

Α.Τ.Ε.Ι. ΠΕΙΡΑΙΑ

ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΙΑΣ

“ Λειτουργία ανεμογεννήτριας μεταβλητών στροφών με σύγχρονη γεννήτρια ”



Επιβλέπων Καθηγητής:

ΣΠΥΡΟΣ ΤΣΙΩΛΗΣ

Σπουδαστές:

ΣΑΚΚΑΣ ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ

ΑΜ: 38983

ΤΖΕΠΕΤΖΗΣ ΘΕΟΔΩΡΟΣ

ΑΜ: 38074

ΑΙΓΑΛΕΩ

ΔΕΚΕΜΒΡΙΟΣ 2013

Copyright © Ανώτατο Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Πειραιά

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή της για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν το συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Ανώτατου Τεχνολογικού Εκπαιδευτικού Ιδρύματος Πειραιά.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Για την εκπόνηση της πτυχιακής μας εργασίας υπήρξαν κάποια πρόσωπα τα οποία διατέλεσαν σημαντικό παράγοντα στην δημιουργία της όπως ο υπεύθυνος καθηγητής μας κ. Σπύρος Τσιώλης ο οποίος μας καθοδήγησε με συμβουλές και πηγές ώστε να εργαστούμε με τον καλύτερο δυνατό τρόπο για την επίτευξη της. Στο σημείο αυτό θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε τις οικογένειες μας για την εμπιστοσύνη και την αμέριστη υποστήριξή τους σε όλη τη διάρκεια της φοιτητικής μας ζωής.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Ευχαριστίες.....	
Περιεχόμενα.....	4
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗΝ ΑΙΟΛΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ.....	9
1.1 Ενεργειακό πρόβλημα - Κλιματική αλλαγή - Πρωτόκολλο του Κιότο	10
1.2 Αιολική ενέργεια	11
1.2.1 Ιστορική ανασκόπηση	11
1.2.2 Μειονεκτήματα και πλεονεκτήματα αξιοποίησης της αιολικής ενέργειας.....	14
1.2.3 Η τρέχουσα κατάσταση της αιολικής ενέργειας	19
1.2.4 Παγκόσμια	19
1.2.5 Ευρώπη.....	21
1.2.6 Ελλάδα.....	22
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο ΑΙΟΛΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ.....	23
2.1 Ο Άνεμος	24
2.1.1 Χαρακτηριστικές παράμετροι του ανέμου.....	25
2.1.2 Κατανομή συχνότητας ταχύτητας ανέμου	29
2.1.3 Ισχύς του ανέμου	31
2.2 Οι Ανεμογεννήτριες	31
2.2.1 Ισχύς Ανεμογεννήτριας.....	31
2.2.2 Καθορισμός της ταχύτητας στην οποία η Ανεμογεννήτρια αρχίζει να λειτουργεί.....	36
2.2.3 Καθορισμός της ταχύτητας διακοπής της λειτουργίας της Ανεμογεννήτριας	36
2.3 Κατηγορίες Ανεμογεννητριών.....	37
2.3.1 Ανεμογεννήτριες κατακόρυφου άξονα	37
2.3.2 Ανεμογεννήτριες οριζοντίου άξονα.....	39
2.4 Λειτουργικά χαρακτηριστικά ανεμογεννήτριας	44
2.4.1 Απόδοση ισχύος.....	44
2.4.2 Διαθεσιμότητα	45
2.4.3 Ετήσιος υπολογισμός ενέργειας	46
2.4.4 Απόδοση συστοιχίας ανεμογεννητριών	46
2.5 Τρόποι λειτουργίας ανεμογεννήτριας.....	47
2.5.1 Ανεμογεννήτριες σταθερής ταχύτητας	47
2.5.2 Ανεμογεννήτριες μεταβλητής ταχύτητας.....	49
2.6 Χρησιμοποιούμενοι τύποι γεννητριών	50
2.6.1 Ασύγχρονη (επαγωγική) γεννήτρια	51
2.6.1.1 Επαγωγική γεννήτρια με ηλεκτρονικά μεταβαλλόμενη αντίσταση (OSIG).....	52
2.6.1.2 Επαγωγική γεννήτρια βραχυκυκλωμένου κλωβού (SCIG).....	52
2.6.1.3 Επαγωγικές γεννήτριες διπλής τροφοδοσίας (DFIG)	53
2.6.2 Σύγχρονη γεννήτρια.....	54
2.6.2.1 Σύγχρονη γεννήτρια δακτυλιοφόρου δρομέα (WRSG)	55
2.6.2.2 Σύγχρονες γεννήτριες μόνιμου μαγνήτη (PMSG)	55
2.7 Τοπολογίες ανεμογεννητριών	56
2.7.1 Τοπολογία Α.....	57
2.7.2 Τοπολογία Β	58
2.7.3 Τοπολογία Γ	59
2.7.4 Τοπολογία Δ	60

2.8 Ηλεκτρονικοί μετατροπείς ισχύος στα αιολικά συστήματα	60
2.8.1. Ηλεκτρονικές συσκευές ισχύος-κατηγορίες-αντιστοιχία.....	62
2.8.2 Μέθοδος διαμόρφωσης εύρους πλάτους παλμών (PWM).....	66
2.9 Έλεγχος ισχύος στις ανεμογεννήτριες	69
2.9.1 Έλεγχος μέσω ηλεκτρονικών ισχύος.....	69
2.9.2 Μηχανικός έλεγχος ισχύος.....	70
2.9.2.1 Έλεγχος γωνίας βήματος πτερυγίων (pitch control).....	70
2.9.2.2 Παθητικός έλεγχος απώλειας στήριξης (passive stall control).	71
2.9.2.3 Ενεργός έλεγχος απώλειας στήριξης (active stall control).....	72
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο ΑΝΑΛΥΣΗ Α/Γ ΜΕΤΑΒΛΗΤΩΝ ΣΤΡΟΦΩΝ ΜΕ ΣΥΓΧΡΟΝΗ	
ΓΕΝΝΗΤΡΙΑ	73
3.1 Το υπό ανάλυση σύστημα	74
3.2 Σύγχρονη μηχανή μόνιμου μαγνήτη	75
3.2.1 Διαμόρφωση γεννήτριας μόνιμων μαγνητών και κυριότερα λειτουργικά χαρακτηριστικά	80
3.2.2 Μοντέλα αναπαράστασης της γεννήτριας μόνιμων Μαγνητών.....	81
3.2.3 Μοντέλο γενικευμένης θεωρίας ηλεκτρικών μηχανών	81
3.3 Εξισώσεις στο χώρο κατάστασης	82
3.4 Ανά μονάδα σύστημα	83
3.5 Διπλός μετατροπέας ανεμογεννήτριας - συνδεσμολογία	85
3.5.1 Ο μετατροπέας στην πλευρά του δικτύου.....	87
3.5.2 DC διασύνδεση.....	90
3.5.3 Στρατηγική του έλεγχου	91
3.6 Έλεγχος σύγχρονης γεννήτριας με μόνιμο μαγνήτη	92
3.6.1 Γενικά.....	92
3.6.2 Το συνολικό μοντέλο στο χώρο κατάστασης.....	92
3.6.3 Ο έλεγχος από την πλευρά της μηχανής	94
3.6.3.1 Ο έλεγχος του ρεύματος του άξονα d.....	94
3.6.3.2 Ο έλεγχος του ρεύματος του άξονα q.....	95
3.6.4 Ο έλεγχος από την πλευρά του δικτύου.....	96
3.6.4.1 Ο έλεγχος του ρεύματος του άξονα d.....	97
3.6.4.2 Ο έλεγχος του ρεύματος του άξονα q.....	97
3.7 Επιλογή κερδών των PI ελεγκτών στην πλευρά της γεννήτριας και του δικτύου	98
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΝΑΛΥΣΗΣ	
ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ ΜΕΤΑΒΛΗΤΩΝ ΣΤΡΟΦΩΝ ΜΕ ΣΥΓΧΡΟΝΗ	
ΓΕΝΝΗΤΡΙΑ	101
4.1 Συμπεράσματα	102
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	104

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία η οποία πραγματοποιείται στο ΤΕΙ ΠΕΙΡΑΙΑ Τμήμα Ηλεκτρολογίας πραγματεύεται τη μελέτη μιας διάταξης ανεμογεννήτριας με σύγχρονη μηχανή με μόνιμους μαγνήτες η οποία συνδέεται μέσω dc διασύνδεσης με το δίκτυο. Τη dc διασύνδεση τη δημιουργεί ένας dc πυκνωτής και από την πλευρά της μηχανής υπάρχει ένας ac /dc πλήρως ελεγχόμενος ανορθωτής ισχύος, ενώ από την πλευρά του δικτύου βρίσκεται ένας dc/ac πλήρως ελεγχόμενος αντιστροφείας.

Στο πρώτο κεφάλαιο θα ασχοληθούμε με το ενεργειακό πρόβλημα και την κλιματική αλλαγή τα οποία αποτελούν δύο από τα σημαντικότερα προβλήματα του πλανήτη. Θα δούμε στοιχεία που αφορούν γενικά την ιστορική εξέλιξη της αιολικής ενέργειας, αλλά και την χρήση της στην Ελλάδα, στην Ευρώπη και σε όλο τον κόσμο. Έπειτα θα γίνει μια παρουσίαση της δομής μιας ανεμογεννήτριας, των τύπων των ανεμογεννητριών καθώς και των τοπολογιών στα αιολικά συστήματα.

Τέλος θα γίνει αναφορά στους ηλεκτρονικούς μετατροπείς καθώς και στις μεθόδους που χρησιμοποιούνται. Στο τελευταίο κεφάλαιο θα αναλύσουμε το σύστημα μεταβλητών στροφών με σύγχρονη μηχανή μόνιμου μαγνήτη, τα αεροδυναμικά χαρακτηριστικά της διάταξης καθώς και της εξισώσεις διασύνδεσης της τοπολογίας.

Λέξεις κλειδιά

Αιολική ενέργεια, Ανεμογεννήτριες, Σύγχρονη γεννήτρια, Μέθοδος ανεύρεσης σημείου, μετατροπέας, στροφές, ροπή.

ABSTRACT

This thesis carried out at TEI Piraeus Department of Electrical Engineering deals with the design of a wind turbine layout with synchronous machine with permanent magnets which is connected through dc interconnection to the grid. The dc link to create a dc capacitor and the side of the machine there is an ac / dc fully controlled rectifier power while on the network side is a dc / ac inverter fully controlled.

The first chapter will deal with the energy problem and climate change which are two of the major problems of the planet. We see evidence for overall historical development of wind energy and its use in Greece in Europe and around the world. Then there will be a presentation of the structure of wind turbine types of wind turbines and the topologies in wind systems.

Finally we refer to electronic converters and methods used. In the last chapter we will analyze the system with variable speed permanent magnet synchronous machine the aerodynamic characteristics of the device and the equations interconnection topology.

Keywords

Wind energy, wind turbine, synchronous generator, and method of finding point, converter, turns and torque

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Τα τελευταία χρόνια γίνεται αρκετός λόγος για τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Η αύξηση της τιμής του πετρελαίου, η επικείμενη εξάντληση των ορυκτών καυσίμων, η αυξανόμενη μόλυνση του περιβάλλοντος, το φαινόμενο του θερμοκηπίου και η βούληση των κρατών για εθνική και ανεξάρτητη ενεργειακή πολιτική με την αξιοποίηση των εγχώριων πηγών ενέργειας, οδηγούν στη χρήση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας που δίνουν σε μεγάλο βαθμό λύση στα παραπάνω προβλήματα. Πηγές ενέργειας όπως η αιολική, έχουν ένα χαρακτηριστικό που τις δίνει την ονομασία ανανεώσιμες, ότι δηλαδή από τη φύση τους ανανεώνονται διαρκώς και προσφέρονται στον άνθρωπο δωρεάν για εκμετάλλευση.

Ένα δεύτερο ιδιαίτερα ευπρόσδεκτο χαρακτηριστικό των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας είναι ότι οι τεχνολογίες εκμετάλλευσής τους βρίσκονται μέσα στις κατασκευαστικές δυνατότητες των αναπτυσσόμενων τεχνολογικά χωρών, συνεπώς, εκτός από τη συνεισφορά στο ενεργειακό ισοζύγιο της χώρας, συνεισφέρουν σημαντικά, αν αναπτυχθούν κατάλληλα και στη δημιουργία νέων θέσεων εργασίας.

Ένα τρίτο χαρακτηριστικό τους είναι ότι οι ανανεώσιμες μορφές ενέργειας δεν είναι εξαγωγίμες, συνεπώς η εκμετάλλευση τους πρέπει να γίνει στη θέση όπου εμφανίζονται άρα πρόκειται για ένα αποκεντρωμένο σύστημα παραγωγής ενέργειας μέσα στην ανθρώπινη κλίμακα δραστηριότητας. Επιπλέον οι ανανεώσιμες μορφές ενέργειας δεν ρυπαίνουν το περιβάλλον, οπότε η εκμετάλλευση τους είναι συνεπής προς μια οικολογικά σωστή αντιμετώπιση της σχέσης ανθρώπινη δραστηριότητα και περιβάλλον, μια σχέση που μόνο τα τελευταία χρόνια ο άνθρωπος συνειδητοποίησε ότι πρέπει να λαμβάνεται σοβαρά υπόψη σε όλα τα σενάρια οικονομικής και τεχνολογικής ανάπτυξης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1⁰

ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗΝ ΑΙΟΛΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ



1.1 Ενεργειακό πρόβλημα - Κλιματική αλλαγή - Πρωτόκολλο του Κιότο

Το ενεργειακό πρόβλημα συσχετίζει τα ενεργειακά αποθέματα που διαρκώς μειώνονται με τις απαιτήσεις για κατανάλωση ενέργειας που διαρκώς αυξάνονται. Κύριο χαρακτηριστικό του είναι η συνεχής αύξηση στις τιμές ενέργειας, αλλά και η εξάντληση των ενεργειακών πόρων, καθώς από τα ορυκτά καύσιμα προέρχεται το 78% της ενέργειας που παράγεται παγκοσμίως. Επιβάλλεται λοιπόν η μείωση της χρήσης των ορυκτών καυσίμων, τα οποία αποτελούν και το σημαντικότερο παράγοντα ρύπανσης της ατμόσφαιρας στις μέρες μας, και ως εκ τούτου η αύξηση του ποσοστού παραγωγής ενέργειας από τις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας το οποίο περιορίζεται μόλις στο 16% της παγκόσμιας παραγωγής. Η καύση λοιπόν των ορυκτών καυσίμων απελευθερώνει στην ατμόσφαιρα δισεκατομμύρια τόνους διοξειδίου του άνθρακα (CO₂) το οποίο θεωρείται υπεύθυνο για το φαινόμενο του θερμοκηπίου και τη δραματική αλλαγή του κλίματος στις επόμενες δεκαετίες.

Οι συνέπειες του φαινομένου του θερμοκηπίου, όπως η μείωση των αποθεμάτων του νερού, οι υψηλές θερμοκρασίες κατά τη θερινή περίοδο ή οι απότομες μεταβολές στη θερμοκρασία του πλανήτη, είναι ήδη φανερές τις τελευταίες δεκαετίες. Αξίζει να σημειώσουμε ότι οι πιο ρυπογόνοι σταθμοί παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στην Ευρώπη λειτουργούν στην Ελλάδα, τη Γερμανία, την Πολωνία και την Ισπανία. Η ανάγκη για την αντιμετώπιση όλων των παραπάνω παραγόντων που οδηγούν στις σφοδρές αυτές κλιματικές αλλαγές οδήγησε στην υπογραφή της σύμβασης πλαισίου για την κλιματική αλλαγή, γνωστή ως το πρωτόκολλο του Κιότο. Σύμφωνα με τη σύμβαση αυτή η διεθνής κοινότητα συμφώνησε στη μείωση των εκπομπών αερίων θέτοντας συγκεκριμένο στόχο. Ωστόσο το πιο αποτελεσματικό ρυθμιστικό πλαίσιο που έχει ως στόχο τον περιορισμό των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα και την ταυτόχρονη ανάπτυξη των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας έχει πραγματοποιηθεί από την Ευρωπαϊκή Ένωση.

1.2 Αιολική ενέργεια

Ο άνεμος έχει χρησιμοποιηθεί ως πηγή ενέργειας από τα πανάρχαια χρόνια. Χώρες χρωστούσαν το πλούτο και την ναυτιλιακή ικανότητά τους στον άνεμο που κινούσε τα ιστιοφόρα πλοία τους.

Στην ξηρά από την άλλη χρησιμοποιήθηκε στους ανεμόμυλους άντλησης νερού ή άλεσης σιτηρών. Η κινητική ενέργεια του ανέμου οφείλεται στην ηλιακή ακτινοβολία και περίπου το 2% της ηλιακής ενέργειας που προσπίπτει στον πλανήτη μας μετατρέπεται σε αιολική ενέργεια. Η ισχύς των ανέμων σε όλη τη γη υπολογίζεται σε 3.610^9 MW.

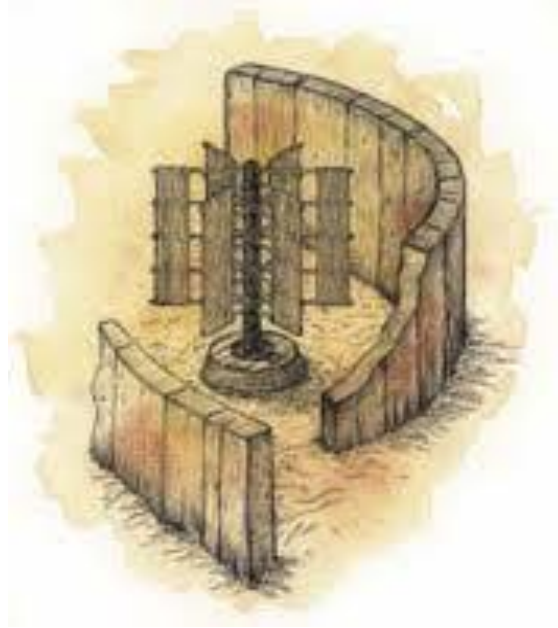
Ενδεικτικά οι ενεργειακές ανάγκες των Η.Π.Α είναι μόλις το 10% της ενέργειας των ανέμων που πνέουν εκεί, γεγονός που αποδεικνύει πόσο πλούσια πηγή ενέργειας είναι ο άνεμος. Η αιολική ενέργεια αποτελεί συνεπώς μια αστείρευτη πηγή ενέργειας με αξιοσημείωτο δυναμικό και με δωρεάν πρώτη ύλη στη διάθεση της ανθρωπότητας και προβάλλει σήμερα ως μια από τις πιο κατάλληλες εναλλακτικές πηγές για την παραγωγή ηλεκτρισμού αλλά και για άλλες χρήσεις.

1.2.1 Ιστορική ανασκόπηση

Η αιολική ενέργεια είναι μια από τις πιο παλιές φυσικές πηγές ενέργειας που αξιοποιήθηκε σε μηχανική μορφή. Η πρωτογενής αυτή μορφή ενέργειας που παρέχεται άμεσα από τη φύση, έπαιξε αποφασιστικό ρόλο στην εξέλιξη της ανθρωπότητας ιδιαίτερα με τη χρήση της στη ναυτιλία για συγκοινωνία και εξερευνήσεις. Η σημασία της ενέργειας του ανέμου φαίνεται στην ελληνική μυθολογία όταν ο Αίολος διορίζεται από τους θεούς ταμίας των ανέμων.

Πρώτη χρήση της αιολικής ενέργειας από τον άνθρωπο έγινε για την κίνηση των πλοίων τους. Υπάρχουν επίσης ιστορικές και αρχαιολογικές μαρτυρίες ότι ανεμόμυλοι χρησιμοποιήθηκαν από τους Κινέζους, τους Πέρσες και τους Αιγύπτιους πολλούς αιώνες πριν από τη γέννηση του

Χριστού. Περισσότερα σήμερα είναι γνωστά για τους ανεμόμυλους των Περσών οι οποίοι ήταν κατακόρυφου άξονα όπως φαίνεται στο σχήμα 1.2.1.



Σχήμα 1.2.1.:Ανεμόμυλος πλακών κατακόρυφου άξονα.

Στις χώρες της ανατολής, στην Περσία, στη Μικρά Ασία, στο Αιγαίο, οι ανεμόμυλοι χρησιμοποιήθηκαν από πολύ παλιά για την άλεση δημητριακών, μέχρι τη Βυζαντινή εποχή και μεταγενέστερα. Χρησιμοποιήθηκαν όμως και για άλλους σκοπούς, με περισσότερο σπουδαίο την άντληση των υδάτων. Η μεγαλύτερη διάδοση ανεμόμυλων έγινε στην Ολλανδία. Εκεί με την βοήθεια των ανεμόμυλων απορροφήθηκαν τα νερά των τεράστιων σε έκταση περιοχών της χώρας που βρίσκονταν σε χαμηλή στάθμη και διοχετεύτηκαν στη θάλασσα.

Στην Ελλάδα για την άντληση ποτιστικού νερού από πηγάδια χρησιμοποιήθηκαν οι ανεμόμυλοι κυρίως στην ανατολική Κρήτη. Υπολογίζεται ότι ο αριθμός τους είχε φτάσει προπολεμικά τους 6.000.

Παρακάτω ακολουθεί ένας συνοπτικός πίνακας, στον οποίο αναφέρονται οι κυριότεροι χρονικοί σταθμοί της εξελικτικής πορείας του ανεμόμυλου.

1200μ.χ	Ανεμόμυλοι οριζοντίου άξονα χρησιμοποιούνται στην Ευρώπη για το άλεσμα σιταριού.
1500μ.χ	Στα πεδινά της Ολλανδία εμφανίζονται οι πρώτοι ανεμόμυλοι. Ο Don Quijote τους φέρνει στην Ισπανία.
1600μ.χ	Άποικοι κατασκευάζουν ανεμόμυλους ευρωπαϊκού τύπου στα ανατολικά παράλια της Αμερικής.
1700μ.χ	Οι ατμομηχανές αρχίζουν να αντικαθιστούν τους ανεμόμυλους.
1860	Οι αμερικανοί κατασκευάζουν πολυπτερωτούς ανεμόμυλους(multi bladed) για να χρησιμοποιηθούν για κίνηση αντλιών.
1870	Το Σικάγο γίνεται κέντρο βιομηχανικής παραγωγής ανεμόμυλων.
1900	Οι Δανοί παράγουν ηλεκτρισμό από τον άνεμο.
1920	Ανεμόμυλοι μεταλλικής κατασκευής χρησιμοποιούνται στην Αμερική για ηλεκτροδότηση στα αγροτικά σπίτια.
1930	Οι ανεμόμυλοι στις αγροτικές περιοχές αντικαθίστανται από την επέκταση των δικτύων ηλεκτρικής ενέργειας.
1940	Στο Vermont(Η.Π.Α) κατασκευάζεται για πρώτη φορά πειραματικός ανεμοκινητήρας αρκετά μεγάλης ισχύος με δύο πτερύγια.
1950	Η ατομική ενέργεια μειώνει το ενδιαφέρον για χρησιμοποίηση της αιολικής ενέργειας.
1960	Η μόλυνση του περιβάλλοντος από τις υπάρχουσες πηγές ενέργειας (άνθρακας-πετρέλαιο) αρχίζει να γίνεται έντονη.
1970	Η έλλειψη καυσίμων αναζωογονεί το ενδιαφέρον για αξιοποίηση της ενέργειας του ανέμου.
1976	Τεχνολογικά αναπτυγμένες χώρες διαθέτουν για πρώτη φορά μεγάλο ύψος χρημάτων για προγράμματα γύρω από την τεχνοοικονομική διερεύνηση των ανεμοκινητήρων.
1983	Κατασκευή ανεμοκινητήρων ισχύος 3ΜV.
1990	Κατασκευή ανεμοκινητήρων ισχύος 7ΜV.

(Πίνακας 1.2.1.)

1.2.2 Μειονεκτήματα και πλεονεκτήματα αξιοποίησης της αιολικής ενέργειας

Όπως προαναφέρθηκε η αιολική ενέργεια χρησιμοποιήθηκε στο παρελθόν από τον άνθρωπο, τόσο στη ναυτιλία όσο και στην άρδευση και τη γεωργία. Όμως αντικαταστάθηκε από άλλες πηγές ενέργειας για ολόκληρο σχεδόν τον εικοστό αιώνα, λόγω των σημαντικών μειονεκτημάτων που παρουσίαζε σε σύγκριση με τις υπόλοιπες «πυκνότερες» μορφές ενέργειας. Βέβαια σήμερα οι χρησιμοποιούμενες μηχανές δεν έχουν καμία σχέση τόσο από αεροδυναμικής σκοπιάς όσο και από κατασκευαστικής αντοχής και ποιότητας με τους παλιούς ανεμόμυλους, εμφανίζουν δε αξιοσημείωτη συγκέντρωση ισχύος. Παρόλα αυτά είναι χρήσιμο να εξετάσουμε τα **κυριότερα μειονεκτήματα** που αποδίδονται στην αιολική ενέργεια, ώστε να αποκτήσουμε μια πιο ολοκληρωμένη εικόνα.

- Η χαμηλή ροή αξιοποιήσιμης κινητικής ενέργειας του ανέμου (Watt/m^2) κατατάσσει την αιολική ενέργεια στις «αραιές» μορφές ενέργειας. Τυπικές τιμές ροής της αξιοποιήσιμης αιολικής ισχύος κυμαίνονται μεταξύ 200W/m^2 και 400W/m^2 . Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη χρήση είτε μεγάλου αριθμού ανεμογεννητριών είτε τη χρήση μηχανών μεγάλων διαστάσεων, για την παραγωγή της επιθυμητής ποσότητας ενέργειας. Σήμερα καταβάλλονται προσπάθειες αύξησης της συγκέντρωσης ισχύος των αιολικών μηχανών, οι οποίες σε επιλεγμένες περιπτώσεις πλησιάζουν ή και υπερβαίνουν τα 500W/m^2 .
- Η αδυναμία ακριβούς πρόβλεψης της ταχύτητας και της διεύθυνσης των ανέμων δεν μας δίνει τη δυνατότητα να έχουμε την απαραίτητη αιολική ενέργεια τη στιγμή που τη χρειαζόμαστε. Το γεγονός αυτό μας υποχρεώνει να χρησιμοποιούμε τις αιολικές μηχανές κυρίως σαν εφεδρικές πηγές ενέργειας σε συνδυασμό πάντοτε με κάποια

άλλη πηγή ενέργειας (π.χ. σύνδεση με ηλεκτρικό δίκτυο, παράλληλη λειτουργία με μονάδες Diesel κλπ.).

- Σε περιπτώσεις διασύνδεσης της αιολικής εγκατάστασης 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 ανεμογεννητριών μεταβλητού βήματος 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. Τέλος, ακόμα και σήμερα εξακολουθούν να μας απασχολούν οι διαδικασίες ζεύξης-απόζευξης αιολικών μηχανών στο ηλεκτρικό δίκτυο, λόγω των μεταβατικών φαινομένων που αυτές προκαλούν. Λόγω των τελευταίων προβλημάτων απαγορεύεται η διασύνδεση, πέραν ενός ορίου παραγόμενης ισχύος, αιολικών μηχανών σε μικρά τοπικά ηλεκτρικά δίκτυα, τα οποία όμως αποτελούν και την πλειοψηφία των δικτύων του ελληνικού αρχιπελάγους.
- Αντίστοιχα, σε περιπτώσεις αυτόνομων μονάδων είναι απαραίτητη η ύπαρξη συστημάτων αποθήκευσης της παραγόμενης ενέργειας, σε μια προσπάθεια να έχουμε συγχρονισμό της ζήτησης και της διαθέσιμης ενέργειας. Το γεγονός αυτό συνεπάγεται αυξημένο αρχικό κόστος (λόγω της προσθήκης του συστήματος αποθήκευσης ενέργειας) και βέβαια επιπλέον απώλειες ενέργειας κατά τις φάσεις μετατροπής και αποθήκευσης, καθώς και αυξημένες υποχρεώσεις συντήρησης και εξασφάλισης της ομαλής λειτουργίας.
- Ένα ακόμα μειονέκτημα της αιολικής ενέργειας είναι η περιορισμένη δυνατότητα αξιοποίησης του διαθέσιμου αιολικού δυναμικού. Στην πραγματικότητα αξιοποιούμε μερικώς μόνο την

κινητική ενέργεια, η οποία αντιστοιχεί σε ένα περιορισμένο φάσμα ταχύτητας του ανέμου.

- Πρέπει επίσης να ληφθεί υπόψη ότι από το σύνολο της απορροφούμενης αιολικής ενέργειας από μια ανεμογεννήτρια, μόνο ένα περιορισμένο μέρος της μετατρέπεται σε ωφέλιμη ενέργεια λόγω των αεροδυναμικών και των μηχανικών απωλειών και περιορισμών.
- Τέλος, θα πρέπει να επισημανθεί το σχετικά υψηλό κόστος της αρχικής επένδυσης για την εγκατάσταση μιας ανεμογεννήτριας, ειδικά μάλιστα για μεμονωμένες περιπτώσεις αιολικών μηχανών μικρού μεγέθους. Πρέπει όμως να προσθέσουμε ότι η συνεχής εξέλιξη της τεχνολογίας και ο ανταγωνισμός μεταξύ των κατασκευαστών έχει τα τελευταία χρόνια συμπίεσει σημαντικά τις τιμές των ανεμογεννητριών.

Αν και δεν είναι δυνατόν να αγνοήσουμε τα μειονεκτήματα που συνοδεύουν την αξιοποίηση της αιολικής ενέργειας, είναι επίσης σημαντικό να ληφθούν υπόψη και οι παρακάτω παράγοντες, ορισμένοι από τους οποίους ισχύουν ιδιαίτερα για τη χώρα μας, ώστε να διαμορφώσουμε μια ολοκληρωμένη εικόνα για τις δυνατότητες και τους περιορισμούς αξιοποίησης της αιολικής ενέργειας. Πιο συγκεκριμένα:

- Η αιολική ενέργεια αποτελεί μια ανανεώσιμη πηγή ενέργειας. Το γεγονός αυτό σημαίνει ότι δεν εξαντλείται σε αντίθεση με το σύνολο των συμβατικών καυσίμων, των οποίων τα βεβαιωμένα αποθέματα του πλανήτη μας αναμένεται να εξαντληθούν σε σύντομο χρονικό διάστημα.
- Αποτελεί μια καθαρή μορφή ενέργειας, ήπια προς το περιβάλλον. Η χρήση της δεν επιβαρύνει τα οικοσυστήματα των περιοχών εγκατάστασης και παράλληλα αντικαθιστά ιδιαίτερα ρυπογόνες πηγές ενέργειας, όπως το κάρβουνο, το πετρέλαιο και την πυρηνική

ενέργεια. Τα σημαντικά περιβαλλοντικά προβλήματα των περισσότερων ανεπτυγμένων χωρών καθώς και της χώρας μας (π.χ. Αθήνα, Πτολεμαΐδα, Μεγαλόπολη, κλπ.) καθιστούν την αιολική ενέργεια ιδιαίτερα ελκυστική σε σχέση με την προστασία του περιβάλλοντος.

Επιπλέον **ειδικά για την χώρα μας** ισχύουν και τα ακόλουθα στοιχεία:

- Η χώρα μας διαθέτει πολύ υψηλό αιολικό δυναμικό (κυρίως τα νησιωτικά συμπλέγματα του Αιγαίου) και μάλιστα άριστης ποιότητας. Πράγματι στα περισσότερα νησιά του αρχιπελάγους εμφανίζονται άνεμοι σημαντικής ταχύτητας και διάρκειας σχεδόν ολόκληρο το έτος.
- Η περιορισμένη συμβολή των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στο ενεργειακό ισοζύγιο, με αμελητέα μάλιστα τη συμμετοχή της αιολικής ενέργειας, καθιστά προφανείς τις σχεδόν απεριόριστες δυνατότητες σύστασης αιολικών εγκαταστάσεων παραγωγής ενέργειας, σε μια αγορά με σημαντικό αριθμό αναξιοποίητων θέσεων εγκατάστασης.
- Η ισχυρή εξάρτηση της χώρας μας από εισαγόμενα καύσιμα, τα οποία αφ' ενός οδηγούν σε συναλλαγματική αιμορραγία τη χώρα μας, αφ' ετέρου σε εξάρτησή της από χώρες εκτός της Ευρωπαϊκής Ένωσης. Ας σημειωθεί ότι, η χώρα μας εξαρτάται κυρίως από το εισαγόμενο πετρέλαιο, που προέρχεται κυρίως από χώρες υψηλού πολιτικό-οικονομικού κινδύνου και οι οποίες εμπλέκονται αρκετά συχνά σε πολιτικές και στρατιωτικές κρίσεις.
- Η υψηλή σεισμικότητα της χώρας μας εγκυμονεί κινδύνους για τις θερμοηλεκτρικές και κυρίως τις πυρηνικές εγκαταστάσεις, με αποτέλεσμα να θεωρείται προβληματική στο άμεσο μέλλον η κατασκευή πυρηνικών μονάδων στη χώρα μας. Προφανώς με τα σημερινά τεχνολογικά δεδομένα είναι δυνατή η δημιουργία υψηλής ασφάλειας συμβατικών μονάδων, με δυσανάλογη όμως αύξηση του κόστους της παραγόμενης ενέργειας.

- Η σημαντική διασπορά και ανομοιομορφία του κόστους παραγωγής της ηλεκτρικής ενέργειας στα διάφορα τμήματα της χώρας μας. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα, ότι ακόμα και σε περίπτωση που η μέση τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας στη χώρα μας θα είναι ελαφρώς κατώτερη του οριακού κόστους της παραγόμενης ηλεκτρικής kWh, σε αρκετά νησιά της χώρας μας το κόστος παραγωγής της ηλεκτρικής ενέργειας είναι πολλαπλάσιο, ενίοτε και υπερδεκαπλάσιο, του οριακού κόστους παραγωγής της Δ.Ε.Η.
- Η δυνατότητα τόνωσης της ελληνικής κατασκευαστικής δραστηριότητας με προϊόντα υψηλής εγχώριας προστιθέμενης αξίας (Ε.Π.Α.) και συγκριτικά χαμηλού επενδυτικού κόστους, όπως θα μπορούσε να αποτελέσει η απόφαση συμπαραγωγής ανεμογεννητριών στη χώρα μας, συνεισφέροντας ταυτόχρονα και στη μείωση της ανεργίας.
- Η αξιόλογη εγχώρια ηλεκτρο-μηχανολογική εμπειρία καθώς και το σημαντικό επιστημονικο-ερευνητικό ενδιαφέρον και δραστηριότητα στη γνωστική περιοχή της αιολικής ενέργειας.
- Η δυνατότητα αξιοποίησης επενδυτικών προγραμμάτων, που χρηματοδοτούνται εν μέρει από ελληνικούς και κοινοτικούς φορείς, δεδομένων των υψηλών επιχορηγήσεων και του συγκριτικά χαμηλού κόστους που συνοδεύουν παρόμοιες επενδύσεις σε τομείς αξιοποίησης της αιολικής ενέργειας.
- Η δυνατότητα αποκεντρωμένης ανάπτυξης μέσα από αυτόνομα συστήματα παραγωγής ενέργειας, γεγονός που μπορεί να ενισχύσει σημαντικά την οικονομική δραστηριότητα των τοπικών κοινωνιών.

Συνοψίζοντας τα ανωτέρω, πιστεύεται ότι τα πλεονεκτήματα που απορρέουν από την αξιοποίηση της αιολικής ενέργειας είναι ασυγκρίτως περισσότερα και σοβαρότερα από τα υπάρχοντα μειονεκτήματα. Για το λόγο αυτό η στρατηγική απόφαση να αξιοποιηθεί στη χώρα μας το υπάρχον αιολικό δυναμικό, καθώς και να

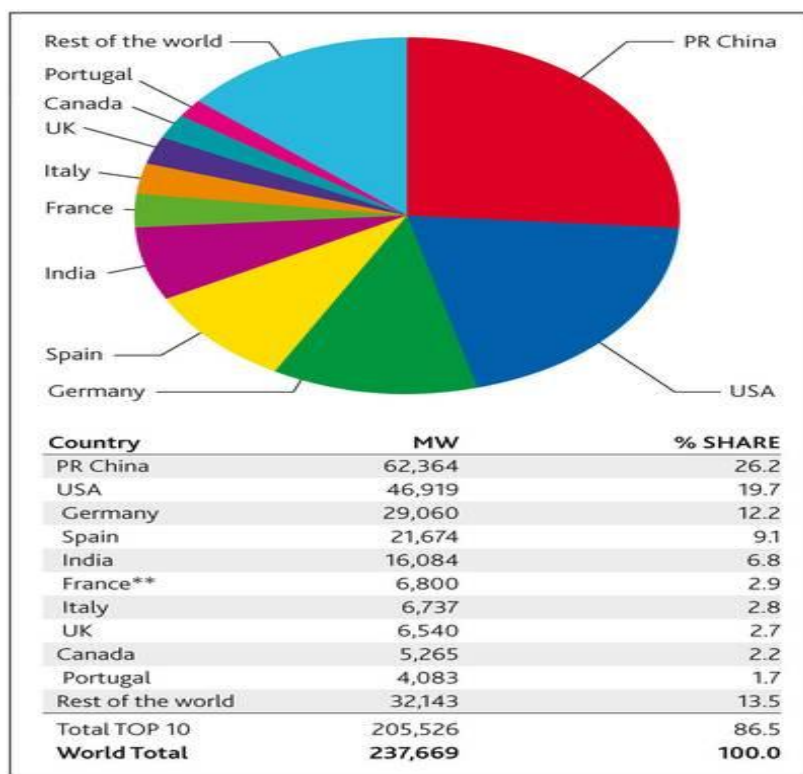
αναπτυχθούν κατασκευαστικές μονάδες ανεμογεννητριών, μπορεί κάλλιστα να οδηγήσει σε οικονομικά βιώσιμες αλλά και ελκυστικές επενδύσεις, μη λαμβάνοντας υπόψη στους ισολογισμούς μας τα παράλληλα οφέλη, που αφορούν την προστασία του περιβάλλοντος και την οικονομική ανεξαρτησία της χώρας μας.

1.2.3 Η τρέχουσα κατάσταση της αιολικής ενέργειας

Πολλές χώρες παγκοσμίως παράγουν μέρος της αναγκαίας ενέργειάς τους με την εκμετάλλευση της αιολικής ενέργειας. Σύμφωνα με κανονισμούς, μέχρι το 2020, πρέπει να έχουμε αύξηση του ποσοστού διείσδυσης των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στην τελική κατανάλωση στο ποσοστό του 20% για την Ευρωπαϊκή Ένωση.

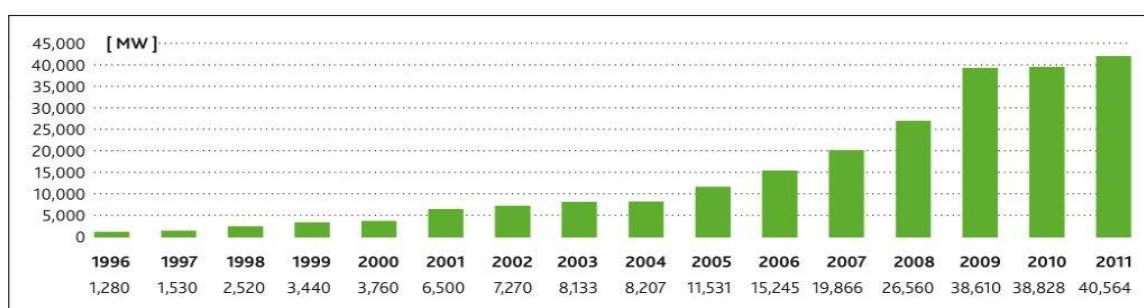
1.2.4 Παγκόσμια

Το αιολικό δυναμικό μεγαλώνει όλο και περισσότερο. Κάθε χρόνο οι ανεμογεννήτριες αυξάνονται κατά 20% και η Παγκόσμια Ένωση Αιολικής Ενέργειας προβλέπει ότι η αιολική ισχύς θα φτάσει στα 1.000 GW μέχρι το 2020. Σε απόλυτους όρους, η Κίνα έχει αναδειχθεί σε ηγετική δύναμη στον τομέα της αιολικής ενέργειας, αφήνοντας πίσω ΗΠΑ και Γερμανία. Ωστόσο οι ευρωπαϊκές χώρες, μεταξύ των οποίων Δανία, Ισπανία και Γερμανία, ξεπερνούν την Κίνα στην αιολική ενέργεια κατά κεφαλήν.



Σχήμα 1.2.4.α.: Οι χώρες με τη μεγαλύτερη παγκόσμια παραγωγή αιολικής ενέργειας.

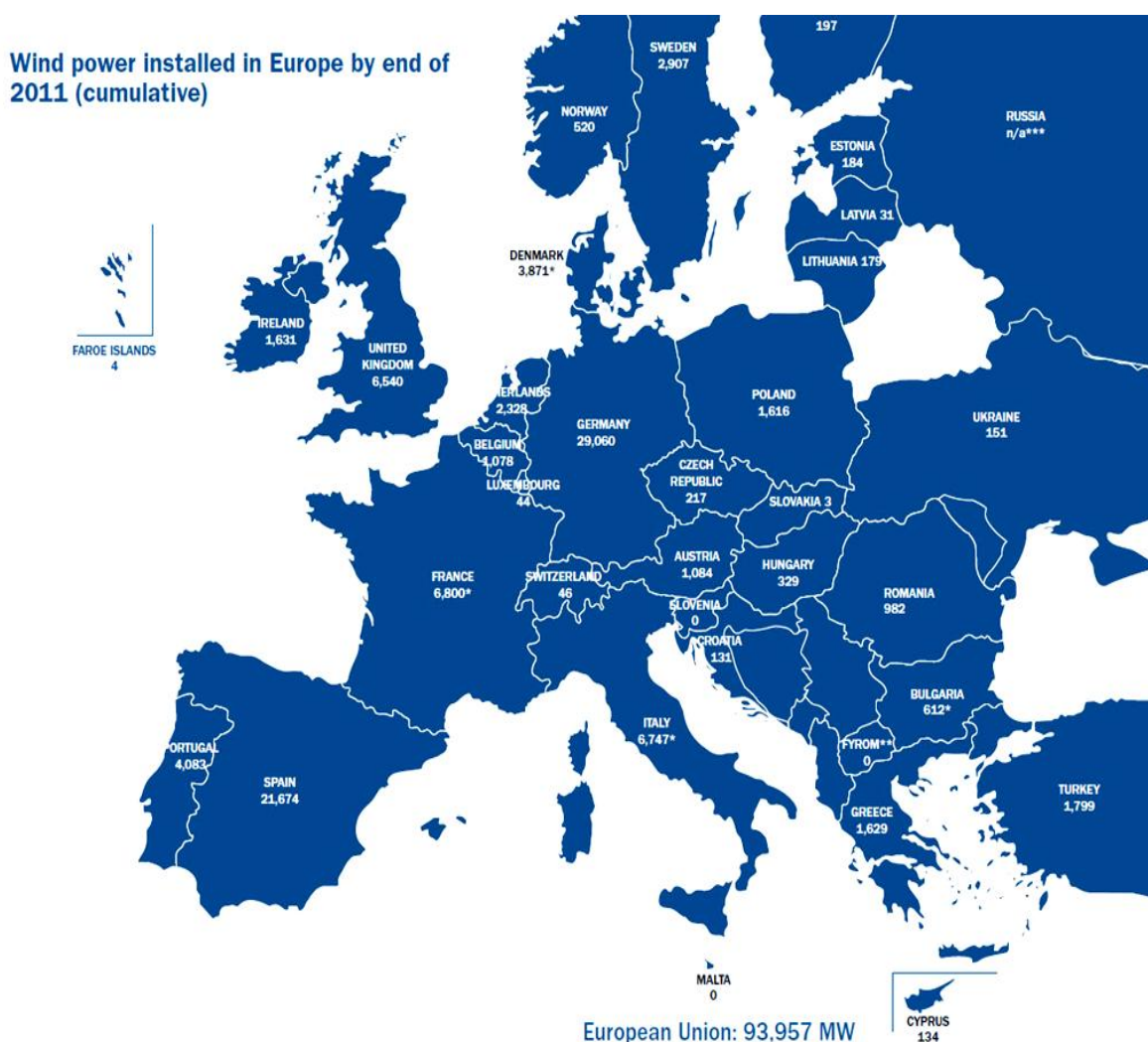
Πολύ σημαντική ήταν η αύξηση της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με βάση τη χρήση αιολικής ενέργειας τα τελευταία 15 χρόνια. Υπήρξε μια σταδιακή αύξηση της ετήσιας εγκατεστημένης αιολικής ενέργειας κάτι που οδήγησε την αιολική ενέργεια σε σημαντική συνιστώσα των ΑΠΕ.



Σχήμα 1.2.4.β.: Η ετήσια παγκόσμια εγκατάσταση αιολικής ενέργειας από το 1996 έως και σήμερα.

1.2.5 Ευρώπη

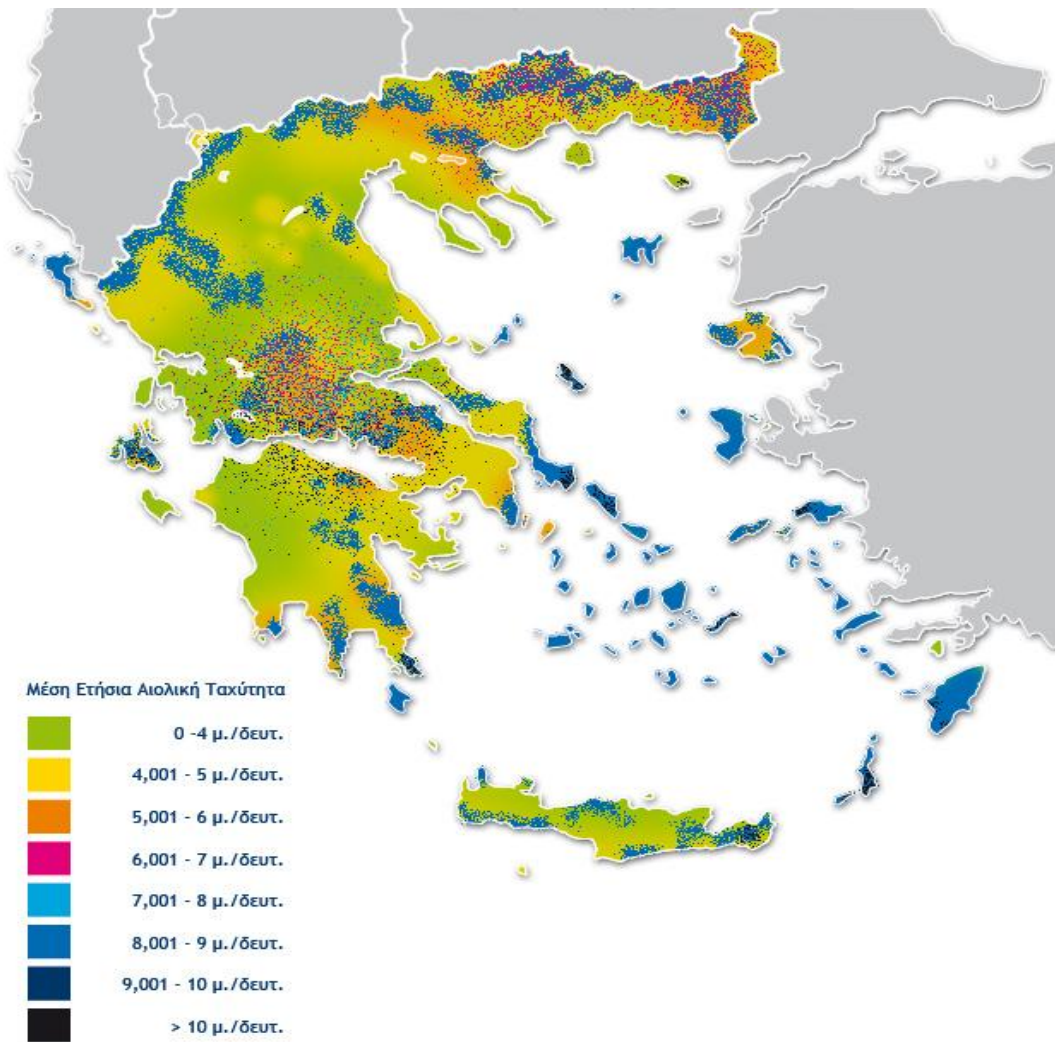
Το 2011, η αιολική ενέργεια παρήγαγε συνολικά στην Ευρωπαϊκή Ένωση 96,957MW και εμφανίζει ένα μέσο ετήσιο ρυθμό ανάπτυξης 20% τα τελευταία 10 χρόνια. Έως το 2020 αναμένεται ότι η παραγωγή αιολικής ενέργειας θα είναι 230GW, εκ των οποίων τα 190GW θα είναι χερσαία και τα υπόλοιπα 40GW υπεράκτια. Η Γερμανία εξακολουθεί να έχει τα πρωτεία στην συνολική εγκατεστημένη ισχύ, ενώ την ακολουθούν η Ισπανία, η Ιταλία, η Γαλλία και το Ηνωμένο Βασίλειο.



Σχήμα 1.2.5.: Η εγκατεστημένη αιολική ισχύς ανά κράτος στην ΕΕ για το 2011.

1.2.6 Ελλάδα

Η χώρα μας διαθέτει πλούσιο αιολικό δυναμικό, ειδικότερα στα παράλια της ηπειρωτικής Ελλάδας και κυρίως στα νησιά του Αιγαίου πελάγους, όπου οι άνεμοι που πνέουν εκεί ξεπερνούν πολύ συχνά σε ένταση τα 8 ή 9 Beaufort. Η αιολική ενέργεια λοιπόν μπορεί να αποτελέσει σημαντική δύναμη ανάπτυξης. Εκτιμάται ότι σήμερα λειτουργούν περίπου 1400 MW από αιολικά πάρκα και στόχος είναι να εγκατασταθούν 7.500 MW μέχρι το 2020, από τα οποία τα 300MW αφορούν υπεράκτια αιολικά πάρκα.



Σχήμα 1.2.6.: Αιολικός χάρτης της Ελλάδας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2⁰

ΑΙΟΛΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ



2.1 Ο Άνεμος

Οι άνεμοι αποτελούν κίνηση αέριας μάζας στην ατμόσφαιρα που κυρίως προκαλείται από την ηλιακή ακτινοβολία. Ειδικότερα, είναι αποτέλεσμα των θερμοκρασιακών διαφορών που δημιουργούνται στην Τροπόσφαιρα είτε λόγω γεωγραφικού πλάτους είτε λόγω διαφορετικής θερμοκρασίας της επιφάνειας της γης. Οι διαφορετικές γεωγραφικές θερμοκρασίες οφείλονται σε δύο κύριους παράγοντες:

- υψομετρική διαφορά δύο σημείων
- διαφορετική φύση της επιφάνειας (έδαφος ή νερό)

Οι άνεμοι που δημιουργούνται λόγω διαφορετικού γεωγραφικού πλάτους είναι φαινόμενα σχεδόν σταθερά ή μεταβλητά με μεγάλη περίοδο μεταβολής (εποχιακά). Λόγω των μεγάλων γεωγραφικών αποστάσεων που καλύπτουν οι κινήσεις αυτές καθώς και της μεγάλης ατμοσφαιρικής μάζας που μετακινείται, τα φαινόμενα αυτά επηρεάζονται και από τη περιστροφή της γης γύρω από τον άξονά της.

Οι άνεμοι που οφείλονται στον δεύτερο παράγοντα χαρακτηρίζονται από μικρή χρονική διάρκεια (ωριαία ή ημερήσια) και παρατηρούνται είτε κοντά σε ορεινούς όγκους, σε κοιλάδες και σε λεκανοπέδια, είτε σε περιοχές κοντά σε θάλασσα ή λίμνη που υπάρχει διαφορετικός ρυθμός θέρμανσης ή ψύξης του εδάφους και του υδάτινου όγκου.

Για την πλήρη περιγραφή του ανέμου πρέπει να γνωρίζουμε την ένταση, δηλαδή την ταχύτητα με την οποία κινείται και τη διεύθυνσή του. Η διεύθυνση και η ταχύτητα του ανέμου εξαρτώνται τόσο από ειδικούς παράγοντες (γενική ατμοσφαιρική κυκλοφορία, πεδίο πίεσης), όσο και από τους τοπικούς παράγοντες (ανάγλυφο της περιοχής, ύπαρξη θάλασσας). Η γενική ατμοσφαιρική κυκλοφορία οφείλεται στη διαφορετική θερμοκρασία μεταξύ Ισημερινού και πόλων, στην περιστροφή της γης, καθώς και στην ανομοιομορφία της θερμικής συμπεριφοράς ξηράς και θάλασσας.

2.1.1 Χαρακτηριστικές παράμετροι του ανέμου

α. Μέση ταχύτητα του ανέμου.

Η χαμηλότερη περιοχή της ατμόσφαιρας, στην οποία βρίσκονται και οι περισσότερες κατασκευές, ονομάζεται ατμοσφαιρικό οριακό στρώμα. Εκεί, η κίνηση του ανέμου επιβραδύνεται από δυνάμεις τριβής και μεγάλα εμπόδια στην επιφάνεια της γης, καθώς και από φαινόμενα που οφείλονται στον στροβιλισμό. Ο στροβιλισμός, προκαλεί απότομες μεταβολές στην ταχύτητα του ανέμου, γνωστές και ως ριπές.

Από μετρήσεις της ταχύτητας του ανέμου σε διάφορα ύψη από το έδαφος, διαπιστώνουμε ότι:

- η ταχύτητα του ανέμου αυξάνεται συναρτήσει του ύψους από το έδαφος
- στην περιοχή υπάρχουν διακυμάνσεις της ταχύτητας του ανέμου, δηλαδή στροβιλισμός
- ο στροβιλισμός διαδίδεται σε ένα ευρύ φάσμα συχνοτήτων

Προκειμένου να διαχωριστούν οι μεταβολές της ταχύτητας του ανέμου που οφείλονται στο στροβιλισμό, από τις πιο αργές που οφείλονται σε μετεωρολογικά φαινόμενα, χρησιμοποιείται το μέγεθος της μέσης τιμής της ταχύτητας του ανέμου, \bar{V} , που δίνεται από τη παρακάτω σχέση:

$$\bar{V} = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} V(t) dt \quad \mathbf{2.1.1.α.}$$

όπου:

$V(t)$: η στιγμιαία ταχύτητα του ανέμου

T : το χρονικό διάστημα στο οποίο γίνεται η ολοκλήρωση, ώστε να υπολογιστεί η μέση τιμή

β. Στιγμιαία ταχύτητα του ανέμου.

Είναι το άθροισμα της μέσης ταχύτητας και της διακύμανσης γύρω από τη μέση τιμή.

$$V(t) = \bar{V} + V'(t) \quad \mathbf{2.1.1.β.}$$

$$\bar{V} = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} V(t) dt \quad V'(t) = 0 \quad \mathbf{2.1.1.γ.}$$

γ. Μέγιστη ταχύτητα του ανέμου.

Εξαρτάται από τη γεωγραφική θέση της περιοχής και τα χαρακτηριστικά του εδάφους και καθορίζει την αντοχή μιας αιολικής μηχανής. Με βάση τις μετρήσεις ανά ώρα καθορίζεται η μέγιστη ημερήσια ταχύτητα του ανέμου και στη συνέχεια η μέγιστη μηνιαία και τέλος η μέγιστη ετήσια ταχύτητα του ανέμου που θα πρέπει να μελετηθεί σε βάθος χρόνου τουλάχιστον μιας δεκαετίας.

δ. Ριπή του ανέμου.

Είναι η ξαφνική και μικρής διάρκειας (περίπου 20sec) αύξηση της ταχύτητας του ανέμου. Η ταχύτητα του ανέμου μετά το τέλος της ριπής επανέρχεται στα προηγούμενα επίπεδα. Η ριπή συνήθως ξεπερνάει τα 9m/sec και διαφέρει από τα συνηθισμένα επίπεδα περίπου κατά 4-5m/sec. Οι ριπές ανέμου καθορίζουν την κόπωση της μηχανής και αν διαρκέσουν περισσότερο από 30sec, θα πρέπει ο μηχανισμός ασφαλείας να θέσει την ανεμογεννήτρια εκτός λειτουργίας

ε. Διεύθυνση του ανέμου.

Ορίζεται από το σημείο του ορίζοντα από το οποίο φυσά ο άνεμος σε σχέση με τη θέση την οποία μελετάμε. Η διεύθυνση του ανέμου εμφανίζει μικρότερες διακυμάνσεις σε σχέση με την ταχύτητά του και εξαρτάται από τον προσανατολισμό της τοποθεσίας, τα χαρακτηριστικά του εδάφους και τη βλάστηση. Ως κύρια διεύθυνση

του ανέμου ορίζεται αυτή που συνεισφέρει τουλάχιστον 10% στη συνολική διαθέσιμη αιολική ενέργεια.

στ. Τραχύτητα του εδάφους.

Η τραχύτητα εκφράζει το είδος του εδάφους και εκφράζεται:

1. Από το μήκος της τραχύτητας Z_0 .
2. Από την κλάση (κατηγορία τραχύτητας).

Το μήκος της τραχύτητας μπορεί να αλλάξει με τις εποχές, ορίζεται για επιφάνειες με ομοιόμορφη κατανομή στοιχείων τραχύτητας και επηρεάζεται από την πυκνότητα των εδαφικών χαρακτηριστικών. Για επίπεδη περιοχή, με τα επίπεδα τραχύτητας να καταλαμβάνουν το 10-20%, το Z_0 συνοδεύεται με το μέσο ύψος (h) των στοιχείων τραχύτητας με τη σχέση:

$$Z_0 = 0,15h \quad \mathbf{2.1.1.δ.}$$

Αν $Z_0 \leq 0,03$, τότε κλάση = $1,698823 + \ln(Z_0) / \ln(150)$ **2.1.1.ε.**

Αν $Z_0 > 0,03$, τότε κλάση = $3,912489 + \ln(Z_0) / \ln(3,333333)$ **2.1.1.στ.**

ζ. Ανατάραξη του αέρα (Τύρβη).

Η διακύμανση της ταχύτητας του αέρα γύρω από την μέση τιμή. Η ένταση της ανατάραξης εξαρτάται από την τραχύτητα του εδάφους. Μπορεί να υπολογισθεί με βάση το μήκος της τραχύτητας Z_0 .

Για $Z_0 \leq 0,20m$
$$I = \frac{1}{\ln\left(\frac{z}{z_0}\right)} \quad \mathbf{2.1.1.ζ.}$$

Για $Z_0 > 0,20m$
$$I = \frac{-0,14 \ln z_0 + 0,78}{\ln\left(\frac{z}{z_0}\right)} \quad \mathbf{2.1.1.η.}$$

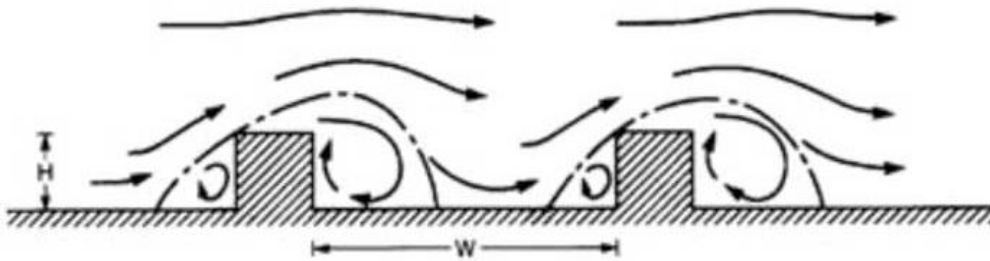
όπου: Z_0 η τραχύτητα του εδάφους σε m

Z το ύψος αναφοράς σε m

I η ένταση ανατάραξης αέρα, καθαρός αριθμός.

η. Στροβιλισμός του αέρα.

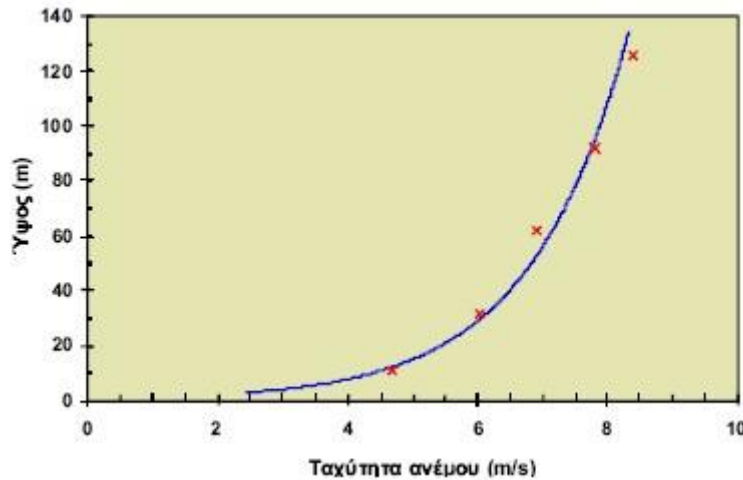
Η ανατάραξη του αέρα δημιουργεί τυχαίους στροβιλισμούς του αέρα λόγω της ύπαρξης διαφόρων χαρακτηριστικών της επιφάνειας του εδάφους. Τα εμπόδια στο έδαφος συχνά δημιουργούν οργανωμένους στροβίλους. Οι οργανωμένοι στροβίλοι επηρεάζουν τόσο την παρεχόμενη ισχύ όσο και την όλη εγκατάσταση του συστήματος μιας αιολικής μηχανής.



Σχήμα 2.1.1.α.: Στροβιλισμός του αέρα.

θ. Κατανομή του ανέμου.

Η κατανομή του ανέμου εκφράζει τις μεταβολές της ταχύτητα του ανέμου σε συνάρτηση με το ύψος.



Σχήμα 2.1.1.β.:Τυπική καμπύλη μεταβολής της ταχύτητας του αέρα σε σχέση με το ύψος.

2.1.2 Κατανομή συχνοτήτων ταχύτητας ανέμου

Για τον υπολογισμό του αιολικού δυναμικού μιας θέσης απαιτείται η γνώση της διαθέσιμης αιολικής ενέργειας, ενέργειας που μεταβάλλεται όμως με το χρόνο. Αντιπροσωπευτική τιμή της μπορεί να είναι η μέση ετήσια τιμή, η οποία όμως για να υπολογισθεί απαιτεί τη γνώση της διάρκειας πνοής των ανέμων κάθε κατηγορίας ή κλίμακας ταχυτήτων.

Με την ύπαρξη των ηλεκτρονικών υπολογιστών είναι επιθυμητή για την εκτίμηση του Αιολικού δυναμικού η ύπαρξη αναλυτικής έκφρασης της διάρκειας πνοής του ανέμου ή της πυκνότητας πιθανότητας πνοής ανέμου.

Για αυτό έχουν προταθεί διάφορες μέθοδοι προσαρμογής αναλυτικών εκφράσεων σε διαθέσιμες ανεμολογικές μετρήσεις. Από τις διάφορες προτάσεις φαίνεται ότι η αναλυτική σχέση Weibull για την πυκνότητα

πιθανότητας έχει ευρύτατη προσαρμογή και για αυτό έχει γενικά καθιερωθεί. Η αναλυτική της έκφραση:

$$P_{(v)} = \left(\frac{k}{c}\right)\left(\frac{V}{c}\right)^{k-1} e^{\left[-\left(\frac{V}{c}\right)^k\right]} \quad \text{2.1.2.α.}$$

όπου:

$P(v)$: κατανομή πυκνότητας της πιθανότητας

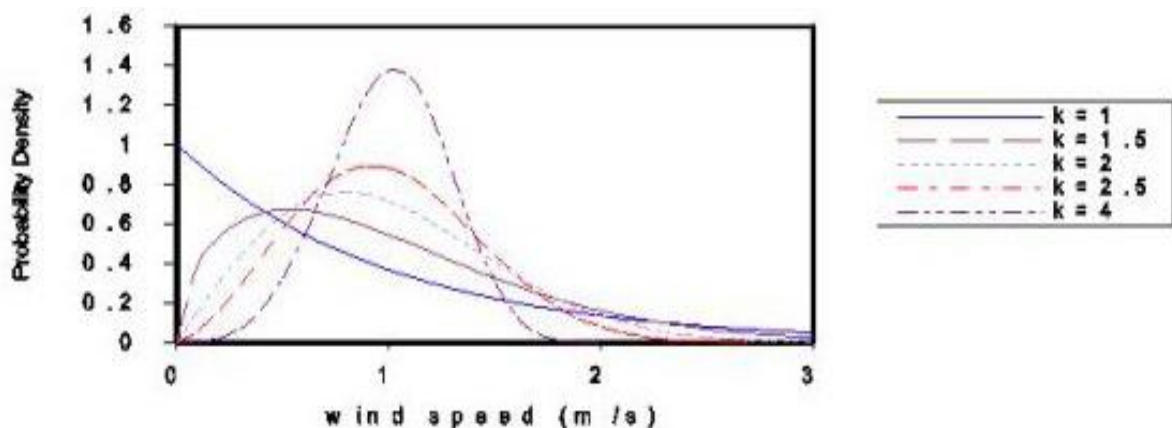
V : η ταχύτητα του ανέμου σε m/sec

k : η παράμετρος μορφής κατανομής Weibull, σχετίζεται με τη μορφή κατανομής και είναι καθαρός αριθμός

c : η παράμετρος ταχύτητας κατανομής Weibull, σχετίζεται με τη μέση ταχύτητα του ανέμου και μετριέται σε m/sec

Μέθοδος υπολογισμού των παραμέτρων k και c

Οι παράμετροι k και c της κατανομής Weibull είναι δυνατόν να υπολογισθούν αν υπάρχουν μετεωρολογικές μετρήσεις στην περιοχή, προσαρμόζοντας με ελάχιστα τετράγωνα την αναλυτική σχέση στα πειράματα.



Σχήμα 2.1.2.:Τυπική μορφή κατανομής Weibull

2.1.3 Ισχύς του ανέμου

Θεωρούμε μια αέρια μάζα m στιγμιαίας ταχύτητας $v(t)$ με κινητική ενέργεια ίση με: $W_{κ}(t) = \frac{1}{2} m * v(t)^2$ **2.1.3.α.**

Εάν το εμβαδό της επιφάνειας που διαπερνά κάθετα ο άνεμος είναι A και η πυκνότητα της αέριας μάζας είναι ρ , τότε η ανά μονάδα χρόνου μάζα είναι: $m(t) = \rho_a * A * v(t)$ **2.1.3.β.**

Από τις 2 παραπάνω σχέσεις προκύπτει ότι η στιγμιαία ισχύς του ανέμου είναι: $P_{αν} = \frac{1}{2} \cdot \rho_a \cdot A \cdot V^3$ **2.1.3.γ.**

2.2 Οι Ανεμογεννήτριες

Η εκμετάλλευση της αιολικής ενέργειας γίνεται με ειδικές μηχανές, που μετατρέπουν την ενέργεια του ανέμου σε ηλεκτρική ενέργεια. Οι μηχανές αυτές ονομάζονται ανεμογεννήτριες.

2.2.1 Ισχύς Ανεμογεννήτριας

Η ισχύς του ανέμου ορισμένης ταχύτητας, υπολογίζεται από τη σχέση:

$$P_{αν} = \frac{1}{2} \cdot \rho_a \cdot A \cdot V^3$$
 2.2.1.α.

όπου,

$P_{αν}$ = Ισχύς του ανέμου ή θεωρητική ισχύς σε KW.

ρ_a = πυκνότητα του αέρα σε Kg/m^3 .

A= Εμβαδόν του κύκλου που δημιουργείται από τη σάρωση των πτερυγίων της ανεμογεννήτριας σε m^2 .

V= ταχύτητα του ανέμου σε m/sec.

Για τα επιμέρους μέρη, θα έχουμε:

$$\rho_{\alpha} = \frac{P_{\alpha}}{R_g \cdot T_{\alpha}} \quad \mathbf{2.2.1.β.}$$

όπου,

P_{α} = πίεση περιβάλλοντος σε Nt/m^2

($1atm=10^5 Nt/m^2$, $1atm=750,058mmHg$, $1mmHg=133,323Nt/m^2$)

R_g = σταθερά αερίων, που για τον αέρα λαμβάνεται ίση με $287 J / Kg^0K$

T_{α} = θερμοκρασία περιβάλλοντος σε 0K . ($T_{\alpha}=\theta_{\alpha}+273$) $\mathbf{2.2.1.γ.}$

$A=\pi D^2/4$ $\mathbf{2.2.1.δ.}$

όπου, D=διάμετρος πτερωτής ανεμογεννήτριας σε m ($D=2r$).

Στην πράξη η ανεμογεννήτρια δεν μπορεί να παραλάβει όλη την ισχύ, επειδή ο αέρας που θα περνούσε πίσω από τον έλικα δεν θα απομακρυνόταν και η κινητική ενέργεια στην έξοδο θα ήταν μηδενική. Μια θ, θα πρέπει να μπορεί να μειώνει την αρχική ταχύτητα του αέρα κατά τα 2/3 της τιμής. Η μηχανική ισχύς που μπορεί να παραχθεί από την αιολική ενέργεια, υπολογίζεται από τη σχέση:

$$P_{\mu\eta\chi} = \frac{1}{2} \cdot \rho_{\alpha} \cdot A \cdot V^3 \cdot C_p \quad \mathbf{2.2.1.ε.}$$

όπου,

C_p =αεροδυναμικός συντελεστής ισχύος, που σύμφωνα με το νόμο του Γερμανού Albert Betz, μπορεί να πάρει τιμή μέχρι 0,593 ($C_{pmax}=0,593$).

$$C_p = C_p(\lambda, \beta) \quad \text{με} \quad \lambda = \frac{\omega * R}{V} \left[\frac{\text{ταχύτητα ακροπτερυγίου}}{\text{ταχύτητα ανέμου}} \right]$$

2.2.1.στ.

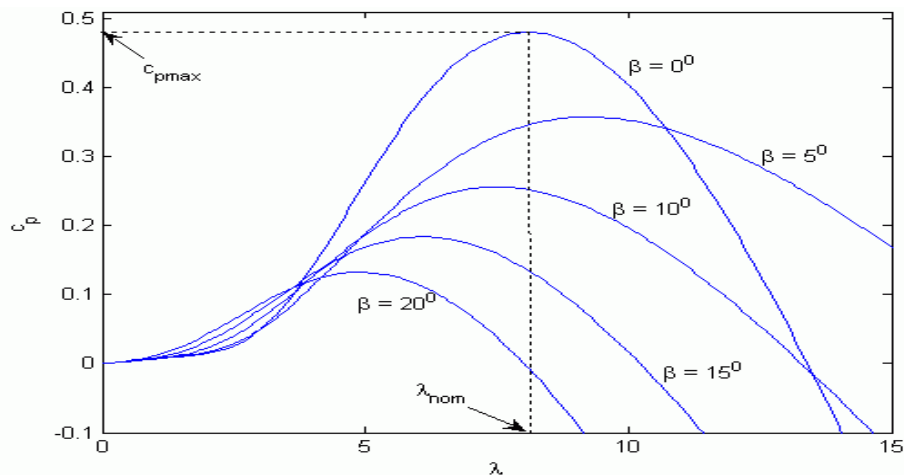
όπου,

ω = η γωνιακή ταχύτητα περιστροφής

R = η ακτίνα του δρομέα

V = η ταχύτητα του ανέμου

και β η γωνία του πτερυγίου ως προς την ταχύτητα του ανέμου, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 2.2.1.α.: Η μεταβολή του αεροδυναμικού συντελεστή ισχύος (C_p) ως προς το λόγο ταχύτητας ακροπτερυγίου (λ) για διάφορες γωνίες πτερυγίου (β).

Σύμφωνα με το νόμο του Albert η μέγιστη μηχανική ισχύς που μπορούμε να πάρουμε από την αιολική ενέργεια είναι ίση με το 59,3% αυτής. Στην πράξη η τιμή του C_p λαμβάνεται συνήθως ίση με το 65% της τιμής του C_{pmax} ($C_p = 0,593 * 0,65 = 0,385$ ή $C_p = 0,4$).

Υπολογίζοντας τις μηχανικές απώλειες στους ανεμοκινητήρες στο 5% ($\eta_m = 0,95$) και στις ηλεκτρικές το 2 μέχρι 5% ($\eta_H = 0,95$ μέχρι $0,98$), η ηλεκτρική ισχύς που θα παραχθεί από τη γεννήτρια θα υπολογίζεται από τη σχέση:

$$P_{\eta\lambda} = \frac{1}{2} \cdot \rho_a \cdot A \cdot V^3 \cdot C_p \cdot \eta_{H/m}$$

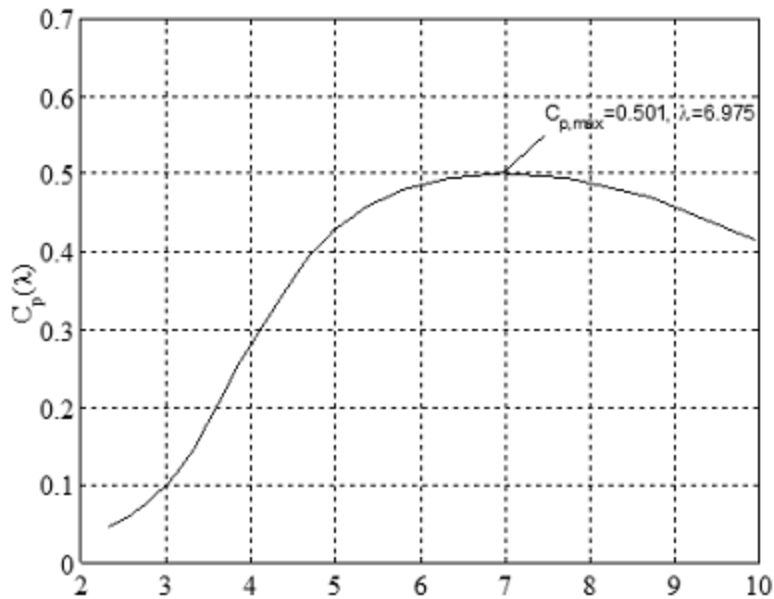
2.2.1.ζ.

όπου, $\eta_{H/m} = \eta_H \cdot \eta_m$

2.2.1.η.

Στο σχήμα 2.2.1.β. φαίνεται η εξάρτηση του αεροδυναμικού συντελεστή C_p από το λόγο λ της ταχύτητας των ακροπτερυγίων. Για να επιτευχθεί η απόδοση της μέγιστης ισχύος από την ανεμογεννήτρια εφαρμόζονται έλεγχοι οι οποίοι έχουν ως σκοπό τη διατήρηση, για κάθε ταχύτητα ανέμου, του μέγιστου αεροδυναμικού συντελεστή C_{pmax} , μέσω κατάλληλης ρύθμισης της ταχύτητας της ανεμογεννήτριας και άρα του λόγου λ , έτσι ώστε $\lambda = \lambda_{opt}$. Τα λειτουργικά σημεία μπορούν να βρίσκονται στη θετική κλίση της, στο ακρότατο ή στην αρνητική κλίση καμπύλης του σχήματος 2.2.1.β..

Εάν ένα λειτουργικό σημείο βρίσκεται στην περιοχή θετικής κλίσης, ο ελεγκτής θα αναλάβει κατάλληλη δράση έτσι ώστε το σημείο λειτουργίας να μετακινηθεί προς τα δεξιά, πιο κοντά στη βέλτιστη τιμή του λόγου της ταχύτητας των ακροπτερυγίων λ_{opt} . Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με αύξηση των στροφών του κινητήρα μέχρι να βρεθεί το βέλτιστο σημείο λειτουργίας. Αντίστοιχα, εάν το λειτουργικό στοιχείο βρίσκεται στη δεξιά πλευρά της κορυφής της καμπύλης, πρέπει να μειωθούν οι στροφές. Έτσι, το σημείο λειτουργίας μπορεί να διατηρηθεί στο C_{pmax} και ο ανεμοκινητήρας να αποδίδει μέγιστη ισχύ για κάθε ταχύτητα ανέμου.



Σχήμα 2.2.1.β.: Τυπική μεταβολή του αεροδυναμικού συντελεστή C_p σε σχέση με το λόγο λ .

Σε ένα σύστημα Α/Γ μεταβλητών στροφών, το σημείο μέγιστης ισχύος (maximum power point, MPP) δύναται να ανιχνευθεί με διάφορες τεχνικές και η γεννήτρια να οδηγηθεί σε αυτό με κατάλληλη ρύθμιση των στροφών της μέσω προσαρμογής του φορτίου της. Βάσει των μετρήσεων τάσης και ρεύματος στο δίκτυο συνεχούς ρεύματος, για την εκάστοτε ταχύτητα ανέμου, ο ελεγκτής δίνει μία εντολή αναπροσαρμογής της σχετικής διάρκειας αγωγής του μετατροπέα ανύψωσης ο οποίος έχει άμεση επίδραση στο ρεύμα που μετάγεται και άρα στην αντιροπή της γεννήτριας. Κατ' αυτόν τον τρόπο το φαινόμενο φορτίο της γεννήτριας αναπροσαρμόζεται ώστε οι στροφές της να αντιστοιχούν στο λ_{opt} , και κατά συνέπεια στη μέγιστη ισχύ.

2.2.2 Καθορισμός της ταχύτητας στην οποία η Ανεμογεννήτρια αρχίζει να λειτουργεί

Η ταχύτητα έναρξης λειτουργίας της ανεμογεννήτριας V_{mi} εξαρτάται από τις απώλειες κενού φορτίου και υπολογίζεται από τη σχέση:

$$P_{κΦ} = \frac{1}{2} \cdot \rho_{\alpha} \cdot C_p \cdot A \cdot V_{mi}^3 \quad \text{2.2.2.α.}$$

οπότε, $V_{mi} = 3 \sqrt{\frac{P_{κΦ}}{\frac{1}{2} \cdot \rho_{\alpha} \cdot C_p \cdot A}}$ και επειδή $P_{κΦ} = 0,1 * P_n$

θα έχουμε: $V_{mi} = 3 \sqrt{\frac{0,2P_n}{\rho_{\alpha} \cdot C_p \cdot A}}$ 2.2.2.β.

όπου,

ρ_{α} =πυκνότητα του αέρα σε Kg/m^3 (συνήθως λαμβάνεται $\rho_{\alpha}=1,25\text{Kg/m}^3$).

C_p =αεροδυναμικός συντελεστής ισχύος (συνήθως λαμβάνεται $C_p =0,385$).

A = Επιφάνεια σάρωσης της πτερωτής της ανεμογεννήτριας σε m^2 .

P_n = Ονομαστική ισχύς της ανεμογεννήτριας.

V_{mi} = ταχύτητα έναρξης λειτουργίας σε m/sec .

2.2.3 Καθορισμός της ταχύτητας διακοπής της λειτουργίας της Ανεμογεννήτριας

Η ταχύτητα της διακοπής της λειτουργίας της ανεμογεννήτριας, V_{mo} καθορίζεται για το ύψος αναφοράς των 10m και κυμαίνεται από 22 μέχρι 25 m/sec .

Σημείωση: Οι κατασκευαστές στα χαρακτηριστικά στοιχεία της ανεμογεννήτριας μας δίνουν την ονομαστική ταχύτητα λειτουργίας, την ταχύτητα έναρξης λειτουργίας και την ταχύτητα διακοπής. Στην πράξη για ανεμογεννήτρια μέσης ισχύος, συνήθως έχουμε:

- Ταχύτητα έναρξης λειτουργίας 3-5 m/sec.
- Ταχύτητα διακοπής λειτουργίας 20-25 m/sec.
- Ονομαστική ταχύτητα λειτουργίας 12-15 m/sec.

2.3 Κατηγορίες Ανεμογεννητριών

Λέγεται ότι μέχρι σήμερα έχουν επινοηθεί και εφαρμοστεί την πράξη περισσότεροι τύποι ανεμογεννητριών από οποιοδήποτε άλλο τύπο εφεύρεσης. Οι ανεμογεννήτριες μπορούν να ταξινομηθούν σύμφωνα με τον προσανατολισμό των αξόνων τους σε σχέση με τη ροή του ανέμου σε:

1. Κατακόρυφου άξονα, ο οποίος παραμένει σταθερός και είναι κάθετος προς την οριζόντια επιφάνεια του εδάφους και κάθετος στη ροή του ανέμου.
2. Οριζοντίου άξονα, των οποίων ο δρομέας είναι τύπου έλικα και βρίσκεται συνεχώς παράλληλος με την κατεύθυνση του ανέμου και του εδάφους.

Τα πιο διαδεδομένα συστήματα, ανεμογεννητριών, είναι εκείνα στα οποία ο άξονας περιστρέφεται οριζόντια και καταλαμβάνουν ποσοστό περίπου 95% των διαθέσιμων συστημάτων αιολικής ενέργειας.

2.3.1 Ανεμογεννήτριες κατακόρυφου άξονα

Τα βασικά μέρη μιας ανεμογεννήτριας κατακόρυφου άξονα συμπίπτουν, με αυτά των ανεμογεννητριών οριζοντίου άξονα, με τη διαφορά, ότι ο άξονας περιστροφής των πρώτων είναι κάθετος στην

επιφάνεια του εδάφους και τα πτερύγια τους στηρίζονται και στρέφονται γύρω από αυτόν τον κατακόρυφο σταθερό άξονα. Επιπλέον, ίδια είναι και η λειτουργία τους, ωστόσο, οι ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα έχουν επικρατήσει, λόγω της μεγαλύτερης αποδοτικότητάς τους. Οι πιο γνωστοί τύποι ανεμογεννητριών κατακόρυφου άξονα είναι οι Darrieus και Savonius. Στο παρακάτω σχήμα βλέπουμε μια ανεμογεννήτρια κατακόρυφου άξονα.



Σχήμα 2.3.1:Ανεμογεννήτρια κατακόρυφου άξονα.

Οι ανεμογεννήτριες αυτού του τύπου είναι κατασκευαστικά απλούστερες από τις αντίστοιχες οριζοντίου άξονα γιατί:

- δεν απαιτούν πτερύγιο ή σύστημα αυτοματισμού του δρομέα στη διεύθυνση πνοής του ανέμου.
- το σύστημα μετατροπής της μηχανικής ενέργειας του δρομέα σε άλλη μορφή ενέργειας βρίσκεται στη βάση της ανεμογεννήτριας.

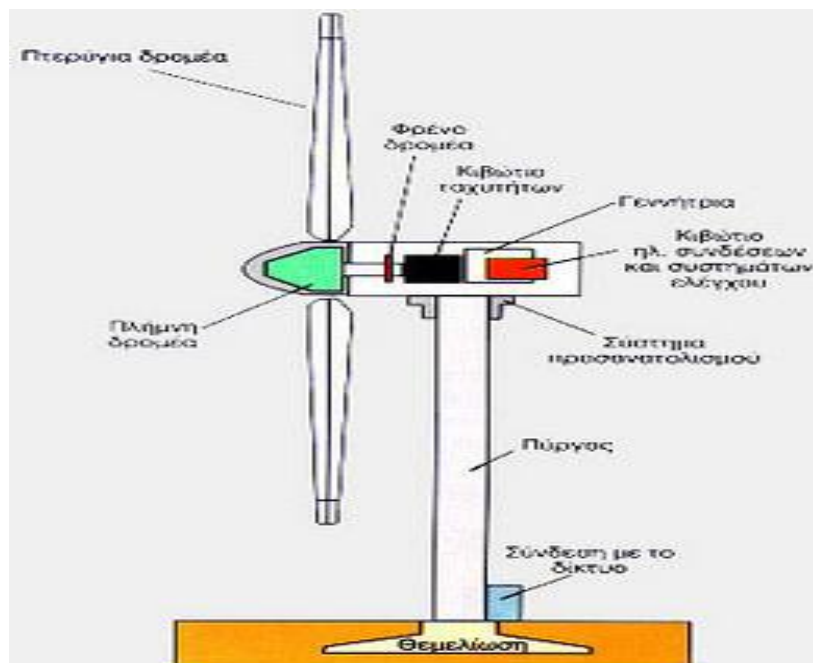
Συνεπώς τα έξοδα αυτοματισμού, συντήρησης ή επισκευών είναι σαφώς μικρότερα σε σύγκριση με τις ανεμογεννήτριες οριζοντίου άξονα.

Από την άλλη πλευρά υπάρχουν και κάποια μειονεκτήματα των ανεμογεννητριών κατακόρυφου άξονα, τα οποία είναι τα εξής:

- Αδυνατούν να εκκινήσουν χωρίς εξωτερική παρέμβαση, διότι έχουν πολύ υψηλή ροπή εκκίνησης. Σε αυτή την περίπτωση λοιπόν, λειτουργούν αρχικά σαν κινητήρες καταναλώνοντας ρεύμα από το δίκτυο.
- Έχουν πολύ μικρό βαθμό απόδοσης. Ειδικότερα, η απόδοση των ανεμογεννητριών κατακόρυφου άξονα τύπου Savonius δεν ξεπερνά το 15%

2.3.2 Ανεμογεννήτριες οριζοντίου άξονα

Τα μέρη από τα οποία αποτελείται μια ανεμογεννήτρια οριζοντίου άξονα φαίνονται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 2.3.2.α.:Μέρη ανεμογεννήτριας οριζοντίου άξονα.

Δρομέας

Ο σχεδιασμός του δρομέα είναι ίσως το πιο βασικό ζήτημα του όλου συστήματος. Στόχος είναι να βρεθεί ένας βέλτιστος συνδυασμός των διάφορων παραμέτρων που συνθέτουν τον δρομέα: ταχύτητα περιστροφής, διάμετρος δρομέα, αριθμός πτερυγίων, κατανομή πλάτους πτερυγίου, κατάλληλη αεροτομή ή αεροτομές, συστρόφη, μέσο γεωγραφικό βήμα. Τα κριτήρια επιλογής είναι η μεγιστοποίηση της ετήσιας παραγόμενης ενέργειας και η ελαχιστοποίηση του κόστους παραγωγής της. Η διάμετρος του δρομέα θα εξαρτηθεί από την απαιτούμενη ονομαστική ισχύ της μηχανής και το αιολικό δυναμικό της περιοχής εγκατάστασης της ανεμογεννήτριας.

Σύστημα αύξησης στροφών (ΣΑΣ)

Η σχεδίαση του συστήματος αύξησης των στροφών του δρομέα για να προσαρμοστεί ο δρομέας στις στροφές, δεν αφορά άμεσα τη σχεδίαση της ανεμογεννήτριας. Η τεχνολογική εξέλιξη των ΣΑΣ, λόγω απαιτήσεων της βιομηχανίας, έχει δώσει πολλούς και καλούς τύπους κιβωτίου ταχυτήτων από άποψη αντοχής υλικού, φθοράς, μεταφερόμενης ισχύος και διαστάσεων. Βασικά κριτήρια επιλογής του είναι η διάρκεια ζωής, ο βαθμός απόδοσής του και ο θόρυβος λειτουργίας του. Λόγω της συνεχούς μεταβολής της ισχύος του ανέμου, το κιβώτιο ταχυτήτων λειτουργεί συνεχώς με κρουστικά φορτία τα οποία οδηγούν σε πρόωρη φθορά υλικού και μείωση της διάρκειας ζωής του κιβωτίου. Για το λόγο αυτό, το κιβώτιο ταχυτήτων της ανεμογεννήτριας επιλέγεται να έχει ονομαστικό μέγεθος ισχύος μεγαλύτερο από το ονομαστικό μέγεθος της μηχανής, ακόμα και ονομαστική ροπή 200% μεγαλύτερη της ονομαστικής ροπής της μηχανής. Για την αύξηση της ζωής του κιβωτίου και τη μείωση των κρουστικών φορτίων λειτουργίας, σε ορισμένες περιπτώσεις το κιβώτιο ταχυτήτων στηρίζεται πάνω σε ελατήρια απόσβεσης κραδασμών.

Σύστημα πέδησης άξονα δρομέα

Υπάρχουν διάφοροι τρόποι ακινητοποίησης του δρομέα της ανεμογεννήτριας.

- Μεταβολή του βήματος του πτερυγίου ή του ακροπτερυγίου ή και ενεργοποίησης της αεροπέδησης στο ακροπτερύγιο.
- Στροφή του ίδιου του δρομέα ώστε να γυρίσει παράλληλα προς τον άνεμο.
- Αύξηση της αεροδυναμικής αντίστασης του πτερυγίου με την ενεργοποίηση αεροπέδης (τύπου spoiler).
- Πέδηση του άξονα.

Είναι φανερό ότι ο προτιμότερος τρόπος ακινητοποίησης της μηχανής είναι η σταδιακή μείωση των αεροδυναμικών φορτίων στη μηχανή με παράλληλη αύξηση της αντιρροπής. Με τον τρόπο αυτό δεν αναπτύσσονται κρουστικά φορτία στη φάση πέδησης της μηχανής. Σε περίπτωση αστοχίας όμως των μηχανισμών ρύθμισης του βήματος του πτερυγίου ή των άλλων μεθόδων ρύθμισης ισχύος απαιτείται η πέδηση του άξονα του δρομέα. Η πέδηση αυτή γίνεται συνήθως με δισκόφρενο τύπου ασφάλειας αστοχίας που ενεργεί αυτόματα στον άξονα. Το δισκόφρενο αυτό τοποθετείται συνήθως στον υψηλόστροφο άξονα της μηχανής (μετά το κιβώτιο ταχυτήτων) διότι έτσι η απαιτούμενη ροή πέδησης είναι πολύ μικρή (λόγω υψηλής γωνιακής ταχύτητας) και κατά συνέπεια το δισκόφρενο είναι μικρού κόστους.

Ελαστικοί σύνδεσμοι

Για τη σύνδεση των αξόνων μεταξύ τους (π.χ. άξονας δρομέα με κιβώτιο ή δισκόφρενο με γεννήτρια κλπ.) απαιτείται ελαστικός σύνδεσμος απορρόφησης κραδασμών. Συνήθως οι σύνδεσμοι αυτοί βασίζονται στην απορροφητική ικανότητα του καουτσούκ.

Ηλεκτρική γεννήτρια

Κάθε ανεμογεννήτρια που συνδέεται στο δίκτυο παροχής κινεί ηλεκτρογεννήτρια εναλλασσομένου τριφασικού ρεύματος. Οι γεννήτριες διαιρούνται σε δύο κύρια είδη: τις σύγχρονες και τις ασύγχρονες. Μια σύγχρονη γεννήτρια παράγει στην έξοδό της ρεύμα της ίδιας συχνότητας με αυτό του δικτύου διανομής που είναι συνδεδεμένη. Οι σύγχρονες γεννήτριες ονομάζονται και εναλλακτήρες. Μια ασύγχρονη γεννήτρια παράγει ρεύμα συχνότητας κάπως μεγαλύτερης της συχνότητας του δικτύου διανομής. Οι ασύγχρονες γεννήτριες ονομάζονται και επαγωγικές γεννήτριες.

Σύστημα προσανατολισμού

Βρίσκεται στη κορυφή του πύργου στήριξης με την ανεμογεννήτρια να εδράζεται πάνω σε αυτό. Κατά τη διάρκεια της λειτουργίας του αναγκάζει τον άξονα περιστροφής του δρομέα να βρίσκεται συνεχώς παράλληλα με τη διεύθυνση του ανέμου.

Ηλεκτρικός ηλεκτρονικός πίνακας

Τοποθετείται συνήθως στη βάση του πύργου και με τις κατάλληλες ηλεκτρικές και ηλεκτρονικές διατάξεις, παρακολουθεί, ελέγχει και συντονίζει με ασφάλεια όλες τις λεπτομέρειες της ανεμογεννήτριας.

Πύργος στήριξης

Στηρίζει όλη την αναγκαία ηλεκτρομηχανολογική εγκατάσταση. Είναι μεταλλικής κατασκευής (σωληνωτός ή δικτυωτός) και σπάνια από οπλισμένο σκυρόδεμα.

Βάση στήριξης (θεμελίωση)

Η βάση κατασκευάζεται από οπλισμένο σκυρόδεμα μέσα στο οποίο εγκιβωτίζεται ο κορμός του πύργου στήριξης. Το μέγεθος της βάσης στήριξης καθορίζεται από προσεκτική μελέτη μηχανικού.



Σχήμα 2.3.2.β.: Ανεμογεννήτρια οριζοντίου άξονα.

Τα πλεονεκτήματα των ανεμογεννητριών οριζοντίου άξονα είναι τα εξής:

- Δεν απαιτούν πολύ υψηλές ταχύτητες ανέμου για να ξεκινήσουν να περιστρέφονται, με αποτέλεσμα να είναι αποτελεσματικές ακόμα και σε πολύ μικρές ταχύτητες του ανέμου.
- Έχουν υψηλό αεροδυναμικό συντελεστή και επιπλέον παρουσιάζουν μεγάλη ευκολία στην συναρμολόγησή τους.

Εκτός όμως από τα πλεονεκτήματα οι ανεμογεννήτριες οριζοντίου άξονα παρουσιάζουν και κάποια μειονεκτήματα:

- Απαιτείται σύστημα αυτοματισμού του δρομέα στην διεύθυνση πνοής του ανέμου, πράγμα το οποίο αυξάνει το κόστος.
- Τόσο η γεννήτρια, όσο και το κιβώτιο ταχυτήτων τοποθετούνται πάνω στον πύργο, πράγμα που σημαίνει δυσκολία στην κατασκευή και στην συντήρηση.

2.4 Λειτουργικά χαρακτηριστικά ανεμογεννήτριας

2.4.1 Απόδοση ισχύος

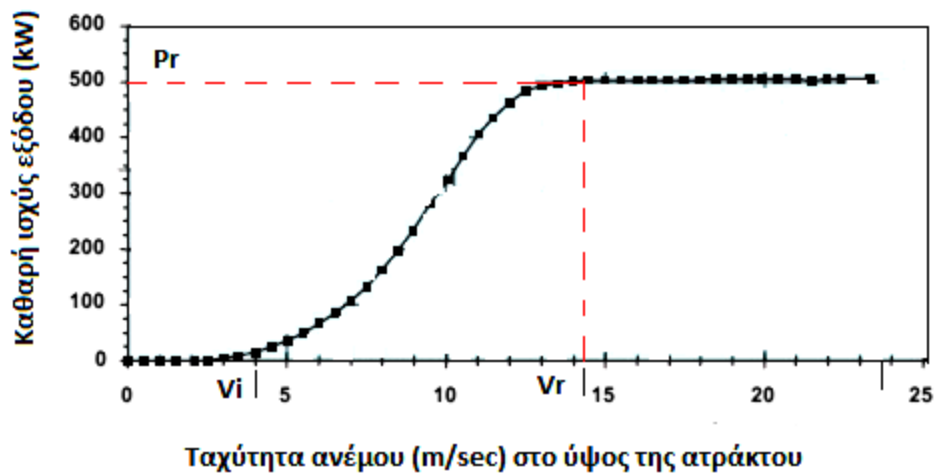
Η καμπύλη ισχύος μιας ανεμογεννήτριας δείχνει την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας σε συνάρτηση με την ταχύτητα του ανέμου που επικρατεί στο ύψος της ατράκτου (στο ύψος της πλήμνης της έλικας). Η καμπύλη αυτή προσδιορίζεται είτε με θεωρητικούς υπολογισμούς, είτε με δοκιμές στην πράξη. Οι δοκιμές αυτές γίνονται σύμφωνα με διεθνείς προδιαγραφές και συστάσεις, όπως αυτές του Διεθνούς Πρακτορείου Ενέργειας. Οι καμπύλες ισχύος που προκύπτουν από αυτές τις δοκιμές καταγράφουν τους μέσους όρους μετρήσεων που λαμβάνονται μέσα σε χρονικό διάστημα 10 λεπτών.

Η απόδοση της ανεμογεννήτριας ορίζεται ως ο λόγος της ηλεκτρικής ενέργειας που μετριέται στην έξοδο της γεννήτριας προς την ενέργεια του ανέμου που σαρώνει το εμβαδό της κυκλικής επιφάνειας που διαγράφεται από τη κυκλική περιστροφή της έλικας.

Στο σχήμα 2.4.1.α. φαίνεται η καμπύλη ισχύος μιας ανεμογεννήτριας. Στην καμπύλη αυτή φαίνονται οι εξής παράμετροι:

- Ταχύτητα κατωφλιού εισόδου V_i : η ταχύτητα του ανέμου που η γεννήτρια αρχίζει να παράγει καθαρή ισχύ. Η ταχύτητα αυτή είναι μεγαλύτερη από την ταχύτητα στην οποία η ανεμογεννήτρια αρχίζει να λειτουργεί (V_{mi}).

- Ταχύτητα κατωφλιού εξόδου V_o : είναι η ταχύτητα του ανέμου που η γεννήτρια παράγει ισχύ με ελαττωμένο μηχανικό και αεροδυναμικό φορτίο και άνευ ηλεκτρικών απωλειών.
- Εκτιμητά ισχύς P_r : η ονομαστική μέγιστη και συνεχής ισχύς εξόδου της γεννήτριας (χωρίς απώλειες).
- Εκτιμητά ταχύτητα V_r : η ταχύτητα του ανέμου που παράγει την εκτιμητά ισχύ.



Σχήμα 2.4.1.α.: Καμπύλη ισχύος ανεμογεννήτριας 500kW

Στο παραπάνω σχήμα φαίνεται η καθαρή ισχύς εξόδου που λαμβάνεται στην έξοδο της γεννήτριας, απαλλαγμένη από αεροδυναμικές, μηχανικές και ηλεκτρικές απώλειες. Καθώς αυξάνει η ταχύτητα του ανέμου υπερνικούνται οι μηχανικές τριβές και τα αεροδυναμικά φορτία που ασκούνται στον άξονα της έλικας, οπότε η ροπή που εφαρμόζεται στον άξονα είναι σταθερή.

2.4.2 Διαθεσιμότητα

Σαν διαθεσιμότητα ορίζουμε το μέρος του χρόνου που η ανεμογεννήτρια μπορεί να παράγει ισχύ. Οι τυπικές διαθεσιμότητες των σύγχρονων

ανεμογεννητριών κυμαίνονται από 95-99%. Το 1-5% του χρόνου που δεν είναι διαθέσιμες οφείλεται είτε σε συντήρηση, είτε σε επισκευή βλάβης.

2.4.3 Ετήσιος υπολογισμός ενέργειας

Ο υπολογισμός ετήσιας ενέργειας που παράγεται από μια ανεμογεννήτρια ενέχει ουσιαστική σημασία για την εκτίμηση ενός σταθμού παραγωγής. Η μακροχρόνια κατανομή των ταχυτήτων του ανέμου σε συνδυασμό με την καμπύλη ισχύος μιας ανεμογεννήτριας δίνει την παραγόμενη ενέργεια για κάθε ταχύτητα ανέμου και συνεπώς το σύνολο της ενέργειας κατά την διάρκεια του έτους. Κατά τον υπολογισμό συνηθίζεται να χρησιμοποιούνται θύλακες του 1 m/sec για ταχύτητες ανέμου και αυτό δίνει μια αποδεκτή ακρίβεια. Επομένως ο ετήσιος υπολογισμός ενέργειας μπορεί να εκφραστεί με τον παρακάτω μαθηματικό τύπο:

$$\text{Ενέργεια} = \sum_{i=1}^{i=n} H(i) * W(i) \quad \mathbf{2.4.3.a.}$$

Όπου $H(i)$ ο αριθμός των ωρών για ταχύτητα ανέμου του θύλακα i και $W(i)$ η ισχύς εξόδου που αντιστοιχεί στην ταχύτητα ανέμου του θύλακα i .

2.4.4 Απόδοση συστοιχίας ανεμογεννητριών

Η συνολική ισχύς εξόδου ενός σταθμού παραγωγής (μιας συστοιχίας ανεμογεννητριών) είναι μικρότερη από το άθροισμα κάθε μιας μεμονωμένης ανεμογεννήτριας, διότι όταν μια ανεμογεννήτρια βρίσκεται στο κατώρευμα της προηγούμενης ανεμογεννήτριας, αποδίδει λιγότερο, επειδή το κατώρευμα έχει μικρότερη ταχύτητα από το ανώρευμα. Πρέπει ακόμα να λάβουμε υπόψη την κόπωση των εξαρτημάτων και τις συχνές μεταβολές της τιμής της παραγόμενης ισχύος. Ανάλογα με τις περιστάσεις

οι συνθήκες που επικρατούν σε ένα αιολικό σταθμό παραγωγής (αιολικό πάρκο) μπορούν να μειώσουν την ισχύ εξόδου κατά 5-15%. Μπορεί ακόμα να έχουμε απώλειες στους μετασχηματιστές του σταθμού και βέβαια λιγότερες απώλειες στα καλώδια συλλογής της παραγόμενης ισχύος, που μειώνουν ακόμα κατά 1-2% τη συνολική παραγόμενη ισχύ εξόδου.

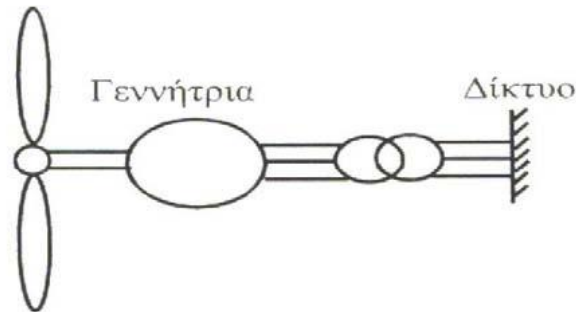
2.5 Τρόποι λειτουργίας ανεμογεννήτριας

Με τον όρο αυτό εννοούμε το σύνολο των μηχανών (π.χ. συνήθων γεννητριών) και λοιπών διατάξεων μετατροπής και ελέγχου (π.χ. μετατροπείς AC-DC) με τα οποία επιτυγχάνεται η μετατροπή της μηχανικής ροπής που λαμβάνεται από το μηχανικό σύστημα, σε ηλεκτρική. Τα συστήματα αυτά ανάλογα με τον τρόπο λειτουργίας και ελέγχου, καθώς και τα χαρακτηριστικά της εξόδου τους, μπορούν να καταταγούν στις ακόλουθες κατηγορίες:

- α) Συστήματα σταθερής ταχύτητας-Σταθερής συχνότητας
- β) Συστήματα μεταβλητής ταχύτητας-Σταθερής συχνότητας

2.5.1 Ανεμογεννήτριες σταθερής ταχύτητας

Λειτουργία σταθερής ταχύτητας σημαίνει ότι ο δρομέας της ανεμογεννήτριας στρέφεται με σταθερό αριθμό στροφών ανεξάρτητα της ταχύτητας του ανέμου. Ο τρόπος σύνδεσης της γεννήτριας με το δίκτυο, είναι ο ίδιος με τον τρόπο σύνδεσης γεννητριών που τροφοδοτούνται από συμβατικές πηγές ενέργειας. Δηλαδή η σύνδεση γίνεται απευθείας, χρησιμοποιώντας ένα μετασχηματιστή προσαρμογής του επιπέδου τάσης της γεννήτριας, σε αυτό του συστήματος μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας.



Σχήμα 2.5.1.:Αναπαράσταση ανεμογεννήτριας σταθερής ταχύτητας.

Αυτός ο τρόπος σύνδεσης, “επιβάλλει” στην ανεμογεννήτρια την γωνιακή ταχύτητα περιστροφής της. Η γεννήτρια που χρησιμοποιείται μπορεί να είναι είτε σύγχρονη είτε ασύγχρονη. Οι συμβατικές ανεμογεννήτριες σταθερών στροφών διαθέτουν κυρίως γεννήτριες επαγωγής τύπου βραχυκυκλωμένου κλωβού. Ο λόγος που προτιμάται η ασύγχρονη γεννήτρια είναι γιατί είναι κατασκευαστικά απλούστερη κάτι που μειώνει το κόστος και αυξάνει την αξιοπιστία της συγκρινόμενη με τη σύγχρονη γεννήτρια. Επιπλέον η γωνιακή της ταχύτητα μπορεί να μεταβάλλεται σε ένα εύρος λίγο πάνω από τη σύγχρονη ταχύτητα. Αυτή η δυνατότητα έχει ως αποτέλεσμα να εξομαλύνονται οι διακυμάνσεις της ισχύος στην έξοδο της γεννήτριας καθώς και η καταπόνηση του μηχανικού συστήματος μεταφοράς. Το μεγάλο μειονέκτημα που παρουσιάζει είναι ότι, σε αντίθεση με την σύγχρονη γεννήτρια, απορροφά άεργο ισχύ. Για την τροφοδοσία της ασύγχρονης γεννήτριας με άεργο ισχύ, συνδέονται στους ακροδέκτες των τυλιγμάτων της κατάλληλοι πυκνωτές.

Πλεονεκτήματα

Το σύστημα σταθερών στροφών παρουσιάζει το πλεονέκτημα της εξαιρετικής απλότητας και αξιοπιστίας και των μηδενικών αναγκών συντήρησης, γεγονός που συνέβαλε στην καθιέρωσή του, σε μια εποχή όπου η αξιοπιστία ήταν το βασικότερο από τα προς επίλυση προβλήματα των ανεμογεννητριών.

Μειονεκτήματα

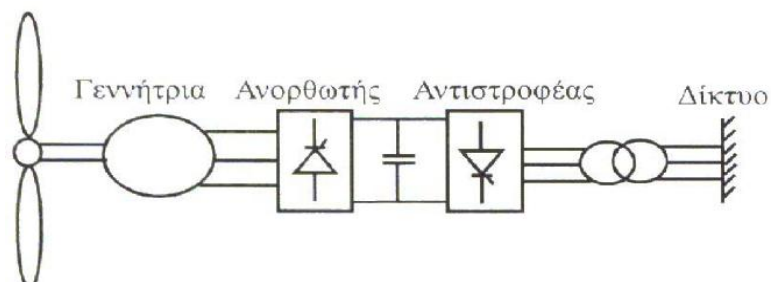
Το σχήμα αυτό χαρακτηρίζεται από μια σειρά καθοριστικών μειονεκτημάτων, τα οποία σχετίζονται αφ’ ενός με την σταθερότητα των

στροφών και αφ' ετέρου με τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά της μηχανής επαγωγής. Εάν η μεταβαλλόμενη αεροδυναμική ροπή περιέχει αρμονικές συνιστώσες, που βρίσκονται κοντά στις συχνότητες συντονισμού του μηχανικού συστήματος μετάδοσης της ισχύος, θα εμφανιστούν έντονες ταλαντώσεις σ' αυτό αλλά και στην ισχύ εξόδου της γεννήτριας. Συνεπώς έχουμε αυξημένη μεταβλητότητα ροπών και της ισχύος εξόδου, ταλαντώσεις του μηχανικού συστήματος και τέλος λειτουργία του δρομέα σε υποβέλτιστο αεροδυναμικό συντελεστή ισχύος.

2.5.2 Ανεμογεννήτριες μεταβλητής ταχύτητας

Στην λειτουργία μεταβλητής ταχύτητας, η ταχύτητα του δρομέα της ανεμογεννήτριας μεταβάλλεται κατά ελεγχόμενο τρόπο, ανάλογα με την ταχύτητα του ανέμου. Για την σύνδεση της ανεμογεννήτριας με το δίκτυο σταθερής συχνότητας χρησιμοποιείται μετατροπέας συχνότητας, με τον τρόπο αυτό η ταχύτητα περιστροφής αποδεσμεύεται από τη σταθερή συχνότητα του δικτύου και είναι δυνατή η μεταβολή της.

Όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα, στην έξοδο της γεννήτριας συνδέεται ένας τριφασικός ανορθωτής ελεγχόμενος ή μη, που μετατρέπει τα εναλλασσόμενα ηλεκτρικά μεγέθη σε συνεχή. Η σύνδεση στο δίκτυο γίνεται μέσω ενός αντιστροφέα, ο οποίος μετατρέπει τα συνεχή ηλεκτρικά μεγέθη σε εναλλασσόμενα, συχνότητας ίδιας με αυτήν του δικτύου.



Σχήμα 2.5.2.α.: Αναπαράσταση ανεμογεννήτριας μεταβλητής ταχύτητας.

Πλεονεκτήματα

Το βασικό πλεονέκτημα της λειτουργίας μεταβλητής ταχύτητας είναι η βελτιστοποίηση της ενεργειακής απόδοσης της μηχανής, καθώς αυξάνεται το ποσοστό εκμετάλλευσης της κινητικής ενέργειας του ανέμου κυρίως

κατά τις χαμηλές ταχύτητες ανέμου, σε σχέση με την λειτουργία σταθερής ταχύτητας. Ένα ακόμα πλεονέκτημα είναι η δυνατότητα ελέγχου της άεργου ισχύος ανάλογα με τον τύπο μετατροπέα που χρησιμοποιείται. Σημαντικό επίσης πλεονέκτημα από την λειτουργία μεταβλητής ταχύτητας είναι η εξομάλυνση της μεταβλητότητας των συστημάτων μετάδοσης της κίνησης, τα οποία σημαίνουν μείωση των μηχανικών καταπονήσεων και αύξηση της διάρκειας ζωής του συστήματος.

Μειονεκτήματα

Τα μειονεκτήματα αυτού του συστήματος είναι καταρχήν η αυξημένη πολυπλοκότητα λόγω του μετατροπέα συχνότητας και η αντίστοιχη αύξηση του κόστους. Επίσης λόγω του ηλεκτρονικού μετατροπέα παρουσιάζεται αύξηση των ανώτερων αρμονικών που εισέρχονται στο δίκτυο, κάτι που κάνει αναγκαία την εγκατάσταση φίλτρων για τον περιορισμό τους.

2.6 Χρησιμοποιούμενοι τύποι γεννητριών

Μια ανεμογεννήτρια μπορεί να εξοπλιστεί με οποιοδήποτε τύπο τριφασικής γεννήτριας. Ο πιο χρησιμοποιημένος τύπος γεννήτριας μέχρι σήμερα είναι οι ασύγχρονες (επαγωγικές) γεννήτριες, ενώ υπάρχει ένα μικρό ποσοστό, αλλά συνεχώς αυξανόμενο με τη χρήση σύγχρονων γεννητριών. Όπως προκύπτει λοιπόν οι γεννήτριες χωρίζονται σε δύο βασικές κατηγορίες:

- Ασύγχρονες (επαγωγικές) γεννήτριες
 - Επαγωγικές γεννήτριες βραχυκυκλωμένου κλωβού (SCIG)
 - Επαγωγικές γεννήτριες δακτυλιοφόρου δρομέα (WRIG)
 - Επαγωγικές γεννήτριες διπλής τροφοδοσίας (DFIG)
 - Επαγωγικές γεννήτριες με ηλεκτρονικά μεταβαλλόμενη αντίσταση (OSIG)

- Σύγχρονες γεννήτριες
 - Σύγχρονες γεννήτριες δακτυλιοφόρου δρομέα (WRSG)
 - Σύγχρονες γεννήτριες μόνιμου μαγνήτη (PMSG)

- Άλλοι τύποι γεννητριών ενδεχόμενου ενδιαφέροντος
 - Γεννήτριες υψηλής τάσης (HVG)
 - Γεννήτριες μεταβλητής μαγνητικής αντίστασης (SRG)
 - Γεννήτριες εγκάρσιας τομής (TFG)

2.6.1 Ασύγχρονη (επαγωγική) γεννήτρια

Ο τύπος της γεννήτριας που χρησιμοποιείται περισσότερο στις ανεμογεννήτριες σήμερα είναι η επαγωγική γεννήτρια. Ο λόγος που συμβαίνει αυτό είναι ότι η επαγωγική γεννήτρια προσφέρει απλότητα στο μηχανικό κομμάτι, αλλά και χαμηλό κόστος λόγω της μεγάλης παραγωγής που έχει. Ωστόσο για τη λειτουργία της επαγωγικής γεννήτριας είναι απαραίτητη η κατανάλωση έργου ισχύς, η οποία παρέχεται είτε από το υπάρχον δίκτυο, είτε από συστοιχίες πυκνωτών, είτε από ένα κατάλληλο σύστημα ηλεκτρονικών ισχύος.

Στην περίπτωση της διέγερσης μιας επαγωγικής γεννήτριας με εναλλασσόμενο ρεύμα, το μαγνητικό πεδίο που δημιουργείται περιστρέφεται με ταχύτητα που καθορίζεται από κοινού, από τον αριθμό των πόλων και από τη συχνότητα του ρεύματος (την σύγχρονη ταχύτητα). Έτσι αν ο ρότορας περιστρέφεται με ταχύτητα που υπερβαίνει τη σύγχρονη ταχύτητα, ένα ηλεκτρικό πεδίο επάγεται μεταξύ του δρομέα και του στρεφόμενου πεδίου του στάτη από τη σχετική κίνηση (ολίσθηση), γεγονός που προκαλεί ένα ρεύμα στα τυλίγματα του δρομέα. Η

αλληλεπίδραση του μαγνητικού πεδίου του δρομέα με το πεδίο του στάτη έχουν σαν αποτέλεσμα τη δημιουργία ροπής στον δρομέα.

2.6.1.1 Επαγωγική γεννήτρια με ηλεκτρονικά μεταβαλλόμενη αντίσταση (OSIG)

Η επαγωγική γεννήτρια με ηλεκτρονικά μεταβαλλόμενη αντίσταση (OSIG) έχει την ικανότητα να μεταβάλλει την αντίσταση και να επιλέγει τη βέλτιστη τιμή για αυτή, με αποτέλεσμα μικρότερες διαταραχές στην ροπή και στην εξαγόμενη ενέργεια. Έτσι, μειώνεται το φορτίο στην ανεμογεννήτρια εξαιτίας των ρίπων ανέμου με απλό τρόπο.

Με την επαγωγική γεννήτρια με ηλεκτρικά μεταβαλλόμενη αντίσταση δρομέα μπορούμε με μια απλή τοπολογία του κυκλώματος του δρομέα να έχουμε αρκετά μεγάλο εύρος ταχύτητας. Επίσης, με τη συγκεκριμένη γεννήτρια μειώνονται και τα μηχανικά φορτία, αλλά και κατ' επέκταση οι διαταραχές στην ενέργεια που οφείλονται στις ριπές του ανέμου. Ωστόσο, επειδή πρόκειται για μια ασύγχρονη επαγωγική γεννήτρια, είναι απαραίτητο ένα κύκλωμα αντιστάθμισης άεργου ισχύος. Επίσης, η μεταβολή της ταχύτητας κυμαίνεται σε τιμές μέχρι 10% και είναι άμεσα εξαρτώμενη από τη τιμή της αντίστασης. Τέλος, θα πρέπει να αναφερθεί και η έλλειψη αξιόλογου ελέγχου της ενεργού και άεργου ισχύος, αλλά και οι απώλειες σημαντικού ποσού ενέργειας πάνω στη μεταβλητή αντίσταση ως θερμότητα.

2.6.1.2 Επαγωγική γεννήτρια βραχυκυκλωμένου κλωβού (SCIG)

Η επαγωγική γεννήτρια βραχυκυκλωμένου κλωβού χρησιμοποιήθηκε στην αρχή σε ανεμογεννήτριες σταθερής ταχύτητας διότι η ταχύτητά της

μεταβάλλεται μόνο κατά ένα μικρό ποσοστό εξαιτίας της ολίσθησής της, η οποία οφείλεται στις αλλαγές στην ταχύτητα του ανέμου. Χαρακτηριστικά τους είναι η μηχανική απλότητα, η υψηλή απόδοση, αλλά και το ελάχιστο κόστος συντήρησης. Ωστόσο, η επαγωγική γεννήτρια βραχυκυκλωμένου κλωβού έχει απότομες αλλαγές στη ροπή εξαιτίας διαταραχών του ανέμου, με αποτέλεσμα οι διαταραχές αυτές να περνούν στο δίκτυο.

Το πιο σημαντικό μειονέκτημά τους είναι η ανάγκη για παροχή από το δίκτυο ρεύματος μαγνήτισης στα τυλίγματα του στάτη, κάτι που οδηγεί το συντελεστή ισχύος υπό πλήρες φορτίο σε χαμηλές τιμές (μη αποδεκτές από τις εταιρίες ηλεκτρισμού). Επίσης, σε υψηλές ταχύτητες ανέμου, μπορεί να παρέχει περισσότερη ενεργό ισχύ μόνο με επιπλέον κατανάλωση άεργου ισχύος από το δίκτυο. Έτσι, είναι απαραίτητη η παροχή άεργου ισχύος μέσω συστοιχιών πυκνωτών παράλληλων με τη γεννήτρια. Επίσης με τη χρήση πλήρως ελεγχόμενου back-to-back μετατροπέα ισχύος IGBT είναι δυνατός ο έλεγχος ενεργού και άεργου ισχύος και η προσαρμογή τους στις εκάστοτε συνθήκες του ανέμου αλλά και στις απαιτήσεις του δικτύου.

2.6.1.3 Επαγωγικές γεννήτριες διπλής τροφοδοσίας (DFIG)

Σήμερα, στη διεθνή αγορά των ανεμογεννητριών κυρίαρχος τύπος ανεμογεννήτριας (σε ποσοστό μεγαλύτερο του 70%) είναι αυτός με επαγωγική γεννήτρια διπλής τροφοδοσίας (DFIG) με μεταβλητή ταχύτητα. Η εφαρμογή της επαγωγικής γεννήτριας διπλής τροφοδοσίας (DFIG) αποτελεί εξέλιξη της επαγωγικής γεννήτριας με ηλεκτρικά μεταβαλλόμενη αντίσταση δρομέα (OSIG) με την έννοια ότι η μεταβλητή αντίσταση στο δρομέα έχει αντικατασταθεί από έναν back-to-back IGBT μετατροπέα πηγής τάσης στο δίκτυο.

Με τη χρήση της επαγωγικής γεννήτριας διπλής τροφοδοσίας (DFIG) είναι δυνατόν να έχουμε λειτουργία με μεταβλητή ταχύτητα σε ένα αρκετά

μεγάλο εύρος ταχυτήτων. Κατά τη λειτουργία της γεννήτριας, τόσο στη μόνιμη κατάσταση όσο και στην περίπτωση σφάλματος, ο μετατροπέας και οι ελεγκτές καθορίζουν απολύτως τη συμπεριφορά της. Ο μετατροπέας στη πλευρά του δρομέα ελέγχει την ενεργό και άεργο ισχύς της γεννήτριας μέσω ελέγχου του ρεύματος του δρομέα, ενώ ταυτόχρονα ο μετατροπέας στη πλευρά του δικτύου ελέγχει τη τάση στην dc διασύνδεση και εξασφαλίζει λειτουργία με μοναδιαίο συντελεστή ισχύος.

Η συγκεκριμένη γεννήτρια έχει δύο περιοχές λειτουργίας ανάλογα με την ολίσθηση (θετική ολίσθηση-αρνητική ολίσθηση). Έτσι η ροή ισχύος του δρομέα έχει διαφορετική κατεύθυνση αναλόγως με τη περιοχή λειτουργίας. Στην περιοχή θετικής ολίσθησης (υπερσύγχρονη λειτουργία) έχουμε ροή ισχύος από το δρομέα μέσω του μετατροπέα στο δίκτυο, ενώ στη περιοχή αρνητικής ολίσθησης (υποσύγχρονη λειτουργία), έχουμε ροή ισχύος με αντίθετη φορά. Το πιο σημαντικό πλεονέκτημα είναι ότι στη περιοχή θετικής ολίσθησης (υπερσύγχρονη λειτουργία) η αυξημένη ισχύς του δρομέα οδηγείται στο δίκτυο κάτι που δεν ισχύει στην επαγωγική γεννήτρια με ηλεκτρικά μεταβαλλόμενη αντίσταση στο δρομέα (OSIG), με αποτέλεσμα η επιπλέον ισχύς του δρομέα να χάνεται ως θερμότητα στην αντίσταση. Ωστόσο, λόγω των ελεγκτών και του μετατροπέα ισχύος το κόστος είναι αυξημένο.

2.6.2 Σύγχρονη γεννήτρια

Αν και η σύγχρονη γεννήτρια είναι πολύ πιο ακριβή και πιο πολύπλοκη μηχανικά από μια επαγωγική γεννήτρια, έχει το πλεονέκτημα ότι δεν χρειάζεται να της δίνεται ρεύμα μαγνήτισης από τον στάτη. Το μαγνητικό πεδίο λοιπόν δημιουργείται από τη χρήση μόνιμων μαγνητών ή μέσω συμβατικών τυλιγμάτων του δρομέα. Ένα ακόμη πλεονέκτημά της είναι ότι σε ορισμένες περιπτώσεις δεν απαιτεί κιβώτιο ταχυτήτων, αρκεί να έχει επαρκές αριθμό πόλων.

Η σύγχρονη γεννήτρια είναι η πιο κατάλληλη για έλεγχο πλήρους ισχύος και μπορεί να λειτουργήσει σε ανεμογεννήτρια με μεταβλητή ταχύτητα. Ο ηλεκτρονικός μετατροπές ισχύος με τον οποίο συνδέεται στο δίκτυο η σύγχρονη γεννήτρια έχει ως πρώτο στόχο να κάνει απόσβεση των διαταραχών της ισχύος που οφείλονται στις ριπές του ανέμου και των μεταβατικών φαινομένων που έρχονται από το δίκτυο. Σαν δεύτερο στόχο έχει να ελέγχει τη μαγνήτιση και να αποφεύγει ενδεχόμενα προβλήματα, παραμένοντας συγχρόνως με τη συχνότητα του δικτύου

2.6.2.1 Σύγχρονη γεννήτρια δακτυλιοφόρου δρομέα (WRSG)

Η σύγχρονη γεννήτρια δακτυλιοφόρου δρομέα (WRSG) αποτελεί το βασικότερο τύπο γεννήτριας στη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Έχει τα τυλίγματα του στάτη απ' ευθείας συνδεδεμένα στο δίκτυο και η ταχύτητα περιστροφής της ρυθμίζεται από τη συχνότητα του δικτύου. Επίσης, τα τυλίγματα του δρομέα διεγείρονται από συνεχές ρεύμα με τη χρήση δακτυλίων ολίσθησης και ψηκτρών ή μέσω ενός διεγέρτη χωρίς ψήκτρες, μέσω ενός στρεφόμενου ανορθωτή.

Το βασικό της πλεονέκτημα έναντι των ασύγχρονων επαγωγικών γεννητριών είναι ότι δεν χρειάζεται επιπλέον μέτρα αντιστάθμισης για την άεργο ισχύ. Στην σύγχρονη γεννήτρια δακτυλιοφόρου δρομέα (WRSG) το πεδίο διέγερσης παράγεται στα τυλίγματα του δρομέα και περιστρέφεται με σύγχρονη ταχύτητα. Τέλος, η ταχύτητά της καθορίζεται από τη συχνότητα του στρεφόμενου πεδίου και των αριθμό των πόλων της.

2.6.2.2 Σύγχρονες γεννήτριες μόνιμου μαγνήτη (PMSG)

Ο στάτης των σύγχρονων γεννητριών μόνιμου μαγνήτη (PMSG) αποτελείται από συμβατικό τριφασικό τύλιγμα και ο δρομέας τους από ένα σύστημα πόλων μαγνήτη που μπορεί να έκτυποι ή κυλινδρικοί. Για

μηχανές με χαμηλή ταχύτητα είναι σύνηθες να χρησιμοποιούνται έκτυποι πόλοι και ιδίως σε εφαρμογές με ανεμογεννήτριες. Έχουν υψηλότερη απόδοση από τις ασύγχρονες επαγωγικές γεννήτριες καθώς είναι αυτοδιεγείρομενες και συνεπώς η διέγερση παρέχεται χωρίς καμιά ακόμη παροχή ενέργειας. Ωστόσο, τα υλικά κατασκευής των μόνιμων μαγνητών είναι αρκετά ακριβά, δημιουργούν δυσκολία κατά την επεξεργασία τους και είναι ευαίσθητα σε υψηλές θερμοκρασίες με αποτέλεσμα να απαιτούν σύστημα ψύξης. Επιπλέον, η χρήση διέγερσης με μόνιμο μαγνήτη απαιτεί τη χρήση ενός ηλεκτρονικού μετατροπέα ισχύος πλήρους κλίμακας για την προσαρμογή της τάσης και τη συχνότητα της γεννήτριας στη τάση και στη συχνότητα της γραμμής αντίστοιχα. Πράγμα που όπως είναι φυσικό αυξάνει το κόστος. Η σύγχρονη φύση τους μπορεί να δημιουργήσει προβλήματα κατά την εκκίνηση, τον συγχρονισμό, τη ρύθμιση της τάσης, αλλά και δύσκαμπτη συμπεριφορά σε περίπτωση μη σταθερού αέρα. Το μεγάλο τους πλεονέκτημα όμως είναι ότι μπορούν να παράγουν ισχύ σε οποιαδήποτε ταχύτητα και επομένως να δουλέψουν σε μεταβλητές στροφές.

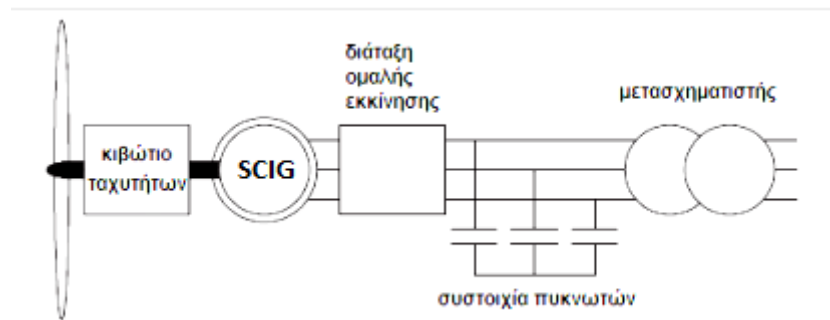
2.7 Τοπολογίες ανεμογεννητριών

Οι πιο συχνά εφαρμοζόμενες τοπολογίες στις ανεμογεννήτριες ταξινομούνται με βάση τον έλεγχο της ταχύτητας που εφαρμόζεται (σταθερής ή μεταβλητής ταχύτητας), αλλά και με βάση τον μηχανικό έλεγχο ισχύος. Ταξινομώντας με βάση τον έλεγχο ταχύτητας έχουμε τις εξής βασικές τοπολογίες:

- **Τύπος Α** : Σταθερής ταχύτητας.
- **Τύπος Β** : Περιορισμένης μεταβλητής ταχύτητας.
- **Τύπος Γ**: Μεταβλητής ταχύτητας με μερικής κλίμακας ηλεκτρονικό μετατροπές συχνότητας.

- **Τύπος Δ** : Μεταβλητής ταχύτητας με πλήρους κλίμακας ηλεκτρονικό μετατροπές συχνότητας

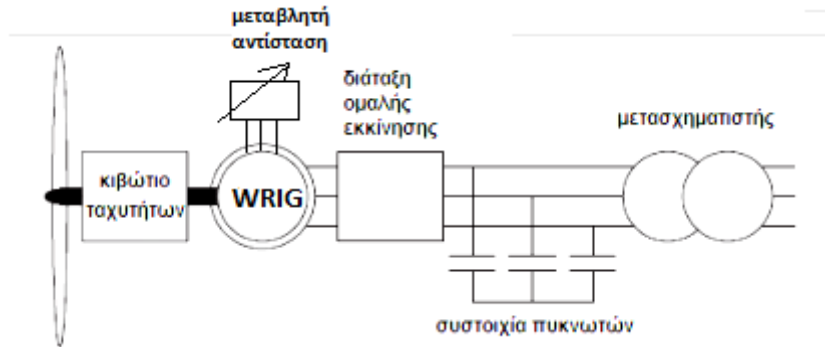
2.7.1 Τοπολογία Α



Σχήμα 2.7.1 : Ανεμογεννήτρια σταθερής ταχύτητας με επαγωγική γεννήτρια βραχυκυκλωμένου κλωβού.

Η τοπολογία αυτή χρησιμοποιείται για ανεμογεννήτριες σταθερής ταχύτητας με επαγωγική γεννήτρια βραχυκυκλωμένου κλωβού (SCIG). Η γεννήτρια είναι απευθείας συνδεδεμένη με το δίκτυο μέσω ηλεκτρικού μετασχηματιστή ισχύος. Η τοπολογία επιπλέον χρησιμοποιεί συστοιχίες πυκνωτών για την αντιστάθμιση της άεργου ισχύος (η επαγωγική γεννήτρια βραχυκυκλωμένου δρομέα καταναλώνει άεργο ισχύ κατά τη λειτουργία της) και για την ομαλή εκκίνηση και σύνδεση με το δίκτυο χρησιμοποιείται ένας ηλεκτρονικά ελεγχόμενος εκκινητής (soft starter). Το βασικότερο μειονέκτημα της συγκεκριμένης τοπολογίας είναι ότι οι διαταραχές του ανέμου μετατρέπονται σε μηχανικές διαταραχές, γεγονός που οδηγεί σε διαταραχές στην παραγόμενη ισχύ και πιθανή διαταραχή στην τάση του δικτύου.

2.7.2 Τοπολογία Β



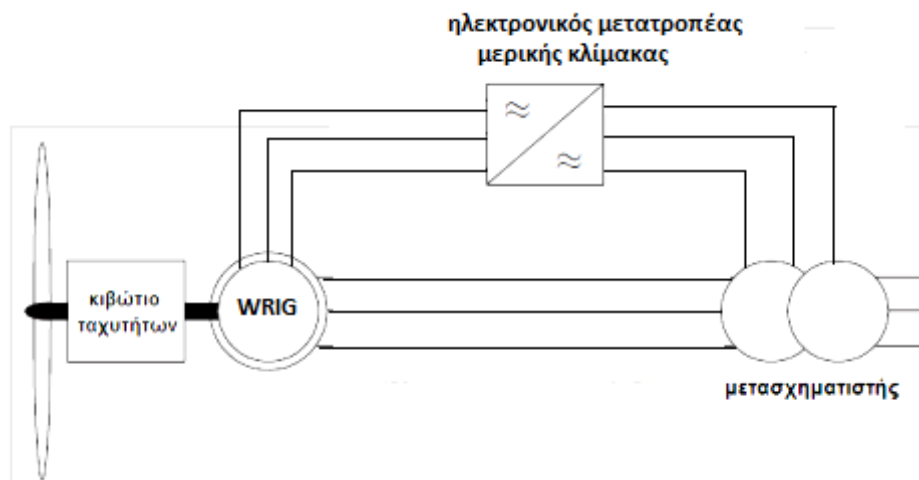
Σχήμα 2.7.2.: Ανεμογεννήτρια μειωμένης μεταβλητής ταχύτητας με επαγωγική γεννήτρια δακτυλιοφόρου δρομέα.

Η τοπολογία αυτή χρησιμοποιείται για ανεμογεννήτριες μειωμένης μεταβλητής ταχύτητας με επαγωγική γεννήτρια δακτυλιοφόρου δρομέα (WRIG). Η γεννήτρια είναι απευθείας συνδεδεμένη με το δίκτυο μέσω ηλεκτρικού μετασχηματιστή ισχύος. Η τοπολογία επιπλέον χρησιμοποιεί συστοιχίες πυκνωτών για την αντιστάθμιση της άεργου ισχύος και για την ομαλή εκκίνηση και σύνδεση με το δίκτυο χρησιμοποιείται ένας ηλεκτρονικά ελεγχόμενος εκκινητής (soft starter). Το βασικότερο μειονέκτημα της συγκεκριμένης τοπολογίας είναι ότι οι διαταραχές του ανέμου μετατρέπονται σε μηχανικές διαταραχές, γεγονός που οδηγεί σε διαταραχές στην παραγόμενη ισχύ και πιθανή διαταραχή στην τάση του δικτύου. Αυτή η τοπολογία χρησιμοποιεί μια ελεγχόμενη αντίσταση, η οποία προστίθεται στην ήδη υπάρχουσα αντίσταση του δρομέα και της δίνει τη δυνατότητα να μεταβάλλει την ολίσθησή της.

Τα μειονεκτήματα της παραπάνω τοπολογίας είναι τα εξής:

- Το εύρος της μεταβολής της ταχύτητας είναι μόνο 0-10%, επειδή εξαρτάται από το μέγεθος της αντίστασης.
- Οι απώλειες ισχύος στην εξωτερική αντίσταση είναι σημαντικές.
- Δεν ελέγχεται ικανοποιητικά η ενεργός και η άεργος ισχύς.

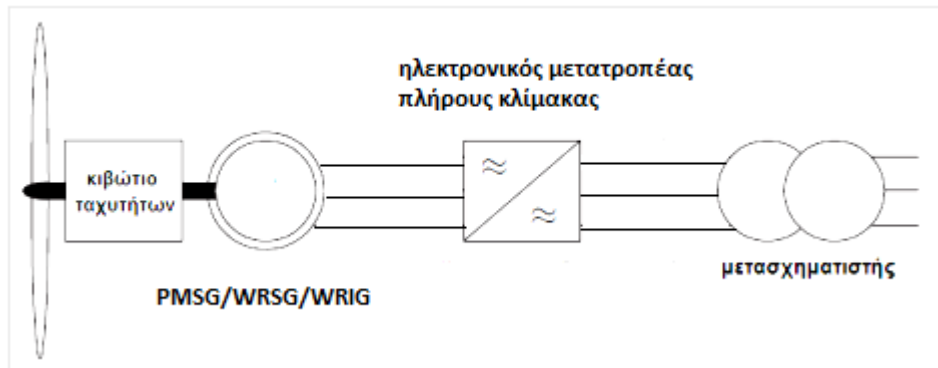
2.7.3 Τοπολογία Γ



Σχήμα 2.7.3.: Ανεμογεννήτρια μειωμένης μεταβλητής ταχύτητας με επαγωγική γεννήτρια δακτυλιοφόρου δρομέα, μέσω ηλεκτρονικού μετατροπέα.

Η τοπολογία αυτή, γνωστή και ως γενικό μοντέλο της επαγωγικής γεννήτριας διπλής τροφοδοσίας (DFIG) χρησιμοποιείται σε ανεμογεννήτριες μειωμένης μεταβλητής ταχύτητας με τη χρήση επαγωγικής γεννήτριας δακτυλιοφόρου δρομέα (WRIG) μέσω σύνδεσης του δρομέα σε ηλεκτρονικό μετατροπέα ισχύος μερικής κλίμακας. Ο μετατροπέας αυτός εξασφαλίζει την αντιστάθμιση της άεργου ισχύος και την ομαλή σύνδεση της γεννήτριας με το δίκτυο. Η τοπολογία αυτή προσφέρει ένα μεγαλύτερο εύρος τιμών για την ταχύτητα του δρομέα σε σχέση με την τοπολογία Β, το οποίο εξαρτάται από το μέγεθος του μετατροπέα που χρησιμοποιείται. Το τυπικό εύρος ταχύτητας που επιτυγχάνεται είναι από -40% έως 30% γύρω από τη σύγχρονη ταχύτητα. Το μειονέκτημα της συγκεκριμένης τοπολογίας είναι ότι ο ηλεκτρονικός μετατροπέας ισχύος επιβαρύνει το κόστος, αλλά με τη χρήση μικρότερης κλίμακας μετατροπέων και με τη συνεχή μείωση των τιμών τους, η τοπολογία αυτή τείνει να γίνει συμφέρουσα.

2.7.4 Τοπολογία Δ



Σχήμα 2.7.4.: Ανεμογεννήτρια πλήρως μεταβλητής ταχύτητας με σύγχρονη ή επαγωγική γεννήτρια.

Η τοπολογία αυτή χρησιμοποιείται σε ανεμογεννήτριες πλήρως μεταβλητής ταχύτητας με την γεννήτρια να είναι απευθείας συνδεδεμένη με το δίκτυο μέσω ενός ηλεκτρονικού μετατροπέα ισχύος πλήρους κλίμακας. Ο μετατροπέας παρέχει την απαιτούμενη άεργο ισχύ, εξασφαλίζει την ομαλή σύνδεση της γεννήτριας με το δίκτυο και επιτυγχάνει τον ανεξάρτητο έλεγχο του συντελεστή ισχύος από τη πλευρά της μηχανής και από τη πλευρά του δικτύου. Σε αυτή τη τοπολογία μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι παρακάτω γεννήτριες:

- Επαγωγική γεννήτρια δακτυλιοφόρου δρομέα (WRIG).
- Σύγχρονη γεννήτρια δακτυλιοφόρου δρομέα (WRSG).
- Σύγχρονη γεννήτρια μόνιμου μαγνήτη (PMSG).

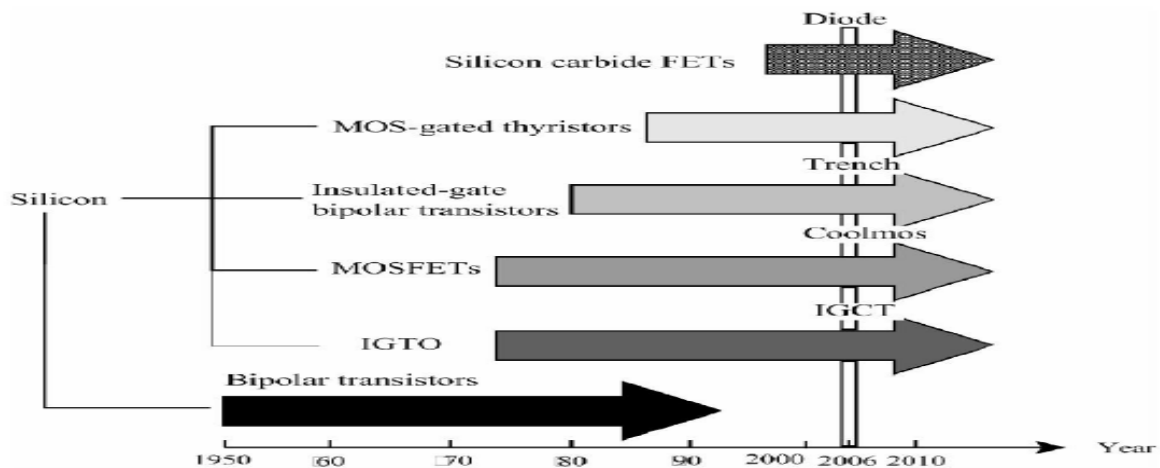
2.8 Ηλεκτρονικοί μετατροπείς ισχύος στα αιολικά συστήματα

Ο ηλεκτρονικά εφαρμοζόμενος έλεγχος χρησιμοποιείται στα συστήματα μεταβλητών στροφών και χρησιμοποιεί την τεχνολογία των

ηλεκτρονικών ισχύος. Τα ηλεκτρονικά ισχύος είναι ηλεκτρονικές συσκευές που μπορούν να διαχειρίζονται μεγάλα ποσά ισχύος της τάξης των MVA. Τα ηλεκτρονικά ισχύος έχουν αλλάξει πολύ τα τελευταία 30 χρόνια και ο αριθμός των εφαρμογών τους έχει αυξηθεί. Η απόδοση σταθερά αυξάνει, ενώ το κόστος συνεχώς μειώνεται.

Το κόστος των συσκευών αυτών ενώ αρχικά ήταν πολύ υψηλό, έχει μειωθεί σημαντικά τα τελευταία χρόνια επιτρέποντας έτσι την αξιοποίηση τους σε μεγάλης κλίμακας εφαρμογές. Η τεχνολογία των ηλεκτρονικών ισχύος εξακολουθεί να διέρχεται μεγάλες αλλαγές και βασικά στοιχεία όπως η τάση κατάρρευσης και η δυνατότητα μεταφοράς ρεύματος των διατάξεων συνεχώς αυξάνει. Σημαντική έρευνα γίνεται επίσης για την αλλαγή των χρησιμοποιούμενων υλικών από πυρίτιο σε καρβίδιο του πυριτίου.

Παρακάτω φαίνεται σχηματικά η εξέλιξη τους τα τελευταία χρόνια.



Σχήμα 2.8.α.: Η εξέλιξη των ηλεκτρονικών ισχύος με το πέρασμα των χρόνων.

Πλεονεκτήματα που απορρέουν από τη χρήση των ηλεκτρονικών μετατροπέων ισχύος :

- Βέλτιστη ενεργειακά λειτουργία με ρύθμιση της πραγματικής ισχύος.

- Μείωση των φορτίων στο κιβώτιο ταχυτήτων, καθώς οι μεταβολές στη ταχύτητα του αέρα απορροφώνται μέσω αλλαγών στη ταχύτητα του δρομέα.
- Έλεγχος του συντελεστή ισχύος με ρύθμιση της άεργου ισχύος.
- Η μη χρησιμοποίηση του κιβωτίου σε πολυπολικές μηχανές.
- Η μείωση του θορύβου στις χαμηλές ταχύτητες.

Παρά τα πολλά πλεονεκτήματα οι ηλεκτρονικοί μετατροπείς παρουσιάζουν και αυτοί τα μειονεκτήματα τους, τα οποία είναι τα εξής:

- Οι απώλειες ενέργειας κατά την αγωγή των ημιαγωγικών στοιχείων ισχύος, οι οποίες ρίχνουν το συνολικό συντελεστή απόδοσης.
- Η παραγωγή υψηλών αρμονικών με συνέπεια τη παρενόχληση της λειτουργίας γειτονικών συσκευών, την αύξηση της άεργου ισχύος και των απωλειών.
- Το αυξημένο τους κόστος (αν και τα τελευταία χρόνια συνεχώς μειώνεται).

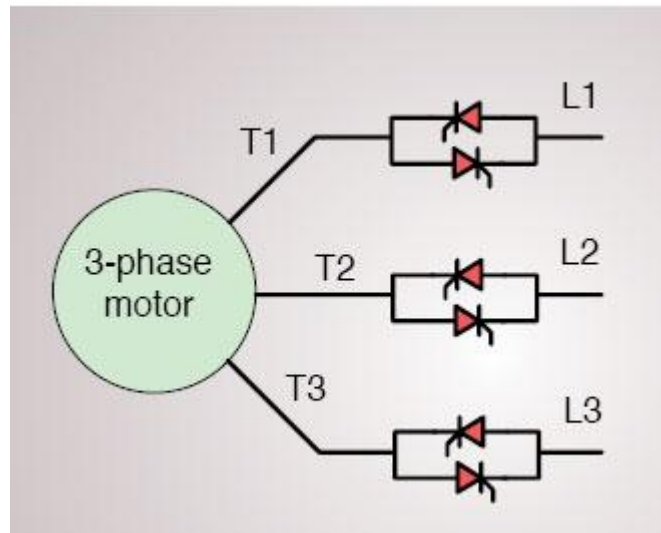
2.8.1. Ηλεκτρονικές συσκευές ισχύος-κατηγορίες-αντιστοιχία

Τα ηλεκτρονικά ισχύος είναι μια εξελισσόμενη και αναπτυσσόμενη τεχνολογία, όπου τα ημιαγωγικά στοιχεία που χρησιμοποιούν μπορούν να διαχειριστούν υψηλές τιμές τάσης και ρεύματος. Με την χρήση κυρίως των Mosfet ισχύος και των IGBT έχουμε τις παρακάτω ηλεκτρονικές συσκευές ισχύος.

Ηλεκτρονικά ελεγχόμενος εκκινητής (soft starter)

Ο soft starter είναι ένας ηλεκτρονικός μετατροπέας ισχύος. Η λειτουργία του αφορά τη μείωση των ρευμάτων εκκίνησης, όταν υπάρχει επαγωγική μηχανή. Χωρίς τη χρήση του soft starter τα ρεύματα εκκίνησης φτάνουν σε τιμές 7-8 φορές μεγαλύτερες από τις ονομαστικές με αποτέλεσμα να

έχουμε σοβαρές διαταραχές στη τάση του δικτύου. Η συσκευή ενός soft starter αποτελείται από 6 θυρίστωρ, 2 σε κάθε φάση, τα οποία είναι συνδεδεμένα αντιπαράλληλα. Συνήθως περιλαμβάνει ένα RC βοηθητικό κύκλωμα ,με σκοπό να περιορίσει τη μεταβολή της τάσης πάνω στα θυρίστωρ.



Σχήμα 2.8.1.: Αντιπαράλληλα θυρίστωρ του soft starter.

Συστοιχία πυκνωτών

Οι συστοιχίες πυκνωτών χρησιμοποιούνται σε ανεμογεννήτριες σταθερής ταχύτητας ή περιορισμένα μεταβλητής ταχύτητας για να παρέχουν άεργο ισχύ στις γεννήτριες, ούτως ώστε αυτές να μην απορροφούν άεργο ισχύ από το δίκτυο. Η τυχόν απορρόφηση άεργου ισχύος από το υπάρχον δίκτυο εξαναγκάζει την ανεμογεννήτρια να δουλεύει με χαμηλό συντελεστή ισχύος και μπορεί να οδηγήσει το δίκτυο σε αστάθεια (ειδικά εάν η ανεμογεννήτρια συνδέεται σε ασθενές δίκτυο).

Έτσι, στα αιολικά συστήματα η αντιστάθμιση μπορεί να εφαρμόζεται με δυναμικό τρόπο, δηλαδή ένας αριθμός πυκνωτών να συνδέεται και να αποσυνδέεται μέσω ηλεκτρονικών διακοπών, αναλόγως με την ζήτηση άεργου ισχύος που υπάρχει. Ωστόσο, οι πυκνωτές κινδυνεύουν από

υπερφόρτιση και από καταστροφές λόγο υπερτάσεων του δικτύου, γεγονός που αυξάνει το κόστος συντήρησης.

Ανορθωτές – Αντιστροφείς

Οι ανορθωτές και οι αντιστροφείς είναι ηλεκτρονικοί μετατροπείς ισχύος ac/dc που χρησιμοποιούν ηλεκτρονικά ισχύος όπως θυρίστορς, τρανζίστορ ισχύος, IGBT κ.α. Υπάρχουν διάφοροι τρόποι που μπορούν να συνδυαστούν ένας αντιστροφέας με έναν ανορθωτή σε ένα μετατροπέα συχνότητας. Επιπλέον ανάλογα με το τύπο του ημιαγωγικού στοιχείου ισχύος που αποτελούνται οι ανορθωτές και οι αντιστροφείς, έχουν διαφορετικά χαρακτηριστικά.

- Ανορθωτές

Με τον όρο ανορθωτή εννοούμε τη ροή μέσης ισχύος από την ac πλευρά στην dc πλευρά.

Η πιο τυπική χρήση ανορθωτή είναι μέσω χρήσης διόδων ισχύος (μη ελεγχόμενων ημιαγωγικών στοιχείων ισχύος). Έτσι εξασφαλίζεται απλότητα, χαμηλό κόστος και όσο το δυνατόν λιγότερες απώλειες. Ωστόσο επιτρέπεται η ροή ισχύος προς μια μόνο κατεύθυνση και δεν μπορεί να γίνει έλεγχος τόσο του ρεύματος όσο και της τάσης. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιούνται μόνο με μια γεννήτρια που μπορεί να ελέγξει τη τάση και με έναν αντιστροφέα μπορεί να ελέγξει το ρεύμα. Όμως οι ανορθωτές με χρήση διόδων ισχύος δεν είναι γραμμικοί με αποτέλεσμα την παραγωγή υψηλών αρμονικών και την παραμόρφωση των ρευμάτων του δικτύου.

Μια άλλη λύση ανορθωτή είναι μέσω χρήσης συμβατικών θυρίστορς ή μέσω GTO θυρίστορς (ελεγχόμενων ημιαγωγικών στοιχείων ισχύος). Εξασφαλίζεται έτσι η δυνατότητα ελέγχου της dc τάσης εξόδου και

επιπλέον υπάρχει η δυνατότητα της αμφίδρομης ροής ισχύος μεταξύ της ac και της dc πλευράς. Μειονεκτήματα αυτού του τύπου ανορθωτή αποτελούν οι υψηλές απώλειες, ιδιαίτερα με τη χρήση GTO θυρίστορ. Τέλος παράγονται υψηλές αρμονικές και υπάρχει παραμόρφωση των ρευμάτων του δικτύου.

- Αντιστροφείς

Με τον όρο αντιστροφέα εννοούμε τη ροή μέσης ισχύος από τη dc πλευρά στην ac πλευρά. Οι αντιστροφείς dc/ac έχουν ως σκοπό τη παραγωγή μιας ημιτονοειδούς ac τάση εξόδου, με ελεγχόμενο πλάτος και συχνότητα. Χρησιμοποιούν ελεγχόμενα ημιαγωγικά στοιχεία ισχύος όπως, συμβατικά θυρίστορς, GTO θυρίστορς και IGBT. Ωστόσο τα τελευταία χρόνια λόγω και της δυνατότητας των IGBT ημιαγωγικών στοιχείων να διαχειριστούν υψηλά ποσοστά ενέργειας, έχουν επικρατήσει οι αντιστροφείς με IGBT. Βασικά τους μειονεκτήματα είναι η κατανάλωση άεργου ισχύος, αλλά και η παραγωγή υψηλών αρμονικών. Ωστόσο οι υψηλές αυτές αρμονικές μπορούν να περιοριστούν μέσω κατάλληλης παλμοδότησης των ημιαγωγικών στοιχείων ισχύος (μέσω διαμόρφωσης εύρους πλάτους παλμών, PWM).

Μετατροπείς συχνότητας

Ένας μετατροπέας συχνότητας αποτελείται από έναν ανορθωτή που μετατρέπει την εναλλασσόμενη ισχύ εισόδου σε συνεχή και από ένα αντιστροφέα, ο οποίος μετατρέπει την συνεχή ισχύ σε εναλλασσόμενη διαφορετικής συχνότητας από την αρχική.

Υπάρχουν διάφορες τοπολογίες μετατροπέων συχνότητας που μπορούν να εφαρμοστούν στις ανεμογεννήτριες και είναι οι εξής:

- Διπλοί μετατροπείς με IGBT (back-to-back converters)

- Μετατροπείς πολλών επιπέδων (multilevel converters)
- Μετατροπείς μήτρας (matrix converters)
- Μετατροπείς συντονισμού (resonant converters)

2.8.2 Μέθοδος διαμόρφωσης εύρους πλάτους παλμών (PWM)

Ο έλεγχος της μέσης τιμής της τάσης εξόδου του αντιστροφέα μπορεί να επιτευχθεί με τη μεταβολή του εύρους πλάτους των παλμών, μεταβάλλοντας δηλαδή τα χρονικά διαστήματα κατά τα οποία τα στοιχεία του αντιστροφέα άγουν ή όχι. Η τεχνική αυτή, με την οποία επιτυγχάνεται ο έλεγχος του πλάτους και της συχνότητας της βασικής αρμονικής της τάσης εξόδου, μέσω της αυξομείωσης του εύρους των παλμών της τάσης εξόδου, ονομάζεται Διαμόρφωση εύρους πλάτους παλμών (Pulse Width Modulation, PWM). Για την παραγωγή των παλμών συγκρίνεται ένα σήμα ελέγχου V_{control} (σταθερό ή αργά μεταβαλλόμενο με το χρόνο) που ονομάζεται φέρον σήμα ή σήμα αναφοράς, με μια περιοδική κυματομορφή (συνήθως τριγωνική) υψηλής συχνότητας f_{tri} , που ονομάζεται φορέας.

Το «ημιτονοειδές σήμα αναφοράς» και το «τριγωνικό σήμα φέροντος» που χρησιμοποιούνται για τη Διαμόρφωση εύρους πλάτους παλμών (PWM) έχουν τα εξής χαρακτηριστικά:

V_{control} το πλάτος της κυματομορφής αναφοράς,

V_{tri} το πλάτος της κυματομορφής φορέα,

f_{control} η συχνότητα της κυματομορφής αναφοράς,

f_{tri} η συχνότητα της κυματομορφής φορέα

Από τα παραπάνω προκύπτουν:

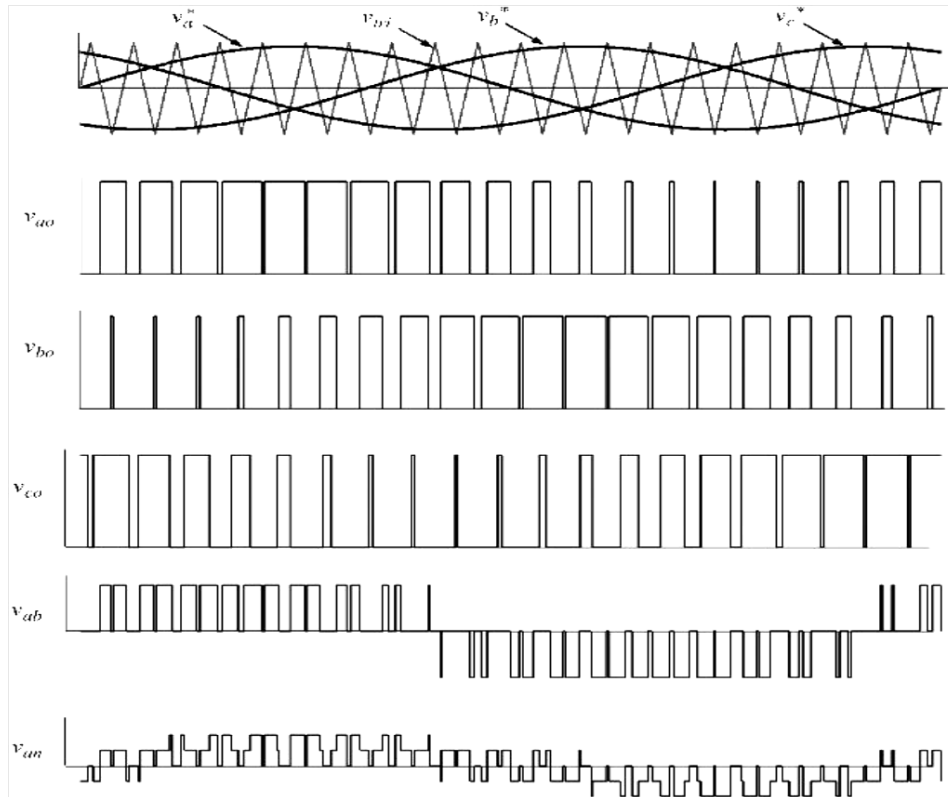
$$m_a = \frac{V_{control}}{V_{tri}} \quad \text{συντελεστής διαμόρφωσης πλάτους} \quad \mathbf{2.8.2.α.}$$

$$m_f = \frac{f_{control}}{f_{tri}} \quad \text{συντελεστής διαμόρφωσης συχνότητας} \quad \mathbf{2.8.2.β.}$$

και $m_a = \sqrt{2} * \sqrt{(m_d^2 + m_q^2)}$ ο λόγος κατάτμησης σ' ένα σύστημα αναφοράς δύο καθέτων αξόνων d-q όπου: **2.8.2.γ.**

m_d ο λόγος κατάτμησης του μετατροπέα του d άξονα και
 m_q ο λόγος κατάτμησης του μετατροπέα του q άξονα.

Σύμφωνα με την τεχνική αυτή, δημιουργείται ένα ημιτονοειδές σήμα το οποίο ονομάζεται ημίτονο αναφοράς και μια τριγωνική κυματομορφή που ονομάζεται κυματομορφή φορέα. Στη συνέχεια οι δύο παραπάνω κυματομορφές συγκρίνονται μεταξύ τους. Το αποτέλεσμα της σύγκρισης είναι μια λογική στάθμη 0, όταν το τρίγωνο είναι μεγαλύτερο του ημιτόνου και μια λογική στάθμη 1, όταν συμβαίνει το αντίθετο. Το αποτέλεσμα της σύγκρισης εξαρτάται από τα σημεία τομής των δύο κυματομορφών.



Σχήμα 2.8.2.: Η κλασσική SPWM.

Στην περίπτωση του τριφασικού αντιστροφέα έχουμε την εφαρμογή τριών σημάτων ελέγχου της επιθυμητής συχνότητας και του ίδιου επιθυμητού πλάτους, τα οποία έχουν μεταξύ τους διαφορά φάσης 120° το καθένα, και συγκρίνονται με την ίδια τριγωνική κυματομορφή.

Με παρόμοιο τρόπο με προηγουμένως προκύπτει ότι η φασική τάση εξόδου του μετατροπέα, στη θεμελιώδη συχνότητα, δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$V_{ao} = m_a * \frac{V_{dc}}{2} \quad \mathbf{2.8.2.δ.}$$

Εάν, θέλουμε την RMS τιμή της πολικής τάσεως στην έξοδο του μετατροπέα, για την θεμελιώδη συχνότητα, τότε θα χρησιμοποιήσουμε την παρακάτω σχέση:

$$V_{RMS} = \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}} * m_a * \frac{V_{dc}}{2} \quad \mathbf{2.8.2.ε.}$$

2.9 Έλεγχος ισχύος στις ανεμογεννήτριες

Είναι γεγονός ότι οι ανεμογεννήτριες, εφόσον συνδέονται στο δίκτυο, αλληλεπιδρούν με αυτό και το επηρεάζουν καθώς οι αλλαγές στην ταχύτητα του ανέμου προκαλούν αλλαγές στην παραγόμενη ενέργεια της ανεμογεννήτριας. Το πρόβλημα αυτό αντιμετωπίζεται μέσω του μηχανικού και του ηλεκτρικού ελέγχου καθώς επίσης και κάνοντας χρήση ηλεκτρονικών ισχύος.

2.9.1 Έλεγχος μέσω ηλεκτρονικών ισχύος

Είναι γεγονός ότι η ενσωμάτωση τεχνολογιών ηλεκτρονικών ισχύος σε αιολικά συστήματα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας δίνει τη δυνατότητα υλοποίησης νέων εφαρμογών οι οποίες επιτρέπουν τη σημαντική αύξηση της συνολικής αποδοτικότητας των συστημάτων καθώς και την ομαλότερη ένταξή τους στο ηλεκτρικό δίκτυο και τη βέλτιστη συνεργασία τους με αυτό. Εντούτοις πέρα των πλεονεκτημάτων, υπάρχουν και σημαντικά μειονεκτήματα όπως ότι παράγουν υψηλές αρμονικές του ρεύματος στο δίκτυο και ότι οι απώλειες ενέργειας σε αυτά καθώς και το επιπλέον κόστος για τον πρόσθετο εξοπλισμό αυξάνουν τελικά το συνολικό κόστος το οποίο βέβαια αξίζει να σημειωθεί ότι διαρκώς μειώνεται.

Οι κυριότερες συσκευές ηλεκτρονικών ισχύος που χρησιμοποιούνται στα αερολογικά συστήματα είναι:

- Ηλεκτρονικά ελεγχόμενοι εκκινητές (soft starters): Μειώνουν τα μεταβατικά ρεύματα και χρησιμοποιούνται κυρίως από ανεμογεννήτριες σταθερής ταχύτητας καθώς έτσι μειώνονται οι διαταραχές στο δίκτυο.
- Συστοιχίες πυκνωτών: Παράγουν άεργο ισχύ την οποία απορροφά η γεννήτρια με αποτέλεσμα να μειώνει την άεργο ισχύ που απορροφά από το δίκτυο
- Ανορθωτές, αντιστροφείς και μετατροπείς συχνότητας από τους οποίους ο πιο σπουδαίος τύπος μετατροπέα είναι ο εξαναγκασμένης μετάβασης με IGBT των οποίων η διακοπτική συχνότητα κυμαίνεται μεταξύ 2 και 20kHz.

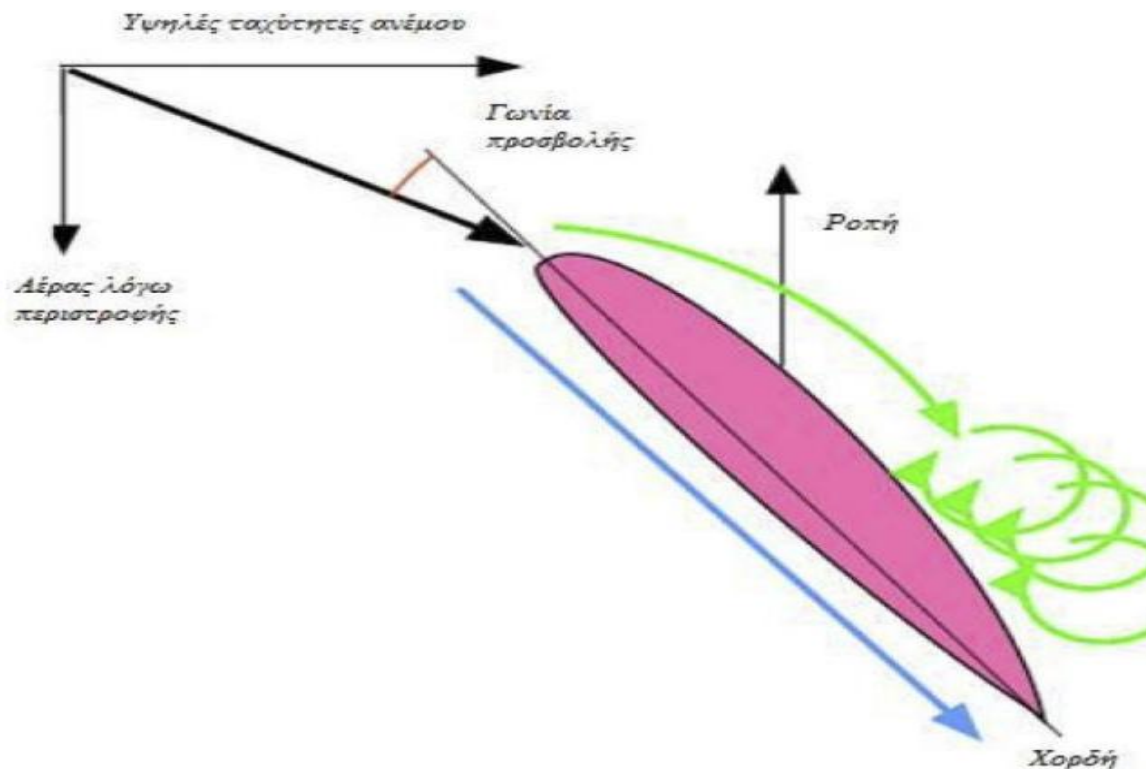
2.9.2 Μηχανικός έλεγχος ισχύος

Ο μηχανικός έλεγχος ισχύος συμβάλλει στην αποφυγή ζημιών στις ανεμογεννήτριες περιορίζοντας την απορροφούμενη από τον άνεμο ισχύ και τις εφαρμοζόμενες αεροδυναμικές δυνάμεις στο δρομέα σε υψηλές τιμές ταχύτητας. Υπάρχουν τρεις τρόποι μηχανικού ελέγχου οι οποίοι χρησιμοποιούνται τόσο σε σταθερής όσο και σε μεταβλητής ταχύτητας ανεμογεννήτριες.

2.9.2.1 Έλεγχος γωνίας βήματος πτερυγίων (pitch control)

Χρησιμοποιείται σχεδόν αποκλειστικά στις ανεμογεννήτριες μεταβλητών στροφών καθώς με το συγκεκριμένο τρόπο ελέγχου

ασκούνται μικρότερες δυνάμεις και πιέσεις στην ανεμογεννήτρια. Σύμφωνα με αυτόν οι ανεμογεννήτριες διαθέτουν πτερύγια που έχουν τη δυνατότητα να περιστρέφονται κατά το διαμήκη άξονά τους. Με αυτόν τον τρόπο είναι δυνατός ο έλεγχος της γωνίας πρόσπτωσης του ανέμου και κατά προέκταση της απορριφθείσας αεροδυναμικής ισχύος από το δρομέα. Πρόκειται για έναν τρόπο μηχανικού ελέγχου που προσφέρει καλό έλεγχο ισχύος στις ανεμογεννήτριες μεταβλητής ταχύτητας, βοηθάει κατά την εκκίνησή τους και εφαρμόζει σχεδόν άμεση διακοπή σε περίπτωση ανάγκης. Από την άλλη πλευρά όμως εισάγει πολυπλοκότητα λόγω του μηχανισμού στρεφόμενων πτερυγίων και αναταράξεις που υπάρχουν σε μεγάλες τιμές ταχύτητας ανέμου.



2.9.2.2 Παθητικός έλεγχος απώλειας στήριξης (passive stall control).

Χρησιμοποιείται πιο συχνά στις ανεμογεννήτριες σταθερής ταχύτητας. Σύμφωνα με αυτόν οι ανεμογεννήτριες διαθέτουν πτερύγια

με σταθερή γωνία τα οποία παρουσιάζουν απώλεια αεροδυναμικής στήριξης σε μεγάλες ταχύτητες ανέμου. Με αυτόν τον τρόπο μειώνεται η αναπτυσσόμενη ροπή και άρα η παραγόμενη ισχύς.

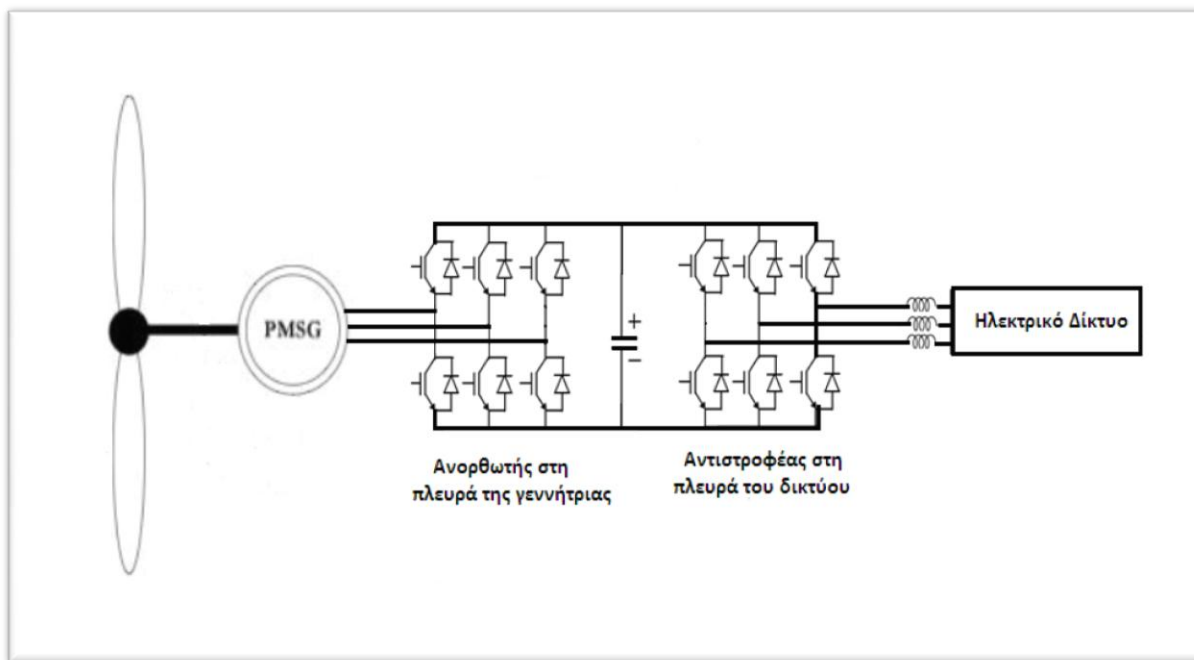
Πρόκειται για έναν απλό, εύρωστο και φθηνό τρόπο μηχανικού ελέγχου που προκαλεί μικρότερες διαταραχές στην ισχύ από ότι μια γρήγορη μεταβολή στη γωνία των πτερυγίων. Από την άλλη πλευρά όμως η απόδοσή του σε χαμηλές ταχύτητες είναι μικρή, δε βοηθάει στην εκκίνηση και δεν επιτρέπει ακριβή έλεγχο της ισχύος.

2.9.2.3 Ενεργός έλεγχος απώλειας στήριξης (active stall control)

Ενεργός έλεγχος απώλειας στήριξης (active stall control): Συνδυάζει τα θετικά των δύο παραπάνω ελέγχων αφού βασίζεται στην ίδια αρχή με αυτή του pitch control με αντίθετη μεταβολή της γωνίας βήματος αλλά χρησιμοποιώντας την ικανότητα της απώλειας της αεροδυναμικής στήριξης των πτερυγίων. Με τον τρόπο αυτόν αποφεύγονται τα μεγάλα δυναμικά φορτία και οι διακυμάνσεις της ισχύος, τα οποία λαμβάνουν χώρα στον κλασικό έλεγχο του βήματος πτερυγίων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3⁰

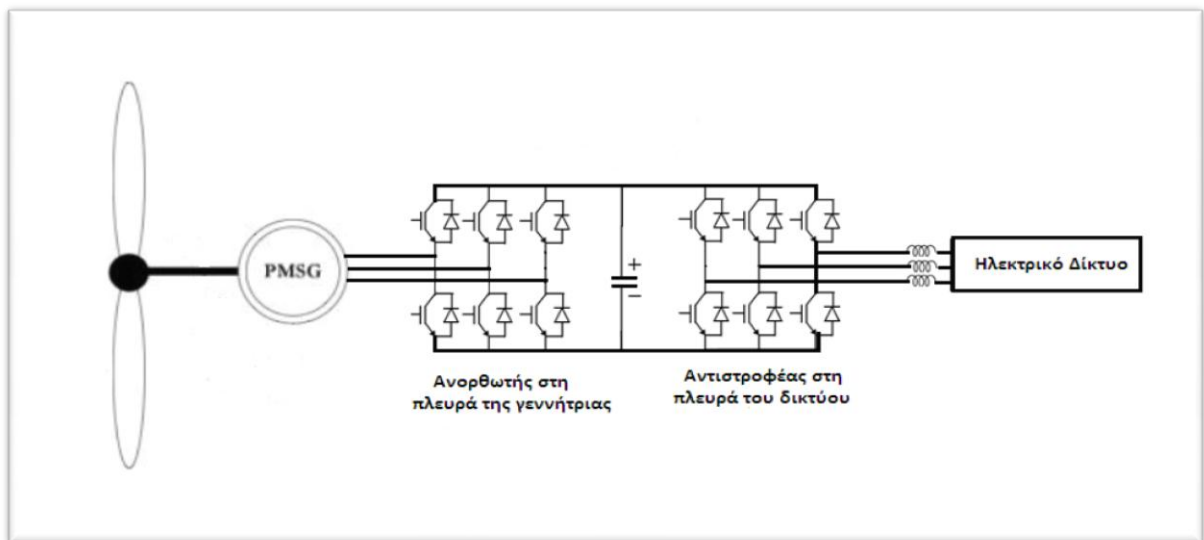
ΑΝΑΛΥΣΗ Α/Γ ΜΕΤΑΒΛΗΤΩΝ ΣΤΡΟΦΩΝ ΜΕ ΣΥΓΧΡΟΝΗ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑ



3.1 Το υπό ανάλυση σύστημα

Το σχήμα 3.1 μας δίνει τη γενική εικόνα του υπό ανάλυση συστήματος το οποίο αποτελείται από μια ανεμογεννήτρια ισχύος της τάξης των MW και η οποία με τη σειρά της περιλαμβάνει :

- Την τριφασική σύγχρονη πολυπολική γεννήτρια μόνιμου μαγνήτη
- Τον ac/dc πλήρως ελεγχόμενο ανορθωτή ισχύος στην πλευρά της μηχανής
- Τη dc διασύνδεση που στην περίπτωση αυτή δημιουργεί ένας dc πυκνωτής
- Τον dc/ac πλήρως ελεγχόμενο αντιστροφέα ισχύος στην πλευρά του δικτύου
- Το σε σειρά απλό τριφασικό ωμικό – επαγωγικό φίλτρο στην ac πλευρά μέχρι το ζυγό διασύνδεσης με τα δίκτυο.



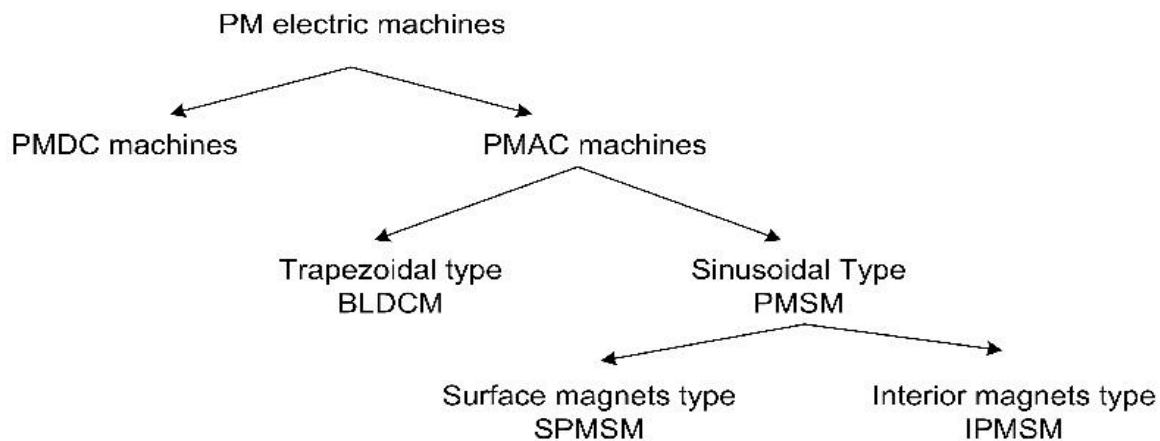
Σχήμα 3.1: Το υπό ανάλυση σύστημα.

3.2 Σύγχρονη μηχανή μόνιμου μαγνήτη

Η μηχανή μόνιμου μαγνήτη είναι μια μηχανή η οποία μαγνητίζεται από μόνιμους μαγνήτες οι οποίοι είναι τοποθετημένοι πάνω στον ρότορα και σε αντίθεση με μια κλασική μηχανή δεν χρησιμοποιεί εξωτερική dc διέγερση. Έχοντας τους μόνιμους μαγνήτες στον ρότορα οι ηλεκτρικές απώλειες της μηχανής μειώνονται και οι απώλειες πεδίου βελτιώνουν τα θερμικά του χαρακτηριστικά.

Επίσης η απουσία μηχανικών εξαρτημάτων, όπως δακτυλίων ολισθήσεως και ψηκτρών κάνει την μηχανή ελαφρότερη με υψηλότερο λόγο ισχύος προς βάρος γεγονός το οποίο της προσδίδει μεγαλύτερη αποδοτικότητα και αξιοπιστία. Λόγω των πλεονεκτημάτων η μηχανή με μόνιμους μαγνήτες αποτελεί μια καλή λύση για αιολικά συστήματα, γι' αυτό τον λόγο χρησιμοποιούμε και την παραπάνω τοπολογία. Παρουσιάζει όμως το μειονέκτημα ότι μπορεί να υπάρξει απομαγνήτιση των μαγνητικών της υλικών σε υψηλές θερμοκρασίες και το κόστος τους.

Παρακάτω διακρίνονται σχηματικά οι κατηγορίες των σύγχρονων μηχανών.



Σχήμα 3.2.α.: Κατηγορίες σύγχρονων μηχανών.

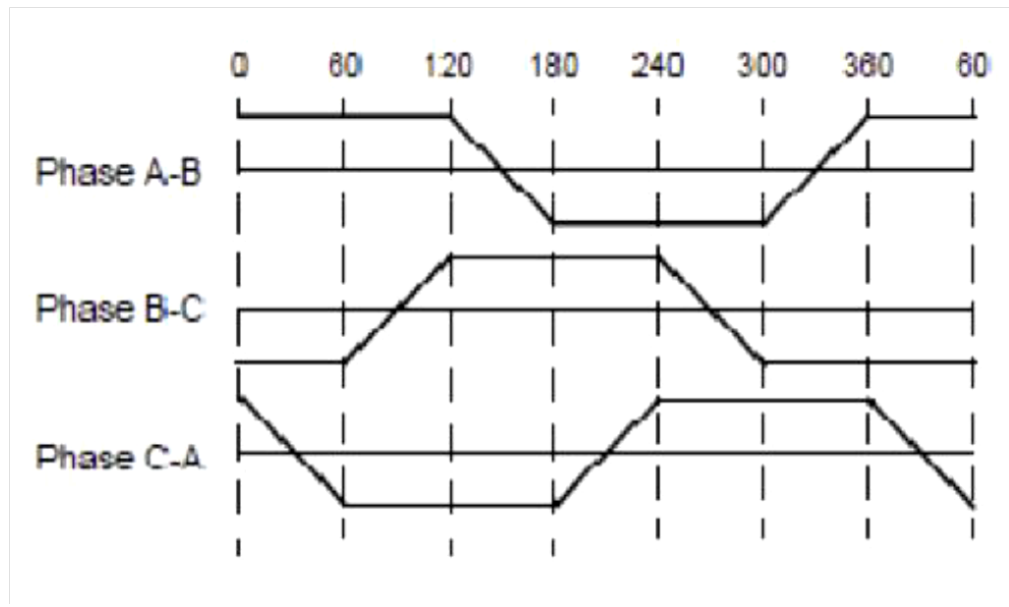
Οι σύγχρονες μηχανές μόνιμου μαγνήτη χωρίζονται στις εξής κατηγορίες, στις PMDC μηχανές και στις PMAC μηχανές. Οι PMDC είναι παρόμοιες με τις κλασικές σύγχρονες μηχανές με τη διαφορά ότι το τύλιγμα διέγερσης έχει αντικατασταθεί από τους μόνιμους μαγνήτες.]

Από την άλλη πλευρά στις PMAC μηχανές το μαγνητικό πεδίο παράγεται από τους μόνιμους μαγνήτες που είναι τοποθετημένοι στο ρήτορα, ενώ οι δακτύλιοι ολίσθησης και οι ψήκτρες δεν υπάρχουν σε αυτές τις μηχανές. Για αυτό το λόγο οι PMAC μηχανές είναι πιο απλές και ελκυστικές για χρήση από τις PMDC μηχανές.

Οι PMAC μηχανές μπορούν να ταξινομηθούν ανάλογα με το τύπο της επαγόμενης τάσης στο στάτη στις εξής κατηγορίες:

- Τραπεζοειδής ή τετραγωνικού παλμού ή διακοπτικής διέγερσης σύγχρονες μηχανές μόνιμου μαγνήτη (trapezoidal ή squarewave ή switched PM synchronous machines).
- Ημιτονοειδής σύγχρονες μηχανές μόνιμου μαγνήτη (sinusoidal PM synchronous machines).

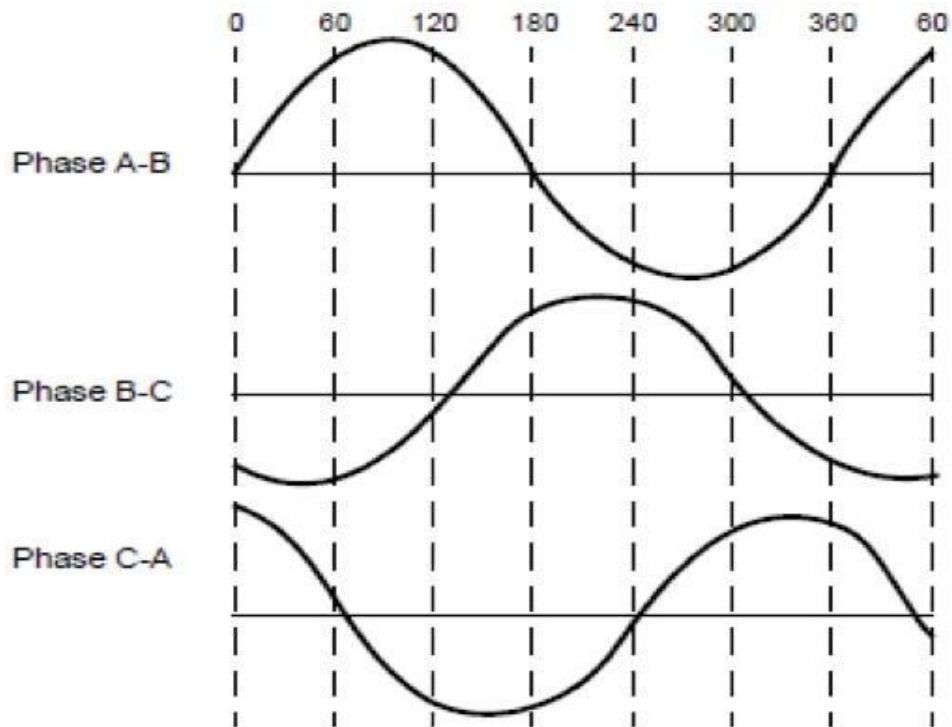
Στις τραπεζοειδής σύγχρονες μηχανές μόνιμου μαγνήτη τα φασικά ρεύματα στο στάτη έχουν σύγχρονη μορφή. Επειδή η εξίσωση ροπής-ταχύτητας που προκύπτει με την εφαρμογή του ελέγχου είναι αντίστοιχη της μηχανής συνεχούς ρεύματος, χαρακτηρίζονται ως «brushless dc machines». Οι μηχανές αυτές δεν έχουν καμία σχέση με τις μηχανές συνεχούς ρεύματος, ωστόσο μέσω του ελέγχου καταφέρνουμε να συμπεριφέρονται σαν να είναι μηχανές συνεχούς ρεύματος.



Σχήμα 3.2.α.: Τάση εξ' επαγωγής σε τραπεζοειδή σύγχρονη μηχανή

Στις ημιτονοειδής σύγχρονες μηχανές μόνιμου μαγνήτη η τάση εξ' επαγωγής είναι ημιτονοειδής ώστε η αλληλεπίδραση με τα ημιτονοειδή ρεύματα να οδηγεί στη παραγωγή σταθερής ροπής με ελάχιστη ταλάντωση.

Οι μηχανές αυτές έχουν τη συμπεριφορά των κλασικών σύγχρονων μηχανών, γι' αυτό το λόγο καλούνται και «brushless ac» μηχανές. Ωστόσο, επειδή στη περίπτωση χρήσης διανυσματικού ελέγχου εφαρμόζεται σε χρονικά αμετάβλητα μεγέθη, μπορεί να θεωρηθεί ότι τουλάχιστον στο επίπεδο ελέγχου η λειτουργία των μηχανών αυτών προσεγγίζει τη λειτουργία των μηχανών συνεχούς ρεύματος. Για το λόγο αυτό πολλές φορές συγχέονται με τις «brushless dc» μηχανές της προηγούμενης κατηγορίας, χαρακτηρισμός ο οποίος πολλές φορές δεν είναι λανθασμένος.



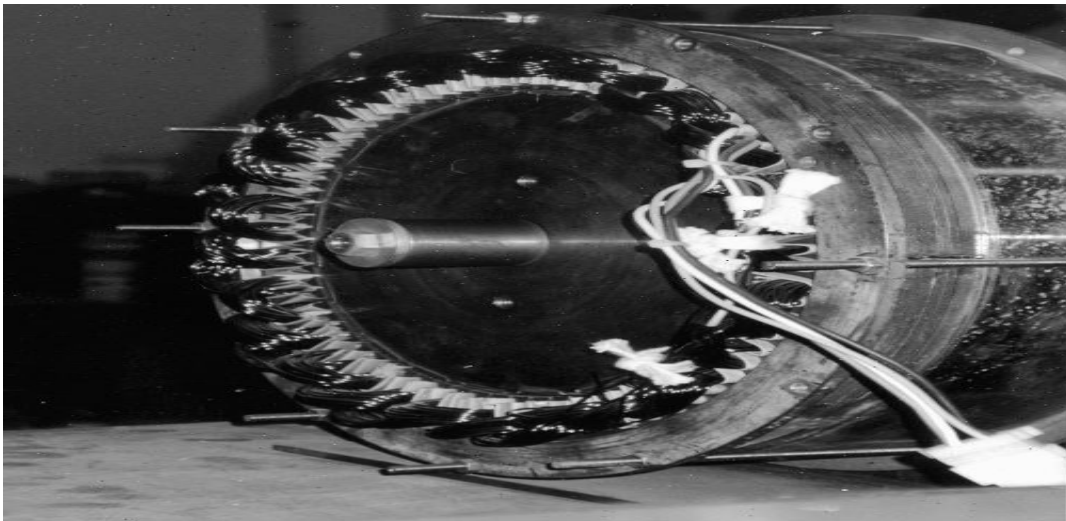
Σχήμα 3.2.β.: Τάση εξ' επαγωγής σε ημιτονοειδή σύγχρονη μηχανή.

Τέλος οι ημιτονοειδής σύγχρονες μηχανές μόνιμου μαγνήτη κατηγοριοποιούνται ανάλογα με τη μορφή του δρομέα τους στις εξής κατηγορίες:

- Επιφανειακού μαγνήτη (surface magnet): Οι μόνιμοι μαγνήτες είναι στην επιφάνεια του ρότορα. Οι μαγνήτες μπορούν να θεωρηθούν σαν να υπήρχε στη θέση τους αέρας μιας και η διαπερατότητα των μαγνητών είναι κοντά στην μονάδα ($\mu=1$). Λόγω του ίδιου πάχους των μαγνητών το έκτυπο των πόλων δεν υφίσταται. Αυτό έχει ως συνέπεια την ισότητα των αυτεπαγωγών στο d και q άξονα ($L_q=L_d$).
- Εσωτερικού μαγνήτη (interior magnet): Οι μόνιμοι μαγνήτες είναι τοποθετημένοι στο εσωτερικό του ρότορα. Σ' αυτήν την κατασκευή το έκτυπο των πόλων γίνεται αντιληπτό, διότι το διάκενο αέρος του d άξονα γίνεται μεγαλύτερο από το διάκενο του q άξονα. Έτσι, η

αυτεπαγωγή του d άξονα έχει διαφορετική τιμή από την αυτεπαγωγή του q άξονα ($L_q \neq L_d$).

Στην περίπτωση των σύγχρονων μηχανών με επιφανειακό μαγνήτη (Surface mounted magnet type,SPMSM), το έκτυπο των πόλων δεν υπάρχει με αποτέλεσμα οι μηχανές αυτές να είναι πιο εύχρηστες στο σχεδιασμό και στην λειτουργία. Έτσι, κερδίζουν διαρκώς έδαφος στις εφαρμογές των ανεμογεννητριών.



Σχήμα 3.2.γ.: Δοκίμιο σύγχρονης γεννήτριας μονίμων μαγνητών.

Τα τελευταία χρόνια χρησιμοποιούνται ολοένα και περισσότερο γεννήτριες μονίμων μαγνητών σε πληθώρα εφαρμογών. Η χρήση σύγχρονων γεννητριών μονίμων μαγνητών στις ανεμογεννήτριες υπερτερεί έναντι άλλων τοπολογιών, σε ορισμένους τομείς, με κυριότερα πλεονεκτήματα το γεγονός ότι λειτουργούν υπό υψηλό συντελεστή ισχύος και υψηλή απόδοση λόγω της ιδιότητάς τους να αυτοδιεγείρονται.

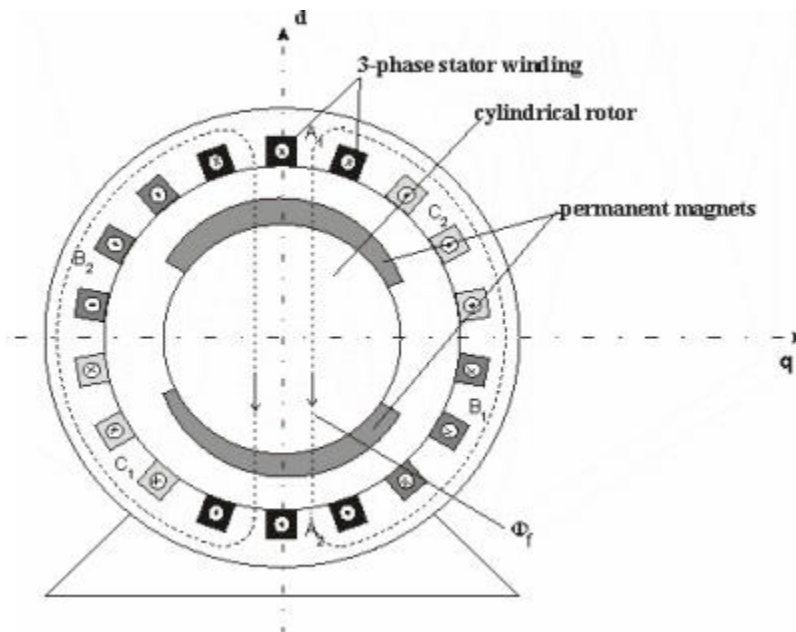
Παρόλο που τα υλικά μονίμων μαγνητών εμφάνιζαν στο παρελθόν προβλήματα απομαγνήτισης, στις μέρες μας χρησιμοποιούνται κράματα όπως νεοδύμιου, τα οποία εμφανίζουν μεγάλη σταθερότητα στα χαρακτηριστικά τους.

Καθώς η γεννήτρια αποτελεί κύριο μέρος των συστημάτων ανεμογεννητριών, η μοντελοποίησή της αλλά και η μελέτη φαινομένων που διέπουν τη λειτουργία της είναι ζητήματα μείζονος σημασίας. Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται η μεθοδολογία ανάπτυξης ενός συζευγμένου δυναμικού μοντέλου συγκεντρωμένων παραμέτρων και πεδιακής ανάλυσης το οποίο χρησιμοποιήθηκε στην πειραματική διερεύνηση της ανεμογεννήτριας.

Με βάση το μοντέλο αυτό μελετώνται φαινόμενα ανώτερων αρμονικών συχνοτήτων των ηλεκτρικών μεγεθών, φαινόμενα μηχανικών ταλαντώσεων της ανεμογεννήτριας και προτείνεται μία μεθοδολογία ελέγχου για την αντιμετώπισή τους.

3.2.1 Διαμόρφωση γεννήτριας μονίμων μαγνητών και κυριότερα λειτουργικά χαρακτηριστικά

Η βασική δομή της γεννήτριας μονίμων μαγνητών που χρησιμοποιείται στη παρούσα εργασία παρουσιάζεται στο Σχ. 3.2.1



Σχημα 3.2.1.(Διατομή γεννήτριας μονίμων μαγνητών με επιφανειακούς μαγνήτες)

Η τοπολογία του Σχ. 3.2.1 είναι αυτή των επιφανειακών μαγνητών και αποτελεί μια τοπολογία που τείνει να επικρατήσει μετά την ανάπτυξη μαγνητικών υλικών υψηλής μαγνήτισης. 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. Μαγνήτες αντίθετης μαγνητικής φοράς παράγουν πυκνότητα ροής ακτινικής κατεύθυνσης διαμέσου του διακένου.

3.2.2 Μοντέλα αναπαράστασης της γεννήτριας μονίμων

Μαγνητών

Η δημιουργία ακριβούς μοντέλου που να περιγράφει ηλεκτρικά μία μηχανή μονίμων μαγνητών δεν είναι απλή λόγω των μη γραμμικών φαινομένων που παρουσιάζουν τα μαγνητικά υλικά αλλά και των αρμονικών φαινομένων που σχετίζονται με την κατασκευή της γεννήτριας. Παρουσιάζονται δύο εναλλακτικές αναπαραστάσεις για τη σύγχρονη γεννήτρια μονίμων μαγνητών.

3.2.3 Μοντέλο γενικευμένης θεωρίας ηλεκτρικών μηχανών

Οι εξισώσεις που περιγράφουν τη λειτουργία της σύγχρονης γεννήτριας προκύπτουν χρησιμοποιώντας στρεφόμενο πλαίσιο δύο αξόνων με εφαρμογή της γενικευμένης θεωρίας των ηλεκτρικών μηχανών.

Η γεννήτρια δε διαθέτει τυλίγματα απόσβεσης και μπορεί να περιγραφεί αναλυτικά ως μοντέλο τέταρτης τάξης με εισόδους τις τάσεις των ακροδεκτών v_{as} , v_{bs} , v_{cs} και τη μηχανική ροπή στον άξονα T_m , ενώ μεταβλητές κατάστασης είναι οι συνιστώσες της πεπλεγμένης ροής του

στάτη ψ_{qs} , ψ_{ds} και η γωνιακή ταχύτητα και θέση του δρομέα ω_r , θ_r , αντίστοιχα.

Ως έξοδοι του συστήματος λαμβάνονται τα ρεύματα γραμμής i_{as} , i_{bs} , i_{cs} . Παρακάτω παρατίθενται οι εξισώσεις που περιγράφουν το σύστημα. Όλα τα μεγέθη (τάσεις, ρεύματα, πεπλεγμένες ροές ανά δευτερόλεπτο, γωνιακή ταχύτητα δρομέα, αντιστάσεις, ροπή) είναι εκφρασμένα σε ανά μονάδα σύστημα με τις βασικές τιμές που δίνονται στη συνέχεια.

3.3 Εξισώσεις στο χώρο κατάστασης

Για την επίλυση από τον ηλεκτρονικό υπολογιστή των εξισώσεων και την προσομοίωση της λειτουργίας της μηχανής είναι ανάγκη να γράφουν οι εξισώσεις στο χώρο κατάστασης δηλαδή υπό την γενική μορφή $x = f(x, u, t)$

Όπου x είναι το διάνυσμα των μεταβλητών κατάστασης, u το διάνυσμα των εισόδων της μηχανής και t ο χρόνος.

Αν οι αμοιβαίες πεπλεγμένες ροές ανά δευτερόλεπτο στους q και d άξονες οριστούν ως

$$\psi_{mq} = X_{mq} (-i_{qs} + i'_{kq})$$

$$\psi_{md} = X_{md} (-i_{ds} + i'_{kd} + i'_m)$$

Τότε προκύπτει

$$i_{qs} = \frac{\psi_{mq} - \psi_{qs}}{X_{ls}}$$

$$i_{ds} = \frac{\psi_{md} - \psi_{ds}}{X_{ls}}$$

$$i_{os} = -\frac{\psi_{0s}}{X_{ls}}$$

$$i'_{kq} = \frac{\psi'_{kq} - \psi_{mq}}{X'_{lkq}}$$

$$i'_{kd} = \frac{\psi'_{kd} - \psi_{md}}{X'_{lkd}}$$

Επομένως απαλείφοντας τις εντάσεις από τις εξισώσεις είναι

$$\psi_{qs} = \omega_b \int \left[v_{qs} + \frac{r_s}{X_{ls}} (\psi_{mq} - \psi_{qs}) - \left(\frac{\omega_r}{\omega_b} \right) \psi_{ds} \right] dt$$

$$\psi_{ds} = \omega_b \int \left[v_{ds} + \frac{r_s}{X_{ls}} (\psi_{md} - \psi_{ds}) + \left(\frac{\omega_r}{\omega_b} \right) \psi_{qs} \right] dt$$

$$\psi_{0s} = \omega_b \int \left(v_{0s} - \frac{r_s}{X_{ls}} \psi_{0s} \right) dt$$

$$\psi'_{kq} = \omega_b \int \frac{r'_{kq}}{X'_{lkq}} (\psi_{mq} - \psi'_{kq}) dt$$

$$\psi'_{kd} = \omega_b \int \frac{r'_{kd}}{X'_{lkd}} (\psi_{md} - \psi'_{kd}) dt$$

3.4 Ανά μονάδα σύστημα

Είναι σύνηθες να εκφράζουμε τις παραμέτρους της μηχανής σε ανοιγμένες ανά μονάδα τιμές. Με επιλογή της βασικής ισχύος και της βασικής τάσης όλες οι παράμετροι κανονικοποιούνται κάνοντας χρήση αυτών των τιμών.

Ως βασική ισχύς επιλέγεται η ονομαστική ισχύς της γεννήτριας.

Ως βασική τάση για τις μεταβλητές abc επιλέγεται η ενεργός τιμή (rms) της φασικής τάσης ανοιχτοκυκλώσης ενώ για τις μεταβλητές qd0 επιλέγεται το πλάτος της φασικής τάσης. Επομένως εάν είναι η βασική τάση για τα μεγέθη abc τότε:

$$V_{b(qd0)} = \sqrt{2V_{b(abc)}}$$

Η βασική ισχύς μπορεί τώρα να εκφραστεί ως

$$S_b = 3V_{b(abc)}I_{b(abc)}$$

Η ισοδύναμα ως

$$S_b = \frac{3}{2}V_{b(qd0)}I_{b(qd0)}$$

Η βασική ένταση ρεύματος μπορεί να υπολογιστεί από τις παραπάνω σχέσεις.

Καταλήγουμε ότι η βασική αντίσταση μπορεί να εκφραστεί ως

$$Z_b = \frac{V_{b(abc)}}{I_{b(abc)}} = \frac{3V_{b(abc)}^2}{S_b}$$

Η ισοδύναμα

$$Z_b = \frac{V_{b(qd0)}}{I_{b(qd0)}} = \left(\frac{3}{2}\right) \frac{V_{b(qd0)}^2}{S_b}$$

Για να κανονικοποιηθει η πεπλεγμένη ροή ανά δευτερόλεπτο αρκεί να διαιρεθεί με την βασική τάση αφού η μονάδα μέτρησης είναι το 1 βολτ. Αν και οι εξισώσεις των τάσεων δεν αλλάζουν μορφή με την αναγωγή τους στο ανά μονάδα σύστημα η εξίσωση της ροπής μεταβάλλεται από την διαδικασία αναγωγής βασική ροπή ορίζεται ως

$$T_b = \frac{S_b}{\left(\frac{2}{P}\right)\omega_b}$$

Όπου η βασική γωνιακή ταχύτητα αντιστοιχεί στην ονομαστική η βασική ηλεκτρική συχνότητα της μηχανής.

Η ανοιγμένη σταθερά αδράνειας ορίζεται ως ακόλουθως:

$$H = \frac{\frac{1}{2} J \omega_{mb}^2}{S_b} = \frac{\frac{1}{2} \left(\frac{2}{P}\right)^2 J \omega_b^2}{S_b}$$

Όπου ω_{mb} είναι η βασική μηχανική ταχύτητα σταθερά αδράνειας έχει μονάδα το 1 sec.

Συνεπώς λύνοντας ως προς J έχουμε

$$J = \frac{H * S_b}{\frac{1}{2} \left(\frac{2}{P}\right)^2 \omega_b^2} = \frac{2H}{\left(\frac{2}{P}\right) \omega_b} \left[\frac{S_b}{\left(\frac{2}{P}\right) \omega_b} \right] = \frac{2H}{\left(\frac{2}{P}\right) \omega_b} T_b$$

Και η εξίσωση κίνησης γράφεται

$$T_m - T_e = \frac{2H}{\left(\frac{2}{P}\right) \omega_b} T_b \left(\frac{2}{P}\right) \frac{d\omega_e}{dt} \Rightarrow \frac{T_m - T_e}{T_b} = 2H \frac{d(\omega_e / \omega_b)}{dt}$$

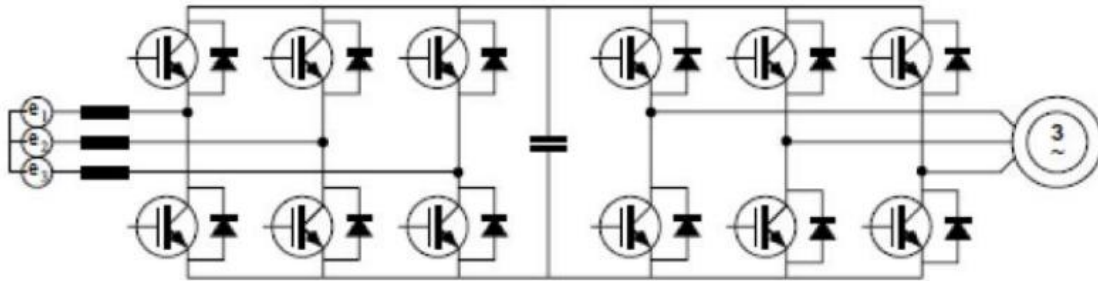
ηλεκτρομαγνητικής ροπής, οποία καθορίζεται από τα χαρακτηριστικά του ηλεκτρικού μέρους της γεννήτριας.

Το να προσπαθήσουμε αποκλειστικά να έχουμε μέγιστη παραγωγή ισχύος δεν θα παρουσιάσει τα επιθυμητά αποτελέσματα.

3.5 Διπλός μετατροπέας ανεμογεννήτριας συνδεσμολογία

Ο τρόπος σύνδεσης των τυλιγμάτων της σύγχρονης γεννήτριας

με τους ηλεκτρονικούς μετατροπείς ισχύος, και κατόπιν με το δίκτυο είναι αυτός που φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 3.5.: Μετατροπέας ΕΡ/ΣΡ/ΕΡ με σύνδεση back-to-back αντιστροφών.

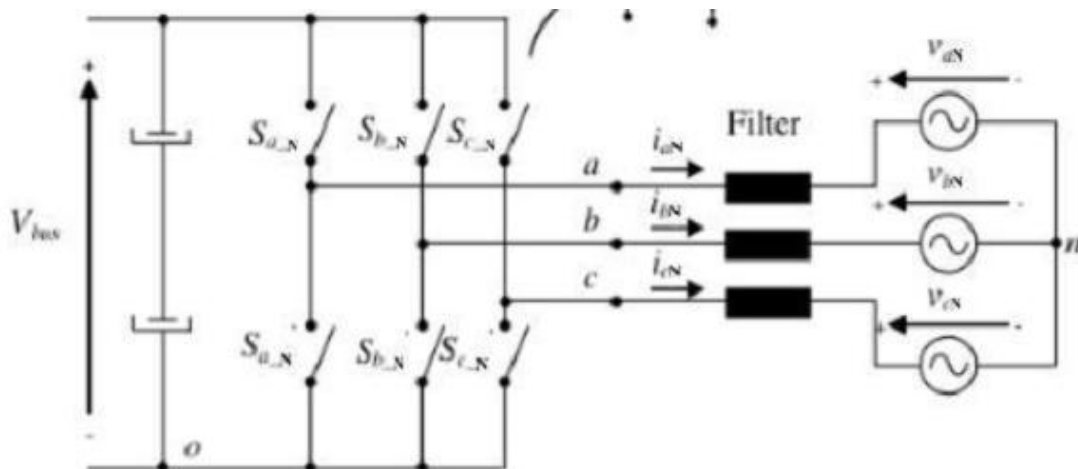
Ο τριφασικός αντιστροφέας τύπου πηγής τάσης είναι ο μετατροπέας ισχύος που μετατρέπει την dc τάση της εξόδου του μετατροπέα ανύψωσης σε εναλλασσόμενη μεταβλητής συχνότητας. Αποτελείται από 6 IGBTs με αντιπαράλληλες διόδους οι οποίες επιτρέπουν την αγωγή από το φορτίο προς την είσοδο σε περίπτωση που ο συντελεστής ισχύος είναι διάφορος της μονάδας. Στόχος του είναι να μετάγει την ισχύ που δίνει ο μετατροπέας ανύψωσης στο δίκτυο κρατώντας σταθερή την τάση του πυκνωτή στην είσοδο.

Ένα άλλο χαρακτηριστικό του συγκεκριμένου αντιστροφέα είναι η ικανότητα ρύθμισης του συντελεστή ισχύος τόσο σε επαγωγικό όσο και σε χωρητικό. Η ρύθμιση αυτή γίνεται μέσω του ελεγκτή του και προσομοιώνει την λειτουργία των συμβατικών σταθμών παραγωγής.

Μετά την ανόρθωση της εναλλασσόμενης τάσης εξόδου από μια τριφασική μη ελεγχόμενη γέφυρα, ακολουθεί ο μετατροπέας ανύψωσης τάσης ΣΡ/ΣΡ. Ο ΣΡ/ΣΡ μετατροπέας ανύψωσης, προσαρμόζει την τάση εξόδου της ανόρθωσης σε επίπεδα τέτοια ώστε να επιτρέπουν τη μεταφορά ισχύος μέσω του αντιστροφέα προς το δίκτυο, ενώ επιφορτίζεται με το ρόλο της προσαρμογής του φορτίου της Α/Γ, ώστε να απομαστεύεται η μέγιστη δυνατή ηλεκτρική ισχύς (λειτουργία στο σημείο μέγιστης ισχύος, maximum power point tracking, MPPT). Στη συγκεκριμένη περίπτωση αποτελείται από ένα IGBT, μία δίοδο, ένα πηνίο και ένα πυκνωτή συνδεδεμένο στην έξοδο.

Στο μετατροπέα ανύψωσης η τάση εξόδου, V_o , είναι μεγαλύτερη από την τάση εισόδου, V_d . Όταν το διακοπτικό στοιχείο άγει, η δίοδος D είναι ανάστροφα πολωμένη, απομονώνοντας την έξοδο οπότε η ενέργεια που έρχεται από την είσοδο του μετατροπέα αποθηκεύεται στο πηνίο. Μόλις το στοιχείο σταματήσει να άγει, τότε η δίοδος πολώνεται θετικά με αποτέλεσμα η αποθηκευμένη ενέργεια του πηνίου να αποδίδεται στην έξοδο. Το ρεύμα του πηνίου, I_d , μπορεί να είναι συνεχές ή διακοπτόμενο ανάλογα με τις παραμέτρους του μετατροπέα και τον συχνότητα αγωγής του IGBT.

3.5.1 Ο μετατροπέας στην πλευρά του δικτύου



Ο μετατροπέας στην πλευρά του δικτύου συνδέεται με την dc πλευρά μέσω του πυκνωτή και με την ac πλευρά του τριφασικού δικτύου μέσω του RL φίλτρου. Για το τριφασικό δίκτυο και το RL φίλτρο ισχύει:

$$\begin{bmatrix} U_{af} \\ U_{bf} \\ U_{cf} \end{bmatrix} = R_f \begin{bmatrix} I_{af} \\ I_{bf} \\ I_{cf} \end{bmatrix} + L_f \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_{af} \\ I_{bf} \\ I_{cf} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_{af} \\ V_{bf} \\ V_{cf} \end{bmatrix} \quad \mathbf{3.5.1.a.}$$

όπου U_{af} , U_{bf} , U_{cf} στιγμιαία τιμή της τάσης του δικτύου στη φάση a , b , c αντίστοιχα I_{af} , I_b , I_{cf} στιγμιαία τιμή του ρεύματος του φίλτρου στη φάση a , b , c αντίστοιχα V_{af} , V_{bf} , V_{cf} στιγμιαία τιμή της τάσης στην έξοδο του μετατροπέα στη φάση a , b και c αντίστοιχα R_f αντίσταση του RL φίλτρου L_f αυτεπαγωγή του RL φίλτρου

Συνεπώς, οι εξισώσεις που περιγράφουν τη συμπεριφορά του RL φίλτρου στο d-q πλαίσιο αναφοράς είναι:

$$\begin{bmatrix} U_{df} \\ U_{qf} \end{bmatrix} = R_f \begin{bmatrix} I_{df} \\ I_{qf} \end{bmatrix} + L_f \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_{df} \\ I_{qf} \end{bmatrix} + \omega_s L_f \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{df} \\ I_{qf} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_{df} \\ V_{qf} \end{bmatrix} \quad \mathbf{3.5.1.β.}$$

όπου U_{df} , U_{qf} τάση του δικτύου στο d και q άξονα αντίστοιχα I_{df} , I_{qf} το ρεύμα του φίλτρου στο d και q άξονα αντίστοιχα V_{df} , V_{qf} η τάση στην έξοδο του μετατροπέα στο d και q άξονα αντίστοιχα ω_s η κυκλική συχνότητα του μετασχηματισμού.

Αν η τάση του δικτύου U_{dqf} ευθυγραμμιστεί με τον q άξονα του στρεφόμενου πλαισίου αναφοράς d-q και το στρεφόμενο πλαίσιο αναφοράς d-q προσανατολιστεί στην τάση του δικτύου (με αποτέλεσμα να στρέφεται με τη γωνιακή ταχύτητα της τάσης του δικτύου) τότε ισχύουν οι σχέσεις:

$$U_{dqf} = 0 + jU_{qf} \quad \mathbf{3.5.1.γ.}$$

$$\omega_s = \omega_f = 2\pi f_f \quad \mathbf{3.5.1.δ.}$$

όπου ω_s η κυκλική συχνότητα του μετασχηματισμού ω_f η γωνιακή ταχύτητα της τάσης του δικτύου f_f συχνότητα του δικτύου

Συνδυάζοντας τα παραπάνω καταλήγουμε στις εξισώσεις:

$$i_{df} = -\frac{R_f}{L_f} I_{df} + \omega_s I_{qf} - \frac{1}{L_f} m_{df} V_{dc} + \frac{1}{L_f} U_{df} \quad \mathbf{3.5.1.ε.}$$

$$i_{qf} = -\frac{R_f}{L_f} I_{qf} + \omega_s I_{df} - \frac{1}{L_f} m_{qf} V_{dc} + \frac{1}{L_f} U_{qf} \quad \mathbf{3.5.1.στ.}$$

όπου ο λόγος κατάτμησης του μετατροπέα στον d και q άξονα στην πλευρά του δικτύου δίνεται από τις σχέσεις:

$$m_{df} = \frac{V_{df}}{V_{dc}} \quad \mathbf{3.5.1.ζ.}$$

$$m_{qf} = \frac{V_{qf}}{V_{dc}} \quad \mathbf{3.5.1.η.}$$

Για τις ισχύεις στην έξοδο του μετατροπέα στην πλευρά του δικτύου ισχύουν οι σχέσεις:

$$P_f = \frac{3}{2} (V_{df} I_{df} + V_{qf} I_{qf}) \quad \mathbf{3.5.1.θ.}$$

$$Q_f = \frac{3}{2} (V_{qf} I_{df} - V_{df} I_{qf}) \quad \mathbf{3.5.1.ι.}$$

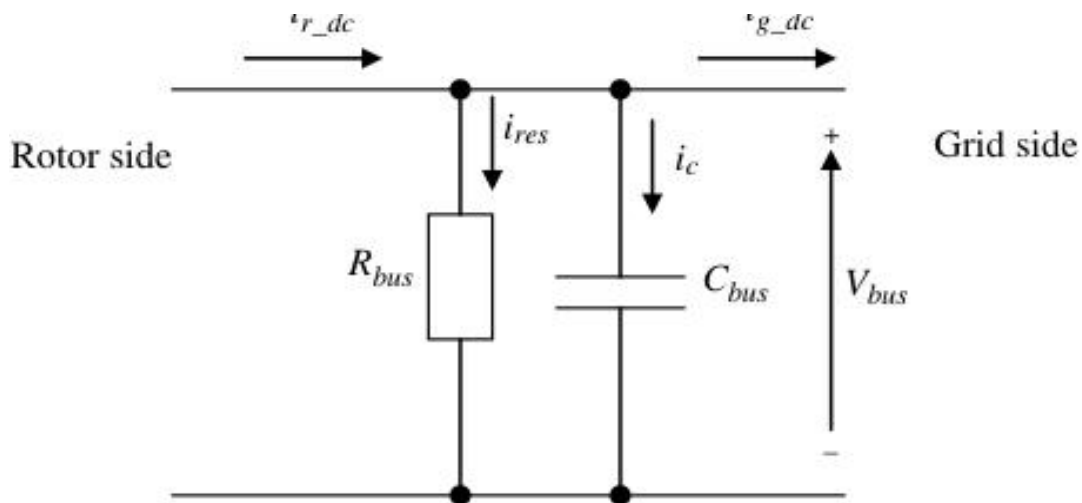
Τέλος, η ενεργός και άεργος ισχύς του δικτύου δίνονται από τις παρακάτω σχέσεις:

$$P_{grid} = \frac{3}{2} (U_{dgrid} I_{df} + U_{qgrid} I_{qf}) \quad \mathbf{3.5.1.ια.}$$

$$Q_{grid} = \frac{3}{2} (U_{qgrid} I_{df} - U_{dgrid} I_{qf}) \quad \mathbf{3.5.1.ιβ.}$$

3.5.2 DC διασύνδεση

Την DC πλευρά του μετατροπέα την ονομάζουμε και τυπικά DC διασύνδεση. Λόγω της ενέργειας που αποθηκεύεται στον πυκνωτή γίνεται προσπάθεια να διατηρηθεί σταθερή η τάση στους τερματικούς σταθμούς και επίσης δίνει την δυνατότητα μεταξύ του μετατροπέα στην πλευρά του δικτύου και του μετατροπέα στην πλευρά της μηχανής δίνοντας την δυνατότητα για ανεξάρτητο έλεγχο στους μετατροπείς κάθε πλευράς.



Σχήμα 3.5.2.: Απλοποιημένο μοντέλο της DC διασύνδεσης.

Η DC διασύνδεση εμφανίζεται σαν ένας πυκνωτής παράλληλα σε μια υψηλής τιμής αντίστασης και υπολογίζεται από τη σχέση:

$$V_{dc,BUS} = \frac{1}{C_{BUS}} \int i_c dt \quad 3.5.2.α.$$

Η οποία μας δίνει και το ρεύμα του πυκνωτή το οποίο είναι:

$$i_c = C_{BUS} \frac{d}{dt} (V_{dc,BUS}) \quad 3.5.2.β.$$

Σημειώνουμε ότι το ρεύμα διάμεσου μπορεί να γραφτεί και ως εξής:

$$\dot{i}_c = \dot{i}_{r_{dc}} - \dot{i}_{g_{dc}} - \dot{i}_{res} \quad \mathbf{3.5.2.γ.}$$

όπου:

$\dot{i}_{res} = \frac{V_{bus}}{R_{bus}}$: το ρεύμα διαμέσου της αντίστασης του μοντέλου του πυκνωτή.

$\dot{i}_{g_{dc}}$: το DC ρεύμα με κατεύθυνση από το DC link προς το δίκτυο.

$\dot{i}_{r_{dc}}$: το DC ρεύμα με κατεύθυνση από την πλευρά της μηχανής προς το DC link.

3.5.3 Στρατηγική του έλεγχου

ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ

Με τον όρο στρατηγική του έλεγχου εννοούμε την λογική που ακολουθείται για τον έλεγχο των στροφών της αννεμογεννητριας. Από τις διάφορες στρατηγικές που υπάρχουν όπως για παράδειγμα ο έλεγχος με μέτρηση της ταχύτητας του ανέμου επιλέγουμε έλεγχο με μέτρηση στροφών της μηχανής. Καθορίζουμε μια χαρακτηριστική στροφών-ροπής την οποία ακλουθεί η μηχανή.

Με μέτρηση κάθε στιγμή των στροφών βρίσκεται βάσει της χαρακτηριστικής απεικόνισης η επιθυμητή ηλεκτρομαγνητική ροπή την οποία πρέπει να αναπτύξει η γεννήτρια. Το σύστημα έλεγχου αποσκοπεί κατ' αρχήν στον έλεγχο των στροφών της μηχανής έτσι ώστε να επιτυγχάνουμε την βέλτιστη εκμετάλλευση της διαθέσιμης μηχανικής ενέργειας.

Ένας επιπλέον στόχος του συστήματος έλεγχου είναι η προστασία της γεννήτριας δηλαδή η αποφυγή υπερταχυνσεων και συνακολουθία υπερφορτίσεων ροπής και ισχύος. Στις υψηλές στροφές μικρή μεταβολή της ταχύτητας του ανέμου προκαλεί μεγάλη μεταβολή της παραγόμενης ισχύος. Στις υψηλές στροφές η μικρή μεταβολή της ταχύτητα του ανέμου προκαλεί μεγάλη μεταβολή της παραγόμενης ισχύος μόνος τρόπος για να περιοριστεί η ταχύτητα της μηχανής είναι μέσω επιβράδυνσης της ηλεκτρομαγνητικής ροπής οποία καθορίζεται από τα χαρακτηριστικά του ηλεκτρικού μέρους της γεννήτριας.

Το να προσπαθήσουμε αποκλειστικά να έχουμε μέγιστη παραγωγή ισχύος δεν θα παρουσιάσει τα επιθυμητά αποτελεσματα.

3.6 Έλεγχος σύγχρονης γεννήτριας με μόνιμο μαγνήτη

3.6.1 Γενικά

Προκειμένου να επιτύχουμε τον έλεγχο της ροπής μιας μηχανής μόνιμου μαγνήτη πιο συχνά χρησιμοποιούμε τον έλεγχο προσανατολισμένο στο πεδίο (field oriented control), όπου ο προσανατολισμός γίνεται στη ροή του μόνιμου μαγνήτη. Η στρατηγική αυτή κλειστού βρόχου χρησιμοποιεί το σύγχρονο πλαίσιο αναφοράς και οι ελεγκτές είναι PI λόγω του ότι έτσι πετυχαίνουμε μηδενικά σφάλματα στη μόνιμη κατάσταση.

Συγκεκριμένα για τον έλεγχο της γωνίας ροπής θα χρησιμοποιήσουμε μια στρατηγική έλεγχου στην οποία η d συνιστώσα ρεύματος διατηρείται στο μηδέν, ενώ το ρεύμα στάτη ευθυγραμμίζεται με τον q άξονα, προκειμένου να διατηρηθεί η γωνία ροπής ίση με 90 μοίρες.

Ο έλεγχος που προαναφέραμε ονομάζεται συνεχής έλεγχος γωνίας ροπής.

3.6.2 Το συνολικό μοντέλο στο χώρο κατάστασης

Στην ανάλυσή μας θα χρειαστούμε το ακριβές μη γραμμικό μοντέλο του συνολικού συστήματος από το οποίο το διάνυσμα των μεταβλητών κατάστασης είναι:

$$x^T = [I_{ds} I_{qs} \omega_r I_{df} I_{qf} V_{dc}] \quad \mathbf{3.6.2.α.}$$

Θέλουμε, επίσης, να υπολογίσουμε τις τάσεις δικτύου U_{df} , U_{qf} , τη ροπή T_m και τους παρακάτω λόγους (duty ratio) των d-q συνιστωσών των τάσεων από τις ac πλευρές ως προς την dc-τάση της διασύνδεσης που αντιστοιχούν στις αντίστοιχες εισόδους των μετατροπέων στις δύο πλευρές:

$$m_{ds} = V_{ds} / V_{dc} \quad \mathbf{3.6.2.β.}$$

$$m_{qs} = V_{qs} / V_{dc} \quad \mathbf{3.6.2.γ.}$$

$$m_{df} = V_{df} / V_{dc} \quad \mathbf{3.6.2.δ.}$$

$$m_{qf} = V_{qf} / V_{dc} \quad \mathbf{3.6.2.ε.}$$

Αφού χρησιμοποιήσουμε τις δυναμικές εξισώσεις αλλά και τις αλγεβρικές σχέσεις που περιγράφουν το σύστημα, και ύστερα από πράξεις, καταλήγουμε στις παρακάτω εξισώσεις στο χώρο κατάστασης:

$$L_{ds} \dot{I}_{ds} = -R_s I_{ds} + p L_{qs} I_{qs} \omega_r + m_{ds} V_{dc} \quad \mathbf{3.6.2.στ.}$$

$$L_{qs} \dot{I}_{qs} = -R_s I_{qs} - p L_{ds} I_{ds} \omega_r - p \lambda_m \omega_r + m_{qs} V_{dc} \quad \mathbf{3.6.2.ζ.}$$

$$J \dot{\omega}_r = \frac{3}{2} (p \lambda_{dc} I_{qs}) - \frac{3}{2} (p \lambda_{qs} I_{ds} - T_m - b_{or}) \quad \mathbf{3.6.2.η.}$$

$$L_f \dot{I}_{df} = -R_f I_{df} + \omega_s L_f I_{qf} - m_{df} V_{dc} + U_{df} \quad \mathbf{3.6.2.θ.}$$

$$L_f \dot{I}_{qf} = -R_f I_{qf} - \omega_s L_f I_{df} - m_{qf} V_{dc} + U_{qf} \quad \mathbf{3.6.2.ι.}$$

$$\dot{V}_{dc} = \frac{3}{2C} (m_{df} I_{df} + m_{qf} I_{qf} - m_{ds} I_{ds} - m_{qs} I_{qs}) \quad \mathbf{3.6.2.ια.}$$

3.6.3 Ο έλεγχος από την πλευρά της μηχανής

Προκειμένου να επιτύχουμε την ανάλυσή μας, επιβάλλεται να αρθούν οι μη γραμμικότητες που παρατηρούνται στις διαφορικές εξισώσεις των ρευμάτων της μηχανής. Παρατηρούμε λοιπόν ότι στις εξισώσεις (4.6.2.στ.) και (3.6.2.ζ.) υπάρχουν μη γραμμικές σχέσεις. Οι μετασχηματισμοί εισόδου των V_{ds} και V_{qs} είναι:

$$V_{ds} = -u_{ds} - p\omega_r L_{qs} I_{qs} \quad \mathbf{3.6.3.α.}$$

$$V_{qs} = -u_{qs} + p\omega_r L_{ds} I_{ds} + p\omega_r \lambda_m \quad \mathbf{3.6.3.β.}$$

όπου u_{ds} και u_{qs} είναι οι νέες εισοδοι ελέγχου.

Συνεπώς, οι εξισώσεις (3.6.2.στ.) και (3.6.2.ζ.) μπορούν και περιγράφουν δύο απολύτως αποσυνδεδεμένα γραμμικά συστήματα αφού παίρνουν πλέον την εξής μορφή:

$$u_{ds} + R_s I_{ds} + L_{ds} \frac{dI_{ds}}{dt} = 0 \quad \mathbf{3.6.3.γ.}$$

$$u_{qs} + R_s I_{qs} + L_{ds} \frac{dI_{qs}}{dt} = 0 \quad \mathbf{3.6.3.δ.}$$

Διαιρώντας στη συνέχεια τις σχέσεις (3.6.3.α.) και (3.6.3.β.) με το V_{dc} οι λόγοι κατάτμησης γίνονται:

$$m_{ds} = \frac{1}{V_{dc}} (-u_{dc} - p\omega_r L_{qs} I_{qs}) \quad \mathbf{3.6.3.ε.}$$

$$m_{qs} = \frac{1}{V_{dc}} (-u_{qs} + p\omega_r L_{ds} I_{ds} + p\omega_r \lambda_m) \quad \mathbf{3.6.3.στ.}$$

3.6.3.1 Ο έλεγχος του ρεύματος του άξονα d

Προκειμένου να ελέγξουμε το ρεύμα του άξονα d μέσω ενός PI ελεγκτή (θεωρούμε $I_{ds}^{ref} = 0$), προτείνεται ο ακόλουθος PI ελεγκτής ρεύματος:

$$u_{ds} = k_{Ids} \int_0^t (I_{ds} - I_{ds}^{ref}) dt + k_{Pds} (I_{ds} - I_{ds}^{ref}) \quad \mathbf{3.6.3.1.α.}$$

όπου k_{Pds} και k_{Ids} : θετικά ορισμένα κέρδη του PI ελεγκτή.

Άρα από τη σχέση (3.8.3.ε.) μέσω της σχέσης (3.8.3.1.α) προκύπτει:

$$m_{ds} = \frac{1}{V_{dc}} \left(-k_{Ids} \int_0^t I_{ds} - I_{ds}^{ref} dt \right) - k_{Pds} (I_{ds} - I_{ds}^{ref}) - p\omega_r L_{qs} I_{qs} \quad \mathbf{3.6.3.1.β.}$$

3.6.3.2 Ο έλεγχος του ρεύματος του άξονα q

Προκειμένου να γίνει ο έλεγχος του ρεύματος του άξονα q χρησιμοποιούμε έναν εξωτερικό PI ελεγκτή, ο οποίος δημιουργεί το ρεύμα αναφοράς I_{qs}^{ref} στον άξονα q και χρησιμοποιείται για τον έλεγχο της ταχύτητας, και από έναν εσωτερικό PI ελεγκτή ρεύματος (συνδεσμολογία cascade).

Προτείνεται, λοιπόν, ο ακόλουθος εσωτερικός PI ελεγκτής ρεύματος:

$$u_{qs} = k_{Iqs}^{in} \int_0^t (I_{qs} - I_{qs}^{ref}) dt + k_{Pqs}^{in} (I_{qs} - I_{qs}^{ref}) \quad \mathbf{3.6.3.2.α.}$$

όπου k_{Iqs}^{in} , k_{Pqs}^{in} θετικά ορισμένα κέρδη του εσωτερικού PI ελεγκτή.

Το ρεύμα αναφοράς I_{qs}^{ref} δίνεται από τη σχέση:

$$I_{qs}^{ref} = -k_{I\omega}^{out} \int_0^t (\omega_r - \omega_r^{ref}) dt - k_{P\omega}^{out} (\omega_r - \omega_r^{ref}) \quad \mathbf{3.6.3.2.β.}$$

όπου $k_{I\omega}^{out}$, $k_{P\omega}^{out}$ θετικά ορισμένα κέρδη του εξωτερικού PI ελεγκτή.

$\omega_r^{ref} = \frac{u^* \lambda_{opt}}{R}$ με λ_{opt} ο βέλτιστος λόγος της ταχύτητας ακροπτερυγίου.

Άρα από τη σχέση (4.5.3.στ) μέσω των σχέσεων (3.6.3.2.α.) και (3.6.3.2.β.) προκύπτει:

$$m_{qs} = \frac{1}{V_{dc}} \left(-k_{I_{qs}}^{in} \int_0^t (I_{qs} - I_{qs}^{ref}) dt - k_{P_{qs}}^{in} (I_{qs} - I_{qs}^{ref}) + p\omega_r L_{ds} I_{ds} + p\omega_r \lambda_m \right) \quad \mathbf{3.6.3.2.γ.}$$

3.6.4 Ο έλεγχος από την πλευρά του δικτύου

Όπως παρατηρήσαμε στην πλευρά της μηχανής, έτσι και στην πλευρά του δικτύου παρατηρούμε με τη βοήθεια των διαφορικών εξισώσεων (3.6.4.θ.) και (3.6.4.ι.) ότι υπάρχουν μη γραμμικότητες οι οποίες πρέπει να αρθούν. Ο έλεγχος που θα υλοποιηθεί έχει ως σκοπό την επίτευξη μοναδιαίου συντελεστή ισχύος στην πλευρά του δικτύου.

Οι μετασχηματισμοί εισόδου των V_{df} και V_{qf} είναι οι εξής:

$$V_{df} = u_{df} + \omega_f L_f I_{qf} \quad \mathbf{3.6.4.α.}$$

$$V_{qf} = u_{qf} - \omega_f L_f I_{df} + u_{qf} \quad \mathbf{3.6.4.β.}$$

όπου οι u_{df} και u_{qf} είναι οι νέες εισοδοι ελέγχου.

Συνεπώς, οι εξισώσεις (3.6.4.θ.) και (3.6.4.ι.) μπορούν και περιγράψουν δύο απολύτως αποσυνδεδεμένα γραμμικά συστήματα αφού παίρνουν πλέον την εξής μορφή:

$$u_{df} + R_f I_{df} + L_f \frac{dI_{df}}{dt} = 0 \quad \mathbf{3.6.4.γ.}$$

$$u_{qf} + R_f I_{qf} + L_f \frac{dI_{qf}}{dt} = 0 \quad \mathbf{3.6.4.δ.}$$

Διαιρώντας στη συνέχεια τις σχέσεις (3.6.4.α.) και (3.6.4.β.) με το V_{dc} οι λόγοι κατάτμησης γίνονται:

$$m_{df} = \frac{1}{V_{dc}} (u_{df} + \omega_f L_f I_{df}) \quad \mathbf{3.6.4.ε.}$$

$$m_{qf} = \frac{1}{V_{dc}} (u_{qf} - \omega_f L_f I_{df} + U_{qf}) \quad \mathbf{3.6.4.στ.}$$

3.6.4.1 Ο έλεγχος του ρεύματος του άξονα d

Λαμβάνοντας υπόψη ότι η τάση του δικτύου U_{dqf} έχει ευθυγραμμιστεί με τον q άξονα του στρεφόμενου πλαισίου αναφορά d-q, μπορούμε να ελέγξουμε την άεργο ισχύ από την πλευρά του δικτύου με ρύθμιση του ρεύματος του d άξονα. Άρα για να επιτύχουμε μοναδιαίο συντελεστή ισχύος αρκεί να μηδενίσουμε το ρεύμα του άξονα d. Θεωρώντας την αναφορά του ρεύματος του d άξονα ως μηδέν ($I_{df}^{ref} = 0$), προτείνεται ο ακόλουθος PI ελεγκτής ρεύματος:

$$u_{df} = k_{Idf} \int_0^t (I_{df} - I_{df}^{ref}) dt + k_{Pdf} (I_{df} - I_{df}^{ref}) \quad \mathbf{4.6.4.1.α.}$$

k_{Idf} , k_{Pdf} : θετικά ορισμένα κέρδη του εσωτερικού PI ελεγκτή.

Άρα από τη σχέση (3.6.4.ε.) μέσω της σχέσης (3.6.4.1.α.) προκύπτει:

$$m_{df} = \frac{1}{V_{dc}} \left(k_{Idf} \int_0^t (I_{df} - I_{df}^{ref}) dt + k_{Pdf} (I_{df} - I_{df}^{ref}) \right) + \omega_f L_f I_{qf} \quad \mathbf{3.6.4.1.β.}$$

3.6.4.2 Ο έλεγχος του ρεύματος του άξονα q

Προκειμένου να γίνει ο έλεγχος της τάσης διασύνδεσης V_{dc} χρησιμοποιούμε έναν εξωτερικό PI ελεγκτή, ο οποίος δημιουργεί το ρεύμα αναφοράς I_{qf}^{ref} στον άξονα q και χρησιμοποιείται για τον έλεγχο της τάσης διασύνδεσης, και από έναν εσωτερικό PI ελεγκτή ρεύματος (συνδεσμολογία cascade). Προτείνεται, λοιπόν, ο ακόλουθος εσωτερικός PI ελεγκτής ρεύματος:

$$u_{qf} = k_{I_{qf}}^{in} \int_0^t (I_{qf} - I_{qf}^{ref}) dt + k_{P_{qf}}^{in} (I_{qf} - I_{qf}^{ref}) \quad \mathbf{3.6.4.2.α.}$$

όπου $k_{I_{qf}}^{in}$, $k_{P_{qf}}^{in}$: θετικά ορισμένα κέρδη του εσωτερικού PI ελεγκτή.

Το ρεύμα αναφοράς I_{qf}^{ref} δίνεται από την εξής σχέση:

$$I_{qf}^{ref} = -k_{I_{qf}}^{out} \int_0^t (V_{dc} - V_{dc}^{ref}) dt - k_{P_{qf}}^{out} (V_{dc} - V_{dc}^{ref}) \quad \mathbf{3.6.4.2.β.}$$

όπου $k_{I_{qf}}^{out}$, $k_{P_{qf}}^{out}$ θετικά ορισμένα κέρδη του εξωτερικού PI ελεγκτή

Άρα από τη σχέση (3.6.4.στ.) μέσω των σχέσεων (3.6.4.2.α.) και (3.6.4.2.β.) προκύπτει:

$$m_{qf} = \frac{1}{V_{dc}} \left(k_{I_{qf}}^{in} \int_0^t (I_{qf} - I_{qf}^{ref}) dt + k_{P_{qf}}^{in} (I_{qf} - I_{qf}^{ref}) - \omega_f L_f I_{df} + U_{qf} \right) \quad \mathbf{3.6.4.2.γ.}$$

3.7 Επιλογή κερδών των PI ελεγκτών στην πλευρά της γεννήτριας και του δικτύου

Θα ρυθμίσουμε τους ελεγκτές που χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο των ρευμάτων (εσωτερικούς βρόχους) τόσο από την πλευρά της μηχανής όσο και από την πλευρά του δικτύου. Θα πρέπει να αναφέρουμε ότι τα κέρδη των εξωτερικών PI ελεγκτών υπολογίζονται έτσι ώστε οι εξωτερικοί βρόχοι να είναι πιο αργοί σε σχέση με τους εσωτερικούς.

Ξεκινώντας, λοιπόν, από την εξίσωση (3.6.3.γ.) της μηχανής και μέσω της εξίσωσης (3.6.3.1.α.) των εσωτερικών PI ελεγκτών προκύπτει για την πλευρά της γεννήτριας:

$$L_{ds} \dot{I}_{ds} + R_s I_{ds} = -u_{ds}$$

$$\rightarrow L_{ds} \dot{I}_{ds} + R_s I_{ds} = k_{I_{ds}} \int_0^t (I_{ds}^{ref} - I_{ds}) dt + k_{P_{ds}} (I_{ds}^{ref} - I_{ds})$$

$$\rightarrow sL_{ds}I_{ds} + R_s I_{ds} = \frac{k_{Ids}}{s} \int_0^t (I_{ds}^{ref} - I_{ds}) dt + k_{Pds} (I_{ds}^{ref} - I_{ds})$$

$$\rightarrow (sL_{ds}I_{ds} + R_s + k_{Pds} + \frac{k_{Ids}}{s})I_{ds} = \left(k_{Pds} + \frac{k_{Ids}}{s} \right) I_{ds}^{ref}$$

Έτσι καταλήγουμε στη συνάρτηση μεταφοράς του συστήματος κλειστού βρόχου που είναι η εξής:

$$\frac{I_{ds}}{I_{ds}^{ref}} = \frac{k_{Pds} + \frac{k_{Ids}}{s}}{sL_{ds} + R_s + k_{Pds} + \frac{k_{Ids}}{s}} \quad \rightarrow \quad \frac{I_{ds}}{I_{ds}^{ref}} = \frac{1}{1 + s \frac{L_{ds} + \frac{R_s}{s}}{k_{Pds} + \frac{k_{Ids}}{s}}}$$

Στην συνέχεια αντικαθιστούμε $k_{Pds} = \frac{L_{ds}}{\tau_{im}}$ και $k_{Ids} = \frac{R_s}{\tau_{im}}$ και η τελευταία σχέση

$$\text{γίνεται: } \frac{I_{ds}}{I_{ds}^{ref}} = \frac{1}{1 + s\tau_{im}}$$

3.7.α.

Ομοίως για τις σχέσεις (3.6.3.δ.) και (4.6.3.2.α.)

Αντίστοιχα, από την εξίσωση (3.6.4.γ.) της πλευράς του δικτύου και μέσω της εξίσωσης (3.6.4.1.α.) των εσωτερικών ΡΙ ελεγκτών προκύπτει για την πλευρά του δικτύου:

$$L_f \dot{I}_{ds} + R_f I_{df} = -u_{df}$$

$$\rightarrow L_f \dot{I}_{ds} + R_f I_{df} = k_{Idf} \int_0^t (I_{df}^{ref} - I_{df}) dt + k_{Pdf} (I_{df}^{ref} - I_{df})$$

$$\rightarrow sL_f I_{df} + R_f I_{df} = \frac{k_{Idf}}{s} \int_0^t (I_{df}^{ref} - I_{df}) dt + k_{Pdf} (I_{df}^{ref} - I_{df})$$

$$\rightarrow (sL_f I_{df} + R_f + k_{Pdf} + \frac{k_{Idf}}{s}) I_{df} = \left(k_{Pdf} + \frac{k_{Idf}}{s} \right) I_{df}^{ref}$$

Έτσι καταλήγουμε στη συνάρτηση μεταφοράς του συστήματος κλειστού βρόχου που είναι η εξής:

$$\frac{I_{df}}{I_{df}^{ref}} = \frac{k_{pdf} + \frac{k_{idf}}{s}}{sL_f + R_f + k_{pdf} + \frac{k_{idf}}{s}} \quad \rightarrow \quad \frac{I_{df}}{I_{df}^{ref}} = \frac{1}{1 + s \frac{L_f + \frac{R_f}{s}}{k_{pdf} + \frac{k_{idf}}{s}}}$$

Στην συνέχεια αντικαθιστούμε $k_{pdf} = \frac{L_f}{\tau_{if}}$ και $k_{idf} = \frac{R_f}{\tau_{if}}$ και η τελευταία σχέση

γίνεται: $\frac{I_{df}}{I_{df}^{ref}} = \frac{1}{1 + s\tau_{if}}$ **3.7.β.**

Ομοίως για τις σχέσεις (3.6.4.δ.) και (3.6.4.2.α.).

Παρατηρούμε ότι το σύστημα κλειστού βρόχου, τόσο από την πλευρά της μηχανής όσο και από την πλευρά του δικτύου, έχει συνάρτηση μεταφοράς πρώτης τάξης με την εκάστοτε επιθυμητή χρονική σταθερά τ_{im} ή τ_{if} .

Συμπεραίνουμε, λοιπόν, πως επιλέγοντας το κατάλληλο τ_{im} ή τ_{if} μπορούμε να μετακινούμε το μοναδικό πόλο και να ελέγχουμε την ταχύτητα απόκρισης του συστήματος.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4⁰

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ ΜΕΤΑΒΛΗΤΩΝ ΣΤΡΟΦΩΝ ΜΕ ΣΥΓΧΡΟΝΗ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑ



4.1 Συμπεράσματα

Στην παραπάνω διπλωματική εργασία αναπτύξαμε ένα ολοκληρωμένο μοντέλο το οποίο αποτελείται από μια σύγχρονη μηχανή με μόνιμους μαγνήτες, η οποία έχει περιγραφεί με τις 3 μη γραμμικές διαφορικές εξισώσεις, τον μετατροπέα ισχύος και τη DC διασύνδεση σε ισχυρό δίκτυο (μέσω ενός R-L φίλτρου) που περιγράφεται από τις 3 διαφορικές εξισώσεις. Στη συνέχεια προχωρήσαμε στην ανάλυση του μοντέλου με σχεδίαση PI ελεγκτών το οποίο δίνει ένα συστηματικό τρόπο προσέγγισης των κερδών των ελεγκτών ώστε να επιτευχθούν οι χρόνοι απόκρισης που θέλουμε.

Πράγματι, αποδείχτηκε ότι, τόσο θεωρητικά όσο και μέσω των προσομοιώσεων που κάναμε, επιτύχαμε τις επιθυμητές αποκρίσεις. Επίσης πρέπει να σημειωθεί ότι ρυθμίζοντας τα κέρδη των ελεγκτών υπάρχει η δυνατότητα ρύθμισης της απόσβεσης του συστήματος. Επιπρόσθετα, δείξαμε αναλυτικά πώς επιλέγονται τα κέρδη των εσωτερικών ελεγκτών τόσο στην πλευρά του δικτύου όσο και στην πλευρά της γεννήτριας και είδαμε ότι εξαρτώνται από τα χαρακτηριστικά στοιχεία του συστήματός μας και απλά επιλέγοντας το κατάλληλο ή μπορούμε και μετακινούμε το μοναδικό πόλο του συστήματος με αποτέλεσμα να ελέγχουμε την ταχύτητα απόκρισης του συστήματος.

Συμπερασματικά λοιπόν, θα πρέπει να επισημάνουμε ότι ο στόχος της μέγιστης απομάστευσης ισχύος επιτυγχάνεται με σθεναρότητα και σχετικά καλές ταχύτητες απόκρισης επιβεβαιώνοντας τη θεωρητική ανάλυση αλλά και δίνοντας τη δυνατότητα για πειραματισμό όσον αφορά τη βέλτιστη επιλογή των PI ελεγκτών .

Τέλος οι παραπάνω σχέσεις που αναπτύχθηκαν μπορούν να εφαρμοστούν με το πρόγραμμα matlab Simulink χρησιμοποιώντας τα παρακάτω χαρακτηριστικά της ανεμογεννήτριας που λάβαμε για την ανάλυση του συστήματος.

Ανεμογεννήτρια (Wind Turbine)

Μέγεθος	Σύμβολο	Τιμή	Μονάδες
Ονομαστική ισχύς	P_{mn}	2.0	MW
Ροπή αδράνειας	J	1,000,000	$Kg \cdot m^2$
Ακτίνα των πτερυγίων	R	30	m
Συντελεστής τριβής	b	0.005	$N \cdot m \cdot s$
Ονομαστική γωνιακή ταχύτητα	ω_{rn}	2.5	rad/s
Ονομαστική ταχύτητα ανέμου	v_n	12	m/s
Ταχύτητα ανέμου εισόδου	v_{cut-in}	4	m/s
Ταχύτητα ανέμου εξόδου	$v_{cut-off}$	22	m/s
Πυκνότητα του αέρα	ρ_{air}	1.2	Kg/m^3
Βήμα του πτερυγίου	β	0	deg

Σύγχρονη Μηχανή Μόνιμου Μαγνήτη (PMSG)

Μέγεθος	Σύμβολο	Τιμή	Μονάδες
Ονομαστική ισχύς	P_{sn}	2.5	MW
Ονομαστική τάση	V_{sn}	800	V
Αντίσταση των τυλιγμάτων του στάτη	R_s	0.33	mΩ

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Γεώργιος Μπεργελές, *Ανεμοκινητήρες, Εκδόσεις Συμεών.*
- [2] Βασίλειος Δ. Μπιτζιώνης, Δημήτριος Β. Μπιτζιώνης, *Εναλλακτικές μορφές ενέργειας, Εκδόσεις Τζιόλα.*
- [3] Ιωάννης Κλεάνθη Κανδέλλης, *Διαχείριση της αιολικής ενέργειας, Εκδόσεις Αθ. Σταμούλης.*
- [4] Ι.Ε. Φραγκιαδάκης, *Φωτοβολταϊκά συστήματα, Εκδόσεις Ζήτη.*
- [5] John F. Walker, Nicolas Jenkins, *Αιολική ενέργεια και ανεμογεννήτριες, Εκδόσεις Ιων.*
- [6] Stephen J. Charman, *Ηλεκτρικές μηχανές, Εκδόσεις Τζιόλα.*
- [7] Στέφανος Μανιάς, *Ηλεκτρονικά Ισχύος, Εκδόσεις Συμεών.*
- [8] Albert Malvino-David J. Bates, *Ηλεκτρονική, Εκδόσεις Τζιόλα.*
- [9] European Wind Energy Association, <http://www.ewea.org>
- [10] American Wind Energy Association, <http://www.awea.org>
- [11] Vestas Wind Systems, <http://www.vestas.com>
- [12] <http://www.google.com>

Υποσημείωση: Οι φωτογραφίες προέρχονται από τους παραπάνω διαδικτυακούς τόπους.