

**ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΜΕΣΟΓΕΙΑΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ**

**ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

**ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ**

**ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ**

**«ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ»**



**ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ**

---

**ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΕΠΑΓΩΓΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ ΚΑΙ  
ΣΤΡΕΦΟΜΕΝΩΝ ΣΦΟΝΔΥΛΩΝ (FLYWHEELS) ΣΤΙΣ ΜΕΤΑΒΟΛΕΣ ΤΗΣ  
ΣΥΧΝΟΤΗΤΑΣ ΤΟΥ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ**

---

**ΝΙΚΟΛΑΟΥ ΠΕΛΕΚΗ**

**ΑΝΤΩΝΙΟΥ ΚΟΥΤΣΑΦΤΗ**

**ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: ΑΝΤΩΝΙΟΣ ΤΣΙΚΑΛΑΚΗΣ, ΕΠΙΚΟΥΡΟΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ ΗΜΜΥ**

**ΗΡΑΚΛΕΙΟ, ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ 2021**



Copyright © Νικόλαος Πελέκης & Αντώνιος Κουτσάφτης, 2021

Ελληνικό Μεσογειακό Πανεπιστήμιο

Δ.Π.Μ.Σ. «Ενεργειακά Συστήματα»

Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών

Σχολή Μηχανικών • ΕΛ.ΜΕ.ΠΑ.

Απαγορεύεται η αναπαραγωγή ολόκληρου ή τμήματος του κειμένου χωρίς την έγγραφη άδεια των συγγραφέων.

*Στον παππού μου τον Κυριάκο...*

*Νίκος Πελέκης*

*Στη γυναίκα μου και στον υιό μου...*

*Αντώνης Κουτσάφτης*

## Ευχαριστίες

Η παρούσα μεταπτυχιακή διατριβή έγινε στα πλαίσια του μεταπτυχιακού προγράμματος σπουδών «Ενεργειακά Συστήματα», του τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Ελληνικού Μεσογειακού Πανεπιστημίου. Θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε θερμά όλους όσους συνέβαλλαν άμεσα ή έμμεσα στην ολοκλήρωση της μεταπτυχιακής μας διατριβής.

Θα θέλαμε να εκφράσουμε τις θερμές μας ευχαριστίες :

- Στον κ. Αντώνιο Τσικαλάκη, Επίκουρο Καθηγητή του τμήματος ΗΜΜΥ και επιβλέποντα της συγκεκριμένης διατριβής, για την καθοδήγηση με καθοριστικές συμβουλές σε όλα τα στάδια της διατριβής, το συνεχές ενδιαφέρον του, τη διόρθωση του κειμένου, την εμπιστοσύνη που έδειξε στο πρόσωπο μας καθώς και για τη συμμετοχή του στην τριμελή συμβουλευτική επιτροπή.
- Στα άλλα δύο μέλη της τριμελούς εξεταστικής επιτροπής, και συγκεκριμένα στον κ. Εμμανουήλ Καραπιδάκη, Αναπληρωτή Καθηγητή του τμήματος ΗΜΜΥ, Κοσμήτορα της Σχολής Μηχανικών και Διευθυντή του Δ.Μ.Π.Σ. «Ενεργειακά Συστήματα» και στον κ. Ιωάννη Κατσίγιαννη, Επίκουρο Καθηγητή του τμήματος ΗΜΜΥ, για τη συμβολή τους στη περάτωση των μεταπτυχιακών σπουδών μας.
- Στον κ. Γεώργιο Ορφανουδάκη, Επίκουρο Καθηγητή του τμήματος ΗΜΜΥ, για τη πολύτιμη βοήθεια του και τις στοχευμένες παρατηρήσεις του στα πλαίσια της διατριβής μας.
- Τέλος, θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε πολύ τις οικογένειες μας και τους φίλους μας, για τη διαρκή στήριξη και συμπαράσταση τους, καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μας.

## Περίληψη

Η μεταπτυχιακή διατριβή αυτή αποσκοπεί στη μελέτη της συμπεριφοράς των επαγωγικών μηχανών και των στρεφόμενων σφονδύλων (FESS) στις μεταβολές της συχνότητας του ηλεκτρικού δικτύου.

Αρχικά, περιγράφονται η δομή και η λειτουργία ενός Σ.Η.Ε., η ευστάθεια και οι διαταραχές ενός τέτοιου συστήματος, αλλά και οι διαταραχές συχνότητας που αντιμετωπίζει το Σ.Η.Ε. της Κρήτης. Έπειτα παρουσιάζονται κάποια από τα αντλητικά συγκροτήματα του νησιού και μετά ο σκοπός και η δομή της διατριβής.

Στη συνέχεια, αναλύονται οι βασικές αρχές των επαγωγικών μηχανών, η δομή, ο έλεγχος αλλά και τα είδη φορτίων που ένα ηλεκτρικό δίκτυο μπορεί να περιλαμβάνει.

Έπειτα, γίνεται μια εκτενής περιγραφή των συστημάτων FESS, όπως τα κύρια μέρη που αποτελείται, η αρχή λειτουργίας τους, τα είδη των σφονδύλων και τα πλεονεκτήματα – μειονεκτήματα σε σχέση με άλλα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας, οι εφαρμογές τους σε υπάρχοντα ηλεκτρικά δίκτυα, και τέλος η μοντελοποίηση δυο διαφορετικών συστημάτων σφονδύλων.

Αργότερα, γίνονται στο Simulink πειράματα προσομοιώσεων με σκοπό τη μελέτη της συμπεριφοράς των επαγωγικών μηχανών ανάλογα με τη συχνότητα του ηλεκτρικού δικτύου και μετά παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των πειραμάτων αυτών, για το πως η συχνότητα επηρεάζει τη λειτουργία των ηλεκτρικών μηχανών ανάλογα με το είδος του μηχανικού φορτίου και του χρησιμοποιούμενου ελεγκτή.

Ύστερα, περιγράφεται το μαθηματικό μοντέλο των FESS που χρησιμοποιήθηκαν, ο αλγόριθμος υπολογισμών κάποιων σημαντικών μεταβλητών για το μοντέλο BP-400 Modular που χρησιμοποιήθηκε και τα σενάρια που αναπτύχθηκαν για τη συμμετοχή των στρεφόμενων σφονδύλων στην ισχύ του δικτύου του Σ.Η.Ε. Κρήτης με σκοπό την επαναφορά της συχνότητας στα ονομαστικά επίπεδα.

Τέλος, αναλύονται τα συμπεράσματα της διατριβής, αλλά και μελλοντικές προτάσεις που θα ήταν χρήσιμες να υλοποιηθούν.

**Λέξεις Κλειδιά:** Συχνότητα Δικτύων, Ηλεκτρικά Δίκτυα, Σφόνδυλοι, Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας, Ευστάθεια, Ασύγχρονες Μηχανές, Simulink, FOC, Υποσυχνότητα, Αντλίες

## Abstract

This master thesis aims to assess the impact of rotating masses like induction motors and flywheels in the frequency deviations of the electric grid.

Initially, the structure and operation of a Power System, the stability, and disturbances of such a system are described, focusing on frequency disturbances observed at the Power System of Crete. Then some of the pumping units of the island are presented and then the purpose and structure of this dissertation.

Then, the basic principles of induction motors, the structure, the control, and the types of loads that an electrical network may include are analyzed.

Next, an extensive description of the FESS systems is given, including the main components, their principle of operation, the flywheel types, and the advantages - disadvantages compared to other energy storage systems, their applications in existing electrical networks, and finally the modeling of two different flywheel systems.

Afterwards, simulations were undertaken in Simulink to study the behavior of induction motors depending on the frequency of the electric grid, and then the results of these experiments are presented, on how frequency affects the operation of electric motors depending on the type of mechanical load and the controller used.

Later, the mathematical model of FESS used is described, the algorithm of calculations of some important variables for the flywheel model BP-400 used and the scenarios studied for the participation of the rotating flywheels in the underfrequency disruptions of the EPS of Crete.

Then, the mathematical model of the FESS used is described, as well as the algorithm of calculations of some important variables for the model BP-400 Modular used. Later, the scenarios developed for the participation of the rotating flywheels in the Power System of Crete are presented, in order to restore the frequency of the grid to the nominal levels.

Finally, the conclusions of the dissertation are analyzed, as well as future proposals that would be useful to implement.

**Key Words:** Frequency of Grids, Electrical Networks, Flywheels, Electrical Power Systems, Stability, Asynchronous Machines, Simulink, FOC, Underfrequency, Pumps

# Περιεχόμενα

Ευχαριστίες .....	v
Περίληψη .....	vi
Abstract .....	vii
Περιεχόμενα .....	viii
Κατάλογος Σχημάτων .....	xi
Κατάλογος Πινάκων.....	xvii
Συντομογραφίες.....	xix
<b>Κεφάλαιο 1 : Εισαγωγή στο αντικείμενο της μεταπτυχιακής διατριβής .....</b>	<b>1</b>
1.1. Βασικές λειτουργίες του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας.....	1
1.2. Δομή συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας .....	3
1.2.1 Το σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας στην Ελλάδα.....	5
1.2.2 Το Σ.Η.Ε. Κρήτης και ιδιαιτερότητες νησιωτικών δικτύων .....	7
1.2.2.1 Ιδιαιτερότητες νησιωτικών δικτύων.....	8
1.3. Ευστάθεια συχνότητας και έλεγχος παραγωγής .....	9
1.3.1 Έλεγχος Παραγωγής .....	9
1.3.2 Ευστάθεια Συχνότητας.....	10
1.4. Προβλήματα στις μεταβολές συχνότητας του δικτύου .....	14
1.4.1 Προβλήματα στην ευστάθεια του δικτύου λόγω υποσυχνότητας.....	14
1.4.2 Στοιχεία για αντλητικά συγκροτήματα .....	18
1.5 Σκοπός και δομή της μεταπτυχιακής διατριβής .....	22
1.5.1 Σκοπός της μεταπτυχιακής διατριβής .....	22
1.5.2 Δομή της μεταπτυχιακής διατριβής.....	23
<b>Κεφάλαιο 2 : Ασύγχρονες Μηχανές .....</b>	<b>25</b>
2.1 Δομή του ασύγχρονου τριφασικού κινητήρα.....	25
2.2 Κατασκευή ασύγχρονου τριφασικού κινητήρα μηχανής .....	26
2.2.1 Ασύγχρονος κινητήρας τύπου κλωβού .....	28
2.2.2 Ασύγχρονος κινητήρας με δακτυλίδια .....	29
2.2.3 Ασύγχρονοι κινητήρες με δρομέα χωρίς αυλάκια .....	30
2.3 Αρχές λειτουργίας του ασύγχρονου κινητήρα .....	30
2.4 Επαγόμενες τάσεις - Η έννοια της ολισθήσεως .....	31
2.5 Θεμελιώδεις Σχέσεις .....	33
2.5.1 Ηλεκτρικό κύκλωμα του στάτη.....	34
2.5.2 Ηλεκτρικό κύκλωμα του δρομέα .....	35



2.5.3 Μαγνητικό Κύκλωμα .....	35
2.6 Ισοδύναμο κύκλωμα τριφασικού ασύγχρονου κινητήρα στη λειτουργία με φορτίο .....	36
2.7 Ανάλυση του ισοδύναμου κυκλώματος .....	36
2.8 Αρχές ελέγχου ασύγχρονων κινητήρων .....	39
2.8.1 Μεταβολή του αριθμού των μαγνητικών πόλων.....	40
2.8.2 Μεταβολή της τάσεως του στάτη.....	42
2.8.3 Μεταβολή της συχνότητας.....	43
2.8.4 Ρύθμιση στροφών ενός ασύγχρονου κινητήρα με δακτυλιοφόρο δρομέα.....	47
2.9 Κατηγορίες φορτίων ασύγχρονων κινητήρων.....	49
2.9.1 Κατηγορίες επαγωγικών κινητήρων με βάση την τυποποίηση NEMA .....	49
2.9.2 Φορτία σταθερής ροπής .....	50
2.9.3 Φορτία μεταβλητής ροπής.....	52
2.9.4 Φορτία σταθερής ισχύος .....	53
2.10 Χαρακτηριστικά παραδείγματα ομάδων κινητήρων .....	54
2.10.1 Αντλίες .....	54
2.10.2 Κινητήρες Αερίων .....	55
<b>Κεφάλαιο 3 : Συστήματα σφονδύλων (Flywheel Energy Storage System - FESS) .....</b>	<b>59</b>
3.1 Κύρια μέρη ενός Flywheel Energy Storage System - FESS .....	59
3.2 Τεχνικές Βελτιώσεις.....	62
3.3 Αρχή Λειτουργίας .....	63
3.4 Εξισώσεις του συστήματος – Τεχνικά χαρακτηριστικά.....	64
3.5 Κατηγοριοποίηση των σφονδύλων .....	68
3.6 Παράγοντες που επηρεάζουν την απόδοση του FESS .....	68
3.7 Συμβολή των συστημάτων FESS στη βελτίωση των Σ.Η.Ε. ....	70
3.8 Σύγκριση των FESS με άλλα Συστήματα Αποθήκευσης.....	73
3.9 Πλεονεκτήματα – Μειονεκτήματα των συστημάτων FESS .....	76
3.10 Υπάρχουσες Εφαρμογές.....	79
3.10.1 Ηλεκτρικό δίκτυο της California.....	79
3.10.2 Αυτόνομο δίκτυο στα νησιά Flores – Azores .....	84
3.10.3 Ηλεκτρικό δίκτυο του Puerto Rico .....	87
3.11. Μοντελοποίηση συστημάτων σφονδύλων.....	90
3.11.1. Μοντελοποίηση συστήματος σφονδύλου AFS TRINITY M3A .....	90
3.11.2. Μοντελοποίηση συστήματος σφονδύλου Beacon BP 400.....	94
3.11.2.1. Διαγράμματα – Εξισώσεις μοντελοποίησης του BP 400 Modular .....	97

<b>Κεφάλαιο 4 : Πειραματική διαδικασία μελέτης της συμπεριφοράς των επαγωγικών μηχανών στο Simulink .....</b>	<b>100</b>
4.1 Εισαγωγή.....	100
4.2 Βιβλιοθήκες του Simulink.....	100
4.3 Προσομοίωση δικτύου με επαγωγικό τριφασικό κινητήρα .....	101
4.3.1 Περιγραφή.....	101
4.3.2 Βασικά μέρη του συστήματος.....	101
4.3.3 Κατασκευή του μοντέλου προσομοίωσης στο Simulink .....	101
4.3.4 Προσομοίωση με φορτίο μεταβλητής ροπής .....	114
4.3.5 Προσομοίωση με φορτίο σταθερής ροπής.....	114
4.4 Προσομοίωση δικτύου με Field-Oriented Control Induction Motor Drive .....	128
4.4.1 Περιγραφή.....	128
4.4.2 Βασικά μέρη του συστήματος.....	128
4.4.3 Κατασκευή του μοντέλου προσομοίωσης στο Simulink .....	128
4.4.4 Προσομοίωση με φορτίο μεταβλητής ροπής .....	139
4.4.5 Προσομοίωση με φορτίο σταθερής ροπής.....	139
<b>Κεφάλαιο 5 : Προσομοίωση συστήματος αποθήκευσης ενέργειας με σφονδύλους στο Σ.Η.Ε. Κρήτης .....</b>	<b>152</b>
5.1 Εισαγωγή.....	152
5.2 Χρονοσειρά συχνότητας δικτύου και φορτίου στο Σ.Η.Ε. Κρήτης .....	152
5.3 Προσομοίωση δικτύου με συστήματα σφονδύλων .....	156
5.3.1. Αλγόριθμος υπολογισμού μεταβλητών μέσω MATLAB .....	159
5.3.2. Προσομοίωση δικτύου με FESS εκφόρτισης 5 λεπτών .....	162
5.3.3. Προσομοίωση δικτύου με FESS εκφόρτισης 10 λεπτών .....	177
5.4 Σύγκριση χαρακτηριστικών στοιχείων χωρίς FESS και με FESS εκφόρτισης 5 λεπτών και 10 λεπτών.....	192
<b>Κεφάλαιο 6 : Συμπεράσματα – Προοπτικές.....</b>	<b>193</b>
6.1 Συμπεράσματα.....	193
6.2 Προοπτικές.....	197
<b>Βιβλιογραφία .....</b>	<b>198</b>

## Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 1.1: Δομή ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας. ....	3
Σχήμα 1.2: Το σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας της Ελλάδας.....	5
Σχήμα 1.3: Σταθμοί παραγωγής του Σ.Η.Ε. της Κρήτης. ....	7
Σχήμα 1.4: Διάγραμμα μονάδας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. ....	9
Σχήμα 1.5: Διακύμανση συχνότητας με σύστημα σφονδύλου και χωρίς σύστημα σφονδύλου. ...	11
Σχήμα 1.6: Διακύμανση συχνότητας και πραγματικής ισχύος δικτύου Κρήτης στις 06/02/2016.12	
Σχήμα 1.7: Πίτα με το μέσο όρο της μη εξυπηρετούμενης ενέργειας σε MWh ανά συμβάν και είδος μονάδας. ....	15
Σχήμα 1.8: Πίτα με τη κατανομή της μη εξυπηρετούμενης ενέργειας του Σ.Η.Ε. Κρήτης για το 2018. ....	16
Σχήμα 1.9: Πίτα με τα ποσοστά των κατηγοριών βλαβών του Σ.Η.Ε. Κρήτης για το 2018.....	17
Σχήμα 1.10: Πίτα με τα ποσοστά της μη εξυπηρετούμενης ενέργειας ανά εργοστάσιο συμβάντος του Σ.Η.Ε. Κρήτης για το 2018.....	17
Σχήμα 1.11: Πίτα με τα ποσοστά της μη εξυπηρετούμενης ενέργειας ανά είδος μονάδας του Σ.Η.Ε. Κρήτης για το 2018.....	18
Σχήμα 2.1: Σχηματική αναπαράσταση ασύγχρονου κινητήρα.....	25
Σχήμα 2.2: Τύποι αυλακίων.....	26
Σχήμα 2.3: Τρόποι συνδέσεως των 3 φάσεων του στάτη ενός τριφασικού ασύγχρονου κινητήρα. ....	27
Σχήμα 2.4: Τριφασικός ασύγχρονος κινητήρας τύπου κλωβού.....	29
Σχήμα 2.5: Τριφασικός ασύγχρονος κινητήρας με δακτυλίδια.....	29
Σχήμα 2.6: Δρομέας ασύγχρονου κινητήρα με δακτυλίδια.....	30
Σχήμα 2.7: Μαγνητικές ροές του στάτη και του δρομέα ασύγχρονου κινητήρα όταν είναι ακίνητος. ....	31
Σχήμα 2.8: Λειτουργία της επαγωγικής μηχανής σαν γεννήτρια, σαν κινητήρας και σαν πέδη για $s < 0$ , $0 < s < 1$ και $s > 1$ αντίστοιχα.....	32
Σχήμα 2.9: Σχηματική παράσταση τριφασικού ασύγχρονου κινητήρα. ....	34
Σχήμα 2.10: Μονοφασικό κύκλωμα του τριφασικού ασύγχρονου κινητήρα. ....	34
Σχήμα 2.11: Πλήρη ισοδύναμα κυκλώματα μιας φάσεως ασύγχρονου κινητήρα ανηγμένα στον στάτη.....	37
Σχήμα 2.12: Συνδεσμολογία των πηνίων των φάσεων ενός τριφασικού ασύγχρονου κινητήρα με 12 αυλάκια στον στάτη. ....	40
Σχήμα 2.13: Συνδέσεις πηνίων του στάτη, τριών ασύγχρονων κινητήρων με ίδιες χαρακτηριστικές ροπής-ταχύτητας. ....	42

Σχήμα 2.14: Χαρακτηριστικές ροπής-ταχύτητας των τριών ασύγχρονων κινητήρων για διάφορες συνδεσμολογίες των πηνίων των φάσεων του στάτη. ....	42
Σχήμα 2.15: Χαρακτηριστικές $T - n$ για διαφορετικές τιμές της τάσεως του στάτη. ....	43
Σχήμα 2.16: Μετατροπέας με αντιπαράλληλα θυρίστορ για τη ρύθμιση της τάσεως. ....	43
Σχήμα 2.17: Απαιτούμενη μεταβολή στην τάση (Volt) αλλάζοντας τη συχνότητα (Hz), ώστε να διατηρείται σταθερό το μαγνητικό πεδίο στο διάκενο. ....	44
Σχήμα 2.18: Μετατροπέας για τη ρύθμιση της συχνότητας και της τάσεως, όπου $L$ ο συντελεστής αυτεπαγωγής του πηνίου και $C$ η χωρητικότητα του πυκνωτή. ....	44
Σχήμα 2.19: Χαρακτηριστική $T = f(n)$ ενός ασύγχρονου κινητήρα με μεταβολή τάσεως και συχνότητας. ....	45
Σχήμα 2.20: Ρύθμιση ταχύτητας ενός ασύγχρονου κινητήρα μέσω ενός αντιστροφέα με πηγή συνεχούς ρεύματος. ....	46
Σχήμα 2.21: Χαρακτηριστική τάσεως του στάτη. ....	46
Σχήμα 2.22: Χαρακτηριστική τάσεως του στάτη. ....	46
Σχήμα 2.23: Σύστημα ρυθμίσεως των στροφών του ασύγχρονου κινητήρα. ....	47
Σχήμα 2.24: Χαρακτηριστικές $T = f(n)$ για διάφορες τιμές της αντιστάσεως. ....	48
Σχήμα 2.25: Τυπικό σύστημα οδήγησης Kramer. ....	48
Σχήμα 2.26: Τυπικές καμπύλες ταχύτητας - ροπής για διαφορετικούς σχεδιασμούς του ρότορα της μηχανής. ....	49
Σχήμα 2.27: Τυπικό γράφημα φορτίου σταθερής ροπής. ....	51
Σχήμα 2.28: Τυπικό γράφημα φορτίου μεταβλητής ροπής. ....	53
Σχήμα 2.29: Τυπικό γράφημα φορτίου σταθερής ισχύος. ....	54
Σχήμα 3.1: Τα κύρια μέρη ενός συστήματος σφονδύλου [20]. ....	60
Σχήμα 3.2: Κύρια μέρη του συστήματος FESS με κάθετο άξονα περιστροφής [21]. ....	61
Σχήμα 3.3: Κύρια μέρη του συστήματος FESS με οριζόντιο άξονα περιστροφής [21]. ....	61
Σχήμα 3.4: Το σύστημα σφονδύλου EnWheel® της εταιρείας STORNETIC. ....	62
Σχήμα 3.5: Μαγνητικά Ρουλεμάν της εταιρείας Calnetix Technologies LLC. ....	63
Σχήμα 3.6: Μορφή κούφιου σφονδύλου. ....	64
Σχήμα 3.7: Φωτογραφία ενός σφονδύλου 1 kWh με περιστρεφόμενη μάζα κατασκευασμένη από ίνες γραφίτη. ....	67
Σχήμα 3.8: Αλλαγή της τάσεως λειτουργίας της ηλεκτρικής γεννήτριας (Sags και Swells). ....	72
Σχήμα 3.9: Οι κόκκινες περιοχές δείχνουν τα συμπληρώματα ενέργειας που παρέχονται από το σφόνδυλο. ....	72
Σχήμα 3.10: Μέθοδος, εφαρμογές και τεχνολογική ωριμότητα των διαφόρων πηγών αποθήκευσης. ....	74
Σχήμα 3.11: Καταλληλότητα διαφόρων διατάξεων αποθήκευσης ανάλογα με το χρονικό ορίζοντα και την ισχύ τους. ....	74

Σχήμα 3.12: Καταλληλότητα διάφορων συστημάτων αποθήκευσης ως προς την ισχύ και τον χρόνο εκφόρτισης.....	75
Σχήμα 3.13: FESS - Διάταξη FESS σε Container – Επιφάνεια κάλυψης από συστοιχίες FESS [24]. .....	78
Σχήμα 3.14: AFS Trinity M3AM System. ....	80
Σχήμα 3.15: Γεννήτρια – Κινητήρας μόνιμου μαγνήτη, στάτης στον οποίο το τύλιγμα των πηνίων είναι από ειδικό πλεκτό σύρμα Litz (πάνω), ειδική διάταξη μόνιμων μαγνητών – Halbach Array (δεξιά).....	81
Σχήμα 3.16: Το ηλεκτρικό δίκτυο στις νήσους Flores-Azores [25].....	84
Σχήμα 3.17: Η δομή του σφονδύλου (PowerStore) [25].....	85
Σχήμα 3.18: Ο σφόνδυλος εγκατεστημένος σε container [26]. ....	85
Σχήμα 3.19: Η συχνότητα δικτύου σε απότομη αύξηση του φορτίου κατά 350 kW χωρίς FESS [25].....	86
Σχήμα 3.20: Η συχνότητα δικτύου σε απότομη μείωση του φορτίου κατά 350 kW χωρίς FESS [25].....	86
Σχήμα 3.21: Η συχνότητα δικτύου σε απότομη αύξηση του φορτίου κατά 350 kW με FESS [25]. .....	87
Σχήμα 3.22: Η συχνότητα δικτύου σε απότομη μείωση του φορτίου κατά 350 kW με FESS [25]. .....	87
Σχήμα 3.23: Η διάταξη των containers (40 MW για 15 min).....	88
Σχήμα 3.24: Το εσωτερικό κάθε container (250 kWh) [24]. ....	88
Σχήμα 3.25: Ο σφόνδυλος (25 kWh) [24]. ....	89
Σχήμα 3.26: Το εσωτερικό του σφονδύλου (Beacon Power) [24].....	89
Σχήμα 3.27: Διάγραμμα Ισχύος Εξόδου – Χρόνου Εκφόρτισης. ....	90
Σχήμα 3.28: Διάγραμμα Ισχύος Εξόδου – Εξαγόμενης Ενέργειας. ....	91
Σχήμα 3.29: Διάγραμμα Χρόνου Εκφόρτισης – Εξαγόμενης Ενέργειας.....	92
Σχήμα 3.30: Διάγραμμα Ελάχιστων Στροφών – Εξαγόμενης Ενέργειας.....	92
Σχήμα 3.31: Διάγραμμα Ελάχιστων Στροφών – Ισχύος Εξόδου. ....	93
Σχήμα 3.32: Διάγραμμα Ισχύος Εξόδου – Χρόνου Εκφόρτισης. ....	93
Σχήμα 3.33: Διάγραμμα Απόκρισης Συστήματος Σφονδύλου της Beacon Power.....	95
Σχήμα 3.34: Διάγραμμα Ισχύος εξόδου – Χρόνου Εκφόρτισης του Συστήματος Σφονδύλου της Beacon Power (BP-400 Modular).....	96
Σχήμα 3.35: Διάγραμμα Συνολικού Χρόνου Εκφόρτισης – Χρόνου στο πλήρες φορτίο.....	97
Σχήμα 3.36: Διάγραμμα Χρόνου επιμήκυνσης – Χρόνου στο πλήρες φορτίο. ....	98
Σχήμα 3.37: Διάγραμμα Ενέργειας Flywheel – Χρόνου εκφόρτισης υπό ονομαστική ισχύ. ....	98
Σχήμα 3.38: Διάγραμμα Ονομαστικής Ισχύος Εξόδου – Χρόνου Εκφόρτισης. ....	99
Σχήμα 4.1: Το μπλοκ του powergui. ....	102

Σχήμα 4.2: Ρύθμιση του powergui.....	102
Σχήμα 4.3: Το μπλοκ Three-Phase Programmable Voltage Source.....	103
Σχήμα 4.4: Ρυθμίσεις παραμέτρων του μπλοκ Three-Phase Programmable Voltage Source....	103
Σχήμα 4.5: Το μπλοκ Three-Phase $V - I$ Measurement.....	104
Σχήμα 4.6: Ρυθμίσεις παραμέτρων του μπλοκ Three-Phase $V - I$ Measurement.....	105
Σχήμα 4.7: Το μπλοκ Asynchronous Machine SI Units.....	105
Σχήμα 4.8: Ρυθμίσεις παραμέτρων του μπλοκ Asynchronous Machine SI Units (Configuration). .....	106
Σχήμα 4.9: Ρυθμίσεις παραμέτρων του μπλοκ Asynchronous Machine SI Units (Parameters).107	107
Σχήμα 4.10: Το μπλοκ Power (3ph, Instantaneous). ....	107
Σχήμα 4.11: Το μπλοκ PLL (3ph). ....	108
Σχήμα 4.12: Το εσωτερικό διάγραμμα του PLL μπλοκ.....	108
Σχήμα 4.13: Ρυθμίσεις παραμέτρων του μπλοκ PLL (3ph).....	109
Σχήμα 4.14: Το μπλοκ Constant.....	109
Σχήμα 4.15: Το μπλοκ Subsystem.....	110
Σχήμα 4.16: Ρυθμίσεις παραμέτρων του μπλοκ Math Function. ....	110
Σχήμα 4.17: Ρυθμίσεις παραμέτρων του μπλοκ Gain. ....	111
Σχήμα 4.18: Ρυθμίσεις παραμέτρων του μπλοκ Unit Delay. ....	112
Σχήμα 4.19: Το μαθηματικό μοντέλο της φυγοκεντρικής αντλίας. ....	112
Σχήμα 4.20: Το τελικό σύστημα της προσομοίωσης του δικτύου με τον επαγωγικό κινητήρα και τα δυο φορτία του. ....	113
Σχήμα 4.21: Διαγράμματα στροφών, ηλεκτρομαγνητικής ροπής και γωνίας του δρομέα του ασύγχρονου κινητήρα σε σχέση με το χρόνο για φορτίο μεταβλητής ροπής. ....	115
Σχήμα 4.22: Διαγράμματα της μηχανικής ισχύος του ασύγχρονου κινητήρα και της συχνότητας της πηγής τάσεως (δικτύου) σε σχέση με το χρόνο για φορτίο μεταβλητής ροπής. 116	116
Σχήμα 4.23: Διαγράμματα των τριφασικών ρευμάτων του ασύγχρονου κινητήρα του στάτη και του δρομέα σε σχέση με το χρόνο για φορτίο μεταβλητής ροπής. ....	117
Σχήμα 4.24: Διαγράμματα της μηχανικής ροπής του ασύγχρονου κινητήρα και της συχνότητας της πηγής τάσεως (δικτύου) σε σχέση με το χρόνο για φορτίο μεταβλητής ροπής. 118	118
Σχήμα 4.25: Γραφήματα $P_{ηλ}$ , $P_{μηχ}$ και $Q_{ηλ}$ σε σχέση με τη συχνότητα του δικτύου για φορτίο μεταβλητής ροπής.....	120
Σχήμα 4.26: Διαγράμματα στροφών, ηλεκτρομαγνητικής ροπής και γωνίας του δρομέα του ασύγχρονου κινητήρα σε σχέση με το χρόνο για φορτίο σταθερής ροπής. ....	121
Σχήμα 4.27: Διαγράμματα της μηχανικής ισχύος του ασύγχρονου κινητήρα και της συχνότητας της πηγής τάσεως (δικτύου) σε σχέση με το χρόνο για φορτίο σταθερής ροπής.....	122
Σχήμα 4.28: Διαγράμματα των τριφασικών ρευμάτων του ασύγχρονου κινητήρα του στάτη και του δρομέα σε σχέση με το χρόνο για φορτίο σταθερής ροπής. ....	123

Σχήμα 4.29: Διαγράμματα της μηχανικής ροπής του ασύγχρονου κινητήρα και της συχνότητας της πηγής τάσεως (δικτύου) σε σχέση με το χρόνο για φορτίο σταθερής ροπής.....	124
Σχήμα 4.30: Γραφήματα $P_{ηλ}$ , $P_{μηχ}$ και $Q_{ηλ}$ σε σχέση με τη συχνότητα του δικτύου για φορτίο σταθερής ροπής.....	126
Σχήμα 4.31: Γραφήματα ποσοστιαίας μεταβολής της ηλεκτρικής ισχύος δικτύου σε σχέση με τη συχνότητα δικτύου (Induction Motor).....	127
Σχήμα 4.32: Ρύθμιση του powergui.....	129
Σχήμα 4.33: Ρυθμίσεις παραμέτρων του μπλοκ Three-Phase Programmable Voltage Source..	129
Σχήμα 4.34: Το μπλοκ Three-Phase Series RLC Branch. ....	130
Σχήμα 4.35: Ρυθμίσεις παραμέτρων του μπλοκ Three-Phase Series RLC Branch.....	131
Σχήμα 4.36: Το μπλοκ Power (PLL-Driven, Positive-Sequence). ....	131
Σχήμα 4.37: Ρυθμίσεις παραμέτρων του μπλοκ Power (PLL-Driven, Positive-Sequence).....	132
Σχήμα 4.38: Επιμέρους στοιχεία του FOC.....	133
Σχήμα 4.39: Το μπλοκ Field-Oriented Control Induction Motor Drive.....	134
Σχήμα 4.40: Ρυθμίσεις παραμέτρων του μπλοκ Field-Oriented Control Induction Motor Drive (Asynchronous Machine). ....	135
Σχήμα 4.41: Ρυθμίσεις παραμέτρων του μπλοκ Field-Oriented Control Induction Motor Drive (Asynchronous Machine). ....	135
Σχήμα 4.42: Ρυθμίσεις παραμέτρων του μπλοκ Field-Oriented Control Induction Motor Drive (Converts and DC bus).....	136
Σχήμα 4.43: Ρυθμίσεις παραμέτρων του μπλοκ Field-Oriented Control Induction Motor Drive (Controller).....	136
Σχήμα 4.44: Ρυθμίσεις παραμέτρων του μπλοκ Step.....	137
Σχήμα 4.45: Το τελικό σύστημα της προσομοίωσης του δικτύου με το Field-Oriented Control Induction Motor Drive και τα δυο φορτία του.....	138
Σχήμα 4.46: Διαγράμματα στροφών, ηλεκτρομαγνητικής ροπής και γωνίας του δρομέα του ασύγχρονου κινητήρα σε σχέση με το χρόνο για φορτίο μεταβλητής ροπής. ....	140
Σχήμα 4.47: Διαγράμματα της μηχανικής ισχύος του συστήματος FOC και της συχνότητας της πηγής τάσεως (δικτύου) σε σχέση με το χρόνο για φορτίο μεταβλητής ροπής. ....	141
Σχήμα 4.48: Διαγράμματα της μηχανικής ροπής του συστήματος FOC και της συχνότητας της πηγής τάσεως (δικτύου) σε σχέση με το χρόνο για φορτίο μεταβλητής ροπής. ....	142
Σχήμα 4.49: (α) Ρεύμα του ανορθωτή [A], (β) Ρεύμα πυκνωτή εξομάλυνσης (DC Bus) [A], (γ) Τάση πυκνωτή εξομάλυνσης (DC Bus) [V].....	143
Σχήμα 4.50: Γραφήματα $P_{ηλ}$ , $P_{μηχ}$ και $Q_{ηλ}$ σε σχέση με τη συχνότητα του δικτύου για φορτίο μεταβλητής ροπής.....	145
Σχήμα 4.51: Διαγράμματα στροφών, ηλεκτρομαγνητικής ροπής και γωνίας του δρομέα του ασύγχρονου κινητήρα σε σχέση με το χρόνο για φορτίο σταθερής ροπής. ....	146

Σχήμα 4.52: Διαγράμματα της μηχανικής ισχύος του συστήματος FOC και της συχνότητας της πηγής τάσεως (δικτύου) σε σχέση με το χρόνο για φορτίο σταθερής ροπής.....	147
Σχήμα 4.53: Διαγράμματα της μηχανικής ροπής του συστήματος FOC και της συχνότητας της πηγής τάσεως (δικτύου) σε σχέση με το χρόνο για φορτίο σταθερής ροπής.....	148
Σχήμα 4.54: Γραφήματα $P_{ηλ}$ , $P_{μηχ}$ και $Q_{ηλ}$ σε σχέση με τη συχνότητα του δικτύου για φορτίο σταθερής ροπής.....	150
Σχήμα 4.55: Γραφήματα ποσοστιαίας μεταβολής της ηλεκτρικής ισχύος δικτύου σε σχέση με τη συχνότητα δικτύου (FOC Drive). .....	151
Σχήμα 5.1: Διάγραμμα μεταβολής της συχνότητας.....	154
Σχήμα 5.2: Διάγραμμα του φορτίου στο Δίκτυο.....	155
Σχήμα 5.3: Διάγραμμα ισχύος εξόδου – χρόνου, για $T_1 = 15 \text{ min}$ με πλήρη ταχύτητα.....	161
Σχήμα 5.4: Διάγραμμα μεταβολής της συχνότητας του δικτύου πριν και μετά την ενεργοποίηση της 1 <sup>ης</sup> σειράς των σφονδύλων.....	166
Σχήμα 5.5: Διάγραμμα μεταβολής του φορτίου πριν και μετά την ενεργοποίηση της 1 <sup>ης</sup> σειράς των σφονδύλων.....	167
Σχήμα 5.6: Διάγραμμα μείωσης του φορτίου, όσο διαρκεί η εκφόρτιση της 1 <sup>ης</sup> σειράς των σφονδύλων.....	168
Σχήμα 5.7: Διάγραμμα μεταβολής της συχνότητας του δικτύου πριν και μετά την ενεργοποίηση της 2 <sup>ης</sup> σειράς των σφονδύλων.....	173
Σχήμα 5.8: Διάγραμμα μεταβολής του φορτίου πριν και μετά την ενεργοποίηση της 2 <sup>ης</sup> σειράς των σφονδύλων.....	174
Σχήμα 5.9: Διάγραμμα μείωσης του φορτίου, όσο διαρκεί η εκφόρτιση της 2 <sup>ης</sup> σειράς των σφονδύλων.....	175
Σχήμα 5.10: Διάγραμμα μεταβολής της συχνότητας του δικτύου πριν και μετά την ενεργοποίηση της 1 <sup>ης</sup> σειράς των σφονδύλων.....	181
Σχήμα 5.11: Διάγραμμα μεταβολής του φορτίου πριν και μετά την ενεργοποίηση της 1 <sup>ης</sup> σειράς των σφονδύλων.....	182
Σχήμα 5.12: Διάγραμμα μείωσης του φορτίου, όσο διαρκεί η εκφόρτιση της 1 <sup>ης</sup> σειράς των σφονδύλων.....	183
Σχήμα 5.13: Διάγραμμα μεταβολής της συχνότητας του δικτύου πριν και μετά την ενεργοποίηση της 2 <sup>ης</sup> σειράς των σφονδύλων.....	188
Σχήμα 5.14: Διάγραμμα μεταβολής του φορτίου πριν και μετά την ενεργοποίηση της 2 <sup>ης</sup> σειράς των σφονδύλων.....	189
Σχήμα 5.15: Διάγραμμα μείωσης του φορτίου, όσο διαρκεί η εκφόρτιση της 2 <sup>ης</sup> σειράς των σφονδύλων.....	190



## Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1.1: Ετήσιες απώλειες ηλεκτρικής ενέργειας του Σ.Η.Ε. Κρήτης για το 2018 λόγω υποσυχνότητας του δικτύου.....	14
Πίνακας 1.2: Ετήσιες κατηγορίες διακοπών της ηλεκτρικής ενέργειας του Σ.Η.Ε. Κρήτης για το 2018. ....	15
Πίνακας 1.3: Ετήσιες κατηγορίες των βλαβών και των απωλειών ηλεκτρικής ενέργειας του Σ.Η.Ε. Κρήτης για το 2018.....	16
Πίνακας 1.4: Ετήσιες καταναλώσεις των δήμων Κρήτης και των αντλιοστασίων τους για το 2017. ....	19
Πίνακας 1.5: Ετήσιες καταναλώσεις νομών για το 2017.....	19
Πίνακας 1.6: Ετήσιες ποσοστιαίες καταναλώσεις νομών για το 2017 συνολικά και για τα αγροτικά τιμολόγια.....	19
Πίνακας 1.7: Η συνολική εγκατεστημένη ισχύς στα Αντλιοστάσια του Ο.Α.ΔΥ.Κ. [10].....	20
Πίνακας 1.8: Εγκατεστημένη ισχύς αντλιών στους Δήμους Μοιρών, Τυμπακίου και Κόφωνα... ..	20
Πίνακας 1.9: Εγκατεστημένη ισχύς αντλιών στο Δήμο Ιεράπετρας. ....	20
Πίνακας 1.10: Συνολική εγκατεστημένη ισχύς για αρδευτικά δίκτυα στο Νοτιοανατολικό Ηράκλειο.....	21
Πίνακας 2.1: Τυπικές αντλίες και τύποι φορτίου [16].....	55
Πίνακας 2.2: Τυπικοί κινητήρες αερίου και τύποι φορτίου [16].....	56
Πίνακας 2.3: Χαρακτηριστικά εφαρμογής για τα διαφορετικά είδη φορτίου [17]. ....	57
Πίνακας 2.4: Εικόνες από διαφορετικές εφαρμογές των κινητήρων.....	58
Πίνακας 3.1: Τιμές συντελεστή $K$ ανάλογα με τη γεωμετρία του σφονδύλου [22].....	66
Πίνακας 3.2: Μορφές μετατροπής ηλεκτρικής ενέργειας και αντιπροσωπευτικές διατάξεις αυτών. ....	73
Πίνακας 3.3: Χρόνος εκφόρτισης έναντι Ισχύος εξόδου. ....	91
Πίνακας 3.4: Χαρακτηριστικά στοιχεία συστήματος σφονδύλου της Beacon Power. ....	94
Πίνακας 3.5: Τυπικές τιμές διαφόρων χαρακτηριστικών του Συστήματος Σφονδύλου της Beacon Power (BP-400 Modular). ....	96
Πίνακας 3.6: Αποτελέσματα ισχύς εξόδου ανάλογα με το χρόνο εκφόρτισης Beacon Power (BP-400 Modular).....	99
Πίνακας 4.1: Βιβλιοθήκες που χρησιμοποιήθηκαν στις προσομοιώσεις του Simulink.....	100
Πίνακας 4.2: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα της προσομοίωσης με φορτίο μεταβλητής ροπής. ....	119
Πίνακας 4.3: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα της προσομοίωσης με φορτίο σταθερής ροπής. ..	125
Πίνακας 4.4: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα της προσομοίωσης με φορτίο μεταβλητής ροπής. ....	144

Πίνακας 4.5: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα της προσομοίωσης με φορτίο σταθερής ροπής. ..	149
Πίνακας 5.1: Χρονοσειρά συχνότητας δικτύου και φορτίου. ....	153
Πίνακας 5.2: Αποτελέσματα προσομοίωσης για $T_1 = 15 \text{ min}$ . ....	160
Πίνακας 5.3: Διαμόρφωση συχνότητας δικτύου και φορτίου μετά την ενεργοποίηση της 1 <sup>ης</sup> σειράς σφονδύλων. ....	165
Πίνακας 5.4: Διαμόρφωση συχνότητας δικτύου και φορτίου μετά την ενεργοποίηση της 2 <sup>ης</sup> σειράς σφονδύλων. ....	172
Πίνακας 5.5: Συγκεντρωτικός πίνακας 1 <sup>ης</sup> προσομοίωσης. ....	176
Πίνακας 5.6: Διαμόρφωση συχνότητας δικτύου και φορτίου μετά την ενεργοποίηση της 1 <sup>ης</sup> σειράς σφονδύλων. ....	180
Πίνακας 5.7: Διαμόρφωση συχνότητας δικτύου και φορτίου μετά την ενεργοποίηση της 2 <sup>ης</sup> σειράς σφονδύλων. ....	187
Πίνακας 5.8: Συγκεντρωτικός πίνακας 2 <sup>ης</sup> προσομοίωσης. ....	191
Πίνακας 5.9: Συγκριτικός Πίνακας χαρακτηριστικών στοιχείων με και χωρίς Flywheel. ....	192

## Συντομογραφίες

Σ.Η.Ε.	Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας
Α.Η.Σ.	Ατμοηλεκτρικός Σταθμός
Υ.Η.Σ.	Υδροηλεκτρικός Σταθμός
Π.Σ.	Πυρηνικός Σταθμός
Μ.Τ.	Μέση Τάση
Χ.Τ.	Χαμηλή Τάση
Α.Π.Ε.	Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας
Ε.Δ.Σ.	Εθνικό Διασυνδεδεμένο Σύστημα
Δ.Ε.Η.	Δημόσια Επιχείρηση Ηλεκτρισμού
Δ.Ε.Δ.Δ.Η.Ε.	Διαχειριστής Ελληνικού Δικτύου Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας
Α.Δ.Μ.Η.Ε.	Ανεξάρτητος Διαχειριστής Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας
Ο.Α.ΔΥ.Κ.	Οργανισμός Ανάπτυξης Δυτικής Κρήτης
Δ.Ε.Υ.Α.	Δημοτική Επιχείρηση Ύδρευσης και Αποχέτευσης
FESS	Flywheel Energy Storage System
EPS	Electrical Power System
RES	Renewable Energy System
PLL	Phase Lock Loop
FOC	Field-Oriented Control
PWM	Pulse-width modulation

# Κεφάλαιο 1 : Εισαγωγή στο αντικείμενο της μεταπτυχιακής διατριβής

## 1.1. Βασικές λειτουργίες του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας

Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας (Σ.Η.Ε.) είναι το σύνολο των εγκαταστάσεων (γεννήτριες, μετασχηματιστές, γραμμές μεταφοράς, διακόπτες, διατάξεις αντιστάθμισης) που χρησιμοποιούνται για να τροφοδοτηθεί με ηλεκτρική ενέργεια ένα σύνολο καταναλωτών. Για να φέρει σε πέρας αυτήν την αποστολή, το σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας διαθέτει:

- Σταθμούς παραγωγής, εγκατεστημένους στις πιο πρόσφορες προς τούτο περιοχές, όπου παράγεται η ηλεκτρική ενέργεια σε επαρκείς ποσότητες.
- Γραμμές μεταφοράς, που χρησιμοποιούνται για τη μεταφορά μεγάλων ποσοτήτων ηλεκτρικής ενέργειας από τους σταθμούς παραγωγής στα κέντρα κατανάλωσης.
- Δίκτυο διανομής, για τη διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας στους επιμέρους καταναλωτές, ώστε να χρησιμοποιηθεί από αυτούς μετατρέπόμενη σε άλλες πιο εξυπηρετικές μορφές, όπως φως, θερμότητα, κίνηση, ήχο, κ.λπ..

Παραδοσιακά τρεις είναι οι βασικές λειτουργίες που συνιστούν τη συνολική λειτουργία ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας: η παραγωγή, η μεταφορά και η διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας [1].

Η παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας γίνεται στους σταθμούς παραγωγής, οι οποίοι, ανάλογα με την πηγή πρωτογενούς ενέργειας που χρησιμοποιούν, διακρίνονται σε ατμοηλεκτρικούς (Α.Η.Σ.), υδροηλεκτρικούς (Υ.Η.Σ.) και πυρηνικούς (Π.Σ.), αλλά και από σταθμούς διεσπαρμένης παραγωγής από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Στους ατμοηλεκτρικούς σταθμούς μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια η χημική ενέργεια που είναι αποθηκευμένη στο καύσιμο (κάρβουνο, λιγνίτη, φυσικό αέριο, πετρέλαιο). Με την καύση του καυσίμου απελευθερώνεται θερμική ενέργεια, που χρησιμοποιείται για την παραγωγή ατμού στο λέβητα. Ο ατμός διοχετεύεται στον αμοστρόβιλο, όπου παρέχει μέρος της ενέργειάς του σε μηχανική μορφή. Ο στρόβιλος με τη σειρά του περιστρέφει τη γεννήτρια, όπου η μηχανική ενέργεια μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια.

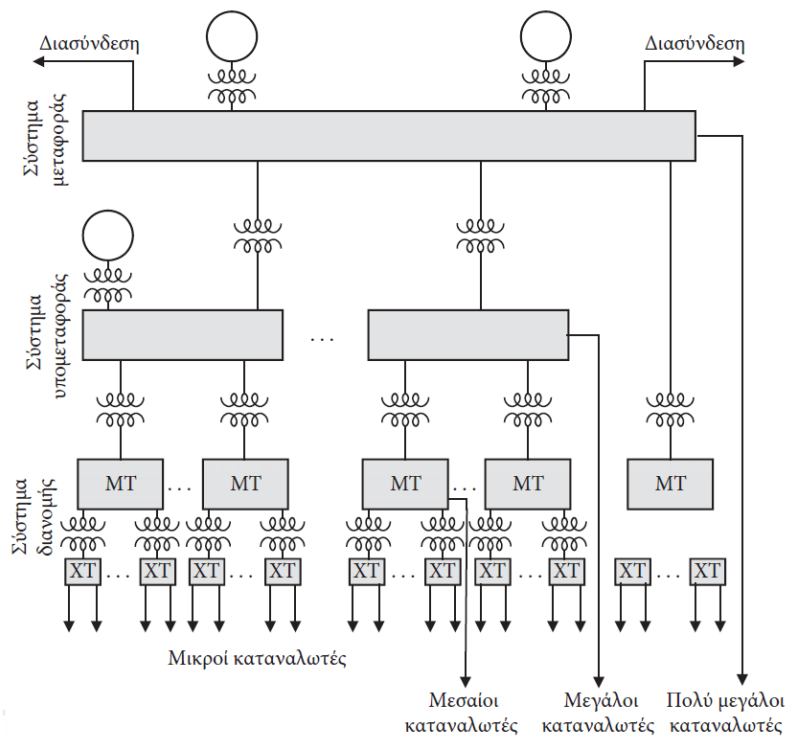
Πρακτικά το σύνολο σχεδόν της παραγόμενης σήμερα ηλεκτρικής ενέργειας λαμβάνεται από περιστρεφόμενες γεννήτριες (ισχύος από  $100\text{ kW}$  μέχρι πάνω από  $1.300\text{ MW}$  και τάσης λειτουργίας από  $480\text{ V}$  μέχρι  $25\text{ kV}$ ), οπότε το τελευταίο βήμα της μετατροπής ενέργειας που λαμβάνει χώρα σε σταθμούς παραγωγής είναι από μηχανική σε ηλεκτρική ενέργεια. Ακόμη, όποτε παρίσταται η ανάγκη μεταφοράς της ηλεκτρικής ενέργειας σε μεγάλες αποστάσεις αυτή γίνεται μέσω των γραμμών μεταφοράς, που μπορεί να είναι εναέριες ή σπανιότερα υπόγειες. Επειδή, όπως θα δούμε αργότερα, το επίπεδο τάσης των γραμμών μεταφοράς καθορίζει το όριο της ηλεκτρικής ενέργειας που μπορούν αυτές να μεταφέρουν, η επίτευξη υψηλών τάσεων μεταφοράς έκανε δυνατή τη μεταφορά μεγάλων ποσοτήτων ηλεκτρικής ενέργειας σε μεγάλες αποστάσεις. Ανάλογα με το επίπεδο της τάσης μεταφοράς επιτυγχάνονται ικανότητες των γραμμών μεταφοράς που εκτείνονται από  $100\text{ MW}$  μέχρι και πάνω από  $4.000\text{ MW}$ . Τέλος, η διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας μέχρι και τον πιο απομακρυσμένο μικρό ή μεσαίο καταναλωτή γίνεται με ένα πυκνό δίκτυο διανομής μέσης και χαμηλής τάσης.

## 1.2. Δομή συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας

Και το μικρότερο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας είναι ένα δίκτυο με πολύ μεγάλη πολυπλοκότητα. Ο παράγοντας που κυρίως καθορίζει τη δομή του είναι το μέγεθός του. Άλλη είναι η δομή ενός μεγάλου συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας που εξυπηρετεί μία εκτεταμένη γεωγραφική περιοχή και άλλη η δομή ενός μικρού συστήματος που εξυπηρετεί μία μικρή περιοχή. Δεν υπάρχουν γενικοί κανόνες όσον αφορά τον τρόπο δόμησης ενός συστήματος που να εφαρμόζονται σε όλα τα συστήματα. Το κάθε σύστημα δομείται με βάση τις ιδιαιτερότητες που καλείται να εξυπηρετήσει. Όλα τα συστήματα, όμως, παρουσιάζουν την εξής ομοιότητα: εργάζονται σε διάφορα επίπεδα τάσης που χωρίζονται μεταξύ τους με μετασχηματιστές. Είναι κοινή πρακτική να διαιρούμε, με βάση την τάση λειτουργίας, το σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας σε τρία υποσυστήματα [2]. Ξεκινώντας από το χαμηλότερο επίπεδο τάσης, διακρίνουμε τα εξής υποσυστήματα:

- Σύστημα διανομής.
- Σύστημα υπομεταφοράς.
- Σύστημα μεταφοράς.

Στο Σχήμα 1.1 φαίνεται ο τρόπος με τον οποίο δομείται ένα τυπικό σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας.



Σχήμα 1.1: Δομή ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας.

Στο σύστημα διανομής χρησιμοποιούνται δύο επίπεδα τάσης διανομής:

- α) Η πρωτεύουσα τάση ή τάση τροφοδοσίας (6,6 kV, 15 kV, 20 kV, 22 kV) που χαρακτηρίζεται και μέση τάση (Μ.Τ.). Σχεδιάζεται, όμως, όλα τα δίκτυα μέσης τάσης της χώρας μας να μετατραπούν σε δίκτυα των 20 kV.
- β) Η δευτερεύουσα τάση ή τάση κατανάλωσης (400 V πολική και 230 V φασική) που χαρακτηρίζεται και χαμηλή τάση (Χ.Τ.).

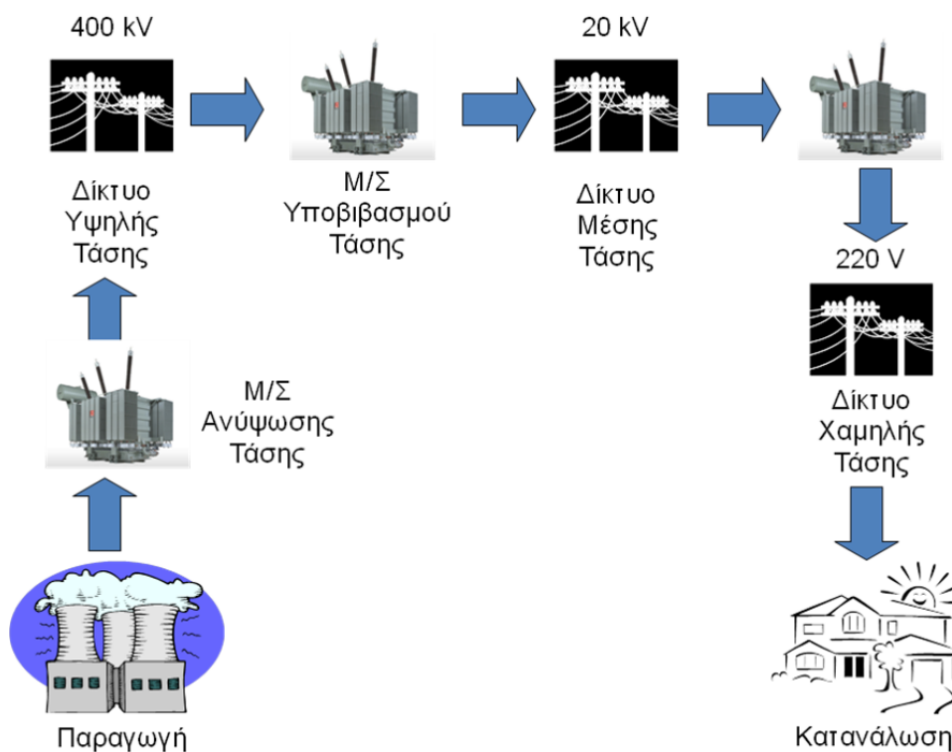
Το σύστημα διανομής περιλαμβάνει τα δίκτυα διανομής μέσης και χαμηλής τάσης και τους μετασχηματιστές διανομής με τους οποίους η μέση τάση υποβιβάζεται σε χαμηλή τάση. Το σύστημα διανομής τροφοδοτείται από τους υποσταθμούς διανομής (όπου η τάση υποβιβάζεται στην τιμή της μέσης τάσης διανομής) και παρέχει ηλεκτρική ενέργεια σε μικρούς οικιακούς καταναλωτές (υπό τη χαμηλή τάση διανομής) και σε μεσαίου μεγέθους καταναλωτές (υπό τη μέση τάση διανομής) [2].

Το σύστημα υπομεταφοράς διανέμει ηλεκτρική ενέργεια σε έναν αριθμό υποσταθμών διανομής που βρίσκονται σε κάποια γεωγραφική περιοχή σε ένα επίπεδο τάσης που τυπικά κυμαίνεται μεταξύ 23 kV και 150 kV. Αυτό δέχεται την ενέργεια είτε κατευθείαν από σταθμούς παραγωγής είτε από το σύστημα μεταφοράς μέσω υποσταθμών (ζεύξεως ή/και μετασχηματισμού). Μεγάλοι καταναλωτές είναι δυνατόν να εξυπηρετηθούν κατευθείαν από το σύστημα υπομεταφοράς. Ο ρόλος ενός συστήματος υπομεταφοράς είναι κυρίως ο ίδιος με εκείνον ενός συστήματος διανομής με μόνη τη διαφορά ότι αυτό εξυπηρετεί μία μεγαλύτερη γεωγραφική περιοχή και διανέμει ενέργεια σε μεγαλύτερα επίπεδα τάσης και ισχύος.

Το σύστημα μεταφοράς δέχεται την ενέργεια κατευθείαν από σταθμούς παραγωγής μέσω μετασχηματιστών ανύψωσης της τάσης και είναι δυνατόν να εξυπηρετεί κατευθείαν πολύ μεγάλους καταναλωτές και να ανταλλάσσει, μέσω διασυνδεδετικών γραμμών, ενέργεια με άλλα γειτονικά ενεργειακά συστήματα. Η βασική διαφορά στο σκοπό που εξυπηρετεί το σύστημα μεταφοράς, συγκρινόμενο με τα συστήματα διανομής και υπομεταφοράς, φαίνεται στον τρόπο δόμησης των δικτύων. Ενώ τα δύο τελευταία έχουν γενικά (όχι όμως πάντοτε) ακτινική δομή, επειδή σκοπεύουν στο να διοχετεύουν την ηλεκτρική ενέργεια σε συγκεκριμένες κατευθύνσεις, το σύστημα μεταφοράς έχει δομή βρόγχου και συνεπώς είναι σε θέση να διοχετεύει την ενέργεια σε μεγαλύτερο συνδυασμό κατευθύνσεων και να εξυπηρετεί έτσι καλύτερα το σκοπό της μεταφοράς.

### 1.2.1 Το σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας στην Ελλάδα

Σε κάθε χώρα είναι δυνατόν να υπάρχουν πολλά ξεχωριστά συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας. Σήμερα, κάθε χώρα έχει προχωρήσει στην ενοποίηση των Σ.Η.Ε. που διαθέτει. Το ενιαίο αυτό σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας κάθε χώρας, ονομάζεται Εθνικό Διασυνδεδεμένο Σύστημα. Η εξέλιξη της τεχνολογίας υπήρξε καταλυτική για την ενοποίηση των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας, καθώς επέτρεψε την εγκατάσταση σταθμών παραγωγής μεγάλης ισχύος και τη μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας σε μεγάλες αποστάσεις [2]. Το Ε.Δ.Σ. αποτελείται από το σύνολο των γεννητριών των σταθμών παραγωγής, των δικτύων των γραμμών μεταφοράς υψηλής και υπερυψηλής τάσης, των γραμμών διανομής μέσης και χαμηλής τάσης, καθώς και των υποσταθμών ανύψωσης και υποβιβασμού της τάσης (βλ. Σχήμα 1.2).



Σχήμα 1.2: Το σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας της Ελλάδας.

Στην Ελλάδα το αποκλειστικό δικαίωμα της παραγωγής, μεταφοράς και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας είχε εκχωρηθεί από το 1950 στη Δημόσια Επιχείρηση Ηλεκτρισμού, που καλύπτει σήμερα τις ανάγκες σε ηλεκτρική ενέργεια του μεγαλύτερου συνόλου του πληθυσμού της χώρας.



Η Δ.Ε.Η. διαθέτει μια μεγάλη υποδομή σε εγκαταστάσεις ορυχείων λιγνίτη, παραγωγής και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας. Η εγκατεστημένη ισχύς των σταθμών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας που διαθέτει ανέρχεται σε 11,6 GW και αντιπροσωπεύει περίπου το 55% της εγκατεστημένης ισχύος των σταθμών ηλεκτροπαραγωγής στην Ελλάδα. Το ενεργειακό της μείγμα περιλαμβάνει λιγνιτικούς, υδροηλεκτρικούς και πετρελαϊκούς σταθμούς, καθώς και σταθμούς φυσικού αερίου, αλλά και εγκαταστάσεις ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Μέσω της θυγατρικής της εταιρίας Δ.Ε.Δ.Δ.Η.Ε., είναι ο διαχειριστής του δικτύου διανομής ηλεκτρικής ενέργειας Μέσης & Χαμηλής Τάσης, μήκους περίπου 240.000 χιλιομέτρων και Υψηλής Τάσης μήκους περίπου 1.000 χιλιομέτρων [3].

Στο Σύστημα Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας της ηπειρωτικής Ελλάδας είναι συνδεδεμένα τα νησιά του Ιονίου, καθώς και ορισμένα νησιά του Αιγαίου και μαζί με το σύστημα αυτό αποτελούν το «Διασυνδεδεμένο Σύστημα». Στο Διασυνδεδεμένο Σύστημα, περίπου το ένα τρίτο της παραγωγικής ισχύος της Δ.Ε.Η. είναι συγκεντρωμένο στο βορειοδυτικό τμήμα της χώρας, κοντά στα μεγάλα λιγνιτωρυχεία.

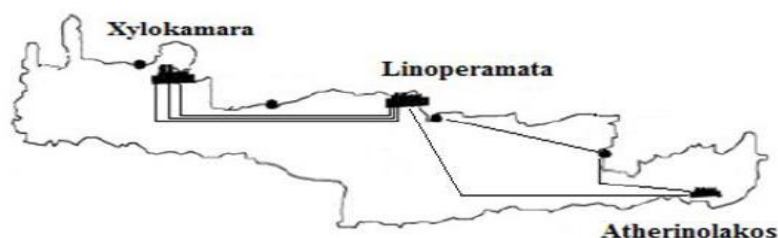
Τα υπόλοιπα νησιά, τα οποία αναφέρονται ως «Μη Διασυνδεδεμένα Νησιά», εξυπηρετούνται από αυτόνομους σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, οι οποίοι λειτουργούν με πετρέλαιο. Συμπληρωματικά, στα περισσότερα από αυτά τα νησιά η ζήτηση καλύπτεται πλέον και από Α.Π.Ε. Οι μεγαλύτεροι σταθμοί παραγωγής στα Μη Διασυνδεδεμένα Νησιά βρίσκονται στην Κρήτη και τη Ρόδο (με συνολική ισχύ θερμικών σταθμών μεγαλύτερη των 1.150 MW). Στη Κρήτη έχει ολοκληρωθεί η πρώτη φάση της «μικρής» διασύνδεσης (150 kV AC 1x200 MVA & 2x200 MVA) Κρήτης και Πελοποννήσου με το ηπειρωτικό σύστημα και αναμένεται μέχρι το 2023 να γίνει και η «μεγάλη» διασύνδεση Κρήτης – Αττικής (500 kV DC 2x350 MW & 2x500 MW) [4].

Οι σταθμοί παραγωγής παράγουν την ηλεκτρική ενέργεια με τάση 15 kV ή 20 kV. Η τάση αυτή είναι πολύ χαμηλή για να μεταφερθεί η ηλεκτρική ενέργεια σε μεγάλες αποστάσεις. Έτσι, η τάση ανυψώνεται στα 150 kV (υψηλή) ή 400 kV (υπερυψηλή) και μεταφέρεται προς τα μεγάλα κέντρα κατανάλωσης. Η ηλεκτρική ενέργεια διανέμεται με μέση τάση στους μεγάλους καταναλωτές (π.χ. βιομηχανίες), ενώ στους μικρούς (σπίτια, καταστήματα κ.λπ.) με χαμηλή τάση (230/400 V). Έτσι, προκύπτει η ανάγκη και άλλων μετασχηματισμών από υψηλή ή υπερυψηλή τάση σε μέση και, στη συνέχεια, από μέση σε χαμηλή. Όλα τα παραπάνω γίνονται στους υποσταθμούς [1].

Το διασυνδεδεμένο σύστημα μεταφοράς διαθέτει επιπλέον γραμμές των 400 kV, καθώς επίσης εναέριες, υπόγειες γραμμές και υποβρύχια καλώδια υψηλής τάσης (150 kV) που συνδέουν τα νησιά της Δυτικής Ελλάδας, Κέρκυρα, Λευκάδα, Κεφαλονιά και Ζάκυνθο με το διασυνδεδεμένο σύστημα μεταφοράς, καθώς και μία υποβρύχια διασύνδεση της Κέρκυρας με την Ηγουμενίτσα στα 66 kV. Η λειτουργία του διασυνδεδεμένου συστήματος μεταφοράς, καθώς και των διασυνδέσεων με τα γειτονικά δίκτυα γίνεται από τον Α.Δ.Μ.Η.Ε. Η Ελλάδα είναι μέλος της Union for Coordination of Transmission of Electricity και το διασυνδεδεμένο σύστημά της λειτουργεί σύγχρονα και παράλληλα με το υπόλοιπο διευρωπαϊκό σύστημα μεταφοράς. Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι η Ελλάδα μπορεί να προμηθεύεται ηλεκτρική ενέργεια από την υπόλοιπη Ευρώπη, όταν οι ανάγκες το επιβάλλουν.

### 1.2.2 Το Σ.Η.Ε. Κρήτης και ιδιαιτερότητες νησιωτικών δικτύων

Το ηλεκτρικό σύστημα της Κρήτης αποτελεί το μεγαλύτερο μη διασυνδεδεμένο σύστημα της Ελλάδας, γεγονός που καθιστά την Κρήτη, λόγω της γεωγραφικής της θέσης, ηλεκτρικά αυτόνομη. Το σύστημα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας της Κρήτης στηρίζεται κατά κύριο λόγο στις θερμικές μονάδες που το συγκροτούν και κατά δεύτερο στις Α.Π.Ε. (κυρίως αιολικά πάρκα και φωτοβολταϊκές μονάδες). Το 2018 το 78,9% της συνολικής παραγωγής προήλθε από τις συμβατικές μονάδες του νησιού [5]. Ωστόσο, υπάρχει ένας μεγάλος αριθμός συμβατικών μονάδων με διαφορετικές τεχνολογίες και χαρακτηριστικά, ανάλογα με τις απαιτήσεις του συστήματος. Στο σύστημα της Κρήτης, υπάρχουν τέσσερα είδη συμβατικών μονάδων τις οποίες διαχειρίζεται αποκλειστικά η Δ.Ε.Η.: αμμοστροβιλικές μονάδες, μηχανές εσωτερικής καύσης (Diesel), αεριοστροβιλικές μονάδες καθώς και μία μονάδα συνδυασμένου κύκλου, οι οποίες βρίσκονται εγκατεστημένες στους τρεις σταθμούς παραγωγής του Σ.Η.Ε. της Κρήτης όπως εκείνοι απεικονίζονται στο Σχήμα 1.3 [6].



Σχήμα 1.3: Σταθμοί παραγωγής του Σ.Η.Ε. της Κρήτης.

Η συνολική εγκατεστημένη ισχύς από θερμικές μονάδες στο Σ.Η.Ε. της Κρήτης ανέρχεται στα 803,1 MW. Στον σταθμό της Ξυλοκαμάρας στα Χανιά, συγκεντρώνεται η μεγαλύτερη εγκατεστημένη ισχύ από θερμικές μονάδες ίση με 329 MW, ενώ διαθέτει την μοναδική μονάδα συνδυασμένου κύκλου (132,3 MW) του Σ.Η.Ε. της Κρήτης. Το δυναμικό του σταθμού συμπληρώνουν πέντε επιπλέον αεριοστροβιλικές μονάδες συνολικής ισχύος 196,7 MW. Ο σταθμός των Λινοπεραμάτων αποτελείται από έξι ατμοστρόβιλους, τέσσερις μονάδες Diesel και πέντε αεριοστρόβιλους συνολικής εγκατεστημένη ισχύος 278,9 MW. Τέλος, ο σταθμός παραγωγής του Αθρινόλακκου στη Σητεία, αποτελείται από δύο μονάδες Diesel και δύο ατμοστρόβιλους συνολικής ισχύος 195,2 MW.

Συνήθως, οι ατμοστροβιλικές μονάδες, αποτελούν τις μονάδες βάσης, οι μονάδες εσωτερικής καύσης καθώς και οι μονάδες συνδυασμένου κύκλου θεωρούνται μονάδες ενδιάμεσου φορτίου, ενώ οι αεριοστροβιλικές είναι μονάδες αιχμής. Η μονάδα που "ακολουθεί το φορτίο", ρυθμίζοντας πρώτη την παραγωγή της, συνήθως είναι η μονάδα συνδυασμένου κύκλου, ακολουθούμενη από αεριοστροβιλικές μονάδες του σταθμού. Οι ατμοστρόβιλοι καθώς και οι μονάδες Diesel καταναλώνουν μαζούτ, μια πιο φθηνή απόσταξη πετρελαίου (Diesel), το οποίο καταναλώνουν αντίστοιχα οι αεριοστρόβιλοι και η μονάδα συνδυασμένου κύκλου [6].

### 1.2.2.1 Ιδιαιτερότητες νησιωτικών δικτύων

Τέλος, τα κυριότερα προβλήματα που σχετίζονται με τη λειτουργία των νησιωτικών δικτύων γενικότερα είναι:

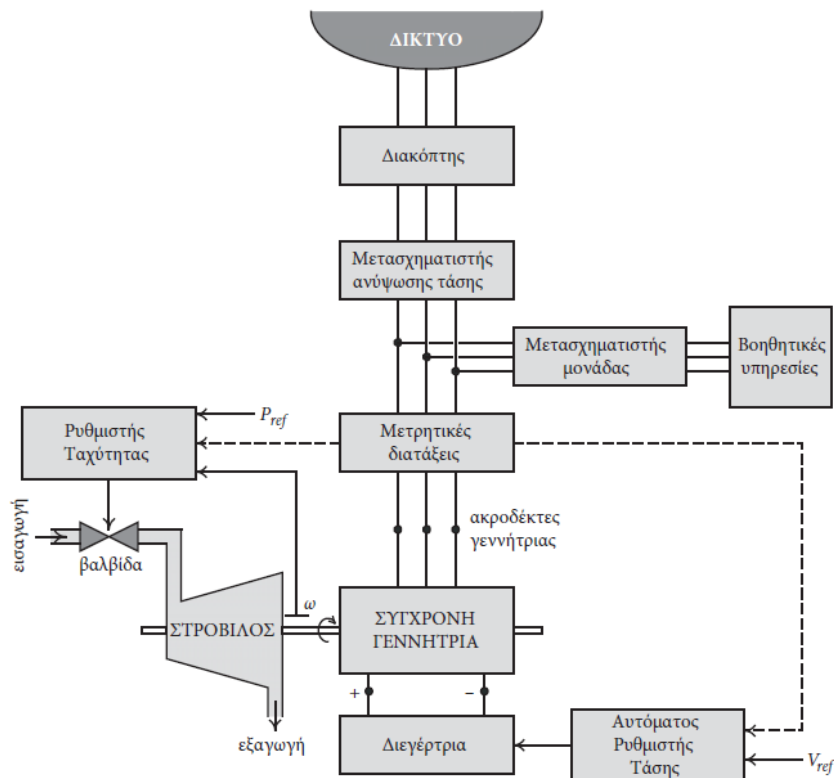
- α) Απαίτηση για διατήρηση περισσότερης στρεφόμενης εφεδρείας.
- β) Υψηλό κόστος στρεφόμενης εφεδρείας.
- γ) Μεγάλο μέγεθος μονάδων παραγωγής, συγκρινόμενο με το φορτίο του συστήματος.
- δ) Μεγάλες διακυμάνσεις στη συχνότητα, εξαιτίας της χαμηλής αδράνειας του συστήματος.
- ε) Μεγάλες διακυμάνσεις στην τάση, εξαιτίας της χαμηλής ισχύος βραχυκύκλωσης.
- στ) Μεγάλη επίδραση των κυμαινόμενων φορτίων στην ποιότητα της παρεχόμενης ενέργειας.
- ζ) Υψηλό κόστος παραγωγής.
- η) Συγκέντρωση της παραγωγής σε λίγες εγκαταστάσεις με επιπτώσεις στην ασφάλεια του συστήματος.
- θ) Οριακή ευστάθεια του συστήματος.

- ι) Υψηλοί ρυθμοί αύξησης της ζήτησης και αυξημένοι περιβαλλοντικοί περιορισμοί στην ανάπτυξη νέων έργων παραγωγής και μεταφοράς.

### 1.3. Ευστάθεια συχνότητας και έλεγχος παραγωγής

#### 1.3.1 Έλεγχος Παραγωγής

Η τυπική δομή μιας μονάδας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας φαίνεται σχηματικά στο διάγραμμα του Σχήματος 1.4. Ο στρόβιλος είναι εφοδιασμένος με ρυθμιστή που ελέγχει τη ταχύτητα περιστροφής ή την ισχύ εξόδου σύμφωνα με κάποια προκαθορισμένη χαρακτηριστική ισχύος – συχνότητας. Η παραγόμενη ισχύς παρέχεται στο δίκτυο μέσω ενός μετασχηματιστή ανύψωσης τάσης. Το συνεχές ρεύμα διέγερσης, που απαιτείται για να παραχθεί το μαγνητικό πεδίο εντός της γεννήτριας, παρέχεται από μια διεγέρτρια μηχανή. Το ρεύμα διέγερσης, και συνεπώς η τερματική τάση της γεννήτριας, ελέγχονται από έναν αυτόματο ρυθμιστή τάσης. Ο μετασχηματιστής μονάδας τροφοδοτεί τα βοηθητικά φορτία του σταθμού παραγωγής, όπως κινητήρες, αντλίες, φωτισμό, κ.λπ.

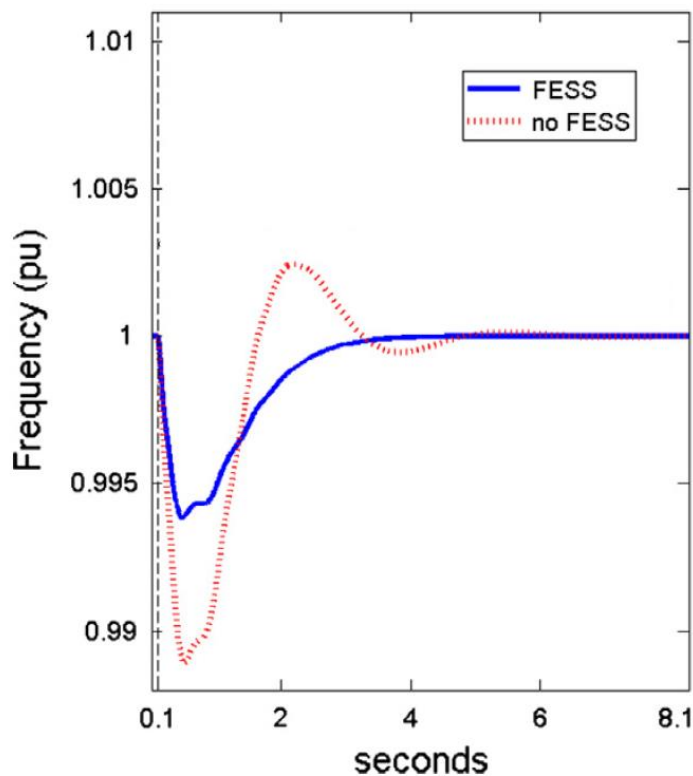


Σχήμα 1.4: Διάγραμμα μονάδας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.

Σε ένα αυτόνομο σύστημα που τροφοδοτείται από μία και μόνο γεννήτρια η συχνότητα εξαρτάται αποκλειστικά από την ταχύτητα περιστροφής της γεννήτριας και άρα από το ρυθμιστή στροφών της. Σε ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας που περιλαμβάνει περισσότερες από μία γεννήτριες οι ρόλοι των ρυθμιστών στροφών διαφοροποιούνται: κάποιες γεννήτριες αναλαμβάνουν να διατηρούν σταθερή τη συχνότητα, η οποία είναι κοινή για ολόκληρο το σύστημα. Αυτές είναι οι ρυθμιζουσες μονάδες. Στις υπόλοιπες ο ρυθμιστής χρησιμοποιείται κυρίως για να κρατά σταθερή την παραγωγή της γεννήτριας στην επιθυμητή τιμή, η οποία έχει προκύψει σύμφωνα με κάποια λογική κατανομής του συνολικού φορτίου του συστήματος. Συνεπώς, ο έλεγχος της συχνότητας και ο έλεγχος του φορτίου κάθε γεννήτριας αποτελούν ένα ενιαίο πρόβλημα ελέγχου. Επίσης, η συχνότητα της τάσης του δικτύου επιβάλλεται να είναι η ίδια σε όλο το σύστημα. Η διατήρηση της εξαρτάται από το ισοζύγιο ενεργού ισχύος της παραγωγής και της κατανάλωσης. Οι σύγχρονες γεννήτριες παρέχουν τη δυνατότητα να ανταποκρίνονται άμεσα στις ταχείες και βραδείες μεταβολές του φορτίου που έχουν αναλάβει να εξυπηρετούν μέσω ενός αυτόματου συστήματος ελέγχου κλειστού βρόχου, τον ρυθμιστή στροφών, ο οποίος, επιταχύνοντας ή επιβραδύνοντας την γεννήτρια, επιτυγχάνει την έξοδο της απαιτούμενης ισχύος.

### **1.3.2 Ευστάθεια Συχνότητας**

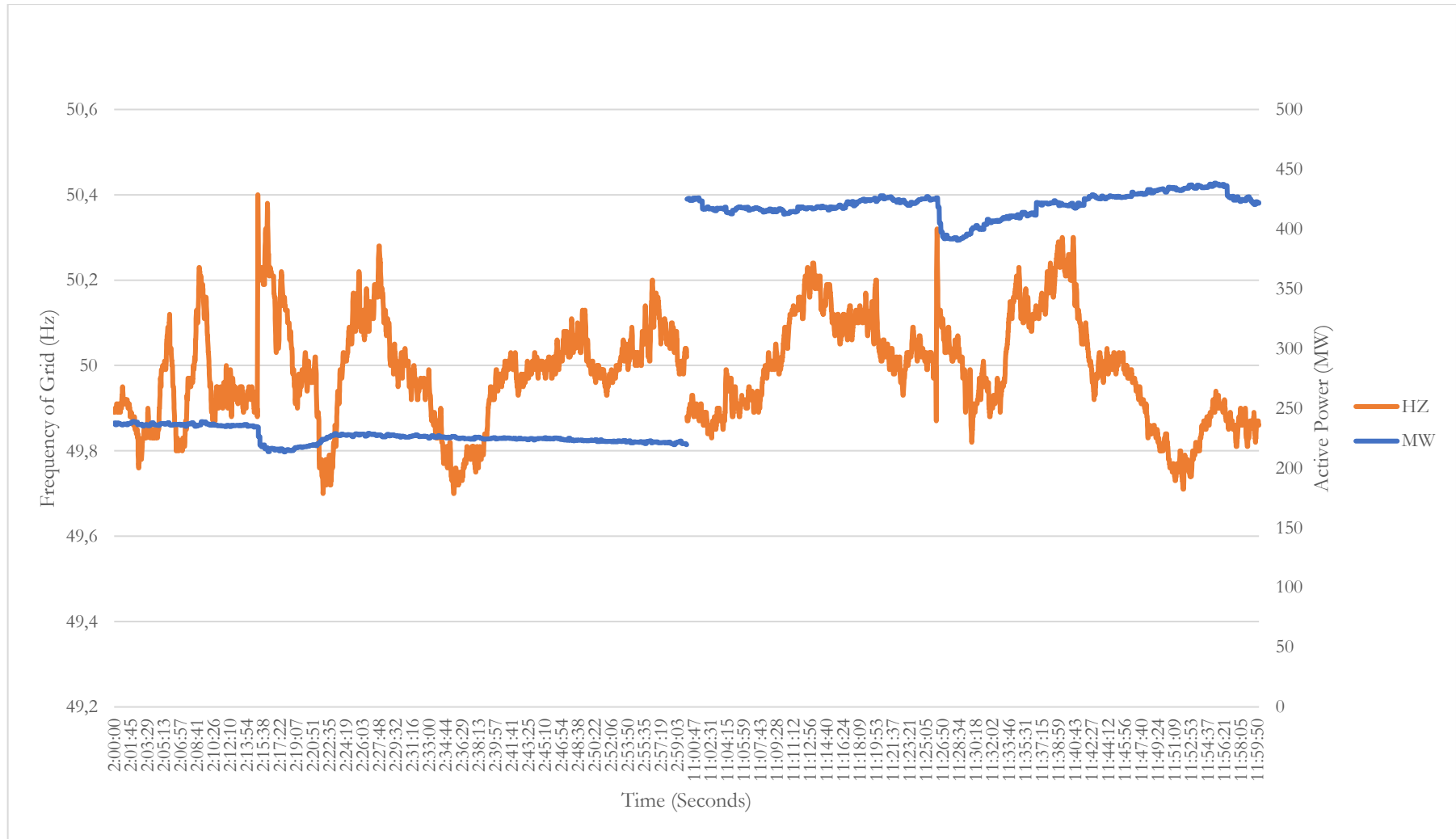
Η ευστάθεια συχνότητας αναφέρεται στην ικανότητα ενός Σ.Η.Ε. να διατηρεί τη συχνότητά του εντός ενός προκαθορισμένου εύρους τιμών μετά από μία διαταραχή. Η συχνότητα στα ηλεκτρικά συστήματα αποτελεί έναν δείκτη της ισορροπίας μεταξύ παραγωγής και κατανάλωσης και κατά τη διάρκεια της κανονικής τους λειτουργίας πρέπει να είναι σταθερή και κοντά στις προκαθορισμένες τιμές. Στην Ευρώπη η συχνότητα είναι συνήθως  $50 \pm 0,1$  Hz και πέφτει ή ανεβαίνει αντίστοιχα στα 49-50.3 Hz πολύ σπάνια. Ειδικότερα, η ευστάθεια συχνότητας εξαρτάται από την ικανότητα του συστήματος να διατηρεί ή να επαναφέρει το ισοζύγιο μεταξύ παραγωγής και ζήτησης με τη μικρότερη δυνατή απόρριψη φορτίου. Στην περίπτωση αυτή, μία πιθανή αστάθεια εκδηλώνεται με τη μορφή συνεχών ταλαντώσεων στην τιμή της συχνότητας, οι οποίες μπορεί να οδηγήσουν στη διαδοχική αποκοπή μονάδων παραγωγής και φορτίων μέχρι ακόμα και την ολική σβέση του συστήματος [1].



**Σχήμα 1.5:** Διακύμανση συχνότητας με σύστημα σφονδύλου και χωρίς σύστημα σφονδύλου.

Γενικά, όσο αυξάνει το μέγεθος ενός απομονωμένου ενεργειακού συστήματος, η ασφάλειά του εξαρτάται από τη λειτουργία ενός συνόλου γεννητριών. Συνήθως, σε μεγάλα απομονωμένα ενεργειακά συστήματα, η λειτουργία κάποιων γεννητριών αποσκοπεί στη ρύθμιση της συχνότητας, ενώ η λειτουργία κάποιων άλλων γεννητριών παρακολουθεί τις μεταβολές του φορτίου. Πρακτικά τα προβλήματα ισχύος που μπορούν να προκαλέσουν σοβαρά προβλήματα στη δυναμική ισορροπία ενός Σ.Η.Ε. είναι η εμφάνιση υπότασης και υποσυχνότητας. Η υπόταση και η υποσυχνότητα μπορεί να είναι συνέπεια κάποιας ξαφνικής αύξησης φορτίου, ή κάποιας ξαφνικής απώλειας παραγωγής, λόγω βλάβης κάποιας γεννήτριας ενταγμένης στην παραγωγή [7], [8]. Η αντίδραση του συστήματος παραγωγής κατά την εμφάνιση ενός τέτοιου συμβάντος εξαρτάται από:

- το ποσοστό στιγμιαίας διείσδυσης μονάδων μη εγγυημένης ισχύος στην παραγωγή
- τα χαρακτηριστικά των διαθέσιμων θερμοηλεκτρικών μηχανών, ειδικότερα δε, τους ρυθμούς απόκρισής τους σε ταχείς μεταβολές του φορτίου
- το ποσοστό επί του φορτίου και το είδος της στρεφόμενης εφεδρείας
- τα όρια ανοχής σε διαταραχές τάσης και συχνότητας των ενταγμένων μονάδων παραγωγής



Σχήμα 1.6: Διακύμανση συχνότητας και πραγματικής ισχύος δικτύου Κρήτης στις 06/02/2016.

Τα θεωρητικά ενδεχόμενα στην περίπτωση εμφάνισης υπότασης ή υποσυχνότητας σε ένα Σ.Η.Ε. είναι τα εξής:

- Το σύστημα αντιμετωπίζει το πρόβλημα επιτυχώς χωρίς διακοπή τροφοδοσίας ισχύος. Η περίπτωση αυτή μπορεί να συμβεί, όταν η διαταραχή δεν είναι έντονη, όταν υπάρχει διαθεσιμότητα γεννητριών με γρήγορη απόκριση ή όταν διατηρείται ικανή στρεφόμενη εφεδρεία.
- Το σύστημα αντιμετωπίζει τη διαταραχή με μερική διακοπή τροφοδοσίας ισχύος σε περιορισμένους καταναλωτές. Στην περίπτωση αυτή οι διαθέσιμες γεννήτριες, ή η στρεφόμενη εφεδρεία, δεν είναι σε θέση να αντιμετωπίσουν την ξαφνική αύξηση φορτίου ή την απώλεια παραγωγής. Οι διατάξεις προστασίας δικτύου αποκόπτουν την παροχή ισχύος σε κάποιο τμήμα καταναλωτών, έως ότου η δυναμική ισορροπία αποκατασταθεί στο υπόλοιπο δίκτυο. Η παροχή στο αποκομμένο τμήμα αποκαθίσταται εφόσον προκύψει η απαιτούμενη παραγωγή ισχύος από νέες γεννήτριες.
- Το σύστημα καταρρέει (black-out). Η περίπτωση αυτή προκύπτει, συνήθως, μετά από σοβαρά σφάλματα που θέτουν εκτός παραγωγής γεννήτριες με μεγάλη ποσοστιαία παραγωγή ισχύος τη στιγμή του συμβάντος. Η κατάρρευση επέρχεται κυρίως λόγω αλυσιδωτών απωλειών παραγωγής από γεννήτριες που τίθενται εκτός λειτουργίας μετά από ενεργοποίηση των προστατευτικών διατάξεών τους (generators' tripping). Οι απώλειες παραγωγής ξεκινούν από τις περισσότερο ευαίσθητες μηχανές στις μεταβολές των βασικών χαρακτηριστικών του δικτύου (τάση, συχνότητα), οι οποίες σειριακά συμπαρασύρουν και τις υπόλοιπες.



## 1.4. Προβλήματα στις μεταβολές συχνότητας του δικτύου

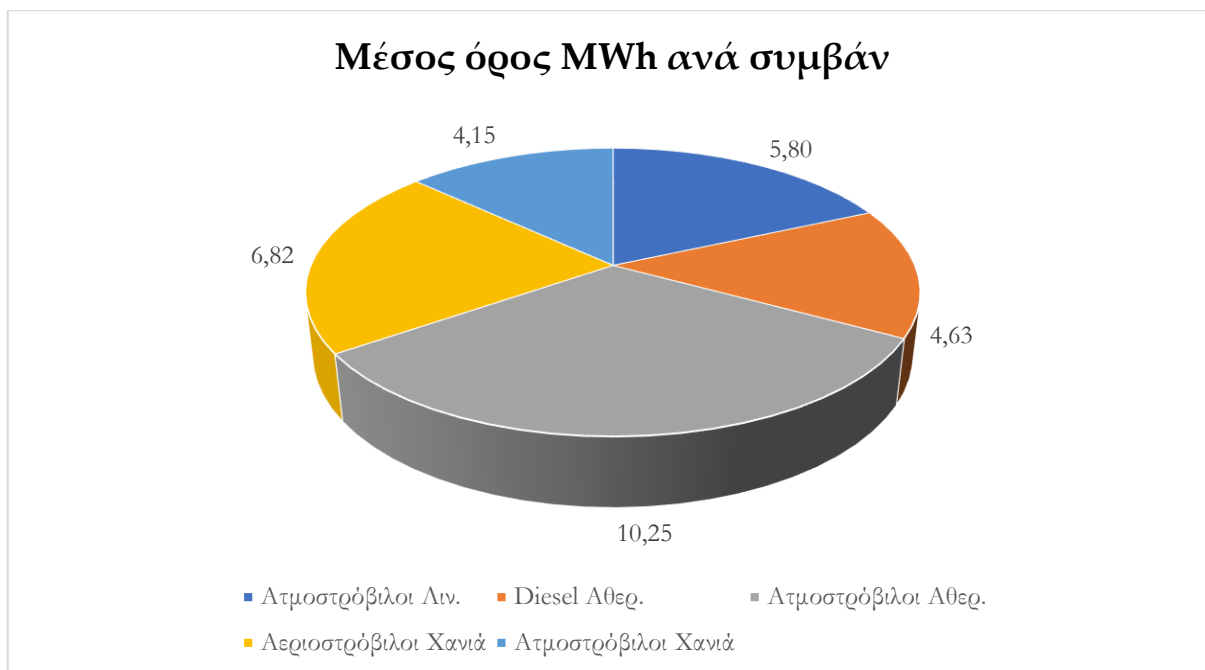
Σε αυτή την ενότητα, θα εξετασθεί το πρόβλημα της υποσυχνότητας του δικτύου του Σ.Η.Ε. Κρήτης και το ρόλο που να διαδραματίζουν τα αρδευτικά αντλιοστάσια σε αυτό.

### 1.4.1 Προβλήματα στην ευστάθεια του δικτύου λόγω υποσυχνότητας

Το Σ.Η.Ε. της Κρήτης όπως και προαναφέρθηκε, μέχρι τα τέλη του 2020 δεν ήταν διασυνδεδεμένο με το ηπειρωτικό σύστημα. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα αρκετές φορές μέσα σε κάθε έτος να υπάρχουν αρκετές μεταβολές στη συχνότητα του δικτύου του νησιού. Παρακάτω, παρουσιάζεται ο Πίνακας 1.1, που καταγράφονται όλες οι απώλειες ενέργειας του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας Κρήτης λόγω υποσυχνοτήτων για το έτος 2018 [5].

Απώλειες Σ.Η.Ε. Κρήτης 2018 λόγω υποσυχνότητας			
Ημερομηνία	Ηλεκτρική Ενέργεια (MWh)	Συχνότητα Δικτύου (Hz)	Μονάδα
13/3/2018	6,58	49,7	ATM No 1 ΑΘΕΡ.
18/3/2018	2,45	49,7	ATM No 1 ΑΘΕΡ.
14/4/2018	0,82	49,6	ATM No 1 ΑΘΕΡ.
1/5/2018	2,85	49,6	Diesel No 1 ΑΘΕΡ.
3/5/2018	2,20	49,7	Diesel No 1 ΑΘΕΡ.
7/5/2018	78,73	49,7	ATM No 1 ΑΘΕΡ.
29/5/2018	4,70	49,7	ATM No 1 ΑΘΕΡ.
31/5/2018	5,80	49,7	ATM No 5 ΑΙΝ.
6/6/2018	12,57	49,12	ΑΕΡ. No 11 & 12 ΧΑΝ.
14/6/2018	1,06	49,3	ΑΕΡ No 12 ΧΑΝ.
15/6/2018	0,50	49,2	ATM No 1 ΧΑΝ.
23/6/2018	0,30	49,3	DIESEL No 2 ΑΘΕΡ.
13/7/2018	6,97	49,4	ATM No 2 ΑΘΕΡ.
26/7/2018	0,70	49,6	ATM No 2 ΑΘΕΡ.
21/8/2018	0,70	49,3	ATM No 1 ΑΘΕΡ.
21/8/2018	1,40	49,2	ATM No 2 ΑΘΕΡ.
1/10/2018	16,94	49,2	Diesel No 1 ΑΘΕΡ.
24/10/2018	8,68	49,2	ATM No 2 ΑΘΕΡ.
29/10/2018	1,29	49,7	DIESEL No 2 ΑΘΕΡ.
29/10/2018	4,20	49,6	DIESEL No 2 ΑΘΕΡ.
23/11/2018	7,80	49,4	ΑΕΡ No 6 ΧΑΝ. & ATM No 1 ΧΑΝ.
25/11/2018	1,03	49,2	ATM No 2 ΑΘΕΡ.
<b>Ετήσιο Σύνολο :</b>	<b>168,27</b>		

**Πίνακας 1.1:** Ετήσιες απώλειες ηλεκτρικής ενέργειας του Σ.Η.Ε. Κρήτης για το 2018 λόγω υποσυχνότητας του δικτύου.

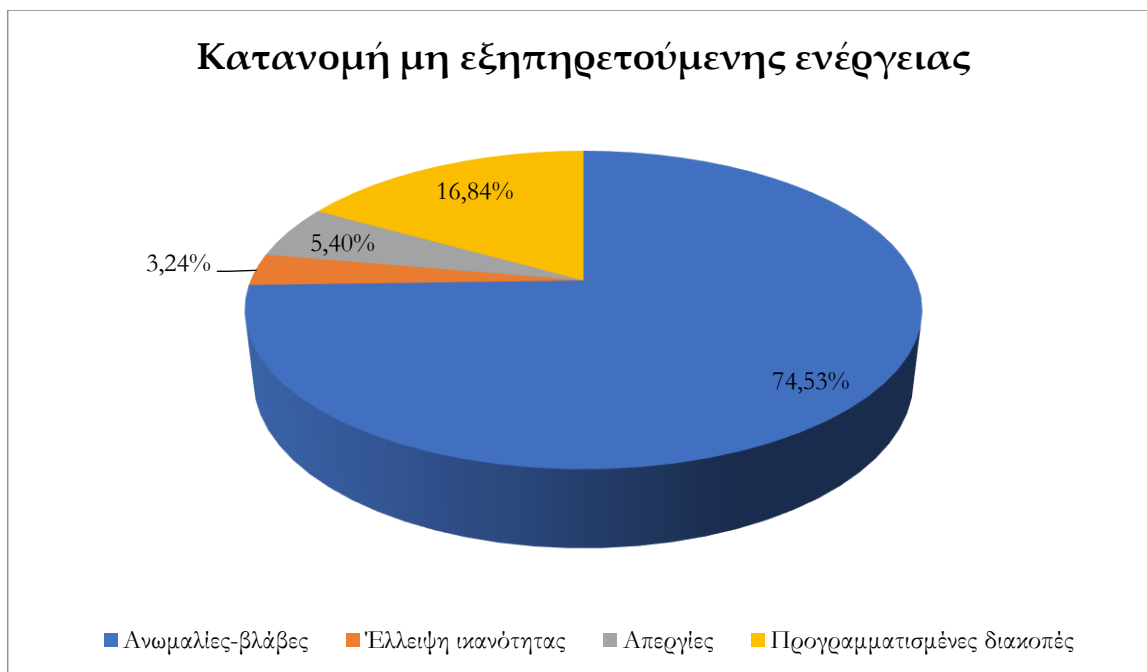


**Σχήμα 1.7:** Πίτα με το μέσο όρο της μη εξυπηρετούμενης ενέργειας σε MWh ανά συμβάν και είδος μονάδας.

Παρακάτω, στον Πίνακα 1.2 καταγράφονται οι κατηγορίες των διακοπών στο Σ.Η.Ε. Κρήτης:

Κατηγορίες Διακοπών	MWh
Ανωμαλίες-βλάβες	409,9
Έλλειψη ικανότητας	17,8
Απεργίες	29,7
Προγραμματισμένες διακοπές	92,6
<b>Σύνολο</b>	<b>550</b>

**Πίνακας 1.2:** Ετήσιες κατηγορίες διακοπών της ηλεκτρικής ενέργειας του Σ.Η.Ε. Κρήτης για το 2018.



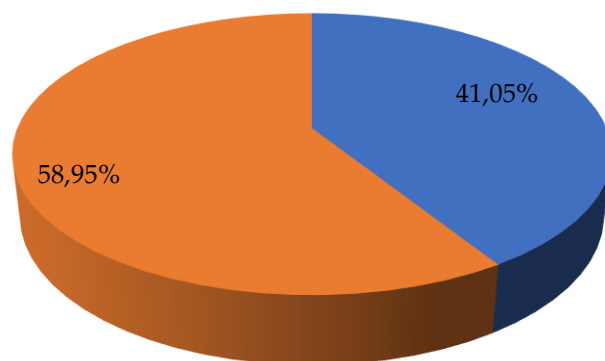
**Σχήμα 1.8:** Πίτα με τη κατανομή της μη εξυπηρετούμενης ενέργειας του Σ.Η.Ε. Κρήτης για το 2018.

Από αυτές τις διακοπές, ένα ποσοστό ήταν όπως προαναφέρθηκε και παραπάνω λόγω των υποσυχνοτήτων του δικτύου. Συνολικά, από τα 51 συμβάντα ανωμαλιών – βλαβών, τα 22 οφείλονταν στην υποσυχνότητα. Στον Πίνακα 1.3, καταγράφεται αναλυτικά η ενέργεια που χάθηκε λόγω της υποσυχνότητας και λόγω άλλων βλαβών επί του συνόλου.

<b>Ανωμαλίες - Βλάβες :</b>	409,9	MWh
<b>Απωλεσθείσα Ηλεκτρική Ενέργεια λόγω Υποσυχνότητας</b>	168,27	MWh
<b>Λοιπές Απώλειες Ηλεκτρικής Ενέργειας</b>	241,63	MWh
<b>Ποσοστό επί του Σύνολου (%) :</b>	<b>41,05%</b>	

**Πίνακας 1.3:** Ετήσιες κατηγορίες των βλαβών και των απωλειών ηλεκτρικής ενέργειας του Σ.Η.Ε. Κρήτης για το 2018.

### Ποσοστό Απωλειών λόγω Υποσυχνότητας

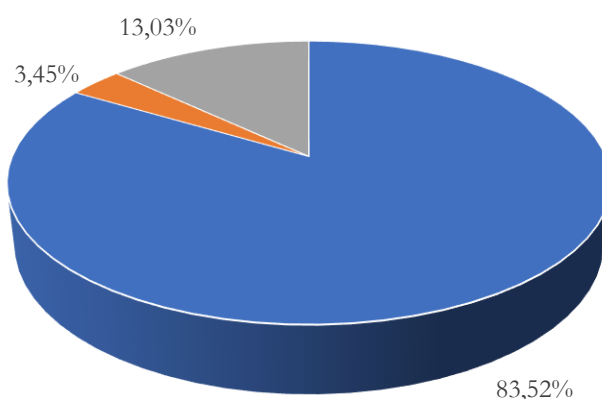


- Απωλεσθείσα Ηλεκτρική Ενέργεια λόγω Υποσυχνότητας
- Λοιπές Απώλειες Ηλεκτρικής Ενέργειας

**Σχήμα 1.9:** Πίτα με τα ποσοστά των κατηγοριών βλαβών του Σ.Η.Ε. Κρήτης για το 2018.

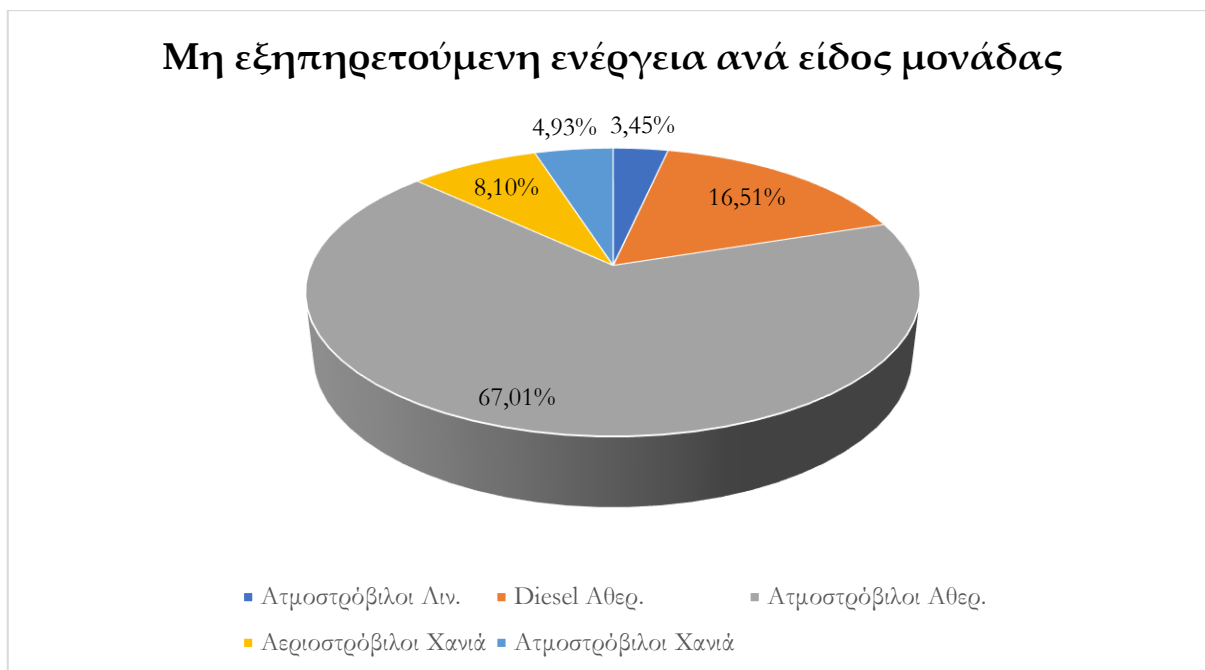
Παρατηρείται λοιπόν, ότι ένα μεγάλο ποσοστό από τις βλάβες οφείλεται σε διακυμάνσεις της συχνότητας του ηλεκτρικού δικτύου.

### Μη εξυπηρετούμενη ενέργεια ανά εργοστάσιο συμβάντος



- Αθερμολακκίος
- Λινοπεράματα
- Χανιά

**Σχήμα 1.10:** Πίτα με τα ποσοστά της μη εξυπηρετούμενης ενέργειας ανά εργοστάσιο συμβάντος του Σ.Η.Ε. Κρήτης για το 2018.



**Σχήμα 1.11:** Πίτα με τα ποσοστά της μη εξυπηρετούμενης ενέργειας ανά είδος μονάδας του Σ.Η.Ε. Κρήτης για το 2018.

#### 1.4.2 Στοιχεία για αντλητικά συγκροτήματα

Αρχικά, ένα πολύ μεγάλο μέρος του πληθυσμού της Κρήτης, ασχολείται επαγγελματικά με αγροτικές και κτηνοτροφικές εργασίες. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την ύπαρξη ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας για την εξυπηρέτηση αυτών των καταναλωτών. Ένα μεγάλο ποσοστό της ηλεκτρικής ενέργειας αυτών των καταναλωτών, χρησιμοποιείται για την άρδευση και την ύδρευση του νερού, καλύπτοντας τις ανάγκες των εργασιών τους. Παρακάτω σε αυτήν την υποενότητα παρουσιάζονται τα στοιχεία μερικών αντλιοστασίων του νησιού [9]–[11].

Ενδεικτικά στον Πίνακα 1.4, παρουσιάζονται οι ετήσιες καταναλώσεις των δήμων για το έτος 2017 συνολικά, αλλά και για τα αγροτικά τιμολόγια.

ΝΟΜΟΙ	ΔΗΜΟΙ	ΕΤΗΣΙΑ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ 2017 (MWh)	ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ ΑΝΑ ΕΙΔΟΣ ΤΙΜΟΛΟΓΙΟΥ 2017 (MWh) - Αγροτικά Τιμολόγια	Ποσοστό (%)
ΝΟΜΟΣ ΗΡΑΚΛΕΙΟΥ	ΗΡΑΚΛΕΙΟΥ	24.391,0	3.121,7	12,80%
	ΜΙΝΩΑ ΠΕΔΙΑΔΟΣ	5.323,3	3.675,7	69,05%
	ΑΡΧΑΝΩΝ ΑΣΤΕΡΟΥΣΙΩΝ	11.846,4	3.887,2	32,81%
	ΒΙΑΝΝΟΥ	9.050,7	6.737,4	74,44%
	ΦΑΙΣΤΟΥ	11.685,2	6.444,3	55,15%
	ΓΟΡΤΥΝΑΣ	7.161,8	2.480,3	34,63%
	ΧΕΡΣΟΝΗΣΟΥ	8.078,9	3.309,4	40,96%
	ΜΑΛΕΒΙΖΙΟΥ	2.350,0	72,4	3,08%
ΝΟΜΟΣ ΡΕΘΥΜΝΗΣ	ΑΝΩΓΕΙΩΝ	441,4	0,0	0,00%
	ΡΕΘΥΜΝΟΥ	6.342,1	92,8	1,46%
	ΑΜΑΡΙΟΥ	1.786,7	279,5	15,64%
	ΑΓΙΟΥ ΒΑΣΙΛΕΙΟΥ	3.459,3	1.030,5	29,79%
	ΜΥΛΟΠΟΤΑΜΟΥ	8.435,0	3.005,2	35,63%
ΝΟΜΟΣ ΛΑΣΙΘΙΟΥ	ΟΡΟΠΕΔΙΟΥ	793,1	0,0	0,00%
	ΑΓΙΟΥ ΝΙΚΟΛΑΟΥ	6.184,3	1.107,6	17,91%
	ΣΗΤΕΙΑΣ	12.423,7	5.289,8	42,58%
	ΙΕΡΑΠΕΤΡΑΣ	9.597,4	2.343,8	24,42%
ΝΟΜΟΣ ΧΑΝΙΩΝ	ΧΑΝΙΩΝ	13.970,5	193,3	1,38%
	ΑΠΟΚΟΡΩΝΑ	11.219,1	3.367,0	30,01%
	ΣΕΛΙΝΟΥ ΚΑΝΤΑΝΟΥ	1.874,0	401,8	21,44%
	ΚΙΣΑΜΟΥ	6.900,7	3.179,4	46,07%
	ΠΛΑΤΑΝΙΑ	5.591,6	2.726,1	48,75%
	ΣΦΑΚΙΩΝ	1.877,0	400,0	21,31%
<b>ΣΥΝΟΛΟ :</b>		<b>170.783,1</b>	<b>53.144,9</b>	

**Πίνακας 1.4:** Ετήσιες καταναλώσεις των δήμων Κρήτης και των αντλιοστασίων τους για το 2017.

Στον Πίνακα 1.5 παραθέτονται τα αποτελέσματα συνολικά ανά νομό:

ΝΟΜΟΙ	ΕΤΗΣΙΑ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ 2017 (MWh)	ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ ΑΝΑ ΕΙΔΟΣ ΤΙΜΟΛΟΓΙΟΥ 2017 (MWh) - Αγροτικά
ΝΟΜΟΣ ΗΡΑΚΛΕΙΟΥ	79.887,2	29.728,2
ΝΟΜΟΣ ΡΕΘΥΜΝΗΣ	20.464,6	4.407,9
ΝΟΜΟΣ ΛΑΣΙΘΙΟΥ	28.998,4	8.741,2
ΝΟΜΟΣ ΧΑΝΙΩΝ	41.432,9	10.267,6
<b>ΣΥΝΟΛΟ :</b>	<b>170.783,1</b>	<b>53.144,9</b>

**Πίνακας 1.5:** Ετήσιες καταναλώσεις νομών για το 2017.

ΝΟΜΟΙ	Ποσοστιαίες Καταναλώσεις (%)	
ΝΟΜΟΣ ΧΑΝΙΩΝ	24%	19%
ΝΟΜΟΣ ΡΕΘΥΜΝΗΣ	12%	8%
ΝΟΜΟΣ ΗΡΑΚΛΕΙΟΥ	47%	56%
ΝΟΜΟΣ ΛΑΣΙΘΙΟΥ	17%	16%

**Πίνακας 1.6:** Ετήσιες ποσοστιαίες καταναλώσεις νομών για το 2017 συνολικά και για τα αγροτικά τιμολόγια.

Η ετήσια κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας των αντλιοστασίων που ανήκουν στους δήμους και χρησιμοποιούνται για άρδευση είναι 53 GWh και σε ποσοστό 31,12% επί της συνολικής ετήσιας ενέργειας κατανάλωσης. Η συνολική καθαρή παραγωγή στο Σ.Η.Ε. Κρήτης για το έτος 2017 ήταν 3.019.581 MWh, και η κατανάλωση των δήμων σε σχέση με τη συνολική καθαρή παραγωγή ήταν 5,66%, ενώ για τα αγροτικά τιμολόγια ήταν 1,76%. Από τα παραπάνω, διαπιστώνεται ότι αρκετή ηλεκτρική ενέργεια απαιτείται για τη λειτουργία των αντλιοστασίων.

Στους παρακάτω πίνακες, παρουσιάζονται ενδεικτικά η εγκατεστημένη ισχύς αντλιοστασίων – αντλιών για αρδευτικά δίκτυα και γεωτρήσεις στην Περιφερειακή Ενότητα των Χανίων και σε ορισμένους δήμους των άλλων περιφερειακών ενοτήτων της Κρήτης.

Αριθμός Αντλιοστασίων	Αριθμός Αντλιών	Εγκατεστημένη Ισχύς (kW)
<b>22</b>	<b>76</b>	<b>10.829</b>

**Πίνακας 1.7:** Η συνολική εγκατεστημένη ισχύς στα Αντλιοστάσια του Ο.Α.ΔΥ.Κ. [10].

	Αριθμός Αντλιών	Εγκατεστημένη Ισχύς (kW)
ΔΗΜΟΣ ΜΟΙΡΩΝ	116	2.000,1
ΔΗΜΟΣ ΤΥΜΠΑΚΙΟΥ	222	3.578,6
ΔΗΜΟΣ ΚΟΦΙΝΑ	79	1.523,7
<b>ΣΥΝΟΛΟ</b>	<b>417</b>	<b>7.102,4</b>

**Πίνακας 1.8:** Εγκατεστημένη ισχύς αντλιών στους Δήμους Μοιρών, Τυμπακίου και Κόφρινα.

Αριθμός Αντλιών	Εγκατεστημένη Ισχύς (kW)	Ενέργεια (kWh)
<b>748</b>	<b>10.457,3</b>	<b>15.916,81</b>

**Πίνακας 1.9:** Εγκατεστημένη ισχύς αντλιών στο Δήμο Ιεράπετρας.

Γραμμή	Αριθμός Υποσταθμών για Αρδευτικά Δίκτυα	Συνολική Εγκατεστημένη Ισχύς (kVA)
R-27 (Υ/Σ Πραιτωρίων)	72	7.525
R-28 (Υ/Σ Πραιτωρίων)	111	13.760
<b>ΣΥΝΟΛΟ</b>	<b>183</b>	<b>21.285</b>

**Πίνακας 1.10:** Συνολική εγκατεστημένη ισχύς για αρδευτικά δίκτυα στο Νοτιοανατολικό Ηράκλειο.

Τέλος, στο Δήμο Μαλεβιζίου υπάρχουν 12 αντλιοστάσια άρδευσης και υδροδοτούν συνολικά 30 χωριά [12].



## 1.5 Σκοπός και δομή της μεταπτυχιακής διατριβής

### 1.5.1 Σκοπός της μεταπτυχιακής διατριβής

Η εν λόγω μεταπτυχιακή διατριβή μελετά τη συμπεριφορά των επαγωγικών μηχανών και των στρεφόμενων σφονδύλων (flywheels) στις μικρές μεταβολές της συχνότητας του ηλεκτρικού δικτύου. Αυτές οι μεταβολές είναι πολύ σημαντικές για ένα ηλεκτρικό δίκτυο και για τη συγκεκριμένη εργασία για το Σ.Η.Ε. της Κρήτης, διότι υπάρχουν πολλές διάσπαρτες αντλίες συνδεδεμένες σε αυτό και διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο για την ευστάθεια του συστήματος ως εύελικτα φορτία, το οποίο μελετήθηκε διεξοδικά. Στη συγκεκριμένη εργασία, η κατ' εκτίμηση καταγραφή των αντλιών ανέρχεται περί τις 2000, και αυτές είναι ένα ποσοστό από το σύνολο του νησιού. Ένα σημαντικό ερώτημα που εγείρετε είναι, ποιες ηλεκτρικές μηχανές θα πρέπει να παραμένουν συνδεδεμένες στο δίκτυο σε περίπτωση μιας διαταραχής υποσυχνότητας, κάτι που απαντάται στο Κεφάλαιο 6 της εργασίας. Ένας από τους στόχους, είναι να διερευνηθεί τι είδους φορτία, σταθερής ή μεταβλητής ροπής θα πρέπει να απομονώνονται σε μια τέτοια διαταραχή του συστήματος, ώστε να διευκολυνθεί η επαναφορά του συστήματος και πάλι σε ισορροπία (δηλ. στην ονομαστική του συχνότητα των 50 Hz). Ακόμη, βάση κάποιων προσομοιώσεων που είδαμε στο Κεφάλαιο 4, συμπεραίνεται ότι σε ένα πρόβλημα υποσυχνότητας, οι γραμμές που έχουν αντλίες ως φορτία δεν πρέπει να βγαίνουν εκτός, διότι βοηθούν την ισορροπία του συστήματος, το οποίο ποσοτικοποιήθηκε στο Κεφάλαιο 4 και 6. Επιπρόσθετα, ο διαχειριστής του δικτύου θα πρέπει να έχει γνώση για ποιες γραμμές θα πρέπει να μένουν εντός σε μια διαταραχή συχνότητας, το οποίο φαίνεται τόσο στο Κεφάλαιο 4, όσο και στο Κεφάλαιο 6. Επίσης, εξετάζεται ο ρόλος ενός συστήματος με στρεφόμενους σφονδύλους - flywheels (FESS), και το πως αυτό θα μπορέσει να αξιοποιηθεί κατάλληλα από το διαχειριστή διανομής της ηλεκτρικής ενέργειας, έτσι ώστε να βοηθήσει ως εφεδρεία για την υποστήριξη της συχνότητας του δικτύου. Τα συστήματα FESS έχουν τη δυνατότητα να λειτουργούν είτε ως μονάδες παραγωγής ισχύος – δηλ. σαν γεννήτριες - για τη περίπτωση της υποστήριξης μιας διαταραχής υποσυχνότητας, είτε να λειτουργούν ως φορτία – δηλαδή σαν κινητήρες – και να υποστηρίξουν μια διαταραχή υπερσυχνότητας. Η μελέτη των στρεφόμενων σφονδύλων έγινε, διότι έχουν ταχεία απόκριση για εκφόρτισης ισχύος στο δίκτυο, και γιατί στην Ελλάδα η συγκεκριμένη τεχνολογία δεν έχει εξεταστεί ενδελεχώς. Όπως φαίνεται από τα Κεφάλαια 5 και 6, είναι ένα σύστημα μηχανικής αποθήκευσης ενέργειας, πολλά υποσχόμενο και αρκετά διαφορετικό από τα κλασικά συστήματα εφεδρείας με συσσωρευτές.

### 1.5.2 Δομή της μεταπτυχιακής διατριβής

Αρχικά, έγινε μια εκτενής περιγραφή των βασικών λειτουργιών ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας και της δομής του, όπως αυτό είναι στην Ελλάδα, με ιδιαίτερη έμφαση στο νησί της Κρήτης. Ακόμη, αναλύθηκαν οι βασικές έννοιες για την ευστάθεια ενός Σ.Η.Ε., τόσο για τον έλεγχο παραγωγής και για την ευστάθεια της συχνότητας του δικτύου, όσο και για τα προβλήματα που μπορεί να αντιμετωπίσει το Σ.Η.Ε λόγω μεταβολών που ανήκουν σε αυτή τη κατηγορία. Έπειτα, παρουσιάστηκαν διάφορες διαταραχές υποσυχνότητας στο Σ.Η.Ε. Κρήτης αλλά και στοιχεία για τα αντλητικά συγκροτήματα του νησιού. Τέλος, περιεγράφηκαν ο σκοπός και η δομή της μεταπτυχιακής διατριβής.

Στο 2<sup>ο</sup> Κεφάλαιο γίνεται μια αναλυτική περιγραφή των ασύγχρονων μηχανών μιας και είναι ο πιο συνηθισμένος τύπος ηλεκτρικής μηχανής που βρίσκεται παντού στη καθημερινότητα μας και για την εν λόγω εργασία βρίσκονται στα αντλιοστάσια. Παρουσιάζεται η δομή, η κατασκευή, τα είδη, οι αρχές λειτουργίας, οι θεμελιώδεις σχέσεις, το ισοδύναμο κύκλωμα, οι αρχές ελέγχου, οι κατηγορίες φορτίων και τέλος χαρακτηριστικά παραδείγματα χρήσης των ασύγχρονων κινητήρων.

Στο 3<sup>ο</sup> Κεφάλαιο, αναλύονται διεξοδικά τα συστήματα στρεφόμενων σφονδύλων (Flywheel Energy Storage System - FESS). Αρχικά, αναφέρονται τα κύρια μέρη των συστημάτων FESS, οι τεχνικές βελτίωσης τους, η αρχή λειτουργίας τους και οι εξισώσεις που τα διέπουν. Στη συνέχεια, γίνεται μια κατηγοριοποίηση των σφονδύλων, μια καταγραφή των παραγόντων που επηρεάζουν την απόδοση ενός συστήματος FESS, περιγράφοντας τη συμβολή του στη βελτίωση της ευστάθειας των Σ.Η.Ε. Έπειτα, γίνεται μια σύγκριση των FESS με άλλα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας, αναδεικνύοντας τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματά τους. Τέλος, αναφέρονται διάφορες, ανά τον κόσμο, εφαρμογές των flywheels σε υπάρχουσες δομές ηλεκτρικών δικτύων.

Στο 4<sup>ο</sup> Κεφάλαιο, γίνεται η μελέτη της συμπεριφοράς των επαγωγικών ή ασύγχρονων κινητήρων στις μεταβολές της συχνότητας σε ένα ηλεκτρικό δίκτυο με τη βοήθεια του γραφικού περιβάλλοντος μοντελοποίησης και προσομοίωσης Simulink. Αρχικά, αναλύεται βήμα βήμα πως υλοποιείται το ηλεκτρικό κύκλωμα της προσομοίωσης και ποια block χρησιμοποιούνται για την υλοποίηση του. Στη συνέχεια, γίνονται τέσσερα διαφορετικά πειράματα. Το πρώτο γίνεται με έναν ασύγχρονο κινητήρα και με φορτίο μεταβαλλόμενης ροπής, το δεύτερο γίνεται με έναν ασύγχρονο κινητήρα και με φορτίο σταθερής ροπής, το τρίτο γίνεται με ένα σύστημα Field-Oriented Control Induction Motor Drive (FOC) με φορτίο μεταβλητής ροπής και το τέταρτο γίνεται με ένα σύστημα Field-Oriented Control Induction Motor Drive (FOC) με φορτίο σταθερής ροπής. Έπειτα από το πέρας του κάθε πειράματος παρουσιάζονται και τα εκάστοτε αποτελέσματα.

Στο 5<sup>ο</sup> Κεφάλαιο, περιγράφεται το μαθηματικό μοντέλο που αναπτύχθηκε για τις προσομοιώσεις των συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας με σφονδύλους στο Σ.Η.Ε. Κρήτης. Αρχικά, αναλύονται διεξοδικά οι κύριες εξισώσεις του μαθηματικού μοντέλου, με χρήση των οποίων προσδιορίζονται, ανάλογα με τον τρόπο εκφόρτισης των σφονδύλων (με πλήρη ή μη πλήρη ταχύτητα), η νέα συχνότητα του δικτύου και το φορτίο. Στη συνέχεια περιγράφεται η δημιουργία αλγόριθμου με χρήση του λογισμικού MATLAB, με τη βοήθεια του οποίου προσδιορίζονται η ισχύς εξόδου του σφονδύλου, η εξαγόμενη ενέργεια του, σε συσχέτιση με το συνολικό χρόνο εκφόρτισης του. Το κεφάλαιο ολοκληρώνεται με την παρουσίαση των αποτελεσμάτων, που προέκυψαν κατά τις προσομοιώσεις των συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας με σφονδύλους για χρόνους εκφόρτισης 5 λεπτών και 10 λεπτών.

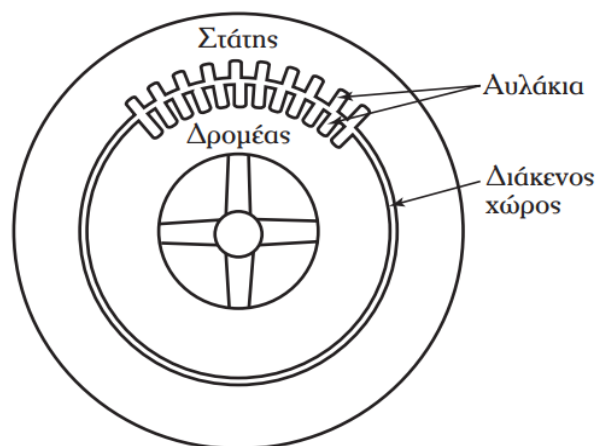
Στο τελευταίο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα συμπεράσματα, που προκύπτουν από την εκπόνηση της παρούσης μεταπτυχιακής διατριβής, καθώς και μελλοντικές προοπτικές του παρόντος θέματος.

## Κεφάλαιο 2 : Ασύγχρονες Μηχανές

Οι ασύγχρονοι ή επαγωγικοί κινητήρες, ανάλογα με τη γεωμετρία του ηλεκτρικού κυκλώματος του δρομέα κατατάσσονται σε δύο κατηγορίες, στους κινητήρες με βραχυκυκλωμένο δρομέα και στους κινητήρες με δακτυλιοφόρο δρομέα. Οι ασύγχρονοι κινητήρες χρησιμοποιούνται στην περίπτωση κατά την οποία δεν απαιτείται σταθερός αριθμός στροφών και είναι επιτρεπτή μικρή αυξομείωση της ταχύτητας περιστροφής τους σε μεταβολές του φορτίου. Χρησιμοποιούνται κυρίως για κίνηση των αντλιών και των συμπιεστών. Οι ασύγχρονες γεννήτριες χρησιμοποιούνται κυρίως σε μικρής ισχύος ανεμογεννήτριες [13].

### 2.1 Δομή του ασύγχρονου τριφασικού κινητήρα

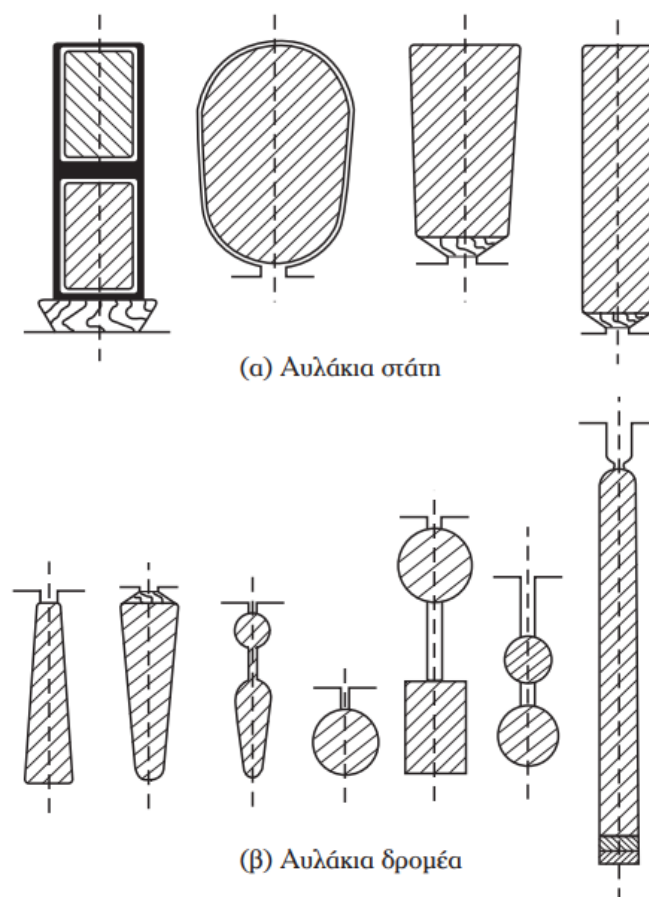
Ο ασύγχρονος κινητήρας είναι μία περιστρεφόμενη μηχανή, η ταχύτητα περιστροφής της οποίας είναι διαφορετική από την ταχύτητα του στρεφόμενου μαγνητικού πεδίου (ταχύτητα συγχρονισμού), που αναπτύσσεται στον διάκενο χώρο της (βλ. Σχήμα 2.1). Ο ασυγχρονισμός μεταξύ της ταχύτητας περιστροφής της μηχανής και του στρεφόμενου μαγνητικού πεδίου της, είναι ο λόγος για τον οποίο ονομάζονται ασύγχρονοι. Ονομάζονται επίσης και επαγωγικοί γιατί στο στρεφόμενο μέρος τους επάγονται ρεύματα, τα οποία είναι απαραίτητα για τη λειτουργία τους [13]. Η πιο διαδεδομένη μορφή ασύγχρονου κινητήρα είναι ο πολυφασικού τύπου και κυρίως ο τριφασικού. Ο μονοφασικός κινητήρας χρησιμοποιείται σε ειδικές βιομηχανικές εφαρμογές, στο πεδίο των μικρών ισχύων.



Σχήμα 2.1: Σχηματική αναπαράσταση ασύγχρονου κινητήρα.

## 2.2 Κατασκευή ασύγχρονου τριφασικού κινητήρα μηχανής

Ο τριφασικός ασύγχρονος κινητήρας αποτελείται από ένα ακίνητο μέρος, τον στάτη και ένα περιστρεφόμενο, τον δρομέα (βλ. Σχήμα 2.1). Ο πυρήνας του στάτη αποτελείται από ένα σύνολο ελασμάτων σιδήρου-πυριτίου (Fe-Si). Στο εσωτερικό του στάτη διαμορφώνονται κατάλληλα αυλάκια, μέσα στα οποία τοποθετούνται τα τυλίγματα (μονοφασικά, διφασικά, τριφασικά). Τα τυλίγματα τροφοδοτούνται από το δίκτυο με ένα συμμετρικό σύστημα τάσεων, οπότε δημιουργείται ένα περιστρεφόμενο μαγνητικό πεδίο, το οποίο επάγει ρεύματα στα κυκλώματα του δρομέα [14]. Τα αυλάκια του στάτη διαμορφώνονται κατά το μισό κλειστά, ενώ του δρομέα κατά το μισό κλειστά ή τελείως κλειστά. Ο διάκενος χώρος (διάκενο) μεταξύ στάτη και δρομέα είναι της τάξεως των 2 – 2,5 mm για τους κινητήρες μικρής ισχύος και μπορεί να είναι 20 mm για τους κινητήρες μεγάλης ισχύος. Στο Σχήμα 2.2 δίδονται διάφοροι τύποι αυλακιών για τον στάτη και για τον δρομέα.



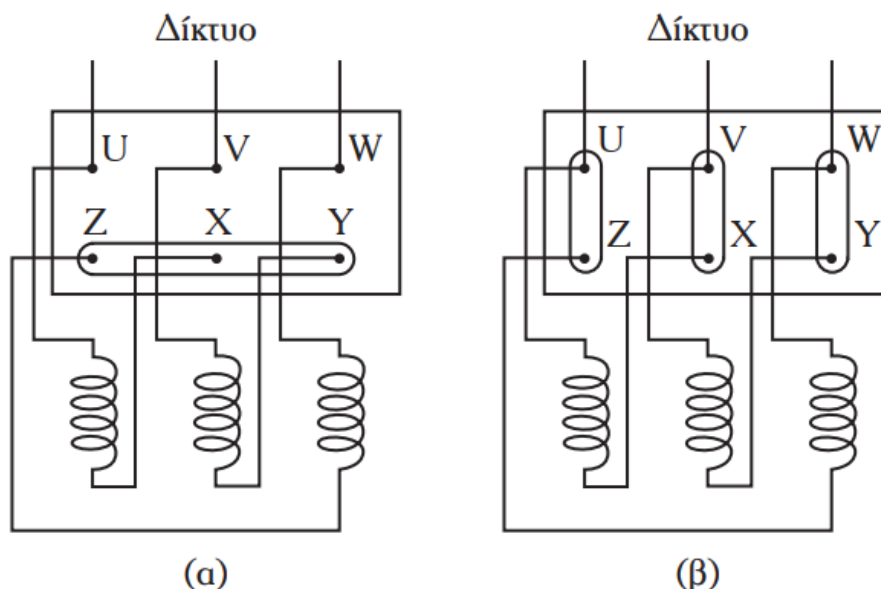
Σχήμα 2.2: Τύποι αυλακιών.

Γενικά, το διάκενο έχει ομοιόμορφο πάχος και είναι πολύ μικρό, προκειμένου να περιορίζεται το ρεύμα μαγνητίσεως και η ροή σκεδάσεως αντίστοιχα. Στην καλύτερη περίπτωση τα αυλάκια πρέπει να είναι κλειστά, αλλά αυτό σημαίνει δύσκολη τοποθέτηση των τυλιγμάτων μέσα σ' αυτά. Όσο μικραίνει το άνοιγμα ενός αυλακιού, τόσο μικρότερη γίνεται η μαγνητική σκέδαση. Στον στάτη συναντάμε, μερικές φορές, ανοικτά αυλάκια. Αυτό συμβαίνει όταν πρόκειται για κινητήρα υψηλών τάσεων.

Τότε τα τυλίγματα απαιτούν ενισχυμένη μόνωση, οπότε προκατασκευάζονται και τοποθετούνται έτοιμα στα αυλάκια. Η απλούστερη μορφή αυλακιού είναι η τελείως ανοικτή, η οποία όμως παρουσιάζει τα εξής μειονεκτήματα:

- 1) Για σταθερό διάκενο, μεγαλώνει το ρεύμα μαγνητίσεως, όσο μεγαλώνει το στόμιο του αυλακιού. Γι' αυτό χρησιμοποιείται ο τύπος αυτός στην περίπτωση ειδικών ηλεκτροτεχνικών αναγκών (π.χ. υψηλές τάσεις).
- 2) Προκαλούνται διακυμάνσεις του μαγνητικού πεδίου στο διάκενο, με αποτέλεσμα να εμφανίζονται μεγάλες απώλειες πυρήνα στον δρομέα, και επί πλέον δημιουργούνται ανεπιθύμητες ανώτερες αρμονικές στην ηλεκτρομαγνητική ροπή.

Για τον τριφασικό ασύγχρονο κινητήρα το ηλεκτρικό κύκλωμα του στάτη του αποτελείται από τρία τυλίγματα (φάσεις) τα οποία συνδέονται σε αστέρα ή σε τρίγωνο (βλ. Σχήμα 2.3).



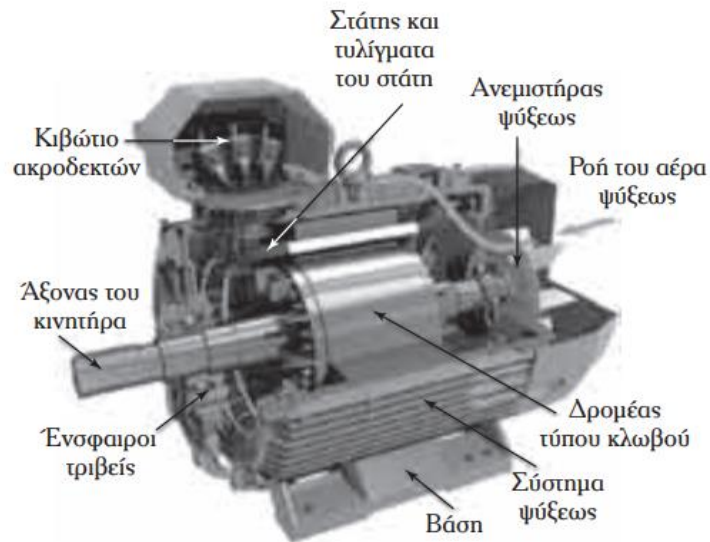
**Σχήμα 2.3:** Τρόποι συνδέσεως των 3 φάσεων του στάτη ενός τριφασικού ασύγχρονου κινητήρα.

(α) Σύνδεση σε αστέρα. (β) Σύνδεση σε τρίγωνο.

Το περιστρεφόμενο μέρος της μηχανής, δηλαδή ο δρομέας έχει κυλινδρική μορφή. Ο πυρήνας του αποτελείται από σύνολο ελασμάτων σιδήρου-πυριτίου, για την ελαχιστοποίηση των απωλειών λόγω δινορρευσμάτων. Στο εξωτερικό μέρος, ο δρομέας φέρει κατάλληλο αριθμό αυλακιών, μέσα στα οποία τοποθετούνται οι αγωγοί του ηλεκτρικού κυκλώματός του (επαγωγικό τύμπανο). Ο αριθμός των αυλακιών του δρομέα είναι μεγαλύτερος από τον αντίστοιχο αριθμό αυλακιών του στάτη. Αυτό συμβαίνει για να αποφεύγεται ή για να μειώνεται αισθητά ο καλούμενος μαγνητικός θόρυβος. Άλλος τρόπος περιορισμού του μαγνητικού θορύβου είναι να κατασκευαστούν τα αυλάκια του δρομέα με μια μικρή κλίση ως προς τον άξονά του. Ανάλογα με τη γεωμετρία του ηλεκτρικού κυκλώματος του δρομέα, υπάρχουν οι εξής τρεις τύποι ασύγχρονων κινητήρων:

### **2.2.1 Ασύγχρονος κινητήρας τύπου κλωβού**

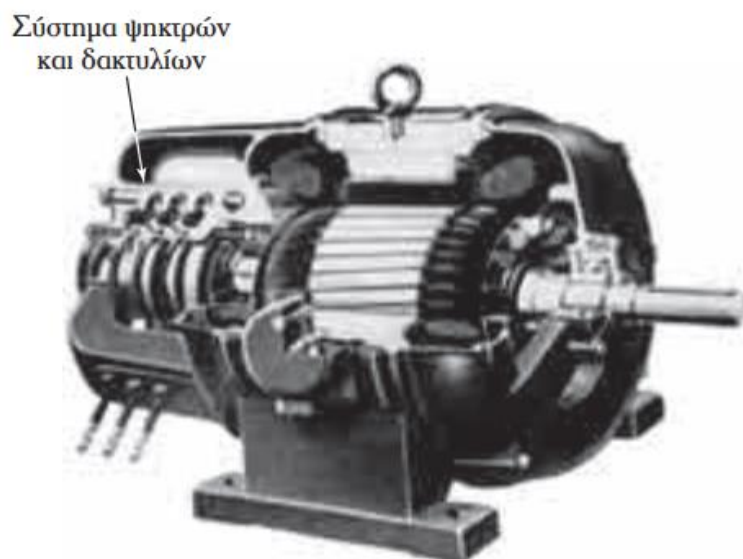
Ο δρομέας αυτού του κινητήρα αποτελείται από ράβδους αλουμινίου ή χαλκού κατά τη διεύθυνση της γενέτειρας ή με κάποια λοξότητα οι οποίες βραχυκυκλώνονται στα δύο άκρα με δακτυλίδια βραχυκυκλώσεως από το ίδιο υλικό. Το τύλιγμα του δρομέα σχηματίζει ένα κλωβί, γι' αυτό ο ασύγχρονος κινητήρας αυτού του είδους ονομάζεται ασύγχρονος κινητήρας με δρομέα κλωβού ή με βραχυκυκλωμένο δρομέα. Μέσα στις αυλακώσεις του πυρήνα του δρομέα τοποθετούνται αγωγοί (ράβδοι χαλκού, ορείχαλκου ή αλουμινίου για κινητήρες μικρής ισχύος), οι οποίοι διαμορφώνουν το επαγωγικό τύμπανό του [13], [14]. Οι ασύγχρονοι κινητήρες με βραχυκυκλωμένο δρομέα είναι απλοί στην κατασκευή και συντήρηση, οικονομικοί και έχουν μεγάλο βαθμό αποδόσεως. Υπάρχουν και ασύγχρονοι κινητήρες με δύο κλωβούς, οι οποίοι κατασκευάζονται με δύο ομόκεντρους κλωβούς. Ο ένας κλωβός παρουσιάζει μεγάλη ωμική αντίσταση, μικρή αυτεπαγωγή και τοποθετείται κοντά στον διάκενο χώρο. Ο άλλος κλωβός παρουσιάζει μικρή ωμική αντίσταση, μεγάλη αυτεπαγωγή και τοποθετείται στον εσωτερικό χώρο του κινητήρα.



**Σχήμα 2.4:** Τριφασικός ασύγχρονος κινητήρας τύπου κλωβού.

### 2.2.2 Ασύγχρονος κινητήρας με δακτυλίδια

Ο δρομέας αυτού του κινητήρα φέρει αυλακώσεις μέσα στις οποίες τοποθετείται τριφασικό τύλιγμα όμοιο με το τύλιγμα του στάτη. Το τριφασικό τύλιγμα του δρομέα καταλήγει σε τρία δακτυλίδια μονωμένα και συναρμολογημένα στον άξονα του κινητήρα. Οι ακροδέκτες του δρομέα συνδέονται με εξωτερικά κυκλώματα μέσω ψηκτρών από άνθρακα που ολισθαίνουν στην επιφάνεια των δακτυλιδιών. Μέσω των ψηκτρών γίνεται η σύνδεση συστήματος αντιστάσεων για κάθε φάση του τυλίγματος του δρομέα, για την ομαλή εκκίνηση του κινητήρα [13].

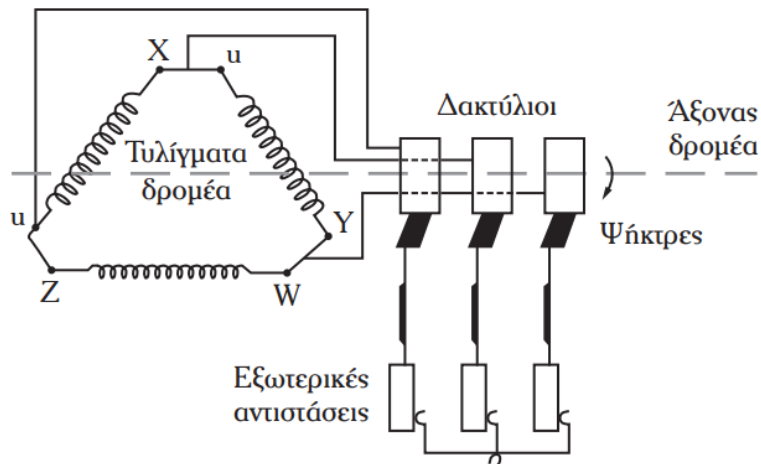


**Σχήμα 2.5:** Τριφασικός ασύγχρονος κινητήρας με δακτυλίδια.



### 2.2.3 Ασύγχρονοι κινητήρες με δρομέα χωρίς αυλάκια

Οι δρομείς αυτών των κινητήρων κατασκευάζονται από συμπαγή σίδηρο όπου επάγονται δινορρέυματα, τα οποία μαζί με το μαγνητικό πεδίο προκαλούν χρήσιμη ροπή. Ασύγχρονες μηχανές με δρομείς τέτοιου είδους χρησιμοποιούνται στην περίπτωση κατά την οποία απαιτείται μεγάλος αριθμός στροφών.



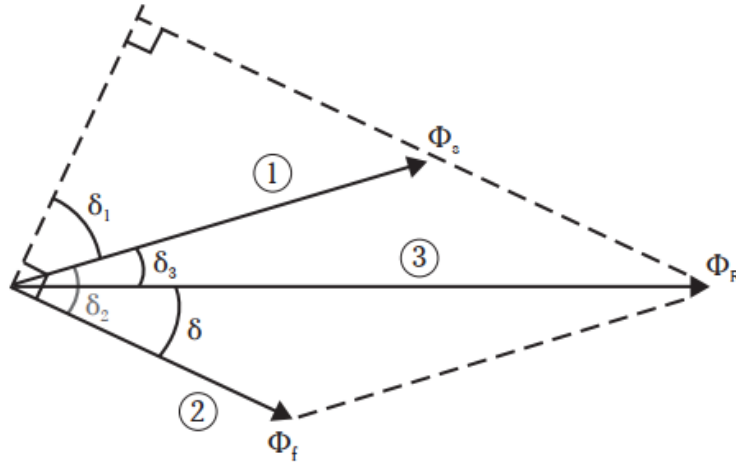
Σχήμα 2.6: Δρομέας ασύγχρονου κινητήρα με δακτυλίδια.

### 2.3 Αρχές λειτουργίας του ασύγχρονου κινητήρα

Γενικά, η λειτουργία του ασύγχρονου κινητήρα βασίζεται:

- 1) Στη δημιουργία ενός στρεφόμενου μαγνητικού πεδίου.
- 2) Στη θεωρία του μετασχηματιστή
- 3) Στην προσπάθεια ευθυγραμμίσεως μεταξύ των αξόνων των αντιστοίχων μαγνητικών πεδίων του στάτη και του δρομέα.

Αν τροφοδοτηθούν τα τυλίγματα του στάτη ενός ασύγχρονου κινητήρα με ένα συμμετρικό τριφασικό σύστημα ρευμάτων, τότε παράγεται στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο, το οποίο επάγει τάσεις στα τυλίγματα του δρομέα. Στα κυκλώματα του δρομέα ρέουν ρεύματα, οπότε προκύπτει η μαγνητική ροή του δρομέα  $\Phi_f$ . Οι μαγνητικοί άξονες των πεδίων του στάτη και του δρομέα προσπαθούν να ευθυγραμμιστούν, με αποτέλεσμα να αναπτύσσεται ροπή. Στο Σχήμα 7 δίδονται τα διανύσματα της μαγνητικής ροής του πεδίου του στάτη  $\Phi_s$ , της μαγνητικής ροής του πεδίου του δρομέα  $\Phi_f$  και το διάνυσμα της συνισταμένης μαγνητικής ροής  $\Phi_R$ , το οποίο προκύπτει από τη διανυσματική σύνθεση των διανυσμάτων  $\Phi_s$  και  $\Phi_f$ .



Σχήμα 2.7: Μαγνητικές ροές του στάτη και του δρομέα ασύγχρονου κινητήρα όταν είναι ακίνητος.

## 2.4 Επαγόμενες τάσεις - Η έννοια της ολισθήσεως

Τροφοδοτούμε τα τυλίγματα του στάτη, ενός τριφασικού ασύγχρονου κινητήρα με δακτυλίδια, με ένα συμμετρικό τριφασικό σύστημα τάσεων, σταθερής συχνότητας. Θεωρούμε το τύλιγμα του δρομέα βραχυκυκλωμένο και ο δρομέας είναι ακίνητος. Τα ρεύματα του στάτη, αποτελούν ένα ισορροπημένο σύστημα και για λόγους συμμετρίας, καθορίζουν στο διάκενο ένα στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο, του οποίου η ταχύτητα περιστροφής (σύγχρονη ταχύτητα) συνδέεται με τη συχνότητα και τον αριθμό των πόλων ως εξής:

$$n_s = \frac{120 \cdot f_1}{P} \quad (\text{Εξ. 2.1})$$

όπου:  $f_1$  είναι η συχνότητα της τάσεως δικτύου και  $P$  ο αριθμός των μαγνητικών πόλων.

Το στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο επάγει στους αγωγούς του στάτη και του δρομέα ηλεκτρεγερτικές δυνάμεις (ΗΕΔ), οι τιμές των οποίων δίδονται ως εξής:

$$\left. \begin{aligned} E_1 &= K_1 \cdot f_1 \cdot \Phi_R \cdot N_1 \\ E_2 &= K_2 \cdot f_1 \cdot \Phi_R \cdot N_2 \text{ (Δρομέας Ακίνητος)} \end{aligned} \right\} (\text{Εξ. 2.2})$$

όπου  $E_1$  είναι η επαγόμενη ΗΕΔ σε κάθε φάση του στάτη, η οποία αποτελείται από  $N_1$  ενεργούς αγωγούς. Με  $K_1=2 \cdot K_{f1} \cdot K_{a1}$  συμβολίζουμε τον συντελεστή τυλίγματος του στάτη,  $\Phi_R$  είναι η κύρια ροή η οποία «σαρώνει» κάθε φάση του στάτη και του δρομέα και  $E_2$  είναι η ΗΕΔ, η οποία επάγεται σε κάθε φάση του δρομέα και αποτελείται από  $N_2$  ενεργούς αγωγούς.  $K_2=2 \cdot K_{f2} \cdot K_{a2}$  (γνωστό και ως συντελεστής του  $K_{app}$ ) είναι ο συντελεστής τυλίγματος, ο

ο οποίος μπορεί να είναι αριθμητικά διαφορετικός από τον συντελεστή τυλίγματος  $K_1$  του στάτη. Όταν ο δρομέας είναι ακίνητος η συχνότητα των απαγομένων ΗΕΔ είναι ίδια με εκείνη του δικτύου. Παρατηρούμε ότι, όπως στους Μ/Σ, ο λόγος  $E_1/E_2$  καθορίζει τον λόγο μετασχηματισμού  $K_n$  του κινητήρα:

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{K_1 \cdot N_1}{K_2 \cdot N_2} = K_n \quad (\text{Εξ. 2.3})$$

Υποθέτουμε ότι ο δρομέας στρέφεται με σταθερή μηχανική ταχύτητα  $n$ , κατά την φορά του στρεφόμενου μαγνητικού πεδίου, έτσι ώστε  $0 < n < n_s$ . Ο δρομέας τότε «βλέπει» το στρεφόμενο πεδίο, όχι στην σύγχρονη ταχύτητα  $n_s$ , αλλά στην ταχύτητα ολισθήσεως  $n_s - n$ . Ο λόγος μεταξύ της ταχύτητας ολισθήσεως και της σύγχρονης ταχύτητας ονομάζεται ολίσθηση  $s$ :

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} \quad (\text{Εξ. 2.4})$$

Η ολίσθηση εκφράζει το κλάσμα της περιστροφής, το οποίο ο δρομέας χάνει για κάθε πλήρη κύκλο περιστροφής του στρεφόμενου μαγνητικού πεδίου. Από την Εξίσωση 2.4, η ολίσθηση χαρακτηρίζει τη σχετική ταχύτητα μεταξύ του στρεφόμενου μαγνητικού πεδίου και του δρομέα μιας ασύγχρονης μηχανής όχι μόνο στη λειτουργία της σαν κινητήρας, αλλά και όταν λειτουργεί σαν γεννήτρια και σαν πέδη.

$\infty - \leftarrow$	<b>0</b>	<b>1</b>	$\rightarrow + \infty$
Γεννήτρια	Κινητήρας	Πέδη	$s = n_s - n/n_s$

**Σχήμα 2.8:** Λειτουργία της επαγωγικής μηχανής σαν γεννήτρια, σαν κινητήρας και σαν πέδη για  $s < 0$ ,  $0 < s < 1$  και  $s > 1$  αντίστοιχα.

Στη λειτουργία της γεννήτριας είναι :  $n > n_s$ , ενώ η ολίσθηση  $s$  γίνεται αρνητική. Στη λειτουργία της πέδης είναι  $n < 0$  (ο δρομέας στρέφεται αντίθετα προς το στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο) γι' αυτό η ολίσθηση  $s$  παίρνει τιμές μεγαλύτερες του 1. Στη λειτουργία του κινητήρα η ταχύτητα  $n$ , παίρνει τιμές μεταξύ 0 και  $n_s$  και η ολίσθηση  $s$  παίρνει τιμές μεταξύ 0 και 1. Η ολίσθηση  $s$  χαρακτηρίζει την σχετική ταχύτητα του δρομέα ως προς το στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο [13], [14].

Αυτή η σχετική ταχύτητα προκαλεί στον δρομέα τάσεις εξ επαγωγής συχνότητας  $f_2$  (συχνότητα ολισθήσεως), η οποία είναι διαφορετική απ' την συχνότητα  $f_1$  του δικτύου. Η συχνότητα  $f_2$  εξαρτάται απ' την ταχύτητα ολισθήσεως μεταξύ του στρεφόμενου πεδίου και του δρομέα ως εξής:

$$f_2 = \frac{(n_s - n) \cdot P}{120} \quad (\text{Εξ. 2.5})$$

Πολλαπλασιάζοντας και διαιρώντας με  $n_s$  την Εξίσωση 2.5 προκύπτει:

$$f_2 = \frac{(n_s - n)}{n_s} \cdot \frac{n_s \cdot P}{120} = s \cdot f_1 \quad (\text{Εξ. 2.6})$$

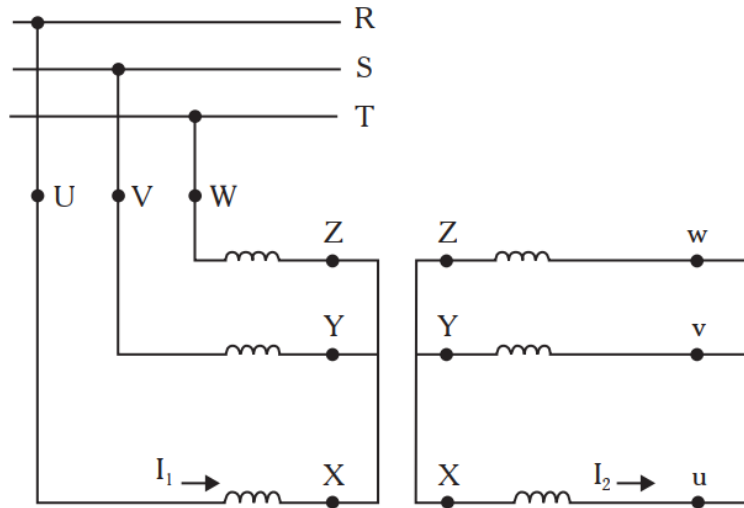
Η συχνότητα  $f_2$  των ΗΕΔ εξ επαγωγής στον δρομέα συνδέεται με τη συχνότητα  $f_1$  του δικτύου με μια απλή σχέση, η οποία μας επιτρέπει να εκφράσουμε την επαγόμενη τάση σε κάθε φάση του δρομέα ως εξής:

$$E_{2s} = K_2 \cdot \Phi_R \cdot f_2 \cdot N_2 = K_2 \cdot \Phi_R \cdot s \cdot f_1 \cdot N_2 = s \cdot E_2 \quad (\text{Εξ. 2.7})$$

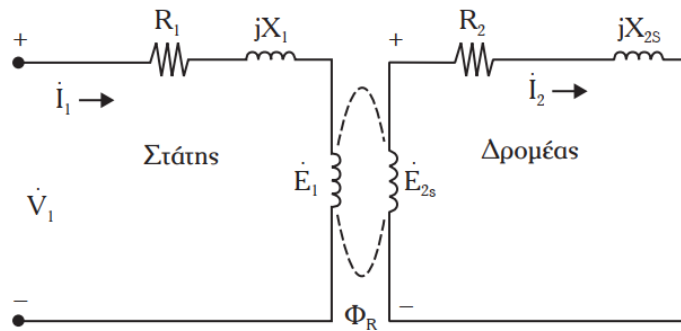
όπου:  $E_{2s}$  : η επαγόμενη ΗΕΔ στον δρομέα στην ολίσθηση  $s$ , ενώ  $E_2$  η επαγόμενη ΗΕΔ στον δρομέα όταν η ολίσθηση  $s = 1$  (ο δρομέας είναι ακίνητος).

## 2.5 Θεμελιώδεις Σχέσεις

Έστω ότι ο ασύγχρονος κινητήρας με δακτυλίδια, στη διάρκεια λειτουργίας του, έχει τα τυλίγματα του δρομέα βραχυκυκλωμένα (βλ. Σχήμα 2.9), στα οποία όμως ρέουν ρεύματα που οφείλονται στις ΗΕΔ του δρομέα. Η μελέτη του ασύγχρονου κινητήρα δεν διαφέρει πολύ από την αντίστοιχη του μετασχηματιστή. Θεωρούμε ότι ο κινητήρας έχει μόνο συμμετρικά τριφασικά τυλίγματα, τα οποία τροφοδοτούνται με συμμετρικές τριφασικές τάσεις. Αυτή η παραδοχή μάς οδηγεί να αναφερόμαστε στο ανά φάση ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα του κινητήρα (βλ. Σχήμα 2.10) [13], [14].



Σχήμα 2.9: Σχηματική παράσταση τριφασικού ασύγχρονου κινητήρα.



- $\Phi_R$ : Κύρια μαγνητική ροή.
- $R_1, R_2$ : ωμικές αντιστάσεις/φάση του στάτη και του δρομέα αντίστοιχα.
- $E_1$ : αντι-ΗΕΔ/φάση που επάγεται σε κάθε φάση του στάτη από το στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο.
- $X_1$ : ανά φάση αντίδραση σκεδάσεως του στάτη.
- $E_{2s}$ : επαγόμενη τάση από το στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο σε κάθε φάση του δρομέα στη συχνότητα  $f_2$ .
- $X_{2s}$ : αντίδραση σκεδάσεως/φάση του δρομέα στη συχνότητα  $f_2$ .

Σχήμα 2.10: Μονοφασικό κύκλωμα του τριφασικού ασύγχρονου κινητήρα.

### 2.5.1 Ηλεκτρικό κύκλωμα του στάτη

Κάθε φάση του στάτη παρουσιάζει μια πραγματική αντίσταση  $R_1$  και μια αντίδραση σκεδάσεως  $X_1$ . Στη φάση αυτή επάγεται μια τάση  $E_1$  η οποία οφείλεται στη κύρια ροή  $\Phi_R$ . Αυτή η τάση ενεργεί σαν αντι-ΗΕΔ ως προς την τάση ακροδεκτών  $V_1$ . Η θεμελιώδης εξίσωση του ηλεκτρικού κυκλώματος του στάτη είναι:

$$V_1 = E_1 + I_1 \cdot (R_1 + j \cdot X_1) \quad (\text{Εξ. 2.8})$$

Όπου :  $I_1$  : το ρεύμα στην κάθε φάση του στάτη όταν ο κινητήρας λειτουργεί με φορτίο.

### 2.5.2 Ηλεκτρικό κύκλωμα του δρομέα

Κάθε φάση του δρομέα παρουσιάζει μια πραγματική αντίσταση  $R_2$  και μια αυτεπαγωγή σκεδάσεως  $L_2$ . Η τελευταία καθορίζει, όταν στο τυλίγμα ρέει το ρεύμα δρομέα  $I_2$ , μια άεργο πτώση τάσεως η οποία οφείλεται στην αντίδραση:

$$X_{2s} = 2 \cdot \pi \cdot f_2 \cdot L_2 \quad (\text{Εξ. 2.9})$$

της οποίας η τιμή είναι συνάρτηση της συχνότητας  $f_2$  των ρευμάτων του δρομέα και συνεπώς της ολισθήσεως  $s$ .

Όταν ο δρομέας είναι ακίνητος, η αντίδραση σκεδάσεως της φάσεως του δρομέα είναι:

$$X_2 = 2 \cdot \pi \cdot f_1 \cdot L_2 \quad (\text{Εξ. 2.10})$$

Όταν ο δρομέας στρέφεται με ταχύτητα  $n$  ως προς τη σύγχρονη ταχύτητα  $n_s$ , τότε η αντίδραση σκεδάσεως της κάθε φάσεως του δρομέα είναι:

$$X_{2s} = 2 \cdot \pi \cdot s \cdot f_1 \cdot L_2 = s \cdot X_2 \quad (\text{Εξ. 2.11})$$

Η αντίδραση σκεδάσεως της κάθε φάσεως του δρομέα είναι συνάρτηση της ολισθήσεως. Η θεμελιώδης εξίσωση τάσεων/φάσεως του ηλεκτρικού κυκλώματος του δρομέα είναι:

$$E_{2s} = I_2 \cdot (R_2 + j \cdot X_{2s}) \quad (\text{Εξ. 2.12})$$

### 2.5.3 Μαγνητικό Κύκλωμα

Τα τριφασικά ρεύματα, όταν διαρρέουν τα τυλίγματα του δρομέα παράγουν ένα στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο ως προς τον δρομέα. Αυτό το μαγνητικό πεδίο στρέφεται, ως προς τον δρομέα, με ταχύτητα η οποία αντιστοιχεί στη συχνότητα των ρευμάτων του δρομέα, δηλαδή στρέφεται με ταχύτητα  $(n_s - n)$  ΣΑΛ. Ο δρομέας στρέφεται, ως προς τον στάτη, με ταχύτητα  $n$  rpm, γι' αυτό το στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο το οποίο οφείλεται στα ρεύματα του δρομέα θα στρέφεται, ως προς τον στάτη, με ταχύτητα  $((n_s - n) + n)$  rpm, δηλαδή με τη σύγχρονη ταχύτητα. Οπότε προκύπτει ότι το μαγνητικό πεδίο του δρομέα στρέφεται με τη σύγχρονη ταχύτητα, με την οποία στρέφεται το μαγνητικό πεδίο του στάτη.

## 2.6 Ισοδύναμο κύκλωμα τριφασικού ασύγχρονου κινητήρα στη λειτουργία με φορτίο

Όταν ο δρομέας είναι ακίνητος ( $s = 1$ ) οι δύο τύποι μηχανών (Μετασχηματιστής και ασύγχρονος κινητήρας) παρουσιάζουν τέλεια αναλογία. Η παρουσία του διάκενου στους τριφασικούς ασύγχρονους κινητήρες απαιτεί υψηλό ρεύμα μαγνητίσεως, με αποτέλεσμα οι αντιδράσεις μαγνητίσεως να έχουν μεγάλες τιμές. Η λειτουργία ενός τριφασικού ασύγχρονου κινητήρα με φορτίο, μπορεί να περιγραφεί μέσω ενός ισοδύναμου κυκλώματος όμοιου με εκείνου του Μ/Σ. Το ισοδύναμο κύκλωμα σχεδιάζεται με μεγέθη του δρομέα (δευτερεύον) ανηγμένα στον στάτη (πρωτεύον) [13]. Στο Σχήμα 2.11 το κύκλωμα μεταξύ των σημείων Α και Β ονομάζεται κύκλωμα διεγέρσεως. Η  $R_c$  εκπροσωπεί τις απώλειες πυρήνα, ενώ ο έλεγχος της άεργου ισχύος γίνεται μέσω της αντιδράσεως μαγνητίσεως  $X_m$ . Το ρεύμα διεγέρσεως  $I_\phi$  αποτελείται από δύο συνιστώσες: το ρεύμα απωλειών πυρήνα  $I_c$  και το ρεύμα μαγνητίσεως  $I_m$ , το οποίο είναι υπεύθυνο για την παραγωγή της κύριας μαγνητικής ροής  $\Phi_R$ .

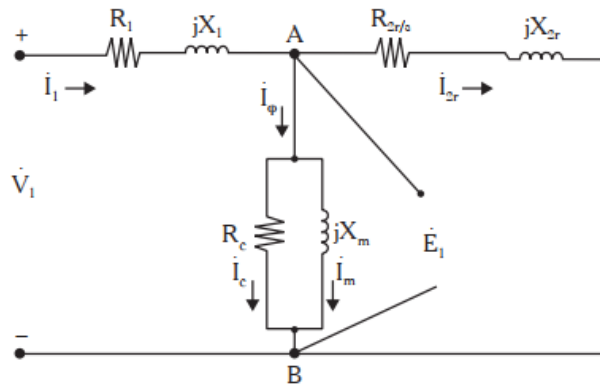
## 2.7 Ανάλυση του ισοδύναμου κυκλώματος

Το ισοδύναμο κύκλωμα του Σχήματος 2.11 χρησιμοποιείται για να καθοριστούν τα χαρακτηριστικά λειτουργίας του ασύγχρονου κινητήρα με δακτυλίδια. Υπολογίζονται οι τάσεις, τα ρεύματα, οι απώλειες ισχύος και οι ροπές οι οποίες συνδέονται με τις διάφορες συνθήκες λειτουργίας της μηχανής [14].

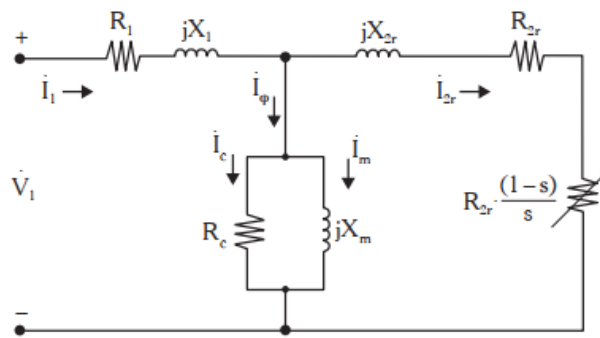
Ο κινητήρας απορροφά από το δίκτυο ισχύ (ισχύς εισόδου):

$$P_{in} = 3 \cdot V_1 \cdot I_1 \cdot \cos\varphi_1 \quad (\text{Εξ. 2.13})$$

όπου:  $V_1$  και  $I_1$  είναι οι ενεργές τιμές της τάσεως και του ρεύματος της μίας φάσεως και  $\varphi_1$  η διαφορά φάσεως ρεύματος ( $I_1$ ) και τάσεως ( $V_1$ ).



(α)



(β)

**Σχήμα 2.11:** Πλήρη ισοδύναμα κυκλώματα μιας φάσεως ασύγχρονου κινητήρα ανηγμένα στον στάτη.

Ένα μέρος της  $P_{in}$  μετατρέπεται σε θερμότητα στα τυλίγματα του στάτη:

$$P_{cust} = 3 \cdot I_1^2 \cdot R_1 \quad (\text{Εξ. 2.14})$$

Το υπόλοιπο μέρος της ισχύος μεταφέρεται στον δρομέα μέσω του διάκενου:

$$P_g = P_{in} - (P_{cust} + P_c) \quad (\text{Εξ. 2.15})$$

όπου:  $P_c$  : οι απώλειες πυρήνα του στάτη και  $P_g$  η ισχύς του στρεφόμενου μαγνητικού πεδίου (ή η ηλεκτρομαγνητική ισχύς).

Η ηλεκτρομαγνητική ισχύς  $P_g$  εκφράζεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$P_g = 3 \cdot I_{2r}^2 \cdot \left( \frac{R_{2r}}{s} \right) \quad (\text{Εξ. 2.16})$$

Από την Εξίσωση 2.16 προκύπτει ότι οι απώλειες χαλκού των τυλιγμάτων του δρομέα είναι:

$$P_{cu} = 3 \cdot I_{2r}^2 \cdot R_{2r} = s \cdot P_g \quad (\text{Εξ. 2.17})$$



Η αντίσταση  $R_{2r}/s$  διαιρείται σε δύο αντιστάσεις. Η μία αντίσταση  $R_{2r}$  αντιπροσωπεύει τις απώλειες χαλκού του δρομέα, ενώ η  $((1-s)/s) \cdot R_{2r}$  εκφράζει τον ενεργειακό μετασχηματισμό, ο οποίος γίνεται στον δρομέα. Το ισοδύναμο κύκλωμα με τις δύο αντιστάσεις στον δρομέα δίδεται στο Σχήμα 2.11. Είναι:

$$\frac{R_{2r}}{s} = R_{2r} + \frac{R_{2r}}{s} - R_{2r} = R_{2r} + \frac{1-s}{s} \cdot R_{2r} \quad (\text{Εξ. 2.18})$$

Πολλαπλασιάζοντας την Εξίσωση 2.18 με τον όρο  $I_{2r}^2$ , προκύπτει:

$$R_{2r} \cdot I_{2r}^2 + \frac{1-s}{s} \cdot I_{2r}^2 = R_{2r} \cdot I_{2r}^2 + \frac{1-s}{s} \cdot R_{2r} \cdot I_{2r}^2 \quad (\text{Εξ. 2.19})$$

Ο πρώτος όρος της Εξίσωσης 2.19, εκφράζει τις απώλειες χαλκού της μιας φάσεως του δρομέα, ενώ ο δεύτερος εκφράζει την εσωτερική αναπτυσσόμενη μηχανική ισχύ ( $P_d$ ). Η χρήσιμη μηχανική ισχύς προκύπτει αν από την εσωτερική ισχύ αν αφαιρεθούν οι απώλειες ισχύος λόγω τριβών και ανεμισμού ( $P_1$ ):

$$P_{out} = P_d - P_1 \quad (\text{Εξ. 2.20})$$

όπου:  $P_d$ , είναι η εσωτερική μηχανική ισχύς και  $P_1$ , οι απώλειες ισχύος λόγω τριβών και ανεμισμού. Η εσωτερική ροπή (ή ηλεκτρομαγνητική ροπή) που αναπτύσσεται στον δρομέα της μηχανής είναι:

$$T_d = \frac{P_g}{\omega} \quad (\text{Εξ. 2.21})$$

$$\omega = \omega_s \cdot (1-s) \quad (\text{Εξ. 2.22})$$

όπου  $\omega$  είναι η γωνιακή ταχύτητα σε  $rad/s$  του δρομέα και  $\omega_s$  είναι η σύγχρονη γωνιακή ταχύτητα σε  $rad/s$ .

Η ωφέλιμη ροπή στον άξονα της μηχανής είναι:

$$T_{out} = \frac{P_{out}}{\omega} = \frac{P_{out}}{\omega_s \cdot (1-s)} \quad (\text{Εξ. 2.23})$$

Στο Σχήμα 2.11, δίδεται το διάγραμμα ροής ισχύος τριφασικού ασύγχρονου κινητήρα. Στην περίπτωση του τριφασικού ασύγχρονου κινητήρα με δακτυλίδια οι απώλειες στις ψήκτρες είναι μικρές και συνήθως αμελούνται στο ενεργειακό ισοζύγιο του κινητήρα.

Η συχνότητα του δικτύου και η συχνότητα του δρομέα της μηχανής μπορούν να υπολογιστούν ακολούθως:

$$f_e = \frac{n_s \cdot p}{120} \quad (\text{Εξ. 2.24})$$

$$f_r = s \cdot f_e \quad (\text{Εξ. 2.25})$$

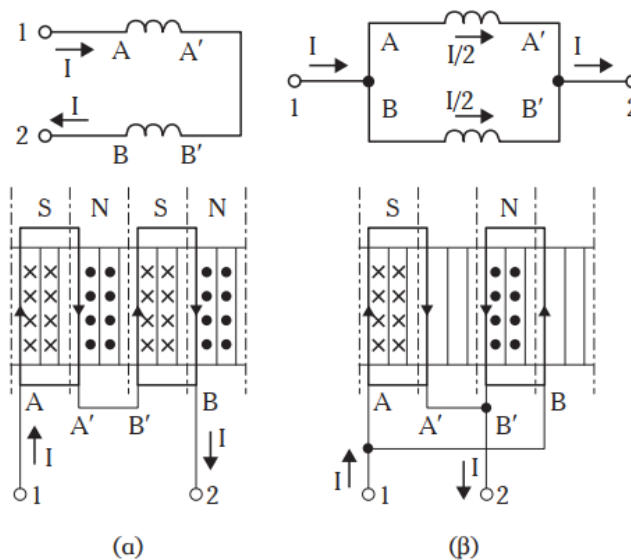
Όπου  $f_e$  η συχνότητα του δικτύου, και  $f_r$  η συχνότητα του δρομέα της μηχανής.

## 2.8 Αρχές ελέγχου ασύγχρονων κινητήρων

Γενικά, ο ασύγχρονος κινητήρας είναι κινητήρας σταθερών στροφών όταν συνδέεται στο δίκτυο σταθερής τάσεως και συχνότητας. Ο ονομαστικός αριθμός στροφών είναι πολύ κοντά στον σύγχρονο αριθμό στροφών. Αν η ροπή φορτίου αυξάνεται, η πτώση του αριθμού στροφών είναι πολύ μικρή. Υπάρχουν βιομηχανικές εφαρμογές, οι οποίες απαιτούν από τους ασύγχρονους κινητήρες να έχουν ορισμένο αριθμό στροφών ή έναν συνεχώς μεταβαλλόμενο αριθμό στροφών. Κινητήρες ΣΡ χρησιμοποιούνται, παραδοσιακά, σε κινητήρια συστήματα όπου απαιτείται συνεχής μεταβολή του αριθμού στροφών. Οι κινητήρες ΣΡ, οι οποίοι είναι αρκετά διαδεδομένοι, απαιτούν συχνή συντήρηση λόγω της υπάρξεως του συλλέκτη και των ψηκτρών και αποφεύγουμε να τους χρησιμοποιούμε σε επικίνδυνο, από ηλεκτρολογικής απόψεως, περιβάλλον. Οι ασύγχρονοι κινητήρες με βραχυκυκλωμένο δρομέα είναι ανθεκτικοί, δεν έχουν συλλέκτη και βρίσκουν εφαρμογή στα πεδία υψηλών ταχυτήτων. Τα κυριότερα πλεονεκτήματα του ασύγχρονου κινητήρα που είναι η απλότητα και η διάρκεια ζωής τους δεν μπορούμε να τα επωφεληθούμε εύκολα όταν επιθυμούμε τον έλεγχο της ταχύτητας. Η ρύθμιση ταχύτητας του ασύγχρονου κινητήρα είναι δύσκολη και, συνεπώς, δαπανηρή. Έχουν βρεθεί πολλές μέθοδοι ρυθμίσεως ταχύτητας, κάθε μία από τις οποίες έχει και τα μειονεκτήματά της. Γενικά οι μέθοδοι ρυθμίσεως ταχύτητας των ασύγχρονων κινητήρων διαιρούνται στην κατηγορία των μεθόδων χωρίς απώλειες και σ' εκείνες με απώλειες [13].

### 2.8.1 Μεταβολή του αριθμού των μαγνητικών πόλων

Σύμφωνα με την εξίσωση  $n_s = 120 \cdot f/P$ , όπου  $n_s$  η σύγχρονη ταχύτητα,  $f$  η συχνότητα των τάσεων και ρευμάτων του δικτύου και  $P$  ο αριθμός των μαγνητικών πόλων, μπορούμε να επηρεάσουμε τη σύγχρονη ταχύτητα και συνεπώς την ταχύτητα του κινητήρα, αν μεταβάλλουμε τον αριθμό των πόλων  $P$ . Το τυλίγμα του στάτη μπορεί να κατασκευαστεί έτσι, ώστε με απλές μεταβολές στις συνδέσεις των πηνίων να μεταβάλλεται, αντίστοιχα, ο αριθμός των μαγνητικών πόλων στον λόγο 2:1. Μπορούμε να επιλέγουμε τη μία ή την άλλη από τις δύο σύγχρονες ταχύτητες. Αυτό ισχύει στην περίπτωση του τριφασικού ασύγχρονου κινητήρα τύπου κλωβού. Πράγματι, αυτός ο τύπος του ασύγχρονου κινητήρα παρουσιάζει το πλεονέκτημα ότι ενώ δεν έχει φυσικούς μαγνητικούς πόλους, στον δρομέα παράγεται μαγνητικό πεδίο, το οποίο έχει τον ίδιο αριθμό μαγνητικών πόλων με τον αριθμό των μαγνητικών πόλων του πεδίου του στάτη. Στην περίπτωση του τριφασικού ασύγχρονου κινητήρα με δακτυλίδια υπάρχει μία πολυπλοκότητα, αφού θα πρέπει να μεταβάλλεται και ο αριθμός των μαγνητικών πόλων του τυλίγματος του δρομέα. Άρα με δύο ανεξάρτητα τυλίγματα στον στάτη, μπορούμε να έχουμε τέσσερις διαφορετικές σύγχρονες ταχύτητες. Ένας τύπος συνδεσμολογίας τυλιγμάτων, ο οποίος χρησιμοποιείται, συνήθως, είναι του Dahlander στον οποίο κάθε φάση αποτελείται από δύο πηνία που μπορούν να συνδεθούν σε σειρά (χαμηλή ταχύτητα) ή παράλληλα (υψηλή ταχύτητα) [15]. Στο Σχήμα 2.12, αναφερόμαστε σε μία φάση τριφασικού ασύγχρονου κινητήρα, ο οποίος έχει 12 αυλάκια στον στάτη.



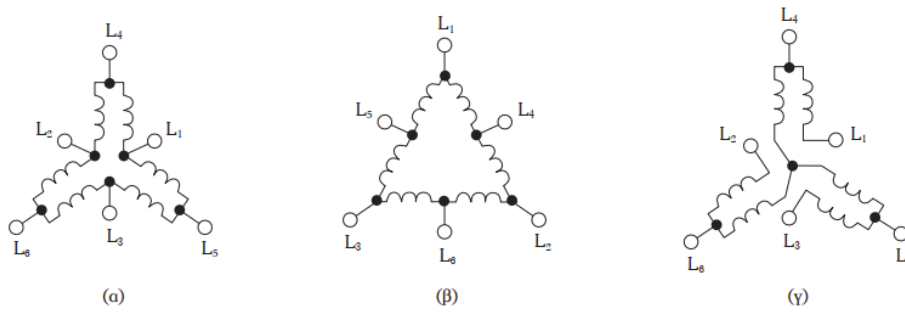
**Σχήμα 2.12:** Συνδεσμολογία των πηνίων των φάσεων ενός τριφασικού ασύγχρονου κινητήρα με 12 αυλάκια στον στάτη.

Η συνδεσμολογία των πηνίων του Σχήματος 2.12 (α) είναι σειράς, οπότε παίρνουμε 4 πόλους (χαμηλή ταχύτητα), ενώ η συνδεσμολογία του Σχήματος 12 (β) είναι παράλληλη, από την οποία παίρνουμε 2 πόλους (υψηλή ταχύτητα).

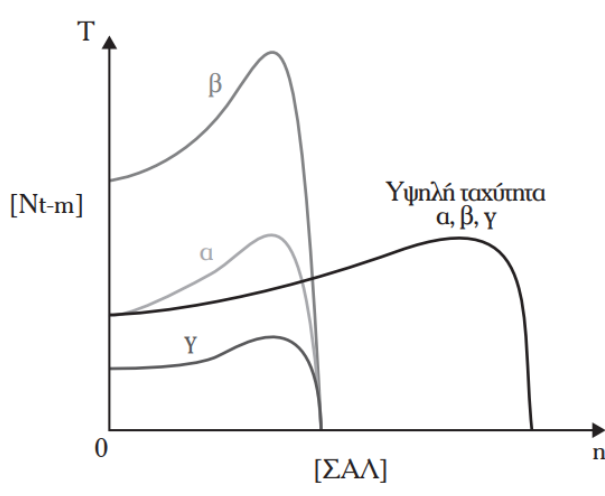
Οι κινητήρες Dahlander χρησιμοποιούνται συνήθως σε εφαρμογές όπου απαιτούνται δύο ταχύτητες. Μερικές τυπικές εφαρμογές είναι:

- Αντλίες, όπου μπορούν να χρησιμοποιηθούν δύο ταχύτητες για τον έλεγχο της ροής εξόδου τους.
- Ανεμιστήρες, για την ύπαρξη μεταβλητής εξόδου ροής αέρα.
- Θραυστήρες.
- Μύλοι.
- Γερανοί, όπου μπορούν να χρησιμοποιηθούν δύο ταχύτητες σε εφαρμογές ανύψωσης: μία ταχύτητα για τη κίνηση του υλικού και η άλλη για τη τοποθέτηση του υλικού που διατηρείται στο ανυψωτικό μηχάνημα.

Μεταβάλλοντας τη συνδεσμολογία των πηνίων μεταβάλλεται, εκτός από την ταχύτητα περιστροφής του περιστρεφόμενου πεδίου, και το φαινόμενο της επαγωγής στο διάκενο της μηχανής, με αποτέλεσμα να έχουμε διαφορετικές χαρακτηριστικές ροπής-ταχύτητας. Στο Σχήμα 2.13, δίδονται διάφορες συνδεσμολογίες των πηνίων, υψηλής ταχύτητας, για τρεις τριφασικούς ασύγχρονους κινητήρες, οι οποίοι έχουν τις ίδιες χαρακτηριστικές ροπής – ταχύτητας. Η συνδεσμολογία του Σχήματος 2.13 (α) δίδει μέγιστη ροπή, περίπου ίδια για όλες τις ταχύτητες. Αυτή η συνδεσμολογία ονομάζεται σταθερής ροπής. Η συνδεσμολογία του Σχήματος 2.13 (β), προσδιορίζει μία ροπή, περίπου διπλάσια στη μικρότερη ταχύτητα. Αυτή η συνδεσμολογία ονομάζεται σταθερής ισχύος. Η συνδεσμολογία του Σχήματος 2.13 (γ), προσδιορίζει μια μέγιστη ροπή αρκετά μειωμένη στη μικρή ταχύτητα. Αυτή η συνδεσμολογία ονομάζεται μέγιστης ροπής. Στο Σχήμα 2.14, δίδονται οι χαρακτηριστικές ροπής – ταχύτητας των τριών κινητήρων για συνδεσμολογίες των πηνίων των φάσεων του στάτη (βλ. Σχήμα 2.13).



**Σχήμα 2.13:** Συνδέσεις πηνίων του στάτη, τριών ασύγχρονων κινητήρων με ίδιες χαρακτηριστικές ροπής-ταχύτητας.

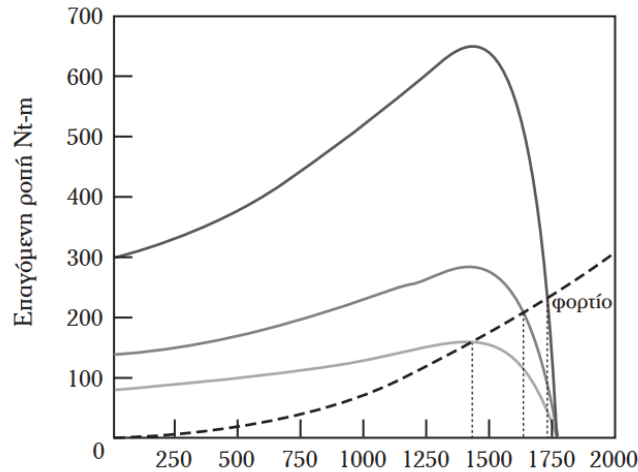


**Σχήμα 2.14:** Χαρακτηριστικές ροπής-ταχύτητας των τριών ασύγχρονων κινητήρων για διάφορες συνδεσμολογίες των πηνίων των φάσεων του στάτη.

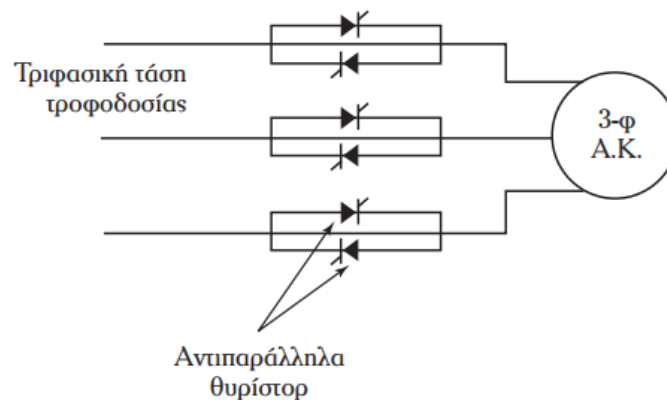
**2.8.2 Μεταβολή της τάσεως του στάτη**

Η ροπή ενός ασύγχρονου κινητήρα είναι ανάλογη του τετραγώνου της τάσεως του στάτη. Η χαρακτηριστική ροπής - ταχύτητας δεν αλλάζει μορφή, αλλά γίνεται πιο μικρή (βλ. Σχήμα 2.15). Μεταβάλλοντας την τάση, το σημείο λειτουργίας (σημείο τομής της χαρακτηριστικής  $T = f(n)$  και της ανθιστάμενης ροπής) μετατοπίζεται προς τα αριστερά δηλαδή προς μικρότερη ταχύτητα. Όταν όμως η ολίσθηση παίρνει μεγάλες τιμές μεγαλώνουν και οι απώλειες του δρομέα σχετικά με την αποδιδόμενη μηχανική ισχύ. Αυτή η μέθοδος ρυθμίσεως συνοδεύεται από απώλειες, γι' αυτό δεν είναι δυνατό να χρησιμοποιηθεί για μεγάλο φάσμα. Αυτή η μέθοδος ρυθμίσεως έχει πρακτική αξία μέχρι 20% κάτω από τον σύγχρονο αριθμό στροφών. Η ρύθμιση ταχύτητας πραγματοποιείται με το απλό κύκλωμα που παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.16.

Σε κάθε φάση συνδέουμε δύο αντιπαράλληλα θυρίστορ και καθυστερώντας τους παλμούς εναύσεως σε κάθε θυρίστορ παίρνουμε ένα μέρος από την ημιτονοειδή τάση του δικτύου. Έτσι ρυθμίζουμε την πρώτη αρμονική κάθε φασικής τάσεως του κινητήρα.



Σχήμα 2.15: Χαρακτηριστικές  $T - n$  για διαφορετικές τιμές της τάσεως του στάτη.

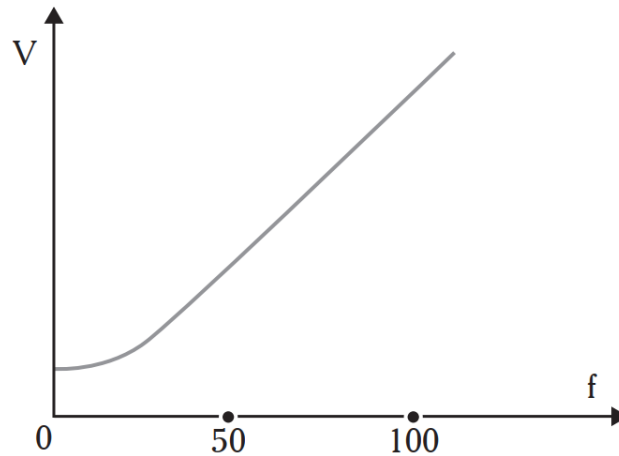


Σχήμα 2.16: Μετατροπέας με αντιπαράλληλα θυρίστορ για τη ρύθμιση της τάσεως.

### 2.8.3 Μεταβολή της συχνότητας

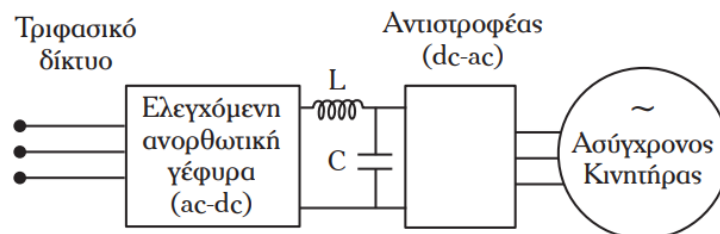
Από την εξίσωση  $n_s = 120 \cdot f/P$ , αλλάζοντας τη συχνότητα  $f$  μπορούμε, χωρίς απώλειες, να ρυθμίσουμε την ταχύτητα του στρεφόμενου πεδίου και συνεπώς την ταχύτητα του δρομέα. Μεταβολή όμως της συχνότητας για μια δεδομένη τιμή της τάσεως δικτύου, παράγει αποτελέσματα, πολλές φορές μη επιθυμητά. Για παράδειγμα αν αυξηθεί η συχνότητα  $f$ , μειώνεται η μέγιστη τιμή της ροπής και η αντίστοιχη τιμή της ροπής εκκινήσεως. Αν αντίθετα μειώσουμε τη συχνότητα  $f_1$ , αυξάνεται η κύρια ροπή και μαζί με αυτήν η μέγιστη μαγνητική επαγωγή στα μαγνητικά κυκλώματα με αύξηση του κορεσμού κ.λ.π.

Αν θέλουμε η χαρακτηριστική  $T = f(n)$  να διατηρεί τη μορφή της και η ροπή ανατροπής να παραμένει σταθερή, πρέπει με τη μεταβολή της συχνότητας να μεταβάλλουμε και το πλάτος της τάσεως, ώστε ο λόγος  $V_1/f$  να διατηρείται σταθερός. Διατηρώντας αυτόν τον λόγο σταθερό, διατηρούμε σταθερό το μαγνητικό πεδίο του διακένου, η χαρακτηριστική  $T = f(n)$  διατηρεί τη μορφή της και η ροπή ανατροπής παραμένει σταθερή. Η μεταβολή της τάσεως με τη συχνότητα φαίνεται στο Σχήμα 2.17.

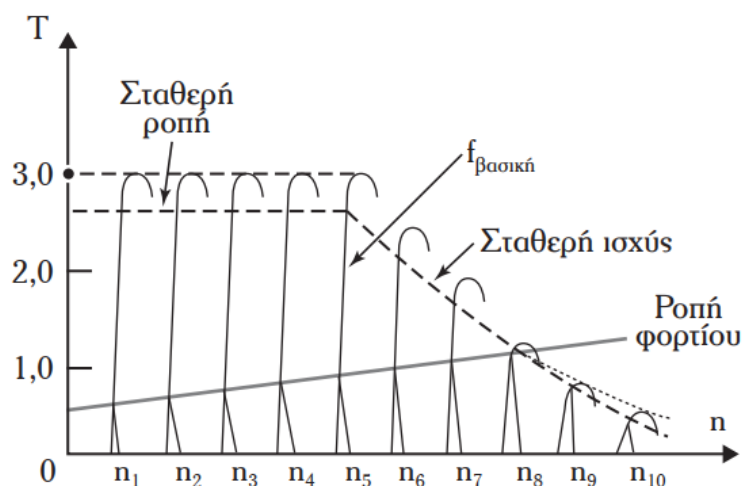


**Σχήμα 2.17:** Απαιτούμενη μεταβολή στην τάση (Volt) αλλάζοντας τη συχνότητα (Hz), ώστε να διατηρείται σταθερό το μαγνητικό πεδίο στο διάκενο.

Στη διάταξη για τη ρύθμιση της τάσεως και της συχνότητας του Σχήματος 2.18, η τάση τροφοδοσίας ανορθώνεται και στη συνέχεια, μέσω ενός αντιστροφέα, μετατρέπεται σε εναλλασσόμενη τάση μεταβλητής συχνότητας και πλάτους. Η χαρακτηριστική  $T = f(n)$  για μεταβλητή συχνότητα δίδεται στο Σχήμα 2.19.



**Σχήμα 2.18:** Μετατροπέας για τη ρύθμιση της συχνότητας και της τάσεως, όπου  $L$  ο συντελεστής αυτεπαγωγής του πηνίου και  $C$  η χωρητικότητα του πυκνωτή.

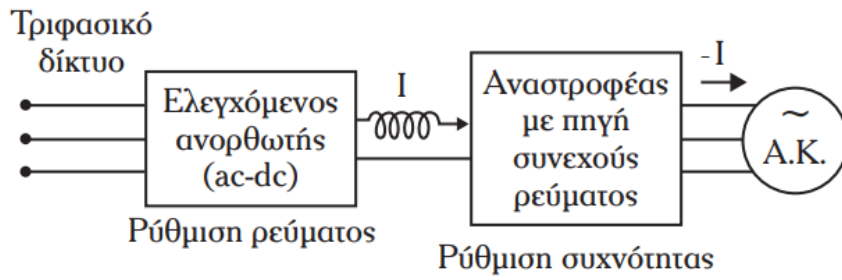


**Σχήμα 2.19:** Χαρακτηριστική  $T = f(n)$  ενός ασύγχρονου κινητήρα με μεταβολή τάσεως και συχνότητας.

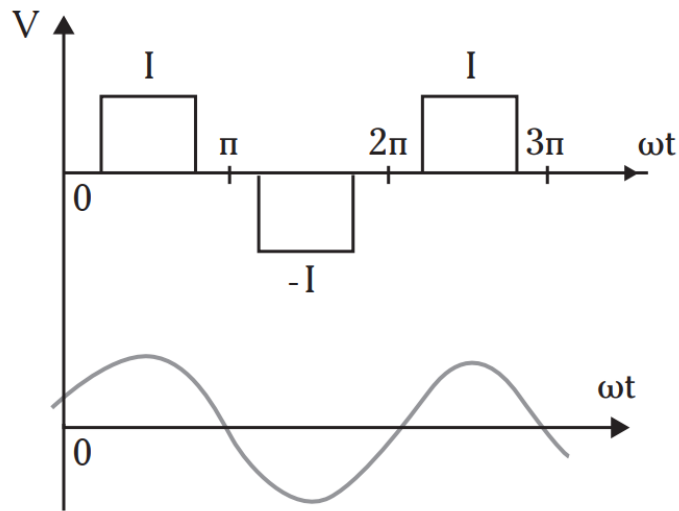
Για μια ορισμένη τιμή της συχνότητας, την  $f_{\beta\alpha\sigma\iota\kappa\eta}$ , η τάση στον στάτη του κινητήρα είναι η μεγαλύτερη την οποία μπορούμε να πάρουμε από τον αντιστροφέα. Πριν από τη συχνότητα  $f_{\beta\alpha\sigma\iota\kappa\eta}$ , το μαγνητικό πεδίο στο διάκενο της μηχανής διατηρείται σταθερό, όταν μεταβάλλεται η τάση με τη συχνότητα, ενώ έχουμε την ίδια τιμή της μέγιστης ροπής. Πέρα από την τιμή της  $f_{\beta\alpha\sigma\iota\kappa\eta}$ , εφόσον η τάση δεν μπορεί να αυξηθεί περισσότερο με τη συχνότητα, το μαγνητικό πεδίο στο διάκενο ελαττώνεται, οπότε ελαττώνεται και η μέγιστη ροπή. Η λειτουργία με σταθερή ισχύ είναι δυναμική στην περιοχή όπου το μαγνητικό πεδίο είναι εξασθενημένο. Στο Σχήμα 2.19, οι τιμές των ταχυτήτων λειτουργίας  $n_1, n_2, \dots, n_{10}$ , βρίσκονται κοντά στις αντίστοιχες τιμές των συγχρόνων ταχυτήτων. Σ' αυτήν τη μέθοδο ρυθμίσεως ταχύτητας, η ολίσθηση λειτουργίας είναι χαμηλή και η απόδοση μεγάλη. Για τη ρύθμιση της ταχύτητας του τριφασικού ασύγχρονου κινητήρα μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένας αντιστροφέας με πηγή συνεχούς ρεύματος (βλ. Σχήμα 2.20). Το πλάτος του ρεύματος ελέγχεται από τον ανορθωτή. Το επαγωγικό φίλτρο χρησιμοποιείται για την εξομάλυνση του ρεύματος. Η κυματομορφή του ρεύματος του κινητήρα είναι σχεδόν τετραγωνική και έχει πλάτος  $120^\circ$ . Η τάση στον στάτη του κινητήρα είναι ημιτονοειδής (βλ. Σχήμα 2.21).

Χαρακτηριστική  $T = f(n)$  του τριφασικού ασύγχρονου κινητήρα, ο οποίος τροφοδοτείται από έναν αντιστροφέα με πηγή συνεχούς ρεύματος δίδεται στο Σχήμα 2.22. Αυτές οι χαρακτηριστικές έχουν απότομη κλίση κοντά στην τιμή της σύγχρονης ταχύτητας.

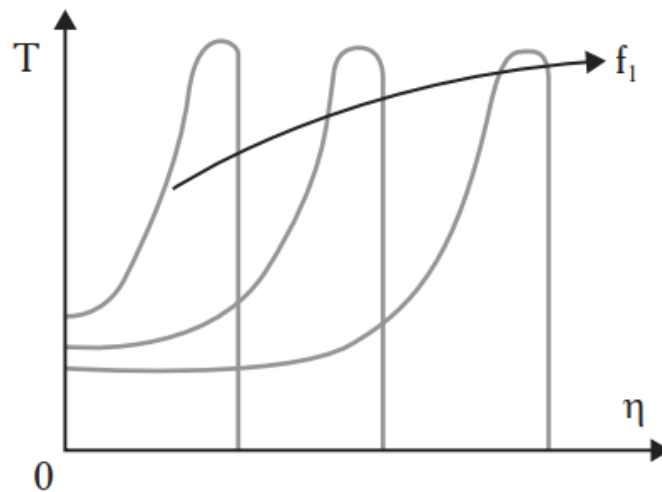




Σχήμα 2.20: Ρύθμιση ταχύτητας ενός ασύγχρονου κινητήρα μέσω ενός αντιστροφέα με πηγή συνεχούς ρεύματος.



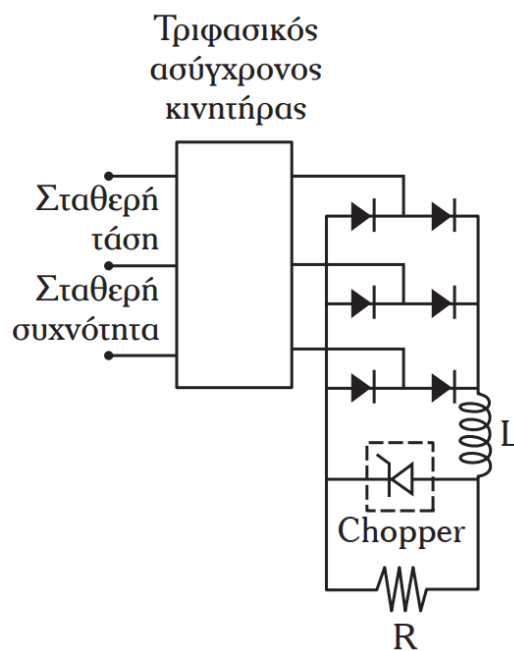
Σχήμα 2.21: Χαρακτηριστική τάσεως του στάτη.



Σχήμα 2.22: Χαρακτηριστική τάσεως του στάτη.

### 2.8.4 Ρύθμιση στροφών ενός ασύγχρονου κινητήρα με δακτυλιοφόρο δρομέα

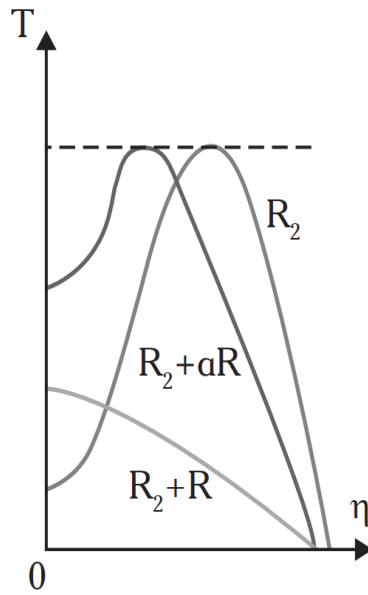
Συνδέοντας ένα σύστημα αντιστάσεων στα κυκλώματα του δρομέα μπορούμε να ρυθμίζουμε τις στροφές του ασύγχρονου κινητήρα με δακτυλίδια. Η ροπή ανατροπής παραμένει αμετάβλητη, ενώ μεταβάλλεται η ταχύτητα ανατροπής. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται για ρύθμιση ταχύτητας, στην περιοχή  $0 < s < 0,5$ , γιατί μεγαλώνοντας την ολίσθηση μεγαλώνουν και οι απώλειες στις ωμικές αντιστάσεις. Μια μέθοδος, την οποία χρησιμοποιούμε για τη ρύθμιση των αντιστάσεων δίδεται στο Σχήμα 2.23. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιεί ανορθωτική γέφυρα στον δρομέα, ηλεκτρονικό διακόπτη (chopper) και ωμική αντίσταση.



Σχήμα 2.23: Σύστημα ρυθμίσεως των στροφών του ασύγχρονου κινητήρα.

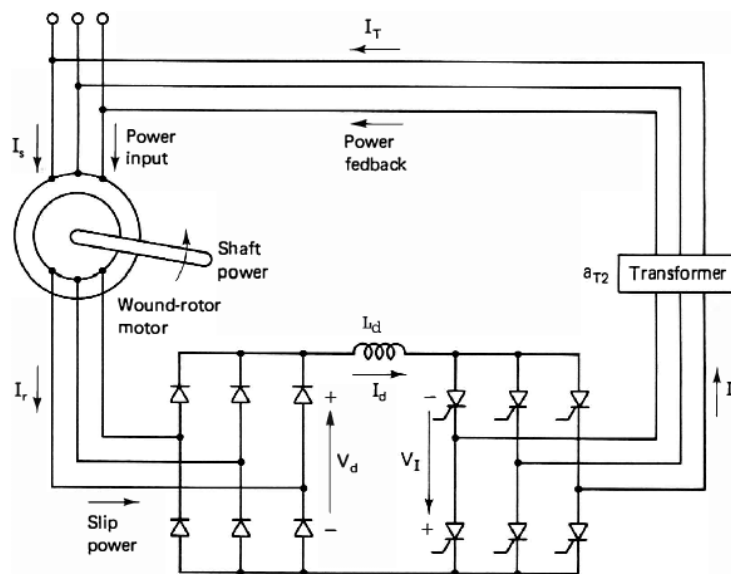
Όταν η αντίσταση  $R$  είναι διαρκώς βραχυκυκλωμένη, (όταν το chopper είναι διαρκώς «αναμμένο») τότε παίρνουμε τα φυσικά χαρακτηριστικά της μηχανής. Όταν το chopper είναι «σβηστό» τότε παίρνουμε την οριακή καμπύλη. Μεταξύ των δύο αυτών καμπυλών μπορούμε να πάρουμε όλες τις ενδιάμεσες καμπύλες μεταβάλλοντας συνεχώς τον συντελεστή  $\alpha$  ο οποίος εκφράζει τον χρόνο «σβέσεως» του chopper προς το άθροισμα των χρόνων εναύσεως και σβέσεως, από μηδέν έως ένα.

$$\alpha = \frac{T_{OFF}}{T_{ON} + T_{OFF}} \quad (\text{Εξ. 2.26})$$



**Σχήμα 2.24:** Χαρακτηριστικές  $T = f(\eta)$  για διάφορες τιμές της αντιστάσεως.

Ανορθώνοντας το ρεύμα του δρομέα και μεταβάλλοντας τη μέση τιμή της αντιστάσεως  $R$  μπορούμε γρήγορα και συνεχώς να ρυθμίσουμε τον αριθμό στροφών εντός μιας περιοχής, που ορίζεται από το μέγεθος της αντιστάσεως. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται για μικρής ισχύος μηχανές, γιατί στην αντίσταση  $R$  έχουμε κατανάλωση ισχύος. Όταν πρόκειται να ρυθμίσουμε την ταχύτητα μεγάλων μηχανών χρησιμοποιούμε το σύστημα Kramer, το οποίο είναι ένα σύστημα που αποτελείται από έξι διόδους, οι οποίες συνδέονται μέσω αυτεπαγωγής, με έξι θυρίστωρ. Το σύστημα ελέγχει την ταχύτητα των στροφών ενός δακτυλιοφόρου κινητήρα, με έγχυση τάσεως στα τυλίγματα του δρομέα (Σχήμα 2.25).



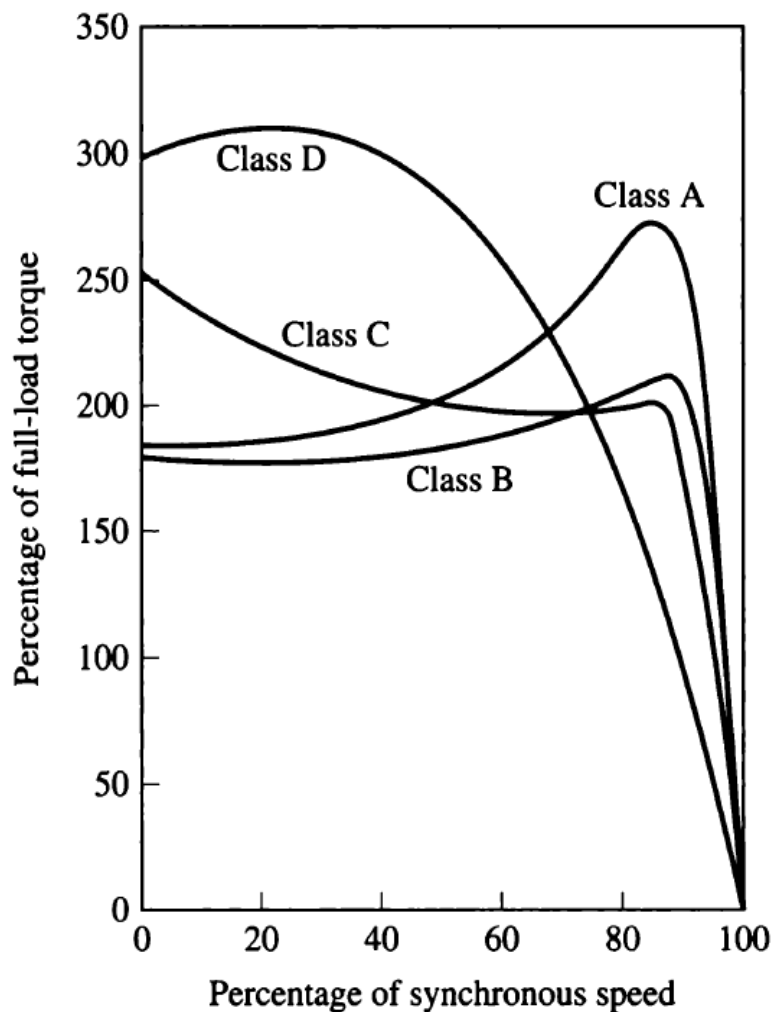
**Σχήμα 2.25:** Τυπικό σύστημα οδήγησης Kramer.

Η ενέργεια ολίσθησης επιστρέφει μέσω του αντιστροφέα (μετατροπέα) στο δίκτυο. Με τον μετατροπέα αυτόν επιβάλλουμε στον δρομέα μία τάση, οπότε ρυθμίζεται η ολίσθηση σύμφωνα με την εξίσωση  $E_{2s} = s \cdot E_2$ .

## 2.9 Κατηγορίες φορτίων ασύγχρονων κινητήρων

### 2.9.1 Κατηγορίες επαγωγικών κινητήρων με βάση την τυποποίηση NEMA

Η μέθοδος σχεδιασμού ηλεκτρικών κινητήρων NEMA (National Electrical Manufacturers Association) ανέπτυξε ένα σύνολο προτύπων που σχετίζονται με ηλεκτρικούς κινητήρες που περιλαμβάνουν κλάσεις σχεδίασης, μεγέθη πλαισίου, περιβλήματα και σχήματα. Μια βασική γνώση των προτύπων NEMA μπορεί να αποδειχθεί ανεκτίμητη κατά την αναζήτηση αγοράς ενός νέου κινητήρα ή της αντικατάστασης ενός παλαιού [13].



Σχήμα 2.26: Τυπικές καμπύλες ταχύτητας - ροπής για διαφορετικούς σχεδιασμούς του ρότορα της μηχανής.

Βάση της τυποποίησης NEMA, υπάρχουν οι τέσσερις παρακάτω κατηγορίες ηλεκτρικών επαγωγικών κινητήρων με τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

1. Κατηγορία Α. Κανονική ροπή εκκίνησης, κανονικό ρεύμα εκκίνησης. Κινητήρες με ρότορα απλού κλωβού.
2. Κατηγορία Β. Κανονική ροπή εκκίνησης, χαμηλό ρεύμα εκκίνησης. Κινητήρες με ρότορα διπλού κλωβού.
3. Κατηγορία C. Υψηλή ροπή εκκίνησης, χαμηλό ρεύμα εκκίνησης. Κινητήρες με ρότορα διπλού κλωβού.
4. Κατηγορία D. Υψηλή ροπή εκκίνησης, υψηλή τιμή ολίσθησης. Κινητήρες με ρότορα διπλού κλωβού με μεγάλη αντίσταση τυλιγμάτων ρότορα.

Για να γίνει κατανοητός ένας κινητήρας, είναι σημαντικό να γίνει αντιληπτό τι σημαίνει φορτίο ενός κινητήρα. Το φορτίο αναφέρεται στη ροπή εξόδου και στο εύρος της ταχύτητα που πρέπει να έχει ένας κινητήρας, αναλόγως την εφαρμογή για την οποία προορίζεται. Η εξίσωση που συνδέει την ροπή με την ισχύ και την ταχύτητα του φορτίου είναι :

$$T_{load} = \frac{P_{load}}{\omega} \quad (\text{Εξ. 2.27})$$

Τα φορτία ενός κινητήρα μπορούν γενικά να κατηγοριοποιηθούν σε τρεις ομάδες:

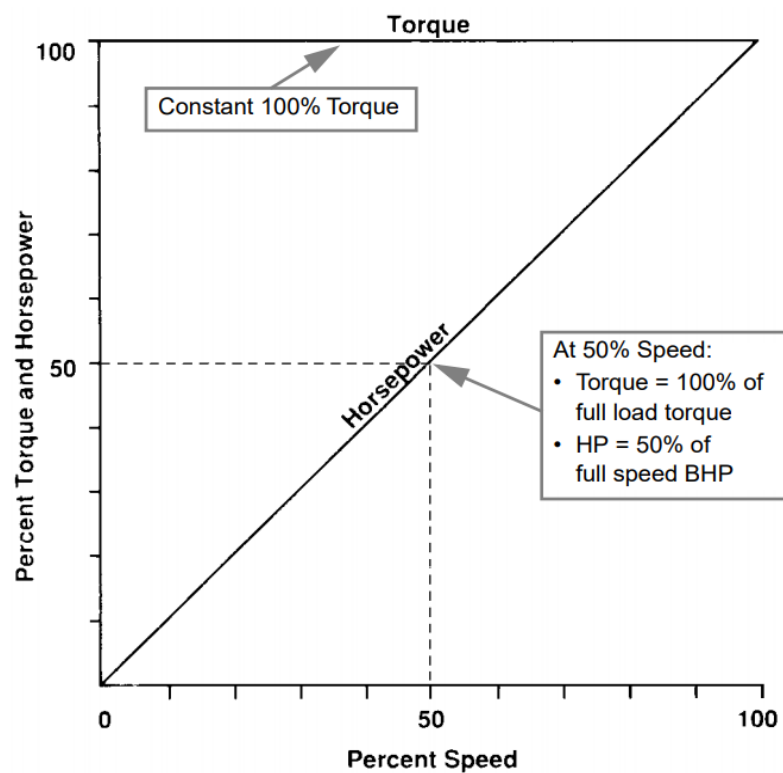
### **2.9.2 Φορτία σταθερής ροπής**

Στα φορτία σταθερής ροπής, η ροπή του φορτίου δεν εξαρτάται από την ταχύτητα. Αναλυτικότερα, στα συγκεκριμένα φορτία, με την αλλαγή της ταχύτητας η ροπή παραμένει αμετάβλητη ενώ η ισχύς μεταβάλλεται γραμμικά. Τα φορτία σταθερής ροπής χρειάζονται σχετικά υψηλά ρεύματα κατά την εκκίνηση, συγκρινόμενα με τα φορτία μεταβλητής ροπής, και για τον λόγο αυτό οι ρυθμιστές στροφών διαστασιολογούνται χαμηλότερα στην περίπτωση φορτίων ίδιας ισχύος αλλά διαφορετικής εφαρμογής. Σαν φορτία σταθερής ροπής θεωρούνται επίσης φορτία στα οποία η κατάσταση τους μπορεί να αλλάξει απότομα ή φορτία μεγάλης αδράνειας [13], [16].

Τυπικές εφαρμογές:

- Ιμάντες μεταφοράς (Ταινιόδρομοι)
- Αντλίες θετικής εκτόπισης
- Ανεψωτικά μηχανήματα
- Κυλιόμενοι μύλοι
- Εργαλειομηχανές

Καθώς αλλάζει η ταχύτητα, η ροπή φορτίου παραμένει σταθερή και η ιπποδύναμη αλλάζει γραμμικά με τη ταχύτητα (Σχήμα 2.27).



Σχήμα 2.27: Τυπικό γράφημα φορτίου σταθερής ροπής.

### 2.9.3 Φορτία μεταβλητής ροπής

Πολλοί τύποι φορτίων απαιτούν μειωμένη ροπή όταν οδηγούνται σε ταχύτητες μικρότερες από τη ταχύτητα βάσης του φορτίου. Αντίθετα, τέτοια φορτία μπορεί να απαιτούν αυξημένη ροπή όταν οδηγούνται σε ταχύτητες μεγαλύτερες από τη ταχύτητα βάσης του φορτίου. Αυτού του είδους τα φορτία κατατάσσονται ως φορτία μεταβλητής ροπής, όπως για παράδειγμα οι φυγοκεντρικές αντλίες, και ορισμένοι τύποι ανεμιστήρων και φυσητήρων. Γενικά, είναι λιγότερο απαιτητικά φορτία κατά την εκκίνηση του κινητήρα με την ροπή τους να εξαρτάται από το τετράγωνο της ταχύτητας και την ισχύ να εξαρτάται από τον κύβο της ταχύτητας του φορτίου [13], [16].

$$\left. \begin{array}{l} T = k \cdot \omega^2 \\ P = \omega \cdot T \end{array} \right\} \Rightarrow P = k \cdot \omega^3 \quad (\text{Εξ. 2.28})$$

Όπου:

$T$ : Η ροπή του φορτίου

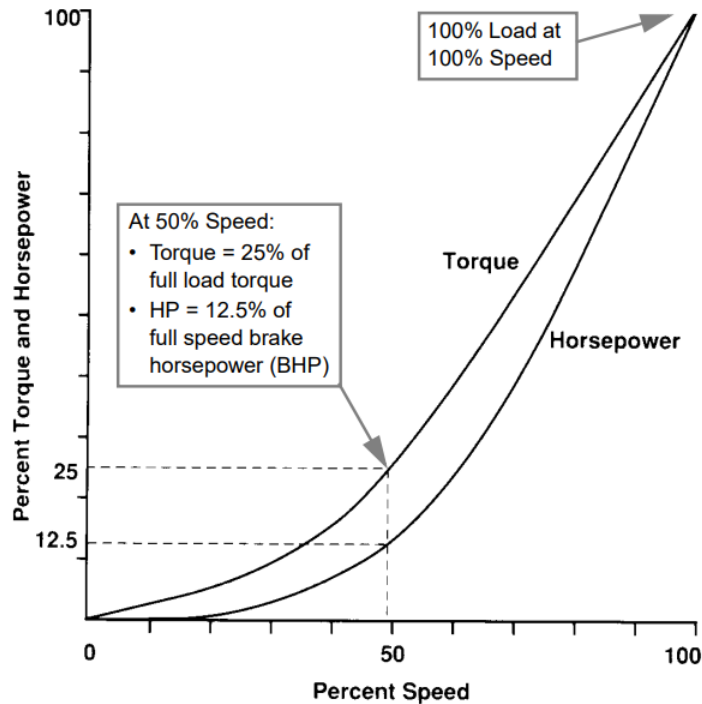
$k$ : Σταθερά της ροπής

$\omega$ : Η ταχύτητα του φορτίου

$P$ : Η ισχύς του φορτίου

Τυπικές εφαρμογές:

- Φυγοκεντρικές αντλίες
- Ανεμιστήρες
- Φυσητήρες λεβήτων



Σχήμα 2.28: Τυπικό γράφημα φορτίου μεταβλητής ροπής.

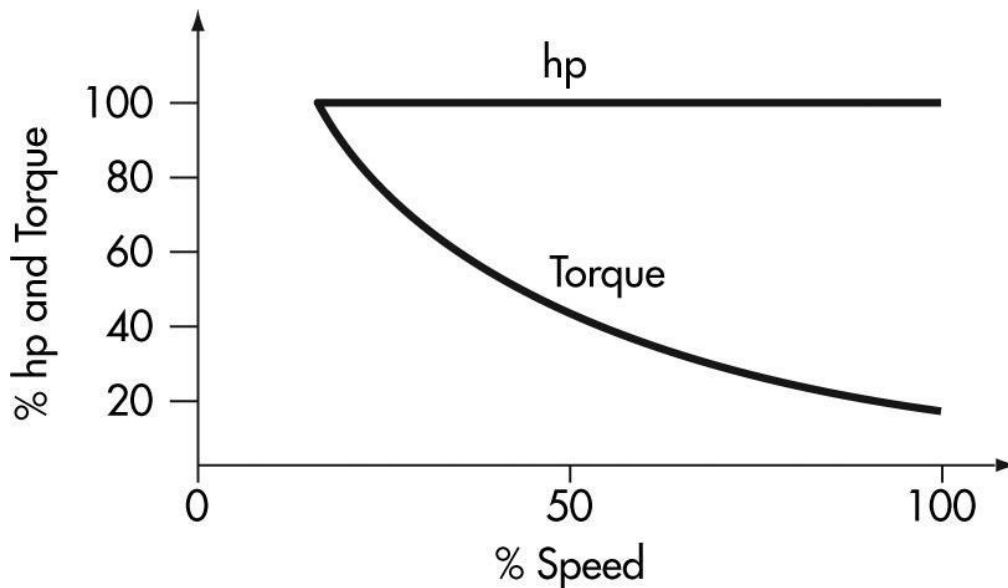
#### 2.9.4 Φορτία σταθερής ισχύος

Για ορισμένα μηχανήματα, απαιτείται η μείωση της ροπής καθώς αυξάνεται η ταχύτητα. Αυτό ισχύει ιδιαίτερα για τη σταθερή λειτουργία ισχύος, όταν ο κινητήρας παρέχει ροπή που είναι αντιστρόφως ανάλογη με την ταχύτητα του κινητήρα. Με αυτά τα φορτία, η ισχύς είναι σταθερή έτσι σπάνια θα υπάρξει εξοικονόμηση ενέργειας όταν η ταχύτητα μειώνεται. Για φορτία σταθερής ισχύος, η ροπή είναι αντιστρόφως ανάλογη με την ταχύτητα. Πάνω από τη ταχύτητα βάσης, η τάση που παρέχεται στο κινητήρα δεν μπορεί να αυξηθεί, καθώς φτάνει το μέγιστο όριο. Καθώς το κινητήριο σύστημα συνεχίζει την αύξηση της ταχύτητας και με την τάση να παραμένει στο ίδιο επίπεδο, το ρεύμα στον κινητήρα αρχίζει να μειώνεται, πράγμα που σημαίνει ότι η ροπή πέφτει επίσης [13], [17]. Για παράδειγμα ένα φορτίο σταθερής ισχύος είναι μια περιελκτική μηχανή. Για την διαδικασία της περιέλιξης απαιτείται η εφαρμογή σταθερής δύναμης σε σταθερή γραμμική ταχύτητα. Με αυτό το τρόπο η ισχύς  $P = \omega \cdot T$  πρέπει να είναι σταθερή, ενώ η γωνιακή ταχύτητα  $\omega = v/r$  να μεταβάλλεται συναρτήσει της ακτίνας περιστροφής, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.29 [18].



Τυπικές εφαρμογές:

- Κοπτικά εργαλεία
- Τόρνοι
- Περιελικτικές μηχανές
- Σπαστήρες



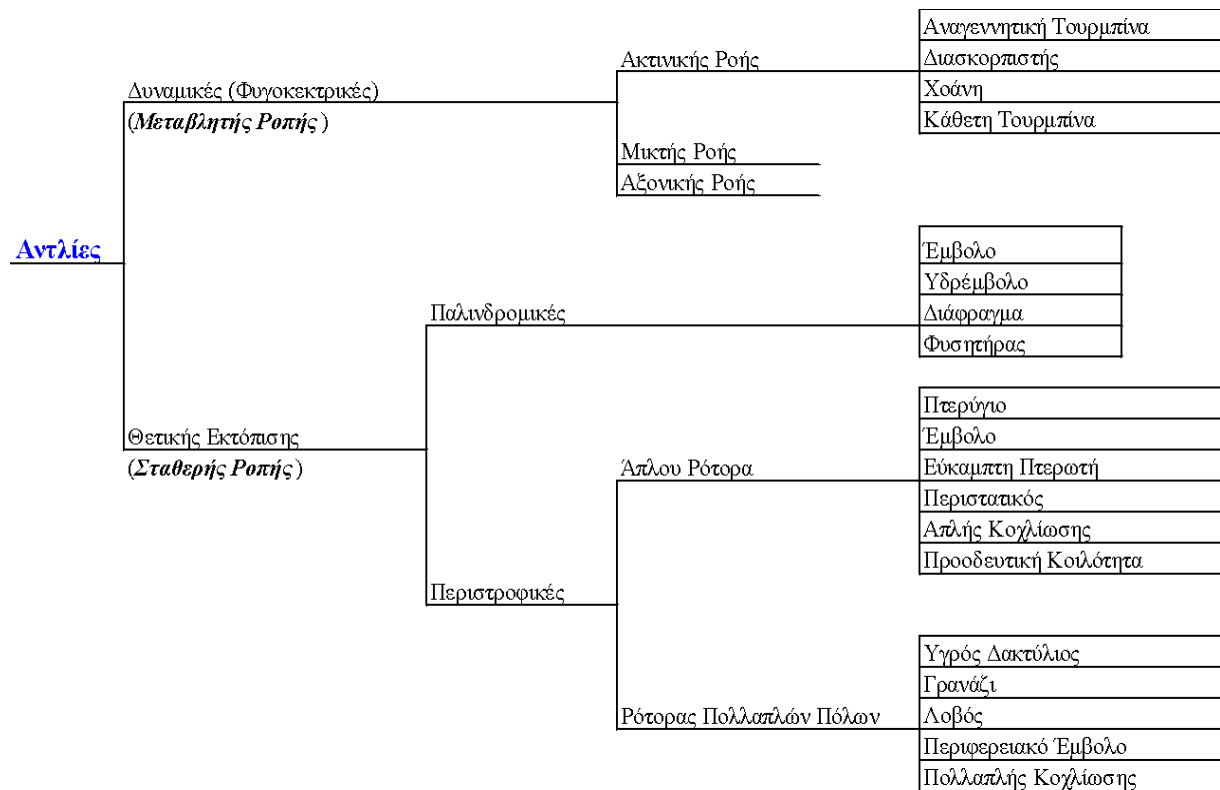
Σχήμα 2.29: Τυπικό γράφημα φορτίου σταθερής ισχύος.

## 2.10 Χαρακτηριστικά παραδείγματα ομάδων κινητήρων

### 2.10.1 Αντλίες

Οι αντλίες μπορούν να ομαδοποιηθούν σε δύο ευρείες κατηγορίες, όπως φαίνονται και στο Πίνακα 2.1, και πιο συγκεκριμένα σε αντλίες θετικής εκτόπισης και σε δυναμικές (φυγοκεντρικές αντλίες). Οι δυναμικές (φυγοκεντρικές) αντλίες αναπτύσσουν πίεση και μεταδίδουν συνεχώς ενέργεια στο υγρό με φυγοκεντρική δύναμη, με δυναμική ανύψωση ή με ανταλλαγή ορμής. Αυτές οι αντλίες συνήθως παρουσιάζουν μεταβλητό φορτίο ροπής, εκτός εάν αλλάζει το ειδικό βάρος του υγρού. Σε αυτές τις περιπτώσεις, η απαιτούμενη ροπή μπορεί να είναι μεγαλύτερη από την τυπική ροπή ταχύτητας που φαίνεται στο Σχήμα 2.27. Οι αντλίες θετικής εκτόπισης εκφορτώνουν έναν δεδομένο όγκο για κάθε μια περιστροφή της αντλίας. Η ενέργεια αυτή προστίθεται σε διακοπτόμενους παλμούς. Αυτές οι αντλίες συνήθως χαρακτηρίζονται ως σταθερά φορτία ροπής [16].

Ωστόσο, ενδέχεται να υπάρχουν απαιτήσεις μέγιστης ροπής μεγαλύτερης από τη ροπή πλήρους φορτίου του κινητήρα, η οποία θα μπορούσε να επηρεάσει το μέγεθος του κινητήρα.



**Πίνακας 2.1:** Τυπικές αντλίες και τύποι φορτίου [16].

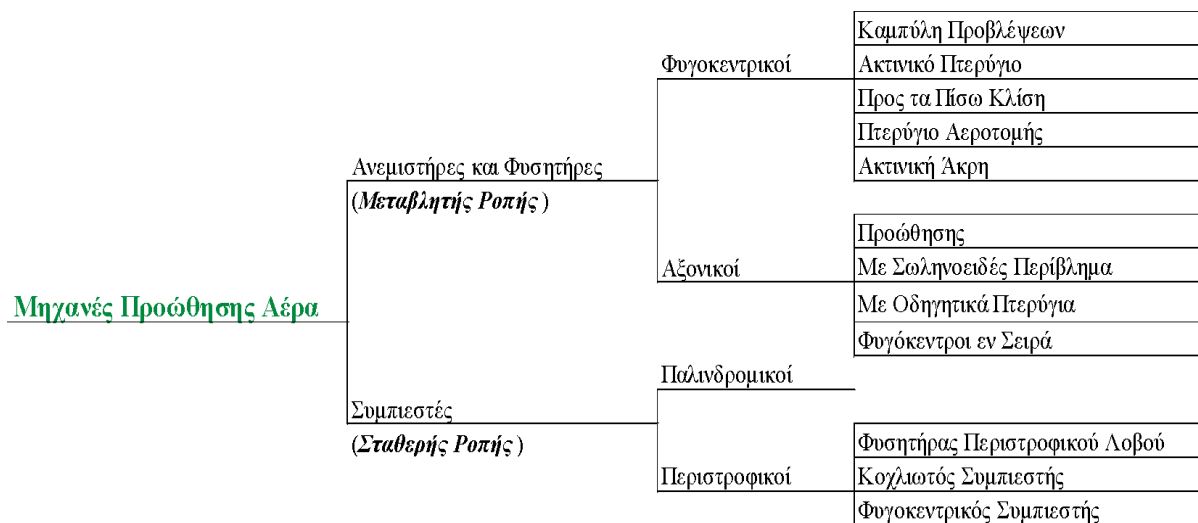
### 2.10.2 Κινητήρες Αερίων

Οι κινητήρες αερίων μπορούν να ομαδοποιηθούν σε δύο ευρείες κατηγορίες, όπως φαίνεται και στο Πίνακα 2.2:

- Ανεμιστήρες μεταβλητής ροπής και φουσητήρες (συνήθως παράγουν λιγότερο από 35 *psi*).
- Συμπίεστες σταθερής ροπής (συνήθως παράγουν περισσότερα από 35 *psi*).

Οι ανεμιστήρες μεταβλητής ροπής και οι φουσητήρες με φυγοκεντρικούς και αξονικούς σχεδιασμούς, αναπτύσσουν στατική πίεση και συνεχώς μεταδίδουν ενέργεια στο αέριο με φυγοκεντρική δύναμη. Αυτοί οι φουσητήρες και οι ανεμιστήρες ακολουθούν τους νόμους ομοιότητας (*affinity laws*) και συνήθως παρουσιάζουν φορτίο μεταβλητής ροπής. Το φορτίο ποικίλλει δραστικά ως συνάρτηση της πυκνότητας αερίου (για παράδειγμα, πυκνότητας θερμού αέρα έναντι πυκνότητας ψυχρού αέρα).

Οι συμπιεστές σταθερής ροπής με παλινδρομικό και ροτοδυναμικό σχεδιασμό, αναπτύσσουν στατική πίεση μεταδίδοντας ενέργεια στο αέριο με διακοπτόμενους παλμούς. Αυτοί οι τύποι φορτίου του συμπιεστή δεν ακολουθούν τους νόμους ομοιότητας (affinity laws), όπως οι ανεμιστήρες παραπάνω (ακόμα και όταν ο συμπιεστής είναι φυγοκεντρικός), και πρέπει να θεωρείται φορτίο σταθερής ροπής. Απαιτήσεις μέγιστης ροπής θα μπορούσε να επηρεάσει το μέγεθος του κινητήρα [16]. Παραδείγματα εφαρμογών αυτών των κινητήρων είναι τα κλιματιστικά και οι ψυκτικοί θάλαμοι.



**Πίνακας 2.2:** Τυπικοί κινητήρες αερίου και τύποι φορτίου [16].

Εφαρμογή	Φορτίο	Ροπή Εκκίνησης
<b>Αναδευτήρες</b>		
▪ Υγρού	Μεταβλητής Ροπής	Μέτρια
▪ Λάσπης	Μεταβλητής Ροπής	Μέτρια
<b>Φυσητήρες</b>		
▪ Φυγοκεντρικοί	Μεταβλητής Ροπής	Χαμηλή
▪ Θετικής Εκτόπισης	Σταθερής Ροπής	Χαμηλή
<b>Συμπιεστές</b>		
▪ Αξονικοί - Φυγοκεντρικοί	Μεταβλητής Ροπής	Χαμηλή
▪ Παλινδρομικοί	Σταθερής Ροπής	Μέτρια
▪ Περιστροφικοί	Σταθερής Ροπής	Μέτρια
<b>Μεταφορείς</b>		
▪ Με Ιμάντα	Σταθερής Ροπής	Μέτρια
▪ Κοχλιοφόρος	Σταθερής Ροπής	Υψηλή
▪ Με Δόνηση	Σταθερής Ροπής	Μέτρια
<b>Ανεμιστήρες</b>		
▪ Αξονικοί	Σταθερής Ροπής	Υψηλή
▪ Φυγοκεντρικοί	Μεταβλητής Ροπής	Χαμηλή
<b>Τροχοί</b>	Σταθερής Ιπποδύναμης	Μέτρια
<b>Τόρνοι</b>	Σταθερής Ιπποδύναμης	Μέτρια
<b>Αναμικτήρες</b>		
▪ Χημικών Ουσιών	Σταθερής Ροπής	Υψηλή
▪ Ζύμης	Σταθερής Ροπής	Υψηλή
▪ Λάσπης	Σταθερής Ροπής	Υψηλή
<b>Αντλίες</b>		
▪ Φυγοκεντρικές	Μεταβλητής Ροπής	Χαμηλή
▪ Θετικής Εκτόπισης	Σταθερής Ροπής	Μέτρια
▪ Λάσπης	Σταθερής Ροπής	Υψηλή
<b>Πριόνια</b>	Σταθερής Ροπής	Μέτρια
<b>Εργαλειομηχανές</b>	Σταθερής Ιπποδύναμης	Μέτρια
<b>Μηχανές Περιέλιξης</b>	Σταθερής Ιπποδύναμης	Μέτρια
<b>Πλυντήρια</b>	Σταθερής Ροπής	Μέτρια

Πίνακας 2.3: Χαρακτηριστικά εφαρμογής για τα διαφορετικά είδη φορτίου [17].

Εφαρμογή	Εικόνα Κινητήρα	Εφαρμογή	Εικόνα Κινητήρα
Αναδευτήρες		Αναμικτήρες	
Φυσητήρες		Αντλίες	
Συμπιεστές		Πριόνια	
Μεταφορείς		Εργαλειομηχανές	
Ανεμιστήρες		Μηχανές Περιέλιξης	
Τροχοί		Πλυντήρια	
Τόρνοι			

**Πίνακας 2.4:** Εικόνες από διαφορετικές εφαρμογές των κινητήρων.

## Κεφάλαιο 3 : Συστήματα σφονδύλων (Flywheel Energy Storage System - FESS)

Οι ασύγχρονοι ή επαγωγικοί κινητήρες, ανάλογα του τρόπου λειτουργίας τους, επηρεάζουν τη συχνότητα του ηλεκτρικού δικτύου. Το ίδιο συμβαίνει, αν στο ηλεκτρικό δίκτυο ενεργοποιηθούν συστήματα αποθήκευσης ενέργειας με σφονδύλους, τα οποία αναλυτικά περιγράφονται στο παρών κεφάλαιο.

### 3.1 Κύρια μέρη ενός Flywheel Energy Storage System - FESS

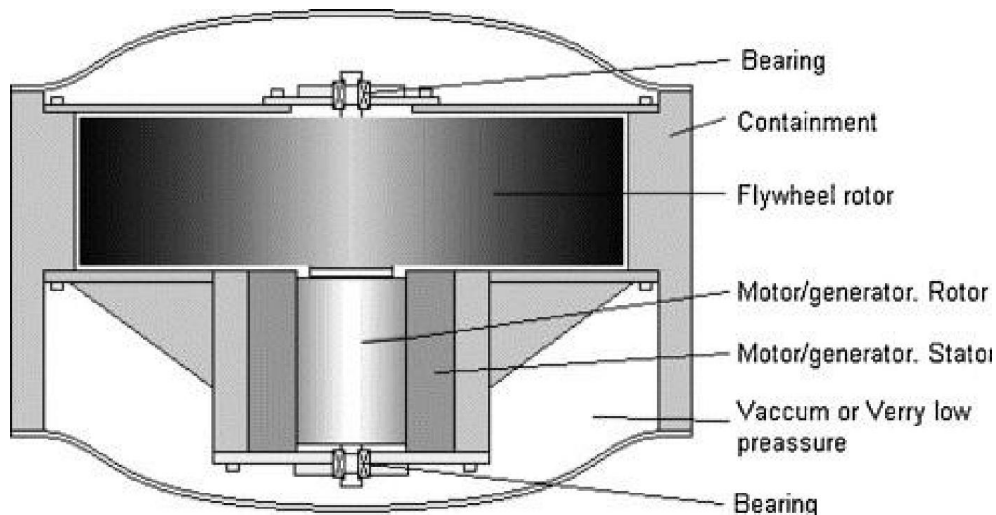
Στα συστήματα σφονδύλων η αδράνεια μιας περιστρεφόμενης μάζας χρησιμοποιείται για την αποθήκευση της ενέργειας. Η ενέργεια αποθηκεύεται σε κινητική μορφή. Τα κύρια μέρη ενός τέτοιου συστήματος είναι:

- **Μία ηλεκτρική μηχανή.** Η ηλεκτρική μηχανή χρησιμοποιείται για την μετατροπή της ενέργειας από ηλεκτρική μορφή σε κινητική κατά τη φόρτιση του συστήματος και αντιστρόφως κατά την εκφόρτισή του. Θεωρητικά μπορεί να χρησιμοποιηθεί οποιοσδήποτε τύπος μηχανής. Ωστόσο η τελική επιλογή καθορίζεται από την εκάστοτε εφαρμογή του συστήματος. Γενικά στους μεγάλους και αργούς σφονδύλους χρησιμοποιούνται οι κλασσικές ασύγχρονες επαγωγικές μηχανές, ενώ στους μικρότερους και ταχύτερους ιδανικές είναι οι μηχανές μόνιμου μαγνήτη. Αν και αυτός είναι ο τύπος που επικρατεί στην πλειοψηφία των εφαρμογών, υπάρχει η δυνατότητα χρησιμοποίησης και μηχανών μαγνητικής αντίστασης (*Synchronous Reluctance Machines*).
- **Μία περιστρεφόμενη μάζα.** Πρόκειται για το κινητό μέρος του συστήματος, η αδράνεια του οποίου χρησιμοποιείται για την αποθήκευση της ενέργειας. Είναι κυλινδρικού σχήματος, συμπαγές ή κούφιο. Η περιστρεφόμενη μάζα συνδέεται με τον δρομέα της μηχανής, μπορεί να θεωρηθεί ως επέκτασή του και ουσιαστικά αποτελεί μαζί μ' αυτόν το κινητό μέρος της μηχανής.
- **Μετατροπείς ισχύος.** Είναι διπλής κατεύθυνσης και μεσολαβούν ανάμεσα στο δίκτυο και τη μηχανή, αφενός για τη σωστή φόρτιση του σφονδύλου και αφετέρου για την επίτευξη της επιθυμητής εξόδου κατά την εκφόρτισή του. Συνήθως χρησιμοποιούνται γέφυρες με συνδυασμό διόδων και IGBTs. Ανάλογα με την εφαρμογή, ο σφόνδυλος συνδέεται στην AC πλευρά ενός δικτύου ή σε DC ζυγό (π.χ. σε εφαρμογές UPS) και

αντίστοιχα χρησιμοποιείται είτε διάταξη δύο μετατροπέων (AC/DC και DC/AC) είτε ένας μετατροπέας (DC/AC).

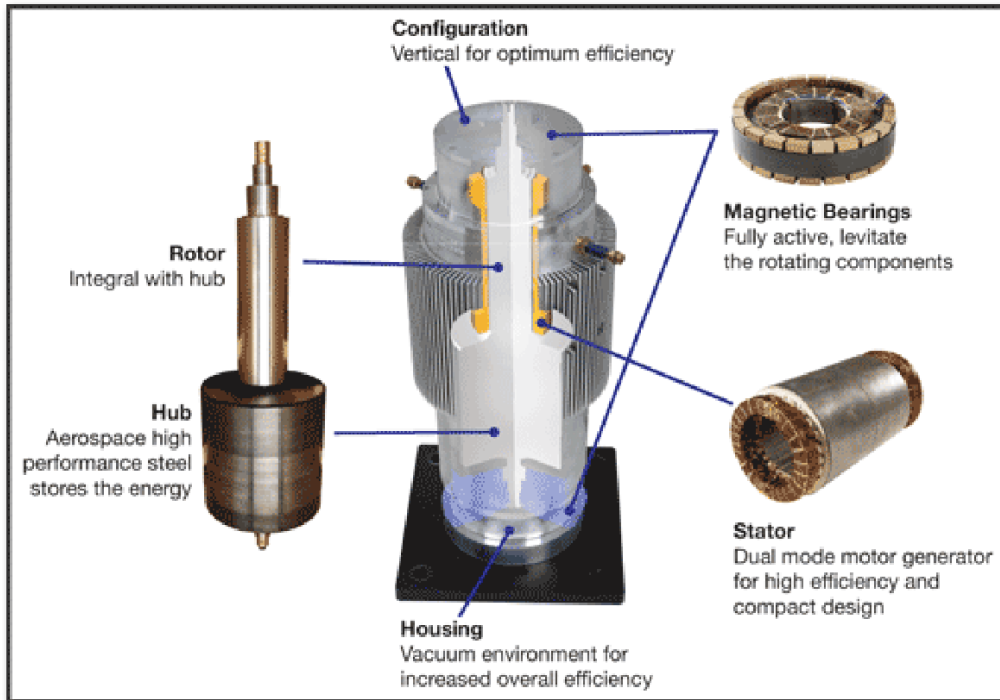
- **Μία διάταξη ελέγχου.** Πρόκειται για τη διάταξη που καθορίζει τη φορά ροής της ενέργειας στο σύστημα, δίνοντας τα κατάλληλα σήματα διέγερσης στους μετατροπείς ανάλογα με τις συνθήκες που επικρατούν στο δίκτυο (επίπεδο τάσης και συχνότητας).
- **Ρουλεμάν.** Χρησιμοποιούνται μηχανικά ή ηλεκτρομαγνητικά ρουλεμάν για τη στήριξη ή αιώρηση του κινητού μέρους του συστήματος, έτσι ώστε να επιτυγχάνεται σταθερή λειτουργία με ελάχιστες δυνατές απώλειες λόγω τριβών.

Τέλος, πρέπει να αναφέρουμε ότι ο σφόνδυλος τοποθετείται σε κενό αέρα ή σε αέρα υπό χαμηλή πίεση για ελαχιστοποίηση των τριβών. Επιπλέον ολόκληρο το σύστημα βρίσκεται μέσα σε δοχείο με κατάλληλα διακοπτικά μέσα και ανεμιστήρες για ασφαλή λειτουργία [19].

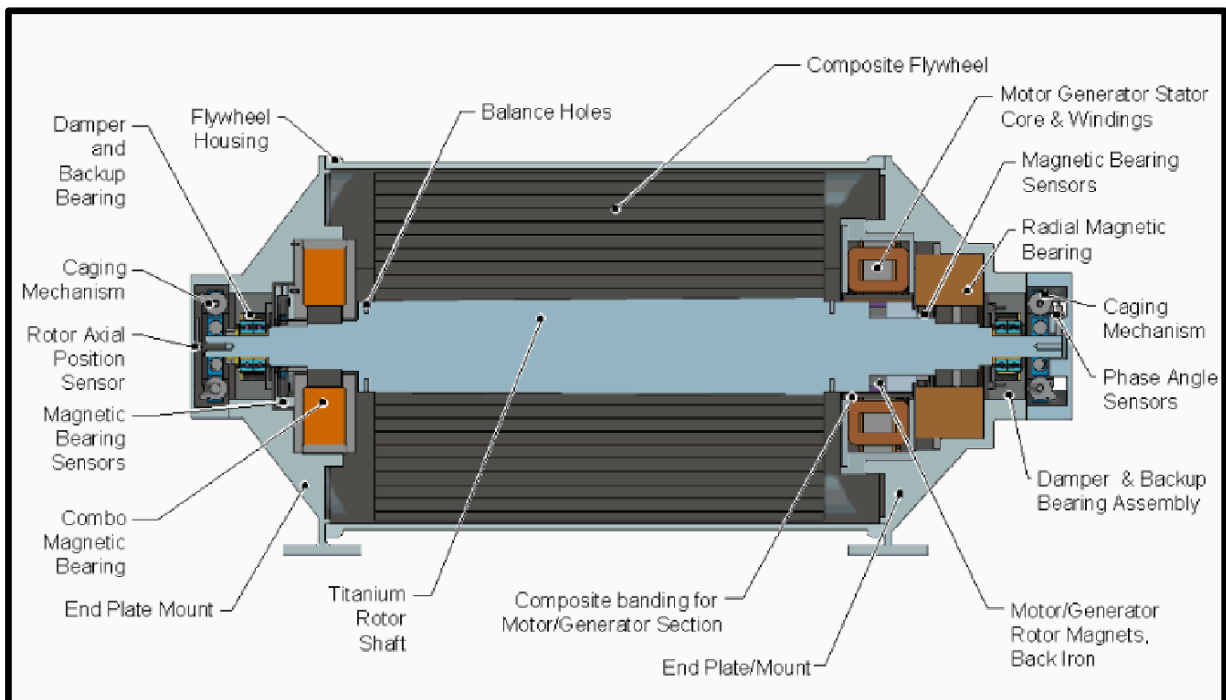


**Σχήμα 3.1:** Τα κύρια μέρη ενός συστήματος σφονδύλου [20].

Στα Σχήματα 3.2 και 3.3 που ακολουθούν, απεικονίζονται τα κύρια μέρη του συστήματος FESS με κάθετο και οριζόντιο άξονα περιστροφής.



Σχήμα 3.2: Κύρια μέρη του συστήματος FESS με κάθετο άξονα περιστροφής [21].



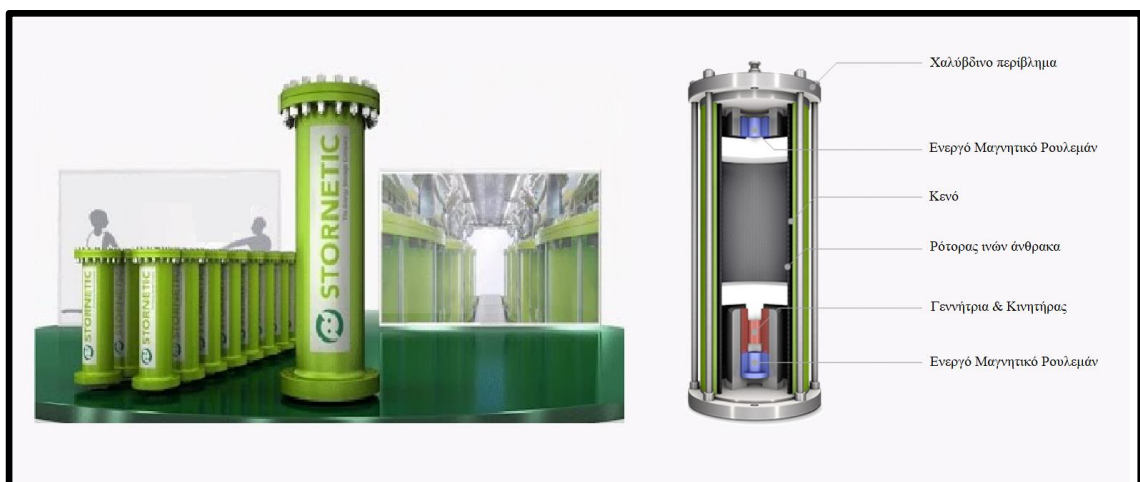
Σχήμα 3.3: Κύρια μέρη του συστήματος FESS με οριζόντιο άξονα περιστροφής [21].



### 3.2 Τεχνικές Βελτιώσεις

Πρόσφατες εξελίξεις στην κατασκευή των συστημάτων σφονδύλων έχουν αυξήσει την αποθηκευτική τους ικανότητα, έχουν βελτιώσει την απόδοση και την αντοχή τους και έχουν διευρύνει το φάσμα των εφαρμογών τους. Οι σημαντικότερες τεχνικές βελτιώσεις αφορούν τα:

- **Συνθετικά υλικά.** Παλαιότερα ο σφόνδυλος κατασκευάζονταν από χάλυβα. Σήμερα όλα σχεδόν τα συστήματα σφονδύλων χρησιμοποιούν συνθετικά υλικά (ανθρακικές ίνες) επειδή είναι ελαφριά και ανθεκτικά. Τέτοια υλικά έχουν μεγάλη εφελκυστική αντοχή, παράμετρος που περιορίζει την ταχύτητα του σφονδύλου και επομένως την ενεργειακή του χωρητικότητα. Η χρησιμοποίηση, λοιπόν, συνθετικών υλικών επιτρέπει την ανάπτυξη μεγάλης ταχύτητας περιστροφής, κάνοντας, έτσι, το σύστημα σφονδύλου όχι μόνο συγκρίσιμο αλλά και καλύτερο από τις μπαταρίες ως προς την πυκνότητα ισχύος (*power density - W/m<sup>3</sup>*) [19].



Σχήμα 3.4: Το σύστημα σφονδύλου EnWheel® της εταιρείας STORNETIC.

- **Μαγνητικά ρουλεμάν (*magnetic bearings*).** Τα μηχανικά ρουλεμάν που χρησιμοποιούνταν στο παρελθόν δεν μπορούν, εξαιτίας των τριβών και του μικρού χρόνου ζωής τους, να χρησιμοποιηθούν στα νέα ταχύτερα συστήματα σφονδύλων. Σήμερα χρησιμοποιούνται ηλεκτρομαγνητικά ρουλεμάν μόνιμου μαγνήτη. Αυτά δεν έχουν καμία μηχανική επαφή με τον κύλινδρο, δεν έχουν κινητά μέρη, φθείρονται ελάχιστα με το πέρασμα του χρόνου και δεν απαιτούν λίπανση [19].



**Σχήμα 3.5:** Μαγνητικά Ρουλεμάν της εταιρείας Calnetix Technologies LLC.

- **Ηλεκτρονικά ισχύος.** Η πρόοδος στον χώρο των ηλεκτρονικών ισχύος έκανε δυνατή τη λειτουργία των σφονδύλων σε υψηλή ισχύ [19].

### 3.3 Αρχή Λειτουργίας

Κατά τη φόρτιση του συστήματος τα τυλίγματα του στάτη της μηχανής τροφοδοτούνται με ρεύμα ονομαστικής συχνότητας (ή με παλμούς ρεύματος μέσω κατάλληλων διατάξεων, όταν πρόκειται για μηχανές μαγνητικής αντίστασης) και το μαγνητικό πεδίο που δημιουργείται περιστρέφει το δρομέα, δηλαδή το σφόνδυλο. Ο σφόνδυλος επιταχύνεται αποκτώντας κινητική ενέργεια. Με αυτόν τον τρόπο αποθηκεύεται ενέργεια στο σύστημα. Η μηχανή κατ' αυτήν τη διαδικασία λειτουργεί ως κινητήρας. Κατά την εκφόρτιση ο σφόνδυλος επιβραδύνεται. Η κινητική ενέργεια που χάνει μετατρέπεται σε ηλεκτρική μέσω της μηχανής, που σ' αυτήν την περίπτωση λειτουργεί ως γεννήτρια, και παρέχεται στο δίκτυο. Όταν ο σφόνδυλος δε βρίσκεται σε κατάσταση φόρτισης (επιτάχυνσης) ή εκφόρτισης (επιβράδυνσης) συνεχίζει να περιστρέφεται με ταχύτητα ικανοποιητικά σταθερή και χωρίς να καταναλώνει ενέργεια από το δίκτυο. Μικρά ποσά ενέργειας απαιτούνται για να επανέλθει ο σφόνδυλος στην κατάσταση πλήρους φόρτισης, όταν ξεφύγει από αυτή λόγω τριβών. Διατηρείται, έτσι, αποθηκευμένη ενέργεια σε μορφή κινητικής ενέργειας. Το είδος της λειτουργίας του σφονδύλου, το αν δηλαδή απορροφά ενέργεια από το δίκτυο ή το αν παρέχει, εξαρτάται από τις εκάστοτε συνθήκες που επικρατούν στο δίκτυο και καθορίζεται από το σύστημα ελέγχου. Το σύστημα ελέγχου παρακολουθεί διάφορες παραμέτρους του δικτύου και όταν υπάρχει ανάγκη για ενέργεια δίνει εντολή στο σφόνδυλο να εκφορτιστεί, ενώ όταν υπάρχει περίσσεια ενέργειας ο σφόνδυλος καλείται να την απορροφήσει [19].

Για παράδειγμα, όταν η τάση πέσει κάτω από μία προκαθορισμένη τιμή, ο σφόνδυλος εκφορτίζεται και παρέχει ενέργεια στο δίκτυο. Όταν η τάση ξεπεράσει μία άλλη προκαθορισμένη τιμή ο σφόνδυλος απορροφά ενέργεια από το δίκτυο. Και στις δύο περιπτώσεις η τάση διατηρείται μέσα στα επιθυμητά όρια.

### 3.4 Εξισώσεις του συστήματος – Τεχνικά χαρακτηριστικά

Η ενέργεια που αποθηκεύεται σε ένα σφόνδυλο δίνεται από τη σχέση:

$$E = \frac{1}{2} \cdot J \cdot \omega^2 \quad (\text{Εξ. 3.1})$$

όπου :  $J$  : η ροπή αδράνειας της συνολικής μάζας του κινητού μέρους σε  $(kg \cdot m^2)$  και

$\omega$  : η γωνιακή ταχύτητα περιστροφής σε  $(rad/sec)$ .

Όταν πρόκειται για συμπαγή σφόνδυλο ισχύει:

$$J = \frac{1}{2} \cdot \pi \cdot \rho \cdot H \cdot R^4 \quad (\text{Εξ. 3.2})$$

όπου :  $\rho$  η πυκνότητα,  $H$  το ύψος και  $R$  η ακτίνα του κυλίνδρου.

Στην περίπτωση του κούφιου σφονδύλου, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.6, ισχύει:

$$J = \frac{1}{2} \cdot \pi \cdot \rho \cdot H \cdot (R^4 - r^4) \quad (\text{Εξ. 3.3})$$

όπου :  $R$  η εξωτερική και  $r$  η εσωτερική ακτίνα αντίστοιχα.



Σχήμα 3.6: Μορφή κούφιου σφονδύλου.

Ωστόσο, μια ευκολότερη προσέγγιση για τη ροπή αδράνειας είναι:

$$J \approx \rho \cdot V \cdot R^2 \quad (\text{Εξ. 3.4})$$

όπου :  $V$  ο όγκος του κυλίνδρου.

Η εφελκυστική τάση που αναπτύσσεται σε κύλινδρο που περιστρέφεται με γωνιακή ταχύτητα  $\omega$  προκύπτει προσεγγιστικά:

$$T \approx \rho \cdot R^2 \cdot \omega^2 \quad (\text{Εξ. 3.5})$$

Η εφελκυστική αντοχή του υλικού από το οποίο είναι κατασκευασμένος ο σφόνδυλος αποτελεί τον περιορισμό για τη μέγιστη ταχύτητα με την οποία αυτός μπορεί να περιστρέφεται. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, τα συνθετικά ανθρακικών ινών είναι ιδανικά για συστήματα σφονδύλων, γιατί έχουν μεγάλη εφελκυστική αντοχή.

### **Παράδειγμα**

Ας θεωρήσουμε έναν σφόνδυλο από τέτοιο υλικό με εφελκυστική αντοχή  $300 \text{ MN/m}^2$ . Αν ο σφόνδυλος έχει εξωτερική ακτίνα  $0,5 \text{ m}$ , εσωτερική ακτίνα  $0,375 \text{ m}$ , ύψος  $1 \text{ m}$ , πυκνότητα  $1.100 \text{ kg/m}^3$  και καταλαμβάνει χώρο  $1 \text{ m}^3$ , τότε η μέγιστη ταχύτητα με την οποία μπορεί να περιστρέφεται είναι:

$$\omega_{max} \approx \frac{1}{R} \cdot \sqrt{\frac{T}{\rho}} \approx 1.045 \text{ rad/sec.} \quad \text{Δηλαδή : } n_{max} = \frac{60 \cdot \omega_{max}}{2 \cdot \pi} \approx 10.000 \text{ rpm} \quad (\text{Εξ. 3.6})$$

ενώ η ροπή αδράνειας του συγκεκριμένου σφονδύλου είναι:

$$J = \frac{1}{2} \cdot \pi \cdot \rho \cdot H \cdot (R^4 - r^4) \approx 74 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \quad (\text{Εξ. 3.7})$$

Επομένως, η ενέργεια που μπορεί να αποθηκεύσει είναι:

$$E = \frac{1}{2} \cdot J \cdot \omega_{max}^2 \approx 41 \text{ MJ} \approx 12,5 \text{ kWh} \quad (\text{Εξ. 3.8})$$






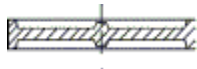

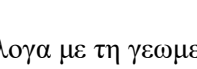

Το βάρος του σφονδύλου είναι περίπου  $375 \text{ kg}$ , ενώ οι απώλειες λόγω τριβών σε ένα σφόνδυλο τέτοιου μεγέθους είναι μόλις  $2 \text{ W}$ .

Γίνεται φανερό ότι η γεωμετρία και η ταχύτητα περιστροφής του σφονδύλου καθορίζουν την ποσότητα της αποθηκευμένης ενέργειας, ενώ το πως θα τη διαχειριστεί, ο ρυθμός δηλαδή με τον οποίο αυτή ανταλλάσσεται ανάμεσα σε δίκτυο και σφόνδυλο (με άλλα λόγια η ισχύς του συστήματος), καθορίζεται από τη μηχανή και τα ηλεκτρονικά ισχύος. Για ένα ρότορα που είναι κατασκευασμένος από ένα ισοτροπικό υλικό, όπως είναι τα περισσότερα μέταλλα, η μέγιστη ειδική ενέργεια  $e$  δίνεται από το παρακάτω τύπο:

$$e = K \cdot \frac{\sigma_u}{\rho} \quad (\text{Εξ. 3.9})$$

όπου :  $\sigma_u$  η τάση θραύσης και  $\rho$  η πυκνότητα υλικού.

Το  $K$  είναι ένας γεωμετρικός παράγοντας και εξαρτάται μόνο από το σχήμα του ρότορα, έτσι η ειδική ενέργεια είναι ανεξάρτητη μεγέθους. Στον Πίνακα 3.1 παρουσιάζονται ενδεικτικά τιμές του συντελεστή  $K$  ανάλογα με το σχήμα του σφονδύλου και στην περίπτωση που χρησιμοποιείται δίσκος με ύψος πολύ μικρότερο από τη διάμετρο και το υλικό είναι ομοιογενές ισοτροπικό με αναλογία Poisson 0,3, δηλαδή χάλυβας. Επειδή η κινητική ενέργεια είναι ανάλογη του τετραγώνου της ταχύτητας συμπεραίνουμε ότι, για συγκεκριμένες αναλογίες γεωμετρίας η περιφερειακή ταχύτητα στην οποία ένας ρότορας θα κινδυνέψει από θραύση είναι ανεξάρτητη του μεγέθους [22].

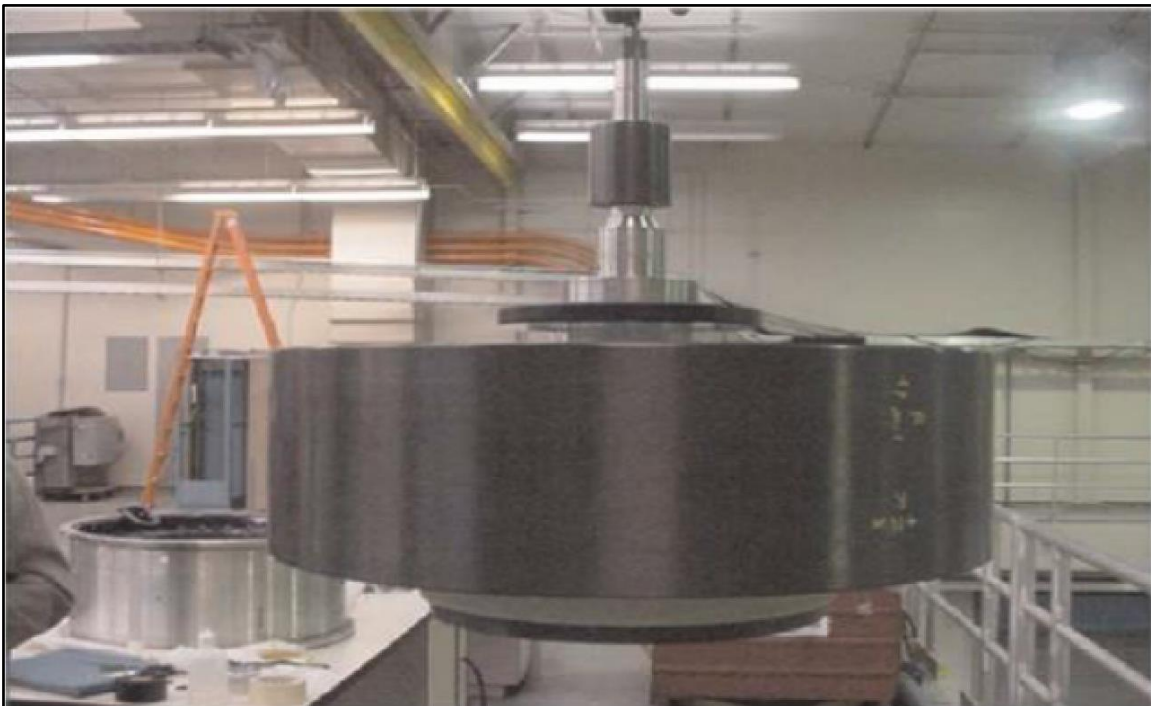
Γεωμετρία Σφονδύλου	Διατομή	Συντελεστής Σχήματος $K$
Δίσκος		1,000
Τροποποιημένος Δίσκος Σταθερής Τάσης		0,931
Κωνικός Δίσκος		0,806
Επίπεδος Δίσκος χωρίς Διάτρηση		0,606
Λεπτός δακτύλιος		0,500
Σε σχήμα ράβδου		0,500
Στεφάνη με νεύρωση		0,400
Απλή ράβδος		0,333
Επίπεδη διάτρητη ράβδος		0,305

**Πίνακας 3.1:** Τιμές συντελεστή  $K$  ανάλογα με τη γεωμετρία του σφονδύλου [22].

Τα ισοτροπικά υλικά που χρησιμοποιούνται είναι κυρίως το τιτάνιο και το ατσάλι, λόγω ενεργειακής πυκνότητας, το οποίο μας ενδιαφέρει και στους σφονδύλους. Οι σφόνδυλοι με χαλύβδινους ρότορες παρουσιάζουν ενεργειακή πυκνότητα  $5 \text{ Wh/kg}$ , ενώ αυτοί με ίνες άνθρακα υψηλής αντοχής παρουσιάζουν  $100 \text{ Wh/kg}$ .

Η κινητική ενέργεια των σφονδύλων μπορεί να αυξηθεί σημαντικά αν χρησιμοποιηθούν ανισότροπα υλικά, όπως είναι οι συνθετικές ίνες, για το ρότορα. Αν και πολλοί συνδυασμοί μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τα συνθετικά υλικά, τα συνηθέστερα είναι πολύκλινα σύρματα υψηλής αντοχής ενσωματωμένα σε μία μήτρα. Συγκεκριμένα, οι ίνες γραφίτη είναι ισχυρότερες 3 έως και 10 φορές από εκείνες του χάλυβα. Ο γραφίτης είναι μία κρυσταλλική μορφή του άνθρακα και η διάμετρος μίας ίνας γραφίτη κυμαίνεται από  $25 \text{ nm}$  έως  $800 \text{ nm}$ . Γενικότερα όσο πιο μικρή διάμετρο έχει μία ίνα, τόσο πιο μεγάλη αντοχή έχει.

Πέρα από την υψηλή ειδική ενέργεια, οι συνθετικές ίνες παρέχουν και περισσότερη ασφάλεια. Αυτό, γιατί όταν ένας ρότορας από ισοτροπικό μέταλλο αστοχήσει, μεγάλα κομμάτια πετιούνται με μεγάλη ταχύτητα, σε αντίθεση με τις σύνθετες ίνες όπου τα κομμάτια θα είναι πολύ μικρά, ίσως και μικροί κόκκοι.



**Σχήμα 3.7:** Φωτογραφία ενός σφονδύλου  $1 \text{ kWh}$  με περιστρεφόμενη μάζα κατασκευασμένη από ίνες γραφίτη.

### 3.5 Κατηγοριοποίηση των σφονδύλων

Υπάρχουν εμπορικά διαθέσιμοι τύποι διατάξεων σφονδύλων, ωστόσο υπάρχουν και τύποι υπό ανάπτυξη. Οι δύο βασικοί τύποι είναι:

- **Τα συστήματα χαμηλής ταχύτητας.** Τα βασικά χαρακτηριστικά αυτού του τύπου είναι ο χαλύβδινος ρότορας και τα συμβατικά ρουλεμάν, η τεχνολογική ωριμότητα και τα υψηλά επίπεδα αξιοπιστίας. Απαιτούν μετασχηματιστή για τη διασύνδεση τους με το δίκτυο, ενώ οι ρότορες έχουν ταχύτητα περιστροφής έως 8.000 *rpm* και ενεργειακή πυκνότητα μέχρι 5 *Wh/kg* [23].
- **Τα συστήματα υψηλής ταχύτητας.** Αποτελούνται από ρότορες που κατασκευάζονται αποκλειστικά από συνθετικά υλικά, τα οποία αντέχουν τις μεγάλες εφελκυστικές τάσεις που αναπτύσσονται σε τέτοιες ταχύτητες. Επιπλέον, οι μεγάλες ταχύτητες έχουν ως αποτέλεσμα την αύξηση των απωλειών, εξαιτίας των τριβών των ρουλεμάν και του αέρα. Για την ελαχιστοποίηση αυτών των απωλειών οι σφόνδυλοι υψηλής ταχύτητας έχουν μαγνητικά ρουλεμάν και βρίσκονται σε κενό. Επειδή η κινητική ενέργεια που μπορεί να αποθηκεύσει ένας σφόνδυλος είναι ανάλογη του τετραγώνου της ταχύτητας περιστροφής του, με αύξηση της ταχύτητας επιτυγχάνεται σημαντική αύξηση της ενεργειακής του χωρητικότητας. Τέλος, τα συστήματα αυτά έχουν ενεργειακή πυκνότητα μέχρι 100 *Wh/kg* και διαρκώς εξελίσσονται [23].

### 3.6 Παράγοντες που επηρεάζουν την απόδοση του FESS

Υπάρχουν διάφοροι παράγοντες που πρέπει να ληφθούν υπόψη, κατά τον σχεδιασμό του συστήματος, ώστε να κατασκευαστεί ένα αποδοτικό, αποτελεσματικό και ασφαλές σύστημα αποθήκευσης ενέργειας. Οι παράγοντες αυτοί αναλύονται στην συνέχεια και είναι οι εξής:

- **Καταπόνηση του δρομέα και αστοχία υλικού.** Η κατασκευή σφονδύλων με μεγάλη ακτίνα και υψηλή ταχύτητα περιστροφής είναι επιθυμητή, γιατί επιτρέπει την αποθήκευση μεγάλου ποσού ενέργειας, σύμφωνα με την Εξίσωση 3.1. Ωστόσο, ο σχεδιασμός του σφονδύλου περιορίζεται από την ικανότητα του υλικού του σφονδύλου να αντέξει τις πιέσεις και τις φυγόκεντρες δυνάμεις που αναπτύσσονται λόγω περιστροφής. Εάν η ταχύτητα του σφονδύλου ξεπεράσει το ανώτατο επιτρεπτό όριο, τότε θα αρχίσουν να εκσφενδονίζονται κομμάτια του σφονδύλου, τερματίζοντας, έτσι, την διάρκεια ζωής του σφονδύλου. Τα κομμάτια αυτά, μπορεί να προκαλέσουν τραυματισμό ατόμων, καθώς και καταστροφή εξοπλισμού που υπάρχει τριγύρω [21].

- **Μετατροπή ενέργειας.** Οι σφόνδυλοι αποθηκεύουν κινητική ενέργεια για την τροφοδότηση εφαρμογών, που απαιτούν ηλεκτρική ενέργεια. Η μετατροπή από την κινητική στην ηλεκτρική ενέργεια επιτυγχάνεται μέσω ηλεκτρικών μηχανών. Υπάρχουν διάφοροι τύποι μηχανών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν στα συστήματα FESS. Όμως, ο στόχος είναι να γίνει η σωστή σύνδεση, ανάμεσα στο ηλεκτρικό δίκτυο που έχει σταθερή συχνότητα και στο σύστημα μηχανής/σφονδύλου, το οποίο επιβραδύνεται κατά την εκφόρτιση και επιταχύνει κατά την φόρτιση. Για να γίνει αυτή η σύνδεση, χρησιμοποιούνται είτε μηχανικοί συμπλέκτες είτε ηλεκτρονικά ισχύος. Η πλειοψηφία των συστημάτων χρησιμοποιεί ηλεκτρονικά ισχύος για μετατροπή της συχνότητας, ενώ οι μηχανικοί συμπλέκτες χρησιμοποιούνται μόνο σε πολύ μεγάλα αργόστροφα συστήματα [21].
- **Ενεργειακές απώλειες και τριβή.** Σε ένα πραγματικό σύστημα FESS, υπάρχουν δυνάμεις, οι οποίες δρουν αντίθετα στην φορά περιστροφής του σφονδύλου, προκαλώντας την επιβράδυνση του και την ταυτόχρονη απώλεια ενέργειας. Οι δυνάμεις αυτές προκύπτουν από την τριβή μεταξύ της στρεφόμενης μάζας και του περιβάλλοντος που την περιβάλλει, καθώς και από την τριβή των ρουλεμάν με την βάση στην οποία εδρεύουν. Ακόμη, οι ενεργειακές απώλειες του συστήματος επιβαρύνονται από τις απώλειες υστέρησης και δινορευμάτων της μηχανής, καθώς και από τις απώλειες μετάβασης του μετατροπέα [21].
- **Επίδραση της θερμότητας.** Η ενέργεια που χάνεται κατά την περιστροφή και οφείλεται στις τριβές, μετατρέπεται σε θερμότητα, η οποία αυξάνει στη συνέχεια τη θερμοκρασία του σφονδύλου. Εάν συσσωρευτούν μεγάλα ποσά θερμότητας, θα πρέπει να απομακρυνθούν, ώστε να αποτρέψουν πιθανή βλάβη στο σφόνδυλο ή σε άλλα μέρη του συστήματος. Η μέγιστη θερμοκρασία αντοχής περιορίζεται από τα υλικά κατασκευής του σφονδύλου. Ένας τρόπος περιορισμού της αναπτυσσόμενης θερμοκρασίας, ώστε να βρίσκεται σε ασφαλές όριο σε σχέση με την μέγιστη επιτρεπτή θερμοκρασία, είναι η μείωση της ονομαστικής ταχύτητας λειτουργίας του συστήματος. Ο περιορισμός αυτός της ταχύτητας, θα μειώσει επίσης και την αποθηκευμένη ενέργεια του συστήματος [21].



### 3.7 Συμβολή των συστημάτων FESS στη βελτίωση των Σ.Η.Ε.

Έχει αποδειχθεί ότι, τα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας με στρεφόμενο σφόνδυλο συνεισφέρουν στην βελτίωση των εξής χαρακτηριστικών ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας:

- **Ευστάθεια του συστήματος.** Τα μεγάλα συστήματα παροχής ηλεκτρικής ενέργειας θα πρέπει να είναι ικανά να αντιμετωπίσουν πιθανά προβλήματα αστάθειας, που οφείλονται σε απότομες αλλαγές στην παρεχόμενη ισχύ, σε απομακρυσμένες περιοχές. Αυτές οι απότομες αλλαγές, μπορούν να προκαλέσουν μεγάλη οικονομική ζημία για τον πάροχο ηλεκτρικής ενέργειας. Έτσι, αν και οι ταλαντώσεις ισχύος που μπορεί να προκύψουν στις γραμμές μεταφοράς, που τροφοδοτούν με ισχύ διάφορες περιοχές και όλες μαζί είναι συνδεδεμένες στο κοινό σημείο τροφοδότησης, είναι γενικά ασήμαντες, μπορούν, κάτω από ορισμένες συνθήκες, να προκαλέσουν μεγάλη ζημία.

Μια μέθοδος για να αντιμετωπιστεί αυτό το πρόβλημα είναι να εγκατασταθούν επιπλέον γραμμές μεταφοράς, ώστε να μειωθεί η ευαισθησία του συστήματος. Όμως, η εγκατάσταση των νέων γραμμών μεταφοράς δημιουργεί μια πληθώρα άλλων προβλημάτων, όπως είναι η υποβάθμιση του περιβάλλοντος.

Συμπεραίνουμε λοιπόν, ότι η εγκατάσταση συστημάτων FESS για μεγαλύτερη αξιοπιστία και ευστάθεια του συστήματος, παρέχει οφέλη που προκύπτουν από την αποφυγή ή τουλάχιστον την αναβολή της εγκατάστασης νέων γραμμών μεταφοράς.

- **Ποιότητα ισχύος.** Η τροφοδότηση των καταναλωτών με ποιοτική ισχύ, ώστε να μην δημιουργηθούν προβλήματα στα φορτία, καθώς και η ύπαρξη εφεδρείας, με την μορφή αποθηκευμένης ενέργειας, είναι απαραίτητη προϋπόθεση για την αξιόπιστη λειτουργία του δικτύου. Σε προβλήματα του δικτύου, όπως στιγμιαίες διαταραχές που απαιτούν ενεργό ισχύ, ώστε να αποφευχθούν τυχόν διακοπές ισχύος, το σύστημα FESS παρέχει την απαιτούμενη ισχύ και κρατά την ποιότητα ισχύος μέσα στα επιτρεπτά όρια. Οι στιγμιαίες διαταραχές μπορεί να οφείλονται, στην πτώση κεραυνού, σε ηλεκτρικά τόξα, σε σφάλματα χειρισμών, κ.ά.

Σε περίπτωση βιομηχανικού καταναλωτή, μπορεί να απαιτηθεί ένα τοπικό σύστημα FESS, ώστε να καλύψει τις ηλεκτρικές ανάγκες της βιομηχανίας.

Πιο συγκεκριμένα, το σύστημα FESS μπορεί να χρειαστεί να λειτουργήσει μέχρι να επανέλθει το δίκτυο, ή μέχρι να εκκινήσει η γεννήτρια που πιθανόν να υπάρχει, ή μέχρι να τεθούν εκτός λειτουργίας όλα τα κρίσιμα φορτία.

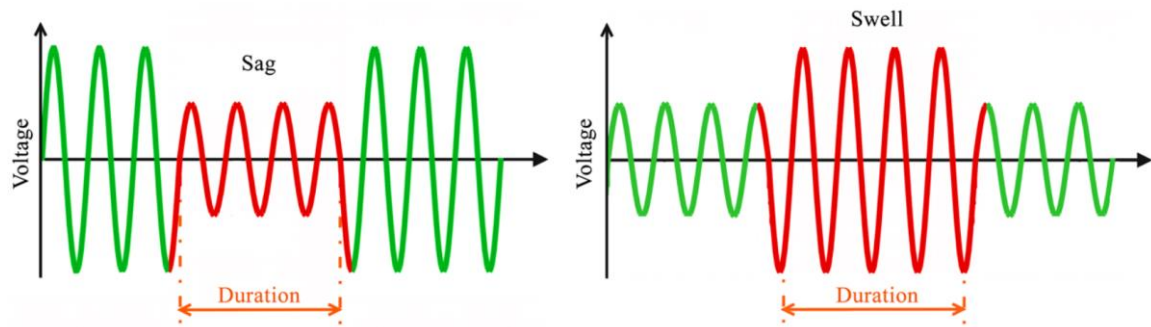
Επομένως, τα οφέλη από την παροχή ποιοτικής ισχύος προκύπτουν κυρίως από την αξιόπιστη παροχή υπηρεσιών. Τα προβλήματα, όπως διακοπές και βυθίσεις τάσης, μπορούν να αποφευχθούν, παρέχοντας σημαντικά οικονομικά οφέλη.

- **Ισορρόπηση διακυμάνσεων φορτίου.** Η απαίτηση για παροχή ηλεκτρικής ισχύος μπορεί να μεταβληθεί, είτε προβλέψιμα, σύμφωνα με τις ημερήσιες καμπύλες φορτίου, είτε τυχαία. Ίσως, η πιο σημαντική μεταβολή σε ζήτηση ισχύος είναι η καθημερινή αλλαγή, που οφείλεται στην εκκίνηση ή στο σταμάτημα κάποιας βιομηχανίας. Τόσο οι βιομηχανικές, όσο και οι οικιακές απαιτήσεις ισχύος είναι μεγαλύτερες την ημέρα, σε σχέση με την νύχτα. Όμως, οι περισσότερες συμβατικές τεχνολογίες παραγωγής ενέργειας έχουν μεγαλύτερη απόδοση και διάρκεια ζωής όταν λειτουργούν συνεχώς, κοντά στην ονομαστική τους ισχύ.

Μία μέθοδος για να καταφέρουμε να ικανοποιήσουμε ταυτόχρονα τις διακυμάνσεις στις απαιτήσεις των καταναλωτών και την απαίτηση για σταθερή έξοδο ισχύος των διαφόρων τεχνολογιών, είναι η εγκατάσταση συστήματος αποθήκευσης ενέργειας, το οποίο θα αποθηκεύει ενέργεια την νύχτα και θα την επιστρέφει στο δίκτυο, κατά την διάρκεια της ημέρας, σε περιόδους υψηλής ζήτησης.

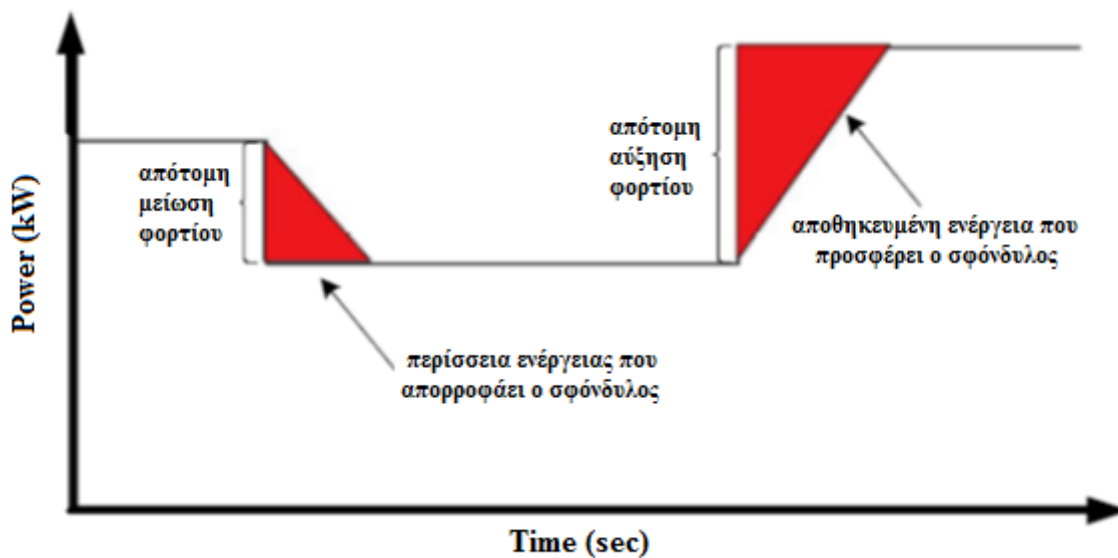
Επομένως, τα οφέλη αυτού του είδους αποθήκευσης ενέργειας βασίζονται στην διαφορά του κόστους παραγωγής ισχύος, σε περιόδους χαμηλής ζήτησης, και του αντίστοιχου κόστους, σε περιόδους αιχμής. Ακόμη, η εγκατάσταση συστημάτων FESS αυτού του είδους, μπορεί να αντικαταστήσει ή να αναβάλλει την εγκατάσταση επιπλέον πηγών παροχής ισχύος.

Στη διανεμημένη παραγωγή τα συστήματα σφονδύλων χρησιμοποιούνται για να παρέχουν ενέργεια στο δίκτυο, όταν χρειάζεται (εφεδρεία) και να αποσπών ενέργεια από αυτό, όταν περισσεύει ενέργεια που διαφορετικά θα έμενε ανεκμετάλλευτη. Όταν συμβεί σημαντική αλλαγή στο φορτίο μιας γεννήτριας δύο πράγματα είναι πιθανό να ακολουθήσουν: η τάση να «*κάνει κοιλιά*» ή να «*φουσκώσει*» και η απόδοση της γεννήτριας να πέσει. Αν το φορτίο αυξηθεί, η τάση «*κάνει κοιλιά*» (sag), ενώ αν μειωθεί η τάση «*φουσκώνει*» (swell). Επιπλέον, η λειτουργία των γεννητριών γίνεται αποδοτικότερη και λιγότερο ρυπογόνα, όταν η έξοδος της προσαρμόζεται βαθμιαία και όχι απότομα.



**Σχήμα 3.8:** Αλλαγή της τάσεως λειτουργίας της ηλεκτρικής γεννήτριας (Sags και Swells).

Το Σχήμα 3.9 δείχνει τη λειτουργία του σφονδύλου στη διανεμημένη παραγωγή, αλλά και σε μικρά ασθενή δίκτυα, όταν υπάρχουν απότομες μεταβολές του φορτίου. Όταν το φορτίο μειωθεί απότομα η γεννήτρια συνεχίζει να παρέχει ισχύ έως ότου ρυθμίσει την έξοδό της στις νέες μειωμένες απαιτήσεις του. Η ισχύς αυτή, η οποία αλλιώς θα έμενε ανεκμετάλλευτη και ενδεχομένως να προκαλούσε προβλήματα στην ποιότητα της τάσης, απορροφάται από το σφόνδυλο και αποθηκεύεται σ' αυτόν (πρώτο κόκκινο τρίγωνο). Αντίστροφα, αν το φορτίο αυξηθεί απότομα, ο σφόνδυλος εκφορτίζεται και παρέχει την ισχύ που χρειάζεται το φορτίο για λίγα δευτερόλεπτα έως ότου η έξοδος της γεννήτριας φτάσει στο σημείο που να μπορεί να το ικανοποιήσει (δεύτερο κόκκινο τρίγωνο). Και στις δύο περιπτώσεις ο σφόνδυλος εξαλείφει τις διαταραχές στην ισχύ και συμβάλλει στη διατήρηση της σταθερότητας της τάσης.



**Σχήμα 3.9:** Οι κόκκινες περιοχές δείχνουν τα συμπληρώματα ενέργειας που παρέχονται από το σφόνδυλο.

Προσθέτοντας, λοιπόν, ένα σύστημα σφονδύλου σ' ένα δίκτυο διανεμημένης παραγωγής έχουμε τα εξής οφέλη:

- Σταθεροποίηση της τάσης.
- Βελτίωση της απόδοσης των γεννητριών.
- Μείωση των εκπομπών τους.
- Αύξηση της ζωής τους.

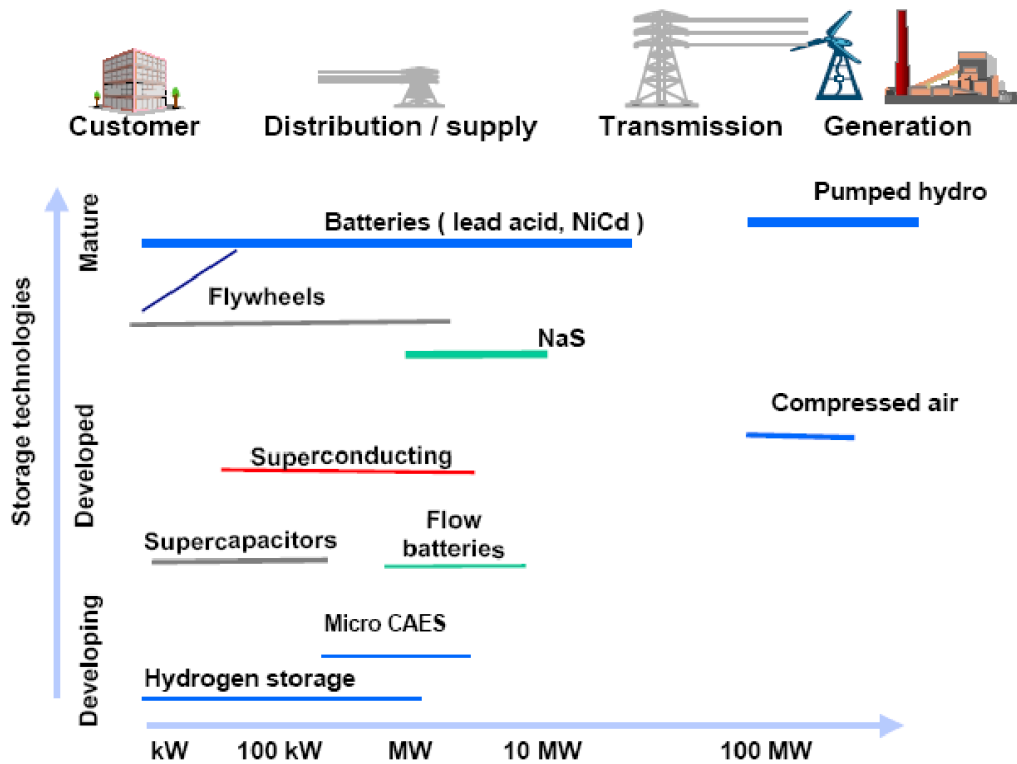
### 3.8 Σύγκριση των FESS με άλλα Συστήματα Αποθήκευσης

Τα διάφορα μέσα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας στηρίζουν τη λειτουργία τους σε μετατροπή της ηλεκτρικής ενέργειας σε χημική, μαγνητική ή δυναμική ενέργεια και στη συνέχεια την εκ νέου μετατροπή της ενέργειας αυτής σε ηλεκτρική. Ο παρακάτω πίνακας παρουσιάζει τις διάφορες μορφές ενέργειας στις οποίες μπορεί να μετατραπεί η ηλεκτρική προκειμένου να αποθηκευτεί καθώς και χαρακτηριστικά παραδείγματα διάταξης για κάθε μορφή μετατροπής.

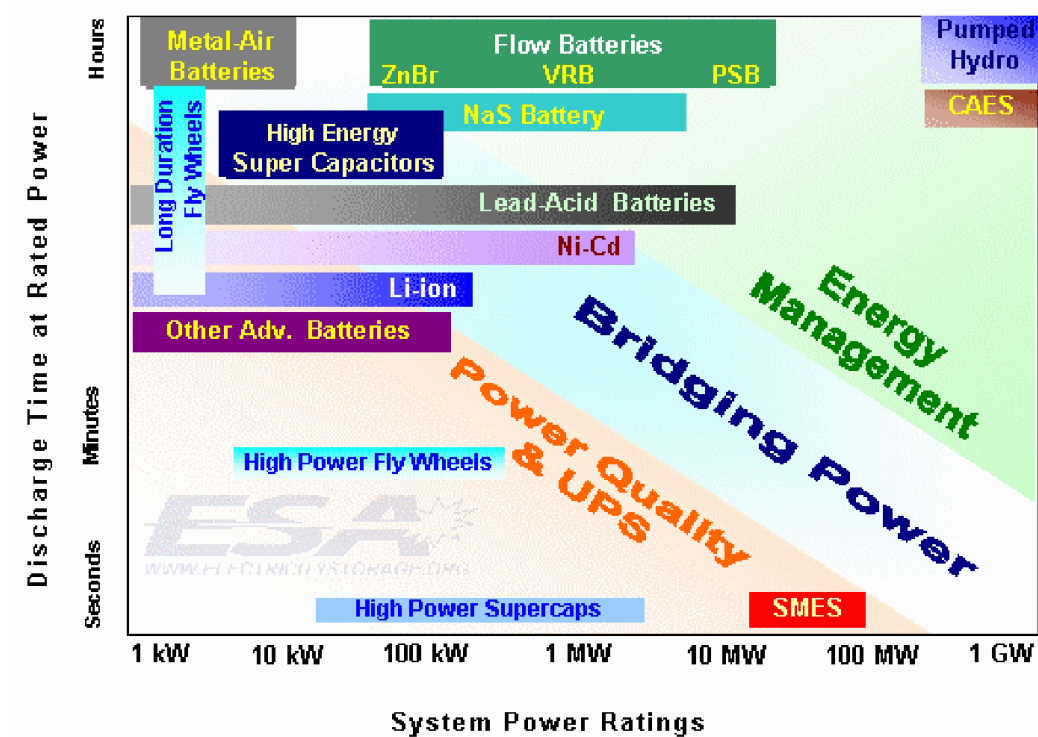
Μορφή μετατροπής	Αντιπροσωπευτική διάταξη
Ηλεκτρική	Πυκνωτές και υπέρπυκνωτές.
Μαγνητική	Υπεραγώγιμα πηνία - Superconducting Magnetic Energy Storage systems (SMES).
Χρήση μηχανικής ενέργειας (δυναμική ή περιστροφή)	Αντλησιοταμίευση (PHS).
	Συστήματα με Συμπιεσμένο αέρα (CAES).
	Στρεφόμενοι Σφόνδυλοι (Flywheels)
Χημικές μέθοδοι	Μπαταρίες, μπαταρίες ροής, προχωρημένου τύπου μπαταρίες (BESS)

**Πίνακας 3.2:** Μορφές μετατροπής ηλεκτρικής ενέργειας και αντιπροσωπευτικές διατάξεις αυτών.

Ανάλογα με την εκάστοτε εφαρμογή, χρειάζεται και μία αποθηκευτική διάταξη με κατάλληλες ιδιότητες. Προκειμένου να αποφασιστεί ποιο αποθηκευτικό μέσο είναι κατάλληλο για κάθε περίπτωση εφαρμογής, χρειάζεται να εξεταστεί μια ευρεία γκάμα αποθηκευτικών διατάξεων. Ένα σχετικό διάγραμμα για τα τυπικά μεγέθη των αποθηκευτικών διατάξεων, τις τυπικές εφαρμογές τους και την ωριμότητα τους παρουσιάζεται στην Σχήμα 3.10 παρακάτω, ενώ το Σχήμα 3.11 παρουσιάζει το χρονικό ορίζοντα χρήσης των διαφόρων αποθηκευτικών διατάξεων.

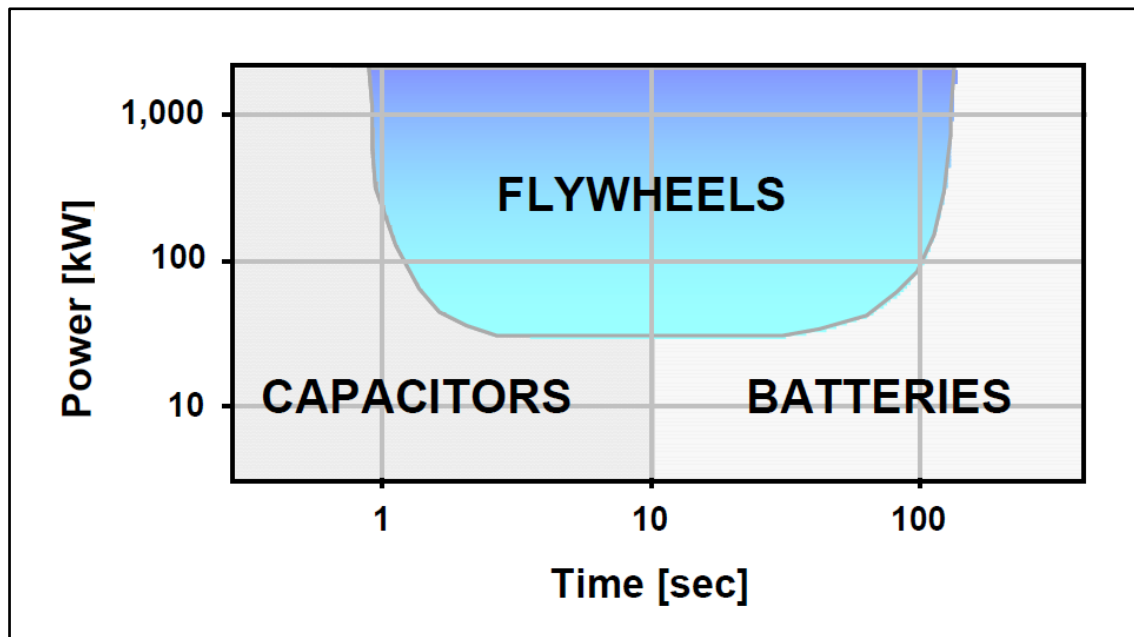


Σχήμα 3.10: Μέθοδος, εφαρμογές και τεχνολογική ωριμότητα των διαφόρων πηγών αποθήκευσης.



Σχήμα 3.11: Καταλληλόλητα διαφόρων διατάξεων αποθήκευσης ανάλογα με το χρονικό ορίζοντα και την ισχύ τους.

Σύμφωνα με έρευνες της *California Energy Commission* τα συστήματα σφονδύλων είναι ιδανικά για χρόνους εκφόρτισης από 10 δευτερόλεπτα ως 2 λεπτά. Ενώ, οι μπαταρίες είναι ασυναγώνιστες για μεγάλους χρόνους εκφόρτισης και οι πυκνωτές για πολύ μικρούς, οι σφόνδυλοι παρουσιάζουν σημαντικά πλεονεκτήματα για χρόνους εκφόρτισης από 1 έως 100 δευτερόλεπτα και για ισχύ εκφόρτισης πάνω από 20 kW, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3.12.



**Σχήμα 3.12:** Καταλληλότητα διάφορων συστημάτων αποθήκευσης ως προς την ισχύ και τον χρόνο εκφόρτισης.

Συγκρινόμενοι οι σφόνδυλοι με τις μπαταρίες έχουν μεγαλύτερο κόστος, που οφείλεται κυρίως στα στοιχεία βελτίωσής τους (ηλεκτρονικά ισχύος, μαγνητικά ρουλεμάν, συνθετικά υλικά, ειδικό δοχείο για τη δημιουργία κενού). Ωστόσο, παρουσιάζουν μεγαλύτερη πυκνότητα ισχύος (*power density*). Για την ίδια ισχύ εξόδου καταλαμβάνουν μόλις το 10 – 20% του χώρου που καταλαμβάνουν οι μπαταρίες. Επίσης, απαιτούν απλούστερη και λιγότερο συχνή συντήρηση και δεν αντιμετωπίζουν προβλήματα ασφάλειας που σχετίζονται με διαρροή χημικών. Η συχνότητα φόρτισης – εκφόρτισης ελάχιστα επηρεάζει τη ζωή του σφονδύλου σε αντίθεση με τις μπαταρίες, η ζωή των οποίων μειώνεται σημαντικά. Ειδικά για εφαρμογές σε UPS, η ζωή των σφονδύλων είναι τυπικά περίπου 20 χρόνια, ενώ οι μπαταρίες διαρκούν μόλις 3 ως 5 χρόνια.

Σημαντικά οφέλη προκύπτουν σε εφαρμογές UPS με τη χρησιμοποίηση συνδυασμού σφονδύλων και μπαταριών ως σύστημα αποθήκευσης. Κάθε φορά που καλείται το σύστημα αποθήκευσης να επέμβει στο δίκτυο αρχικά αποκρίνεται ο σφόνδυλος και στη συνέχεια,

εφόσον χρειαστεί, η μπαταρία. Αν αναλογιστεί κανείς ότι η πλειοψηφία των διαταραχών ισχύος διαρκούν 5 δευτερόλεπτα ή και λιγότερο, αντιλαμβάνεται ότι τα περισσότερα προβλήματα αντιμετωπίζονται από τον σφόνδυλο, η ζωή και η απόδοση του οποίου μένουν ανεπηρέαστες από τη συχνότητα φόρτισης – εκφόρτισης. Με τον τρόπο αυτό προστατεύεται η μπαταρία και αυξάνεται η διάρκεια ζωής της.

Αξίζει να σημειωθεί, ότι τα συστήματα σφονδύλων δεν πρέπει να χρησιμοποιούνται μόνο τους χωρίς υποστήριξη από μπαταρίες, για εφεδρεία (μεγάλους χρόνους εκφόρτισης) και στις περιπτώσεις που δεν είναι σίγουρο ότι η γεννήτρια θα ανακτήσει την πλήρη ισχύ της σε λίγα δευτερόλεπτα (περίπου 10 sec).

### **3.9 Πλεονεκτήματα – Μειονεκτήματα των συστημάτων FESS**

Στη συνέχεια συνοψίζονται τα πλεονεκτήματα των συστημάτων αποθήκευσης που χρησιμοποιούν σφονδύλους [22]:

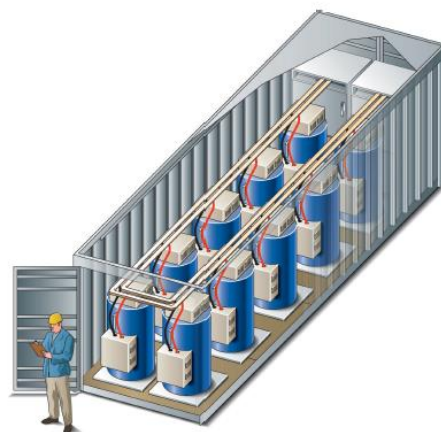
- Απαιτούν εύκολη, φθηνή και όχι συχνή συντήρηση.
- Η ενεργειακή τους χωρητικότητα δε φθίνει με τη συχνότητα φόρτισης – εκφόρτισης και το χρόνο, καθώς και η λειτουργία τους δεν επηρεάζεται από τη θερμοκρασία.
- Έχουν μεγάλη διάρκεια ζωής (15 με 30 χρόνια), ανάλογα με την ταχύτητα λειτουργίας τους.
- Έχουν γρήγορη απόκριση και γρήγορη επαναφόρτιση.
- Οι σφόνδυλοι έχουν σχεδόν απεριόριστο αριθμό κύκλων φόρτισης – εκφόρτισης.
- Παρουσιάζουν μεγάλη απόδοση και ελάχιστες απώλειες (οι απώλειες όταν βρίσκονται εκτός λειτουργίας – *standby losses* – κυμαίνονται περίπου από 0,1 ως 1% της ονομαστικής τους ισχύος).
- Έχουν προβλέψιμη λειτουργία, αφού γνωρίζοντας την ταχύτητα περιστροφής τους, ξέρουμε πάντα την διαθέσιμη αποθηκευμένη ενέργεια.
- Αποθηκεύουν και αποδίδουν μεγάλες ποσότητες ενέργειας. Συγκεκριμένα, είναι απολύτως αξιόπιστα για βραχυπρόθεσμη ενεργειακή αποθήκευση και δύναται να παρέχουν στιγμιαία μεγάλα ποσά ισχύος, γι' αυτό και προτιμώνται περισσότερο σε ώρες αιχμής.

- Παρουσιάζουν μεγάλη πυκνότητα ισχύος (καταλαμβάνουν λίγο χώρο για την ισχύ που αποδίδουν).
- Τέλος, είναι συστήματα αποθήκευσης ενέργειας φιλικά προς το περιβάλλον, καθώς αποτελούνται από αδρανή μη τοξικά υλικά.

Όμως, τα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας με στρεφόμενους σφονδύλους παρουσιάζουν και κάποια μειονεκτήματα, τα οποία αναφέρονται παρακάτω και είναι τα εξής:

- Το υψηλό κόστος κατασκευής, σε σχέση με τις μπαταρίες.
- Κίνδυνος καταστροφής του σφονδύλου από τις αναπτυσσόμενες φυγόκεντρες δυνάμεις, όταν υπερβεί το σύστημα την ονομαστική ταχύτητα περιστροφής του.
- Ένα τέτοιο σύστημα, δεν μπορεί να τοποθετηθεί μέσα σε κτίρια, λόγω του μεγέθους τους, αλλά και λόγω αυξημένου κινδύνου από τις υψηλές ταχύτητες περιστροφής και κατ' επέκταση του θορύβου.
- Λόγω του παραπάνω μειονεκτήματος, απαιτείται ο σφόνδυλος να βρίσκεται μέσα σε ένα ειδικά κατασκευασμένο δοχείο, ώστε σε περίπτωση ατυχήματος τα κομμάτια που θα εκτιναχθούν να μην το τρυπήσουν και προκληθούν επιπλέον ζημιές και ατυχήματα. Αυτό είναι κάτι που αυξάνει το βάρος και τον όγκο του.
- Οι ενεργειακές απώλειες, όταν οι κύκλοι φόρτισης αποφόρτισης είναι ασυνεχείς.
- Ο θόρυβος κατά την παραγωγή ενέργειας.
- Τα τρέχοντα συστήματα FESS λειτουργούν σε χαμηλά επίπεδα ενέργειας.
- Ο σφόνδυλος, λόγω των υψηλών ποσοστών αυτοεκφόρτισης τα οποία φθάνουν μέχρι και το 20% της αποθηκευτικής του ικανότητας ανά ώρα, οδηγείται σε χειροτέρευση της ενεργειακής του απόδοσης, όταν ο κύκλος φόρτισης – αποφόρτισης δεν είναι συνεχής. Αυτό, τον καθιστά μη κατάλληλο για μακροπρόθεσμη ενεργειακή αποθήκευση.





Container

**Ενέργεια εξόδου :** 25 kWh @ 100 kW

**Ύψος :** 60 in (≈ 1,52 m)

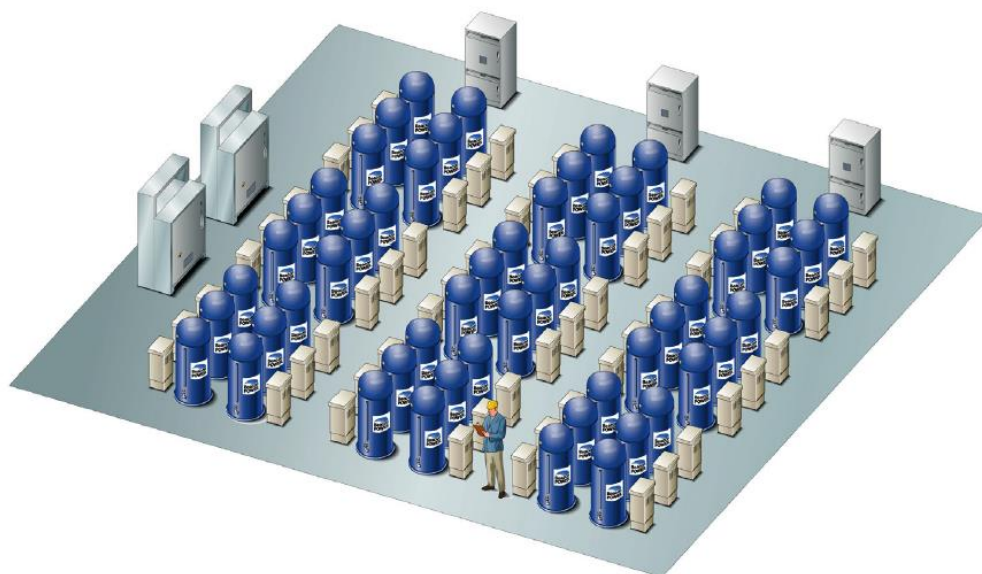
**Διάμετρος :** 36 in (≈ 0,92 m)

**Ενέργεια εξόδου :** 250 kWh @ 1,0 MW

**Μήκος :** 30 ft (≈ 9,15 m)

**Πλάτος :** 8 ft (≈ 2,44 m)

**Ύψος :** 8,5 ft (≈ 2,59 m)



**Ενέργεια εξόδου :** 1,35 MWh @ 5,4 MW

**Μήκος :** 60 ft (≈ 18,29 m)

**Πλάτος :** 42 ft (≈ 12,80 m)

**Επιφάνεια κάλυψης :** 2.520 ft<sup>2</sup> (≈ 234,12 m<sup>2</sup>)

**Ισχύς εγκατάστασης FESS ανά στρέμμα :** ≈ 23,06 MW / στρέμμα.

**Σχήμα 3.13:** FESS - Διάταξη FESS σε Container – Επιφάνεια κάλυψης από συστοιχίες FESS [24].

## 3.10 Υπάρχουσες Εφαρμογές

### 3.10.1 Ηλεκτρικό δίκτυο της California

Παράδειγμα εφαρμογής των σφονδύλων στη διανεμημένη παραγωγή αποτελεί το ηλεκτρικό δίκτυο της *California*.

Τα κίνητρα που οδήγησαν στην εγκατάσταση των σφονδύλων ήταν:

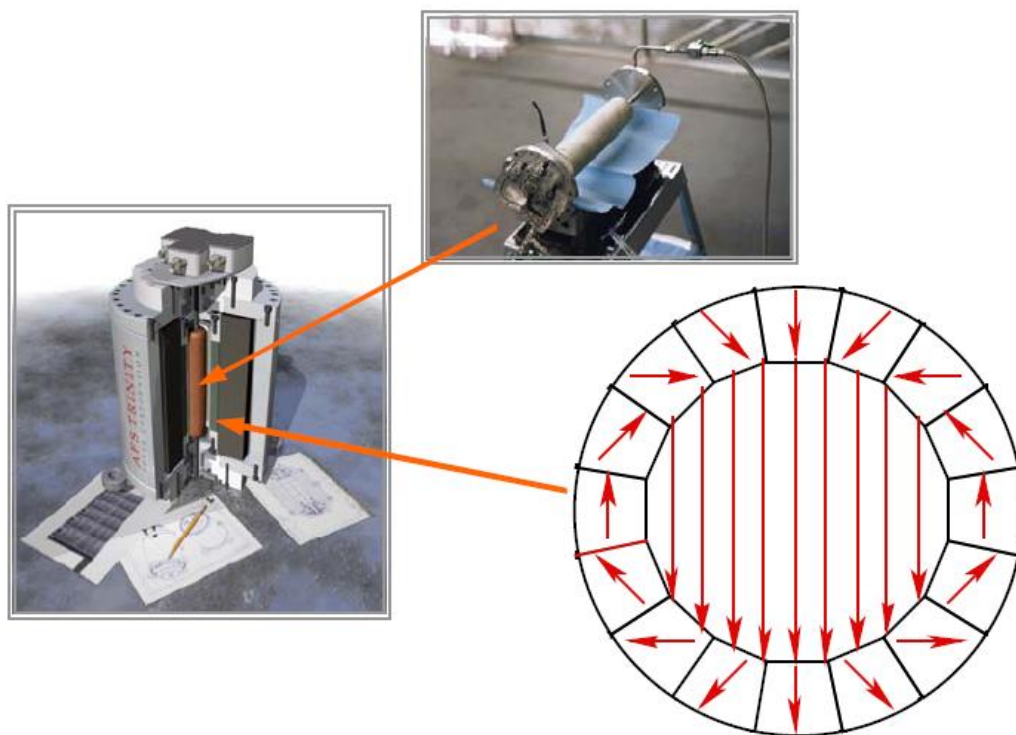
- 1) η βελτίωση της αξιοπιστίας του δικτύου αναπτύσσοντας ένα σύστημα διανεμημένης παραγωγής στο οποίο το FESS επέτρεπε τις τεχνολογίες παραγωγής να ενσωματώνονται πιο εύκολα στο δίκτυο και
- 2) η μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων που προέρχονται από το ηλεκτρικό σύστημα της *California*, χρησιμοποιώντας μια φιλική προς το περιβάλλον τεχνολογία αποθήκευσης ενέργειας και κάνοντας δυνατή τη διείσδυση περισσότερων ανανεώσιμων πηγών στη διανεμημένη παραγωγή.

Η εταιρία AFS TRINITY κατασκεύασε και εγκατέστησε το σύστημα σφονδύλου (AFS TRINITY M3AM) το οποίο μπορεί να παρέχει 100 kW για 15 sec κατά την εκφόρτιση και να επαναφορτιστεί στο ίδιο επίπεδο ισχύος στον ίδιο χρόνο. Η χωρητικότητα του σφονδύλου είναι 0,42 kWh, η μέγιστη ταχύτητα περιστροφής του 40.800 rpm και τυπικά έχει τάση εξόδου 680 V DC. Το σύστημα χρησιμοποιεί σφόνδυλο από συνθετικό, μηχανή μόνιμου μαγνήτη, μαγνητικά ρουλεμάν και καταλαμβάνει χώρο μικρότερο από 4 τετραγωνικά πόδια (1,22 m<sup>2</sup>), όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.14.



**Σχήμα 3.14:** AFS Trinity M3AM System.

Το σύστημα σφονδύλου AFS TRINITY M3AM ενσωματώνει μια νέα γεννήτρια - κινητήρα μόνιμου μαγνήτη, που αναπτύχθηκε στο Εθνικό Εργαστήριο Lawrence Livermore και έχει άδεια για την AFS Trinity. Το τμήμα ρότορα της γεννήτριας - κινητήρα αποτελείται από μια σειρά μόνιμων μαγνητών, που ευθυγραμμίζουν την οπή του ρότορα. Οι μαγνήτες είναι προσανατολισμένοι για να παράγουν ένα δίπολο πεδίο, ευθυγραμμισμένο κατά μήκος της οπής του ρότορα. Ο στάτης αποτελείται από σπείρες λεπτόκλωνου σύρματος, όπου κάθε κλώνος είναι μονωμένος (σύρμα Litz). Το σύρμα Litz χρησιμοποιείται για την ελαχιστοποίηση των απωλειών ρεύματος στο στάτη. Κατά τη λειτουργία εκφόρτισης, το περιστρεφόμενο πεδίο διπόλου των μόνιμων μαγνητών παρεμποδίζει τις περιελίξεις και προκαλεί τάση στις περιελίξεις. Αντίθετα, όταν η μηχανή φορτίζει, τα ρεύματα που μεταφέρονται στις περιελίξεις του στάτη δημιουργούν μαγνητικά πεδία που ασκούν δυνάμεις στη διάταξη των μαγνητών στην οπή του ρότορα, προκαλώντας την περιστροφή. Η πυκνότητα ισχύος και η απόδοση της γεννήτριας AFS TRINITY είναι εξαιρετικά υψηλή και αποφεύγονται τα ανεπιθύμητα θερμικά φορτία.



**Σχήμα 3.15:** Γεννήτρια – Κινητήρας μόνιμου μαγνήτη, στάτης στον οποίο το τύλιγμα των πηνίων είναι από ειδικό πλεκτό σύρμα Litz (πάνω), ειδική διάταξη μόνιμων μαγνητών – Halbach Array (δεξιά).

Το 2003 και το 2004 διερευνήθηκε διεξοδικά το πλαίσιο λειτουργίας του παραπάνω συστήματος. Αυτή η δραστηριότητα ολοκληρώθηκε τον Φεβρουάριο του 2004 με τη δοκιμή επίδειξης του συστήματος. Η δοκιμή επίδειξης του συστήματος εμφάνισε τα ακόλουθα χαρακτηριστικά στην απόδοση του συστήματος:

1. **Τάση εξόδου.** Η τάση του αγωγού DC ρυθμίζεται από τον πελάτη. Στη λειτουργία εκφόρτισης, το σύστημα σφονδύλου ρυθμίζει την τάση του αγωγού DC σε αυτήν την τιμή. Η δοκιμή τάσης εξόδου έδειξε ακριβή έλεγχο τάσης, για εύρος ισχύος εξόδου από 0 έως 100 kW, ταχύτητα 50% έως ταχύτητα 100% και ρυθμίσεις τάσης αγωγού που κυμαίνονται από 580 VDC έως 680 VDC. Μετά την ανάκτηση από μια αρχική μετάβαση, το σύστημα σφονδύλου ρύθμισε την τάση του αγωγού σε καλύτερη από  $\pm 0,75\%$  σε όλες τις συνθήκες λειτουργίας.

2. **Μεταβατική απόκριση βήματος φορτίου.** Αμέσως μετά από μια αλλαγή βήματος στο φορτίο, η τάση του αγωγού DC θα πέσει στιγμιαία κάτω από την τιμή που έχει επιλέξει ο χρήστης. Διεξήχθησαν μετρήσεις μεταβατικής απόκρισης για να προσδιοριστεί το μέγεθος της μετάβασης και η διάρκεια της μετάβασης για ένα ευρύ φάσμα συνθηκών λειτουργίας.
3. **Χρόνος εκκίνησης και φόρτισης.** Ο χρόνος που απαιτείται για το σύστημα να επιτύχει μια κατάσταση πλήρους φόρτισης μετά την έναρξη από ένα νεκρό σταμάτημα μετρήθηκε για ένα εύρος συνθηκών φόρτισης. Για αντιπροσωπευτική διαθέσιμη ισχύ φόρτισης (ιδιοκτησία της εγκατάστασης και όχι του FPS), το M3 μπορεί να φτάσει την πλήρη φόρτιση από μια στάση νεκρού σε λιγότερο από 4 λεπτά.
4. **Ισχύς - Χρόνος.** Κατά την εκφόρτιση, το σύστημα σφονδύλου παρέχει ισχύ στο φορτίο έως ότου εξαντληθεί η εξαγόμενη ενέργεια. Η διάρκεια εκφόρτισης μετρήθηκε σε διάφορα φορτία. Η ρύθμιση τάσης διατηρήθηκε με το χρονικό διάστημα σε κάθε επίπεδο ισχύος.
5. **Κατανάλωση της ισχύος αναμονής.** Η ισχύς αναμονής είναι το άθροισμα δύο όρων : της ισχύος που καταναλώνεται για να ξεπεραστεί η οπισθέλκουσα και να διατηρηθεί ο ρότορας του σφονδύλου σε μια συγκεκριμένη κατάσταση φόρτισης και της ισχύος που χρησιμοποιείται από τα βοηθητικά συστήματα. Η ισχύς που καταναλώνεται από το βοηθητικό σύστημα και εντός των ηλεκτρονικών ισχύος διαφέρει από τις απώλειες που ασκούν έλξη στο ρότορα. Μετρήσαμε ξεχωριστά τα διάφορα στοιχεία απώλειας. Προσδιορίσαμε ότι η συνολική κατανάλωση της ισχύος αναμονής, για το παρόν σύστημα, είναι 931 *Watt* και ότι αυτή η τιμή θα μειωθεί σημαντικά μέσω απλών τροποποιήσεων σχεδιασμού, που σχεδιάζονται επί του παρόντος για την επόμενη φάση ανάπτυξης.
6. **Συντελεστής λειτουργίας.** Ο κύκλος λειτουργίας ορίζεται ως η εκφόρτιση που ακολουθείται αμέσως από επαναφόρτιση. Ένας κύκλος λειτουργίας χαρακτηρίζεται από το ρυθμό εκφόρτισης, το βάθος εκφόρτισης και το ρυθμό επαναφόρτισης. Ο συντελεστής λειτουργίας χαρακτηρίζει τη συχνότητα με την οποία επαναλαμβάνεται αυτός ο κύκλος εκφόρτισης – φόρτισης.

Εδώ ορίζουμε τον συντελεστή λειτουργίας για αποθήκευση ενέργειας υψηλής ισχύος:

- Η πλήρης ονομαστική ισχύς του σφονδύλου είναι  $100 \text{ kW}$ .
- Η παρεχόμενη ενέργεια αντιστοιχεί σε εκφόρτιση 15 δευτερολέπτων στην ονομαστική ισχύ ( $1,5 \text{ MJ} = 100 \text{ kW} \cdot 15 \text{ sec}$ ).
- Ο κύκλος περιλαμβάνει τρία στάδια
  - α) Εκφόρτιση από πλήρη ταχύτητα.
  - β) Επαναφόρτιση από την ελάχιστη ταχύτητα στην πλήρη ταχύτητα.
  - γ) Παραμονή στην πλήρη ταχύτητα.
- Ο συντελεστής λειτουργίας 100% ορίζεται ως:
  1.  $100 \text{ kW}$ , εκφόρτιση 15 δευτερολέπτων από πλήρη ταχύτητα.
  2.  $100 \text{ kW}$ , επαναφόρτιση 15 δευτερολέπτων.
  3. Μη παραμονή στην πλήρη ταχύτητα.

Με τον ορισμό αυτό, η λειτουργία με συντελεστή λειτουργίας 100% αντιστοιχεί σε επανάληψη του κύκλου πλήρους φόρτισης – εκφόρτισης ισχύος σε διαστήματα των 30 δευτερολέπτων.

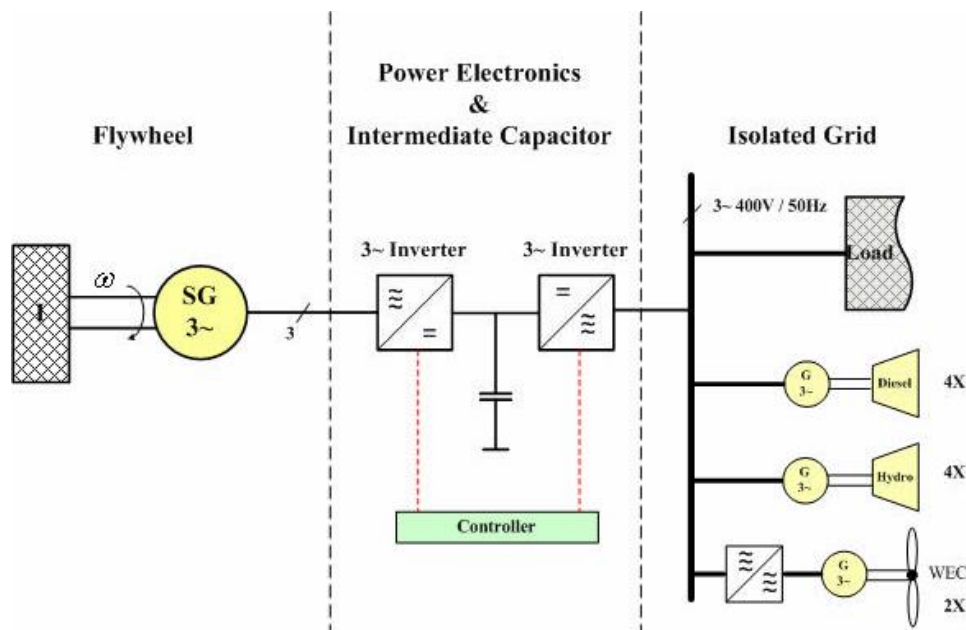
- Ο συντελεστής λειτουργίας ορίζεται ως ο λόγος:  
 $(30 \text{ δευτερόλεπτα}) / (\text{πραγματική διάρκεια κύκλου φόρτισης} - \text{εκφόρτισης})$ .
- Ένας συντελεστής λειτουργίας 50% αντιστοιχεί σε έναν κύκλο φόρτισης – εκφόρτισης που επαναλαμβάνεται σε διαστήματα 60 δευτερολέπτων, όπου ο κύκλος ξεκινά με εκφόρτιση  $1,5 \text{ MJ}$  από πλήρη ταχύτητα. Το υπόλοιπο του κύκλου περιλαμβάνει έναν αυθαίρετο συνδυασμό επαναφόρτισης και παραμονής.
- Συντελεστής λειτουργίας = 33% σημαίνει διάρκεια κύκλου = 90 δευτερόλεπτα.  
Συντελεστής λειτουργίας = 25% σημαίνει διάρκεια κύκλου = 120 δευτερόλεπτα.  
Συντελεστής λειτουργίας = 10% σημαίνει διάρκεια κύκλου = 5 λεπτά.

Οι δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν στο πλαίσιο αυτού του προγράμματος έδειξαν μια ακολουθία περισσότερων από 100 διαδοχικών κύκλων φόρτισης - εκφόρτισης με συντελεστή λειτουργίας 40%. Η λειτουργία με υψηλότερο συντελεστή λειτουργίας αποκλείστηκε από περιορισμούς εγκαταστάσεων, που περιορίζουν τη μέγιστη τιμή φόρτισης στα περίπου  $50 \text{ kW}$ .

7. **Απόδοση ανάκτησης ενέργειας.** Η ενέργεια χάνεται κατά τη διαδικασία φόρτισης – εκφόρτισης, λόγω της αποτελεσματικότητας της μετατροπής ενέργειας του μετατροπέα ισχύος και του κινητήρα. Η ενέργεια που χάνεται στις διαδικασίες φόρτισης και εκφόρτισης είναι ξεχωριστή και διαφορετική από την κατανάλωση της ενέργειας αναμονής και πρέπει να ληφθεί υπόψη χωριστά. Η απόδοση ανάκτησης ενέργειας ορίζεται ως το κλάσμα της ηλεκτρικής ενέργειας εισόδου που ανακτάται από το σφόνδυλο και παραδίδεται ως ηλεκτρική ενέργεια εξόδου. Για δοκιμές κύκλου υψηλής ισχύος, που πραγματοποιήθηκαν στο πλαίσιο αυτού του προγράμματος, η απόδοση ανάκτησης ενέργειας συνήθως ξεπερνούσε το 85%.

### 3.10.2 Αυτόνομο δίκτυο στα νησιά Flores – Azores

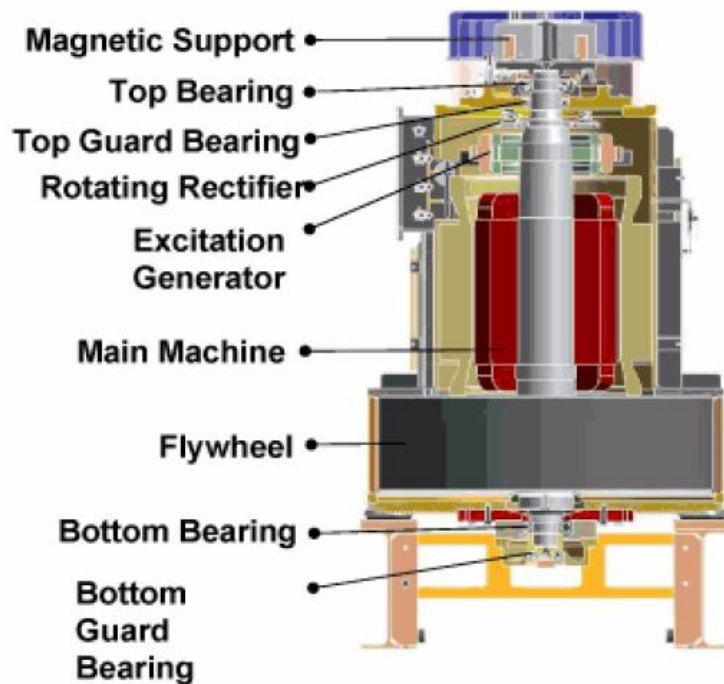
Στις νήσους Flores – Azores το εγκατεστημένο σύστημα ισχύος αποτελείται από 4 υδροηλεκτρικές μονάδες ( $3 \times 250 \text{ kW} + 1 \times 600 \text{ kW}$ ), 2 ανεμογεννήτριες ( $2 \times 315 \text{ kW}$ ) και 4 νηζελογεννήτριες ( $3 \times 550 \text{ kW} + 1 \times 810 \text{ kW}$ ). Στο δίκτυο εγκαταστάθηκε σύστημα αποθήκευσης με σφόνδυλο με κύριους σκοπούς την ελαχιστοποίηση των διακυμάνσεων στην τάση και τη συχνότητα, τη μείωση των *blackout* και την ελάχιστη δυνατή χρησιμοποίηση των νηζελογεννητριών. Το σύστημα αποθήκευσης έχει ενεργειακή χωρητικότητα  $5 \text{ kWh}$  ( $18 \text{ MJ}$ ) και συνδέεται στον ζυγό των  $400 \text{ V}$  (βλ. Σχήμα 3.16).



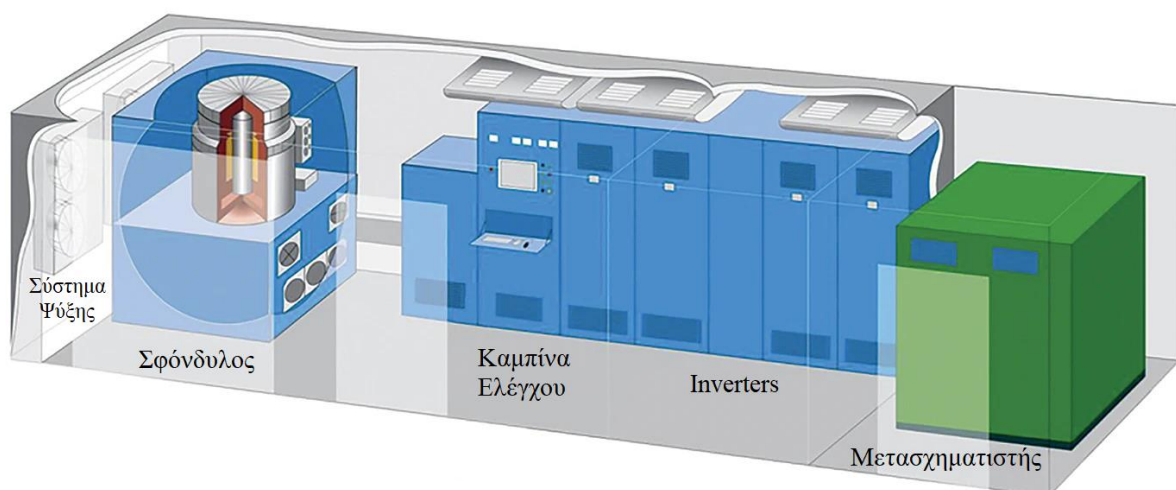
Σχήμα 3.16: Το ηλεκτρικό δίκτυο στις νήσους Flores-Azores [25].



Η ισχύς του συστήματος του σφονδύλου είναι  $350\text{ kW}$ , χρησιμοποιεί μηχανή μόνιμου μαγνήτη, μαγνητικά ρουλεμάν, η ταχύτητα περιστροφής του είναι  $3.300\text{ rpm} - 1.800\text{ rpm}$  και είναι εγκατεστημένος σε *container* διαστάσεων  $20\text{ ft}$  ( $6\text{ m}$ ). Κατασκευάστρια εταιρία είναι η *PowerStore*. Στο Σχήμα 3.17 φαίνεται η δομή του σφονδύλου, ενώ στο Σχήμα 3.18 το *container* στο οποίο βρίσκεται.



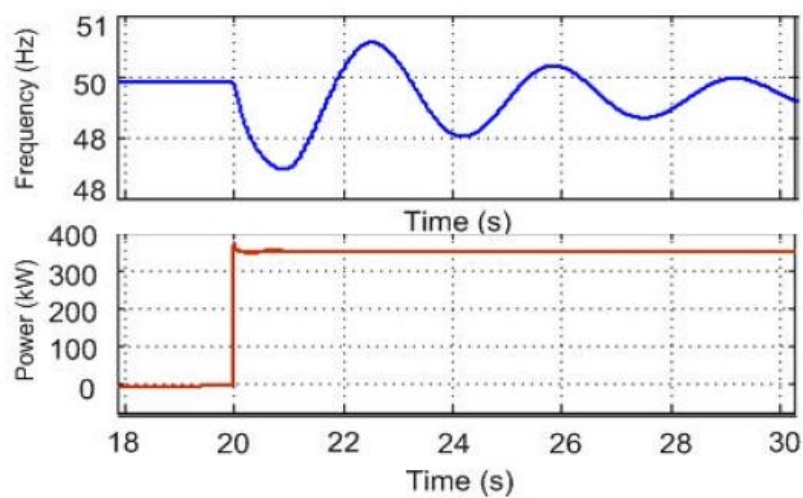
Σχήμα 3.17: Η δομή του σφονδύλου (PowerStore) [25].



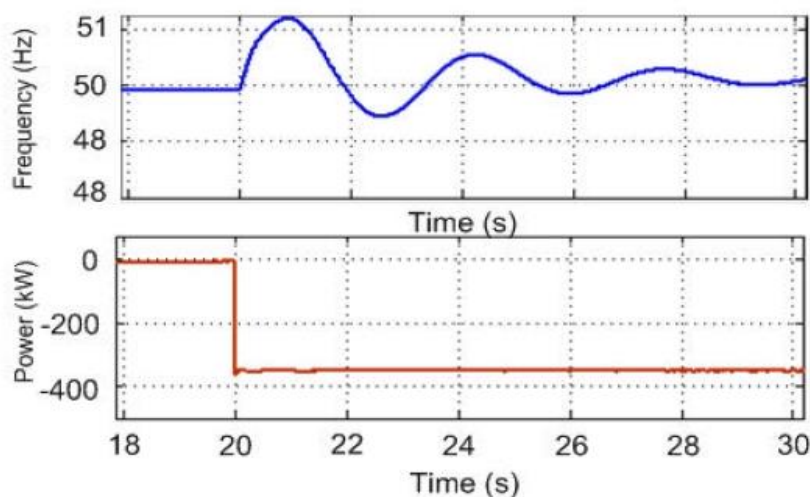
Σχήμα 3.18: Ο σφόνδυλος εγκατεστημένος σε container [26].



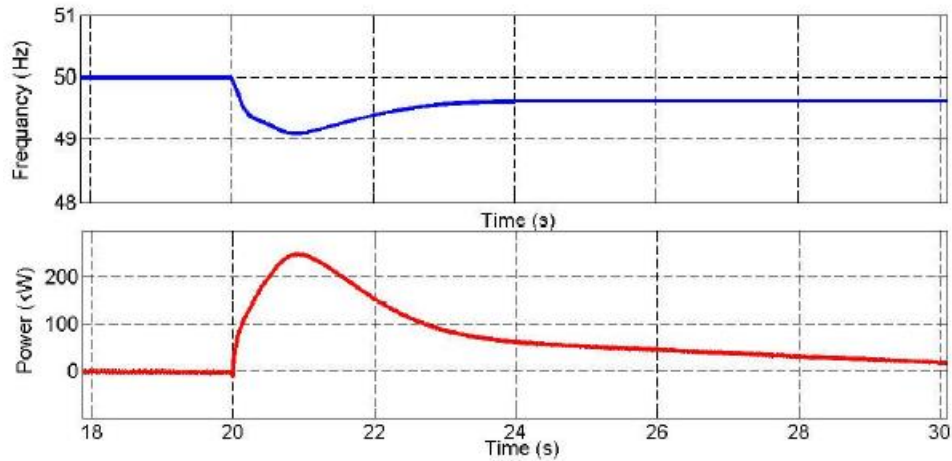
Ακολουθούν διαγράμματα στα οποία φαίνεται πως βελτιώνει η παρουσία του σφονδύλου τη συχνότητα του δικτύου σε κάθε μείωση ή αύξηση του φορτίου. Τα Σχήματα 3.19 και 3.20 δείχνουν τη συχνότητα σε μια απότομη αύξηση του φορτίου κατά  $350\text{ kW}$  και σε μείωση του κατά  $350\text{ kW}$  αντίστοιχα, όταν στο δίκτυο δεν υπάρχει το σύστημα σφονδύλου (FESS). Τα Σχήματα 3.21 και 3.22 δείχνουν τη συχνότητα στις ίδιες συνθήκες μεταβολής του φορτίου με την παρουσία του (FESS) στο δίκτυο. Γίνεται φανερό ότι η συμμετοχή του συστήματος αποθήκευσης εξαλείφει σε ικανοποιητικό βαθμό τις διακυμάνσεις που παρουσιάζονται στη συχνότητα του δικτύου μετά από κάθε απότομη μεταβολή του φορτίου.



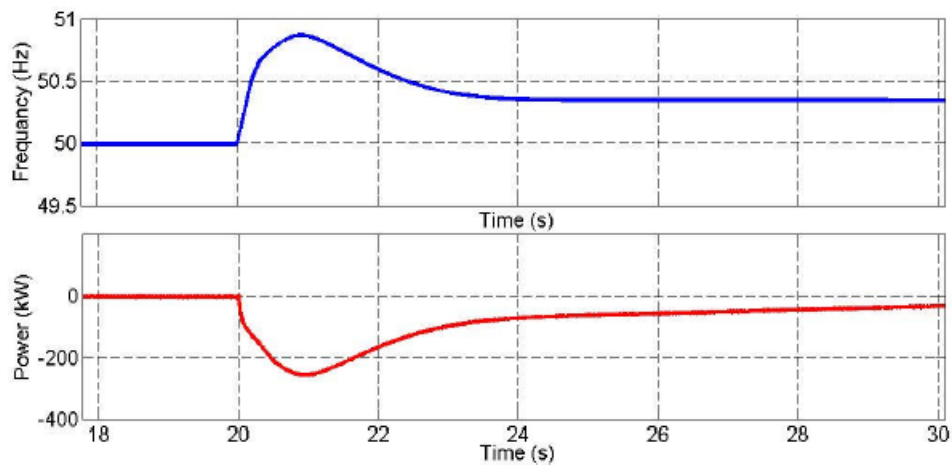
**Σχήμα 3.19:** Η συχνότητα δικτύου σε απότομη αύξηση του φορτίου κατά  $350\text{ kW}$  χωρίς FESS [25].



**Σχήμα 3.20:** Η συχνότητα δικτύου σε απότομη μείωση του φορτίου κατά  $350\text{ kW}$  χωρίς FESS [25].



Σχήμα 3.21: Η συχνότητα δικτύου σε απότομη αύξηση του φορτίου κατά 350 kW με FESS [25].



Σχήμα 3.22: Η συχνότητα δικτύου σε απότομη μείωση του φορτίου κατά 350 kW με FESS [25].

### 3.10.3 Ηλεκτρικό δίκτυο του Puerto Rico

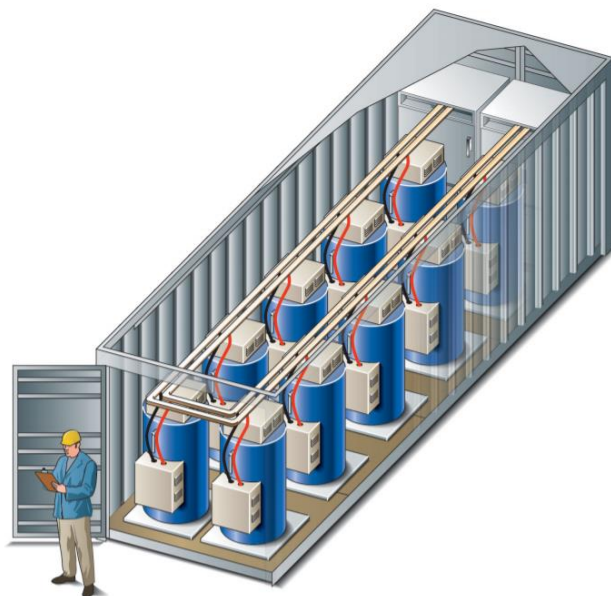
Η υποστήριξη της τάσης και της συχνότητας ενός δικτύου με τη χρησιμοποίηση συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας αποτέλεσε το κίνητρο για την εγκατάσταση ενός μεγάλου τέτοιου συστήματος με μπαταρίες στο *Puerto Rico*. Το σύστημα σχεδιάστηκε για να παρέχει 20 MW για 15 λεπτά. Οι μπαταρίες (*Lead-Acid*) διήρκησαν μόνο 2 – 3 χρόνια και τώρα είναι σε φάση αντικατάστασης.

Αντίθετα, για λόγους σύγκρισης, ένα αντίστοιχο σύστημα σφονδύλων της εταιρείας *Beacon Power* συνολικής χωρητικότητας 10 MWh (40 MW για 15 λεπτά) που θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί, φαίνεται στο Σχήμα 3.23.

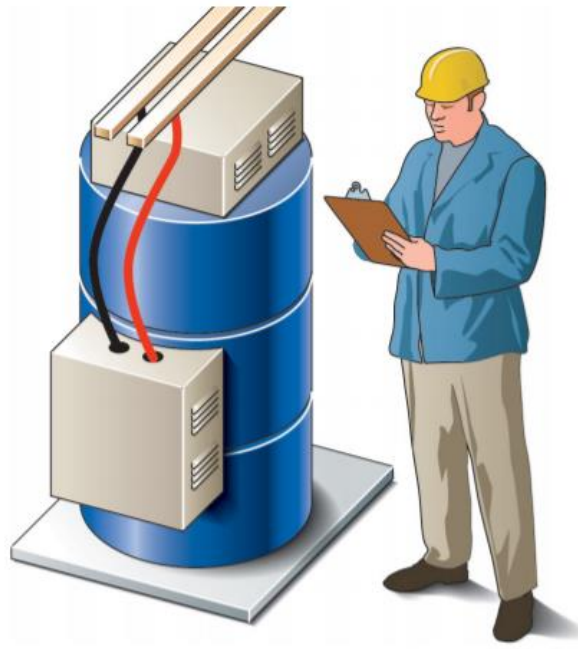
Το σύστημα αυτό αποτελείται από 40 υποσυστήματα – *containers* (βλ. Σχήμα 3.24) ενεργειακής χωρητικότητας  $250\text{ kWh}$  το καθένα και το κάθε *container* περιέχει 10 σφονδύλους  $25\text{ kWh}$  ο καθένας (βλ. Σχήμα 3.25), δηλαδή 400 σφόνδυλοι συνολικά. Το σύστημα είναι σχεδιασμένο με αναμενόμενο χρόνο ζωής 20 χρόνια απαιτώντας ελάχιστη συντήρηση.



**Σχήμα 3.23:** Η διάταξη των containers ( $40\text{ MW}$  για  $15\text{ min}$ ).

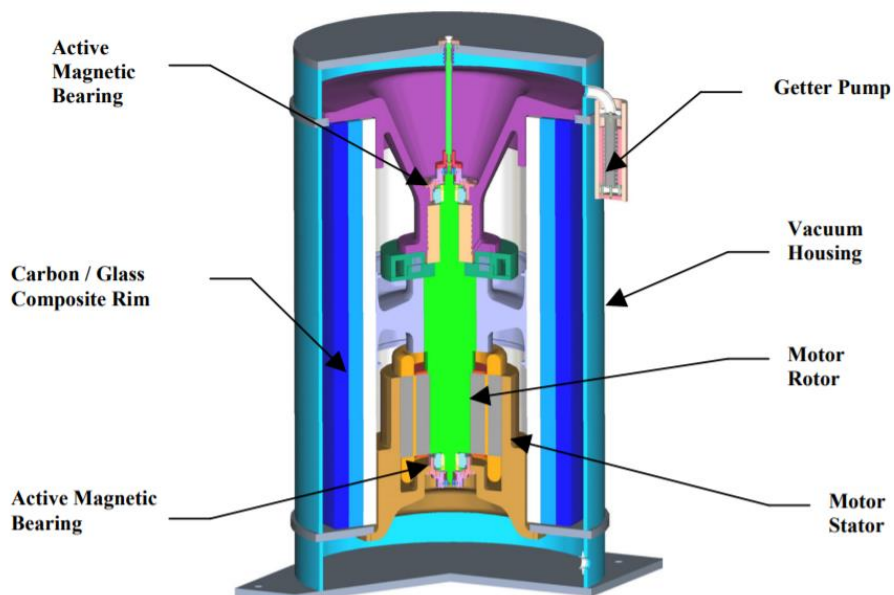


**Σχήμα 3.24:** Το εσωτερικό κάθε container ( $250\text{ kWh}$ ) [24].



**Σχήμα 3.25:** Ο σφόνδυλος (25 kWh) [24].

Ο κάθε σφόνδυλος έχει χωρητικότητα 25 kWh και περιστρέφεται με ταχύτητες μεγαλύτερες από 15.000 rpm. Χρησιμοποιεί τετραπολική μηχανή μόνιμου μαγνήτη, μαγνητικά ρουλεμάν και βρίσκεται εγκατεστημένος σε δοχείο με χαμηλή πίεση. Το εσωτερικό του σφονδύλου φαίνεται στο Σχήμα 3.26.



**Σχήμα 3.26:** Το εσωτερικό του σφονδύλου (Beacon Power) [24].

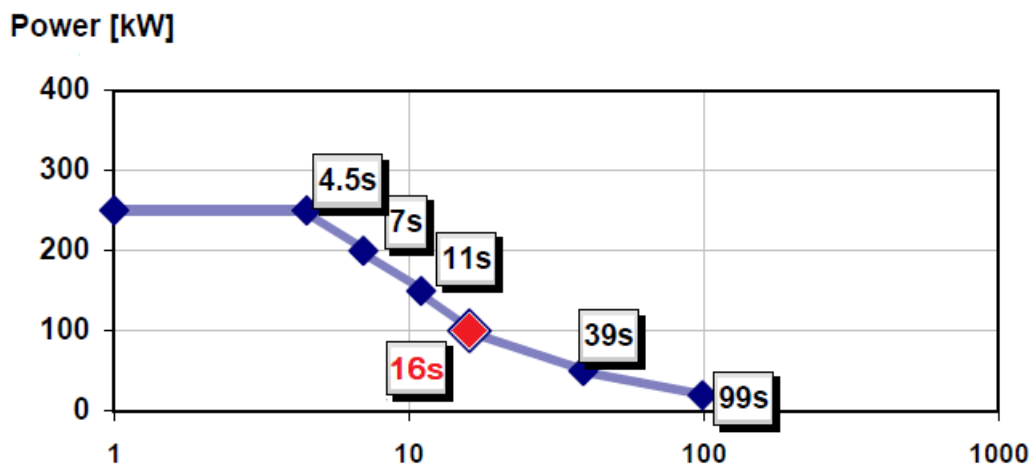
### 3.11. Μοντελοποίηση συστημάτων σφονδύλων

#### 3.11.1. Μοντελοποίηση συστήματος σφονδύλου AFS TRINITY M3A

Το AFS Trinity M3A FPS είναι ένα σύστημα διαχείρισης ισχύος συνδεδεμένο με DC. Το στοιχείο αποθήκευσης ενέργειας είναι σύνθετος ρότορας που ενσωματώνει μια γεννήτρια κινητήρα μόνιμου μαγνήτη με συνολικό βάρος ρότορα 86 λίβρες (39,01 kg). Ο σφόνδυλος μεταβλητής ταχύτητας, μεταβλητής τάσης διασυνδέεται με ένα δίαυλο DC μέσω ενός μετατροπέα IGBT.

Στο σύστημα περιλαμβάνονται, επίσης, ένα κύκλωμα προφόρτισης και μια αντίσταση απόρριψης που επιτρέπει στο σφόνδυλο να ξεκουραστεί σε περίπτωση βλάβης του συστήματος. Ο χρόνος ανάκτησης για ρύθμιση τάσης μετά από μια βαθμιαία αλλαγή στο φορτίο είναι 10 - 30 ms [27].

Η ονομαστική ισχύς του συστήματος M3 είναι 100 kW για 16 δευτερόλεπτα, αν και μπορεί επίσης να τροφοδοτεί ή να καταναλώνει ισχύ σε πάνω από 200 kW για μικρότερα διαστήματα, όπως φαίνεται στο διάγραμμα του Σχήματος 3.27.



Σχήμα 3.27: Διάγραμμα Ισχύος Εξόδου – Χρόνου Εκφόρτισης.

Στο παραπάνω διάγραμμα φαίνεται πως σχετίζεται ο χρόνος εκφόρτισης του σφονδύλου με την ισχύ εξόδου. Συγκεκριμένα:

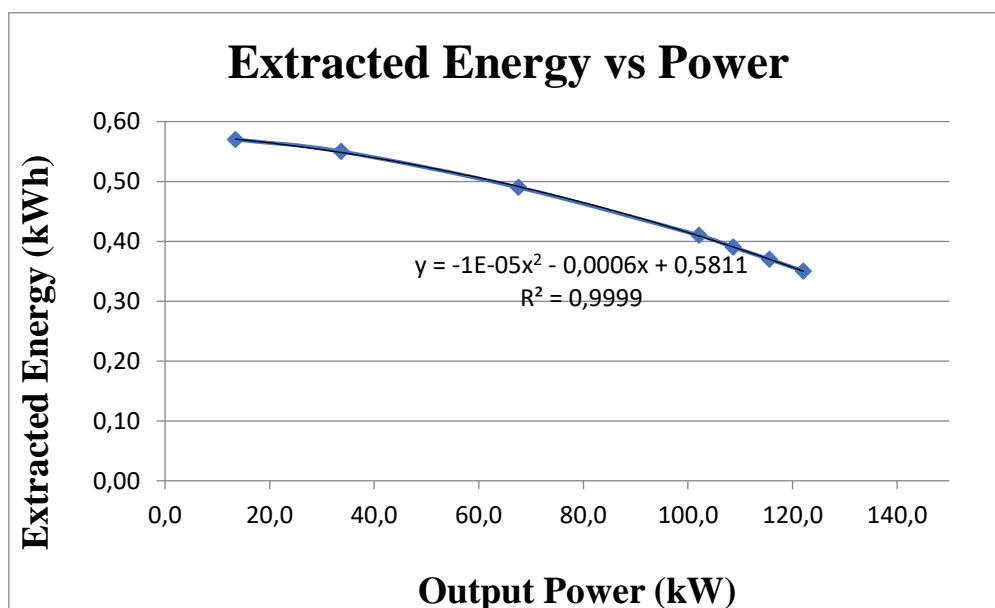
- Αν ο χρόνος εκφόρτισης είναι μικρότερος ή ίσος με 4,5s, τότε ο σφόνδυλος παρέχει ισχύ σταθερή και ίση με 250 kW.
- Αν ο χρόνος εκφόρτισης είναι μεγαλύτερος από 4,5s, τότε ο σφόνδυλος παρέχει ισχύ μεταβλητή. Στην περίπτωση αυτή, ο χρόνος εκφόρτισης μετρήθηκε σε διάφορα φορτία

(από 13,5 kW έως 122,1 kW), ενώ η ρύθμιση τάσης διατηρήθηκε με την πάροδο του χρόνου σε κάθε επίπεδο ισχύος. Όλα τα αποτελέσματα συνοψίζονται στον Πίνακα 3.3 που ακολουθεί.

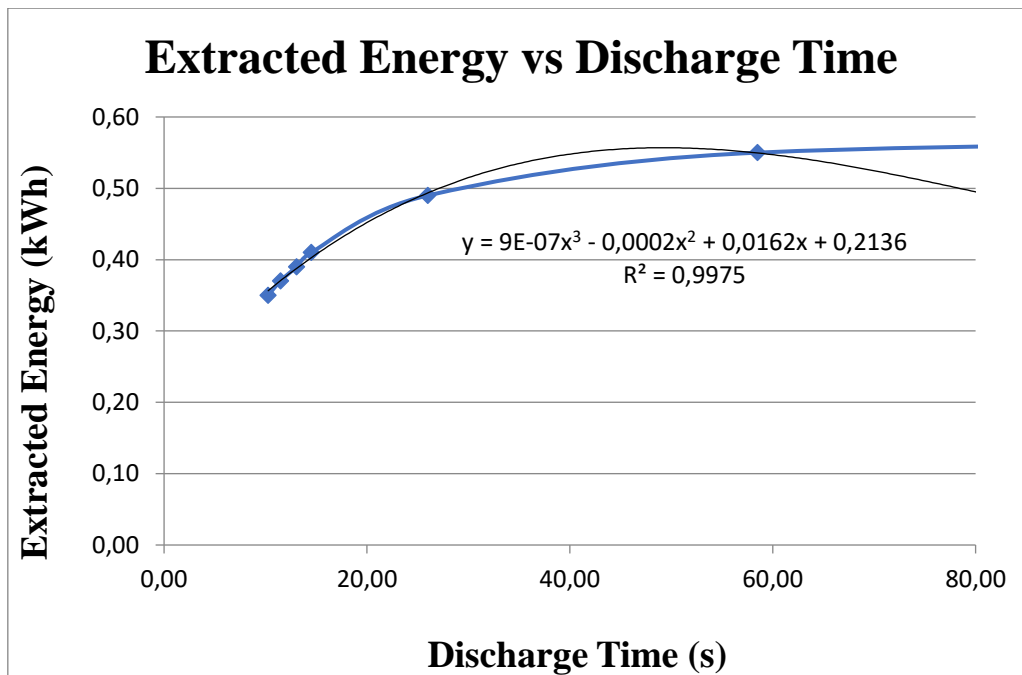
Power (kW)	Discharge Time (s)	Min. Speed (RPM)	Extracted Energy (kWh)
122,1	10,26	23.000	0,35
115,6	11,46	22.000	0,37
108,7	13,06	21.000	0,39
102,1	14,50	18.800	0,41
67,6	26,00	13.800	0,49
33,7	58,50	9.000	0,55
13,5	150,60	4.800	0,57

**Πίνακας 3.3:** Χρόνος εκφόρτισης έναντι Ισχύος εξόδου.

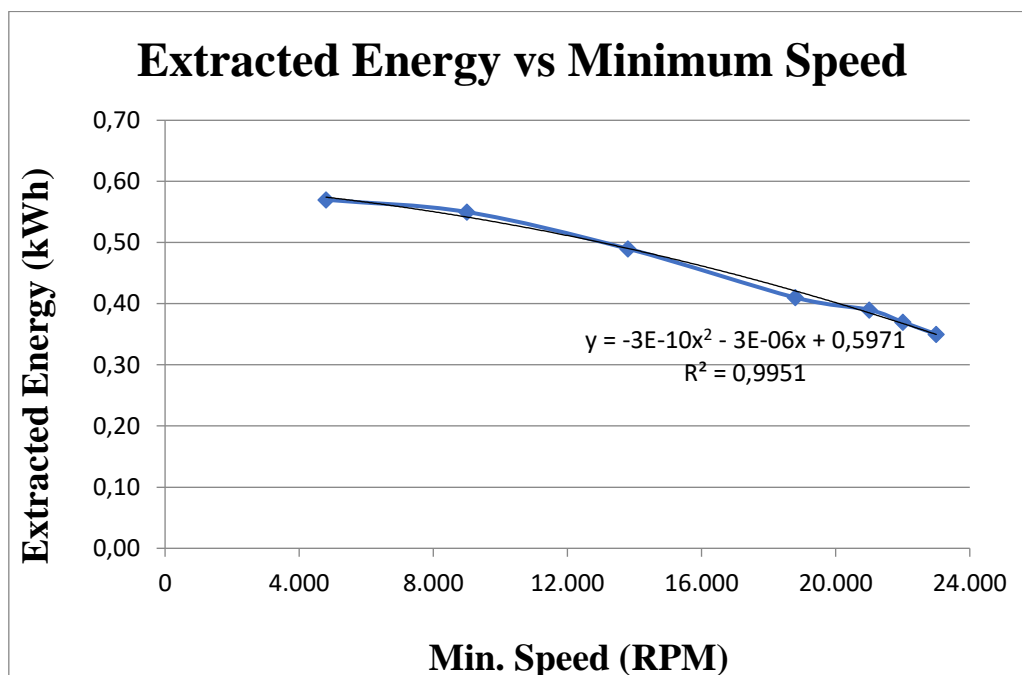
Με χρήση του παραπάνω πίνακα και της εφαρμογής Microsoft Excel κατασκευάστηκαν τα διαγράμματα 3.28, 3.29, 3.30, 3.31 και 3.32 που ακολουθούν.



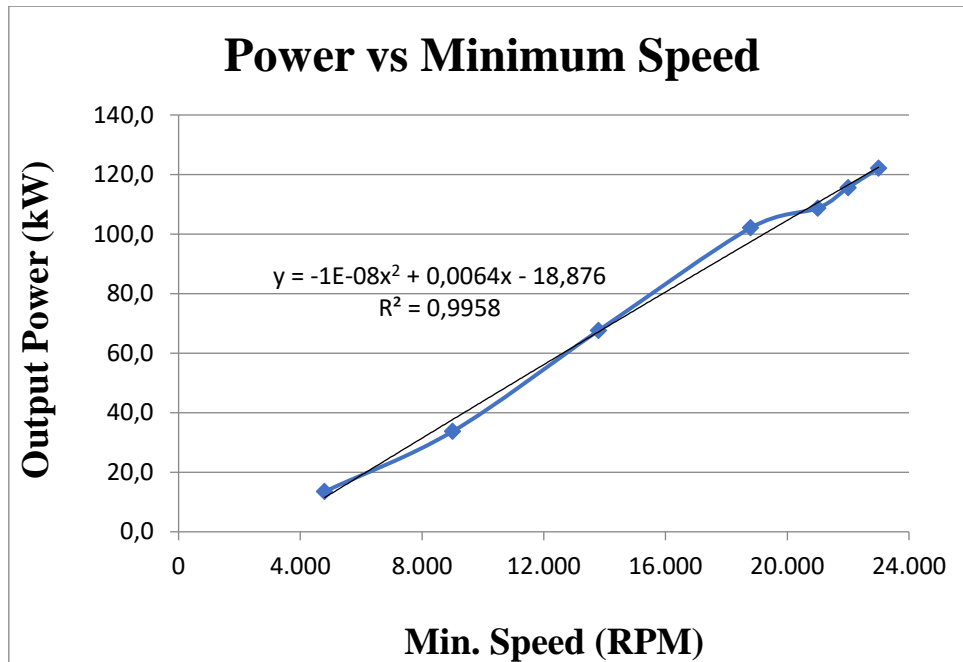
**Σχήμα 3.28:** Διάγραμμα Ισχύος Εξόδου – Εξαγόμενης Ενέργειας.



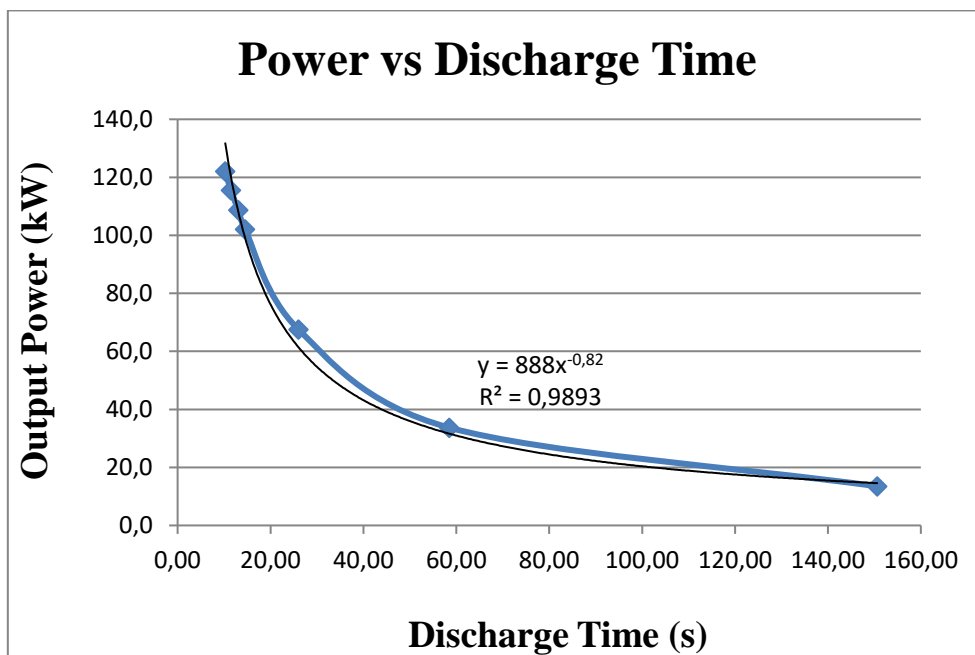
Σχήμα 3.29: Διάγραμμα Χρόνου Εκφόρτισης – Εξαγόμενης Ενέργειας.



Σχήμα 3.30: Διάγραμμα Ελάχιστων Στροφών – Εξαγόμενης Ενέργειας.



Σχήμα 3.31: Διάγραμμα Ελάχιστων Στροφών – Ισχύος Εξόδου.



Σχήμα 3.32: Διάγραμμα Ισχύος Εξόδου – Χρόνου Εκφόρτισης.



Παρατηρώντας το διάγραμμα του Σχήματος 3.32, προκύπτει ότι όταν ο χρόνος εκφόρτισης του συστήματος σφονδύλου AFS Trinity M3A είναι μεγαλύτερος από 4,5 s, τότε αυτός επιδρά στην ισχύ εξόδου μεταβάλλοντας τη σύμφωνα με τη σχέση:

$$P(t) = 888 \cdot t^{-0,82} \quad (\text{Εξ. 3.10})$$

όπου :  $t$  σε  $sec$  και  $P$  σε  $kW$ .

### 3.11.2. Μοντελοποίηση συστήματος σφονδύλου Beacon BP 400

Η διόρθωση στιγμιαίων ανισορροπιών στην παραγωγή και το φορτίο είναι ζωτικής σημασίας για τη διατήρηση ενός σταθερού δικτύου ισχύος. Ωστόσο, η επίτευξη αυτής της ισορροπίας σε πραγματικό χρόνο ήταν ανέκαθεν δύσκολη υπόθεση λόγω του χρόνου που χρειάζονται οι συμβατικές γεννήτριες ισχύος για να αυξήσουν την παραγωγή ισχύος τους προς τα πάνω ή προς τα κάτω για να αντιδράσουν σε αυτές τις σταθερές διακυμάνσεις του συστήματος ισχύος. Τα συστήματα αποθήκευσης σφονδύλου Beacon έχουν πολύ ταχύτερους ρυθμούς ράμπας από την παραδοσιακή παραγωγή και μπορούν να διορθώσουν τις ανισορροπίες νωρίτερα με πολύ μεγαλύτερη ακρίβεια και αποδοτικότητα. Στην πραγματικότητα, οι σφόνδυλοι Beacon μπορούν να εγχύσουν ή να απορροφήσουν πλήρη ισχύ σχεδόν στιγμιαία [28].

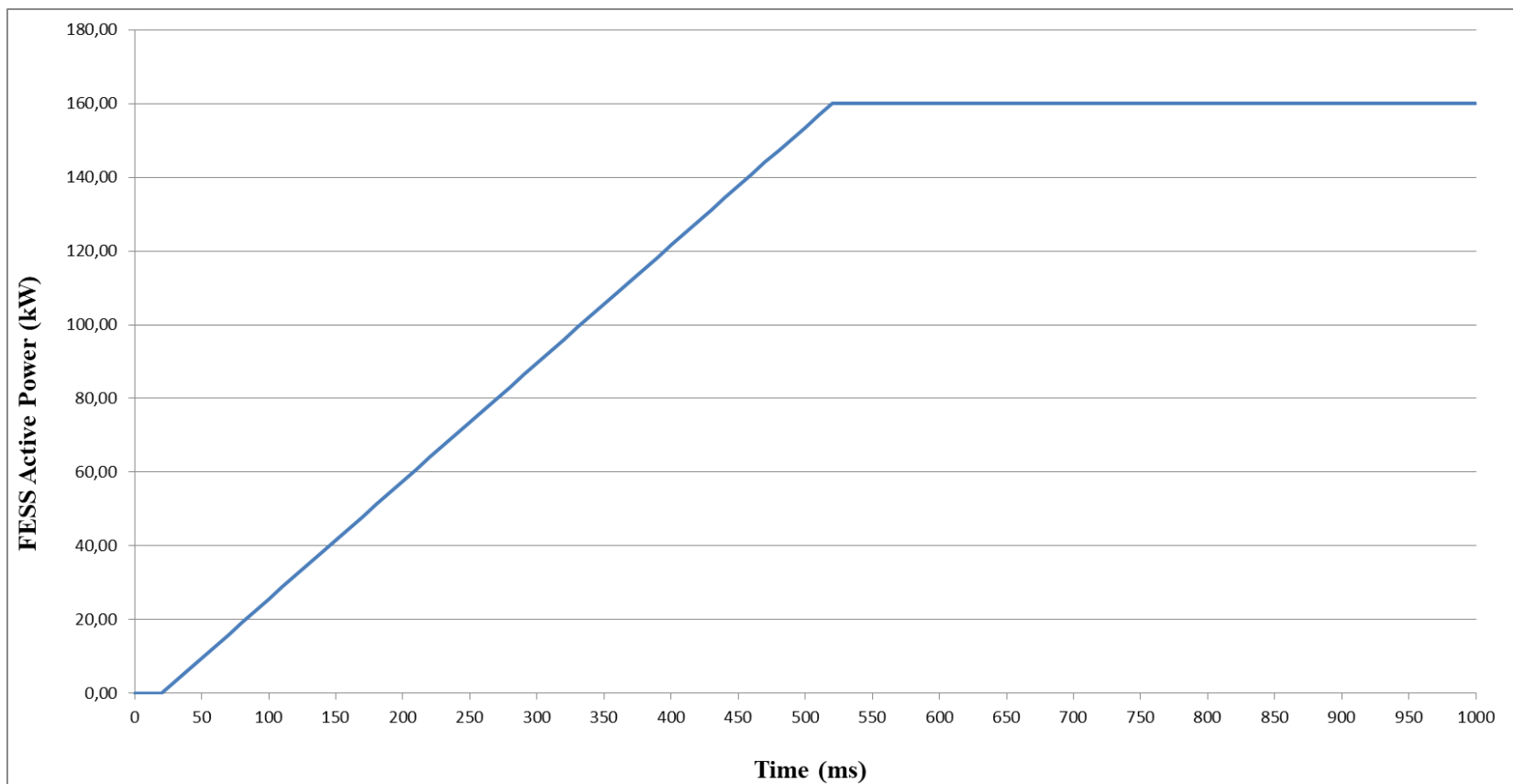
Ένα τέτοιο σύστημα σφονδύλου της Beacon Power απεικονίζεται παρακάτω, το οποίο συνοδεύεται από ορισμένες προδιαγραφές.

Χαρακτηριστικά στοιχεία συστήματος σφονδύλου της Beacon Power	
Μοντέλο :	Beacon BP - 400 Modular Flywheel
Υψος :	7 ft ( ≈ 2,13 m)
Διάμετρος Εσωτερική :	3 ft ( ≈ 0,91 m)
Στροφές ανά λεπτό (rpm) :	16.000
Πραγματική Ισχύς Εξόδου / Χρόνος Εκφόρτισης (kW) :	160 kW για 5 min έως 50 kW για 35 min
Ενέργεια προς χρήση με Πλήρη Φόρτιση (kWh) :	30
Διάρκεια Ζωής (MWh) :	> 5.000
Μάζα Ρότορα :	2.500 lb ( ≈ 1.134 kg)



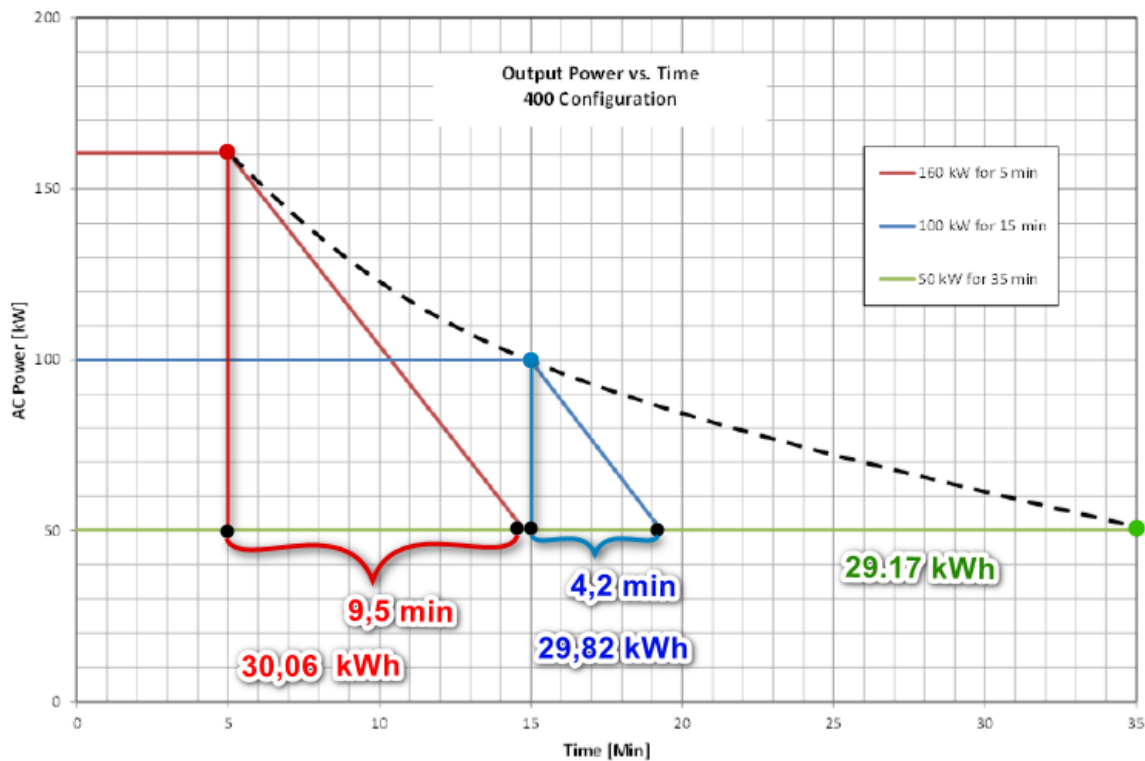
Πίνακας 3.4: Χαρακτηριστικά στοιχεία συστήματος σφονδύλου της Beacon Power.

Επίσης, ο χρόνος απόκρισης είναι 20 ms ή λιγότερο από τη λήψη σήματος έως την έναρξη της αλλαγής εξόδου και πλήρης έξοδος σε 500 ms ή λιγότερο μετά τον αρχικό χρόνο απόκρισης (Διάγραμμα Σχήματος 3.33).



**Σχήμα 3.33:** Διάγραμμα Απόκρισης Συστήματος Σφονδύλου της Beacon Power.

Η διαμόρφωση της ισχύος εξόδου συναρτήσει του χρόνου εκφόρτισης, παριστάνεται στο διάγραμμα που ακολουθεί.



**Σχήμα 3.34:** Διάγραμμα Ισχύος εξόδου – Χρόνου Εκφόρτισης του Συστήματος Σφονδύλου της Beacon Power (BP-400 Modular).

Χρόνος Εκφόρτισης (min)	Ισχύς Εξόδου (kW)	Συνολική Ενέργεια (kWh)	Χρόνος λειτουργίας (min)	Περίσσεια Χρόνου (min)
5	160	30.06	14,5	9,5
15	100	29,82	19,2	4,2
35	50	29,17	35	0

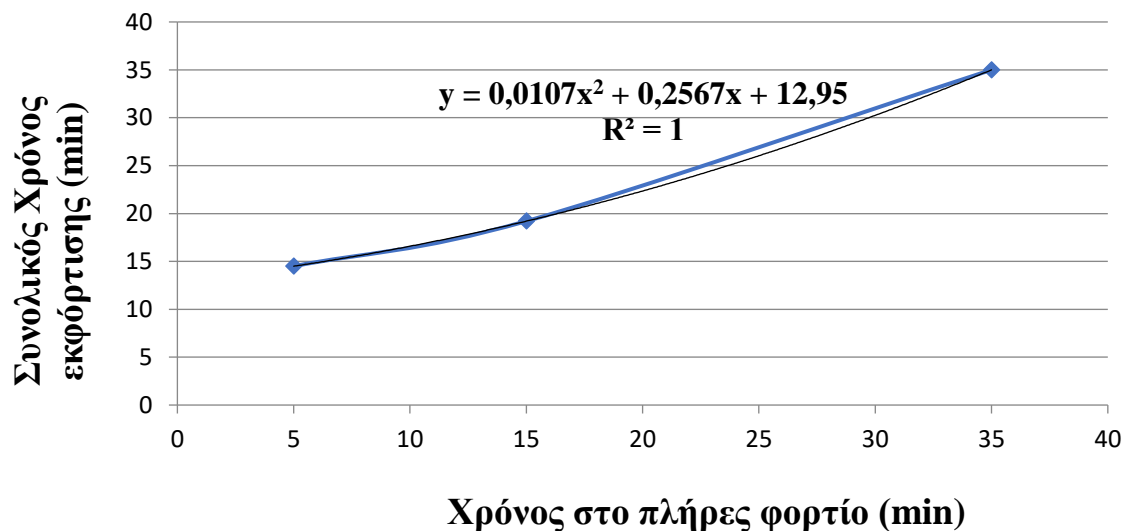
**Πίνακας 3.5:** Τυπικές τιμές διαφόρων χαρακτηριστικών του Συστήματος Σφονδύλου της Beacon Power (BP-400 Modular).

Από το διάγραμμα του σχήματος 3.34 προκύπτει ο πίνακας 3.5 και παρατηρείται ότι ο συνολικός χρόνος εκφόρτισης του σφονδύλου είναι το άθροισμα:

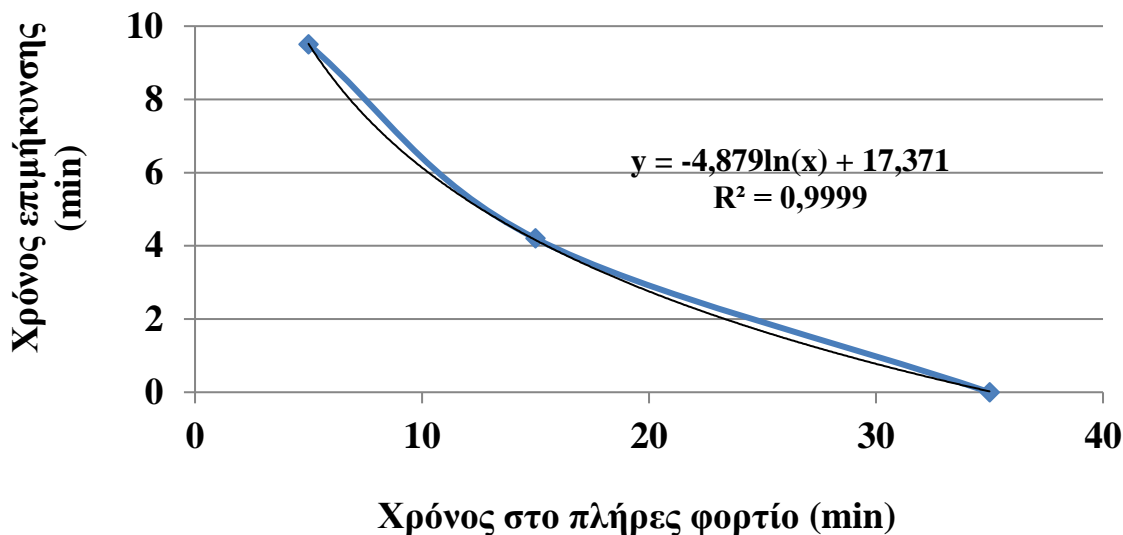
- Του χρόνου εκφόρτισης, κατά τη διάρκεια του οποίου ο σφόνδυλος παρέχει σταθερή ισχύ στο φορτίο. Οι τιμές που δύναται να έχει ο χρόνος αυτός, κυμαίνονται από 5 min έως 35 min.
- Του χρόνου εκφόρτισης, κατά τη διάρκεια του οποίου η ισχύς που παρέχει ο σφόνδυλος μειώνεται γραμμικά μέχρι τα 50 kW. Οι τιμές που δύναται να έχει ο χρόνος αυτός, κυμαίνονται από 0 min έως 9,5 min. Σε αυτό τον χρόνο επιτυγχάνεται η απόδοση πρόσθετης ενέργειας, η τιμή της οποίας μεγιστοποιείται στα 9,5 min.

### 3.11.2.1. Διαγράμματα – Εξισώσεις μοντελοποίησης του BP 400 Modular

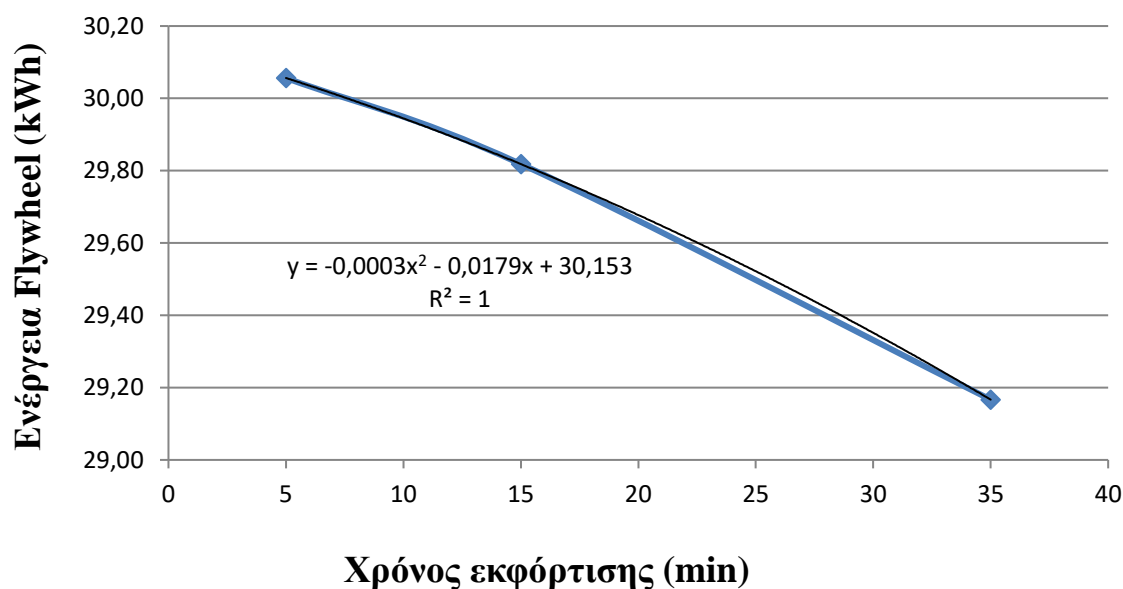
Με χρήση του πίνακα 3.5 και της εφαρμογής Microsoft Excel κατασκευάστηκαν τα διαγράμματα 3.35, 3.36, 3.37 και 3.38 που ακολουθούν.



Σχήμα 3.35: Διάγραμμα Συνολικού Χρόνου Εκφόρτισης – Χρόνου στο πλήρες φορτίο.



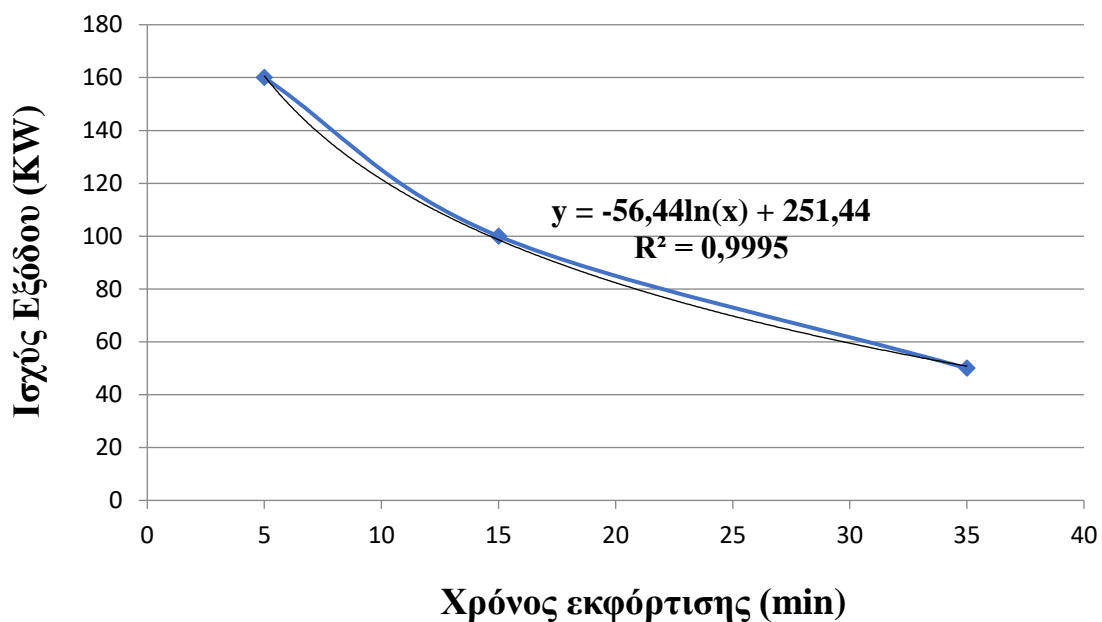
Σχήμα 3.36: Διάγραμμα Χρόνου επιμήκυνσης – Χρόνου στο πλήρες φορτίο.



Σχήμα 3.37: Διάγραμμα Ενέργειας Flywheel – Χρόνου εκφόρτισης υπό ονομαστική ισχύ.

Από το διάγραμμα του σχήματος 3.38 προκύπτει ότι η εξαγόμενη ενέργεια του συστήματος σφονδύλου της Beacon Power (BP-400 Modular) αυξάνεται σύμφωνα με τη σχέση :

$$E(t) = -0,0003 \cdot t^2 - 0,0179 \cdot t + 30,153 \quad (\text{Εξ. 3.11})$$



**Σχήμα 3.38:** Διάγραμμα Ονομαστικής Ισχύος Εξόδου – Χρόνου Εκφόρτισης.

Παρατηρώντας το διάγραμμα του Σχήματος 3.39, προκύπτει ότι ο χρόνος εκφόρτισης του συστήματος σφονδύλου Beacon Power (BP-400 Modular) επηρεάζει την ισχύ εξόδου και η σχέση που τα συνδέει είναι :

$$P(t) = -56,44 \cdot \ln(t) + 251,44 \quad (\text{Εξ. 3.12})$$

Έτσι, με χρήση της παραπάνω εξίσωσης μπορούμε να προσδιορίσουμε την ισχύ εξόδου για χρόνους εκφόρτισης μεγαλύτερους των 5 min (Πίνακας 3.6).

Χρόνος Εκφόρτισης (min)	Ισχύς Εξόδου (kW)
5	160,60
10	121,48
15	98,60
20	82,36
25	69,77
30	59,48
35	50,78

**Πίνακας 3.6:** Αποτελέσματα ισχύς εξόδου ανάλογα με το χρόνο εκφόρτισης Beacon Power (BP-400 Modular).

## Κεφάλαιο 4 : Πειραματική διαδικασία μελέτης της συμπεριφοράς των επαγωγικών μηχανών στο Simulink

### 4.1 Εισαγωγή

Ένας από τους σκοπούς της συγκεκριμένης μεταπτυχιακής διατριβής είναι η μελέτη της συμπεριφοράς επαγωγικών μηχανών στις μικρές μεταβολές της συχνότητας του ηλεκτρικού δικτύου. Για να εξεταστεί λοιπόν η μεταβολή της συχνότητας του δικτύου χρησιμοποιήθηκε το Simulink, όπου είναι ένα γραφικό περιβάλλον μοντελοποίησης και προσομοίωσης block διαγραμμάτων και μη γραμμικών συστημάτων. Αποτελεί επέκταση του MATLAB και διαφοροποιείται από αυτό στο ότι διαθέτει ένα παραθυρικό γραφικό user interface και μπορεί να προσθέσει περεταίρω λειτουργίες στο MATLAB. Η πειραματική διαδικασία χωρίστηκε σε δυο μέρη. Στο πρώτο, εξετάζεται η μεταβολή της συχνότητας του δικτύου σε σχέση με ένα επαγωγικό κινητήρα με φορτία σταθερής και μεταβλητής ροπής, ενώ στο δεύτερο μέρος εξετάζεται η μεταβολή της συχνότητας του δικτύου σε σχέση με ένα FOC Drive και ένα επαγωγικό κινητήρα (Field-Oriented Control Induction Motor Drive) με φορτία σταθερής και μεταβλητής ροπής. Τέλος, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από τις προσομοιώσεις που διεξήχθησαν.

### 4.2 Βιβλιοθήκες του Simulink

Στις προσομοιώσεις που θα ακολουθήσουν παρακάτω χρησιμοποιήθηκαν μερικές από τις βιβλιοθήκες του Simulink και αναφέρονται ενδεικτικά:

Simulink	Simscape
Discrete	Specialized Power Systems
Math Operations	Fundamental Blocks
Ports & Subsystems	Electrical Sources
Signal Routing	Elements
Sinks	Machines
Sources	Measurements
	Power Electronics
	Control & Measurements
	Measurements
	PLL
	Electric Drives
	AC Drives

Πίνακας 4.1: Βιβλιοθήκες που χρησιμοποιήθηκαν στις προσομοιώσεις του Simulink.

## 4.3 Προσομοίωση δικτύου με επαγωγικό τριφασικό κινητήρα

### 4.3.1 Περιγραφή

Στη συγκεκριμένη προσομοίωση, στόχος είναι να δημιουργηθεί το κατάλληλο μοντέλο στο περιβάλλον του Simulink, ώστε να ελεγχθεί η συμπεριφορά των επαγωγικών μηχανών σε δυναμικές καταστάσεις της συχνότητας του δικτύου και πιο συγκεκριμένα για πιθανές μεταβολές της συχνότητας με εύρος τιμών από 48 Hz έως τα 51 Hz και βήμα 0,1 Hz. Ως φορτία των μηχανών, τοποθετούνται δυο είδη φορτίων. Φορτία σταθερής ροπής και φορτία μεταβαλλόμενης ροπής (βλ. Ενότητα 2.9). Στόχος είναι να διαπιστωθεί ποιο είδος από αυτά τα φορτία θα είναι συνετό να αποκοπεί σε μια πιθανή διαταραχή της ευστάθειας του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας (Σ.Η.Ε.).

### 4.3.2 Βασικά μέρη του συστήματος

- Τριφασική προγραμματιζόμενη πηγή τάσης.
- Ασύγχρονη μηχανή (Μονάδες στο SI).
- Τριφασικό πολύμετρο  $V - I$ .
- Τριφασικό βαττόμετρο πραγματικής και άεργης ισχύος.
- PLL (Βρόχος κλειδωμένης φάσης [Phase-Locked Loop]).
- Παλμογράφοι.
- Φορτίο σταθερής ροπής (π.χ. Ταινιόδρομος).
- Φορτίο μεταβαλλόμενης ροπής (π.χ. Φυγοκεντρική Αντλία).
- powergui.

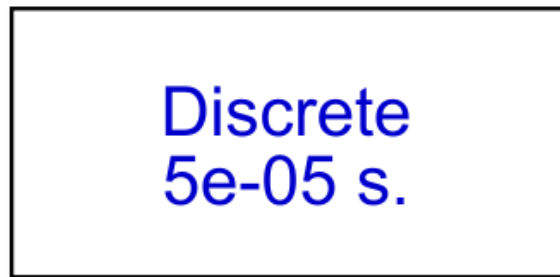
### 4.3.3 Κατασκευή του μοντέλου προσομοίωσης στο Simulink

Αρχικά, για την επίλυση του συστήματος που κατασκευάστηκε τοποθετήθηκε το μπλοκ powergui, που μας επιτρέπει να επιλέξουμε μία από τις παρακάτω μεθόδους για την επίλυση του κυκλώματός μας:

- Συνεχής (Continuous), η οποία χρησιμοποιεί ένα πρόγραμμα επίλυσης μεταβλητών βημάτων από το Simulink.
- Διακριτοποίηση (Discretization) του ηλεκτρικού συστήματος για επίλυση σε καθορισμένα χρονικά βήματα.
- Συνεχής ή διακριτή επίλυση φάσης.

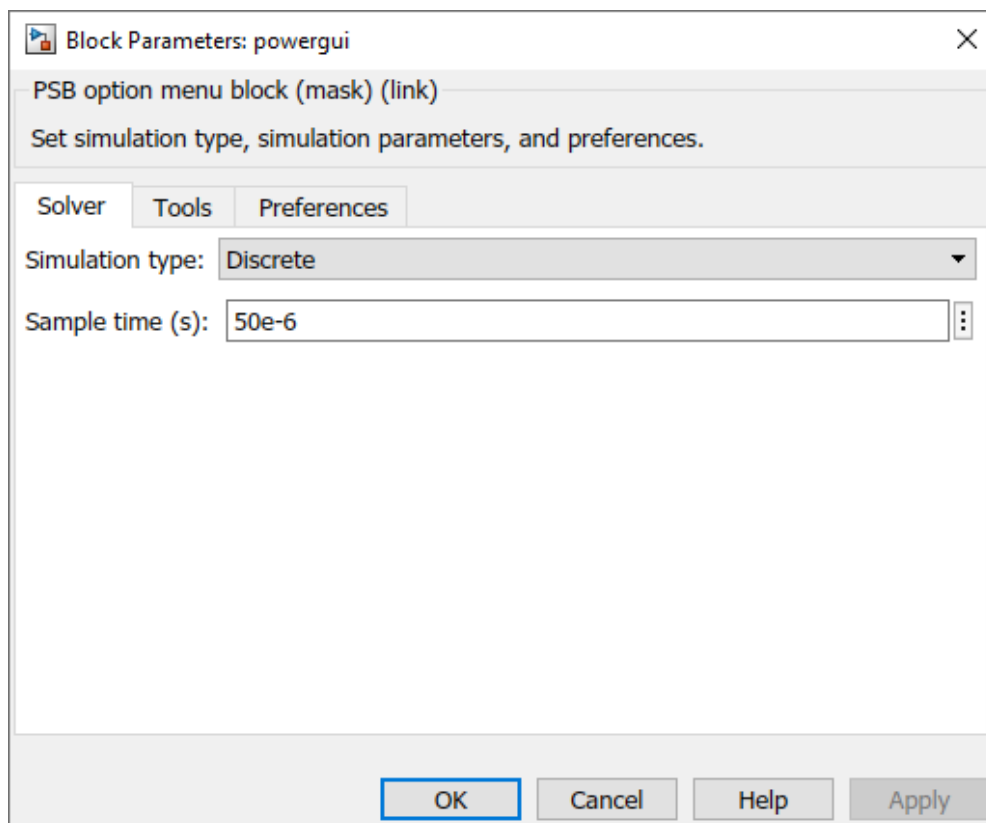


Για τις ανάγκες της δικής μας προσομοίωσης, χρησιμοποιήθηκε η δεύτερη μέθοδος επίλυσης του συστήματος μας, δηλαδή η επίλυση με διακριτοποίηση.



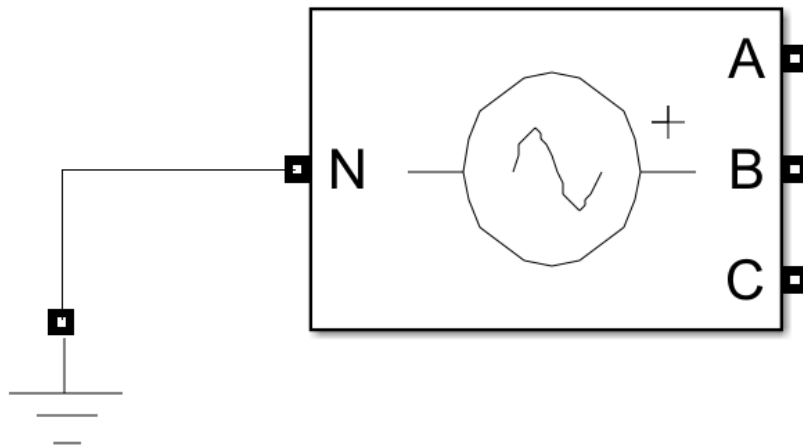
Σχήμα 4.1: Το μπλοκ του powergui.

Ο χρόνος δειγματοληψίας της προσομοίωσης, ορίστηκε στα  $0,05 \text{ ms}$ . Συγκριτικά με τη περίοδο της συχνότητας του ηλεκτρικού δικτύου ( $20 \text{ ms}$ ) είναι τετρακόσιες φορές μικρότερος.

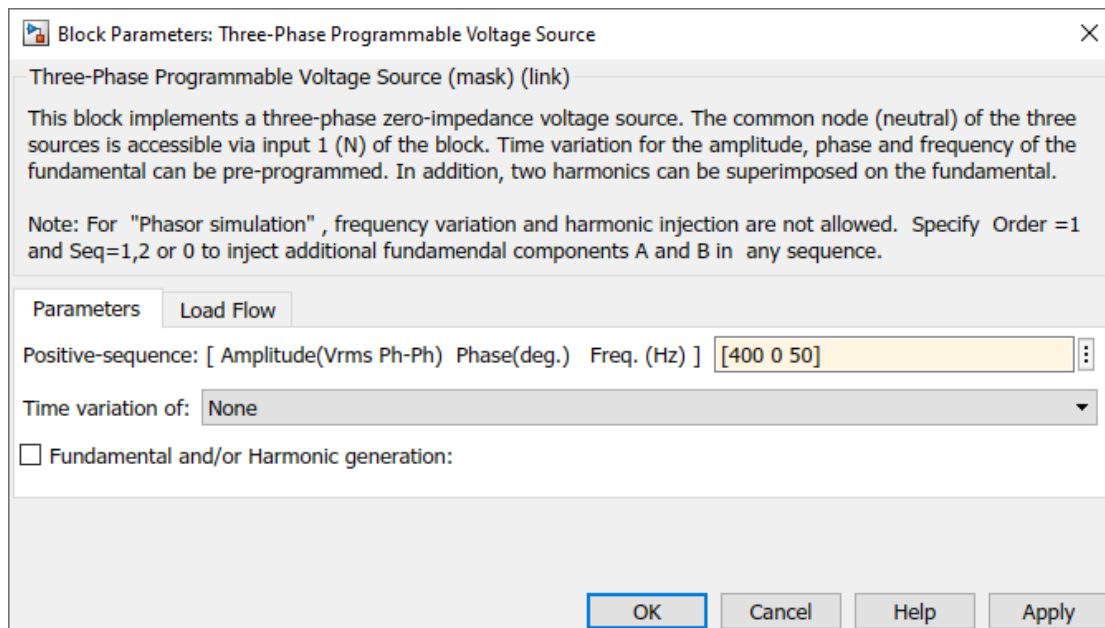


Σχήμα 4.2: Ρύθμιση του powergui.

Στη συνέχεια, τοποθετήθηκε το μπλοκ Three-Phase Programmable Voltage Source που ως στόχο έχει να δημιουργήσει μια τριφασική ημιτονοειδή τάση με παραμέτρους που ποικίλλουν σε σχέση με χρόνο. Μπορεί να προγραμματιστεί η αλλαγή του πλάτους, της φάσης ή και της συχνότητας της πηγής. Επιπλέον, μπορούν να εισαχθούν αρμονικές στο βασικό σήμα της πηγής.



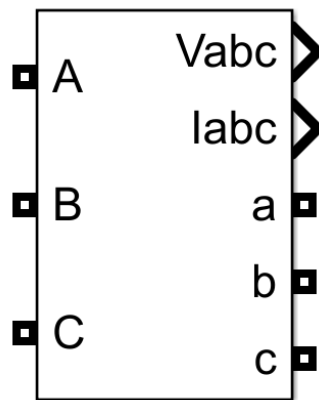
**Σχήμα 4.3:** Το μπλοκ Three-Phase Programmable Voltage Source.



**Σχήμα 4.4:** Ρυθμίσεις παραμέτρων του μπλοκ Three-Phase Programmable Voltage Source.

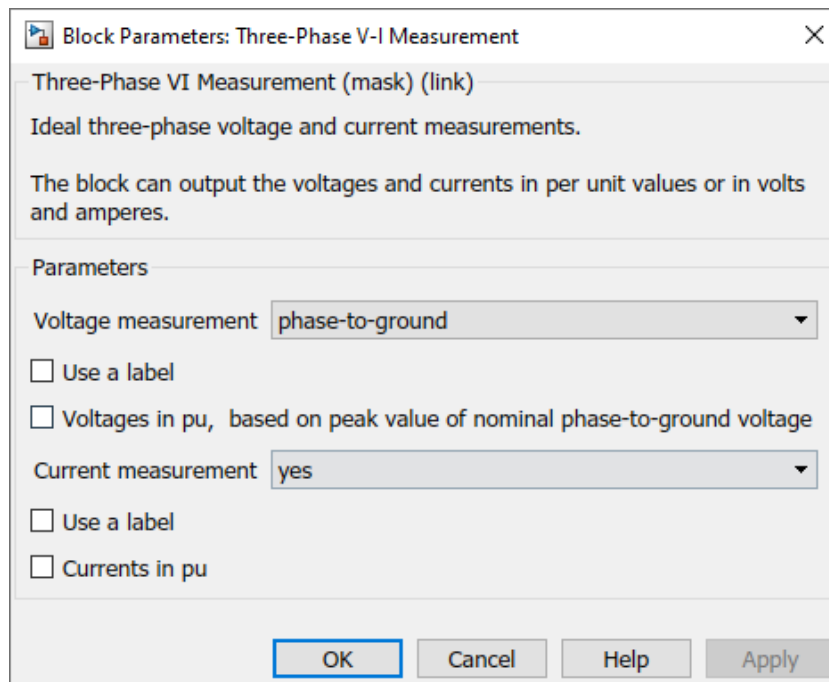
Η συγκεκριμένη πηγή τάσης ρυθμίστηκε ώστε να έχει ολική τάσης  $400\text{ V RMS}$ , φάση  $0$  μοίρες και συχνότητα  $50\text{ Hz}$  για την αρχή του πειράματος. Για το σκοπό της μελέτης που πραγματεύεται η εργασία, το πεδίο της συχνότητας αλλάζει από τα  $48\text{ Hz}$  έως τα  $51\text{ Hz}$  με βήμα  $0,1\text{ Hz}$ , και ως εκ τούτου θα έχουμε παρακάτω αποτελέσματα για 31 διαφορετικές τιμές συχνότητας δικτύου.

Έπειτα, τοποθετήθηκε το μπλοκ Three-Phase  $V - I$  Measurement, όπου χρησιμοποιείται για τη μέτρηση στιγμιαίων τριφασικών τάσεων και ρευμάτων σε ένα κύκλωμα. Όταν συνδέεται σε σειρά με τριφασικά στοιχεία, μας επιστρέφει τις τρεις τάσεις και ρεύματα είτε ως προς αναφορά φάσης - γείωσης, είτε ως αναφορά φάσης - φάσης. Το μπλοκ μπορεί να εξάγει τις τάσεις και τα ρεύματα σε τιμές ανά μονάδα ( $pu$ ) ή σε βολτ και αμπέρ ( $SI$ ).



**Σχήμα 4.5:** Το μπλοκ Three-Phase  $V - I$  Measurement.

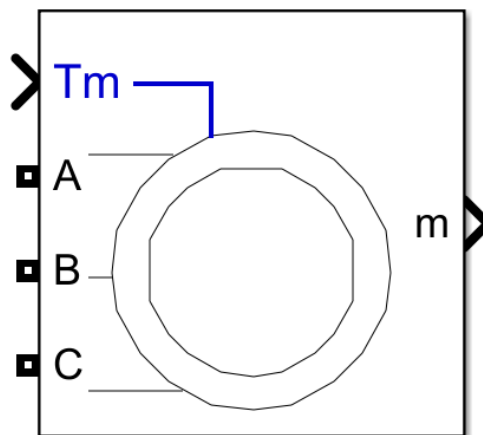
Στη περίπτωση μας, το μπλοκ ρυθμίστηκε ώστε να μετράει τη τάση με αναφορά φάση προς γη και οι μονάδες να είναι στο  $SI$ .



Σχήμα 4.6: Ρυθμίσεις παραμέτρων του μπλοκ Three-Phase  $V - I$  Measurement.

Ύστερα, προστέθηκε το μπλοκ Asynchronous Machine SI Units. Το μπλοκ της ασύγχρονης μηχανής εμπεριέχει μια τριφασική ασύγχρονη μηχανή (με δακτυλιοφόρο ρότορα, με ρότορα βραχυκυκλωμένου κλωβού ή μονού σκιουροκλωβού ή διπλού σκιουροκλωβού). Μπορεί να λειτουργήσει είτε ως κινητήρας, είτε ως γεννήτρια. Ο τρόπος της λειτουργίας της, καθορίζεται από το πρόσημο της μηχανικής ροπής:

- Εάν το  $T_m$  είναι θετικό, η μηχανή λειτουργεί ως κινητήρας.
- Εάν το  $T_m$  είναι αρνητικό, η μηχανή λειτουργεί ως γεννήτρια.

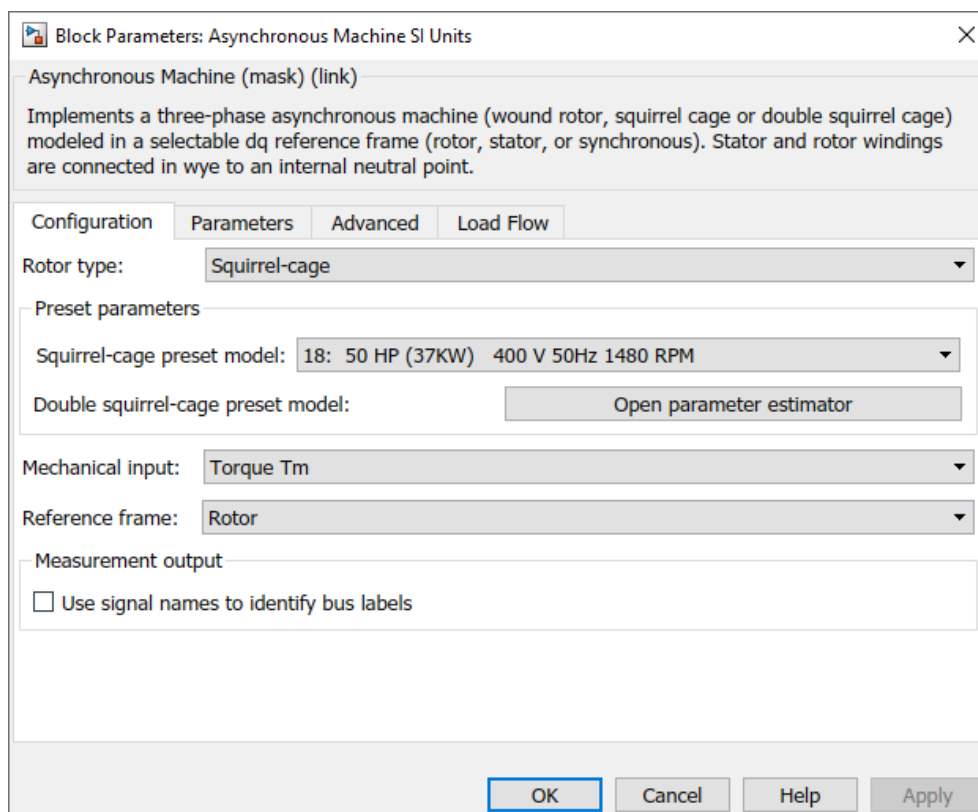


Σχήμα 4.7: Το μπλοκ Asynchronous Machine SI Units.

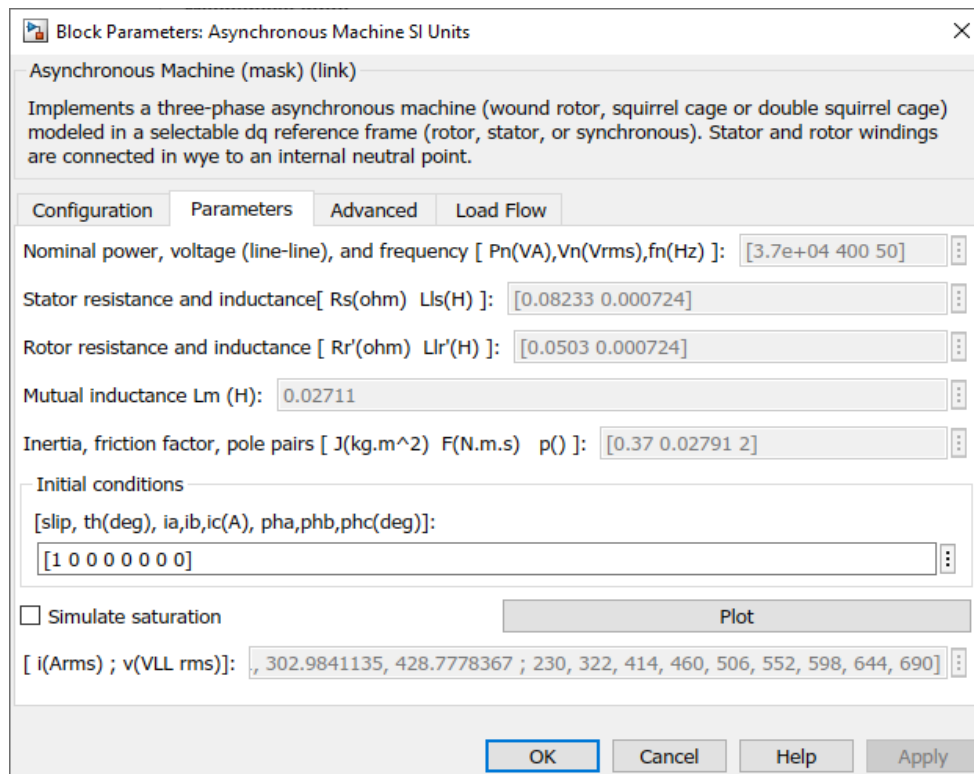
Στη περίπτωση μας στη τριφασική επαγωγική μηχανή επιλέχθηκε ρότορας τύπου βραχυκυκλωμένου κλωβού ή μονού σκιουροκλωβού. Επίσης, επιλέχθηκε ένα έτοιμο μοντέλο του Simulink ηλεκτρικής μηχανής με τα παρακάτω ονομαστικά στοιχεία:

- Μηχανική Ισχύς: 50 HP ή 37 kW.
- Συχνότητα: 50 Hz.
- Ταχύτητα: 1480 rpm.

Ακόμη, επιλέχθηκε ως μηχανική είσοδος η επιλογή Torque  $T_m$  για να καθορίσουμε μια ροπή εισόδου σε  $N \cdot m$ . Η ταχύτητα της ηλεκτρικής μηχανής καθορίζεται από τη ροπή αδράνειας  $J$  και από τη διαφορά μεταξύ της εφαρμοζόμενης μηχανικής ροπής  $T_m$  και της εσωτερικής ηλεκτρομαγνητικής ροπής  $T_e$ . Η σύμβαση του πρόσημου για τη μηχανική ροπή είναι: όταν η ταχύτητα είναι θετική, ένα σήμα θετικής ροπής δείχνει ότι η μηχανή λειτουργεί ως κινητήρας και ένα αρνητικό σήμα δείχνει ότι η μηχανή λειτουργεί ως γεννήτρια.



**Σχήμα 4.8:** Ρυθμίσεις παραμέτρων του μπλοκ Asynchronous Machine SI Units (Configuration).

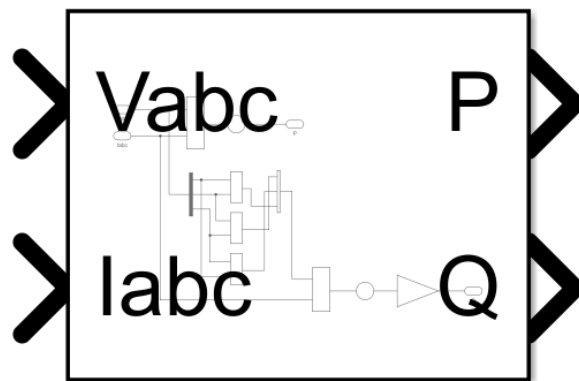


**Σχήμα 4.9:** Ρυθμίσεις παραμέτρων του μπλοκ Asynchronous Machine SI Units (Parameters).

Για να μπορεί να μετρηθεί η τριφασική ενεργός και άεργος ισχύς του δικτύου, τοποθετήθηκε το μπλοκ Power (3ph, Instantaneous) το οποίο υπολογίζει την τριφασική στιγμιαία ενεργή ισχύ  $P$  (σε *Watt*) και την άεργη ισχύ  $Q$  (σε *vars*). Οι παρακάτω τύποι χρησιμοποιούνται για την εκτέλεση των υπολογισμών του μπλοκ:

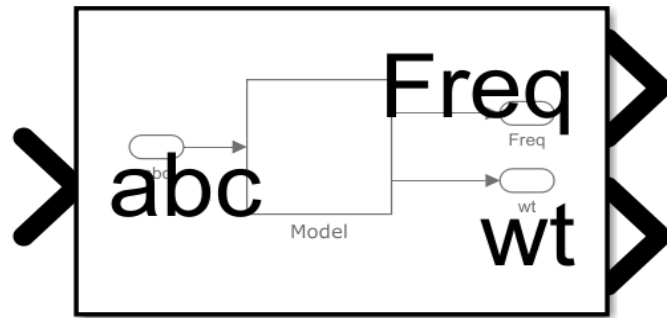
$$P = V_a \cdot I_a + V_b \cdot I_b + V_c \cdot I_c \quad (\text{Εξ. 4.1})$$

$$Q = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot [(V_b - V_c) \cdot I_a + (V_c - V_a) \cdot I_b + (V_a - V_b) \cdot I_c] \quad (\text{Εξ. 4.2})$$

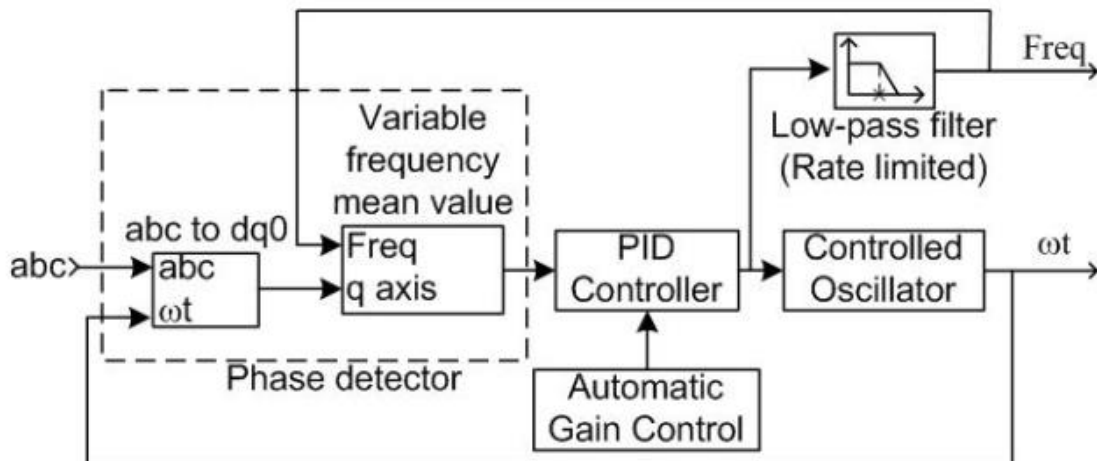


**Σχήμα 4.10:** Το μπλοκ Power (3ph, Instantaneous).

Έπειτα, τοποθετήθηκε το μπλοκ PLL (3ph), όπου διαμορφώνει ένα σύστημα ελέγχου κλειστού βρόχου Phase Locked Loop (PLL), το οποίο παρακολουθεί τη συχνότητα και τη φάση ενός ημιτονοειδούς τριφασικού σήματος, χρησιμοποιώντας έναν εσωτερικό ταλαντωτή συχνότητας. Το σύστημα ελέγχου ρυθμίζει τη συχνότητα του εσωτερικού ταλαντωτή για να διατηρήσει τη διαφορά φάσεων στο 0.

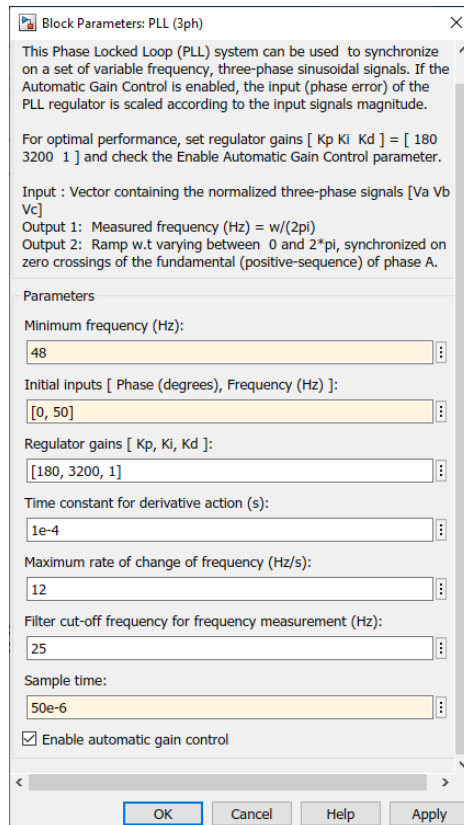


Σχήμα 4.11: Το μπλοκ PLL (3ph).



Σχήμα 4.12: Το εσωτερικό διάγραμμα του PLL μπλοκ.

Πιο αναλυτικά, το τριφασικό σήμα εισόδου μετατρέπεται σε στρεφόμενο σύστημα αξόνων  $dq0$  (μετασχηματισμός κατά Park) χρησιμοποιώντας τη γωνιακή ταχύτητα ενός εσωτερικού ταλαντωτή. Ο άξονας τετραγωνισμού του σήματος, ανάλογος προς τη διαφορά φάσης μεταξύ του σήματος  $abc$  και του στρεφόμενου συστήματος αξόνων του εσωτερικού ταλαντωτή, φιλτράρεται με ένα μπλοκ μέσης (μεταβλητής συχνότητας). Ένας ελεγκτής Proportional – Integral – Derivative (PID), με προαιρετικό αυτόματο έλεγχο κέρδους (AGC), διατηρεί τη διαφορά φάσης στο 0 ενεργώντας στον ελεγχόμενο ταλαντωτή. Η έξοδος PID, που αντιστοιχεί στη γωνιακή ταχύτητα, φιλτράρεται και μετατρέπεται στη συχνότητα σε Hertz.

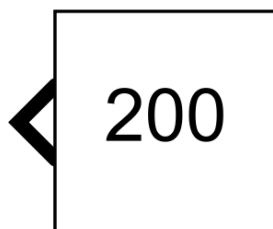


**Σχήμα 4.13:** Ρυθμίσεις παραμέτρων του μπλοκ PLL (3ph).

Στη συνέχεια, τοποθετήθηκαν στο σύστημα τα δυο είδη φορτίων που προαναφέρθηκαν, και πιο συγκεκριμένα για φορτίο σταθερής ροπής προσομοιώθηκε ένας ταινιόδρομος (βλ. Κεφάλαιο 2) – τέτοια φορτία βρίσκονται για παράδειγμα σε λατομεία ή σε αεροδρόμια κ.α.- και για φορτίο μεταβαλλόμενης ροπής μια φυγοκεντρική αντλία.

Για τον ταινιόδρομο, χρησιμοποιήθηκε ένα μπλοκ Constant, μέσω του οποίου υπάρχει η δυνατότητα επιλογής μια σταθερής τιμής, και στην περίπτωση του ταινιόδρομου ορίστηκε μηχανική ροπή ίση με  $200 N \cdot m$ .

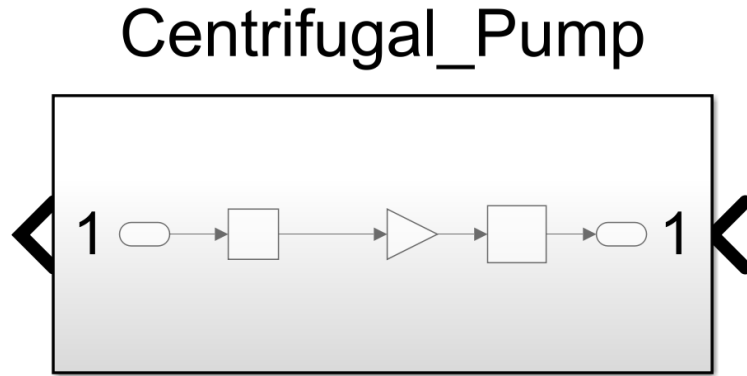
## Conveyor\_Belt



**Σχήμα 4.14:** Το μπλοκ Constant.



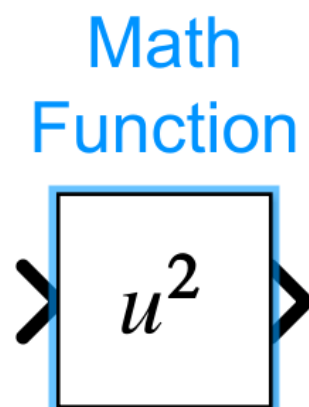
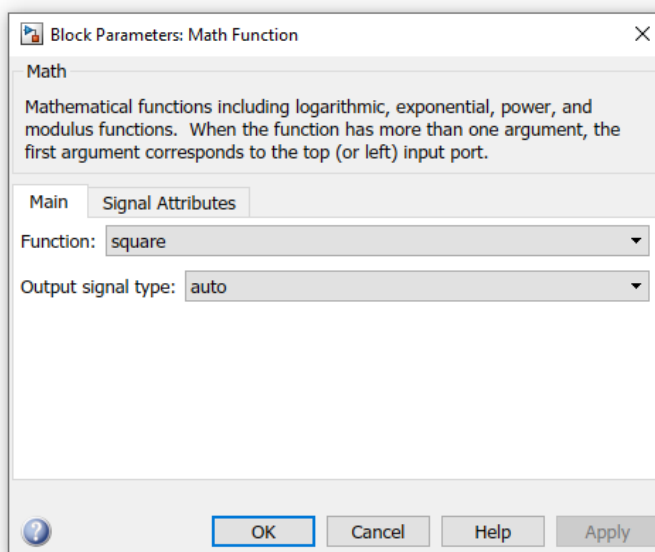
Για τη προσομοίωση της φυγοκεντρικής αντλίας, τοποθετήθηκε το μπλοκ Subsystem, μέσω του οποίου δύναται να κατασκευαστεί ένα υποσύστημα στο συνολικό σύστημα της προσομοίωσης.



Σχήμα 4.15: Το μπλοκ Subsystem.

Εφόσον τοποθετήθηκε το μπλοκ Subsystem, ξεκίνησε η κατασκευή του μαθηματικού μοντέλου της φυγοκεντρικής αντλίας ως εξής:

Γενικά, τα φορτία μεταβλητής ροπής είναι λιγότερο απαιτητικά φορτία κατά την εκκίνηση του κινητήρα με την ροπή τους να εξαρτάται από το τετράγωνο της ταχύτητας και την ισχύ να εξαρτάται από τον κύβο της ταχύτητας του εκάστοτε φορτίου. Έτσι, αρχικά τοποθετήθηκε το μπλοκ Math Function, όπου εκτελεί μια τετραγωνική συνάρτηση.



Σχήμα 4.16: Ρυθμίσεις παραμέτρων του μπλοκ Math Function.

Έπειτα, τοποθετήθηκε το μπλοκ Gain που πολλαπλασιάζει την είσοδο με μια σταθερή τιμή (κέρδος). Στη δική μας περίπτωση, αυτό το κέρδος είναι η σταθερά ροπής του επαγωγικού κινητήρα και μπορεί να υπολογιστεί από τα ονομαστικά στοιχεία της ηλεκτρικής μηχανής ως εξής:

$$P = 37.000 \text{ W}$$

$$N = 1.480 \text{ rpm}$$

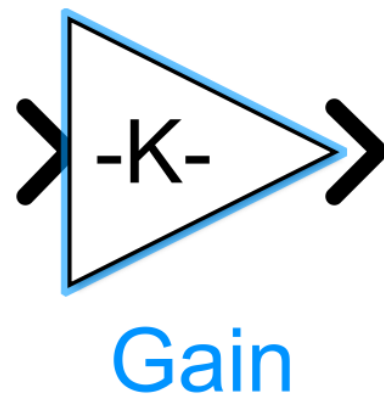
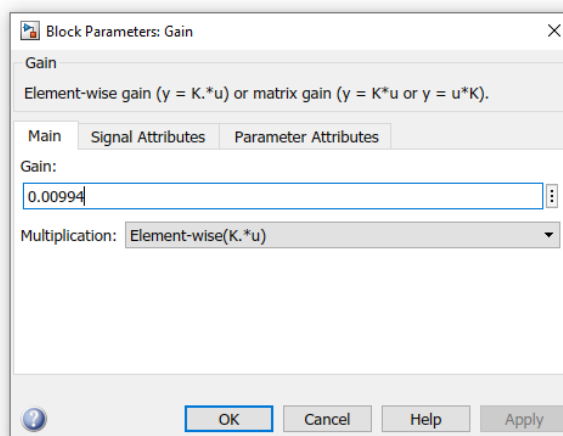
$$W_m = \frac{N}{9,55} = \frac{1.480 \text{ rpm}}{9,55} = 154,97 \frac{\text{rad}}{\text{sec}} \quad (\text{Εξ. 4.3})$$

$$T = \frac{30 \cdot P}{3,14 \cdot N} = \frac{30 \cdot 37.000 \text{ W}}{3,14 \cdot 1.480 \text{ rpm}} = 238,73 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (\text{Εξ. 4.4})$$

$$\text{1ος Τρόπος: } K = \frac{T}{W_m^2} = \frac{238,73 \text{ N} \cdot \text{m}}{\left(154,97 \frac{\text{rad}}{\text{sec}}\right)^2} = 0,00994 \quad (\text{Εξ. 4.5})$$

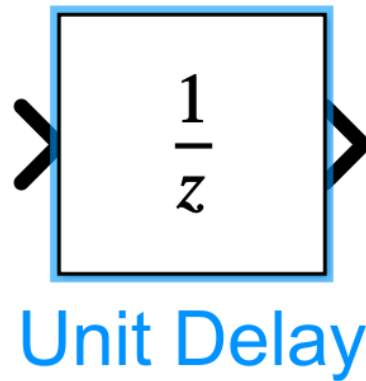
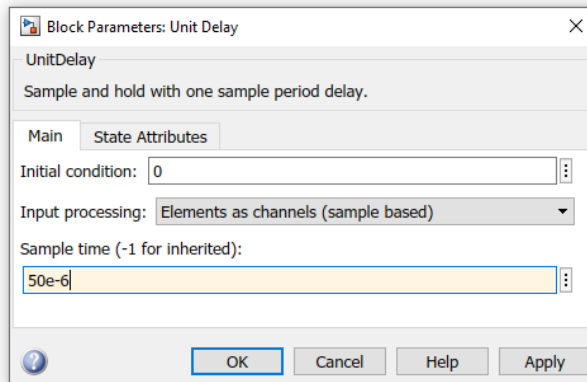
$$\text{2ος Τρόπος: } K = \frac{P}{W_m^3} = \frac{37.000 \text{ W}}{\left(154,97 \frac{\text{rad}}{\text{sec}}\right)^3} = 0,00994 \quad (\text{Εξ. 4.6})$$

Όπου  $P$  η μηχανική ισχύς του κινητήρα,  $N$  οι ονομαστικές στροφές,  $W_m$  η ονομαστική γωνιακή ταχύτητα,  $T$  η ονομαστική μηχανική ροπή και  $K$  η σταθερά ροπής.



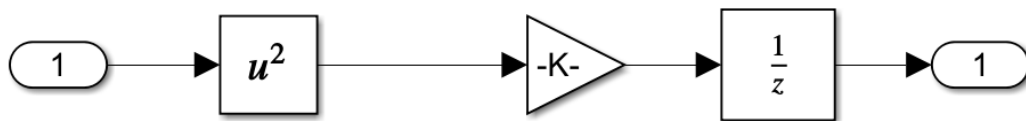
**Σχήμα 4.17:** Ρυθμίσεις παραμέτρων του μπλοκ Gain.

Για τη καλύτερη λειτουργία του υποσυστήματος, προστέθηκε το μπλοκ Unit Delay, όπου έχει την ιδιότητα να διατηρεί και να καθυστερεί την εισαγωγή του σήματος εισόδου κατά την περίοδο της δειγματοληψίας που έχουμε ορίσει.



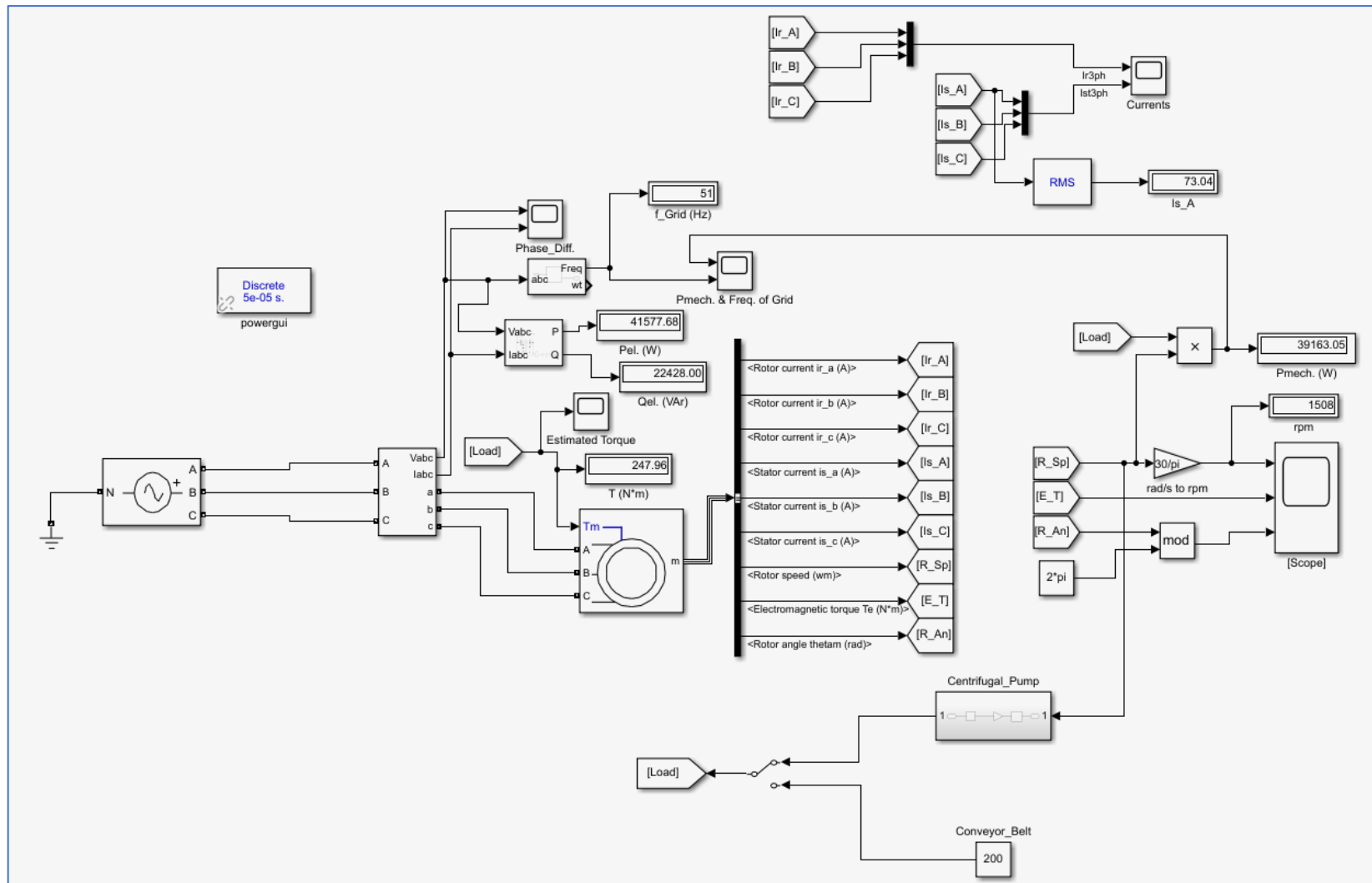
**Σχήμα 4.18:** Ρυθμίσεις παραμέτρων του μπλοκ Unit Delay.

Το τελικό υποσύστημα όπου απαρτίζεται από τα παραπάνω μπλοκ, φαίνεται στο Σχήμα 4.19.



**Σχήμα 4.19:** Το μαθηματικό μοντέλο της φυγοκεντρικής αντλίας.

Τέλος, και τα δυο φορτία συνδέονται στο μπλοκ Manual Switch μέσω του οποίου μπορεί να γίνει η επιλογή του επιθυμητού φορτίου, και αυτό με τη σειρά του συνδέεται στην είσοδο του μηχανικού φορτίου του μπλοκ Asynchronous Machine SI Units.



Σχήμα 4.20: Το τελικό σύστημα της προσομοίωσης του δικτύου με τον επαγωγικό κινητήρα και τα δυο φορτία του.

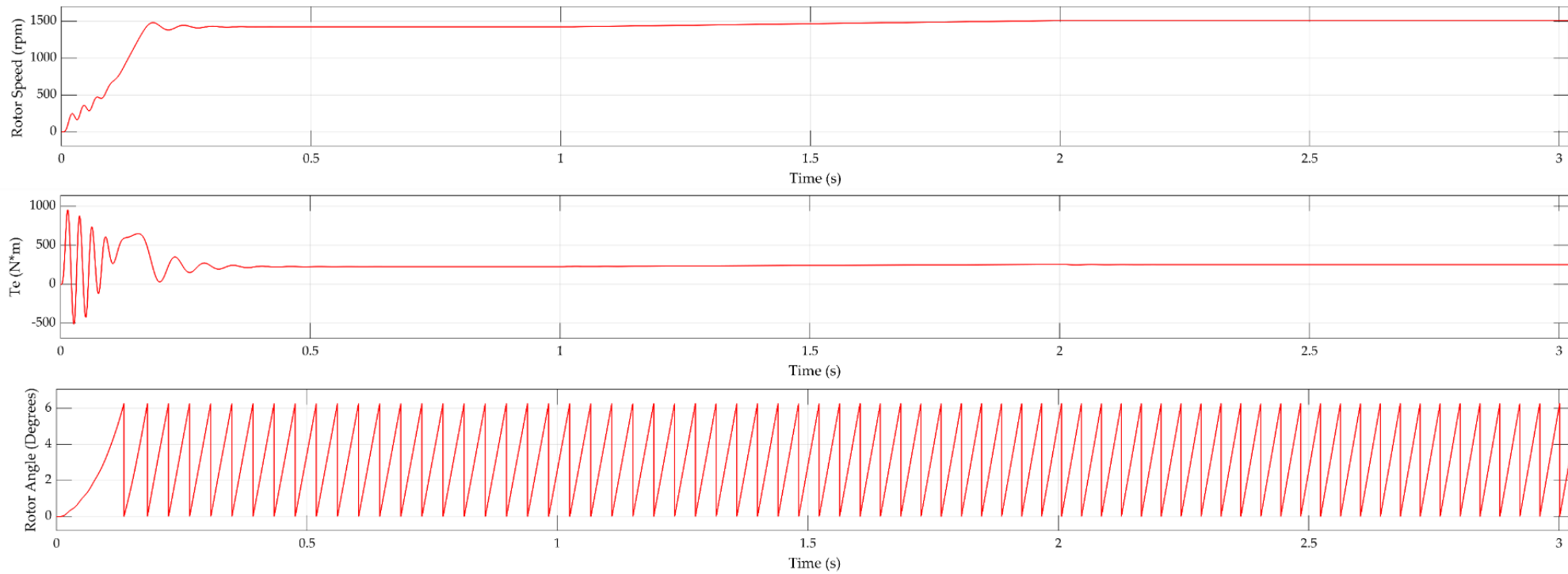
#### 4.3.4 Προσομοίωση με φορτίο μεταβλητής ροπής

Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 4.20, έχουν τοποθετηθεί πολλά μπλοκ Display για να εμφανίζονται τα αποτελέσματα από διάφορα άλλα μπλοκ, αλλά και από πράξεις που γίνονται. Επίσης, έχουν τοποθετηθεί και πέντε παλμογράφοι έτσι ώστε να έχουμε γραφικές παραστάσεις για τα αποτελέσματα της προσομοίωσης.

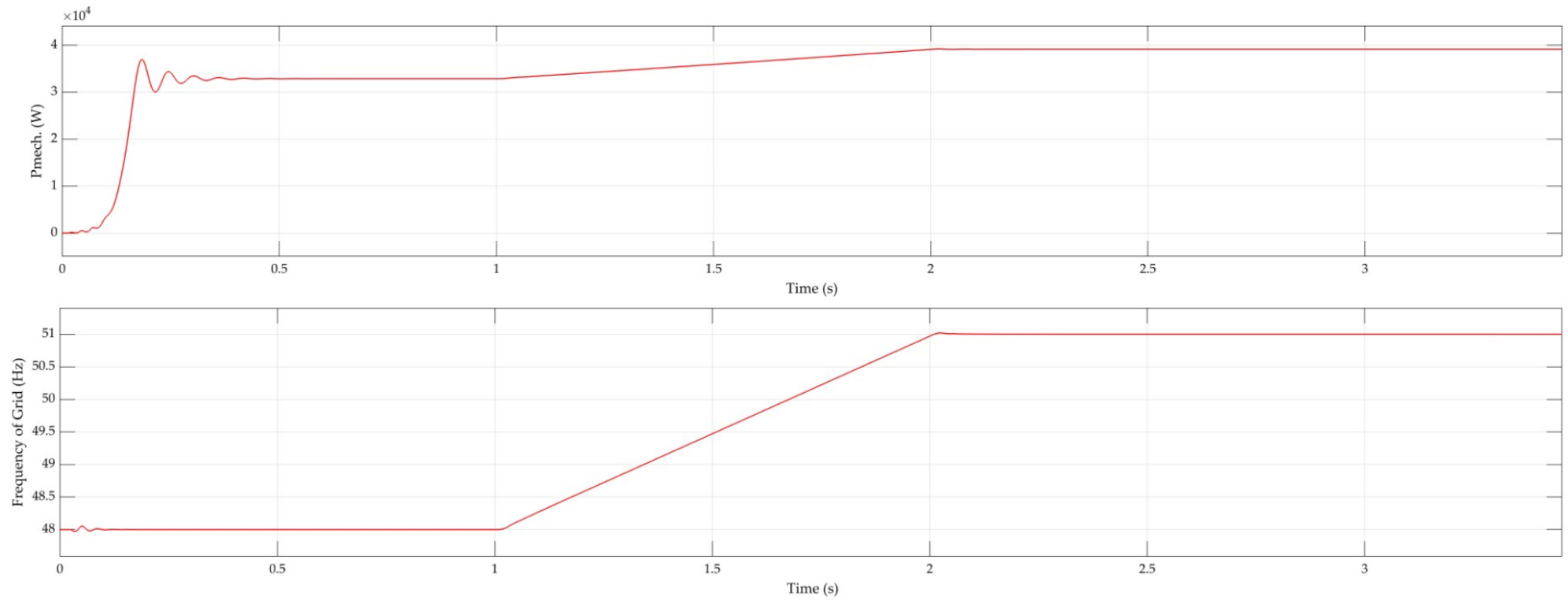
Η πρώτη προσομοίωση που γίνεται σε αυτό το μοντέλο με τον τριφασικό ασύγχρονο κινητήρα, είναι με φορτίο τη φυγοκεντρική αντλία (φορτίο μεταβλητής ροπής) και σκοπός είναι να μετρηθούν τα  $P_{\eta\lambda}$ ,  $Q_{\eta\lambda}$ ,  $P_{\mu\eta\chi}$  και  $T_{\mu\eta\chi}$  και να εξαχθούν αποτελέσματα για τη μεταβολή της συχνότητας του δικτύου σε σχέση με τον επαγωγικό κινητήρα.

#### 4.3.5 Προσομοίωση με φορτίο σταθερής ροπής

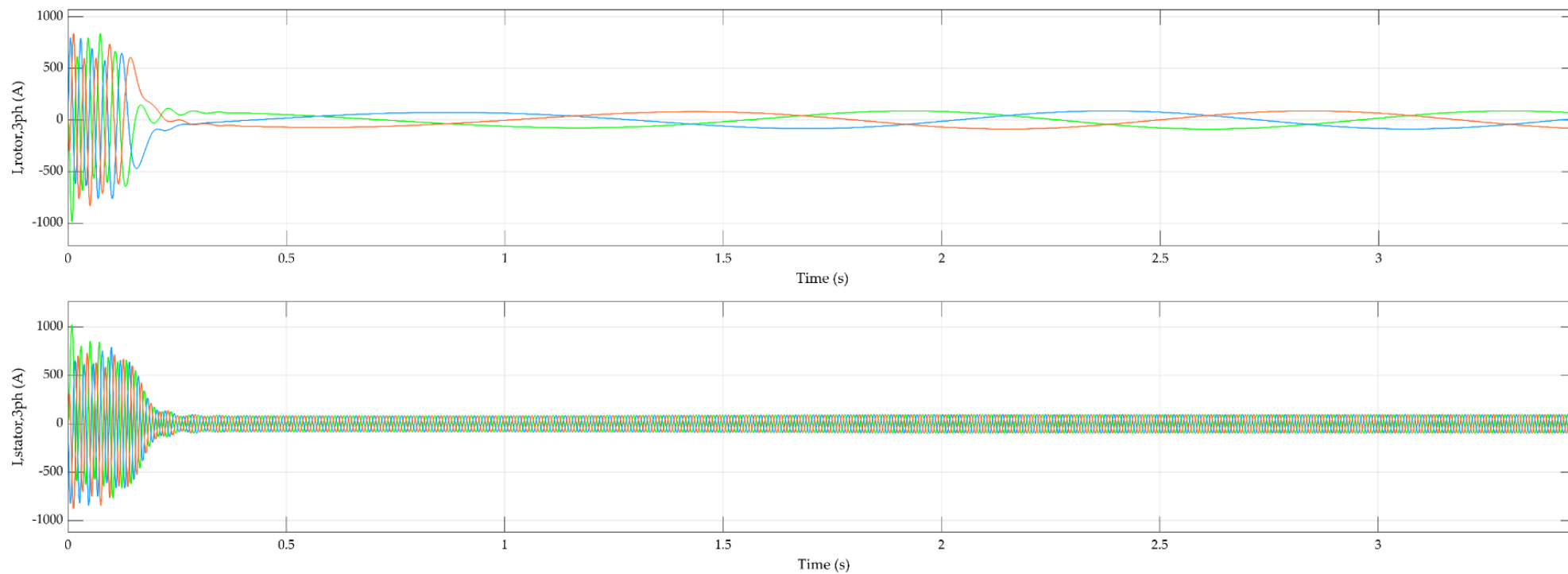
Η δεύτερη προσομοίωση που γίνεται σε αυτό το μοντέλο με τον τριφασικό ασύγχρονο κινητήρα, είναι με φορτίο το ταινιόδρομο (φορτίο σταθερής ροπής) και σκοπός είναι να μετρηθούν τα  $P_{\eta\lambda}$ ,  $Q_{\eta\lambda}$ ,  $P_{\mu\eta\chi}$  (εδώ  $T_{\mu\eta\chi} = \text{σταθ.}$ ) και να εξαχθούν αποτελέσματα για τη μεταβολή της συχνότητας του δικτύου σε σχέση με τον επαγωγικό κινητήρα. Σε σχέση με το Σχήμα 4.20, η μόνη αλλαγή που γίνεται είναι να αλλάξει η επιλογή του μπλοκ Manual Switch, από το φορτίο της αντλίας στο φορτίο του ταινιόδρομου.



**Σχήμα 4.21:** Διαγράμματα στροφών, ηλεκτρομαγνητικής ροπής και γωνίας του δρομέα του ασύγχρονου κινητήρα σε σχέση με το χρόνο για φορτίο μεταβλητής ροπής.

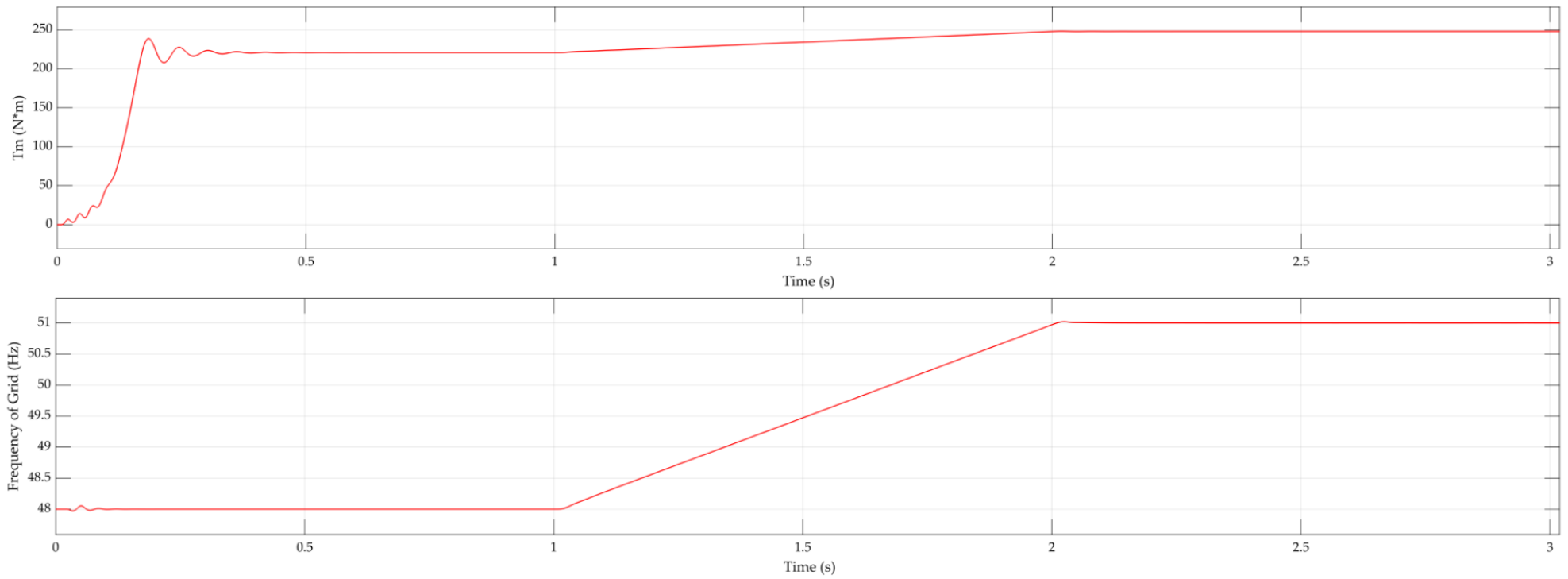


**Σχήμα 4.22:** Διαγράμματα της μηχανικής ισχύος του ασύγχρονου κινητήρα και της συχνότητας της πηγής τάσεως (δικτύου) σε σχέση με το χρόνο για φορτίο μεταβλητής ροπής.



**Σχήμα 4.23:** Διαγράμματα των τριφασικών ρευμάτων του ασύγχρονου κινητήρα του στάτη και του δρομέα σε σχέση με το χρόνο για φορτίο μεταβλητής ροπής.



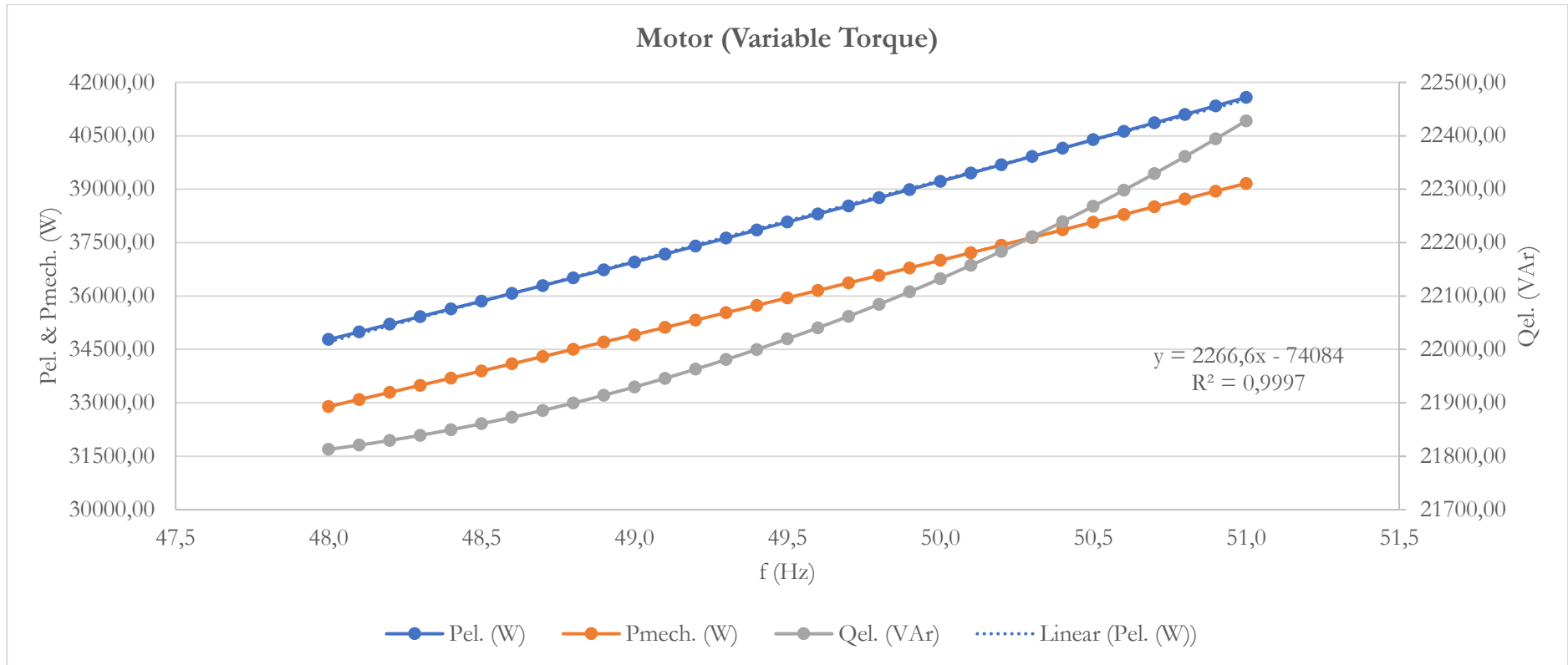


**Σχήμα 4.24:** Διαγράμματα της μηχανικής ροπής του ασύγχρονου κινητήρα και της συχνότητας της πηγής τάσεως (δικτύου) σε σχέση με το χρόνο για φορτίο μεταβλητής ροπής.

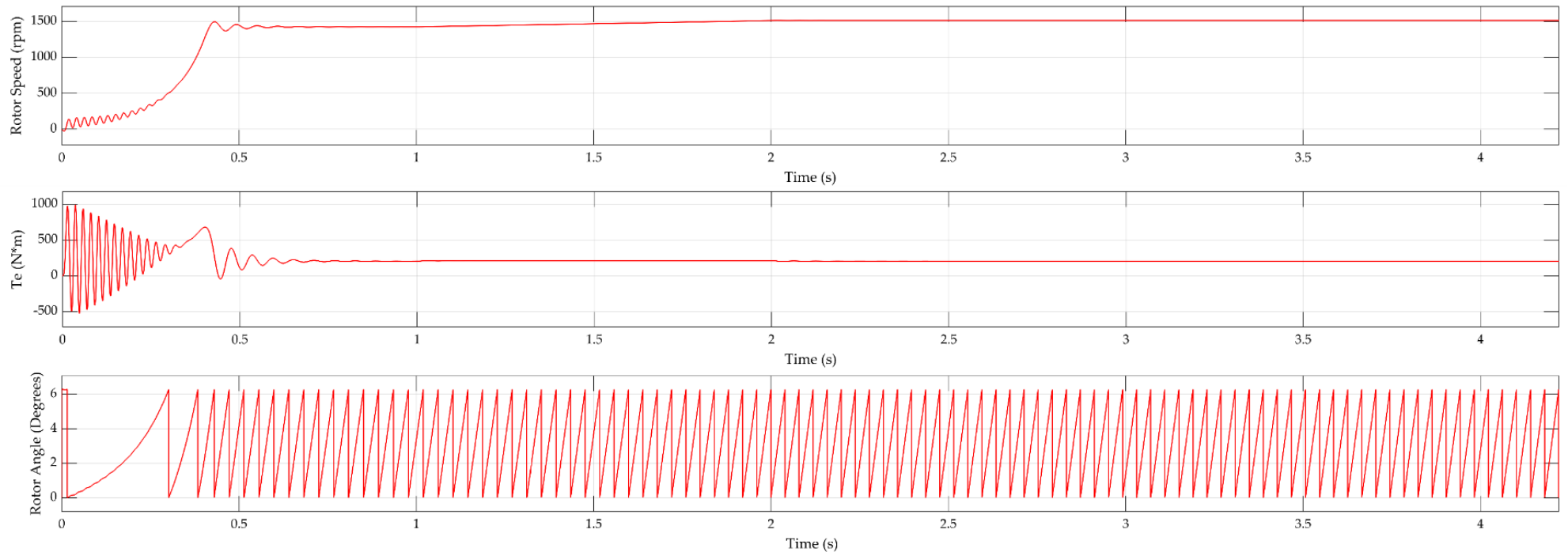
Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης:

<b>Motor (Variable Torque)</b>							
<b>f<sub>grid</sub> (Hz)</b>	<b>P<sub>el.</sub> (W)</b>	<b>Q<sub>el.</sub> (VAr)</b>	<b>P<sub>mech.</sub> (W)</b>	<b>T<sub>load</sub> (N*m)</b>	<b>tanφ</b>	<b>f/f<sub>0</sub> (%)</b>	<b>P<sub>ηλ.</sub>/P<sub>ηλ.0</sub> (%)</b>
48,0	34777,64	21812,77	32895,37	220,74	0,627	96,00	88,672
48,1	34991,34	21820,78	33093,75	221,63	0,624	96,20	89,216
48,2	35205,92	21829,58	33292,85	222,52	0,620	96,40	89,764
48,3	35421,39	21839,19	33492,67	223,41	0,617	96,60	90,313
48,4	35637,73	21849,61	33693,23	224,30	0,613	96,80	90,864
48,5	35854,97	21860,86	33894,51	225,19	0,610	97,00	91,418
48,6	36073,09	21872,92	34096,51	226,08	0,606	97,20	91,975
48,7	36292,09	21885,82	34299,25	226,98	0,603	97,40	92,533
48,8	36511,99	21899,56	34502,71	227,88	0,600	97,60	93,094
48,9	36732,78	21914,14	34706,90	228,77	0,597	97,80	93,656
49,0	36954,46	21929,57	34911,82	229,67	0,593	98,00	94,222
49,1	37177,04	21945,86	35117,47	230,57	0,590	98,20	94,789
49,2	37400,51	21963,02	35323,85	231,48	0,587	98,40	95,359
49,3	37624,88	21981,05	35530,95	232,38	0,584	98,60	95,931
49,4	37850,15	21999,95	35738,79	233,29	0,581	98,80	96,505
49,5	38076,32	22019,74	35947,35	234,19	0,578	99,00	97,082
49,6	38303,39	22040,43	36156,65	235,10	0,575	99,20	97,661
49,7	38531,37	22062,02	36366,67	236,01	0,573	99,40	98,242
49,8	38760,26	22084,51	36577,42	236,92	0,570	99,60	98,826
49,9	38990,05	22107,92	36788,91	237,83	0,567	99,80	99,412
50,0	39220,75	22132,25	37001,12	238,75	0,564	100,00	100,000
50,1	39452,35	22157,51	37214,06	239,66	0,562	100,20	100,591
50,2	39684,88	22183,71	37427,73	240,58	0,559	100,40	101,183
50,3	39918,31	22210,86	37642,13	241,50	0,556	100,60	101,779
50,4	40152,66	22238,96	37857,27	242,42	0,554	100,80	102,376
50,5	40387,93	22268,02	38073,13	243,34	0,551	101,00	102,976
50,6	40624,11	22298,05	38289,72	244,26	0,549	101,20	103,578
50,7	40861,21	22329,06	38507,04	245,18	0,546	101,40	104,183
50,8	41099,24	22361,06	38725,09	246,11	0,544	101,60	104,790
50,9	41338,19	22394,05	38943,87	247,03	0,542	101,80	105,399
51,0	41578,06	22428,05	39163,38	247,96	0,539	102,00	106,010

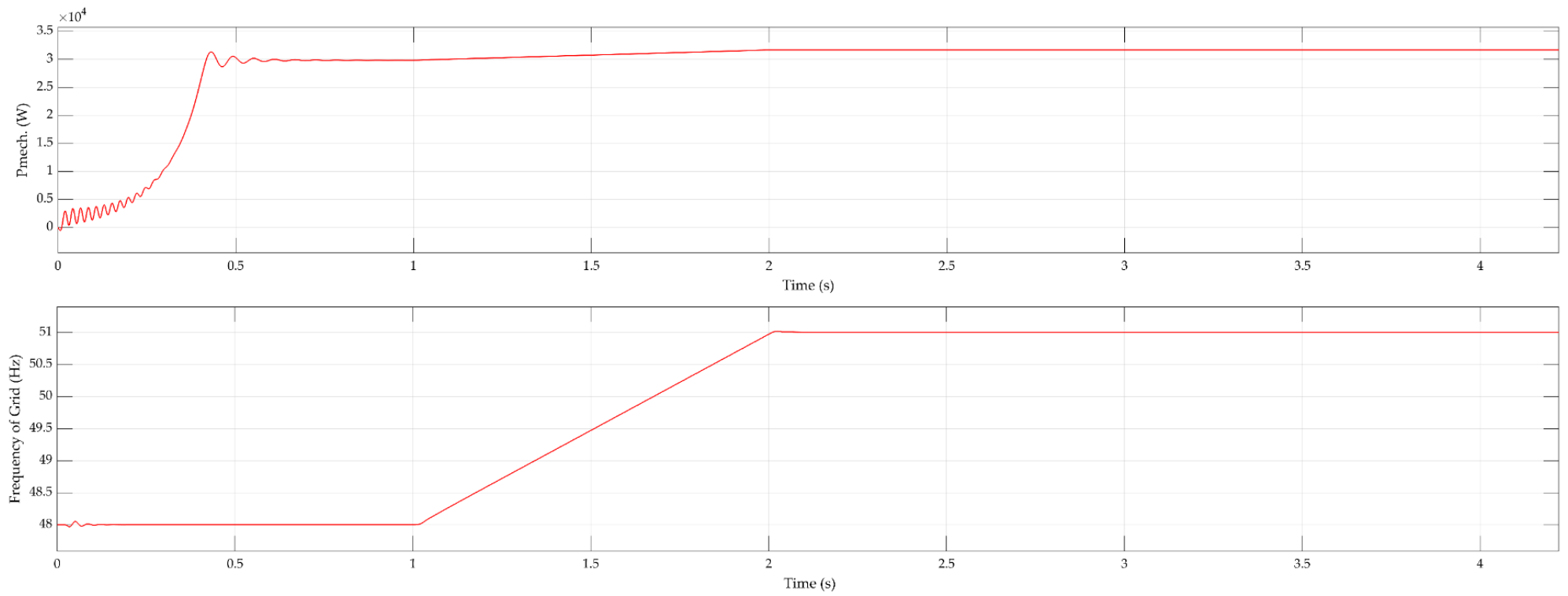
**Πίνακας 4.2:** Συγκεντρωτικά αποτελέσματα της προσομοίωσης με φορτίο μεταβλητής ροπής.



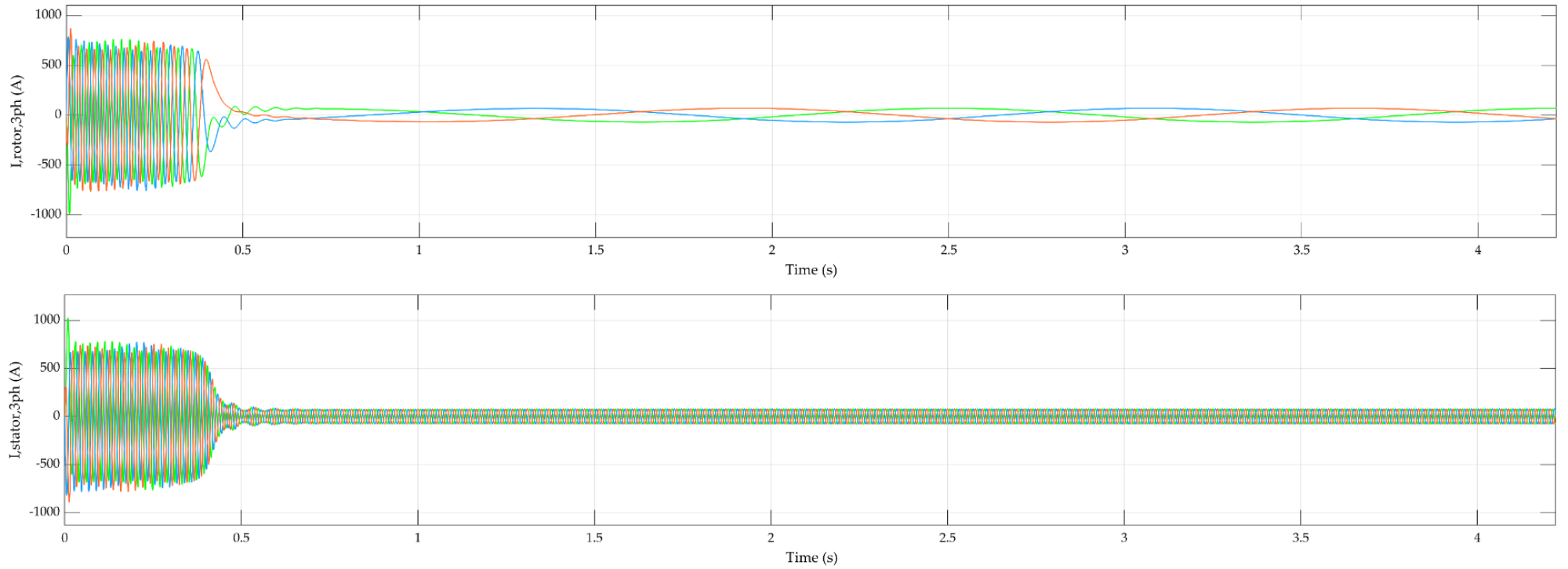
**Σχήμα 4.25:** Γραφήματα  $P_{ηλ}$ ,  $P_{μηχ}$  και  $Q_{ηλ}$  σε σχέση με τη συχνότητα του δικτύου για φορτίο μεταβλητής ροπής.



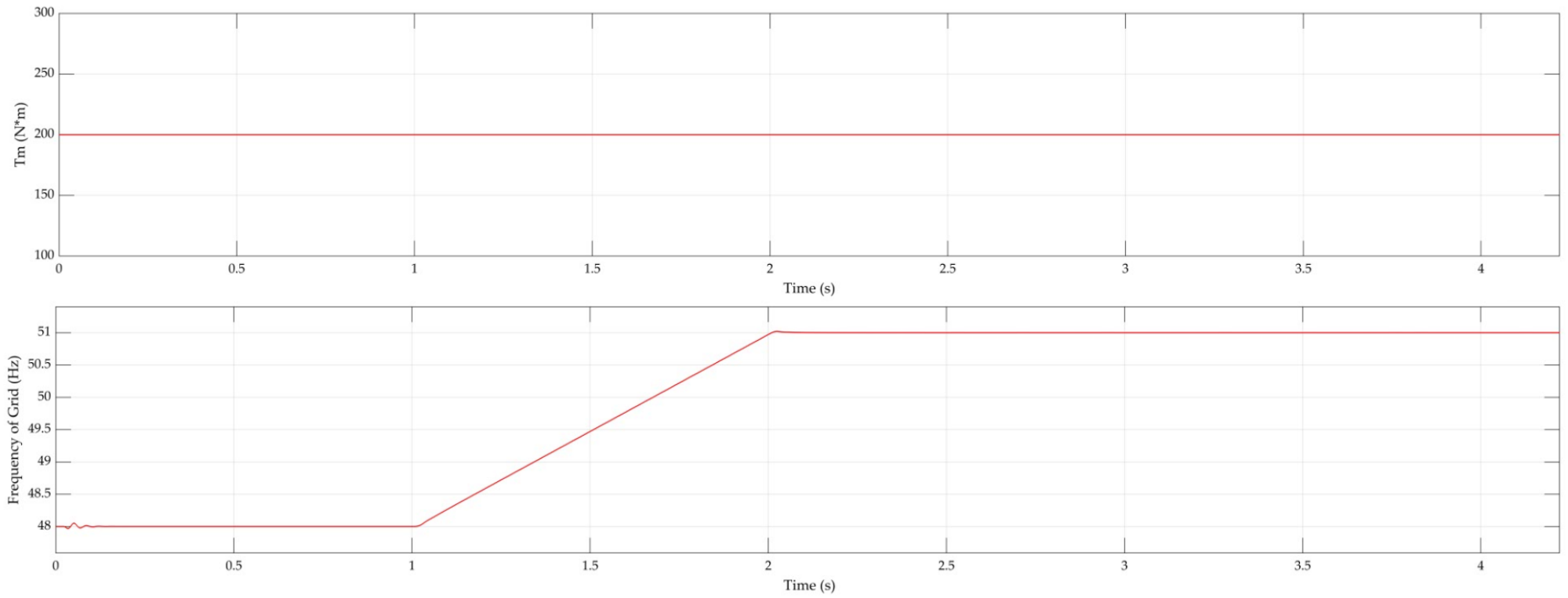
**Σχήμα 4.26:** Διαγράμματα στροφών, ηλεκτρομαγνητικής ροπής και γωνίας του δρομέα του ασύγχρονου κινητήρα σε σχέση με το χρόνο για φορτίο σταθερής ροπής.



**Σχήμα 4.27:** Διαγράμματα της μηχανικής ισχύος του ασύγχρονου κινητήρα και της συχνότητας της πηγής τάσεως (δικτύου) σε σχέση με το χρόνο για φορτίο σταθερής ροπής.



**Σχήμα 4.28:** Διαγράμματα των τριφασικών ρευμάτων του ασύγχρονου κινητήρα του στάτη και του δρομέα σε σχέση με το χρόνο για φορτίο σταθερής ροπής.



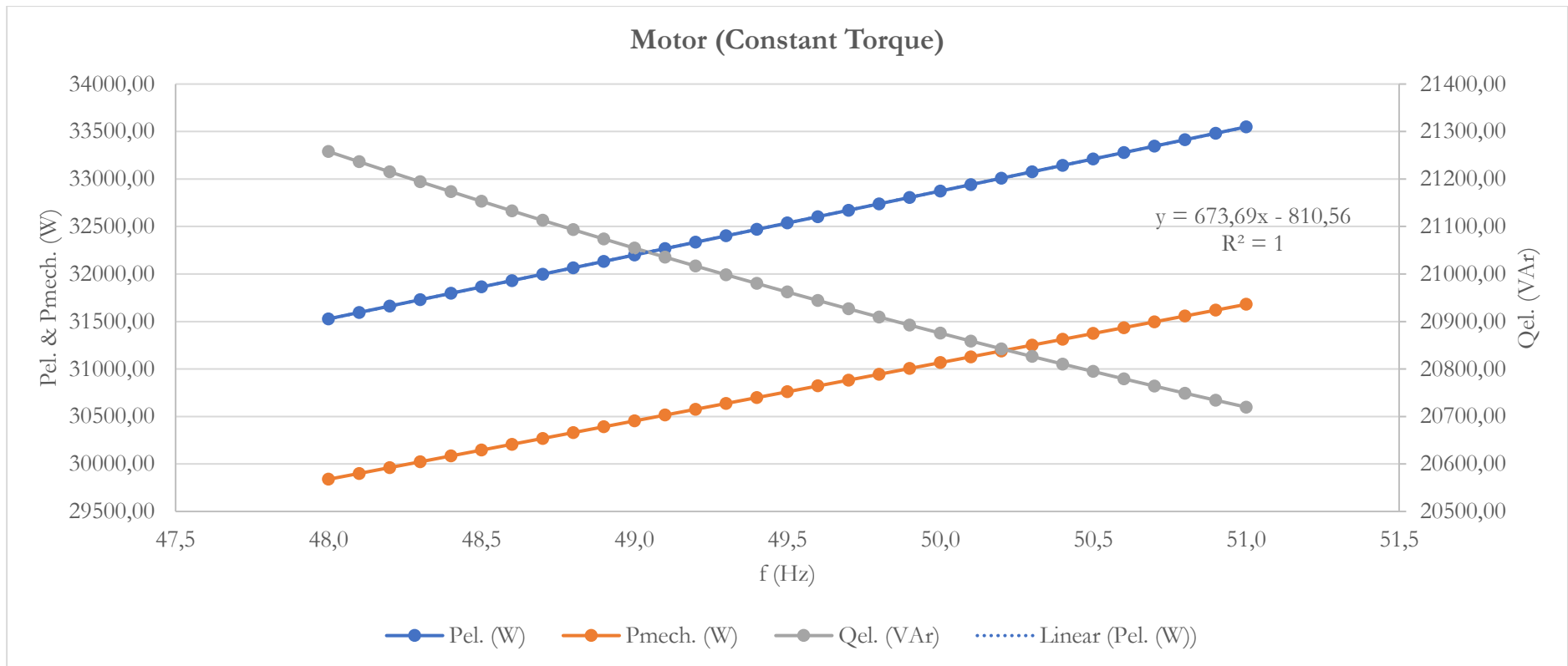
**Σχήμα 4.29:** Διαγράμματα της μηχανικής ροπής του ασύγχρονου κινητήρα και της συχνότητας της πηγής τάσεως (δικτύου) σε σχέση με το χρόνο για φορτίο σταθερής ροπής.

Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης:

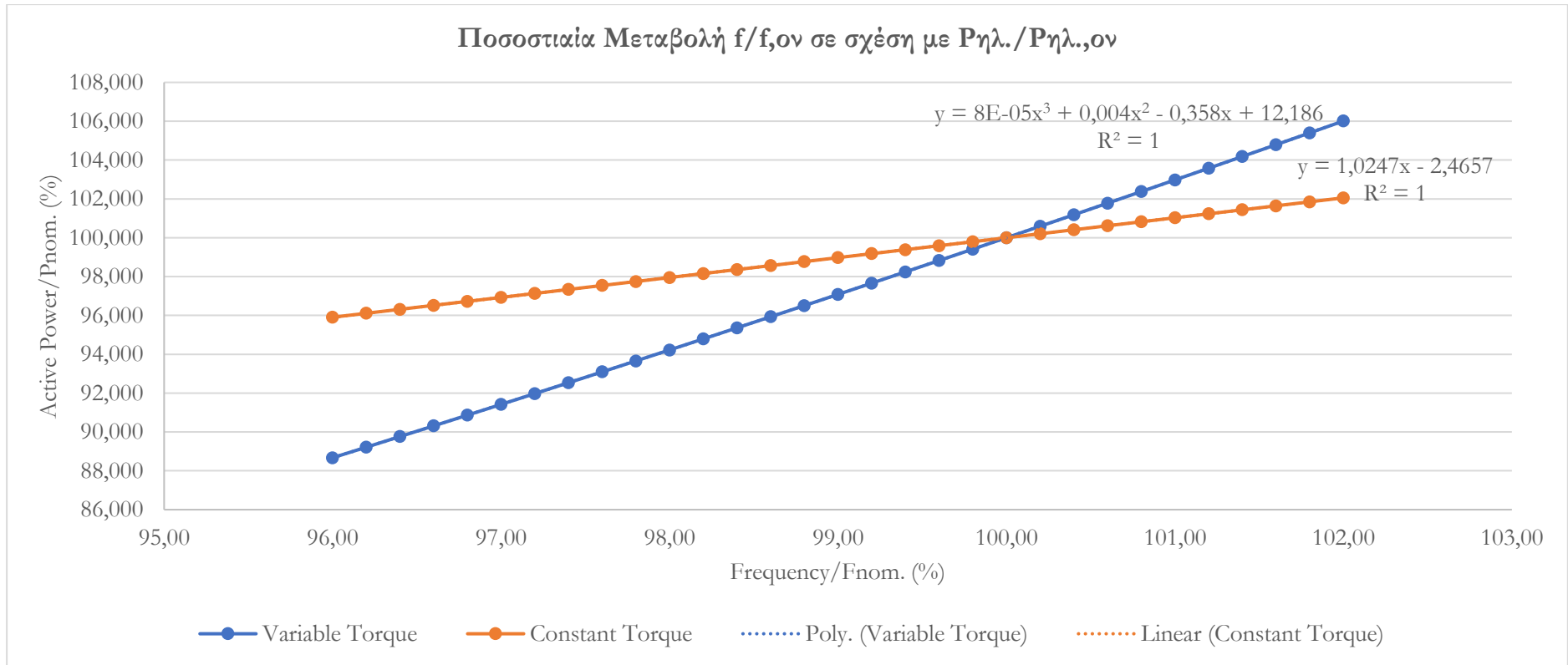
<b>Motor (Constant Torque)</b>							
$f_{grid}$ (Hz)	$P_{el.}$ (W)	$Q_{el.}$ (VAr)	$P_{mech.}$ (W)	$T_{load}$ (N*m)	$\tan\phi$	$f/f_0$ (%)	$P_{\eta\lambda.}/P_{\eta\lambda.0}$ (%)
48,0	31527,80	21257,75	29838,76	200	0,674	96,00	95,906
48,1	31594,94	21236,33	29900,19		0,672	96,20	96,110
48,2	31662,09	21215,16	29961,62		0,670	96,40	96,315
48,3	31729,26	21194,23	30023,05		0,668	96,60	96,519
48,4	31796,45	21173,55	30084,48		0,666	96,80	96,723
48,5	31863,65	21153,11	30145,90		0,664	97,00	96,928
48,6	31930,86	21132,92	30207,32		0,662	97,20	97,132
48,7	31998,10	21112,97	30268,73		0,660	97,40	97,337
48,8	32065,35	21093,27	30330,14		0,658	97,60	97,541
48,9	32132,61	21073,80	30391,55		0,656	97,80	97,746
49,0	32199,90	21054,58	30452,96		0,654	98,00	97,951
49,1	32267,19	21035,60	30514,36		0,652	98,20	98,155
49,2	32334,51	21016,85	30575,75		0,650	98,40	98,360
49,3	32401,84	20998,35	30637,15		0,648	98,60	98,565
49,4	32469,18	20980,08	30698,54		0,646	98,80	98,770
49,5	32536,55	20962,05	30759,93		0,644	99,00	98,975
49,6	32603,92	20944,26	30821,31		0,642	99,20	99,180
49,7	32671,32	20926,71	30882,69		0,641	99,40	99,385
49,8	32738,73	20909,39	30944,07		0,639	99,60	99,590
49,9	32806,15	20892,31	31005,44		0,637	99,80	99,795
50,0	32873,58	20875,46	31066,81		0,635	100,00	100,000
50,1	32941,03	20858,84	31128,17		0,633	100,20	100,205
50,2	33008,52	20842,46	31189,53		0,631	100,40	100,410
50,3	33076,01	20826,31	31250,89		0,630	100,60	100,616
50,4	33143,52	20810,39	31312,25		0,628	100,80	100,821
50,5	33211,04	20794,70	31373,60		0,626	101,00	101,027
50,6	33278,57	20779,25	31434,95		0,624	101,20	101,232
50,7	33346,12	20764,02	31496,29		0,623	101,40	101,437
50,8	33413,69	20749,03	31557,63		0,621	101,60	101,643
50,9	33481,27	20734,26	31618,97	0,619	101,80	101,849	
51,0	33548,87	20719,72	31680,30	0,618	102,00	102,054	

**Πίνακας 4.3:** Συγκεντρωτικά αποτελέσματα της προσομοίωσης με φορτίο σταθερής ροπής.





**Σχήμα 4.30:** Γραφήματα  $P_{ηλ}$ ,  $P_{μηχ}$  και  $Q_{ηλ}$  σε σχέση με τη συχνότητα του δικτύου για φορτίο σταθερής ροπής.



**Σχήμα 4.31:** Γραφήματα ποσοστιαίας μεταβολής της ηλεκτρικής ισχύος δικτύου σε σχέση με τη συχνότητα δικτύου (Induction Motor).

## 4.4 Προσομοίωση δικτύου με Field-Oriented Control Induction Motor Drive

### 4.4.1 Περιγραφή

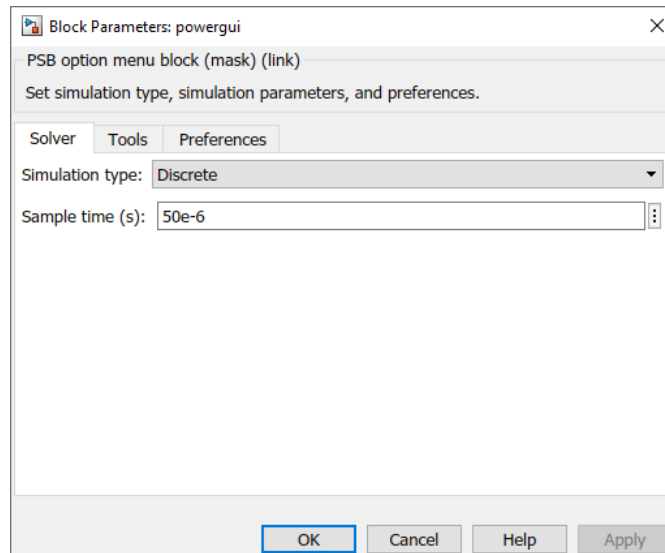
Σε αυτή τη προσομοίωση, στόχος είναι να δημιουργηθεί το κατάλληλο μοντέλο στο περιβάλλον του Simulink, ώστε να ελεγχθεί η συμπεριφορά των επαγωγικών μηχανών σε συνδυασμό με χρήση inverter σε δυναμικές καταστάσεις της συχνότητας του δικτύου και πιο συγκεκριμένα για πιθανές μεταβολές της συχνότητας με εύρος τιμών ξανά από 48 Hz έως τα 51 Hz και βήμα 0,1 Hz. Ως φορτία των μηχανών, τοποθετούνται δυο είδη φορτίων, φορτία σταθερής ροπής και φορτία μεταβαλλόμενης ροπής. Στόχος είναι να διαπιστωθεί αν θα υπάρξει αλλαγή της μηχανικής ισχύος του ασύγχρονου κινητήρα σε σχέση με τις παραπάνω αλλαγές από τις μεταβολές της συχνότητα του δικτύου.

### 4.4.2 Βασικά μέρη του συστήματος

- Τριφασική προγραμματιζόμενη πηγή τάσης.
- Field-Oriented Control Induction Motor Drive.
- Τριφασικό πολύμετρο  $V - I$ .
- Τριφασικό βατόμετρο πραγματικής και άεργης ισχύος.
- Τριφασικός  $RL$  κλάδος.
- PLL (Βρόχος κλειδωμένης φάσης [Phase-Locked Loop]).
- Παλμογράφοι.
- Φορτίο σταθερής ροπής (π.χ. Ταινιόδρομος).
- Φορτίο μεταβαλλόμενης ροπής (π.χ. Φυγοκεντρική Αντλία).
- powergui.

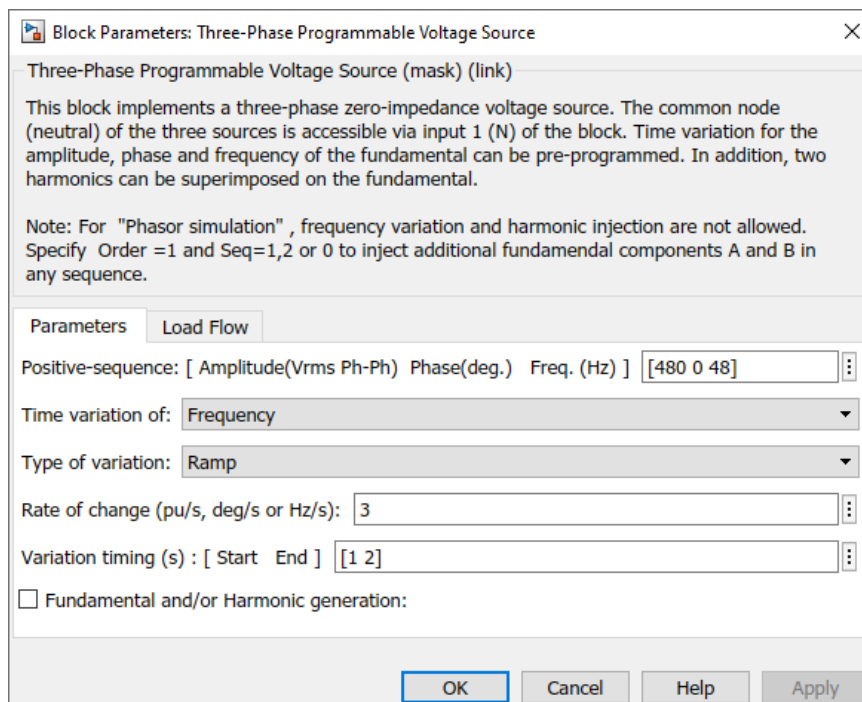
### 4.4.3 Κατασκευή του μοντέλου προσομοίωσης στο Simulink

Αρχικά, για την επίλυση του συστήματος που κατασκευάστηκε, τοποθετήθηκε το μπλοκ powergui - όπως και στη προσομοίωση με τον επαγωγικό κινητήρα μόνο - με επίλυση με διακριτοποίηση. Ο χρόνος δειγματοληψίας της προσομοίωσης, ορίστηκε στα 0,05 ms. Συγκριτικά με τη περίοδο της συχνότητας του ηλεκτρικού δικτύου (20 ms) είναι τετρακόσιες φορές μικρότερος.



**Σχήμα 4.32:** Ρύθμιση του powergui.

Στη συνέχεια, τοποθετήθηκε το μπλοκ Three-Phase Programmable Voltage Source που ως στόχο έχει να δημιουργήσει μια τριφασική ημιτονοειδή τάση.

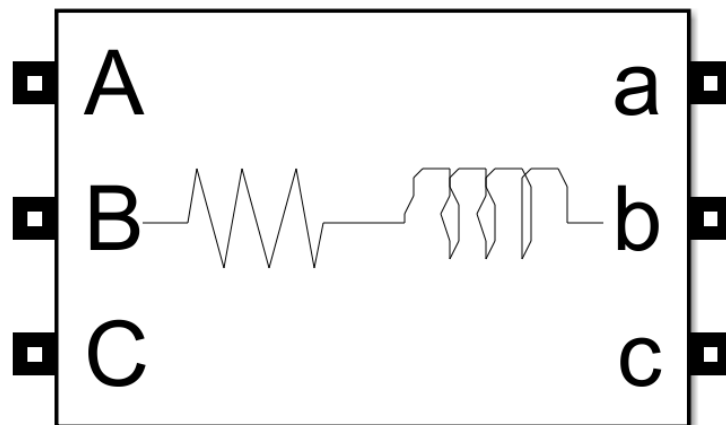


**Σχήμα 4.33:** Ρυθμίσεις παραμέτρων του μπλοκ Three-Phase Programmable Voltage Source.

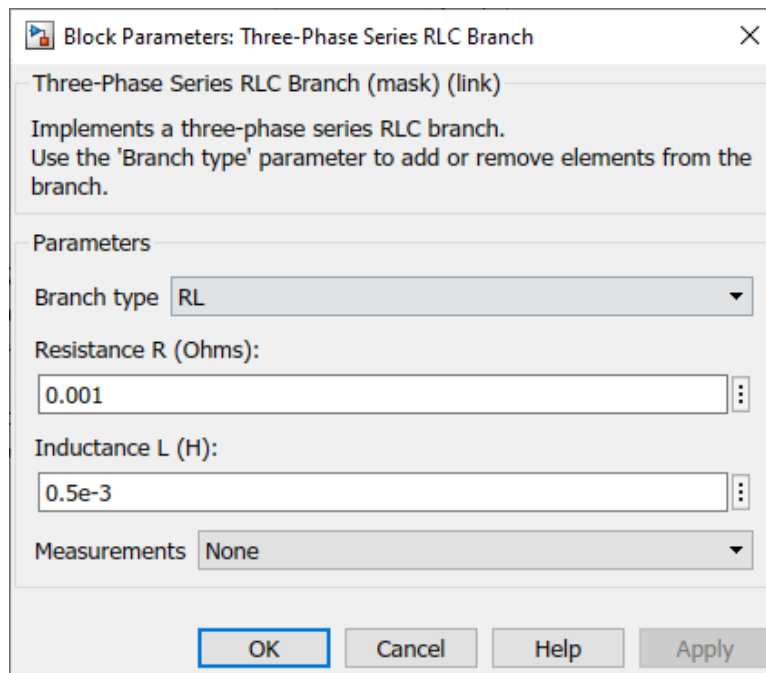
Η πηγή τάσης ρυθμίστηκε ώστε να έχει πολική τάσης  $480\text{ V RMS}$ , φάση  $0$  μοίρες και αρχική συχνότητα  $48\text{ Hz}$  για την αρχή του πειράματος. Και σε αυτή τη προσομοίωση η συχνότητα μεταβάλλεται από τα  $48\text{ Hz}$  έως τα  $51\text{ Hz}$  με βήμα  $0,1\text{ Hz}$ , και ως εκ τούτου θα έχουμε αποτελέσματα για 31 διαφορετικές τιμές συχνότητας δικτύου. Επίσης, ο λόγος που η τάση ρυθμίστηκε στα  $480\text{ V}$ , είναι επειδή το μπλοκ Field-Oriented Control Induction Motor Drive που θα χρησιμοποιηθεί στη συνέχεια, περιέχει ένα τριφασικό inverter. Όπως είναι γνωστό οι inverter έχουν ένα μειονέκτημα. Η τάση που βγάζουν στην έξοδο αν θέλεις να είναι ημιτονοειδής, δεν μπορεί να είναι ίση σαν  $RMS$  τιμή με τη τάση της εισόδου, είναι λίγο λιγότερη. Άρα η μέγιστη τάση που μπορεί να δώσει ο inverter σε αυτή τη προσομοίωση είναι:

$$V_{out,max,ph-ph,RMS} = \frac{V_{DC}}{\sqrt{2}} = \frac{635}{\sqrt{2}} = 449\text{ V} \quad (\text{Εξ. 4.7})$$

Στη συνέχεια, προστέθηκε το μπλοκ Three-Phase Series RLC Branch και έγινε επιλογή κλάδου τύπου RL και οι τιμές επιλέχθηκαν πειραματικά. Ο σκοπός της προσθήκης αυτού του κλάδου είναι η χρήση του ως χαμηλοπερατό φίλτρο. Σχεδόν όλοι οι drivers των inverter για κινητήρες, αντλίες, κ.λ.π. χρησιμοποιούν ένα χαμηλοπερατό φίλτρο ρεύματος. Ένα απλό χαμηλοπερατό φίλτρο RL, είναι ένα φίλτρο πρώτης τάξεως το οποίο λειτουργεί με παρόμοιο τρόπο όπως ένα απλό RC χαμηλοπερατό φίλτρο. Συνήθως τα πηνία χρησιμοποιούνται περισσότερο σε εφαρμογές που χρειάζεται φιλτράρισμα του ρεύματος, σε σχέση με τους πυκνωτές που χρησιμοποιούνται περισσότερο για φιλτράρισμα των τάσεων.

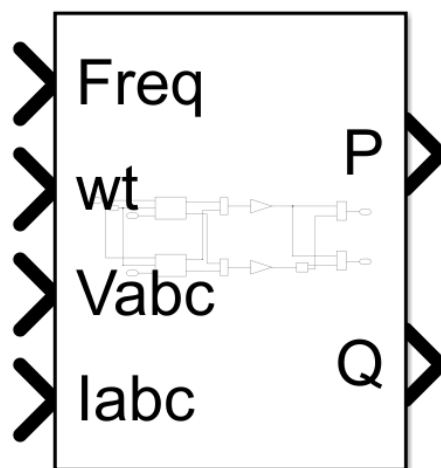


**Σχήμα 4.34:** Το μπλοκ Three-Phase Series RLC Branch.

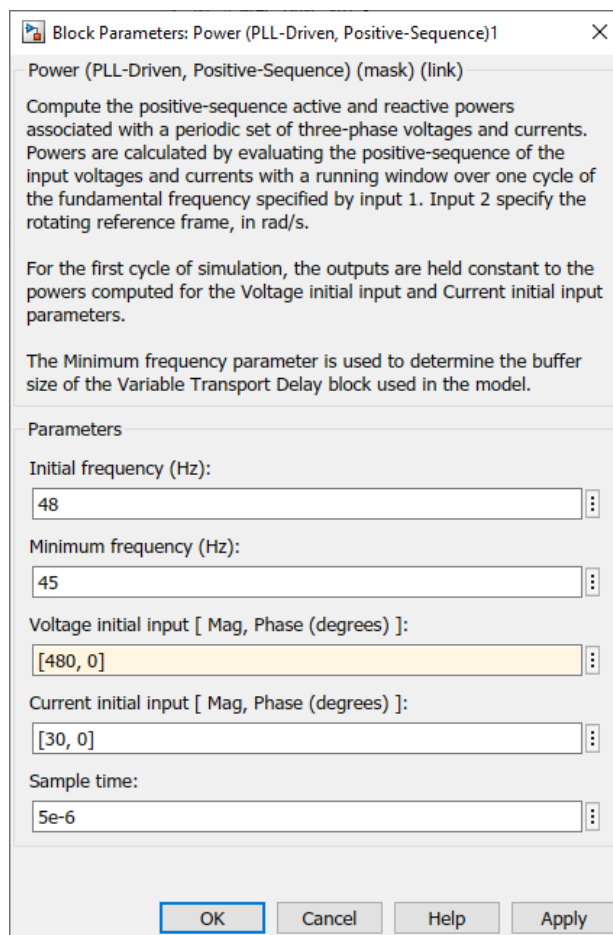


Σχήμα 4.35: Ρυθμίσεις παραμέτρων του μπλοκ Three-Phase Series RLC Branch.

Έπειτα, τοποθετήθηκαν τα μπλοκ Three-Phase V-I Measurement και PLL (3 $\phi$ ). Για τη μέτρηση της πραγματικής και της αέργου ισχύος, προστέθηκε το μπλοκ Power (PLL-Driven, Positive-Sequence).



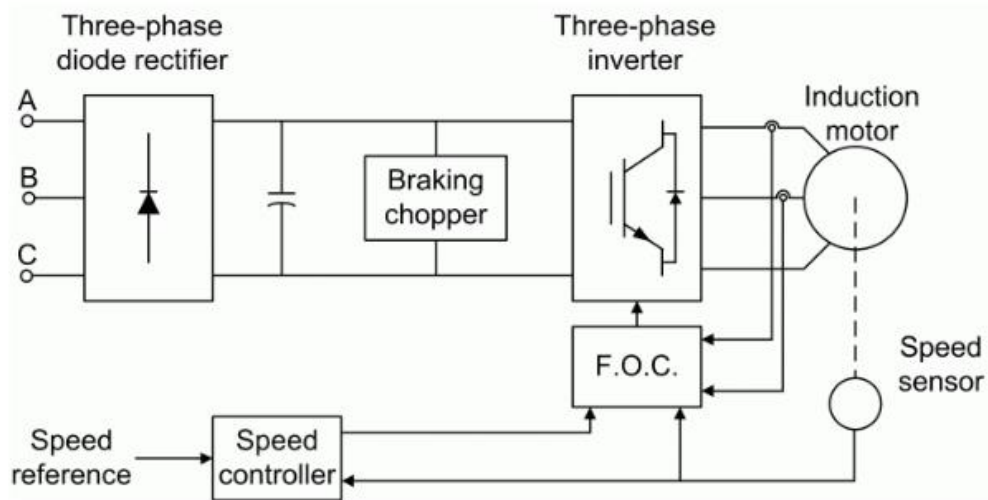
Σχήμα 4.36: Το μπλοκ Power (PLL-Driven, Positive-Sequence).



Σχήμα 4.37: Ρυθμίσεις παραμέτρων του μπλοκ Power (PLL-Driven, Positive-Sequence).

Το μπλοκ Power (PLL-Driven, Positive-Sequence) υπολογίζει την ενεργή ισχύ θετικής ακολουθίας  $P$  (σε *Watt*) και την άεργη ισχύ  $Q$  (σε *vars*), ενός περιοδικού συνόλου τριφασικών τάσεων και ρευμάτων. Για να εκτελεστεί αυτός ο υπολογισμός, το μπλοκ υπολογίζει πρώτα τη θετική ακολουθία των τάσεων και των ρευμάτων εισόδου σε συνάρτηση με συχνότητας που δίνεται από την είσοδο  $Freq$ . Το πλαίσιο αναφοράς που απαιτείται για τον υπολογισμό δίνεται από την είσοδο  $wt$ . Οι δυο πρώτοι είσοδοι, συνήθως συνδέονται με τις εξόδους ενός μπλοκ PLL.

Ύστερα, προστέθηκε το μπλοκ Field-Oriented Control Induction Motor Drive (FOC). Τα επιμέρους στοιχεία του μπλοκ φαίνονται αναλυτικότερα στο Σχήμα 4.38 παρακάτω:



Σχήμα 4.38: Επιμέρους στοιχεία του FOC.

Τα κύρια μέρη από τα οποία αποτελείται το σύστημα FOC είναι τα εξής:

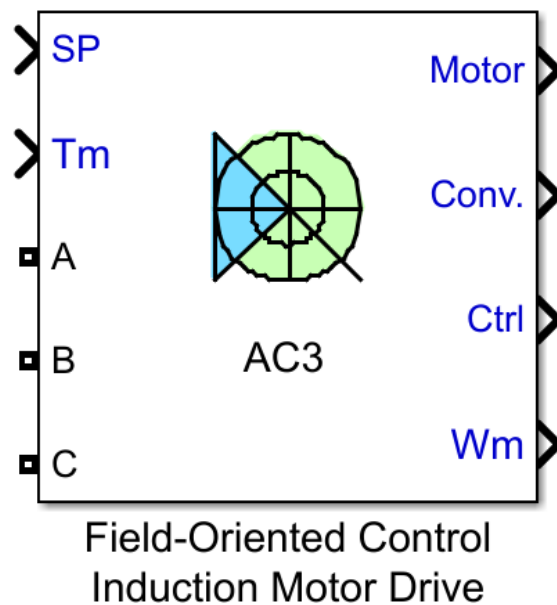
- Τριφασικός ανορθωτής (Rectifier).
- Μονάδα συστήματος αντιστάσεων πέδησης (Brake chopper).
- Τριφασικός αντιστροφέας (Inverter).
- Τριφασικός Επαγωγικός Κινητήρας (Induction Motor).
- F.O.C.
- Αισθητήρας ταχύτητας.
- Ελεγκτής ταχύτητας.

Η μέθοδος ελέγχου FOC χρησιμοποιείται για τον έλεγχο σύγχρονων και επαγωγικών κινητήρων εναλλασσόμενου ρεύματος με στόχο τον έλεγχο της ροπής και της μαγνητικής ροής του κινητήρα ξεχωριστά. Αρχικά αναπτύχθηκε για εφαρμογές κινητήρων υψηλής απόδοσης που απαιτείται να λειτουργούν ομαλά σε όλο το εύρος ταχύτητας, να παράγουν πλήρη ροπή σε μηδενική ταχύτητα και να έχουν υψηλή δυναμική απόδοση, όπως γρήγορη επιτάχυνση και επιβράδυνση. Ωστόσο, αυτή η μέθοδος ελέγχου γίνεται ολοένα και πιο ελκυστική για εφαρμογές χαμηλότερης απόδοσης, λόγω του μεγέθους του κινητήρα της μεθόδου FOC, του κόστους και της υπεροχής μείωσης της κατανάλωσης ισχύος. Αναμένεται ότι με την αυξανόμενη υπολογιστική ισχύ των μικροεπεξεργαστών, τελικά η συγκεκριμένη μέθοδος ελέγχου θα μετατοπίσει σχεδόν καθολικά τη μέθοδο ελέγχου με μεταβολή τάσης και συχνότητας, με σταθερό λόγο  $V/f$ .

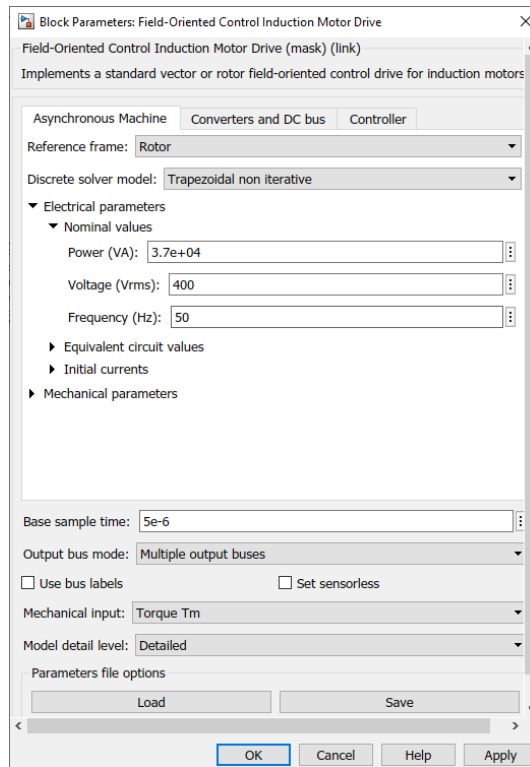


Αναλυτικότερα, ο διανυσματικός έλεγχος, που ονομάζεται επίσης έλεγχος προσανατολισμένου πεδίου (FOC), είναι μια μέθοδος ελέγχου μεταβλητής συχνότητας (VFD) στην οποία χρησιμοποιώντας τους μετασχηματισμούς Clarke και Park, τα ρεύματα του στάτη ενός τριφασικού ηλεκτρικού κινητήρα μεταφέρονται σε ένα πλαίσιο αναφοράς που ορίζεται από τα κάθετα διανύσματα  $\{\alpha, \beta\}$  χωρίς να χάνεται πληροφορία. Ο ένας άξονας καθορίζει τη μαγνητική ροή του κινητήρα και ο άλλος τη ροπή. Το σύστημα ελέγχου της μονάδας υπολογίζει τις αντίστοιχες τρέχουσες αναφορές των αξόνων από τις αναφορές ροής και ροπής που δίνονται από τον έλεγχο ταχύτητας της μονάδας. Συνήθως οι ελεγκτές αναλογικής ολοκλήρωσης (PI) χρησιμοποιούνται για να διατηρούν τα μετρούμενα τρέχοντα στοιχεία στις τιμές αναφοράς τους.

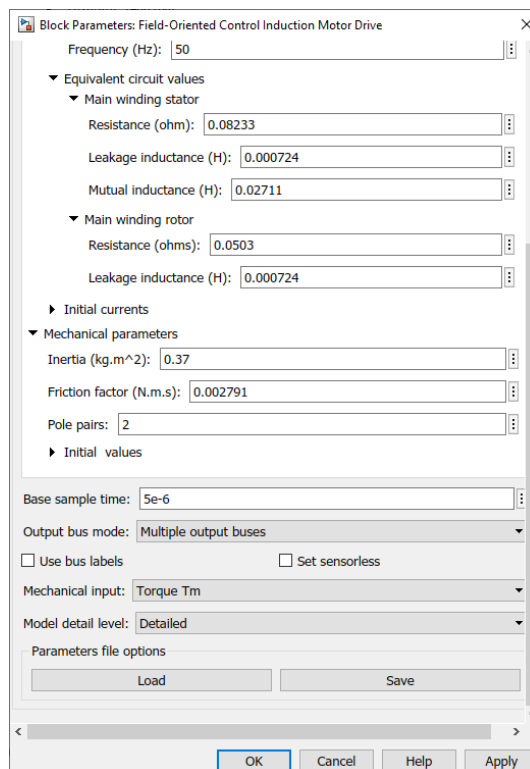
Η διαμόρφωση πλάτους παλμού (PWM) της μονάδας κίνησης μεταβλητής συχνότητας καθορίζει τη μεταγωγή των τρανζίστορ σύμφωνα με τις αναφορές τάσης του στάτη που είναι η έξοδος των ελεγκτών ρεύματος PI.



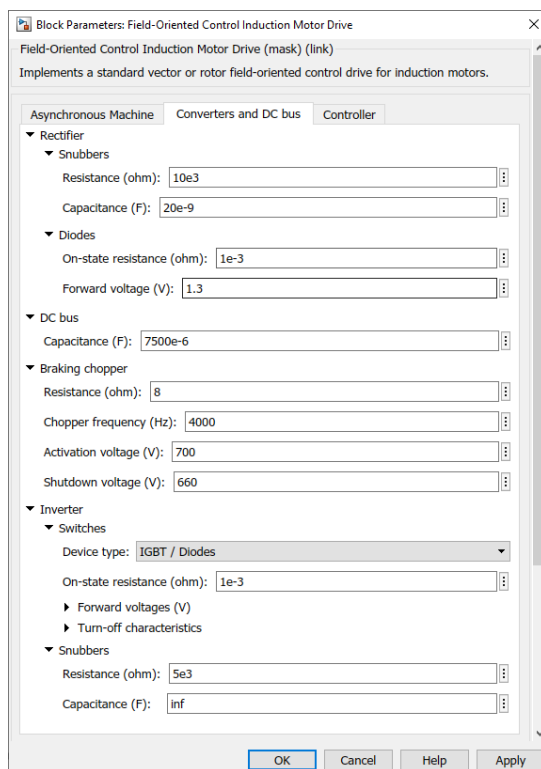
**Σχήμα 4.39:** Το μπλοκ Field-Oriented Control Induction Motor Drive.



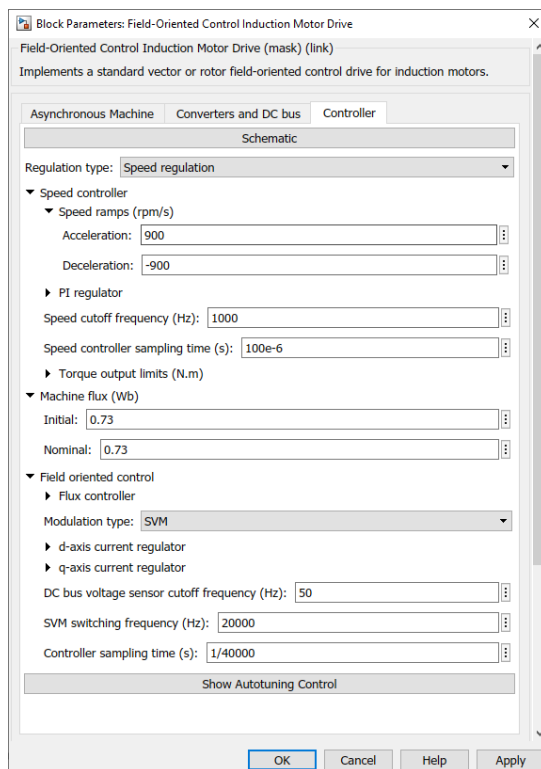
Σχήμα 4.40: Ρυθμίσεις παραμέτρων του μπλοκ Field-Oriented Control Induction Motor Drive (Asynchronous Machine).



Σχήμα 4.41: Ρυθμίσεις παραμέτρων του μπλοκ Field-Oriented Control Induction Motor Drive (Asynchronous Machine).

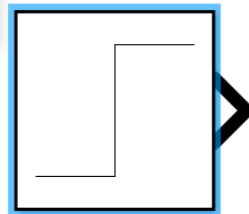
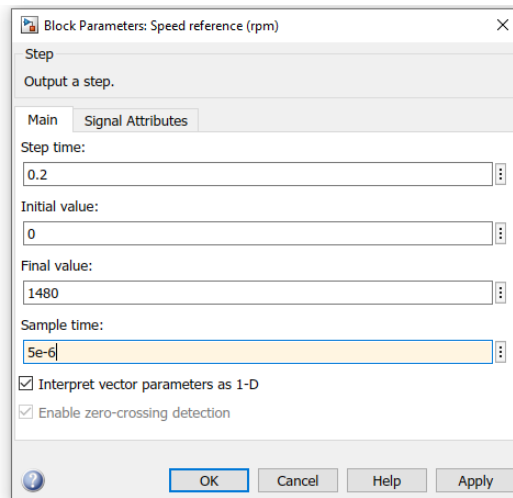


Σχήμα 4.42: Ρυθμίσεις παραμέτρων του μπλοκ Field-Oriented Control Induction Motor Drive (Converters and DC bus).



Σχήμα 4.43: Ρυθμίσεις παραμέτρων του μπλοκ Field-Oriented Control Induction Motor Drive (Controller).

Στην είσοδο SP του μπλοκ, συνδέθηκε ένα μπλοκ Step που στην ουσία θα είναι η ταχύτητα αναφοράς της μηχανής.



## Speed reference (rpm)

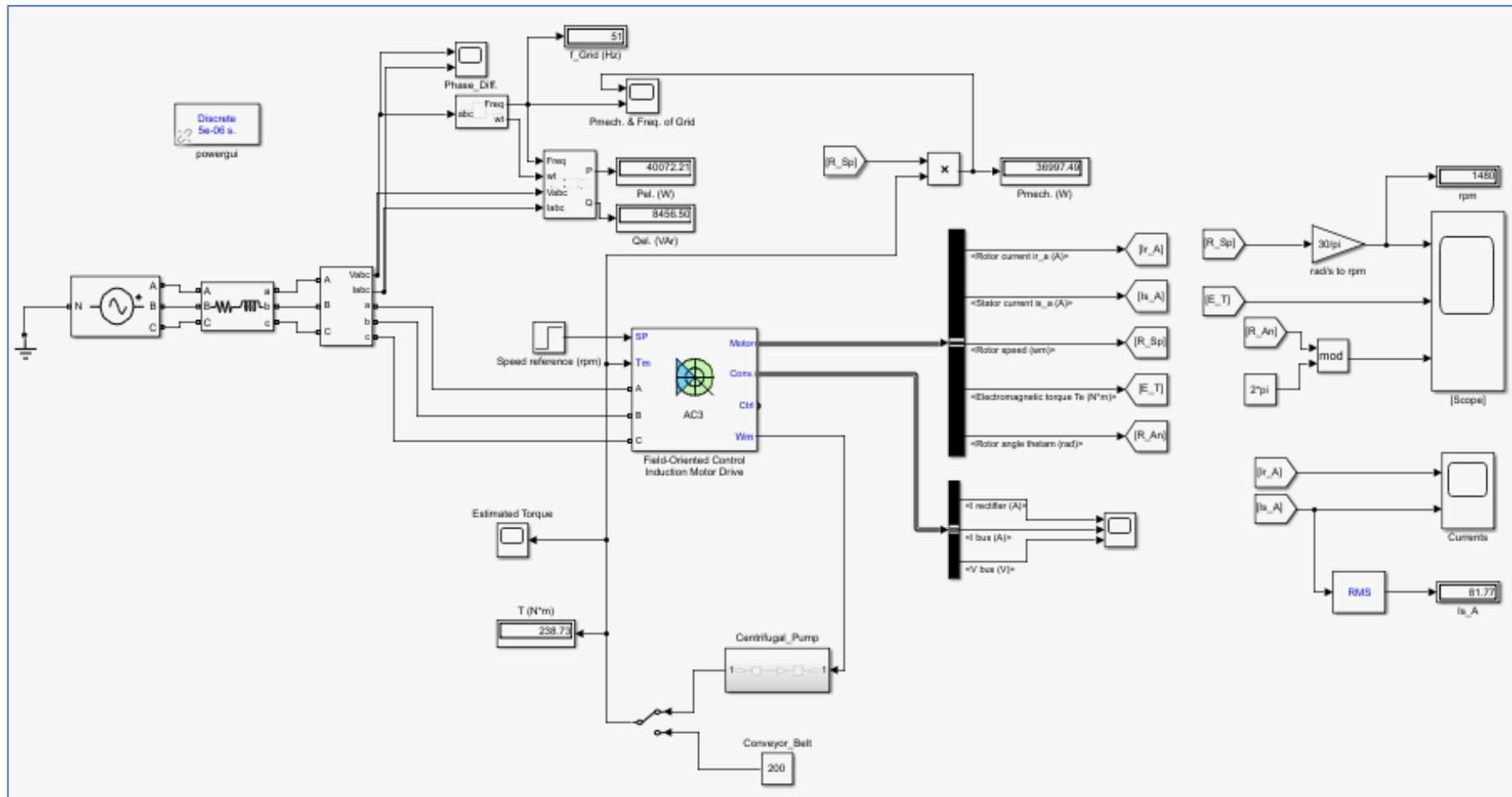
**Σχήμα 4.44:** Ρυθμίσεις παραμέτρων του μπλοκ Step.

Στη καρτέλα Asynchronous Machine, έγιναν οι κατάλληλες ρυθμίσεις ώστε τα στοιχεία του συστήματος FOC να έχει τα ίδια στοιχεία με αυτά του ασύγχρονου κινητήρα από τη προηγούμενη προσομοίωση.

Στην είσοδο  $T_m$ , συνδέεται το εκάστοτε μηχανικό φορτίο που θέλουμε να προσομοιώσουμε και στις εισόδους A, B, C συνδέονται οι φάσεις από τη πηγή τάσης.

Στη συνέχεια, προστέθηκαν στο σύστημα τα δυο είδη φορτίων που αναφέρθηκαν και στην Ενότητα 4.3 με τα ίδια ακριβώς χαρακτηριστικά.

Τέλος, και τα δυο φορτία συνδέονται στο μπλοκ Manual Switch μέσω του οποίου μπορεί να γίνει η επιλογή του επιθυμητού φορτίου, και αυτό με τη σειρά του συνδέεται στην είσοδο του μηχανικού φορτίου του μπλοκ Field-Oriented Control Induction Motor Drive.



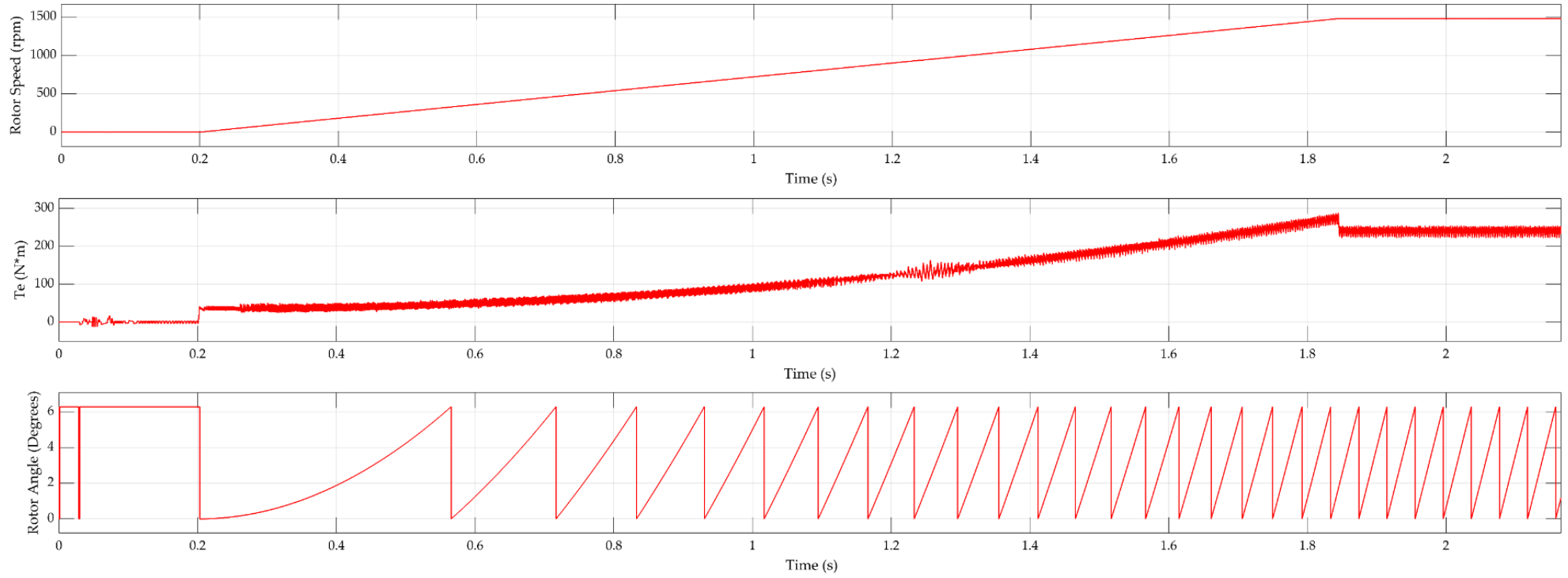
Σχήμα 4.45: Το τελικό σύστημα της προσομοίωσης του δικτύου με το Field-Oriented Control Induction Motor Drive και τα δυο φορτία του.

#### 4.4.4 Προσομοίωση με φορτίο μεταβλητής ροπής

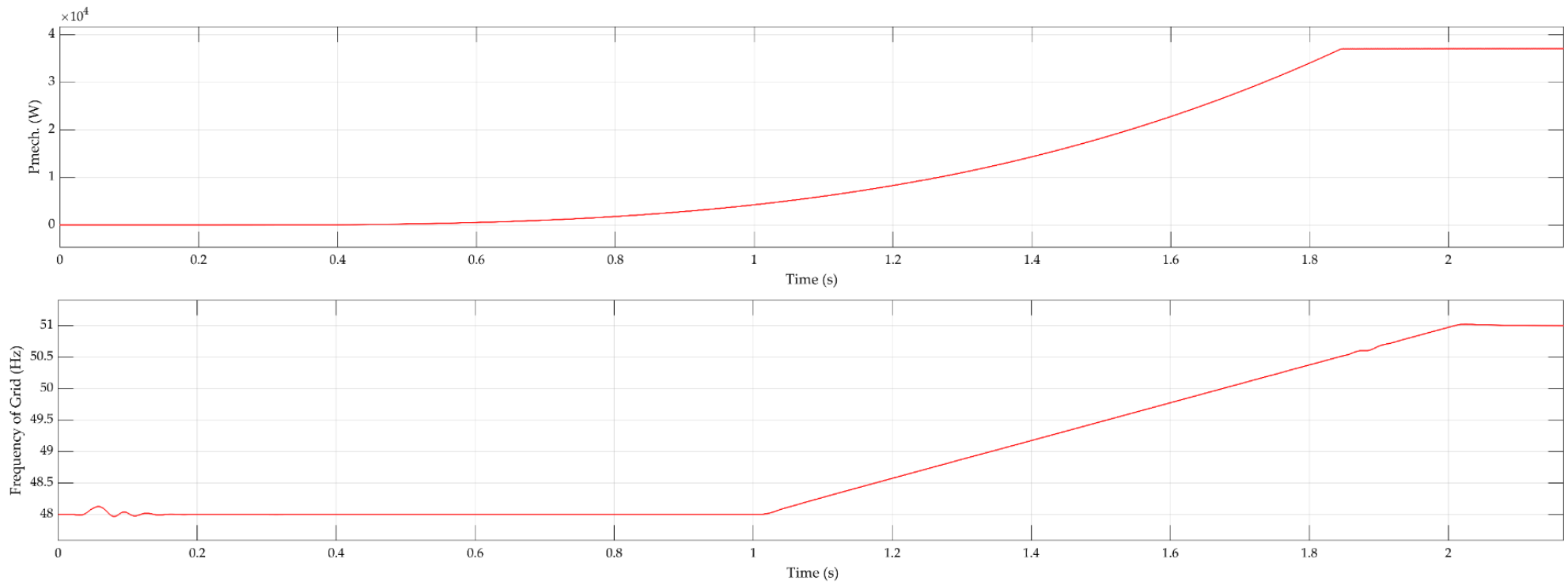
Η πρώτη προσομοίωση που γίνεται σε αυτό το μοντέλο με το σύστημα FOC, είναι με φορτίο τη φυγοκεντρική αντλία (φορτίο μεταβλητής ροπής) και σκοπός είναι να μετρηθούν τα  $P_{ηλ}$ ,  $Q_{ηλ}$ ,  $P_{μηχ}$  και  $T_{μηχ}$  και να εξαχθούν αποτελέσματα για τη μεταβολή της συχνότητας του δικτύου σε σχέση με το σύστημα FOC.

#### 4.4.5 Προσομοίωση με φορτίο σταθερής ροπής

Η δεύτερη προσομοίωση που γίνεται σε αυτό το μοντέλο με με το σύστημα FOC, είναι με φορτίο το ταινιόδρομο (φορτίο σταθερής ροπής) και σκοπός είναι να μετρηθούν τα  $P_{ηλ}$ ,  $Q_{ηλ}$ ,  $P_{μηχ}$  (εδώ  $T_{μηχ} = σταθ.$ ) και να εξαχθούν αποτελέσματα για τη μεταβολή της συχνότητας του δικτύου σε σχέση με το σύστημα FOC. Σε σχέση με το Σχήμα 4.45, η μόνη αλλαγή που γίνεται είναι να αλλάξει η επιλογή του μπλοκ Manual Switch, από το φορτίο της αντλίας στο φορτίο του ταινιόδρομου.

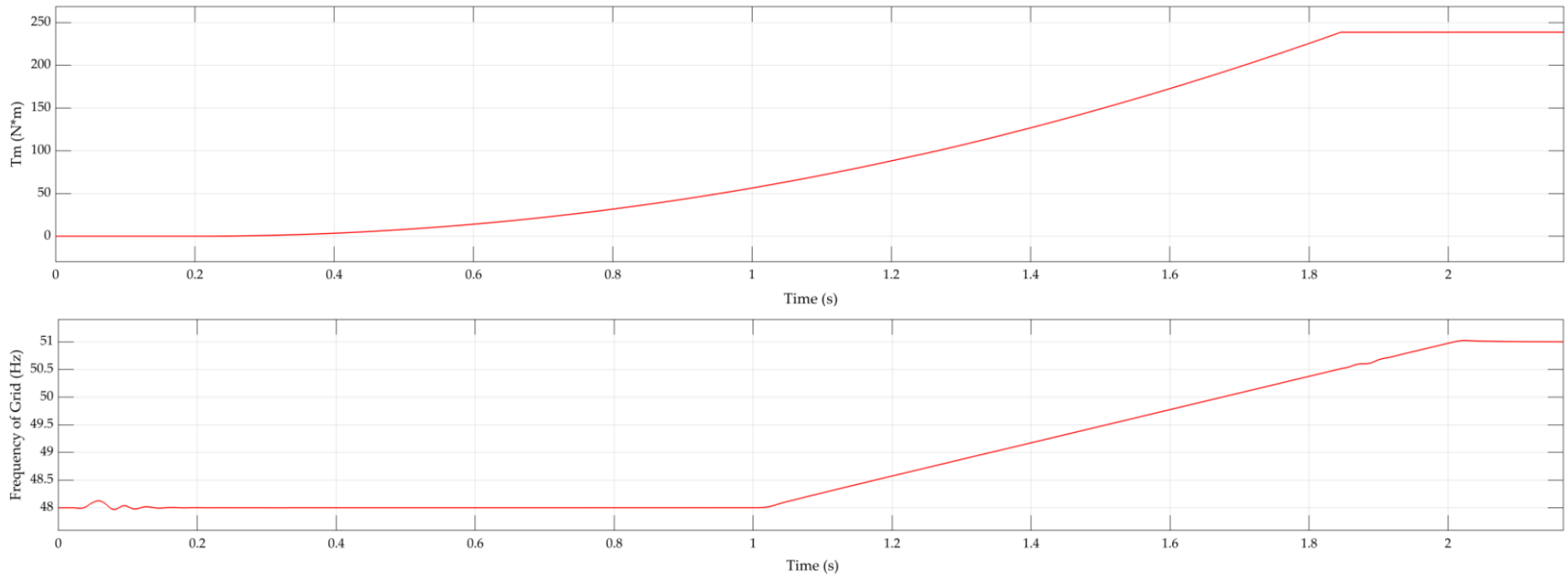


**Σχήμα 4.46:** Διαγράμματα στροφών, ηλεκτρομαγνητικής ροπής και γωνίας του δρομέα του ασύγχρονου κινητήρα σε σχέση με το χρόνο για φορτίο μεταβλητής ροπής.

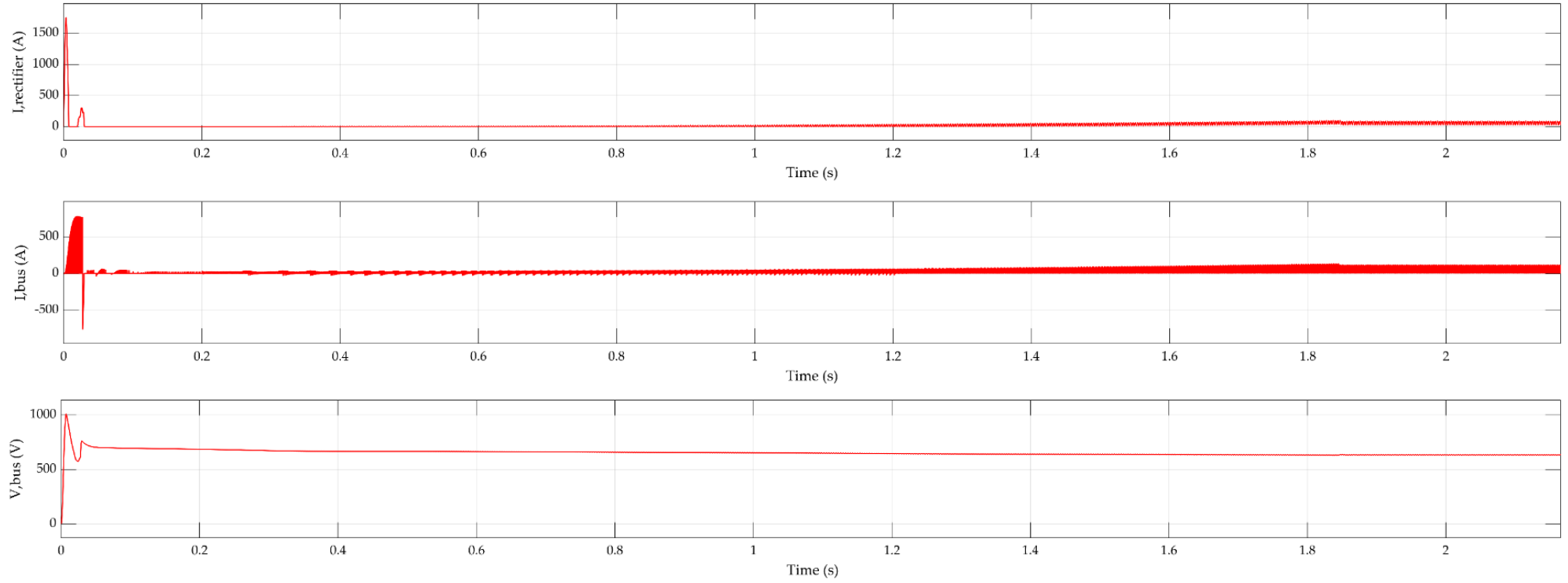


**Σχήμα 4.47:** Διαγράμματα της μηχανικής ισχύος του συστήματος FOC και της συχνότητας της πηγής τάσεως (δικτύου) σε σχέση με το χρόνο για φορτίο μεταβλητής ροπής.





**Σχήμα 4.48:** Διαγράμματα της μηχανικής ροπής του συστήματος FOC και της συχνότητας της πηγής τάσεως (δικτύου) σε σχέση με το χρόνο για φορτίο μεταβλητής ροπής.

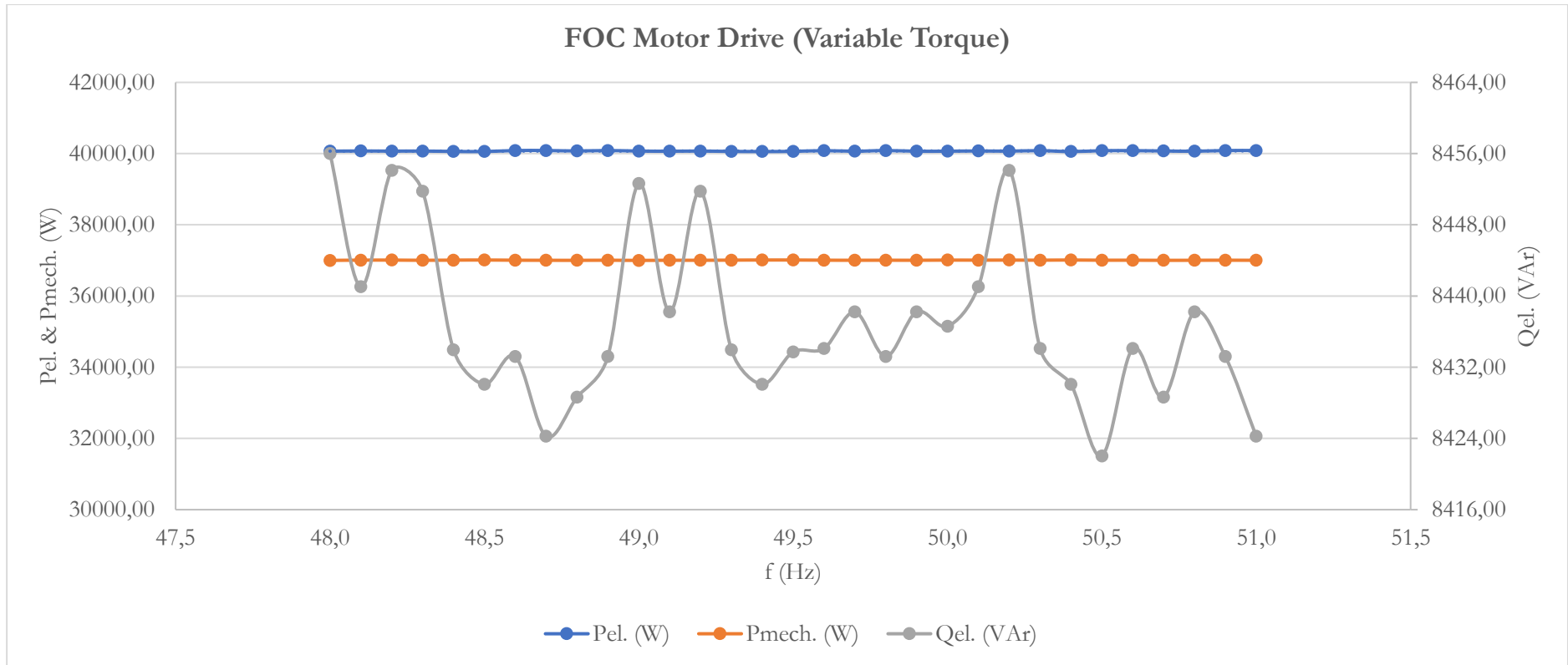


**Σχήμα 4.49:** (α) Ρεύμα του ανορθωτή [A], (β) Ρεύμα πυκνωτή εξομάλυνσης (DC Bus) [A], (γ) Τάση πυκνωτή εξομάλυνσης (DC Bus) [V].

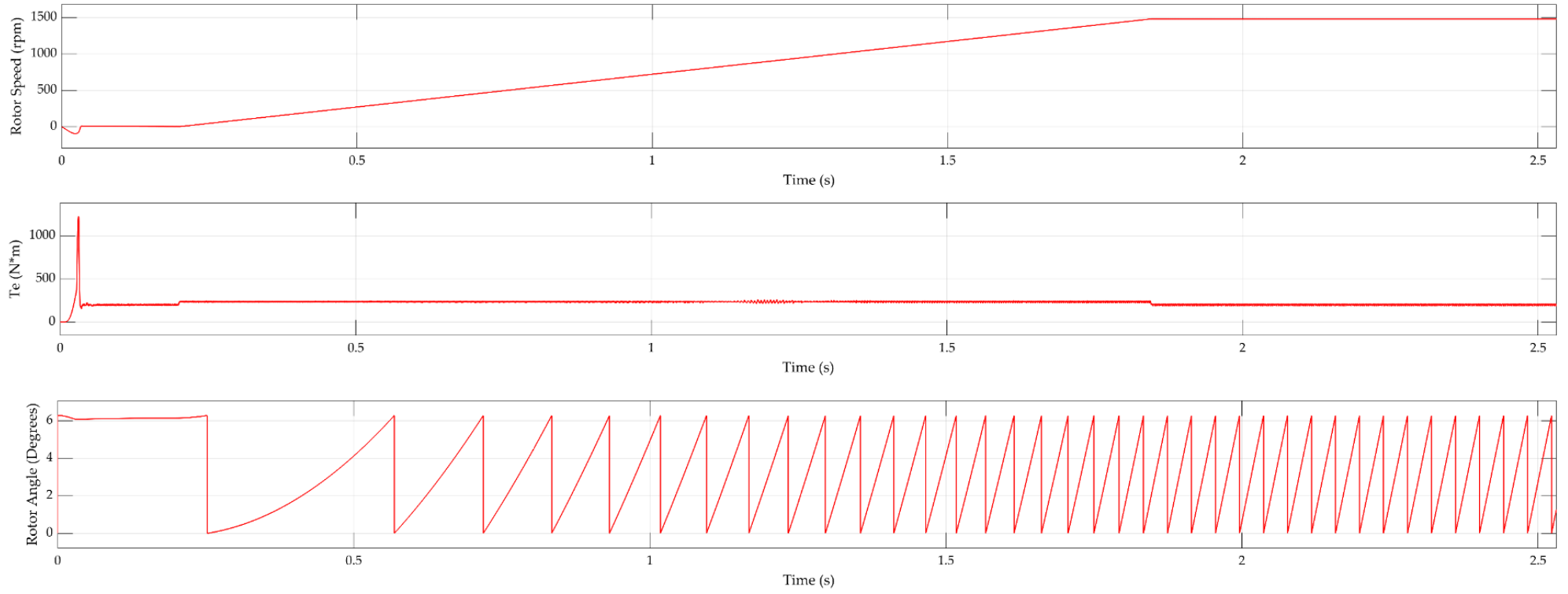
Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης:

<b>FOC Motor Drive (Variable Torque)</b>							
<b>f<sub>grid</sub> (Hz)</b>	<b>P<sub>el.</sub> (W)</b>	<b>Q<sub>el.</sub> (VAr)</b>	<b>P<sub>mech.</sub> (W)</b>	<b>T<sub>load</sub> (N*m)</b>	<b>tanφ</b>	<b>f/f<sub>0</sub> (%)</b>	<b>P<sub>ηλ.</sub>/P<sub>ηλ.0</sub> (%)</b>
48,0	40067,00	8456,00	37000,00	238,70	0,211	96,00	100,000
48,1	40072,83	8441,05	37006,74	238,72	0,211	96,20	100,014
48,2	40068,74	8454,12	37008,64	238,73	0,211	96,40	100,004
48,3	40070,54	8451,78	37003,22	238,71	0,211	96,60	100,008
48,4	40060,47	8433,96	37007,62	238,74	0,211	96,80	99,983
48,5	40057,38	8430,07	37010,83	238,79	0,210	97,00	99,976
48,6	40084,90	8433,20	37004,88	238,71	0,210	97,20	100,044
48,7	40085,80	8424,24	37002,90	238,76	0,210	97,40	100,047
48,8	40072,93	8428,64	37001,80	238,75	0,210	97,60	100,014
48,9	40084,90	8433,20	37004,88	238,71	0,210	97,80	100,044
49,0	40070,20	8452,64	37000,03	238,74	0,211	98,00	100,008
49,1	40065,70	8438,21	37003,66	238,75	0,211	98,20	99,996
49,2	40070,54	8451,78	37003,22	238,71	0,211	98,40	100,008
49,3	40060,47	8433,96	37007,62	238,74	0,211	98,60	99,983
49,4	40057,38	8430,07	37010,83	238,79	0,210	98,80	99,976
49,5	40062,53	8433,71	37010,67	238,79	0,211	99,00	99,988
49,6	40081,45	8434,10	37005,56	238,74	0,210	99,20	100,036
49,7	40065,70	8438,21	37003,66	238,75	0,211	99,40	99,996
49,8	40084,90	8433,20	37004,88	238,71	0,210	99,60	100,044
49,9	40065,70	8438,21	37003,66	238,75	0,211	99,80	99,996
<b>50,0</b>	<b>40067,15</b>	<b>8436,60</b>	<b>37008,18</b>	<b>238,78</b>	<b>0,211</b>	<b>100,00</b>	<b>100,000</b>
50,1	40072,83	8441,05	37006,74	238,72	0,211	100,20	100,014
50,2	40068,74	8454,12	37008,64	238,73	0,211	100,40	100,004
50,3	40081,45	8434,10	37005,56	238,74	0,210	100,60	100,036
50,4	40057,38	8430,07	37010,83	238,79	0,210	100,80	99,976
50,5	40080,94	8422,04	37004,97	238,76	0,210	101,00	100,034
50,6	40081,45	8434,10	37005,56	238,74	0,210	101,20	100,036
50,7	40072,93	8428,64	37001,80	238,75	0,210	101,40	100,014
50,8	40065,70	8438,21	37003,66	238,75	0,211	101,60	99,996
50,9	40084,90	8433,20	37004,88	238,71	0,210	101,80	100,044
51,0	40085,80	8424,24	37002,90	238,76	0,210	102,00	100,047

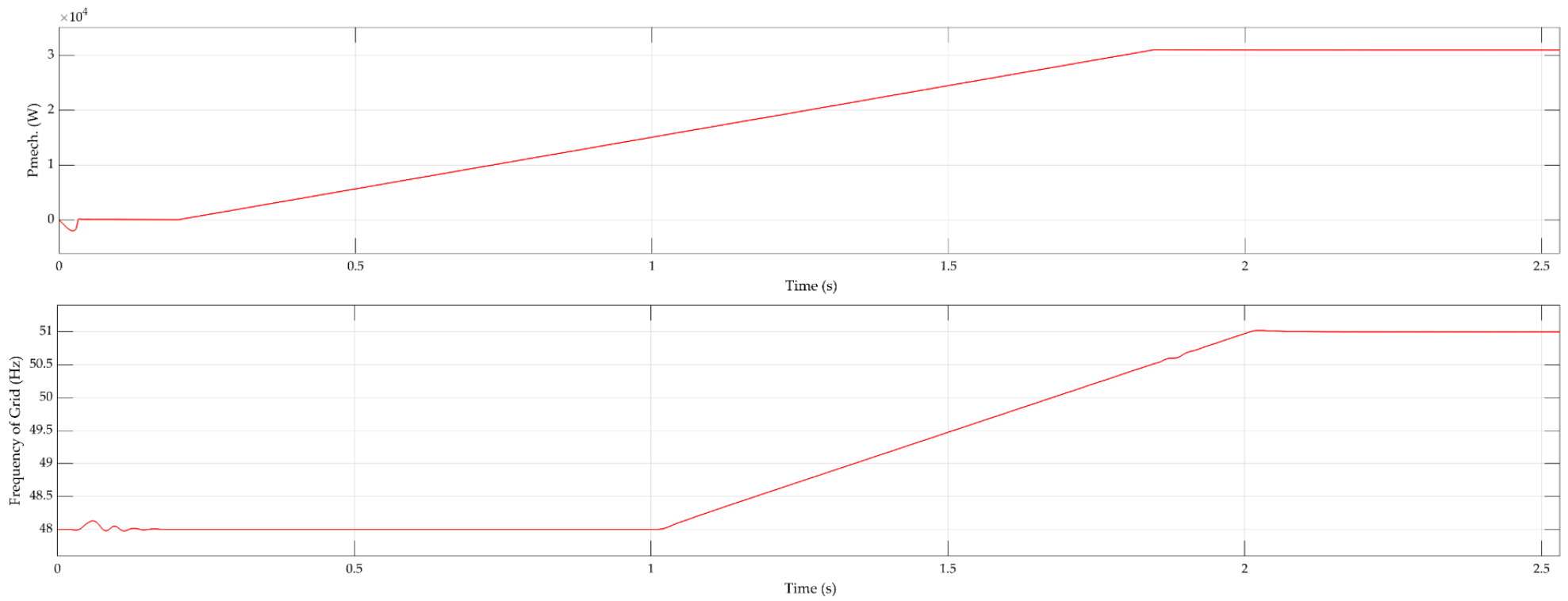
**Πίνακας 4.4:** Συγκεντρωτικά αποτελέσματα της προσομοίωσης με φορτίο μεταβλητής ροπής.



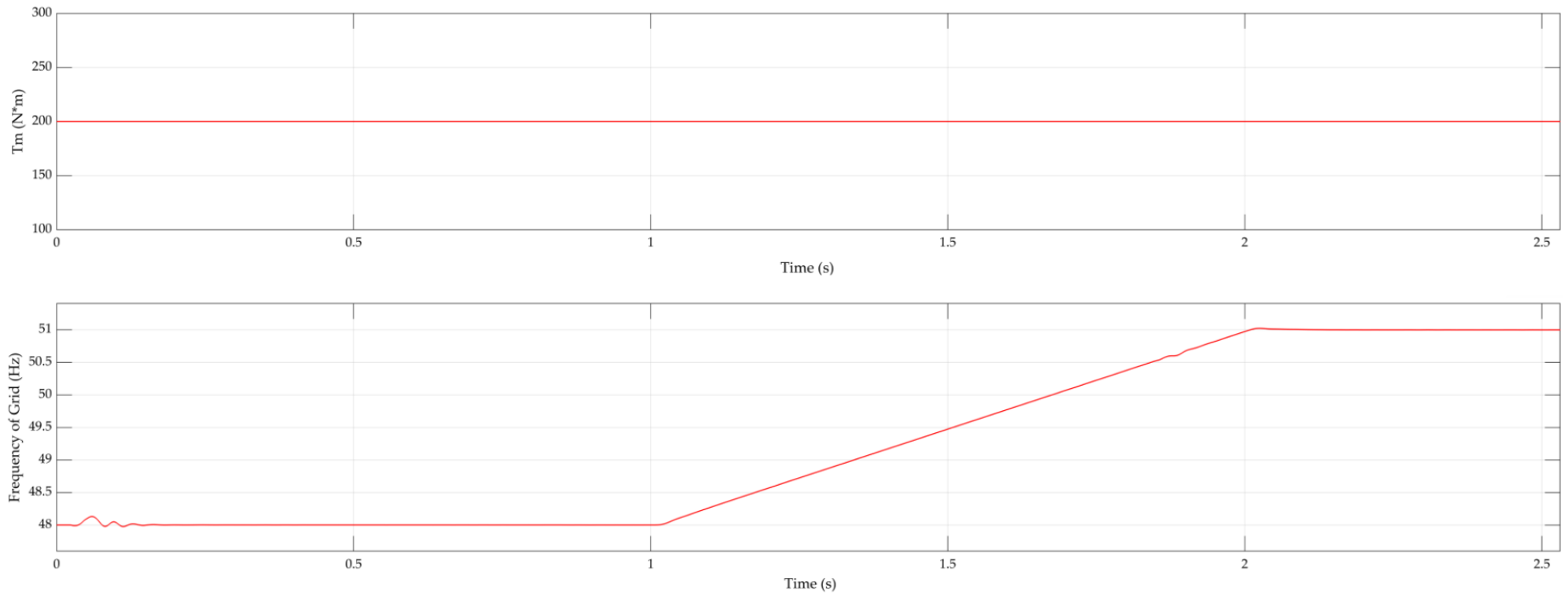
Σχήμα 4.50: Γραφήματα  $P_{ηλ}$ ,  $P_{μηχ}$  και  $Q_{ηλ}$  σε σχέση με τη συχνότητα του δικτύου για φορτίο μεταβλητής ροπής.



**Σχήμα 4.51:** Διαγράμματα στροφών, ηλεκτρομαγνητικής ροπής και γωνίας του δρομέα του ασύγχρονου κινητήρα σε σχέση με το χρόνο για φορτίο σταθερής ροπής.



**Σχήμα 4.52:** Διαγράμματα της μηχανικής ισχύος του συστήματος FOC και της συχνότητας της πηγής τάσεως (δικτύου) σε σχέση με το χρόνο για φορτίο σταθερής ροπής.



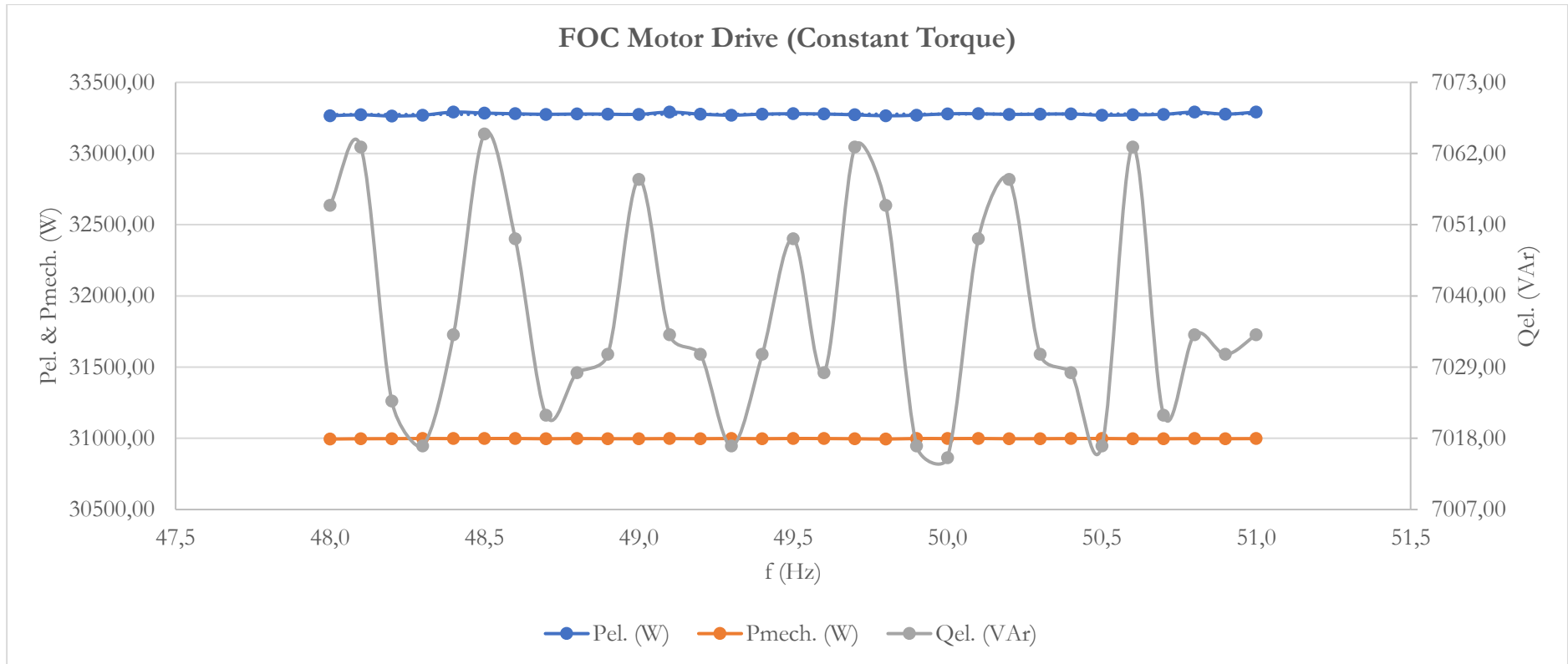
**Σχήμα 4.53:** Διαγράμματα της μηχανικής ροπής του συστήματος FOC και της συχνότητας της πηγής τάσεως (δικτύου) σε σχέση με το χρόνο για φορτίο σταθερής ροπής.

Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης:

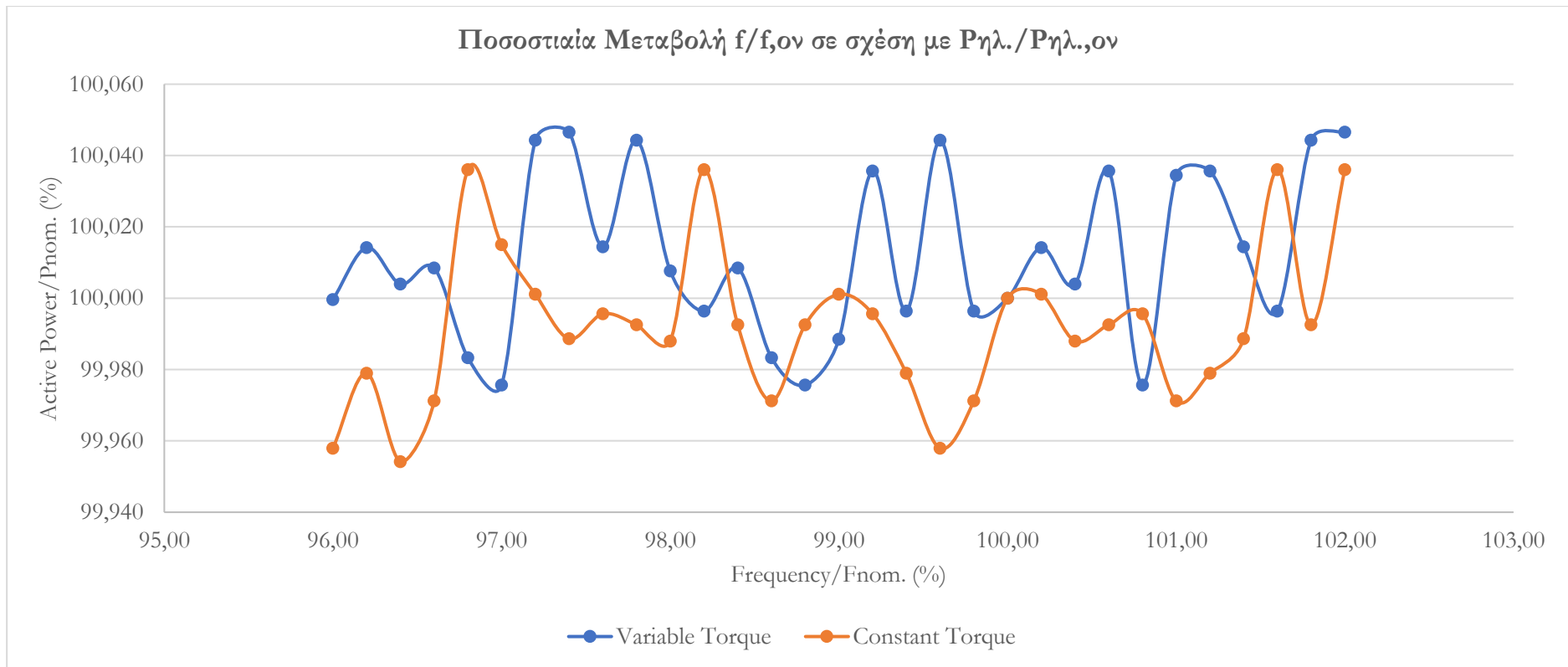
<b>FOC Motor Drive (Constant Torque)</b>							
<b>f<sub>grid</sub> (Hz)</b>	<b>P<sub>el.</sub> (W)</b>	<b>Q<sub>el.</sub> (VAr)</b>	<b>P<sub>mech.</sub> (W)</b>	<b>T<sub>load</sub> (N*m)</b>	<b>tanφ</b>	<b>f/f<sub>0</sub> (%)</b>	<b>P<sub>ηλ.</sub>/P<sub>ηλ.0</sub> (%)</b>
48,0	33265,00	7054,00	30995,00	200	0,212	96,00	99,958
48,1	33272,00	7063,00	30997,00		0,212	96,20	99,979
48,2	33263,74	7023,77	30997,63		0,211	96,40	99,954
48,3	33269,41	7016,82	30998,69		0,211	96,60	99,971
48,4	33291,00	7034,00	30998,00		0,211	96,80	100,036
48,5	33284,00	7065,00	30998,50		0,212	97,00	100,015
48,6	33279,36	7048,84	30998,73		0,212	97,20	100,001
48,7	33275,21	7021,57	30996,92		0,211	97,40	99,989
48,8	33277,54	7028,15	30998,36		0,211	97,60	99,996
48,9	33276,52	7030,97	30997,32		0,211	97,80	99,993
49,0	33275,00	7058,00	30997,00		0,212	98,00	99,988
49,1	33291,00	7034,00	30998,00		0,211	98,20	100,036
49,2	33276,52	7030,97	30997,32		0,211	98,40	99,993
49,3	33269,41	7016,82	30998,69		0,211	98,60	99,971
49,4	33276,52	7030,97	30997,32		0,211	98,80	99,993
49,5	33279,36	7048,84	30998,73		0,212	99,00	100,001
49,6	33277,54	7028,15	30998,36		0,211	99,20	99,996
49,7	33272,00	7063,00	30997,00		0,212	99,40	99,979
49,8	33265,00	7054,00	30995,00		0,212	99,60	99,958
49,9	33269,41	7016,82	30998,69		0,211	99,80	99,971
50,0	33279,00	7015,00	30998,00		0,211	100,00	100,000
50,1	33279,36	7048,84	30998,73		0,212	100,20	100,001
50,2	33275,00	7058,00	30997,00		0,212	100,40	99,988
50,3	33276,52	7030,97	30997,32		0,211	100,60	99,993
50,4	33277,54	7028,15	30998,36		0,211	100,80	99,996
50,5	33269,41	7016,82	30998,69		0,211	101,00	99,971
50,6	33272,00	7063,00	30997,00		0,212	101,20	99,979
50,7	33275,21	7021,57	30996,92		0,211	101,40	99,989
50,8	33291,00	7034,00	30998,00		0,211	101,60	100,036
50,9	33276,52	7030,97	30997,32		0,211	101,80	99,993
51,0	33291,00	7034,00	30998,00	0,211	102,00	100,036	

**Πίνακας 4.5:** Συγκεντρωτικά αποτελέσματα της προσομοίωσης με φορτίο σταθερής ροπής.





Σχήμα 4.54: Γραφήματα  $P_{ηλ}$ ,  $P_{μηχ}$  και  $Q_{ηλ}$  σε σχέση με τη συχνότητα του δικτύου για φορτίο σταθερής ροπής.



**Σχήμα 4.55:** Γραφήματα ποσοστιαίας μεταβολής της ηλεκτρικής ισχύος δικτύου σε σχέση με τη συχνότητα δικτύου (FOC Drive).

## Κεφάλαιο 5 : Προσομοίωση συστήματος αποθήκευσης ενέργειας με σφονδύλους στο Σ.Η.Ε. Κρήτης

### 5.1 Εισαγωγή

Η προσομοίωση συστήματος αποθήκευσης ενέργειας με σφονδύλους στο Σ.Η.Ε. Κρήτης έγινε με εφαρμογή ενός μαθηματικού μοντέλου στο Microsoft Excel. Στο μοντέλο που αναπτύχθηκε, χρησιμοποιείται σύστημα σφονδύλου BP-400 Modular της Beacon Power με ικανότητα αποθήκευσης ενέργειας 30 kWh. Για την εφαρμογή του μοντέλου, χρησιμοποιήθηκε χρονοσειρά καταγραφής συχνότητας δικτύου και φορτίου ανά δευτερόλεπτο στο Σ.Η.Ε. Κρήτης, που έχει ληφθεί στις 06-02-2016 (από τις 02:00:00 πμ έως τις 03:00:00 πμ). Σκοπός του μοντέλου αυτού είναι η εξέταση της συμπεριφοράς των συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας με σφονδύλους, πρωτίστως στην μεταβολή της συχνότητας του δικτύου σε μια πιθανή διαταραχή της ευστάθειας του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, αλλά και στη διαμόρφωση του φορτίου.

### 5.2 Χρονοσειρά συχνότητας δικτύου και φορτίου στο Σ.Η.Ε. Κρήτης

Στις 06-02-2016, κατά το χρονικό διάστημα από 02:00:00 πμ έως 03:00:00 πμ, λήφθηκαν μετρήσεις ανά δευτερόλεπτο της συχνότητας δικτύου και του φορτίου, οι οποίες καταδεικνύουν ότι για μικρά χρονικά διαστήματα το Σ.Η.Ε. Κρήτης υπέστη διαταραχή της ευστάθειας του. Η διαταραχή της ευστάθειας διαπιστώνεται με τιμές της συχνότητας δικτύου που κυμαίνονται είτε κάτω από το «όριο» των 49,8 Hz (υποσυχνότητα) ή πάνω από το «όριο» των 50,2 Hz (υπερσυχνότητα). Η παραπάνω χρονοσειρά παρουσιάζεται για επιλεγμένα χρονικά διαστήματα στον πίνακα που ακολουθεί (Πίνακας 5.1).

Ωρα	Συχνότητα (Hz)	Φορτίο (MW)
2:00:00 πμ	49,89	237,71
2:00:01 πμ	49,89	237,71
2:00:02 πμ	49,89	237,71
2:00:03 πμ	49,89	237,71

.....  
.....  
.....

2:02:30 πμ	49,82	236,17
2:02:31 πμ	49,79	236,17
2:02:32 πμ	49,78	236,17
2:02:33 πμ	49,77	236,17
2:02:34 πμ	49,76	236,17

.....  
.....  
.....

2:27:40 πμ	50,25	227,7
2:27:41 πμ	50,26	227,7
2:27:42 πμ	50,27	227,7
2:27:43 πμ	50,28	227,7

.....  
.....  
.....

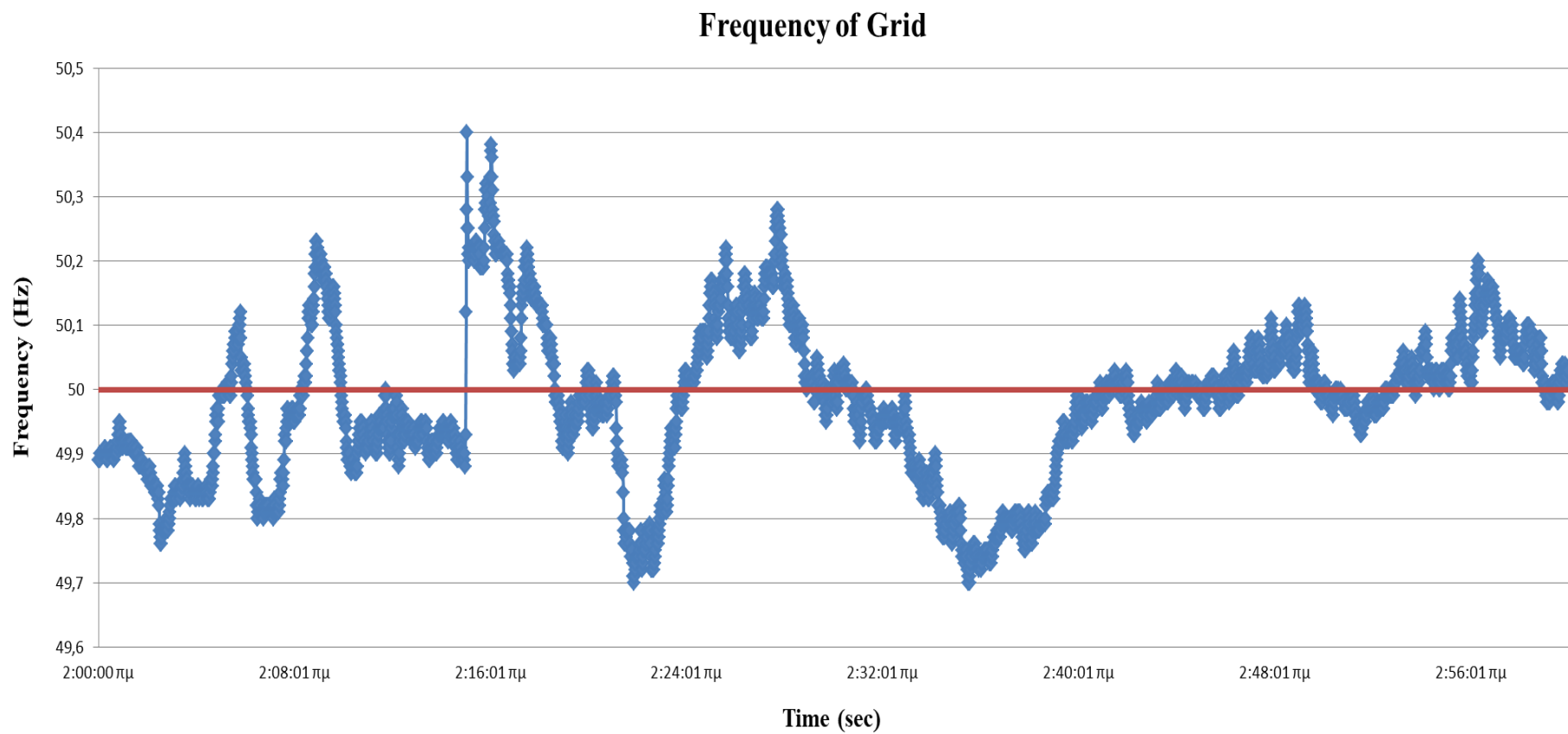
2:35:28 πμ	49,74	226,44
2:35:29 πμ	49,72	226,44
2:35:30 πμ	49,71	226,44
2:35:31 πμ	49,70	226,44

.....  
.....  
.....

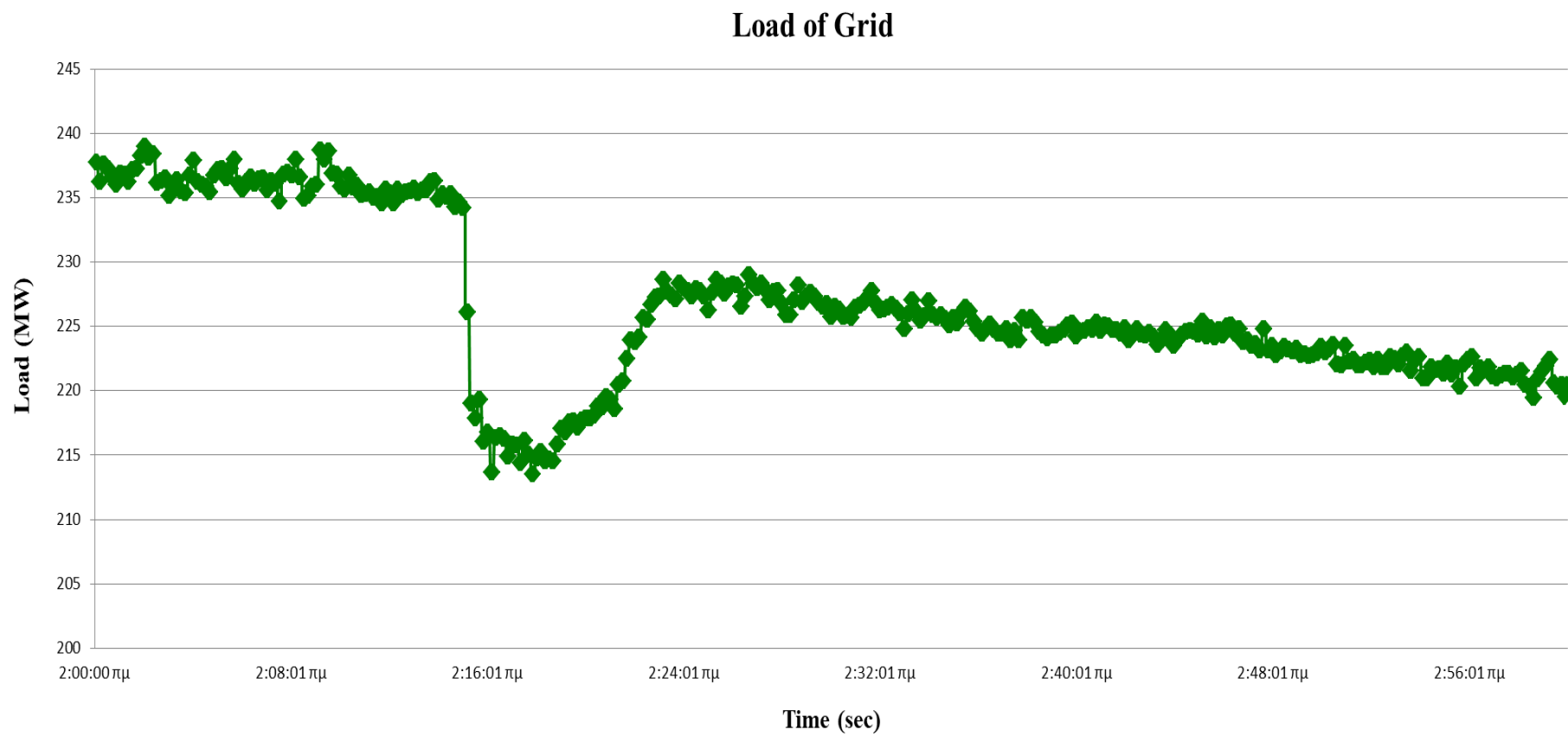
2:59:56 πμ	50,02	220,31
2:59:57 πμ	50,02	220,42
2:59:58 πμ	50,03	220,42
2:59:59 πμ	50,03	220,42
3:00:00 πμ	50,03	220,42

**Πίνακας 5.1:** Χρονοσειρά συχνότητας δικτύου και φορτίου.

Στα διαγράμματα (Σχήμα 5.1 και 5.2) που ακολουθούν παριστάνονται οι μεταβολές της συχνότητας και του φορτίου της προαναφερθείσας χρονοσειράς.



**Σχήμα 5.1:** Διάγραμμα μεταβολής της συχνότητας.



Σχήμα 5.2: Διάγραμμα του φορτίου στο Δίκτυο.

Τέλος, ελέγχοντας τον Πίνακα 5.1, προκύπτουν για τη συχνότητα του δικτύου οι εξής παρατηρήσεις:

- Ελάχιστη συχνότητα (min) : **49,70 Hz**.
- Μέγιστη συχνότητα (max) : **50,40 Hz**.
- Μέγιστη συνεχόμενη διάρκεια, όπου η Συχνότητα είναι κάτω από (49,8 Hz) : **100 sec**.
- Μέγιστη συνεχόμενη διάρκεια, όπου η Συχνότητα είναι πάνω από (50,2 Hz) : **56 sec**
- Συνολικός χρόνος, όπου η Συχνότητα είναι κάτω από (49,8 Hz) : **252 sec**.
- Συνολικός χρόνος, όπου η Συχνότητα είναι πάνω από (50,2 Hz) : **123 sec**.

### 5.3 Προσομοίωση δικτύου με συστήματα σφονδύλων

Στην προσομοίωση χρησιμοποιούνται η προαναφερθείσα χρονοσειρά και δύο σειρές από 5 συστήματα σφονδύλων της Beacon Power (BP-400 Modular) η κάθε μία. Η κάθε σειρά ενεργοποιείται, όταν η συχνότητα του δικτύου πέσει κάτω από το όριο των 49,8 Hz, ενώ ο συνολικός χρόνος λειτουργίας της κάθε σειράς είναι ίδιος και καθορίζεται από τον επιθυμητό χρόνο εκφόρτισης των σφονδύλων. Όσο διαρκεί η λειτουργία της 1<sup>ης</sup> σειράς, η 2<sup>η</sup> σειρά καθίσταται ανενεργή και το αντίστροφο.

Με την ενεργοποίηση της κάθε σειράς, η συχνότητα του δικτύου και το φορτίο θα μεταβάλλονται ανά δευτερόλεπτο. Οι μεταβολές των τιμών της συχνότητας δικτύου και του φορτίου εξαρτώνται από το αν οι σφόνδυλοι εκφορτίζονται σε πλήρη ή μη πλήρη ταχύτητα.

Οι μαθηματικές εξισώσεις προσδιορισμού των τιμών τους, για κάθε περίπτωση, διαμορφώνονται ως εξής:

- **Εκφόρτιση των σφονδύλων σε πλήρη ταχύτητα**

α) Συχνότητα Δικτύου  $f_{i,Nf}$  (Hz):

$$f_{i,Nf} = \left( 1 + \frac{k \cdot P_{out,F}}{L_{i,o}} \right) \cdot f_{i,o} \quad (Eξ. 5.1)$$

Όπου:

$k$  : Ο αριθμός των συστημάτων σφονδύλων της κάθε σειράς.

$P_{out,F}$  : Η παρεχόμενη ισχύ εξόδου του κάθε συστήματος σφονδύλου σε  $MW$ . Η τιμή της εξαρτάται από το χρόνο εκφόρτισης του συστήματος σφονδύλου.

$L_{i,o}$  : Το φορτίο πριν την ενεργοποίηση της σειράς των συστημάτων σφονδύλων σε  $MW$ .

$f_{i,o}$  : Η συχνότητα δικτύου πριν την ενεργοποίηση της σειράς των συστημάτων σφονδύλων σε  $Hz$ .

$i$  :  $1, 2, \dots, n$  όπου  $n$ : καθαρός αριθμός, του οποίου η τιμή αντιστοιχεί στο συνολικό χρόνο εκφόρτισης (sec) του συστήματος σφονδύλου σε πλήρη ταχύτητα.

**β)**

**Φορτίο**

$L_{i,Nf}$  ( $MW$ ) :

$$L_{i,Nf} = L_{i,o} - k \cdot P_{out,F} \quad (Eξ. 5.2)$$

Όπου:

$k$  : Ο αριθμός των συστημάτων σφονδύλων της κάθε σειράς.

$P_{out,F}$  : Η παρεχόμενη ισχύ εξόδου του κάθε συστήματος σφονδύλου σε  $MW$ .

$L_{i,o}$  : Το φορτίο πριν την ενεργοποίηση της σειράς των συστημάτων σφονδύλων σε  $MW$ .

$i$  :  $1, 2, \dots, n$  όπου  $n$ : καθαρός αριθμός, του οποίου η τιμή αντιστοιχεί στο συνολικό χρόνο εκφόρτισης (sec) του συστήματος σφονδύλου σε πλήρη ταχύτητα.

▪ **Εκφόρτιση των Σφονδύλων σε μη πλήρη ταχύτητα**

**α) Συχνότητα Δικτύου  $f_{j,Nnf}$  ( $Hz$ ):**

$$f_{j,Nnf} = \left[ 1 + \frac{k \cdot P_{out,F} - j \cdot k \cdot \left( \frac{P_{out,F} - 0,05}{t_e} \right)}{L_{j,o}} \right] \cdot f_{j,o} \quad (Eξ. 5.3)$$

Όπου:

$k$  : Ο αριθμός των συστημάτων σφονδύλων της κάθε σειράς.



$P_{out,F}$  : Η παρεχόμενη ισχύ εξόδου του κάθε συστήματος σφονδύλου σε  $MW$ . Η τιμή της εξαρτάται από το χρόνο εκφόρτισης του συστήματος σφονδύλου.

$L_{j,o}$  : Το φορτίο πριν την ενεργοποίηση της σειράς των συστημάτων σφονδύλων σε  $MW$ .

$f_{j,o}$  : Η συχνότητα δικτύου πριν την ενεργοποίηση της σειράς των συστημάτων σφονδύλων σε  $Hz$ .

$t_e$  : Η περίσσεια χρόνου εκφόρτισης του συστήματος σφονδύλου σε  $sec$ .

$j$  :  $1, 2, \dots, m$  όπου  $m$ : καθαρός αριθμός, του οποίου η τιμή αντιστοιχεί στην περίσσεια χρόνου εκφόρτισης  $t_e$  (sec) του συστήματος σφονδύλου σε μη πλήρη ταχύτητα.

**β)**

**Φορτίο  $L_{j,Nnf}$  ( $MW$ ):**

$$L_{j,Nnf} = L_{j,o} - k \cdot P_{out,F} + j \cdot k \cdot \left( \frac{P_{out,F} - 0,05}{t_e} \right) \quad (Eξ. 5.4)$$

Όπου:

$k$  : Ο αριθμός των συστημάτων σφονδύλων της κάθε σειράς.

$P_{out,F}$  : Η παρεχόμενη ισχύ εξόδου του κάθε συστήματος σφονδύλου σε  $MW$ .

$L_{j,o}$  : Το φορτίο πριν την ενεργοποίηση της σειράς των συστημάτων σφονδύλων σε  $MW$ .

$t_e$  : Η περίσσεια χρόνου εκφόρτισης του συστήματος σφονδύλου σε  $sec$ .

$j$  :  $1, 2, \dots, m$  όπου  $m$ : καθαρός αριθμός, του οποίου η τιμή αντιστοιχεί στην περίσσεια χρόνου εκφόρτισης  $t_e$  (sec) του συστήματος σφονδύλου σε μη πλήρη ταχύτητα.

### 5.3.1. Αλγόριθμος υπολογισμού μεταβλητών μέσω MATLAB

Για τον υπολογισμό της ισχύος εξόδου, του συνολικού χρόνου εκφόρτισης, και της ενέργειας του συστήματος σφονδύλου με εμπορική ονομασία Beacon Power 400, δημιουργήθηκε ο παρακάτω κώδικας στο MATLAB και οι εξισώσεις δημιουργήθηκαν βάση τριγωνομετρίας από το Σχήμα 3.34.

```
1 clear all;close all;clc;
2 hold all
3 % Created by Nikos Pelekis
4 % Insert the desired time in minutes. T must be >=5 and <=35.
5 T1 = str2num(input('Give time (min):','s'));
6 P1 = -56.44*log(T1) + 251.44
7
8 P2 = P1-50;
9 % a = -(P2/T2) %Constant Value (-11.6425)
10 a = -11.6425;
11 b = P1-a*T1;
12 T2 = P2 / abs(a)
13
14 Ttotal= T1+T2
15
16 P3 = sqrt(P2^2-T2^2);
17
18 if ((T1>=5) && (T1<35))
19     E = ((P1*T1)+((P1+50)*T2)/2)/60
20 elseif T1 == 35
21     E = (P1 * Ttotal) / 60
22 else
23     disp('T must be >=5 and <=35. Re-enter a new input and try again.')
24 end
25
26 plot([0 T1 Ttotal],[P1 P1 50], 'r', 'LineWidth', 3)
27
28 plot([0 35],[50 50], 'g', 'LineWidth', 3);
29 % hold off;
30 title('Output Power vs. Time')
31 ylabel('AC Power (kW)')
32 xlabel('Time (min)')
33 % axis ([min(0) max(40) min(0) max(180)])
34 grid on
```

Αρχικά, ο χρήστης όταν τρέξει τον παραπάνω αλγόριθμο, καλείται να εισάγει ένα συγκεκριμένο χρόνο  $T_1$  (σε λεπτά) κατά τον οποίο ο σφόνδυλος θα εκφορτίζει σταθερή ισχύ. Ο χρόνος που θα εισαχθεί θα πρέπει να είναι αυστηρά μεταξύ των 5 και 35 λεπτών, αλλιώς εμφανίζεται μήνυμα σφάλματος. Έπειτα, υπολογίζεται η ισχύς  $P_1$  που θα εκφορτίζει το flywheel σταθερά και δίδεται από την Εξίσωση 3.12. Στη συνέχεια, υπολογίζεται η ισχύς  $P_2$  και το  $a$ , όπου  $a$  είναι η κλίση της ευθείας και είναι σταθερή τιμή.

Ακολούθως, υπολογίζεται ο χρόνος  $T_2$ , ο οποίος εκφράζει το χρονικό διάστημα κατά το οποίο ο σφόνδυλος εκφορτίζει από το τέλος του σημείου ισχύος  $P_1$  μέχρι και τα 50 W, όπου έχει γίνει η πλήρης εκφόρτιση του. Ύστερα, υπολογίζεται ο συνολικός χρόνος εκφόρτισης του σφονδύλου.

Έπειτα, βάση των χρονικών περιορισμών που έχουν αναφερθεί και στην αρχή, υπολογίζεται η ενέργεια που αποδίδει το flywheel βάση του αθροίσματος των εμβαδών του τραπεζίου και του ορθογωνίου, αν ο χρόνος  $T_1$  είναι μεγαλύτερος ή ίσος του 5 και μικρότερος του 35, ενώ αν είναι 35 τότε υπολογίζεται βάση του εμβαδού του ορθογωνίου. Τέλος, μετά από όλες αυτές τις υπολογιστικές διαδικασίες, εμφανίζεται το τελικό διάγραμμα ισχύος εξόδου – χρόνου εκφόρτισης, που έχουμε δημιουργήσει σύμφωνα με τον εκάστοτε επιθυμητό χρόνο  $T_1$ .

Παρακάτω, παρατίθεται ένας πίνακας και ένα διάγραμμα, όπου έγινε προσομοίωση με το παραπάνω script για χρόνο  $T_1$  ίσο με 15 λεπτά.

$T_1$ (min)	15
$P_1$ (kW)	98,6
$T_2$ (min)	4,174
$T_{total}$ (min)	19,174
E (kWh)	29,818

**Πίνακας 5.2:** Αποτελέσματα προσομοίωσης για  $T_1 = 15$  min.



**Σχήμα 5.3:** Διάγραμμα ισχύος εξόδου – χρόνου, για  $T_1 = 15$  min με πλήρη ταχύτητα.

### 5.3.2. Προσομοίωση δικτύου με FESS εκφόρτισης 5 λεπτών

Στην 1<sup>η</sup> προσομοίωση και στις 2 σειρές των συστημάτων σφονδύλων η εκφόρτιση πραγματοποιείται για 5 *min* σε πλήρη ταχύτητα και για 9,5 *min* σε μη πλήρη ταχύτητα.

Η ισχύς εξόδου, για κάθε σύστημα σφονδύλου που θα χρησιμοποιηθεί, με χρόνο εκφόρτισης 5 *min* προσδιορίζεται με τη βοήθεια του αλγόριθμου που περιγράφηκε στην παράγραφο 5.3.1 και είναι : 160,60 *kW* ή 0,16060 *MW*.

Επομένως, η συνολική ισχύς εξόδου για κάθε σειρά συστημάτων σφονδύλων που θα ενεργοποιείται είναι :  $5 \cdot 0,16060 \text{ MW} = 0,803 \text{ MW}$ .

Η 1<sup>η</sup> διαταραχή της συχνότητας του δικτύου εμφανίζεται στις 02:02:31 π.μ., καθώς η τιμή της συχνότητας πέφτει κάτω από το "όριο" των 49,8 *Hz* (49,79 *Hz*) και τίθεται σε λειτουργία η 1<sup>η</sup> σειρά των σφονδύλων (η 2<sup>η</sup> σειρά είναι ανενεργή).

Στην εκφόρτιση της 1<sup>ης</sup> σειράς σφονδύλων :

- Με πλήρη ταχύτητα για 5 *min*, η συχνότητα του δικτύου και το φορτίο προσδιορίζονται για κάθε *sec* από τις εξισώσεις 5.1 και 5.2 αντίστοιχα.
- Με μη πλήρη ταχύτητα για 9,5 *min*, η συχνότητα του δικτύου και το φορτίο προσδιορίζονται για κάθε *sec* από τις εξισώσεις 5.3 και 5.4 αντίστοιχα.

Στον Πίνακα 5.3 που ακολουθεί συνοψίζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης για την 1<sup>η</sup> διαταραχή της συχνότητας του δικτύου.

Ωρα	Συχνότητα (Hz)	Συχνότητα με Flywheel (Hz)	Φορτίο (MW)	Φορτίο με Flywheel (MW)	Μείωση Φορτίου (MW)
2:02:30 πμ	49,82	49,82	236,17	236,17	0
2:02:31 πμ	49,79	49,96	236,17	235,37	0,80
2:02:32 πμ	49,78	49,95	236,17	235,37	0,80
2:02:33 πμ	49,77	49,94	236,17	235,37	0,80
2:02:34 πμ	49,76	49,93	236,17	235,37	0,80
2:02:35 πμ	49,76	49,93	236,17	235,37	0,80
2:02:36 πμ	49,77	49,94	236,17	235,37	0,80
2:02:37 πμ	49,77	49,94	236,17	235,37	0,80
2:02:38 πμ	49,78	49,95	236,27	235,47	0,80
2:02:39 πμ	49,78	49,95	236,27	235,47	0,80
2:02:40 πμ	49,78	49,95	236,27	235,47	0,80

**Κίτρινη Περιοχή** : Εκφόρτιση με πλήρη ταχύτητα για 5 min.

2:04:57 πμ	49,99	50,16	237,12	236,32	0,80
2:04:58 πμ	49,99	50,16	237,12	236,32	0,80
2:04:59 πμ	49,99	50,16	237,12	236,32	0,80
2:05:00 πμ	49,99	50,16	237,12	236,32	0,80

2:05:01 πμ	49,99	50,16	237,12	236,32	0,80
2:05:02 πμ	49,99	50,16	237,12	236,32	0,80
2:05:03 πμ	49,99	50,16	237,12	236,32	0,80
2:05:04 πμ	49,99	50,16	237,12	236,32	0,80
2:05:05 πμ	50,00	50,17	237,12	236,32	0,80
2:05:06 πμ	50,00	50,17	237,12	236,32	0,80

2:07:26 πμ	49,84	50,01	236,1	235,30	0,80
2:07:27 πμ	49,86	50,03	234,73	233,93	0,80
2:07:28 πμ	49,86	50,03	234,73	233,93	0,80
2:07:29 πμ	49,87	50,04	234,73	233,93	0,80
2:07:30 πμ	49,87	50,04	234,73	233,93	0,80
2:07:31 πμ	49,86	50,03	234,73	233,93	0,80
2:07:32 πμ	49,86	50,03	234,73	233,93	0,80
2:07:33 πμ	49,85	50,02	234,73	233,93	0,80
2:07:34 πμ	49,85	50,02	234,73	233,93	0,80
2:07:35 πμ	49,87	50,04	234,73	233,93	0,80
2:07:36 πμ	49,89	50,06	234,73	233,93	0,80



**Πράσινη Περιοχή** : Εκφόρτιση όχι σε πλήρη ταχύτητα για 9,5 min.

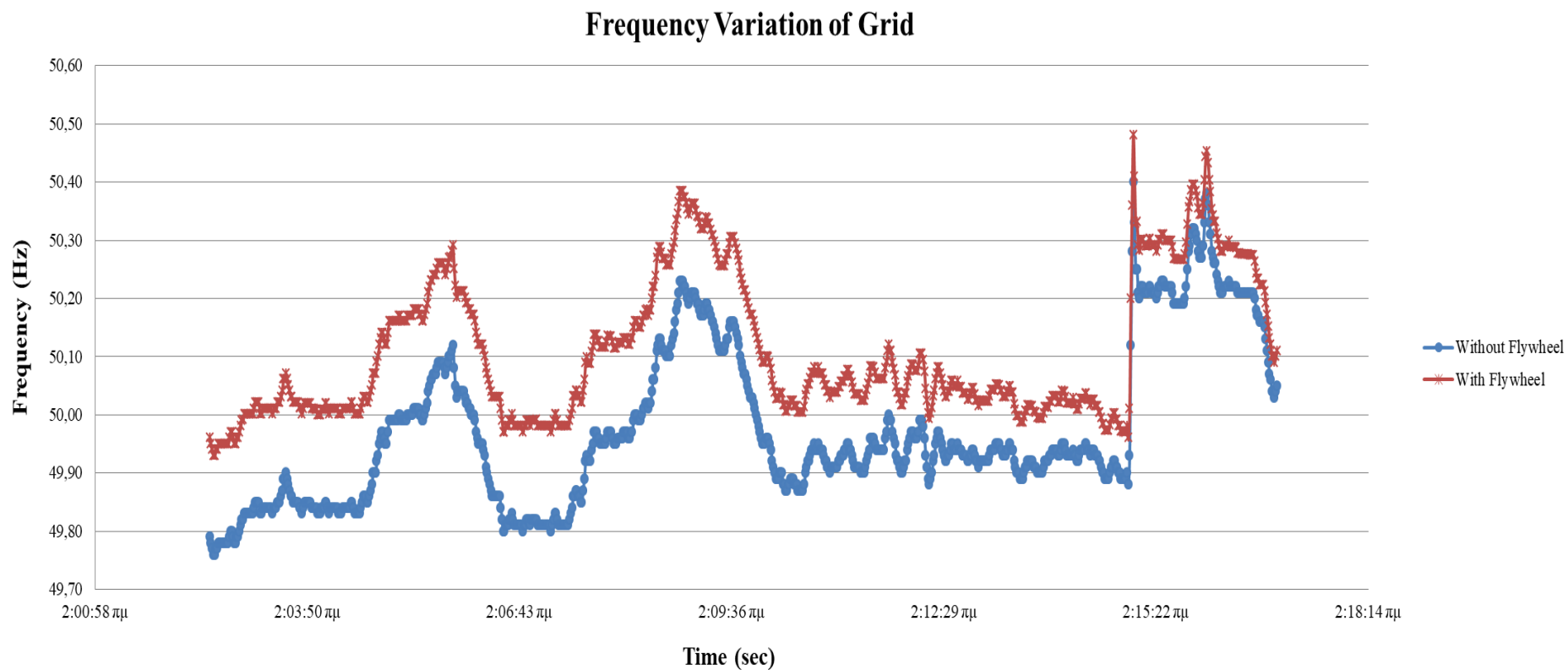
2:12:26 πμ	49,96	50,07	235,2	234,68	0,52
2:12:27 πμ	49,95	50,06	235,2	234,68	0,52
2:12:28 πμ	49,94	50,05	235,2	234,68	0,52
2:12:29 πμ	49,93	50,04	235,2	234,69	0,51

2:16:53 πμ	50,09	50,15	214,88	214,62	0,26
2:16:54 πμ	50,07	50,13	214,88	214,62	0,26
2:16:55 πμ	50,06	50,12	214,88	214,62	0,26
2:16:56 πμ	50,04	50,10	215,86	215,60	0,26
2:16:57 πμ	50,04	50,10	215,86	215,60	0,26
2:16:58 πμ	50,03	50,09	215,86	215,61	0,25
2:16:59 πμ	50,04	50,10	215,86	215,61	0,25
2:17:00 πμ	50,05	50,11	215,86	215,61	0,25
2:17:01 πμ	50,05	50,05	215,86	215,86	0

**Πίνακας 5.3:** Διαμόρφωση συχνότητας δικτύου και φορτίου μετά την ενεργοποίηση της 1<sup>ης</sup> σειράς σφονδύλων.

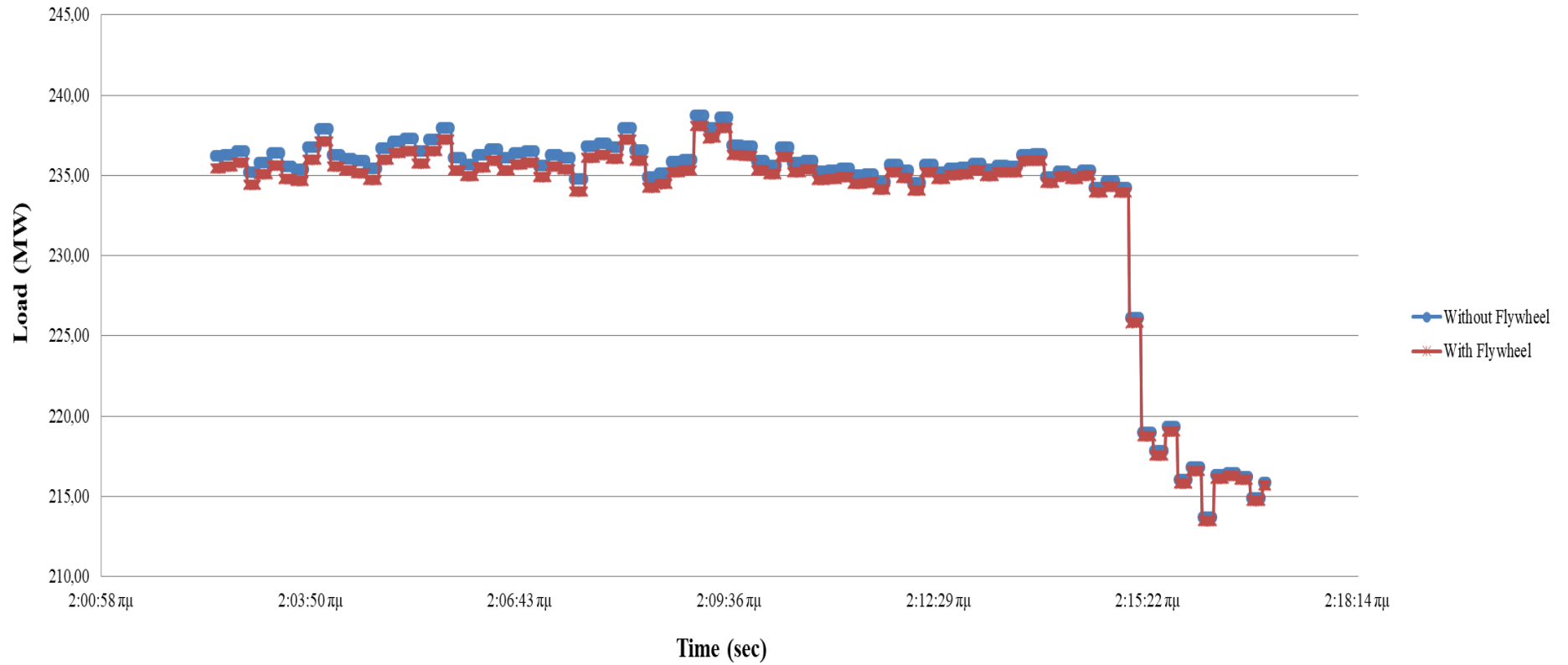


Με χρήση του Πίνακα 5.3 κατασκευάστηκαν τα παρακάτω Διαγράμματα (Σχήμα 5.4, 5.5 και 5.6) της 1<sup>ης</sup> διαταραχής συχνότητας του δικτύου.

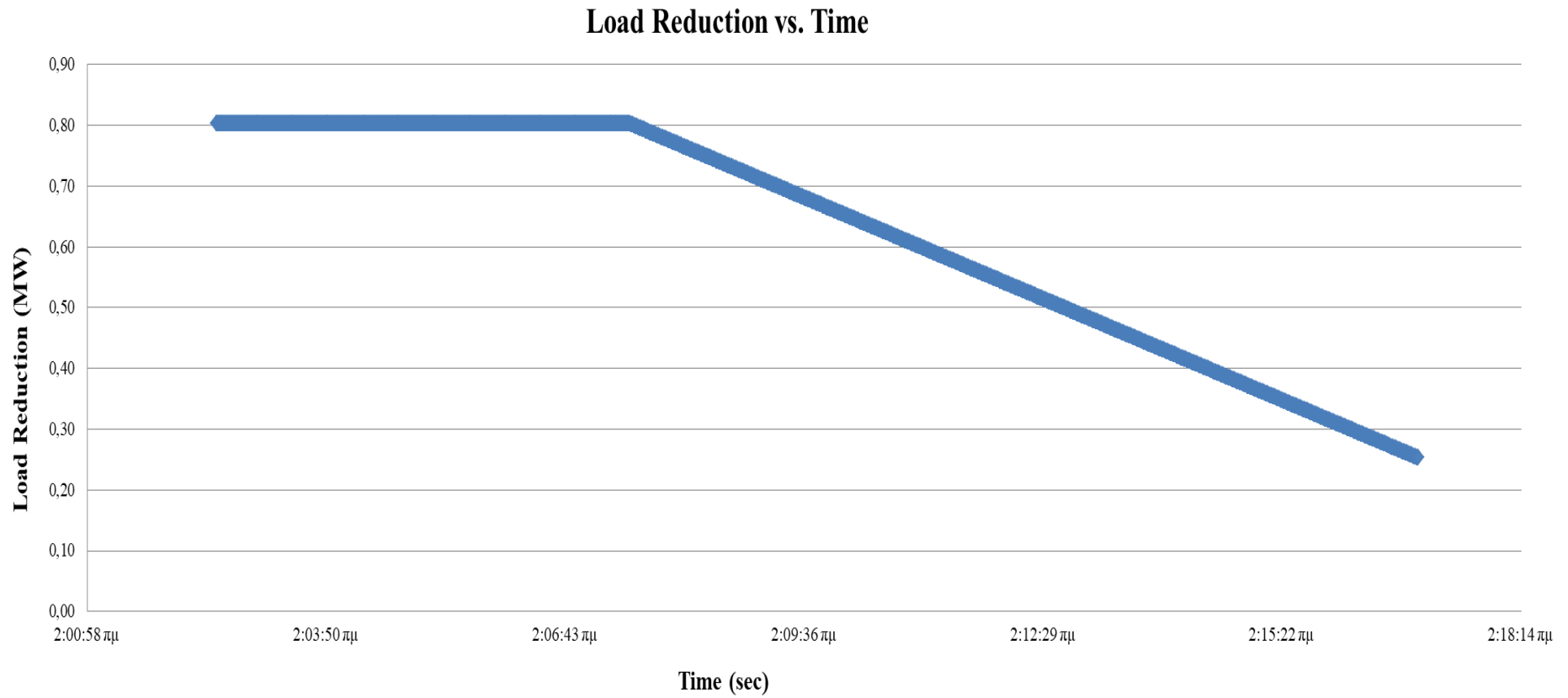


**Σχήμα 5.4:** Διάγραμμα μεταβολής της συχνότητας του δικτύου πριν και μετά την ενεργοποίηση της 1<sup>ης</sup> σειράς των σφονδύλων.

### Load Variation of Grid



Σχήμα 5.5: Διάγραμμα μεταβολής του φορτίου πριν και μετά την ενεργοποίηση της 1<sup>ης</sup> σειράς των σφονδύλων.



**Σχήμα 5.6:** Διάγραμμα μείωσης του φορτίου, όσο διαρκεί η εκφόρτιση της 1<sup>ης</sup> σειράς των σφονδύλων.

Η 2<sup>η</sup> διαταραχή της συχνότητας του δικτύου εμφανίζεται στις 02:21:28 π.μ., καθώς η τιμή της συχνότητας πέφτει κάτω από το "όριο" των 49,8 Hz (49,78 Hz) και τίθεται σε λειτουργία η 2<sup>η</sup> σειρά των σφονδύλων (η 1<sup>η</sup> σειρά είναι ανενεργή).

Η συχνότητα του δικτύου και το φορτίο για κάθε sec, προσδιορίζονται με όμοιο τρόπο, όπως στην 1<sup>η</sup> διαταραχή.

Στον Πίνακα 5.4 που ακολουθεί συνοψίζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης για την 2<sup>η</sup> διαταραχή της συχνότητας του δικτύου.

Ωρα	Συχνότητα (Hz)	Συχνότητα με Flywheel (Hz)	Φορτίο (MW)	Φορτίο με Flywheel (MW)	Μείωση Φορτίου (MW)
2:21:27 πμ	49,80	49,80	220,77	220,77	0
2:21:28 πμ	49,78	49,96	220,77	219,97	0,80
2:21:29 πμ	49,76	49,94	220,77	219,97	0,80
2:21:30 πμ	49,76	49,94	220,77	219,97	0,80
2:21:31 πμ	49,76	49,94	220,77	219,97	0,80
2:21:32 πμ	49,76	49,94	220,77	219,97	0,80
2:21:33 πμ	49,77	49,95	220,77	219,97	0,80
2:21:34 πμ	49,78	49,96	220,77	219,97	0,80
2:21:35 πμ	49,78	49,96	220,77	219,97	0,80
2:21:36 πμ	49,78	49,96	222,50	221,70	0,80
2:21:37 πμ	49,78	49,96	222,50	221,70	0,80

**Κίτρινη Περιοχή** : Εκφόρτιση με πλήρη ταχύτητα για 5 min.

2:24:15 πμ	50,01	50,19	227,32	226,52	0,80
2:24:16 πμ	50,01	50,19	227,32	226,52	0,80
2:24:17 πμ	50,01	50,19	227,32	226,52	0,80
2:24:18 πμ	50,01	50,19	227,32	226,52	0,80

2:24:19 πμ	50,01	50,19	227,32	226,52	0,80
2:24:20 πμ	50,02	50,20	227,32	226,52	0,80
2:24:21 πμ	50,02	50,20	227,32	226,52	0,80
2:24:22 πμ	50,02	50,20	227,32	226,52	0,80
2:24:23 πμ	50,03	50,21	227,32	226,52	0,80
2:24:24 πμ	50,03	50,21	227,32	226,52	0,80

2:26:23 πμ	50,17	50,35	226,52	225,72	0,80
2:26:24 πμ	50,18	50,36	226,52	225,72	0,80
2:26:25 πμ	50,18	50,36	227,30	226,50	0,80
2:26:26 πμ	50,17	50,35	227,30	226,50	0,80
2:26:27 πμ	50,16	50,34	227,30	226,50	0,80
2:26:28 πμ	50,15	50,33	227,30	226,50	0,80
2:26:29 πμ	50,15	50,33	227,30	226,50	0,80
2:26:30 πμ	50,14	50,32	227,30	226,50	0,80
2:26:31 πμ	50,14	50,32	227,30	226,50	0,80
2:26:32 πμ	50,13	50,31	227,30	226,50	0,80
2:26:33 πμ	50,13	50,31	227,30	226,50	0,80



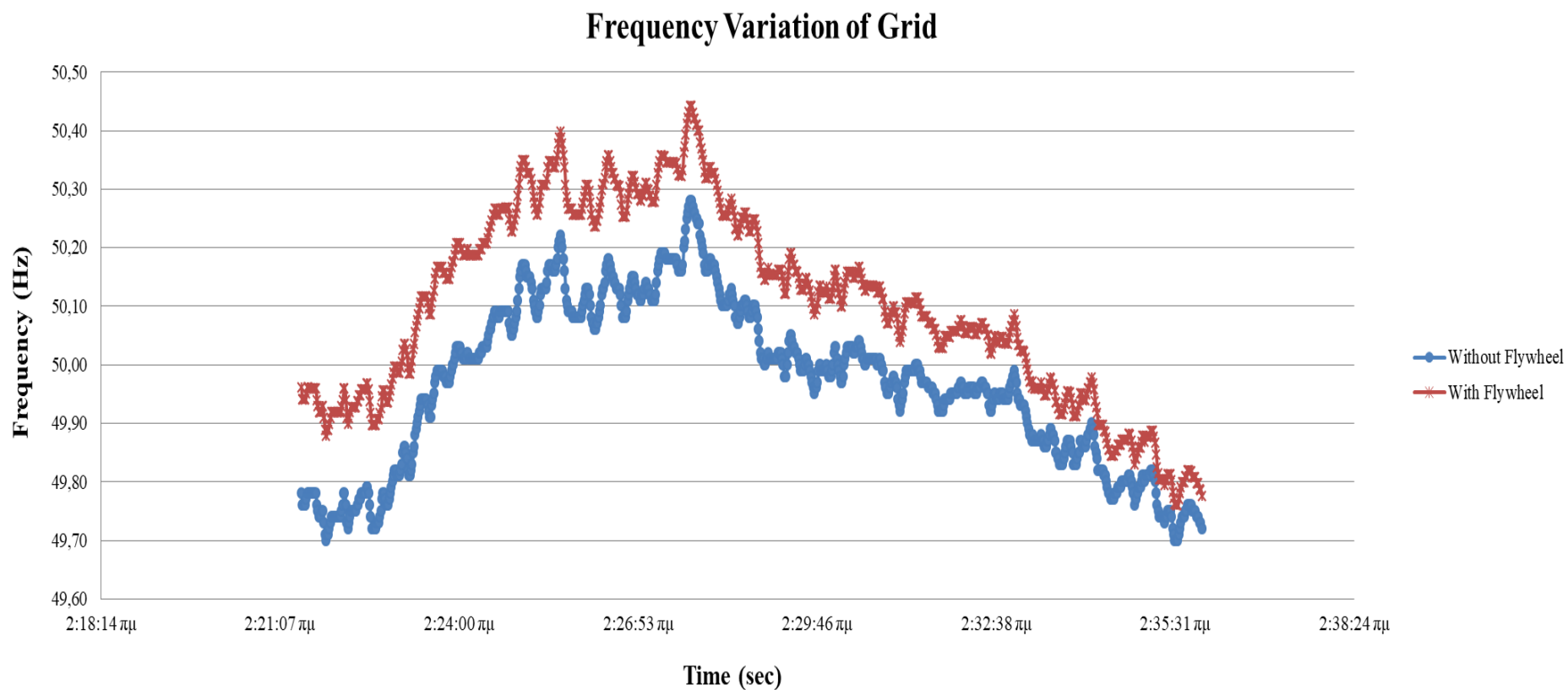
**Πράσινη Περιοχή** : Εκφόρτιση όχι σε πλήρη ταχύτητα για 9,5 min.

2:28:12 πμ	50,12	50,28	225,89	225,19	0,70
2:28:13 πμ	50,11	50,27	225,89	225,19	0,70
2:28:14 πμ	50,10	50,26	225,89	225,19	0,70
2:28:15 πμ	50,10	50,25	225,89	225,19	0,70

2:35:50 πμ	49,75	49,81	225,35	225,09	0,26
2:35:51 πμ	49,75	49,81	225,35	225,09	0,26
2:35:52 πμ	49,74	49,80	225,35	225,09	0,26
2:35:53 πμ	49,74	49,80	225,35	225,09	0,26
2:35:54 πμ	49,74	49,80	224,80	224,54	0,26
2:35:55 πμ	49,73	49,79	224,80	224,55	0,25
2:35:56 πμ	49,73	49,79	224,80	224,55	0,25
2:35:57 πμ	49,72	49,78	224,80	224,55	0,25
2:35:58 πμ	49,73	49,73	224,80	224,80	0

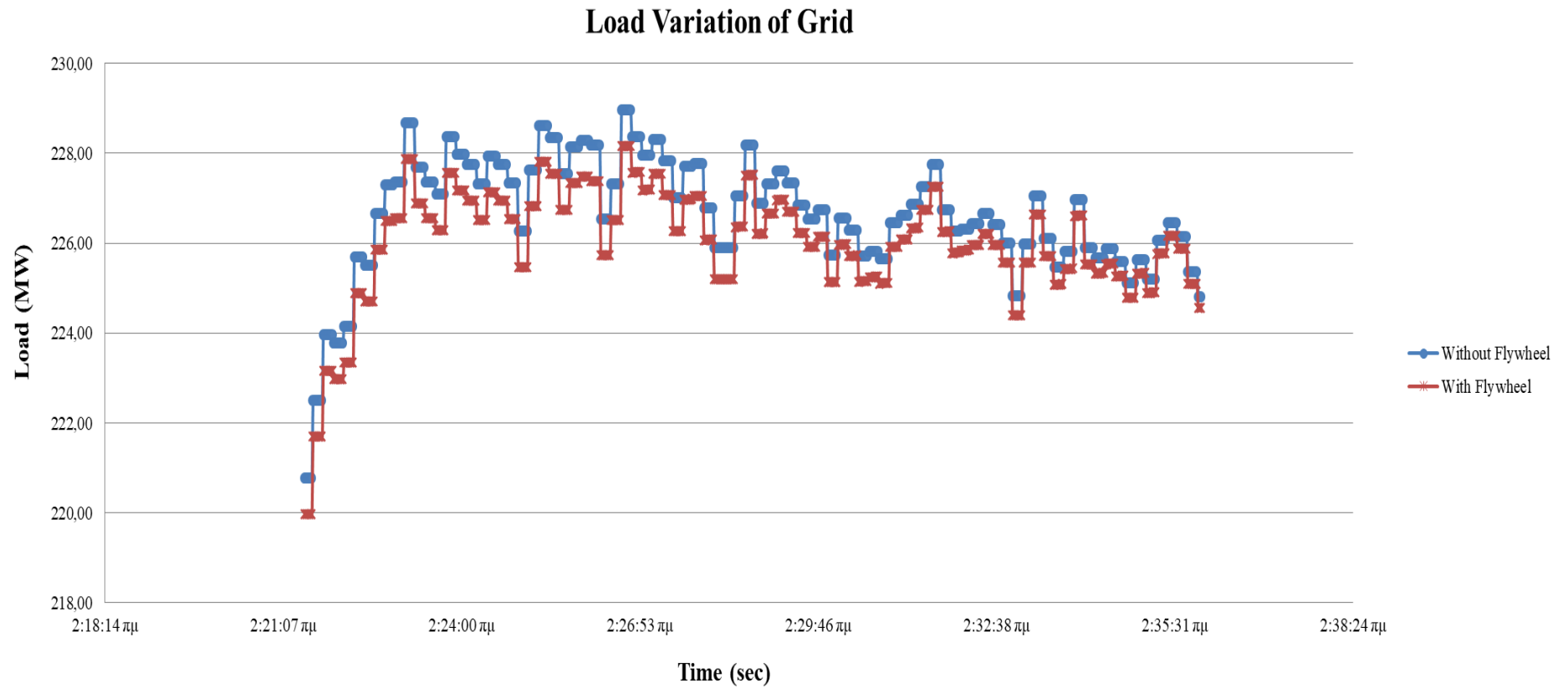
**Πίνακας 5.4:** Διαμόρφωση συχνότητας δικτύου και φορτίου μετά την ενεργοποίηση της 2<sup>ης</sup> σειράς σφονδύλων.

Με χρήση του Πίνακα 5.4 κατασκευάστηκαν τα παρακάτω Διαγράμματα (Σχήμα 5.7, 5.8 και 5.9) της 2<sup>ης</sup> διαταραχής συχνότητας του δικτύου.

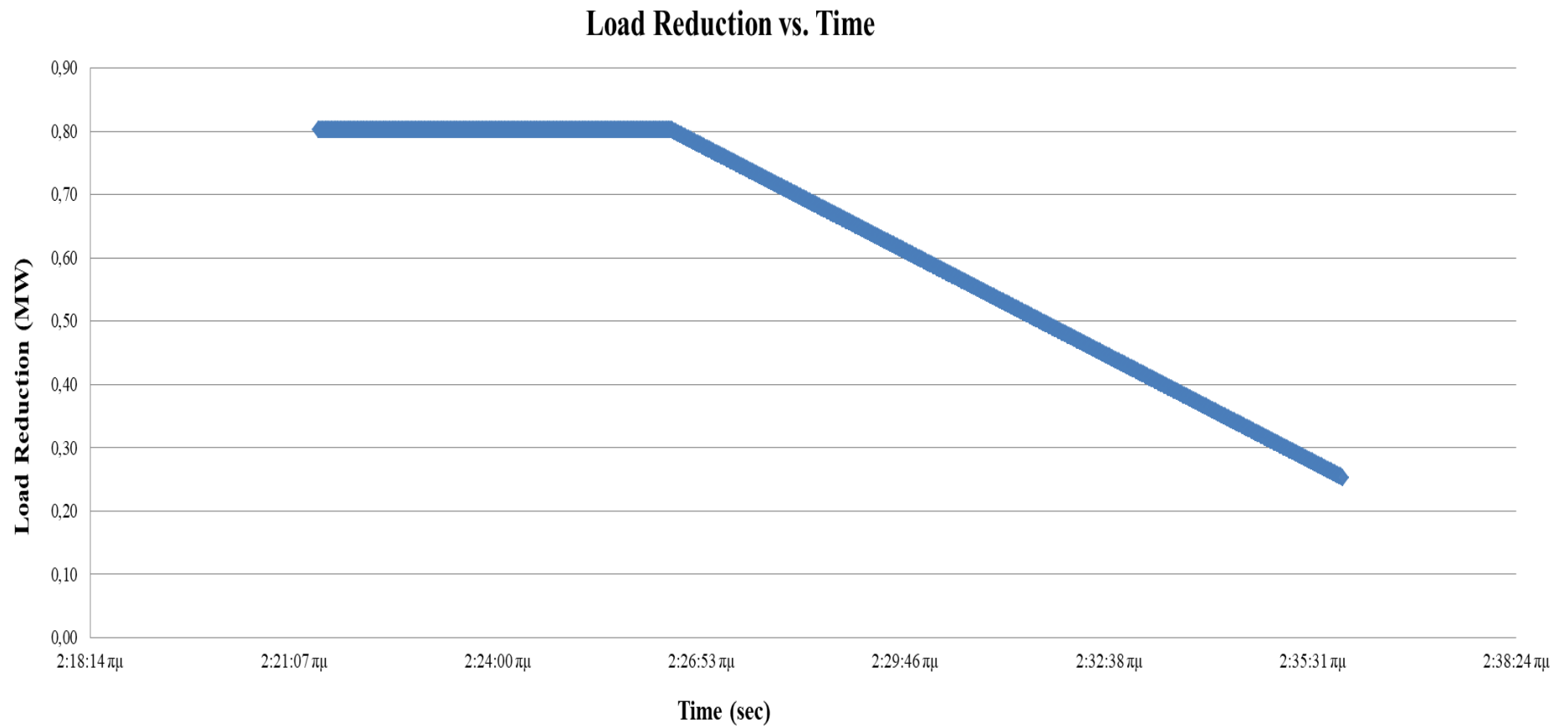


**Σχήμα 5.7:** Διάγραμμα μεταβολής της συχνότητας του δικτύου πριν και μετά την ενεργοποίηση της 2<sup>ης</sup> σειράς των σφονδύλων.





**Σχήμα 5.8:** Διάγραμμα μεταβολής του φορτίου πριν και μετά την ενεργοποίηση της 2<sup>ης</sup> σειράς των σφονδύλων.



**Σχήμα 5.9:** Διάγραμμα μείωσης του φορτίου, όσο διαρκεί η εκφόρτιση της 2<sup>ης</sup> σειράς των σφονδύλων.

Από τους Πίνακες 5.3 και 5.4 προκύπτει ο παρακάτω συγκεντρωτικός Πίνακας 5.5 για την 1<sup>η</sup> προσομοίωση.

Χαρακτηριστικά 1ης Προσομοίωσης	Συστήματα Flywheel (5 min)	
	1η Σειρά	2η Σειρά
Συχνότητα Ελάχιστη (Hz) :	49,93	49,76
Συχνότητα Μέγιστη (Hz) :	50,48	50,44
Ελάχιστο Φορτίο (MW) :	213,36	219,97
Μέγιστο Φορτίο (MW) :	238,00	228,16
Μέγιστη συνεχόμενη διάρκεια σε sec , όπου η Συχνότητα είναι κάτω από 49,8 Hz :	0	0
Μέγιστη συνεχόμενη διάρκεια σε sec, όπου η Συχνότητα είναι πάνω από 50,2 Hz :	109	267
Συνολικός χρόνος, όπου η Συχνότητα είναι κάτω από 49,8 Hz (sec) :	0	19
Συνολικός χρόνος, όπου η Συχνότητα είναι πάνω από 50,2 Hz (sec) :	217	271
Ισχύς εξόδου κάθε σειράς σφονδύλων (MW) :	0,803	
Χρόνος εκφόρτισης με πλήρη ταχύτητα κάθε σειράς (sec) :	300	
Περίσσεια χρόνου κάθε σειράς (sec) :	570	
Συνολικός χρόνος εκφόρτισης κάθε σειράς (sec) :	870	
Εξαγόμενη ενέργεια κάθε σειράς (kWh) :	150,28	150,28
Συνολική εξαγόμενη ενέργεια (kWh) :	300,56	

Πίνακας 5.5: Συγκεντρωτικός πίνακας 1<sup>ης</sup> προσομοίωσης.

### 5.3.3. Προσομοίωση δικτύου με FESS εκφόρτισης 10 λεπτών

Στην 2<sup>η</sup> προσομοίωση και στις 2 σειρές των συστημάτων σφονδύλων η εκφόρτιση πραγματοποιείται για 10 *min* σε πλήρη ταχύτητα και για 6 *min* και 11 *sec* σε μη πλήρη ταχύτητα.

Η ισχύς εξόδου, για κάθε σύστημα σφονδύλου που θα χρησιμοποιηθεί, με χρόνο εκφόρτισης 10 *min* προσδιορίζεται με τη βοήθεια του αλγόριθμου της παραγράφου 5.3.1 και είναι : 121,48 *kW* ή 0,12148 *MW*.

Επομένως, η συνολική ισχύς εξόδου για κάθε σειρά συστημάτων σφονδύλων που θα ενεργοποιείται είναι :  $5 \cdot 0,12148 \text{ MW} = 0,607 \text{ MW}$ .

Η 1<sup>η</sup> διαταραχή της συχνότητας του δικτύου εμφανίζεται στις 02:02:31 π.μ., καθώς η τιμή της συχνότητας πέφτει κάτω από το "όριο" των 49,8 *Hz* (49,79 *Hz*) και τίθεται σε λειτουργία η 1<sup>η</sup> σειρά των σφονδύλων (η 2<sup>η</sup> σειρά είναι ανενεργή).

Στην εκφόρτιση της 1<sup>ης</sup> σειράς σφονδύλων :

- Με **πλήρη ταχύτητα** για 10 *min*, η συχνότητα του δικτύου και το φορτίο προσδιορίζονται για κάθε *sec* από τις εξισώσεις 5.1 και 5.2 αντίστοιχα.
- Με **μη πλήρη ταχύτητα** για 6 *min* και 11 *sec*, η συχνότητα του δικτύου και το φορτίο προσδιορίζονται για κάθε *sec* από τις εξισώσεις 5.3 και 5.4 αντίστοιχα.

Στον Πίνακα 5.6 που ακολουθεί συνοψίζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης για την 1<sup>η</sup> διαταραχή της συχνότητας του δικτύου.

Ωρα	Συχνότητα (Hz)	Συχνότητα με Flywheel (Hz)	Φορτίο (MW)	Φορτίο με Flywheel (MW)	Μείωση Φορτίου (MW)
2:02:30 πμ	49,82	49,82	236,17	236,17	0
2:02:31 πμ	49,79	49,92	236,17	235,56	0,61
2:02:32 πμ	49,78	49,91	236,17	235,56	0,61
2:02:33 πμ	49,77	49,90	236,17	235,56	0,61
2:02:34 πμ	49,76	49,89	236,17	235,56	0,61
2:02:35 πμ	49,76	49,89	236,17	235,56	0,61
2:02:36 πμ	49,77	49,90	236,17	235,56	0,61
2:02:37 πμ	49,77	49,90	236,17	235,56	0,61
2:02:38 πμ	49,78	49,91	236,27	235,66	0,61
2:02:39 πμ	49,78	49,91	236,27	235,66	0,61
2:02:40 πμ	49,78	49,91	236,27	235,66	0,61

**Κίτρινη Περιοχή** : Εκφόρτιση με πλήρη ταχύτητα για 10 min.

2:04:57 πμ	49,99	50,12	237,12	236,51	0,61
2:04:58 πμ	49,99	50,12	237,12	236,51	0,61
2:04:59 πμ	49,99	50,12	237,12	236,51	0,61
2:05:00 πμ	49,99	50,12	237,12	236,51	0,61

2:05:01 πμ	49,99	50,12	237,12	236,51	0,61
2:05:02 πμ	49,99	50,12	237,12	236,51	0,61
2:05:03 πμ	49,99	50,12	237,12	236,51	0,61
2:05:04 πμ	49,99	50,12	237,12	236,51	0,61
2:05:05 πμ	50,00	50,13	237,12	236,51	0,61
2:05:06 πμ	50,00	50,13	237,12	236,51	0,61

2:12:26 πμ	49,96	50,09	235,20	234,59	0,61
2:12:27 πμ	49,95	50,08	235,20	234,59	0,61
2:12:28 πμ	49,94	50,07	235,20	234,59	0,61
2:12:29 πμ	49,93	50,06	235,20	234,59	0,61
2:12:30 πμ	49,92	50,05	235,20	234,59	0,61
2:12:31 πμ	49,92	50,05	235,20	234,59	0,61
2:12:32 πμ	49,93	50,06	235,20	234,59	0,61
2:12:33 πμ	49,93	50,06	235,20	234,60	0,60
2:12:34 πμ	49,94	50,07	235,20	234,60	0,60
2:12:35 πμ	49,95	50,08	235,20	234,60	0,60
2:12:36 πμ	49,95	50,08	235,43	234,83	0,60

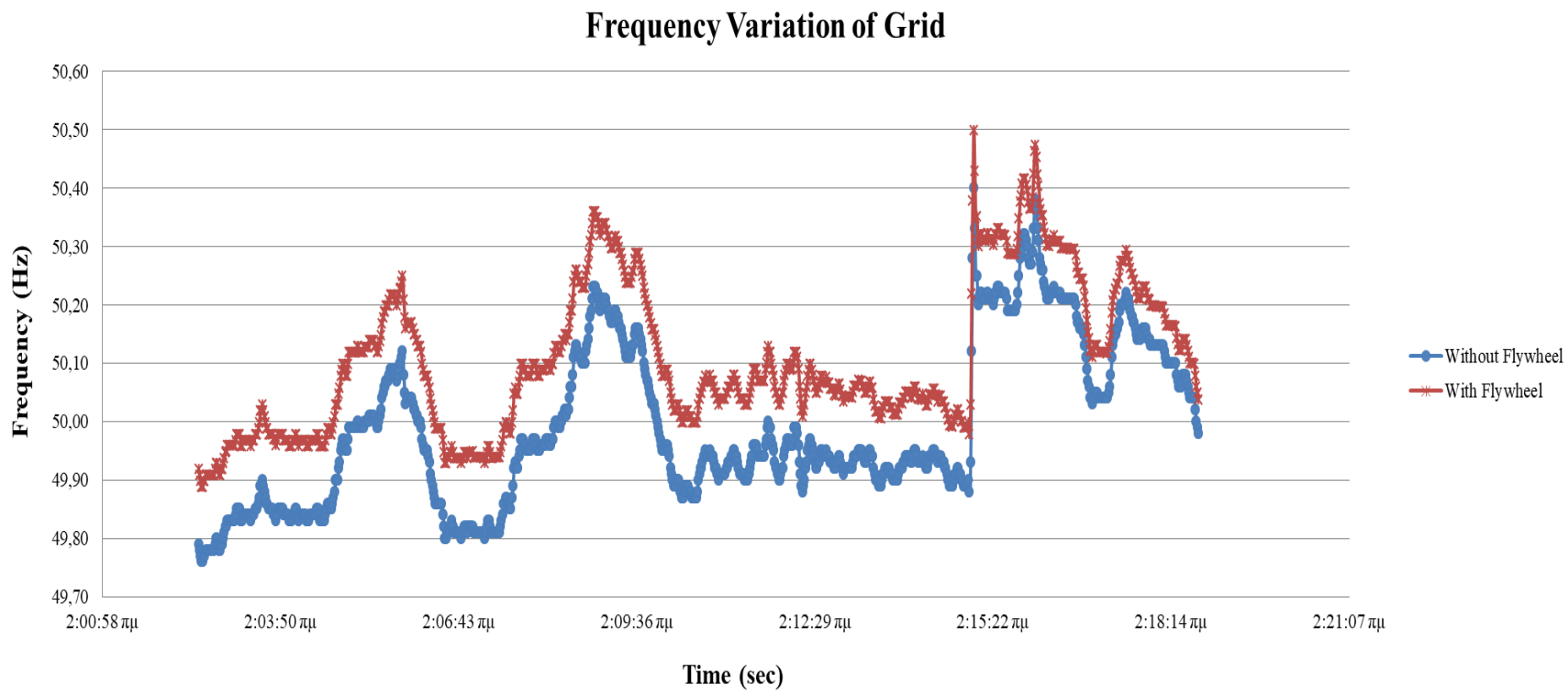
**Πράσινη Περιοχή** : Εκφόρτιση όχι σε πλήρη ταχύτητα για 6 min και 11 sec.

2:14:28 πμ	49,93	50,03	235,30	234,81	0,49
2:14:29 πμ	49,94	50,04	235,30	234,81	0,49
2:14:30 πμ	49,94	50,04	235,30	234,81	0,49
2:14:31 πμ	49,94	50,04	235,30	234,81	0,49

2:18:34 πμ	50,04	50,10	214,65	214,39	0,26
2:18:35 πμ	50,04	50,10	214,65	214,39	0,26
2:18:36 πμ	50,04	50,10	214,54	214,29	0,25
2:18:37 πμ	50,04	50,10	214,54	214,29	0,25
2:18:38 πμ	50,02	50,08	214,54	214,29	0,25
2:18:39 πμ	50,00	50,06	214,54	214,29	0,25
2:18:40 πμ	49,99	50,05	214,54	214,29	0,25
2:18:41 πμ	49,98	50,04	214,54	214,29	0,25
2:18:42 πμ	49,98	49,98	214,54	214,54	0

**Πίνακας 5.6:** Διαμόρφωση συχνότητας δικτύου και φορτίου μετά την ενεργοποίηση της 1<sup>ης</sup> σειράς σφονδύλων.

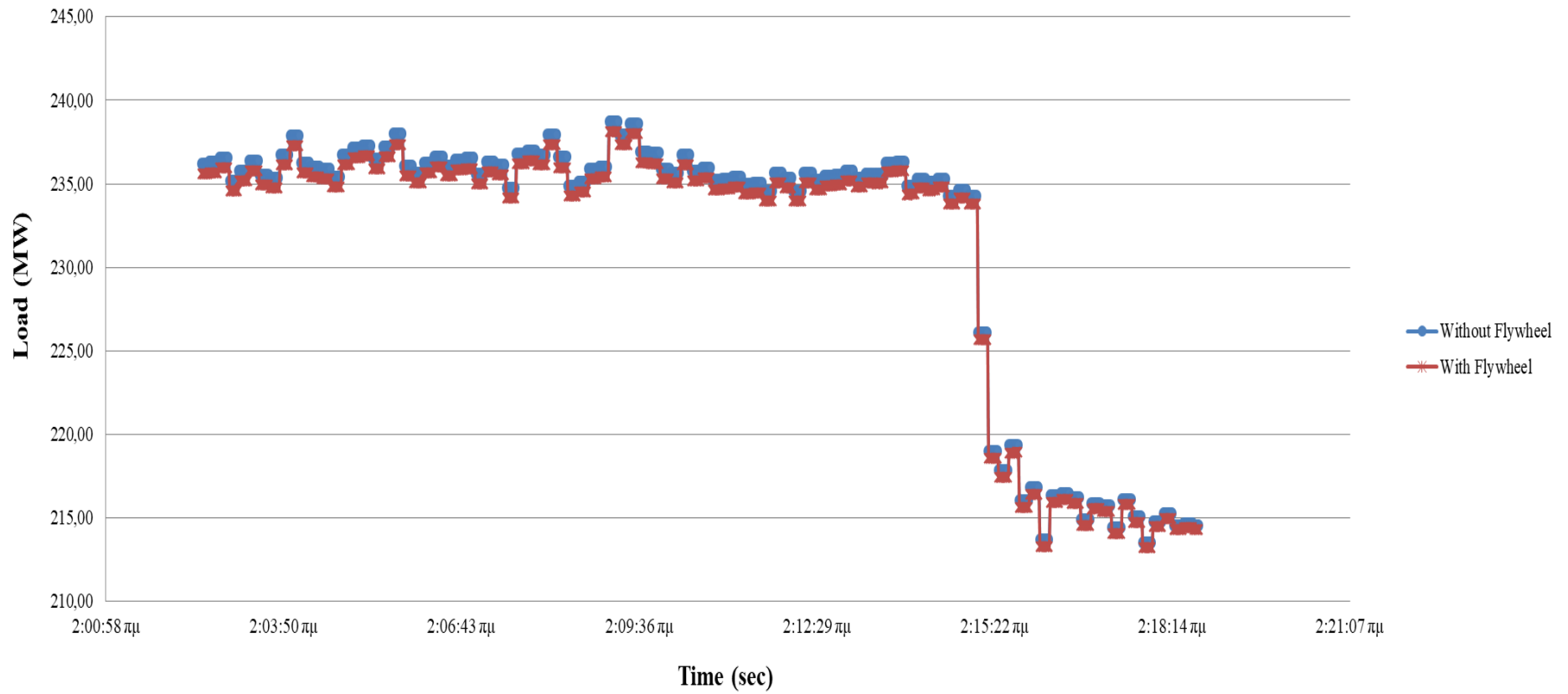
Με χρήση του Πίνακα 5.6 κατασκευάστηκαν τα παρακάτω Διαγράμματα (Σχήμα 5.10, 5.11 και 5.12) της 1<sup>ης</sup> διαταραχής συχνότητας του δικτύου.



**Σχήμα 5.10:** Διάγραμμα μεταβολής της συχνότητας του δικτύου πριν και μετά την ενεργοποίηση της 1<sup>ης</sup> σειράς των σφονδύλων.

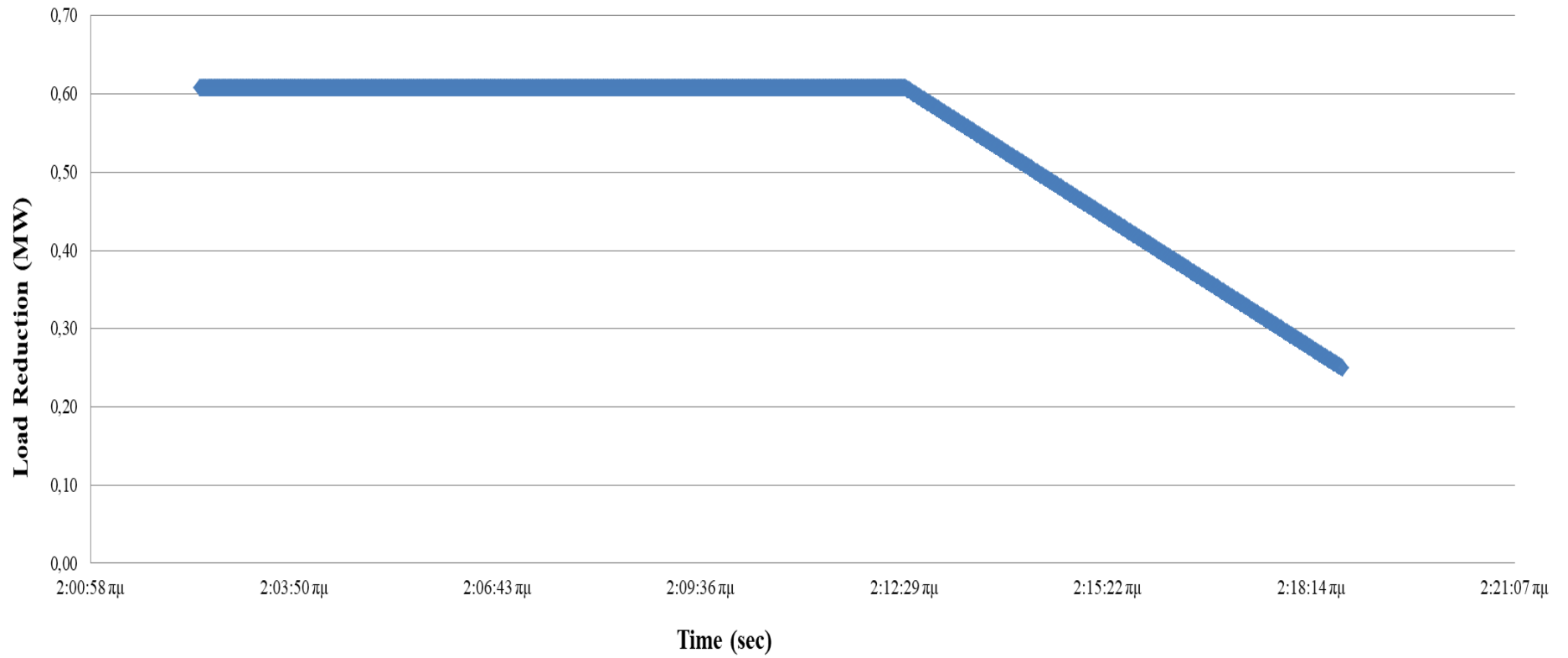


### Load Variation of Grid



Σχήμα 5.11: Διάγραμμα μεταβολής του φορτίου πριν και μετά την ενεργοποίηση της 1<sup>ης</sup> σειράς των σφονδύλων.

### Load Reduction vs. Time



**Σχήμα 5.12:** Διάγραμμα μείωσης του φορτίου, όσο διαρκεί η εκφόρτιση της 1<sup>ης</sup> σειράς των σφονδύλων.

Η 2<sup>η</sup> διαταραχή της συχνότητας του δικτύου εμφανίζεται στις 02:21:28 π.μ., καθώς η τιμή της συχνότητας πέφτει κάτω από το "όριο" των 49,8 Hz (49,78 Hz) και τίθεται σε λειτουργία η 2<sup>η</sup> σειρά των σφονδύλων (η 1<sup>η</sup> σειρά είναι ανενεργή).

Η συχνότητα του δικτύου και το φορτίο για κάθε sec, προσδιορίζονται με όμοιο τρόπο, όπως στην 1<sup>η</sup> διαταραχή.

Στον Πίνακα 5.7 που ακολουθεί συνοψίζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης για την 2<sup>η</sup> διαταραχή της συχνότητας του δικτύου.

Ωρα	Συχνότητα (Hz)	Συχνότητα με Flywheel (Hz)	Φορτίο (MW)	Φορτίο με Flywheel (MW)	Μείωση Φορτίου (MW)
2:21:27 πμ	49,80	49,80	220,77	220,77	0
2:21:28 πμ	49,78	49,92	220,77	220,16	0,61
2:21:29 πμ	49,76	49,90	220,77	220,16	0,61
2:21:30 πμ	49,76	49,90	220,77	220,16	0,61
2:21:31 πμ	49,76	49,90	220,77	220,16	0,61
2:21:32 πμ	49,76	49,90	220,77	220,16	0,61
2:21:33 πμ	49,77	49,91	220,77	220,16	0,61
2:21:34 πμ	49,78	49,92	220,77	220,16	0,61
2:21:35 πμ	49,78	49,92	220,77	220,16	0,61
2:21:36 πμ	49,78	49,92	222,50	221,89	0,61
2:21:37 πμ	49,78	49,92	222,50	221,89	0,61

**Κίτρινη Περιοχή** : Εκφόρτιση με πλήρη ταχύτητα για 10 min.

2:30:50 πμ	49,99	50,12	225,65	225,04	0,61
2:30:51 πμ	49,97	50,10	225,65	225,04	0,61
2:30:52 πμ	49,96	50,09	225,65	225,04	0,61
2:30:53 πμ	49,95	50,08	225,65	225,04	0,61

2:30:54 πμ	49,95	50,08	225,65	225,04	0,61
2:30:55 πμ	49,95	50,08	226,45	225,84	0,61
2:30:56 πμ	49,96	50,09	226,45	225,84	0,61
2:30:57 πμ	49,97	50,10	226,45	225,84	0,61
2:30:58 πμ	49,97	50,10	226,45	225,84	0,61
2:30:59 πμ	49,98	50,11	226,45	225,84	0,61

2:31:23 πμ	50,00	50,13	226,85	226,24	0,61
2:31:24 πμ	49,99	50,12	226,85	226,24	0,61
2:31:25 πμ	49,99	50,12	227,25	226,64	0,61
2:31:26 πμ	49,98	50,11	227,25	226,64	0,61
2:31:27 πμ	49,97	50,10	227,25	226,64	0,61
2:31:28 πμ	49,97	50,10	227,25	226,64	0,61
2:31:29 πμ	49,97	50,10	227,25	226,64	0,61
2:31:30 πμ	49,97	50,10	227,25	226,65	0,60
2:31:31 πμ	49,97	50,10	227,25	226,65	0,60
2:31:32 πμ	49,97	50,10	227,25	226,65	0,60
2:31:33 πμ	49,96	50,09	227,25	226,65	0,60



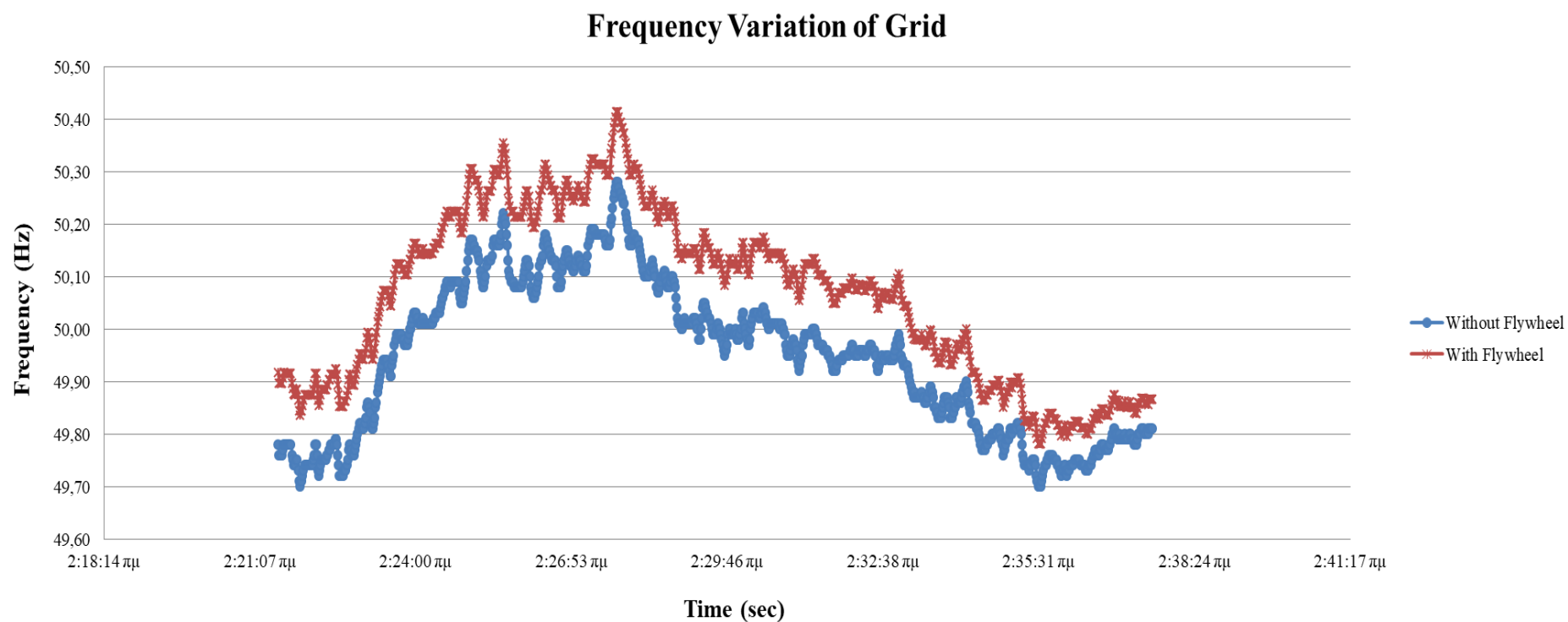
Πράσινη Περιοχή : Εκφόρτιση όχι σε πλήρη ταχύτητα για 6 min και 11 sec.

2:35:35 πμ	49,71	49,79	226,14	225,77	0,37
2:35:36 πμ	49,72	49,80	226,14	225,77	0,37
2:35:37 πμ	49,73	49,81	226,14	225,77	0,37
2:35:38 πμ	49,74	49,82	226,14	225,77	0,37

2:37:32 πμ	49,81	49,87	224,64	224,38	0,26
2:37:33 πμ	49,80	49,86	224,64	224,39	0,25
2:37:34 πμ	49,81	49,87	223,96	223,71	0,25
2:37:35 πμ	49,81	49,87	223,96	223,71	0,25
2:37:36 πμ	49,81	49,87	223,96	223,71	0,25
2:37:37 πμ	49,81	49,87	223,96	223,71	0,25
2:37:38 πμ	49,81	49,87	223,96	223,71	0,25
2:37:39 πμ	49,80	49,80	223,96	223,96	0

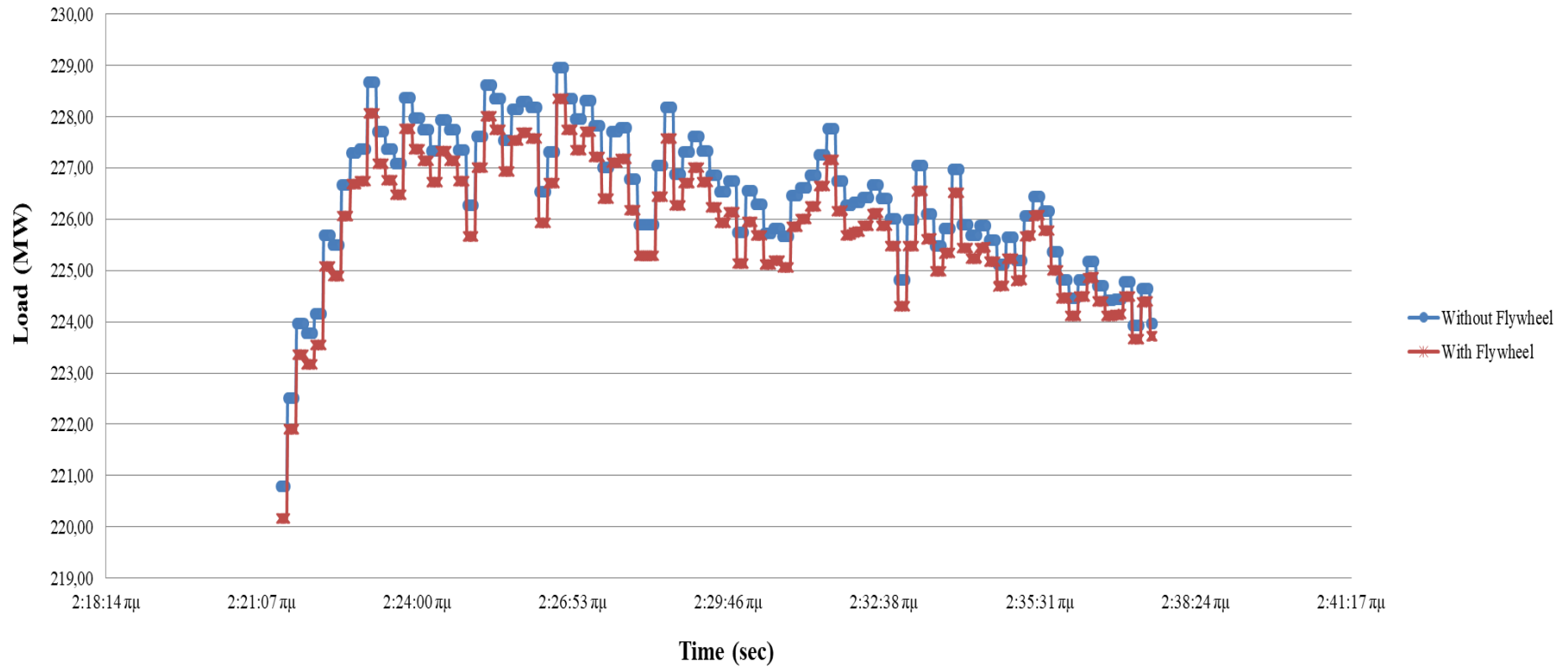
**Πίνακας 5.7:** Διαμόρφωση συχνότητας δικτύου και φορτίου μετά την ενεργοποίηση της 2<sup>ης</sup> σειράς σφονδύλων.

Με χρήση του Πίνακα 5.7 κατασκευάστηκαν τα παρακάτω Διαγράμματα (Σχήμα 5.13, 5.14 και 5.15) της 2<sup>ης</sup> διαταραχής συχνότητας του δικτύου.



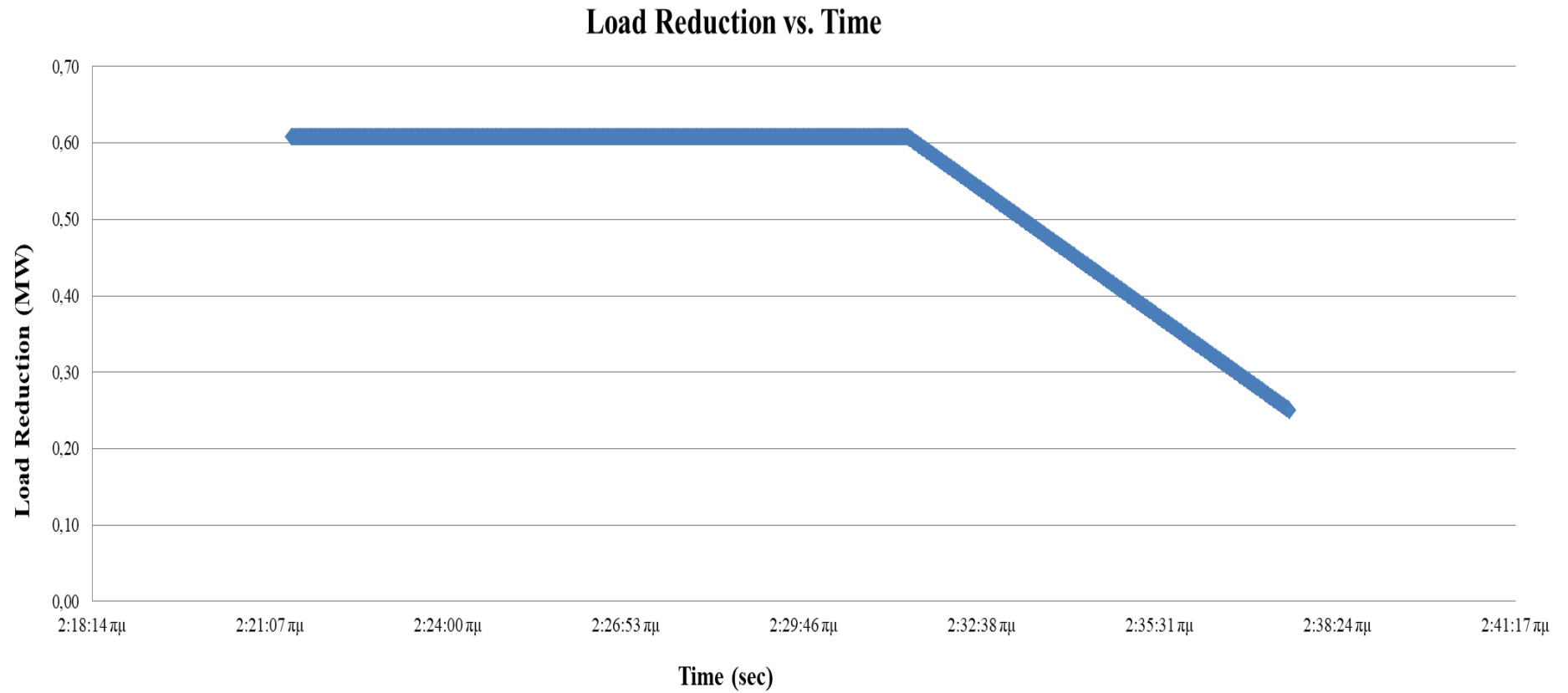
**Σχήμα 5.13:** Διάγραμμα μεταβολής της συχνότητας του δικτύου πριν και μετά την ενεργοποίηση της 2<sup>ης</sup> σειράς των σφονδύλων.

### Load Variation of Grid



**Σχήμα 5.14:** Διάγραμμα μεταβολής του φορτίου πριν και μετά την ενεργοποίηση της 2<sup>ης</sup> σειράς των σφονδύλων.





**Σχήμα 5.15:** Διάγραμμα μείωσης του φορτίου, όσο διαρκεί η εκφόρτιση της 2<sup>ης</sup> σειράς των σφονδύλων.

Από τους Πίνακες 5.6 και 5.7 προκύπτει ο παρακάτω συγκεντρωτικός Πίνακας 5.8 για την 2<sup>η</sup> προσομοίωση.

Χαρακτηριστικά 2ης Προσομοίωσης	Συστήματα Flywheel (10 min)	
	1η Σειρά	2η Σειρά
Συχνότητα Ελάχιστη (Hz) :	49,89	49,78
Συχνότητα Μέγιστη (Hz) :	50,50	50,41
Ελάχιστο Φορτίο (MW) :	213,20	220,16
Μέγιστο Φορτίο (MW) :	238,09	228,34
Μέγιστη συνεχόμενη διάρκεια σε sec , όπου η Συχνότητα είναι κάτω από 49,8 Hz :	0	6
Μέγιστη συνεχόμενη διάρκεια σε sec, όπου η Συχνότητα είναι πάνω από 50,2 Hz :	111	234
Συνολικός χρόνος, όπου η Συχνότητα είναι κάτω από 49,8 Hz (sec) :	0	8
Συνολικός χρόνος, όπου η Συχνότητα είναι πάνω από 50,2 Hz (sec) :	234	251
Ισχύς εξόδου κάθε σειράς σφονδύλων (MW) :	0,607	
Χρόνος εκφόρτισης με πλήρη ταχύτητα κάθε σειράς (sec) :	600	
Περίσσεια χρόνου κάθε σειράς (sec) :	371	
Συνολικός χρόνος εκφόρτισης κάθε σειράς (sec) :	971	
Εξαγόμενη ενέργεια κάθε σειράς (kWh) :	145,10	145,10
Συνολική εξαγόμενη ενέργεια (kWh) :	290,21	

Πίνακας 5.8: Συγκεντρωτικός πίνακας 2<sup>ης</sup> προσομοίωσης.

#### 5.4 Σύγκριση χαρακτηριστικών στοιχείων χωρίς FESS και με FESS εκφόρτισης 5 λεπτών και 10 λεπτών

Για την εξαγωγή συμπερασμάτων, που αφορούν την επίδραση των συστημάτων σφονδύλων στη συχνότητα του δικτύου και στο φορτίο κατασκευάστηκε ο ακόλουθος συγκριτικός Πίνακας 5.9.

Χαρακτηριστικά Στοιχεία	Χωρίς Flywheel	1η Προσομοίωση με Συστήματα Flywheel (5 min)		2η Προσομοίωση με Συστήματα Flywheel (10 min)	
		1η Σειρά	2η Σειρά	1η Σειρά	2η Σειρά
Συχνότητα Ελάχιστη (Hz) :	49,70	49,93	49,76	49,89	49,78
Συχνότητα Μέγιστη (Hz) :	50,40	50,48	50,44	50,50	50,41
Ελάχιστο Φορτίο (MW) :	213,50	213,36	219,97	213,20	220,16
Μέγιστο Φορτίο (MW) :	238,94	238,00	228,16	238,09	228,34
Μέγιστη συνεχόμενη διάρκεια σε sec , όπου η Συχνότητα είναι κάτω από 49,8 Hz :	100	0	0	0	6
Μέγιστη συνεχόμενη διάρκεια σε sec, όπου η Συχνότητα είναι πάνω από 50,2 Hz :	56	109	267	111	234
Συνολικός χρόνος, όπου η Συχνότητα είναι κάτω από 49,8 Hz (sec) :	252	0	19	0	8
Συνολικός χρόνος, όπου η Συχνότητα είναι πάνω από 50,2 Hz (sec) :	123	217	271	234	251
Ισχύς εξόδου κάθε σειράς σφονδύλων (MW) :	-	0,803		0,607	
Χρόνος εκφόρτισης με πλήρη ταχύτητα κάθε σειράς (sec) :	-	300		600	
Περίσσεια χρόνου κάθε σειράς (sec) :	-	570		371	
Συνολικός χρόνος εκφόρτισης κάθε σειράς (sec) :	-	870		971	
Εξαγόμενη ενέργεια κάθε σειράς (kWh) :	-	150,28	150,28	145,10	145,10
Συνολική εξαγόμενη ενέργεια (kWh) :	-	300,56		290,21	

Πίνακας 5.9: Συγκριτικός Πίνακας χαρακτηριστικών στοιχείων με και χωρίς Flywheel.

## Κεφάλαιο 6 : Συμπεράσματα – Προοπτικές

Ο στόχος της μεταπτυχιακής διατριβής ήταν η μελέτη τη συμπεριφοράς των επαγωγικών μηχανών και των στρεφόμενων σφονδύλων στις μεταβολές της συχνότητας του ηλεκτρικού δικτύου και πιο συγκεκριμένα στις διαταραχές γύρω από την ονομαστική τιμή της συχνότητας του ηλεκτρικού δικτύου.

### 6.1 Συμπεράσματα

Αρχικά, γίνεται κιόλας αντιληπτό πόσο σημαντική είναι η ευστάθεια ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, δηλαδή η ισορροπία της παραγωγής και της κατανάλωσης της ηλεκτρικής ενέργειας για τη διατήρηση των τιμών της συχνότητας του δικτύου στις προκαθορισμένες τιμές που έχουν οριστεί από τον διαχειριστή. Η υποσυχνότητα σε ένα Σ.Η.Ε. μπορεί να συμβεί είτε λόγω μιας ξαφνικής αύξησης του φορτίου, είτε λόγω απώλειας κάποιας μονάδας παραγωγής, και για αυτούς τους λόγους, είναι πολύ σημαντικό να υπάρχουν μονάδες εφεδρείας με μικρή απόκριση, με σκοπό την άμεση ένταξη τους σε τέτοια φαινόμενα διαταραχών. Για τη συγκεκριμένη διατριβή, εξετάστηκε το Σ.Η.Ε. της Κρήτης, ένα νησιωτικό σύστημα με αρκετές διαταραχές συχνότητας λόγω βλαβών των μονάδων παραγωγής ή λόγω μεγάλης ζήτησης, ιδίως τους καλοκαιρινούς μήνες εξαιτίας του τουρισμού.

Ακόμη, επισημαίνεται πόσο σημαντικά είναι τα αντλητικά συγκροτήματα του νησιού για το σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας, μιας και οι αντλίες είναι πολύ σημαντικά φορτία από άποψης πλήθους και συνολικής ισχύος, άρα και κατανάλωσης ενέργειας για τις διαταραχές της συχνότητας του δικτύου και επίσης είναι φορτία που μπορούν να μετατεθούν χρονικά. Ακόμη, ένα πολύ σημαντικό στοιχείο από το Κεφάλαιο 1 για το διαχειριστή, είναι ότι οι αντλίες που έχουν καταγραφεί στη διατριβή είναι διάσπαρτες στο νησί, και έτσι είναι διαφορετικό να βγάλει εκτός μια γραμμή διανομής ηλεκτρικής ενέργειας και διαφορετικό να κόψει φορτία από πολλές διαφορετικές γραμμές διανομής ηλεκτρικής ενέργειας.

Επίσης, ενδεικτικά η συνολική καθαρή παραγωγή ενέργειας του Σ.Η.Ε. Κρήτης για το έτος 2017 ήταν 3.019.581 MWh, και η κατανάλωση των δήμων της Κρήτης σε σχέση με τη συνολική καθαρή παραγωγή ήταν 5,66%, ενώ για τα αγροτικά τους τιμολόγια ήταν 1,76%. Επίσης, από τον Πίνακα 1.3, γίνεται αντιληπτό ότι ένα πολύ μεγάλο μέρος των διακοπών ηλεκτρικής ενέργειας (41,05% ή 168,27 MWh) οφείλεται στη λειτουργία συστημάτων υποσυχνότητας του Σ.Η.Ε. Κρήτης.

Στη συνέχεια, έγιναν προσομοιώσεις επαγωγικών μηχανών, με φορτία σταθερής και μεταβλητής ροπής, αλλά και με σύστημα οδήγησης FOC με φορτία σταθερής και μεταβλητής ροπής, με σκοπό την εξέταση της μεταβολής της επίπτωσης στη λειτουργία τους εξαιτίας μεταβολής της συχνότητας του δικτύου από 48 έως 51 Hz. Οι προσομοιώσεις έγιναν με τη βοήθεια του λογισμικού Simulink.

Στο σενάριο της απλής επαγωγικής μηχανής, από το Σχήμα 4.31, παρατηρείται ότι με το φορτίο σταθερής ροπής, η ενεργός ισχύς του δικτύου από τα 48 Hz έως τα 50 Hz (δηλ. από 95,9% έως το 100%) έχει μια διαφορά της τάξεως περίπου 4% και η διακύμανση του φορτίου είναι περίπου 1345 Watt, και από τα 50 Hz στα 51 Hz, έχει 2%. Στο φορτίο μεταβλητής ροπής, η ενεργός ισχύς του δικτύου από τα 48 Hz έως τα 50 Hz έχει μια διαφορά της τάξεως περίπου 11,5% και η διακύμανση του φορτίου είναι περίπου 4443 Watt, και από τα 50 Hz στα 51 Hz, έχει 6%. Άρα, συμπεραίνεται ότι σε μια διαταραχή υποσυχνότητας στο ηλεκτρικό δίκτυο, ο διαχειριστής θα πρέπει να προτιμάει να βγάξει εκτός δικτύου καταναλωτές που έχουν φορτία σταθερής ροπής, μιας και τα μεταβλητής είναι αρκετά πιο ευέλικτα και μειώνουν την ισχύ τους αρκετά περισσότερο σε σχέση με τα σταθερής ροπής σε περίπτωση μείωσης της συχνότητας. Σε περίπτωση υπερσυχνότητας, οι αντλίες ανεβάζουν την ισχύ τους, αρά πρακτικά βοηθούν το σύστημα στη μείωση της συχνότητας του φορτίου λόγω αυξημένης ισχύος φορτίου.

Στο σενάριο της επαγωγικής μηχανής με σύστημα οδήγησης μέσω ηλεκτρονικών ισχύος (FOC), διαπιστώνεται από το Σχήμα 4.55, ότι δεν παρατηρούνται ιδιαίτερες αλλαγές στην ισχύ του δικτύου για τους δυο τύπους φορτίου και αυτό οφείλεται στο τριφασικό αντιστροφέα που χρησιμοποιείται από το σύστημα FOC, άρα για τον διαχειριστή του δικτύου δεν υπάρχει καμία ιδιαίτερη διαφορά μεταξύ των φορτίων σταθερής και μεταβλητής ροπής.

Σημαντικό ρόλο στη διαχείριση μιας διαταραχής συχνότητας του ηλεκτρικού δικτύου μπορεί να διαδραματίσει και η χρήση συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας με σφονδύλους. Η πρόοδος της έρευνας και της τεχνολογίας στην επιστήμη υλικών, θέτει τις βάσεις προκειμένου η μέθοδος αυτή αποθήκευσης ενέργειας να υποστηρίξει την ισχύ του δικτύου συμπληρωματικά από τα δαπανηρά συστήματα των μπαταριών.

Η βιβλιογραφική ανασκόπηση στο Κεφάλαιο 3 καταδεικνύει τη συμμετοχή των συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας με στρεφόμενους σφονδύλους στη βελτίωση των εξής χαρακτηριστικών ενός Σ.Η.Ε.:

- α) Ευστάθεια του συστήματος.
- β) Ποιότητα ισχύος.
- γ) Ισορρόπηση διακυμάνσεων φορτίου.

Τα συστήματα στρεφόμενων σφονδύλων είναι ιδανικά για εφαρμογές με χρόνους εκφόρτισης από 10 δευτερόλεπτα ως 2 λεπτά και για ισχύ εξόδου μεγαλύτερη από 20 kW, σε αντίθεση με τα συστήματα μπαταριών όπου ο αντίστοιχος χρόνος εκφόρτισης είναι πολύ μεγαλύτερος και η ισχύς εξόδου μικρότερη. Αντίθετα από τις μπαταρίες, τα συστήματα στρεφόμενων σφονδύλων δεν είναι ευαίσθητα στη θερμοκρασία, παρουσιάζουν μεγάλη απόδοση και ελάχιστες απώλειες, μεγάλη διάρκεια ζωής (15 με 30 χρόνια), απαιτούν μικρή συντήρηση και μπορούν να εγκατασταθούν επί εδάφους ή υπογείως (καταλαμβάνοντας λίγο χώρο για την ισχύ που αποδίδουν).

Επίσης, η αποθηκευμένη ενέργεια στους σφονδύλους εξαρτάται από την ταχύτητα περιστροφής και τη ροπή αδρανείας, οπότε και από το σχήμα και το υλικό κατασκευής.

Οι στρεφόμενοι σφόνδυλοι μπορούν να συμπληρώσουν τις μπαταρίες στα Σ.Η.Ε. με υψηλή διεύδυση μονάδων Α.Π.Ε., εξισορροπώντας τις γρήγορες και απότομες μεταβολές λόγω των περιορισμένων κύκλων ζωής που έχουν. Επίσης, ο πολύ μικρός χρόνος απόκρισης τους στη ρύθμιση της συχνότητας τα καθιστά κυρίαρχο μέσο αποθήκευσης ενέργειας.

Μέχρι σήμερα έχουν χρησιμοποιηθεί σε εφαρμογές, κάποιες από τις οποίες αναλύονται στην Ενότητα 3.10. Για τα συστήματα στρεφόμενων σφονδύλων AFS TRINITY M3AM και Beacon BP 400 των εφαρμογών του ηλεκτρικού δικτύου της California και του Puerto Rico αντίστοιχα, αναπτύχθηκαν μαθηματικά μοντέλα αξιοποιώντας το διάγραμμα ισχύος εξόδου – χρόνου εκφόρτισης του κάθε συστήματος και χρησιμοποιώντας το λογισμικό Matlab αναπτύχθηκε αλγόριθμος με τη βοήθεια του οποίου μπορούν να προσδιοριστούν η ισχύς εξόδου, η εξαγόμενη ενέργεια, η περίσσεια χρόνου εκφόρτισης και ο συνολικός χρόνος εκφόρτισης του συστήματος στρεφόμενου σφονδύλου Beacon BP 400, αν είναι γνωστός ο χρόνος εκφόρτισης. Ο αλγόριθμος αυτός μπορεί να θεωρηθεί ως εργαλείο για τον διαχειριστή του Σ.Η.Ε. και λοιπών φορέων της αγοράς ενέργειας, και ως οδηγός για την κατασκευή στο μέλλον παρόμοιων αλγόριθμων σε άλλα συστήματα στρεφόμενων σφονδύλων.

Σύμφωνα με το Κεφάλαιο 3 και το Κεφάλαιο 5 εξάγονται τα παρακάτω συμπεράσματα:

- Όταν αυξάνεται ο χρόνος εκφόρτισης των σφονδύλων με πλήρη ταχύτητα, τότε μειώνεται η περίσσεια χρόνου εκφόρτισης τους.
- Όταν οι σφόνδυλοι εκφορτίζονται σε μη πλήρη ταχύτητα, παρατηρείται μια "γραμμική" πτώση της ισχύος εξόδου, γεγονός που οδηγεί σε μικρότερη αύξηση της συχνότητας του δικτύου και μικρότερη μείωση του φορτίου.
- Ο χρόνος εκφόρτισης των σφονδύλων δεν επηρεάζει σημαντικά την ενέργεια που εξάγουν.

Έπειτα, έγιναν οι προσομοιώσεις των συστημάτων στρεφόμενων σφονδύλων BP-400 Modular της Beacon Power με χρόνους εκφόρτισης 5 λεπτών και 10 λεπτών, για διαταραχές της συχνότητας στο Σ.Η.Ε. της Κρήτης που παρουσιάστηκαν στις 06/02/2016 από τις 02:00:00 π.μ. έως τις 03:00:00 π.μ. Τα συμπεράσματα που εξήχθησαν από τις προσομοιώσεις αυτές είναι τα παρακάτω:

- Αν αυξηθεί ο χρόνος εκφόρτισης των σφονδύλων, τότε παρατηρείται μικρότερη αύξηση συχνότητας του δικτύου καθώς και μικρότερη μείωση του φορτίου. Συνεπώς, για διαταραχές, όπως αυτές που εξετάσαμε, όπου η συχνότητα πέφτει κάτω από το "όριο" των 49,8 Hz, είναι προτιμότερο ο χρόνος εκφόρτισης να είναι ο μικρότερος δυνατός και η ισχύς εξόδου από κάθε σύστημα σφονδύλου να είναι η μέγιστη δυνατή.

- Από τον Πίνακα 5.9 προκύπτει ότι οι 2 σειρές των σφονδύλων κατά τη λειτουργία τους αντιμετωπίζουν θετικά το πρόβλημα της υποσυχνότητας (κάτω από το "όριο" των 49,8 Hz), ενώ αυξήθηκε ο χρόνος κατά τον οποίο η συχνότητα του δικτύου είναι πάνω από το "όριο" των 50,2 Hz (υπερσυχνότητα).
- Η αύξηση του φορτίου στο δίκτυο, π.χ. κατά τις μεσημεριανές ώρες, οδηγεί σε μείωση της αύξησης της συχνότητας του δικτύου.

## 6.2 Προοπτικές

Σχετικά με τις ηλεκτρικές μηχανές και τη συμπεριφορά τους σε διαταραχές συχνοτήτων του δικτύου, θα ήταν επιθυμητός ένας ελεγκτής στον αντιστροφέα, όπου όταν διαπιστώνει ότι η συχνότητα του δικτύου μειώνεται κάτω από το επιτρεπτό όριο, να συμπεριφέρεται όπως οι απλές επαγωγικές μηχανές, δηλαδή να μειώνει την ισχύ της αντλίας ή και άλλων φορτίων που έχει αποφασίσει ο διαχειριστής ότι είναι ευέλικτα, εάν μειώνεται η συχνότητα του δικτύου, κάτι που κανονικά δεν γίνεται όπως παρατηρείτε από το Σχήμα 4.55.

Τέλος για τα συστήματα στρεφόμενων σφονδύλων, το μαθηματικό μοντέλο που αναπτύχθηκε στην συγκεκριμένη μεταπτυχιακή διατριβή, με το οποίο εξετάζεται η συμπεριφορά των συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας με σφονδύλους στη μεταβολή της συχνότητας του δικτύου, μπορεί να αποτελέσει αφετηρία για την ανάπτυξη ανάλογων μοντέλων στο προσεχές μέλλον. Πέρα, όμως, από τη μελέτη της συμπεριφοράς στρεφόμενων σφονδύλων στις μεταβολές της συχνότητας του ηλεκτρικού δικτύου, θα μπορούσε να μελετηθεί και η εξής περίπτωση:

- Ανάπτυξη μοντέλου με το οποίο ελέγχεται η υπερσυχνότητα του ηλεκτρικού δικτύου, μετά από ενεργοποίηση στρεφόμενων σφονδύλων.
- Επίδραση των στρεφόμενων σφονδύλων στις μονάδες διανεμημένης παραγωγής.
- Δημιουργία προσομοίωσης ηλεκτρικού δικτύου με συστήματα FESS στο Simulink.



## Βιβλιογραφία

- [1] Ν. Βοβός and Γ. Γιαννακόπουλος, *Εισαγωγή στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας*. 2008.
- [2] Μ. Σκανδαλάκη, “Βέλτιστη επέκταση συστήματος μεταφοράς σε απομονωμένα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας με μεγάλη διείσδυση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας,” 2016.
- [3] ΔΕΗ, “Ταυτότητα εταιρείας,” 2021. <https://www.dei.gr/Default.aspx?id=1144&nt=18>.
- [4] ΑΔΜΗΕ, “Διασύνδεση της Κρήτης με την Πελοπόννησο,” 2021. <https://www.admie.gr/erga/erga-diasyndeseis/diasyndesi-tis-kritis-me-tin-peloponniso>.
- [5] Α. Γιαντίδου, “Ετήσιο δελτίο εκμετάλλευσης συστήματος Κρήτης έτους 2018,” 2018.
- [6] Κ. Φιορέντζης, “Εκτίμηση της συνεισφοράς των πηγών διεσπαρμένης παραγωγής σε δείκτες αξιοπιστίας του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας της Κρήτης,” 2020.
- [7] Ι. Σπανός, “Δυναμική ανάλυση συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας με αιολική παραγωγή,” 2017.
- [8] Ν. Ταγκούλης, “Ανάλυση ευστάθειας τάσεως και συχνότητας σε αυτόνομο νησιωτικό σύστημα με χωρητική συμπεριφορά,” 2018.
- [9] Ε. Μπουντάκης, “Δυνατότητες εξοικονόμησης ενέργειας σε κινητήρια συστήματα και πιθανή συνεισφορά τους ως ευέλικτα φορτία,” 2012.
- [10] Α. Σακκάς, “Εξοικονόμηση ενέργειας και τεχνικές παρακολούθησης λειτουργίας σε αντλιοστάσια. Δυνατότητα λειτουργίας τους ως ευέλικτα φορτία,” 2012.
- [11] Μ. Γαϊτανάκης, “Δυνατότητες εξοικονόμησης ενέργειας σε οργανισμούς άρδευσης μέσω ευφύους μέτρησης,” 2018.
- [12] Δ. Γκιαουράκης, “Δ.Ε.Υ.Α. Μαλεβιζίου,” 2017.
- [13] S. J. Chapman, *Electric Machinery Fundamentals*. 2012.
- [14] Α. Βλάχος, *Ηλεκτρικές Μηχανές, Τόμος II*. Ίδρυμα Ευγενίδου, 2016.
- [15] Wikipedia, “Dahlander pole changing motor.” [https://en.wikipedia.org/wiki/Dahlander\\_pole\\_changing\\_motor](https://en.wikipedia.org/wiki/Dahlander_pole_changing_motor).
- [16] Schneider Electric, “Adjustable Frequency Controllers Application Guide,” 1995.
- [17] V. Balaraj, “How to Select a Variable Frequency Drive Based on Load Characteristics.”
- [18] Χ. Μπάνος, “Ανάλυση , Διαστασιολόγηση και Προσομοίωση στο PSIM συστημάτων ηλεκτροκίνησης με επαγωγικούς κινητήρες,” 2019.
- [19] Π. Τσιώλης, “Μοντελοποίηση Συστήματος Αποθήκευσης Ενέργειας με Σφόνδυλο (Flywheel Energy System Storage),” 2007.
- [20] B. Bolund, H. Bernhoff, and M. Leijon, “Flywheel energy and power storage systems,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 11, no. 2, pp. 235–258, 2007, doi: 10.1016/j.rser.2005.01.004.
- [21] Μ. Μπίτος, “Έλεγχος συστήματος αποθήκευσης ενέργειας με στρεφόμενη μάζα,” 2013.

- [22] Α. Παναγιωτοπούλου, “Ενεργειακή σύγκριση τεχνολογιών αποθήκευσης ενέργειας μέσης ισχύος,” 2016.
- [23] Ε. Θεοπούλου, “Δυνατότητες χρήσης συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας με προοπτική ηλεκτρικής δικτύωσης σε επίπεδο συνοικίας,” 2012.
- [24] Α. Rojas, “Flywheel Energy Matrix Systems – Today’s Technology , Tomorrow’s Energy Storage Solution.”
- [25] N. Hamsic *et al.*, “Increasing renewable energy penetration in isolated grids using a Flywheel Energy Storage System,” *POWERENG 2007 - Int. Conf. Power Eng. - Energy Electr. Drives Proc.*, no. May, pp. 195–200, 2007, doi: 10.1109/POWERENG.2007.4380112.
- [26] C. Silva, “New Solar Technology ABB’s Advanced Solutions for Solar Plants,” 2012.
- [27] AFS Trinity, “DC Power Management with a High Performance Flywheel,” 2002.
- [28] Beacon Power, “Beacon Power 400 Performance Specifications,” 2019.