



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ

ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ ΚΑΙ ΜΕΛΕΤΗ
ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ ΜΕ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑ
ΔΙΠΛΗΣ ΤΡΟΦΟΔΟΤΗΣΗΣ ΣΤΟ ΔΙΚΤΥΟ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Νικόλαος Ε. Παπαδάκης

Επιβλέπουσα: Μαρία-Παρασκευή Ιωαννίδου
Καθηγήτρια ΕΜΠ

Αθήνα, Μάϊος 2016



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ

ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ ΚΑΙ ΜΕΛΕΤΗ
ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ ΜΕ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑ
ΔΙΠΛΗΣ ΤΡΟΦΟΔΟΤΗΣΗΣ ΣΤΟ ΔΙΚΤΥΟ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Νικόλαος Ε. Παπαδάκης

Επιβλέπουσα: Μαρία-Παρασκευή Ιωαννίδου
Καθηγήτρια ΕΜΠ

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την Μαΐου 2016

.....
Μαρία Ιωαννίδου
Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

.....
Νικόλαος Θεοδώρου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Παναγιώτης Τσαραμπάρης
Λέκτορας Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Μάιος 2016

.....

Νικόλαος Ε. Παπαδάκης

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

Copyright © Νικόλαος Ε. Παπαδάκης, 2016

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 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 το 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 Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Περίληψη

Η μόλυνση του περιβάλλοντος λόγω της ανθρώπινης δραστηριότητας και της χρήσης ορυκτών καυσίμων σε συνδυασμό με την εξάντληση των πόρων που διαθέτει ο πλανήτης έχουν ως αποτέλεσμα την επικέντρωση του ενδιαφέροντος στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.

Στην παρούσα εργασία θα γίνει μία ανάλυση της αιολικής ενέργειας και των ανεμογεννητριών. Αρχικά αναφέρονται τα διάφορα είδη ανανεώσιμων πηγών ενέργειας καθώς και τα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας που έχουν αναπτυχθεί για την αποθήκευσή της. Στην συνέχεια αναλύεται η αιολική ενέργεια, οι εξισώσεις υπολογισμού της και η κατάσταση που επικρατεί στον κόσμο όσο αφορά την συνολική εγκατεστημένη ισχύς αιολικής ενέργειας. Επίσης γίνεται μία διεξοδική περιγραφή των διαφόρων ειδών ανεμογεννητριών, των επιμέρους μερών από τα οποία αποτελούνται καθώς και των τοπολογιών ηλεκτρονικών ισχύος που χρησιμοποιούνται προκειμένου να επιτευχθεί η ομαλή λειτουργία και σύνδεσή τους στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας. Τέλος παρουσιάζονται τα διεθνή πρότυπα για την ποιότητα ισχύος των ανεμογεννητριών και γίνεται μελέτη για την επίδραση των ανεμογεννητριών με γεννήτριες διπλής τροφοδότησης στο δίκτυο.

Λέξεις Κλειδιά

Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, αιολική ενέργεια, ανεμογεννήτριες, ανεμογεννήτριες DFIG, ηλεκτρονικά ισχύος, ποιότητα ισχύος, επίδραση ανεμογεννητριών DFIG στο δίκτυο.

Abstract

The environmental pollution due to human activity and fossil fuel extraction as well as the elimination of the planet's resources, has resulted in an elevated interest in renewable energy sources.

This diploma thesis' aim is to present wind energy and wind turbines applications. At first, various renewable energy sources and renewable energy storage systems are mentioned. Next, wind energy is explained in detail, including the mathematical equations that describe it, as well as the current status regarding the already installed worldwide wind energy power. Moreover, the different wind turbine kinds, their parts and the power electronics systems that are deployed in order to achieve normal operation and connection to the electrical grid are thoroughly described. Finally, the international standards regarding the wind turbines power quality are presented and the effect of doubly fed induction generator wind turbines on the grid is examined.

Key Words

Renewable energy sources, wind power, wind turbines, DFIG wind turbines, power electronics, power quality, DFIG wind turbines' impact on grid.

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαιτέρως την καθηγήτρια Ε.Μ.Π κυρία Μαρία Ιωαννίδου για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε αναθέτοντάς μου την διπλωματική εργασία καθώς και για την βοήθεια και την στήριξη που είχα καθ'όλη την διάρκεια εκπόνησής της, σφραγίζοντας μία επιτυχημένη συνεργασία.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου για την στήριξη που είχα όχι μόνο κατά την διάρκεια της διπλωματικής εργασίας αλλά και σε όλα τα φοιτητικά μου χρόνια. Τέλος δεν θα μπορούσα να παραλείψω και τους φίλους μου που ήταν πάντα δίπλα μου όταν τους χρειαζόμουν.

Πίνακας Περιεχομένων

1	Εισαγωγή.....	12
1.1	Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας	12
1.2	Ηλιακή ενέργεια.....	13
1.3	Υδραυλική ενέργεια.....	14
1.4	Γεωθερμία.....	15
1.5	Βιομάζα	16
1.6	Συστήματα αποθήκευσης ενέργειας	18
1.6.1	Αποθήκευση ενέργειας με μπαταρίες	18
1.6.2	Αποθήκευση ενέργειας με σφόνδυλο	18
1.6.3	Μαγνητική υπεραγώγιμη αποθήκευση ενέργειας	19
1.6.4	Αποθήκευση ενέργειας με πεπιεσμένο αέρα	20
1.6.5	Αποθήκευση ενέργειας με αντλιοστάσιο	21
1.6.6	Αποθήκευση ενέργειας με υπερπυκνωτή.....	21
2	Αιολική ενέργεια.....	23
2.1	Εισαγωγή στην αιολική ενέργεια	23
2.2	Εξισώσεις υπολογισμού ισχύος ανεμογεννήτριας.....	25
2.2.1	Υπολογισμός ισχύς ιδανικής ανεμογεννήτριας	25
2.2.2	Υπολογισμός ισχύς πραγματικής γεννήτριας.....	27
2.2.3	Απόδοση της ανεμογεννήτριας	30
2.3	Η κατάσταση της αιολικής ενέργειας σε όλο τον κόσμο	31
2.3.1	Ασία	32
2.3.2	Βόρεια Αμερική.....	33
2.3.3	Ευρώπη	34
2.3.4	Λατινική Αμερική	35
2.3.5	Ειρηνικός Ωκεανός.....	36
2.3.6	Αφρική και Μέση Ανατολή	36
3	Ανεμογεννήτριες και είδη ανεμογεννητριών	38
3.1	Ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα.....	38
3.1.1	Είδη ανεμογεννητριών οριζόντιου άξονα	39
3.1.2	Μέρη ανεμογεννήτριας οριζόντιου άξονα	39
3.1.3	Πλεονεκτήματα – Μειονεκτήματα.....	46
3.2	Ανεμογεννήτριες κάθετου άξονα	47
3.2.1	Είδη ανεμογεννητριών κάθετου άξονα	48
3.2.2	Πλεονεκτήματα – Μειονεκτήματα.....	50
3.3	Ανεμογεννήτριες σταθερών στροφών – Fixed Speed Wind Turbines.....	51
3.4	Ανεμογεννήτριες μεταβλητών στροφών – Variable Speed Wind Turbines	52
4	Ηλεκτρονικά ισχύος και τεχνικές ελέγχου	53
4.1	Μετασχηματισμοί Clarke και Park.....	53

4.2	PWM έλεγχος – Μετατροπείς.....	56
4.3	Έλεγκτές PI	61
4.4	Soft-starter	62
4.5	Συστοιχία πυκνωτών (Capacitor bank)	63
4.6	Ηλεκτρονικά ισχύος για συνδέσεις ανεμογεννητριών	63
4.6.1	Ανεμογεννήτριες σταθερών στροφών	63
4.6.2	Ανεμογεννήτριες μεταβλητών στροφών	64
5	Ποιότητα και πρότυπα ισχύος ανεμογεννητριών	68
5.1	Μέγιστη επιτρεπόμενη ισχύς	69
5.2	Μέγιστη μετρούμενη ισχύς	69
5.3	Άεργος ισχύς	70
5.4	Flicker	70
5.4.1	Συντελεστής flicker	71
5.4.2	Παράγοντας βήματος flicker	71
5.5	Μέγιστος αριθμός των διακοπτικών λειτουργιών της ανεμογεννήτριας.....	71
5.6	Παράγοντας μεταβολής της τάσης.....	72
5.7	Αρμονικές.....	72
6	Μελέτη επίδρασης στο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας των ανεμογεννητριών με γεννήτριες διπλής τροφοδότησης	75
6.1	Επίδραση στην ευστάθεια της γωνίας του δρομέα	75
6.1.1	Επίδραση στην ευστάθεια μικρού σήματος της γωνίας του δρομέα.	76
6.1.2	Πρόβλημα ευστάθειας μικρού σήματος.....	77
6.1.3	Ευαισθησία ιδιοτιμών	78
6.1.4	Επίδραση στην μεταβατική ευστάθεια της γωνίας του δρομέα.....	80
6.2	Επίδραση στην ευστάθεια τάσης	81
6.2.1	Τρόποι λειτουργίας ανεμογεννητριών DFIG.....	81
6.2.2	Αδιάλειπτη λειτουργία ανεμογεννητριών DFIG.....	81
6.2.3	Χαρακτηριστική ισχύος ανεμογεννητριών DFIG	82
6.2.4	Επίδραση στην ευστάθεια μόνιμης κατάστασης της τάσης	83
6.3	Επίδραση στην απόκριση συχνότητας του συστήματος.....	84
6.3.1	Υποστήριξη συχνότητας από ανεμογεννήτριες DFIG.....	85
6.3.2	Ρύθμιση βήματος πτερυγίων.....	87
6.3.3	Ρύθμιση μέγιστης απαιτούμενης ισχύος	87
7	Βιβλιογραφία	89

1 Εισαγωγή

1.1 Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας

Ως ανανεώσιμη ενέργεια ορίζεται η ενέργεια η οποία συλλέγεται από πηγές οι οποίες αναπληρώνονται φυσικά, όπως είναι η ηλιακή ακτινοβολία, ο άνεμος, η βροχή, η παλίρροια, τα κύματα, η γεωθερμία και η βιομάζα. Η ανανεώσιμη ενέργεια παρέχει ενέργεια σε τέσσερις σημαντικές κατηγορίες, στην παραγωγή ηλεκτρισμού, στον κλιματισμό και στην θέρμανση ή ψύξη του νερού, στις μεταφορές και σε αγροτικές (εκτός δικτύου) ενεργειακές ανάγκες. Σε αντίθεση με τις συμβατικές μορφές ενέργειας που είναι συγκεντρωμένες σε περιορισμένο αριθμό χωρών, οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας προσφέρουν σημαντικές ευκαιρίες ενεργειακής απόδοσης σε μία ευρεία κλίμακα γεωγραφικών περιοχών. Η γρήγορη ανάπτυξη των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, η ενεργειακή τους απόδοση και η τεχνολογική τους ποικιλία έχουν ως αποτέλεσμα σημαντική ενεργειακή ασφάλεια καθώς και οικονομικά οφέλη.

Οι κλιματικές αλλαγές και η υπερθέρμανση του πλανήτη λόγω των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου και η γενικότερη περιβαλλοντολογική μόλυνση που προέρχεται από την καύση ορυκτών καυσίμων που χρησιμοποιούν οι μεγάλες μονάδες παραγωγής όπως είναι τα θερμοηλεκτρικά εργοστάσια καθιστούν αναγκαία την όλο και μεγαλύτερη διείσδυση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας. Η επέκταση αυτή των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας ενισχύεται από την όλο και πιο αυξανόμενη τιμή του πετρελαίου, τις κυβερνητικές επιχορηγήσεις και την νέα νομοθεσία που εισάγεται παγκοσμίως για τα ενεργειακά θέματα. Αν και οι περισσότερες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας παρέχουν ηλεκτρισμό, μπορούν να εφαρμοσθούν σε συνδιασμό με εξηλεκτρισμό, γεγονός που προσφέρει ακόμα περισσότερα οφέλη. Για παράδειγμα ο ηλεκτρισμός μπορεί να μετατραπεί σε θερμότητα χωρίς απώλειες και να επιτευχθούν μεγαλύτερες θερμοκρασίες από ότι με τα ορυκτά καύσιμα. Επίσης μπορεί να μετατραπεί σε μηχανική ενέργεια με μεγάλη απόδοση και έτοιμη για κατανάλωση. Ο εξηλεκτρισμός με ανανεώσιμες πηγές ενέργειας είναι πιο αποτελεσματικός και οδηγεί σε σημαντική μείωση των απαιτήσεων πρωτογενούς ενέργειας καθώς οι περισσότερες πηγές ανανεώσιμης ενέργειας δεν έχουν κύκλο ατμού με μεγάλες απώλειες (υπολογίζεται ότι στα εργοστάσια ηλεκτροπαραγωγής με ορυκτά καύσιμα οι απώλειες κυμαίνονται μεταξύ 40%-65%).

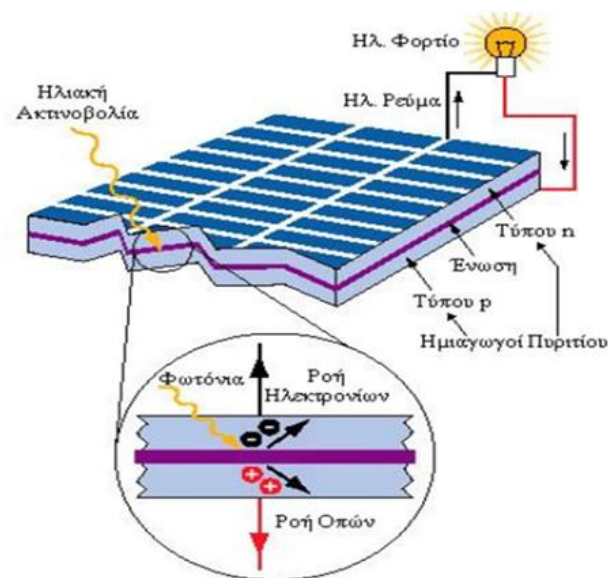
Τέλος, η ανάπτυξη και η εξέλιξη των μικροδικτύων που χρησιμοποιούν κατά κύριο λόγο ανανεώσιμες πηγές ενέργειας για την παραγωγή ηλεκτρισμού δίνουν την δυνατότητα παροχής ηλεκτρικού ρεύματος και θέρμανσης σε περιοχές που λόγω της γεωγραφικής τους θέσης ή των οικονομικών δυσχεριών που αντιμετωπίζουν δεν ήταν εφικτό να συνδεθούν με κάποιο δίκτυο διανομής ηλεκτρικής ενέργειας. [1]

1.2 Ηλιακή ενέργεια

Το ηλιακό φως είναι η πιο άφθονη πηγή ενέργειας και βρίσκεται παντού και δωρεάν. Ωστόσο η απευθείας χρήση της ηλιακής ενέργειας, δηλαδή η άμεση αξιοποίηση του ενεργειακού περιεχομένου άμεσα και όχι έμμεσα με ορυκτά καύσιμα ή την αιολική ενέργεια, συμβάλει με ένα μικρό ποσοστό μόνο στον ενεργειακό εφοδιασμό της ανθρωπότητας.

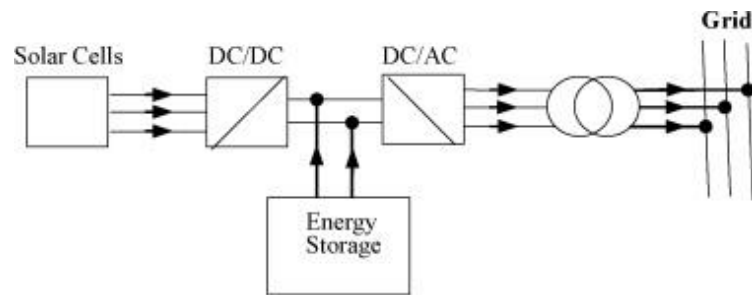
Η ηλιακή ενέργεια, η ακτινοβολία και η θερμότητα από τον ήλιο, αξιοποιείται χρησιμοποιώντας ένα εύρος συνεχώς εξελισσόμενων τεχνολογιών όπως είναι η ηλιακή θέρμανση, τα φωτοβολταϊκά πάνελ (photovoltaics-PV), η συγκεντρωμένη ηλιακή ενέργεια (concentrated solar power-CSP), συγκεντρωτικά φωτοβολταϊκά (concentrator photovoltaics-CPV), η ηλιακή αρχιτεκτονική (solar architecture) και η τεχνητή φωτοσύνθεση (artificial photosynthesis). Οι τεχνολογίες αυτές μπορούν να χαρακτηρισθούν ως ενεργητικές ή παθητικές ανάλογα με τον τρόπο που συλλαμβάνουν, μετατρέπουν και διανέμουν την ηλιακή ενέργεια. Οι παθητικές ηλιακές τεχνολογίες περιλαμβάνουν την επιλογή υλικών με ευνοϊκές ιδιότητες θερμικής μάζας ή του φωτός διασποράς, τον προσανατολισμό ενός κτηρίου με τον ήλιο και τον σχεδιασμό χώρων που φυσικά κυκλοφορούν αέρα. Οι ενεργητικές ηλιακές τεχνολογίες περιλαμβάνουν την ηλιακή θερμική ενέργεια χρησιμοποιώντας ηλιακούς συλλέκτες για θέρμανση και την ηλιακή ενέργεια μετατρέποντας την ηλιακή ακτινοβολία σε ηλεκτρισμό είτε άμεσα μέσω των φωτοβολταϊκών είτε έμμεσα με την συγκεντρωμένη ηλιακή ενέργεια. [1]

Τα φωτοβολταϊκά συστήματα είναι η κύρια πηγή ηλεκτρικής ενέργειας εκμεταλλευόμενη την ηλιακή ενέργεια καθώς μετατρέπουν την ηλιακή ακτινοβολία σε ηλεκτρική ενέργεια. Η λειτουργία τους βασίζεται στο φωτοηλεκτρικό φαινόμενο. Τα φωτοβολταϊκά ή ηλιακά πάνελ αποτελούνται από πολλές διακριτές κυψέλες που συγκεντρώνονται σε επίπεδες πλάκες οι οποίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε στέγες σπιτιών, σε ολοκληρωμένες εγκαταστάσεις κτιρίων ή ακόμα και σε σταθμούς παραγωγής ηλιακής ενέργειας.



Εικόνα 1. Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με χρήση φωτοβολταϊκών πάνελ.

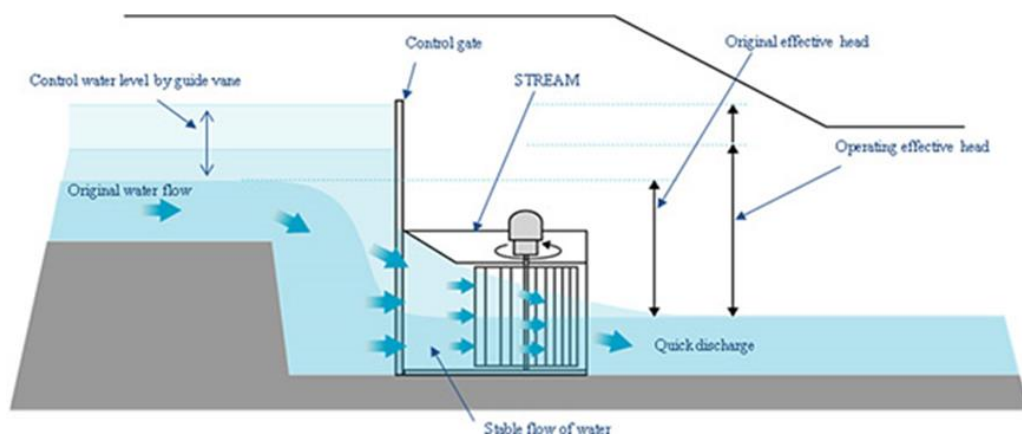
Τα φωτοβολταϊκά μπορούν να συνδεθούν στο δίκτυο αλλά και να λειτουργήσουν αυτόνομα. Παράγουν συνεχές ρεύμα και έτσι για την σύνδεση τους στο δίκτυο απαιτείται η χρήση αντιστροφών. [2]



Εικόνα 2. Σύνδεση φωτοβολταϊκών στο δίκτυο.

1.3 Υδραυλική ενέργεια

Η υδραυλική ενέργεια προέρχεται από την ενέργεια που έχει το νερό όταν βρίσκεται σε μεγάλο υψόμετρο ή όταν ρέει με μεγάλη ταχύτητα. Αυτή η μορφή της ενέργειας ήταν γνωστή από την αρχαιότητα με την χρήση των νερόμυλων για άρδευση αλλά και την λειτουργία μηχανικών συσκευών. Από τον 19^ο αιώνα και μετά χρησιμοποιήθηκε η υδραυλική ενέργεια για την παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος. Αυτό έγινε εφικτό με την κατασκευή υδροηλεκτρικών έργων (υδροταμιευτήρας, φράγμα, κλειστός αγωγός πτώσεως, υδροστρόβιλος, ηλεκτρογεννήτρια, διώρυγα φυγής). Με την χρήση υδραυλικών τουρμπινών μετατρέπεται η κινητική ενέργεια του νερού σε μηχανική ενέργεια η οποία με την σειρά της μέσω μια γεννήτριας μετατρέπεται σε ηλεκτρική. [3]



Εικόνα 3. Παραγωγή υδροηλεκτρικής ενέργειας.

Η υδροηλεκτρική ενέργεια ταξινομείται σε μεγάλης και μικρής κλίμακας. Οι υδροηλεκτρικές μονάδες μεγάλης κλίμακας απαιτούν τη δημιουργία φραγμάτων και

μεγάλων δεξαμενών με αποτέλεσμα να έχουν σημαντικές επιπτώσεις στο οικοσύστημα και γενικότερα στο περιβάλλον. Αντίθετα, τα συστήματα μικρής κλίμακας δεν έχουν μεγάλες επιπτώσεις στο περιβάλλον καθώς τοποθετούνται δίπλα σε ποτάμια και κανάλια. Επίσης οι μονάδες υδροηλεκτρικής ενέργειας ανάλογα με την ισχύ που μπορούν να παράγουν ταξινομούνται σε επιμέρους κατηγορίες. Πιο συγκεκριμένα υπάρχουν οι μεγάλες υδροηλεκτρικές μονάδες με ισχύ μεγαλύτερη των 100 MW που τροφοδοτούν μεγάλο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας, οι μεσαίες που παράγουν 15-100 MW για ένα πλέγμα δικτύων, οι μικρές που με ισχύ 1-15 MW τροφοδοτούν ένα δίκτυο, οι μίνι που με 100 KW-1 MW τροφοδοτούν αυτόνομες μονάδες ή ενισχύουν ένα δίκτυο και τέλος οι μικρο υδροηλεκτρικές μονάδες που με ισχύ μικρότερη των 100 KW παρέχουν ενέργεια σε μικρές κοινοτικές ή αγροτικές περιοχές απομακρυσμένες από το δίκτυο.

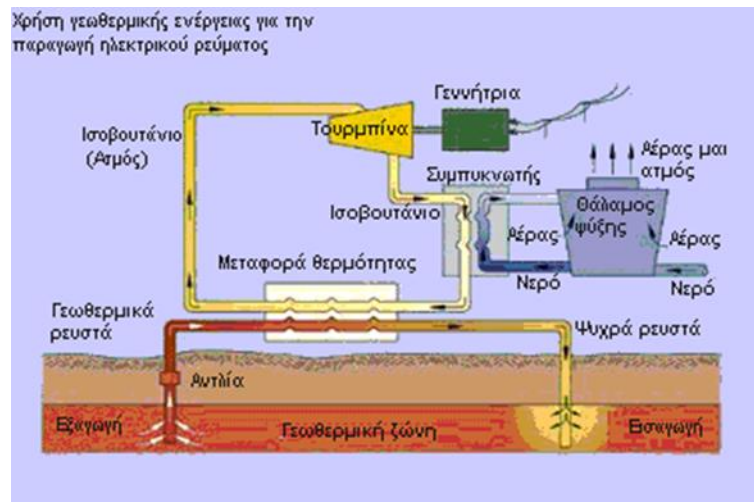
Τα πλεονεκτήματα που προσφέρει η υδραυλική ενέργεια είναι ότι αποτελεί μία καθαρή και ανανεώσιμη μορφή ενέργειας, δίνει την δυνατότητα μέσω των υδροταμιευτήρων για άρδευση, ύρδευση και κάλυψη άλλων αναγκών και επίσης οι υδροηλεκτρικοί σταθμοί μπορούν να τεθούν σε λειτουργία αμέσως μόλις ζητηθεί ηλεκτρική ενέργεια σε αντίθεση με τους θερμικούς. Παρ'όλα αυτά το μεγάλο κόστος κατασκευής των φραγμάτων και των εξοπλισμών των σταθμών αλλά και οι επιπτώσεις στο περιβάλλον αποτελούν σημαντικά μειονεκτήματα.

Η κυματική και η παλιρροιακή ενέργεια αποτελούν και αυτές μορφές της υδραυλικής ενέργειας που δεν χρησιμοποιούνται ευρέως στο εμπόριο αλλά έχουν μεγάλες μελλοντικές πιθανότητες. [4]

1.4 Γεωθερμία

Με τον όρο γεωθερμία αναφέρεται η ενέργεια η οποία παράγεται και αποθηκεύεται στο εσωτερικό της γης. Η γεωθερμική ενέργεια του φλοιού της γης προέρχεται από τον αρχικό σχηματισμό του πλανήτη και από τις ραδιενεργές διασπάσεις υλικών. Η γεωθερμική βαθμίδα, η οποία είναι η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ του πυρήνα του πλανήτη και της επιφάνειάς του, οδηγεί σε μία συνεχόμενη επαγωγή θερμικής ενέργειας σε μορφή θερμότητας από τον πυρήνα στην επιφάνεια. [5]

Μία γεωθερμική εγκατάσταση χρησιμοποιεί την γεωθερμική δραστηριότητα για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Για την αξιοποίηση της ενέργειας δημιουργούνται βαθιές τρύπες στο έδαφος μέχρι να βρεθεί ένα σημαντικό ζεστό γεωθερμικό σημείο. Στη συνέχεια τοποθετούνται σωλήνες που επιτρέπουν την ροή του θερμού ατμού από τον φλοιό στην επιφάνεια. Ο συμπιεσμένος αυτός ατμός διοχετεύεται σε στρόβιλο ο οποίος αρχίζει να περιστρέφεται υπό την μεγάλη δύναμη που ασκεί ο ατμός. Ο στρόβιλος είναι συνδεδεμένος με μία γεννήτρια η οποία με τη σειρά της περιστρέφεται και παράγει ηλεκτρισμό. Στη συνέχεια διοχετεύεται από άλλο σωλήνα κρύο νερό στο εσωτερικό της γης το οποίο ζεσταίνεται και έτσι συνεχίζεται η διαδικασία.



Εικόνα 4. Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με γεωθερμία.

Εκτός από την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας όπου χρησιμοποιείται η γεωθερμία υψηλής θερμοκρασίας, υπάρχει και αυτή της χαμηλής όπου ενδύκνεται για την θέρμανση και την ψύξη κτηρίων καθώς και για άλλες βιομηχανικές χρήσεις. Σε αυτή την μορφή υπάρχει μία αντλία θερμότητας και ένας εναλλάκτης θερμότητας συνδεδεμένος με το έδαφος, τα οποία χρησιμοποιούνται για την μεταφορά θερμότητας προς τη γη στην περίπτωση ψύξης ή από την γη σε περίπτωση θέρμανσης. Αποτελεί μία ολοένα και πιο σημαντική τεχνολογία καθώς μειώνει σημαντικά την κατανάλωση ενέργειας για κλιματισμό, ειδικά σε περιόδους αιχμής. [2]

Η γεωθερμία θεωρείται μία ανανεώσιμη πηγή ενέργειας με μεγάλη απόδοση και πολύ φιλική προς το περιβάλλον. Έχει πολύ λίγες εκπομπές σε σχέση με άλλους σταθμούς παραγωγής οι οποίες μπορούν να περιοριστούν και να συγκρατηθούν αρκετά εύκολα. Επίσης σε αντίθεση με την ηλιακή και την αιολική ενέργεια μπορεί να λειτουργεί αδιάλειπτα. Κάποια σημαντικά της μειονεκτήματα είναι το κόστος κατασκευής της εγκατάστασης καθώς και της εξερεύνησης για την ανεύρεση γεωθερμικών σημείων σε μεγάλο βάθος αλλά και ο περιορισμός των πηγών αυτών κυρίως σε περιοχές που βρίσκονται στα όρια τεκτονικών πλακών. [5]

1.5 Βιομάζα

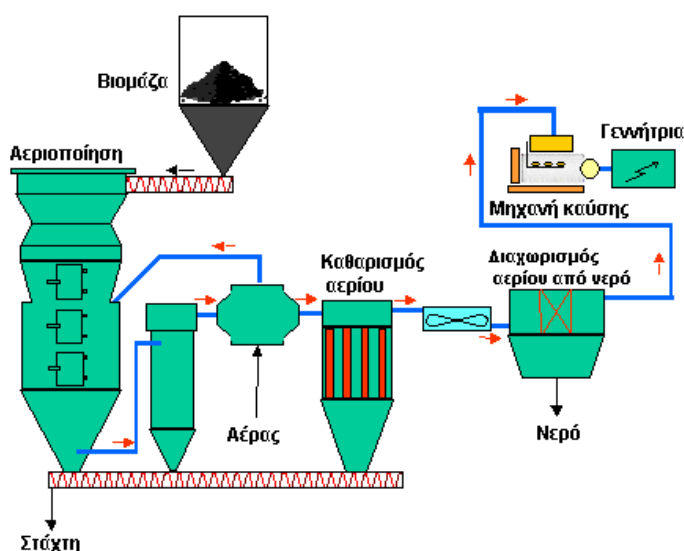
Η βιομάζα θεωρείται μία από τις σημαντικότερες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Είναι οργανικό υλικό που προέρχεται από φυτά και από ζώα. Όταν προέρχεται από φυτά ή από υλικά που παράγονται από φυτά, που είναι και η πιο συνηθισμένη της μορφή, αποκαλείται ως λιγνοκυτταρινική βιομάζα. Ως πηγή ενέργειας η βιομάζα μπορεί να χρησιμοποιηθεί είτε αμέσως μέσω καύσης και παραγωγής θερμότητας είτε έμμεσα μετατρέποντάς την σε διάφορες μορφές βιοκαυσίμων.

Η πιο μεγάλη πηγή βιομάζας είναι το ξύλο, συμπεριλαμβανομένου τα δασικά υπολείμματα (νεκρά δέντρα, κλαδιά και κούτσουρα δέντρων) και τα ροκανίδια. Επίσης περιλαμβάνει οργανικά απόβλητα από τη δασοκομία και την γεωργία όπως είναι τα υπολείμματα καλλιέργειας καλαμποκιού, φλούδες ριζιού, συμπιεζόμενο ζαχαροκάλαμο ή

χρησιμοποιούνται ταχέως αναπτυσσόμενες ενεργειακές σοδιές. Τέλος μπορούν να χρησιμοποιηθούν ακόμα και στερεά απόβλητα αστικών περιοχών.

Η μετατροπή της βιομάζας σε βιοκαύσιμα επιτυγχάνεται με διάφορες μεθόδους (θερμική, χημική ή βιοχημική μέθοδος). Τα βιοκαύσιμα περιλαμβάνουν ένα ευρύ φάσμα καυσίμων σε στερεή, υγρή και αέρια μορφή. Τα υγρά περιλαμβάνουν κυρίως βιοαιθανόλη και βιοντίζελ ενώ τα αέρια περιλαμβάνουν κυρίως βιοαέριο, πίσσα και ξυλάνθρακα. Από αυτά τα πιο κατάλληλα για ηλεκτροπαραγωγή είναι η καύση στερεής βιομάζας και του βιοαερίου. Σκοπός της ενεργειακής αξιοποίησης της βιομάζας είναι η παραγωγή θερμότητας, ηλεκτρισμού και κίνησης και ανάλογα με την διαθέσιμη πρώτη ύλη επιλέγεται και η κατάλληλη διεργασία. [1]

Όταν καίγεται η βιομάζα, η χημική ενέργεια που έχει απελευθερώνεται ως θερμότητα η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή ατμού και στη συνέχεια είτε κινεί κάποιο στρόβιλο συνδεδεμένο με γεννήτρια για την παραγωγή ηλεκτρισμού είτε παρέχει θερμότητα σε σπίτια και σε βιομηχανίες.



Εικόνα 5. Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με βιομάζα.

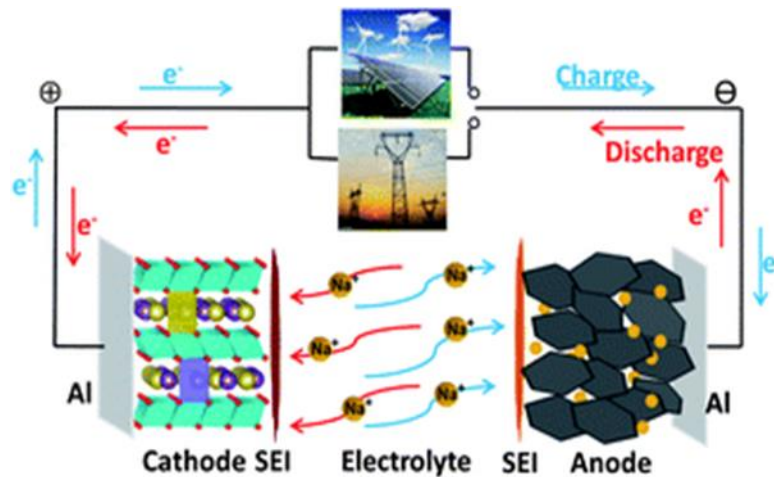
Τα πιο σημαντικά πλεονεκτήματα της βιομάζας είναι ότι αποτελεί μία ανεξάντλητη πηγή καυσίμου, έχει ελάχιστη επίδραση στο περιβάλλον όταν η ζύμωση, η πυρόλυση κλπ χρησιμοποιούνται για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και όχι για άμεση καύση φυτικής μάζας. Οι αλκοόλες που παράγονται από την βιομάζα είναι αποδοτικές με σχετικά καθαρή καύση, είναι διαθέσιμη σε όλο τον κόσμο και η χρήση βιοκαυσίμων στα αμάξια οδηγεί σε λιγότερη μόλυνση συγκριτικά με την βενζίνη. Όπως και όλες οι πηγές ενέργειας έχει και κάποια μειονεκτήματα. Μπορεί να συμβάλλει σε μεγάλο βαθμό στο φαινόμενο του θερμοκηπίου αν καεί άμεσα, αποτελεί ακριβή πηγή ενέργειας τόσο στην παραγωγή της βιομάζας όσο και στην μετατροπή της σε αλκοόλες και τέλος σε μικρή κλίμακα είναι πιθανόν να μην είναι συμφέρουσα. [2]

1.6 Συστήματα αποθήκευσης ενέργειας

Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας απαιτεί την μετατροπή ενέργειας σε ηλεκτρισμό. Ωστόσο, κάποιες διαδικασίες μετατροπής όπως η ηλιακή, η αιολική και η υδραυλική βασίζονται σε κυμαινόμενη πηγή καυσίμου. Σε αυτές τις περιπτώσεις το σύστημα θα πρέπει να διαθέτει αποθηκευτική ικανότητα ώστε να αντιμετωπιστούν οι διακυμάνσεις στην παροχή ηλεκτρικής ενέργειας. Εκτός αυτού, η αποθήκευση ενέργειας παρέχει την δυνατότητα αξιοποίησης περίσσειας ενέργειας και χρησιμοποίηση της όταν αυτό κρίνεται αναγκαίο (σε περίοδο αιχμής ή την τροφοδότηση κρίσιμων φορτίων).

1.6.1 Αποθήκευση ενέργειας με μπαταρίες

Η κύρια λειτουργία των μπαταριών είναι να παρέχουν εφεδρεία στο δίκτυο σε περίπτωση σφάλματος στον σταθμό παραγωγής ή στην γραμμή μεταφοράς. Επίσης χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο της τάσης και της συχνότητας. Αποθηκεύουν ηλεκτρική ενέργεια σε χημική. Τα κριτήρια που πρέπει να τηρούν είναι υψηλή πυκνότητα ενέργειας, υψηλή ισχύς, φόρτιση με υψηλή απόδοση, μεγάλη διάρκεια ζωής και μικρό αρχικό κόστος. Ο κύριος όγκος των μπαταριών σε κλίμα δικτύου αποτελούνται από μεγάλο αριθμό κυψελών μολύβδου-οξέως. Τέλος, έχουν αρκετά καλή απόκριση, είναι αθόρυβες και δεν μολύνουν το περιβάλλον. [6] [2]

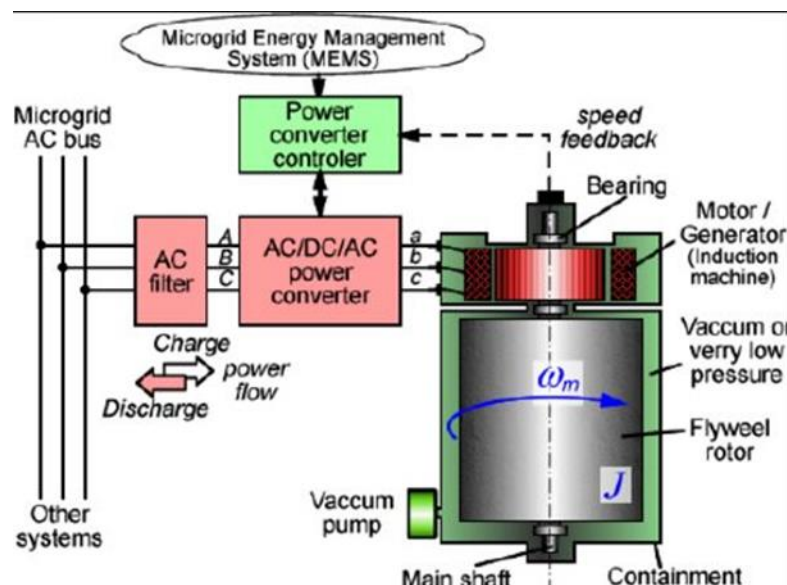


Εικόνα 6. Αποθήκευση ενέργειας με μπαταρίες.

1.6.2 Αποθήκευση ενέργειας με σφόνδυλο

Είναι ένα ηλεκτρομηχανικό σύστημα αποθήκευσης όπου η ενέργεια αποθηκεύεται σε κινητική ενέργεια μιας περιστρεφόμενης μάζας. Ένας ηλεκτρικός κινητήρας τροφοδοτεί με μηχανική ενέργεια τον σφόνδυλο και στον ίδιο άξονα είναι συνδεδεμένη μία γεννήτρια

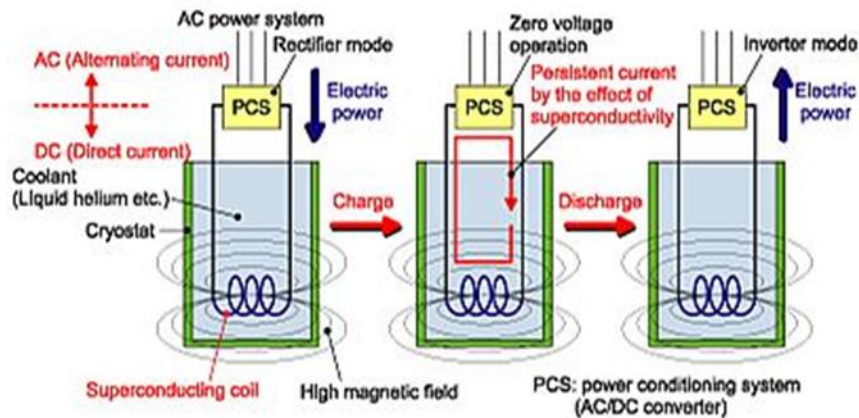
που δίνει ηλεκτρική ενέργεια. Κατά την φόρτιση, ηλεκτρικό ρεύμα ρέει απο τον κινητήρα και αυξάνει την ταχύτητα του σφονδύλου ενώ η γεννήτρια παράγει ρεύμα προς το δίκτυο μειώνοντας την ταχύτητά του και εκφορτίζοντάς τον. Χρησιμοποιείται κυρίως για την τροφοδότηση κρίσιμων φορτίων λόγω της πολύς γρήγορης απόκρισής του. Επίσης χρησιμοποιούνται για αντιμετώπιση διακυμάνσεων ενέργειας στις μηχανές καύσης ή για φιλτράρισμα διακυμάνσεων αιολικής ενέργειας. Τέλος, είναι ανθεκτικά και φιλικά προς το περιβάλλον. [7] [6] [2]



Εικόνα 7. Αποθήκευση ενέργειας με σφόνδυλο.

1.6.3 Μαγνητική υπεραγωγίμη αποθήκευση ενέργειας

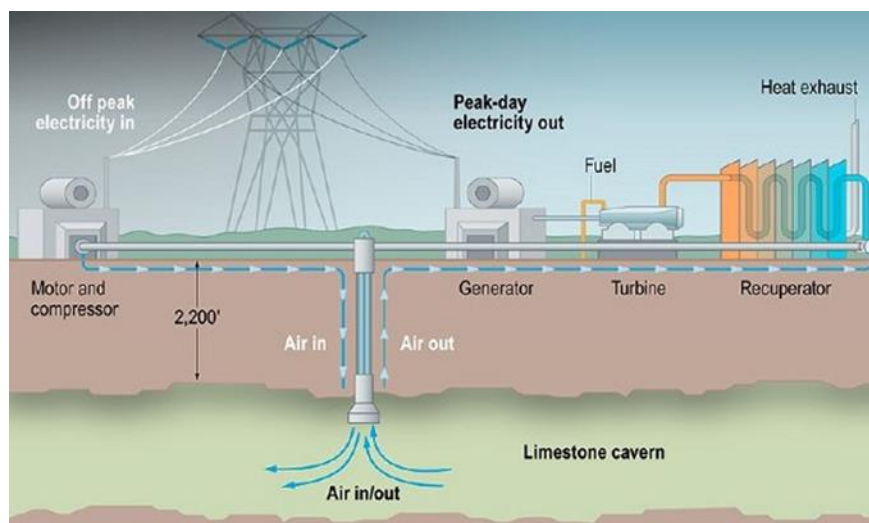
Σε αυτά τα συστήματα, η ενέργεια αποθηκεύεται σε ένα μαγνητικό πεδίο το οποίο δημιουργείται από συνεχές ρεύμα που διαρρέει ένα υπεραγωγίμη πηνίο. Μεταξύ άλλων, το σύστημα ψύξης που απαιτεί το καθιστά ένα ακριβό μέσο αποθήκευσης ενώ το μεγάλο μαγνητικό πεδίο που δημιουργεί αποτελεί κίνδυνο για την υγεία του ανθρώπου. Μπορεί να απορροφήσει και να τροφοδοτήσει με ενεργό και άεργο ισχύ. Τα σημαντικότερα πλεονεκτήματά του είναι η μεγάλη του απόδοση και το γεγονός ότι μπορεί άμεσα να παρέχει μεγάλα ποσά ισχύος. [6] [2]



Εικόνα 8. Μαγνητική υπεραγώγιμη αποθήκευση ενέργειας.

1.6.4 Αποθήκευση ενέργειας με πεπιεσμένο αέρα

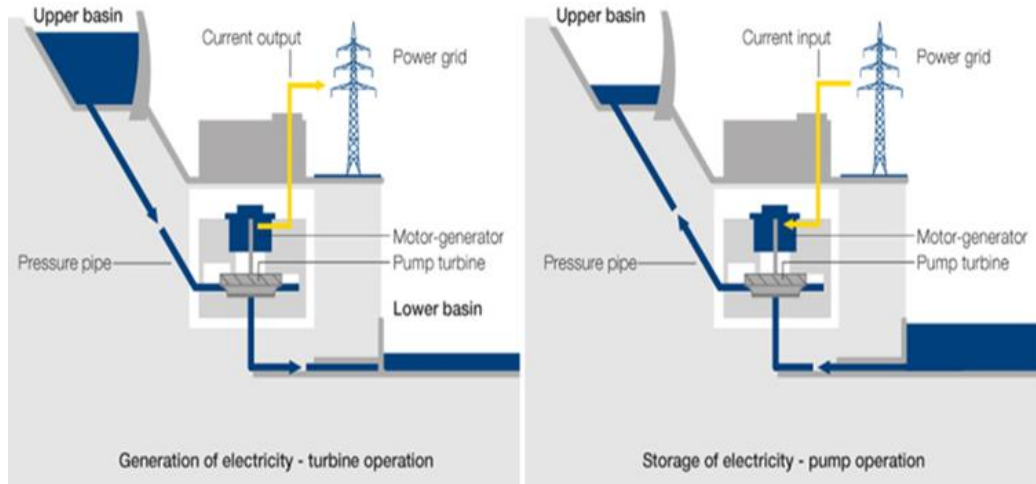
Ο τρόπος λειτουργίας του βασίζεται στις συμβατικές μηχανές καύσης. Αποθηκεύουν ενέργεια ώστε να χρησιμοποιείται σε ώρες αιχμής όπου η ζήτηση είναι μεγάλη. Κατά την αποθήκευση χρησιμοποιείται μια σειρά από συμπιεστές που διοχετεύουν τον υψηλής πίεσης αέρα σε μία υπόγεια συνήθως δεξαμενή. Ενώ κατά την εξαγωγή ο συμπιεσμένος αέρας με την χρήση καυσίμων οδηγείται σε τουρμπίνες εκτόνωσης οι οποίες είναι συνδεδεμένες με μια γεννήτρια που παράγει ηλεκτρισμό. Οι εγκαταστάσεις αυτές χρησιμοποιούν περίπου το 1/3 του καυσίμου που χρειάζονται οι συμβατικές μηχανές καύσης οπότε επιβαρύνουν λιγότερο το περιβάλλον. Μία από τις κύριες εφαρμογές τους είναι σε εγκαταστάσεις με ανεμογεννήτριες λόγω της διακοπτόμενης αιολικής ενέργειας. [8] [2]



Εικόνα 9. Αποθήκευση ενέργειας με πεπιεσμένο αέρα.

1.6.5 Αποθήκευση ενέργειας με αντλιοστάσιο

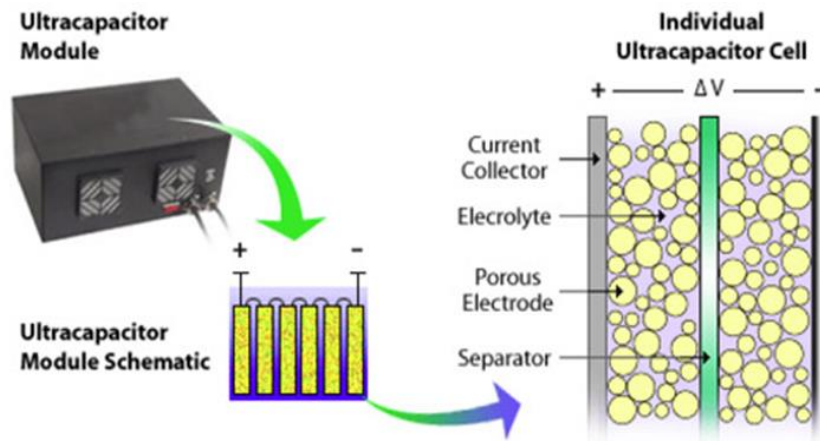
Όπως τα συστήματα αποθήκευσης με πεπιεσμένο αέρα, χρησιμοποιούν τον εκτός αιχμής ηλεκτρισμό για να αντλήσουν νερό από μία δεξαμενή σε άλλη σε μεγαλύτερο ύψος. Οπότε όταν η ζήτηση είναι μεγάλη, απελευθερώνεται το νερό και περνάει μέσα από υδροστρόβιλους για την παραγωγή ηλεκτρισμού. Το μεγαλύτερο πλεονέκτημά του είναι ότι με αυτό τον τρόπο μπορούν να αποθηκευτούν τεράστια ποσά ενέργειας για μεγάλο χρονικό διάστημα. Επίσης είναι χαμηλού κόστους ενώ συμβάλλει στη ρύθμιση της συχνότητας του δικτύου. [2]



Εικόνα 10. Αποθήκευση ενέργειας με αντλιοστάσιο.

1.6.6 Αποθήκευση ενέργειας με υπερπυκνωτή

Οι υπερπυκνωτές είναι διπλής στρώσης πυκνωτές που αποθηκεύουν ηλεκτρική ενέργεια χωρίς χημικές αντιδράσεις και μεγαλώνουν την αποθηκευτική τους ικανότητα λόγω αύξησης της επιφάνειάς τους μέσω της χρήσης ενός πορώδους ηλεκτρολύτη. Ανάλογα με το συνδιασμό ηλεκτρολύτη και ηλεκτροδίων που χρησιμοποιούνται ποικίλουν στην πυκνότητα ισχύος, την χωρητικότητα, στον κύκλο ζωής και στο κόστος. Μπορούν να παρέχουν εκτεταμένη ενεργειακή διαθεσιμότητα σε πιθανή βύθιση τάσης ή στιγμιαίες διακοπές. Επίσης είναι εύκολοι στην εγκατάσταση, μπορούν να μείνουν τελείως αφόρτιστοι, είναι μικροί σε μέγεθος και μπορούν να λειτουργήσουν αποτελεσματικά σε διάφορες συνθήκες θερμοκρασίας και υγρασίας. Τέλος, χρησιμοποιούνται κυρίως σε χαμηλά επίπεδα ισχύος. [7] [6]

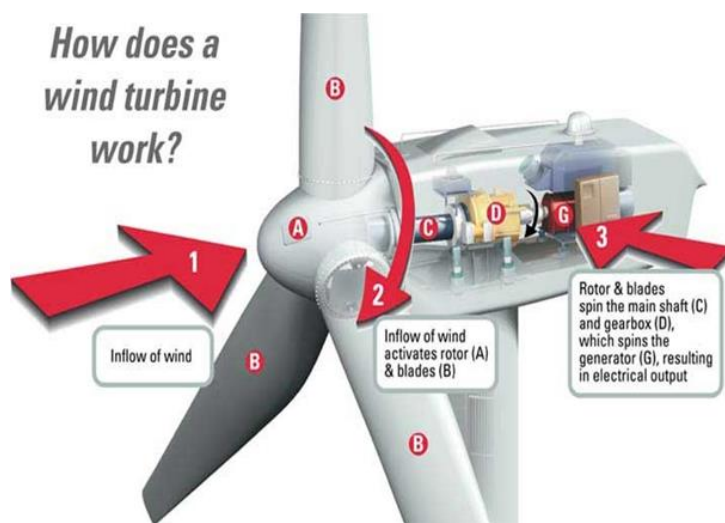


Εικόνα 11. Αποθήκευση ενέργειας με υπερπυκνωτή.

2 Αιολική ενέργεια

2.1 Εισαγωγή στην αιολική ενέργεια

Ως αιολική αναφέρεται η χρήση της ροής του αέρα (της κινητικής του ενέργειας δηλαδή) μέσω ανεμόμυλων ή ανεμογεννητριών, οι οποίοι την μετατρέπουν σε μηχανική και από εκεί μέσω γεννητριών μετατρέπεται σε ηλεκτρισμό. Η αιολική ενέργεια ως εναλλακτική λύση για την καύση ορυκτών καυσίμων είναι άφθονη, ανανεώσιμη, δεν παράγει εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου και καταλαμβάνει μικρή έκταση γης.



Εικόνα 12. Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με ανεμογεννήτριες.

Τα αιολικά πάρκα αποτελούνται από πολλές μεμονομένες ανεμογεννήτριες οι οποίες είναι συνδεδεμένες στο δίκτυο μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας. Υπάρχουν δύο είδη αιολικών πάρκων, τα χερσαία (onshore wind farm) και τα υπεράκτια (offshore wind farm). [9] [2]

- Οι χερσαίες εγκαταστάσεις ανεμογεννητριών σε λοφώδεις ή ορεινές περιοχές τείνουν να βρίσκονται σε απόσταση τριών ή περισσότερων χιλιομέτρων από την πλησιέστερη ακτογραμμή ώστε να εκμεταλλεύονται την τοπογραφική επιτάχυνση του ανέμου καθώς επιταχύνει σε μια κορυφογραμμή. Με αυτόν τον τρόπο οι πρόσθετες ταχύτητες του ανέμου μπορούν να αυξήσουν την ενέργεια που παράγεται από τις ανεμογεννήτριες. Η ακριβής θέση κάθε ανεμογεννήτριας αποτελεί μεγάλο ζήτημα καθώς μία διαφορά 30 m για παράδειγμα μπορεί δυνητικά να διπλασιάσει την απόδοση. [10]



Εικόνα 13. Χερσαίο αιολικό πάρκο.

- Η υπεράκτια αιολική ενέργεια αναφέρεται στην κατασκευή αιολικών πάρκων για την παραγωγή αιολικής ενέργειας στο νερό. Περιλαμβάνει περιοχές όπως λίμνες, φιορδ και προστατευόμενες παράκτιες περιοχές όπου χρησιμοποιούνται τεχνολογίες ανεμογεννητριών με σταθερή βάση αλλά και περιοχές με μεγάλα βάθη όπου οι ανεμογεννήτριες είναι πλωτές. Σε σχέση με τις χερσαίες ανεμογεννήτριες είναι λιγότερο ενοχλητικές καθώς το μέγεθος και ο θόρυβος τους μετριάζεται λόγω της μεγάλης απόστασης. Επίσης επειδή η επιφάνεια του νερού έχει μικρότερη τραχύτητα από αυτή της γης, η μέση ταχύτητα του αέρα είναι μεγαλύτερη και η συνεισφορά στην παροχή ηλεκτρισμού είναι μεγαλύτερη. Το ακριβές κόστος εγκατάστασης και συντήρησής τους όμως αποτελεί ένα μεγάλο μειονέκτημα σε σύγκριση με τα χερσαία αιολικά πάρκα. [11]



Εικόνα 14. Υπεράκτιο αιολικό πάρκο.

Η ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται από τον άνεμο είναι εξαιρετικά κυμαινόμενη σε πολλές διαφορετικές χρονικές κλίμακες: ωριαία, ημερήσια και εποχιακή. Επειδή η στιγμιαία παραγωγή και κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας πρέπει να παραμένει σε ισορροπία για να διατηρείται η σταθερότητα του δικτύου, αυτή η διακύμανση μπορεί να παρουσιάσει σημαντικές προκλήσεις για την ενσωμάτωση μεγάλων ποσών αιολικής ενέργειας στο δίκτυο. Η διαλείπουσα και μη κατανεμόμενη φύση της παραγωγής αιολικής ενέργειας μπορεί να αυξήσει το κόστος για ρύθμιση και λειτουργία εφεδρείας και να απαιτήσει αύξηση στις περικοπές φορτίων, λύσεων αποθήκευσης ή του συστήματος αποθήκευσης με HVDC (High Voltage Direct Current) ζυγό.

Όσο αφορά τα συστήματα αποθήκευσης αιολικής ενέργειας, ο συμβατικός υδροηλεκτρισμός αποτελεί μία πολύ καλή λύση. Όταν υπάρχει δυνατός άνεμος, η περισσευόμενη ενέργεια μπορεί να χρησιμοποιηθεί από κάποιον κοντινό υδροηλεκτρικό σταθμό ώστε να αντλήσουν νερό πίσω στο φράγμα και όταν πέσει η δύναμη του ανέμου, δεδομένου ότι έχει τη δυνατότητα παραγωγής, να αυξήσει την παραγωγή και να αντισταθμίσει την αδυναμία των ανεμογεννητριών. Έτσι δίνεται η δυνατότητα μίας ομαλής τροφοδοσίας ισχύος, ουσιαστικά χωρίς απώλειες και χωρίς την απαίτηση επιπλέον ποσότητας νερού. Εναλλακτικά, άλλα συστήματα αποθήκευσης όπως αποθήκευση ενέργειας με πεπιεσμένο αέρα και θερμική αποθήκευση μπορούν να αποθηκεύσουν ενέργεια σε περιόδους με ισχυρό άνεμο και να χρησιμοποιηθεί όταν χρειαστεί. Το είδος αποθήκευσης εξαρτάται από το επίπεδο διείσδυσης αιολικής ενέργειας. Στη χαμηλή διείσδυση απαιτείται καθημερινή αποθήκευση ενώ στην υψηλή διείσδυση τόσο βραχυπρόθεσμη όσο και μακροπρόθεσμη αποθήκευση. [9]

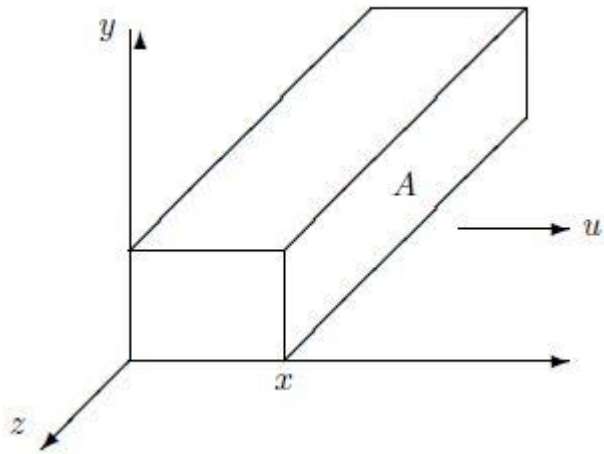
2.2 Εξισώσεις υπολογισμού ισχύος ανεμογεννήτριας

2.2.1 Υπολογισμός ισχύος ιδανικής ανεμογεννήτριας

Η κινητική ενέργεια ενός σώματος αέρα μάζας m η οποία ρέει με ταχύτητα u σε διεύθυνση χ δίνεται από την εξίσωση:

$$U = \frac{1}{2} m u^2 = \frac{1}{2} (\rho A \chi) u^2 \text{ Joules} \quad \text{Εξ 2-1}$$

όπου A είναι η διατομή σε m^2 , ρ η πυκνότητα του αέρα σε kg/m^3 και χ είναι το πάχος του σώματος αέρα σε m . Παρακάτω φαίνεται η αναπαράσταση αυτού του σώματος αέρα.



Εικόνα 15. Σώμα αέρα που κινείται με ταχύτητα u .

Η ισχύς του ανέμου, P_w , είναι η παράγωγος ως προς το χρόνο της κινητικής ενέργειας:

$$P_w = \frac{dU}{dt} = \frac{1}{2} \rho A u^2 \frac{dx}{dt} = \frac{1}{2} \rho A u^3 \quad w \quad \text{εξ 2-2}$$

Η πυκνότητα του αέρα δίνεται από τον τύπο

$$\rho = 3.485 \frac{p}{T} \quad \text{kg/m}^3 \quad \text{εξ 2-3}$$

Όπου p είναι η πίεση σε kPA και T η θερμοκρασία σε Kelvin. Έτσι η ισχύς του ανέμου γίνεται:

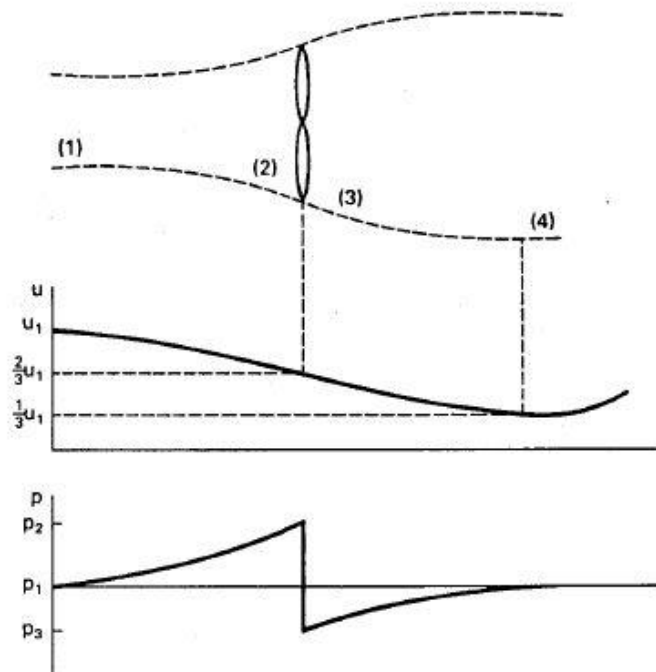
$$P_w = \frac{1}{2} \rho A u^3 = \frac{1.742 p A u^3}{T} \quad w \quad \text{εξ 2-4}$$

Για αέρα σε κανονικές συνθήκες, 101.3 kPA και 273 K

$$P_w = 0.647 A u^3 \quad w \quad \text{εξ 2-5}$$

Η πιο γενική εξίσωση 2-4 χρησιμοποιείται όταν οι ανεμογεννήτριες βρίσκονται σε υψόμετρο μεγαλύτερο από μερικές εκατοντάδες μέτρα από το επίπεδο της θάλασσας ή θερμοκρασία σημαντικά πάνω από 0° .

Θεωρούμε σωληνοειδή μάζα αέρα με αρχική ταχύτητα u_1 , διάμετρο d_1 και πίεση p_1 . Καθώς προσεγγίζει την ανεμογεννήτρια η ταχύτητά του μειώνεται ενώ η διάμετρος του μεγαλώνει. Η πίεση του αέρα φτάνει στο μέγιστο σημείο ενώ μειώνεται και πέφτει κάτω από την ατμοσφαιρική πίσω από την ανεμογεννήτρια. Ένα μέρος της κινητικής ενέργειας του αέρα μετατρέπεται σε δυναμική ενέργεια ώστε να αυξηθεί και πάλι η πίεση του και αυτό συνεχίζεται μέχρι να φτάσει και πάλι την ατμοσφαιρική. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την συνεχή μείωση της ταχύτητάς του μέχρι να φτάσει στη ισορροπία. Αφού φτάσει στην πιο χαμηλή ταχύτητα αρχίζει και πάλι να αυξάνεται και φτάνει στην αρχική της τιμή καθώς απορροφάει κινητική ενέργεια από τον γειτονικό αέρα.



Εικόνα 16. Διάγραμμα ταχύτητας-πυκνότητας μιας μάζας αέρα καθώς προσεγγίζει μία ιδανική ανεμογεννήτρια.

Η μηχανική ενέργεια που αποσπάται σε βέλτιστες συνθήκες είναι η διαφορά της αρχικής και τελικής ισχύς του ανέμου:

$$P_{m,ideal} = P_1 - P_4 = \frac{1}{2} \rho (A_1 u_1^3 - A_4 u_4^3) = \frac{1}{2} \rho \left(\frac{8}{9} A_1 u_1^3 \right) \quad W \quad \text{εξ 2-6}$$

Για να εκφραστεί όμως η ισχύς αυτή συναρτήσει της ταχύτητας του αέρα και της διαμέτρου της γεννήτριας, γνωρίζοντας ότι $A_1 = \frac{2}{3} A_2$ η εξίσωση 2-6 γίνεται:

$$P_{m,ideal} = \frac{1}{2} \rho \left(\frac{8}{9} \left(\frac{2}{3} A_2 \right) u_1^3 \right) = \frac{1}{2} \rho \left(\frac{16}{27} A_2 u_1^3 \right) \quad W \quad \text{εξ 2-7}$$

Ο παράγοντας $16/27=0.593$ που είναι γνωστός και ως συντελεστής Betz δείχνει ότι μία πραγματική ανεμογεννήτρια δεν μπορεί να εξάγει περισσότερη από το 59,3% της ισχύς του αέρα με ίδια διάμετρο. Στην πράξη το ποσοστό αυτό είναι ακόμα μικρότερο με ένα εύρος του 35-40% να θεωρείται αρκετά καλό. [12]

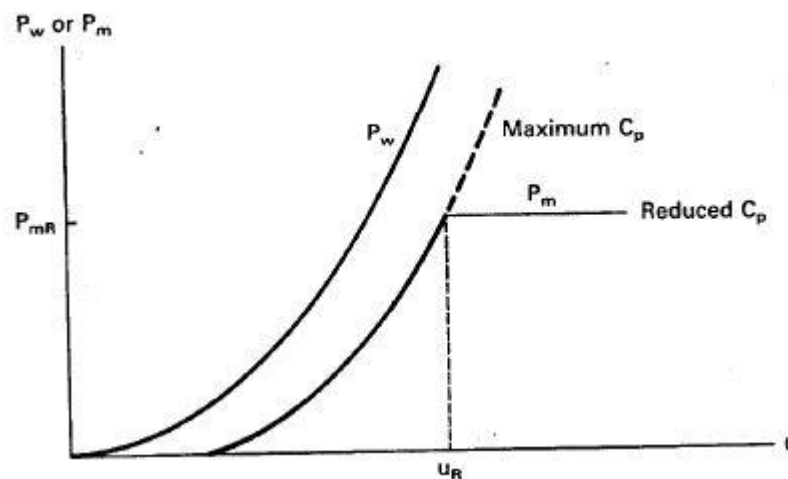
2.2.2 Υπολογισμός ισχύς πραγματικής γεννήτριας

Κατά τον υπολογισμό της ισχύς του ανέμου που εξάγει μία γεννήτρια στην πράξη, ο συντελεστής Betz συμβολίζεται ως C_p οπότε η εξίσωση της πραγματικής μηχανικής ισχύς εξόδου γράφεται ως εξής:

$$P_m = C_p \left(\frac{1}{2} \rho A u^3 \right) = C_p P_w \quad W$$

εξ 2-8

Ο συντελεστής επίδοσης όπως ονομάζεται δεν είναι σταθερός αλλά εξαρτάται από την ταχύτητα του ανέμου, την ταχύτητα περιστροφής της ανεμογεννήτριας και τις παραμέτρους των πτερυγίων της όπως η γωνία προσβολής και το βήμα γωνίας. Οι ανεμογεννήτριες Darrieus για παράδειγμα λειτουργούν με σταθερό βήμα γωνίας ενώ οι μεγάλες ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα με μεταβλητή. Αυτό συμβαίνει για να κρατηθεί η τιμή του C_p στη μεγαλύτερη δυνατή τιμή στην ονομαστική τιμή της ταχύτητας της ανεμογεννήτριας u_R και έπειτα για να μειώσει το C_p ενώ η ισχύς P_w συνεχίζει να αυξάνεται ώστε να διατηρηθεί η ισχύς εξόδου στην ονομαστική της τιμή P_{mR} . Παρακάτω φαίνεται και σχηματικά:



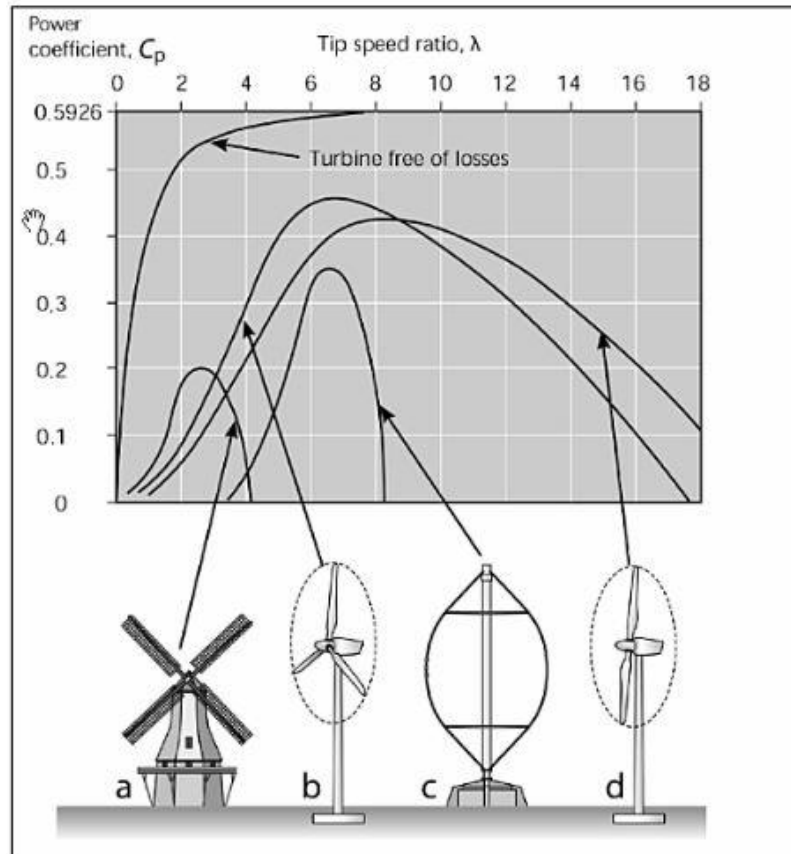
Εικόνα 17. Η ισχύς εξόδου ανεμογεννήτριας με μεταβλητό βήμα γωνίας συναρτήσει της ταχύτητας.

Λόγο κατασκευαστικών περιορισμών και περιορισμών ελέγχου δεν είναι πρακτικό να κρατηθεί σταθερός ο έλεγχος του βήματος γωνίας οπότε θα μεταβάλεται ανάλογα με την ταχύτητα του ανέμου ακόμα και για σταθερή ταχύτητα περιστροφής. Η τιμή του συντελεστή C_p επηρεάζεται από τον τύπο της ανεμογεννήτριας και την τιμή της παραμέτρου λ , που ονομάζεται λόγος ταχύτητας του ακροπτερυγίου.

$$\lambda = \frac{\omega * r}{v}$$

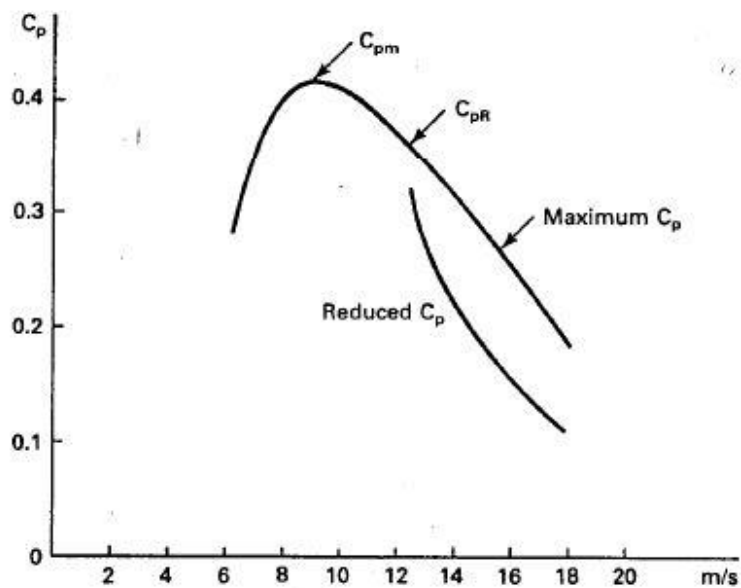
εξ 2-9

Όπου ω είναι η ταχύτητα περιστροφής του στροβίλου σε rpm, r η ακτίνα του ρότορα και v η ταχύτητα του ανέμου.



Εικόνα 18. Ο συντελεστής C_p συναρτήσει του λ για διάφορους τύπους ανεμογεννητριών.

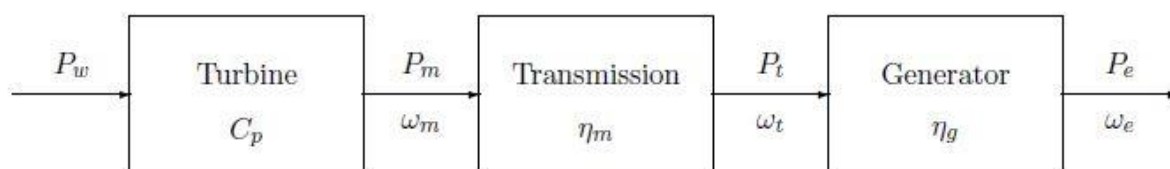
Παρακάτω φαίνεται η μεταβολή του C_p συναρτήσει της ταχύτητας για μια ανεμογεννήτρια MOD-2. [12]



Εικόνα 19. Συντελεστής επίδοσης συναρτήσει της ταχύτητας σε ανεμογεννήτρια MOD-2.

2.2.3 Απόδοση της ανεμογεννήτριας

Η ισχύς εξόδου στον άξονα της ανεμογεννήτριας δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί αμέσως αλλά είναι συνδεδεμένη με ένα φορτίο μέσω μετάδοσης ή ενός κιβώτιου ταχυτήτων. Το φορτίο μπορεί να είναι αντλία, συμπιεστής, ηλεκτρική γεννήτρια κλπ. Θεωρώντας σαν φορτίο μία ηλεκτρική γεννήτρια, στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζονται τα στάδια από την ισχύ εισόδου μέχρι την τελική ισχύ εξόδου.



Εικόνα 20. Ηλεκτρικό σύστημα ανέμου.

Στο σχήμα φαίνεται η ισχύς του ανέμου P_w και η μηχανική ισχύς P_m της ανεμογεννήτριας με γωνιακή ταχύτητα ω_m η οποία τροφοδοτείται στην μετάδοση με βαθμό απόδοσης η_m . Η ισχύς εξόδου της μετάδοσης, P_t , είναι το γινόμενο της μηχανικής ισχύς και του βαθμού απόδοσης:

$$P_t = \eta_m P_m \quad W \quad \text{εξ 2-10}$$

Με τον ίδιο τρόπο, η ισχύς εξόδου της γεννήτριας P_e δίνεται από το γινόμενο της ισχύς εξόδου της μετάδοσης και της απόδοσης της γεννήτριας η_g .

$$P_e = \eta_g P_t \quad W \quad \text{εξ 2-11}$$

Συνδυάζοντας τις εξισώσεις 2-8, 2-9 και 2-10, η ισχύς εξόδου της γεννήτριας συναρτήσει της ισχύς εισόδου της ανεμογεννήτριας δίνεται από τον τύπο:

$$P_e = C_p \eta_m \eta_g P_w \quad W \quad \text{εξ 2-12}$$

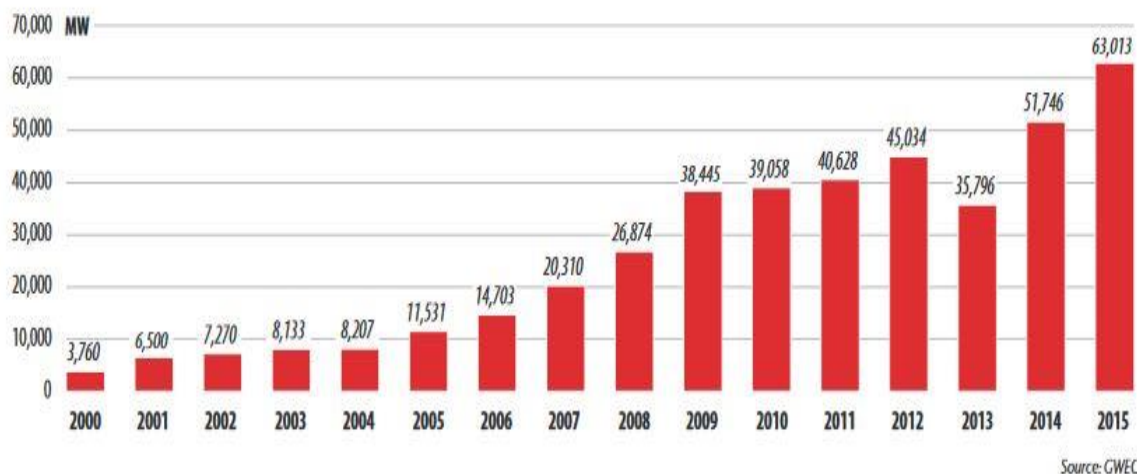
Σε ονομαστική ταχύτητα, η ονομαστική ηλεκτρική ισχύς εξόδου εκφράζεται ως:

$$P_e = C_{pR} \eta_{mR} \eta_{gR} \frac{\rho}{2} A u_R^3 \quad W \quad \text{εξ 2-13}$$

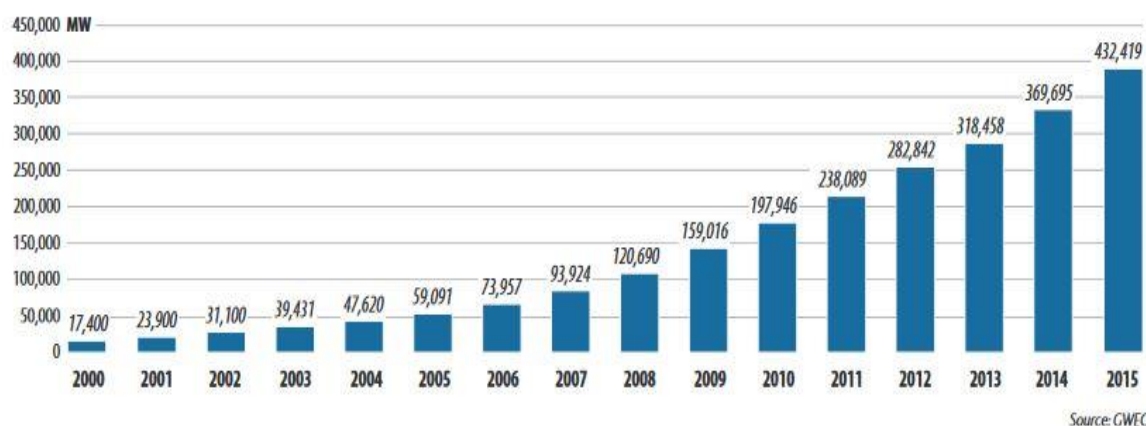
Όπου το γινόμενο $C_{pR} \eta_{mR} \eta_{gR}$ αποτελεί την ολική ονομαστική απόδοση της ανεμογεννήτριας. [12]

2.3 Η κατάσταση της αιολικής ενέργειας σε όλο τον κόσμο

Το 2015 αποτέλεσε μία χρονιά άνευ προηγουμένου για την βιομηχανία αιολικής ενέργειας καθώς η ετήσια εγκατεστημένη ισχύς ξεπέρασε το φράγμα των 60 GW για πρώτη φορά στην ιστορία φτάνοντας τα 63 GW. Το τελευταίο ρεκόρ που είχε επιτευχθεί ήταν τα 51.7 GW που είχαν εγκατασταθεί παγκοσμίως το 2014. Το νέο παγκόσμιο σύνολο αιολικής ενέργειας στο τέλος του 2015 ήταν 432.9 GW.



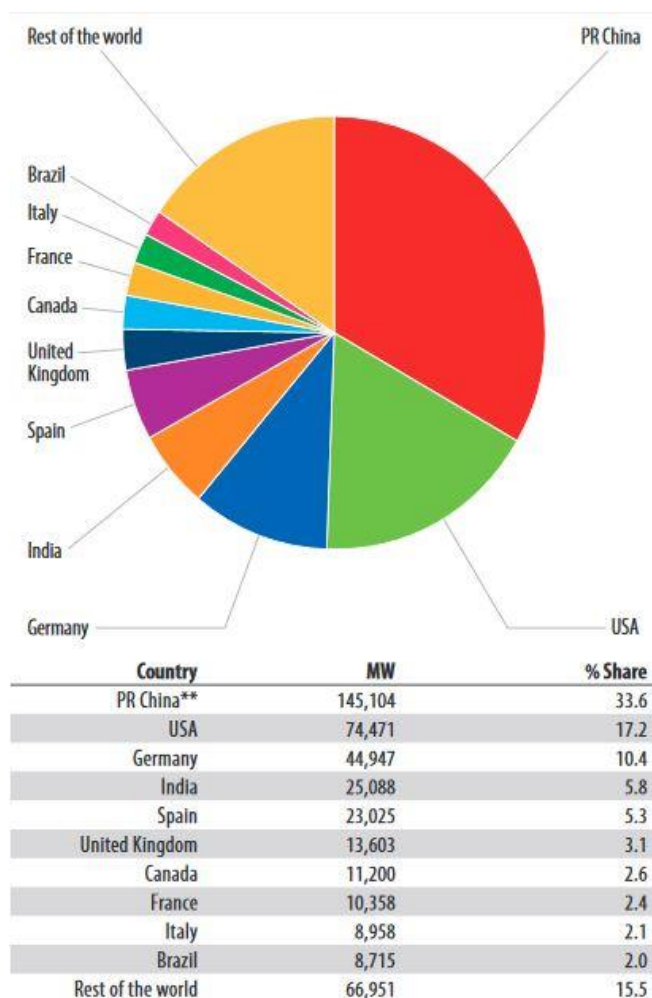
Εικόνα 21. Παγκόσμια ετήσια εγκατεστημένη αιολική ισχύς 2000-2015



Εικόνα 22. Παγκόσμια αθροιστική εγκατεστημένη αιολική ισχύς 2000-2015.

Μέχρι το τέλος του προηγούμενου έτους οι χώρες με εγκατεστημένη ισχύ πάνω από 1,000 MW ήταν 26, συμπεριλαμβάνοντας 17 χώρες από την Ευρώπη, 4 από Ασία και Ειρηνικό Ωκεανό (Κίνα, Ινδία, Ιαπωνία και Αυστραλία), 3 από Βόρεια Αμερική (Καναδά, Μεξικό και Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής), 1 από την Λατινική Αμερική (Βραζιλία) και 1 από Αφρική (Νότια Αφρική). Μεγαλύτερη από 10,000 MW έχουν μόνο 8 χώρες σε ολόκληρο τον κόσμο, η Κίνα (145,362 MW), οι Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής (74,471 MW),

η Γερμανία (44,947 MW), η Ινδία (25,088 MW), η Ισπανία (23,025 MW), ο Καναδάς (11,205 MW) και η Γαλλία (10,358 MW). [13]



Εικόνα 23. Οι 10 χώρες με την μεγαλύτερη συνολικά εγκατεστημένη ισχύ.

2.3.1 Ασία

2.3.1.1 Κίνα

Για 7^η συνεχόμενη χρονιά η Ασία είναι η μεγαλύτερη τοπική αγορά για νέα ανάπτυξη αιολικής ισχύος στον κόσμο με την ικανότητα να ανέρχεται περίπου στα 33.9 GW. Όσο αφορά τις ετήσιες εγκαταστάσεις η Κίνα διατηρεί την πρωτιά καθώς το 2015 προσέθεσε 30.8 GW που αποτελεί και το μεγαλύτερο ποσό για οποιαδήποτε χώρα. Η παραγωγή αιολικής ενέργειας έχει φτάσει στα 186.3 TWh αντιπροσωπεύοντας το 3.3% της συνολικής παραγωγής ηλεκτρισμού. Αυτό αποτελεί εκπληκτικό ρεκόρ ανάπτυξης στον τομέα αιολικής ενέργεια από τη στιγμή που το ποσοστό αυτό ήταν 2.78% το 2014, 2.6% το 2013 και 2% το 2012. Οι περικοπές για τα αιολικά πάρκα χειροτέρεψαν το 2015 καθώς σχεδόν 34

δισεκατομμύρια kWh δεν διανεμήθηκαν στο δίκτυο με αποτέλεσμα να χαθεί το 15% της παραγόμενης αιολικής ενέργειας. [13]

2.3.1.2 Ινδία

Η Ινδία αποτελεί την δεύτερη μεγαλύτερη αγορά αιολικής ενέργειας στην Ασία ενώ το 2015 από πλευράς συνολικών εγκαταστάσεων πέρασε την Ισπανία κατακτώντας την 4^η θέση παγκοσμίως. Οι νέες εγκαταστάσεις αιολικής ενέργειας στην Ινδία ανήλθαν σε 2,623 MW το 2015 φτάνοντας στο σύνολο 25,088 MW. Οι συνολική εγκατεστημένη ισχύ ανανεώσιμων πηγών ενέργειας συνδεδεμένη στο δίκτυο είναι 39,411 MW. [13]

2.3.1.3 Ιαπωνία

Αν και στην υπόλοιπη Ασία δεν υπήρξε μεγάλη πρόοδος το 2015, υπάρχουν κάποια ευνοϊκά σημάδια. Η Ιαπωνέζικη αγορά εγκατέστησε 245 MW το 2015 φτάνοντας συνολικά τα 3,038 MW. Αυτό αντιπροσωπεύει περίπου το 0.5% της συνολικής τροφοδότησης ηλεκτρικής ισχύος και η Ιαπωνία κινείται αργά προς το μετασχηματισμό του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας ώστε να επιτρέψει ένα μείγμα ενέργειας με μεγαλύτερη ποικιλία συμπεριλαμβάνοντας αιολική ενέργεια και άλλες ανανεώσιμες πηγές. Η ανάπτυξη των υπεράκτιων αιολικών πάρκων, και πιο συγκεκριμένα στις ανεμογεννήτριες σε πλωτές πλατφόρμες, αποτελεί μία ελπιδοφόρα προοπτική για το μέλλον. [13]

2.3.1.4 Νότια Κορέα

Παρά το γεγονός ότι η Νότια Κορέα έχει ως προτεραιότητα την πράσινη ανάπτυξη, η αιολική ενέργεια αποτελεί ένα μικρό ποσοστό της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Με 225 MW νέων εγκαταστάσεων το 2015 έχει φτάσει συνολικά τα 835 MW. [13]

2.3.2 Βόρεια Αμερική

2.3.2.1 Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής

Οι Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής αποτελούν την δεύτερη μεγαλύτερη αγορά από την άποψη της συνολικής εγκατεστημένης ισχύς μετά από την Κίνα. Το 2015 προστέθηκαν 4000 καινούριες ανεμογεννήτριες με συνολική ισχύ 8,598 MW φτάνοντας τα 74,471 MW και αυξάνοντας αυτή του 2014 κατά 77%. Από τον άνεμο παράχθηκαν περισσότερες από 190 TWh τον τελευταίο χρόνο αποτελώντας το 4.7% της συνολικής παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας. Για παράδειγμα το 25% του ηλεκτρισμού στην Νότια Ντακότα και στην Αϊόβα προέρχεται από τον άνεμο ενώ σε άλλες 9 πολιτείες το ποσοστό αυτό φτάνει το 12%. Όσο αφορά την ετήσια αύξηση για το 2015, το Τέξας βρίσκεται στην πρώτη θέση

με 3,615 MW και ακολουθεί η Οκλαχόμα με 1,402 MW, το Κάνσας με 799 MW, η Αϊόβα με 524 MW και το Κολοράντο με 399 MW. [13]

2.3.2.2 Καναδάς

Ο Καναδάς με τα καινούρια 1,506 MW που προστέθηκαν το 2015 έγινε η 6^η μεγαλύτερη αγορά φτάνοντας έτσι τα 11.2 GW και αποτελώντας την 7^η μεγαλύτερη αγορά παγκοσμίως σε συνολική εγκατεστημένη ισχύ. Τα έργα αιολικής ενέργειας το 2015 αντιπροσωπεύουν πάνω από 3 δισεκατομμύρια καναδικά δολάρια με αποτέλεσμα το 5% της ζήτητης ηλεκτρικής ενέργειας να καλύπτεται από τον άνεμο. Επίσης τα τελευταία 5 χρόνια παρατηρείται ετήσια ανάπτυξη γύρω στο 23% στην αιολική βιομηχανία. Το μεγαλύτερο μέρος της ανάπτυξης αυτής επικεντρώνεται στις επαρχίες του Οντάριο (871 MW), του Κεμπέκ (397 MW) και της Νέας Σκωτίας (186 MW). [13]

2.3.2.3 Μεξικό

Το Μεξικό εγκατέστησε 713.6 MW το 2015 φτάνοντας συνολικά τα 3,073 MW. Το 2013 τέθηκαν σε ισχύ οι μεταρρυθμίσεις της νομοθεσίας για την ενέργεια ανοίγοντας τον δρόμο για μεγάλη ανάπτυξη στην αγορά της ηλεκτρικής ενέργειας. Η χώρα αντιμετωπίζει μία από τις μεγαλύτερες προκλήσεις στην ενέργεια θέτοντας ένα φιλόδοξο στόχο ετήσιας αύξησης 2,000 MW μέχρι το 2023. [13]

2.3.3 Ευρώπη

Το 2015 εγκαταστάθηκαν σε ολόκληρη την Ευρώπη 13,805 MW αιολικής ισχύς ενώ από αυτά τα 12,800 MW πραγματοποιήθηκαν σε μέλη της Ευρωπαϊκής Ένωσης. Συνολικά υπάρχουν 141.6 GW στην Ευρωπαϊκή Ένωση και 147.8 GW σε όλη την Ευρώπη. Οι εγκαταστάσεις για αιολική ενέργεια ξεπέρασαν οποιαδήποτε άλλη μορφή παραγωγής ενέργειας το 2015 αντιπροσωπεύοντας το 44.2% των συνολικών εγκαταστάσεων, τα φωτοβολταϊκά το 29%, ο άνθρακας το 16% και το αέριο το 6.4%. Επίσης η αιολική ενέργεια ξεπέρασε την υδροηλεκτρική αποτελώντας την 3^η μεγαλύτερη πηγή ενέργειας από την οποία παράγεται το 15.6% της συνολικής ενέργειας. Συνολικά οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας αντιπροσωπεύουν το 77% των νέων εγκαταστάσεων ηλεκτροπαραγωγής το 2015 (22.3 GW από τα 29 GW). Το 2015 επενδύθηκαν 26,4 δισεκατομμύρια ευρώ στην αιολική ενέργεια.

Η Γερμανία έχει αυτόν τον χρόνο 6,013 MW, σχεδόν το 50% των συνολικών εγκαταστάσεων αιολικής ενέργειας της Ευρωπαϊκής Ένωσης ενώ η Πολωνία με 1,266 MW και η Γαλλία με 1,073 MW είναι οι άλλες 2 αγορές που ξεπέρασαν το 1 GW. Η Ευρωπαϊκή Ένωση έχει συνολικά 142 GW εγκατεστημένης αιολικής ισχύος από τα οποία τα 131 GW προέρχεται από χερσαία αιολικά πάρκα και τα υπόλοιπα 11 GW από υπεράκτια. Η Γερμανία παραμένει η χώρα με την μεγαλύτερη εγκατεστημένη ισχύ καθώς έχει 44.9 GW και ακολουθεί η Ισπανία με 23 GW, το Ηνωμένο Βασίλειο με 13.6 GW, η Γαλλία με 10 GW

και η Ιταλία με 9 GW. Τέλος η Σουηδία, η Δανία, η Πολωνία και η Πορτογαλία έχουν περισσότερο από 5 GW η κάθε μία.

Το 2015 οι χερσαίες εγκαταστάσεις μειώθηκαν κατά 7.8% αλλά οι υπεράκτιες υπερδιαπλασιάστηκαν από το 2014 ενώ οι συνολικές εγκαταστάσεις αυξήθηκαν κατά 6.3%. Η υπεράκτια αιολική ενέργεια αποτέλεσε το 1/4 των συνολικών νέων εγκαταστάσεων που έγιναν το 2015 με τις επενδύσεις να φτάνουν τα 13.3 δισεκατομμύρια ευρώ. Οι τρεις χώρες με τις περισσότερες νέες υπεράκτιες εγκαταστάσεις είναι η Γερμανία (2,282 MW), το Ηνωμένο Βασίλειο (572 MW) και η Ολλανδία (180 MW). Παρ' όλα αυτά το Ηνωμένο Βασίλειο με τα 5,067 MW εξακολουθεί να έχει την μεγαλύτερη εγκατεστημένη αιολική ισχύ που προέρχεται από υπεράκτια αιολικά πάρκα και ακολουθεί η Γερμανία με 3,295 MW, η Δανία με 1,271 MW, το Βέλγιο με 712 MW, η Ολλανδία με 427 MW και η Σουηδία με 202 MW.

Το αποδυναμωμένα νομοθετικά πλαίσια σε συνδιασμό με την τρέχουσα οικονομική κρίση και τα μέτρα λιτότητας που εφαρμόζονται σε όλη την Ευρώπη εξακολουθούν να εμποδίζουν την ανάπτυξη της βιομηχανίας της αιολικής ενέργειας. Αν και το έτος που ακολουθεί αναμένεται να είναι δύσκολο, το γεγονός ότι οι επενδύσεις απομακρύνονται από τα ορυκτά καύσιμα θα μπορούσε να ενισχύσει τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας ακόμα και σε αυτή την δύσκολη για την Ευρώπη περίοδο. [13]

2.3.4 Λατινική Αμερική

Το 2015 αποτέλεσε μία πολύ καλή χρονιά για την Λατινική Αμερική και την Καραϊβική καθώς εγκαταστάθηκαν 3,652 MW φτάνοντας συνολικά τα 12.2 GW. Η Λατινική Αμερική έχει ξεκινήσει να αναπτύσει σημαντικά την βιομηχανία της αιολικής ενέργειας για να συμπληρώσει τις πλούσιες πηγές υδροηλεκτρισμού και βιομάζας που διαθέτει. Η ζήτηση καθαρής ενέργειας, ενισχυμένη από τις ανησυχίες για ενεργειακή ασφάλεια και ποικιλία τροφοδότησης θα προωθήσει την ανάπτυξη του αιολικού δυναμικού στην Λατινική Αμερική και στην Καραϊβική. Για 4^η συνεχόμενη χρονιά η αγορά της Λατινικής Αμερικής εγκατέστησε πάνω από 1 GW νέας αιολικής ισχύς. [13]

2.3.4.1 Βραζιλία

Η Βραζιλία κατέχει την πρωτιά στην αγορά αιολικής ενέργειας με 2,754 MW νέες εγκαταστάσεις φτάνοντας συνολικά τα 8,715 MW. Αν και πολλά έργα ήταν έτοιμα δεν μπορούσαν να συνδεθούν όλα στο δίκτυο μέχρι το τέλος του 2015. Συνεχίζει πάντως να αποτελεί την πιο πολλά υποσχόμενη αγορά όσο αφορά τα χερσαία αιολικά πάρκα μέχρι το 2020. [13]

2.3.4.2 Ουρουγουάη

Η Ουρουγουάη έχει ως στόχο την παραγωγή του 38% της συνολικής της ενέργειας από τον άνεμο μέχρι το τέλος του 2017 και εγκατέστησε σχεδόν 316 MW φτάνοντας συνολικά

τα 845 MW. Για αρκετά χρόνια υπήρχε ανταλλαγή ενέργειας με τους γείτονες της, Βραζιλία και Αργεντινή. Το 2013 όμως για πρώτη φορά την τελευταία 10ετία δεν εισήγαγε ηλεκτρισμό πουλώντας 21 εκατομμύρια δολάρια ηλεκτρισμού στην Αργεντινή. [13]

2.3.4.3 Υπόλοιπες χώρες

Η Χιλή εγκατέστησε 169 MW φτάνοντας συνολικά σχεδόν το 1 GW, ο Παναμάς 235 MW φτάνοντας τα 270 MW, η Αργεντινή 8 MW με σύνολο 279 MW και η Καραϊβική έφτασε συνολικά τα 250 MW. [13]

2.3.5 Ειρηνικός Ωκεανός

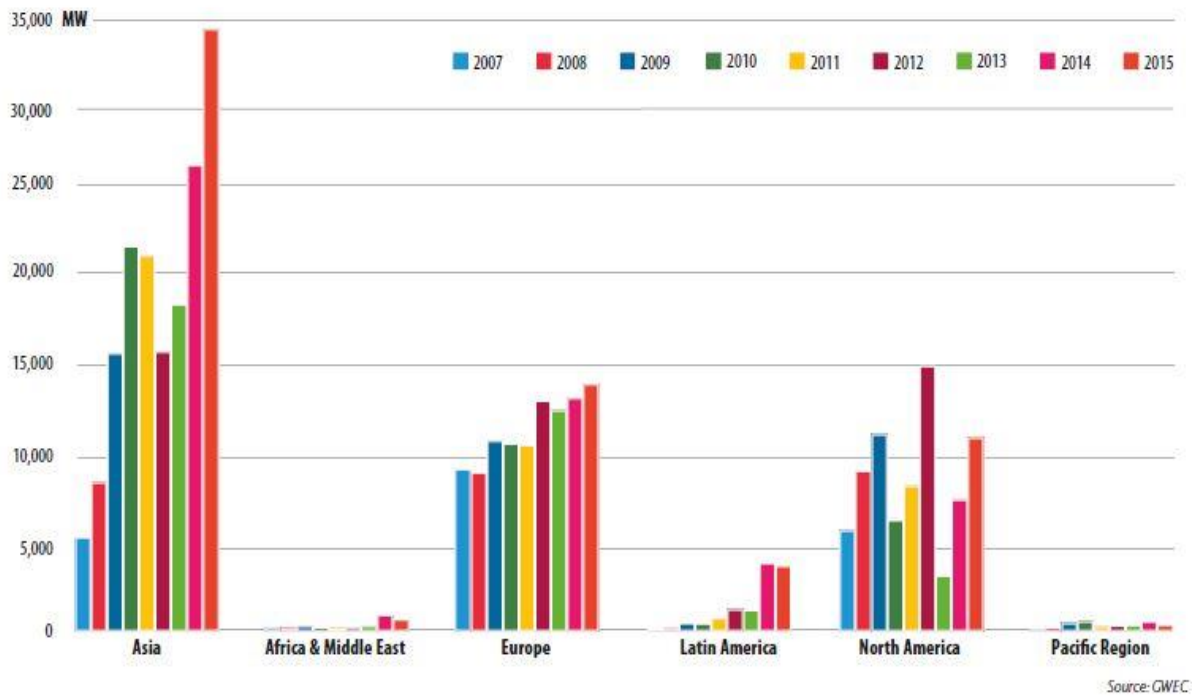
Στις χώρες του Ειρηνικού Ωκεανού εγκαταστήθηκαν πάνω από 4.8 GW το τελευταίο έτος. Η Αυστραλία προσέθεσε 380 MW το 2015 ανεβάζοντας την συνολική εγκατεστημένη ισχύ στα 4,187 MW. Ο προηγούμενος προθυπουργός της Αυστραλίας δεν υποστήριζε τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας προκαλώντας προβλήματα στον τομέα αυτό. Πλέον με την νέα κυβέρνηση και την νομοθεσία που έχει εισηγηθεί έχει στραφεί και πάλι η χώρα στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας με την επαρχία της Νότιας Αυστραλίας να δεσμεύεται ένα νέο στόχο μηδενικών εκπομπών μέχρι το 2050. Το κράτος των Σαμόα εγκατέστησε 550 kW νέας αιολικής ισχύς αποτελώντας το πρώτο έργο αιολικής ενέργειας στις Νήσους του Ειρηνικού. Τέλος στη Νέα Ζηλανδία και τις υπόλοιπες χώρες του Ειρηνικού Ωκεανού δεν άλλαξε κάτι. [13]

2.3.6 Αφρική και Μέση Ανατολή

Στην Αφρική και στην Μέση Ανατολή παρουσιάστηκε αύξηση της τάξης των 953 MW φτάνοντας συνολικά τα 3,489 MW. Το αιολικό δυναμικό της Αφρικής είναι καλύτερο κοντά στις ακτές και στα ανατολικά υψίπεδα αλλά μέχρι το 2014 η αιολική ενέργεια είχε αναπτυχθεί σε μεγάλη κλίμακα στη Βόρεια και Ανατολική Αφρική. Η Νότιος Αφρική εγκατέστησε 483 MW νέας ισχύος φτάνοντας συνολικά τα 1,053 MW αποτελώντας την αρχή μιας πολλά υποσχόμενης αγοράς καθώς μόλις σε 2 χρόνια ξεπέρασε τα 1 GW. Στην Αίγυπτο δημιουργήθηκε και συνδέθηκε ένα νέο αιολικό πάρκο με 100 ανεμογεννήτριες και συνολική ισχύ 200 MW αποτελώντας ένα από τα μεγαλύτερα αιολικά πάρκα της Αφρικής. Έτσι η Αίγυπτος έφτασε συνολικά τα 810 MW και στοχεύει μέχρι το 2030 το 20% της συνολικής της ενέργειας να προέρχεται από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.

Το 2015 αποτέλεσε μία καλή χρονιά και για την Αιθιοπία καθώς με 153 MW έφτασε τα 324 MW συνολικής εγκατεστημένης αιολικής ισχύος. Η Ιορδανία κατασκεύασε το πρώτο μεγάλο της αιολικό πάρκο ισχύος 117 MW το οποίο αποτελεί το πρώτο έργο σε μεγάλη κλίμακα στην Μέση Ανατολή. Στο τέλος του 2015 πάνω από το 99% των συνολικών εγκαταστάσεων αιολικής ενέργειας επεκτάθηκαν σε 11 χώρες, τη Νότια Αφρική (1,053 MW), το Μαρόκο (787 MW), την Αίγυπτο (810 MW), την Τυνησία (245 MW), την Αιθιοπία

(324 MW), την Ιορδανία (119 MW), το Ιράν (91 MW), το Πράσινο Ακρωτήριο (24 MW), την Κένυα (19 MW), την Αλγερία (10 MW) και το Ισραήλ (6.25 MW). [13]



Εικόνα 24. Ετήσια εγκατεστημένη αιολική ισχύς ανά ήπειρο.

3 Ανεμογεννήτριες και είδη ανεμογεννητριών

Ανεμογεννήτρια είναι η συσκευή που μετατρέπει την κινητική ενέργεια του ανέμου σε ηλεκτρισμό. Η σύγχρονη τεχνολογία και η ανάπτυξη των ανεμόμυλων για πάνω από μία χιλιετία έχει ως αποτέλεσμα τη μορφή και την μεγάλη ποικιλία των σύγχρονων ανεμογεννητριών. Οι πιο μικρές ανεμογεννήτριες χρησιμοποιούνται για εφαρμογές όπως είναι η φόρτιση μπαταριών για βοηθητική τροφοδότηση σκαφών, τροχόσπιτων ή προειδοποιητικά σήματα της κυκλοφορίας. Οι ελαφρώς μεγαλύτερες ανεμογεννήτριες μπορούν να χρησιμοποιηθούν συνεισφέροντας στην οικιακή τροφοδοσία καθώς και για την πώληση της επιπλέον ενέργειας στο πάροχο του δικτύου μέσω του ηλεκτρικού δικτύου. Τέλος, οι συστημικές μεγάλων ανεμογεννητριών, γνωστές και ως αιολικά πάρκα, αποτελούν μία όλο και πιο σημαντική πηγή ανεύσιμης ενέργειας και χρησιμοποιούνται από πολλές χώρες για μέρος της παραγωγής της ηλεκτρικής τους ενέργειας προκειμένου να μειωθεί η εξάρτησή τους από τα ορυκτά καύσιμα.

Ανάλογα με τον τρόπο που περιστρέφεται ο στρόβιλος οι ανεμογεννήτριες χωρίζονται σε 2 βασικές κατηγορίες. Στις ανεμογεννήτριες που περιστρέφονται γύρω από έναν οριζόντιο άξονα και ονομάζονται ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα (Horizontal Axis Wind Turbine-HAWT) και σε αυτές που περιστρέφονται γύρω από ένα κάθετο άξονα, γνωστές ως ανεμογεννήτριες κάθετου άξονα (Vertical Axis Wind Turbine-VAWT). [14] [15]

3.1 Ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα

Οι ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα είναι το πιο συνηθισμένο είδος ανεμογεννητριών που χρησιμοποιούνται στο εμπόριο. Μοιάζουν πολύ με τους παραδοσιακούς ανεμόμυλους τα πτερύγια των οποίων μοιάζουν με έλικα και περιστρέφονται γύρω από ένα άξονα που είναι παράλληλος με το έδαφος.



Εικόνα 25. Ανεμογεννήτρια οριζόντιου άξονα

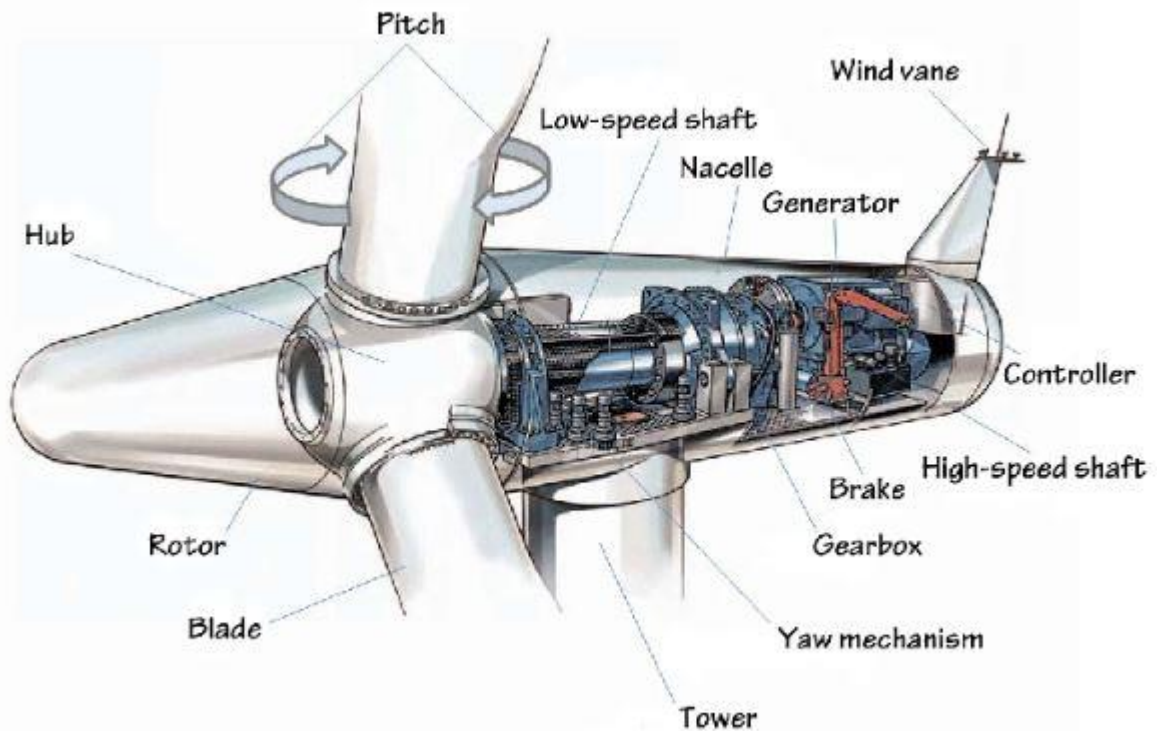
Οι ανεμογεννήτριες αυτές έχουν τον κύριο άξονα του ρότορα και την γεννήτρια στην κορυφή του πύργου και πρέπει να είναι τοποθετημένες στην διεύθυνση του ανέμου. Στις μικρές ανεμογεννήτριες αυτό επιτυγχάνεται με την χρήση ενός απλού ανεμοδείκτη ενώ στις μεγάλες χρησιμοποιούνται αισθητήρες συνδεδεμένοι με ένα σερβοκινητήρα που γυρίζει την ανεμογεννήτρια προς τον άνεμο. Λόγω του μεγάλου μεγέθους τους είναι δύσκολο να χρησιμοποιηθούν σε κατοικημένες περιοχές. Ανάλογα με την διάμετρο του ρότορα, το ύψος του πύργου και την απόδοσή τους, το ποσό ισχύος που παράγουν κυμαίνεται από 1 kW μέχρι 20 MW. [15] [16]

3.1.1 Είδη ανεμογεννητριών οριζόντιου άξονα

Από τη στιγμή που ο πύργος προκαλεί αναταράξεις στον άνεμο συνήθως οι ανεμογεννήτριες βρίσκονται και λειτουργούν αντίθετα στην διεύθυνση του ανέμου (upwind turbines). Τα πτερύγιά τους είναι κατασκευασμένα από άκαμπτο υλικό και βρίσκονται σε υπολογίσιμη απόσταση μπροστά από τον πύργο ώστε να μην ταλαντώνονται από τους πολύ ισχυρούς ανέμους αλλά και όταν συμβαίνει αυτό να μην υπάρχει περίπτωση να συγκρουστούν με τον πύργο. Υπάρχουν και οι ανεμογεννήτριες που λειτουργούν στην διεύθυνση του αέρα (down wind turbines) οι οποίες δεν χρειάζονται επιπλέον μηχανισμούς για τον προσανατολισμό τους ενώ τα πτερύγιά τους μπορούν να κάμπτονται μειώνοντας έτσι το εμβαδό περιστροφής τους και συνεπώς και την αντίσταση του ανέμου. Όμως οι διαταραχές του πύργου (tower shadow effects) στον άνεμο αποτελεί ένα μεγάλο εμπόδιο και για το λόγο αυτό χρησιμοποιούνται σπάνια.

Ανάλογα με τον αριθμό των πτερυγίων τους οι ανεμογεννήτριες διακρίνονται σε επιμέρους κατηγορίες. Υπάρχουν ανεμογεννήτριες με ένα πτερύγιο οι οποίες χρησιμοποιούνται σπάνια εξαιτίας της επίδρασης του πύργου. Εκτός αυτού χρειάζονται αντίβαρο στην άλλη πλευρά του πτερυγίου και έχουν μικρότερη σταθερότητα. Το πλεονέκτημά τους είναι το χαμηλό κόστος και βάρος. Οι ανεμογεννήτριες 2 πτερυγίων οι οποίες επίσης εξοικονομούν κόστος και βάρος, απαιτούν πιο περίπλοκο σχεδιασμό λόγω των διαταραχών του ανέμου και είναι λιγότερο σταθερές. Οι σύγχρονες ανεμογεννήτριες αποτελούνται συνήθως από 3 πτερύγια καθώς με αυτή τη δομή έχουν μεγαλύτερη αντοχή στους σφοδρούς ανέμους, μικρότερη επίδραση από τον πύργο και μεγαλύτερη απόδοση. Υπάρχουν και ανεμογεννήτριες με περισσότερα πτερύγια. Γενικότερα, οι ανεμογεννήτριες με πολλά πτερύγια ονομάζονται ανεμογεννήτριες χαμηλής ταχύτητας καθώς όταν λειτουργούν σε χαμηλή ταχύτητα αποκτούν υψηλή αναλογία χρησιμοποίησης του ανέμου και μεγάλη ροπή ενώ αυτές με λίγα πτερύγια ονομάζονται υψηλής ταχύτητας καθώς για να το επιτύχουν αυτό θα πρέπει να λειτουργούν με μεγάλη ταχύτητα και για το λόγο αυτό τα πτερύγιά τους είναι και ελαφρύτερα. [17] [16] [14]

3.1.2 Μέρη ανεμογεννήτριας οριζόντιου άξονα



Εικόνα 26. Η εσωτερική δομή της ανεμογεννήτριας

3.1.2.1 Πτερύγια

Τα πτερύγια των ανεμογεννητριών χρησιμοποιούνται για να εξάγουν την κινητική ενέργεια του ανέμου. Είναι σχεδιασμένα ώστε να έχουν αεροδυναμική διατομή και εκμεταλλεύονται τον άνεμο με την δύναμη της ανύψωσης που δημιουργείται λόγω της διαφοράς πίεσης που υπάρχει μεταξύ των πλευρών των πτερυγίων. Για μέγιστη απόδοση είναι κωνοειδή και στρέφονται αλλάζοντας γωνία.

Συνηθιζόταν να είναι κατασκευασμένα από ξύλο καθώς το ξύλο έχει φυσική σύνθετη δομή χαμηλής πυκνότητας και καλή αντοχή. Διαθέτει όμως και αρκετά μειονεκτήματα όπως είναι η ευαισθησία στην υγρασία και το μεγάλο κόστος επεξεργασίας με αποτέλεσμα να αναζητούνται νέα υλικά και νέες τεχνικές για να ξεπεραστούν αυτά τα προβλήματα. Τα πτερύγια των περισσότερων μεγάλων ανεμογεννητριών είναι κατασκευασμένα από ίνες γυαλιού ενισχυμένες με πλαστικό (Carbon Fibre Reinforced Plastic-CFRP) όπως είναι ο πολυεστέρας ή η εποξική. Όταν χρησιμοποιείται η εποξική σημειώνεται πλεονέκτημα στο βάρος μέχρι και 30% σε σύγκριση με την φτηνότερη πολυεστερική ρυτίνη. Παρά το γεγονός ότι το CFRP θεωρείται υλικό αυστηρά για εφαρμογές της αεροδιαστημικής και είναι πολύ ακριβό για να χρησιμοποιείται στις ανεμογεννήτριες, με τη χρήση αποτελεσματικών τεχνικών παραγωγής κάποιοι κατασκευαστές παράγουν οικονομικά αποδοτικά πτερύγια.

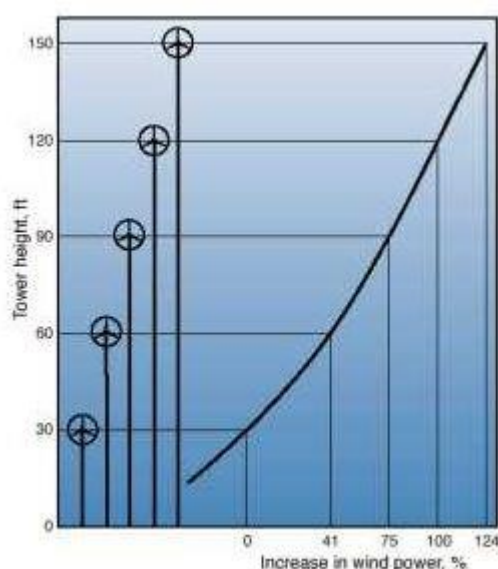
Στην αρχή, τα περισσότερα πτερύγια κατασκευάστηκαν με μεθόδους αεροδυναμικής που χρησιμοποιούνταν για τα αεροσκάφη με αποτέλεσμα να μην έχουν βελτιστοποιηθεί

για χρήση σε ανεμογεννήτριες. Τα τελευταία χρόνια βρίσκονται σε εξέλιξη βελτιωμένοι τομείς αεροδυναμικής για ανεμογεννήτριες. Για να αποκτήσει αποδοτικότητα η λεπίδα θα πρέπει να είναι αεροδυναμική κωνική και να περιστρέφεται. Μόνο έτσι θα είναι σε θέση να συλλαμβάνει την περισσότερη δυνατή ενέργεια που αναλογεί στην εκάστοτε ταχύτητα του ρότορα καθώς. Ένα σημαντικό πρόβλημα με τα πτερύγια των ανεμογεννητριών είναι ότι ακόμα και σε σχετικά χαμηλές ταχύτητες ανέμου το ενδότερο μέρος κάποιων πτερυγίων καθυστερεί.

Οι ζημιές από τους κεραυνούς για τις ανεμογεννήτριες αποτελεί ένα σοβαρό πρόβλημα για τις εταιρίες ηλεκτρικής ενέργειας από την στιγμή που οι πύργοι γίνονται όλο και μεγαλύτεροι. Ακόμα μεγαλύτερο πρόβλημα αντιμετωπίζουν τα υπεράκτια αιολικά πάρκα τα οποία είναι ακόμα πιο εκτεθειμένα στον κίνδυνο των κεραυνών. Έρευνες για τις ζημιές που προκάλεσαν οι κεραυνοί στις ανεμογεννήτριες στην Δανία κατά τα έτη 1985-1997 έδειξαν ότι προκαλούσαν 4.1 σφάλματα ανά 100 χρόνια. Το 50% των ζημιών αυτών σχετίζονται με το σύστημα ελέγχου, το 20% το σύστημα ενέργειας και το 18% με τα μηχανικά εξαρτήματα. Η αντικεραυνική προστασία των ανεμογεννητριών μπορεί να επιτευχθεί με πολλούς τρόπους αλλά η πιο κοινή ιδέα είναι να οδηγήσει τον κεραυνό από την κορυφή των πτερυγίων στον άξονα και από εκεί μέσω του ατράκτου και του πύργου στο έδαφος. [18] [19] [17]

3.1.2.2 Πύργος

Ο πύργος στην κορυφή του στηρίζει την άτρακτο και τον κόμβο του ρότορα. Είναι κατασκευασμένοι από σωληνοειδή χάλυβα, σκυρόδεμα ή πλέγμα χάλυβα. Το ύψος του πύργου είναι πολύ σημαντικό για τον σχεδιασμό των ανεμογεννητριών. Επειδή η ταχύτητα του ανέμου αυξάνεται όσο αυξάνεται το ύψος και οι διαταραχές μειώνονται, ψηλότεροι πύργοι επιτρέπουν στην ανεμογεννήτρια να συλλάβει περισσότερη ενέργεια και να παράγει περισσότερο ηλεκτρισμό.



Εικόνα 27. Η αύξηση της ισχύς εξόδου συναρτῆσει του ὕψους των ανεμογεννητριών.

Υπάρχουν διαφορετικοί τύποι πύργων ανεμογεννητριών με τους 2 πρώτους να είναι οι πιο συνηθισμένοι στο εμπόριο:

- Οι σωληνοειδείς πύργοι (Tubular Tower) που είναι κατασκευασμένοι από τυλιγμένες πλάκες χάλυβα συγκολλημένες με πέλματα πάνω κάτω. Έχουν θύρες για την τοποθέτηση κάθετων σκαλών που επιτρέπουν την πρόσβαση στα καλώδια τροφοδοσίας και στο μηχανισμό εκτροπής. Υπάρχουν επίσης σκάλες στο εξωτερικό του πύργου για την συντήρηση και άλλους ελέγχους στο άτρακτο.
- Ο πύργος πλέγμα (Lattice Tower) που κατασκευάζεται με άριστα διαμορφωμένους ράβδους χάλυβα που έχουν τοποθετηθεί μαζί για να σχηματίσουν ένα πλέγμα. Οι πύργοι αυτοί είναι πολύ ισχυροί και φθηνοί ενώ παράλληλα η μεταφορά και η ανέγερσή τους αποτελεί εύκολη διαδικασία.
- Ο καλωδιωτός πύργος (Guyed Tower) που αποτελεί μία πολύ ισχυρή και οικονομική κατασκευή αν εγκατασταθεί σωστά. Το μειονέκτημά τους είναι ότι απαιτούν περισσότερο χώρο γύρω από τον πύργο.
- Οι πύργοι με κλίση προς τα πάνω (Tilt up Tower) οι οποίοι χρησιμοποιούνται για αιολική ενέργεια καταναλωτών. Οι ανεμογεννήτριες αυτές έχουν σύστημα κλειδώματος και ενώ λειτουργούν ο στρόβιλος είναι κλειδωμένος. Είναι εύκολο να κλειδωθούν και να τις κατέβουν προς το έδαφος για επισκευή. [17]

3.1.2.3 Κόμβος του ρότορα (Hub)

Ο κόμβος αυτός συνδέει τα πτερύγια της ανεμογεννήτριας με τον κύριο άξονα. Τα πτερύγια είναι βιδωμένα στα πέλματα του hub ενώ οι οπές του μπορούν να επιμηκυνθούν ώστε να μπορεί να προσαρμοστεί η γωνία του ακροπτερυγίου. Θα πρέπει να είναι ιδιαίτερα ανθεκτικό στην φθορά του μετάλλου πράγμα πολύ δύσκολο σε μία συγκολλημένη κατασκευή. Ο τύπος του μπορεί να είναι άκαμπτος ή να ταλαντεύεται. Το hub ενός ρότορα τριών πτερυγίων είναι σχετικά άκαμπτο και δεν συμβάλλει στην συνολική δυναμική συμπεριφορά. Αν χρησιμοποιείται ταλαντούμενο hub, που είναι κοινό για ανεμογεννήτριες με 2 πτερύγια, η δυναμική της ανεμογεννήτριας εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τις ιδιότητες απόσβεσης και δυσκαμψίας του ταλαντούμενου συστήματος. [19]

3.1.2.4 Άτρακτος

Η άτρακτος περιλαμβάνει τα βασικά συστατικά της ανεμογεννήτριας όπως είναι το κιβώτιο ταχυτήτων και η γεννήτρια. Είναι κατασκευασμένη από χάλυβα ενώ στις σύγχρονες ανεμογεννήτριες το προσωπικό μπορεί να εισέλθει στην άτρακτο μέσω του πύργου. Επειδή είναι άκαμπτη σε σχέση με τα άλλα συστατικά δεν συμβάλλει σημαντικά στη δυναμική συμπεριφορά της ανεμογεννήτριας. Όμως η άτρακτος περιέχει και τα ρουλεμάν του άξονα και της εκτροπής η ακαμψία των οποίων συμβάλλει σημαντικά στην δυναμική της ανεμογεννήτριας. [19]

3.1.2.5 Σύστημα πέδησης

Η ισχύς του ανέμου είναι ανάλογη με τον κύβο της ταχύτητας του ανέμου. Επομένως κατά τη διάρκεια ισχυρών ανέμων οι δυνάμεις πρέπει να ελέγχονται προκειμένου να επιτευχθεί ομαλή λειτουργία. Συνήθως υπάρχουν τουλάχιστον 2 διαφορετικά συστήματα πέδησης ικανά να επαναφέρουν την ανεμογεννήτρια σε ασφαλή κατάσταση σε περιπτώσεις ισχυρών ανέμων, απώλειας της σύνδεσης με το δίκτυο ή άλλων καταστάσεων έκτακτης ανάγκης.

- Αεροδυναμικά φρένα: Λειτουργούν καθορίζοντας το βήμα της γωνίας των πτερυγίων ή γυρνώντας το ακροπτερύγιο προκειμένου να αποφευχθούν ισχυρές αεροδυναμικές δυνάμεις. Είναι προτιμότερα από τα μηχανικά φρένα καθώς η πίεση που προκαλούν στα μέρη που λειτουργούν είναι μικρότερη. Τα συστήματα είναι υδραυλικά ή λειτουργούν με ελατήρια για να μπορούν να ανταποκριθούν και σε περίπτωση διακοπής του ηλεκτρικού ρεύματος.
- Μηχανικά φρένα: Είναι εξοπλισμένα στον άξονα μετάδοσης ώστε να μπορούν να σταματήσουν πλήρως τον ρότορα. Βρίσκονται μεταξύ του ρότορα και του κιβωτίου ταχυτήτων σε περίπτωση αποτυχίας του δεύτερου. Ωστόσο η ροπή στον άξονα χαμηλής ταχύτητας μπορεί να είναι πολύ μεγάλη. Έτσι οι κατασκευαστές τοποθετούν τα φρένα συχνά μεταξύ του κιβωτίου ταχυτήτων και της γεννήτριας. Το μηχανικό φρένο είναι ένα δισκόφρενο από χάλυβα και όπως και τα αεροδυναμικά φρένα είναι ένα σύστημα ασφαλείας σε περίπτωση βλάβης. Για τη ενεργοποίηση των φρένων μπορεί να χρησιμοποιηθεί η υδραυλική πίεση λαδιού ή ένα ισχυρό ελατήριο σταματώντας έτσι την ανεμογεννήτρια. [19] [18]

3.1.2.6 Κιβώτιο ταχυτήτων

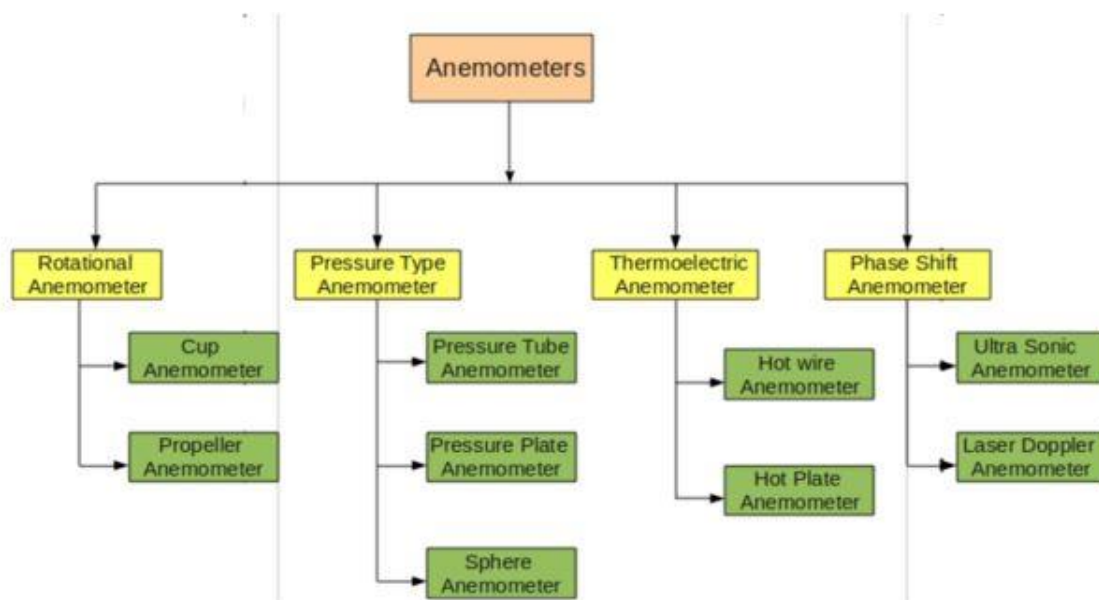
Το κιβώτιο ταχυτήτων απαιτείται για να επιταχύνει την ταχύτητα περιστροφής του άξονα χαμηλής ταχύτητας πριν συνδεθεί με την γεννήτρια. Η ταχύτητα των πτερυγίων περιορίζεται από την απόδοση και από περιορισμούς των μηχανικών ιδιοτήτων του στροβίλου και των άλλων υποστηρικτικών δομών. Η αναλογία του κιβωτίου ταχυτήτων εξαρτάται από τον αριθμό των πόλων και από τον τύπο της γεννήτριας. Για παράδειγμα μία γεννήτρια σταθερών στροφών έχει κιβώτιο ταχυτήτων αναλογίας 50:1 ώστε να δώσει ακριβή συχνότητα. Κατασκευαστικά το κιβώτιο ταχυτήτων θα πρέπει να αντέχει διάφορα δυναμικά φορτία καθώς υπάρχουν σταθερά και μεταβλητά φορτία που συμβάλλουν στην κόπωση και στην φθορά της γεννήτριας. [19] [17]

3.1.2.7 Μηχανισμός εκτροπής

Είναι αναγκαίο να ευθυγραμμίζεται ο άξονας του ρότορα με τον άνεμο προκειμένου να εξάγεται όσο το δυνατόν περισσότερη ενέργεια από τον άνεμο χρησιμοποιώντας ένα ηλεκτρικό ή υδραυλικό σύστημα. Η μονάδα εκτροπής αντιδράει σε σήματα που δέχεται όπως για παράδειγμα από ένα ανεμοδείκτη που βρίσκεται στην κορυφή της ατράκτου. Είναι υπεύθυνος για την ομαλή σύνδεση μεταξύ της ατράκτου και του πύργου. Σε κάποιες περιπτώσεις η ανεμογεννήτρια στρέφεται προς την ίδια κατεύθυνση για πολύ ώρα με αποτέλεσμα να στρίβουν και τα καλώδια που μεταφέρουν το ρεύμα από την γεννήτρια προς τον πύργο. Έτσι χρησιμοποιούνται συσκευές που μετράνε τον αριθμό των στροφών των καλωδίων ώστε να μπορούν να επανέλθουν στην αρχική τους θέση. [17] [18]

3.1.2.8 Ανεμόμετρο

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, ο πιο σημαντικός παράγοντας για τον καθορισμό της ισχύς που περιέχεται στον άνεμο είναι η ταχύτητα του. Η συσκευή που χρησιμοποιείται για την μέτρηση της ταχύτητας του ανέμου ονομάζεται ανεμόμετρο και τοποθετείται συνήθως στην κορυφή της ατράκτου. Όπως φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα υπάρχουν πολλά είδη ανεμόμετρων ανάλογα με τον τρόπο που λειτουργούν, τα περιστροφικά, τα θερμοηλεκτρικά και αυτά που λειτουργούν με πίεση ή αλλαγή φάσης.



Εικόνα 28. Είδη ανεμόμετρων.

Επίσης τα ανεμόμετρα έχουν και ανεμοδείκτες που προσδιορίζουν την κατεύθυνση του ανέμου και επικοινωνούν με το σύστημα εκτροπής ώστε να στρέψουν την ανεμογεννήτρια κατάλληλα και να εκμεταλλευτεί στο μέγιστο την ισχύ του ανέμου. [17]

3.1.2.9 Γεννήτρια

Η γεννήτρια είναι ο μηχανισμός που είναι υπεύθυνος για την μετατροπή της μηχανικής ενέργειας σε ηλεκτρική. Επειδή η ισχύς του ανέμου έχει μεγάλες διακυμάνσεις και η ισχύς εξόδου της γεννήτριας μπορεί να πέσει πολύ γρήγορα κάτω από το επιθυμητό όριο είναι σημαντικό να λαμβάνεται υπόψιν η σχέση μεταξύ της ταχύτητας του ανέμου και της επιθυμητής ισχύς. Έχουν αναπτυχθεί αρκετές τεχνικές ώστε να βελτιωθεί η απόδοση των γεννητριών ιδιαίτερα για χαμηλές ταχύτητες περιστροφής.

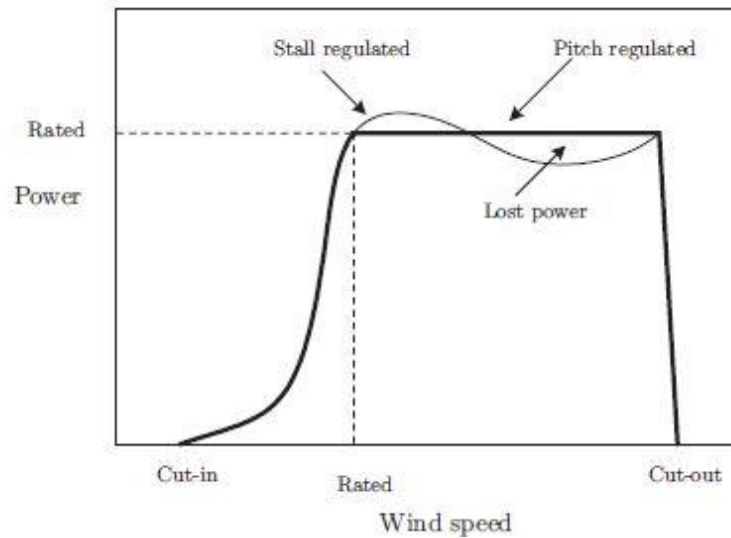
Οι πιο συνηθισμένες γεννήτριες που χρησιμοποιούνται στις ανεμογεννήτριες είναι οι ασύγχρονες ή γεννήτριες επαγωγής. Ένας άλλος όχι και τόσο συνηθισμένος τύπος γεννητριών είναι οι σύγχρονες γεννήτριες οι οποίες χρησιμοποιούνται στις *directly driven* γεννήτριες. Το πλεονέκτημα των γεννητριών επαγωγής είναι η μηχανική τους απλότητα, η δύναμή τους και το κλειστό σύστημα ψύξης ενώ το γεγονός ότι ο στάτης θα πρέπει να μαγνητιστεί από το δίκτυο για να ξεκινήσει αποτελεί ένα μεγάλο μειονέκτημα. Οι σύγχρονες γεννήτριες είναι πιο περίπλοκες, έχουν πιο πολλά μέρη και ψύχονται εσωτερικά με τον περιβάλλον αέρα. Μπορούν να λειτουργήσουν χωρίς να είναι συνδεδεμένες με το δίκτυο σε αντίθεση με τις επαγωγικές που χρειάζονται επιπλέον εξαρτήματα για να λειτουργήσουν σε ένα αυτόνομο σύστημα. [18] [19]

3.1.2.10 Έλεγχος ισχύος

Οι ανεμογεννήτριες όπως είναι λογικό, είναι σχεδιασμένες να παράγουν ηλεκτρική ενέργεια με όσο το δυνατόν μικρότερο κόστος. Από τη στιγμή λοιπόν που η ταχύτητα του ανέμου σπάνια ξεπερνάει τα 15 m/s έχουν σχεδιαστεί έτσι ώστε να παράγουν την μέγιστη ισχύ σε ταχύτητες 10-15 m/s. Καθώς η ταχύτητα του ανέμου αυξάνεται και ξεπερνάει την επιθυμητή ταχύτητα της ανεμογεννήτριας ο ρότορας περιορίζει την παραγόμενη ισχύ από τον άνεμο ώστε να διατηρηθεί σταθερή η ροπή μετάδοσης. Για να αποφευχθούν οι καταπληκτικές ή οι ζημιές στην γεννήτρια όταν η ταχύτητά της φτάσει μια προκαθορισμένη τιμή, περίπου στα 25 m/s, η λειτουργία της διακόπτεται. Υπάρχουν 2 βασικοί μέθοδοι ελέγχου, ο *pitch control* και ο *stall control*.

- Στις ανεμογεννήτριες με *pitch control* τα πτερύγια τοποθετούνται πάνω στο κόμβο του ρότορα με στηρίγματα τα οποία μπορούν να γυρνάνε. Στους ισχυρούς ανέμους το βήμα της γωνίας των πτερυγίων ρυθμίζεται συνεχώς μακριά από το σημείο *stall* ώστε να μειώνεται η δύναμη ανύψωσης και συνεπώς να καθορίζεται η παραγόμενη ισχύς. Ο χρόνος αντίδρασης είναι πολύ κρίσιμος ώστε να ακολουθήσουν τις διακυμάνσεις του ανέμου και να αποφευχθούν υπέρμετρες φορτίσεις.
- Ο *stall control* βασίζεται στα εγγενή χαρακτηριστικά της μηχανής της ανεμογεννήτριας όπου τα αεροδυναμικά χαρακτηριστικά του δρομέα περιορίζουν την ροπή που παράγεται στους ισχυρούς ανέμους. Η γεωμετρία του πτερυγίου έχει σχεδιαστεί έτσι ώστε να δημιουργεί διαταραχές από την πλευρά του ανέμου όταν αυτός γίνεται ισχυρός. Σε μία τέτοια ανεμογεννήτρια το πτερύγιο είναι ελαφρώς γυρισμένο ώστε το *stall* να γίνει προοδευτικά και

όσο πιο ισχυρός είναι ο άνεμος τόσο μεγαλύτερη είναι η επιφάνεια του πτερυγίου που βρίσκεται σε stall. Τα βασικά πλεονεκτήματα του ελέγχου αυτού είναι η έλλειψη κινούμενων μερών και ότι αποτελεί ενεργό σύστημα ελέγχου. Απαιτεί όμως ένα πολύπλοκο αεροδυναμικό σχεδιασμό ενώ εμφανίζονται προκλήσεις για την κατασκευή ολόκληρης της ανεμογεννήτριας. [19] [18]



Εικόνα 29. Καμπύλη ισχύος της ανεμογεννήτριας.

3.1.3 Πλεονεκτήματα – Μειονεκτήματα

Πλεονεκτήματα:

- Τα πτερύγια μεταβλητού βήματος δίνουν την δυνατότητα να μεταβάλουν την γωνία προσβολής του ανέμου με αποτέλεσμα η ανεμογεννήτρια να εκμεταλλεύεται το μέγιστο ποσό της αιολικής ενέργειας
- Ο ψηλός πύργος επιτρέπει την πρόσβαση σε ισχυρότερους ανέμους ειδικά σε περιοχές όπου η διαβάθμιση είναι μεγάλη. Για παράδειγμα υπάρχουν περιοχές όπου κάθε 10 μέτρα η ταχύτητα του ανέμου μπορεί να αυξηθεί κατά 20% και η ισχύς εξόδου κατά 34%.
- Υψηλή απόδοση καθώς τα πτερύγια κινούνται κάθετα στον άνεμο καθ'όλη την διάρκεια περιστροφής τους σε αντίθεση με της ανεμογεννήτριες κάθετου άξονα.

Μειονεκτήματα:

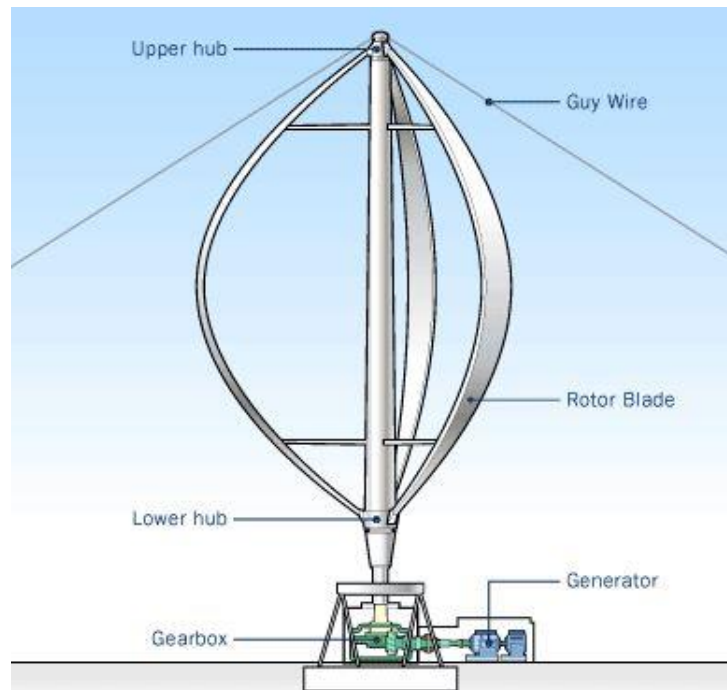
- Τα ψηλά πτερύγια έχουν δύσκολη και ακριβή μεταφορά και εγκατάσταση καθώς κοστίζουν το 20% του εξοπλισμού.

- Απαιτείται ισχυρότερη κατασκευή πύργου ώστε να μπορεί να στηρίξει τα βαριά πτερύγια, το κιβώτιο των ταχυτήτων και τη γεννήτρια.
- Οι αντανάκλασεις από τις ανεμογεννήτριες μπορεί να επηρεάσει τις εγκαταστάσεις των ραντάρ προκαλώντας σύγχυση στα σήματα.
- Απαιτούν πρόσθετο μηχανισμό ελέγχου εκτροπής για να στρέφουν την ανεμογεννήτρια προς τον άνεμο.
- Το μεγάλο τους ύψος τις κάνει ορατές από μεγάλες αποστάσεις διαταράσσοντας την ομορφιά των τοπίων. [14] [15]

3.2 Ανεμογεννήτριες κάθετου άξονα

Οι ανεμογεννήτριες κάθετου άξονα είναι ένα είδος ανεμογεννητριών όπου ο κύριος άξονας του ρότορα τίθεται εγκάρσια προς τον άνεμο. Βρίσκονται πιο κοντά στο έδαφος γεγονός που τις καθιστάει ιδανικές για την σύλληψη χαμηλότερης ταχύτητας ανέμου σε κατοικημένες και αστικές περιοχές. Τα βασικά της μέρη, όπως είναι η γεννήτρια και το κιβώτιο ταχυτήτων είναι τοποθετημένα στην βάση της ανεμογεννήτριας.

Δεδομένου ότι περιστρέφεται γύρω από ένα κάθετο άξονα, τα πτερύγια είναι σε θέση να εκμεταλλευτούν τον άνεμο από οποιαδήποτε διεύθυνση και να παράγουν ηλεκτρισμό χωρίς τη χρήση κάποιου μηχανισμού εκτροπής. Το γεγονός ότι παράγουν μικρότερη ποσότητα ενέργειας και θόρυβο και το ότι χρειάζονται λιγότερη συντήρηση από αυτές του οριζόντιου άξονα, τις καθιστάει ιδανικές για ιδιοκτήτες ακινήτων και επιχειρήσεων.



Εικόνα 30. Ανεμογεννήτρια κάθετου άξονα.

Όπως παρατηρείται στο παραπάνω σχήμα, τα περισσότερα μέρη της ανεμογεννήτριας οριζόντιου άξονα αποτελούν μέρη και των ανεμογεννητριών κάθετου άξονα. Αποτελούνται από 2 κόμβους, ένα στην κορυφή και ένα στο κάτω μέρος, από σχοινιά στήριξης, πτερύγια και από ένα κιβώτιο ταχυτήτων και γεννήτρια τα οποία όπως προαναφέρθηκε βρίσκονται στην βάση της ανεμογεννήτριας. [15] [14]

3.2.1 Είδη ανεμογεννητριών κάθετου άξονα

Ο σχεδιασμός των ανεμογεννητριών κάθετου άξονα έχει 2 βασικές υποκατηγορίες, τις Darrieus και τις Savonius.

3.2.1.1 Ανεμογεννήτρια Darrieus - Darrieus Wind Turbine

Οι ανεμογεννήτριες Darrieus ή Eggbeater (καθώς μοιάζουν με χτυπητήρι αυγών) πήραν το όνομά τους από τον Γάλο εφευρέτη Georges Darrieus. Έχουν καλή απόδοση αλλά παράγουν ροπή με μεγάλη κυμάτωση και κυκλική καταπόνηση στον πύργο μην έχοντας καλή αξιοπιστία. Η κυμάτωση αυτή μειώνεται με την χρήση τριών ή περισσότερων πτερυγίων που οδηγεί σε μεγαλύτερη σταθερότητα του ρότορα αν και έχει αποδειχτεί ότι τα 2 πτερύγια έχουν μεγαλύτερη απόδοση. Η σταθερότητα υπολογίζεται διαιρώντας το εμβαδό των πτερυγίων με το εμβαδό του ρότορα. Οι πιο σύγχρονες ανεμογεννήτριες Darrieus δεν χρειάζονται καλώδια στήριξης καθώς έχουν ένα εξωτερικό εποικοδόμημα που συνδέεται με το επάνω στήριγμα.

Ένα μεγάλο πρόβλημα που αντιμετωπίζεται κατά τον σχεδιασμό τους είναι ότι η γωνία προσβολής αλλάζει καθώς στρέφεται ο στρόβιλος και έτσι κάθε λεπίδα παράγει μέγιστη ροπή μόνο 2 φορές σε κάθε κύκλο. Ένα άλλο μειονέκτημα είναι ότι η κύρια μάζα του περιστρεφόμενου μηχανισμού βρίσκεται στην περιφέρεια και όχι στο hub δημιουργώντας ισχυρές φυγόκεντρες δυνάμεις. Επίσης απαιτούν εξωτερική πηγή τροφοδοσίας ή ένα επιπλέον ρότορα Savonius επειδή έχουν πολύ χαμηλή ροπή εκκίνησης.

Ένα από τα πιο διαδεδομένα είδη ανεμογεννητριών Darrieus είναι αυτές με ρότορα σε σχήμα Η, γνωστές και ως Giromill στις οποίες τα πτερύγια σε σχήμα “eggbeater” αντικαθίστανται από κάθετα πτερύγια τα οποία συνδέονται στον πύργο με κάθετα στηρίγματα. Το σχήμα αυτό βοηθάει στην εξομάλυνση του ανέμου, στην μείωση των κραδασμών και της φθοράς καθώς και του θορύβου. [20] [21] [14]



Εικόνα 31. H-rotor ανεμογεννήτρια.

3.2.1.2 Ανεμογεννήτρια Savonius – Savonius Wind Turbine

Οι ανεμογεννήτριες Savonius εφευρέθηκαν από τον Φινλανδό μηχανικό Sigurd J. Savonius το 1922 αν και η πρώτη απόπειρα έγινε Johann Ernst Elias Bessler το 1745. Αυτός ο τύπος ανεμογεννητριών σήμερα σπάνια είναι συνδεδεμένος στο δίκτυο.

Αποτελούν drag-style ανεμογεννήτριες κάθετου άξονα και έτσι δεν μπορούν να περιστρέφονται με ταχύτητα μεγαλύτερη από αυτή του ανέμου. Αυτό σημαίνει ότι ο λόγος ταχύτητας ακροπτερυγίου είναι ίσος ή μικρότερος του 1 καθιστώντας τις όχι και τόσο κατάλληλες για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Επιπλέον η απόδοσή τους είναι χαμηλή σε σύγκριση με τα άλλα είδη και γι'αυτό χρησιμοποιούνται κυρίως για την άντληση νερού ή την άλεση σιτηρών.

Τα πλεονεκτήματα που προσφέρουν είναι η απλότητα κατασκευής τους, η αξιοπιστία και η πολύ χαμηλή παραγωγή θορύβου. Μπορούν να λειτουργήσουν και σε χαμηλές ταχύτητες ανέμου καθώς ειδικά σε αυτές τις συνθήκες η ροπή είναι μεγάλη. Ωστόσο η ροπή δεν είναι σταθερή και συχνά χρησιμοποιούνται κάποιες βελτιώσεις όπως είναι το ελικοειδές σχήμα. [20] [21] [14]



Εικόνα 32. Ανεμογεννήτρια Savonius.

3.2.2 Πλεονεκτήματα – Μειονεκτήματα

Πλεονεκτήματα:

- Μπορούν να αξιοποιήσουν οποιαδήποτε κατεύθυνση του ανέμου χωρίς να χρειάζονται μηχανισμούς εκτροπής και ελέγχου του βήματος της γωνίας των πτερυγίων. Επιπλέον μπορούν να επωφεληθούν ταραχώδεις και θυελλώδεις ανέμους τους οποίους όχι μόνο δεν αξιοποιούν οι ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα αλλά καταπονούνται από αυτούς.
- Το κιβώτιο ταχυτήτων καταπονείται λιγότερο στις ανεμογεννήτριες κάθετου άξονα. Ακόμα και σε περίπτωση όμως που χρειαστεί αντικατάσταση ή επιδιόρθωση, το γεγονός ότι βρίσκεται στην βάση της ανεμογεννήτριας και η πρόσβασή του είναι εύκολη, κάνει την διαδικασία αυτή απλή και οικονομικά συμφέρουσα καθώς δεν απαιτείται η χρήση γερανών και άλλων μεγάλων εξοπλισμών. Οι βλάβες στην γεννήτρια και στο κιβώτιο ταχυτήτων των ανεμογεννητριών οριζόντιου άξονα αυξάνουν κατά πολύ τα λειτουργικά έξοδα και τα έξοδα συντήρησης τόσο στα χερσαία όσο και στα υπεράκτια αιολικά πάρκα.
- Μπορούν να τοποθετηθούν πιο κοντά στα αιολικά πάρκα αυξάνοντας την παραγόμενη ενέργεια ανά μονάδα έκτασης γης ενώ ένα προσεκτικά σχεδιασμένο αιολικό πάρκο με ανεμογεννήτριες κάθετου άξονα μπορεί να αποδώσει ισχύ εξόδου μέχρι και 10 φορές μεγαλύτερη σε σχέση με ένα αιολικό πάρκο με ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα ίδιας έκτασης.

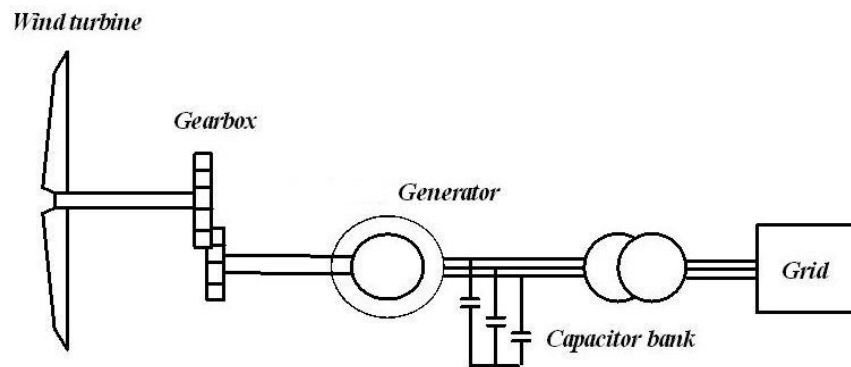
- Τέλος μπορούν να εγκατασταθούν σε ένα αιολικό πάρκο κάτω από τις ήδη υπάρχουσες ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα αυξάνοντας της απόδοσή του.

Μειονεκτήματα:

- Λόγω του χαμηλού τους ύψους δεν μπορούν να αξιοποιήσουν την μεγάλη ταχύτητα του αέρα στα μεγάλα ύψη.
- Τα πτερύγια των ανεμογεννητριών κάθετου άξονα δέχονται μεγάλες καταπονήσεις λόγω της ποικιλίας των δυνάμεων που ασκούνται σε αυτά κατά τη διάρκεια κάθε περιστροφής.
- Είναι λιγότερο αξιόπιστες από τις ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα. [22] [15]

3.3 Ανεμογεννήτριες σταθερών στροφών – Fixed Speed Wind Turbines

Οι ανεμογεννήτριες σταθερών στροφών έχουν σταθερή ταχύτητα περιστροφής ανεξάρτητα από την ταχύτητα του ανέμου. Στις ανεμογεννήτριες αυτές η γεννήτρια συνδέεται απευθείας στο δίκτυο χρησιμοποιώντας μόνο ένα μετασχηματιστή προσαρμογής του επιπέδου τάσης της γεννήτριας σε αυτό του δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας. Η συχνότητα του δικτύου καθορίζει τη συχνότητα περιστροφής της γεννήτριας και συνεπώς της ανεμογεννήτριας. Συνήθως σε αυτό τον τύπο των ανεμογεννητριών χρησιμοποιούνται γεννήτριες επαγωγής βραχυκυκλωμένου κλωβού.



Εικόνα 33. Σύνδεση ανεμογεννήτριας σταθερών στροφών στο δίκτυο

Η ταχύτητα περιστροφής του ρότορα n_{rotor} της ανεμογεννήτριας μετατρέπεται στην ταχύτητα περιστροφής της γεννήτριας $n_{generator}$ μέσω του κιβώτιου ταχυτήτων με λόγο r . Η ταχύτητα της γεννήτριας εξαρτάται από τον αριθμό των πόλων της και την συχνότητα του δικτύου f_{grid} .

$$n_{rotor} = \frac{n_{generator}}{r} \quad \text{εξ 3-1}$$

$$n_{generator} = \frac{f_{grid}}{p}$$

εξ 3-2

Το μεγαλύτερο τους πλεονέκτημα είναι η απλή και φθηνή κατασκευή τους καθώς και το ότι δεν χρειάζονται συσκευές για τον συγχρονισμό τους και άλλα ηλεκτρονικά ισχύος. Έχουν όμως και αρκετά μειονεκτήματα. Τα μεγάλα ρεύματα εκκίνησης και η αδυναμία ελέγχου των διακυμάνσεων του ανέμου αποτελούν ανασταλτικό παράγοντα για την χρησιμοποίησή τους καθώς έχουν αποτέλεσμα σε διακυμάνσεις της ισχύος εξόδου και πολύ πιθανόν της τάσης σε ένα αδύναμο δίκτυο. Ένα άλλο μειονέκτημα αυτού του τύπου ανεμογεννητριών είναι το ρίσκο αποσυγχρονισμού σε περίπτωση πτώσης της τάσεως και η αύξηση κατανάλωσης της αέργου ισχύος ιδιαίτερα μετά την εκκαθάριση του σφάλματος. [23] [24]

3.4 Ανεμογεννήτριες μεταβλητών στροφών – Variable Speed Wind Turbines

Οι ανεμογεννήτριες αυτές μεταβάλλουν την ταχύτητα περιστροφής τους με ελέγχομενο τρόπο ανάλογα με την ταχύτητα του ανέμου. Αυτό γίνεται ώστε να επιτυγχάνεται μέγιστο C_p , μέγιστος λόγος ακροπτερυγίου λ και μέγιστη απόδοση στην εκάστοτε ταχύτητα του ανέμου.

Για την σύνδεση της ανεμογεννήτριας στο δίκτυο απαιτείται η χρήση ηλεκτρονικών ισχύος ώστε να αποδεσμεύεται η γεννήτρια από την συχνότητα του δικτύου και να μπορεί να κυμαίνεται σε ένα μεγάλο εύρος συχνοτήτων. Χρησιμοποιούνται τόσο επαγωγικές όσο και σύγχρονες γεννήτριες. Στις σύγχρονες και τις επαγωγικές γεννήτριες χωρίς δακτύλιο ολίσθησης ο αντιστροφέας συνδέεται μεταξύ του στάτη της γεννήτριας και του δικτύου και όλη η ισχύς τροφοδοτείται μέσω του αντιστροφέα ενώ στις επαγωγικές με ολίσθηση ο στάτης συνδέεται απευθείας στο δίκτυο και ο δρομέας μόνο απαιτεί χρήση αντιστροφέα.

Τα πλεονεκτήματα που προσφέρουν οι ανεμογεννήτριες μεταβλητών στροφών είναι ότι αξιοποιούν καλύτερα την αιολική ισχύ έχοντας μεγαλύτερη απόδοση ενώ αποδίδουν σταθερή ροπή και δίνεται η δυνατότητα ελέγχου αέργου ισχύος, επομένως καλύτερη ποιότητα ισχύος καταστέλλοντας τις όποιες διακυμάνσεις δημιουργούνται από τον άνεμο. Επίσης υπάρχει μικρότερη καταπόνηση στα μηχανικά μέρη της ανεμογεννήτριας καθώς εξαλείφονται οι διακυμάνσεις της μηχανικής ροπής και οι συντονισμοί στο σύστημα μετάδοσης της κίνησης αυξάνοντας τη διάρκεια ζωής της ανεμογεννήτριας. Τέλος δίνεται η δυνατότητα ελέγχου της τάσης που είναι σημαντικό για αδύναμα κυρίως δίκτυα.

Παρουσιάζουν όμως και κάποια μειονεκτήματα. Η χρήση εξελιγμένων ηλεκτρονικών ισχύος απαιτεί πιο περίπλοκο σχεδιασμό ενώ παράλληλα αυξάνουν το κόστος της εγκατάστασης καθώς και τις απώλειες ισχύος. Η παρουσία ανώτερων αρμονικών δημιουργεί επίσης μεγάλο πρόβλημα και απαιτούνται επιπλέον φίλτρα για την εξάλειψή τους. [23] [24]

4 Ηλεκτρονικά ισχύος και τεχνικές ελέγχου

4.1 Μετασχηματισμοί Clarke και Park

Οι μετασχηματισμοί Clark και Park είναι μαθηματικοί μετασχηματισμοί οι οποίοι χρησιμοποιούνται για την απλοποίηση της ανάλυσης των τριφασικών συστημάτων. Μία πολύ χρήσιμη εφαρμογή τους είναι η παραγωγή του σήματος αναφοράς που χρησιμοποιείται στον έλεγχο των αντιστοφών. Πιο συγκεκριμένα αλλάζουν το πλαίσιο αναφοράς βάση του οποίου απεικονίζουμε τα διάφορα σήματα τάσεων και ρευμάτων. Ενώ το τριφασικό σύστημα το απεικονίζουμε σύμφωνα με το ακίνητο πλαίσιο αναφοράς abc και αναγνωρίζουμε τρία στρεφόμενα διανύσματα ή τρία ημιτονοειδείς σήματα στο χρόνο, ο μετασχηματισμός Clark χρησιμοποιεί το ακίνητο πλαίσιο αναφοράς αβ στο οποίο απεικονίζονται δύο διανύσματα στρεφόμενα με την ίδια γωνιακή ταχύτητα. Στη συνέχεια ο μετασχηματισμός Park χρησιμοποιεί ως πλαίσιο αναφοράς το στρεφόμενο πλαίσιο με συχνότητα αυτή του δικτύου στο οποίο απεικονίζονται πλέον 2 DC σήματα. Επομένως:

$$i_{\alpha\beta\gamma}(t) = T i_{abc}(t) = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a(t) \\ i_b(t) \\ i_c(t) \end{bmatrix} \quad \text{εξ 4-1}$$

όπου $i_{abc}(t)$ είναι η γενέτειρα τριφασική ακολουθία ρεύματος ενώ $i_{\alpha\beta\gamma}(t)$ είναι η αντίστοιχη ακολουθία ρεύματος που προκύπτει από τον μετασχηματισμό T . Ο αντίστροφος μετασχηματισμός είναι:

$$i_{abc}(t) = T^{-1} i_{\alpha\beta\gamma}(t) = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & 1 \\ \frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a(t) \\ i_b(t) \\ i_c(t) \end{bmatrix} \quad \text{εξ 4-2}$$

Ο παραπάνω μετασχηματισμός Clark διατηρεί το πλάτος των ηλεκτρικών μεγεθών σταθερό καθώς:

$$\begin{bmatrix} i_a(t) \\ i_b(t) \\ i_c(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{2}I \cos \theta(t) \\ \sqrt{2}I \cos \left(\theta(t) - \frac{2\pi}{3} \right) \\ \sqrt{2}I \cos \left(\theta(t) + \frac{2\pi}{3} \right) \end{bmatrix} \quad \text{εξ 4-3}$$

όπου I είναι η RMS τιμή των $i_a(t)$, $i_b(t)$ και $i_c(t)$ ενώ $\theta(t)$ είναι η μεταβαλλόμενη με τον χρόνο γωνία των ρευμάτων.

$$\begin{bmatrix} i_a(t) \\ i_b(t) \\ i_c(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{2}I \cos \theta(t) \\ \sqrt{2}I \sin \theta(t) \\ 0 \end{bmatrix} \quad \text{εξ 4-4}$$

Η ενεργός και άεργος ισχύς που υπολογίζεται στο μετασχηματισμό Clark δεν είναι ίδιες με αυτές που υπολογίζονται στο abc πλαίσιο αναφοράς και αυτό συμβαίνει γιατί ο μετασχηματισμός T δεν είναι μοναδιαίος. Για να γίνει αυτό πρέπει να εφαρμοστεί ο παρακάτω μετασχηματισμός:

$$i_{\alpha\beta\gamma}(t) = T i_{abc}(t) = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a(t) \\ i_b(t) \\ i_c(t) \end{bmatrix} \quad \text{εξ 4-5}$$

Στην περίπτωση αυτή όμως τα πλάτη των μετασχηματισμένων ρευμάτων δεν είναι ίδια με αυτά του πλαισίου αναφοράς abc.

$$\begin{bmatrix} i_a(t) \\ i_b(t) \\ i_c(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{3}I \cos \theta(t) \\ \sqrt{3}I \sin \theta(t) \\ 0 \end{bmatrix} \quad \text{εξ 4-6}$$

Ο αντίστροφος μετασχηματισμός Clark γίνεται με την σειρά του:

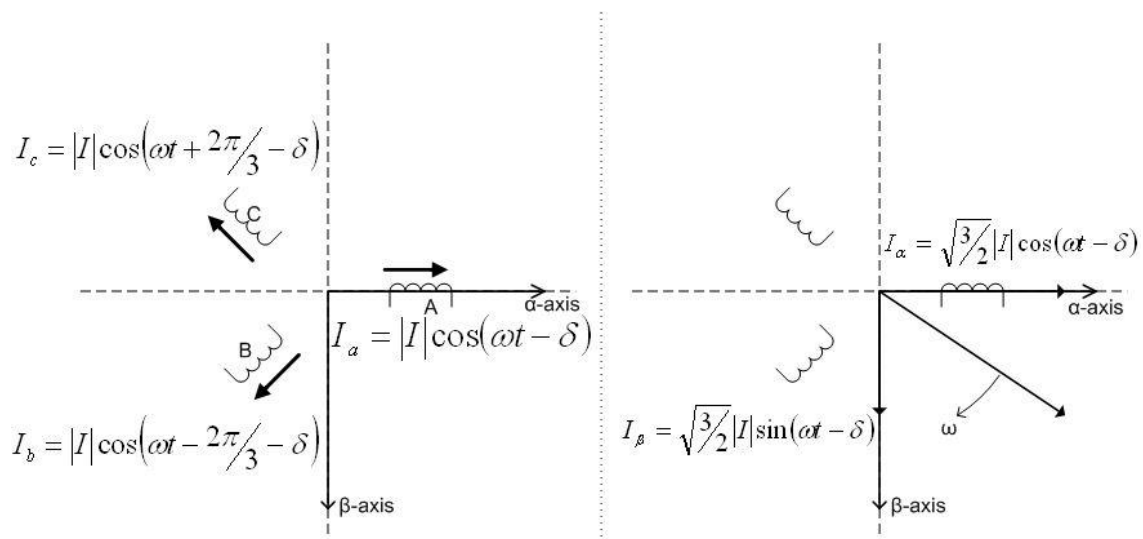
$$i_{abc}(t) = T^{-1} i_{\alpha\beta\gamma}(t) = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 & \frac{\sqrt{2}}{2} \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{\sqrt{2}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{\sqrt{2}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a(t) \\ i_b(t) \\ i_c(t) \end{bmatrix} \quad \text{εξ 4-7}$$

Επειδή σε ένα συμμετρικό σύστημα ισχύει $i_a(t) + i_b(t) + i_c(t) = 0$ και έτσι $i_\gamma(t) = 0$ και μπορούμε να θεωρήσουμε την απλοποιημένη μορφή του μετασχηματισμού:

$$i_{\alpha\beta}(t) = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a(t) \\ i_b(t) \\ i_c(t) \end{bmatrix} \quad \text{εξ 4-8}$$

που είναι απλά ο μετασχηματισμός Clark βγάζοντας την τρίτη εξίσωση ενώ ο αντίστροφος γίνεται:

$$i_{ab}(t) = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \frac{2}{3} & 0 \\ -\frac{1}{3} & \frac{\sqrt{3}}{3} \\ -\frac{1}{3} & -\frac{\sqrt{3}}{3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a(t) \\ i_b(t) \\ i_c(t) \end{bmatrix} \quad \text{εξ 4-9}$$

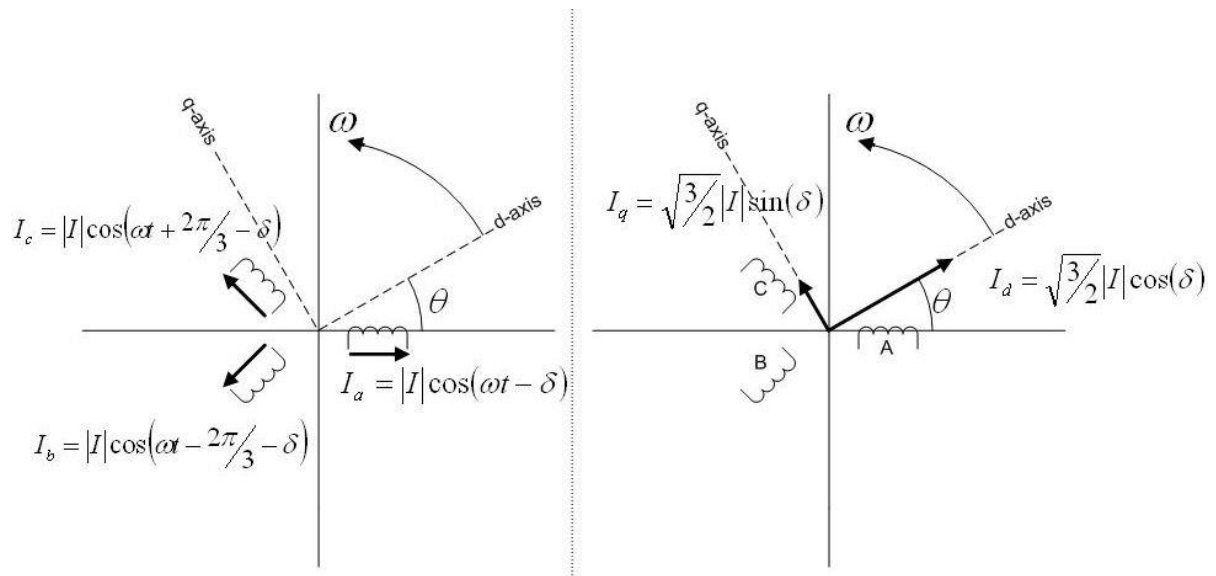


Εικόνα 34. Γεωμετρική αναπαράσταση του μετασχηματισμού Clark.

Στην απλουστευμένη μορφή του μετασχηματισμού Clark τα τριφασικά ρεύματα ή τις τάσεις που έχουν μεταξύ τους διαφορά φάσης 120° και θα μετατραπούν σε 2 κάθετα μεταξύ τους διανύσματα τα οποία στρέφονται με την ίδια συχνότητα με τα αρχικά. Οι στρεφόμενες συνιστώσες $\alpha\beta$ ως προς το ακίνητο πλαίσιο αναφοράς θεωρούνται εναλλασσόμενα σήματα. Εφαρμόζοντας τον μετασχηματισμό Park τα σήματα αυτά γίνεται

να απεικονιστούν σαν DC συνιστώσες καθώς ο μετασχηματισμός αυτός έχει κεντρική ιδέα την απεικόνιση ημιτονοειδών διανυσμάτων σε στρεφόμενο πλαίσιο. [25] [26]

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad \text{εξ 4-10}$$



Εικόνα 35. Γεωμετρική αναπαράσταση του μετασχηματισμού Park.

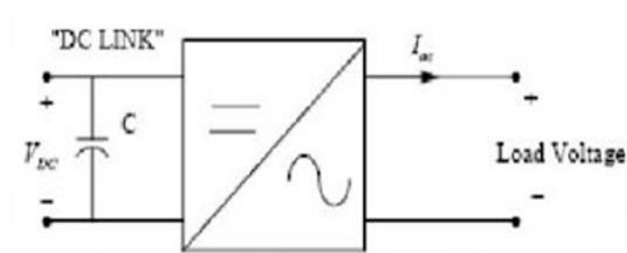
4.2 PWM έλεγχος – Μετατροπείς

Ένας αντιστροφέας χρησιμοποιείται για την μετατροπή της ηλεκτρικής ενέργειας από DC μορφή σε AC. Ο σκοπός ενός DC-AC αντιστροφέα είναι να παίρνει DC ισχύ από μία μπαταρία ή από μία εναλλασσόμενη πηγή ενέργειας (όπως τα φωτοβολταϊκά πάνελ) και να την μετατρέπει σε AC. Επίσης χρησιμοποιούνται σε διάφορες βιομηχανικές εφαρμογές όπως είναι τα συστήματα αδιάκοπης τροφοδοσίας (UPS) ή οι AC κινητήρες. Επιπροσθέτως, οι στρατηγικές έλεγχου που χρησιμοποιούνται στους αντιστροφέες είναι ίδιοι με αυτούς που χρησιμοποιούνται στους DC-DC μετατροπείς.

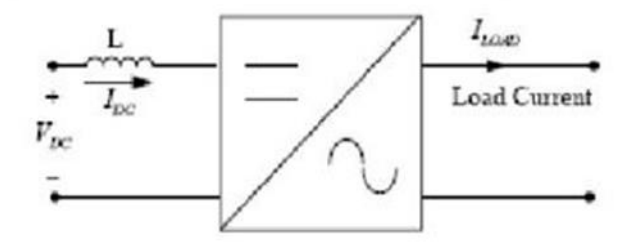
Οι DC-AC αντιστροφέες οδηγούνται συνήθως από την τεχνική διαμόρφωσης εύρους παλμών (Pulse Width Modulation – PWM) που είναι μία πολύ προχωρημένη και χρήσιμη τεχνική στην οποία το εύρος των παλμών που εφαρμόζονται στις πύλες ελέγχεται με διάφορους μηχανισμούς. Ο PWM αντιστροφέας χρησιμοποιείται για να διατηρήσει την τάση εξόδου στα επιθυμητά επίπεδα ανεξάρτητα από τα φορτία που υπάρχουν. Σε ένα συμβατικό αντιστροφέα η τάση εξόδου αλλάζει σύμφωνα με τις αλλαγές στα φορτία. Η AC τάση εξόδου εξαρτάται από την διακοπτική συχνότητα των διακοπών και το εύρος των

παλμών και ρυθμίζοντας τα αυτά σύμφωνα με το φορτίο που έχει συνδεθεί στην έξοδο ο PWM διορθώνει και παρέχει σταθερή τάση εξόδου.

Στον αντιστροφέα πηγής τάσης (Voltage Source Inverter – VSI) η AC έξοδος είναι μία κυματομορφή τάσης η οποία παραμένει ανεπηρέαστη από το φορτίο και έχει πολλές βιομηχανικές εφαρμογές όπως είναι η ρύθμιση ταχύτητας μηχανών η σε συστήματα ενέργειας για ευέλικτη μεταφορά AC ισχύος (Flexible AC Transmission - FACTS). Υπάρχουν και οι αντιστροφείς πηγής ρεύματος (Current Source Inverter – CSI) όπου η AC έξοδος είναι μία κυματομορφή ρεύματος που διατηρείται σταθερή και ανεπηρέαστη από το φορτίο και οι οποίοι χρησιμοποιούνται ευρέως σε βιομηχανικές εφαρμογές μέσης τάσης καθώς απαιτείται κυματομορφή υψηλής ποιότητας.

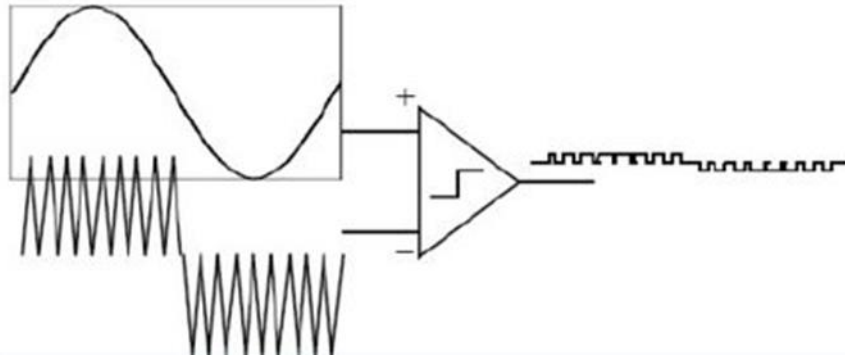


Εικόνα 36. Voltage Source Inverter.



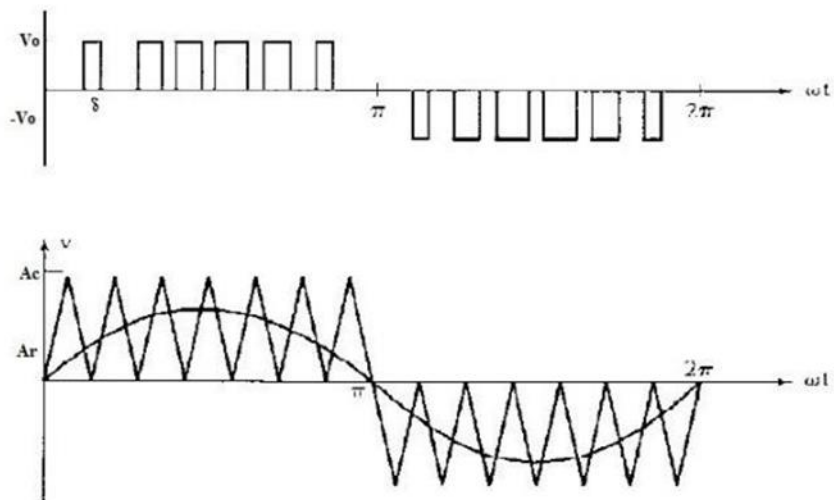
Εικόνα 37. Current Source Inverter.

Το PWM είναι μία τεχνική που χαρακτηρίζεται από την παραγωγή παλμών σταθερού πλάτους η διάρκεια των οποίων ρυθμίζεται μέσω της ρύθμισης του duty cycle. Απαιτεί την παραγωγή δύο σημάτων, αναφοράς και φέροντος, τα οποία τροφοδοτούνται στον ίδιο συγκριτή και μετά από λογικές πράξεις παράγεται το αποτέλεσμα. Το σήμα αναφοράς είναι ένα ημιτονοειδές ή ένα τετραγωνικό σήμα ενώ το φέρον είναι ένα πριονωτό ή ένα τριγωνικό σήμα με συχνότητα πολύ μεγαλύτερη από αυτή του σήματος αναφοράς.



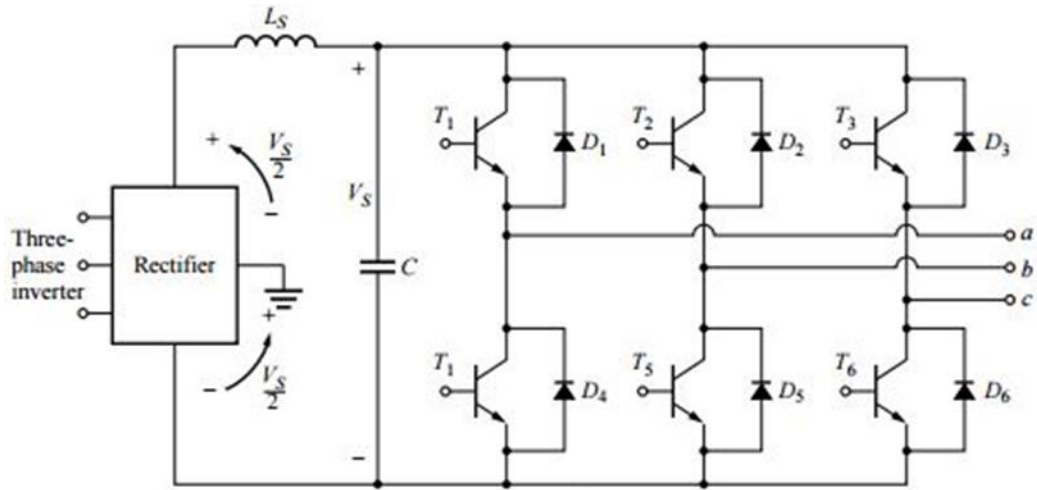
Εικόνα 38. Σύγκριση ημιτονοειδούς σήματος με τριγωνικό σήμα.

Υπάρχουν τρεις βασικές τεχνικές ελέγχου PWM, η απλή διαμόρφωση ευρούς παλμών (Single Pulse Width Modulation) όπου κάθε μισό κύκλο παράγεται ένας παλμός, η πολλαπλή διαμόρφωση εύρους παλμών (Multiple Pulse Width Modulation) όπου παράγονται πολλαπλοί παλμοί ανά μισό κύκλο με ίδιο εύρος και η ημιτονοειδής διαμόρφωση εύρους παλμών (Sinusoidal Pulse Width Modulation) όπου παράγονται πολλαπλοί παλμοί ανά μισό κύκλο με διαφορετικό εύρος.



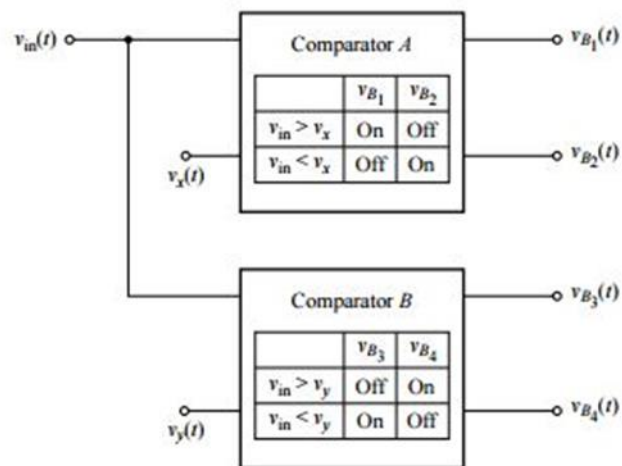
Εικόνα 39. Ημιτονοειδής διαμόρφωση εύρους παλμών.

Παρακάτω παρουσιάζεται ένα τριφασικός αντιστροφέας πλήρους γέφυρας με τεχνική ελέγχου SPWM:

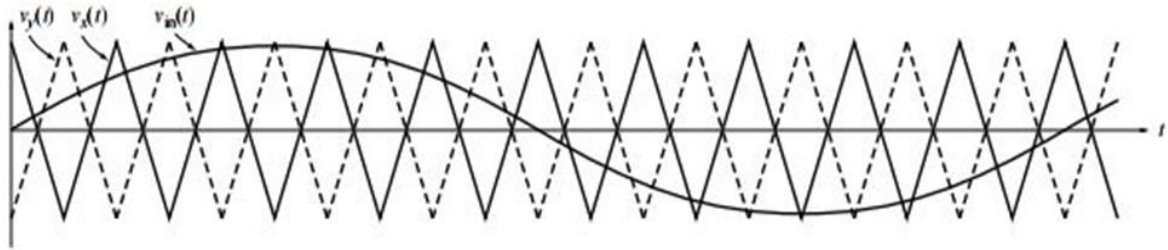


Εικόνα 40. Τριφασικός αντιστροφέας πλήρους γέφυρας.

Αποτελείται από έξι IGBT τρανζίστορ με αντιπαράλληλες διόδους η κατάσταση των οποίων ελέγχονται από δύο συγκριτές. Οι συγκριτές αυτοί συγκρίνουν την τάση εισόδου $v_{in}(t)$ με ένα σήμα αναφοράς και δίνει παλμούς στα τρανζίστορ ανάλογα με το αποτέλεσμα. Ο συγκριτής A συγκρίνει την τάση εισόδου με την τάση αναφοράς $v_x(t)$ και ελέγχει τα T_1 και T_2 IGBTs ενώ ο B την τάση εισόδου με την τάση αναφοράς $v_y(t)$ και ελέγχει τα T_3 και T_4 τρανζίστορ. Αν η τάση εισόδου είναι μεγαλύτερη από την $v_x(t)$ το τρανζίστορ T_1 γίνεται on και το T_2 off και αντίστροφα. Αντίστοιχα, αν η τάση εισόδου είναι μεγαλύτερη από την $v_y(t)$ το τρανζίστορ T_3 γίνεται on και το T_4 off και αντίστροφα. [27] [28]

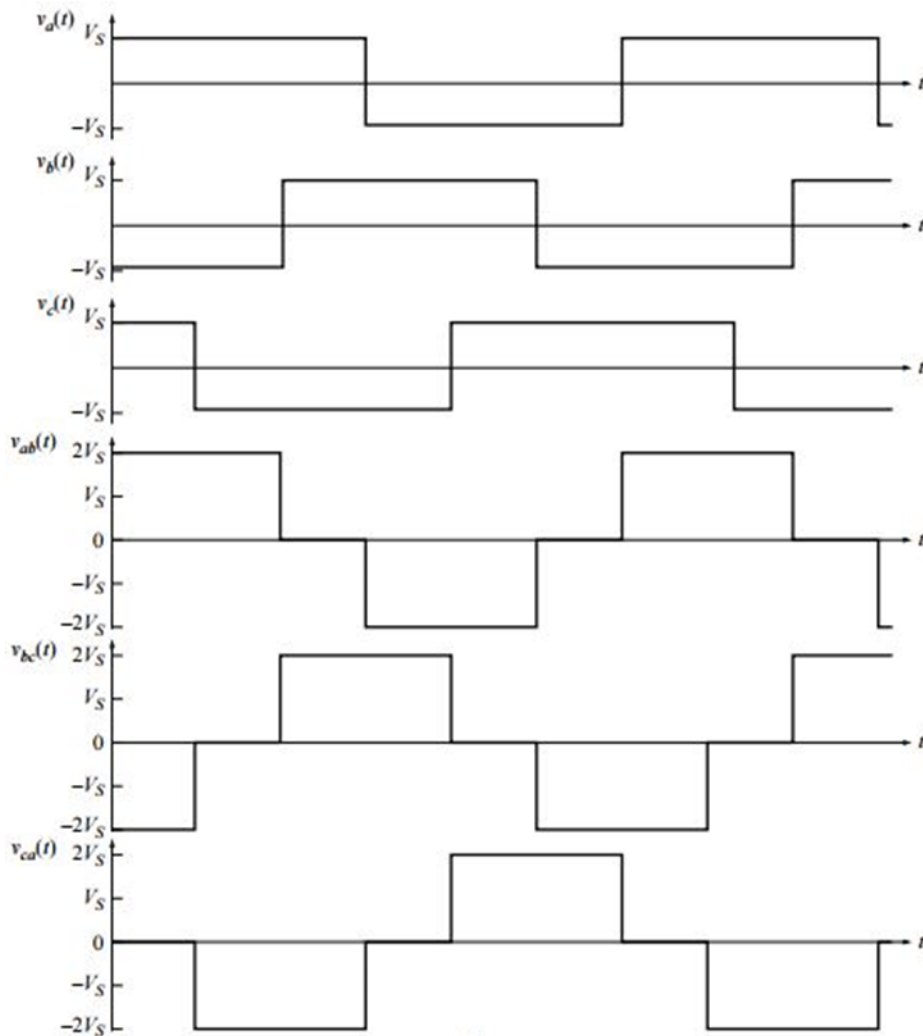


Εικόνα 41. Οι συγκριτές A και B.



Εικόνα 42. Τα σήματα αναφοράς $v_x(t)$ και $v_y(t)$.

Και έτσι η τάση εξόδου του τριφασικού αντιστροφέα γίνεται:



Εικόνα 43. Οι τάσεις εξόδου του αντιστροφέα.

4.3 Ελεγκτές PI

Ο αναλογικός-ολοκληρωτικός-διαφορικός ελεγκτής (Proportional-Integral-Derivative controller – PID) είναι ένας μηχανισμός βρόγχος ελέγχου με ανάδραση που χρησιμοποιείται συχνά σε βιομηχανικά συστήματα ελέγχου. Ένα PID ελεγκτής συνεχώς υπολογίζει ένα σφάλμα ως τη διαφορά μίας μετρούμενης τιμής και ενός σημείου αναφοράς και προσπαθεί να ελαχιστοποιήσει το σφάλμα αυτό. Αποτελείται από τρεις ρυθμιστικούς όρους, τον αναλογικό, τον ολοκληρωτικό και τον διαφορικό, από τους οποίους πήρε και το όνομά του.

- **Proportional (αναλογικός):** Ο όρος αυτός παράγει μία τιμή εξόδου ανάλογη με την τωρινή τιμή του σφάλματος και μπορεί να ρυθμιστεί πολλαπλασιάζοντας το σφάλμα με μία σταθερά K_p που ονομάζεται αναλογική σταθερά κέρδους.

$$P_{out} = K_p e(t) \quad \text{εξ 4-11}$$

Ένα μεγάλο κέρδος θα επηρεάσει σε μεγάλη κλίμακα το σφάλμα και το σύστημα θα φτάσει πιο γρήγορα στο σημείο αναφοράς αλλά το σύστημα γίνεται ασταθές γύρω από το σημείο αυτό. Αντίθετα, ένα μικρό κέρδος θα έχει μικρή επίδραση και το σύστημα θα σταθεροποιηθεί σε ένα σημείο λίγο κάτω (ή πάνω) από το σημείο αναφοράς. Ο αναλογικός έλεγχος αφήνει ένα σφάλμα offset στην μόνιμη κατάσταση το οποίο για να διορθωθεί χρειάζεται ο ολοκληρωτικός έλεγχος.

- **Integral (ολοκληρωτικός):** Η συνεισφορά του ολοκληρωτικού όρου είναι ανάλογη και στο μέγεθος του σφάλματος αλλά και στη διάρκειά του. Είναι το άθροισμα του στιγμιαίου σφάλματος καθόλη την διάρκεια και δίνει το συγκεντρωμένο offset του σφάλματος που έπρεπε να διορθωθεί προηγουμένως το οποίο πολλαπλασιάζεται με το ολοκληρωτικό κέρδος K_i .

$$I_{out} = K_i \int_0^t e(\tau) d\tau \quad \text{εξ 4-12}$$

Ο όρος αυτός επιταχύνει την διαδικασία και εξαλείφει το απομένον σφάλμα μόνιμης κατάστασης του αναλογικού ρυθμιστή. Ένα μεγάλο κέρδος προκαλεί πιο γρήγορη ανταπόκριση του συστήματος αλλά είναι πολύ πιθανόν να προκαλέσει και υπερβάσεις και μετά από μερικές ταλαντώσεις θα σταθεροποιηθεί στο σημείο αναφοράς. Όσο το κέρδος γίνεται μικρότερο, η απόκριση του συστήματος γίνεται πιο αργή αλλά σταθεροποιείται γρηγορότερα με λιγότερες ταλαντώσεις. Το

βέλτιστο κέρδος οδηγεί σε πολύ αργή απόκριση αλλά σταθεροποίηση χωρίς ταλαντώσεις.

- **Derivative (διαφορικός):** Η παράγωγος του σφάλματος υπολογίζεται καθορίζοντας την κλίση του και πολλαπλασιάζοντάς το με το διαφορικό κέρδος K_d .

$$I_{out} = K_d \frac{de(t)}{dt} \quad \text{εξ 4-13}$$

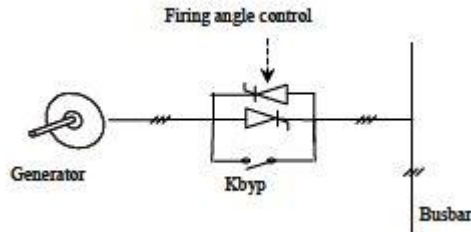
Προβλέπει τη συμπεριφορά του συστήματος και έτσι βελτιώνει τον χρόνο αποκατάστασης και την ευστάθεια του συστήματος.

Έτσι λοιπόν, ο PID ελεγκτής δίνει σαν έξοδο : [29] [30]

$$u(t) = P_{out} + I_{out} + D_{out} = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad \text{εξ 4-14}$$

4.4 Soft-starter

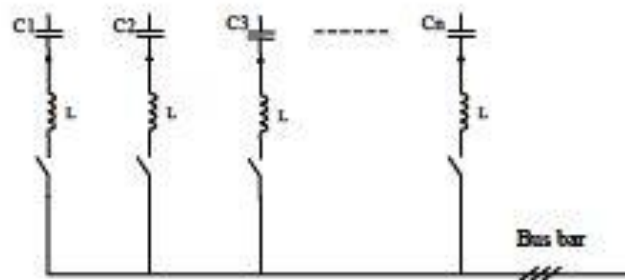
Ο soft-starter είναι μία απλή και φτηνή συσκευή ηλεκτρονικών ισχύος που χρησιμοποιείται στις ανεμογεννήτριες σταθερών στροφών κατά την σύνδεσή τους ή την αποσύνδεσή τους από το δίκτυο για την μείωση των μεταβατικών ρευμάτων και την μείωση των διαταραχών. Χωρίς τον soft-starter το εισερχόμενο ρεύμα θα μπορούσε να φτάσει μέχρι και 7-8 φορές της επιθυμητής τιμής του με αποτέλεσμα να προκαλεί διακυμάνσεις στην τάση και να καταπονεί τον εξοπλισμό. Αποτελείται από δύο αντιπαράλληλα θυρίστορ σε κάθε φάση. Όταν η ταχύτητα της γεννήτριας ξεπεράσει την σύγχρονη ταχύτητα, ενεργοποιούνται τα θυρίστορ πυροδοτώντας την γωνία έναυσής τους και συνδέεται ομαλά η γεννήτρια σε ένα καθορισμένο αριθμό περιόδων. Η σχέση μεταξύ της γωνίας έναυσης των θυρίστορ και της ενίσχυσης του soft-starter δεν είναι γραμμική και εξαρτάται από τον συντελεστή του συνδεόμενου στοιχείου. Αφού συνδεθεί η γεννήτρια κανονικά με το δίκτυο, τα θυρίστορ παρακάμπτονται μέσω ενός ρελέ ώστε να μειωθούν οι απώλειες ισχύος. Παρακάτω φαίνεται η σύνδεση μιας ανεμογεννήτριας μέσω ενός soft-starter. [31] [32]



Εικόνα 44. Σύνδεση ανεμογεννήτριας στο δίκτυο μέσω soft-starter.

4.5 Συστοιχία πυκνωτών (Capacitor bank)

Η συστοιχία πυκνωτών χρησιμοποιείται σε ανεμογεννήτριες σταθερών στροφών ή περιορισμένων μεταβλητών στροφών για να τροφοδοτούν με άεργο ισχύ τις επαγωγικές γεννήτριες, μειώνοντας με αυτό τον τρόπο την απορρόφηση αέργου ισχύος από το δίκτυο και βελτιώνοντας τον συντελεστή ισχύος της ανεμογεννήτριας. Ανάλογα με την μέση ζήτηση αέργου ισχύος συνδέονται και αποσυνδέονται σε ένα προκαθορισμένο χρονικό διάστημα. Συνήθως τοποθετούνται στην βάση του πύργου ή στην άτρακτο. Σε περίπτωση υπερτάσεων στο δίκτυο υπερφορτίζονται και ζημιώνονται αυξάνοντας το κόστος συντήρησης του συστήματος. [31] [32]



Εικόνα 45. Συστοιχία πυκνωτών για διόρθωση συντελεστή ισχύος.

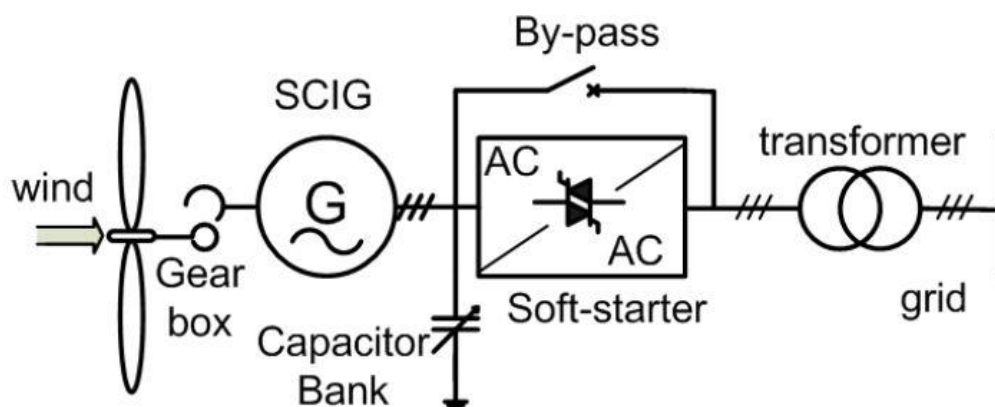
4.6 Ηλεκτρονικά ισχύος για συνδέσεις ανεμογεννητριών

4.6.1 Ανεμογεννήτριες σταθερών στροφών

Η χρήση ηλεκτρονικών ισχύος στις ανεμογεννήτριες σταθερών στροφών έχουν σκοπό την βελτίωση της λειτουργίας της γεννήτριας. Πιο συγκεκριμένα χρησιμοποιούνται για την ομαλή εκκίνηση της γεννήτριας και σύνδεσής της στο δίκτυο καθώς και για τη μείωση της τάσης της και των μαγνητικών απωλειών κυρίως σε χαμηλές ταχύτητες ανέμου. Στα συστήματα αυτά χρησιμοποιούνται συνήθως ασύγχρονες γεννήτριες βραχυκυκλωμένου δρομέα ή σύγχρονες γεννήτριες.

Τα υψηλά ρεύματα εκκίνησης των ανεμογεννητριών αυτών προκαλούν σοβαρά προβλήματα τόσο στο δίκτυο όσο και στον ηλεκτρομηχανολογικό εξοπλισμό του συστήματος λόγω των ταλαντώσεων. Με τη βοήθεια ενός μετατροπέα εναλλασόμενης τάσης (soft-starter) που αποτελείται από τρία αντιπαράλληλα θυρίστορ ρυθμίζεται η τάση του στάτη της γεννήτριας και συνδέεται ομαλά στο δίκτυο.

Επίσης είναι απαραίτητη μία συστοιχία πυκνωτών για την παροχή αέργου ισχύος που απορροφάται από την επαγωγική γεννήτρια για αντιστάθμιση ισχύος. Αυτό γίνεται συνήθως με την συνεχή εναλλαγή των πυκνωτών μετά από μεταβολές στην τάση. Η χρήση των πυκνωτών αυτών γίνεται ακόμα πιο απαραίτητη καθώς χωρίς αυτούς, λόγω διακυμάνσεων της τάσης οι ανεμογεννήτριες αντλούν ποικίλα ποσά αέργου ισχύος από το δίκτυο και προκαλούν διακυμάνσεις της τάσης του δικτύου και αύξηση των απωλειών γραμμής. [33] [34]



Εικόνα 46. Σύνδεση στο δίκτυο ανεμογεννήτριας σταθερών στροφών.

4.6.2 Ανεμογεννήτριες μεταβλητών στροφών

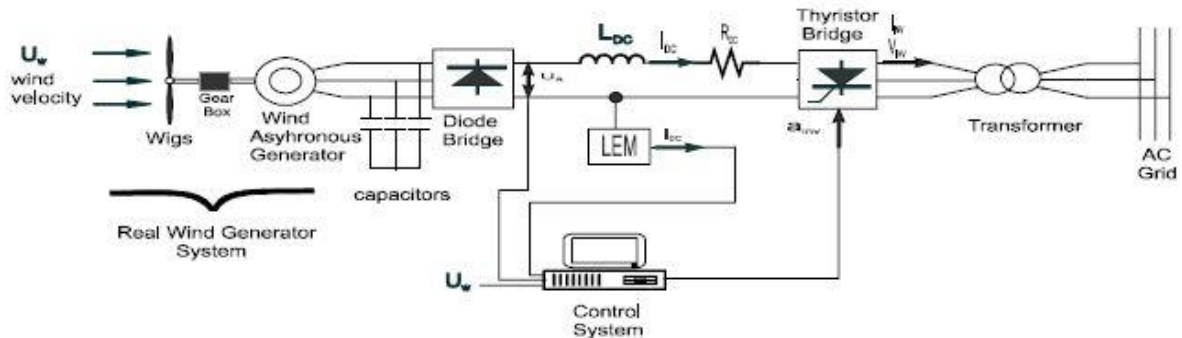
Στις ανεμογεννήτριες αυτές δεν είναι δυνατή η απευθείας σύνδεσή τους στο δίκτυο καθώς η ταχύτητα του ρότορα θα καθοριζόταν από την σταθερή συχνότητα του δικτύου και έτσι θα ήταν αδύνατο να ακολουθήσει την ταχύτητα του ανέμου. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιούνται διάφορες τοπολογίες ηλεκτρονικών ισχύος και μεταβάλλοντας τις γωνίες έναυσης των ηλεκτρονικών στοιχείων των τοπολογιών αυτών ελέγχεται η μεταβολή του ηλεκτρικού φορτίου της γεννήτριας και συνεπώς η μέγιστη παραγωγή. [33] [34] [35]

4.6.2.1 Ασύγχρονη γεννήτρια βραχυκυκλωμένου κλωβού

Οι ασύγχρονες γεννήτριες βραχυκυκλωμένου κλωβού μπορούν να λειτουργήσουν σε ανεμογεννήτριες μεταβλητών στροφών είτε με τη χρήση μετατροπέων πηγής τάσης είτε πηγής ρεύματος. Η πιο απλή και συνηθισμένη διάταξη είναι ένας μετατροπέας πηγής τάσης στην πλευρά του δικτύου που αποτελείται από ένα αντιστροφέα με θυρίστορ και μεταγωγή από την τάση δικτύου και ένα ελεγχόμενο ανορθωτή δίοδων στην πλευρά του στάτη. Επίσης τις περισσότερες φορές απαιτείται και η χρήση πυκνωτών. [33] [34] [35]

Η γωνία έναυσης των θυρίστορ ρυθμίζεται έτσι ώστε να αρχίζει η αγωγή τους όταν η γεννήτρια έχει επιταχυνθεί, αποκτώντας ταχύτητα τέτοια ώστε η τάση εξόδου του ανορθωτή να είναι μεγαλύτερη από τη τάση του δικτύου. Η ταχύτητα, το ρεύμα και η ισχύς αυξάνονται με σχεδόν σταθερό συντελεστή ισχύος καθώς αυξάνεται η ταχύτητα του ανέμου. Ο μετατροπέας αυτός μπορεί να αποτελείται από θυρίστορ GTO λόγω της ικανότητάς τους να λειτουργούν σε ισχύ της τάξεως των MW και τα οποία προοπτικά αντικαθίστανται με στοιχεία IGBT εξαιτίας της αύξησης της ονομαστικής τάσης και του ρεύματος αυτών.

Ένα πρόβλημα που παρουσιάζεται είναι ότι υπάρχουν σημαντικές μεταβολές της παραγόμενης ισχύος λόγω της αυτοδιέγερσης των πυκνωτών και των ανεπιθύμητων συντονισμών, ειδικά στις χαμηλές ταχύτητες ανέμου.



Εικόνα 47. Σύνδεση ανεμογεννήτριας μεταβλητών στροφών με ασύγχρονη γεννήτρια βραχυκυκλωμένου κλωβού στο δίκτυο.

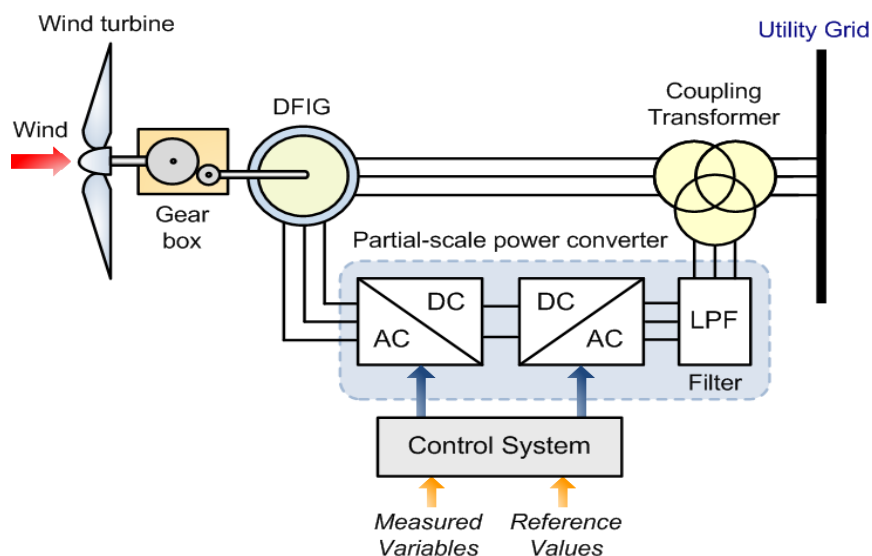
Μία άλλη συχνά χρησιμοποιούμενη τοπολογία περιέχει δύο όμοιους μετατροπείς πηγή τάσης με έλεγχο PWM παρουσιάζοντας όμως μεγάλο κόστος. Έτσι εξασφαλίζεται η δυνατότητα ροής ισχύος και προς τις δύο κατευθύνσεις, ελαχιστοποίηση της αρμονικής παραμόρφωσης των ρευμάτων και έλεγχος της αέργου ισχύος του συστήματος. Στην πλευρά της γεννήτριας περιορίζονται οι αρμονικές των ρευμάτων και της ροπής της μηχανής και επιτρέπεται η βελτιστοποίηση της δυναμικής απόκρισης της ανεμογεννήτριας.

Ένας μετατροπέας πηγής ρεύματος στην πλευρά της γεννήτριας και ένας μετατροπέας με μεταγωγή από την τάση του δικτύου στην πλευρά του δικτύου αποτελεί άλλη μία συνδεσμολογία η οποία όμως δεν είναι τόσο διαδεδομένη στις ανεμογεννήτριες όσο σε άλλες εφαρμογές, όπως για παράδειγμα σε έλεγχο ηλεκτρικών κινητηρίων συστημάτων. Αποτελεί μία απλή, αξιόπιστη και φτηνή κατασκευή που δίνει τη δυνατότητα αντιστροφής της ροής ισχύος χωρίς όμως να αντιμετωπίζεται το πρόβλημα των αρμονικών και των αιχμών των τάσεων της μηχανής. Αντίστοιχα προβλήματα παρουσιάζει και ο μετατροπέας εξόδου καθώς απαιτεί μεγάλη κατανάλωση ισχύος, καθιστώντας την τοπολογία αυτή ακατάλληλη για ασθενή δίκτυα με μεγάλη διείδυση ισχύος. Μία καλή βελτίωση αυτής της τοπολογίας είναι η χρήση δύο μετατροπέων πηγής ρεύματος με έλεγχο PWM όπου μειώνει τις αρμονικές των ρευμάτων και της ροπής της μηχανής και προσφέρει έλεγχο της αέργου ισχύος. [33] [34] [35]

4.6.2.2 Ασύγχρονη γεννήτρια δακτυλιοφόρου δρομέα

Στις ανεμογεννήτριες με ασύγχρονη γεννήτρια δακτυλιοφόρου δρομέα το σύστημα μετατροπών μπορεί να αποτελείται από ένα μη ελεγχόμενο ανορθωτή διόδων στον δρομέα και έναν αντιστροφέα στην έξοδο. Μπορεί η χρησιμοποίηση αυτού του συστήματος να χαρακτηρίζεται από υψηλό κόστος, δίνει όμως λύση στο πρόβλημα των αρμονικών στο δίκτυο και στην υψηλή κατανάλωση αέργου ισχύος, φαινόμενα που είναι μειωμένα σε σχέση με την χρήση ενός ανάλογου μετατροπέα στο στάτη. Όπως και στις προηγούμενες τροπολογίες, μπορούν να χρησιμοποιηθούν ελεγχόμενοι μετατροπείς με θυρίστορ, μετατροπείς ρεύματος ή διπλοί μετατροπείς με έλεγχο PWM για καλύτερο έλεγχο, μείωση των αρμονικών και βελτίωση του συντελεστή ισχύος του φορτίου.

Μία απλή, αξιόπιστη αλλά ακριβή λύση για μεγάλες κυρίως ανεμογεννήτριες είναι η χρήση κυκλομετατροπέα για την σύνδεση του δρομέα της γεννήτριας και του δικτύου. Δίνει τη δυνατότητα αμφίδρομης μεταφοράς ισχύος ενώ η λειτουργία μπορεί να λειτουργήσει και κάτω από την σύγχρονη ταχύτητα καθιστώντας δυνατό τον έλεγχο της αέργου ισχύος.



Εικόνα 48. Σύνδεση ανεμογεννήτριας μεταβλητών στροφών με δακτυλιοφόρο δρομέα με το δίκτυο.

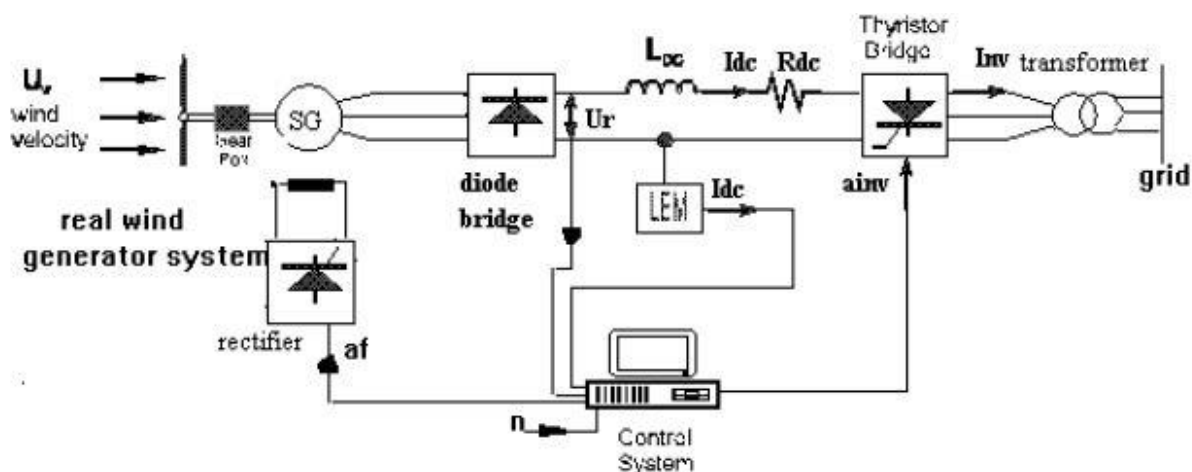
Τέλος, υπάρχουν εφαρμογές όπου επιτυγχάνεται περιορισμένη μεταβολή στροφών, της τάξης του 10%, μέσω των εξωτερικών κυκλωμάτων. Έτσι περιορίζονται τα δυναμικά προβλήματα λόγω του μηχανικού ελέγχου της γωνίας κλίσης των πτερυγίων και εξομαλύνεται η ροπή και η ισχύς εξόδου. Όμως με αυτό τον τρόπο δεν είναι δυνατή η πλήρης ανάκτηση της ισχύος του δρομέα. [33] [34] [35]

4.6.2.3 Σύγχρονη γεννήτρια

Η δυνατότητα της σύγχρονης γεννήτριας να ελέγχει τον συντελεστή ισχύος και να λειτουργεί με μοναδιαίο ή και χωρητικό συντελεστή ισχύος απαλείφει την απαίτηση παραγωγής αέργου ισχύος με αποτέλεσμα να μην χρειάζεται συστοιχία πυκνωτών. Λόγω της απαίτησης για συγχρονισμό με το δίκτυο, της άμεσης διασύνδεσης με αυτό και τις μεγάλες ηλεκτρομηχανικές ταλαντώσεις που προκαλεί ο αέρας, οι σύγχρονες γεννήτριες δεν είχαν μεγάλη εφαρμογή σε ανεμογεννήτριες. Με τη χρήση όμως των ηλεκτρονικών ισχύος ξεπεράστηκαν αυτά τα προβλήματα.

Μία απλή διάταξη είναι η χρήση μη ελεγχόμενου ανορθωτή και συμβατικού αντιστροφέα με θυρίστορ. Για την αντιμετώπιση του χαμηλού συντελεστή ισχύος καθώς και των αρμονικών χρησιμοποιείται μία βελτιωμένη τοπολογία, με μετατροπέα πηγής τάσης με IGBTs στην έξοδο, ένα μετατροπέα DC/DC στην πλευρά συνεχούς και την είσοδο να παραμένει ίδια. Με την διάταξη αυτή όμως δεν λύνεται το πρόβλημα της μονόδρομης ροής ισχύος.

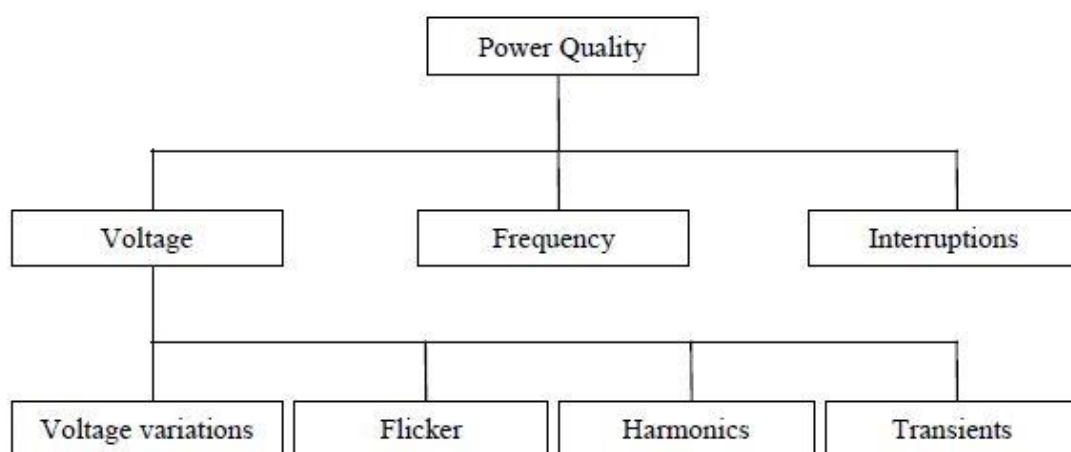
Με τις σύγχρονες γεννήτριες μεγάλου αριθμού πόλων και με τις τεχνικές που περιγράφηκαν προηγουμένως ξεπεράστηκε η αναγκαιότητα χρήσης κιβώτιου ταχυτήτων με αποτέλεσμα την εξάλειψη των μηχανικών θορύβων, βελτίωση της αξιοπιστίας και μείωση του βάρους των ανεμογεννητριών. Εκτός αυτού η σύνδεση της γεννήτριας στο δίκτυο χωρίς την ύπαρξη μηχανικών μερών σημαίνει εξάλειψη των αρμονικών του μηχανικού συστήματος και αύξηση του χρόνου ζωής της ανεμογεννήτριας, ενώ μπορεί να γίνει άμεσος έλεγχος της τάσης εξόδου και μείωση των αρμονικών στο δίκτυο καθώς και της άεργου ισχύος. [33] [34]



Εικόνα 49. Σύνδεση ανεμογεννήτριας μεταβλητών στροφών με σύγχρονη γεννήτρια με δυνατότητα ελέγχου της τάσης του αντιστροφέα και της διέγερσης της Σ.Γ.

5 Ποιότητα και πρότυπα ισχύος ανεμογεννητριών

Τέλεια ποιότητα ισχύος σημαίνει ότι η τάση είναι μία συνεχής και ημιτονοειδής κυματομορφή με σταθερό πλάτος και συχνότητα. Η ποιότητα ισχύος εξαρτάται από τρεις κατηγορίες, την τάση, την συχνότητα και τις διακοπές λειτουργίας. Με τη σειρά της οι διαταραχές της τάσης χωρίζονται σε διακυμάνσεις της τάσης, στα flicker, στα μεταβατικά φαινόμενα και στην αρμονική παραμόρφωση. [36]



Εικόνα 50. Κατηγορίες της ποιότητας ισχύος.

Η έγχυση της αιολικής ενέργειας στο δίκτυο επηρεάζει την ποιότητα της τάσης και καθώς η τάση θα πρέπει να ικανοποιεί τις απαιτήσεις του δικτύου και να βρίσκεται εντός ορισμένων ορίων, αυτή η επίδραση θα πρέπει να έχει εκτιμηθεί πριν από την εγκατάσταση των ανεμογεννητριών. Για να εκτιμηθεί αυτή η επίδραση θα πρέπει να υπάρχει γνώση των ηλεκτρικών χαρακτηριστικών των ανεμογεννητριών τα οποία είναι συγκεκριμένα για τον κατασκευαστή αλλά όχι και την τοποθεσία εγκατάστασης. Έχοντας λοιπόν τις τιμές των παραμέτρων για μια συγκεκριμένη ανεμογεννήτρια, η επίδρασή της στην ποιότητα της τάσης όταν εγκατασταθεί σε μία συγκεκριμένη τοποθεσία μπορεί να υπολογιστεί.

Ένα από τα πιο σημαντικά πρότυπα για την μέτρηση της ποιότητας ισχύος είναι το IEC 61400-21 από την International Electrotechnical Commission το οποίο προσδιορίζει ποια χαρακτηριστικά που είναι σχετικά με την ποιότητα ισχύος των ανεμογεννητριών πρέπει να μετρηθούν και ποια μέθοδος πρέπει να χρησιμοποιηθεί. Όλα τα αποτελέσματα είναι κανονικοποιημένα και ανεξάρτητα από την τοποθεσία της εγκατάστασης και το δίκτυο που θα συνδεθεί. Μετρήσεις και έρευνες για διαφορετικές ανεμογεννήτριες του ίδιου τύπου αλλά σε διαφορετικά μέρη έδειξαν ότι τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά στην μία τοποθεσία είναι παρόμοια ή ίδια με αυτά σε άλλες τοποθεσίες και έτσι δεν χρειάζεται να υπολογίζονται για κάθε μεμονωμένη ανεμογεννήτρια αλλά για μία κάθε τύπου. Τα δεδομένα με τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά των ανεμογεννητριών παρέχουν τα βασικά σχετικά με την σύνδεση στο δίκτυο μιας ανεμογεννήτριας ή ενός αιολικού πάρκου. Για να

συνδεθεί ένα αιολικό πάρκο στο δίκτυο μιας συγκεκριμένης τοποθεσίας απαιτούνται δεδομένα τόσο για την τοποθεσία όσο και για το δίκτυο στην τοποθεσία αυτή.

Η MEASNET αποτελεί ένα δίκτυο ισοτιούτων μέτρησης αιολικής ενέργειας που έχει σκοπό να εναρμονίσει μετρητικές διαδικασίες και συστάσεις ώστε να επιτευχθεί σύγκριση και κοινή αναγνώριση των αποτελεσμάτων από τα μέλη της. Ένα μεγάλο μέρος των διαδικασιών και των αποτελεσμάτων της συμπίπτουν με αυτά της IEC, όμως οι κατευθυντήριες γραμμές της MEASNET απαιτούν πιο εκτεταμένες μετρήσεις όσο αφορά τα αρμονικά ρεύματα.

Στη Γερμανία, το *Fordergesellschaft Windenergie (FGW)* χρησιμοποιείται για την μέτρηση της ποιότητας ισχύος των ανεμογεννητριών. Συντάχθηκε στις αρχές τις δεκαετίας του 90' και αποτελεί ένα χρήσιμο όργανο για την σύνδεση των ανεμογεννητριών στο δίκτυο που συνεχώς βελτιώνεται και ανανεώνεται. Αν και οι μέθοδοι και οι διαδικασίες που χρησιμοποιούνται μοιάζουν με αυτές της IEC, υπάρχουν κάποιες διαφορές μεταξύ των μεθόδων των δύο αυτών κατευθυντήριων γραμμών και έτσι τα αποτελέσματα δεν είναι συγκρίσιμα.

Σύμφωνα με τις παραπάνω κατευθυντήριες γραμμές για την ποιότητα ισχύος μετριοούνται αρμονικές, flicker και μετάδοση τόσο για κανονική όσο και για διακοπτική λειτουργία ξεχωριστά, καθώς και ο συντελεστής ισχύος, η κατανάλωση αέργου ισχύος και οι αιχμές της ισχύος. [36] [32]

5.1 Μέγιστη επιτρεπόμενη ισχύς

Ο μέσος όρος της ισχύος εξόδου για διάστημα 10 λεπτών μια ανεμογεννήτριας μπορεί να υπερβεί την εκτιμώμενη της τιμή. Έτσι η παράμετρος της μέγιστης επιτρεπόμενης ισχύος P_{mc} χρησιμοποιείται για τον καθορισμό της μέγιστης δεκάλεπτης μέσης ισχύος προσδοκώμενη από την ανεμογεννήτρια. Οι ανεμογεννήτριες με ενεργό έλεγχο της ισχύος εξόδου παρέχουν $P_{mc} = P_n$, όπου P_n είναι η εκτιμώμενη τιμή της ισχύος εξόδου, δηλαδή η μέγιστη συνεχής ισχύος εξόδου που είναι η ανεμογεννήτρια σχεδιασμένη να παράγει κάτω από κανονικές συνθήκες λειτουργίας. Οι ανεμογεννήτριες με παθητικό έλεγχο της ισχύος εξόδου συνήθως καθορίζονται με P_{mc} 20% περισσότερη από την P_n .

Ως αιχμή ισχύος ορίζεται η μέγιστη ενεργός ισχύος εξόδου της ανεμογεννήτριας για ένα συγκεκριμένο χρόνο κατά τη διάρκεια συνεχής λειτουργίας, χωρίς ξεκίνημα ή σταμάτημα της ανεμογεννήτριας. Καθορίζονται για τρία διαφορετικά χρονικά διαστήματα: στιγμιαία, 1 λεπτό και 10 λεπτά. Οι αιχμές ισχύος πρέπει να μετρηθούν και μόνο υπό τις οδηγίες της IEC καθορίζεται η δεκάλεπτη αιχμή ισχύος σύμφωνα με τις πληροφορίες των κατασκευαστών. [32]

5.2 Μέγιστη μετρούμενη ισχύς

Η μέγιστη μετρούμενη ισχύς, P_{60} , μέσος όρος ισχύος σε διάστημα 60 δευτερολέπτων, και $P_{0.2}$, μέσο όρος ισχύος σε διάστημα 0.2 δευτερολέπτων, χρησιμοποιείται για δύο σκοπούς. Από τη μία σε συστήματα προστασίας σε συνδιασμό με τα ρελέ και από την άλλη για την

λειτουργία των ανεμογεννητριών σε απομονωμένα δίκτυα. Μία τυπική γεννήτρια μεταβλητών στροφών παρέχει $P_{0.2} = P_{60} = P_n$. Ενώ στις γεννήτριες σταθερών στροφών συνήθως το $P_{0.2}$ είναι μεγαλύτερο από το P_n . [32]

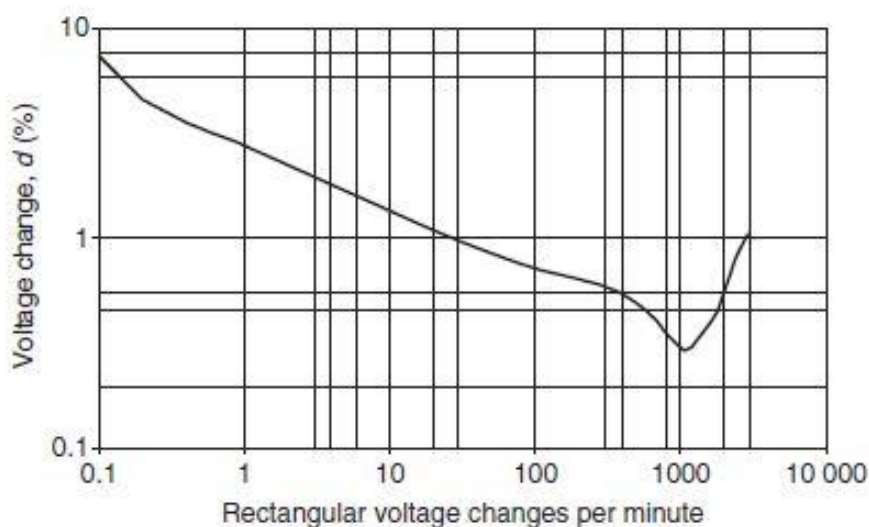
5.3 Άεργος ισχύς

Η άεργος ισχύς της ανεμογεννήτριας ορίζεται σε ένα πίνακα ως ένα 10 λεπτών μέσο όρο τιμών σε συνάρτηση ενός 10 λεπτών μέσο όρο της ισχύς εξόδου για 0%,10%,...,100% της εκτιμώμενης ισχύς. Οι ανεμογεννήτριες με γεννήτρια επαγωγής που είναι συνδεδεμένες κατευθείαν στο δίκτυο καταναλώνουν άεργο ισχύ συνάρτησε της ενεργού ισχύος εξόδου ενώ οι ανεμογεννήτριες που έχουν μετατροπείς συχνότητας είναι ικανοί να ρυθμίσουν την άεργο ισχύ στο μηδέν και ακόμα να παράγουν ή να καταναλώσουν άεργο ισχύ ανάλογα με τις ανάγκες.

Η άεργος ισχύς υπολογίζεται ως μία δεκάλεπτη μέση τιμή σύμφωνα με την IEC ή ως μία μέση τιμή σε διάρκεια ενός λεπτού σύμφωνα με το FGW για όλο το εύρος της ισχύος. Αντί για την άεργο ισχύ, το FGW απαιτεί την μέτρηση του συντελεστή ισχύος. [37] [32]

5.4 Flicker

Οι διακυμάνσεις της ισχύς των ανεμογεννητριών κατά την συνεχή λειτουργία προκαλεί διακυμάνσεις στην τάση του δικτύου. Ως flicker ορίζονται οι διακυμάνσεις της τάσης σε ένα εύρος συχνοτήτων πάνω από 35 Hz. Η IEC προσδιορίζει το flickermeter το οποίο μπορεί να μετρήσει το flicker αμέσως. Βέβαια μία απευθείας μέτρηση απαιτεί μία αδιάκοπη σταθερής αντίστασης τροφοδοσία που δεν είναι εφικτό στις ανεμογεννήτριες εξ' αιτίας τους μεγέθους τους. Ο υπολογισμός του flicker βασίζεται στη μέτρηση στιγμιαίων τριφασικών τάσεων και ρευμάτων που ακολουθείται από ένα αναλυτικό καθορισμό του P_{st} για διάφορες γωνίες αντίστασης δικτύου. [36] [32]



Εικόνα 51. Καμπύλη μεταβολής της τάσης συναρτήσε των ορθογώνιων μεταβολών τάσης ανά λεπτό.

5.4.1 Συντελεστής flicker

Ο συντελεστής flicker είναι μία κανονικοποιημένη μέτρηση της μέγιστης εκπομπής flicker από μία ανεμογεννήτρια κατά τη διάρκεια συνεχούς λειτουργίας.

$$c(\psi_k, v_\alpha) = P_{st} \frac{S_k}{S_n} \quad \text{εξ 5-1}$$

Όπου P_{st} είναι η εκπομπή flicker της ανεμογεννήτριας, S_n η εκτιμώμενη φαινόμενη ισχύς και S_k η φαινόμενη ισχύς βραχυκυκλώσεως του δικτύου.

Οι ανεμογεννήτριες μεταβλητών στροφών αποφέρουν σχετικά χαμηλό συντελεστή flicker ενώ στις ανεμογεννήτριες σταθερών στροφών κυμαίνεται από μία μέση τιμή (stall-controlled) σε μία υψηλή (pitch-controlled). [36] [32]

5.4.2 Παράγοντας βήματος flicker

Ο παράγοντας βήματος flicker είναι μία κανονικοποιημένη μέτρηση της εκπομπής flicker μίας συγκεκριμένης διακοπτικής λειτουργίας της ανεμογεννήτριας:

$$k_f(\psi_k) = \frac{1}{130} \frac{S_k}{S_n} P_{st} T_p^{0.31} \quad \text{εξ 5-2}$$

Όπου T_p είναι η διάρκεια της μεταβολής της τάσης λόγω της διακοπτικής λειτουργίας.

Ο παράγοντας αυτός θα πρέπει να δίνεται για συγκεκριμένη γωνία φάσης αντίστασης δικτύου και τύπου διακοπτικών λειτουργιών. Οι ανεμογεννήτριες μεταβλητών στροφών αποφέρουν σχετικά χαμηλό παράγοντα βήματος flicker ενώ στις ανεμογεννήτριες σταθερών στροφών κυμαίνεται από μία μέση τιμή (pitch-controlled) σε μία υψηλή (stall-controlled). [36] [32]

5.5 Μέγιστος αριθμός των διακοπτικών λειτουργιών της ανεμογεννήτριας

Οι διακοπτικές λειτουργίες μπορούν να προκαλέσουν διακυμάνσεις εξ αιτίας των ρευμάτων εισροής και να προκαλέσουν flicker. Όλα τα πρότυπα απαιτούν μετρήσεις που έχουν να κάνουν με flicker και διακυμάνσεις τάσεις κατά τη διάρκεια διακοπτικών λειτουργιών. Στα Γερμανικά πρότυπα η αποτύπωση του flicker και οι διακυμάνσεις της τάσης συνδυάζονται σε ένα παράγοντα που είναι εύκολο να εφαρμοστεί στο δίκτυο όμως είναι λιγότερο ακριβής.

Οι εξής περιπτώσεις είναι σχετικές καθώς προκαλούν σημαντικές μεταβολές στην τάση:

- Ξεκίνημα της ανεμογεννήτριας στο cut-in της ταχύτητας του ανέμου.
- Ξεκίνημα της ανεμογεννήτριας στην εκτιμώμενη ταχύτητα του ανέμου.
- Η χειρότερη περίπτωση της διακοπής μεταξύ των γεννητριών (αν η ανεμογεννήτρια έχει περισσότερες από μία γεννήτρια ή μία γεννήτρια με πολλαπλά τυλίγματα).

Η αποδοχή των διακοπών λειτουργίας εξαρτάται όχι μόνο από την επίδρασή τους στην τάση του δικτύου αλλά και από το πόσο συχνά συμβαίνουν. Έτσι πρέπει να δηλώνεται ο μέγιστος αριθμός διακοπών εντός περιόδου 10 λεπτών N_{10} και εντός 2 ωρών N_{120} οι οποίοι χρησιμοποιούνται από τα σύγχρονα συστήματα ελέγχου. [36] [32]

5.6 Παράγοντας μεταβολής της τάσης

Ο παράγοντας μεταβολής της τάσης είναι μια κανονικοποιημένη μέτρηση μεταβολής της τάσης που προκαλείται από μία διακοπτική λειτουργία της ανεμογεννήτριας:

$$k_u(\psi_k) = \sqrt{3} \frac{U_{max} - U_{min}}{U_n} \frac{S_k}{S_n} \quad \text{εξ 5-3}$$

Όπου U_{min} και U_{max} είναι η ελάχιστη και μέγιστη τάση λόγω των διακοπών και U_n η ονομαστική πολιτική τάση. Ο παράγοντας μεταβολής της τάσης k_u είναι παρόμοιος με το παράγοντα του ρεύματος εισροής k_i , που είναι ο λόγος του μέγιστου ρεύματος εισροής και του εκτιμώμενου ρεύματος, αν και το k_u εξαρτάται από γωνία φάσης της αντίστασης δικτύου. Η μέγιστη τιμή του θα είναι αριθμητικά κοντά με αυτή του k_i .

Οι ανεμογεννήτριες μεταβλητών στροφών αποφέρουν σχετικά χαμηλό παράγοντα μεταβολής ενώ στις ανεμογεννήτριες σταθερών στροφών κυμαίνεται από μία μέση τιμή (pitch-controlled) σε μία υψηλή (stall-controlled). [36] [32]

5.7 Αρμονικές

Η εκπομπή αρμονικών ρευμάτων κατά τη διάρκεια συνεχής λειτουργίας της ανεμογεννήτριας θα πρέπει να έχει οριστεί. Τα μεμονομένα αρμονικά ρεύματα δίνονται σαν ένας μέσος όρος σε διάρκεια 10 λεπτών για κάθε αρμονική μέχρι και την 50^η στην ισχύ εξόδου δίνοντας το μέγιστο αρμονικό ρεύμα και επιπλέον η μέγιστη συνολική αρμονική παραμόρφωση του ρεύματος θα πρέπει επίσης να έχει οριστεί. Οι αρμονικές εκπομπές έχουν υπολογιστεί από μερικές εγκαταστάσεις ανεμογεννητριών με επαγωγικές γεννήτριες αλλά χωρίς μετατροπείς ηλεκτρονικών ισχύος. Όμως δεν υπάρχει ακριβής διαδικασία μέτρησης των αρμονικών εκπομπών των μηχανών επαγωγής και δεν υπάρχει παράδειγμα παρενόχλησης των πελατών ή ζημιών στον εξοπλισμό λόγω των αρμονικών εκπομπών. Ένας συνηθισμένος τρόπος μέτρησης των αρμονικών είναι ο συντελεστής ολικής αρμονικής παραμόρφωσης, THD (Total Harmonic Distortion).

Ο συντελεστής ολικής αρμονικής παραμόρφωσης της τάσης δίνεται από τον τύπο:

$$V_{THD} = \sqrt{\sum_{h=2}^{h=40} \frac{V_h^2}{V_1^2}} * 100\% \quad \text{εξ 5-4}$$

Όπου V_h είναι η αρμονική τάση τάξεως h^{th} και V_1 η τάση της θεμελιώδης συχνότητας. Τα όρια παραμόρφωσης τάσης για ένα σύστημα είναι 5% για τον THD και 3% για κάθε μεμονομένη αρμονική.

Ο συντελεστής ολικής αρμονικής παραμόρφωσης του ρεύματος δίνεται από τον τύπο:

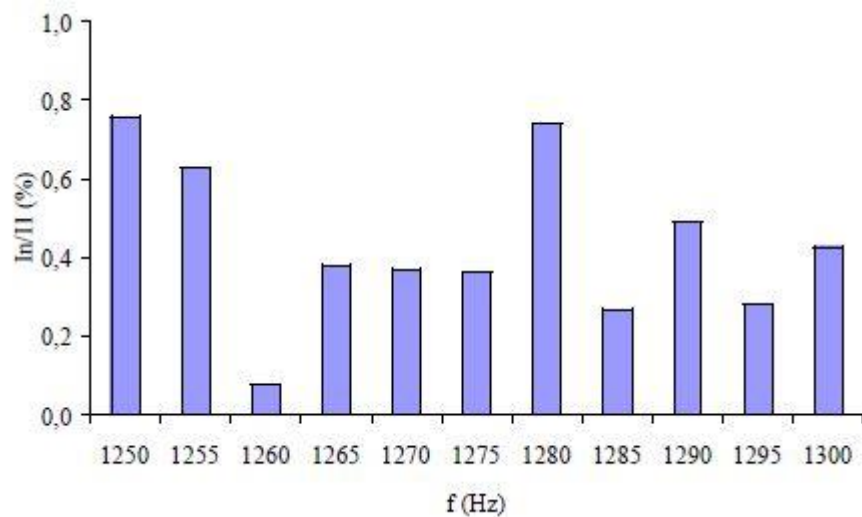
$$I_{THD} = \sqrt{\sum_{h=2}^{h=40} \frac{I_h^2}{I_1^2}} * 100\% \quad \text{εξ 5-5}$$

Όπου I_h είναι το αρμονικό ρεύμα τάξεως h^{th} και I_1 το ρεύμα της θεμελιώδης συχνότητας. Τα όρια του THD του ρεύματος σε ένα σύστημα είναι 5%. [37]

Σύμφωνα με τα πρότυπα αυτά, η μέτρηση των αρμονικών δεν απαιτείται για ανεμογεννήτριες με σταθερές στροφές που η μηχανή επαγωγής είναι συνδεδεμένη κατευθείαν στο δίκτυο αλλά μόνο για μεταβλητών στροφών που χρησιμοποιούν μετατροπείς καθώς αυτές παράγουν αρμονικά ρεύματα. Η IEC απαιτεί την μέτρηση ακέραιων αρμονικών ρευμάτων μέχρι 50^{ης} τάξης. Συνήθως οι μετατροπείς ισχύος των ανεμογεννητριών είναι αντιστροφείς με έλεγχο PWM που έχουν ρολόγια συχνοτήτων εύρους 2-3 kHz και παράγουν κυρίως υπερ-αρμονικά ρεύματα. Έτσι οι απαιτήσεις αυτές δεν αντικατοπτρίζουν τις αρμονικές εκπομπές των ανεμογεννητριών.

Η MEASNET και η FGW απαιτούν μετρήσεις υπερ-αρμονικών ρευμάτων μέχρι 2 kHz και παραμορφώσεις ρευμάτων στο εύρος 2-9 kHz. Αν και οι δύο απαιτούν υπολογισμούς στο ίδιο εύρος συχνοτήτων τα αποτελέσματα δεν είναι συγκρίσιμα. Η MEASNET απαιτεί μετρήσεις σε διάστημα 10 λεπτών και η σχετική τιμή είναι η μέγιστη δεκάλεπτη τιμή κάθε συχνότητας. Η FGW απαιτεί μέτρηση διαστημάτων 8 περιόδων της γραμμής και για κάθε συχνότητα καθορίζεται το 99% κάθε τιμής του αρμονικού ρεύματος. Στην πράξη, η μόνη τους διαφορά είναι τα διαφορετικά χρονικά διαστήματα που χρησιμοποιούνται. Γενικά, οι αρμονικές εκπομπές των ανεμογεννητριών δεν είναι σταθερές και οι αρμονικές, οι υπερ-αρμονικές και οι υψηλής συχνότητας παραμορφώσεις συμπεριφέρονται στοχαστικά.

Ένα από τα κύρια προβλήματα από τους υπολογισμούς των αρμονικών στις ανεμογεννήτριες είναι η επιρροή των ήδη υπάρχουσων αρμονικών της τάσης στο δίκτυο. Η κυματομορφή της τάσης στο δίκτυο δεν είναι ημιτονοειδής καθώς υπάρχουν αρμονικές όπως είναι της 5^{ης} και 7^{ης} τάξης που επηρεάζουν τις μετρήσεις. Δεν έχει νόημα να συμπεριλαμβάνονται αυτές γιατί προέρχονται από το δίκτυο οπότε δημιουργείται το πρόβλημα του προσδιορισμού και ξεχωρισμού των αρμονικών που προέρχονται από την ανεμογεννήτρια και αυτών που προέρχονται από το δίκτυο. Ένας δείκτης είναι η γωνία φάσης της αρμονικής και η εξάρτηση από το χρόνο ή την ισχύ. Επίσης πρέπει να είναι γνωστό αν υπάρχουν κοντά άλλες ανεμογεννήτριες με ηλεκτρονικά ισχύος καθώς επηρεάζουν τις μετρήσεις των αρμονικών. [36] [32]



Εικόνα 52. Περιεχόμενο υπερ-αρμονικών του ρεύματος μεταξύ 1250-1300 Hz.

Οι αρμονικές αυξάνουν τις απώλειες γραμμής ενώ μπορούν να προκαλέσουν υπερθέρμανση των εξοπλισμών, καταπονώντας τους και μειώνοντας την διάρκεια ζωής τους. Οι υποαρμονικές μπορούν να προκαλέσουν flickers, ανισορροπία και κορεσμό στον πυρήνα των μετασχηματιστών καθώς και θερμική γήρανση στις επαγωγικές μηχανές. [38]

6 Μελέτη επίδρασης στο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας των ανεμογεννητριών με γεννήτριες διπλής τροφοδότησης

Η επίδραση της αυξημένης διείσδυσης ανεμογεννητριών με γεννήτρια διπλής τροφοδότησης έχει επιδράσεις στο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας οι οποίες εξετάζονται εκτιμώντας ηλεκτρομηχανικά φαινόμενα που σχετίζονται με την ευστάθεια της γωνίας του δρομέα, την ευστάθεια του μικρού σήματος, της τάσης και της συχνότητας. Η συμπεριφορά τους καθορίζεται σε μεγάλο βαθμό από τον μετατροπέα και τα συστήματα ελέγχου και εφόσον είναι επαγωγικές μηχανές έχουν 4 μηχανισμούς με τους οποίους μπορούν να επηρεάσουν την απόσβεση ηλεκτρομηχανικών ταλαντώσεων:

- Εκτοπίζοντας τις σύγχρονες μηχανές από την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.
- Αντικαθιστώντας τις σύγχρονες γεννήτριες που έχουν σταθεροποιητές ισχύος.
- Ελέγχοντας την αλληλεπίδραση με την αποσβεννύμενη ροπή στις κοντινές μεγάλες σύγχρονες γεννήτριες.
- Επιδρώντας σε μεγάλα ποσά των ροών ισχύος στις γραμμές μεταφοράς.

Η μελέτη της επίδρασης αυτής είναι αναγκαία για την λήψη των απαραίτητων μέτρων και την βελτίωση της αξιοπιστίας και της αποτελεσματικότητας του συστήματος. Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, οι τρεις πιο σημαντικές πτυχές της δυναμικής παρουσίας του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας που θα μελετηθούν για την επίδραση των ανεμογεννητριών είναι η ευστάθεια της γωνίας του δρομέα, της τάσης και της συχνότητας. [39]

6.1 Επίδραση στην ευστάθεια της γωνίας του δρομέα

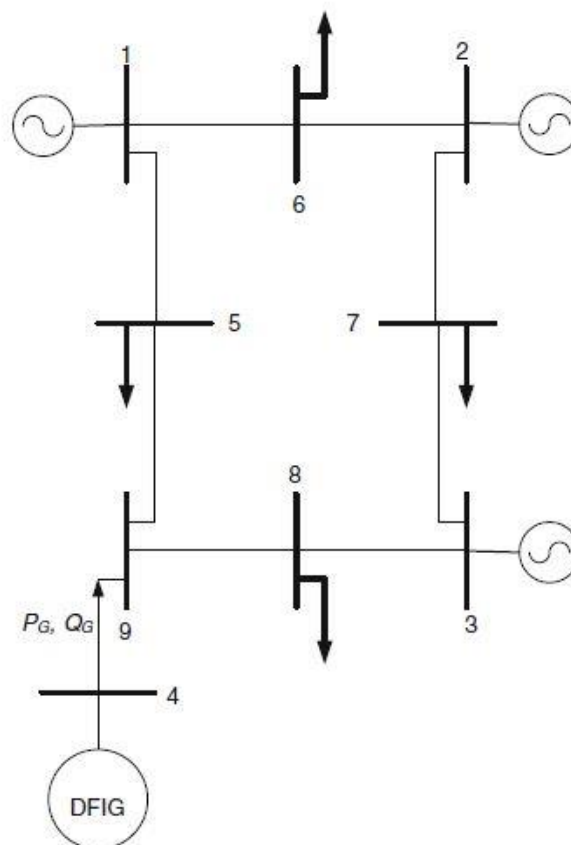
Κατά την μελέτη της επίδρασης των ανεμογεννητριών στην ευστάθεια της γωνία του δρομέα, είναι δύο διαφορετικές πτυχές που πρέπει να συζητηθούν που διαφέρουν σε σχέση με την φύση του φαινομένου που εξετάζεται και το είδος των εργαλείων που χρησιμοποιούνται.

- Ευστάθεια μικρού σήματος της γωνίας του δρομέα.
- Μεταβατική ευστάθεια της γωνίας του δρομέα.

6.1.1 Επίδραση στην ευστάθεια μικρού σήματος της γωνίας του δρομέα.

Κλειδί για την ανάλυση της επίδρασης αυτής είναι η παραδοχή ότι οι αλλαγές θεωρούνται αρκετά μικρές και επιτρέπουν την γραμμικοποίηση των εξισώσεων του συστήματος με αποτέλεσμα όλα τα διαθέσιμα εργαλεία για την ανάλυση ευστάθειας μικρού σήματος που χρησιμοποιούν κατάλληλες αναπαραστάσεις ανεμογεννητριών με διπλή τροφοδότηση μπορούν να εφαρμοσθούν.

Για την ευκολότερη κατανόηση της επίδρασης αυτής, θεωρούμε το παρακάτω μικρό σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας που αποτελείται από 9 ζυγούς, τρεις σύγχρονες γεννήτριες και ένα αιολικό πάρκο με μια ισοδύναμη γεννήτρια διπλής τροφοδότησης που είναι συνδεδεμένο στο ζυγό 9 :



Εικόνα 53. Σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας με γεννήτρια διπλής τροφοδότησης.

Ως μηχανή επαγωγής, η γεννήτρια διπλής τροφοδότησης εκχέει στο ζυγό 9 ενεργό και άεργο ισχύ, P_G και Q_G αντίστοιχα και οι γωνίες του δρομέα των σύγχρονων γεννητριών θα ρυθμιστούν κατάλληλα ώστε να επιτευχθεί εκ νέου κατάσταση μόνιμης λειτουργίας. Ανάλογα με την αντίσταση, τα φορτία και την ροή ισχύος των γραμμών μεταφοράς, κάποιες από τις γωνίες του δρομέα μπορεί να καθυστερήσουν και κάποιες να προηγηθούν σε σχέση με την αρχική τους θέση ενώ λόγω των μετατροπών που υπάρχουν η έκχυση ισχύος δεν συνοδεύεται με προσθήκη αδράνειας στο σύστημα.

Παρατηρείται ότι ανάλογα με τις μεταβολές των διαφορών της γωνίας του δρομέα μεταξύ των τριών σύγχρονων γεννητριών, αλλάζει και η δυνατότητα συγχρονισμού κάποιων μηχανών και αν οι σχετικές διαφορές αυξηθούν μειώνεται η δυνατότητα

συγχρονισμού ενώ αν μειωθούν αυξάνεται. Επίσης θα επηρεάσει και την απόσβεση των ηλεκτρομηχανικών ταλαντώσεων και την συχνότητα ταλάντωσης που σημαίνει ότι η τοποθεσία και η ποσότητα έγχυσης ισχύος έχει επίδραση στην συμπεριφορά ταλάντωσης του συστήματος. [39]

6.1.2 Πρόβλημα ευστάθειας μικρού σήματος

Η δυναμική συμπεριφορά του συστήματος ενέργειας περιγράφεται από τις παρακάτω εξισώσεις:

$$\dot{x} = h(x, u, t) \quad \text{εξ 6-1}$$

$$y = g(x, u) \quad \text{εξ 6-2}$$

Όπου x είναι το διάνυσμα μεταβλητών κατάστασης, h το σύστημα μη γραμμικών εξισώσεων, u το διάνυσμα εισόδων του συστήματος και y το διάνυσμα των αλγεβρικών μεταβλητών ή μεταβλητών του δικτύου. Για την ανάλυση της ευστάθειας μικρού σήματος, οι μη γραμμικές εξισώσεις του δυναμικού συστήματος ηλεκτρικές ενέργειας γραμμικοποιούνται γύρω από ένα συγκεκριμένο σημείο λειτουργίας και γίνονται:

$$\Delta \dot{x} = A \Delta x + B \Delta u \quad \text{εξ 6-3}$$

$$\Delta y = C \Delta x + D \Delta u \quad \text{εξ 6-4}$$

Όπου A η μήτρα κατάστασης, B η μήτρα εισόδων, C η μήτρα εξόδων και D η μήτρα ανατροφοδότησης. Με εφαρμογή του μετασχηματισμού Laplace έχουμε:

$$s \Delta X(s) - \Delta x(0) = A \Delta X(s) + B U(s) \quad \text{εξ 6-5}$$

$$(sI - A) \Delta X(s) = \Delta x(0) + B U(s) \quad \text{εξ 6-6}$$

Η εξίσωση 6-6 μπορεί να μετασχηματιστεί και με μια απλή μετατόπιση μεταβλητών να επιτευχθεί η προέλευση της αρχικής κατάστασης. Έτσι η απόκριση του συστήματος με μηδενική είσοδο δίνεται από:

$$(sI - A) \Delta X(s) = 0 \quad \text{εξ 6-7}$$

Οι τιμές του s που ικανοποιούν την παραπάνω εξίσωση ονομάζονται ιδιοτιμές της μήτρας A και περιέχουν σημαντικές πληροφορίες για την απόκριση του συστήματος σε μικρές διαταραχές, χαρακτηρίζοντας την ευστάθεια του συστήματος. Τα χρονοεξαρτώμενα χαρακτηριστικά μια λειτουργίας που αντιστοιχούν σε μία ιδιοτιμή λ δίνονται από την

συνάρτηση $e^{\lambda t}$. Μία θετική πραγματική ιδιοτιμή ορίζει μία εκθετική αύξουσα συμπεριφορά ενώ μία αρνητική πραγματική ιδιοτιμή ορίζει μία φθίνουσα. Μία μιγαδική ιδιοτιμή με θετικό πραγματικό μέρος έχει ως αποτέλεσμα αυξανόμενη ταλαντωτική συμπεριφορά ενώ μία με αρνητικό πραγματικό μέρος οδηγεί σε αποσβεννύμενη ταλάντωση. Άρα, το πραγματικό μέρος της ιδιοτιμής δίνει την απόσβεση ενώ το φανταστικό την συχνότητα ταλάντωσης. Η συχνότητα ταλάντωσης f και ο λόγος απόσβεσης ζ μιας μιγαδικής ιδιοτιμής $\lambda = \sigma + j\omega$ δίνονται από τις παρακάτω σχέσεις:

$$f = \frac{\omega}{2\pi} \quad \text{εξ 6-8}$$

$$\zeta = \frac{-\sigma}{\sqrt{\omega^2 + \sigma^2}} \quad \text{εξ 6-9}$$

Για μία ιδιοτιμή λ_i της μήτρας A , το ιδιοδιάνυσμά της από δεξιά v_i και το ιδιοδιάνυσμά της από αριστερά w_i ισχύει:

$$Av_i = v_i \lambda_i \quad \text{εξ 6-10}$$

$$w_i A = \lambda_i w_i \quad \text{εξ 6-11}$$

Στα μεγάλα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας, το πρόβλημα ευστάθειας μικρού σήματος μπορεί να είναι τοπικής ή γενικής φύσης. Η ταλάντωση της συχνότητας κυμαίνεται γενικά μεταξύ 0.1 και 2 Hz ανάλογα με τον αριθμό των γεννητριών. Οι τοπικές ταλαντώσεις βρίσκονται στο πάνω όριο του φάσματος αυτού, αποτελούνται από την ταλάντωση μίας γεννήτριας ή μιας ομάδας γεννητριών και η ευστάθεια τους εξαρτάται από την ισχύ του συστήματος μεταφοράς όπως φαίνεται από την πλευρά των ανεμογεννητριών, του συστήματος ελέγχου και της ισχύς εξόδου τους. Αντίθετα, οι ταλαντώσεις μιας μεγάλης περιοχής βρίσκονται στο κάτω όριο του φάσματος, αντιπροσωπεύουν ταλαντώσεις μεταξύ ομάδων γεννητριών και τα χαρακτηριστικά του φορτίου αποτελούν σημαντικό παράγοντα στην ευστάθεια των περιοχών λειτουργίας. Στην ευστάθεια μικρού σήματος το χρονικό διάστημα που μελετάται μετά τις διαταραχές είναι μεταξύ 10 και 20 δευτερολέπτων.

Οι γεννήτριες διπλής τροφοδότησης που αποτελούνται από μετρατροπείς ισχύος παίζουν σημαντικό ρόλο στη δυναμική συμπεριφορά του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας. Είναι επαγωγικές μηχανές, εκχέουν ισχύ στο σύστημα επηρεάζοντας τις γωνίες των άλλων σύγχρονων γεννητριών και δεν προσθέτουν αδράνεια στο σύστημα οπότε επηρεάζουν και την ικανότητα συγχρονισμού των σύγχρονων γεννητριών. Έτσι έχουν σημαντική επίδραση στις ηλεκτρομηχανικές ταλαντώσεις και αξίζει να αναφερθεί ο τρόπος με τον οποίο επηρεάζουν τις ταλαντώσεις αυτές οι αλλαγές στις παράμετρους του συστήματος. [39]

6.1.3 Ευαισθησία ιδιοτιμών

Η επίδραση των παραμέτρων του συστήματος στην συνολική δυναμική συμπεριφορά του συστήματος μπορεί να εξετασθεί εκτιμώντας την ευαισθησία των ιδιοτιμών σχετικά με διάφορες παραμέτρους του συστήματος.

Λαμβάνοντας την μερική παράγωγο της εξίσωσης 6-10 ως προς x_j έχουμε:

$$\frac{\partial A}{\partial x_j} v_i + A \frac{\partial v_i}{\partial x_j} = \lambda_i \frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \lambda_i}{\partial x_j} v_i \quad \text{εξ 6-12}$$

Όπου A είναι μία μήτρα κατάστασης $n \times n$, λ_i είναι η i -οστή ιδιοτιμή, v_i είναι ένα $n \times 1$ δεξιό ιδιοδιάνυσμα της μήτρας A που αντιστοιχεί στην ιδιοτιμή λ_i και n η τάξη του συστήματος.

Πολλαπλασιάζοντας την παραπάνω εξίσωση με το αριστερό ιδιοδιάνυσμα $1 \times n$ της μήτρας A , w_i που αντιστοιχεί στην ιδιοτιμή λ_i :

$$w_i \frac{\partial A}{\partial x_j} v_i + w_i A \frac{\partial v_i}{\partial x_j} = w_i \lambda_i \frac{\partial v_i}{\partial x_j} + w_i \frac{\partial \lambda_i}{\partial x_j} v_i \quad \text{εξ 6-13}$$

Και

$$w_i \frac{\partial A}{\partial x_j} v_i + w_i (A - \lambda_i I) \frac{\partial v_i}{\partial x_j} = w_i \frac{\partial \lambda_i}{\partial x_j} v_i \quad \text{εξ 6-14}$$

Όμως ισχύει

$$w_i (A - \lambda_i I) = 0 \quad \text{εξ 6-15}$$

Αντικαθιστώντας την 6-15 στην 6-14 :

$$w_i \frac{\partial A}{\partial x_j} v_i = w_i \frac{\partial \lambda_i}{\partial x_j} v_i \quad \text{εξ 6-16}$$

$$\frac{\partial \lambda_i}{\partial x_j} = \frac{w_i \frac{\partial A}{\partial x_j} v_i}{w_i v_i} \quad \text{εξ 6-17}$$

Η παραπάνω εξίσωση δείχνει την ευαισθησία της ιδιοτιμής λ_i η οποία θα χρησιμοποιηθεί για την περαιτέρω εξερεύνηση της επίδρασης της μεταβολής των παραμέτρων εξαιτίας των γεννητριών διπλής τροφοδότησης στην ταλάντωση του δικτύου.

Η βασική αρχή για την εξέταση της επίδρασης των γεννητριών διπλής τροφοδότησης στην ευστάθεια μικρού σήματος είναι η παραδοχή ότι με την διεύθυνση αιολικών πάρκων με γεννήτριες διπλής τροφοδότησης η αρχική αδράνεια του συστήματος θα μειωθεί. Πρέπει λοιπόν να προσδιοριστεί πως αλλάζει η ευστάθεια του συστήματος στην αλλαγή της αδράνειας οπότε η εξίσωση 6-18 γράφεται με τη μορφή:

$$\frac{\partial \lambda_i}{\partial H_j} = \frac{w_i \frac{\partial A}{\partial H_j} v_i}{w_i v_i}$$

εξ 6-18

Όπου H_j είναι η αδράνεια της j-οστής συμβατικής σύγχρονης γεννήτριας.

Καθώς επίσης θα πρέπει να μελετηθεί ποιοι τρόποι ταλάντωσης επηρεάζονται με επιζήμιο τρόπο και ποιοι με επικερδές.

Για να αξιολογηθεί η απόκριση του συστήματος σχετικά με μικρές διαταραχές, θα πρέπει να εκτελεστούν τα παρακάτω βήματα:

- Αντικατάσταση όλων των γεννητριών διπλής τροφοδότησης με συμβατικές σύγχρονες γεννήτριες ίδιας εγκατεστημένης ισχύς, που θα αντιπροσωπεύει το βασικό σενάριο λειτουργίας της εκτίμησης.
- Ανάλυση των ιδιοτιμών σε ένα εύρος συχνοτήτων 0.1-2 Hz και λόγο απόσβεσης κάτω από ένα ασφαλές επιλεγμένο όριο.
- Εκτίμηση της ευαισθησίας των ιδιοτιμών ως προς την αδράνεια του κάθε αιολικού πάρκου που αντιπροσωπεύεται ως μία συμβατική σύγχρονη μηχανή, που στοχεύει στην παρατήρηση της επίδρασης της αδράνειας της γεννήτριας στην δυναμική συμπεριφορά του συστήματος.
- Ανάλυση των ιδιοτιμών για την περίπτωση μετά της εισαγωγής των αιολικών πάρκων με γεννήτριες διπλής τροφοδότησης στο σύστημα όπως είχε προγραμματιστεί. [39]

6.1.4 Επίδραση στην μεταβατική ευστάθεια της γωνίας του δρομέα

Κύριος σκοπός της μελέτης της μεταβατικής ευστάθειας της γωνίας του δρομέα είναι ο διευκρινισμός της ικανότητας του συστήματος να διατηρήσει τον συγχρονισμό του μετά από μία μεγάλη διαταραχή. Χρησιμοποιείται η πλήρης μη γραμμική αναπαράσταση του μοντέλου του συστήματος και εκτελούνται προσωμοιώσεις στο πεδίο του χρόνου χρησιμοποιώντας κατάλληλα μοντέλα για τα διάφορα στοιχεία του συστήματος. Τα μοντέλα των ανεμογεννητριών, των συμβατικών σύγχρονων γεννητριών και των υπόλοιπων στοιχείων του συστήματος διατυπώνονται ως ένα σύστημα αλγεβρικών διαφορικών εξισώσεων ο οποίο λύνεται για κάποια διαταραχή. Στην περίπτωση των ανεμογεννητριών, το αιολικό πάρκο μοντελοποιείται με μία ισοδύναμη γεννήτρια και η ταχύτητα του ανέμου διατηρείται σταθερή ενώ υπάρχουν και διάφορα λογισμικά που μοντελοποιούν την ταχύτητα του ανέμου και εξετάζουν την επίδραση της διακύμανσης της ισχύς εξόδου του αιολικού πάρκου στο υπόλοιπο σύστημα.

Ένα αιολικό πάρκο εκχέει ενεργό και άεργο ισχύ στο σημείο διασύνδεσης με το δίκτυο η οποία ανάλογα με το σημείο και το μέγεθος της έκχυσης επηρεάζει τη ροή ισχύος του υπόλοιπου συστήματος. Επίσης, οι θέσεις της γωνίας του δρομέα των σύγχρονων γεννητριών του συστήματος προσαρμόζονται στην μεταβολή αυτή. Τόσο η επίδραση της μεγάλης διαταραχής στις σύγχρονες γεννήτριες όσο και η ανισοροπία ισχύος που θα προκύψει εξαρτώνται από την τοποθεσία και το μέγεθος της έκχυσης των

ανεμογεννητριών. Πρέπει να εκτελεσθούν λεπτομερείς προσωμοιώσεις στο πεδίο του χρόνου για διάφορες συνθήκες λειτουργίας και πολλά επίπεδα ισχύς εξόδου του αιολικού πάρκου ώστε να εξεταστεί η επίδραση στην μεταβατική ευστάθεια της γωνίας του δρομέα στις άλλες σύγχρονες γεννήτριες του συστήματος. [39]

6.2 Επίδραση στην ευστάθεια τάσης

Κατά την εξέταση της επίδρασης των ανεμογεννητριών με γεννήτρια διπλής τροφοδότησης στην απόκριση της τάσης μετά από διαταραχές στην περιοχή του αιολικού πάρκου και στην ευστάθεια της τάσης του συστήματος στο οποίο είναι διασυνδεδεμένο, είναι πολύ σημαντική η ικανότητα ελέγχου της άεργου ισχύος τόσο της ανεμογεννήτριας όσο και όλου του αιολικού πάρκου. [39]

6.2.1 Τρόποι λειτουργίας ανεμογεννητριών DFIG

Ο μετατροπέας που είναι συνδεδεμένος στην πλευρά του δρομέα της ανεμογεννήτριας έχει την δυνατότητα να προσαρμόσει τα ρεύματα του δρομέα ώστε να επιτυγχθεί η επιθυμητή ενεργός και άεργος ισχύς εξόδου στην πλευρά του στάτη. Η επιθυμητή ενεργός ισχύς επιτυγχάνεται μέσω της καμπύλης μέγιστης ισχύος ενώ η επιθυμητή άεργος ισχύς εξαρτάται από τον τρόπο ελέγχου της ανεμογεννήτριας. Υπάρχουν δύο τρόποι ελέγχου:

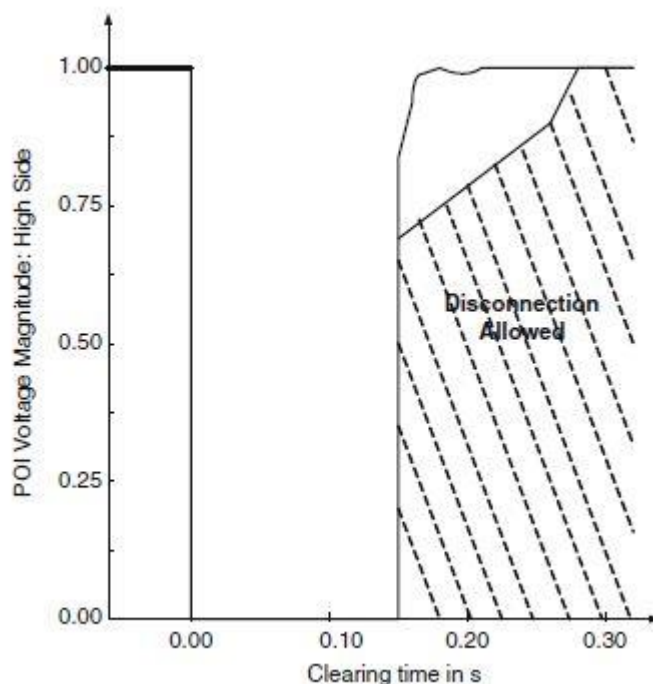
- Έλεγχος τάσης
- Έλεγχος συντελεστή ισχύος

Η ενεργός και άεργος ισχύς του στάτη ελέγχονται μέσω του συντελεστή ισχύος ώστε να διατηρείται σταθερός στο σημείο διασύνδεσης. Η άεργος ισχύς ελέγχεται μέσω της τάσης ώστε να διατηρηθεί το πλάτος της τάσης σε μία συγκεκριμένη τιμή. Συνήθως ο μετατροπέας στην πλευρά του στάτη είναι ρυθμισμένος σε μοναδιαίο συντελεστή ισχύος. [39]

6.2.2 Αδιάλειπτη λειτουργία ανεμογεννητριών DFIG

Ανέκαθεν οι ανεμογεννήτριες ήταν συνδεδεμένες στα δίκτυα διανομής και σε περίπτωση μιας μεγάλης διαταραχής που είχε ως συνέπεια σημαντική βύθιση της τάσης κοντά στην ανεμογεννήτρια ήταν θεμιτή πρακτική η ενεργοποίησή της. Αυτό βασιζόταν στο γεγονός ότι επειδή το σύστημα διανομής τροφοδοτούνταν από ακτινικά συστήματα θα είχαν ως αποτέλεσμα τα αιολικά πάρκα που ήταν διασυνδεδεμένα στο σύστημα να ακολουθούν την διαταραχή και συνεπώς σε μία απομονωμένη λειτουργία ικανή να προκαλέσει συνθήκες υπερτάσεων. Με την εξέλιξη της τεχνολογίας των ανεμογεννητριών και την δημιουργία μεγάλων αιολικών πάρκων που συνδέονται σε μεγάλα δίκτυα μεταφοράς, το ζήτημα της αδιάλειπτης λειτουργίας υπό τάση αποτελούσε ένα σημαντικό

λειτουργικό θέμα οδηγώντας στην ανάπτυξη κανονισμών για τα αιολικά πάρκα, όπως είναι η παραμονή τους στο δίκτυο σε περίπτωση μεγάλων διαταραχών τάσης για συγκεκριμένο χρονικό διάστημα και τάση λειτουργίας.



Εικόνα 54. Καμπύλη τάσης ανεμογεννήτριας συναρτήσει του χρόνου εκκαθάρισης.

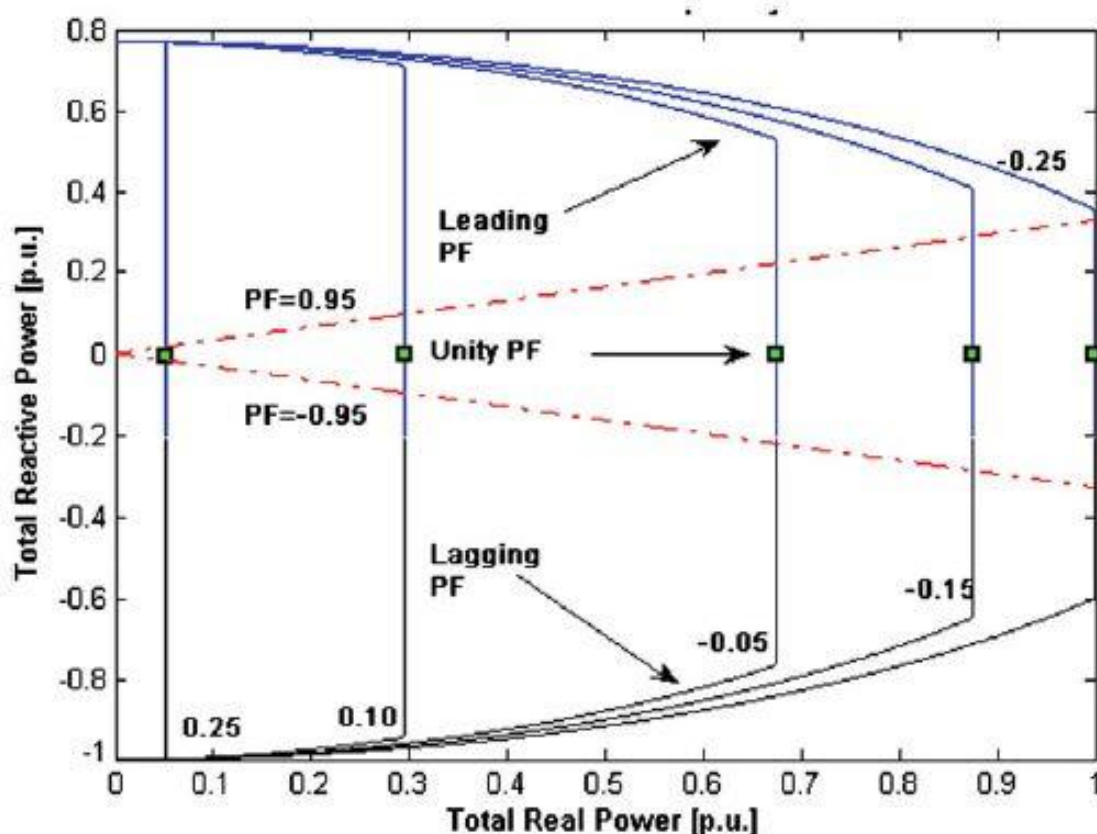
Οι κανονισμοί απαιτούν τα αιολικά πάρκα να παραμένουν σε λειτουργία κατά την διάρκεια τριφασικών σφαλμάτων με κανονικό χρόνο εκκαθάρισης και για σφάλματα μίας φάσης-γης με καθυστερημένη εκκαθάριση καθώς και την επαναφορά της τιμής της τάσης στα επίπεδα που ήταν πριν το σφάλμα εκτός αν αυτό αποσυνδέει την ανεμογεννήτρια από το σύστημα. Σε περίπτωση που ο χρόνος εκκαθάρισης είναι μεγαλύτερος από τον προκαθορισμένο ή η τάση δεν επανέρχεται στα επίπεδα που βρισκόταν πριν από το σφάλμα, το αιολικό πάρκο μπορεί να αποσυνδεθεί από το σύστημα διανομής. Οι αιολικοί σταθμοί παραγωγής θα πρέπει να μείνουν συνδεδεμένοι κατά την διάρκεια τέτοιων σφαλμάτων με επίπεδα τάσης κοντά στο 0, όπως μετράται στην υψηλή πλευρά του σημείου διασύνδεσης του μετασχηματιστή.

Το επόμενο σημαντικό θέμα με τις γεννήτριες διπλής τροφοδότησης είναι η ευαισθησία ρεύματος των IGBTs τρανζίστορ που αποτελούν του μετατροπείς καθώς είναι πιθανόν να καταστραφούν αν ξεπεραστούν τα όρια του ρεύματος. Ένας τρόπος να αποφευχθεί αυτό είναι η χρήση ενός συστήματος βραχυκύκλωσης μεταβλητής αντίστασης. Πιο συγκεκριμένα, μία εξωτερική μεταβλητή αντίσταση συνδέεται παράλληλα με τους δακτύλιους ολίσθησης, περιορίζει το ρεύμα του δρομέα και απομονώνει τον μετατροπέα από την πλευρά του δρομέα προστατεύοντάς τον από τα καταστροφικά μεταβατικά ρεύματα που μπορούν να παραχθούν κατά την διάρκεια των διαταραχών. [39]

6.2.3 Χαρακτηριστική ισχύος ανεμογεννητριών DFIG

Οι συμβατικές ηλεκτρομηχανικές μηχανές έχουν εγγενείς περιορισμούς που περιορίζουν την παραγωγή ισχύος τους και για προσδιορίσει κανείς την πραγματική ισχύ που μπορούν να παράξουν θα πρέπει ξέρει τα λειτουργικά χαρακτηριστικά τους. Στην περίπτωση των ανεμογεννητριών με γεννήτριες διπλής τροφοδότησης, δύο είναι οι παράγοντες που επηρεάζουν τους περιορισμούς που καθορίζουν την ικανότητα παραγωγής ισχύος, η επαγωγική μηχανή δακτυλιοφόρου δρομέα και τα ηλεκτρονικά ισχύος των μετατροπέων. Μία άλλη διάκριση των ανεμογεννητριών αυτών και μίας συμβατικής σύγχρονης γεννήτριας είναι ότι στις πρώτες η ισχύς εξόδου εξαρτάται και από την ταχύτητα του ανέμου καθώς και από την καμπύλη μέγιστης ισχύος και έτσι τα όρια της ενεργού ισχύος ορίζονται από την ταχύτητα του ανέμου. Από την άλλη πλευρά, η ικανότητα παραγωγής αέργου ισχύος καθορίζεται από τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά της μηχανής, τα οποία θέτουν περιορισμούς στις τάσεις και τα ρεύματα του στάτη και του δρομέα.

Παρακάτω φαίνεται η καμπύλη ισχύος ενός αιολικού πάρκου ανεμογεννητριών με γεννήτρια διπλής τροφοδότησης. [39]



Εικόνα 55. Στατική καμπύλη ισχύος αιολικού πάρκου ανεμογεννητριών DFIG

6.2.4 Επίδραση στην ευστάθεια μόνιμης κατάστασης της τάσης

Οι ανεμογεννήτριες με γεννήτρια διπλής τροφοδότησης έχουν την ικανότητα να ελέγχουν την άεργο ισχύ εξόδου χωρίς να χρειάζονται πρόσθετη υποστήριξη αέργου ισχύος. Η επίδρασή τους στην ευστάθεια μόνιμης κατάστασης της τάσης εξαρτάται από την θέση διασύνδεσης του αιολικού πάρκου με το δίκτυο καθώς και από την τοποθεσία

των περιοχών που είναι ευαίσθητες στα προβλήματα τάσης, πράγμα που συμβαίνει λόγω έλειψης πηγών αέργου ισχύος, της φύσης του φορτίου στην περιοχή αυτή ή της ικανότητας του συστήματος διανομής στην περιοχή. Σε πολλά μέρη του κόσμου οι ανεμογεννήτριες συνδέονται στο σύστημα διανομής ή στο υποσύστημα μεταφοράς με αποτέλεσμα να έχει επίδραση στο μαζικό σύστημα μεταφοράς όσο αφορά την υποστήριξη της τάσης.

Μια ανεμογεννήτρια διπλής τροφοδότησης μπορεί να λειτουργήσει με 2 τεχνικές έλεγχου. Με τον έλεγχο σταθερού συντελεστή ισχύος όπου ελέγχεται η παραγωγή αέργου ισχύος ώστε να επιτευχθεί σταθερός συντελεστής ισχύος και με τον έλεγχο τερματικής τάσης όπου ελέγχεται η άεργος ισχύς ώστε να επιτευχθεί η επιθυμητή τάση σε ένα συγκεκριμένο ζυγό. Έχει αποδειχθεί ότι ο ενισχυμένος έλεγχος τάσης βελτιώνει την τάση στο σύστημα και επομένως την απόδοση του συστήματος.

Κατά την μελέτη τις επίδρασης στην ευστάθεια μόνιμης κατάστασης είναι σημαντικό να εξετασθεί η μεταβλητότητα του ανέμου καθώς η μεταβλητότητα αυτή έχει επίδραση στην ικανότητα των αιολικών πάρκων να παρέχουν την επιθυμητή άεργο ισχύ ενώ υπάρχουν δύο τρόποι ώστε να αντιμετωπιστεί. Ο πρώτος είναι η χρήση μιας πιθανοτικής προσέγγισης της ροής ισχύος και ο δεύτερος είναι μία προσέγγιση της ροής ισχύος με χρονοσειρές. Στην πιθανοτική προσέγγιση χρησιμοποιούνται ιστορικά δεδομένα ώστε να χαρακτηριστεί στατιστικά ο άνεμος μέσω μια συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας. Χρειάζεται όμως προσοχή ώστε να υπάρξει διαβεβαίωση ότι τα στοιχεία αυτά έχουν συλλεχθεί από όλες τις τοποθεσίες του αιολικού πάρκου καθώς πρέπει να καταγραφεί τόσο η χωρική όσο και η χρονική μεταβλητότητα του ανέμου. Η ανάλυση αυτή παρέχει σημαντικές στατιστικές μετρήσεις για την επίδοση του συστήματος αλλά δεν καταγράφει μηχανισμούς που σχετίζονται με τα προβλήματα τάσης. Αντίθετα, οι προσωμοιώσεις της ροής ισχύος με χρονοσειρές, χρησιμοποιώντας δεδομένα για την ταχύτητα του ανέμου και την μεταβλητότητα του φορτίου, μπορούν να χρησιμοποιηθούν αποτελεσματικά ώστε να δημιουργηθεί μία προσωμοίωση λειτουργίας του αιολικού πάρκου για διάφορες συνθήκες και να εξετασθεί η ικανότητα των αιολικών πάρκων να παρέχουν υποστήριξη τάσης ενώ επίσης και για την κατασκευή ενός ντετερμινιστικού μοντέλου για την χειρότερη περίπτωση λειτουργίας. Είναι σημαντικό να εξετασθούν προσεκτικά τα δεδομένα για τα φορτία του συστήματος και την ισχύς εξόδου του αιολικού πάρκου ώστε να επιλεγεί η χρονοσειρά που θα καταγράφει την πολύπλοκη σχέση μεταξύ του ανέμου και του φορτίου.

Στα συστήματα με υψηλή διείσδυση ανεμογεννητριών διπλής τροφοδότησης οι χειρότερες συνθήκες λειτουργίας συμβαίνουν όταν η ανεμογεννήτριες εξυπηρετούν ένα σημαντικό μέρος της ζήτησης και οι μηχανισμοί υποστήριξης τάσης είναι ανεπαρκείς. Μία άλλη σημαντική πτυχή είναι ότι επειδή η ικανότητα των ανεμογεννητριών αυτών να ελέγχουν την τερματική τάση του ζυγού είναι περιορισμένη τοπικά, ο έλεγχος αυτός μπορεί να επηρεάσει σημαντικά μόνο το μέρος του συστήματος στο οποίο παράγεται η αιολική ενέργεια και γι αυτό θα πρέπει υπάρχουν δεδομένα συγκεκριμένων περιοχών για διάφορα τμήματα του συστήματος. [39]

6.3 Επίδραση στην απόκριση συχνότητας του συστήματος

Στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας η συχνότητα ελέγχεται εξισσοροπώντας συνεχώς την ζήτηση φορτίου με την παραγωγή ενέργειας οπότε όταν η ζήτηση μεταβάλλεται, η

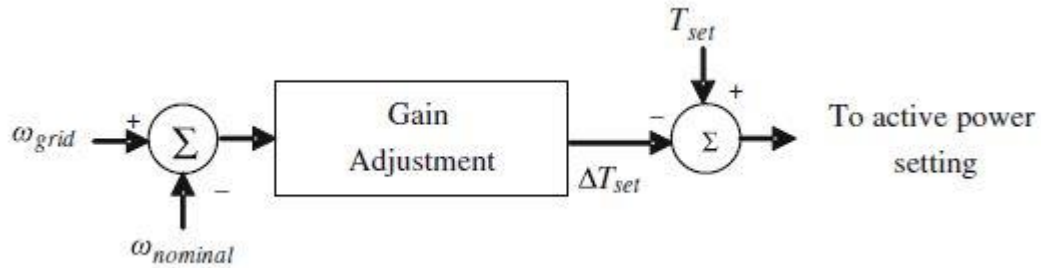
έξοδος των ανεμογεννητριών πρέπει να ρυθμίζεται συνεχώς και παράλληλα θα πρέπει το σύστημα να είναι έτοιμο να ανταποκριθεί σε μεγάλες ανισοροπίες μεταξύ ζήτησης και παραγωγής όπως για παράδειγμα όταν συνδεθεί μια μεγάλη ανεμογεννήτρια ή ένα μεγάλο φορτίο.

Σε περίπτωση ανισοροπιών, οι σύγχρονες γεννήτριες ενός συστήματος ανταποκρίνονται σε 3 στάδια ώστε να επαναφέρουν το σύστημα στην κανονική λειτουργία. Το πρώτο στάδιο ονομάζεται αρχική απόκριση και χαρακτηρίζεται από την ελευθέρωση ή την απορρόφηση κινητικής ενέργειας της στρεφόμενης μάζας. Αν για παράδειγμα υπάρξει μία απότομη αύξηση του φορτίου, η ηλεκτρική ροπή αυξάνεται για να τροφοδοτήσει το φορτίο ενώ η μηχανική ροπή της γεννήτριας παραμένει σταθερή και η σύγχρονη μηχανή επιβραδύνεται απελευθερώνοντας κινητική ενέργεια για την τροφοδότηση της μεταβολής του φορτίου. Καθώς η απόκριση της συχνότητας συνεχίζει να υπερβαίνει τα όρια, ενεργοποιείται ο κυρίαρχος έλεγχος της γεννήτριας αλλάζοντας την ισχύ εισόδου και η επιτάχυνση του δρομέα γίνεται μηδέν ενώ η συχνότητα η συχνότητα φτάνει σε μία νέα μόνιμη κατάσταση. Το στάδιο αυτό ονομάζεται πρωταρχικός έλεγχος συχνότητας. Μετά ακολουθεί ο δευτερεύον έλεγχος συχνότητας που είναι υπεύθυνος για την διόρθωση του σφάλματος μόνιμης κατάστασης της συχνότητας που δημιουργεί ο προηγούμενος έλεγχος και αλλάζοντας τα σημεία ρύθμισης επαναφέρει την συχνότητα στην ονομαστική της τιμή.

Η δυναμική συμπεριφορά των ανεμογεννητριών με γεννήτριες διπλής τροφοδότησης διέπεται από τους μετατροπείς ηλεκτρονικών ισχύος από του οποίους ελέγχονται. Με τον συμβατικό έλεγχο, όπου τα ρεύματα του δρομέα ελέγχονται ώστε να εξάγουν την μέγιστη ενέργεια από τον άνεμο μεταβάλλοντας την ταχύτητά του, η αδράνεια της γεννήτριας είναι αποτελεσματικά αποσυνδεδεμένη από το σύστημα. Με την διείσδυση ανεμογεννητριών διπλής τροφοδότησης, η αδράνεια του συστήματος μειώνεται και η αξιοπιστία του λόγω των μεγάλων διαταραχών επηρεάζεται. Εφόσον η αδράνεια των ανεμογεννητριών καλύπτεται πλήρως από τους back-to-back μετατροπείς, η απόκριση συχνότητας του συστήματος θα μειωθεί αν ένας μεγάλος αριθμός συμβατικών σύγχρονων γεννητριών αντικατασταθεί από ανεμογεννήτριες διπλής τροφοδότησης. Επίσης είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι το κατώτατο σημείο της απόκρισης συχνότητας μπορεί να επηρεαστεί από το ποσό της διαθέσιμης περιστρεφόμενης εφεδρείας και μπορεί να ελεγχθεί όταν το ποσό αυτό είναι μεγάλο. [39]

6.3.1 Υποστήριξη συχνότητας από ανεμογεννήτριες DFIG

Για τη μελέτη της υποστήριξης της συχνότητας από ανεμογεννήτριες διπλής τροφοδότησης είναι απαραίτητο να γίνει μια εξομοίωση της αδρανειακής απόκρισης αυτών των ανεμογεννητριών. Η στρατηγική αυτή βασίζεται στην ιδέα της μεταβολής της προκαθορισμένης ροπής προκειμένου να ρυθμιστεί η συχνότητα του δικτύου. Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται ένας συμπληρωματικός έλεγχος ο οποίος εφαρμόζεται σε ένα σύστημα πολλών αιολικών πάρκων τα οποία είναι διασκορπισμένα γεωγραφικά.



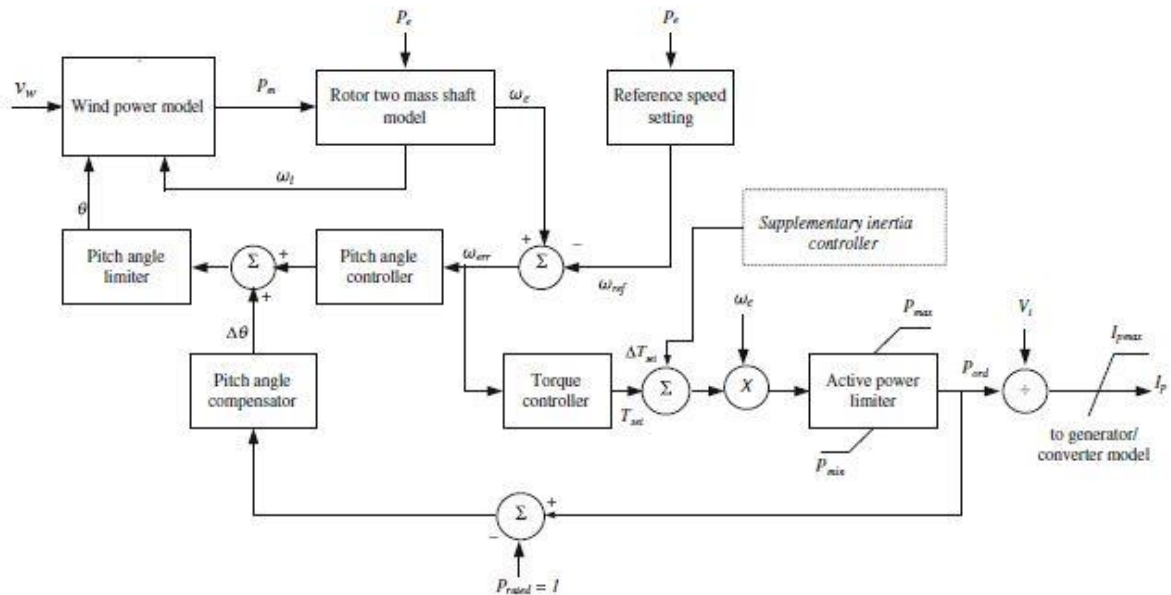
Εικόνα 56. Συμπληρωματικός βρόγχος ελέγχου.

Η είσοδος στον συμπληρωματικό αυτό έλεγχο είναι η απόκλιση της συχνότητας στο σημείο διασύνδεσης. Κατά το πρώτο χρονικό διάστημα, η ίδια διαταραχή μπορεί να έχει ένα ευρύ φάσμα επιδράσεων στις ανεμογεννήτριες του συστήματος οπότε το σφάλμα της συχνότητας μπορεί να διαφέρει από ζυγό σε ζυγό. Η απόκλιση της συχνότητας του δικτύου εισάγεται ως είσοδος στον ελεγκτή. Η υποστήριξη των ανεμογεννητριών εξαρτάται από την κινητική ενέργεια που αποθηκεύεται στα πτερύγιά τους, η οποία όμως περιορίζεται από την σταθερή αδράνεια των γεννητριών που με την σειρά τους εξαρτώνται από την ονομαστική τους φαινόμενη ισχύ. Συνεπώς, το κέρδος του ελεγκτή ρυθμίζεται σύμφωνα με την απόκλιση της συχνότητας και την ονομαστική φαινόμενη ισχύ του αιολικού πάρκου:

$$G = \frac{1}{\Delta\omega_{max}} \frac{S_{BM}}{S_{B,sys}} \quad \text{εξ 6-19}$$

Όπου $\Delta\omega_{max}$ είναι η μέγιστη απόκλιση της συχνότητας του δικτύου στο σημείο σύνδεσης με όλα τα αιολικά πάρκα, S_{BM} είναι η ονομαστική φαινόμενη ισχύ του αιολικού πάρκου με της ανεμογεννήτριες διπλής τροφοδότησης και $S_{B,sys}$ η βασική ισχύ για το αναμονάδα σύστημα. Η μέγιστη απόκλιση της συχνότητας του δικτύου εκτιμάται μέσω προσωμοιώσεων μιας σειράς μεγάλων διαταραχών που μειώνουν την παραγόμενη ενέργεια χωρίς όμως να φέρουν το σύστημα σε αστάθεια. Το σήμα που προέρχεται από τον συμπληρωματικό έλεγχο, ΔT_{set} , προστίθεται αλγεβρικά με την προκαθορισμένη ροπή T_{set} , η οποία αυξάνεται αν η συχνότητα του δικτύου πέσει από την ονομαστική της τιμή 1 p.u.

Όταν ο στόχος είναι η αδρανειακή υποστήριξη, το πιο σημαντικό διάστημα είναι τα πρώτα δευτερόλεπτα μετά την διαταραχή και μία ανεμογεννήτρια με διπλή τροφοδότηση και εξοπλισμένη με τον συμπληρωματικό ελεγκτή μπορεί να υποστηρίξει το σύστημα αυτή την περίοδο. Η επιπλέον ηλεκτρική ισχύς εξόδου παρέχεται μέσω μιας επακόλουθης μείωσης της ταχύτητας του δρομέα. Επίσης, η ροή του αέρα, που είναι και η βασική είσοδος, δεν μπορεί να αλλάξει και η κινητική ενέργεια που είναι αποθηκευμένη στην περιστρεφόμενη μάζα της ανεμογεννήτριας παρέχει τον πρωτεύον έλεγχο συχνότητας. Αυτό εξαρτάται και από παράγοντες όπως η αεροδυναμική της ανεμογεννήτριας, η απόδοση και τα όρια λειτουργίας του μετατροπέα. Εξ'αιτίας της περιορισμένης αποθηκευμένης κινητικής ενέργειας, η υποστήριξη αυτή μπορεί να παρέχεται για σύντομο χρονικό διάστημα. Τέλος, αν το σφάλμα μόνιμης κατάστασης είναι μη μηδενικό θα πρέπει να ρυθμιστεί όπως ειπώθηκε και προηγουμένως από τον δευτερεύον έλεγχο συχνότητας μέσω ενός αναλογικού ελεγκτή. [39]



Εικόνα 57. Ελεγκτής DFIG με συμπληρωματικό ελεγκτή αδράνειας

6.3.2 Ρύθμιση βήματος πτερυγίων

Εξ'ατίας της λειτουργίας μεταβλητής ταχύτητας, η αποθηκευμένη κινητική ενέργεια και η αδρανειακή απόκριση των ανεμογεννητριών διπλής τροφοδότησης εξαρτάται από την δεσμευμένη μηχανική ισχύ, η οποία δεσμεύεται από τον ελεγκτή βήματος πτερυγίων. Οι παράμετροι του ελεγκτή αυτού προσαρμόζονται ώστε να μεταβάλλεται η μηχανική ισχύς και να παρέχεται ευστάθεια στις μεταβατικές καταστάσεις. Αυτό γίνεται με την κατάλληλη μεταβολή του κέρδους του PI ελεγκτή του ρυθμιστή βήματος. Αυτοί οι παράμετροι θα πρέπει να μεταβάλλονται με τέτοιο τρόπο ώστε ο ρυθμιστής να μην αυξάνει την γωνία του πτερυγίου κατά τη διάρκεια μεταβατικής περιόδου όπου το σύστημα υφίσταται πτώση στην παραγωγή ενέργειας

Για την ρύθμιση του ελεγκτή ακολουθείται πειραματική προσέγγιση. Οι παράμετροι επιλέγονται έτσι ώστε ο ρυθμιστής να μειώσει την γωνία βήματος πτερυγίων και να αποφεύγεται η μεταβατική πτώση της εξαγόμενης μηχανικής ισχύς όταν το σύστημα απαιτεί περισσότερη ενεργό ισχύ. Με αυτό τον τρόπο ενισχύεται ο συμπληρωματικός ελεγκτής καθώς αυξάνεται η ισχύς εξόδου κατά τη διάρκεια μεταβατικών φαινομένων που έχουν ως αποτέλεσμα την πτώση της συχνότητας του δικτύου. [39]

6.3.3 Ρύθμιση μέγιστης απαιτούμενης ισχύος

Η επιπλέον ισχύς που παρέχεται από τις ανεμογεννήτριες διπλής τροφοδότησης εξαρτάται από την μέγιστη ισχύ P_{max} η οποία με την σειρά της εξαρτάται από την αεροδυναμική της ανεμογεννήτριας, την απόδοση και τα όρια λειτουργίας του μετατροπέα. Η ρύθμιση της μέγιστης απαιτούμενης ισχύος βασίζεται στην αύξηση της τιμής της P_{max} έτσι ώστε η απόκριση της αδράνειας της ανεμογεννήτριας διπλής τροφοδότησης να βελτιώνεται κατά την διάρκεια μεταβατικών φαινομένων. Για να

βρίσκεται εντός των κατασκευαστικών ορίων του μετατροπέα, η αύξηση της P_{max} δεν θα πρέπει να απαιτεί περισσότερο ρεύμα από την βραχυπρόθεσμη ικανότητα ρεύματος του μετατροπέα I_{pmax} . [39]

7 Βιβλιογραφία

- [1] "Renewable energy," Wikipedia, [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Renewable_energy.
- [2] M. F. Akorede, H. Hizam and E. Pouresmaeil, "Distributed energy resources and benefits to the environment," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 14, no. 2, p. 724–734, 2010.
- [3] "Hydropower," Wikipedia, [Online]. Available: <https://en.wikipedia.org/wiki/Hydropower>.
- [4] "Περιβάλλον και διαχείριση ενέργειας," [Online]. Available: <http://www.allaboutenergy.gr/YdravlikiEnergeia.html>.
- [5] "Geothermal energy," Wikipedia, [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Geothermal_energy.
- [6] P. F. Ribeiro, B. K. Johnson, M. L. Crow, A. Arsoy and Y. Liu, "Energy storage systems for advanced power applications," *Proceedings of the IEEE*, vol. 89, no. 12, pp. 1744 - 1756, 2001.
- [7] B. Kroposki, C. Pink, R. DeBlasio, H. Thomas, M. Simões and P. K. Sen, "Benefits of Power Electronic Interfaces for Distributed Energy Systems," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 25, no. 3, pp. 901 - 908, 2010.
- [8] H. Chen, X. Zhang, J. Liu and C. Tan, "Compressed Air Energy Storage," in *Energy Storage - Technologies and Applications*, InTech, 2013, pp. 101-112.
- [9] "Wind power," Wikipedia, [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Wind_power.
- [10] "Wind farm," Wikipedia, [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Wind_farm.
- [11] «Offshore wind power,» Wikipedia, [Ηλεκτρονικό]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Offshore_wind_power.
- [12] G. L. Johnson, "WIND TURBINE POWER, ENERGY, AND TORQUE," in *Wind Energy Systems*, Kansas State University, 2006.
- [13] GLOBAL WIND REPORT, Global Wind Energy Council (GWEC), 2015.
- [14] "Wind turbine," wikipedia, [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Wind_turbine.
- [15] "Types of Wind Turbines," Centurion Energy, [Online]. Available: <http://centurionenergy.net/types-of-wind-turbines>.
- [16] "The Horizontal Axis Wind Turbine Instruction," Aeolos Wind Turbine, [Online]. Available: <http://www.windturbinestar.com/horizontal-axis-wind-turbine-2.html>.
- [17] "Different Types and Parts of a Horizontal Axis Wind Turbines," dolcera, [Online]. Available: https://dolcera.com/wiki/index.php?title=Different_Types_and_Parts_of_a_Horizontal_Axis_Wind_Turbines.
- [18] H. Stiesdal, "THE WIND TURBINE-COMPONENTS AND OPERATION".

- [19] R. Gasch και J. Twele, *Wind Power Plants-Fundamentals, Design, Construction*, Berlin: Springer, 2012.
- [20] C. Shen and P. Meisen, "Various Wind Turbine Technologies," Global Energy Network Institute, 2012.
- [21] "Vertical Axis Wnd Turbines," [Online]. Available: <http://mragheb.com/>.
- [22] "Vertical axis wind turbine," Wikipedia, [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Vertical_axis_wind_turbine.
- [23] "Wind Turbine Grid Connection and Interaction," Deutsches Windenergie-Institut .
- [24] S. Soter and R. Wegener, "Development of Induction Machines in Wind Power Technology," in *IEEE International Electric Machines & Drives Conference* , Antalya, 2007.
- [25] "Direct–quadrature–zero transformation," Wikipedia, [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Direct%E2%80%93quadrature%E2%80%93zero_transformation.
- [26] "Alpha–beta transformation," Wikipedia, [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Alpha%E2%80%93beta_transformation.
- [27] S. J. Chapman, "Pulse Width Modulation Inverters," in *Electric Machinery Fundamentals*, pp. 189-195.
- [28] B. Majhi and S. Maity, "Analysis of Single-Phase SPWM Inverter".
- [29] "PID controller," Wikipedia, [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/PID_controller.
- [30] «PID Theory,» pcbheaven, [Ηλεκτρονικό]. Available: http://www.pcbheaven.com/wikipages/PID_Theory/.
- [31] L. H. Hansen, L. Helle, F. Blaabjerg, E. Ritchie, S. M. Nielsen, H. Bindner, P. Sørensen and B. Bak-Jensen, "Conceptual survey of Generators and Power Electronics for Wind Turbines".
- [32] T. Ackermann, "Wind Power in Power Systems".
- [33] F. Iov, M. Ciobotaru, D. Sera and F. Blaabjerg, "Power Electronics and Control of Renewable Energy Systems," in *Power Electronics and Drive Systems*, 2007.
- [34] Φ.Δ.Κανέλλος και Ν.Δ.Χατζηαργυρίου, «Τεχνολογίες Ηλεκτρονικών Ισχύος για Συνδέσεις Ανεμογεννητριών».
- [35] Μ.Π.Μπράττισης και Ε.Τσιμπλοστεφανάκης, «Ανεμογεννήτριες και Ηλεκτρονικά ισχύος».
- [36] A. Larsson, "The Power Quality of Wind Turbines".
- [37] S. W. Mohod and M. V. Aware, "Power Quality and Grid Code Issues in Wind," in *An Update on Power Quality*, InTech, pp. 21-36.
- [38] T. Ayodele, A. Jimoh, J. Munda and J. Agee, "Challenges of Grid Integration of Wind Power on Power System Grid Integrity: A Review," *INTERNATIONAL JOURNAL of RENEWABLE ENERGY RESEARCH*, vol. 2, no. 4, 2012.
- [39] V. Vittal and R. Ayyanar, *Grid Integration and Dynamic Impact of Wind Energy*, Springer.

