



Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Κρήτης

Σχολή Τεχνολογικών Εφαρμογών

Τμήμα Ηλεκτρολογίας



**«ΜΕΛΕΤΗ ΣΥΝΔΕΣΗ ΜΙΚΡΗΣ  
ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ ΣΤΟ ΔΙΚΤΥΟ ΤΗΣ ΔΕΗ»**

**Εισηγητής Χρηστάκης Δημήτρης  
Σπουδαστής : Λεόντιος Χατζηρουσεας**

**Ηράκλειο 2010**



ΕΡΕΥΝΗΤΗ  
~~Διευθυντής~~  
Δ. Χατζηρουσέας







## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

### ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

### ΕΙΣΑΓΩΓΗ

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 : ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΕΣ ΠΗΓΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

12

- 1.1 Οι μορφές των ΑΠΕ
- 1.2 Οι βασικές μορφές των ΑΠΕ
  - 1.2.1 Ηλιακή ενέργεια
  - 1.2.2 Αιολική ενέργεια
- 1.3 Πλεονεκτήματα - μειονεκτήματα των ΑΠΕ
- 1.4 Ιστορική εξέλιξη
- 1.5 Χρησιμότητα αιολικής ενέργειας
- 1.6 Πώς λειτουργεί η ανεμογεννήτρια
- 1.7 Τύποι και τοπολογίες ανεμογεννήτρια
  - 1.7.1 ανεμογεννήτρια σταθερών στροφών (fixed speed)
  - 1.7.2 Οι ανεμογεννήτρια μεταβλητών στροφών (variable speed)
  - 1.7.3 Κατάταξη των Α/Γ ως προς τον τύπο των πτερυγίων τους
    - 1.7.3.1 Α/Γ με έλεγχο του βήματος των πτερυγίων (pitch control)
    - 1.7.3.2 Α/Γ με παθητικό αεροδυναμικό έλεγχο (passive stall control)
    - 1.7.3.3 Α/Γ με ενεργό αεροδυναμικό έλεγχο (active stall control)
  - 1.7.4 Βασικές τοπολογίες των Α/Γ
  - 1.7.5 Σταθερών στροφών με γεννήτρια επαγωγής κλωβού (βραχυκυκλωμένου δρομέα)
  - 1.7.6 Μεταβλητών στροφών με σύγχρονη πολυπολική γεννήτρια
  - 1.7.7 Μεταβλητών στροφών με Γεννήτρια Επαγωγής Διπλής Τροφοδότησης
- 1.8 Προβλήματα από την αξιοποίηση της αιολικής ενέργειας
- 1.9 Το ενεργειακό σύστημα της Ελλάδας
- 1.10 Επιλογή θέσης εγκατάστασης Α/Γ
- 1.11 Πρακτικά στοιχεία επιλογής ανεμογεννήτριας
- 1.12 Σύνδεση μικρής ανεμογεννήτριας στο σπίτι σας
- 1.13 Σύνδεση με το δίκτυο ή απομονωμένη λειτουργία
  - 1.13.1 Απόδοση αυτομάτων συστημάτων
- 1.14 Συστήματα Σταθερής Ταχύτητας (Σταθερής Συχνότητας Σταθερών στροφών)
  - 1.14.1 Λειτουργία ανεμογεννήτριας με μια ταχύτητα
  - 1.14.2 Λειτουργία ανεμογεννήτριας.: με δύο ταχύτητες
  - 1.14.3 Συστήματα Μεταβλητής Ταχύτητας (Σταθερής Συχνότητας Μεταβλητών Στροφών)
  - 1.14.4 Συστήματα μεταβλητής ταχύτητας με γεννήτρια διπλής τροφοδοσία
  - 1.14.5 Σύστημα μεταβλητής ταχύτητας με πλήρη μετατροπή
  - 1.14.6 ΜΕΤΑΤΡΟΠΗ ΑΙΟΛΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΕ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ CASCADE
    - 1.14.6.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΑΥΤΟΜΑΤΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ
    - 1.14.6.2 ΜΕΛΕΤΗ ΤΟΥ ΚΛΕΙΣΤΟΥ ΒΡΟΧΟΥ ΚΑΙ ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥ ΕΛΕΓΚΤΗ
- 1.15 ΔΙΑΣΥΝΔΕΣΗ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ ΜΕ ΤΟ ΔΙΚΤΥΟ ΜΕΣΩ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΩΝ ΙΣΧΥΟΣ
- 1.16 ΔΙΑΣΥΝΔΕΣΗ ΑΙΟΛΙΚΩΝ ΠΑΡΚΩΝ ΜΕΓΑΛΗΣ ΙΣΧΥΟΣ
- 1.17 Περιγραφή της υπό μελέτη Ανεμογεννήτριας και της εργαστηριακής Διάταξης



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 : ΓΕΝΝΗΤΡΙΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

46

- 2.1 Διάκριση εναλλακτών
  - 2.1.1 Είδη επαγωγικών μηχανών
- 2.2 Συχνότητα περιστροφής και σύγχρονη ταχύτητα περιστροφής
  - 2.2.α Αρχή λειτουργίας των επαγωγικών μηχανών εναλλασσόμενου ρεύματος
  - 2.2.β Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας
  - 2.2.γ Δομή Επαγωγικού Κινητήρα
- 2.3 Παραγωγή ΗΕΔ (Ηλεκτρεγερτική Δύναμη–Επαγόμενη τάση)
  - 2.3.α Υπολογισμός της ΗΕΔ και της ηλεκτρομαγνητικής ροπής
- 2.4 Γενική περιγραφή σύγχρονων γεννητριών
- 2.6 Ρύθμιση τάσης εναλλακτήρα
- 2.7 Λειτουργία υπό φορτίο
- 2.8 Χαρακτηριστικά εναλλακτών
- 2.9 Επιδόσεις της γεννήτριας
- 2.10 Απώλειες και βαθμός απόδοσης γεννήτριας
- 2.11 Τρόπος κατασκευής της γεννήτριας
  - 2.11.α Κατασκευή του στάτη
  - 2.11.β Κατασκευή του δρομέα
  - 2.11.γ Χαλύβδινη κατασκευή στήριξης

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΣΥΓΧΡΟΝΕΣ ΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ ΑΞΟΝΙΚΗΣ ΡΟΗΣ ΜΟΝΙΜΩΝ ΜΑΓΝΗΤΩΝ

74

- 3.1 Πλεονεκτήματα και εφαρμογές
  - 3.1.1 Διαμόρφωση Γεννήτριας Μονίμων Μαγνητών και Κυριότερα Λειτουργικά Χαρακτηριστικά
- 3.2 Βασικές τοπολογίες
  - 3.2.α Μονός δρομέας-Μονός στάτης: πυρήνας σιδήρου στον στάτη με αύλακες
  - 3.2.β Διπλός δρομέας-Μονός στάτης πυρήνας σιδήρου στον στάτη χωρίς αύλακες
  - 3.2.γ Διπλός Στάτης-Μονός δρομέας (εσωτερικός)
  - 3.2.δ Διπλός Δρομέας-Μονός Στάτης χωρίς πυρήνα σιδήρου
- 3.3 Σχέσεις υπολογισμού της μαγνητικής ροής και ηλεκτρομαγνητικής ροπής για γεννήτριες αξονικής ροής
- 3.4 Μορφή του τυλίγματος του στάτη και αριθμός των πόλων και των πηνίων
- 3.5 Ισοδύναμο κύκλωμα και απόδοση της γεννήτριας

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΑΝΟΡΘΩΤΗΣ ΓΕΦΥΡΑΣ ΕΙΣΑΓΩΓΗ - ΜΕΡΗ ΤΡΟΦΟΔΟΤΙΚΟΥ.[14]

84

- 4.1 Εκκίνηση Ανορθωτή[15]
- 4.2 Μη ελεγχόμενη πλήρης ανόρθωση με μετασχηματιστή μέσης λήψης.[2]
- 4.3 Μονοφασική ανορθωτική διάταξη με διόδους.[2]
  - 4.3.1 Κυκλώματα μονοφασικής ανόρθωσης και τυπολόγιο
  - 4.3.2 Τριφασική μη ελεγχόμενη ανορθωτική διάταξη.[2]
  - 4.3.3 Τριφασική ανόρθωση κοινού σημείου.[2]
  - 4.3.5 Ελεγχόμενη τριφασική ανόρθωση σε συνδεσμολογία γέφυρας.[2]
- 4.4 Ανυψωτής Τάσης

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΥΚΛΩΜΑΤΟΣ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΕΑ. 92 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΟΥΣ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΟΥΣ ΜΕΤΑΤΡΟΠΗΣ ΙΣΧΥΟΣ ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΟΥΣ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΕΙΣ



5.1	ΑΡΧΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΟΥ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΕΑ	
5.1.1	Πρώτη προσέγγιση Ισοδύναμο κύκλωμα με διακόπτες	
5.2.2	Δεύτερη προσέγγιση: Ισοδύναμο κύκλωμα με διόδους και διακόπτες	
5.3	ΜΟΝΟΦΑΣΙΚΟΙ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΕΙΣ	
5.3.1	Μονοφασικός inverter τύπου ημιγέφυρας	
5.3.2	Μονοφασικός inverter τύπου γέφυρας τετραγωνικού κύματος (square wave inverter)	
5.3.3	Μονοφασικός inverter τύπου γέφυρας ημιτετραγωνικού κύματος	
5.4	Τριφασικοί Inverters	
5.5	ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ SPWM	
5.5.1	ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ SPWM ΜΕ ΔΙΠΟΛΙΚΗ ΤΑΣΗ ΕΞΟΔΟΥ	
5.5.2	ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ SPWM ΜΕ ΜΟΝΟΠΟΛΙΚΗ ΤΑΣΗ ΕΞΟΔΟΥ	
5.6	ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ PWM ΜΕ ΜΟΝΟΠΟΛΙΚΗ ΤΑΣΗ ΕΞΟΔΟΥ	
5.6.1	Λειτουργία τετραγωνικής κυματομορφής	
5.3.2	Έλεγχος της εξόδου με απαλοιφή της τάσης	
5.6.3	Αξιοποίηση διακοπών σε αντιστροφής με πλήρη γέφυρα	
5.6.4	Κυμάτωση στην έξοδο του μονοφασικού αντιστροφέα	
5.6.5	ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΗΣ PUSH – PULL	
5.6.6	ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗ ΔΙΑΚΟΠΤΩΝ ΣΕ ΜΟΝΟΦΑΣΙΚΟΥΣ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΗΣ	
5.6.7	ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ PWM ΣΕ ΤΡΙΦΑΣΙΚΟΥΣ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΗΣ ΠΗΓΗΣ ΤΑΣΗΣ	
5.7	Γραμμική διαμόρφωση	
5.8	Υπερδιαμόρφωση	
5.9	ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΜΕ ΤΕΤΡΑΓΩΝΙΚΗ ΚΥΜΑΤΟΜΟΡΦΗ ΣΕ ΤΡΙΦΑΣΙΚΟΥ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΕΙΣ	
5.10	Αξιοποίηση Διακοπών σε Τριφασικούς Αντιστροφείς	
5.11	ΚΥΜΑΤΩΣΗ ΣΤΗΝ ΕΞΟΔΟ ΤΟΥ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΕΑ	
5.12	ΡΕΥΜΑ $I_{DC}$ ΠΛΕΥΡΑΣ	
5.13	ΑΓΩΓΗ ΔΙΑΚΟΠΤΩΝ ΣΕ ΤΡΙΦΑΣΙΚΟΥΣ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΕΙΣ	
5.14	Λειτουργία Τετραγωνικής Κυματομορφής	
5.15	Λειτουργία με διαμόρφωση PWM	
	<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΕΝΟΣ ΠΡΩΤΟΤΥΠΟΥ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΕΑ ΤΑΣΗΣ ΥΨΗΛΩΝ ΠΡΟΔΙΑΓΡΑΦΩΝ</b>	<b>124</b>
6.1	ΒΑΣΙΚΕΣ ΠΡΟΔΙΑΓΡΑΦΕΣ ΤΟΥ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΕΑ ΤΑΣΗΣ	
6.2.	ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΤΟΥ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΕΑ ΤΑΣΗΣ	
	<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΣΥΝΔΕΣΗΣ ΜΕ ΤΟ ΔΙΚΤΥΟ</b>	<b>130</b>
7.1	ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΣΥΝΔΕΣΗΣ ΜΟΝΟΦΑΣΙΚΟΥ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΕΑ ΜΕ ΤΟ ΔΙΚΤΥΟ (ΧΩΡΙΣ Μ/Σ)	
7.2	ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΣΥΝΔΕΣΗΣ ΜΟΝΟΦΑΣΙΚΟΥ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΕΑ ΜΕ ΤΟ ΔΙΚΤΥΟ (ΜΕ Μ/Σ)	
	<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8: ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΑΝΕΜΟΓΕΝΗΤΡΙΑΣ 5KW</b>	<b>136</b>
	<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ</b>	<b>140</b>





## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Ευχαριστώ πολύ την οικογένεια μου για την στήριξη που μου έδωσαν για να τελειώσω την πτυχιακή μου. Ευχαριστώ τους καθηγητές μου, κύριο Καρναβά, Μιναδάκης, Φραγκιαδάκης και κύριο Χρηστάκη Δημήτρη για τις πολύτιμες συμβουλές που μου έδωσαν, και τους λοιπούς καθηγητές μου για τις πολύτιμες γνώσεις που μου δώσανε στα μαθήματα τους.

Επίσης ευχαριστώ τον θείο μου Σάββα Τσημπογλου για τις πληροφορίες και τη βοήθεια που μου έδωσε όπως επίσης και τον ξάδελφο μου Μπάμπη για τις χρήσιμες σημειώσεις του.



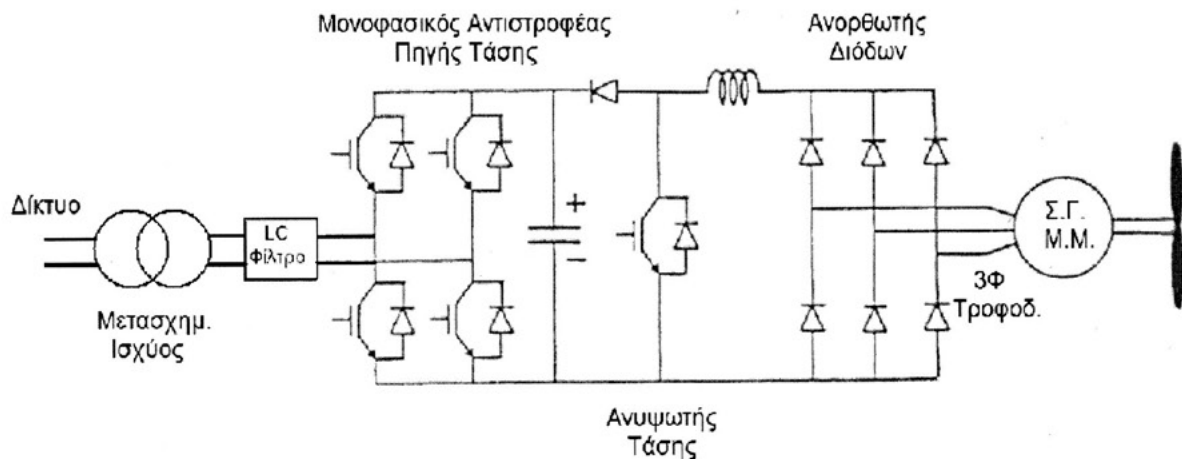


## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας έχουν μπει για τα καλά στη ζωή μας. Η μορφές των ήπιων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας που μπορεί να στραφεί η χώρα μας είναι η ηλιακή και η ανεμογεννήτριες για την παράγωγη ηλεκτρικής ενέργειας που χρησιμοποιούνται σε πλήθος εφαρμογών όπως σε οικιακές, βιομηχανικές εφαρμογές, ηλεκτρικά μέσα μεταφοράς.

Η παρούσα πτυχιακή διαπραγματεύεται τη διερεύνηση της λειτουργίας- ιδιοτήτων των υποσυστημάτων παραγωγής εναλλασσόμενης τάσης ενός αιολικού συστήματος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας συνδεδεμένο στο δίκτυο της ΔΕΗ. Το αιολικό σύστημα συγκροτείται από μία σύγχρονη γεννήτρια μόνιμων μαγνητών από τις διατάξεις ηλεκτρονικών ισχύος που μετατρέπουν αρχικά την εναλλασσόμενη τάση σε συνεχή και στη συνέχεια τη συνεχή τάση σε εναλλασσόμενη συχνότητας 50HZ για τη σύνδεση της με το δίκτυο.

Πιο συγκεκριμένα, χρησιμοποιούνται κατά σειρά μία γεννήτρια εναλλασσόμενης τάσης για την παραγωγή ηλεκτρικής εναλλασσόμενης τάσης, μια ανορθωτική διάταξη γέφυρας με διόδους για την ανόρθωση της τάσης, ένας μετατροπέας για την ανύψωση και σταθεροποίηση της τάσης τύπου Boost, ένας μονοφασικός αναστροφέας με MOSFET ελεγχόμενος με τη μέθοδο SPWM για τη σύνδεση της αυτόνομης ανεμογεννήτριας στα δίκτυα της ΔΕΗ ώστε να είμαστε σίγουροι ότι τηρούνται οι προϋποθέσεις ώστε να εξασφαλίζεται η σωστή λειτουργία των μονάδων και ότι δεν επρόκειτο να προκαλέσει ανεπίτρεπτες διαταραχές στην τάση του δικτύου και άρα δεν επηρεάζει τη λειτουργία των λοιπών συνδεδεμένων συσκευών στο δίκτυο. Τέλος ένας μονοφασικός μετασχηματιστής.





## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

### ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΕΣ ΠΗΓΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

#### 1.1 Οι μορφές των ΑΠΕ .[1]

Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας παρουσιάζονται με τις παρακάτω μορφές:

**Αιολική ενέργεια:** Ενέργεια που προέρχεται από τον άνεμο. Χρησιμοποιήθηκε παλιότερα για την άντληση νερού από πηγάδια καθώς και για μηχανικές εφαρμογές. Έχει αρχίσει να χρησιμοποιείται πλατιά για ηλεκτροπαραγωγή.

**Ηλιακή ενέργεια:** Χρησιμοποιείται περισσότερο για θερμικές εφαρμογές ενώ η χρήση της για την παραγωγή ηλεκτρισμού έχει αρχίσει να κερδίζει έδαφος, με την βοήθεια της πολιτικής προώθησης των ΑΠΕ από το ελληνικό κράτος και την Ευρωπαϊκή Ένωση.

**Υδατοπτώσεις:** Είναι τα γνωστά υδροηλεκτρικά έργα, που στο πεδίο των ήπιων μορφών ενέργειας εξειδικεύονται περισσότερο στα μικρά υδροηλεκτρικά. Είναι η πιο διαδεδομένη μορφή ανανεώσιμης ενέργειας.

**Γεωθερμική ενέργεια:** Προέρχεται από τη θερμότητα που παράγεται απ' τη ραδιενεργό αποσύνθεση των πετρωμάτων της γης. Είναι εκμεταλλεύσιμη εκεί όπου η θερμότητα αυτή ανεβαίνει με φυσικό τρόπο στην επιφάνεια, π.χ. στους θερμοπίδακες ή στις πηγές ζεστού νερού. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί είτε απευθείας για θερμικές εφαρμογές είτε για την παραγωγή ηλεκτρισμού. Η Ισλανδία καλύπτει το 80-90% των ενεργειακών της αναγκών με γεωθερμική ενέργεια.

**θαλάσσια ενέργεια:** Οι ωκεανοί καλύπτουν το μεγαλύτερο μέρος του πλανήτη, και μπορεί να αποτελέσουν μια τεράστια αποθήκη ενέργειας. Η ενέργεια αυτή έχει τη μορφή κινητικής ενέργειας που λαμβάνεται από τα κύματα, τις παλίρροιες, τα θαλάσσια ρεύματα, καθώς και τη μορφή θερμικής ενέργειας, που λαμβάνεται από τη μετατροπή της θερμικής ενέργειας των ωκεανών.

**Η κυματική ενέργεια:** Η ενέργεια που περικλείουν τα κύματα, η οποία ακόμα αποτελεί αντικείμενο έρευνας και πειραματισμού για τον ικανοποιητικό τρόπο αξιοποίησης της, αποτελεί μια άλλη μορφή ενέργειας, που έμμεσα οφείλεται στον ήλιο. Όσο μεγαλύτερο είναι το ύψος και το μήκος ενός κύματος, τόσο μεγαλύτερα ποσά ενέργειας μεταφέρει.

**Ενέργεια από την παλίρροια:** Η παλίρροια, δηλαδή το να αποσύρεται η θάλασσα (άμπωτη) και μετά από ορισμένες ώρες, να επιστρέφει (πλημμυρίδα), αποτελεί μορφή έμμεσης ηλιακής ενέργειας. Οι παλίρροιες, οφείλονται σε δυνάμεις που δημιουργούνται στις υδάτινες μάζες από το πεδίο βαρύτητας, καθώς και από την περιστροφή της γης. Διαρκούν για συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα και έχουν συγκεκριμένη κατεύθυνση. Σήμερα, για λόγους εξοικονόμησης ενέργειας καθώς και περιβαλλοντικούς, το ενδιαφέρον ανεμογεννήτριας αυτή τη μορφή ενέργειας είναι έντονο. Το κόστος των εγκαταστάσεων παλιρροϊκής ενέργειας είναι πολύ μεγάλο. Εντούτοις, μακροπρόθεσμα θεωρείται μια ενδιαφέρουσα επένδυση επειδή οι εγκαταστάσεις αυτές έχουν χαμηλό κόστος λειτουργίας και συντήρησης, όπως επίσης και το γεγονός ότι δεν υπάρχει κόστος καυσίμου και δεν δημιουργούνται καυσαέρια.

**θερμική ενέργεια από τους ωκεανούς:** Εκεί όπου υπάρχουν θαλάσσια ρεύματα από τους πόλους προς τον ισημερινό, και όπου ο ήλιος, μεταφέροντας μεγάλα ποσά θερμότητας, θερμαίνει το νερό στην επιφάνεια της θάλασσας μέχρι και 25 °C. (Στις τροπικές περιοχές, η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ επιφάνειας και βάθους 600



από την ακτινοβολία, η τεχνολογία των παθητικών συστημάτων μπορεί να αυξήσει την συνεισφορά της ηλιακής ενέργειας στις ανάγκες θέρμανσης, ελαττώνοντας την κατανάλωση καυσίμου για τη θέρμανση του χώρου. Μερικά, χαρακτηριστικά παθητικών ηλιακών συστημάτων προσθέτουν λίγο ή και καθόλου στο κόστος κατασκευής του κτιρίου και μπορούν να επιτύχουν αποτελεσματική απόσβεση κόστους σε μικρή ή σε σχετικά μικρή χρονική περίοδο.

### 1.2.2 Αιολική ενέργεια.[1]

Με τον όρο αιολική ενέργεια εννοούμε την δέσμευση της κινητικής ενέργειας του ανέμου, που προέρχεται από τη μετακίνηση αερίων μαζών της ατμόσφαιρας και τη μετατροπή της σε ηλεκτρική ή μηχανική. Η αιολική ενέργεια είναι σήμερα η πιο φτηνή απ' όλες τις υπάρχουσες ήπιες μορφές και είναι ανεξάντλητη. Η προσπάθεια για την κατασκευή ανάλογων μηχανών από τους ανθρώπους ξεκίνησε από την αρχαιότητα και συνεχίζεται μέχρι τις μέρες μας όπου η συγκεκριμένη τεχνολογία βρίσκεται σε πολύ υψηλά επίπεδα με συνεχώς αυξανόμενη τάση για περαιτέρω ανάπτυξη. Σήμερα υπάρχουν πολλοί τύποι Α/Γ οι οποίοι εφαρμόζονται ανάλογα με την επιθυμητή ισχύ, τα γεωγραφικά χαρακτηριστικά και το αιολικό δυναμικό του κάθε τόπου. Το τεχνικά εκμεταλλεύσιμο συνολικό δυναμικό στην Ελλάδα, όπως προκύπτει με βάση τις σημερινές τεχνολογικές δυνατότητες και τους βασικούς περιορισμούς οροθέτησης αιολικών πάρκων εκτιμάται σε 11.000 MW για ταχύτητες ανέμου πάνω από 6 m/sec (για σύγκριση αναφέρεται ότι η συνολική εγκατεστημένη ισχύς όλων των ηλεκτροπαραγωγικών μονάδων της ΔΕΗ είναι περίπου 9.500 MW). Όλες οι περιφέρειες της χώρας εμφανίζουν αξιόλογο αιολικό δυναμικό, το μεγαλύτερο όμως ποσοστό συγκεντρώνεται στις νησιωτικές περιοχές, την ανατολική Στερεά Ελλάδα και την ανατολική Πελοπόννησο. Μέχρι το 2000 είχαν εγκατασταθεί στην Ελλάδα περίπου 200 MW από τη ΔΕΗ και από ιδιωτικούς φορείς, ενώ οι εκκρεμείς αιτήσεις αδειοδότησης υπερβαίνουν τα 800 MW, γεγονός που καταγράφει την πρόθεση των επενδυτών και τη δυναμική που αναδεικνύεται. Η εμπειρία στον χώρο της αιολικής τεχνολογίας είναι ήδη σημαντική. Έτσι, κάποια προβλήματα τεχνικής φύσεως που παρουσιάστηκαν στις πρώτες απόπειρες εγκατάστασης ανεμογεννήτριας έχουν πλέον ξεπεραστεί. Σαν συνέπεια της εμπειρίας αυτής, η διάρκεια ζωής των αιολικών σταθμών παρουσιάζει συνεχώς αυξητικές τάσεις, όπως και ο αριθμός των εγκατεστημένων αιολικών σταθμών σε όλο τον κόσμο και στην Ελλάδα. Τα παραπάνω πιστοποιούν την αξιοπιστία των αιολικών συστημάτων.

Τα νησιά του Αιγαίου, μαζί με την Εύβοια και την Κρήτη διαθέτουν το υψηλότερο αιολικό δυναμικό στην Ελλάδα και θεωρούνται από τις πλέον ευνοούμενες περιοχές της Ευρώπης από πλευράς αιολικής ενέργειας. Το υψηλό αυτό δυναμικό αντανακλάται στον υψηλό συντελεστή εκμετάλλευσης των Ανεμογεννήτρια που δείχνει το ποσοστό της ετήσιας παραγόμενης ενέργειας σε σχέση με την ενέργεια που θα παραγόταν, εάν οι Α/Γ λειτουργούσαν συνεχώς (8760 ώρες το χρόνο) στην ονομαστική τους ισχύ. Πρέπει να τονιστεί ότι, τα υψηλά αιολικά δυναμικά δεν συνοδεύονται πάντα από εξίσου υψηλές οικονομικές αποδόσεις των επενδύσεων διότι υπεισέρχεται ο παράγοντας του κόστους εγκατάστασης και λειτουργίας των αιολικών σταθμών. Πέρα από τα οικονομικά οφέλη, υπάρχει πάντα άμεση η ανάγκη της προστασίας του περιβάλλοντος και της σημαντική απεξάρτησης από τα εισαγόμενα καύσιμα. Η αιολική ενέργεια είναι καθαρή ενέργεια, απεριόριστη, άμεσα εκμεταλλεύσιμη και φιλική προς το περιβάλλον.

Γενικά, η στάση της κοινής γνώμης απέναντι στην εγκατάσταση Αιολικών Σταθμών είναι θετική. Αν και μπορεί να υπάρξουν κάποια προβλήματα οπτικής εναρμόνισης με

το περιβάλλον, ιδιαίτερα σε μικρά νησιά με παραδοσιακή αρχιτεκτονική, σε γενικές γραμμές οι αιολικοί σταθμοί εγκαθίστανται μακριά από κατοικημένες περιοχές. Συνεπώς, προβλήματα θορύβου και οπτικής ενόχλησης είναι σχεδόν ανύπαρκτα. Σε ότι αφορά στις μηχανές αξιοποίησης του αιολικού δυναμικού, διακρίνονται τρεις κατηγορίες:

Ανεμογεννήτριες έως 300 kW, που αποτελούν το αντιπροσωπευτικότερο εμπορικό μέγεθος της παρερχόμενης τεχνολογικής γενιάς και είναι κατ' ουσία μία μέση τιμή της αντίστοιχης περιοχής ισχύος (150 - 450 kW)

Ανεμογεννήτριες 600 kW, που αποτελούν το αντιπροσωπευτικότερο εμπορικό μέγεθος της σημερινής αιολικής τεχνολογίας και μέση τιμή της σημερινής περιοχής ισχύων (450 - 750 kW)

Ανεμογεννήτριες 1500 kW, που φαίνονται να αποτελούν το αντιπροσωπευτικότερο εμπορικό μέγεθος μιας μελλοντικής γενιάς ανεμογεννητριών για μεγάλα αιολικά πάρκα. Από συγκρίσεις που έχουν γίνει έως τώρα, σχετικά με τις 3 αυτές κατηγορίες Α/Γ παρατηρούνται τα εξής:

Οι μικρότερες Α/Γ πετυχαίνουν μεγαλύτερη ενεργειακή απόδοση ανά εγκατεστημένο kW, συγκριτικά με εκείνες των 600 και 1500 kW. Αυτό οφείλεται στις καιρικές συνθήκες που τις ευνοούν. Για το λόγω αυτό οι συγκεκριμένες Α/Γ έχουν αυξημένο συντελεστή εκμετάλλευσης. Παρά τη σχετικά χαμηλή ενεργειακή τους απόδοση οι ανεμογεννήτρια 1500 kW, παρουσιάζουν αισθητά χαμηλότερο κόστος εγκατάστασης ανά kW από εκείνες τις ανεμογεννήτρια των 600 και κυρίως 300 kW. Έτσι, αποτελούν πολύ ελκυστικότερες επενδύσεις, παρουσιάζοντας πιο σύντομη περίοδο αποπληρωμής. Τέλος, επισημαίνεται ότι, τα αποτελέσματα των προηγούμενων μελετών, βασίζονται στην ακρίβεια και στην αξιοπιστία των διαθέσιμων καιρικών στοιχείων. Η ευαισθησία των αιολικών μηχανών σε πιθανές αποκλίσεις των παραμέτρων του αιολικού δυναμικού από τις προσδοκώμενες τιμές, μπορεί να είναι μεγάλη. Επιπλέον σημειώνεται ότι, εξαιτίας της εξάρτησης των καιρικών συνθηκών από το ανάγλυφο του εδάφους, απαιτούνται ξεχωριστές μετεωρολογικές μετρήσεις για κάθε τοποθεσία που κρίνεται κατάλληλη για την εγκατάσταση αιολικού σταθμού

### 1.3 Πλεονεκτήματα - μειονεκτήματα των ΑΠΕ.[1]

Παρακάτω συνοψίζονται τα κυριότερα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των ΑΠΕ, έτσι όπως αυτά προκύπτουν από την υφιστάμενη τεχνολογία και τις πρακτικές αξιολόγησής τους

#### Πλεονεκτήματα

- Είναι φιλικές προς το περιβάλλον, έχοντας ουσιαστικά μηδενικά κατάλοιπα και απόβλητα.
- Είναι πρακτικά ανεξάντλητες σε αντίθεση με τα ορυκτά καύσιμα.
- Μπορεί να βοηθήσουν ενεργειακά μικρές και αναπτυσσόμενες χώρες, καθώς και να αποτελέσουν την εναλλακτική πρόταση σε σχέση με την οικονομία του πετρελαίου.
- Εφαρμόζονται ευέλικτα και μπορούν να παράγουν ενέργεια ανάλογη με τις ανάγκες τοπικών πληθυσμών, καταργώντας την ανάγκη για τεράστιες μονάδες παραγωγής ενέργειας (καταρχήν για την ύπαιθρο) αλλά και για μεταφορά της ενέργειας σε μεγάλες αποστάσεις.
- Ο εξοπλισμός είναι απλός στην κατασκευή και τη συντήρηση και έχει μεγάλο χρόνο ζωής.

- Απαντούν στο ενεργειακό πρόβλημα για τη σταθεροποίηση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα και των υπόλοιπων αερίων του θερμοκηπίου. Επιπλέον, υποκαθιστώντας τους σταθμούς παραγωγής ενέργειας από συμβατικές πηγές οδηγούν σε μειωμένη ρύποι εκπομπών από άλλους ρυπαντές π.χ. οξείδια θείου και αζώτου που προκαλούν την όξινη βροχή.
- Είναι εγχώριες πηγές ενέργειας και συνεισφέρουν στην ενίσχυση της ενεργειακής ανεξαρτησίας και της ασφάλειας του ενεργειακού εφοδιασμού σε εθνικό επίπεδο.
- Προσφέρουν τη δυνατότητα ορθολογικής αξιοποίησης των ενεργειακών πόρων, καλύπτοντας ένα ευρύ φάσμα των ενεργειακών αναγκών των χρηστών (π.χ. ηλιακή ενέργεια για θερμότητα χαμηλών θερμοκρασιών, αιολική ενέργεια για ηλεκτροπαραγωγή).
- Έχουν συνήθως χαμηλό λειτουργικό κόστος που δεν επηρεάζεται από τις διακυμάνσεις της διεθνούς οικονομίας και ειδικότερα των τιμών των συμβατικών καυσίμων.
- Οι επενδύσεις των ΑΠΕ δημιουργούν σημαντικό αριθμό νέων θέσεων εργασίας, ιδιαίτερα σε τοπικό επίπεδο.
- Μπορούν να αποτελέσουν σε πολλές περιπτώσεις πυρήνα για την αναζωογόνηση οικονομικά και κοινωνικά υποβαθμισμένων περιοχών και πόλο για την τοπική ανάπτυξη, με την προώθηση ανάλογων επενδύσεων (π.χ. καλλιέργειες θερμοκηπίου με τη χρήση γεωθερμικής ενέργειας).
- Δίνουν τη δυνατότητα επιλογής της κατάλληλης μορφής ενέργειας που είναι προσαρμοσμένη στις ανάγκες του χρήστη.
- Οι εγκαταστάσεις εκμετάλλευσης των ΑΠΕ διατίθενται σε μικρά μεγέθη και έχουν μικρή διάρκεια κατασκευής, επιτρέποντας έτσι τη γρήγορη ανταπόκριση της προσφοράς προς τη ζήτηση ενέργειας, με επαναλαμβανόμενα συστήματα σε πολλές περιπτώσεις.

### Μειονεκτήματα

- Έχουν αρκετά μικρό συντελεστή απόδοσης, της τάξης του 30% ή και χαμηλότερο. Συνεπώς απαιτείται αρκετά μεγάλο αρχικό κόστος εφαρμογής σε μεγάλη επιφάνεια γης. Για αυτό το λόγο μέχρι τώρα χρησιμοποιούνται σαν συμπληρωματικές πηγές ενέργειας.
- Για τον παραπάνω λόγω προς το παρόν δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την κάλυψη των αναγκών μεγάλων αστικών κέντρων.
- Η παροχή και απόδοση τους εξαρτάται από την εποχή του έτους αλλά και από το γεωγραφικό πλάτος και το κλίμα της περιοχής στην οποία εγκαθίστανται.
- Για τις Α/Γ υπάρχει η άποψη ότι δεν είναι κομψές από αισθητική άποψη κι ότι προκαλούν θόρυβο και θανάτους πουλιών. Με την εξέλιξη όμως της τεχνολογίας τους και την προσεκτικότερη επιλογή χώρων εγκατάστασης (π.χ. σε πλατφόρμες στην ανοιχτή θάλασσα) αυτά τα προβλήματα μπορούν να αντιμετωπιστούν.
- Σε περιπτώσεις διασύνδεσης της αιολικής εγκατάστασης ή της ηλιακής με το ηλεκτρικό δίκτυο η παραγόμενη ενέργεια δεν πληροί πάντοτε τις τεχνικές απαιτήσεις του δικτύου, με αποτέλεσμα να είναι απαραίτητη η τοποθέτηση αυτοματισμών ελέγχου, μηχανημάτων ρύθμισης τάσεως και συχνότητας, καθώς και ελέγχου της άεργης ισχύος. Η εξέλιξη της τεχνολογίας σήμερα έχει δώσει λύσεις στα περισσότερα από τα αναφερόμενα προβλήματα, ιδιαίτερα με



την κατασκευή Α/Γ μεταβλητού βήματος (pitch control) και μεταβλητών στροφών. Παρόλα αυτά υπάρχει κάποιο αυξημένο κόστος για τη βελτίωση των χαρακτηριστικών της παραγόμενης ενέργειας, το οποίο προστίθεται στο συνολικό κόστος της παραγόμενης kWh. Επίσης σε περιπτώσεις διασύνδεσης με το ηλεκτρικό δίκτυο, η διείσδυση της παραγωγής από τις ΑΠΕ δεν μπορεί να ξεπερνά το 25% για λόγους ευστάθειας του συστήματος.

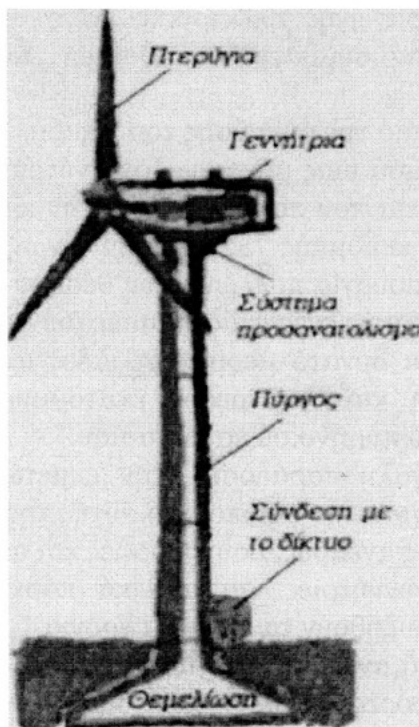
- Για τα υδροηλεκτρικά έργα λέγεται ότι προκαλούν έκλυση μεθανίου από την αποσύνθεση των φυτών που βρίσκονται κάτω από το νερό κι έτσι συντελούν στο φαινόμενο του θερμοκηπίου και ότι αλλάζουν το μικροκλίμα της περιοχής.
- Το διεσπαρμένο δυναμικό τους είναι δύσκολο να συγκεντρωθεί σε μεγάλα μεγέθη ισχύος, να μεταφερθεί και να αποθηκευτεί. Έχουν χαμηλή πυκνότητα ισχύος και ενέργειας και συνεπώς για μεγάλες ισχύς απαιτούνται συχνά εκτεταμένες εγκαταστάσεις. Παρουσιάζουν συχνά διακυμάνσεις στη διαθεσιμότητα τους που μπορεί να είναι μεγάλης διάρκειας απαιτώντας την εφεδρεία άλλων ενεργειακών πηγών (Υ/Σ) ή γενικά δαπανηρές μεθόδους αποθήκευσης. Η χαμηλή διαθεσιμότητά τους συνήθως οδηγεί σε χαμηλό συντελεστή χρησιμοποίησης των εγκαταστάσεων εκμετάλλευσής τους. Το κόστος επένδυσης ανά μονάδα εγκατεστημένης ισχύος σε σύγκριση με τις σημερινές τιμές των συμβατικών καυσίμων είναι ακόμη υψηλό

#### 1.4 Ιστορική εξέλιξη. [2]

Ο ανεμόμυλος χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά ως ανεμογεννήτρια το 1890 όταν εγκαταστάθηκε πάνω σε χαλύβδινο πύργο ο ανεμόμυλος του Π. Λα Κούρ στη Δανία, με ισχία με σχισμές και διπλά πτερύγια αυτόματης μετάπτωσης προς τη διεύθυνση του ανέμου. Μετά τον Α' Παγκόσμιο πόλεμο, έγιναν πειράματα με ανεμόμυλους που είχαν ισχία αεροτομής, δηλαδή όμοια με πτερύγια αεροπορικής έλικας. Το 1931 μια τέτοια ανεμογεννήτρια εγκαταστάθηκε στην Κριμαία και η παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς διοχετευόταν στο τμήμα χαμηλής τάσης του τοπικού δικτύου. Πραγματικές ανεμογεννήτριες με δύο πτερύγια λειτούργησαν κατά στις ΗΠΑ κατά τη δεκαετία του 1940, στην Αγγλία στη δεκαετία του 1950 καθώς και στη Γαλλία. Η πιο πετυχημένη ανεμογεννήτρια αναπτύχθηκε στη Δανία από τον J. Juul με τρία πτερύγια αλληλοσυνδεόμενα μεταξύ τους και με έναν πρόβολο στο μπροστινό μέρος του άξονα περιστροφής. Στην Ολλανδία εκτελέστηκαν πειράματα από τον F. G. Pigeaud με αντικείμενο τη μετασκευή των παλαιών ανεμόμυλων άλεσης δημητριακών, έτσι ώστε η πλεονάζουσα ενέργεια να χρησιμοποιείται για ηλεκτροπαραγωγή. Χρησιμοποιήθηκε ένας ασύγχρονος ηλεκτροκινητήρας που κινούσε τον ανεμόμυλο (σε περίπτωση άπνοιας) ή λειτουργούσε σαν γεννήτρια, όταν φυσούσε.

Ο μηχανισμός μετάδοσης κίνησης περιλάμβανε συμπλέκτη παράκαμψης με σκοπό ο ηλεκτροκινητήρας να μην κινεί τα ιστία παρά μόνο να εκτελεί χρήσιμο έργο. Η οροφή στρεφόταν με τη βοήθεια σερβοκινητήρα που ελεγχόταν από έναν ανεμοδείκτη. Μετά τον Β' Παγκόσμιο πόλεμο πολλοί περίμεναν ότι η αιολική ενέργεια θα συνέβαλλε σημαντικά στην παραγωγή ηλεκτρισμού, αλλά οι προσπάθειες ανάπτυξης ανεμογεννητριών ατόνησαν μέχρι τις αρχές της δεκαετίας του 1970. Οι προσπάθειες αυτές ξανάρχισαν πιο έντονες μετά την πρώτη πετρελαϊκή κρίση (1973) και στηρίχθηκαν κατά μεγάλο μέρος στην σύγχρονη αεροδιαστημική τεχνολογία. Έτσι αναπτύχθηκαν διάφοροι τύποι ανεμογεννητριών και στις αρχές της δεκαετίας του 1980 διατίθονταν στο εμπόριο συγκροτήματα μικρής ισχύος (μέχρι 20-25 kW) ενώ είχαν κατασκευαστεί και ανεμογεννήτριες μεγαλύτερης ισχύος (3-4 MW). Οι ανεμογεννήτριες προηγμένης τεχνολογίας που παρουσιάζουν το μεγαλύτερο

ενδιαφέρον είναι κυρίως δύο τύπων: ανεμογεννήτριες οριζοντίου άξονα με πτερύγια και ανεμογεννήτριες Νταριέ με κατακόρυφο άξονα (από τον Γάλλο G. J. M .Darrieus που τις εφεύρε το 1925).



Σχήμα 1.1

### 1.5 Χρησιμότητα αιολικής ενέργειας. [2]

Η συστηματική εκμετάλλευση του αξιόλογου αιολικού δυναμικού της χώρας μας θα συμβάλει στην αύξηση της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με ταυτόχρονη εξοικονόμηση σημαντικών ποσοτήτων συμβατικών καυσίμων, που συνεπάγεται συναλλαγματικά οφέλησε σημαντικό περιορισμό της ρύπανσης του περιβάλλοντος, αφού έχει υπολογισθεί ότι η παραγωγή ηλεκτρισμού μιας μόνο ανεμογεννήτριας ισχύος 550 KW σε ένα χρόνο , υποκαθιστά την ενέργεια που παράγεται από την καύση 2.700 βαρελιών πετρελαίου, δηλαδή αποτροπή της εκπομπής 735 περίπου τόνων CO<sub>2</sub> ετησίως καθώς και 2 τόνων άλλων ρύπων στη δημιουργία πολλών νέων θέσεων εργασίας, αφού εκτιμάται ότι για κάθε νέο Μεγαβάτ αιολικής ενέργειας δημιουργούνται 14 νέες θέσεις εργασίας.

Υπολογίζεται ότι είναι δυνατό μερικές χιλιάδες ανεμογεννήτριες να παράγουν την ενέργεια που δίνει η καύση μερικών εκατομμυρίων βαρελιών πετρελαίου ή η λειτουργία ενός μικρού πυρηνικού εργοστασίου.

Η χώρα μας, με μεγάλη παράδοση στην εκμετάλλευση της αιολικής ενέργειας, προσφέρεται ιδιαίτερα για την αξιοποίηση αυτής της ανανεώσιμης και καθαρής πηγής αφού διαθέτει ισχυρούς ανέμους, βουνοκορφές και απομονωμένα νησιά.

Μεμονωμένες ανεμογεννήτριες και αιολικά πάρκα λειτουργούν ήδη σε αρκετές περιοχές, με τάση να αυξηθούν τα επόμενα χρόνια.

Η αιολική ενέργεια και ανεξάντλητη (αφού ο ήλιος θα φροντίζει πάντα να υπάρχουν θερμοκρασιακές διαφορές μεταξύ των διάφορων περιοχών της γης, ώστε να προκαλούνται οι άνεμοι), δηλαδή ανανεώσιμη, αλλά και καθαρή, "φιλική" προς το περιβάλλον (αφού η μετατροπή της σε ηλεκτρική δεν το επιβαρύνει).

### 1.5 Χρησιμότητα αιολικής ενέργειας. [2]

Η συστηματική εκμετάλλευση του αξιόλογου αιολικού δυναμικού της χώρας μας θα συμβάλει:

στην αύξηση της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με ταυτόχρονη εξοικονόμηση σημαντικών ποσοτήτων συμβατικών καυσίμων, που συνεπάγεται συναλλαγματικά οφέλη.

σε σημαντικό περιορισμό της ρύπανσης του περιβάλλοντος, αφού έχει υπολογισθεί ότι η παραγωγή ηλεκτρισμού μιας μόνο ανεμογεννήτριας ισχύος 550 KW σε ένα χρόνο, υποκαθιστά την ενέργεια που παράγεται από την καύση 2.700 βαρελιών πετρελαίου, δηλαδή αποτροπή της εκπομπής 735 περίπου τόνων CO<sub>2</sub> ετησίως καθώς και 2 τόνων άλλων ρύπων στη δημιουργία πολλών νέων θέσεων εργασίας, αφού εκτιμάται ότι για κάθε νέο Μεγαβάτ αιολικής ενέργειας δημιουργούνται 14 νέες θέσεις εργασίας.

Υπολογίζεται ότι είναι δυνατό μερικές χιλιάδες ανεμογεννήτριες να παράγουν την ενέργεια που δίνει η καύση μερικών εκατομμυρίων βαρελιών πετρελαίου ή η λειτουργία ενός μικρού πυρηνικού εργοστασίου.

Η χώρα μας, με μεγάλη παράδοση στην εκμετάλλευση της αιολικής ενέργειας, προσφέρεται ιδιαίτερα για την αξιοποίηση αυτής της ανανεώσιμης και καθαρής πηγής αφού διαθέτει ισχυρούς ανέμους, βουνοκορφές και απομονωμένα νησιά.

Μεμονωμένες ανεμογεννήτριες και αιολικά πάρκα λειτουργούν ήδη σε αρκετές περιοχές, με τάση να αυξηθούν τα επόμενα χρόνια.

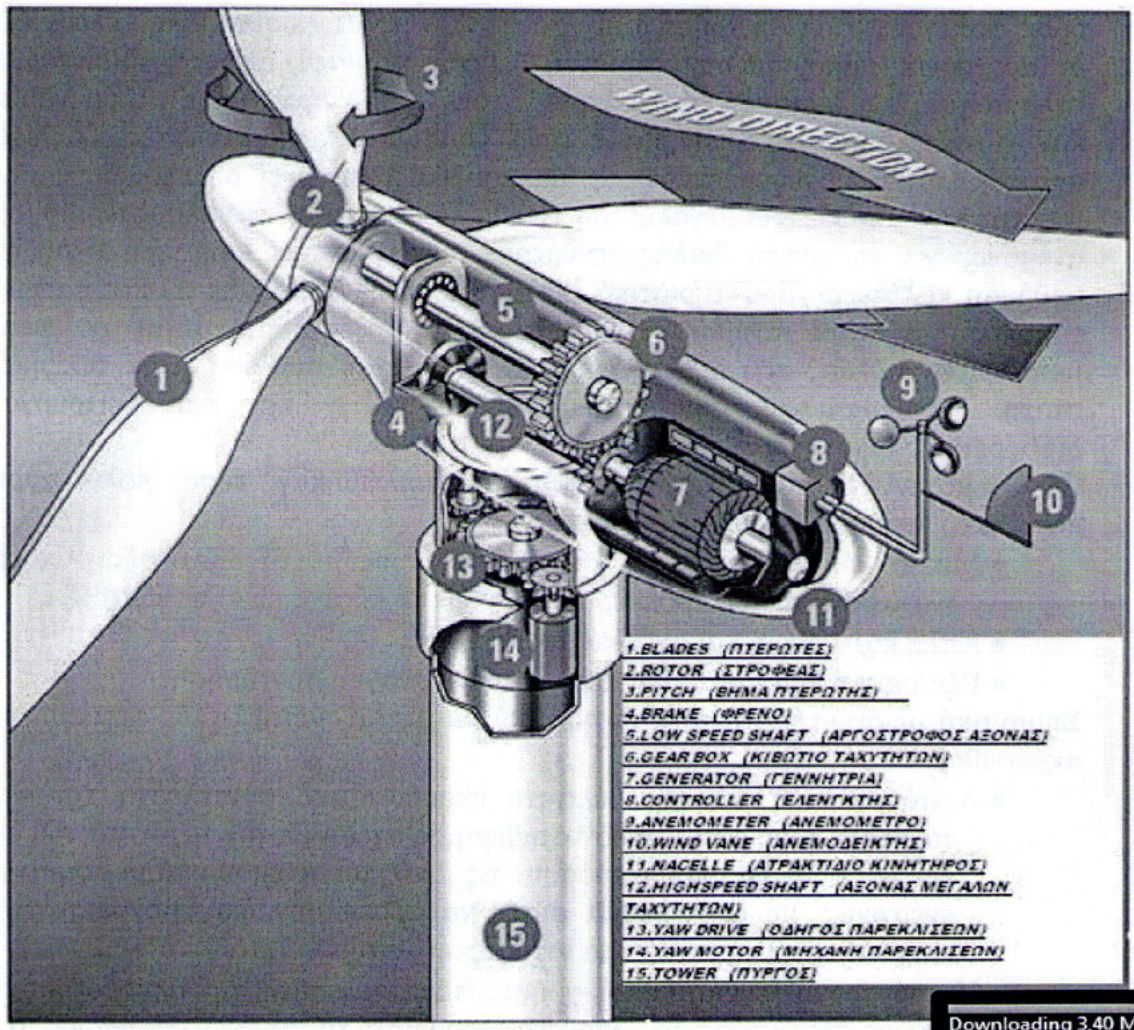
Η αιολική ενέργεια και ανεξάντλητη (αφού ο ήλιος θα φροντίζει πάντα να υπάρχουν θερμοκρασιακές διαφορές μεταξύ των διάφορων περιοχών της γης, ώστε να προκαλούνται οι άνεμοι), δηλαδή ανανεώσιμη, αλλά και καθαρή, "φιλική" προς το περιβάλλον (αφού η μετατροπή της σε ηλεκτρική δεν το επιβαρύνει).

#### 1.6 Πώς λειτουργεί η ανεμογεννήτρια. [3]

Ο άνεμος περιστρέφει τα πτερύγια μιας ανεμογεννήτριας, τα οποία είναι συνδεδεμένα με ένα περιστρεφόμενο άξονα. Ο άξονας περνάει μέσα σε ένα κιβώτιο μετάδοσης της κίνησης όπου αυξάνεται η ταχύτητα περιστροφής. Το κιβώτιο συνδέεται με έναν άξονα μεγάλης ταχύτητας περιστροφής ο οποίος κινεί μια γεννήτρια παραγωγής ηλεκτρικού ρεύματος. Αν η ένταση του ανέμου ενισχυθεί πάρα πολύ, η τουρμπίνα έχει ένα φρένο που περιορίζει την υπερβολική αύξηση περιστροφής των πτερυγίων για να περιοριστεί η φθορά της και να αποφευχθεί η καταστροφή της.

Η ταχύτητα του ανέμου πρέπει να είναι περισσότερο από 15 kwh για να μπορέσει η μια κοινή τουρμπίνα να παράγει ηλεκτρισμό. Συνήθως παράγουν 50-300 KW η κάθε μία. Ένα kw ηλεκτρικού ρεύματος μπορεί να ανάψει 100 λάμπες των 100w. Καθώς η γεννήτρια περιστρέφεται παράγει ηλεκτρισμό με τάση 25.000 volt. Το ηλεκτρικό ρεύμα περνάει πρώτα από ένα μετασχηματιστή στην ηλεκτροπαραγωγική μονάδα ο οποίος ανεβάζει την τάση του στα 400.000 volt. Όταν το ηλεκτρικό ρεύμα διανύει μεγάλες αποστάσεις είναι καλύτερα να έχουμε υψηλή τάση. Τα μεγάλα, χοντρά σύρματα της μεταφοράς του ηλεκτρικού ρεύματος είναι κατασκευασμένα από χαλκό ή αλουμίνιο για να υπάρχει μικρότερη αντίσταση στη μεταφορά του ρεύματος. Όσο μεγαλύτερη είναι η αντίσταση του σύρματος τόσο πιο πολύ θερμαίνεται. Έτσι κάποιο ποσό ηλεκτρικής ενέργειας χάνεται επειδή μετατρέπεται σε θερμική ενέργεια. Τα σύρματα μεταφοράς ρεύματος καταλήγουν σε ένα υποσταθμό όπου οι μετασχηματιστές του μετατρέπουν την υψηλή τάση σε χαμηλή για να μπορέσουν να λειτουργήσουν ηλεκτρικές συσκευές





ΣΧ1.2 Τα μέρη μιας ανεμογεννήτριας

## 1.7 Τύποι και τοπολογίες ανεμογεννήτρια. [2]

Κατάταξη των ανεμογεννήτρια ως προς την γωνιακή ταχύτητα.

Μια ανεμογεννήτρια μπορεί να είναι είτε σταθερών είτε μεταβλητών στροφών. Κάθε λειτουργία συγκεντρώνει κάποια πλεονεκτήματα και κάποια μειονεκτήματα, τα οποία αναλύονται στη συνέχεια.

### 1.7.1 ανεμογεννήτρια σταθερών στροφών (fixed speed). [2]

Οι ανεμογεννήτρια σταθερών στροφών συνδέονται απευθείας στο δίκτυο και λειτουργεί σε ένα στενό εύρος ταχύτητας περιστροφής, λίγο πάνω από τη σύγχρονη ταχύτητα. Πρακτικά, η ταχύτητα του δρομέα είναι σταθερή και ίση με τη σύγχρονη, με αποκλίσεις της τάξης περίπου του 1%, δηλαδή όσο και η ολίσθηση ονομαστικής λειτουργίας. Αν και είναι οι πρώτες που χρησιμοποιήθηκαν, ακόμα και στις μέρες μας αποτελούν το σημαντικότερο κομμάτι από τις ήδη λειτουργούσες ανεμογεννήτρια. Μπορούν να λειτουργούν είτε με γεννήτριες επαγωγής είτε με σύγχρονες γεννήτριες,



όμως επιλέγεται πάντα η χρήση ασύγχρονης γεννήτριας, κυρίως τύπου κλωβού, καθώς οι σύγχρονες παρουσιάζουν σημαντικά μειονεκτήματα όπως η ιδιαίτερα υψηλή ταλαντωτική συμπεριφορά της απόκρισης τους σε συνθήκες μεταβαλλόμενου ανέμου και το αυξημένο κόστος και βάρος τους. Ορισμένοι κατασκευαστές εξοπλίζουν τις ανεμογεννήτρια με δύο γεννήτριες μία που θα λειτουργεί σε περιόδους με μικρή ταχύτητα ανέμου και μία μεγαλύτερη που θα λειτουργεί σε περιόδους με πιο ισχυρούς ανέμους. Με τη χρήση διπλής γεννήτριας επιτυγχάνεται καλύτερη αεροδυναμική απόδοση καλύτερα χαρακτηριστικά ζεύξης και υψηλότερος συντελεστής ισχύος στις χαμηλές ταχύτητες ανέμου. Εναλλακτική τους σχεδίαση είναι οι γεννήτριες μεταβλητών πόλων, που ανάλογα με τον τρόπο που συνδέονται τα τυλίγματα του στάτη, εργάζονται με διαφορετικό αριθμό πόλων και έτσι λειτουργούν σε διαφορετικές ταχύτητες περιστροφής.

Οι ανεμογεννήτρια σταθερών στροφών εξαπλώθηκαν τόσο πολύ χάρη στα πλεονεκτήματα που συγκεντρώνουν όπως:

- Μικρό κόστος, αφού για τη σύνδεσή τους με το δίκτυο δεν απαιτούνται ηλεκτρονικοί μετατροπείς, των οποίων το κόστος είναι σημαντικό.
- Απλή κατασκευή και σχετικά μικρό βάρος.
- Εξαιρετική αξιοπιστία και περιορισμένη ανάγκη συντήρησης.

Σημαντικά μειονεκτήματά τους συγκριτικά με τις Α/Γ μεταβλητών στροφών είναι τα ακόλουθα:

- Λειτουργώντας υπό μη βέλτιστο αεροδυναμικό συντελεστή και επειδή η ταχύτητα τους είναι σχεδόν σταθερή σε σχέση με την ταχύτητα του δικτύου, δεν μπορούν να αποθηκεύσουν τις ριπές του ανέμου υπό μορφή μηχανικής ενέργειας, με αποτέλεσμα αυτές να προκαλούν διακυμάνσεις στην ισχύ, επηρεάζοντας την ποιότητα ισχύος του δικτύου.
- Η ασύγχρονη γεννήτρια που χρησιμοποιείται απαιτεί την απορρόφηση άεργης ισχύος της, καθώς δεν μπορεί να ρυθμίσει το συντελεστή ισχύος, ο οποίος είναι χαμηλός.
- Κατά την εκκίνηση και τη ζεύξη-απόζευξη των γεννητριών σταθερών στροφών, παρατηρούνται έντονα μεταβατικά φαινόμενα.

Όλα τα προαναφερθέντα μειονεκτήματα έπαιξαν καθοριστικό ρόλο στη στροφή τόσο του επιστημονικού ενδιαφέροντος όσο και των κατασκευαστών προς τις Α/Γ μεταβλητών στροφών, οι οποίες φαίνονται να δίνουν ικανοποιητική λύση σε πολλά από τα παραπάνω προβλήματα

### 1.7.2 Οι ανεμογεννήτρια μεταβλητών στροφών (variable speed) . [2]

Τα τελευταία χρόνια οι ανεμογεννήτρια μεταβλητών στροφών έχουν καταστεί ο κυρίαρχος τύπος των ανά έτος εγκαθιστάμενων ανεμογεννητριών. Το αυξημένο ενδιαφέρον σε αυτές οφείλεται στα ελκυστικά χαρακτηριστικά τους, εξαιτίας της παρουσίας του ηλεκτρονικού μετατροπέα ισχύος, που επιτρέπει την ικανοποίηση των ολοένα αυξανόμενων απαιτήσεων των διαχειριστών του δικτύου.

Οι ανεμογεννήτρια μεταβλητών στροφών έχει πιο πολύπλοκο ηλεκτρικό σύστημα από την ανεμογεννήτρια σταθερών στροφών. Είναι εφοδιασμένη με επαγωγική (κλωβού ή τυλιγμένου δρομέα) ή με σύγχρονη γεννήτρια με τυλίγμα πεδίου ή μονίμων μαγνητών και μετατροπέα ισχύος. Χάρη στην παρουσία του μετατροπέα, μπορούν και λειτουργούν σε μεγάλο εύρος ταχυτήτων πάνω και κάτω από τη σύγχρονη ταχύτητα. Η ταχύτητα περιστροφής τους βελτιστοποιείται με βάση την τιμή του εισερχόμενου ανέμου, με στόχο την αύξηση της ενεργειακής απόδοσης. Για να είναι η απόδοση της

ανεμογεννήτρια βέλτιστη, πρέπει η ταχύτητα περιστροφής των πτερυγίων να είναι ανάλογη της ταχύτητας του ανέμου. Αυτός ο τρόπος λειτουργίας απαιτεί σημαντική μεταβολή της ταχύτητας περιστροφής των πτερυγίων. Κάτι τέτοιο σχεδιάστηκε παλαιότερα με διάφορες μεθόδους, όπως με χρήση υδραυλικών συστημάτων ή κιβωτίων ταχυτήτων μεταβαλλόμενου λόγου, αλλά αργότερα οι μέθοδοι αυτές εγκαταλείφθηκαν. Τη θέση των παραπάνω μεθόδων πήραν τα συστήματα ηλεκτρονικών μετατροπών συχνότητας τα οποία έχουνε περιορισμένες απώλειες και είναι αρκετά αξιόπιστα. Τα συστήματα αυτά παρεμβάλλονται ανάμεσα στο δίκτυο και στην ηλεκτρική γεννήτρια και έτσι η ταχύτητα περιστροφής αποδεσμεύεται από τη σταθερή συχνότητα του δικτύου κάνοντας δυνατή τη μεταβολή της εντός ευρύτερων ορίων. Ο μετατροπέας ισχύος λειτουργεί έτσι ώστε οι μεταβολές του ανέμου να παύουν να αποτελούν πρόβλημα και οι διακυμάνσεις ισχύος να απορροφώνται από αλλαγή στην ταχύτητα της ανεμογεννήτρια.

Οι ανεμογεννήτρια μεταβλητών στροφών έχουν πληθώρα σημαντικών πλεονεκτημάτων σε σχέση με τις ανεμογεννήτρια σταθερών στροφών, όπως:

- Μειωμένες μηχανικές καταπονήσεις στα μηχανικά μέρη και αυξημένη διάρκεια ζωής της ανεμογεννήτρια.
- Αυξημένη ενεργειακή απόδοση και προσαρμογή της ανεμογεννήτρια στις τοπικές ανεμολογικές συνθήκες, καθώς χάρη στην ιδιότητα της μεταβλητής ταχύτητας, είναι δυνατή η συνεχής προσαρμογή της γωνιακής ταχύτητας της ανεμογεννήτρια στην ταχύτητα του ανέμου έτσι ώστε να ο αεροδυναμικός συντελεστής να διατηρείται στη μέγιστη δυνατή τιμή του.
- Μειωμένος ακουστικός θόρυβος, καθώς είναι δυνατή η λειτουργία σε χαμηλές ταχύτητες, σε περίπτωση ασθενούς ανέμου.
- Δυνατότητας απαλοιφής του κιβωτίου ταχυτήτων.

Επίσης, η παρουσία του ηλεκτρονικού μετατροπέα ισχύος δίνει στην ανεμογεννήτρια τη δυνατότητα να εκπληρώσει τις υψηλές τεχνικές απαιτήσεις που επιβάλλονται από τους διαχειριστές δικτύων, όπως:

- Παραγωγή ελεγχόμενης ενεργούς και άεργου ισχύος.
- Καλύτερης ποιότητας παρεχόμενης ισχύς εξόδου (μείωση διακυμάνσεων ισχύος, βελτιωμένο επίπεδο flicker, περιορισμένα ρεύματα βραχυκύκλωσης).
- Γρήγορη απόκριση σε μεταβατικά φαινόμενα.

Κάποια μειονεκτήματα των Α/Γ μεταβλητών στροφών είναι τα ακόλουθα:

- Αυξημένο κόστος λόγω των χρησιμοποιούμενων ηλεκτρονικών ισχύος.
- Απώλειες στον μετατροπέα ισχύος.
- Αυξημένη πολυπλοκότητα.
- Έγχυση αρμονικών συχνοτήτων στο δίκτυο και ανάγκη εγκατάστασης φίλτρων στο δίκτυο.

Με την πρόοδο της τεχνολογίας των ηλεκτρονικών ισχύος, πολλά από τα παραπάνω προβλήματα αναμένεται να επιλυθούν, κάτι που θα κάνει τις Α/Γ μεταβλητών στροφών ακόμη πιο ελκυστικές.

### 1.7.3 Κατάταξη των Α/Γ ως προς τον τύπο των πτερυγίων τους. [2]

Ένα κριτήριο διαχωρισμού των Α/Γ είναι ο τύπος των πτερυγίων τους και ο τρόπος ελέγχου της γωνίας τους, προκειμένου να περιορίζεται η παραγόμενη αεροδυναμική ισχύς.

#### 1.7.3.1. Α/Γ με έλεγχο του βήματος των πτερυγίων (pitch control) . [2]

Πρόκειται για Α/Γ με πτερύγια, που μπορούν να περιστραφούν κατά το διαμήκη άξονά τους. Με τη μεταβολή του βήματος της έλικας, δηλαδή της γωνίας  $\beta$  που σχηματίζει η χορδή της αεροτομής με την κατεύθυνση της κίνησης (pitch angle), ελέγχεται η γωνία πρόσπτωσης του ανέμου και κατά συνέπεια η ασκούμενη ροπή. Η γωνία  $\beta$  παίρνει τιμές  $0^\circ$  —  $90^\circ$ . Πιο συγκεκριμένα, για έλεγχο ισχύος, παίρνει τιμές  $0^\circ$  —  $35^\circ$  περίπου. Όταν η Α/Γ λειτουργεί με άνεμο πάνω από τον ονομαστικό, τα πτερύγια στρέφονται κατά κατάλληλη γωνία μέσα από ένα σύστημα ελέγχου, και έτσι εξασφαλίζεται ότι δε θα αναπτυχθεί ροπή μεγαλύτερη της ονομαστικής. Βέβαια, για να σταματήσει η περιστροφή της Α/Γ (αεροδυναμική πέδηση) όταν η ταχύτητα του ανέμου φτάσει το όριο αντοχής της έλικας σε μηχανική καταπόνηση, τα πτερύγια στρέφονται στις  $90^\circ$ , ώστε να παρουσιάζουν την ελάχιστη αντίσταση. Χάρη στο pitch control αναπτύσσονται χαμηλότερα φορτία στα πτερύγια και στο δομικό σύστημα της Α/Γ, περιορίζεται η αεροδυναμική ισχύς χωρίς διακοπή της λειτουργίας, ενώ παράλληλα επιτυγχάνεται καλύτερη απόδοση σε χαμηλό άνεμο. Τα κύρια μειονεκτήματα αυτού του συστήματος είναι η αυξημένη πολυπλοκότητα λόγω του ελέγχου τους καθώς και η καταπόνηση των πτερυγίων λόγω αδρανειακής φόρτισης.

#### 1.7.3.2 Α/Γ με παθητικό αεροδυναμικό έλεγχο (passive stall control) . [2]

Πρόκειται για Α/Γ με αεροδυναμικό έλεγχο της ροής και ισχύος του δρομέα (passive stall control), χωρίς έλεγχο βήματος. Διαθέτουν πτερύγια σταθερής κλίσης τα οποία σε υψηλές ταχύτητες ανέμου εμφανίζουν απώλεια αεροδυναμικής στήριξης. Η ανυψωτική δύναμη παύει να αυξάνεται και έτσι περιορίζεται η αναπτυσσόμενη ροπή και η παραγόμενη ενέργεια και αποφεύγεται η φόρτιση της Α/Γ πέρα από τα όρια για τα οποία έχει σχεδιαστεί. Στα υπέρ αυτού του τρόπου ελέγχου είναι η απλότητα της κατασκευής, το χαμηλό κόστος και η απουσία ανάγκης συντήρησης, αποφεύγοντας κινούμενα τμήματα στο δρομέα και πολύπλοκα συστήματα ελέγχου. Βασικά μειονεκτήματα είναι τα υψηλά φορτία που αναπτύσσονται στο δρομέα και στο δομικό σύστημα, η αδυναμία ρύθμισης της ισχύος εξόδου και η μειωμένη παραγόμενη ισχύς σε μεγάλες ταχύτητες ανέμου.

#### 1.7.3.3 Α/Γ με ενεργό αεροδυναμικό έλεγχο (active stall control) . [2]

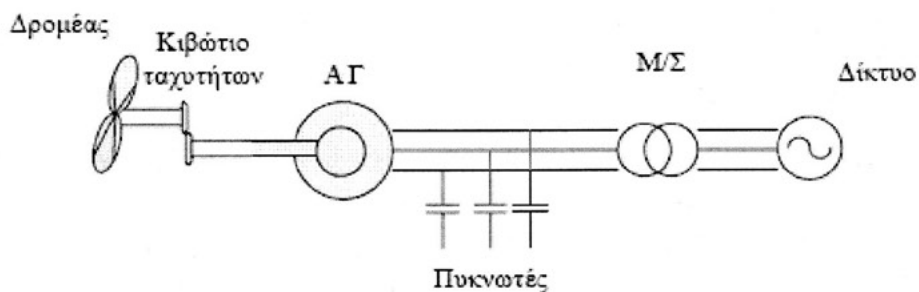
Τελευταία, παρατηρείται η τάση να χρησιμοποιείται ενεργός έλεγχος του βήματος των πτερυγίων σε Α/Γ 1 MW και μεγαλύτερες (active stall). Η διαφορά αυτού του τρόπου ελέγχου σε σχέση με τον κλασικό έλεγχο του βήματος των πτερυγίων είναι ότι όταν η ταχύτητα του ανέμου ξεπεράσει την ονομαστική της τιμή και η Α/Γ πρόκειται να υπερφορτιστεί, η γωνία pitch μεταβάλλεται αντίθετα (negative pitch control), ώστε να γίνει πιο έντονο το φαινόμενο stall (stall effect) και να αποκοπεί με αυτόν τον τρόπο η περίσσεια αεροδυναμικής ισχύος. Το εύρος τιμών της γωνίας είναι μικρό, περίπου  $0^\circ$  —  $4^\circ$ . Το πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι ότι η ισχύς εξόδου της γεννήτριας μπορεί να ελεγχθεί με μεγαλύτερη ακρίβεια και κατά συνέπεια δεν καταπονείται το σύστημα σε περιόδους ριπών ανέμου. Επίσης, η Α/Γ μπορεί να αποδίδει σχεδόν την ονομαστική της ισχύ σε όλες τις υψηλές ταχύτητες ανέμου, σε αντίθεση με Α/Γ που χρησιμοποιούν passive stall control. Εκτός της καλύτερης απόδοσης, επιτυγχάνεται επίσης ευκολότερη εκκίνηση και αποσύνδεση.

#### 1.7.4 Βασικές τοπολογίες των Α/Γ. [2]

Υπάρχουν διάφορες τυπικές διαμορφώσεις του ηλεκτρικού μέρους της Α/Γ, οι οποίες ποικίλλουν ανάλογα με το είδος της γεννήτριας που χρησιμοποιείται, η οποία μπορεί να είναι επαγωγής, σύγχρονη ή συνεχούς ρεύματος. Η γεννήτρια επαγωγής με δρομέα κλωβού χρησιμοποιείται σε σχετικά μικρά μεγέθη Α/Γ που παράγουν ισχύ της τάξης των KW, ενώ αυτή με τυλιγμένο δρομέα και δακτυλίους απαντάται σε Α/Γ μέσου και μεγάλου μεγέθους, με παραγωγή ισχύος έως και 5MW. Η σύγχρονη γεννήτρια χρησιμοποιείται σχεδόν αποκλειστικά για μεσαίου και μεγάλου μεγέθους Α/Γ, οι οποίες είναι είτε ηλεκτρικά διεγερόμενες είτε με μόνιμους μαγνήτες. Τέλος, γεννήτριες συνεχούς ρεύματος χρησιμοποιούνται από μικρού μεγέθους Α/Γ και σε πολύ μικρή έκταση, λόγω αυξημένης πολυπλοκότητας και αναγκών συντήρησης.

Παρακάτω, παρουσιάζονται οι βασικοί τρόποι σύνδεσης των Α/Γ στο δίκτυο και τα βασικά χαρακτηριστικά κάθε τοπολογίας.

### 1.7.5 Σταθερών στροφών με γεννήτρια επαγωγής κλωβού (βραχυκυκλωμένου δρομέα) . [2]

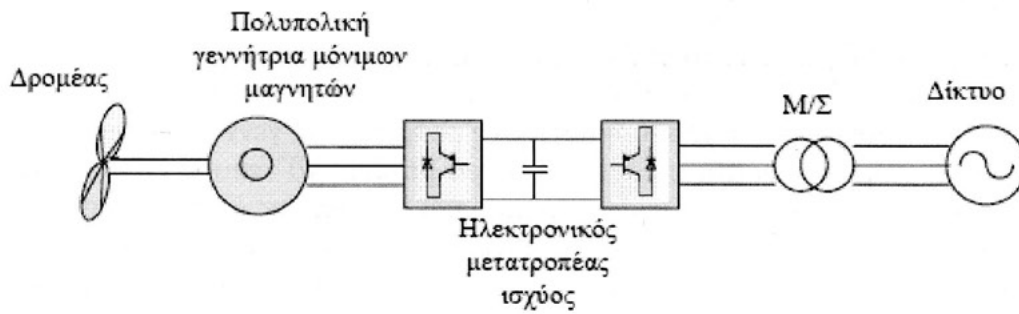


Σχήμα 1.3 Α/Γ σταθερών στροφών με γεννήτρια επαγωγής

Σε αυτήν την τοπολογία, καθώς οι ταχύτητες του δρομέα και της γεννήτριας διαφέρουν, απαιτείται κιβώτιο ταχυτήτων το οποίο επιτυγχάνει τη σύζευξή τους. Η ολίσθηση της γεννήτριας είναι πολύ μικρή, της τάξης του 1%, οπότε γενικά αυτές οι Α/Γ θεωρούνται σταθερών στροφών. Η σταθερή ταχύτητα του δρομέα προσδιορίζεται από τη συχνότητα του δικτύου, το λόγω του κιβωτίου ταχυτήτων και τον αριθμό ζευγών πόλων της ασύγχρονης γεννήτριας. Ο στάτης συνδέεται στο δίκτυο μέσω μιας διάταξης ομαλής εκκίνησης και μιας συστοιχίας πυκνωτών, για περιορισμό της κατανάλωσης άεργου ισχύος. Αυτή η διάταξη είναι γνωστή ως "the Danish design" και συνήθως συνδυάζεται με stall control. Το πλεονέκτημα αυτής της τοπολογίας είναι η απλότητα και το χαμηλό κόστος της. Παρόλα αυτά, πρέπει να είναι και μηχανικά πιο στιβαρή, λόγω των μεγάλων μηχανικών καταπονήσεων, καθώς η ταχύτητα του δρομέα δεν μπορεί να αλλάζει αισθητά, με αποτέλεσμα οι διαταραχές του ανέμου να μεταφράζονται απευθείας σε διαταραχές της ροπής. Επίσης, παρατηρούνται μεγαλύτερες διαταραχές στην ισχύ εξόδου, οι οποίες σε ασθενή δίκτυα συνεπάγονται και διαταραχές στην τάση (flicker)

### 1.7.6 Μεταβλητών στροφών με σύγχρονη πολυπολική γεννήτρια. [2]

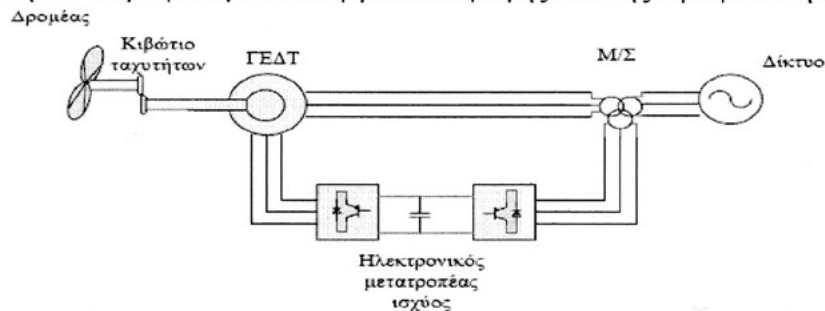




Σχήμα 1.4 A/G μεταβλητών στροφών με σύγχρονη γεννήτρια.

Σε αυτές τις A/G, η σύγχρονη γεννήτρια έχει την ίδια ταχύτητα με το δρομέα, γι' αυτό δεν απαιτείται κιβώτιο ταχυτήτων. Με αυτόν τον τρόπο μειώνεται το κόστος και το βάρος της διάταξης, αυξάνεται η αξιοπιστία και ελαττώνεται ο θόρυβος. Η γεννήτρια συνδέεται στο δίκτυο μέσω ηλεκτρονικών ισχύος, που της επιτρέπουν να λειτουργεί με μεταβλητή ταχύτητα και να παράγει ισχύ ακόμη και σε αρκετά χαμηλό αριθμό στροφών. Επιπλέον, η γεννήτρια μπορεί να αυτοδιεγείρεται είτε με μόνιμους μαγνήτες, είτε με ηλεκτρική διέγερση. Τα μειονεκτήματα αυτής της διάταξης είναι ότι απαιτεί μεγάλη και πολύπλοκη γεννήτρια και μεγάλο μετατροπέα ο οποίος διαχειρίζεται το 100% της παραγόμενης ισχύος, με αποτέλεσμα να αυξάνονται οι απώλειες και το κόστος του.

#### 1.7.7 Μεταβλητών στροφών με Γεννήτρια Επαγωγής Διπλής Τροφοδότησης. [2]



Σχήμα 1.5 A/G μεταβλητών στροφών με γεννήτρια επαγωγής διπλής τροφοδότησης.

Σε αυτήν την τοπολογία απαιτείται κιβώτιο ταχυτήτων, καθώς ο δρομέας στρέφεται με διαφορετική ταχύτητα από αυτήν της ασύγχρονης γεννήτριας. Ο στάτης συνδέεται απευθείας στο δίκτυο ενώ ο δρομέας συνδέεται στο δίκτυο μέσω μετατροπέα ισχύος ΕΡ/ΣΡ/ΕΡ (back to back AC/DC/AC), στον οποίο συνδέεται μέσω δαχτυλιδιών (slip rings). Ο μετατροπέας αυτός είναι διπλής κατεύθυνσης και αποτελείται από δύο ανεξάρτητα ελεγχόμενους μετατροπέες πηγής τάσης: το μετατροπέα που συνδέεται στην πλευρά της μηχανής και τον μετατροπέα που συνδέεται στην πλευρά του δικτύου. Μεταξύ τους συνδέονται σε ένα κοινό ζυγό συνεχούς ρεύματος. Ανάμεσα στους δύο μετατροπέες τοποθετείται ένας πυκνωτής στόχος του οποίου είναι να διατηρεί μικρές τις διακυμάνσεις στην τάση της συνεχούς σύνδεσης. Οι μετατροπέες ελέγχουν την τάση του δρομέα και επομένως την ενεργό και την άεργο ισχύ που παράγεται. Με το μετατροπέα στην πλευρά της μηχανής είναι δυνατό να ελεγχθεί η ροπή ή η ταχύτητα της ΓΕΔΤ και επίσης ο συντελεστής ισχύος στα τερματικά του στάτη, ενώ ο βασικός στόχος για το μετατροπέα από την πλευρά του δικτύου είναι ο έλεγχος της άεργου ισχύος που ανταλλάσσεται με αυτό. Χάρη στο μετατροπέα, η λειτουργία της ΓΕΔΤ είναι πιο ευέλικτη, συγκρινόμενη με τη γεννήτρια βραχυκυκλωμένου δρομέα. Ο μετατροπέας αντισταθμίζει τη διαφορά ανάμεσα στη μηχανική και την ηλεκτρική ταχύτητα του ρότορα εγχύοντας στο δρομέα ρεύματα μεταβλητής συχνότητας. Πολύ σημαντικό πλεονέκτημα αυτής της τοπολογίας είναι ότι επιτρέπει τον ανεξάρτητο έλεγχο της ενεργού και της άεργου ισχύος, ενώ ταυτόχρονα

δε διαχειρίζεται την πλήρη ισχύ, αλλά μόνο ένα ποσοστό της, περίπου 20-30%, μειώνοντας τις απώλειες και το κόστος του.

#### 1.8 Προβλήματα από την αξιοποίηση της αιολικής ενέργειας. [2]

Τα ενδεχόμενα προβλήματα από την αξιοποίηση της αιολικής ενέργειας είναι ο θόρυβος από τη λειτουργία των ανεμογεννητριών, οι σπάνιες ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές στο ραδιόφωνο, τηλεόραση, τηλεπικοινωνίες, που επιλύονται όμως με την ανάπτυξη της τεχνολογίας και επίσης, προβλήματα περιβαλλοντικής αισθητικής όπως για παράδειγμα στην περιοχή της Νότιας Εύβοιας.

Η ένταξη των ανεμογεννητριών στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας, εκτός από τα προαναφερθέντα πλεονεκτήματα, συνεπάγεται και κάποια προβλήματα. Η μεταβλητότητα του ανέμου προκαλεί σημαντικές διακυμάνσεις στην ισχύ που παράγεται από τον άνεμο, με αποτέλεσμα την εμφάνιση μηχανικών και ηλεκτρικών ταλαντώσεων καθώς και τη μείωση της ποιότητας της ηλεκτρικής ισχύος η οποία τροφοδοτείται στο ηλεκτρικό δίκτυο.

Το πρόβλημα αυτό είναι ακόμα πιο έντονο στην περίπτωση της διεσπαρμένης παραγωγής, όπου τα δίκτυα με τα οποία συνδέονται τα αιολικά πάρκα είναι συνήθως ασθενή δίκτυα απομακρυσμένων περιοχών.

Οι κυριότερες επιπτώσεις της διεσπαρμένης παραγωγής στη λειτουργία των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας είναι οι ακόλουθες :

- αλλαγές στο επίπεδο της τάσης των δικτύων
- μειωμένη ποιότητα ηλεκτρικής ισχύος
- μεταβολή των ρευμάτων από σφάλματα του δικτύου- αλλαγή του επιπέδου βραχυκύκλωσης
- αύξηση της αρμονικής παραμόρφωσης των τάσεων και ρευμάτων του δικτύου
- διακύβευση της ευστάθειας του συστήματος

Αρκετά από αυτά τα προβλήματα μπορούν να αντιμετωπισθούν με τη χρήση των Ευέλικτων Συστημάτων Μεταφοράς Εναλλασσόμενου Ρεύματος (EP) -Flexible AC Transmission System (FACTS). Η τεχνολογία τους βασίζεται στη χρήση αξιόπιστων, μεγάλης ταχύτητας ηλεκτρονικών διακοπών ισχύος, προχωρημένης θεωρίας ελέγχου και σύγχρονους επεξεργαστές.

Στην εξάπλωσή του βοήθησε η τεχνολογία οπτικών ινών, η οποία επέτρεψε την αποστολή και λήψη σημάτων σε επίπεδα υψηλών τάσεων αλλά και η ανάπτυξη της.

#### 1.9 Το ενεργειακό σύστημα της Ελλάδας. [1]

Το ελληνικό ηλεκτρικό σύστημα χαρακτηρίζεται από τη σχετική απομόνωση της θέσης του από τα άλλα ευρωπαϊκά συστήματα, την οξεία αύξηση της κατανάλωσης την τελευταία δεκαετία, την ύπαρξη μεγάλου αριθμού μικρών καταναλωτών στα νησιά και την καθοριστική εξάρτηση του από το λιγνίτη. Όπως προκύπτει από στοιχεία, οι θερμοηλεκτρικοί σταθμοί του διασυνδεδεμένου δικτύου αποτελούν τη σπονδυλική στήλη του συστήματος. Μεγάλοι θερμοηλεκτρικοί σταθμοί υπάρχουν στη Ρόδο και την Κρήτη, ενώ τα υπόλοιπα νησιά τροφοδοτούνται από μικρότερους αυτόνομους σταθμούς. Επίσης από τα στοιχεία αυτά η εγκατεστημένη ισχύς των υδροηλεκτρικών σταθμών είναι σημαντική, όπως φαίνεται και από τα στοιχεία του ακόλουθου πίνακα. Ωστόσο, οι περιορισμοί της δουλικότητας (λόγω μικρών ποταμών και μη σταθερών βροχοπτώσεων) καθιστούν συχνά μη εκμεταλλεύσιμη αυτήν την ισχύ.

Οι λιγνίτες ανήκουν στις στερεές ορυκτές καύσιμες ύλες με τη γενική ονομασία γαιάνθρακες και προήλθαν από φυτικά υπολείμματα μέσω μιας σειράς διεργασιών ενανθράκωσης. Οι διεργασίες αυτές είχαν ως αποτέλεσμα τον εμπλουτισμό των

φυτικών υπολειμμάτων σε άνθρακα. Η μετατροπή των φυτών σε τύρφη και η μετάβαση από την τύρφη, στο αρχικό στάδιο της ενανθράκωσης, (στον ανθρακίτη στο τελικό στάδιο ενανθράκωσης) είναι συνάρτηση της επίδρασης του χρόνου, θερμοκρασίας και της πίεσης. Η αύξηση του βαθμού ενανθράκωσης επηρεάζει τα φυσικοχημικά χαρακτηριστικά των γαιανθράκων.

Η θερμογόνο ισχύς των λιγνιτών είναι από 3 - 7 φορές χαμηλότερη από αυτήν του λιθάνθρακα και 5 έως 10 φορές μικρότερη από αυτήν του πετρελαίου. Γενικά η ποιότητα των ελληνικών λιγνιτών είναι χαμηλή. Η θερμογόνο δύναμη κυμαίνεται από 4 - 4,5 MJ/kg (900 - 1100 kcal/kg) στις περιοχές Μεγαλόπολης, Αμυνταίου και Δράμας, από 5,2 - 5,6 MJ/kg (1250 - 1350 kcal/kg) στην περιοχή Πτολεμαϊδας και 7,5 - 9,5 MJ/kg (1800 - 2300 kcal/kg) στις περιοχές Φλώρινας και Ελασσόνας. Σημαντικό συγκριτικό πλεονέκτημα των λιγνιτών της χώρας είναι η χαμηλή περιεκτικότητα σε καύσιμο θείο. Τα συνολικά βεβαιωμένα γεωλογικά αποθέματα λιγνίτη στη χώρα ανέρχονται σε περίπου 5 δις. τόνους. Τα κοιτάσματα αυτά παρουσιάζουν αξιοσημείωτη γεωγραφική εξάπλωση στον ελληνικό χώρο. Με τα σημερινά τεχνικοοικονομικά δεδομένα τα κοιτάσματα που είναι κατάλληλα για ενεργειακή εκμετάλλευση, ανέρχονται σε περίπου 4 δις τόνους και ισοδυναμούν με 550 εκ. τόνους πετρελαίου.

Με βάση τα συνολικά εκμεταλλεύσιμα αποθέματα λιγνίτη της χώρας και τον προγραμματιζόμενο ρυθμό κατανάλωσης στο μέλλον, υπολογίζεται ότι τα αποθέματα αυτά επαρκούν για περισσότερο από 40 χρόνια. Μέχρι σήμερα οι εξορυχθείσες ποσότητες λιγνίτη δεν ξεπερνούν το 25% των συνολικών αποθεμάτων. Εκτός από λιγνίτη η Ελλάδα διαθέτει και ένα μεγάλο κοιτάσμα Τύρφης στην περιοχή των φιλίππων (Ανατολική Μακεδονία). Τα εκμεταλλεύσιμα αποθέματα στο κοιτάσμα εκτιμώνται σε 4 δις κυβικά μέτρα. Το ελληνικό σύστημα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας από τους Σταθμούς Παραγωγής στα μεγάλα αστικά κέντρα, περιλαμβάνει γραμμές 400 kV, 150 kV και 20 kV. Το συνολικό του μήκος ανέρχεται σε 9.500 km περίπου. Ακόμη, το σύστημα μεταφοράς τροφοδοτεί 23 μεγάλους βιομηχανικούς καταναλωτές, ενώ είναι διασυνδεδεμένο με τα αντίστοιχα ηλεκτρικά δίκτυα της Αλβανίας, της πρώην Γιουγκοσλαβίας και Βουλγαρίας, με γραμμές 400 kV και 150 kV, όπως αναφέρθηκε και στην εισαγωγή του κεφαλαίου.

Το σύστημα διανομής που μεταφέρει την ηλεκτρική ενέργεια στους τελικούς καταναλωτές έχει γραμμές μήκους 160.000 km και τροφοδοτεί περίπου 6 εκατομμύρια καταναλωτές μέσης (20 kV, 15 kV, 6,6 kV) και χαμηλής τάσης (400/230 V). Η ύπαρξη δικτύων σε διάφορες τάσεις εξηγείται από την ανάγκη οικονομικής μεταφοράς της ηλεκτρικής ενέργειας από τα σημεία παραγωγής στην τελική κατανάλωση.

#### 1.10 Επιλογή θέσης εγκατάστασης Α/Γ.[4]

Σε γενικές γραμμές η επιλογή θέσης εγκατάστασης Α/Γ παρουσιάζει τα ίδια προβλήματα με την επιλογή θέσης εγκατάστασης οποιουδήποτε συστήματος παραγωγής ενέργειας. Διαφέρει όμως σ' ένα βασικό σημείο: είναι αδύνατο να προσδιορισθεί η καθαρή παραγωγή ενέργειας ή το κατά προσέγγιση κόστος αυτής, αν δεν είναι γνωστή η ακριβής θέση εγκατάστασης της Α/Γ. Η συμπεριφορά του ανέμου σε μία θέση, είναι αυτή που καθορίζει και τη λειτουργική συμπεριφορά της Α/Γ. Έτσι, η οικονομική βιωσιμότητα μιας συγκεκριμένης Α/Γ, σ' ένα συγκεκριμένο τόπο δεν μπορεί να προβλεφθεί χωρίς την ακριβή γνώση της συμπεριφοράς του ανέμου στη θέση αυτή. Επομένως, η ένταση του ανέμου και οι διακυμάνσεις στο μέτρο και τη διεύθυνση είναι οι βασικές παράμετροι για την επιλογή της θέσης της Α/Γ όχι όμως και οι μοναδικές. Για να θεωρείται η θέση τοποθέτησης μιας Α/Γ οικονομικά βιώσιμη

πρέπει να πλήρει τα παρακάτω κριτήρια. Η παραγωγή ενέργειας να είναι συμφέρουσα οικονομικά (το κόστος της παραγόμενης kWh να είναι μικρό). Η εγκατάσταση να μην έχει αρνητικές επιπτώσεις στο περιβάλλον.

Η λειτουργία της Α/Γ να είναι συμβατή με τη λειτουργία του ηλεκτρικού δικτύου, σε περίπτωση διασύνδεσης με αυτό. Να έχουν ληφθεί υπόψη κατά το σχεδιασμό της Α/Γ οι πιθανές ακραίες μετεωρολογικές συνθήκες της συγκεκριμένης θέσης (παγετοί, εξαιρετικά ισχυροί άνεμοι κλπ.). Η επιλεγμένη θέση να είναι αποδεκτή από το κοινό. Η διαδικασία επιλογής θέσης εγκατάστασης Α/Γ μπορεί να χαρακτηριστεί επιτυχής, όταν είναι δυνατός, μέσα σε σύντομο χρονικό διάστημα, ο προσδιορισμός περιοχής με υψηλό αιολικό δυναμικό. Έπειτα, αφού γίνει προσεκτικός έλεγχος της περιοχής αυτής, επιλέγονται οι θέσεις που ικανοποιούν τις υπόλοιπες παραμέτρους που απαριθμήθηκαν προηγουμένως. Ένας πρωταρχικός παράγοντας που σχετίζεται με την οικονομική βιωσιμότητα της εγκατάστασης είναι το μέγεθος και οι περιοδικές διακυμάνσεις της έντασης του ανέμου. Η συμπεριφορά όμως του ανέμου κοντά στην επιφάνεια της γης είναι περίπλοκη και η ταχύτητα του μπορεί να μεταβληθεί απότομα, τόσο στο οριζόντιο όσο και στο κατακόρυφο επίπεδο. Οι τεχνικές που έχουν αναπτυχθεί για να ανάγουμε υπάρχοντα δεδομένα, σε θέσεις που μας ενδιαφέρουν δεν είναι ακριβείς. Έτσι, δεν μπορούμε να σχεδιάσουμε ένα δίκτυο μετρήσεων ταχυτήτων του ανέμου που να μπορεί να μας δώσει το αιολικό δυναμικό σε κάθε θέση μιας μεγάλης περιοχής. Επίσης οι μετρήσεις χρειάζονται χρόνο και χρήματα να πραγματοποιηθούν. Η πιο πρακτική λύση στο πρόβλημα επιλογής θέσης ανεμογεννήτριας είναι να χρησιμοποιήσουμε υπάρχουσες πληροφορίες για τον προσδιορισμό περιοχών με υψηλό αιολικό δυναμικό, τέτοιο που να δικαιολογεί την οικονομική βιωσιμότητα της εγκατάστασης. Έπειτα, μέσα στις περιοχές αυτές, επιλέγονται τοποθεσίες στις οποίες η εγκατάσταση Α/Γ είναι πρακτικώς εφικτή. Τέλος εκτελούνται μετρήσεις των ανέμων στις συγκεκριμένες πλέον θέσεις

#### 1.11 Πρακτικά στοιχεία επιλογής ανεμογεννήτριας.[5]

Χρειάζεται πολύ μεγάλη προσοχή κατά τη διαδικασία αγοράς ανεμογεννήτριας. Είναι πολύ εύκολο να πέσουμε σε παγίδες και να μας πουλήσουν "φύκια για μεταξωτές κορδέλες". Κι αυτό επειδή οι ανεμογεννητριες πωλούνται με βάση την ονομαστική τους ισχύ, π.χ. 1.000W. Σε ποια ταχύτητα ανέμου όμως. Οι περισσότεροι κατασκευαστές αναφέρονται σε ταχύτητα ανέμου 12,5m/sec (μέτρα ανά δευτερόλεπτο). Πόσες μέρες το χρόνο (και για πόσες ώρες) έχουμε τέτοιους ανέμους στην περιοχή μας; Ελάχιστες

Πόσα Watt ισχύος δίνει σε φυσιολογικούς ανέμους με ταχύτητες της τάξεως των 5-6 m/sec; Μην ξεχνάμε αυτό που είπαμε παραπάνω: Διπλάσια ταχύτητα ανέμου για οκταπλάσια ισχύ. Άρα στα 6m/sec ταχύτητας ανέμου έχουμε το 1/8 της ονομαστικής ισχύος της ανεμογεννητριας, αν η ονομαστική ισχύς αποδίδεται από τον κατασκευαστή της στα 12m/sec. Δηλαδή μια ανεμογεννήτρια με ονομαστική ισχύ 400W (σε ταχύτητα 12m/s), θα αποδίδει σε καθημερινές συνθήκες μόλις 50W (με ταχύτητες 6m/s). Για αυτό καλύτερα να ζητάμε την καμπύλη απόδοσης της ανεμογεννητριας, με την οποία μπορούμε να δούμε την ισχύ σε κάθε ταχύτητα ανέμου και να κάνουμε συγκρίσεις μεταξύ διάφορων ανεμογεννητριών με βάση τους ανέμους που επικρατούν στην τοποθεσία εγκατάστασης.

Επίσης, να ξέρουμε ότι είναι αδύνατο να υπάρχουν ανεμογεννητριες με μικρότερα πτερύγια αλλά με μεγαλύτερη ισχύ, από άλλες ανεμογεννήτριες που έχουν αρκετά μεγαλύτερα πτερύγια (πάντα στην ίδια ταχύτητα ανέμου). Δεν γίνεται δηλαδή μια



ανεμογεννήτρια με διάμετρο 3,5 μέτρα να είναι 1000W και μια άλλη με διάμετρο 2 μέτρα να είναι πάλι 1000W στην ίδια ταχύτητα ανέμου.

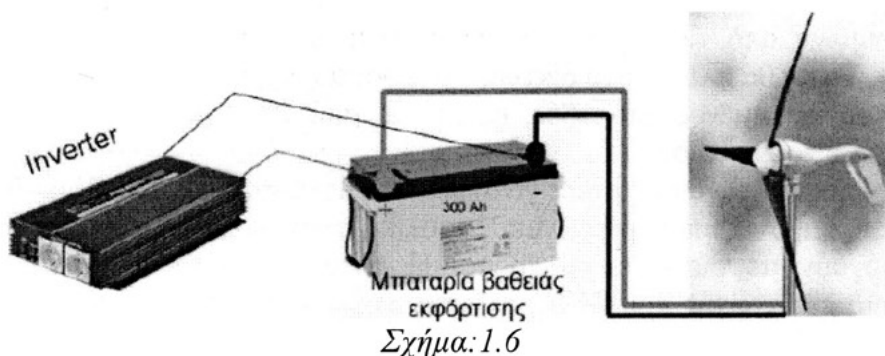
### 1.12 Σύνδεση μικρής ανεμογεννήτριας στο σπίτι σας.[6]

Όπως ξέρουμε η Παχιά Άμμος είναι ιδανικό μέρος για να εκμεταλλευτεί κάποιος την αιολική ενέργεια με διάφορους τρόπους. Παλαιότερα, υπήρχαν αρκετοί απλοί ανεμόμυλοι σε πηγάδια για άντληση νερού, αλλά με την έλευση των βενζινοκίνητων και ηλεκτροκίνητων αντλιών, οι ανεμόμυλοι σάπισαν και έπεσαν άδοξα στον ανελέητο πόλεμο της σκουριάς και της αδιαφορίας.

Ευτυχώς στις μέρες μας κάτι δείχνει να κινείται στον τομέα των ανεμογεννητριών ρεύματος! Ξεφεύγουμε σιγά-σιγά από τη νοοτροπία των μεγάλων αιολικών πάρκων και οι βιομηχανίες του χώρου έχουν αναπτύξει μικρές ανεμογεννήτριες για οικιακή χρήση. Το πρόβλημα της συντήρησης έχει αντιμετωπιστεί πλέον, αφού η νέα γενιά ανεμογεννητριών έχει ελάχιστα κινούμενα μέρη από χυτό αλουμίνιο ή άλλα ανθεκτικά υλικά. Η τεχνολογία των μπαταριών μπορεί να μην έχει κάνει εντυπωσιακά άλματα, αλλά υπάρχουν σήμερα πολλές και αξιόπιστες προτάσεις και λύσεις. Μπορεί κανείς πλέον να βρει μικρές ανεμογεννήτριες ακόμα και σε ηλεκτρονικά καταστήματα και στο Internet. Το μόνο που χρειάζεστε είναι περίπου 1.800€. έναν ηλεκτρολόγο και μεράκι. Έτσι ο αέρας δεν θα σας χαλάει πια το κέφι. αφού θα ξέρετε ότι δουλεύει για σας!

Από μια μικρή έρευνα αγοράς που έκανα στο Internet διαπίστωσα ότι πωλούνται ανεμογεννήτριες από 750€. ισχύος 400W/cbpa. Εάν δηλαδή φυσάει άνεμος περίπου 5 μποφόρ για 10 ώρες την ημέρα, θα παραχθεί ισχύς 4.000W. Το ισχύς αυτή είναι αρκετή για να ανάβουν όλα τα φώτα ενός σπιτιού (15 οικονομικές λάμπες των 20W) για 13 ώρες! Λάβετε υπόψη σας ότι μια μικρή ανεμογεννήτρια ξεκινά να παράγει ρεύμα αμέσως από τα 3 μποφόρ και όταν η ένταση του ανέμου φτάνει τα 7-8 μποφόρ έχετε πολύ μεγαλύτερη παραγωγή από τα 400W/cbpa. Επειδή όμως θα υπάρχουν και μέρες άπνοιας (σπάνιο φαινόμενο για την Παχιά Άμμο), θα πρέπει να φροντίσετε να αποθηκεύετε το ρεύμα σε μια μπαταρία. Οι περισσότερες ανεμογεννήτριες, έχουν ενσωματωμένο έναν «ρυθμιστή φόρτισης» ο οποίος φροντίζει να μην γίνεται υπερφόρτιση της μπαταρίας. Οι μπαταρίες που προτείνονται είναι αυτές με δυνατότητα πλήρους εκφόρτωσης και οι οποίες έχουν χρόνο ζωής μπαταρίας από 6 έως 12 χρόνια. Το κόστος των μπαταριών εξαρτάται από την αποθηκευτική τους ικανότητα, η οποία σχετίζεται με τα αμπερόρια τους (Ah). Μια τυπική μπαταρία αυτοκινήτου είναι 50Ah (και δεν είναι βαθιάς εκφόρτωσης) αλλά για την ανεμογεννήτρια προτείνεται μπαταρία πάνω από 300Ah και η οποία μπορεί να αποθηκεύσει περίπου 3.600Wh (300Ah\*12V=3.600Wh). Η τιμή μιας τέτοιας μπαταρίας ανέρχεται σε περίπου 900€. Τέλος θα χρειαστείτε και ένα inverter, η τιμή του οποίου εξαρτάται από την ισχύ και την «καθαρότητα» του ρεύματος που μπορεί να σας δώσει. Ο ρόλος αυτής της συσκευής, είναι να μετατρέπει το συνεχές ρεύμα της μπαταρίας σε εναλλασσόμενο, που καταναλώνουν οι οικιακές συσκευές. Πιο συγκεκριμένα, για 15 οικονομικές λάμπες των 20W η μία. χρειάζεστε ένα Inverter τροποποιημένου ημίτονου με ισχύ εξόδου τουλάχιστον 300W (15 λάμπες\*2(^)). Φυσικά θα αγοράσετε ένα μεγαλύτερο για να μην είσαστε οριακά. Ένα inverter τροποποιημένου ημίτονου, 500W. κοστίζει περίπου 150€. Στην περίπτωση που θέλετε να λειτουργήσετε συσκευές όπως τηλεόραση, στερεοφωνικό. Η/Υ. το inverter θα πρέπει να είναι καθαρού ημίτονου για να μην προκληθούν ζημιές στις συσκευές αυτές. Τα inverter καθαρού ημίτονου είναι πολύ πιο ακριβά (έχουν διπλάσια τιμή). Η συνδεσμολογία ενός μικρού οικιακού συστήματος φαίνεται στο παρακάτω σχήμα 1.6

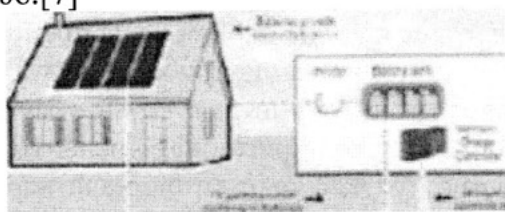




Με την παραπάνω συνδεσμολογία, μπορείτε να χρησιμοποιήσετε το ρεύμα είτε απευθείας από το inverter, είτε «ρίχνοντας» το ρεύμα στον πίνακα του σπιτιού. Στην περίπτωση αυτή, καλό θα ήταν να έχετε απομονώσει τα φώτα σας σε συγκεκριμένες γραμμές του πίνακα, ώστε να μην παίρνει ρεύμα κάποια πρίζα στην οποία θα μπορούσε να συνδεθεί π.χ. ένα ηλεκτρικό σίδερο το οποίο έχει τεράστιες καταναλώσεις. Επιπρόσθετα, μπορείτε να ζητήσετε από τον ηλεκτρολόγο σας να τοποθετήσει ένα ρελέ

το οποίο όταν θα αποφορτιστεί η μπαταρία (πέφτει η τάση της), η γραμμή θα παίρνει ρεύμα από την ΔΕΗ. Προσωπικά, έχω εγκαταστήσει ένα τέτοιο μικρό σύστημα στο σπίτι μου (όχι με ανεμογεννήτρια αλλά με φωτοβολταϊκό), ώστε να ανάβω τα φωτιστικά του κήπου. Έχω βάλει ένα χρονοδιακόπτη στο Inverter και ανάβουν 8 φωτιστικά από της 07.00 έως τις 11.00. Η επόμενη κίνηση μου θα είναι η αγορά μιας μικρής ανεμογεννήτριας ώστε να στήσω ένα «υβριδικό» σύστημα και το οποίο θα μου δίνει ρεύμα σε όλες τις καιρικές συνθήκες και για περισσότερες ώρες. Όσον αφορά τα οικονομικά στοιχεία, η απόσβεση μιας τέτοιας αγοράς επιτυγχάνεται μετά από 10 περίπου χρόνια. Το ίδιο όμως ισχύει και στην περίπτωση του ηλιακού θερμοσίφωνα! Επίσης, κανείς δεν συνυπολογίζει το περιβαλλοντικό όφελος που μεταφράζεται σε 800 κιλά λιγότερο διοξείδιο του άνθρακα στην ατμόσφαιρα και σε αρκετά κιλά διοξειδίου του θείου, μονοξειδίου του άνθρακα, οξειδίων του αζώτου, υδρογονανθράκων και αιωρούμενων σωματιδίων. Πόσο κοστίζουν αυτά; Και στο κάτω-κάτω, με τα ίδια χρήματα θα προτιμούσα να αγοράσω μια μικρή ανεμογεννήτρια παρά μια τηλεόραση LCD που δεν μου προσφέρει και τίποτα! Τέλος, προσπαθήστε να φανταστείτε την Παχιά Άμμο με δεκάδες μικρές ανεμογεννήτριες στις ταράτσες των σπιτιών και οι οποίες δεν θα είναι τεράστιες όπως στα αιολικά πάρκα, αλλά κομψές και διακριτικές (1.80 μ διάμετρος φτερωτής). Μάλλον μιλάμε για αισθητική αναβάθμιση παρά για υποβάθμιση περιβάλλοντος.

### 1.13 Σύνδεση με το δίκτυο.[7]



Σε μία τυπική οικιακή εφαρμογή μιας ανεμογεννήτριας εξυπηρετεί το φορτίο του σπιτιού παράλληλα με το δίκτυο. Αν η ταχύτητα ανέμου είναι χαμηλότερη του ορίου λειτουργίας (3-5 m/s) η ανεμογεννήτρια δεν θα παράγει ενέργεια και έτσι η εγκατάσταση θα τροφοδοτείται από το δίκτυο. Όταν η ταχύτητα του ανέμου αυξηθεί, θα παρουσιαστεί αύξηση και στην ενέργεια που αποδίδει και ανάλογα θα μειωθεί η κατανάλωση από το δίκτυο. Σε περίπτωση που η ενέργεια από τον άνεμο ξεπερνά την

απαιτούμενη από το φορτίο του σπιτιού, η πλεονάζουσα ενέργεια αποδίδεται στο δίκτυο. Το αν θα πλυθεί στο δίκτυο, επιφέροντας κέρδος στον ιδιοκτήτη ή θα αποδοθεί χωρίς συγκεκριμένες απολαβές, εξαρτάται από τη συμφωνία που έχει γίνει με τον διαχειριστή του δικτύου.

Όλες οι παραπάνω διαδικασίες γίνονται αυτόματα σε ένα τυπικό οικιακό σύστημα που δεν περιλαμβάνει μπαταρίες. Μικρά αιολικά συστήματα σε απομακρυσμένες περιοχές λειτουργούν με διαφορετικό τρόπο. Η αυτονομία από το δίκτυο εγκαθιστώντας σύστημα παραγωγής που βασίζεται στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας είναι η σωστή λύση αν ισχύουν τα ακόλουθα:

- Η τοποθεσία που βρίσκεται η εγκατάσταση έχει επαρκές δυναμικό ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.
- Δεν υπάρχει υφιστάμενη σύνδεση με το δίκτυο ή για να υλοποιηθεί απαιτείται επέκταση γραμμών που επιφέρει μεγάλο κόστος. Υπάρχει επιθυμία για ενεργειακή ανεξαρτησία από τον πάροχο ηλεκτρικής ενέργειας. Υπάρχει επιθυμία και οικονομική δυνατότητα να επενδυθούν χρήματα σε ανανεώσιμες πηγές για περιβαλλοντικούς λόγους. Υπάρχει μελλοντικός σχεδιασμός για επέκταση του δικτύου και αγορά από το δίκτυο της πλεονάζουσας ενέργειας.

#### 1.13.1. Απόδοση αυτόνομων συστημάτων.[7]

Τα μικρά συστήματα αιολικής ενέργειας μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε συνεργασία με το δίκτυο ή σε αυτόνομες εφαρμογές. Στα διασυνδεδεμένα συστήματα, η ενέργεια από την ανεμογεννήτρια καλύπτει το φορτίο (φωτισμός διάφορες συσκευές) όταν είναι επαρκής. Αν είναι λιγότερη από την απαιτούμενη, το δίκτυο καλύπτει τη διαφορά ενώ στην αντίθετη περίπτωση το πλεόνασμα πωλείται στο δίκτυο. Η παραπάνω διαδικασία εξασφαλίζει ότι όλη η ενέργεια που παράγεται χρησιμοποιείται με το έναν ή τον άλλο τρόπο προς όφελος του ιδιοκτήτη.

Τα αυτόνομα συστήματα μπορεί να είναι κατάλληλα για σπίτια, αγροκτήματα, ή ακόμα και ολόκληρες κοινότητες. Είναι απαραίτητο να περιλαμβάνουν διατάξεις αποθήκευσης ενέργειας ή πρόσβαση σε άλλη μορφή ενέργειας για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών σε περιόδους μειωμένου αιολικού δυναμικού. Οι μπαταρίες αποθήκευσης είναι η καρδιά ενός αυτόνομου συστήματος. Αποθηκεύουν την πλεονάζουσα ηλεκτρική ενέργεια για χρήση σε περιόδους που η ανανεώσιμη πηγή δεν είναι διαθέσιμη.

Σε ένα τέτοιο σύστημα όμως υπάρχουν πολλές απώλειες του συστήματος είναι σύνθετα και άλλες πολλές διαδοχικές μετατροπές ενέργειας αυξάνουν τις απώλειες και μειώνουν τη συνολική απόδοση του συστήματος. Μια άλλη κατάσταση όπου υπάρχει απώλεια ενέργειας είναι σε περιόδους με αυξημένο άνεμο όπου η παραγόμενη ενέργεια ξεπερνά την απαιτούμενη για την κάλυψη του φορτίου και την φόρτιση των μπαταριών. Τότε μέρος της παραγόμενης ενέργειας δεν χρησιμοποιείται.

Η ικανότητα αποθήκευσης των μπαταριών πρέπει να είναι αρκετά μεγάλη ώστε να μπορεί να καλύπτει της ανάγκες κατά τη διάρκεια περιόδων μειωμένης παραγωγής. Συνήθως η συστοιχία των μπαταριών σχεδιάζεται για 1 ως 3 μέρες λειτουργίας χωρίς άνεμο.

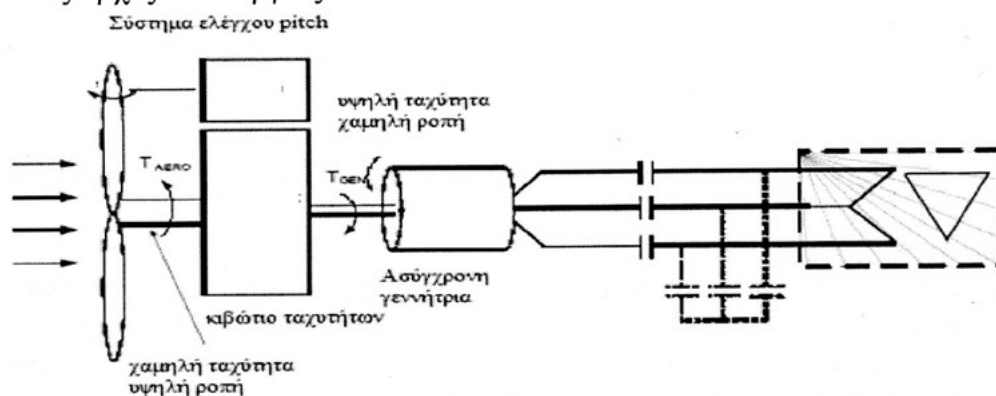
#### 1.14 Συστήματα Σταθερής Ταχύτητας (Σταθερής Συχνότητας Σταθερών στροφών-Σ.Σ.Σ.Σ).[8]

Στην πρώτη κατηγορία-Συστήματα Σταθερής Ταχύτητας (ή αλλιώς Σταθερής Συχνότητας- Σταθερών Στροφών μιας ανεμογεννήτριας. Με αυτή τη μέθοδο ελέγχους αποτελείται από έναν Ασύγχρονος κινητήρας και μια ασύγχρονη γεννήτρια βραχυκυκλωμένου κλωβού, που συνδέονται μέσω ενός κιβωτίου ταχυτήτων. Η ολίσθηση των γεννητριών αυτής της κατηγορίας ποικίλει ανάλογα με την παραγόμενη ενεργό ισχύ έτσι η ταχύτητα δεν είναι στην πραγματικότητα σταθερή εντούτοις. δεδομένου ότι οι μεταβολές της ταχύτητας είναι πολύ μικρές; (περίπου 1-2%). αναφέρεται συνήθως ως ανεμογεννήτρια «σταθερής ταχύτητας» Επίσης, η άεργος ισχύς των ασύγχρονων γεννητριών βραχυκυκλωμένου κλωβού.

Το πλεονέκτημα ενός τέτοιου συστήματος είναι η σχετικά απλή δομή του και το κόστος του που τείνει να είναι χαμηλό Αυτές οι ανεμογεννήτριες πρέπει να είναι μηχανικά περισσότερο στιβαρές από άλλες, λόγω των υψηλότερων μηχανικών φορτίων ξοδεμένου ότι η ταχύτητα του ασύγχρονος κινητήρας δεν μπορεί να ποικίλει Οι διακυμάνσεις στην ταχύτητα του αέρα έχουν ως άμεσο αποτέλεσμα διακυμάνσεις στη ροπή Ο διακυμάνσεις ισχύος μπορούν να προκαλέσουν διακυμάνσεις τάσης οι οποίες αντισταθμίζονται από πυκνωτές Σε αυτήν την κατηγορία ανήκουν τα παρακάτω συστήματα:

#### 1.14.1 Λειτουργία ανεμογεννήτριας με μια ταχύτητα.[8]

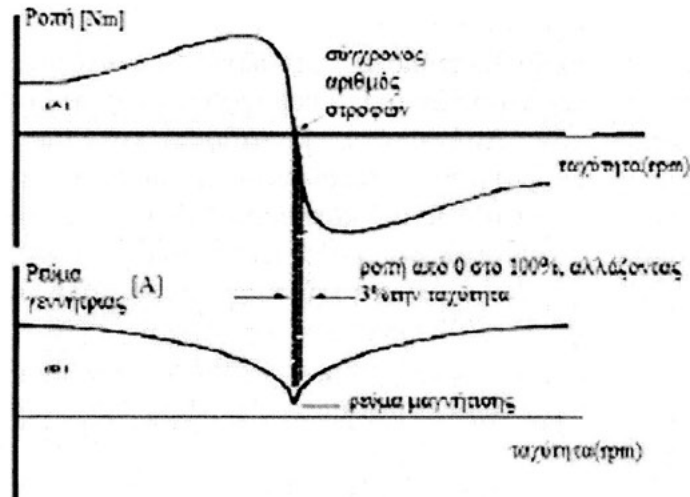
##### Βασικές αρχές λειτουργίας



Σχήμα 1.8 σχηματικό διάγραμμα συστήματος ΣΣΣΣ

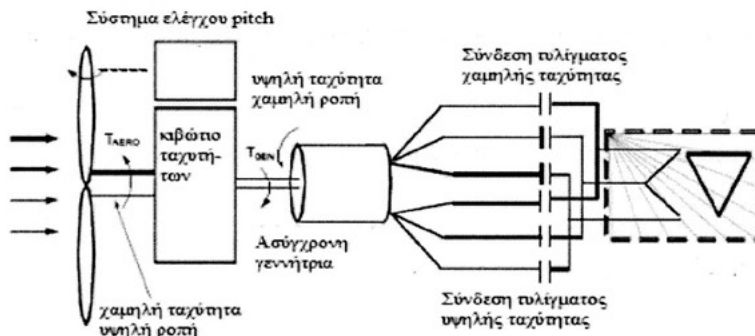
Ο αέρας επιδρά στον ασύγχρονο κινητήρα και παράγει την αεροδυναμική ροπή σχήμα 1.8 Στον άξονα που συνδέει τον ισόχρονο κινητήρα με το κιβώτιο ταχυτήτων έχουμε χαμηλές στροφές αλλά υψηλή ροπή.

Η ροπή διαβιβάζεται μέσω του κιβωτίου ταχυτήτων στη γεννήτρια, το οποίο χρησιμεύει για να αυξήσει την ταχύτητα μέχρι αυτή να γίνει ίση με την επιθυμητή ταχύτητα του άξονα της γεννήτριας. Στην ιδανική περίπτωση η ταχύτητα αυξάνεται σύμφωνα με την αναλογία του κιβωτίων ταχυτήτων ενώ η ροπή μειώνεται στην ίδια αναλογία. Στην πραγματικότητα υπάρχουν απώλειες στο κιβώτιο ταχυτήτων που προκαλούν την απόκλιση από αυτήν την ιδανική σχέση, αλλά οι αποδόσεις είναι αρκετά υψηλές και η σχέση αυτή είναι μια καλή πρώτη προσέγγιση ηλεκτρικής έξοδος της γεννήτριας συνδέεται με ένα γειωμένο τριφασικό μετασχηματιστή. Η γεννήτρια μπορεί να είναι ασύγχρονη βραχυκυκλωμένου κλωβού ή σύγχρονη. Το κιβώτιο ταχυτήτων είναι σχεδιασμένο έτσι ώστε η μέγιστη ταχύτητα του δρομέα της γεννήτριας να αντιστοιχεί στην ονομαστική ταχύτητα αυτής. Στην περίπτωση της σύγχρονης γεννήτριας, το τύλιγμα του δρομέα μπορεί να διεγείρεται με συνεχές ρεύμα ή να υπάρχει αυτοδιέγερση μέσω μονίμων μαγνητών.



Σχήμα 1.9 Χαρακτηριστικές καμπύλες λειτουργίας

1.14.2 Λειτουργία ανεμογεννήτρια.: με δύο ταχύτητες.[8]



Σχήμα 1.10. Σχηματικό διάγραμμα συστήματος ΣΣΣΣ με δύο ταχύτητες

Βασικά αρχές λειτουργίας:

Ο ασύγχρονος κινητήρας μπορεί να συνδέεται με δύο ασύγχρονες γεννήτριες μέσω ενός κιβωτίου ταχυτήτων Η μικρότερη γεννήτρια έχει ένα πιο χαμηλό σύγχρονο αριθμό στροφών η μεγαλύτερη γεννήτρια έχει ένα υψηλότερο σύγχρονο αριθμό στροφών. Σε αυτά τα συστήματα επίσης είναι δυνατόν να συναρτήσουμε την περίπτωση μιας γεννήτριας με δύο τυλίγματα που το κάθε τύλιγμα έχει ένα διαφορετικό αριθμό πόλων (σχ.1.10)

Στην εκκίνηση χρησιμοποιείται η μικρότερη μηχανή η οποία έχει την υψηλότερη αυτεπαγωγή και αντιστάσεις σκέδασης για την εκκίνηση. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα το ρεύμα να είναι χαμηλότερο.

Όταν η ταχύτητα του ανέμου φτάσει σε μια συγκεκριμένη τιμή τότε αποσυνδέεται το τύλιγμα χαμηλής ταχύτητας από το τριφασικό δίκτυο και συνδέεται το τύλιγμα υψηλής ταχύτητας συνήθως υπάρχει μία πολύ μικρή περιοχή ταχυτήτων όπου και τα δύο τυλίγματα είναι συνδεδεμένα Όταν η γεννήτρια συνδέεται με το τύλιγμα χαμηλής ταχύτητας το σύστημα ελέγχου στροφής των πτερυγίων που είναι γύρω από τον άξονά τους ("pitch control") δεν είναι συνήθως ενεργά επειδή η ταχύτητα ανέμου είναι χαμηλή. Σε έναν ασύγχρονο κινητήρα με "pitch control" ο ηλεκτρονικός ελεγκτής του ασύγχρονου κινητήρα ελέγχει την παραγωγή ισχύος του ασύγχρονου κινητήρα ανά δευτερόλεπτο. Όταν η παραγωγή ισχύος γίνεται πάρα πολύ υψηλή τότε στέλνει μια εντολή στο μηχανισμό στροφής των πτερυγίων ώστε τα πτερύγια να αποκλίνουν ελαφρώς από την κατεύθυνση του ανέμου. Αντιθέτως τα πτερύγια επιστρέφουν στην αρχική τους θέση όταν η ταχύτητα του ανέμου μειώνεται πάλι κατά τη διάρκεια της

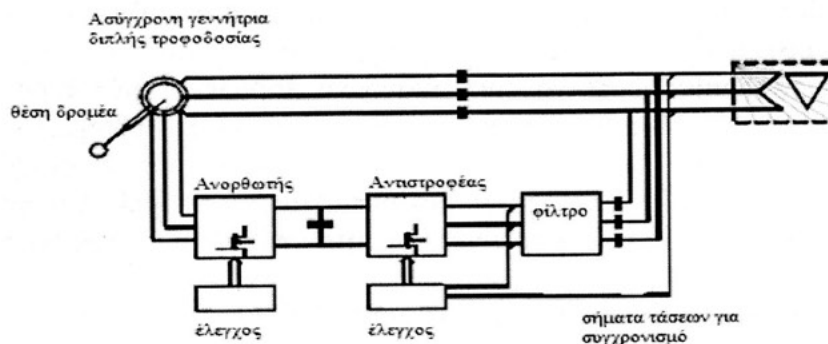


κανονικής λειτουργίας τα πτερύγια θα στραφούν κατά μία μοίρα τη φορά και ο έλικας θα στρίβει συγχρόνως. Ο σχεδιασμός ενός τέτοιου ασύγχρονου κινητήρα απαιτεί πολύ προσοχή ώστε να είναι σίγουρο ότι τα πτερύγια στρίβουν ακριβό όσο απαιτείται. Σε έναν ασύγχρονο κινητήρα με αυτόν τον έλεγχο ο ελεγκτής θα στρέφει τα πτερύγια σε ορισμένες μοίρες κάθε φορά που αλλάζει ο αέρας προκείμενου να κρατηθούν τα πτερύγια στη βέλτιστη γωνία για να μεγιστοποιηθεί η παραγωγή ισχύος για όλες της ταχύτητες ανέμου. Ο έλεγχος στροφής των πτερυγίων γίνεται συνήθως με υδραυλικά μέσα. Όμως πραγματοποιείται και με τη χρήση ηλεκτρικών μέσων

### 1.14.3 Συστήματα Μεταβλητής Ταχύτητας (Σταθερής Συχνότητας Μεταβλητών Στροφών).[8]

Στη δεύτερη κατηγορία συστήματα μεταβλητής ταχύτητας (ή αλλιώς σταθερής συχνότητας μεταβλητών στρόφων οι ανεμογεννήτριες με αυτόν τον τύπο ελέγχου έχουν αναπτυχθεί εντυπωσιακά τα τελευταία χρόνια. Η λειτουργία με μεταβλητή ταχύτητα μπορεί να επιτευχθεί μόνο με την αποσήζευξη της ηλεκτρικής συχνότητας του δικτύου και της μηχανικής συχνότητας. Για αυτόν τον λόγο οι ηλεκτρονικοί μετατροπείς ισχύος όπως ένας μετατροπέας συνεχούς τάσεως σε εναλλασσόμενη τάση, συνδυάζονται με τα προηγμένα συστήματα ελέγχου. Σε αυτήν την κατηγορία ανήκουν τα παρακάτω συστήματα

### 1.14.4 Συστήματα μεταβλητής ταχύτητας με γεννήτρια διπλής τροφοδοσία.[8]



Σχήμα 1.11. Σχηματικό διάγραμμα του συστήματος μεταβλητής ταχύτητας με γεννήτρια διπλής τροφοδοσίας

Βασικές αρχές λειτουργίας:

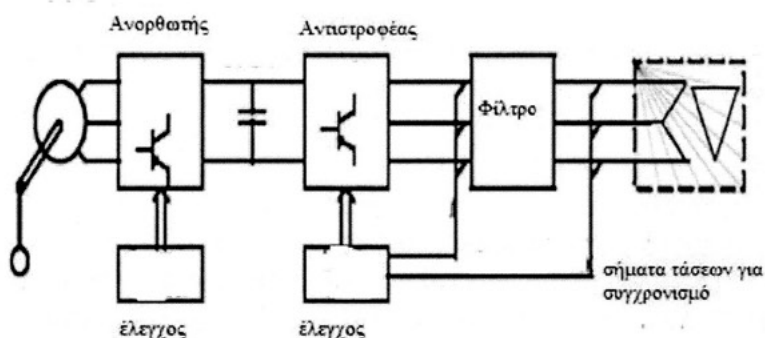
Αποτελείται από μια ασύγχρονη γεννήτρια δακτυλιοφόρου δρομέα με τα τυλίγματα του στάτη απευθείας συνδεδεμένα με το τριφασικό δίκτυο και με τα τυλίγματα του δρομέα συνδεδεμένα μέσω δακτυλίων ολίσθησης και ψηκτρών με ένα μετατροπέα ισχύος ΕΡ/ΣΡ/ΕΡ (back to back AC/DC/AC). Ο μετατροπέας είναι διπλής κατεύθυνσης ισχύος. Αποτελείται από δύο ανεξάρτητα ελεγχόμενους μετατροπείς τάσεις που συνδέονται σε ένα κοινό ζυγό συνεχούς ρεύματος. Ο πυκνωτής μεταξύ των δύο μετατροπέων σταθεροποιεί την τάση (σχ. 1.11). Η συμπεριφορά της γεννήτριας εξαρτάται από αυτούς τους μετατροπείς και τους ελεγκτές τους τόσο στη μόνιμη κατάσταση όσο και σε συνθήκες σφαλμάτων. Οι μετατροπείς ελέγχουν την τάση του δρομέα κατά πλάτος και κατά φάση και ως εκ τούτου χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο της ενεργούς και άεργου ισχύος. Το σύστημα αυτό επιτρέπει τη λειτουργία μεταβλητής ταχύτητας σε ένα μεγάλο βαθμό αλλά περιορισμένο εύρος. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα η ισχύς που πρέπει να διαχειριστεί ο μετατροπέας να είναι περίπου στο



30% της ονομαστικής ισχύος της γεννήτριας. Έτσι το μέγεθος του μετατροπέα είναι αντίστοιχο της ισχύος που διαχειρίζεται δηλαδή της ισχύος ολίσθησης το οποίο είναι αρκετά μικρό σε σχέση με την ονομαστική ισχύ. Αυτό οδηγεί σε μείωση του κόστους του μετατροπέα. Αξίζει όμως να σημειωθεί ότι επειδή το εύρος της ταχύτητας είναι περιορισμένο η επαγόμενη τάση είναι ένα κλάσμα αυτής του δικτύου και συγκεκριμένα εξαρτάται από το λόγο των τυλιγμάτων μεταξύ του δρομέα και του στάτη. Η τάση του ζυγού συνεχούς ρεύματος είναι σχετικά χαμηλή. Το σύστημα αυτό χρησιμοποιείται για να επιτευχθεί ένα μεγάλο εύρος λειτουργίας από την υπερσύγχρονη μέχρι την υπερσύγχρονη λειτουργίας της δηλαδή η γεννήτρια να λειτουργεί και με αρνητική ολίσθηση και με θετική. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί στην περίπτωση που ο μετατροπέας ισχύος μπορεί να λειτουργήσει με ροή ισχύος και θ προς τις δυο κατευθύνσεις. Αυτό είναι και ο λόγος που χρησιμοποιείται η τοπολογία των EP/ΣP/EP μετατροπέα διπλής κατεύθυνσης. Η ολίσθηση ορίζεται από τον τύπο  $S=(n_{syn}-n_{gen})/n_{syn}$

όπου  $n_{syn}$  και  $n_{gen}$  είναι αντίστοιχα η σύγχρονη ταχύτητα και η ταχύτητα της γεννήτριας σε στροφές ανά λεπτό (rpm). Υποθέτοντας ότι όλες οι απώλειες στα κυκλώματα του στατη και του δρομέα μπορούν να αμεληθούν η ισχύς μέσω του μετατροπέα ισχύος και η αποδιδόμενη ισχύς του στάτη που είναι βασισμένη στην μηχανική ισχύς. Η παρουσία του μετατροπέα ισχύος επιτρέπει στην γεννήτρια διπλής τροφοδοσίας μία πιο ευέλικτη λειτουργία σε σχέση με μια γεννήτρια βραχυκυκλωμένου κλωβού. Επίσης πετυχαίνει απόζευξη της μηχανικής συχνότητας από την ηλεκτρική συχνότητα μέσω ρευμάτων μεταβλητής συχνότητας στο δρομέα πάντα όμως σύμφωνα με την ταχύτητα του άξονα. Μέσω των δαχτυλιών ο μετατροπέας τροφοδοτεί τα τυλίγματα του δρομέα με την τάση μεταβλητού πλάτους και συχνότητας και έτσι μπορεί να επιτευχθεί ο έλεγχος της άεργου ισχύος εφόσον η γεννήτρια διπλής τροφοδοσίας ώστε να είναι ικανή να παράγει η να απορροφήσει άεργος ισχύς προς η από το δίκτυο με τη δυνατότητα ελέγχου της τάσης. Επιπλέον επιτυγχάνεται η απόζευξη του ελέγχου ενεργούς και άεργου ισχύος με ανεξάρτητο έλεγχο του ρεύματος του δρομέα. Επίσης ο μετατροπέας ισχύος μπορεί να μαγνητίσει τη μηχανή μέσα από το κύκλωμα του δρομέα ανεξάρτητα από την τάση του δικτύου

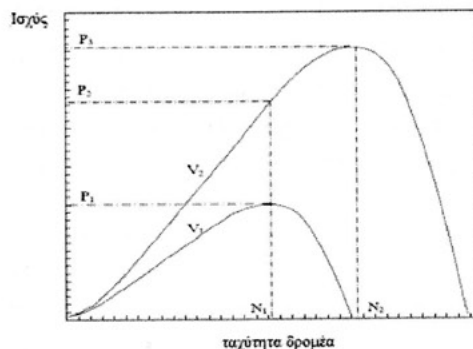
#### 1.14.5 Σύστημα μεταβλητής ταχύτητας με πλήρη μετατροπή.[8]



Σχήμα 1.12 σχηματικό διάγραμμα του συστήματος με πλήρη μετατροπή

• Η ορολογία πλήρης μετατροπή χρησιμοποιείται επειδή υπάρχει μόνο μια ηλεκτρική σύνδεση στη γεννήτρια και όλη η ισχύς μετατρέπεται μέσω αυτής της σύνδεσης στον πλήρη μετατροπέα ισχύος για τη διασύνδεση με το δίκτυο. Συγκρίνοντας τις δυο μεθόδους μεταβλητής ταχύτητας το ένα πλεονέκτημα που μπορεί να παρατηρηθεί στην περίπτωση αυτή είναι ότι οι ηλεκτρονικοί μετατροπείς ισχύος είναι έτσι ώστε να περνάει το 1/3 της συνολικής ισχύος. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα οι ηλεκτρονικοί

μετατροπείς να είναι και πιο φθηνοί από αυτούς που χρησιμοποιούνται στην περίπτωση του συστήματος με πλήρης μετατροπή. Επίσης σε αυτήν την περίπτωση έχουμε και λιγότερες απώλειες ισχύος σε σχέση με το σύστημα με πλήρης μετατροπή εφόσον εκμεταλλευόμαστε μια πολύ μεγαλύτερη περιοχή ταχυτήτων ανέμου και κύκλος επειδή χρησιμοποιούμε και πολύ χαμηλές ταχύτητες ανέμου. Ακόμα ένα άλλο πλεονέκτημα της διπλής τροφοδοτούμενης γεννήτριας είναι ότι παράγει μεγαλύτερη ισχύ για δεδομένη ταχύτητα ανέμου και ο έλεγχος των σημαντικών μεγεθών της είναι πιο εύκολος. Τέλος κάνοντας μια σύγκριση μεταξύ αυτών των δύο κατηγοριών παρατηρούμε ότι οι ανεμογεννήτριες σταθερής ταχύτητας είναι απλές στην κατασκευή και έτσι τείνουν να είναι φθηνότερες από αυτές που χρησιμοποιούν τη μέθοδο της μεταβλητής ταχύτητας. Εντούτοις δεδομένου ότι δεν μπορούν να ακολουθήσουν πάντα την μεταβαλλόμενη ταχύτητα του ανέμου η μετατροπή της ενέργειας δεν είναι τόσο αποδοτική όσο στα συστήματα σταθερής ταχύτητας. Όπως είναι εφικτό ένας ανεμοκινητήρας έχει το μέγιστο συντελεστή ισχύος στην καθορισμένη τιμή από τον κατασκευαστή του. Για τη σταθερής ταχύτητας λειτουργίας αυτός ο μέγιστος συντελεστής ισχύος μπορεί να επιτευχθεί σε συγκεκριμένη ταχύτητα ανέμου όπου είναι η ταχύτητα ανέμου, στην οποία ο Α Κ λειτουργεί με μια ταχύτητα  $N1$  και παράγει μια ισχύ  $P1$ . Σε αυτήν την ταχύτητα ανέμου, ο Α Κ λειτουργεί στο μέγιστο συντελεστή ισχύος. Όμως όταν μεταβάλλεται η ταχύτητα ανέμου από  $V_1$  σε  $V_2$ , δεδομένου ότι το σύστημα σταθερής ταχύτητας μπορεί να λειτουργήσει μόνο με την ίδια ταχύτητα  $N1$ , η ισχύ που αναπτύσσεται είναι  $P2$ . Κατά συνέπεια, η μέγιστη ισχύ  $P3$  που παράγεται από το δρομέα για ταχύτητα ανέμου  $V2$  δεν χρησιμοποιείται πλήρως από το σύστημα, δεδομένου ότι ο ασύγχρονος κινητήρας πρέπει να λειτουργήσει με τη σταθερή ταχύτητά του  $N1$ .



Σχήμα 1.13 Ισχύς Α/Κ συναρτήσει ταχύτητας δρομέα σε δύο διαφορετικές ταχύτητες ανέμου

Αφ' ετέρου, στην περίπτωση της λειτουργίας με μεταβλητή ταχύτητα, το σύστημα μπορεί να σχεδιαστεί για να λειτουργήσει με μια ταχύτητα  $N2$  για ταχύτητα ανέμου  $V2$  και έτσι θα έχουμε ως αποτέλεσμα την παραγωγή μεγαλύτερης ισχύος  $P3$  σε αυτήν την ταχύτητα. Συμπεραίνουμε, λοιπόν, ότι η λειτουργία με μεταβλητή ταχύτητα επιτρέπει στον ασύγχρονο κινητήρα να λειτουργήσει σε βέλτιστο επίπεδο σε ένα ευρύ φάσμα ταχυτήτων ανέμου. Με άλλα λόγια, επιτρέποντας στον ασύγχρονο κινητήρα να λειτουργήσει με μεταβλητή ταχύτητα, η εκμετάλλευση ενέργειας μπορεί να μεγιστοποιηθεί. Αυτό είναι ιδιαίτερα θετικό σε τοποθεσίες με ιδιαίτερα μεταβαλλόμενες συνθήκες αέρα. Η ενέργεια μπορεί να είναι 5% έως 15% μεγαλύτερη σε μερικές συγκεκριμένες περιοχές.

Λειτουργώντας τον ασύγχρονο γεννήτρια με μεταβαλλόμενη ισχύ οδηγούμεστε σε διακυμάνσεις στη ροπή της μηχανής. Όταν όμως, η ταχύτητα επιτρέπεται να μεταβάλλεται, η ροπή μπορεί να κρατηθεί σχεδόν σταθερή μέσα σε ένα ευρύ φάσμα ισχύος. Αυτό μειώνει τις καταπονήσεις που επιβάλλονται στα τμήματα της

κατασκευής και έτσι ο ασύγχρονος κινητήρας μπορεί να γίνει ελαφρύτερος και φτηνότερος. Ο δρομέας, που λειτουργεί με μεταβλητή ταχύτητα, μπορεί να απορροφήσει την υπερβολική ενέργεια λόγω μιας ριπής ανέμου με το να επιταχύνει και να την δώσει στο σύστημα, όταν μειώνεται η ταχύτητα του ανέμου. Δεδομένου ότι η περιστροφική ταχύτητα είναι χαμηλή στις χαμηλότερες ταχύτητες ανέμου, οι ασύγχρονος κινητήρας με μεταβλητή ταχύτητα είναι λιγότερο θορυβώδεις καθιστώντας τους ηχητικά αποδεκτές.

#### 1.14.6 Μετατροπή Αιολικής Ενέργειας Σε Ηλεκτρική Ενέργεια Με Τη Μέθοδο CASCADE.[8]

##### ΒΑΣΙΚΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ

Ο μετατροπέας αποτελείται από δύο τριφασικές γέφυρες με διόδους και θυρίστορ (σχήμα 3). Η πρώτη αναλαμβάνει την ανόρθωση της τάσης του δρομέα, ενώ η γέφυρα με τα θυρίστορ αναλαμβάνει την αντιστροφή της στη συχνότητα του δικτύου. Το πηνίο απαιτείται για να εξομαλυνθεί η συνεχής τάση και ο μετασχηματιστής υπάρχει για να προσαρμόζει την αντιστραμμένη πλέον τάση στην εναλλασσόμενη τάση του δικτύου. Ο έλεγχος της ταχύτητας έγκειται στο γεγονός ότι ρυθμίζεται το ρεύμα που ρέει στο κύκλωμα του δρομέα, το οποίο σε μόνιμη κατάσταση θα είναι τέτοιο, ώστε να ικανοποιεί το μηχανικό φορτίο του κινητήρα. Η ανάστροφη στην επαγόμενη του δρομέα τάση, που θα ρυθμίσει το ρεύμα του δρομέα προκύπτει και ρυθμίζεται μέσω των γεφυρών διόδων και θυρίστορ, επιτυγχάνεται δε με ρύθμιση της γωνίας έναυσης των θυρίστορ. Είναι γνωστό ότι η τάση που επάγεται στα τυλίγματα του δρομέα της μηχανής ισούται με  $U_{RO}$ , όπου  $U_{RO}$  η επαγόμενη τάση όταν ο δρομέας είναι ακίνητος, ενώ  $s$  είναι η ολίσθηση του κινητήρα. Αν η αναλογία των τυλιγμάτων στάτη-δρομέα είναι  $\lambda$ , τότε  $U_{RO}=U_s/\lambda$  με  $U_s$  την πολική τάση. Έτσι η πολική τάση της γέφυρας των διόδων είναι  $U_s/\lambda$ . Με βάση την κλασσική θεωρία των ηλεκτρονικών ισχύος η συνεχής τάση στην έξοδο της ανορθωτικής γέφυρας προκύπτει:

$$U_d = \frac{3 \cdot \sqrt{2}}{\pi} \cdot \frac{s}{\lambda} \cdot U_s$$

Ομοίως, αν ο μετασχηματιστής έχει λόγω  $m$ , τότε η είσοδος του αντιστροφέα είναι:

$$U_{di} = \frac{3 \cdot \sqrt{2}}{\pi} \cdot \frac{1}{m} \cdot U_s \cdot \cos \alpha$$

με  $\alpha$  τη γωνία έναυσης των θυρίστορ. Το αρνητικό πρόσημο στη σχέση δείχνει, ότι η γέφυρα των θυρίστορ λειτουργεί ως αντιστροφέας, δηλαδή η γωνία έναυσης θα μεταβάλλεται από  $90^\circ$ - $180^\circ$  ώστε το  $\cos \alpha$  να παίρνει αρνητικές τιμές. Η τελευταία σχέση, αν και πρόκειται για οριακό σημείο λειτουργίας, δείχνει ότι η ολίσθηση μπορεί να ρυθμιστεί μεταβάλλοντας τη γωνία έναυσης. Στην πραγματικότητα εξαρτάται και από το ρεύμα του δρομέα, που είναι ένα μέτρο για το φορτίο του κινητήρα.

Αν η αντίσταση του δρομέα αμεληθεί η ισχύς ολίσθησης είναι περίπου ίση με την ισχύ στο κύκλωμα συνεχούς ρεύματος μεταξύ των δύο γεφυρών (PD η ισχύς του διακένου).

$$M = \frac{3 \cdot \sqrt{2}}{\pi} \cdot \frac{U_s \cdot I_d}{\omega_s}$$

όπου  $M$  η ροπή που αναπτύσσει ο κινητήρας και  $\omega_s$  ο σύγχρονος αριθμός στροφών. Τελικά η ροπή σταθερής κατάστασης είναι ανάλογη του ανορθωμένου ρεύματος του δρομέα (και όχι άμεσα της ολίσθησης), το οποίο είναι ανάλογο της διαφοράς της

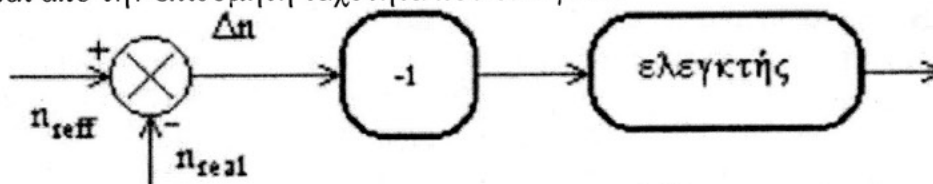
τάσης εξόδου του ανορθωτή και της τάσης εισόδου του αντιστροφέα (διαφορά μέσω των τιμών). Για σταθερή γωνία έναυσης η τάση του αντιστροφέα είναι επίσης σταθερή, με αποτέλεσμα η ολίσθηση να αυξάνεται σχεδόν γραμμικά με τη ροπή φορτίου δίνοντας στη χαρακτηριστική ροπής-αριθμού στροφών μια μορφή που μοιάζει πολύ με παράλληλα μετατεθειμένη χαρακτηριστική ενός κινητήρα βραχυκυκλωμένου κλωβού.

#### 1.14.6.1 Περιγραφή Του Αυτόματου Ελέγχου .[8]

Όπως φαίνεται και στο σχήμα 3, για το υπό έλεγχο σύστημα το κέντρο ελέγχου είναι ο μικροϋπολογιστής, ο οποίος αναλαμβάνει πρωτίστως την παραγωγή των παλμών έναυσης με καθυστέρηση είτε συγκεκριμένη που θέτει ο χειριστής, είτε προσαρμοζόμενη, όταν ο χειριστής επιθυμεί συγκεκριμένη ταχύτητα, ανεξαρτήτως του μεγέθους του μηχανικού φορτίου. Για την τελευταία περίπτωση ο αεροελεγκτής χρειάζεται ανατροφοδότηση του σήματος της ταχύτητας, που επιτυγχάνεται με τη βοήθεια μιας ταχογεννήτριας και ενός απλού κυκλώματος προσαρμογής του. Τα υπόλοιπα κυκλώματα σκοπό έχουν την ενίσχυση και απομόνωση των παλμών έναυσης, το συγχρονισμό τους, την προσαρμογή του ρεύματος σε ασφαλείς τιμές και την επικοινωνία του χρήστη με τον μικροελεγκτή μέσω ενός προσωπικού υπολογιστή. Χρησιμοποιήθηκε ο μικροελεγκτής 80C196KC της INTEL και πέρα από το πλούσιο σύνολο εντολών, την ταχύτητα εκτέλεσης αυτών και την απλότητα στη λογική προγραμματισμού, διαθέτει και ειδικές μονάδες που τον καθιστούν ένα ισχυρό εργαλείο για οποιαδήποτε σχεδόν βιομηχανική εφαρμογή. Ιδιαίτερα ο ενσωματωμένος σε αυτόν μετατροπέας A/D κράτησε τον αριθμό των εξωτερικών κυκλωμάτων μικρό με τελικό αποτέλεσμα την απλότητα του συστήματος.

#### 1.14.6.2 Μελέτη Του Κλειστού Βρόχου Και Υλοποίηση Του Ελεγκτή .[8]

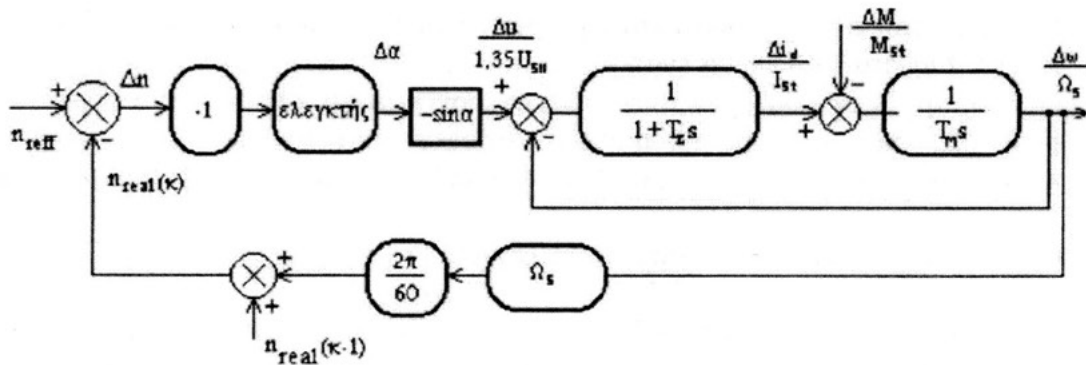
Όπως έχει αναφερθεί, το σήμα της ταχογεννήτριας, αφού προσαρμοστεί, εισάγεται στη κάρτα του μικροελεγκτή. Αυτός "αποφασίζει" για την τιμή του ρεύματος, που θα πρέπει να ρέει στο κύκλωμα συνεχούς ρεύματος. Το παρακάτω σχήμα δείχνει τον τρόπο, που ανιχνεύεται το σφάλμα της ταχύτητας και μέσω του ελεγκτή καθορίζεται η μεταβολή της γωνίας έναυσης. Η πραγματική ταχύτητα που μετράει η ταχογεννήτρια αφαιρείται από την επιθυμητή ταχύτητα που εισάγεται



Σχ. 1.14 Χονδρικό διάγραμμα προσδιορισμού της μεταβολής της γωνίας έναυσης στον αντίστοιχο καταχωρητή στη μνήμη του μικροελεγκτή με τη βοήθεια του προσωπικού υπολογιστή.

Ο συντελεστής έχει προστεθεί στο διάγραμμα για να δηλώσει, ότι στην επιτάχυνση χρειαζόμαστε μείωση της γωνίας έναυσης, ενώ στην επιβράδυνση αύξηση. Είναι χρήσιμο να γνωρίζει κανείς το μεταβατικό μοντέλο του συστήματος cascade, ώστε να γνωρίζει τι είδους φαινόμενα θα επιφέρει μια ενδεχόμενη μεταβολή της γωνίας έναυσης, καθώς επίσης και πώς επιδρούν στη μεταβατική συμπεριφορά οι ηλεκτρομηχανικές σταθερές. Στο σχήμα που ακολουθεί δίνεται το συνολικό χονδρικό διάγραμμα του συστήματος, που ισχύει για τη γραμμική περιοχή των χαρακτηριστικών καμπύλων του cascade.





Σχ. 2 Συνολικό χονδρικό διάγραμμα

Ο όρος  $\eta(k)$  εκφράζει τη ταχύτητα, όπως μετρήθηκε τη χρονική στιγμή  $k$  (αριθμός δειγματοληψίας). Το ότι ο χρόνος είναι διακριτός είναι μια απαραίτητη θεώρηση, επειδή η μέτρηση της ταχύτητας και η ρύθμιση της γωνίας έναυσης δεν γίνονται συνεχώς, αλλά μια φορά σε κάθε περίοδο. Η συχνότητα δειγματοληψίας είναι ίση με τη συχνότητα των ηλεκτρικών μεγεθών του στάτη. Όταν αυτή είναι 50Hz διαπιστώσαμε πειραματικά ότι ο ρυθμός μεταβολής των στροφών δεν υπερβαίνει τις  $I_0$  ανά περίοδο. Δεδομένου ότι υπάρχει ένα μικρό σφάλμα στη μετρούμενη ταχύτητα, λόγω της αναπόφευκτης ανακρίβειας του κυκλώματος προσαρμογής και της μη γραμμικότητας της ταχογεννήτριας, δε θα είχε ιδιαίτερη σημασία ο χρόνος δειγματοληψίας να γίνει μικρότερος. Ο χρόνος αυτός όμως θα μπορούσε να μειωθεί περαιτέρω με μια απλή τροποποίηση του λογισμικού.

Στον κλασικό αυτόματο έλεγχο και για ένα σύστημα με αντιστάθμιση σειράς όπως το παραπάνω, η λογική που επικρατεί είναι να ενισχυθεί το σφάλμα ανατροφοδότησης έτσι, ώστε να προσεγγίζεται η επιθυμητή στάθμη ( $n_{ref}$ ) όσο το δυνατό πιο γρήγορα και πιο πιστά. Με βάση τις αρχές του ψηφιακού ελέγχου, ένας P.I.D. ελεγκτής για τη δική μας εφαρμογή θα πρέπει να έχει την εξής μορφή:

$$\Delta\alpha(k) = -K_p \cdot \left[ \Delta n(k) + \frac{T}{T_i} \cdot \sum_{i=0}^k \Delta n(i) + \frac{T_d}{T} \cdot (\Delta n(k) - \Delta n(k-1)) \right]$$

Ο πρώτος όρος αυτού του αθροίσματος μαζί με το συντελεστή εκτός της παρένθεσης εκφράζει τον αναλογικό έλεγχο. Ο συντελεστής αυτός είναι κοινός για όλους τους όρους του αθροίσματος και είναι η απολαβή του αναλογικού ελέγχου, επηρεάζει δε την ταχύτητα απόκρισης και έχει σχέση με το μόνιμο σφάλμα. Το  $T_i$  έχει σχέση με την εξάλειψη αυτού του μόνιμου σφάλματος, το  $T_d$  με την ταλαντωτική συμπεριφορά της εξόδου και παράλληλα κάνει την απόκριση του συστήματος ταχύτερη, ενώ το  $T$  εκφράζει το χρόνο δειγματοληψίας. Στις ενδεικτικές αποκρίσεις της ταχύτητας που παρουσιάζονται στα διαγράμματα επιβεβαιώνεται η φύση της κάθε παραμέτρου. Η προηγούμενη εξίσωση ουσιαστικά υπολογίζει τη μεταβολή της γωνίας έναυσης  $\alpha$  σε σχέση με το σφάλμα ταχύτητας που καταγράφεται. Ένα από τα σπουδαιότερα προβλήματα που προκύπτουν κατά την υλοποίηση του ελεγκτή είναι ο καθορισμός των παραπάνω παραμέτρων, ιδιαίτερα όταν δε γίνεται μαθηματική ανάλυση του μοντέλου, όπως συμβαίνει και εδώ. Υπάρχουν διάφορες μέθοδοι για μια πρώτη εκτίμηση αυτών, ώστε να μπορεί κανείς να καταλήξει στις ακριβείς τιμές μετά από τα κατάλληλα πειράματα. Εδώ υιοθετήθηκε η μέθοδος του ορίου ευστάθειας. Σύμφωνα με αυτή χρησιμοποιούμε μόνο τον αναλογικό ελεγκτή με τέτοιο  $k_p$ , ώστε η ταχύτητα να ταλαντώνεται αμείωτα. Σε αυτή τη κατάσταση καταγράφουμε τη τιμή του  $k_p$ , καθώς και την περίοδο της ταλάντωσης  $T_x$ . Στη δική μας εφαρμογή διαπιστώθηκαν οι



τιμές  $k_p=0,24$  και  $T_x=4\text{sec}$ . Ανάλογα με τον ελεγκτή, που θέλουμε να υλοποιήσουμε, οι ενδεικτικές τιμές των παραμέτρων είναι:

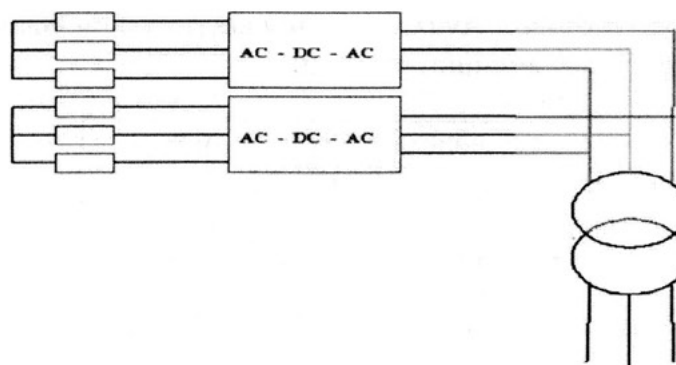
controller	$k_p$	$T_x$
P	0,5 $k_p$	8.33 sec
PL	0,45 $k_p$	7.5 sec
P.I.D	0.6 $k_p$	10 sec

Πίνακας 1

Π.1 Αρχική εκτίμηση των παραμέτρων των τριών ελεγκτών βάση της μεθόδου του ορίου ευστάθειας κατά Ziegler-Nichols. Οι βέλτιστες τιμές στις οποίες καταλήγουμε είναι κοντά στις τιμές των Ziegler-Nichols, επιβεβαιώνοντας έτσι την όποια ισχύ της μεθόδου.

#### 1.15 ΔΙΑΣΥΝΔΕΣΗ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ ΜΕ ΤΟ ΔΙΚΤΥΟ ΜΕΣΩ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΩΝ ΙΣΧΥΟΣ.[8]

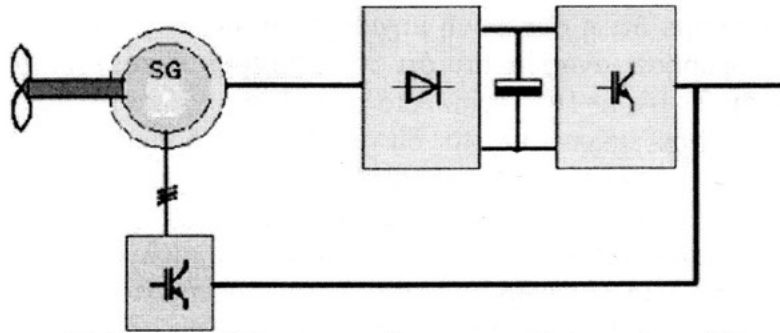
Δύο από τους τρόπους διασύνδεσης αιολικών πάρκων με το δίκτυο μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας είναι είτε μέσω ηλεκτρονικών μετατροπέων ισχύος είτε κατευθείαν. Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζεται η πρώτη περίπτωση βασιζόμενη στον τρόπο διασύνδεσης των ανεμογεννητριών μιας γνωστής γερμανικής εταιρείας ανεμογεννητριών. Οι ανεμογεννήτριες που κατασκευάζει η συγκεκριμένη εταιρεία έχουν το χαρακτηριστικό ότι η κάθε ηλεκτρογεννήτρια (σύγχρονη) είναι απευθείας οδηγούμενη (direct-driven) από τον ανεμοκινητήρα. Σύμφωνα με τις προδιαγραφές της εταιρείας η τάση που παράγει η μηχανή είναι η ονομαστική (400V) εφόσον ο δρομέας (A/K) περιστρέφεται μέσα στην περιοχή επιτρεπτών ταχυτήτων του και το μόνο μέγεθος που μεταβάλλεται είναι η συχνότητα που παράγει η γεννήτρια, η οποία είναι διαφορετική από 50Hz. (Λόγω του χαρακτηριστικού της ηλεκτρογεννήτριας να διατηρεί σταθερή την τάση της η εταιρεία έχει δώσει ένα ιδιαίτερο όνομα στις γεννήτριες και τις ονομάζει ring generators). Η ταχύτητα περιστροφής του ανεμοκινητήρα εξαρτάται από την ταχύτητα του αέρα. Συνεπώς για να υπάρχει σύνδεση με το δίκτυο είναι απαραίτητη η ύπαρξη διπλής γέφυρας με ηλεκτρονικά ισχύος, ο λεγόμενος ηλεκτρονικός μετατροπέας ισχύος. Ο τελευταίος αναλαμβάνει το ρόλο του συγχρονισμού της σύγχρονης μηχανής με το ισχυρό δίκτυο αφού φροντίζει να οδηγεί στην έξοδο την τάση που παράγει η σύγχρονη γεννήτρια και να μετατρέπει τη συχνότητά της σε 50Hz που είναι η ονομαστική τιμή. Όσον αφορά την τάση που παράγει η σύγχρονη γεννήτρια το ύψος εξαρτάται εκτός της ταχύτητας περιστροφής του δρομέα και από τη διέγερσή του, δηλαδή από το μαγνητικό πεδίο. Η διέγερση φροντίζει ώστε η τάση που παράγεται από τη σύγχρονη γεννήτρια να είναι σταθερή. Η ανεμογεννήτρια της εν λόγω εταιρείας συνδέεται με το δίκτυο μέσω δύο ηλεκτρονικών μετατροπέων ισχύος. Ο λόγος ύπαρξης των δύο ηλεκτρονικών μετατροπέων είναι επειδή υπάρχουν 6 φάσεις στη σύγχρονη γεννήτρια. Ο τρόπος σύνδεσης των τυλιγμάτων της σύγχρονης γεννήτριας με τους ηλεκτρονικούς μετατροπείς ισχύος και κατόπιν με το δίκτυο είναι αυτός που φαίνεται στο σχήμα 1.5. Βλέπουμε από το εν λόγω σχήμα ότι τα τυλίγματα της μηχανής είναι συνδεδεμένα σε αστέρα ανά τρία.



Σχήμα 1.15: Σύνδεση της Σ.Μ. μέσω ηλεκτρονικού μετατροπέα ισχύος με το δίκτυο διανομής.

Στη συνέχεια τα τυλίγματα συνδέονται με τον ηλεκτρονικό μετατροπέα ισχύος και καταλήγουν στο μετασχηματιστή ανύψωσης τάσης. Όσον αφορά την λειτουργία των ηλεκτρονικών μετατροπέων ισχύος θα γίνει μια σύντομη περιγραφή του ενός και τα ίδια ισχύουν και για τον άλλο. Ο ηλεκτρονικός μετατροπέας ισχύος αυτός είναι Ε.Ρ.-Σ.Ρ.-Ε.Ρ. (AC-DC- AC) ο οποίος όπως φαίνεται και από το σχήμα 1.6 αποτελείται από δύο μέρη, το μετατροπέα Ε.Ρ.-Σ.Ρ. που είναι στη μεριά της μηχανής και το μετατροπέα που είναι στη μεριά του δικτύου Σ.Ρ.-Ε.Ρ. Ο μετατροπέας στη μεριά της μηχανής είναι ανορθωτής δηλαδή Ε.Ρ.-Σ.Ρ. ο οποίος μετατρέπει την εκάστοτε εναλλασσόμενη τάση που βγάζει η μηχανή σε συνεχή. Η ανόρθωση γίνεται με διόδους ισχύος όπως φαίνεται στο εν λόγω σχήμα, συνεπώς δεν υπάρχει η δυνατότητα αντιστροφής της φοράς του ρεύματος. Παρόλο αυτά αν αυτό χρειαζόταν θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί γέφυρα με IGBT ή με αντιπαράλληλες διόδους ισχύος. Στην πλευρά του μετατροπέα στην οποία επικρατεί συνεχής τάση υπάρχουν και κατάλληλοι πυκνωτές οι οποίοι εξομαλύνουν και διατηρούν σταθερή την τάση. Εν συνεχεία ο μετατροπέας που είναι στην πλευρά του δικτύου είναι γέφυρα με IGBT η οποία είναι ο αντιστροφέας δηλαδή μετατρέπει με κατάλληλο κύκλωμα παλμοδότησης τη συνεχή τάση σε εναλλασσόμενη με χαρακτηριστικά 400V-50Hz.

Όσον αφορά την εκκίνηση της σύγχρονης μηχανής αυτή γίνεται με τη βοήθεια του ανέμου ο οποίος έχει το ρόλο της κινητήριας δύναμης. Εφόσον η ταχύτητα του ανέμου είναι κατάλληλη δηλαδή ίση με την ταχύτητα σύζευξης τότε ο ανεμοκινητήρας αρχίζει και περιστρέφεται. Εν συνεχεία με ξεχωριστό κύκλωμα διέγερσης το οποίο όπως φαίνεται στο σχήμα 1.16 αποτελείται από ένα ηλεκτρονικό μετατροπέα ισχύος Ε.Ρ.-Σ.Ρ. ο οποίος ανορθώνει την τάση του δικτύου και τη μετατρέπει σε συνεχή η οποία τελικά θα αποτελέσει τη διέγερση του δρομέα. Καθώς η ταχύτητα του ανέμου μεταβάλλεται ο εν λόγω μετατροπέας παρακολουθεί τις αλλαγές στην ταχύτητα του Α/Κ και ρυθμίζει ανάλογα τη διέγερση ώστε η τάση να είναι αυτή που πρέπει. Ο ηλεκτρονικός μετατροπέας ισχύος δεν παίζει μόνο το ρόλο που είδαμε, αλλά ρυθμίζει και την άεργο ισχύ της γεννήτριας. Σε περίπτωση που στη μεριά του ηλεκτρονικού μετατροπέα ισχύος που είναι στο δίκτυο παρατηρηθεί μείωση της τάσης τότε θα μειωθεί και η τάση στην περιοχή του μετατροπέα που επικρατεί συνεχής τάση και κατόπιν η τάση της γεννήτριας, οπότε ο μετατροπέας μέσω πολυάριθμων μικροελεγκτών δίνει εντολή στο κύκλωμα διέγερσης να αυξηθεί το ρεύμα διέγερσης στο δρομέα της σύγχρονης μηχανής οπότε αντίστοιχα θα ανεβεί η τάση της γεννήτριας και η συχνότητα και η γεννήτρια θα τροφοδοτήσει τελικά το δίκτυο με άεργο ισχύ. Έτσι ο μετατροπέας με τον τρόπο αυτό καθορίζει και τον τρόπο λειτουργίας της σύγχρονης γεννήτριας (χωρητικά ή επαγωγικά).



Σχήμα 1.16 Ηλεκτρονικός μετατροπέας ισχύος A/G

Ο μετατροπέας εκτός από το να πραγματοποιεί όσα αναφέρθηκαν παραπάνω πρέπει να φροντίζει ώστε οι στροφές του ανεμοκινητήρα να είναι κατάλληλες ώστε να πετυχαίνετε λειτουργία του (ανεμοκινητήρα) στο μέγιστο  $C_p$  για κάθε ταχύτητα ανέμου. Συνεπώς απαιτείται να υπάρχουν τέτοιες στροφές του δρομέα ώστε να υπάρχει το  $\lambda_{opt}$ , και το  $C_{p_{opt}}$ . Αυτό είναι ευθύνη του αναστροφέα αφού ρυθμίζει την ενεργό ισχύ που στέλνεται στο δίκτυο συνεπώς με βάση τον τύπο:

$$D_{\Omega}/dt = (1/j) * (M_{wind} - M_{elec.})$$

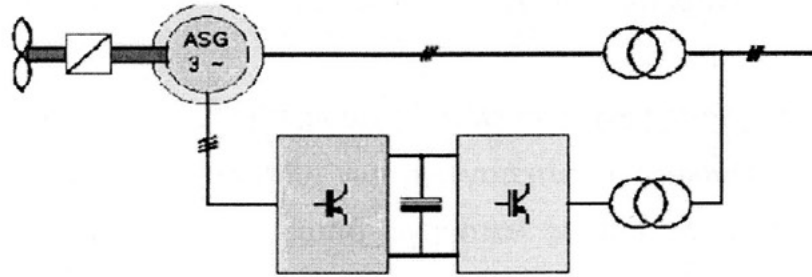
επηρεάζεται ο αριθμός περιστροφής του δρομέα. Ο αναγνώστης πρέπει να λάβει υπόψη του ότι η βέλτιστη ταχύτητα  $\Omega_{OPT}$  περιστροφής του δρομέα είναι συνάρτηση της ταχύτητας του ανέμου, της ακτίνας του πτερυγίου, της γωνίας pitch και πολλών άλλων παραμέτρων. Ο ηλεκτρονικός μετατροπέας ισχύος προκειμένου να πετύχει όλα τα παραπάνω πρέπει να επικοινωνεί με πολλαπλούς μικροελεγκτές και φυσικά με τον κεντρικό επεξεργαστή της ανεμογεννήτριας ώστε να πετυχαίνει την αποδοτικότερη, συμφέρουσα και ασφαλέστερη λειτουργία της ανεμογεννήτριας. Χρειάζεται να επισημανθεί ότι η απρόσκοπτη και εύρυθμη λειτουργία μιας ανεμογεννήτριας και ενός αιολικού πάρκου γενικότερα βασίζεται κυρίως στο θέμα του αεροδυναμικού ελέγχου, ελέγχου ηλεκτρικής ισχύος και εσωτερικού ελέγχου κάθε A/G. Στη συνέχεια ο αναγνώστης θα διαπιστώσει την πολυπλοκότητα των συστημάτων. Άλλωστε ο ηλεκτρονικός μετατροπέας ισχύος δεν είναι ανεξάρτητος από τα υπόλοιπα μέρη της ανεμογεννήτριας και βρίσκεται σε διαρκή ανταλλαγή δεδομένων διάφορους μικροελεγκτές. Ο ηλεκτρονικός μετατροπέας επικοινωνεί και με τον έλεγχο "pitch" ο οποίος όπως τονίστηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο βοηθά στην εκκίνηση του ανεμοκινητήρα και ρυθμίζει την αεροδυναμική ισχύ όταν η ταχύτητα του ανέμου είναι μεγαλύτερη από την ονομαστική ταχύτητα του δρομέα. Ο έλεγχος "pitch" επικοινωνεί με τον ηλεκτρονικό μετατροπέα ισχύος μέσω της κεντρικής μονάδας επεξεργασίας της ανεμογεννήτριας. Γενικά μπορούμε να πούμε ότι η καρδιά όλων των υποσυστημάτων είναι ο κεντρικός ελεγκτής της ανεμογεννήτριας όπου αν κάτι δεν πάει καλά γίνεται αυτοδιάγνωση και προσπάθεια για διόρθωση του σφάλματος, ειδάλλως υπάρχει κατάσταση εκτάκτου ανάγκης, δίνει εντολή να σταματήσει πλήρως η περιστροφή του ανεμοκινητήρα και του ηλεκτρονικού μετατροπέα ισχύος. Συνεπώς ο αναγνώστης αντιλαμβάνεται ότι η λειτουργία τόσο του ηλεκτρονικού μετατροπέα ισχύος όσο και η γενικότερη λειτουργία της ανεμογεννήτριας είναι ιδιαίτερα πολύπλοκη διαδικασία που γνωρίζει μόνο η κατασκευάστρια εταιρεία και μόνο αυτή.

### 1.16 Διασύνδεση Αιολικών Πάρκων Μεγάλης Ισχύος [8]

Στην παρούσα ενότητα θα γίνει περιγραφή του τρόπου της κατευθείαν διασύνδεσης ανεμογεννητριών με το δίκτυο. Η περιγραφή βασίζεται στον τρόπο διασύνδεσης των ανεμογεννητριών σύγχρονης γεννήτρια δακτυλιοφόρου δρομέα. Σύμφωνα με τον κάθε κατασκευαστή ένας χονδρικός τρόπος σύνδεσης φαίνεται στο σχήμα 1.17. Σύμφωνα

με αυτό βλέπουμε ότι η σύγχρονη μηχανή είναι διπλά τροφοδοτούμενη (double-fed). Προς πληροφόρηση αναφέρεται ότι η γεννήτρια είναι έχει ονομαστικά στοιχεία  $U_n=690V$ ,  $I_n=71\text{ IA}$ ,  $n=1620\text{ rpm}$ . Από το εν λόγω σχήμα βλέπουμε ότι ο στάτης είναι κατευθείαν συνδεδεμένος με το δίκτυο ενώ ο δρομέας είναι συνδεδεμένος με ηλεκτρονικό μετατροπέα ισχύος. Ο τελευταίος αποτελείται από μια διπλή γέφυρα από στοιχεία IGBT. Ο τρόπος λειτουργίας θα εξηγηθεί στη συνέχεια. Το σύστημα αυτό άρχισε να χρησιμοποιείται ευρέως πρόσφατα στα αιολικά συστήματα (μεταβλητών στροφών). Το κύριο πλεονέκτημα αυτού του συστήματος είναι ότι ο ηλεκτρονικός μετατροπέας ισχύος διαπερνάτε από ένα ποσοστό της ισχύος της τάξης του 20-30% της συνολικής ισχύος και συνεπώς εμφανίζονται λιγότερες απώλειες σε σχέση με ένα σύστημα απευθείας οδηγούμενο από τον ατμοκινητήρα [4], Επίσης το κόστος του ηλεκτρονικού μετατροπέα είναι μικρότερο σε σχέση με αυτό του μετατροπέα που χρησιμοποιείται σε αιολικά πάρκα όπως αυτό του προηγούμενου κεφαλαίου και λόγω του παραπάνω ισχυρισμού αλλά και επειδή δεν χρειάζεται εξωτερικό κύκλωμα διέγερσης αφού αυτή προέρχεται απευθείας από το «δίκτυο». Όπως αναφέρθηκε παραπάνω η ηλεκτρική γεννήτρια είναι δακτυλιοφόρου δρομέα η οποία είναι διπλά τροφοδοτούμενη και φαίνεται στο σχήμα 1.17 Ως γνωστών μία μέθοδος μετατόπισης των καμπύλων ροπής-στροφών είναι μέσω διάφορων αντιστάσεων. Ο τρόπος αυτός εκτός του ότι εμφανίζει πολλές απώλειες (ωμικές) δεν έχει και τη δυνατότητα ενεργητικού ελέγχου δηλαδή δεν μπορεί ανά πάσα στιγμή η τιμή της αντίστασης να αλλάζει τόσο λόγω συνδεσμολογίας της όσο και λόγω έλλειψης επικοινωνίας με το υπόλοιπο κύκλωμα. Αντίθετα με τον ηλεκτρονικό μετατροπέα ισχύος E.P.-Σ.Ρ.,-E.P. ο οποίος ουσιαστικά παίζει τον ρόλο των αντιστάσεων, δεν υπάρχουν ωμικές απώλειες και υπάρχει ανά πάσα στιγμή δυνατότητα ρύθμισης σε μεγάλο εύρος της ροπής εκκίνησης της γεννήτριας μετατοπίζοντας την καμπύλη ροπής- στροφών δεξιά ή αριστερά ανάλογα με την ταχύτητα του αέρα. Με αυτό τον τρόπο εκτός του ότι υπάρχει η δυνατότητα εκμετάλλευσης ακόμα και των πιο χαμηλών ταχυτήτων αέρα (εφόσον είναι πάνω από την ταχύτητα σύζευξης), και ταυτόχρονα προστατεύεται η ηλεκτρική γεννήτρια από την εμφάνιση υψηλών ρευμάτων κατά την εκκίνηση. Ο ηλεκτρονικός μετατροπέας ισχύος έχει τη δυνατότητα ανά πάσα στιγμή να επικοινωνεί με την Κεντρική Μονάδα Ελέγχου της ανεμογεννήτριας και ρυθμίζει τη συμπεριφορά του σύμφωνα με τις εντολές που λαμβάνει από αυτή (ΚΜΕ). Έτσι ο ηλεκτρονικός μετατροπέας ισχύος αλλάζοντας ουσιαστικά την αντίσταση του δρομέα αλλάζει το μαγνητικό πεδίο στο εσωτερικό της μηχανής και πετυχαίνει τη μετακίνηση της καμπύλης  $C_p$ -λ στην επιθυμητή τιμή όπου υπάρχει μέγιστο  $C_p$ . Με αυτό τον τρόπο η ανεμογεννήτρια παρακολουθεί τις αλλαγές του ανέμου και προσαρμόζει τη λειτουργία της. Χάρη στον ηλεκτρονικό μετατροπέα ισχύος υπάρχει μεγάλο εύρος ρύθμισης της τάσης και συνεπώς της άεργου ισχύος. Συνοψίζοντας, μπορεί να αναφερθεί ότι οι λόγοι που δικαιολογούν την ευρεία εφαρμογή των ασύγχρονων διπλά τροφοδοτούμενων ηλεκτρικών γεννητριών είναι ότι οι ηλεκτρονικοί μετατροπέες ισχύος που χρησιμοποιούν εμφανίζουν λιγότερες απώλειες αφού έχουν να διαχειριστούν μικρό μέρος της συνολικής ισχύος 20-30% και το κόστος τους είναι μικρότερο σε σχέση με τον μετατροπέα που χρησιμοποιείται σε απευθείας οδηγούμενες από τον ανεμοκινητήρα σύγχρονες μηχανές. Βέβαια με το μετατροπέα που περιγράψαμε στην προηγούμενη ενότητα έχουμε πιο αξιόπιστη λειτουργία της ανεμογεννήτριας αφού αυτός αναλαμβάνει εξ ολοκλήρου τη σύνδεση με το δίκτυο άρα μπορεί να υπάρχει άμεσος έλεγχος ενώ εδώ έχουμε κατευθείαν σύνδεση μεταξύ γεννήτριας και δικτύου.

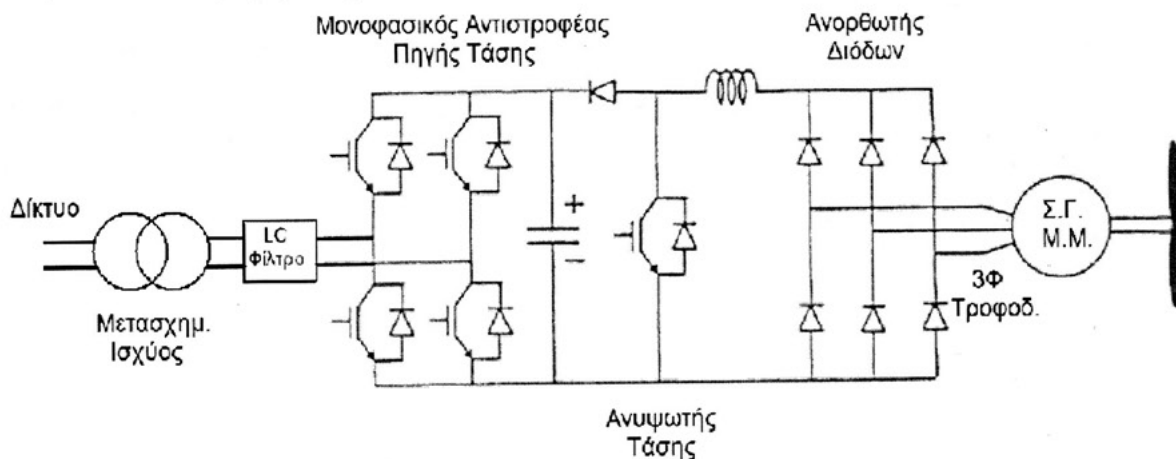




Σχήμα 1.17 Ηλεκτρονικός μετατροπέας ισχύος Α/Γ [1].

### 1.17 Περιγραφή της υπό μελέτη Ανεμογεννήτριας και της εργαστηριακής Διάταξης.[2]

Στο εργαστήριο φωτοβολταϊκών, έχει κατασκευασθεί και λειτουργεί διασυνδεδεμένο με το δίκτυο ένα δοκίμιο σύγχρονης μηχανής μόνιμων μαγνητών 2.5kW που οδηγείται στο εργαστήριο άμεσα από έναν DC κινητήρα ο οποίος προσομοιώνει τη ροπή του ανεμοκινητήρα.. Η διάταξη που έχει υλοποιηθεί για τη σύνδεση της ανεμογεννήτριας με το δίκτυο έχει την παρακάτω διαμόρφωση



Σχ . 1.18 Σχηματικό διάγραμμα συστήματος εκ τούτου η ροή της ενέργειας περιλαμβάνει τα παρακάτω στάδια:

- Από κινητική ενέργεια του ανέμου μετατρέπεται σε κινητική ενέργεια του ανεμοκινητήρα.
- Από κινητική ενέργεια του ανεμοκινητήρα μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια (AC) μέσω της γεννήτριας.
- Από AC μετατρέπεται σε DC μέσω του ανορθωτή και κατόπιν ανυψώνεται η τάση.

□ Από DC μετατρέπεται σε AC μέσω του αντιστροφέα και αποδίδεται στο δίκτυο.

Ο ανυψωτής τάσης φαίνεται ελλιπής χωρίς πηνίο, όμως όπως θα φανεί στη σχετική παράγραφο, η αυτεπαγωγή των τυλιγμάτων της γεννήτριας επαρκεί για τη λειτουργία του καθώς λειτουργεί όπως θα λειτουργούσε ένα πηνίο στον ανυψωτή. Συγκεκριμένα η ανεμογεννήτρια έχει μέγιστη ταχύτητα περιστροφής είναι 100 ΣΑΛ. Η έξοδος της γεννήτριας ανορθώνεται από έναν απλό ανορθωτή διόδων και ανυψώνεται με τη βοήθεια ενός DC/DC μετατροπέα ανύψωσης (boost converter) και ενός πυκνωτή. Ο μετατροπέας αυτός χρησιμοποιείται για να φέρει την τάση εισόδου του αντιστροφέα σε επίπεδα που να καθιστούν δυνατή τη μεταφορά ισχύος. Πρόκειται για αντιστροφή πηγής τάσης ο οποίος και χρησιμοποιεί τεχνική SPWM για την παραγωγή ημιτονοειδούς τάσης. Επιθυμούμε η διάταξη να παρέχει όσο περισσότερη ενέργεια είναι δυνατό. Για να επιτυγχάνεται αυτό, ο Αντιστροφέας πρέπει να λειτουργεί με όσο γίνεται μεγαλύτερη απόδοση και να εξασφαλίζει ότι η τάση στον πυκνωτή είναι περίπου σταθερή. Μέσω του ανυψωτή είναι εφικτό η τάση του πυκνωτή να αντιστοιχεί σε DC τάση του επιθυμητού επιπέδου στους ακροδέκτες του ανορθωτή και έτσι να ελέγχεται το ρεύμα που δίνει η γεννήτρια άρα και η ροπή της. Επομένως απαιτείται κατάλληλο σύστημα ελέγχου για το ρεύμα που παράγει η γεννήτρια. Έτσι λοιπόν οι δύο μετατροπείς ελέγχονται από δύο μικροεπεξεργαστές οι οποίοι επικοινωνούν μεταξύ τους.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

# ΓΕΝΝΗΤΡΙΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

### ΕΙΣΑΓΩΓΗ.[2],[9]

Η γεννήτρια ή ηλεκτρογεννήτρια, (generator), είναι μηχανή που βασίζεται πάνω στους νόμους της ηλεκτροφυσικής και ιδιαίτερα του φαινομένου της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής που ανακάλυψε ο διάσημος Άγγλος φυσικός Μιχαήλ Φαραντέϋ, το 1831 και που αφορά την ενέργεια και τη μετατροπή της από τη μια μορφή σε μια άλλη δηλαδή μετατρέπει τη μηχανική ενέργεια σε ηλεκτρική, σύμφωνα με φαινόμενο της φυσικής. Για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ο βασικός τύπος γεννητριών που χρησιμοποιούνται είναι οι σύγχρονες γεννήτριες. Σύγχρονες γεννήτριες συναντώνται στις μεγάλες θερμοηλεκτρικές μονάδες, σε υδροηλεκτρικά έργα, σε σταθμούς παραγωγής ενέργειας με ντίζελ μηχανές κ.τ.λ. Σε μεγάλους σταθμούς παραγωγής ενέργειας χρησιμοποιούμε τις μεγάλες ανεμογεννήτριες που χρησιμοποιούνται γεννήτριες επαγωγής και σύγχρονες γεννήτριες. Οι γεννήτριες επαγωγής μπορούν να συνδεθούν είτε απευθείας στο δίκτυο σε λειτουργία σταθερών στροφών, εφόσον μικρή αλλαγή στις στροφές μπορεί να επιτευχθεί μεταβολή της ολίσθησης, είτε σε λειτουργία μεταβλητών στροφών, ενώ οι σύγχρονες γεννήτριες συνδέονται γενικά με ηλεκτρονικά ισχύος σε λειτουργία μεταβλητών στροφών.

Οι σύγχρονες γεννήτριες μπορούν είτε να έχουν ηλεκτρική διέγερση είτε το πεδίο της διέγερσης τους να δημιουργείται από μόνιμους μαγνήτες. Οι γεννήτριες με ηλεκτρική διέγερση έχουν το πλεονέκτημα πως μπορούν να ελέγξουν τον συντελεστή ισχύος τους μέσω του ρεύματος διέγερσης. Από την άλλη οι γεννήτριες μόνιμου μαγνήτη πλεονεκτούν στο ότι έχουν καλύτερη απόδοση εφόσον δεν παρουσιάζουν απώλειες χαλκού στο δρομέα. Επίσης, δεν χρειάζονται ψήκτρες στο δρομέα για την εγκατάσταση του ρεύματος διέγερσης άρα χρειάζονται λιγότερη συντήρηση και η κατασκευή τους είναι απλούστερη. Μειονεκτήματα τους είναι το μεγαλύτερο κόστος λόγω του αυξημένου κόστους των μόνιμων μαγνητών και η μη δυνατότητα ελέγχου του συντελεστή ισχύος.

Ένα ζήτημα που έχει ιδιαίτερη σημασία στις ανεμογεννήτριες είναι ο τρόπος σύνδεσης της έλικας με τη γεννήτρια. Η έλικα στρέφεται με αργές ταχύτητες, ενώ οι γεννήτριες γενικά στρέφονται με πολύ υψηλότερες. Έτσι, οι περισσότερες μεγάλες ανεμογεννήτριες διαθέτουν κιβώτιο ταχυτήτων μεταξύ της έλικας και της γεννήτριας το οποίο πολλαπλασιάζει τις στροφές της έλικας. Με αυτόν τον τρόπο όμως δημιουργούνται επιπλέον απώλειες στο κιβώτιο ταχυτήτων απαιτείται επιπλέον συντήρηση, αυξάνει το μέγεθος και το βάρος του συστήματος και παρουσιάζεται μεγαλύτερη πολυπλοκότητα κατά την κατασκευή. Απευθείας σύνδεση της έλικας με την γεννήτρια μπορεί να επιτευχθεί μόνο αν η γεννήτρια διαθέτει έναν μεγάλο αριθμό πόλων. Αυτό είναι εφικτό σε σύγχρονες γεννήτριες μόνιμων μαγνητών και τέτοια συστήματα εφαρμόζονται πλέον σε μεγάλες ανεμογεννήτριες [3] και συχνότερα σε μικρές ανεμογεννήτριες. Όσον αφορά τις μικρές ανεμογεννήτριες συνήθως χρησιμοποιούνται σύγχρονες γεννήτριες μόνιμου μαγνήτη. Βασικό πλεονέκτημα των σύγχρονων γεννητριών σε σχέση με τις γεννήτριες επαγωγής είναι πως δεν χρειάζεται να απορροφούν άεργο ισχύ από το δίκτυο οπότε ενδείκνυνται για αυτόνομες εφαρμογές. Σχετικά μεγάλος αριθμός πόλων εγκαθίσταται στο δρομέα ώστε να μην

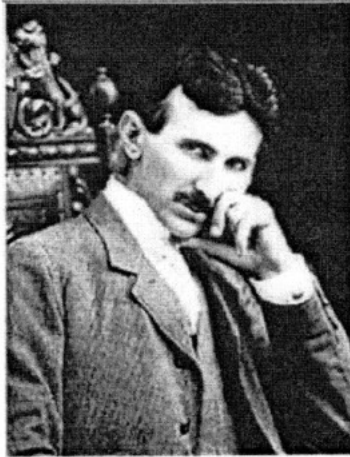
απαιτείται η χρήση κιβωτίου ταχυτήτων. Η σύνδεση χωρίς κιβώτιο ταχυτήτων διευκολύνεται από το γεγονός πως η έλικα περιστρέφεται με πιο μεγάλες ταχύτητες, λόγω της μικρότερης διαμέτρου της, οπότε δεν απαιτείται ιδιαίτερα μεγάλος αριθμός πólων. Επίσης, το γεγονός ποιος οι τιμές των μονίμων μαγνητών και ειδικότερα των μαγνητών NdFeB μειώνονται περιορίζει το μειονέκτημα του υψηλότερου κόστους των γεννητριών με μόνιμους μαγνήτες. Ενώ ο τριφασικός ασύγχρονος ή επαγωγικός κινητήρας (induction motor), χρησιμοποιείται ευρύτατα στις βιομηχανικές εφαρμογές. Ενδεικτικό της καθολικής χρήσης της μηχανής αυτής είναι ότι, οι επαγωγικοί κινητήρες απορροφούν το 60% περίπου, της συνολικά παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας. Τα πλεονεκτήματα του ασύγχρονου κινητήρα, με κυριότερο την απλή κατασκευαστική δομή του δρομέα, θα εξηγηθούν στη συνέχεια. Οι επαγωγικές μηχανές χρησιμοποιούνται σχεδόν αποκλειστικά ως κινητήρες, εξαιτίας των μειονεκτημάτων που παρουσιάζουν όταν λειτουργούν ως γεννήτριες. Η αρχή λειτουργίας των ασύγχρονων κινητήρων διατυπώθηκε από τον N. Tesla (Εικόνα 1.1) στα τέλη της δεκαετίας του 1880. Επαγωγικοί κινητήρες με μορφή αντίστοιχη της σημερινής, ήταν εμπορικά διαθέσιμοι από το 1896. Από τότε έως το 1970, οι βελτιώσεις στην ποιότητα των υλικών κατασκευής, στις τεχνικές χύτευσης και στη μόνωση των τυλιγμάτων, επέτρεψε τη δραστική μείωση του μεγέθους και του κόστους κατασκευής των επαγωγικών κινητήρων. Ενδεικτικά αναφέρουμε ότι ένας σημερινός ασύγχρονος κινητήρας των 100hp, έχει τις ίδιες διαστάσεις με ένα κινητήρα 7.5hp του 1897. Η μείωση στις διαστάσεις των επαγωγικών κινητήρων δεν είχε συνοδευτεί από ουσιαστική βελτίωση του βαθμού απόδοσης, έως την πετρελαϊκή κρίση του 1973, εξαιτίας του μικρού κόστους της ηλεκτρικής ενέργειας. Όμως, στη συνέχεια, όλοι οι κατασκευαστές ανέπτυξαν επαγωγικούς κινητήρες με το χαρακτηρισμό υψηλής απόδοσης (high efficiency induction motors). Οι κινητήρες αυτοί, αν και έχουν μεγαλύτερο κόστος από τους τυπικούς επαγωγικούς κινητήρες, αποκτούν όλο και μεγαλύτερο μερίδιο της αγοράς. Η τυπική μορφή ενός επαγωγικού κινητήρα υψηλής απόδοσης εικονίζεται στο Σχήμα 2.1.

Σήμερα περισσότερο από το μισό της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται στις αναπτυγμένες χώρες μετατρέπεται σε μηχανική ενέργεια στις ηλεκτρικές μηχανές, ελευθερώνοντας το κοινωνικό σύνολο από τα δεσμά της χειρωνακτικής εργασίας. Ανάμεσα σε πολλούς τύπους ηλεκτρικών μηχανών, η τριφασικές ασύγχρονες μηχανές -μηχανές επαγωγής- συνεχίζουν να απολαμβάνουν την ίδια εμπιστοσύνη όπως και έναν αιώνα πριν. Τουλάχιστον το 90% των βιομηχανικών κινητήριων συστημάτων χρησιμοποιούν ασύγχρονους τριφασικούς κινητήρες, κατά πλειοψηφία με δρομέα τύπου κλωβού.

Η πλειοψηφία των ασύγχρονων μηχανών λειτουργεί χωρίς έλεγχο καθώς τροφοδοτούνται απευθείας από το εκάστοτε τριφασικό δίκτυο, ωστόσο το ποσοστό των υπό έλεγχο μηχανών που προορίζονται για συστήματα ελέγχου μεταβλητής ταχύτητας αυξάνει σταθερά καθώς οι μηχανές dc χρησιμοποιούνται σπανιότερα. Οι τελευταίες έχουν μειονεκτήματα όπως το υψηλό κόστος αγοράς, η αυξημένη αδράνεια του δρομέα, η κατασκευαστική πολυπλοκότητα και το υψηλό κόστος συντήρησης που προκύπτει λόγω των εγγενών προβλημάτων που συσχετίζονται με τη λειτουργία του συλλέκτη και των ψηκτρών, του συστήματος που πετυχαίνει την ανόρθωση της τάσεως σε μια dc μηχανή. Τα πλεονεκτήματα αυτών των μηχανών με σημαντικότερα τον απλό έλεγχο τους και την ταχεία απόκτηση ροπής δυσκολεύονται όλο και περισσότερο να αντισταθμίσουν τα μειονεκτήματα καθώς η εξέλιξη των ηλεκτρονικών ισχύος και των μικροεπεξεργαστών δίνει πλέον τη δυνατότητα υλοποίησης συστημάτων ελέγχου ac μηχανών υψηλής αποδόσεως, με βελτιστοποιημένες αποκρίσεις σε δυναμικές ή στατικές καταστάσεις λειτουργίας. Αντίθετα, η εξέλιξη στο



σχεδιασμό των ηλεκτρικών μηχανών γίνεται με αργά βήματα σε σχέση με τα πεδία των ηλεκτρονικών ισχύος και της αρχιτεκτονικής υπολογιστών, πρέπει ωστόσο να σημειωθεί ότι η έρευνα και η ανάπτυξη σε αυτήν την περιοχή ξεκίνησε περισσότερο από εκατό χρόνια πριν, όταν ξεκίνησε και η κατασκευή των ηλεκτρικών μηχανών, και διαφαίνεται πως δεν θα υπάρξει κάποιος κορεσμός σε αυτό το πεδίο. Έτσι τα μειονεκτήματα των dc μηχανών, τα οποία κατά το πλείστον σχετίζονται με κατασκευαστικά ζητήματα φαίνεται να αποκτούν μεγαλύτερο ειδικό βάρος και να καταδικάζουν τις μηχανές συνεχούς ρεύματος σε περιορισμένη και μάλλον εξειδικευμένη χρήση σε εφαρμογές χαμηλής ισχύος.



Εικ. Nicola Tesla

## 2.1 Διάκριση εναλλακτών.[10]

Οι γεννήτριες εναλλασσόμενου ρεύματος χωρίζονται σε δυο κατηγορίες του είναι:

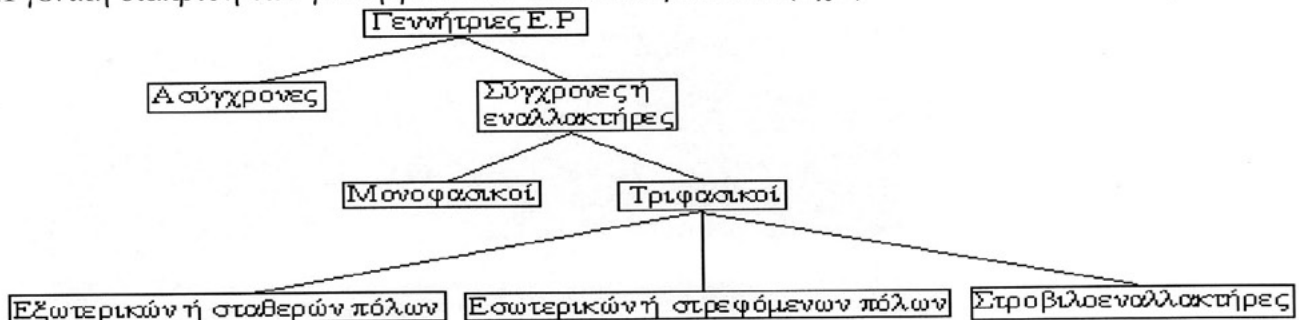
A) οι ασύγχρονες : (είναι ανεξάρτητη από την ταχύτητα περιστροφής του δρομέα τους και η διέγερση τους γίνεται με E.P)

B) οι σύγχρονες ή εναλλακτές : (είναι ανάλογη της ταχύτητας περιστροφής του δρομέα τους που λέγεται "σύγχρονη" ns και η διέγερση τους γίνεται με συνεχές ρεύμα.)

Επίσης διακρίνονται σε κατηγορίες που αφορούν την τοποθέτησης των μαγνητικών πόλων τους και χωρίζονται σε :

- εξωτερικών ή σταθερών πόλων
- εσωτερικών ή στρεφόμενων πόλων και
- στροβιλοεναλλακτήρες (που ουσιαστικά αποτελούν μια κατασκευαστική παραλλαγή των εναλλακτών με εσωτερικούς πόλους)

Η γενική διάκριση των γεννητριών E.P δίνεται παρακάτω. (Σχ.1)



Σχήμα 1

Οι γεννήτριες εναλλασσόμενου ρεύματος είναι δύο ειδών  
Τύποι και κατασκευή εναλλακτών

Από κατασκευαστική άποψη οι εναλλακτήρες διακρίνονται σε δύο κατηγορίες:

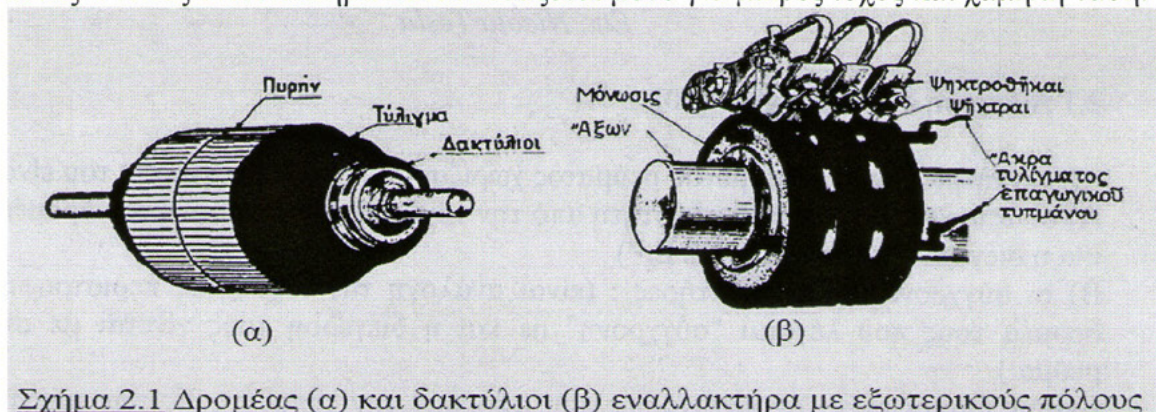
A) εναλλακτήρες με εξωτερικούς πόλους

B) εναλλακτήρες με εσωτερικούς ή περιστρεφόμενους πόλους (στροβιλοεναλλακτήρες)

Εναλλακτήρες με εξωτερικούς πόλους.[10]

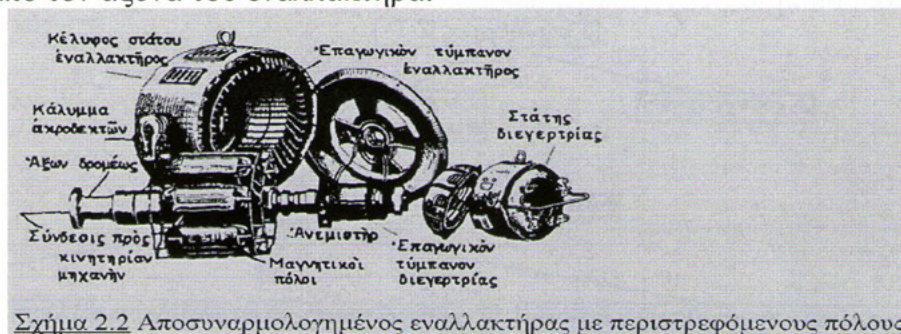
Σ' αυτούς η διέγερση της μηχανής γίνεται από μαγνητικούς πόλους στερεωμένους στο εσωτερικό του ζυγώματος του στάτη, όπως και στις μηχανές συνεχούς ρεύματος. Τα τυλίγματα των πόλων τροφοδοτούνται με συνεχές ρεύμα από πηγή συνεχούς ρεύματος είτε γεννήτρια συνεχούς ρεύματος ή ανορθωτική διάταξη. Ο δρομέας φέρει το επαγωγικό τύμπανο όπως και η μηχανή συνεχούς ρεύματος και το τύλιγμά του τοποθετείται στα αυλάκια του πυρήνα. Αντί συλλέκτη υπάρχουν δακτύλιοι κατασκευασμένοι από ορείχαλκο στερεωμένοι στον άξονα του δρομέα σε αριθμό ίσο με των αριθμό των φάσεων του εναλλακτήρα που συνδέονται με το τύλιγμα του επαγωγικού τυμπάνου. Στους δακτυλίους εφάπτονται ψήκτρες σταθερά συνδεδεμένες στο ακίνητο τμήμα της μηχανής που οδηγούν το παραγόμενο ρεύμα έξω από την μηχανή.

Βασικά μειονεκτήματα της κατασκευής είναι ότι ολόκληρο το ρεύμα φορτίου πρέπει να περνά από τις ψήκτρες και η ισχυρή καταπόνηση των τυλιγμάτων λόγω περιστροφής τους σε πολύστροφους εναλλακτήρες. Για τους παραπάνω δύο λόγους αυτός ο τύπος εναλλακτήρα κατασκευάζεται μόνο για μικρές ισχύς και χαμηλή τάση.



Σχήμα 2.1 Δρομέας (α) και δακτύλιοι (β) εναλλακτήρα με εξωτερικούς πόλους

Στους εναλλακτήρες αυτούς το επαγωγικό τύμπανο είναι τοποθετημένο στο ακίνητο μέρος της μηχανής τον στάτη. Οι μαγνητικοί πόλοι τοποθετούνται ακτινικά στον άξονα του περιστρεφόμενου δρομέα και για τον λόγο αυτό ονομάζονται και εναλλακτήρες με περιστρεφόμενους πόλους. Στο Σχήμα 2.2 φαίνεται ένας αποσυναρμολογημένος εναλλακτήρας με εσωτερικούς πόλους. Η διεγέρτρια μηχανή κινείται από τον άξονα του εναλλακτήρα.



Σχήμα 2.2 Αποσυναρμολογημένος εναλλακτήρας με περιστρεφόμενους πόλους.

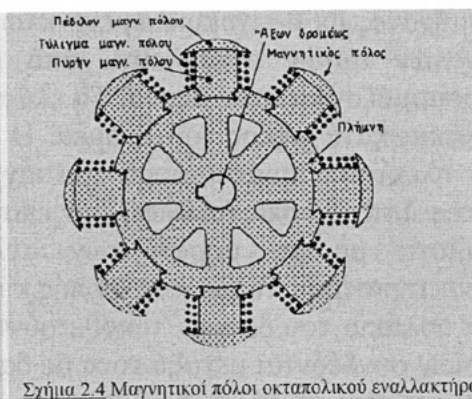
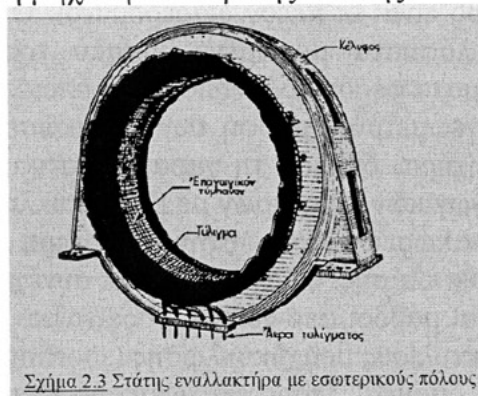
Ο στάτης αποτελείται από εξωτερικό κέλυφος κατασκευασμένο από χαλύβδινα ελάσματα μέσα στο οποίο τοποθετείται το επαγωγικό τύμπανο που αποτελείται από τον πυρήνα και το τύλιγμα. Ο πυρήνας κατασκευάζεται από πολλούς δίσκους



ελασμάτων με κατάλληλο σχήμα ώστε να σχηματίζουν τα αυλάκια (όταν τοποθετούνται παράλληλα) μέσα στα οποία τοποθετείται το τύλιγμα, τα άκρα του οποίου καταλήγουν απευθείας στους ακροδέκτες χωρίς την παρεμβολή ψηκτρών και δακτυλίων.

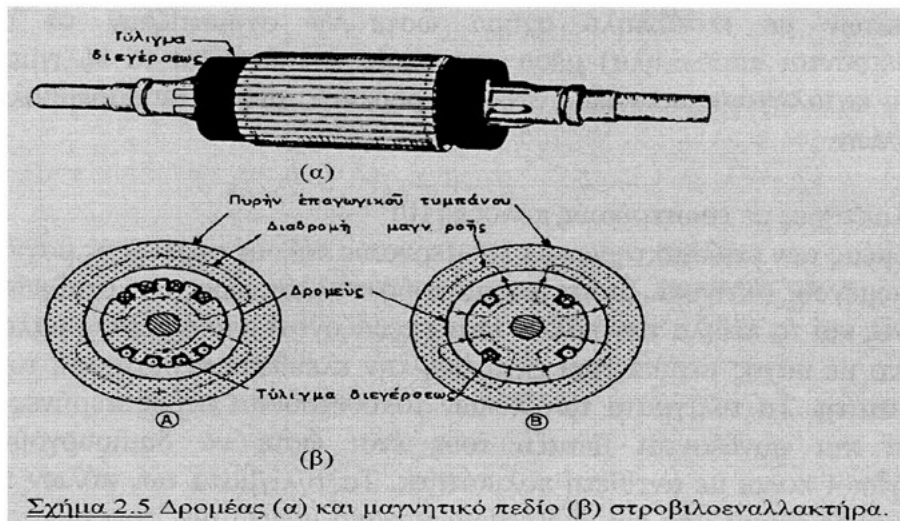
Εναλλακτήρες με εσωτερικούς πόλους.[10]

Ο δρομέας των εναλλακτῆρων με εσωτερικούς πόλους φέρει τους μαγνητικούς πόλους στερεωμένους ακτινικά. Στους τριφασικούς εναλλακτῆρες των σταθμών παραγωγής οι πυρήνες και τα πέδιλα των πόλων κατασκευάζονται από συμπαγή μαλακό χάλυβα. Το διάκενο με πάχος μερικά grm επιτρέπει την ελεύθερη περιστροφή του δρομέα μέσα στον στάτη. Τα τυλίγματα των πόλων τοποθετούνται στους πυρήνες πριν μπουν τα πέδιλα και συνδέονται μεταξύ τους έτσι ώστε να δημιουργούνται διαδοχικά μαγνητικοί πόλοι με αντίθετη πολικότητα. Τα τυλίγματα των πόλων τροφοδοτούνται με συνεχές ρεύμα από την διεγέρτρια μηχανή (γεννήτρια συνεχούς ρεύματος) μέσω ψηκτρών και δύο δακτυλίων στερεωμένων στον άξονα του δρομέα. Το ρεύμα αυτό και η τάση του είναι πολύ μικρά σε σχέση με τα αντίστοιχα μεγέθη του επαγωγικού τυμπάνου και επομένως η κατασκευή δεν καταπονείται ιδιαίτερα η όλη διάταξη είναι κατάλληλη για μηχανές με μικρή σχετικά ταχύτητα περιστροφής και χρησιμοποιούνται σε συστήματα παραγωγής με κινητήρια μηχανή είτε υδροστρόβιλο ή μεγάλη μηχανή εσωτερικής καύσης.



Εναλλακτῆρες με εσωτερικούς πόλους ή περιστρεφόμενους πόλους (στροβιλοεναλλακτῆρες).[10]

Ανήκουν στην κατηγορία των μηχανών με εσωτερικούς πόλους αλλά κατασκευάζονται να λειτουργούν με κινητήριες μηχανές μεγάλης ταχύτητας περιστροφής όπως οι ατμοστρόβιλοι. Έτσι βασικό χαρακτηριστικό είναι η μικρή διάμετρος αλλά και το μεγάλο μήκος άξονα. Ο στάτης έχει την ίδια κατασκευή αλλά ο δρομέας δεν έχει εμφανείς πόλους και αποτελείται από συμπαγές κυλινδρικό τύμπανο με αυλάκια μέσα στα οποία μπαίνει και στερεώνεται το τύλιγμα διέγερσης με δύο συνήθως πόλους που καταλήγει σε δύο δακτυλίους στερεωμένους στον δρομέα που εφάπτονται σε δύο ψηκτρες στερεωμένες στον στάτη. Ο δρομέας και το μαγνητικό πεδίο φαίνονται στο Σχήμα 2.5.



### 2.1.1 Είδη επαγωγικών μηχανών.[2]

Οι επαγωγικές μηχανές διακρίνονται σε δύο κατηγορίες, ανάλογα με την κατασκευαστική δομή του δρομέα τους σε κινητήρες με βραχυκυκλωμένο δρομέα ή κλωβό (squirrel cage rotor) και σε κινητήρες με δακτυλιοφόρο δρομέα (wound rotor).

Οι μηχανές με βραχυκυκλωμένο κλωβό είναι οι πλέον διαδεδομένοι. Ο δρομέας των μηχανών αυτών αποτελείται από ελάσματα μονωμένα μεταξύ τους, τα οποία προσαρμόζονται στον άξονα. Τα ελάσματα φέρουν οδοντώσεις, οι οποίες σχηματίζουν αυλάκια κατά μήκος του δρομέα. Η γεωμετρική μορφή των αυλακώσεων καθορίζει την ηλεκτρική συμπεριφορά του κινητήρα, δηλαδή τη χαρακτηριστική ταχύτητας -ροπής. Στις κλάσεις (classes) των επαγωγικών κινητήρων με βραχυκυκλωμένο κλωβό, ανάλογα με τη μορφή των αυλακώσεων και στην ιδιαίτερη μορφή της χαρακτηριστικής ταχύτητας -ροπής κάθε κλάσης, θα αναφερθούμε συνέχεια.

Στα αυλάκια του δρομέα τοποθετούνται ράβδοι από χαλκό ή ορείχαλκο, τα άκρα των οποίων συνδέονται μεταξύ τους με δακτυλίους βραχυκύκλωσης (shorting rings). Έτσι, σχηματίζεται το τύλιγμα κλωβού του δρομέα. Στους επαγωγικούς κινητήρες μικρής ισχύος, το τύλιγμα κλωβού κατασκευάζεται με χύτευση αλουμινίου στα αυλάκια του δρομέα. Στην περίπτωση αυτή, οι δακτύλιοι βραχυκύκλωσης και τα πτερύγια εξαιρισμού χυτεύονται μαζί με τους αγωγούς του κλωβού, οι οποίοι δεν είναι μονωμένοι ως προς το σίδηρο του δρομέα. Όμως, τα ρεύματα κυκλοφορούν κυρίως από τον κλωβό, καθώς η αγωγιμότητα του αλουμινίου είναι πολύ μεγαλύτερη από εκείνη του σιδήρου. Είναι φανερό ότι, ο δρομέας του επαγωγικού κινητήρα με βραχυκυκλωμένο κλωβό, δεν συνδέεται ηλεκτρικά με καμία πηγή. Στο γεγονός αυτό οφείλεται η απλή κατασκευή και η ευρεία χρήση του επαγωγικού κινητήρα βραχυκυκλωμένου κλωβού.

Ο δρομέας των επαγωγικών κινητήρων με δακτυλιοφόρο δρομέα φέρει αυλακώσεις, μέσα στις οποίες τοποθετείται ένα τριφασικό τύλιγμα, αντίστοιχο μ' εκείνο του στάτη. Οι τρεις φάσεις του τυλίγματος στο δρομέα συνδέονται σχεδόν πάντα σε αστέρα. Τα τρία άκρα του τυλίγματος αστέρα καταλήγουν σε ισάριθμους δακτυλίους, που φέρει ο δρομέας. Μέσω των δακτυλίων και των ψηκτρών που εφάπτονται σ' αυτούς, είναι δυνατή η σύνδεση ρυθμιστικών αντιστάσεων στο τύλιγμα του δρομέα. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται η



2.2 Συχνότητα περιστροφής και σύγχρονη ταχύτητα περιστροφής.[11]

Η συχνότητα  $f$  της παραγόμενης ηλεκτρεγερτικής δύναμης αποδεικνύεται ότι είναι :  $n_s = 60 \cdot f / p$  (στρ/sec) Στην Ελλάδα και την Ευρώπη είναι  $f = 50$  Hz οπότε ανάλογα με τον αριθμό ζευγών πόλων μπορεί να προκύψει και η απαραίτητη ταχύτητα περιστροφής της κινητήριας μηχανής  $n$  για  $p = 1$  η ταχύτητα είναι 3000 rpm/s. όπου η σύγχρονη ταχύτητα περιστροφής ενός εναλλακτήρα εξαρτάται άμεσα από τον αριθμό ζευγών των μαγνητικών πόλων και για συγκεκριμένες τιμές συχνότητας παραγόμενου ρεύματος δίνεται στον Πίνακας 1

A/A	ΣΥΧΝΟΤΗΤΑ	ΣΥΓΧΡΟΝΗ ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΠΕΡΙΣΤΡΟΦΗΣ $n_s = 60 \cdot f / p$									
ΑΡΙΘΜΟΣ ΠΟΛΩΝ		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	50	3000	1500	1000	750	600	500	428	375	333	300
2	60	3600	1800	1200	900	720	600	515	450	400	360
A/A	ΣΥΧΝΟΤΗΤΑ	ΣΥΓΧΡΟΝΗ ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΠΕΡΙΣΤΡΟΦΗΣ $n_s = 60 \cdot f / p$									
ΑΡΙΘΜΟΣ ΠΟΛΩΝ		11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1	50	273	250	231	215	200	189	175	167	158	150
2	60	328	300	278	258	240	225	212	200	190	180
A/A	ΣΥΧΝΟΤΗΤΑ	ΣΥΓΧΡΟΝΗ ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΠΕΡΙΣΤΡΟΦΗΣ $n_s = 60 \cdot f / p$									
ΑΡΙΘΜΟΣ ΠΟΛΩΝ		24	50	100	150	300					
1	50	125	60	30	20	10					
2	60	150	72	36	24	12					

Πίνακας 1

Οι τιμές της σύγχρονης ταχύτητας περιστροφής για συγκεκριμένο αριθμό πόλων και συχνότητας γεννήτριας. Ο τρόπος μετάδοσης κίνησης στον άξονα του εναλλακτήρα εξαρτάται από το είδος της κινητήριας μηχανής και την σύγχρονη ταχύτητα περιστροφής που αναπτύσσει. Οι πιο συνηθισμένες περιπτώσεις αναφέρονται στον Πίνακα. 2.

α/α	Ταχύτητα περιστροφής εναλλακτήρα (rpm/s)	Είδος κινητήριας μηχανής
1.	>500	Υδροστρόβιλος
2.	220-2000	Μηχανή ατμού βενζίνης ή πετρελαίου
3.	N-3600	Στρόβιλος αέρα ή ατμού

Πίνακας 2. Ταχύτητα περιστροφής εναλλακτήρα ανάλογα με τον τύπο της μηχανής.

2.2.a Αρχή λειτουργίας των επαγωγικών μηχανών εναλλασσόμενου ρεύματος.[2]

Οι μηχανές εναλλασσόμενου ρεύματος διακρίνονται σε δύο βασικές κατηγορίες: τις σύγχρονες (synchronous) και τις ασύγχρονες ή επαγωγικές μηχανές. Οι σύγχρονες

μηχανές, αντίθετα από τις επαγωγικές, όπως είπαμε χρησιμοποιούνται κυρίως ως γεννήτριες.

Οι κινητήρες εναλλασσόμενου ρεύματος, όλων των κατηγοριών, έχουν την ίδια αρχή λειτουργίας. Σύμφωνα μ' αυτή, ο δρομέας του κινητήρα στρέφεται από τη ροπή, η οποία τείνει να ευθυγραμμίσει τα μαγνητικά πεδία που αναπτύσσουν τα τυλίγματα του στάτη και του δρομέα.

Αν το μαγνητικό πεδίο του στάτη μπορούσε να στραφεί, τότε η αναπτυσσόμενη ροπή θα ανάγκαζε το δρομέα να ακολουθεί το μαγνητικό πεδίο του στάτη. Επομένως, η λειτουργία όλων κινητήρων εναλλασσόμενου ρεύματος στηρίζεται στη δυνατότητα παραγωγής από το τυλίγμα του στάτη ενός στρεφόμενου μαγνητικού πεδίου.

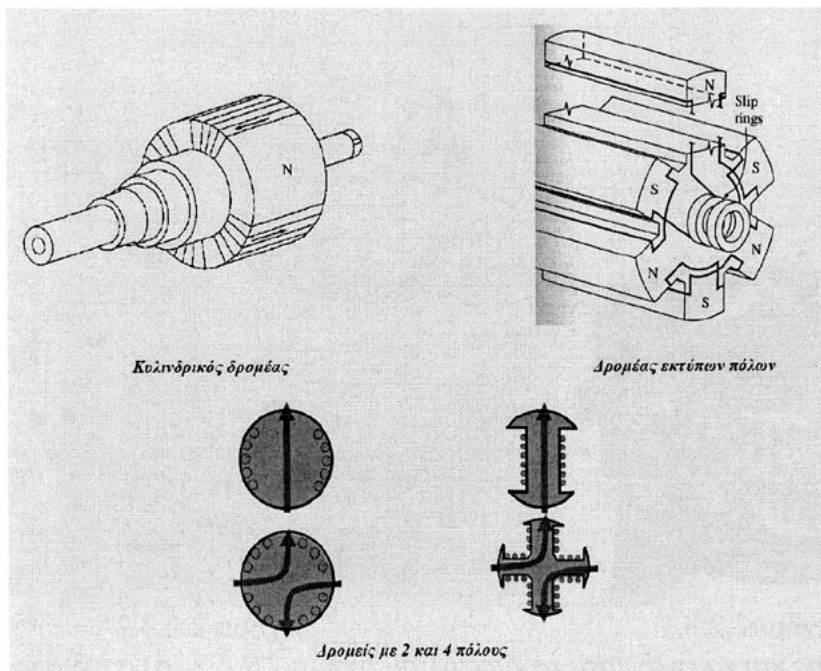
Στους σύγχρονους κινητήρες η ταχύτητα περιστροφής του δρομέα είναι ίση με την ταχύτητα που στρέφεται το πεδίο του στάτη. Αντίθετα, στους ασύγχρονους κινητήρες, η ταχύτητα του δρομέα είναι μικρότερη από εκείνη του στρεφόμενου πεδίου του στάτη και εξαρτάται από το μέγεθος του φορτίου

## 2.2.β Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.[11]

Για την δημιουργία του ηλεκτρικού ρεύματος παίρνουμε την κινητική ενέργεια και την οδηγούμε στο δρομέα της γεννήτριας μας που είναι συνδεδεμένη με το τύμπανο του δρομέα της γεννήτριας.

Ο τύπος που δημιουργείτε η ηλεκτρική μας ενέργεια είναι διότι μέσα στον στατη δημιουργούμε μαγνητικό πεδίο που με στο μαγνητικό πεδίο έχουμε τοποθετήσει το τύμπανο του δρομέα της γεννήτριας όπου για την περιστροφή του δρομέα μας παίρνουμε την κίνηση από την κινητήρια μηχανή μας που μπορεί να είναι είτε άνεμος είτε μηχανή είτε νερό. Όποτε έχουμε την κίνηση του δρομέα μας όπου έχουμε εκεί τοποθετήσει το τύμπανο της γεννήτριας μας που αποτελείται από έναν καλό αγωγό και μεταξύ των καλών αγωγών που είναι τυλιγμένα γύρω από το δρομέα έχουμε τοποθετήσει ένα ειδικό χαρτί το οποίο κατά την κίνηση του δρομέα μας τέμνει κάθετα τη μαγνητικές γραμμές με αποτέλεσμα να δημιουργείτε διαφορά δυναμικού η επονομαζόμενη ( επαγόμενη τάση ) η οποία έχει σαν αποτέλεσμα την κίνηση των ηλεκτρονίων προς μια κατεύθυνση που οδηγούνται μέσα στον αγωγό από τον δρομέα στις ψήκτρες και από εκεί στην πηγή μέσω του αγωγού τροφοδοσίας.

Για τη λειτουργία των σύγχρονων γεννητριών (που ονομάζονται και εναλλακτήρες) απαραίτητη προϋπόθεση είναι η τροφοδοσία του τυλίγματος διέγερσης του δρομέα με συνεχές ρεύμα. Καθώς περιστρέφεται ο δρομέας (που είναι πρακτικά ένας μεγάλος στρεφόμενος ηλεκτρομαγνήτης) λόγω κάποιας κινητήριας μηχανής περιστρέφεται μαζί του και το παραγόμενο μαγνητικό πεδίο, επάγοντας τριφασική τάση στο τυλίγμα του στάτη. Ο δρομέας μπορεί να είναι είτε κυλινδρικός, είτε εκτύπων πόλων (τότε οι πόλοι διακρίνονται στην επιφάνεια του δρομέα) και είναι κατασκευασμένος από δυναμοελάσματα. Οι κυλινδρικοί δρομείς φέρουν τις κατάλληλες αυλακώσεις όπου τοποθετούνται τα τυλίγματα και χρησιμοποιούνται κυρίως σε γεννήτριες μέχρι τεσσάρων πόλων. Αντίθετα, σε γεννήτριες με περισσότερους πόλους επιλέγονται δρομείς εκτύπων πόλων.

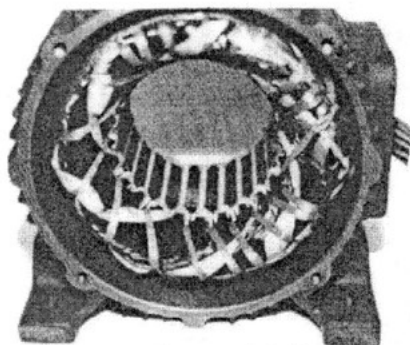


Η τροφοδοσία του δρομέα με συνεχές ρεύμα μπορεί να πραγματοποιηθεί με δύο τρόπους: α) από εξωτερική πηγή συνεχούς ρεύματος, οπότε στο στρεφόμενο δρομέα προσαρμολάζονται ψήκτρες και δακτυλίδια, β) από πηγή συνεχούς ρεύματος τοποθετημένη στον άξονα της μηχανής. Στην πρώτη περίπτωση, καθένα από τα δύο άκρα του τυλίγματος του δρομέα αντιστοιχεί σε ένα δακτυλίδι, οπότε μέσω των ψηκτρών επιτυγχάνεται η συνεχής τροφοδοσία του κυκλώματος. Τα μειονεκτήματα αυτής της λύσης σχετίζονται με τη φθορά των ψηκτρών (λόγω τριβής), καθώς και με την πτώση τάσης πάνω σ' αυτές, η οποία μπορεί να οδηγήσει σε σημαντικές απώλειες ισχύος. Στη δεύτερη περίπτωση, το ρεύμα του δρομέα προέρχεται από μια διεγέρτρια μηχανή, η οποία είναι μια μικρή γεννήτρια ΕΡ. Το κύκλωμα διέγερσης της τελευταίας τροφοδοτείται από το στάτη της κύριας γεννήτριας και το κύκλωμα οπλισμού της βρίσκεται πάνω στον άξονα του δρομέα. γ) Η τριφασική έξοδος της διεγέρτριας ανορθώνεται από τριφασικό ανορθωτή και το συνεχές ρεύμα που προκύπτει διαρρέει το κύκλωμα διέγερσης της κύριας γεννήτριας. Με τον τρόπο αυτό αποφεύγονται τα μειονεκτήματα του πρώτου τρόπου τροφοδοσίας, αφού πλέον δεν εμπλέκονται μηχανικά τμήματα.

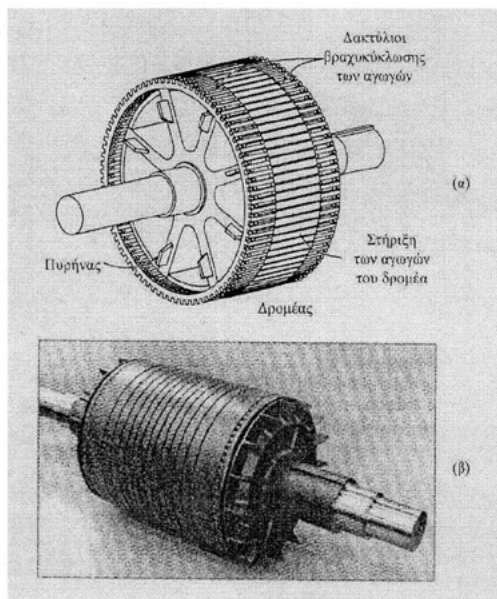
## 2.2.γ ΔΟΜΗ ΤΟΥ ΕΠΑΓΩΓΙΚΟΥ ΚΙΝΗΤΗΡΑ.[12]

Ο επαγωγικός κινητήρας είναι ο πιο κοινός τύπος κινητήρα λόγω της απλής κατασκευής του και της ευκολίας που παρουσιάζει στη λειτουργία του. Ο κινητήρας αυτός δεν έχει ξεχωριστό κύκλωμα διέγερσης. Αντίθετα οι τάσεις και τα ρεύματα επάγονται στη διέγερση του σύμφωνα με την αρχή λειτουργίας του μετασχηματιστή. Στην πραγματικότητα ο επαγωγικός κινητήρας είναι ένας στρεφόμενος μετασχηματιστής. Το ισοδύναμο κύκλωμα του είναι όμοιο μ' αυτό του μετασχηματιστή και διαφέρει μόνο στην επίδραση της μεταβλητής ταχύτητας.

Ένας επαγωγικός κινητήρας έχει τον ίδιο στατη με ένα σύγχρονο κινητήρα, αλλά ο δρομαίος του έχει διαφορετική δομή. Ένας τυπικός στατης φαίνεται στο σχήμα 2.2.δ.1 Οι τύποι των δρομέων που τοποθετούνται στο εσωτερικό του στατη ενός επαγωγικού κινητήρα είναι δυο. Ο ένας ονομάζεται δρομέας βραχυκυκλωμένου κλωβού (σχήμα 2.2.δ.2) και ο άλλος δακτυλιοφόρος δρομέας (σχήμα 2.2.δ.3)



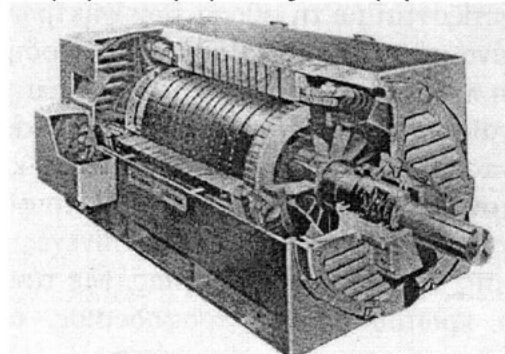
Σχήμα 2.2.δ.1



Σχήμα 2.2.δ.2

σχήμα 2.2.δ.1 Ο στατης και τα τυλίγματα το Δακτύλιοι, σχήμα 2.2.δ.2 (α) σχεδιάγραμμα δρομέα βραχυκυκλωμένου κλωβού, ((b) τυπικός δρομέας βραχυκυκλωμένου κλωβού

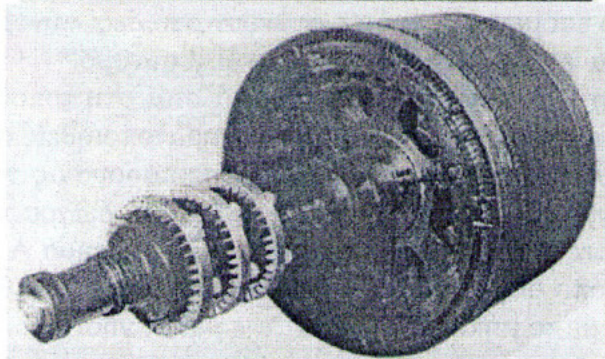
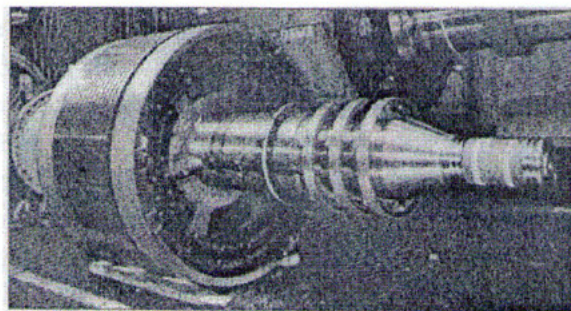
Στο σχήμα 2 όπως είπαμε απεικονίζεται ο δρομέας κλωβού ο οποίος αποτελείται από μια σειρά αγωγίμων ράβδων που είναι τοποθετημένες σε αυλακιά της επιφανείας του δρομαία και βραχυκύκλωνες στα δυο άκρα τους μέσω μεγάλων δακτυλίων βραχυκυκλώσεις. Στο 2.2.δ.3 απεικονίζεται ένας επαγωγικός κινητήρας βραχυκυκλωμένου κλωβού μεγάλου μεγέθους σε τομή.



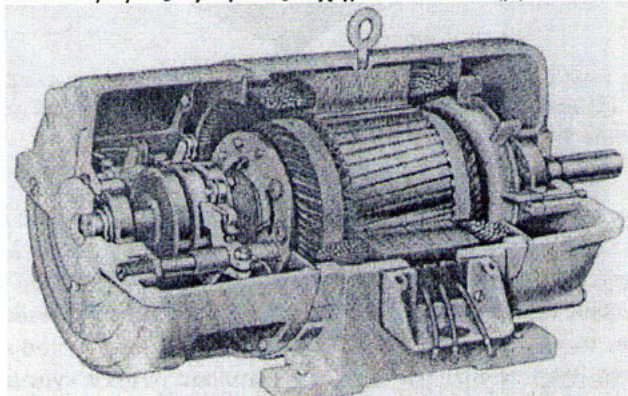
Σχήμα 2.2.δ.3 επαγωγικός κινητήρας βραχυκυκλωμένου κλωβού

Ο άλλος τύπος δρομέα είναι ο δακτυλιοφόρος δρομέας, που διαθέτει ολοκληρωμένο τριφασικό τύλιγμα, το οποίο είναι τοποθετημένο, ώστε να αποτελεί το κατοπτρικό είδωλο του τυλίγματος του στατη. Οι τρεις φάσεις ενός τέτοιου τυλίγματος συνδέονται συνήθως σε αστέρα, ενώ τα άκρα των αγωγών συνδέονται σε δακτυλίους. Έτσι τα ρεύματα στο δακτυλιοφόρο δρομέα ενός επαγωγικού κινητήρα μπορούν να μετρηθούν στις ψήκτρες και ακόμη είναι δυνατή η σύνδεση εξωτερικών αντιστάσεων στο κύκλωμα της διέγερσης. Η τελευταία δυνατότητα δίνει το πλεονέκτημα ρύθμισης της χαρακτηριστικής ροπής-ταχύτητας ενός επαγωγικού κινητήρα δακτυλιοφόρου δρομέα. Το δείχνει δυο δακτυλιοφόρους δρομείς όπου φαίνονται ξεκάθαρα οι δακτύλιοι και οι ράβδοι που συνδέουν τα τυλίγματα του δρομέα με τους δακτυλίους, ενώ το σχήμα 5 έναν πλήρη κινητήρα δακτυλιοφόρου δρομέα οπότε φαίνονται ξεκάθαρα οι ψήκτρες και οι δακτύλιοι. Επίσης ότι τα τυλίγματα στο δρομαία έχουν κάποια κλίση, ώστε να περιορίζονται οι αρμονικές εγκοπών.





Σχήμα 2.2.δ.4 (α) δακτυλιοφόρος δρομέας Σχήμα 2.2.δ.4 (β) δακτυλιοφόρος δρομέας



σχήμα 5. επαγωγικός κινητήρας δακτυλιοφόρου δρομέα σε τομή

Η λειτουργία των επαγωγικών κινητήρων είναι βασικά η ίδια με τη λειτουργία των τυλιγμάτων απόσβεσης στις σύγχρονες μηχανές.

### 2.3 Παραγωγή ΗΕΔ (Ηλεκτρεγερτική Δύναμη Επαγόμενη τάση).[2]

Η ΗΕΔ της γεννήτριας είναι ανάλογη με την ταχύτητα περιστροφής της. Όταν η γεννήτρια στρέφεται με χαμηλή ταχύτητα περιστροφής και η ανορθωμένη ΗΕΔ είναι μικρότερη από την τάση της μπαταρίας δεν περνά ρεύμα στη μπαταρία οπότε η ΗΕΔ είναι ίση με την τερματική τάση της γεννήτριας  $V_t$ . Μόλις οι στροφές γίνουν αρκετές ώστε η ανορθωμένη ΗΕΔ να είναι ίση με την τάση της μπαταρίας ξεκινά η έγχυση ισχύος στο σύστημα.

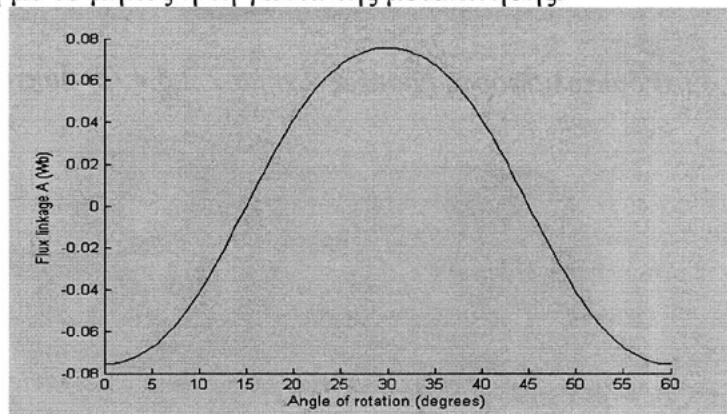
#### 2.3.α Υπολογισμός της ΗΕΔ και της ηλεκτρομαγνητικής ροπής.[2]

Η γεωμετρία που έχουμε πραγματοποιήσει μέχρι στιγμής είναι στατική και το πρόβλημα μαγνητοστατικό. Για να υπολογίσουμε την ΗΕΔ χρειάζεται να πραγματοποιηθεί μετακίνηση του δρομέα ως προς τον στάτη. Για να γίνει αυτό αναπτύσσεται πρόγραμμα στη γλώσσα προγραμματισμού του Matlab που δέχεται την γεωμετρία του προβλήματος, μετακινεί τον δρομέα προς τα δεξιά για απόσταση 1mm

που ισοδυναμεί σε μηχανική γωνία περιστροφής  $0,9^\circ$  και επιλύει το μαγνητοστατικό πρόβλημα σε κάθε θέση. Για κάθε μετακίνηση του δρομέα διαγράφονται τα σημεία δεξιά της γεωμετρίας και δημιουργούνται νέα σημεία στα αριστερά της γεωμετρίας ώστε το πρόβλημα να παραμένει ανάμεσα στα προκαθορισμένα όρια. Σε κάθε μετακίνηση τοποθετούνται εκ νέου οι συνοριακές συνθήκες στα αριστερά και δεξιά σύνορα. Για κάθε ημιπερίοδο των ηλεκτρικών μεγεθών το πρόγραμμα χωρίζεται σε τρεις περιπτώσεις: Αρχικά οι αντικριστοί δεξιά μαγνήτες κινούνται προς τα δεξιά μέχρι να διαγραφούν, έπειτα οι δύο επόμενοι μαγνήτες πλησιάζουν το δεξί σύνορο, και τέλος οι δύο επόμενοι μαγνήτες φτάνουν στο δεξί σύνορο και μετακινούνται προς τα δεξιά μέχρι να φτάσει το μέσο τους στο δεξί σύνορο.

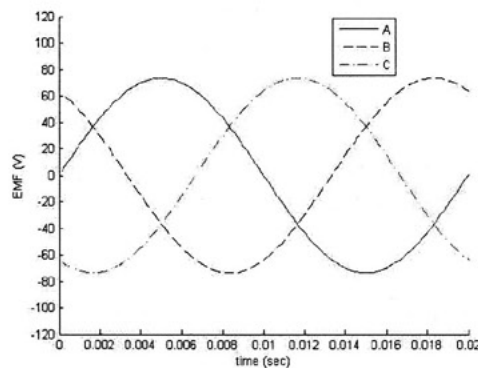
Ιδιαίτερη προσοχή σε αυτή τη μέθοδο χρειάζεται στη τοποθέτηση της σωστής φοράς μαγνήτισης στον νέο μαγνήτη μόλις σχηματοποιηθεί στο αριστερό μέρος της γεωμετρίας, καθώς και στην εξασφάλιση της παρουσίας των μαγνητικών ιδιοτήτων εντός του περιγράμματος του μαγνήτη μέχρι να διαγραφεί εντελώς από τη δεξιά πλευρά. Το πλήρες πρόγραμμα βρίσκεται στο Παράρτημα Α.

Με αυτό τον τρόπο υπολογίζεται η πεπλεγμένη ροή για καθένα από τα τρία πηνία σε σχέση σε σχέση με το μήκος ή τη γωνία της μετακίνησης.



(Σχήμα 2.3.1)

Ο χρόνος της μετακίνησης ισούται με την μηχανική γωνία περιστροφής προς την γωνιακή ταχύτητα. Έτσι, προκύπτει η σχέση της πεπλεγμένης ροής σε σχέση με τον χρόνο της μετακίνησης για συγκεκριμένη ταχύτητα περιστροφής. Η ΗΕΔ προκύπτει παραγιομίζοντας την πεπλεγμένη ροή ανά φάση ως προς τον χρόνο. Στο Σχήμα 2.2.3 παριστάνεται η κυματομορφή της αναπτυσσόμενης ΗΕΔ και των τριών φάσεων για ταχύτητα περιστροφής 500RPM

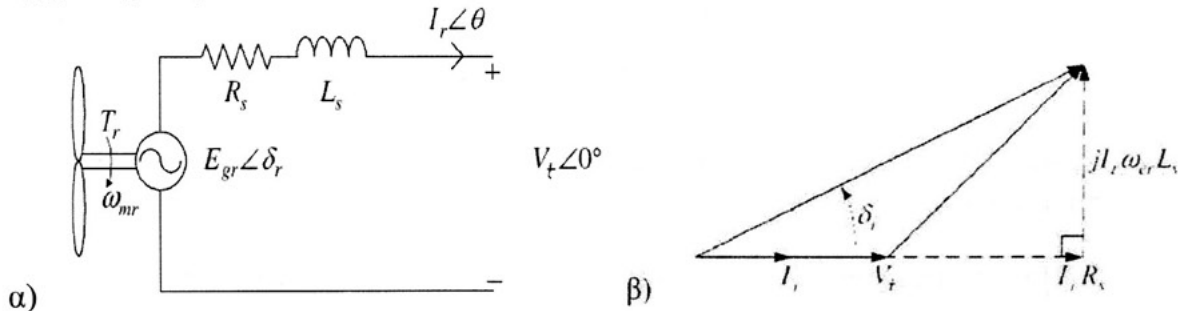


Σχήμα 2.3.2

Εκτός από την ημιτονοειδή μορφή αξίζει να παρατηρήσουμε την σωστή ανάπτυξη τριφασικού συστήματος με διαφορά φάσης  $120^\circ$  μεταξύ δύο διαδοχικών φάσεων. Για τον υπολογισμό της ηλεκτρομαγνητικής ροπής χρειάζεται να τοποθετηθεί κατάλληλο ρεύμα στο τύλιγμα. Για να γίνει αυτό κρίνεται σκόπιμο να αναφερθούν σε βασικές



σχέσεις που ισχύουν όταν η γεννήτρια παράγει μόνο ενεργό ισχύ ( $\cos\phi = 1$ ) που είναι και η περίπτωση που θα δούμε σε όλες τις εφαρμογές ανεμογεννητριών αυτής της εργασίας. Στο Σχήμα 2.3.α παριστάνεται το ισοδύναμο κύκλωμα μίας ανεμογεννήτριας με σύγχρονη γεννήτρια που πρόκειται να συνδεθεί σε μία μη ελεγχόμενη ανόρθωση πλήρους γέφυρας. Η ανόρθωση επιβάλλει μοναδιαίο συντελεστή ισχύος στην είσοδο του. Έτσι, το ρεύμα γραμμής είναι συμφασικό με την τερματική τάση της γεννήτριας, οπότε προκύπτει το διανυσματικό διάγραμμα του Σχήματος 2.3.β



Σχήμα 2.3.β: Ισοδύναμο κύκλωμα σύγχρονης γεννήτριας σε εφαρμογή ανεμογεννήτριας (α), διανυσματικό διάγραμμα της γεννήτριας συνδεδεμένης σε ανορθωτή. Από το διανυσματικό διάγραμμα προκύπτουν εύκολα οι σχέσεις για τη γωνία ισχύος δ:

$$\cos \delta = \frac{V_t + I_{rms} \cdot R_s}{E_f}$$

$$\sin \delta = \frac{I_{rms} \cdot \omega_e \cdot L_s}{E_f}$$

Η ηλεκτρομαγνητική ισχύς της γεννήτριας ισούται με το άθροισμα της ενεργού ισχύος στους ακροδέκτες της γεννήτριας και των ωμικών απωλειών χαλκού αν αγνοήσουμε τις πιθανές απώλειες πυρήνα ή τις απώλειες δινορευμάτων του τυλίγματος.

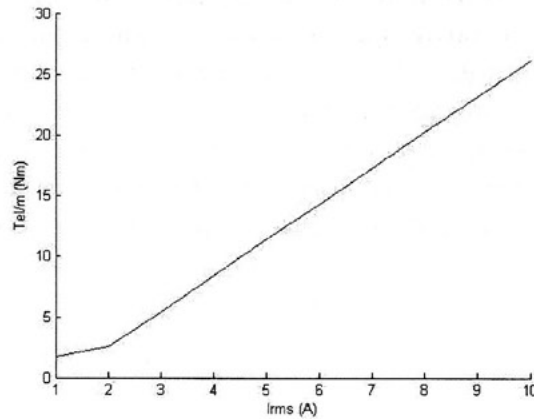
$$P_{H/M} = 3V_t \cdot I_{rms} + 3I_{rms}^2 \cdot R_s$$

Λύνοντας την εξίσωση δευτέρου βαθμού υπολογίζεται το ρεύμα γραμμής:

$$I_{rms} = \frac{\sqrt{V_t^2 + \frac{4}{3} R_s \cdot P_{H/M}} - V_t}{2R_s}$$

Με βάση την παραπάνω σχέση υπολογίζεται στο ίδιο πρόγραμμα η γωνία ισχύος δ και εγκαθίστανται κατάλληλα ημιτονοειδή ρεύματα στο τυλίγμα. Ταυτόχρονα μετακινώντας με την αντίστοιχη γωνιακή ταχύτητα τον δρομέα, υπολογίζεται η ηλεκτρομαγνητική δύναμη με χρήση του Maxwell, η οποία πολλαπλασιαζόμενη με τη μέση ακτίνα της μηχανής δίνει την ηλεκτρομαγνητική ροπή.

Η μέση τιμή της ηλεκτρομαγνητικής ροπής που υπολογίστηκε για διάφορα ρεύματα γραμμής παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.3.3 Στην επόμενο παράγραφο θα υπολογιστεί η ηλεκτρομαγνητική ροπή με βάση το ισοδύναμο κύκλωμα της γεννήτριας που δίνει πιο ακριβή αποτελέσματα.



Σχήμα 2.2.3: Ηλεκτρομαγνητική ροπή σε σχέση με το ρεύμα γραμμής με βάση την προσομοίωση στο FEMM.

## 2.4 Γενική περιγραφή σύγχρονων γεννητριών.[13]

### A) Στάτης

1. Ο προορισμός του στάτη στους εναλλακτήρες σταθερών πόλων είναι να στηρίζει την ηλεκτρική μηχανή

να δημιουργεί καθορισμένη μαγνητική ροή στο εσωτερικό της ηλεκτρικής μηχανής να τροφοδοτεί το φορτίο με ηλεκτρική ενέργεια με τους ανάλογους αγωγούς. Τα μέρη τα οποία περιλαμβάνει ο στάτης ενός εναλλακτήρα με σταθερούς πόλους είναι τα πιο κάτω:

2. Το ζύγωμα που αποτελεί τον κορμό του εναλλακτήρα. Το σχήμα του είναι κυλινδρικό και έχει: διαμόρφωση στήριξης στο κάτω μέρος ώστε να αποτελεί την βάση και κρίκο μεταφοράς στο πάνω μέρος. Η κατασκευή του είναι από χυτοσίδηρο και ο προορισμός του είναι η δημιουργία κλειστού μαγνητικού κυκλώματος στην ηλεκτρική μηχανή. Ο πυρήνας των μαγνητικών πόλων που στερεώνεται με ειδικές βίδες στο εσωτερικό μέρος του ζυγώματος η κατασκευή του πυρήνα των μαγνητικών πόλων των εναλλακτών είναι από Ελάσματα που είναι μονωμένα μεταξύ τους. Αυτό γίνεται για την αποφυγή των επαγωγικών ρευμάτων Foucault (δινορρεύματα) και σκληρά σιδηρομαγνητικό υλικό για την ύπαρξη σημαντικής ποσότητας παραμένοντα μαγνητισμού όταν ο εναλλακτήρας δεν λειτουργεί. Ο αριθμός των μαγνητικών πόλων είναι πάντα ζυγός αριθμός. Έτσι αναφερόμαστε στα ζεύγη των μαγνητικών πόλων που συμβολίζονται με  $p$ . Ανάλογα με τον αριθμό των μαγνητικών πόλων που έχει ένας εναλλακτήρας χαρακτηρίζεται σαν διπολικός, τετραπολικός, εξαπολικός, οκταπολικός κ.λ.π. Η μαγνητική ροή  $\Phi$  του μαγνητικού πεδίου ορίζεται από τον κατασκευαστή.

3. Τα καλύμματα ή καπάκια που στερεώνονται με βίδες στο ζύγωμα και βρίσκονται σε ζευγάρια. Η κατασκευή τους είναι από χυτοσίδηρο και στο κέντρο τους φέρουν τα έδρανα (ρουλεμάν). Ο προορισμός τους είναι να στηρίζουν τον άξονα ώστε να είναι δυνατή η περιστροφή τους στα έδρανα να προφυλάσσουν το εσωτερικό μέρος του εναλλακτήρα από διάφορα σκουπίδια η μικροαντικείμενα.

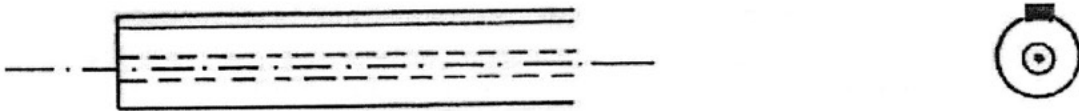
4. Ο ψυκτροφορέας ο οποίος αποτελείται από τη βάση, η οποία με την σειρά της αποτελείται από ένα σιδερένιο δακτυλίδι. Η βάση χρησιμεύει για την στερέωση του συστήματος του ψηκτροφορέα στο εσωτερικό μέρος του καλύμματος προς την πλευρά των δακτυλιδιών και τις τρεις ψυκτροθήκες που είναι μεταλλικές και στο εσωτερικό τους τοποθετούνται οι ψήκτρες. Το σύστημα του ψηκτροφορέα δίνει την δυνατότητα μετακίνησης των ψηκτρών.



Οι ψήκτρες που είναι κατασκευασμένες από ηλεκτραγώγιμο άνθρακα και χαλκό. Αυτές τοποθετούνται μέσα στις ψηκτροθήκες και με ελατηριωτό μηχανισμό που βρίσκεται στο σύστημα του ψηκτροφορέα πιέζονται, για να εφάπτονται στους δακτυλίου. Στο αντίθετο μέρος της επαφής του, έχουν αγωγό κατασκευασμένο από ευλύγιστη πλέξη χάλκινου σύρματος. Ο προορισμός των ψηκτρών στους εναλλακτήρες σταθερών πόλων είναι να παίρνουν την ηλεκτρική ενέργεια από αυτόν και να την οδηγούν προς τον καταναλωτή. Το κιβώτιο ακροδεκτών που βρίσκεται στο εξωτερικό μέρος του ζυγώματος και έχει ίδια εξωτερική κατασκευή με αυτό. Στο κιβώτιο ακροδεκτών καταλήγουν σε συγκεκριμένες θέσεις τα άκρα των διαφόρων τυλιγμάτων που περιλαμβάνει ο εναλλακτήρας. Στους ακροδέκτες του κιβωτίου ακροδεκτών γίνεται η σύνδεση των καλωδίων τροφοδοσίας φορτίων των καταναλωτών με τον εναλλακτήρα.

### Β) Δρομέας

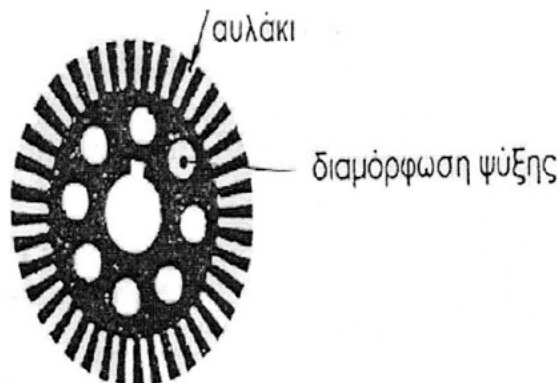
Ο προορισμός του δρομέα είναι: i. να περιστρέφεται μέσα στο μαγνητικό πεδίο των πόλων ii. να δημιουργεί το φαινόμενο της επαγωγής στους αγωγούς που διαθέτει. Τα μέρη τα οποία περιλαμβάνει ο δρομέας ενός εναλλακτήρα με σταθερούς πόλους είναι τα πιο κάτω ο άξονας που είναι κατασκευασμένος από ατσάλι. Κατά μήκος της επιφάνειάς του διαθέτει προεξοχή που δίνει τη δυνατότητα προσαρμογής σ αυτόν διάφορα εξαρτήματα. (Σχ.2).



Σχήμα 2. Σχηματική μορφή άξονα

Τα άκρα του άξονα προσαρμόζονται στα έδρανα. Με τον τρόπο αυτό εξασφαλίζεται η εύκολη περιστροφή του δρομέα στο εσωτερικό μέρος του εναλλακτήρα.

Το επαγωγικό τύμπανο, που περιλαμβάνει πυρήνα και τύλιγμα. Πιο συγκεκριμένα: Ο πυρήνας του επαγωγικού τυμπάνου είναι κατασκευασμένος από ελάσματα σιδηρομαγνητικού υλικού που είναι μονωμένα μεταξύ τους για την αποφυγή των επαγωγικών ρευμάτων Foucault.



Σχήμα 3 Σχηματική μορφή ελασμάτων

Τα ελάσματα του επαγωγικού τυμπάνου στερεώνονται στον άξονα με ειδικές σφήνες. Κατά μήκος της επιφάνειας του πυρήνα του επαγωγικού τυμπάνου σχηματίζονται αυλάκια μέσα στα οποία τοποθετείται το τύλιγμα .

Το τύλιγμα του επαγωγικού τυμπάνου αποτελείται από επισμαλτωμένο αγωγό χαλκού i κυκλικής ή ii. ορθογωνικής διατομής. Το τύλιγμα του επαγωγικού τυμπάνου τοποθετείται στον πυρήνα απευθείας ή με διαμόρφωση σε ειδικά καλούπια.

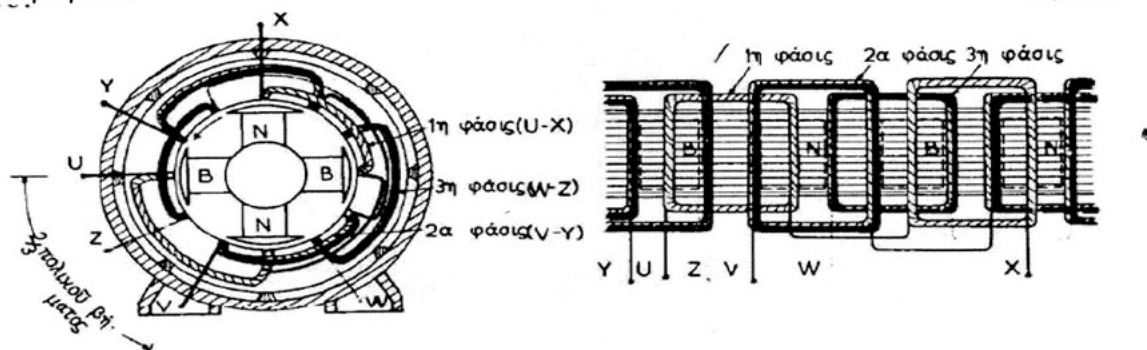
Ανάλογα με τη μορφή της εγκοπής του πυρήνα χρησιμοποιείται και ειδικός τύπος σφήνας. Ο σκοπός των σφηνών είναι η προστασία του τυλίγματος από τις φυγοκεντρικές δυνάμεις που αναπτύσσονται σ' αυτό όταν ο δρομέας περιστρέφεται με μεγάλη ταχύτητα . Τα άκρα των ομάδων του τυλίγματος του επαγωγικού τυμπάνου των εναλλακτών με σταθερούς πόλους, καταλήγουν στα δακτυλίδια .

Ο προορισμός του τυλίγματος του επαγωγικού τυμπάνου (που βρίσκεται μέσα στο σταθερό μαγνητικό πεδίο των πόλων) είναι η δημιουργία του φαινομένου της επαγωγής στους αγωγούς του όταν στρέφεται ο δρομέας μέσα στο μόνιμο μαγνητικό πεδίο των πόλων. Τα δακτυλίδια που έχουν κατασκευή από ορείχαλκο και ο αριθμός τους εξαρτάται από τον αριθμό των φάσεων του εναλλακτήρα. Έτσι στους τριφασικούς εναλλακτές με σταθερούς πόλους υπάρχουν τρία δακτυλίδια.

Τα δακτυλίδια είναι μονωμένα μεταξύ τους με μίκα και στερεώνονται με ειδικό τρόπο στον άξονα του εναλλακτήρα . Στα δακτυλίδια καταλήγουν τα άκρα του τυλίγματος του επαγωγικού τυμπάνου του εναλλακτήρα σταθερών πόλων. Ο προορισμός των δακτυλιδιών είναι να μεταβιβάζουν την ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται στο τριφασικό τύλιγμα του επαγωγικού τυμπάνου του εναλλακτήρα σταθερών πόλων στην κατανάλωση. Ο ανεμιστήρας που βρίσκεται τοποθετημένος πάνω στον άξονα και προς την αντίθετη πλευρά των δακτυλιδιών. Ο προορισμός του ανεμιστήρα είναι να δημιουργεί ψύξη τυλίγματος του επαγωγικού τυμπάνου, επειδή κατά την λειτουργία του εναλλακτήρα των σταθερών πόλων διαρρέοντα! από ρεύματα μεγάλων τιμών και αναπτύσσουν θερμότητα Joule. Η κατασκευή τους είναι σε μορφή φτερωτής πλαστικής ύλη ή από αλουμίνιο σε μορφή φτερωτής. Η βασική διαφορά της σύγχρονης γεννήτριας μονίμων μαγνητών από μια κοινή σύγχρονη γεννήτρια είναι η απουσία του τυλίγματος διέγερσης. Το πεδίο διέγερσης της μηχανής δημιουργείται από τη συστοιχία των μονίμων μαγνητών, οι οποίοι βρίσκονται τοποθετημένοι περιμετρικά στην επιφάνεια του δρομέα, ώστε να δημιουργούν ακτινικό μαγνητικό πεδίο.

## 2.5 Τριφασικοί εναλλακτές.[10]

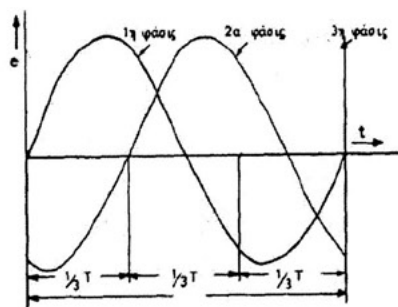
Οι τριφασικοί εναλλακτές φέρουν στο επαγωγικό τύμπανο τρία όμοια και ανεξάρτητα μεταξύ τους μονοφασικά τυλίγματα, τις τρεις φάσεις του εναλλακτήρα. Στο Σχήμα 2.5.1 φαίνεται ένας απλός τριφασικός εναλλακτής και το ανάπτυγμα του επαγωγικού τυμπάνου



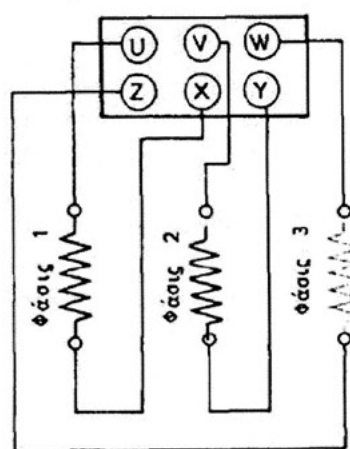
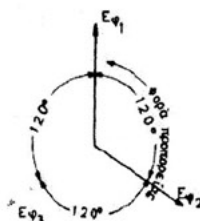
Σχήμα 2.5.1

Στα τριφασικά τυλίγματα υπάρχουν 6 άκρα, τρεις αρχές U, V, W και τρία πέρατα X, Y, Z. Έτσι το τύλιγμα U-X αποτελεί την πρώτη φάση, το τύλιγμα V-Y την δεύτερη και το W-Z την τρίτη. Οι εναλλασσόμενες ηλεκτρεγερτικές δυνάμεις που αναπτύσσονται στις τρεις φάσεις έχουν το ίδιο μέγεθος (ενεργές τιμές), την ίδια συχνότητα και λέγονται φασικές ηλεκτρεγερτικές δυνάμεις. Οι φασικές ΗΕΔ έχουν μεταξύ τους φασική μετατόπιση 120 μοιρών. Στο Σχήμα 2.5.1 φαίνονται οι ηλεκτρεγερτικές δυνάμεις τριφασικού εναλλακτήρα τόσο συναρτήσεως του χρόνου όσο και με διανυσματική μορφή.

Τα έξι ελεύθερα άκρα της μηχανής συνδέονται στους έξι ακροδέκτες της μηχανής όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.5.2 Τότε οι τρεις φάσεις είναι εντελώς ανεξάρτητες μεταξύ τους και το σύστημα που προκύπτει λέγεται ανεξάρτητο τριφασικό σύστημα. Πρακτικά όμως τα τυλίγματα των τριών φάσεων συνδέονται μεταξύ τους με αποτέλεσμα το συνδεδεμένο τριφασικό σύστημα.

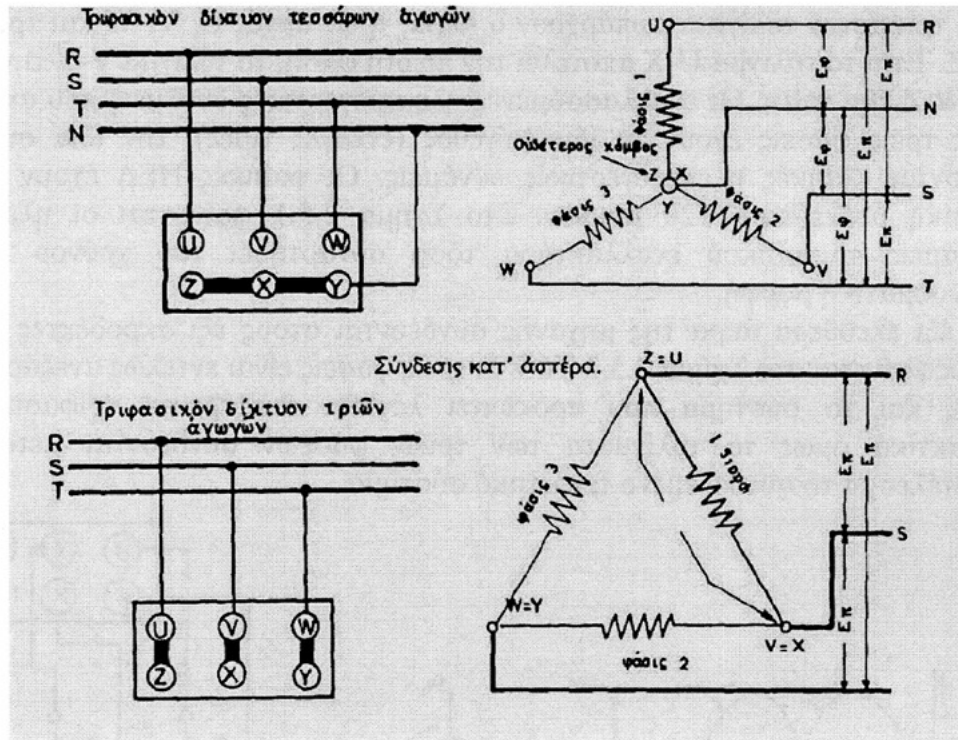


Σχήμα 2.5.1



Σχήμα 2.5.2

Υπάρχουν δύο τρόποι σύνδεσης μεταξύ των φάσεων, η σύνδεση σε αστέρα και η σύνδεση σε τρίγωνο. Στην σύνδεση σε αστέρα συνδέονται οι ακροδέκτες Z, X, Y που αποτελούν έτσι τον ουδέτερο κόμβο της μηχανής και οι άλλοι τρεις ακροδέκτες U, V, W συνδέονται στο τριφασικό δίκτυο. Όταν το τριφασικό δίκτυο είναι τεσσάρων αγωγών, ο τέταρτος αγωγός συνδέεται στον ουδέτερο κόμβο της μηχανής. Μεταξύ του ακροδέκτη μιας φάσεως και του ουδέτερου υπάρχει η φασική ΗΕΔ του εναλλακτήρα  $E_{\phi}$  και μεταξύ δύο φάσεων υπάρχει η πολική τάση  $H$  μεταξύ των δύο σχέσης είναι  $E_{\pi} = \sqrt{3}E_{\phi} = 1,73E_{\phi}$ . Η σύνδεση σε τρίγωνο πραγματοποιείται με σύνδεση των ακροδεκτών των φάσεων έτσι ώστε η Z να συνδέεται με την U, η W με την Y και η V με την X. Στην περίπτωση αυτή η φασική ΗΕΔ είναι ίση με την πολική ζ. Στο Σχήμα 2.5.3 φαίνονται οι συνδέσεις σε αστέρα και τρίγωνο.



Σχήμα 2.5.3

Η ενεργός τιμή της φασικής ΗΕΔ δίνεται από την σχέση  $E_{\phi} = Kf\omega\Phi$  και η μονάδα μέτρησης είναι σε V. Όπου K σταθερά εξαρτώμενη από το τύλιγμα με τιμές μεταξύ 1.9 και 3.4 f η συχνότητα, της παραγόμενης τάσης,  $\Phi$  η μαγνητική ροή ανά πόλο σε Wb,  $\omega$  ο αριθμός των σε σειρά αγωγών του τυλίγματος της φάσης (αριθμός αυλακιών επί τον αριθμό των αγωγών ανά αυλάκι).

## 2.6 Ρύθμιση τάσης εναλλακτήρα.[10]

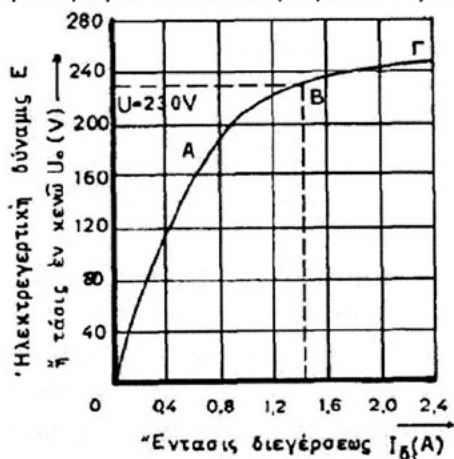
Η μεταβολή της ΗΕΔ εναλλακτήρα μπορεί να γίνει είτε με μεταβολή της ταχύτητας περιστροφής ή της μαγνητικής ροής  $\Phi$  σύμφωνα με τον παραπάνω τόπο της ΗΕΔ. των άλλων παραμέτρων να αποκλείονται λόγω του ότι εξαρτώνται από κατασκευαστικά στοιχεία. Η μεταβολή της ταχύτητας πάλι δεν είναι επιτρεπτή αφού έτσι θα αλλάξει η συχνότητα της παραγόμενης τάσης. Επομένως η μόνη πρακτική δυνατότητα μεταβολής είναι εκείνη της μαγνητικής ροής  $\Phi$  που εξαρτάται από το ρεύμα διέγερσης.

Στους μεγάλους εναλλακτήρες, λόγω του σα το ρεύμα διέγερσης: έχει σημαντικές τιμές η ρύθμιση της διέγερσης γίνεται όχι με ροοστάτη διεγέρσεως στο τύλιγμα της διεγέρτριας μηχανή αλλά με τροφοδοσία του τυλίγματος την διεγέρτριας από άλλη γεννήτρια συνεχούς ρεύματος (λέγεται διεγέρτρια πιλότος). Στο Σχήμα 2.10 φαίνονται δύο περιπτώσεις ρύθμισης τάσης με μεταβολή διέγερσης Η καμπύλη μεταβολής της ΗΕΔ ενάλλακτήρα που είναι η τάση χωρίς φορτίο όταν μεταβάλλεται η ένταση διέγερσης για σταθερή ταχύτητα περιστροφής λέγεται χαρακτηριστική στο κενό ή στατική χαρακτηριστική του εναλλακτήρα και φαίνεται στο Σχήμα 2.11. Στην χαρακτηριστική διακρίνονται δύο τμήματα : η γραμμική περιοχή όπου η E είναι ανάλογη του ρεύματος διέγερσης και η περιοχή κορεσμού όπου σημαντική αύξηση του ρεύματος διέγερσης έχει σαν αποτέλεσμα μικρή μόνο αύξηση της τάσης Οι εναλλακτήρες κατασκευάζονται ώστε να λειτουργούν στην αρχή της περιοχής κορεσμού στο ονομαστικό σημείο λειτουργίας.

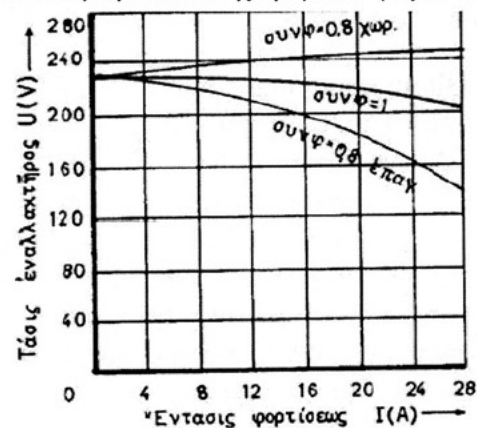


2.7 Λειτουργία υπό φορτίο.[10]

Όταν ο εναλλακτήρας λειτουργεί στο κενό με τις ονομαστικές στροφές, η τάση στα άκρα του είναι ίση με την ΗΕΔ και εξαρτάται μόνο από την τιμή της έντασης διέγερσης. Συνδέοντας φορτίο (σύνθετες αναστάσεις) και κρατώντας σταθερή την διέγερση η τάση του εναλλακτήρα μεταβάλλεται και εξαρτάται εκτός των άλλων και από το είδη του φορτίου (ωμικό, επαγωγικό ή χωρητικό) που εκφράζεται με τον συντελεστή ισχύος του. Έτσι προκύπτουν χαρακτηριστικές υπό φορτίο με την μορφή του Σχήματος 2.12 και 2.13 Ένα άλλο σημαντικό μέγεθος του εναλλακτήρα είναι η διακύμανση τάσεως από το κενό (LT0) μέχρι το ονομαστικό φορτίο ( $U_n$ ) που ορίζεται σαν  $U\% = 100 (U_0 - U_n)/U_n$ . Η ρύθμιση τάσης του εναλλακτήρα όταν μεταβάλλεται το φορτίο του γίνεται πάντα μέσω της έντασης διέγερσης και πραγματοποιείται με αυτόματο ρυθμιστή που προσαρμόζει πάντα την διέγερση ώστε να υπάρχει στην έξοδο η σταθερή ονομαστική τάση. Έτσι ανάλογα με το είδος του φορτίου ο εναλλακτήρας υπερδιεγείρεται σε επαγωγικά Φορτία και υποδιεγείρεται σε χωρητικά φορτία.



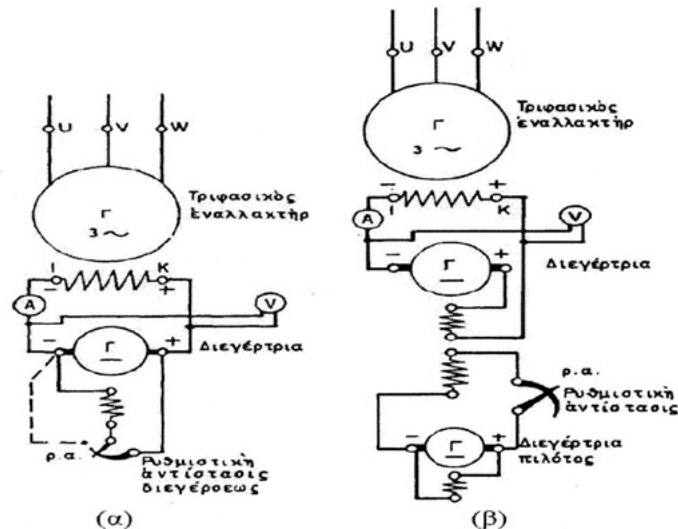
Σχήμα 2.11 Χαρακτηριστική στο κενό



Σχήμα 2.12 Χαρακτηριστικές φόρτισης

2.8 Χαρακτηριστικά εναλλακτών.[10]

Με την βοήθεια οργάνων που έχει κάθε εγκατάσταση εναλλακτήρα μπορεί να μετρηθεί κατά την λειτουργία του η πολική τάση  $U$ , η ένταση γραμμής  $I$  και η πραγματική ισχύς:  $P$  που αποδίδεται στο δίκτυο. Από τα μεγέθη αυτά μπορεί να υπολογισθεί η φαινόμενη ισχύς  $S$  και η άεργος ισχύς  $Q$  που παρέχει ο εναλλακτήρας όπως και ο συντελεστής ισχύος  $\cos\phi$  με τις γνωστές από την ηλεκτροτεχνία σχέσεις που ακολουθούν στον Πίνακα 2.1



Σχήμα 2.10 Ρύθμιση τάσης με μεταβολή διέγερσης

	Μονοφασική έναλλακτήρας	Τριφασικός έναλλακτήρας
Φαινόμενη ισχύς (VA)	$S = U \cdot I$	$S = 1.73 \cdot U \cdot I$
Πραγματική Ισχύς (W)	$P = U \cdot I \cdot \text{συνφ}$	$P = 1.73 \cdot U \cdot I \cdot \text{συνφ}$
Άεργος Ισχύς (var)	$Q = U \cdot I \cdot \eta\mu\phi$	$Q = 1.73 \cdot U \cdot I \cdot \eta\mu\phi$
Συντελεστής Ισχύος	$\text{συνφ} = P / (I \cdot U)$	$\text{συνφ} = P / (1.73 \cdot I \cdot U)$

Πίνακας 2.1 Σχέσεις υπολογισμού της ισχύος .

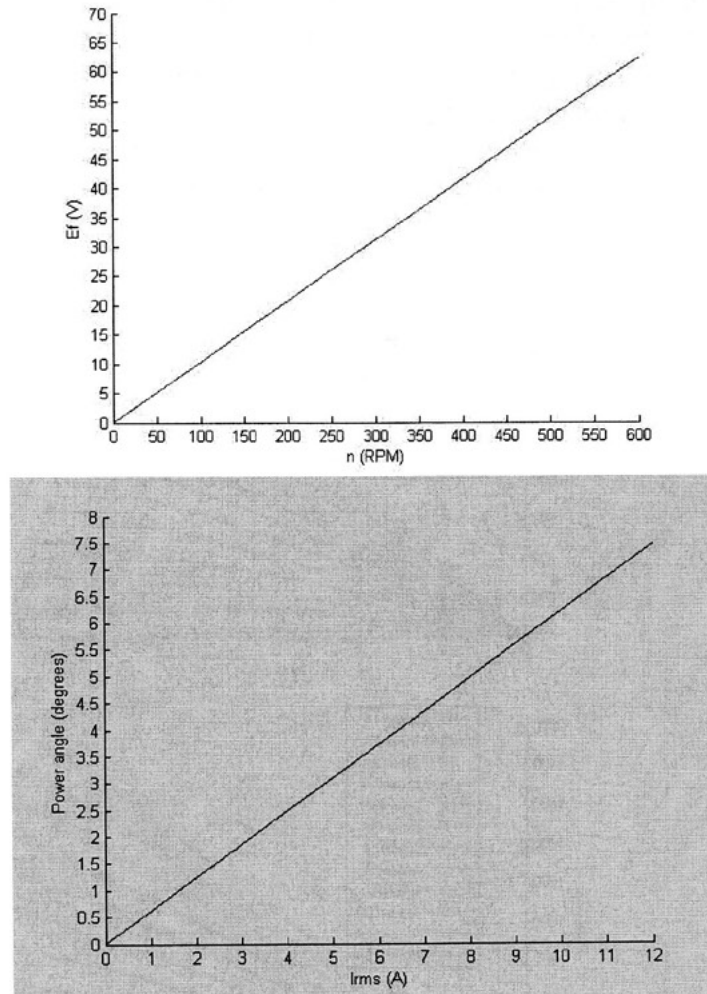
Οι εναλλακτήρες κατασκευάζονται για μια ορισμένη ονομαστική τάση λειτουργίας που δίνεται πάντα από τον κατασκευαστή σαν πολική τάση πχ. 380Y ή 15kV. Το μέγεθος ενός εναλλακτήρα χαρακτηρίζεται από την ονομαστική του ισχύ που είναι η φαινόμενη ισχύς που ο εναλλακτήρας μπορεί να δίνει συνεχώς στην ονομαστική του τάση χωρίς κίνδυνο καταστροφής των μονώσεων του από υπερθέρμανση. Στην πινακίδα του εναλλακτήρα εκτός της ονομαστικής ισχύος, τάσης έντασης του ονόματος του κατασκευαστή και του αριθμού της κατασκευής γράφονται και τα εξής στοιχεία:

- α) ο αριθμός των φάσεων
  - β) η συχνότητα του ρεύματος
  - γ) ο ονομαστικός συντελεστής ισχύος με βάση τον οποίο έχει υπολογισθεί η ισχύς της κινητήριας μηχανής
  - δ) η σύγχρονη ταχύτητα περιστροφής
  - ε) η μέγιστη επιτρεπόμενη ένταση και τάση διέγερσης
- Επίσης στην πινακίδα μπορεί να γράφεται και το είδος της επιτρεπόμενης λειτουργίας (συνεχής, διακοπτόμενη) και στην περίπτωση που δεν γράφεται αυτό η λειτουργία θεωρείται συνεχής.

## 2.9 Επιδόσεις της γεννήτριας.[2]

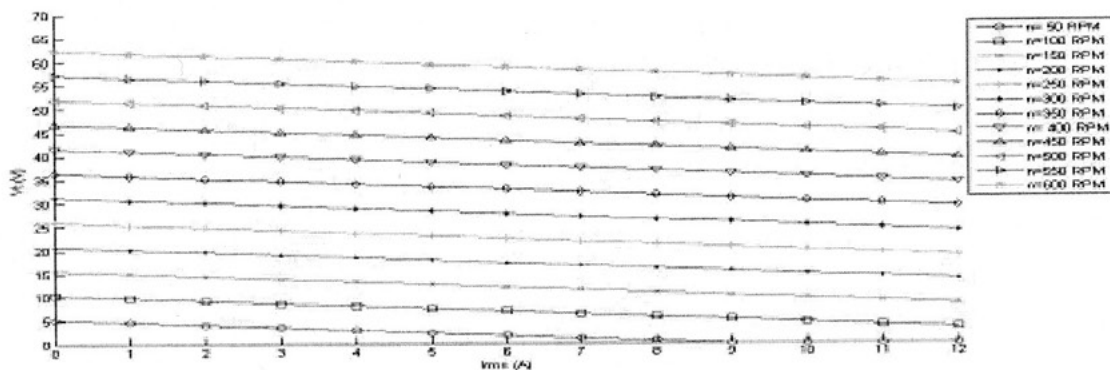
Στην παράγραφο αυτή για διάφορες τιμές του ρεύματος γραμμής και της ταχύτητας περιστροφής θα υπολογιστούν χρήσιμα ηλεκτρικά και μηχανικά μεγέθη. Το πλήρες πρόγραμμα που υλοποιήθηκε βρίσκεται στο Παράρτημα Β

Η σχέση της ΗΕΔ με την ταχύτητα περιστροφής είναι ως γνωστόν γραμμική και παριστάνεται στο Σχήμα 4.11 α. Η γωνία ισχύος  $\delta$  υπολογίζεται από την σχέση (4.21). Η μικρή σύγχρονη αντίδραση οδηγεί σε μικρές τιμές της γωνίας  $\delta$  που εξηγεί την γραμμική της σχέση με το ρεύμα γραμμής (Σχήμα 4.11 β).



Σχήμα 2.9 : ΗΕΔ σε σχέση με την ταχύτητα περιστροφής (α).  
Γωνία ισχύος  $\theta$  σε σχέση με το ρεύμα γραμμής(β).

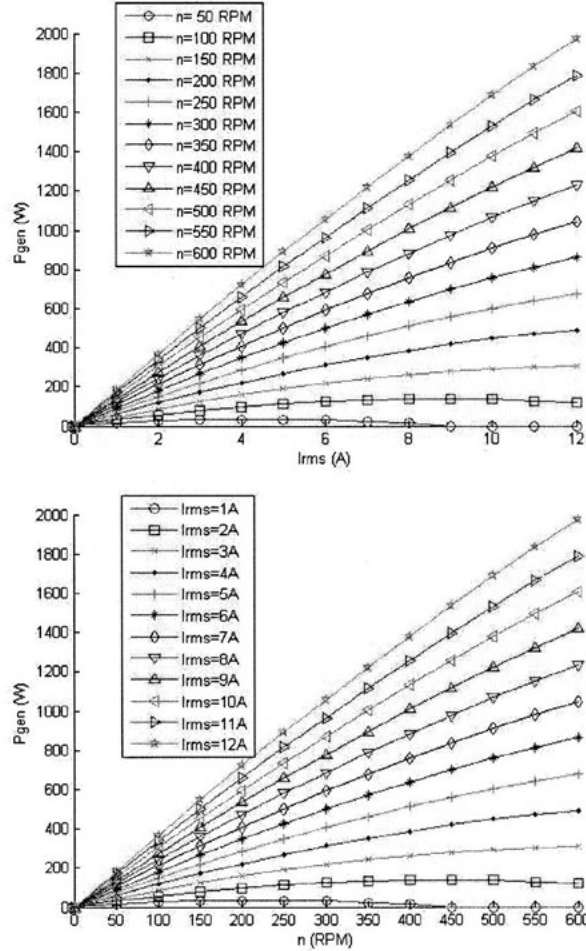
Η σχέση της τερματικής τάσης με το ρεύμα γραμμής για διάφορες ταχύτητες περιστροφής παριστάνεται στο Σχήμα 4.12. Για δεδομένη ταχύτητα περιστροφής όταν αυξάνεται το ρεύμα αυξάνεται η πτώση τάσης και μειώνεται η τερματική τάση. Η γραμμική τους σχέση οφείλεται στη μικρή τιμή της σύγχρονης αυτεπαγωγής. Για μεγαλύτερες ταχύτητες περιστροφής η ΗΕΔ αυξάνεται οπότε αυξάνεται και η τερματική τάση.



Σχήμα 4.9.1: Τερματική τάση σε σχέση με το ρεύμα γραμμής για διάφορες ταχύτητες περιστροφής.

Η μεταβολή της ηλεκτρικής ισχύος σε σχέση με το ρεύμα για διάφορες ταχύτητες περιστροφής και της ισχύος σε σχέση με την ταχύτητα περιστροφής για διάφορα ρεύματα παρουσιάζονται στα Σχήματα 4.13α και 4.13β αντίστοιχα. Η σχεδόν

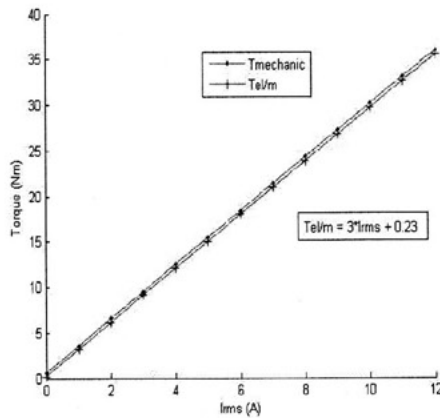
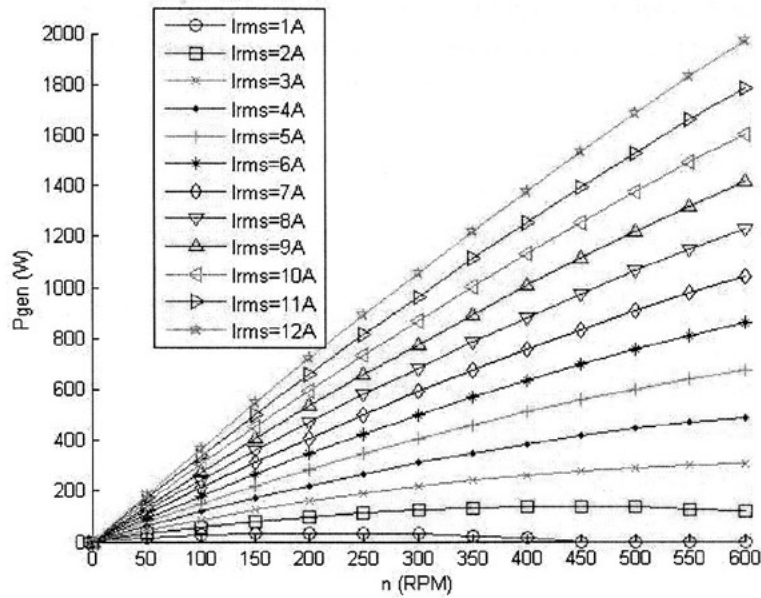
γραμμική σχέση της ισχύος με το ρεύμα για δεδομένη ταχύτητα περιστροφής οφείλεται στην μικρή μείωση της τερματικής τάσης με την αύξηση του ρεύματος. Για μεγαλύτερες τιμές της ταχύτητας περιστροφής η παραγόμενη ισχύς αυξάνεται. Η κατά προσέγγιση γραμμική σχέση της ισχύος με την ταχύτητα περιστροφής για δεδομένο ρεύμα οφείλεται στην σχεδόν γραμμική σχέση της τερματικής τάσης με την ταχύτητα περιστροφής. Για μεγαλύτερα ρεύματα η παραγόμενη ισχύς αυξάνεται.



Σχήμα 2.9.2: Ηλεκτρική ισχύς σε σχέση με το ρεύμα γραμμής για διάφορες ταχύτητες περιστροφής(α). Ηλεκτρική ισχύς σε σχέση με την ταχύτητα περιστροφής για διάφορα ρεύματα γραμμής(β).

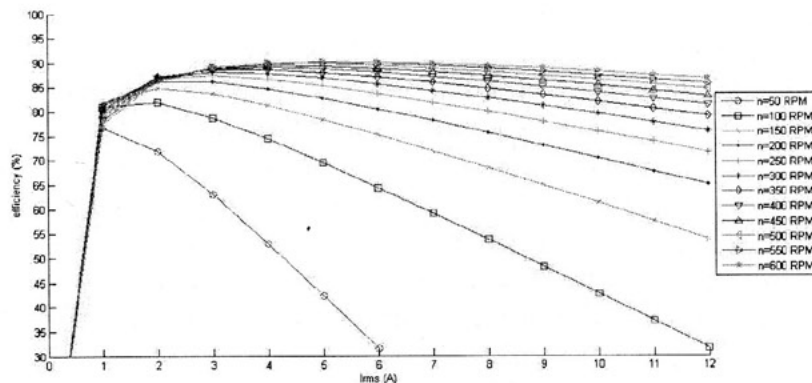
Η μεταβολή της ηλεκτρομαγνητικής ροπής και της μηχανικής ροπής στον άξονα σε σχέση με το ρεύμα γραμμής χαράσσονται στο Σχήμα 4.14α. Ως γνωστόν η ηλεκτρομαγνητική ροπή είναι ανεξάρτητη της ταχύτητας περιστροφής και η ακριβής σχέση της με το ρεύμα αναγράφεται στο Σχήμα 2.9.3.α





Σχήμα 2.9.3.α, Σχήμα 2.9.3.β: Ηλεκτρομαγνητική ροπή και μηχανική ροπή στον άξονα σε σχέση με το ρεύμα γραμμής(α). Απόδοση της γεννήτριας σε σχέση με την ταχύτητα περιστροφής για διάφορα ρεύματα γραμμής(β).

Τέλος, παρουσιάζεται η μεταβολή της απόδοσης της γεννήτριας σε σχέση με την ταχύτητα περιστροφής για διάφορα ρεύματα γραμμής (Σχήμα 4.14β) και η μεταβολή της απόδοσης σε σχέση με το ρεύμα για διάφορες ταχύτητες περιστροφής (Σχήμα 4.15). Για δεδομένο ρεύμα, αύξηση της ταχύτητας περιστροφής οδηγεί σε σημαντική αύξηση της παραγόμενης ισχύος ενώ οι απώλειες περιστροφής και δινορευμάτων αυξάνονται λιγότερο. Αύξηση του ρεύματος για δεδομένη ταχύτητα περιστροφής οδηγεί σε μεγαλύτερες απώλειες χαλκού που είναι οι κυρίαρχες απώλειες της γεννήτριας με αποτέλεσμα να μειώνεται η απόδοσή της.



Σχήμα 2.9.4: Απόδοση της γεννήτριας σε σχέση με το ρεύμα γραμμής για διάφορες ταχύτητες περιστροφής κατασκευή και πειραματικές μετρήσεις στη γεννήτρια αξονικής ροής.

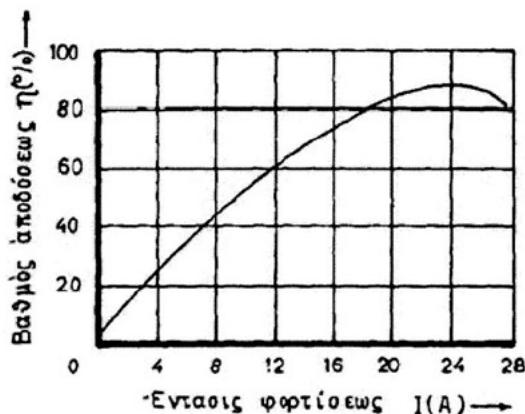
## 2.10 Απώλειες και βαθμός απόδοσης γεννήτριας.[10]

Οι απώλειες των εναλλακτών που λειτουργούν με σταθερή συχνότητα διακρίνονται στις σταθερές απώλειες  $P_1$  που είναι οι μηχανικές απώλειες, οι μαγνητικές απώλειες και οι ηλεκτρικές απώλειες διέγερσης που δεν εξαρτώνται από το φορτίο και στις μεταβλητές απώλειες  $P_2$  που είναι οι ηλεκτρικές απώλειες του τυλίγματος στάτη. Αν  $R$  είναι η ωμική αντίσταση ανά φάση του τυλίγματος τυμπάνου και  $I$  η ένταση γραμμής τριφασικού εναλλακτήρα, τότε οι μεταβλητές απώλειες είναι

A) Για σύνδεση αστέρα  $P_2 = 3RI^2$

B) Για σύνδεση τριγώνου  $P_2 = R I^2$

Οι συνολικές απώλειες του εναλλακτήρα είναι  $\Sigma P = P_1 + P_2$  και ο βαθμός απόδοσης είναι  $\eta = P/\Sigma P$  με  $P$  την αποδομένη πραγματική ισχύ στο δίκτυο, Είναι προφανές ότι ο βαθμός απόδοσης είναι μικρότερος της μονάδας. Ο βαθμός απόδοσης εξαρτάται από το φορτίο του εναλλακτήρα. Η καμπύλη του Σχήματος 2.13 δείχνει πως μεταβάλλεται ο βαθμός απόδοσης ενός εναλλακτήρα όταν μεταβάλλεται το ρεύμα φορτίου του με σταθερό συντελεστή ισχύος. Ο βαθμός απόδοσης: μεγιστοποιείται όταν αποδίδει την ονομαστική ένταση με τον ονομαστικό συντελεστή ισχύος και μπορεί να φθάσει μέχρι και 95% στους μεγάλους εναλλακτήρες



Σχήμα 2.13 Μεταβολή βαθμού απόδοσης εναλλακτήρα.

## 2.11 Τρόπος κατασκευής της γεννήτριας.[2]

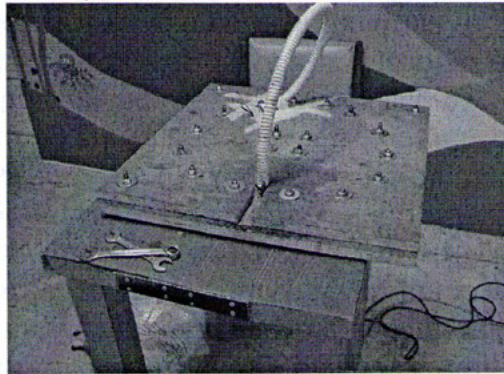
### 2.11.α Κατασκευή του στάτη.[2]

Η γεννήτρια αξονικής ροής μονίμων μαγνητών χωρίς πυρήνα στον στάτη παρουσιάζει απλότητα στον τρόπο κατασκευής. Η κατασκευή της γεννήτριας βασίστηκε στις λεπτομερείς οδηγίες που βρίσκονται στο [1] πραγματοποιήθηκε χωρίς να χρειάζονται εξειδικευμένα εργαλεία ούτε κάποια σημαντική κατασκευαστική εμπειρία. Τα βασικά εργαλεία που χρησιμοποιούνται είναι ηλεκτρική σέγα, πριόνια, λίμες, επιτραπέζιο δράπανο, ηλεκτρικός τροχός, ηλεκτροσυγκόλληση, βιδολόγος κ.α.

Τα πηνία πρόκειται να τοποθετηθούν σε μία πλάκα από πολυεστερική ρητίνη που θα τα κρατά στη θέση τους και θα εξασφαλίζει μηχανική αντοχή. Για να γίνει αυτό χρειάζεται να κατασκευαστεί πρώτα ένα καλούπι στο οποίο στη συνέχεια θα γίνει έγχυση της ρητίνης. Το καλούπι κατασκευάζεται από τρία ξύλα τύπου κόντρα πλακέ όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.11 Το κάτω κόντρα πλακέ είναι η βάση και το πάνω

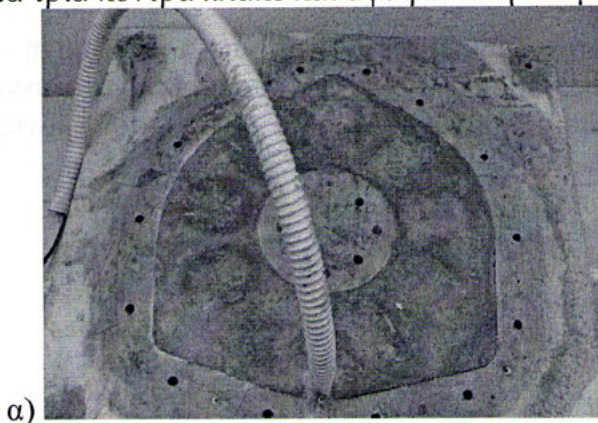


χρησιμοποιείται ως καπάκι μετά την έγχυση της ρητίνης ώστε η πλάκα που θα προκύψει να είναι επίπεδη. Το μεσαίο κόβεται εσωτερικά σε κατάλληλες διαστάσεις ώστε να δημιουργηθεί ο χώρος στον οποίο θα τοποθετηθούν τα πηνία. Παράλληλα, κόβεται ένας μικρός δίσκος ιδίου πάχους που τοποθετείται στο κέντρο του μεσαίου κόντρα πλακέ ώστε η πλάκα που θα προκύψει να είναι κενή στο κέντρο της για να μπορεί να περιστρέφεται ο άξονας της γεννήτριας. Αρχικά κατασκευάζεται από ξύλο η μηχανή χειρός που χρησιμοποιείται στην περιέλιξη των πηνίων. Οι διαστάσεις της επιλέγονται ίσες με τις επιθυμητές εσωτερικές διαστάσεις των πηνίων. Τυλίγονται 9 πηνία από καλώδιο τυλίγματος διαμέτρου 1.5mm", όπου το καθένα αποτελείται από 90 ελίγματα.

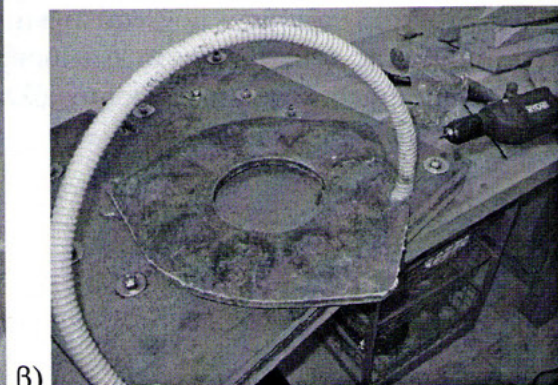


Σχήμα 2.11: Καλούπι κατασκευής του στάτη.

Στη συνέχεια τα πηνία τοποθετούνται στο καλούπι χωρίς το καπάκι του σε θέσεις που καθορίζονται από την εσωτερική διάμετρο του τυλίγματος της γεννήτριας περιμετρικά και με συμμετρικό τρόπο (Σχήμα 2.11.1). Εφόσον υπάρχουν τρία πηνία ανά φάση, κάθε πηνίο συνδέεται σε σειρά με τα πηνία με τα οποία σχηματίζει γωνία  $120^\circ$  ως προς το κέντρο, ο ουδέτερος κόμβος προκύπτει συνδέοντας τη μία άκρη των καλωδίων των τριών φάσεων και η άλλη άκρη των καλωδίων των τριών φάσεων που καταλήγει στην έξοδο. Οι συνδέσεις γίνονται χρησιμοποιώντας κολλητήρι. Έχοντας εξασφαλίσει πως οι θέσεις των πηνίων είναι σωστές στο καλούπι έρχεται η ώρα για την έγχυση της ρητίνης. Πρώτα τοποθετείται κερί στα σημεία που δεν πρέπει να κολλήσουν με την πλάκα ρητίνης, όπως είναι ο κεντρικός δίσκος και τα τοιχώματα. Η πολυεστερική ρητίνη βρίσκεται σε υγρή μορφή και για να στερεοποιηθεί χρειάζεται να αναμειχθεί με κατάλληλη ποσότητα καταλύτη ο οποίος και αυτός είναι σε υγρή μορφή. Στο μείγμα τοποθετείται κατάλληλη ποσότητα ταλκ ώστε να προστεθεί όγκος. Παράλληλα, τοποθετούνται δύο λεπτά φύλλα από υαλονήματα στις δύο εξωτερικές πλευρές του στάτη ώστε να προσδοθεί μηχανική αντοχή. Οι αναλογίες οι οποίες εξαρτώνται και από τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος πρέπει να τηρηθούν αυστηρά ώστε να αποφευχθεί αδυναμία στερεοποίησης ή πρόωρη στερεοποίηση του μείγματος. Στη συνέχεια το καλούπι αποσυναρμολογείται ξεβιδώνοντας τις βίδες που συγκρατούν τα τρία κόντρα πλακέ και αφαιρείται η έτοιμη πλάκα του στάτη (Σχήμα 2.11.2).



α)



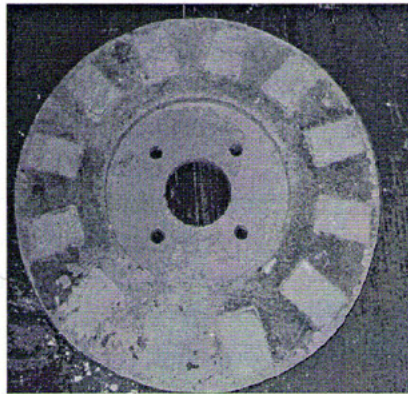
β)



*Σχήμα 2.11.2: (α) Η πλάκα του στάτη μέσα στο καλούπι μετά την στερεοποίηση της ρητίνης, (β) Η πλάκα του στάτη έτοιμη για τοποθέτηση.*

#### 2.11.β Κατασκευή του δρομέα.[2]

Ο δρομέας αποτελείται από δύο χαλύβδινους δίσκους περιμετρικά των οποίων είναι τοποθετημένοι μόνιμοι μαγνήτες. Αρχικά αφαιρείται από το κέντρο των δίσκων κυκλικός δίσκος κατάλληλης διαμέτρου ώστε να μπορεί γίνει η σύνδεση με το ρουλεμάν και να μειωθεί η μάζα του δρομέα. Στη συνέχεια ανοίγονται τέσσερις τρύπες στον κάθε δίσκο με το επιτραπέζιο δράπανο για να περάσει ο άξονας της γεννήτριας που αποτελείται από τέσσερις ντίζες. Δύο τρύπες με σπείρωμα ανοίγονται με βιδολόγο στον ένα δίσκο ώστε να διευκολυνθεί η συναρμολόγηση. Έπειτα, τοποθετούνται οι 24 μόνιμοι μαγνήτες περιμετρικά των δύο δίσκων με βάση την εσωτερική διάμετρο της γεννήτριας με συμμετρικό τρόπο. Διαδοχικοί μαγνήτες στον ίδιο δίσκο έχουν αντίθετη πολικότητα και αντικριστοί μαγνήτες στον απέναντι δίσκο έχουν επίσης αντίθετη πολικότητα. Οι μαγνήτες τοποθετούνται με ισχυρή κόλλα. Για επιπλέον μηχανική αντοχή και σταθεροποίηση των μαγνητών πάνω στους δίσκους, ο κάθε δίσκος με τους αντίστοιχους μαγνήτες τοποθετείται μέσα σε μία πλάκα ρητίνης. Με παρόμοιο τρόπο με την κατασκευή του καλουπιού του στάτη, κατασκευάζονται τα καλούπια του δρομέα χρησιμοποιώντας τρία κόντρα πλακέ για το καθένα και τοποθετώντας έναν κεντρικό ξύλινο δίσκο εκεί από όπου αρχικά είχε αφαιρεθεί χάλυβας. Στη συνέχεια, αφού απλωθεί το κερί, τοποθετείται φύλλο από υαλονήματα στη πλευρά που βρίσκονται οι μαγνήτες του κάθε δίσκου για επιπλέον μηχανική αντοχή, γίνεται έγχυση του μείγματος πολυεστερικής ρητίνης, καταλύτη και ταλκ και ο δίσκος είναι έτοιμος (Σχήμα 2.11.3).

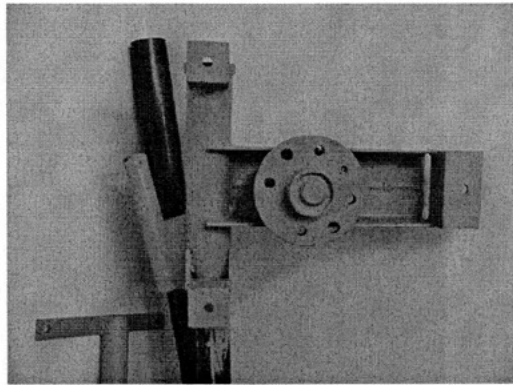


*Σχήμα 2.11.3 : Ο ένας δίσκος του δρομέα έτοιμος για τοποθέτηση.*

#### 2.11.γ Χαλύβδινη κατασκευή στήριξης.[2]

Έχοντας, ετοιμάσει τον στάτη και τον δρομέα της γεννήτριας προκύπτει η ανάγκη σύνδεσης τους με τον ιστό στήριξης, την έλικα και την ουρά της ανεμογεννήτριας. Χρησιμοποιώντας ηλεκτροσυγκόλληση δημιουργείται η κατασκευή που φαίνεται στο Σχήμα 2.11.4.

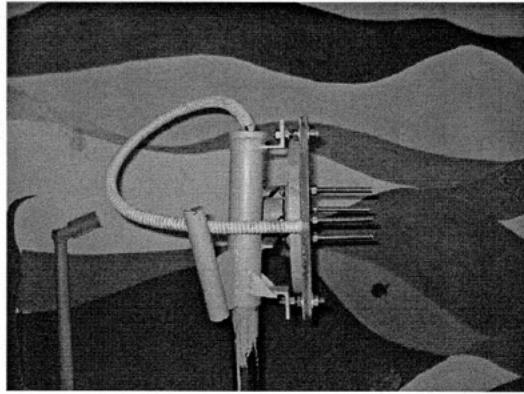




Σχήμα 2.11.4: Η χαλύβδινη κατασκευή στήριξης.

Ένας σωλήνας κατάλληλης διαμέτρου τοποθετείται στο δεξί μέρος της κατασκευής στήριξης και προσαρμόζεται στον κατακόρυφο ιστό της ανεμογεννήτριας. Τοποθετώντας γράσο στο σωλήνα και στον ιστό γίνεται εφικτή η περιστροφή της ανεμογεννήτριας ως προς τον κατακόρυφο άξονα για την προσαρμογή της στην κύρια κατεύθυνση του ανέμου (σύστημα yaw). Για την στήριξη του δρομέα χρησιμοποιείται ένα ρουλεμάν αυτοκινήτου (μουαγιέ) στο οποίο περνούν οι τέσσερις ντίτζες του άξονα περιστροφής και προσαρμόζεται με βίδες στη χαλύβδινη κατασκευή στήριξης. Το ρουλεμάν αυτό είναι μεγάλο και στιβαρό και μόνο του αρκεί για τη στήριξη του δρομέα της γεννήτριας και της έλικας. Ο στάτης στηρίζεται σε τρία σταθερά σημεία πάνω στη χαλύβδινη κατασκευή. Μία ελαφριά κλίση προς τα πάνω σε σχέση με το οριζόντιο επίπεδο δίνεται στη χαλύβδινη κατασκευή ώστε σε περίπτωση ισχυρού ανέμου να μην είναι δυνατή η πρόσκρουση της έλικας πάνω στον κατακόρυφο ιστό. Τέλος ένας μικρότερος σωλήνας τοποθετείται στο πίσω δεξί μέρος της κατασκευής σε κατάλληλη γωνία ως προς την κατακόρυφο σωλήνα. Σε αυτόν προσαρμόζεται ένας άλλος σωλήνας που είναι συνδεδεμένος με την ουρά της ανεμογεννήτριας. Οι δύο αυτοί σωλήνες επιτρέπουν την σχετική κίνηση μεταξύ της κατασκευής στήριξης και της ουράς ώστε σε μεγάλες ταχύτητες ανέμου η έλικα να εκτρέπεται από την κύρια κατεύθυνση του ανέμου (σύστημα furling) για την προστασία της ανεμογεννήτριας. Τέλος, όλα τα χαλύβδινα μέρη πρέπει να περαστούν με αντισκωρικό χρομα.5.1.4:

Για να γίνει η συναρμολόγηση της γεννήτριας με ευκολία τοποθετείται η κατασκευή στήριξης σε κατακόρυφο ιστό χαμηλού ύψους. Οι τέσσερις ντίτζες του άξονα περιστροφής προσαρμόζονται πάνω στο ρουλεμάν. Πρώτα τοποθετείται το πίσω δίσκο του δρομέα μέχρι να ακουμπήσει στο κινούμενο μέρος του ρουλεμάν. Για να κρατιέται σταθερή η απόσταση μεταξύ των δύο δίσκων του δρομέα τοποθετούνται διαδοχικά παξιμάδια στις ντίτζες. Στη συνέχεια η πλάκα του στάτη ωθείται προς τον πίσω δίσκο του δρομέα και βιδώνεται προσωρινά στα τρία σημεία στήριξης της (Σχήμα 2.11.5). Για την τοποθέτηση του εμπρόσθιου δίσκου του δρομέα χρειάζεται ιδιαίτερη προσοχή λόγω των ελκτικών δυνάμεων που ασκούνται μεταξύ των μαγνητών των δύο δίσκων, που μπορεί να προκαλέσουν πρόβλημα κατά τη συναρμολόγηση. Για αυτό τοποθετούνται βίδες στις δύο τρύπες με σπείρωμα που ανοίχτηκαν στον μπροστά δίσκο του δρομέα. Ο δίσκος σπρώχνεται μέχρι οι δύο βίδες να ακουμπήσουν τον άλλο χαλύβδινο δίσκο. Στη συνέχεια ξεβιδώνοντας τις βίδες αργά γίνεται ομαλά η τοποθέτηση και του δεύτερου δίσκου.



*Σχήμα 2.11.5: Συναρμολόγηση της γεννήτριας.*

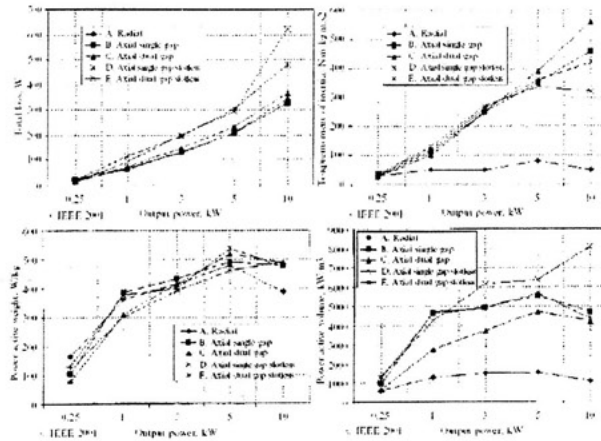
Η απόσταση μεταξύ των δύο δίσκων του δρομέα έχει καθοριστεί από τα παξιμάδια που βρίσκονται ανάμεσα τους πάνω στις ντίζες του άξονα περιστροφής. Ο στάτης τώρα προσαρμόζεται ώστε να απέχει ίση απόσταση από τους δύο δίσκους και βιδώνεται οριστικά. Ιδιαίτερη προσοχή χρειάζεται ώστε η απόσταση του στάτη από κάθε έναν από τους δύο δίσκους να είναι γύρω στο 1mm. Μικρότερη απόσταση αυξάνει την πιθανότητα επαφής του στάτη και του δρομέα κατά την περιστροφή, ενώ μεγαλύτερη απόσταση μειώνει την μαγνητική επαγωγή στο διάκενο της μηχανής. Τελειώνοντας, στις τέσσερις ντίζες του άξονα τοποθετείται πρώτα ο πίσω ξύλινος δίσκος της πλήμνης της έλικας, εν συνεχεία τα τρία πτερύγια και μετά ο μπροστά δίσκος της πλήμνης και βιδώνονται με παξιμάδια. Σε όλες τις βίδες τοποθετείται κατάλληλο υλικό που εμποδίζει το ξεβίδωμα τους.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

### ΣΥΓΧΡΟΝΕΣ ΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ ΑΞΟΝΙΚΗΣ ΡΟΗΣ ΜΟΝΙΜΩΝ ΜΑΓΝΗΤΩΝ

#### 3.1 Πλεονεκτήματα και εφαρμογές.[2]

- I. η δυνατότητα σχεδίασης της ώστε να έχει υψηλότερη πυκνότητα ισχύος (ισχύς εξόδου ανά μονάδα μάζας ή όγκου) περιορίζοντας το υλικό του πυρήνα. Έτσι, έχει πιο συμπαγή κατασκευή.
- II. ο λόγος της διαμέτρου του πυρήνα προς το αξονικό μήκος είναι μεγαλύτερος. Όταν μεγαλώνει η διάμετρος του πυρήνα μπορεί να εγκατασταθεί μεγαλύτερος αριθμός πόλων, κάνοντας τις μηχανές αξονικής ροής κατάλληλες για εφαρμογές υψηλής συχνότητας ή χαμηλής ταχύτητας.
- III. η εσωτερική διάμετρος του πυρήνα είναι συνήθως πολύ μεγαλύτερη από τη διάμετρο του άξονα περιστροφής και έτσι μπορεί να επιτευχθεί καλύτερος αερισμός και ψύξη.



Σχήμα 3.2: Σύγκριση των επιδόσεων μηχανών μόνιμων μαγνητών ακτινικής ροής με αξονικής ροής διαφορετικών τοπολογιών.

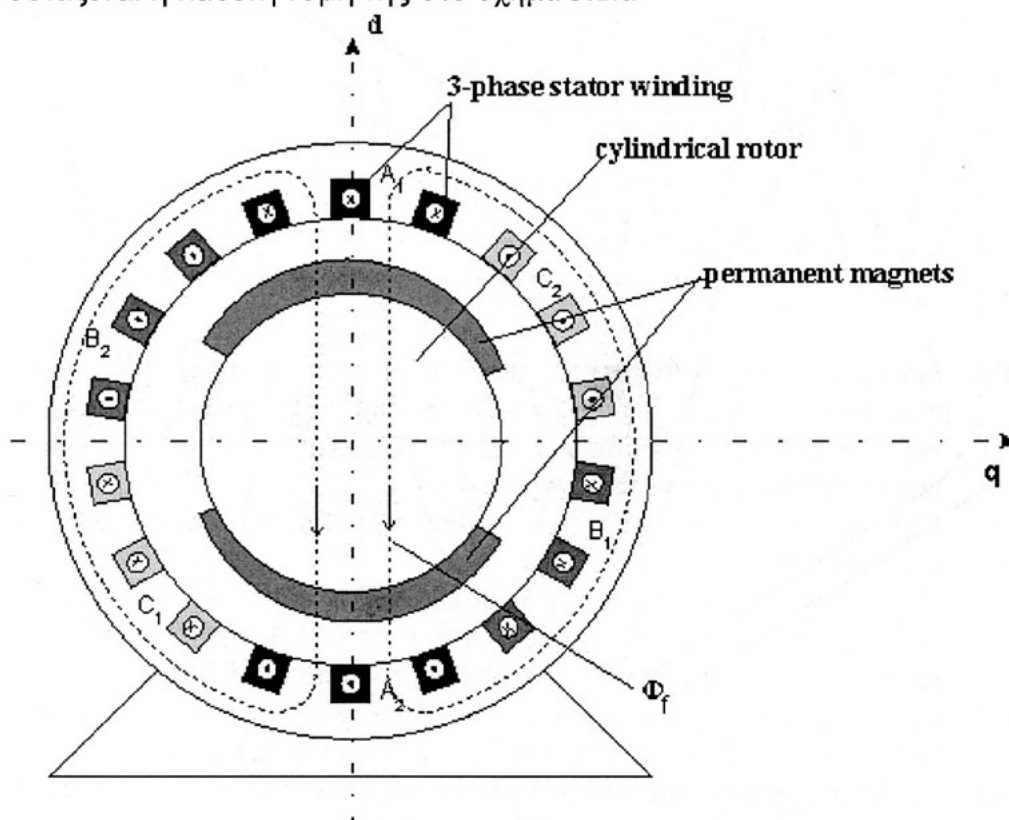
#### Στο Σχήμα 3.1

- IV. Γεννήτριες υψηλής ταχύτητας συνδεδεμένες με αεριοστρόβιλο. Μία τοπολογία πολλαπλών δίσκων, χωρίς πυρήνα στον στάτη άρα υψηλής απόδοσης και χαμηλής μάζας με ονομαστική ισχύ 100RW και ταχύτητα περιστροφής 60.000RPM φαίνεται στο Σχήμα
- V. Γεννήτριες χαμηλής ταχύτητας συνδεδεμένες απευθείας με την έλικα ανεμογεννήτριας.
- VI. Κινητήρες για ηλεκτρικά οχήματα. Η μεγάλη διάμετρος του δρομέα που οδηγεί σε υψηλή ροπή αδράνειας, καθώς και η υψηλή πυκνότητα ροπής καθιστούν τις μηχανές αξονικής ροής κατάλληλες για ηλεκτρικά οχήματα.
- VII. Επίσης, μηχανές αξονικής ροής χρησιμοποιούνται σε αντλίες, ανεμιστήρες, ηλεκτρικά εργαλεία, βιομηχανικό εξοπλισμό και στη ρομποτική.
- VIII. Για λόγους συντομίας σε αυτό το σύγγραμμα οι μηχανές αξονικής ροής μόνιμων μαγνητών αναφέρονται απλά ως μηχανές αξονικής ροής και οι μηχανές μόνιμων μαγνητών ακτινικής ροής θα αναφέρονται ως μηχανές ακτινικής ροής.

### 3.1.1 Διαμόρφωση Γεννήτριας Μονίμων Μαγνητών και Κυριότερα Λειτουργικά Χαρακτηριστικά.[2]

Παρά το γεγονός ότι αυτή τη στιγμή οι επαγωγικές μηχανές κυριαρχούν μαζί με τις μηχανές συνεχούς ρεύματος στην αγορά των συστημάτων ηλεκτρικής κίνησης μεγάλο ενδιαφέρον παρουσιάζεται γύρω από τη μελέτη και κατασκευή μηχανών με μόνιμους μαγνήτες. Η παραγωγή μαγνητικού πεδίου στο διάκενο από μόνιμους μαγνήτες (και όχι με τη χρήση τυλιγμάτων στο στάτη), έχει να επιδείξει σημαντικά πλεονεκτήματα όσον αφορά στην απλότητα της κατασκευής και την μείωση των απωλειών με ταυτόχρονη βελτίωση της απόδοσης.

Οι δύο συνηθέστεροι τύποι μηχανών μόνιμων μαγνητών είναι οι σύγχρονες (με ομοιόμορφα στρεφόμενο, ημιτονοειδές κατανεμημένο πεδίο στο στάτη) και οι διακοπτικοί, τραπεζοειδής (με πεδίο στο στάτη το οποίο εναλλάσσεται διακοπτικά σε διακριτά βήματα. Η γεννήτρια μόνιμων μαγνητών που χρησιμοποιείται στη παρούσα εργασία ανήκει στην πρώτη περίπτωση και παρουσιάζεται η κάθετη τομή της στο σχημα 3.1.α

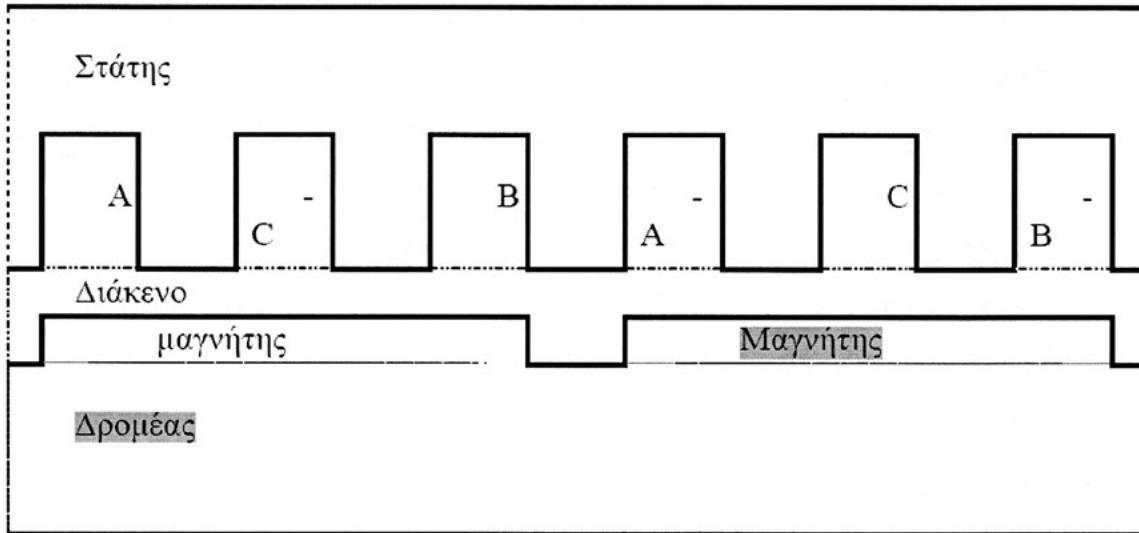


σχ. 3.1.α διατομή γεννήτριας μόνιμων μαγνητών με επιφανειακούς μαγνήτες  
Τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά των μηχανών με μόνιμους μαγνήτες



ποικίλουν. Μια τοπολογία που τείνει να επικρατήσει μετά την ανάπτυξη μαγνητικών υλικών υψηλής μαγνήτισης, είναι αυτή των επιφανειακών μαγνητών. Ο δρομέας αποτελείται από ένα σιδηροπυρήνα ο οποίος μπορεί να είναι συμπαγής ή και να έχει κατασκευαστεί από φύλλα σιδήρου. Λεπτοί μόνιμοι μαγνήτες τοποθετούνται στην επιφάνεια του πυρήνα. Εναλλασσόμενοι μαγνήτες αντίθετης μαγνητικής φοράς παράγουν πυκνότητα ροής ακτινικής κατεύθυνσης διαμέσου του διακένου. Στην εσωτερική επιφάνεια του στάτη υπάρχουν αύλακες στις οποίες τοποθετούνται τυλίγματα. Τα ρεύματα που διαρρέουν αυτά τα τυλίγματα, αλληλεπιδρούν με την πυκνότητα ροής για την παραγωγή ροπής. Η γεννήτρια που χρησιμοποιείται στη διάταξη έχει ονομαστική ισχύ 2kW, ονομαστική φασική τάση 220V, ονομαστική συχνότητα 80Hz και 12 ζεύγη πόλων [1]. Η μέγιστη πυκνότητα ροής διακένου στις επαγωγικές μηχανές είναι της τάξης 0.7- 0.9 T, αφού ο κορεσμός των δοντιών του στάτη περιορίζει την πυκνότητα ροής στα 1.4-1.8 T και η σχεδίαση συνήθως οδηγεί σε ίσο εύρος αυλακών και δοντιών. Επομένως ένα ιδανικό μαγνητικό υλικό για χρήση σε σύγχρονες μηχανές μόνιμου μαγνήτη, θα έπρεπε να δημιουργεί αντίστοιχα επίπεδα μαγνητικής ροής στο διάκενο. Μια μηχανή μόνιμων μαγνητών παρέχει συνεχή ροπή μόνο όταν η ταχύτητα συσχετίζεται άμεσα με τη συχνότητα αναφοράς. Η αναφορά μπορεί να είναι είτε μια τριφασική ελεγχόμενη τάση είτε ελεγχόμενο ρεύμα. Πολλές σύγχρονες μηχανές μ.μ. έχουν εγκατεστημένο έναν αισθητήρα στον δρομέα από τον οποίο η γωνία του δρομέα μπορεί να ληφθεί. Τα ρεύματα στάτη παράγουν μια περιστρεφόμενη μαγνητική ροή. Η μαγνητική ροή που οφείλεται στους μόνιμους μαγνήτες είναι σταθερή όσον αφορά τον δρομέα. Για να παραχθεί ροπή, αυτές οι δύο μαγνητικές ροές δεν μπορούν να κινηθούν όσον αφορά τη μια την άλλη. Αυτό σημαίνει ότι ο δρομέας πρέπει να περιστραφεί με την ίδια ταχύτητα με αυτήν της περιστρεφόμενης ροής που παράγεται από το στάτη. Ο δρομέας ακολουθεί τον περιστρεφόμενο μαγνητικό πεδίο του στάτη με γωνία  $-\delta$ . Για να λειτουργήσει η μηχανή, ο δρομέας πρέπει πρώτα να φθάσει σε μια σύγχρονη ταχύτητα. Αυτό μπορεί να γίνει με τρεις τρόπους: με την οδήγηση του στροφέα στη σύγχρονη ταχύτητα (με μια εξωτερική μηχανή), με την έναρξη του δρομέα όπως στις μηχανές επαγωγής, ή με την παροχή του τυλίγματος του στάτη με μεταβλητή συχνότητα, που αρχίζει από μηδέν έως την συχνότητα αναφοράς. Μάλιστα, παρατηρείται ότι η σύζευξη

των τυλιγμάτων είναι περίπου στο  $-1/3$ . Αυτό είναι αναμενόμενο από την κατασκευή της μηχανής, καθώς κάθε πηνίο περιέχει τρία δόντια του στάτη, οπότε κάθε δόντι του στάτη μετέχει σε δύο φάσεις οι οποίες έχουν αντίθετη φορά, όπως φαίνεται στο Σχ. 3.1.β. Έτσι, κάθε φάση είναι κατά το  $-1/3$  εξαρτημένη από την άλλη.

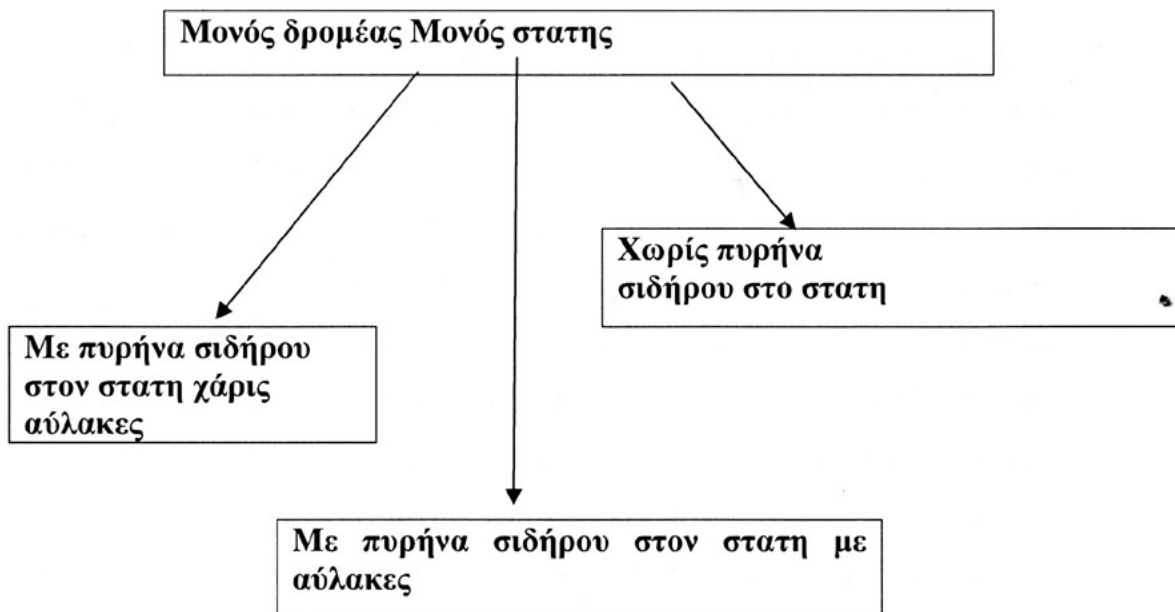


Σχ1. 3.β Διαμόρφωση στάτη και δρομέα μηχανής μονίμων μαγνητών

### 3.2 Βασικές τοπολογίες.[2]

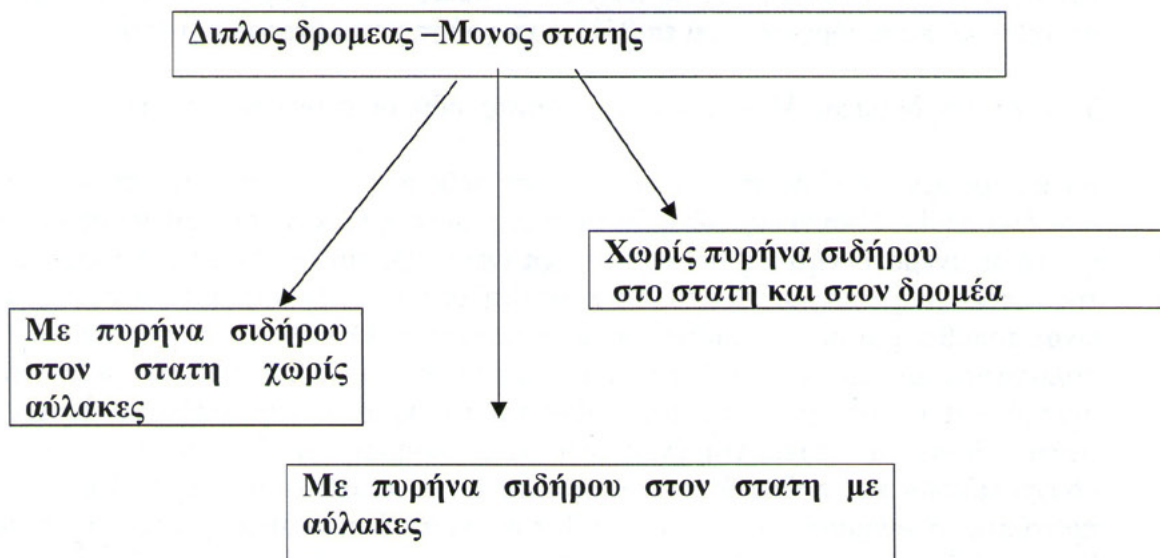
Υπάρχει ένα μεγάλο εύρος διαφορετικών τοπολογιών μηχανών αξονικής ροής όπου μπορεί να επιλεγεί ανάλογα με την εφαρμογή οι βασικές κατηγορίες είναι οι εξής.

A. Πρώτη βασική κατηγορία τοπολογίας μηχανής



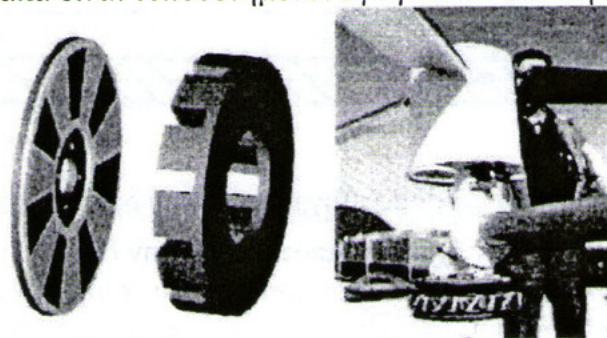


B. Δεύτερη βασική κατηγορία τοπολογίας μηχανής



3.2.α Μονός δρομέας-Μονός στάτης: πυρήνας σιδήρου στον στάτη με αύλακες.[2]

Μία τέτοια διάταξη ισχύος 1.6kW. Αποτελείται από τον δρομέα, ο οποίος είναι ένας χαλύβδινος δίσκος στην περιφέρεια του οποίου είναι εγκιβωτισμένοι οι μαγνήτες, και τον στάτη ο οποίος διαθέτει σιδερένιο πυρήνα με αύλακες. Ο κάθε μαγνήτης έχει αντίθετη πολικότητα με τον διπλανό του ώστε να κλείνει το μαγνητικό κύκλωμα περνώντας από τον πυρήνα του στάτη και από τον χαλύβδινο δίσκο του δρομέα. Το τύλιγμα που τοποθετείται στους αύλακες είναι συγκεντρωμένο στην διπλής στρώσης δηλαδή σε κάθε αύλακα είναι τοποθετημένοι αγωγοί από δυο πηνία



(Σχήμα 3.2: Γεννήτρια αξονικής ροής μονού δρομέα-μονού στάτη με αύλακα')

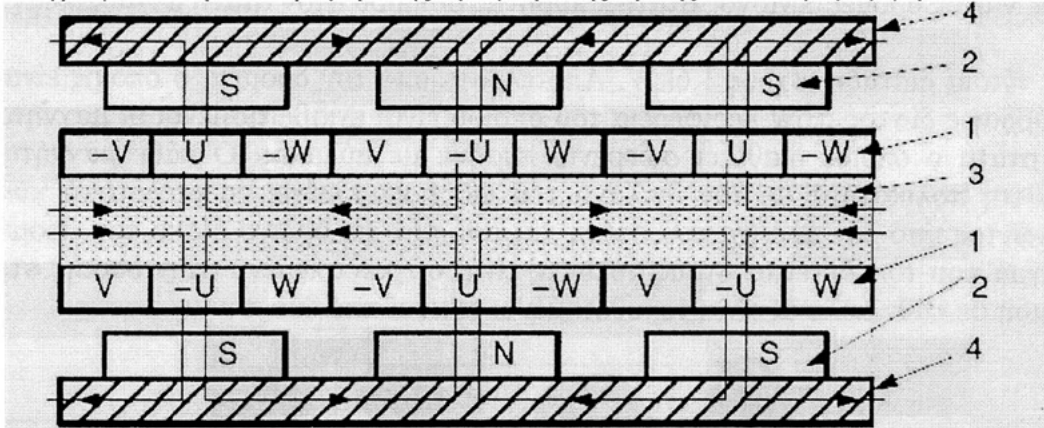
Εφόσον η γεννήτρια είναι αξονικής ροής έχει υψηλή πυκνότητα ισχύος άρα και ροπής. Επίσης, το συγκεντρωμένο τύλιγμα λόγω των μικρότερων άκρων τυλίγματος που διαθέτει από ότι το διανεμημένο τύλιγμα μειώνει την εξωτερική διάμετρο της γεννήτριας. Έτσι, η συγκεκριμένη γεννήτρια καταλαμβάνει μικρό όγκο για τις επιδόσεις της που είναι ένα σημαντικό πλεονέκτημα.

Οι αύλακες μειώνουν το διάκενο της μηχανής και εξυπηρετούν στη δημιουργία ισχυρότερου μαγνητικού πεδίου στο διάκενο. Μεγαλύτερη μαγνητική επαγωγή οδηγεί σε ανάπτυξη μεγαλύτερης ροπής. Αυτό σημαίνει πως για την παραγωγή της ίδιας ροπής χρειάζονται λιγότεροι μόνιμοι μαγνήτες το οποίο μειώνει το κόστος της μηχανής, εφόσον το κόστος των μαγνητών είναι πολύ υψηλότερο από το κόστος του σιδήρου. Έχουν όμως το μειονέκτημα της δημιουργίας ροπής ευθυγράμμισης. Η ροπή ευθυγράμμισης είναι ιδιαίτερα σημαντικό μέγεθος σε εφαρμογές ανεμογεννητριών γιατί δυσκολεύει την εκκίνηση της έλικας με αποτέλεσμα να μην είναι εφικτή η παραγωγή ισχύος σε χαμηλές ταχύτητες ανέμου. Ένα άλλο μειονέκτημα που

προκύπτει λόγω των αυλακιών είναι η μεγάλη ελκτική δύναμη ανάμεσα στο δρομέα και στον στάτη που αυξάνει το πάχος του δίσκου του δρομέα ώστε να αποφευχθεί υπερβολική παραμόρφωση και επιβάλλει τη χρήση μεγαλύτερου ρουλεμάν.

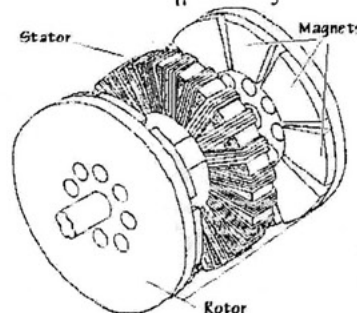
### 3.2.β Διπλός δρομέας-Μονός στάτης πυρήνας σιδήρου στον στάτη χωρίς αύλακες.[2]

συγκεντρωμένο, διπλής στρώσης δηλαδή σε κάθε αύλακα είναι τοποθετημένοι αγωγοί από δύο πηνία. Η συγκεκριμένη διάταξη έχει μελετηθεί και πραγματοποιηθεί αρκετές φορές σε ανεμογεννήτριες για ισχύ που φτάνει μέχρι και τα 100kW. Ο δρομέας αυτής της τοπολογίας αποτελείται από δύο παράλληλους χαλύβδινους δίσκους στους οποίους είναι τοποθετημένοι αντικριστά μόνιμοι μαγνήτες. Ο κάθε μαγνήτης έχει αντίθετη πολικότητα με τον διπλανό του πάνω στον ίδιο χαλύβδινο δίσκο, και την ίδια πολικότητα με τον μαγνήτη που βρίσκεται αντικριστά στον απέναντι δίσκο. Στον στάτη βρίσκεται τοποθετημένος πυρήνας σιδήρου χωρίς αύλακες σε σχήμα «δαχτυλιδιού» και πολυφασικό τύλιγμα το οποίο αποκαλείται τυροειδές, από όπου προκύπτει η ονομασία της μηχανής Torus. Μια τέτοια μηχανή αναπαρίσταται στο Σχήμα 3.5 και το ευθύγραμμο ανάπτυγμα της φαίνεται στο Σχήμα3.4 όπου διαγράφεται η διαδρομή της μαγνητικής ροής και η μορφή του τυλίγματος.



Σχήμα3.4 Ευθύγραμμο ανάπτυγμα μηχανής διπλού δρομέα-μονού στάτη με τυροειδές

Η απουσία των αυλακιών έχει σαν αποτέλεσμα την δημιουργία ενός μεγάλου διάκενου μεταξύ των πυρήνων του στάτη και του δρομέα που οδηγεί σε μικρότερες τιμές της αυτεπαγωγής μαγνήτισης. Επίσης, σκέδαση της μαγνητικής ροής λόγω αυλακιών δεν υπάρχει και έτσι περιορίζεται επιπλέον η τιμή της σύγχρονης αυτεπαγωγής. Παράλληλα, για τον ίδιο λόγο η ροπή ευθυγράμμισης πρακτικά είναι ανύπαρκτη το οποίο είναι ένα πολύ σημαντικό πλεονέκτημα στις αιολικές εφαρμογές.



Σχήμα 3.5: Μηχανή διπλού δρομέα-μονού στάτη με τυροειδές τύλιγμα.

Συγκρίνοντας αυτή τη μηχανή με μία μηχανή που διαθέτει πυρήνα σιδήρου στον στάτη με αύλακες παρατηρούμε πως οι μηχανικοί περιορισμοί που δημιουργούνταν



λόγω των υψηλών ελκτικών δυνάμεων εξαιτίας των αυλακιών δεν ισχύουν, εφόσον το διπλό διάκενο περιορίζει την ελκτική δύναμη που ασκείται στους δρομείς. Πλεονέκτημα της απουσίας των αυλακιών είναι επίσης οι μικρότερες τιμές της αυτεπαγωγής μαγνήτισης και σκέδασης της μηχανής. Από την άλλη, η ανυπαρξία των αυλακιών σημαίνει πως για την ανάπτυξη της ίδιας μαγνητικής επαγωγής χρειάζονται περισσότεροι μαγνήτες, που οδηγεί σε αύξηση του κόστους. Τέλος, η συγκεκριμένη κατασκευή είναι λιγότερο στιβαρή.

### 3.2.γ Διπλός Στάτης-Μονός δρομέας (εσωτερικός) .[2]

Η παρακάτω τοπολογία που φαίνεται στο Σχήμα 3.6 χωρίς αύλακες



*Σχήμα 3.6: Τοπολογία μηχανής διπλού στάτη-μονού δρομέα, με τον δρομέα στο εσωτερικό.*

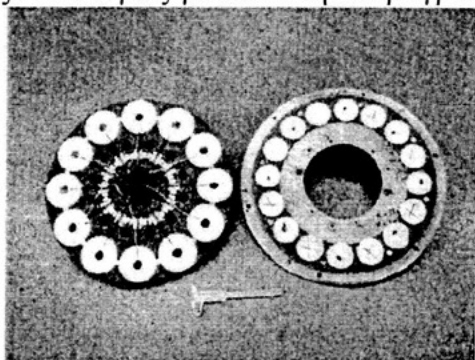
Ο δρομέας βρίσκεται στο εσωτερικό της μηχανής και αποτελείται από έναν μη μαγνητικό μεταλλικό δίσκο στον οποίο είναι τοποθετημένοι κυβοειδής μαγνήτες. Κάθε μαγνήτης έχει αντίθετη πολικότητα από τον διπλανό του και είναι ενσωματωμένος στο δίσκο με τέτοιο τρόπο ώστε να είναι σε άμεση επαφή με τον αέρα και στις δύο πλευρές του δίσκου. Ο στάτης βρίσκεται στο εξωτερικό της μηχανής και αποτελείται από δύο ξεχωριστά τυλίγματα με πυρήνα σιδήρου σε σχήμα «δαχτυλιδιού» ώστε να αυξάνεται η τιμή της μαγνητικής επαγωγής στο διάκενο. Οι γεννήτριες αξονικής ροής με εσωτερικό δρομέα και αυλακώσεις στον στάτη έχουν καλύτερη επίδοση από τις γεννήτριες ακτινικής ροής μόνιμων μαγνητών και τις γεννήτριες αξονικής ροής με εσωτερικό δρομέα και αυλακώσεις στον στάτη έχουν καλύτερη επίδοση από τις γεννήτριες ακτινικής ροής μόνιμων μαγνητών και της γεννήτριες αξονικής ροής με τροχοειδές τύλιγμα στον στατη για δεδομένη διάμετρο[9]. Δεδομένου πως μέχρι στιγμής λίγη έρευνα έχει εκπονηθεί και λίγες κατασκευές έχουν πραγματοποιηθεί με τη συγκεκριμένη τοπολογία για εφαρμογές ανεμογεννητριών [9] μας οδηγεί στο συμπέρασμα πως αξίζει να ερευνηθεί περαιτέρω.

### 3.2.δ Διπλός Δρομέας-Μονός Στάτης χωρίς πυρήνα σιδήρου.[2]

Η συγκεκριμένη τοπολογία παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον λόγω της απουσίας πυρήνα σιδήρου στον στάτη. Ο δρομέας αποτελείται από δύο μεταλλικούς δίσκους στην περιφέρεια των οποίων είναι τοποθετημένοι μόνιμοι μαγνήτες. Κάθε μαγνήτης έχει αντίθετη πολικότητα από τον διπλανό του και επίσης αντίθετη πολικότητα με αυτόν που βρίσκεται αντικριστά στον απέναντι δίσκο. Το τύλιγμα είναι τοποθετημένο σε ένα διαμαγνητικό υλικό και μη αγωγίμο στάτη που βρίσκεται ανάμεσα στους δύο μεταλλικούς δίσκους και μπορεί να είναι διανεμημένο ή συγκεντρωμένο .

Η διάταξη αυτή περιλαμβάνει σημαντικά πλεονεκτήματα. Απώλειες πυρήνα υστέρησης ή δινορευμάτων είναι ανύπαρκτες εφόσον στον στάτη δεν υπάρχει σίδηρος και η μαγνητική ροή που διέρχεται από τον σίδηρο του δρομέα δεν μεταβάλλεται. Αυτό σημαίνει πως μπορεί να λειτουργήσει με υψηλότερη απόδοση από ότι άλλες τοπολογίες. Η απουσία σιδήρου στον στάτη επίσης οδηγεί σε μηδενική ροπή ευθυγράμμισης και απουσία μαγνητικού κορεσμού με αποτέλεσμα η σχέση της ροπής

με το ρεύμα να είναι γραμμική. Παράλληλα, η κυματομορφή της τάσης είναι σχεδόν ημιτονοειδής. Επιπλέον, η κατασκευή είναι ιδιαίτερα εύκολη, αφού δεν υπάρχουν αύλακες ούτε σίδηρος στο στάτη, και η συναρμολόγηση δεν παρουσιάζει προβλήματα, εφόσον δεν υπάρχουν μαγνητικές δυνάμεις μεταξύ του στάτη και του δρομέα. Το μεγάλο διάκενο που δημιουργείται οδηγεί σε μεγαλύτερο όγκο μόνιμων μαγνητών στο δρομέα για την ανάπτυξη της ίδιας μαγνητικής επαγωγής στο διάκενο. Έτσι, αυξάνεται το κόστος της γεννήτριας. Επίσης, κατά τη λειτουργία σε σχετικά υψηλές συχνότητες εκδηλώνονται απώλειες δινορευμάτων στους αγωγούς του τυλίγματος του στάτη. Σε εφαρμογές μικρών ανεμογεννητριών υπάρχει η δυνατότητα σύνδεσης των πηνίων παράλληλα ή σε σειρά ώστε να είναι εφικτή η σύνδεση είτε σε συσσωρευτές είτε στο δίκτυο χαμηλής τάσης [15]. Στο Σχήμα 3.8 φαίνεται ο στάτης και ο ένας δίσκος του δρομέα γεννήτριας ισχύος 1 kW και απόδοσης 93.94% με κυκλικούς μαγνήτες και πηνία. Η γεννήτρια αυτή είναι κατάλληλη και για εφαρμογή μικρού υδροηλεκτρικού. Εκτενέστερη ανάλυση της τοπολογίας γίνεται στην παράγραφο 3.5.2.



Σχήμα 3.8: Στάτης και δρομέας γεννήτριας αξονικής ροής χωρίς πυρήνα στον στάτη ονομαστικής ισχύος 1kW με κυκλικούς μαγνήτες και πηνία.

### 3.3 Σχέσεις υπολογισμού της μαγνητικής ροής και ηλεκτρομαγνητικής ροπής για γεννήτριες αξονικής ροής.[2]

Θεωρούμε μία μηχανή με τραπεζοειδή τυλίγματα και τραπεζοειδής μαγνήτες. Το πολικό βήμα  $\tau$  και το πλάτος του πόλου  $w_p$  δεν είναι σταθερά, αλλά είναι συναρτήσεις της

$$\tau(r) = \frac{2\pi \cdot r}{p} \quad (3.1)$$

$$a_i = \frac{w_p(r)}{\tau(r)} = \frac{B_{avg}}{B_{mg}} \quad (3.2)$$

- $P$  : είναι ο αριθμός των πόλων της μηχανής,
- $a$  : ο λόγος του πλάτους του μαγνήτη προς το πολικό βήμα,  $B_{mg}$  η μέγιστη τιμή της μαγνητικής επαγωγής στο διάκενο μαγνητικής επαγωγής στο διάκενο.

Η μαγνητική ροή που δημιουργείται από τους μόνιμους μαγνήτες ανά πόλο μπορεί να υπολογιστεί από το παρακάτω ολοκλήρωμα:

$$\Phi_f = \int_{rin} a_l B_m g \frac{2\pi}{p} r dr = a_l B_m g \frac{\pi}{p} (r_{out}^2 - r_{in}^2) \quad (3.3)$$

Η ειδική ηλεκτρική φόρτιση (line current density) είναι συνάρτηση της ακτίνας:

$$A(r) = \frac{m_1 2N_\phi I_a}{p\tau(r)} = \frac{m_1 N_\phi I_a}{\pi \cdot r} \quad (3.5)$$

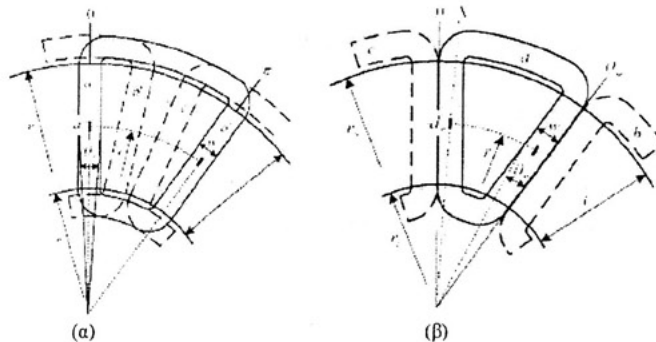
όπου

- $m_1$  είναι ο αριθμός των φάσεων
- $N_\phi$  είναι τα ελίγματα ανά φάση
- $I_a$  είναι η ενεργός τιμή του ρεύματος της κάθε φάσης.

### 3.4 Μορφή του τυλίγματος του στάτη και αριθμός των πόλων και των πηνίων.[2]

Το τύλιγμα του στάτη δεν έχει πυρήνα σιδήρου και είναι τοποθετημένο σε μία πλάκα από ρητίνη η οποία είναι διαμαγνητικό υλικό. Μπορούμε να θεωρήσουμε την κάθε πλευρά πηνίου ως έναν αύλακα γεννήτριας με πυρήνα σιδήρου. Το τύλιγμα μπορεί να έχει τις εξής μορφές:

-επικαλυπτόμενο τύλιγμα. Όπως φαίνεται στο παρακάτω Σχήμα 3.10α



Σχήμα 3.10

το τριφασικό τύλιγμα είναι διανεμημένο σε αύλακες. Τα πηνία είναι τοποθετημένα στο ίδιο επίπεδο και επικαλύπτουν το ένα το άλλο. Στην περίπτωση που το τύλιγμα έχει έναν ιδεατό αύλακα ανά πόλο, ανά φάση ο συντελεστής τυλίγματος  $k_w$  ισούται με τη μονάδα.

-συγκεντρωμένο μη επικαλυπτόμενο τύλιγμα διπλής στρώσης. Το τύλιγμα αποτελείται από ανεξάρτητα μη επικαλυπτόμενα πηνία (Σχήμα 3.10.β).

Σε κάθε ιδεατό αύλακα είναι τοποθετημένες πλευρές πηνίων από δύο ανεξάρτητα πηνία. Τα πηνία εφάπτονται μεταξύ τους σε όλο το μήκος επαφής τους.

-συγκεντρωμένο μη επικαλυπτόμενο τύλιγμα μονής στρώσης. Το τύλιγμα αποτελείται από ανεξάρτητα μη επικαλυπτόμενα πηνία. Σε κάθε ιδεατό αύλακα είναι τοποθετημένη μόνο μία πλευρά πηνίου. Τα πηνία βρίσκονται σε επαφή μόνο στην εσωτερική ακτίνα  $r_{in}$ .

-συγκεντρωμένο μη επικαλυπτόμενο τύλιγμα χωρισμένο σε σκιάδες φάσης. Πηνία της ίδιας φάσης τοποθετούνται σε διπλανές θέσεις και σχηματίζουν μία ομάδα φάσης, ζ είναι ο αριθμός των πηνίων που ανήκουν στην ίδια ομάδα φάσης. Τα συγκεντρωμένα τυλίγματα παρουσιάζουν κάποια πλεονεκτήματα σε σχέση με τα επικαλυπτόμενα που συνοψίζονται στα εξής:

1. ευκολότερη κατασκευή του στάτη.
2. μικρότερη εξωτερική διάμετρος της μηχανής χάρη στο μικρότερο μήκος άκρων τυλίγματος.
3. λιγότερες απώλειες τυλίγματος χάρη στο μικρότερο μήκος άκρων τυλίγματος,
4. μικρότερο κόστος του τυλίγματος του στάτη χάρη στον μικρότερο αριθμό πηνίων και στην απλή δομή του τυλίγματος.

Ένα μειονέκτημα γενικά των συγκεντρωμένων τυλιγμάτων είναι η ανάπτυξη χαμηλότερης ηλεκτρομαγνητικής ροπής εξαιτίας του χαμηλότερου συντελεστή τυλίγματος. Πρόσφατες έρευνες όμως δείχνουν πως συγκεντρωμένα τυλίγματα με μεγάλο αριθμό πόλων μπορούν να έχουν υψηλό συντελεστή τυλίγματος οπότε και καλή ανάπτυξη ροπής.

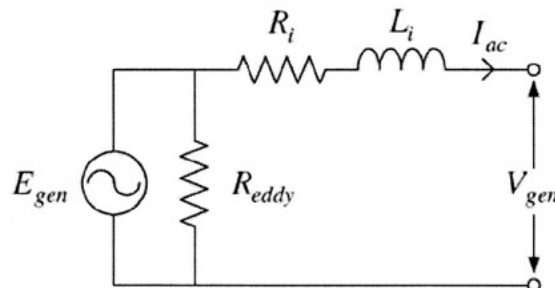
Η σύγκριση των τριών τύπων συγκεντρωμένου τυλίγματος οδηγεί στο συμπέρασμα πως το συγκεντρωμένο τύλιγμα διπλής στρώσης αναπτύσσει μεγαλύτερη ροπή από τους δύο άλλους τύπους συγκεντρωμένου τυλίγματος και είναι συγκρίσιμη με την ροπή που αναπτύσσει ένα επικαλυπτόμενο τύλιγμα. Το συγκεντρωμένο τύλιγμα μονής στρώσης οδηγεί σε χαμηλότερη πεπλεγμένη ροή, αλλά έχει το πλεονέκτημα των μικρότερων άκρων τυλίγματος σε σχέση με το συγκεντρωμένο διπλής στρώσης. Η επίδοση των συγκεντρωμένων τυλιγμάτων σε σχέση με των επικαλυπτόμενων βελτιώνεται όσο αυξάνεται ο αριθμός των πόλων. Επίσης, όσο αυξάνεται ο αριθμός των πόλων τόσο μειώνεται η μάζα του χαλκού που απαιτείται για το τύλιγμα

### 3.5 Ισοδύναμο κύκλωμα και απόδοση της γεννήτριας.[2]

Με βάση τα παραπάνω) προκύπτει το ισοδύναμο κύκλωμα της γεννήτριας αξονικής ροής χωρίς πυρήνα στον στάτη που φαίνεται στο Σχήμα 3.14.

$E_{gen}$  είναι η ΗΕΔ που επάγεται στο τύλιγμα και ισούται με την τάση ανοιχτοκύκλωσης της γεννήτριας. Η Reddy αντιστοιχεί στις απώλειες δινορευμάτων και υπολογίζεται από τη σχέση

$$R_{eddy} = \frac{3E_{gen}^2}{\Delta P_{eddy}} \quad (3.19)$$



$R_i$  είναι η ωμική αντίσταση ανά φάση του τυλίγματος

$L_i$  η σύγχρονη αυτεπαγωγή ανά φάση του τυλίγματος

$I_{ac}$  είναι η ενεργός τιμή του ρεύματος γραμμής

$V_{gen}$  είναι η τερματική τάση της γεννήτριας

Σχήμα 3.14: Ισοδύναμο κύκλωμα γεννήτριας αξονικής ροής χωρίς πυρήνα στον στάτη.

Οι ωμικές απώλειες χαλκού ανά φάση υπολογίζονται:



Πτυχιακή εργασία Λεόντιος Χατζηρουσέας

$$\Delta P_{ohm} = 3I_{AC}^2 * R_l$$

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

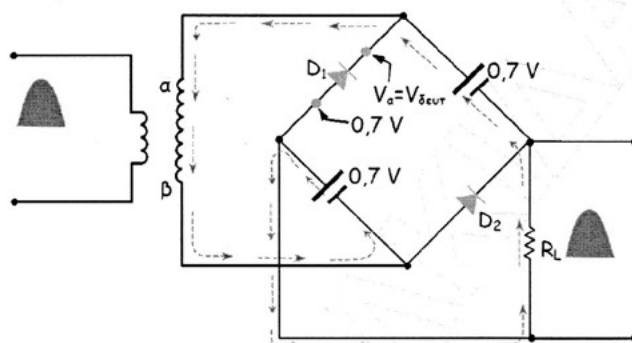
### ΑΝΟΡΘΩΤΗΣ ΓΕΦΥΡΑΣ ΔΙΟΔΩΝ

ΕΙΣΑΓΩΓΗ - ΜΕΡΗ ΤΡΟΦΟΔΟΤΙΚΟΥ.[14]

Ανορθωτής: περιλαμβάνει διόδους. Τροφοδοτείται από πηγή AC, παρέχει τάση DC.

Εφαρμογή θετικής ημιπεριόδου:  $V_a > V_b$  άγουν D4, D3. πορεία ρεύματος

Εφαρμογή αρνητικής ημιπεριόδου:  $V_a > V_b \Rightarrow$  άγουν D2, D3 πορεία ρεύματος



Όταν D1 δεν άγει, με αναφορά το σημείο β του δευτερεύοντος του μετασχηματιστή, στην κάθοδο της έχει το δυναμικό του σημείου α όπου  $U_a = U_{\delta\epsilon\upsilon\tau}$  και στην άνοδο της, το δυναμικό της ανόδου της D3 που άγει και το οποίο είναι  $V_{D3} = 0,7 \text{ V}$ . Επομένως η  $P_{IU}$  που εφαρμόζεται στα άκρα της θα είναι η διαφορά των δύο αυτών δυναμικών. Δηλ.

$$P_{IU} = U_{\delta\epsilon\upsilon\tau} - 0,7 \text{ V}.$$

Επειδή όμως  $U_{\delta\epsilon\upsilon\tau} = V_{out(max)} + 1,4 \text{ V}$ , τελικά:

$$P_{IU} = V_{out(max)} + 0,7 \text{ V}$$

Το ίδιο ισχύει και για όλες τις διόδους της γέφυρας όταν δεν άγουν για την ίδια τάση εξόδου  $V_{out(max)}$  ο ανορθωτής γέφυρας χρησιμοποιεί διόδους που έχουν μισή τιμή  $P_{IV}$  από αυτές που χρησιμοποιεί ο ανορθωτής με μετασχηματιστή με μεσαία Λήψη.

Η ίδια τιμή όπως και στον πλήρη ανορθωτή με μετασχηματιστή με μεσαία Λήψη. Δηλαδή ισχύουν οι σχέσεις :

$$V_{dc} = (2/\pi) * V_{out(max)} = 0,637 V_{out(max)} \text{ και}$$

$$I_{dc} = (2/\pi) I_{out(max)} = 0,637 I_{out(max)}$$

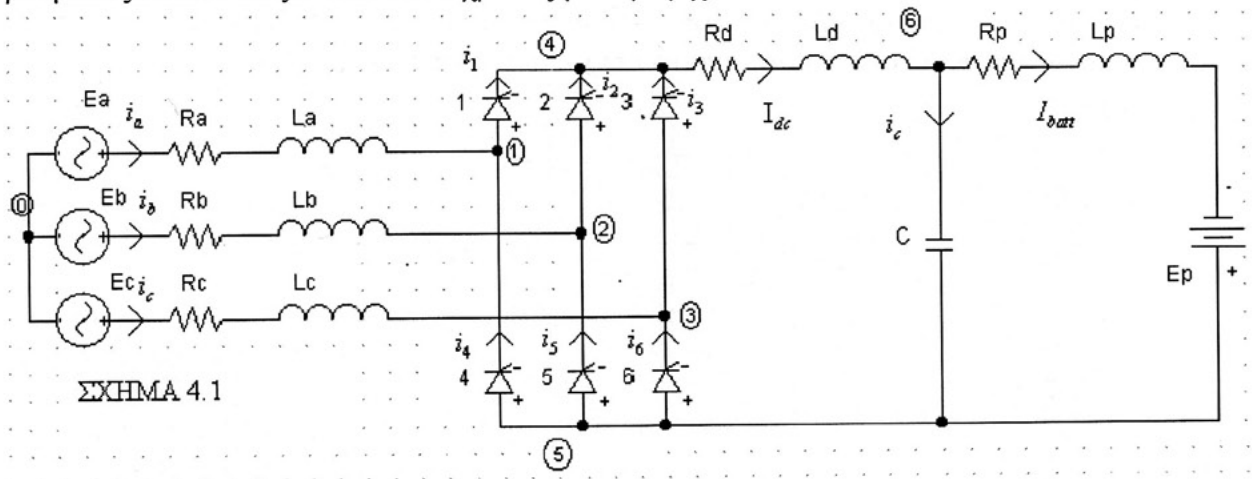
#### 4.1 Εκκίνηση Ανορθωτή[15]

Κατά την έναυση της γέφυρας (εκκίνηση ανορθωτή) φαίνονται οι δέκα πρώτες περίοδοι. Οι καμπύλες για τις γωνίες έναυσης των  $25^\circ$  και  $50^\circ$  μοιρών ξεκινούν από την χρονική στιγμή  $t$  που αντιστοιχεί στην εκάστοτε γωνία έναυσης. Για τις διάφορες παραμέτρους του συστήματος έχουμε:

Το συνεχές ρεύμα που ξεκινά από την τιμή μηδέν και αυξάνεται έως ότου φθάσει την τιμή στην οποία ισορροπεί το σύστημα. Ομοίως συμβαίνει και με τα ρεύματα των βαλβίδων  $i_{12}i_{34}i_{56}$ . Για την συνεχή τάση  $V_{dc}$  έχουμε ότι αρχικά είναι υψηλή, και καθώς αυξάνεται το ρεύμα μειώνεται. Το ρεύμα του πυκνωτή  $i_c$  έχει μικρές τιμές και ταλαντώνεται γύρω από το μηδέν. Το ρεύμα του συσσωρευτή  $watt$  είναι ίδιας μορφής με το συνεχές ρεύμα. Ξεκινά από την τιμή μηδέν και αυξάνεται έως ότου φθάσει την

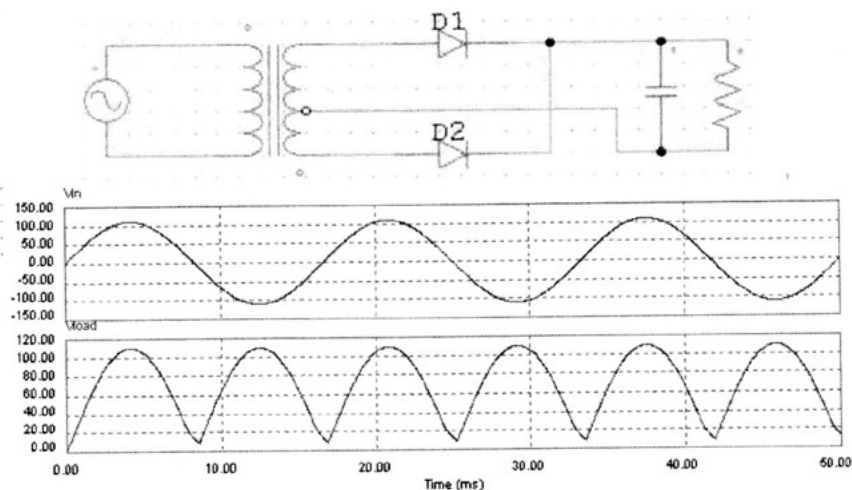
τιμή στην οποία ισορροπεί το σύστημα. Τα ρεύματα των φάσεων a, b και c ξεκινούν από την τιμή μηδέν και αυξάνονται έως ότου φθάσει το καθένα την τιμή στην οποία ισορροπεί το σύστημα.

Οι εναλλασσόμενες τάσεις,  $V_a$ ,  $V_b$  και  $V_c$  για την χρονική διάρκεια μιας περιόδου. Η παραμόρφωση των τάσεων οφείλεται στην γωνία μεταγωγής, δηλαδή στο χρόνο κατά τον οποίο άγουν τρεις βαλβίδες ταυτόχρονα. Κατά την χρονική διάρκεια αυτή η φασική τάση ισούται με το ημίθροισμα δύο φασικών τάσεων. Ο χρόνος της μεταγωγής στα παραπάνω διαγράμματα αυξάνεται από μεταγωγή σε μεταγωγή. Αυτό οφείλεται στο ότι το ρεύμα ξεκινά από μηδέν και αυξάνεται. Αυξανόμενου του ρεύματος λοιπόν αυξάνεται και ο χρόνος μεταγωγής.



#### 4.2 Μη ελεγχόμενη πλήρης ανόρθωση με μετασχηματιστή μέσης λήψης.[2]

Στο σχήμα 4. 2 παρουσιάζεται μια από τις απλούστερες, μη ελεγχόμενες, πλήρεις ανορθώσεις. Για την εξομάλυνση της τάσης στην έξοδο της διάταξης χρησιμοποιείται πυκνωτής εξόδου. Από τα φάσματα συχνοτήτων της τάσης και του ρεύματος εξόδου. Οι κύριες αρμονικές συνιστώσες είναι η μηδενική και η δεύτερη, το πλάτος των οποίων είναι κατά πολύ μεγαλύτερο σε σύγκριση με τις υπόλοιπες αρμονικές συνιστώσες.



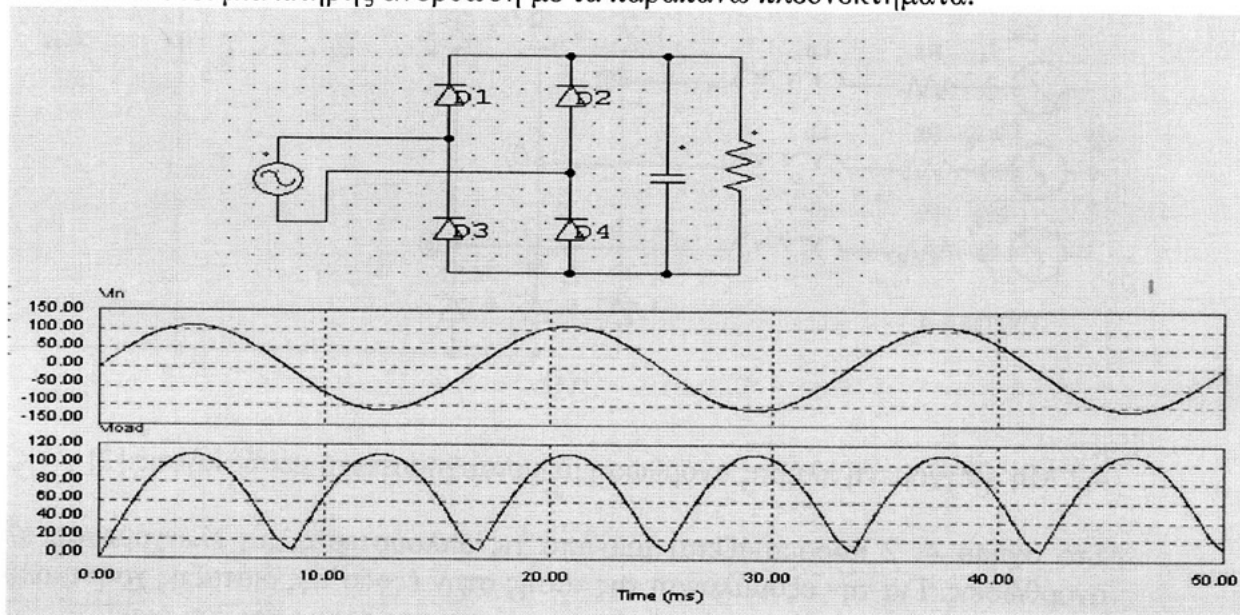
Σχήμα 4.2 Μη ελεγχόμενη πλήρης ανόρθωση με μετασχηματιστή μέσης λήψης.

#### 4.3.1.A Μονοφασική ανορθωτική διάταξη με διόδους.[2]

Στο σχήμα 4.3 παρουσιάζεται η μονοφασική ανορθωτική διάταξη με διόδους, μη ελεγχόμενη, καθώς και οι βασικότερες κυματομορφές της. Οι κυματομορφές της ανόρθωσης αυτής είναι ίδιες με αυτές του σχήματος 4.2 ωστόσο τα πλεονεκτήματα της διάταξης αυτής σε σχέση με την ανόρθωση με μετασχηματιστή μέσης λήψης είναι: Απαιτεί απλούστερη κατασκευή μετασχηματιστή.

Η καταπόνηση των διόδων είναι μισή από αυτή της μέσης λήψης και κατά συνέπεια μπορεί να αποδώσει διπλάσια ισχύ εξόδου.

Επομένως με το κόστος της χρησιμοποίησης δύο επιπλέον διόδων μπορεί να κατασκευαστεί μια πλήρης ανόρθωση με τα παραπάνω πλεονεκτήματα.

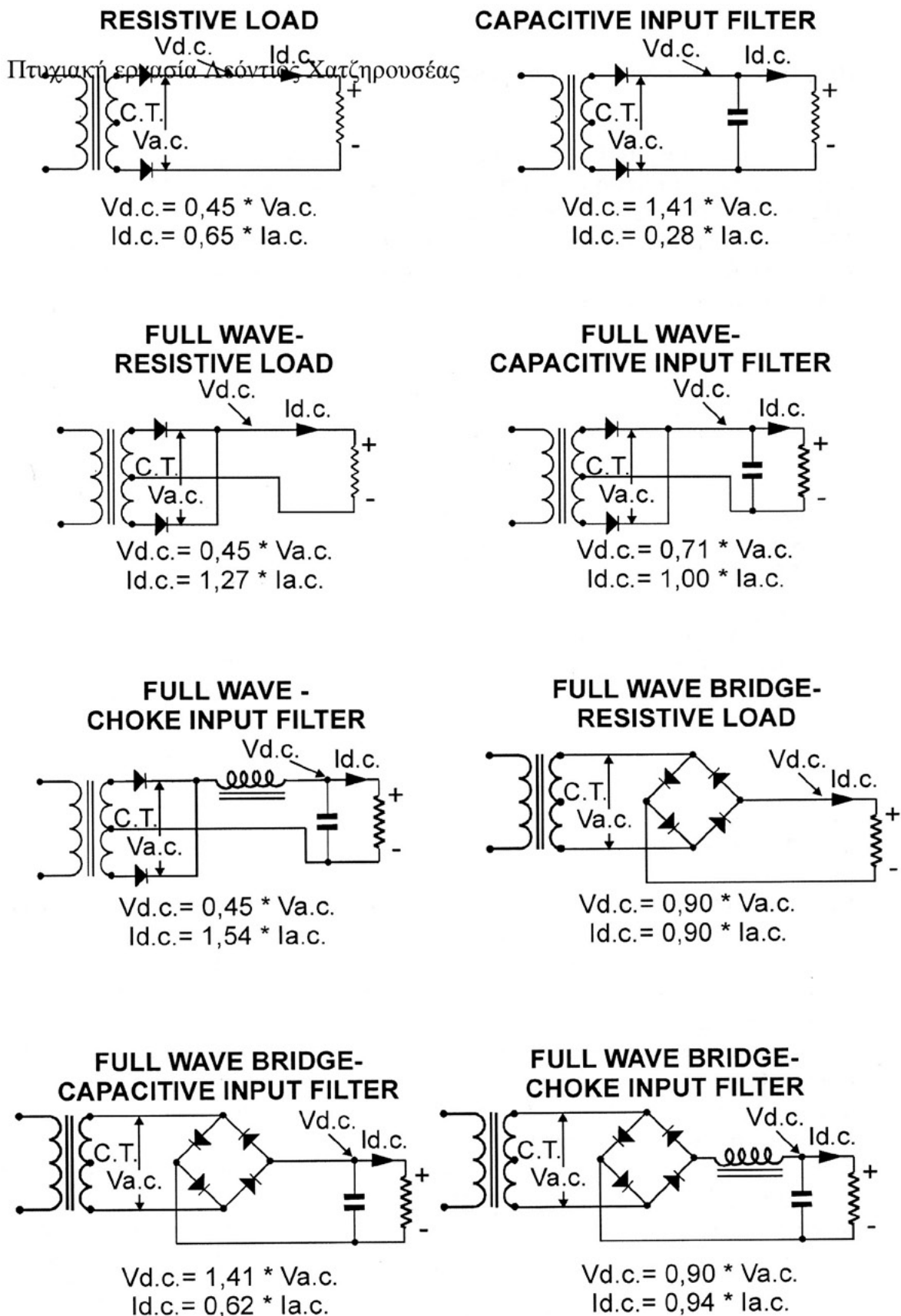


Σχήμα 4.3: Μονοφασική ανορθωτική διάταξη με διόδους

#### 4.3.1 Κυκλώματα μονοφασικής ανόρθωσης και τυπολόγιο

Στο σχήμα 78 υπενθυμίζουμε τα κυκλώματα μονοφασικής ανόρθωσης με τις αντίστοιχες τιμές εξόδου σε τάση  $V_{DC}$  και ρεύμα  $I_{DC}$ .



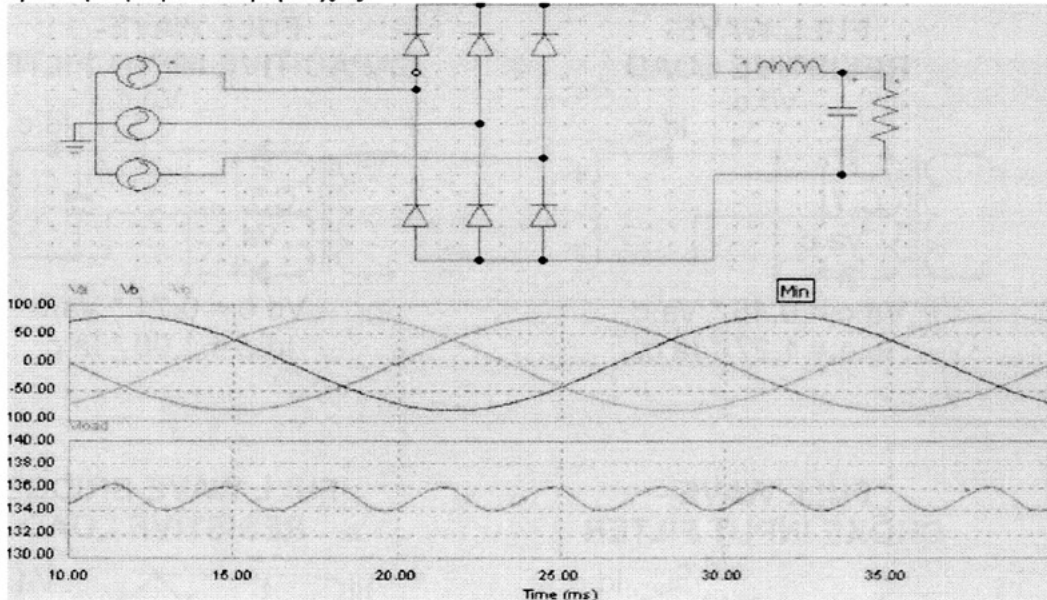


Σχήμα 1

#### 4.3.2 Τριφασική μη ελεγχόμενη ανορθωτική διάταξη.[2]

Στο σχήμα 4. παρουσιάζεται η τριφασική ανορθωτική διάταξη με διόδους, καθώς και οι βασικότερες κυματομορφές της. Κατά τη λειτουργία αυτής της διάταξης πάντοτε άγει μια διάδος από την πάνω ομάδα διόδων και μια από την κάτω ομάδα διόδων. Όπως μπορούμε να διαπιστώσουμε ότι η μεν μονοφασική ανορθωτική διάταξη, έχει

μόνο δυο παλμούς τάσης στην έξοδο ενώ στην τριφασική έξο, πράγμα το οποίο υποδεικνύει ότι η τριφασική ανόρθωση παρέχει τάση μικρότερης κυμάτωσης και κατά συνέπεια απαιτεί μικρότερο φίλτρο εξόδου για την εξομάλυνση την κυμάτωσης αυτής. Τέλος με την τριφασική ανόρθωση έχουμε τη δυνατότητα να πάρουμε μεγαλύτερη DC τάση στην έξοδο σε σχέση με τη μονοφασική και κατά συνέπεια να τροφοδοτήσουμε το φορτίο με μεγαλύτερη ισχύς.

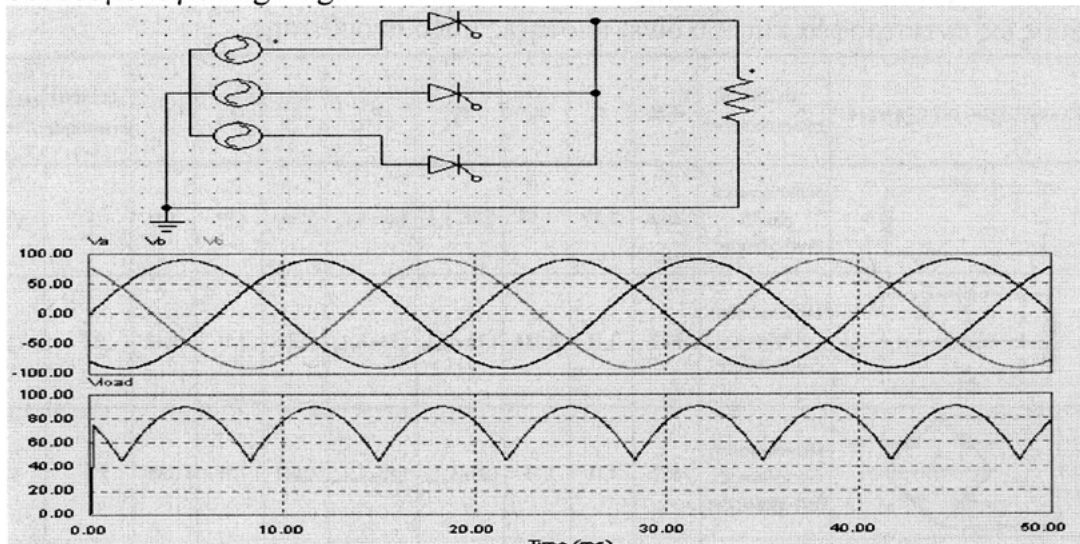


Σχήμα 3.4 Τριφασική μη ελεγχόμενη ανορθωτική διάταξη.

#### 4.3.3 Τριφασική ανόρθωση κοινού σημείου.[2]

Στο σχήμα 4.7 παρουσιάζεται μια τριφασική ελεγχόμενη ανόρθωση κοινού σημείου. Η συνδεσμολογία δείχνει πως κάθε φάση εισόδου συνδέεται με ένα θυριστορ. Οι κυματομορφές της ανόρθωσης αυτής παρουσιάζονται στο ίδιο σχήμα. Εάν την τάση εισόδου αποτελούσαν  $m$  αριθμός φάσεων τότε η τάση εξόδου για κάθε κύκλο λειτουργίας έχει  $m$  αριθμό παλμών. Όταν αυξάνεται ο αριθμός των φάσεων αυξάνεται και ο αριθμός των παλμών της τάσης εξόδου, ενώ μειώνεται η κυμάτωση της τάσης εξόδου. Επομένως αν εφαρμοστεί κάποιο φίλτρο εξόδου για τη μείωση της κυμάτωσης αυτής, το μέγεθος του θα μειώνεται σε σχέση με την αύξηση του αριθμού φάσεων  $m$ . Πρέπει ωστόσο να σημειωθεί, πως αυξάνοντας τον αριθμό φάσεων  $m$  αυξάνει ο αριθμός των θυριστορ και το κόστος της ανόρθωσης, ενώ μειώνεται η αξιοπιστία του συστήματος. Το σοβαρότερο μειονέκτημα της ανόρθωσης αυτής, η οποία για την περίπτωση της τριφασικής εισόδου ονομάζεται και ανόρθωση τριών παλμών, αποτελεί η δημιουργία ρευμάτων εισόδου που περιέχουν συνεχή συνιστώσα, πράγμα που δημιουργεί το πρόβλημα του μαγνητικού κορεσμού, εφόσον στην είσοδο της χρησιμοποιηθεί μετασχηματιστής. Το πρόβλημα αυτό μπορεί να λυθεί με τη χρήση ενός μετασχηματιστή, του οποίου τα τυλίγματα του δευτερεύοντος είναι συνδεδεμένα σε

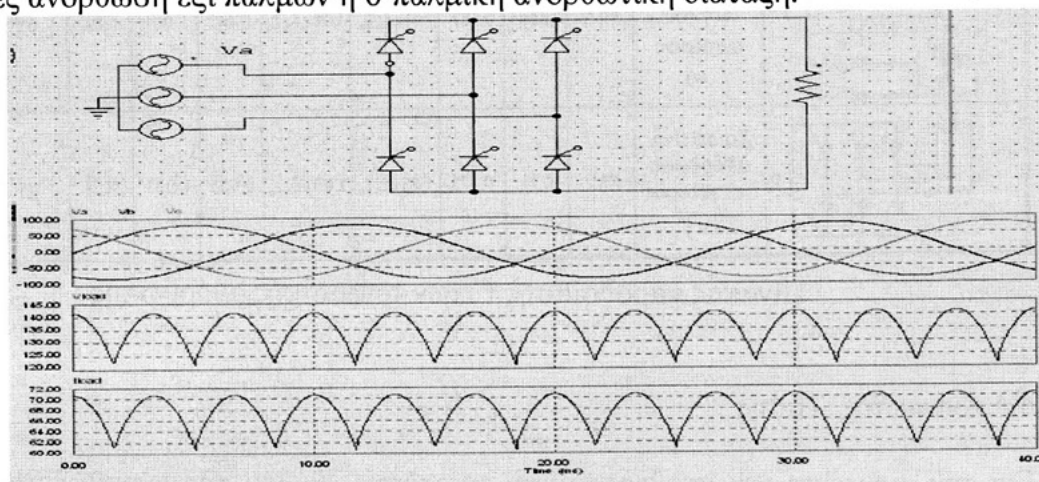
συνδεσμολογία Zig-Zag.



Σχήμα 4.7: Τριφασική ανόρθωση κοινού σημείου, με φορτίο  $R$  και κυματομορφές τάσεων εισόδου και ρεύματος εξόδου, με  $\alpha=0^\circ$ .

#### 4.3.4 Ελεγχόμενη τριφασική ανόρθωση σε συνδεσμολογία γέφυρας.[2]

Το κύκλωμα της ανόρθωσης αυτής, το οποίο παρουσιάζεται στο σχήμα 4.8 αποτελεί μια από τις καλύτερες επιλογές στη μετατροπή του εναλλασσόμενου ρεύματος σε συνεχές. Αυτό οφείλεται στις δυνατότητες παροχής υψηλής ισχύος εξόδου και της μικρής κυμάτωσης της τάσης εξόδου. Ένα επιπλέον πλεονέκτημα της ανόρθωσης αυτής είναι ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί μετασχηματιστής εισόδου χωρίς να υπάρχει το πρόβλημα του μαγνητικού κορεσμού, όπως στην περίπτωση της τριφασικής ανόρθωσης κοινού σημείου. Για κάθε περίοδο της τάσης εισόδου η τάση εξόδου αποτελείται από έξι παλμούς. Για το λόγο αυτό η ανόρθωση αυτή ονομάζεται πολλές φορές ανόρθωση έξι παλμών ή 6-παλμική ανορθωτική διάταξη.



Σχήμα 4.8 Ελεγχόμενη τριφασική ανόρθωση σε συνδεσμολογία γέφυρας, με φορτίο  $R$  και κυματομορφές τάσεων εισόδου, τάσης και ρεύματος εξόδου για  $\alpha=0^\circ$

Μια διαφορετική μορφή της 6-παλμικής ανορθωτικής διάταξης παρουσιάζεται στο σχήμα 3,8, όπου στα άκρα του φορτίου χρησιμοποιείται μια δίοδος ελεύθερης διέλευσης. Η δίοδος αυτή άγει όταν η τάση στο φορτίο εξόδου γίνει αρνητική. Σε ορισμένα χρονικά διαστήματα το δίκτυο και η ανόρθωση δεν τροφοδοτούν το φορτίο με αποτέλεσμα τα ημιαγωγά στοιχεία να μην επιβαρύνονται με θερμικές απώλειες.

Ωστόσο η χρήση διόδου ελεύθερης διέλευσης εμποδίζει τη λειτουργία του μετατροπέα ισχύος ως αντιστροφέα και του δίνει ιδιότητες μόνο ανόρθωσης.

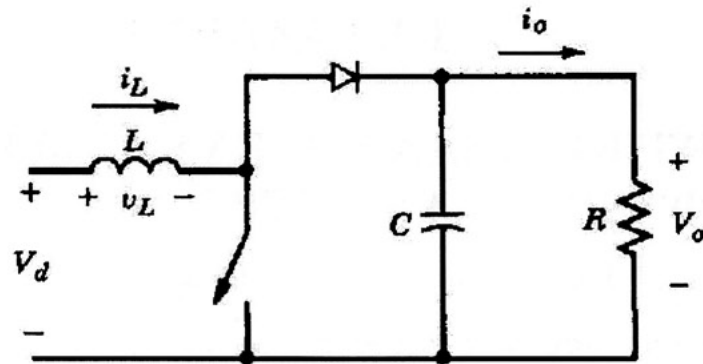
ΣΧΗΜΑΤΙΚΟΝ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ	ΟΝΟΜΑΤΙΑ ΣΥΝΔΕΣΜΟΛΟΓΙΑΣ	η %	$F_v$	$F_c$	$P_{\Phi_e}$	$P_{\Phi_s}$	$F_u$	$F_f$	$\gamma$	ΣΥΧΝΟΤΗΤΑ ΚΥΜΑΤΟΣΙΔΟΣ $f_r$	ΜΕΓΙΣΤΗ ΑΝΑΤΙΡΟΦΩΣ ΤΑΞΙΣ $V_{\alpha(max)}$
	Μονοφασική απλή ανόρθωση	40,6	2,22	1,57	$3,49 \times E_o I_o$	$3,49 \times E_o I_o$	0,286	1,57	1,21	f	$\sqrt{2} E$
	Μονοφασική πλήρης ανόρθωση	81,2	1,11	0,786	$1,75 \times E_o I_o$	$1,23 \times E_o I_o$	0,57	1,11	0,48	2f	$2\sqrt{2} E$
	Μονοφασική ανόρθωση διά γεφύρας	81,2	1,11	1,11	$1,23 \times E_o I_o$	$1,23 \times E_o I_o$	0,813	1,11	0,48	2f	$\sqrt{2} E$
	Τριφασική απλή ανόρθωση (ν=3)	97	0,8565	0,587	$1,51 \times E_o I_o$	$1,51 \times E_o I_o$	0,662	1,02	0,21	3f	$\sqrt{2} E$
	Διφασική πλήρης ανόρθωση (ν=4)	98,8	0,783	0,502	$1,57 \times E_o I_o$	$1,11 \times E_o I_o$	0,636	1,005	0,11	4f	$2\sqrt{2} E$
	Τριφασική πλήρης ανόρθωση (ν=6)	99,5	0,74	0,408	$1,81 \times E_o I_o$	$1,28 \times E_o I_o$	0,551	1,001	0,04	6f	$1,51\sqrt{2} E$
	Τριφασική ανόρθωση διπλού άστερος *	99,5	0,8565	0,587	$1,51 \times E_o I_o$	$1,06 \times E_o I_o$	0,662	1,001	0,04	6f	$\sqrt{2} E$
	Τριφασική ανόρθωση διά γεφύρας **	99,5	0,74	0,479	$1,05 \times E_o I_o$	$1,05 \times E_o I_o$	0,955	1,001	0,04	6f	$\sqrt{2} E$

Πίνακας παρουσίασης τύπων τριφασικής ανόρθωσης

#### 4.4 Ανυψωτής Τάσης

Για την ανύψωση και σταθεροποίηση της τάσης εξόδου της ανορθωτικής γέφυρας, έτσι ώστε στην είσοδο του αντιστροφέα να υπάρχει μία σταθερή τάση ανεξαρτήτως της ταχύτητας του ανέμου και της ισχύος του φορτίου, επιλέγεται η χρήση ενός μετατροπέα τύπου Boost. Στο σχήμα 4.11 παριστάνεται ο ανυψωτής τάσης τύπου Boost, όπου από τα αριστερά προς τα δεξιά διακρίνονται η συνεχής τάση εισόδου, το πηνίο του μετατροπέα, ο ιδανικός διακόπτης, η διόδος και ο πυκνωτής του μετατροπέα και τέλος ένα ωμικό φορτίο στην έξοδό του.





Σχήμα 4.11 Ανυψωτής τάσης τύπου Boost.

Όσο μεγαλύτερος είναι ο πυκνωτής εξόδου του μετατροπέα Boost, τόσο μικρότερη είναι η κυμάτωση της τάσης εξόδου. Όσον αφορά το πηνίο του μετατροπέα, αυτό επιλέγεται έτσι ώστε ο μετατροπέας να λειτουργεί αποκλειστικά στην κατάσταση συνεχούς αγωγής (CCM), δηλαδή να μην υπάρχουν χρονικά διαστήματα στα οποία το ρεύμα μέσα από το πηνίο μηδενίζεται [10]. Σε αυτήν την κατάσταση λειτουργίας (CCM), η τάση εξόδου του ανυψωτή δίνεται από τη σχέση (4.1)

$$V_o = (1/1-\delta) \cdot V_i \quad (4.1)$$

όπου,  $\delta$  ο λόγος κατάτμησης του μετατροπέα. Είναι φανερό από τη σχέση 4.1 ότι μεταβάλλοντας είτε την τάση εισόδου είτε την αντίσταση φορτίου η τάση εξόδου του μετατροπέα θα μεταβληθεί, γεγονός που αντιτίθεται στην επιθυμητή λειτουργία του κυκλώματος. Για να διατηρείται σταθερή η τάση θα πρέπει με κάποιο τρόπο να αλλάζει ο λόγος κατάτμησης  $\delta$ . Το ρόλο αυτό αναλαμβάνει ένας κλειστός βρόχος ελέγχου ο οποίος λαμβάνει ως είσοδο την τιμή της εκάστοτε τάσης εξόδου, κατάλληλα υποβιβασμένης, την οποία συγκρίνει με μια τάση αναφοράς έτσι ώστε να ρυθμιστεί κατάλληλα ο λόγος κατάτμησης..

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

### ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΥΚΛΩΜΑΤΟΣ ΜΟΝΟΦΑΣΙΚΟΥ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΕΑ

Εισαγωγή Στους Ηλεκτρονικούς Μετατροπής Ισχύος.[19]

Οι ηλεκτρονικοί μετατροπείς ισχύος είναι διατάξεις που χρησιμοποιούνται για τη μετατροπή της ηλεκτρικής ισχύος από μια μορφή σε μια άλλη και για το σκοπό αυτό περιλαμβάνουν ηλεκτρονικά στοιχεία ισχύος, τα οποία ελέγχονται από αναλογικά ή ψηφιακά ηλεκτρονικά κυκλώματα χαμηλής ισχύος. Με τους μετατροπείς αυτούς μπορούμε να ελέγξουμε και να ρυθμίσουμε τη ροή ενέργειας μεταξύ διαφορετικών συστημάτων. Σε σχέση με τις ηλεκτρομηχανικές διατάξεις που χρησιμοποιούνταν παλιότερα, οι σύγχρονοι ηλεκτρονικοί μετατροπείς ισχύος :

- Έχουν μικρότερο όγκο και βάρος
- Προσφέρουν μεγαλύτερη ακρίβεια και ταχύτερη απόκριση στη ρύθμιση των μεγεθών εξόδου
- Έχουν υψηλότερο συντελεστή απόδοσης
- Έχουν ελάχιστες ανάγκες συντήρησης και παρουσιάζουν αθόρυβη λειτουργία
- Μοναδικό, ίσως, μειονέκτημα είναι η εμφάνιση ανώτερων αρμονικών στην πλευρά της τροφοδοσίας τους αλλά και στην πλευρά του φορτίου

Αν θέλαμε να κατηγοριοποιήσουμε τους ηλεκτρονικούς μετατροπείς ισχύος με βάση τη μορφή της μετατρεπόμενης και ανταλλασσόμενης ηλεκτρικής ενέργειας έχουμε τις εξής κατηγορίες [10]:

- Μετατροπείς εναλλασσόμενης τάσης σε εναλλασσόμενη, οι οποίοι μετατρέπουν την εναλλασσόμενη τάση μιας ορισμένης τιμής, συχνότητας και αριθμού φάσεων σε εναλλασσόμενη τάση άλλης ενεργού τιμής, της ίδιας ή άλλης συχνότητας και ενδεχομένως άλλου αριθμού φάσεων.
- Μετατροπείς εναλλασσόμενης τάσης σε συνεχή (ανορθωτές), οι οποίοι μετατρέπουν την εναλλασσόμενη τάση σε συνεχή.
- Μετατροπείς συνεχούς τάσης σε συνεχή, οι οποίοι μετατρέπουν τη συνεχή τάση ορισμένης τιμής και πολικότητας σε συνεχή τάση άλλης τιμής και ενίοτε άλλης πολικότητας.
- Μετατροπείς συνεχούς τάσης σε εναλλασσόμενη τάση (αντιστροφής), οι οποίοι μετατρέπουν τη συνεχή τάση σε εναλλασσόμενη τάση.

Στην παρούσα διπλωματική κατασκευάσαμε ένα μονοφασικό αντιστροφέα για τη διασύνδεση της ανεμογεννήτριας μικρής ισχύος του εργαστηρίου με το δίκτυο χαμηλής τάσης.

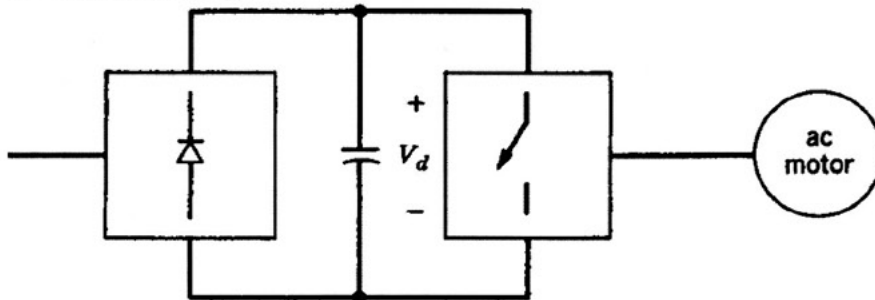
Εισαγωγή Στους Αντιστροφής .[19]

Λύση στο πρόβλημα της δημιουργίας μιας πηγής εναλλασσόμενης τάσης με μεταβλητή συχνότητα και πλάτος, αποτελεί η μετατροπή της συνεχούς τάσης σε εναλλασσόμενη με τη βοήθεια των αντιστροφών. Οι αντιστροφής μπορούν να κατηγοριοποιηθούν με βάση τον αριθμό των φάσεων σε

- a) Μονοφασικούς αντιστροφής σε συνδεσμολογία ημιγέφυρας (με δύο ελεγχόμενα ημιαγωγικά στοιχεία) ή σε συνδεσμολογία πλήρους γέφυρας (με τέσσερα ελεγχόμενα ημιαγωγικά στοιχεία).

b) Τριφασικούς αντιστροφής (με έξι ελεγχόμενα ημιαγωγικά διακοπτικά στοιχεία).

Οι αντιστροφής που συναντώνται συχνότερα σε εφαρμογές (όπως και στην περίπτωση μας) τροφοδοτούνται από πηγή συνεχούς τάσης, που προέρχεται από ανορθωτικό σύστημα αποτελούμενο από διόδους ή από θυρίστορ. Ονομάζονται αντιστροφής πηγής τάσης (VSI, voltage source inverters). Οι αντιστρέφεις διακοπτικού τύπου βρίσκουν εφαρμογή, όπως φαίνεται και στο σχήμα 3.1, σε κινητήρια συστήματα εναλλασσόμενου ρεύματος και σε τροφοδοτικά αδιάλειπτης λειτουργίας εναλλασσόμενου ρεύματος, όπου ο αντικειμενικός σκοπός είναι η παραγωγή μιας ημιτονοειδούς εναλλασσόμενης τάσης εξόδου, με ελεγχόμενα τόσο το πλάτος όσο και τη συχνότητά της.



Σχήμα 1 Αντιστροφείας διακοπτικού τύπου σε ac κινητήριο σύστημα.

Οι αντιστροφής πηγής τάσης μπορούν να χωριστούν στις παρακάτω τρεις γενικές κατηγορίες :

- Αντίστροφης με διαμόρφωση εύρους παλμών (PWM), στους οποίους η συνεχής τάση εισόδου του αντιστροφέα έχει σταθερό πλάτος, ενώ το πλάτος και η συχνότητα της εναλλασσόμενης τάσης εξόδου ελέγχεται με διαμόρφωση του εύρους των παλμών των διακοπτικών στοιχείων του αντιστροφέα .
- Αντιστροφής με τετραγωνική κυματομορφή, στους οποίους για τον έλεγχο του πλάτους της εναλλασσόμενης τάσης εξόδου, ελέγχεται το πλάτος της συνεχούς τάσης εισόδου. Έτσι ο αντιστροφέας ελέγχει μόνο τη συχνότητα της τάσης εξόδου. Η εναλλασσόμενη τάση εξόδου έχει μια κυματομορφή παρόμοια με τετραγωνική και για αυτόν το λόγο ονομάζονται αντιστροφής με τετραγωνική κυματομορφή.
- Μονοφασικοί αντιστροφής με απαλοιφή τάσης, στους οποίους είναι δυνατός ο έλεγχος του πλάτους και της συχνότητας της τάσης εξόδου του μετατροπέα, αν και η είσοδος του αντιστροφέα είναι μια σταθερή συνεχής τάση και στους διακόπτες δεν επιβάλλεται διαμόρφωση PWM (η κυματομορφή της τάσης εξόδου είναι σχεδόν τετραγωνική). Επομένως, οι αντιστροφής αυτοί συνδυάζουν τα χαρακτηριστικά των δυο προηγούμενων αντιστροφέων.

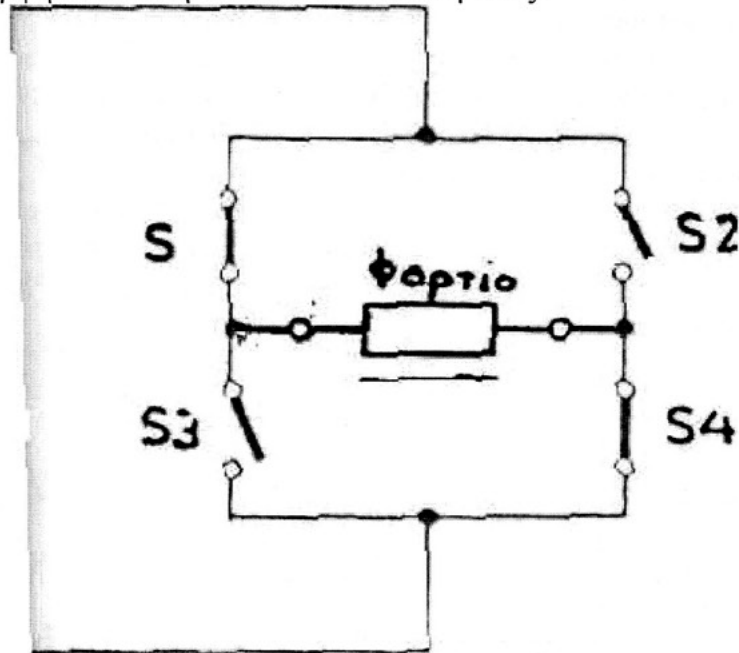
Στην περίπτωσή μας κατασκευάσαμε έναν μονοφασικό αντιστροφέα της πρώτης κατηγορίας. Υπάρχουν διάφορες μέθοδοι διαμόρφωσης του εύρους παλμών (PWM) του αντιστροφέα με σκοπό την παραγωγή της ημιτονοειδούς εναλλασσόμενης τάσεως εξόδου. Αυτή που χρησιμοποιήσαμε και θα αναλύσουμε εκτενώς παρακάτω είναι η «ημιτονοειδής Διαμόρφωση Εύρους Παλμών, SPWM».

## 5.1 Αρχή Λειτουργίας Του Αντιστροφέα

### 5.1.1 Πρώτη προσέγγιση Ισοδύναμο κύκλωμα με διακόπτες.[20]

Η αρχή λειτουργίας του μονοφασικού αντιστροφέα εξηγείται, σε πρώτη προσέγγιση με το κύκλωμα των τεσσάρων διακοπών (σχήμα 2). Αν ένα ζεύγος διακοπών (π.χ. SI,

S4 κλείσει και το άλλο π.χ. (S2, S3) παραμένει ανοικτό, τότε δημιουργείται η τετραγωνική κυματομορφή του 1 στην είσοδο του κυκλώματος.



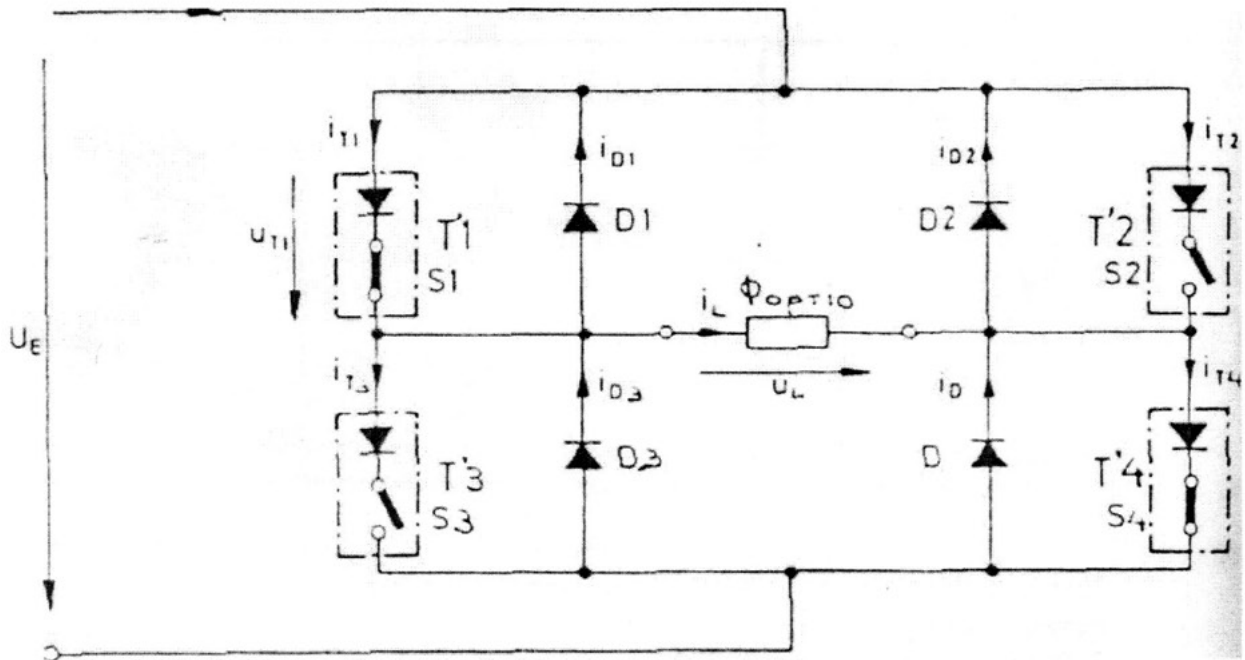
σχήμα 2: Ισοδύναμο κύκλωμα τεσσάρων διακοπών και αντίστοιχη κυματομορφή ρεύματος

### 5.2 Δεύτερη προσέγγιση: Ισοδύναμο κύκλωμα με διόδους και διακόπτες.[20]

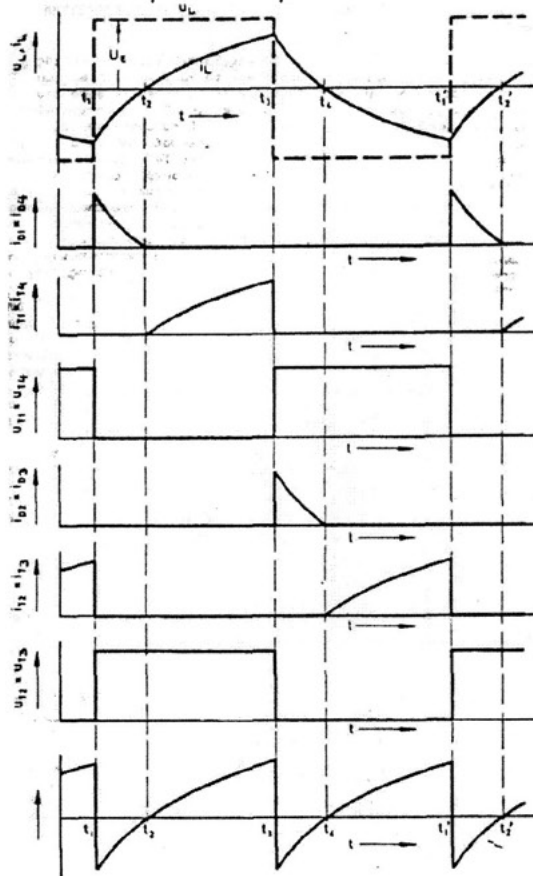
Αν υλοποιηθούν τα στοιχεία  $S_1, S_2, S_3, S_4$  του σχήμα 2 με διακόπτες ηλεκτρονικής ισχύος, πρέπει να ληφθεί υπόψη το εξής γεγονός: Το ρεύμα που ρέει σε έναν τέτοιο διακόπτη (δίοδο, θυρίστορ) πρέπει να έχει το ίδιο πρόβλημα με την τάση, αλλιώς το στοιχείο δεν άγει. Αυτό σημαίνει ότι ο αντιστροφέας μπορεί να δώσει μόνο ενεργό ισχύ (τάση και ρεύμα πρέπει να βρίσκονται πάντα σε φάση), πράγμα που κάνει προβληματική την τροφοδοσία ενός μη ωμικού φορτίου. Αλλά φορτία που περιέχουν και επαγωγικό μέρος είναι πολύ συνηθισμένα. Ο περιορισμός αυτός μπορεί, να αρθεί αν ο κάθε διακόπτης του σχήμα 2 υλοποιηθεί όχι μόνο με ένα θυρίστορ, αλλά με ένα θυρίστορ (T) και μια αντιπαράλληλη δίοδο (D), Όπως εξηγείται παρακάτω, με τον τρόπο αυτόν είναι δυνατή η δημιουργία άεργου ισχύος (δηλ. διαφοράς φάσης μεταξύ ρεύματος και τάσης), ώστε να τροφοδοτούνται και φορτία με επαγωγικό μέρος.

Για τη διερεύνηση των σχετικών κυματομορφών, θα εξετασθεί το ισοδύναμο κύκλωμα του σχήμα 3, στο οποίο τα θυρίστορ έχουν αντικατασταθεί με ζεύγη διόδων - διακοπών σε σειρά. Οι διακόπτες ανοίγουν και κλείνουν ανά δυο (εκείνοι που έχουν διαφορά φάσης 180 μοίρες), όπως ακριβώς και στο σχήμα 1. Σε συνθήκες μόνιμης λειτουργίας και εφόσον το φορτίο είναι ωμικό-επαγωγικό, ισχύουν οι κυματομορφές του σχήμα 3.





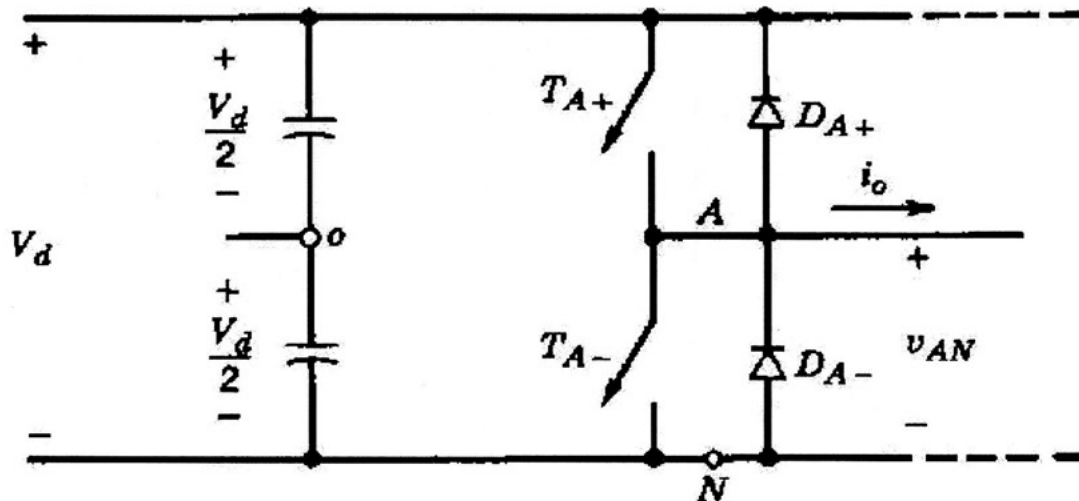
Σχήμα 2 Ισοδύναμο κύκλωμα διακοπών και διόδων.



Σχήμα 3 : Κυματομορφές αντιστροφέα για μικτό φορτίο χωρίς διάταξη μετάβασης

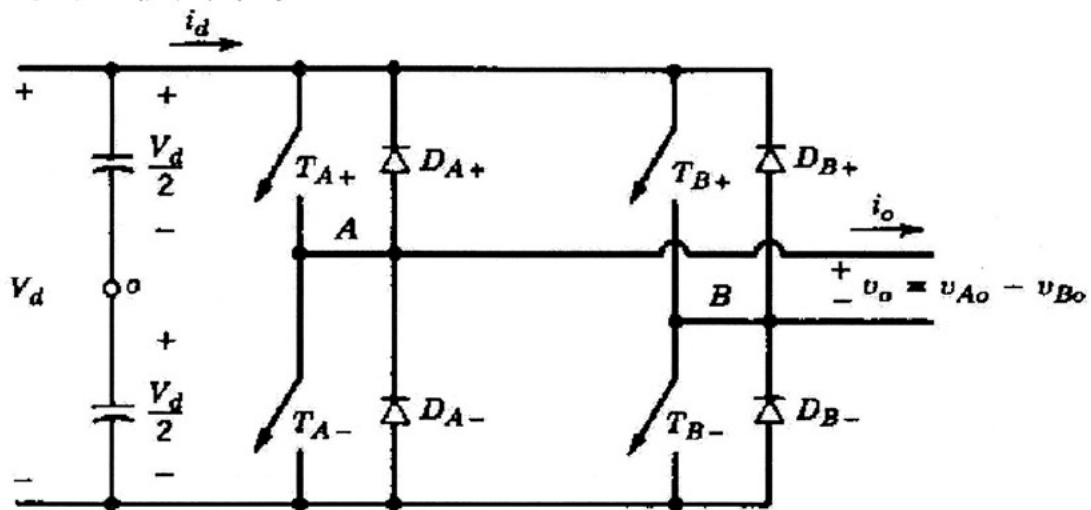
### 5.3 Μονοφασική Αντιστροφής.[19]

Στο σχήμα 5.2 δίνεται ο αντιστροφέας ημιγέφυρας. Εδώ, στα άκρα της εισόδου συνεχούς τάσης ( $V_d$ ) συνδέονται σε σειρά δυο ίδιοι πυκνωτές. Το σημείο σύνδεσης των πυκνωτών βρίσκεται στο μισό δυναμικό, οπότε στα άκρα του κάθε πυκνωτή αναπτύσσεται τάση ίση με  $V_d / 2$ .



Σχήμα 5.2 Αντιστροφείας ημιγέφυρας .

Ένας αντιστροφείας με πλήρη γέφυρα παρουσιάζεται στο σχήμα 5.3 συγκεκριμένος αντιστροφείας αποτελείται από δυο αντιστροφές ημιγέφυρας (σχήμα 3.2) και προτιμάται σε διατάξεις με υψηλότερες απαιτήσεις ισχύος. Με την ίδια συνεχή τάση εισόδου, η μέγιστη τάση εξόδου του αντιστροφεία πλήρους γέφυρας είναι διπλάσια από αυτή του αντιστροφεία ημιγέφυρας. Αυτό σημαίνει ότι για την ίδια ισχύ, το ρεύμα εξόδου και τα ρεύματα των διακοπών είναι το μισό εκείνων του αντιστροφεία ημιγέφυρας

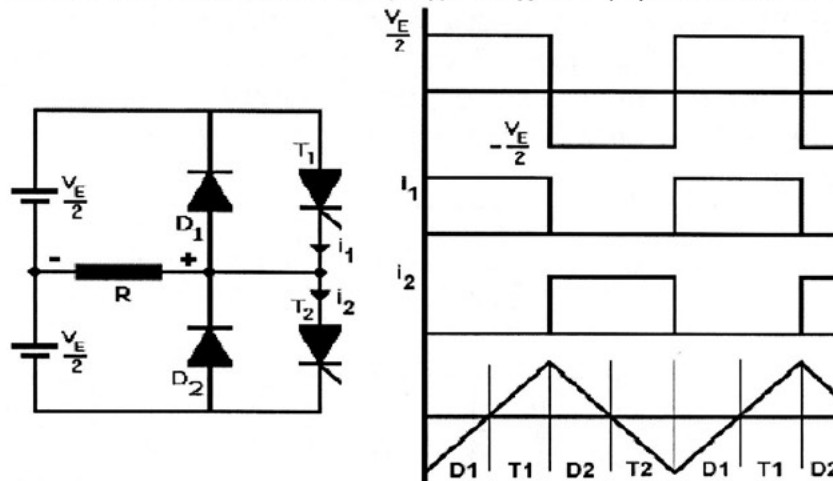


Σχήμα 5.3 Μονοφασικός αντιστροφείας πλήρους γέφυρας

Δυο είναι οι πιο διαδεδομένες διαμορφώσεις SPWM που μπορούν να εφαρμοστούν σε ένα μονοφασικό αντιστροφεία πλήρους γέφυρας 1) η διαμόρφωση SPWM με διπολική τάση εξόδου και 2) η διαμόρφωση SPWM με μονοπολική τάση εξόδου. Εξαιτίας ορισμένων σημαντικών πλεονεκτημάτων που παρουσιάζει η δεύτερη διαμόρφωση σε σχέση με την πρώτη, επιλέχθηκε προκειμένου να υλοποιηθεί για τους σκοπούς της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Οι λόγοι που οδήγησαν στην παραπάνω επιλογή γίνονται κατανοητοί στη συνέχεια, όπου αναλύονται και συγκρίνονται διεξοδικά οι δύο μέθοδοι διαμόρφωσης.

### 5.3.1 Μονοφασικός inverter τύπου ημιγέφυρας.[21]

Η αρχή λειτουργίας του μονοφασικού αναστροφέα εξηγείται με την βοήθεια του σχήματος 4 το οποίο αποτελείται από δύο chopper. Όταν είναι αναμμένο το θυρίστορ T1 για μισή περίοδο ( $T/2$ ) η στιγμιαία τιμή της τάσης στο φορτίο θα είναι  $V_E/2$ .



Σχήμα 5 Μονοφασικός inverter με τοπολογία ημιγέφυρας

Όταν είναι αναμμένο μόνο το θυρίστορ T2 για άλλη μισή περίοδο τότε η στιγμιαία τιμή της τάσης στο φορτίο θα είναι  $-V_E/2$ . Τα κύκλωμα είναι σχεδιασμένο έτσι ώστε τα T1, T2 να μην είναι ποτέ αναμμένα ταυτόχρονα διότι η πηγή θα βραχυκυκλώνεται. Στο σχήμα 5 φαίνονται επίσης οι κυματομορφές της τάσης εξόδου και των ρευμάτων στα δύο θυρίστορ με φορτίο καθαρά ωμικό. Ο αναστροφέας αυτός απαιτεί dc πηγή τριών καλωδίων. Σε κάθε θυρίστορ όταν αυτό είναι ανοικτό η τάση που εφαρμόζεται στα άκρα του είναι  $V_E$ . Η ενεργός τιμή της τάσης εξόδου δίνεται από την σχέση 5.1

$$V_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \left[ \int_0^{\pi} \left(\frac{V_E}{2}\right)^2 d\omega t + \int_{\pi}^{2\pi} \left(-\frac{V_E}{2}\right)^2 d\omega t \right]} = \frac{V_E}{2} \quad 5.1$$

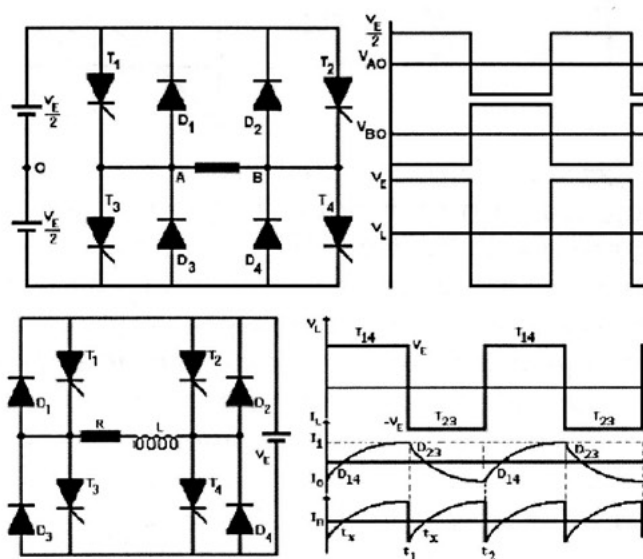
Εάν το φορτίο είναι επαγωγικό το ρεύμα φορτίου δεν μπορεί να αλλάξει ακαριαία φορά μαζί με την τάση εξόδου. Εάν λοιπόν το T1 σβήσει την χρονική στιγμή  $t=T/2$  τότε το ρεύμα φορτίου εξακολουθεί να ρέει μέχρις ότου να μηδενιστεί μέσω της διόδου D2 και του κάτω μισού τμήματος της dc πηγής. Παρόμοια εάν το T2 σβήσει την χρονική στιγμή  $t=T$  τότε το ρεύμα φορτίου εξακολουθεί να ρέει μέχρις ότου να μηδενιστεί μέσω της διόδου D1 και του πάνω μισού τμήματος της dc πηγής. Όταν οι διόδοι D1 και D2 άγουν τότε ένα μέρος της αποθηκευμένης στην αυτεπαγωγή του φορτίου ενέργειας επιστρέφει στην πηγή. Στο σχήμα 2.7 φαίνεται το ρεύμα στο φορτίο και τα διαστήματα στα οποία άγουν οι διόδοι και τα θυρίστορ για καθαρά επαγωγικό φορτίο. Ας σημειωθεί ότι για καθαρά επαγωγικό φορτίο, κάθε θυρίστορ άγει μόνο για  $T/2$  (ή  $90^\circ$ ).

Ανάλογα με τον συντελεστή ισχύος του φορτίου, η περίοδος αγωγής ενός θυρίστορ κυμαίνεται από  $90^\circ$  σε  $180^\circ$ . Στην πράξη αν  $t_q$  είναι ο χρόνος σβέσης ενός θυρίστορ, θα πρέπει οπωσδήποτε να υπάρχει μια ελάχιστη χρονική καθυστέρηση  $t_q$ , ανάμεσα στο θυρίστορ που τείνει να σβήσει και στο επόμενο που τείνει να ανάψει, διαφορετικά το αποτέλεσμα θα είναι βραχυκύκλωμα μέσω των δυο θυρίστορ. Συνεπώς η μέγιστη αγωγή ενός θυρίστορ σε χρόνο θα είναι  $T/2 - t_q$ .

5.3.2 Μονοφασικός inverter τύπου γέφυρας τετραγωνικού κύματος (square wave inverter).[21]

Ένας μονοφασικός inverter τύπου γέφυρας φαίνεται στο σχήμα 2.8 και αποτελείται από τέσσερα θυρίστορ σε συνδεσμολογία μονοφασικής γέφυρας. Όταν τα θυρίστορς T1 και T4 ανάψουν ταυτόχρονα η τάση εισόδου  $V_E$ , εμφανίζεται στα άκρα του φορτίου. Όταν τα θυρίστορς T2 και T3 ανάψουν με την προϋπόθεση ότι θα σβήσουν τα T1, T4 η τάση στα άκρα του φορτίου αντιστρέφεται και είναι  $-V_E$ . Η κυματομορφή της τάσης εξόδου φαίνεται στο σχήμα 6. Η ενεργός (rms) τάση εξόδου μπορεί να βρεθεί από:

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \left[ \int_0^{\pi} V_E^2 dt + \int_{\pi}^{2\pi} (-V_E)^2 dt \right]} = V_E \quad 5.2$$



Σχήμα 6 : Μονοφασικός inverter πλήρους γέφυρας με φορτίο ωμικό-επαγωγικό  
 Από τις κυματομορφές του σχήματος 2.8 φαίνεται ότι το κάθε ζευγάρι από τα θυρίστορς της γέφυρας είναι αναμμένο για  $180^\circ$  από την συνολική περίοδο της τάσης στο φορτίο. Το ρεύμα στο φορτίο αυξάνει εκθετικά μέσα από τα T1 και T4 σύμφωνα με την εξίσωση :

$$V_E = L \frac{di_L}{dt} + i_L R \quad 5.3$$

Όταν τα T1, T4 σβήνουν τα T2, T3 ανάβουν αναστρέφοντας την τάση στο φορτίο. Λόγω της επαγωγικής συμπεριφοράς του φορτίου το ρεύμα σε αυτό δεν αναστρέφεται ακαριαία και έτσι η ενέργεια που είναι αποθηκευμένη στο πηνίο ρέει προς την τροφοδοσία μέσα από τις D2, D3 σύμφωνα με τη εξίσωση :

$$-V_E = L \frac{di_L}{dt} + i_L R \quad 5.3$$

Το ρεύμα ελαττώνεται εκθετικά και όταν μηδενισθεί τότε τα θυρίστορς T3, T4 πολώνονται ορθά και οδηγούν το ρεύμα του φορτίου προσφέροντας ενέργεια στη αυτεπαγωγή. Η τάση εξόδου έχει τετραγωνική μορφή όπως φαίνεται και στο σχήμα 6 και η ενεργός τιμή όπως δείξαμε πιο πάνω είναι ίση με την τάση εισόδου  $V_E$ . Για ένα



από ωμικό επαγωγικό φορτίο κατά την διάρκεια του πρώτου κύκλου χωρίς αρχικό ρεύμα φορτίου αν λύσουμε την διαφορική εξίσωση 5.3 τότε προκύπτει το ρεύμα φορτίο που δίνεται από την :

$$i_L = \frac{V_E}{R} \left( 1 - e^{-\frac{R}{L}t} \right) \quad 5.4$$

Όπως φαίνεται από το σχήμα 2.8 για  $t = 0$   $I_L = -I_0$  οπότε η παραπάνω εξίσωση δίνει:

$$i_L = \frac{V_E}{R} - \left( \frac{V_E}{R} - I_0 \right) e^{-\frac{R}{L}t} \quad \text{με } 0 \leq t \leq t_1 \quad 5.5.a$$

για  $V_L = V_E$  τότε  $I_0 = < 0$

κατά την διάρκεια του δεύτερου κύκλου ( $t_1 < t < t_2$ ) όταν η τάση στο φορτίο αναστρέφεται η διαφορική εξίσωση 2.5 δίνει:

$$i_L = -\frac{V_E}{R} + \left( \frac{V_E}{R} - I_1 \right) e^{-\frac{R}{L}t} \quad \text{με } 0 \leq t \leq t_2 - t_1 \quad 5.5.b$$

για  $V_L = V_E$  τότε  $I_0 \geq 0$

Επειδή  $I_1 = -I_0$  το ρεύμα μπορεί να βρεθεί την σχέση 2.6 αν θέσουμε για  $t = t_1$   $I_L = I_1$  οπότε

$$I_1 = \frac{V_E}{R} \left( \frac{1 - e^{-\frac{R}{L}t_1}}{1 + e^{-\frac{R}{L}t_1}} \right) \quad 5.6$$

Ο χρόνος υπολογίζεται από την σχέση 2.6 αν θέσουμε  $I_L = 0$  οπότε έχουμε :

$$t_x = \frac{L}{R} \ln \left( 1 - \frac{I_0 R}{V_E} \right) \quad 5.7$$

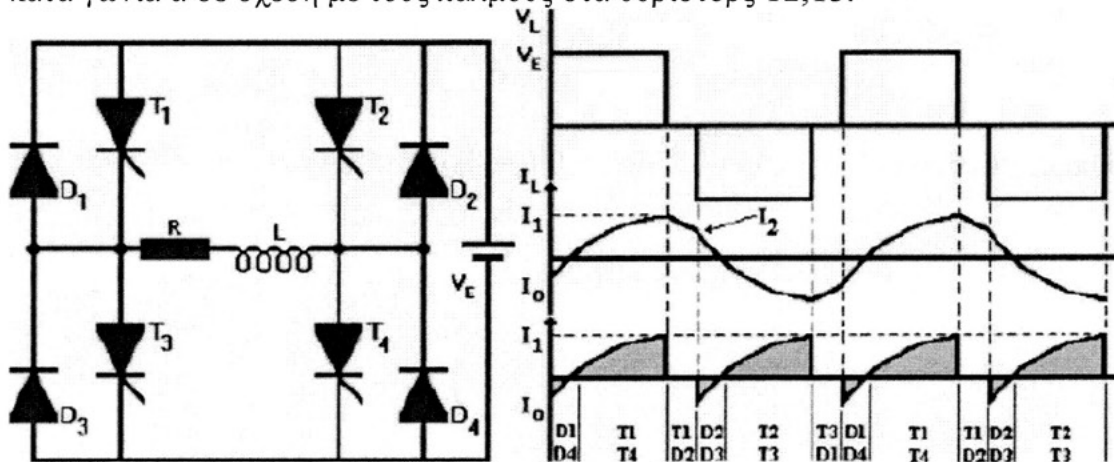
Η ενεργός ισχύς στο φορτίο θα είναι:

$$P_L = \frac{1}{t_1} \int_0^{t_1} V_E i_L(t) dt \quad 5.8$$

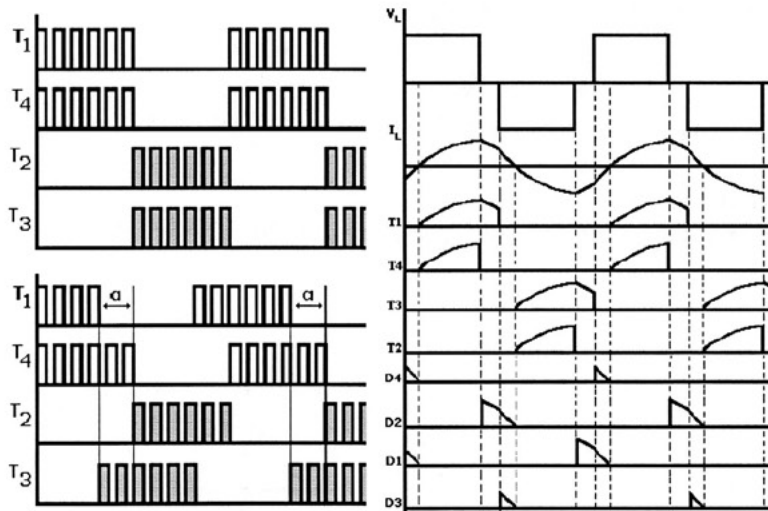
### 5.3.3 Μονοφασικός inverter τύπου γέφυρας ημιτετραγωνικού κύματος.[21]

Ο έλεγχος της τάσης εξόδου μπορεί να γίνει εάν μέσα στην περίοδο της τετραγωνικής τάσης του φορτίου δημιουργήσουμε περιοχές όπου αυτή θα είναι μηδέν δίνοντας έτσι την μορφή ενός ημι-τετραγωνικού κύματος. Αυτό μπορούμε να το πετύχουμε με έναν

inverter με τοπολογία γέφυρας όπως φαίνεται στο σχήμα 8 όπου όμως έχουμε αλλάξει τον τρόπο πυροδότησης των θυρίστωρς όπως φαίνεται στο σχήμα 9. Όπως παρατηρούμε οι παλμοί στα θυρίστωρς T1,T4 είναι μετατοπισμένοι (προηγούνται) κατά γωνία α σε σχέση με τους παλμούς στα θυρίστωρς T2,T3.



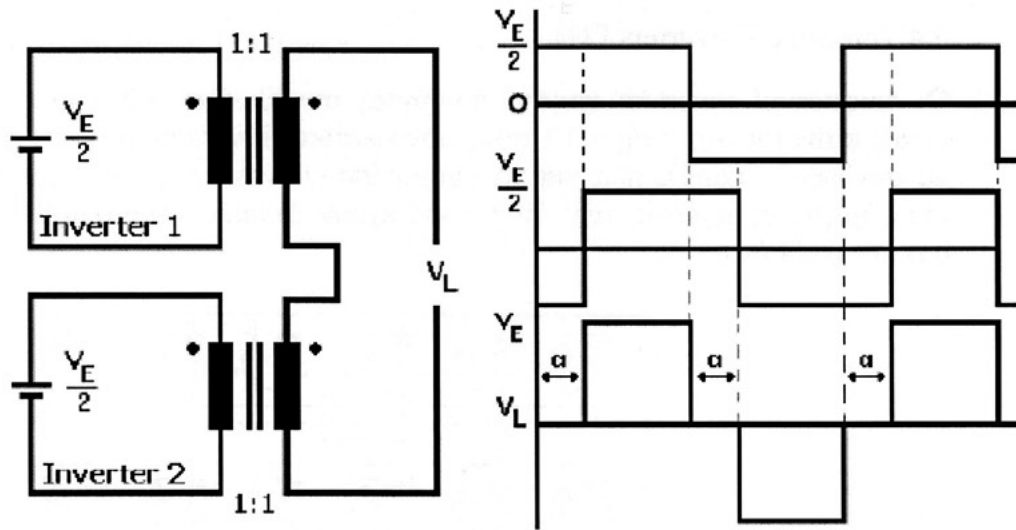
Σχήμα 7 : Μονοφασικός inverter πλήρους γέφυρας με φορτίο ωμικό-επαγωγικό



Σχήμα 8: Πυροδότησης των θυρίστωρς και χαρακτηριστικές κυματομορφές.

Ας πάρουμε για παράδειγμα την χρονική στιγμή όπου το T3 πυροδοτείται προκειμένου να σβήσει το T1, το ρεύμα του φορτίου μεταφέρεται στη δίοδο D3, αλλά καθώς το θυρίστωρ T4 είναι ακόμη αναμμένο το ρεύμα του φορτίου ακολουθεί το δρόμο μέσω των T4, D3 βραχυκυκλώνοντας το φορτίο, κάνοντας μηδενική την τιμή της τάσης στο φορτίο. Τώρα όταν πυροδοτείται το T2 προκειμένου να σβήσει το T4, ο μόνος δρόμος για το ρεύμα του φορτίου είναι μέσω των διόδων D3 και D4 συνδέοντας την dc πηγή τροφοδοσίας με το φορτίο κατά την αρνητική φορά. Τα θυρίστωρς T2,T3 αρχίζουν να άγουν αμέσως μετά τον μηδενισμό του ρεύματος. Τα ρεύμα στα θυρίστωρς όπως και στις διόδους δεν είναι πλέον τα ίδια. Ένας εναλλακτικός τρόπος παραγωγής ημιτετραγωνικού κύματος είναι να συνδυάσουμε τις εξόδους από δύο push-pull inverters από τις οποίες η μία είναι μετατοπισμένη ως προς την άλλη κατά γωνία α όπως φαίνεται και στο σχήμα 9. Έτσι αν προσθέσουμε τις δύο εξόδους προκύπτει το επιθυμητό αποτέλεσμα. Η ενεργός τιμή της τάσης εξόδου δίνεται από την σχέση 5.9

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \left[ \int_0^{\pi-\alpha} V_E^2 dt + \int_{\pi}^{2\pi-\alpha} (-V_E)^2 dt \right]} = V_E \sqrt{1 - \frac{\alpha}{\pi}}$$



Σχήμα 9 Ολίσθηση της τάσης εξόδου του ενός inverter έναντι του άλλου. Το ρεύμα στο φορτίο δίνεται από την :

με  $V_L > 0$  και  $I_0 \leq 0$

$$i_L = \frac{V_E}{R} - \left( \frac{V_E}{R} - I_0 \right) e^{-\frac{R}{L}t} \quad \text{με } 0 \leq t \leq t_0 \quad 5.10$$

με  $V_L = 0$  και  $I_1 \geq 0$

$$i_L = I_1 e^{-\frac{R}{L}t} \quad \text{με } 0 \leq t \leq t_1 - t_0 \quad 5.11$$

με  $V_L < 0$  και  $I_2 \geq 0$

$$i_L = -\frac{V_E}{R} + \left( \frac{V_E}{R} + I_2 \right) e^{-\frac{R}{L}t} \quad \text{με } 0 \leq t \leq t_2 - t_1 \quad 5.12$$

Τα ρεύματα  $I_1, I_0, I_2$  δίνονται από τις σχέσεις 5.10, 5.11, 5.12

$$I_0 = \frac{-V_E}{R} \left( \frac{e^{-\frac{L}{R}t_0} - e^{-\frac{L}{R}t_1}}{1 - e^{-\frac{L}{R}t_1}} \right), \quad I_1 = \frac{V_E}{R} \left( \frac{1 - e^{-\frac{L}{R}t_0}}{1 - e^{-\frac{L}{R}t_1}} \right), \quad I_2 = -I_0 \quad 5.13$$

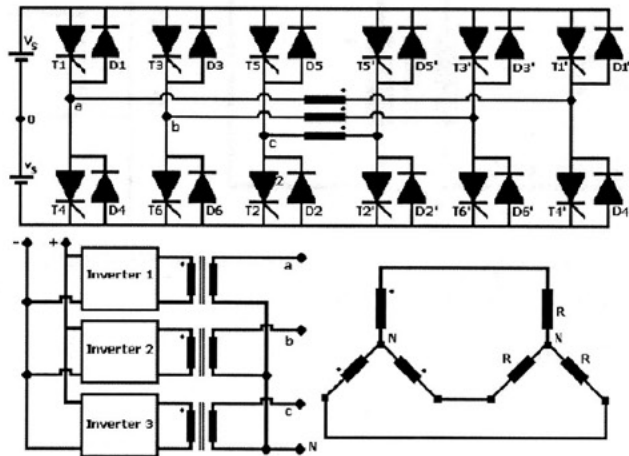
Η ενεργός ισχύς στο φορτίο θα είναι :

$$P_L = \frac{1}{t_1} \int_0^{t_0} V_E i_L(t) dt \quad 5.14$$

όπου το ρεύμα  $I_L$  δίνεται από τις σχέσεις 5.10 , 5.12 , 5.13

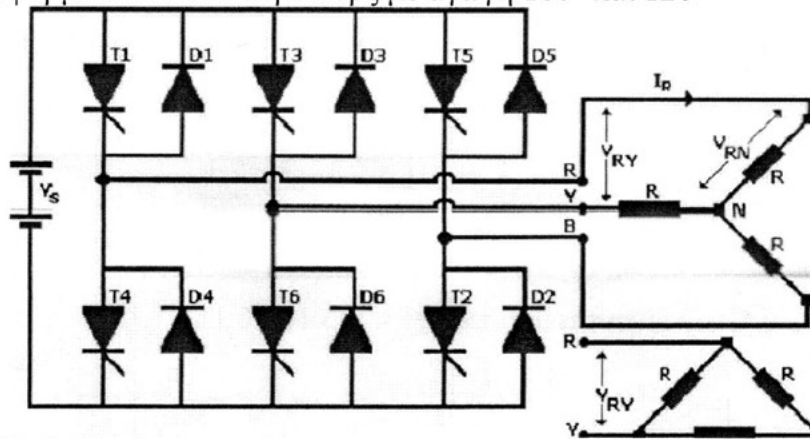
#### 5.4 Τριφασικοί Inverters.[21]

Οι τριφασικοί inverters χρησιμοποιούνται συνήθως σε εφαρμογές υψηλής ισχύος. Όπως φαίνεται στο σχήμα 10 τρεις μονοφασικοί inverters πλήρους γέφυρας μπορούν να συνδεθούν παράλληλα για να σχηματίσουν έναν τριφασικό inverter. Τα διάφορα κυκλώματα μεταγωγής των θυρίστωρ έχουν σκόπιμα παραληφθεί προκειμένου να απλουστευθούν αυτές.



ΣΧΗΜΑ 10 Τριφασικός inverter αποτελούμενος από τρεις μονοφασικούς inverters πλήρους γέφυρας με διόδους ελεύθερης ροής και φορτίο σε συνδεσμολογία αστέρα.

Στο σχήμα 11 έχουν συνδυαστεί επίσης τρεις μονοφασικοί inverters μισής γέφυρας για να δημιουργήσουν έναν τριφασικό inverter με έξι θυρίστωρ και έξι διόδους ελεύθερης ροής αντιπαράλληλα με αυτά. Στη συνέχεια θα μελετήσουμε δύο τύπους ελέγχου που μπορούν να εφαρμοστούν στα θυρίστωρ με αγωγή  $180^\circ$  και  $120^\circ$



ΣΧΗΜΑ 11 : Τριφασικός inverter με φορτίο σε συνδεσμολογία αστέρα

#### 5.5 Ανάλυση Της Μεθόδου SPWM.[19]

Όπως επισημάνθηκε και παραπάνω είναι επιθυμητό η έξοδος του αντιστροφέα (μετά το φίλτρο) να είναι ημιτονοειδής και να υπάρχει η δυνατότητα ελέγχου τόσο του πλάτους όσο και της συχνότητάς της. Για την παραγωγή μιας ημιτονοειδούς τάσης εξόδου σε μια επιθυμητή συχνότητα, συγκρίνεται ένα ημιτονοειδές σήμα ελέγχου  $v_{control}$  που είναι στην επιθυμητή συχνότητα, με μία τριγωνική κυματομορφή  $V_{tri}$  (σχήμα 12 ). Η συχνότητα της τριγωνικής κυματομορφής, καθορίζει τη διακοπτική συχνότητα λειτουργίας των ημιαγωγών στοιχείων του αντιστροφέα και διατηρείται



γενικά σταθερή, όπως και το πλάτος της . Πριν την ανάλυση της μεθόδου, καλό είναι να ορίσουμε κάποιους βασικούς συμβολισμούς:

$f_s$  → Διακοπτική συχνότητα, είναι η συχνότητα της τριγωνικής κυματομορφής

$f_x$  → Συχνότητα διαμόρφωσης, είναι η συχνότητα του σήματος ελέγχου

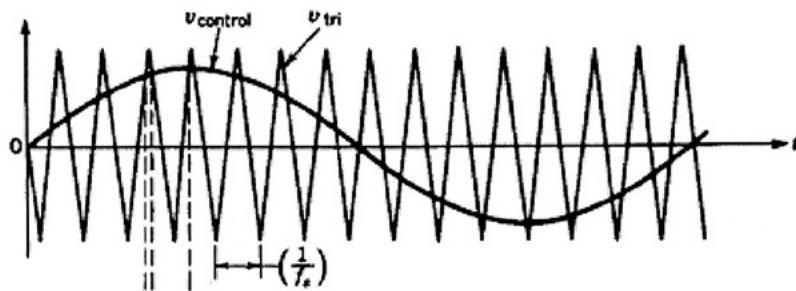
$V_{tri}$  → Πλάτος της τριγωνικής κυματομορφής

$V_{control}$  → Πλάτος του σήματος ελέγχου

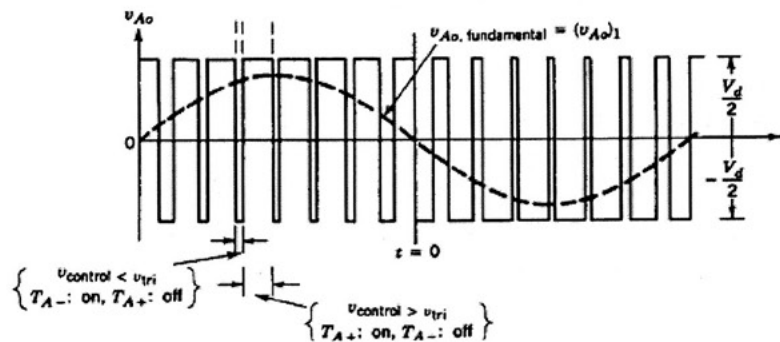
$M_a$  → Συντελεστής διαμόρφωσης πλάτους με  $M_a = V_{control} / V_{tri}$  (5.16)

$M_f$  → Συντελεστής διαμόρφωσης συχνότητας με  $M_f = f_s / f_x$  (5.17)

Το σήμα ελέγχου  $v_{control}$  χρησιμοποιείται για τη διαμόρφωση της σχετικής διάρκειας αγωγής, η δε τάση εξόδου του αντιστροφέα δεν θα είναι τέλεια ημιτονοειδής κυματομορφή αλλά θα περιέχει και ανώτερες αρμονικές (αναφερόμαστε πάντα για την τάση μετά το φίλτρο). Στο σχήμα 12 παρουσιάζεται η διαδικασία σύγκρισης ενός ημιτονοειδούς σήματος ελέγχου με μια τριγωνική κυματομορφή για την επίτευξη της SPWM .



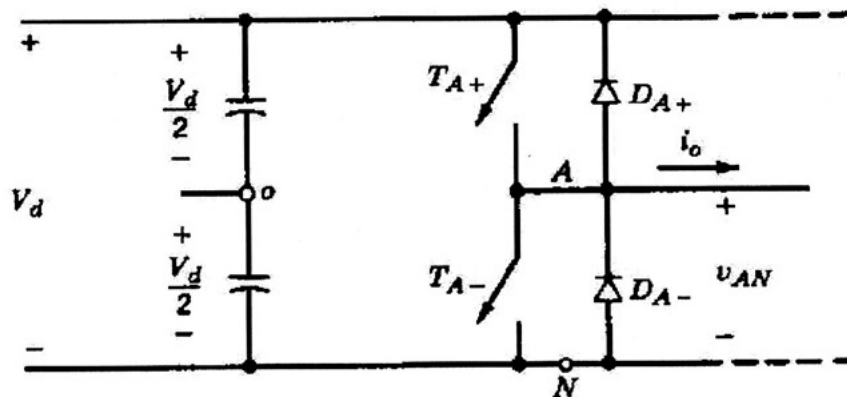
a



B

Σχήμα 12 Ημιτονοειδής διαμόρφωση εύρους παλμών

Για την καλύτερη κατανόηση της μεθόδου, ας αναφερθούμε στον αντιστροφέα ημιγέφυρας του σχήματος 13 που στη συνέχεια επαναλαμβάνεται.



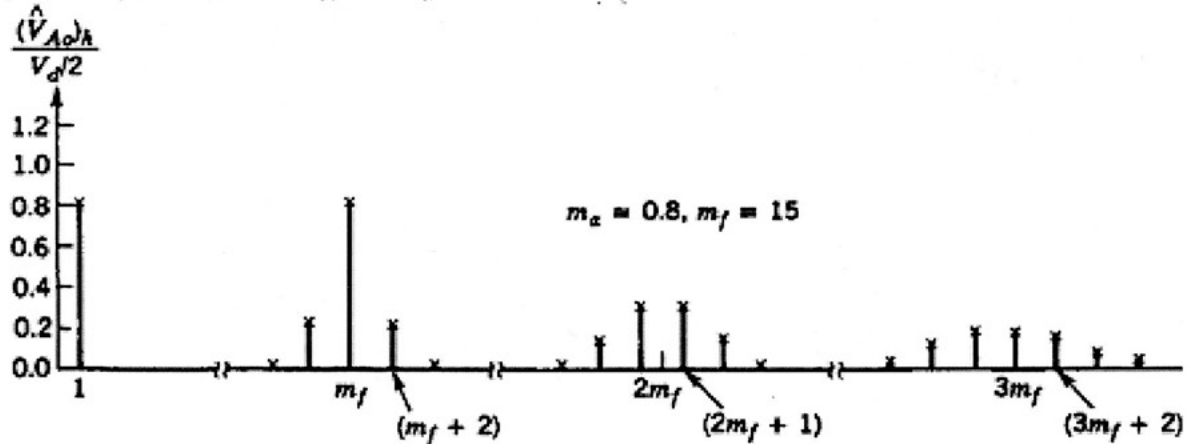
Σχήμα 13 Αντιστροφέας ημιγέφυρας

Οι διακόπτες TA+, TA. ελέγχονται με βάση τη σύγκριση των  $V_{control}$  και  $V_{tri}$  όπου και προκύπτει η ακόλουθη τάση εξόδου  $V_{control} > V_{tri}$  τότε,  $TA+ \rightarrow on$  ( $V_{Ao} = 1/2 * V_d$ ) (5.14)

Αν  $V_{control} < V_{tri}$  τότε,  $TA- \rightarrow on$  ( $V_{Ao} = 1/2 * V_d$ ) (5.14)

Εφόσον οι δύο διακόπτες δεν μπορεί να είναι ταυτόχρονα ανοιχτοί, η τάση εξόδου  $v_{Ao}$  κυμαίνεται μεταξύ  $V_d / 2$  και  $-V_d / 2$ . Διαπιστώνεται επίσης, ότι αυξομειώνοντας το συντελεστή διαμόρφωσης πλάτους  $M_a$  (από 0 έως 1) μεταβάλλεται και το εύρος των παλμών της κυματομορφής που προκύπτει από τη σύγκριση (σχήμα 3.4b).

Το φάσμα της  $v_{Ao}$  φαίνεται στο σχήμα 3.5, όπου σχεδιάζονται οι κανονικοποιημένες αρμονικές ( $V_{Ao}$ )h που έχουν σημαντικά πλάτη.



Σχήμα 14 Φάσμα της τάσης εξόδου για αντιστροφέα ημιγέφυρας.

Οι ανώτερες αρμονικές της τάσης εξόδου του αντιστροφέα μπορούν να ομαδοποιηθούν σε ζώνες συχνοτήτων, γύρω από τα ακέραια πολλαπλάσια της συχνότητας τριγώνου ή συχνότητας μετάβασης ( $f_s$ ).

Για την τρίτη ομάδα ισχύει ότι και για την πρώτη, μόνο που η κεντρική αρμονική είναι σε συχνότητα  $3 f_s$ . Αντίστοιχα στην τέταρτη ομάδα ισχύει ότι και για την δεύτερη, αλλά με κεντρική συχνότητα  $4f_s$ . Η συλλογιστική αυτή ισχύει και για τις υπόλοιπες ομάδες ανωτέρων αρμονικών, όπως φαίνεται και στο σχήμα 13. Συνεπώς μπορούμε να πούμε, πως οι ανώτερες αρμονικές εμφανίζονται σε συχνότητες που ακολουθούν την σχέση :

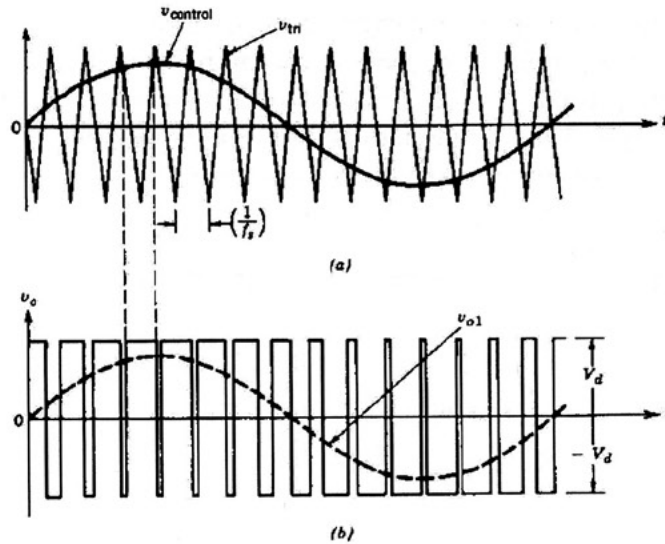
$$f_v = n \cdot f_s \pm k \cdot f_1$$

όπου,  $n = 1, 2, 3, \dots$  και  $k = 1, 3, 5, \dots$  αν  $n =$  άρτιος ή

$k = 2, 4, 6, \dots$  αν  $n =$  περιττός

### 5.5.1 Διαμόρφωση SPWM Με Διπολική Τάση Εξόδου.[19]

Στη συγκεκριμένη διαμόρφωση τα ζεύγη των διακοπών ( $TA+ , TB.$ ) και ( $TA- , TB+$ ) από τα δύο σκέλη αλλάζουν κατάσταση ως ζεύγη διακοπών 1 και 2 αντίστοιχα. Με το είδος αυτό της μετάβασης, η κυματομορφή της τάσης εξόδου (σχήμα 15) έχει την ίδια μορφή με την έξοδο του βασικού αντιστροφέα ημιγέφυρας (σχήμα 13) και συνεπώς το ίδιο φάσμα (σχήμα 14), καθώς η σύγκριση του  $V_{control}$  και  $V_{tri}$  γίνεται με τον ίδιο ακριβώς τρόπο. Η μόνη διαφορά που υπάρχει είναι ότι η μέγιστη τάση εξόδου γίνεται τώρα  $V_d$ .

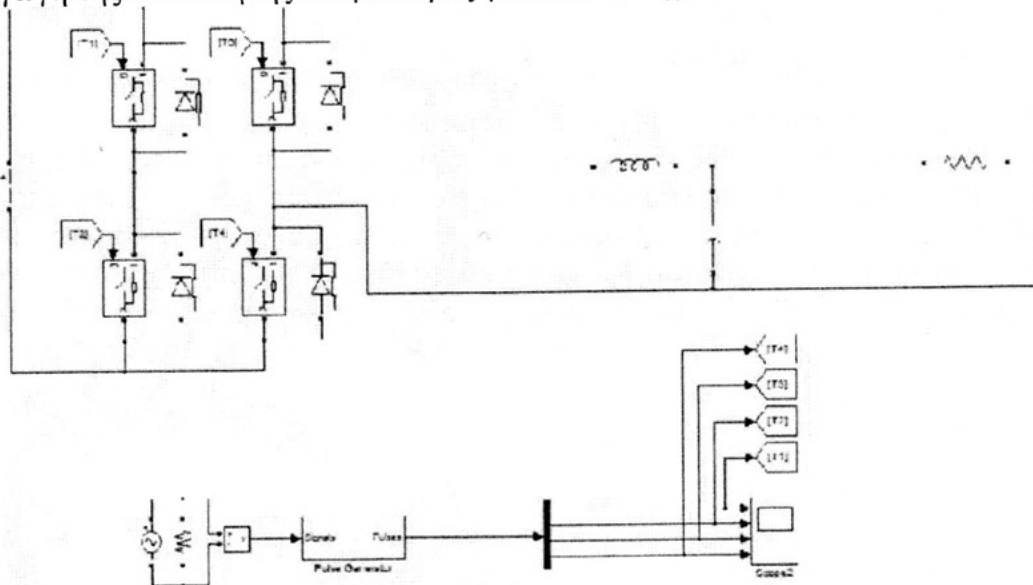


Σχήμα 15 Διαμόρφωση SPWM με διπολική τάση εξόδου

Η κυματομορφή της τάσης εξόδου φαίνεται στο σχήμα 3.6b και το πλάτος της θεμελιώδους συνιστώσας της τάσης εξόδου  $V_0$  δίνεται από τη σχέση:

$$V_0 = M_a \cdot V_d \quad (5.16)$$

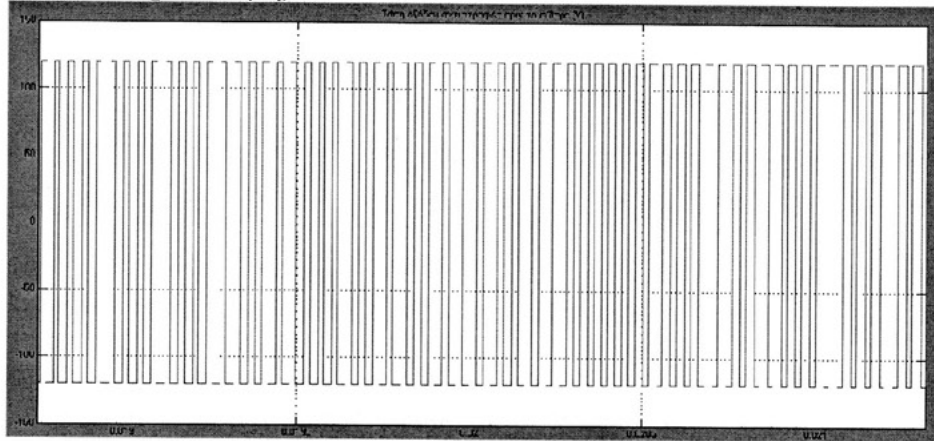
Επίσης στο σχήμα 3.6b φαίνεται ότι η τάση εξόδου  $v_0$  μεταβαίνει μεταξύ των επιπέδων τάσης  $-V_d$  και  $V_d$  και για αυτόν το λόγο ονομάζεται διαμόρφωση SPWM με διπολική τάση εξόδου. Στη συνέχεια θα παρουσιαστούν διάφορες προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν στο περιβάλλον του Simulink (MATLAB), προκειμένου να αναλυθούν και επαληθευτούν τα παραπάνω θεωρητικά αποτελέσματα. Το block διάγραμμα του αντιστροφέα μαζί με τη διαδικασία παραγωγής των παλμών για κάθε ημιαγωγικό στοιχείο φαίνεται στο σχήμα 16 όπου διακρίνονται η dc πηγή τάσης, τα ημιαγωγικά στοιχεία (4 διακόπτες και 4 δίοδοι), ένα LC φίλτρο στην έξοδο του αντιστροφέα και ένα μονοφασικό ωμικό φορτίο. Στο block Pulse Generator γίνεται η υλοποίηση της μεθόδου SPWM με διπολική τάση εξόδου, η οποία συνίσταται στην παραγωγή της κατάλληλης παλμοσειράς για κάθε στοιχείο.



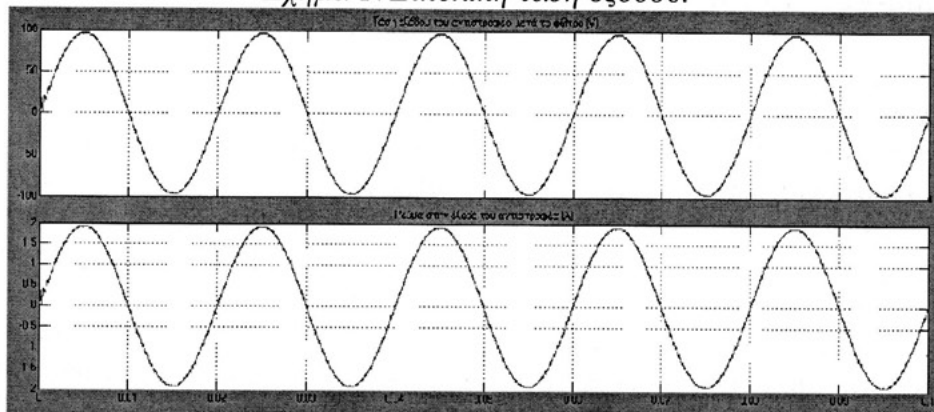
Σχήμα 16 Block διάγραμμα αντιστροφέα.

Η συχνότητα της τριγωνικής κυματομορφής (συχνότητα φορέα) επιλέγεται να είναι τα 25KHZ. Υπολογίζοντας το LC φίλτρο εξόδου, ώστε να έχει συχνότητα αποκοπής

2.5ΚΗζ και χρησιμοποιώντας τις σχέσεις  $\omega = 2\pi f$  και  $\omega = 1/(4.1 \cdot 10^{-9})$  προκύπτει ότι  $LC \sim 4.1 \cdot 10^{-9}$ . Επίσης, πρέπει να γίνει κατάλληλη επιλογή του πυκνωτή, έτσι ώστε να απορροφά πολύ χαμηλό ρεύμα. Τελικά, καταλήγουμε στις τιμές  $L = 0.92\text{mH}$  και  $C = 4.4\mu\text{F}$ . Στο σχήμα 3.8 απεικονίζονται οι κυματομορφές που προέκυψαν από την προσομοίωση του αντιστροφέα για τάση εισόδου 120V, αντίσταση φορτίου 50Ω και συντελεστή διαμόρφωσης  $M_a = 0.8$ , έτσι ώστε  $V_o = M_a \cdot V = 96\text{V}$  (peak τιμή).

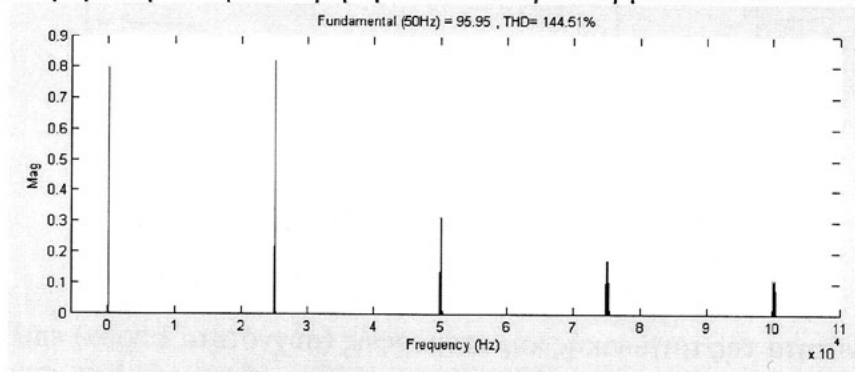


Σχήμα 17 Διπολική τάση εξόδου.



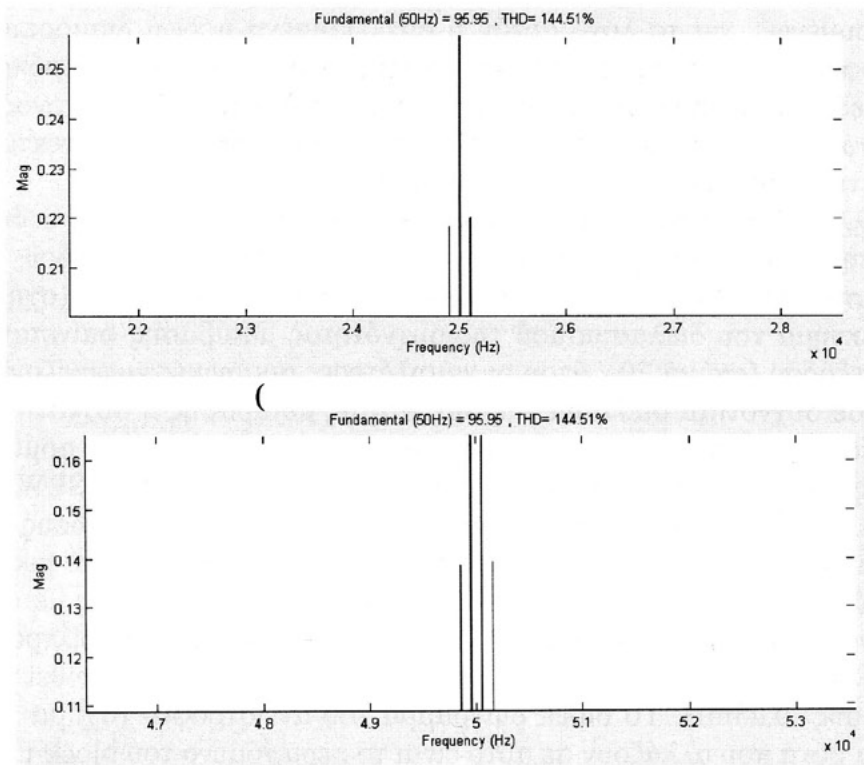
Σχήμα 18 Τάση και ρεύμα στην έξοδο του αντιστροφέα (για διαμόρφωση με διπολική τάση).

Παρατηρούμε στο σχήμα 3.8 ότι η τάση εξόδου πριν το φίλτρο, έχει την αναμενόμενη θεωρητική μορφή (σχήμα 14), ενώ η τάση μετά το φίλτρο (σχήμα 10) έχει πράγματι μέγιστη τιμή 96V, όπως είχε υπολογισθεί, και συνεπώς ενεργό τιμή  $96/\sqrt{2} \sim 68\text{ V}$ . Επιπλέον, το ρεύμα στο φορτίο έχει ενεργό τιμή  $68/50 = 1.36\text{A}$ . Τέλος, στο σχήμα 19a δίνεται το φάσμα της τάσης εξόδου του αντιστροφέα, το οποίο βρίσκεται σε πλήρη συμφωνία με το αντίστοιχο θεωρητικό (σχήμα 15). Στα σχήματα 19b και 19c παριστάνεται η πρώτη και η δεύτερη ομάδα ανωτέρων αρμονικών αντίστοιχα.



(a)



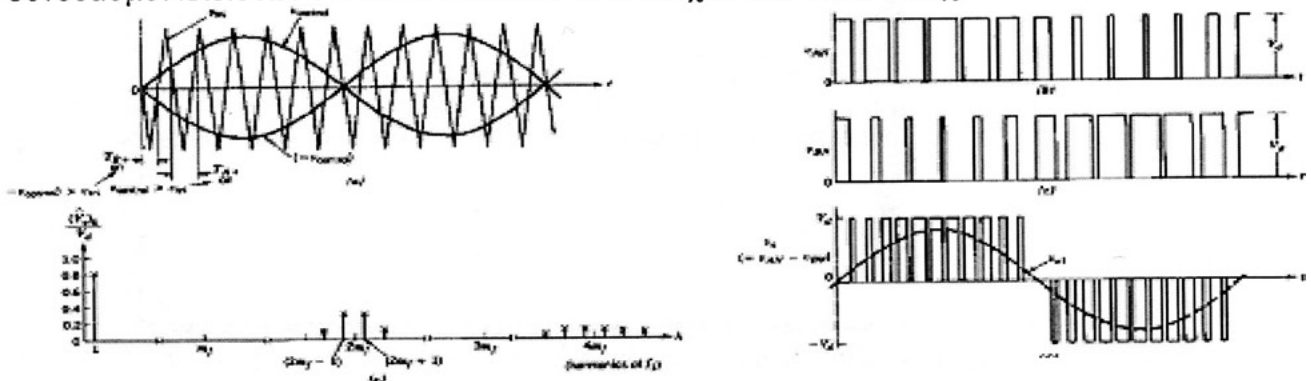


(c)

Σχήμα 19 Φάσματα τάσης εξόδου του αντιστροφέα (για διαμόρφωση με διπολική SPWM).

5.5.2 Διαμόρφωση SPWM Με Μονοπολική Τάση Εξόδου .[19]

Στη διαμόρφωση SPWM με μονοπολική τάση εξόδου οι διακόπτες στα δύο σκέλη του αντιστροφέα με πλήρη γέφυρα του σχήματος 3.5, ελέγχονται ξεχωριστά με σύγκριση της  $V_{tri}$  με τα  $v_{control}$  και  $-v_{control}$  αντίστοιχα. Όπως φαίνεται στο σχήμα 20a η σύγκριση του  $v_{control}$  με την τριγωνική κυματομορφή έχει ως αποτέλεσμα τα ακόλουθα λογικά σήματα για τον έλεγχο των διακοπτικών στοιχείων του σκέλους Α. Η τάση εξόδου του σκέλους Α του αντιστροφέα σε σχέση με τον αγωγό Ν που φέρει την αρνητική dc τάση φαίνεται στο σχήμα 20 b. Για τον έλεγχο των διακοπών του σκέλους Β, το  $(-v_{control})$  συγκρίνεται με την ίδια τριγωνική κυματομορφή, δίνοντας τα ακόλουθα. Από τις κυματομορφές του σχήματος 20 φαίνεται ότι υπάρχουν τέσσερις συνδυασμοί κλειστών διακοπών και των αντίστοιχων επιπέδων τάσης.

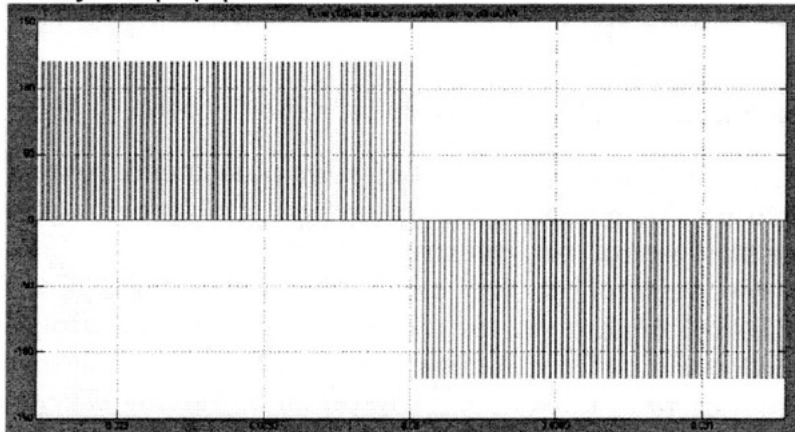


Σχήμα 20 Διαμόρφωση PWM με μονοπολική τάση εξόδου

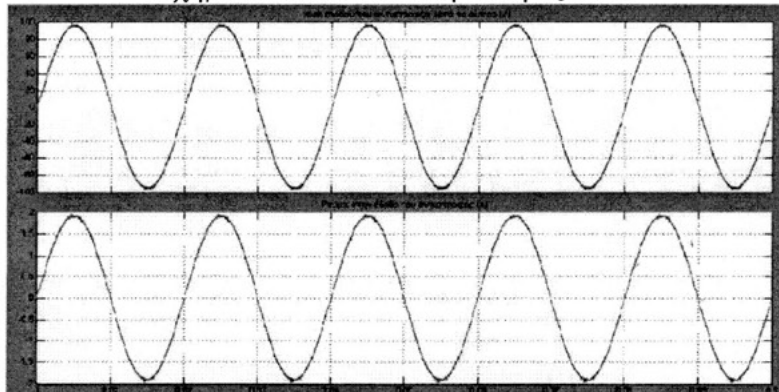
Σε αυτήν τη διαμόρφωση PWM, όταν συμβαίνει μια μετάβαση, η τάση εξόδου αλλάζει μεταξύ των επιπέδων τάσης 0 και  $+V_d$  ή μεταξύ των 0 και  $-V_d$ , σε αντίθεση με αυτή της διπολικής τάσης εξόδου (μεταξύ  $+V_d$  και  $-V_d$ ) που εξετάστηκε

προηγουμένως, για το λόγο αυτόν η συγκεκριμένη μορφή διαμόρφωσης ονομάζεται διαμόρφωση παλμού με μονοπολική τάση εξόδου. Με αυτόν τον τρόπο, τα άλματα της τάσης εξόδου σε κάθε μετάβαση μειώνονται σε  $V_d$  από  $2V_d$ , γεγονός που καθιστά τη διαμόρφωση PWM με μονοπολική τάση εξόδου σαφώς πλεονεκτικότερη αφού οι διακοπτικές απώλειες μειώνονται στο μισό.

Ένα άλλο πλεονέκτημα της συγκεκριμένης διαμόρφωσης είναι ο διπλασιασμός της συχνότητας μετάβασης μόνο όσον αφορά τις αρμονικές εξόδου (σχήμα 20), σε σύγκριση πάντα με τη διάταξη διπολικής μετάβασης της τάσης (σχήμα 3.5) [10]. Το πλεονέκτημα του διπλασιασμού της συχνότητας μετάβασης φαίνεται στο φάσμα της τάσης εξόδου (σχήμα 20), όπου οι χαμηλότερες αρμονικές εμφανίζονται ως πλευρικές ζώνες σε συχνότητα διπλάσια της συχνότητας μετάβασης ή συχνότητας του τριγώνου  $f_s$ . Επίσης στο ίδιο φάσμα φαίνεται πως απαλείφονται και οι αρμονικές της τρίτης ομάδας. Τέλος από τη σύγκριση της μονοπολικής και διπολικής SPWM συμπεραίνεται ότι και στις δύο περιπτώσεις το πλάτη των τάσεων της θεμελιώδους συχνότητας είναι ίσα για ίδια  $M_a$ . Ωστόσο, με τη μονοπολική τάση εξόδου έχουμε μικρότερο αρμονικό περιεχόμενο. Το πλεονέκτημα του διπλασιασμού της συχνότητας μετάβασης, μας δίνει τη δυνατότητα να αυξήσουμε τη συχνότητα αποκοπής του φίλτρου σε 5KHz από 2.5KHz που είχαμε για τη διπολική τάση, με αποτέλεσμα να μειωθεί το L από 0.92mH σε εύρους 0.23mH. Το block διάγραμμα του αντιστροφέα (σχήμα 16) παραμένει το ίδιο, τα μόνα που αλλάζουν σε αυτό είναι το περιεχόμενο του block 1 Pulse Generator όπου τώρα γίνεται η υλοποίηση της μεθόδου SPWM με μονοπολική τάση εξόδου καθώς και η τιμή του L.



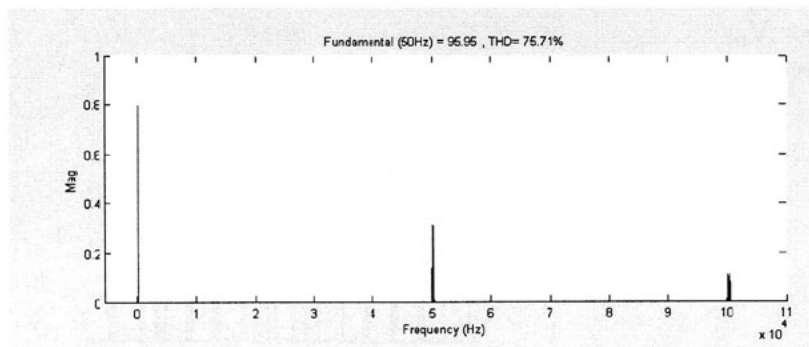
Σχήμα 21: Μονοπολική τάση εξόδου.



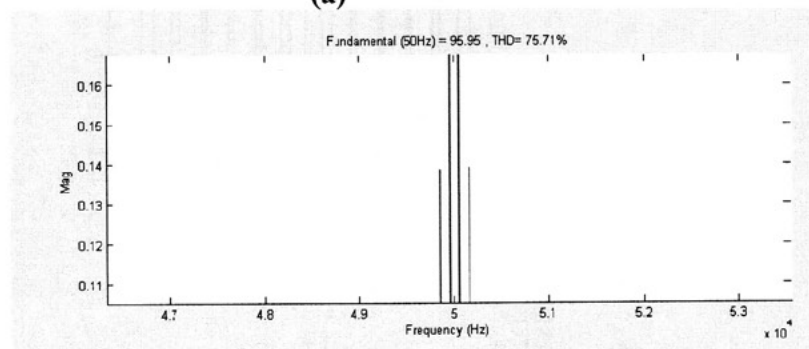
Σχήμα 22: Τάση και ρεύμα στην έξοδο του αντιστροφέα (για διαμόρφωση με μονοπολική SPWM).

Παρατηρούμε και εδώ ότι η τάση εξόδου πριν το φίλτρο (σχήμα 21), έχει την αναμενόμενη θεωρητική μορφή (σχήμα 20 d), ενώ η τάση μετά το φίλτρο (σχήμα 22) έχει πράγματι μέγιστη τιμή 96V, όπως είχε υπολογισθεί, και συνεπώς ενεργό τιμή

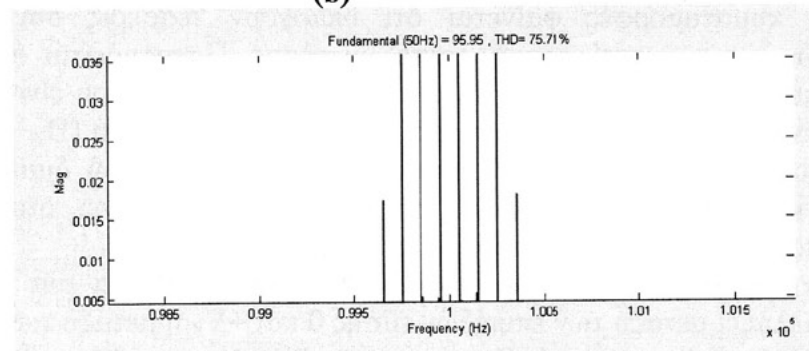
96/1.41 ~ 68 V. Επιπλέον, το ρεύμα στο φορτίο έχει ενεργό τιμή  $68/50 = 1.36\text{A}$ . Τέλος, στο σχήμα 323 δίνεται το φάσμα της τάσης εξόδου του αντιστροφέα, το οποίο βρίσκεται σε πλήρη συμφωνία με το αντίστοιχο θεωρητικό (σχήμα 20). Στα σχήματα 23b και 23c παριστάνεται η δεύτερη και η τέταρτη ομάδα ανωτέρων αρμονικών αντίστοιχα.



(a)



(b)



(c)

Σχήμα 22 Φάσματα τάσης εξόδου του αντιστροφέα (για διαμόρφωση με μονοπολική τάση)

Τέλος αξίζει να αναφερθούμε στην ένδειξη THD (Total Harmonic Distortion) που εμφανίζεται στο πάνω μέρος των σχημάτων 3.10 και 3.14. Με τον όρο THD αναφερόμαστε στο συνολικό αρμονικό περιεχόμενο ενός σήματος. Συνεπώς είναι απολύτως λογικό να έχουμε αρκετά μικρότερο THD κατά την μονοπολική SPWM (THD=75.71%) σε σχέση με την διπολική SPWM (THD=144.51%).

## 5.6 ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ PWM ΜΕ ΜΟΝΟΠΟΛΙΚΗ ΤΑΣΗ ΕΞΟΔΟΥ.[18]

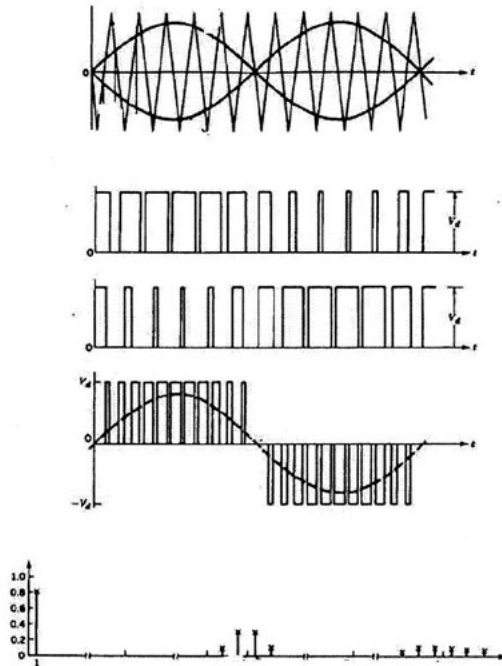
Στη διαμόρφωση PWM με μονοπολική τάση εξόδου οι διακόπτες στα δυο σκέλη του αντιστροφέα με πλήρη γέφυρα δεν αλλάζουν κατάσταση ταυτόχρονα, όπως στην προηγούμενη διάταξη διαμόρφωσης PWM. Εδώ, τα σκέλη A και B του αντιστροφέα με πλήρη γέφυρα ελέγχονται ξεχωριστά με σύγκριση της  $V_{tri}$  με τα  $U_{control}$  και  $-U_{control}$  αντίστοιχα. Όπως φαίνεται, η σύγκριση του  $U_{control}$  με την τριγωνική κυματομορφή

έχει ως αποτέλεσμα τα ακόλουθα λογικά σήματα για τον έλεγχο των διακοπών του σκέλους A:

Η τάση εξόδου του σκέλους A του αντιστροφέα σε σχέση με τον αγωγό N που φέρει την αρνητική dc τάση φαίνεται. Για τον έλεγχο των διακοπών του σκέλους B, το  $(-V_{\text{control}})$  συγκρίνεται με την ίδια τριγωνική κυματομορφή, δίνοντας τα ακόλουθα

$$(-V_{\text{control}}) > V_{\text{tri}}$$

$$(-V_{\text{control}}) < -V_{\text{tri}}$$



Από τις κυματομορφές φαίνεται ότι υπάρχουν τέσσερις συνδυασμοί κλειστών διακοπών και των αντίστοιχων επιπέδων τάσης. Παρατηρείται ότι όταν και οι δύο επάνω διακόπτες  $T_{A+}$  και  $T_{B+}$  είναι κλειστοί, η τάση εξόδου είναι μηδέν. Το ρεύμα εξόδου κυκλοφορεί σ' ένα βρόχο μέσω των  $(T_{A+}$  και  $D_{B+})$  ή  $(D_{A+}$  και  $T_{B+})$  ανάλογα με τη φορά του  $I_o$ . Κατά τη διάρκεια αυτού του χρονικού διαστήματος το ρεύμα εισόδου  $i_d$  είναι μηδέν. Μια παρόμοια κατάσταση συμβαίνει, όταν και οι δύο κάτω διακόπτες  $T_A$  και  $T_B$  είναι κλειστοί.

Σ' αυτήν τη διάταξη διαμόρφωσης PWM, όταν συμβαίνει μια μετάβαση, η τάση εξόδου αλλάζει μεταξύ των επιπέδων τάσης 0 και  $+V_d$  ή μεταξύ των 0 και  $-V_d$ . Για τον λόγο αυτό, αυτή η μορφή διαμόρφωσης PWM ονομάζεται διαμόρφωση εύρους παλμού με μονοπολική τάση εξόδου, σε αντίθεση με τη διάταξη PWM με διπολική τάση εξόδου (μεταξύ  $+V_d$  και  $-V_d$ ) που περιγράφε προηγουμένως. Η διάταξη αυτή έχει το πλεονέκτημα του διπλασιασμού της συχνότητας μετάβασης όσον αφορά τις αρμονικές εξόδου, σε σύγκριση με τη διάταξη διπολικής μετάβασης τάσης. Επίσης, τα άλματα της τάσης εξόδου σε κάθε μετάβαση μειώνονται σε  $V_d$  από  $2V_d$  στην προηγούμενη διάταξη.

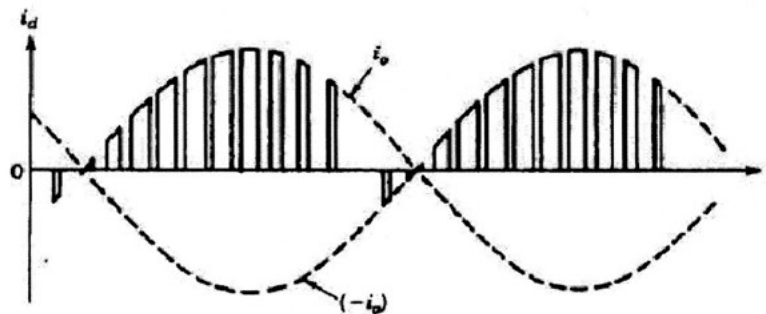
Το πλεονέκτημα του "ουσιαστικού" διπλασιασμού της συχνότητας μετάβασης εμφανίζεται στο φάσμα της τάσης εξόδου, όπου οι χαμηλότερες αρμονικές (στο εξιδανικευμένο κύκλωμα) εμφανίζονται ως πλευρικές ζώνες σε συχνότητα διπλάσια της θεμελιώδους. Αυτό είναι εύκολο να γίνει κατανοητό σ' ένα μονοφασικό αντιστροφέα, αν επιλεγεί άρτιος συντελεστής διαμόρφωσης συχνότητας  $m_f$  (ο  $m_f$  πρέπει να είναι περιττός στη διαμόρφωση PWM με διπολική τάση εξόδου). Οι κυματομορφές της τάσης  $U_{an}$  και  $V_{BN}$  μετατοπίζονται κατά  $180^\circ$  από τη θεμελιώδη συχνότητα  $f_i$ , η μία σε σχέση με την άλλη. Επομένως, οι αρμονικοί όροι στη συχνότητα μετάβασης στις  $V_{AN}$  και  $V_{BN}$  έχουν την ίδια φάση. Αυτό έχει ως



αποτέλεσμα την απαλοιφή του αρμονικού όρου στη συχνότητα μετάβασης στην τάση εξόδου  $V_0 = V_{AN} - V_{BN}$ . Επίσης, εξαλείφονται οι πλευρικές ζώνες των αρμονικών της συχνότητας μετάβασης. Κατά παρόμοιο τρόπο, εξαλείφεται η άλλη κύρια αρμονική με συχνότητα διπλάσια της θεμελιώδους, ενώ οι πλευρικές ζώνες της παραμένουν.

### 5.6.1 Λειτουργία τετραγωνικής κυματομορφής.[18]

Ο αντιστροφέας με πλήρη γέφυρα μπορεί επίσης να λειτουργήσει ως αντιστροφέας με τετραγωνική κυματομορφή. Και οι δύο τρόποι διαμόρφωση PWM που εξετάστηκαν προηγουμένως, εκφυλίζονται στον ίδιο τρόπο λειτουργίας τετραγωνικής κυματομορφής, όπου οι διακόπτες ( $T_{A+}$ ,  $T_B$ ) και ( $T_{A-}$ ,  $T_{B+}$ ) λειτουργούν ως δύο ζεύγη με σχετική διάρκεια αγωγής 0,5.



Όπως συμβαίνει στον τρόπο λειτουργίας τετραγωνικής κυματομορφής, το πλάτος της τάσης εξόδου, που δίνεται παρακάτω, ρυθμίζεται με έλεγχο της dc τάσης εισόδου

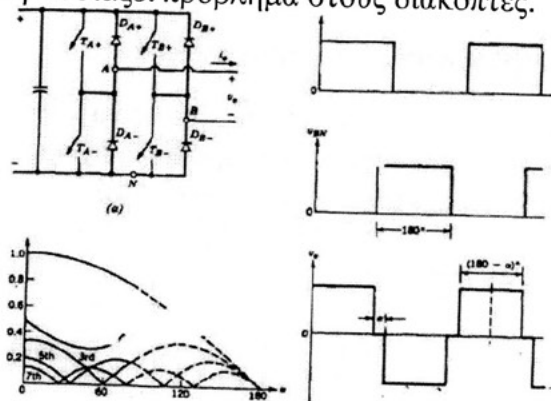
### 5.6.2 Έλεγχος της εξόδου με απαλοιφή της τάσης.[18]

Αυτή η μορφή ελέγχου είναι εφικτή μόνο σε κύκλωμα μονοφασικού αντιστροφέα με πλήρη γέφυρα. Βασίζεται στο συνδυασμό της μετάβασης τετραγωνικής κυματομορφής και της διαμόρφωσης PWM με μονοπολική τάση εξόδου. Στο κύκλωμα, οι διακόπτες στα δυο σκέλη του αντιστροφέα ελέγχονται ξεχωριστά (όπως στη διαμόρφωση PWM με μονοπολική τάση εξόδου), αλλά όλοι οι διακόπτες έχουν σχετική διάρκεια αγωγής 0.5, όπως στον έλεγχο τετραγωνικής κυματομορφής. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τις κυματομορφές που φαίνονται στο για τις  $V_{AN}$  και  $V_{BN}$  όπου η γωνία επικάλυψης των κυματομορφών  $\alpha$  μπορεί να ελέγχεται. Κατά τη διάρκεια αυτού του χρονικού διαστήματος επικάλυψης, η τάση εξόδου είναι μηδενική, επειδή είτε οι δύο επάνω είτε οι δύο κάτω διακόπτες είναι κλειστοί. Με  $\alpha=0$  η κυματομορφή εξόδου είναι ίδια με αυτήν ενός αντιστροφέα με τετραγωνική κυματομορφή και μέγιστο πλάτος θεμελιώδους συνιστώσας εξόδου. Όπως φαίνεται, είναι ευκολότερο να βρεθούν οι όροι της θεμελιώδους και των αρμονικών συχνοτήτων της τάσης εξόδου ως συνάρτηση της  $\beta = 90^\circ - \alpha/2$ : όπου  $\beta = 90^\circ - \alpha/2$  και  $h =$  περιττός ακέραιος.

Στο φαίνεται οι μεταβολές της θεμελιώδους συνιστώσας και των αρμονικών τάσεων ως συνάρτηση της γωνίας  $\alpha$ . Αυτές είναι κανονικοποιημένες σε σχέση με τη θεμελιώδη συνιστώσα της λειτουργία με τετραγωνική κυματομορφή ( $\alpha=0$ ). Επίσης σχεδιάζεται, ως συνάρτηση της γωνίας,  $\alpha$  η ολική αρμονική παραμόρφωση (THD), η οποία είναι ο λόγος της rms τιμής της αρμονικής παραμόρφωσης προς την rms τιμή της θεμελιώδους συνιστώσας. Λόγω μεγάλης παραμόρφωσης, για μεγάλες τιμές της  $\alpha$  οι καμπύλες σημειώνονται με διακεκομμένες γραμμές.

5.6.3 Αξιοποίηση διακοπών σε αντιστροφής με πλήρη γέφυρα.[18]

Όπως σ' έναν αντιστροφέα με μισή γέφυρα, αν στην έξοδο ενός αντιστροφέα με πλήρη γέφυρα χρησιμοποιείται ένας μετασχηματιστής, η αυτεπαγωγή διαρροής του μετασχηματιστή δεν παρουσιάζει πρόβλημα στους διακόπτες.



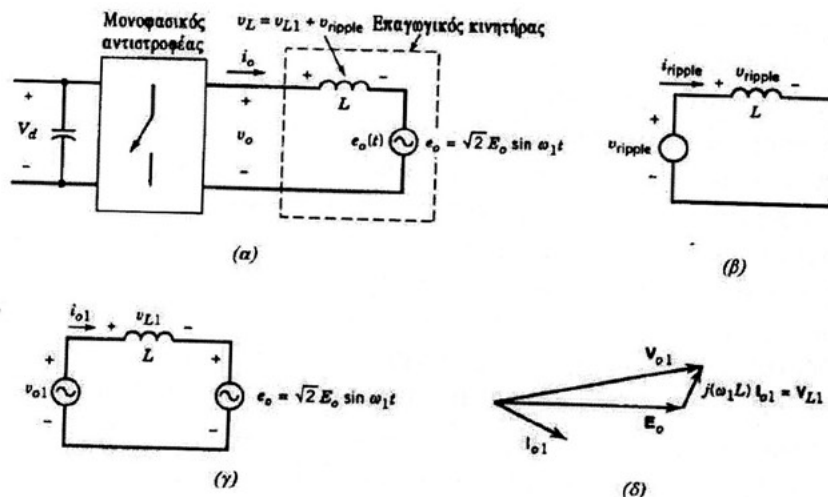
Σχημα 23

Σχημα23 Έλεγχος με απαλοιφή τάσης μονοφασικού αντιστροφέα με πλήρη γέφυρα: (α) κύκλωμα ισχύος, (β) κυματομορφές, (γ) κανονικοποιημενη θεμελιώδης και αρμονική τάση εξόδου και ολική αρμονική παραμόρφωση ως συνάρτηση της γωνίας α.

Ανεξάρτητα από το είδος ελέγχου και τη διάταξη μετάβασης που χρησιμοποιείται, οι μέγιστες προδιαγραφές τάσης και ρεύματος των διακοπών που απαιτούνται σ' έναν αντιστροφέα με πλήρη γέφυρα είναι  $V_T = V_d$  και  $I_t = I_o \text{ peak}$

5.6.4 Κυμάτωση στην έξοδο του μονοφασικού αντιστροφέα.[18]

Η κυμάτωση σε μια επαναλαμβανόμενη κυματομορφή αναφέρεται στη διαφορά μεταξύ των στιγμιαίων τιμών της κυματομορφής και της θεμελιώδους συνιστώσας της. Φαίνεται ένας μονοφασικός αντιστροφέας διακοπτικού τύπου, θεωρείται ότι τροφοδοτεί έναν επαγωγικό κινητήρα, ο οποίος φαίνεται με ένα απλοποιημένο ισοδύναμο κύκλωμα με μια ΑΗΔ (αντιηλεκτρεγερτική δύναμη)  $e_o$ . Εφόσον η  $e_o(t)$  είναι ημιτονοειδής, μόνο οι θεμελιώδεις συνιστώσες της τάσης και του ρεύματος εξόδου του αντιστροφέα είναι υπεύθυνες για τη μεταφορά πραγματικής ισχύος στο φορτίο.



Σχήμα 24

Σχήμα 24: Μονοφασικός αντιστροφέας: (α) κύκλωμα, (β) κύκλωμα με συνιστώσα στη θεμελιώδη συχνότητα, (γ) κύκλωμα συνιστώσα στη συχνότητα κυμάτωσης, (δ) διανυσματικό διάγραμμα στη θεμελιώδη συχνότητα.

Μπορούμε να διαχωρίσουμε τη θεμελιώδη συνιστώσα από την κυμάτωση στα  $v_0$  και  $i_0$  εφαρμόζοντας την αρχή της επαλληλίας στο γραμμικό κύκλωμα Έστω  $V_0 = V_{o1} + V_{ripple}$  και  $I_0 = I_{o1} + I_{ripple}$ . Παρουσιάζουν τα κυκλώματα στη θεμελιώδη συχνότητα και στη συχνότητα της κυμάτωσης αντίστοιχα, όπου η συχνότητα κυμάτωσης περιέχει υποσυνιστώσες σε διάφορες αρμονικές συχνότητες. Επομένως, με στρεφόμενα διανύσματα (η θεμελιώδης συνιστώσα χαρακτηρίζεται με το δείκτη 1), έχουμε:

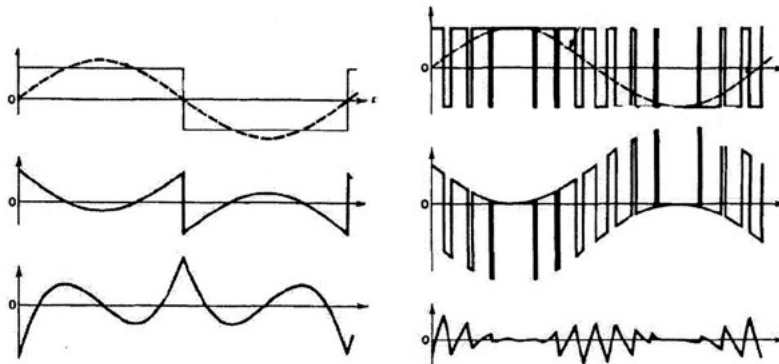
$$V_{o1} = E_0 + V_{Li} = E_0 + j\omega_1 L I_{o1}$$

Εφόσον ισχύει εδώ η αρχή της επαλληλίας, όλη η κυμάτωση στη  $v_0$  αναπτύσσεται στα άκρα της  $L$ , όπου

$$V_{ripple(t)} = V_0 - V_{o1}$$

όπου  $\zeta$  είναι η μεταβλητή και  $k$  είναι μια σταθερά ολοκλήρωσης.

Με μια κατάλληλα επιλεγμένη αρχή του χρόνου  $t=0$ , η σταθερά  $k$  θα είναι μηδέν. Επομένως, δείχνουν ότι η κυμάτωση του ρεύματος είναι ανεξάρτητη της ισχύος που μεταφέρεται στο φορτίο.



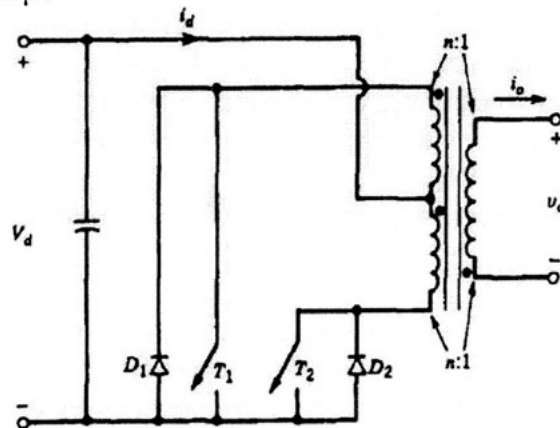
Σχήμα 24

Για παράδειγμα, στο σχήμα φαίνεται το ρεύμα κυμάτωσης στην έξοδο αντιστροφέα με τετραγωνική κυματομορφή. Στο το ρεύμα κυμάτωσης σε μια διαμόρφωση PWM με διπολική τάση εξόδου. Στις παραστάσεις οι θεμελιώδεις συνιστώσες των τάσεων εξόδου του αντιστροφέα διατηρούνται ίσες στο πλάτος (αυτό απαιτεί υψηλότερη τιμή της  $V_d$  στον αντιστροφέα με διαμόρφωση PWM). Ο αντιστροφέας με διαμόρφωση PWM έχει ως αποτέλεσμα ένα ρεύμα κυμάτωσης με σημαντικά μικρότερο πλάτος σε σύγκριση με τον αντιστροφέα με τετραγωνική κυματομορφή. Αυτό δείχνει το πλεονέκτημα της ώθησης των αρμονικών της τάσης εξόδου του αντιστροφέα σε όσο το δυνατό πιο υψηλές συχνότητες, μειώνοντας έτσι τις απώλειες στο φορτίο με μείωση των αρμονικών του ρεύματος εξόδου. Αυτό επιτυγχάνεται με τη χρήση υψηλότερων συχνοτήτων μετάβασης του αντιστροφέα, η οποία έχει ως αποτέλεσμα πιο συχνές μεταβάσεις και έτσι μεγαλύτερες απώλειες μετάβασης στον αντιστροφέα. Επομένως, από την άποψη της ολικής ενεργειακής απόδοσης του συστήματος, πρέπει να επιλεγεί μια συμβιβαστική λύση ως προς τη συχνότητα μετάβασης του αντιστροφέα.

#### 5.6.5 Αντιστροφής PUSH – PULL.[18]

Φαίνεται ένα κύκλωμα αντιστροφέα push-pull. Αυτός απαιτεί ένα μετασχηματιστή με μεσαία λήψη στο πρωτεύον. Αρχικά θα υποθεθεί ότι το ρεύμα εξόδου  $i_0$  ρέει συνεχώς. Με την υπόθεση αυτή, όταν ο διακόπτης  $T_1$  είναι κλειστός (και ο  $T_2$  ανοιχτός), ο  $T_1$  θα άγει για ένα θετικό  $i_0$  και η  $D_1$  θα άγει για ένα αρνητικό  $i_0$ . Επομένως, ανεξάρτητα από τη φορά του  $i_0$ ,  $v_0 = V_d/n$ , όπου  $n$  είναι ο λόγος σπειρών του μετασχηματιστή

μεταξύ του μισού πρωτεύοντος και του δευτερεύοντος τυλίγματος. Παρόμοια, όταν ο T2 είναι κλειστός (και ο T1 ανοιχτός),  $v_0 = -V_d/n$ . Ένας αντιστροφείας push-pull μπορεί να λειτουργήσει με διαμόρφωση PWM ή με τετραγωνική κυματομορφή και οι κυματομορφές ταυτίζονται με εκείνες για αντιστροφής με μισή και με πλήρη γέφυρα. Η τάση εξόδου ισούται με



Σχήμα

οδήγησης για τους δύο διακόπτες έχουν κοινή γείωση. Ωστόσο, στον αντιστροφεία push-pull είναι δύσκολο να αποφευχθεί ο dc κορεσμός του μετασχηματιστή.

Το ρεύμα εξόδου, το οποίο είναι το ρεύμα στο δευτερεύον του μετασχηματιστή, είναι ένα αργά μεταβαλλόμενο ρεύμα στη θεμελιώδη συχνότητα της εξόδου και μπορεί να υποθεθεί σταθερό κατά τη διάρκεια του χρονικού διαστήματος μετάβασης. Όταν συμβαίνει μια μετάβαση, το ρεύμα μεταβαίνει από το ένα μισό στο άλλο μισό του πρωτεύοντος τυλίγματος. Αυτό απαιτεί πολύ καλή μαγνητική σύζευξη μεταξύ των δύο αυτών μισών τυλιγμάτων, με σκοπό τη μείωση της ενέργειας που σχετίζεται με την αυτεπαγωγή διαρροής των δύο πρωτεύοντων τυλιγμάτων. Η ενέργεια αυτή θα καταναλωθεί στους διακόπτες ή σε κυκλώματα snobbier που χρησιμοποιούνται για την προστασία των διακοπών. Αυτό είναι ένα γενικό φαινόμενο που σχετίζεται με όλους τους μετατροπείς (ή αντιστροφής) με απομόνωση, όπου το ρεύμα σε ένα από τα τυλίγματα εξαναγκάζεται σε μηδενισμό με κάθε μετάβαση. Το φαινόμενο αυτό είναι πολύ σημαντικό στη σχεδίαση τέτοιων μετατροπέων.

Σ' έναν αντιστροφεία push-pull με διαμόρφωση PWM για την παραγωγή ημιτονοειδούς εξόδου (αντίθετα με εκείνους που χρησιμοποιούνται σε dc τροφοδοτικά διακοπτικού τύπου), ο μετασχηματιστής πρέπει να είναι σχεδιασμένος για τη θεμελιώδη συχνότητα εξόδου. Το αριθμός των σπειρών του θα είναι για το λόγω αυτό υψηλός σε σύγκριση με ένα μετασχηματιστή σχεδιασμένο για λειτουργία στη συχνότητα μετάβασης σε ένα dc τροφοδοτικό διακοπτικού τύπου. Αυτό θα έχει ως αποτέλεσμα μια υψηλή αυτεπαγωγή διαρροής του μετασχηματιστή, η οποία είναι ανάλογη προς το τετράγωνο του αριθμού των σπειρών, με την προϋπόθεση ότι όλες οι άλλες διαστάσεις διατηρούνται σταθερές. Αυτό καθιστά δύσκολη τη λειτουργία ενός αντιστροφεία push-pull με ημιτονοειδή διαμόρφωση PWM σε συχνότητες μετάβασης υψηλότερες του 1 kHz περίπου.

### 5.6.6 ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗ ΔΙΑΚΟΠΤΩΝ ΣΕ ΜΟΝΟΦΑΣΙΚΟΥΣ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΗΣ.[18]

Εφόσον σκοπός αυτής της ενότητας είναι η σύγκριση της αξιοποίησης των διακοπών σε διάφορους μονοφασικούς αντιστροφής, οι συνθήκες των κυκλωμάτων εξιδανικεύονται. Θα υποθεθεί ότι  $V_{dmax}$  είναι η υψηλότερη τιμή της τάσης εισόδου, η οποία καθορίζει τους περιορισμούς τάσης των διακοπών. Στη λειτουργία με διαμόρφωση PWM η είσοδος παραμένει σταθερή ίση με  $V_{dmax}$ . Στη λειτουργία



αντιστροφής με τετραγωνική κυματομορφή, η τάση εισόδου μειώνεται κάτω από την τιμή  $V_{dmax}$ , ώστε να μειωθεί η μέγιστη τάση εξόδου. Ανεξάρτητα από τον τρόπο λειτουργίας, με διαμόρφωση PWM ή με τετραγωνική κυματομορφή, υποτίθεται ότι το φορτίο εξόδου έχει επαρκή αυτεπαγωγή, ώστε το ρεύμα εξόδου να είναι ένα καθαρά ημιτονοειδές ρεύμα (πραγματικά εξιδανικευμένη συνθήκη για έξοδο τετραγωνικής κυματομορφής) με rms τιμή  $I_{omax}$ , όταν το φορτίο είναι μέγιστο.

Αν το ρεύμα εξόδου υποτεθεί καθαρά ημιτονοειδές, η rms έξοδος του αντιστροφέα σε volt-ampere στη θεμελιώδη συχνότητα ισούται με  $V_{0i} I_{0max}$  στη μέγιστη προδιαγεγραμμένη έξοδο, όπου ο δείκτης "1" σημαίνει τη θεμελιώδη συνιστώσα της εξόδου του αντιστροφέα. Με μέγιστες τιμές τάσης και ρεύματος ενός διακόπτη  $V_T$  και  $I_T$  αντίστοιχα, η συνδυασμένη αξιοποίηση όλων των διακοπών του αντιστροφέα μπορεί να οριστεί ως αρχικά η σύγκριση της αξιοποίησης των διακοπών στους διάφορους μονοφασικούς αντιστροφής θα γίνει για τη λειτουργία με τετραγωνική κυματομορφή στη μέγιστη προδιαγεγραμμένη έξοδο. (Η μέγιστη αξιοποίηση των διακοπών γίνεται όταν  $V_d = V_{dmax}$ .) Στην πράξη ο λόγος αξιοποίησης των διακοπών θα είναι πολύ μικρότερος από 0.16 για τους παρακάτω λόγους: (1) οι περιορισμοί τάσης και ρεύματος των διακοπών επιλέγονται συντηρητικά, ώστε να παρέχονται όρια ασφαλείας, (2) στον καθορισμό των περιορισμών ρεύματος των διακοπών ενός αντιστροφέα με διαμόρφωση PWM θα πρέπει να ληφθούν υπόψη οι μεταβολές στη διαθέσιμη dc τάση εισόδου και (3) η κυμάτωση στο ρεύμα εξόδου θα επηρεάζει τις προδιαγραφές ρεύματος των διακοπών. Επίσης, μπορεί να απαιτείται από τον αντιστροφέα μια βραχυχρόνια υπερφόρτιση. Έτσι, ο λόγος αξιοποίησης των διακοπών θα είναι στην πράξη σημαντικά μικρότερος από το 0.16 που υπολογίστηκε. Στη χαμηλότερη έξοδο σε volt-amperes σε σύγκριση με τη μέγιστη προδιαγεγραμμένη έξοδο, η αξιοποίηση των διακοπών μειώνεται γραμμικά. Πρέπει να σημειωθεί ότι χρησιμοποιώντας μετάβαση με διαμόρφωση PWM με  $m_a < 1.0$ , ο λόγος αυτός θα μειώνεται κατά έναν παράγοντα  $(\pi/4)$ πια σε σχέση με τη μετάβαση με τετραγωνική κυματομορφή: Επομένως, ο θεωρητικός μέγιστος λόγος αξιοποίησης των διακοπών ενός αντιστροφέα με διαμόρφωση PWM είναι μόνο 0.125, για  $m_a$  ίσο με 1, συγκρινόμενος με το 0.6 του αντιστροφέα με τετραγωνική] κυματομορφή.

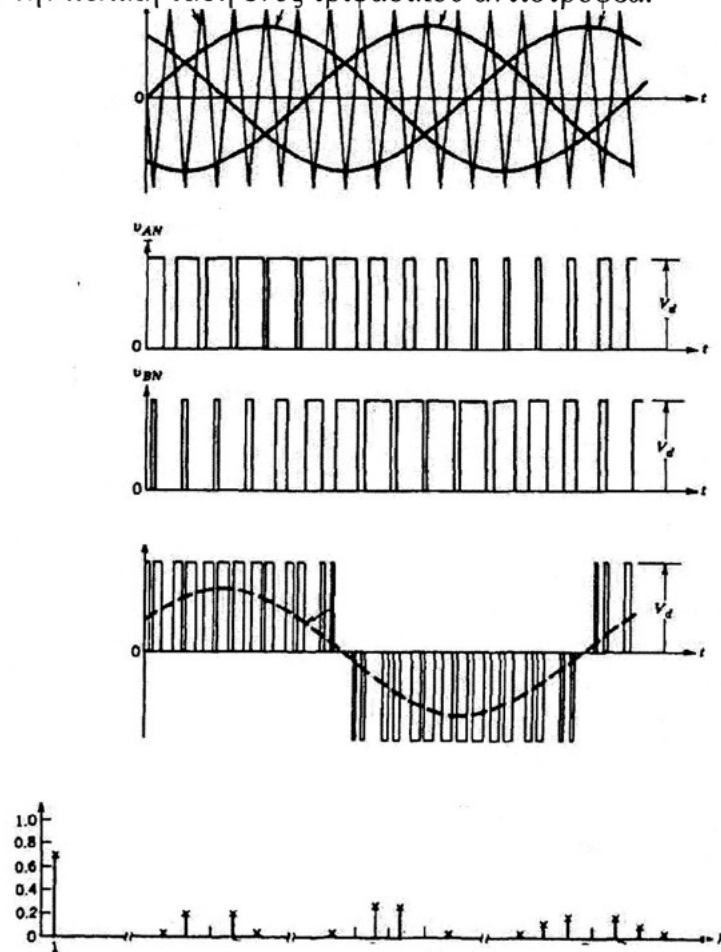
#### 5.6.7 ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ PWM ΣΕ ΤΡΙΦΑΣΙΚΟΥΣ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΗΣ ΠΗΓΗΣ ΤΑΣΗΣ.[18]

Παρόμοια με τους μονοφασικούς αντιστροφής, ο αντικειμενικός σκοπός στους τριφασικούς αναστροφείς με διαμόρφωση PWM είναι η μορφοποίηση και ο έλεγχος των τριφασικών τάσεων εξόδου κατά πλάτος και συχνότητα, με μια ουσιαστικά σταθερή τάση εισόδου  $V_d$  Για τη επίτευξη συμμετρικών τριφασικών τάσεων εξόδου σ' έναν τριφασικό αντιστροφέα με διαμόρφωση PWM, συγκρίνεται η ίδια τριγωνική κυματομορφή τάσης με τρεις ημιτονοειδείς τάσεις ελέγχου, οι οποίες είναι κατά  $120^\circ$  εκτός φάσης, όπως φαίνεται στο (το οποίο σχεδιάζεται για  $m_f=15$ ).

Όπως προκύπτει στις τάσεις εξόδου  $V_{AN}$  και  $V_{BN}$  οποίες μετρούνται σε σχέση με τον αγωγό που φέρει την αρνητική dc τάση, υπάρχει η ίδια ακριβώς dc συνιστώσα. Οι dc συνιστώσες απαλείφονται στις πολικές τάσεις, για παράδειγμα στη  $V_{AN}$  που φαίνεται. Αυτό είναι παρόμοιο με αυτό που συμβαίνει σ' έναν μονοφασικό αντιστροφέα με πλήρη γέφυρα που λειτουργεί με διαμόρφωση PWM.

Στους τριφασικούς αντιστροφής, ενδιαφέρουν μόνο οι αρμονικές των πολικών τάσεων. Οι αρμονικές εξόδου οποιουδήποτε σκέλους, για παράδειγμα της  $v_{an}$  είναι ίδιες με τις αρμονικές της  $V_{AN}$  όπου εμφανίζονται μόνο οι περιττές αρμονικές πλευρικές ζώνες, με κέντρο τον  $M_f$  και τα πολλαπλάσια του, με την προϋπόθεση ότι ο

$M_f$  είναι περιττός. Θεωρώντας μόνο την αρμονική στο  $M_f$  (το ίδιο ισχύει και στα περιττά πολλαπλάσιά του), η διαφορά φάσης μεταξύ της αρμονικής στο  $M_f$  των  $v$  αν και  $V_{BN}$  είναι  $(120mf)$ . Αυτή η διαφορά φάσης θα ισοδυναμεί με μηδέν (ένα πολλαπλάσιο των  $360^\circ$ ), αν ο  $M_f$  είναι περιττός και πολλαπλάσιος του. Κατά συνέπεια, η αρμονική στο  $M_f$  δεν εμφανίζεται στην πολική τάση  $V_{AB}$ . Το ίδιο ισχύει για τις αρμονικές στα περιττά πολλαπλάσια του  $M_f$  αν ο  $M_f$  επιλέγεται περιττό πολλαπλάσιο του (όπου ο λόγος επιλογής περιττού πολλαπλάσιου του 3 για τον  $M_f$  είναι η διατήρηση του  $M_f$  περιττού και, έτσι, η εξάλειψη των άρτιων αρμονικών). Έτσι, κάποιες από τις κύριες αρμονικές στον αναστροφέα ενός σκέλους μπορούν να εξαλειφθούν από την πολική τάση ενός τριφασικού αντιστροφέα.



### 5.7 Γραμμική διαμόρφωση ( $ma < 1.0$ )

Στη γραμμική περιοχή ( $ma < 1.0$ ) η θεμελιώδης συνιστώσα της τάση εξόδου μεταβάλλεται γραμμικά με το λόγο διαμόρφωσης πλάτους  $ma$ . Από το πλάτος της θεμελιώδους συνιστώσας  $s'$  ένα από τα σκέλη του αντιστροφέα είναι αρμονικοί όροι των πολικών τάσεων εξόδου μπορούν να υπολογιστούν με παρόμοιο τρόπο, αναγνωρίζοντας ότι κάποιες από τις αρμονικές στις πολικές τάσεις καταστέλλονται.

### 5.8 Υπερδιαμόρφωση ( $ma < 1.0$ ).[18]

Στην υπερδιαμόρφωση PWM το πλάτος των τάσεων ελέγχου επιτρέπεται να υπερβαίνει το πλάτος της τριγωνικής κυματομορφής. Σ' αυτή τη μορφή λειτουργίας, σε αντίθεση με τη λειτουργία στη γραμμική περιοχή, το πλάτος της τάσης της θεμελιώδους συνιστώσας δεν αυξάνεται ανάλογα με την τιμή του  $ma$ . Αυτό φαίνεται, όπου σχεδιάζεται η rms τιμή της θεμελιώδους συνιστώσας της πολικής τάσης  $V_{LI}$  ως

συνάρτηση του  $ma$ . Όπως και στη μονοφασική διαμόρφωση PWM, για αρκετά μεγάλες τιμές του  $ma$ , η διαμόρφωση PWM εκφυλίζεται σε κυματομορφή αντιστροφέα με τετραγωνική κυματομορφή. Αυτό οδηγεί στη μέγιστη τιμή της  $V_{LL1}$  που ισούται με  $0.78 V_d$ , όπως εξηγείται στην επόμενη ενότητα.

### 5.9 ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΜΕ ΤΕΤΡΑΓΩΝΙΚΗ ΚΥΜΑΤΟΜΟΡΦΗ ΣΕ ΤΡΙΦΑΣΙΚΟΥ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΗΣ.[18]

Αν η dc τάση εισόδου  $V_d$  είναι ελεγχόμενη, ο αντιστροφέας μπορεί να λειτουργήσει με τετραγωνική κυματομορφή. Επίσης, για επαρκώς μεγάλες τιμές του  $ma$ , η διαμόρφωση PWM εκφυλίζεται σε λειτουργία τετραγωνικής κυματομορφής και οι κυματομορφές των τάσεων φαίνονται. Εδώ, κάθε διακόπτης είναι κλειστός για  $180^\circ$  (δηλαδή, η σχετική διάρκεια του παλμού είναι 50%). Επομένως, σε κάθε χρονική στιγμή είναι κλειστοί τρεις διακόπτες.

Στη λειτουργία με τετραγωνική κυματομορφή ο αντιστροφέας δεν μπορεί να ελέγξει το πλάτος των ac τάσεων εξόδου από μόνος του. Για τον λόγο αυτό, η dc τάση εισόδου πρέπει να ελέγχεται, ώστε να ελέγχεται το πλάτος στην έξοδο. Εδώ, η θεμελιώδης συνιστώσα της πολικής τάσης (rms) στην έξοδο μπορεί να βρεθεί από την Εξ. 1-13, για το βασικό αντιστροφέα ενός σκέλους που λειτουργεί με τετραγωνική κυματομορφή Η κυματομορφή της πολικής τάσης εξόδου δεν εξαρτάται από το φορτίο και περιέχει αρμονικές  $(6n + 1, \eta=1,2,\dots)$ , τα πλάτη των οποίων μειώνονται αντιστρόφως ανάλογα προς την αρμονική τους τάξη. Πρέπει να σημειωθεί ότι δεν είναι δυνατό να ελεγχθεί το πλάτος εξόδου σ' έναν τριφασικό αντιστροφέα με τετραγωνική κυματομορφή με απαλοιφή τάσης, όπως περιγράφεται για τους μονοφασικούς αντιστροφές.

### 5.10 Αξιοποίηση Διακοπών σε Τριφασικούς Αντιστροφές.[18]

Θα θεωρηθεί ότι  $V_{dmax}$  είναι η μέγιστη τάση εισόδου που παραμένει σταθερή κατά την διαμόρφωση PWM και μειώνεται κάτω από το επίπεδο αυτό για να ελέγξει το πλάτος της τάσης εξόδου στη λειτουργία με τετραγωνική κυματομορφή. Θα θεωρηθεί επίσης ότι το φορτίο έχει επαρκή αυτεπαγωγή, ώστε να προκαλεί ένα καθαρά ημιτονοειδές ρεύμα εξόδου με rms τιμή  $I_{0,max}$  όταν το φορτίο είναι μέγιστο (τόσο στην διαμόρφωση PWM όσο και στη λειτουργία με τετραγωνική κυματομορφή). Επομένως, κάθε διακόπτης θα έχει τους ακόλουθους περιορισμούς τάσης και ρεύματος αντίστοιχα:

Στη λειτουργία με τετραγωνική κυματομορφή ο λόγος αυτός είναι  $1/2\pi \sim 0.16$ , σε σύγκριση με ένα μέγιστο 0.125 για μια γραμμική περιοχή διαμόρφωσης PWM με  $ma=1.0$ .

Παρατηρείται ότι ο μέγιστος λόγος αξιοποίησης των διακοπών είναι ο ίδιος σ' έναν τριφασικό αντιστροφέα τριών σκελών και σ' ένα μονοφασικό αντιστροφέα. Με άλλα λόγια, χρησιμοποιώντας διακόπτες με τις ίδιες προδιαγραφές, ένας τριφασικός αντιστροφέας με 50% αύξηση στο πλήθος των διακοπών οδηγεί σε μια 50% αύξηση της εξόδου σε volt-ampere, σε σύγκριση μ' έναν μονοφασικό αντιστροφέα.

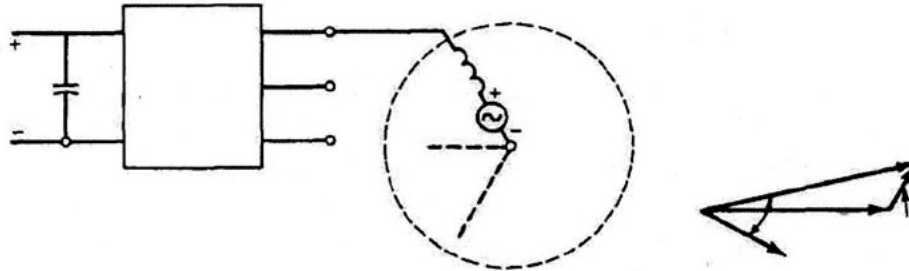
### 5.11 Κυμάτωση Στην Έξοδο Του Αντιστροφέα .[18]

Δίνεται το λειτουργικό διάγραμμα του τριφασικού αντιστροφέα πηγής τάσης διακοπτικού τύπου με τρία σκέλη, θεωρείται ότι τροφοδοτεί έναν τριφασικό ac κινητήρα. Κάθε φάση του φορτίου φαίνεται με το απλοποιημένο ισοδύναμο κύκλωμα

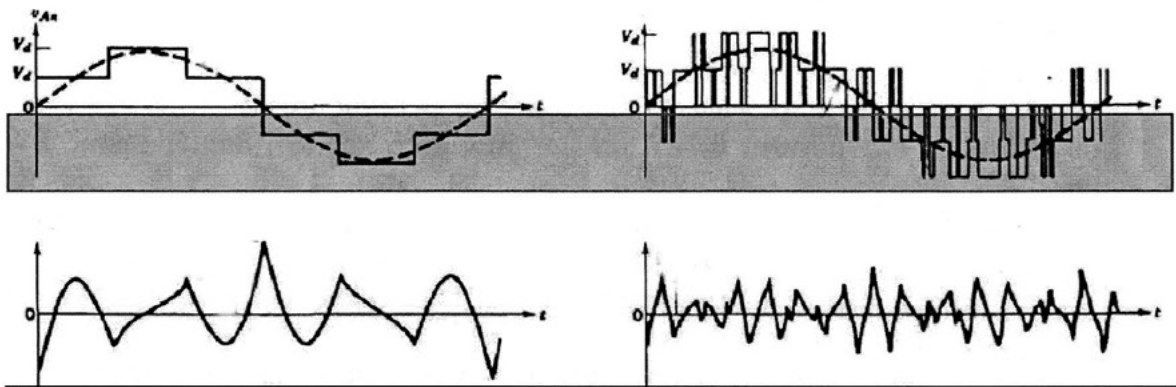
της με αναφορά με το ουδέτερο σημείο του φορτίου "η". Οι επαγόμενες αντί ΗΕΔ  $e_A(t)$ ,  $e_B(t)$  και  $e_C(t)$  θεωρούνται ημιτονοειδείς.

Σε συμμετρικές συνθήκες λειτουργίας είναι δυνατό να εκφραστούν οι φασικές τάσεις εξόδου του αντιστροφέα  $v_{an}$  (με αναφορά το ουδέτερο σημείο του φορτίου "η") με την τάση εξόδου του αντιστροφέα με αναφορά τον αγωγό που φέρει την αρνητική dc τάση N

$$V_{Kn} = V_{Kn} \cdot V_{KnN} \quad (k = A, B, C)$$



Παρόμοιες εξισώσεις μπορούν να γραφούν και για τις φασικές τάσεις των φάσεων B και C.. Όπως και στην Ενότητα 5.4.6 για την κυμάτωση στην έξοδο του μονοφασικού αντιστροφέα, μόνο η θεμελιώδης συνιστώσα της φασικής τάσης  $V_{AN}$  και του ρεύματος εξόδου  $I_{A1}$  συμβάλλουν στην πραγματική ισχύ, εφόσον η ΑΗΕΔ  $e_A(t)$  θεωρείται ημιτονοειδής και η αντίσταση του φορτίου αγνοείται. Επομένως, σ' ένα διανυσματικό διάγραμμα, ισχύει  $V_{An1} = E_a + j\omega_1 L I_{A1}$ . Χρησιμοποιώντας την αρχή της επαλληλίας, όλη η κυμάτωση της  $U_{An}$  εμφανίζεται στα άκρα της αυτεπαγωγής L του φορτίου. Φαίνεται η κυματομορφή για τη φασική τάση του φορτίου  $V_{An}$  για τις λειτουργίες με τετραγωνική κυματομορφή και με διαμόρφωση PWM αντίστοιχα. Και οι δύο αντιστροφές έχουν τα ίδια πλάτη θεμελιώδους συνιστώσας  $V_{AN}$  πράγμα το οποίο απαιτεί υψηλότερη  $V_d$  κατά τη λειτουργία με διαμόρφωση PWM. Η κυμάτωση τάσης  $V_{ridd1c} (=U_{An} - U_{An})$  είναι η κυμάτωση της φασικής τάσης, θεωρώντας ίδια φορτία στις δύο αυτές περιπτώσεις, η κυμάτωση του ρεύματος εξόδου. Η κυμάτωση αυτή του ρεύματος είναι ανεξάρτητη της ισχύος που μεταφέρεται, δηλαδή, η κυμάτωση του ρεύματος θα είναι η ίδια, εφόσον, για μια δεδομένη αυτεπαγωγή φορτίου L, η κυμάτωση στην τάση εξόδου του αντιστροφέα παραμένει σταθερή κατά πλάτος και συχνότητα. Από τη σύγκριση αυτή διαπιστώνεται ότι για μεγάλες τιμές του  $M_f$  η κυμάτωση του ρεύματος στον αντιστροφέα με διαμόρφωση PWM θα είναι σημαντικά μικρότερη από ότι είναι στον αντιστροφέα με τετραγωνική κυματομορφή.



### 5.12 Ρεύμα $I_d$ DC-Πλευράς .[18]

Όπως και κατά την αντιμετώπιση του μονοφασικού αντιστροφέα, στη συνέχεια εξετάζονται οι κυματομορφές ρεύματος και τάσης που σχετίζονται με τη dc-πλευρά

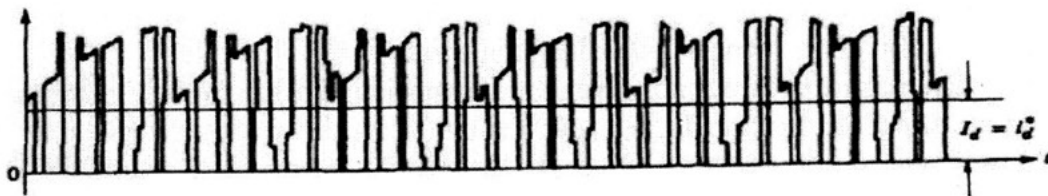


ενός τριφασικού αντιστροφέα με διαμόρφωση PWM. Η τάση εισόδου  $V_a$  θεωρείται dc χωρίς κυμάτωση. Αν θεωρηθεί ότι η συχνότητα μετάβασης προσεγγίζει το άπειρο, τότε, όπως, μπορεί να εισαχθεί στην ac- πλευρά ένα εικονικό φίλτρο με αμελητέα αποθήκευση ενέργειας και το ρεύμα στην έξοδο του αντιστροφέα θα είναι ημιτονοειδές χωρίς κυμάτωση. Εξαιτίας της υπόθεσης μη αποθήκευσης ενέργειας στο εικονικό φίλτρο της ac- πλευράς, η στιγμιαία ac ισχύς εξόδου μπορεί να εκφραστεί ως συνάρτηση των θεμελιωδών συνιστωσών των τάσεων και των ρευμάτων εξόδου. Με τον ίδιο τρόπο στη dc-πλευρά μπορεί να θεωρηθεί ένα εικονικό φίλτρο χωρίς αποθήκευση ενέργειας, όπως φαίνεται, οπότε φιλτράρονται οι όροι υψηλής συχνότητας του  $i_d$ . Εξισώνοντας τώρα τη στιγμιαία ισχύ εισόδου με τη στιγμιαία ισχύ εξόδου, βρίσκεται ότι σε συμμετρική μόνιμη κατάσταση ισορροπίας οι ποσότητες των τριών φάσεων είναι μετατοπισμένες κατά  $120^\circ$  μεταξύ τους. Υποθέτοντας ότι  $\phi$  είναι η γωνία φάσης κατά την οποία ένα φασικό ρεύμα καθυστερεί σε σχέση με τη φασική τάση του αντιστροφέα και ότι  $(1.41 \cdot V_0)$  και  $(1.41 \cdot I_0)$  είναι τα πλάτη των φασικών τάσεων και ρευμάτων αντίστοιχα: Από την προηγούμενη ανάλυση φαίνεται ότι το  $i_d^*$  είναι μια dc ποσότητα, αντίθετα με το μονοφασικό αντιστροφέα, όπου το  $i_d^*$  περιείχε έναν όρο με συχνότητα διπλάσια της συχνότητας εξόδου. Ωστόσο, το  $i_d$  αποτελείται από όρους υψηλής συχνότητας μετάβασης, όπως φαίνεται, που υπερτίθενται στο  $i_d^*$ . Αυτοί οι όροι υψηλής συχνότητας, εξαιτίας των υψηλών συχνοτήτων τους, θα έχουν αμελητέα επίδραση στην τάση  $V_d$  του πυκνωτή.

### 5.13 ΑΓΩΓΗ ΔΙΑΚΟΠΤΩΝ ΣΕ ΤΡΙΦΑΣΙΚΟΥΣ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΗΣ .[18]

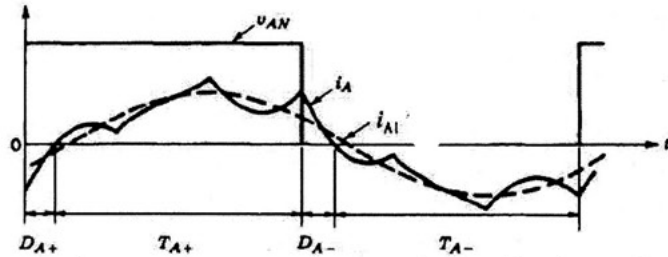
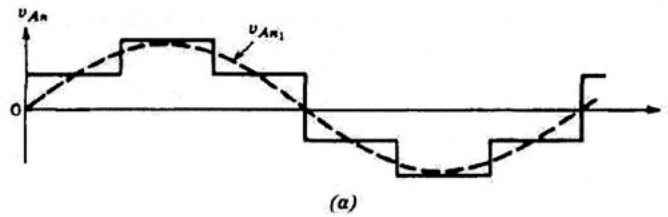
Αποδείχθηκε προηγουμένως ότι η τάση εξόδου δεν εξαρτάται από το φορτίο. Ωστόσο, η διάρκεια της αγωγής του κάθε διακόπτη εξαρτάται από τον συντελεστή ισχύος του φορτίου.

•α



5.11 Λειτουργία Τετραγωνικής Κυματομορφής

Εδώ κάθε διακόπτης είναι κλειστός για  $180^\circ$ . Για να καθοριστεί το χρονικό διάστημα αγωγής του διακόπτη, θεωρείται (για παράδειγμα) ένα φορτίο με γωνία μετατόπισης της θεμελιώδους συχνότητας  $30^\circ$  (καθυστέρηση). Φαίνονται οι κυματομορφές για μια από τις τρεις φάσεις. Φαίνονται οι φασικές τάσεις  $V_{An}$  και  $V_{AN1}$ . Σοδιάζονται η  $V_{an}$

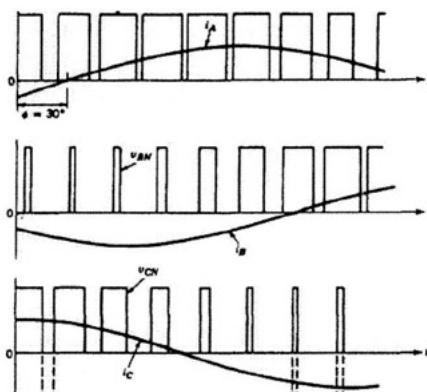


(σε σχέση με τον αγωγό που φέρει την αρνητική dc τάση), το  $I_A$  και η θεμελιώδης συνιστώσα του  $I_{A1}$ . Παρά το ότι οι διακόπτες  $T_{A+}$  και  $T_{A-}$  είναι κλειστοί για  $180^\circ$ , εξαιτίας του συντελεστή ισχύος του φορτίου (καθυστέρηση), τα πραγματικά διαστήματα αγωγής τους είναι μικρότερα από  $180^\circ$ . Είναι εύκολο να γίνει κατανοητό ότι, καθώς ο συντελεστής ισχύος του φορτίου μειώνεται, τα διαστήματα αγωγής των διόδων θα αυξάνουν και τα διαστήματα αγωγής των διακοπών θα μειώνονται. Από την άλλη μεριά, μ' ένα καθαρά ωμικό φορτίο θεωρητικά οι δίοδοι ανάδρασης δεν θα άγουν καθόλου.

#### 5.14 Λειτουργία με διαμόρφωση PWM.[18]

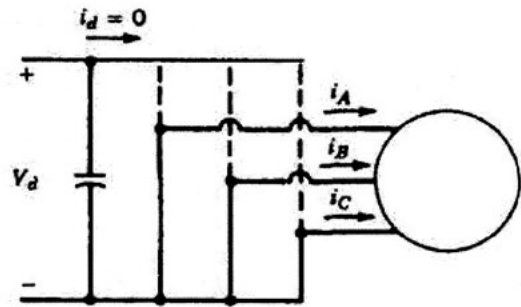
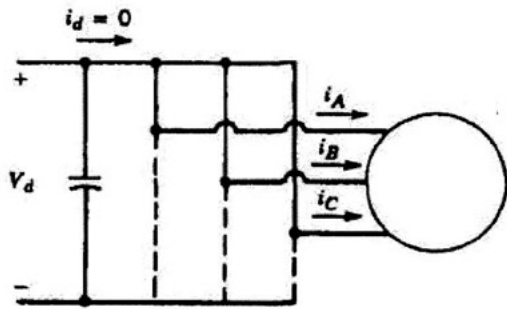
Οι κυματομορφές τάσης και ρεύματος του αντιστροφέα με διαμόρφωση PWM. Εδώ, για παράδειγμα, η γωνία μετατόπισης του φορτίου θεωρείται ίση με  $30^\circ$  (καθυστέρηση). Επίσης, το ρεύμα εξόδου θεωρείται τέλειο ημίτονο. Τρεις φάσεις αγωγού αρνητικής dc τάσης και το φασικό ρεύμα ( $V_A, I_A$  κτλ ) για ένα τέταρτο περίπου του κύκλου της θεμελιώδους κυματομορφής.

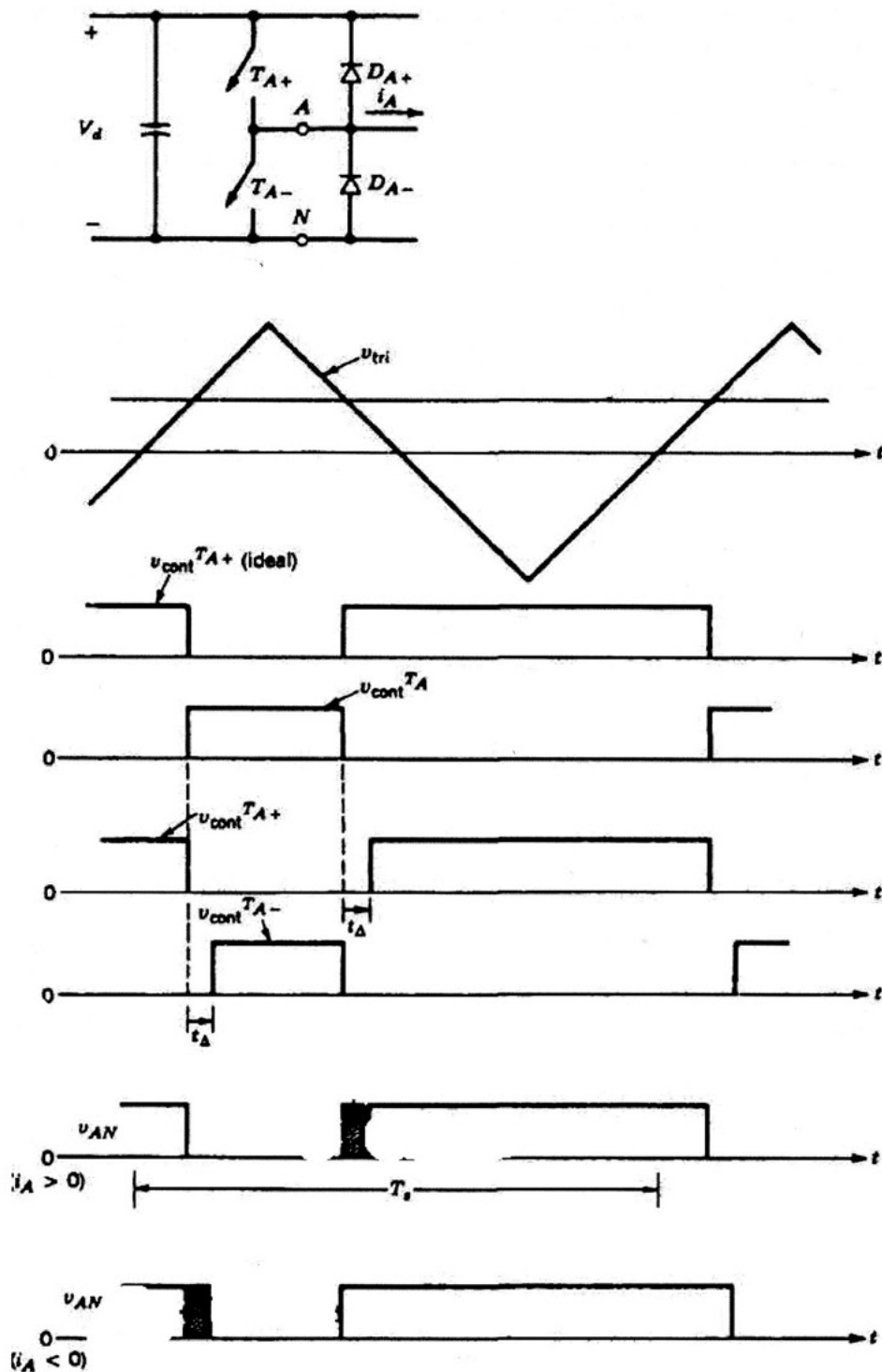
Εξετάζοντας τα στοιχεία που άγουν, παρατηρείται ότι υπάρχουν διαστήματα κατά τα οποία τα ρεύματα φάσης  $I_A, I_B, I_C$  ρέουν μόνο μέσω των στοιχείων που είναι συνδεδεμένα με τον αγωγό που φέρει τη θετική dc τάση (δηλαδή, τρία από τα στοιχεία  $T_{A+}, D_{A+}, T_{B+}, D_{B+}, T_{C+}$  και  $D_{C+}$ ). Αυτό σημαίνει ότι κατά τα διαστήματα αυτά βραχυκυκλώνονται και οι τρεις φάσεις του φορτίου και δεν υπάρχει είσοδος ισχύος από



τον αγωγό της dc τάσης (δηλαδή  $i_d=0$ ), όπως φαίνεται. Παρόμοια, υπάρχουν διαστήματα κατά τα οποία όλα τα στοιχεία που άγουν, συνδέονται στον αγωγό που φέρει την αρνητική dc τάση, όπως φαίνεται στο κύκλωμα. Το πλάτος της τάσης εξόδου ρυθμίζεται με τον έλεγχο της διάρκειας αυτών των χρονικών διαστημάτων βραχυκυκλώσεις. Στη λειτουργία με τετραγωνική κυματομορφή δεν υπάρχουν τέτοια διαστήματα τριφασικής βραχυκύκλωσης. Για τον λόγο αυτό, το πλάτος της τάσης

εξόδου σ' έναν αντιστροφέα που λειτουργεί με τετραγωνική κυματομορφή πρέπει να ρυθμίζεται ελέγχοντας την τάση εισόδου  $V_d$ .





Η περίοδο μετάβασης, το  $V_{control}$  είναι μια σταθερή dc τάση, όπως εξηγήθηκε. Η σύγκριση του με μια τριγωνική κυματομορφή  $v_{tri}$  καθορίζει τις χρονικές στιγμές μετάβασης και τα σήματα ελέγχου (ιδανικά) των διακοπών, θεωρώντας ιδανικούς διακόπτες.

Στην πράξη, εξαιτίας των πεπερασμένων χρόνων μετάβασης που σχετίζονται με οποιοδήποτε είδος διακόπτη, ένας διακόπτης ανοίγει κατά τη χρονική στιγμή μετάβασης που καθορίζεται. Ωστόσο, το κλείσιμο του άλλου διακόπτη στο σκέλος εκείνο του αντιστροφέα καθυστερείτε κατά έναν κενό χρόνο  $t_{\Delta}$  ο οποίος επιλέγεται συντηρητικά, για την αποφυγή της βραχυκυκλώσεως του σκέλους. Αυτός ο κενός χρόνος επιλέγεται να είναι μόλις μερικά  $\mu s$  για γρήγορα διακριτικά στοιχεία, όπως



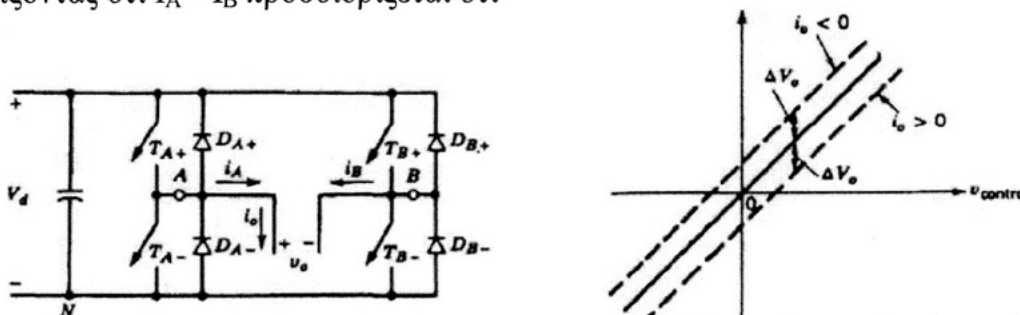
είναι τα Misfits, και μεγαλύτερος για αργά διακριτικά στοιχεία. Τα σήματα ελέγχου των διακοπών για τους δύο διακόπτες με την παρουσία του κενού χρόνου, φαίνονται. Εφόσον κατά τον κενό χρόνο και οι δύο διακόπτες είναι ανοιχτοί, η  $v$  αν κατά αυτό το χρονικό διάστημα εξαρτάται από τη φορά του  $I_A$  όπως φαίνεται για  $I_A > 0$  και για  $I_A < 0$ . Οι ιδανικές κυματομορφές (χωρίς τον κενό χρόνο) σημειώνονται με διακεκομμένη γραμμή. Συγκρίνοντας την ιδανική κυματομορφή της  $v$  αν χωρίς τον κενό χρόνο, με την πραγματική κυματομορφή, με τον κενό χρόνο, η διαφορά μεταξύ της ιδανικής και της πραγματικής τάσης εξόδου είναι

$$v_e = (V_{AN})_{ideal} - (V_{AN})_{actual}$$

Παίρνοντας το μέσο όρο της  $V_e$  στη διάρκεια μιας περιόδου μετάβασης, μπορεί να βρεθεί η μεταβολή (που ορίζεται ως πτώση, αν είναι θετική) της τάσης εξόδου που οφείλεται στον χρόνο  $t_\Delta$

Από την φαίνεται ότι η  $\Delta V_{AN}$  δεν εξαρτάται από το πλάτος του ρεύματος, αλλά η πολικότητά της εξαρτάται από τη φορά του ρεύματος. Επίσης, η  $\Delta V_{AN}$  είναι ανάλογη προς τον κενό χρόνο  $t_\Delta$  και τη συχνότητα μετάβασης  $f_s (=1/T_s)$ , που σημαίνει ότι σε υψηλότερες συχνότητες μετάβασης, πρέπει να χρησιμοποιούνται ταχύτερα διακόπτικα στοιχεία, που επιτρέπουν μικρότερο  $t_\Delta$ .

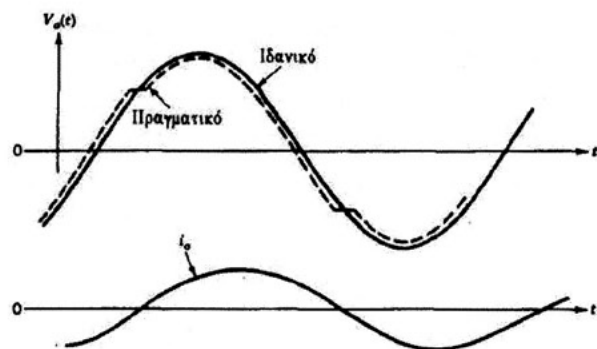
Εφαρμόζοντας την ίδια ανάλυση στο σκέλος B του μονοφασικού αντιστροφέα και γνωρίζοντας ότι  $I_A = -I_B$  προσδιορίζεται ότι



Εφόσον  $v_0 = V_{AN} - V_{BN}$  και  $I_0 = I_{A0}$ , η "στιγμιαία-μέση τιμή" της διαφοράς τάσης δηλαδή η μέση τιμή κατά την περίοδο μετάβασης  $T_s$  της διαφοράς της ιδανικής κυματομορφής από την πραγματική κυματομορφή. Φαίνεται η παράσταση της "στιγμιαίας -μέσης τιμής" της  $V_0$  ως συνάρτηση της  $U_{control}$  με και χωρίς τον κενό χρόνο.

Αν ο μετατροπέας με πλήρη γέφυρα του λειτουργεί με διαμόρφωση PWM, για μια μετατροπή  $dc$  σε  $ac$ , τότε το  $U_{control}$  είναι μια σταθερή  $dc$  τάση στη μόνιμη κατάσταση ισορροπίας. Η παράσταση του είναι χρήσιμη για τον καθορισμό της επίδρασης του κενού χρόνου σε εφαρμογές τέτοιων μετατροπέων για  $dc$  κινητήρια συστήματα.

Για ένα ημιτονοειδές  $U_{control}$  σε μονοφασικό μετατροπέα με διαμόρφωση PWM με πλήρη γέφυρα, η "στιγμιαία-μέση" έξοδος  $V_0(t)$  φαίνεται για ρεύμα φορτίου  $I_0$ , το οποίο θεωρείται ημιτονοειδές και με καθυστέρηση σε σχέση με τη  $V_0(t)$ . Η παραμόρφωση στη  $V_0(t)$  στους μηδενισμούς του ρεύματος προκαλεί στην έξοδο του αντιστροφέα αρμονικές χαμηλής τάξης, όπως τρίτη, πέμπτη, έβδομη κ.ο.κ.. Παρόμοιες παραμορφώσεις συμβαίνουν στις πολικές τάσεις στην έξοδο ενός τριφασικού αντιστροφέα με διαμόρφωση PWM, όπου οι αρμονικές χαμηλής τάξης είναι της τάξης  $6m \pm 1$  ( $m = 1, 2, 3, \dots$ ) της θεμελιώδους συχνότητας.



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

# ΠΕΡΗΓΡΑΦΗ ΕΝΟΣ ΠΡΩΤΟΤΥΠΟΥ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΕΑ ΤΑΣΗΣ ΥΨΗΛΩΝ ΠΡΟΔΙΑΓΡΑΦΩΝ

### 6.1 ΒΑΣΙΚΕΣ ΠΡΟΔΙΑΓΡΑΦΕΣ ΤΟΥ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΕΑ ΤΑΣΗΣ.[17]

Το πρώτο και ιδιαίτερα σημαντικό βήμα στο σχεδιασμό ενός ηλεκτρονικού μετατροπέα ισχύος είναι ο καθορισμός των βασικών κατασκευαστικών και λειτουργικών του προδιαγραφών. Οι προδιαγραφές αυτές καθορίζονται βάσει κάποιων κανονισμών αλλά και βάσει των απαιτήσεων της εκάστοτε εφαρμογής. Στην περίπτωση της παρούσας εφαρμογής, οι βασικότερες κατασκευαστικές και λειτουργικές προδιαγραφές του αντιστροφέα είναι οι παρακάτω:

#### A. Κατασκευαστικές προδιαγραφές

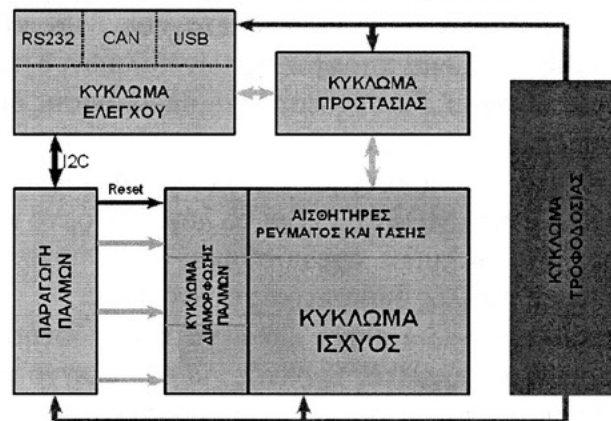
- Αποφασίσθηκε να βασισθεί η κατασκευή στη σύνθεση από εύκολα συναρμολογούμενα τμήματα (modular design). Ο σχεδιασμός αυτός συμβαδίζει με το σκοπό της κατασκευής και δίνει ευελιξία στην ανάπτυξη του συστήματος. Τα βασικά του πλεονέκτημα είναι ότι προσφέρει ευελιξία σε περίπτωση αναβάθμισης των υποσυστημάτων του αντιστροφέα. Επίσης, διευκολύνει την αντικατάσταση τυχόν δυσλειτουργικών τμημάτων. Με βάση την απαίτηση αυτή, η συνολική κατασκευή χωρίζεται σε πέντε βασικά λειτουργικά τμήματα: α) το κύκλωμα ισχύος, β) το κύκλωμα διαμόρφωσης των παλμών, γ) το κύκλωμα παραγωγής των παλμών, δ) το κύκλωμα προστασίας, ε) το κύκλωμα ελέγχου, διασύνδεσης και απεικόνισης δεδομένων.
- Αποτέλεσε βασική απαίτηση ο σχεδιασμός ενός συστήματος, το οποίο να έχει τη δυνατότητα να λειτουργεί με κύκλωμα ισχύος αποτελούμενο είτε από στοιχεία IGBT είτε MOSFET. Για το λόγο αυτό, το κύκλωμα διαμόρφωσης και ενίσχυσης των παλμών σχεδιάσθηκε έτσι ώστε να δίνει τη δυνατότητα λειτουργίας σε υψηλές διακοπτικές συχνότητες.
- Ο αναστροφέας σχεδιάσθηκε ώστε να τροφοδοτήσει τριφασικούς κινητήρες χρησιμοποιώντας σύνθετες τεχνικές για τον έλεγχο τους. Έτσι, σε αντίθεση με τους συμβατικούς αντιστροφής χαμηλού κόστους που διατίθενται στο εμπόριο, κρίθηκε απαραίτητο να χρησιμοποιηθούν για τη μέτρηση των ρευμάτων αισθητήρες ακριβείας τύπου Hall. Η προσαρμογή των μετρούμενων σημάτων ώστε να οδηγηθούν στις αναλογικές εισόδους του μικροελεγκτή παλμοδότησης γίνεται στην πλακέτα του μικροελεγκτή.
- Άλλη βασική απαίτηση αποτέλεσε η πλήρης γαλβανική απομόνωση του κυκλώματος ισχύος από τα κυκλώματα ελέγχου και προστασίας (μικροηλεκτρονικά κυκλώματα). Αυτό κρίθηκε απαραίτητο λόγω της βασικής αποστολής του συστήματος, για χρήση δηλαδή σε εργαστηριακό περιβάλλον.
- Ζητούμενη είναι η δυνατότητα σύνδεσης του αντιστροφέα τάσης με άλλα ψηφιακά συστήματα, ώστε να είναι δυνατή η ανταλλαγή πακέτων δεδομένων μεταξύ αντιστροφέα και άλλων συσκευών. Η επικοινωνία ορίσθηκε ότι πρέπει να γίνεται με ευρέως διαδεδομένους διάυλους επικοινωνίας (CAN, RS232, USB)

## B. Λειτουργικές προδιαγραφές

- Κρίθηκε σκόπιμο να μπορεί ο αναστροφέας να χρησιμοποιηθεί για την τροφοδότηση είτε μονοφασικών ή τριφασικών φορτίων. Για το λόγο αυτό έπρεπε να δίνει τη δυνατότητα εύκολης αλλαγής της λειτουργίας του σε μονοφασική ή τριφασική.
- Η παλμοδότηση, ο έλεγχος και η διασύνδεση του αντιστροφέα γίνεται εναλλακτικά με έναν ή δύο συνεργαζόμενους μικροεπεξεργαστές/DSP. Για να εξασφαλισθεί η ευελιξία στην ανάπτυξη και τον έλεγχο λειτουργίας (debugging), απαιτείται να υπάρχει δυνατότητα επαναπρογραμματισμού και αποσφαλμάτωσης λογισμικού (debugging), χωρίς να χρειάζεται αποσυναρμολόγηση του συστήματος.
- Σε περίπτωση που είτε λόγω σύνδεσης είτε για κάποιο άλλο λόγο παρουσιαστεί σφάλμα στη λειτουργία (υπέρρευμα, υπέρταση, διαρροή ως προς γη, βραχυκύκλωμα, κ.α.), η λειτουργία του κυκλώματος ισχύος πρέπει να διακόπτεται άμεσα, ενώ πρέπει να υπάρχει ένδειξη ανάλογα με το σφάλμα. Ο επεξεργαστής του ελέγχου ενημερώνεται για τον τύπο του σφάλματος και το απεικονίζει στην οθόνη των ενδείξεων. Όταν γίνει εκκαθάριση του σφάλματος, το κύκλωμα ισχύος αρχικοποιείται από τον επεξεργαστή της παλμοδότησης.
- Τέλος, σε κανονική λειτουργία το κύκλωμα ισχύος πρέπει να έχει τη δυνατότητα υπερφόρτισης, χωρίς να υφίσταται βλάβη.

## 6.2. ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΤΟΥ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΕΑ ΤΑΣΗΣ.[17]

Το δομικό διάγραμμα του αναστροφέα τάσης απεικονίζεται στο σχ. 1. Τα επιμέρους στοιχεία του δομικού διαγράμματος αναλύονται παρακάτω.



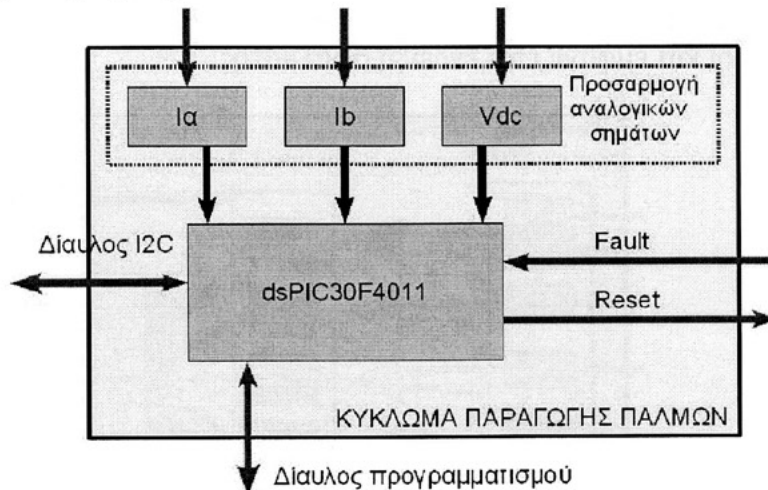
Σχήμα 1. Δομικό διάγραμμα του αντιστροφέα τάσης.

### A. Κύκλωμα παραγωγής παλμών

Η δημιουργία των παλμών για την οδήγηση των στοιχείων ισχύος του μετατροπέα επιτυγχάνεται με τη χρήση ενός χαμηλού κόστους ψηφιακού ελεγκτή/DSP, του DSPIC30F4011 του κατασκευαστικού οίκου Microchip. Πρόκειται για έναν μικροελεγκτή βιομηχανικών προδιαγραφών με δυνατότητες DSP, ο οποίος είναι εφοδιασμένος με περιφερειακά κατάλληλα για τον έλεγχο κινητήρων. Διαθέτει αναλογικές μονάδες εισόδου σημάτων, εξόδους PWM, ενώ ενσωματώνει τυποποιημένους διαύλους επικοινωνίας. Η διασύνδεση του μικροελεγκτή με τις περιφερειακές μονάδες, η οποία φαίνεται στο σχ. 2, καθορίζεται από τις παρακάτω απαιτήσεις:



- Η ενίσχυση/διαμόρφωση των αναλογικών σημάτων γίνεται εντός του κυκλώματος παραγωγής των παλμών. Ιδιαίτερα για τα δύο μετρούμενα φασικά ρεύματα που είναι εναλλασσόμενα, η διαμόρφωση περιλαμβάνει την πρόσθεση μιας συνεχούς συνιστώσας στο αναλογικό σήμα.
- Το κύκλωμα παλμοδότησης επικοινωνεί με το κύκλωμα ισχύος μέσω του σήματος ένδειξης σφάλματος, ενώ αρχικοποιεί το κύκλωμα ισχύος μέσω του σήματος «Reset».
- Ο μικροελεγκτής του κυκλώματος παλμοδότησης είναι απαραίτητος για τη λειτουργία του αντιστροφέα. Η επικοινωνία του με τον βοηθητικό επεξεργαστή (επεξεργαστή ελέγχου) γίνεται μέσω σειριακού διαύλου I2C.
- Ο προγραμματισμός και η αποσφαλμάτωση (debugging) του προγράμματος του μικροελεγκτή γίνεται χωρίς να αποσυναρμολογείται ο αναστροφέας, μέσω του τυποποιημένου εργαλείου που χρησιμοποιείται για τον προγραμματισμό του.
- Τέλος, έχει επιδιωχθεί να σχεδιασθεί η παλμοδότηση με τέτοιο τρόπο, ώστε τυχόν αποσύνδεση της πλακέτας από την κεντρική πλακέτα, όπου συνδέεται, να δημιουργεί αυτόματα σήμα σφάλματος και να διακόπτεται η λειτουργία του κυκλώματος ισχύος.



Σχήμα. 2. Δομικό διάγραμμα του κυκλώματος παραγωγής παλμών.

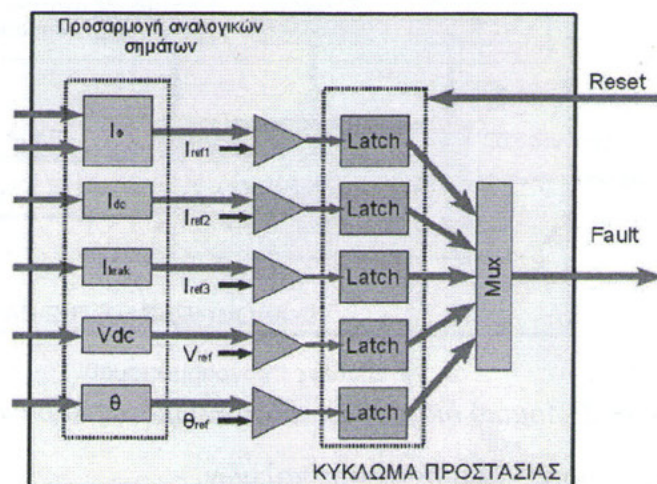
### Β. Κύκλωμα ενίσχυσης - διαμόρφωσης παλμών.

Ο σχεδιασμός του κυκλώματος ενίσχυσης - διαμόρφωσης των παλμών έχει βασισθεί στο ολοκληρωμένο IR2213 του κατασκευαστικού οίκου International Rectifier. Η δυνατότητα λειτουργίας του μέσω τροφοδοσίας τύπου Bootstrap είναι και ο βασικός λόγος για την επιλογή του, καθότι με τον τρόπο αυτό περιορίζεται δραστικά ο αριθμός των τροφοδοτικών που απαιτούνται για τη λειτουργία του αντιστροφέα, αφού αρκεί μόνο μια τροφοδοσία 15V για την τροφοδοσία όλων των κυκλωμάτων ενίσχυσης παλμών. Σχεδιάστηκαν τρία όμοια κυκλώματα οδήγησης, ένα για κάθε κλάδο του αντιστροφέα.

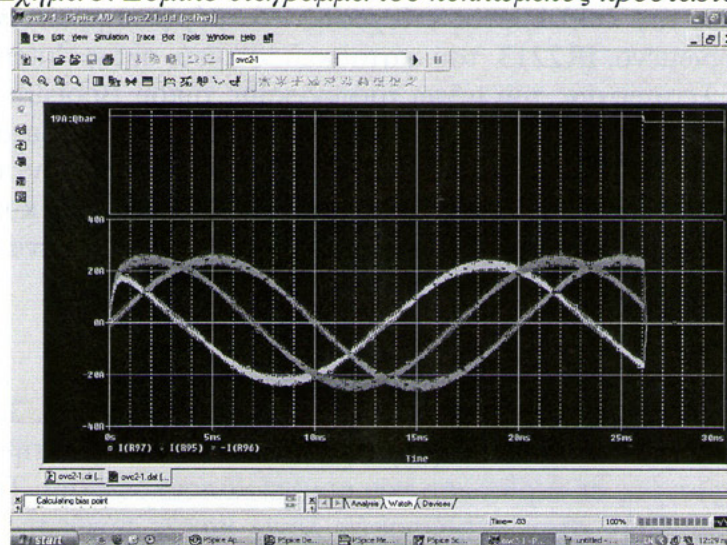
### Γ. Κύκλωμα προστασίας

Το κύκλωμα προστασίας του οποίου η δομή φαίνεται στο σχ. 3, είναι ένα από τα πιο κρίσιμα κυκλώματα του αντιστροφέα, είναι υπεύθυνο για την άμεση διακοπή του κυκλώματος ισχύος σε περίπτωση που συμβεί κάποιο σφάλμα. Τα σφάλματα που είναι πιθανό να συμβούν στον αντιστροφέα λόγω κακής σύνδεσης ή λόγω βλάβης του φορτίου, είναι τα παρακάτω:

- Υπέρρευμα λόγω βραχυκυκλώματος στην έξοδο. Το σφάλμα είναι δυνατό ν' ανιχνευθεί με τη χρήση αισθητήρα ρεύματος στον κλάδο συνεχούς τάσης. Στην περίπτωση μας, αυτό αποφεύχθηκε επειδή θα δημιουργούσε πρόβλημα στο διαχωρισμό του σφάλματος αυτού με το σφάλμα λόγω βραχυκυκλώματος ενός κλάδου του αντιστροφέα. Προτιμήθηκε το σήμα σφάλματος να δημιουργηθεί βάσει των μετρούμενων φασικών ρευμάτων.
- Σφάλμα βραχυκυκλώματος ως προς τη γη. Το σφάλμα αυτό ανιχνεύεται με διαφορική μέτρηση των ρευμάτων του κλάδου συνεχούς τάσης. Αν η διαφορά των ρευμάτων ξεπεράσει μια τιμή διακόπτονται οι παλμοί στο κύκλωμα ισχύος.
- Βραχυκύκλωμα των ημιαγωγών στοιχείων σε κλάδο του αναστροφέα τάσης. Ανιχνεύεται μέσω μέτρησης του ρεύματος στον κλάδο συνεχούς τάσης.
- Υψηλή τάση εισόδου. Ο αναστροφέας διακόπτει τη λειτουργία του σε περίπτωση που η τάση εισόδου υπερβεί μια μέγιστη τιμή (800 V στην περίπτωση μας).
- Υπερθέρμανση ημιαγωγών στοιχείων. Η θερμοκρασία των ημιαγωγών διακοπών ισχύος μετριέται συνεχώς πάνω στο ψυκτικό στοιχείο. Σε περίπτωση που αυτή υπερβεί μια προκαθορισμένη τιμή, διακόπτονται οι παλμοί και εμφανίζεται ένδειξη σφάλματος.



Σχήμα 3. Δομικό διάγραμμα του κυκλώματος προστασίας



Σχήμα 4. Αποτελέσματα εξομοίωσης με PSPICE - διακοπή του κυκλώματος ισχύος ως αποτέλεσμα ενός σφάλματος υπέρτασης.

#### Δ. Κύκλωμα ισχύος

Το κύκλωμα ισχύος αποτελείται από τα παρακάτω μέρη:

Γέφυρα διόδων, που πραγματοποιεί την ανόρθωση της εναλλασσόμενης τάσης τροφοδοσίας. Ημιαγωγοί διακόπτες ισχύος. Στην πρωτότυπη κατασκευή επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθούν στοιχεία IGBT με ονομαστικό ρεύμα 50A. Λαμβάνοντας υπόψη την αρχική απαίτηση μας για φόρτιση με διπλάσιο ρεύμα χωρίς βλάβη του κυκλώματος ισχύος, με τα στοιχεία αυτά ο αναστροφέας μπορεί να οδηγήσει τριφασική μηχανή ονομαστικής ισχύος 10kW.

Αισθητήρες ρεύματος και τάσης. Στην πλακέτα ισχύος είναι ενσωματωμένοι οι αισθητήρες μέτρησης των ρευμάτων και των τάσεων. Συγκεκριμένα, μετρώνται τα ρεύματα σε δύο φάσεις της εξόδου, η τάση στον κλάδο συνεχούς τάσης, το ρεύμα στον κλάδο συνεχούς, ενώ μετριέται και η διαφορά των ρευμάτων στον κλάδο αυτό.

Στον κλάδο συνεχούς είναι προσαρμοσμένο ένα στοιχείο IGBT μικρής ισχύος, το οποίο συνδέεται εξωτερικά με ωμική αντίσταση, ώστε σε περίπτωση επιβράδυνσης μιας τριφασικής μηχανής να καταναλώνει την επιστρεφόμενη ενέργεια (Όπως είναι γνωστό, η γέφυρα διόδων δεν επιτρέπει την επιστροφή ενέργειας στο δίκτυο).

#### Ε. Κύκλωμα ελέγχου, διασύνδεσης και απεικόνισης των δεδομένων

Το κύκλωμα διασύνδεσης και απεικόνισης των δεδομένων αποτελεί προαιρετικό εξάρτημα του αντιστροφέα τάσης και χρησιμοποιείται σε περίπτωση που υπάρχει η ανάγκη απεικόνισης σε οθόνη υγρών κρυστάλλων, επέκτασης των δυνατοτήτων ελέγχου, η διασύνδεσης με άλλα συστήματα (συσκευές ισχύος, υπολογιστής, κ.α.). Συνδέεται μέσω ειδικού ακροδέκτη με το κύκλωμα προστασίας, ενώ μέσω του ίδιου ακροδέκτη εξασφαλίζεται η διασύνδεσή του με τον μικροελεγκτή της παλμοδότησης, με τον οποίο ανταλλάσσει δεδομένα μέσα σειριακού διαύλου. Το κύκλωμα βασίζεται στον ίδιο μικροελεγκτή με το κύκλωμα παλμοδότησης, και μπορεί να συνδεθεί με εξωτερικές συσκευές με θύρα RS232 και CAN. Προβλέπεται στο μέλλον προσθήκη στο κύκλωμα θύρας USB για σύνδεση με υπολογιστή.





## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

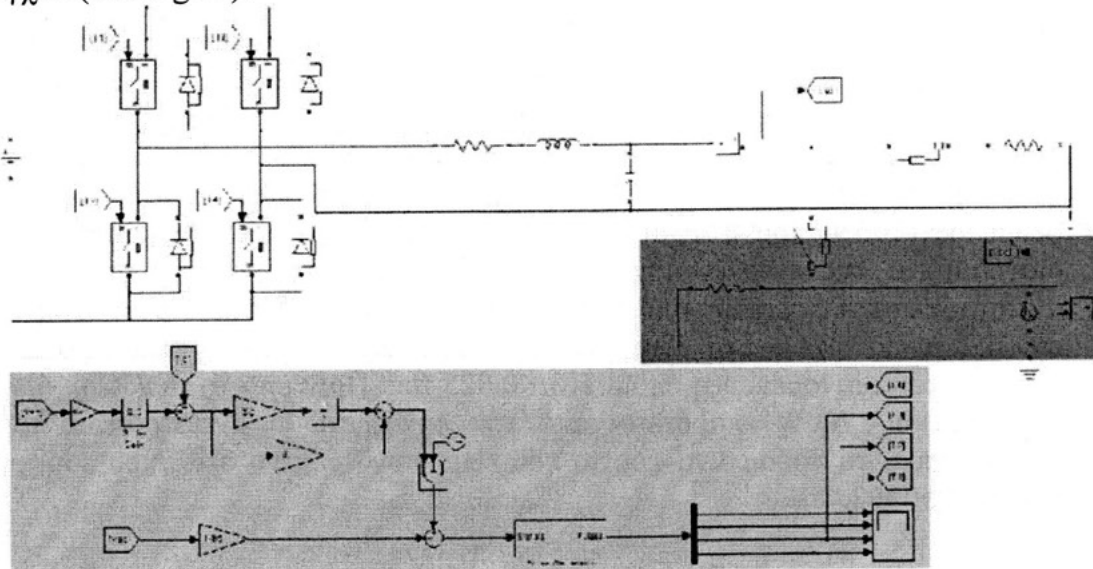
# ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΣΥΝΔΕΣΗΣ ΜΕ ΤΟ ΔΙΚΤΥΟ

### 7.1 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΣΥΝΔΕΣΗΣ ΜΟΝΟΦΑΣΙΚΟΥ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΕ Α ΜΕ ΤΟ ΔΙΚΤΥΟ (ΧΩΡΙΣ Μ/Σ).[19]

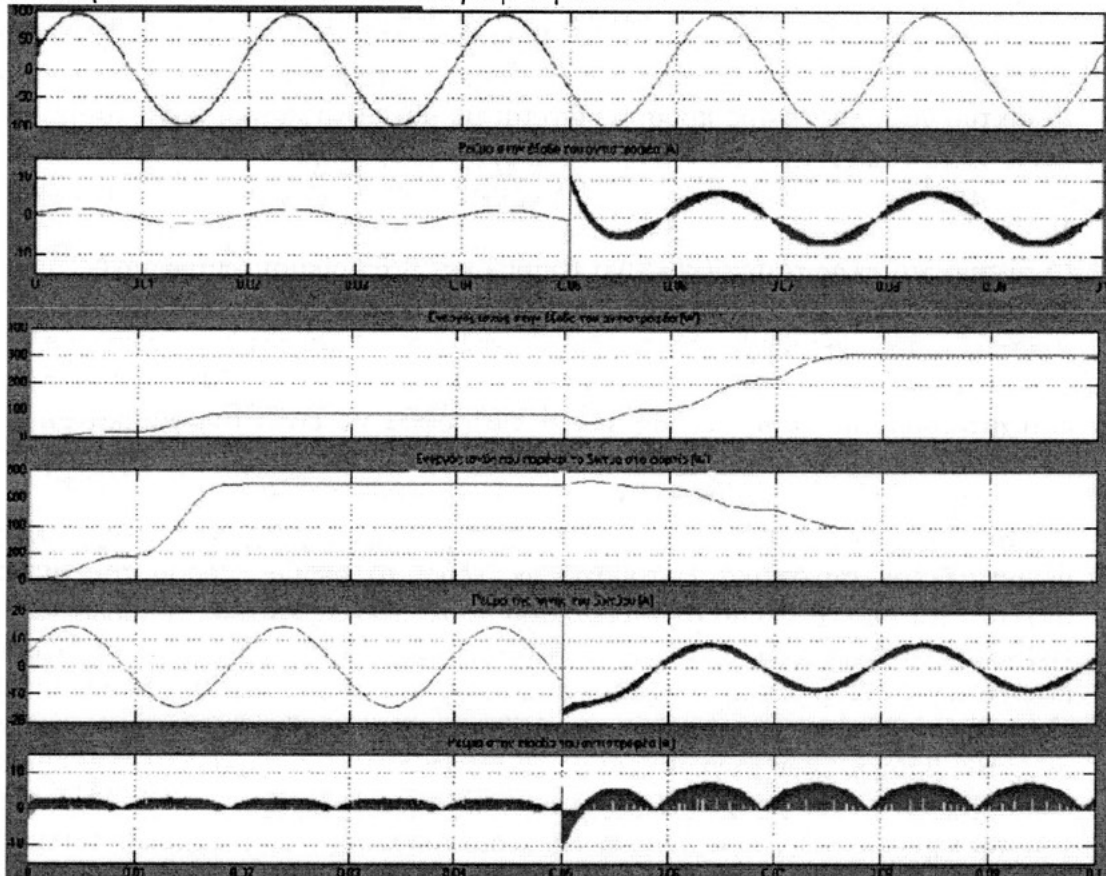
Αφού διαπιστώθηκε η ορθή προσομοίωση και λειτουργία του μονοφασικού αντιστροφέα (με διαμόρφωση SPWM με μονοπολική τάση εξόδου), μπορούμε να προχωρήσουμε στην υλοποίηση της σύνδεσης με το δίκτυο. Έτσι θα θεωρήσουμε ότι το δίκτυο χαμηλής τάσης προσομοιώνεται με μία μονοφασική πηγή τάσης με ενεργό τιμή 68V, συχνότητας 50Hz και τυχαίας αρχικής φάσης, στην οποία είναι συνδεδεμένο ένα μονοφασικό ωμικό φορτίο το οποίο απορροφά μονίμως ενεργό ισχύ 700W. Το αντίστοιχο block διάγραμμα όπου διακρίνονται εκτός από το μετατροπέα, το δίκτυο χαμηλής τάσης (κόκκινο τμήμα) και η διαδικασία παραγωγής των παλμών (πράσινο τμήμα).

Αρχικά, πριν τη σύνδεση με το δίκτυο, ο αντιστροφέας λειτουργεί έχοντας συνδεδεμένο το μονοφασικό φορτίο στην έξοδό του. Με αυτόν τον τρόπο πετυχαίνουμε την τάση εξόδου του αντιστροφέα να είναι συμφασική με αυτή του δικτύου. Επίσης, επιλέγεται και ο κατάλληλος συντελεστής διαμόρφωσης ( $m_a=0.8$ ), έτσι ώστε η τάση εξόδου να έχει και το ίδιο μέτρο με την τάση του δικτύου.

Για τον έλεγχο της σύνδεσης με το δίκτυο θα χρησιμοποιηθεί ένας βρόχος ελέγχου του ρεύματος που συνοπτικά λειτουργεί ως εξής: το ρεύμα εξόδου του αντιστροφέα συγκρίνεται με ένα ρεύμα αναφοράς που προκύπτει από τον κατάλληλο υποβιβασμό της τάσης του δικτύου, ώστε να είναι συμφασικό με αυτή και έτσι να δίνουμε μόνο ενεργό ισχύ στο δίκτυο. Το αποτέλεσμα της σύγκρισης περνάει μέσα από έναν PI ελεγκτή, η έξοδος του οποίου προστίθεται στο προϋπάρχον σήμα ελέγχου του ανοιχτού βρόχου (που συγκρίνεται με το τρίγωνο για την παραγωγή των παλμών). Τα κέρδη  $K_p$  και  $K_i$  του βρόχου ελέγχου του ρεύματος καθορίζονται ύστερα από ανάλυση του συστήματος ελέγχου ρεύματος στο πεδίο του Laplace Στο σχήμα 7.1 απεικονίζεται επίσης, ο κλειστός βρόχος ελέγχου του ρεύματος (πράσινο τμήμα). Η επιθυμητή τιμή του ρεύματος διασύνδεσης καθορίζεται μέσω της αναφοράς ρεύματος του PI βρόχου ελέγχου (slider gain).



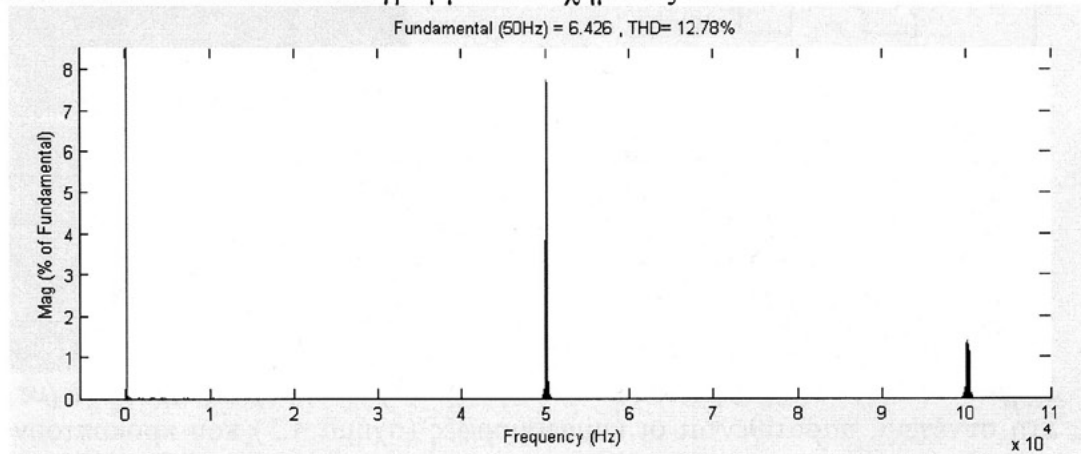
Σχήμα 7.1 Block διάγραμμα του αντιστροφέα μαζί με το βρόχο ελέγχου του (χωρίς Μ/Σ). Στη συνέχεια, στο σχήμα 4.2 παρατίθενται οι κυματομορφές που προκύπτουν από την προσομοίωση του παραπάνω συστήματος. Στις πρώτες τρεις κυματομορφές φαίνονται η τάση του δικτύου, η τάση εξόδου του αντιστροφέα πριν το φίλτρο και η τάση εξόδου του αντιστροφέα μετά το φίλτρο αντίστοιχα. Η αντίσταση στην έξοδο του αντιστροφέα πριν τη σύνδεση με το δίκτυο είναι  $50\Omega$ , ενώ το ρεύμα σύνδεσης καθορίζεται να έχει μέγιστη τιμή  $6.5A$ . Η σύνδεση, όπως άλλωστε φαίνεται και στα διαγράμματα του σχήματος 7.2, πραγματοποιείται τη χρονική στιγμή  $t=0.05sec$ , οπότε και ανοίγει ο διακόπτης του μονοφασικού φορτίου με ταυτόχρονο κλείσιμο του διακόπτη που διασυνδέει τον αντιστροφέα με το δίκτυο.



Σχήμα 7.2 Κυματομορφές προσομοίωσης του αντιστροφέα με το βρόχο ελέγχου του (χωρίς Μ/Σ).

Πριν το ανοιγοκλείσιμο των διακοπών, το ρεύμα στην έξοδο του αντιστροφέα έχει μέγιστη τιμή  $1,41 \cdot 68/50 = 1.92^{\wedge}4$  (τέταρτη κυματομορφή σχ. 7.2), ενώ μετά τη σύνδεση έχει την αναμενόμενη μέγιστη τιμή των  $6.5A$ . Παρατηρούμε βέβαια και κάποιες ανώτερες αρμονικές στο ρεύμα εξόδου του αντιστροφέα, τις οποίες δεν κατάφερε να απορροφήσει το LC φίλτρο. Αυτό φαίνεται και από το φάσμα του ρεύματος εξόδου που φαίνεται στο σχήμα 4.3. Ενδιαφέρον παρουσιάζουν και τα διαγράμματα της ενεργού ισχύος που προσφέρεται στο φορτίο αφενός από τον αντιστροφέα και αφετέρου από την μονοφασική πηγή (πέμπτη και έκτη κυματομορφή σχ. 4.2 αντίστοιχα). Στα ίδια διαγράμματα φαίνεται επίσης και η διάρκεια του μεταβατικού φαινομένου η οποία είναι  $0.025 sec$ . Πριν από τη σύνδεση, όλη η ισχύς του φορτίου ( $700W$ ) παρέχεται από την πηγή, ενώ ο αντιστροφέας τροφοδοτεί αποκλειστικά το προσωρινό φορτίο που είναι συνδεδεμένο στα άκρα του, με ενεργό ισχύ  $682/50=92.48W$ .

Μετά τη σύνδεση του αντιστροφέα με το δίκτυο, η ενεργός ισχύς που παρέχεται από αυτόν είναι  $68 (6.5/\lambda/2) = 312.5W$ , ενώ η ισχύς που δίνει η πηγή πέφτει στα  $700-312.5 = 387.5JF$ . Στο προτελευταίο από τα διαγράμματα του σχήματος 4.2 δίνεται το ρεύμα που παρέχει η πηγή, το οποίο μετά τη σύνδεση με το δίκτυο αφενός μειώνεται, αφετέρου όμως, αποκτά κάποιες ανεπιθύμητες ανώτερες αρμονικές. Τέλος, το ρεύμα στην είσοδο του αντιστροφέα έχει την αναμενόμενη τιμή και κυματομορφή, όπως φαίνεται και στο τελευταίο διάγραμμα του σχήματος 7.2.

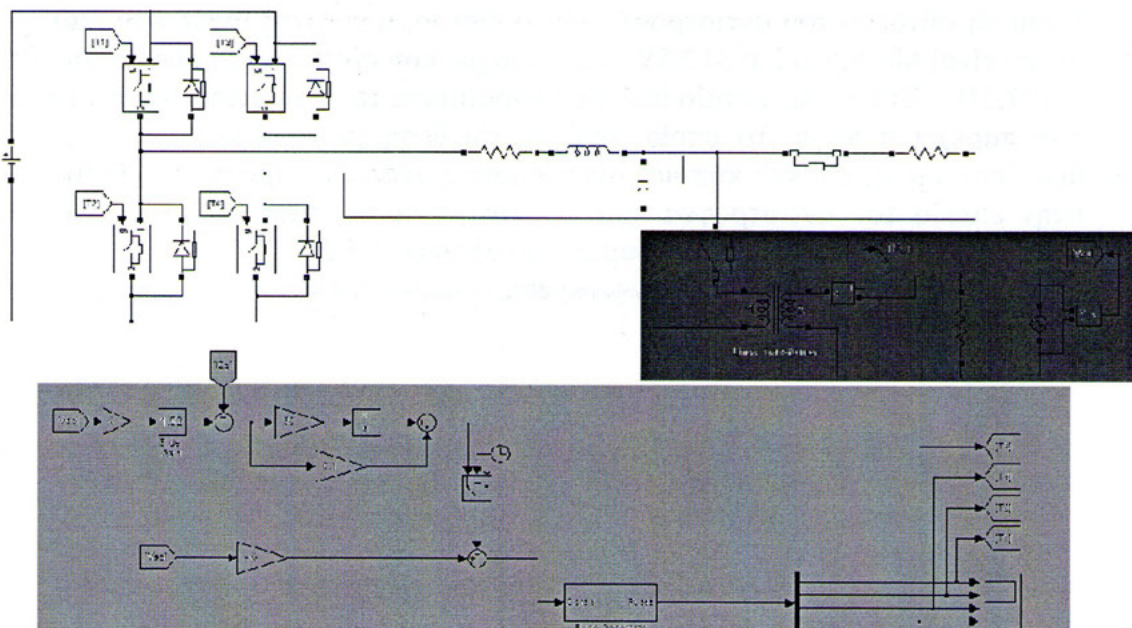


Σχήμα 7.3 Φάσμα ρεύματος στην έξοδο του αντιστροφέα μετά τη σύνδεση.

## 7.2 Προσομοίωση Σύνδεσης Μονοφασικού Αντιστροφέα Με Το Δίκτυο (Με Μ/Σ).[19]

Τώρα τοποθετούμε τον Μ/Σ 1:4, προκειμένου να πετύχουμε την τάση των 230V του δικτύου χαμηλής τάσης. Πάλι θεωρούμε ότι το δίκτυο χαμηλής τάσης προσομοιώνεται με μία μονοφασική πηγή τάσης με ενεργό τιμή όμως 230V, συχνότητας 50Hz και τυχαίας αρχικής φάσης, στην οποία είναι συνδεδεμένο ένα μονοφασικό ωμικό φορτίο, το οποίο απορροφά μονίμως ενεργό ισχύ 700W. Το αντίστοιχο block διάγραμμα φαίνεται στο σχήμα 7.4, όπου και φαίνεται ότι είναι όμοιο με αυτό του σχήματος 7.1, με τη βασική διαφορά ότι τώρα ως ρεύμα εξόδου του αντιστροφέα θεωρείται το ρεύμα στο δευτερεύον του Μ/Σ. Αντίστοιχα το συγκεκριμένο ρεύμα, συγκρίνεται με ένα ρεύμα αναφοράς που προκύπτει από τον κατάλληλο υποβιβασμό της τάσης του δικτύου. Ένα άλλο στοιχείο που αλλάζει σε σχέση με την ενότητα 7.1 είναι ο συντελεστής διαμόρφωσης ( $m_a$ ), όπου επιλέγεται να έχει την τιμή  $m_a=0.678$ . Το παραπάνω προκύπτει ως εξής: Αφού ο Μ/Σ έχει λόγο μετασχηματισμού 1:4 και το δευτερεύον του συνδέεται σε τάση με μέγιστη τιμή  $325.3V (230-\lambda/2)$ , συνεπάγεται ότι στο πρωτεύον πρέπει να εφαρμοστεί τάση με μέγιστη τιμή  $325.3/4 = 81.32$ , οπότε από  $V_o=M_\alpha \cdot V_{in}$  και  $V_{in}=120V$  προκύπτει  $m_a=0.678$ .

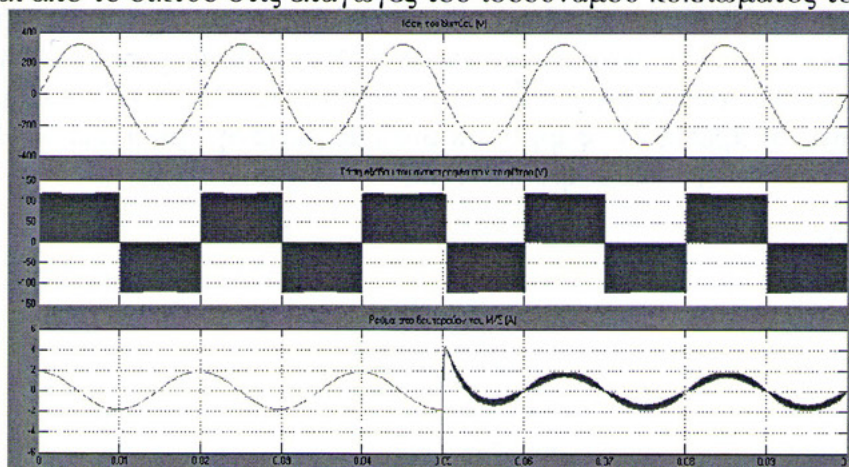




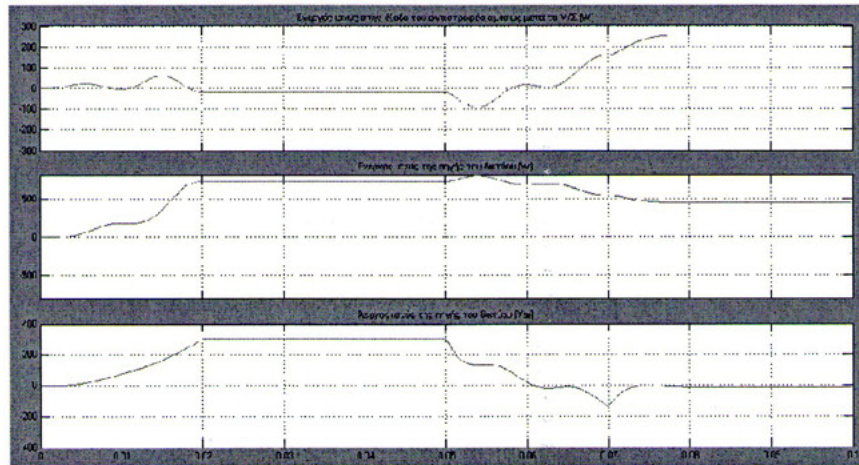
**Σχήμα 7.4** Block διάγραμμα του αντιστροφέα μαζί με το βρόχο ελέγχου (με M/Σ).

Στη συνέχεια, παρατίθενται οι κυματομορφές (σχήμα 4.5) που προκύπτουν από την προσομοίωση του παραπάνω συστήματος. Η αντίσταση στην έξοδο του αντιστροφέα πριν τη σύνδεση με το δίκτυο παραμένει και πάλι 50Ω, ενώ το ρεύμα σύνδεσης καθορίζεται να έχει μέγιστη τιμή 1.92A (στο δευτερεύον του Μ/Σ) έτσι ώστε η παρεχόμενη ενεργός ισχύς να είναι η ίδια με την προηγούμενη ενότητα, δηλαδή 230 ( $1.92/\sqrt{2}$ )=312.5W.

Σε αυτήν την προσομοίωση, ενδιαφέρον παρουσιάζει το τρίτο διάγραμμα του σχήματος 4.5 που αναπαριστά το ρεύμα στο δευτερεύον του Μ/Σ. Παρατηρούμε ότι μετά από ένα peak στα 4A το ρεύμα στο δευτερεύον του Μ/Σ λαμβάνει την τιμή που ορίζει το ρεύμα αναφοράς του κλειστού βρόχου (1.92A). Από το τέταρτο διάγραμμα του σχήματος 7.5 παρατηρούμε ότι ο αντιστροφέας πριν τη σύνδεση με το δίκτυο δεν προσφέρει καθόλου ενεργό ισχύ σε αυτό, ενώ έπειτα προσφέρει ενεργό ισχύ μικρότερη της θεωρητικής (312.5W). Επίσης ενδιαφέρον παρουσιάζει και το διάγραμμα της άεργου ισχύος της πηγής του δικτύου που αποτελεί το τελευταίο από τα διαγράμματα του σχήματος 4.5, καθώς πριν τη διασύνδεση, άεργος ισχύς 300Var προσφέρεται από το δίκτυο στις επαγωγές του ισοδύναμου κυκλώματος του Μ/Σ.







Σχήμα 7.5 Κοματομορφές προσομοίωσης του αντιστροφέα με το βρόχο ελέγχου του (με M/Σ).



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8 .[22] ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΑΝΕΜΟΓΕΝΗΤΡΙΑΣ 5KW

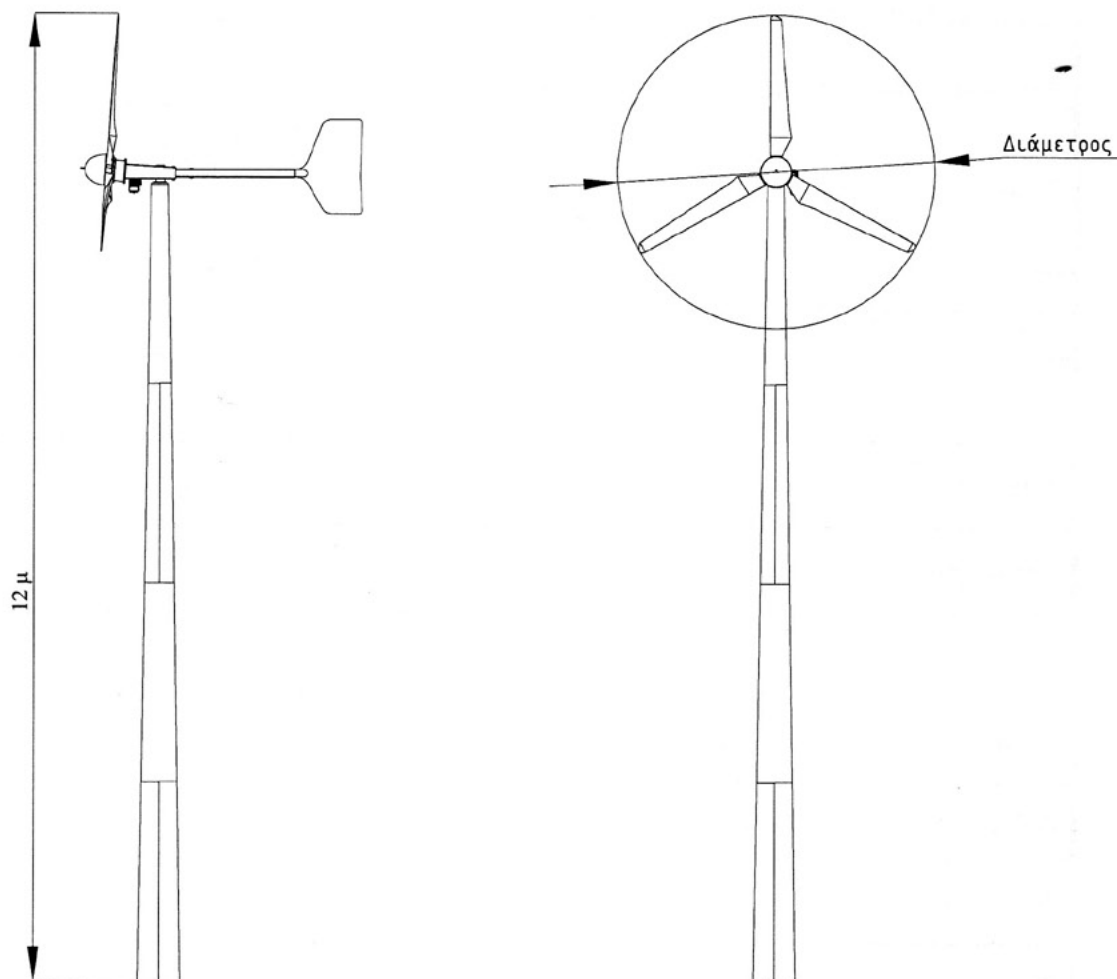
### 8.1 Τεχνικά Χαρακτηριστικά της ανεμογεννήτριας ανεμογεννήτριας WEL\_5kW

Στον Πίνακα 1. που ακολουθεί παρουσιάζονται συνοπτικά τα χαρακτηριστικά της εγκατάστασης της ανεμογεννήτριας WEL\_5kW.

Τεχνικά Χαρακτηριστικά της ανεμογεννήτριας WEL_5kW	
Τύπος γεννήτριας	Σύγχρονη, Μεταβλητών Στροφών με Μόνιμους Μαγνήτες
Ισχύς μηχανής (kW)	5
Ονομαστική Τάση γεννήτριας A/Γ (V)	480
Διάμετρος Πτερύγωσης (m)	4,65
Ταχύτητα περιστροφής Ρότορα (rpm)	350
Ύψος Πλήμνης ανεμογεννήτριας (m)	9,5
Ονομαστική ταχύτητα ανέμου (m/s)	12
Διάμετρος πυλώνα στη βάση (m)	0,6
Ύψος πυλώνα (m)	11,8
Ταχύτητα ανέμου έναρξης λειτουργίας (m/s)	2,5
Ταχύτητα ανέμου αποκοπής, δεκάλεπτη (m/s)	18
Αριθμός κεντρικών πινάκων	1
Τάση εξόδου μορφοτροπέα ισχύος	230 V
Διακύμανση συχνότητας εξόδου μορφοτροπέα ισχύος	49,5-50,5 Hz
Προστασία έναντι του φαινομένου της νησιδοποίησης κατά VDE 0126	NAI (cut-off time <0,2s)

Πίνακας 1: Χαρακτηριστικά της προς εγκατάσταση Ανεμογεννήτριας

Οι βασικές διαστάσεις του συστήματος της Α/Γ φαίνονται στο Σχήμα 1.



Σχήμα 1: Σχηματικό γράφημα Α/Γ ισχύος 5kW.

8.2 Λειτουργία του συστήματος της ανεμογεννήτριας WEL\_5kW.

Το ενεργειακό αυτό σύστημα περιλαμβάνει μία ανεμογεννήτρια ονομαστικής ισχύος 5kW, το σύστημα ελέγχου αυτής, την ανορθωτική διάταξη και τον μορφοτροπέα ισχύος. Η ανεμογεννήτρια αποτελεί μια μονάδα παραγωγής της ηλεκτρικής ενέργειας η οποία μετατρέπει την κινητική ενέργεια του ανέμου σε ηλεκτρική και αποτελείται από:



1. Την πτερύγωση, η οποία είναι συνολικής διαμέτρου 4,65 μ και αποτελείται από τρία (3) πτερύγια σταθερού βήματος, κατασκευασμένα από πολυεστερική ρητίνη οπλισμένη με ίνες γυαλιού.
  2. Την σύγχρονη γεννήτρια, μεταβλητών στροφών με μόνιμους μαγνήτες. Η ψύξη της επιτυγχάνεται με την χρήση του αέρα που περιβάλλει την γεννήτρια.
  3. Το σύστημα ελέγχου, που περιλαμβάνει διάταξη προσανεμισμού της ανεμογεννήτριας. Το σύστημα αυτό προσανατολίζει την φτερωτή στην διεύθυνση του ανέμου σε συνθήκες κανονικής λειτουργίας. Σε περίπτωση που η ταχύτητα του ανέμου υπερβαίνει τα επιτρεπτά όρια ή παρουσιαστεί κάποιο πρόβλημα στη λειτουργία της μικρής ανεμογεννήτριας, το σύστημα ελέγχου αναγκάζει την πτερύγωση να βγει εκτός του πεδίου ροής του ανέμου.
  4. Την βάση στήριξης, η οποία αποτελείται από χαλύβδινα ελάσματα και τη διάταξη περιστροφής γύρω από τον κατακόρυφο άξονα (yaw).
  5. Τον πυλώνα με ύψος 11,8 μέτρα.
- Η ταχύτητα έναρξης λειτουργίας της ανεμογεννήτριας (cutin wind speed) είναι ίση με 2,5 m/sec και η ταχύτητα αποκοπής (cutout wind speed) είναι ίση με 18 m/sec.



## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. <a href="http://nefeli.lib.teicrete.gr/browse/stef">http://nefeli.lib.teicrete.gr/browse/stef</a>
2. <a href="http://artemis.cslab.ntua.gr/el_thesis/artemis.ntua.ece/DT2008-0080/DT2008-0080.pdf">http://artemis.cslab.ntua.gr/el_thesis/artemis.ntua.ece/DT2008-0080/DT2008-0080.pdf</a>
3. <a href="http://kpe-kastor.kas.sch.gr/energy1/alternative/generator.htm">http://kpe-kastor.kas.sch.gr/energy1/alternative/generator.htm</a>
4. ΣΗΜΕΙΩΣΗΣ ΜΠΙΑΜΠΗΣ ΤΣΙΜΠΙΟΓΛΟΥ
5. <a href="http://www.anemogennitria.gr">http://www.anemogennitria.gr</a>
6. <a href="http://www.neanap.com/files/energy.pdf">http://www.neanap.com/files/energy.pdf</a>
7. ΕΥΑ ΠΑΡΑΣΚΕΥΑΔΑΚΗ
8. <a href="http://library.tee.gr/digital/m2107/m2107_pastromas.pdf">http://library.tee.gr/digital/m2107/m2107_pastromas.pdf</a>
9. <a href="http://el.wikipedia.org/wiki/%CE%93%CE%B5%CE%BD%CE%BD%CE%AE%CF%84%CF%81%CE%B9%CE%B1">http://el.wikipedia.org/wiki/%CE%93%CE%B5%CE%BD%CE%BD%CE%AE%CF%84%CF%81%CE%B9%CE%B1</a>
10. <a href="http://iiu.teikav.edu.gr/iw/courses/eksamino_04/ilixios/BIOM_SYST_HL_EN/Theory/syncmach0.pdf">http://iiu.teikav.edu.gr/iw/courses/eksamino_04/ilixios/BIOM_SYST_HL_EN/Theory/syncmach0.pdf</a>
11. <a href="http://www.google.gr/url?sa=t&amp;source=web&amp;cd=1&amp;ved=0CBwQFjAA&amp;url=http%3A%2F%2Fteiserron.gr%2Findex.php%3Faction%3Ddlattach%3Btopic%3D745.0%3Battach%3D904&amp;ei=ayFgTJadDc2N4QbG7uy6Ag&amp;usq=AFQjCNFXR8kNnohOR93fprlcKBy0JSrUCw&amp;sig2=WD1VuQ9vvvWXIAV8Ce7mlQ">http://www.google.gr/url?sa=t&amp;source=web&amp;cd=1&amp;ved=0CBwQFjAA&amp;url=http%3A%2F%2Fteiserron.gr%2Findex.php%3Faction%3Ddlattach%3Btopic%3D745.0%3Battach%3D904&amp;ei=ayFgTJadDc2N4QbG7uy6Ag&amp;usq=AFQjCNFXR8kNnohOR93fprlcKBy0JSrUCw&amp;sig2=WD1VuQ9vvvWXIAV8Ce7mlQ</a>
12. <a href="http://magnmat.physics.auth.gr/documents/Motors2005.pdf">http://magnmat.physics.auth.gr/documents/Motors2005.pdf</a>
13. Διάλεξη Σάββας Τσιμπογλου
14. <a href="http://www.ee.teihal.gr/labs/electronics/web/downloads/theory/05_anorth.pdf">http://www.ee.teihal.gr/labs/electronics/web/downloads/theory/05_anorth.pdf</a>
15. <a href="http://nemertes.lis.upatras.gr/dspace/bitstream/123456789/77/1/387.pdf">http://nemertes.lis.upatras.gr/dspace/bitstream/123456789/77/1/387.pdf</a>
16. <a href="http://eureka.lib.teithe.gr:8080/bitstream/handle/10184/1300/Papaioanou%20P%20%28main%29.pdf?sequence=2">http://eureka.lib.teithe.gr:8080/bitstream/handle/10184/1300/Papaioanou%20P%20%28main%29.pdf?sequence=2</a>
17. <a href="http://portal.tee.gr/portal/page/portal/SCIENTIFIC_WORK/EKDILOSEIS_P/EPISTHMONIKES_EVENTS/HLEKTROKINHTA%20ISXYOS/268/269/B2%20MITRONIKAS%20SAFAKAS.pdf">http://portal.tee.gr/portal/page/portal/SCIENTIFIC_WORK/EKDILOSEIS_P/EPISTHMONIKES_EVENTS/HLEKTROKINHTA%20ISXYOS/268/269/B2%20MITRONIKAS%20SAFAKAS.pdf</a>
18. ΣΠΟΥΔΑΣΤΗΣ ΣΤΕΛΙΟΣ ΒΟΖΙΚΑΚΗΣ
19. <a href="http://nemertes.lis.upatras.gr/dspace/bitstream/123456789/2585/1/%CE%94%CE%99%CE%91%CE%93%CE%9F%CE%A5%CE%A0%CE%97%CE%A3_%CE%94%CE%99%CE%A0%CE%9B%CE%A9%CE%9C%CE%91%CE%A4%CE%99%CE%9A.pdf">http://nemertes.lis.upatras.gr/dspace/bitstream/123456789/2585/1/%CE%94%CE%99%CE%91%CE%93%CE%9F%CE%A5%CE%A0%CE%97%CE%A3_%CE%94%CE%99%CE%A0%CE%9B%CE%A9%CE%9C%CE%91%CE%A4%CE%99%CE%9A.pdf</a>
20. <a href="http://www.ee.teihal.gr/labs/powerlabs/private/uploads/SR6_inverter_ver2.pdf">http://www.ee.teihal.gr/labs/powerlabs/private/uploads/SR6_inverter_ver2.pdf</a>
21. ΣΠΟΥΔΑΣΤΗΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ ΛΥΡΩΝΗΣ
22. .ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΙΚΩΝ