



ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΚΡΗΤΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΙΑΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ

**Έλεγχος φορτίου συχνότητας αυτόνομων
και διασυνδεδεμένων συστημάτων
παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με χρήση
συμβατικών και ευφυών μεθόδων**

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Σπουδαστής: Κων/νος Σ. Δεδούσης, ΑΜ: 3671

Επιβλέπων: Δρ. Μηχ. Ιωάννης Λ. Καρναβάς,
Επίκουρος Καθηγητής

Ηράκλειο 2012

Nulla dies sine linea
“Μην αφήνεις καμία
μέρα ανεκμετάλλευτη”
(*Nikola Tesla,*
1856-1943)

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Τον τελευταίο μισό αιώνα έγινε ακόμα πιο έντονη η ανάπτυξη των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας. Η γεωγραφική επέκταση τους, αλλά και η αύξηση της εγκατεστημένης ισχύος τους δημιούργησαν αρκετά πρακτικά προβλήματα στα οποία έδωσε λύση όσο καλύτερα μπορούσε η προηγούμενη γενιά. Τα σύγχρονα προβλήματα των ΣΗΕ έχουν να κάνουν, μεταξύ άλλων, με την ποιότητα της παραγόμενης ενέργειας, τον περιορισμό των ρύπων και την βέλτιστη οικονομική λειτουργία τους. Λόγω του ενδιαφέροντος του συγγραφέα στους παραπάνω τομείς και επίσης προς τα συστήματα αυτομάτου ελέγχου, επιλέχθηκε ο έλεγχος φορτίου συχνότητας (Load Frequency Control, LFC), ο οποίος είναι επίσης γνωστός ως αυτόματος έλεγχος παραγωγής (Automatic Generation Control, AGC), σαν θέμα της πτυχιακής του εργασίας. Η εργασία αυτή θα εκπονηθεί με τέτοιο τρόπο ώστε να είναι δυνατή η χρήση της σαν διδακτικό βοήθημα, σε μαθήματα όπως “μοντελοποίηση συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας”, σε φοιτητές της ηλεκτρολογίας.

Στην παρακάτω πτυχιακή εργασία θα γίνει μια προσπάθεια να εξεταστούν αρκετά μοντέλα συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας, όσο αφορά την μεταβατική συμπεριφορά της συχνότητας τους, σε μια διαταραχή του φορτίου. Σκοπός της είναι να ρυθμιστούν κατάλληλα οι ελεγκτές που χρησιμοποιούνται από τα μοντέλα των ΣΗΕ, για την πραγματοποίηση του ελέγχου που αναφέρθηκε, ώστε να βελτιωθούν συγκεκριμένα χαρακτηριστικά του συστήματος. Για τον σκοπό αυτό θα χρησιμοποιηθεί το Matlab, ένα πρόγραμμα με δυνατότητες μοντελοποίησης και εξομίωσης της λειτουργίας ενός ΣΗΕ, μιας και είναι αδύνατο να εξεταστεί ένα τέτοιο θέμα σε πρακτικό επίπεδο. Για τον υπολογισμό των παραμέτρων των ελεγκτών θα χρησιμοποιηθεί ο γενετικός αλγόριθμος, ένα μαθηματικό εργαλείο το οποίο χρησιμοποιείται ευρέως για να δοθούν αριθμητικές λύσεις σε προβλήματα που δεν είναι εύκολο να βρεθεί αναλυτικά η λύση τους. Ακόμα, εκτός από τους συμβατικούς ελεγκτές, οι οποίοι χρησιμοποιούνται κατά κόρο σήμερα, θα εξεταστεί και η συμπεριφορά των ΣΗΕ, με ελεγκτές που βασίζουν την λειτουργία τους στην ασαφή λογική. Η ασαφής λογική είναι μια καινοτόμα μαθηματική θεωρία η οποία εισήχθη στα μέσα του προηγούμενου αιώνα από τον Lotfi Zadeh, αφού έφερε στο προσκήνιο την έννοια των ασαφών συνόλων, αλλάζοντας την μέχρι τότε καλά εδραιωμένη θεωρία των συνόλων.

Στο τέλος της εργασίας αναμένεται να έχει βελτιωθεί η συμπεριφορά των μοντέλων που θα εξεταστούν σε σχέση με αντίστοιχα μοντέλα της βιβλιογραφίας. Επίσης θα γίνει αναζήτηση των βέλτιστων παραμέτρων για διάφορα κριτήρια απόδοσης και τα αποτελέσματα θα συγκριθούν και θα αξιολογηθούν μεταξύ τους. Για να γίνει διευκολυνθεί η ανάγνωση της πτυχιακής εργασίας θα παρουσιαστεί εδώ η δομή της, και τα θέματα που θα εξεταστούν σε κάθε κεφάλαιο.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: Γίνεται μια παρουσίαση των ΣΗΕ, εξετάζοντας κάποια από τα δομικά στοιχεία από τα οποία αποτελούνται, αλλά και κάποια από τα συστήματα τηλεμετρίας που σήμερα είναι απαραίτητο κομμάτι ενός ΣΗΕ.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: Σε αυτό το κεφάλαιο, γίνεται ιδιαίτερη αναφορά στον τομέα της παραγωγής αφού εκεί βρίσκεται εφαρμογή το αντικείμενο της πτυχιακής εργασίας. Ως επί το πλείστον παρουσιάζονται οι πιο διαδεδομένες μονάδες παραγωγής, οι οποίες αργότερα θα εξεταστούν και σε επίπεδο μοντελοποίησης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: Το αντικείμενο αυτού του κεφαλαίου έχει να κάνει με τα καθεστώτα που επικρατούν στις αγορές ηλεκτρικής ενέργειας, μέχρι σήμερα, ενώ θα αναφερθούν και οι τρόποι διασύνδεσης διαφόρων ΣΗΕ μεταξύ τους.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: Αναφέρονται οι τεχνικές ελέγχου που έχει επικρατήσει να χρησιμοποιούνται στα συστήματα αυτομάτου ελέγχου και την εφαρμογή τους στον αυτόματο έλεγχο παραγωγής.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: Αναφέρεται η βασική θεωρία που αφορά τους γενετικούς αλγόριθμους και την ασαφή λογική. Τις τεχνικές δηλαδή που θα χρησιμοποιηθούν σε αυτήν την πτυχιακή εργασία και έχουν να κάνουν με την τεχνητή νοημοσύνη του υπολογιστή.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: Στο σημείο αυτό, γίνεται μια παρουσίαση όλων των προγραμμάτων που θα χρησιμοποιηθούν και με χρήση απλών παραδειγμάτων θα εξηγηθεί πως θα χρησιμοποιηθούν για τις διάφορες διεργασίες που πρόκειται να διατελέσουν.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: Σε αυτό το κεφάλαιο, θα παρουσιαστεί ο τρόπος που κατασκευάζονται τα βασικότερα μοντέλα των ΣΗΕ που θα εξεταστούν καθώς και ο τρόπος που συνδέονται με τα φυσικά συστήματα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8: Εδώ, ουσιαστικά γίνεται ανάπτυξη του προηγούμενου κεφαλαίου και θα δειχθεί ο τρόπος σύνθεσης όλων των μοντέλων που θα εξεταστούν.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9: Στο κεφάλαιο αυτό, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων και οι χρονοαποκρίσεις των διαφόρων συστημάτων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 10: Τέλος, συγκρίνονται τα αποτελέσματα του ένατου κεφαλαίου και εξάγονται τα συμπεράσματα της πτυχιακής εργασίας.

ABSTRACT

The development of power systems has become much more intense in the past fifty years. Their geographical expansion and the increase of the loading has created many practical problems, while the previous generation has tried to solve some of them. Modern power systems' problems concern, among others, the generated power quality, limiting the emissions and the financial optimization of their operation. Due to writers' interest towards these fields and automatic control systems, Load Frequency Control (LFC), which is also called automatic generation control (AGC), has been selected as the subject of this dissertation. This dissertation will be elaborated, so that it could be used by undergraduates electrical engineers in courses like "modeling power systems", as a tutorial.

In the following dissertation an effort will be made, for several power systems models to be examined, concerning the transient response of their frequency when a sudden load change occurs. The purpose is to appropriately tune the controllers used by the systems, in order to optimize certain characteristics of their behavior. Matlab/Simulink, which is a program with modeling and simulation capabilities, will be used, since it is impossible to be considered on a practical level. For the calculation of the controllers' coefficients a genetic algorithm is going to be used. Genetic algorithms are mathematical tools used to calculate numeric solutions that are difficult to determine with analytical ways. In addition, besides the conventional controllers which are going to be studied, the use of fuzzy controllers is going to be examined too.

At the final part of the dissertation, it is expected, the responses of various models to be improved compared to the corresponding responses in the literature. Optimal tuning of the controllers is going to be performed with several criteria and the results are to be evaluated and compared with each other. In order to make this dissertation easier to read the subject of each chapter is going to be mentioned here.

CHAPTER 1: A presentation of power systems, with focuses in the basic elements from which they are consisted of and some of the remote measuring and control systems, that are nowadays essential to the operation of a robust power system.

CHAPTER 2: A further examination of the generation part of the power systems, since that where the subject of this dissertation is implemented. Mostly it consists of the analysis of the most common generation units.

CHAPTER 3: This part of the dissertation concerns the electricity market environments, while there is going to be a discussion regarding the ways power systems are interconnected and cooperate with each other.

CHAPTER 4: In this chapter a reference will be made to the techniques used in the automatic control systems and their implementation on the AGC.

CHAPTER 5: The artificial intelligence techniques that are going to be used are discussed here, namely, genetic algorithm theory and fuzzy logic theory.

CHAPTER 6: This chapter concerns the software that will be used and via simple tutorials, the processes each program executes, are going to be explained.

CHAPTER 7: An explanation of the way the basic models were created and their connection with the physical systems.

CHAPTER 8: A more exhaustive analysis in the creation of all the models that were simulated is presented here.

CHAPTER 9: The presentation of the results of this dissertation that are consisted of the matrices with the coefficients the genetic algorithm has calculated and the time-responses of several models.

CHAPTER 10: Evaluation and comparison of the results.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου για την στήριξη που μου έδειξαν, σε όλη την πορεία των σπουδών μου, και που συνεχίζουν να το κάνουν μέχρι και σήμερα. Επίσης οφείλω να ευχαριστήσω τον παιδικό μου φίλο, Γιώργο Γαϊτανάκη, για την συμπαράσταση που μου πρόσφερε κατά την διάρκεια της εκπόνησης αυτής της εργασίας, αλλά και για τις συμβουλές του, που ήταν στην διάθεση μου, όποτε βρισκόμουν σε θέση να τις χρειαστώ. Οφείλω επίσης να ευχαριστήσω τον φίλο και συνάδελφο Βασίλη Στεφανάκη, για τον χρόνο και τον κόπο που αφιέρωσε προσπαθώντας να με μνήσει στον κόσμο της θερμοδυναμικής καθώς και για την πλούσια βιβλιογραφία που μοιράστηκε μαζί μου σχετικά με τον τομέα αυτό.

Ένα μεγάλο ευχαριστώ χρωστάω στον καθηγητή μου κ. Ιωάννη Καρναβά ο οποίος δεν έπαψε στιγμή κατά την διάρκεια της πτυχιακής μου εργασίας να με στηρίζει, να με καθοδηγεί και προπάντων να μου δίνει κίνητρο να βελτιωθώ στους τομείς που επιδέχομαι βελτίωση. Ο κ. Ιωάννης Φραγκιαδάκης έχει και αυτός τις ευχαριστίες μου, αφού μου έδειξε ότι πίστεψε σε εμένα σε στιγμές που το είχα ανάγκη. Ακόμα τον ευχαριστώ επειδή, με την καθοδήγηση του και την εμπιστοσύνη που μου πρόσφερε, με έκανε, κατά την διάρκεια της πρακτικής μου άσκησης, να αγαπήσω ένα τομέα που μέχρι τότε δεν είχα γνωρίσει. Ακόμα θα πρέπει να ευχαριστήσω τον κ. Αριστοτέλη Γιαννακουδάκη καθηγητή του τμήματος ηλεκτρολογίας για την συμβολή του, αφού αφιέρωσε αρκετό από τον χρόνο του λύνοντας πολλές από τις απορίες μου σχετικά με τα συστήματα αυτομάτου ελέγχου, κατά την διάρκεια των διαλέξεων του και όχι μόνο. Θα πρέπει τέλος να ευχαριστήσω όλους εκείνους που με τον τρόπο του ο καθένας με έστρεψαν στον δρόμο που σήμερα βαδίζω.

ΣΥΜΒΟΛΗ ΤΗΣ ΠΤΥΧΙΑΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Δημοσίευση που προέκυψε από αυτή την πτυχιακή εργασία

Y.L. Karnavas, K.S. Dedousis, "Overall Performance Evaluation of Evolutionary Designed Conventional AGC Controllers for Interconnected Electric Power System Studies in a Deregulated Market Environment", International Journal of Engineering Science and Technology (IJEST), March 2010, Vol. 2, No. 3, pp. 150-166

Ετεροαναφορές (ως 01/09/2012)

S.Farook, Dr.P.Sangameswara Raju, "Robust Tuning of PID Controller to Optimize Bilateral Contracts in Deregulated Power System Using Evolutionary Algorithms", International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA), 2011, Vol. 1, No. 2, pp. 165-172

S.Farook, Dr. P.Sangameswara Raju, "Optimization of Feedback Controller in Restructured Power System Using Evolutionary Genetic Algorithms", International Journal of Engineering Science and Technology (IJEST), May 2011, Vol. 3, No. 5, pp. 4074-4083

S.Farook, Dr. P.Sangameswara Raju, "AGC Controllers to Optimize LFC Regulation in Deregulated Power System", International Journal of Advances in Engineering and Technology (IJAET), Nov 2011, Vol. 1, No. 5, pp. 278-289

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	ii
ABSTRACT	iii
ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ	iv
ΣΥΜΒΟΛΗ ΤΗΣ ΠΤΥΧΙΑΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ	v
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ	x
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ	xi
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ.....	xiv
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 ΔΟΜΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ.....	1
1. Εισαγωγή	1
1.1. Γεννήτριες – Μονάδες Παραγωγής.....	1
1.2. Μετασχηματιστές	9
1.3. Γραμμές μεταφοράς.....	18
1.4. Υποσταθμοί.....	25
1.5. Καταναλώσεις	28
1.6. Κέντρο κατανομής φορτίου (ΚΚΦ).....	30
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ΣΤΑΘΜΟΙ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ.....	33
2. Εισαγωγή	33
2.1. Ατμοηλεκτρικοί Σταθμοί	34
2.2. Αεριοστροβιλικόι Σταθμοί	40
2.3. Υδροηλεκτρικοί Σταθμοί	45
2.4. Ντιζελοηλεκτρικοί Σταθμοί.....	51
2.5. Αιολικά Πάρκα	56
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 ΜΟΡΦΗ ΑΓΟΡΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΚΑΙ ΔΙΑΣΥΝΔΕΣΕΙΣ.....	62
3. Εισαγωγή	62
3.1. Αυτόνομα Συστήματα	62
3.2. Διασυνδεδεμένα Συστήματα	64
3.3. Αγορές Ηλεκτρικής Ενέργειας.....	65
3.3.1. Μη Απελευθερωμένη Αγορά.....	66
3.3.2. Απελευθερωμένη Αγορά	66
3.4. Μοντελοποίηση Συστημάτων Απελευθερωμένης Αγοράς.....	69
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 ΣΥΜΒΑΤΙΚΟΣ ΕΛΕΓΧΟΣ	75
4. Εισαγωγή	75
4.1. Συστήματα Ελέγχου	75
4.2. Κλασικοί Ελεγκτές	77
4.2.1. Αναλογικός Ελεγκτής (P).....	78
4.2.2. Ολοκληρωτικός Ελεγκτής (I)	82
4.2.3. Διαφορικός Ελεγκτής (D)	84
4.3. Συμβατικοί Ελεγκτές Για Έλεγχο Φορτίου-Συχνότητας.....	85
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 ΕΥΦΥΕΙΣ ΤΕΧΝΙΚΕΣ.....	87
5. Εισαγωγή	87
5.1. Ασαφής Λογική	89
5.1.1. Συναρτήσεις Συμμετοχής.....	91

5.1.2.	Στοιχειώδεις Τελεστές Ασαφών Συνόλων.....	93
5.1.3.	Ασαφείς Κανόνες	95
5.1.4.	Υλοποίηση Ασαφών Ελεγκτών στο Simulink.....	96
5.2.	Γενετικός Αλγόριθμος	100
5.2.1.	Αντικειμενική Συνάρτηση του Προβλήματος	102
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6	ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΤΙΚΑ ΚΑΙ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΑ ΕΡΓΑΛΕΙΑ	105
6.	Εισαγωγή	105
6.1.	Matlab	105
6.2.	Simulink	106
6.3.	Graphics User Interface (GUI)	108
6.4.	Το AGCLAB.....	111
6.5.	Microsoft Excel.....	113
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7	ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΑΥΤΟΜΑΤΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ	115
7.	Εισαγωγή	115
7.1.	Μοντελοποίηση ΑΗΣ.....	116
7.1.1.	Το Υποσύστημα Ρυθμιστή Στροφών	116
7.1.2.	Το Υποσύστημα Στροβίλου - Γεννήτριας	118
7.1.3.	Το Υποσύστημα Φορτίου – Συστήματος Ισχύος.....	121
7.1.4.	Σύνθεση Του Μοντέλου.....	123
7.2.	Μοντελοποίηση Αεριοστροβιλικού Σταθμού	125
7.2.1.	Το Υποσύστημα Ρυθμιστή Στροφών	125
7.2.2.	Το Υποσύστημα Ρυθμιστή Βαλβίδας.....	125
7.2.3.	Το Υποσύστημα Καυστήρα Και Ψεκασμού Καυσίμου.....	126
7.2.4.	Το Υποσύστημα Στροβίλου-Γεννήτριας	126
7.2.5.	Το Υποσύστημα Φορτίου – Συστήματος Ισχύος.....	127
7.2.6.	Σύνθεση Του Μοντέλου.....	127
7.3.	Μοντελοποίηση ΥΗΣ	128
7.3.1.	Το Υποσύστημα Ρυθμιστή Στροφών	128
7.3.2.	Το Υποσύστημα Στροβίλου - Γεννήτριας	129
7.3.3.	Το Υποσύστημα Φορτίου – Συστήματος Ισχύος.....	130
7.3.4.	Σύνθεση Του Μοντέλου.....	131
7.4.	Μοντελοποίηση Ντιζελοηλεκτρικών Σταθμών	132
7.4.1.	Το Υποσύστημα Της Μηχανής Εσωτερικής Καύσης	132
7.4.2.	Το Υποσύστημα Γεννήτριας	134
7.4.3.	Το Υποσύστημα Φορτίου – Συστήματος Ισχύος.....	135
7.4.4.	Σύνθεση Του μοντέλου	135
7.5.	Μοντελοποίηση Αιολικών πάρκων.....	136
7.5.1.	Ανάλυση Των Υποσυστημάτων Και Σύνθεση Του Μοντέλου	137
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8	ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΥΠΟ ΜΕΛΕΤΗ.....	138
8.	Εισαγωγή	138

8.1.	Ανάλυση Και Κωδικοποίηση Συστημάτων	140
8.2.	Ανάλυση Και Κωδικοποίηση Ελεγκτών	147
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΙΣ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ		149
9.	Εισαγωγή	149
9.1.	Συστήματα Μίας Περιοχής Σε Μη Απελευθερωμένη Αγορά.....	149
9.1.1.	Μοναδική Πηγή Αεριοστροβιλική Μονάδα	149
9.1.2.	Μοναδική Πηγή Υδροστροβιλική Μονάδα.....	151
9.1.3.	Μοναδική Πηγή Ατμοστροβιλική Μονάδα Χωρίς Αναθέρμανση Και Χωρίς Περιορισμό Του Ρυθμού Παραγωγής.....	152
9.1.4.	Μοναδική Πηγή Ατμοστροβιλική Μονάδα Με Αναθέρμανση Και Με Περιορισμό Του Ρυθμού Παραγωγής.....	154
9.1.5.	Μοναδική Πηγή Ντιζελοηλεκτρική Μονάδα Χωρίς Αναθέρμανση Και Χωρίς Περιορισμό Του Ρυθμού Παραγωγής.....	156
9.1.6.	Μοναδική Πηγή Ντιζελοηλεκτρική Μονάδα Χωρίς Αναθέρμανση Αλλά Με Περιορισμό Του Ρυθμού Παραγωγής.....	157
9.1.7.	Ντιζελοηλεκτρική Μονάδα Και Ανεμογεννήτρια	159
9.1.8.	Ντιζελοηλεκτρική Και Υδροστροβιλική Μονάδα.....	160
9.1.9.	Υδροστροβιλική Μονάδα, Ανεμογεννήτρια Και Ντιζελοηλεκτρική Μονάδα.....	161
9.1.10.	Ατμοστροβιλική Μονάδα Και Ανεμογεννήτρια	162
9.1.11.	Ατμοστροβιλική Και Υδροστροβιλική Μονάδα	163
9.1.12.	Ατμοστροβιλική, Υδροστροβιλική Και Αεριοστροβιλική Μονάδα	163
9.1.13.	Ατμοστροβιλική Μονάδα, Ανεμογεννήτρια Και Υδροστροβιλική Μονάδα	164
9.1.14.	Ντιζελοηλεκτρική Και Ατμοστροβιλική Μονάδα.....	165
9.1.15.	Ατμοστροβιλική Μονάδα, Ανεμογεννήτρια Και Ντιζελοηλεκτρική Μονάδα.....	166
9.1.16.	Ατμοστροβιλική, Υδροστροβιλική Και Ντιζελοηλεκτρική Μονάδα	167
9.1.17.	Ατμοστροβιλική, Υδροστροβιλική, Ντιζελοηλεκτρική Μονάδα Και Ανεμογεννήτρια.....	168
9.2.	Συστήματα Δύο Περιοχών Σε Μη Απελευθερωμένη Αγορά.....	168
9.2.1.	Αεριοστροβιλικές Μονάδες.....	169
9.2.2.	Υδροστροβιλικές Μονάδες	170
9.2.3.	Ατμοστροβιλικές Μονάδες	171
9.2.4.	Ντιζελοηλεκτρικές Μονάδες.....	172
9.2.5.	Μεικτά Συστήματα Δύο Περιοχών	175
9.3.	Συστήματα Τριών Περιοχών Σε Μη Απελευθερωμένη Αγορά.....	180
9.3.1.	Αεριοστροβιλικές Μονάδες.....	181
9.3.2.	Υδροστροβιλικές Μονάδες	184
9.3.3.	Ατμοστροβιλικές Μονάδες	186
9.3.4.	Ντιζελοηλεκτρικές Μονάδες.....	188
9.3.5.	Μεικτό Μοντέλο Τριών Περιοχών	190
9.4.	Συστήματα Τεσσάρων Περιοχών Σε Μη Απελευθερωμένη Αγορά	194
9.4.1.	Αεριοστροβιλικές Μονάδες.....	194

9.4.2. Υδροστροβλικές Μονάδες	197
9.4.3. Ατμοστροβλικές Μονάδες	200
9.4.4. Ντιζελοηλεκτρικές Μονάδες.....	203
9.4.5. Μεικτό Μοντέλο Τεσσάρων Περιοχών	206
9.5. Συστήματα Δυο Περιοχών Σε Καθεστώς Απελευθερωμένης Αγοράς.....	210
9.5.1. Μοναδικές Πηγές Ατμοστροβλικές Μονάδες.....	210
9.5.2. Ατμοστροβλικές Και Αεριοστροβλικές Μονάδες	213
9.5.3. Ατμοστροβλικές Και Υδροστροβλικές Μονάδες.....	216
9.5.4. Ατμοστροβλικές, Αεριοστροβλικές Και Ντιζελοηλεκτρικές Μονάδες.....	219
9.5.5. Ατμοστροβλικές, Υδροστροβλικές Και Αεριοστροβλικές Μονάδες	221
9.5.6. Σύστημα Με Μεικτές Μονάδες	224
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 10 ΕΠΙΛΟΓΟΣ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	237
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	239
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ	242

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικ. 1.1. Γραμμές διανομής (κάτω αριστερά) μέσης τάσης και μεταφοράς υψηλής τάσης.	18
Εικ. 1.2. Μετασηματιστής ελαίου με δοχείο διαστολής και ανεμιστήρες για την ψύξη του, σε εξωτερικό χώρο. ...	26
Εικ. 1.3. Μονοφασικός αποζεύκτης με δυνατότητα έντασης διακοπής 80 kA.	27
Εικ. 1.4. Αντικεραυνική προστασία οικίας (α), αλεξικέραυνο έλξης κεραυνών (β), αλεξικέραυνο τύπου Tesla (γ). .	27
Εικ. 1.5. Υπαίθριος υποσταθμός (α) και έτοιμος για τοποθέτηση υποσταθμός σε οικίσκο (β).	28
Εικ. 1.6. Καμπύλη ζήτησης τυχαίου συστήματος.	29
Εικ. 1.7. Εθνικό κέντρο ελέγχου ενέργειας στον Άγιο Στέφανο Αττικής.	32
Εικ. 2.1. Μηχανές εσωτερικής καύσης με έμβολα (α) και αεριοστροβλικές (β).....	34
Εικ. 2.2. Συναρμολόγηση βασικών εξαρτημάτων ενός αεριοστροβίλου.	42
Εικ. 2.3. Αριοστρόβιλος τύπου LM 2500.	43
Εικ. 2.4. Πλωτός υδροκοχλίας.	48
Εικ. 2.5. Δρομέας υδροστρόβιλου τύπου Francis.	49
Εικ. 2.6. Υδροστροβλική μονάδα τύπου Kaplan.....	49
Εικ. 2.7. Δρομέας υδροστρόβιλος τύπου Pelton.....	50
Εικ. 2.8. Διάταξη υδροηλεκτρικής μονάδας παραγωγής.	51
Εικ. 2.9. Ντιζελογεννήτρια WARTSILA 14 κυλίνδρων, RT-flex96C, 102 rpm, 80 MW.....	52
Εικ. 3.1. Το αυτόνομο ΣΗΕ της νήσου Κρήτης σε μια σχηματική αναπαράσταση πάνω στον χάρτη όπως προβλέπεται να είναι μέχρι το τέλος του 2013.	63
Εικ. 3.2. Ευρασιατικός χάρτης με τα διακριτά εθνικά ηλεκτρικά συστήματα.	65
Εικ. 3.3. Χάρτης Βορείου Αμερικής με τα διακριτά τοπικά ηλεκτρικά συστήματα. Το διασυνδεδεμένο αυτό ΣΗΕ διαχειρίζεται από το συμβούλιο ηλεκτρικής αξιοπιστίας Βορείου Αμερικής (North America Electric Reliability Council, NERC).	65
Εικ. 5.1. Αρχικό παράθυρο του FIS Editor για την δημιουργία ασαφών ελεγκτών.....	97
Εικ. 5.2. Το παράθυρο του FIS Editor αφού έχουν οριστεί οι εισόδοι και έξοδοι του ασαφούς ελεγκτή.	98
Εικ. 5.3. Ορισμός των συναρτήσεων συμμετοχής για τις εισόδους και εξόδους του ασαφούς ελεγκτή.	98
Εικ. 5.4. Οι ασαφείς κανόνες του ελεγκτή σε μορφή if-then.	99
Εικ. 5.5. Οι ασαφείς κανόνες του ελεγκτή συσχετίζοντας τις συναρτήσεις συμμετοχής εισόδων και εξόδων.	99
Εικ. 5.6. Επιφάνεια ελέγχου του ασαφούς ελεγκτή.....	100
Εικ. 6.1. Αρχική οθόνη του Matlab.	106
Εικ. 6.2. Αρχική οθόνη της βιβλιοθήκης Simulink.	107
Εικ. 6.3. Νέο αρχείο Model.	108
Εικ. 6.4. Menu παραμετροποίησης για την δημιουργία μοντέλου διακριτού χρόνου.	108
Εικ. 6.5. Αρχικό παράθυρο του GUI.....	109
Εικ. 6.6. Παράθυρο σχεδιασμού του GUI.....	109
Εικ. 6.7. Παράθυρο σχεδιασμού του GUI με τα βασικά αντικείμενα ελέγχου.	110
Εικ. 6.8. Παράθυρο ρύθμισης παραμέτρων των αντικειμένων.	110
Εικ. 6.9. Αρχική οθόνη του AGCLAB (α) και επιλογή π.χ. απελευθερωμένης αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας (β).	111
Εικ. 6.10. Επιλογή ρύθμισης πολλαπλών πηγών ανά περιοχή σε μη απελευθερωμένη αγορά (α) και ρύθμιση τύπου μονάδων ανά εταιρεία παραγωγής σε απελευθερωμένη αγορά (β).	112
Εικ. 6.11. Παράθυρο καθορισμού παραμέτρων.	113
Εικ. 6.12. Φύλλο του Excel για το προεπιλεγμένο σύστημα. Φαίνεται το φύλλο καταχώρησης των παραμέτρων (param)	114
Εικ. 8.1. Τρόπος κωδικοποίησης συστημάτων σε σχηματική μορφή για την καλύτερη εξοικείωση με τις κωδικές ονομασίες.	139

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχ. 1.1. Χαρακτηριστική ανοικτού κυκλώματος σύγχρονης γεννήτριας ή καμπύλη μαγνήτησης.....	3
Σχ. 1.2. Πλήρες τριφασικό ισοδύναμο κύκλωμα σύγχρονης γεννήτριας.....	4
Σχ. 1.3. Μονοφασικό ισοδύναμο κύκλωμα σύγχρονης γεννήτριας.....	4
Σχ. 1.4. Αύξηση του ωμικού φορτίου σε μια σύγχρονη γεννήτρια σε αυτόνομη λειτουργία.....	5
Σχ. 1.5. Διαφορετικές φορτίσεις σύγχρονης γεννήτριας.....	6
Σχ. 1.6. Διανυσματικό διάγραμμα σύγχρονης γεννήτριας με επαγωγική φόρτιση θεωρώντας αμελητέα την ωμική αντίσταση του τυλίγματος του στάτη.....	7
Σχ. 1.7. Διάταξη παραλληλισμού σύγχρονης γεννήτριας στο σύστημα.....	8
Σχ. 1.8. Συνδεσμολογία μετασχηματιστή τύπου πυρήνα.	10
Σχ. 1.9. Συνδεσμολογία μετασχηματιστή τύπου μανδύα.	11
Σχ. 1.10. Συμβολικές παραστάσεις ιδανικών μετασχηματιστών.	11
Σχ. 1.11. Φασικό ισοδύναμο κύκλωμα μετασχηματιστή.	12
Σχ. 1.12. Μορφή και ισοδύναμο κύκλωμα μετασχηματιστή τριπλού τυλίγματος.	14
Σχ. 1.13. Φασικό κυκλωματικό διάγραμμα αυτομετασχηματιστή.	14
Σχ. 1.14.Τυπικές ονομασίες τριφασικών Μ/Σ: α) ονομασία τυλιγμάτων πρωτεύοντος και δευτερεύοντος, β) παράδειγμα της συνδεσμολογίας της ομάδας Dz0.....	17
Σχ. 1.15. Μονογραμμικές αναπαραστάσεις μετασχηματιστών: (α) τριφασικός μετασχηματιστής τριγώνου-τεθλασμένου αστέρα με γειωμένο τον κοινό κόμβο του δευτερεύοντος, (β) τριφασικός μετασχηματιστής αστέρα-τριγώνου με γειωμένο τον κοινό κόμβο του πρωτεύοντος και μεταβλητό λόγο σπειρών μέσω πολλαπλών λήψεων στο πρωτεύον, (γ) τριφασικός μετασχηματιστής αστέρα-τριγώνου με γειωμένο τον κοινό κόμβο του πρωτεύοντος και μεταβλητό λόγο σπειρών μέσω πολλαπλών λήψεων στο δευτερεύον, (δ) τριφασικός μετασχηματιστής τριπλού τυλίγματος αστέρα-τριγώνου με τριτεύων τύλιγμα σε συνδεσμολογία τεθλασμένου αστέρα και γειωμένο τον κοινό του κόμβο, (ε) αυτομετασχηματιστής σε συνδεσμολογία αστέρα με γειωμένο τον κοινό κόμβο, (στ) αυτομετασχηματιστής σε συνδεσμολογία τριγώνου με τριτεύων τύλιγμα σε συνδεσμολογία τεθλασμένου αστέρα και γειωμένο τον κοινό κόμβο.	17
Σχ. 1.16. Μοντέλο γραμμής μικρού μήκους, φασικό ισοδύναμο.	21
Σχ. 1.17. Διανυσματικά διαγράμματα τάσεων και εντάσεων για γραμμή μεταφοράς μικρού μήκους σε επαγωγική φόρτιση (α) και χωρητική φόρτιση (β).	21
Σχ. 1.18. Τετράπολο που αναπαριστά γραμμή μεταφοράς.	22
Σχ. 1.19. Απειροστική ανάλυση μιας γραμμής μεταφοράς.	23
Σχ. 1.20. Τετράπολα τύπου Π (α) και Τ (β).	25
Σχ. 2.1. Διάγραμμα Mollier για το νερό.....	35
Σχ. 2.2. Μοντέλο ατμοηλεκτρικής μονάδας.....	35
Σχ. 2.3. Μοντέλο ατμοστροβίλου με διατάξεις βελτίωσης του βαθμού απόδοσης.....	36
Σχ. 2.4. Κάτοψη βαθμίδων στροβίλων δράσης, αντίδρασης και συνδυασμού τους.....	37
Σχ. 2.5 Ροή ατμού σε ατμοστρόβιλο.	38
Σχ. 2.6. Βαθμίδες ατμοστροβίλων δράσης με κόκκινο τα κινούμενα σκαφίδια και με πράσινο τα σταθερά.Βαθμίδα τύπου Curtis (α) και τύπου Rateau (β).....	38
Σχ. 2.7. Ροή ατμού σε στρόβιλους αντίδρασης.....	39
Σχ. 2.8. Μοντέλο αεριοστροβιλικής μονάδας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας ανοικτού κυκλώματος.	42
Σχ. 2.9. Μοντέλο αεριοστροβιλικής μονάδας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας κλειστού κυκλώματος.....	44
Σχ. 2.10. Αεριοστρόβιλος διπλής ατράκτου με αντλία θερμότητας στον αεριογόνο και καυστήρα στο στρόβιλο ισχύος (C:συμπιεστής, GT:αεριογόνος, PT:στρόβιλος ισχύος).	44
Σχ. 2.11. Αεριοστρόβιλος διπλού τυμπάνου κλειστού κυκλώματος. (C1:συμπιεστής χαμηλής πίεσης, C2: συμπιεστής υψηλής πίεσης, T1:στρόβιλος χαμηλής πίεσης, T2:στρόβιλος υψηλής πίεσης).	45
Σχ. 2.12. Μοντέλο υδροηλεκτρικής μονάδας.....	46
Σχ. 2.13. Σκαρίφημα του συστήματος πιστονιού, εμβόλου, στροφάλου μιας εμβολοφόρου ΜΕΚ. Vc, Vh και Vo συμβολίζουν τους όγκους διακένου, μετατόπισης και ολικό του θαλάμου καύσης αντίστοιχα.....	53
Σχ. 2.14. Φάσεις τετράχρονης μηχανής με ανάφλεξη με συμπίεση.....	54

Σχ. 2.15. Φάσεις δίχρονης μηχανής με ανάφλεξη με συμπίεση.....	54
Σχ. 2.16. Μοντέλο ντιζελοηλεκτρικής μονάδας.....	55
Σχ. 2.17. Μοντέλο αιολικής ηλεκτροπαραγωγικής μονάδας.....	56
Σχ. 2.18. Ανεμογεννήτριες κατακόρυφου άξονα. i) δρομέας τύπου Savonius ii) δρομέας τύπου Darrieus με σχοινοειδή πτερύγια iii) δρομέας τύπου Darrieus με ευθύγραμμα πτερύγια.....	57
Σχ. 2.19. Ανεμογεννήτριες οριζοντίου άξονα ανάντη τριπτέρυγη και κατάντη διπτέρυγη.....	58
Σχ. 2.20. Ιστόγραμμα και συνάρτηση (Weilbull) για πιθανότητα ύπαρξης συγκεκριμένης ταχύτητας ανέμου.....	60
Σχ. 3.1. Μονογραμμική αναπαράσταση του ΣΗΕ της Κρήτης. Με μεγάλο σύμβολο εναλλασσόμενης πηγής συμβολίζονται οι θερμικοί σταθμοί του νησιού ενώ με μικρό οι ανανεώσιμες πηγές.....	63
Σχ. 3.2. Μορφή ΣΗΕ κάθετης ολοκλήρωσης με διαχωρισμένες τις τρεις βασικές διεργασίες.....	66
Σχ. 3.3. Μορφή ενός ΣΗΕ μετά την απελευθέρωση της αγοράς του.....	68
Σχ. 3.4. Δομή των μοντέλων που εξετάζονται στην περίπτωση της απελευθερωμένης αγοράς.....	69
Σχ. 4.1. Σχηματική αναπαράσταση μοντέλου κατάστασης.....	77
Σχ. 4.2. Σύστημα ελέγχου θέσης αυτοκινήτου.....	78
Σχ. 4.3. Κρουστική και βηματική απόκριση της συνάρτησης μεταφοράς σε ευθύ βρόχο.....	79
Σχ. 4.4. Το σύστημα ελέγχεται από αναλογικό ελεγκτή.....	80
Σχ. 4.5. Βηματική απόκριση του πλήρους συστήματος ελέγχου για διάφορες τιμές κέρδους του ελεγκτή.....	80
Σχ. 4.6. Κρουστική και βηματική απόκριση της συνάρτησης μεταφοράς δευτέρας τάξης σε ευθύ βρόχο.....	81
Σχ. 4.7. Βηματική απόκριση του πλήρους συστήματος ελέγχου για διάφορες τιμές κέρδους του ελεγκτή και με συνάρτηση μεταφοράς δευτέρου βαθμού.....	82
Σχ. 4.8. Το σύστημα ελέγχεται από ολοκληρωτικό ελεγκτή.....	82
Σχ. 4.9. Βηματική απόκριση του συστήματος Η ελεγχόμενο από ολοκληρωτικό ελεγκτή.....	83
Σχ. 4.10. Βηματική απόκριση του συστήματος Η2 ελεγχόμενο από ολοκληρωτικό ελεγκτή.....	83
Σχ. 4.11. Βηματική απόκριση πλήρους συστήματος τρίτης τάξης με χρήση διαφορικού ελεγκτή.....	84
Σχ. 4.12. Βηματική απόκριση πλήρους συστήματος δεύτερης τάξης με χρήση διαφορικού ελεγκτή.....	85
Σχ. 5.1. Σχηματική αναπαράσταση των κατηγοριών των μεθυρετικών αλγορίθμων.....	88
Σχ. 5.2. Γραφικές παραστάσεις ασαφών (επάνω) και ευκρινών (κάτω) υποσυνόλων του Χ.....	90
Σχ. 5.3. Βαθμοί συμμετοχής του στοιχείου x_0 στα ασαφή σύνολα Α και Β.....	91
Σχ. 5.4. Κανονικά και υποκανονικά ασαφή σύνολα (α) και χαρακτηριστικά ενός ασαφούς συνόλου (β).....	92
Σχ. 5.5. Μη γραμμικές συναρτήσεις συμμετοχής.....	92
Σχ. 5.6. Οι γραμμοσκιασμένες με κίτρινο περιοχές δείχνουν τα αποτελέσματα της δράσης των βασικών τελεστών. Στο Α φαίνεται η τομή των συνόλων με την μέθοδο μέγιστου – ελάχιστου, στο Β η ένωση τους και στο Γ το συμπλήρωμα ενός από αυτά.....	94
Σχ. 5.7. Ένωση (α) και τομή (β) των συνόλων Α και Β με την χρήση της μεθόδου μέγιστου – γινομένου.....	94
Σχ. 5.8. Τομές (επάνω) και ενώσεις (κάτω) των δύο συνόλων. Με κόκκινο το ασαφές σύνολο Α , με μπλέ το ευκρινές σύνολο με σταθερή τιμή και με πράσινο η ένωση ή η τομή τους.....	95
Σχ. 5.9. Ο ασαφής ελεγκτής PI που χρησιμοποιήθηκε στην πτυχιακή εργασία.....	97
Σχ. 5.10. Αναπαράσταση ενός φαινότυπου που ανήκει σε άτομο το οποίο αποτελείται από δυο μεταβλητές.....	102
Σχ. 7.1. Απεικόνιση ρυθμιστών φορτίου-συχνότητας και διέγερσης σε μια τριφασική σύγχρονη γεννήτρια οδηγούμενη από κάποιο στρόβιλο.....	115
Σχ. 7.2. Διάγραμμα βαθμίδων απλοποιημένης ατμοηλεκτρικής μονάδας.....	116
Σχ. 7.3. Κατανομή αύξησης φορτίου σε δύο γεννήτριες με διαφορετικό στατισμό.....	117
Σχ. 7.4. Μπλοκ του ρυθμιστή στροφών.....	118
Σχ. 7.5. Βηματική (α) και κρουστική (β) απόκριση του υποσυστήματος ρυθμιστή στροφών.....	118
Σχ. 7.6. Το υποσύστημα στροβίλου-γεννήτριας.....	119
Σχ. 7.7. Βηματική (α) και κρουστική (β) απόκριση του υποσυστήματος στροβίλου γεννήτριας.....	119
Σχ. 7.8. Μπλοκ διάγραμμα ατμοστροβιλικής μονάδας με διάταξη προθέρμανσης και περιορισμό ρυθμού παραγωγής.....	120
Σχ. 7.9. Το υποσύστημα της διάταξης προθέρμανσης.....	120

Σχ. 7.10. Βηματική (α) και κρουστική (β) απόκριση του υποσυστήματος προθέρμανσης.....	121
Σχ. 7.11. Μπλοκ διάγραμμα ατμοστροβλικής μονάδας με διάταξη προθέρμανσης.....	121
Σχ. 7.12. Μπλοκ διάγραμμα του υπόσυστήματος φορτίου – συστήματος ισχύος.....	122
Σχ. 7.13. Βηματική (α) και κρουστική (β) απόκριση του υπόσυστήματος φορτίου – συστήματος ισχύος.....	122
Σχ. 7.14. Βηματική (α) και κρουστική (β) απόκριση του συνολικού απλοποιημένου συστήματος με είσοδο, την είσοδο διαταραχής.	123
Σχ. 7.15. Κρουστική (α) και βηματική (β) απόκριση του συνολικού συστήματος με προσθήκη διάταξης προθέρμανσης και με είσοδο, την είσοδο διαταραχής.....	124
Σχ. 7.16. Μπλοκ διάγραμμα ρυθμιστή στροφών αεριοστροβλικής μονάδας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. .	125
Σχ. 7.17. Το υποσύστημα του ρυθμιστή θέσης της βαλβίδας εισαγωγής καυσίμου.....	126
Σχ. 7.18. Διάγραμμα Βαθμίδας θαλάμου καύσης και του συστήματος ψεκασμού καυσίμου.....	126
Σχ. 7.19. Μπλοκ διάγραμμα του στροβίλου αεριοστροβλικού σταθμού παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.....	126
Σχ. 7.20. Μπλοκ διάγραμμα υπόσυστήματος φορτίου – συστήματος ισχύος.	127
Σχ. 7.21. Κρουστική (α) και βηματική (β) απόκριση του υπόσυστήματος φορτίου – συστήματος ισχύος.	127
Σχ. 7.22. Μπλοκ διάγραμμα αεριοστροβλικής μονάδας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.	128
Σχ. 7.23. Διάγραμμα βαθμίδων υδροηλεκτρικού σταθμού.....	128
Σχ. 7.24. Μπλοκ διάγραμμα της βαθμίδας μηχανικού και υδραυλικού ελέγχου του ρυθμιστή στροφών σε υδροηλεκτρικό σταθμό.....	129
Σχ. 7.25. Κρουστική (α) και βηματική (β) απόκριση του υποσυστήματος μηχανικό-υδραυλικού ελέγχου βαλβίδας.	129
Σχ. 7.26. Μπλοκ διάγραμμα υδροστροβίλου.....	130
Σχ. 7.27. Κρουστική (α) και βηματική (β) απόκριση του υδροστροβίλου.....	130
Σχ. 7.28. Μπλοκ διάγραμμα υπόσυστήματος φορτίου – συστήματος ισχύος.	131
Σχ. 7.29. Βηματική (α) και κρουστική (β) απόκριση του υπόσυστήματος φορτίου – συστήματος ισχύος.....	131
Σχ. 7.30. Διάγραμμα βαθμίδων ντιζελοηλεκτρικού σταθμού που δεν λαμβάνει υπόψη τον περιορισμό του ρυθμού παραγωγής.....	132
Σχ. 7.31. Μπλοκ διάγραμμα της βαθμίδας της μηχανής εσωτερικής καύσης σε ντιζελοηλεκτρικό σταθμό.	133
Σχ. 7.32. Κρουστική (α) και βηματική (β) απόκριση του υποσυστήματος της μηχανής εσωτερικής καύσης.	133
Σχ. 7.33. Μπλοκ διάγραμμα της βαθμίδας της γεννήτριας σε ντιζελοηλεκτρικό σταθμό.	134
Σχ. 7.34. Κρουστική (α) και βηματική (β) απόκριση του υποσυστήματος της γεννήτριας.	134
Σχ. 7.35. Διάγραμμα βαθμίδων ντιζελοηλεκτρικού σταθμού που λαμβάνει υπόψη τον περιορισμό του ρυθμού παραγωγής.....	135
Σχ. 7.36. Κρουστική (α) και βηματική (β) απόκριση του συστήματος του ντιζελοηλεκτρικού σταθμού χωρίς τον περιορισμό του ρυθμού παραγωγής με είσοδο, την είσοδο διαταραχής.	135
Σχ. 7.37. Κρουστική (α) και βηματική (β) απόκριση του συστήματος του ντιζελοηλεκτρικού σταθμού με περιορισμό του ρυθμού παραγωγής και με είσοδο, την είσοδο διαταραχής.....	136
Σχ. 7.38. Διάγραμμα βαθμίδων ενός αιολικού πάρκου.....	137
Σχ. 8.1. Σχηματική διάταξη συστημάτων μίας περιοχής με ένα ή περισσότερα είδη πηγών.....	138
Σχ. 8.2. Σχηματική διάταξη συστημάτων δυο περιοχών με ένα ή περισσότερα είδη πηγών.....	142
Σχ. 8.3. Σχηματική διάταξη συστημάτων τριών περιοχών με ένα ή περισσότερα είδη πηγών.....	143
Σχ. 8.4. Σχηματική διάταξη συστημάτων τεσσάρων περιοχών με ένα ή περισσότερα είδη πηγών.....	145
Σχ. 8.5. Γραφική αναπαράσταση διαγράμματος βαθμίδων που αναπαριστά σύστημα δυο περιοχών σε καθεστώς απελευθέρωσης της αγοράς.....	147

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1. Διεθνείς ονομασίες συνδεσμολογίας τριφασικών μετασχηματιστών υποβιβασμού.	15
Πίνακας 2. Παράμετροι για τον υπολογισμό κατακόρυφου προφίλ ταχύτητας ανέμου.	61
Πίνακας 3. Ιδιότητες διαχείρισης ασαφών συνόλων.	95
Πίνακας 4. Συγκέντρωση των ασαφών κανόνων που ορίζουν την έξοδο του ασαφούς ελεγκτή.	99
Πίνακας 5. Τυπικές τιμές παραμέτρων ατμοηλεκτρικού σταθμού.	124
Πίνακας 6. Τυπικές τιμές παραμέτρων αεριοστροβιλικού σταθμού.	128
Πίνακας 7. Τυπικές τιμές παραμέτρων υδροστροβιλικού σταθμού.	132
Πίνακας 8. Τυπικές τιμές παραμέτρων ντιζελοηλεκτρικού σταθμού.	136
Πίνακας 9. Τυπικές τιμές παραμέτρων αιολικού πάρκου.	137
Πίνακας 10. Τυπικές τιμές παραμέτρων για διασύνδεση συστημάτων δύο περιοχών.	141
Πίνακας 11. Τυπικές τιμές παραμέτρων για διασύνδεση συστημάτων τριών περιοχών.	142
Πίνακας 12. Τυπικές τιμές παραμέτρων για διασύνδεση συστημάτων τεσσάρων περιοχών.	144

**ΔΟΜΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ
ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ****1. Εισαγωγή**

Ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας (ΣΗΕ) είναι το σύνολο των κατάλληλα συνδεδεμένων ηλεκτρολογικών υλικών (συσκευές, γεννήτριες, αγωγοί κτλ) το οποίο εξυπηρετεί ένα συγκεκριμένο σκοπό που σχετίζεται με την παραγωγή, μεταφορά και διανομή ηλεκτρικής ενέργειας. Ο παραπάνω ορισμός αν και γενικός παραπέμπει σε πολλά στοιχεία που απαιτείται να συνεργαστούν αρμονικά ώστε να επιτευχθεί ο σκοπός. Τα παραπάνω στοιχεία θα αναλυθούν στο Κεφάλαιο αυτό ενώ ο σκοπός ο οποίος αναφέρθηκε προηγουμένως θα αναλυθεί στα επόμενα Κεφάλαια. Για την καλύτερη κατανόηση της λειτουργίας ενός ΣΗΕ θεωρείται χρηστό να γίνει αναφορά σε κάποια από τα δομικά στοιχεία από τα οποία αυτό αποτελείται. Δομικά στοιχεία ενός ΣΗΕ είναι μεταξύ άλλων, οι μονάδες παραγωγής, οι μετασχηματιστές, οι γραμμές μεταφοράς, οι υποσταθμοί, τα συστήματα τηλεμετρίας και απομακρυσμένου ελέγχου και τα φορτία. Για να καταλήξουν τα ΣΗΕ στην σημερινή τους μορφή χρειάστηκε περισσότερο ένα αιώνα εξέλιξης τους. Όταν εμφανίστηκαν τα πρώτα ΣΗΕ ήταν πολύ πιο απλά και σίγουρα μικρότερης ισχύος από τα αντίστοιχα σημερινά. Η χρονοβόρα και δύσκολη εξέλιξη τους πέρασε πολλά στάδια και δυστυχώς στα πρώτα της βήματα βασίστηκαν στην μέθοδο δοκιμής και λάθους. Μετά από όλα αυτά σήμερα έχουν πλέον καταλήξει στην χρήση εναλλασσόμενης τάσης για την παραγωγή και διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας (στην μεταφορά υπάρχει σήμερα έντονα και το στοιχείο της συνεχούς τάσης). Αναπτύχθηκαν χάρη σε αυτά επιστήμες όπως τεχνολογία των υλικών, χημεία, φυσική, ιατρική, ηλεκτρονική κ.α. Γενικά η ανάπτυξη ΣΗΕ συμβαδίζει με την ανάπτυξη του βιοτικού, μορφωτικού και κοινωνικού επιπέδου των λαών. Ακόμα και σήμερα συνεχίζεται η προσπάθεια εξηλεκτρισμού του αναπτυσσόμενου κόσμου με αποτέλεσμα τόσο την αύξηση της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας σε επίπεδο πλανήτη, όσο και την πολυπλοκότητα των ΣΗΕ που θα εξυπηρετούν τις τεράστιες αυτές εκτάσεις.

Για την κάλυψη της ζήτησης αυτής χρησιμοποιούνται διάφορες πηγές ενέργειας από τις οποίες παράγεται η ηλεκτρική, οι κυριότερες από αυτές είναι τα ορυκτά και τα αέρια καύσιμα, η δυναμική ενέργεια του νερού και οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Κάθε μια από αυτές μετατρέπεται με κατάλληλες μηχανές σε ηλεκτρική και διοχετεύεται στο σύστημα. Προϋπόθεση για να συμβεί αυτό είναι η ποιότητα της ηλεκτρικής ενέργειας να είναι εντός σαφώς προκαθορισμένων ορίων. Για αυτόν ακριβώς το λόγο αναπτύχθηκε και η λογική του ελέγχου της παραγόμενης τάσης και συχνότητας. Στην συνέχεια επόμενος σταθμός είναι οι μετασχηματιστές. Αυτοί είναι υπεύθυνοι για την ανύψωση ή τον υποβιβασμό της παραγόμενων ηλεκτρικών μεγεθών αρκεί αυτά να είναι εναλλασσόμενα ή έστω μεταβαλλόμενης μορφής. Η διαδικασία της μεταφοράς της ηλεκτρικής ενέργειας από τον χώρο της παραγωγής στο χώρο της κατανάλωσης, γίνεται μέσω των γραμμών μεταφοράς. Η μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας θεωρήθηκε σωστό να γίνεται στην όσο δυνατό υψηλότερη τάση για την μείωση των απωλειών μεταφοράς. Οι γραμμές μεταφοράς δεν παίζουν απλά τον ρόλο της σύνδεσης παραγωγής και κατανάλωσης, στην πορεία τους παρεμβάλλονται υποσταθμοί στους οποίους γίνεται διασύνδεση περισσότερων γραμμών οι οποίες μπορεί να προέρχονται είτε από παραγωγούς είτε από καταναλωτές, δημιουργώντας έτσι το σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας. Τα βασικότερα στοιχεία του συστήματος αυτού περιγράφονται στις παρακάτω Παραγράφους.

1.1. Γεννήτριες – Μονάδες Παραγωγής

Μονάδα παραγωγής θεωρείται η διάταξη εκείνη η οποία μετατρέπει ενέργεια οποιασδήποτε μορφής σε ηλεκτρική. Επιθυμητό είναι να υπάρχει έλεγχος σε ότι αφορά τα χαρακτηριστικά της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας καθώς και στο ρυθμό παραγωγής της. Αυτό επιτυγχάνεται με χρήση κατάλληλων μηχανικών ή ηλεκτρικών διατάξεων. Οι μονάδες παραγωγής μπορούν να διακριθούν ανάλογα με πηγή ενέργειας που εκμεταλλεύονται σε κατηγορίες, όπως, θερμικές, υδροηλεκτρικές, αιολικές, φωτοβολταϊκές, ηλιοθερμικές, γεωθερμικές ή ακόμα και κυματικές. Με εξαίρεση κάποιων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας όλες τους χρησιμοποιούν σύγχρονες γεννήτριες για την παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας. Οι σύγχρονες γεννήτριες είναι ηλεκτρικές μηχανές, συνήθως τριφασικές, οι οποίες μετατρέπουν την μηχανική ενέργεια σε ηλεκτρική (συχνά ονομάζονται και εναλλακτικές ή στροβιλοεναλλακτικές). Το σταθερό τους μέρος ονομάζεται στάτης και σε αυτόν τοποθετείται κατάλληλα ένα τριφασικό τύλιγμα ισχύος, μέσα στο οποίο επάγεται η εναλλασσόμενη τάση. Το

στρεφόμενο μέρος τους ονομάζεται δρομέας και πάνω του τοποθετείται ένα δεύτερο τύλιγμα, το οποίο ονομάζεται διέγερσης και τροφοδοτείται με συνεχή τάση. Τα άκρα του τυλίγματος αυτού καταλήγουν σε δύο μεταλλικά δαχτυλίδια στο τέλος του άξονα τα οποία είναι μονωμένα τόσο μεταξύ τους όσο και προς τον άξονα. Σε αυτά εφάπτονται ψήκτρες (καρβουνάκια) οι οποίες άγουν την συνεχή τάση στο εσωτερικό του δρομέα με σκοπό να δημιουργήσουν ένα μόνιμο μαγνητικό πεδίο, όταν το τύλιγμα διέγερσης τροφοδοτείται, από εξωτερικό τροφοδοτικό DC. Είναι συνηθισμένο στις μονάδες παραγωγής, η συνεχής τάση που απαιτείται να προέρχεται από μια μικρότερης ισχύος γεννήτρια εναλλασσόμενου ρεύματος, η οποία είναι εγκατεστημένη σε κοινό άξονα με την κυρίως γεννήτρια. Η τάση της εναλλασσόμενης γεννήτριας μετατρέπεται σε DC μέσω ανορθωτικής διάταξης και έπειτα τροφοδοτεί το τύλιγμα του δρομέα της κυρίως γεννήτριας. Επειδή η γεννήτρια αυτή παράγει την ηλεκτρική ισχύ που είναι απαραίτητη για την τροφοδοσία του τυλίγματος διέγερσης καλείται διεγέρτρια. Αυτή μπορεί να είναι μια μηχανή με διέγερση από μόνιμους μαγνήτες ή με την ίδια λογική να χρησιμοποιεί μια αντίστοιχη διάταξη μικρότερης ισχύος με μόνιμους μαγνήτες, σε αυτήν την περίπτωση η δεύτερη γεννήτρια λέγεται προδιεγέρτρια. Με την χρήση της διεγέρτριας αποφεύγεται η χρήση ψηκτρών και άρα μειώνονται οι απώλειες και αυξάνεται η απόδοση της γεννήτριας. Η σύγχρονη γεννήτρια απαιτεί δύο “εισόδους” για να παράγει εναλλασσόμενο ηλεκτρικό ρεύμα, δηλαδή, την μηχανική ενέργεια από την κινητήρια μηχανή και την συνεχή τάση από την διεγέρτρια. Μια σύγχρονη γεννήτρια έχει διαφορετική συμπεριφορά όταν λειτουργεί αυτόνομα και διαφορετική όταν λειτουργεί σαν μέρος ενός ΣΗΕ παραλληλισμένη δηλαδή σε ένα “άπειρο ζυγό”. Στην αυτόνομη λειτουργία η συχνότητα μεταβάλλεται σε ακριβή αναλογία με τις στροφές με τις οποίες στρέφεται ο άξονάς της και η παραγόμενη ηλεκτρεγερτική της δύναμη E_a μεταβάλλεται ανάλογα με την μαγνητική ροή Φ στο εσωτερικό της μηχανής στην λειτουργία με σταθερές στροφές ω_s . Η μαγνητική ροή είναι ανάλογη με το ρεύμα διέγερσης I_f μέχρι την περιοχή του μαγνητικού κορεσμού του πυρήνα κατά τον οποίο παραμένει σχεδόν σταθερή. Ισχύει δηλαδή ότι:

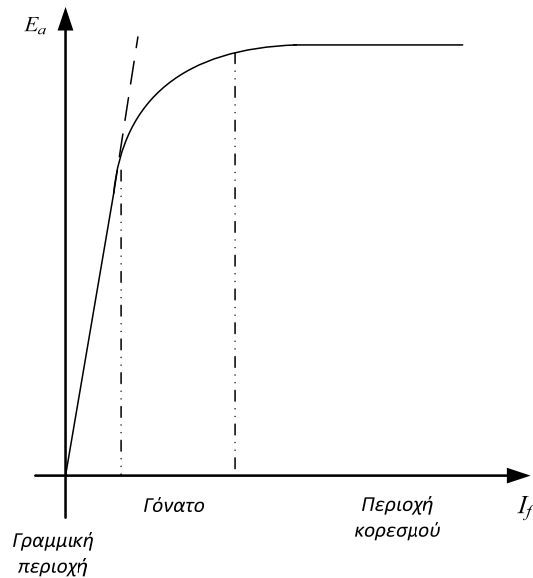
$$f = \frac{Pn_s}{60} = \frac{pn_s}{120} \quad (1.1)$$

$$E_a = K\Phi(I_f)\omega_s \quad (1.2)$$

$$\omega_s = \frac{2\pi n_s}{60} \quad (1.3)$$

όπου f η συχνότητα της παραγόμενης τάσης σε Hz, P τα ζεύγη μαγνητικών πόλων, p ο αριθμός των μαγνητικών πόλων, n_s η ταχύτητα περιστροφής του άξονα ή του μαγνητικού πεδίου του στάτη, που ονομάζεται επίσης και σύγχρονη ταχύτητα, σε ΣΑΛ (στροφές ανά λεπτό) (rpm, rounds per minute), K η σταθερά της μηχανής η οποία εξαρτάται από τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά της και ω_s η σύγχρονη γωνιακή ταχύτητα του άξονα σε rad/sec.

Αυτό σημαίνει ότι για μικρές τιμές ρεύματος διέγερσης μια συγκεκριμένη ποσοστιαία του μεταβολή θα επιφέρει ανάλογη ποσοστιαία μεταβολή στην μαγνητική ροή και αντίστοιχα στην παραγόμενη ΗΕΔ, ενώ όσο πιο κοντά βρίσκεται το ρεύμα διέγερσης στην περιοχή του γόνατου της καμπύλης μαγνήτησης θα χάνεται η γραμμικότητα μέχρι την περιοχή κορεσμού στην οποία για οποιαδήποτε αύξηση του ρεύματος διέγερσης η μαγνητική ροή και η παραγόμενη ΗΕΔ θα παραμένουν σταθερές ή σχεδόν σταθερές. Στο Σχ. 1.1 φαίνεται η χαρακτηριστική ανοιχτού κυκλώματος μιας σύγχρονης γεννήτριας όπως αυτή προκύπτει από το πείραμα ανοιχτοκύκλωσης, ενώ η γραφική δεν θα αλλάξει αν ο κατακόρυφος άξονας ήταν η μαγνητική ροή.



Σχ. 1.1. Χαρακτηριστική ανοικτού κυκλώματος σύγχρονης γεννήτριας ή καμπύλη μαγνήτησης.

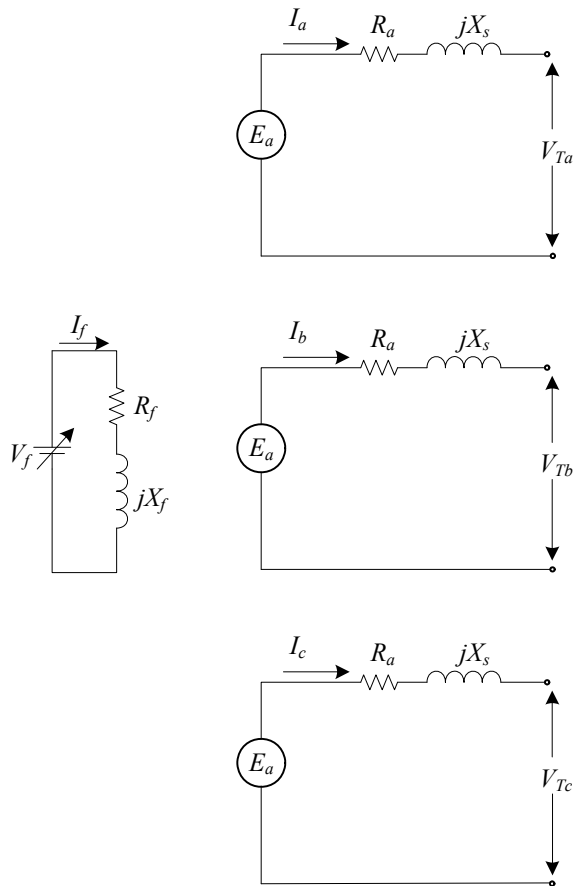
Στα Σχ. 1.2 και Σχ. 1.3 παρουσιάζεται το τριφασικό και μονοφασικό ισοδύναμο της σύγχρονης γεννήτριας, αντίστοιχα. Θα πρέπει να τονιστεί ότι στο μονοφασικό ισοδύναμο το ρεύμα I_a και η τάση V_T είναι μεγέθη φασικά. Όπως αναφέρθηκε η γεννήτρια αυτή είναι τριφασική και τα τρία μονοφασικά τυλίγματα της μπορεί να είναι συνδεδεμένα είτε σε αστέρα, είτε σε τρίγωνο. Στην πρώτη εκ των δύο περιπτώσεων το φασικό και το πολικό ρεύμα είναι ίσα ενώ η πολική τάση είναι $\sqrt{3}$ φορές μεγαλύτερη. Στην περίπτωση της συνδεσμολογίας τυλιγμάτων στάτη κατά τρίγωνο, πολική και φασική τάση έχουν την ίδια τιμή ενώ το ρεύμα γραμμής είναι $\sqrt{3}$ φορές μεγαλύτερο του φασικού. Για συνδεσμολογία τυλιγμάτων στάτη κατά αστέρα ισχύει:

$$\begin{aligned} I_a &= I_{\text{γραμμής}} \\ V_T &= \frac{V_{\text{πολικό}}}{\sqrt{3}} \end{aligned} \quad (1.4)$$

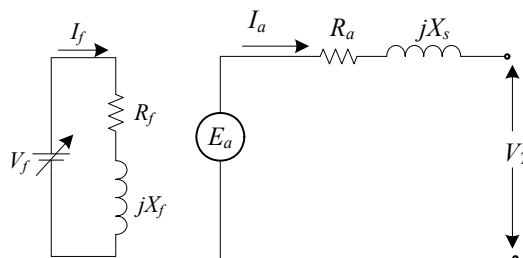
ενώ για συνδεσμολογία τυλιγμάτων στάτη κατά τρίγωνο:

$$\begin{aligned} I_a &= \frac{I_{\text{γραμμής}}}{\sqrt{3}} \\ V_T &= V_{\text{πολικό}} \end{aligned} \quad (1.5)$$

όπου V_f και I_f η τάση και το ρεύμα του τυλίγματος διέγερσης, $R_f + jX_f$ η σύνθετη αντίσταση του τυλίγματος διέγερσης, V_T η φασική τάση εξόδου της σύγχρονης γεννήτριας, I_a το φασικό ρεύμα τυμπάνου της, R_a η ωμική αντίσταση του τυλίγματος του στάτη ανά φάση και X_s η σύγχρονη αντίδραση του στάτη ανά φάση που στην πραγματικότητα αποτελείται από δύο επιμέρους επαγωγικές αντιδράσεις. Την επαγωγική αντίδραση του σπλισμού και την επαγωγική αντίδραση λόγω της αυτεπαγωγής του τυλίγματος.



Σχ. 1.2. Πλήρες τριφασικό ισοδύναμο κύκλωμα σύγχρονης γεννήτριας



Σχ. 1.3. Μονοφασικό ισοδύναμο κύκλωμα σύγχρονης γεννήτριας.

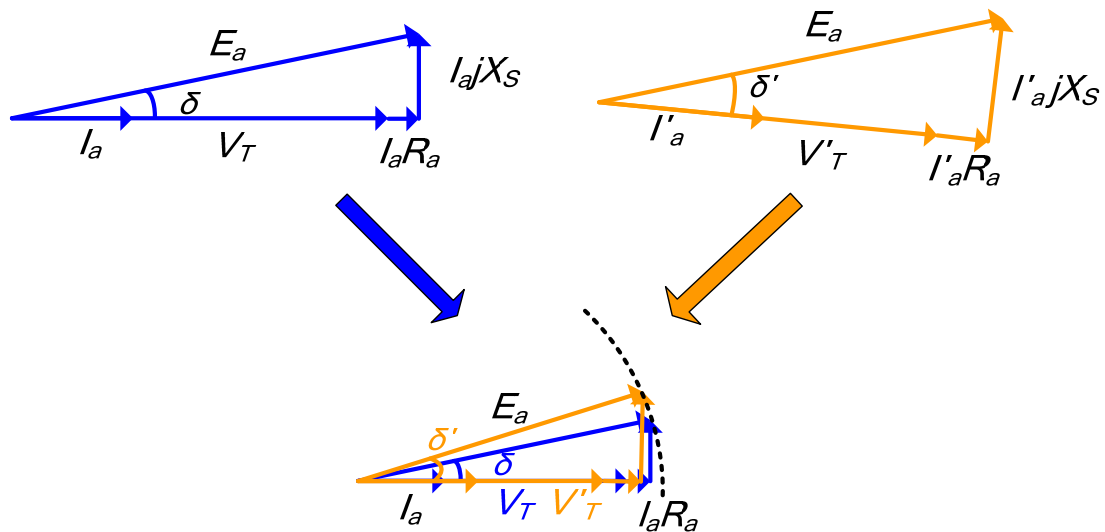
Ο δρομέας φιλοξενεί το τυλίγμα διέγερσης το οποίο τροφοδοτείται από συνεχές ρεύμα, αυτό σημαίνει ότι στην ουσία ο δρομέας είναι ένας στρεφόμενος ηλεκτρομαγνήτης ο οποίος διεγείρει το τυλίγμα του στάτη. Ο δρομέας, όπως κάθε μαγνήτης, έχει άρτιο αριθμό πόλων (Βόρειος, Νότιος) που έχουν να κάνουν εδώ με τον τρόπο κατανομής των περιελίξεων του τυλίγματος στην περιφέρεια του δρομέα. Οι δρομείς επίσης έχουν δυο διαφορετικές γεωμετρικές εκδοχές, έτσι προκύπτουν οι μηχανές με κυλινδρικό δρομέα και οι μηχανές με δρομείς έκτυπων πόλων. Οι μηχανές κυλινδρικού δρομέα που ονομάζονται και στροβιλοεναλλακτήρες έχουν τα τυλίγματα του δρομέα τοποθετημένα σε αυλάκια κατά μήκος του χωρίς αυτά να προεξέχουν από την περιφέρεια του. Συνήθως έχουν μεγάλο μήκος και μικρότερη διάμετρο δρομέα και χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές με υψηλές ταχύτητες περιστροφής (διπολικές ή τετραπολικές μηχανές), με ατμοστροβίλους ή μεγάλες μηχανές εσωτερικής καύσης. Αντίθετα οι μηχανές με δρομείς έκτυπων πόλων έχουν μικρό μήκος άξονα και μεγάλη διάμετρο δρομέα και είναι κατάλληλες για εφαρμογές μικρότερων φυγοκεντρικών δυνάμεων άρα μικρότερης ταχύτητας περιστροφής. Προτιμώνται για υδροστροβιλικές μονάδες και συχνά εγκαθίστανται με τον δρομέα κατακόρυφα και τον στάτη να στηρίζεται στην περιφέρεια του. Οι πόλοι σε αυτή την περίπτωση δημιουργούνται με περιέλιξη του τυλίγματος διέγερσης σε προεξοχές του δρομέα που ονομάζονται κορμοί ή πυρήνες των πόλων και κατανέμονται ακτινικά σε αυτόν με απόλυτη συμμετρία. Στην άκρη των κορμών ή πυρήνων που δεν είναι

στερεωμένη στον άξονα της μηχανής βρίσκονται μεταλλικές απολήξεις οι οποίες ονομάζονται πέδιλα και χρησιμοποιούνται για την σωστή γεωμετρική κατανομή του μαγνητικού πεδίου.

Είναι προφανές ότι η E_a ισούται με την V_T όταν δεν υπάρχει ρεύμα, στην λειτουργία δηλαδή χωρίς φορτίο. Από τον νόμο τάσεων του Kirchhoff προκύπτει η σχέση που υπολογίζει την φασική τάση εξόδου για δεδομένο φορτίο και ΗΕΔ. Οι τάσεις και τα ρεύματα κάθε φάσης με την επόμενη διαφέρουν κατά 120° ενώ τα μέτρα τους είναι ίσα.

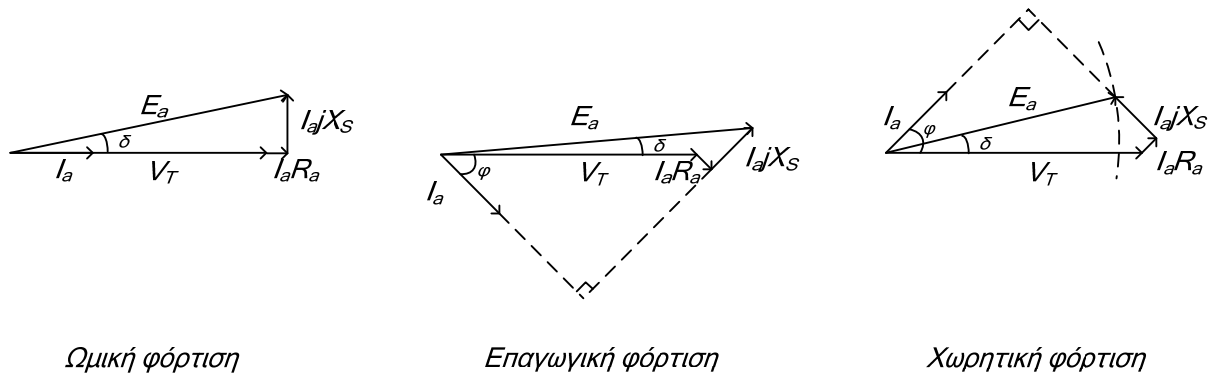
$$\vec{V}_T = \vec{E}_a - \vec{I}_a(R_a + jX_s) \quad (1.6)$$

Στην αυτόνομη λειτουργία της γεννήτριας με σταθερό ρεύμα διέγερσης και σταθερές στροφές, θα θεωρηθεί ωμικό φορτίο (χωρίς βλάβη της γενικότητας) και θα αυξηθεί η τιμή του ρεύματος φορτίου χωρίς όμως να αλλάξει ο συντελεστής ισχύος του. Είναι προφανές ότι η ΗΕΔ θα παραμείνει σταθερή αφού δεν μεταβλήθηκε ούτε το ρεύμα διέγερσης ούτε και οι στροφές. Λόγω της αύξησης του ρεύματος φορτίου υπάρχει αντίστοιχη αύξηση της πτώσης τάσης στην σύνθετη αντίσταση του στάτη με αποτέλεσμα να μειωθεί το μέτρο της τάσης εξόδου και να αυξηθεί η γωνία ισχύος ανάμεσα σε ΗΕΔ και τάση εξόδου.



Σχ. 1.4. Αύξηση του ωμικού φορτίου σε μια σύγχρονη γεννήτρια σε αυτόνομη λειτουργία.

Τα παραπάνω ισχύουν για κάθε είδος φόρτισης (επαγωγικό, ωμικό, χωρητικό) αν κατά την αυξομείωση του φορτίου ο συντελεστής ισχύος παραμένει σταθερός. Είναι επιθυμητό να υπάρχει σταθερότητα από τις γεννήτριες και αναισθησία στις μεταβολές του φορτίου. Αυτό σημαίνει ότι πρέπει να εξεταστούν οι καταστάσεις κατά τις οποίες η τάση εξόδου παραμένει σταθερή ασχέτως φόρτισης, στα όρια πάντα των δυνατοτήτων της γεννήτριας. Για κάθε είδος φόρτισης ακόμα και αν το ρεύμα παραμένει σταθερό σαν μέτρο η πτώση τάσης στην σύνθετη αντίσταση του στάτη έχει διαφορετική γωνία με αποτέλεσμα να απαιτείται μεταβολή του ρεύματος διέγερσης, ώστε η επαγόμενη ΗΕΔ να πάρει κατάλληλη τιμή που θα προκαλέσει σταθερή τάση εξόδου. Όπως μπορεί να παρατηρηθεί από το Σχ. 1.5 στην επαγωγική και ωμική φόρτιση απαιτείται μεγαλύτερου μέτρου ΗΕΔ για να παραχθεί σταθερή τάση εξόδου ενώ στην χωρητική φόρτιση απαιτείται μικρότερου μέτρου ΗΕΔ. Η γωνία ανάμεσα στην ΗΕΔ και την τάση εξόδου λέγεται γωνία ισχύος και συμβολίζεται διεθνώς με τον πεζό χαρακτήρα δ .



Σχ. 1.5. Διαφορετικές φορτίσεις σύγχρονης γεννήτριας.

Η μηχανική ισχύς που δέχεται μια σύγχρονη γεννήτρια στον άξονα της από την κινητήρια μηχανή, είναι ανάλογη της ροπής στην σύγχρονη ταχύτητα περιστροφής. Μετά από τις απώλειες περιστροφής που οφείλονται στο φαινόμενο του ανεμισμού, σε τριβές στα ρουλεμάν και τις απώλειες πυρήνα (ή σιδήρου) ένα ποσοστό αυτής της μηχανικής ισχύος εισόδου μπορεί να μετατραπεί σε ηλεκτρική. Αυτή ονομάζεται “ισχύς διακένου” ή “μετατρέπόμενη ισχύς” και συμβολίζεται σαν P_{AG} ή P_{conv} . Και υπολογίζεται σαν την ηλεκτρική ισχύ που προσφέρουν οι τρεις πηγές του τριφασικού ισοδύναμου που συμβολίζουν τις τρεις ΗΕΔ. Σαν γωνία γ εννοείται η φασική απόκλιση ανάμεσα στο διάνυσμα της ΗΕΔ και του ρεύματος φορτίου.

$$P_{μηχ} = T \omega_s \quad (1.7)$$

$$P_{AG} = 3E_a I_a \cos(\varphi + \delta) \quad (1.8)$$

$$P_{AG} = 3E_a I_a \cos(\gamma)$$

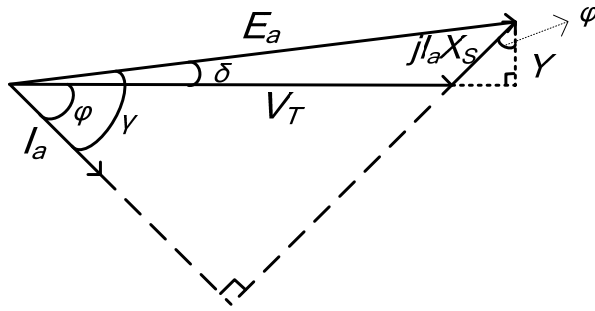
Αν μετά από την μετατροπή σε εναλλασσόμενη ηλεκτρική ισχύ αφαιρεθούν και οι ωμικές απώλειες στο τριφασικό τύλιγμα του στάτη θα προκύψει η ισχύς εξόδου της γεννήτριας που με φασικά μεγέθη είναι:

$$P_{out} = 3V_T I_a \cos(\varphi) \quad (1.9)$$

και με πολικά:

$$P_{out} = \sqrt{3} V_{πολ} I_{γρ} \cos(\varphi) \quad (1.9)$$

Στη συνέχεια θεωρείται αμελητέα η αντίσταση του τυλίγματος του στάτη σε σχέση με την σύγχρονη αντίδραση, υπόθεση που πλησιάζει πάρα πολύ την πραγματικότητα, αφού η αναλογία τους συνήθως είναι ανάμεσα στο 1/10 και το 1/20. Για επαγωγική φόρτιση π.χ., προκύπτει το παρακάτω διανυσματικό διάγραμμα.



Σχ. 1.6. Διανυσματικό διάγραμμα σύγχρονης γεννήτριας με επαγωγική φόρτιση θεωρώντας αμελητέα την ωμική αντίσταση του τυλίγματος του στάτη.

Από το τελευταίο και σύμφωνα με τους κανόνες των ημιτόνων και συνημιτόνων προκύπτει ότι:

$$Y = E_a \sin(\delta) \quad (1.10)$$

$$Y = I_a X_s \cos(\varphi) \quad (1.11)$$

Άρα:

$$\begin{aligned} E_a \sin(\delta) &= I_a X_s \cos(\varphi) \\ I_a \cos(\varphi) &= \frac{E_a \sin(\delta)}{X_s} \end{aligned} \quad (1.12)$$

Από την Εξ. 1.9 και την Εξ. 1.12 προκύπτει ότι η ισχύς εξόδου μιας σύγχρονης γεννήτριας κυλινδρικού δρομέα (όταν η ωμική αντίσταση του τυλίγματος του στάτη είναι πολύ μικρότερη από της αντίστοιχη σύγχρονη επαγωγική αντίδραση) θα είναι:

$$P_{out} = P_{AG} = \frac{3V_T E_a \sin(\delta)}{X_s} \quad (1.13)$$

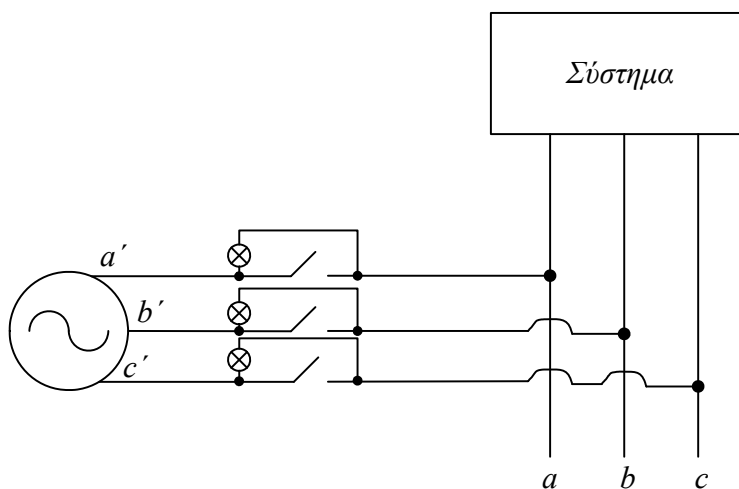
Όπως φαίνεται αυτή η ισχύς θα είναι ίση με την ισχύ διακένου αφού δεν υπάρχουν ηλεκτρικές απώλειες δεδομένου ότι αμελείται η R_a . Εφόσον η ισχύς διακένου συνδέεται με την επαγόμενη ροπή T_{ind} μέσω της σύγχρονης γωνιακής ταχύτητας θα ισχύει ότι:

$$P_{AG} = T_{ind} \omega_s \quad (1.14)$$

$$T_{ind} = \frac{3V_T E_a \sin(\delta)}{\omega_s X_s} \quad (1.15)$$

Μέχρι αυτό το σημείο εξετάστηκε μόνο η αυτόνομη λειτουργία της σύγχρονης γεννήτριας. Στην πραγματικότητα είναι πια εξαιρετικά απίθανο να τροφοδοτούνται ισχυρά φορτία από μία μόνο μηχανή. Με την εξαίρεση περιπτώσεων μικρών αυτόνομων συστημάτων, οι σύγχρονες γεννήτριες συνεργάζονται για να εξυπηρετήσουν συνολικά φορτία πολύ μεγαλύτερα από την ονομαστική ισχύ κάθε μίας από αυτές. Η διαδικασία κατά την οποία μια σύγχρονη γεννήτρια συνδέεται με τις υπόλοιπες ονομάζεται παραλληλισμός. Είναι γεγονός ότι ο παραλληλισμός των γεννητριών παρουσιάζει σημαντικά πλεονεκτήματα όσο αφορά την απόδοση, την αξιοπιστία, την ευστάθεια και την ευκολία επέκτασης σε σχέση με ένα σύστημα μιας μόνο γεννήτριας. Παρόλα αυτά για να γίνει ο παραλληλισμός μιας σύγχρονης γεννήτριας σε ένα σύστημα θα πρέπει να ακολουθηθεί μια

διαδικασία η οποία θα εξασφαλίζει την ασφαλή και ομαλή σύνδεση και λειτουργία της γεννήτριας αλλά και του δικτύου. Για να μπορέσει μια γεννήτρια να παραλληλιστεί σε ένα σύστημα θα πρέπει να πληρούνται κάποιες προϋποθέσεις, θα πρέπει δηλαδή, τα δυνάμιστα των τάσεων της να είναι σχεδόν ίδια με τα δυνάμιστα των τάσεων του συστήματος σε κάθε χρονική στιγμή. Αυτό σημαίνει ότι θα πρέπει να έχουν πολύ κοντινές ενεργές τιμές τάσεων (λίγο μεγαλύτερες στην γεννήτρια), ίδια διαδοχή φάσεων, κάθε φάση της γεννήτριας θα πρέπει να έχει ίση γωνία με την τάση του συστήματος στο οποίο παραλληλίζεται και τέλος θα πρέπει η συχνότητα του συστήματος και της μηχανής να είναι έχουν πολύ μικρή απόκλιση. Η λάθος διαδοχή φάσεων μπορεί να διορθωθεί με την αντιμετάθεση οποιονδήποτε δύο εκ των ενεργών αγωγών της γεννήτριας. Η διαδικασία του παραλληλισμού απαιτεί την συνδεσμολογία του Σχ. 1.7 και πριν γίνει προσπάθεια παραλληλισμού θα πρέπει να ρυθμιστεί η γεννήτρια σύμφωνα με τις προϋποθέσεις που αναφέρθηκαν. Αρχικά ρυθμίζεται το ρεύμα διέγερσης ώστε η τάση εξόδου της να είναι λίγο μεγαλύτερη από αυτήν του συστήματος. Μετά θα πρέπει να επιβεβαιωθεί η σωστή διαδοχή των φάσεων βάση της ένδειξης των λαμπτήρων, αν αυτοί αναβοσβήνουν διαδοχικά θα πρέπει να γίνει εναλλαγή οποιονδήποτε δύο φάσεων της γεννήτριας μεταξύ τους. Όταν η διαδοχή των φάσεων είναι σωστή θα παρατηρηθεί ταυτόχρονη φωτοβολία και σβέση των λαμπτήρων. Στην συνέχεια ρυθμίζονται οι στροφές της κινητήριας μηχανής ώστε η συχνότητα της γεννήτριας να είναι ελαφρώς μεγαλύτερη από αυτήν του συστήματος. Η αυξημένη ελαφρώς συχνότητα της σύγχρονης γεννήτριας δημιουργεί μια μικρή διαφορική ταχύτητα ανάμεσα στα δυνάμιστα του συστήματος και της ίδιας ώστε να μεταβάλλεται συνεχώς η φασική απόκλιση μεταξύ τους. Επίσης επιλέγεται να έχει η σύγχρονη γεννήτρια ελαφρώς υψηλότερη συχνότητα για να εισαχθεί στο σύστημα σαν γεννήτρια και όχι σαν φορτίο. Τέλος παρατηρούνται ξανά οι λαμπτήρες αν οι συχνότητες είναι αρκετά κοντά θα πρέπει αυτοί να αναβοσβήνουν με πολύ αργό ρυθμό. Την στιγμή που οι λαμπτήρες είναι σβηστοί σημαίνει ότι τα δυνάμιστα δεξιά και αριστερά του διακόπτη είναι συμφασικά και έχουν την ελάχιστη διαφορά δυναμικού ανάμεσα τους. Αυτή είναι η ιδανική στιγμή για τον παραλληλισμό, τότε δηλαδή πρέπει να κλείσει ο διακόπτης που γεφυρώνει το σύστημα με την προς παραλληλισμό γεννήτρια. Η συγκεκριμένη διαδικασία δεν χρησιμοποιείται πλέον χειροκίνητα σε σύγχρονα μεγάλα συστήματα, αλλά επιτελείται αυτόματα από Η/Υ με πολύ μεγαλύτερη ταχύτητα και ακρίβεια και πολύ μικρότερη καταπόνηση στις μηχανές. Παρόλα αυτά θεωρήθηκε σωστό να αναφερθεί αφού και τα λογισμικά των διατάξεων που αναπτύχθηκαν για τον αυτόματο παραλληλισμό βασίστηκαν στην ίδια λογική.



Σχ. 1.7. Διάταξη παραλληλισμού σύγχρονης γεννήτριας στο σύστημα.

Στην παραλληλισμένη λειτουργία οι γεννήτριες έχουν διαφορετική συμπεριφορά σε σχέση με την αυτόνομη εκδοχή. Αυτό συμβαίνει επειδή πλέον είναι συνδεδεμένοι πάνω σε έναν "άπειρο ζυγό" ο οποίος επιβάλλει σε όλο το μήκος του κοινή τάση και συχνότητα. Αυτό σημαίνει ότι δεν μπορεί να υπάρξει μεταβολή στις στροφές μίας μόνο γεννήτριας του συστήματος, και ότι όλες θα πρέπει να είναι συγχρονισμένες μεταξύ τους. Αντίστοιχα η μεταβολή του ρεύματος διέγερσης δεν θα μπορεί να έχει σημαντική επίδραση στην τάση του ζυγού αφού η μία γεννήτρια είναι ένα μικρό τμήμα του συστήματος και ως τέτοιο, ανίκανο να μεταβάλλει σημαντικά την συμπεριφορά του. Παρόλα αυτά όταν συμβεί μια ξαφνική μεταβολή του φορτίου (διαταραχή) θα μεταβάλλει τις παραμέτρους του συστήματος, την τάση δηλαδή και την συχνότητα. Οποιαδήποτε μεταβολή πραγματικής ισχύος ΔP θα μεταβάλλει μόνο την φασική απόκλιση ανάμεσα στην παραγόμενη ΗΕΔ και την τάση του ζυγού, αφήνοντας σχεδόν ανεπηρέαστα τα μέτρα τους, ενώ αντίθετα μια μεταβολή της άεργης ισχύος ΔQ θα επηρεάσει τα μέτρα των τάσεων χωρίς να επηρεαστεί η φασική απόκλιση. Είναι γνωστό ότι δεν είναι αποδοτικό να αποθηκεύεται η ηλεκτρική ενέργεια, για αυτό το λόγο η λογική των ΣΗΕ έχει δομηθεί με τέτοιο τρόπο ώστε ανά πάσα στιγμή να

καλύπτεται η ζήτηση από την παραγωγή. Αυτό συνεπάγεται ότι μόλις γίνουν αντιληπτές μεταβολές του φορτίου, θα πρέπει να γίνουν κατάλληλες κινήσεις στις γεννήτριες για την επαναφορά της ισορροπίας. Οι μεταβολές στην πραγματική ισχύ ανιχνεύονται με διακυμάνσεις στην συχνότητα και οι μεταβολές στην άεργη ισχύ με διακυμάνσεις στην τάση. Έτσι προκύπτουν οι έλεγχοι φορτίου-συχνότητας ($P-f$) και αέργου ισχύος-τάσης εξόδου ($Q-V$). Με την μεταβολή της ροπής εισόδου, ανάλογα επηρεάζεται και η παραγωγή πραγματικής ισχύος της γεννήτριας ενώ με την μεταβολή του ρεύματος διέγερσης επηρεάζεται η παραγωγή της αέργου ισχύος της. Επειδή οι κινήσεις του ενός ελέγχου δεν επηρεάζουν την συμπεριφορά του δεύτερου κάθε ένας από αυτούς μπορεί να εξεταστεί αυτόνομα και διαχωρισμένος από τον άλλον. Επίσης ο έλεγχος αέργου ισχύος-τάσης εξόδου είναι πολύ γρηγορότερος από τον έλεγχο φορτίου-συχνότητας μιας και ο πρώτος έχει να κάνει με μεταβολή ηλεκτρικών μεγεθών ενώ ο δεύτερος με μηχανικά μεγέθη όπως ροπή, θέσεις βαλβίδων και στροφές.

Παρόλο που η πλειοψηφία των μηχανών που παράγουν ηλεκτρική ενέργεια είναι σύγχρονες με την διάδοση της εκμετάλλευσης των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ΑΠΕ) υπάρχουν περιπτώσεις που αυτό δεν είναι εφικτό να γίνει με τους παραδοσιακούς τρόπους. Η παραγωγή ενέργειας από φωτοβολταϊκές (Φ/Β) κυψέλες για παράδειγμα είναι μια από αυτές τις περιπτώσεις. Εκεί, λόγω του Φ/Β φαινομένου παράγεται συνεχής τάση και ρεύμα το οποίο δεν μπορεί να διοχετευτεί άμεσα στο σύστημα. Με την ανάπτυξη των ηλεκτρονικών ισχύος, και την δημιουργία των αντιστροφών (inverter) έγινε δυνατή η μετατροπή της ενέργειας αυτής σε εναλλασσόμενη μορφή με πολύ υψηλό βαθμό απόδοσης. Η ισχύς των Φ/Β μονάδων δεν περιορίζεται πια και μπορεί να φτάσει μέχρι αρκετές δεκάδες Mw. Δυστυχώς τέτοιου είδους μονάδες δεν έχουν δυνατότητα παραγωγής ίδιων μεγάλων ποσοτήτων αέργου ισχύος ούτε και άλλων επικουρικών υπηρεσιών, όπως εφεδρεία ή επανεκκίνηση συστήματος. Αυτό συμβαίνει επειδή, οι αντιστροφείς που χρησιμοποιούνται έχουν ανάγκη το σύστημα για να σχηματίσουν τα δικά τους ημίτονα και χωρίς αυτό δεν μπορούν να συγχρονιστούν επιτυχώς. Το μεγαλύτερο μειονέκτημά τους παλιότερα ήταν οι αρμονικές συνιστώσες που διοχέτευαν στο σύστημα, αν και σήμερα αυτό έχει ξεπεραστεί. Τα σημερινά μοντέλα αντιστροφών έχουν συνολικό αρμονικό περιεχόμενο (THD) μικρότερο του 0.5% ενώ η έγχυση συνεχούς ρεύματος δεν ξεπερνά το 5% βάσει κανονισμών. Οι μικροεπεξεργαστές που χρησιμοποιούν του δίνουν δυνατότητες κάποιου βαθμού ελέγχου και μεγάλου βαθμού ασφάλειας όσο αφορά την συμπεριφορά των Φ/Β μονάδων παραγωγής σε σχέση με το σύστημα.

Επίσης διαδεδομένη έγινε η χρήση γεννητριών μονίμου μαγνήτη για την παραγωγή εναλλασσόμενης ηλεκτρικής ενέργειας από ανεμογεννήτριες. Εδώ ο δρομέας αντί να έχει το τύλιγμα διέγερσης, έχει έναν μόνιμο μαγνήτη στην θέση του, υπεύθυνο για την δημιουργία του σταθερού μαγνητικού πεδίου. Προφανώς με αυτόν τον τρόπο δεν είναι δυνατό να ελεγχθεί το μέγεθος του σταθερού μαγνητικού πεδίου. Κατά συνέπεια δεν μπορεί να υπάρχει τόσο ο έλεγχος του μέτρου της τάσης εξόδου στην αυτόνομη λειτουργία όσο και ο έλεγχος αέργου ισχύος-τάσης εξόδου στην διασυνδεδεμένη. Επίσης το ασταθές προφίλ του ανέμου είναι ευνόητο ότι δεν είναι ικανό να διατηρήσει τις στροφές της ανεμογεννήτριας σταθερές άρα και η συχνότητα της τάσης εξόδου επηρεάζεται σημαντικά. Σε αυτόν τον τομέα επενέβησαν ξανά τα ηλεκτρονικά ισχύος με τους μετατροπείς εναλλασσόμενου σε εναλλασσόμενο οι οποίοι δέχονται αυτή την κυματομορφή ασταθούς πλάτους και συχνότητας και δημιουργούν μια άλλη σύμφωνα με τις απαιτήσεις του συστήματος και των κανονισμών που το διέπουν. Σε μεγάλης ισχύος ανεμογεννήτριες είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθούν και σύγχρονες γεννήτριες αλλά λόγω των ριπών ανέμου εισάγονται κατά περιοχές περισσότερες αρμονικές στο σύστημα από ότι με την χρήση μετατροπών για αυτό και η χρήση των τελευταίων με τον καιρό κερδίζει έδαφος.

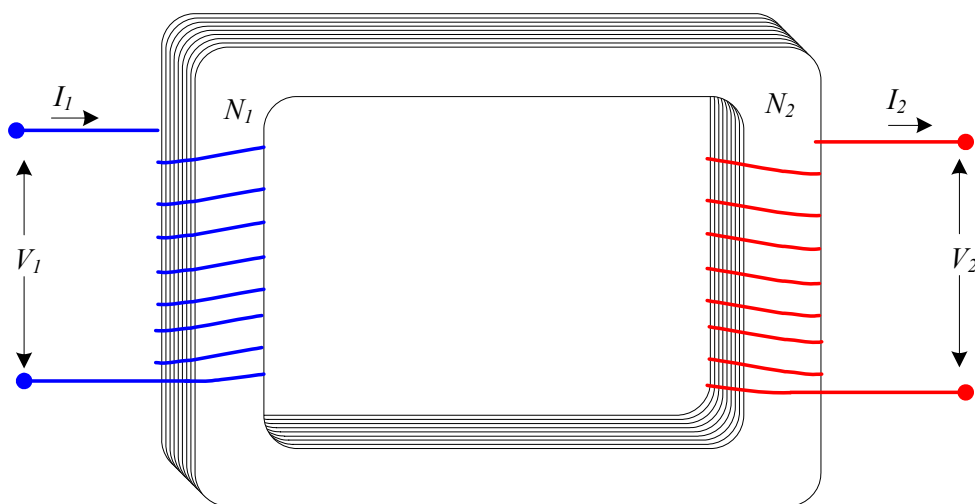
1.2. Μετασχηματιστές

Οι μετασχηματιστές είναι ηλεκτρικές διατάξεις οι οποίες μετατρέπουν ηλεκτρική ενέργεια, από ένα επίπεδο εναλλασσόμενης ή μεταβαλλόμενης τάσης σε ένα άλλο, απομονώνοντας ταυτόχρονα ηλεκτρικά τα δυο επίπεδα τάσης. Η αρχή λειτουργίας τους βασίζεται στη δημιουργία εναλλασσόμενου μαγνητικού πεδίου στον πυρήνα των τυλιγμάτων από το τύλιγμα εισόδου και στην συνέχεια την εξ' επαγωγής δημιουργία εναλλασσόμενης ηλεκτρεγερτικής δύναμης (ΗΕΔ) στο τύλιγμα εξόδου. Κατασκευαστικά αποτελούνται από δύο – τουλάχιστον - τυλίγματα ανά φάση, τυλιγμένα σε κοινό σιδηρομαγνητικό πυρήνα. Τα τυλίγματα αυτά δεν συνδέονται μεταξύ τους (εκτός των περιπτώσεων των αυτομετασχηματιστών) παρά μόνο μαγνητικά μέσω του πυρήνα. Το μέγεθος της ανύψωσης ή του υποβιβασμού εξαρτάται από τον λόγο των σπειρών του πρωτεύοντος, προς τις σπείρες του δευτερεύοντος τυλιγματος. Στα ΣΗΕ οι μετασχηματιστές χρησιμοποιούνται τόσο για λόγους μετρήσεων, οπότε ονομάζονται μετασχηματιστές ρεύματος ή τάσης αλλά και για την μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας, που ονομάζονται μετασχηματιστές ισχύος (ανύψωσης ή υποβιβασμού). Γενικά το ένα από τα τυλίγματα συνδέεται σε μια εναλλασσόμενη πηγή και το άλλο (ή άλλα) συνδέονται σε ένα φορτίο. Το πρώτο ονομάζεται πρωτεύων ή τύλιγμα εισόδου και το δεύτερο δευτερεύων ή τύλιγμα εξόδου. Πολλές φορές ένας μετασχηματιστής με ένα πρωτεύων τύλιγμα μπορεί να έχει διπλό δευτερεύων. Σε αυτή την περίπτωση ονομάζεται μετασχηματιστής τριπλού τυλιγματος και το τρίτο τύλιγμα, τριτεύων. Μια ακόμα συνηθισμένη λειτουργία των μετασχηματιστών

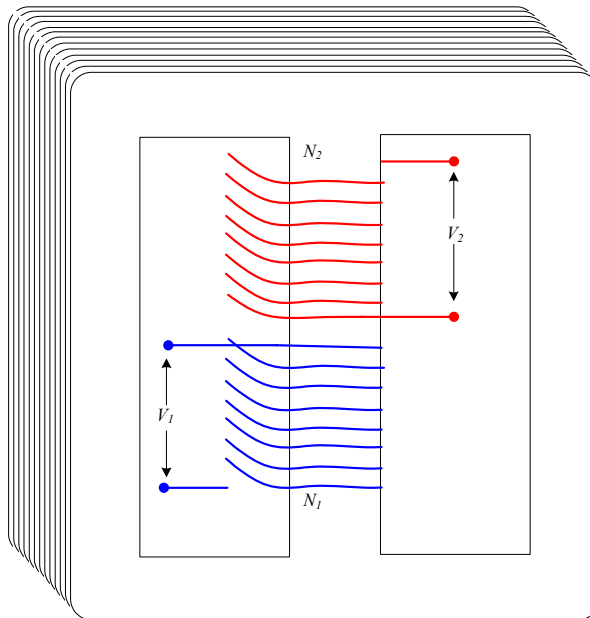
είναι η μερική μεταβολή του λόγου των σπειρών (tap changing) και κατ' επέκταση του λόγου μετασχηματισμού. Γενικά ισχύει:

$$a = \frac{N_1}{N_2} = \frac{V_1}{V_2} = \frac{I_2}{I_1} \quad (1.16)$$

όπου a ο λόγος μετασχηματισμού, N ο αριθμός σπειρών, V η τάση και I το ρεύμα ενώ οι δείκτες 1 και 2 αναφέρονται στο πρωτεύων και το δευτερεύων τύλιγμα του μετασχηματιστή. Υπάρχουν δύο βασικοί τρόποι κατασκευής μετασχηματιστών ισχύος, ο πρώτος χρησιμοποιεί έναν ορθογώνιας διατομής πυρήνα, που είναι κατασκευασμένος από ελάσματα χάλυβα (δυναμοελάσματα) κολλημένα με κατάλληλο τρόπο ώστε να μην υπάρχει αγωγή μεταξύ τους. Στα άκρα του (ζυγώματα), τοποθετούνται κατάλληλα οι σπείρες του πρωτεύοντος και του δευτερεύοντος (Σχ. 1.8). Αυτού του τύπου οι μετασχηματιστές ονομάζονται μετασχηματιστές πυρήνα (core transformers). Με τον δεύτερο τρόπο κατασκευής αντί να χρησιμοποιηθεί ένας ορθογώνιος πυρήνας επιλέγεται ένας πυρήνας με τρία ζυγώματα όμοιας κατασκευής με προηγουμένως, όπως αυτός του Σχ. 1.9, ενώ αυτή τη φορά τα τυλίγματα τοποθετούνται και τα δύο στο μεσαίο ζύγωμα. Αυτού του τύπου οι μετασχηματιστές ονομάζονται τύπου μανδύα (shell transformers). Συνήθως το τύλιγμα της ασθενέστερης τάσης περιελίσσεται στο εσωτερικό του τυλίγματος της ισχυρότερης τάσης και στους δύο τύπους, ώστε να μειωθεί η μαγνητική ροή σκέδασης και να βελτιωθεί η μόνωση ανάμεσα στον πυρήνα και το τύλιγμα υψηλής τάσης.

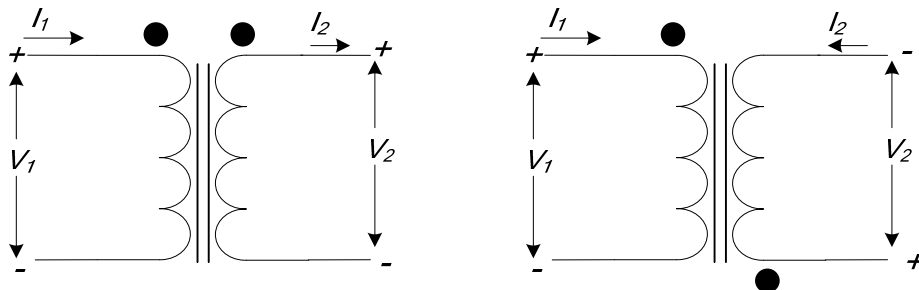


Σχ. 1.8. Συνδεσμολογία μετασχηματιστή τύπου πυρήνα.



Σχ. 1.9. Συνδεσμολογία μετασχηματιστή τύπου μανδύα.

Ένας “ιδανικός” μετασχηματιστής δεν παρουσιάζει απώλειες. Έχει ένα τύλιγμα εισόδου και ένα εξόδου των οποίων οι τάσεις και τα ρεύματα συσχετίζονται σε κάθε χρονική στιγμή σύμφωνα με την Εξ. 1.16. Παρόλο που είναι ξεκάθαρη η αναλογία των τάσεων και των ρευμάτων η πολικότητα τους μπορεί να διαφέρει και εξαρτάται από την φορά με την οποία έχουν περιελιχθεί τα τυλίγματα στον πυρήνα. Για να είναι εμφανής η πολικότητα της επαγόμενης τάσης – ρεύματος, σε κάθε τύλιγμα σημειώνεται μία τελεία σε ένα από τα δύο άκρα του. Αν στο πρωτεύων, το δυναμικό της τελείας είναι μεγαλύτερο από το δυναμικό της αντιτελείας (όχι τελεία) τότε και στο δευτερεύων το δυναμικό της τελείας θα είναι υψηλότερο σε σχέση με το δυναμικό της αντίστοιχης αντιτελείας. Ή σε όρους ρευμάτων, αν το ρεύμα στο πρωτεύων έχει φορά από τελεία σε αντιτελεία το ρεύμα στο δευτερεύων θα έχει φορά από αντιτελεία σε τελεία.



Σχ. 1.10. Συμβολικές παραστάσεις ιδανικών μετασχηματιστών.

$$P_1 = V_1 I_1 \cos \varphi_1 \quad (1.17)$$

$$P_2 = V_2 I_2 \cos \varphi_2 \quad (1.18)$$

Η πραγματική ισχύς εισόδου στους ιδανικούς μετασχηματιστές δίνεται από την Εξ. 1.7 και η ενεργός ισχύς εξόδου από την Εξ. 1.8 όπου φ_1 η διαφορά φάσης ανάμεσα στην τάση και το ρεύμα του πρωτεύοντος και φ_2 η διαφορά φάσης ανάμεσα σε τάση και ρεύμα εξόδου. Επειδή ο ιδανικός μετασχηματιστής επηρεάζει μεν τα μέτρα των τάσεων αλλά δεν μεταβάλλει της φάσεις των διανυσμάτων θα ισχύει ότι $\varphi_1 = \varphi_2 = \varphi$. Ακόμα λόγω της Εξ. 1.6 η Εξ. 1.8 μπορεί να γραφτεί ως:

αν επιστρατεύονται συστήματα ψύξης στα οποία το σώμα του Μ/Σ είναι εμβαπτισμένο σε μονωτικό ορυκτέλαιο, λέγονται Μ/Σ ελαίου. Οι Μ/Σ ελαίου καλύπτονται πλήρως, πλην των ακροδεκτών τους φυσικά, από ορυκτέλαιο χωρίς ίχνο υγρασίας, ενώ υπάρχουν δοχεία διαστολής στα οποία οδηγείται η περίσσια του λαδιού όταν θερμαίνονται. Εναλλακτικά μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένα στρώμα αζώτου για τον ίδιο σκοπό, ο στόχος είναι να μην μολυνθεί η δεξαμενή του ελαίου με ατμοσφαιρικό αέρα ο οποίος περιέχει υγρασία. Οι Μ/Σ διαχωρίζονται ανάλογα με τον τρόπο ψύξης τους στις παρακάτω κατηγορίες:

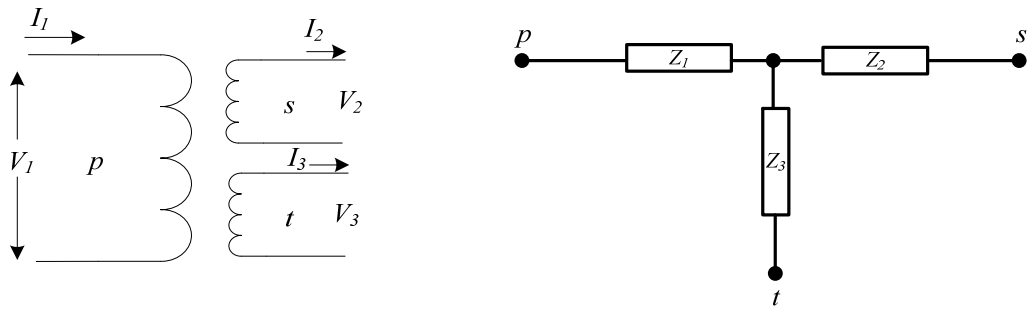
- Ξηρούς με φυσική ψύξη. Αυτός είναι και ο πιο απλός τρόπος ψύξης και χρησιμοποιείται σε Μ/Σ μικρής ισχύος, μικρότερης από 25 kVA και χαμηλής τάσης. Ο ατμοσφαιρικός αέρας απάγει την θερμότητα από την εξωτερική επιφάνεια του, και αυτό είναι αρκετό για να διατηρήσει την επιθυμητή θερμοκρασία. Συνήθως αυτού του τύπου οι Μ/Σ εγκαθίστανται με κάποια μικρή απόσταση από το έδαφος ώστε να υπάρχει ροή αέρος σε μεγαλύτερη επιφάνεια μετάλλου.
- Ξηρούς με εξαναγκασμένη ροή. Σε αυτή την περίπτωση δημιουργούνται κανάλια στον πυρήνα του Μ/Σ στις άκρες των οποίων προσαρμόζονται φτερωτές. Όταν αυτές στρέφονται εξαναγκάζουν τον αέρα να ρέει εντός των καναλιών απάγοντας με αυτό τον τρόπο γρηγορότερα την θερμοκρασία.
- Ελαίου με φυσική ροή. Το ενεργό μέρος του Μ/Σ είναι εμβαπτισμένο σε μονωτικό ορυκτέλαιο το οποίο απάγει την θερμοκρασία προς τα τοιχώματα. Οι Μ/Σ αυτής της μορφής χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές μεγαλύτερης ισχύος και υψηλότερης τάσης. Για ισχύ μεγαλύτερη των 10 MVA μπορεί να γίνει βελτίωση του ρυθμού μετάδοσης της θερμότητας μέσω ανεμιστήρων στα εξωτερικά τοιχώματα.
- Ελαίου με εξαναγκασμένη ροής. Με αυτόν τον τρόπο ψύξης είναι δυνατό να διαχειριστούν υψηλότερες τιμές ισχύος. Διατηρείται η κατασκευή που έχει αναλυθεί παραπάνω με την διαφορά ότι αντί να υπάρχει ένας σφραγισμένος θάλαμος μέσα στον οποίο βρίσκεται ο Μ/Σ και το λάδι, τώρα υπάρχουν είσοδοι και έξοδοι ελαίου. Με την χρήση αντλιών (κυκλοφορητών) και ψυγείων επιτυγχάνεται με άμεσο τρόπο η ψύξη του ενεργού μέρους του μετασχηματιστή. Αυτός ο τρόπος ψύξης προορίζεται για εφαρμογές μεγάλης κλίμακας για ισχύς μεγαλύτερες των 50 MVA.

Οι μετασχηματιστές τριπλού τυλίγματος χρησιμοποιούν το τρίτευον τυλίγμα τους ως επί το πλείστον για την σύνδεση εξοπλισμού αντιστάθμισης, όταν τα επίπεδα τάσης το επιτρέπουν οικονομικά. Μια άλλη χρήση του τρίτευοντος τυλίγματος είναι για την ροή των ρευμάτων τρίτης αρμονικής δια μέσου του, ώστε να προστατευτεί το υπόλοιπο σύστημα από αυτά. Το φασικό ισοδύναμο κύκλωμα του υπό συμμετρικές συνθήκες είναι τρεις σύνθετες αντιστάσεις συνδεδεμένες σε αστέρα όπως φαίνεται και στο Σχ. 1.12, όπου για τον υπολογισμό των Z_1 , Z_2 και Z_3 απαιτούνται κάποιες δοκιμές. Θα πρέπει να μετρηθεί η εμπέδηση κάθε τυλίγματος όταν ένα από τα άλλα δύο είναι ανοιχτοκυκλωμένο και το τελευταίο βραχυκυκλωμένο. Οι Z_{12} , Z_{13} και Z_{23} υπολογίζονται με αυτό τον τρόπο. Το πρώτο γράμμα του δείκτη δηλώνει σε ποιο τυλίγμα έγινε η μέτρηση εμπέδησης και το δεύτερο ποιο από τα άλλα ήταν βραχυκυκλωμένο εκείνη την στιγμή. Άρα η Z_{12} αναφέρεται στην σύνθετη αντίσταση του πρωτεύοντος με το με το δευτερεύον βραχυκυκλωμένο και το τρίτευον ανοικτό κοκ. Ισχύει λοιπόν ότι:

$$\begin{aligned} Z_{12} &= Z_1 + Z_2 \\ Z_{13} &= Z_1 + Z_3 \\ Z_{23} &= Z_2 + Z_3 \end{aligned} \tag{1.20}$$

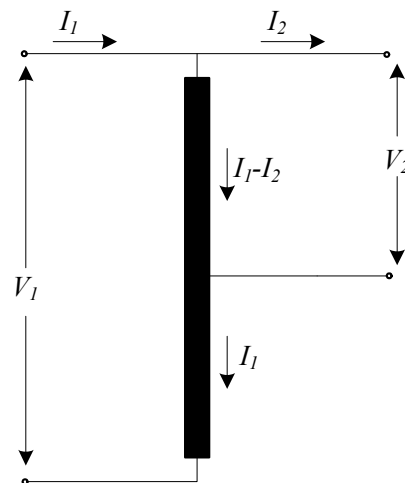
όπου λύνοντας το σύστημα 3x3 προκύπτει ότι:

$$\begin{aligned} Z_1 &= \frac{1}{2}(Z_{12} + Z_{13} - Z_{23}) \\ Z_2 &= \frac{1}{2}(Z_{12} + Z_{23} - Z_{13}) \\ Z_3 &= \frac{1}{2}(Z_{13} + Z_{23} - Z_{12}) \end{aligned} \tag{1.21}$$



Σχ. 1.12. Μορφή και ισοδύναμο κύκλωμα μετασχηματιστή τριπλού τυλίγματος.

Μια άλλη κατηγορία μετασχηματιστών είναι οι αυτομετασχηματιστές. Η βασική διαφορά τους από τους κανονικούς μετασχηματιστές έγκειται στο γεγονός ότι δεν υπάρχει γαλβανική απομόνωση μεταξύ πρωτεύοντος και δευτερεύοντος τυλίγματος. Αυτό συμβαίνει επειδή το δευτερεύον τυλίγμα είναι στην πραγματικότητα τμήμα του πρωτεύοντος. Η διάταξη αυτή μοιάζει περισσότερο με ένα διαιρέτη τάσης παρά με μετασχηματιστή όπως φαίνεται και στην παρακάτω εικόνα. Ο ένας ακροδέκτης του πλήρους τυλίγματος είναι κοινός τόσο για το πρωτεύον όσο και για το δευτερεύον. Η τάση εισόδου συνδέεται στα άκρα του πλήρους τυλίγματος ενώ το δευτερεύον λαμβάνεται από μεσαία λήψη του πλήρους τυλίγματος και τον κοινό ακροδέκτη. Το τμήμα του τυλίγματος το οποίο είναι κοινό και για τις δύο πλευρές διαρρέεται από την διαφορά των δύο ρευμάτων με αποτέλεσμα να κατασκευάζεται με διαφορετικής διατομής αγωγούς. Προφανώς, η πηγή εισόδου και το φορτίο μπορούν να αλλάξουν θέση και αντί για υποβιβασμό να υπάρχει ανύψωση τάσης. Το μεγαλύτερο τους πλεονέκτημα είναι η εξοικονόμηση όγκου, βάρους και φυσικά χρημάτων. Από την άλλη πλευρά, αυτές οι διατάξεις έχουν μικρότερη εμπέδηση από τους μετασχηματιστές διπλού τυλίγματος με αποτέλεσμα σε περίπτωση βραχυκυκλώματος να δημιουργούνται αρκετά μεγαλύτερα ρεύματα. Ακόμα χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές όπου οι τάσεις πρωτεύοντος και δευτερεύοντος είναι σε σχετικά κοντινές τιμές, μιας και εκεί γίνεται η μεγαλύτερη οικονομία. Τέλος να τονιστεί ότι με την χρήση αυτομετασχηματιστών οι τάσεις πρωτεύοντος και δευτερεύοντος που θα παρουσιαστούν θα είναι συμφασικές ακόμα και σε συνδεσμολογία αστέρα-τριγώνου και ακόμα ότι δεν υπάρχει γαλβανική απομόνωση πρωτεύοντος – δευτερεύοντος.



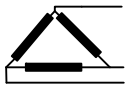
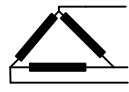
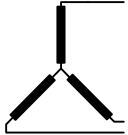
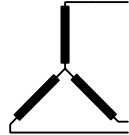
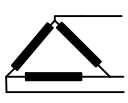
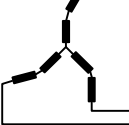
Σχ. 1.13. Φασικό κυκλωματικό διάγραμμα αυτομετασχηματιστή.

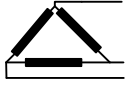
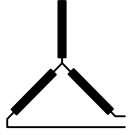
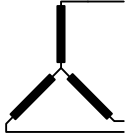
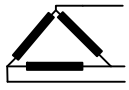
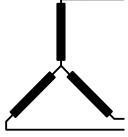
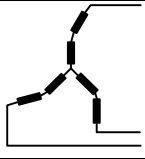


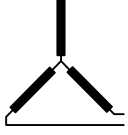
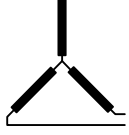
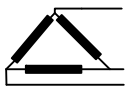
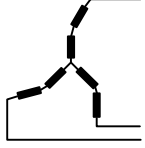
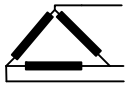
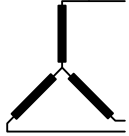
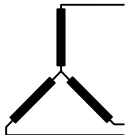
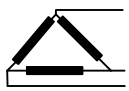
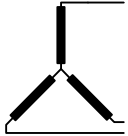
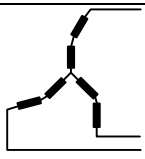
Μια ακόμα κατηγορία μετασχηματιστών που χρησιμοποιούνται ΣΗΕ είναι οι μετασχηματιστές μετρήσεων. Οι μετασχηματιστές μετρήσεων χρησιμοποιούνται ως επί το πλείστον σε υποσταθμούς για τον έλεγχο της ποιότητας της τάσης αλλά και κατά μήκος των γραμμών μεταφοράς. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν και μετασχηματιστές ισχύος για αυτή την εφαρμογή, αλλά είναι πιο οικονομικό και ακριβές να χρησιμοποιούνται μετρήσεων σε τέτοιες περιπτώσεις. Οι μετασχηματιστές μετρήσεων μπορεί να είναι είτε μετασχηματιστές τάσης είτε έντασης. Οι πρώτοι χρησιμοποιούνται σε παράλληλη συνδεσμολογία και υποβιβάζουν την τάση με σταθερό λόγο μετασχηματισμού για να μετρηθεί από κατάλληλο βολτόμετρο. Προϋπόθεση είναι ο λόγος μετασχηματισμού να είναι σταθερός για όλες τις περιοχές μέτρησης, όπως και στους μετασχηματιστές έντασης. Οι μετασχηματιστές

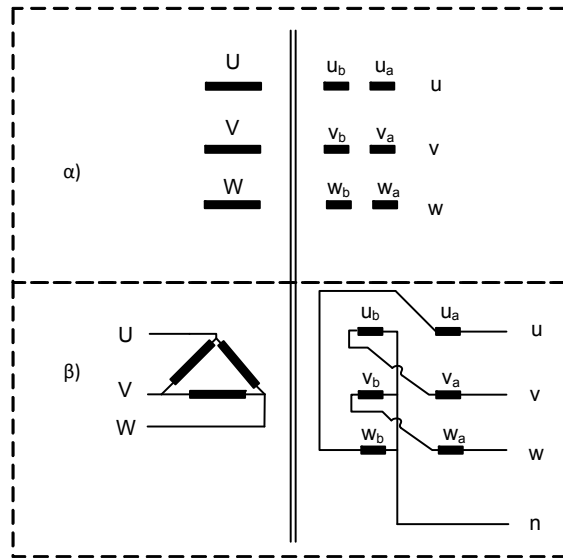
έντασης από την άλλη παρεμβάλουν το πρωτεύον τους τύλιγμα στο κύκλωμα του οποίου το ρεύμα πρέπει να μετρηθεί. Σε αυτήν την περίπτωση γίνεται συνήθως υποβιβασμός ρεύματος, δηλαδή ανύψωση τάσης και στο δευτερεύον συνδέεται αμπερόμετρο για να γίνει η μέτρηση. Επειδή το πρωτεύον παρεμβάλλεται σε κύκλωμα με μεγάλη ένταση ρεύματος θα πρέπει να έχει πολύ μικρή αντίσταση, για αυτό το λόγο κατασκευάζεται από έναν αγωγό ικανό να άγει το απαιτούμενο ρεύμα με πολύ λίγες σπείρες. Το δευτερεύον του μετασχηματιστή έντασης δεν πρέπει σε καμία περίπτωση να παραμείνει ανοιχτό μετά την σύνδεση του πρωτεύοντος γιατί δημιουργούνται επικίνδυνα υψηλές τάσεις σε περιπτώσεις ανοιχτοκυκλώματος του δευτερεύοντος του. Μια μακρινή παραλλαγή του μετασχηματιστή ρεύματος είναι και η αμπεροτσιμπίδα όπου το ρόλο του πρωτεύοντος παίζει ο ενεργός αγωγός και του δευτερεύοντος η περιφέρεια του μετρητικού. Το βασικό πλεονέκτημα με αυτού του είδους τις μετρήσεις είναι ότι πραγματοποιούνται με ασφάλεια αφού το κύκλωμα μέτρησης είναι γαλβανικά απομονωμένο από το κύκλωμα υψηλής τάσης.

Η ανάπτυξη των μετασχηματιστών ισχύος είναι ο λόγος που επικράτησε το μοντέλο της απομακρυσμένης παραγωγής στα ΣΗΕ, μιας και με την ανακάλυψη τους έγινε δυνατή η μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας με μορφή εναλλασσόμενης τάσης σε μεγάλες αποστάσεις με μικρές σχετικά απώλειες μεταφοράς, αυτό συμβαίνει επειδή η μεταφορά γίνεται με υψηλή τάση. Η ανύψωση της τάσης συνεπάγεται ανάλογο υποβιβασμό του ρεύματος και αφού οι απώλειες μεταφοράς εξαρτώνται από το τετράγωνο του ρεύματος οι απώλειες μειώνονται ανάλογα με το τετράγωνο του λόγου μετασχηματισμού, σε σχέση με την μεταφορά σε χαμηλότερο επίπεδο τάσης. Η στρατηγική των μεγαλύτερων ΣΗΕ είναι να γίνεται συνήθως η παραγωγή σε μέση τάση περίπου 12 - 25 kV αμέσως ανύψωση σε υψηλή για την μεταφορά σε απομακρυσμένους χρήστες. Ακολουθεί ο υποβιβασμός σε υποσταθμούς διανομής κοντά σε αστικά κέντρα σε μέση τάση από 12 ως 34.5 kV για την τοπική μεταφορά και τέλος σε κάθε γειτονιά υποβιβασμός σε χαμηλή τάση και τροφοδότηση κάθε καταναλωτή με ασφάλεια. Οι μετασχηματιστές τόσο στα ΣΗΕ όσο και σε ιδιωτικές χρήσεις επιλέγονται βάσει κάποιων χαρακτηριστικών μεγεθών. Αυτά μπορεί να είναι η ονομαστική ισχύς τους, ο αριθμός των φάσεων τους που στα ΣΗΕ είναι κατά κανόνα τριφασικοί, η ονομαστική τάση πρωτεύοντος και δευτερεύοντος, το ποσοστό της τάσης σε περίπτωση βραχυκυκλώματος και τέλος σε ποια ομάδα ανήκουν. Οι τριφασικοί μετασχηματιστές έχουν τρία τυλίγματα πρωτεύοντος τα οποία μπορούν να συνδεθούν είτε σε τρίγωνο είτε σε αστέρα. Ακόμα έχουν τρία τυλίγματα δευτερεύοντος κάθε ένα από τα οποία μπορεί να είναι χωρισμένο και στα δυο, έτσι δημιουργούνται τρεις πιθανές συνδεσμολογίες δευτερεύοντος, τρίγωνου, αστέρα και τεθλασμένου αστέρα. Στην συνδεσμολογία τεθλασμένου αστέρα το μισό τύλιγμα κάθε ζυγώματος συνδέεται σε σειρά με το μισό τύλιγμα κάποιου άλλου ζυγώματος και στη συνέχεια οι τρεις αυτές σειριακές συνδέσεις συνδέονται σε αστέρα. Με την συγκεκριμένη συνδεσμολογία απαιτούνται περισσότερες σπείρες για να επιτευχθεί ο ίδιος λόγος μετασχηματισμού, αλλά επιτυγχάνεται καλύτερη ισοκατανομή σε μη συμμετρικά φορτία επίσης δημιουργείται ουδέτερος κόμβος όπως και στην κλασική συνδεσμολογία αστέρα ο οποίος είναι απαραίτητος για δίκτυα διανομής χαμηλής τάσης. Ο αριθμός ομάδας πολλαπλασιασμένος επί 30° δείχνει την φασική απόκλιση των διανυσμάτων της χαμηλής τάσης σε σχέση με τα αντίστοιχα της υψηλής. Τέλος οι δείκτες D,Y,Z αναφέρονται στις τρεις συνδεσμολογίες, τρίγωνου, αστέρα και τεθλασμένου αστέρα αντίστοιχα, ενώ όταν παρουσιάζονται με κεφαλαίο χαρακτήρα αναφέρονται στο τύλιγμα υψηλής τάσης (εδώ πρωτεύον), και με πεζό (d,y,z) στο τύλιγμα χαμηλής.

Πίνακας 1. Διεθνείς ονομασίες συνδεσμολογίας τριφασικών μετασχηματιστών υποβιβασμού.

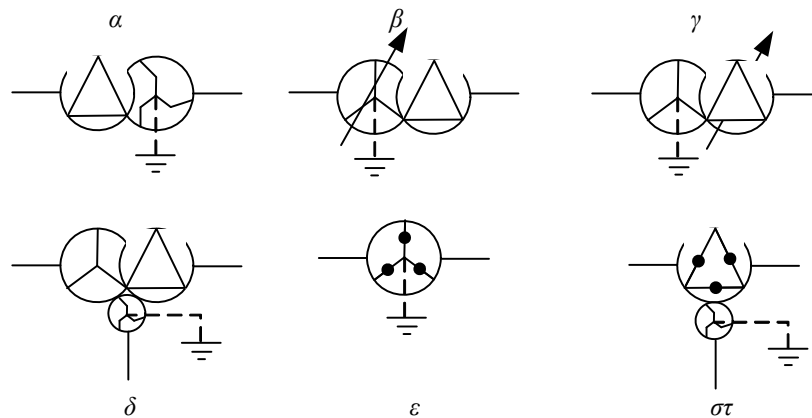
Ομάδα	Συμβολισμός	Συνδεσμολογία Τυλιγμάτων Πρωτεύοντος	Συνδεσμολογία Τυλιγμάτων Δευτερεύοντος	Λόγος Μετασχηματισμού
0	Dd0			$\frac{V_1}{V_2}$
	Yy0			$\frac{V_1}{V_2}$
	Dz0			$\frac{2V_1}{3V_2}$

5	Dy5			$\frac{V_1}{\sqrt{3}V_2}$
	Yd5			$\frac{\sqrt{3}V_1}{V_2}$
	Yz5			$\frac{2V_1}{\sqrt{3}V_2}$
6	Dd6			$\frac{V_1}{V_2}$
	Yy6			$\frac{V_1}{V_2}$
	Dz6			$\frac{2V_1}{3V_2}$
11	Dy11			$\frac{V_1}{\sqrt{3}V_2}$
	Yd11			$\frac{\sqrt{3}V_1}{V_2}$
	Yz11			$\frac{2V_1}{\sqrt{3}V_2}$



Σχ. 1.14. Τυπικές ονομασίες τριφασικών Μ/Σ: α) ονομασία τυλιγμάτων πρωτεύοντος και δευτερεύοντος, β) παράδειγμα της συνδεσμολογίας της ομάδας Δz0.

Τέλος, θα πρέπει να αναφερθεί η μονογραμμική αναπαράσταση των σημαντικότερων τύπων Μ/Σ. Σε μονογραμμικές απεικονίσεις συστημάτων όπου χρησιμοποιούνται τριφασικοί Μ/Σ συμβολίζονται με δύο ή περισσότερους κύκλους, οι οποίοι επικαλύπτουν ο ένας μέρος του άλλου. Κάθε κύκλος παραπέμπει σε μια πλευρά του Μ/Σ, ενώ είναι συνηθισμένο να φαίνεται σχηματικά μέσα στον κύκλο η συνδεσμολογία τυλιγμάτων κάθε πλευράς, δηλαδή, αστέρα, τρίγωνο ή τεθλασμένος αστέρας. Οι αυτομετασχηματιστές αποδίδονται συμβολικά με έναν κύκλο μόνο, όπου η σχηματική συνδεσμολογία εσωτερικά του τροποποιείται ώστε σε κάθε τύλιγμα που συμβολίζεται να υπάρχει ένας κόμβος κατά μήκος του. Οι Μ/Σ με μεταβλητό λόγο σπειρών αναπαρίστανται όπως και οι κανονικοί με την διαφορά ότι ο αντίστοιχος κύκλος του τυλιγματος, στο οποίο υπάρχουν οι πολλαπλές λήψεις, θα πρέπει να τέμνεται με ένα βέλος όπως και γενικότερα στα κυκλώματα όταν πρέπει να δειχθεί ότι ένα μέγεθος είναι μεταβλητό. Το Σχ. 1.15 παρουσιάζει κάποιους από τους βασικότερους τύπους Μ/Σ στην μονογραμμική τους αναπαράσταση.



Σχ. 1.15. Μονογραμμικές αναπαραστάσεις μετασχηματιστών: (α) τριφασικός μετασχηματιστής τριγώνου-τεθλασμένου αστέρα με γειωμένο τον κοινό κόμβο του δευτερεύοντος, (β) τριφασικός μετασχηματιστής αστέρα-τριγώνου με γειωμένο τον κοινό κόμβο του πρωτεύοντος και μεταβλητό λόγο σπειρών μέσω πολλαπλών λήψεων στο πρωτεύον, (γ) τριφασικός μετασχηματιστής αστέρα-τριγώνου με γειωμένο τον κοινό κόμβο του πρωτεύοντος και μεταβλητό λόγο σπειρών μέσω πολλαπλών λήψεων στο δευτερεύον, (δ) τριφασικός μετασχηματιστής τριπλού τυλιγματος αστέρα-τριγώνου με τριτεύων τύλιγμα σε συνδεσμολογία τεθλασμένου αστέρα και γειωμένο τον κοινό του κόμβο, (ε) αυτομετασχηματιστής σε συνδεσμολογία αστέρα με γειωμένο τον κοινό κόμβο, (στ) αυτομετασχηματιστής σε συνδεσμολογία τριγώνου με τριτεύων τύλιγμα σε συνδεσμολογία τεθλασμένου αστέρα και γειωμένο τον κοινό κόμβο.

1.3. Γραμμές μεταφοράς

Ως γραμμή μεταφοράς θεωρείται το σύνολο του ηλεκτρολογικού και μηχανολογικού υλικού που απαιτείται για να μεταφερθεί η ηλεκτρική ενέργεια. Μια γραμμή μεταφοράς αποτελείται από αρκετά μέρη (Εικ. 1.1), ενώ κάποια από αυτά είναι: οι αγωγοί μέσα από τους οποίους ρέει το ηλεκτρικό ρεύμα, τους πυλώνες ή τους στύλους πάνω στους οποίους αναρτώνται οι αγωγοί, οι μονωτήρες οι οποίοι εμποδίζουν την διαρροή του ρεύματος προς την γη μέσω των πυλώνων και τέλος όλες οι διατάξεις μέτρησης και ελέγχου που χρησιμοποιούν. Το εκτενέστερο γεωγραφικά κομμάτι ενός ΣΗΕ είναι οι γραμμές μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας. Αυτές απλώνονται από τα σημεία παραγωγής μέχρι και τον τελευταίο καταναλωτή και επεκτείνονται συνεχώς ώστε να συμπεριλάβουν ακόμα περισσότερους καταναλωτές και παραγωγούς στο σύστημα.



Εικ. 1.1. Γραμμές διανομής (κάτω αριστερά) μέσης τάσης και μεταφοράς υψηλής τάσης.

Η διάκρισή τους γίνεται με πολλά κριτήρια και μπορούν να κατανεμηθούν σε πολλές κατηγορίες. Όσο αφορά το επίπεδο τάσης στο οποίο λειτουργούν, διακρίνονται σε γραμμές υπερυψηλής, υψηλής, μέσης και χαμηλής τάσης. Οι γραμμές υψηλής τάσης έχουν ονομαστική τάση λειτουργίας από 66 ως 150 kV. Γραμμές με υψηλότερες τάσεις από αυτές θεωρούνται γραμμές υπερυψηλής τάσης ενώ και τα δύο είδη ανήκουν στο σύστημα μεταφοράς. Λόγω της ανύψωσης της τάσης τους διαχειρίζονται πολύ μικρότερα ρεύματα με αποτέλεσμα, αφενός μεν οι απώλειες ισχύος σε αυτές τις γραμμές να παραμένουν σε χαμηλά σχετικά επίπεδα, ακόμα και για μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας σε σχετικά μεγάλες αποστάσεις και αφετέρου να μειώνονται ποσοστιαία και οι πτώσεις τάσης στις γραμμές. Παρόλα αυτά το κόστος κατασκευής τους είναι πολύ υψηλό. Οι γραμμές μέσης τάσης διαχειρίζονται επίπεδα τάσης από 2,4 μέχρι 34,5 kV και ανήκουν στο δίκτυο διανομής. Το χαρακτηριστικό τους είναι ότι παρόλο που έχουν αρκετά υψηλή τάση για να περιορίσουν τις απώλειες μεταφοράς δεν είναι τόσο υψηλή ώστε να προκαλέσει προβλήματα στο αστικό περιβάλλον. Στο Ελληνικό δίκτυο οι γραμμές μέσης τάσης είναι ως επί το πλείστον εναέριες, με γυμνούς αγωγούς και εκτείνονται ε όλη την επικράτεια. Η επιλογή του συγκεκριμένου επιπέδου τάσης επιτρέπει την φτηνή κατασκευή τους, ενώ παράλληλα οι απώλειες μεταφοράς διατηρούνται σε χαμηλά επίπεδα. Στο δίκτυο διανομής ανήκουν, μαζί με τις γραμμές μέσης τάσης και οι γραμμές χαμηλής τάσης με ονομαστική πολική τάση λειτουργίας τα 400 V (Ευρώπη). Αυτές ξεκινούν από κάθε Μ/Σ μέσης

σε χαμηλή και φτάνουν μέχρι τον μετρητή του κάθε καταναλωτή. Η τάση τους είναι προφανώς σε χαμηλό επίπεδο με αποτέλεσμα την αύξηση των απωλειών. Παρόλο που αυτό θεωρείται αντισυμβαλλόμενο, λόγω του μικρού μήκους τους, της χαμηλής ισχύος που διαχειρίζεται κάθε μία από αυτές και δεδομένου ότι είναι προϋπόθεση της ασφαλούς λειτουργίας ενός ΣΗΕ να μην φτάνει η υψηλή τάση στους οικιακούς καταναλωτές, έχει πλέον επικρατήσει. Επίσης, το κόστος των απωλειών αντισταθμίζεται από το πολύ μικρό κόστος κατασκευής που έχουν οι γραμμές αυτές. Οι αγωγοί που χρησιμοποιούνται στις γραμμές μεταφοράς μπορεί να είναι είτε χαλκού, είτε αλουμινίου. Ο χαλκός έχει μεγαλύτερη ηλεκτρική αγωγιμότητα από το αλουμίνιο αλλά μικρότερη μηχανική αντοχή από τα κράματα αλουμινίου που χρησιμοποιούνται στις συγκεκριμένες εφαρμογές. Επίσης, ο χαλκός είναι αρκετά ακριβότερος αλλά και βαρύτερος από το αλουμίνιο. Για αυτούς τους λόγους, ο χαλκός επιλέγεται για τα χαμηλότερα επίπεδα τάσης (μέση, χαμηλή) ενώ στην υψηλή και υπερυψηλή τάση επιλέγονται αγωγοί αλουμινίου μιας και οι αποστάσεις ανάμεσα στους πυλώνες είναι μεγάλες και απαιτείται μεγάλη μηχανική αντοχή με το δυνατό μικρότερο βάρος. Για τις γραμμές μεταφοράς χρησιμοποιούνται συνήθως πολύκλωνοι αγωγοί αλουμινίου συνεστραμμένοι γύρω από χαλύβδινο συρματοσκόινο. Η χρήση του χάλυβα αυξάνει την μηχανική αντοχή χωρίς να επηρεάζει την αγωγιμότητα της γραμμής αφού όλο το ρεύμα ρέει από την περιφέρεια του αγωγού δηλαδή το μέρος του αλουμινίου λόγω του επιδερμικού φαινομένου στο εναλλασσόμενο ρεύμα. Κατασκευάζονται πολλά τμήματα με τέτοιου είδους αγωγούς τα οποία ενώνονται καθώς αναρτώνται στους πυλώνες για να σχηματίσουν το πλήρες μήκος της γραμμής. Η ένωσή τους γίνεται μέσω σφικκτῆρων ή συνδετήρων, ενώ σε κάθε πυλώνα χρησιμοποιούνται μονωτήρες για να διατηρηθεί απόσταση ασφαλείας ανάμεσα στον γυμνό αγωγό και τον γειωμένο μεταλλικό, συνήθως, πυλώνα. Οι μονωτήρες πρέπει να έχουν μεγάλη ηλεκτρική και μηχανική αντοχή ώστε να αντέχουν το βάρος του αγωγού αλλά ταυτόχρονα να μην επιτρέπεται η διάσπαση τους λόγω της υψηλής τάσης του αγωγού. Συνήθως κατασκευάζονται από πορσελάνη και έχουν κατάλληλη μορφή ώστε να αποφεύγεται η συγκέντρωση σκόνης και υγρασίας πάνω τους, παράγοντες που μειώνουν την ηλεκτρική τους αντοχή, όπως και οποιαδήποτε ανομοιομορφία στην επιφάνεια τους. Στους πυλώνες των γραμμών μεταφοράς σχεδόν πάντα υπάρχουν τα σύρματα γης. Αυτά είναι ένας ή δύο αγωγοί ανά πυλώνα, που γειώνονται στη βάση του και μεταφέρονται από τον ένα στον επόμενο μέσω παρόμοιων αγωγών από τα ψηλότερα σημεία των πυλώνων. Αυτό γίνεται για την προστασία της γραμμής και του συστήματος γενικότερα από κεραυνικά πλήγματα. Όταν για λόγους υψηλού κόστους δεν υπάρχουν σύρματα γης, συνήθως στις γραμμές μέσης τάσης, χρησιμοποιούνται αλεξικέραυνα για την προστασία των γραμμών. Οι γραμμές μεταφοράς πέρα από την βασική τους λειτουργία, να μεταφέρουν δηλαδή ηλεκτρική ενέργεια, χρησιμοποιούνται και για την αποστολή ή λήψη σημάτων-εντολών για απομακρυσμένο έλεγχο και επικοινωνία ανάμεσα στις διάφορες περιοχές του συστήματος και των κέντρων κατανομής φορτίου που θα αναλυθούν παρακάτω.

Κάθε γραμμή μεταφοράς θεωρείται ότι έχει μια αρχή, που λέγεται αναχώρηση με την έννοια ότι από εκεί αναχωρεί η ενέργεια, και ένα πέρας που ονομάζεται άφιξη αντίστοιχα. Η φιλοσοφία των σύγχρονων ΣΗΕ, ειδικά αυτών που καταλαμβάνουν την μεγαλύτερη έκταση, είναι η βέλτιστη οικονομική λειτουργία. Ένα μεγάλο τμήμα της βελτιστοποίησης αυτής έχει να κάνει με τις απώλειες μεταφοράς. Για τον λόγο αυτό με την παραγωγή της ενέργειας από της μονάδες παραγωγής γίνεται άμεσα και η ανύψωση σε κατά το δυνατό υψηλότερο επίπεδο τάσης συνήθως υπερυψηλή τάση. Είναι επίσης συνήθης τακτική κάθε μονάδα να έχει των δικό της μετασχηματιστή ανύψωσης ώστε να υπάρχει απόλυτη αυτονομία στην παραγωγή και κάθε μονάδα να μπορεί να προσφέρει ενέργεια στο σύστημα, άσχετα αν η γειτονική μονάδα ή μετασχηματιστής δεν προσφέρουν λόγω βλάβης ή συντήρησης. Από την έξοδο του μετασχηματιστή ξεκινάει το σύστημα μεταφοράς υπερυψηλής τάσης το οποίο είναι υπεύθυνο για την μεταφορά της ηλεκτρικής στους πιο απομακρυσμένους υποσταθμούς. Εκεί γίνεται ο υποβιβασμός της τάσης σε υψηλή και ουσιαστικά η ενέργεια διαχέεται στο υποσύστημα υψηλής τάσης. Σε υψηλή τάση μεταφέρεται η ενέργεια στους υποσταθμούς που βρίσκονται στα πέριξ των αστικών κέντρων όπου και βρίσκεται η πλειοψηφία των καταναλωτών. Στους υποσταθμούς διανομής γίνεται εκ νέου υποβιβασμός σε μέση τάση και η ενέργεια οδηγείται στους μετασχηματιστές διανομής. Οι μετασχηματιστές διανομής βρίσκονται σε κάθε γειτονιά, μεγάλο κτίριο ή βιοτεχνία με μεγάλες απαιτήσεις ισχύος. Τέλος από τους μετασχηματιστές διανομής τροφοδοτείται το δίκτυο χαμηλής τάσης το οποίο επεκτείνεται μέχρι τους γενικούς πίνακες κάθε οικιακής εγκατάστασης. Θα πρέπει να τονιστεί εδώ, ότι ανάλογα με το μέγεθος της ενέργειας που πρόκειται να μεταφερθεί και της απόστασης υπάρχει μια οικονομικά βέλτιστη τάση μεταφοράς όποτε μπορούν κάλλιστα να υπάρξουν εξαιρέσεις στην παραπάνω περιγραφή του δικτύου. Γενικά είναι δύσκολο να εξαχθεί ένας κανόνας βάση του οποίου θα επιλέγεται η τάση μεταφοράς και αυτό επειδή εξαρτάται από πάρα πολλούς παράγοντες. Για παράδειγμα όσα συζητήθηκαν μέχρι στιγμής αναφέρονται σε εναέριες γραμμές αλλά στην πραγματικότητα υπάρχουν περιπτώσεις που δεν είναι εφικτή η εναέρια σύνδεση. Τότε θα πρέπει να επιλεγεί μια διαφορετική μεθοδολογία, όπως οι υπόγειες ή οι υποθαλάσσιες γραμμές. Η ηλεκτρική συμπεριφορά εξαρτάται ως επί το πλείστον από τον τρόπο κατασκευής της, οπότε μια τέτοια παραδοχή θα άλλαζε εντελώς τα δεδομένα για την επιλογή κατάλληλης στάθμης τάσης.

Για μεγάλες αποστάσεις η εναλλασσόμενη υψηλή τάση δεν είναι πια μονόδρομος. Με την ανάπτυξη των ηλεκτρονικών ισχύος τις τελευταίες δεκαετίες του εικοστού αιώνα έγινε δυνατή η επιλογή μεταφοράς με συνεχή υψηλή τάση. Η διαδικασία δεν αλλάζει ιδιαίτερα από πλευράς ΣΗΕ, απλά αφού ανυψωθεί η τάση, ανορθώνεται

με γέφυρα κατάλληλων προδιαγραφών και μεταφέρεται σαν συνεχής τάση. Όταν φτάσει στον υποσταθμό χρησιμοποιείται κατάλληλος μετατροπέας ο οποίος την αντιστρέφει ξανά σε εναλλασσόμενη και ακολουθεί ο υποβιβασμός της. Σε περιπτώσεις υποθαλάσσιας διασύνδεσης σε αποστάσεις που ξεπερνούν τα 45 km κατά κανόνα χρησιμοποιείται συνεχούς ρεύματος υψηλή τάση ή ΣΡΥΤ (HVDC) έναντι της εναλλασσόμενου ρεύματος υψηλής τάσης ή ΕΡΥΤ (HVAC). Κάποιες τεχνικές προδιαγραφές που επιβάλλουν την αλληλοσύνδεση με ΣΡΥΤ είναι διασύνδεση συστημάτων χωρίς να είναι επιθυμητός ο συγχρονισμός τους και η εξασφάλιση κοινών ορίων ευστάθειας, η διασύνδεση συστημάτων διαφορετικής συχνότητας ή η μεταφορά ενέργειας σε αποστάσεις εκατοντάδων χιλιομέτρων όπου είναι περισσότερο συμφέρουσα η χρήση ΣΡΥΤ. Παραθέτονται τα μεγαλύτερα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της χρήσης ΣΡΥΤ έναντι ΕΡΥΤ:

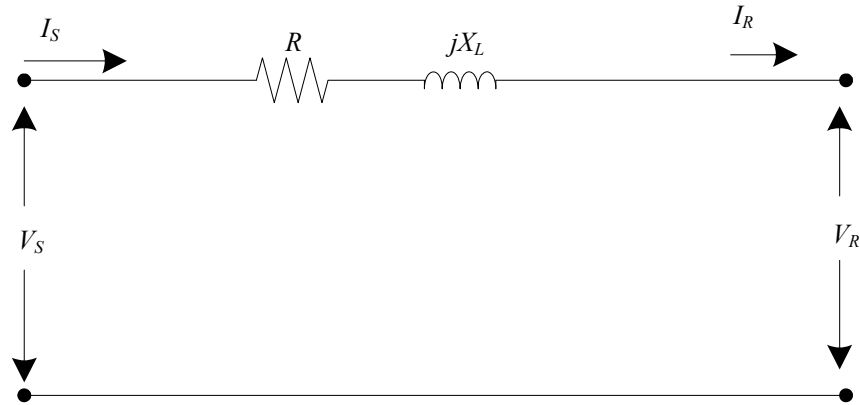
- + Χρησιμοποιούνται λιγότεροι αγωγοί για την μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας αφού στο εναλλασσόμενο η μεταφορά απαιτεί τρεις αγωγούς αντί για δύο που απαιτούνται στο συνεχές ρεύμα. Άρα ίδιοι αγωγοί που θα χρησιμοποιούνταν για μεταφορά με ΕΡΥΤ αλλά λιγότεροι.
- + Με κατάλληλη ρύθμιση η μέση τιμή της συνεχής τάσης μπορεί να είναι ίση με την μέγιστη τιμή της εναλλασσόμενης τάσης, οπότε απαιτείται ίδια μόνωση ως προς την γη. Άρα, ίδιου ύψους πυλώνες που θα χρησιμοποιούνταν για μεταφορά με ΕΡΥΤ αλλά με μικρότερη μηχανική αντοχή αφού θα δέχονται μειωμένο φορτίο λόγω της μείωσης των αγωγών.
- + Γίνεται καλύτερη εκμετάλλευση του αγωγού αφού με το συνεχές ρεύμα η ροή ρεύματος γίνεται σε όλη την διατομή του αγωγού αντί για την περιφέρεια του μόνο, όπως στα εναλλασσόμενα σήματα λόγω επιδερμικού φαινομένου. Άρα μειωμένες απώλειες μεταφοράς.
- + Με την συνεχή τάση μειώνεται η καταπόνηση της επιφάνειας των αγωγών και με κατάλληλη ρύθμιση μπορούν να αποφευχθούν φαινόμενα όπως ραδιοφωνικές παρεμβολές, Corona, ακουστικός θόρυβος και πρόωρη γήρανση του αγωγού.
- + Η τεχνολογία των μετατροπέων και των μικροελεγκτών που είναι υπεύθυνοι για την σωστή λειτουργία τους δίνει δυνατότητα απόσβεσης ταλαντώσεων που δημιουργούνται εκατέρωθεν τις γραμμής μεταφοράς.

Από την άλλη πλευρά όμως:

- Με την μεταφορά με ΕΡΥΤ το μόνο που απαιτείται στον υποσταθμό είναι ο μετασχηματιστής που έτσι κι αλλιώς θα χρησιμοποιηθεί και στην μεταφορά με ΣΡΥΤ. Στην δεύτερη περίπτωση επιπρόσθετα θα πρέπει να γίνει προμήθεια μετατροπέα, φίλτρων και διατάξεων ελέγχου για την ίδια μεταφερόμενη ισχύ.
- Δεν είναι εύκολο να γίνουν διασυνδέσεις κατά μήκος της γραμμής δεδομένου ότι πρέπει να υπάρχει συντονισμένος έλεγχος από όλες τις πλευρές της γραμμής.

Σε τελική ανάλυση η μεταφορά με ΣΡΥΤ είναι άλλο ένα εργαλείο των σχεδιαστών ΣΗΕ με τις δυνάμεις και αδυναμίες που αυτό συνεπάγεται και για την χρήση του θα πρέπει να γίνει μια πολύ λεπτομερής οικονομοτεχνική μελέτη. Χονδρικά όσο μεγαλώνει η απόσταση και η μεταφερόμενη ισχύς τόσο πιο συμφέρων γίνεται ο τρόπος μεταφοράς με ΣΡΥΤ. Επίσης για υποθαλάσσιες διασυνδέσεις άνω των 45 km είναι η μοναδική επιλογή.

Ανάλογα με το μήκος τους οι γραμμές μεταφοράς (υψηλής και μέσης τάσης) διαχωρίζονται σε μικρού μεσαίου και μεγάλου μήκους. Αυτή η διάκριση βοηθά στην μοντελοποίηση τους ενώ τα όρια δεν είναι πάντα ευδιάκριτα. Γενικά μεγάλου μήκους θεωρούνται γραμμές άνω των 240 km, μεσαίου ανάμεσα στα 80 και τα 240 km και από εκεί και κάτω θεωρούνται μικρού μήκους. Για τις γραμμές μικρού μήκους χρησιμοποιείται μοντέλο R-L μιας και οι εγκάρσιες αγωγιμότητες δεν παίζουν ιδιαίτερο ρόλο σε μικρές αποστάσεις. Οι μεσαίου μήκους μοντελοποιούνται ως επί το πλείστον με μοντέλα συγκεντρωμένων παραμέτρων τύπου Π ή Τ με παρουσία τις εγκάρσιας χωρητικής αγωγιμότητας τους. Ενώ οι δε μεγάλου μήκους γραμμές εξετάζονται με τη χρήση του μοντέλου των κατανεμημένων παραμέτρων που προσφέρει και την μεγαλύτερη ακρίβεια, ρεαλισμό αλλά και δυσκολία στους υπολογισμούς. Μια γραμμή μικρού μήκους μπορεί να μοντελοποιηθεί όπως στο Σχ. 1.16 με το ανά φάση ισοδύναμο της, ενώ οι τάσεις V_S και V_R είναι φασικά μεγέθη.

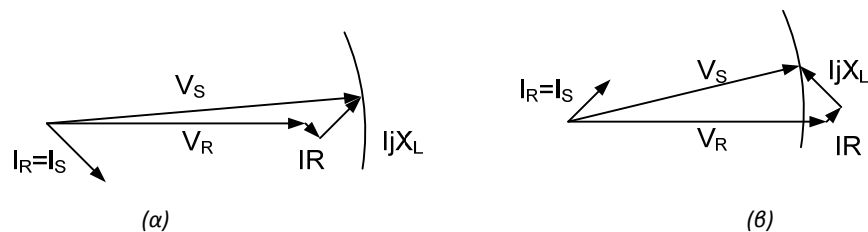


Σχ. 1.16. Μοντέλο γραμμής μικρού μήκους, φασικό ισοδύναμο.

Όπως φαίνεται και στο Σχ. 1.16 οι γραμμές μικρού μήκους είναι εξαιρετικά απλές στους υπολογισμούς τους. Αυτό συμβαίνει επειδή δεν λαμβάνονται υπόψη οι εγκάρσιες αγωγιμότητες της γραμμής. Οι τάσεις και τα ρεύματα που παρουσιάζονται με δείκτη S αναφέρονται στην αναχώρηση ενώ τα αντίστοιχα με δείκτη R στην άφιξη. Το R και το X_L είναι η ωμική αντίσταση και η επαγωγική αντίδραση, της γραμμής ανά φάση, αντίστοιχα. Οι γραμμές μικρού μήκους όπως και οι μεγαλύτερου όταν τροφοδοτούν ένα φορτίο το οποίο έχει ωμικό ή επαγωγικό συντελεστή ισχύος έχουν μια πτώση τάσης κατά μήκος της γραμμής και στην άφιξη καταλήγει μια τάση μικρότερη κατά μέτρο από την τάση αναχώρησης. Στις περιπτώσεις χωρητικής φόρτισης, όπου το ρεύμα άφιξης προηγείται της τάσης άφιξης, δεν συμβαίνει το ίδιο. Σε αυτήν την περίπτωση όπως φαίνεται και στο Σχ. 1.17 (αριστερά) η τάση άφιξης είναι μεγαλύτερη από την τάση αναχώρησης. Αυτό είναι γνωστό σαν φαινόμενο Ferranti και οφείλεται στο χωρητικό ρεύμα που ρέει μέσω των επαγωγών της γραμμής. Ακόμα το τετράγωνο του ρεύματος πολλαπλασιασμένο επί την ωμική αντίσταση της γραμμής δίνει τις απώλειες μεταφοράς της γραμμής ανά φάση, άρα αυτό το μέγεθος πολλαπλασιασμένο με τρία θα δώσει τις πλήρεις απώλειες μεταφοράς. Οι απώλειες μεταφοράς προκύπτουν επίσης από την διαφορά της πραγματικής ισχύος αποστολής πλην την πραγματική ισχύ άφιξης.

$$P_{\mu\epsilon\tau} = 3I_S^2 R = 3V_S I_S \cos \varphi_S - 3V_R I_R \cos \varphi_R \quad (1.22)$$

$$P_{\mu\epsilon\tau} = 3I_S (V_S \cos \varphi_S - V_R \cos \varphi_R)$$



Σχ. 1.17. Διανυσματικά διαγράμματα τάσεων και εντάσεων για γραμμή μεταφοράς μικρού μήκους σε επαγωγική φόρτιση (α) και χωρητική φόρτιση (β).

Εύκολα εξάγονται οι παρακάτω εξισώσεις που προκύπτουν αν εξεταστεί το ισοδύναμο κύκλωμα της γραμμής.

$$\vec{I}_S = \vec{I}_R \quad (1.23)$$

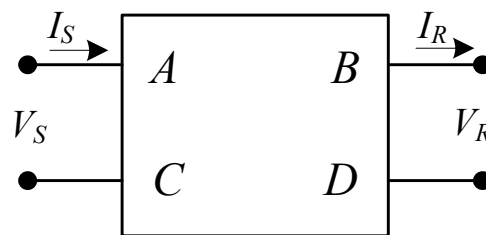
$$\vec{V}_S = \vec{V}_R + \vec{I}_R (R + jX_L) \quad (1.24)$$

και σε μορφή μήτρων:

$$\begin{bmatrix} \vec{V}_S \\ \vec{I}_S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & (R + jX_L) \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \vec{V}_R \\ \vec{I}_R \end{bmatrix} \quad (1.25)$$

Κάθε γραμμή μεταφοράς ιδιαίτερα αυτές μεγαλύτερου μήκους μπορεί να θεωρηθεί σαν ένα ξεχωριστό υποσύστημα μέσα στα συστήματα μεταφοράς. Αυτό συμβαίνει επειδή σε αυτού του μήκους της γραμμής δεν μπορούν να αμεληθούν τα εγκάρσια στοιχεία της γραμμής. Μπορούν λοιπόν να παρασταθούν με την μορφή τετραπόλων με συγκεκριμένες παραμέτρους, ένα μαύρο κουτί δηλαδή το οποίο μεταβάλλει τα χαρακτηριστικά των παραμέτρων εισόδου του με συγκεκριμένο τρόπο ώστε να προκύψουν οι έξοδοι του. Άρα μια γραμμή μεταφοράς μπορεί να παρασταθεί όπως στο Σχ. 1.18 όπου A, B, C, και D οι παράμετροι του τετραπόλου που προκύπτουν από τα χαρακτηριστικά της γραμμής. Και ισχύει ότι:

$$\begin{bmatrix} \vec{V}_S \\ \vec{I}_S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \vec{V}_R \\ \vec{I}_R \end{bmatrix} \quad (1.26)$$



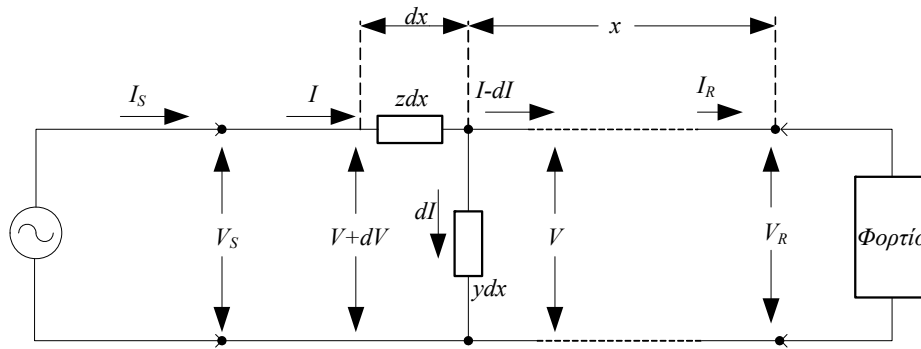
Σχ. 1.18. Τετράπολο που αναπαριστά γραμμή μεταφοράς.

Συσχετίζοντας τα παραπάνω με την γραμμή μικρού μήκους προκύπτει ότι οι παράμετροι A, B, C, και D για την γραμμή μικρού μήκους, ισούνται με:

$$A = 1, B = R + jX_L, C = 0, D = 1 \quad (1.27)$$

Όταν ένα τετράπολο είναι συμμετρικό ισχύει ότι η παράμετρος A ισούται με την D. Επίσης αν πρόκειται για τετράπολο το οποίο αποτελείται μόνο από παθητικά στοιχεία θα ισχύει ότι $AD - BC = 1$. Όπως ήταν αναμενόμενο, τα παραπάνω ισχύουν για την γραμμή μικρού μήκους που αναφέρθηκε. Όταν πρόκειται να μελετηθούν γραμμές μεγαλύτερου μήκους λαμβάνονται υπόψη οι εγκάρσιες χωρητικότητες λόγω της απόστασης των φορτισμένων αγωγών της γραμμής αλλά και λόγω της απόστασης των φορτισμένων αγωγών προς την γη. Επίσης, πρέπει να ληφθούν υπόψη και οι παρασιτικές αγωγιμότητες των μονωτήρων ως προς την γη. Ο πιο ακριβής τρόπος ανάλυσης επιβάλλει να θεωρηθεί η γραμμή, ως σειριακή σύνδεση απειροστών τμημάτων γραμμής για κάθε απειροστή μονάδα μήκους στην οποία εκτείνεται. Μπορεί να διακριθεί τότε μια διαμήκη σύνθετη αντίσταση και μια εγκάρσια σύνθετη αγωγιμότητα. Λόγω αυτών των στοιχείων δημιουργείται μια απειροστή πτώση τάσης και ένα απειροστό ρεύμα διαρροής που επιστρέφει μέσω της εγκάρσιας σύνθετης αγωγιμότητας. Έστω λοιπόν ότι μια γραμμή μεταφοράς μπορεί να σχεδιαστεί όπως στο Σχ. 1.19 με μια πηγή συνδεδεμένη στην αναχώρηση και ένα φορτίο στην άφιξη. Δεδομένου ότι:

$$\begin{aligned} z &= R + j2\pi fL \\ y &= G + j2\pi fC \end{aligned} \quad (1.28)$$



Σχ. 1.19. Απειροστική ανάλυση μιας γραμμής μεταφοράς.

Ισχύει ότι:

$$\begin{aligned} dV &= Izdx \\ dI &= Vydx \end{aligned} \quad (1.29)$$

άρα:

$$\begin{aligned} \frac{dV}{dx} &= Iz \\ \frac{dI}{dx} &= Vy \end{aligned} \quad (1.30)$$

οι οποίες είναι σύστημα διαφορικών εξισώσεων που περιγράφουν την τάση και το ρεύμα συναρτήσει της απόστασης. Αν λυθεί το σύστημα προκύπτουν:

$$V(x) = \frac{V(0) + I(0)Z_0}{2} e^{\gamma x} + \frac{V(0) - I(0)Z_0}{2} e^{-\gamma x} \quad (1.31)$$

$$I(x) = \frac{V(0) + I(0)Z_0}{2Z_0} e^{\gamma x} - \frac{V(0) - I(0)Z_0}{2Z_0} e^{-\gamma x} \quad (1.32)$$

ή πιο απλά:

$$V(x) = A_1 e^{\gamma x} + A_2 e^{-\gamma x} \quad (1.33)$$

$$I(x) = \frac{A_1 e^{\gamma x}}{Z_0} - \frac{A_2 e^{-\gamma x}}{Z_0} \quad (1.34)$$

όπου γ ο μιγαδικός που συμβολίζει τη σταθερά μετάδοσης της γραμμής, όπου το πραγματικό του μέρος είναι η σταθερά απόσβεσης της γραμμής ανά μονάδα μήκους, το φανταστικό του μέρος η σταθερά μεταβολής φάσης κύματος ανά μονάδα μήκους, Z_0 η κυματική αντίσταση της γραμμής και $V(0)$ και $I(0)$ οι αρχικές συνθήκες του συστήματος ή η τάση και το ρεύμα στο σημείο που θεωρείται $x=0$.

$$\gamma = \sqrt{zy} \quad (1.35)$$

$$Z_0 = \sqrt{\frac{z}{y}} \quad (1.36)$$

Αν θεωρηθεί το πέρας της γραμμής σαν $x=0$ και επιθυμητό μήκος το πλήρες μήκος της γραμμής l μπορούν από τις παραπάνω σχέσεις με γνωστά τα V_R και I_R να υπολογιστούν τα V_S και I_S .

$$V_S = \frac{V_R + I_R Z_0}{2} e^{\gamma l} + \frac{V_R - I_R Z_0}{2} e^{-\gamma l} \quad (1.37)$$

$$I_S = \frac{V_R + I_R Z_0}{2Z_0} e^{\gamma l} - \frac{V_R - I_R Z_0}{2Z_0} e^{-\gamma l} \quad (1.38)$$

ή με απλούς αλγεβρικούς μετασχηματισμούς:

$$V_S = V_R \cosh(\gamma l) + I_R Z_0 \sinh(\gamma l) \quad (1.39)$$

$$I_S = \frac{V_R}{Z_0} \sinh(\gamma l) + I_R \cosh(\gamma l) \quad (1.40)$$

ή σε μορφή πίνακα:

$$\begin{bmatrix} V_S \\ I_S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh(\gamma l) & Z_0 \sinh(\gamma l) \\ \frac{\sinh(\gamma l)}{Z_0} & \cosh(\gamma l) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_R \\ I_R \end{bmatrix} \quad (1.41)$$

Μπορεί λοιπόν κάθε γραμμή μεταφοράς ανεξαρτήτως μήκους να θεωρηθεί τετράπολο με παραμέτρους A , B , C και D όπως προκύπτουν από την μήτρα της Εξ. 1.41.

$$A = D = \cosh(\gamma l), \quad B = Z_0 \sinh(\gamma l), \quad C = \frac{\sinh(\gamma l)}{Z_0} \quad (1.42)$$

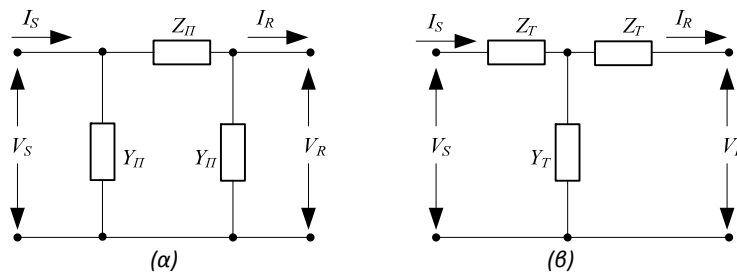
Μια γραμμή μπορεί να προσομοιωθεί και σαν τετράπολο τύπου Π ή Τ (Σχ. 1.20) διατηρώντας την φιλοσοφία των κατανομημένων παραμέτρων όπως παραπάνω. Προκύπτει λοιπόν ότι:

$$Z_{\Pi} = B = Z_0 \sinh(\gamma l) \quad (1.43)$$

$$Y_{\Pi} = \frac{(A-1)}{B} = \frac{\tanh(\gamma l / 2)}{Z_0} \quad (1.44)$$

$$Z_T = \frac{(A-1)}{C} = Z_0 \tanh(\gamma l / 2) \quad (1.45)$$

$$Y_T = C = \frac{\sinh(\gamma l)}{Z_0} \quad (1.46)$$



Σχ. 1.20. Τετράπολα τύπου Π (α) και Τ (β).

Οι γραμμές μεταφοράς όταν δεν έχουν μεγάλο μήκος μπορούν να μελετηθούν θεωρώντας συγκεντρωμένες τις παραμέτρους τους αντί για κατανεμημένες, όπως έγινε και για τις κοντές γραμμές χωρίς μεγάλο σφάλμα στα αποτελέσματα που προκύπτουν. Οι γραμμές μεσαίου μήκους λοιπόν μπορούν και αυτές να γραφτούν σαν τετράπολα με συγκεντρωμένες παραμέτρους είτε τύπου Π, είτε τύπου Τ. Στην περίπτωση του Π τετραπόλου σαν Z_{Π} θα θεωρηθεί η πλήρης σύνθετη διαμήκης αντίσταση της γραμμής και Y_{Π} θα θεωρηθεί το ένα δεύτερο της πλήρους σύνθετης εγκάρσιας αγωγιμότητας της. Αντίθετα στο Τ τετράπολο ως Y_T θα θεωρηθεί η πλήρης σύνθετη εγκάρσια αγωγιμότητα και συνδέεται στο μέσο της γραμμής, ενώ από κάθε πλευρά της συνδέεται το ένα δεύτερο της σύνθετης πλήρους διαμήκης αντίστασης της, Z_T .

Ένας ακόμα διαχωρισμός των γραμμών μεταφοράς γίνεται ανάλογα με τον χώρο εγκατάστασης τους. Η διάκριση γίνεται ανάμεσα σε εναέριες που είναι και οι πιο συνηθισμένες, υπόγειες, και υποθαλάσσιες. Η βασική διαφορά στους αγωγούς που χρησιμοποιούνται εδώ έχει να κάνει με το μονωτικό υλικό, το οποίο στις εναέριες γραμμές είναι ο ατμοσφαιρικός αέρας ενώ στις άλλες κατηγορίες προφανώς αυτό δεν μπορεί να είναι λύση. Τα υπόγεια και υποθαλάσσια καλώδια των γραμμών μεταφοράς χρησιμοποιούν συνθετικά υλικά για την μόνωση τους και μάλιστα σε πολλές στρώσεις διαφορετικών υλικών γύρω από τον αγωγό.

1.4. Υποσταθμοί

Οι υποσταθμοί (Υ/Σ) διαχωρίζονται ανάμεσα σε Υ/Σ μεταφοράς και Υ/Σ διανομής αλλά και ανάλογα με την τάση την οποία διαχειρίζονται. Αν θεωρηθεί ότι ένα ΣΗΕ είναι μία ηλεκτρική εγκατάσταση τότε οι Υ/Σ θα πρέπει να θεωρηθούν ως οι υποπίνακες. Σε κάθε ένα από αυτούς υπάρχουν διατάξεις προστασίας και μετρήσεων. Κάποιες από αυτές είναι τα ακροκιβώτια, τα συστήματα μετρήσεων, οι διακόπτες φορτίου με δυνατότητα τηλεχειρισμού, οι ηλεκτρονόμοι, οι αποζεύκτες και οι τερματικές μονάδες ελέγχου. Ο σκοπός που εξυπηρετούν είναι να δώσουν την δυνατότητα στο διαχειριστή του συστήματος, πρώτον να γνωρίζει τα επίπεδα τάσης, συχνότητας, ενεργού και αέργου ισχύος σε κάθε γεωγραφική περιοχή ηλεκτρικού ενδιαφέροντος και δεύτερον να μπορεί να επέμβει στα σημεία αυτά. Παράλληλα, στεγάζουν διατάξεις απαραίτητες για την σωστή λειτουργία του ΣΗΕ όπως μετασχηματιστές και πεδία (πίνακες) υψηλής και μέσης τάσης. Σε περίπτωση ανάγκης ο διαχειριστής μπορεί να κάνει βελτιωτικές κινήσεις ή να απομονώσει κομμάτι του συστήματος σε καταστάσεις σφάλματος ή συντήρησης. Ένας Υ/Σ έχει μεγάλο κόστος κατασκευής και λειτουργίας άρα θα πρέπει να γίνει προσεκτικός σχεδιασμός πριν την εγκατάστασή του και σίγουρα σωστά στοχευμένη επιλογή υλικού. Συγκεκριμένα για τους Υ/Σ διανομής θα πρέπει να γίνει ιδιαίτερα προσεκτική μελέτη λόγω της εγγύτητας τους σε πόλεις, αφού σε περιπτώσεις βραχυκυκλωμάτων ή άλλων δυσλειτουργιών κατά την γείωση των εξαρτημάτων είναι δυνατό να ανέβει το ηλεκτρικό δυναμικό της γης με επικίνδυνες συνέπειες για τους περαστικούς. Θα πρέπει να υπάρχει λοιπόν πολύ καλής ποιότητας και μεγάλης έκτασης γείωση αλλά και ευκρινής σήμανση για την προειδοποίηση των περαστικών.

Όπως προαναφέρθηκε οι υποσταθμοί μπορούν να διαχωριστούν σε υποσταθμούς μεταφοράς, διανομής, μετατροπής, συλλογής και διακοπτικούς. Οι πρώτοι χρησιμοποιούνται για να συνδέσουν δύο ή περισσότερες γραμμές μεταφοράς οι οποίες μπορεί να έχουν ίδιο ή διαφορετικό επίπεδο τάσης. Στις περιπτώσεις που οι ονομαστικές τάσεις είναι κοινές, η σύνδεση γίνεται με διακόπτες ισχύος και οι Υ/Σ ονομάζονται διακοπτικοί, όταν αυτές διαφέρουν είναι απαραίτητη η χρήση μετασχηματιστών. Υ/Σ μεταφοράς θεωρούνται και οι Υ/Σ οι οποίοι βρίσκονται κοντά σε μεγάλες μονάδες παραγωγής για την ανύψωση της τάσης εξόδου της μονάδας σε υψηλή ή υπερυψηλή για την μεταφορά της. Αν πρόκειται να συνδεθούν γραμμές οι οποίες χρησιμοποιούν συνεχές ρεύμα οι μεν και εναλλασσόμενο ρεύμα οι δε, ο Υ/Σ περιλαμβάνει ανορθωτικές διατάξεις ή κατάλληλους μετατροπείς

και διατάξεις για τον έλεγχο τους και ονομάζονται Υ/Σ μετατροπής. Στην τελευταία περίπτωση μάλιστα, θα πρέπει στο χώρο του υποσταθμού να εγκατασταθούν και τα φίλτρα εξομάλυνσης και οι διατάξεις αντιστάθμισης που απαιτούνται στην μετατροπή από συνεχές σε εναλλασσόμενο και αντίστροφα. Όσο αφορά τους υποσταθμούς διανομής, η χρήση των μετασχηματιστών είναι απαραίτητη αφού η παρουσία τους σχετίζεται με τον υποβιβασμό της τάσης για την εξυπηρέτηση τοπικών φορτίων κοντά σε αστικά κέντρα, στην Ελλάδα οι Υ/Σ διανομής κατά κανόνα υποβιβάζουν την τάση στα 20 kV αν και σε παλαιότερες γραμμές ή σε γραμμές των μη διασυνδεδεμένων νησιών μπορεί να είναι και 15 kV. Οι Υ/Σ συλλογής προέκυψαν μετά την απελευθέρωση της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας και την ανάπτυξη της διεσπαρμένης παραγωγής. Αυτοί οι Υ/Σ χρησιμοποιούνται για αιολικές ή άλλες μονάδες παραγωγής από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας μεγαλύτερες των 100 kW, αλλά έχουν περισσότερα κοινά χαρακτηριστικά με τους Υ/Σ διανομής παρόλο που η ροή ισχύος είναι αντίθετη. Επίσης σε μικρότερη κλίμακα χρησιμοποιούνταν και παλαιότερα σε περιοχές όπου σχετικά κοντά υπήρχαν διαφορετικές μονάδες παραγωγής. Σκοπός τους ήταν να συγκεντρώσουν την ενέργεια από τις διάφορες μονάδες και να την οδηγήσουν στον Υ/Σ μεταφοράς ο οποίος ήταν εξοπλισμένος με τον Μ/Σ ανύψωσης. Ένας υποσταθμός θα πρέπει να περιέχει κάποιες ή όλες από τις παρακάτω διατάξεις:

- **Μετασχηματιστές.** Οι συγκεκριμένες διατάξεις έχουν αναφερθεί και παραπάνω, ακόμα και αν δεν χρησιμοποιούνται Μ/Σ ισχύος θα πρέπει να χρησιμοποιούνται Μ/Σ μετρήσεων για την μέτρηση τάσεων και ρευμάτων της γραμμής. Για τους Μ/Σ ισχύος-όπου αυτοί χρησιμοποιούνται-είναι κανόνας να χρησιμοποιούνται με τυλίγματα εμβαπτισμένα σε μονωτικό ορυκτέλαιο για την αποφυγή βραχυκυκλωμάτων και σπινθηρισμών.



Εικ. 1.2. Μετασχηματιστής ελαίου με δοχείο διαστολής και ανεμιστήρες για την ψύξη του, σε εξωτερικό χώρο.

- **Διακόπτες Ισχύος.** Αυτοί μπορεί να είναι είτε ηλεκτρικά ή ηλεκτρομηχανικά ελεγχόμενοι και έχουν σκοπό την διακοπή του κυκλώματος υπό φορτίο. Διαχωρίζονται ανάλογα το υλικό στο οποίο βρίσκονται οι επαφές τους σε ελαιοδιακόπτες αν οι επαφές βρίσκονται εμβαπτισμένες σε μονωτικό ορυκτέλαιο και διακόπτες αερίου αν οι επαφές τους βρίσκονται σε αεροστεγή θάλαμο στον οποίο υπάρχει υπό πίεση κατάλληλο αέριο (SF_6 , εξαφθοριούχο θείο) για την απόσβεση του τόξου στις καταστάσεις ζεύξης απόζευξης. Οι διακόπτες αερίου μπορεί να έχουν ατμοσφαιρικό αέρα (αέρος) ή κενό αέρος (κενού) στο θάλαμο των επαφών τους αλλά έτσι διαχειρίζονται μικρότερες ισχύς. Ένας διακόπτης ισχύος επιλέγεται βάση του ρεύματος και της ισχύος απόζευξης που μπορεί να διαχειριστεί και ακόμα βάσει του χρόνου στον οποίο επιτυγχάνεται η απόζευξη. Συνήθως ελέγχονται με ηλεκτρονόμους που δέχονται εντολή είτε από διατάξεις προστασίας είτε από τους χειριστές του συστήματος.
- **Επαναζεύκτες.** Αυτές είναι συσκευές οι οποίες χρησιμοποιούνται ως επί το πλείστον σε Υ/Σ διανομής για την εκκαθάριση βραχυκυκλωμάτων παροδικής φύσης. Είναι γενικά μικρότερης ονομαστικής ισχύος από τους διακόπτες φορτίου, αφού ελέγχουν μόνο μέρος της πλήρους εξόδου. Με την ανίχνευση ενός σφάλματος ο επαναζεύκτης διακόπτει την ροή ισχύος στο κύκλωμα και την αποκαθιστά άμεσα, ελέγχοντας αν το σφάλμα αποκαταστάθηκε από μόνο του. Αν δεν έχει αποκατασταθεί, επαναλαμβάνει την διαδικασία άλλες δύο φορές και αν το σφάλμα επιμένει διατηρεί ένα μεγαλύτερο διάστημα απόζευξης και δοκιμάζει για τελευταία φορά την επανάζευξη του συστήματος. Αν το σφάλμα επιμένει μετά από αυτή την διαδικασία ο επαναζεύκτης κλειδώνει στην θέση ανοικτός και λειτουργεί ξανά μετά από εντολή των χειριστών του συστήματος. Πρόκειται για μια ιδιαίτερα χρήσιμη διάταξη μιας και η πλειοψηφία των βραχυκυκλωμάτων είναι μεταβατικά και αποκαθίστανται από μόνα τους. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι τα κλαδιά των δέντρων σε περιόδους δυνατών ανέμων τα οποία πέφτουν πάνω στις γραμμές μεταφοράς δημιουργώντας βραχυκυκλώματα. Συνήθως, αυτά στην

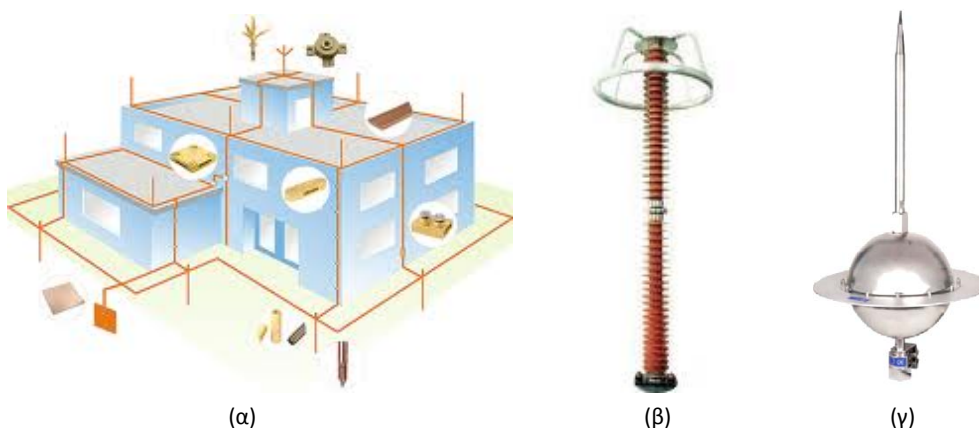
συνέχεια και λόγω του ανέμου απομακρύνονται από την γραμμή, αποκαθιστώντας με αυτό τον τρόπο την κανονική λειτουργία.

- **Αποζεύκτες.** Αυτές οι συσκευές λειτουργούν συμπληρωματικά με τους διακόπτες φορτίου και υπάρχουν κατά κύριο λόγο για την προστασία του προσωπικού που είναι υπεύθυνο για την συντήρηση και την επιδιόρθωση βλαβών στον Υ/Σ. Συχνά αναφέρονται και σαν “μαχαιρωτοί διακόπτες” και αποτελούνται από δύο μεταλλικά ελάσματα ανά φάση τα οποία με ηλεκτρομηχανικό σύστημα έρχονται σε επαφή ή απομακρύνονται, αυτοί είναι εγκατεστημένοι σε εμφανές σημείο κοντά στο χώρο αναχώρησης της γραμμής από τον Υ/Σ. Οι αποζεύκτες χρησιμοποιούνται σαν διακόπτες χωρίς φορτίο και δείχνουν από απόσταση ότι μια γραμμή είναι αποσυνδεδεμένη. Κυρίως τους χειρίζονται τοπικά τα συνεργεία που αναφέρθηκαν, ανοίγοντας τους πριν εισέλθουν στον Υ/Σ και κλείνοντας τους ξανά μετά το πέρας των εργασιών.



Εικ. 1.3. Μονοφασικός αποζεύκτης με δυνατότητα έντασης διακοπής 80 kA.

- **Αλεξικέραυνα.** Πρόκειται για στοιχεία τα οποία εγκαθίστανται για να οδηγήσουν τυχόν πτώσεις κεραυνών στην γη με ασφάλεια χωρίς να επηρεαστεί ο υπόλοιπος εξοπλισμός. Μπορεί να αποτελούνται από ακίδες που τοποθετούνται σε κατάλληλες αποστάσεις μεταξύ τους και σε συγκεκριμένο ύψος ή από αλεξικέραυνα ενισχυμένου ιονισμού τύπου Tesla αλλά το σημαντικότερο χαρακτηριστικό τους έχει να κάνει με την αντίσταση της γείωσης. Για να υπάρχει επαρκής προστασία απαιτείται η αντίσταση γείωσης να είναι μικρότερη του ενός Ohm.



Εικ. 1.4. Αντικεραυνική προστασία οικίας (α), αλεξικέραυνο έλξης κεραυνών (β), αλεξικέραυνο τύπου Tesla (γ).

- **Διατάξεις αντιστάθμισης.** Συνήθως αναφέρονται σε διατάξεις πυκνωτών αλλά και πηνίων που χρησιμοποιούνται για την διόρθωση του συντελεστή ισχύος στην επιθυμητή τιμή. Ο έλεγχος τους γίνεται με απομακρυσμένο τρόπο και έχει διάφορες στάθμες άεργης ισχύος, οι οποίες επιλέγονται ανάλογα με το ποσό της πραγματικής ισχύος που χρησιμοποιείται. Σε κάποιες περιπτώσεις η αντιστάθμιση γίνεται μόνο για να μεταβληθεί ο συντελεστής ισχύος της γραμμής, αφού σε μακριές γραμμές η χωρητική

αντίδραση της γραμμής γίνεται πιο έντονη με αποτέλεσμα να αυξάνεται η τάση σε επίπεδα υψηλότερα τον ονομαστικών. Τότε χρησιμοποιούνται πηνία αντιστάθμισης για την καταπολέμηση του φαινομένου Ferranti.

- Ρυθμιστές τάσης. Εδώ οι ρυθμιστές τάσης αναφέρονται σε διατάξεις ελέγχου του λόγου μετασχηματισμού των Μ/Σ ισχύος. Αναφέρθηκαν στην παράγραφο των μετασχηματιστών οι Μ/Σ με μεταβλητό λόγο μετασχηματισμού (tap changers). Αυτοί παλαιότερα δεν μπορούσαν να μεταβάλουν τον λόγο τους υπό φορτίο αλλά με την ανάπτυξη των ηλεκτρονικών ισχύος αυτή η δυνατότητα σήμερα είναι πραγματικότητα. Οι ρυθμιστές τάσης επεμβαίνουν σε αυτή ακριβώς την λειτουργία του Μ/Σ ανάλογα με τις εντολές που δέχονται από τους χειριστές του συστήματος.
- Συστήματα τηλεμετρίας. Με την χρήση φερέςυχνων (PCM, pulse code modulators) επιτυγχάνεται η επικοινωνία ανάμεσα στο κέντρο κατανομής φορτίου και τους απομακρυσμένους Υ/Σ με την χρήση των ίδιων των γραμμών μεταφοράς. Όπως θα αναφερθεί και στην παράγραφο 1.6 το κέντρο κατανομής φορτίου (ΚΚΦ) χρησιμοποιεί ένα πρόγραμμα εποπτείας και ελέγχου το οποίο ονομάζεται Scada. Αυτό χρησιμοποιεί δεδομένα που συλλέγονται από διάφορες τοποθεσίες του συστήματος μέσω συσκευών οι οποίες ονομάζονται απομακρυσμένες τερματικές μονάδες ή ATM (remote terminal units, RTU). Η μεταφορά των δεδομένων από τις διάφορες περιοχές στο ΚΚΦ γίνεται με μετατροπή του σήματος στις διάφορες περιοχές και τροφοδοσία του στο σύστημα μεταφοράς. Με κατάλληλους “μεταφραστές” οι χειριστές του συστήματος δέχονται τις πληροφορίες και χρησιμοποιώντας τα ίδια κανάλια στέλνουν εντολές στους επιμέρους Υ/Σ.
- Οικίσκος στέγασης. Χρησιμοποιείται για την στέγαση των περισσότερο ευαίσθητων (μετρητικά, ή ηλεκτρονικά εξαρτήματα) ή/και των περισσότερο θορυβωδών εξαρτημάτων του υποσταθμού όπως Μ/Σ. Ως επί το πλείστον εξυπηρετεί σκοπούς της βελτίωσης της αισθητικής του Υ/Σ αλλά ταυτόχρονα προστατεύει τα εξαρτήματα που αναφέρθηκαν παραπάνω από ακραία καιρικά φαινόμενα. Κάθε οικίσκος που χρησιμοποιείται μελετάται ώστε να αερίζεται επαρκώς και όλα τα εξαρτήματα του να έχουν άμεση σύνδεση με την γείωση του Υ/Σ. Για μικρά μεγέθη οικίσκων δεν απαιτείται οικοδομική άδεια, ενώ τα τετραγωνικά μέτρα που επιτρέπουν εξαίρεση από οικοδομική άδεια προκύπτουν από την ισχύ του Υ/Σ.



(α)



(β)

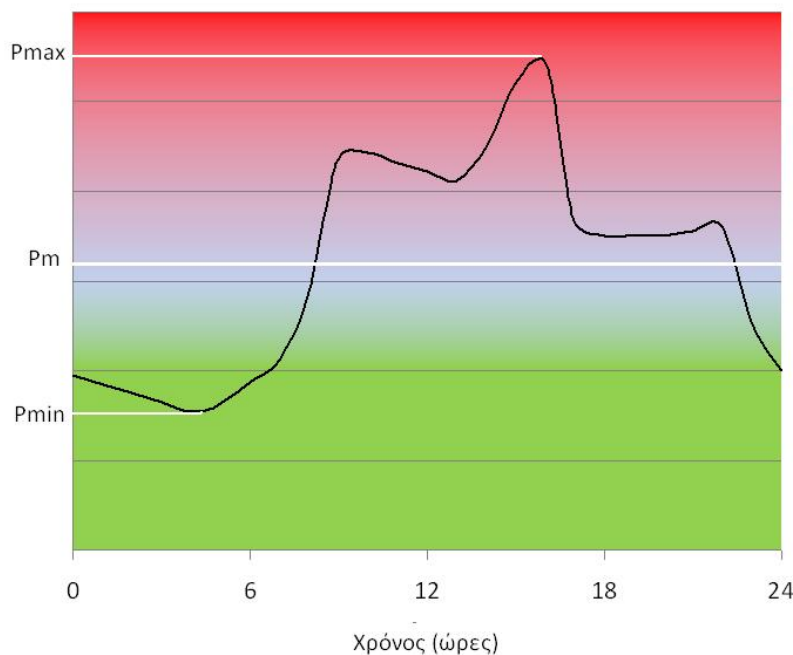
Εικ. 1.5. Υπαίθριος υποσταθμός (α) και έτοιμος για τοποθέτηση υποσταθμός σε οικίσκο (β).

Γενικά τα συστήματα μετρήσεων, αντιστάθμισης και απομακρυσμένου ελέγχου εγκαθίστανται στους υποσταθμούς, ενώ δεν είναι σπάνιο, να εγκατασταθούν και κατά μήκος των γραμμών μεταφοράς όταν αυτές είναι αρκετά μακριές. Στην Ευρώπη οι υποσταθμοί διανομής μπορούν να εγκατασταθούν εντός κτιρίων ή παραπλεύρως αυτών σύμφωνα με το Ευρωπαϊκό πρότυπο IEC 61850. Οι υποσταθμοί μεταφοράς αντίθετα εγκαθίστανται σε απομακρυσμένες τοποθεσίες, κοντά σε γραμμές μεταφοράς υψηλής τάσης ή δίπλα στο χώρο στέγασης των μονάδων παραγωγής.

1.5. Καταναλώσεις

Οποιαδήποτε συσκευή καταναλώνει ηλεκτρική ενέργεια θεωρείται φορτίο. Είναι συνηθισμένη τακτική στα ΣΗΕ να θεωρεί κανείς το φορτίο σαν κάτι το αρκετά γενικό. Για παράδειγμα παρόλο που μπορεί να υπάρχουν χιλιάδες κάτοικοι σε μια πόλη με καθένα από αυτούς να έχει το δικό του ενεργειακό προφίλ, ο διαχειριστής του

δικτύου είναι υποχρεωμένος να θεωρήσει όλα αυτά τα φορτία συν τις όποιες απώλειες, σαν ένα ποσό πραγματικής και άεργης ισχύος συνδεδεμένα πάνω στον υποσταθμό (ζυγό) που τροφοδοτεί την πόλη. Το βασικό πρόβλημα στα ΣΗΕ είναι ότι δεν υπάρχει δυνατότητα αποθήκευσης της ηλεκτρικής ενέργειας με εξαίρεση στους υδροαντλητικούς σταθμούς και κάποιους υβριδικούς σταθμούς που θα αναφερθούν παρακάτω. Για το λόγο αυτό θα πρέπει ανά πάσα χρονική στιγμή η παραγωγή και η κατανάλωση να είναι ίσες τόσο για την πραγματική όσο και για την άεργη ισχύ. Για την σωστή λειτουργία ενός ΣΗΕ είναι απαραίτητη η πρόβλεψη του φορτίου του συστήματος ανά πάσα χρονική στιγμή, ή η πρόβλεψη της καμπύλης φορτίου όπως είναι ευρύτερα γνωστή. Για την διαδικασία αυτή επιστρατεύονται στατιστικά στοιχεία πολλών ετών, μετεωρολογικά δεδομένα και εξειδικευμένα προγράμματα ανάλυσης. Παρόλα αυτά η πρόβλεψη δεν μπορεί να είναι πάντα απόλυτα ακριβής και πάντα γίνονται διορθωτικές κινήσεις σε πραγματικό χρόνο. Η πρόβλεψη της καμπύλης ζήτησης είναι ιδιαίτερα σημαντική για τον σωστό προγραμματισμό της παραγωγής της επόμενης μέρας αλλά και για την οικονομικότερη ένταξη μονάδων στο σύστημα. Ακόμα βάσει αυτής δίνεται άδεια στους παραγωγούς από ΑΠΕ να προσφέρουν ενέργεια στο σύστημα όταν αυτό την έχει ανάγκη. Σε περιπτώσεις χαμηλής ζήτησης μπορεί να γίνει απόρριψη ισχύος από ΑΠΕ όταν ο διαχειριστής θεωρεί ότι η είσοδος της στο σύστημα μπορεί να οδηγήσει σε αποσταθεροποίηση. Στην Εικ. 1.6. φαίνεται μια ημερήσια καμπύλη ζήτησης ενός τυχαίου συστήματος. Η καμπύλη ζήτησης παρουσιάζει τοπικά μέγιστα και ελάχιστα τα οποία ονομάζονται αιχμές και βυθίσεις αντίστοιχα. Η καμπύλη αυτή μπορεί να χωριστεί σε τρεις περιοχές ή ζώνες. Η περιοχή της καμπύλης η οποία είναι πράσινη ορίζει το “φορτίο βάσης”, το φορτίο δηλαδή που τροφοδοτείται σχεδόν σταθερά και συνεχώς από σύστημα. Η μεσαία περιοχή με σιέλ ονομάζεται “κυμαινόμενο φορτίο” ενώ η αντίστοιχη κόκκινη περιοχή ορίζει το “φορτίο αιχμής”. Σαν φορτίο αιχμής θεωρείται η μέγιστη ισχύς που τροφοδοτείται για εκείνη την ημέρα. Από την καμπύλη ζήτησης προκύπτουν κάποιοι συντελεστές οι οποίοι χρησιμοποιούνται για την καλύτερη κατανόηση της συμπεριφοράς του συστήματος. Κάποιοι από αυτούς είναι ο συντελεστής ομοιομορφίας m_0 ο οποίος εκφράζει το ποσοστό του μέγιστου φορτίου το οποίο είναι φορτίο βάσης. Ο συντελεστής φόρτισης m εκφράζει ποσοστιαία πόσο απέχει η μέγιστη ζήτηση από την μέση, αν γίνει μονάδα σημαίνει ότι η καμπύλη ζήτησης είναι μια ευθεία παράλληλη στον άξονα του χρόνου. Η ημερήσια ενέργεια W είναι η ενέργεια που καταναλώθηκε εκείνη την ημέρα και υπολογίζεται από το εμβαδό της καμπύλης ζήτησης.



Εικ. 1.6. Καμπύλη ζήτησης τυχαίου συστήματος.

$$W = \int_0^{T_0} P dt \quad (1.47)$$

$$P_m = \frac{W}{T_0} \quad (1.48)$$

$$m_0 = \frac{P_{\min}}{P_{\max}} \quad (1.39)$$

$$m = \frac{1}{T_0 P_{\max}} \int_0^{T_0} P dt = \frac{P_m}{P_{\max}} \quad (1.50)$$

Οι παραπάνω σχέσεις έχουν νόημα και για μηνιαίες ή μεγαλύτερες καμπύλες ζήτησης. Ένας ακόμα συντελεστής που αναφέρεται όμως σε κάθε φορτίο ξεχωριστά είναι ο συντελεστής ταυτοχρονισμού ή ο αντίστροφος του, ο συντελεστής ετεροχρονισμού. Αυτοί δείχνουν κατά πόσο η αιχμή του φορτίου συμπίπτει με την αιχμή του συστήματος.

Οι καταναλωτές του Ελληνικού συστήματος διακρίνονται ανάλογα με την τιμολόγηση τους σε βιομηχανικούς καταναλωτές υψηλής, μέσης και χαμηλής τάσης, εμπορικούς καταναλωτές, αγροτικούς καταναλωτές, οικιακούς καταναλωτές και λοιπούς. Οι βιομηχανικοί καταναλωτές υψηλής τάσης ονομάζονται και καταναλωτές του συστήματος μεταφοράς. Πέρα από τις καταναλώσεις οι οποίες τιμολογούνται υπάρχουν και καταναλώσεις πάνω στο σύστημα μεταφοράς (απώλειες) και ίδιες καταναλώσεις των σταθμών παραγωγής ή άμεσα συνδεδεμένων εγκαταστάσεων. Κάθε ένας από τους παραπάνω καταναλωτές χρεώνεται την ενέργεια που καταναλώνει με διαφορετικό τιμολόγιο. Για αυτό το λόγο γίνεται οικονομοτεχνική μελέτη πριν από την ηλεκτροδότηση νέων βιομηχανιών λαμβάνοντας υπόψη τα τιμολόγια του παρόχου ηλεκτρικής ενέργειας του. Σε ορισμένες περιπτώσεις (μεγάλη ισχύς) θεωρείται περισσότερο συμφέρον να χρεωθεί ο καταναλωτής το κόστος εγκατάστασης και λειτουργίας ενός υποσταθμού με όλα τα παρελκόμενα, προκειμένου να ισχύσει το φθηνότερο τιμολόγιο. Για καταναλωτές μεγάλων ποσών ισχύος υπάρχουν προϋποθέσεις για την ζεύξη τους στο σύστημα ώστε να διασφαλιστεί η σωστή λειτουργία του. Κάποιες από αυτές είναι ο περιορισμός του ρεύματος εκκίνησης σε περιπτώσεις που τα φορτία είναι ηλεκτρικοί κινητήρες και η διόρθωση του συντελεστή ισχύος όταν ο χαρακτήρας των φορτίων είναι έντονα χωρητικός ή επαγωγικός. Γενικά τα φορτία τείνουν να έχουν επαγωγική συμπεριφορά και έτσι η αντιστάθμιση αέργου ισχύος γίνεται με ερμάρια πυκνωτών. Αντιστάθμιση αέργου ισχύος γίνεται και κατά μήκος των γραμμών μεταφοράς είτε με διατάξεις πυκνωτών είτε πηνίων.

Οι καταναλώσεις που συνδέονται σε ένα ΣΗΕ περιγράφονται σαν ισχείς σε W και VAr αλλά στην πραγματικότητα υπάρχουν πολλά περισσότερα σε σχέση με το φορτίο που αφορούν τον διαχειριστή ενός ΣΗΕ. Για παράδειγμα ένα σύνολο οικιακών καταναλωτών έχει πολύ απρόβλεπτο χαρακτήρα ενώ ο συντελεστής ισχύος του παρουσιάζει επίσης μεταβολές. Αντίθετα κάποιος βιομηχανικός καταναλωτής έχει συγκεκριμένες καταναλώσεις, που λειτουργούν για ορισμένους χρόνους, ενώ ο διαχειριστής μπορεί να γνωρίζει από πριν την στιγμή της ζεύξης τους στο σύστημα. Μια ακόμα διαφορά υπάρχει και στο βαθμό αξιοπιστίας για κάθε ένα από αυτούς.

1.6. Κέντρο κατανομής φορτίου (ΚΚΦ)

Λόγω της πολυπλοκότητας των σύγχρονων ΣΗΕ με μεγάλο αριθμό γραμμών μεταφοράς, υποσταθμών κ.α., ο έλεγχός τους έγινε επίσης πολύπλοκος. Για την σωστή παρακολούθηση και εκτέλεση διορθωτικών ενεργειών δημιουργήθηκαν τα κέντρα κατανομής φορτίου ή κέντρα ελέγχου ενέργειας (ΚΕΕ). Ο στόχος τους είναι να εκτελούν ταυτόχρονη παρακολούθηση ολόκληρου του ΣΗΕ, με σκοπό να αυξήσουν την αξιοπιστία του συστήματος και να επιτύχουν την λειτουργία του συστήματος με τον βέλτιστα οικονομικά τρόπο. Για την επίτευξη αυτού του στόχου το κέντρο κατανομής φορτίου δέχεται μετρήσεις και πληροφορίες από κάθε δομικό στοιχείο του συστήματος ενώ παράλληλα ελέγχει τα περισσότερα από αυτά. Από την άλλη πλευρά τα μοντέρνα ΣΗΕ επιδιώκουν να διατηρήσουν κάποιο βαθμό ευελιξίας, δηλαδή, να μπορεί να συνεχιστεί η λειτουργία τους ακόμα και αν διακοπεί η επικοινωνία με τα ΚΚΦ. Για παράδειγμα οι ίδιες διατάξεις προστασίας που μπορούσαν να ελεγχθούν για την εκκαθάριση κάποιου βραχυκυκλώματος σε έναν υποσταθμό θα λειτουργήσουν αυτόματα και σε πολύ μικρότερο χρονικό διάστημα. Επίσης μια μονάδα παραγωγής δέχεται σήματα τάσης, ισχύος, και συχνότητας ώστε να μπορεί χωρίς επέμβαση του ΚΚΦ να διατηρήσει ή να μεταβάλλει ελαφρώς την παραγόμενη ισχύ της.

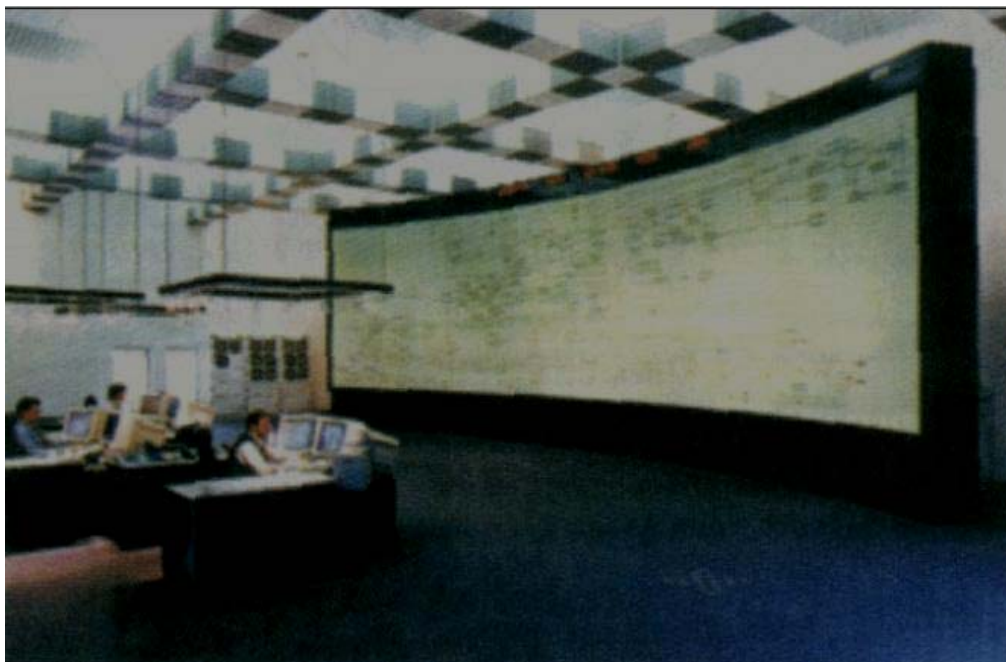
Πέρα από τις καταστάσεις ανάγκης στα ΚΚΦ λαμβάνονται αποφάσεις για την σειρά ένταξης των μονάδων και τον βέλτιστο συνδυασμό μονάδων που θα πρέπει να παράγουν κάθε στιγμή για να ελαχιστοποιηθεί το κόστος παραγωγής. Επίσης εκεί γίνεται και η πρόβλεψη ζήτησης τόσο μακροπρόθεσμα όσο και βραχυπρόθεσμα. Από την προηγούμενη μέρα αποφασίζεται το χρονοδιάγραμμα ένταξης/κράτησης των μονάδων αφού καθοριστεί η αναμενόμενη ζήτηση, μέσω μεθόδων στατιστικής ανάλυσης με δεδομένα δεκαετιών και λαμβάνοντας υπόψη πολλούς παράγοντες που την επηρεάζουν. Στα ΚΚΦ αποφασίζεται τέλος και η κατάλληλη στιγμή για την πλήρωση των δεξαμενών των υδροαντλητικών σταθμών και η μεταφερόμενη ενέργεια από τις διεθνείς διασυνδέσεις. Ακόμα διαθέτουν κατάλληλα προγράμματα βέλτιστης οικονομικής κατανομής του φορτίου στις διάφορες μονάδες και βέλτιστης υδροθερμικής συνεργασίας από όπου προκύπτουν οι επιθυμητές τιμές για τις ισχύς εξόδου κάθε σταθμού.

Τα άτομα που διαχειρίζονται ένα ΚΚΦ λέγονται χειριστές (dispatchers) και με την χρήση Η/Υ ενημερώνονται για τις επικίνδυνες καταστάσεις και παίρνουν αποφάσεις για την τελική εντολή διόρθωσης του σφάλματος. Θα πρέπει να τονιστεί ότι ο Η/Υ δίνει μόνο σήματα σφάλματος χωρίς να μπορεί να διαγνώσει το είδος της ανωμαλίας που παρουσιάζεται. Ο χειριστής είναι αυτός που παίρνει τις τελικές αποφάσεις. Σε ένα ΚΚΦ θα περίμενε κανείς να δει αρκετούς Η/Υ από τους οποίους κάποιοι θα εργάζονται online και κάποιοι offline σε εφεδρεία για περίπτωση απώλειας κάποιου από τους πρώτους. Συνηθισμένο είναι να υπάρχουν ακόμα ειδικά πληκτρολόγια που επιτρέπουν επέμβαση σε λόγους μετασχηματισμού και διακόπτες του συστήματος, ενώ σχεδόν πάντα υπάρχει ένα μεγάλο μονογραμμικό του συστήματος με φωτεινές ενδεικτικές λυχνίες για την άμεση ειδοποίηση των χειριστών. Θα πρέπει να σημειωθεί ακόμα ότι σε ένα ΣΗΕ μπορούν να υπάρχουν περισσότερα από ένα ΚΚΦ. Αν εξεταστεί το Ελληνικό διασυνδεδεμένο σύστημα θα παρατηρηθεί ότι υπάρχουν δυο περιφερειακά ΚΚΦ και ένα το οποίο έχει την γενική επίβλεψη το εθνικό κέντρο ελέγχου ενέργειας (ΕΚΕΕ). Ένα ακόμα σημείο που χρήζει διευκρίνησης είναι ο τρόπος επικοινωνίας με τους απομακρυσμένους ΥΣ, Μ/Σ και διακόπτες. Για τον λόγο αυτό χρησιμοποιούνται συσκευές που λέγονται απομακρυσμένες τερματικές μονάδες, ATM (remote terminal units, RTU). Αυτές μεταφέρουν αμφίδρομα πληροφορίες όπως αναλογικά σήματα μετρήσεων και ψηφιακές εντολές. Για την επικοινωνία με τις μονάδες παραγωγής χρησιμοποιούνται παρόμοιας φιλοσοφίας συσκευές οι οποίες ονομάζονται μονάδες ελέγχου παραγωγής (ΜΕΠ) (generation control units, GCU). Όλες αυτές οι πληροφορίες, μέσω των φερέσυχων και άλλων ζεύξεων, φτάνουν στους υπολογιστές του ΚΚΦ όπου και αναλύονται με την βοήθεια του προγράμματος SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) (εποπτικός έλεγχος και αναζήτηση δεδομένων). Το SCADA χρησιμοποιεί μινικά διαγράμματα για να αναπαραστήσει το σύστημα με γραφικό τρόπο με τρόπο άμεσο και ευνόητο για τους χειριστές. Μέσω των μινικών διαγραμμάτων του SCADA δίνεται η δυνατότητα τόσο για πληροφόρηση, όσο και για έλεγχο.

Το ΕΚΕΕ πέραν των επιμέρους ΚΚΦ του (Βόρειο και Νότιο) περιλαμβάνει τερματικές μονάδες, ελεγκτές παραγωγής καθώς και πλήθος σημείων τηλεχειρισμού. Ολόκληρο το σύστημα αποτελεί ένα πληροφορικό δίκτυο το οποίο συλλέγει δεδομένα από όλη την Ελλάδα, τα οποία επεξεργάζονται τοπικά ή κεντρικά και οδηγούν σε αποφάσεις για τη βέλτιστη λειτουργία του ηλεκτρικού συστήματος μεταφοράς, από άποψη ασφάλειας και οικονομίας.

Μερικά βασικά χαρακτηριστικά του είναι:

- Υπάρχουν διπλά υπολογιστικά συστήματα με αυτόματη μεταγωγή σε περίπτωση βλάβης.
- Οι μονάδες αποθήκευσης είναι κοινές και σε τακτά χρονικά διαστήματα τα δεδομένα καταγράφονται και σε εφεδρικά μέσα αποθήκευσης.
- Τα συστήματα τρέχουν λειτουργικά συστήματα με προδιαγραφές για λειτουργία σε πραγματικό χρόνο.
- Το δίκτυο δεδομένων των κέντρων είναι τριπλό Ethernet και οι μικροκυματικές ζεύξεις με τις απομακρυσμένες μονάδες διπλές.
- Υπάρχουν πέντε ζεύξεις μεταξύ του ΕΚΕΕ και του ΒΠΚΕΕ, τέσσερις μισθωμένες μικροκυματικές του ΟΤΕ και επιπλέον μία φερέσυχη ζεύξη για μεγαλύτερη ασφάλεια.
- Οι χειριστές των συστημάτων μπορούν να έχουν μια σαφή και παραστατική εικόνα της κατάστασης του συστήματος μέσω μινικών διαγραμμάτων και γραφικών απεικονίσεων.
- Για την εκπαίδευση των χειριστών υπάρχει ειδικό σύστημα εξομίωσης καταστάσεων του ηλεκτρικού συστήματος το οποίο λειτουργεί off line αλλά ενημερώνεται συνεχώς.



Εικ. 1.7. Εθνικό κέντρο ελέγχου ενέργειας στον Άγιο Στέφανο Αττικής.

Το ΕΚΕΕ βρίσκεται στον Άγιο Στέφανο Αττικής και συσσεγάζεται με το Νότιο ΚΚΦ που ονομάζεται, Νότιο κέντρο ελέγχου ενέργειας (ΝΚΕΕ). Το δεύτερο επιμέρους ΚΚΦ βρίσκεται στην Πτολεμαΐδα και ονομάζεται ΒΚΕΕ. Ένα από τα σημαντικότερα στοιχεία του ΕΚΕΕ είναι ότι, όπως και σε όλα τα ΚΚΦ, γίνεται εκπαίδευση των νέων χειριστών με χρήση κατάλληλου προγράμματος εξομοίωσης που ονομάζεται DTS (dispatcher training simulator) δηλαδή προσομοιωτής εκπαίδευσης χειριστών. Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως η διαχείριση του δικτύου κάθε άλλο παρά απλή διαδικασία είναι. Προφανώς δεν μπορεί να επιτραπεί σε άπειρους χειριστές να αναπτύξουν την εμπειρία τους στο πραγματικό σύστημα. Για αυτόν τον λόγο δημιουργήθηκε το εικονικό περιβάλλον του προσομοιωτή που αντιγράφει είτε στιγμιότυπα δικτύου είτε προκατασκευασμένα σενάρια μελλοντικής λειτουργίας στα οποία κάθε χειριστής θα πρέπει να μπορεί να ανταπεξέλθει. Θα πρέπει να αναφερθεί τέλος ότι όπως και γενικότερα υπεύθυνος για τα ΚΚΦ είναι ο Διαχειριστής του συστήματος που στην Ελλάδα είναι ο ΔΕΣΜΗΕ (διαχειριστής Ελληνικού συστήματος μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας).

Πέρα από τον εποπτικό έλεγχο που συζητήθηκε μέχρι τώρα, τα ΚΚΦ είναι υπεύθυνα και για την συλλογή δεδομένων από την λειτουργία του δικτύου. Τα δεδομένα αυτά αποθηκεύονται και αναλύονται από κατάλληλο προσωπικό για την αναγνώριση ευαίσθητων σημείων του συστήματος και τρόπων ενδυνάμωσης τους, είτε με επεκτάσεις είτε με αντικατάσταση εξοπλισμού. Τα ίδια δεδομένα χρησιμοποιούνται και για έναν πολύ πιο άμεσο σκοπό. Αναφέρθηκε προηγουμένως η πρόβλεψη της καμπύλης ζήτησης μια ημέρα πριν. Αυτό είναι μέρος μιας ευρύτερης διαδικασίας που ονομάζεται πρόβλεψη φορτίου και όταν γίνεται σωστά έχει ακρίβεια μέχρι και 98-99 %. Απαιτούνται βέβαια πάρα πολλά στατιστικά στοιχεία για την σωστή πρόβλεψη της ζήτησης και αυτό ακριβώς επιτυγχάνεται με την αποθήκευση των δεδομένων από το SCADA, δημιουργείται μια βάση δεδομένων δηλαδή που ανανεώνεται συνεχώς με σκοπό να βοηθήσει την πρόγνωση της μελλοντικής ζήτησης. Δεν μπορεί κανείς να βασιστεί αποκλειστικά στα “ωμά” δεδομένα (raw data) για την πρόβλεψη φορτίου. Λαμβάνονται υπόψη παράγοντες όπως η ημέρα της εβδομάδας (εργάσιμη/αργία), η θερμοκρασία, η ηλιοφάνεια και οι άνεμοι που επικρατούν μεταξύ άλλων, ενώ τα πιο ακριβή συστήματα μπορεί να λάβουν υπόψη ακόμα και τηλεοπτικά προγράμματα ή πολιτικά γεγονότα που μεταβάλουν με τον τρόπο του το καθένα την μελλοντική καμπύλη ζήτησης. Η πρόβλεψη γίνεται χονδρικά σε εβδομαδιαία βάση και επαναλαμβάνεται σε ημερήσια αλλά αυτό δεν είναι αρκετά ακριβές και απαιτείται διόρθωση σε πραγματικό χρόνο, σύμφωνα με τα δεδομένα της μέχρι εκείνης της στιγμής συμπεριφοράς του συστήματος.

ΣΤΑΘΜΟΙ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ
ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

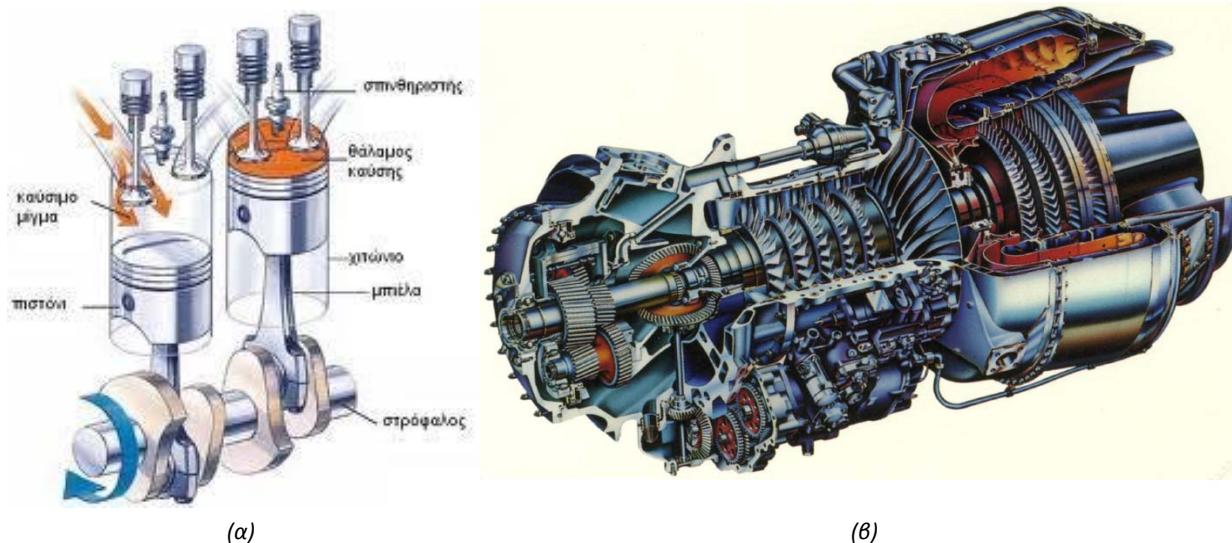
2. Εισαγωγή

Τα πιο σημαντικά στοιχεία ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας είναι οι σταθμοί παραγωγής. Ανάλογα με την πρώτη ύλη που χρησιμοποιούν για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μπορούν να διακριθούν σε θερμικούς, σε υδροηλεκτρικούς και υδροαντλητικούς. Οι θερμικοί σταθμοί καίνε άνθρακα, λιγνίτη, μαζούτ, ντίζελ, ή φυσικό αέριο ενώ οι υδροηλεκτρικοί και υδροαντλητικοί μετασχηματίζουν την δυναμική και κινητική ενέργεια του νερού σε πρώτη φάση σε μηχανική και στη συνέχεια σε ηλεκτρική ενέργεια. Σε πολύ μικρότερη κλίμακα χρησιμοποιούνται σταθμοί παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας οι οποίοι εκμεταλλεύονται ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Οι θερμικές μονάδες είναι οι πιο διαδεδομένες από τις παραπάνω ενώ οι παλαιότερες μονάδες παραγωγής ανήκουν στην συντριπτική πλειοψηφία τους σε αυτή τη κατηγορία. Η γενική αρχή που της διέπει είναι η καύση κάποιου καυσίμου παράγει θερμική ενέργεια η οποία είτε θερμαίνει νερό για την παραγωγή ατμού (ατμοστρόβιλοι) είτε πιο άμεσα με μηχανές εσωτερικής καύσης (ΜΕΚ) μετατρέπεται σε μηχανική.

Η δεύτερη κατηγορία θερμοηλεκτρικών σταθμών χρησιμοποιεί μηχανές εσωτερικής καύσης για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Οι ΜΕΚ χωρίζονται σε δύο υποκατηγορίες, τις εμβολοφόρες μηχανές και τους αεριοστροβίλους. Στις εμβολοφόρες μηχανές (Εικ. 2.1 α) το καύσιμο ψεκάζεται στον θάλαμο καύσης όταν ένα από τα έμβολα συμπιέζεται και με ηλεκτρικό σπινθήρα δημιουργείται έκρηξη. Αυτή έχει σαν αποτέλεσμα την εκτόνωση του εμβόλου και την συμπίεση του συμμετρικού του. Αυτή η διαδικασία επαναλαμβάνεται συνεχώς. Τα έμβολα είναι συνδεδεμένα σε ένα στρόφαλο ο οποίος μετατρέπει την παλινδρομική κίνηση των εμβόλων σε περιστροφική. Οι αεριοστροβιλικές μηχανές ή τύπου Jet όπως μπορεί να αναφερθούν, δεν χρησιμοποιούν έμβολα. Σε αυτήν την περίπτωση το καύσιμο ψεκάζεται στο εσωτερικό του καυστήρα μέσω θυρίδων που στην συνέχεια κλείνουν και δημιουργείται ηλεκτρικός σπινθήρας. Έτσι πυροδοτείται έκρηξη τις οποίες τα καυσαέρια οδηγούνται με μεγάλη πίεση σε ειδικά κατασκευασμένο στρόβιλο (Εικ. 2.1 β) ο οποίος περιστρέφεται λόγω της ροής αυτής. Η μηχανική ενέργεια που παράγεται με οποιονδήποτε από τους παραπάνω δύο τρόπους, οδηγείται στον άξονα μιας σύγχρονης γεννήτριας ώστε να γίνει η τελική μετατροπή σε ηλεκτρική. Για την μετατροπή σε ηλεκτρισμό δεν επαρκεί μόνο η μηχανική ενέργεια αλλά απαιτείται και μια ποσότητα ηλεκτρικής ενέργειας για την τροφοδοσία του τυλίγματος διέγερσης. Αυτή η ηλεκτρική ενέργεια παράγεται μέσω μηχανής συνεχούς ρεύματος προσαρμοσμένη στον ίδιο άξονα με την υπόλοιπη διάταξη η οποία για αυτό το λόγο λέγεται διεγέρτρια και οδηγείται στο τυλίγμα διέγερσης μέσω κατάλληλων διατάξεων ελέγχου και προστασίας. Τα καύσιμα που χρησιμοποιούταν παλαιότερα για την παραπάνω διαδικασία, ήταν γαιάνθρακες στην συνέχεια κάποια κλάσματα αργού πετρελαίου ή σε κάποιες περιπτώσεις πυρηνική ενέργεια και πιο πρόσφατα φιλικότερα προς το περιβάλλον καύσιμα όπως φυσικό αέριο, βιομάζα, βιοαέριο ή υδρογόνο. Η πρόοδος της τεχνολογίας και η γενικότερη στροφή σε ενεργειακές λύσεις πιο φιλικές προς το περιβάλλον, προωθούν την χρήση βιομάζας για τον συγκεκριμένο τρόπο παραγωγής. Παρόλα αυτά η εξαιρετικά μεγάλες εκτάσεις καλλιεργήσιμης γης και η μεγάλες ανάγκες σε νερό παραμένουν τα μεγάλα μειονεκτήματα του. Η πιο βιώσιμη εναλλακτική των ορυκτών καυσίμων είναι η χρήση υδρογόνου αν και αυτό με την σειρά του αμφισβητείται. Η καύση του υδρογόνου δεν αφήνει κατάλοιπα ενώ η θερμογόνο δύναμη του είναι ικανή να αντικαταστήσει τα ορυκτά καύσιμα από την άλλη όμως ο τρόπος παραγωγής του παραμένει τόσο επιβλαβής προς το περιβάλλον όσο και οικονομικά δυσβάσταχτος. Οι πιο σύγχρονες μονάδες παραγωγής χρησιμοποιούν φυσικό αέριο μιας και είναι το λιγότερο ρυπογόνο από τα ορυκτά καύσιμα.

Οι υδροηλεκτρικοί σταθμοί χρησιμοποιούνται εδώ και δεκαετίες για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με άριστη συμπεριφορά αφού έχουν σχετικά γρήγορη απόκριση ανάλογα βέβαια και με την ισχύ τους και σταθερή και προβλέψιμη παραγωγή. Είναι οι σταθμοί που εκμεταλλεύτηκαν για πρώτη φορά μια ανανεώσιμη πηγή ενέργειας, αν και πολλοί θα υποστήριζαν ότι όπου έχουν εγκατασταθεί έχουν αλλοιώσει το φυσικό περιβάλλον και έχουν επιβαρύνει την υδρόβια πανίδα και χλωρίδα. Παρόλα αυτά θεωρούνται από τις καθαρότερες μονάδες παραγωγής μεγάλης κλίμακας, ενώ η εγκατάστασή τους συνοδεύεται με αρκετά έργα άρδευσης και ύδρευσης που βελτιώνουν την ποιότητα ζωής και εργασίας των κατοίκων της περιοχής. Παράλληλα, οι ίδιες εγκαταστάσεις χρησιμοποιούνται σε περιόδους μεγάλων βροχοπτώσεων σαν αντιπλημμυρικά έργα. Ακόμα, ορισμένοι υδροηλεκτρικοί σταθμοί που ονομάζονται υδροαντλητικοί συνδυάζουν την λειτουργία τους με αυτήν άλλων μονάδων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές όπως αιολικές μονάδες σχηματίζοντας έτσι

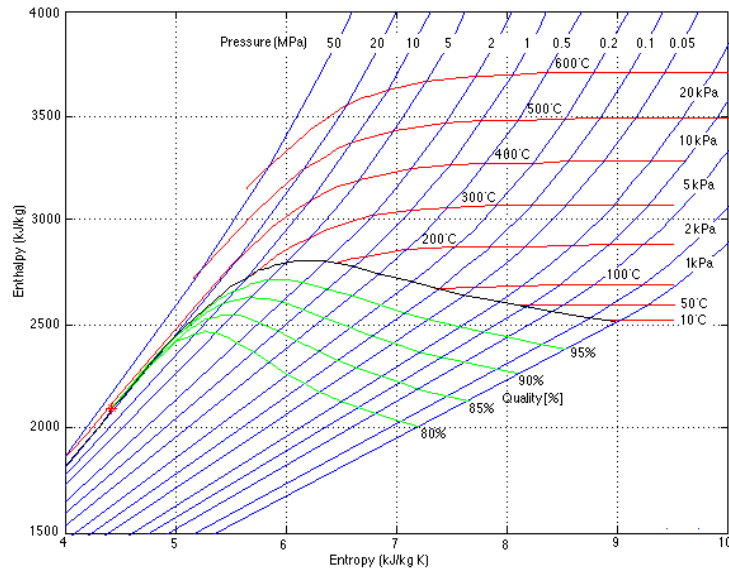
υβριδικούς σταθμούς με δυνατότητα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας. Οι αιολικές μονάδες όπως και οι Φ/Β μονάδες αναπτύχθηκαν τις τελευταίες δεκαετίες ενώ μεγάλο ρόλο έπαιξε η ανάπτυξη της μηχανικής, της τεχνολογίας των υλικών και της ηλεκτρονικής. Τα τελευταία χρόνια δίνεται κίνητρο από το κράτος για την εγκατάσταση τέτοιων μονάδων από ιδιώτες μιας και η παραγωγή από τέτοιου είδους μονάδες δεν παράγει ρύπους και είναι γενικά περισσότερο φιλική προς το περιβάλλον σε σχέση με τους θερμικούς σταθμούς.



Εικ. 2.1. Μηχανές εσωτερικής καύσης με έμβολα (α) και αεριοστρωβλικές (β).

2.1. Ατμοηλεκτρικοί Σταθμοί

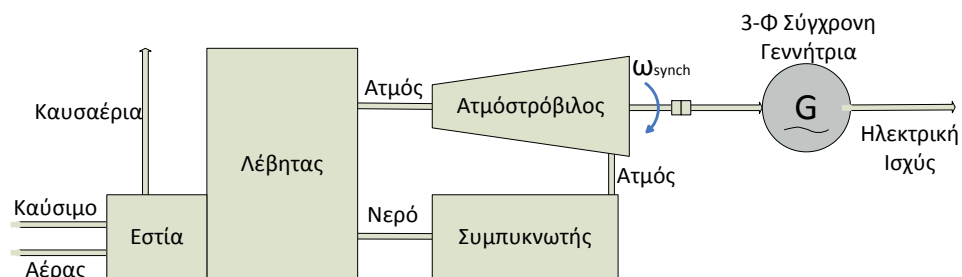
Ο ατμός είναι παράγωγο της θέρμανσης του νερού σε θερμοκρασία μεγαλύτερη των $100\text{ }^{\circ}\text{C}$, όταν αυτός περιέχει ακόμα σταγονίδια νερού ονομάζεται υγρός ατμός ενώ αν δεν έχει ονομάζεται κορεσμένος ή ξηρός. Αν μια ποσότητα κορεσμένου ατμού ζεσταθεί περαιτέρω τότε ο ατμός ονομάζεται υπέρθερμος. Κατά την διάρκεια της εξάτμισης ενός υγρού δεν παρατηρείται μεταβολή της θερμοκρασίας του αφού όλη η ενέργεια που του παρέχεται, δαπανάται για την μετατροπή του σε ατμό, και ονομάζεται λανθάνουσα ενέργεια εξάτμισης. Για την δημιουργία ατμού πίεσης ενός bar από μια ποσότητα νερού σε μια θερμοκρασία T_1 απαιτείται η ενέργεια για την θέρμανση του νερού από την θερμοκρασία T_1 μέχρι τους $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ συν την λανθάνουσα ενέργεια εξάτμισης. Για την αύξηση της πίεσης του ατμού αυτού απαιτείται σχετικά μικρή ποσότητα ενέργειας σε σχέση με την προηγούμενη άρα είναι εύκολο να δημιουργηθεί υψηλής πίεσης ατμός χωρίς μεγάλες δαπάνες ενέργειας σε σχέση με τον ατμό χαμηλής πίεσης. Η θερμική ενέργεια που περιέχεται σε μια ποσότητα ενός υλικού ονομάζεται ενθαλπία h και μετριέται σε J/kg . Γενικά, όσο μεγαλύτερη είναι η διαφορά ενθαλπίας (θερμική πτώση) ανάμεσα στον ατμό εισόδου και εξόδου ενός ατμοστρωβίλου τόσο μεγαλύτερος ο εσωτερικός βαθμός απόδοσης του. Η εντροπία s αποτελεί ένα μέτρο των απωλειών ενός συστήματος π.χ. σε ένα συμπιεστή, η εντροπία αυξάνει επειδή η μεταβολή της συμπίεσης δεν είναι ιδανική-ισεντροπική. Για τον προσδιορισμό της θερμικής πτώσης ενός συστήματος χρησιμοποιούνται τα διαγράμματα Mollier ($h-s$) που στον άξονα των τετμημένων έχουν την εντροπία με μονάδες J/kgK και στον άξονα των τεταγμένων την ενθαλπία.



Σχ. 2.1. Διάγραμμα Mollier για το νερό.

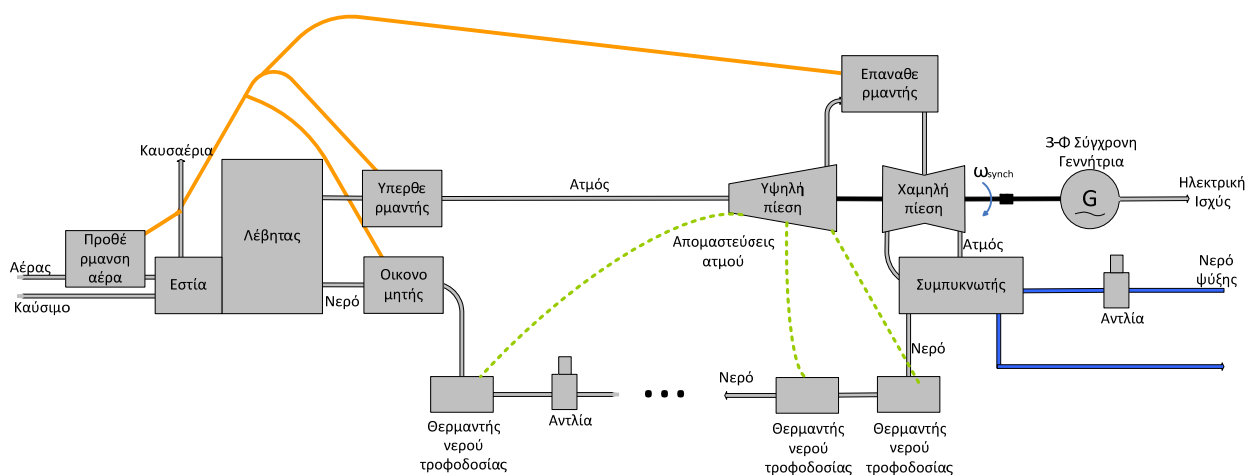
Οι ατμοηλεκτρικοί σταθμοί (ΑΗΣ) μπορεί να αποτελούνται από μια ή περισσότερες μονάδες που εργάζονται σαν μια ισοδύναμη μονάδα και μοντελοποιούνται σαν τέτοια. Κάθε μια από τις παραπάνω μονάδες χρησιμοποιεί έναν λέβητα, έναν στρόβιλο, μια σύγχρονη γεννήτρια, ένα πύργο ψύξης και το σύστημα μεταφοράς της ηλεκτρικής ενέργειας στο ζυγό του δικτύου. Οι εγκαταστάσεις μεταφοράς καυσίμου και σε κάποιες περιπτώσεις η καμινάδα είναι κοινές για όλες τις μονάδες. Αρχικά οι θερμικές μηχανές που χρησιμοποιούσαν ατμό για την παραγωγή ενέργειας ήταν εμβολοφόρες αλλά αυτή η μορφή δεν άντεξε στο χρόνο μιας και με την μορφή του στρόβιλου ελαχιστοποιήθηκαν οι απώλειες και αυξήθηκε ο χρόνος ζωής τους. Οι ατμοστρόβιλοι είναι κινητήριες μηχανές που χρησιμοποιούν ατμό υψηλής πίεσης για την παραγωγή κινητικής ενέργειας. Πάντα έχουν κάποιου είδους στροφέιο το οποίο είναι ένα περιστρεφόμενο τύμπανο εφοδιασμένο περιφερειακά με πτερύγια. Ο ατμός μέσω των ακροφυσίων διοχετεύεται στα πτερύγια και η ενέργεια του ατμού προκαλεί την περιστροφή του στροφέιου. Ένας τυπικός ΑΗΣ έχει βαθμό απόδοσης 35 με 45% που είναι αρκετά υψηλός για θερμικό σταθμό. Γενικά χρησιμοποιεί για καύσιμα λιθάνθρακες, λιγνίτη, τύρφη, μαζούτ και φυσικό αέριο. Στην Ελλάδα έχει επικρατήσει η χρήση του λιγνίτη ως καύσιμο στους ατμοηλεκτρικούς σταθμούς, λόγω του σχετικά μεγάλου βαθμού απόδοσης, του μικρού κόστους εξόρυξης και λειτουργικού κόστους ενέργειας(€/KWh).

Το καύσιμο μαζί με ατμοσφαιρικό αέρα ο οποίος μπορεί να είναι υπό πίεση οδηγούνται σε έναν χώρο καύσης που ονομάζεται εστία. Εκεί γίνεται η καύση και η θερμική ενέργεια που παράγεται θερμαίνει τον λέβητα που εφάπτεται στην εστία ενώ τα προϊόντα της καύσης απορρίπτονται προς το περιβάλλον μέσω καμινάδων. Μέσα στον λέβητα υπάρχει νερό το οποίο λόγω της θερμικής ενέργειας ατμοποιείται και μέσω σωληνώσεων οδηγείται στον στρόβιλο ο οποίος είναι σε κοινό άξονα με την σύγχρονη γεννήτρια, την διεγέρτρια και την προδιεγέρτρια αν υπάρχει. Μετά τον στρόβιλο ο ατμός οδηγείται σε έναν ψυγείο που ονομάζεται συμπυκνωτής και υγροποιείται. Στην συνέχεια μια αντλία κυκλοφορίας αναλαμβάνει να επιστρέψει το νερό στον λέβητα για να επαναλάβει τον κύκλο του. Η διαδικασία που αναλύθηκε παραπάνω είναι η βασική για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με ατμό. Με την πάροδο του χρόνου η διαδικασία αυτή βελτιώθηκε και με την βοήθεια διατάξεων που προστέθηκαν αύξησε τον βαθμό απόδοσης της. Τα καυσάερια για παράδειγμα, παρατηρήθηκε ότι είχαν υψηλή θερμοκρασία και ότι θα μπορούσαν να προθερμάνουν τον αέρα ή το νερό πριν εγκαταλείψουν την μονάδα.



Σχ. 2.2. Μοντέλο ατμοηλεκτρικής μονάδας.

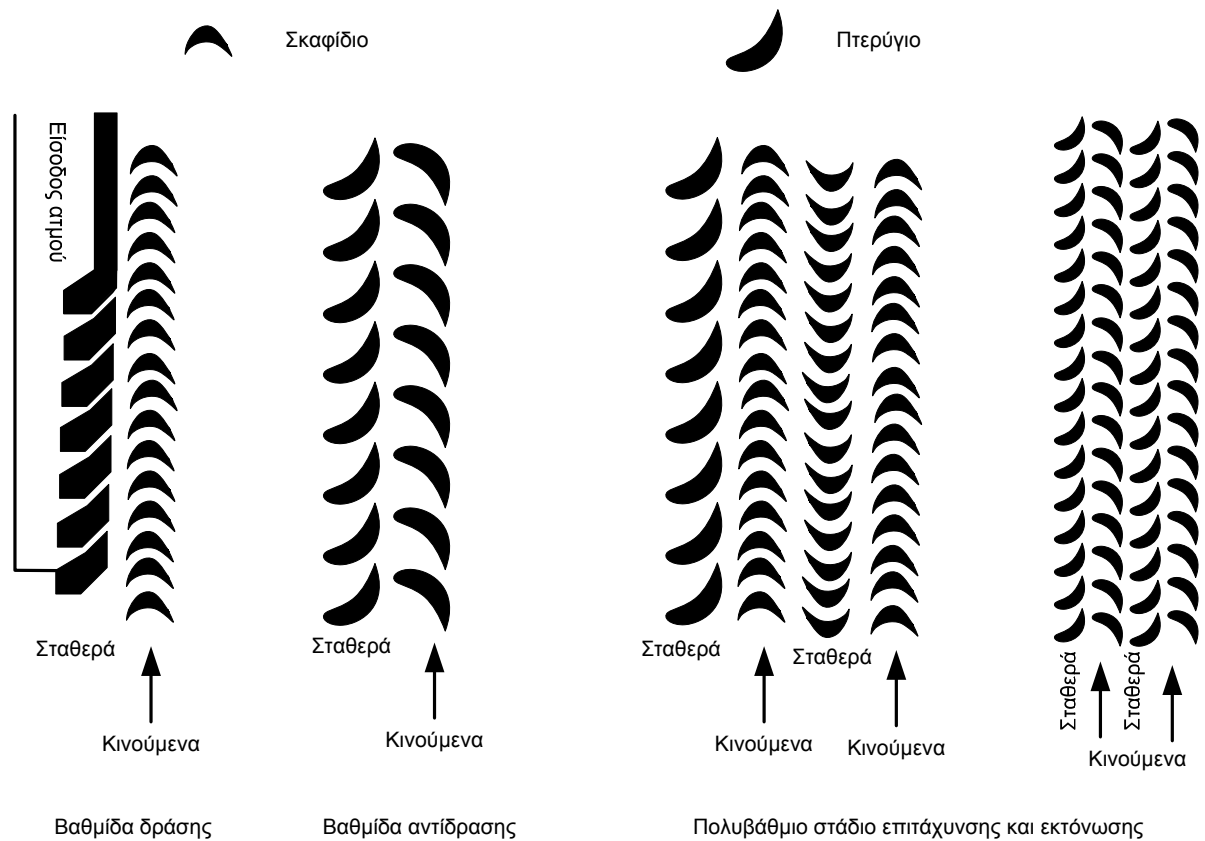
Με αυτές τις διατάξεις, πέρα από την αύξηση του βαθμού απόδοσης, πέφτει η θερμοκρασία των καυσαερίων εξόδου και μειώνονται οι ρύποι ανά μονάδα ηλεκτρικής ισχύος. Για να συμβούν αυτά πρέπει ο στρόβιλος να χωριστεί σε δύο μέρη: στην βαθμίδα υψηλής πίεσης και την βαθμίδα χαμηλής πίεσης. Μετά την έξοδο του ατμού από τον ατμοπαραγωγό λέβητα αυτός οδηγείται σε μια βαθμίδα που ονομάζεται υπερθερμαντής και αξιοποιεί την θερμότητα των καυσαερίων για να θερμάνει περαιτέρω τον ήδη θερμό ατμό πριν φτάσει στην βαθμίδα υψηλής πίεσης του ατμοστροβίλου περιστρέφοντας τον. Το μεγαλύτερο μέρος του ατμού που εξέρχεται από τη βαθμίδα υψηλής πίεσης περνάει μέσα από μια διάταξη που ονομάζεται επαναθερμαντής και θερμαίνεται ξανά τον ατμό πριν οδηγηθεί στην δεύτερη βαθμίδα του στροβίλου. Ένα μικρό μέρος ατμού από αυτό που εκτονώθηκε στην βαθμίδα υψηλής πίεσης οδηγείται μέσω ενός συστήματος αντλιών και θερμαντών πίσω στον λέβητα όπως και η πλήρης έξοδος της βαθμίδας χαμηλής πίεσης του στροβίλου αφού βέβαια περάσει πρώτα από τον συμπιεστή για να υγροποιηθεί. Η διαφορά ανάμεσα στην έξοδο της βαθμίδας χαμηλής πίεσης και την έξοδο της βαθμίδας υψηλής πίεσης είναι ότι η πρώτη παρέχει το νερό το οποίο θα επιστρέψει στον λέβητα με υψηλότερη τώρα θερμοκρασία ενώ η δεύτερη είναι το μέσο με το οποίο θερμαίνεται αυτό το νερό. Ο τελευταίος θερμαντής πριν από τον στρόβιλο ονομάζεται οικονομητής και η διαφορά του με τους υπόλοιπους είναι ότι αυτός θερμαίνει το νερό εκμεταλλευόμενος την θερμοκρασία των καυσαερίων και όχι του ατμού που προήλθε από την βαθμίδα υψηλής πίεσης του στροβίλου όπως οι προηγούμενοι. Ακόμα σε αυτήν την λειτουργία υψηλής απόδοσης η θερμότητα των καυσαερίων είναι συνηθισμένο να θερμαίνει και τον αέρα πριν εισαχθεί στην εστία μέσω μιας διάταξης προθέρμανσης αέρος για να βελτιωθεί και ο βαθμός απόδοσης της ίδιας της καύσης.



Σχ. 2.3. Μοντέλο ατμοστροβίλου με διατάξεις βελτίωσης του βαθμού απόδοσης.

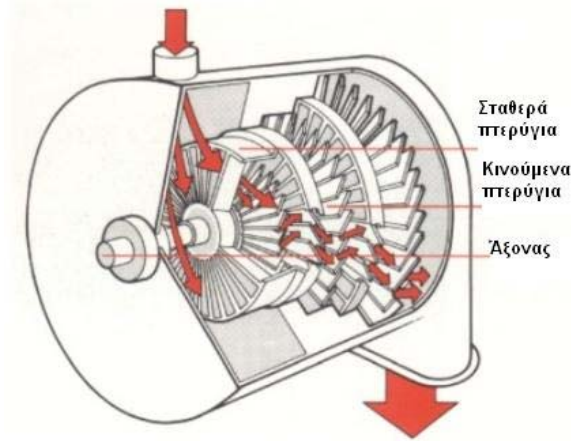
Αξίζει να σημειωθεί ότι σε μεγάλες ατμοηλεκτρικές μονάδες μπορούν να παρατηρηθούν θερμοκρασίες ατμού που πλησιάζουν τους 600° με 700° C και πιέσεις που φτάνουν τις 250 με 300 At. Γενικά οι μεγάλοι ατμοηλεκτρικοί σταθμοί βρίσκονται σε περιοχές με πρόσβαση σε νερό για την τροφοδοσία του συμπιεστή και την ψύξη του ατμού. Όταν αυτό δεν είναι εφικτό η ψύξη του ύδατος γίνεται μέσω πύργων ψύξεως φυσικής ή τεχνητής κυκλοφορίας αέρα οι οποίοι αναλαμβάνουν να υγροποιήσουν ξανά τον ατμό και να τον επιστρέψουν, σε μορφή νερού πια. Το μεγαλύτερο μέρος των απωλειών σε έναν ατμοηλεκτρικό σταθμό χάνεται στον συμπιεστή κατά την απόρριψη της θερμικής ενέργειας που δεν χρησιμοποιήθηκε για την παραγωγή ηλεκτρισμού. Όταν αυτή η ενέργεια αξιοποιείται είτε σε μονάδες συνδυασμένου κύκλου είτε με συμπαραγωγή θερμότητας και ηλεκτρισμού ο βαθμός απόδοσης από 45% το μέγιστο μπορεί να φτάσει μέχρι και 60-65%.

Κάθε ένα από τα εξαρτήματα που αναφέρθηκαν παραπάνω χρήζει περαιτέρω εξήγησης για να γίνει κατανοητή η λειτουργία του ατμοστροβίλου. Πρώτα όμως θα πρέπει κανείς να αναφερθεί στην θερμοδυναμική του φαινομένου ώστε να γίνουν κατανοητές οι φυσικές διεργασίες που κρύβονται πίσω από κάθε διάταξη της μηχανής αυτής.



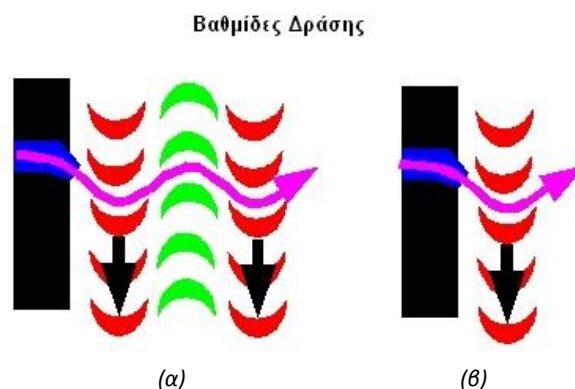
Σχ. 2.4. Κάτοψη βαθμίδων στρόβιλων δράσης, αντίδρασης και συνδυασμού τους.

Όλοι οι στρόβιλοι παρουσιάζουν κάποιες κατασκευαστικές ομοιότητες. Για παράδειγμα, όλοι έχουν κάποιες “φέτες” συνδεδεμένες μηχανικά στον άξονα τους ώστε να περιστρέφονται και κάποιες άλλες συνδεδεμένες στο κέλυφός τους, ώστε να μένουν σταθερές. Πάντα μια σταθερή βαθμίδα ακολουθείται από μια κινούμενη και ούτο καθεξής. Κάθε μία από αυτές τις φέτες έχει πτερυγία ή σκαφίδια στην περίμετρο της και γενικά μια βαθμίδα κοντά στην είσοδο του ατμού θα έχει πάντα μεγαλύτερη διατομή και άρα μήκος πτερυγίων σε σχέση με μία βαθμίδα πιο κοντά στην έξοδο του ατμού. Οι σταθερές βαθμίδες έχουν σκοπό να κατευθύνουν τον ατμό με κατάλληλη γωνία και ταχύτητα στην επόμενη βαθμίδα ενώ οι κινούμενες έχουν σκοπό να εκμεταλλευτούν αυτά τα στοιχεία του ατμού για να παραχθεί μηχανικό έργο, περιστροφή δηλαδή του στροφείου. Ένας διαχωρισμός των στρόβιλων που μπορεί να γίνει είναι ανάλογα με την πίεση του ατμού εισόδου που διαχειρίζονται. Έτσι προκύπτουν οι Ατμοστρόβιλοι χαμηλής πίεσης για ατμό εισόδου με πίεση κάτω των 20 bar, μεσαίας πίεσης για πιέσεις ανάμεσα σε 20 και 40 bar, υψηλής πίεσης για πιέσεις ανάμεσα σε 40 και 170 bar και τέλος σε ατμοστρόβιλους υπερυψηλής πίεσης για πίεση εισερχόμενου ατμού που ξεπερνά τα 170 bar. Ακόμα υπάρχει και η κατηγορία υπερκρίσιμης πίεσης για περιπτώσεις όπου ο ατμός εισόδου έχει πίεση μεγαλύτερη των 225 bar. Ο γενικότερος διαχωρισμός που μπορεί κάποιος να κάνει όσο αφορά τους ατμοστρόβιλους έχει να κάνει με τον τρόπο που εισχωρεί ο ατμός στον στρόβιλο, δηλαδή ανάλογα με την θέση των ακροφυσίων. Τόσο η θέση των ακροφυσίων όσο και το σχήμα των πτερυγίων επιδρούν στην ροή που ακολουθεί ο διερχόμενος ατμός αλλά και στην μετατροπή ενέργειας από θερμική και κινητική σε μηχανική (περιστροφή).



Σχ. 2.5 Ροή ατμού σε ατμοστρόβιλο.

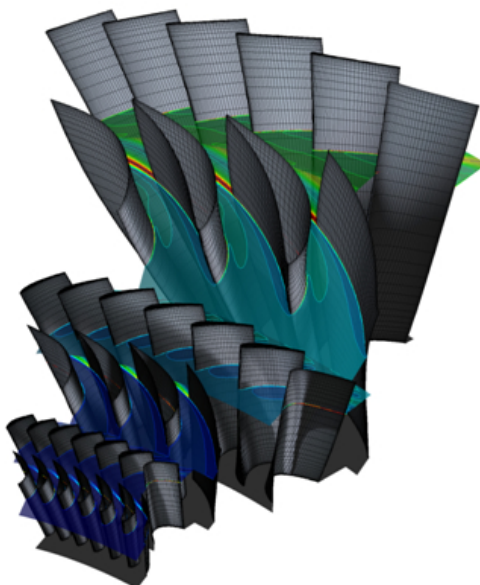
- Οι ατμοστρόβιλοι δράσης (Impulse turbines) έχουν σταθερά ακροφύσια τα οποία οδηγούν τον ατμό σε μορφή πιδάκων υψηλής πίεσης στα στρεφόμενα μέρη του στρόβιλου, τα οποία λόγω του σχήματος τους ονομάζονται σκαφίδια. Αυτοί οι πίδακες έχουν μεγάλο ενεργειακό περιεχόμενο, μέρος του οποίου μετατρέπεται σε περιστροφική κίνηση του συστήματος σκαφιδίων-άξονα. Ο ατμός χάνει πίεση όταν διέρχεται από τα ακροφύσια ενώ μετά την δίοδο του από τα σκαφίδια μειώνεται η ταχύτητά του. Εφόσον αυτό συμβαίνει σε κάθε βαθμίδα στο τέλος της διάταξης ο ατμός θα καταλήξει να έχει πολύ μικρότερη πίεση και χαμηλότερη ταχύτητα. Για αυτό το λόγο ο στρόβιλος έχει κωνικό σχήμα με μικρότερη διατομή στην είσοδο και μεγαλύτερη στις τελευταίες βαθμίδες. Γενικά οι βαθμίδες υψηλής πίεσης είναι δράσης και οι βαθμίδες χαμηλής πίεσης είναι αντίδρασης. Θα πρέπει να αναφερθεί ότι με την στάση ορισμένων βαθμίδων, οι βαθμίδες λειτουργούν σαν μόνωση ανάμεσα στις κινούμενες και ο ατμός βρίσκει δίοδο μόνο διαμέσου του κενού ανάμεσα στα πτερύγια. Όταν η διατομή της εισόδου είναι μεγαλύτερη από την διατομή εξόδου η ταχύτητα του ατμού αυξάνεται. Οι ατμοστρόβιλοι δράσης μπορούν να διαχωριστούν τις βαθμίδες τους σε δύο υποκατηγορίες, τις βαθμίδες πίεσης (Rateau) και τις βαθμίδες ταχύτητας (Curtis). Οι πρώτες από αυτές έχουν μόνο μια σειρά κινούμενων σκαφιδίων ανά βαθμίδα ενώ οι Curtis δύο. Στην βαθμίδα Rateau ο ατμός οδηγείται μέσω των ακροφυσίων σε μία σειρά από κινούμενα σκαφίδια τα οποία περιστρέφονται μειώνοντας όμως κατά μεγάλο μέρος την πίεση του ατμού στην έξοδό τους. Οι βαθμίδες Curtis συνεχίζουν την διαδικασία από εκεί που σταματούν οι πρώτες και ο βαθμός χαμηλής πίεσης οδηγείται σε σταθερά σκαφίδια τα οποία αυξάνουν ξανά την πίεση του ατμού αλλά αλλάζουν την κατεύθυνση του ώστε να τον εκμεταλλευτεί πλήρως μια δεύτερη σειρά κινούμενων σκαφιδίων. Ο ατμός τότε καταλήγει να εξέρχεται με σχεδόν μηδενική ταχύτητα από την βαθμίδα αυτή.



Σχ. 2.6. Βαθμίδες ατμοστροβίλων δράσης με κόκκινο τα κινούμενα σκαφίδια και με πράσινο τα σταθερά. Βαθμίδα τύπου Curtis (α) και τύπου Rateau (β).

- Οι ατμοστρόβιλοι αντίδρασης (Reaction turbines) έχουν πτερύγια κατάλληλου σχήματος ώστε αυτά τα ίδια να σχηματίζουν τα ακροφύσια στα κενά ανάμεσα σε διπλανά πτερύγια της ίδιας σειράς. Ο ατμός επιταχύνεται εντός των ακροφυσίων που σχηματίζουν τα πτερύγια του δρομέα και κατευθύνεται στην επόμενη βαθμίδα μέσω σταθερών πτερυγίων αντίθετης φοράς. Ο ατμός στην συνέχεια φεύγει από τα

σταθερά πτερύγια υπό μορφή πίδακα που καταλαμβάνει την πλήρη ακτίνα του στρόβιλου με αυξημένη ταχύτητα αλλά μειωμένη πίεση. Έπειτα, ο πίδακας αυτός αλλάζει φορά όταν πέφτει στα κινούμενα πτερύγια μειώνοντας με αυτόν τον τρόπο την ταχύτητα αλλά και την πίεση του για να επαναλάβει την διαδικασία στην επόμενη βαθμίδα. Τελικά ο ατμός εξέρχεται από τον στρόβιλο με όση ταχύτητα είχε εισέλθει αλλά με μειωμένη πίεση και θερμοκρασία. Αυτή η μείωση της ταχύτητας και θερμοκρασίας αντικατοπτρίζει την παραγωγή έργου που έλαβε χώρα στον στρόβιλο.



Σχ. 2.7. Ροή ατμού σε στρόβιλους αντίδρασης.

- Οι μικτοί στρόβιλοι είναι πολυβάθμιοι στρόβιλοι με βαθμίδες των δύο παραπάνω ειδών με κατάλληλη σειρά όπως προαναφέρθηκε δηλαδή ξεκινώντας από την πλευρά της υψηλής πίεσης πρώτα χρησιμοποιούνται οι βαθμίδες δράσεως και όσο πέφτει η πίεση του ατμού μπορούν να χρησιμοποιηθούν και βαθμίδες αντίδρασης.

Γενικά οι ατμοστρόβιλοι μετατρέπουν την ορμή της μάζας του ατμού σε μηχανική ενέργεια με την περιστροφή των πτερυγίων και στην συνέχεια ο ατμός οδηγείται στην επόμενη βαθμίδα. Υπάρχουν δύο βασικοί τύποι βαθμίδων, οι βαθμίδες δράσεως και αντιδράσεως. Στις βαθμίδες δράσεως η εκτόνωση του ατμού γίνεται στο ακροφύσιο ενώ στις βαθμίδες αντιδράσεως η εκτόνωση του ατμού γίνεται τόσο στο ακροφύσιο όσο και στα περιστρεφόμενα πτερύγια. Η πλειοψηφία των στρόβιλων χρησιμοποιούν συνδυασμό των βαθμίδων αυτών ενώ κάποιοι άλλοι είναι αποκλειστικά ατμοστρόβιλοι δράσεως ή αποκλειστικά αντίδρασης.

Επίσης οι ατμοστρόβιλοι μπορούν να διαχωριστούν ανάλογα με την διάταξη του κελύφους και του άξονα τους. Η απλούστερη διάταξη είναι αυτή του μονού κελύφους (Single casing) όπου όλες οι στρεφόμενες βαθμίδες συνδέονται μηχανικά σε έναν άξονα και η ροή του ατμού γίνεται προς μια κατεύθυνση. Σε αυτή την διάταξη το κέλυφος είναι ένα και μοναδικό και έχει σχήμα κωνικό όπως αναφέρθηκε. Η διάταξη εφ' ενός ζυγού (Tandem compound casing) περιλαμβάνει τουλάχιστον δύο κελύφη σε κοινό άξονα και βρίσκει εφαρμογή σε μεγαλύτερης κλίμακας μονάδες από ότι η προηγούμενη. Κάθε κέλυφος αντιστοιχεί και σε μία βαθμίδα υψηλότερης πίεσης από την επόμενη. Γενικά ο ατμός εισέρχεται σε κάθε βαθμίδα με υψηλή πίεση και εκτονώνεται στην έξοδο της. Για παράδειγμα, σε μία διάταξη με δύο βαθμίδες η πρώτη θα ονομαζόταν βαθμίδα υψηλής πίεσης και η δεύτερη χαμηλής πίεσης. Ο ατμός υψηλής πίεσης θα εισερχόταν στην βαθμίδα υψηλής πίεσης και θα εκτονωνόταν σε χαμηλότερη πίεση στην έξοδο της. Στην συνέχεια, μέσω σωληνώσεων θα οδηγούνταν στην βαθμίδα χαμηλής πίεσης και θα εκτονωνόταν σε ακόμα χαμηλότερη πίεση. Τέλος, υπάρχουν και οι διασταυρούμενες διατάξεις (Cross compound casing) στις οποίες τα διαφορετικά κελύφη έχουν διαφορετικούς άξονες το κάθε ένα. Κατά τα άλλα ισχύουν όσα και στις διατάξεις εφ' ενός ζυγού. Οι συγκεκριμένες διατάξεις όταν χρησιμοποιούνται σαν κινητήριες μηχανές για την παραγωγή ενέργειας μπορεί να απασχολούν διαφορετική σύγχρονη γεννήτρια σε κάθε άξονα (στρόβιλος χαμηλής πίεσης, μέσης πίεσης, κοκ). Θα πρέπει ακόμα να σημειωθεί ότι, οι στρόβιλοι χαμηλής πίεσης συχνά κατασκευάζονται σαν δύο ξεχωριστοί στρόβιλοι ενωμένοι στις εισόδους τους όπως φαίνεται και στο μπλοκ "Χαμηλή Πίεση" του Σχ. 2.3. Σε αυτήν την περίπτωση η εισαγωγή ατμού γίνεται από το κέντρο και οι έξοδοι από τα άκρα. Αυτή η διάταξη επίσης θεωρείται διάταξη εφ' ενός ζυγού.

Έχει επικρατήσει, οι ατμοηλεκτρικοί σταθμοί, να χρησιμοποιούνται σαν μονάδες βάσης μιας και η εκκίνηση και η παύση τους είναι μια πολύπλοκη, ακριβή και χρονοβόρα διαδικασία. Επίσης χρονοβόρα είναι και η ρύθμιση

των στροφών τους ειδικά όταν η θερμική ενέργεια παράγεται από την καύση στερεών καυσίμων. Οι δυσκολίες της εκκίνησης των ατμοστροβιλικών μονάδων εκφράζονται με το κόστος και τον χρόνο εκκίνησης τους. Αυτά αυξάνονται με την πάροδο του χρόνου που μένουν εκτός λειτουργίας, αυτός ο χρόνος ονομάζεται και “χρόνος κράτησης”. Επίσης, επηρεάζονται ακόμα από το είδος του καυσίμου που χρησιμοποιείται και το μέγεθος της μονάδας. Ανάλογα με τον χρόνο που έχει μείνει εκτός λειτουργίας ένας τέτοιος σταθμός η εκκίνηση του διαχωρίζεται σε ψυχρή για μεγάλο χρόνο κράτησης και θερμή για μικρότερο. Στην ψυχρή εκκίνηση το κόστος και ο χρόνος εκκίνησης είναι μεγαλύτερα σε σχέση με αυτά της θερμής και είναι ανάλογα με τον χρόνο κράτησης. Για τους λόγους αυτούς οι ατμοστροβιλικοί σταθμοί λειτουργούν όλο το εικοσιτετράωρο με σταθερή παραγωγή ισχύος, λίγο μικρότερη της ονομαστικής τους, ενώ αποφεύγεται η κράτηση τους ακόμα και για μικρά χρονικά διαστήματα. Η εκκίνηση μιας ατμοστροβιλικής μονάδας διαρκεί από την στιγμή που ξεκινά η καύση του καυσίμου μέχρι την στιγμή του συγχρονισμού της με το σύστημα και την ζεύξη της σε αυτό. Για αυτό το χρονικό διάστημα η ισχύς εξόδου της γεννήτριας θεωρείται ότι αυξάνεται σχεδόν γραμμικά με μέγιστη τιμή την τιμή κανονικής λειτουργίας της μονάδας. Ο χρόνος εκκίνησης αυξάνεται ιδιαίτερα λόγω των καταπονήσεων που δέχονται τα μέταλλα εξαιτίας της διαφοράς θερμοκρασίας τους (εσωτερικό-εξωτερικό κελύφους), της διαφορικής διαστολής τους (στροφέιο-κέλυφος), των θερμικών τάσεων που αναπτύσσονται, των παραμορφώσεων των μετάλλων που μπορεί να προκύψουν και λόγω των ταλαντώσεων του στροβίλου τόσο κατά την εκκίνηση όσο και κατά την μεταβολή του φορτίου του. Για τον περιορισμό των καταπονήσεων και της επακόλουθης γήρανσης του ατμοστροβίλου λόγω κακού χειρισμού είναι απαραίτητο να ακολουθηθεί κατά γράμμα η διαδικασία που περιγράφεται από τον κατασκευαστή της μονάδας, για την εκκίνηση αυτής.

2.2. Αεριοστροβιλικοί Σταθμοί

Αντίθετα με τους ατμοηλεκτρικούς, οι αεριοστροβιλικοί σταθμοί παραγωγής έχουν δυνατότητα πολύ γρήγορης εκκίνησης όπως πολύ γρήγορη είναι επίσης η ρύθμιση των στροφών τους. Παρόλα αυτά ο βαθμός απόδοσης τους είναι σχετικά μικρός, κυμαίνεται γύρω στο 25%. Το κόστος καυσίμου αλλά και το λειτουργικό κόστος ενέργειας, ειδικά όταν χρησιμοποιούν ντίζελ, είναι πάρα πολύ υψηλό. Για τους λόγους αυτούς έχει επικρατήσει να χρησιμοποιούνται ως μονάδες κάλυψης της αιχμής ζήτησης. Είναι και αυτές θερμικές μηχανές οι οποίες εκμεταλλεύονται την καύση υγρού ή αέριου καυσίμου για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

Ένας αεριοστροβιλικός σταθμός παραγωγής συντελείται από μια ή περισσότερες μονάδες. Κάθε μια από αυτές αποτελείται από τέσσερα βασικά μέρη: το συμπιεστή, το θάλαμο καύσης, τον αεριοστρόβιλο και την τριφασική σύγχρονη γεννήτρια. Κάποια από τα καύσιμα που έχει επικρατήσει να χρησιμοποιούνται σε τέτοιου τύπου μονάδες είναι το πετρέλαιο (ντίζελ), το φυσικό αέριο (LNG) και το υγραέριο (LPG). Για να γίνει αντιληπτή η λειτουργία των αεριοστροβιλικών μονάδων αξίζει να συσχετιστούν με την παραγωγή περιστροφικής κίνησης όταν ο αποθηκευμένος αέρας σε ένα μπαλόνι εκτονώνεται σε μια φτερωτή. Τον ρόλο της φτερωτής παίζει ο στρόβιλος, το πρόβλημα στο συγκεκριμένο παράδειγμα είναι ότι ενώ όσο η πίεση στο εσωτερικό του μπαλονιού τείνει να εξισωθεί με αυτήν του περιβάλλοντος τόσο μειώνεται και η ροή του αέρα στα πτερύγια της φτερωτής και έτσι αυτή σταματά να περιστρέφεται. Για να αποφευχθεί αυτή η κατάληξη θα πρέπει ο αέρας στο εσωτερικό του μπαλονιού να συμπληρώνεται συνεχώς ώστε τόσο η πίεση όσο και η ροή του αέρα να παραμένει συνεχής. Τη λειτουργία αυτή αναλαμβάνει ο συμπιεστής. Η εμπειρία αλλά και οι νόμοι της φυσικής δείχνουν ότι αν ανέβει η θερμοκρασία ενός ρευστού θα αυξηθεί και η πίεση του. Αυτό επιτυγχάνεται με την εισαγωγή του καυσίμου στον θάλαμο με τον υπό πίεση αέρα και την ανάφλεξη του. Η αύξηση της θερμοκρασίας έχει σκοπό να αυξήσει το ενεργειακό περιεχόμενο του αέρα που ρέει ανάμεσα από τα πτερύγια του στροβίλου αυξάνοντας έτσι την μηχανική ισχύ που αποδίδει.

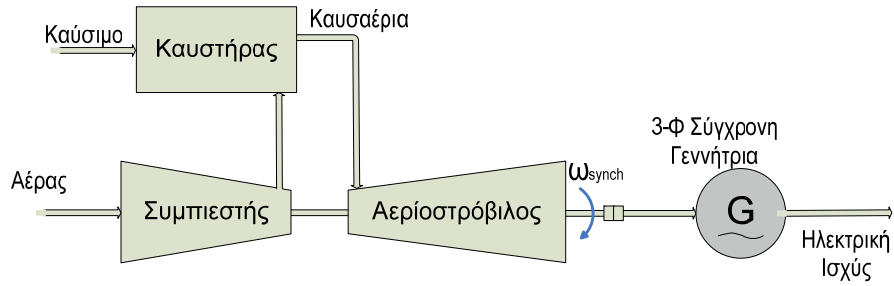
Η όλη διαδικασία βασίζεται στην χρήση του συμπιεστή ο οποίος κατά την εκκίνηση περιστρέφεται μέσω άλλης μηχανής ενώ στην κανονική λειτουργία εκμεταλλεύεται μέρος της ενέργειας που παράγει ο στρόβιλος. Ο συμπιεστής και ο στρόβιλος είναι όμοιες μηχανές με την διαφορά ότι η ροή του αέριου μέσου είναι αντίθετη άρα και η λειτουργία τους είναι αντίθετη. Ο συμπιεστής τραβάει αέρα από την πλατιά του περιφέρεια και μέσω διαδοχικών φτερωτών όμοιας λογικής με αυτήν του στροβίλου (εναλλάξ σταθερά και στρεφόμενα πτερύγια) οδηγεί το αέριο μέσω προς τον θάλαμο καύσης. Για κάθε βαθμίδα πτερυγίων που πλησιάζει τον θάλαμο καύσης η διάμετρος των πτερυγίων μειώνεται και άρα ο χώρος στον οποίο είναι ελεύθερο να κινείται το αέριο. Με αυτόν τον τρόπο το αέριο μέσο εισέρχεται στον θάλαμο καύσης με αυξημένη την πίεση του δημιουργώντας ιδανικές συνθήκες για αυτόανάφλεξη του καυσίμου. Υπάρχουν δύο είδη συμπιεστών ο ακτινικός ή φυγοκεντρικός και ο αξονικός.

- Ακτινικός συμπιεστής (radial compressor). Αυτή η διάταξη αποτελείται από ένα περιστρεφόμενο δίσκο πάνω στον οποίο είναι προσαρμοσμένα τα πτερύγια, είτε μόνο από την μία του πλευρά είτε και από τις δύο. Η ροή αέρα γίνεται κάθετα στον δίσκο ξεκινώντας από το κέντρο του ενώ λόγω τις περιστροφής αναγκάζεται να φυγοκεντριστεί προς την περιφέρεια της φτερωτής. Στην περίπτωση που τα πτερύγια

βρίσκονται και από τις δύο πλευρές του δίσκου χρησιμοποιείται κατάλληλη διάταξη αεραγωγών εισόδου αέρος ώστε η ίδια διαδικασία να συμβαίνει ταυτόχρονα και στις δύο πλευρές. Τα πτερύγια είτε ακολουθούν καθαρά ακτινική πορεία από το κέντρο προς την περιφέρεια οπότε παρουσιάζουν ευκολία στην κατασκευή τους, είτε έχουν ελαφρά κλίση στην φορά της περιστροφής οπότε επιτυγχάνεται μεγαλύτερος βαθμός απόδοσης. Ο δίσκος αυτός περιστρέφεται εντός κελύφους ενώ είναι μηχανικά συνδεδεμένος στον άξονα της μηχανής. Για να είναι δυνατή η περιστροφή το κέλυφος και τα πτερύγια απέχουν μεταξύ τους. Το διάκενο ανάμεσα στην περιφέρεια του δίσκου και του κελύφους είναι πολύ μικρή για να αποφεύγονται μεγάλες διαρροές αέρος αλλά αρκετά μεγάλο ώστε να μην υπάρχει φόβος επαφής λόγω φυγοκεντρικών δυνάμεων και διαφορετικών συντελεστών διαστολής. Μετά τον ακτινικό συμπιεστή ο αέρας οδηγείται σε μια βαθμίδα σταθερών πτερυγίων ή ακροφυσίων τα οποία ονομάζονται διασκορπιστές, αυτά αποτελούν το διαχύτη. Ο διαχύτης αποτελεί ένα ξεχωριστό εξάρτημα αλλά μπορεί να είναι και μέρος του κελύφους του συμπιεστή. Η διατομή του διαχύτη είναι μεγαλύτερη στην έξοδο από ότι στην είσοδο με αποτέλεσμα να μειώνεται η ταχύτητα του αέριου μέσου και να αυξάνεται η πίεση του. Ο συμπιεστής είναι σε κοινό άξονα με τον στρόβιλο ενώ ανάμεσα τους μπορεί να παρεμβάλλεται διαιρούμενος συμπλέκτης για ευκολότερη συντήρηση ή αντικατάσταση του συμπιεστή και του στρόβιλου. Ο άξονας και το κέλυφος ενώνονται μόνο μέσω στρεφόμενων τριβείων τα οποία μπορεί να σφαιρικά, κυλινδρικά ή κωνικά.

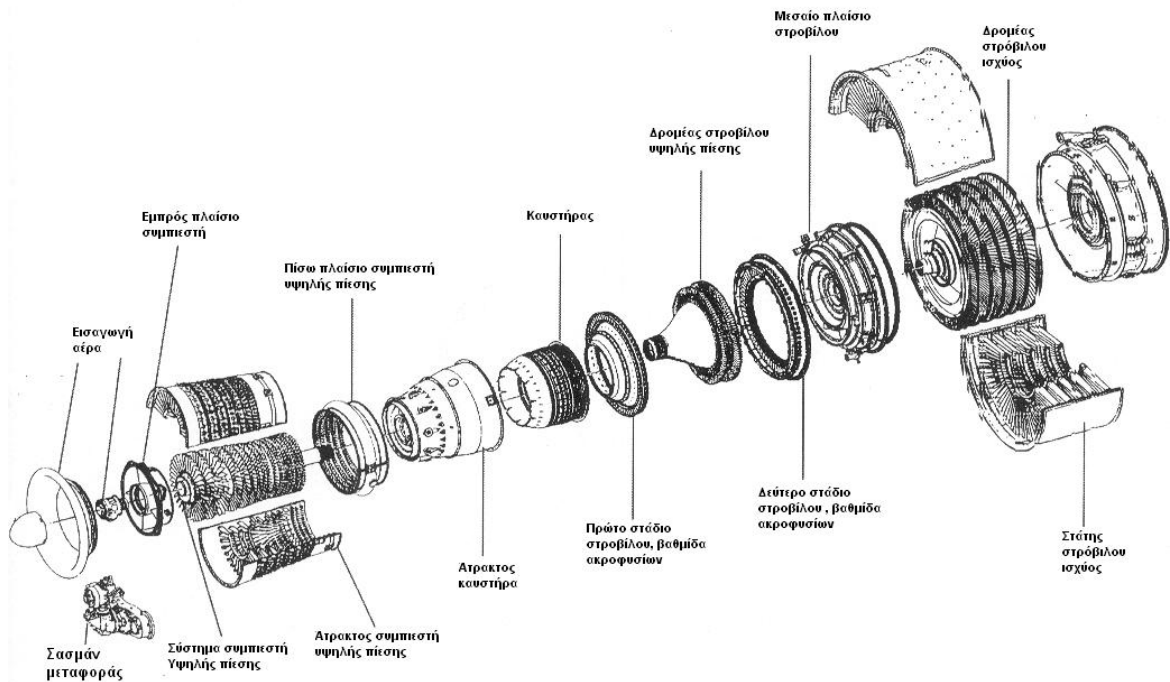
- **Αξονικός συμπιεστής (axial compressor).** Η βασική διαφορά του αξονικού συμπιεστή σε σχέση με τον ακτινικό είναι ότι αυτός έχει πολλές βαθμίδες. Κάθε μια από αυτές αποτελείται από μία στρεφόμενη φτερωτή η οποία στηρίζεται στον άξονα και μια σταθερή με τα πτερύγια μηχανικά συνδεδεμένα στο κέλυφος και αντίθετα συστραμμένα σε σχέση με τα κινούμενα. Με την ροή του αέρα μέσω της στρεφόμενης φτερωτής αυξάνεται η κινητική του ενέργεια καθώς και η πίεση του. Όταν το εργαζόμενο μέσο στην συνέχεια ρέει εντός των σταθερών πτερυγίων επιβραδύνεται ενώ ταυτόχρονα αυξάνεται επιπρόσθετα η πίεση του. Επίσης, τα σταθερά πτερύγια αναγκάζουν το εργαζόμενο μέσο να πάρει κατάλληλη φορά ώστε να εισέλθει με τον αποδοτικότερο τρόπο στην επόμενη βαθμίδα. Εξαιρέση αποτελεί η τελευταία βαθμίδα στην οποία τα σταθερά πτερύγια αναγκάζουν το εργαζόμενο μέσο να πάρει αξονική κατεύθυνση ώστε να εισέλθει ταχύτερα και με ευθύγραμμο τρόπο στον θάλαμο καύσης. Η γωνία των πτερυγίων σε σχέση πρέπει να είναι κατάλληλη ώστε να ακολουθείται η διεύθυνση της ροής, ενώ σε διαφορετική περίπτωση η απόδοση του συμπιεστή επηρεάζεται σημαντικά. Πολλές φορές δημιουργείται η ανάγκη λειτουργίας σε κάποιο σημείο διαφορετικό του σημείου κανονικής λειτουργίας αλλά παρόλα αυτά με την απαίτηση να διατηρηθεί η απόδοση σε υψηλά επίπεδα. Για αυτό το λόγο αναπτύχθηκε η τεχνική της μεταβολής της γωνίας (pitch) των σταθερών πτερυγίων του συμπιεστή σε σχέση με τον άξονα του, οπότε και ονομάζονται πτερύγια μεταβλητής γεωμετρίας. Όσο το εργαζόμενο μέσο πλησιάζει στην έξοδο αυξάνεται τόσο η πίεση του όσο και η πυκνότητα του, αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να μειώνεται ο όγκος του. Για να διατηρηθεί σταθερή η ταχύτητα του κατά την αξονική διεύθυνση επιβάλλεται να μειωθεί η διατομή του συμπιεστή από την είσοδο στην έξοδο. Από όσα αναφέρθηκαν μέχρι στιγμής προκύπτει ότι στις βαθμίδες υψηλότερης πίεσης, δηλαδή, προς την έξοδο το διάκενο ανάμεσα στα στρεφόμενα πτερύγια και το κέλυφος είναι αρκετά μικρότερο σε σχέση με αυτό πιο κοντά στην είσοδο του συμπιεστή. Όταν όλες οι στρεφόμενες βαθμίδες του δρομέα σε ένα αξονικό συμπιεστή είναι σε κοινό άξονα και περιστρέφονται με κοινή γωνιακή ταχύτητα τότε αυτός ονομάζεται μονού τυμπάνου (single spool). Υπάρχει περίπτωση ορισμένες από τις βαθμίδες του συμπιεστή να είναι ομαδοποιημένες και να περιστρέφονται με διαφορετική γωνιακή ταχύτητα από ότι οι υπόλοιπες, τότε ο συμπιεστής ονομάζεται πολλαπλού τυμπάνου (multi spool compressor). Σε αυτή την διάταξη χρησιμοποιούνται εμφωλιασμένοι ομόκεντροι άξονες ο καθένας από τους οποίους έχει την δική του γωνιακή ταχύτητα και τις ανάλογες βαθμίδες μηχανικά συνδεδεμένες πάνω του. Οι πιο συνηθισμένες περιπτώσεις είναι αυτές του διπλού τυμπάνου ενώ κάθε ένας από τους άξονες του συμπιεστή παίρνει κίνηση από αντίστοιχες διαφορετικές βαθμίδες του στρόβιλου.

Οι ακτινικοί συμπιεστές χρησιμοποιούνται ως επί το πλείστον σε μικρής ισχύος εφαρμογές αντίθετα με τους αξονικούς που προτιμώνται σε υψηλότερες απαιτήσεις ισχύος. Οι ακτινικοί συμπιεστές είναι πιο συμπαγείς σαν κατασκευή, δηλαδή, παρόλο που έχουν μικρότερο βάρος και όγκο επιτυγχάνουν μεγάλη αύξηση πίεσης με λόγους πίεσης εξόδου προς εισόδου να φτάνουν το 9/1. Ο αντίστοιχος λόγος πίεσης σε μια πολύ αποδοτική βαθμίδα αξονικού συμπιεστή δεν ξεπερνά το 1.8/1. Ακόμα οι φυγοκεντρικοί συμπιεστές έχουν μεγαλύτερη αντοχή στην είσοδο ξένων σωματιδίων και στην επικάλυψη των πτερυγίων τους από στρώματα άλλων υλικών. Οι αξονικοί συμπιεστές από την άλλη πλευρά διαχειρίζονται μεγαλύτερες παροχές αέρα για ίδια μετωπική επιφάνεια με έναν αντίστοιχο φυγοκεντρικό. Όσο για τον χαμηλό λόγο πίεσης που παρουσιάζουν οι αξονικοί συμπιεστές μπορεί να αντιμετωπιστεί με την προσθήκη πολλών βαθμίδων όπως και συνηθίζεται άλλωστε. Τέλος θα πρέπει να αναφερθεί ότι οι αξονικοί συμπιεστές έχουν επικρατήσει σε εφαρμογές με μεγάλες απαιτήσεις ισχύος λόγω του υψηλότερου βαθμού απόδοσης τους και άρα την μικρότερη κατανάλωση καυσίμου για την ίδια συμπίεση.



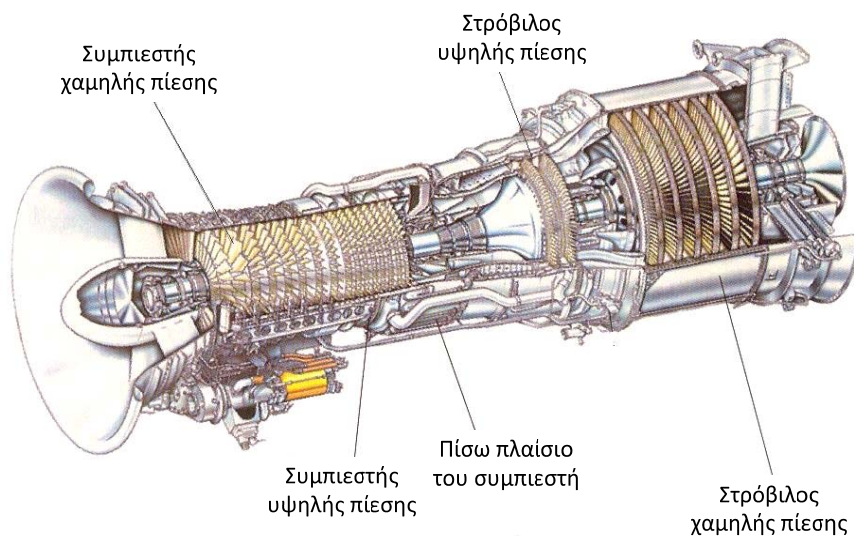
Σχ. 2.8. Μοντέλο αεριοστροβιλικής μονάδας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας ανοιχτού κυκλώματος.

Όπως αναφέρθηκε και στην εισαγωγή οι αεριοστρόβιλοι είναι και αυτοί μηχανές εσωτερικής καύσης και η λειτουργία τους βασίζεται στον κύκλο των Joule-Brayton. Έχουν σε κοινό άξονα ένα συμπιεστή, ο οποίος ουσιαστικά αντιστρέφει την διαδικασία του στρόβιλου, έναν χώρο καύσης και ένα στρόβιλο. Ο συμπιεστής, ο οποίος μπορεί να είναι φυγοκεντρικός ή ακτινικός, δέχεται τον ατμοσφαιρικό αέρα και περνώντας τον από μια σειρά ελίκων, όμοιους με αυτούς που αναφέρθηκαν στους ατμοστρόβιλους αλλά αντίθετης φοράς ροής, αυξάνει την πίεση του. Ο συμπιεσμένος αέρας στην συνέχεια επιβραδύνεται μέσω ενός ακροφυσίου που λέγεται διασκορπιστής και είναι συνήθως η τελευταία βαθμίδα ελίκων του συμπιεστή. Κατά την διάρκεια αυτής της διαδικασίας κάποιο μέρος της ενέργειας του αέρα χάνεται σε θερμότητα λόγω τριβών, αλλά αυξάνεται τόσο η πίεση όσο και η θερμοκρασία του ατμοσφαιρικού αέρα. Στην συνέχεια ο θερμότερος και υπό πίεση αέρας οδηγείται στον θάλαμο καύσης μαζί με το επιλεγμένο υγρό ή αέριο καύσιμο και αναφλέγεται λόγω της υψηλής θερμοκρασίας. Αυτή η διαδικασία πρακτικά έχει κάποιες μικρές απώλειες πίεσης παρόλα αυτά ο όγκος των αερίων αυξάνεται λόγω της καύσης του καυσίμου. Τέλος ο μεγαλύτερος αυτός όγκος αερίων εκτονώνεται και επιταχύνεται μέσω ψευδοακροφυσίων που δημιουργούνται ανάμεσα στα πτερύγια των σταθερών (οδηγών) βαθμίδων του στρόβιλου και μέρος της ενέργειας τους μετατρέπεται σε μηχανική (περιστροφή). Είναι απαραίτητο στην έξοδο να υπάρχει αρκετά μεγάλη πίεση ώστε τα καυσαέρια να απομακρύνονται πλήρως. Όπως και στις εμβολοφόρες μηχανές, με υψηλότερη θερμοκρασία καύσης επιτυγχάνονται υψηλότεροι βαθμοί απόδοσης. Παρόλα αυτά οι θερμοκρασίες περιορίζονται λόγω της δυνατότητας των υλικών από τα οποία είναι κατασκευασμένοι οι αεριοστρόβιλοι να απάγουν την θερμότητα. Για την καταπολέμηση αυτού του φαινομένου οι κατασκευαστές προσαρμόζουν περίπλοκα συστήματα ψύξης των πτερυγίων. Τα έδρανα ώθησης και τα έδρανα άξονα είναι από τις σημαντικότερες παραμέτρους της κατασκευής τέτοιων μηχανών.



Εικ. 2.2. Συναρμολόγηση βασικών εξαρτημάτων ενός αεριοστρόβιλου.

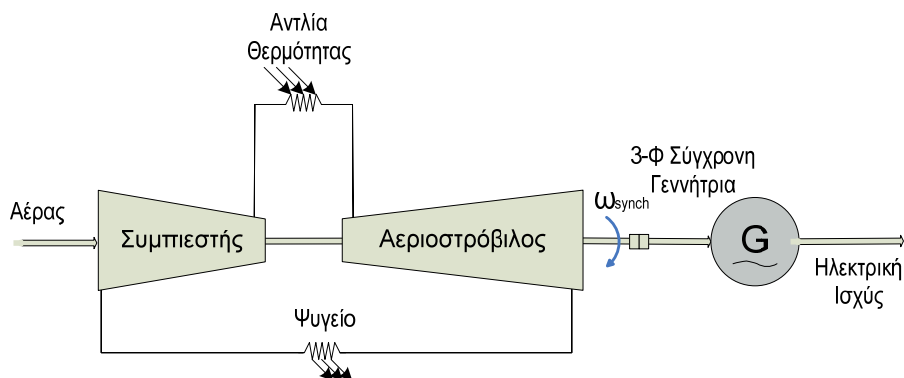
Ο χρόνος κατασκευής τέτοιων μονάδων είναι πολύ μικρότερος από αυτό των αντίστοιχων μονάδων βάσης όπως των ατμοηλεκτρικών σταθμών για παράδειγμα. Η θερμοκρασία εισόδου των καυσαερίων από τον θάλαμο καύσης είναι περίπου 850 °C ενώ μετά την εκτόνωση στον στρόβιλο, η θερμοκρασία τους πέφτει περίπου στους 600 °C. Ο χαμηλός βαθμός απόδοσης που αναφέρθηκε προηγουμένως οφείλεται εν μέρει στην υψηλή θερμοκρασία εξόδου των καυσαερίων. Εκμεταλλευόμενοι αυτήν ακριβώς την υψηλή θερμοκρασία των καυσαερίων, δημιουργήθηκαν διάφορες μονάδες συμπαραγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας ή οι σταθμοί παραγωγής συνδυασμένου κύκλου. Στους σταθμούς συνδυασμένου κύκλου, ουσιαστικά τα πολύ ζεστά καυσαέρια της αεριοστροβιλικής μονάδας χρησιμοποιούνται για να ζεστάνουν νερό μέχρι να εξατμιστεί ώστε να λειτουργήσει μία ατμοστροβιλική μονάδα. Ο συνολικός βαθμός απόδοσης σε μια τέτοια μονάδα ξεπερνά το 50% ενώ λόγω του κύκλου του ατμού η ρύθμιση δεν είναι τόσο γρήγορη όσο με την απλή αεριοστροβιλική μονάδα. Ένας άλλος λόγος στον οποίο οφείλεται ο χαμηλός βαθμός απόδοσης αυτών των μονάδων είναι το γεγονός ότι μέρος της μηχανικής ισχύος που παράγεται χρησιμοποιείται για την τροφοδοσία του συμπιεστή.



Εικ. 2.3. Αριοστρόβιλος τύπου LM 2500.

Κάποια άλλα χαρακτηριστικά των αεριοστροβιλικών μονάδων που τις διαχωρίζουν από τις υπόλοιπες θερμικές μονάδες είναι ότι η διαδικασία παραγωγής ενέργειας περιλαμβάνει μονάχα περιστροφική κίνηση αντίθετα με τις εμβολοφόρες μηχανές εσωτερικής καύσης. Για τον λόγο αυτό η ροπή εξόδου έχει καλύτερη ομοιομορφία ενώ μειώνονται και η ανάγκες συντήρησης καθώς και ο χρόνος λειτουργίας ανάμεσα στις αναγκαστικές διακοπές για λόγους συντήρησης. Ακόμα θα πρέπει να σημειωθεί ότι πρόκειται για μηχανές σταθερής πίεσης αντίθετα με τις εμβολοφόρες στις οποίες η πίεση μεταβάλλεται ανάλογα με τον χρόνο της καύσης στον οποίο βρίσκονται. Οι αεριοστρόβιλοι μπορούν να διαχωριστούν ανάμεσα σε κλειστού και ανοιχτού κυκλώματος. Στους πρώτους το εργαζόμενο μέσο (εκτός από ατμοσφαιρικός αέρας μπορεί να είναι και ήλιο ή υδρογόνο) θερμαίνεται μέσω ενός εναλλάκτη θερμότητας στο σημείο που θα υπήρχε ο θάλαμος καύσης και αφού εκτονωθεί μέσω του στρόβιλου ψύχεται και οδηγείται ξανά στον συμπιεστή. Αντίθετα στους αεριοστρόβιλους ανοιχτού κυκλώματος ο συμπιεστής δέχεται σαν είσοδο ατμοσφαιρικό αέρα και τα προϊόντα της καύσης απελευθερώνονται στο περιβάλλον. Στους αεριοστρόβιλους κλειστού κυκλώματος ο αέρας διατηρεί υψηλή πίεση σε ολόκληρο τον κύκλο γεγονός το οποίο συνεπάγεται αύξηση της παραγόμενης ισχύος από συγκεκριμένων διαστάσεων μηχανή. Δίνεται ακόμα σε αυτού του τύπου τις μηχανές δυνατότητα δευτερεύουσας ρύθμισης μέσω της πίεσης του εισερχόμενου αέρα χωρίς δηλαδή να μεταβληθεί η παροχή του καυσίμου και άρα η θερμοκρασία του αερίου. Με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται υψηλότερος βαθμός απόδοσης για μεγαλύτερο εύρος φόρτισης της μηχανής. Ένα ακόμα πλεονέκτημα των μηχανών αυτών είναι ότι δεν απαιτείται φιλτράρισμα του ατμοσφαιρικού αέρα αφού το εργαζόμενο μέσο βρίσκεται σε κλειστό κύκλωμα. Η παράληψη του συστήματος φιλτραρίσματος είναι πολύ σημαντική μιας και πρόκειται για μια από τις συνηθέστερες αιτίες αστοχίας αυτών των μηχανών. Επίσης επειδή τα προϊόντα της καύσης δεν διαρρέουν τον στρόβιλο σε αυτές τις μηχανές υπάρχουν εμφανώς λιγότερες διαβρώσεις στα μέταλλα του. Το βασικό μειονέκτημα των αεριοστροβίλων

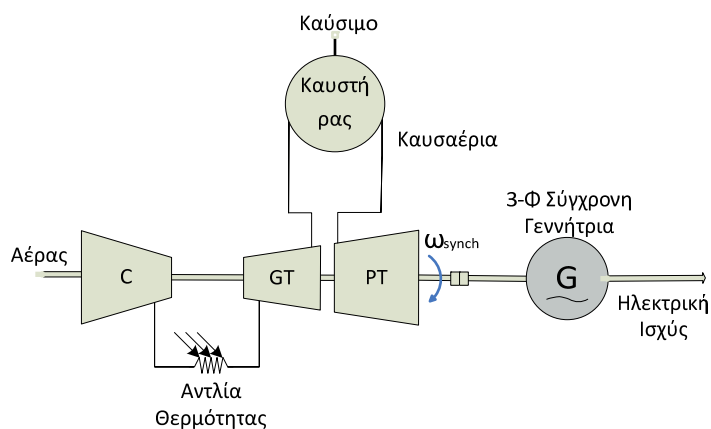
κλειστού κυκλώματος είναι ότι η προσφορά θερμότητας γίνεται μέσω εναλλάκτη θερμότητας υπάρχει θερμικό όριο εξ' αιτίας των μετάλλων του εναλλάκτη με αποτέλεσμα να περιορίζεται ο βαθμός απόδοσης της μηχανής.



Σχ. 2.9. Μοντέλο αεριοστροβιλικής μονάδας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας κλειστού κυκλώματος.

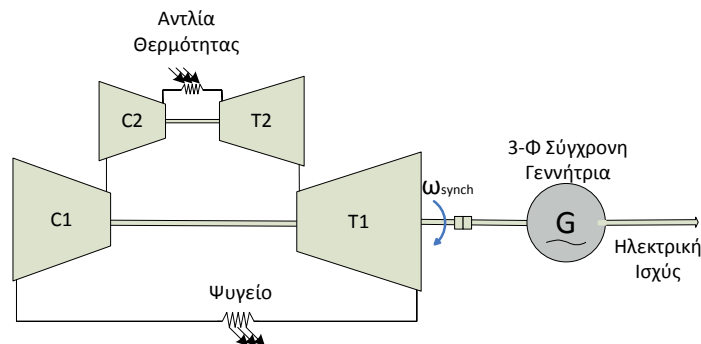
Ένας άλλος διαχωρισμός μπορεί να γίνει ανάλογα με το μέγεθος τους, όπου οι στρόβιλοι ονομαστικής ισχύος μεγαλύτερης των 12 MW θεωρούνται βαρέως φορτίου. Οι στρόβιλοι των οποίων η ισχύς είναι μεγαλύτερη από 4 MW αλλά μικρότερη από 12 MW, θεωρούνται μεσαίου μεγέθους. Ενώ οι μικρότερης ισχύος μηχανές θεωρούνται μικροί αεριοστρόβιλοι. Θα πρέπει να αναφερθεί σε αυτό το σημείο ότι ο βαθμός απόδοσης των μηχανών πέφτει όσο μειώνεται το μέγεθος τους δεδομένου ότι με την μείωση του μεγέθους είναι δυσκολότερη η ψύξη των πτερυγίων του συμπιεστή και του στροβίλου. Παρόλο που έχει ήδη περιγραφεί η βασική μορφή των μονάδων αυτών, υπάρχουν ωστόσο αρκετές παραλλαγές οι οποίες έχουν σκοπό να βελτιώσουν κάποια χαρακτηριστικά των μηχανών. Κάποιες από τις διατάξεις της ατράκτου των μηχανών αυτών είναι οι παρακάτω:

- Απλής ατράκτου (single shaft), πρόκειται για την λιγότερο σύνθετη διάταξη στην οποία ο συμπιεστής, ο στρόβιλος και το φορτίο βρίσκονται σε κοινό άξονα. Με αυτή την διάταξη επιτυγχάνεται καλύτερη ρύθμιση των στροφών αφού στην στρεφόμενη μάζα του στροβίλου προστίθεται και αυτή της σύγχρονης γεννήτριας με αποτέλεσμα να είναι λιγότερο επιρρεπής σε μεταβολές του φορτίου.
- Διπλής ατράκτου (twin shaft), σε αυτήν την διάταξη χρησιμοποιούνται σε κοινό άξονα ένας συμπιεστής και δύο βαθμίδες στροβίλου. Η πρώτη βαθμίδα στροβίλου παράγει ακριβώς την ενέργεια που χρειάζεται ο συμπιεστής και ονομάζεται αεριογόνος. Η δεύτερη βαθμίδα χρησιμοποιεί την έξοδο της πρώτης βαθμίδας για να εξυπηρετήσει το φορτίο, για αυτό και ονομάζεται στρόβιλος ισχύος (Power Turbine, PT). Δεδομένου ότι η έξοδος του αεριογόνου χρησιμοποιείται ξανά από τον στρόβιλο ισχύος, ο πρώτος θα πρέπει αναγκαστικά να χρησιμοποιεί αντλία θερμότητας και όχι καυστήρα, ενώ για την δεύτερη βαθμίδα δεν υπάρχει περιορισμός. Με την διάταξη αυτή οι μεταβολές του φορτίου έχουν μεγαλύτερη επίδραση στις στροφές άρα απαιτείται πιο ευαίσθητο σύστημα ελέγχου για να διατηρηθούν εντός επιθυμητών ορίων.



Σχ. 2.10. Αεριοστρόβιλος διπλής ατράκτου με αντλία θερμότητας στον αεριογόνο και καυστήρα στο στρόβιλο ισχύος (C:συμπιεστής, GT:αεριογόνος, PT:στρόβιλος ισχύος).

- Διπλού τυμπάνου (twin spool), εδώ πρόκειται για μια διάταξη με δυο ξεχωριστούς άξονες κάθε ένας από τους οποίους περιλαμβάνει μια βαθμίδα στροβίλου και συμπιεστή και είναι εγκατεστημένες σε δύο ομόκεντρους ατράκτους. Στην ουσία τόσο ο συμπιεστής όσο και ο στρόβιλος χωρίζονται σε δύο διαφορετικές βαθμίδες, οι οποίες στρέφονται σε διαφορετικές στροφές, αφού είναι απαραίτητο λόγω της κατασκευής τους. Η διάταξη αυτή μπορεί να εμφανιστεί τόσο σε μηχανές απλής ατράκτου όσο και σε μηχανές διπλής ατράκτου, ενώ στην δεύτερη περίπτωση μόνο ο αεριογόνος είναι διπλού τυμπάνου.



Σχ. 2.11. Αεριοστρόβιλος διπλού τυμπάνου κλειστού κυκλώματος. (C1:συμπιεστής χαμηλής πίεσης, C2: συμπιεστής υψηλής πίεσης, T1:στρόβιλος χαμηλής πίεσης, T2:στρόβιλος υψηλής πίεσης).

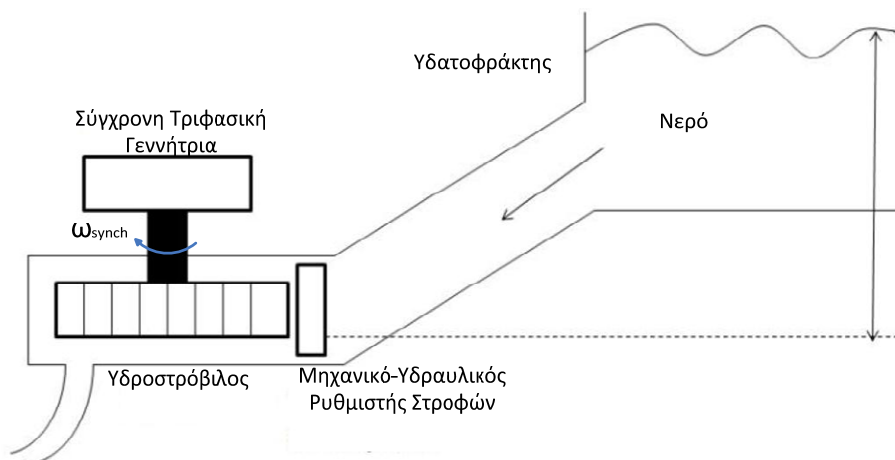
Κλείνοντας την παράγραφο αυτή, θα πρέπει να αναφερθεί ότι στους αεριοστρόβιλους το κέλυφος της μηχανής έχει και αυτό δύο τρόπους κατασκευής. Είτε αποτελείται από κυλινδρικά τμήματα συνδεδεμένα μεταξύ τους και τα οποία έχουν μήκος ίσο με την βαθμίδα την οποία περικλείουν, είτε από δύο ημικυλινδρικά τμήματα τα οποία το ένα είναι στο έδαφος και το άλλο σκεπάζει το δρομέα. Και στις δύο περιπτώσεις απαιτείται μεγάλη ακρίβεια κατά την συναρμολόγηση αφού οι ανοχές ανάμεσα στα πτερύγια και το κέλυφος είναι πολύ μικρές. Επίσης θα πρέπει να δωθεί μεγάλη προσοχή στον υπολογισμό του κέντρου του κελύφους μιας και οποιοδήποτε απόκλιση του άξονα από αυτό θα μπορούσε να έχει καταστροφικές συνέπειες για την μηχανή.

2.3. Υδροηλεκτρικοί Σταθμοί

Εάν συγκεντρωθεί το νερό μιας φυσικής ροής σε μια υψηλότερη στάθμη και οδηγηθεί σε μία χαμηλότερη μέσω ενός κλειστού αγωγού, τότε είναι δυνατή η μετατροπή της δυναμικής ενέργειας του σε μηχανική. Η μηχανή που μετατρέπει την ενέργεια από την πρώτη μορφή στην δεύτερη ονομάζεται υδροστρόβιλος. Συνδέοντας στον άξονα του υδροστροβίλου μια σύγχρονη τριφασική γεννήτρια, απευθείας ή μέσω ενός συστήματος με γραναζωτή μετάδοση, η μηχανική αυτή ενέργεια μετατρέπεται σε ηλεκτρική. Η παραγωγή ενέργειας από υδροηλεκτρικούς σταθμούς (ΥΗΣ) μπορεί να είναι φιλική προς το περιβάλλον, αλλά δεν είναι δυνατό να γίνει οπουδήποτε. Απαιτείται συγκεκριμένο ανάγλυφο εδάφους και περιοχές στις οποίες έχουμε συχνές βροχοπτώσεις. Η δυναμική ενέργεια του νερού είναι ανανεώσιμη δεδομένου ότι η επιφανειακή απορροή είναι αποτέλεσμα του υδρολογικού κύκλου. Κατά τον υδρολογικό κύκλο οι λεκάνες απορροής τροφοδοτούνται με νερό μέσω των βροχοπτώσεων και των χιονοπτώσεων, κατά την υγρή περίοδο. Στην συνέχεια, το νερό αυτό οδηγείται στη θάλασσα από όπου εξατμίζεται και επαναλαμβάνει την διαδρομή του. Ένας υδροηλεκτρικός σταθμός μπορεί να αποτελείται από έναν ή περισσότερους υδροστρόβιλους (συνήθως περισσότερους για λόγους συντήρησης) οι οποίοι λειτουργούν και μοντελοποιούνται σαν ένας. Καθένας από αυτούς αποτελείται από: το υδραυλικό σύστημα παροχής και απαγωγής για την υδροληψία στους υδροστροβίλους, μια βαλβίδα ελέγχου της παροχής του νερού στον υδροστρόβιλο, τον υδροστρόβιλο και την σύγχρονη τριφασική γεννήτρια.

Ανάλογα με το αν το νερό προέρχεται από την συνεχή ροή ενός ποταμού ή από μια δεξαμενή, οι υδροηλεκτρικοί σταθμοί χωρίζονται σε σταθμούς φυσικής ροής και σταθμούς δεξαμενής αντίστοιχα. Στους σταθμούς δεξαμενής ανήκουν και οι υδροαντλητικοί σταθμοί. Οι σταθμοί φυσικής ροής χρησιμοποιούνται ως επί το πλείστον σαν μονάδες βάσης μιας και έχουν υψηλότερους βαθμούς απόδοσης, 80-92%, ενώ η εκκίνηση και η ρύθμιση ισχύος τους είναι σχετικά απλή και γρήγορη. Η εκκίνηση τους μάλιστα είναι ταχύτατη, μπορούν να φτάσουν από το μηδέν στην ονομαστική τους ισχύ σε ελάχιστο χρόνο (περίπου ένα λεπτό). Οι σταθμοί δεξαμενής αντιθέτως δεν είναι ξεκάθαρο τί σειρά ένταξης έχουν. Σε περιόδους μεγάλης ζηρασίας, καλύπτουν μονάχα τις αιχμές του δικτύου. Αντίθετα σε περιόδους μεγάλων βροχοπτώσεων μπορούν να χρησιμοποιηθούν ακόμα και

σαν μονάδες βάσης. Οι υδροαντλητικοί σταθμοί χρησιμοποιούνται σαν αποθήκες ενέργειας (αντλησιοταμίευση). Είναι σύνηθες να αντλούν νερό σε περιόδους χαμηλής ζήτησης ηλεκτρικής ισχύος (φτηνή kWh) για να το ξαναχρησιμοποιήσουν αντίστροφα παράγοντας ενέργεια στις αιχμές του δικτύου. Έτσι είναι δυνατό να αντικαταστήσουν τους σταθμούς αιχμής (π.χ. αεριοστρόβιλους) οι οποίοι παράγουν μεν ενέργεια κατά βούληση αλλά με μεγαλύτερο κόστος (€/kWh).



Σχ. 2.12. Μοντέλο υδροηλεκτρικής μονάδας.

Οι υδροηλεκτρικές μονάδες εκμεταλλεύονται την δυναμική ή κινητική (υδραυλική) ενέργεια του νερού μετατρέποντας την σε ηλεκτρική με τρόπο όμοιο με τις θερμικές μονάδες με την χρήση δηλαδή σύγχρονων γεννητριών. Η ιδέα κάθε άλλο παρά καινούρια είναι αφού έχει χρησιμοποιηθεί για την κίνηση μύλων για να επεξεργαστεί το σιτάρι σε αλεύρι σε εγκαταστάσεις πλησίον ποταμών. Είναι προφανές ότι πλέον οι υδροηλεκτρικές μονάδες έχουν βελτιωθεί κατά πολύ προσφέροντας καλύτερο βαθμό απόδοσης και αισθητικά ομορφότερες εγκαταστάσεις. Θα θεωρούσε κανείς ότι ο συγκεκριμένος τρόπος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας είναι απόλυτα φιλικός προς το περιβάλλον αλλά στην πραγματικότητα έχει αποδειχθεί ότι στις περιπτώσεις που χρησιμοποιείται σε κοίτες ποταμών δημιουργεί κάποιου είδους φύκια τα οποία βλάπτουν την υποβρύχια πανίδα και χλωρίδα. Επίσης παρόλο που έχουν μηδενικό κόστος καυσίμου η εγκατάστασή τους πολλές φορές κοστίζει πολύ περισσότερο από ότι μια αντίστοιχη κλίμακας θερμική μονάδα. Αυτό συμβαίνει λόγω των πολλών δομικών έργων που πρέπει να πραγματοποιηθούν για την εγκατάσταση τέτοιου είδους σταθμών παραγωγής. Μια ακόμα διαφορά από τους θερμικούς σταθμούς είναι ότι ενώ με τους θερμικούς σταθμούς μπορεί να γίνει εγκατάσταση οπουδήποτε, οι υδροηλεκτρικοί μπορούν να εγκατασταθούν μόνο σε περιοχές όπου το υδραυλικό δυναμικό είναι κατάλληλο. Για αυτό το λόγο υπάρχει περίπτωση η ιδανική τοποθεσία για εγκατάσταση να είναι απομακρυσμένη με αποτέλεσμα να απαιτούνται περισσότερα έργα οδοποιίας για να μεταφερθούν τα υλικά, τα εξαρτήματα και το προσωπικό στο εργοτάξιο. Το βασικό πλεονέκτημα βέβαια αυτών των μονάδων είναι ότι το νερό δεν καταστρέφεται μετά την ηλεκτροπαραγωγική διαδικασία οπότε μπορεί να χρησιμοποιηθεί για άρδευση ή άλλες κοινωφελείς εργασίες. Όσο μεγαλύτερο είναι το μέγεθος ενός υδροηλεκτρικού σταθμού τόσο μικρότερο είναι το ποσοστιαίο κόστος των λοιπών εργασιών οι οποίες είναι άσχετες με την λειτουργία του σταθμού. Πολύ συχνά οι μονάδες κατασκευάζονται σε περιοχές όπου η ροή δεν είναι σταθερή καθ' όλη την διάρκεια του έτους, αλλά αυξομειώνεται ανάλογα με την εποχή συνήθως λόγω βροχοπτώσεων ή τήξης του χιονιού που έχει συσσωρευτεί στα ορεινά. Για να εξομαλυνθεί αυτό το χαρακτηριστικό κατασκευάζονται τεχνητές λίμνες, φράγματα ή δεξαμενές για να δεσμεύεται το νερό. Έτσι ο διαχειριστής της υδροηλεκτρικής μονάδας μπορεί να ελέγξει τη στιγμή κατά την οποία θα παραχθεί ηλεκτρισμός αλλά και την ποσότητα που θα παραχθεί. Οι σταθμοί κατασκευάζονται αρκετά χαμηλότερα από τις δεξαμενές για να γίνεται εκμετάλλευση της υδατόπτωσης λόγω της υψομετρικής διαφοράς. Πλέον είναι πολύ συνηθισμένο να κατασκευάζονται υδροηλεκτρικοί σταθμοί με δυνατότητα αντλησιοταμίευσης (αντλητικοί-υδροηλεκτρικοί σταθμοί), οι οποίοι έχουν την δυνατότητα τις ώρες χαμηλής ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας να αντλούν νερό από χαμηλότερο ύψος σε δεξαμενές υψηλότερα, αντιστρέφοντας την λειτουργία των υδροστροβίλων τους και κάνοντας τους να δουλέψουν σαν αντλίες. Ο λόγος που συμβαίνει αυτό, όπως αναφέρθηκε, είναι για να παραχθεί ηλεκτρική ενέργεια στις ώρες μεγάλης ζήτησης από το νερό που αποθηκεύτηκε στην δεξαμενή. Παρόλο που ενεργειακά μοιάζει άσκοπη η παραπάνω διαδικασία και μάλλον ασύμφορη, με οικονομοτεχνικούς όρους είναι κάθε άλλο. Στις ώρες χαμηλής ζήτησης η ηλεκτρική ενέργεια κοστίζει αρκετά λιγότερο από ότι τις ώρες υψηλής ζήτησης, αφού:

$$A = C_{\chi\zeta} \cdot E$$

$$B = C_{\nu\zeta} \cdot E \cdot n_{\text{αντλίας}} \cdot n_{\text{στροβίλου}} \quad (2.1)$$

$$A < B$$

όπου E είναι η ενέργεια που καταναλώθηκε για την άντληση του νερού στην δεξαμενή, $C_{\chi\zeta}$ και $C_{\nu\zeta}$ είναι το κόστος ενέργειας τις ώρες χαμηλής και υψηλής ζήτησης αντίστοιχα, $n_{\text{αντλίας}}$ και $n_{\text{στροβίλου}}$ είναι ο βαθμός απόδοσης όταν ο σταθμός λειτουργεί σαν αντλία και όταν λειτουργεί σαν ηλεκτροπαραγωγική μονάδα αντίστοιχα. Προκύπτει λοιπόν ότι είναι περισσότερο συμφέρον να χρησιμοποιηθεί κάποιο ποσό όταν υπάρχει πλεόνασμα για να γίνει οικονομία καυσίμου σε στιγμές που η ανάγκες το απαιτούν. Οι μονάδες που έχουν τέτοια συμπεριφορά έχουν πολύ μικρότερες απαιτήσεις παροχής σε σχέση με τους συμβατικούς υδροηλεκτρικούς σταθμούς διότι το μόνο νερό που χρειάζεται, χρησιμοποιείται για την κάλυψη των απωλειών εξάτμισης και διαρροών. Δεν υπάρχουν πια συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας τα οποία τροφοδοτούνται αποκλειστικά από υδροηλεκτρικούς σταθμούς. Ακόμα και σε περιοχές με μεγάλο υδάτινο δυναμικό εγκαθίστανται συνδυασμός από θερμοηλεκτρικές και υδροηλεκτρικές μονάδες. Σε αυτές τις περιπτώσεις επειδή η υδραυλική ενέργεια είναι πεπερασμένη, γίνεται προγραμματισμός και η ενέργεια από τους υδροηλεκτρικούς σταθμούς παράγεται τις στιγμές που γίνεται η μεγαλύτερη οικονομία καυσίμου. Η δυναμική ενέργεια ενός σώματος είναι το γινόμενο της μάζας του επί την επιτάχυνση της βαρύτητας και του ύψους στο οποίο βρίσκεται. Όταν το σώμα αυτό είναι νερό με ειδικό βάρος $\gamma=9,81 \text{ kNt/m}^3$ για επιτάχυνση της βαρύτητας $9,81 \text{ m/sec}^2$ τότε προκύπτει ο παρακάτω τύπος.

$$E = \gamma \cdot V \cdot H \cdot n_{\text{στροβίλου}} \quad (2.2)$$

όπου E η ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται από τον υδροστρόβιλο V ο όγκος του νερού που περνάει από τον στρόβιλο, $n_{\text{στροβίλου}}$ ο βαθμός απόδοσης του υδροηλεκτρικού σταθμού και H το καθαρό ύψος που προκύπτει από την διαφορά της υψομετρικής διαφοράς πλην των υδραυλικών απωλειών σε μέτρα. Ακόμα ο όγκος του νερού προκύπτει από το γινόμενο της παροχής επί τον χρόνο, άρα η παραπάνω σχέση μπορεί να γραφτεί ξανά ως:

$$E = \gamma \cdot Q \cdot T \cdot H \cdot n_{\text{στροβίλου}} \quad (2.3)$$

όπου Q η μέση παροχή σε m^3/sec και T ο χρόνος. Διαιρώντας και τα δύο μέλη με τον χρόνο προκύπτει η ηλεκτρική ισχύς, η οποία θα είναι:

$$P = \frac{E}{T} = \gamma \cdot Q \cdot H \cdot n_{\text{στροβίλου}} \quad (2.4)$$

Η βασικότερες φιλοσοφίες χρήσης υδροηλεκτρικών σταθμών παραγωγής έχουν να κάνουν με σταθμούς υδατοπτώσεων, υδάτινων ρευμάτων και αντλησιοταμιευτικούς. Υπάρχουν πολλοί τύποι υδροηλεκτρικών μονάδων και διαχωρίζονται βάσει της κατασκευής τους, του ύψους ύδατος που μπορούν να διαχειριστούν και της ισχύος που εξυπηρετούν. Ο περισσότερο εμφανής διαχωρισμός τους έχει να κάνει με την διεύθυνση του άξονα τους, αφού υπάρχουν μηχανές οριζοντίου και κατακόρυφου άξονα με αυτές του κατακόρυφου να είναι οι πιο διαδεδομένες ειδικά στις μεγαλύτερες ονομαστικές ισχύς. Οι υδροηλεκτρικές μονάδες μπορούν να διαχωριστούν ανάλογα με την ονομαστική τους ισχύ σε μικρές και μεγάλες, οι μικρές έχουν ονομαστική ισχύ μέχρι 10 MW και οι μεγάλες, περισσότερη. Στην Αμερική και στον Καναδά μικρές θεωρούνται και μονάδες ισχύος μέχρι και 50 MW, αυτό συμβαίνει επειδή στις συγκεκριμένες περιοχές έχουν εγκατασταθεί μονάδες όπως αυτή του φράγματος Hoover ισχύος 2.07 GW, οπότε είναι ευνόητο ότι αλλάζει η κλίμακα του τι θεωρείται μεγάλο. Οι μικροί υδροηλεκτρικοί σταθμοί κατηγοριοποιούνται σε pico, για ισχύ κάτω των 5 kW, micro, για ισχύ ως 100 kW και τέλος mini για μονάδες που η ονομαστική τους ισχύ δεν υπερβαίνει το 1 MW. Ένας ακόμα τρόπος κατηγοριοποίησης ανάλογα με την κατασκευή και τα χαρακτηριστικά τους είναι ο εξής:

- Τύπου νερόμυλου. Πρόκειται για την παλιότερη μορφή υδροηλεκτρικών μονάδων, με εμφανείς ομοιότητες με τους προγόνους τους του οριζοντίου άξονα, που χρησιμοποιούνταν για το άλεσμα του σιταριού. Γενικά είναι μικρής ισχύος και δεν μπορούν να διαχειριστούν υψηλή παροχή νερού. Το μέγιστο ύψος πτώσης νερού που λειτουργούν δεν ξεπερνά τα 4 μέτρα. Με την σειρά τους και αυτές έχουν υποκατηγορίες με αρκετές παραλλαγές ανάλογα με την εφαρμογή.

- Τύπου ατέρμονου κοχλίας (έλιξ του Αρχιμήδη). Μια κατασκευή που ονομάστηκε και υδρόβιδα ή υδροκοχλίας λόγω του σχήματος της (Εικ. 2.4). στην πραγματικότητα αυτή η κατασκευή δεν έχει ακόμα χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας αλλά την τελευταία δεκαετία η χρήση της εξετάζεται από διαφορά πανεπιστήμια του εσωτερικού και του εξωτερικού. Η λογική της μονάδας αυτής είναι ο κοχλίας να είναι κατά το 50 % περίπου βυθισμένος στο νερό σε περιοχές που επικρατούν ρεύματα ή σε κοίτες ποταμών. Μπορεί να εκμεταλλευτεί ύψος πτώσης νερού από 1 ως 10 μέτρα ενώ είναι κατάλληλη για μικρές ποσότητες ροής νερού.

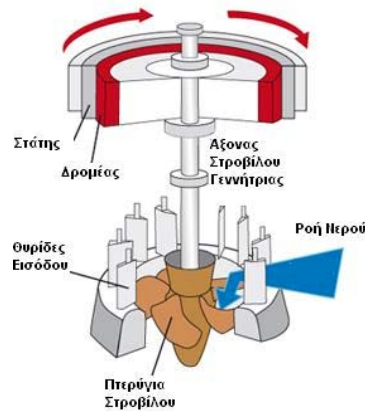


Εικ. 2.4. Πλωτός υδροκοχλίας.

- Τύπου Francis. Είναι οι πιο ευρέως χρησιμοποιούμενες υδροηλεκτρικές μονάδες αντιδράσεως αυτή τη στιγμή για εφαρμογές με ύψος πτώσης νερού από 10 μέχρι 650 μέτρα με μεγάλη ροή. Μπορούν να παράγουν από 10 ως 750 MW ανάλογα με το ύψος πτώσης νερού και την γεωμετρία του έλικα. Είναι μια μηχανή εσωτερικής ροής η οποία κατασκευάστηκε να έχει βαθμό απόδοσης μετατροπής από δυναμική – κινητική, σε μηχανική ενέργεια κοντά στο 93 %. Μπορεί να περιστραφεί με μέχρι και 1000 στροφές το λεπτό και μπορεί να χρησιμοποιηθεί και σε αντλιοσταμειυτικές εγκαταστάσεις. Κατασκευάζονται με τέτοιο τρόπο ώστε το νερό να εισέρχεται από τα πλάγια του δρομέα (Εικ. 2.5), μα οδηγείται στα πτερύγια με εφαπτομενική κατεύθυνση και να εξέρχεται από το κάτω μέρος. Η είσοδος του νερού στον υδροστρόβιλο γίνεται μέσω ενός περιμετρικού αγωγού και εισέρχεται στην περιφέρεια του αγωγού μέσω θυρίδων, με αυτές τις θυρίδες γίνεται και ο έλεγχος της παροχής νερού. Όσο πιο βαθιά στον δρομέα μπαίνει το νερό τόσο μεγαλύτερη ταχύτητα αποκτά συμβάλλοντας ακόμα περισσότερο στην αύξηση των στροφών. Τέλος, οι μονάδες παραγωγής αυτού του τύπου είναι κατά κανόνα κατακόρυφου άξονα, τουλάχιστον για μεγάλες ισχύς εξόδου.
- Τύπου Kaplan. Είναι ένας πολύ δημοφιλής τύπος ηλεκτροπαραγωγών μονάδων εσωτερικής ροής με υψηλό βαθμό απόδοσης, αυτοί οι υδροστρόβιλοι είναι υδροστρόβιλοι προώσεως που όπως και οι παραπάνω θεωρούνται αντιδράσεως. Μπορεί να είναι είτε οριζοντίου είτε κατακόρυφου άξονα και διαχειρίζονται ύψος πτώσης νερού από 2 ως 70 μέτρα, με αποτέλεσμα ο δρομέας τους να περιστρέφεται με μέχρι και 428.57 στροφές το λεπτό και να παράγουν από 5 ως 120 MW. Η διάμετρος του δρομέα μιας υδροηλεκτρικής μονάδας τύπου Kaplan μπορεί να έχει μήκος από 2 ως 8 μέτρα και χρησιμοποιείται ως επί το πλείστον σε εφαρμογές μεγάλης ροής αλλά με σχετικά μικρό ύψος πτώσης νερού για να καλύψουν το κενό που άφησαν οι τύπου Francis. Υπάρχουν δύο βασικές παραλλαγές των συγκεκριμένων υδροστρόβιλων, σταθερά και ρυθμιζόμενα πτερύγια. Σε αυτούς τους υδροστρόβιλους ο τρόπος κατασκευής των πτερυγίων επιβάλλει την διατήρηση της αξονικής κατεύθυνσης του νερού σε αντίθεση με τους τύπου Francis στους οποίους η κίνηση του νερού είναι περιστροφική. Οι υδροστρόβιλοι τύπου Kaplan είναι συνήθως ρυθμιζόμενων πτερυγίων τα οποία προσαρμόζουν την θέση τους για κάθε μεταβολή του ανοίγματος της θυρίδας ώστε να επιτυγχάνεται πάντα η βέλτιστη απόδοση, ακόμα και σε φορτία μικρότερα του ονομαστικού.



Εικ. 2.5. Δρομέας υδροστροβίλου τύπου Francis.



Εικ. 2.6. Υδροστροβιλική μονάδα τύπου Kaplan.

- Τύπου Pelton.** Οι υδροστρόβιλοι τύπου Pelton, οι οποίοι είναι υδροστρόβιλοι δράσεως έχουν δρομείς της μορφής που φαίνεται στην Εικ. 2.6 .Αυτοί αποτελούνται από ένα δακτύλιο που στην περιφέρεια του είναι τοποθετημένοι κάδοι στους οποίους εισέρχεται η ροή του νερού και προκαλείται η περιστροφή. Το νερό εισέρχεται με ορμή μέσω συνήθως ενός και μοναδικού ακροφυσίου, όπου διαχωρίζεται στους δύο γειτονικούς κάδους. Με αυτό τον τρόπο όλη η κινητική ενέργεια του νερού μετατρέπεται σε περιστροφή ενώ στη συνέχεια το νερό αποχετεύεται και απομακρύνεται από τον δρομέα με ελάχιστη εναπομένουσα κινητική ενέργεια. Οι μονάδες αυτές μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε ύψη πτώσης νερού από 50 μέτρα για να έχουν μια ικανοποιητική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ενώ δεν υπάρχει θεωρητικό μέγιστο. Είναι κατάλληλες για εφαρμογές μεγάλου ύψους πτώσης νερού αλλά μικρής παροχής. Θεωρητικά η ταχύτητα του νερού όταν εξέρχεται από το ακροφύσιο υπολογίζεται με τον παρακάτω τύπο:

$$u = \sqrt{2 \cdot g \cdot H} \quad (2.5)$$

όπου g η επιτάχυνση της βαρύτητας και H το καθαρό ύψος πτώσης του νερού το οποίο είναι η διαφορά του υψομετρικού ύψους πλην της υδραυλικής απώλειες στις σωληνώσεις.

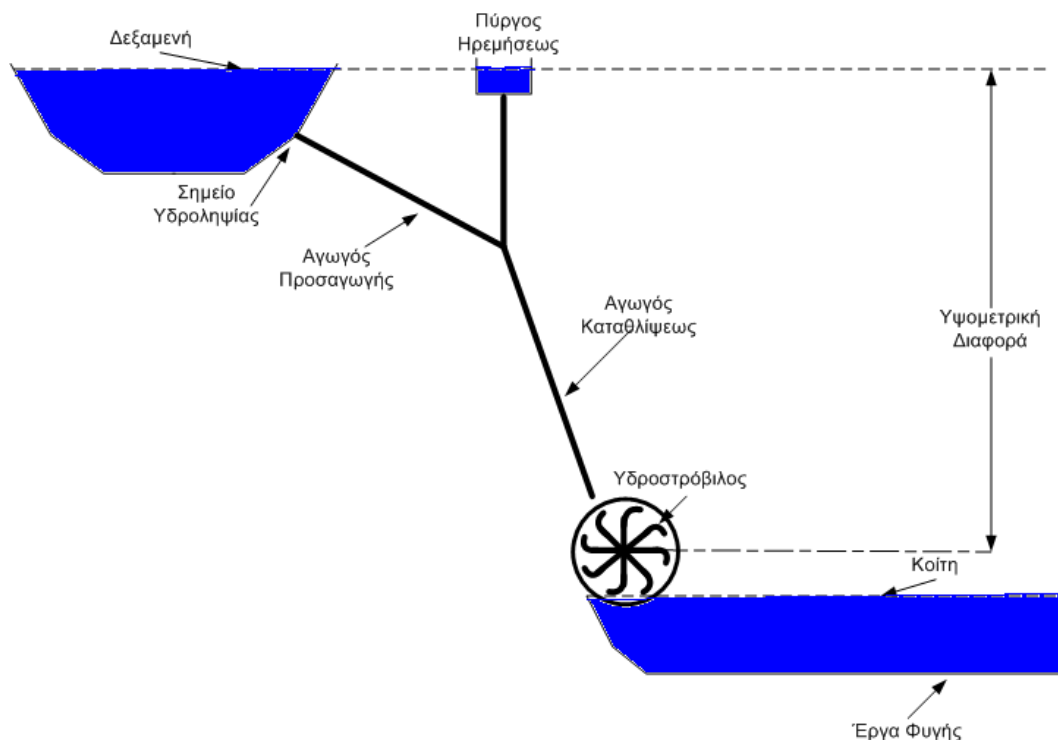


Εικ. 2.7. Δρομέας υδροστρόβιλος τύπου Pelton.

- Τύπου Turgo. Αυτός ο τύπος είναι μια παραλλαγή των υδροστρόβιλων δράσεως τύπου Pelton μόνο που στην προκειμένη περίπτωση δεν υπάρχουν κάδοι αλλά πτερύγια στα οποία το νερό χτυπάει με γωνία περίπου 20° , έτσι το νερό εισέρχεται από την μία πλευρά του δρομέα (πάνω) και εξέρχεται από την άλλη (κάτω) χωρίς να εμποδίζεται από το εναπομείναν νερό, με αποτέλεσμα να γίνεται πιο αποδοτική μετατροπή ενέργειας. Με αυτόν τον τύπο μπορεί, πρώτον να παραχθεί ίση ποσότητα ενέργειας με μικρότερη διάμετρο δρομέα από ότι σε έναν Pelton, και δεύτερον να γίνει διαχείριση πολύ μεγαλύτερης ροής, το ύψος πτώσης νερού που μπορεί να δεχτεί είναι ανάμεσα σε 50 και 650 μέτρα, στην περιοχή δηλαδή που επικαλύπτονται οι Francis και Pelton. Ένα άλλο πλεονέκτημα τους που τους καθιστά ιδανικούς για χρήση σε μικρές υδροηλεκτρικές μονάδες είναι το πολύ μικρότερο κόστος κατασκευής και εγκατάστασης σε σχέση με τις άλλες κατηγορίες.

Γενικά για τα μεγαλύτερα ύψη πτώσης νερού η καλύτερη επιλογή είναι οι υδροστρόβιλοι τύπου Pelton, ενώ αντίθετα στα μικρότερα δυνατά επιλέγονται οι Kaplan. Για ύψη υδρόπτωσης από 25 ως 80 μέτρα επιλέγονται υδροστρόβιλοι αντίδρασης Francis ή Pelton ή ακόμα και Turgo. Η περιοχή ύψους υδρόπτωσης από 100 ως 300 μέτρα είναι κατάλληλη αποκλειστικά για υδροστρόβιλους τύπου Francis. Για τα μεσαία ύψη πτώσης νερού από 300 ως 600 μέτρο είναι το ίδιο συνηθισμένο να χρησιμοποιούνται τόσο Francis όσο και Pelton, αλλά για μεγαλύτερα ύψη οι δεύτεροι προτιμώνται κατά κόρο.

Σε όλες τις παραπάνω κατηγορίες η υδραυλική ενέργεια του νερού μετατρέπεται σε μηχανική με την μορφή περιστροφικής κίνησης. Η κίνηση αυτή μεταφέρεται μέσω ενός άξονα και σε ορισμένες περιπτώσεις και ενός κιβωτίου ταχυτήτων (σασμάν) σε μια σύγχρονη γεννήτρια, η οποία σχεδόν πάντα έχει πολλά ζεύγη πόλων. Και σε αυτές τις περιπτώσεις δεν λείπει η διάταξη διέγερσης με μορφή μηχανής DC σε κοινό άξονα με την υπόλοιπη κατασκευή η οποία παράγει την ισχύ που απαιτείται για τη τροφοδοσία του τυλίγματος διέγερσης. Οποιοσδήποτε τύπος στρόβιλου και αν επιλεγεί θα πρέπει να γίνει σύμφωνα με την εφαρμογή στην οποία πρόκειται να χρησιμοποιηθεί. Ο έλεγχος των στροφών μιας τέτοιας μηχανής είναι μια πρόκληση λόγω της αδράνειας του δρομέα και του γεγονότος ότι το νερό είναι ασυμπίεστο. Όσο μεγαλύτερο είναι το μήκος του αγωγού προσαγωγής (Εικ. 2.8) τόσο πιο δύσκολο είναι να επιβληθούν μεγάλες και απότομες μεταβολές. Οι μεταβολές των στροφών ή της παραγόμενης ισχύος ή της ροής νερού πραγματοποιούνται μέσω της ρύθμισης του ανοίγματος των θυρίδων που άγουν το νερό προς τον στρόβιλο, ή στην περίπτωση που υπάρχουν υδατοφράκτες του αντίστοιχου ανοίγματός τους. Η μεταβολή του ανοίγματος δεν πρέπει να γίνει με γρήγορο τρόπο για να αποφευχθούν υδραυλικά πλήγματα. Ένα πρόσθετο μέτρο προστασίας είναι η εγκατάσταση ενός φρεατίου ή πύργου ηρεμίσσεως, ώστε να απορροφάται η ενέργεια του αγωγού κατά το ξαφνικό κλείσιμο του υδατοφράκτη ή της θυρίδας. Μια δεύτερη χρήση του πύργου ηρεμίσσεως είναι η τροφοδοσία συμπληρωματικής ροής στις περιπτώσεις των απότομων μεταβολών του φορτίου. Αντίθετα με τους ατμοστρόβιλους, στους υδροστρόβιλους δεν υπάρχει όριο υπερτάχυνσης κατά την απόρριψη φορτίου. Αυτό σημαίνει ότι μπορούν να αναπτύξουν ταχύτητες (n_v) πολύ μεγαλύτερες από τις κανονικές (n). Για τους υδροστρόβιλους τύπου Pelton ο λόγος n_v/n κυμαίνεται γύρω στο 1.8, για τους Francis από 1.8 ως 2.4 και για του Kaplan από 2.5 μέχρι 3.5.



Εικ. 2.8. Διάταξη υδροηλεκτρικής μονάδας παραγωγής.

2.4. Ντιζελοηλεκτρικοί Σταθμοί

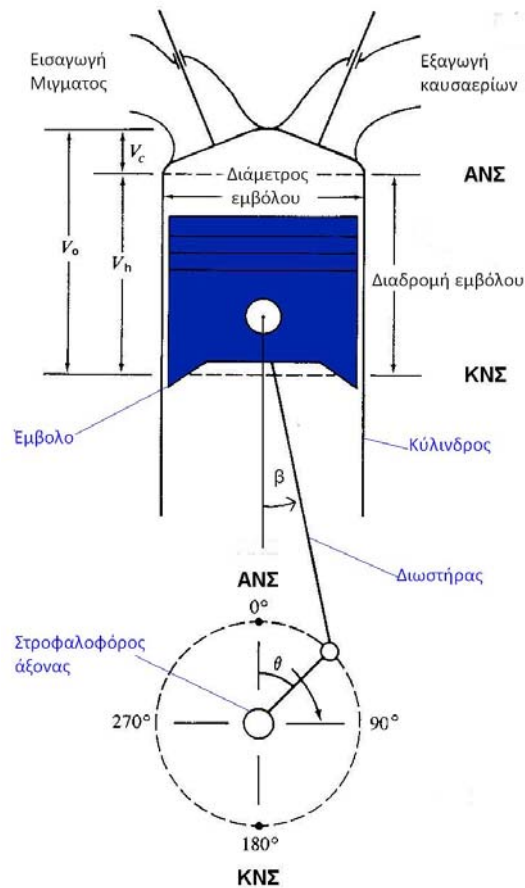
Οι ντιζελοηλεκτρικοί σταθμοί οι οποίοι εκμεταλλεύονται εμβολοφόρους κινητήρες εσωτερικής καύσεως χρησιμοποιούν για καύσιμα αποστάγματα του πετρελαίου. Όσο μεγαλύτερος ο κινητήρας τόσο βαρύτερο το απόσταγμα που χρησιμοποιείται. Η ρύθμιση των στροφών τους γίνεται με τον έλεγχο της βαλβίδας εισαγωγής καυσίμου. Παρόλο που έχουν ψηλό βαθμό απόδοσης δεν χρησιμοποιούνται στο διασυνδεδεμένο δίκτυο παρά μόνο σε μικρά αυτόνομα συνήθως νησιωτικά δίκτυα όπως της Κρήτης και της Ρόδου. Μεγάλο ρόλο στη διάδοση τους έπαιξε το μικρό τους μέγεθος και η δυνατότητα εύκολης, οικονομικής και γρήγορης μεταφοράς που προσφέρουν.

Οι μηχανές που χρησιμοποιούνται όπως αναφέρθηκε προηγουμένως είναι εμβολοφόρες ΜΕΚ. Οι συγκεκριμένες μηχανές έκαναν την εμφάνιση τους κατά το δεύτερο μισό του δέκατου ένατου αιώνα και από τότε έχουν βρει εφαρμογή σε πάρα πολλούς τομείς του ανθρώπινου ενδιαφέροντος, όπως στην αυτοκίνηση, την παραγωγή ενέργειας και την πρόωση πλοίων. Προφανώς από την εμφάνιση τους και μετά έχουν εξελιχθεί κατά κόρο με αποτέλεσμα να αυξηθεί η πολυπλοκότητα τους και ο όγκος τους αλλά ταυτόχρονα και η ισχύς εξόδου, ο βαθμός απόδοσης και οι παραλλαγές τους που συναντούν τις προϋποθέσεις σχεδόν κάθε σχετικής εφαρμογής. Οι μηχανές που θα απασχολήσουν αυτήν την πτυχιακή εργασία είναι μηχανές με ανάφλεξη με συμπίεση δύο ή τεσσάρων χρόνων υδρόψυκτες. Αυτές είναι και οι πιο συχνά χρησιμοποιούμενες σε εφαρμογές ηλεκτροπαραγωγής μεγάλης κλίμακας. Θα πρέπει βέβαια να εξηγηθεί κάθε ένα από τα χαρακτηριστικά που παρατέθηκαν παραπάνω. Η βασικότερη κατηγοριοποίηση των εμβολοφόρων ΜΕΚ έχει να κάνει με τον τρόπο ανάφλεξης και διαχωρίζονται σε αυτές με ανάφλεξη με σπινθήρα και αυτές με ανάφλεξη με συμπίεση. Ο διαχωρισμός αυτός έχει να κάνει τόσο με την κατασκευή της μηχανής και τα χαρακτηριστικά της άλλα και με το είδος του καυσίμου που είναι κατάλληλο για κάθε είδος μηχανής. Οι μηχανές ανάφλεξης με σπινθήρα χρησιμοποιούν ως επί το πλείστον βενζίνη για την παρασκευή του μίγματος καύσης τους. Επίσης κατασκευαστικά θα πρέπει να αναφερθεί ότι χρησιμοποιούν σπινθηριστές (μπουζί) για την ανάφλεξη του μείγματος. Αντίθετα στις μηχανές ανάφλεξης με συμπίεση δεν υπάρχει σπινθηριστής και το μείγμα καυσίμου ατμοσφαιρικού αέρα αυτοαναφλέγεται κατά την συμπίεση του εντός του κυλίνδρου. Σε αυτήν την περίπτωση το καύσιμο που επιλέγεται είναι πετρέλαιο ντίζελ.



Εικ. 2.9. Ντιζελογεννήτρια WARTSILA 14 κυλίνδρων, RT-flex96C, 102 rpm, 80 MW.

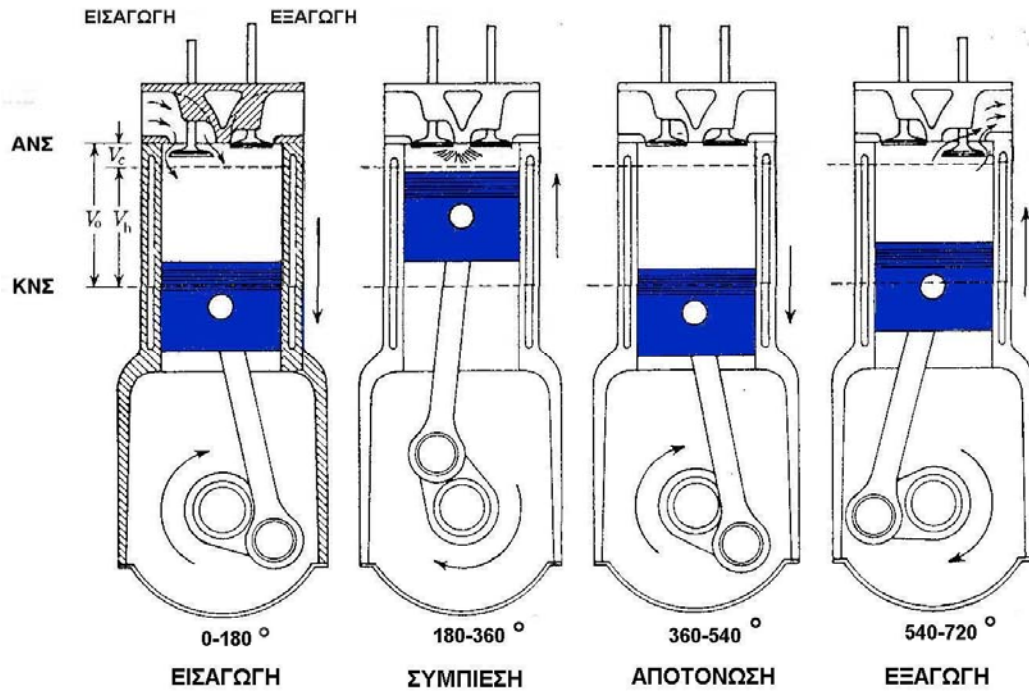
Ακόμα θα πρέπει να εξηγηθεί ο τρόπος λειτουργίας όταν πρόκειται για δίχρονες ή τετράχρονες μηχανές καθώς και τα πλεονεκτήματα κάθε τύπου. Τα βασικά μέρη της μηχανής που πρέπει να είναι γνωστά σε αυτή την φάση είναι ο κύλινδρος του οποίου τα εσωτερικά τοιχώματα σχηματίζουν το μεγαλύτερο μέρος του θαλάμου καύσης, το έμβολο (πιστόνι) του οποίου η μετωπική επιφάνεια είναι το υπολειπόμενο μέρος του θαλάμου καύσης, ο στροφαλοφόρος άξονας ο οποίος μετατρέπει την παλινδρομική κίνηση των εμβόλων σε περιστροφική και ο διωστήρας ο οποίος συνδέει κάθε έμβολο με τον στροφαλοφόρο. Γενικά το εργαζόμενο μέσο αναρροφάται από ή ψεκάζεται στη μηχανή και ακολούθως συμπιέζεται μέχρι μιας ορισμένης πίεσης με ταυτόχρονη αύξηση της θερμοκρασίας του, στη συνέχεια προσδίδεται σε αυτό θερμική ενέργεια που εκλύεται από την καύση του καυσίμου με αποτέλεσμα την αύξηση τόσο της θερμοκρασίας όσο και της πίεσης του. Στην εκτόνωση που ακολουθεί αποδίδεται σε κινητήριο έργο μεγάλο μέρος της ενέργειας που προσδόθηκε προηγουμένως. Αυτό είναι και το ωφέλιμο έργο της μηχανής αν αφαιρεθούν οι απώλειες και η ενέργεια που απορροφά η ίδια η μηχανή κατά την συμπίεση. Το τελευταίο κομμάτι της διαδικασίας έχει να κάνει με την απόπλυση του θαλάμου καύσης από τα καυσαέρια και την εισαγωγή νέου μείγματος για να επαναληφθεί ο κύκλος. Όσα αναφέρθηκαν μέχρι στιγμής είναι κοινά τόσο για τις τετράχρονες όσο και για τις δίχρονες μηχανές. Ξεκινώντας από τις τετράχρονες, που είναι και οι πιο συνηθισμένες, αναφέρεται ότι μια πλήρης περιστροφή του στροφαλοφόρου άξονα αντιστοιχεί σε μια πλήρη περίοδο της παλινδρομικής κίνησης του εμβόλου από το άνω νεκρό σημείο (ΑΝΣ) στο κάτω νεκρό σημείο και ξανά στο άνω. Κάθε κίνηση του εμβόλου από το ένα νεκρό σημείο στο άλλο ονομάζεται χρόνος του κύκλου, ενώ όπως είναι προφανές από την ονομασία τους οι τετράχρονες μηχανές απαιτούν τέσσερις χρόνους για να πραγματοποιηθεί ένας κύκλος και αντίστοιχα δύο πλήρεις περιστροφές του στροφαλοφόρου. Στις θέσεις των νεκρών σημείων η ταχύτητα του εμβόλου μηδενίζεται και η κίνηση του αλλάζει φορά. Ο όγκος που απομένει του θαλάμου καύσης όταν το έμβολο βρίσκεται στο ΑΝΣ ονομάζεται και όγκος διακένου ή επιζήμιος ή συμπίεσεως και συμβολίζεται με V_c . Ο όγκος που διαγράφει το έμβολο κατά την κίνηση του, δηλαδή η διαφορά του μέγιστου ή ολικού όγκου V_o και του όγκου συμπίεσεως, ονομάζεται όγκος μετατοπίσεως ή εμβολισμού V_h . Ο λόγος του ολικού προς τον όγκο συμπίεσεως ονομάζεται βαθμός συμπίεσεως r_c ή ϵ στην ελληνική βιβλιογραφία και παίρνει τιμές από 12 ως 24 για μηχανές ντίζελ. Από τους τέσσερις χρόνους μόνο στον ένα αποδίδεται έργο στο στροφαλοφόρο και ονομάζεται εμβολισμός ισχύος.



Σχ. 2.13. Σκαρίφημα του συστήματος πιστονιού, εμβόλου, στροφάλου μιας εμβολοφόρου ΜΕΚ. V_c , V_h και V_o συμβολίζουν τους όγκους διακένου, μετατόπισης και ολικό του θαλάμου καύσης αντίστοιχα.

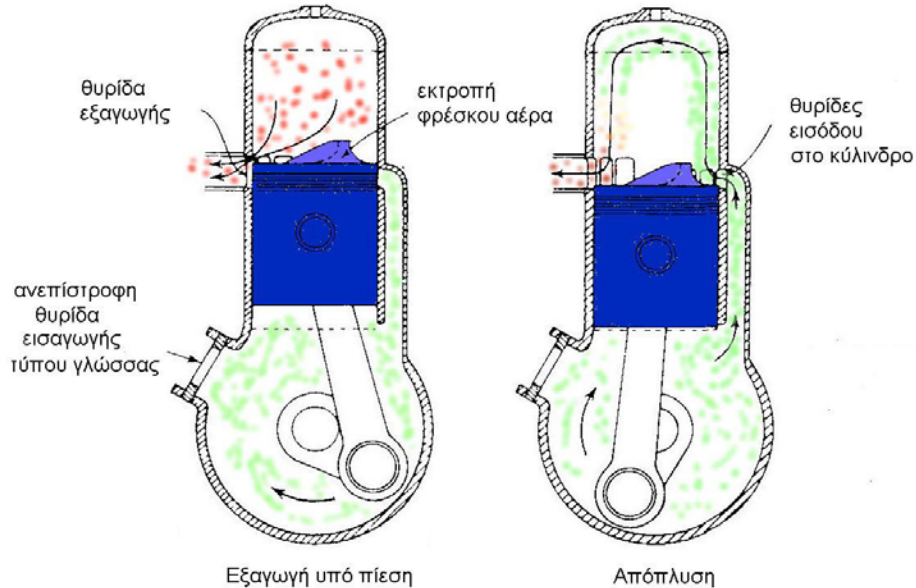
Οι φάσεις του κύκλου των τετράχρονων μηχανών περιγράφονται παρακάτω:

1. Φάση αναρρόφησης, που ξεκινά με το έμβολο στο ΑΝΣ και τελειώνει με το έμβολο στο ΚΝΣ, και αναρροφά το μείγμα μέσα στον κύλινδρο. Για να επιτευχθεί μέγιστη εισαγωγή μίγματος στον κύλινδρο, η βαλβίδα εισαγωγής ανοίγει λίγο πριν το ΑΝΣ και κλείνει μετά τη θέση στο ΚΝΣ.
2. Φάση συμπίεσης, με τις δύο βαλβίδες να είναι κλειστές και το μείγμα μέσα στον κύλινδρο να συμπιέζεται από τον αρχικό του όγκο – δηλαδή τον ολικό - έως τον όγκο συμπίεσεως, που είναι ο όγκος που απομένει όταν το έμβολο είναι στο ΑΝΣ. Προς το τέλος της συμπίεσης ξεκινά η καύση και η πίεση μέσα στον κύλινδρο αυξάνεται απότομα.
3. Φάση καύσης-αποτόνωσης (εμβολισμός ισχύος), ξεκινά με το έμβολο στο ΑΝΣ και τελειώνει στο ΚΝΣ, κατά την οποία τα αέρια, υψηλής πίεσης και θερμοκρασίας σπρώχνουν το έμβολο προς τα κάτω εξαναγκάζοντας τον στροφαλοφόρο να στραφεί, αποδίδοντας πενταπλάσιο περίπου έργο από αυτό που απαιτεί η φάση της συμπίεσης. Η βαλβίδα εξαγωγής ανοίγει καθώς το έμβολο φτάνει στο ΚΝΣ και ξεκινά η φάση εξαγωγής, ρίχνοντας την πίεση σε αυτή της εξόδου της μηχανής.
4. Φάση εξαγωγής, κατά την οποία τα υπόλοιπα αέρια που έχουν απομείνει μέσα στον κύλινδρο εξωθούνται προς την έξοδο: κατά πρώτον καθώς η πίεση που επικρατεί μέσα στον κύλινδρο μπορεί να είναι αισθητά υψηλότερη από της εξόδου, και κατά δεύτερον καθώς σπρώχνονται προς τα έξω παρασυρόμενα από την κίνηση του εμβόλου προς το ΑΝΣ. Καθώς αυτό φτάνει στο ΑΝΣ ανοίγει και η βαλβίδα εισαγωγής. Αμέσως μετά τη θέση του ΑΝΣ κλείνει πάλι η βαλβίδα εξαγωγής και ο κύκλος επαναλαμβάνεται.



Σχ. 2.14. Φάσεις τετράχρονης μηχανής με ανάφλεξη με συμπίεση.

Ο κύκλος λειτουργίας των τετράχρονων ΜΕΚ απαιτεί, σε κάθε κύλινδρο, δύο περιστροφές του στροφαλοφόρου για κάθε εμβολισμό ισχύος. Για να επιτευχθεί υψηλότερη αποδοτικότητα ισχύος για δεδομένο μέγεθος μηχανής, και με το πρόσθετο πλεονέκτημα της απλούστερης σχεδίασης των βαλβίδων, αναπτύχθηκε ο δίχρονος κύκλος λειτουργίας. Αυτός βρίσκει εφαρμογή τόσο σε μηχανές με ανάφλεξη σπινθήρα όσο και συμπίεσης.



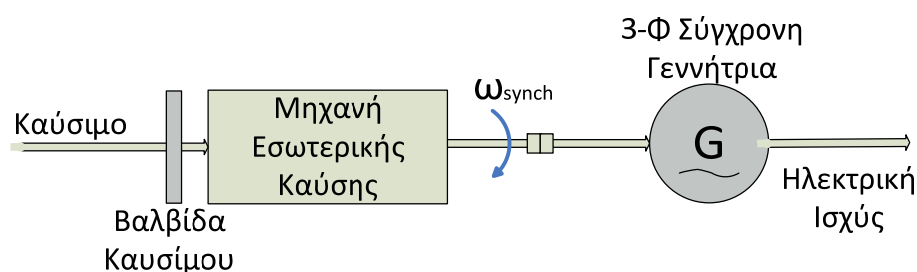
Σχ. 2.15. Φάσεις δίχρονης μηχανής με ανάφλεξη με συμπίεση.

Εδώ τις βαλβίδες εισαγωγής και εξαγωγής αντικαθιστούν εγκοπές στην περιφέρεια του κυλίνδρου κατάλληλα τοποθετημένες ώστε να αποκαλύπτονται κοντά στο ΚΝΣ και να επιτρέπουν την σχεδόν ταυτόχρονη εξαγωγή των καυσαερίων και την εισαγωγή φρέσκου αέρα. Ακόμα μια διαφορά είναι ότι σε αυτή τη διάταξη ο στροφαλοφόρος άξονας γεμάτος με τον αέρα που θα χρησιμοποιηθεί για την καύση ενώ το καύσιμο ψεκάζεται ξεχωριστά μέσα στο θάλαμο όπου και γίνεται η μείξη με τον αέρα. Σε μηχανές με υπερπλήρωση εισάγεται μεγαλύτερη ποσότητα αέρα λόγω της συμπίεσης του στο στροφαλοθάλαμο με αποτέλεσμα να μπορεί να ψεκαστεί μεγαλύτερη

ποσότητα καυσίμου στον ίδιο χώρο καύσης και η χημική αντίδραση της καύσης να είναι το ίδιο αποδοτική και με ίδια αναλογία κατάλοιπων. Η γεωμετρία του πάνω μέρος του εμβόλου έχει αλλάξει ώστε να διευκολύνεται η απόπλυση των καυσαερίων αφήνοντας το δυνατό λιγότερα κατάλοιπα όταν ξεκινά ο επόμενος κύκλος. Η εγκοπές στην περιφέρεια του κυλίνδρου ονομάζονται θυρίδες, αυτή που επικοινωνεί με το στροφαλοφόρο λέγεται εισαγωγής ενώ εκείνη που επικοινωνεί με το σύστημα απόρριψης των καυσαερίων ονομάζεται εξαγωγής. Η κατασκευή τους είναι τέτοια ώστε η θυρίδα εξαγωγής να αποκαλύπτεται πρώτη εξάγοντας έτσι το μεγαλύτερο όγκο των καυσαερίων ενώ με την είσοδο του νέου μείγματος λίγο αργότερα και τα τελευταία κατάλοιπα απορρίπτονται. Στις δίχρονες μηχανές κάθε κύκλος του στροφαλοφόρου περιλαμβάνει και ένα εμβολισμό ισχύος. Το βασικό μειονέκτημα αυτών των μηχανών είναι ότι ποτέ δεν απορρίπτονται όλα τα καυσαέρια με αποτέλεσμα ένα μέρος από τον διαθέσιμο όγκο του εμβόλου να μην περιέχει μείγμα μειώνοντας έτσι την ισχύ εισόδου άρα και εξόδου της μηχανής. Οι φάσεις του δίχρονου κύκλου είναι οι εξής:

1. Φάση συμπίεσης, ξεκινά κλείνοντας τις θυρίδες εισαγωγής και εξαγωγής, και στη συνέχεια συμπιέζοντας το περιεχόμενο στον κύλινδρο προς καύση μείγμα και ταυτόχρονα αναρροφά νέο καύσιμο μείγμα στον χώρο του στροφαλοθαλάμου. Καθώς το έμβολο προσεγγίζει το ΑΝΣ αρχίζει η καύση.
2. Φάση καύσης-αποτόνωσης (εμβολισμός ισχύος), παρόμοια με την τετράχρονη μηχανή εωσότου το έμβολο πλησιάσει το ΚΝΣ, όταν πρώτα αποκαλύπτεται η θυρίδα εξαγωγής και στη συνέχεια της εισαγωγής. Τα περισσότερα καυσαέρια εγκαταλείπουν το θάλαμο σε μια διαδικασία απότομης εξωθήσεως. Όταν αποκαλύπτονται και οι θυρίδες εισαγωγής τότε το φρέσκο μείγμα που βρίσκεται συμπιεσμένο στο χώρο του στροφαλοθαλάμου εισρέει στον κύλινδρο. Οι θυρίδες εισαγωγής είναι έτσι σχεδιασμένες ώστε το εκτρέπουν από το να κατευθυνθεί άμεσα προς τις θυρίδες εξαγωγής και γίνει ικανοποιητική σάρωση των υπολοίπων καυσαερίων από τον κύλινδρο.

Οι περισσότεροι χρησιμοποιούμενοι ντιζελοκινητήρες στην ηλεκτροπαραγωγή μεγάλης ισχύος είναι δίχρονοι και χρησιμοποιούν σχεδόν πάντα διατάξεις υπερπλήρωσης. Υπερπλήρωση σε αυτές τις μηχανές εννοείται η συμπίεση του μείγματος που εισάγεται στο θάλαμο ώστε για τον ίδιο όγκο να παράγονται μεγαλύτερα ποσά ισχύος. Οι υπερπληρωτές αναρροφούν αέρα και τον συμπιέζουν, στη συνέχεια ο αέρας ψύχεται σε ψυγεία και δια μέσω των θυρίδων εισαγωγής γεμίζει τον κύλινδρο εκτοπίζοντας τα υπολείμματα των καυσαερίων από τον προηγούμενο κύκλο. Στην εκκίνηση των μηχανών και στην λειτουργία σε χαμηλό φορτίο είναι απαραίτητη η υποβοήθηση των υπερπληρωτών με τη χρησιμοποίηση επιπλέον αεροσυμπιεστών για τη συμπίεση του αέρα σάρωσης. Λόγω των πολύ χαμηλών στροφών ο χρόνος που διατίθεται για την παρασκευή του μείγματος αέρα και καυσίμου μέσα στον κύλινδρο είναι αρκετός, και έτσι και για τα πολύ χαμηλής ποιότητας βαριά καύσιμα μαζούτ που χρησιμοποιούν οι μηχανές αυτές, εφαρμόζεται απευθείας έγχυση του καυσίμου μέσα στο κύλινδρο και έχουν απλής γεωμετρίας κεφαλές εμβόλων. Τέλος συνήθως χρησιμοποιείται ξεχωριστή αντλία καυσίμου για κάθε κύλινδρο, και τα έμβολα όπως και τα χιτώνια είναι υδρόψυχτα αφού τα ελαιόψυχτα συστήματα για την ψύξη των εμβόλων που συχνά χρησιμοποιούνται σε μικρές και μεσαίου μεγέθους μηχανές, δεν επαρκούν για τις μεγάλες. Σε τέτοιου είδους μηχανές ο διωστήρας τροποποιείται με την χρήση ενός βάκτρου. Αυτό γίνεται για να προστατευτεί τόσο το βάκτρο όσο και η περιφέρεια του χιτωνίου του κυλίνδρου από τις μεγάλες πλάγιες δυνάμεις που αναπτύσσονται. Έτσι στο σημείο εκείνο με την χρήση του βάκτρου η κίνηση του γίνεται σχεδόν ευθύγραμμη και κατά μήκος του κυλίνδρου. Οι ντιζελοκινητήρες που χρησιμοποιούνται στην ηλεκτροπαραγωγή, είναι συνδεδεμένοι στην ίδια άτρακτο με μια σύγχρονη τριφασική γεννήτρια η οποία μετατρέπει την μηχανική ενέργεια σε ηλεκτρική. Όπως έχουμε αναφέρει για τους προηγούμενους σταθμούς, ένας ντιζελοηλεκτρικός σταθμός ενδέχεται να αποτελείται από μία ή περισσότερες ντιζελογεννήτριες, οι οποίες λειτουργούν και μοντελοποιούνται σαν μία.



Σχ. 2.16. Μοντέλο ντιζελοηλεκτρικής μονάδας.

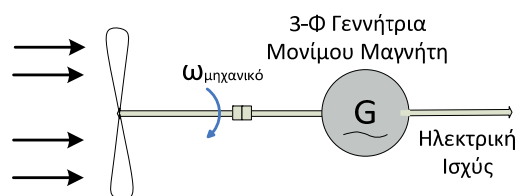
2.5. Αιολικά Πάρκα

Τα αιολικά πάρκα είναι σταθμοί παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας οι οποίοι χρησιμοποιούν ανεμογεννήτριες για να μετατρέψουν την αιολική ενέργεια σε μηχανική και στη συνέχεια σε ηλεκτρική. Ένα αιολικό πάρκο αποτελείται από πολλές ανεμογεννήτριες οι οποίες λειτουργούν με τον ίδιο τρόπο και άρα μοντελοποιούνται σαν μια.

Ο έλεγχος των στροφών τους γίνεται συνήθως με έλεγχο της κλίσης των πτερυγίων της φτερωτής της ανεμογεννήτριας (Pitch Control). Ορισμένες από αυτές, ειδικά οι μικρής ισχύος, δεν χρησιμοποιούν την συγκεκριμένη τεχνική για τον έλεγχο των στροφών τους, αλλά έχουν κατάλληλους μετατροπείς χάρη στους οποίους δεν απαιτείται ακρίβεια στροφών.

Τα αιολικά πάρκα εκμεταλλεύονται μια ήπια πηγή ενέργειας και όπως οι υδροηλεκτρικοί σταθμοί είναι φιλικά προς το περιβάλλον. Τα αιολικά πάρκα πλέον θεωρούνται αρκετά αξιόπιστα όσο αφορά την ποιότητα ισχύος την οποία παράγουν, ενώ από την άλλη είναι αδύνατο να προβλέψουμε με σιγουριά την διαθεσιμότητα τους σε ισχύ, έστω και σε μικρό βάθος χρόνου.

Η νέα τάση είναι να συνδυάζονται Αιολικά πάρκα με αντλησιοταμειυτικές εγκαταστάσεις προσφέροντας μια υβριδική, πράσινη λύση με απόλυτη πιστότητα στον ημερήσιο προγραμματισμό. Εκτός της αξιοπιστίας που προσφέρει το παραπάνω σύστημα για παραγωγή ενέργειας μεγάλης ισχύος, και ειδικότερα σε μη διασυνδεδεμένα δίκτυα, υπάρχει δυνατότητα προσφοράς επικουρικών υπηρεσιών στον διαχειριστή του δικτύου. Τέτοιες θα μπορούσαν να είναι η δυνατότητα τριτογενούς στρεφόμενης εφεδρείας ή ψυχρής εφεδρείας.



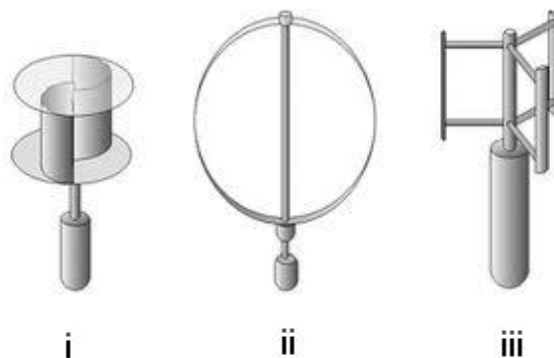
Σχ. 2.17. Μοντέλο αιολικής ηλεκτροπαραγωγικής μονάδας.

Για να γίνει αντιληπτή η λειτουργία των Αιολικών πάρκων θα πρέπει πρώτα να εξεταστούν οι ανεμογεννήτριες σαν ξεχωριστές μονάδες. Όπως και οι υδροστρόβιλοι δεν είναι καινούρια η ιδέα να εκμεταλλευτεί κανείς την κινητική ενέργεια του ανέμου και να την μετατρέψει σε μια πιο εύχρηστη μορφή που θα εξυπηρετεί τις ανάγκες του. Παρόλα αυτά τις τελευταίες δεκαετίες έχουν γίνει αλματώδη βήματα στο σχεδιασμό και στην κλίμακα των νέων Αιολικών σταθμών. Πλέον υπάρχουν μηχανές ονομαστικής ισχύος που ξεπερνά κατά πολύ το 1 MW ανά μηχανή με ιστούς που έχουν ύψος μεγαλύτερο των 150 m. Αυτό που αξίζει ακόμα να αναφερθεί είναι η ανάπτυξη που έχει παρουσιαστεί ακόμα και σε μηχανές μικρότερης ισχύος όπου δίνεται έμφαση στην στιβαρότητα της κατασκευής, τον σχεδιασμό και τον ψηλό βαθμό απόδοσης σε μηχανές οι οποίες εγκαθίστανται δίπλα σε κατοικίες με ονομαστική ισχύ συνήθως μικρότερη των 50 kW.

Οι ανεμογεννήτριες χωρίζονται σε δύο βασικές κατηγορίες:

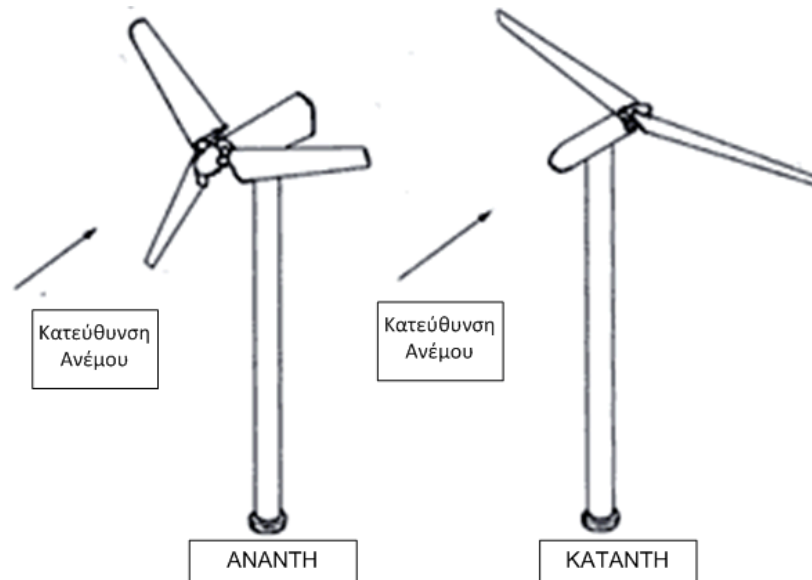
- **Ανεμογεννήτριες κατακόρυφου άξονα.** Πρόκειται για μηχανές οι οποίες χρησιμοποιούν μια φτερωτή κατακόρυφου άξονα, δηλαδή κάθετο τόσο προς την γη όσο και προς την πορεία του ανέμου, για να συλλέξουν την κινητική ενέργεια του ανέμου. Το μεγαλύτερο πλεονέκτημα τους έναντι αυτών με οριζόντιο άξονα είναι ο αυτόματος προσανεμισμός τους. Με άλλα λόγια για αυτές τις μηχανές δεν παίζει ρόλο η πορεία του ανέμου αφού όποια και να είναι αυτή πάντα βρίσκει κάθετα των άξονα τους, στην ιδανική δηλαδή θέση για παραγωγή ενέργειας. Ένα ακόμα θετικό χαρακτηριστικό τους είναι η αναισθησία τους σε κακής ποιότητας άνεμο, δηλαδή με δίνες και στροβιλισμούς. Λόγω του σχεδιασμού τους η παρουσία τέτοιων φαινομένων μάλλον βοηθά παρά εμποδίζει την διαδικασία παραγωγής ενέργειας. Το κόστος κατασκευής τους είναι αρκετά μικρότερο από αυτό των μηχανών οριζοντίου άξονα ενώ συνήθως πρόκειται για κατασκευές με μικρή ονομαστική ισχύ. Οι μορφολογίες του δρομέα ποικίλουν με πιο εξελιγμένες τις μηχανές με δρομέα τύπου Darrieus οι οποίες είναι και οι περισσότερο διαδεδομένες πλέον. Με την χρήση αυτής της μορφολογίας δρομέα μπορούν να κατασκευαστούν μηχανές ονομαστικής ισχύος κοντά στο 1 MW. Το πιο έξυπνο κομμάτι της κατασκευής τους έχει να κάνει με το γεγονός ότι η γεννήτρια και τα συστήματα ελέγχου της μηχανής βρίσκονται στο έδαφος και όχι υπερυψωμένα στην κορυφή του πυλώνα όπως στις μηχανές οριζοντίου άξονα, με αποτέλεσμα η

κατασκευή να μην χρειάζεται να είναι τόσο στιβαρή και άρα πολύ φθηνότερη. Η σταθεροποίηση του πυλώνα γίνεται με επίτονα από την κορυφή του πυλώνα προς την γη, κατά κανόνα με συρματόσχοινα. Ο αριθμός των πτερυγίων ποικίλει αλλά περισσότερο συνηθισμένοι αριθμοί πτερυγίων είναι δυο με τρία σε διάταξη 180° ή 120° αντίστοιχα. Εκτός των μηχανών Darrieus υπάρχουν και άλλοι λιγότερο διαδεδομένοι τύποι μηχανών όπως οι Savonius που είναι και αυτές αρκετά διαδεδομένες, οι Torpedo, οι Lebest, οι Gyromill, και τα συστήματα τύπου Cyclonico. Οι ανεμογεννήτριες τύπου Darrieus επικράτησαν λόγω του πολύ υψηλού βαθμού απόδοσης τους για τέτοιου είδους μηχανές αλλά έχουν ένα βασικό μειονέκτημα που δεν παρουσιάζεται στους υπόλοιπους τύπους που αναφέρθηκαν, απαιτούν εκκινήτρια μηχανή, η οποία μπορεί να είναι και η ίδια η γεννήτρια που χρησιμοποιείται για να ξεκινήσει η λειτουργία τους.



Σχ. 2.18. Ανεμογεννήτριες κατακόρυφου άξονα. i) δρομέας τύπου Savonius ii) δρομέας τύπου Darrieus με σχοινοειδή πτερύγια iii) δρομέας τύπου Darrieus με ευθύγραμμα πτερύγια.

- Ανεμογεννήτριες οριζοντίου άξονα.** Εδώ γίνεται αναφορά στις κλασικές ανεμογεννήτριες τις οποίες μπορεί να παρατηρήσει κανείς σε κορυφογραμμές βουνών κυρίως σε νησιωτικά συστήματα ενώ η διεύθυνση τους είναι μεγάλη και στο διασυνδεδεμένο σύστημα. Ονομάζονται και ανεμογεννήτριες έλικα και βασίζονται στην λογική των παλιών ανεμόμυλων όπως αυτούς τις Μυκόνου. Ο άξονας τους βρίσκεται παράλληλα με το έδαφος στην κορυφή του πυλώνα τους ενώ η μέγιστη ισχύς παράγεται όταν με κάποιο από τα συστήματα προσανεμισμού από αυτά που χρησιμοποιούν ο άξονας ρυθμίζεται να είναι παράλληλα στην πορεία του ανέμου, δηλαδή, όταν ο άνεμος χτυπά κάθετα στον δίσκο που σχηματίζει η πτερωτή. Ο βασικότερος διαχωρισμός σε αυτού του είδους τις μηχανές είναι ανάμεσα σε μηχανές ανάντη και κατάντη του πύργου στήριξης και έχει να κάνει με το τι συναντά πρώτα η ροή του ανέμου όταν στρέφει την ανεμογεννήτρια. Οι μηχανές που είναι κατασκευασμένες ώστε η ροή του ανέμου να συναντά πρώτα τον πυλώνα και μετά την πτερωτή ονομάζονται κατάντη και έχουν του βασικό μειονέκτημα ότι η σκίαση του πυλώνα μειώνει την παραγόμενη ισχύ σε σχέση με αυτή που θα μπορούσε να παραχθεί από μια ανάντη ανεμογεννήτρια με ίδια διάμετρο δρομέα. Από την άλλη πλευρά στις κατάντη ανεμογεννήτριες δεν απαιτείται σύστημα προσανεμισμού. Σε μηχανές μεγάλης ισχύος έχει επικρατήσει να χρησιμοποιείται η ανάντη διαμόρφωση. Αυτό έχει γίνει αφενός για να αποφευχθεί η σκίαση λόγω του πυλώνα και αφετέρου επειδή οι κατάντη ανεμογεννήτριες συνήθως χρησιμοποιούν ψήκτρες για την μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας από την κορυφή του πύργου, γεγονός που είναι εντελώς αναξιόπιστο και καθόλου αποδοτικό ειδικά όσο αυξάνεται η ονομαστική ισχύς. Εδώ επίσης η πιο συνηθισμένη διαμόρφωση είναι αυτή με τα τρία πτερύγια ενώ δεν σπάνια υπάρχουν και μηχανές με λιγότερα ή περισσότερα. Ο γενικός κανόνας είναι ότι όσο μικρότερη η ταχύτητα ανέμου τόσο περισσότερα πτερύγια χρησιμοποιούνται ενώ στις πολυπτέρυγες αναπτύσσονται μεγαλύτερες τιμές ροπής παρόλο που δεν παρουσιάζονται μεγάλες ταχύτητες περιστροφής. Για την παραγωγή ισχύος σε μεγάλη κλίμακα δηλαδή στα Αιολικά πάρκα χρησιμοποιούνται συνήθως τριπτέρυγες μηχανές, οριζοντίου άξονα, ανάντη του πυλώνα και αυτές θα αναλυθούν περισσότερο. Τα τελευταία χρόνια βέβαια δίνεται κίνητρο από την πολιτεία για την εγκατάσταση μικρότερων μονάδων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από μικρότερες ανεμογεννήτριες ισχύος μέχρι 50 kW με αποτέλεσμα να προτιμώνται και οι κατάντη μηχανές ή αυτές οριζοντίου άξονα παρόλο που δεν θεωρείται ότι έχουν φτάσει σε συγκρίσιμη εγκατεστημένη ισχύ σε σχέση με τις πρώτες. Άσχετα με τον συγκεκριμένο τύπο κάθε μηχανής τα όσα αναφέρονται παρακάτω ανάγονται και στις υπόλοιπες διαμορφώσεις των μηχανών.



Σχ. 2.19. Ανεμογεννήτριες οριζοντίου άξονα ανάντη τριπτέρυγη και κατάντη διπτέρυγη.

Μια τυπική αιολική μηχανή έχει κάποια βασικά ηλεκτρομηχανολογικά μέρη όπως τον πύργο στήριξης, την πτερωτή, τον άξονα περιστροφής, το σύστημα μετάδοσης της κίνησης, το σύστημα ελέγχου, το σύστημα προσανατολισμού και την γεννήτρια. Κάποια άλλα βασικά εξαρτήματα που συνηθίζεται πλέον να είναι εξοπλισμένες όλες οι σύγχρονες ανεμογεννήτριες είναι τα αισθητήρια ανέμου και κάποιου είδους εφεδρικής πέδης που συνήθως είναι υδραυλικό δισκόφρενο. Η πτερωτή είναι από τα περισσότερο εμφανή σημεία της μηχανής και αποτελείται από τα πτερύγια, ο αριθμός των οποίων είναι συνήθως τρία για μεγάλες ανεμογεννήτριες, τα οποία κατασκευάζονται ως επί το πλείστον από ελαφρά κράματα μετάλλων επενδυμένα με ενισχυμένο πολυεστέρα ή από ξύλο σε συνδυασμό με ειδικές ρητίνες. Η γενική ιδέα στην κατασκευή των πτερυγίων είναι να κατασκευαστεί ένας συμπαγής πυρήνας επιφορτισμένος με την απορρόφηση των κραδασμών και των στρεπτικών και καμπτικών φορτίων ενώ για το περίβλημα του επιλέγεται κάποιου είδους ελαφρού υλικού ώστε να είναι εύκολο να πάρει αεροδυναμικό σχήμα χωρίς όμως να αυξηθεί περαιτέρω το συνολικό βάρος της κατασκευής. Το συνολικό εμβαδό όλων των πτερυγίων σπάνια καλύπτει περισσότερο από 10% του εμβαδού του κύκλου που διαγράφουν τα άκρα των πτερυγίων (επιφάνεια σάρωσης). Η πιο διαδεδομένη διάταξη πτερωτής όπως αναφέρθηκε προηγουμένα είναι ανάντη του πύργου στήριξης με αποτέλεσμα να μην υπάρχει μεν αεροδυναμικός θόρυβος λόγω του πύργου στήριξης αλλά να απαιτείται, δε, ξεχωριστό σύστημα το οποίο θα ευθυγραμμίζει τον άξονα της μηχανής με την πορεία του ανέμου. Η επιλογή του αριθμού πτερυγίων έχει να κάνει με αρκετά θέματα μηχανικής και αντοχής αλλά σχεδόν πάντα δίνεται μια μικρή κλίση του άξονα περιστροφής ως προς το οριζόντιο επίπεδο και άλλη μια μικρή κλίση (κωνικότητα) των πτερυγίων με την κορυφή του κώνου της πτερωτής να δείχνει αντίθετα από την πορεία του ανέμου. Οι κλίσεις αυτές βοηθούν στον μετριασμό των ασκούμενων δυνάμεων και την βελτίωση της αεροδυναμικής της μηχανής, ενώ σε καμία περίπτωση δεν ξεπερνούν τις 10° . Στις μηχανές που απαιτείται διατήρηση σταθερών στροφών, δηλαδή με σύγχρονη γεννήτρια, έχει αναπτυχθεί μια μέθοδος ελέγχου στροφών σταθερών με την μεταβολή του βήματος των πτερυγίων. Εδώ τα πτερύγια έχουν την δυνατότητα να στραφούν γύρω από τον διαμήκη άξονά τους, ολόκληρα ή μέρος τους, ώστε να μεταβάλλεται η γωνία προσβολής τους από τον άνεμο. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται αφενός ο έλεγχος στροφών και αφετέρου ο έλεγχος παραγόμενης ισχύος, η ελαχιστοποίηση της μηχανικής καταπόνησης των πτερυγίων καθώς και η βελτίωση της αεροδυναμικής τους απόδοσης, ενώ ταυτόχρονα παρέχεται ένας ακόμα τρόπος πέδησης της μηχανής. Σε μικρής ισχύος ανεμογεννήτριες αντί του συστήματος ελέγχου με βήμα πτερυγίων μπορούσε να εγκατασταθεί πτυσσόμενη ουρά η οποία κατά την κανονική λειτουργία έφερνε τον άξονα της ανεμογεννήτριας παράλληλα στην πορεία του ανέμου. Από την άλλη όταν οι στροφές ξεπερνούσαν ένα όριο η ουρά αναδιπλωνόταν φέρνοντας έτσι τον άξονα κάθετα στην πορεία του ανέμου και έτσι σταματώντας την περιστροφή της μηχανής για να προστατευτεί.

Η πλήμνη είναι το μέρος του άξονα πάνω στο οποίο προσαρμίζονται τα πτερύγια, το αεροδυναμικό ρύγχος και η άτρακτος της μηχανής. Από την πλήμνη η κίνηση μεταφέρεται στον άξονα της μηχανής. Αυτός είναι κατασκευασμένος από χάλυβα και έχει μεγάλη μηχανική αντοχή αφού διαχειρίζεται μεγάλες μη μόνιμες στρεπτικές και καμπτικές ροπές. Στηρίζεται σε δυο τουλάχιστον ένοσφαιρα έδρανα στήριξης τα οποία αντέχουν τόσο το βάρος του άξονα όσο και τα εξασκούμενα μηχανικά φορτία. Ολόκληρος ο άξονας καθώς και τα υπόλοιπα στοιχεία τα οποία κινεί βρίσκονται στο εσωτερικό ενός κελύφους στην κορυφή του πύργου στήριξης το οποίο

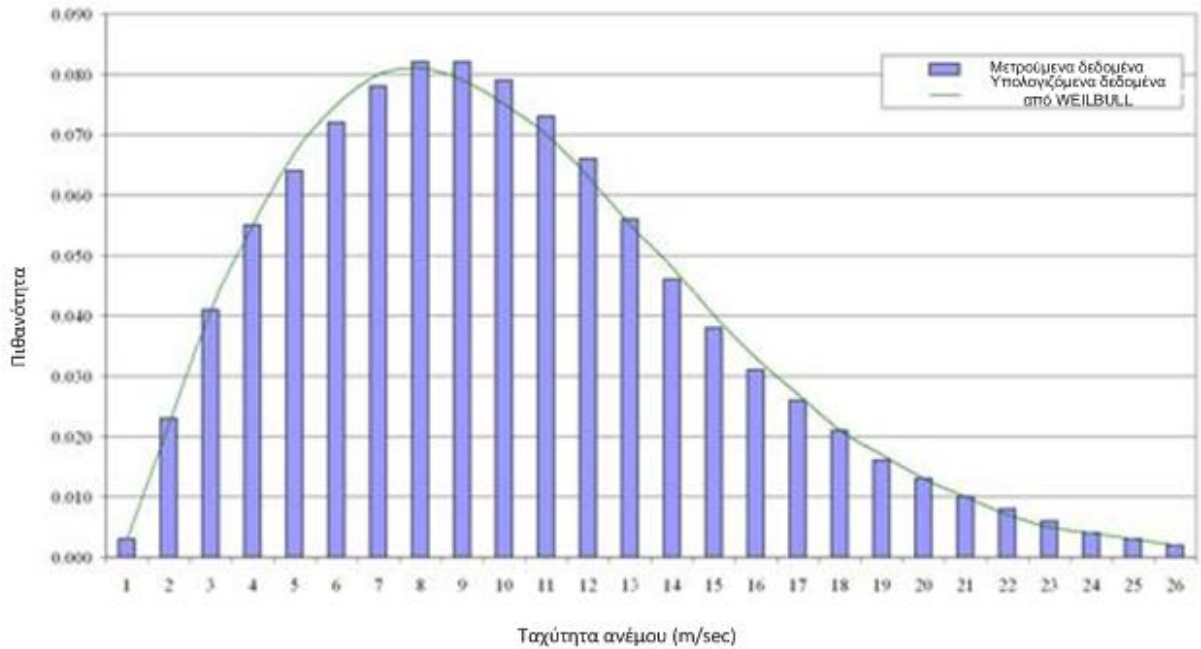
ονομάζεται νασέλα. Μέσα στην νασέλα βρίσκονται τα εφεδρικά συστήματα πέδησης, το σύστημα προσανατολισμού και η γεννήτρια με τα συστήματα ελέγχου της, ενώ στην κορυφή της υπάρχουν συνήθως αισθητήρια διεύθυνσης και ταχύτητας ανέμου.

Το σύστημα προσανατολισμού είναι ένα σύστημα αυτομάτου ελέγχου το οποίο δέχεται δεδομένα διεύθυνσης ανέμου και ενεργοποιεί κατάλληλο μηχανισμό ο οποίος στρέφει ολόκληρη την νασέλα παράλληλα στην πορεία του ανέμου (στην βέλτιστη θέση) για την πλήρη εκμετάλλευση του. Η μετάδοση της κίνησης από τον άξονα της πτερωτής σχεδόν πάντα γίνεται μέσω ενός κιβωτίου ταχυτήτων, με σχέση από 20 ως 110 ΣΑΛ σε 1000 ή 1500 ΣΑΛ, που είναι και η σύγχρονη ταχύτητα για τις εξαπολικές και τετραπολικές σύγχρονες γεννήτριες αντίστοιχα. Παρόλο που αυτή είναι μια πολύ συνηθισμένη μεθοδολογία κατασκευής δεν είναι απαραίτητη η χρήση σύγχρονης γεννήτριας. Έχουν κατασκευαστεί ανεμογεννήτριες με ασύγχρονες γεννήτριες ή με γεννήτριες συνεχούς ρεύματος. Με την ανάπτυξη που γνώρισαν τα ηλεκτρονικά ισχύος τις τελευταίες δεκαετίες αναπτύχθηκαν και συστήματα τα οποία χρησιμοποιούν ασύγχρονες γεννήτριες ή γεννήτριες μονίμου μαγνήτη για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με της μορφή εναλλασσόμενης τάσης διαφορετικής συχνότητας από αυτήν του δικτύου. Στην συνέχεια η εναλλασσόμενη αυτή τάση ανορθώνεται και με χρήση αντιστροφέα ξαναγίνεται εναλλασσόμενη της μορφής που χρησιμοποιεί το ΣΗΕ στο σημείο σύνδεσης. Με αυτό τον τρόπο αντιμετωπιστήκαν και προβλήματα όπως οι επιπτώσεις των ρυπών ανέμου στο σύστημα ή η απαίτηση για σταθερότητα στροφών και για αυτούς τους λόγους έχει γίνει πλέον πολύ διαδεδομένη η ανάπτυξη τέτοιων ανεμογεννητριών.

Ο πύργος στήριξης είναι συνήθως κατασκευασμένος είτε από χάλυβα ή από σκυρόδεμα και έχει κοίλο εσωτερικό στις ανεμογεννήτριες μεγάλης ισχύος. Δεν είναι σπάνιο σε μικρότερης ονομαστικής ισχύος και άρα βάρους ανεμογεννήτριες να βρεθούν και πύργοι στήριξης κατασκευασμένοι από μεταλλικό δίκτυωμα. Μέσω του κοίλου εσωτερικού τους επιτρέπεται η πρόσβαση στη κορυφή της ανεμογεννήτριας ενώ από εκεί γίνεται και η όδευση των αγωγών που μεταφέρουν την ηλεκτρική ισχύ από την ανεμογεννήτρια στον ηλεκτρολογικό πίνακα ο οποίος της αντιστοιχεί. Ο πύργος πρέπει να στηρίζεται σε γερά και βαθιά θεμέλια και η φυσική συχνότητα συντονισμού του δεν πρέπει σε καμία περίπτωση να συμπίπτει με τις επαγόμενες συχνότητες από την περιστροφή της πτερωτής, οι οποίες όπως και να έχει θα πρέπει να αποσβένονται. Οι άκαμπτοι πύργοι έχουν φυσική συχνότητα ιδιοσυντονισμού υψηλότερη από την επαγόμενη συχνότητα από την περιστροφή της πτερωτής, ενώ οι εύκαμπτοι μικρότερη. Οι εύκαμπτοι πύργοι είναι λιγότερο ακριβοί και έχουν μικρότερο βάρος από τους άκαμπτους, αλλά παρουσιάζουν μεγαλύτερες ταλαντώσεις της κορυφής τους, με αποτέλεσμα να είναι πολύ δύσκολη η πρόσβαση στην κορυφή τους σε ώρες με έστω και μεσαία ταχύτητα ανέμου. Επειδή οι εύκαμπτοι πύργοι έχουν φυσική ιδιοσυχνότητα μικρότερη από αυτή που επάγεται από την περιστροφή της έλικας, η κατασκευή παρουσιάζει μικρά διαστήματα φυσικού συντονισμού κατά τις περιπτώσεις που αναπτύσσονται στρόφες στον άξονα. Παρόλα αυτά το τράνταγμα που δημιουργεί ο συντονισμός τόσο στον πύργο όσο και στον άξονα δεν είναι μεγάλης έντασης αν και έχει αρκετά μεγάλη διάρκεια χωρίς να δημιουργούνται προβλήματα. Το ύψος των πύργων στήριξης είναι συνήθως μεγαλύτερο από μιάμιση φορά το μήκος του πτερυγίου (ακτίνα του κύκλου σάρωσης).

Επειδή πρόκειται για κατασκευές με πολύ μεγάλο στρεφόμενο όγκο έχει δοθεί μεγάλη έμφαση στο να γίνουν κατά το δυνατό ασφαλέστερες τόσο στην εγκατάστασή τους όσο και στην λειτουργία τους. Για την εξασφάλιση της ασφαλούς λειτουργίας των ανεμογεννητριών εγκαθίσταται, σύστημα εποπτείας και ελέγχου, το οποίο είναι υπεύθυνο για τον έλεγχο της αυτόματης απότομης αύξησης των στροφών, της μεταβολής του βήματος των πτερυγίων και της παύσης λειτουργίας τόσο σε ομαλές όσο και σε ανώμαλες συνθήκες. Επίσης το σύστημα αυτό είναι υπεύθυνο για την εποπτεία μεγεθών όπως ταχύτητα και φορά ανέμου, παραγόμενη ισχύς παρούσα θέση του άξονα σε σχέση με την φορά του ανέμου κλπ. Τα δεδομένα που συλλέγονται είναι προσβάσιμα και απομακρυσμένα από υπολογιστή (τηλεοπτεία).

Ακόμα θα πρέπει να γίνει μια αναφορά στην Αιολική ενέργεια καθαυτή και τον τρόπο εκτίμησης των ενεργειακών απολαβών που θα είχε μια ανεμογεννήτρια δεδομένου ότι είναι γνωστά τα Αιολικά χαρακτηριστικά μιας περιοχής. Η ισχύς που παρέχει ο άνεμος είναι ανάλογη με τον κύβο της ταχύτητας του, είναι λοιπόν απαραίτητο να είναι γνωστή η ταχύτητα του ανέμου και η συχνότητα με την οποία απαντάται στην διάρκεια ενός έτους π.χ. για να εκτιμηθεί η ετήσια ηλεκτροπαραγωγή μιας γνωστής ανεμογεννητριας. Η εγκατάσταση ενός Αιολικού πάρκου είναι μια ιδιαίτερα ακριβή επένδυση και αν δεν γίνει σωστή μελέτη ενδέχεται να αυξηθεί υπερβολικά ο χρόνος απόσβεσης. Για την σωστή εκμετάλλευση του ανέμου επιστρατεύονται διάφορα στατιστικά εργαλεία το σημαντικότερο των οποίων είναι η καμπύλη Weibull που δείχνει την στατιστική πιθανότητα εμφάνισης κάθε ταχύτητας ανέμου. Από τα δεδομένα αυτά επιλέγεται το κατάλληλο είδος ανεμογεννήτριας, το σωστό ύψος ιστού και τα ειδικά χαρακτηριστικά που πρέπει να έχει η μηχανή όπως ταχύτητα εισαγωγής (cut in speed) και ταχύτητα αποκοπής (cut out speed).



Σχ. 2.20. Ιστόγραμμα και συνάρτηση (Weibull) για πιθανότητα ύπαρξης συγκεκριμένης ταχύτητας ανέμου.

Αξίζει να αναφερθεί για το παραπάνω σχήμα ότι είναι κατασκευασμένο λαμβάνοντας υπόψη δεδομένα τουλάχιστον ενός έτους με μετρήσεις ανέμου που λαμβάνονται ανά δευτερόλεπτο και ομαδοποιούνται με μορφή μέσης τιμής δεκαλέπτου για έναν τουλάχιστον χρόνο. Επίσης οι μετρήσεις λαμβάνονται σε συγκεκριμένο ύψος και ανάγονται στο ύψος στερέωσης της ανεμογεννήτριας σύμφωνα με μια από τις παρακάτω εξισώσεις.

- Εκθετική συνάρτηση:
$$V_{(z)} = V_r \left(\frac{z}{z_r} \right)^a \quad (2.6)$$

όπου z το επιθυμητό ύψος από την επιφάνεια του εδάφους, V_r η ταχύτητα ανέμου στο ύψος αναφοράς, δηλαδή στο ύψος στο οποίο ελήφθησαν οι μετρήσεις, z_r το ύψος αναφοράς, $V_{(z)}$ η ταχύτητα στο επιθυμητό ύψος και a ένας συντελεστής που εξαρτάται από την μορφολογία του εδάφους. Τυπικές τιμές του a είναι από 0.01 για λείο ανάγλυφο εδάφους ως 0.28 για αγροτικές ή δασώδεις περιοχές με πολλά δέντρα.

- Λογαριθμική συνάρτηση:
$$V_{(z)} = V_r \frac{\ln \left(\frac{z}{z_0} \right)}{\ln \left(\frac{z_r}{z_0} \right)} \quad (2.7)$$

όπου z_0 το μήκος της ανωμαλίας του εδάφους.

Μπορούν να χρησιμοποιηθούν και οι δύο συναρτήσεις για τον υπολογισμό της ταχύτητας ανέμου στο επιθυμητό ύψος αν είναι γνωστή η ταχύτητα του στο ύψος αναφοράς. Ακολουθεί πίνακας με τις τυπικές παραμέτρους που χρησιμοποιούνται σε τέτοιου είδους υπολογισμούς. Ενώ ο υπολογισμός της καμπύλης Weibull γίνεται με την χρήση της παρακάτω εξίσωσης.

$$P_{(V)} = \frac{k}{C} \left(\frac{V}{C} \right)^{k-1} e^{-\left(\frac{V}{C} \right)^k} \quad (2.8)$$

όπου $p_{(V)}$ η συχνότητα συμβάντος μιας ταχύτητας ανέμου V , το C είναι η χαρακτηριστική ταχύτητα ανέμου ή η παράμετρος κλίμακας όπως αναφέρεται στην στατιστική, ενώ μπορεί να συμβολίζεται και με το λ και τέλος k είναι η μορφολογική παράμετρος.

Πίνακας 2. Παράμετροι για τον υπολογισμό κατακόρυφου προφίλ ταχύτητας ανέμου.

Τύπος εδάφους	Κατάταξη ανωμαλίας εδάφους	Μήκος ανωμαλίας του εδάφους z_0 (m)	Εκθέτης a
Υδάτινες περιοχές	0	0.001	0.01
Ανοικτός χώρος με λίγα εμπόδια	1	0.12	0.12
Αγροτική περιοχή με κτίρια και αχυρώνες	2	0.05	0.16
Αγροτική περιοχή με πολλά δέντρα, δάση και χωριά	3	0.3	0.28

Γνωρίζοντας κανείς το προφίλ του ανέμου στο ύψος του άξονα μπορεί να υπολογίσει τόσο την ισχύ που αποδίδει ο άνεμος σε μια δεδομένη χρονική στιγμή ή την ενέργεια που μπορεί να προσφέρει σε μια χρονική περίοδο που συνήθως επιλέγεται να είναι ένα έτος. Ένα ρεύμα ανέμου που διαρρέει μια επιφάνεια A αποδίδει ροή μάζας ανά μονάδα χρόνου ίση με ρAV . Προκύπτει ότι η παρεχόμενη ισχύς είναι:

$$W = \frac{1}{2} \rho \cdot A \cdot V^3 \quad (2.9)$$

Όπου ρ η πυκνότητα του αέρα σε kg/m^3 , V η ταχύτητα του ανέμου σε m/sec και W η ισχύς σε $Watt$ ή j/sec . Αυτή η ισχύς αναφέρεται και σαν ροή ενέργειας ή πυκνότητα ισχύος του ανέμου. Πολλαπλασιασμένη με τον χρόνο τον οποίο εφαρμόζεται ο άνεμος στην πτερωτή, η ισχύς αυτή θα δώσει την ενέργεια που προσέφερε ο άνεμος στην μηχανή. Από όλη αυτήν την ενέργεια μόνο ένα ποσοστό μπορεί να καταλήξει να γίνει ηλεκτρική, λόγω των απωλειών και των φυσικών φαινομένων που συμβαίνουν αφού η ροή του ανέμου περάσει την πτερωτή. Το ποσοστό αυτό λέγεται συντελεστής απόδοσης και συμβολίζεται διεθνώς ως c_p . Ο Betz απέδειξε ότι σε καμία περίπτωση το ποσοστό αυτό δεν μπορεί να ξεπεράσει το 59.3%, αριθμός που ονομάστηκε όριο Betz. Οι σύγχρονοι κατασκευαστές ανεμογεννητριών έχουν αυξήσει την απόδοση των μηχανών με επεμβάσεις στην αεροδυναμική και την γεωμετρία των πτερυγίων, ενώ σε μηχανές ισχύος μεγαλύτερης του 1 MW ο συντελεστής απόδοσης μπορεί να ξεπεράσει το 35%.

ΜΟΡΦΗ ΑΓΟΡΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΚΑΙ ΔΙΑΣΥΝΔΕΣΕΙΣ

3. Εισαγωγή

Η επιλογή του εναλλασσόμενου ρεύματος, έναντι του συνεχούς, σχετίζεται άμεσα με το σημερινό μοντέλο κεντρικοποιημένης παραγωγής, έναντι του μοντέλου της διεσπαρμένης παραγωγής. Η επικράτηση του εναλλασσόμενου ρεύματος έναντι του συνεχούς ακολούθησε μετά από σφοδρή αντιδικία και ανταγωνισμό μεταξύ δύο σημαντικών παραγόντων της οικονομικής και τεχνολογικής ζωής στις ΗΠΑ κατά τις αρχές του 20^{ου} αιώνα, του Thomas Alva Edison και του βιομήχανου George Westinghouse ο οποίος υπήρξε χρηματοδότης και ένθερμος υποστηρικτής του Nicola Tesla, εφευρέτη μεταξύ άλλων της μηχανής εναλλασσόμενου ρεύματος.

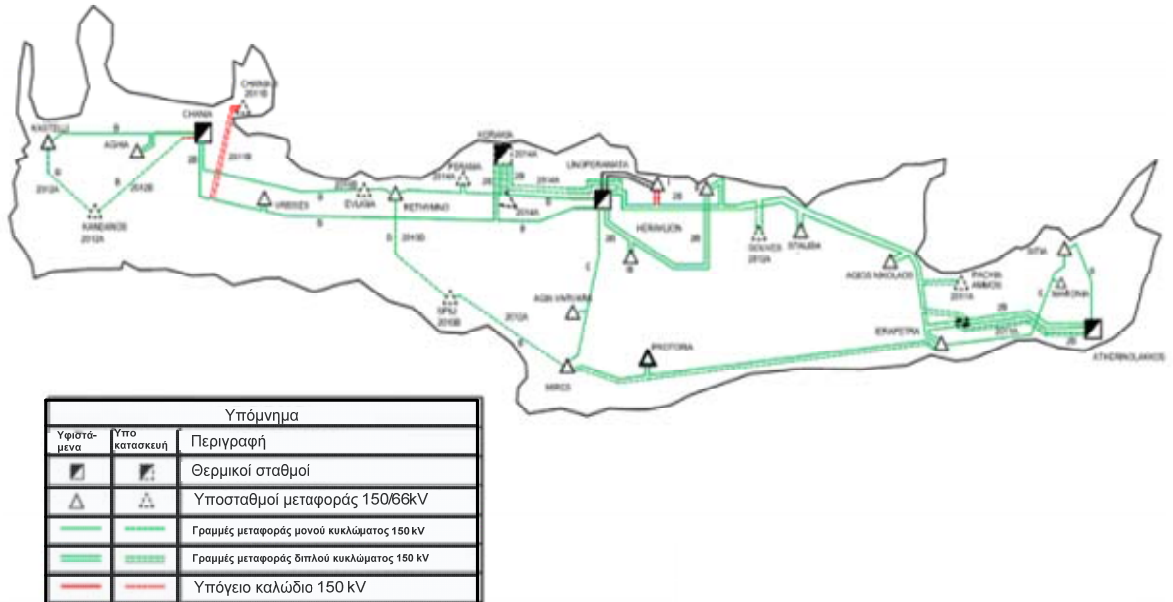
Τη στιγμή που έγινε δυνατή η μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας από ένα παραγωγό σε ένα καταναλωτή δημιουργήθηκε το πρώτο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας. Με την επέκταση των δικτύων ηλεκτρικής ενέργειας, ώστε να συμπεριλάβουν περισσότερους καταναλωτές, εμφανίστηκε η ανάγκη μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας σε μεγάλες αποστάσεις. Η καλύτερη λύση για να μειωθούν οι απώλειες ισχύος σε αυτές τις μεταφορές είναι η ανύψωση της τάσης. Αυτό ήταν εξαιρετικά απλό με την χρήση μετασχηματιστών στο εναλλασσόμενο ρεύμα και ιδιαίτερα δύσκολο και μη αποδοτικό με το συνεχές, εκείνη την εποχή. Για αυτό το λόγο επικράτησε άλλωστε και η χρήση του.

Σκοπός ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας είναι να παράγει και να μεταφέρει ηλεκτρική ενέργεια στον τελικό καταναλωτή σε επιθυμητό επίπεδο τάσης και συχνότητας, με τον οικονομικά και περιβαλλοντικά βέλτιστο τρόπο. Τα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας ή δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας χωρίζονται σε δύο κατηγορίες ανάλογα με το μέγεθος τους. Τα αυτόνομα συστήματα τα οποία είναι μικρότερα τόσο όσον αφορά στην ισχύ που εξυπηρετούν αλλά και ως προς την γεωγραφική τους έκταση η οποία είναι επίσης περιορισμένη. Τα διασυνδεδεμένα συστήματα αποτελούνται ουσιαστικά από πολλά υποσυστήματα (αυτόνομα δίκτυα) συνδεδεμένα με τέτοιο τρόπο ώστε να βελτιστοποιείται η συνολική λειτουργία τους.

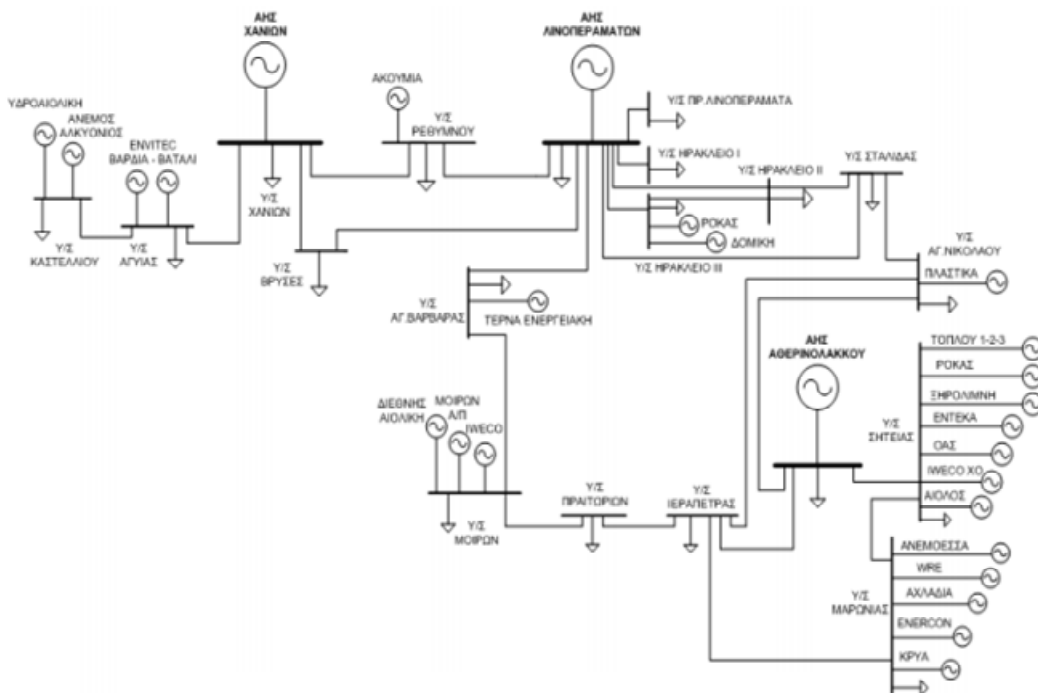
Η πρώτη διεθνής διασύνδεση στον κόσμο έγινε το 1901 μεταξύ των δικτύων του Καναδά και των ΗΠΑ. Μετά από 5 χρόνια επιτεύχθηκε η πρώτη διεθνής διασύνδεση στην Ευρώπη όταν το 1906 η Ελβετία εγκατέστησε τότε διασυνδεδεμένες γραμμές ανάμεσα στο δίκτυο της και αυτά της Γαλλίας και της Ιταλίας. Έκτοτε τα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας συνδέονται με γειτονικά δίκτυα και συνεργάζονται μεταξύ τους, πλην όσων συναντούν γεωγραφικούς ή πολιτικούς περιορισμούς, κάνοντας όλο και πιο αξιόπιστη τη λειτουργία τους.

3.1. Αυτόνομα Συστήματα

Αυτόνομο θεωρείται ένα ΣΗΕ όταν έχει ένα μόνο σταθμό παραγωγής σε μικρή σχετικά απόσταση από τις καταναλώσεις, δεν έχει διασυνδέσεις με άλλα παρόμοια ΣΗΕ, έχει ένα μόνο ΚΚΦ και βρίσκεται σε τέτοια γεωγραφική θέση που είναι δύσκολο ή αδύνατο (για οικονομοτεχνικούς ή πολιτικούς λόγους) να διασυνδεθεί με κοντινά του ΣΗΕ. Χαρακτηριστικό των αυτόνομων δικτύων είναι η μικρή εγκατεστημένη ισχύς αλλά και η μικρή γεωγραφική έκταση που αυτά καταλαμβάνουν. Λόγω της μη σύνδεσης τους με γειτονικά δίκτυα όλες οι ενεργειακές ανάγκες (φορτίο) του δικτύου πρέπει ανά πάσα στιγμή να καλύπτονται από τις μονάδες παραγωγής του αυτόνομου δικτύου. Αυτό συνεπάγεται αυστηρό προγραμματισμό και μεγάλες ανάγκες σε στρεφόμενη εφεδρεία. Η στρεφόμενη εφεδρεία που απαιτείται αυξάνει το κόστος παραγωγής της kWh ενώ αν δεν είναι δυνατή η κάλυψη του φορτίου μέσω της στρεφόμενης εφεδρείας, ο διαχειριστής του δικτύου αναγκάζεται να καταφύγει σε απόρριψη φορτίου. Όσο πιο σπάνια γίνεται απόρριψη φορτίου υπονοείται καλύτερη ποιότητα του δικτύου. Γενικότερα στα μικρά αυτόνομα δίκτυα, κυρίως νησιωτικά, χρησιμοποιούνται γραμμές μέσης τάσης για μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας. Σε μεγαλύτερα αυτόνομα δίκτυα όπως αυτό της Κρήτης (Crete Power System, CPS) χρησιμοποιούνται και γραμμές υψηλής τάσης, λόγω των μεγαλύτερων αποστάσεων κατά τις οποίες πρέπει να μεταφερθεί η παραγόμενη ενέργεια (Εικ. 3.1). Επίσης στα μικρά αυτόνομα δίκτυα συνήθως υπάρχει χειρότερη ποιότητα ηλεκτρικής ενέργειας. Οι μεταβολές της συχνότητας του δικτύου είναι πολύ συχνές ενώ το ίδιο ισχύει και για την τάση.



Εικ. 3.1. Το αυτόνομο ΣΗΕ της νήσου Κρήτης σε μια σχηματική αναπαράσταση πάνω στον χάρτη όπως προβλέπεται να είναι μέχρι το τέλος του 2013.



Σχ. 3.1. Μονογραμμική αναπαράσταση του ΣΗΕ της Κρήτης. Με μεγάλο σύμβολο εναλλασσόμενης πηγής συμβολίζονται οι θερμικοί σταθμοί του νησιού ενώ με μικρό οι ανανεώσιμες πηγές.

Ένα άλλο χαρακτηριστικό των αυτόνομων συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας είναι ο περιορισμός της ενέργειας που δέχονται από “μη ελεγχόμενες” ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, όπως Φ/Β ή Αιολικά πάρκα (Σχ. 3.1). Γενικά ο διαχειριστής του συστήματος ορίζει στενά όρια διείσδυσης των ΑΠΕ στην παραγωγή του συστήματος που όταν υπερβαίνουν, οι διαχειριστές του συστήματος έχουν υποχρέωση να δώσουν εντολή για απόρριψη φορτίου στους παραγωγούς από ΑΠΕ. Τα τελευταία χρόνια γίνεται προσπάθεια και δίνονται κίνητρα για να βελτιωθεί η αξιοπιστία της παραγωγής από ΑΠΕ είτε με καλύτερες μετεωρολογικές προβλέψεις, είτε με εγκατάσταση πάρκων με εφεδρική συμβατική μονάδα παραγωγής συνήθως ντιζελοηλεκτρική, φυσικού αερίου για την ακριβή τήρηση του ημερήσιου προγραμματισμού. Ένας ακόμα τρόπος που εξετάζεται για την βελτίωση της συμπεριφοράς αυτόνομων συστημάτων είναι η εγκατάσταση υβριδικών πάρκων με δυνατότητα

αποθήκευσης ενέργειας. Με αυτή τη λογική θα πρέπει η περίσσεια ενέργειας όταν παρουσιάζεται να απορροφάται από τους υβριδικούς σταθμούς ενώ σε περιπτώσεις υψηλής ζήτησης θα πρέπει οι σταθμοί αυτοί να προσφέρουν τόσο την ισχύ που παράγουν όσο και κάποιο μέρος της ισχύος που έχουν υποθηκεύσει. Οι πιο συνηθισμένοι συνδυασμοί υβριδικών σταθμών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας είναι Αιολικά πάρκα με δυνατότητα αντλησιοταμίευσης ή Φ/Β πάρκα με μπαταρίες για αποθήκευση ενέργειας.

3.2. Διασυνδεδεμένα Συστήματα

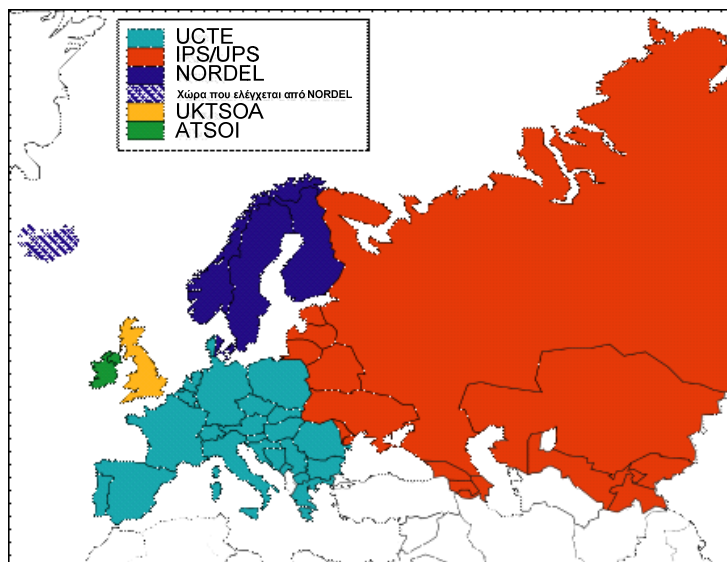
Όπως αναφέρθηκε παραπάνω δεν υπάρχει σαφής διαχωρισμός ανάμεσα στα αυτόνομα και τα διασυνδεδεμένα δίκτυα. Ένα διασυνδεδεμένο ΣΗΕ θα πρέπει να έχει διασυνδετήριες γραμμές που θα ενώνουν δυο τουλάχιστον απομακρυσμένα τμήματα του, κάθε ένα από τα τμήματα αυτά θα πρέπει σε κάποιο βαθμό να μπορεί να λειτουργήσει και ανεξάρτητα. Θα πρέπει δηλαδή να είναι δυνατή η κάλυψη της ζήτησης κάθε τμήματος είτε από το ίδιο, είτε έπειτα από συμφωνία από κάποιο άλλο μέσω των διασυνδετήριων γραμμών. Στην ουσία ένα διασυνδεδεμένο δίκτυο αποτελείται από περισσότερα αυτόνομα δίκτυα τα οποία έχουν δυνατότητα ανταλλαγής ισχύος μέσω διασυνδέσεων τους.

Οι διασυνδέσεις αυτές βελτιώνουν την ποιότητα της ενέργειας του δικτύου μειώνοντας την εφεδρεία που απαιτείται ενώ ταυτόχρονα μειώνουν το κόστος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Εξαιτίας του μεγέθους των διασυνδεδεμένων δικτύων οι διαταραχές που δημιουργούνται λόγω των μεταβολών του φορτίου καλύπτονται από όλες της μονάδες του συστήματος και έτσι απαιτείται μικρότερη εφεδρεία. Για τον ίδιο λόγο μπορεί να αποφευχθεί ή να αναβληθεί η κατασκευή ορισμένων μονάδων παραγωγής. Οι διασυνδέσεις μπορούν να είναι είτε σύγχρονες είτε ασύγχρονες ανάλογα με την απόσταση και την ποιότητα των προς διασύνδεση δικτύων.

Η σύγχρονη διασύνδεση υπονοεί διασύνδεση με μετασχηματιστές και γραμμές μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας υψηλής τάσης εναλλασσόμενου ρεύματος (High Voltage Alternating Current, HVAC). Σε αυτή την περίπτωση απαραίτητη προϋπόθεση για την διασύνδεση είναι και τα δύο δίκτυα να έχουν την ίδια ονομαστική συχνότητα λειτουργίας. Αυτός ο τρόπος διασύνδεσης προτιμάται για δίκτυα παρόμοιας ποιότητας ηλεκτρικής ενέργειας και για σχετικά κοντινές αποστάσεις. Η χρήση των ευέλικτων συστημάτων μεταφοράς εναλλασσόμενου ρεύματος (Flexible Alternating Current Transmission Systems, FACTS) που έγινε εφικτή με την ανάπτυξη των ηλεκτρονικών ισχύος, βοήθησε επίσης να εδραιωθεί αυτή η τοπολογία διασύνδεσης. Έτσι αυξήθηκε η δυνατότητα ελέγχου της μεταφερόμενης ισχύος, που μέχρι πρότινος δεν ήταν εφικτός.

Η ασύγχρονη διασύνδεση από την άλλη χρησιμοποιείται σε περιπτώσεις που η απόσταση ανάμεσα στα προς διασύνδεση δίκτυα είναι πολύ μεγάλη ή όταν το ένα από τα δύο δίκτυα έχει πολύ χειρότερης ποιότητας ενέργεια από το άλλο. Ακόμα, όταν η ονομαστική συχνότητα των προς διασύνδεση δικτύων είναι διαφορετική ο μόνος τρόπος μεταφοράς ενέργειας είναι με ασύγχρονη διασύνδεση. Τότε η διασύνδεση γίνεται με χρήση αντιστροφών που χρησιμοποιούν ηλεκτρονικά ισχύος και με γραμμές μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας συνεχούς ρεύματος υψηλής τάσης (High Voltage Direct Current, HVDC). Σε αυτές της περιπτώσεις, παρόλο που αυξάνεται το κόστος και η πολυπλοκότητα εγκατάστασης, παρατηρείται μείωση των απωλειών μεταφοράς. Παρατηρείται επίσης μείωση της χωρητικότητας της γραμμής, που στο εναλλασσόμενο ρεύμα αυξάνεται ανάλογα με το μήκος της γραμμής μεταφοράς. Γενικότερα επιτυγχάνεται καλύτερος βαθμός απόδοσης της μεταφοράς. Το μεγαλύτερο πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι η δυνατότητα που δίνει, να μεταφέρεται ενέργεια αμφίδρομα ανάμεσα στα δίκτυα χωρίς όμως να μεταφέρονται και τα σφάλματα από την μια πλευρά της διασυνδετήριας γραμμής στην άλλη. Με αυτόν τον τρόπο συμβάλουν στην προστασία από το φαινόμενο Domino. Κατά το φαινόμενο Domino, το διασυνδεδεμένο δίκτυο βγαίνει εκτός λειτουργίας σταδιακά, λόγω σφάλματος ή μη ικανής εφεδρείας σε συνδυασμό με απροσεξία. Με χρήση της ασύγχρονης διασύνδεσης ελαχιστοποιείται η πιθανότητα ολικού black out.

Άσχετα με τον τρόπο, η διασύνδεση των ΣΗΕ είναι ζωτική για την βελτίωση της ευστάθειας τους. Λόγω της έκτασης που καταλαμβάνουν και της απόστασης που τα χωρίζει η διασυνδέσεις μπορεί να εκτείνονται για εκατοντάδες χιλιόμετρα και να διασχίζουν αρκετές χώρες. Κλασικά παραδείγματα είναι αυτά του ευρωπαϊκού διασυνδεδεμένου συστήματος (Εικ. 3.2) και του συστήματος των ΗΠΑ (Εικ. 3.3).



Εικ. 3.2. Ευρασιατικός χάρτης με τα διακριτά εθνικά ηλεκτρικά συστήματα.



Εικ. 3.3. Χάρτης Βορείου Αμερικής με τα διακριτά τοπικά ηλεκτρικά συστήματα. Το διασυνδεδεμένο αυτό ΣΗΕ διαχειρίζεται από το συμβούλιο ηλεκτρικής αξιοπιστίας Βορείου Αμερικής (North America Electric Reliability Council, NERC).

3.3. Αγορές Ηλεκτρικής Ενέργειας

Αρχικά τα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας ήταν δομημένα ώστε οι μονάδες παραγωγής, οι οποίες σχεδόν πάντα ήταν σε απόσταση από τους καταναλωτές, να παράγουν ηλεκτρική ενέργεια και να τροφοδοτούν γραμμές μεταφοράς υψηλής τάσης. Οι όποιες ανταλλαγές ενέργειας, γίνονταν σε αυτό το επίπεδο τάσης. Στη συνέχεια η ενέργεια έφτανε στους τελικούς καταναλωτές μέσω δικτύων διανομής.

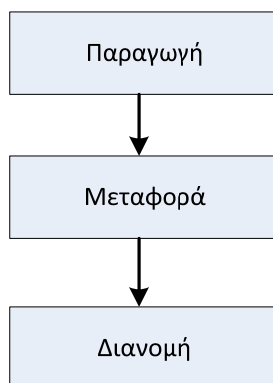
Μέχρι πολύ πρόσφατα η παραγωγή, μεταφορά και διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας γινόταν από μία εταιρεία (κάθετης ολοκλήρωσης). Στις περιπτώσεις που η διανομή γινόταν από διαφορετικές εταιρείες, η παραγωγή προερχόταν από ένα και μοναδικό παραγωγό. Ο καταναλωτής σε αυτή την φάση βρίσκεται σε ένα μονοπωλιακό καθεστώς. Δεν έχει δυνατότητα επιλογής ή σύγκρισης της ποιότητας της ενέργειας που δέχεται έναντι μιας άλλης. Στον αντίποδα αυτή η δομή έδινε στις κυβερνήσεις την δυνατότητα να ασκήσουν κοινωνική πολιτική, αναπτύσσοντας το σύστημα ώστε να ηλεκτροδοτηθούν φτωχές ή αγροτικές περιοχές ή να γίνει καλύτερη εκμετάλλευση των εγχώριων ενεργειακών πηγών που υπήρχαν σε μεγαλύτερη αφθονία.

Από την δεκαετία του 70 στην Αμερική και αργότερα και στην Ευρώπη εισήχθη η έννοια του ανταγωνισμού στον τομέα της παραγωγής. Λίγο αργότερα ξεκίνησε και η ιδιωτικοποίηση των ΣΗΕ. Παρόλο που η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μπορεί να είναι μια ανταγωνιστική αγορά το δίκτυο μεταφοράς και διανομής δεν μπορεί παρά να θεωρηθεί φυσικό μονοπώλιο. Στην Ευρωπαϊκή ένωση η οποία είναι μια γεωγραφική περιοχή όπου επιτρέπεται η ελεύθερη μετακίνηση αγαθών και υπηρεσιών εντός των συνόρων της, έγιναν προσπάθειες ώστε να ληφθούν μέτρα για τη δημιουργία μιας εσωτερικής αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας.

Επειδή η αγορά ηλεκτρικής ενέργειας έχει πάρα πολλούς εμπλεκόμενους, το βάρος πέφτει στην εταιρεία που κατέχει το δίκτυο. Ο ρόλος της εταιρείας που κατέχει το δίκτυο είναι μόνο να μεταφέρει την ηλεκτρική ενέργεια, ή με οικονομικούς όρους, να επιτρέψει τις συνδιαλλαγές μεταξύ καταναλωτών και παραγωγών έναντι αμοιβής. Στην ουσία στα σύγχρονα συστήματα το δίκτυο από μέσο για την μεταφορά ενέργειας γίνεται προϊόν το οποίο διαχειρίζεται ο κάτοχος του δικτύου, δημιουργώντας με αυτό τον τρόπο μια νέα αγορά.

3.3.1. Μη Απελευθερωμένη Αγορά

Σε αυτό το καθεστώς παρουσιάζεται μια εταιρεία παραγωγής που ταυτόχρονα είναι και ο διαχειριστής του δικτύου. Πέρα από τα καθήκοντα που αναφέρθηκαν η εταιρεία επωμίζεται και τον τομέα της διανομής. Αυτή είναι μια καθαρά μονοπωλιακή αγορά. Υπάρχουν περιπτώσεις σε τέτοιες αγορές ειδικά μετά την ανάπτυξη των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας κατά τις οποίες ανεξάρτητοι παραγωγοί πουλάνε ενέργεια στον διαχειριστή του δικτύου. Πρόκειται για μια κατάσταση στην οποία η εταιρεία συνήθως ελέγχεται από τον κρατικό μηχανισμό με ότι αυτό συνεπάγεται. Γενικά τέτοιου είδους εταιρείες, κάθετης ολοκλήρωσης, είναι κρατικοποιημένες και η πλειοψηφία των ΣΗΕ μέχρι τα τέλη της δεκαετίας του 80 λειτουργούσαν με αυτό τον τρόπο. Ακόμα και σε μονοπωλιακές αγορές όπως αυτές που περιγράφονται, οι ανταλλαγές ενέργειας ανάμεσα σε διασυνδεδεμένα δίκτυα ήταν αναγκαίες.



Σχ. 3.2. Μορφή ΣΗΕ κάθετης ολοκλήρωσης με διαχωρισμένες τις τρεις βασικές διεργασίες.

Το συγκεκριμένο μοντέλο σταμάτησε να λειτουργεί τις τελευταίες δεκαετίες στον Δυτικό κόσμο τουλάχιστον. Σημαντικό ρόλο σε αυτό έπαιξε η νομοθεσία που επιβλήθηκε από τον κρατικό μηχανισμό των χωρών αλλά και η αφύπνιση των καταναλωτών οι οποίοι άρχισαν να απαιτούν ποιοτική ενέργεια σε χαμηλή τιμή. Επίσης σημαντικό ρόλο έπαιξαν η ανάπτυξη της τεχνολογίας των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας αλλά και ευαισθητοποίηση προς την μόλυνση του περιβάλλοντος από ρύπους που δημιουργούνται με τους περισσότερους συμβατικούς τρόπους παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.

Στα αυτόνομα δίκτυα η απελευθέρωση της αγοράς δεν είναι εύκολη, κυρίως λόγω των γεωγραφικών περιορισμών αλλά και του κορεσμού του δικτύου από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Για παράδειγμα παρόλες τις προσπάθειες που έχουν γίνει στο αυτόνομο σύστημα της Κρήτης για διασύνδεση με το ηπειρωτικό σύστημα, δυστυχώς δεν προβλέπεται αυτό να γίνει άμεσα. Προς το παρόν διαχειριστής του δικτύου παραμένει η Δημόσια Εταιρεία Ηλεκτρισμού (ΔΕΗ).

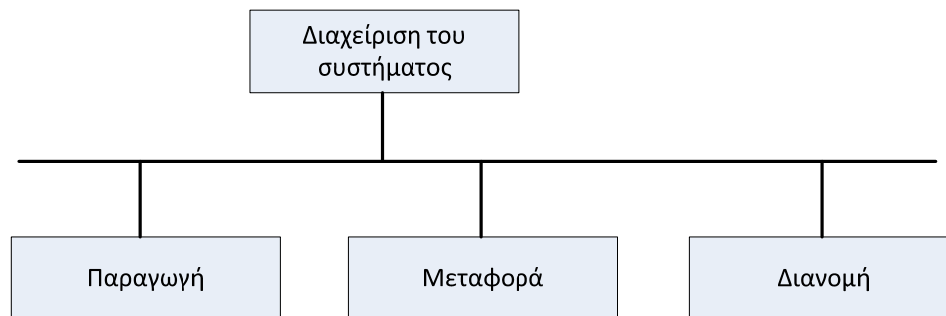
3.3.2. Απελευθερωμένη Αγορά

Το καπιταλιστικό οικονομικό σύστημα ευνοεί την ανάπτυξη απελευθερωμένων αγορών σε όλους τους τομείς. Οι βασικές αρχές του είναι η ανυπαρξία μονοπωλίων που, θεωρητικά τουλάχιστον, συνεπάγεται ανταγωνιστικές τιμές και βελτίωση της ποιότητας του τελικού προϊόντος. Η επιτυχία της εφαρμογής όσων αναφέρθηκαν σε αγορές ειδών πρώτης ανάγκης, όπως η αγορά ηλεκτρικής ενέργειας, είναι αμφιλεγόμενη διότι προϋποθέτει την ύπαρξη αδιάφθορου μηχανισμού ελέγχου της ανταγωνιστικότητας. Η μετάβαση από μη απελευθερωμένη, σε απελευθερωμένη αγορά πάντα έχει πρακτικές δυσκολίες. Η εταιρεία που αρχικά διαχειριζόταν την αγορά, στην μετάβαση, έχει πλεονέκτημα έναντι των νεοεισερχόμενων εταιριών. Υποχρεωτικά οι νεοεισερχόμενες εταιρείες αναγκάζονται να ξεκινήσουν με την κατασκευή ή αγορά μικρής κλίμακας μονάδων. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα το υψηλό κόστος παραγωγής του προϊόντος, στη συγκεκριμένη περίπτωση, της ηλεκτρικής ενέργειας. Το υψηλό κόστος παραγωγής είτε θα μεταφερθεί στον τελικό καταναλωτή, με αποτέλεσμα να μειωθεί η ανταγωνιστικότητα της εταιρείας, είτε θα μειωθεί το κέρδος της εταιρείας. Η μείωση του κέρδους συνεπάγεται μεγάλο χρόνο απόσβεσης του αρχικού κεφαλαίου και υποβάθμιση της αναπτυξιακής πολιτικής της εταιρείας.

Αυτό το καθεστώς εμπορικής λειτουργίας προϋποθέτει πολλές εταιρείες παραγωγής (Generation Companies, GENCOs) και διανομής (Distribution Companies, DISCOs) οι οποίες ανταγωνιστικά καθορίζουν τις τιμές τους ώστε να προσελκύσουν περισσότερους καταναλωτές. Επίσης θεωρείται αναγκαίο να υπάρχει τουλάχιστον μια εταιρεία μεταφοράς (Transmission Company, TRANSCO), η οποία διαχειρίζεται της συναλλαγές ανάμεσα στις εταιρείες παραγωγής και διανομής, έχει στην κυριότητα της το δίκτυο μεταφοράς και έχει ευθύνη για κάποιες επικουρικές υπηρεσίες (ancillary services). Μαζί οι εταιρείες παραγωγής και η εταιρεία μεταφοράς σχηματίζουν αυτό που ονομάζεται δεξαμενή ενέργειας (Energy pool). Κάθε δεξαμενή ενέργειας που δημιουργείται έχει την δυνατότητα να τροφοδοτήσει τους καταναλωτές που είναι διατεθειμένοι να αγοράσουν ενέργεια από αυτήν. Επειδή θα ήταν αδύνατο να γίνουν συναλλαγές ανάμεσα σε κάθε καταναλωτή και την δεξαμενή ενέργειας, επεμβαίνουν οι εταιρείες διανομής. Κάθε μια από αυτές δραστηριοποιείται ώστε να προσελκύσει καταναλωτές για να επιλέξουν αυτήν για την ηλεκτροδότηση τους. Παράλληλα, συνάπτει συμβόλαια με τις εταιρείες παραγωγής για να αγοράσει ενέργεια από αυτές σε ανταγωνιστικές τιμές. Οι εταιρείες διανομής δεν περιορίζονται στα στενά γεωγραφικά όρια της περιοχής τους (περιοχή ελέγχου), αλλά μπορούν να αναζητούν περισσότερο ανταγωνιστικές τιμές σε εταιρείες παραγωγής άλλων περιοχών. Για να διασφαλιστεί ότι όλοι οι καταναλωτές που επέλεξαν την εταιρεία διανομής θα έχουν απρόσκοπτα ενέργεια, συνάπτονται συμβόλαια ανάμεσα στις εταιρείες παραγωγής και διανομής. Έτσι ορίζεται η τιμή και η ποσότητα της ενέργειας που θα παράγεται και θα προμηθεύεται από την εταιρεία παραγωγής. Σε κάποιες περιπτώσεις ορίζεται ακόμα και ο χρόνος κατά τον οποίο θα παραχθεί η ενέργεια αυτή. Όταν τα συμβόλαια αφορούν εταιρείες παραγωγής και διανομής που ανήκουν σε διαφορετικές περιοχές ελέγχου, τα συμβόλαια αυτά ονομάζονται διμερή (bilateral contracts).

Η απελευθέρωση της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας είναι μια έννοια τουλάχιστον δυσνόητη. Έχει πολλές μορφές που μπορεί να επιτευχθεί και εφαρμόζονται σε κάθε περιοχή, βάσει πολιτικών, πολιτισμικών και κυρίως τεχνολογικών κριτηρίων. Η πιο απλή μορφή απελευθέρωσης περιλαμβάνει τον διαχωρισμό της παραγωγής, της μεταφοράς και της διανομής. Παρόλο που γίνεται αυτός ο διαχωρισμός δεν υπάρχει η έννοια του ανταγωνισμού σε αυτή την μορφή αφού επικρατεί μονοπωλιακό καθεστώς. Αυτή η μορφή απελευθέρωσης επικρατούσε και στην Ελλάδα μέχρι τον Φεβρουάριο του 2001. Γενικά με αυτόν τον τρόπο απελευθέρωσης επιτυγχάνεται ανάπτυξη του συστήματος και δίνεται η δυνατότητα άσκησης κοινωνικής πολιτικής στις κυβερνήσεις.

Στην δεύτερη μορφή απελευθέρωσης εισάγεται η έννοια του αντιπροσώπου της αγοράς. Ουσιαστικά όλοι οι καταναλωτές του συστήματος εκπροσωπούνται από ένα πρόσωπο που του ανατίθεται η ευθύνη να εξασφαλίσει ηλεκτρική ενέργεια στην καλύτερη δυνατή τιμή επιλέγοντας από διάφορους παραγωγούς. Στόχος αυτού του είδους απελευθέρωσης είναι η δημιουργία ανταγωνισμού στην παραγωγή με σκοπό να μειωθεί το κόστος, γεγονός αμφισβητήσιμο από πολλούς κατά την εφαρμογή του στις ΗΠΑ το 1978. Παρόλα αυτά το μονοπώλιο στη διανομή και την μεταφορά παρέμεινε στον αντιπρόσωπο της αγοράς. Αυτή η σχετικά απλή μορφή απελευθέρωσης απαιτεί σύναψη συμβολαίων ανάμεσα στον αντιπρόσωπο της αγοράς και τους ανεξάρτητους παραγωγούς ώστε να προστατευτούν οι ανεξάρτητοι παραγωγοί από τον κίνδυνο της αγοράς με σκοπό να αυξηθούν οι επενδύσεις τους χωρίς τον φόβο του ανταγωνισμού με έναν νέο παραγωγό που κατασκευάζει μια νέα μονάδα με πολύ χαμηλότερο κόστος παραγωγής. Με αυτήν την πολιτική το τεχνολογικό κόστος και το κόστος κινδύνου της αγοράς περνάει στον καταναλωτή. Με αυτή την μορφή απελευθέρωσης μετριάζεται το όφελος του ανταγωνισμού στην παραγωγή ενώ ταυτόχρονα το σύστημα και οι νέες μονάδες δεν αναπτύσσονται με το ρυθμό που θα έπρεπε.



Σχ. 3.3. Μορφή ενός ΣΗΕ μετά την απελευθέρωση της αγοράς του.

Η τρίτη μορφή απελευθέρωσης η οποία αντικατέστησε την προηγούμενη στις ΗΠΑ το 1992 ενώ εφαρμόστηκε το 1990 στη Μ. Βρετανία αμέσως μετά την ιδιωτικοποίηση του ηλεκτρικού συστήματος, κατήργησε την έννοια του αντιπροσώπου της αγοράς. Εδώ εισάγεται ο ανταγωνισμός στην χονδρική πώληση με την μορφή των εταιριών λιανικής πώλησης ή εταιριών διανομής (Distribution Companies, DISCOs). Σε αυτήν την μορφή οι εταιρείες διανομής αγοράζουν απευθείας από τις εταιρείες παραγωγής (Generation Companies, GENCOs) και την μεταφέρουν με το δίκτυο μεταφοράς, στο οποίο έχουν ελεύθερη πρόσβαση. Από την πλευρά των τελικών καταναλωτών διατηρείται το μονοπώλιο τουλάχιστον σε τοπικό επίπεδο, αφού κάθε εταιρεία διανομής δραστηριοποιείται σε ξεχωριστό γεωγραφικό χώρο χωρίς να υπάρχει επικάλυψη. Επειδή δημιουργείται ένα μοντέλο με πολλούς αγοραστές και παραγωγούς ο ανταγωνισμός στην παραγωγή γίνεται πιο έντονος ενώ ο κίνδυνος αγοράς και τεχνολογίας επιστρέφει στους παραγωγούς. Με αυτήν την μορφή αυξάνεται ακόμα το κόστος συναλλαγών αφού απαιτείται η σύναψη συμφωνιών αγοράς και χρήσης του δικτύου. Ένα ακόμα αρνητικό χαρακτηριστικό της τρίτης μορφής απελευθέρωσης είναι η απώλεια της κυβερνητικής εξουσίας να επιβάλλει την χρήση συγκεκριμένων τεχνολογιών παραγωγής με άμεσο τρόπο.

Η τέταρτη και τελευταία μορφή απελευθέρωσης που εξετάζεται διαχωρίζει την διανομή από την διαδικασία της λιανικής πώλησης και εισάγει ακόμα ένα επίπεδο ανταγωνισμού, συγκεκριμένα στην λιανική πώληση. Σε αυτή τη μορφή κάθε καταναλωτής μπορεί να επιλέξει τον προμηθευτή του. Υπάρχει ελεύθερη πρόσβαση τόσο στο δίκτυο μεταφοράς όσο και διανομής. Η Καλιφόρνια, Βρετανία, Νορβηγία, Χιλή και Αυστραλία έχουν συστήματα που βασίζονται ή προσεγγίζουν αυτή τη μορφή απελευθέρωσης. Παρόλο που με αυτό τον τρόπο αυξάνεται ο ανταγωνισμός ταυτόχρονα αυξάνεται και η πολυπλοκότητα των συναλλαγών με άμεση επίδραση στο κόστος. Επίσης απαιτείται σύγχρονη τεχνολογία μετρητικού εξοπλισμού για την εφαρμογή αυτής της μορφής απελευθέρωσης. Για τους μικρούς καταναλωτές τα κόστη αυτά είναι δυσβάσταχτα στις περιπτώσεις που ο λιανοπωλητής δεν είναι η τοπική εταιρεία διανομής, ενώ σε περίπτωση κακής ποιότητας των υπηρεσιών είναι πολύ δύσκολη η ανίχνευση του υπεύθυνου.

Στον διαδικαστικό τομέα υπήρξαν πολλές δυσκολίες που η σύναψη συμβολαίων δεν αρκεί για να αντιμετωπίσει, αυτό οφείλεται στην δυναμική και απρόβλεπτη φύση των φορτίων που αυξάνεται ανάλογα με το μέγεθος του συστήματος. Ακόμα υπάρχει το θέμα της διαχείρισης του συστήματος μεταφοράς, η οποία πρέπει να γίνεται από ανεξάρτητο φορέα ώστε να αποφεύγονται συγκρούσεις συμφερόντων και ανεπιθύμητες καταστάσεις για το σύστημα. Για την αντιμετώπιση των παραπάνω δυσκολιών έγιναν οι κινήσεις που περιγράφονται παρακάτω. Καταρχάς ορίζεται ανεξάρτητος χειριστής συστήματος ο οποίος επιφορτίζεται την ευθύνη να είναι εφικτός ο προγραμματισμός για την χρήση του συστήματος, να διευθετούνται οι οικονομικές διαφορές ανάμεσα στους χρήστες του συστήματος αλλά και να εγγυάται την ελεύθερη πρόσβαση στο σύστημα. Ακόμα αυτή η αρχή θα πρέπει να είναι υπεύθυνη για την ποιότητα της ενέργειας που ρέει στο σύστημα, για αυτό το λόγο θα πρέπει να έχει δυνατότητα να ξεκινά ή να σταματά μονάδες ανεξάρτητα με τις συμφωνίες που υπάρχουν όταν απαιτείται έλεγχος συχνότητας, τάσης ή όταν υπάρχει κορεσμός των περιορισμών της μεταφοράς. Αυτή η αρχή είναι υπεύθυνη για την εξασφάλιση αυτών που ονομάζεται επικουρικές υπηρεσίες, δηλαδή εξασφάλιση στρεφόμενης και μη εφεδρείας και παραγωγή που μπορεί να ξεκινήσει χωρίς να τραβάει ισχύ από το δίκτυο ώστε να υπάρχει δυνατότητα επανεκκίνησης του συστήματος (black start). Τέλος, εξασφαλίζει τον καλύτερο τρόπο για ικανοποιητική επέκταση του συστήματος.

Όταν ένας καταναλωτής χρησιμοποιεί ένα φορτίο αυτόματα τραβάει ενέργεια από το δίκτυο άσχετα αν ο παραγωγός που είναι επιφορτισμένος με την παραγωγή της είναι εντός ή εκτός δικτύου. Ο καταναλωτής είναι δεσμευμένος να πληρώσει στον παραγωγό που έχει συμφωνήσει το κόστος της ενέργειας που κατανάλωσε. Στην συνέχεια θα πρέπει ο παραγωγός που πήρε τα χρήματα για την ενέργεια που δεν παρήγαγε να τα αποδώσει σε αυτούς που τελικά παρήγαγαν την ηλεκτρική ενέργεια. Λόγω του μεγάλου πλήθους τέτοιου είδους συναλλαγών, γίνεται αντιληπτή η πολυπλοκότητα του προβλήματος. Γεννήθηκε λοιπόν η ανάγκη, πέραν των συμβολαίων που δέσμευαν εταιρείες παραγωγής και διανομής, να δημιουργηθεί μια αγορά ή χρηματιστήριο. Με αυτό τον τρόπο

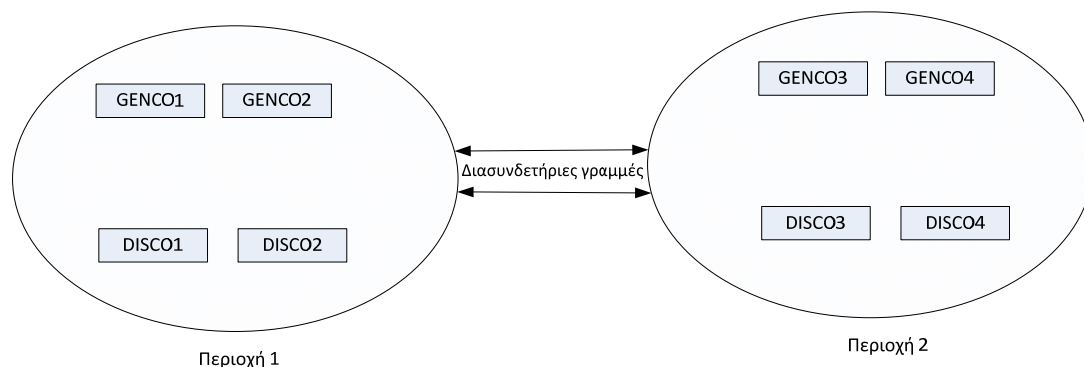
είναι δυνατό να καθοριστεί μια δίκαια τιμή για κάθε χρονική ζώνη. Πρακτικά, αν και υπάρχουν μειονεκτήματα σε αυτή τη διαδικασία, λόγω της φύσης της ηλεκτρικής ενέργειας και δεδομένου ότι δεν μπορεί να αποθηκευτεί αποδοτικά, φαίνεται να είναι η σωστότερη λύση. Όταν γίνεται παραβίαση συμβολαίων η περίσσια ηλεκτρικής ενέργειας χρεώνεται με την τιμή που έχει καθοριστεί για εκείνη τη χρονική ζώνη. Ένα ακόμα θετικό στοιχείο της δημιουργίας χρηματιστηρίου ηλεκτρικής ενέργειας είναι ότι διευκολύνει την μετάβαση από μη απελευθερωμένη σε απελευθερωμένη αγορά, πριν δηλαδή οι καταναλωτές κινητοποιηθούν για να επιλέξουν κατάλληλο προμηθευτή. Σε αυτό το στάδιο οι καταναλωτές επιθυμούν οι αντίστοιχοι προμηθευτές τους να εξασφαλίζουν τις καλύτερες τιμές.

Η λειτουργία αυτού του χρηματιστηρίου ισχύος βασίζεται στην διαχείριση του από έναν ανεξάρτητο φορέα ή τον χειριστή του δικτύου που όπως προαναφέρθηκε θα πρέπει να είναι αμερόληπτος και αδιάφθορος. Σε αυτό γίνεται μια δημοπρασία ανά τακτά χρονικά διαστήματα, συνήθως κάθε μέρα, όπου θα δίνονται προσφορές ηλεκτρικής ενέργειας για κάθε ώρα της επόμενης ημέρας. Σε πραγματικό χρόνο, την επόμενη μέρα, κάθε εταιρεία διανομής θα μπορεί να επιλέγει από ποιόν παραγωγό θα αγοράζει ηλεκτρική ενέργεια και σε ποια τιμή άσχετα με τα συμβόλαια που ίσως έχει υπογράψει με κάθε παραγωγό, αν την συμφέρει κάποια καλύτερη προσφορά.

Πριν προχωρήσει κάποιος στην επόμενη παράγραφο θεωρήθηκε απαραίτητο να οριστεί η έννοια της περιοχής ελέγχου, μια και θα απασχολήσει μεγάλο μέρος όσων ακολουθούν. Μια **περιοχή ελέγχου** είναι ένα ΣΗΕ το οποίο είτε είναι αυτόνομο είτε συνδέεται με άλλα ΣΗΕ μέσω διασυνδετήριων γραμμών (tie lines) με δυνατότητα μέτρησης της ανταλλασσόμενης ισχύος. Κάθε περιοχή ελέγχου ελέγχει την παραγωγή ενέργειας της ώστε να τηρήσει το πρόγραμμα ανταλλαγής ισχύος με τις υπόλοιπες περιοχές ελέγχου, ενώ παράλληλα συμβάλλει στη ρύθμιση συχνότητας του πλήρους συστήματος. Όλες οι περιοχές ελέγχου περιλαμβάνουν, αλλά δεν περιορίζονται σε, ένα κέντρο κατανομής φορτίου, αρκετές μονάδες παραγωγής, μετρητικά συχνότητας και ισχύος σε κάθε διασύνδεση τους και κάποιας μορφής έλεγχο φορτίου συχνότητας και αέργου ισχύος τάσης διέγερσης για τις μονάδες παραγωγής τους.

3.4. Μοντελοποίηση Συστημάτων Απελευθερωμένης Αγοράς

Σε αυτή την πτυχιακή εργασία θα εξεταστούν - μεταξύ άλλων - κάποια μοντέλα συστημάτων τα οποία ακολουθούν την λογική της απελευθερωμένης αγοράς. Όλα τα μοντέλα αυτής της κατηγορίας έχουν δύο περιοχές ελέγχου και έχει θεωρηθεί ότι κάθε περιοχή έχει δύο εταιρείες παραγωγής και δύο εταιρείες διανομής. Έστω ότι οι εταιρείες παραγωγής GENCO1 και GENCO2 βρίσκονται στην πρώτη περιοχή ενώ οι εταιρείες παραγωγής GENCO3 και GENCO4 βρίσκονται στην δεύτερη περιοχή. Αντίστοιχα, ας θεωρηθεί ότι οι εταιρείες διανομής DISCO1 και DISCO2 βρίσκονται στην πρώτη περιοχή και οι DISCO3 και DISCO4 στην δεύτερη περιοχή. Δεδομένου ότι κάθε εταιρεία διανομής μπορεί να συνάψει συμβόλαια με οποιαδήποτε εταιρεία παραγωγής προκύπτουν πάρα πολλοί συνδυασμοί συμβολαίων. Για να διευκολυνθεί η κατανόηση και η μοντελοποίηση της περίπτωσης αυτής δημιουργείται ένας πίνακας ο οποίος ονομάζεται “πίνακας συμμετοχής των εταιριών διανομής” (Disco Participation Matrix, *DPM*). Ο πίνακας αυτός έχει τόσες στήλες (j) όσες είναι οι εταιρείες διανομής και τόσες σειρές (i) όσες είναι οι εταιρείες παραγωγής. Κάθε στοιχείο του πίνακα αντιστοιχεί σε έναν αριθμό ο οποίος δείχνει το ποσοστό της ζητούμενης ενέργειας της κάθε εταιρείας διανομής που έχει συμφωνηθεί μέσω συμβολαίου να αγοραστεί από κάθε εταιρεία παραγωγής. Το στοιχείο αυτό ονομάζεται συντελεστής συμμετοχής συμβολαίου (contract participation factor, cpf_{ij}). Για παράδειγμα αν ο συντελεστής cpf_{23} είναι 0.4, σημαίνει ότι η εταιρεία διανομής DISCO3 έχει συμφωνήσει να αγοράσει το 40% της ισχύος που απαιτεί από την εταιρεία παραγωγής GENCO2. Επειδή όπως φαίνεται στο Σχ. 3.4 οι εταιρείες DISCO3 και GENCO2 ανήκουν σε διαφορετικές περιοχές ελέγχου το συμβόλαιο που έχουν συνάψει θεωρείται διμερές.



Σχ. 3.4. Δομή των μοντέλων που εξετάζονται στην περίπτωση της απελευθερωμένης αγοράς.

$$\begin{array}{c}
 \text{Αριθμός εταιρείας διανομής} \\
 \longrightarrow \\
 j \\
 DPM = \begin{bmatrix} c_{pf}_{11} & c_{pf}_{12} & c_{pf}_{13} & c_{pf}_{14} \\ c_{pf}_{21} & c_{pf}_{22} & c_{pf}_{23} & c_{pf}_{24} \\ c_{pf}_{31} & c_{pf}_{32} & c_{pf}_{33} & c_{pf}_{34} \\ c_{pf}_{41} & c_{pf}_{42} & c_{pf}_{43} & c_{pf}_{44} \end{bmatrix} \begin{array}{c} i \\ \downarrow \\ \text{Αριθμός εταιρείας} \\ \text{παραγωγής} \end{array}
 \end{array} \quad (3.1)$$

Πρέπει να ισχύει ότι σε κάθε στήλη το άθροισμα των στοιχείων θα ισούται με την μονάδα αφού ουσιαστικά πρόκειται για το 100% της ισχύος που απαιτεί κάθε εταιρεία διανομής. Από την άλλη η ισχύς σε pu που παράγει κάθε εταιρεία παραγωγής μπορεί να υπολογιστεί αν κάθε στοιχείο μιας γραμμής πολλαπλασιαστεί με την αντίστοιχη ισχύ που συνολικά απαιτεί η εταιρεία διανομής της ίδιας στήλης και στη συνέχεια προστεθούν. Αν για παράδειγμα ισχύει ότι όλες οι εταιρείες διανομής έχουν απαίτηση ισχύος 0.1 puMW και ο πίνακας DPM είναι:

$$DPM = \begin{bmatrix} 0.5 & 0.25 & 0 & 0.3 \\ 0.1 & 0.35 & 0.5 & 0.35 \\ 0.2 & 0.3 & 0 & 0 \\ 0.2 & 0.1 & 0.5 & 0.35 \end{bmatrix}$$

τότε από την παρακάτω σχέση:

$$P_{GENCOi} = c_{pf}_{i1} \cdot P_{DISCO1} + c_{pf}_{i2} \cdot P_{DISCO2} + c_{pf}_{i3} \cdot P_{DISCO3} + c_{pf}_{i4} \cdot P_{DISCO4} \quad (3.2)$$

προκύπτει ότι:

$$P_{GENCO1} = 0.5 \cdot 0.1 + 0.25 \cdot 0.1 + 0 \cdot 0.1 + 0.3 \cdot 0.1 = 0.105 \text{ puMW}$$

όπου P_{GENCOi} η ισχύς που έχει συμφωνηθεί να παράγει η εταιρεία παραγωγής 1 για να μοιραστεί στις εταιρείες διανομής 1,2 και 4.

Ακόμα, πέρα από τον πίνακα συμμετοχής των εταιριών διανομής ορίζεται ακόμα ένας πίνακας στον οποίο αναγράφεται ο συντελεστής συμμετοχής κάθε εταιρείας παραγωγής στον αυτόματο έλεγχο παραγωγής και ονομάζεται συντελεστής συμμετοχής περιοχής (area participation factor, apf). Ο πίνακας αυτός έχει μια στήλη και τόσες γραμμές όσες είναι οι εταιρείες παραγωγής. Το άθροισμα των συντελεστών που αντιστοιχούν στις εταιρείες παραγωγής μιας περιοχής θα πρέπει πάντα να ισούται με την μονάδα. Για την δομή που αναφέρεται, δηλαδή με δυο εταιρείες παραγωγής σε κάθε μια από τις δυο περιοχές ελέγχου, αν θεωρηθεί ότι η GENCO1 έχει $apf_1=0.3$ και η GENCO2 έχει $apf_2=0.7$, αυτό σημαίνει ότι από το συνολικό φορτίο της περιοχής 1 το 30% θα εξυπηρετηθεί από την πρώτη εταιρεία παραγωγής και το υπόλοιπο 70% από την δεύτερη, δηλαδή:

$$apf = \begin{bmatrix} 0.3 \\ 0.7 \\ 0.5 \\ 0.5 \end{bmatrix}$$

Για τις ανάγκες αυτής της πτυχιακής εργασίας, δεν ήταν δυνατό να εξεταστούν όλες οι πιθανές περιπτώσεις που μπορεί να παρουσιαστούν σε ένα τέτοιου είδους σύστημα όσο αφορά τα συμβόλαια που μπορούν να συναφθούν ανάμεσα στις διάφορες εταιρείες. Αντί για αυτό θα εξεταστούν τρία σενάρια λειτουργίας τα οποία

θεωρήθηκαν ότι αντιπροσωπεύουν κάποιες καταστάσεις που μπορεί να παρουσιαστούν συχνά και θα βοηθήσουν την κατανόηση της λειτουργίας του μοντέλου.

- Σενάριο 1 (Βασικό): Σε αυτήν την περίπτωση θεωρείται ότι κάθε εταιρεία παραγωγής συμμετέχει εξίσου στον αυτόματο έλεγχο παραγωγής. Ακόμα, θα υποθεθεί ότι η διαταραχή θα συμβεί στην πρώτη περιοχή του μοντέλου, έτσι μόνο οι εταιρείες διανομής 1 και 2 θα έχουν απαίτηση ισχύος. Έστω λοιπόν ότι η απαίτηση ισχύος είναι 0.1 puMW για κάθε μια από αυτές. Επίσης, θα θεωρηθεί ότι δεν υπάρχουν διμερή συμβόλαια σε αυτό το σενάριο και άρα κάθε εταιρεία διανομής θα καλύψει την ζήτηση της από τις εταιρείες παραγωγής που βρίσκονται στην περιοχή που ανήκουν. Κάθε εταιρεία παραγωγής θα συμμετέχει εξίσου στην κάλυψη της ζήτησης κάθε εταιρείας διανομής. Έτσι προκύπτουν οι πίνακες συμμετοχής εταιρειών διανομής (DPM_A) και συντελεστών συμμετοχής περιοχής (apf_A) όπως φαίνονται αντίστοιχα:

$$DPM_A = \begin{bmatrix} 0.5 & 0.5 & 0 & 0 \\ 0.5 & 0.5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$apf_A = \begin{bmatrix} 0.5 \\ 0.5 \\ 0.5 \\ 0.5 \end{bmatrix}$$

Επειδή δεν υπάρχει ζήτηση ισχύος από τις εταιρείες διανομής 3 και 4 οι δυο δεξιές στήλες του πίνακα συμμετοχής εταιρειών διανομής είναι μηδενικές, όπως επίσης είναι μηδενικό το κάτω μισό των δυο αριστερών στηλών αφού δεν υπάρχουν διμερή συμβόλαια. Για τους λόγους αυτούς η μεταφορά ισχύος από την μία περιοχή στην άλλη θα πρέπει να είναι μηδενική στην μόνιμη κατάσταση λειτουργίας. Αυτό σημαίνει ότι οι αποκρίσεις που θα αφορούν την ισχύ της διασυνδετήριας γραμμής θα πρέπει να ισορροπούν στο μηδέν μετά το πέρας του μεταβατικού φαινομένου. Σύμφωνα με όσα έχουν αναφερθεί μέχρι τώρα η παραγόμενη ισχύς κάθε εταιρείας παραγωγής θα πρέπει να καλύπτει την ζήτηση που έχει συμφωνηθεί βάσει των συμβολαίων με κάθε εταιρεία διανομής. Από την Εξ. 3.2 προκύπτει ότι η παραγόμενη ισχύς της πρώτης εταιρείας παραγωγής θα είναι:

$$P_{GENCO1} = 0.5 \cdot 0.1 + 0.5 \cdot 0.1 + 0 \cdot 0.1 + 0 \cdot 0.1 = 0.1 \text{ puMW}$$

ενώ οι παραγόμενες ισχύεις των υπόλοιπων εταιριών παραγωγής προκύπτουν ομοίως:

$$P_{GENCO2} = 0.1 \text{ puMW}$$

$$P_{GENCO3} = 0 \text{ puMW}$$

$$P_{GENCO4} = 0 \text{ puMW}$$

αυτές θα πρέπει να είναι και οι τιμές των αποκρίσεων της παραγόμενης ισχύος κάθε εταιρείας παραγωγής στην μόνιμη κατάσταση λειτουργίας.

Η ισχύς φορτίου σε κάθε περιοχή προκύπτει από το άθροισμα των ισχύων που παράγουν οι εταιρείες παραγωγής σύμφωνα με τον παράγοντα συμμετοχής τους. Η ισχύς φορτίου της περιοχής 1 και 2 υπολογίζεται από τις επόμενες εξισώσεις:

$$\Delta P_{L1} = P_{GENCO1} + P_{GENCO2} \quad (3.3)$$

$$\Delta P_{L2} = P_{GENCO3} + P_{GENCO4} \quad (3.4)$$

Με αντικατάσταση λοιπόν προκύπτει ότι $\Delta P_{L1}=0.2$ puMW και αντίστοιχα για την περιοχή 2, $\Delta P_{L2}=0$ puMW. Τα φορτία αυτά εισάγονται στα μοντέλα σαν διαταραχές ροπής φορτίου σε κάθε περιοχή.

- Σενάριο 2 (Μικτό): Εδώ επίσης θεωρείται ότι η απαίτηση ισχύος είναι 0.1 puMW για κάθε εταιρεία διανομής ενώ υπάρχουν και διμερή συμβόλαια. Κάθε εταιρεία παραγωγής θα συμμετέχει στην κάλυψη της ζήτησης κάθε εταιρείας διανομής σύμφωνα με τον πίνακα συντελεστών συμμετοχής περιοχής apf_B , ενώ διαμορφώνεται κατάλληλα και ο πίνακας συμμετοχής εταιρειών διανομής DPM_B :

$$DPM_B = \left[\begin{array}{cc|cc} 0.5 & 0.25 & 0 & 0.3 \\ 0.2 & 0.25 & 0 & 0 \\ 0 & 0.25 & 1 & 0.7 \\ 0.3 & 0.25 & 0 & 0 \end{array} \right]$$

$$apf_B = \begin{bmatrix} 0.75 \\ 0.25 \\ 0.5 \\ 0.5 \end{bmatrix}$$

Αφού εδώ υπάρχουν διμερή συμβόλαια, μπορεί να υπολογιστεί η ισχύς που πρέπει να μεταφερθεί από την μία περιοχή στην άλλη. Για τον υπολογισμό αυτό θα πρέπει να χρησιμοποιηθούν οι συντελεστές συμμετοχής συμβολαίων στο πάνω δεξιά και κάτω αριστερό τεταρτημόριο του πίνακα DPM_B και η απαιτούμενη ισχύς κάθε εταιρείας διανομής παραμένει όπως και στο σενάριο 1, στο 0.1 puMW. Άρα η περιοχή 1 θα πρέπει να δεχθεί από την περιοχή 2 ισχύ:

$$P_{2 \rightarrow 1} = cpf_{31} \cdot P_{DISCO1} + cpf_{32} \cdot P_{DISCO2} + cpf_{41} \cdot P_{DISCO1} + cpf_{42} \cdot P_{DISCO2} \quad (3.5)$$

$$P_{2 \rightarrow 1} = 0 \cdot 0.1 + 0.25 \cdot 0.1 + 0.3 \cdot 0.1 + 0.25 \cdot 0.1 = 0.08 \text{ puMW}$$

Ενώ αντίστοιχα η περιοχή 2 θα πρέπει να δεχθεί από την περιοχή 1 ισχύ:

$$P_{1 \rightarrow 2} = cpf_{13} \cdot P_{DISCO3} + cpf_{14} \cdot P_{DISCO4} + cpf_{23} \cdot P_{DISCO3} + cpf_{24} \cdot P_{DISCO4} \quad (3.6)$$

$$P_{1 \rightarrow 2} = 0 \cdot 0.1 + 0.3 \cdot 0.1 + 0 \cdot 0.1 + 0 \cdot 0.1 = 0.03 \text{ puMW}$$

Άρα η ισχύς της διασυνδετήριας γραμμής θα πρέπει μετά το πέρας του μεταβατικού φαινομένου να καταλήξει στην διαφορά των δυο παραπάνω ισχύων. Επειδή γενικά θεωρείται αναφορά η πρώτη περιοχή, ο αριθμός αυτός θα υπολογιστεί αφαιρώντας από την ισχύ που μεταφέρεται από την περιοχή 1 στην 2, την ισχύ που μεταφέρεται από την περιοχή 2 στην 1. Δηλαδή θα ισχύει:

$$\Delta P_{1 \rightarrow 2} = P_{1 \rightarrow 2} - P_{2 \rightarrow 1} \quad (3.7)$$

$$\Delta P_{1 \rightarrow 2} = 0.03 - 0.08$$

$$\Delta P_{1 \rightarrow 2} = -0.05 \text{ puMW}$$

Συνεπώς, στην περίπτωση αυτή, η μεταφορά ισχύος από την μία περιοχή στην άλλη θα πρέπει να είναι -0.05 puMW στην μόνιμη κατάσταση λειτουργίας. Η παραγόμενη ισχύς κάθε εταιρείας παραγωγής θα πρέπει να καλύπτει την ζήτηση που έχει συμφωνηθεί βάσει των συμβολαίων με κάθε εταιρεία διανομής. Προκύπτει ότι η παραγόμενη ισχύς της πρώτης εταιρείας παραγωγής θα είναι:

$$P_{GENCO1} = 0.5 \cdot 0.1 + 0.25 \cdot 0.1 + 0 \cdot 0.1 + 0.3 \cdot 0.1 = 0.105 \text{ puMW}$$

ενώ οι παραγόμενες ισχύεις των υπόλοιπων εταιριών παραγωγής προκύπτουν ομοίως:

$$P_{GENCO2} = 0.045 \text{ puMW}$$

$$P_{GENCO3} = 0.195 \text{ puMW}$$

$$P_{GENCO4} = 0.055 \text{ puMW}$$

αυτές θα πρέπει να είναι και οι τιμές των αποκρίσεων της παραγόμενης ισχύος κάθε εταιρείας παραγωγής στην μόνιμη κατάσταση λειτουργίας.

Με αντικατάσταση στις Εξ. 3.3 και 3.4, προκύπτει ότι $\Delta P_{L1} = 0.15$ puMW και αντίστοιχα για την περιοχή 2, $\Delta P_{L2} = 0.25$ puMW. Τα φορτία αυτά εισάγονται στα μοντέλα σαν διαταραχές ροπής φορτίου σε κάθε περιοχή.

- Σενάριο 3 (Παραβίαση Συμβολαίων): Στην περίπτωση αυτή παρουσιάζεται παραβίαση του συμβολαίου της εταιρείας διανομής 1. Κατά τα άλλα ισχύουν όσα ίσχυαν και στο σενάριο 2 με την διαφορά ότι θα θεωρηθεί ότι η απαιτούμενη ισχύς της πρώτης εταιρείας διανομής (DISCO1) θα γίνει 0.2 puMW αντί για 0.1 (μεγαλύτερη από τη συμφωνηθείσα). Άρα και εδώ ισχύουν οι πίνακες συντελεστών συμμετοχής περιοχής ($apf_c = apf_b$) και συμμετοχής εταιριών διανομής ($DPM_C = DPM_B$).

Για τον υπολογισμό της ισχύος από την περιοχή ελέγχου 1 στην 2 ακολουθείται η ίδια τεχνική με αυτήν που χρησιμοποιήθηκε στο σενάριο 2. Άρα σύμφωνα με την Εξ. 3.3, η περιοχή 1 θα πρέπει να δεχθεί από την περιοχή 2 ισχύ:

$$P_{2 \rightarrow 1} = 0 \cdot 0.2 + 0.25 \cdot 0.1 + 0.3 \cdot 0.2 + 0.25 \cdot 0.1 = 0.11 \text{ puMW}$$

Ενώ αντίστοιχα η περιοχή 2 θα πρέπει να δεχθεί από την περιοχή 1 ισχύ:

$$P_{1 \rightarrow 2} = 0 \cdot 0.1 + 0.3 \cdot 0.1 + 0 \cdot 0.1 + 0 \cdot 0.1 = 0.03 \text{ puMW}$$

Άρα η ισχύς της διασυνδετήριας γραμμής θα πρέπει μετά το πέρασ του μεταβατικού φαινομένου να καταλήξει στην διαφορά των δυο παραπάνω ισχύων. Δηλαδή θα ισχύει:

$$\Delta P_{1 \rightarrow 2} = 0.03 - 0.11$$

$$\Delta P_{1 \rightarrow 2} = -0.08 \text{ puMW}$$

λόγω όσων αναφέρθηκαν η μεταφορά ισχύος από την μία περιοχή στην άλλη θα πρέπει να είναι -0.08 puMW στην μόνιμη κατάσταση λειτουργίας. Προκύπτει ότι η παραγόμενη ισχύς της πρώτης εταιρείας παραγωγής θα είναι:

$$P_{GENCO1} = 0.5 \cdot 0.2 + 0.25 \cdot 0.1 + 0 \cdot 0.1 + 0.3 \cdot 0.1 = 0.205 \text{ puMW}$$

ενώ οι παραγόμενες ισχύεις των υπόλοιπων εταιριών παραγωγής προκύπτουν ομοίως:

$$P_{GENCO2} = 0.065 \mu MW$$

$$P_{GENCO3} = 0.195 \mu MW$$

$$P_{GENCO4} = 0.085 \mu MW$$

αυτές θα πρέπει να είναι και οι τιμές των αποκρίσεων της παραγόμενης ισχύος κάθε εταιρείας παραγωγής στην μόνιμη κατάσταση λειτουργίας.

Με αντικατάσταση στις Εξ. 3.3 και 3.4, προκύπτει ότι $\Delta P_{L1}=0.25 \mu MW$ λόγω της παραβίασης συμβολαίου της πρώτης εταιρείας διανομής και αντίστοιχα για την περιοχή 2, $\Delta P_{L2}=0.25 \mu MW$. Τα φορτία αυτά εισάγονται στα μοντέλα σαν διαταραχές ροπής φορτίου σε κάθε περιοχή.

Τα συστήματα που θα εξεταστούν σε αυτήν την πτυχιακή εργασία για λόγους οικονομίας υπολογιστικού χρόνου εξετάστηκαν για το σενάριο 1 εκτός από ένα το οποίο εξετάστηκε για όλα τα σενάρια λειτουργίας.

4. Εισαγωγή

Σε αυτό το Κεφάλαιο γίνεται αναφορά στο μαθηματικό υπόβαθρο που αφορά στην μοντελοποίηση των φυσικών συστημάτων. Παρουσιάζονται παραδείγματα εξαγωγής εξισώσεων καταστάσεων οι οποίες μοντελοποιούν κάποιες διεργασίες. Επίσης αναφέρονται μερικοί από τους πιο διαδεδομένους τρόπους επίλυσης των διαφορικών εξισώσεων που αφορούν τα συστήματα αυτά. Στη συνέχεια γίνεται μια παρουσίαση της μεθοδολογίας που αντιμετωπίζονται μέσω των μετασχηματισμών κατά Laplace ώστε να είναι κατανοητή η εξαγωγή συναρτήσεων μεταφοράς που στην ουσία μοντελοποιούν ένα σύστημα. Εξετάζονται ακόμα, ορισμένες τεχνικές που έχει επικρατήσει στην βιβλιογραφία να αναφέρονται σαν συμβατικές τεχνικές ελέγχου. Πρόκειται να γίνει μια αναφορά σε κάποιες από αυτές και μια αξιολόγηση των χαρακτηριστικών τους.

Γενικά τέτοιου είδους ελεγκτές δέχονται στην είσοδο τους το σήμα που προκύπτει από την διαφορά του σήματος ελέγχου ή αναφοράς (set point, sr) και του σήματος εξόδου που επιστρέφει με ανάδραση. Έπειτα δημιουργούν κατάλληλο σήμα που τροφοδοτείται στην είσοδο του συστήματος με σκοπό να αλλάξουν την έξοδό του στην επιθυμητή τιμή. Όταν ολοκληρωθεί η διαδικασία θα πρέπει, ιδανικά, το σήμα σφάλματος να έχει μηδενιστεί και η είσοδος του ελεγκτή να είναι μηδενική. Επίσης οι ελεγκτές αυτοί είναι κατασκευασμένοι να μην δίνουν έξοδο όταν δέχονται μηδενικό σήμα σφάλματος. Στα συστήματα αυτομάτου ελέγχου η χρήση των συμβατικών ελεγκτών έχει να κάνει σχεδόν πάντα με την βελτίωση των χαρακτηριστικών ενός υπάρχοντος συστήματος, ενώ η μεγαλύτερη πρόκληση παρουσιάζεται στο συντονισμό τους (ρύθμιση παραμέτρων, tuning) ώστε να έχουν την καλύτερη δυνατή επίδραση στο υπό μελέτη σύστημα. Η ευεργετική επίδραση των ελεγκτών έχει να κάνει με την αύξηση της ταχύτητας απόκρισης του συστήματος και την βελτίωση της ευστάθειας και της ακρίβειας του. Ο τρόπος που επεμβαίνουν στο σύστημα περιλαμβάνει την προσθήκη πόλων ή/και μηδενικών στην συνάρτηση μεταφοράς του συστήματος. Κάποιοι βασικοί τύποι ελεγκτών είναι οι διαφορικοί, οι ολοκληρωτικοί και οι αναλογικοί ελεγκτές, ενώ συχνά συναντάται αθροιστικός συνδυασμός και των τριών. Παρόλα αυτά δεν είναι σπάνιες οι περιπτώσεις που παρατηρείται η παράλειψη ενός εκ των τριών όρων αφού με αυτό τον τρόπο τελικά βελτιώνεται η απόκριση του συστήματος.

Τέλος συζητείται η προσθήκη των παραπάνω ελεγκτών σε μοντέλα μονάδων ηλεκτροπαραγωγής ώστε να βελτιώσουν την συμπεριφορά τους. Αρχικά θα αναλυθούν οι τρεις βασικοί τύποι ελεγκτών και έπειτα θα εξεταστούν αυτοί που χρησιμοποιήθηκαν για τις ανάγκες της παρούσας πτυχιακής εργασίας.

4.1. Συστήματα Ελέγχου

Ένα σύστημα ελέγχου είναι το σύνολο των εξαρτημάτων που χρησιμοποιούνται για να μεταβληθεί και να ισορροπήσει η τιμή μιας ή περισσότερων μεταβλητών εντός επιθυμητών ορίων. Τέτοιου είδους συστήματα συναντώνται συχνά στην καθημερινότητα του σύγχρονου ανθρώπου. Αυτά πάντα έχουν μια τουλάχιστον είσοδο, που ονομάζεται είτε μεταβλητή ελέγχου είτε διαταραχή ανάλογα με την προέλευση της. Ακόμα περιέχουν μια τουλάχιστον έξοδο, κάποιου τύπου ελεγκτή και μια βασική διεργασία προς έλεγχο. Επίσης μπορούν να συμπεριλαμβάνουν κλάδους ανατροφοδότησης (ανάδραση) των δεδομένων εξόδου ώστε να γίνει κατάλληλη ενέργεια διόρθωσης της μεταβλητής, αισθητήρια, ενισχυτές κ.α.. Το πιο σημαντικό κομμάτι των συστημάτων αυτομάτου ελέγχου είναι οι ελεγχόμενες μεταβλητές. Σαν ελεγχόμενη μεταβλητή χαρακτηρίζεται οποιαδήποτε μεταβλητή εξόδου του φυσικού συστήματος στην οποία επικεντρώνεται το ενδιαφέρον για έλεγχο. Για παράδειγμα ελεγχόμενη μεταβλητή θα μπορούσε να θεωρηθεί η θερμοκρασία ενός ψυγείου ή η θέση ενός ρομποτικού βραχίονα σε μια γραμμή παραγωγής. Για να αναπαρασταθεί ένα σύστημα ελέγχου χρησιμοποιούνται διαγράμματα που περιέχουν τις συναρτήσεις μεταφοράς κάθε στοιχείου και ονομάζονται διαγράμματα βαθμίδων. Ο τρόπος εξαγωγής των συναρτήσεων μεταφοράς περιγράφεται στη συνέχεια. Από τα προηγούμενα προκύπτει ότι για να αναλυθεί ένα σύστημα ελέγχου πρέπει πρώτα να καθοριστούν οι συναρτήσεις μεταφοράς κάθε στοιχείου του, να μελετηθεί ο τρόπος σύνδεσής τους και να εξακριβωθεί το πλήθος και το σημείο σύνδεσης των εισόδων και των εξόδων του. Παρόλο που αυτός ο τρόπος ανάλυσης δεν είναι ο μοναδικός είναι ένας από τους απλούστερους και πιο ευρέως διαδεδομένους.

Είναι προφανές λοιπόν ότι η έννοια του ελέγχου είναι άμεσα εξαρτώμενη από αυτή της μοντελοποίησης ενός συστήματος. Η πιο διαδεδομένη τακτική για την μοντελοποίηση όπως έχει αναφερθεί είναι με την των εξισώσεων καταστάσεων. Αυτές προκύπτουν από τις διαφορικές εξισώσεις που περιγράφουν ένα σύστημα και τις μεταβλητές κατάστασης. Οι μεταβλητές κατάστασης είναι το ελάχιστο σύνολο των μεταβλητών που μπορούν να περιγράψουν την μελλοντική κατάσταση ενός συστήματος αν είναι γνωστές οι αρχικές τιμές τους και οι διαφορικές εξισώσεις του συστήματος. Πέραν των μεταβλητών κατάστασης είναι απαραίτητες και οι μεταβλητές ελέγχου και διαταραχής για την πλήρη περιγραφή του μοντέλου. Γενικά το σύστημα των διαφορικών εξισώσεων του συστήματος είναι της μορφής:

$$\dot{x} = Ax + Bu + Dw \quad (4.1)$$

όπου x οι μεταβλητές κατάστασης του συστήματος, u οι μεταβλητές ελέγχου, w οι μεταβλητές διαταραχής, A η μήτρα συστήματος, B η μήτρα κατανομής εισόδων και D η μήτρα κατανομής διαταραχών. Ακολουθεί η γενική μορφή των παραπάνω:

$$x = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_v \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

όπου v το πλήθος των μεταβλητών κατάστασης του συστήματος.

$$u = \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \vdots \\ u_\mu \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

όπου μ το πλήθος των μεταβλητών ελέγχου του συστήματος.

$$w = \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \vdots \\ w_\xi \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

όπου ξ το πλήθος των μεταβλητών διαταραχής του συστήματος.

$$A = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{21} & \cdots & A_{v1} \\ A_{12} & \ddots & & \\ \vdots & & \ddots & \\ A_{1v} & & & A_{vv} \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

$$B = \begin{bmatrix} B_{11} & B_{21} & \cdots & B_{\mu 1} \\ B_{12} & \ddots & & \\ \vdots & & \ddots & \\ B_{1\nu} & & & B_{\mu\nu} \end{bmatrix} \quad (4.6)$$

$$D = \begin{bmatrix} D_{11} & D_{21} & \cdots & D_{\xi 1} \\ D_{12} & \ddots & & \\ \vdots & & \ddots & \\ D_{1\nu} & & & D_{\xi\nu} \end{bmatrix} \quad (4.6)$$

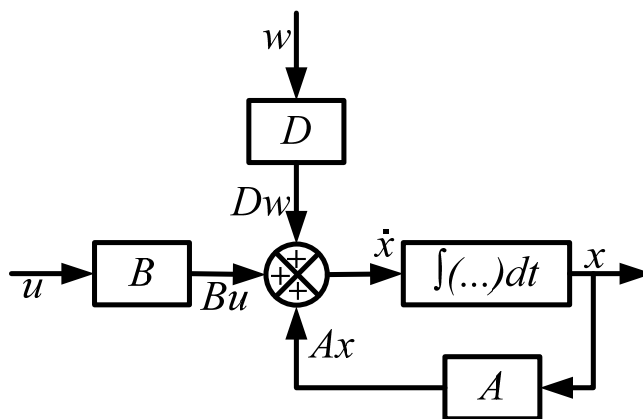
ενώ αν αναπτυχθούν τα παραπάνω το σύστημα των διαφορικών εξισώσεων που περιγράφει το σύστημα είναι της μορφής:

$$\frac{dx_1}{dt} = (A_{11}x_1 + A_{12}x_2 \cdots A_{1\nu}x_\nu) + (B_{11}u_1 + B_{12}u_2 \cdots B_{1\mu}u_\mu) + (D_{11}w_1 + D_{12}w_2 \cdots D_{1\xi}w_\xi) \quad (4.7)$$

$$\vdots$$

Το σύστημα διαφορικών εξισώσεων της Εξ. 4.7 περιγράφει το δυναμικό μοντέλο μεταβλητών κατάστασης, ενώ θα πρέπει να τονιστεί ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε αυτήν την διανυσματική του μορφή μόνο όταν οι διαφορικές εξισώσεις είναι γραμμικές και μη χρονικά μεταβαλλόμενες. Η συνθήκη αυτή ικανοποιείται για τα συστήματα αυτής της πτυχιακής εργασίας. Αυτό που κάνει εξαιρετικά χρήσιμες τις εξισώσεις καταστάσεων είναι ότι με την μορφή της Εξ. 4.1 είναι εξαιρετικά απλό να διαχειριστεί ένας Η/Υ το πρόβλημα με αποτέλεσμα την σαφώς γρηγορότερη και σωστότερη επίλυση του σε σχέση με την αναλυτική μέθοδο. Ακόμα με μετασχηματισμό Laplace του συστήματος της Εξ. 4.7 προκύπτει συνάρτηση μεταφοράς του συστήματος και έτσι μπορεί να κατασκευαστεί το διάγραμμα βαθμίδων το οποίο χρησιμοποιείται και περισσότερο πλέον.

Για να γίνει καλύτερα αντιληπτή η λειτουργία των εξισώσεων καταστάσεων δίνεται ένα μοντέλο το οποίο περιγράφει την διαδικασία που εκτελείται σχηματικά στο Σχ. 4.1.



Σχ. 4.1. Σχηματική αναπαράσταση μοντέλου κατάστασης.

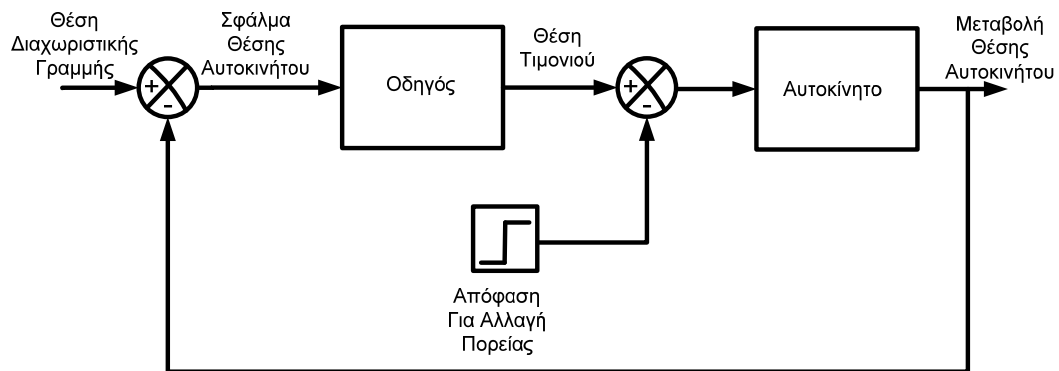
4.2. Κλασικοί Ελεγκτές

Στην βιομηχανία έχει επικρατήσει η χρήση των ελεγκτών PID ή ελεγκτών τριών όρων όπως επίσης ονομάζονται αφού χρησιμοποιούν αθροιστικά – κατά περίπτωση - τους τρεις απλούστερους τύπους ελεγκτών, δηλαδή αναλογικούς, διαφορικούς και ολοκληρωτικούς. Η χρήση των συμβατικών ελεγκτών βασίζεται αρχικά στη δημιουργία ενός ακριβούς μικροσκοπικού προτύπου της διεργασίας (μοντέλου) που γενικά στη βιομηχανία είναι πολύ δύσκολο να κατασκευαστεί. Αυτό συμβαίνει λόγω της πολυπλοκότητας και της ασάφειας των διεργασιών

της παραγωγικής διαδικασίας. Παρόλο που ο συμβατικός έλεγχος υπάρχει σαν θεωρία για αρκετά χρόνια η εφαρμογή του, στις αρχές της δεκαετίας του 1960 δεν καρποφόρησε για τους λόγους που αναφέρθηκαν. Παρόλα αυτά υπήρχαν περιπτώσεις που ο χειροκίνητος έλεγχος ήταν τόσο μη αποδοτικός, που η χρήση των συμβατικών ελεγκτών ήταν μονόδρομος. Κλασικό παράδειγμα τέτοιων περιπτώσεων είναι οι πολύπλοκες χημικές διεργασίες που παρουσιάζονται σε τσιμεντοβιομηχανίες. Εκεί παρουσιάστηκε η χρήση πολλών ελεγκτών σε επιμέρους υποσυστήματα και ο έλεγχος τους από χειριστές σε κεντρικό επίπεδο. Μεγάλη σημασία σε τέτοιου είδους συστήματα έπαιξε ο συχνός συντονισμός ή επαναρύθμιση (tuning, calibration) των ελεγκτών από έμπειρους χειριστές ώστε να βελτιώνεται συνεχώς η συμπεριφορά τους.

Για να γίνει περισσότερο κατανοητή η παραπάνω έννοια δίνεται ένα κλασικό παράδειγμα συστήματος ελέγχου. Η διατήρηση ενός αυτοκινήτου, που κατευθύνεται από τον οδηγό του, στην σωστή θέση στον δρόμο (Σχ. 4.2) είναι ένα σύστημα ελέγχου. Είσοδος θεωρείται η διαχωριστική γραμμή του οδοστρώματος κοντά στην οποία είναι επιθυμητό να κινείται το αυτοκίνητο. Τον ρόλο του ελεγκτή παίζει ο οδηγός, ενώ η χειριζόμενη μεταβλητή είναι θέση του τιμονιού. Έξοδος είναι η απόσταση του αυτοκινήτου από την διαχωριστική γραμμή, η οποία πρέπει να είναι εντός ορισμένων ορίων. Η απόφαση του οδηγού να αλλάξει πορεία μπορεί να θεωρηθεί διαταραχή του συστήματος. Σε ένα σύστημα ελέγχου ο μόνος να υπάρξει μη μηδενικό σήμα σφάλματος είναι να υπάρξει μεταβολή είτε στην είσοδο ελέγχου είτε στην είσοδο διαταραχής. Σκοπός των συστημάτων ελέγχου είναι εκ πρώτης να διασφαλιστεί η ευστάθεια του συστήματος και στην συνέχεια να :

- Ελαχιστοποιηθεί το σφάλμα μόνιμης κατάστασης (steady state error)
- Ελαχιστοποιηθεί ο χρόνος αποκατάστασης (settling time)
- Ικανοποιούνται συγκεκριμένες παράμετροι ευστάθειας κατά την διάρκεια της μεταβατικής συμπεριφοράς (transient stability)



Σχ. 4.2. Σύστημα ελέγχου θέσης αυτοκινήτου.

Στη συνέχεια αναλύονται οι τρεις βασικότεροι τύποι ελεγκτών. Για κάθε ένα από αυτούς θα περιγραφεί η λογική ελέγχου και τα χαρακτηριστικά του, ενώ για να γίνει καλύτερα αντιληπτή η λειτουργία τους θα δοθούν κάποια παραδείγματα χρήσης τους.

4.2.1. Αναλογικός Ελεγκτής (P)

Ο αναλογικός ελεγκτής (Proportional controller) ή ενισχυτής, συνδέεται στην είσοδο ελέγχου ενός συστήματος και δέχεται είσοδο από έναν αθροιστή. Ο αθροιστής αναλαμβάνει να αφαιρεί ανά πάσα χρονική στιγμή την ανάδραση της εξόδου από την είσοδο ελέγχου, η οποία γενικά θεωρείται σταθερή, ενώ το αποτέλεσμα ονομάζεται σήμα σφάλματος $e(t)$. Ο αναλογικός ελεγκτής βασίζεται στην πιο απλή λογική ελέγχου. Αν το σήμα σφάλματος είναι μικρό αντίστοιχα μικρό θα είναι και το ενισχυμένο σήμα εξόδου του, ενώ αν το σήμα σφάλματος είναι μεγάλο, ανάλογα μεγάλο θα είναι και το σήμα που προκύπτει, και ονομάζεται σήμα ελέγχου $v(t)$. Ο αναλογικός ελεγκτής έχει ένα κέρδος που αναφέρεται διεθνώς στην βιβλιογραφία σαν K_p . Το σήμα σφάλματος πολλαπλασιάζεται με το κέρδος του ελεγκτή και προκύπτει το σήμα διόρθωσης $v(t)$ το οποίο στην συνέχεια οδηγείται στο σύστημα στην θέση που αυτό θα δεχόταν την είσοδο ελέγχου. Έτσι αλλάζει η έξοδος του συστήματος $y(t)$ στην επιθυμητή τιμή και σταθεροποιείται σε αυτή. Θα πρέπει να τονιστεί σε αυτό το σημείο ότι

σήμα σφάλματος μπορεί να προκύψει είτε με την μεταβολή της εξόδου, είτε με την μεταβολή της εισόδου ελέγχου.

Σε συστήματα πρώτης τάξης με αναλογικό έλεγχο μειώνεται αισθητά ο χρόνος αποκατάστασης. Ακόμα σε συστήματα ανώτερης τάξης η χρήση του αναλογικού ελεγκτή μπορεί να οδηγήσει σε αύξηση της υπερύψωσης και των ταλαντώσεων. Ακόμα η χρήση του αναλογικού ελεγκτή αποφεύγεται αφού η επιλογή του συνεπάγεται ένα σφάλμα μόνιμης κατάστασης που από μόνος του δεν μπορεί να εξαλείψει. Το σφάλμα μόνιμης κατάστασης και ο χρόνος αποκατάστασης, μειώνονται αντιστρόφως ανάλογα με το κέρδος του ελεγκτή, αλλά δεν είναι δυνατόν πρακτικά να οριστούν τόσο μεγάλες τιμές κέρδους σε μια βαθμίδα ώστε να τα μηδενίσει. Για παράδειγμα ας θεωρηθεί ότι ένα σύστημα έχει συνάρτηση μεταφοράς τρίτης τάξης:

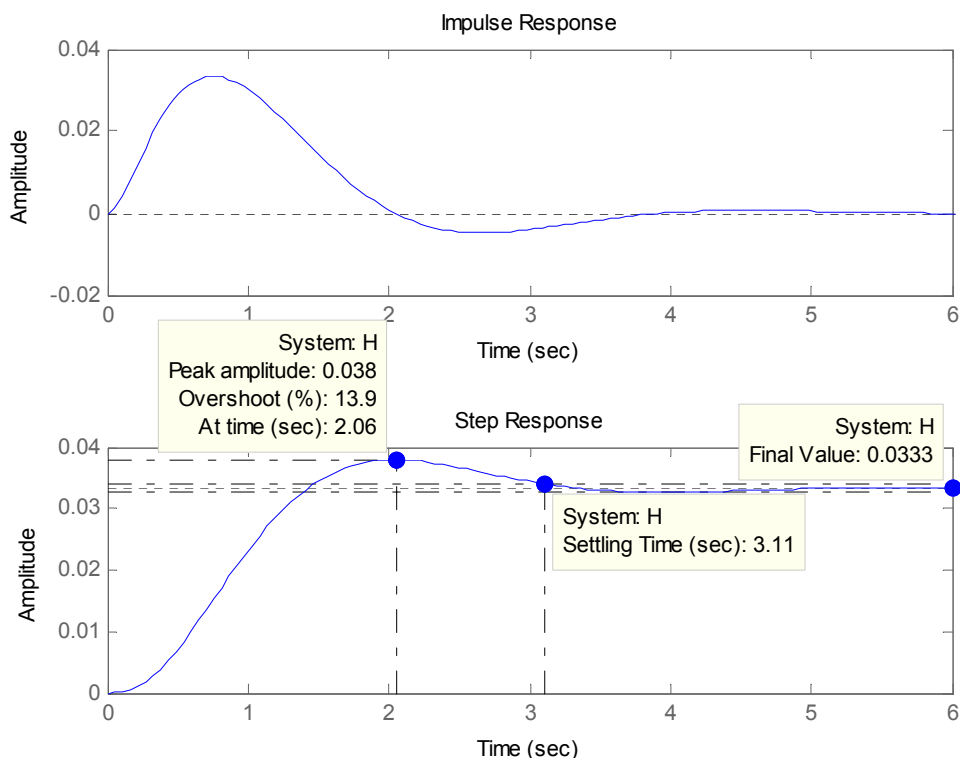
$$H(s) = \frac{1}{s^3 + 10s^2 + 20s + 30} \quad (4.8)$$

Το οποίο σύστημα θα δώσει την παρακάτω κρουστική και βηματική απόκριση που φαίνονται στο Σχ. 4.3 με την χρήση των επόμενων εντολών στο Matlab. Ενώ, έχουν σημειωθεί με την χρήση του control toolbox τα χαρακτηριστικά της βηματικής απόκρισης επάνω στο σχήμα.

```
H=tf(1,[1 10 20 30])
subplot(2,1,2)
step(H)
subplot(2,1,1)
impulse(H)
```

Transfer function:

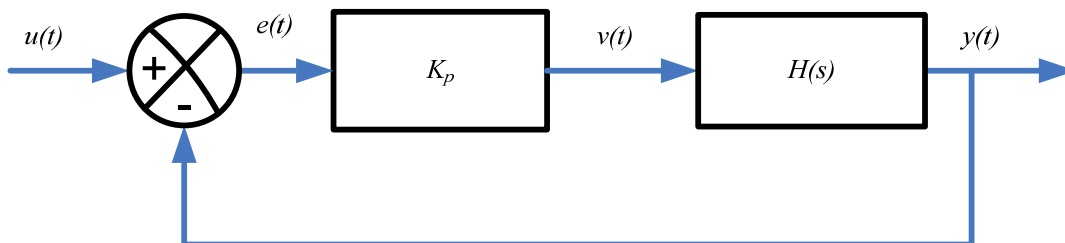
$$\frac{1}{s^3 + 10 s^2 + 20 s + 30}$$



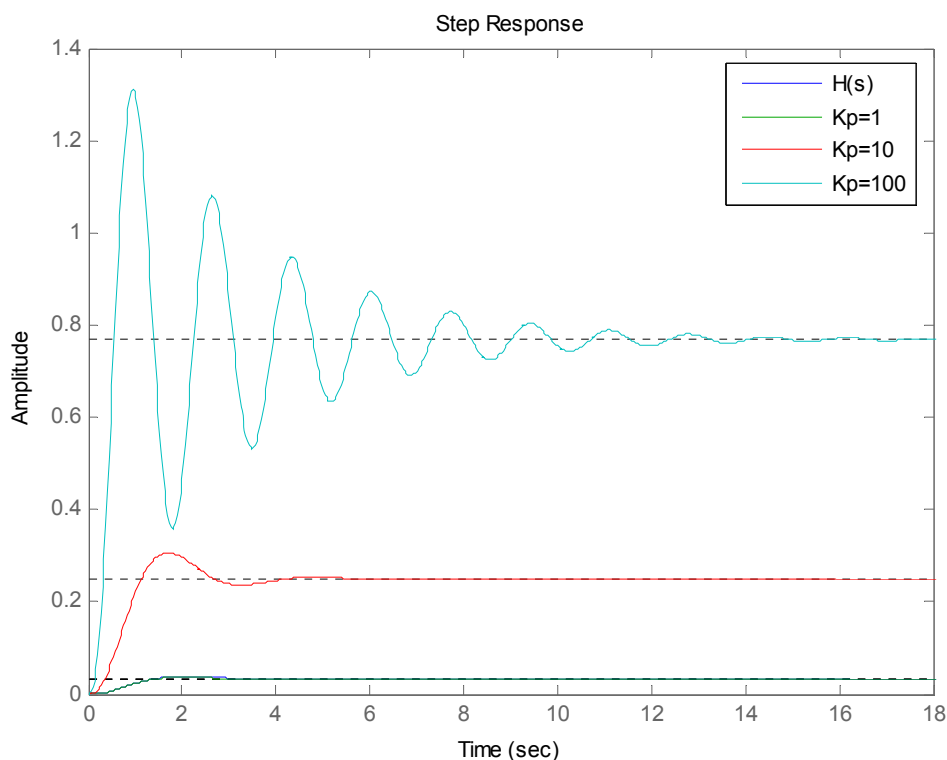
Σχ. 4.3. Κρουστική και βηματική απόκριση της συνάρτησης μεταφοράς σε ευθύ βρόχο.

Όπως μπορεί να διακριθεί από το Σχ. 4.3 αυτό το σύστημα παρουσιάζει υπερύψωση της τάξης του 13.9 % σε χρόνο 2.06 δευτερόλεπτα από την στιγμή που δέχεται την βηματική είσοδο. Ακόμα, η τελική τιμή ισορροπίας του είναι 0.0333 ενώ θα θεωρηθεί ότι η επιθυμητή τιμή ισορροπίας θα έπρεπε να είναι ίση με την είσοδο δηλαδή μονάδα. Τέλος, θα πρέπει να αναφερθεί ότι ο χρόνος ισορροπίας 3.11 sec είναι ο χρόνος που χρειάζεται το σύστημα ώστε η τιμή εξόδου να μην υπερβαίνει το $\pm 2\%$ της τελικής τιμής.

Έστω λοιπόν ότι χρησιμοποιείται ένα σχήμα αναλογικού ελέγχου για την βελτίωση της συμπεριφοράς του συστήματος αυτού όπως φαίνεται στο Σχ. 4.4. Δοκιμάζονται διάφορες τιμές για την παράμετρο του ελεγκτή K_p όπως 1, 10 και 100 και για κάθε μία από αυτές υπολογίζεται η βηματική απόκριση του συστήματος.



Σχ. 4.4. Το σύστημα ελέγχεται από αναλογικό ελεγκτή.



Σχ. 4.5. Βηματική απόκριση του πλήρους συστήματος ελέγχου για διάφορες τιμές κέρδους του ελεγκτή.

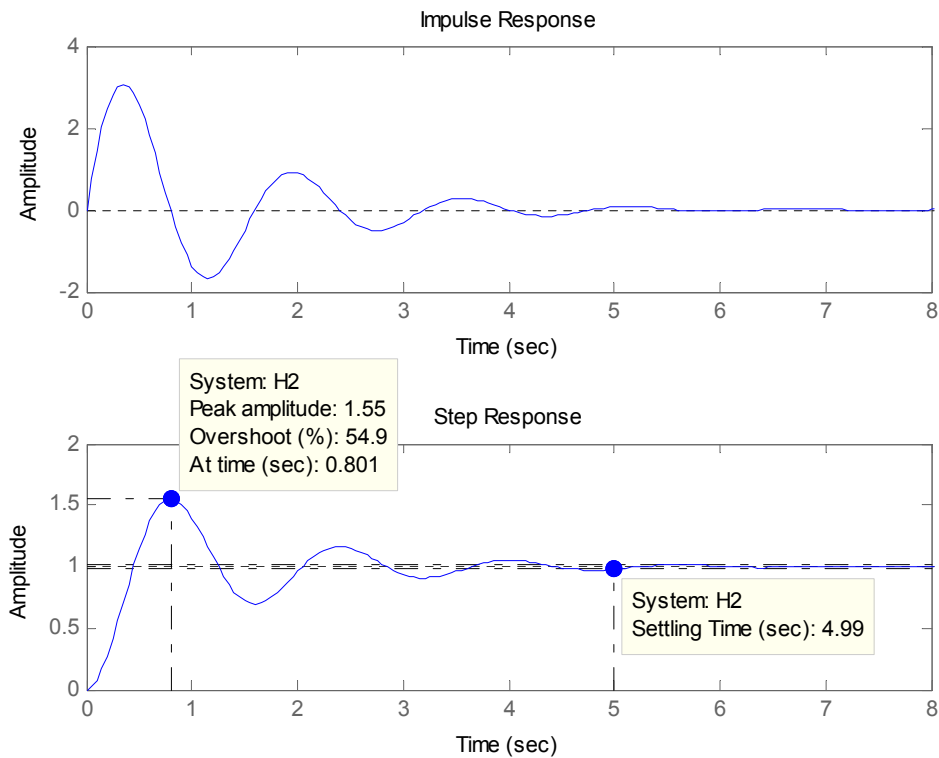
Όπως φαίνεται στο Σχ. 4.5 όσο αυξάνεται το αναλογικό κέρδος του ελεγκτή τόσο πιο ασταθές γίνεται το σύστημα. Επίσης, για κάθε αύξηση του αναλογικού κέρδους υπήρχε αύξηση της υπερύψωσης της γραφικής. Θα πρέπει τέλος να σημειωθεί ότι με την αύξηση του αναλογικού κέρδους η τελική τιμή της εξόδου πλησιάζει όλο και πιο κοντά στην μονάδα, το οποίο ήταν και το επιθυμητό. Είναι προφανές ότι ο αναλογικός έλεγχος δεν είναι κατάλληλος για αυτό το σύστημα αφού το μεταβατικό φαινόμενο διαρκεί περισσότερο και αν αυξηθεί η τιμή του K_p το τόσο πιο ασταθές γίνεται το σύστημα. Ο αναλογικός ελεγκτής έχει καλύτερη συμπεριφορά όταν εξετάζεται σε μικρότερης τάξης συστήματα. Ας θεωρηθεί ότι αντί για την αρχική συνάρτηση μεταφοράς τρίτης τάξης που εξετάστηκε χρησιμοποιείται ένα σύστημα δεύτερης τάξης $H2$ με φυσική συχνότητα $\omega=4$ και συντελεστή απόσβεσης $\zeta=0.1875$.

$$H2(s) = \frac{\omega^2}{s^2 + 2\xi\omega s + \omega^2} \quad (4.9)$$

$$H2(s) = \frac{4^2}{s^2 + 2 \cdot 0.1875 \cdot 4 \cdot s + 4^2}$$

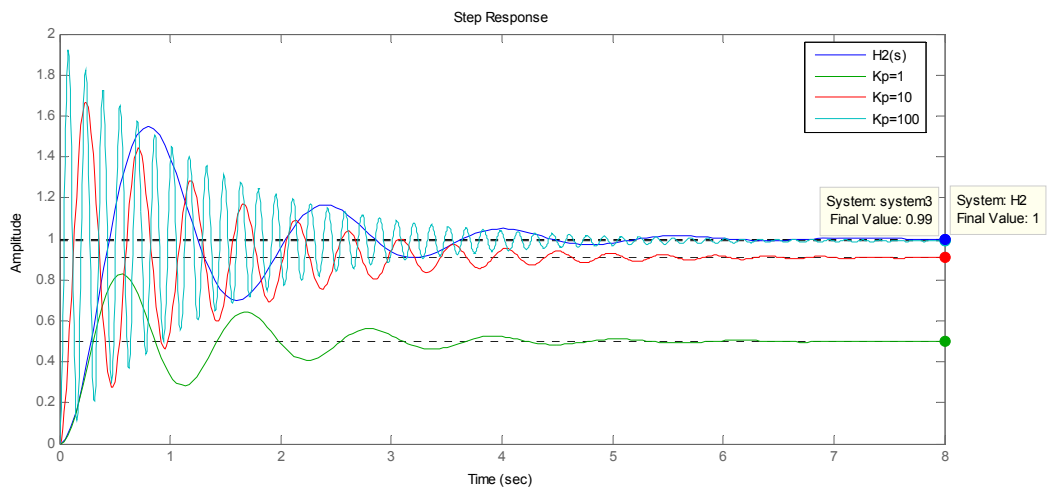
$$H2(s) = \frac{16}{s^2 + 4s + 16} \quad (4.10)$$

Για την οποία υπολογίζεται η κρουστική και η βηματική απόκριση και φαίνεται στο Σχ. 4.6.



Σχ. 4.6. Κρουστική και βηματική απόκριση της συνάρτησης μεταφοράς δευτέρας τάξης σε ευθύ βρόχο.

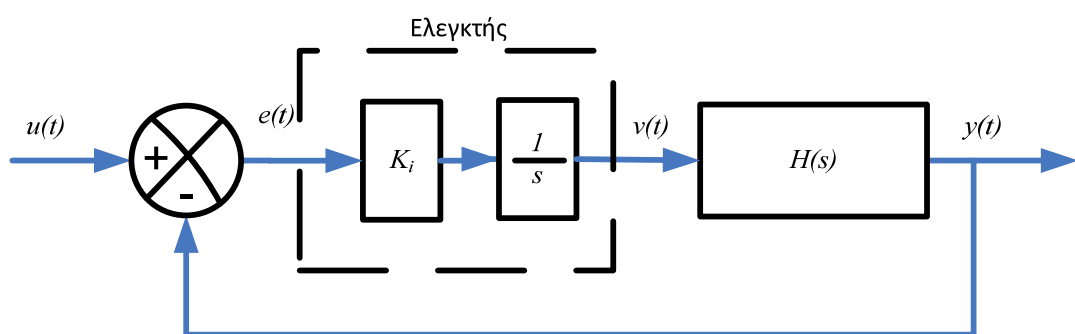
Σε αυτό το σύστημα είναι εμφανές ότι η υπερύψωση είναι πιο έντονη και πιο γρήγορη αφού φτάνει το 54.9 % της τελικής της τιμής σε μόλις 0.8 sec από την εφαρμογή της βηματικής εισόδου. Στην συνέχεια εφαρμόζεται το σχήμα ελέγχου του Σχ. 4.4 αλλά αυτή τη φορά θα χρησιμοποιηθεί η νέα συνάρτηση μεταφοράς $H2(s)$. Παρατηρώντας το Σχ. 4.7 γίνονται πιο εύκολα αντιληπτά όσα αναφέρθηκαν για τον αναλογικό ελεγκτή. Η αύξηση του αναλογικού κέρδους είναι προφανές ότι μειώνει το σφάλμα μόνιμης κατάστασης αλλά παράλληλα μειώνει την ευστάθεια του συστήματος δημιουργώντας έντονες ταλαντώσεις και υψηλές υπερυψώσεις. Παρατηρείται επίσης ότι για μικρότερες τιμές του αναλογικού κέρδους το σύστημα ισορροπεί συντομότερα αλλά το σφάλμα μόνιμης κατάστασης είναι αρκετά μεγάλο.



Σχ. 4.7. Βηματική απόκριση του πλήρους συστήματος ελέγχου για διάφορες τιμές κέρδους του ελεγκτή και με συνάρτηση μεταφοράς δευτέρου βαθμού..

4.2.2. Ολοκληρωτικός Ελεγκτής (I)

Ο ολοκληρωτικός ελεγκτής (Integral controller) συνδέεται με τον ίδιο τρόπο που συνδέεται και ο αναλογικός ελεγκτής, δηλαδή, όπως φαίνεται στο Σχ. 4.8. Αυτό που αλλάζει σε αυτή την περίπτωση είναι ότι αντί για ένα απλό κέρδος που πολλαπλασιάζεται με το σήμα σφάλματος, υπάρχει και μία διάταξη ολοκλήρωσης του σφάλματος. Η συνάρτηση μεταφοράς αυτής της βαθμίδας ορίζεται ως $I(s)=K_i/s$ με K_i να είναι το κέρδος του ολοκληρωτικού ελεγκτή. Αυτό σημαίνει ότι θα παράγεται ένα σήμα ελέγχου το οποίο θα αυξάνει την διορθωτική του δράση για όσο χρόνο το σήμα σφάλματος είναι μη μηδενικό. Πρακτικά αν το σφάλμα είναι μεγάλο, το ολοκλήρωμα του θα αυξάνει με γρήγορο ρυθμό και η διόρθωση θα επιτυγχάνεται γρηγορότερα, αντίθετα αν το σφάλμα είναι μικρό το ολοκλήρωμα θα αυξάνει με μικρότερο ρυθμό με αποτέλεσμα να υπάρχει μεγαλύτερος χρόνος αποκατάστασης. Όπως και να έχει όμως η τελική τιμή της εξόδου μετά την μεταβατική περίοδο θα είναι ακριβώς η επιθυμητή.

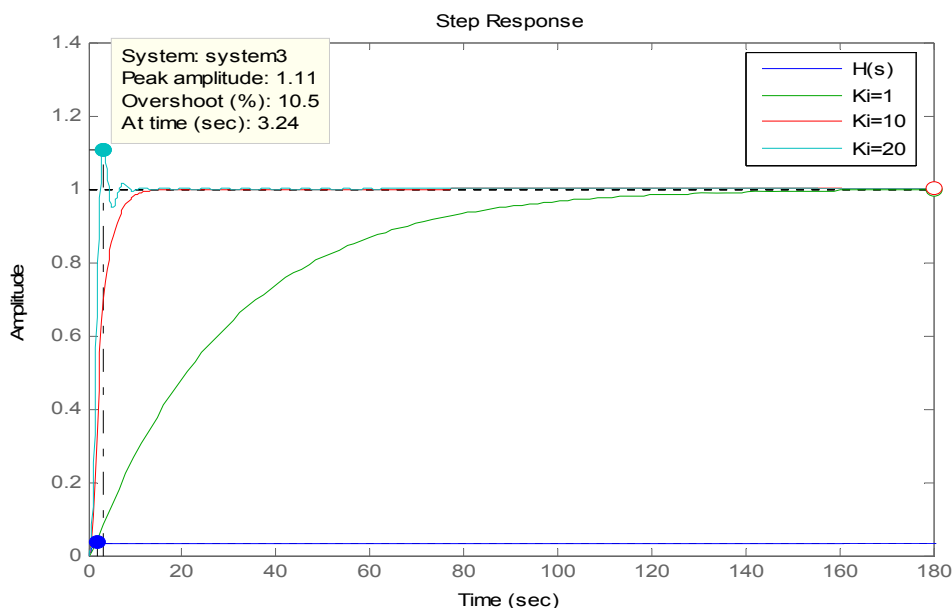


Σχ. 4.8. Το σύστημα ελέγχεται από ολοκληρωτικό ελεγκτή.

Με αυτό τον τρόπο ελέγχου το σφάλμα μόνιμης κατάστασης μηδενίζεται κάνοντας τον ιδανικό για εφαρμογές που απαιτείται μεγάλη ακρίβεια. Παρόλο που στην κατάσταση ισορροπίας επιτυγχάνεται απόλυτη ακρίβεια στην περίοδο της μεταβατικής κατάστασης η συμπεριφορά του συστήματος χειροτερεύει αφού αυξάνεται ο αριθμός ταλαντώσεων μέχρι την τελική ισορροπία.

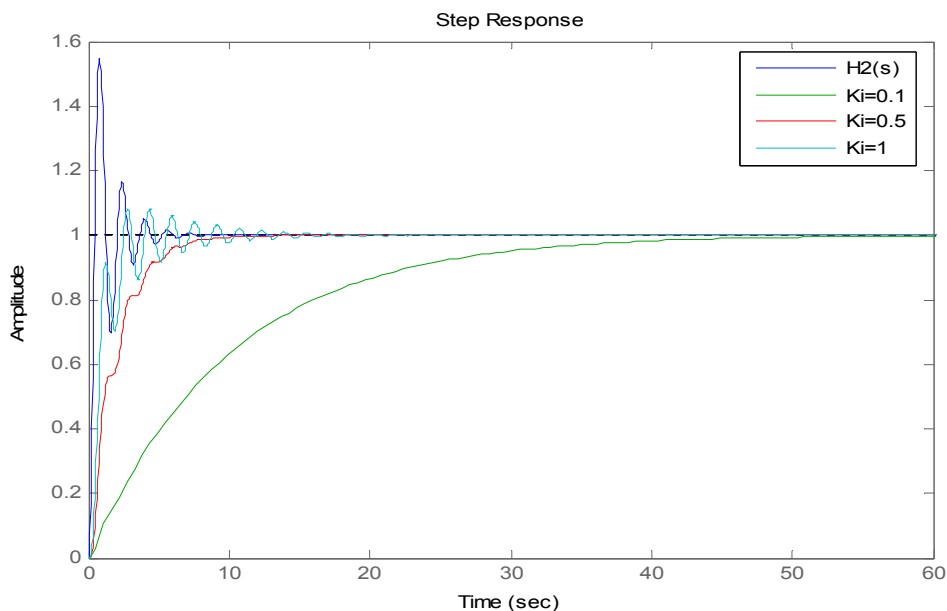
Αρχικά εξετάζεται η χρήση του ολοκληρωτικού ελεγκτή με το σύστημα της Εξ. 4.8 το οποίο είναι τρίτης τάξης ενώ η είσοδος ελέγχου δέχεται την μοναδιαία βηματική συνάρτηση. Στο Σχ. 4.9 φαίνεται ότι άσχετα με την τιμή

του ολοκληρωτικού κέρδους η το σφάλμα μόνιμης κατάστασης θα είναι μηδέν. Ακόμα παρατηρείται ότι όσο αυξάνεται η τιμή του ολοκληρωτικού κέρδους τόσο πιο σύντομα ισορροπεί το σύστημα αν και στην περίπτωση με ολοκληρωτικό κέρδος 20 εμφανίζονται ταλαντώσεις και μια υπερύψωση περίπου 10.5 %. Ο ολοκληρωτικός ελεγκτής είναι απαραίτητο στοιχεία σε συστήματα με απαιτήσεις υψηλής ακρίβειας και ιδανικός για τον έλεγχο συχνότητας – φορτίου όπου ένα μόνιμο σφάλμα δεν μπορεί να γίνει δεκτό.



Σχ. 4.9. Βηματική απόκριση του συστήματος H ελεγχόμενο από ολοκληρωτικό ελεγκτή.

Επίσης ο ολοκληρωτικός ελεγκτής θα εξεταστεί και με το σύστημα δεύτερης τάξης (H_2) όπως παρουσιάζεται στο Σχ. 4.10 χωρίς να υπάρχει ιδιαίτερη διαφορά από στην προηγούμενη

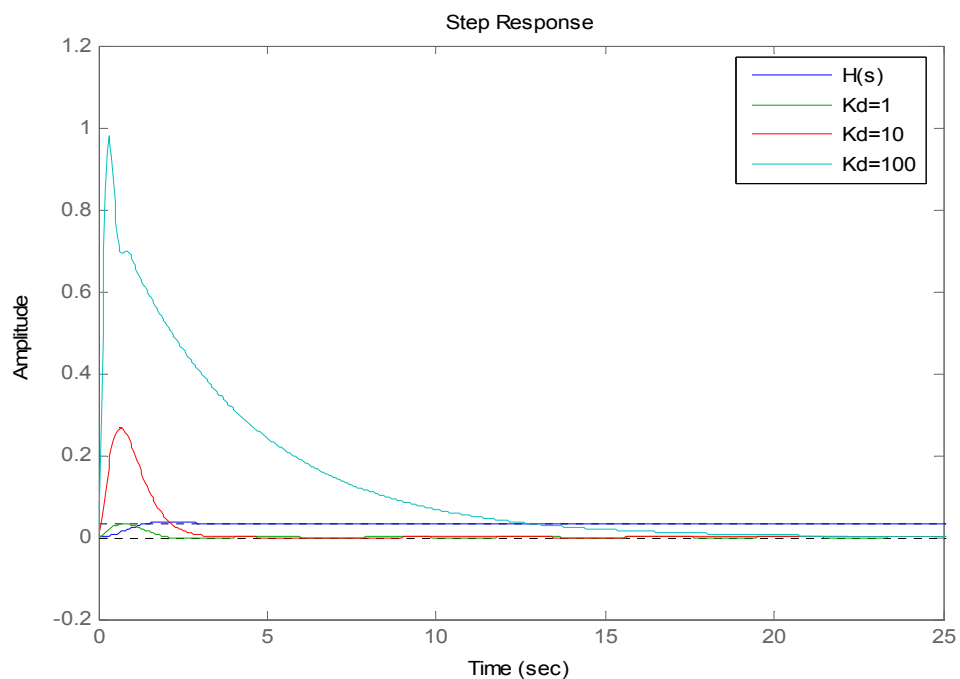


Σχ. 4.10. Βηματική απόκριση του συστήματος H_2 ελεγχόμενο από ολοκληρωτικό ελεγκτή.

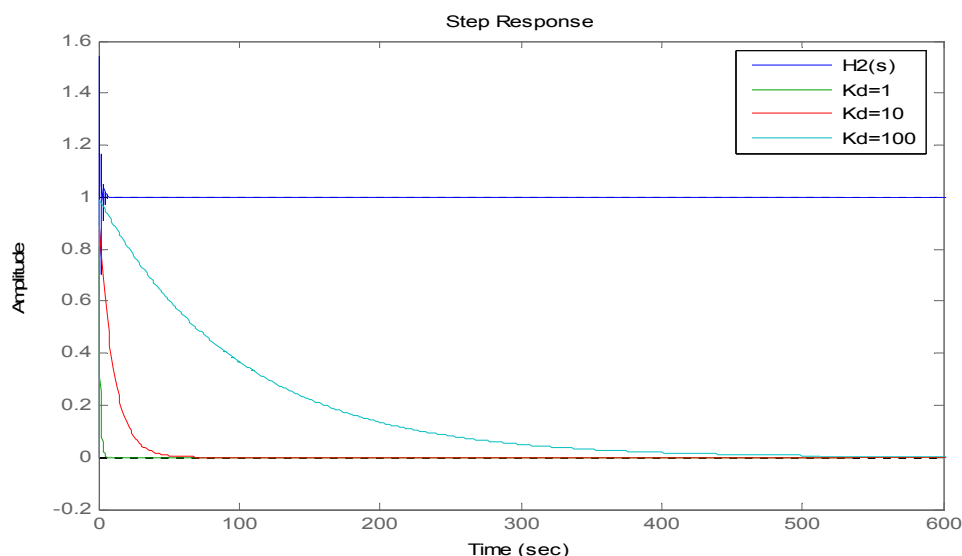
4.2.3. Διαφορικός Ελεγκτής (D)

Ο διαφορικός ελεγκτής (differential controller) παρόλο που έχει την ίδια συνδεσμολογία με τους προηγούμενους δύο αντιμετωπίζει το πρόβλημα του ελέγχου με διαφορετικό τρόπο. Αν ένα σήμα σφάλματος αυξάνεται με μεγάλο ρυθμό σύντομα θα πρέπει να αντιμετωπιστεί ένα μεγάλο σήμα σφάλματος, οπότε ο διαφορικός ελεγκτής, υπολογίζοντας την παράγωγο του σήματος σφάλματος προλαμβάνει την υπερβολική αύξηση του σήματος σφάλματος παράγοντας διορθωτικό σήμα ελέγχου ανάλογο με την παράγωγο του σήματος σφάλματος. Η συνάρτηση μεταφοράς ενός διαφορικού ελεγκτή είναι της μορφής $D(s)=K_D*s$ με K_D να είναι το κέρδος του διαφορικού ελεγκτή.

Ο διαφορικός έλεγχος δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί αποκλειστικά, σαν μοναδικός ελεγκτής αφού σε συστήματα μεγαλύτερης από πρώτης τάξης αυξάνει κατά πολύ τις ταλαντώσεις στην μεταβατική κατάσταση ενώ παράλληλα αυξάνει την φυσική συχνότητα του συστήματος. Αυτό έχει αποτέλεσμα να έχει πολύ κακή συμπεριφορά σε συστήματα που παρουσιάζεται θόρυβος. Το μεγαλύτερο μειονέκτημα του διαφορικού ελεγκτή είναι ότι είναι αναισθητός σε σφάλματα σταθερής τιμής όσο μεγάλα και αν είναι, για αυτό το λόγο δεν χρησιμοποιείται παρά μόνο σε συνδυασμό με κάποιον από τους προηγούμενους. Για λόγους πληρότητας δίνονται τα Σχ. 4.11 και Σχ. 4.12 απεικονίζοντας τις αποκρίσεις που θα δώσουν τα πλήρη συστήματα με την χρήση του διαφορικού ελεγκτή. Εύκολα μπορεί να παρατηρηθεί ότι η ενέργεια που κάνει ο ελεγκτής δεν διαρκούν πολύ αφού μόλις το σφάλμα σταθεροποιηθεί ο ελεγκτής δίνει μηδενική έξοδο. Έτσι παντού παρατηρείται μια αρχική διορθωτική ενέργεια η οποία όμως σύντομα τελειώνει και πάντα η γραφική καταλήγει να δείχνει το μηδέν.



Σχ. 4.11. Βηματική απόκριση πλήρους συστήματος τρίτης τάξης με χρήση διαφορικού ελεγκτή.



Σχ. 4.12. Βηματική απόκριση πλήρους συστήματος δεύτερης τάξης με χρήση διαφορικού ελεγκτή.

4.3. Συμβατικοί Ελεγκτές Για Έλεγχο Φορτίου-Συχνότητας

Οι ελεγκτές που επιλέχθηκαν προτιμήθηκαν λόγω των συνδυαστικών τους χαρακτηριστικών, δεδομένου ότι στην εφαρμογή που εξετάζεται, δεν είναι δυνατό να υπάρχει σφάλμα μόνιμης κατάστασης, ενώ ο χρόνος αποκατάστασης θα πρέπει να είναι το δυνατό μικρότερος, χωρίς να ταλαιπωρείται το σύστημα από άσκοπες ταλαντώσεις. Στην συγκεκριμένη εφαρμογή σαν σήμα ελέγχου θεωρείται το ΔP_{sp} , σαν σήμα ανάδρασης το Δf και σαν σήμα σφάλματος το σήμα σφάλματος περιοχής με δείκτη ACE. Λόγω της ευαισθησίας της εφαρμογής θεωρήθηκε σωστό να απορριφθούν οι αναλογικοί και διαφορικοί ελεγκτές. Μιας και οι πρώτοι δεν μπορούν να εξαλείψουν το σφάλμα μόνιμης κατάστασης και οι δεύτεροι δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν κατάλληλα σε ένα σύστημα αφού χειροτερεύουν την μεταβατική συμπεριφορά. Για αυτό το λόγο αρχικά επιλέχθηκε ένας ολοκληρωτικός ελεγκτής ο οποίος θα διασφάλιζε το μηδενισμό του σφάλματος μόνιμου καταστάσεως. Αυτός ήταν ο απλούστερος ελεγκτής που χρησιμοποιήθηκε και μόνο στα απλούστερα μοντέλα.

Όσο αύξανε η πολυπλοκότητα των συστημάτων θεωρήθηκε ότι μια περισσότερο εκλεπτυσμένη μέθοδος ελέγχου θα είχε καλύτερα αποτελέσματα. Έτσι συνδυάστηκε αθροιστικά ο αναλογικός και ο ολοκληρωτικός έλεγχος δημιουργώντας έναν νέο τύπο γνωστό στη βιβλιογραφία σαν αναλογικό-ολοκληρωτικό ελεγκτή (PI). Σε αυτήν την περίπτωση το σήμα σφάλματος διακλαδίζεται στις δύο βαθμίδες που έχουν παρουσιαστεί προηγουμένως, ενώ τα σήματα ελέγχου που προκύπτουν από τον κάθε επιμέρους ελεγκτή καταλήγουν στις εισόδους ενός αθροιστή με σκοπό να προστεθούν. Το συνολικό σήμα ελέγχου που προκύπτει οδηγείται στην είσοδο ελέγχου του κάθε συστήματος. Με αυτόν τον τρόπο ελέγχου, και δεδομένου ότι τα κέρδη κάθε βαθμίδας έχουν κατάλληλη τιμή, ο χρόνος αποκατάστασης βελτιώνεται σημαντικά, η μεταβατική συμπεριφορά χαρακτηρίζεται από μικρές και λίγες ταλαντώσεις ενώ λόγω της συμμετοχής του ολοκληρωτικού ελέγχου το κέρδος μόνιμης κατάστασης.

Μετά την χρήση του αναλογικού-ολοκληρωτικού ελεγκτή εξερευνήθηκε το ενδεχόμενο, τα κριτήρια ελέγχου να ικανοποιούνται καλύτερα με κάποιο ελεγκτή που ίσως να είχε, θεωρητικά τουλάχιστο, χειρότερη μεταβατική συμπεριφορά αλλά να μείωνε κατά πολύ τον χρόνο αποκατάστασης. Έτσι προστέθηκε μια βαθμίδα διαφορικού ελέγχου και μελετήθηκε η χρήση του αναλογικού-διαφορικού-ολοκληρωτικού ελεγκτή (PID), ο οποίος είναι ο αθροιστικός συνδυασμός των τριών βασικών ελεγκτών. Στην πραγματικότητα ήταν αναμενόμενο ο έλεγχος αυτός να προτιμηθεί μόνο σε συστήματα με αργές μεταβολές όπως οι υδροστρόβιλοι. Παρόλο που η χρήση του διαφορικού ελεγκτή συνήθως αυξάνει τις ταλαντώσεις σε συστήματα πρώτης και δεύτερης τάξης, δεν είναι ξεκάθαρη η συμπεριφορά του σε συστήματα ανώτερων τάξεων όπως αυτά που μελετούνται σε αυτή την πτυχιακή εργασία.

Για την εισαγωγή των παραπάνω ελεγκτών στο Matlab χρησιμοποιήθηκε το μπλοκ PID controller του simulink το οποίο βρίσκεται στην βιβλιοθήκη simulink extras στον κατάλογο additional linear για τα μοντέλα συνεχούς χρόνου. Ενώ τα μοντέλα διακριτού χρόνου χρησιμοποιούν το ανάλογο μπλοκ από την βιβλιοθήκη SimPowerSystems extra library στον κατάλογο discrete control blocks.

Όλα τα μοντέλα έχουν εξομοιωθεί με χρήση αναλογικού-ολοκληρωτικού και αναλογικού-διαφορικού-ολοκληρωτικού ελεγκτή σε διακριτό χρόνο αφού κατά την κρίση του συγγραφέα αυτοί οι τρόποι παρουσιάζουν το μεγαλύτερο ρεαλισμό. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι αυτά τα δύο είδη ελεγκτών έχει επικρατήσει να χρησιμοποιούνται σε τέτοιου είδους εφαρμογές, ενώ η επιλογή του διακριτού χρόνου έναντι του συνεχούς έχει να κάνει με την χρήση μικροελεγκτών σε τέτοιου είδους συστήματα οι οποίοι εισάγουν λόγω της κατασκευής τους την έννοια του διακριτού βήματος. Παρόλα αυτά στα συστήματα στα οποία μοντελοποιούνται δίκτυα με ένα είδος πηγής σε μία περιοχή ελέγχου θεωρήθηκε απαραίτητο για λόγους πληρότητας να εξεταστεί και ο έλεγχος από απλό ολοκληρωτικό ελεγκτή. Αυτό συνέβη επειδή τα συγκεκριμένα συστήματα παρουσιάζουν μια πολύ απλούστερη συνάρτηση μεταφοράς από τα υπόλοιπα οπότε ίσως ένα απλούστερο είδος ελέγχου να μπορούσε να δώσει ικανοποιητικά αποτελέσματα. Αναφέρεται ακόμα ότι για τα εν λόγω συστήματα όλοι οι ελεγκτές εξετάζονται τόσο σε διακριτό όσο και συνεχή χρόνο. Τέλος, πέρα από τους ελεγκτές που αναφέρθηκαν μέχρι στιγμής εξετάζεται σε κάποια από τα μοντέλα η χρήση ελεγκτή ασαφούς λογικής όπως θα αναφερθεί στο Κεφάλαιο 5.

5. Εισαγωγή

Στο παρακάτω Κεφάλαιο πρόκειται να αναλυθούν οι τεχνικές εκείνες που εισάγουν την έννοια της νοημοσύνης στα συστήματα που μοντελοποιήθηκαν κατά την διάρκεια της εκπόνησης αυτής της πτυχιακής εργασίας. Ο Τζον Μακάρθι (1927-2011) το 1956 – οπότε και πρωτοεμφανίστηκε ο όρος – όρισε τον τομέα της τεχνητής νοημοσύνης, TN (Artificial Intelligence, AI) σαν την επιστήμη και μεθοδολογία της δημιουργίας νοούντων μηχανών. Η προβολή μέσω του κινηματογράφου και της λογοτεχνίας επιστημονικής φαντασίας, οδήγησε το ευρύ κοινό να πιστεύει ότι η συγκεκριμένη επιστήμη καταπιάνεται με την δημιουργία ανθρωποειδών, τα οποία θα αποκτούσαν ανθρώπινα χαρακτηριστικά όπως συναισθήματα. Στην πραγματικότητα, η τεχνητή νοημοσύνη έχει σκοπό την κατασκευή λογισμικού ή μηχανών, τα οποία θα επιλύουν σύνθετα ή απλούστερα προβλήματα οποιουδήποτε τύπου, με ευρέως αποδεκτές λύσεις. Η τεχνητή νοημοσύνη εμπνέεται από τομείς όπως η νευρολογία, η γενετική, η ψυχολογία αλλά και από έννοιες όπως η ομάδα ή η φύση για να δώσει λύσεις σε προβλήματα μαθηματικής φύσεως τα οποία είναι αρκετά πολύπλοκα για να λυθούν με αναλυτικές μεθόδους. Μέσα της περιέχει στοιχεία όπως η μάθηση ή η εκπαίδευση ή οι λογικοί κανόνες.

Η πρώτη εφαρμογή τεχνητής νοημοσύνης έγινε το 1940 με την μορφή του πρώτου νευρωνικού δικτύου. Πρόκειται για μια προσπάθεια μίμησης της λειτουργίας των κατωτέρων επιπέδων του ανθρώπινου εγκεφάλου. Ο ανθρώπινος εγκέφαλος αποτελείται από δέκα δισεκατομμύρια περίπου νευρώνες, κύτταρα τα οποία έχουν την δυνατότητα να άγουν ηλεκτροχημικά σήματα. Καθένας από αυτούς τους νευρώνες, είναι συνδεδεμένος με συνάψεις με μερικές χιλιάδες άλλους, μέσω είτε εισρών που ονομάζονται δενδρίτες είτε εξόδων που ονομάζονται άξονες. Κάθε νευρώνας είναι ανενεργός μέχρι το άθροισμα των σημάτων που θα δεχτεί να ξεπεράσει μια τιμή που ονομάζεται κατώφλι ενεργοποίησης (firing threshold). Όμοια με τον βιολογικό τρόπο κατασκευάζονται και τα υπολογιστικά νευρωνικά δίκτυα τα οποία περιλαμβάνουν νευρώνες που στον καθένα από αυτούς έχει οριστεί ένα βάρος το οποίο μπορεί να μεταβληθεί κατά την διάρκεια της εκπαίδευσης του συστήματος. Κάθε νευρώνας μπορεί να έχει αρκετές εισόδους και εξόδους. Οι εισοδοί μπορεί να προέρχονται είτε από άλλους νευρώνες, είτε από εξωτερικές εισόδους. Αντίστοιχα, οι εξοδοί μπορεί να οδηγούνται σε άλλους νευρώνες ή στην διάταξη άθροισης των σημάτων εξόδου. Από την διάταξη αυτή μπορεί να γίνει η ενέργεια στο προς έλεγχο σύστημα ενώ αναλύοντας την συμπεριφορά της εξόδου και των χειριζόμενων μεταβλητών γίνεται παράλληλα και η εκπαίδευση του δικτύου. Τα νευρωνικά δίκτυα χρησιμοποιούνται σε ένα μεγάλο πλήθος εφαρμογών που περιλαμβάνουν την ιατρική, τα χρηματοοικονομικά και την μηχανική. Ο λόγος της διάδοσης τους έχει να κάνει την ευχρηστία τους στα περισσότερα προβλήματα ταξινόμησης, στατιστικής και ελέγχου. Είναι ένας τρόπος μη γραμμικής μοντελοποίησης συστημάτων ικανός να μοντελοποιεί εξαιρετικά πολύπλοκες διαδικασίες.

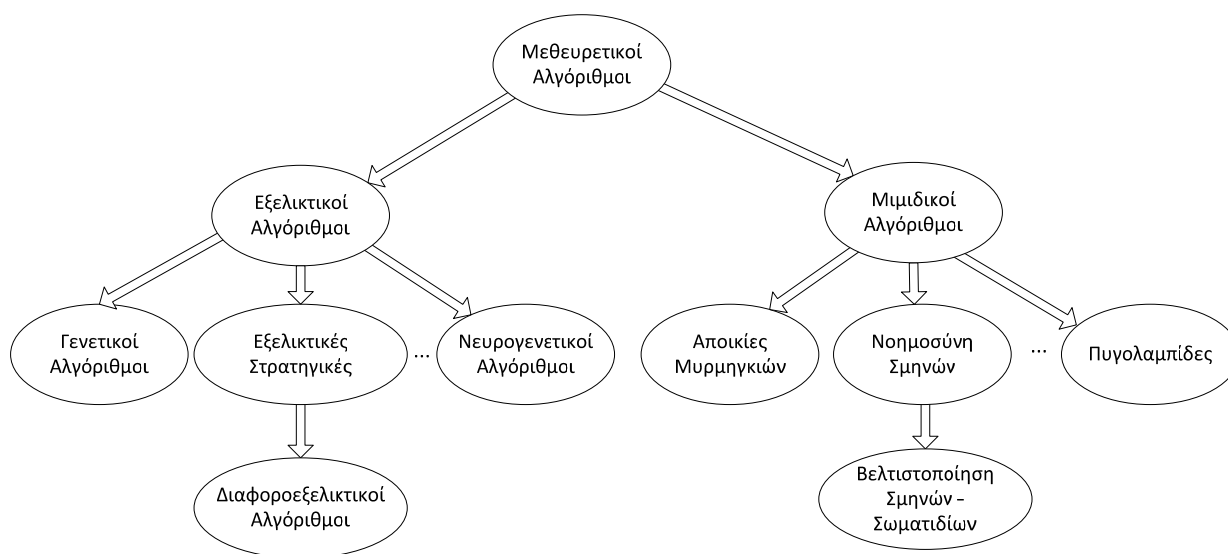
Μετά την κατασκευή ενός νευρωνικού δικτύου απαιτείται η εκπαίδευση του για την εφαρμογή που επιλέχθηκε. Η εκπαίδευση αυτή γίνεται με παραδείγματα ανταπόκρισης σε συγκεκριμένους είδους διαταραχές. Αυτή ακριβώς η ικανότητα των νευρωνικών δικτύων για εκπαίδευση είναι που τα κατατάσσει στις τάξεις της τεχνητής νοημοσύνης. Η διαδικασία της μάθησης γίνεται είτε με την βοήθεια κάποιου εκπαιδευτή ο οποίος επιβλέπει την διαδικασία είτε χωρίς επίβλεψη μέσω κατάλληλων αλγορίθμων που ονομάζονται αυτό-οργανωμένοι (π.χ. Hebbian). Τέλος τα νευρωνικά δίκτυα μπορούν να εκπαιδευτούν πριν την χρήση τους σε κάθε εφαρμογή (off line) η και κατά την διάρκεια της χρησιμοποίησής τους (on line). Τα πρώτα δεν μπορούν να εκπαιδευτούν μετά την εγκατάστασή τους ενώ τα δεύτερα επιτρέπουν την “δια βίου” εκμάθηση. Τα νευρωνικά δίκτυα ανήκουν στον τομέα των εμπειρικών συστημάτων. Αυτά είναι υπολογιστικά συστήματα που βασίζονται στην λύση προηγούμενων προβλημάτων για να δώσουν λύση σε νέα, όπως ακριβώς θα έκανε κάποιος τεχνίτης για την επιδιόρθωση μιας βλάβης, αντί να βασιστούν στον συμβατικό προγραμματισμό με την εκτέλεση ρουτινών.

Τα νευρωνικά δίκτυα ήταν η πρώτη μορφή ευφυΐας στα υπολογιστικά συστήματα αλλά δεν θα μπορούσαν να αναπτυχθούν στο βαθμό που έχουν φτάσει σήμερα αν δεν είχε ανακαλυφθεί ένας τρόπος επικοινωνίας και μεταφοράς της ανθρώπινης γνώσης στον υπολογιστή με ένα σχετικά απλό τρόπο. Την λύση έδωσε στα μέσα της δεκαετίας του '60 ο Lotfi Zadeh με την εισαγωγή της θεωρίας των ασαφών συνόλων και γενικότερα της ασαφούς λογικής. Ο Zadeh παρατήρησε ότι στην μέχρι τότε μαθηματική θεωρία ένα στοιχείο μπορούσε είτε να ανήκει σε ένα σύνολο ή μια κλάση, είτε να μην ανήκει. Θεώρησε λοιπόν τότε ότι αυτό δεν ήταν σωστό, αφού στην φύση τα διάφορα στοιχεία μπορούν να ανήκουν μερικώς σε κάποιο σύνολο και μερικώς σε κάποιο διαφορετικό. Αφού

έγινε γνωστή η θεωρία των ασαφών συνόλων άρχισαν να παρουσιάζονται οι πρώτοι ασαφής ελεγκτές, εφαρμογή που αποτέλεσε το μεγαλύτερο επίτευγμα της συγκεκριμένης θεωρίας. Πρέπει να αναφερθεί εδώ και η συνεισφορά των Mamdani, Takagi, Sugeno και Khag των οποίων τα μοντέλα συμπερασματικών διαδικασιών χρησιμοποιούνται μέχρι και σήμερα. Ουσιαστικά, με την ασαφή λογική έγινε δυνατή η δημιουργία μιας γνωστικής βάσης (knowledge base) και η εκμετάλλευση της για εξαγωγή συμπερασμάτων με σκοπό την βελτιστοποίηση του ελέγχου.

Τέλος, την διαδικασία της μετάδοσης της ευφυΐας στα υπολογιστικά συστήματα ήρθαν να συμπληρώσουν μεθευρετικοί αλγόριθμοι. Πρόκειται για υπολογιστικά προγράμματα τα οποία αντιγράφουν ή μιμούνται τις διαδικασίες που χρησιμοποιεί η φύση για να βελτιώσει διάφορα χαρακτηριστικά. Αυτά είναι προγράμματα με σκοπό να βοηθήσουν την αυτό-βελτίωση ενός συστήματος στο οποίο έχει είδη κατοχυρωθεί μια γνωστική βάση μέσω της ασαφούς λογικής και έχει εκπαιδευτεί μέσω των αλγόριθμων εκπαίδευσης των νευρωνικών δικτύων. Οι μεθευρετικοί αλγόριθμοι χωρίζονται σε δυο βασικές κατηγορίες. Η πρώτη ονομάζεται εξελικτικοί αλγόριθμοι και αναφέρεται ως επί το πλείστον σε προγράμματα τα οποία αντιγράφουν τις βιολογικές διαδικασίες όπως προτάθηκαν από το Δαρβίνο στη θεωρία του για την εξέλιξη των ειδών, για να αντιμετωπίσουν αναλυτικά προβλήματα στα οποία όμως μια αναλυτική λύση θα ήταν είτε χρονοβόρα είτε αδύνατη. Τον ίδιο σκοπό εξυπηρετεί και η δεύτερη κατηγορία μεθευρετικών αλγορίθμων η οποία ονομάζεται μιμιδικοί αλγόριθμοι. Οι τελευταίοι μιμούνται τις στρατηγικές που ανέπτυξαν διάφορα είδη για την επιβίωση τους ή για την εξασφάλιση της τροφής τους για να δώσουν λύση σε ίδιου τύπου προβλήματα.

Ο πιο διαδεδομένος τύπος εξελικτικών αλγορίθμων είναι ο γενετικός αλγόριθμος (Genetic algorithm, GA) ο οποίος αντιγράφει την διαδικασία της εξέλιξης σε επίπεδο DNA χρησιμοποιώντας έννοιες όπως μετάλλαξη, διασταύρωση και φαινότυπο. Παρόλο που ο γενετικός είναι ο πιο διαδεδομένος τύπος εξελικτικών αλγορίθμων, αρκετά διαδεδομένοι είναι οι διαφοροεξελικτικοί αλγόριθμοι και οι αλγόριθμοι νευροεξέλιξης που ανήκουν στην ίδια κατηγορία. Από την άλλη πλευρά οι μιμιδικοί αλγόριθμοι έχουν πολλές γνωστές παραλλαγές, εκ των οποίων οι πιο γνωστές είναι οι αποικίες μυρμηγκιών (ants colony), οι αλγόριθμοι νοημοσύνης σμηνών (particle swarm intelligence), οι πυγολαμπίδες (firefly) και οι μέλισσες (Bees).



Σχ. 5.1. Σχηματική αναπαράσταση των κατηγοριών των μεθευρετικών αλγορίθμων.

Προφανώς η χρήση των μεθευρετικών αλγορίθμων δεν περιορίζεται σε αυτή τη διαδικασία, και βρίσκουν εφαρμογή σε πολλά άλλα πρακτικά προβλήματα. Η τεχνητή νοημοσύνη κάνει όλο και πιο έντονη την παρουσία της τις τελευταίες δεκαετίες ακόμα και στην καθημερινή ζωή. Είναι είδη διαδεδομένα τα πλυντήρια ρούχων ασαφούς λογικής τα οποία μετρούν την ποιότητα των ρούχων και το είδος των λεκέδων και αποφασίζουν, χρησιμοποιώντας βέβαια την γνωστική τους βάση, τι πρόγραμμα πλύσης πρέπει να χρησιμοποιηθεί τι θερμοκρασία πρέπει να έχει το νερό και τι ποσότητα απορρυπαντικού είναι απαραίτητη για να υπάρξει το βέλτιστο αποτέλεσμα. Επίσης διαδεδομένα είναι τα κλιματιστικά τα οποία, με κατάλληλα αισθητήρια αντιλαμβάνονται τις συνθήκες υγρασίας και θερμοκρασίας και ρυθμίζουν τα αντίστοιχα χαρακτηριστικά του χώρου σύμφωνα με τις επιλογές του χρήστη. Το μεγαλύτερο πρόβλημα παραμένει ο τρόπος καθιέρωσης της βάσης γνώσης του συστήματος αφού πρέπει να διαμορφωθούν ξεκάθαροι κανόνες για την εκτέλεση των διεργασιών. Αυτοί οι κανόνες στις περισσότερες περιπτώσεις καθορίζονται με την μέθοδο δοκιμής και λάθους αν

και δεν είναι σπάνιες οι περιπτώσεις που οι κατασκευαστές των συστημάτων επιστρατεύουν εμπειρογνώμονες για να τους βοηθήσουν να εξάγουν σωστούς και αντιπροσωπευτικούς κανόνες.

Τα εμπειρικά συστήματα αποτελούνται από τρεις διακριτές περιοχές, την βάση γνώσης, την μηχανή εξαγωγής συμπερασμάτων και την διεπαφή. Η βάση γνώσης είναι το μεταβλητό μέρος του εμπειρικού συστήματος, είναι ευμετάβλητη και μπορεί διαρκώς να εμπλουτίζεται με νέα εμπειρία. Η μηχανή εξαγωγής συμπερασμάτων δεν μεταβάλλεται, αντλεί την πείρα που έχει συσσωρευτεί στην βάση γνώσης και παράγει ένα συλλογισμό σε κανόνες. Η παραγωγή του συλλογισμού βασίζεται σε κάποια λογική η οποία μπορεί να είναι προτασιακή, τροπική ή ασαφής κ.α.. Η μηχανή μπορεί να λειτουργήσει με δυο διαφορετικούς τρόπους, είτε με είτε χωρίς την συμμετοχή του χρήστη. Στην πρώτη περίπτωση γίνεται ένας διάλογος μεταξύ του χρήστη-εκπαιδευτή και της μηχανής μέσω της διεπαφής. Με αυτό τον τρόπο γίνεται η εκπαίδευση του συστήματος ενώ τα πιο σύγχρονα συστήματα μπορούν κατά την διάρκεια αυτής της διαδικασίας να διακρίνουν αντιφάσεις ή να προβλέψουν τις απαντήσεις του χρήστη πριν καν γίνει η ερώτηση. Με την λειτουργία χωρίς την συμμετοχή του χρήστη η μοναδική πηγή γνώσης είναι η βάση γνώσης και εκεί βασίζεται η παραγωγή του συλλογισμού. Κάποια από τα πλεονεκτήματα των εμπειρικών συστημάτων είναι η αξιοπιστία, η επεκτασιμότητα, η δυνατότητα αυτοπρογραμματισμού και διατήρηση και βελτίωση της γνώσης. Ενώ το βασικό τους μειονέκτημα είναι η διαδικασία καταχώρισης της γνώσης που στα λιγότερο σύγχρονα συστήματα γινόταν χειροκίνητα με αποτέλεσμα να αυξάνεται η πιθανότητα σφάλματος στη διαδικασία. Αυτό τείνει να βελτιωθεί στα τελευταία γενιάς συστήματα αφού η καταχώριση της γνώσης γίνεται μέσω συνέντευξης του χρήστη από το πρόγραμμα.

Παρακάτω θα αναλυθούν οι ευφυείς τεχνικές που χρησιμοποιήθηκαν στα πλαίσια αυτής της πτυχιακής εργασίας καθώς και η βασική λογική τους. Θα γίνει ακόμα μια επίδειξη του τρόπου εισαγωγής των λογικών αυτών στο Matlab και του τρόπου που αυτές καλούνται.

5.1. Ασαφής Λογική

Μπορεί το όνομα της συγκεκριμένης τεχνικής να είναι ασαφής αλλά στην πραγματικότητα το μαθηματικό της υπόβαθρο είναι σαφέστατα διατυπωμένο και βασίζεται στην άλγεβρα Boole. Δεν πρόκειται τόσο για μια ασαφή λογική, παρά για την λογική της ασάφειας ή σωστότερα για την λογική των ασαφών συνόλων. Μέχρι το 1964 ένα στοιχείο είχε μόνο δύο πιθανές σχέσεις με ένα σύνολο, μπορούσε είτε να ανήκει είτε να μην ανήκει σε αυτό σύμφωνα με την συμβατική θεωρία των ευκρινών συνόλων. Ο Lotfi Zadeh ήρθε να διορθώσει αυτή την πρόταση αυτή σε “ένα στοιχείο μπορεί να ανήκει, να μην ανήκει ή να ανήκει μερικώς σε ένα σύνολο τιμών” και έτσι προέκυψε η θεωρία των ασαφών συνόλων. Μια ριζοσπαστική θεωρία που εκφράστηκε στα μέσα του προηγούμενου αιώνα από έναν άνθρωπο που θέλησε να δώσει μια “αναλογική” λύση στα προβλήματα ενός αναλογικού κόσμου. Με την κλασική θεωρία συνόλων, ένα πρόβλημα με πολλές εισόδους οι οποίες μπορεί να πάρουν ένα μεγάλο εύρος τιμών και με μία έξοδο η οποία θα έπρεπε να διαφοροποιείται κατάλληλα σε κάθε διακριτό συνδυασμό των εισόδων θα είχε μια πολλή περίπλοκη και δύσκολη λύση. Ο Zadeh υποστήριξε ότι αν αντί για αριθμητικούς όρους χρησιμοποιηθούν λεκτικοί (linguistic) το πρόβλημα θα απλοποιούταν αφού θα πλησίαζε περισσότερο στον ανθρώπινο τρόπο σκέψης. Η πρόκληση ήταν να μπορέσει ο Η/Υ να αντιληφθεί την έννοια των λεκτικών όρων και την λύση έδωσε η θεωρία των ασαφών συνόλων.

Έστω ότι τα στοιχεία a_1 ως a_n ανήκουν στο σύνολο A , αυτό μαθηματικά συμβολίζεται:

$$A = \{a_1, a_2, a_3 \dots a_n\}$$

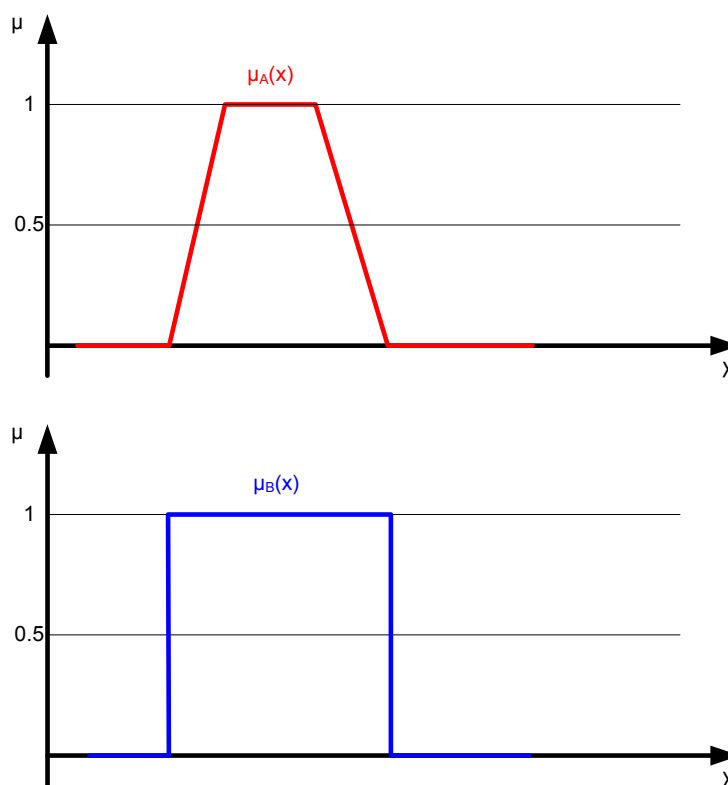
Με την κλασική θεωρία συνόλων το σύνολο A μπορεί να συσχετιστεί με ένα σύνολο που περιέχει όλα τα στοιχεία και θα ονομάζεται πλήρες. Έστω X το σύνολο που περιλαμβάνει όλους τους αριθμούς. Αν κάποια από τα στοιχεία του A είναι ίσα με τα στοιχεία x στο σύνολο X , υπάρχει χαρακτηριστική συνάρτηση η οποία συνδέει τα στοιχεία αυτά με το σύνολο X όπως φαίνεται παρακάτω. Άρα για οποιοδήποτε στοιχείο x του πλήρους συνόλου X θα ισχύει:

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 1 & \text{Αν } x \in A \\ 0 & \text{Αν } x \notin A \end{cases}$$

Η συνάρτηση αυτή λέγεται χαρακτηριστική και ουσιαστικά επιστρέφει τιμές μόνο 1 και 0 δηλαδή αληθές ή ψευδές αντίστοιχα. Έτσι το σύνολο A συσχετίζεται με κάθε στοιχείο του πλήρους συνόλου X με μια τιμή που

δείχνει αν το στοιχείο αυτό ανήκει στο A ή όχι. Τέτοιου είδους σύνολα, με δύο μόνο τιμές δηλαδή, λέγονται ευκρινή (crisp) σύνολα. Οποιοδήποτε σύνολο έχει έστω και ένα στοιχείο που δεν κατατάσσεται ούτε μόνο αληθές ούτε μόνο ψευδές ονομάζεται ασαφές σύνολο. Σε αυτή τη περίπτωση αντί για χαρακτηριστική συνάρτηση υπάρχει μια συνάρτηση συμμετοχής που δείχνει το βαθμό συμμετοχής κάθε στοιχείου x στο σύνολο A. Σε αντίθεση με την κλασική θεωρία συνόλων μια συνάρτηση συμμετοχής ενός ασαφούς συνόλου $\mu_A(x)$ μπορεί να έχει ένα αυθαίρετο βαθμό αληθείας στο κλειστό διάστημα $[0, 1]$ με 0 να θεωρείται μηδενική συμμετοχή και 1 πλήρης συμμετοχή όπως και στα ευκρινή σύνολα. Στο Σχ. 5.2 παρουσιάζεται η γραφική παράσταση ενός ασαφούς συνόλου A με τραπεζοειδή συνάρτηση συμμετοχής και ενός ευκρινούς συνόλου B. Κάθε ασαφές σύνολο ορίζεται πλήρως και μοναδικά από μία συνάρτηση συμμετοχής η οποία συμβολίζεται με τον πεζό χαρακτήρα "μ" με δείκτη το κεφαλαίο γράμμα του εν λόγω συνόλου. Όσο αφορά τα ευκρινή σύνολα, αφού μπορούν να θεωρηθούν γενικευμένες περιπτώσεις ασαφών συνόλων μπορούν να συμβολιστούν με τον ίδιο τρόπο.

Το σύνολο X ορίστηκε προηγουμένως σαν το πλήρες σύνολο που περιλαμβάνει τα υπόλοιπα ή το πεδίου ορισμού. Σε πρακτικές εφαρμογές, οι φυσικές ή οποιεσδήποτε άλλες ποσότητες θεωρείται ότι ορίζονται εντός συγκεκριμένων συνόλων τιμών. Όταν τέτοιες ποσότητες περιγράφονται με σύνολα, το πλήρες σύνολο μπορεί να γενικευτεί ώστε και αυτό να είναι ασαφούς μορφής. Αυτή η γενίκευση είναι απαραίτητη για να εξεταστούν αργότερα τα πολυδιάστατα ασαφή σύνολα.



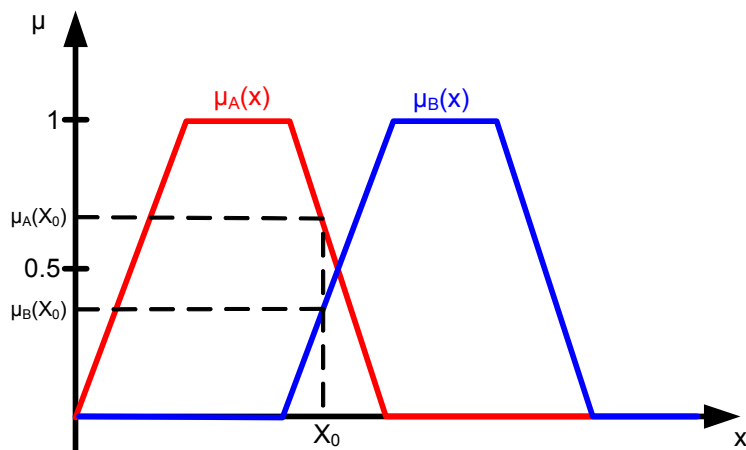
Σχ. 5.2. Γραφικές παραστάσεις ασαφών (επάνω) και ευκρινών (κάτω) υποσυνόλων του X.

Όλη αυτή η θεωρία αναπτύχθηκε με αποτέλεσμα να δημιουργηθούν οι ασαφείς ελεγκτές. Η λειτουργία τους βασίζεται στη εισαγωγή δεδομένων ασαφούς μορφής, την εφαρμογή κατάλληλων κανόνων για την εξαγωγή κατάλληλης ασαφούς εξόδου η οποία λαμβάνει υπόψη όλα τα δεδομένα εισόδου και τέλος μετατροπή της ασαφούς εξόδου σε αριθμητική (defuzzification). Μια είσοδος θα μπορούσε να ασαφοποιηθεί (fuzzification) με την βοήθεια εμπειρογνομώνων ή με την μέθοδο δοκιμής και λάθους και αντί να υπάρχουν διακριτές τιμές θα δημιουργούνταν ασαφή σύνολα τα οποία θα περιλάμβαναν τις τιμές αυτές. Οπότε π.χ. αντί να υπάρχει μια είσοδος από 0 ως 10 θα υπήρχαν τρία ασαφή σύνολα το κάθε ένα από τα οποία θα ονομαζόταν μικρό, μέτριο και μεγάλο κάθε ένα με την δική του συνάρτηση συμμετοχής. Με αυτό τον τρόπο η τιμή εισόδου 2 θα μπορούσε να είναι 0.7 μικρή και 0.2 μέτρια. Ο ελεγκτής θα υπολόγιζε μια ασαφή έξοδο για μικρή είσοδο με συμμετοχή 0.7 και μια για μέτρια με συμμετοχή 0.2 χρησιμοποιώντας λεκτικούς κανόνες. Στη συνέχεια θα έπρεπε να ενώσει κατάλληλα τις εξόδους με τους παράγοντες συμμετοχής τους ώστε να προκύψει μια και μοναδική ασαφής έξοδος. Τέλος, η έξοδος αυτή θα έπρεπε να μετατραπεί σε μια αριθμητική τιμή. Σε αυτό το κεφάλαιο θα γίνει

προσπάθεια να αναλυθεί περισσότερο η λειτουργία του ασαφούς ελεγκτή αφού όμως πρώτα εξεταστούν τα δομικά του στοιχεία, ξεκινώντας από τις συναρτήσεις συμμετοχής.

5.1.1. Συναρτήσεις Συμμετοχής

Οι συνάρτηση συμμετοχής $\mu_A(x)$ περιγράφει τους συντελεστές συμμετοχής κάθε στοιχείου x του πεδίου ορισμού X στο ασαφές σύνολο A . Από την συνάρτηση συμμετοχής $\mu_A(x)$ μπορούν να εξαχθούν πολλές τμηματικές συναρτήσεις οι οποίες μπορούν να είναι γραμμικές, όπως τριγωνικές και τραπεζοειδής μεταξύ άλλων. Ο βαθμός συμμετοχής ενός στοιχείου x_0 μιας συνάρτησης συμμετοχής $\mu_A(x)$ θα συμβολίζεται σαν $\mu_A(x_0)$ και θα περιγράφει σε ποιο βαθμό ανήκει στο σύνολο A . Υπάρχει ταυτόχρονα η δυνατότητα το ίδιο στοιχείο να ανήκει μερικώς ή πλήρως σε ένα διαφορετικό ασαφές σύνολο, το B για παράδειγμα με βαθμό συμμετοχής $\mu_B(x_0)$, όπως φαίνεται στο Σχ. 5.3.



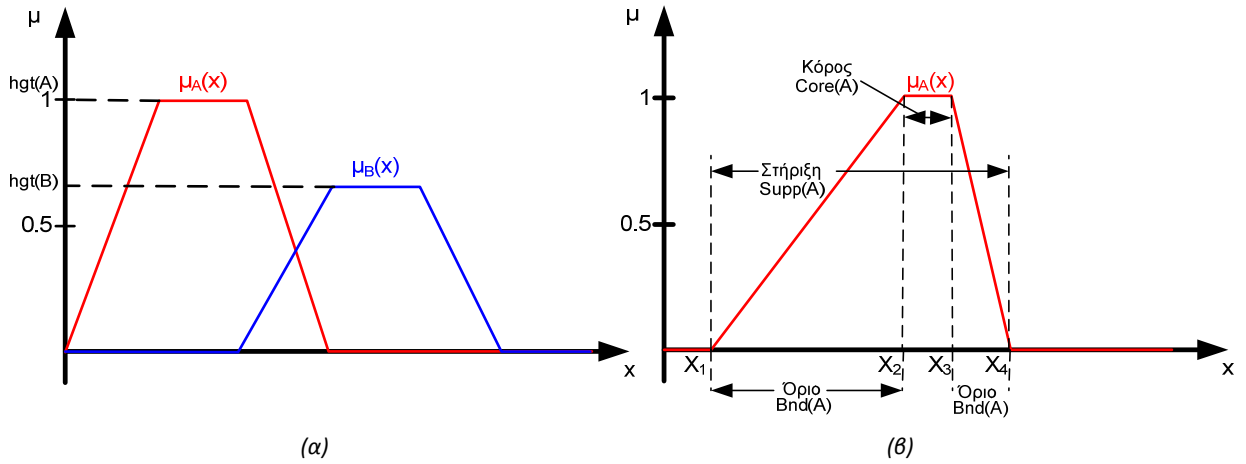
Σχ. 5.3. Βαθμοί συμμετοχής του στοιχείου x_0 στα ασαφή σύνολα A και B .

Θα αναφερθούν ακόμα κάποια βασικά χαρακτηριστικά και ιδιότητες των ασαφών συνόλων. Τα σημαντικότερα αυτών είναι ο κόρος (core), το ύψος (height), η στήριξη (support), η ομοιότητα (similarity), τα όρια (boundaries) και το μονήρες σύνολο (singleton). Τα παραπάνω χαρακτηριστικά μπορούν να παρατηρηθούν στο Σχ. 5.4. Αυτά είναι έννοιες που αναπτύχθηκαν για να περιγράψουν τα ασαφή σύνολα ή ειδικές περιπτώσεις αυτών. Το ύψος ενός ασαφούς συνόλου είναι η μέγιστη τιμή της συνάρτησης συμμετοχής που θα ληφθεί από οποιοδήποτε στοιχείο του συνόλου και δεν μπορεί να είναι μεγαλύτερη από 1. Συμβολίζεται με τους χαρακτήρες $\text{hgt}(A)$ όταν αναφέρεται στο σύνολο A . Ένα ασαφές σύνολο λέγεται κανονικό όταν έχει ύψος 1 και υποκανονικό όταν το ύψος του είναι μικρότερο της μονάδας (Σχ. 5.4 αριστερά). Η στήριξη ενός ασαφούς συνόλου είναι το ευκρινές σύνολο που περιέχει όλα τα στοιχεία του ασαφούς συνόλου για τα οποία αυτό έχει μη μηδενικό βαθμό συμμετοχής. Όπως φαίνεται και στο Σχ. 5.4 η στήριξη για το τυχαίο σύνολο A είναι το διάστημα από x_1 ως x_4 μη συμπεριλαμβανομένων των άκρων δηλαδή (x_1, x_4) . Ο κόρος ενός ασαφούς συνόλου είναι το σύνολο των στοιχείων τα οποία έχουν μοναδιαίο βαθμό συμμετοχής δηλαδή το κλειστό διάστημα από x_2 ως x_3 . Το όριο ενός ασαφούς συνόλου είναι το σύνολο των στοιχείων του ασαφούς συνόλου για τα οποία ο βαθμός συμμετοχής είναι μεγαλύτερος του μηδέν αλλά μικρότερος της μονάδας. Στο Σχ. 5.4 δεξιά το όριο του A είναι τα ανοικτά διαστήματα (x_1, x_2) και (x_3, x_4) . Προκύπτει από τα παραπάνω ότι η ένωση των συνόλων του κόρου και του ορίου ενός ασαφούς έτους θα ισούται με την στήριξη του συνόλου.

Δύο ασαφή σύνολα A και B μπορούν να θεωρηθούν όμοια όταν αυτά έχουν ίδιους κόρους και ίδιες ανοχές όπως περιγράφεται και στην Εξ. (5.1). Επίσης ένα ασαφές σύνολο χαρακτηρίζεται μονήρες (singleton) όταν η στήριξη του αλλά και ο κόρος του είναι ένα και μοναδικό στοιχείο (Εξ. 5.2). Σε αυτή την περίπτωση εννοείται ότι το όριο του μονήρους συνόλου δεν υπάρχει.

$$\text{core}(A) = \text{core}(B) \quad \& \quad \text{sup}(A) = \text{sup}(B) \tag{5.1}$$

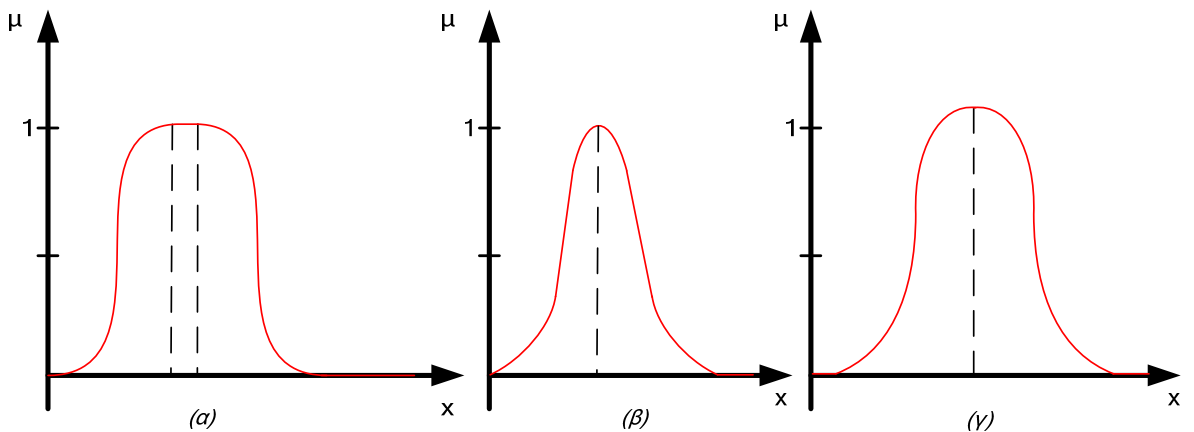
$$\text{core}(A) = \text{sup}(A) = \{x_0\} \tag{5.2}$$



Σχ. 5.4. Κανονικά και υποκανονικά ασαφή σύνολα (α) και χαρακτηριστικά ενός ασαφους συνόλου (β).

Το είδος της αναπαράστασης των συναρτήσεων συμμετοχής εξαρτάται από το μέγεθος του αναφερόμενου συνόλου. Αν αυτό αποτελείται από πολλά στοιχεία ή είναι το πλήρες σύνολο, τότε μια τμηματική συνάρτηση ίσως είναι ο καλύτερος τρόπος αναπαράστασης. Για αυτό τον λόγο χρησιμοποιούνται συναρτήσεις οι οποίες μπορούν να μεταβληθούν αλλάζοντας τις παραμέτρους τους. Προτιμώνται οι κατά διαστήματα γραμμικές συναρτήσεις λόγω της απλότητάς τους και της γρήγορης επεξεργασίας τους από τους Η/Υ. Αυτές είναι ως επί το πλείστον τραπεζοειδής ή τριγωνικές συναρτήσεις με 4 ή 3 παραμέτρους αντίστοιχα. Στην Εξ. (5.3) φαίνεται η τμηματική συνάρτηση για τραπεζοειδή αναπαράσταση, η ίδια συνάρτηση μπορεί να αναπαραστήσει μια τριγωνική μορφή αν η παράμετρος “β” γίνει ίση με την παράμετρο “γ”. Παρόλο που είναι πιο αποδοτικό και πιο απλό να χρησιμοποιηθούν τοπικά γραμμικές συναρτήσεις αυτό δεν είναι δεσμευτικό. Μπορούν κάλλιστα να χρησιμοποιηθούν συναρτήσεις με μορφή κατανομής καμπάνας (Σχ. 5.5.γ) ή της γενικευμένης συνάρτησης του Gauss (Σχ. 5.5.β) ή της μορφής της διαφοράς δύο σιγμοειδών συναρτήσεων (Σχ. 5.5.α).

$$\mu(x, \alpha, \beta, \gamma, \delta) = \begin{cases} 0, & \text{για } x < \alpha, \delta < x \\ \frac{x - \gamma}{\beta - \alpha}, & \text{για } \alpha \leq x \leq \beta \\ 1, & \text{για } \beta < x < \gamma \\ \frac{\delta - x}{\delta - \gamma}, & \text{για } \gamma \leq x \leq \delta \end{cases} \quad (5.3)$$



Σχ. 5.5. Μη γραμμικές συναρτήσεις συμμετοχής

5.1.2. Στοιχειώδεις Τελεστές Ασαφών Συνόλων

Όπως και στην κλασική θεωρία των συνόλων οι βασικοί τελεστές είναι αυτοί της τομής, της ένωσης και του συμπληρώματος, οι ίδιοι υπάρχουν και στα ασαφή σύνολα. Για την ακρίβεια η εφαρμογή τους σε ασαφή σύνολα μπορεί να γίνει με παραπάνω από έναν τρόπο. Πρώτα θα αναλυθεί η εφαρμογή τους με τον τυπικό τρόπο, οπότε και ονομάζονται τυπικοί τελεστές ασαφών συνόλων.

- Ο ασαφής τελεστής της τομής \cap , ο οποίος χαρακτηρίζεται και σαν το ασαφές συνδετικό ΚΑΙ, χρησιμοποιείται σε δύο ασαφή σύνολα A και B με συναρτήσεις συμμετοχής $\mu_A(x)$ και $\mu_B(x)$ αντίστοιχα και προκύπτει ότι:

$$\mu_A(x) \cap \mu_B(x) = \mu_{A \cap B}(x) = \min[\mu_A(x), \mu_B(x)], \quad x \in X \quad (5.4)$$

- Ο ασαφής τελεστής της ένωσης \cup , ο οποίος μπορεί να θεωρηθεί και σαν το ασαφές συνδετικό Ή, χρησιμοποιείται στα ίδια ασαφή σύνολα A και B με συναρτήσεις συμμετοχής $\mu_A(x)$ και $\mu_B(x)$ αντίστοιχα και προκύπτει ότι:

$$\mu_A(x) \cup \mu_B(x) = \mu_{A \cup B}(x) = \max[\mu_A(x), \mu_B(x)], \quad x \in X \quad (5.5)$$

- Ο ασαφής τελεστής του συμπληρώματος ή το ασαφές συνδετικό ΌΧΙ, αν χρησιμοποιηθεί σε ένα ασαφές σύνολο A με συνάρτηση συμμετοχής $\mu_A(x)$ θα προκύψει:

$$\mu_{\bar{A}}(x) = 1 - \mu_A(x), \quad x \in X \quad (5.6)$$

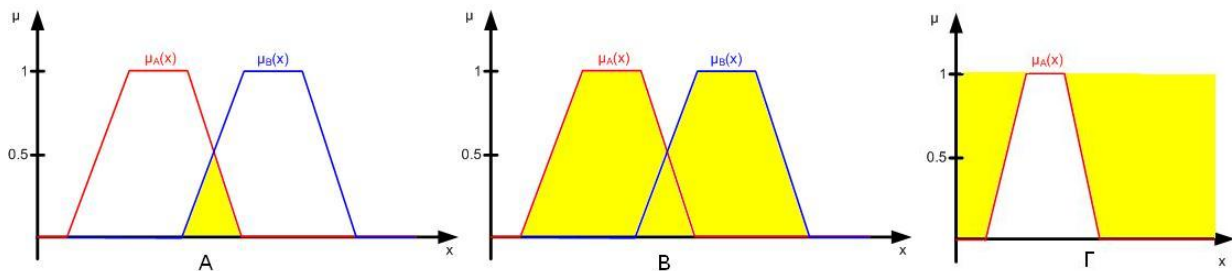
Μπορεί να παρατηρηθεί ότι στις περιπτώσεις της τομής και της ένωσης χρησιμοποιούνται σχέσεις ελάχιστου – μέγιστου ενώ για τον προσδιορισμό του συμπληρώματος χρησιμοποιείται αλγεβρική σχέση. Ομοίως θα μπορούσε να δοθεί η αλγεβρική λύση για τις πρώτες δύο περιπτώσεις παρόλο που για την περίπτωση της τομής θα έχει διαφορετικά αποτελέσματα. Η αλγεβρική μέθοδος ονομάζεται στην βιβλιογραφία σαν μέθοδος μέγιστου – γινομένου (max – prod), ενώ η πρώτη μέθοδος ονομάζεται μέγιστου – ελάχιστου (max – min).

- Ο ασαφής τελεστής της τομής \cap , με αλγεβρικό τρόπο ορίζεται σαν το γινόμενο των συναρτήσεων συμμετοχής των συνόλων.

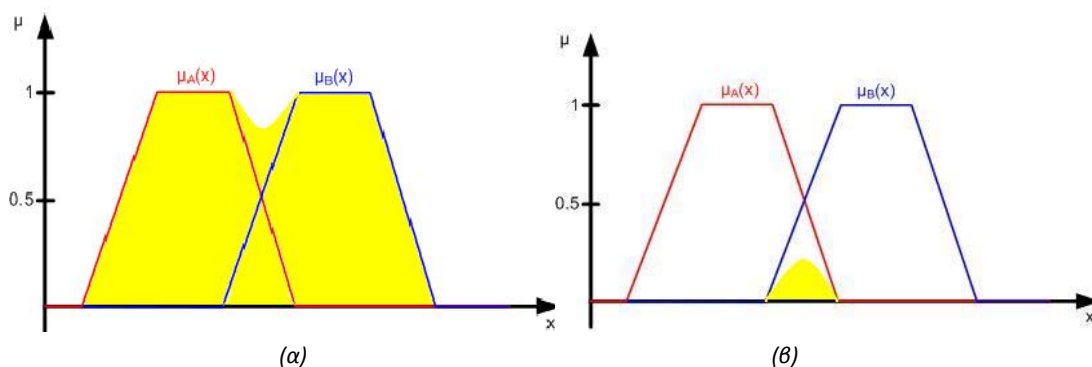
$$\mu_A(x) \cap \mu_B(x) = \mu_{A \cap B}(x) = \mu_A(x) * \mu_B(x), \quad x \in X \quad (5.7)$$

- Ο ασαφής τελεστής της ένωσης \cup , με αλγεβρικό τρόπο ορίζεται σαν το άθροισμα των συναρτήσεων συμμετοχής των συνόλων που ενώνονται πλην την κοινή τους περιοχή η οποία λόγω της άθροισης προκύπτει δύο φορές.

$$\mu_A(x) \cup \mu_B(x) = \mu_{A \cup B}(x) = \mu_A(x) + \mu_B(x) - \mu_A(x) * \mu_B(x), \quad x \in X \quad (5.8)$$



Σχ. 5.6. Οι γραμμοσκιασμένες με κίτρινο περιοχές δείχνουν τα αποτελέσματα της δράσης των βασικών τελεστών. Στο A φαίνεται η τομή των συνόλων με την μέθοδο μέγιστου – ελάχιστου, στο B η ένωση τους και στο Γ το συμπλήρωμα ενός από αυτά.

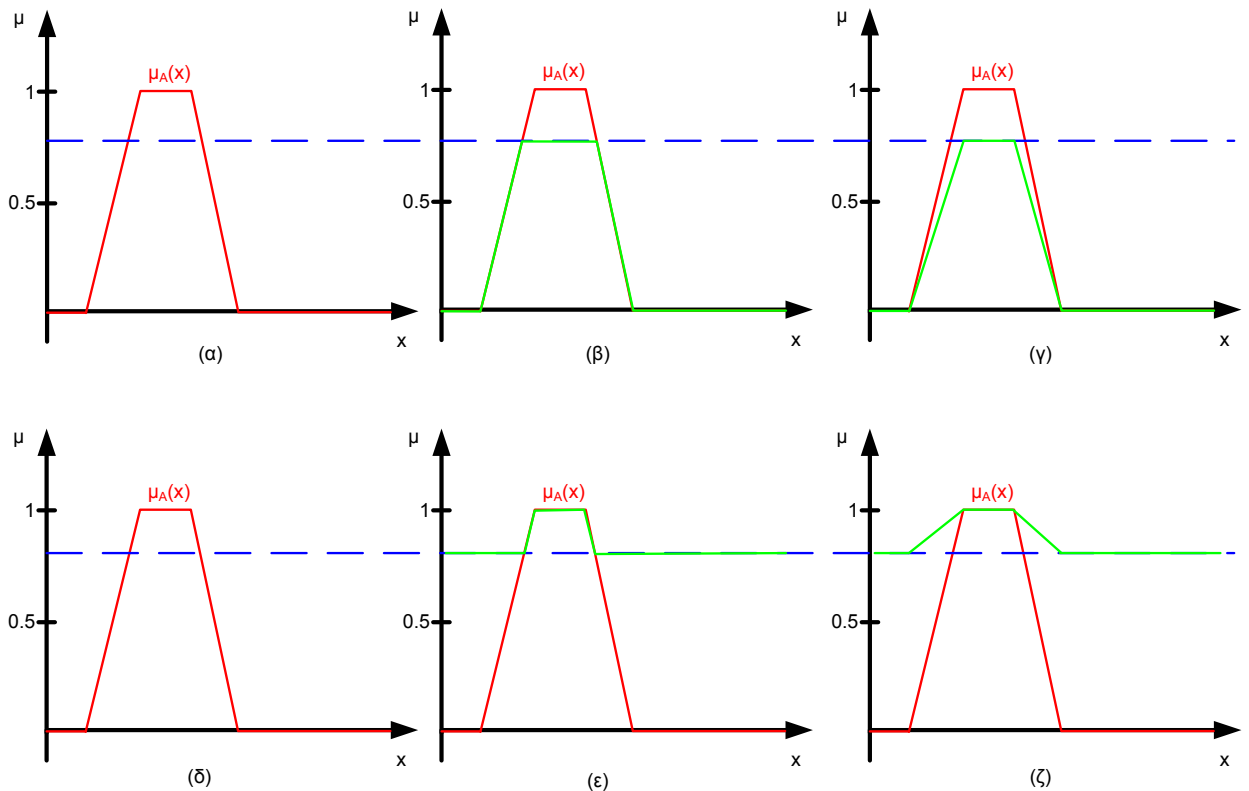


Σχ. 5.7. Ένωση (α) και τομή (β) των συνόλων A και B με την χρήση της μεθόδου μέγιστου – γινομένου.

Πριν προχωρήσει κανείς στην περαιτέρω ανάλυση των ασαφών συνόλων θα πρέπει να παρατηρήσει τις διαφορές των δύο τεχνικών τομής και ένωσης όταν πρόκειται για την χρήση τους με ένα ασαφές σύνολο και ένα ευκρινές με σταθερή τιμή σε όλο το πεδίο ορισμού. Η διαφορά έγκειται στο γεγονός ότι στην μια περίπτωση θα χρησιμοποιηθεί η μέθοδος μέγιστου – ελάχιστου ενώ στην δεύτερη η μέθοδος μέγιστου – γινομένου. Προκύπτει λοιπόν, όπως φαίνεται και στο Σχ. 5.8., ότι με την πρώτη θα υπάρξει ψαλίδισμα (α -cut) της γραφικής στην τιμή του ευκρινούς συνόλου, ενώ στην δεύτερη περίπτωση, η γραφική θα προκύψει, από αλλαγή κλίμακας της γραφικής του ασαφούς συνόλου.

Όπως γίνεται εύκολα αντιληπτό οι ασαφής τελεστές λειτουργούν στα ασαφή σύνολα όπως και οι αντίστοιχοι κλασικοί τελεστές στα ευκρινή σύνολα. Αυτό είναι απόρροια του γεγονότος ότι τα ασαφή σύνολα είναι μια ειδική περίπτωση ευκρινών συνόλων στην οποία οι βαθμοί συμμετοχής περιορίζονται στους πραγματικούς αριθμούς του κλειστού διαστήματος $[0,1]$. Είναι λογικό ότι όταν κάποιος χρησιμοποιήσει τους παραπάνω τελεστές σε περισσότερο σύνθετες εξισώσεις θα πρέπει να χρησιμοποιήσει τεχνικές απλοποίησης όπως και στην κλασική θεωρία συνόλων. Ένα παράδειγμα είναι το θεώρημα De Morgan που στην κλασική θεωρία συνόλων ισχύει όπως στην Εξ. (5.9) για τα ευκρινή σύνολα A και B. Είναι επιθυμητό οι ίδιοι νόμοι να ισχύουν και στα ασαφή σύνολα. Επίσης είναι επιθυμητό να ισχύουν και άλλες αλγεβρικές ιδιότητες όπως η αντιμεταθετική, η προσεταιριστική και η επιμεριστική. Στην πραγματικότητα όλες οι παραπάνω συμπεριλαμβανομένου και του θεωρήματος De Morgan ισχύουν για τα ασαφή σύνολα ασχέτως ποια μέθοδος χρησιμοποιείται για τις τομές και τις ενώσεις. Εξάιρεση αποτελεί η επιμεριστική ιδιότητα με την μέθοδο μέγιστου – γινομένου η οποία δεν ισχύει. Για την καλύτερη κατανόηση των παραπάνω προτάσεων δίνεται ο Πίνακας 3.

$$\begin{aligned} \overline{(A \cap B)} &= \overline{A} \cup \overline{B} \\ \overline{(A \cup B)} &= \overline{A} \cap \overline{B} \end{aligned} \tag{5.9}$$



Σχ. 5.8. Τομές (επάνω) και ενώσεις (κάτω) των δύο συνόλων. Με κόκκινο το ασαφές σύνολο A , με μπλέ το ευκρινές σύνολο με σταθερή τιμή και με πράσινο η ένωση ή η τομή τους.

Πίνακας 3. Ιδιότητες διαχείρισης ασαφών συνόλων.

	Ιδιότητες	Μέθοδος Μέγιστου – Ελάχιστου	Μέθοδος Μέγιστου – Γινόμενου
Αντιμεταθετική	$A \cup B = B \cup A$ $A \cap B = B \cap A$	*	*
Προσεταιριστική	$A \cup (B \cap C) = (A \cup B) \cap C$ $A \cap (B \cup C) = (A \cap B) \cup C$	*	*
Επιμεριστική	$A \cup (B \cap C) = (A \cup B) \cap (A \cup C)$ $A \cap (B \cup C) = (A \cap B) \cup (A \cap C)$	*	-
De Morgan	$\overline{(A \cap B)} = \overline{A} \cup \overline{B}$ $\overline{(A \cup B)} = \overline{A} \cap \overline{B}$	*	*

5.1.3. Ασαφείς Κανόνες

Οι ασαφείς κανόνες είναι μηχανισμοί αναπαράστασης της γνώσης, οι οποίοι ακολουθούν τον ανθρώπινο τρόπο σκέψης. Ακόμα και αν δεν το αντιλαμβάνεται κανείς οι καθημερινές του αποφάσεις βασίζονται σε ένα σύνολο κανόνων που έχει δημιουργήσει. Για παράδειγμα αν κάποιος έχει σχηματίσει βάσει της εμπειρίας του τον κανόνα “Αν έχει κακό καιρό, τότε δεν θα πηγαίνω εκδρομή” όταν ακούσει ότι θα φυσάει πολύ, μάλλον θα αποφασίσει να αναβάλει την εκδρομή του. Ο “κακός” είναι ένας ασαφής λεκτικός όρος ο οποίος χαρακτηρίζει την είσοδο “καιρός”. Στο συγκεκριμένο παράδειγμα, η έξοδος “θα πηγαίνω εκδρομή” είναι ευκρινής και δυαδική, μπορεί να είναι είτε αληθής είτε ψευδής. Στην πραγματικότητα οι ανθρώπινοι κανόνες είναι αρκετά σύνθετοι και

λαμβάνουν πολλές παραμέτρους υπόψη. Από την άλλη το ίδιο μπορούν να κάνουν και οι κανόνες των ασαφών συστημάτων ανάλογα με την λεπτομέρεια που θέλει να πετύχει ο κατασκευαστής τους.

Τα ασαφή σύνολα που εκφράζουν λεκτικούς όρους συνδυάζονται μεταξύ τους και δημιουργούν ασαφείς κανόνες που αναπαριστούν τη γνώση που έχει αποκτήσει ο κατασκευαστής τους ή κάποιος εμπειρογνώμονας για το σύστημα. Ένας ασαφής κανόνας αποτελείται από δύο βασικά μέρη, πρώτον το τμήμα υπόθεσης και δεύτερον το τμήμα απόφασης. Ένας απλός κανόνας είναι της μορφής: (If) $A_n x$ είναι A , (then) τότε y είναι B . Όπου A και B ασαφή σύνολα. Το τμήμα της πρότασης πριν από το κόμμα είναι το τμήμα υπόθεσης και το δεύτερο το τμήμα απόφασης η συμπεράσματος. Το x είναι η τιμή μιας μεταβλητής εισόδου, η οποία ασαφοποιείται (fuzzification), δηλαδή αποκτά ένα βαθμό συμμετοχής στο ασαφές σύνολο A . Η y είναι η έξοδος του συστήματος που εκφράζει την απόφαση του κανόνα και παρέχεται από τον μηχανισμό του συμπεράσματος (inference) σε ασαφή μορφή. Στη συνέχεια το ασαφές συμπέρασμα από-ασαφοποιείται με το μηχανισμό της αποασαφοποίησης (defuzzification), και προκύπτει μια ευκρινής, αριθμητική (ή λογική) τιμή που είναι το τελικό αριθμητικό συμπέρασμα που μπορεί να χειριστεί η υπολογιστική μηχανή ή ένα αισθητήριο. Ένας κανόνας μπορεί να πάρει διάφορες μορφές εκτός από αυτή της προηγούμενης πρότασης (A_n , τότε). Οι κανόνες της μορφής αυτής, των οποίων η έξοδος είναι ασαφή σύνολα ονομάζονται κανόνες τύπου Mamdani από τον Ebrahim Mamdani του πανεπιστημίου της California, Berkeley, ο οποίος ήταν πρωτοπόρος στην εφαρμογή της ασαφούς λογικής στα συστήματα αυτόματου ελέγχου.

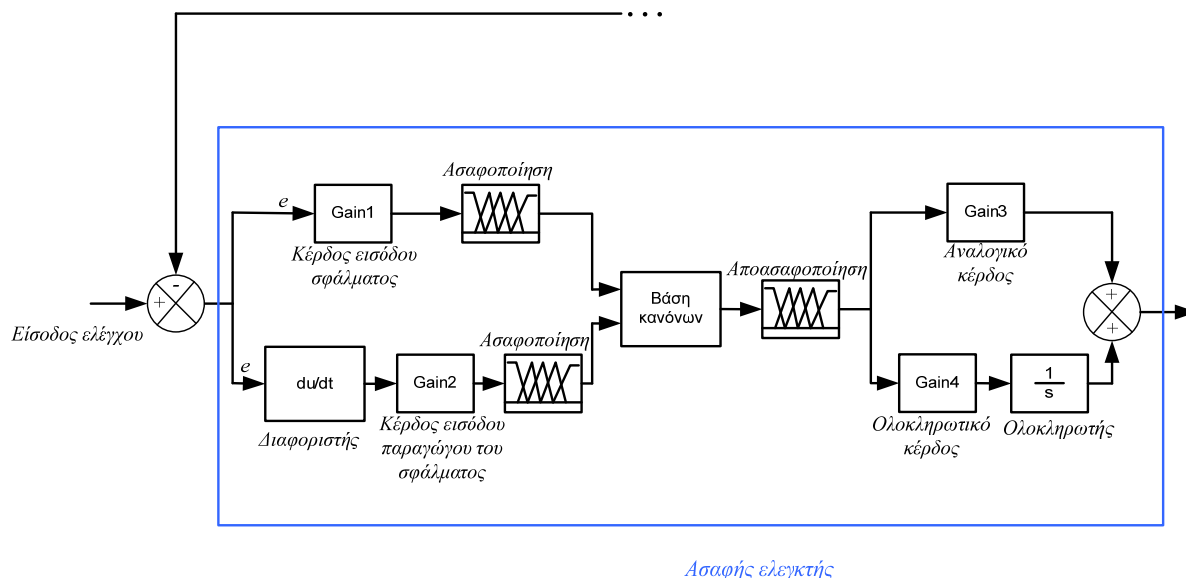
Οι Takagi – Sugeno (T-S) πρότειναν μια παραλλαγή των κανόνων του Mamdani όπου η έξοδος δεν συσχετίζεται με ένα ασαφές σύνολο αλλά με μία αριθμητική τιμή ή ένα ευκρινές σύνολο όπως στο παράδειγμα με τον καιρό και την εκδρομή. Ο κανόνας τότε γίνεται: (If) $A_n x$ είναι A , (then) τότε y είναι c . Όπου c μία αριθμητική τιμή ή ένα ευκρινές σύνολο. Μια επέκταση προτάθηκε από τους ίδιους με την βοήθεια του Kang με την μορφή: (If) $A_n x$ είναι A , (then) τότε y είναι c_0+c_1x . Αυτή η μορφή κανόνων γνωστή σαν T-S-K χρησιμοποιείται κατά κόρο σε εφαρμογές ανάπτυξης ασαφών ελεγκτών.

Είναι δυνατό για περισσότερες εισόδους και εξόδους οι παραπάνω κανόνες να επεκταθούν με χρήση των λογικών τελεστών ΚΑΙ και Ή. Φερ' ειπείν για τον κανόνα τύπου Mamdani και με x_1, x_2, \dots, x_n εισόδους και έστω μία έξοδος y χωρίς βλάβη της γενικότητας, θα προκύψει: $A_n x_1$ είναι A , και x_2 είναι B , ... και x_n είναι N , τότε y είναι M . Εννοείται πως αντίστοιχα μπορούν να επεκταθούν και οι αποφάσεις του κανόνα αν και σε αυτήν την περίπτωση συνήθως προτιμάται να διασπαστεί ο κανόνας σε περισσότερους κανόνες με μια μόνο απόφαση στον κάθε ένα.

5.1.4. Υλοποίηση Ασαφών Ελεγκτών στο Simulink

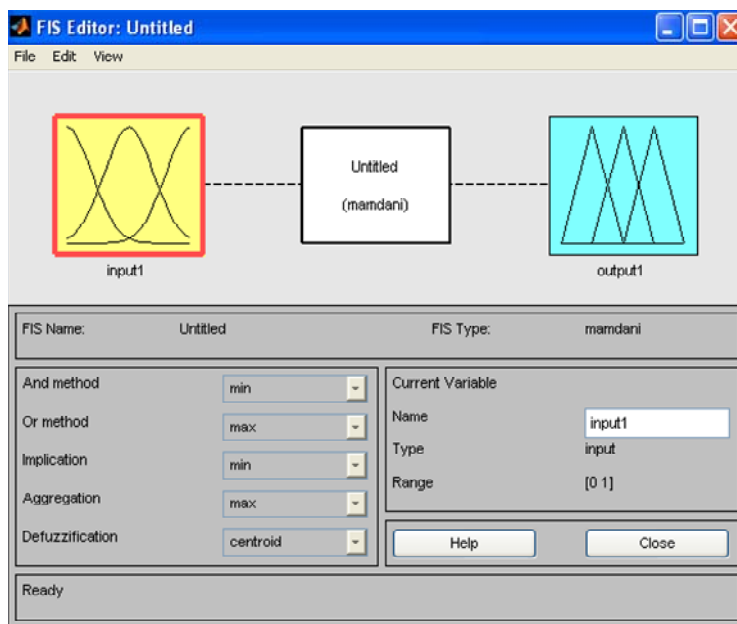
Η κυριότερη εφαρμογή της ασαφούς λογικής είναι οι ασαφείς ελεγκτές. Για την κατασκευή ενός τέτοιου απαιτείται πρώτα από όλα ο καθορισμός συναρτήσεων συμμετοχής για τις εισόδους και τις εξόδους. Στην συνέχεια αυτό που πρέπει να γίνει είναι ο καθορισμός κανόνων που θα συσχετίζουν τις εισόδους με τις εξόδους. Για τις ανάγκες αυτής της πτυχιακής εργασίας δημιουργήθηκαν ασαφείς ελεγκτές αναλογικού και ολοκληρωτικού τύπου (PI) οι οποίοι δέχονται είσοδο το σφάλμα ελέγχου της περιοχής την οποία ελέγχει και την παράγωγο του σφάλματος όπως φαίνεται στο Σχ. 5.9. Στην συνέχεια γίνεται ασαφοποίηση των δυο σημάτων εισόδου σύμφωνα με όσα έχουν περιγραφεί ως τώρα. Ακολουθεί η τροφοδότηση των δυο ασαφών πια σημάτων στην βάση κανόνων που έχει δημιουργηθεί ώστε να μπορέσει να προκύψει το σήμα εξόδου σαν συμπέρασμα των σημάτων εισόδου και της βάσης κανόνων. Από το σημείο αυτό και μετά ακολουθεί ένας απλός PI ελεγκτής με την διαφορά ότι το αναλογικό του κέρδος ονομάζεται Gain3 και το ολοκληρωτικό του Gain4.

Λόγω περιορισμού χώρου ο ελεγκτής αυτός θα χρησιμοποιηθεί σε επιλεγμένα μοντέλα από αυτά που εξετάζονται ώστε να συγκριθεί με τους PI και PID ελεγκτές. Η απόκριση του αναμένεται να είναι λίγο καλύτερη από τον συμβατικό PI ελεγκτή και παράλληλα χειρότερη από αυτήν του PID ελεγκτή.



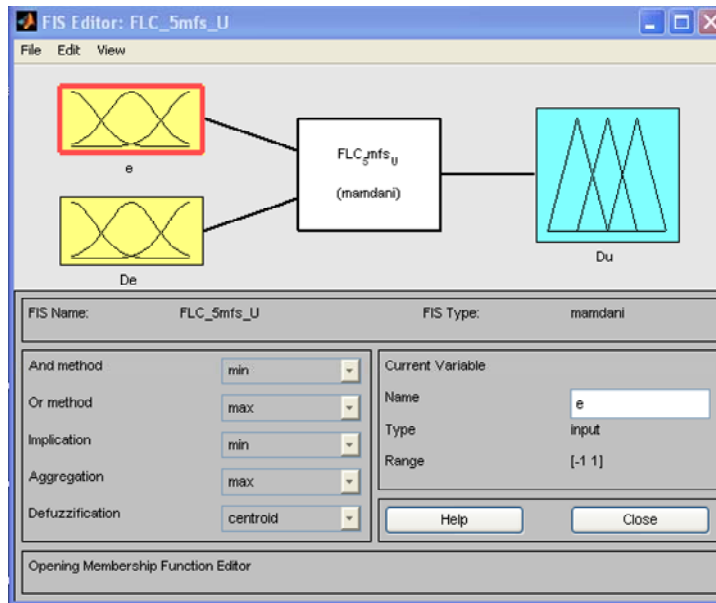
Σχ. 5.9. Ο ασαφής ελεγκτής PI που χρησιμοποιήθηκε στην πτυχιακή εργασία.

Για την δημιουργία του ασαφούς ελεγκτή χρησιμοποιήθηκε το fuzzy toolbox του Matlab. Εισάγοντας την εντολή fuzzy στο κεντρικό παράθυρο του Matlab εμφανίζεται ένα διαδραστικό παράθυρο για την δημιουργία ασαφών ελεγκτών, συναρτήσεων συμμετοχής και βάσεων κανόνων όπως αυτό της Εικ. 5.1.



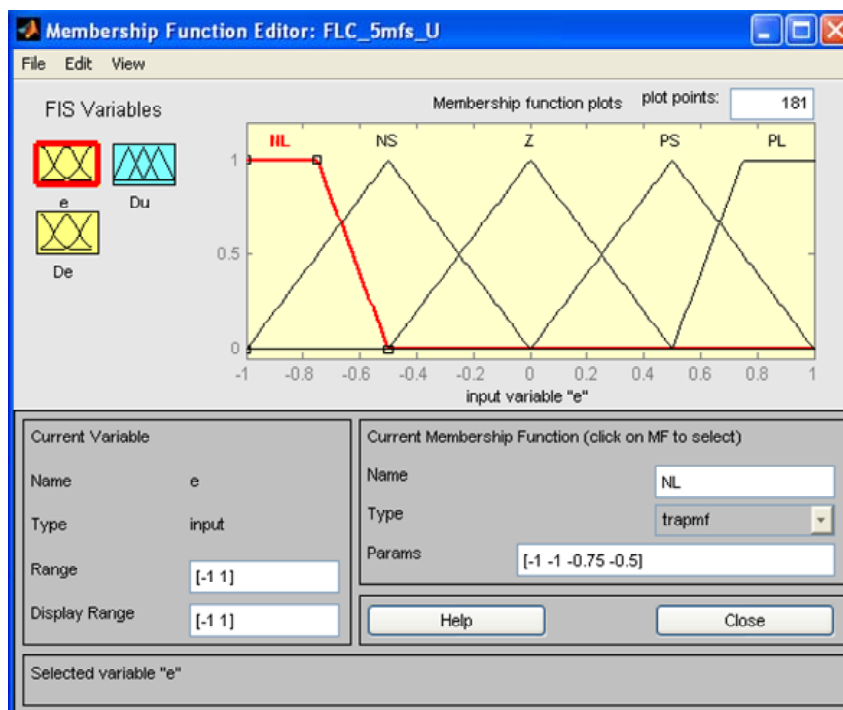
Εικ. 5.1. Αρχικό παράθυρο του FIS Editor για την δημιουργία ασαφών ελεγκτών.

Με την χρήση του FIS editor δημιουργείται ένα αρχείο το οποίο περιέχει τις ρυθμίσεις του ασαφούς ελεγκτή όσο αφορά τον τρόπο εισαγωγής των κανόνων που θα αποτελέσουν την βάση γνώσης, του τρόπου αποασαφοποίησης και το εύρος τιμών των εισόδων μεταξύ άλλων. Επίσης θα πρέπει να επιλεγεί ένα όνομα για το αρχείο FIS που θα δημιουργηθεί αφού είναι απαραίτητο για την δημιουργία του ασαφούς ελεγκτή. Στην Εικ. 5.2 φαίνεται το αρχείο που δημιουργήθηκε για τους σκοπούς αυτής της πτυχιακής εργασίας και ονομάστηκε FLC_5mfs_U.fis. Ακόμα, φαίνεται ότι η βάση κανόνων έχει δύο μεταβλητές εισόδου (e, De) και μια μεταβλητή απόφασης (Du). Τέλος, μπορεί να παρατηρήσει κανείς ότι το μοντέλο που έχει επιλεγεί για την εισαγωγή των ασαφών κανόνων είναι αυτό του Mamdani.



Εικ. 5.2. Το παράθυρο του FIS Editor αφού έχουν οριστεί οι εισοδοι και εξοδοι του ασαφούς ελεγκτή.

Στην συνέχεια για κάθε μια από της μεταβλητές εισόδου και εξόδου ορίζονται τα ασαφή σύνολα τα οποία καθορίζουν το σχετικό μέγεθος τους. Οι εισοδοι είναι το σήμα σφάλματος (e) και η παράγωγος του (De) και η έξοδος το σήμα ελέγχου (Du). Για κάθε μεταβλητή ορίστηκε το εύρος της να είναι από -1 ως 1 και το διάστημα αυτό να χωρίζεται σε 5 ασαφή σύνολα που ποιοτικά θα δείχνουν το μέγεθος του κάθε σφάλματος ή της εξόδου. Τα ασαφή σύνολα αυτά ουσιαστικά απαρτίζουν τις συναρτήσεις συμμετοχής κάθε μεταβλητής. Για μεγάλες αρνητικές τιμές το ασαφές σύνολο ονομάζεται NL, για μικρές αρνητικές τιμές το ασαφές σύνολο ονομάζεται NS, για σχεδόν μηδενικές τιμές το ασαφές σύνολο ονομάζεται Z κοκ. Όσα αναφέρονται εδώ μπορούν να φανούν καλύτερα στην Εικ. 5.3.



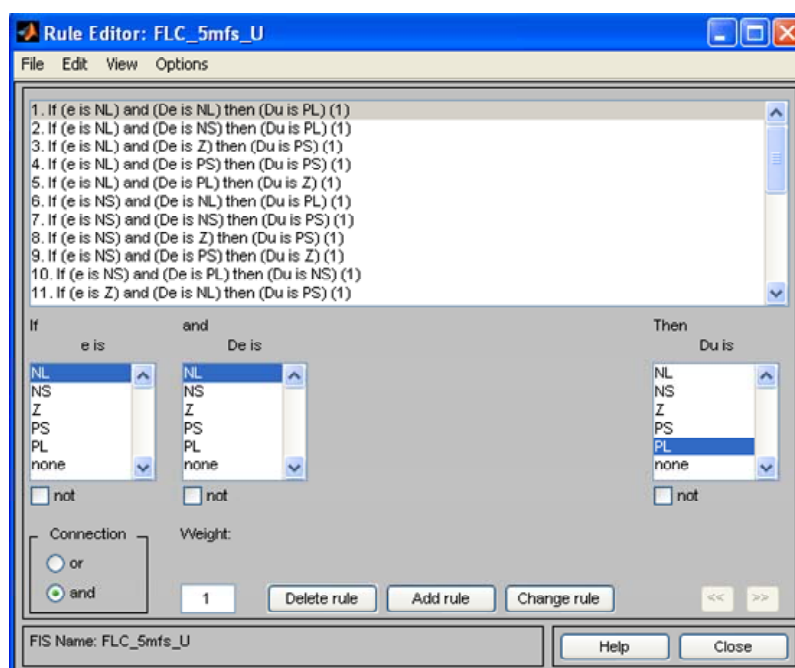
Εικ. 5.3. Ορισμός των συναρτήσεων συμμετοχής για τις εισόδους και εξόδους του ασαφούς ελεγκτή.

Αφού δημιουργήθηκαν οι συναρτήσεις συμμετοχής κάθε μεταβλητής στην συνέχεια αυτές θα συνδυαστούν για να καταχωρηθούν οι ασαφείς κανόνες. Οι κανόνες αυτοί θα πρέπει να οριστούν σύμφωνα με την εμπειρία

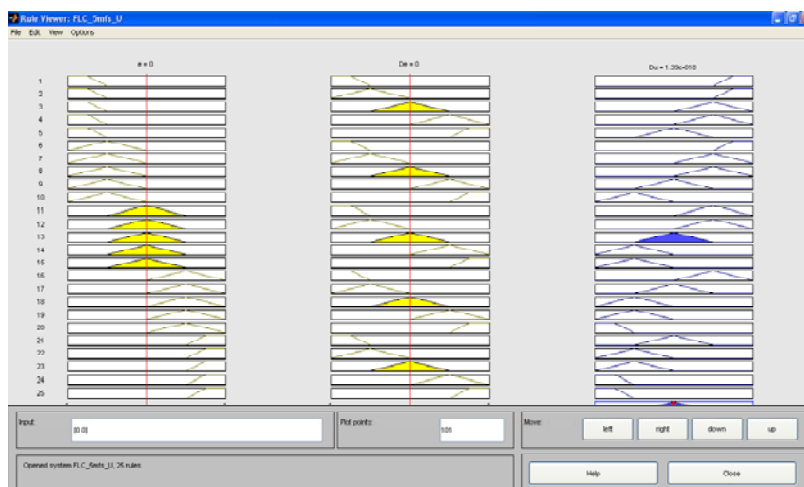
όσον είδη έχουν ασχοληθεί με το θέμα και μπορούν να εξαγάγουν ποιοτικές σχέσεις ανάμεσα στις μεταβλητές και την έξοδο ελέγχου του συστήματος. Για την δημιουργία του ασαφούς ελεγκτή αυτής της πτυχιακής εργασίας χρησιμοποιήθηκαν 25 ασαφείς κανόνες οι οποίοι είναι ευκολότερο να εξαχθούν από τον Πίνακα 4 ενώ κάποιιοι από αυτούς παρουσιάζονται στις Εικ. 5.4-Εικ. 5.5 με τον τρόπο του Matlab.

Πίνακας 4. Συγκέντρωση των ασαφών κανόνων που ορίζουν την έξοδο του ασαφούς ελεγκτή.

Av – τότε	De=NL	De=NS	De=Z	De=PS	De=PL
e=NL	Du=PL	Du=PL	Du=PS	Du=PS	Du=Z
e=NS	Du=PL	Du=PS	Du=PS	Du=Z	Du=NS
e=Z	Du=PS	Du=PS	Du=Z	Du=NS	Du=NS
e=PS	Du=PS	Du=Z	Du=NS	Du=NS	Du=NL
e=PL	Du=Z	Du=NS	Du=NS	Du=NL	Du=NL

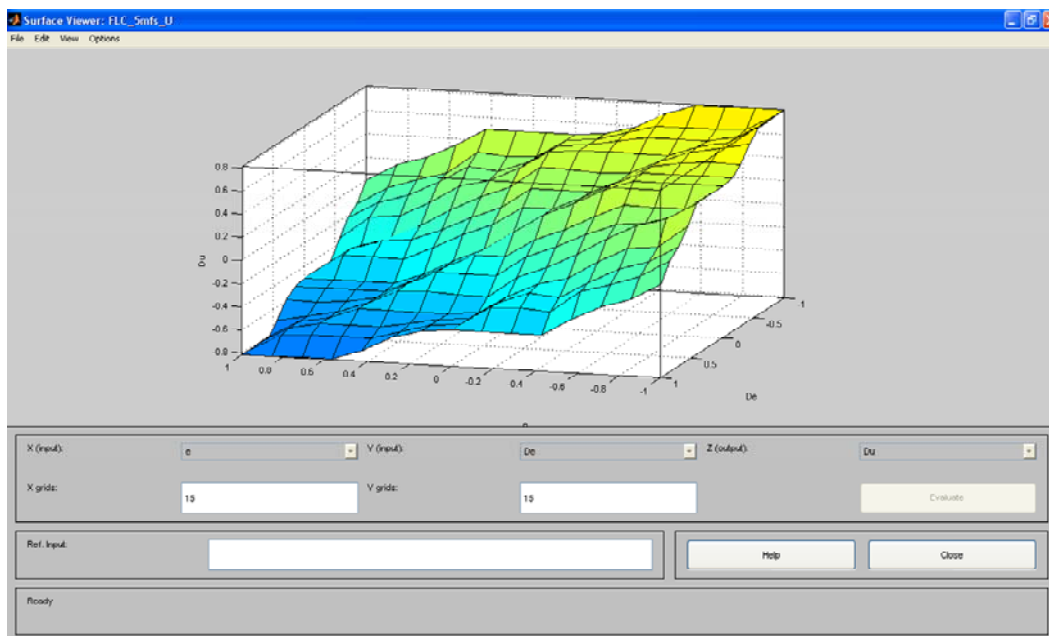


Εικ. 5.4. Οι ασαφείς κανόνες του ελεγκτή σε μορφή if-then.



Εικ. 5.5. Οι ασαφείς κανόνες του ελεγκτή συσχετίζοντας τις συναρτήσεις συμμετοχής εισόδων και εξόδων.

Έτσι δημιουργήθηκε ο ασαφής ελεγκτής που χρησιμοποιήθηκε για τις ανάγκες αυτής της πτυχιακής εργασίας. Αξίζει να αναφερθεί ότι οι παράμετροι που αναλύθηκαν εδώ δεν άλλαξαν σε καμία από τις περιπτώσεις που χρησιμοποιήθηκε ο ελεγκτής ενώ για να ρυθμιστεί ώστε να λειτουργεί με σχετικά καλή συμπεριφορά σε κάθε μοντέλο από αυτά που χρησιμοποιήθηκε ρυθμίστηκαν τα κέρδη του (Gain1 - Gain4) όπως φαίνονται στο Σχ. 5.9. Κλείνοντας παρουσιάζεται η επιφάνεια ελέγχου του ελεγκτή που κατασκευάστηκε από την οποία για γνωστές εισόδους μπορεί να προκύψει η τιμή της εξόδου. Το σχήμα της επιφάνειας αυτής έχει να κάνει τόσο με τους ασαφείς κανόνες όσο και με τις συναρτήσεις συμμετοχής και οποιαδήποτε μεταβολή σε ένα από αυτά θα είχε επίπτωση και στην επιφάνεια ελέγχου.



Εικ. 5.6. Επιφάνεια ελέγχου του ασαφούς ελεγκτή.

5.2. Γενετικός Αλγόριθμος

Ο γενετικός αλγόριθμος ανήκει στην οικογένεια των εξελικτικών αλγορίθμων. Οι γενετικοί αλγόριθμοι είναι υπολογιστικά προγράμματα τα οποία χρησιμοποιούνται ως επί το πλείστον για να δώσουν λύση σε προβλήματα τα οποία θα ήταν αδύνατο ή πολύ δύσκολο να λυθούν αναλυτικά. Για το λόγο αυτό έχει επικρατήσει να χρησιμοποιούνται σε προβλήματα βελτιστοποίησης. Παρόμοια χρήση θα γίνει και σε αυτή την πτυχιακή εργασία. Ο γενετικός αλγόριθμος θα χρησιμοποιηθεί για να υπολογίσει τις βέλτιστες τιμές των κερδών των ελεγκτών ώστε να βελτιστοποιηθεί η χρονοαπόκριση του εκάστοτε συστήματος, σύμφωνα με κάποια κριτήρια που θα οριστούν. Για να γίνει περισσότερο κατανοητή η διαδικασία, αρχικά θα αναλυθεί η γενική λειτουργία του γενετικού αλγόριθμου και στην συνέχεια θα γίνει ιδιαίτερη αναφορά στην εφαρμογή του εδώ.

Οι γενετικοί αλγόριθμοι είναι στοχαστικοί αλγόριθμοι που παράγουν ένα σύνολο από υποψήφιας λύσεις ενός προβλήματος, που ονομάζεται πληθυσμός (population), και εξελίσσουν αυτόν τον πληθυσμό χρησιμοποιώντας μηχανισμούς που χρησιμοποιούνται από τη φύση για την εξέλιξη όπως η διασταύρωση (crossover), η μετάλλαξη

(mutation) και η φυσική επιλογή (selection). Ο γενετικός αλγόριθμος πρωτοεμφανίστηκε σαν έννοια στα τέλη της δεκαετίας του 60 και όπως έχει αναφερθεί βρίσκεται συχνότερα εφαρμογή σε προβλήματα βελτιστοποίησης σε επιστήμες όπως η μηχανική, η φυσική και τα οικονομικά μεταξύ άλλων. Η γενική ιδέα έχει ως εξής: έστω ότι υπάρχει ένας χώρος αναζήτησης X και μια συνάρτηση $f(x)$, ο γενετικός αλγόριθμος καλείται να βρει την κατάλληλη τιμή του x που ανήκει στο X ώστε η $f(x)$ να ελαχιστοποιείται ή να μεγιστοποιείται ή να ξεπερνά κάποιο

όριο. Η συνάρτηση $f(x)$ ονομάζεται αντικειμενική συνάρτηση ή συνάρτηση βελτιστοποίησης (Objective function). Για να επιτευχθούν τα παραπάνω θα πρέπει να χρησιμοποιηθούν οι μηχανισμοί του γενετικού οι οποίοι ονομάζονται γενετικοί τελεστές.

Πριν προχωρήσει κανείς στην ανάλυση της λειτουργίας του γενετικού αλγόριθμου κρίνεται απαραίτητο να παρουσιαστούν οι δύο βασικοί μηχανισμοί αναπαραγωγής του πληθυσμού.

- **Διασταύρωση:** κατά την διαδικασία αυτή κατάλληλα επιλεγμένα άτομα του πληθυσμού επιλέγονται για να προκύψουν οι απόγονοι τους. Ανά ζεύγος λοιπόν, αυτά τα άτομα ανταλλάζουν ένα μέρος του γενετικού τους υλικού με αποτέλεσμα να προκύψουν δυο νέα άτομα του πληθυσμού της επόμενης γενιάς. Για να γίνουν πιο κατανοητά τα παραπάνω, ας θεωρηθούν δυο μεταβλητές κ_1 και κ_2 οι οποίες θα είναι δυαδικής μορφής και θα αναπαριστούν πιθανές λύσεις του προβλήματος ενώ ο δείκτης δηλώνει τον αριθμό του ατόμου. Ακόμα, ας θεωρήσουμε αυτές τις λύσεις “γονείς” και αυτές που θα προκύψουν από την διασταύρωσή τους “απογόνους”. Έστω λοιπόν:

$$\kappa_{1,γονέας} = 0110110111$$

$$\kappa_{2,γονέας} = 1011101010$$

όπου και οι δυο (αναγκαστικά) έχουν ανάλυση 10 ψηφίων. Η πιο διαδεδομένη διαδικασία διασταύρωσης, που ονομάζεται διασταύρωση ενός σημείου, ακολουθεί την παρακάτω λογική. Επιλέγεται με τυχαίο τρόπο (που υπακούει όμως γενικότερα σε μια κανονική κατανομή), ένας ακέραιος i ο οποίος ορίζει την θέση ενός ψηφίου των λύσεων που ονομάστηκαν γονείς. Ο i μπορεί να πάρει τιμές από 1 μέχρι τον αριθμό των ψηφίων των γονέων ($size$) πλην ένα ($[1, size-1]$). Στη συνέχεια τα bit του πρώτου γονέα από την θέση i μέχρι το τελευταίο ψηφίο του πίνακα ανταλλάσσονται με τα αντίστοιχα του δεύτερου γονέα. Έτσι προκύπτουν δυο νέες λύσεις (απόγονοι) οι οποίες θα συνεχίσουν στην επόμενη γενιά. Για παράδειγμα αν $i=7$ από τους παραπάνω γονείς θα προκύψουν οι εξής απόγονοι:

$$\begin{array}{cccccccccc} & 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8 & 9 & 10 \\ \kappa_{1,απόγονος} & = & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ \kappa_{2,απόγονος} & = & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \end{array}$$

Ο μηχανισμός της διασταύρωσης μπορεί να εφαρμοστεί σε όλα τα άτομα του πληθυσμού μπορεί και να οριστεί από τον χρήστη μια πιθανότητα (P_x) με την οποία θα εφαρμόζεται. Θα πρέπει ακόμα να αναφερθεί ότι ένας γονέας μπορεί να χρησιμοποιηθεί για πολλές διασταυρώσεις στην πάροδο μιας γενιάς. Αφού δημιουργηθεί ο νέος πληθυσμός από τις διασταυρώσεις των γονέων εφαρμόζεται στους απογόνους ο γενετικός τελεστής της μετάλλαξης. Τέλος, πρέπει να αναφερθεί ότι η μέθοδος που περιγράφεται εδώ είναι μια μόνο από τις πολλές παραλλαγές που υπάρχουν και επιλέχθηκε λόγω της απλότητας της. Ακόμα κάποιος θα μπορούσε να επιλέξει διασταύρωση δύο σημείων, ομοιόμορφη, ημίμοιόμορφη ή την μέθοδο “κόψε – σύνδεσε” (cut and splice), ενώ σε ορισμένες περιπτώσεις μπορεί να γίνει και διασταύρωση τριών γονέων.

- **Μετάλλαξη:** εδώ και πάλι βάση πιθανότητας που ορίζεται από τον χρήστη (P_m) επιλέγονται κάποιοι απόγονοι για να εφαρμοστεί σε αυτούς η μετάλλαξη. Αυτός ο τελεστής χρησιμοποιείται για να εξασφαλιστεί ότι ο αλγόριθμος δεν θα φυλακιστεί σε κάποιο χώρο αναζήτησης και ότι θα υπάρχει ποικιλία όσο αφορά τις πιθανές λύσεις. Η πιο συχνή εφαρμογή αυτού του τελεστή στους δυαδικούς ΓΑ γίνεται με αντιστροφή ενός bit από αυτά του απογόνου που επιλέγεται για μετάλλαξη. Αν επιλεγθεί δηλαδή ο απόγονος κ_2 για μετάλλαξη θα οριστεί με αυθαίρετο τρόπο ένα από τα bit του για να γίνει από 1 -> 0 ή από 0 -> 1. Έστω λοιπόν ότι επιλέγεται το τρίτο bit του, θα προκύψει:

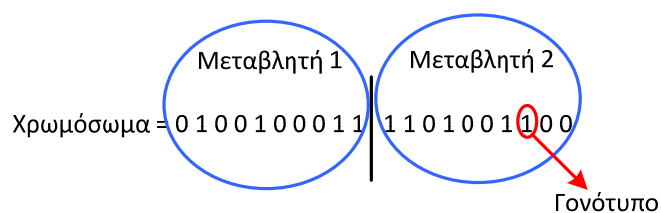
$$\kappa_{2,μεταλλαγμένος\ απόγονος} = 1001100111$$

Όσο αυξάνεται ο χώρος αναζήτησης θα πρέπει να αυξάνεται και η πιθανότητα μετάλλαξης για να καλυφθούν περισσότερες υποπεριοχές του χώρου αναζήτησης. Τέλος αν η πιθανότητα μετάλλαξης είναι αρκετά υψηλή είναι επιθυμητό να συνδυάζεται με τον ελιτισμό ο οποίος θα εξηγηθεί στη συνέχεια.

Το πρώτο βήμα στην λειτουργία ενός ΓΑ είναι η αρχικοποίηση. Σε αυτήν την φάση δημιουργείται με τυχαίο συνήθως τρόπο ένας αρχικός πληθυσμός με τόσα άτομα όσα έχουν οριστεί σαν παράμετρος του γενετικού. Κάθε άτομο αντιπροσωπεύει μια πιθανή λύση. Η λύση αυτή μπορεί να αποδίδεται από μια ή περισσότερες μεταβλητές ενώ, οι τιμές που μπορούν να πάρουν οι μεταβλητές ανήκουν στο πεδίο ορισμού εκάστης, όπως ορίζονται από τον χρήστη. Κάθε άτομο χρησιμοποιείται με την αντικειμενική συνάρτηση και αξιολογείται με μία τιμή που ονομάζεται αντικειμενική τιμή. Όταν αξιολογηθεί ολόκληρος ο πληθυσμός της πρώτης γενιάς γίνεται η επιλογή (selection) των πιο “άξιων” ατόμων για να συνεχίσουν στην επόμενη φάση της εξελικτικής διαδικασίας.

Παρόλο που αναλύθηκαν οι βασικοί τελεστές της μετάλλαξης υπάρχει ακόμα ένας μηχανισμός που χρήζει εξήγησης μιας και χωρίς αυτόν δεν είναι δυνατοί οι δυο παραπάνω. Πρόκειται για την λειτουργία της επιλογής κατά την οποία επιλέγονται τα κατάλληλα άτομα του πληθυσμού που θα χρησιμοποιηθούν για την διασταύρωση. Για την επιλογή αυτή χρησιμοποιούνται αλγόριθμοι οι οποίοι ονομάζονται ευρετικοί και χρησιμοποιούν ημιτυχαίες τεχνικές με βαρύτητα στα άτομα που έχουν καλύτερη αντικειμενική τιμή. Κάποιοι από τους αλγόριθμους αυτούς είναι η στοχαστική καθολική δειγματοληψία (stochastic universal sampling, sus) η οποία χρησιμοποιείται σε αυτήν την πτυχιακή εργασία, η επιλογή αναλογικά με την αντικειμενική τιμή η οποία είναι γνωστή και σαν μέθοδος ρουλέτας (fitness proportionate selection / roulette – wheel), η επιλογή μέσω πρωταθλημάτων (tournament selection) και επιλογή μέσω περικοπής (truncation selection).

Επίσης αναφέρεται ότι υπάρχουν δυο βασικές κατηγορίες των γενετικών αλγορίθμων οι “δυναδικοί” και οι “πραγματικών τιμών”. Στην περίπτωση των δυναδικών κάθε άτομο όσες μεταβλητές και αν έχει κωδικοποιείται σαν ένας πίνακας με όλες τις μεταβλητές αναζήτησης (γονίδια). Αυτός ο πίνακας ονομάζεται φαινότυπο (Phenotype). Τα φαινότυπα με κατάλληλο τρόπο μεταφράζονται σε δυαδική μορφή ενώ θα πρέπει να έχει οριστεί παράμετρος ακρίβειας (Precision) του γενετικού ώστε η δυαδική εκδοχή να προσεγγίζει όσο το δυνατό καλύτερα την πραγματική. Η δυαδική εκδοχή του φαινοτύπου ονομάζεται χρωμόσωμα και κάθε ψηφίο του χρωμοσώματος γονότυπο. Στο Σχ. 5.10 παρουσιάζεται ένα παράδειγμα μιας εφαρμογής στην οποία ο γενετικός αλγόριθμος προσπαθεί να υπολογίσει τις βέλτιστες τιμές δυο μεταβλητών.



Σχ. 5.10. Αναπαράσταση ενός φαινότυπου που ανήκει σε άτομο το οποίο αποτελείται από δυο μεταβλητές.

Στους αντίστοιχους γενετικούς αλγόριθμους με πραγματικές τιμές η διαδικασία μετατροπής σε χρωμόσωμα δεν υφίσταται. Στη συνέχεια ξεκινάει ένας βρόχος ο οποίος επαναλαμβάνεται είτε για συγκεκριμένο αριθμό γενεών (αυτό συμβαίνει σε αυτήν την πτυχιακή εργασία), είτε μέχρι η αντικειμενική αξία κάποιου ατόμου να ξεπεράσει κάποιο όριο ή πιο σπάνια μέχρι ο γενετικός αλγόριθμος να μην μπορεί να προσφέρει καλύτερη λύση. Μέσα σε αυτό το βρόχο οι πρωταθλητές κάθε γενιάς χρησιμοποιούνται για να παράγουν απόγονους (ίσος πληθυσμός με την πρώτη γενιά) μέσω των τελεστών του ανασυνδυασμού (ή διασταύρωσης) και της μετάλλαξης. Το ποσοστό των ατόμων που χρησιμοποιούνται για ανασυνδυασμό ή για μετάλλαξη ορίζονται από τον χρήστη και είναι παραμετροποιήσιμο. Σε αυτήν την πτυχιακή εργασία χρησιμοποιήθηκε ακόμα και η έννοια του ελιτισμού. Με τον ελιτισμό ο πρωταθλητής κάθε γενιάς αυτόματα περνάει στον πληθυσμό της επόμενης με αποτέλεσμα να μην χάνεται μια καλή λύση στην πορεία των γενεών αλλά αντίθετα να συμμετέχει πιο συχνά στις διαδικασίες της εξέλιξης ώστε να παράγει καλύτερες λύσεις. Στο τέλος του βρόχου ξαναγίνεται αξιολόγηση του πληθυσμού και η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι να εκπληρωθεί η συνθήκη στην αρχή του βρόχου.

5.2.1. Αντικειμενική Συνάρτηση του Προβλήματος

Ο γενετικός αλγόριθμος χρησιμοποιείται εδώ για να δώσει τα βέλτιστα ή σωστότερα τα υποβέλτιστα κέρδη των ελεγκτών. Η βελτιστοποίηση που αναφέρεται έχει να κάνει κατά κανόνα με την αντικειμενική συνάρτηση που επιλέγεται. Στα πλαίσια αυτής της πτυχιακής εργασίας εξετάζεται ένα πρόβλημα ελαχιστοποίησης του μεταβατικού φαινομένου, τόσο σε διάρκεια όσο και σε ένταση, το οποίο ακολουθεί μια διαταραχή. Είναι λοιπόν απαραίτητο, να οριστεί μια κατάλληλη αντικειμενική συνάρτηση μέσω της οποίας θα υπολογίζεται ο δείκτης απόδοσης (performance index, j) που θα έχει κάθε πιθανή λύση. Μέσω του δείκτη απόδοσης αξιολογούνται οι

διάφορες λύσεις και επιλέγεται ο πρωταθλητής της γενιάς ο οποίος αυτόματα περνά στην επόμενη, όπως αναφέρθηκε προηγούμενα. Στην βιβλιογραφία υπάρχουν αρκετές αντικειμενικές συναρτήσεις οι οποίες επιβραβεύουν διαφορετικά χαρακτηριστικά του συστήματος σε κάθε περίπτωση. Από αυτές επιλέχθηκαν οι 5 δημοφιλέστερες και εξετάζονται εδώ. Στο εξής οι 5 αυτές αντικειμενικές συναρτήσεις θα αναφέρονται σαν κριτήρια αφού κάθε ένα από αυτά επιβραβεύει ή τιμωρεί διαφορετικά χαρακτηριστικά της απόκρισης του συστήματος.

Αυτά τα κριτήρια είναι τα εξής:

α) Το ολοκλήρωμα του τετραγώνου του σφάλματος (ISE) το οποίο δίνεται από τη σχέση:

$$ISE = \int_0^{\infty} e^2(t) dt \quad (5.10)$$

όπου e το σήμα σφάλματος του συστήματος και t ο χρόνος.

β) Το ολοκλήρωμα του χρόνου πολλαπλασιασμένου επί την απόλυτη τιμή του σφάλματος (ITAE) το οποίο δίνεται από τη σχέση:

$$ITAE = \int_0^{\infty} t |e(t)| dt \quad (5.11)$$

αυτό το κριτήριο τιμωρεί την μεγάλη διάρκεια των μεταβατικών φαινομένων και είναι πολύ πιο επιλεκτικό από το κριτήριο ISE. Ένα σύστημα το οποίο έχει σχεδιαστεί με βάση αυτό το κριτήριο επιδεικνύει μια μικρή υπερύψωση (overshoot) και ομαλά αποσβαινουσες ταλαντώσεις.

γ) Το ολοκλήρωμα του χρόνου πολλαπλασιασμένου επί το τετράγωνο του σφάλματος (ITSE) το οποίο δίνεται από τη σχέση:

$$ITSE = \int_0^{\infty} t e^2(t) dt \quad (5.12)$$

αυτό το κριτήριο τιμωρεί ελαφρά τα αρχικά σφάλματα ενώ τιμωρεί περισσότερο τα σφάλματα που συμβαίνουν αργότερα στη μεταβατική απόκριση. Αυτό το κριτήριο έχει καλύτερη επιλεκτικότητα από το ISE.

δ) Το ολοκλήρωμα του τετραγώνου του χρόνου πολλαπλασιασμένου επί την απόλυτη τιμή του σφάλματος (ISTAE) το οποίο δίνεται από τη σχέση:

$$ISTAE = \int_0^{\infty} t^2 |e(t)| dt \quad (5.13)$$

ε) Το ολοκλήρωμα του τετραγώνου του χρόνου πολλαπλασιασμένου επί το τετράγωνο του σφάλματος (ISTSE) το οποίο δίνεται από τη σχέση:

$$ISTSE = \int_0^{\infty} t^2 e^2(t) dt \quad (5.14)$$

Παρόλο που οι δείκτες απόδοσης (γ) ως (ε) δεν έχουν χρησιμοποιηθεί σε μεγάλο βαθμό πρακτικά λόγω της αυξημένης δυσκολίας που συνεπάγεται η χρήση τους, θα ληφθούν υπ' όψη σε αυτήν την πτυχιακή εργασία.

Επίσης, αναφέρεται ότι για να διασφαλιστεί όσο δυνατό καλύτερα η σωστή χρήση του γενετικού αλγόριθμου κάθε πλήρης εξομοίωση ενός συστήματος περιλάμβανε τρεις επαναλήψεις της διαδικασίας για κάθε κριτήριο ελέγχου, δηλαδή, 15 προσομοιώσεις ανά σύστημα και ελεγκτή. Με τον τρόπο αυτό διασφαλίζεται ότι ακόμα και αν ο γενετικός αλγόριθμος "φυλακιστεί" σε κάποιο τοπικό ελάχιστο του εκάστοτε κριτηρίου πιθανώς στην επόμενη επανάληψη οι τυχαίες λύσεις που θα προκύψουν να μην οδηγηθούν στο τοπικό ελάχιστο αυτό.

Εναλλακτικά θα μπορούσαν να ισορροπήσουν σε κάποιο άλλο σημείο του χώρου αναζήτησης που επίσης μπορεί να μην είναι το ολικό ελάχιστο του κριτηρίου για το σύστημα αυτό αλλά καλύτερο από πλευράς δείκτη απόδοσης από το πρώτο. Πέραν των κριτηρίων που αναφέρθηκαν μέχρι στιγμής ήταν αναγκαίο να χρησιμοποιηθεί μια ακόμα συνάρτηση η οποία δεν έχει τόσο το ρόλο της βελτιστοποίησης όσο της αναγωγής των λύσεων που προκύπτουν για κάθε κριτήριο σε μεγέθη συγκρίσιμα.

Αρχικά εξετάστηκε το ενδεχόμενο να επιλεγεί ένα από τα 5 κριτήρια βελτιστοποίησης και σαν αναγωγής αλλά αυτή η λύση εγκαταλείφθηκε αφού όποιο και αν είχε επιλεγθεί οι λύσεις που θα προέκυπταν με αυτό σαν αντικειμενική συνάρτηση θα είχαν πάντα τον καλύτερο (μικρότερο) δείκτη επίδοσης. Έτσι ήταν προφανές ότι θα έπρεπε να υπάρχει μια ξεχωριστή συνάρτηση αναγωγής. Αποφασίστηκε ότι αυτή θα έπρεπε να αξιολογεί καθαρά το εμβαδό της απόκρισης χωρίς να τιμωρεί τίποτα συγκεκριμένο και να είναι ένας γενικός δείκτης του μεγέθους του μεταβατικού φαινομένου.

Έτσι επιλέχθηκε το ολοκλήρωμα της απόλυτης τιμής του σφάλματος (IAE) το οποίο δίνεται από τη σχέση:

$$IAE = \int_0^{\infty} |e(t)| dt \quad (5.15)$$

Με αυτόν τον δείκτη απόδοσης είναι δυνατόν να συγκριθούν τα αποτελέσματα κάθε προσομοίωσης και να βρεθεί η βέλτιστη κατά IAE απόκριση όπως πρόκειται να γίνει στο Κεφάλαιο 9. Αναφέρεται τέλος ότι η αναγωγή στο κριτήριο IAE δεν γίνεται κατά την προσομοίωση αλλά αργότερα κατά την εξαγωγή των χρονοαποκρίσεων.

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΤΙΚΑ ΚΑΙ
ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΑ ΕΡΓΑΛΕΙΑ

6. Εισαγωγή

Σε αυτό το κεφάλαιο θα γίνει αναφορά και ανάλυση των μαθηματικών και προγραμματιστικών, εργαλείων που χρησιμοποιήθηκαν για την εκπόνηση της πτυχιακής εργασίας. Το βασικότερο αυτών είναι το Matlab της Mathworks και οι συγκεκριμένες βιβλιοθήκες του, που αφορούν την ανάλυση σημάτων και ελέγχου. Το Matlab δημιουργήθηκε από τον Κληβ Μόλερ στα τέλη της δεκαετίας του 1970 και είχε γραφτεί σε fortran ενώ το 1984 ο πρώτος συνεργάστηκε με τους Τζακ Λιτλ και Στηβ Μπάγκερτ. Μαζί ξαναέγραψαν το πρόγραμμα σε C++ και ίδρυσαν την Mathworks για να συνεχιστεί η εξέλιξη του και να αρχίσει να διατίθεται στους πρώτους πελάτες.

Θα παρουσιαστεί επίσης ένα πρόγραμμα που έχει φτιαχτεί από τον συγγραφέα, το οποίο έχει σκοπό να απλοποιήσει την “πλοήγηση” στα διάφορα μοντέλα και ονομάστηκε AGCLAB. Αυτό το πρόγραμμα, ακόμα, δημιουργήθηκε ώστε να δώσει την δυνατότητα σε κάποιον μη γνώστη του Matlab να χειριστεί τα αρχεία του σε μια πιο απλοποιημένη και στοχευμένη πλατφόρμα αρκετά ευκολότερη στη χρήση αλλά με οπωσδήποτε μικρότερες δυνατότητες.

Τέλος θα γίνει αναφορά στο λογισμικό Excel της Microsoft, ένα πρόγραμμα με εκατομμύρια χρήστες στον κόσμο και γνωστό πλέον σε οποιονδήποτε ασχολείται με ηλεκτρονικούς υπολογιστές. Εδώ χρησιμοποιείται περισσότερο σαν αποθηκευτικός χώρος ελεγχόμενος από το Matlab και δεν αξιοποιούνται οι δυνατότητες του πέραν αυτής της πολύ εύκολης επικοινωνίας και συνεργασίας με όλα τα προγράμματα τα οποία διαχειρίζονται δεδομένα.

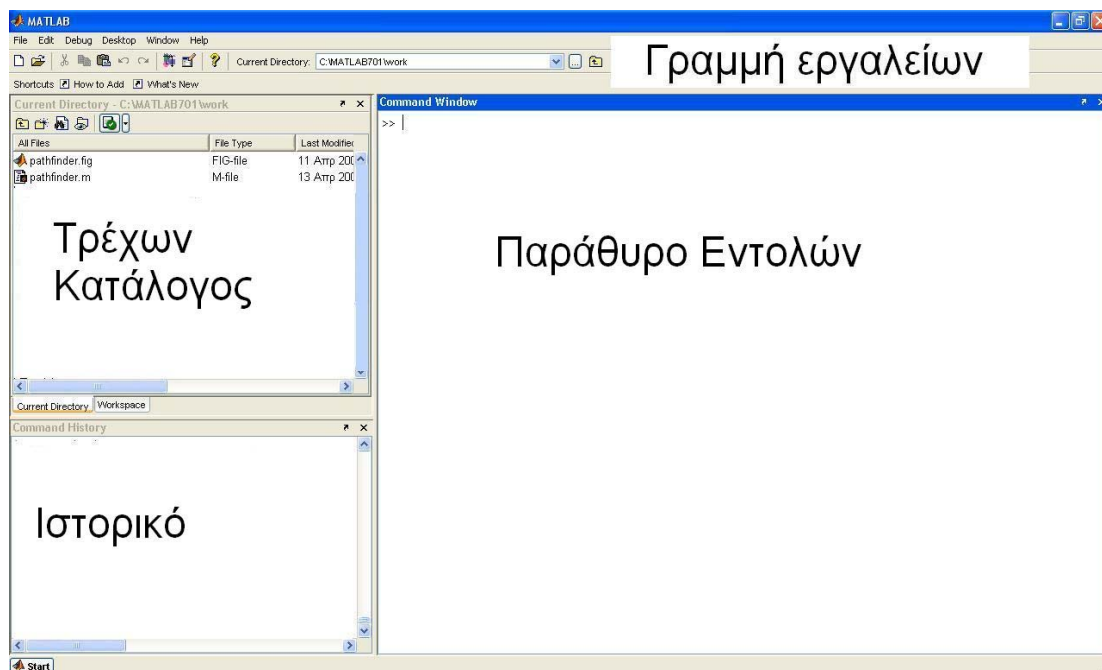
6.1. Matlab

Το Matlab ξεκίνησε σαν ένα πρόγραμμα υπολογιστών για ανθρώπους που χρησιμοποιούν μαθηματικούς υπολογισμούς, ειδικά στη γραμμική άλγεβρα, την μηχανική, την στατιστική και τα οικονομικά. Αναφέρεται σε μεγάλη γκάμα χρηστών αφού επιλέγεται τόσο από μηχανικούς όσο και από ακαδημαϊκούς ή μαθητές. Στην πρώτη του μορφή ήταν ένα πρόγραμμα επεξεργασίας πινάκων ("MATrix LABoratory") με την χρήση της γλώσσας Fortran αλλά και της C. Από τότε έχει αναπτυχθεί, για να γίνει ένα ισχυρότατο εργαλείο στην οπτικοποίηση, στον προγραμματισμό και στην έρευνα. Είναι μια γλώσσα προγραμματισμού τέταρτης γενιάς φτιαγμένη με την λογική να αποφεύγονται οι μεγάλης έκτασης κώδικες με την χρήση απλών εντολών που είναι αποθηκευμένες στις εκατοντάδες βιβλιοθήκες του.

Στο δυναμικό του Matlab συμπεριλαμβάνονται μοντέρνοι αλγόριθμοι, δυνατότητες χειρισμού τεράστιων ποσοτήτων δεδομένων, και ισχυρά προγραμματιστικά εργαλεία. Πλέον με το symbolic toolbox το Matlab αποκτά την δυνατότητα συμβολικών υπολογισμών. Παρόλο που από μόνο του είναι όντως ένα ισχυρότατο εργαλείο τόσο μαθηματικό όσο και προγραμματιστικό αυτό που κάνει την διαφορά με το Matlab είναι ότι ανάλογα με την βιβλιοθήκη που προσπελάζει μπορεί να χρησιμοποιηθεί το ίδιο καλά για εντελώς διαφορετικούς τομείς. Ένα ακόμα πλεονέκτημα του είναι ότι λόγω της μεγάλης διάδοσης του, πλέον συνεργάζεται με τα πιο γνωστά προγράμματα Η/Υ, ενώ επίσης δίνεται η δυνατότητα σύνδεσης με το διαδίκτυο και απομακρυσμένης χρήσης. Οι καλοί γνώστες της αγγλικής δεν έχουν ιδιαίτερα προβλήματα να χρησιμοποιήσουν το Matlab αφού ανά πάσα στιγμή με χρήση της εντολής help, μέσα από το πρόγραμμα, έχουν πρόσβαση στο menu βοήθειας του. Με αυτό τον τρόπο κάποιος μπορεί να δει τον ορισμό κάθε εντολής, τον τρόπο σύνταξης της και κάποια απλά παραδείγματα χωρίς να χρειάζεται να θυμάται ή να σημειώνει μεγάλους όγκους πληροφοριών.

Για τις ανάγκες αυτής της πτυχιακής εργασίας χρησιμοποιήθηκε η έκδοση 7.0.1 (R14) ενώ τα αρχεία που δημιουργήθηκαν λειτουργούν σε όλες τις μεταγενέστερες εκδόσεις. Ο χρήστης όταν ανοίγει για πρώτη φορά το πρόγραμμα θα δει στην οθόνη του την Εικ. 6.1, όπου σημειώνονται οι πιο σημαντικές περιοχές. Η εκτενέστερη από αυτές είναι το command window δηλαδή το παράθυρο εντολών. Αυτή είναι η περιοχή όπου το Matlab δέχεται δεδομένα από τον χρήστη και εμφανίζει τα αριθμητικά αποτελέσματα. Όσα γράφονται σε αυτό το παράθυρο εκτελούνται άμεσα από το Matlab με το πάτημα του κουμπιού Enter και δεν μπορούν να σωθούν σε

κάποιο αρχείο. Για να μπορέσει να έχει ο χρήστης πρόσβαση σε εντολές που εισήγαγε παλαιότερα ή προηγουμένως στην ίδια συνεδρία (session) πρέπει να ελέγξει την περιοχή command history (ιστορικό). Εκεί αποθηκεύονται όλες οι γραμμές που έχουν γραφτεί και εκτελεστεί στο command window και μπορούν να εκτελεστούν ξανά με διπλό πάτημα του αριστερού πλήκτρου του ποντικιού. Στην περιοχή current directory φαίνεται ο καθορισμένος φάκελος του Matlab για να αποθηκεύει αρχεία. Ο προκαθορισμένος φάκελος που έχει οριστεί λέγεται work και βρίσκεται στον φάκελο εγκατάστασης του Matlab στον σκληρό δίσκο.



Εικ. 6.1. Αρχική οθόνη του Matlab.

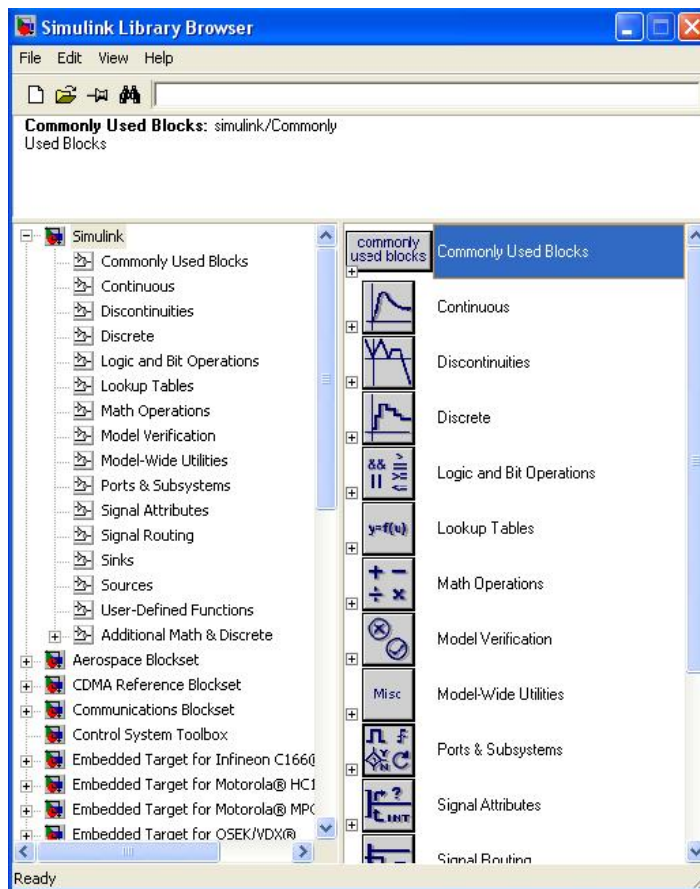
Τα αρχεία που αποθηκεύονται σε αυτή την περιοχή μπορεί να είναι με κατάληξη .m γνωστά και σαν m-files. Αυτά είναι αρχεία κειμένου που έχουν κάποιο διαχωρισμό σχετικά με την χρήση τους, ανάλογα με την πρώτη γραμμή κώδικα μέσα τους. Όταν ξεκινούν με την λέξη function ουσιαστικά είναι συναρτήσεις που είναι κατασκευασμένες από τον χρήστη και καλούνται από το command window. Σε διαφορετική περίπτωση τα αρχεία αυτά λέγονται scripts και για να χρησιμοποιηθούν πρέπει να συρθούν στο command window ή να εκτελεστούν με την εντολή run. Ένα άλλο είδος αρχείων που μπορεί να αποθηκευτεί είναι οι εικόνες (figure, .fig) οι οποίες μπορεί να είναι οποιουδήποτε είδος γραφήματα. Με την κατάληξη .mat αποθηκεύονται αρχεία μεταβλητών του Matlab τα οποία ως επί το πλείστον χρησιμοποιούνται για να μεταφερθεί η πρόοδος του χρήστη σε άλλο τερματικό ή για να μπορέσει να συνεχίσει αργότερα. Ένα ακόμα είδος αρχείων που διαχειρίζεται το Matlab είναι τα model τα οποία περιέχουν είτε μπλοκ διαγράμματα είτε ηλεκτρικά-ηλεκτρονικά είτε οτιδήποτε άλλο μπορεί να προσφέρει η βιβλιοθήκη simulink.

6.2. Simulink

Γράφοντας και εκτελώντας την εντολή simulink στο παράθυρο εντολών του Matlab, ο χρήστης θα παρατηρήσει το παράθυρο της Εικ. 6.2. Σε αυτό περιέχονται όλα τα στοιχεία που μπορεί να χρειαστούν για τις περισσότερες εφαρμογές μοντελοποίησης ή εξομοίωσης φαινομένων. Με την χρήση αυτής της βιβλιοθήκης μπορούν να δημιουργηθούν μοντέλα δυναμικών συστημάτων και στην συνέχεια να εξομοιωθούν. Έχει άμεση επικοινωνία με το βασικό κορμό του Matlab αλλά έχει και την δυνατότητα να δουλέψει εντελώς αυτόνομα. Χρησιμοποιείται κατά κόρον σε εφαρμογές που αφορούν θεωρία ελέγχου και επεξεργασίας σημάτων.

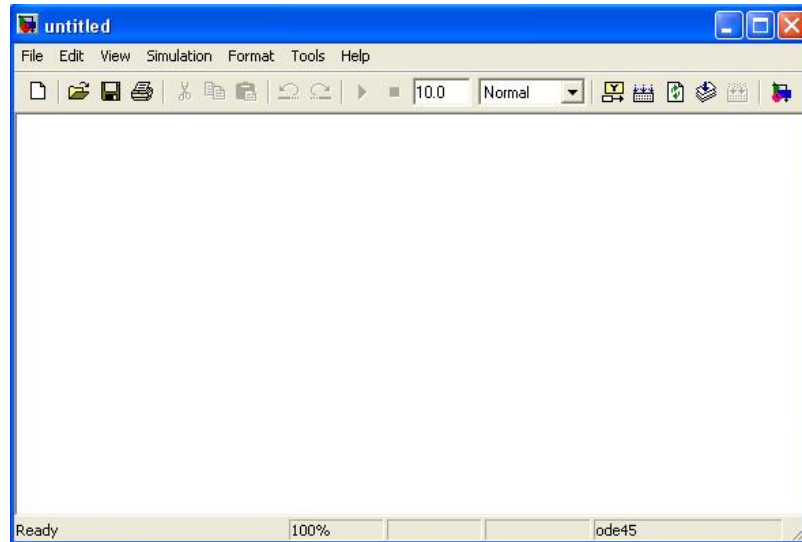
Για να δημιουργήσει ο χρήστης ένα αρχείο model θα πρέπει να πάει στην αρχική οθόνη του Matlab, στην γραμμή επιλογών, στην καρτέλα File, στην επιλογή new και να επιλέξει model. Τότε ένα νέο κενό αρχείο θα δημιουργηθεί όπως φαίνεται στην Εικ. 6.3 στο οποίο θα μπορεί να σύρει ο χρήστης τα επιθυμητά στοιχεία από την βιβλιοθήκη simulink. Μόλις τα στοιχεία εισαχθούν, θα πρέπει να συνδεθούν κατάλληλα μεταξύ τους. Στην συνέχεια με διπλό πάτημα του αριστερού πλήκτρου του ποντικιού, σε κάθε ένα από αυτά, θα πρέπει να οριστούν οι εκάστοτε παράμετροι. Οι παράμετροι κάθε στοιχείου εναλλακτικά μπορούν να οριστούν από την γραμμή

εντολών μέσω της εντολής `setparam`. Όταν ολοκληρωθεί η διαδικασία της κατασκευής του μοντέλου πρέπει να αποθηκευτεί στον φάκελο που εκείνη την στιγμή έχει οριστεί σαν τρέχων κατάλογος του Matlab με όνομα που επιλέγεται από τον χρήστη. Στην συνέχεια με το πάτημα του κουμπιού `play` στο μοντέλο ή με την εντολή `sim` από το παράθυρο εντολών, εκτελείται η εξομοίωση.

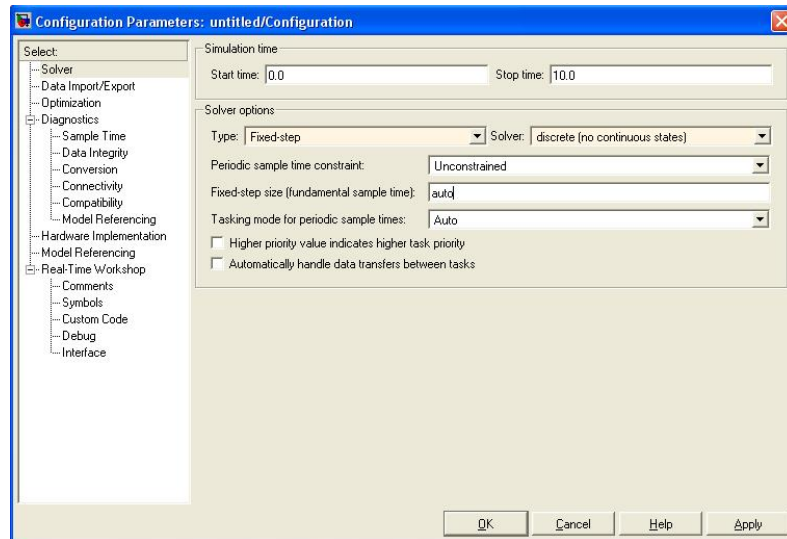


Εικ. 6.2. Αρχική οθόνη της βιβλιοθήκης Simulink.

Τα μοντέλα που δημιουργούνται είναι κατασκευασμένα να λειτουργούν σε συνεχή χρόνο (continuous) γεγονός που δεν είναι πάντα επιθυμητό. Εδώ μοντελοποιείται ένα σύστημα του οποίου ο έλεγχος πρακτικά γίνεται με μικροελεγκτές. Εξαρτήματα δηλαδή που δίνουν την δυνατότητα να μην παρακολουθείται συνεχώς στο σφάλμα εξόδου αλλά σε τακτά χρονικά διαστήματα τα οποία εξαρτώνται από το ρολόι (κρύσταλλο) του μικροελεγκτή. Οι ενέργειες δηλαδή δεν εκτελούνται άμεσα αλλά με κάποιο βήμα χρόνου. Για το λόγο αυτό θεωρήθηκε περισσότερο ρεαλιστικό να εξετάζονται όλα τα μοντέλα που δημιουργήθηκαν σε διακριτό χρόνο αντί για συνεχή. Για λόγους πληρότητας υπάρχουν μοντέλα τα οποία εξετάζονται τόσο συνεχή όσο και σε διακριτό χρόνο αν και όπως αναφέρθηκε η δεύτερη περίπτωση θεωρείται ότι έχει την μεγαλύτερη πιστότητα στην πραγματικότητα. Αυτό το χαρακτηριστικό των μικροελεγκτών είναι ακόμα εξαιρετικά χρήσιμο στα μοντέρνα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας, επειδή οι μηχανές παραγωγής δεν αναγκάζονται να “ακολουθήσουν” ταχείες μεταβολές και έτσι καταπονούνται σημαντικά λιγότερο. Αυτή η διαδικασία προσομοιώνεται στο simulink με μια λειτουργία που θα μπορούσε να αποδοθεί σαν διακριτοποίηση του μοντέλου. Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι Matlab θα εκτελέσει την εξομοίωση σε διακριτό χρόνο με βήμα που ορίζεται από τον χρήστη. Για να μετατραπεί το μοντέλο σε μοντέλο διακριτού χρόνου ο χρήστης θα πρέπει να πάει στο μοντέλο που είχε ετοιμάσει για την εξομοίωση συνεχούς χρόνου και από την καρτέλα `tools`, στην επιλογή `control design` να επιλέξει `model discretizer`. Μετά θα πρέπει να εμφανίσει το `menu configuration parameters` από την καρτέλα `simulation` επιλέγοντας την ομώνυμη επιλογή ή εναλλακτικά με `ctrl+E`. Αμέσως θα εμφανιστεί το παράθυρο της εικόνας Εικ. 6.4 στο οποίο ο χρήστης πρέπει να ρυθμίσει την παράμετρο `type` στην επιλογή `fixed step` και την παράμετρο `solver` σε `discrete (no continuous states)`. Με το πάτημα των κουμπιών `apply` και `OK` το παράθυρο θα εξαφανιστεί και τα μπλοκ θα μετατραπούν σε διακριτά. Σε αυτό το σημείο πρέπει να γίνει αποθήκευση του μοντέλου με διαφορετικό όνομα από το αρχικό ώστε να μην χαθεί αυτό με την συνεχή κατάσταση.



Εικ. 6.3. Νέο αρχείο Model.

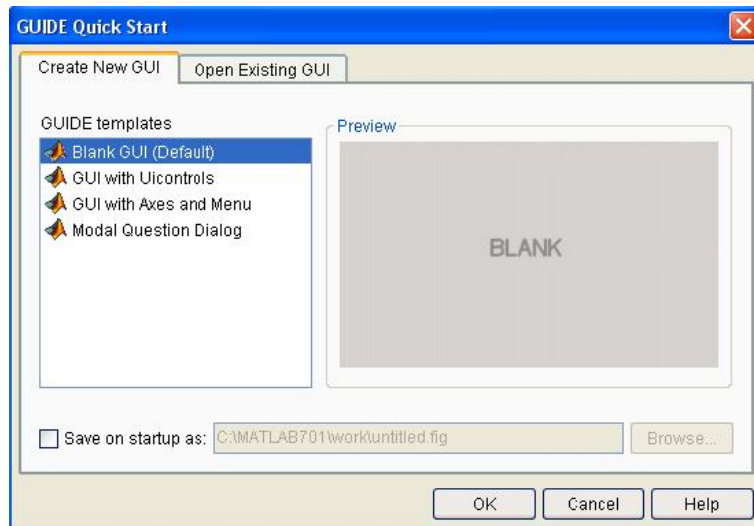


Εικ. 6.4. Menu παραμετροποίησης για την δημιουργία μοντέλου διακριτού χρόνου.

Με την διαδικασία που έχει περιγραφεί σε αυτό το κεφάλαιο δημιουργήθηκαν όλα τα μοντέλα που χρησιμοποιήθηκαν σε αυτήν την πτυχιακή εργασία, παρόλο που η προσομοίωση κάθε ενός από αυτών, πραγματοποιήθηκε αρκετές χιλιάδες φορές μέσω κώδικα. Ο κώδικας αυτός αναπτύχθηκε στο Matlab και σε κάθε εξομίωση μετέβαλε τις παραμέτρους των ελεγκτών και αποθήκευε κατάλληλα τα δεδομένα εξόδου ώστε να αποκαλυφθούν οι παράμετροι με τις οποίες είχε την βέλτιστη συμπεριφορά το σύστημα.

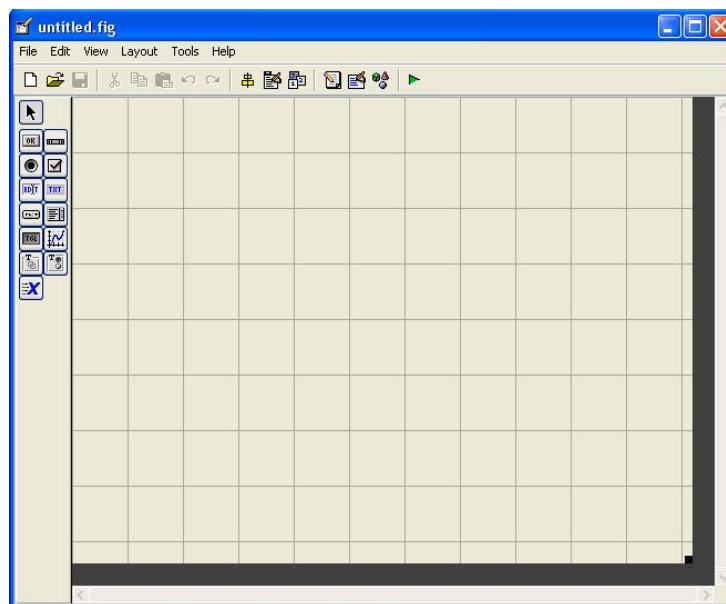
6.3. Graphics User Interface (GUI)

Πρόκειται για ακόμα μια βιβλιοθήκη του Matlab στην οποία μπορεί να απευθυνθεί ο χρήστης για την δημιουργία γραφικών διαδραστικών περιβαλλόντων. Για να αποκτήσει κάποιος πρόσβαση σε αυτό αρκεί να πληκτρολογήσει και να εκτελέσει την εντολή `guide` στο παράθυρο εντολών του Matlab. Από εκεί και μετά η διαδικασία χωρίζεται σε δυο μέρη. Σε πρώτη φάση σχηματίζεται το διαδραστικό παράθυρο που επιθυμεί ο χρήστης χωρίς να γίνει κανένα είδος προγραμματισμού απλά με βάση την οπτική αισθητική κάθε χρήστη. Αφού πλέον καταλήξει ο χρήστης στην ιδανική μορφή του παραθύρου του καλείται να τροποποιήσει το `m-file` που συνοδεύει το αρχείο εικόνας (`figure`) που είχε μέχρι τότε επεξεργαστεί. Ο συνδυασμός των δύο αυτών αρχείων είναι το διαδραστικό περιβάλλον.



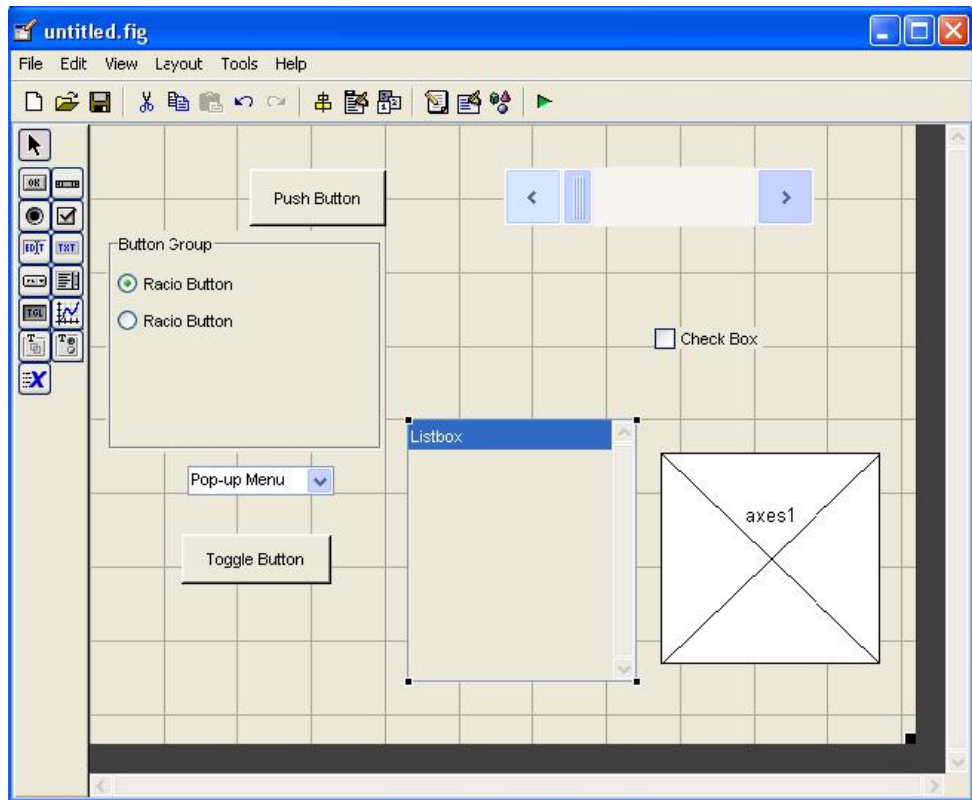
Εικ. 6.5. Αρχικό παράθυρο του GUI.

Μετά την εκτέλεση της εντολής `guide` θα εμφανιστεί το παραπάνω παράθυρο (Εικ. 6.5). Με αυτό δίνονται οι επιλογές να ανοιχτεί ένα ήδη υπάρχων αρχείο προς επεξεργασία ή να δημιουργηθεί ένα νέο. Από τις τέσσερις επιλογές που προσφέρονται, η προκαθορισμένη (Blank GUI(Default)) είναι η πιο απλή αφού επιστρέφει ένα κενό χώρο έτοιμο να προστεθεί οτιδήποτε. Οι υπόλοιπες επιλογές αναφέρονται σε περισσότερο εξειδικευμένες εφαρμογές. Παράλληλα στο κάτω μέρος του παραθύρου δίνεται η δυνατότητα επιλογής διαδρομής αποθήκευσης. Μετά το πάτημα της πρώτης επιλογής το αρχικό παράθυρο αντικαθίσταται από αυτό της Εικ. 6.6.



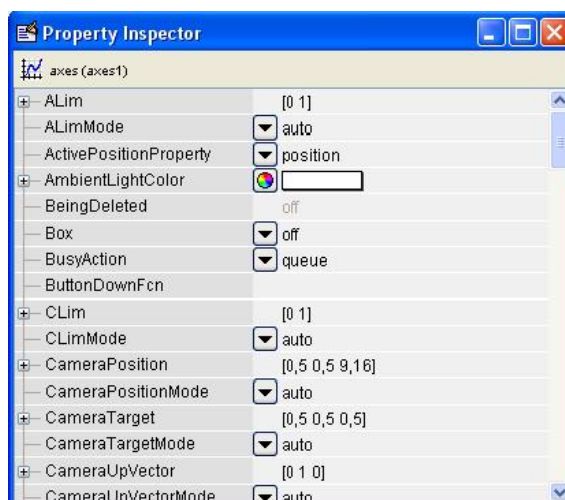
Εικ. 6.6. Παράθυρο σχεδιασμού του GUI.

Στην γκρι περιοχή του παραθύρου αυτού, θα σχεδιαστεί το διαδραστικό παράθυρο του χρήστη, με την προσθήκη αντικειμένων από την μπάρα στα αριστερά. Κάποια από αυτά φαίνονται στην Εικ. 6.7.



Εικ. 6.7. Παράθυρο σχεδιασμού του GUI με τα βασικά αντικείμενα ελέγχου.

Πατώντας την καρτέλα View και επιλέγοντας το Property inspector θα ανοίξει το παράθυρο της Εικ. 6.8 με το οποίο μπορεί κανείς να ρυθμίσει όλες τις παραμέτρους από όλα τα αντικείμενα που έχουν προστεθεί χωρίς βέβαια να μπορεί από αυτό το σημείο να προγραμματίσει τις λειτουργίες που θα εκτελεί κάθε ένα από αυτά. Για να ρυθμίσει τις παραμέτρους ενός αντικειμένου ο χρήστης θα πρέπει να επιλέξει πρώτα το αντικείμενο και στην συνέχεια να πάει στο παράθυρο property inspector και να ρυθμίσει στο ανάλογο πεδίο τις κατάλληλες παραμέτρους.



Εικ. 6.8. Παράθυρο ρύθμισης παραμέτρων των αντικειμένων.

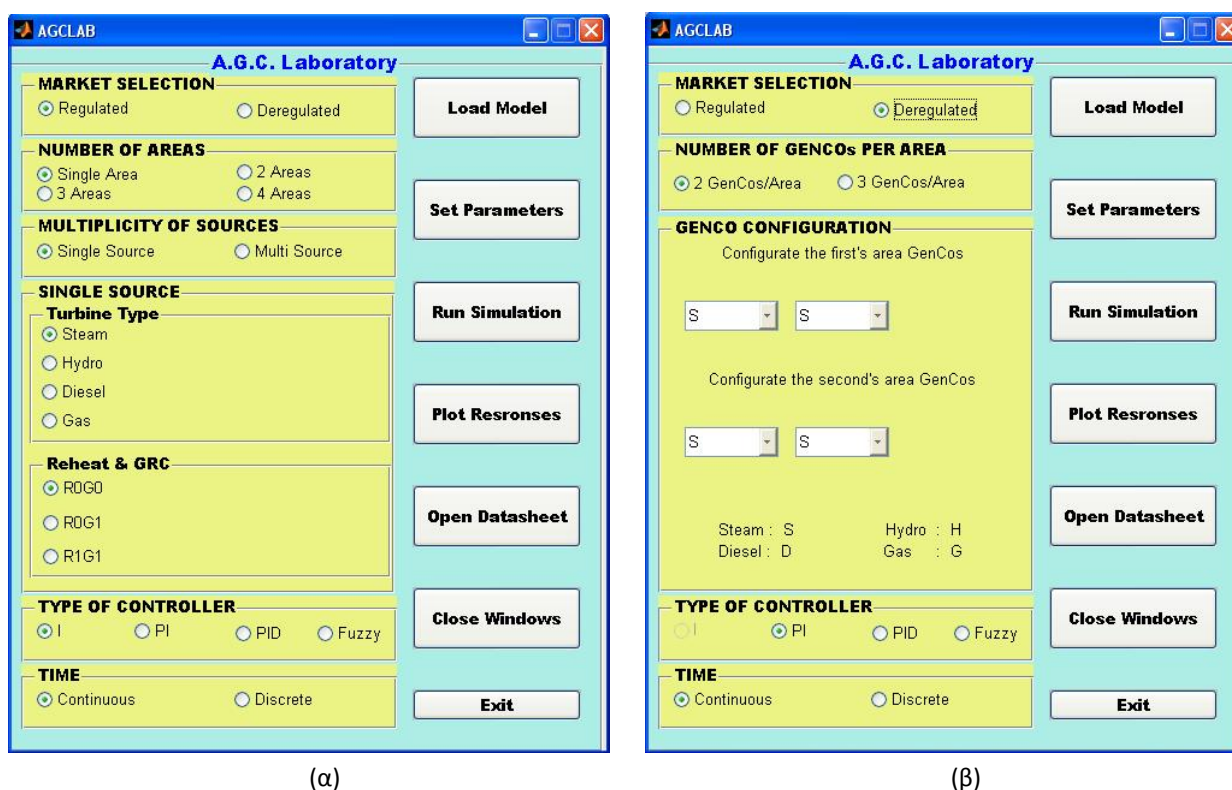
Από την καρτέλα View με την επιλογή m file editor ο χρήστης μεταβαίνει στο αρχείο κειμένου που συνοδεύει το αρχείο εικόνας και ορίζει τις εντολές που θα αντιστοιχούν στην χρήση κάθε αντικειμένου. Αφού ολοκληρωθούν οι παραπάνω διαδικασίες και γίνει αποθήκευση, το αρχείο είναι έτοιμο για χρήση. Όσο βρίσκεται κάποιος ακόμα στο στάδιο της δοκιμής το GUI δίνει δυνατότητα δοκιμαστικής λειτουργίας μέσω του πλήκτρου με το σύμβολο play ή μέσω της καρτέλας Tools πατώντας run ή με ctrl+T. Η διαδικασία που περιγράφεται σε αυτό το

Κεφάλαιο ακολουθήθηκε για την κατασκευή του προγράμματος πλοήγησης ανάμεσα στα μοντέλα που ονομάστηκε AGCLAB. Προφανώς δεν είναι δυνατό να περιγραφεί εδώ η πλήρης διαδικασία προγραμματισμού, αλλά θα αναλυθούν οι βασικές λειτουργίες που εκτελεί το AGCLAB και η γενική ιδέα της χρησιμότητας του.

6.4. Το AGCLAB

Λόγω του μεγάλου πλήθους και των διαφοροποιήσεων των περιπτώσεων που μελετήθηκαν, θεωρήθηκε αναγκαίο να αναπτυχθεί κατάλληλο λογισμικό, το οποίο θα διευκόλυνε τον χρήστη να επιλέξει το κατάλληλο μοντέλο και παραμέτρους. Επίσης από αυτό το λογισμικό ο χρήστης θα μπορούσε να διεξάγει κάποιες βασικές λειτουργίες όπως παραμετροποίηση, εξαγωγή αποτελεσμάτων εκκίνηση νέας εξομοίωσης κλπ. Πρόκειται για ένα πρόγραμμα πλοήγησης το οποίο ονομάστηκε AGCLAB και αναπτύχθηκε μέσω του GUI του Matlab. Όπως φαίνεται και στην Εικ. 6.9 (α) με το τρέξιμο του `rathfinder.m`, του αρχείου που είναι αποθηκευμένος ο κώδικας του AGCLAB, θα εμφανιστούν οι επιλογές που μπορεί κάποιος να χρησιμοποιήσει. Στην αριστερή πλευρά φαίνονται τα παράθυρα παραμετροποίησης και στην δεξιά οι επιλογές ενεργειών που μπορεί να εκτελέσει.

Στην αριστερή πλευρά, ξεκινώντας από πάνω, στην πρώτη ομάδα επιλογών με τίτλο MARKET SELECTION επιλέγεται το καθεστώς αγοράς που επιθυμεί ο χρήστης να εξετάσει. Η προεπιλογή είναι Regulated που αναφέρεται σε μη απελευθερωμένη αγορά ηλεκτρικής ενέργειας. Η εναλλακτική επιλογή είναι Deregulated και αναφέρεται σε καθεστώς απελευθέρωσης της αγοράς όπου επικρατούν οι προϋποθέσεις συμβολαίων και παραβίασης αυτών όπως αναφέρθηκαν στο Κεφάλαιο 3. Η δεύτερη ομάδα επιλογών με τίτλο NUMBER OF AREAS δίνει στο χρήστη δυνατότητα να επιλέξει συστήματα από μίας ως τεσσάρων περιοχών ελέγχου σε καθεστώς μη απελευθερωμένης αγοράς. Όταν ενεργοποιηθεί η επιλογή απελευθέρωσης της αγοράς όπως στην Εικ. 6.9 (β) η ομάδα επιλογών NUMBER OF AREAS δίνει την θέση της σε μια νέα με τίτλο NUMBER OF GENCOs PER AREA.

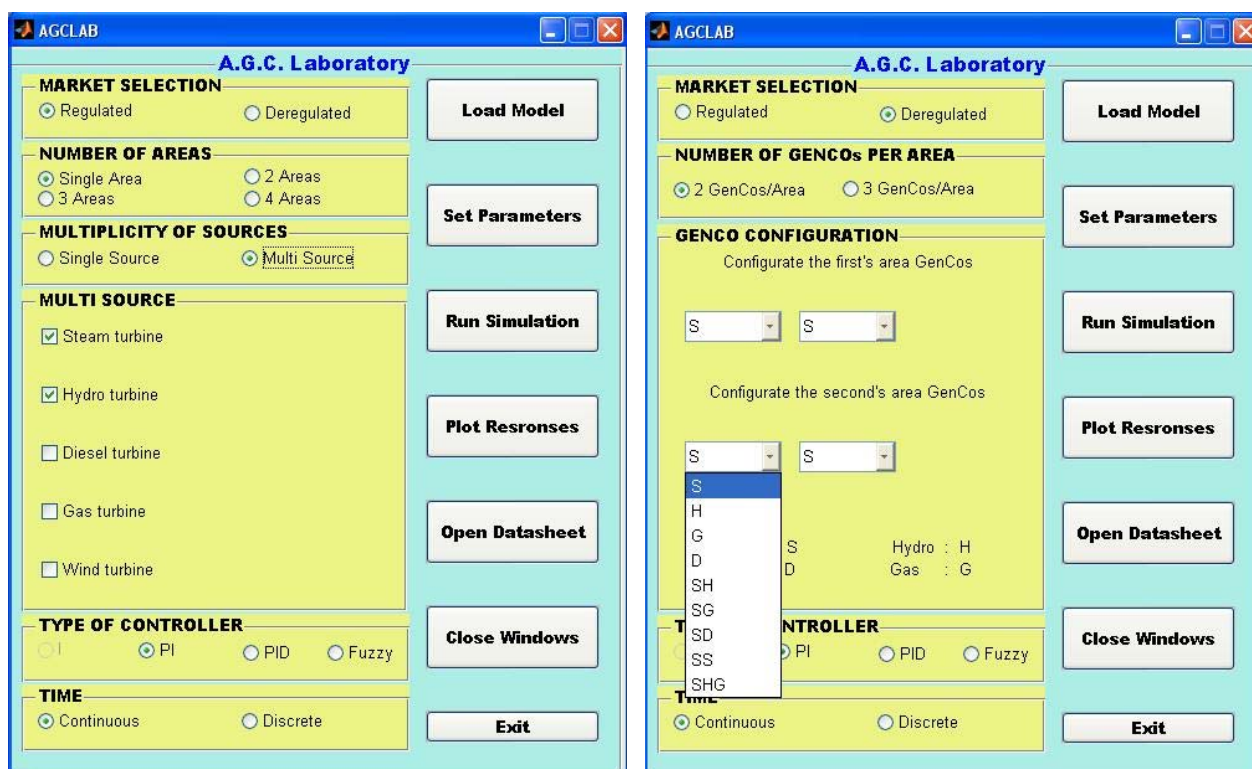


Εικ. 6.9. Αρχική οθόνη του AGCLAB (α) και επιλογή π.χ. απελευθερωμένης αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας (β).

Στην νέα ομάδα επιλογών επιλέγεται η ανταγωνιστικότητα των περιοχών ελέγχου, αν θα υπάρχουν, δηλαδή, δύο ή τρεις εταιρείες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας ανά περιοχή. Η προεπιλογή όπως φαίνεται είναι δύο ενώ η επιλογή των τριών εταιριών ανά περιοχή δεν θα δώσει έγκυρο σύστημα και έχει κατασκευαστεί μόνο για λόγους μελλοντικής επέκτασης. Η τρίτη κατά σειρά ομάδα επιλογών διαχωρίζει τα συστήματα με όμοιες και ανόμοιες μονάδες παραγωγής. Ο τίτλος της είναι MULTIPLICITY OF SOURCES και η προεπιλογή της Single Source. Αυτό σημαίνει συστήματα με παραγωγή μόνο από ένα είδος σταθμών π.χ. μόνο ατμοστρόβιλους. Η δεύτερη επιλογή, Multi Source, αναφέρεται σε συστήματα ακόμα και μίας περιοχής, τα οποία βασίζουν την παραγωγή

τους σε τουλάχιστον δύο είδη σταθμών. Ακόμα η επιλογή που γίνεται σε αυτήν την ομάδα επιλογών επηρεάζει επίσης τον τίτλο και το περιεχόμενο της τέταρτης ομάδας επιλογών με προκαθορισμένο τίτλο SINGLE SOURCE όπως μπορεί να παρατηρηθεί στην Εικ. 6.10 (α).

Η τέταρτη ομάδα επιλογών με τίτλο SINGLE/MULTI SOURCE επιτρέπει την επιλογή του είδους των μονάδων καθώς επίσης και αν ο χρήστης επιθυμεί να λάβει υπόψη παραμέτρους όπως το σύστημα προθέρμανσης και τον περιορισμό του ρυθμού παραγωγής, όπου αυτό έχει νόημα να εξεταστεί. Με την επιλογή ROGO δεν λαμβάνεται υπόψη καμία από τις δύο παραμέτρους, με την επιλογή ROG1 εισάγεται ο περιορισμός ρυθμού παραγωγής (Ντιζελοηλεκτρικές μονάδες) και τέλος με το R1G1 ορίζονται ενεργές και οι δύο παράμετροι (Ατμοηλεκτρικές μονάδες). Στην περίπτωση της απελευθερωμένης αγοράς οι τελευταίες δυο ομάδες επιλογών συμπυκνώνονται σε μια με τίτλο GENCO CONFIGURATION όπως φαίνεται και στην Εικ. 6.10 (β). Εκεί γίνεται η ρύθμιση του είδους των μονάδων που κατέχει κάθε εταιρεία παραγωγής. Η πέμπτη ομάδα επιλογών με τίτλο TYPE OF CONTROLLER καθορίζει τον τύπο ελεγκτή που χρησιμοποιείται στο μοντέλο που επιλέχθηκε και ο χρήστης μπορεί να επιλέξει μεταξύ απλού ολοκληρωτικού ελεγκτή (I), αναλογικού-ολοκληρωτικού ελεγκτή (PI), αναλογικού-ολοκληρωτικού-διαφορικού ελεγκτή (PID) ή τέλος ελεγκτή ασαφούς λογικής με αναλογικό και ολοκληρωτικό κέρδος (Fuzzy). Στην τελευταία ομάδα επιλογών γίνεται η επιλογή του τρόπου εξομοίωσης ανάμεσα σε συνεχή (Continuous) και διακριτού (Discrete) χρόνου.



(α)

(β)

Εικ. 6.10. Επιλογή ρύθμισης πολλαπλών πηγών ανά περιοχή σε μη απελευθερωμένη αγορά (α) και ρύθμιση τύπου μονάδων ανά εταιρεία παραγωγής σε απελευθερωμένη αγορά (β).

Η δεξιά πλευρά του παραθύρου του AGCLAB είναι αφιερωμένη στις διάφορες ενέργειες που εκτελεί το πρόγραμμα πάνω στο επιλεγμένο μοντέλο. Το πρώτο κουμπί ξεκινώντας από την κορυφή, που ονομάζεται Load Model, εντοπίζει τον φάκελο που είναι αποθηκευμένο το σύστημα που επιλέχθηκε και τον καθιστά τρέχων κατάλογο στο παράθυρο του Matlab. Στην συνέχεια ανοίγει το μοντέλο όπως είχε αποθηκευτεί την τελευταία φορά που έτρεξε. Η διαδικασία του ορισμού τρέχοντος καταλόγου γίνεται ανεξαρτήτως ποιου κουμπιού θα πατηθεί. Εξάιρεση σε αυτό αποτελεί το τελευταίο κουμπί με τίτλο Exit, το οποίο απλά τερματίζει το πρόγραμμα. Το δεύτερο κουμπί που ονομάζεται Set Parameters εκτελεί ρουτίνα οι οποία εμφανίζει ένα νέο διαδραστικό παράθυρο του Matlab για να διευκολυνθεί ο ορισμός παραμέτρων του μοντέλου. Στην Εικ. 6.11 φαίνεται το παράθυρο αυτό για την προκαθορισμένη περίπτωση, δηλαδή, ένα σύστημα μίας περιοχής, σε μη απελευθερωμένη αγορά, με μόνη μονάδα παραγωγής έναν ατμοστρόβιλο ενώ ο ελεγκτής είναι ολοκληρωτικός και η εξομοίωση γίνεται σε συνεχή χρόνο. Επίσης από αυτό το παράθυρο μπορούν να οριστούν οι παράμετροι του γενετικού αλγόριθμου. Εάν ο χρήστης το επιθυμεί, μπορεί να αλλάξει τις προκαθορισμένες τιμές και να τις αποθηκεύσει με το πλήκτρο SAVE AND EXIT. Σε περίπτωση που κάποιος έχει αλλάξει τις παραμέτρους με

αποτέλεσμα μην τρέχει σωστά η εξομοίωση, με το πάτημα του πλήκτρου RESTORE DEFAULT θα οριστούν ξανά οι αρχικές παράμετροι.

PARAMETERS SELECTION					
System frequency	50	Kps (Power System)	120	Number of runs (1-10)	3
Damping coefficient	0.0833333	Tps (Power System)	20		
System inertia	4.16667	Disturbance	0.01		
Droop constant (R)	5	Individuals	60		
Kg (Governor)	1	Generations	40		
Tg (Governor)	0.08	Precision	30		
Kt (Turbine)	1	T' Low Limit	-4		
Tt (Turbine)	0.3	T' Upper Limit	4		

SAVE AND EXIT RESTORE DEFAULT

Εικ. 6.11. Παράθυρο καθορισμού παραμέτρων.

Με το τρίτο πλήκτρο ξεκινάει η εξομοίωση η οποία θα επαναληφθεί πέντε τουλάχιστον φορές, μία για κάθε ένα από τα κριτήρια βελτιστοποίησης, ενώ αυτή η διαδικασία θα επαναληφθεί όσες φορές έχει επιλέξει ο χρήστης από την επιλογή Number of runs του παραθύρου PARAMETERS SELECTION. Για την περίπτωση της Εικ. 6.11 για παράδειγμα η εξομοίωση θα επαναληφθεί συνολικά 15 φορές, δηλαδή, 3 φορές θα εξεταστεί κάθε ένα από τα 5 κριτήρια βελτιστοποίησης. Με το πάτημα του τέταρτου κουμπιού το Matlab καθορίζει τις τιμές που έχουν υπολογιστεί ως υποβέλτιστες και υπολογίζει τις αποκρίσεις, μια φορά για κάθε κριτήριο. Στην συνέχεια εμφανίζει και αποθηκεύει σε μορφή emf τις γραφικές παραστάσεις για κάθε μετρούμενο μέγεθος. Σημειώνεται εδώ ότι για κάθε εικόνα θα υπάρχουν πέντε αποκρίσεις, μια για κάθε κριτήριο και στην πρώτη εικόνα φαίνεται ο δείκτης απόδοσης κάθε απόκρισης σύμφωνα με την συνάρτηση αναγωγής. Με το κουμπί Close Windows κλείνουν όλα τα παράθυρα του Matlab τα οποία είναι ανοιχτά εκείνη τη στιγμή πλην του AGCLAB το οποίο παραμένει σε λειτουργία. Αυτό θεωρήθηκε σκόπιμο να υπάρχει λόγω του μεγάλου πλήθους παραθύρων τα οποία ανοίγουν τόσο κατά την εξομοίωση όσο και κατά την γραφική αποτύπωση των αποκρίσεων.

6.5. Microsoft Excel

Το Excel είναι λογισμικό που παρέχει τη δυνατότητα δημιουργίας πινάκων καθώς και υπολογισμών ή ανάλυσης δεδομένων. Αυτός ο τύπος προγραμμάτων ονομάζεται λογισμικό υπολογιστικών φύλλων. Το Excel παρέχει δυνατότητες δημιουργίας πινάκων που υπολογίζουν αυτόματα τα σύνολα αριθμητικών τιμών που εισάγονται, ενώ ταυτόχρονα επιτρέπει την εκτύπωση σε ευπαρουσίαστες διατάξεις και την δημιουργία απλών γραφημάτων. Το Excel αποτελεί μέρος του "Office", μιας οικογένειας προϊόντων της εταιρείας λογισμικού Microsoft. Σε αυτήν την οικογένεια συνδυάζονται διάφοροι τύποι λογισμικού για τη δημιουργία εγγράφων, υπολογιστικών φύλλων και παρουσιάσεων καθώς και για τη διαχείριση ηλεκτρονικού ταχυδρομείου.

Για τις ανάγκες της παρούσας πτυχιακής εργασίας χρησιμοποιήθηκε το Excel τόσο σαν μέσο αποθήκευσης των δεδομένων εισόδου και εξόδου των εξομοιώσεων αλλά και σαν εναλλακτικός τρόπος παραμετροποίησης των διαφόρων μοντέλων πριν την δημιουργία του AGCLAB. Για την επιλογή του Excel έπαιξε μεγάλο ρόλο η διάδοση του και η σχεδόν καθολική πρόσβαση σε αυτό από τους περισσότερους χρήστες Η/Υ αλλά και η ευκολία διασύνδεσής του με το Matlab. Με την χρήση των εντολών xlswrite και xlsread μπορεί κάποιος να τραβήξει ή να στείλει δεδομένα από το Matlab στο Excel και αντίστροφα. Για κάθε μοντέλο που εξομοιώθηκε δημιουργήθηκε ένα ομώνυμο αρχείο του Excel το οποίο στο πρώτο του φύλλο με τίτλο param έχει αποθηκευμένες τις

παραμέτρους που ορίστηκαν για το μοντέλο αυτό. Στο ίδιο αρχείο δημιουργούνται αυτόματα τρία ακόμα φύλλα για κάθε κριτήριο που εξετάζεται. Τα τρία φύλλα προορίζονται για την καταχώρηση των δεικτών απόδοσης, του χρόνου προσομοίωσης και των κερδών των ελεγκτών. Η ονομασία τους προκύπτει από το όνομα του κριτηρίου στο οποίο αναφέρονται και στην συνέχεια ακολουθεί το γράμμα J όταν πρόκειται για τους δείκτες απόδοσης, η λέξη Simtime αν πρόκειται για τον χρόνο εξομοίωσης και η λέξη Gains όταν πρόκειται για τα κέρδη των ελεγκτών όπως φαίνεται και στην Εικ. 6.12. Με αυτόν τον τρόπο γίνεται η αποθήκευση των αποτελεσμάτων της εξομοίωσης χωρίς να επιβαρύνεται επιπλέον η ήδη φορτωμένη μνήμη του υπολογιστή λόγω του Matlab, ενώ παράλληλα μπορεί κανείς να έχει πρόσβαση στα δεδομένα του εκάστοτε μοντέλου χωρίς απαραίτητα να υπάρχει το Matlab εγκατεστημένο στον υπολογιστή του. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό αφού πέραν της διάδοσης του το Excel είναι σαφώς ελαφρύτερο πρόγραμμα από ότι το Matlab με αποτέλεσμα να μπορεί να εγκατασταθεί ακόμα και σε σύγχρονα κινητά τηλέφωνα δίνοντας έτσι ουσιαστικά πρόσβαση στα δεδομένα που εξάγονται μέσω συσκευών πολύ χαμηλών απαιτήσεων.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S
1																			
2																			
3	f	50		NIND	60														
4	D	0.008333		MAXGEN	40														
5	H	4.166667		PERCI	30														
6	R	5		G1LowLim	-4														
7	Kg	1		G1UpLim	4														
8	Tg	0.08		G2LowLim	-4														
9	Kt	1		G2UpLim	4														
10	Tt	0.3		G3LowLim	-4														
11	Kps	120		G3UpLim	4														
12	Tps	20		runs	3														
13	DPL	0.01																	
14																			
15																			
16																			
17																			
18																			
19																			
20																			
21																			
22																			
23	f	50		NIND	60														
24	D	0.008333		MAXGEN	40														
25	H	4.166667		PERCI	30														
26	R	5		G1LowLim	-4														
27	Kg	1		G1UpLim	4														
28	Tg	0.08		G2LowLim	-4														
29	Kt	1		G2UpLim	4														
30	Tt	0.3		G3LowLim	-4														
31	Kps	120		G3UpLim	4														
32	Tps	20		runs	3														
33	DPL	0.01																	
34																			
35																			
36																			
37																			

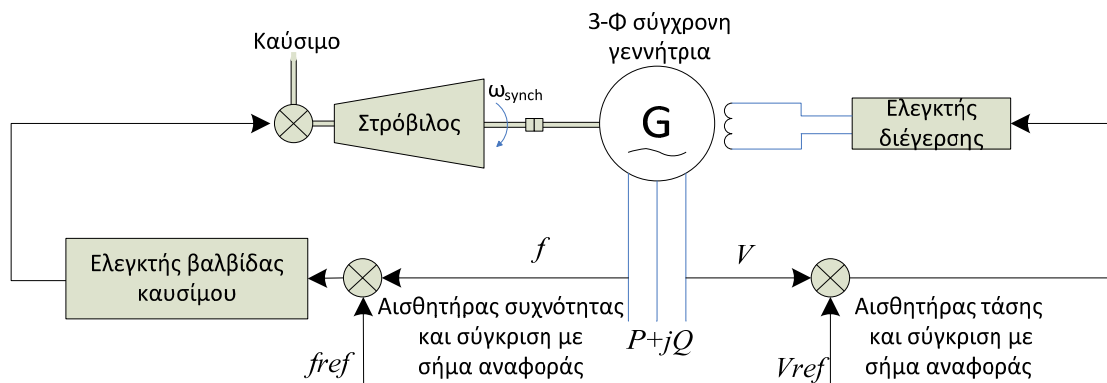
Εικ. 6.12. Φύλλο του Excel για το προεπιλεγμένο σύστημα. Φαίνεται το φύλλο καταχώρησης των παραμέτρων (param).

ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΑΥΤΟΜΑΤΟΥ
ΕΛΕΓΧΟΥ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ

7. Εισαγωγή

Σε κάθε δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας η διασφάλιση της σωστής λειτουργίας του γίνεται με συνεχείς ελέγχους και διορθωτικές ενέργειες. Αυτό συμβαίνει διότι τα ηλεκτρικά φορτία έχουν δυναμική συμπεριφορά, δηλαδή μεταβάλλονται συνεχώς. Η μεταβολή της ζήτησης ενεργού και άεργου ισχύος τείνει να βγάλει το σύστημα από την κατάσταση ισορροπίας. Για τον λόγο αυτό πρέπει να γίνουν ενέργειες ώστε η συχνότητα, η τάση, η ένταση στους ζυγούς, αλλά και οι ροές ισχύος ανάμεσα στα υποσυστήματα να μείνουν εντός επιθυμητών ορίων. Το θεμελιώδες πρόβλημα που αντιμετωπίζεται στα σύγχρονα δίκτυα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας είναι ο έλεγχος κάθε μονάδας παραγωγής ώστε να λειτουργεί με ονομαστική τάση και συχνότητα. Στον πρώτο έλεγχο ονομάζεται έλεγχος τάσης διέγερσης ελέγχεται η άεργη ισχύς της μονάδας παραγωγής. Αυτός ο τύπος ελέγχου συντελείται με ιδιαίτερα μεγάλη συχνότητα και οι λεγόμενοι αυτόματοι ρυθμιστές τάσης (Automatic Voltage Regulator, AVR) εκτελούν την παραπάνω διαδικασία. Ο δεύτερος έλεγχος που ονομάζεται έλεγχος φορτίου-συχνότητας είναι το αντικείμενο αυτής της πτυχιακής εργασίας και θα αναλυθεί εδώ εκτενέστερα. Σε αντίθεση με τον πρώτο, εκτελείται με αρκετά μικρότερη συχνότητα για αυτό και τα δύο αυτά προβλήματα θεωρούνται ανεξάρτητα (decoupled) και μπορούν να εξεταστούν ξεχωριστά. Τέλος, για τον δεύτερο τύπο ελέγχου υπάρχουν οι λεγόμενοι “κυβερνήτες” (governors) που επιτελούν την συγκεκριμένη λειτουργία.

Για να γίνει κατανοητό το πρόβλημα του ελέγχου φορτίου-συχνότητας θα πρέπει να δημιουργηθεί ένα μαθηματικό μοντέλο της μονάδας παραγωγής, του φορτίου και ενδεχομένως των γραμμών μεταφοράς. Για τον αποτελεσματικό έλεγχο και διαχείριση ενός μεγάλου συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, είναι απαραίτητο να μοντελοποιηθεί με τέτοιο τρόπο ώστε να υπάρχουν διακριτά υποσυστήματα, τα οποία θα είναι τμήματα του πλήρους δικτύου. Τα υποσυστήματα αυτά ορίζονται ως “περιοχές ελέγχου” (Control Areas, Areas). Θεωρείται ότι οι όμοιες γεννήτριες που λειτουργούν σε κάθε μια από αυτές τις περιοχές ελέγχου αντιδρούν με τον ίδιο τρόπο σε κάθε μεταβολή ή διαταραχή του συστήματος. Για αυτό το λόγο μπορούν να μοντελοποιηθούν σαν μία ισοδύναμη γεννήτρια. Το άθροισμα των ισχύων εξόδου κάθε γεννήτριας της περιοχής ελέγχου θα πρέπει να ισούται με την ισχύ εξόδου της ισοδύναμης γεννήτριας. Επίσης με ανάλογες διαδικασίες υπολογίζεται ισοδύναμη ροπή αδράνειας και ισοδύναμος συντελεστής απόσβεσης για την ισοδύναμη γεννήτρια η οποία μοντελοποιεί όλες τις υπόλοιπες. Ακόμα δεν είναι δυνατό να μοντελοποιηθούν μαζί διαφορετικού τύπου γεννήτριες (π.χ. ατμοστρόβιλοι με υδροστρόβιλους). Για να συντεθεί ξανά το πλήρες σύστημα οι επιμέρους περιοχές ελέγχου συνδέονται μεταξύ τους με διασυνδετήριες γραμμές ή γραμμές μεταφοράς (Tie Lines).



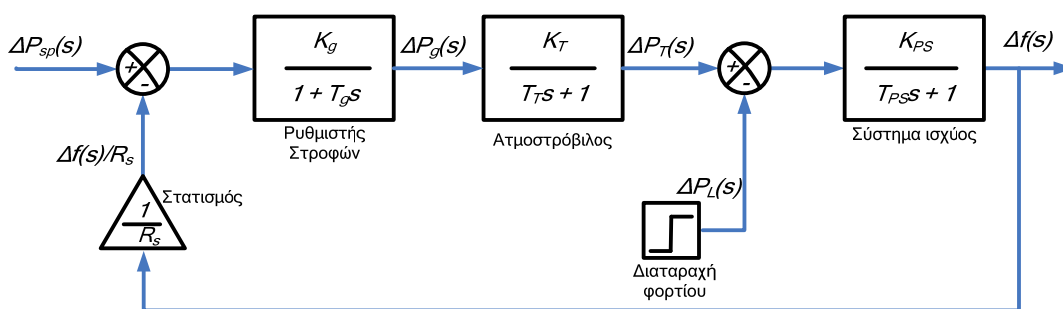
Σχ. 7.1. Απεικόνιση ρυθμιστών φορτίου-συχνότητας και διέγερσης σε μια τριφασική σύγχρονη γεννήτρια οδηγούμενη από κάποιο στρόβιλο.

Στο Σχ. 7.1. φαίνεται μια απεικόνιση μιας τριφασικής σύγχρονης γεννήτριας και ο τρόπος σύνδεσης των ρυθμιστών τάσης και φορτίου-συχνότητας. Για μικρές διαταραχές του φορτίου οι ρυθμιστές μπορούν να κάνουν

τις απαραίτητες διορθώσεις αλλά αν η ζήτηση του φορτίου μεταβληθεί περισσότερο θα πρέπει να επαναπροσαρμοστούν. Για μικρές μεταβολές του σημείου λειτουργίας μιας μηχανής η ενεργός ισχύς εξαρτάται αποκλειστικά από την γωνία που σχηματίζουν τα διανύσματα της παραγόμενης ηλεκτρεγερτικής δύναμης και της τάσης εξόδου της μηχανής. Η γωνία αυτή είναι γνωστή και ως γωνία δ . Αυτή η γωνία μπορεί να μεταβληθεί ακόμα και αν η τάση εξόδου μένει σταθερή. Για να μεταβληθεί το μέτρο της τάσης εξόδου το οποίο ουσιαστικά ρυθμίζει την άεργο ισχύ, θα πρέπει ανάλογα να μεταβληθεί η διέγερση της σύγχρονης μηχανής.

7.1. Μοντελοποίηση ΑΗΣ

Ένας ΑΗΣ παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας αποτελείται από υποσυστήματα τα οποία πρέπει να αναλυθούν ξεχωριστά. Στο Σχ. 7.2 φαίνεται το μπλοκ διάγραμμα του ΑΗΣ με την ονομασία κάθε υποσυστήματος. Η βαλβίδα του ρυθμιστή στροφών ελέγχει την ταχύτητα του στροβίλου. Ο στρόβιλος με την σειρά του ελέγχει την ταχύτητα περιστροφής της σύγχρονης γεννήτριας και κατ' επέκταση την ισχύ εξόδου αυτής. Με ανάδραση, η ταχύτητα της γεννήτριας ελέγχει την θέση της βαλβίδας του ρυθμιστή στροφών επαναλαμβάνοντας την διαδικασία. Η διαδικασία διαρκεί ώπου η παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς να γίνει ίση με την ζήτηση του συστήματος. Δεδομένου ότι πρακτικά το φορτίο μεταβάλλεται συνεχώς με τυχαίο τρόπο, η συχνότητα του συστήματος μεταβάλλεται επίσης συνεχώς δημιουργώντας αποκλίσεις από την συχνότητα του δικτύου. Ο σκοπός του ελέγχου φορτίου-συχνότητας είναι να επέμβει ώστε οι αποκλίσεις συχνότητας, να τείνουν στο μηδέν ή ασυμπτωτικά στο μηδέν εντός πολύ στενών ορίων, μετά από μία σχετικά "καλή" μεταβατική συμπεριφορά.



Σχ. 7.2. Διάγραμμα βαθμίδων απλοποιημένης ατμοηλεκτρικής μονάδας.

Όπως φαίνεται στο σχήμα, το μπλοκ του ρυθμιστή στροφών δέχεται τη διαφορά δύο εισόδων. Η πρώτη είναι το σήμα φορτίου αναφοράς το οποίο είναι άμεσο και το σήμα απόκλισης συχνότητας το οποίο είναι έμμεσο (feedback). Η έξοδος του ρυθμιστή στροφών είναι συνάρτηση της διαφοράς των δύο παραπάνω σημάτων και αποτελεί μια διορθωτική ενέργεια. Αυτή η απλή ανάδραση όμως δεν είναι επαρκής ώστε να επανέλθει η συχνότητα εξόδου εντός των αποδεκτών ορίων.

Απαραίτητη προϋπόθεση για τον τρόπο μαθηματικής μοντελοποίησης που ακολουθείται είναι οι διαταραχές του φορτίου να είναι μικρές ώστε να μπορεί να αναπαρασταθεί κάθε υποσύστημα με την συνάρτηση μεταφοράς του. Επίσης θεωρείται ότι το σήμα αναφοράς παραμένει σταθερό στην τιμή που είχε ώστε να παράγεται η ονομαστική συχνότητα πριν την διαταραχή. Βάση των συναρτήσεων μεταφοράς το σύστημα αναπαρίσταται όπως φαίνεται στο Σχ. 7.2 ενώ τα υποσυστήματα του αναλύονται στη συνέχεια.

7.1.1. Το Υποσύστημα Ρυθμιστή Στροφών

Σε έναν ΑΗΣ το νερό ζεσταίνεται για να δημιουργηθεί ατμός είτε καίγοντας ορυκτά καύσιμα είτε με εναλλακτικούς τρόπους όπως η πυρηνική ενέργεια ή η ηλιοθερμία (solar towers). Ο ατμός χρησιμοποιείται για να στρέψει έναν στρόβιλο ο οποίος οδηγεί μια σύγχρονη τριφασική γεννήτρια. Όσο η παραγόμενη ισχύς είναι ίση με την ζήτηση η ροή του ατμού είναι σταθερή. Μόλις διαταραχτεί η ισορροπία ανάμεσα στην παραγόμενη και την ζητούμενη ισχύ ο ρυθμιστής στροφών αντιδρά ώστε να την επαναφέρει. Αν για παράδειγμα το φορτίο στιγμιαία αυξηθεί θα γίνει ισχυρότερη η ηλεκτρική ροπή που αντιτίθεται στην μηχανική στον άξονα της μηχανής. Αυτό θα έχει ως αποτέλεσμα την μείωση των στροφών της μηχανής αλλά ο ρυθμιστής στροφών θα ανοίξει την βαλβίδα

εισαγωγής ατμού, ώστε να αυξηθεί η ροή του ατμού άρα και η μηχανική ροπή και να ισορροπήσει το σύστημα σε διαφορετική ταχύτητα.

Μετά από ανάλυση της μηχανικής του ρυθμιστή στροφών (δεν αναφέρεται εδώ), προκύπτει η συνάρτηση μεταφοράς του όπως φαίνεται στην Εξ. (7.1):

$$\frac{\Delta P_g(s)}{\Delta P_{sp}(s) - \frac{\Delta f(s)}{R_s}} = \frac{K_g}{1+T_g s} \quad (7.1)$$

όπου:

R_s συντελεστής της χαρακτηριστικής καμπύλης συχνότητας-φορτίου της μονάδας, ή στατισμός (Hz/puMW)

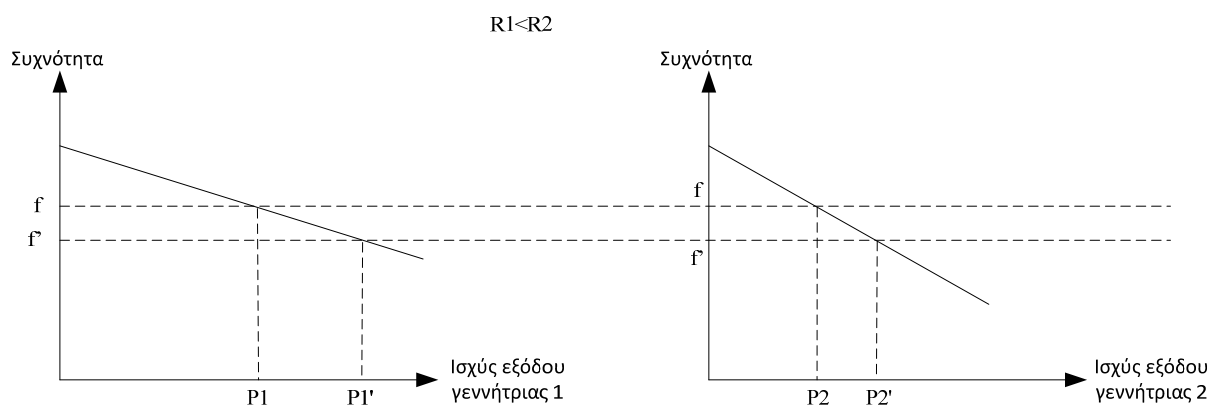
K_g κέρδος του ρυθμιστή στροφών

T_g χρονική σταθερά του ρυθμιστή στροφών (sec)

Ο ρυθμιστής στροφών είναι ένας μηχανισμός ελέγχου ο οποίος δίνει στην ταχύτητα της μηχανής κάποια φθίνουσα χαρακτηριστική με μικρή κλίση, καθώς το φορτίο της γεννήτριας αυξάνεται. Αυτή η “πτώση της ταχύτητας” ή “στατισμός” (speed droop - 1/R) της κινητήριας μηχανής περιγράφεται από την σχέση:

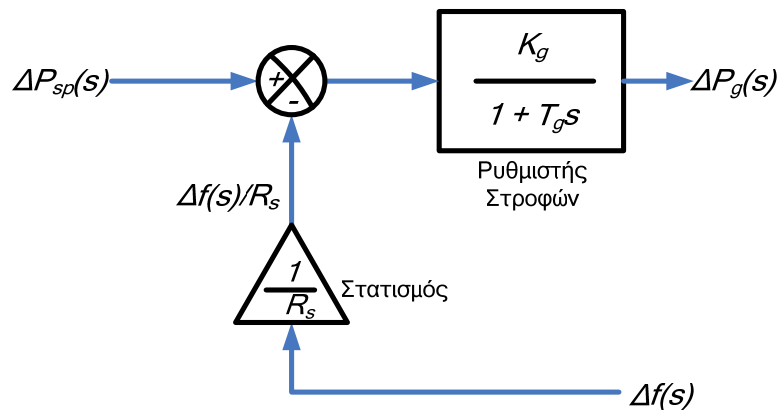
$$\frac{1}{R_s} = \frac{n_{nl} - n_{fl}}{n_{fl}} \times 100\% \quad (7.2)$$

όπου n_{nl} και n_{fl} είναι οι ταχύτητες της κινητήριας μηχανής στις περιπτώσεις λειτουργίας χωρίς φορτίο και με πλήρες φορτίο, αντίστοιχα. Το R_s καθορίζει την μεταβολή στην ισχύ εξόδου της μονάδας για μια δεδομένη μεταβολή στην συχνότητα της μονάδας. Γενικά για κάθε μονάδα παραγωγής το R_s καθορίζεται ώστε μια μεταβολή από μηδενικό ως ονομαστικό φορτίο, να έχει αποτέλεσμα αντίστοιχη μεταβολή από μηδενική ως ονομαστική συχνότητα. Στην περίπτωση που δύο γεννήτριες τροφοδοτούν ένα φορτίο και ενώ το σύστημα ισορροπεί, έστω ότι το φορτίο μεταβάλλεται ελαφρώς. Οι μονάδες παραγωγής θα αντισταθμίσουν την μεταβολή του φορτίου ανάλογα με την ονομαστική ισχύ τους. Δηλαδή ενώ ξεκινούν με μια αρχική τιμή συχνότητας f , η αύξηση του φορτίου κατά ΔP_d τις αναγκάζει να ισορροπήσουν σε μία διαφορετική συχνότητα f' . Το ποσό της αύξησης του φορτίου σε κάθε μονάδα είναι ανάλογο με την κλίση της χαρακτηριστικής της όπως φαίνεται και στο Σχ. 7.3 Σε κάθε περίπτωση θα πρέπει το άθροισμα των μεταβολών των μονάδων να ισούται με την μεταβολή του φορτίου. Θα πρέπει να σημειωθεί ακόμα ότι κάθε φορά, η συχνότητα που αναζητείται εξαρτάται από το σήμα αναφοράς του φορτίου.



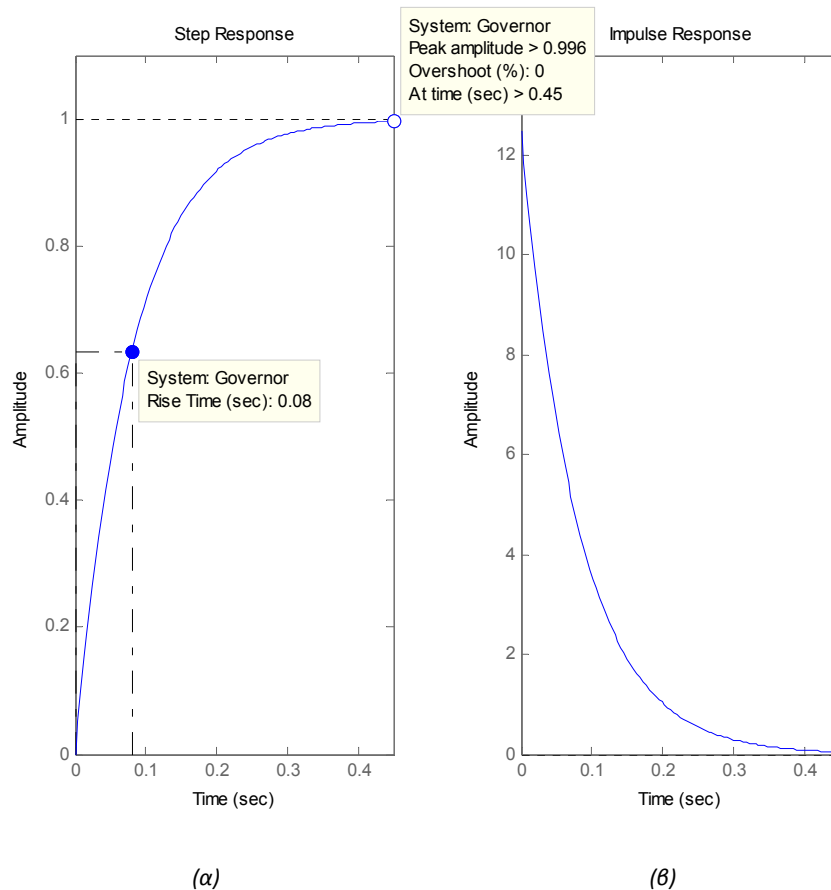
Σχ. 7.3. Κατανομή αύξησης φορτίου σε δύο γεννήτριες με διαφορετικό στατισμό.

Σύμφωνα με όσα αναφέρθηκαν προκύπτει το μπλοκ διάγραμμα του ρυθμιστή στροφών στο Σχ. 7.4.



Σχ. 7.4. Μπλοκ του ρυθμιστή στροφών.

Στο Σχ. 7.5. παρουσιάζεται η κρουστική και βηματική απόκριση του υποσυστήματος του ρυθμιστή στροφών. Για το υπόλοιπο της παρούσας πτυχιακής εργασίας μετά την παρουσίαση του μπλοκ διαγράμματος θα δίνονται πάντα οι αντίστοιχες αποκρίσεις.



Σχ. 7.5. Βηματική (α) και κρουστική (β) απόκριση του υποσυστήματος ρυθμιστή στροφών.

7.1.2. Το Υποσύστημα Στροβίλου - Γεννήτριας

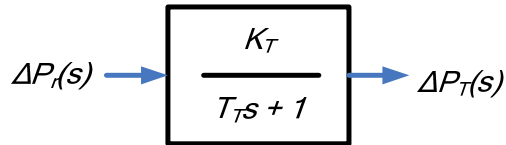
Στα συστήματα που θα εξεταστούν το υποσύστημα στροβίλου – γεννήτριας έχει μελετηθεί με δύο διαφορετικές μορφές για τους ΑΗΣ. Στην πιο απλή περίπτωση χρησιμοποιείται το μοντέλο πρώτης τάξης που φαίνεται στο Σχ. 7.6. Δέχεται σαν είσοδο την έξοδο του υποσυστήματος ρυθμιστή στροφών, ενώ η σχέση που συνδέει την είσοδο και την έξοδο του είναι η εξής:

$$\frac{\Delta P_T(s)}{\Delta P_g(s)} = \frac{K_T}{1 + T_T s} \quad (7.3)$$

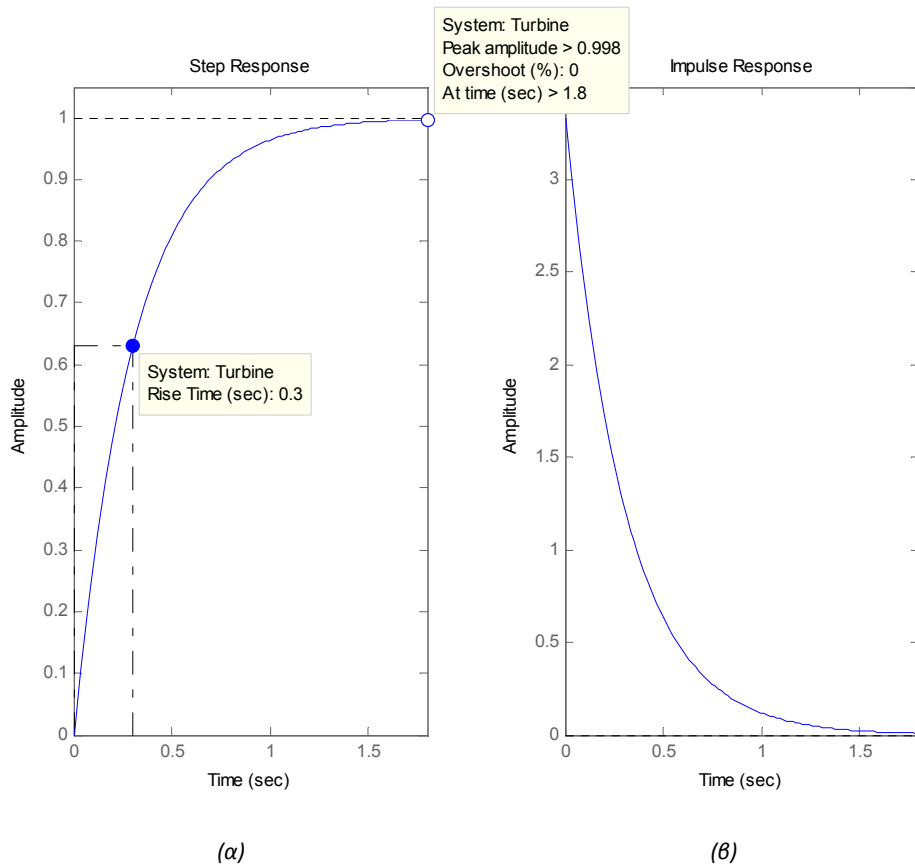
Όπου:

K_T το κέρδος του υποσυστήματος

T_T η χρονική σταθερά του υποσυστήματος (sec)

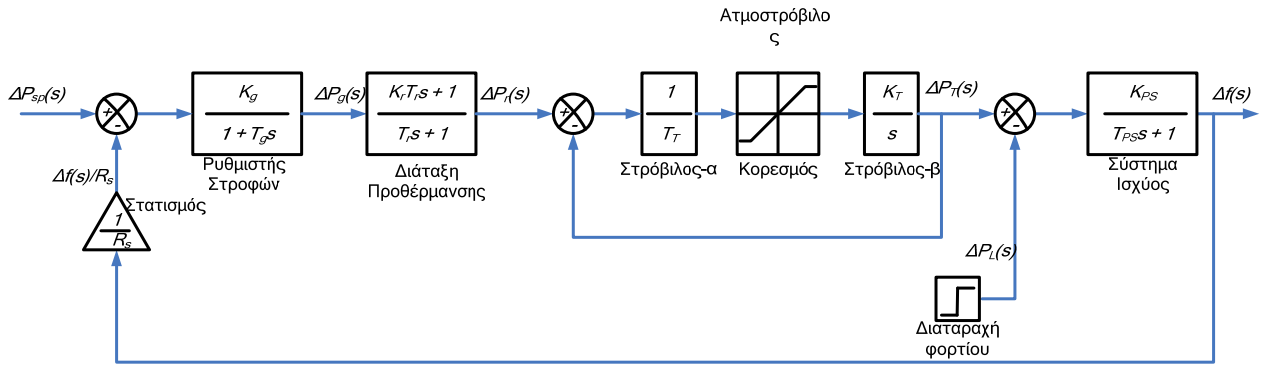


Σχ. 7.6. Το υποσύστημα στροβίλου-γεννήτριας.



Σχ. 7.7. Βηματική (α) και κρουστική (β) απόκριση του υποσυστήματος στροβίλου γεννήτριας.

Θεωρήθηκε σε αυτό το σημείο ότι για να γίνει περισσότερο ρεαλιστική η μελέτη του συγκεκριμένου μοντέλου θα έπρεπε να γίνουν κάποιες βελτιώσεις ώστε αυτό να ανταποκρίνεται καλύτερα στην πραγματικότητα. Έτσι υιοθετήθηκε το παρακάτω μοντέλο το οποίο είναι ευρέως αποδεκτό στην επιστημονική κοινότητα και λαμβάνει υπ' όψη την διάταξη προθέρμανσης (reheater) καθώς επίσης άλλη μία παράμετρο που στην διεθνή βιβλιογραφία ονομάζεται Generation Rate Constraint, GRC. Μια Ελληνική απόδοση θα ήταν περιορισμός του ρυθμού παραγωγής και έχει να κάνει με την ταχύτητα με την οποία μπορεί η μονάδα να μεταβάλει την ισχύ εξόδου της. Οπότε προκύπτει ένα δεύτερο μοντέλο του οποίου το μπλοκ διάγραμμα φαίνεται στο Σχ. 7.8. Όταν θα χρησιμοποιείται το απλοποιημένο μοντέλο από εδώ και στο εξής θα αναφέρεται ως ROGO ενώ το δεύτερο θα αναφέρεται ως R1G1.



Σχ. 7.8. Μπλοκ διάγραμμα ατμοστροβιλικής μονάδας με διάταξη προθέρμανσης και περιορισμό ρυθμού παραγωγής.

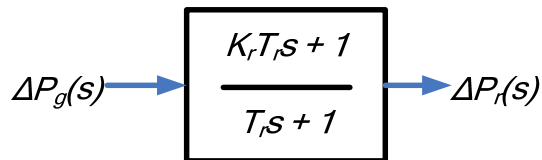
Ακόμα ένα μοντέλο που εμφανίζεται συχνά στην βιβλιογραφία είναι αυτό που λαμβάνει υπ' όψη την διάταξη προθέρμανσης αλλά όχι την διάταξη περιορισμού του ρυθμού παραγωγής. Για αυτό τον λόγο παρουσιάζεται στο Σχ. 7.11 το αντίστοιχο μπλοκ διάγραμμα που στο εξής θα αναφέρεται σαν R1G0. Επίσης στο Σχ. 7.9 παρατίθεται το υποσύστημα του προθερμαντή, ενώ η συνάρτηση μεταφοράς του δίνεται παρακάτω. Παρόλο που όπως αναφέρεται το συγκεκριμένο μοντέλο έχει κάνει συχνά την εμφάνιση του στην διεθνή βιβλιογραφία δεν εξετάζεται σε αυτήν την πτυχιακή εργασία αφού θεωρήθηκε ότι λαμβάνοντας υπόψη τον περιορισμό του ρυθμού παραγωγής αυξάνεται ο ρεαλισμός του μοντέλου και η πιστότητα στην πραγματικότητα.

$$\frac{\Delta P_r(s)}{\Delta P_g(s)} = \frac{K_r}{1 + T_r s} \quad (7.4)$$

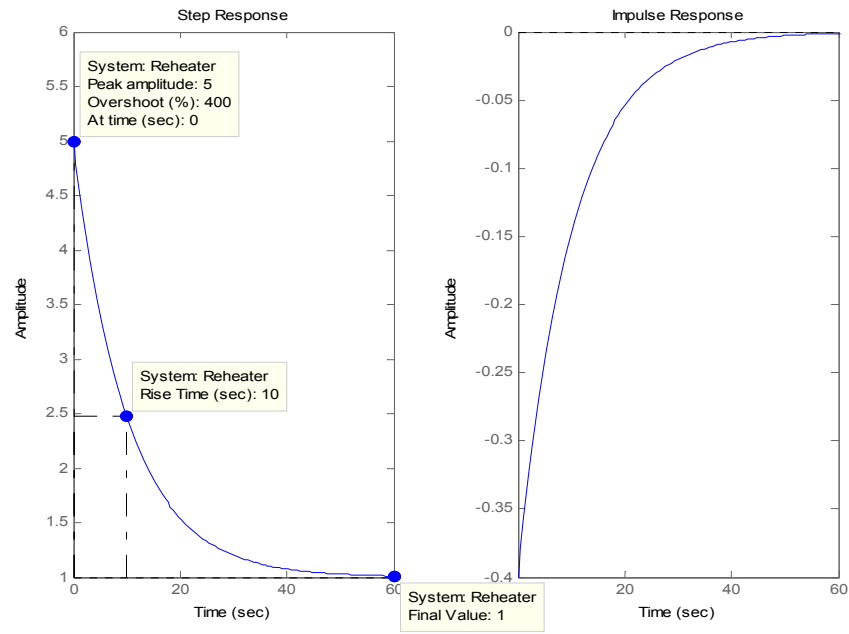
Όπου:

K_r το κέρδος του υποσυστήματος

T_r η χρονική σταθερά του υποσυστήματος (sec)



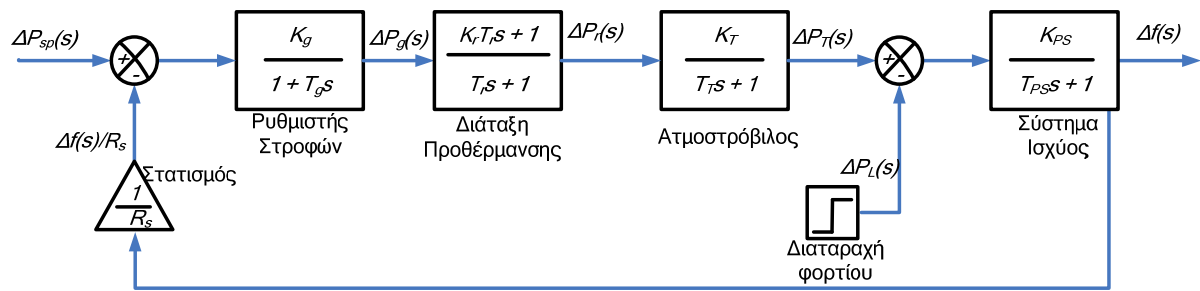
Σχ. 7.9. Το υποσύστημα της διάταξης προθέρμανσης.



(α)

(β)

Σχ. 7.10. Βηματική (α) και κρουστική (β) απόκριση του υποσυστήματος προθέρμανσης.



Σχ. 7.11. Μπλοκ διάγραμμα ατμοστροβιλικής μονάδας με διάταξη προθέρμανσης.

7.1.3. Το Υποσύστημα Φορτίου – Συστήματος Ισχύος

Το υποσύστημα του συστήματος ισχύος μπορεί να μοντελοποιηθεί με την παραδοχή ότι η ισχύς του στροβίλου P_t εξισορροπείται από την ισχύ της σύγχρονης γεννήτριας P_{gen} . Η ζητούμενη ισχύς του φορτίου P_d που όπως έχει αναφερθεί παραπάνω υπόκειται σε συνεχής μεταβολές θα πρέπει να καλυφθεί από την ισχύ της γεννήτριας. Η όποια διαφορά ανάμεσα στην παραγόμενη ισχύ από την γεννήτρια και την ζήτηση του φορτίου $P_{gen} - P_d$, δημιουργεί μια μεταβολή της συχνότητας του συστήματος Δf . Η εξίσωση ισορροπίας του συστήματος δίνεται από την Εξ. (7.5) :

$$\Delta P_T(s) - \Delta P_L(s) = (2H / f_0) \Delta f(s) + D \Delta f(s) \quad (7.5)$$

Όπου:

H η σταθερά αδράνειας του υποσυστήματος

D ο συντελεστής απόσβεσης του υποσυστήματος (puMW/Hz)

f_0 η ονομαστική συχνότητα λειτουργίας (Hz)

ενώ η προηγούμενη εξίσωση μπορεί να γραφτεί και ως

$$\frac{\Delta f(s)}{\Delta P_T(s) - \Delta P_L(s)} = \frac{K_{PS}}{1 + sT_{PS}} \quad (7.6)$$

Όπου:

T_{ps} η χρονική σταθερά του υποσυστήματος (sec)

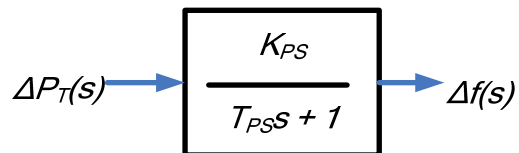
K_{ps} ο σταθερά κέρδους του υποσυστήματος (Hz/ριMW)

Και προσδιορίζονται από τις σχέσεις:

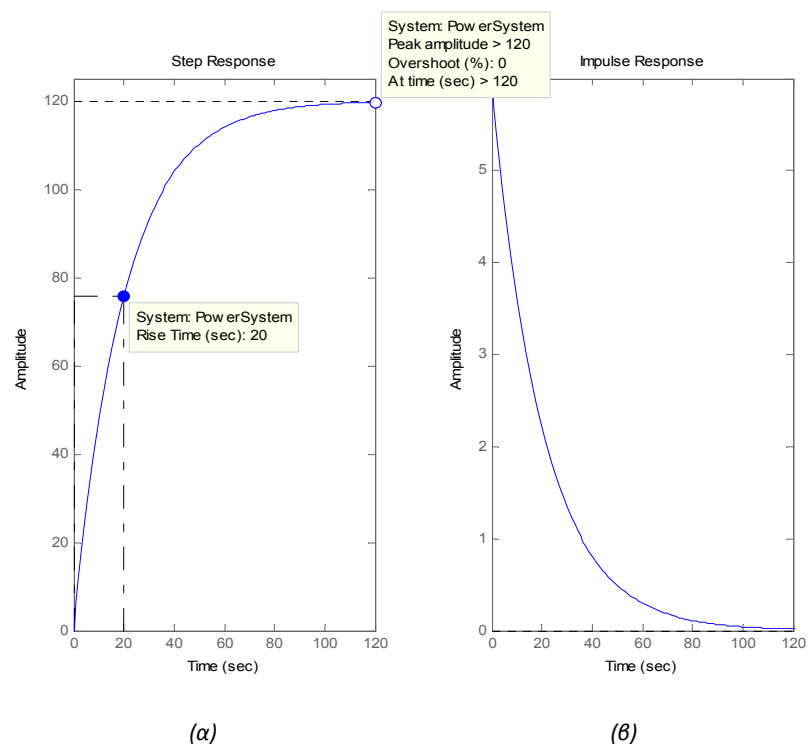
$$T_{PS} = \frac{2H}{f_0 D} \quad (7.7)$$

$$K_{PS} = \frac{1}{D} \quad (7.8)$$

Έτσι τελικά το υποσύστημα συστήματος ισχύος μπορεί να μοντελοποιηθεί όπως φαίνεται στο Σχ. 7.12.



Σχ. 7.12. Μπλοκ διάγραμμα του υπόσυστήματος φορτίου – συστήματος ισχύος.



Σχ. 7.13. Βηματική (α) και κρουστική (β) απόκριση του υπόσυστήματος φορτίου – συστήματος ισχύος.

7.1.4. Σύνθεση Του Μοντέλου

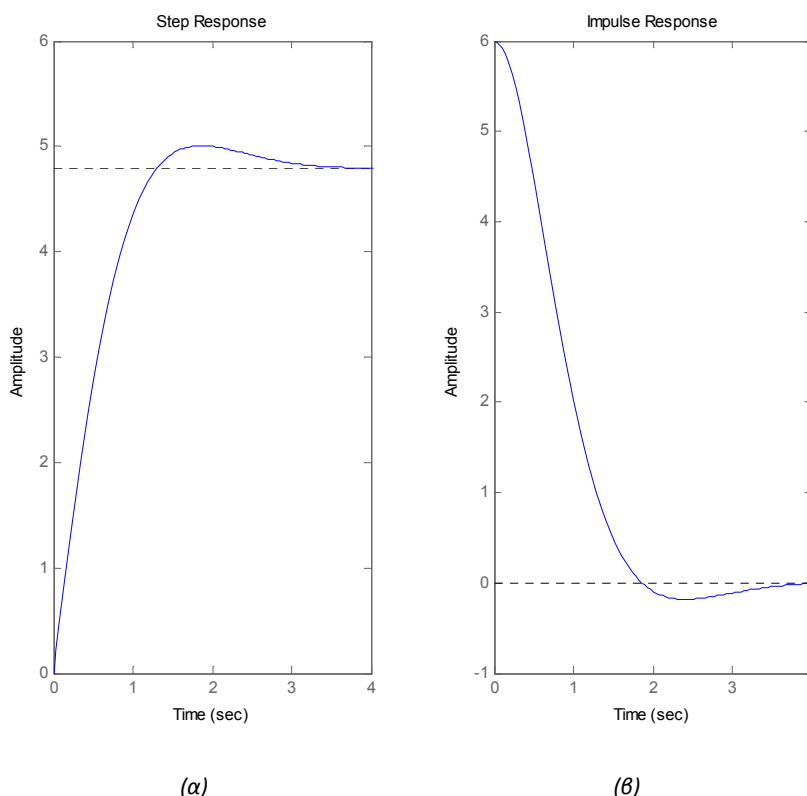
Το πλήρες μοντέλο ενός ΑΗΣ όπως φαίνεται και στην αρχή του κεφαλαίου Σχ. 7.2 είναι ένα απλό ανατροφοδοτούμενο σύστημα με δύο εισόδους (MISO, multi input single output). Η πρώτη είναι το σήμα αναφοράς φορτίου P_{sp} (είσοδος ελέγχου) και η δεύτερη η μεταβολή του φορτίου (είσοδος διαταραχής) DPL . Με ελεύθερη λειτουργία του ρυθμιστή στροφών (δηλαδή, $P_{sp}=0$ και μεταβολή του DPL), τότε μόνο η διαταραχή επιδρά στην συχνότητα του υπό μελέτη συστήματος. Η επίδραση της μεταβολής του φορτίου στη συχνότητα του συστήματος δίνεται από την Εξ. (7.9):

$$\Delta f(s) = H(s)DPL(s) \quad (7.9)$$

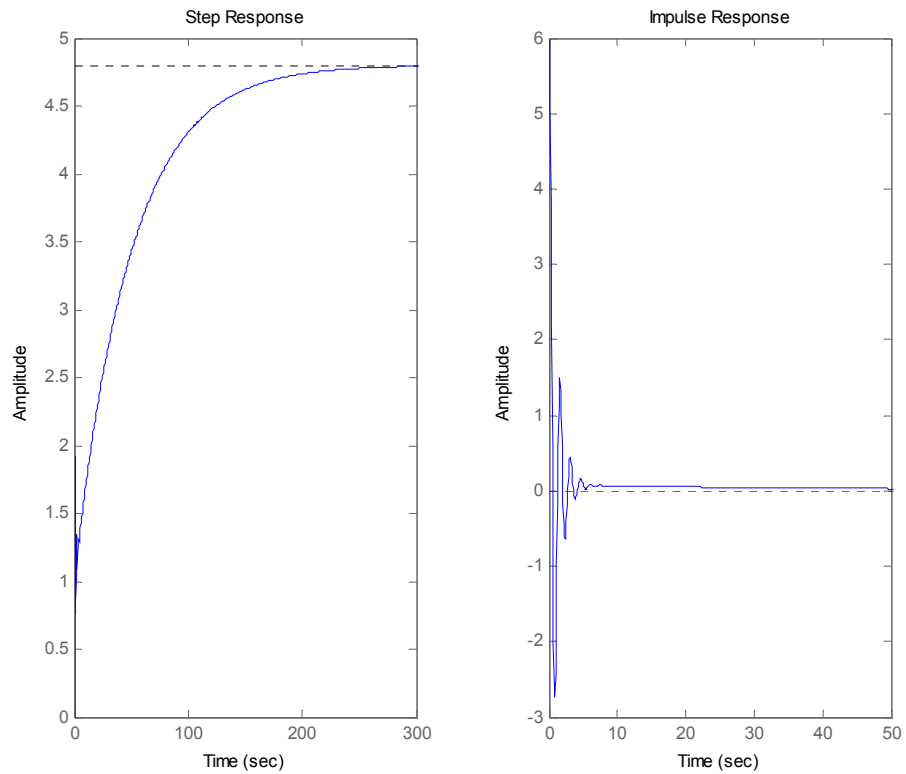
Όπου η $H(s)$ είναι η συνάρτηση μεταφοράς του συστήματος κλειστού βρόχου με είσοδο την διαταραχή και δίνεται από την Εξ. (7.10).

$$H(s) = \frac{G_{PS}(s)}{1 + \frac{G_{PS}(s)G_g(s)G_T(s)}{R_S}} \quad (7.10)$$

Όσο αφορά το μοντέλο με την διάταξη προθέρμανσης και τον περιορισμό του ρυθμού παραγωγής θα πρέπει να παρεμβληθεί στην συνάρτηση μεταφοράς ανοικτού βρόχου, η συνάρτηση μεταφοράς των επιπλέον στοιχείων. Ο Πίνακας 5 παρουσιάζει τις τιμές των παραμέτρων που χρησιμοποιήθηκαν για την μοντελοποίηση και εξομοίωση του ατμοηλεκτρικού σταθμού. Στο τέλος κάθε ενότητας που αναλύεται, θα παρατίθεται αντίστοιχος πίνακας με τις παραμέτρους του εκάστοτε σταθμού. Ακολουθούν οι βηματικές και κρουστικές αποκρίσεις του συστήματος στην αρχική του μορφή (H) και μετά από την προσθήκη τις βαθμίδας αναθέρμανσης (HR).



Σχ. 7.14. Βηματική (α) και κρουστική (β) απόκριση του συνολικού απλοποιημένου συστήματος με είσοδο, την είσοδο διαταραχής.



(α)

(β)

Σχ. 7.15. Κρουστική (α) και βηματική (β) απόκριση του συνολικού συστήματος με προσθήκη διάταξης προθέρμανσης και με είσοδο, την είσοδο διαταραχής.

Πίνακας 5. Τυπικές τιμές παραμέτρων ατμοηλεκτρικού σταθμού.

	R_S	K_G	T_G	K_r	T_r	K_T	T_T	K_{PS}	T_{PS}	Saturation
Μοντέλα μιας περιοχής με μοναδική πηγή ατμοστρόβιλο χωρίς αναθέρμανση και χωρίς περιορισμό του ρυθμού παραγωγής	5	1	0,08	-	-	1	0,3	120	20	-
Μοντέλα μιας περιοχής με μοναδική πηγή ατμοστρόβιλο με αναθέρμανση και με περιορισμό του ρυθμού παραγωγής	2,4	1	0,08	0,5	10	1	0,3	120	20	$\pm\infty$
Λοιπά μοντέλα με μικρότερης ισχύος με αναθέρμανση και με περιορισμό του ρυθμού παραγωγής	2,4	1	0,08	0,5	10	1	0,3	72	14,4	$\pm\infty$
	Hz/μMW	-	sec	-	sec	-	sec	Hz/μMW	sec	-

Σημειώνεται ότι το σύστημα που φαίνεται στο Σχ. 7.2 εξετάζεται εδώ μόνο στις περιπτώσεις μίας περιοχής ελέγχου (single area) με μία μονάδα παραγωγής (single source), ενώ για όλες τις περιπτώσεις μελέτης, για λόγους πληρότητας, εξετάζεται το σύστημα που εικονίζεται στο Σχ. 7.8.

7.2. Μοντελοποίηση Αεριοστροβλικού Σταθμού

Ένας αεριοστροβλικός σταθμός παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας αποτελείται από υποσυστήματα τα οποία παρουσιάζουν κάποιες ομοιότητες με τα αντίστοιχα ενός ΑΗΣ. Στο Σχ. 7.22 φαίνεται το πλήρες μοντέλο με τα υποσυστήματα του τα οποία θα αναλυθούν παρακάτω. Όπως είναι γνωστό η παραγωγή ενέργειας γίνεται με εισαγωγή αέρα υπό πίεση και καυσίμου σε ένα καυστήρα όπου γίνεται ανάφλεξη και στην συνέχεια τα καυσαέρια αυτής της καύσης οδηγούν ένα στρόβιλο συνδεδεμένο σε μια σύγχρονη γεννήτρια. Η έννοια της ανάδρασης μέσω του μπλοκ που αναπαριστά τον στατισμό της μονάδας παραμένει και σε αυτήν την περίπτωση όπως και στους ΑΗΣ με όμοια συμπεριφορά στη ρύθμιση των στροφών.

7.2.1. Το Υποσύστημα Ρυθμιστή Στροφών

Όμοια με τα προηγούμενα στη βαθμίδα αυτή μοντελοποιείται η λειτουργία του ρυθμιστή στροφών ενός αεριοστροβλικού σταθμού. Πρόκειται για την βαθμίδα εκείνη που ελέγχει την ισορροπία μεταξύ παραγόμενης και ζητούμενης ισχύος και δίνει κατάλληλο σήμα όταν υπάρχει ανισότητα ώστε να αποκατασταθεί η ισορροπία αυτή.

Μετά από ανάλυση της μηχανικής των βαθμίδων του ρυθμιστή στροφών προκύπτει η συνάρτηση μεταφοράς του.

$$\frac{\Delta P_g(s)}{\Delta P_{sp}(s) - \frac{\Delta f(s)}{R_G}} = \frac{1 + Xs}{1 + Ys} \quad (7.11)$$

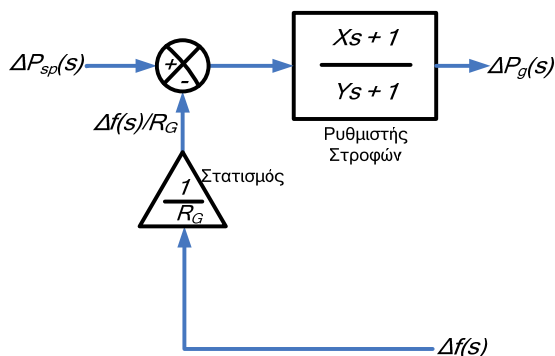
Όπου:

R_G κλίση της χαρακτηριστικής καμπύλης συχνότητας-φορτίου της μονάδας, ή στατισμός

X κέρδος του ρυθμιστή στροφών

Y χρονική σταθερά του ρυθμιστή στροφών (sec)

Σύμφωνα με όσα αναφέρθηκαν προκύπτει το μπλοκ διάγραμμα του ρυθμιστή στροφών στο Σχ. 7.16.



Σχ. 7.16. Μπλοκ διάγραμμα ρυθμιστή στροφών αεριοστροβλικής μονάδας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.

7.2.2. Το Υποσύστημα Ρυθμιστή Βαλβίδας

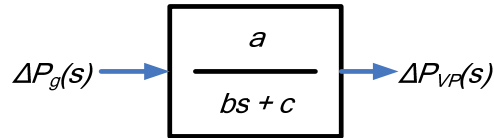
Το υποσύστημα ρυθμιστή στροφών οδηγεί μια δευτερεύουσα βαθμίδα η οποία ελέγχει την θέση της βαλβίδας εισαγωγής καυσίμου στον θάλαμο καύσης. Αυτή η βαθμίδα ονομάζεται υποσύστημα ρυθμιστή βαλβίδας και έχει την εξής συνάρτηση μεταφοράς:

$$\frac{\Delta P_g(s)}{\Delta P_{vp}(s)} = \frac{a}{c + bs} \quad (7.12)$$

Όπου:

a/c κέρδος του ρυθμιστή βαλβίδας

b/c χρονική σταθερά του ρυθμιστή βαλβίδας (sec)



Σχ. 7.17. Το υποσύστημα του ρυθμιστή θέσης της βαλβίδας εισαγωγής καυσίμου.

7.2.3. Το Υποσύστημα Καυστήρα Και Ψεκασμού Καυσίμου

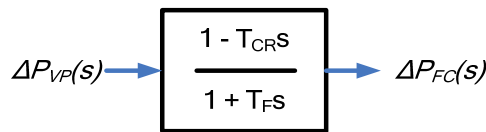
Το υποσύστημα καυστήρα και ψεκασμού καυσίμου είναι το σημείο στο οποίο συμβαίνουν οι χημικές διεργασίες της καύσης οι οποίες παράγουν την θερμική ενέργεια που χρησιμοποιεί ο αεριοστρόβιλος για να περιστραφεί. Αυτή η βαθμίδα έχει την εξής συνάρτηση μεταφοράς:

$$\frac{\Delta P_{vp}(s)}{\Delta P_{FC}(s)} = \frac{1 - T_{CR}s}{1 + T_Fs} \quad (7.13)$$

όπου:

$-T_{CR}$ κέρδος του υποσυστήματος

T_F χρονική σταθερά του (sec)

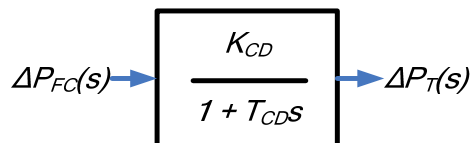


Σχ. 7.18. Διάγραμμα Βαθμίδας θαλάμου καύσης και του συστήματος ψεκασμού καυσίμου.

7.2.4. Το Υποσύστημα Στροβίλου-Γεννήτριας

Το υποσύστημα αυτό μοντελοποιεί την συμπεριφορά του στροβίλου και της σύγχρονης τριφασικής γεννήτριας με την οποία είναι συνδεδεμένος. Η συνάρτηση μεταφοράς του είναι:

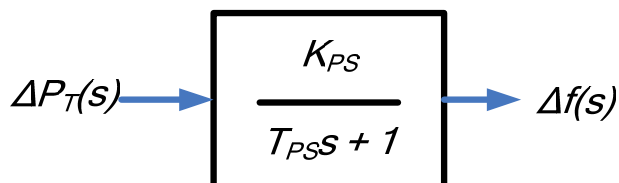
$$\frac{\Delta P_{FC}(s)}{\Delta P_T(s)} = \frac{K_{CD}}{1 + T_{CD}s} \quad (7.14)$$



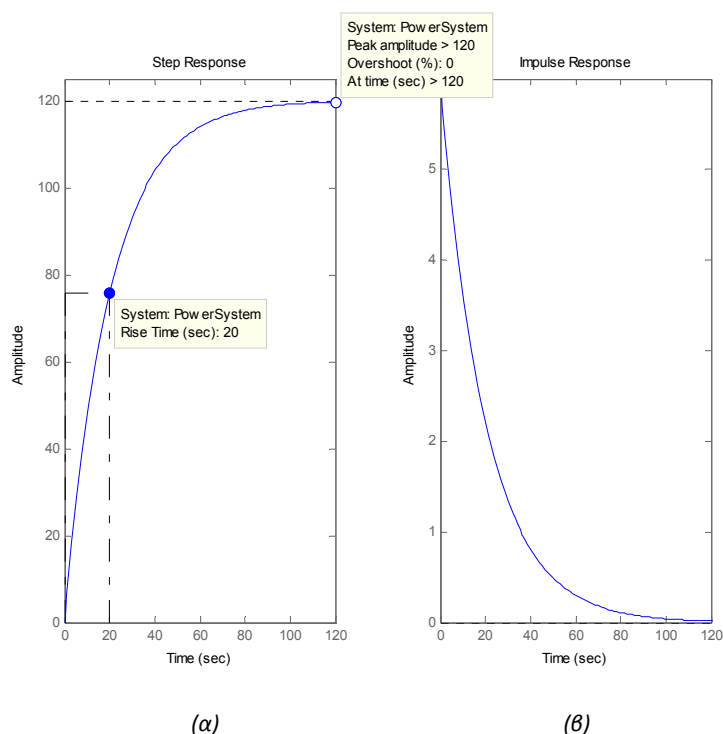
Σχ. 7.19. Μπλοκ διάγραμμα του στροβίλου αεριοστροβιλικού σταθμού παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.

7.2.5. Το Υποσύστημα Φορτίου – Συστήματος Ισχύος

Με το υποσύστημα αυτό μοντελοποιείται το κομμάτι εκείνο του συστήματος που μετατρέπει την ισχύ κάθε μηχανής σε συχνότητα ή για την ακρίβεια σε σφάλμα συχνότητας. Αυτό το υποσύστημα είναι κοινό σε όλα τα μοντέλα που θα εξεταστούν σε αυτό το Κεφάλαιο.



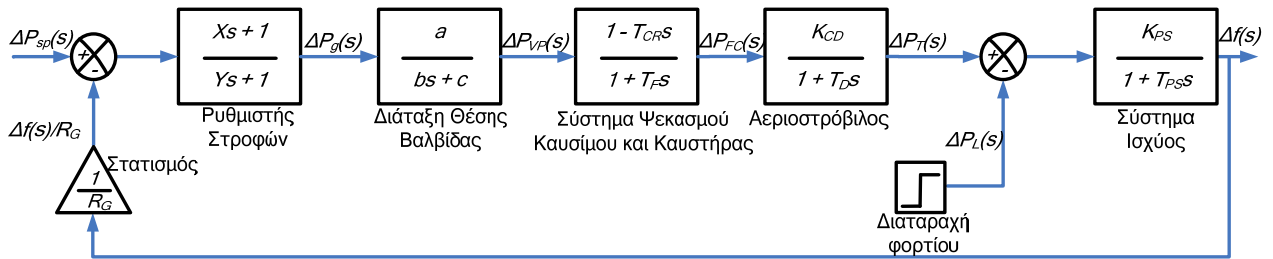
Σχ. 7.20. Μπλοκ διάγραμμα υπόσυστηματος φορτίου – συστήματος ισχύος.



Σχ. 7.21. Κρουστική (α) και βηματική (β) απόκριση του υπόσυστηματος φορτίου – συστήματος ισχύος.

7.2.6. Σύνθεση Του Μοντέλου

Σύμφωνα με όσα αναφέρθηκαν στην ανάλυση των επιμέρους υποσυστημάτων και όπως αναφέρθηκε και στην Παράγραφο 7.1.4, προκύπτει το σύστημα του Σχ. 7.22. Όπως είναι προφανές το μοντέλο αυτό έχει επίσης δύο εισόδους από τις οποίες η μία ονομάζεται είσοδος ελέγχου ($\Delta P_{sp}(s)$) και η άλλη είσοδος διαταραχής ($\Delta P_L(s)$). Θα πρέπει να αναφερθεί ότι στα συστήματα που εξετάζονται σε αυτή τη πτυχιακή εργασία η είσοδος ελέγχου τροφοδοτείται από τους διάφορους ελεγκτές. Ακολουθεί το μοντέλο του αεριοστροβλικού σταθμού παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και ο πίνακας με τις παραμέτρους που χρησιμοποιήθηκαν για τις εξομοιώσεις.



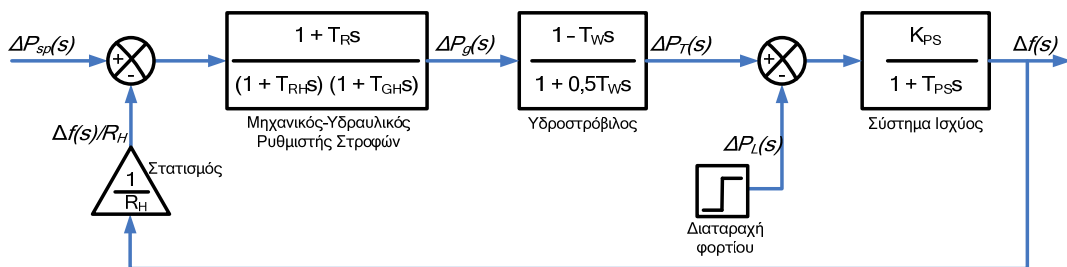
Σχ. 7.22. Μπλοκ διάγραμμα αεριοστροβιλικής μονάδας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.

Πίνακας 6. Τυπικές τιμές παραμέτρων αεριοστροβιλικού σταθμού.

R_G	X	Y	a	b	c	T_F	K_{CD}	T_{CD}	T_{CR}	K_{PS}	T_{PS}
2,4	0,6	1	1	0,05	1	0,23	1	0,2	0,01	120	20
2,4	0,6	1	1	0,05	1	0,23	1	0,2	0,01	72	14,4
Hz/puMW	-	sec	-	-	-	sec	-	sec	sec	-	sec

7.3. Μοντελοποίηση ΥΗΣ

Οι υδροηλεκτρικοί σταθμοί παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας παρόλο που ποικίλουν όσο αφορά τον τρόπο κατασκευής τους, στην μοντελοποίηση τους ακολουθούν της ίδιες βασικές αρχές με τους προηγούμενους σταθμούς. Τα υποσυστήματα από τα οποία αποτελούνται φαίνονται στο Σχ. 7.23 που παρουσιάζει το πλήρες μοντέλο και θα αναλυθούν παρακάτω. Σε αυτή την περίπτωση η ρύθμιση των στροφών επιτυγχάνεται με την χρήση ενός μηχανικό-υδραυλικού ρυθμιστή (mechanic-hydraulic governor) ο οποίος ουσιαστικά ελέγχει την παροχή νερού στο στρόβιλο. Σύμφωνα με όσα προαναφέρθηκαν αύξηση στην ροή προκαλεί ανάλογη αύξηση στην μηχανική ροπή εισόδου του στρόβιλου. Ο στρόβιλος είναι συνδεδεμένος σε σύγχρονη γεννήτρια συνήθως με πολλούς πόλους ώστε να έχει χαμηλή ταχύτητα περιστροφής. Εάν υπάρχει απόκλιση ανάμεσα στην παραγόμενη και τη ζητούμενη πραγματική ισχύ ένα διαφορικό σήμα ελέγχου επιστρέφει με ανάδραση στον μηχανικό-υδραυλικό ρυθμιστή, μέσω της βαθμίδας που μοντελοποιεί τον στατισμό της κινητήριας μηχανής, με σκοπό να διορθώσει την θέση της βαλβίδας εισαγωγής νερού και να εξισώσει παραγόμενη και ζητούμενη ισχύ.



Σχ. 7.23. Διάγραμμα βαθμίδων υδροηλεκτρικού σταθμού.

7.3.1. Το Υποσύστημα Ρυθμιστή Στροφών

Όπως αναφέρθηκε, η βαθμίδα αυτή μοντελοποιεί την λειτουργία ενός μηχανικό-υδραυλικού ρυθμιστή και στην ουσία είναι δύο μπλοκ σε σειρά συμπυγμένα σε ένα. Το πρώτο από αυτά είναι η βαθμίδα του “πιλότου” κινητήρα που οδηγεί το δεύτερο μπλοκ. Το δεύτερο από αυτά μοντελοποιεί το σερβομηχανισμό που ελέγχει την βαλβίδα εισαγωγής νερού. Αυτές οι δύο βαθμίδες είναι συνηθισμένο να μοντελοποιούνται σαν μία που θεωρείται ο μηχανικό-υδραυλικός ρυθμιστής. Όσο η παραγόμενη ισχύς είναι ίση με την ζήτηση η ροή του νερού είναι σταθερή. Μόλις διαταραχτεί η ισορροπία ανάμεσα στην παραγόμενη και την ζητούμενη ισχύ ο ρυθμιστής στροφών αντιδρά ώστε να την επαναφέρει, δηλαδή εδώ ο μηχανικός – υδραυλικός ρυθμιστής παίζει το ρόλο του κυβερνήτη.

Μετά από ανάλυση της μηχανικής των βαθμίδων του ρυθμιστή στροφών προκύπτει η συνάρτηση μεταφοράς του.

$$\frac{\Delta P_g(s)}{\Delta P_{sp}(s) - \frac{\Delta f(s)}{R_H}} = \frac{1 + T_R s}{(1 + T_{RH} s)(1 + T_{GH} s)} \quad (7.13)$$

όπου:

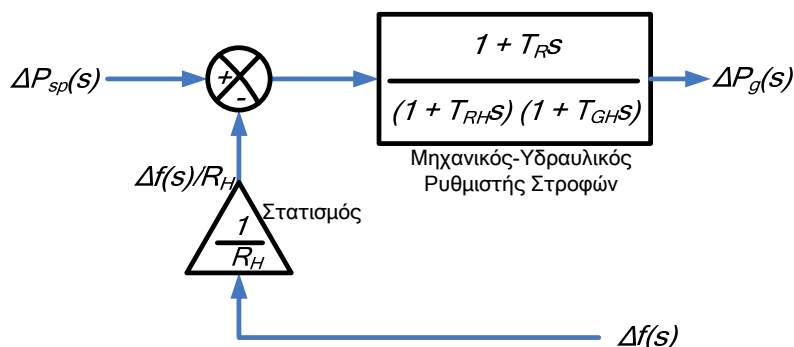
R_H κλίση της χαρακτηριστικής καμπύλης συχνότητας-φορτίου της μονάδας, ή στατισμός

T_R κέρδος του ρυθμιστή στροφών

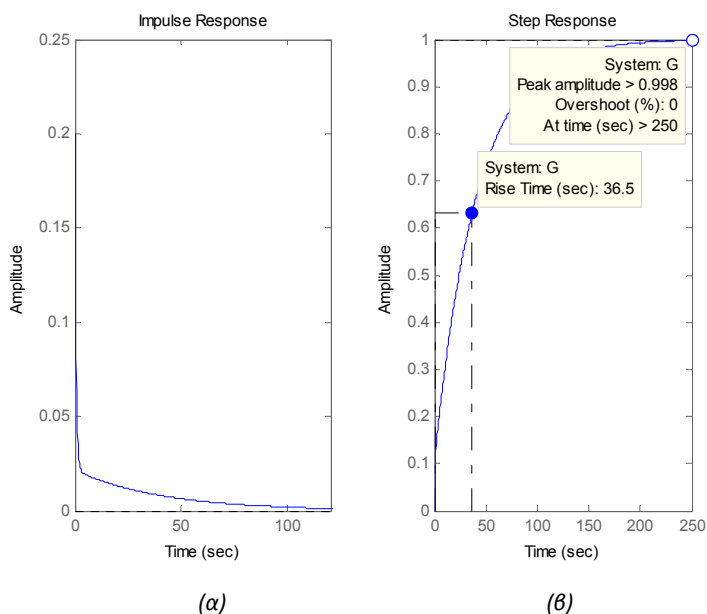
T_{RH} χρονική σταθερά του ρυθμιστή στροφών

T_{GH} χρονική σταθερά του ρυθμιστή στροφών

Σύμφωνα με όσα αναφέρθηκαν προκύπτει το μπλοκ διάγραμμα του μηχανικό-υδραυλικού ρυθμιστή στροφών στο Σχ. 7.24.



Σχ. 7.24. Μπλοκ διάγραμμα της βαθμίδας μηχανικού και υδραυλικού ελέγχου του ρυθμιστή στροφών σε υδροηλεκτρικό σταθμό.



Σχ. 7.25. Κρουστική (α) και βηματική (β) απόκριση του υποσυστήματος μηχανικό-υδραυλικού ελέγχου βαλβίδας.

7.3.2. Το Υποσύστημα Στροβίλου - Γεννήτριας

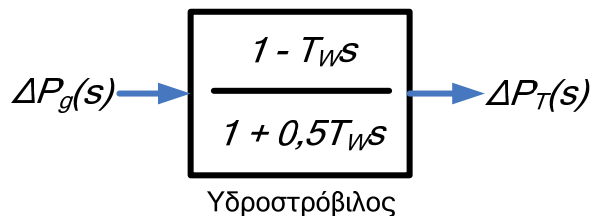
Το υποσύστημα στροβίλου – γεννήτριας ενός ΥΗΣ μοντελοποιείται σε μια βαθμίδα η οποία μετατρέπει την μηχανική ισχύ εισόδου που προσφέρεται από τον ρυθμιστή στροφών, σε ηλεκτρική ισχύ. Στο Σχ. 7.26 φαίνεται το

μπλοκ διάγραμμα του υποσυστήματος, ενώ η συνάρτηση μεταφοράς που συνδέει την είσοδο και την έξοδο του είναι η εξής:

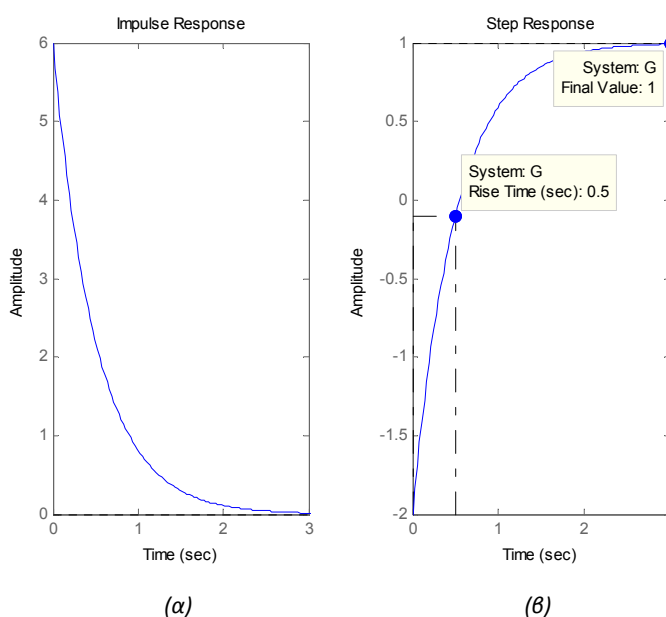
$$\frac{\Delta P_g(s)}{\Delta P_T(s)} = \frac{1 - sT_W}{1 + s0.5T_W} \quad (7.14)$$

όπου:

T_W η χρονική σταθερά του χρόνου εκκίνησης του νερού



Σχ. 7.26. Μπλοκ διάγραμμα υδροστροβίλου.



Σχ. 7.27. Κρουστική (α) και βηματική (β) απόκριση του υδροστροβίλου.

7.3.3. Το Υποσύστημα Φορτίου – Συστήματος Ισχύος

Το υποσύστημα του συστήματος ισχύος μοντελοποιείται όπως προηγουμένως, με την παραδοχή ότι η ισχύς του στροβίλου P_i εξισορροπείται από την ισχύ της σύγχρονης γεννήτριας P_{gen} . Η όποια διαφορά ανάμεσα στην παραγόμενη ισχύ από την γεννήτρια και την ζήτηση του φορτίου $P_{gen} - P_d$, δημιουργεί μια μεταβολή της συχνότητας του συστήματος Δf . Η εξίσωση ισορροπίας του συστήματος δίνεται από την Εξ. (7.15):

$$\Delta P_i(s) - \Delta P_L(s) = (2H / f_0) \Delta f(s) + D \Delta f(s) \quad (7.15)$$

όπου:

H η σταθερά αδράνειας του υποσυστήματος

D ο συντελεστής απόσβεσης του υποσυστήματος

f_0 η ονομαστική συχνότητα λειτουργίας

ενώ η προηγούμενη εξίσωση μπορεί να γραφτεί και ως

$$\frac{\Delta f(s)}{\Delta P_T(s) - \Delta P_L(s)} = \frac{K_{PS}}{1 + sT_{PS}} \quad (7.16)$$

όπου:

T_{ps} η χρονική σταθερά του υποσυστήματος

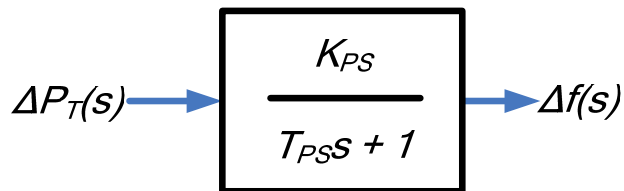
K_{ps} ο σταθερά κέρδους του υποσυστήματος

Και προσδιορίζονται από τις σχέσεις:

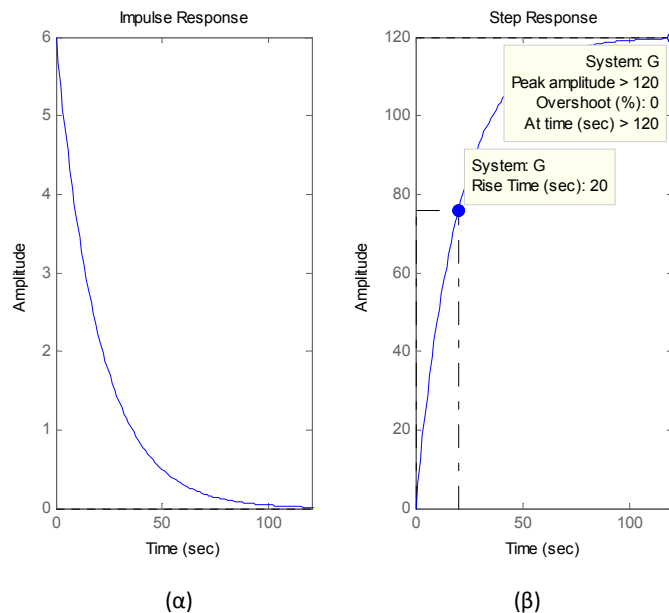
$$T_{PS} = \frac{2H}{f_0 D} \quad (7.17)$$

$$K_{PS} = \frac{1}{D} \quad (7.18)$$

Ενώ τελικά το υποσύστημα συστήματος ισχύος μπορεί να μοντελοποιηθεί όπως φαίνεται στο Σχ. 7.28.



Σχ. 7.28. Μπλοκ διάγραμμα υπόσυστήματος φορτίου – συστήματος ισχύος.



Σχ. 7.29. Βηματική (α) και κρουστική (β) απόκριση του υπόσυστήματος φορτίου – συστήματος ισχύος.

7.3.4. Σύνθεση Του Μοντέλου

Το πλήρες μοντέλο ενός ΥΗΣ όπως φαίνεται και στην αρχή του κεφαλαίου Σχ. 7.23 είναι ένα απλό ανατροφοδοτούμενο σύστημα με δύο εισόδους (MISO, multi input single output). Η πρώτη είναι το σήμα αναφοράς φορτίου P_{sp} (είσοδος ελέγχου) και η δεύτερη η μεταβολή του φορτίου (είσοδος διαταραχής) DPL . Με

ελεύθερη λειτουργία του ρυθμιστή στροφών (δηλαδή, $P_{sp}=0$ και μεταβολή του DPL), τότε μόνο η διαταραχή επιδρά στην συχνότητα του υπό μελέτη συστήματος. Η επίδραση της μεταβολής του φορτίου στη συχνότητα του συστήματος δίνεται από την Εξ. (7.19):

$$\Delta f(s) = H(s)DPL(s) \quad (7.19)$$

Όπου η $H(s)$ είναι η συνάρτηση μεταφοράς του συστήματος κλειστού βρόχου με είσοδο την διαταραχή και δίνεται από την Εξ. (7.20).

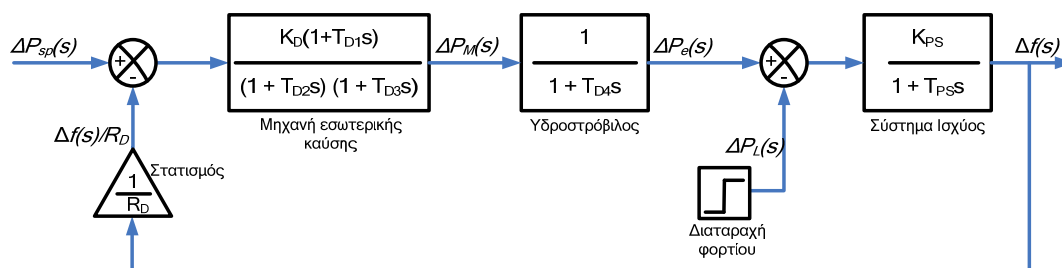
$$H(s) = \frac{G_{ps}(s)}{1 + \frac{G_{ps}(s)G_g(s)G_T(s)}{R_H}} \quad (7.20)$$

Πίνακας 7. Τυπικές τιμές παραμέτρων υδροστροβιλικού σταθμού.

R_H	T_W	T_R	T_{RH}	T_{GH}	K_{PS}	T_{PS}
2,4	1	5	41,25	0.606	120	20
2,4	1	5	28,75	0,2	72	14,4
Hz/ρuMW	sec	sec	sec	sec	-	sec

7.4. Μοντελοποίηση Ντιζελοηλεκτρικών Σταθμών

Οι Ντιζελοηλεκτρικοί σταθμοί παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας όπως έχει αναφερθεί συναντιόνται πολύ συχνά σε μικρά αυτόνομα συστήματα λόγω της φτηνής τους κατασκευής αλλά και της ταχύτητας με την οποία μπορούν να αντιμετωπίσουν την αύξηση της ζήτησης. Πρόκειται για ιδιαίτερα γρήγορες μονάδες παραγωγής τόσο κατά την ανάληψη φορτίου όσο και κατά την ρύθμιση των στροφών τους. Το μοντέλο που παρουσιάζεται εδώ (Σχ. 7.30) έχει μόλις τρεις βαθμίδες και για το λόγο αυτό αρκετές από τις λειτουργίες του έχουν συμπυκωθεί ή αμεληθεί.



Σχ. 7.30. Διάγραμμα βαθμίδων ντιζελοηλεκτρικού σταθμού που δεν λαμβάνει υπόψη τον περιορισμό του ρυθμού παραγωγής.

7.4.1. Το Υποσύστημα Της Μηχανής Εσωτερικής Καύσης

Η βαθμίδα αυτή μοντελοποιεί την λειτουργία μιας ΜΕΚ και περιλαμβάνει και την ρύθμιση των στροφών της. Σαν είσοδο δέχεται το σφάλμα ανάμεσα στο προκαθορισμένη τιμή πλην την διαφορά συχνότητας πολλαπλασιασμένη με τον στατισμό της μονάδας. Όσο η παραγόμενη ισχύς είναι ίση με την ζήτηση η ροή του άξονα είναι σταθερή, δηλαδή συνεχώς οι θάλαμοι καύσης τροφοδοτούνται με ίσες ποσότητες καυσίμου ίδιας πυκνότητας. Μόλις διαταραχθεί η ισορροπία ανάμεσα στην παραγόμενη και την ζητούμενη ισχύ η ΜΕΚ αντιδρά ώστε να την επαναφέρει.

Μετά από ανάλυση των βαθμίδων της μηχανής εσωτερικής καύσης προκύπτει η συνάρτηση μεταφοράς της.

$$\frac{\Delta P_M(s)}{\Delta P_{sp}(s) - \frac{\Delta f(s)}{R_H}} = \frac{K_D(1+T_{D1}s)}{(1+T_{D2}s)(1+T_{D3}s)} \quad (7.21)$$

όπου:

R_D κλίση της χαρακτηριστικής καμπύλης συχνότητας-φορτίου της μονάδας, ή στατισμός

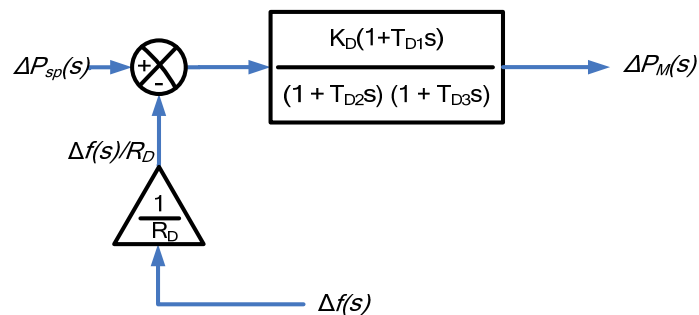
K_D κέρδος του ρυθμιστή στροφών

T_{D1} χρονική σταθερά του ρυθμιστή στροφών

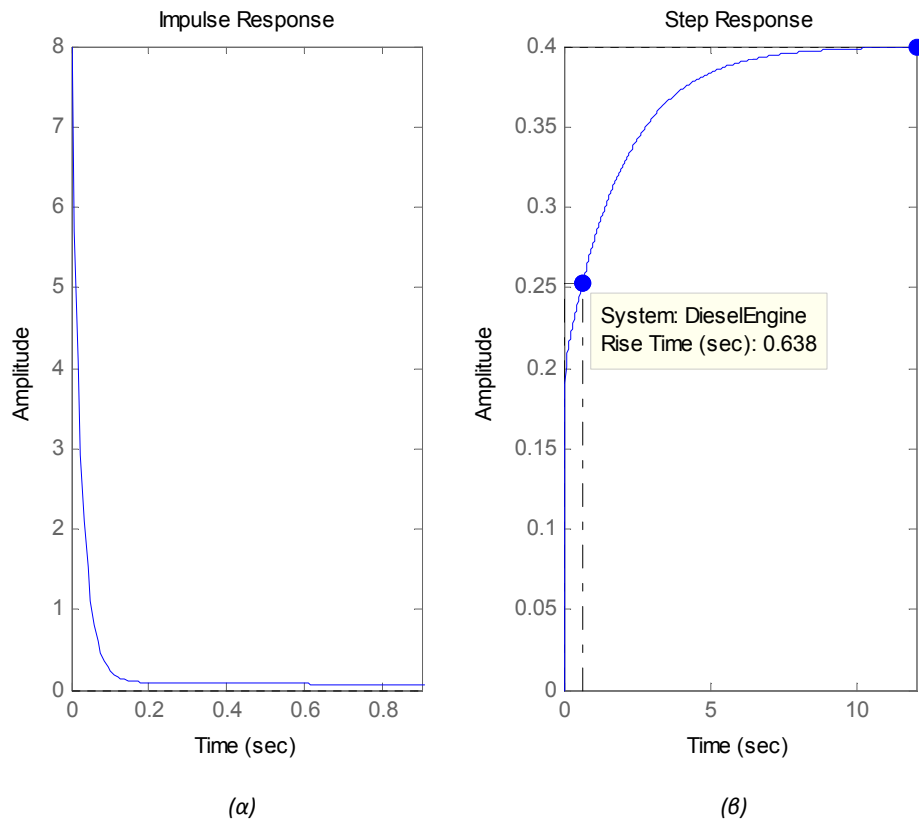
T_{D2} χρονική σταθερά του ρυθμιστή στροφών

T_{D3} χρονική σταθερά του ρυθμιστή στροφών

Σύμφωνα με όσα αναφέρθηκαν προκύπτει το μπλοκ διάγραμμα της μηχανής εσωτερικής καύσης στο Σχ. 7.31 και η κρουστική και βηματική του απόκριση στο Σχ. 7.32.



Σχ. 7.31. Μπλοκ διάγραμμα της βαθμίδας της μηχανής εσωτερικής καύσης σε ντιζελοηλεκτρικό σταθμό.



Σχ. 7.32. Κρουστική (α) και βηματική (β) απόκριση του υποσυστήματος της μηχανής εσωτερικής καύσης.

7.4.2. Το Υποσύστημα Γεννήτριας

Εδώ εξετάζεται η βαθμίδα που μοντελοποιεί την μετατροπή της μηχανικής ενέργειας στον άξονα της ΜΕΚ σε ηλεκτρική. Η συνάρτηση μεταφοράς της βαθμίδας αυτής είναι πρώτου βαθμού με μοναδιαίο κέρδος και περιγράφεται από την Εξ. 7.22.

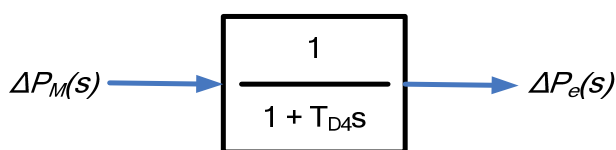
$$\frac{\Delta P_e(s)}{\Delta P_M(s)} = \frac{1}{1 + T_{D4}s} \quad (7.22)$$

όπου:

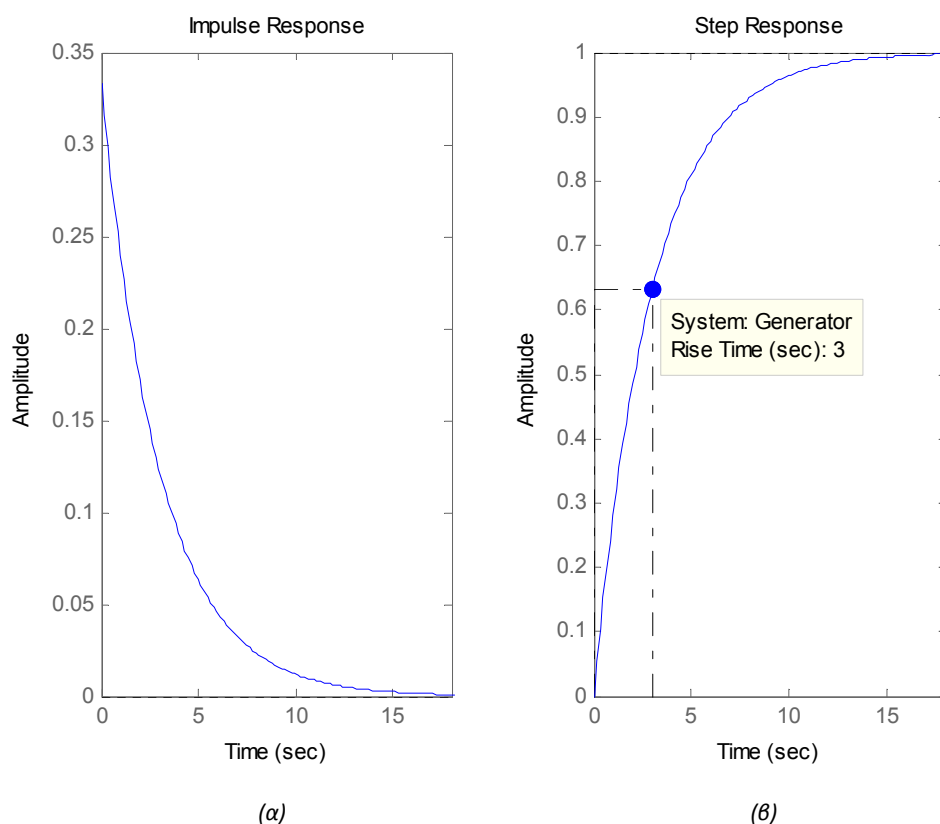
T_{D4} Η σταθερά χρόνου της βαθμίδας.

Ακολουθεί το μπλοκ διάγραμμα της βαθμίδας της γεννήτριας στο Σχ. 7.33 και η κρουστική και βηματική της απόκριση στο (α) (β)

Σχ. 7.34.



Σχ. 7.33. Μπλοκ διάγραμμα της βαθμίδας της γεννήτριας σε ντιζελοηλεκτρικό σταθμό.



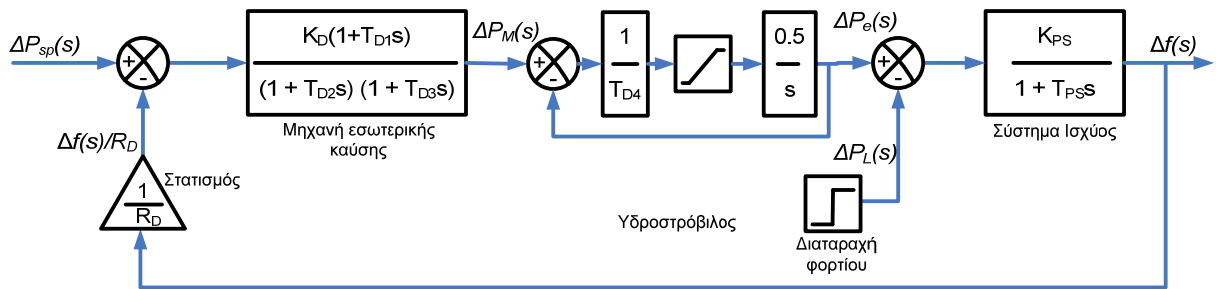
Σχ. 7.34. Κρουστική (α) και βηματική (β) απόκριση του υποσυστήματος της γεννήτριας.

7.4.3. Το Υποσύστημα Φορτίου – Συστήματος Ισχύος

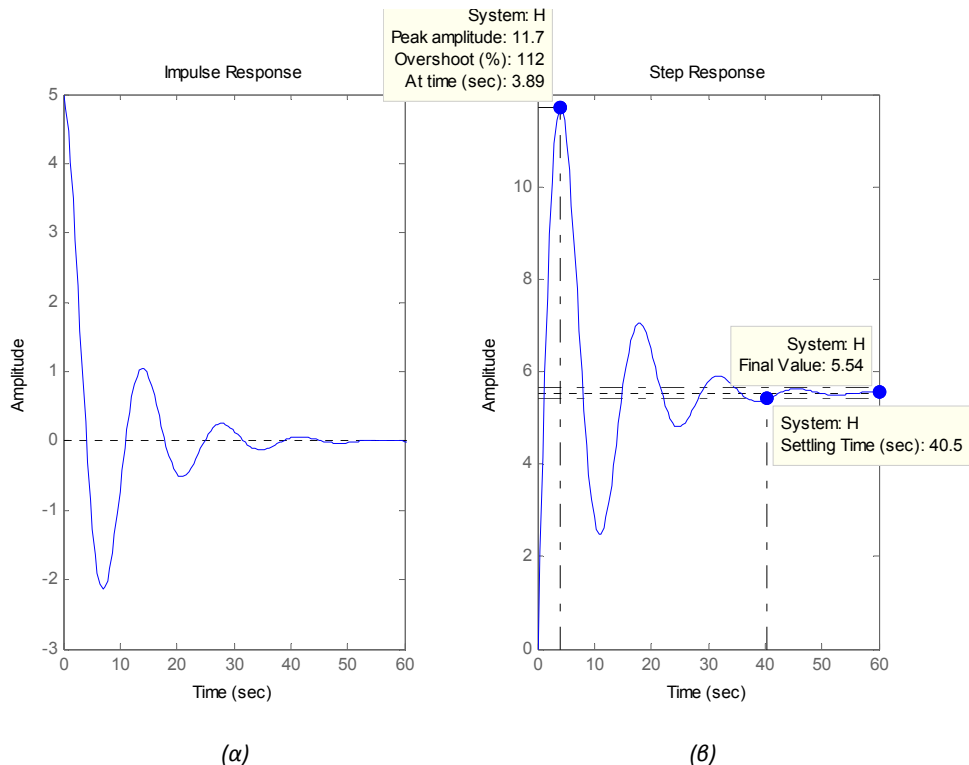
Το υποσύστημα αυτό είναι κοινό σε όλα τα συστήματα και δεν θα αναλυθεί ξανά. Ισχύουν όσα και στις παραγράφους 7.1.3, 7.2.5 και 7.3.3.

7.4.4. Σύνθεση Του μοντέλου

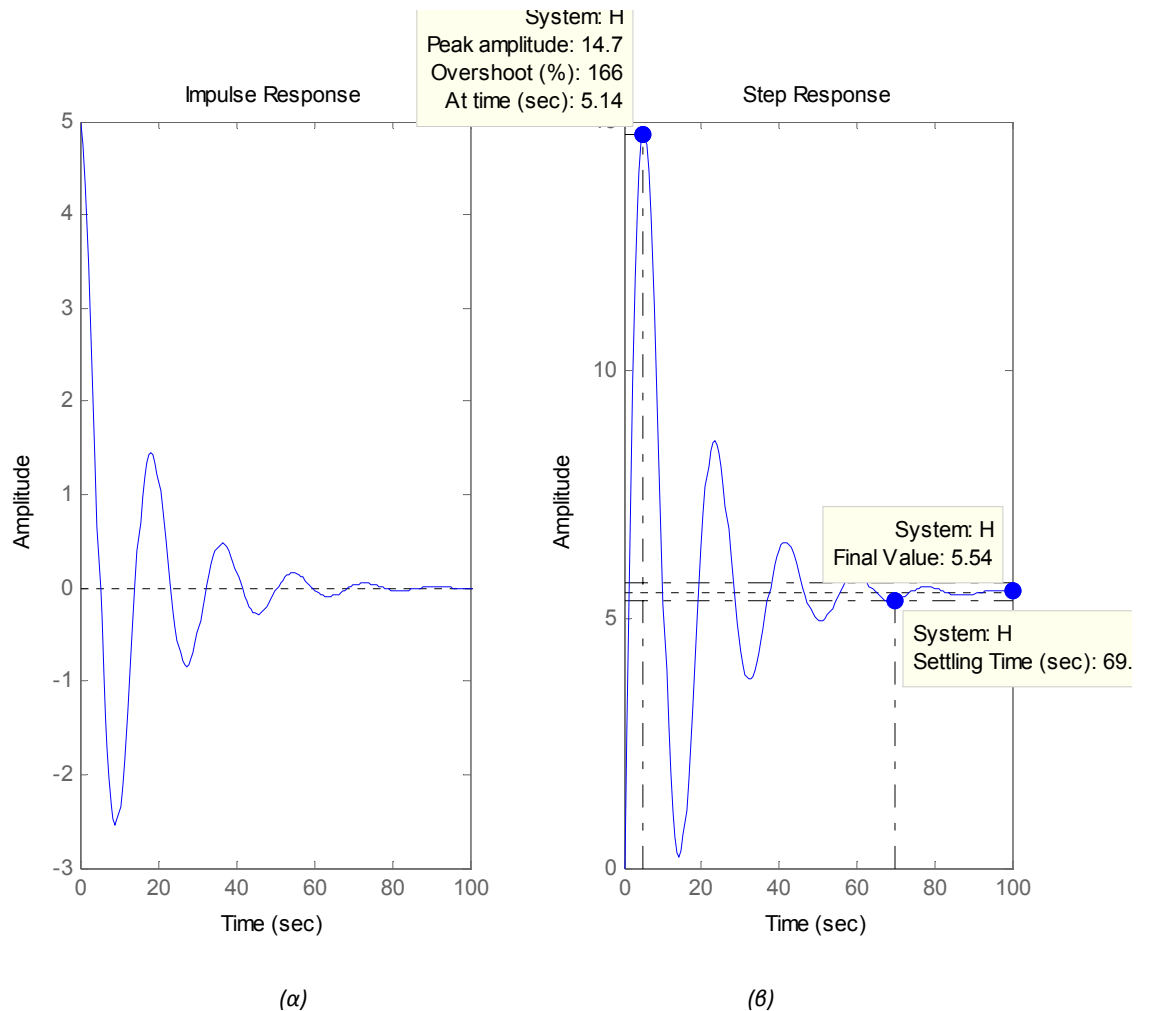
Σύμφωνα με όσα αναφέρθηκαν το μοντέλο του ντιζελοηλεκτρικού σταθμού είναι της μορφής που φαίνεται στο Σχ. 7.30. Για λόγους πληρότητας το μοντέλο αυτό εξετάστηκε επίσης λαμβάνοντας υπόψη την παράμετρο του περιορισμού του ρυθμού παραγωγής. Ο Πίνακας 8 περιέχει τις τιμές των διαφόρων παραμέτρων και για τα δύο μοντέλα, όπως χρησιμοποιήθηκαν για τις προσομοιώσεις.



Σχ. 7.35. Διάγραμμα βαθμίδων ντιζελοηλεκτρικού σταθμού που λαμβάνει υπόψη τον περιορισμό του ρυθμού παραγωγής.



Σχ. 7.36. Κρουστική (α) και βηματική (β) απόκριση του συστήματος του ντιζελοηλεκτρικού σταθμού χωρίς τον περιορισμό του ρυθμού παραγωγής με είσοδο, την είσοδο διαταραχής.



Σχ. 7.37. Κρουστική (α) και βηματική (β) απόκριση του συστήματος του ντιζελοηλεκτρικού σταθμού με περιορισμό του ρυθμού παραγωγής και με είσοδο, την είσοδο διαταραχής.

Πίνακας 8. Τυπικές τιμές παραμέτρων ντιζελοηλεκτρικού σταθμού.

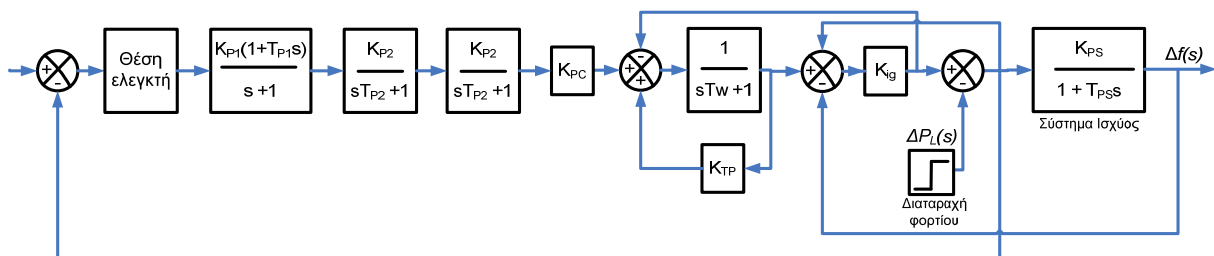
R_D	K_D	T_{d1}	T_{d2}	T_{d3}	T_{d4}	K_{PS}	T_{PS}	Saturation
5	0,4	1	2	0,025	3	72	14,4	-
5	0,4	1	2	0,025	3	72	14,4	$\pm\infty$
Hz/puMW	-	sec	sec	sec	sec	Hz/puMW	sec	-

7.5. Μοντελοποίηση Αιολικών πάρκων

Τα αιολικά πάρκα είναι η μοναδικά περίπτωση μονάδας παραγωγής στην οποία η χρήση του ελέγχου φορτίου – συχνότητας δεν φαίνεται να έχει νόημα, αφού δεν μπορεί να ελεγχθεί η ένταση του ανέμου. Παρόλα αυτά όντως έχει νόημα να εξεταστούν και τα αιολικά πάρκα σαν μονάδα παραγωγής με δυνατότητα ελέγχου φορτίου – συχνότητας αφού είναι δυνατόν να ρυθμιστεί η κλίση των πτερυγίων ώστε να εκμεταλλεύονται αποδοτικότερα ή λιγότερο αποδοτικά την ενέργεια του ανέμου. Το μοντέλο αυτό μπορεί να γίνει ακόμα πιο σύνθετο αν εξεταστούν και οι διαταραχές λόγω τυχαίων ρυθμών ανέμου, αλλά αυτό δεν θα εξεταστεί σε αυτή την πτυχιακή εργασία. Ακόμα, τα διάφορα υποσυστήματα του μοντέλου θα εξεταστούν όλα μαζί στην επόμενη παράγραφο αφού λόγω πολυπλοκότητας δεν ήταν δυνατό να γίνει μεμονωμένα. Να αναφερθεί ακόμα ότι οι αιολικές μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, προφανώς δεν μπορούν να είναι οι μοναδική πηγή ενέργειας ενός συστήματος. Για αυτό το λόγο εξετάζονται παντού σε συνδυασμό με τουλάχιστον ένα ακόμα είδος μονάδων παραγωγής, δηλαδή, σε μικτά μοντέλα.

7.5.1. Ανάλυση Των Υποσυστημάτων Και Σύνθεση Του Μοντέλου

Όπως είναι εμφανές από το Σχ. 7.38 η πολυπλοκότητα του μοντέλου είναι σαφώς μεγαλύτερη σε σχέση με όσα έχουν παρουσιαστεί μέχρι τώρα. Τα πρώτα τέσσερα μπλοκ μοντελοποιούν τα υδραυλικά συστήματα για την μετάδοση της κίνησης και τον έλεγχο της κλίσης των πτερυγίων. Τα επόμενα έχουν να κάνουν με τα χαρακτηριστικά του έλικα και την μετατροπή της ενέργειας από αιολική αρχικά σε μηχανική και στην συνέχεια σε ηλεκτρική. Δεν αποτελεί εξαίρεση αυτό το μοντέλο όσο αφορά την σύνδεση του με το φορτίο, αφού ακολουθεί την ίδια λογική με όλα τα προηγούμενα.



Σχ. 7.38. Διάγραμμα βαθμίδων ενός αιολικού πάρκου.

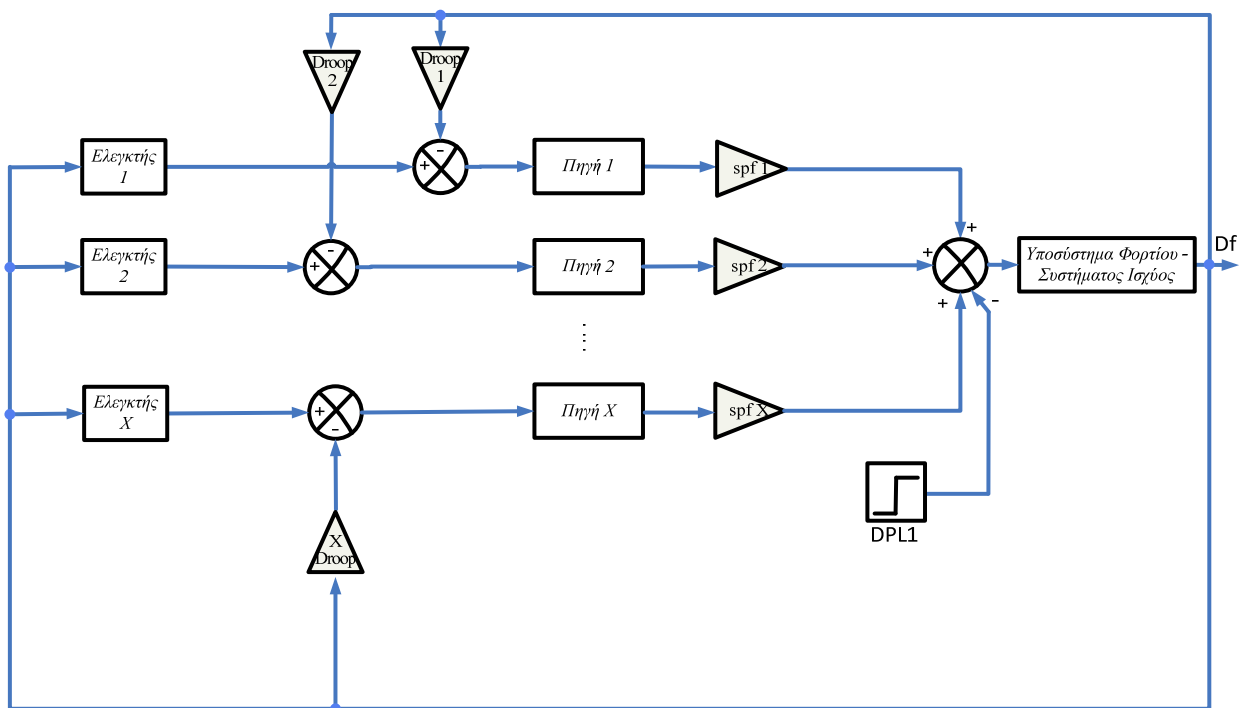
Τέλος δίνονται οι τιμές των παραμέτρων των υποσυστημάτων οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν.

Πίνακας 9. Τυπικές τιμές παραμέτρων αιολικού πάρκου.

T_W	K_{PC}	K_{P1}	T_{P1}	K_{P2}	T_{P2}	K_{P3}	T_{P3}	K_{PS}	T_{PS}
4	0,08	1.25	0.6	1	0.041	1.4	1	72	14,4
sec	puMW/deg	-	sec	-	sec	-	sec	Hz/puMW	sec

8. Εισαγωγή

Στο Κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα συστήματα που μελετήθηκαν, αναλύθηκαν, μοντελοποιήθηκαν και προσομοιώθηκαν με τις διάφορες παραλλαγές τους όπου υπάρχουν. Επίσης θα γίνει μια μορφή κωδικοποίησης αφού λόγω του μεγάλου όγκου είναι δύσκολο να αναφέρεται ολόκληρη η περιγραφή του συστήματος κάθε φορά που θα εξετάζεται. Έχει γίνει ένας διαχωρισμός στις πέντε βασικές κατηγορίες συστημάτων που εξετάζονται, δηλαδή, για καθεστώς μη απελευθερωμένης αγοράς υπάρχουν συστήματα από μια ως και τέσσερις περιοχές και ακόμα υπάρχουν τα συστήματα που υπακούν στο μοντέλο της απελευθερωμένης αγοράς όπως αναλύθηκε σε προηγούμενα Κεφάλαια. Για κάθε μια από αυτές τις κατηγορίες θα δίνεται ένα γενικό σχηματικό διάγραμμα και ένας πίνακας στον οποίο αναλύονται τα χαρακτηριστικά του κάθε συστήματος και η κωδική ονομασία του. Θα πρέπει σε αυτό το σημείο να αναφερθεί η χρήση των συντελεστών συμμετοχής πηγών (source participation factor, spf), οι οποίοι χρησιμοποιούνται για τα συστήματα με περισσότερα από ένα είδος πηγών ανά περιοχή ελέγχου. Οι συντελεστές συμμετοχής πηγών διαιρούν σε ίσα μέρη την ισχύ των φορτίων κάθε περιοχής ώστε όλες οι μονάδες να εξυπηρετούν ισοδύναμα ένα μέρος της ζήτησης. Για παράδειγμα σε ένα σύστημα μιας περιοχής με δύο είδη πηγών ο συντελεστής συμμετοχής κάθε πηγής θα είναι 0.5 αντίστοιχα αν υπήρχαν τρία είδη πηγών θα ήταν 1/3, όπως φαίνεται και στο Σχ. 8.1.

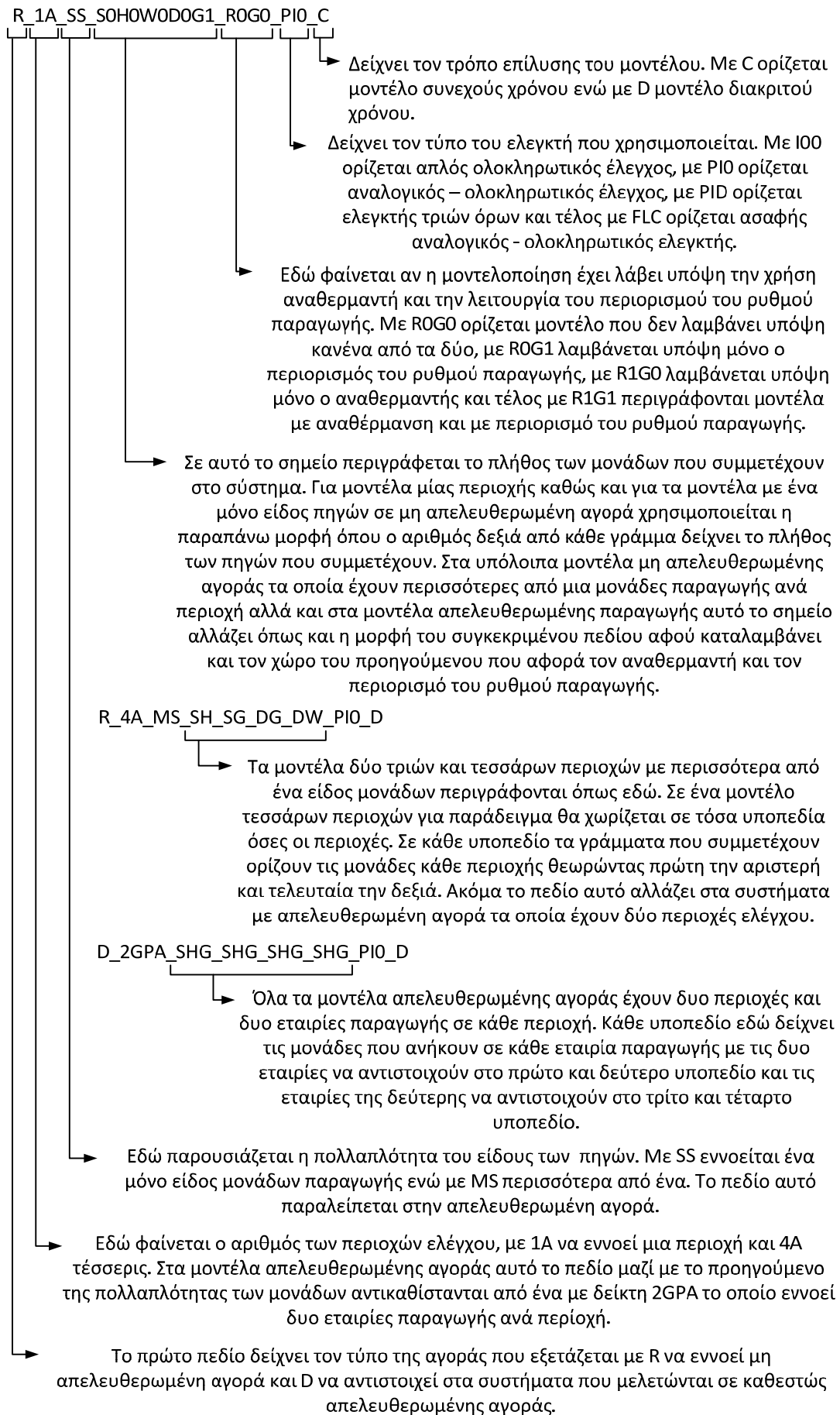


Σχ. 8.1. Σχηματική διάταξη συστημάτων μιας περιοχής με ένα ή περισσότερα είδη πηγών.

Τέλος, θα γίνει αναφορά στα είδη των ελεγκτών που χρησιμοποιούνται και αντίστοιχα ορίζεται ειδική κωδικοποίηση και για αυτούς. Αν συντεθεί η κωδικοποίηση του μοντέλου με αυτή του ελεγκτή δίνεται ο πλήρης μοναδικός κωδικός κάθε συστήματος που μελετήθηκε. Η σύνθεση γίνεται ως εξής:

Κωδικός συστήματος_κωδικός ελεγκτή

Όπως φαίνεται και παρακάτω:



Εικ. 8.1. Τρόπος κωδικοποίησης συστημάτων σε σχηματική μορφή για την καλύτερη εξοικείωση με τις κωδικές ονομασίες.

Επισημαίνεται ότι τα μοντέλα στα οποία θα χρησιμοποιηθεί ο ασαφής ελεγκτής έχουν το σύμβολο (*) κάτω από την κωδική ονομασία τους στην Παράγραφο 8.1, καθώς και ότι τα είδη των μονάδων που χρησιμοποιούνται είναι ατμοστροβλικές που θα συμβολίζονται με S, υδροστροβλικές που θα συμβολίζονται με H, ντιζελοηλεκτρικές που θα συμβολίζονται με D, ανεμογεννήτριες που θα συμβολίζονται με W και αεριοστροβλικές που θα συμβολίζονται με G.

8.1. Ανάλυση Και Κωδικοποίηση Συστημάτων

Για καθεστώς μη απελευθερωμένης αγοράς και για μοντέλα μιας περιοχής.

Τα μοντέλα που περιγράφονται εδώ ακολουθούν την λογική του Σχ. 8.1 ενώ οι ιδιομορφίες κάθε περίπτωσης εξηγούνται παρακάτω. Να αναφερθεί ότι στις βαθμίδες που ονομάζονται “πηγή” συνδέονται τα μοντέλα των μονάδων παραγωγής που περιγράφονται στο Κεφάλαιο 7.

R_1A_SS_S0H0D0W0G1_ROG0	Μοντέλο μίας περιοχής σε καθεστώς μη απελευθερωμένης αγοράς όπου η παραγωγή ενέργειας γίνεται από ένα μόνο είδος πηγής. Το είδος της μονάδας παραγωγής είναι αεριοστρόβιλος.
R_1A_SS_S0H1D0W0G0_ROG0	Μοντέλο μίας περιοχής σε καθεστώς μη απελευθερωμένης αγοράς όπου η παραγωγή ενέργειας γίνεται από ένα μόνο είδος πηγής. Το είδος της μονάδας παραγωγής είναι υδροστρόβιλος.
R_1A_SS_S1H0D0W0G0_ROG0	Μοντέλο μίας περιοχής σε καθεστώς μη απελευθερωμένης αγοράς όπου η παραγωγή ενέργειας γίνεται από ένα μόνο είδος πηγής. Το είδος της μονάδας παραγωγής είναι ατμοστρόβιλος.
R_1A_SS_S1H0D0W0G0_R1G1 (*)	Μοντέλο μίας περιοχής σε καθεστώς μη απελευθερωμένης αγοράς όπου η παραγωγή ενέργειας γίνεται από ένα μόνο είδος πηγής. Το είδος της μονάδας παραγωγής είναι ατμοστρόβιλος. Εδώ συμπεριλαμβάνονται οι βαθμίδες αναθέρμανσης (R) και περιορισμού του ρυθμού παραγωγής (G) .
R_1A_SS_S0H0D1W0G0_ROG0	Μοντέλο μίας περιοχής σε καθεστώς μη απελευθερωμένης αγοράς όπου η παραγωγή ενέργειας γίνεται από ένα μόνο είδος πηγής. Το είδος της μονάδας παραγωγής είναι εμβολοφόρος MEK η οποία καταναλώνει ντήζελ.
R_1A_SS_S0H0D1W0G0_ROG1	Μοντέλο μίας περιοχής σε καθεστώς μη απελευθερωμένης αγοράς όπου η παραγωγή ενέργειας γίνεται από ένα μόνο είδος πηγής. Το είδος της μονάδας παραγωγής είναι εμβολοφόρος MEK η οποία καταναλώνει ντήζελ. Εδώ συμπεριλαμβάνεται η βαθμίδα περιορισμού του ρυθμού παραγωγής (G) .
R_1A_MS_S0H0D1W1G0	Μοντέλο μίας περιοχής σε καθεστώς μη απελευθερωμένης αγοράς όπου η παραγωγή ενέργειας γίνεται από περισσότερα από ένα είδη πηγής . Το είδος των μονάδων παραγωγής είναι εμβολοφόρος MEK η οποία καταναλώνει ντήζελ και ανεμογεννήτρια.
R_1A_MS_S0D1H1W0G0 (*)	Μοντέλο μίας περιοχής σε καθεστώς μη απελευθερωμένης αγοράς όπου η παραγωγή ενέργειας γίνεται από περισσότερα από ένα είδη πηγής . Το είδος των μονάδων παραγωγής είναι εμβολοφόρος MEK η οποία καταναλώνει ντήζελ και υδροστρόβιλος.
R_1A_MS_S0D1H1W1G0	Μοντέλο μίας περιοχής σε καθεστώς μη απελευθερωμένης αγοράς όπου η παραγωγή ενέργειας γίνεται από περισσότερα από ένα είδη πηγής . Το είδος των μονάδων παραγωγής είναι εμβολοφόρος MEK η οποία καταναλώνει ντήζελ, υδροστρόβιλος και ανεμογεννήτρια.
R_1A_MS_S1D0H0W1G0	Μοντέλο μίας περιοχής σε καθεστώς μη απελευθερωμένης αγοράς όπου η παραγωγή ενέργειας γίνεται από περισσότερα από ένα είδη πηγής . Το είδος των μονάδων παραγωγής είναι εμβολοφόρος MEK η οποία καταναλώνει ντήζελ και ανεμογεννήτρια.
R_1A_MS_S1D0H1W0G0	Μοντέλο μίας περιοχής σε καθεστώς μη απελευθερωμένης αγοράς όπου η παραγωγή ενέργειας γίνεται από περισσότερα από ένα είδη πηγής . Το είδος των μονάδων παραγωγής είναι ατμοστρόβιλος και υδροστρόβιλος.
R_1A_MS_S1D0H1W0G1	Μοντέλο μίας περιοχής σε καθεστώς μη απελευθερωμένης αγοράς όπου η παραγωγή ενέργειας γίνεται από περισσότερα από ένα είδη πηγής . Το είδος

	των μονάδων παραγωγής είναι ατμοστρόβιλος, υδροστρόβιλος αεριοστρόβιλος.
R_1A_MS_S1D0H1W1G0	Μοντέλο μίας περιοχής σε καθεστώς μη απελευθερωμένης αγοράς όπου η παραγωγή ενέργειας γίνεται από περισσότερα από ένα είδη πηγής. Το είδος των μονάδων παραγωγής είναι ατμοστρόβιλος, υδροστρόβιλος ανεμογεννήτρια.
R_1A_MS_S1D1H0W0G0	Μοντέλο μίας περιοχής σε καθεστώς μη απελευθερωμένης αγοράς όπου η παραγωγή ενέργειας γίνεται από περισσότερα από ένα είδη πηγής. Το είδος των μονάδων παραγωγής είναι εμβολοφόρος MEK η οποία καταναλώνει ντήζελ και ατμοστρόβιλος.
R_1A_MS_S1D1H0W1G0	Μοντέλο μίας περιοχής σε καθεστώς μη απελευθερωμένης αγοράς όπου η παραγωγή ενέργειας γίνεται από περισσότερα από ένα είδη πηγής. Το είδος των μονάδων παραγωγής είναι εμβολοφόρος MEK η οποία καταναλώνει ντήζελ, ατμοστρόβιλος και ανεμογεννήτρια.
R_1A_MS_S1D1H1W0G0	Μοντέλο μίας περιοχής σε καθεστώς μη απελευθερωμένης αγοράς όπου η παραγωγή ενέργειας γίνεται από περισσότερα από ένα είδη πηγής. Το είδος των μονάδων παραγωγής είναι εμβολοφόρος MEK η οποία καταναλώνει ντήζελ, ατμοστρόβιλος και υδροστρόβιλος.
R_1A_MS_S1D1H1W1G0	Μοντέλο μίας περιοχής σε καθεστώς μη απελευθερωμένης αγοράς όπου η παραγωγή ενέργειας γίνεται από περισσότερα από ένα είδη πηγής. Το είδος των μονάδων παραγωγής είναι εμβολοφόρος MEK η οποία καταναλώνει ντήζελ, ατμοστρόβιλος, υδροστρόβιλος και ανεμογεννήτρια.

Για καθεστώς μη απελευθερωμένης αγοράς και για μοντέλα δύο περιοχών.

Εδώ εισάγεται από πλευράς μοντελοποίησης η έννοια της διασύνδεσης διαφορετικών περιοχών ελέγχου. Οι παράμετροι που αφορούν την μοντελοποίηση αναφέρονται στο Σχ. 8.2 και παρουσιάζονται στον επόμενο πίνακα. Ακόμα στο Σχ. 8.2 φαίνονται οι ελεγχόμενες μεταβλητές των οποίων οι χρονοαποκρίσεις θα παρουσιαστούν στο Κεφάλαιο 9.

Πίνακας 10. Τυπικές τιμές παραμέτρων για διασύνδεση συστημάτων δύο περιοχών.

a121= a122	T12	B1=B2
-1	0.086	0.425

R_2A_SS_S0H0D0W0G2_ROG0	Μοντέλο δύο περιοχών σε καθεστώς μη απελευθερωμένης αγοράς όπου η παραγωγή ενέργειας γίνεται από ένα μόνο είδος πηγής. Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας γίνεται από έναν αεριοστρόβιλο σε κάθε περιοχή.
R_2A_SS_S0H2D0W0G0_ROG0	Μοντέλο δύο περιοχών σε καθεστώς μη απελευθερωμένης αγοράς όπου η παραγωγή ενέργειας γίνεται από ένα μόνο είδος πηγής. Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας γίνεται από έναν υδροστρόβιλο σε κάθε περιοχή.
R_2A_SS_S2H0D0W0G0_R1G1	Μοντέλο δύο περιοχών σε καθεστώς μη απελευθερωμένης αγοράς όπου η παραγωγή ενέργειας γίνεται από ένα μόνο είδος πηγής. Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας γίνεται από έναν ατμοστρόβιλο σε κάθε περιοχή. Εδώ συμπεριλαμβάνονται οι βαθμίδες αναθέρμανσης (R) και περιορισμού του ρυθμού παραγωγής (G).
R_2A_SS_S0H0D2W0G0_ROG1 (*)	Μοντέλο δύο περιοχών σε καθεστώς μη απελευθερωμένης αγοράς όπου η παραγωγή ενέργειας γίνεται από ένα μόνο είδος πηγής. Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας γίνεται από μια εμβολοφόρο MEK η οποία καταναλώνει ντήζελ σε κάθε περιοχή. Εδώ συμπεριλαμβάνεται η βαθμίδα περιορισμού του ρυθμού παραγωγής (G).
R_2A_MS_SDG_SHW	Μοντέλο δύο περιοχών σε καθεστώς μη απελευθερωμένης αγοράς όπου η παραγωγή ενέργειας γίνεται από περισσότερα από ένα είδη πηγής. Η πρώτη περιοχή τροφοδοτείται από έναν ατμοστρόβιλο, έναν αεριοστρόβιλο και μια εμβολοφόρο MEK που καταναλώνει ντήζελ. Η δεύτερη περιοχή τροφοδοτείται

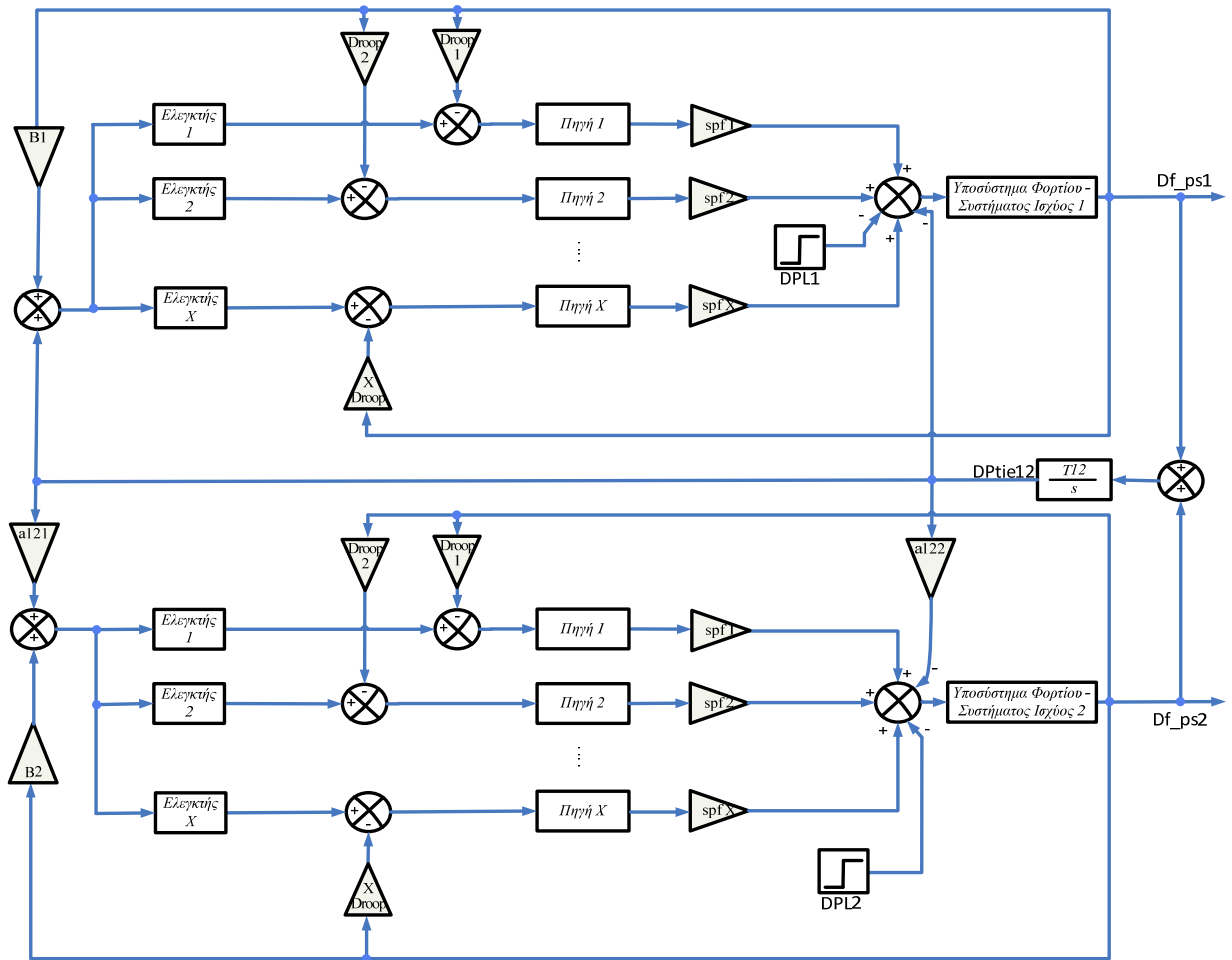
R_2A_MS_SDW_SDH

από έναν ατμοστρόβιλο, έναν υδροστρόβιλο και μια ανεμογεννήτρια.

Μοντέλο δύο περιοχών σε καθεστώς μη απελευθερωμένης αγοράς όπου η παραγωγή ενέργειας γίνεται από περισσότερα από ένα είδη πηγής. Η πρώτη περιοχή τροφοδοτείται από έναν ατμοστρόβιλο, μια ανεμογεννήτρια και μια εμβολοφόρο ΜΕΚ που καταναλώνει ντίζελ. Η δεύτερη περιοχή τροφοδοτείται από έναν ατμοστρόβιλο, έναν υδροστρόβιλο και μια εμβολοφόρο ΜΕΚ που καταναλώνει ντίζελ.

R_2A_MS_SHG_WD

Μοντέλο δύο περιοχών σε καθεστώς μη απελευθερωμένης αγοράς όπου η παραγωγή ενέργειας γίνεται από περισσότερα από ένα είδη πηγής. Η πρώτη περιοχή τροφοδοτείται από έναν ατμοστρόβιλο, έναν αεριοστρόβιλο και έναν αεριοστρόβιλο. Η δεύτερη περιοχή τροφοδοτείται από μια εμβολοφόρο ΜΕΚ που καταναλώνει ντίζελ και μια ανεμογεννήτρια.



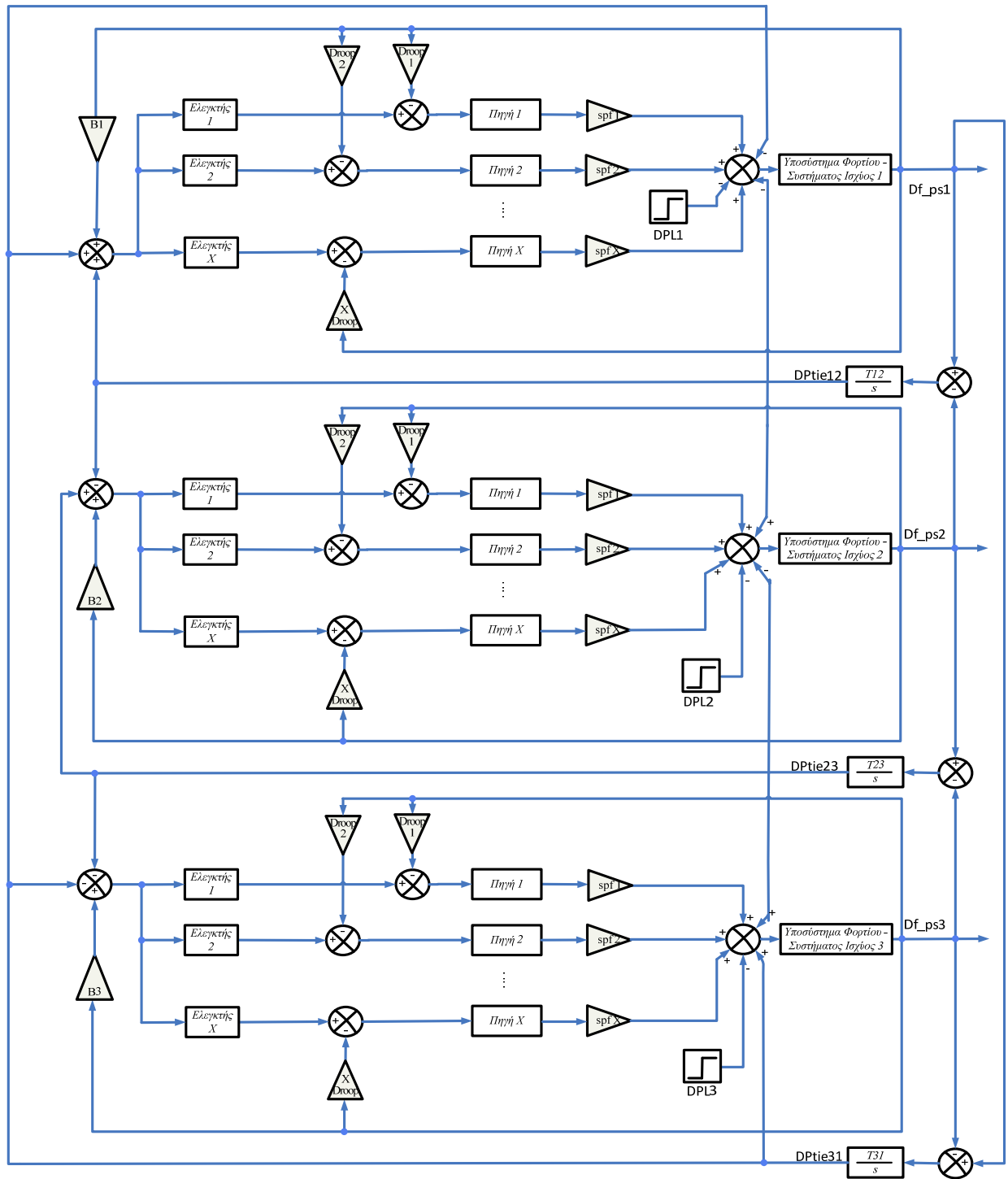
Σχ. 8.2. Σχηματική διάταξη συστημάτων δυο περιοχών με ένα ή περισσότερα είδη πηγών.

Για καθεστώς μη απελευθερωμένης αγοράς και για μοντέλα τριών περιοχών.

Τα μοντέλα που περιγράφονται σε αυτό το σημείο αντιπροσωπεύουν συστήματα με τρεις περιοχές ελέγχου διασυνδεδεμένες μεταξύ τους με κυκλικό τρόπο και όχι σειριακά. Αυτό επιτρέπει την μεταφορά ισχύος από ανάμεσα σε δυο περιοχές χωρίς την συμμετοχή της τρίτης. Για την καλύτερη κατανόηση των συστημάτων που μελετήθηκαν δίνεται το Σχ. 8.3.

Πίνακας 11. Τυπικές τιμές παραμέτρων για διασύνδεση συστημάτων τριών περιοχών.

$T12=T23=T31$	$B1=B2=B3$
0.086	0.425



Σχ. 8.3. Σχηματική διάταξη συστημάτων τριών περιοχών με ένα ή περισσότερα είδη πηγών.

- R_3A_SS_S0H0D0W0G3_ROG0 Μοντέλο τριών περιοχών σε καθεστώς μη απελευθερωμένης αγοράς όπου η παραγωγή ενέργειας γίνεται από ένα μόνο είδος πηγής. Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας γίνεται από έναν αεριοστρόβιλο σε κάθε περιοχή.
- R_3A_SS_S0H3D0W0G0_ROG0 Μοντέλο τριών περιοχών σε καθεστώς μη απελευθερωμένης αγοράς όπου η παραγωγή ενέργειας γίνεται από ένα μόνο είδος πηγής. Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας γίνεται από έναν υδροστρόβιλο σε κάθε περιοχή.
- R_3A_SS_S3H0D0W0G0_R1G1 Μοντέλο τριών περιοχών σε καθεστώς μη απελευθερωμένης αγοράς όπου η παραγωγή ενέργειας γίνεται από ένα μόνο είδος πηγής. Η παραγωγή

ηλεκτρικής ενέργειας γίνεται από έναν ατμοστρόβιλο σε κάθε περιοχή. Εδώ συμπεριλαμβάνονται οι βαθμίδες αναθέρμανσης (R) και περιορισμού του ρυθμού παραγωγής (G).

- R_3A_SS_S0H0D3W0G0_ROG1 Μοντέλο τριών περιοχών σε καθεστώς μη απελευθερωμένης αγοράς όπου η παραγωγή ενέργειας γίνεται από ένα μόνο είδος πηγής. Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας γίνεται από μια εμβολοφόρο MEK η οποία καταναλώνει ντήζελ σε κάθε περιοχή. Εδώ συμπεριλαμβάνεται η βαθμίδα περιορισμού του ρυθμού παραγωγής (G).
- R_3A_MS_SHG_SDW_SHW Μοντέλο τριών περιοχών σε καθεστώς μη απελευθερωμένης αγοράς όπου η παραγωγή ενέργειας γίνεται από περισσότερα από ένα είδη πηγής. Η πρώτη περιοχή τροφοδοτείται από έναν ατμοστρόβιλο, έναν υδροστρόβιλο και έναν αεριοστρόβιλο. Η δεύτερη περιοχή τροφοδοτείται από έναν ατμοστρόβιλο, μια εμβολοφόρο MEK που καταναλώνει ντήζελ και μια ανεμογεννήτρια. Η τρίτη περιοχή τροφοδοτείται από έναν ατμοστρόβιλο, έναν υδροστρόβιλο και μια ανεμογεννήτρια.

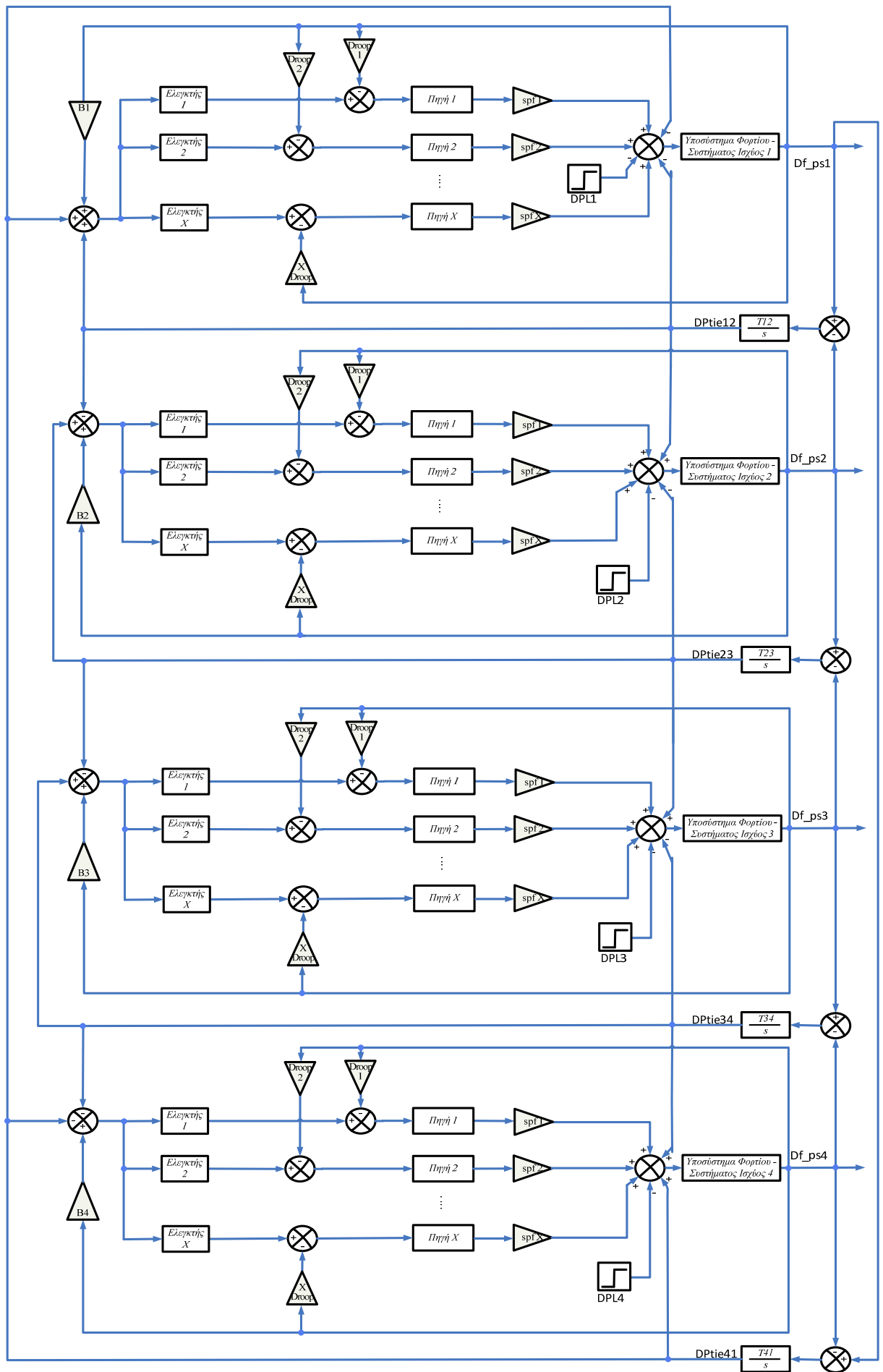
Για καθεστώς μη απελευθερωμένης αγοράς και για μοντέλα τεσσάρων περιοχών.

Οι περιπτώσεις που περιγράφονται εδώ αφορούν συστήματα με τέσσερις περιοχές ελέγχου τα οποία μοντελοποιούνται όπως φαίνεται στο Σχ. 8.4, ενώ οι παράμετροι τους που αφορούν στην διασύνδεση αναμεσα στις περιοχές παρουσιάζονται στον Πίνακας 12.

Πίνακας 12. Τυπικές τιμές παραμέτρων για διασύνδεση συστημάτων τεσσάρων περιοχών.

T12=T23=T34=T41	B1=B2=B3=B4
0.086	0.425

- R_4A_SS_S0H0D0W0G4_ROG0 Μοντέλο τριών περιοχών σε καθεστώς μη απελευθερωμένης αγοράς όπου η παραγωγή ενέργειας γίνεται από ένα μόνο είδος πηγής. Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας γίνεται από έναν αεριοστρόβιλο σε κάθε περιοχή.
- R_4A_SS_S0H4D0W0G0_ROG0 (*) Μοντέλο τεσσάρων περιοχών σε καθεστώς μη απελευθερωμένης αγοράς όπου η παραγωγή ενέργειας γίνεται από ένα μόνο είδος πηγής. Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας γίνεται από έναν υδροστρόβιλο σε κάθε περιοχή.
- R_4A_SS_S4H0D0W0G0_R1G1 Μοντέλο τεσσάρων περιοχών σε καθεστώς μη απελευθερωμένης αγοράς όπου η παραγωγή ενέργειας γίνεται από ένα μόνο είδος πηγής. Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας γίνεται από έναν ατμοστρόβιλο σε κάθε περιοχή. Εδώ συμπεριλαμβάνονται οι βαθμίδες αναθέρμανσης (R) και περιορισμού του ρυθμού παραγωγής (G).
- R_4A_SS_S0H0D4W0G0_ROG1 Μοντέλο τεσσάρων περιοχών σε καθεστώς μη απελευθερωμένης αγοράς όπου η παραγωγή ενέργειας γίνεται από ένα μόνο είδος πηγής. Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας γίνεται από μια εμβολοφόρο MEK η οποία καταναλώνει ντήζελ σε κάθε περιοχή. Εδώ συμπεριλαμβάνεται η βαθμίδα περιορισμού του ρυθμού παραγωγής (G).
- R_4A_MS_SH_SG_DG_DW Μοντέλο τεσσάρων περιοχών σε καθεστώς μη απελευθερωμένης αγοράς όπου η παραγωγή ενέργειας γίνεται από περισσότερα από ένα είδη πηγής. Η πρώτη περιοχή τροφοδοτείται από έναν ατμοστρόβιλο και έναν υδροστρόβιλο. Η δεύτερη περιοχή τροφοδοτείται από έναν ατμοστρόβιλο και έναν αεριοστρόβιλο. Η τρίτη περιοχή τροφοδοτείται από μια εμβολοφόρο MEK που καταναλώνει ντήζελ και έναν αεριοστρόβιλο. Η τέταρτη περιοχή τροφοδοτείται από μια εμβολοφόρο MEK που καταναλώνει ντήζελ και μια ανεμογεννήτρια.



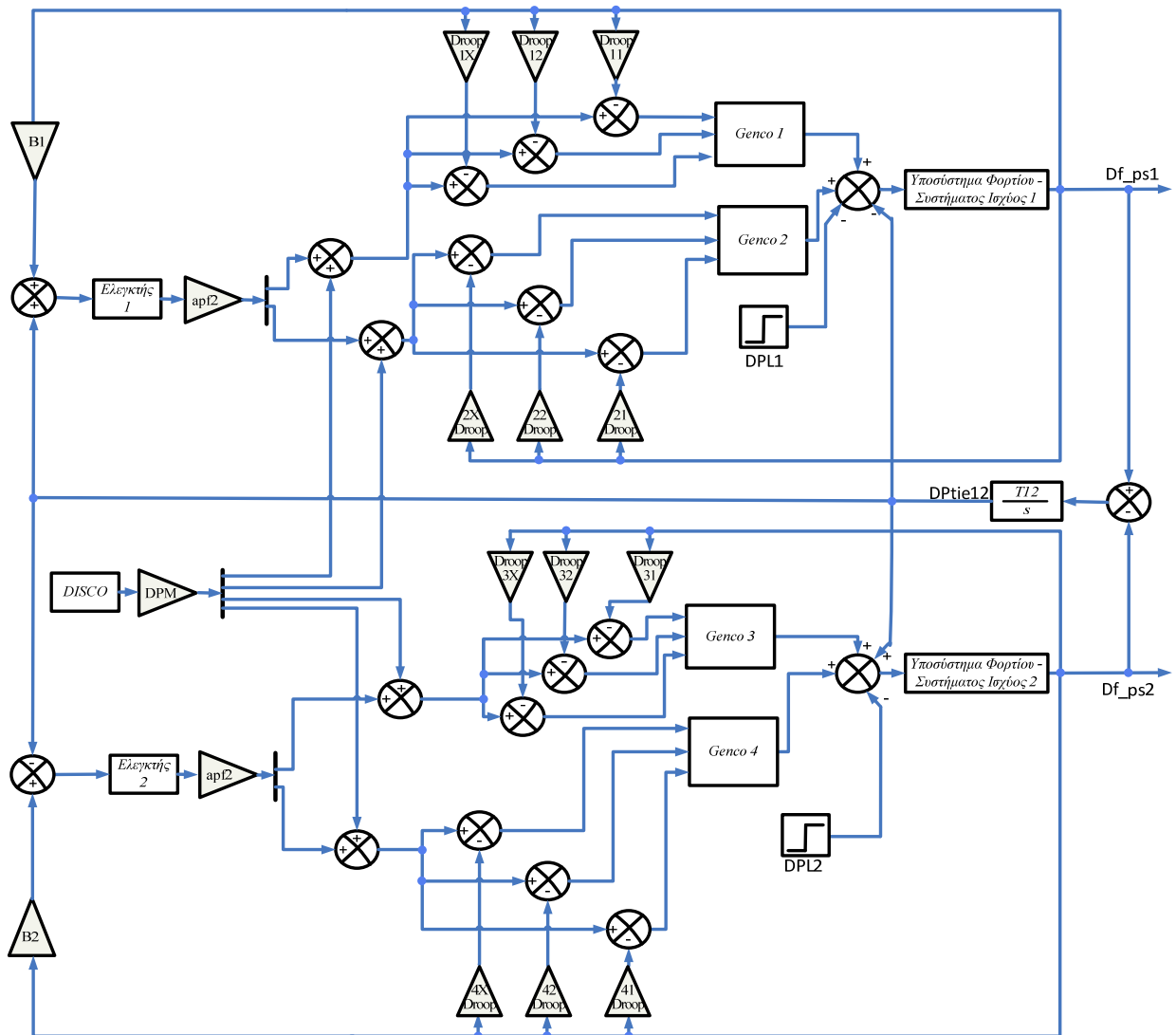
Σχ. 8.4. Σχηματική διάταξη συστημάτων τεσσάρων περιοχών με ένα ή περισσότερα είδη πηγών.

Για καθεστώς απελευθερωμένης αγοράς και για μοντέλα δυο περιοχών. Κάθε περιοχή έχει δυο εταιρείες παραγωγής και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας.

Εδώ εξετάζονται συστήματα στα οποία ισχύει καθεστώς απελευθερωμένης αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας και μοντελοποιούνται όπως αναφέρεται στο Κεφάλαιο 3. Παρόλα αυτά δεν παύουν να είναι συστήματα δυο περιοχών και άρα οι παράμετροι διασύνδεσης δίνονται από τον Πίνακα 9. Θα πρέπει να αναφερθεί ότι ο πίνακας συμμετοχής περιοχής (ar_f) ο οποίος έχει αναφερθεί ότι είναι μια μήτρα 1x4 χωρίζεται στο μοντέλο αυτό σε ar_{f1} και ar_{f2} οι οποίοι είναι πίνακες 1x2 και ο πρώτος αποτελείται από τα δύο πρώτα στοιχεία του ar_f και ο δεύτερος από τα δύο τελευταία. Η γραφική αναπαράσταση του μοντέλου φαίνεται στο Σχ. 8.5.

D_2GPA_S_S_S_S	Μοντέλο δυο περιοχών σε καθεστώς απελευθερωμένης αγοράς όπου η παραγωγή ενέργειας γίνεται από τέσσερις εταιρείες παραγωγής. Η πρώτη και η δεύτερη εταιρεία ανήκει στην πρώτη περιοχή ενώ, η τρίτη και η τέταρτη ανήκουν στην δεύτερη περιοχή. Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας γίνεται από έναν ατμοστρόβιλο σε κάθε εταιρεία παραγωγής.
D_2GPA_S_H_S_H	Μοντέλο δυο περιοχών σε καθεστώς απελευθερωμένης αγοράς όπου η παραγωγή ενέργειας γίνεται από τέσσερις εταιρείες παραγωγής. Η πρώτη και η δεύτερη εταιρεία ανήκει στην πρώτη περιοχή ενώ, η τρίτη και η τέταρτη ανήκουν στην δεύτερη περιοχή. Η πρώτη εταιρεία παραγωγής χρησιμοποιεί έναν ατμοστρόβιλο για την παραγωγή ενέργειας που της αντιστοιχεί. Η δεύτερη εταιρεία παραγωγής χρησιμοποιεί έναν υδροστρόβιλο για την παραγωγή ενέργειας που της αντιστοιχεί. Η τρίτη εταιρεία παραγωγής χρησιμοποιεί έναν ατμοστρόβιλο για την παραγωγή ενέργειας που της αντιστοιχεί. Η τέταρτη εταιρεία παραγωγής χρησιμοποιεί έναν υδροστρόβιλο για την παραγωγή ενέργειας που της αντιστοιχεί.
D_2GPA_S_G_S_G	Μοντέλο δυο περιοχών σε καθεστώς απελευθερωμένης αγοράς όπου η παραγωγή ενέργειας γίνεται από τέσσερις εταιρείες παραγωγής. Η πρώτη και η δεύτερη εταιρεία ανήκει στην πρώτη περιοχή ενώ, η τρίτη και η τέταρτη ανήκουν στην δεύτερη περιοχή. Η πρώτη εταιρεία παραγωγής χρησιμοποιεί έναν ατμοστρόβιλο για την παραγωγή ενέργειας που της αντιστοιχεί. Η δεύτερη εταιρεία παραγωγής χρησιμοποιεί έναν αεριοστρόβιλο για την παραγωγή ενέργειας που της αντιστοιχεί. Η τρίτη εταιρεία παραγωγής χρησιμοποιεί έναν ατμοστρόβιλο για την παραγωγή ενέργειας που της αντιστοιχεί. Η τέταρτη εταιρεία παραγωγής χρησιμοποιεί έναν αεριοστρόβιλο για την παραγωγή ενέργειας που της αντιστοιχεί.
D_2GPA_S_G_S_D	Μοντέλο δυο περιοχών σε καθεστώς απελευθερωμένης αγοράς όπου η παραγωγή ενέργειας γίνεται από τέσσερις εταιρείες παραγωγής. Η πρώτη και η δεύτερη εταιρεία ανήκει στην πρώτη περιοχή ενώ, η τρίτη και η τέταρτη ανήκουν στην δεύτερη περιοχή. Η πρώτη εταιρεία παραγωγής χρησιμοποιεί έναν ατμοστρόβιλο για την παραγωγή ενέργειας που της αντιστοιχεί. Η δεύτερη εταιρεία παραγωγής χρησιμοποιεί μια εμβολοφόρο ΜΕΚ που καταναλώνει ντήζελ για την παραγωγή ενέργειας που της αντιστοιχεί. Η τρίτη εταιρεία παραγωγής χρησιμοποιεί έναν ατμοστρόβιλο για την παραγωγή ενέργειας που της αντιστοιχεί. Η τέταρτη εταιρεία παραγωγής χρησιμοποιεί μια εμβολοφόρο ΜΕΚ που καταναλώνει ντήζελ για την παραγωγή ενέργειας που της αντιστοιχεί.
D_2GPA_SHG_SHG_SHG_SHG	Μοντέλο δυο περιοχών σε καθεστώς απελευθερωμένης αγοράς όπου η παραγωγή ενέργειας γίνεται από τέσσερις εταιρείες παραγωγής. Η πρώτη και η δεύτερη εταιρεία ανήκει στην πρώτη περιοχή ενώ, η τρίτη και η τέταρτη ανήκουν στην δεύτερη περιοχή. Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας γίνεται από έναν ατμοστρόβιλο, έναν υδροστρόβιλο και έναν αεριοστρόβιλο σε κάθε εταιρεία παραγωγής.
D_2GPA_SH_SG_SD_SS (*)	Μοντέλο δυο περιοχών σε καθεστώς απελευθερωμένης αγοράς όπου η παραγωγή ενέργειας γίνεται από τέσσερις εταιρείες παραγωγής. Η πρώτη και η δεύτερη εταιρεία ανήκει στην πρώτη περιοχή ενώ, η τρίτη και η τέταρτη ανήκουν στην δεύτερη περιοχή. Η πρώτη εταιρεία παραγωγής χρησιμοποιεί έναν ατμοστρόβιλο και έναν υδροστρόβιλο για την παραγωγή ενέργειας που

της αντιστοιχεί. Η δεύτερη εταιρεία παραγωγής χρησιμοποιεί έναν ατμοστρόβιλο και έναν αεριοστρόβιλο για την παραγωγή ενέργειας που της αντιστοιχεί. Η τρίτη εταιρεία παραγωγής χρησιμοποιεί έναν ατμοστρόβιλο και μια εμβολοφόρο ΜΕΚ που καταναλώνει ντίζελ για την παραγωγή ενέργειας που της αντιστοιχεί. Η τέταρτη εταιρεία παραγωγής χρησιμοποιεί δυο ατμοστρόβιλους για την παραγωγή ενέργειας που της αντιστοιχεί.



Σχ. 8.5. Γραφική αναπαράσταση διαγράμματος βαθμίδων που αναπαριστά σύστημα δυο περιοχών σε καθεστώς απελευθέρωσης της αγοράς.

8.2. Ανάλυση Και Κωδικοποίηση Ελεγκτών

Ανάλογα με τον ελεγκτή που χρησιμοποιείται και τον τρόπο επίλυσης του μοντέλου (συνεχή και διακριτού χρόνου) δημιουργείται μια κατάληξη η οποία συνοδεύει τις κωδικοποιήσεις που αναφέρθηκαν μέχρι αυτό το σημείο.

..._I00_C
..._I00_D

Ο απλός ολοκληρωτικός ελεγκτής χρησιμοποιείται για τον έλεγχο φορτίου συχνότητας είτε σε συνεχή χρόνο οπότε έχει κατάληξη C, είτε σε διακριτό οπότε έχει κατάληξη D. Αυτοί οι δυο ελεγκτές χρησιμοποιούνται μόνο στα μοντέλα μιας περιοχής στα οποία υπάρχει ένα είδος μονάδων παραγωγής.

Θεωρείται ότι λόγω της απλότητας των μοντέλων θα μπορούσε να δώσει ικανοποιητικά αποτελέσματα αλλά όσο αυξάνεται η πολυπλοκότητα τους θα είναι δύσκολο να παράγει μια ανταγωνιστική λύση.

..._PIO_C

..._PIO_D

Ένας αναλογικός – ολοκληρωτικός ελεγκτής χρησιμοποιείται σε όλα τα μοντέλα που συντέθηκαν στην διακριτή του μορφή ενώ για τα μοντέλα μιας περιοχής ελέγχου με ένα μόνο είδος μονάδων παραγωγής εξετάζεται και η συνεχής εκδοχή του.

..._PID_C

..._PID_D

Ένας ελεγκτής τριών όρων χρησιμοποιείται σε όλα τα μοντέλα που συντέθηκαν στην διακριτή του μορφή ενώ για τα μοντέλα μιας περιοχής ελέγχου με ένα μόνο είδος μονάδων παραγωγής εξετάζεται και η συνεχής εκδοχή του.

..._FLC_D

Ο ασαφής ελεγκτής που περιγράφεται στην Παράγραφο 5.1.4 χρησιμοποιείται για 5 από τα μοντέλα που δημιουργήθηκαν τα οποία θεωρήθηκε ότι θα προσφέρουν περισσότερο αντιπροσωπευτικά αποτελέσματα. Εδώ επιλέχθηκε μόνο η εκδοχή του ελεγκτή που χρησιμοποιεί διακριτό χρόνο αφού έχει πιο ρεαλιστική συμπεριφορά και για λόγους οικονομίας χώρου δεν θα ήταν εύκολο να εξεταστεί σε όλα τα μοντέλα και ιδιαίτερα στην περίπτωση του συνεχούς χρόνου.

ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΙΣ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

9. Εισαγωγή

Το Κεφάλαιο αυτό είναι αφιερωμένο στην οπτικοποίηση των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από αυτή τη πτυχιική εργασία. Τα αποτελέσματα αυτά είναι οι χρονοαποκρίσεις των συστημάτων που μοντελοποιούνται και προσομοιώνονται όπως έχουν περιγραφεί στα προηγούμενα Κεφάλαια. Εκτός από τις χρονοαποκρίσεις κάθε μοντέλου θα δοθούν πίνακες στους οποίους καταχωρούνται οι τιμές των παραμέτρων των ελεγκτών όπως υπολογίστηκαν από τον γενετικό αλγόριθμο. Ενώ, θα παρουσιαστούν για κάθε κριτήριο οι δείκτες επίδοσης ώστε να μπορεί να γίνει σύγκριση ανάμεσα στις συμπεριφορές των ελεγκτών σε κάθε μοντέλο. Για κάθε κριτήριο εξάγεται μια τιμή που αναπαριστά το πόσο “καλή” είναι η απόκριση του συστήματος. Το πρόβλημα είναι ότι επειδή κάθε κριτήριο δίνει τιμές διαφορετικής τάξης μεγέθους δεν είναι εύκολο να αξιοποιηθούν τα δεδομένα που εξάγονται. Για να γίνει ευκολότερα η σύγκριση ανάμεσα στα 5 κριτήρια που αναφέρθηκαν στο Κεφάλαιο 5 πρέπει οι αποκρίσεις να εξεταστούν με κοινή συνάρτηση για την εξαγωγή ενός δείκτη επίδοσης ο οποίος θα είναι συγκρίσιμος στις 5 περιπτώσεις. Ο δείκτης αυτός επιλέχθηκε να είναι το ολοκλήρωμα της απόλυτης τιμής της απόκρισης (Integral Absolute Error, IAE). Με αυτό τον τρόπο υπολογίζεται το εμβαδό που καταλαμβάνει η χρονοαπόκριση σε κάθε περίπτωση, ενώ είναι λογικό ότι όσο μικρότερος είναι ο δείκτης τόσο πιο “καλή” θεωρείται η απόκριση. Η καλύτερη απόκριση ενός μοντέλου για κάθε ελεγκτή κατά IAE θα φαίνεται με **bold** στους παρακάτω πίνακες.

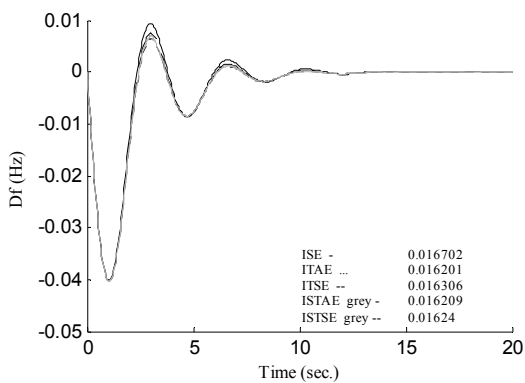
9.1. Συστήματα Μίας Περιοχής Σε Μη Απελευθερωμένη Αγορά

Εδώ εξετάζονται τα συστήματα στα οποία δεν έχει θεωρηθεί απελευθέρωση αγοράς και έτσι η εταιρία παραγωγής και διανομής δεν διαχωρίζονται. Θα παρουσιαστούν σε αυτό το εδάφιο μοντέλα μίας περιοχής, ενώ θα παρουσιαστεί πρώτα το απλούστερο μοντέλο με ένα είδος πηγών και η πολυπλοκότητα των συστημάτων που θα ακολουθούν θα είναι αύξουσα. Σε κάθε σύστημα που προσομοιώνεται δίνονται αποτελέσματα παραμέτρων για όλα τα είδη ελέγχου που εφαρμόστηκαν σε αυτό, καθώς και οι αντίστοιχοι δείκτες απόδοσης για κάθε κριτήριο που εξετάζεται αλλά και οι δείκτες απόδοσης όπως προκύπτουν μετά από αναγωγή (IAE). Στην συνέχεια θα παρατίθενται οι αντίστοιχες γραφικές χρονοαποκρίσεις.

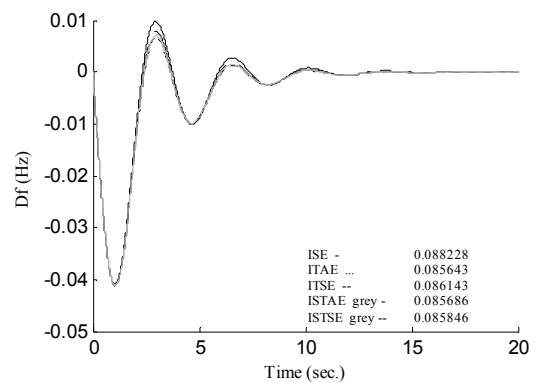
9.1.1. Μοναδική Πηγή Αεριοστροβλική Μονάδα

	ISE	ITAE	ITSE	ISTAE	ISTSE
<i>Ελεγκτής I συνεχής χρόνος (α)</i>					
<i>K_i</i>	-0.16635	-0.14504	-0.152793	-0.14619	-0.14883
<i>J</i>	0.384035	777.8385	11.134874	69910.69	457.726
<i>J</i> (IAE)	0.016702	0.016201	0.0163055	0.016209	0.01624
<i>Ελεγκτής I διακριτός χρόνος (β)</i>					
<i>K_i</i>	-0.15845	-0.13755	-0.14522	-0.13907	-0.14191
<i>J</i>	2.020091	20826.94	275.9853	10123485	59611.76
<i>J</i> (IAE)	0.088228	0.085643	0.086143	0.085686	0.085846

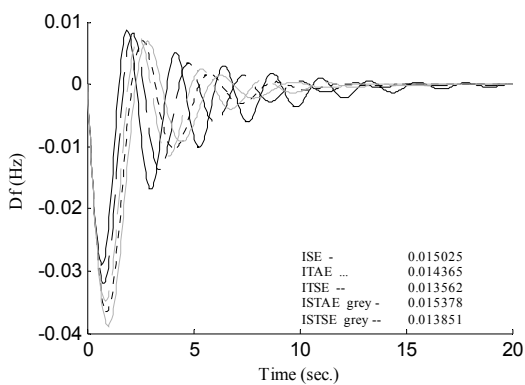
Ελεγκτής PI συνεχής χρόνος (γ)					
K_i	-0.18537	-0.1689	-0.19542	-0.15724	-0.18413
K_p	-0.48527	-0.10174	-0.29163	-0.03735	-0.1621
J	0.191056	736.2066	6.888425	69658.4	364.2319
$J(IAE)$	0.015025	0.014365	0.013562	0.015378	0.013851
Ελεγκτής PI διακριτός χρόνος (δ)					
K_i	-0.16212	-0.1477	-0.17004	-0.13135	-0.15927
K_p	-0.38035	-0.04741	-0.20398	0.029544	-0.08956
J	1.188189	20569.55	204.1263	10018863	54625.65
$J(IAE)$	0.084858	0.081249	0.076804	0.089438	0.07892
Ελεγκτής PID συνεχής χρόνος (ϵ)					
K_i	-1.99911	-1.9994	-1.99998	-1.31749	-1.99999
K_p	-2.19738	-1.70604	-1.98314	-1.31734	-1.8924
K_d	-1.11127	-0.69689	-1.00581	-0.46768	-0.93694
J	0.011464	43.02265	0.175122	1294.207	3.599907
$J(IAE)$	0.002149	0.002099	0.001914	0.0026	0.001902
Ελεγκτής PID διακριτός χρόνος (σ)					
K_i	-1.99992	-1.8973	-1.99998	-1.14047	-1.99999
K_p	-2.18359	-1.65841	-1.98488	-1.21235	-1.7613
K_d	-1.40549	-0.70639	-1.01093	-0.49679	-0.79175
J	0.031977	489.9013	1.579354	59526.36	106.3298
$J(IAE)$	0.007432	0.007037	0.006528	0.009018	0.006742



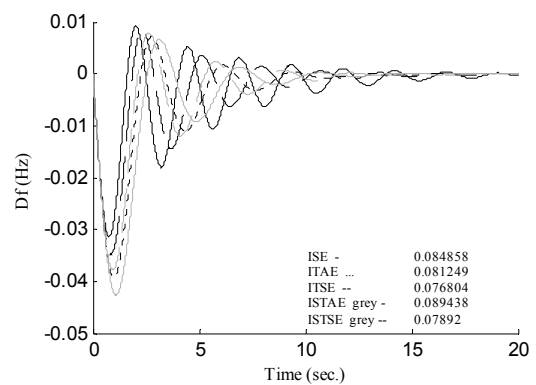
(α) R_1A_SS_S0H0D0W0G1_ROG0_I00_C



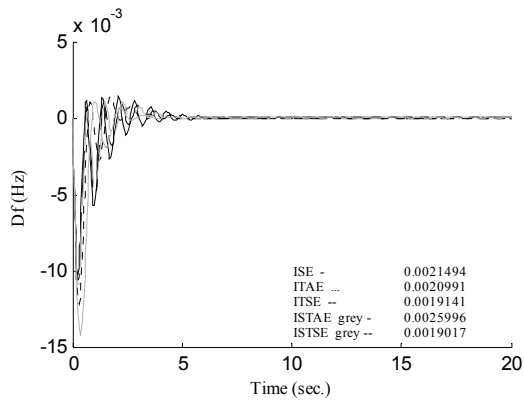
(β) R_1A_SS_S0H0D0W0G1_ROG0_I00_D



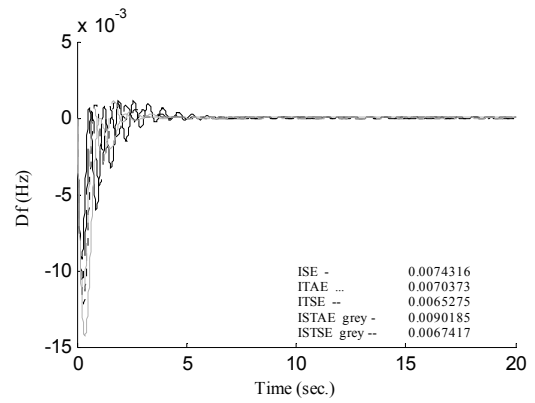
(γ) R_1A_SS_S0H0D0W0G1_ROG0_PIO_C



(δ) R_1A_SS_S0H0D0W0G1_ROG0_PIO_D



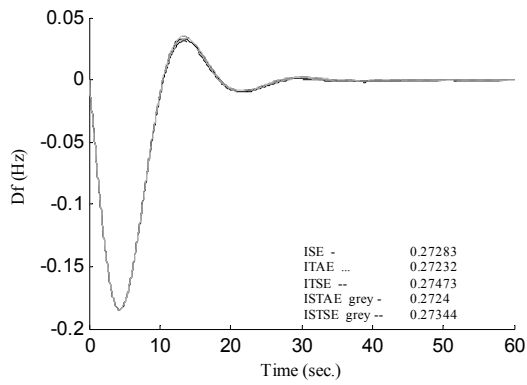
(ε) R_1A_SS_S0H0D0W0G1_ROG0_PID_C



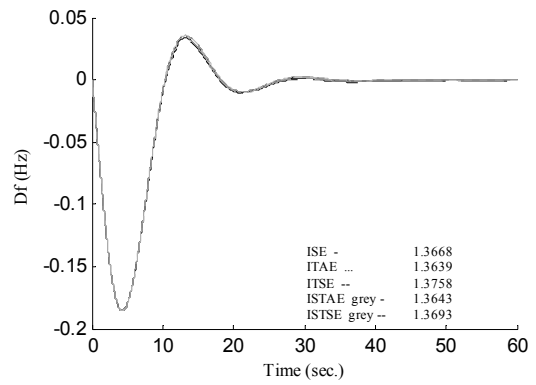
(στ) R_1A_SS_S0H0D0W0G1_ROG0_PID_D

9.1.2. Μοναδική Πηγή Υδροστρωβλική Μονάδα

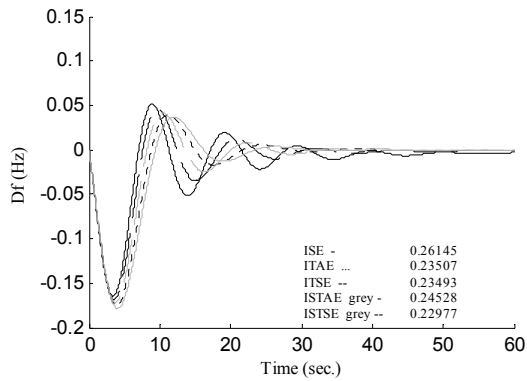
	ISE	ITAE	ITSE	ISTAE	ISTSE
<i>Ελεγκτής I συνεχής χρόνος (α)</i>					
K_i	-0.00956	-0.01006	-0.009	-0.0101	-0.00933
J	0.032855	37.9276	3.297944	8565.906	408.7237
$J(IAE)$	0.272828	0.272318	0.274727	0.272402	0.273439
<i>Ελεγκτής I διακριτός χρόνος (β)</i>					
K_i	-0.00953	-0.01007	-0.009	-0.01011	-0.00935
J	0.165012	932.5272	80.33434	1054737	48872.47
$J(IAE)$	1.36678	1.363904	1.375794	1.364252	1.36928
<i>Ελεγκτής PI συνεχής χρόνος (γ)</i>					
K_i	-0.00839	-0.01217	-0.01149	-0.01135	-0.01222
K_p	-0.26009	-0.08936	-0.19054	-0.05368	-0.13636
J	20.89261	32342.05	2023.16	7537091	260063.3
$J(IAE)$	0.261449	0.235073	0.234934	0.245282	0.229766
<i>Ελεγκτής PI διακριτός χρόνος (δ)</i>					
K_i	-0.00817	-0.01187	-0.01119	-0.01123	-0.0119
K_p	-0.24365	-0.07679	-0.17526	-0.04829	-0.12219
J	108.5936	820929.5	51562.83	9.63E+08	32993716
$J(IAE)$	1.337622	1.205273	1.202434	1.246573	1.177368
<i>Ελεγκτής PID συνεχής χρόνος (ε)</i>					
K_i	-0.05917	-0.02896	-0.05061	-0.027	-0.03707
K_p	-0.53882	-0.52815	-0.53435	-0.51306	-0.52017
K_d	-0.8	-0.72576	-0.87991	-0.69304	-0.78219
J	5.879955	6247.248	279.9499	767988.4	19782.15
$J(IAE)$	0.084308	0.083593	0.083767	0.085322	0.082767
<i>Ελεγκτής PID διακριτός χρόνος (στ)</i>					
K_i	-0.08431	-0.0292	-0.05084	-0.02705	-0.03705
K_p	-0.51187	-0.52506	-0.53089	-0.50932	-0.51581
K_d	-0.99072	-0.7375	-0.89075	-0.69811	-0.79348
J	27.35286	150027	6518.594	91933843	2247493
$J(IAE)$	0.455604	0.41731	0.417039	0.426916	0.413181



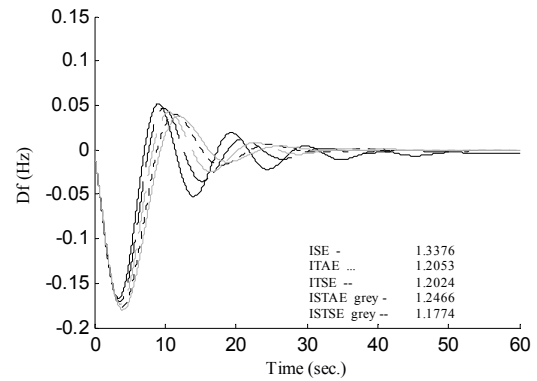
(α) R_1A_SS_S0H1D0W0G0_R0G0_I00_C



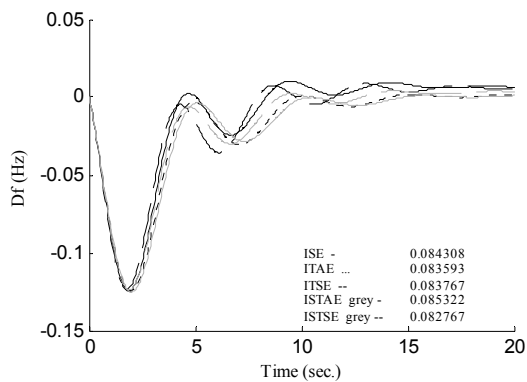
(β) R_1A_SS_S0H1D0W0G0_R0G0_I00_D



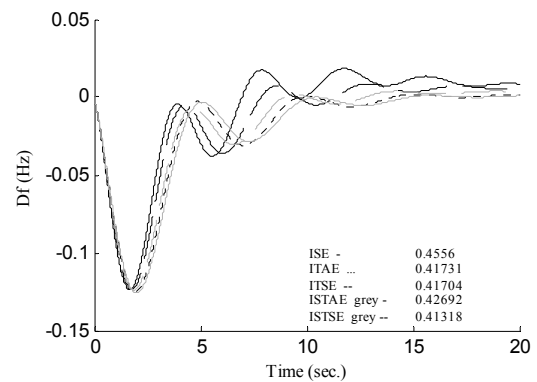
(γ) R_1A_SS_S0H1D0W0G0_R0G0_PIO_C



(δ) R_1A_SS_S0H1D0W0G0_R0G0_PIO_D



(ε) R_1A_SS_S0H1D0W0G0_R0G0_PID_C

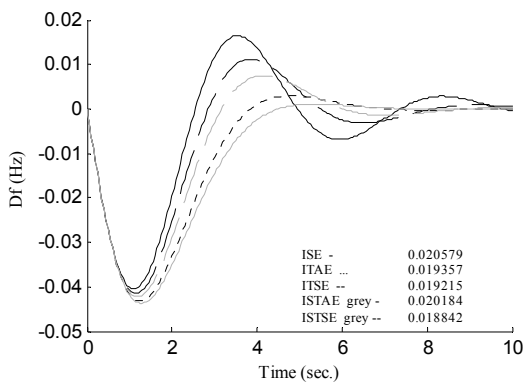


(σ) R_1A_SS_S0H1D0W0G0_R0G0_PID_D

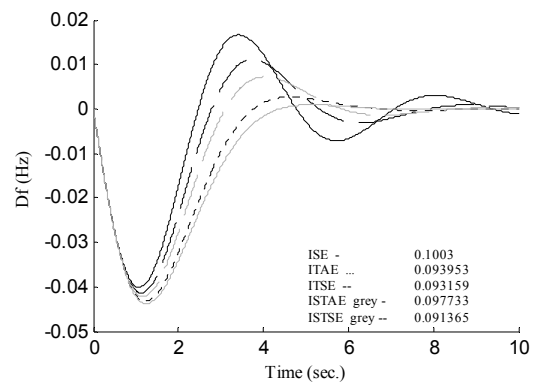
9.1.3. Μοναδική Πηγή Ατμοστροβλική Μονάδα Χωρίς Αναθέρμανση Και Χωρίς Περιορισμό Του Ρυθμού Παραγωγής

	ISE	ITAE	ITSE	ISTAE	ISTSE
<i>Ελεγκτής I συνεχής χρόνος (α)</i>					
K_i	-0.21739	-0.11604	-0.17427	-0.10297	-0.14708
J	0.000475	0.745026	0.015739	37.84195	0.626074
$J(IAE)$	0.020579	0.019357	0.019215	0.020184	0.018842
<i>Ελεγκτής I διακριτός χρόνος (β)</i>					
K_i	-0.22601	-0.11764	-0.17816	-0.10535	-0.149
J	0.002288	16.19247	0.339378	3778.623	62.05984
$J(IAE)$	0.100303	0.093953	0.093159	0.097733	0.091365

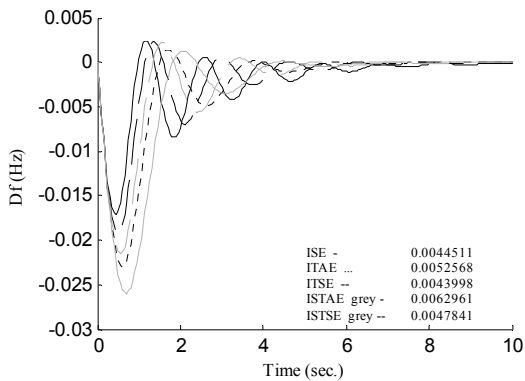
Ελεγκτής PI συνεχής χρόνος (γ)					
K_i	-0.4762	-0.39557	-0.49156	-0.32881	-0.45386
K_p	-1.0296	-0.45657	-0.75325	-0.30964	-0.55632
J	4.76E-05	0.170909	0.00112	8.60933	0.0357
$J(IAE)$	0.004451	0.005257	0.0044	0.006296	0.004784
Ελεγκτής PI διακριτός χρόνος (δ)					
K_i	-0.49714	-0.41024	-0.51324	-0.32303	-0.46572
K_p	-1.11506	-0.47663	-0.77944	-0.28571	-0.56032
J	0.000214	3.77903	0.022151	959.5326	3.417793
$J(IAE)$	0.02783	0.027186	0.025141	0.033355	0.02608
Ελεγκτής PID συνεχής χρόνος (ϵ)					
K_i	-3.99995	-3.60414	-3.99993	-3.42658	-3.99952
K_p	-3.99858	-2.25167	-3.98335	-2.19506	-3.48443
K_d	-1.36238	-0.35823	-0.97427	-0.35921	-0.68425
J	1.43E-06	0.005421	1.41E-05	0.063942	0.00017
$J(IAE)$	0.000576	0.000605	0.000562	0.000615	0.000575
Ελεγκτής PID διακριτός χρόνος ($\sigma\tau$)					
K_i	-3.99964	-3.99868	-3.99978	-3.98845	-3.99951
K_p	-3.99969	-2.45915	-3.99929	-2.49239	-2.88175
K_d	-2.52768	-0.46224	-0.90885	-0.47016	-0.57558
J	4.29E-06	0.075327	0.000176	3.567137	0.007569
$J(IAE)$	0.002949	0.002546	0.0025	0.002528	0.0025



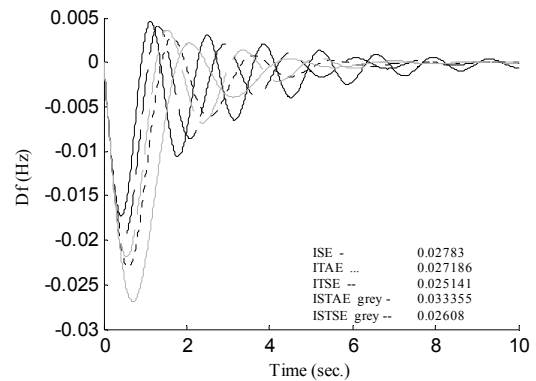
(α) R_1A_SS_S1H0D0W0G0_ROG0_I00_C



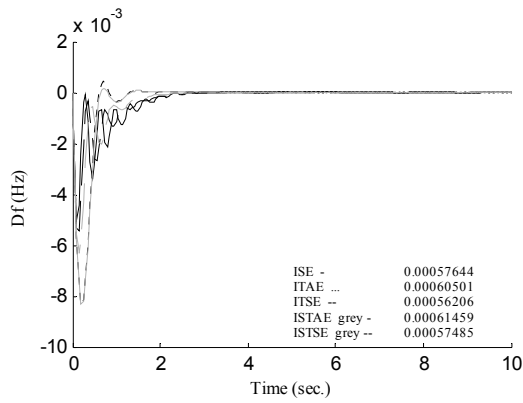
(β) R_1A_SS_S1H0D0W0G0_ROG0_I00_D



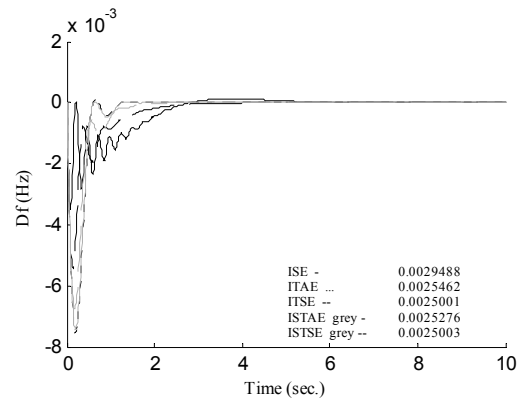
(γ) R_1A_SS_S1H0D0W0G0_ROG0_PI0_C



(δ) R_1A_SS_S1H0D0W0G0_ROG0_PI0_D



(ε) R_1A_SS_S1H0D0W0G0_ROG0_PID_C



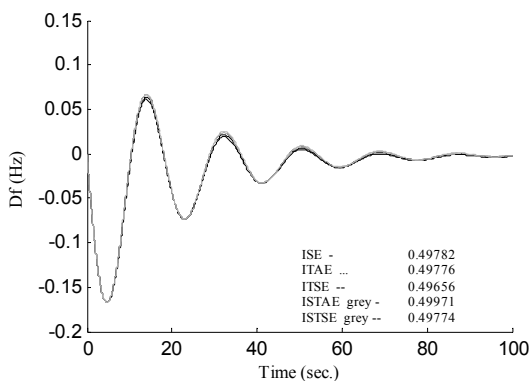
(στ) R_1A_SS_S1H0D0W0G0_ROG0_PID_D

9.1.4. Μοναδική Πηγή Ατμοστροβλική Μονάδα Με Αναθέρμανση Και Με Περιορισμό Του Ρυθμού Παραγωγής

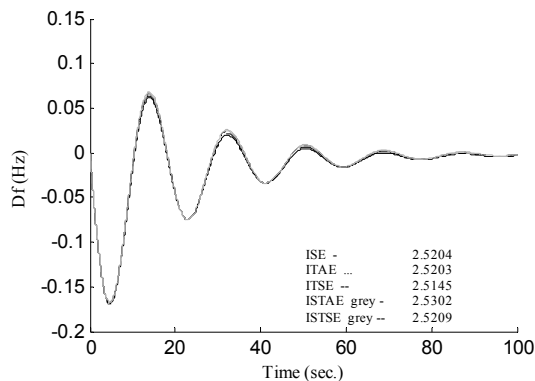
	ISE	ITAE	ITSE	ISTAE	ISTSE
<i>Ελεγκτής I συνεχής χρόνος (α)</i>					
K_i	-0.00561	-0.00633	-0.00593	-0.00655	-0.00632
J	0.039336	204.0855	8.165468	160639.5	3464.872
$J(IAE)$	0.497824	0.497762	0.496557	0.499713	0.497738
<i>Ελεγκτής I διακριτός χρόνος (β)</i>					
K_i	-0.00554	-0.00623	-0.00586	-0.00645	-0.00625
J	0.199243	5193.466	206.8709	20626089	445981.2
$J(IAE)$	2.520414	2.52035	2.51447	2.53018	2.520893
<i>Ελεγκτής PI συνεχής χρόνος (γ)</i>					
K_i	-0.00232	-0.01072	-0.00713	-0.01112	-0.01051
K_p	-0.99999	-0.74631	-0.94488	-0.43856	-0.75366
J	0.009941	174.6513	3.462164	159760	2255.646
$J(IAE)$	0.318398	0.323436	0.313232	0.359574	0.322666
<i>Ελεγκτής PI διακριτός χρόνος (δ)</i>					
K_i	-0.00282	-0.00841	-0.00806	-0.00856	-0.00898
K_p	-0.62702	-0.13641	-0.34662	-0.12763	-0.2263
J	0.073615	4629.28	121.192	19152340	337273.8
$J(IAE)$	1.982199	2.073987	1.885744	2.097112	1.954941
<i>Ελεγκτής PID συνεχής χρόνος (ε)</i>					
K_i	-0.07704	-0.12238	-0.09099	-0.12113	-0.10453
K_p	-0.99258	-0.96088	-0.99926	-0.90211	-0.99909
K_d	-0.99975	-0.9974	-0.99905	-0.99995	-0.99969
J	0.000895	2.832615	0.041973	411.0429	3.032459
$J(IAE)$	0.036847	0.034648	0.035035	0.035194	0.034185
<i>Ελεγκτής PID διακριτός χρόνος (στ)</i>					
K_i	-0.07528	-0.10031	-0.08569	-0.08545	-0.08564
K_p	-0.99975	-0.92986	-0.99746	-0.75476	-0.99957
K_d	-0.99945	-0.99997	-0.99762	-0.99975	-0.99982
J	0.005232	70.69583	1.135214	48870.01	385.9868
$J(IAE)$	0.190361	0.187162	0.185031	0.200123	0.184605

Ελεγκτής ασαφούς λογικής διακριτός χρόνος (ζ)

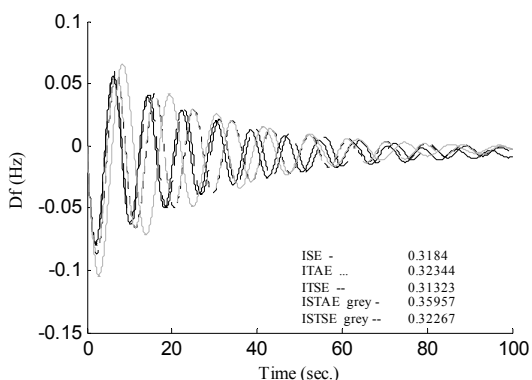
e	-0.49833321	-0.0987	0.434691	-0.03391	0.117656
de	-0.98699786	-0.9968	0.978661	-0.99981	0.962945
Fi	-0.00412350	-0.06088	0.012829	-0.15987	0.053405
Fp	-0.97772295	-0.97733	0.573085	-0.99667	0.989579
J	0.069810732	4346.773	114.8899	17607791	304625.7
$J(IAE)$	1.939790883	1.997445	1.845443	2.227628	1.961507



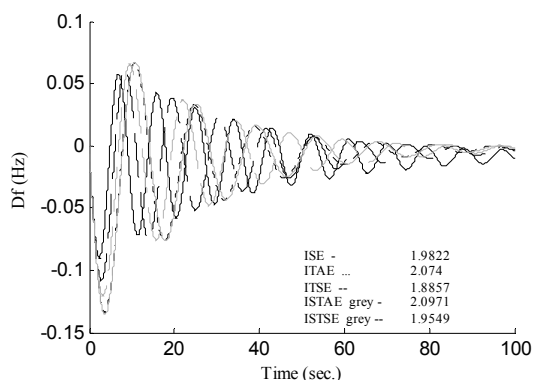
(α) R_1A_SS_S1H0D0W0G0_R1G1_I00_C



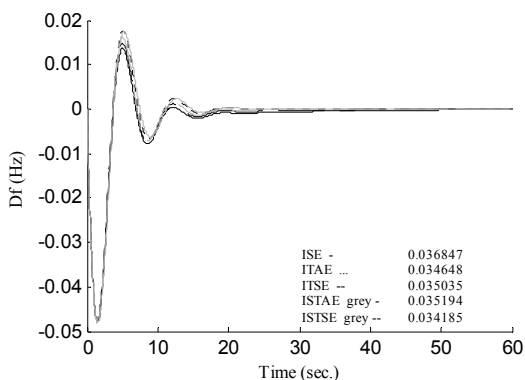
(β) R_1A_SS_S1H0D0W0G0_R1G1_I00_D



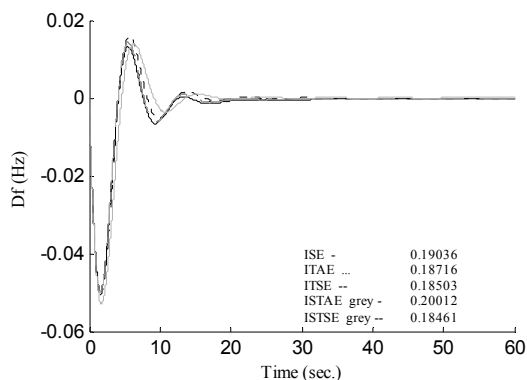
(γ) R_1A_SS_S1H0D0W0G0_R1G1_PI0_C



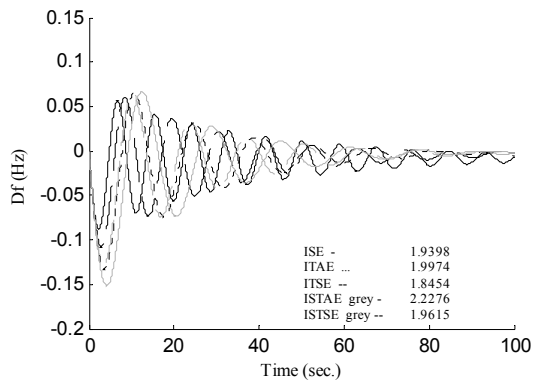
(δ) R_1A_SS_S1H0D0W0G0_R1G1_PI0_D



(ε) R_1A_SS_S1H0D0W0G0_R1G1_PID_C



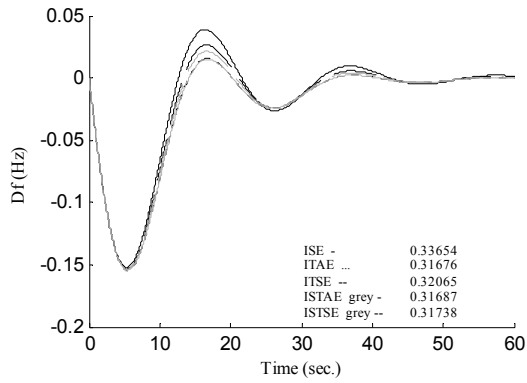
(σ) R_1A_SS_S1H0D0W0G0_R1G1_PID_D



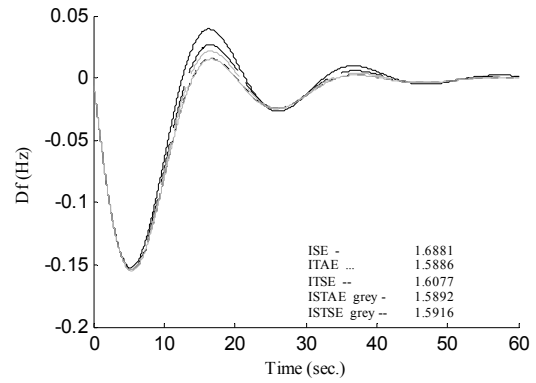
(ζ) R_1A_SS_S1H0D0W0G0_R1G1_FLC_D

9.1.5. Μοναδική Πηγή Ντιζελοηλεκτρική Μονάδα Χωρίς Αναθέρμανση Και Χωρίς Περιορισμό Του Ρυθμού Παραγωγής

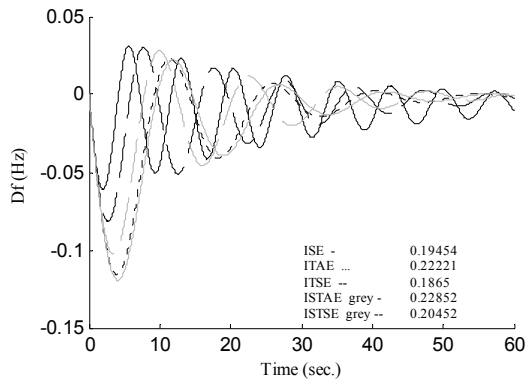
	ISE	ITAE	ITSE	ISTAE	ISTSE
<i>Ελεγκτής I συνεχής χρόνος (α)</i>					
K_i	-0.02266	-0.01733	-0.01972	-0.01726	-0.01859
J	0.029976	65.98969	4.022634	25325.46	744.5542
$J(IAE)$	0.336543	0.316763	0.320648	0.316867	0.317381
<i>Ελεγκτής I διακριτός χρόνος (β)</i>					
K_i	-0.02265	-0.0173	-0.01966	-0.0172	-0.01854
J	0.150112	1641.322	98.80957	3164981	91211.1
$J(IAE)$	1.688092	1.588583	1.607677	1.589235	1.591577
<i>Ελεγκτής PI συνεχής χρόνος (γ)</i>					
K_i	-0.0238	-0.02713	-0.0372	-0.02606	-0.03296
K_p	-1.53699	-0.19991	-0.69941	-0.17245	-0.32997
J	0.005423	54.23815	1.283204	24738	419.4607
$J(IAE)$	0.19454	0.222213	0.186498	0.228521	0.204524
<i>Ελεγκτής PI διακριτός χρόνος (δ)</i>					
K_i	-0.02172	0.076112	-0.03583	-0.01552	-0.03028
K_p	-1.43612	-3.2265	-0.6048	-1.56807	-0.27315
J	0.030236	4380.84	34.00627	8269647	54410.12
$J(IAE)$	1.034555	1.467789	0.974201	1.05776	1.071212
<i>Ελεγκτής PID συνεχής χρόνος (ε)</i>					
K_i	-3.9975	-3.99985	-3.99994	-3.99985	-3.99992
K_p	-360.77	-23.4118	-361.475	-19.5876	-30.1446
K_d	-66.2902	-37.6205	-59.504	-22.4375	-55.53
J	5.96E-07	0.089433	1.9E-05	4.509096	0.003906
$J(IAE)$	0.000503	0.001963	0.000492	0.002628	0.001621
<i>Ελεγκτής PID διακριτός χρόνος (στ)</i>					
K_i	-3.99978	-3.99561	-3.99992	-3.99913	-3.99999
K_p	-399.999	-19.008	-399.994	-19.3423	-21.079
K_d	-136.84	-20.2449	-98.1153	-22.2543	-19.7727
J	4.96E-07	0.546353	0.00031	93.47476	0.092422
$J(IAE)$	0.001348	0.006369	0.001329	0.00629	0.006238



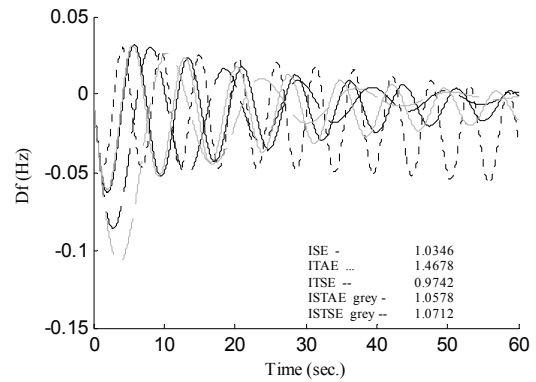
(α) R_1A_SS_S0H0D1W0G0_ROG0_I00_C



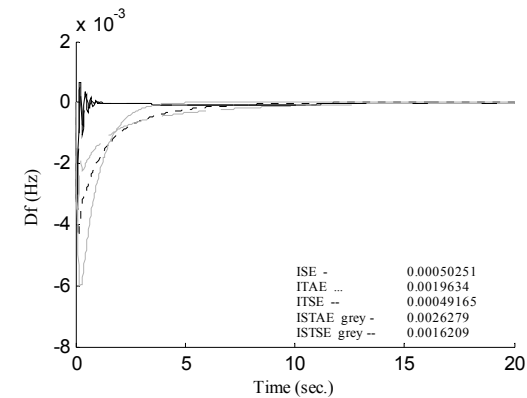
(β) R_1A_SS_S0H0D1W0G0_ROG0_I00_D



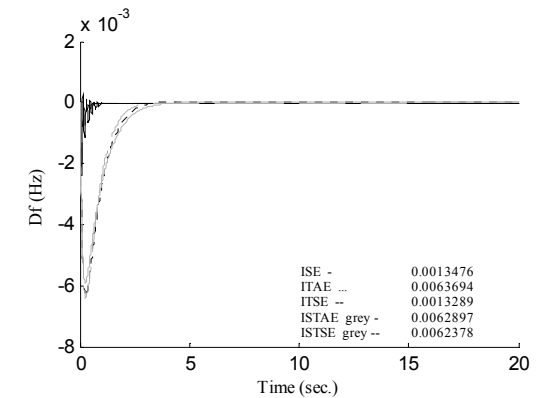
(γ) R_1A_SS_S0H0D1W0G0_ROG0_PIO_C



(δ) R_1A_SS_S0H0D1W0G0_ROG0_PIO_D



(ε) R_1A_SS_S0H0D1W0G0_ROG0_PID_C

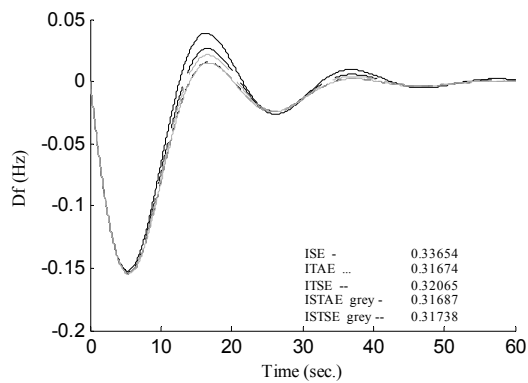


(στ) R_1A_SS_S0H0D1W0G0_ROG0_PID_D

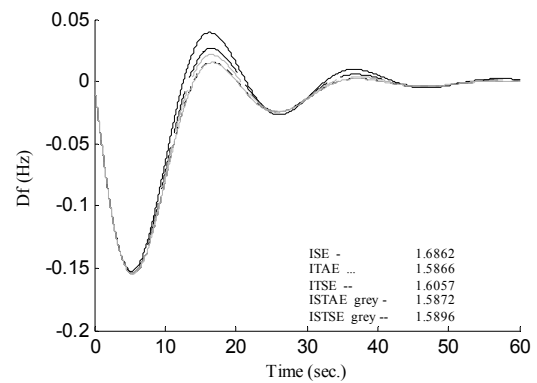
9.1.6. Μοναδική Πηγή Ντιζελοληλεκτρική Μονάδα Χωρίς Αναθέρμανση Αλλά Με Περιορισμό Του Ρυθμού Παραγωγής

	ISE	ITAE	ITSE	ISTAE	ISTSE
<i>Ελεγκτής I συνεχής χρόνος (α)</i>					
K_i	-0.02266	-0.01735	-0.01972	-0.01726	-0.01859
J	0.029976	65.98986	4.022634	25325.46	744.5542
$J(IAE)$	0.336542	0.316744	0.320652	0.316867	0.317381

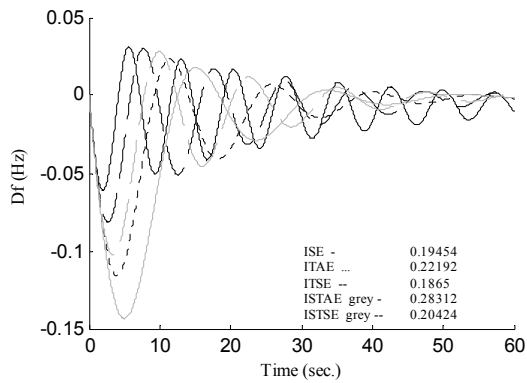
<i>Ελεγκτής I διακριτός χρόνος (β)</i>					
<i>K_i</i>	-0.02268	-0.01732	-0.01969	-0.01722	-0.01856
<i>J</i>	0.149866	1637.568	98.57809	3154307	90895.87
<i>J(IAE)</i>	1.686162	1.586616	1.605696	1.587233	1.589562
<i>Ελεγκτής PI συνεχής χρόνος (γ)</i>					
<i>K_i</i>	-0.02381	-0.02717	-0.03719	-0.01981	-0.03303
<i>K_p</i>	-1.537	-0.20135	-0.6991	-0.04029	-0.33264
<i>J</i>	0.005423	54.23981	1.283204	24302.79	419.4665
<i>J(IAE)</i>	0.194542	0.221924	0.1865	0.283116	0.204241
<i>Ελεγκτής PI διακριτός χρόνος (δ)</i>					
<i>K_i</i>	-0.02182	-0.0262	-0.03578	-0.02571	-0.03155
<i>K_p</i>	-1.43932	-0.18858	-0.61279	-0.1677	-0.29232
<i>J</i>	0.03011	1368.478	33.84993	3133756	54057.68
<i>J(IAE)</i>	1.031886	1.13359	0.970831	1.158551	1.059922
<i>Ελεγκτής PID συνεχής χρόνος (ε)</i>					
<i>K_i</i>	-0.7199	-0.85821	-0.70245	-0.84742	-0.71717
<i>K_p</i>	-3.99911	-3.99985	-3.9996	-3.87641	-3.99984
<i>K_d</i>	-3.99963	-3.99975	-3.99684	-3.99973	-3.99956
<i>J</i>	0.000275	1.335984	0.015634	135.9803	1.060548
<i>J(IAE)</i>	0.000275	0.000283	0.000276	0.000289	0.000275
<i>Ελεγκτής PID διακριτός χρόνος (στ)</i>					
<i>K_i</i>	-0.81853	-0.88507	-0.75559	-0.67714	-0.77496
<i>K_p</i>	-3.99985	-3.99879	-3.99934	-3.16575	-3.99934
<i>K_d</i>	-3.99995	-3.99994	-3.99997	-3.99805	-3.99972
<i>J</i>	0.000567	7.43967	0.064483	2034.952	9.936176
<i>J(IAE)</i>	0.000567	0.000568	0.000568	0.000689	0.000568



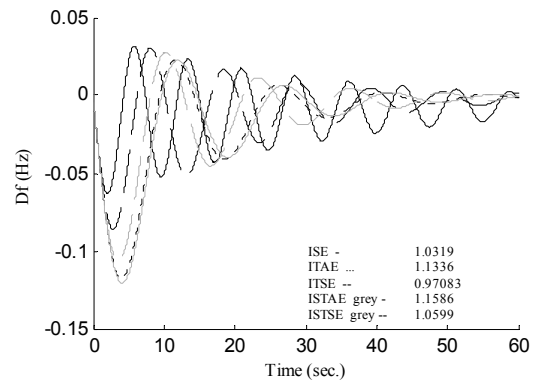
(α) R_1A_SS_S0H0D1W0G0_ROG1_I00_C



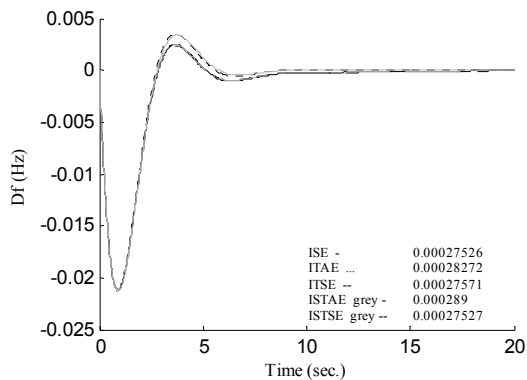
(β) R_1A_SS_S0H0D1W0G0_ROG1_I00_D



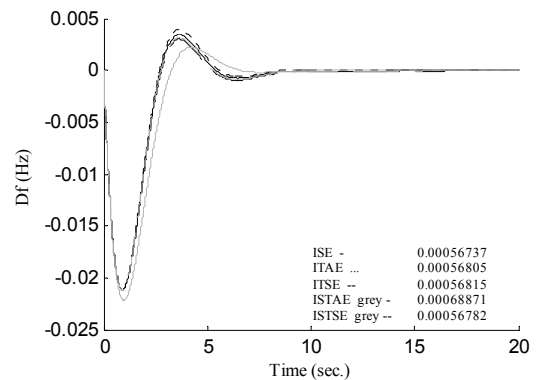
(γ) R_1A_SS_S0H0D1W0G0_ROG1_PIO_C



(δ) R_1A_SS_S0H0D1W0G0_ROG1_PIO_D



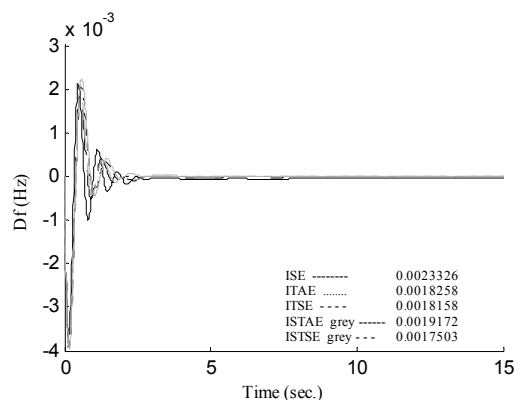
(ε) R_1A_SS_S0H0D1W0G0_ROG1_PID_C



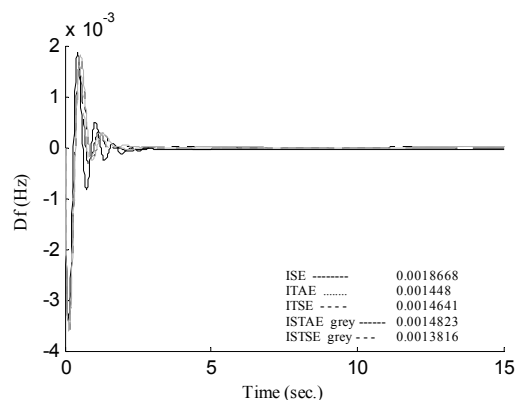
(σ) R_1A_SS_S0H0D1W0G0_ROG1_PID_D

9.1.7. Ντιζελοληκτρική Μονάδα Και Ανεμογεννήτρια

	ISE	ITAE	ITSE	ISTAE	ISTSE
<i>Ελεγκτές PI διακριτός χρόνος (α)</i>					
<i>Diesel Ki</i>	-6.9606	-54.7455	-30.2261	-60.0671	-41.8999
<i>Diesel Kp</i>	-299.643	-201.583	-236.41	-197.003	-224.04
<i>Wind Ki</i>	-3.98517	-0.29331	-3.99664	-0.00763	-3.9937
<i>Wind Kp</i>	99.98362	38.47311	99.99884	10.11028	90.02923
<i>J</i>	3.24E-06	0.098861	9.57E-05	10.53459	0.004751
<i>J(IAE)</i>	0.002333	0.001826	0.001816	0.001917	0.00175
<i>Ελεγκτές PID διακριτός χρόνος (β)</i>					
<i>Diesel Ki</i>	-11.0306	-64.7435	-34.4939	-68.7088	-51.5286
<i>Diesel Kp</i>	-340.429	-234.454	-267.012	-232.214	-264.032
<i>Diesel Kd</i>	-3.99986	-3.97445	-3.98593	-3.9564	-3.99211
<i>Wind Ki</i>	-3.85651	-0.17187	-3.67558	-0.03203	-3.44445
<i>Wind Kp</i>	99.98236	28.39225	99.78791	16.20593	99.80235
<i>Wind Kd</i>	-3.10646	3.995062	-3.02377	3.892376	3.359667
<i>J</i>	2.42E-06	0.064918	6.18E-05	6.08678	0.00255
<i>J(IAE)</i>	0.001867	0.001448	0.001464	0.001482	0.001382



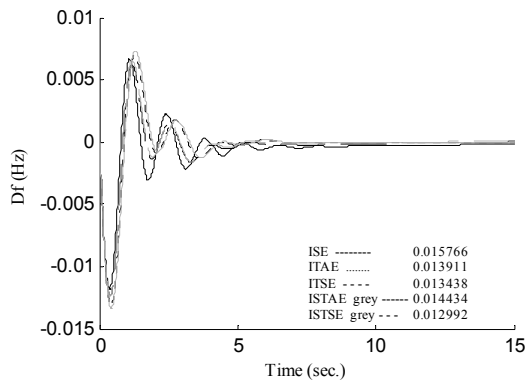
(α) R_1A_MS_S0H0D1W1G0_PIO_D



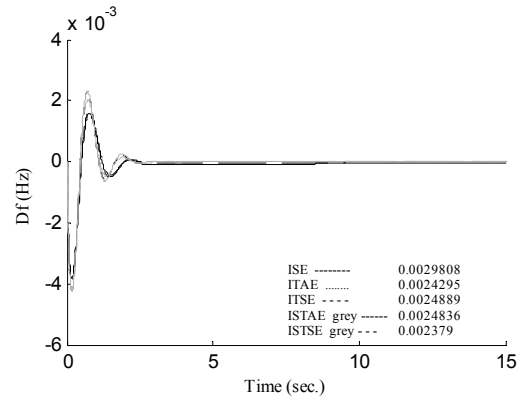
(β) R_1A_MS_S0H0D1W1G0_PID_D

9.1.8. Ντιζελοηλεκτρική Και Υδροστροβιλική Μονάδα

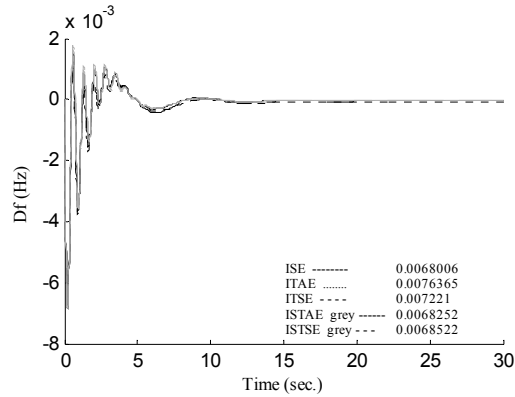
	ISE	ITAE	ITSE	ISTAE	ISTSE
<i>Ελεγκτές PI διακριτός χρόνος (α)</i>					
<i>Diesel Ki</i>	3.927186	-12.6935	0.102927	-14.7929	-3.05916
<i>Diesel Kp</i>	-95.2644	-62.7872	-82.3675	-59.6533	-81.7926
<i>Hydro Ki</i>	-9.98839	-1.4118	-9.98752	-0.45635	-9.94918
<i>Hydro Kp</i>	9.999717	9.996314	9.99812	9.8261	9.98392
<i>J</i>	7.69E-05	1.750667	0.00544	448.8716	0.665031
<i>J(IAE)</i>	0.015766	0.013911	0.013438	0.014434	0.012992
<i>Ελεγκτές PID διακριτός χρόνος (β)</i>					
<i>Diesel Ki</i>	-19.0219	-97.2439	-41.4619	-99.9177	-65.2302
<i>Diesel Kp</i>	-399.891	-396.593	-399.991	-391.961	-398.954
<i>Diesel Kd</i>	-3.96562	-3.97843	-3.99671	-3.98257	-3.99439
<i>Hydro Ki</i>	-0.17845	-8.79759	-9.70827	-4.98975	-9.90272
<i>Hydro Kp</i>	9.969318	9.977647	9.985859	9.923109	9.995264
<i>Hydro Kd</i>	9.978961	7.962053	9.606612	7.952366	8.317633
<i>J</i>	4.56E-06	0.15379	0.000175	22.71722	0.011429
<i>J(IAE)</i>	0.002981	0.00243	0.002489	0.002484	0.002379
<i>Ελεγκτές ασαφούς λογικής διακριτός χρόνος (γ)</i>					
<i>Diesel e</i>	9.97461	9.973422	-9.90538	9.899007	-9.9105
<i>Diesel de</i>	9.322756	9.812519	-9.54912	6.802458	-4.6968
<i>Diesel Fi</i>	2.793417	1.722946	-1.61116	2.785472	-3.49833
<i>Diesel Fp</i>	9.882774	9.948536	-9.88784	9.991975	-9.81045
<i>Hydro e</i>	3.858571	-3.99945	-3.99617	-3.9206	-3.92386
<i>Hydro de</i>	3.499753	-2.93115	-3.44565	-3.8736	-3.86546
<i>Hydro Fi</i>	-2.95531	1.959116	1.3422	3.223001	4.09205
<i>Hydro Fp</i>	-9.91677	9.959135	9.746183	9.647885	9.813879
<i>J</i>	1.53E-05	1.53E-05	1.56E-05	1.54E-05	1.54E-05
<i>J(IAE)</i>	0.006801	0.007637	0.007221	0.006825	0.006852



(α) R_1A_MS_S0H1D1W0G0_PIO_D



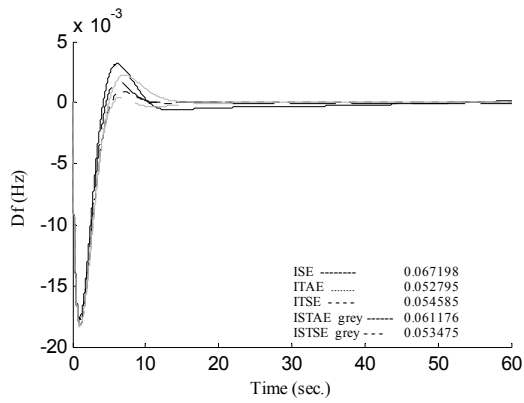
(β) R_1A_MS_S0H1D1W0G0_PID_D



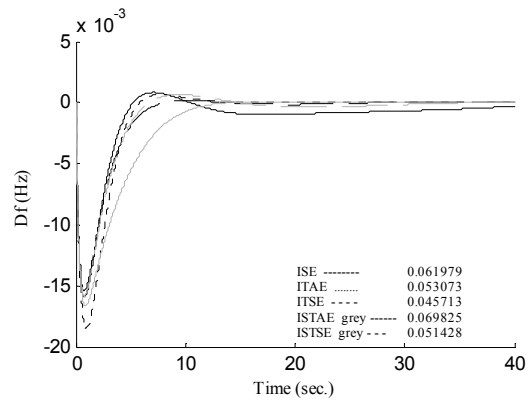
(γ) R_1A_MS_S0H1D1W0G0_FLC_D

9.1.9. Υδροτροβιλική Μονάδα, Ανεμογεννήτρια Και Ντιζελοηλεκτρική Μονάδα

	ISE	ITAE	ITSE	ISTAE	ISTSE
<i>Ελεγκτές PI διακριτός χρόνος (α)</i>					
Hydro Ki	0.913933	-0.08045	-0.17172	-0.36472	-0.1503
Hydro Kp	-1.48589	-2.8457	-3.98072	-2.90601	-3.65569
Wind Ki	-0.14497	1.63951	0.05394	0.25078	0.021015
Wind Kp	-9.96018	-9.15035	-9.91182	-8.04261	-9.97989
Diesel Ki	-1.72926	-1.43508	-0.8342	-1.00834	-0.5781
Diesel Kp	-3.99472	-3.91066	-3.98454	-3.95651	-3.68738
J	0.000609	12.67271	0.097985	12850.5	21.84989
J(IAE)	0.067198	0.052795	0.054585	0.061176	0.053475
<i>Ελεγκτές PID διακριτός χρόνος (β)</i>					
Hydro Ki	1.640235	-0.04365	-0.15375	-0.1043	-0.18109
Hydro Kp	-3.63306	-1.38647	-3.91816	0.704885	-1.62715
Hydro Kd	-3.18577	-3.61376	-2.97486	-3.05454	-3.8939
Wind Ki	-0.30597	1.630305	1.130827	0.319077	0.610706
Wind Kp	-9.60003	-8.67232	-9.60758	-6.27116	-9.85202
Wind Kd	-3.15439	3.327969	-3.88516	-1.40067	-1.95211
Diesel Ki	-1.70933	-1.49909	-1.40764	-0.82829	-1.34905
Diesel Kp	-3.52025	-3.84729	-3.93256	-3.88016	-3.92527
Diesel Kd	-2.9819	-0.66394	-3.73226	-1.81664	-3.20071
J	0.000463	12.76628	0.065398	14859.58	24.75487
J(IAE)	0.061979	0.053073	0.045713	0.069825	0.051428



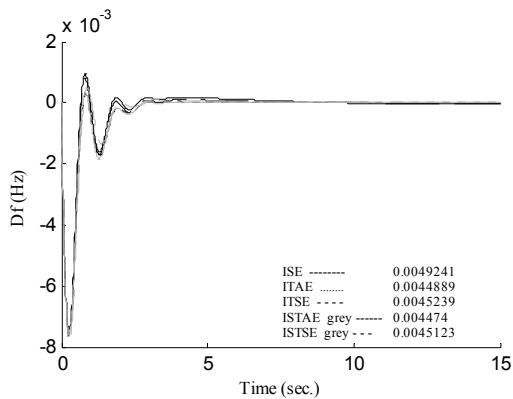
(α) R_1A_MS_S0H1D1W1G0_PIO_D



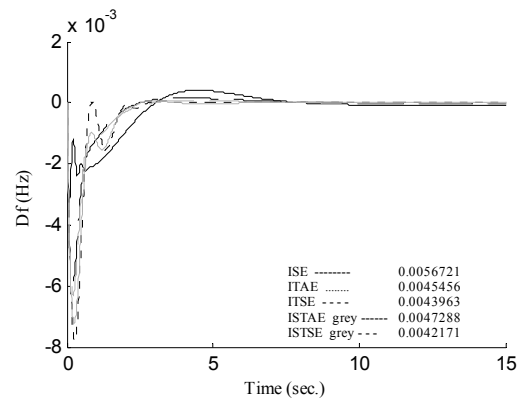
(β) R_1A_MS_S0H1D1W1G0_PID_D

9.1.10. Ατμοστροβλική Μονάδα Και Ανεμογεννήτρια

	ISE	ITAE	ITSE	ISTAE	ISTSE
<i>Ελεγκτές PI διακριτός χρόνος (α)</i>					
<i>Steam Ki</i>	-3.99939	-3.97059	-3.95024	-3.99035	-3.99586
<i>Steam Kp</i>	-3.99196	-3.78599	-3.99664	-3.88716	-3.37677
<i>Wind Ki</i>	0.38397	0.043971	0.192722	0.00548	0.133271
<i>Wind Kp</i>	-7.56995	20.93856	-1.60549	22.63922	5.232953
<i>J</i>	1.88E-05	0.313932	0.000676	47.43555	0.040433
<i>J(IAE)</i>	0.004924	0.004489	0.004524	0.004474	0.004512
<i>Ελεγκτές PID διακριτός χρόνος (β)</i>					
<i>Steam Ki</i>	-3.97604	-3.98346	-3.98842	-3.98089	-3.99742
<i>Steam Kp</i>	-3.99362	-3.55255	-3.93246	-3.74083	-3.9203
<i>Steam Kd</i>	-3.71163	-0.00315	-0.53463	-0.12854	-0.38691
<i>Wind Ki</i>	0.479415	0.033729	0.265509	0.028617	0.262848
<i>Wind Kp</i>	-7.06991	29.08817	-5.05062	48.51004	1.776391
<i>Wind Kd</i>	-3.92643	3.904064	-2.46499	3.659181	-2.69352
<i>J</i>	7.74E-06	0.297734	0.00047	59.86216	0.032328
<i>J(IAE)</i>	0.005672	0.004546	0.004396	0.004729	0.004217



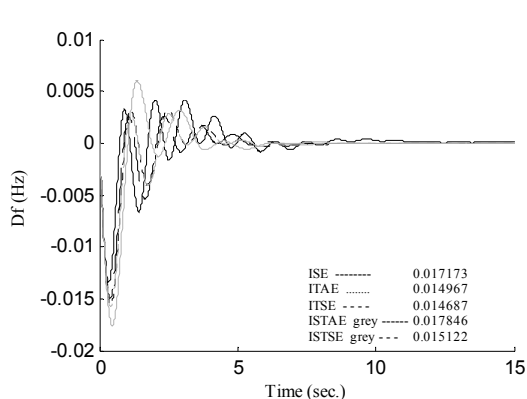
(α) R_1A_MS_S1H0D0W1G0_PIO_D



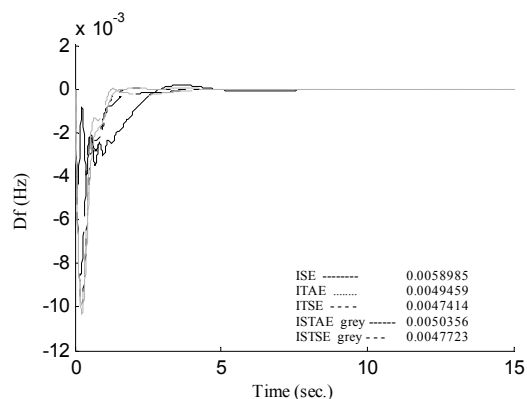
(β) R_1A_MS_S1H0D0W1G0_PID_D

9.1.11. Ατμοστροβλική Και Υδροστροβλική Μονάδα

	ISE	ITAE	ITSE	ISTAE	ISTSE
<i>Ελεγκτές PI διακριτός χρόνος (α)</i>					
Steam Ki	-3.10829	-3.04891	-2.86802	-3.153	-2.95727
Steam Kp	-2.7428	-1.30102	-1.58519	-0.77529	-1.2334
Hydro Ki	-9.64358	0.218693	0.370777	0.211746	1.024017
Hydro Kp	9.991989	9.87113	9.999915	8.717267	9.986274
J	9.48E-05	2.086004	0.007186	593.8573	0.917674
J(IAE)	0.017173	0.014967	0.014687	0.017846	0.015122
<i>Ελεγκτές PID διακριτός χρόνος (β)</i>					
Steam Ki	-3.99415	-3.98364	-3.99687	-3.96467	-3.91728
Steam Kp	-3.99511	-2.76147	-3.97292	-2.63504	-3.59098
Steam Kd	-3.95643	-1.12974	-1.4158	-1.02521	-1.19396
Hydro Ki	1.668294	-0.09251	-0.58931	-0.07188	-0.69061
Hydro Kp	-9.70859	-3.3892	-7.48348	-2.68978	-9.3752
Hydro Kd	-2.31534	-2.99809	-2.97391	-2.80397	-3.10096
J	1.28E-05	0.227328	0.000661	18.27369	0.034603
J(IAE)	0.005898	0.004946	0.004741	0.005036	0.004772



(α) R_1A_MS_S1H1D0W0GO_PIO_D



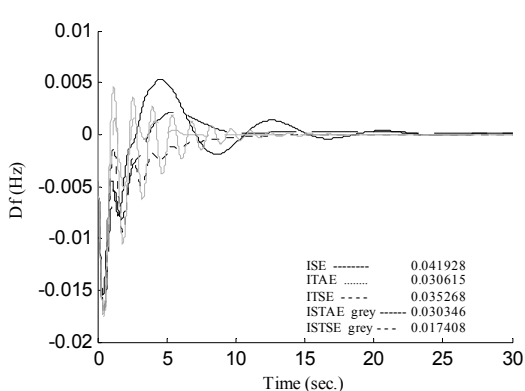
(β) R_1A_MS_S1H1D0W0GO_PID_D

9.1.12. Ατμοστροβλική, Υδροστροβλική Και Αεριοστροβλική Μονάδα

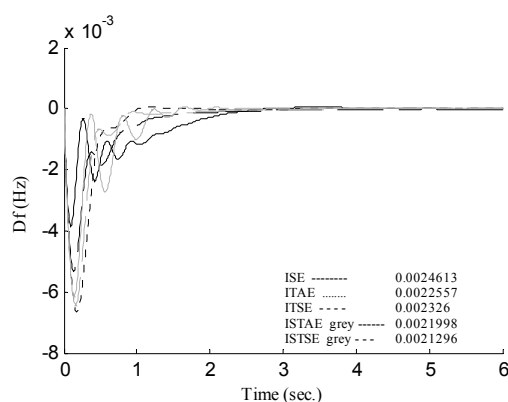
	ISE	ITAE	ITSE	ISTAE	ISTSE
<i>Ελεγκτές PI διακριτός χρόνος (α)</i>					
Steam Ki	-3.58694	-3.15754	-3.37352	-3.467	-2.7197
Steam Kp	-3.97383	-2.03454	-2.5104	-1.49586	-2.07182
Hydro Ki	-9.9901	0.219547	-1.66229	0.202569	0.262648
Hydro Kp	9.985007	9.432999	9.968175	9.138391	8.506468
Gas Ki	1.819861	1.958608	1.850228	1.626309	0.0126
Gas Kp	2.551641	-0.00169	1.617704	-1.483	0.3177
J	0.000114	2.2404	0.009347	652.8681	1.218579
J(IAE)	0.041928	0.030615	0.035268	0.030346	0.017408

Ελεγκτές PID διακριτός χρόνος (β)

Steam Ki	-9.97467	-9.67722	-9.69227	-9.78293	-9.97913
Steam Kp	-9.90805	-8.85505	-9.92846	-8.20796	-9.83137
Steam Kd	-3.97771	-1.95297	-3.20241	-3.13956	-2.67541
Hydro Ki	6.660776	-0.1937	-0.64234	-0.21736	-0.35249
Hydro Kp	1.86312	-5.81652	-4.2525	-8.6804	-5.36789
Hydro Kd	3.646136	-0.21108	-0.49547	-3.98121	-2.25595
Gas Ki	-3.96528	-3.7993	-2.9681	-3.84549	-3.92694
Gas Kp	-3.82955	-1.14317	-3.83875	-3.52389	-2.39046
Gas Kd	-3.99604	0.272538	0.663982	-0.64818	1.046168
J	3.84E-06	0.077127	0.00015	9.131016	0.004642
J(IAE)	0.002461	0.002256	0.002326	0.0022	0.00213



(α) R_1A_MS_S1H1D0W0G1_P10_D



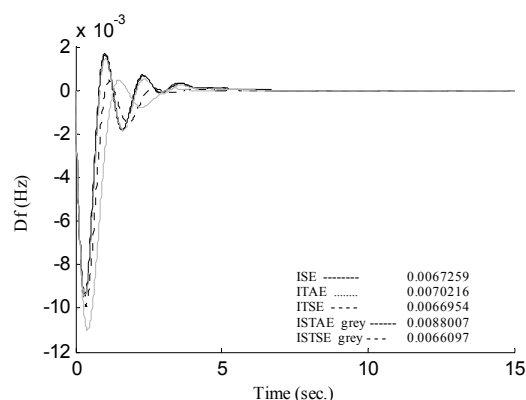
(β) R_1A_MS_S1H1D0W0G1_PID_D

9.1.13. Ατμοστροβλική Μονάδα, Ανεμογεννήτρια Και Υδροστροβλική Μονάδα

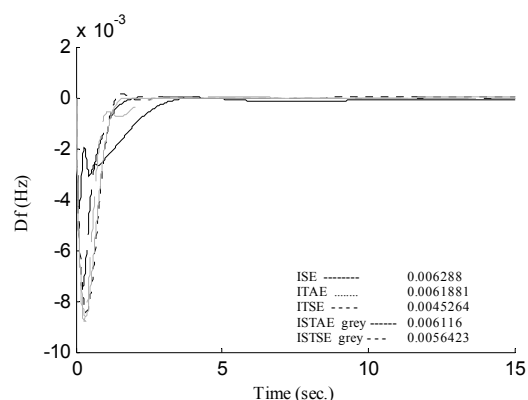
	ISE	ITAE	ITSE	ISTAE	ISTSE
<i>Ελεγκτές PI διακριτός χρόνος (α)</i>					
Steam Ki	-3.91438	-3.98348	-3.89861	-3.06484	-3.76343
Steam Kp	-3.9956	-3.55556	-3.93409	-2.49978	-3.85588
Wind Ki	0.093555	2.194513	0.149832	0.034434	0.10367
Wind Kp	-9.97551	9.328638	-9.56528	6.843618	-8.95071
Hydro Ki	-1.91408	-1.05574	-1.97389	-0.01577	-1.23311
Hydro Kp	3.964224	2.953374	3.860439	1.416719	3.95745
J	3.54E-05	0.525073	0.001531	80.2396	0.104694
J(IAE)	0.006726	0.007022	0.006695	0.008801	0.00661

Ελεγκτές PID διακριτός χρόνος (β)

Steam Ki	-3.9012	-3.83674	-3.96854	-3.90212	-3.95812
Steam Kp	-3.98272	-3.66162	-3.35535	-3.17256	-3.11385
Steam Kd	-3.74473	-0.00537	-1.12377	-0.26372	-0.46161
Wind Ki	0.702262	0.50987	0.027253	0.724039	0.451403
Wind Kp	-9.14106	-1.14569	-9.87842	1.414876	-4.42362
Wind Kd	-3.86103	2.625451	-3.98336	-2.09904	-3.24023
Hydro Ki	-0.45986	-1.27172	-0.40002	-1.28363	-1.75328
Hydro Kp	-2.5079	3.157509	-2.63443	-0.31089	0.387168
Hydro Kd	-2.98442	3.08112	-3.28902	0.558141	-1.72296
J	1.18E-05	0.352867	0.000695	39.0873	0.05939
J(IAE)	0.006288	0.006188	0.004526	0.006116	0.005642



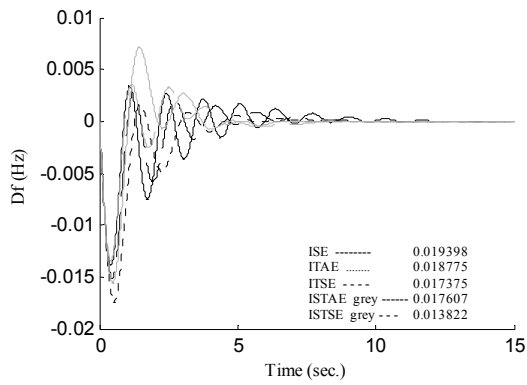
(α) R_1A_MS_S1H1D0W1G0_PIO_D



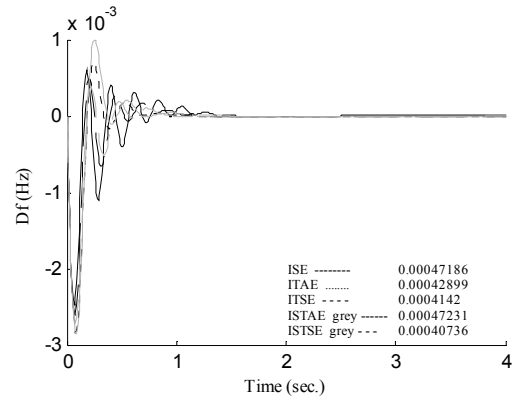
(β) R_1A_MS_S1H1D0W1G0_PID_D

9.1.14. Ντιζελοηλεκτρική Και Ατμοστροβλική Μονάδα

	ISE	ITAE	ITSE	ISTAE	ISTSE
<i>Ελεγκτές PI διακριτός χρόνος (α)</i>					
Diesel Ki	-6.04578	-2.67064	-5.86211	-20.1478	-24.5057
Diesel Kp	-15.9058	-9.40577	-18.5082	-69.134	-93.4011
Steam Ki	0.2057	-0.18794	0.369644	3.69863	5.878646
Steam Kp	-2.6816	-1.52493	-1.97269	-0.27205	-0.54708
J	0.000118	2.555339	0.010079	632.6164	0.871962
J(IAE)	0.019398	0.018775	0.017375	0.017607	0.013822
<i>Ελεγκτές PID διακριτός χρόνος (β)</i>					
Diesel Ki	7.336855	4.723617	26.58806	-3.47272	-0.85773
Diesel Kp	78.69633	-4.67999	99.99803	-36.8213	-11.8764
Diesel Kd	-99.4463	-98.9701	-99.9809	-95.0557	-99.4074
Steam Ki	-93.5259	-82.6021	-93.6815	-99.3452	-71.2043
Steam Kp	-26.6202	-24.7644	-26.8339	-25.4801	-22.3929
Steam Kd	-4.22136	-1.57242	-2.95274	-1.53275	-2.25525
J	5.41E-07	0.00854	6.26E-06	0.472042	0.0001
J(IAE)	0.000472	0.000429	0.000414	0.000472	0.000407



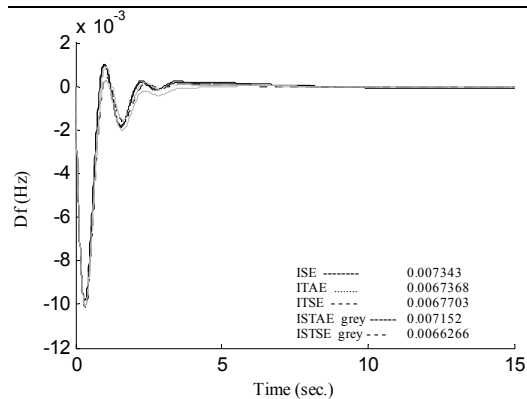
(α) R_1A_MS_S1H0D1W0G0_PID_D



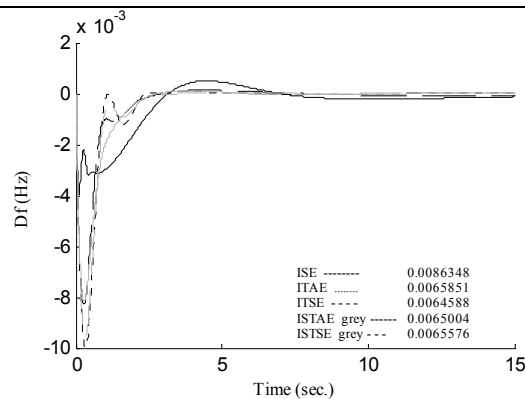
(β) R_1A_MS_S1H0D1W0G0_PID_D

9.1.15. Ατμοστροβλική Μονάδα, Ανεμογεννήτρια Και Ντιζελοηλεκτρική Μονάδα

	ISE	ITAE	ITSE	ISTAE	ISTSE
<i>Ελεγκτές PI διακριτός χρόνος (α)</i>					
Steam Ki	-3.8381	-3.96499	-3.9764	-3.74647	-3.99742
Steam Kp	-3.99464	-3.49229	-3.96696	-3.63159	-3.55314
Wind Ki	0.80402	-0.06832	0.331276	9.84185	-0.03389
Wind Kp	-9.71283	8.574714	-4.60851	4.532524	-4.84082
Diesel Ki	-1.64432	-0.55624	-1.06384	-1.36324	0.466537
Diesel Kp	-3.99391	-3.20044	-3.86991	-2.84194	-3.86131
J	3.82E-05	0.51563	0.00158	127.542	0.098902
J(IAE)	0.007343	0.006737	0.00677	0.007152	0.006627
<i>Ελεγκτές PID διακριτός χρόνος (β)</i>					
Steam Ki	-3.99565	-3.93877	-3.98463	-3.99679	-3.98585
Steam Kp	-3.98136	-3.40857	-3.91162	-3.47151	-3.25081
Steam Kd	-3.86952	-0.05863	-0.27812	-0.44142	-0.20351
Wind Ki	2.005021	-0.23438	0.744154	-0.13967	8.124638
Wind Kp	-9.66006	8.221016	-9.16629	2.770268	0.266456
Wind Kd	-3.2381	3.9028	-0.77699	2.925251	-3.02838
Diesel Ki	-1.88229	-0.17318	-0.55378	-0.0684	-1.85722
Diesel Kp	-3.95868	-3.07482	-3.99161	-3.34797	-2.70742
Diesel Kd	-3.86827	-0.11645	-3.74649	-1.92074	1.560191
J	1.64E-05	0.472725	0.001157	117.5056	0.088443
J(IAE)	0.008635	0.006585	0.006459	0.0065	0.006558



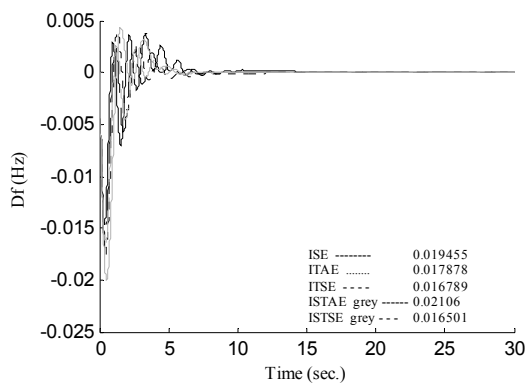
(α) R_1A_MS_S1H0D1W1G0_PID_D



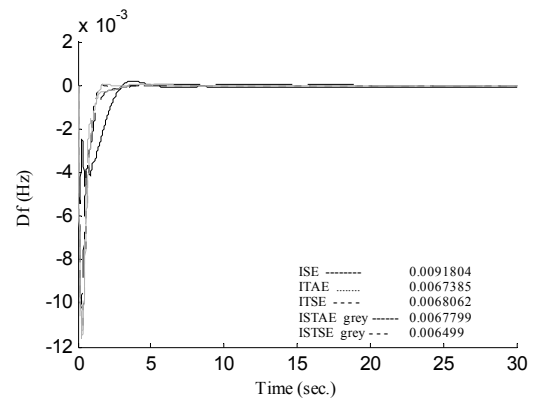
(β) R_1A_MS_S1H0D1W1G0_PID_D

9.1.16. Ατμοστροβλική, Υδροστροβλική Και Ντιζελοηλεκτρική Μονάδα

	ISE	ITAE	ITSE	ISTAE	ISTSE
<i>Ελεγκτές PI διακριτός χρόνος (α)</i>					
<i>Steam Ki</i>	-3.31757	-3.5727	-3.28351	-2.9852	-3.40279
<i>Steam Kp</i>	-3.96535	-1.77268	-2.60473	-1.50126	-2.13713
<i>Hydro Ki</i>	-9.47887	0.227478	-0.35592	0.196632	0.291143
<i>Hydro Kp</i>	9.912175	9.845368	9.996144	7.159122	9.96822
<i>Diesel Ki</i>	-1.43952	1.503574	-0.49625	-0.9755	0.298121
<i>Diesel Kp</i>	1.307396	-2.55644	0.18018	2.82035	0.465707
<i>J</i>	0.000112	2.298188	0.009113	783.2408	1.128108
<i>J(IAE)</i>	0.019455	0.017878	0.016789	0.02106	0.016501
<i>Ελεγκτές PID διακριτός χρόνος (β)</i>					
<i>Steam Ki</i>	-3.95749	-3.88025	-3.95407	-3.95081	-3.9624
<i>Steam Kp</i>	-3.98722	-3.92958	-3.9668	-3.47127	-3.88056
<i>Steam Kd</i>	-3.98177	-1.16964	-1.49177	-1.17591	-1.3637
<i>Hydro Ki</i>	2.917131	-0.19857	-0.71023	-0.11296	-0.17303
<i>Hydro Kp</i>	-8.84358	-5.08436	-7.20621	-3.73909	-6.98389
<i>Hydro Kd</i>	-3.61368	-1.90905	-3.87851	-2.5326	-3.92467
<i>Diesel Ki</i>	-1.95166	-1.11338	-1.47526	-1.17558	-1.33343
<i>Diesel Kp</i>	-3.92028	-2.84899	-3.3902	-3.27744	-3.39295
<i>Diesel Kd</i>	-3.48527	3.889828	-2.98485	1.922605	2.105302
<i>J</i>	2.36E-05	0.408093	0.001384	56.39269	0.071413
<i>J(IAE)</i>	0.00918	0.006738	0.006806	0.00678	0.006499



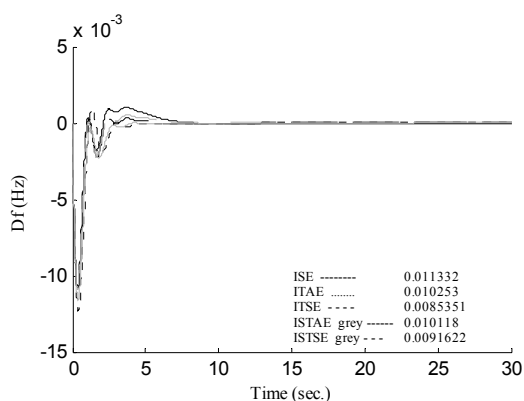
(α) R_1A_MS_S1H1D1W0G0_PIO_D



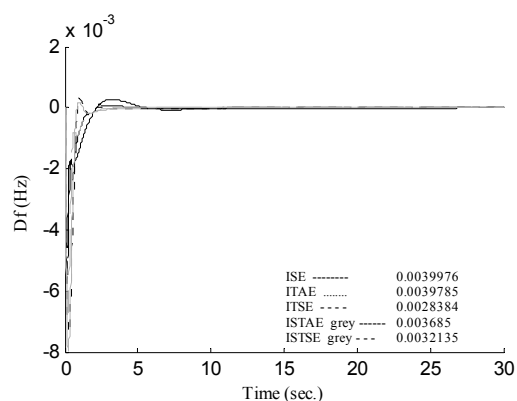
(β) R_1A_MS_S1H1D1W0G0_PID_D

9.1.17. Ατμοστροβλική, Υδροστροβλική, Ντιζελοηλεκτρική Μονάδα Και Ανεμογεννήτρια

	ISE	ITAE	ITSE	ISTAE	ISTSE
<i>Ελεγκτές PI διακριτός χρόνος (α)</i>					
Steam Ki	-3.81303	-3.71816	-3.97806	-3.94125	-3.93406
Steam Kp	-3.98207	-3.57208	-3.9573	-3.80334	-3.92877
Hydro Ki	-2.72102	-0.29675	0.049997	-0.51352	-0.57306
Hydro Kp	9.915273	1.825737	9.720405	5.673483	9.906749
Diesel Ki	0.000947	0.619041	1.016965	0.985765	0.425689
Diesel Kp	0.608013	0.661912	-1.78215	0.241414	1.754668
Wind Ki	0.09815	0.075632	-0.03094	0.721106	0.013542
Wind Kp	-14.6644	-0.45762	-11.6492	2.691207	-12.3287
J	4.75E-05	0.974954	0.002178	242.3421	0.177198
J(IAE)	0.011332	0.010253	0.008535	0.010118	0.009162
<i>Ελεγκτές PID διακριτός χρόνος (β)</i>					
Steam Ki	-9.29877	-9.93583	-9.95141	-9.80964	-9.83926
Steam Kp	-9.83405	-6.97395	-9.48271	-7.66546	-9.30764
Steam Kd	-3.98527	-0.26509	-3.05821	-1.38822	-1.76332
Hydro Ki	-3.50922	-1.3448	6.48065	-0.99624	-2.16932
Hydro Kp	9.358313	5.618024	-3.03021	-7.17915	-5.06924
Hydro Kd	-1.25479	3.778525	-3.40853	-2.55894	-2.98483
Diesel Ki	-1.43281	0.916968	-1.874	-1.90269	0.599139
Diesel Kp	-1.99181	-3.57611	-3.65293	-0.03623	-2.36516
Diesel Kd	3.33857	-2.4231	-2.38309	2.250918	-3.72986
Wind Ki	0.227405	1.229064	-0.08801	2.318522	0.157948
Wind Kp	-12.1558	6.363261	-12.0724	15.07903	-4.58369
Wind Kd	-3.93867	-2.66268	-3.37687	2.393461	0.232258
J	5.93E-06	0.19299	0.000205	105.5335	0.012611
J(IAE)	0.003998	0.003978	0.002838	0.003685	0.003214



(α) R_1A_MS_S1H1D1W1G0_PIO_D



(β) R_1A_MS_S1H1D1W1G0_PID_D

9.2. Συστήματα Δύο Περιοχών Σε Μη Απελευθερωμένη Αγορά

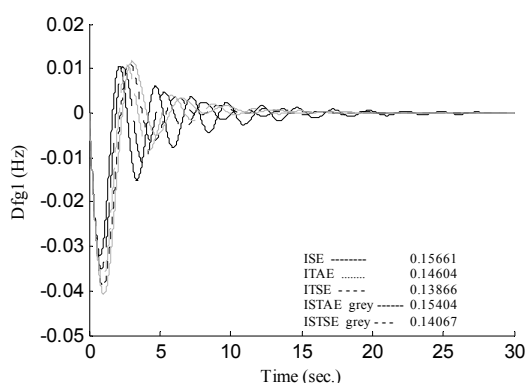
Στους πίνακες που ακολουθούν παρουσιάζονται οι παράμετροι των ελεγκτών όπως υπολογίστηκαν από τον γενετικό αλγόριθμο για τα συστήματα δύο περιοχών ελέγχου όταν δεν υπάρχει καθεστώς απελευθερωμένης

αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας. Ακόμα, υπολογίζονται οι δείκτες απόδοσης για κάθε κριτήριο αλλά και ανηγμένοι σύμφωνα με όσα έχουν αναφερθεί. Για τα συστήματα αυτού του εδαφίου παρουσιάζονται οι χρονοαποκρίσεις της συχνότητας κάθε περιοχής (ps1, ps2) ελέγχου, της ισχύς που μεταφέρεται μέσω της διασύνδεσης των δύο περιοχών (DPtie) και αν υπάρχει ανεμογεννήτρια στο εξεταζόμενο σύστημα φαίνεται επίσης η χρονοαπόκριση της παραγόμενης ισχύος από αυτή την μονάδα μόνο (DPwind). Τα πρώτα τέσσερα συστήματα είναι με ένα μόνο είδος πηγών δηλαδή μια όμοια μονάδα σε κάθε περιοχή. Τα υπόλοιπα έχουν διαφορετικά είδη πηγών σε κάθε περιοχή, ενώ για όλες τις περιπτώσεις έχει θεωρηθεί διαταραχή στην πρώτη περιοχή $DP_1=0.01$ και βήμα χρόνου για τους υπολογισμούς των δεικτών απόδοσης 0.01 sec όσο δηλαδή είναι και το βήμα των ελεγκτών αφού εδώ εξετάζονται μόνο περιπτώσεις διακριτού χρόνου.

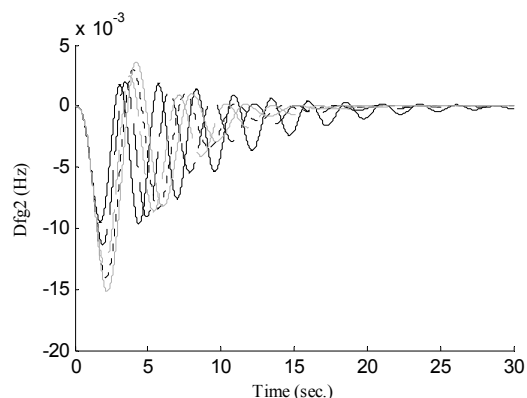
9.2.1. Αεριοστροβλικές Μονάδες

Σε αυτήν την περίπτωση έχουν χρησιμοποιηθεί κοινά κέρδη για τους ελεγκτές κάθε μονάδας.

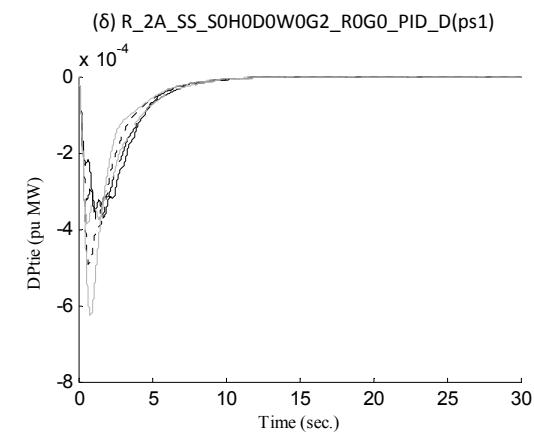
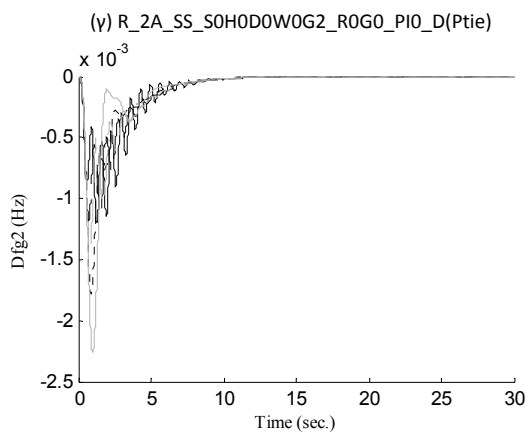
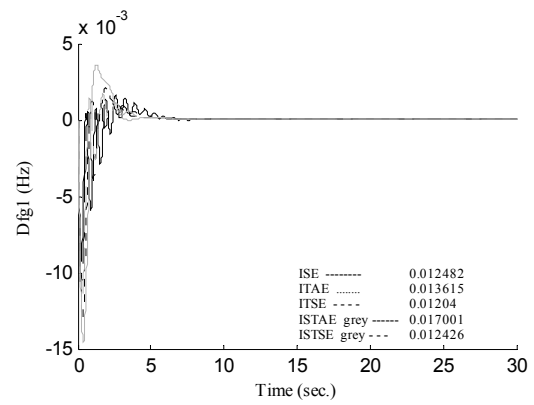
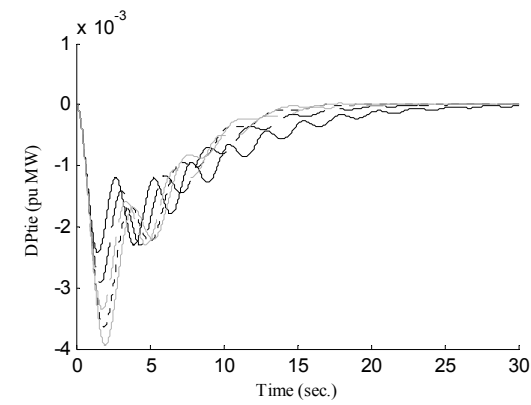
	ISE	ITAE	ITSE	ISTAE	ISTSE
<i>Ελεγκτές PI διακριτός χρόνος (α-γ)</i>					
Περιοχή 1 Ki	-0.25581	-0.28299	-0.28519	-0.27683	-0.28469
Περιοχή 1 Kr	-0.52243	0.125874	-0.18742	0.217767	0.018514
Περιοχή 2 Ki	-0.25581	-0.28299	-0.28519	-0.27683	-0.28469
Περιοχή 2 Kr	-0.52243	0.125874	-0.18742	0.217767	0.018514
J	0.001449	52.17793	0.298099	34556.52	104.3532
J(IAE)	0.15661	0.146042	0.138664	0.154042	0.140672
<i>Ελεγκτές PID διακριτός χρόνος (δ-στ)</i>					
Περιοχή 1 Ki	-3.99984	-3.99995	-3.99995	-4	-3.99959
Περιοχή 1 Kr	-3.99992	-2.74653	-3.99991	-2.03278	-3.84528
Περιοχή 1 Kd	-3.30809	-1.42799	-2.2463	-1.1102	-1.78095
Περιοχή 2 Ki	-3.99984	-3.99995	-3.99995	-4	-3.99959
Περιοχή 2 Kr	-3.99992	-2.74653	-3.99991	-2.03278	-3.84528
Περιοχή 2 Kd	-3.30809	-1.42799	-2.2463	-1.1102	-1.78095
J	3.44E-05	2.225981	0.00217	832.2732	0.283336
J(IAE)	0.012482	0.013615	0.01204	0.017001	0.012426



(α) R_2A_SS_S0H0D0W0G2_ROG0_PIO_D(ps1)



(β) R_2A_SS_S0H0D0W0G2_ROG0_PIO_D(ps2)



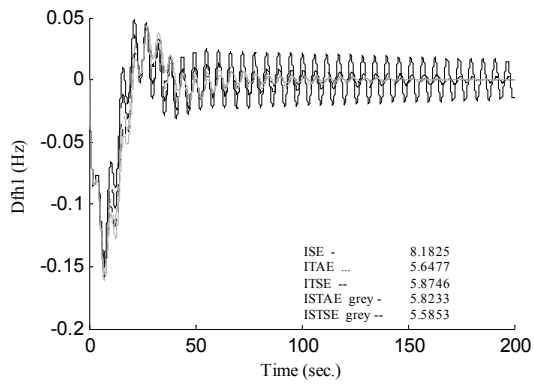
(ε) R_2A_SS_S0H0D0W0G2_R0G0_PID_D(ps2)

(σ) R_2A_SS_S0H0D0W0G2_R0G0_PID_D(Ptie)

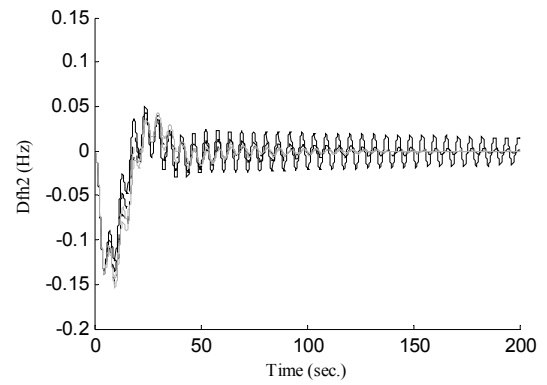
9.2.2. Υδροτροβλικές Μονάδες

Σε αυτήν την περίπτωση έχουν χρησιμοποιηθεί κοινά κέρδη για τους ελεγκτές κάθε μονάδας.

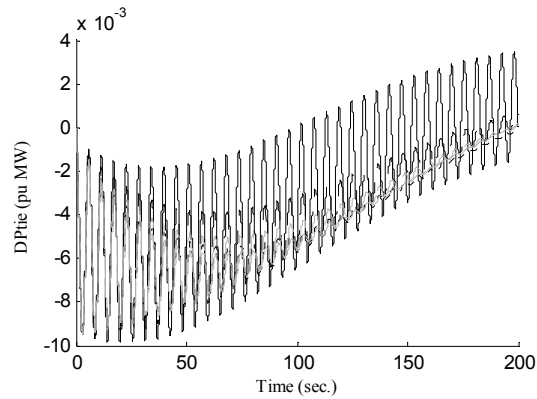
	ISE	ITAE	ITSE	ISTAE	ISTSE
<i>Ελεγκτές PI διακριτός χρόνος (α-γ)</i>					
Περιοχή 1 K_i	-0.01095	-0.00754	-0.0086	-0.00772	-0.00791
Περιοχή 1 K_p	0.496867	0.615456	0.554992	0.639235	0.596626
Περιοχή 2 K_i	-0.01095	-0.00754	-0.0086	-0.00772	-0.00791
Περιοχή 2 K_p	0.496867	0.615456	0.554992	0.639235	0.596626
J	0.294668	10676.81	348.7184	42320558	680281
$J(IAE)$	8.182514	5.647742	5.874591	5.823278	5.585305
<i>Ελεγκτές PID διακριτός χρόνος (δ-στ)</i>					
Περιοχή 1 K_i	-0.07283	-0.08104	-0.06172	-0.07299	-0.06644
Περιοχή 1 K_p	0.1103	0.159992	0.132498	0.176717	0.150141
Περιοχή 1 K_d	-1.46511	-1.35359	-1.37221	-1.34014	-1.33787
Περιοχή 2 K_i	-0.07283	-0.08104	-0.06172	-0.07299	-0.06644
Περιοχή 2 K_p	0.1103	0.159992	0.132498	0.176717	0.150141
Περιοχή 2 K_d	-1.46511	-1.35359	-1.37221	-1.34014	-1.33787
J	5.035441	391349.8	4264.752	1.03E+09	6496757
$J(IAE)$	1.925559	1.905163	1.869793	1.909803	1.877978



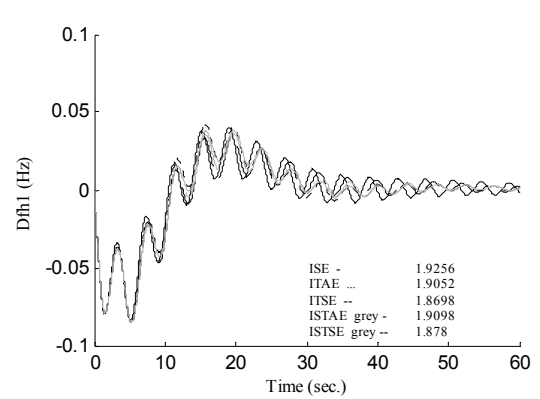
(α) R_2A_SS_S0H2D0W0G0_R0G0_PIO_D(ps1)



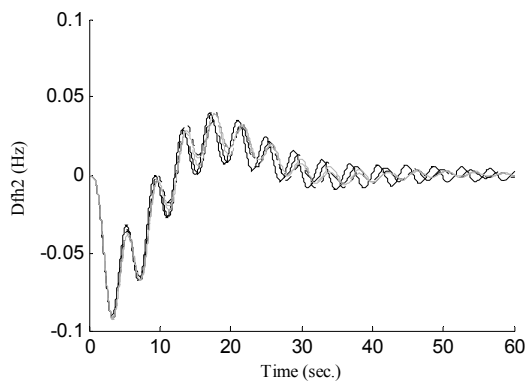
(β) R_2A_SS_S0H2D0W0G0_R0G0_PIO_D(ps2)



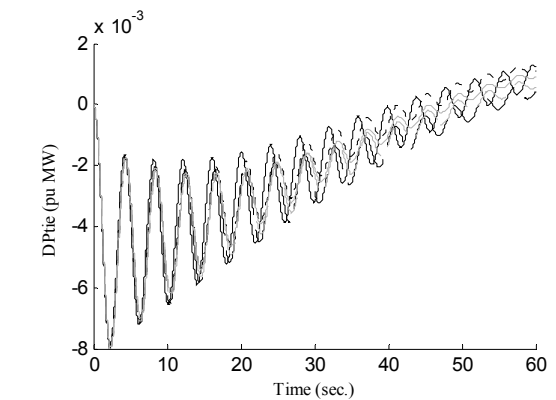
(γ) R_2A_SS_S0H2D0W0G0_R0G0_PIO_D(Ptie)



(δ) R_2A_SS_S0H2D0W0G0_R0G0_PID_D(ps1)



(ε) R_2A_SS_S0H2D0W0G0_R0G0_PID_D(ps2)



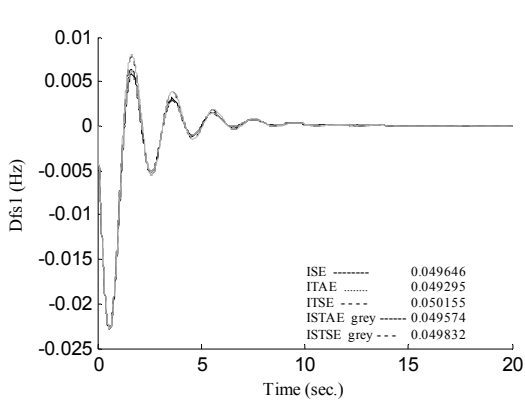
(σ) R_2A_SS_S0H2D0W0G0_R0G0_PID_D(Ptie)

9.2.3. Ατμοστροβλικές Μονάδες

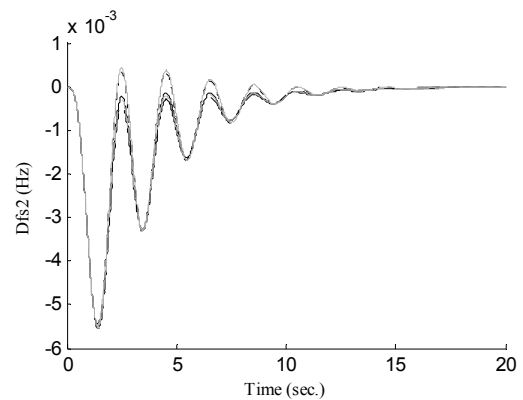
Σε αυτήν την περίπτωση έχουν χρησιμοποιηθεί κοινά κέρδη για τους ελεγκτές κάθε μονάδας.

	ISE	ITAE	ITSE	ISTAE	ISTSE
<i>Ελεγκτές PI διακριτός χρόνος (α-γ)</i>					
Περιοχή 1 Ki	-0.86943	-0.9875	-0.83019	-0.99998	-0.85401
Περιοχή 1 Kp	-1	-0.99999	-0.99997	-0.99124	-1
Περιοχή 2 Ki	-0.86943	-0.9875	-0.83019	-0.99998	-0.85401
Περιοχή 2 Kp	-1	-0.99999	-0.99997	-0.99124	-1
J	0.000397	12.85112	0.038635	7004.814	7.617152
J(IAE)	0.049646	0.049295	0.050155	0.049574	0.049832

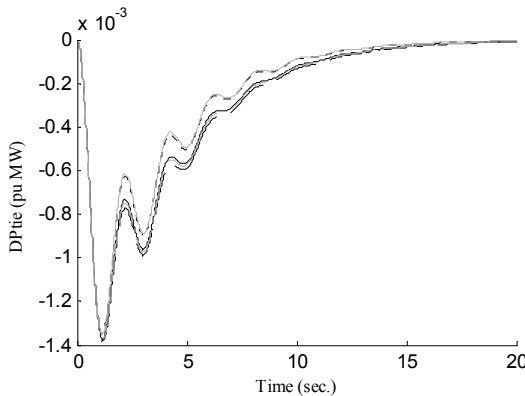
Ελεγκτές PID διακριτός χρόνος (δ -στ)					
Περιοχή 1 K_i	-9.9995	-9.99875	-9.99669	-9.98988	-9.99419
Περιοχή 1 K_p	-9.98901	-5.89219	-9.99568	-3.85813	-7.67073
Περιοχή 1 K_d	-5.83931	-1.19556	-2.28456	-0.98749	-1.45672
Περιοχή 2 K_i	-9.9995	-9.99875	-9.99669	-9.98988	-9.99419
Περιοχή 2 K_p	-9.98901	-5.89219	-9.99568	-3.85813	-7.67073
Περιοχή 2 K_d	-5.83931	-1.19556	-2.28456	-0.98749	-1.45672
J	3.54E-06	0.812663	0.000181	359.2241	0.027175
$J(IAE)$	0.004388	0.00472	0.004	0.006336	0.004243



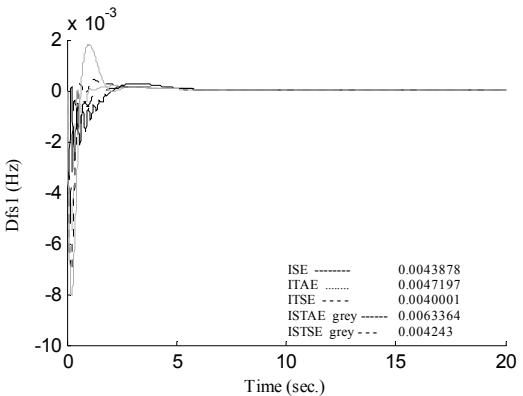
(α) R_2A_SS_S2H0D0W0G0_R1G1_PIO_D(ps1)



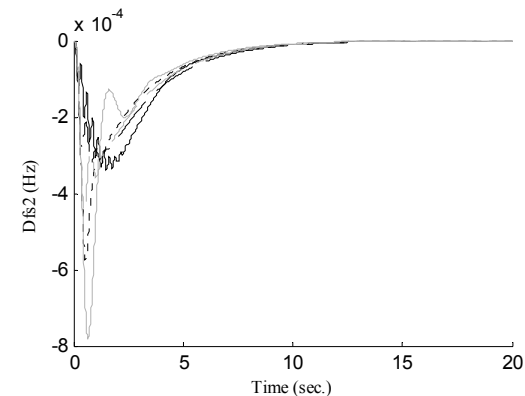
(β) R_2A_SS_S2H0D0W0G0_R1G1_PIO_D(ps2)



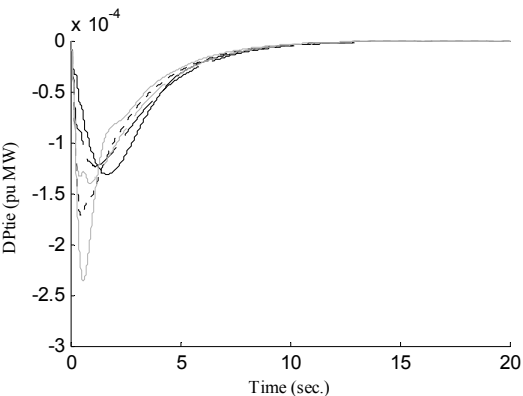
(γ) R_2A_SS_S2H0D0W0G0_R1G1_PIO_D(Ptie)



(δ) R_2A_SS_S2H0D0W0G0_R1G1_PID_D(ps1)



(ε) R_2A_SS_S2H0D0W0G0_R1G1_PID_D(ps2)

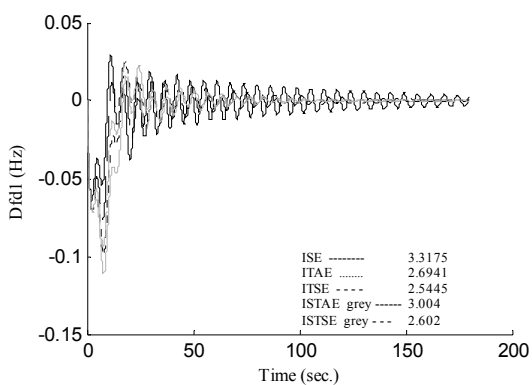


(σ) R_2A_SS_S2H0D0W0G0_R1G1_PID_D(Ptie)

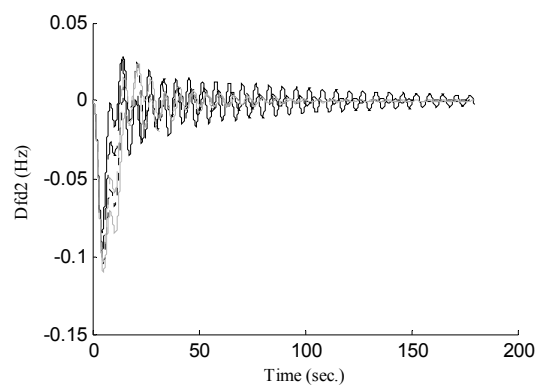
9.2.4. Ντιζελοηλεκτρικές Μονάδες

Εδώ οι ελεγκτές που χρησιμοποιούνται έχουν ρυθμιστεί ώστε κάθε ένας από αυτούς να έχει διαφορετικά κέρδη σε κάθε περιοχή.

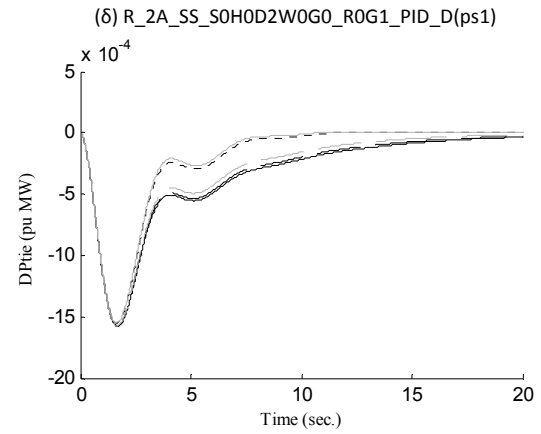
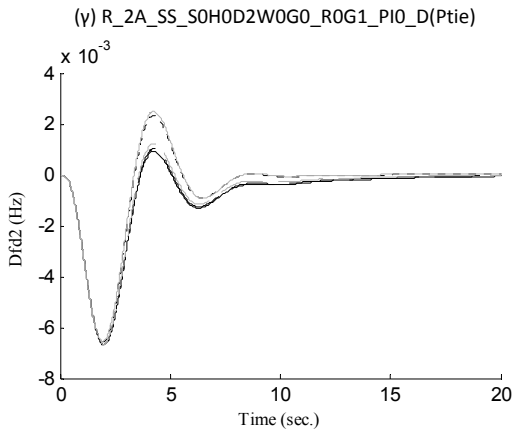
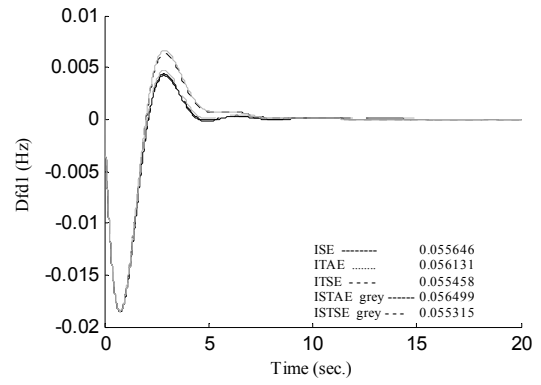
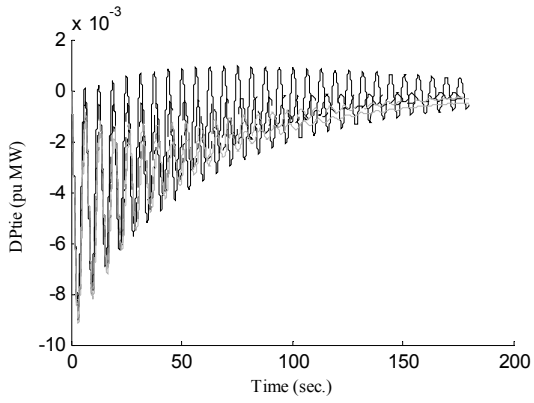
	ISE	ITAE	ITSE	ISTAE	ISTSE
<i>Ελεγκτές PI διακριτός χρόνος (α-γ)</i>					
Περιοχή 1 Ki	-0.05712	-0.03659	-0.04791	-0.03071	-0.03841
Περιοχή 1 Kr	-0.345	0.119317	-0.08087	0.190336	0.072681
Περιοχή 2 Ki	-0.05712	-0.03659	-0.04791	-0.03071	-0.03841
Περιοχή 2 Kr	-0.345	0.119317	-0.08087	0.190336	0.072681
J	0.065549	4650.421	73.21705	17378814	132969
J(IAE)	3.31751	2.694058	2.544502	3.003988	2.601999
<i>Ελεγκτές PID διακριτός χρόνος (δ-στ)</i>					
Περιοχή 1 Ki	-1.73395	-2.98566	-1.81257	-3.15015	-1.99764
Περιοχή 1 Kr	-9.99979	-9.99842	-9.99786	-9.99984	-9.99995
Περιοχή 1 Kd	-9.99957	-9.99988	-9.99969	-9.99805	-9.99999
Περιοχή 2 Ki	-1.73395	-2.98566	-1.81257	-3.15015	-1.99764
Περιοχή 2 Kr	-9.99979	-9.99842	-9.99786	-9.99984	-9.99995
Περιοχή 2 Kd	-9.99957	-9.99988	-9.99969	-9.99805	-9.99999
J	0.000428	13.08869	0.051696	5154.566	9.964748
J(IAE)	0.055646	0.056131	0.055458	0.056499	0.055315
<i>Ελεγκτές ασαφούς λογικής διακριτός χρόνος (η-ι)</i>					
Περιοχή 1 e	0.133963	0.087712	0.059967	0.282508	0.203145
Περιοχή 1 de	0.990469	-0.99043	0.997362	-0.9886	-0.99974
Περιοχή 1 Fi	0.298879	0.314353	0.560254	0.104396	0.131849
Περιοχή 1 Fp	0.995941	-0.996	0.900456	-0.42312	-0.28969
Περιοχή 2 e	0.133963	0.087712	0.059967	0.282508	0.203145
Περιοχή 2de	0.990469	-0.99043	0.997362	-0.9886	-0.99974
Περιοχή 2 Fi	0.298879	0.314353	0.560254	0.104396	0.131849
Περιοχή 2 Fp	0.995941	-0.996	0.900456	-0.42312	-0.28969
J	0.069338	5983.162	75.01577	32479119	145153.4
J(IAE)	2.707671	2.704054	2.510701	3.003863	2.610151



(α) R_2A_SS_S0H0D2W0G0_R0G1_P10_D(ps1)

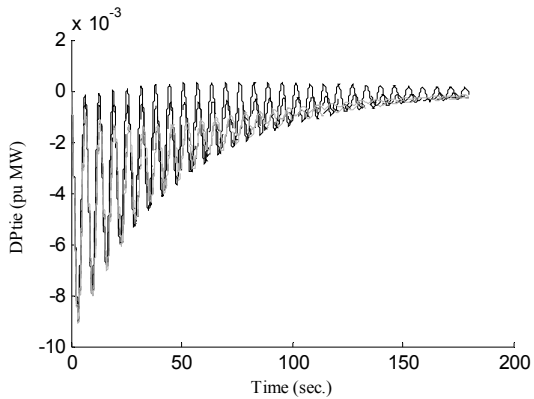
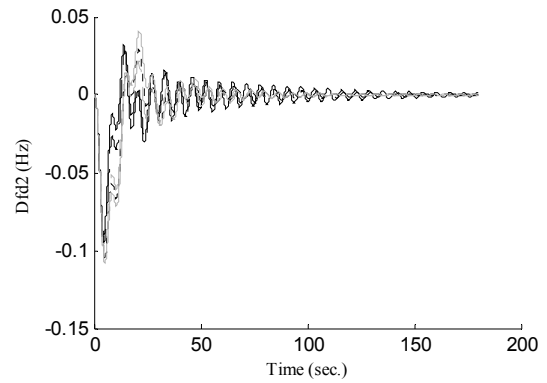
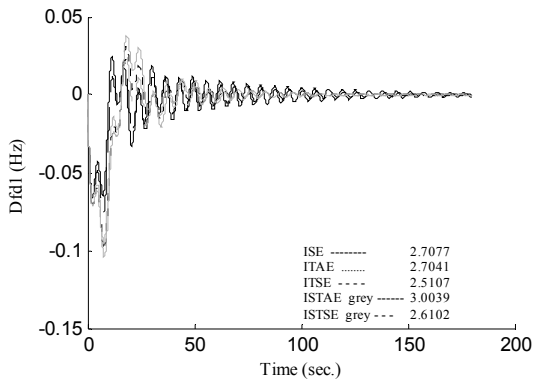


(β) R_2A_SS_S0H0D2W0G0_R0G1_P10_D(ps2)



(ε) R_2A_SS_S0H0D2W0G0_R0G1_PID_D(ps2)

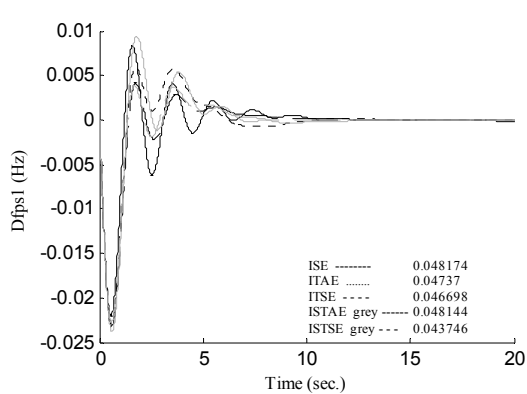
(σ) R_2A_SS_S0H0D2W0G0_R0G1_PID_D(Ptie)



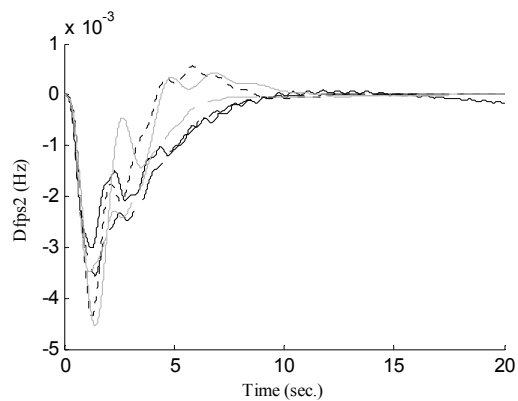
9.2.5. Μεικτά Συστήματα Δύο Περιοχών

α) Σε αυτό το σύστημα η πρώτη περιοχή εξυπηρετείται από μία ατμοστροβλική, μια ντιζελοηλεκτρική και μια αεριοστροβλική μονάδα ενώ η δεύτερη περιοχή έχει μια ατμοηλεκτρική μονάδα, μια υδροηλεκτρική μονάδα και μια ανεμογεννήτρια. Κάθε μια από τις μονάδες που αναφέρονται έχει δικό της ελεγκτή.

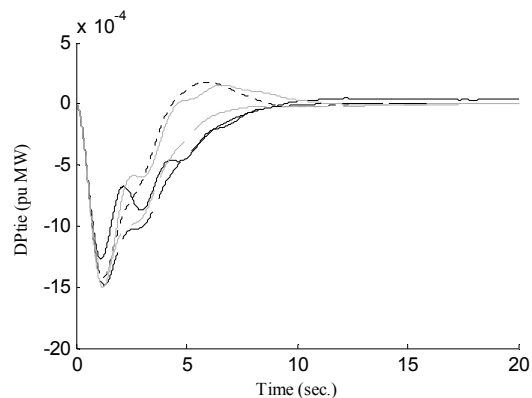
		ISE	ITAE	ITSE	ISTAE	ISTSE
<i>Ελεγκτές PI διακριτός χρόνος (α-δ)</i>						
Περιοχή 1	<i>Steam Ki</i>	-1.39937	-2.12863	0.190581	-2.91825	-1.28967
	<i>Steam Kp</i>	-3.97406	-3.97969	-3.60973	-3.32019	-3.9339
	<i>Diesel Ki</i>	-6.74648	-4.11983	-3.67227	-8.84401	-1.38253
	<i>Diesel Kp</i>	-9.51368	0.838097	-9.85781	-4.73812	-5.68429
	<i>Gas Ki</i>	0.347289	-1.94388	-1.67587	0.550147	-1.52743
	<i>Gas Kp</i>	-0.57082	2.410841	-0.40789	2.852908	1.728162
Περιοχή 2	<i>Steam Ki</i>	5.093362	-22.7296	7.642411	-39.8876	-37.4655
	<i>Steam Kp</i>	-38.1412	-13.5898	-34.4256	3.491612	-20.8061
	<i>Hydro Ki</i>	2.305163	0.649316	3.986624	2.61411	-1.91519
	<i>Hydro Kp</i>	89.48953	-12.8986	59.03594	93.62623	58.75597
	<i>Wind Ki</i>	0.274337	2.050536	2.291655	-3.91085	-2.97913
	<i>Wind Kp</i>	-74.8628	13.00265	36.63616	51.70005	66.42216
<i>J</i>	0.000333	7.2679	0.034134	3165.771	5.043205	
<i>J(IAE)</i>	0.048174	0.04737	0.046698	0.048144	0.043746	
<i>Ελεγκτές PID διακριτός χρόνος (ε-η)</i>						
Περιοχή 1	<i>Steam Ki</i>	-3.73544	-3.84256	-3.94829	-3.91159	-3.74555
	<i>Steam Kp</i>	-3.99678	-3.73413	-3.91092	-2.39842	-3.86331
	<i>Steam Kd</i>	-3.93952	-0.98039	-0.76431	-0.69627	-1.70766
	<i>Diesel Ki</i>	-1.49944	-6.71107	-4.59928	-9.43013	-3.92433
	<i>Diesel Kp</i>	-9.23569	-9.76595	-9.79659	-9.59299	-5.84999
	<i>Diesel Kd</i>	3.931452	1.705968	1.294732	3.742622	-0.39473
	<i>Gas Ki</i>	-1.29048	-1.89627	-1.96831	-1.42144	-1.89926
	<i>Gas Kp</i>	-3.49339	-2.14233	-3.96178	-2.20896	-2.62433
	<i>Gas Kp</i>	-3.78549	-0.6419	-2.31473	-1.06408	-0.37987
Περιοχή 2	<i>Steam Ki</i>	-7.04622	1.911837	-34.7538	-26.1296	15.53201
	<i>Steam Kp</i>	-38.4039	-65.5011	-30.9387	-67.0919	-66.4309
	<i>Steam Kd</i>	-3.96035	-2.23017	-1.90224	-3.02336	-3.29598
	<i>Hydro Ki</i>	-0.16415	0.95951	-3.03955	-0.68566	2.004742
	<i>Hydro Kp</i>	68.40417	-26.523	57.75213	96.72698	82.08218
	<i>Hydro Kd</i>	2.36557	3.950256	1.196032	1.811723	-0.47714
	<i>Wind Ki</i>	3.325696	-3.71248	-1.43666	0.645038	2.786277
	<i>Wind Kp</i>	93.7798	-31.3932	93.31378	4.389187	97.87118
	<i>Wind Kd</i>	-2.8247	-0.14287	0.478294	2.242226	-1.19771
<i>J</i>	4.47E-05	3.467812	0.003598	1311.378	0.795602	
<i>J(IAE)</i>	0.021694	0.025195	0.02338	0.050347	0.024231	



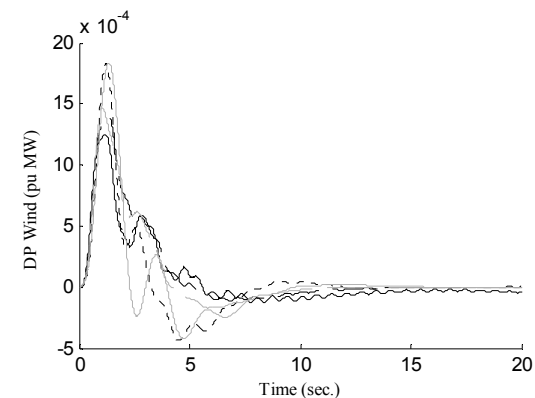
(α) R_2A_MS_SDG_SHW_PI0_D(ps1)



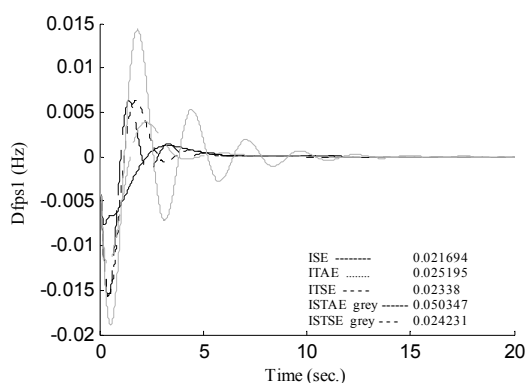
(β) R_2A_MS_SDG_SHW_PI0_D(ps2)



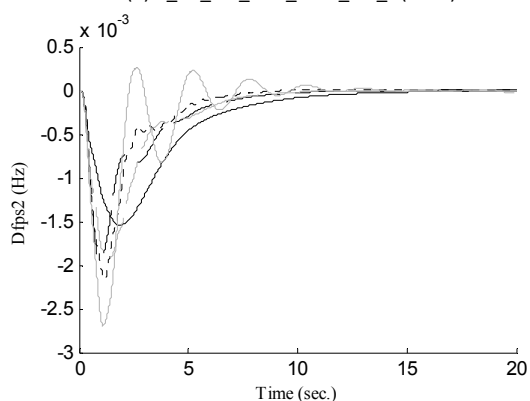
(γ) R_2A_MS_SDG_SHW_PI0_D(Ptie)



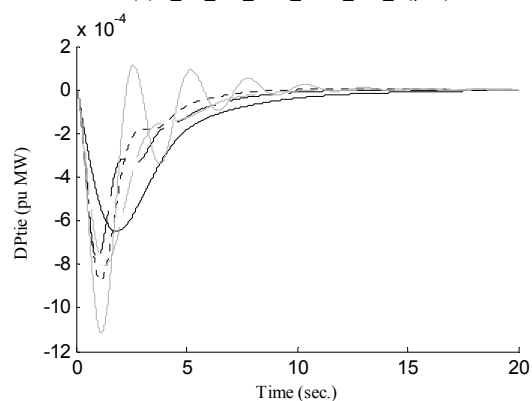
(δ) R_2A_MS_SDG_SHW_PI0_D(DPW)



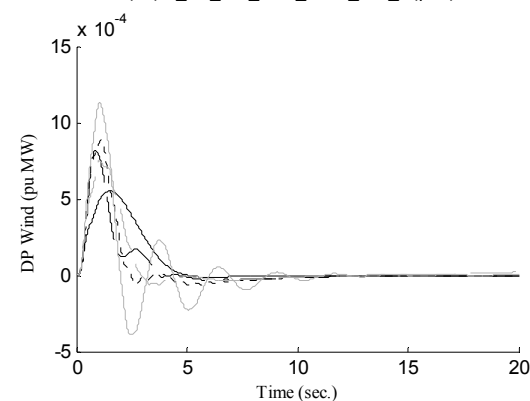
(ε) R_2A_MS_SDG_SHW_PID_D(ps1)



(σ) R_2A_MS_SDG_SHW_PID_D(ps2)



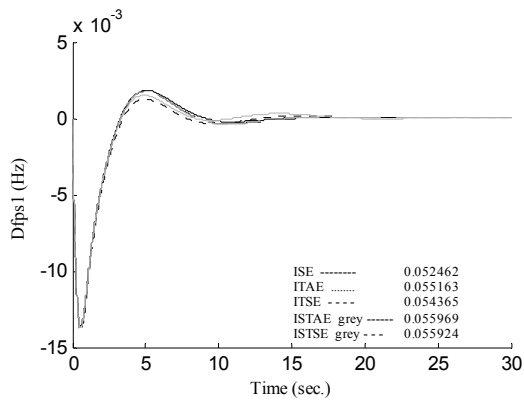
(ζ) R_2A_MS_SDG_SHW_PID_D(Ptie)



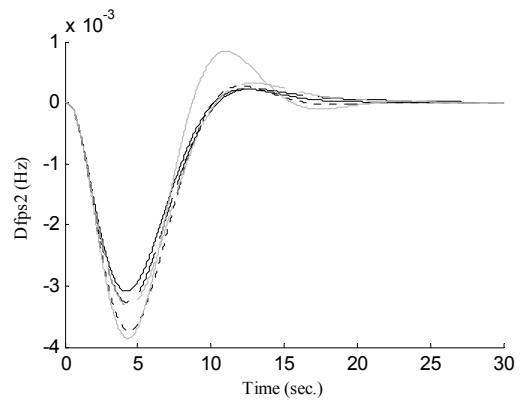
(η) R_2A_MS_SDG_SHW_PID_D(DPW)

β) Σε αυτό το σύστημα η πρώτη περιοχή εξυπηρετείται από μια ατμοηλεκτρική μονάδα, μια ντιζελοηλεκτρική μονάδα και μια ανεμογεννήτρια ενώ η δεύτερη περιοχή έχει μια ατμοηλεκτρική, μια ντιζελοηλεκτρική και μια υδροηλεκτρική μονάδα. Κάθε μια από τις μονάδες που αναφέρονται έχει δικό της ελεγκτή.

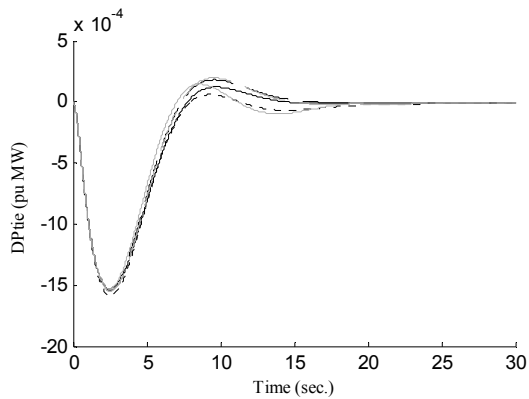
		ISE	ITAE	ITSE	ISTAE	ISTSE
<i>Ελεγκτές PI διακριτός χρόνος (α-δ)</i>						
Περιοχή 1	<i>Steam Ki</i>	-1.99299	-1.99906	-1.99538	-1.99353	-1.97861
	<i>Steam Kp</i>	-1.99757	-1.83592	-1.9876	-1.97472	-1.97134
	<i>Diesel Ki</i>	-0.84475	0.082787	-0.94641	-0.94149	-0.86678
	<i>Diesel Kp</i>	-0.86702	-0.98928	-0.97435	-0.90694	-0.74632
	<i>Wind Ki</i>	0.940161	0.606214	0.804861	0.243003	0.968606
	<i>Wind Kp</i>	-0.03747	0.361576	0.541892	0.890082	0.699274
Περιοχή 2	<i>Steam Ki</i>	0.308354	-0.12113	0.238947	-0.60453	0.144583
	<i>Steam Kp</i>	-0.75905	-0.99279	-0.99747	-0.98257	-0.7455
	<i>Diesel Ki</i>	-0.06935	0.151697	-0.66757	0.393869	-0.45382
	<i>Diesel Kp</i>	-0.46879	-0.82419	-0.29422	-0.1085	-0.8509
	<i>Hydro Ki</i>	0.613116	0.235559	0.153474	0.705346	0.159836
	<i>Hydro Kp</i>	0.982523	-0.65349	0.706599	-0.98752	0.912773
<i>J</i>	0.000249	23.2209	0.043718	21238.7	17.83207	
<i>J(IAE)</i>	0.052462	0.055163	0.054365	0.055969	0.055924	
<i>Ελεγκτές PID διακριτός χρόνος (ε-η)</i>						
Περιοχή 1	<i>Steam Ki</i>	-0.88416	-0.90366	-0.98732	-0.99939	-0.99001
	<i>Steam Kp</i>	-0.97309	-0.93333	-0.96964	-0.85009	-0.91107
	<i>Steam Kd</i>	-0.94885	0.981683	0.997114	0.993014	0.954235
	<i>Diesel Ki</i>	-0.59541	-0.62834	-0.9576	-0.55699	-0.79601
	<i>Diesel Kp</i>	-0.86395	-0.74873	-0.87935	-0.95249	-0.70518
	<i>Diesel Kd</i>	-0.68583	0.335876	-0.93266	0.982195	-0.41094
	<i>Wind Ki</i>	0.891926	0.201551	0.57799	0.81176	0.969308
	<i>Wind Kp</i>	0.247923	0.453461	0.245335	0.803829	0.663128
	<i>Wind Kd</i>	0.557649	0.057012	0.600089	-0.30297	-0.62837
Περιοχή 2	<i>Steam Ki</i>	0.623444	0.252246	0.922274	0.599286	0.312555
	<i>Steam Kp</i>	0.957053	-0.88489	-0.97646	-0.92901	-0.95375
	<i>Steam Kd</i>	0.755116	0.235709	-0.71921	0.725116	-0.98245
	<i>Diesel Ki</i>	-0.86098	0.621843	-0.83945	-0.5789	0.62842
	<i>Diesel Kp</i>	0.372928	-0.82897	-0.16814	0.280754	0.890632
	<i>Diesel Kd</i>	0.477503	-0.99328	0.128016	-0.7206	-0.74483
	<i>Hydro Ki</i>	-0.82182	0.07913	-0.93248	0.053894	-0.18193
	<i>Hydro Kp</i>	0.895314	-0.83037	0.290591	-0.44314	0.773745
	<i>Hydro Kd</i>	-0.39177	-0.14416	-0.61822	-0.49378	-0.70064
<i>J</i>	0.000471	31.69269	0.097563	17815.83	39.24873	
<i>J(IAE)</i>	0.110126	0.088969	0.082207	0.083364	0.085085	



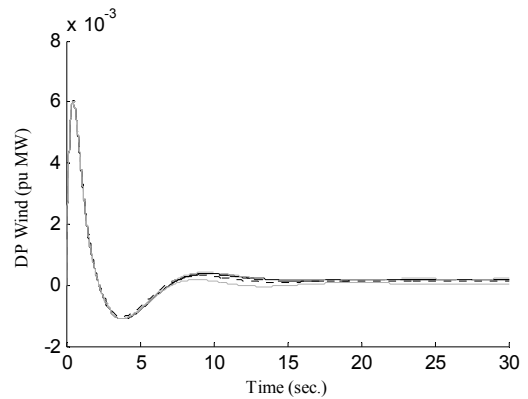
(α) R_2A_MS_SDW_SDH_PIO_D(ps1)



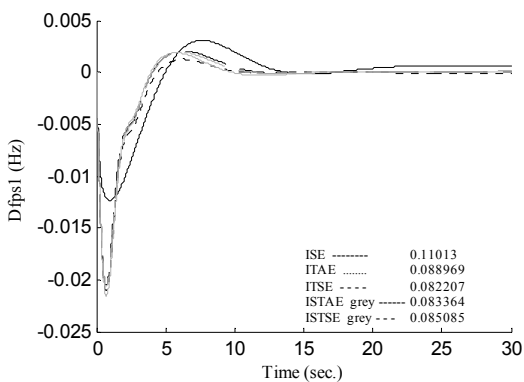
(β) R_2A_MS_SDW_SDH_PIO_D(ps2)



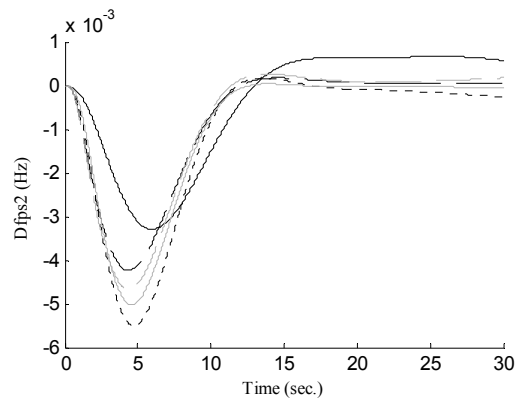
(γ) R_2A_MS_SDW_SDH_PIO_D(Ptie)



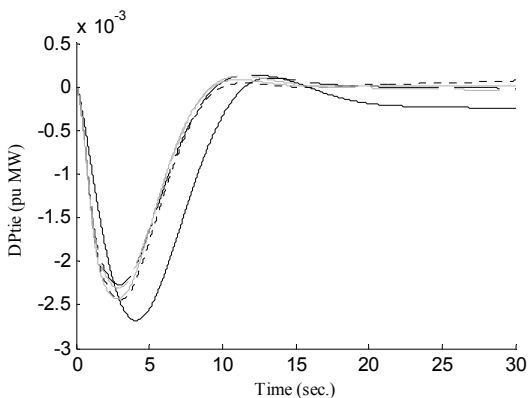
(δ) R_2A_MS_SDW_SDH_PIO_D(DPW)



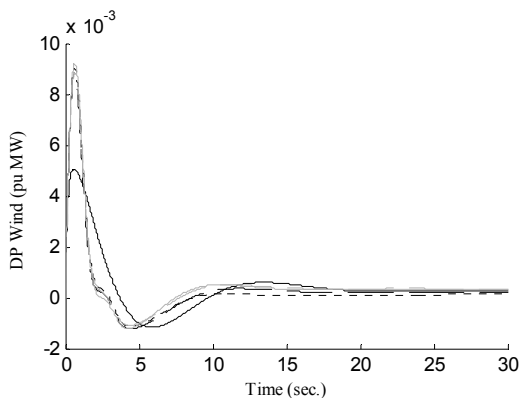
(ε) R_2A_MS_SDW_SDH_PID_D(ps1)



(σ) R_2A_MS_SDW_SDH_PID_D(ps2)



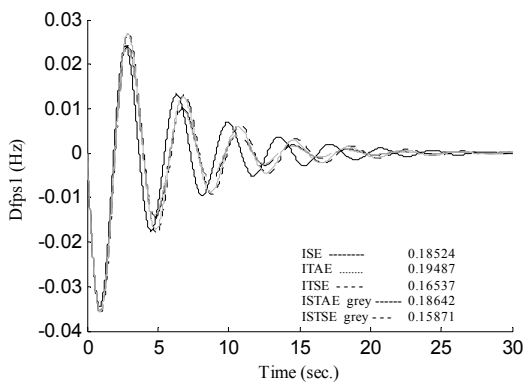
(ζ) R_2A_MS_SDW_SDH_PID_D(Ptie)



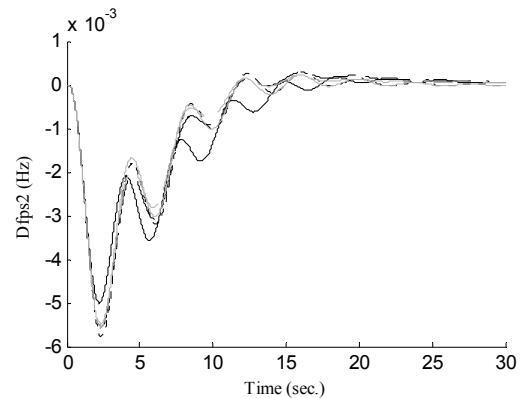
(η) R_2A_MS_SDW_SDH_PID_D(DPW)

γ) Σε αυτό το σύστημα η πρώτη περιοχή εξυπηρετείται από μια ατμοηλεκτρική, μια υδροηλεκτρική και μια αεριοστροβιλική μονάδα ενώ η δεύτερη περιοχή έχει μια ντιζελοηλεκτρική μονάδα και μια ανεμογεννήτρια. Κάθε μια από τις μονάδες που αναφέρονται έχει δική της ελεγκτή.

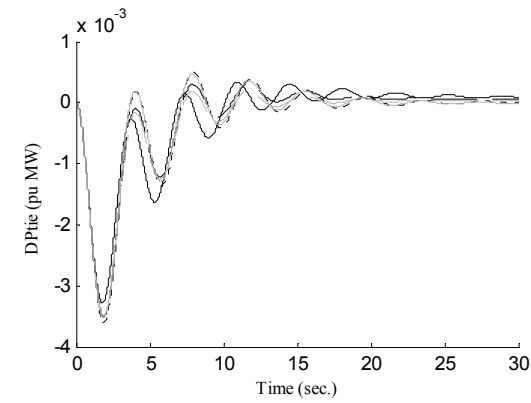
		ISE	ITAE	ITSE	ISTAE	ISTSE
<i>Ελεγκτές PI διακριτός χρόνος (α-δ)</i>						
Περιοχή 1	Steam Ki	-0.89305	-0.61087	-0.46622	-0.72499	-0.60096
	Steam Kp	-0.99945	-0.87027	-0.998	-0.91516	-0.98971
	Hydro Ki	-0.62852	-0.06256	-0.66397	0.010722	-0.38147
	Hydro Kp	0.99713	0.987936	0.964539	0.940443	0.97017
	Gas Ki	-0.40973	-0.97685	-0.96513	-0.96662	-0.86461
	Gas Kp	-0.99574	-0.75378	-0.96665	-0.58859	-0.73003
Περιοχή 2	Diesel Ki	0.076483	0.109622	-0.00096	-0.07713	0.96024
	Diesel Kp	0.779222	-0.82267	-0.78234	-0.34959	-0.29112
	Wind Ki	-0.32991	0.664877	-0.83986	-0.60805	0.702889
	Wind Kp	-0.66467	0.720999	-0.80665	0.644977	0.55646
	J	0.000923	32.10986	0.127201	19885.94	34.59697
	J(IAE)	0.185235	0.194865	0.16537	0.186417	0.158714
<i>Ελεγκτές PID διακριτός χρόνος (ε-η)</i>						
Περιοχή 1	Steam Ki	-0.94578	-0.99553	-0.90463	-0.99643	-0.98773
	Steam Kp	-0.99858	-0.84411	-0.99946	-0.98037	-0.85635
	Steam Kd	-0.80804	-0.01891	-0.4446	0.16614	-0.03165
	Hydro Ki	-0.30724	-0.15307	-0.17419	-0.26363	-0.45986
	Hydro Kp	-0.31877	0.062493	-0.9979	-0.55416	-0.71628
	Hydro Kd	-0.84883	-0.89369	-0.87312	-0.67237	-0.9465
	Gas Ki	-0.98772	-0.97522	-0.99944	-0.99859	-0.9677
	Gas Kp	-0.98989	-0.85144	-0.9847	0.358084	-0.98068
	Gas Kd	-0.99024	-0.68529	-0.98838	-0.97079	-0.99287
Περιοχή 2	Diesel Ki	-0.00572	0.884435	0.758558	0.882911	0.923138
	Diesel Kp	-0.11578	-0.61959	0.350141	-0.79183	-0.94382
	Diesel Kd	0.039257	-0.5315	-0.0397	-0.51886	-0.85249
	Wind Ki	-0.45504	0.843775	-0.88974	0.633781	0.081088
	Wind Kp	0.613022	-0.25698	-0.39598	0.92673	-0.87324
	Wind Kd	0.468341	-0.22817	-0.34944	-0.29424	0.983777
	J	0.000383	15.6746	0.048024	7330.091	11.02621
	J(IAE)	0.072884	0.143041	0.078528	0.126603	0.136244



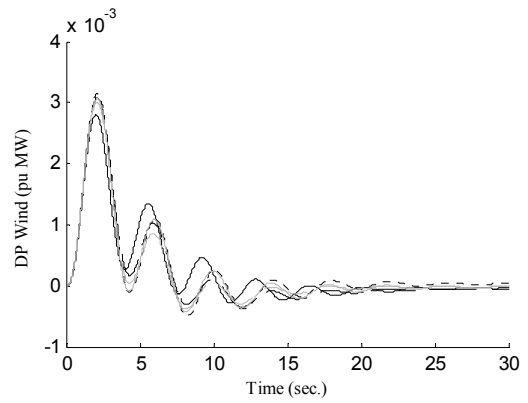
(α) R_2A_MS_SHG_WD_PIO_D(ps1)



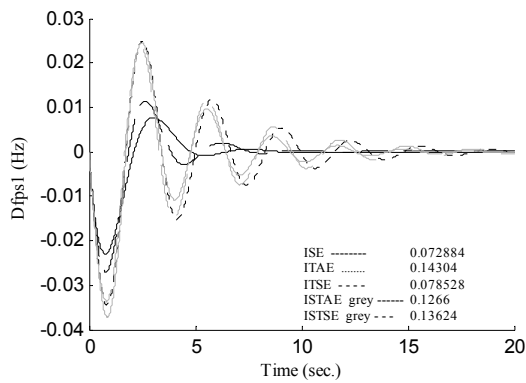
(β) R_2A_MS_SHG_WD_PIO_D(ps2)



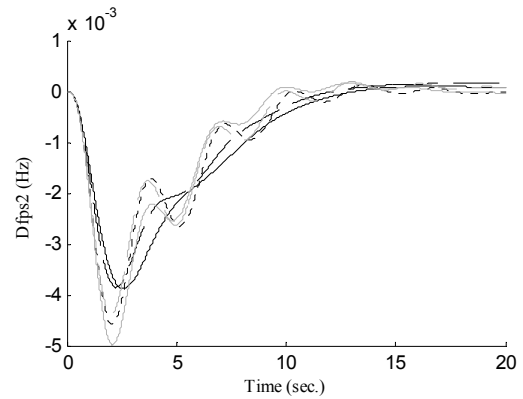
(γ) R_2A_MS_SHG_WD_PIO_D(Ptie)



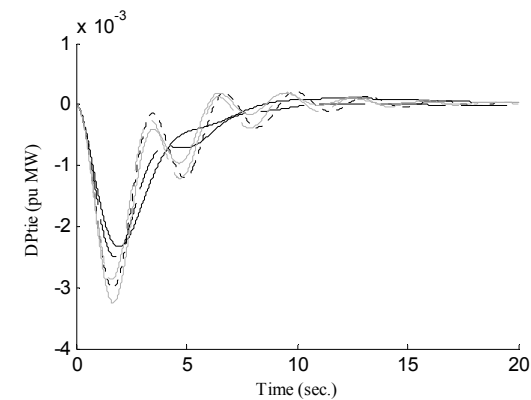
(δ) R_2A_MS_SHG_WD_PIO_D(DPW)



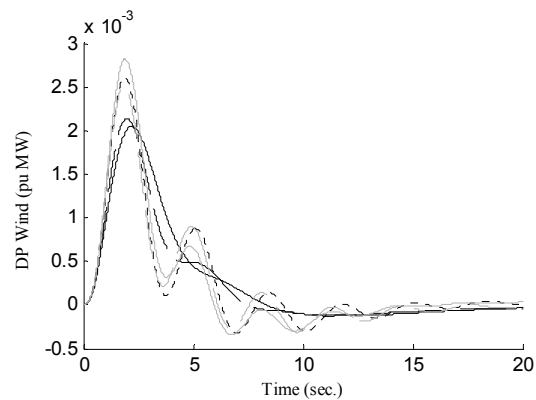
(ε) R_2A_MS_SHG_WD_PID_D(ps1)



(σ) R_2A_MS_SHG_WD_PID_D(ps2)



(ζ) R_2A_MS_SHG_WD_PID_D(Ptie)



(η) R_2A_MS_SHG_WD_PID_D(DPW)

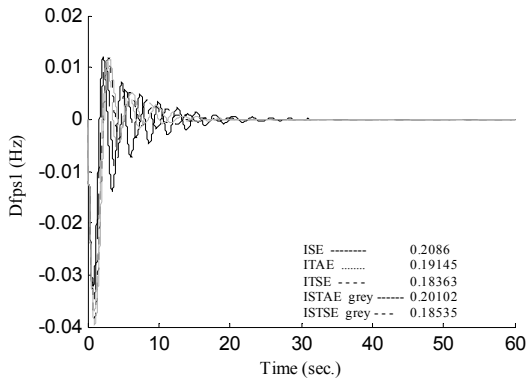
9.3. Συστήματα Τριών Περιοχών Σε Μη Απελευθερωμένη Αγορά

Στους πίνακες που ακολουθούν παρουσιάζονται τα κέρδη των ελεγκτών όπως υπολογίστηκαν από τον γενετικό αλγόριθμο για τα συστήματα τριών περιοχών ελέγχου όταν δεν υπάρχει καθεστώς απελευθερωμένης αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας. Ακόμα, υπολογίζονται οι δείκτες απόδοσης για κάθε κριτήριο αλλά και ανηγμένοι σύμφωνα με όσα έχουν αναφερθεί. Για τα συστήματα αυτού του εδαφίου παρουσιάζονται οι χρονοαποκρίσεις της συχνότητας κάθε περιοχής (ps1, ps2, ps3) ελέγχου, της ισχύς που μεταφέρεται μέσω της διασύνδεσης των περιοχών (DPtie12, DPtie23, DPtie13) και αν υπάρχει ανεμογεννήτρια στο εξεταζόμενο σύστημα φαίνεται επίσης η χρονοαπόκριση της παραγόμενης ισχύος από αυτή την μονάδα μόνο (DPwind1, DPwind2). Τα πρώτα τέσσερα συστήματα είναι με ένα μόνο είδος πηγών δηλαδή μια όμοια μονάδα σε κάθε περιοχή. Το επόμενο έχει διαφορετικά είδη πηγών σε κάθε περιοχή, ενώ για όλες τις περιπτώσεις έχει θεωρηθεί διαταραχή στην πρώτη περιοχή $DP_L=0.01$ και βήμα χρόνου για τους υπολογισμούς των δεικτών απόδοσης 0.01 sec όσο δηλαδή είναι και το βήμα των ελεγκτών αφού εδώ εξετάζονται μόνο περιπτώσεις διακριτού χρόνου.

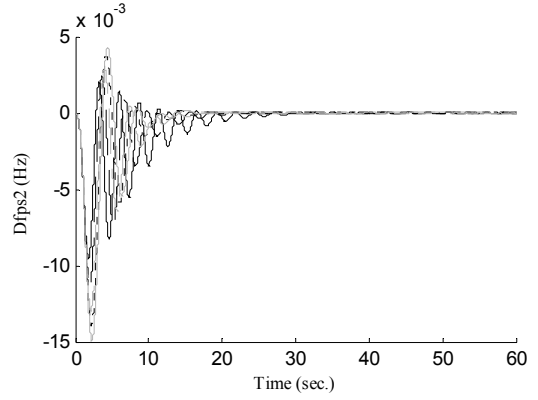
9.3.1. Αεριοστροβλικές Μονάδες

Σε αυτήν την περίπτωση έχουν χρησιμοποιηθεί κοινά κέρδη για τον αναλογικό – ολοκληρωτικό ελεγκτή κάθε μονάδας, καθώς επίσης και για τον ελεγκτή τριών όρων κάθε μονάδας. Ακόμα για αυτό το σύστημα μόνο, στον έλεγχο τριών όρων χάριν παραδείγματος, έγινε προσομοίωση στην οποία χρησιμοποιήθηκαν διαφορετικές ρυθμίσεις για τον ελεγκτή κάθε περιοχής.

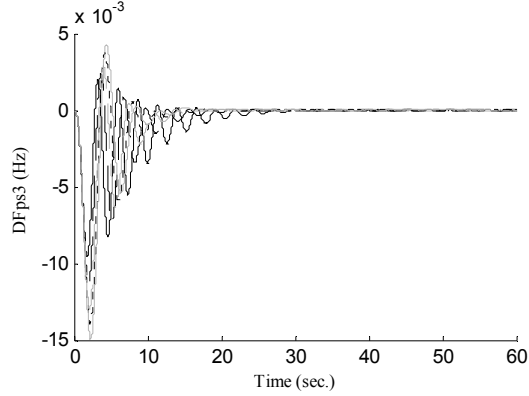
	ISE	ITAE	ITSE	ISTAE	ISTSE
<i>Ελεγκτές PI διακριτός χρόνος (α-στ)</i>					
Περιοχή 1 Κί	-0.20421	-0.23999	-0.23144	-0.23437	-0.23182
Περιοχή 1 Κρ	-0.26347	0.302471	0.032351	0.376708	0.211893
Περιοχή 2 Κί	-0.20421	-0.23999	-0.23144	-0.23437	-0.23182
Περιοχή 2 Κρ	-0.26347	0.302471	0.032351	0.376708	0.211893
Περιοχή 3 Κί	-0.20421	-0.23999	-0.23144	-0.23437	-0.23182
Περιοχή 3 Κρ	-0.26347	0.302471	0.032351	0.376708	0.211893
J	0.00162	67.75086	0.345949	42172.59	118.2175
J(IAE)	0.208606	0.191453	0.18363	0.201025	0.185347
<i>Ελεγκτές PID με κοινές παραμέτρους σε διακριτό χρόνο (1.ζ-1.λ)</i>					
Περιοχή 1 Κί	-0.99973	-1	-1	-1	-0.99972
Περιοχή 1 Κρ	-0.99951	-0.99976	-0.99999	-0.3724	-0.99998
Περιοχή 1 Κδ	-0.99997	-0.69511	-0.99947	-0.51302	-0.68404
Περιοχή 2 Κί	-0.99973	-1	-1	-1	-0.99972
Περιοχή 2 Κρ	-0.99951	-0.99976	-0.99999	-0.3724	-0.99998
Περιοχή 2 Κδ	-0.99997	-0.69511	-0.99947	-0.51302	-0.68404
Περιοχή 3 Κί	-0.99973	-1	-1	-1	-0.99972
Περιοχή 3 Κρ	-0.99951	-0.99976	-0.99999	-0.3724	-0.99998
Περιοχή 3 Κδ	-0.99997	-0.69511	-0.99947	-0.51302	-0.68404
J	0.041512	9.602899	0.015873	3336.513	2.9189
J(IAE)	0.041736	0.041174	0.0415	0.052445	0.041292
<i>Ελεγκτές PID με διαφορετικές παραμέτρους σε διακριτό χρόνο (2.ζ-2.λ)</i>					
Περιοχή 1 Κί	-0.99584	-0.99726	-0.99973	-0.99227	-0.99994
Περιοχή 1 Κρ	-0.99737	-0.6009	-0.9947	-0.17143	-0.9921
Περιοχή 1 Κδ	-0.99954	-0.65847	-0.97735	-0.51188	-0.63482
Περιοχή 2 Κί	-0.65226	-0.02097	-0.7364	-0.00651	-0.50236
Περιοχή 2 Κρ	-0.39122	-0.6881	-0.99366	-0.62969	-0.77267
Περιοχή 2 Κδ	-0.9577	-0.43408	-0.95435	-0.84772	-0.89343
Περιοχή 3 Κί	-0.7323	-0.02288	-0.98029	-0.01262	-0.25756
Περιοχή 3 Κρ	-0.89043	-0.76692	-0.98417	-0.75388	-0.93439
Περιοχή 3 Κδ	-0.94771	-0.49726	-0.89767	-0.87107	-0.89509
J	0.000171	9.397988	0.015966	2586.258	2.902478
J(IAE)	0.041736	0.046292	0.041554	0.056055	0.042061



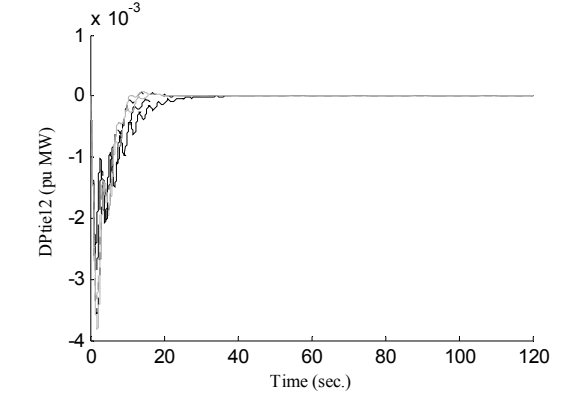
(α) R_3A_SS_S0H0D0W0G3_ROG0_PIO_D(ps1)



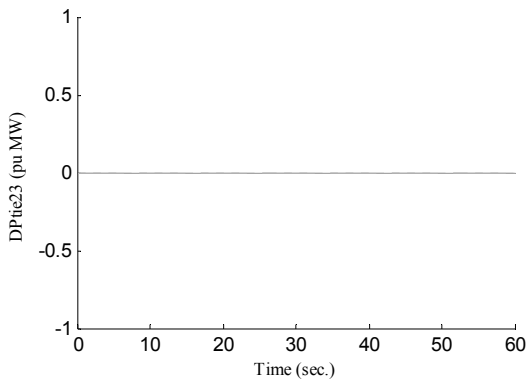
(β) R_3A_SS_S0H0D0W0G3_ROG0_PIO_D(ps2)



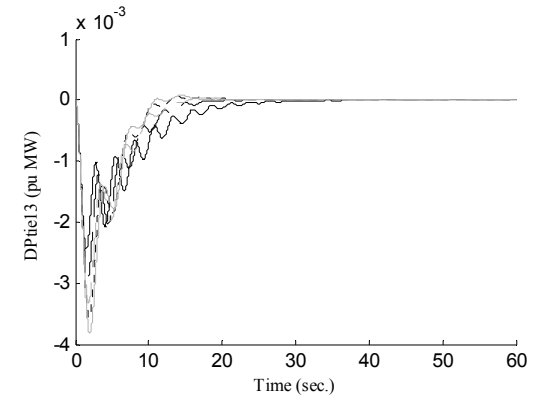
(γ) R_3A_SS_S0H0D0W0G3_ROG0_PIO_D(ps3)



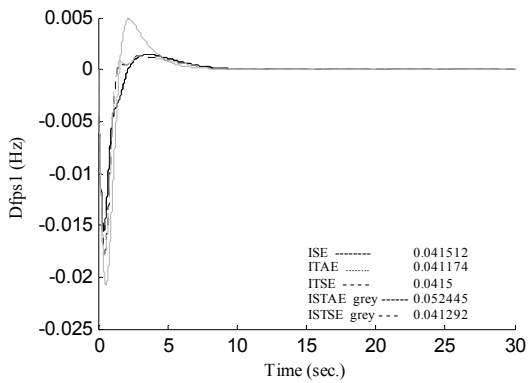
(δ) R_3A_SS_S0H0D0W0G3_ROG0_PIO_D(Ptie12)



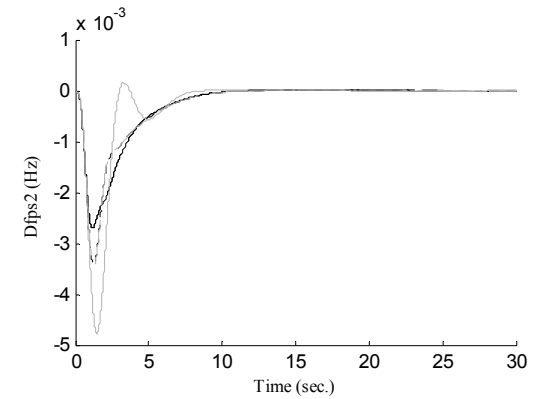
(ε) R_3A_SS_S0H0D0W0G3_ROG0_PIO_D(Ptie23)



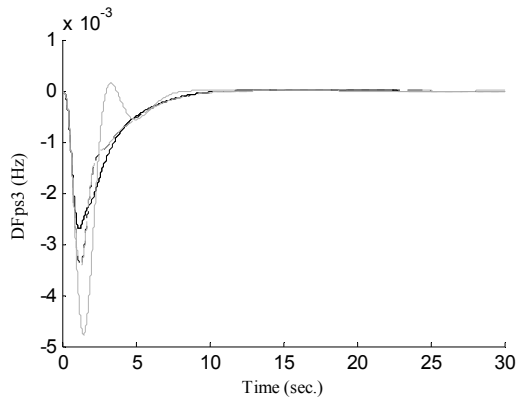
(σ) R_3A_SS_S0H0D0W0G3_ROG0_PIO_D(Ptie13)



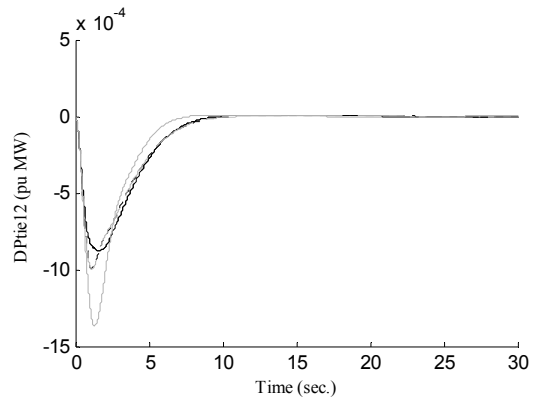
(1.ζ) R_3A_SS_S0H0D0W0G3_ROG0_PID_D(ps1)



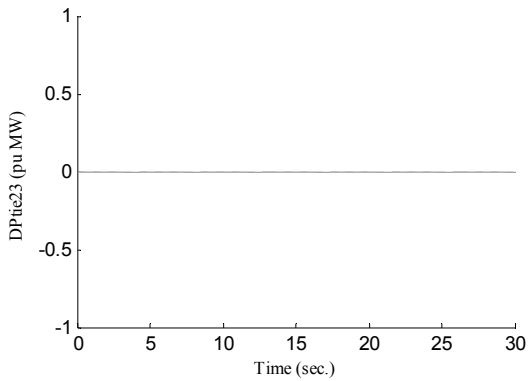
(1.η) R_3A_SS_S0H0D0W0G3_ROG0_PID_D(ps2)



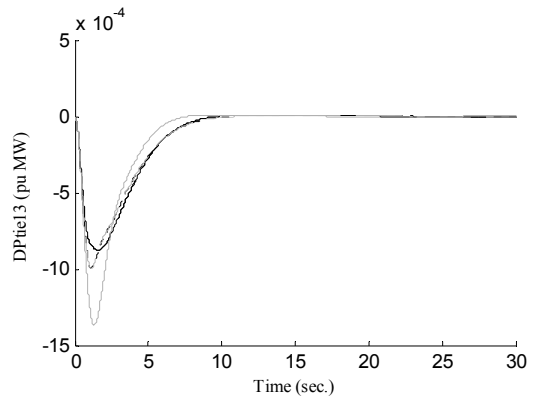
(1.θ) R_3A_SS_S0H0D0W0G3_ROG0_PID_D(ps3)



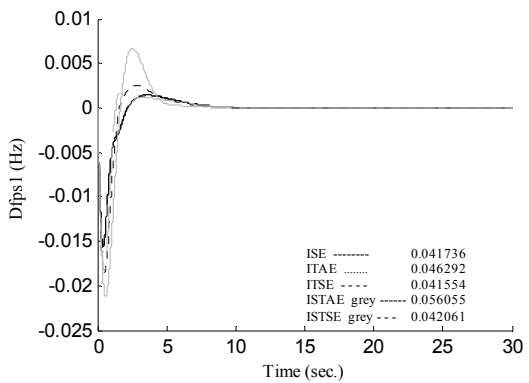
(1.ι) R_3A_SS_S0H0D0W0G3_ROG0_PID_D(Ptie12)



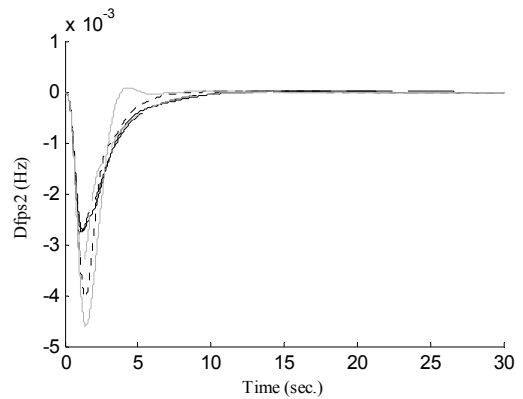
(1.κ) R_3A_SS_S0H0D0W0G3_ROG0_PID_D(Ptie23)



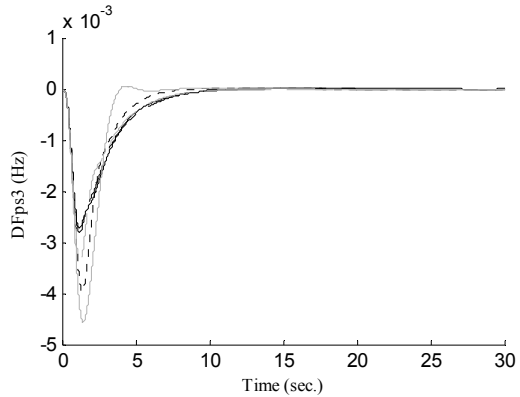
(1.λ) R_3A_SS_S0H0D0W0G3_ROG0_PID_D(Ptie13)



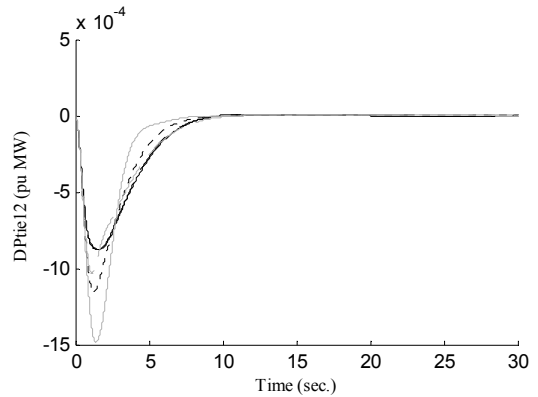
(2.ζ) R_3A_SS_S0H0D0W0G3_ROG0_PID_D(ps1)



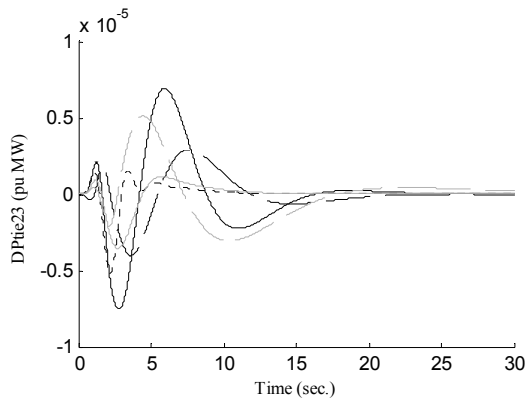
(2.η) R_3A_SS_S0H0D0W0G3_ROG0_PID_D(ps2)



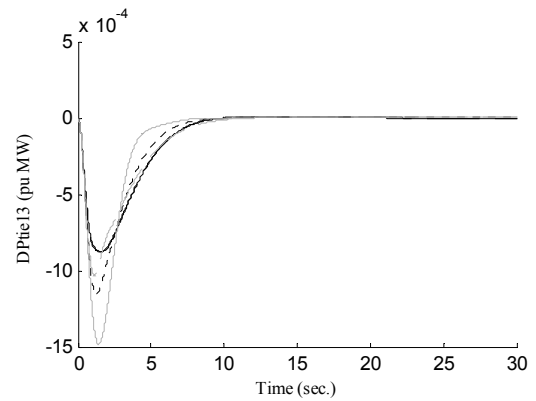
(2.θ) R_3A_SS_S0H0D0W0G3_ROG0_PID_D(ps3)



(2.ι) R_3A_SS_S0H0D0W0G3_ROG0_PID_D(Ptie12)



(2.κ) R_3A_SS_S0H0D0W0G3_ROG0_PID_D(Ptie23)

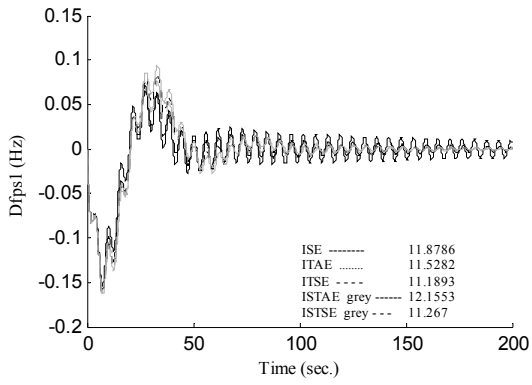


(2.λ) R_3A_SS_S0H0D0W0G3_ROG0_PID_D(Ptie13)

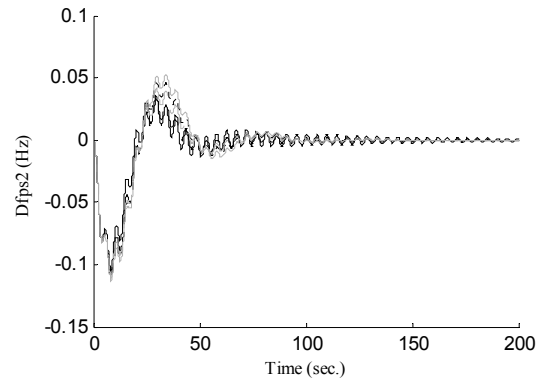
9.3.2. Υδροτροβιλικές Μονάδες

Σε αυτήν την περίπτωση έχουν χρησιμοποιηθεί κοινά κέρδη για τους ελεγκτές κάθε περιοχής.

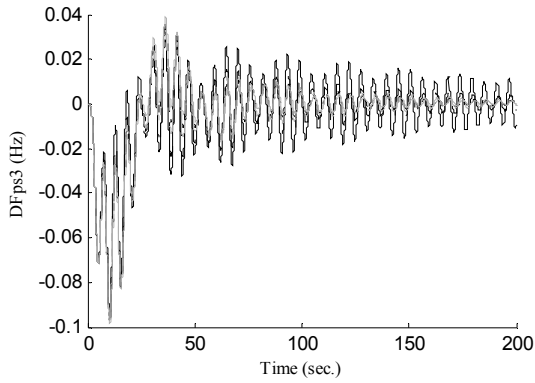
	ISE	ITAE	ITSE	ISTAE	ISTSE
<i>Ελεγκτές PI διακριτός χρόνος (α-στ)</i>					
Περιοχή 1 Ki	-0.00924	-0.01042	-0.00772	-0.01111	-0.00933
Περιοχή 1 Kp	0.637278	0.706637	0.673301	0.722209	0.695963
Περιοχή 2 Ki	-0.00924	-0.01042	-0.00772	-0.01111	-0.00933
Περιοχή 2 Kp	0.637278	0.706637	0.673301	0.722209	0.695963
Περιοχή 3 Ki	-0.00924	-0.01042	-0.00772	-0.01111	-0.00933
Περιοχή 3 Kp	0.637278	0.706637	0.673301	0.722209	0.695963
J	0.433776	43078.39	782.8148	3.28E+08	2819071
J(IAE)	11.87857	11.52817	11.18926	12.15526	11.26701
<i>Ελεγκτές PID διακριτός χρόνος (ζ-λ)</i>					
Περιοχή 1 Ki	-0.02594	-0.01946	-0.01646	-0.01395	-0.01364
Περιοχή 1 Kp	0.466685	0.486162	0.460435	0.518171	0.489617
Περιοχή 1 Kd	-0.89204	-0.70305	-0.82247	-0.68333	-0.79412
Περιοχή 2 Ki	-0.02594	-0.01946	-0.01646	-0.01395	-0.01364
Περιοχή 2 Kp	0.466685	0.486162	0.460435	0.518171	0.489617
Περιοχή 2 Kd	-0.89204	-0.70305	-0.82247	-0.68333	-0.79412
Περιοχή 3 Ki	-0.02594	-0.01946	-0.01646	-0.01395	-0.01364
Περιοχή 3 Kp	0.466685	0.486162	0.460435	0.518171	0.489617
Περιοχή 3 Kd	-0.89204	-0.70305	-0.82247	-0.68333	-0.79412
J	0.150643	8177.171	159.6649	22812938	286750.9
J(IAE)	5.638194	5.501291	5.765873	5.623535	5.575441



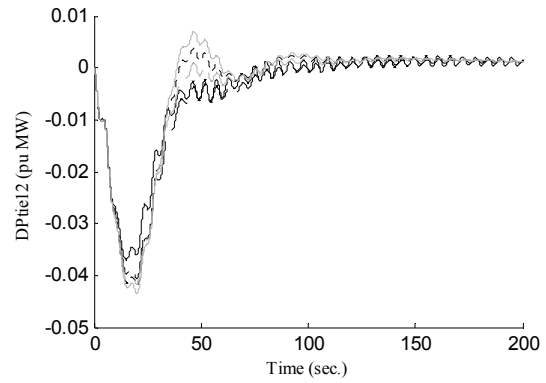
(α) R_3A_SS_S0H3D0W0G0_ROG0_PIO_D(ps1)



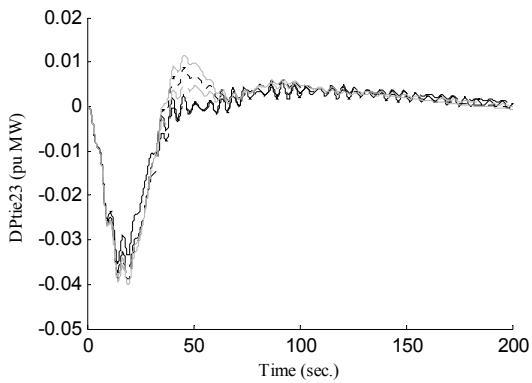
(β) R_3A_SS_S0H3D0W0G0_ROG0_PIO_D(ps2)



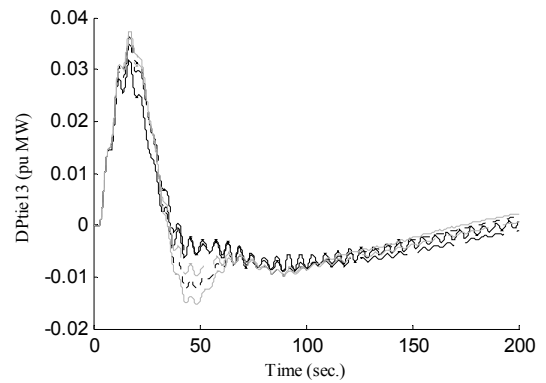
(γ) R_3A_SS_S0H3D0W0G0_ROG0_PIO_D(ps3)



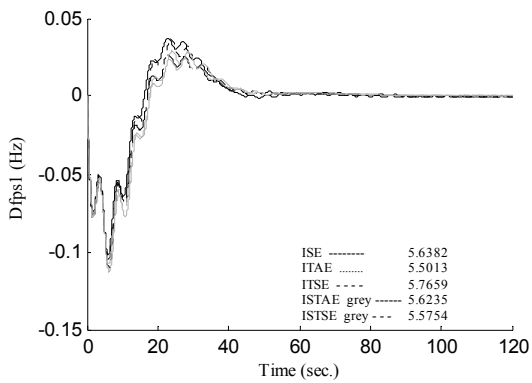
(δ) R_3A_SS_S0H3D0W0G0_ROG0_PIO_D(Ptie12)



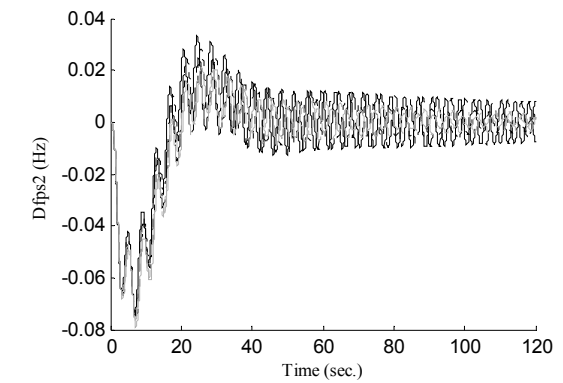
(ε) R_3A_SS_S0H3D0W0G0_ROG0_PIO_D(Ptie23)



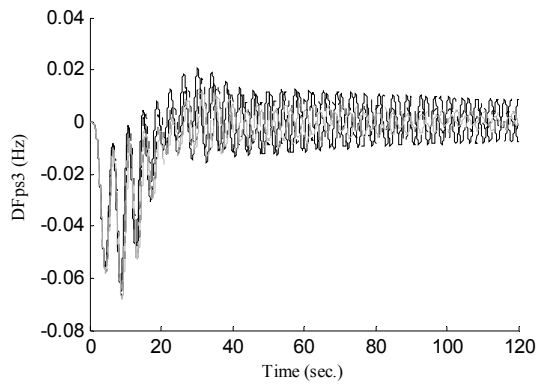
(σ) R_3A_SS_S0H3D0W0G0_ROG0_PIO_D(Ptie13)



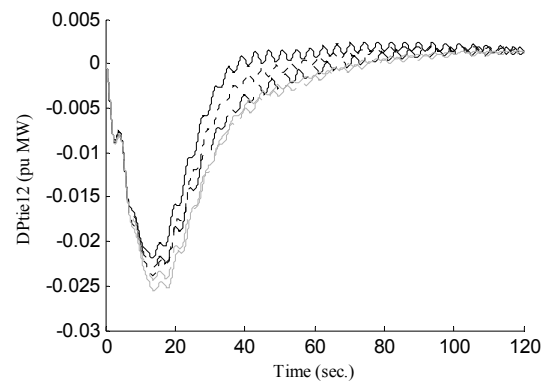
(ζ) R_3A_SS_S0H3D0W0G0_ROG0_PID_D(ps1)



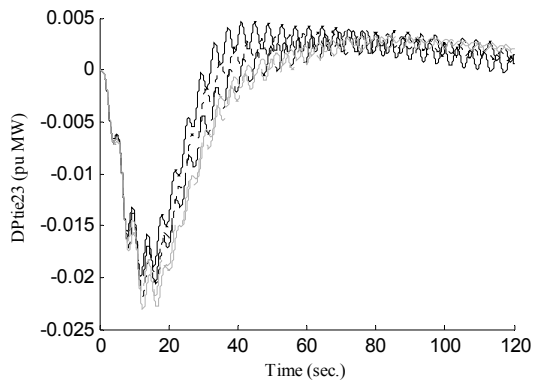
(η) R_3A_SS_S0H3D0W0G0_ROG0_PID_D(ps2)



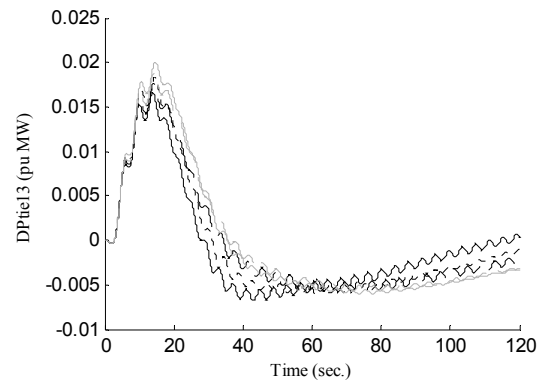
(θ) R_3A_SS_S0H3D0W0G0_R0G0_PID_D(ps3)



(ι) R_3A_SS_S0H3D0W0G0_R0G0_PID_D(Ptie12)



(κ) R_3A_SS_S0H3D0W0G0_R0G0_PID_D(Ptie23)



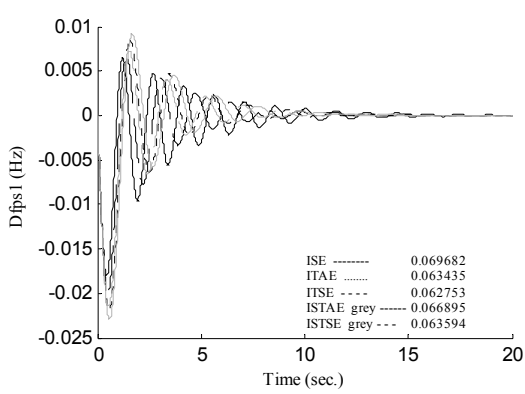
(λ) R_3A_SS_S0H3D0W0G0_R0G0_PID_D(Ptie13)

9.3.3. Ατμοστροβλικές Μονάδες

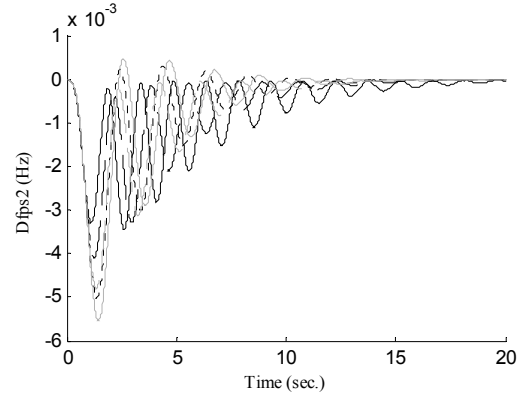
Σε αυτήν την περίπτωση έχουν χρησιμοποιηθεί κοινά κέρδη για τους ελεγκτές κάθε περιοχής.

	ISE	ITAE	ITSE	ISTAE	ISTSE
<i>Ελεγκτές PI διακριτός χρόνος (α-στ)</i>					
Περιοχή 1 Ki	-0.58491	-0.75913	-0.67214	-0.74211	-0.67917
Περιοχή 1 Kr	-2.00715	-1.0176	-1.43692	-0.85164	-1.11655
Περιοχή 2 Ki	-0.58491	-0.75913	-0.67214	-0.74211	-0.67917
Περιοχή 2 Kr	-2.00715	-1.0176	-1.43692	-0.85164	-1.11655
Περιοχή 3 Ki	-0.58491	-0.75913	-0.67214	-0.74211	-0.67917
Περιοχή 3 Kr	-2.00715	-1.0176	-1.43692	-0.85164	-1.11655
J	0.000284	17.93821	0.04014	9606.315	10.19405
J(IAE)	0.069682	0.063435	0.062753	0.066895	0.063594
<i>Ελεγκτές PID διακριτός χρόνος (ζ-λ)</i>					
Περιοχή 1 Ki	-3.99688	-3.99991	-3.99974	-3.99956	-3.99987
Περιοχή 1 Kr	-3.99975	-3.27672	-3.99995	-1.83868	-3.99501
Περιοχή 1 Kd	-3.99954	-0.72391	-1.06579	-0.67218	-0.77135
Περιοχή 2 Ki	-3.99688	-3.99991	-3.99974	-3.99956	-3.99987
Περιοχή 2 Kr	-3.99975	-3.27672	-3.99995	-1.83868	-3.99501
Περιοχή 2 Kd	-3.99954	-0.72391	-1.06579	-0.67218	-0.77135

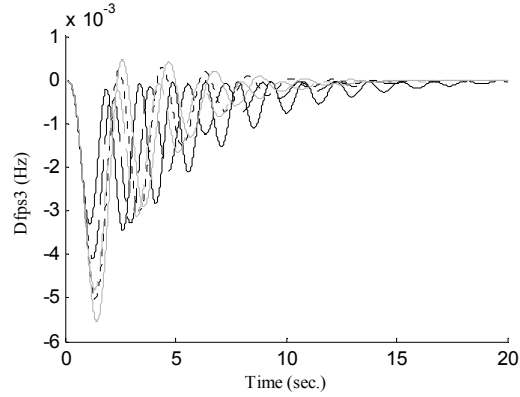
Περιοχή 3 Ki	-3.99688	-3.99991	-3.99974	-3.99956	-3.99987
Περιοχή 3 Kp	-3.99975	-3.27672	-3.99995	-1.83868	-3.99501
Περιοχή 3 Kd	-3.99954	-0.72391	-1.06579	-0.67218	-0.77135
J	1.25E-05	2.043313	0.001032	634.5587	0.143316
J(IAE)	0.011952	0.011641	0.010906	0.015116	0.010706



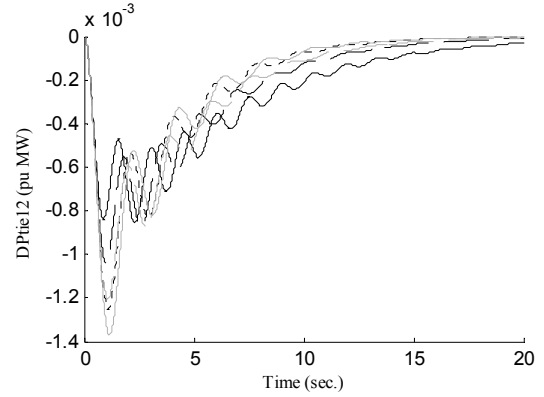
(α) R_3A_SS_S3H0D0W0G0_R1G1_PI0_D(ps1)



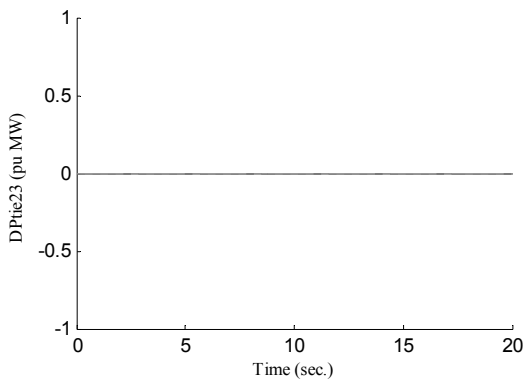
(β) R_3A_SS_S3H0D0W0G0_R1G1_PI0_D(ps2)



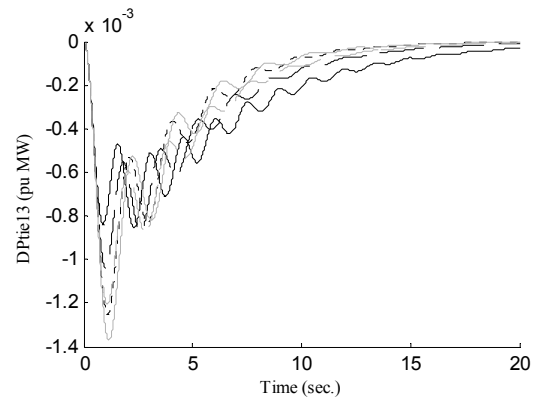
(γ) R_3A_SS_S3H0D0W0G0_R1G1_PI0_D(ps3)



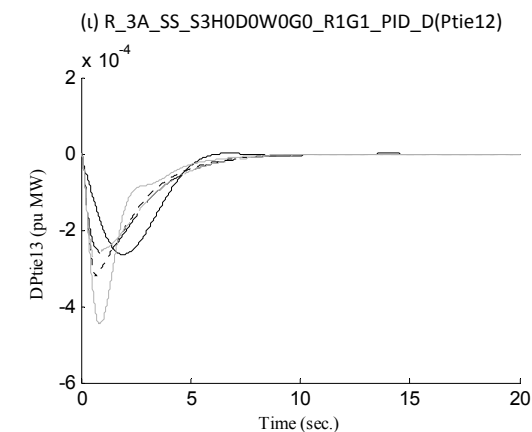
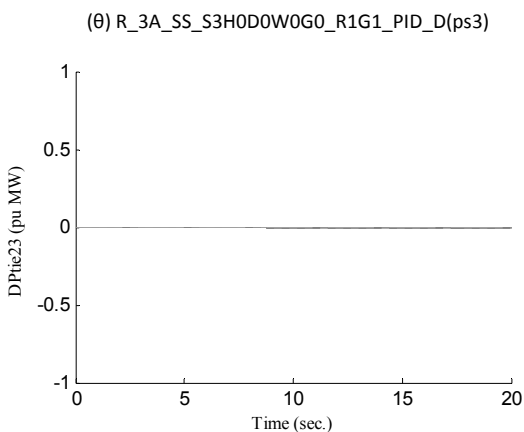
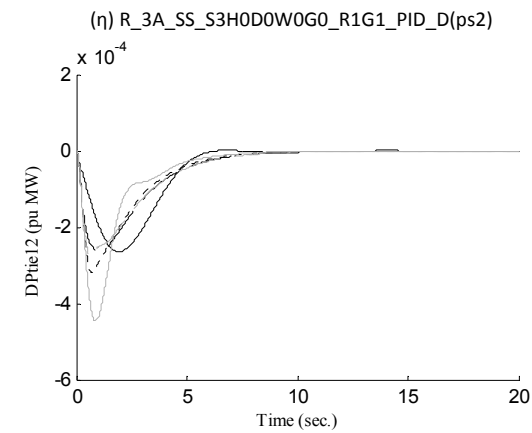
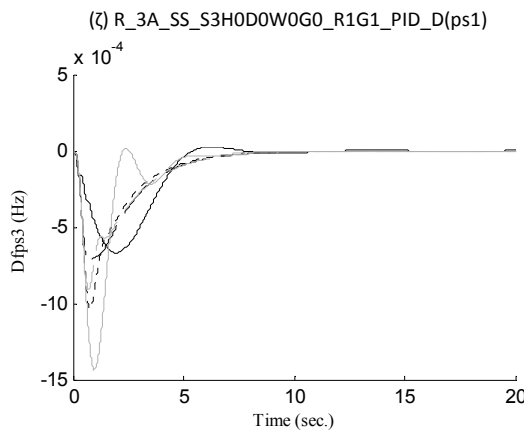
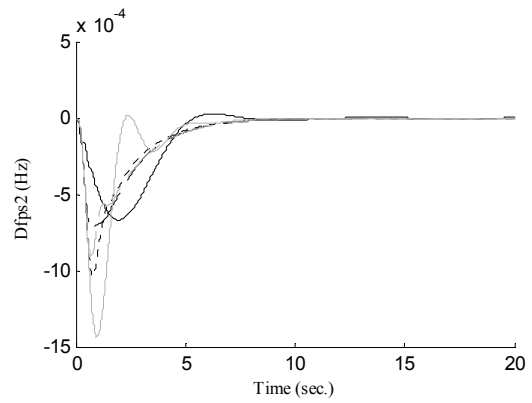
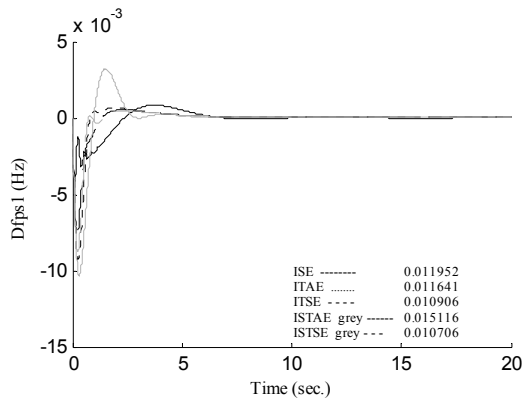
(δ) R_3A_SS_S3H0D0W0G0_R1G1_PI0_D(Ptie12)



(ε) R_3A_SS_S3H0D0W0G0_R1G1_PI0_D(Ptie23)



(σ) R_3A_SS_S3H0D0W0G0_R1G1_PI0_D(Ptie13)



(κ) R_3A_SS_S3H0D0W0G0_R1G1_PID_D(Ptie23)

(λ) R_3A_SS_S3H0D0W0G0_R1G1_PID_D(Ptie13)

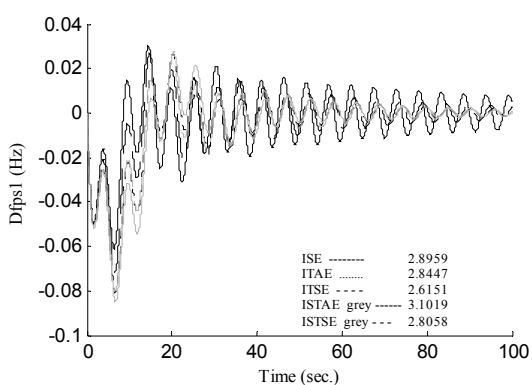
9.3.4. Ντιζελοηλεκτρικές Μονάδες

Σε αυτήν την περίπτωση έχουν χρησιμοποιηθεί κοινά κέρδη για τους ελεγκτές κάθε περιοχής.

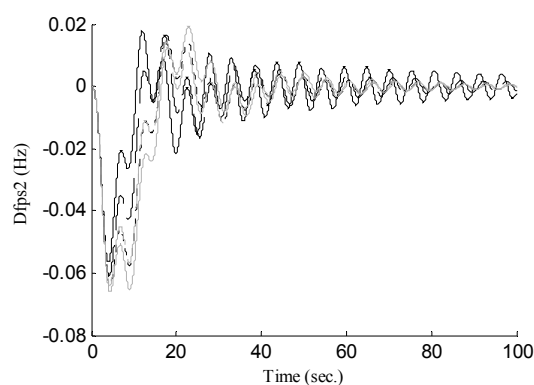
	ISE	ITAE	ITSE	ISTAE	ISTSE
<i>Ελεγκτές PI διακριτός χρόνος (α-στ)</i>					
Περιοχή 1 K _i	-0.05743	-0.03848	-0.04575	-0.0348	-0.03658
Περιοχή 1 K _p	-0.2332	0.127435	-0.01631	0.188139	0.111218
Περιοχή 2 K _i	-0.05743	-0.03848	-0.04575	-0.0348	-0.03658
Περιοχή 2 K _p	-0.2332	0.127435	-0.01631	0.188139	0.111218
Περιοχή 3 K _i	-0.05743	-0.03848	-0.04575	-0.0348	-0.03658
Περιοχή 3 K _p	-0.2332	0.127435	-0.01631	0.188139	0.111218
J	0.053069	5831.027	61.36151	24579104	119366.5
J(IAE)	2.895871	2.844746	2.615093	3.101863	2.805836

Ελεγκτές PID διακριτός χρόνος (ζ-λ)

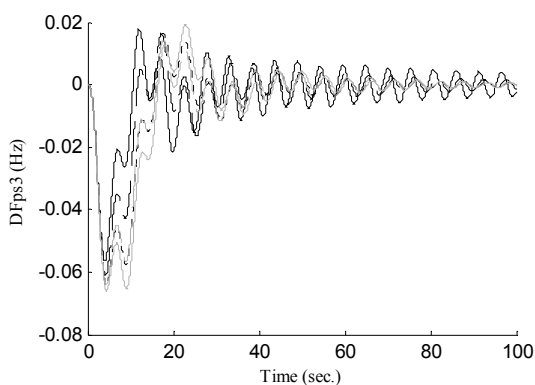
Περιοχή 1 K_i	-0.15548	-0.15026	-0.13949	-0.14384	-0.12225
Περιοχή 1 K_p	-0.99999	-0.53586	-0.82761	-0.43715	-0.52804
Περιοχή 1 K_d	-0.99989	-1	-1	-1	-1
Περιοχή 2 K_i	-0.15548	-0.15026	-0.13949	-0.14384	-0.12225
Περιοχή 2 K_p	-0.99999	-0.53586	-0.82761	-0.43715	-0.52804
Περιοχή 2 K_d	-0.99989	-1	-1	-1	-1
Περιοχή 3 K_i	-0.15548	-0.15026	-0.13949	-0.14384	-0.12225
Περιοχή 3 K_p	-0.99999	-0.53586	-0.82761	-0.43715	-0.52804
Περιοχή 3 K_d	-0.99989	-1	-1	-1	-1
J	0.011794	901.5066	6.494085	1899130	5993.604
$J(IAE)$	0.826915	0.853391	0.826539	0.89901	0.865278



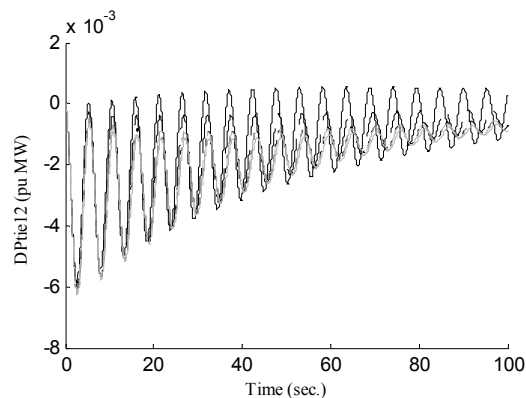
(α) R_3A_SS_S0H0D3W0G0_R0G1_PI0_D(ps1)



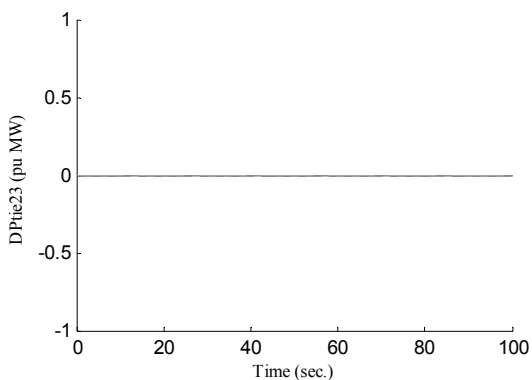
(β) R_3A_SS_S0H0D3W0G0_R0G1_PI0_D(ps2)



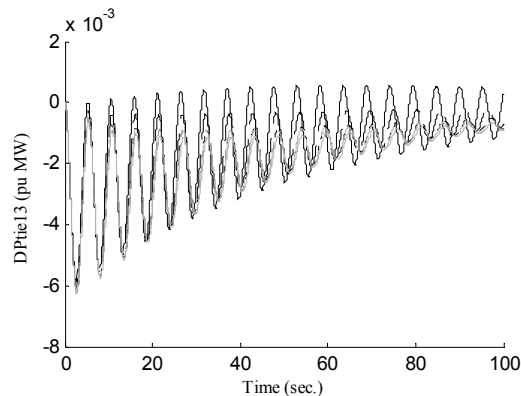
(γ) R_3A_SS_S0H0D3W0G0_R0G1_PI0_D(ps3)



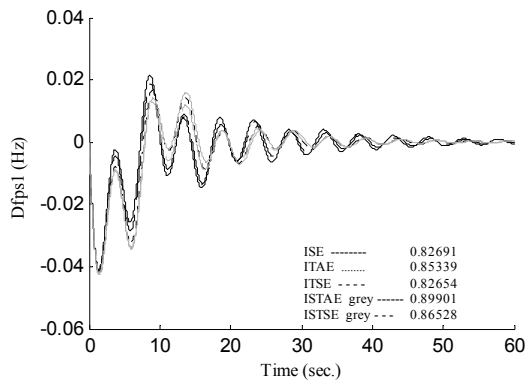
(δ) R_3A_SS_S0H0D3W0G0_R0G1_PI0_D(Ptie12)



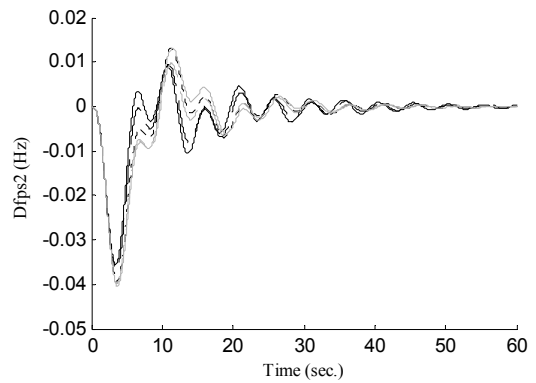
(ε) R_3A_SS_S0H0D3W0G0_R0G1_PI0_D(Ptie23)



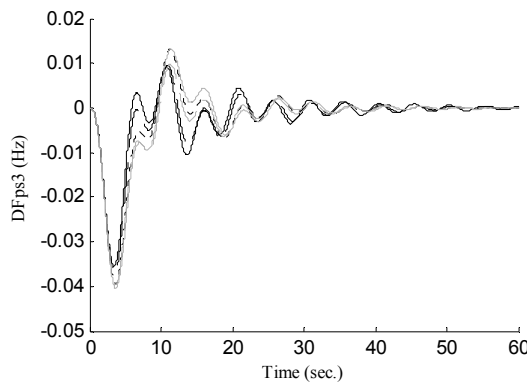
(σ) R_3A_SS_S0H0D3W0G0_R0G1_PI0_D(Ptie13)



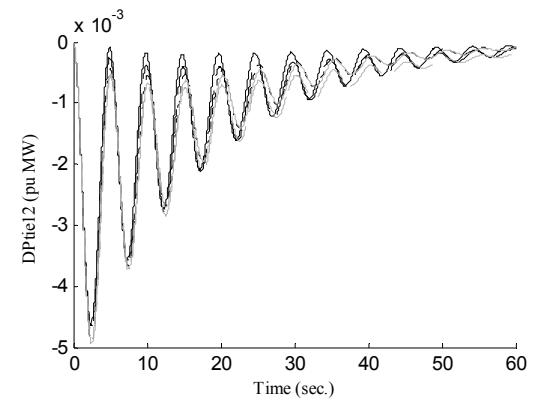
(ζ) R_3A_SS_S0H0D3W0G0_ROG1_PID_D(ps1)



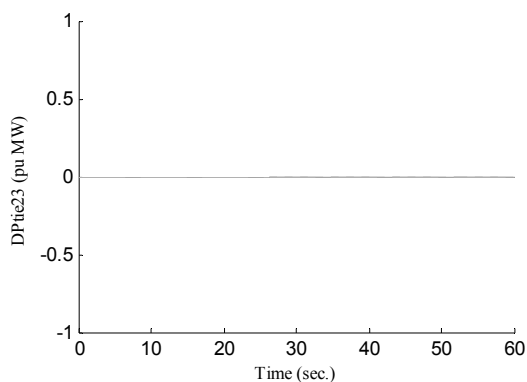
(η) R_3A_SS_S0H0D3W0G0_ROG1_PID_D(ps2)



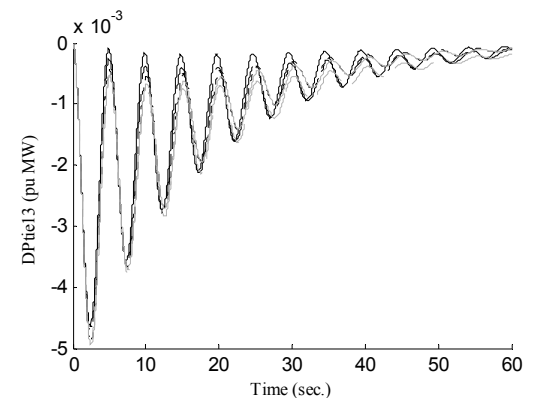
(θ) R_3A_SS_S0H0D3W0G0_ROG1_PID_D(ps3)



(ι) R_3A_SS_S0H0D3W0G0_ROG1_PID_D(Ptie12)



(κ) R_3A_SS_S0H0D3W0G0_ROG1_PID_D(Ptie23)



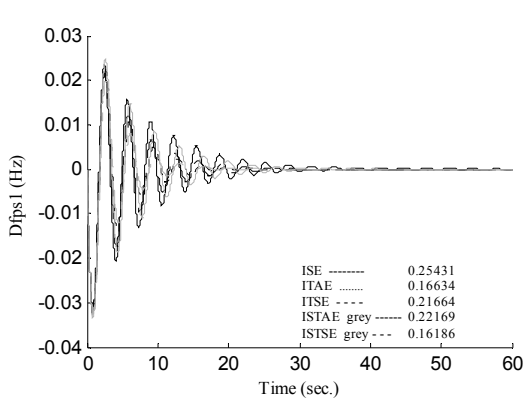
(λ) R_3A_SS_S0H0D3W0G0_ROG1_PID_D(Ptie13)

9.3.5. Μεικτό Μοντέλο Τριών Περιοχών

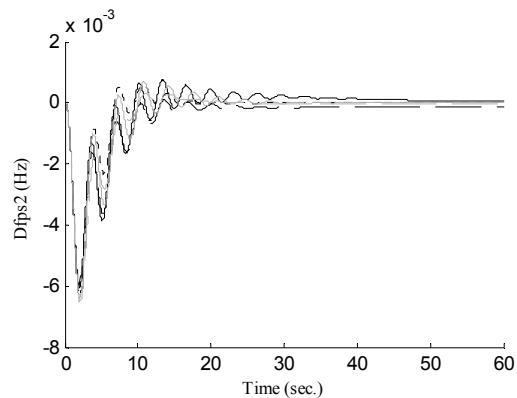
Εδώ εξετάζεται ένα σύστημα τριών περιοχών το οποίο παρουσιάζει αυξημένο βαθμό πολυπλοκότητας. Κάθε περιοχή του συστήματος έχει τρεις μονάδες παραγωγής με κάθε μια από αυτές να έχει δικό της ελεγκτή, δηλαδή, συνολικά εννέα ελεγκτές. Η πρώτη περιοχή χρησιμοποιεί μια ατμοστροβιλική, μια υδροστροβιλική και μια αεριοστροβιλική μονάδα. Η δεύτερη περιοχή χρησιμοποιεί μια ατμοστροβιλική μονάδα, μια ντιζελοηλεκτρική μονάδα και μια ανεμογεννήτρια. Η τρίτη περιοχή αποτελείται από μια ατμοστροβιλική μονάδα, μια υδροστροβιλική μονάδα και μια ανεμογεννήτρια. Λόγω μεγάλου όγκου δεδομένων έχει γίνει διαχωρισμός για αυτό το σύστημα και ο αναλογικός – ολοκληρωτικός έλεγχος πινακοποιείται ξεχωριστά από τον έλεγχο τριών όρων. Ακόμα σημειώνεται ότι η ισχύς που παράγεται από την ανεμογεννήτρια της δεύτερης περιοχής φαίνεται με τον δείκτη DPwind1 στις χρονοαποκρίσεις ενώ η ανεμογεννήτρια της τρίτης περιοχής με DPwind2.

α) Αναλογικός – ολοκληρωτικός έλεγχος.

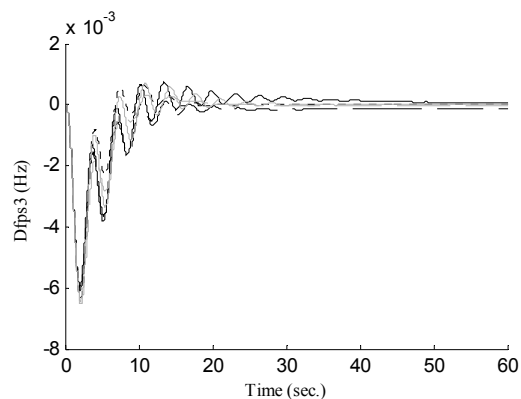
		ISE	ITAE	ITSE	ISTAE	ISTSE
<i>Ελεγκτές PI διακριτός χρόνος (α-η)</i>						
Περιοχή 1	<i>Steam Ki</i>	-0.85859	-0.95285	-0.66059	-0.5207	-0.55578
	<i>Steam Kp</i>	-0.98779	-0.9974	-0.9837	-0.90701	-0.96444
	<i>Hydro Ki</i>	-0.94484	0.000802	0.543443	-0.00325	0.135797
	<i>Hydro Kp</i>	0.98619	0.895258	0.909797	0.474207	0.95648
	<i>Gas Ki</i>	-0.03419	-0.60455	-0.48874	-0.74168	-0.68883
	<i>Gas Kp</i>	-0.99184	0.195333	-0.65713	-0.59552	-0.08464
Περιοχή 2	<i>Steam Ki</i>	-0.42943	-0.98762	-0.79895	-0.89523	-0.97252
	<i>Steam Kp</i>	0.741018	-0.44649	-0.59907	-0.3394	-0.5306
	<i>Diesel Ki</i>	0.686362	-0.83021	-0.65093	0.054011	-0.25734
	<i>Diesel Kp</i>	0.717314	0.484445	-0.87024	-0.45967	-0.74862
	<i>Wind Ki</i>	-0.26517	-0.01501	0.967436	0.010531	-0.7761
	<i>Wind Kp</i>	-0.40906	0.909603	-0.90109	-0.12693	-0.26903
Περιοχή 3	<i>Steam Ki</i>	-0.10693	-0.98305	0.107569	-0.98527	-0.38822
	<i>Steam Kp</i>	-0.60121	-0.57925	-0.83729	-0.48887	-0.88282
	<i>Hydro Ki</i>	0.62732	0.102376	-0.76667	0.259984	0.843735
	<i>Hydro Kp</i>	-0.10356	-0.59855	-0.38619	-0.78752	-0.54034
	<i>Wind Ki</i>	0.267317	0.464133	-0.53849	0.686867	0.448712
	<i>Wind Kp</i>	0.493542	0.204884	0.905206	0.878101	0.232298
	<i>J</i>	0.00094	43.0855	0.178984	29915.18	48.71917
	<i>J(IAE)</i>	0.254312	0.166339	0.216642	0.221686	0.161856



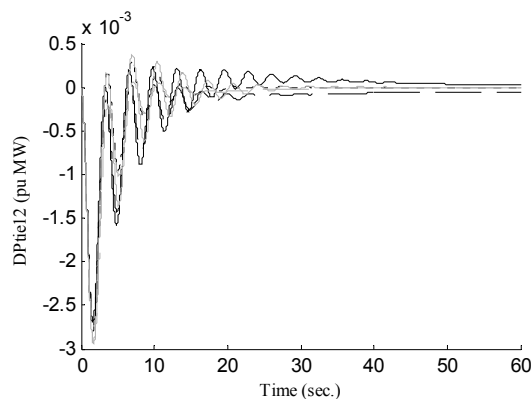
(α) R_3A_MS_SHG_SDW_SHW_PIO_D(ps1)



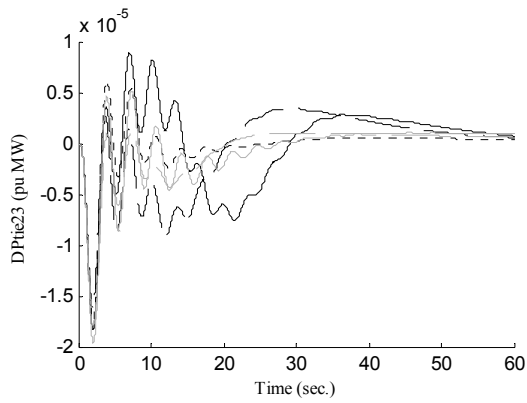
(β) R_3A_MS_SHG_SDW_SHW_PIO_D(ps2)



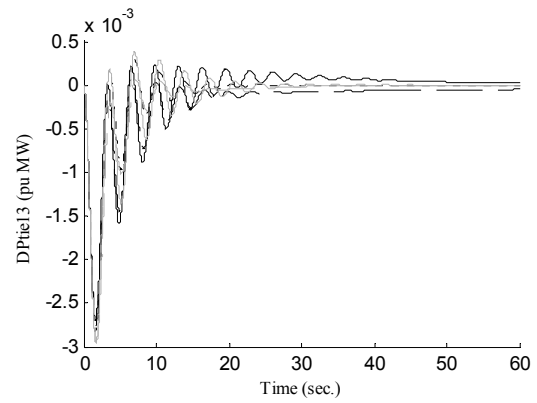
(γ) R_3A_MS_SHG_SDW_SHW_PIO_D(ps3)



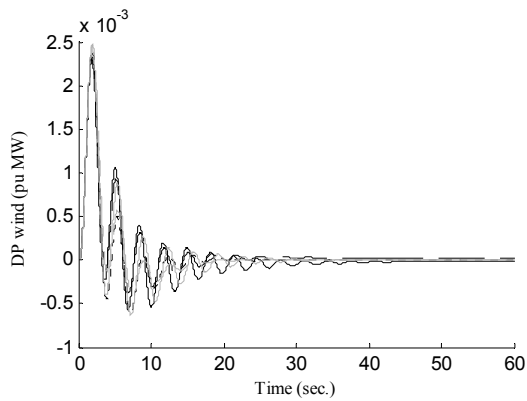
(δ) R_3A_MS_SHG_SDW_SHW_PIO_D(Ptie12)



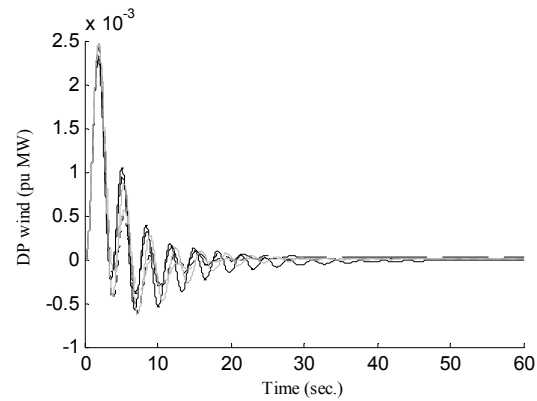
(ε) R_3A_MS_SHG_SDW_SHW_PIO_D(Ptie23)



(σ) R_3A_MS_SHG_SDW_SHW_PIO_D(Ptie13)



(ζ) R_3A_MS_SHG_SDW_SHW_PIO_D(area 2 wind)

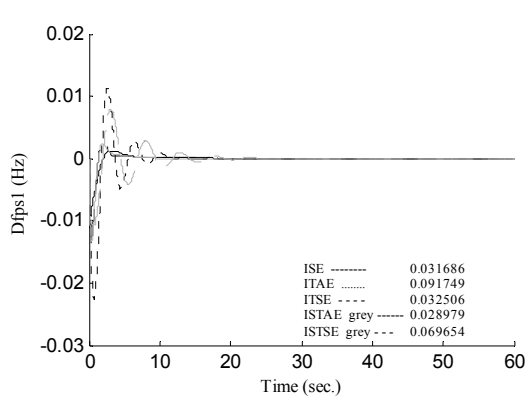


(η) R_3A_MS_SHG_SDW_SHW_PIO_D(area 3 wind)

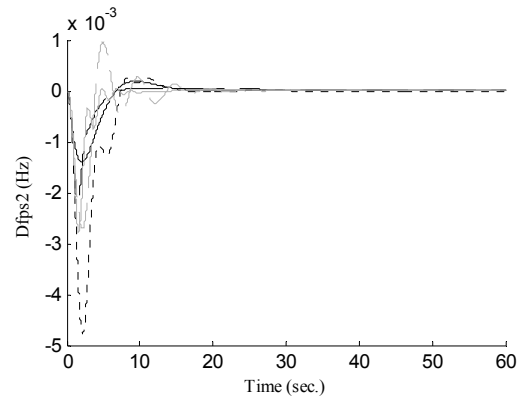
β) Αναλογικός – ολοκληρωτικός – διαφορικός έλεγχος.

		ISE	ITAE	ITSE	ISTAE	ISTSE
<i>Ελεγκτές PID διακριτός χρόνος (α-η)</i>						
Περιοχή 1	<i>Steam Ki</i>	-3.10234	-0.97233	-2.91521	-3.97747	-2.62859
	<i>Steam Kp</i>	-3.76504	-0.98795	-3.32419	-3.97759	-1.81789
	<i>Steam Kd</i>	-3.24444	-0.74109	-1.93336	-1.83724	-3.0649
	<i>Hydro Ki</i>	-3.21649	-0.02593	-3.13486	-0.17655	-0.62666
	<i>Hydro Kp</i>	0.227767	-0.89387	-5.39106	-5.11985	3.272174
	<i>Hydro Kd</i>	-3.18425	-0.58388	-2.3698	-3.06969	-3.20418
	<i>Gas Ki</i>	-1.65674	-0.90145	-1.49938	-0.80362	-1.98265
	<i>Gas Kp</i>	-3.33829	-0.97547	-3.19477	0.260671	-3.18662
	<i>Gas Kd</i>	-3.92964	-0.47261	-2.28269	-0.72913	2.070692
Περιοχή 2	<i>Steam Ki</i>	-0.21515	-0.85218	-3.26683	-3.45512	-1.9024
	<i>Steam Kp</i>	-1.0797	-0.62684	-3.9023	-2.09812	-1.35716
	<i>Steam Kd</i>	-1.22671	0.655975	0.771521	1.288368	-0.30423
	<i>Diesel Ki</i>	-1.70419	-0.1125	-2.89936	-7.78728	-5.17592
	<i>Diesel Kp</i>	-3.38826	-0.86641	5.273075	-2.23794	0.290436
	<i>Diesel Kd</i>	-1.91007	0.542703	-1.80253	-1.38859	1.346386
	<i>Wind Ki</i>	1.579225	-0.72706	0.205443	-0.9007	-1.58974
	<i>Wind Kp</i>	-3.75406	-0.16139	1.532356	-3.07138	2.05213
<i>Wind Kd</i>	0.006788	-0.12277	0.170258	2.445519	2.740311	

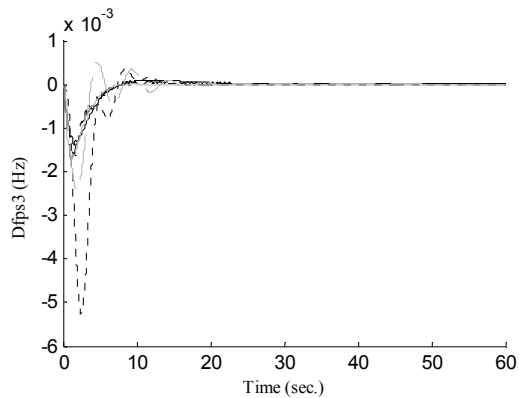
Περιοχή 3	Steam Ki	-4.81199	-0.96885	-12.4999	-28.8976	-4.4926
	Steam Kp	-78.2361	0.398489	-72.002	-76.5491	-8.01864
	Steam Kd	-3.76547	0.855576	-2.50493	-3.75808	-2.99598
	Hydro Ki	-0.71878	0.924726	0.602857	-0.10224	1.687646
	Hydro Kp	29.38366	-0.48561	3.243904	-79.6023	29.56053
	Hydro Kd	3.559401	-0.64983	3.759915	3.954883	-0.5727
	Wind Ki	0.543531	0.388383	3.092464	-3.96376	3.535445
	Wind Kp	26.27479	0.987632	-58.0798	2.763479	88.75812
	Wind Kd	-0.23046	-0.79351	-3.85171	-0.1766	2.565621
J	4.54E-05	20.12872	0.005666	3172.594	1.925269	
J(IAE)	0.031686	0.091749	0.032506	0.028979	0.069654	



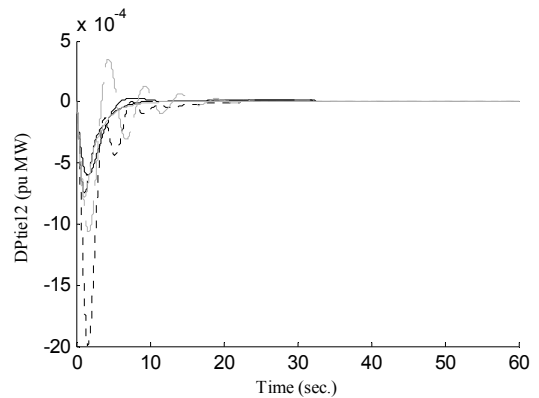
(α) R_3A_MS_SHG_SDW_SHW_PID_D(ps1)



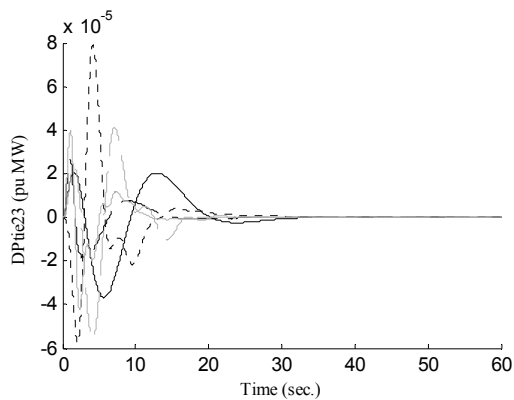
(β) R_3A_MS_SHG_SDW_SHW_PID_D(ps2)



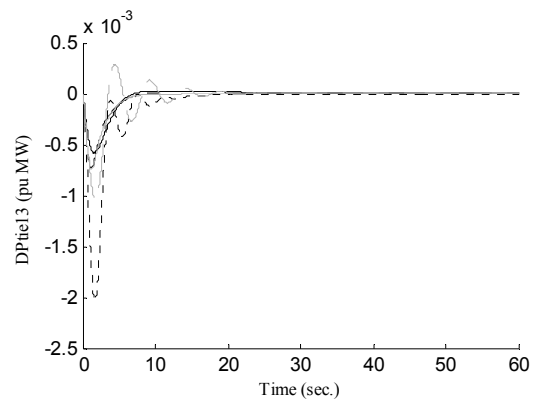
(γ) R_3A_MS_SHG_SDW_SHW_PID_D(ps3)



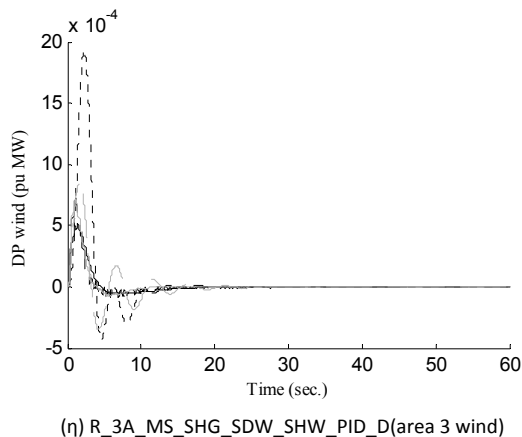
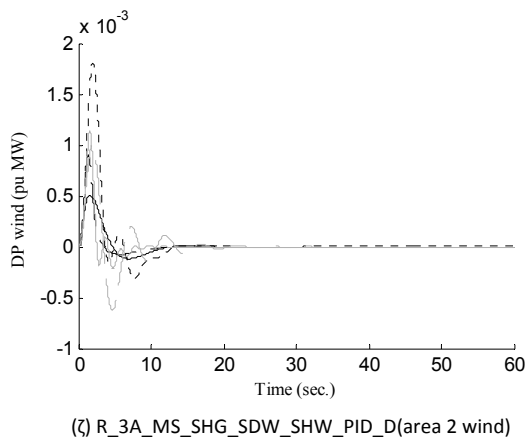
(δ) R_3A_MS_SHG_SDW_SHW_PID_D(Ptie12)



(ε) R_3A_MS_SHG_SDW_SHW_PID_D(Ptie23)



(σ) R_3A_MS_SHG_SDW_SHW_PID_D(Ptie13)



9.4. Συστήματα Τεσσάρων Περιοχών Σε Μη Απελευθερωμένη Αγορά

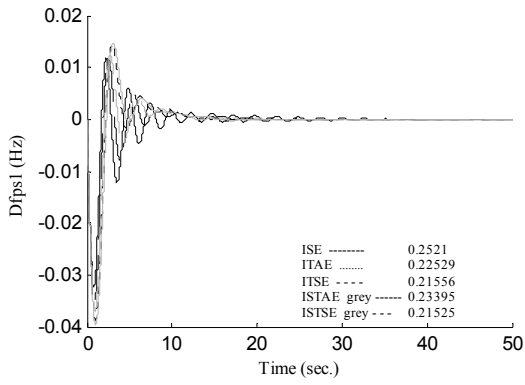
Στους πίνακες που ακολουθούν παρουσιάζονται τα κέρδη των ελεγκτών όπως υπολογίστηκαν από τον γενετικό αλγόριθμο για τα συστήματα τεσσάρων περιοχών ελέγχου όταν δεν υπάρχει καθεστώς απελευθερωμένης αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας. Ακόμα, υπολογίζονται οι δείκτες απόδοσης για κάθε κριτήριο αλλά και ανηγμένοι σύμφωνα με όσα έχουν αναφερθεί. Για τα συστήματα αυτού του εδαφίου παρουσιάζονται οι χρονοαποκρίσεις της συχνότητας κάθε περιοχής (ps1, ps2, ps3, ps4) ελέγχου, της ισχύς που μεταφέρεται μέσω της διασύνδεσης των περιοχών (DPtie12, DPtie23, DPtie34, DPtie14) και αν υπάρχει ανεμογεννήτρια στο εξεταζόμενο σύστημα φαίνεται επίσης η χρονοαπόκριση της παραγόμενης ισχύος από αυτή την μονάδα μόνο (DPwind1, DPwind2). Τα πρώτα τέσσερα συστήματα είναι με ένα μόνο είδος πηγών δηλαδή μια όμοια μονάδα σε κάθε περιοχή. Το επόμενο έχει διαφορετικά είδη πηγών σε κάθε περιοχή, ενώ για όλες τις περιπτώσεις έχει θεωρηθεί διαταραχή στην πρώτη περιοχή $DP_1=0.01$ και βήμα χρόνου για τους υπολογισμούς των δεικτών απόδοσης 0.01 sec όσο δηλαδή είναι και το βήμα των ελεγκτών αφού εδώ εξετάζονται μόνο περιπτώσεις διακριτού χρόνου.

9.4.1. Αεριοστροβλικές Μονάδες

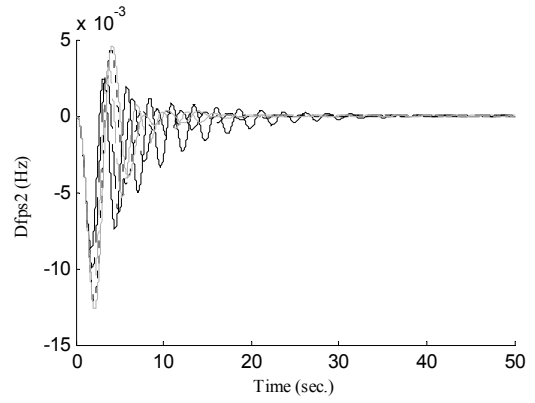
Σε αυτήν την περίπτωση έχουν χρησιμοποιηθεί κοινά κέρδη για τον αναλογικό – ολοκληρωτικό ελεγκτή καθώς επίσης και για τον ελεγκτή τριών όρων κάθε μονάδας.

α) Αναλογικός – ολοκληρωτικός έλεγχος.

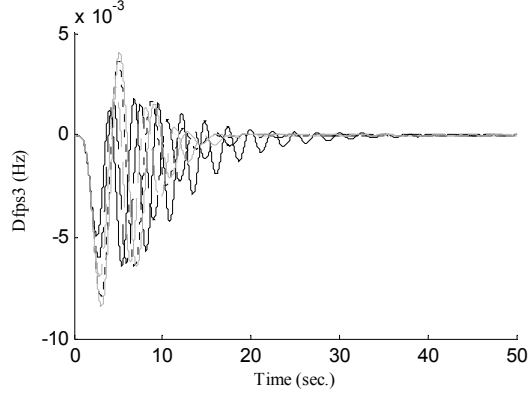
	ISE	ITAE	ITSE	ISTAE	ISTSE
<i>Ελεγκτές PI διακριτός χρόνος (α-η)</i>					
Περιοχή 1 Ki	-0.19181	-0.25878	-0.22624	-0.2542	-0.23866
Περιοχή 1 Kp	-0.22543	0.32592	0.038846	0.378818	0.197615
Περιοχή 2 Ki	-0.19181	-0.25878	-0.22624	-0.2542	-0.23866
Περιοχή 2 Kp	-0.22543	0.32592	0.038846	0.378818	0.197615
Περιοχή 3 Ki	-0.19181	-0.25878	-0.22624	-0.2542	-0.23866
Περιοχή 3 Kp	-0.22543	0.32592	0.038846	0.378818	0.197615
Περιοχή 4 Ki	-0.19181	-0.25878	-0.22624	-0.2542	-0.23866
Περιοχή 4 Kp	-0.22543	0.32592	0.038846	0.378818	0.197615
J	0.001613	87.56395	0.352363	58179.14	131.5643
J(IAE)	0.252099	0.225291	0.215562	0.233946	0.215254



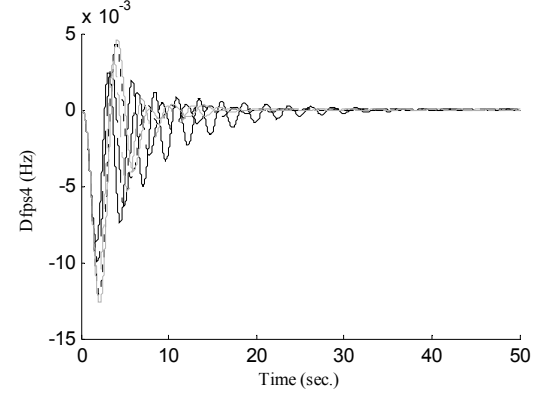
(α) R_4A_SS_S0H0D0W0G4_ROG0_PIO_D(ps1)



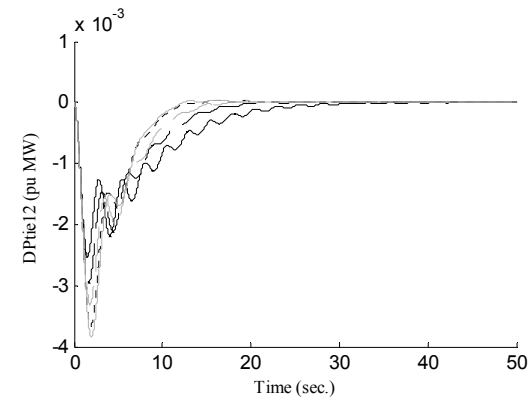
(β) R_4A_SS_S0H0D0W0G4_ROG0_PIO_D(ps2)



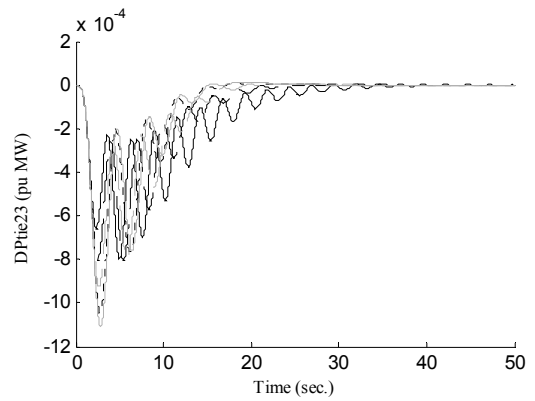
(γ) R_4A_SS_S0H0D0W0G4_ROG0_PIO_D(ps3)



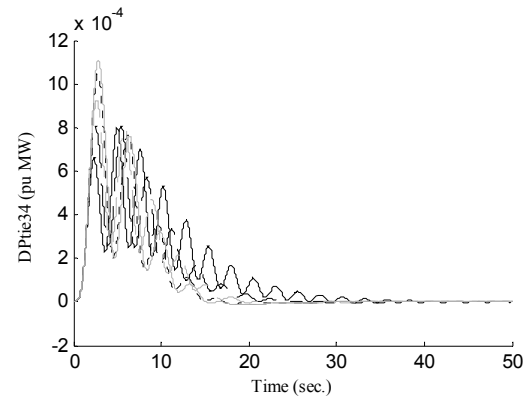
(δ) R_4A_SS_S0H0D0W0G4_ROG0_PIO_D(ps4)



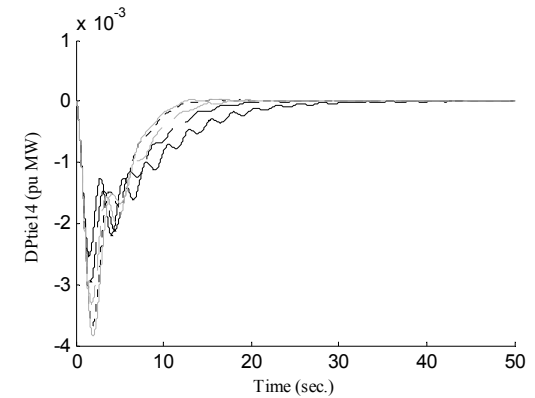
(ε) R_4A_SS_S0H0D0W0G4_ROG0_PIO_D(Ptie12)



(σ) R_4A_SS_S0H0D0W0G4_ROG0_PIO_D(Ptie23)



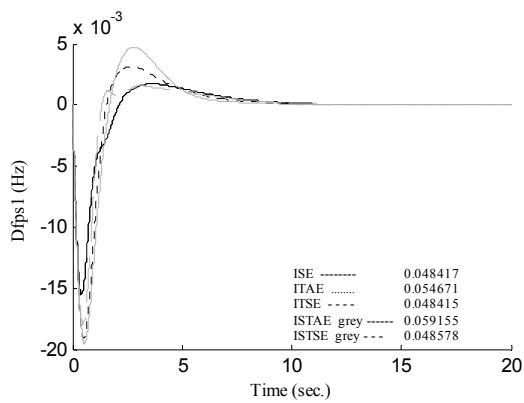
(ζ) R_4A_SS_S0H0D0W0G4_ROG0_PIO_D(Ptie34)



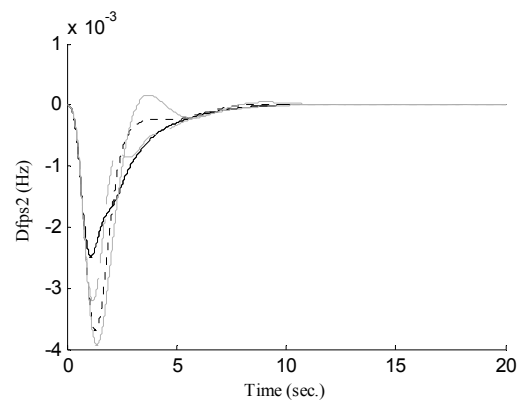
(η) R_4A_SS_S0H0D0W0G4_ROG0_PIO_D(Ptie14)

β) Αναλογικός – ολοκληρωτικός – διαφορικός έλεγχος.

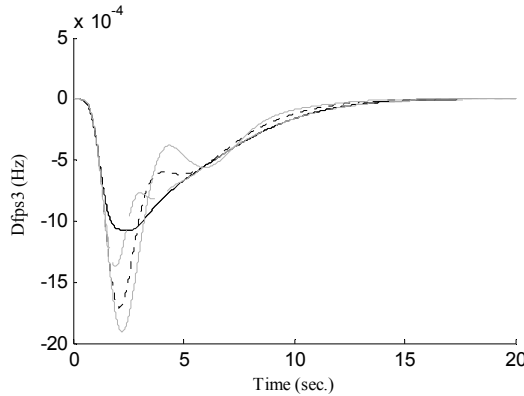
	ISE	ITAE	ITSE	ISTAE	ISTSE
<i>Ελεγκτές PID διακριτός χρόνος (α-η)</i>					
Περιοχή 1 Ki	-0.99991	-1	-0.99999	-0.99993	-1
Περιοχή 1 Kr	-0.99993	-0.55314	-0.99997	-0.32364	-0.99997
Περιοχή 1 Kd	-0.99998	-0.62211	-0.9999	-0.62051	-0.67166
Περιοχή 2 Ki	-0.99991	-1	-0.99999	-0.99993	-1
Περιοχή 2 Kr	-0.99993	-0.55314	-0.99997	-0.32364	-0.99997
Περιοχή 2 Kd	-0.99998	-0.62211	-0.9999	-0.62051	-0.67166
Περιοχή 3 Ki	-0.99991	-1	-0.99999	-0.99993	-1
Περιοχή 3 Kr	-0.99993	-0.55314	-0.99997	-0.32364	-0.99997
Περιοχή 3 Kd	-0.99998	-0.62211	-0.9999	-0.62051	-0.67166
Περιοχή 4 Ki	-0.99991	-1	-0.99999	-0.99993	-1
Περιοχή 4 Kr	-0.99993	-0.55314	-0.99997	-0.32364	-0.99997
Περιοχή 4 Kd	-0.99998	-0.62211	-0.9999	-0.62051	-0.67166
J	0.00017	13.48566	0.017027	5668.989	3.816034
J(IAE)	0.048417	0.054671	0.048415	0.059155	0.048578



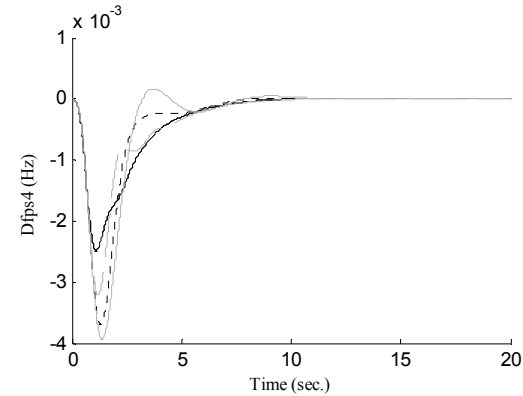
(α) R_4A_SS_S0H0D0W0G4_R0G0_PID_D(ps1)



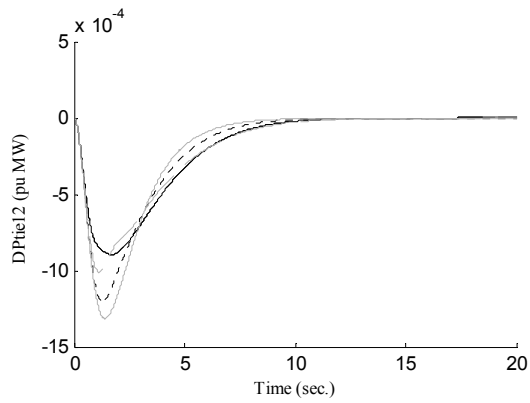
(β) R_4A_SS_S0H0D0W0G4_R0G0_PID_D(ps2)



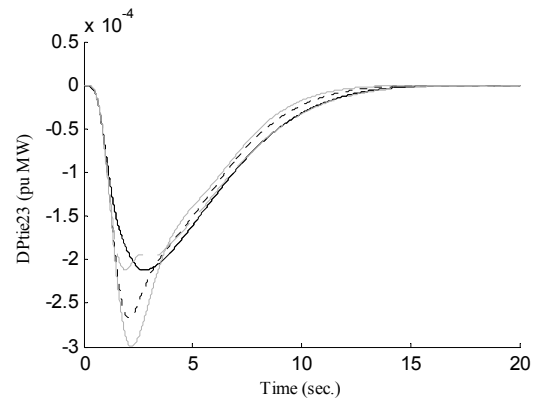
(γ) R_4A_SS_S0H0D0W0G4_R0G0_PID_D(ps3)



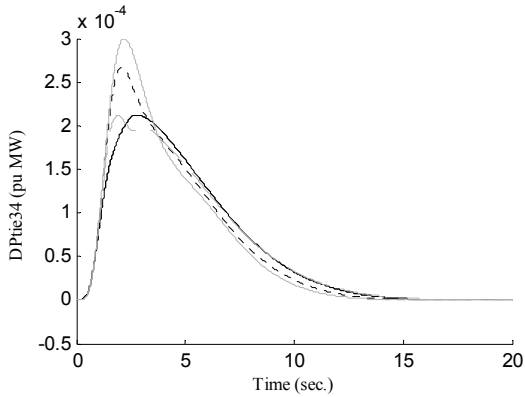
(δ) R_4A_SS_S0H0D0W0G4_R0G0_PID_D(ps4)



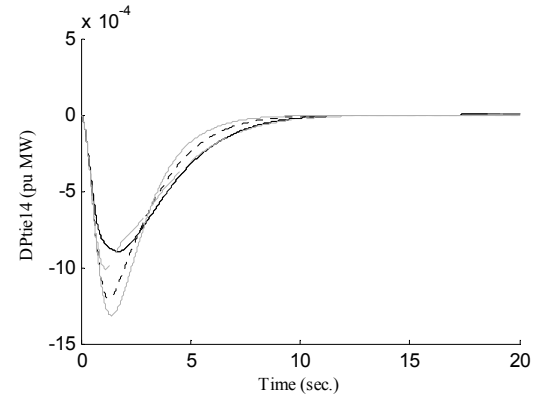
(ε) R_4A_SS_S0H0D0W0G4_R0G0_PID_D(Ptie12)



(σ) R_4A_SS_S0H0D0W0G4_R0G0_PID_D(Ptie23)



(ζ) R_4A_SS_S0H0D0W0G4_R0G0_PID_D(Ptie34)



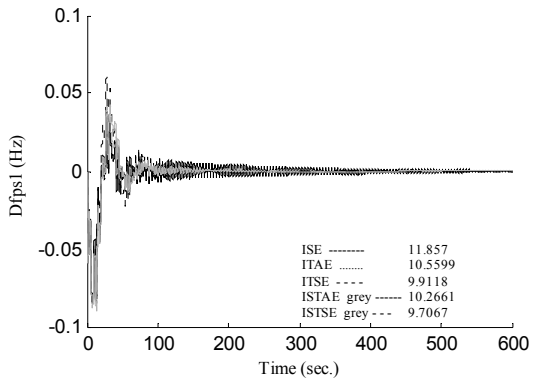
(η) R_4A_SS_S0H0D0W0G4_R0G0_PID_D(Ptie14)

9.4.2. Υδροτροβλικές Μονάδες

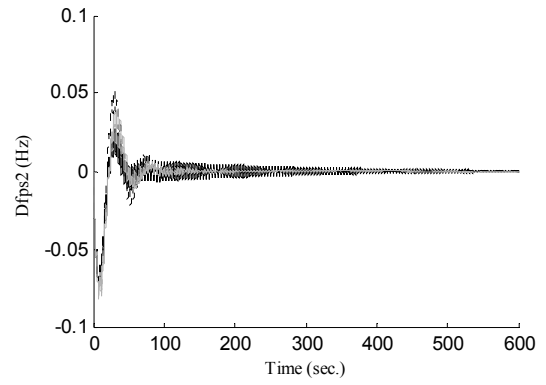
Σε αυτήν την περίπτωση έχουν χρησιμοποιηθεί κοινά κέρδη τόσο για τον αναλογικό – ολοκληρωτικό ελεγκτή όσο και για τον ελεγκτή τριών όρων κάθε μονάδας.

α) Αναλογικός – ολοκληρωτικός έλεγχος.

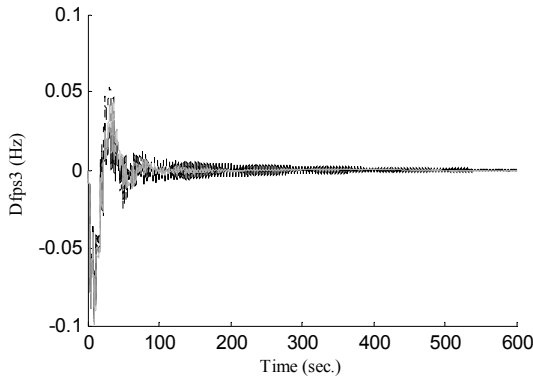
	ISE	ITAE	ITSE	ISTAE	ISTSE
<i>Ελεγκτές PI διακριτός χρόνος (α-η)</i>					
Περιοχή 1 Ki	-0.00836	-0.01678	-0.00753	-0.01048	-0.00869
Περιοχή 1 Kp	0.658215	0.70186	0.683455	0.723663	0.697956
Περιοχή 2 Ki	-0.00836	-0.01678	-0.00753	-0.01048	-0.00869
Περιοχή 2 Kp	0.658215	0.70186	0.683455	0.723663	0.697956
Περιοχή 3 Ki	-0.00836	-0.01678	-0.00753	-0.01048	-0.00869
Περιοχή 3 Kp	0.658215	0.70186	0.683455	0.723663	0.697956
Περιοχή 4 Ki	-0.00836	-0.01678	-0.00753	-0.01048	-0.00869
Περιοχή 4 Kp	0.658215	0.70186	0.683455	0.723663	0.697956
J	0.2608	64771.52	431.083	1.95E+08	1202835
J(IAE)	11.85697	10.55991	9.911834	10.26615	9.706654



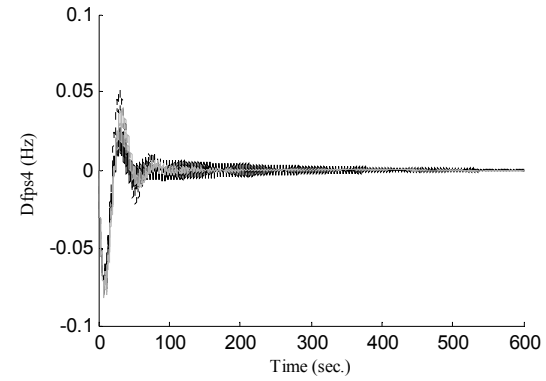
(α) R_4A_SS_S0H4D0W0G0_ROG0_PIO_D(ps1)



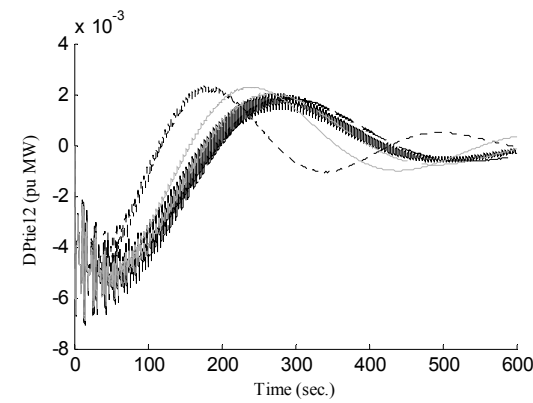
(β) R_4A_SS_S0H4D0W0G0_ROG0_PIO_D(ps2)



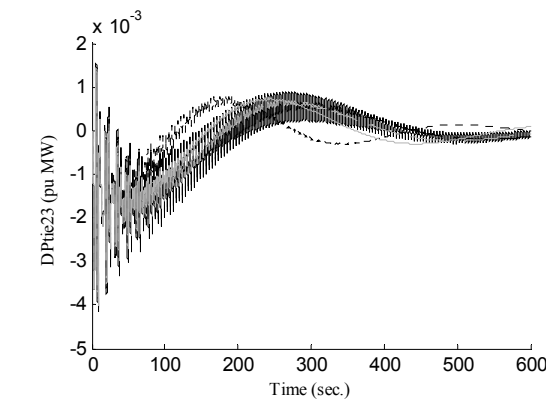
(γ) R_4A_SS_S0H4D0W0G0_ROG0_PIO_D(ps3)



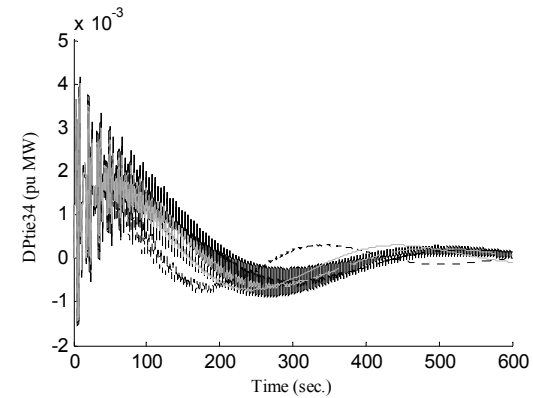
(δ) R_4A_SS_S0H4D0W0G0_ROG0_PIO_D(ps4)



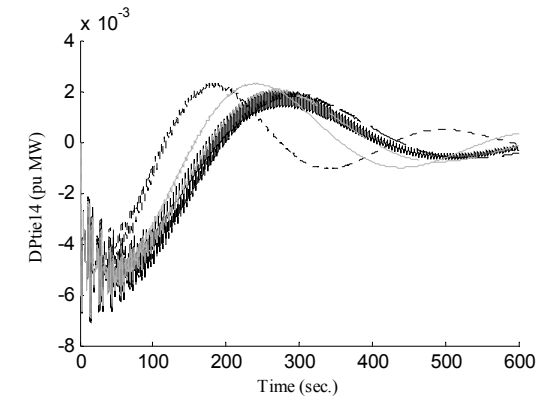
(ϵ) R_4A_SS_S0H4D0W0G0_ROG0_PIO_D(Ptie12)



(σ) R_4A_SS_S0H4D0W0G0_ROG0_PIO_D(Ptie23)



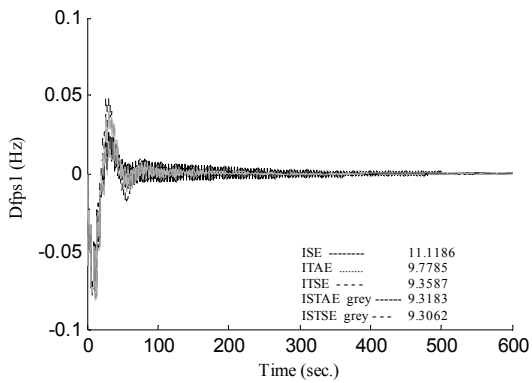
(ζ) R_4A_SS_S0H4D0W0G0_ROG0_PIO_D(Ptie34)



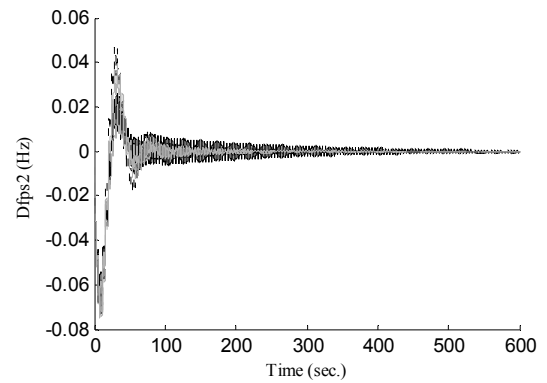
(η) R_4A_SS_S0H4D0W0G0_ROG0_PIO_D(Ptie14)

β) Αναλογικός – ολοκληρωτικός – διαφορικός έλεγχος.

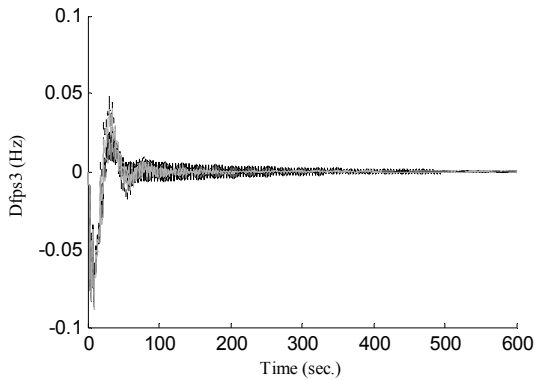
	ISE	ITAE	ITSE	ISTAE	ISTSE
<i>Ελεγκτές PID διακριτός χρόνος (α-η)</i>					
Περιοχή 1 K_i	-0.00994	-0.01785	-0.00834	-0.0144	-0.00726
Περιοχή 1 K_p	0.668627	0.701515	0.688463	0.701533	0.693828
Περιοχή 1 K_d	-0.31876	-0.20486	-0.26592	-0.25295	-0.23901
Περιοχή 2 K_i	-0.00994	-0.01785	-0.00834	-0.0144	-0.00726
Περιοχή 2 K_p	0.668627	0.701515	0.688463	0.701533	0.693828
Περιοχή 2 K_d	-0.31876	-0.20486	-0.26592	-0.25295	-0.23901
Περιοχή 3 K_i	-0.00994	-0.01785	-0.00834	-0.0144	-0.00726
Περιοχή 3 K_p	0.668627	0.701515	0.688463	0.701533	0.693828
Περιοχή 3 K_d	-0.31876	-0.20486	-0.26592	-0.25295	-0.23901
Περιοχή 4 K_i	-0.00994	-0.01785	-0.00834	-0.0144	-0.00726
Περιοχή 4 K_p	0.668627	0.701515	0.688463	0.701533	0.693828
Περιοχή 4 K_d	-0.31876	-0.20486	-0.26592	-0.25295	-0.23901
J	0.225721	60190.21	375.9986	1.2E+08	866855.7
$J(IAE)$	11.11862	9.778524	9.358715	9.318316	9.306164



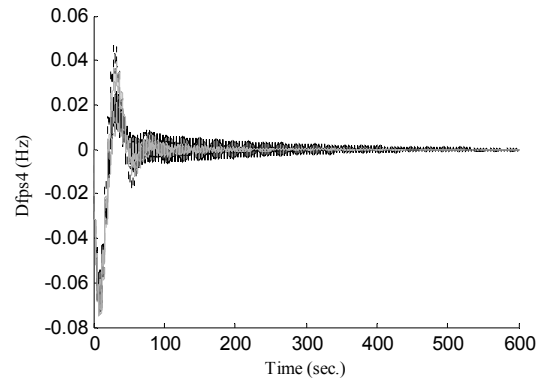
(α) R_4A_SS_S0H4D0W0G0_R0G0_PID_D(ps1)



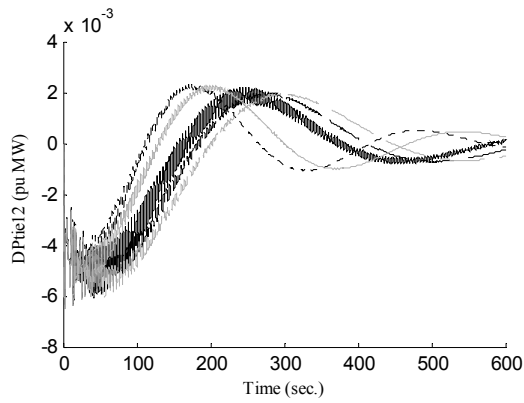
(β) R_4A_SS_S0H4D0W0G0_R0G0_PID_D(ps2)



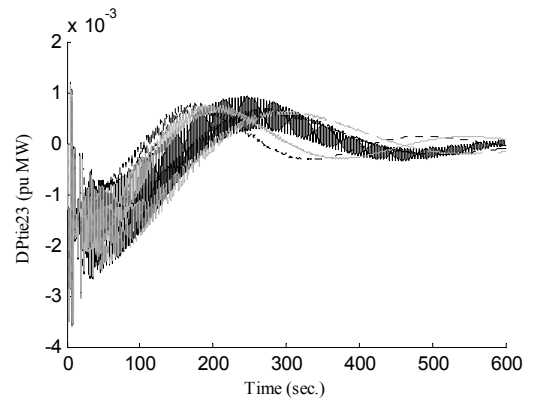
(γ) R_4A_SS_S0H4D0W0G0_R0G0_PID_D(ps3)



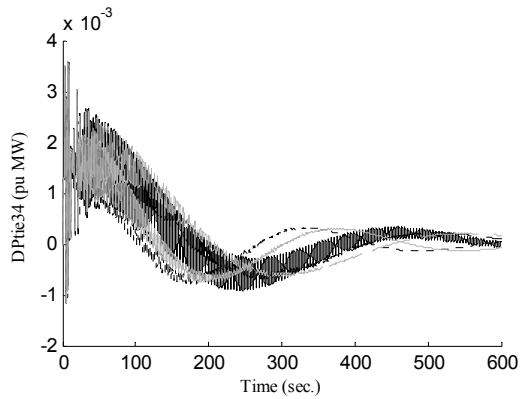
(δ) R_4A_SS_S0H4D0W0G0_R0G0_PID_D(ps4)



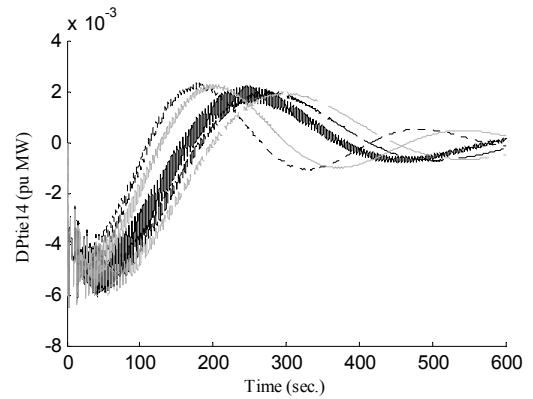
(ε) R_4A_SS_S0H4D0W0G0_ROG0_PID_D(Ptie12)



(στ) R_4A_SS_S0H4D0W0G0_ROG0_PID_D(Ptie23)



(ζ) R_4A_SS_S0H4D0W0G0_ROG0_PID_D(Ptie34)



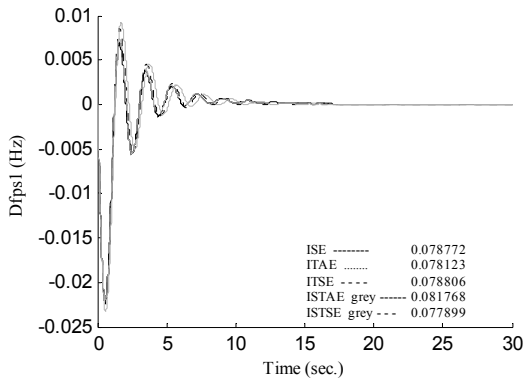
(η) R_4A_SS_S0H4D0W0G0_ROG0_PID_D(Ptie14)

9.4.3. Ατμοστροβλικές Μονάδες

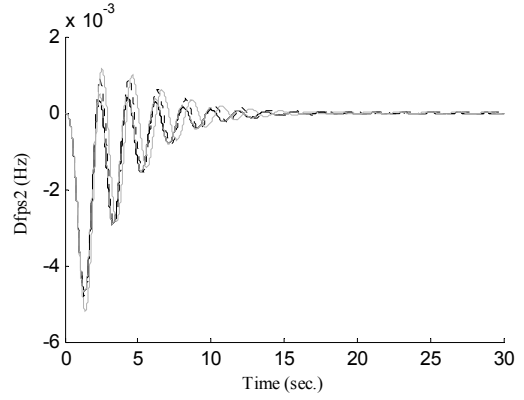
Εδώ επίσης έχουν χρησιμοποιηθεί κοινά κέρδη και για τις δύο περιπτώσεις ελέγχου.

α) Αναλογικός – ολοκληρωτικός έλεγχος.

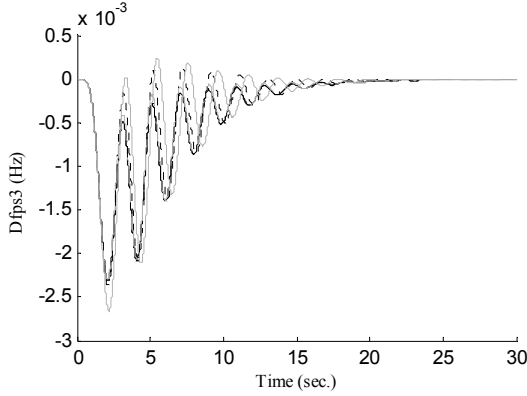
	ISE	ITAE	ITSE	ISTAE	ISTSE
<i>Ελεγκτές PI διακριτός χρόνος (α-η)</i>					
Περιοχή 1 Ki	-0.61614	-0.72397	-0.61512	-0.71807	-0.64698
Περιοχή 1 Kr	-0.99998	-0.94418	-1	-0.80887	-0.99999
Περιοχή 2 Ki	-0.61614	-0.72397	-0.61512	-0.71807	-0.64698
Περιοχή 2 Kr	-0.99998	-0.94418	-1	-0.80887	-0.99999
Περιοχή 3 Ki	-0.61614	-0.72397	-0.61512	-0.71807	-0.64698
Περιοχή 3 Kr	-0.99998	-0.94418	-1	-0.80887	-0.99999
Περιοχή 4 Ki	-0.61614	-0.72397	-0.61512	-0.71807	-0.64698
Περιοχή 4 Kr	-0.99998	-0.94418	-1	-0.80887	-0.99999
J	0.000404	27.61905	0.047869	19205.28	12.82393
J(IAE)	0.078772	0.078123	0.078806	0.081768	0.077899



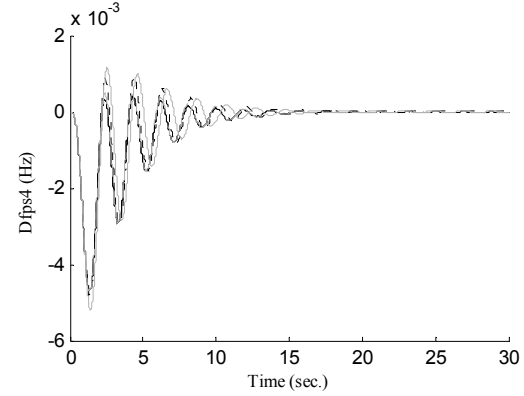
(α) R_4A_SS_S4H0D0W0G0_R1G1_PI0_D(ps1)



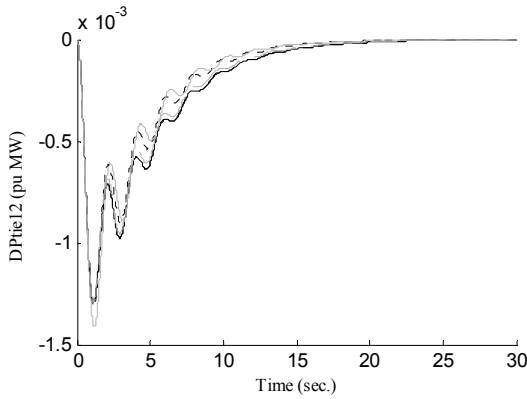
(β) R_4A_SS_S4H0D0W0G0_R1G1_PI0_D(ps2)



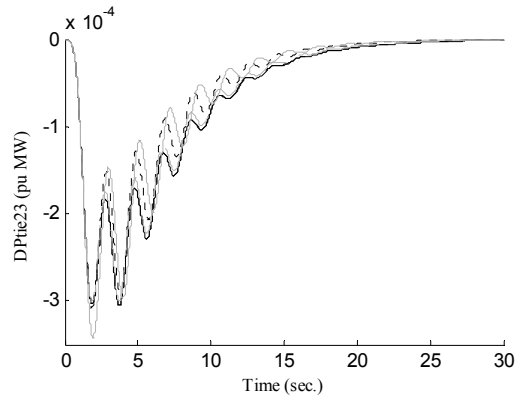
(γ) R_4A_SS_S4H0D0W0G0_R1G1_PI0_D(ps3)



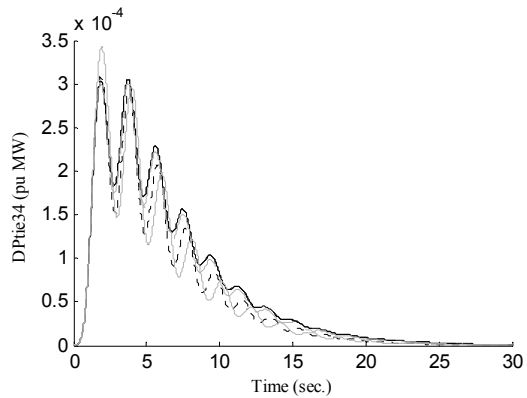
(δ) R_4A_SS_S4H0D0W0G0_R1G1_PI0_D(ps4)



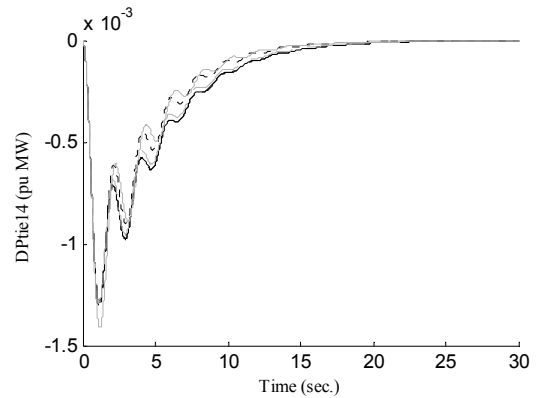
(ε) R_4A_SS_S4H0D0W0G0_R1G1_PI0_D(Ptie12)



(σ) R_4A_SS_S4H0D0W0G0_R1G1_PI0_D(Ptie23)



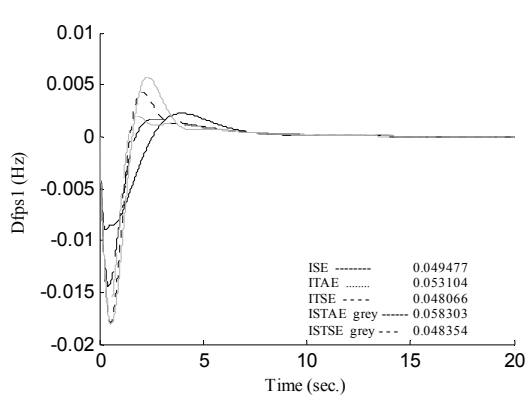
(ζ) R_4A_SS_S4H0D0W0G0_R1G1_PI0_D(Ptie34)



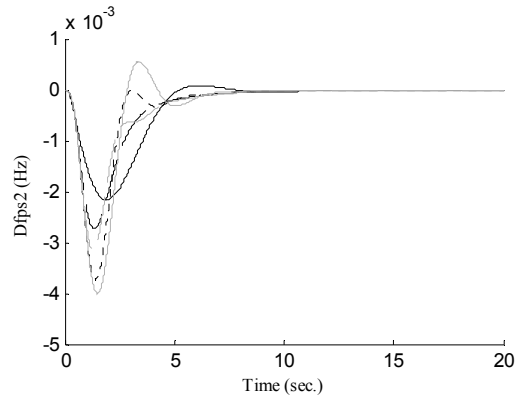
(η) R_4A_SS_S4H0D0W0G0_R1G1_PI0_D(Ptie14)

β) Αναλογικός – ολοκληρωτικός – διαφορικός έλεγχος.

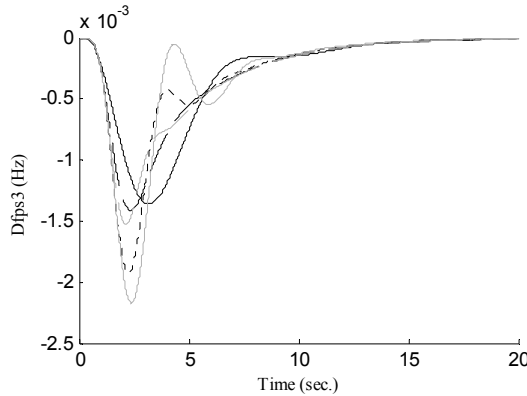
	ISE	ITAE	ITSE	ISTAE	ISTSE
<i>Ελεγκτές PID διακριτός χρόνος (α-η)</i>					
Περιοχή 1 K_i	-0.99996	-0.99985	-0.99993	-0.99998	-0.99964
Περιοχή 1 K_p	-0.99903	-0.71636	-0.99957	-0.53518	-0.99973
Περιοχή 1 K_d	-0.99877	-0.23175	-0.39135	-0.26279	-0.25007
Περιοχή 2 K_i	-0.99996	-0.99985	-0.99993	-0.99998	-0.99964
Περιοχή 2 K_p	-0.99903	-0.71636	-0.99957	-0.53518	-0.99973
Περιοχή 2 K_d	-0.99877	-0.23175	-0.39135	-0.26279	-0.25007
Περιοχή 3 K_i	-0.99996	-0.99985	-0.99993	-0.99998	-0.99964
Περιοχή 3 K_p	-0.99903	-0.71636	-0.99957	-0.53518	-0.99973
Περιοχή 3 K_d	-0.99877	-0.23175	-0.39135	-0.26279	-0.25007
Περιοχή 4 K_i	-0.99996	-0.99985	-0.99993	-0.99998	-0.99964
Περιοχή 4 K_p	-0.99903	-0.71636	-0.99957	-0.53518	-0.99973
Περιοχή 4 K_d	-0.99877	-0.23175	-0.39135	-0.26279	-0.25007
J	0.000135	13.86144	0.017078	7236.905	3.386635
$J(IAE)$	0.049477	0.053104	0.048066	0.058303	0.048354



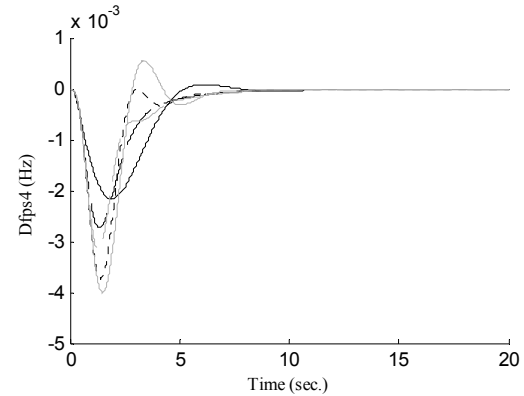
(α) R_4A_SS_S4H0D0W0G0_R1G1_PID_D(ps1)



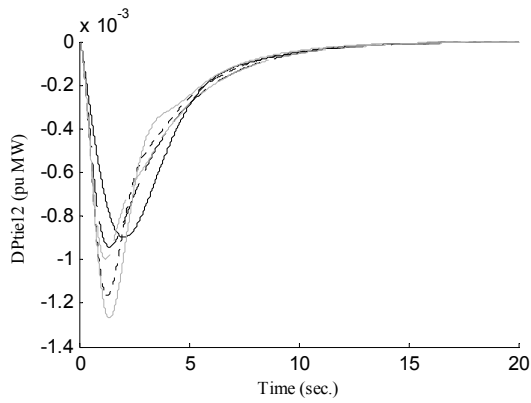
(β) R_4A_SS_S4H0D0W0G0_R1G1_PID_D(ps2)



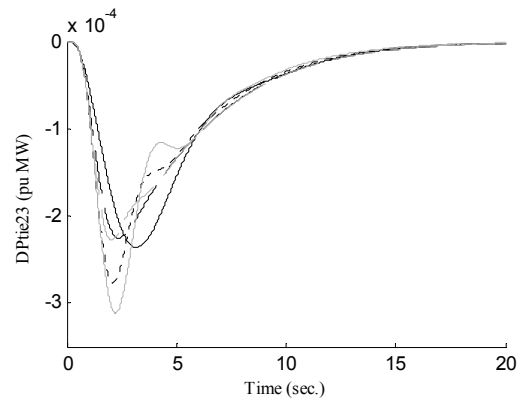
(γ) R_4A_SS_S4H0D0W0G0_R1G1_PID_D(ps3)



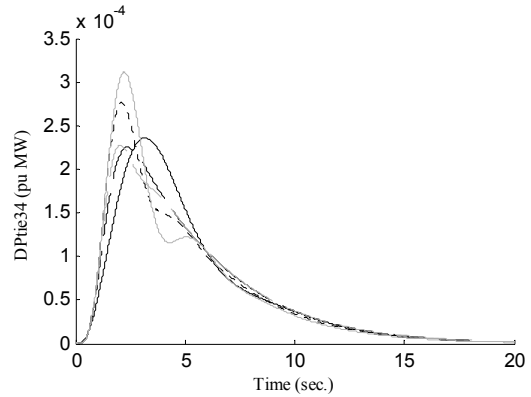
(δ) R_4A_SS_S4H0D0W0G0_R1G1_PID_D(ps4)



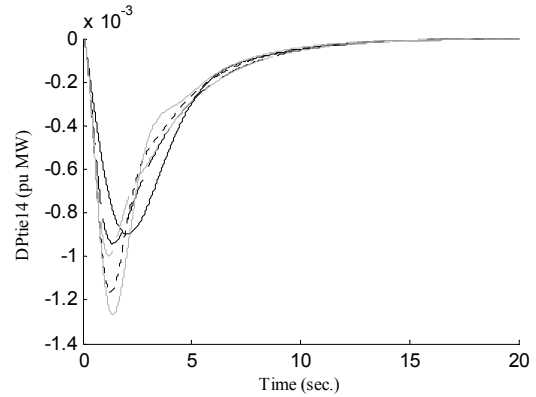
(ε) R_4A_SS_S4H0D0W0G0_R1G1_PID_D(Ptie12)



(σ) R_4A_SS_S4H0D0W0G0_R1G1_PID_D(Ptie23)



(ζ) R_4A_SS_S4H0D0W0G0_R1G1_PID_D(Ptie34)



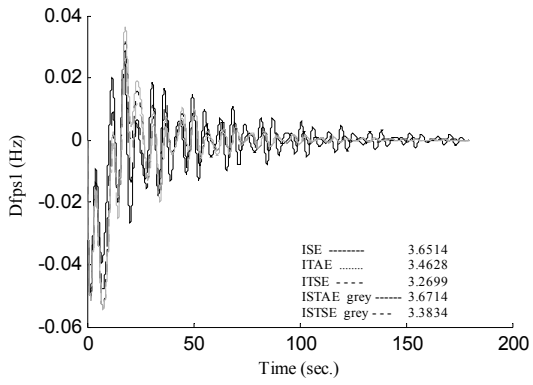
(η) R_4A_SS_S4H0D0W0G0_R1G1_PID_D(Ptie14)

9.4.4. Ντιζελοηλεκτρικές Μονάδες

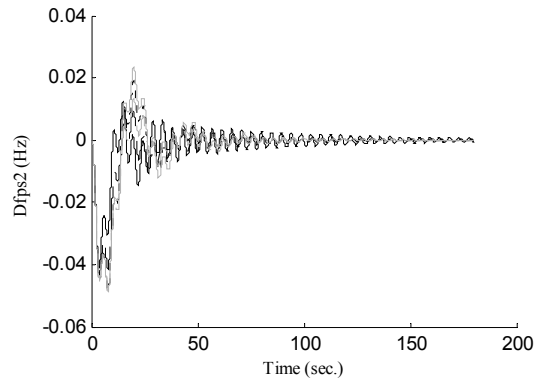
Ακόμα μια περίπτωση στην οποία έχουν χρησιμοποιηθεί κοινά κέρδη και για τις δύο περιπτώσεις ελέγχου.

α) Αναλογικός – ολοκληρωτικός έλεγχος.

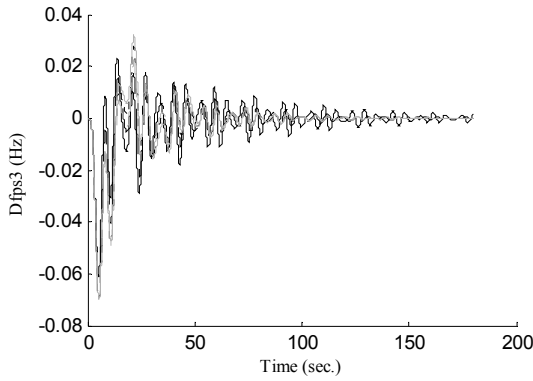
	ISE	ITAE	ITSE	ISTAE	ISTSE
<i>Ελεγκτές PI διακριτός χρόνος (α-η)</i>					
Περιοχή 1 K_i	-0.05214	-0.04425	-0.04259	-0.04858	-0.03741
Περιοχή 1 K_p	-0.15393	0.153675	0.038048	0.173609	0.139139
Περιοχή 2 K_i	-0.05214	-0.04425	-0.04259	-0.04858	-0.03741
Περιοχή 2 K_p	-0.15393	0.153675	0.038048	0.173609	0.139139
Περιοχή 3 K_i	-0.05214	-0.04425	-0.04259	-0.04858	-0.03741
Περιοχή 3 K_p	-0.15393	0.153675	0.038048	0.173609	0.139139
Περιοχή 4 K_i	-0.05214	-0.04425	-0.04259	-0.04858	-0.03741
Περιοχή 4 K_p	-0.15393	0.153675	0.038048	0.173609	0.139139
J	0.051325	8987.125	62.61831	51398952	139135.2
$J(IAE)$	3.651428	3.462767	3.269881	3.671408	3.383398



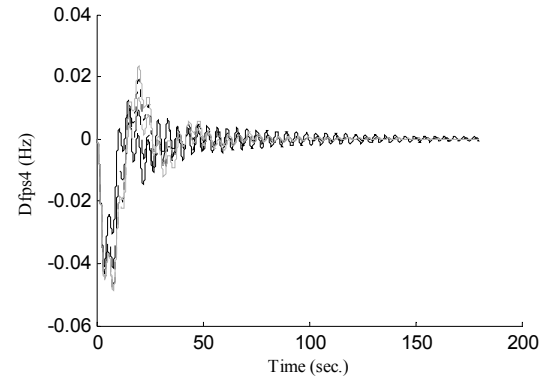
(α) R_4A_SS_S0H0D4W0G0_ROG1_PIO_D(ps1)



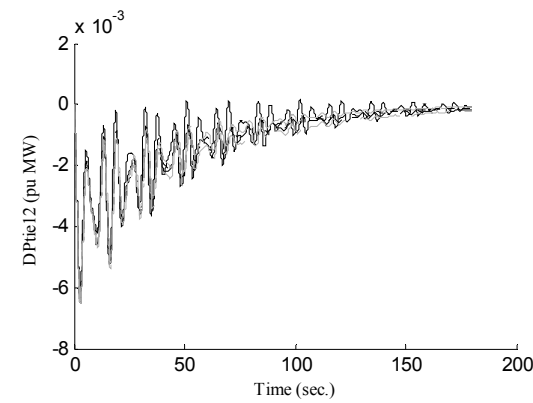
(β) R_4A_SS_S0H0D4W0G0_ROG1_PIO_D(ps2)



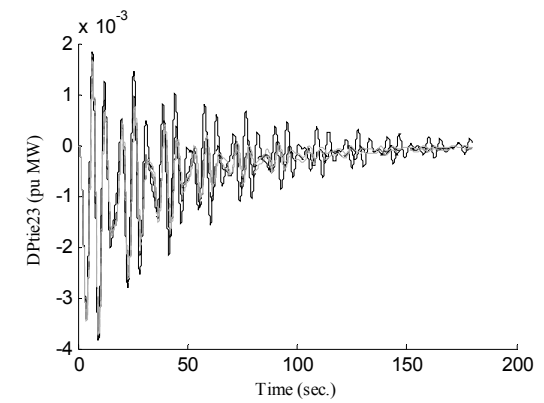
(γ) R_4A_SS_S0H0D4W0G0_ROG1_PIO_D(ps3)



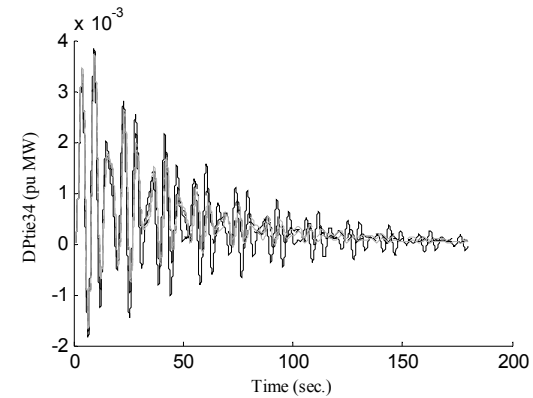
(δ) R_4A_SS_S0H0D4W0G0_ROG1_PIO_D(ps4)



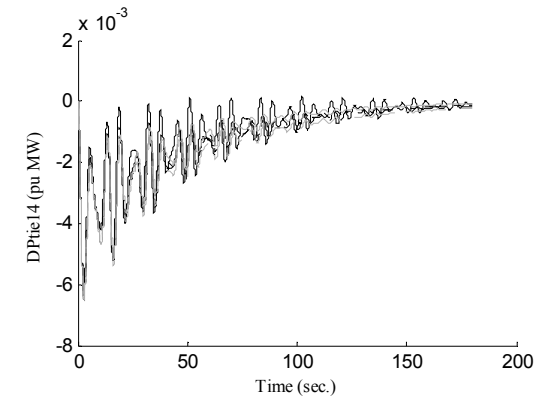
(ε) R_4A_SS_S0H0D4W0G0_ROG1_PIO_D(Ptie12)



(σ) R_4A_SS_S0H0D4W0G0_ROG1_PIO_D(Ptie23)



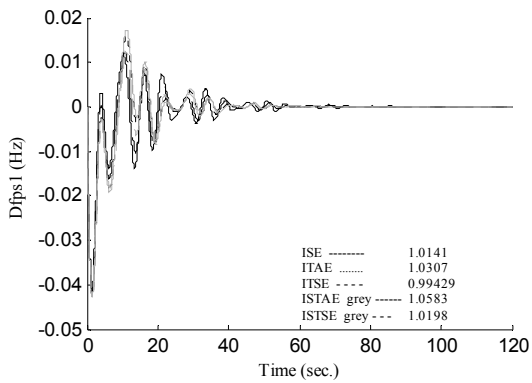
(ζ) R_4A_SS_S0H0D4W0G0_ROG1_PIO_D(Ptie34)



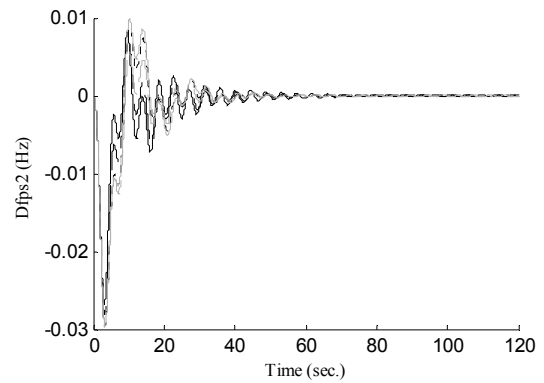
(η) R_4A_SS_S0H0D4W0G0_ROG1_PIO_D(Ptie14)

β) Αναλογικός – ολοκληρωτικός – διαφορικός έλεγχος.

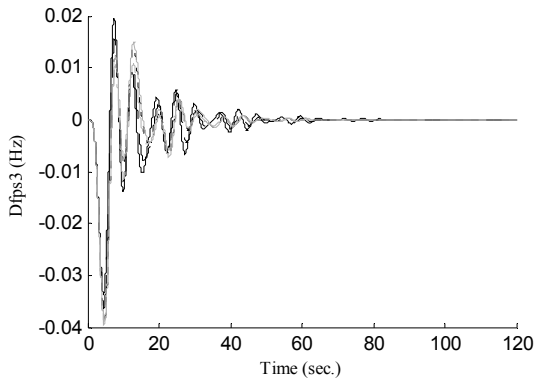
	ISE	ITAE	ITSE	ISTAE	ISTSE
<i>Ελεγκτές PID διακριτός χρόνος (α-η)</i>					
Περιοχή 1 Ki	-0.14446	-0.15407	-0.13311	-0.16309	-0.12322
Περιοχή 1 Kr	-1	-0.44031	-0.73032	-0.40482	-0.48335
Περιοχή 1 Kd	-1	-0.99998	-0.99998	-1	-1
Περιοχή 2 Ki	-0.14446	-0.15407	-0.13311	-0.16309	-0.12322
Περιοχή 2 Kr	-1	-0.44031	-0.73032	-0.40482	-0.48335
Περιοχή 2 Kd	-1	-0.99998	-0.99998	-1	-1
Περιοχή 3 Ki	-0.14446	-0.15407	-0.13311	-0.16309	-0.12322
Περιοχή 3 Kr	-1	-0.44031	-0.73032	-0.40482	-0.48335
Περιοχή 3 Kd	-1	-0.99998	-0.99998	-1	-1
Περιοχή 4 Ki	-0.14446	-0.15407	-0.13311	-0.16309	-0.12322
Περιοχή 4 Kr	-1	-0.44031	-0.73032	-0.40482	-0.48335
Περιοχή 4 Kd	-1	-0.99998	-0.99998	-1	-1
J	0.011123	1187.69	6.407674	2776112	6280.114
J(IAE)	1.014067	1.030698	0.994294	1.058257	1.019781



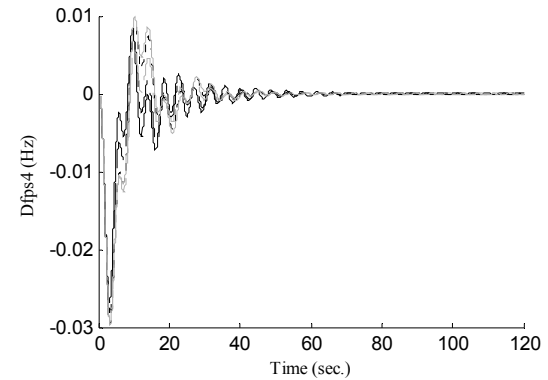
(α) R_4A_SS_S0H0D4W0G0_R0G1_PID_D(ps1)



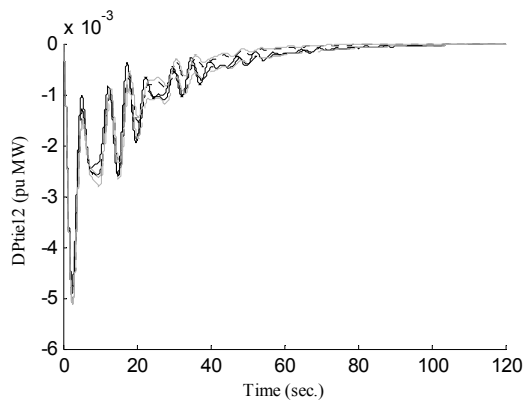
(β) R_4A_SS_S0H0D4W0G0_R0G1_PID_D(ps2)



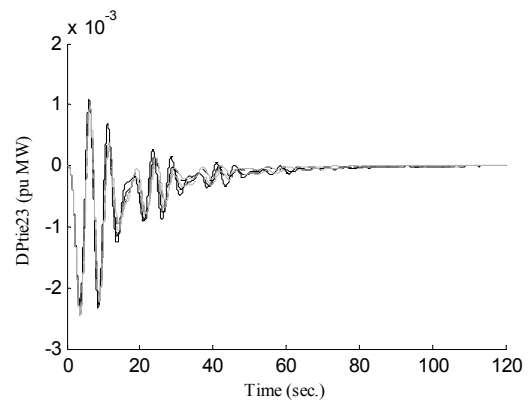
(γ) R_4A_SS_S0H0D4W0G0_R0G1_PID_D(ps3)



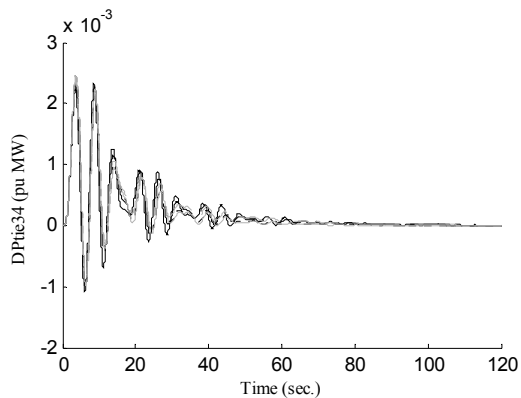
(δ) R_4A_SS_S0H0D4W0G0_R0G1_PID_D(ps4)



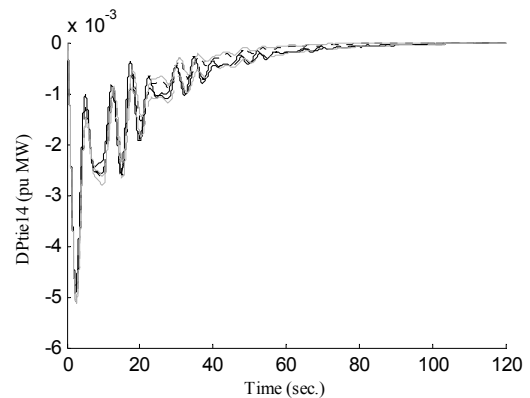
(ε) R_4A_SS_S0H0D4W0G0_R0G1_PID_D(Ptie12)



(στ) R_4A_SS_S0H0D4W0G0_R0G1_PID_D(Ptie23)



(ζ) R_4A_SS_S0H0D4W0G0_R0G1_PID_D(Ptie34)



(η) R_4A_SS_S0H0D4W0G0_R0G1_PID_D(Ptie14)

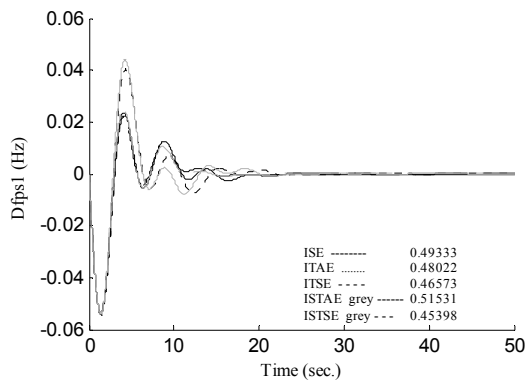
9.4.5. Μεικτό Μοντέλο Τεσσάρων Περιοχών

Εδώ εξετάζεται ένα σύστημα το οποίο παρουσιάζει αυξημένο βαθμό πολυπλοκότητας. Κάθε μια περιοχή από τις τέσσερις του συστήματος έχει δυο μονάδες παραγωγής με κάθε μια από αυτές να έχει δικό της ελεγκτή, δηλαδή, συνολικά οκτώ ελεγκτές. Η πρώτη περιοχή χρησιμοποιεί μια ατμοστροβιλική και μια υδροστροβιλική μονάδα. Η δεύτερη περιοχή χρησιμοποιεί μια ατμοστροβιλική μονάδα και μια αεριοστροβιλική μονάδα. Η τρίτη περιοχή αποτελείται από μια ντιζελοηλεκτρική και μια αεριοστροβιλική μονάδα. Ενώ η τέταρτη περιοχή χρησιμοποιεί μια ντιζελοηλεκτρική μονάδα και μια ανεμογεννήτρια. Λόγω μεγάλου όγκου δεδομένων έχει γίνει διαχωρισμός και για αυτό το σύστημα και ο αναλογικός – ολοκληρωτικός έλεγχος πινακοποιείται ξεχωριστά από τον έλεγχο τριών όρων. Ακόμα σημειώνεται ότι η ισχύς που παράγεται από την ανεμογεννήτρια της τέταρτης περιοχής φαίνεται με τον δείκτη DPwind στις χρονοαποκρίσεις.

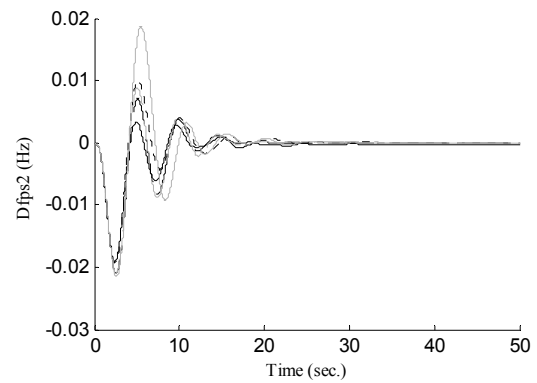
α) Αναλογικός – ολοκληρωτικός έλεγχος.

		ISE	ITAE	ITSE	ISTAE	ISTSE
<i>Ελεγκτές PI διακριτός χρόνος (α-θ)</i>						
Περιοχή 1	<i>Steam Ki</i>	-0.40833	-0.57765	-0.35814	-0.68972	-0.38194
	<i>Steam Kp</i>	0.581305	0.559194	0.556659	0.453559	0.439672
	<i>Hydro Ki</i>	0.224517	-0.07592	0.056797	-0.00226	-0.00971
	<i>Hydro Kp</i>	0.995164	-0.15741	0.810135	0.026104	0.908304
Περιοχή 2	<i>Steam Ki</i>	-0.31965	-0.10861	-0.06605	0.259801	0.195898
	<i>Steam Kp</i>	-0.65039	-0.76327	-0.22405	-0.19395	-0.00136
	<i>Gas Ki</i>	-0.54513	-0.94441	-0.57483	-0.8008	-0.82686
	<i>Gas Kp</i>	0.736763	0.95102	0.782644	0.893747	0.417526

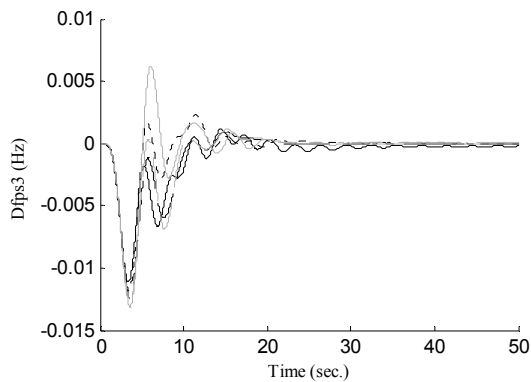
Περιοχή 3	<i>Diesel Ki</i>	0.221756	-0.33708	-0.82577	-0.08544	0.938943
	<i>Diesel Kp</i>	-0.71818	-0.99477	0.01571	-0.84007	-0.16765
	<i>Gas Ki</i>	-0.91951	-0.66981	-0.29365	-0.59342	-0.396
	<i>Gas Kp</i>	-0.9228	-0.70641	-0.9531	-0.50156	-0.67714
Περιοχή 4	<i>Diesel Ki</i>	-0.12493	-0.42236	-0.2347	-0.45448	0.10825
	<i>Diesel Kp</i>	0.361362	-0.90013	0.488038	-0.67774	0.956223
	<i>Wind Ki</i>	0.064728	0.12451	0.554076	-0.19603	-0.52101
	<i>Wind Kp</i>	0.810096	0.422974	0.930522	-0.03164	-0.11239
	<i>J</i>	0.006959	289.3872	1.848562	265399.3	820.5268
	<i>J(IAE)</i>	0.493327	0.480218	0.46573	0.515311	0.45398



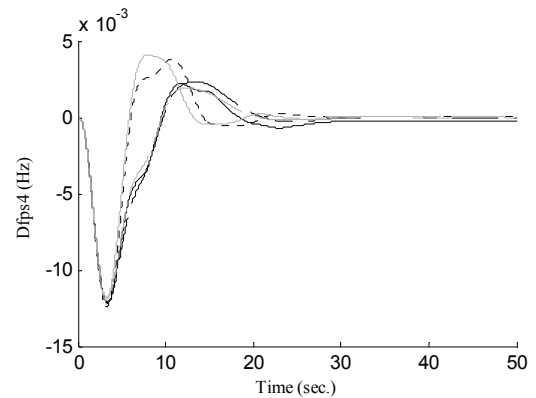
(α) R_4A_MS_SH_SG_DG_DW_PIO_D(ps1)



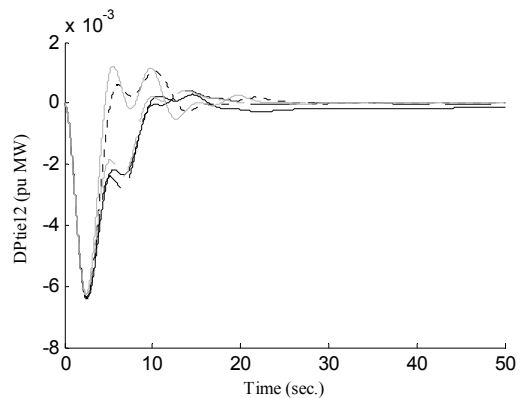
(β) R_4A_MS_SH_SG_DG_DW_PIO_D(ps2)



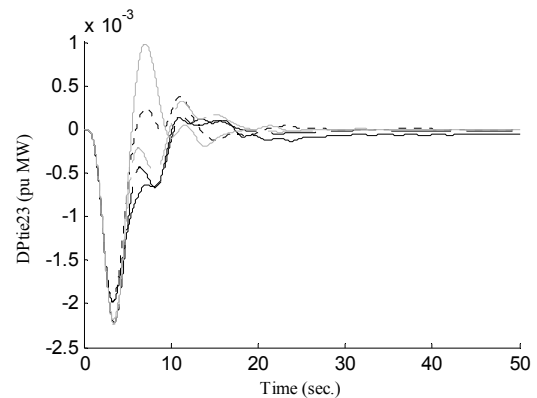
(γ) R_4A_MS_SH_SG_DG_DW_PIO_D(ps3)



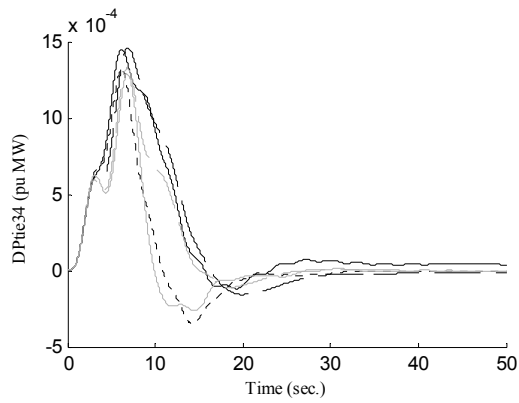
(δ) R_4A_MS_SH_SG_DG_DW_PIO_D(ps4)



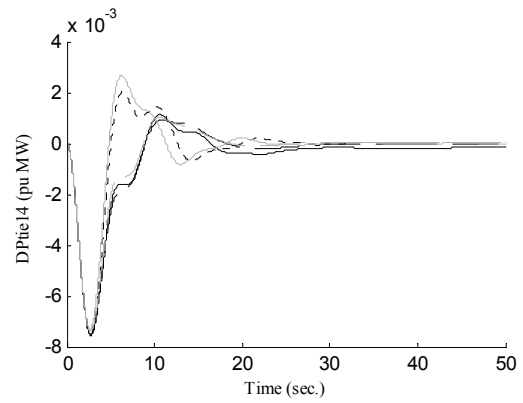
(ε) R_4A_MS_SH_SG_DG_DW_PIO_D(Ptie12)



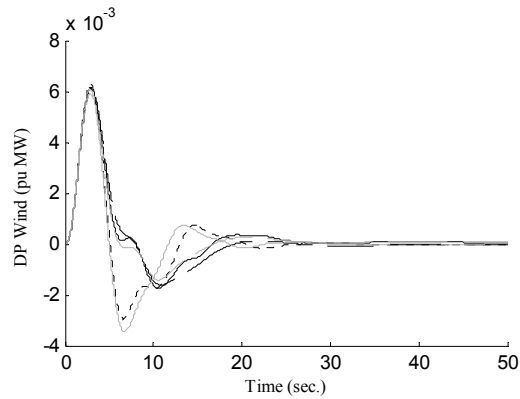
(στ) R_4A_MS_SH_SG_DG_DW_PIO_D(Ptie23)



(ζ) R_4A_MS_SH_SG_DG_DW_PIO_D(Ptie34)



(η) R_4A_MS_SH_SG_DG_DW_PIO_D(Ptie14)

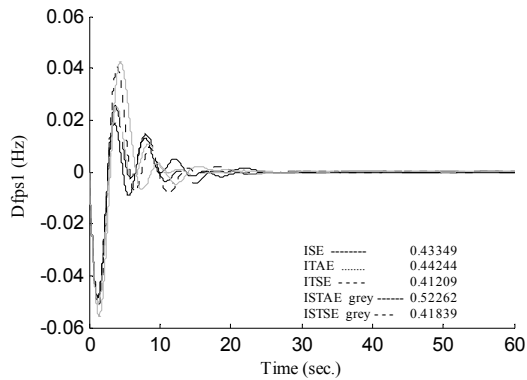


(θ) R_4A_MS_SH_SG_DG_DW_PIO_D(wind)

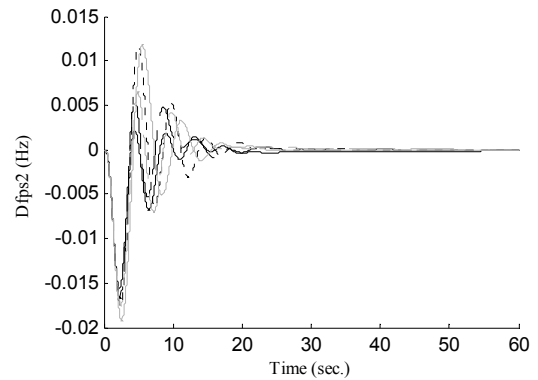
β) Αναλογικός – ολοκληρωτικός – διαφορικός έλεγχος.

		ISE	ITAE	ITSE	ISTAE	ISTSE
<i>Ελεγκτές PI διακριτός χρόνος (α-θ)</i>						
Περιοχή 1	<i>Steam Ki</i>	-0.45016	-0.71109	-0.627	-0.56255	-0.44525
	<i>Steam Kp</i>	0.421218	0.490266	0.469149	0.557032	0.518455
	<i>Steam Kd</i>	-0.92173	-0.55778	-0.94217	0.217068	-0.62043
	<i>Hydro Ki</i>	0.213155	-0.02293	-0.03336	-0.0344	-0.05514
	<i>Hydro Kp</i>	0.941215	-0.87957	0.307745	0.04158	-0.61435
	<i>Hydro Kd</i>	0.961403	0.037916	0.741242	0.204811	0.91662
Περιοχή 2	<i>Steam Ki</i>	-0.67067	-0.09113	0.044965	-0.43396	-0.56233
	<i>Steam Kp</i>	-0.59486	-0.61194	0.175245	0.114005	0.043107
	<i>Steam Kd</i>	0.127912	-0.56299	-0.38316	0.002328	-0.09787
	<i>Gas Ki</i>	-0.61956	-0.88111	-0.83451	-0.68943	-0.54131
	<i>Gas Kp</i>	0.902593	0.772795	-0.70607	0.620489	0.565514
	<i>Gas Kd</i>	-0.5569	0.533698	0.402032	-0.8469	-0.40058
Περιοχή 3	<i>Diesel Ki</i>	-0.29091	-0.08978	-0.36685	-0.97777	-0.23035
	<i>Diesel Kp</i>	-0.08926	-0.82599	0.115324	-0.9411	-0.62097
	<i>Diesel Kd</i>	-0.49195	0.844642	-0.34704	-0.82955	-0.28338
	<i>Gas Ki</i>	-0.89975	-0.17443	-0.10242	-0.32438	-0.11315
	<i>Gas Kp</i>	-0.61441	-0.47038	-0.85543	0.38568	-0.25874
	<i>Gas Kd</i>	-0.6623	-0.93457	-0.91562	-0.89079	-0.93721

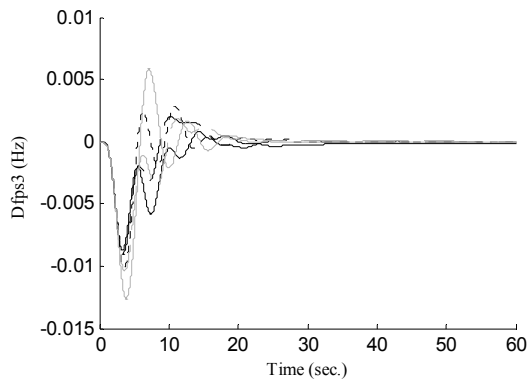
Περιοχή 4	<i>Diesel Ki</i>	0.019106	-0.16149	0.112874	-0.6598	-0.25426
	<i>Diesel Kp</i>	0.38867	-0.11268	-0.61576	-0.47566	-0.37313
	<i>Diesel Kd</i>	-0.53198	-0.29128	-0.58893	-0.02492	-0.76822
	<i>Wind Ki</i>	-0.36963	-0.83906	-0.45361	-0.14174	0.110176
	<i>Wind Kp</i>	-0.19718	0.838481	0.958745	-0.56655	0.546587
	<i>Wind Kd</i>	-0.25592	-0.05301	-0.2989	0.341338	-0.91974
<i>J</i>		0.005023	239.1197	1.525706	419569.9	681.935
<i>J(IAE)</i>		0.433485	0.442442	0.41209	0.522623	0.418394



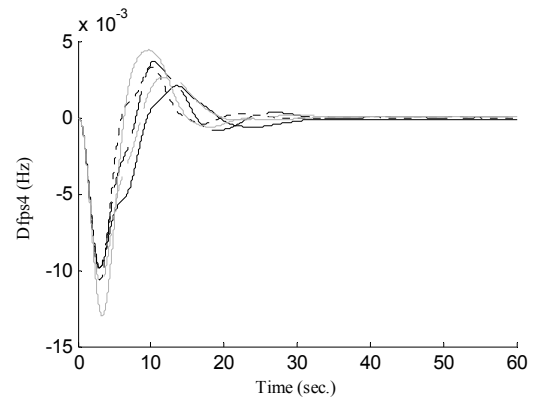
(α) R_4A_MS_SH_SG_DG_DW_PID_D(ps1)



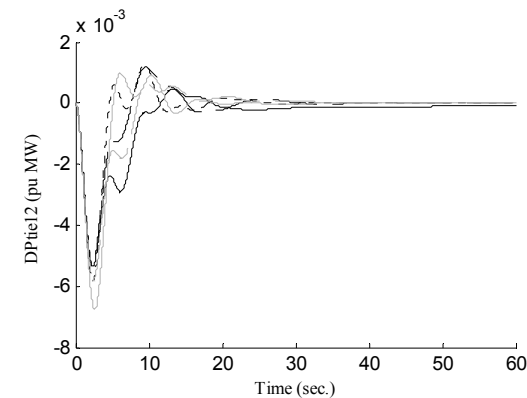
(β) R_4A_MS_SH_SG_DG_DW_PID_D(ps2)



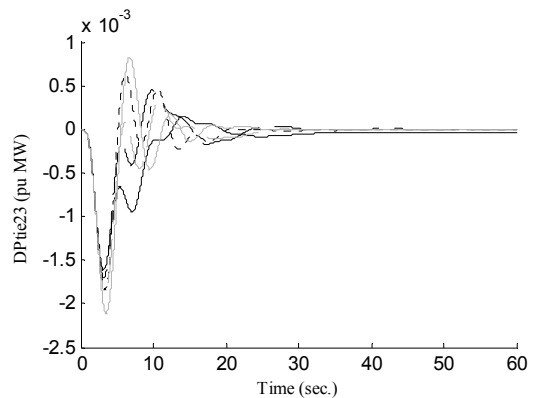
(γ) R_4A_MS_SH_SG_DG_DW_PID_D(ps3)



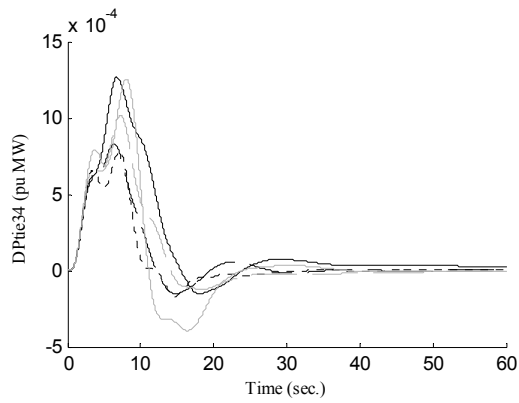
(δ) R_4A_MS_SH_SG_DG_DW_PID_D(ps4)



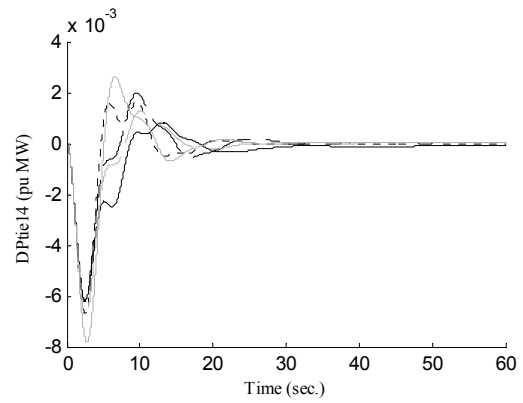
(ε) R_4A_MS_SH_SG_DG_DW_PID_D(Ptie12)



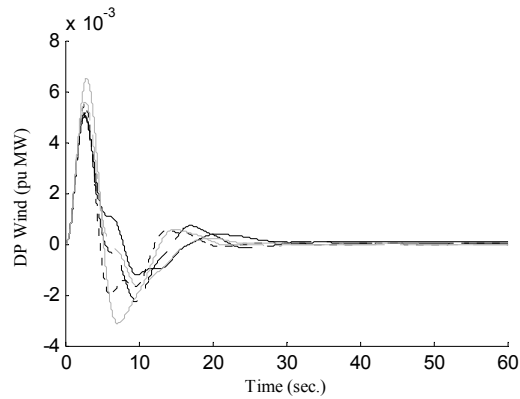
(σ) R_4A_MS_SH_SG_DG_DW_PID_D(Ptie23)



(ζ) R_4A_MS_SH_SG_DG_DW_PID_D(Ptie34)



(η) R_4A_MS_SH_SG_DG_DW_PID_D(Ptie14)



(θ) R_4A_MS_SH_SG_DG_DW_PID_D(wind)

9.5. Συστήματα Δυο Περιοχών Σε Καθεστώς Απελευθερωμένης Αγοράς

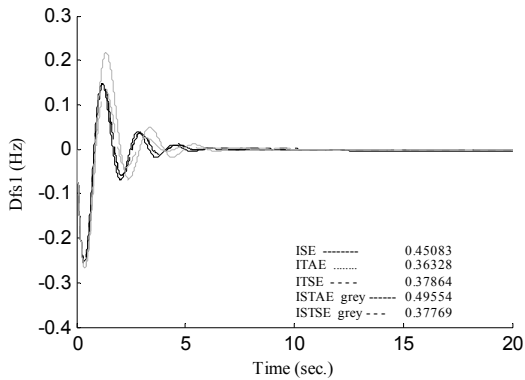
Εδώ εξετάζονται τα συστήματα στα οποία έχει θεωρηθεί απελευθέρωση αγοράς και έτσι η εταιρίες παραγωγής και διανομής διαχωρίζονται. Θα παρουσιαστούν σε αυτό το εδάφιο μοντέλα τα οποία εξετάζονται για το πρώτο σενάριο (βασική περίπτωση) όπως αναφέρθηκε στο Εδάφιο 3.4, ενώ για το τελευταίο μοντέλο θα γίνει εκτενέστερη ανάλυση τόσο από άποψη σεναρίων όσο και ελέγχου. Αρχικά θα παρουσιαστεί το απλούστερο μοντέλο με ένα είδος πηγών και η πολυπλοκότητα των συστημάτων που θα ακολουθούν θα είναι αύξουσα. Σε κάθε σύστημα που παρουσιάζεται δίνονται δεδομένα για όλα τα είδη ελέγχου που εφαρμόστηκαν σε αυτό, καθώς και οι αντίστοιχοι δείκτες απόδοσης για κάθε κριτήριο που εξετάζεται αλλά και οι δείκτες απόδοσης όπως προκύπτουν μετά από αναγωγή (IAE). Οι χρονοαποκρίσεις αυτού του Εδαφίου θα παρουσιάζουν εκτός από το σφάλμα συχνότητας κάθε περιοχής και την ισχύ που μεταφέρεται μέσω της διασυνδετήριας γραμμής, όπως γίνεται μέχρι τώρα, ακόμα την παραγόμενη ισχύ κάθε περιοχής (GenCo1 – 4).

9.5.1. Μοναδικές Πηγές Ατμοστροβιλικές Μονάδες

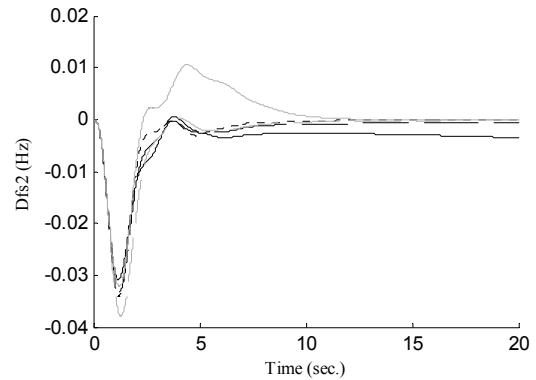
Το σύστημα που εξετάζεται εδώ έχει δυο εταιρίες παραγωγής σε κάθε περιοχή δηλαδή συνολικά τέσσερις και ίσες εταιρίες διανομής. Κάθε εταιρία παραγωγής έχει μια ατμοστροβιλική μονάδα. Λόγω του πλήθους των χρονοαποκρίσεων και διαχωρίστηκαν ο αναλογικός – ολοκληρωτικός έλεγχος με τον έλεγχο τριών όρων. Σημειώνεται ακόμα ότι κάθε περιοχή έχει έναν μόνο ελεγκτή για να ελέγχει όλες τις μονάδες της ασχέτως σε ποια εταιρία παραγωγής ανήκουν.

α) Αναλογικός – ολοκληρωτικός έλεγχος.

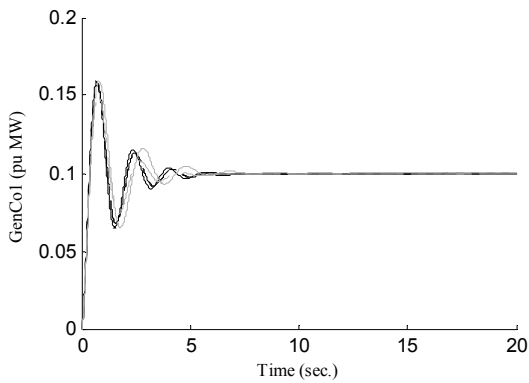
		ISE	ITAE	ITSE	ISTAE	ISTSE
<i>Ελεγκτές PI διακριτός χρόνος (α-ζ)</i>						
Περιοχή 1	K_i	0.076796	-0.00095	0.021223	-0.70778	0.001748
	K_p	-0.9999	-0.84655	-0.84937	-0.49765	-0.56573
Περιοχή 2	K_i	-0.03167	0.00742	-0.01707	-0.0017	0.010835
	K_p	0.490854	0.299215	0.435905	0.900179	0.481319
J		0.038914	57.24867	2.980978	35037.17	364.2154
$J(IAE)$		0.450825	0.363277	0.378643	0.495537	0.377694



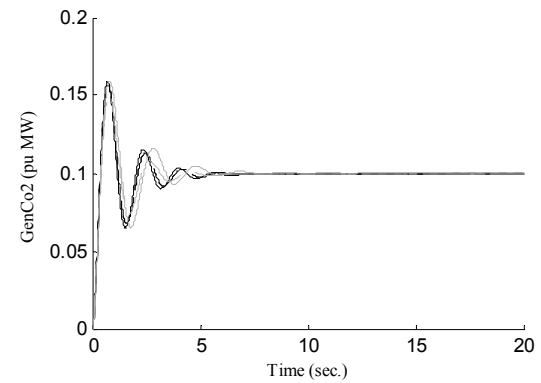
(α) D_2GPA_S_S_S_S_PIO_D(ps1)



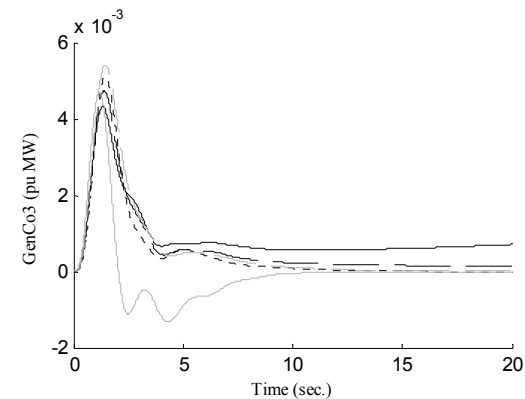
(β) D_2GPA_S_S_S_S_PIO_D(ps2)



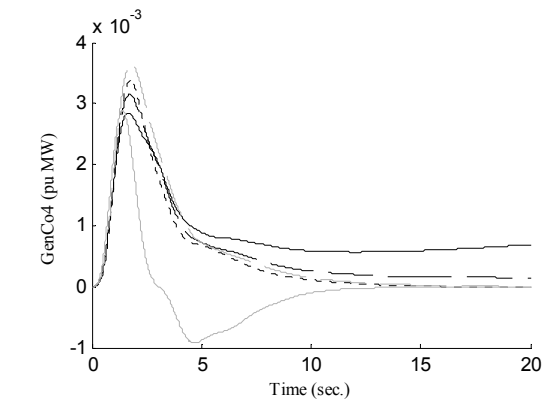
(γ) D_2GPA_S_S_S_S_PIO_D(GenCo1)



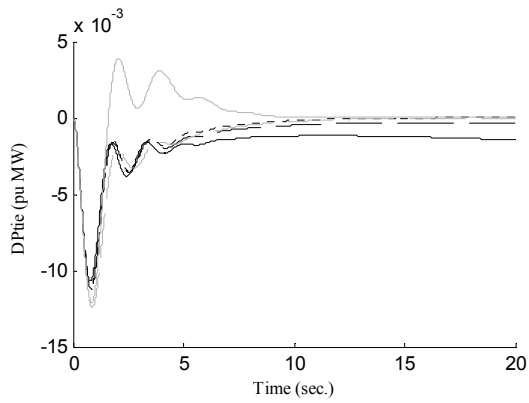
(δ) D_2GPA_S_S_S_S_PIO_D(GenCo2)



(ε) D_2GPA_S_S_S_S_PIO_D(GenCo3)



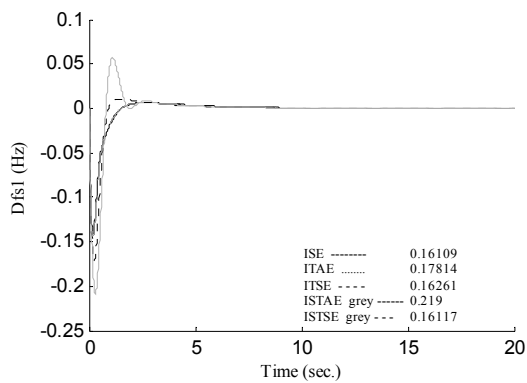
(στ) D_2GPA_S_S_S_S_PIO_D(GenCo4)



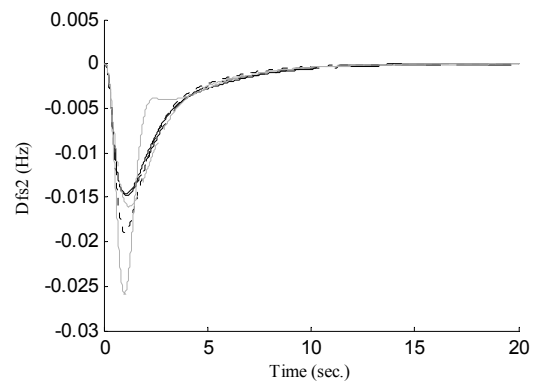
(ζ) D_2GPA_S_S_S_S_PID_D(Ptie)

β) Αναλογικός – ολοκληρωτικός – διαφορικός έλεγχος.

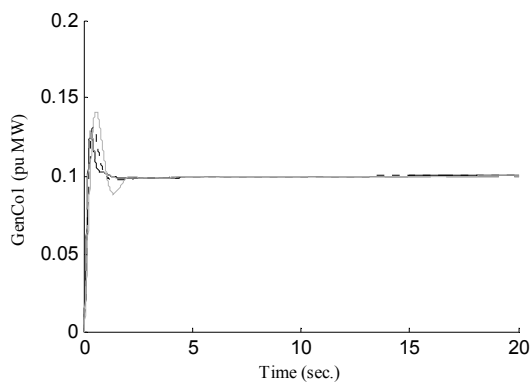
		ISE	ITAE	ITSE	ISTAE	ISTSE
<i>Ελεγκτές PID διακριτός χρόνος (α-ζ)</i>						
Περιοχή 1	<i>K_i</i>	-0.00216	-0.00408	0.00291	-0.00038	0.000967
	<i>K_p</i>	-0.99987	-0.99627	-0.99797	-0.99883	-0.99953
	<i>K_d</i>	-0.9998	-0.55931	-0.96855	-0.25147	-0.96726
Περιοχή 2	<i>K_i</i>	-0.961	0.042245	-0.45388	-0.86991	0.008507
	<i>K_p</i>	-0.95723	-0.08547	-0.58492	-0.68105	-0.02276
	<i>K_d</i>	-0.9612	-0.57588	-0.96301	-0.43916	-0.47663
	<i>J</i>	0.00672	33.26002	0.313715	14882.87	44.61459
	<i>J(IAE)</i>	0.16109	0.178137	0.162606	0.219001	0.161171



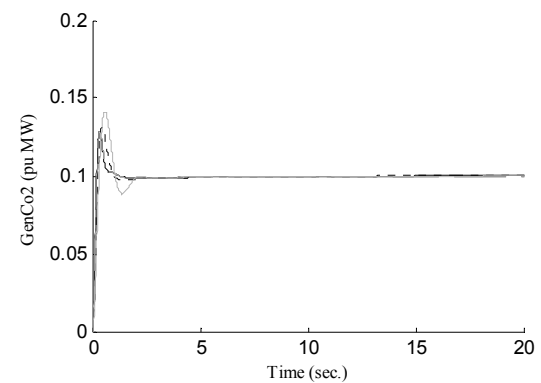
(α) D_2GPA_S_S_S_S_PID_D(ps1)



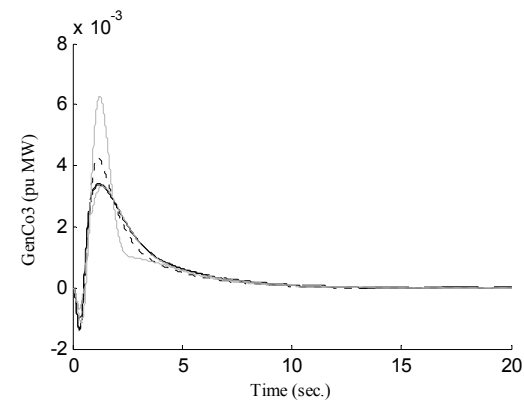
(β) D_2GPA_S_S_S_S_PID_D(ps2)



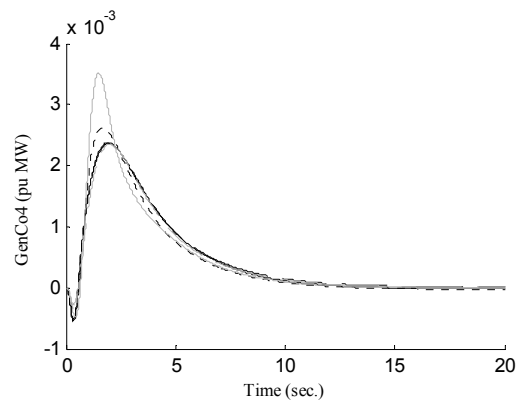
(γ) D_2GPA_S_S_S_S_PID_D(GenCo1)



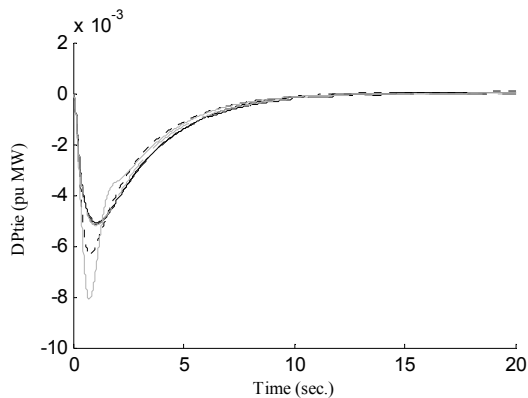
(δ) D_2GPA_S_S_S_S_PID_D(GenCo2)



(ε) D_2GPA_S_S_S_S_PID_D(GenCo3)



(στ) D_2GPA_S_S_S_S_PID_D(GenCo4)



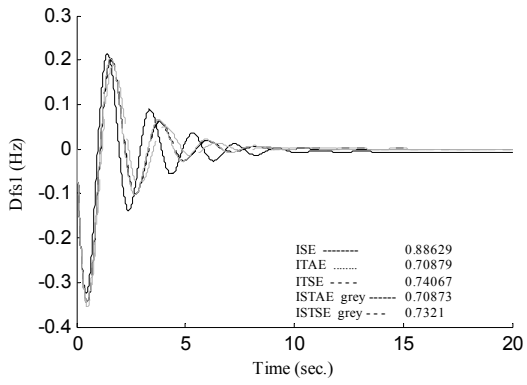
(ζ) D_2GPA_S_S_S_S_PID_D(Ptie)

9.5.2. Ατμοστροβλικές Και Αεριοστροβλικές Μονάδες

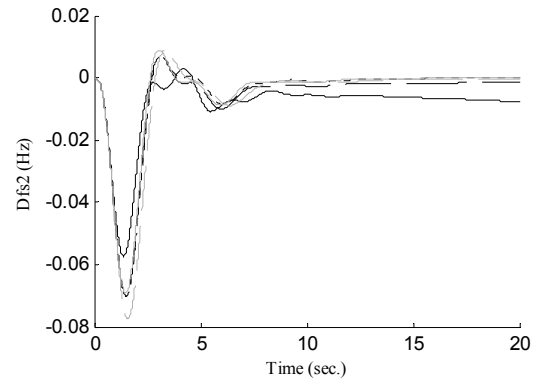
Εδώ εξετάζεται ένα σύστημα το οποίο έχει δυο εταιρίες παραγωγής σε κάθε περιοχή δηλαδή συνολικά τέσσερις και ίσες εταιρίες διανομής. Σε κάθε περιοχή δραστηριοποιείται μια εταιρία παραγωγής η οποία έχει μια ατμοστροβλική μονάδα και μια εταιρία η οποία έχει μια αεριοστροβλική μονάδα. Λόγω του πλήθους των χρονοαποκρίσεων και διαχωρίστηκαν ο αναλογικός – ολοκληρωτικός έλεγχος με τον έλεγχο τριών όρων. Σημειώνεται ακόμα ότι κάθε περιοχή έχει έναν μόνο ελεγκτή για να ελέγχει όλες τις μονάδες της ασχέτως σε ποια εταιρία παραγωγής ανήκουν.

α) Αναλογικός – ολοκληρωτικός έλεγχος.

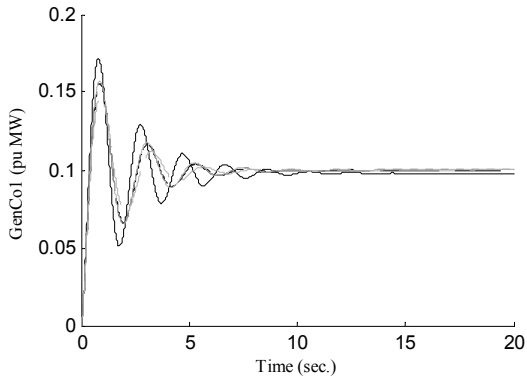
		ISE	ITAE	ITSE	ISTAE	ISTSE
<i>Ελεγκτές PI διακριτός χρόνος (α-ζ)</i>						
Περιοχή 1	K_i	0.085249	-0.00339	0.015914	-0.00308	0.000221
	K_p	-0.63244	-0.17243	-0.18415	-0.20511	0.013141
Περιοχή 2	K_i	-0.0266	0.020158	0.012454	0.018513	0.021082
	K_p	0.262379	0.281949	0.236519	0.213054	0.328576
	J	0.094084	152.8419	10.63304	68945.79	1902.062
	$J(IAE)$	0.886288	0.708786	0.740667	0.708726	0.732101



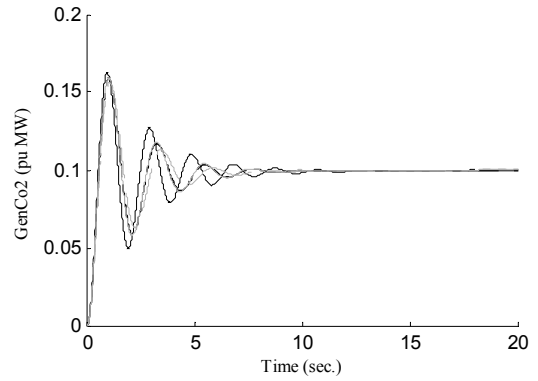
(α) D_2GPA_S_G_S_G_PI0_D(ps1)



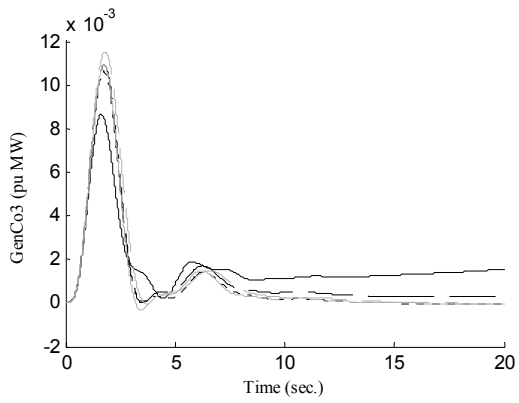
(β) D_2GPA_S_G_S_G_PI0_D(ps2)



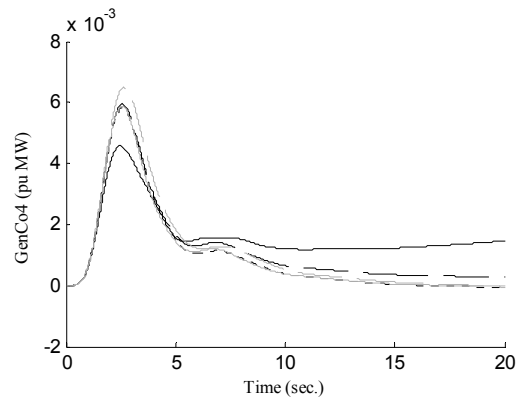
(γ) D_2GPA_S_G_S_G_PI0_D(GenCo1)



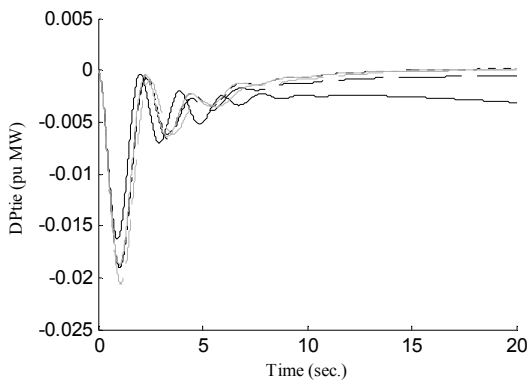
(δ) D_2GPA_S_G_S_G_PI0_D(GenCo2)



(ε) D_2GPA_S_G_S_G_PI0_D(GenCo3)



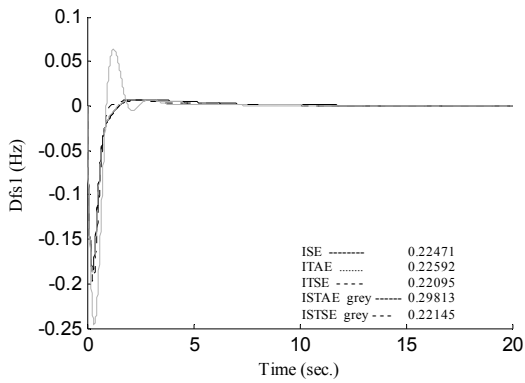
(σ) D_2GPA_S_G_S_G_PI0_D(GenCo4)



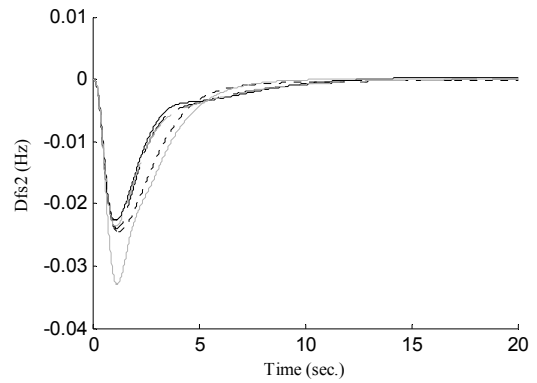
(ζ) D_2GPA_S_G_S_G_PI0_D(Ptie)

β) Αναλογικός – ολοκληρωτικός – διαφορικός έλεγχος.

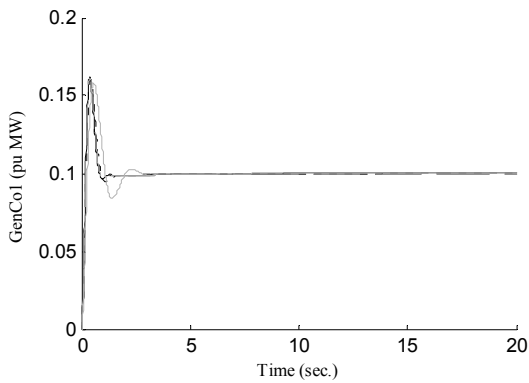
		ISE	ITAE	ITSE	ISTAE	ISTSE
<i>Ελεγκτές PID διακριτός χρόνος (α-ζ)</i>						
Περιοχή 1	<i>K_i</i>	-0.0145	-0.00292	-0.00013	-0.00589	-0.00032
	<i>K_p</i>	-0.99818	-0.96062	-0.99169	-0.81047	-0.99155
	<i>K_d</i>	-0.99911	-0.83377	-0.9892	-0.3935	-0.96726
Περιοχή 2	<i>K_i</i>	-0.72412	0.015717	-0.07321	0.00346	-0.05972
	<i>K_p</i>	-0.87273	0.590942	-0.687	0.866197	-0.88995
	<i>K_d</i>	-0.99469	-0.84395	-0.6696	-0.70654	-0.81
	<i>J</i>	0.013187	46.8229	0.633235	19822.19	85.06559
	<i>J(IAE)</i>	0.224708	0.225916	0.220952	0.298132	0.221448



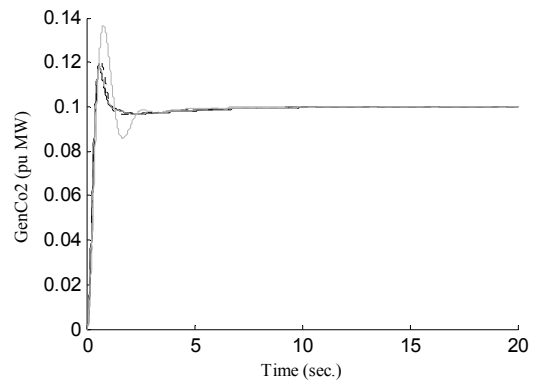
(α) D_2GPA_S_G_S_G_PID_D(ps1)



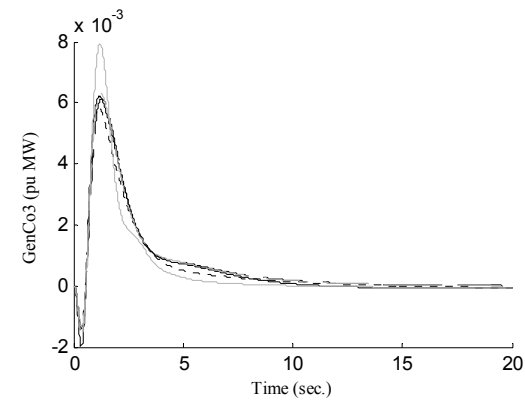
(β) D_2GPA_S_G_S_G_PID_D(ps2)



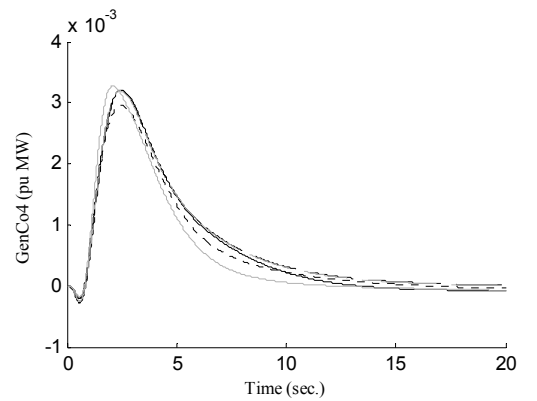
(γ) D_2GPA_S_G_S_G_PID_D(GenCo1)



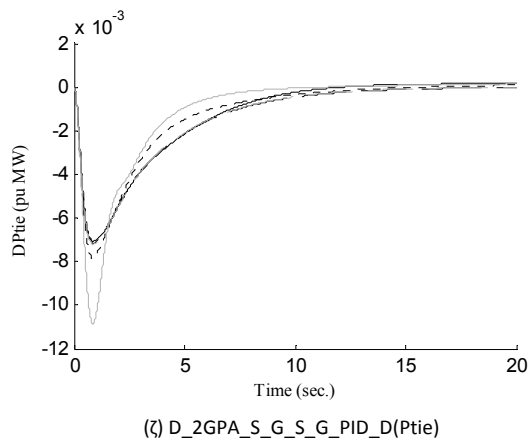
(δ) D_2GPA_S_G_S_G_PID_D(GenCo2)



(ε) D_2GPA_S_G_S_G_PID_D(GenCo3)



(σ) D_2GPA_S_G_S_G_PID_D(GenCo4)

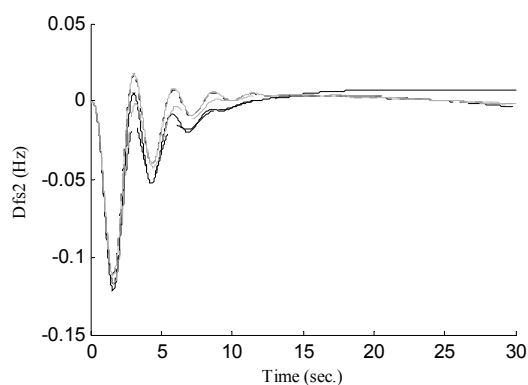
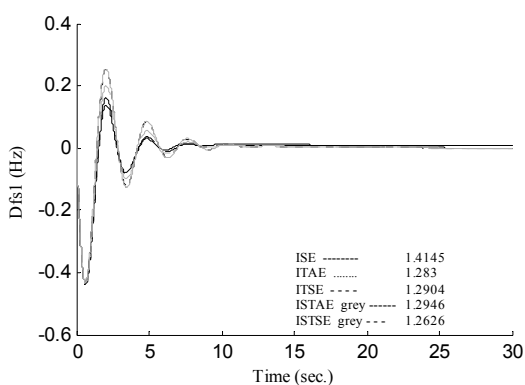


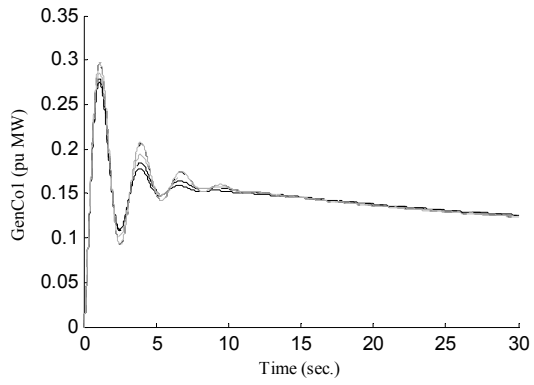
9.5.3. Ατμοστροβλικές Και Υδροστροβλικές Μονάδες

Εδώ εξετάζεται ένα σύστημα το οποίο έχει δυο εταιρίες παραγωγής σε κάθε περιοχή δηλαδή συνολικά τέσσερις και ίσες εταιρίες διανομής. Σε κάθε περιοχή δραστηριοποιείται μια εταιρία παραγωγής η οποία έχει μια ατμοστροβλική μονάδα και μια εταιρία η οποία έχει μια υδροστροβλική μονάδα. Λόγω του πλήθους των χρονοαποκρίσεων και διαχωρίστηκαν ο αναλογικός – ολοκληρωτικός έλεγχος με τον έλεγχο τριών όρων. Σημειώνεται ακόμα ότι κάθε περιοχή έχει έναν μόνο ελεγκτή για να ελέγχει όλες τις μονάδες της ασχέτως σε ποια εταιρία παραγωγής ανήκουν.

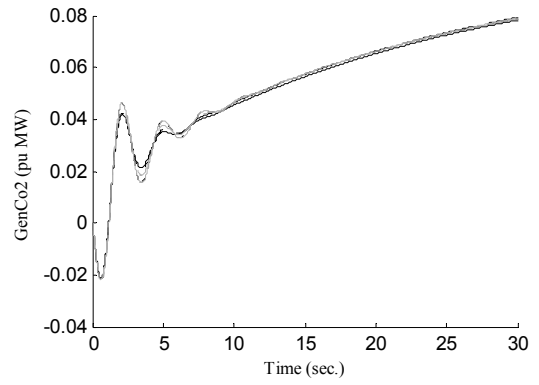
α) Αναλογικός – ολοκληρωτικός έλεγχος.

		ISE	ITAE	ITSE	ISTAE	ISTSE
<i>Ελεγκτές PI διακριτός χρόνος (α-ζ)</i>						
Περιοχή 1	<i>K_i</i>	-0.43525	-0.98596	-0.5376	-0.99689	-0.7175
	<i>K_p</i>	-0.99996	-0.99705	-0.99933	-0.99491	-0.98735
Περιοχή 2	<i>K_i</i>	-0.97711	0.138559	0.147632	0.128552	0.118936
	<i>K_p</i>	-0.99769	-0.9923	-0.99148	-0.89535	-0.70281
<i>J</i>		0.18062	527.5987	22.03908	602232.8	6999.49
<i>J(IAE)</i>		1.414534	1.282964	1.29042	1.29461	1.262562

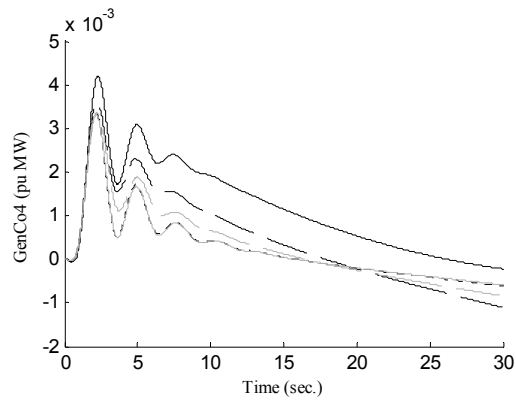




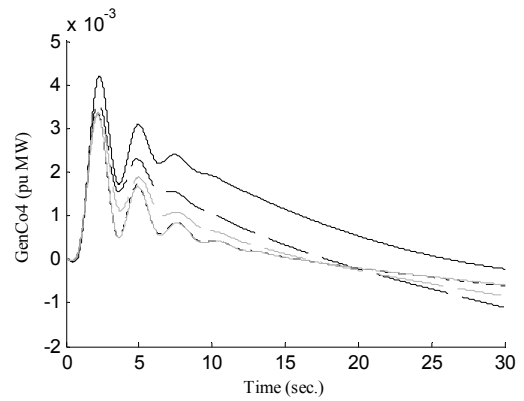
(γ) D_2GPA_S_H_S_H_PIO_D(GenCo1)



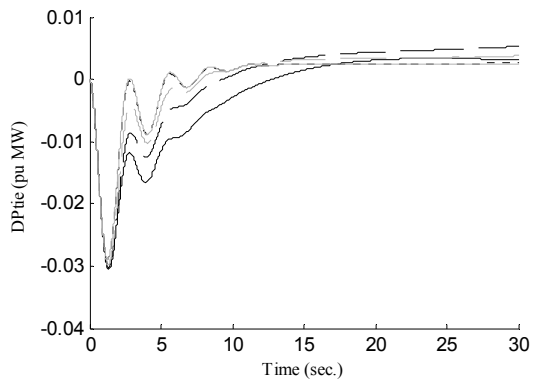
(δ) D_2GPA_S_H_S_H_PIO_D(GenCo2)



(ε) D_2GPA_S_H_S_H_PIO_D(GenCo3)



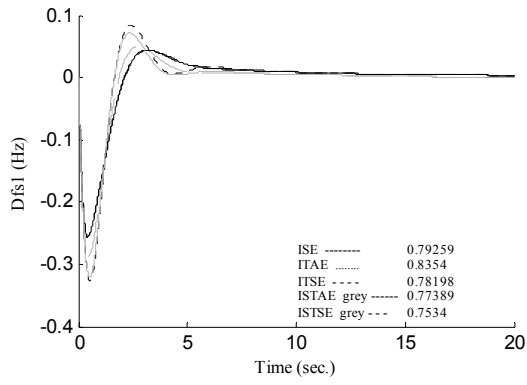
(σ) D_2GPA_S_H_S_H_PIO_D(GenCo4)



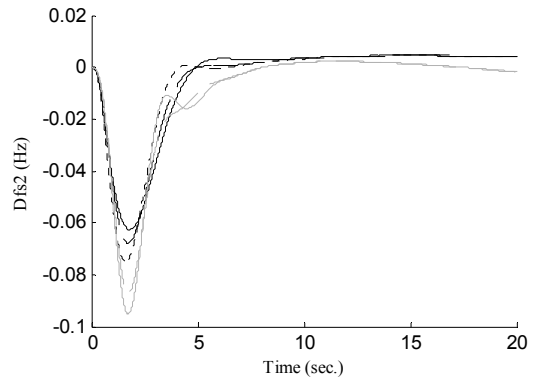
(ζ) D_2GPA_S_H_S_H_PIO_D(Ptie)

β) Αναλογικός – ολοκληρωτικός – διαφορικός έλεγχος.

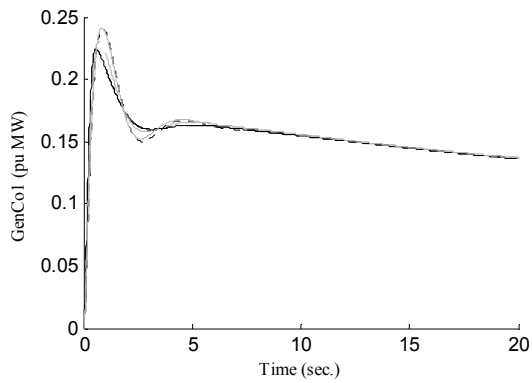
		ISE	ITAE	ITSE	ISTAE	ISTSE
<i>Ελεγκτές PID διακριτός χρόνος (α-ζ)</i>						
Περιοχή 1	<i>K_i</i>	-0.99853	-0.99964	-0.9981	-0.99962	-0.99697
	<i>K_p</i>	-0.99907	-0.92752	-0.99828	-0.99359	-0.98404
	<i>K_d</i>	-0.99927	-0.49624	-0.99956	-0.51778	-0.74451
Περιοχή 2	<i>K_i</i>	-0.88037	-0.98957	-0.98695	0.153296	0.169009
	<i>K_p</i>	-0.92348	-0.8525	-0.88558	-0.66145	-0.79166
	<i>K_d</i>	-0.95098	-0.84409	-0.3959	0.143528	0.145105
	<i>J</i>	0.066966	318.266	7.781844	198359.8	1738.22
	<i>J(IAE)</i>	0.79259	0.835396	0.781977	0.77389	0.753404



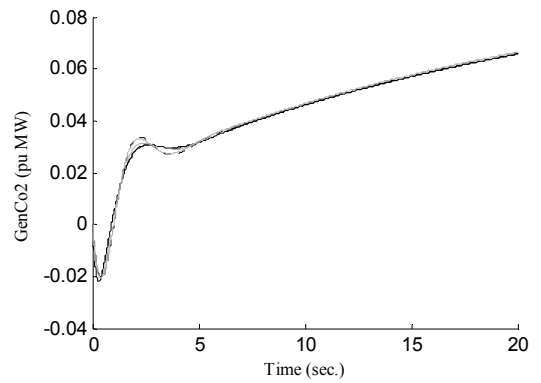
(α) D_2GPA_S_H_S_H_PID_D(ps1)



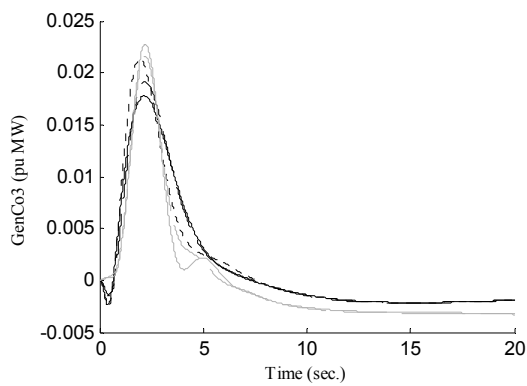
(β) D_2GPA_S_H_S_H_PID_D(ps2)



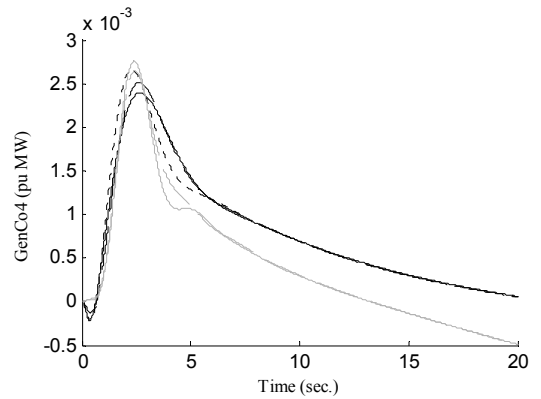
(γ) D_2GPA_S_H_S_H_PID_D(GenCo1)



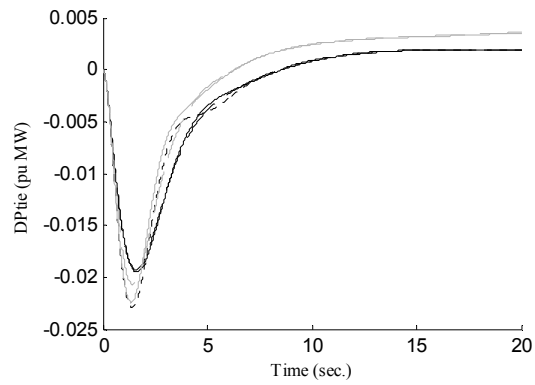
(δ) D_2GPA_S_H_S_H_PID_D(GenCo2)



(ε) D_2GPA_S_H_S_H_PID_D(GenCo3)



(σ) D_2GPA_S_H_S_H_PID_D(GenCo4)



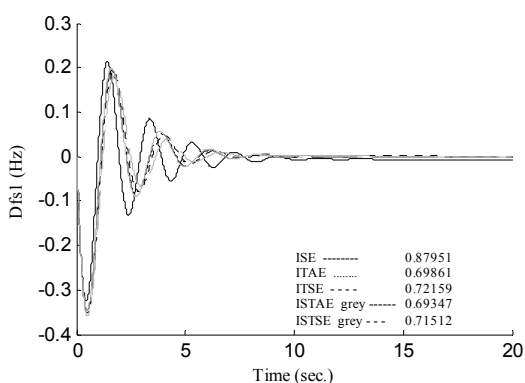
(ζ) D_2GPA_S_H_S_H_PID_D(Ptie)

9.5.4. Ατμοστροβιλικές, Αεριοστροβιλικές Και Ντιζελοηλεκτρικές Μονάδες

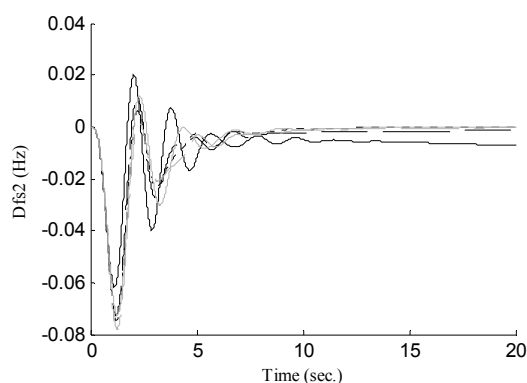
Εδώ εξετάζεται ένα σύστημα το οποίο έχει δυο εταιρίες παραγωγής σε κάθε περιοχή δηλαδή συνολικά τέσσερις και ίσες εταιρίες διανομής. Στην πρώτη περιοχή δραστηριοποιείται μια εταιρία παραγωγής η οποία έχει μια ατμοστροβιλική μονάδα και μια εταιρία η οποία έχει μια αεριοστροβιλική μονάδα. Ενώ, στην δεύτερη περιοχή δραστηριοποιείται μια εταιρία παραγωγής η οποία έχει μια ατμοστροβιλική μονάδα και μια εταιρία η οποία έχει μια ντιζελοηλεκτρική μονάδα. Λόγω του πλήθους των χρονοαποκρίσεων και διαχωρίστηκαν ο αναλογικός – ολοκληρωτικός έλεγχος με τον έλεγχο τριών όρων. Σημειώνεται ακόμα ότι κάθε περιοχή έχει έναν μόνο ελεγκτή για να ελέγχει όλες τις μονάδες της ασχέτως σε ποια εταιρία παραγωγής ανήκουν.

α) Αναλογικός – ολοκληρωτικός έλεγχος.

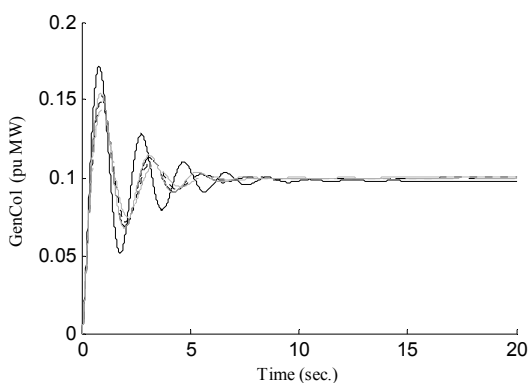
		ISE	ITAE	ITSE	ISTAE	ISTSE
<i>Ελεγκτές PI διακριτός χρόνος (α-ζ)</i>						
Περιοχή 1	<i>K_i</i>	0.082361	-0.00219	0.013917	-0.00231	0.001955
	<i>K_p</i>	-0.62836	-0.01628	-0.11644	-0.13868	0.093713
Περιοχή 2	<i>K_i</i>	-0.57065	-0.39629	-0.91532	0.066173	-0.42931
	<i>K_p</i>	-3.99127	-3.98494	-3.95666	-3.03414	-3.93374
<i>J</i>		0.092487	147.6423	9.897643	61564.27	1652.778
<i>J(IAE)</i>		0.879508	0.69861	0.721589	0.693471	0.715116



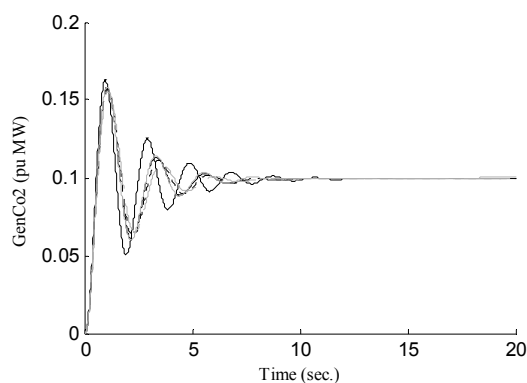
(α) D_2GPA_S_G_S_D_PIO_D(ps1)



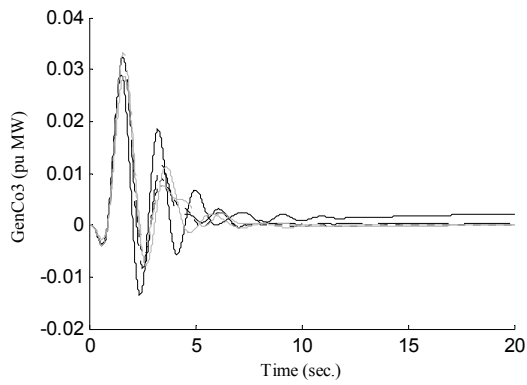
(β) D_2GPA_S_G_S_D_PIO_D(ps2)



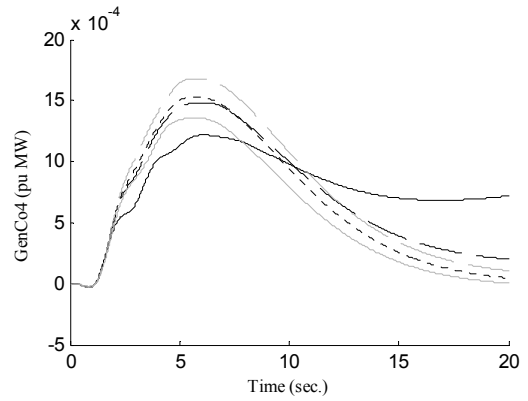
(γ) D_2GPA_S_G_S_D_PIO_D(GenCo1)



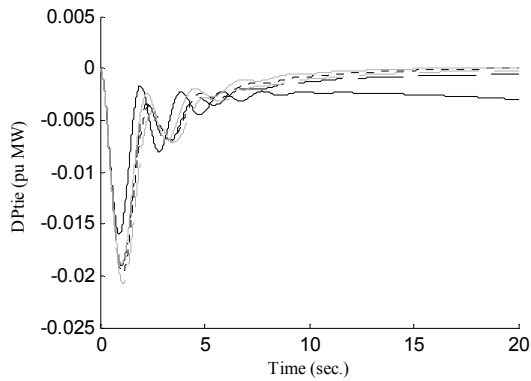
(δ) D_2GPA_S_G_S_D_PIO_D(GenCo2)



(ε) D_2GPA_S_G_S_D_PID_D(GenCo3)



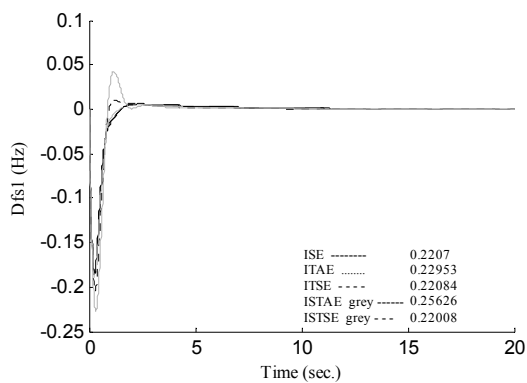
(σ) D_2GPA_S_G_S_D_PID_D(GenCo4)



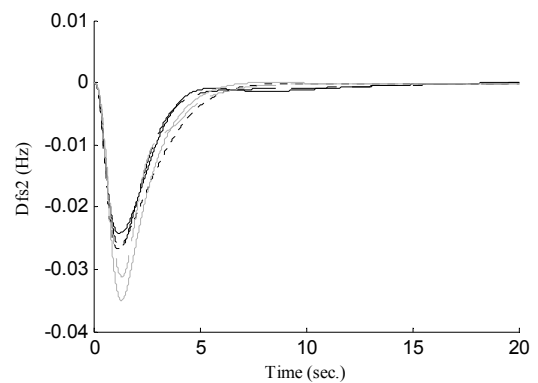
(ζ) D_2GPA_S_G_S_D_PID_D(Ptie)

β) Αναλογικός – ολοκληρωτικός – διαφορικός έλεγχος.

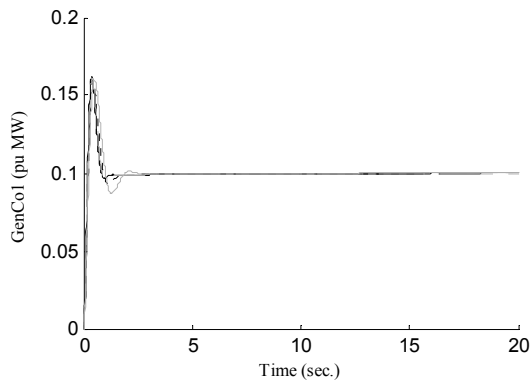
		ISE	ITAE	ITSE	ISTAE	ISTSE
<i>Ελεγκτές PID διακριτός χρόνος (α-ζ)</i>						
Περιοχή 1	<i>K_i</i>	-0.00114	-0.00153	-0.0003	-0.00416	0.005465
	<i>K_p</i>	-0.99857	-0.99068	-0.9986	-0.99475	-0.99646
	<i>K_d</i>	-0.99905	-0.74316	-0.99103	-0.52854	-0.9184
Περιοχή 2	<i>K_i</i>	-0.95579	0.026163	-0.75317	0.023666	-0.09976
	<i>K_p</i>	-0.85909	-0.58496	-0.93966	-0.19569	-0.92662
	<i>K_d</i>	-0.81111	-0.77024	-0.43625	-0.14903	0.001095
	<i>J</i>	0.013336	42.70515	0.646331	21052.09	84.09038
	<i>J</i> (IAE)	0.220699	0.229535	0.220841	0.256264	0.220078



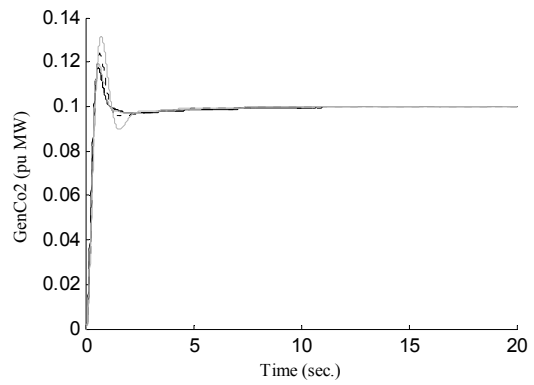
(α) D_2GPA_S_G_S_D_PID_D(ps1)



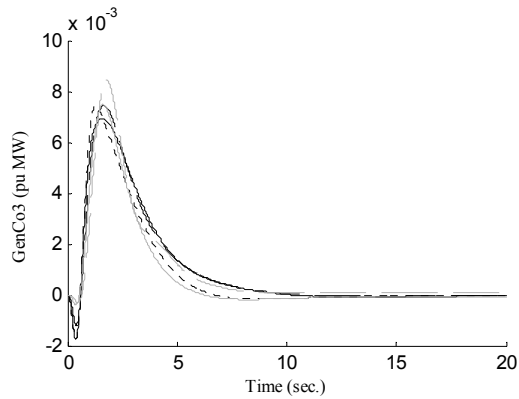
(β) D_2GPA_S_G_S_D_PID_D(ps2)



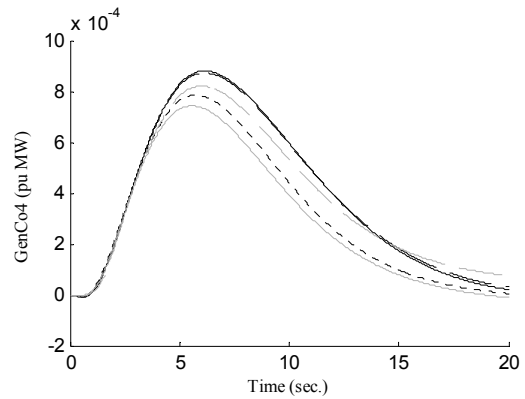
(γ) D_2GPA_S_G_S_D_PID_D(GenCo1)



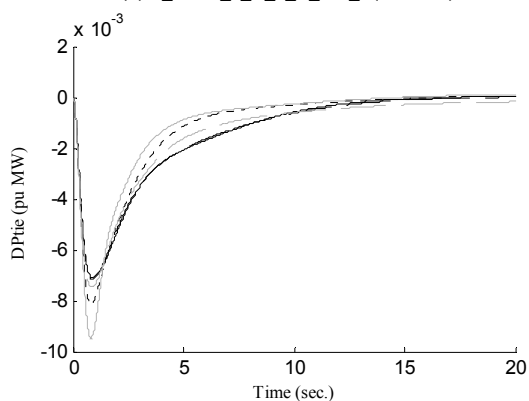
(δ) D_2GPA_S_G_S_D_PID_D(GenCo2)



(ε) D_2GPA_S_G_S_D_PID_D(GenCo3)



(σ) D_2GPA_S_G_S_D_PID_D(GenCo4)



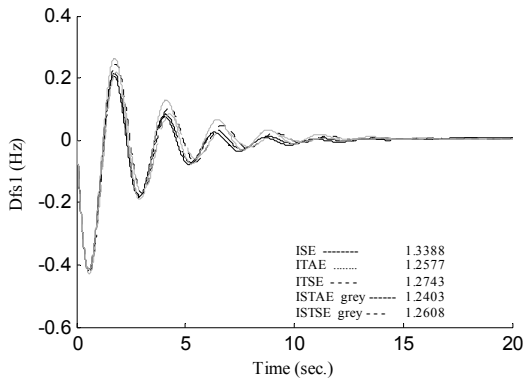
(ζ) D_2GPA_S_G_S_D_PID_D(Ptie)

9.5.5. Ατμοστροβλικές, Υδροστροβλικές Και Αεριοστροβλικές Μονάδες

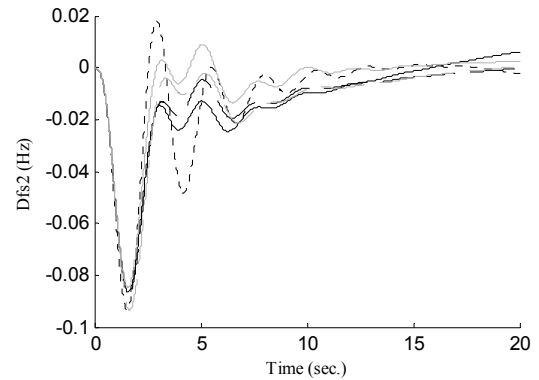
Εδώ εξετάζεται ένα σύστημα το οποίο έχει δυο εταιρίες παραγωγής σε κάθε περιοχή δηλαδή συνολικά τέσσερις και ίσες εταιρίες διανομής. Κάθε εταιρία παραγωγής έχει ένα συνδυασμό από μια ατμοστροβλική μονάδα, μια υδροστροβλική και μια αεριοστροβλική μονάδα. Λόγω του πλήθους των χρονοαποκρίσεων και διαχωρίστηκαν ο αναλογικός – ολοκληρωτικός έλεγχος με τον έλεγχο τριών όρων. Σημειώνεται ακόμα ότι κάθε περιοχή έχει έναν μόνο ελεγκτή για να ελέγχει όλες τις μονάδες της ασχέτως σε ποια εταιρία παραγωγής ανήκουν.

α) Αναλογικός – ολοκληρωτικός έλεγχος.

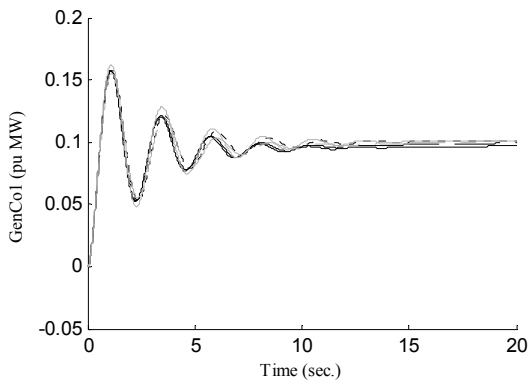
		ISE	ITAE	ITSE	ISTAE	ISTSE
<i>Ελεγκτές PI διακριτός χρόνος (α-ζ)</i>						
Περιοχή 1	K_i	-0.1081	-0.34656	-0.16513	-0.42767	-0.21261
	K_p	-0.99893	-0.77738	-0.94742	-0.95115	-0.76651
Περιοχή 2	K_i	0.024421	0.448058	-0.03646	-0.08788	-0.09627
	K_p	0.913414	0.127614	0.998499	0.999687	0.990841
J		0.171324	438.5284	25.01581	341025.7	7576.619
$J(IAE)$		1.338793	1.257665	1.274345	1.24026	1.260848



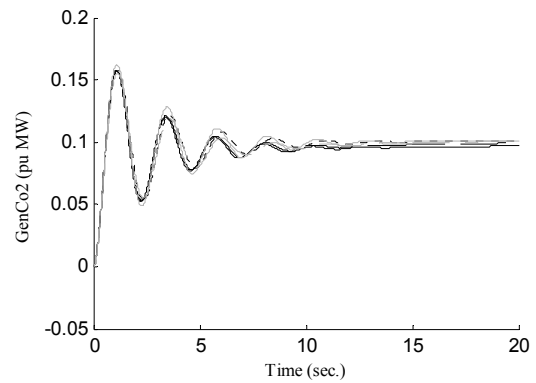
(α) D_2GPA_SHG_SHG_SHG_SHG_PI0_D(ps1)



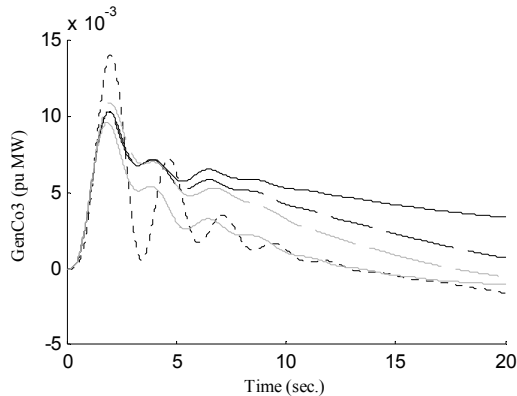
(β) D_2GPA_SHG_SHG_SHG_SHG_PI0_D(ps2)



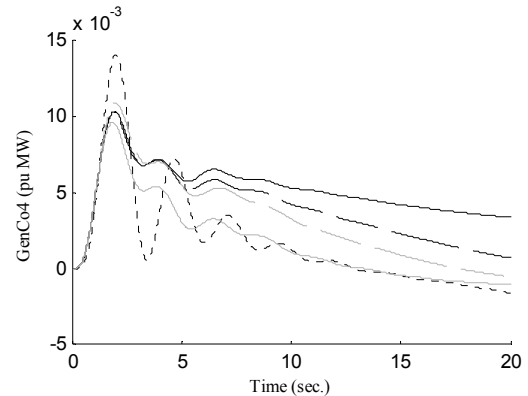
(γ) D_2GPA_SHG_SHG_SHG_SHG_PI0_D(GenCo1)



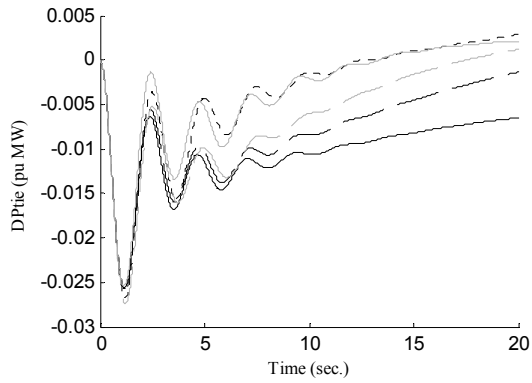
(δ) D_2GPA_SHG_SHG_SHG_SHG_PI0_D(GenCo2)



(ε) D_2GPA_SHG_SHG_SHG_SHG_PI0_D(GenCo3)



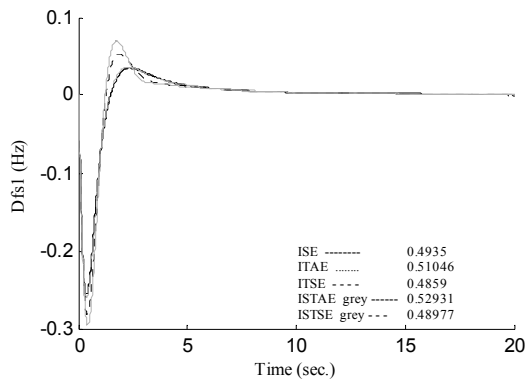
(σ) D_2GPA_SHG_SHG_SHG_SHG_PI0_D(GenCo4)



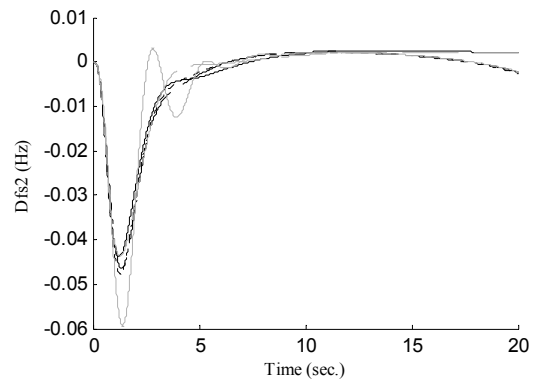
(ζ) D_2GPA_SHG_SHG_SHG_SHG_PIO_D(Ptie)

β) Αναλογικός – ολοκληρωτικός – διαφορικός έλεγχος.

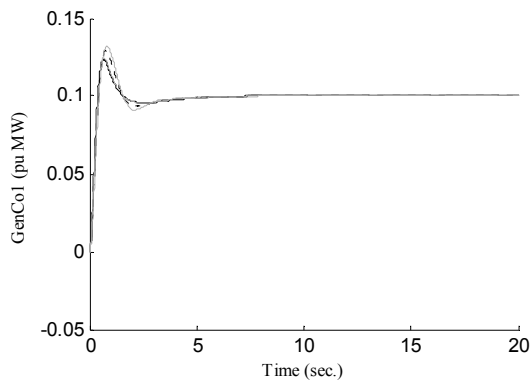
		ISE	ITAE	ITSE	ISTAE	ISTSE
<i>Ελεγκτές PID διακριτός χρόνος (α-ζ)</i>						
Περιοχή 1	<i>Ki</i>	-0.99694	-0.99981	-0.99117	-0.99943	-0.99878
	<i>Kp</i>	-0.99889	-0.99192	-0.99575	-0.98783	-0.99674
	<i>Kd</i>	-0.99999	-0.75128	-0.99512	-0.64567	-0.96823
Περιοχή 2	<i>Ki</i>	-0.86307	0.510356	0.614515	0.656788	-0.33377
	<i>Kp</i>	-0.72782	0.161959	-0.30776	-0.56853	-0.01077
	<i>Kd</i>	-0.91085	-0.81615	-0.42155	-0.02971	-0.93695
	<i>J</i>	0.04066	153.8864	3.105489	130596.5	741.6788
	<i>J(IAE)</i>	0.493496	0.510464	0.485901	0.529312	0.48977



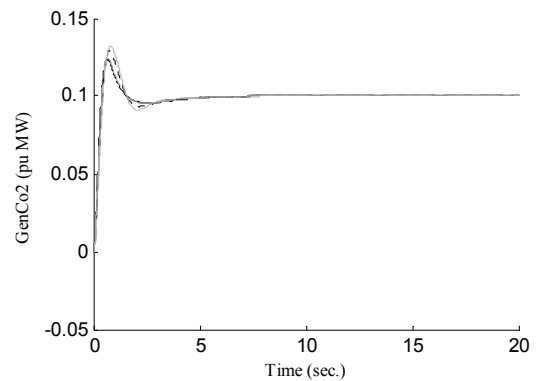
(α) D_2GPA_SHG_SHG_SHG_SHG_PID_D(ps1)



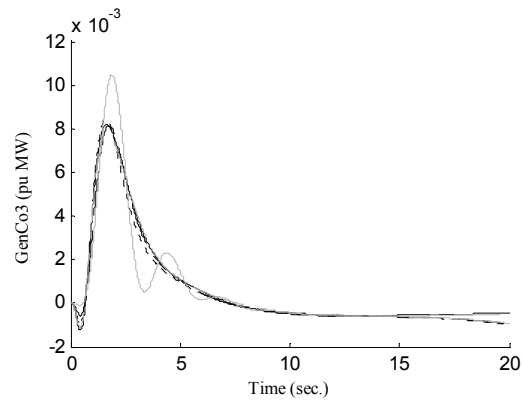
(β) D_2GPA_SHG_SHG_SHG_SHG_PID_D(ps2)



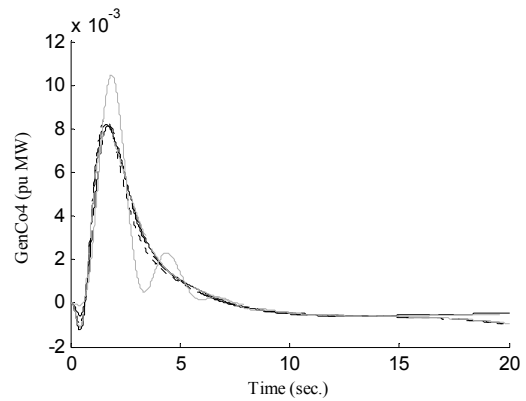
(γ) D_2GPA_SHG_SHG_SHG_SHG_PID_D(GenCo1)



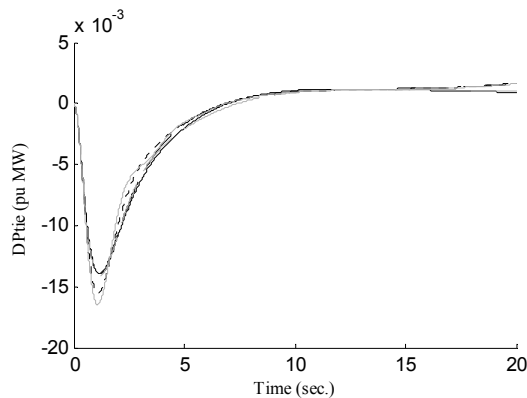
(δ) D_2GPA_SHG_SHG_SHG_SHG_PID_D(GenCo2)



(ε) D_2GPA_SHG_SHG_SHG_SHG_PID_D(GenCo3)



(στ) D_2GPA_SHG_SHG_SHG_SHG_PID_D(GenCo4)



(ζ) D_2GPA_SHG_SHG_SHG_SHG_PID_D(Ptie)

9.5.6. Σύστημα Με Μεικτές Μονάδες

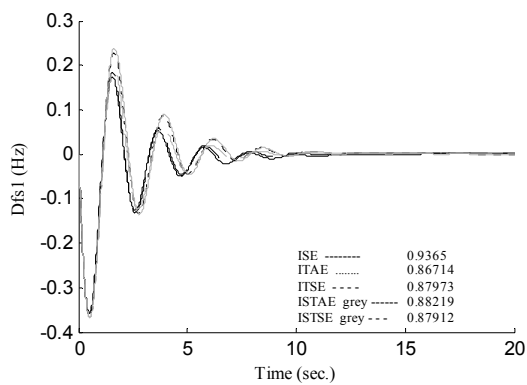
Εδώ εξετάζεται ένα σύστημα το οποίο έχει δυο εταιρίες παραγωγής σε κάθε περιοχή δηλαδή συνολικά τέσσερις και ίσες εταιρίες διανομής. Στην πρώτη περιοχή η πρώτη εταιρία παραγωγής έχει μια ατμοστροβιλική και μια υδροστροβιλική μονάδα ενώ η δεύτερη εταιρία παραγωγής έχει μια ατμοστροβιλική και μια αεριοστροβιλική μονάδα. Στην δεύτερη περιοχή η πρώτη εταιρία παραγωγής έχει δυο ατμοστροβιλικές μονάδες ενώ η δεύτερη εταιρία παραγωγής έχει μια ατμοστροβιλική και μια ντιζελοηλεκτρική μονάδα. Λόγω του πλήθους των χρονοαποκρίσεων και διαχωρίστηκαν ο αναλογικός – ολοκληρωτικός έλεγχος με τον έλεγχο τριών όρων. Σημειώνεται ακόμα ότι κάθε περιοχή έχει έναν μόνο ελεγκτή για να ελέγχει όλες τις μονάδες της ασχέτως σε ποια εταιρία παραγωγής ανήκουν και ότι εδώ θα εξεταστούν και τα τρία σενάρια λειτουργίας και για τα τρία είδη ελέγχου, δηλαδή, εννέα διαφορετικές εκδοχές.

α) Αναλογικός – ολοκληρωτικός έλεγχος.

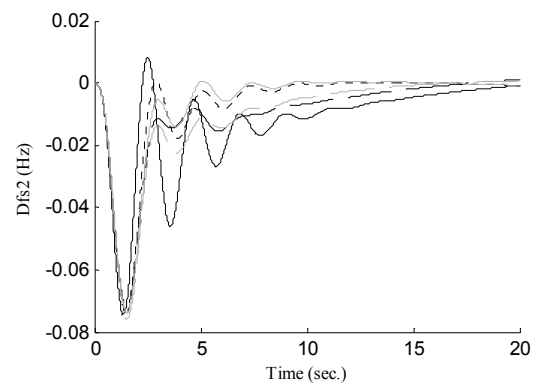
		ISE	ITAE	ITSE	ISTAE	ISTSE
<i>Ελεγκτές PI διακριτός χρόνος</i>						
<i>Σενάριο 1 (1α-1ζ)</i>						
Περιοχή 1	<i>K_i</i>	-0.14892	-0.52667	-0.20725	-0.57952	-0.30201
	<i>K_p</i>	-0.99996	-0.79737	-0.99937	-0.76095	-0.80953
Περιοχή 2	<i>K_i</i>	-0.22751	0.068753	-0.21607	0.046596	0.04313
	<i>K_p</i>	-0.99582	0.158542	0.265731	0.394345	0.25485
	<i>J</i>	0.106006	235.0533	12.23535	143213.4	2892.336
	<i>J(IAE)</i>	0.936501	0.867144	0.879733	0.882195	0.879118

Σενάριο 2 (2α-2ζ)						
Περιοχή 1	K_i	-0.67887	-0.77907	-0.62477	-0.83796	-0.72571
	K_p	-0.99725	-0.99909	-0.97048	-0.99926	-0.99355
Περιοχή 2	K_i	-0.40385	-0.17266	-0.33954	-0.16058	-0.19377
	K_p	-0.99976	-0.99949	-0.99996	-0.9846	-0.98441
	J	0.208042	262.888	16.77267	179290.1	2880.51
	$J(IAE)$	1.087154	1.095556	1.07253	1.111612	1.083705
Σενάριο 3 (3α-3ζ)						
Περιοχή 1	K_i	-0.5441	-0.78602	-0.51115	-0.81219	-0.69471
	K_p	-0.99995	-0.99707	-0.99939	-0.96344	-0.99895
Περιοχή 2	K_i	-0.42027	-0.00273	-0.4616	-0.00296	-0.01456
	K_p	-0.99552	-0.92468	-0.99868	-0.94149	-0.94159
	J	0.32942	346.6275	29.65653	217143.8	5888.913
	$J(IAE)$	1.514576	1.43887	1.525392	1.446137	1.431763

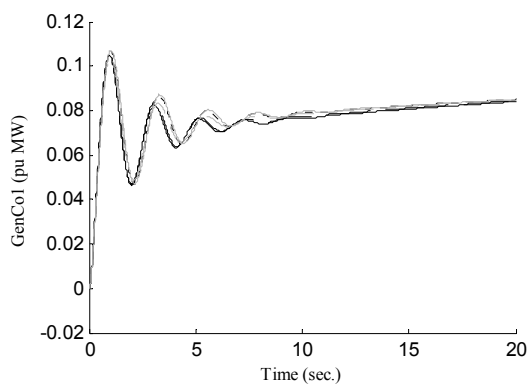
PI Σενάριο 1



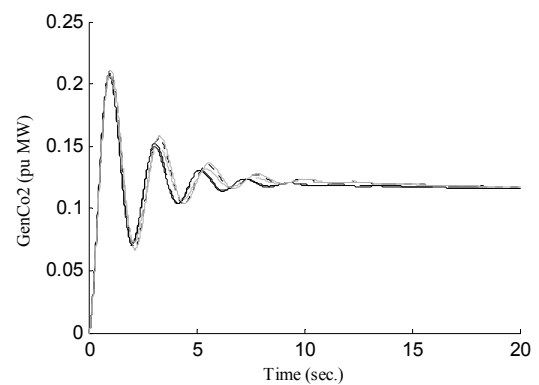
(1.α) D_2GPA_SH_SG_SD_SS_PIO_D(ps1)



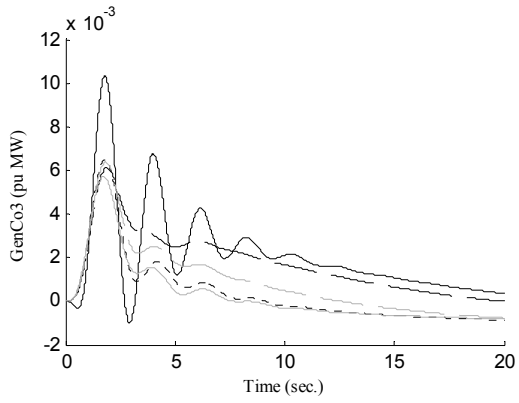
(1.β) D_2GPA_SH_SG_SD_SS_PIO_D(ps2)



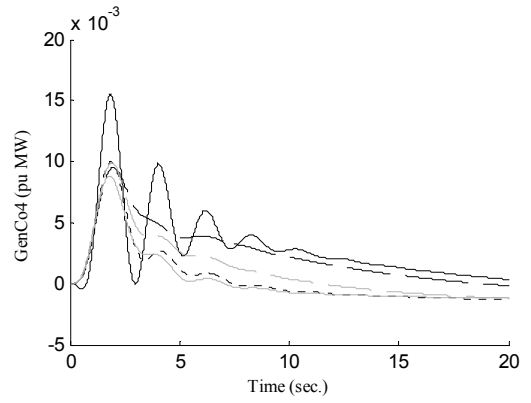
(1.γ) D_2GPA_SH_SG_SD_SS_PIO_D(GenCo1)



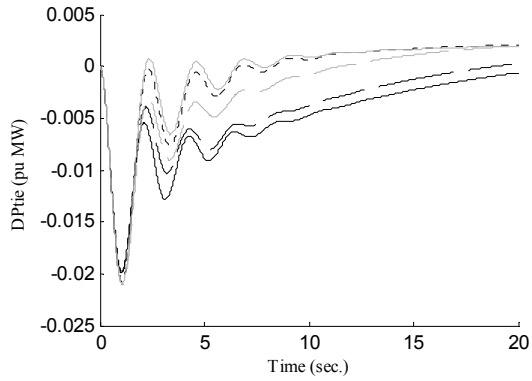
(1.δ) D_2GPA_SH_SG_SD_SS_PIO_D(GenCo2)



(1.ε) D_2GPA_SH_SG_SD_SS_PIO_D(GenCo3)

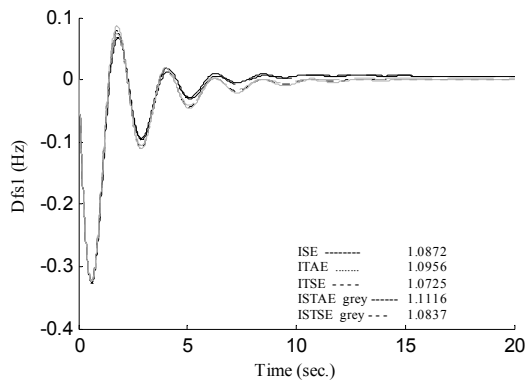


(1.σ) D_2GPA_SH_SG_SD_SS_PIO_D(GenCo4)

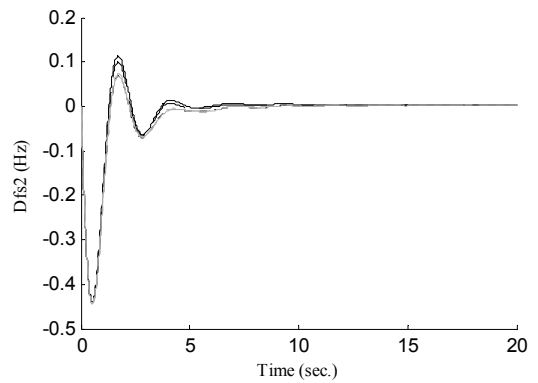


(1.ζ) D_2GPA_SH_SG_SD_SS_PIO_D(Ptie)

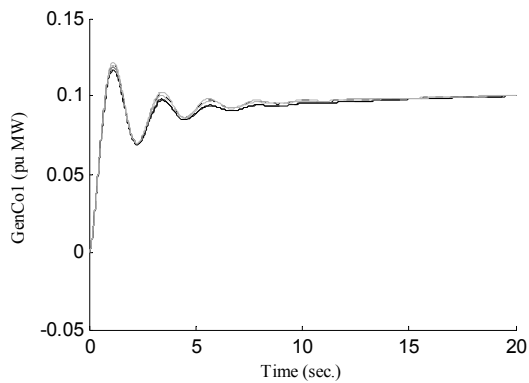
PI Σενάριο 2



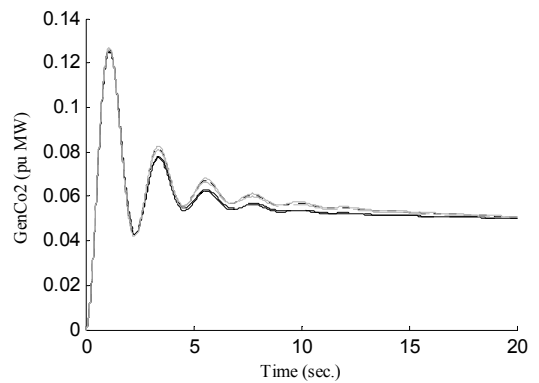
(2.α) D_2GPA_SH_SG_SD_SS_PIO_D(ps1)



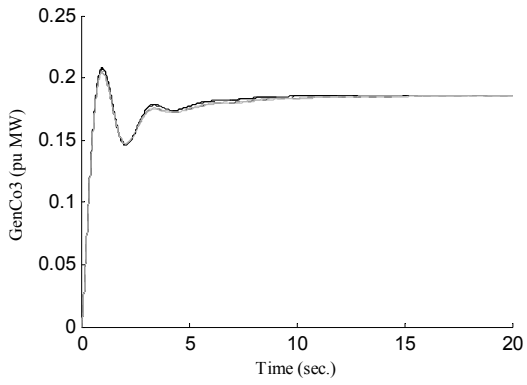
(2.β) D_2GPA_SH_SG_SD_SS_PIO_D(ps2)



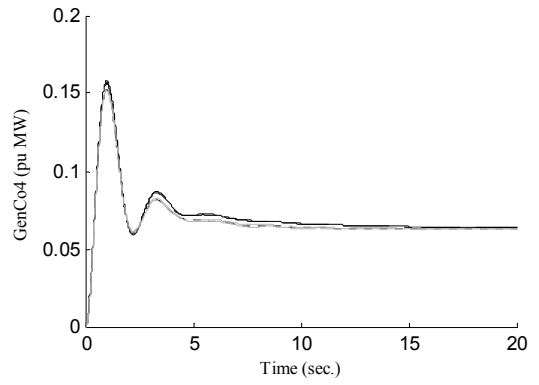
(2.γ) D_2GPA_SH_SG_SD_SS_PIO_D(GenCo1)



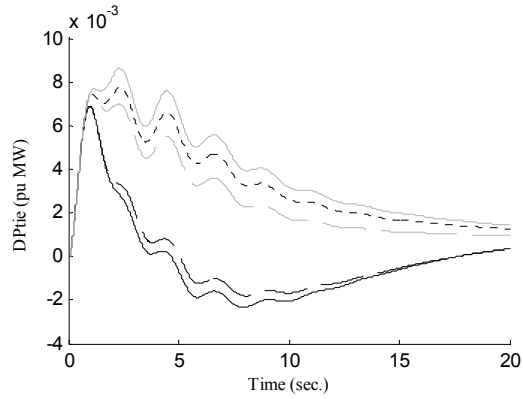
(2.δ) D_2GPA_SH_SG_SD_SS_PIO_D(GenCo2)



(2.ε) D_2GPA_SH_SG_SD_SS_PIO_D(GenCo3)

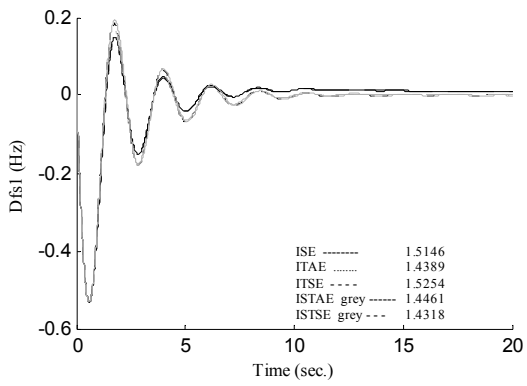


(2.σ) D_2GPA_SH_SG_SD_SS_PIO_D(GenCo4)

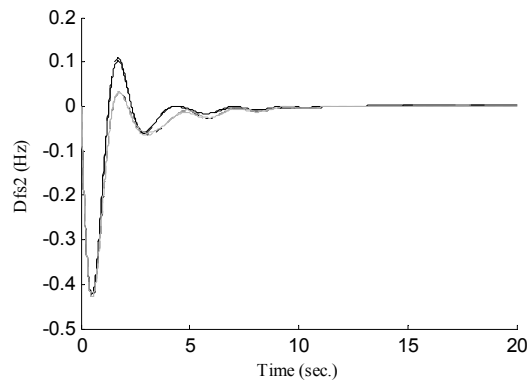


(2.ζ) D_2GPA_SH_SG_SD_SS_PIO_D(Ptie)

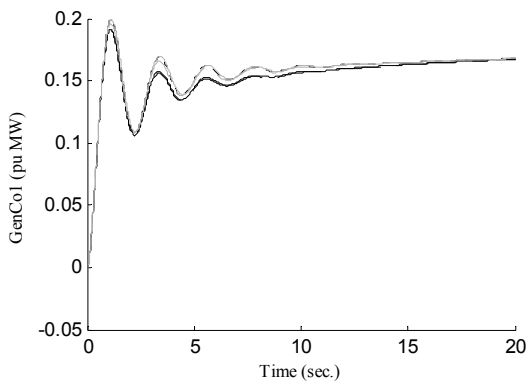
PI Σενάριο 3



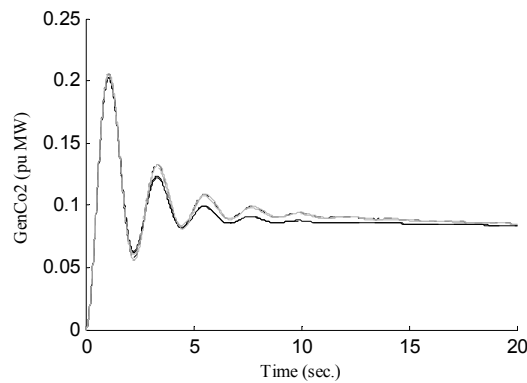
(3.α) D_2GPA_SH_SG_SD_SS_PIO_D(ps1)



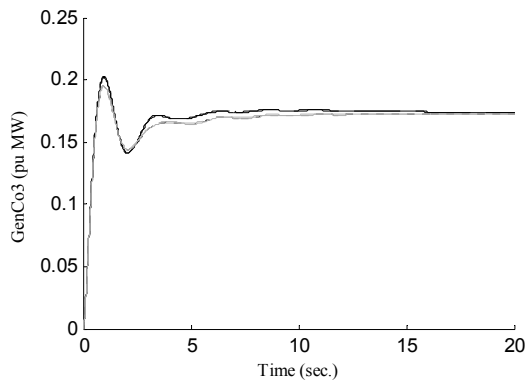
(3.β) D_2GPA_SH_SG_SD_SS_PIO_D(ps2)



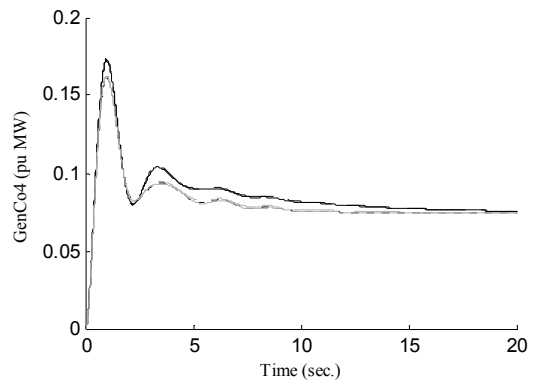
(3.γ) D_2GPA_SH_SG_SD_SS_PIO_D(GenCo1)



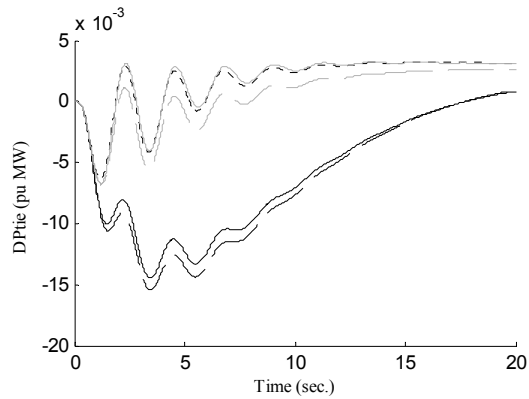
(3.δ) D_2GPA_SH_SG_SD_SS_PIO_D(GenCo2)



(3.ε) D_2GPA_SH_SG_SD_SS_PIO_D(GenCo3)



(3.στ) D_2GPA_SH_SG_SD_SS_PIO_D(GenCo4)



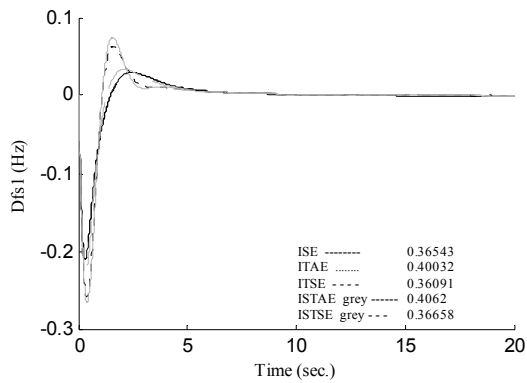
(3.ζ) D_2GPA_SH_SG_SD_SS_PIO_D(Ptie)

β) Αναλογικός – ολοκληρωτικός – διαφορικός έλεγχος.

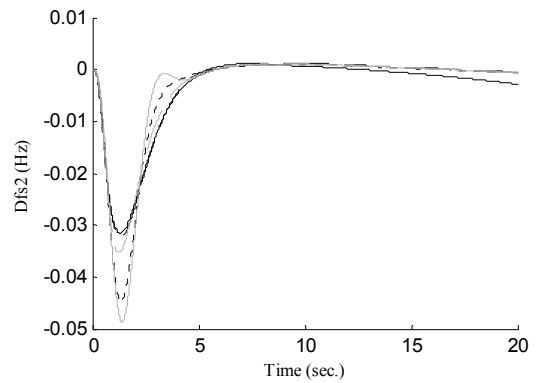
		ISE	ITAE	ITSE	ISTAE	ISTSE
<i>Ελεγκτές PID διακριτός χρόνος</i>						
<i>Σενάριο 1 (1α-1ζ)</i>						
Περιοχή 1	<i>Ki</i>	-0.99381	-0.98414	-0.9875	-0.99947	-0.99098
	<i>Kp</i>	-0.9983	-0.99268	-0.98775	-0.99902	-0.99988
	<i>Kd</i>	-0.998	-0.52899	-0.99966	-0.48091	-0.82124
Περιοχή 2	<i>Ki</i>	0.244876	0.094685	0.16876	0.095655	0.193543
	<i>Kp</i>	-0.83586	-0.06006	-0.68381	-0.10929	-0.85798
	<i>Kd</i>	-0.98161	-0.27465	-0.88683	-0.08806	-0.70373
	<i>J</i>	0.024767	92.51498	1.767563	65359.62	317.4122
	<i>J(IAE)</i>	0.365428	0.400315	0.360915	0.406195	0.366577
<i>Σενάριο 2 (2α-2ζ)</i>						
Περιοχή 1	<i>Ki</i>	-0.96532	-0.99641	-0.99637	-0.97989	-0.99853
	<i>Kp</i>	-0.96768	-0.98266	-0.99384	-0.93598	-0.99393
	<i>Kd</i>	-0.93766	-0.43537	-0.93667	-0.45955	-0.56167
Περιοχή 2	<i>Ki</i>	-0.97938	-0.97658	-0.97751	-0.16568	-0.96342
	<i>Kp</i>	-0.99683	-0.98999	-0.99989	-0.96932	-0.98381
	<i>Kd</i>	-0.99774	-0.30938	-0.98996	-0.01807	-0.4247
	<i>J</i>	0.076184	204.4128	6.181239	168019.9	1276.64
	<i>J(IAE)</i>	0.738644	0.767538	0.733398	0.962204	0.74507

Σενάριο 3 (3α-3ζ)						
Περιοχή 1	K_i	-0.98692	-0.99959	-0.98883	-0.96387	-0.99775
	K_p	-0.99989	-0.822	-0.99042	-0.99585	-0.98389
	K_d	-0.99818	-0.55742	-0.89892	-0.45581	-0.7146
Περιοχή 2	K_i	-0.94893	-0.01712	-0.96462	-0.00737	-0.01388
	K_p	-0.97636	-0.72205	-0.99449	-0.99767	-0.95409
	K_d	-0.99645	-0.09056	-0.91442	-0.0624	-0.46452
	J	0.116463	208.6669	9.853953	134236.7	1529.934
	$J(IAE)$	0.939129	0.994737	0.932236	0.956287	0.929839

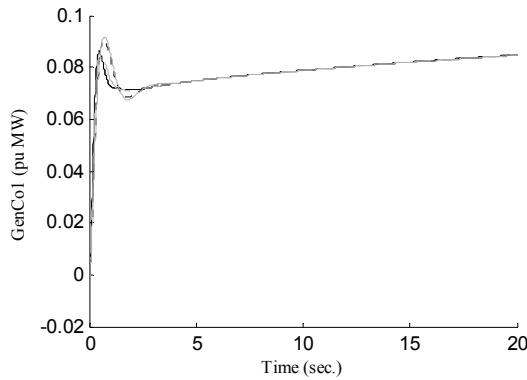
PID Σενάριο 1



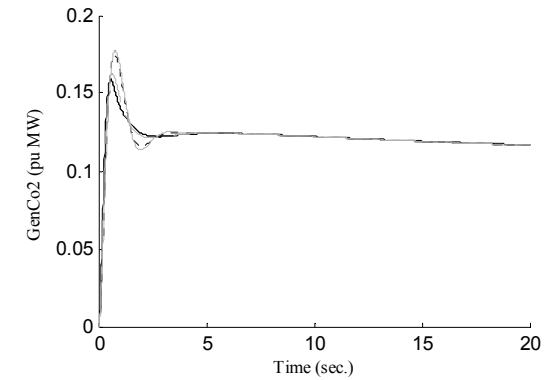
(1.α) D_2GPA_SH_SG_SD_SS_PID_D(ps1)



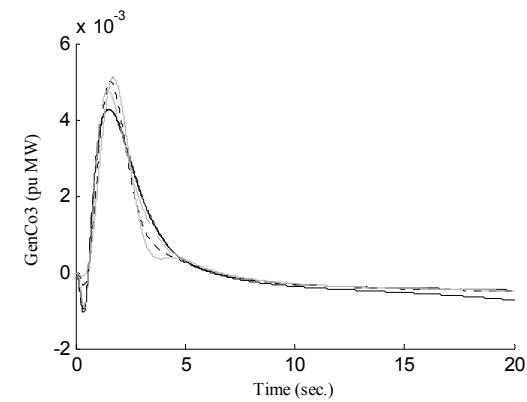
(1.β) D_2GPA_SH_SG_SD_SS_PID_D(ps2)



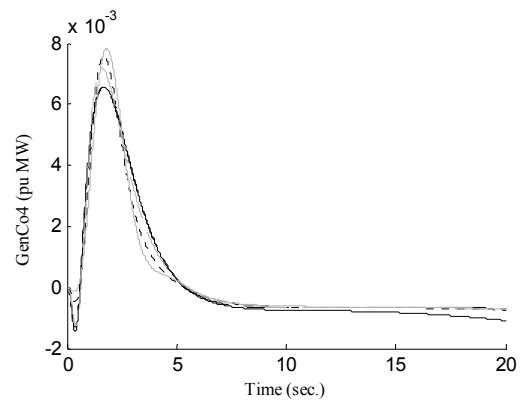
(1.γ) D_2GPA_SH_SG_SD_SS_PID_D(GenCo1)



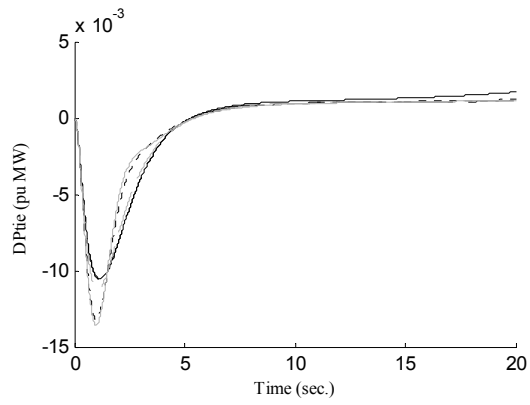
(1.δ) D_2GPA_SH_SG_SD_SS_PID_D(GenCo2)



(1.ε) D_2GPA_SH_SG_SD_SS_PID_D(GenCo3)

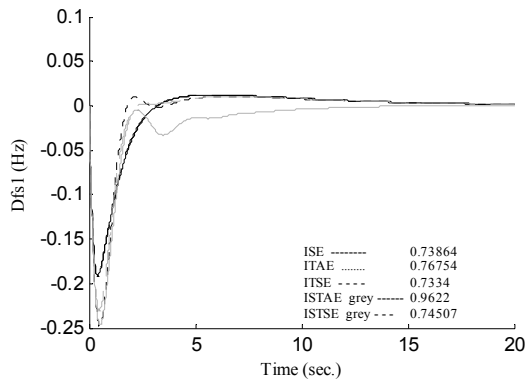


(1.σ) D_2GPA_SH_SG_SD_SS_PID_D(GenCo4)

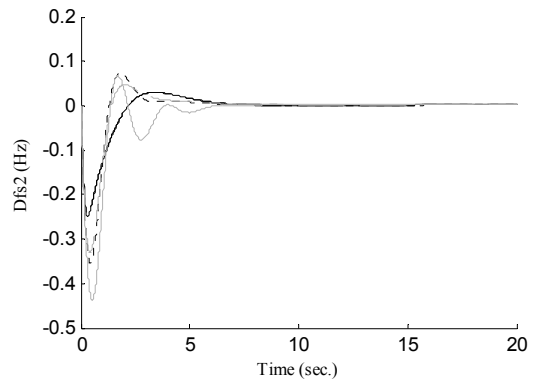


(1.ζ) D_2GPA_SH_SG_SD_SS_PID_D(Ptie)

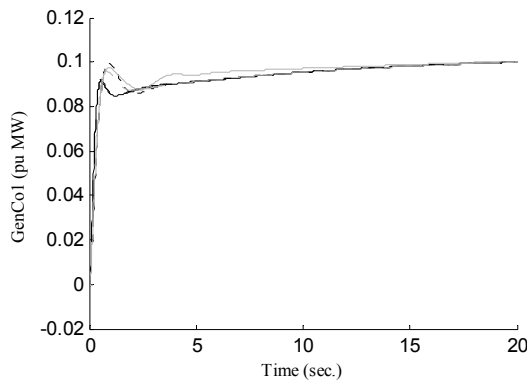
PID Σενάριο 2



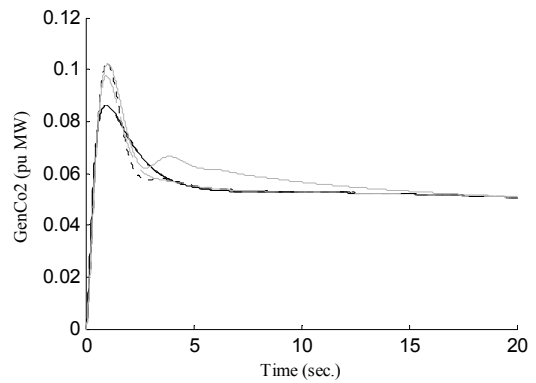
(2.α) D_2GPA_SH_SG_SD_SS_PID_D(ps1)



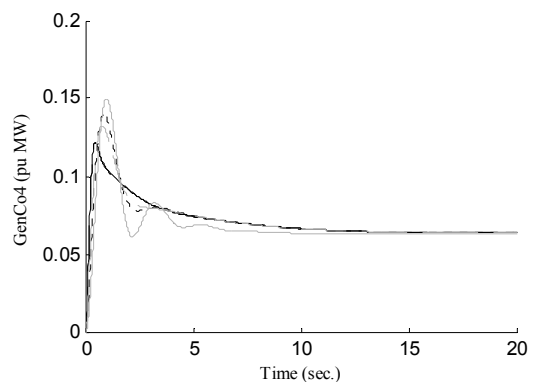
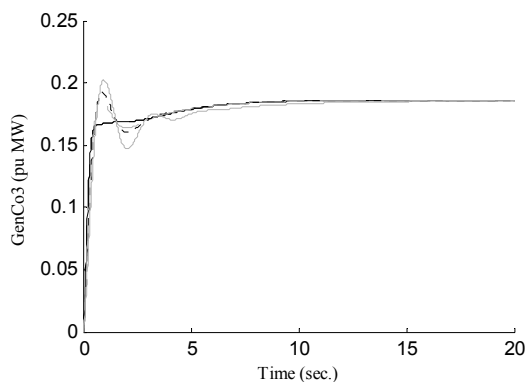
(2.β) D_2GPA_SH_SG_SD_SS_PID_D(ps2)

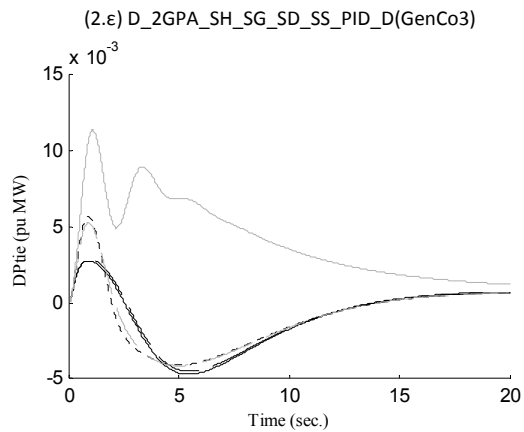


(2.γ) D_2GPA_SH_SG_SD_SS_PID_D(GenCo1)



(2.δ) D_2GPA_SH_SG_SD_SS_PID_D(GenCo2)

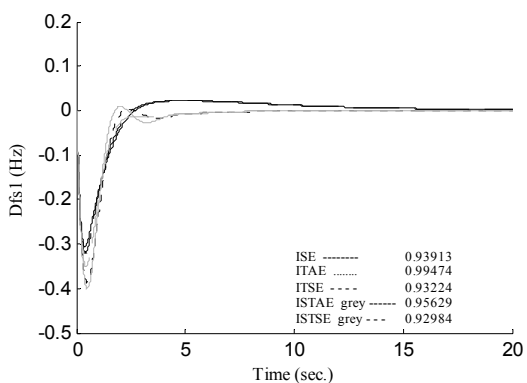




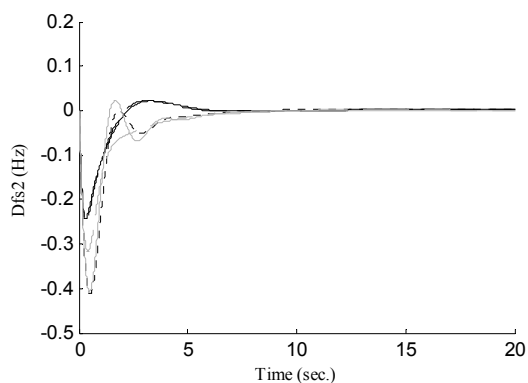
(2.σ) D_2GPA_SH_SG_SD_SS_PID_D(GenCo4)

(2.ζ) D_2GPA_SH_SG_SD_SS_PID_D(Ptie)

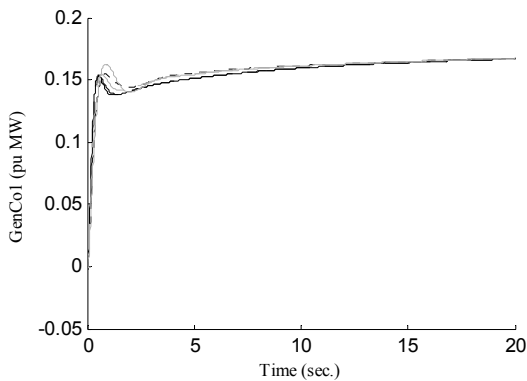
PID Σενάριο 3



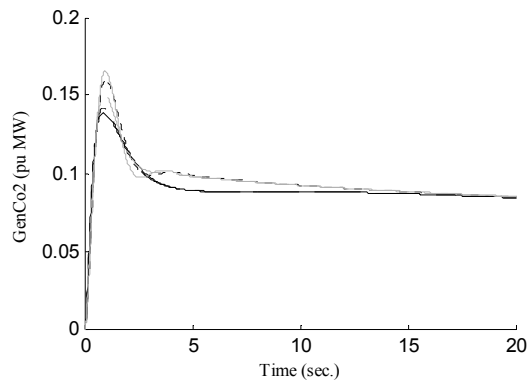
(3.α) D_2GPA_SH_SG_SD_SS_PID_D(ps1)



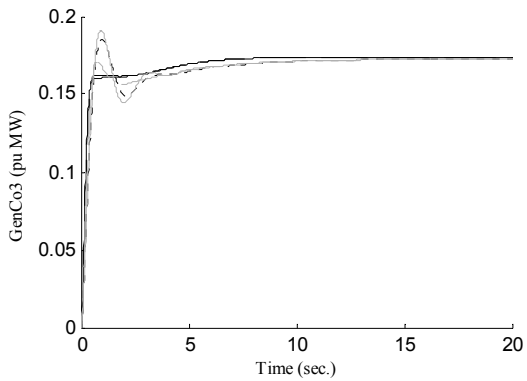
(3.β) D_2GPA_SH_SG_SD_SS_PID_D(ps2)



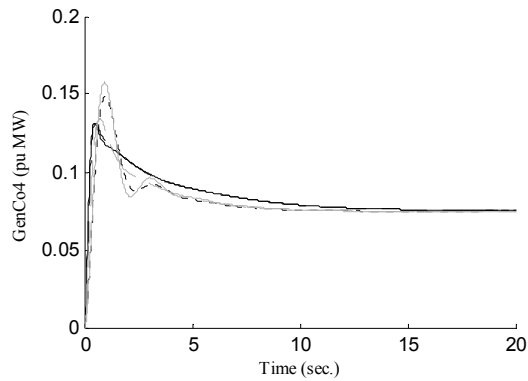
(3.γ) D_2GPA_SH_SG_SD_SS_PID_D(GenCo1)



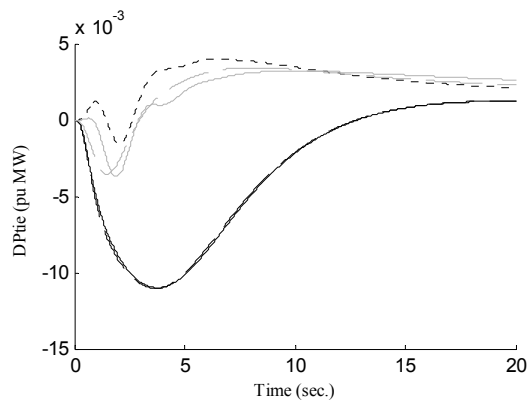
(3.δ) D_2GPA_SH_SG_SD_SS_PID_D(GenCo2)



(3.ε) D_2GPA_SH_SG_SD_SS_PID_D(GenCo3)



(3.σ) D_2GPA_SH_SG_SD_SS_PID_D(GenCo4)



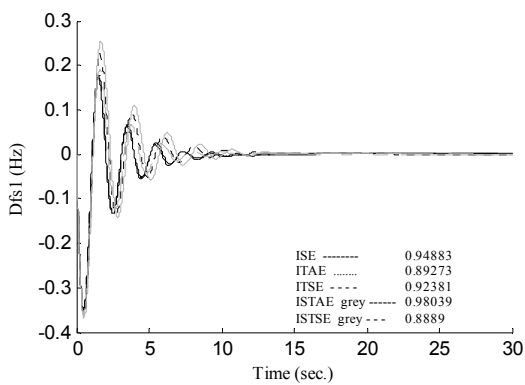
(3.ζ) D_2GPA_SH_SG_SD_SS_PID_D(Ptie)

γ) Ασαφής έλεγχος.

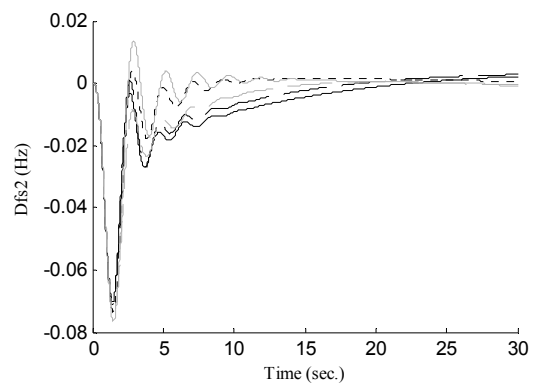
		ISE	ITAE	ITSE	ISTAЕ	ISTSE
<i>Ελεγκτές ασαφούς λογικής διακριτός χρόνος</i>						
<i>Σενάριο 1 (1α-1ζ)</i>						
Περιοχή 1	<i>e</i>	-0.99569	-0.85195	0.983824	-0.93544	0.78155
	<i>de</i>	-0.86677	-0.86451	0.958517	-0.89726	0.994655
	<i>Fi</i>	-0.11847	-0.55915	0.163592	-0.65051	0.330573
	<i>Fp</i>	-0.99204	-0.82196	0.977674	-0.61836	0.921288
Περιοχή 2	<i>e</i>	0.596042	-0.19979	-0.53135	0.22701	-0.09405
	<i>de</i>	0.707922	0.634526	0.41001	-0.31468	0.231527
	<i>Fi</i>	0.302332	0.134441	-0.39995	-0.14996	0.404639
	<i>Fp</i>	0.160443	0.915276	0.205445	-0.10797	0.156728
	<i>J</i>	0.100618	292.1363	12.10167	265778.9	3084.501
	<i>J(IAE)</i>	0.948827	0.892732	0.923812	0.980393	0.888901
<i>Σενάριο 2 (2α-2ζ)</i>						
Περιοχή 1	<i>e</i>	-0.9673	-0.77496	-0.97349	0.968631	0.941032
	<i>de</i>	0.005083	-0.83382	-0.48673	0.93632	0.422762
	<i>Fi</i>	-0.58201	-0.90499	-0.55752	0.998944	0.693505
	<i>Fp</i>	-0.94924	-0.84506	-0.99919	0.703679	0.939828
Περιοχή 2	<i>e</i>	0.99108	0.663631	-0.97857	-0.94237	-0.91739
	<i>de</i>	0.968287	0.694311	-0.6908	0.909519	-0.65394
	<i>Fi</i>	0.332317	0.169615	-0.31445	-0.84895	-0.15525
	<i>Fp</i>	0.955997	0.999691	-0.99638	-0.74284	-0.99293
	<i>J</i>	0.199574	339.6941	15.66921	337403.4	3029.405
	<i>J(IAE)</i>	1.087686	1.194439	1.070351	1.339576	1.103447

Σενάριο 3 (3α-3ζ)						
Περιοχή 1	<i>e</i>	0.977951	-0.98659	-0.98314	-0.9848	0.964351
	<i>de</i>	0.790025	-0.91843	-0.886	-0.97084	0.971252
	<i>Fi</i>	0.566828	-0.69718	-0.58116	-0.68063	0.627486
	<i>Fp</i>	0.936655	-0.98086	-0.93837	-0.94988	0.885487
Περιοχή 2	<i>e</i>	-0.89566	-0.83977	-0.99286	-0.0747	0.983561
	<i>de</i>	0.329821	0.270847	-0.79786	0.144528	-0.39465
	<i>Fi</i>	-0.24036	-0.01089	-0.48433	-0.10684	0.009412
	<i>Fp</i>	-0.99275	-0.86605	-0.91085	-0.65051	0.757215
	<i>J</i>	0.32854	406.5886	29.588	416275.3	5996.279
	<i>J</i> (IAE)	1.573939	1.450732	1.54434	1.746449	1.465891

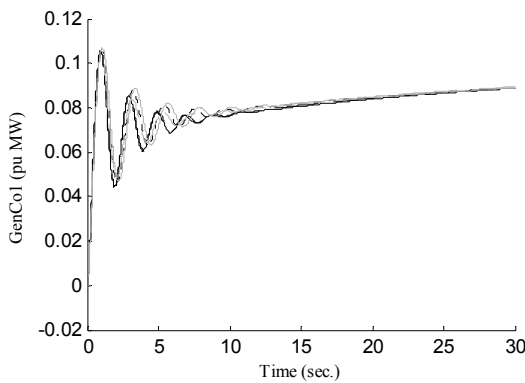
FLC Σενάριο 1



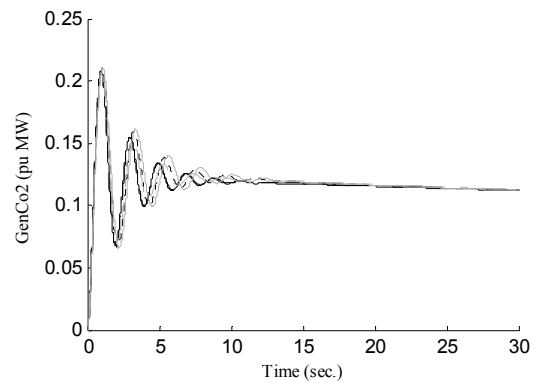
(1.α) D_2GPA_SH_SG_SD_SS_FLC_D(ps1)



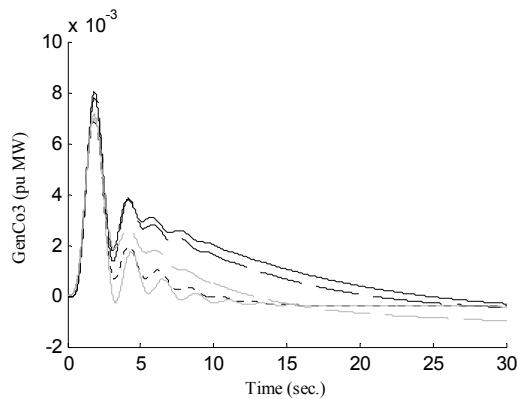
(1.β) D_2GPA_SH_SG_SD_SS_FLC_D(ps2)



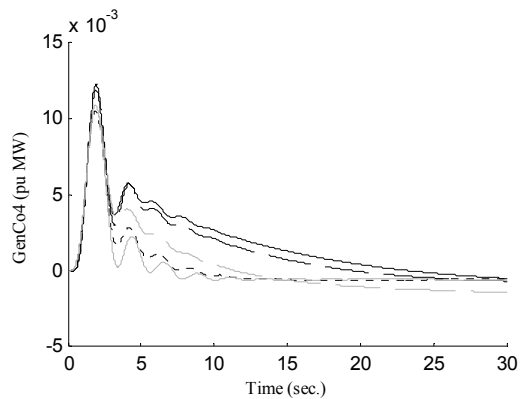
(1.γ) D_2GPA_SH_SG_SD_SS_FLC_D(GenCo1)



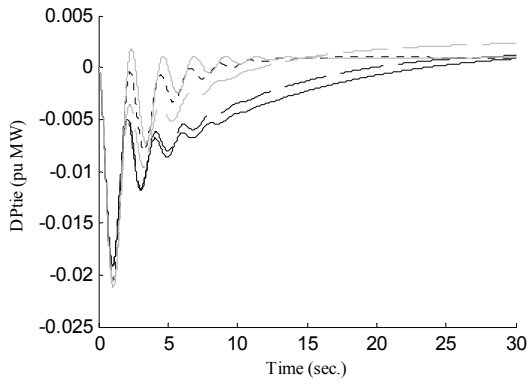
(1.δ) D_2GPA_SH_SG_SD_SS_FLC_D(GenCo2)



(1.ε) D_2GPA_SH_SG_SD_SS_FLC_D(GenCo3)

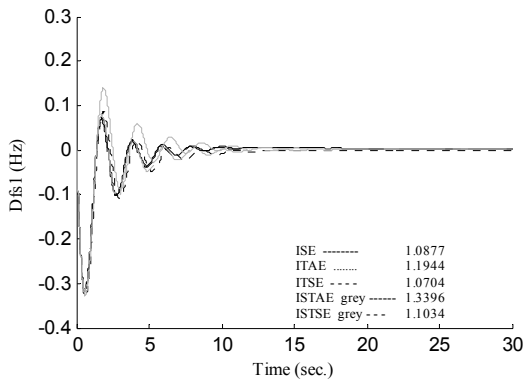


(1.σ) D_2GPA_SH_SG_SD_SS_FLC_D(GenCo4)

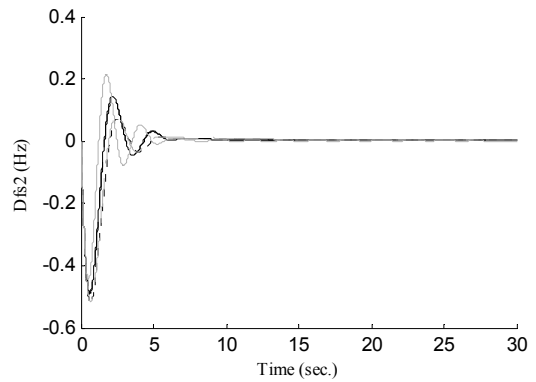


(1.ζ) D_2GPA_SH_SG_SD_SS_FLC_D(Ptie)

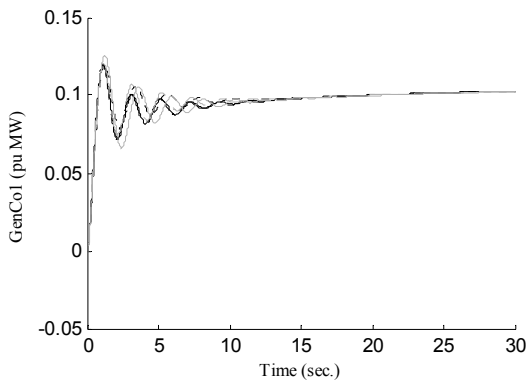
FLC Σενάριο 2



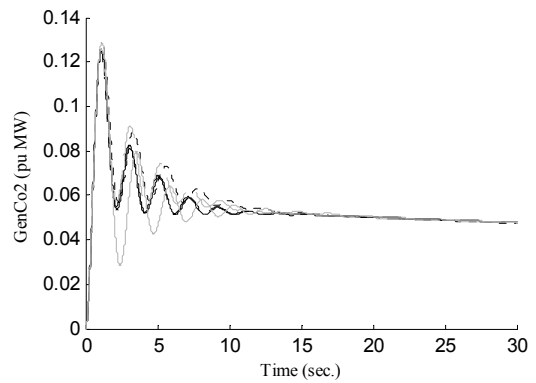
(2.α) D_2GPA_SH_SG_SD_SS_FLC_D(ps1)



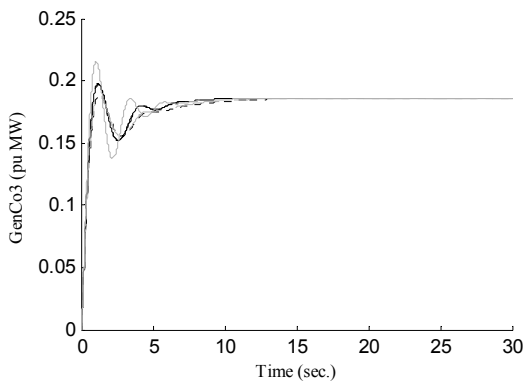
(2.β) D_2GPA_SH_SG_SD_SS_FLC_D(ps2)



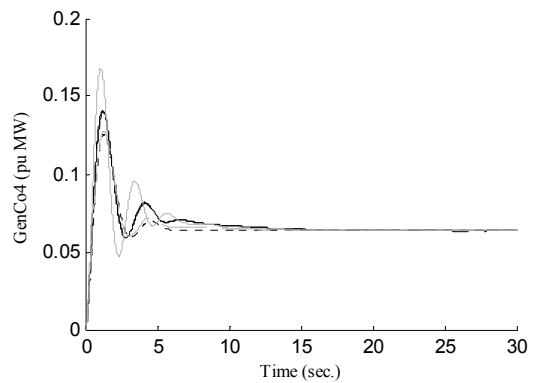
(2.γ) D_2GPA_SH_SG_SD_SS_FLC_D(GenCo1)



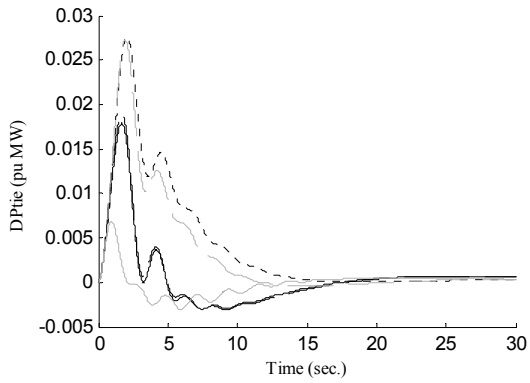
(2.δ) D_2GPA_SH_SG_SD_SS_FLC_D(GenCo2)



(2.ε) D_2GPA_SH_SG_SD_SS_FLC_D(GenCo3)

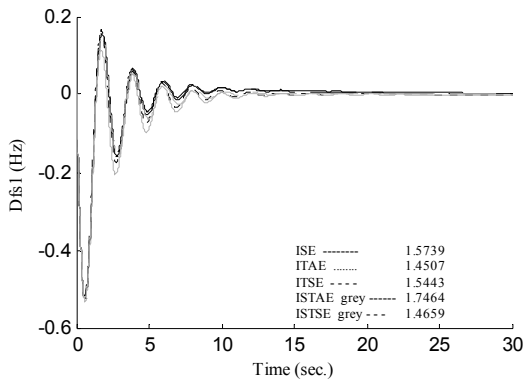


(2.σ) D_2GPA_SH_SG_SD_SS_FLC_D(GenCo4)

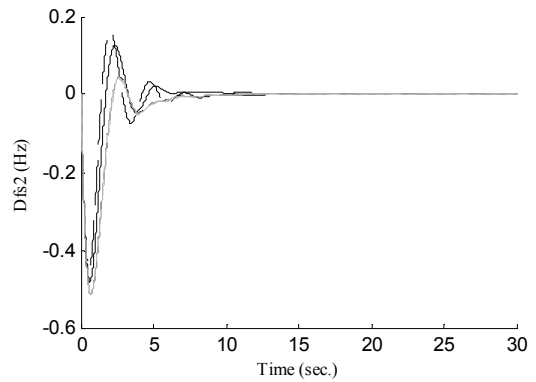


(2.ζ) D_2GPA_SH_SG_SD_SS_FLC_D(Ptie)

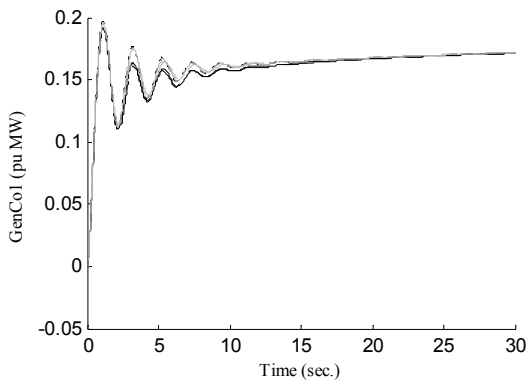
FLC Σενάριο 3



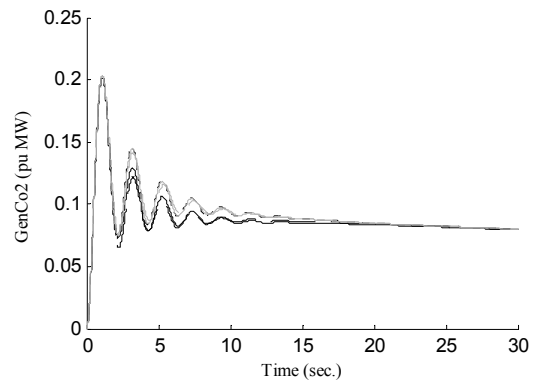
(3.α) D_2GPA_SH_SG_SD_SS_FLC_D(ps1)



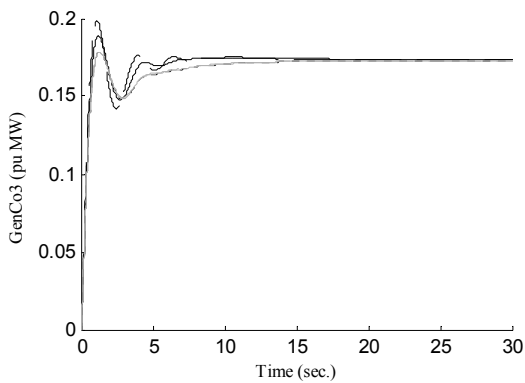
(3.β) D_2GPA_SH_SG_SD_SS_FLC_D(ps2)



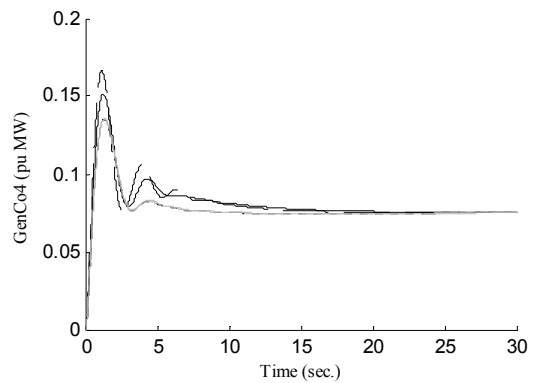
(3.γ) D_2GPA_SH_SG_SD_SS_FLC_D(GenCo1)



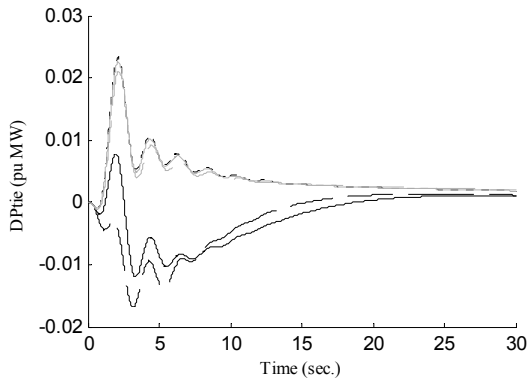
(3.δ) D_2GPA_SH_SG_SD_SS_FLC_D(GenCo2)



(3.ε) D_2GPA_SH_SG_SD_SS_FLC_D(GenCo3)



(3.σ) D_2GPA_SH_SG_SD_SS_FLC_D(GenCo4)



(3.7) D_2GPA_SH_SG_SD_SS_FLC_D(Ptie)

ΕΠΙΛΟΓΟΣ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Κατά την εκπόνηση αυτής της πτυχιακής εργασίας έγινε ανάλυση, μοντελοποίηση, προσομοίωση και αξιολόγηση 40 μοντέλων ΣΗΕ, με διάφορους βαθμούς πολυπλοκότητας, σχετικά με το πρόβλημα του αυτόματου ελέγχου παραγωγής. Παρόλο που πολλά από τα μοντέλα αυτά μπορεί να μην υπάρχουν στην διεθνή βιβλιογραφία, θεωρήθηκε ότι για λόγους πληρότητας θα έπρεπε να εξεταστούν. Σε κάθε ένα από τα μοντέλα αυτά χρησιμοποιήθηκαν τουλάχιστον δυο διαφορετικές εκδοχές ελέγχου δημιουργώντας με αυτόν τον τρόπο περισσότερους από 100 διαφορετικούς συνδυασμούς μοντέλου – ελεγκτή. Η μοντελοποίηση βασίστηκε σε μοντέλα ευρέως αποδεχτά από την διεθνή βιβλιογραφία. Οι προσομοιώσεις χρησιμοποιήσαν τα πέντε πιο διαδεδομένα κριτήρια, σαν συναρτήσεις βελτιστοποίησης. Για κάθε κριτήριο που εξετάστηκε, η προσομοίωση επαναλήφθηκε τουλάχιστον τρεις φορές για να διασφαλιστεί η αποτελεσματικότητα της διαδικασίας.

Η πτυχιακή εργασία αυτή ασχολείται με έννοιες όπως τεχνητή νοημοσύνη, υπολογιστική ευφυΐα, γενετικός αλγόριθμος και ασαφής λογική. Αρκετά από τα συστήματα που αναφέρθηκαν εξετάστηκαν με χρήση ασαφούς ελεγκτή ο οποίος αναπτύχθηκε από τον συγγραφέα στο περιβάλλον του Matlab. Ακόμα για τον υπολογισμό των υποβέλτιστων παραμέτρων των διαφόρων ελεγκτών χρησιμοποιήθηκε δυαδικός γενετικός αλγόριθμος ο οποίος εμπλουτίστηκε από τον συγγραφέα με την προσθήκη ελιτισμού. Για την πλοήγηση στα διάφορα συστήματα και την ρύθμιση των παραμέτρων της προσομοίωσης, κρίθηκε αναγκαίο να κατασκευαστεί λειτουργικό, το οποίο ονομάστηκε AGCLab και βοήθησε στην ταχύτερη διαχείριση τόσο των προσομοιώσεων όσο και των αποτελεσμάτων.

Θα πρέπει να αναφερθεί ότι εξετάζεται και η έννοια της απελευθερωμένης αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας εκτός από την διαδεδομένη λογική της μη απελευθερωμένης αγοράς. Από την δουλειά που έγινε στα πλαίσια αυτής της εργασίας, προέκυψε εργασία η οποία δημοσιεύθηκε στο διεθνές επιστημονικό περιοδικό IJEST ενώ κατά τη γνώμη του συγγραφέα πολύ σημαντικό ρόλο στην αποδοχή της, έπαιξε η πληρότητα της εργασίας καθώς και το μοντέλο που επιλέχθηκε. Τα χαρακτηριστικά που ξεχωρίζουν αυτήν την πτυχιακή εργασία είναι:

- Η πρωτοτυπία της αφού είναι από τις ελάχιστες που εξετάζει το πρόβλημα του αυτόματου ελέγχου με την χρήση 5 κριτηρίων, γεγονός που είναι σπάνιο ακόμα και στην διεθνή βιβλιογραφία. Ενώ είναι μια από τις λίγες εργασίες που σε προπτυχιακό επίπεδο ασχολούνται σχεδόν εξολοκλήρου με το μεταβατικό φαινόμενο.
- Η πληρότητα της αφού δόθηκε ιδιαίτερη προσοχή ώστε να εξεταστούν όσο δυνατόν περισσότερες περιπτώσεις. Ακόμα οι τεχνικές ελέγχου περιλάμβαναν από συμβατικές μέχρι ευφυείς για να διασφαλιστεί ότι εξετάστηκαν κατά το δυνατόν περισσότερες περιπτώσεις.
- Η λειτουργικότητα της αφού αφιερώθηκαν μεγάλες χρονικές περίοδοι για την ανάπτυξη σχετικού λογισμικού το οποίο δεν είχε να κάνει τόσο με καθαυτό το πρόβλημα της πτυχιακής εργασίας αλλά περισσότερο με το δευτερεύον πρόβλημα που δημιούργησε ο μεγάλος όγκος των δεδομένων και η ανάγκη πλοήγησης σε αυτόν.
- Η αποτελεσματικότητα της αφού στο χρονικό διάστημα που δουλεύτηκε αυτή η πτυχιακή εργασία όχι μόνο κατάφερε να εξάγει μια εργασία σε επιστημονικό περιοδικό, αλλά και να αναφερθεί τρεις μέχρι στιγμής φορές από άλλους συγγραφείς, προσφέροντας με τον τρόπο αυτό στην επιστημονική κοινότητα.

Μετά την εξαγωγή των αποτελεσμάτων, δηλαδή, των γραφικών χρονοαποκρίσεων, των παραμέτρων των ελεγκτών και των δεικτών απόδοσης κάθε συστήματος, έγινε αξιολόγηση τόσο αυτών όσο και της διαδικασίας και προέκυψαν τα παρακάτω συμπεράσματα:

- Ο γενετικός αλγόριθμος αποδείχτηκε ένα πολύ χρήσιμο εργαλείο για την αντιμετώπιση προβλημάτων στα οποία η αναλυτική αντιμετώπιση είτε δεν είναι δυνατή είτε είναι ιδιαίτερα χρονοβόρα. Μεγάλη σημασία θα πρέπει να δίνεται στην ρύθμιση του, όσο αφορά τον αριθμό των γενεών, το μέγεθος του πληθυσμού και τις πιθανότητες διασταύρωσης και μετάλλαξης. Ειδικά μετά την προσθήκη του ελιτισμού είναι η άποψη του συγγραφέα ότι βελτιώθηκε ακόμα περισσότερο η απόδοση του γενετικού αλγόριθμου και προτείνεται ανεπιφύλακτα η χρήση του σε παρόμοια προβλήματα βελτιστοποίησης.
- Επιβεβαιώνεται η αρχική υπόθεση ότι ένας πιο περίπλοκος ελεγκτής θα έχει καλύτερα αποτελέσματα από ένα πιο απλό. Δηλαδή, ο ολοκληρωτικός ελεγκτής έχει χειρότερα αποτελέσματα από τον

αναλογικό – ολοκληρωτικό και αυτός με την σειρά του χειρότερα από τον αναλογικό – ολοκληρωτικό – διαφορικό.

- Η απόδοση του ασαφούς ελεγκτή είναι καλύτερη από αυτή του αναλογικού – ολοκληρωτικού αλλά χειρότερη από αυτή του ελεγκτή τριών όρων. Αυτό έχει να κάνει με το γεγονός ότι ο ασαφής ελεγκτής που αναπτύχθηκε έχει και αυτός αναλογικό – ολοκληρωτικό χαρακτήρα αλλά με την πρόσθετη λειτουργία να αντιλαμβάνεται όχι μόνο το σήμα σφάλματος αλλά και την παράγωγο του δίνοντας έτσι ένα πιο αποτελεσματικό σήμα ελέγχου.
- Τα κριτήρια βελτιστοποίησης θα έπρεπε να χρησιμοποιούνται σε αντίστοιχες μελέτες αφού η εναλλακτική που συνηθίζεται δηλαδή η χρήση μόνο του κριτηρίου ISE δίνει ελλιπή αποτελέσματα και εξετάζει το όλο πρόβλημα μονόπλευρα.
- Το πρόβλημα του αυτομάτου ελέγχου παραγωγής αποκτά ακόμα μεγαλύτερο ενδιαφέρον όταν συναντάται σε καθεστώς απελευθέρωσης της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας. Μέσα από τα σενάρια λειτουργίας που εξετάστηκαν θεωρείται ότι έγιναν κατανοητές οι γενικές αρχές που διέπουν τέτοιου είδους συστήματα. Αν εξεταστούν τα αποτελέσματα της παραγράφου 9.5.6 φαίνεται ότι όσο αυξάνεται η πολυπλοκότητα του σεναρίου ασχέτως ελεγκτή, όλο και πιο έντονο είναι το μεταβατικό φαινόμενο. Επίσης είναι η γνώμη του συγγραφέα ότι το συγκεκριμένο τμήμα της πτυχιακής εργασίας χρήζει περαιτέρω μελέτης και θα εξεταστεί εκτενέστερα στο μέλλον.
- Τέλος θα πρέπει να τονιστεί ότι ένας μικρής τιμής δείκτης απόδοσης από μόνος του δεν σημαίνει αυτόματα και ότι έχει υπολογιστεί ο σωστός ελεγκτής. Μόνο βάση της χρονοαπόκρισης συνδυαστικά με τα αποτελέσματα των δεικτών απόδοσης μπορεί να φανεί ποιος είναι ο αποδοτικότερος έλεγχος. Αλλά ακόμα και με αυτά θα πρέπει να έχει οριστεί ξεκάθαρα ποια είναι τα χαρακτηριστικά εκείνα που είναι επιθυμητό να βελτιωθούν. Πάνω σε αυτό να αναφερθεί ότι παρόλο που σε όλα τα μοντέλα που εξετάστηκαν ο ελεγκτής τριών όρων έδωσε τα καλύτερα αποτελέσματα, λίγα είναι τα συστήματα που πρακτικά θα επέλεγαν έναν τέτοιο ελεγκτή για την βελτιστοποίηση της λειτουργίας τους.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Οικονομική λειτουργία συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας, Αναστασίου Γ. Μπακιρτζή, εκδόσεις ΖΗΤΗ, 1998.
- [2] Έλεγχος και ευστάθεια συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας, Νικολάου Βοβού και Γαβριήλ Γιαννακόπουλου, εκδόσεις ΖΗΤΗ, 2008.
- [3] Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και έλεγχος συχνότητας και τάσεως, Β. Κ. Παπαδιά και Κ. Βουρνά, εκδόσεις συμμετρία 1991.
- [4] Μεταφορά & διανομή ηλεκτρικής ενέργειας, Β. Μ. Weedy and Β. J. Cory, εκδόσεις ΙΩΝ 1998.
- [5] Συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας Τόμος Α, Δ. Λαμπρίδη, Π. Ντοκόπουλου και Γ. Παπαγιάννη, εκδόσεις ΖΗΤΗ 2007.
- [6] Μοντελοποίηση – έλεγχος συστημάτων ηλεκτροπαραγωγής, Ιωάννη Καρναβά, διδακτικές σημειώσεις εκδόσεις ΤΕΙ Κρήτης 2010.
- [7] Βασικές αρχές σημάτων & συστημάτων, Γεώργιου Καραγιάννη και Πέτρου Μαραγκού, εκδόσεις Παπασωτηρίου 2011.
- [8] Σήματα και συστήματα για τεχνολόγους, Πάνου Φωτόπουλου και Αναστασίας Βελώνη, σύγχρονη εκδοτική 2008.
- [9] Θεωρία και προβλήματα στα συστήματα αυτομάτου ελέγχου, σειρά Schaum, Joseph J. Distefano, Allen R. Stubberud and Ivan J. Williams, εκδόσεις Τζιόλα 2004.
- [10] Εισαγωγή στον αυτόματο έλεγχο, Π. Ν. Παρασκευόπουλος, πρώτη έκδοση, 1991.
- [11] Ευφυής έλεγχος, Ροβέρτος-Ε. Κικκ, εκδόσεις Τζιόλα, 2004.
- [12] Ηλεκτρικές μηχανές AC-DC, Stephen J. Charman, εκδόσεις Τζιόλα, 3^η έκδοση, 2001.
- [13] Σύγχρονα συστήματα αυτομάτου ελέγχου, Richard C. Dorf & Robert H. Bishop, 9^η έκδοση, εκδόσεις Τζιόλα, 2003.
- [14] Συστήματα αυτομάτου ελέγχου τόμος Α και Β, Παντελή Β. Μαλατέστα, Εκδόσεις Τζιόλα, 2001.
- [15] Συστήματα αυτομάτου ελέγχου εργαστηριακές ασκήσεις, Ν. Γ. Σμυρλής & Λ. Θ. Ζαρογιάννης, εκδόσεις Τζιόλα, 2005.
- [16] Θερμοδυναμική για μηχανικούς Τόμος Β, Yunus A. Cengel and Michael A. Booles, εκδόσεις Τζιόλα 2003.
- [17] Αιολική ενέργεια & ανεμογεννήτριες, John F. Walker and Nicolas Jenkins, εκδόσεις ΙΩΝ 2007.
- [18] Διαχείριση της αιολικής ενέργειας, Ιωάννης Κ. Καλδέλλης, εκδόσεις Αθ. Σταμούλης 2005.
- [19] Μηχανές εσωτερικής καύσεως Τόμος Β, Λάζαρου Χ. Κλιάνη, Ιωάννη Κ. Νικολού και Ιωάννη Α. Σιδέρη, πρώτη έκδοση Αθήνα 2008.
- [20] Εφαρμογές μεθόδων υπολογιστικής νοημοσύνης για τον σχεδιασμό και την βελτίωση λειτουργίας ενεργειακών συστημάτων, ΗΜΕΡΙΔΑ «Ενεργειακές Προσεγγίσεις Φιλικές προς το Περιβάλλον», 15/10/2008, Ιωάννης Λ. Καρναβάς.
- [21] Οικονομική λειτουργία συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, Διπλωματική Εργασία Πανεπιστημίου Πατρών, Παπανικολάου Δημήτριος.
- [22] Αξιολόγηση της ποιότητας ισχύος δικτύων με μοντέλο ασαφούς λογικής, Διπλωματική Εργασία ΕΜΠ, Παναγιώτης Λαγουράνης.
- [23] Επίπτωση της διεύθυνσης φωτοβολταϊκών συστημάτων στο μη διασυνδεδεμένο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας της Κρήτης, Πτυχιακή εργασία ΤΕΙ Κρήτης, Απόστολος Τσακρίδης.
- [24] Ασαφή συστήματα θεωρία και εργαστηριακές ασκήσεις, Στέλιου Παπαδάκη και Παναγιώτη Αδαμίδη, ΤΕΙ Θεσσαλονίκης, 2004.
- [25] Ευφυής έλεγχος θεωρία και εφαρμογές, Σταύρου Βολογιαννίδη, ΤΕΙ Σερρών, Διδακτικές σημειώσεις.
- [26] The interpretation of fuzziness, Pei Wang, Indiana University 1993.
- [27] Generating fuzzy rules by learning from examples, IEEE TRANSACTIONS ON SYSTEMS, MAN AND CYBERNETICS, Vol. 22, No. 6, NOVEMBER/DECEMBER 1992, Li-Xin Wang and Jerry M. Mendel.
- [28] Sampled-data automatic load frequency control of a single area power system with multisource power generation, Electric Power Components and Systems, 35:955-980, 2007, K. S. S. Ramakrishna and T. S. Bhati.
- [29] On the optimal control of interconnected electric power systems in a re-structured environment using genetic algorithms, WSEAS transactions on systems journal, issue 8, Vol. 4, pp 1248-1258, August 2005, Yannis L. Karnavas.
- [30] Load frequency control of isolated wind diesel hybrid power systems, Energy convers. Mgmt. Vol. 38, No. 9, pp 829-837, 1997, T. S. Bhati et al.

- [31] GA application to optimization of AGC in three-area power system after deregulation, *Electrical Power and Energy Systems (ELSEVIER)* 29 (2007), 230 – 240, A. Demiroren and H. L. Zeynelgil.
- [32] L. A. Zadeh, *Fuzzy Sets, Inform. and Control*, vol. 8, 1965, pp. 338-353.
- [33] *The art of scientific writing*, H. F. Ebel & C. Bliefert & W. E. Russey, Wiley- VCH, second revised edition.
- [34] *Multi dimensional issues in international power grid interconnections*, United Nations, New York 2006.
- [35] Automatic generation control of interconnected power system with diverse sources of power generation, *International Journal of Engineering, Science and Technology* Vol. 2, No. 5, 2010, pp. 51-65, K. S. S. Ramakrishna, Pawan Sharma, T. S. Bhatti.
- [36] Sliding Mode/ H_{∞} Control of a Hydro-power Plant, 2011 American Control Conference on O'Farrell Street, San Francisco, CA, USA June 29 - July 01, 2011, Xibei Ding, Alok Sinha.
- [37] Development of Variable Structure fuzzy Logic Controller for enhanced Load Frequency Control, *J. Electrical Systems* 7-3 (2011): 297-307, S. Balamurugan et al.
- [38] MATLAB/Simulink User Manuals, *Mathworks Inc.*, USA, 2000.
- [39] MATLAB/Fuzzy Logic Toolbox User Manuals, *Mathworks Inc.*, USA, 2000.
- [40] MATLAB/Genetic algorithm Toolbox User Manuals, *Mathworks Inc.*, USA, 2000.
- [41] Frequency control on an island power system with evolving plant mix, Thesis university college Dublin, Gillian R. Lalor.
- [42] Competitive electricity market design: a wholesale primer, Harvard University, William W. Hogan
- [43] Successful market design (SMD) and failure diagnosis: blackouts and lampposts in regulating electricity markets, Harvard University, William W. Hogan
- [44] Lessons learned fom electricity market liberalization, *The Energy Journal*, Special Issue. The future of electricity: papers in honor of David Newbery, Paul L. Joskow.
- [45] Experience with PJM market operation, system design, and implementation, *IEEE TRANSACTIONS ON POWER SYSTEMS*, VOL. 18, NO. 2, MAY 2003, Andrew L. Ott.
- [46] Control area concepts and obligations, N.E.R.C., 1992.
- [47] Handbook of metaheuristics, edited by Fred Glover and Gary A. Kochenberger.
- [48] Simulation and optimization in an AGC system after deregulation, *IEEE TRANSACTIONS ON POWER SYSTEMS*, VOL. 16, NO. 3, AUGUST 2001, Vaibhav Donde, M. A. Pai and Ian A. Hiskens.
- [49] Definition and classification of power system stability, *IEEE TRANSACTIONS ON POWER SYSTEMS*, IEEE/CIGRE Joint Task Force on Stability Terms and Definitions.
- [50] Fuzzy control, Kevin M. Passino and Stephen Yurkovich, Addison – Wesley longman, Inc. 1998.
- [51] Fuzzy control systems design and analysis, Kazuo Tanaka and Hua O. Wang, John Willey and sons, Inc. 2001.
- [52] Takagi-Sugeno fuzzy modeling for process control, Kamyar Mehran, Newcastle University, 2008.
- [53] <http://www.un.org/esa/sustdev/publications/energy/chapter2.pdf>
- [54] <http://www.upwind.eu/Shared%20Documents/WP9%20-%20Publications/Report2007D933Part3.pdf>
- [55] <http://www.re-public.gr/?p=1867>
- [56] http://shop-microtherm.com/pdf/studer_prices_2010.pdf
- [57] http://www.studer-inno.com/?cat=sine_wave_inverter-chargers&id=432&tab=3
- [58] http://en.wikipedia.org/wiki/Evolutionary_algorithm
- [59] http://en.wikipedia.org/wiki/Genetic_operators
- [60] http://en.wikipedia.org/wiki/Evolutionary_computation
- [61] http://en.wikipedia.org/wiki/Super_grid
- [62] http://en.wikipedia.org/wiki/Electricity_market
- [63] http://en.wikipedia.org/wiki/Electricity_sector_of_the_United_States
- [64] http://www.tic.toshiba.com.au/product_brochures_and_reference_lists/hydrogen.pdf
- [65] <http://www.leander-project.homecall.co.uk/turbines.html>
- [66] <http://www.powerfromthesun.net/Book/chapter12/chapter12.html>
- [67] http://www.mstudioblackboard.tudelft.nl/duwind/Wind%20energy%20online%20reader/Static_pages/upwind_downwind.htm

[68] <http://nswep.electricalcomputerengineering.dal.ca/tools/weibull.html>

[69] <http://geospatial.blogs.com/geospatial/2011/11/ec-proposes-electric-transmission-development-plan-in-the-european-union.html>

[70] http://sae.ee.teikoz.gr/parartimata/parartima2/met_laplace.html

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Στον πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζονται οι ιδιότητες του μετασχηματισμού Laplace.

A/A	$f(t)$	$F(s) = \int_0^{\infty} f(t)e^{-st} dt$
1	$\alpha f_1(t) \pm \beta f_2(t)$	$\alpha F_1(s) \pm \beta F_2(s)$
2	$\frac{df(t)}{dt} = f'(t) = \dot{f}(t)$	$sF(s) - f(0)$
3	$\frac{d^2 f(t)}{dt^2} = f''(t) = \ddot{f}(t)$	$s^2 F(s) - sf(0) - \dot{f}(0)$
4	$\frac{d^n f(t)}{dt^n} = f^{(n)}(t)$	$s^n F(s) - s^{n-1} f(0) - \dots - \dot{f}(0)$
5	$\int_0^t f(t) dt$	$\frac{F(s)}{s} + \frac{f^{(-1)}(0)}{s}$
6	$\int_0^t \int_0^t f(t) dt^2$	$\frac{F(s)}{s^2} + \frac{f^{(-1)}(0)}{s^2} + \frac{f^{(-2)}(0)}{s}$
7	$\int_0^t \dots \int_0^t f(t) dt^n$	$\frac{F(s)}{s^n} + \sum_{k=1}^n \left[\int \dots \int f(t) dt^k \right]_{t=0}$
8	$f(t-r) \cdot u(t-r)$	$e^{-rs} \cdot F(s)$
9	$t_n f(t)$	$(-1)^n \frac{d^n}{ds^n} F(s)$
10	$\frac{f(t)}{t}$	$\int_s^{\infty} \Phi(\sigma) d\sigma$
11	$f_1(t) * f_2(t)$	$F_1(s) * F_2(s)$
12	$f_1(t) \cdot f_2(t)$	$\frac{1}{2\pi j} \int_{c-j\omega}^{c+j\omega} F_1(p) F_2(s-p) dp$
13	$e^{-\alpha t} \cdot f(t)$	$F(s + \alpha)$
14	$f\left(\frac{t}{\alpha}\right)$	$\alpha F(\alpha s)$
15	$f(t) \cos \omega t$	$\frac{1}{2} F(s - j\omega) + \frac{1}{2} F(s + j\omega)$
16	$f(\alpha t)$	$\frac{F\left(\frac{s}{\alpha}\right)}{\alpha}$
17	$\frac{f(t)}{t^n}$	$\int_s^{\infty} \dots \int_s^{\infty} F(s) (ds)^n$

18	$\lim_{t \rightarrow 0} f(t)$	$\lim_{s \rightarrow \infty} sF(s)$, Θεώρημα αρχικής τιμής
19	$\lim_{t \rightarrow \infty} f(t)$	$\lim_{s \rightarrow 0} sF(s)$, Θεώρημα τελικής τιμής

Στον πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζονται οι μετασχηματισμοί Laplace βασικών συναρτήσεων.

A/A	$F(s) = LT\{f(t)\}$	$f(t) = ILT\{F(s)\}$
1	1	$\delta(t)$
2	$\frac{1}{s}$	$u(t)$
3	$\frac{1}{s^2}$	t
4	$\frac{1}{s^n}$	$\frac{1}{(n-1)!} t^{n-1}, n$ Θετικός αριθμός
5	s	$\frac{d\delta(t)}{dt} = \delta^{(1)}(t)$
6	s^n	$\delta^{(n)}(t), n$ Θετικός αριθμός
7	$\frac{1}{\sqrt{s}}$	$\frac{1}{\sqrt{\pi t}}$
8	$\frac{1}{s^{n+1/2}}$	$\frac{2^n t^{n-1/2}}{1 \cdot 3 \cdot 5 \cdots (2n-1) \pi^{1/2}}$
9	$\frac{e^{\alpha s}}{s}$	$u(t-\alpha)$
10	$\frac{1}{s}(1-e^{-\alpha s})$	$u(t)-u(t-\alpha)$
11	$\frac{1}{s+\alpha}$	$e^{-\alpha t}$
12	$\frac{1}{(s+\alpha)^n}$	$\frac{1}{(n-1)!} t^{n-1} \cdot e^{-\alpha t}, n$ Θετικός αριθμός
13	$\frac{1}{s(s+\alpha)}$	$\frac{1-e^{-\alpha t}}{\alpha}$
14	$\frac{1}{s(s+\alpha)(s+\beta)}$	$1 - \frac{\beta}{\beta-\alpha} e^{-\alpha t} + \frac{\alpha}{\beta-\alpha} e^{-\beta t}$
15	$\frac{s+\gamma}{s(s+\alpha)(s+\beta)}$	$\frac{1}{\alpha\beta} \left(\gamma - \frac{\beta(\gamma-\alpha)}{\beta-\alpha} e^{-\alpha t} + \frac{\alpha(\gamma-\beta)}{\beta-\alpha} e^{-\beta t} \right)$
16	$\frac{1}{(s+\alpha)(s+\beta)}$	$\frac{e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}}{\beta-\alpha}$

17	$\frac{s}{(s+\alpha)(s+\beta)}$	$\frac{\alpha e^{-\alpha t} - \beta e^{-\beta t}}{\alpha - \beta}$
18	$\frac{s+\gamma}{(s+\alpha)(s+\beta)}$	$\frac{(\gamma-\alpha)e^{-\alpha t} - (\gamma-\beta)e^{-\beta t}}{\beta-\alpha}$
19	$\frac{1}{(s+\alpha)(s+\beta)(s+\gamma)}$	$\frac{e^{-\alpha t}}{(\beta-\alpha)(\gamma-\alpha)} + \frac{e^{-\beta t}}{(\gamma-\beta)(\alpha-\beta)} + \frac{e^{-\gamma t}}{(\alpha-\gamma)(\beta-\gamma)}$
20	$\frac{s+\delta}{(s+\alpha)(s+\beta)(s+\gamma)}$	$\frac{(\delta-\alpha)e^{-\alpha t}}{(\beta-\alpha)(\gamma-\alpha)} + \frac{(\delta-\beta)e^{-\beta t}}{(\gamma-\beta)(\alpha-\beta)} + \frac{(\delta-\gamma)e^{-\gamma t}}{(\alpha-\gamma)(\beta-\gamma)}$
21	$\frac{\omega}{s^2 + \omega^2}$	$\sin \omega t$
22	$\frac{s}{s^2 + \omega^2}$	$\cos \omega t$
23	$\frac{s+\alpha}{s^2 + \omega^2}$	$\frac{\sqrt{\alpha^2 + \omega^2}}{\omega} \sin(\omega t + \varphi), \varphi = \tan^{-1} \frac{\omega}{\alpha}$
24	$\frac{s \cdot \sin \alpha + \omega \cdot \cos \alpha}{s^2 + \omega^2}$	$\sin(\omega t + \alpha)$
25	$\frac{1}{s(s^2 + \omega^2)}$	$\frac{1 - \cos \omega t}{\omega^2}$
26	$\frac{s+\alpha}{s(s^2 + \omega^2)}$	$\frac{\alpha}{\omega^2} - \frac{\sqrt{\alpha^2 + \omega^2}}{\omega^2} \cos(\omega t + \varphi), \varphi = \tan^{-1} \frac{\omega}{\alpha}$
27	$\frac{1}{(s+\alpha)(s^2 + \omega^2)}$	$\frac{e^{-\alpha t}}{\alpha^2 + \omega^2} + \frac{1}{\omega \sqrt{\alpha^2 + \omega^2}} \sin(\omega t - \varphi), \varphi = \tan^{-1} \frac{\omega}{\alpha}$
28	$\frac{1}{(s+\alpha)^2 + \beta^2}$	$\frac{e^{-\alpha t} \sin \beta t}{\beta}$
29	$\frac{s+\alpha}{(s+\alpha)^2 + \beta^2}$	$e^{-\alpha t} \cos \beta t$
30	$\frac{s+\gamma}{(s+\alpha)^2 + \beta^2}$	$\frac{\sqrt{(\gamma+\alpha)^2 + \beta^2}}{\beta} e^{-\alpha t} \sin(\beta t + \varphi), \varphi = \tan^{-1} \frac{\beta}{\gamma-\alpha}$
31	$\frac{1}{s[(s+\alpha)^2 + \beta^2]}$	$\frac{1}{\alpha^2 + \beta^2} + \frac{1}{\beta \sqrt{\alpha^2 + \beta^2}} e^{-\alpha t} \sin(\beta t - \varphi), \varphi = \tan^{-1} \frac{\beta}{-\alpha}$
32	$\frac{s+\gamma}{s[(s+\alpha)^2 + \beta^2]}$	$\frac{\gamma}{\alpha^2 + \beta^2} + \frac{1}{\beta} \sqrt{\frac{(\gamma-\alpha)^2 + \beta^2}{\alpha^2 + \beta^2}} e^{-\alpha t} \sin(\beta t + \varphi),$ $\varphi = \tan^{-1} \frac{\beta}{\gamma-\alpha} - \tan^{-1} \frac{\beta}{-\alpha}$
33	$\frac{1}{s^2(s+\alpha)}$	$\frac{1}{\alpha^2} (\alpha t - 1 + e^{-\alpha t})$

34	$\frac{1}{s(s+\alpha)^2}$	$\frac{1}{\alpha^2}(1-e^{-\alpha t}-\alpha t e^{-\alpha t})$
35	$\frac{s+\beta}{s(s+\alpha)^2}$	$\frac{1}{\alpha^2}(\beta-\beta e^{-\alpha t}+\alpha(\alpha-\beta)t e^{-\alpha t})$
36	$\frac{s^2+\alpha_1 s+\alpha_0}{s(s+\alpha)(s+\beta)}$	$\frac{\alpha_0}{\alpha\beta}+\frac{\alpha^2-\alpha_1\alpha+\alpha_0}{\alpha(\alpha-\beta)}e^{-\alpha t}-\frac{\beta^2-\alpha_1\beta+\alpha_0}{\beta(\alpha-\beta)}e^{-\beta t}$
37	$\frac{1}{(s^2+\omega^2)^2}$	$\frac{1}{2\omega^3}(\sin \omega t-\omega t \cos \omega t)$
38	$\frac{1}{(s^2-\omega^2)}$	$\frac{1}{\omega} \sinh \omega t$
39	$\frac{1}{(s+\alpha)^2(s+\beta)}$	$\frac{1}{(\beta-\alpha)^2}[[(\beta-\alpha)t-1]e^{-\alpha t}+e^{-\beta t}]$
40	$\frac{1}{s^2(s^2+\omega^2)}$	$\frac{1}{\omega^3}(\omega t-\sin \omega t)$
41	$\frac{s}{(s^2+\omega^2)^2}$	$\frac{t}{2\omega} \sin \omega t$
42	$\frac{s^2}{(s^2+\omega^2)^2}$	$\frac{1}{2\omega}(\omega t \cos \omega t+\sin \omega t)$
43	$\frac{s^n}{(s^2+\omega^2)^{n+1}}$	$\frac{t^n \sin \omega t}{n!2^n \omega}$
44	$\frac{s^2-\omega^2}{(s^2+\omega^2)^2}$	$t \cos \omega t$