



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΚΑΙ
ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

“ΤΙΤΛΟΣ ΠΤΥΧΙΑΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ”

“ Μέθοδοι ελέγχου λειτουργίας ανεμογεννήτριας με μεταβλητές
στροφές ”

(Control methods for variable speed operation of wind turbines)

Επιβλέπων Καθηγητής: Κωνσταντίνος Ψωμόπουλος

Σπουδαστής:

Ηλίας Χλωρός

ΑΜ: 37303

Μάιος 2018, Αθήνα

Copyright © Ανώτατο Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Πειραιά Τεχνολογικού Τομέα

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. Allrightsreserved.

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

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

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Καθηγητή μου κ. Κωσταντίνο Ψωμόπουλο για την καθοδήγηση, τις πολύτιμες συμβουλές, τις υποδείξεις και την γνώση που μου παρείχε κατά την διάρκεια της εκπόνησης της παρούσας διπλωματικής καθώς και για την ευκαιρία που μου έδωσε να ασχοληθώ με ένα τόσο επίκαιρο θέμα γόνιμης δημιουργίας.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου για την αμέριστη συμπαράσταση καθ'όλη τη διάρκεια των σπουδών καθώς και όλους τους συμφοιτητές μου που γνώρισα στην διάρκεια των προπτυχιακών μου χρόνων.

2.3	ΑΕΡΟΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΩΝ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ	34
2.3.1	Δυναμική Άνωση και Αντίσταση των Πτερυγίων	34
2.3.2	Αιολική Ισχύς	37
2.3.3	Αεροδυναμικός Συντελεστής Ισχύος	39
2.3.4	Λόγος Ταχύτητας Ακροπτερυγίου	40
2.3.5	Μέγιστος Αεροδυναμικός Συντελεστής Ισχύος και Βέλτιστος Λόγος Ταχύτητας Ακροπτερυγίου	41
2.3.6	Γωνία Βήματος Πτερυγίου	43
2.3.7	Απώλεια Στήριξης	44
2.4	ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ	45
2.4.1	Ανεμογεννήτριες Σταθερών Στροφών	45
2.4.2	Ανεμογεννήτριες Μεταβλητών Στροφών	48
2.5	ΤΑ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΑ ΙΣΧΥΟΣ ΣΤΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ.....	52
2.5.1	Ανορθωτές	53
2.5.2	Αντιστροφείς	53
2.5.3	Μετατροπείς Συχνότητας	54
2.5.4	Ηλεκτρονικά Ελεγχόμενος Εκκινητής	56
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΕΛΕΓΧΟΥ ΤΩΝ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ ΜΕΤΑΒΛΗΤΩΝ ΣΤΡΟΦΩΝ		57
3.1	ΣΥΣΤΗΜΑ ΕΛΕΓΧΟΥ ΤΩΝ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ ΜΕ ΕΠΑΓΩΓΙΚΗ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑ ΔΙΠΛΗΣ ΤΡΟΦΟΔΟΣΙΑΣ (DFIG).....	57
3.1.1	Έλεγχος του Μετατροπέα στην Πλευρά του Δρομέα	62
3.2	ΣΥΣΤΗΜΑ ΕΛΕΓΧΟΥ ΤΩΝ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ ΜΕ ΣΥΓΧΡΟΝΗ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑ ΜΟΝΙΜΟΥ ΜΑΓΝΗΤΗ (PMSG).....	69

3.2.1	Έλεγχος του Μετατροπέα στην Πλευρά της Γεννήτριας	70
3.2.2	Έλεγχος του Μετατροπέα στην Πλευρά του Δικτύου	75
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΩΝ		
ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ ΜΕΤΑΒΛΗΤΩΝ ΣΤΡΟΦΩΝ ΣΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ		
ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ		78
4.1	ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΩΝ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ ΜΕΤΑΒΛΗΤΩΝ	
	ΣΤΡΟΦΩΝ ΣΤΟΝ ΕΛΕΓΧΟ ΤΗΣ ΤΑΣΗΣ	78
4.1.1	Ο Έλεγχος Τάσης στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας	78
4.1.2	Ενεργός και Άεργος Ισχύς στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας	81
4.1.3	Επίδραση των Αιολικών Συστημάτων στα Συστήματα Μεταφοράς	82
4.1.4	Δυνατότητες Ελέγχου Τάσης από Ανεμογεννήτριες Μεταβλητών Στροφών	83
4.1.5	Επίδραση Παραγόντων στον Έλεγχο Τάσης	87
4.2	ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΩΝ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ ΜΕΤΑΒΛΗΤΩΝ	
	ΣΤΡΟΦΩΝ ΣΤΗΝ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑ ΤΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ	
	ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ 88	
4.2.1	Ευστάθεια Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας	88
4.2.2	Μεταβατική Συμπεριφορά Ανεμογεννητριών Μεταβλητών Στροφών	89
	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	92
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	94

ABSTRACT

The purpose of this dissertation is to study the operating methods of wind turbines with variable speed control.

The first chapter introduces an introduction to wind energy as a renewable energy source. In particular, the major advantages and main features of wind energy, as well as the interconnection of wind energy with the electrical grid, are mentioned.

The second chapter presents a detailed presentation of the structure and operation of wind systems. Initially, a classification of wind turbines is made on the basis of their construction form and the description of the basic structure of the wind turbines. In addition, aerodynamic analysis of the wind turbines is carried out, which defines the basic aerodynamic sizes for the study of wind turbines. Additionally, wind systems with fixed and variable wind turbines are examined. Finally, the application of induction and modern generators to wind systems, as well as the use of power electronics in wind turbine systems, is evaluated.

In the third chapter, wind turbine variable speed control is performed. Initially, the model of the dual-power induction generator is presented, followed by a description of the wind power control system with a dual-power induction generator. Then, the model of the synchronous permanent magnet generator is presented, followed by the description of the control system of the wind systems with a synchronous permanent magnet generator.

In the fourth chapter we study the effect of variable speed wind turbines on the electrical grid. First of all, we examine the effect of variable speed wind turbines on voltage control on the electrical power transmission systems, distributed generation power networks and then on the overall electrical grid.

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η αιολική ενέργεια αποτελεί μια από τις πλέον διαδεδομένες μορφές ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Η όλο και αυξανόμενη ανάπτυξη ανεμογεννητριών στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας δημιουργεί νέες απαιτήσεις ως προς τη λειτουργία των ανεμογεννητριών. Βασική επιδίωξη των αιολικών συστημάτων αποτελεί η κατά το δυνατό αδιάλειπτη σύνδεση τους στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας και η ικανότητα λειτουργίας τους ακόμα και σε περιπτώσεις διαταραχών που λαμβάνουν χώρα σε αυτό.

Αν και υπάρχουν αυτόνομα συστήματα Α/Γ που χρησιμοποιούν για παράδειγμα σύστημα αποθήκευσης της παραγόμενης ενέργειας σε μπαταρίες, η πλειοψηφία των Α/Γ είναι συνδεδεμένες στο δίκτυο. Η τάση λειτουργίας της γεννήτριας είναι γενικά χαμηλότερη από την τάση του δικτύου στο οποίο συνδέεται, γεγονός που δημιουργεί την ανάγκη ύπαρξης Μ/Σ ανύψωσης. Επιπλέον, κρίνεται απαραίτητη η ύπαρξη διακόπτη για την αποσύνδεση της Α/Γ σε περίπτωση βραχυκυκλώματος για την αποφυγή της λεγόμενης νησιδοποίησης, κατάσταση κατά την οποία ένα μικρότμημα του δικτύου λειτουργεί με τοπική ισορροπία μεταξύ παραγωγής και φορτίου, αλλά χωρίς σύνδεση στο κύριο σύστημα. Η κατάσταση αυτή λειτουργίας είναι ανεπιθύμητη καθώς προκύπτουν τάσεις και συχνότητες έξω από τα επιτρεπτά όρια καθώς και κίνδυνος για το τεχνικό προσωπικό που αναλαμβάνει την επισκευή του σφάλματος στη νησιδοποιημένη περιοχή.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας

Τα τελευταία χρόνια παρατηρείται μια έντονη διάθεση, ιδιαίτερα από την πλευρά των περισσότερο ανεπτυγμένων χωρών, για επένδυση χρόνου και πόρων στην έρευνα και αξιοποίηση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Λόγοι όπως η ρύπανση του περιβάλλοντος, το φαινόμενο του θερμοκηπίου, οι ανθυγιεινές συνθήκες ζωής στα μεγάλα αστικά κέντρα αλλά και η διαφαινόμενη από κάποιους εξάντληση των ορυκτών καυσίμων σε συνδυασμό με την αυξανόμενη ενεργειακή ζήτηση, συνηγορούν προς τη χάραξη της παραπάνω στρατηγικής. Είναι πλέον αποδεκτό πως για να καλυφθούν οι σύγχρονες ενεργειακές ανάγκες πρέπει να διασφαλισθεί μια πολυμορφία στην ενεργειακή παραγωγή. Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας πρέπει να ξεφύγει από τα καθιερωμένα στάνταρ και τους κλασσικούς τρόπους και να στραφεί σε νέες μεθόδους που θα είναι περισσότερο φιλικό προς το περιβάλλον και θα εξασφαλίζουν χαμηλό κόστος παραγωγής.

Λύση στις νέες αυτές προκλήσεις αποτελούν οι Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ). Αντίθετα με τις παραδοσιακές πρωτογενείς πηγές όπως το πετρέλαιο, το μαζούτ και το λιγνίτη, οι ΑΠΕ αναπληρώνονται μέσω των φυσικών κύκλων και θεωρούνται πρακτικά ανεξάντλητες. Ο ήλιος, ο άνεμος, η γεωθερμία, τα ποτάμια, οι οργανικές ύλες, όπως το ξύλο και ακόμη τα απορρίμματα οικιακής και γεωργικής προέλευσης, είναι πηγές ενέργειας, που η προσφορά τους δεν εξαντλείται ποτέ. Εξάλλου, η αξιοποίησή τους για την παραγωγή ενέργειας δεν επιβαρύνει το περιβάλλον. Η Ελλάδα διαθέτει αξιόλογο δυναμικό ΑΠΕ, οι οποίες μπορούν να προσφέρουν μια πραγματική εναλλακτική λύση για την κάλυψη μέρους των ενεργειακών μας αναγκών, συνεισφέροντας στη μείωση της εξάρτησης από συμβατικά καύσιμα, στην ελάττωση του φαινομένου του Θερμοκηπίου, στη δημιουργία νέων θέσεων εργασίας και στην ανάπτυξη αποκεντρωμένων περιοχών.

Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας είναι ένα αυξανόμενο τμήμα των δικτύων ηλεκτρικής ενέργειας σε παγκόσμια κλίμακα λόγω της συνεισφορά τους στην

απομάκρυνση των συμβατικών ορυκτών καυσίμων από την παραγωγή ενέργειας, στην εξασφάλιση συνθηκών μακροχρόνιας ασφάλειας στο μέλλον της ενέργειας και στην επέκταση της πρόσβασης στην ενέργεια σε νέους καταναλωτές σε κάθε γωνιά του πλανήτη. Με απλά λόγια η πρόκληση είναι να εξασφαλισθεί η διαθεσιμότητα της ενέργειας και η διατήρηση του περιβάλλοντος. Τα βασικά στοιχεία που καθορίζουν τους στόχους της χρήσης των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας είναι τα ακόλουθα:

- Η σταθεροποίηση του κλίματος και η προστασία του περιβάλλοντος
- Η κάλυψη της ζήτησης σε ενέργεια του αυξανόμενου πληθυσμού
- Η εξασφάλιση σταθερής πρόσβασης στην ενέργεια για όλα τα έθνη
- Η παροχή ηλεκτρισμού σε 1.6 δισεκατομμύρια νέους καταναλωτές
- Η μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας σε μακρινές αποστάσεις

Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας εμπλέκονται σε όλα τα παραπάνω και ακόμη είναι ζωτικής σημασίας για το μετασχηματισμό των ενεργειακών δικτύων, ώστε να μπορούν να αντιμετωπίσουν τις οικονομικές, κοινωνικές και περιβαλλοντικές προκλήσεις του μέλλοντος.

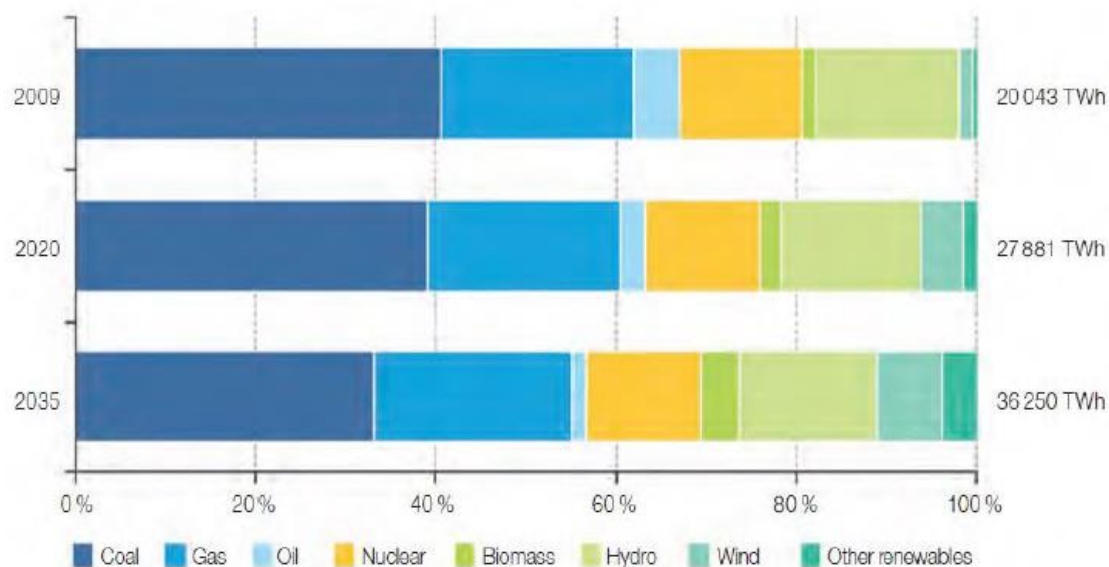
Συνολικά, η συμμετοχή των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στην παραγωγή ενέργειας θα αυξηθεί τις επόμενες δεκαετίες, πράγμα που αποδεικνύεται από την υιοθέτηση των ανάλογων κυβερνητικών πολιτικών που αφορούν τα ενεργειακά θέματα. Συγκεκριμένες νομοθετικές και ρυθμιστικές διατάξεις έχουν δημιουργηθεί από τα διάφορα κράτη με στόχο να συμβάλλουν στην προώθηση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.

Η ανάγκη για την αντιμετώπιση της παγκόσμιας κλιματικής αλλαγής, που είναι ένα παγκόσμιο περιβαλλοντικό φαινόμενο και θα επηρεάσει τους πάντες στον πλανήτη, είναι η μεγαλύτερη κινητήριος δύναμη για την ανάπτυξη των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Η Διακυβερνητική Επιτροπή για την Κλιματική Αλλαγή, που είναι ο πρωτοπόρος οργανισμός σε όλο τον κόσμο στην έρευνα για τις κλιματικές αλλαγές, αναφέρει σε έκθεσή της ότι η υπερθέρμανση του κλίματος του πλανήτη είναι αδιαμφισβήτητη. Αυτό είναι εμφανές από τις παρατηρήσεις της Επιτροπής για

αύξηση της παγκόσμιας μέσης θερμοκρασίας στην ατμόσφαιρα της γης και στους ωκεανούς, για εκτεταμένη τήξη του χιονιού και των πάγων και για άνοδο της παγκόσμιας μέσης στάθμης των ωκεανών.

Σε περιβαλλοντική έκθεση σημειώνεται ότι οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα για ενεργειακή χρήση αποτελούν το 70% των συνολικών εκπομπών υδρογονανθράκων και πως το 50% των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα προέρχονται από τα θερμοηλεκτρικά εργοστάσια παραγωγής ενέργειας. Κατά συνέπεια, οι κυβερνήσεις έχουν θέσει σε εφαρμογή πολιτικές για τον περιορισμό των εκπομπών καυσαερίων από τον τομέα της ενέργειας.

Στο παρακάτω διάγραμμα, όπου παρουσιάζεται η συνεισφορά διαφόρων πηγών ενέργειας στην παραγωγή ηλεκτρισμού μέχρι το 2035, είναι εμφανής η αύξηση του ποσοστού συμμετοχής των ανανεώσιμων πηγών και η μείωση του ποσοστού των συμβατικών πηγών.



Εικόνα 1.1: Ποσοστά παγκόσμιας παραγωγής ηλεκτρισμού ανά καύσιμο [1]

Καθώς αυξάνεται η συνολική ενεργειακή ζήτηση οι ανανεώσιμες πηγές θα γίνουν καθοριστικές στην παροχή ηλεκτρισμού. Σύμφωνα με εκτιμήσεις του Διεθνούς Οργανισμού Ενέργειας η παγκόσμια παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από

ανανεώσιμες πηγές θα τριπλασιαστεί από 3.900 TWh το 2009 σε 11.100 TWh το 2035. Ακόμη οι ανανεώσιμες πηγές θα συμβάλλουν στην αύξηση κατά 50% της συνολικής παραγόμενης ενέργειας μέχρι το 2035, ενώ το 33% της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας θα προέρχεται από ανανεώσιμες πηγές [1].

1.2 Η ΑΙΟΛΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ

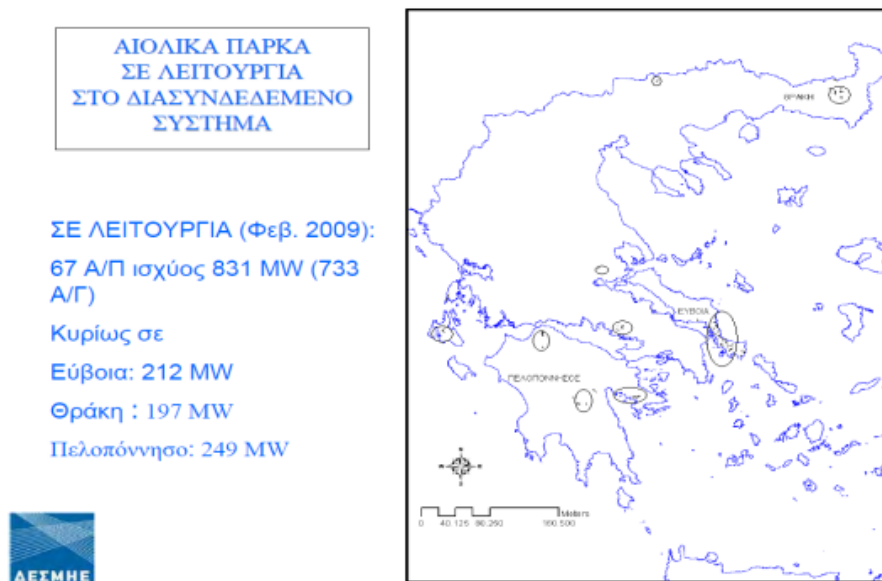
1.2.1 Εισαγωγή στην Αιολική Ενέργεια

Στην κατηγορία των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας εντάσσεται και η αιολική ενέργεια, δηλαδή η ενέργεια που παράγεται από την εκμετάλλευση του πνέοντος ανέμου. Ο άνεμος ορίζεται ως η κίνηση αέριων μαζών στην ατμόσφαιρα που προκαλείται από την ηλιακή ακτινοβολία. Η κίνηση αυτή οφείλεται στην ύπαρξη διαφορετικών θερμοκρασιακών συνθηκών στην ατμόσφαιρα που παρατηρούνται λόγω του διαφορετικού γεωγραφικού πλάτους και της διαφορετικής θερμοκρασίας της επιφάνειας της γης. Αυτή η διαφορετικότητα στις γεωγραφικές θερμοκρασίες έχει ως αιτίες την υψομετρική διαφορά μεταξύ δύο σημείων και τη διαφορετική φύση της κάθε επιφάνειας.

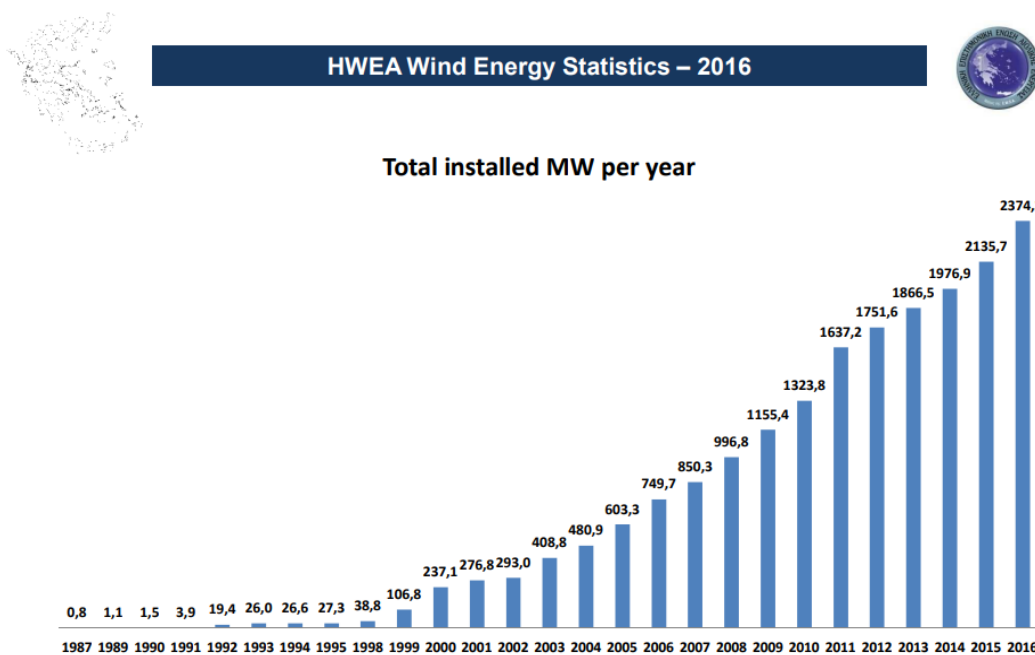
Η αιολική ενέργεια αποτελεί το στυλοβάτη των ΑΠΕ , τουλάχιστον στην Ευρώπη. Στη χώρα μας οι επικρατούσες συνθήκες στο Αιγαίο, στο Κρητικό και στο Καρπάθιο πέλαγος, στις ανατολικές ακτές της κεντρικής και νότιας Χώρας, στη Β. Κρήτη και στα Δωδεκάνησα καθ' όλη τη διάρκεια του έτους ευνοούν την εμφάνιση ανέμων σημαντικής εντάσεως, ικανής να διατηρεί σε λειτουργία ανεμογεννήτριες για μεγάλα χρονικά διαστήματα. Έτσι, ευνοείται η εγκατάσταση αιολικών πάρκων που συνήθως συνδέονται σε δίκτυα μέσης και υψηλής τάσης ανάλογα με την εγκατεστημένη ισχύ τους.

Παρόμοιες συνθήκες ισχύουν και στο εσωτερικό της χώρας και ιδιαίτερα στις ορεινές περιοχές. Οι συνθήκες στις περιοχές αυτές είναι αρκετά ευνοϊκές διότι υπάρχει συνεχής πνοή καλής ποιότητας ανέμου, ελάχιστες μέρες άπνοιας και ανυπαρξία τυφώνων. Ενδεικτικά παρουσιάζουμε στον Ελλαδικό χώρο τις συγκεντρώσεις

αιολικής παραγωγής μέχρι το 2009, σχήμα 1.2, από επίσημα στοιχεία του ΔΕΣΜΗΕ [2].



Εικόνα 1.2: Συγκεντρώσεις αιολικής παραγωγής στην Ελλάδα [2]

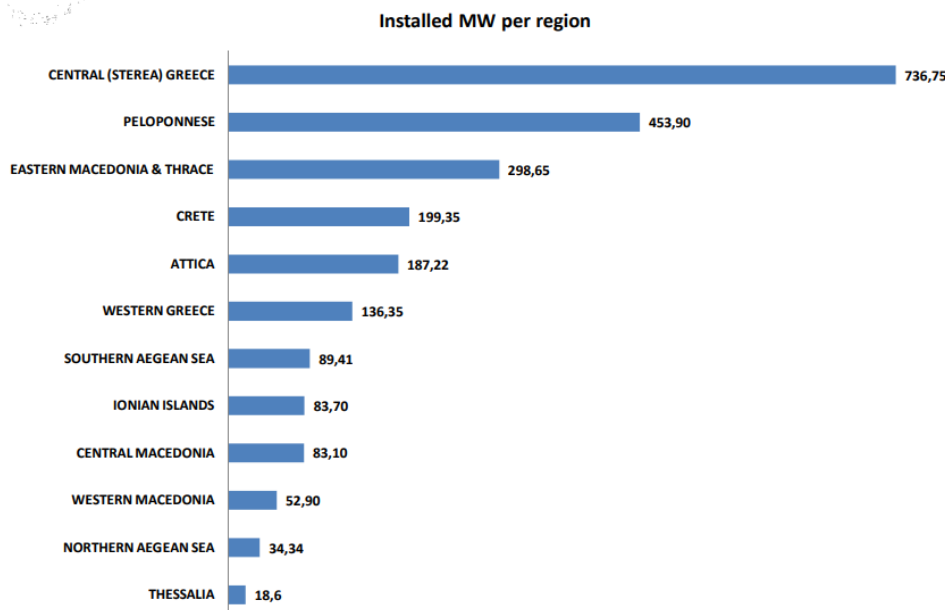


The HWEA Wind Energy Statistics take into account the wind capacity which is in commercial or test operation in Greece and it is based on sources from the market actors.

Εικόνα 1.2α: Αύξηση αιολικής παραγωγής στην Ελλάδα στο πέρασμα του χρόνου [2.1]



HWEA Wind Energy Statistics – 2016



Εικόνα 1.2β: Εγκατεστημένη αιολική ισχύς ανά Περιφέρεια [2.1]

1.3 Όρια διείσδυσης αιολικής ενέργειας

Μέχρι το 2009 στην Ελλάδα, η διείσδυση των ΑΠΕ έφτανε το 8% [2]. Η όλο και αυξανόμενη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας σε συνδυασμό με τη συνεχόμενη ανάπτυξη των δικτύων μεταφοράς και διανομής και τη διασύνδεση των νησιών [2.1], έδωσε τη δυνατότητα περαιτέρω διείσδυσης των ΑΠΕ στο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας, που το 2016 πλησίασε το 15% [2.2]. Το ερώτημα που τίθεται είναι αν υπάρχουν όρια διείσδυσης των ΑΠΕ και από τι καθορίζονται αυτά.

Ένα σύγχρονο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας οφείλει να παρέχει στους καταναλωτές του ηλεκτρική ισχύ αποδεκτής ποιότητας. Η «ποιότητα» ισχύος που παρέχεται χαρακτηρίζεται ως «αποδεκτή» όταν τηρούνται τα χαρακτηριστικά της τάσης που ορίζουν οι εθνικοί και διεθνείς κανονισμοί [3]. Με βάση αυτές τις γενικές αρχές πρέπει να γίνεται η σύνδεση μονάδων παραγωγής στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας, ώστε αφενός μεν να μην προκαλούνται ενοχλήσεις στους λοιπούς καταναλωτές και

αφετέρου να υπάρχει συμβατότητα μεταξύ του δικτύου διανομής και των εγκαταστάσεων των παραγωγών.

Στη περίπτωση αιολικών πάρκων που συνδέονται σε ασθενή και μη διασυνδεδεμένα ηλεκτρικά συστήματα υπάρχουν κάποιοι περιορισμοί διείσδυσης. Οι περιορισμοί αυτοί σχετίζονται με τα τεχνικά ελάχιστα των συμβατικών μονάδων παραγωγής αλλά και περιορισμούς που εξασφαλίζουν την ευστάθεια του ηλεκτρικού συστήματος [4].

Στα μη διασυνδεδεμένα νησιά, που τροφοδοτούνται στη πλειονότητα από πετρελαϊκές μονάδες υπάρχουν κάποιοι τεχνικοί περιορισμοί που πηγάζουν από την λειτουργία των ίδιων των μονάδων. Οι μονάδες αυτές δεν μπορούν να υποφορτιστούν κάτω από ένα όριο ισχύος που τίθεται από τους κατασκευαστές τους [2] για λόγους οικονομικούς αλλά και ορθής λειτουργίας. Τα όρια ελάχιστης παραγωγής των συμβατικών μονάδων σε συνδυασμό με την εκάστοτε ζήτηση δημιουργούν κάποια όρια μέγιστης διείσδυσης αιολική ισχύος, τα οποία ονομάζονται τεχνικά ελάχιστα των συμβατικών μονάδων παραγωγής.

Η διείσδυση της αιολικής ενέργειας ιδιαίτερα σε μη διασυνδεδεμένα και ασθενή δίκτυα είναι περιορισμένη από τεχνικούς και δυναμικούς περιορισμούς. Οι περιορισμοί αυτοί θέτουν κάποια όρια μέγιστης διείσδυσης αιολικής παραγωγής. Στη περίπτωση των τεχνικών περιορισμών, τα όρια καθορίζονται συνάρτηση της παραγωγής των συμβατικών σταθμών παραγωγής αλλά και της εκάστοτε ζήτησης. Όσον αφορά όμως τους δυναμικούς περιορισμούς, γίνονται προσπάθειες αύξησης των ορίων τους βελτιώνοντας τη τεχνολογία των ανεμογεννητριών και τον τρόπο με τον οποίο λειτουργούν σε περιπτώσεις σφαλμάτων του δικτύου.

Προς αυτή τη κατεύθυνση η σχεδίαση των Α/Γ γίνεται με τρόπο ώστε να είναι περισσότερο ευέλικτες ως προς την λειτουργία τους, ιδιαίτερα σε διαταραχές, παρέχοντας αδιάλειπτη παροχή ηλεκτρικής ισχύος κατά τη διάρκεια σφαλμάτων και όσο είναι δυνατό να αποφεύγεται η αποσύνδεση τους. Συγκεκριμένα η σχεδίαση των Α/Γ θα πρέπει να εξασφαλίζει [5] ικανότητα αδιάλειπτης λειτουργίας σε σφάλματα δικτύου αλλά και βυθίσεις τάσης, ικανότητα ρύθμισης και υποστήριξης τάσης σε

Ευρωπαϊκό επίπεδο, συμμετοχή όσο το δυνατό στη ρύθμιση συχνότητας, κρατώντας κάποια εφεδρεία στη παραγωγή και τέλος πρόβλεψη της ταχύτητας του ανέμου.

1.4 Τα Χαρακτηριστικά της Αιολικής Ενέργειας

Η αιολική ενέργεια παρουσιάζει την ιδιότητα ότι είναι μια πηγή ενέργειας που δεν έχει πάντα τις διαθέσιμες ποσότητες εξαιτίας κάποιων παραγόντων που είναι εκτός άμεσου ελέγχου. Το γεγονός αυτό είναι ένας συνδυασμός της μη ελεγχόμενης διακύμανσης, της μερικής απροβλεπτότητας και της τοπολογικής εξάρτησης που είναι διακριτά χαρακτηριστικά της αιολικής ενέργειας. Αυτές οι τρεις διακριτές πτυχές δημιουργούν ξεχωριστές προκλήσεις, η καθεμιά στην ενσωμάτωση μεγάλων επιπέδων αιολικής ενέργειας στο δίκτυο, οι οποίες πρέπει να αντιμετωπιστούν από τους ιδιοκτήτες των αιολικών μονάδων παραγωγής και τους διαχειριστές του ηλεκτρικού δικτύου. Παρακάτω ακολουθεί μια αναλυτική περιγραφή των τριών αυτών χαρακτηριστικών της αιολικής ενέργειας:

α) Μη ελεγχόμενη διακύμανση: ο άνεμος είναι μεταβλητός σε τέτοιο σημείο που οι ανεμογεννήτριες δεν είναι εύκολο να έχουν ελεγχόμενη παραγωγή διότι η ταχύτητα του ανέμου μπορεί να διαφέρει από λεπτό σε λεπτό με αποτέλεσμα να επηρεάζεται κάθε στιγμή η αποδιδόμενη ηλεκτρικής ισχύς. Αυτή η διακύμανση στην ισχύ εξόδου καθιστά αναγκαία την παροχή επιπρόσθετων ποσοτήτων ενέργειας ώστε να ισορροπήσει η προσφορά και η ζήτηση ενέργειας στο δίκτυο σε στιγμιαία βάση. Επίσης, η πρόσθετη ενέργεια προσφέρει άλλες απαραίτητες βοηθητικές υπηρεσίες όπως αυτές της ρύθμισης της συχνότητας του δικτύου και του επιπέδου της τάσης.

β) Μερική απροβλεπτότητα: Η διαθεσιμότητα του ανέμου είναι εν μέρει απρόβλεπτη, όμως μια ανεμογεννήτρια μπορεί να παράγει ηλεκτρική ενέργεια μόνο όταν φυσά ο άνεμος. Αυτό το πρόβλημα της απροβλεπτότητας του ανέμου μπορεί να αντιμετωπιστεί μέσω της βελτίωσης των τεχνολογιών που εφαρμόζονται στην πρόβλεψη των καιρικών συνθηκών και στην εκτίμηση της παραγόμενης ενέργειας. Επιπλέον, είναι απαραίτητη η διατήρηση ενεργειακών αποθεμάτων τα οποία να είναι έτοιμα να υποστηρίξουν το σύστημα με επιπλέον ενέργεια όταν οι αιολικές μονάδες

παράγουν λιγότερη ενέργεια από την προβλεπόμενη. Τέλος, χρειάζεται η διαθεσιμότητα φορτίων ώστε να απορροφήσουν την πλεονάζουσα ενέργεια σε περιπτώσεις που παράγεται περισσότερη ενέργεια από την επιτρεπτή.

γ) Τοπολογική εξάρτηση: Το βέλτιστο αιολικό δυναμικό βρίσκεται σε συγκεκριμένες τοποθεσίες και σε αντίθεση με τα ορυκτά καύσιμα δε είναι δυνατόν να μεταφερθεί σε έναν αιολικό σταθμό που είναι ιδανικός από άποψη δικτύου. Η περιοχή εγκατάστασης των αιολικών πάρκων πρέπει να ταυτίζεται με την περιοχή της ύπαρξης του δυνατού ανέμου και συχνά αυτές οι περιοχές βρίσκονται πολύ μακριά σε σχέση με τα κέντρα κατανάλωσης της παραγόμενης ενέργειας. Η επέκταση του ηλεκτρικού δικτύου από άποψη δυνατότητας μεταφοράς είναι αναγκαία για την ένταξη αιολικών μονάδων στο δίκτυο, ενώ για τη σύνδεση υπεράκτιων αιολικών πάρκων απαιτούνται σημαντικές επενδύσεις για γραμμές μεταφοράς ειδικής τεχνολογίας.

Επειδή η παρουσία του ανέμου είναι χωρικά και χρονικά εκτός ανθρώπινου ελέγχου, η ενσωμάτωση των αιολικών μονάδων παραγωγής στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας συνεπάγεται τη διαχείριση άλλων ελεγχόμενων λειτουργιών, τα οποία επηρεάζουν πολλά άλλα τμήματα του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, συμπεριλαμβανομένων και των συμβατικών σταθμών. Αυτές οι λειτουργίες και οι επακόλουθες δραστηριότητες συμβαίνουν σε μια σειρά από πληθώρες χρονικές κλίμακες δηλαδή από δευτερόλεπτα μέχρι χρόνια. Η βασική προϋπόθεση για την ένταξη της αιολικής ενέργειας στο σύστημα είναι η ανάγκη για μεγαλύτερη ευελιξία από το υπόλοιπο τμήμα του δικτύου, που περιλαμβάνει τις γεννήτριες, τις γραμμές μεταφοράς και τα φορτία. Τέλος, εκτός από τη μεταβλητότητα των ανεμογεννητριών είναι απαραίτητο να εξεταστούν οι πλήρεις επιδράσεις από τη διείσδυση σημαντικών ποσοτήτων αιολικής ενέργειας στο δίκτυο [6].

1.5 Η Αιολική Ενέργεια και το Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας

Η αιολική ενέργεια είναι ιδιαίτερα συνεπής από έτος σε έτος, αλλά παρουσιάζει σημαντικές διακυμάνσεις για μικρότερες χρονικές κλίμακες. Αν το ποσοστό της

αιολικής ενέργειας σε μια περιοχή αυξηθεί είναι αναγκαία η αναβάθμιση του ηλεκτρικού δικτύου και η μείωση της παραγωγής των συμβατικών σταθμών.

Η αιολική ενέργεια δε μπορεί να αναλυθεί ξεχωριστά από τα υπόλοιπα μέρη του ηλεκτρικού συστήματος και επίσης το κάθε σύστημα έχει τη διαφοράς του από τα υπόλοιπα. Το μέγεθος και η εγγενής ευελιξία του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας είναι ζωτικής σημασίας για να καθοριστεί αν στο σύστημα μπορεί να διοχετευτεί ένα μεγάλο ποσό αιολικής ενέργειας. Ο ρόλος μια μεταβλητής πηγής ενέργειας όπως είναι ο άνεμος πρέπει να θεωρηθεί ως μια πτυχή μεταβλητής παροχής και ζήτησης στο ηλεκτρικό ενεργειακό σύστημα.

Οι διαχειριστές του ηλεκτρικού δικτύου δεν πρέπει να αναλαμβάνουν δράση κάθε φορά που ένας μεμονωμένος καταναλωτής αλλάζει την κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας. Ομοίως, δεν πρέπει να ασχοληθεί με την διακύμανση εξόδου μιας μεμονωμένης ανεμογεννήτριας, διότι αυτό που έχει σημασία είναι η καθαρή παραγωγή όλων των ανεμογεννητριών ή των μεγάλων ομάδων αιολικών πάρκων.

Ως εκ τούτου, η αιολική ενέργεια πρέπει να εξεταστεί σε σχέση με τη συνολική ζήτηση για μεταβλητότητα αλλά και με τη μεταβλητή και διακοπτόμενη λειτουργία των άλλων ηλεκτροπαραγωγικών μονάδων.

Η μεταβλητότητα του ανέμου σαν πηγή ενέργειας πρέπει να εξεταστεί στα πλαίσια του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας και όχι στο επίπεδο της μεμονωμένης ανεμογεννήτριας ή του αυτόνομου αιολικού πάρκου. Ο άνεμος δε φυσά συνεχώς, ενώ υπάρχει μικρή επίπτωση αν σταματήσει να φυσάει σε μια συγκεκριμένη θέση αφού θα φυσάει σε κάποιο άλλο μέρος. Έτσι, ο άνεμος μπορεί να αξιοποιηθεί για να παρέχει ηλεκτρική ενέργεια με αξιοπιστία, ακόμη κι αν ο άνεμος δε είναι διαθέσιμος στο 100% του χρόνου σε ένα συγκεκριμένο μέρος.

Επειδή το αιολικό δυναμικό είναι μεταβλητό, αυτό μερικές φορές μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν επιχείρημα ότι η αιολική ενέργεια αυτή καθ' εαυτή δεν είναι αξιόπιστη. Στην πραγματικότητα κανένας σταθμός παραγωγής οποιαδήποτε τύπου δεν

είναι απολύτως αξιόπιστος διότι κάθε τμήμα του εξοπλισμού του σταθμού θα μπορούσε να παρουσιάσει σφάλμα κατά τη λειτουργία του.

Αντίθετα, η αιολική ενέργεια δεν παρουσιάζει απότομη πτώση στο ηλεκτρικό σύστημα. Οι μεταβολές στην αιολική ενέργεια είναι πιο ομαλές, διότι υπάρχουν εκατοντάδες ή χιλιάδες μονάδες αιολικών συστημάτων, πράγμα που καθιστά ευκολότερο στο διαχειριστή του συστήματος να προβλέπει και να διαχειρίζεται τις αλλαγές στην παροχή, όπως αυτές εμφανίζονται στο πλαίσιο του συνολικού συστήματος.

Τόσο η προσφορά και η ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας είναι μεταβλητή. Το ζήτημα όμως είναι να βρεθούν οι τρόποι πρόβλεψης, διαχείρισης και καλυτέρευσης της μεταβλητότητας αυτής και τα εργαλεία που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη βελτίωση της αποδοτικότητας του συστήματος.

Τα επίπεδα παραγωγής των αιολικών σταθμών που συνδέονται σε ορισμένα εθνικά συστήματα ηλεκτροδότησης δείχνουν ότι η αιολική ενέργεια μπορεί να πετύχει μεγάλου βαθμού διείσδυση στο δίκτυο, ανάλογο με εκείνου των συμβατικών πηγών ενέργειας, και μάλιστα χωρίς να απαιτούνται σημαντικές αλλαγές στο υπάρχον δίκτυο. Η εγκατάσταση αιολικών μονάδων σε περιοχές υψηλής, μέσης και χαμηλής διείσδυσης μπορεί να μελετηθεί ώστε να εντοπίσουμε τα υπάρχοντα προβλήματα και τις μελλοντικές προκλήσεις.

Για να είναι επιτυχής η ενσωμάτωση της αιολικής ενέργειας στο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας, είναι απαραίτητο να αντιμετωπιστούν τα ζητήματα που αφορούν στους ακόλουθους τομείς [7]:

- Σχεδιασμός και λειτουργία του συστήματος, που αφορά ζητήματα όπως ικανότητα αποθεμάτων και διαχείριση ισορροπίας του συστήματος, βραχυπρόθεσμες προβλέψεις και διαχείριση της ζήτησης για αιολική ενέργεια, αποθήκευση και συμβολή της αιολικής ενέργειας στην επάρκεια του συστήματος.

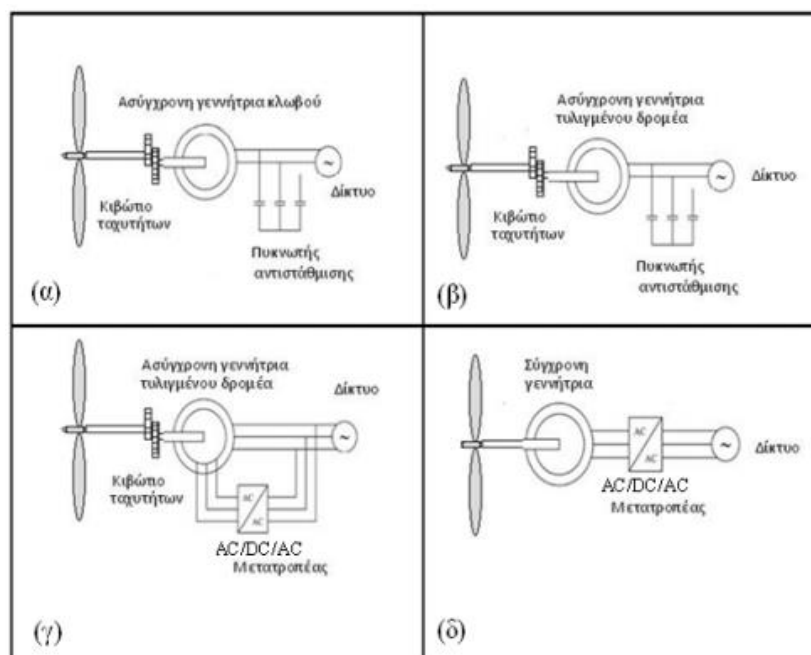
- Σύνδεση των αιολικών μονάδων με το δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας, που αφορά ζητήματα όπως απαιτήσεις δικτύου και ποιότητα ισχύος.
- Θέματα που σχετίζονται με την υποδομή του δικτύου όπως διαχείριση της συμφόρησης, επέκταση και αναβάθμιση, διασύνδεση, υπεράκτια δίκτυα και μικροδίκτυα.
- Θέματα που σχετίζονται με την αγορά ηλεκτρικής ενέργειας, όπως προώθηση της αιολικής ενέργειας στον επενδυτικό τομέα και δημιουργία νέων κανόνων αγοράς στο διεθνές εμπόριο.

1.6 Τεχνολογίες ανεμογεννητριών

1.6.1 Επικρατέστερες διαμορφώσεις ηλεκτρικού μέρους ανεμογεννητριών

Υπάρχουν διάφοροι τύποι ανεμογεννητριών αναφορικά με την διαμόρφωση του ηλεκτρικού μέρους τους κάθε ένας με διαφορετικά χαρακτηριστικά και διαφορετικά πλεονεκτήματα λειτουργίας. Οι κύριοι τύποι διακρίνονται σε [8]:

1. Σταθερών στροφών, με ασύγχρονη γεννήτρια κλωβού, απ' ευθείας συνδεδεμένη στο δίκτυο(σχήμα1.6.1.α)
2. Περιορισμένης λειτουργίας μεταβλητών στροφών, με ασύγχρονη γεννήτρια τυλιγμένου δρομέα μεταβλητής αντίστασης, απ' ευθείας συνδεδεμένη στο δίκτυο (σχήμα1.6.1.β).
3. Μεταβλητών στροφών με ασύγχρονη γεννήτρια διπλής τροφοδότησης (σχήμα1.6.1.γ).
4. Μεταβλητών στροφών με σύγχρονη γεννήτρια με τύλιγμα διεγέρσεως ή μόνιμο μαγνήτη (σχήμα1.6.1.δ)



Σχήμα 1.6.1: Επικρατέστερες διαμορφώσεις ηλεκτρικού μέρους Ανεμογεννητριών

Η ανεμογεννήτρια σταθερών στροφών, σχήμα 1.6.1.α, έχει ως βασικό πλεονέκτημα το μικρό κόστος, το μικρό βάρος και γενικά την απλότητα στην κατασκευή. Η μείωση του κόστους οφείλεται αφενός στην έλλειψη μετατροπέα και αφετέρου στην ίδια τη γεννήτρια που χρησιμοποιεί η οποία είναι μια συνηθισμένη ασύγχρονη γεννήτρια τύπου κλωβού. Η απουσία μετατροπέα δίνει αξιοπιστία στη κατασκευή ενώ παράλληλα οι ανάγκες συντήρησης είναι μειωμένες. Βασικό μειονέκτημα των ανεμογεννητριών σταθερών στροφών είναι το γεγονός ότι δεν υπάρχει δυνατότητα ρύθμισης των στροφών της ανάλογα με την ταχύτητα του ανέμου. Αυτό έχει ως συνέπεια οποιαδήποτε μεταβολή στην ταχύτητα του ανέμου να μεταφράζεται σε αντίστοιχη μεταβολή της μηχανικής ροπής στον άξονα με συνέπεια τη παρουσία έντονων μηχανικών καταπονήσεων που φθείρουν το σύστημα. Ένα άλλο σημαντικό μειονέκτημα της Α/Γ σταθερών στροφών είναι ότι λόγω της έλλειψης ηλεκτρονικών ισχύος δεν μπορεί να συμβάλει στην ρύθμιση της αέργου ισχύος που ανταλλάσσει με το δίκτυο με συνέπεια να είναι απαραίτητη η σύνδεση πυκνωτών στην έξοδο ώστε να κάνουν αντιστάθμιση της αέργου ισχύος που απορροφούν. Αυτό έχει συνέπεια την αδυναμία λειτουργίας κάτω από τις νέες συνθήκες που επιβάλουν οι νέοι κανονισμοί λειτουργίας των αιολικών πάρκων που συνδέονται στα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας.

Όσον αφορά την ισχύ εξόδου, παρουσιάζει έντονη διακύμανση με αποτέλεσμα εκπομπές flicker τάσης, που περιορίζουν την σύνδεση μεγάλης ποσότητας ισχύος σε ασθενή δίκτυα. Λόγω αυτών των ατελειών η χρήση τους τα τελευταία χρόνια έχει εγκαταλειφθεί με εξαίρεση κάποιες ειδικές περιπτώσεις [9].

Πολλές φορές χρησιμοποιείται ασύγχρονη γεννήτρια τυλιγμένου δρομέα παρέχοντας τη δυνατότητα μεταβάλλοντας την αντίσταση του δρομέα, να ελέγχουμε την ηλεκτρική ροπή, δυναμικός έλεγχος της γεννήτριας, σχήμα 1.6.1.β. Με τον τρόπο αυτό ελέγχουμε την γεννήτρια δίνοντας τη δυνατότητα αλλαγής των στροφών της κατά την διάρκεια ριπών ανέμου. Αυτό, αφενός μεν μας περιορίζει σε κάποιο βαθμό τις μηχανικές καταπονήσεις, αφετέρου βελτιώνει την ποιότητα ισχύος που παίρνουμε στην έξοδο.

Πέρα από τις Α/Γ σταθερών στροφών οι πιο συνήθεις και πλέον συχνά εφαρμόσιμες στην κατασκευή αιολικών πάρκων είναι οι Α/Γ μεταβλητών στροφών (Σχήμα 1.6.1.γ-δ).

Οι Α/Γ μεταβλητών στροφών παρουσιάζουν αυξημένη ενεργειακή απόδοση με μέγιστη αξιοποίηση της αιολικής ενέργειας. Αυτό οφείλεται στην μεταβολή της γωνιακής ταχύτητας περιστροφής ανάλογα με την ταχύτητα του ανέμου. Εξαιτίας αυτού υπάρχει μειωμένη μηχανική καταπόνηση τόσο στα πτερύγια όσο και στο σύστημα μετάδοσης της κίνησης, απαλοιφή του κιβωτίου ταχυτήτων, μείωση του ακουστικού θορύβου και προσαρμογή της ανεμογεννήτριας στις τοπικές ανεμολογικές συνθήκες.

Ένα άλλο χαρακτηριστικό πλεονέκτημα των Α/Γ μεταβλητών στροφών είναι το γεγονός ότι μπορούν να παρέχουν στο δίκτυο καλύτερης ποιότητας ηλεκτρική ισχύ. Επίσης υπάρχει δυνατότητα ρύθμισης του συντελεστή ισχύος ανάλογα με τις απαιτήσεις του δικτύου. Αυτό πραγματοποιείται ελέγχοντας κατάλληλα τον μετατροπέα ώστε ανάλογα με τα επίπεδα της τάσης του δικτύου, να γίνεται κατάλληλη έγχυση αέργου ισχύος. Αυτή η λειτουργία είναι συναφής με εκείνη των

συμβατικών σταθμών και εναρμονίζεται πλήρως με τα νέα πρότυπα που αναφέρονται στη ποιότητα ισχύος.

Μια συνήθης διαμόρφωση ηλεκτρικού μέρους ανεμογεννήτριας μεταβλητών στροφών είναι εκείνη με ασύγχρονη γεννήτρια τυλιγμένου δρομέα και διπλή τροφοδότηση με μετατροπέα συνδεδεμένο στο δρομέα, σχήμα 1.4.1.γ. Στη περίπτωση αυτής της ηλεκτρικής διαμόρφωσης, υπάρχει δυνατότητα ελέγχου των στροφών ρυθμίζοντας κατάλληλα τη συχνότητα των ρευμάτων που κυκλοφορούν στο δρομέα.

Ο τύπος αυτός έχει όλα τα παραπάνω πλεονεκτήματα ανεμογεννήτριας μεταβλητών στροφών. Επιπλέον αποτελείται από μια συνηθισμένη γεννήτρια και ένα μικρό και σχετικά φθινό μετατροπέα. Βασικό μειονέκτημα της διπλής τροφοδότησης είναι το γεγονός ότι ο στάτης της ασύγχρονης γεννήτριας είναι άμεσα συνδεδεμένος στο δίκτυο, έτσι σε οποιαδήποτε βύθιση τάσης είναι εκτεθειμένος στη δυναμική συμπεριφορά του δικτύου. Αυτό δεν ισχύει στη διαμόρφωση του σχήματος 1.4.1.γ, όπου υπάρχει απομόνωση της συχνότητας του δικτύου και των μεγεθών του στάτη μέσω του μετατροπέα ανύψωσης τάσης.

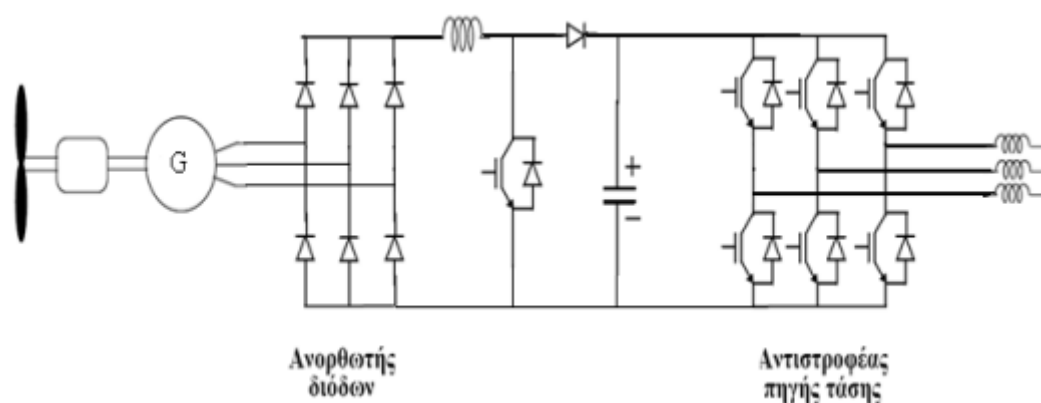
Η Α/Γ μεταβλητών στροφών με σύγχρονη γεννήτρια και μετατροπέα ΕΡ/ΣΡ/ΕΡ, σχήμα 1.4.1.δ, είναι κατάλληλη για σύνδεση στο δίκτυο δεδομένου ότι οι ραγδαίες μεταβολές της ταχύτητας περιστροφής είτε εξαιτίας του ανέμου είτε από κάποια διαταραχή στο δίκτυο, μπορούν εύκολα να εξομαλυνθούν από το δρομέα της και οποιαδήποτε μεγάλο ρεύμα που ίσως θα προκληθεί αποσβένεται από το μαγνητικό κύκλωμα του πυρήνα χωρίς τον κίνδυνο απομαγνητισμού, ειδικά σε σύγχρονες γεννήτριες μόνιμου μαγνήτη[10]. Επίσης δεν διαθέτει κιβώτιο ταχυτήτων, επιτυγχάνοντας έτσι μείωση του κόστους και του βάρους, βελτίωση της αξιοπιστίας και ελάττωση του θορύβου.

Μειονέκτημα της διαμόρφωσης του σχήματος 1.4.1.δ είναι η μεγάλη και βαριά γεννήτρια που χρησιμοποιεί. Επίσης από το μετατροπέα της μεταφέρεται το 100% της παραγόμενης ισχύος σε αντίθεση με την ασύγχρονη διπλής τροφοδότησης που μόνο το 1/3 περίπου της παραγόμενης ισχύος περνάει από το μετατροπέα. Το γεγονός ότι όλη η ισχύς μεταφέρεται από το μετατροπέα περιορίζει κάπως την λειτουργία του

συστήματος ιδιαίτερα σε μη φυσιολογικές καταστάσεις λειτουργίας και συγκεκριμένα την ικανότητα αδιάλειπτης παροχής ισχύος.

1.6.2 Συνήθεις τοπολογίες μετατροπέων σε συστήματα ανεμογεννητριών

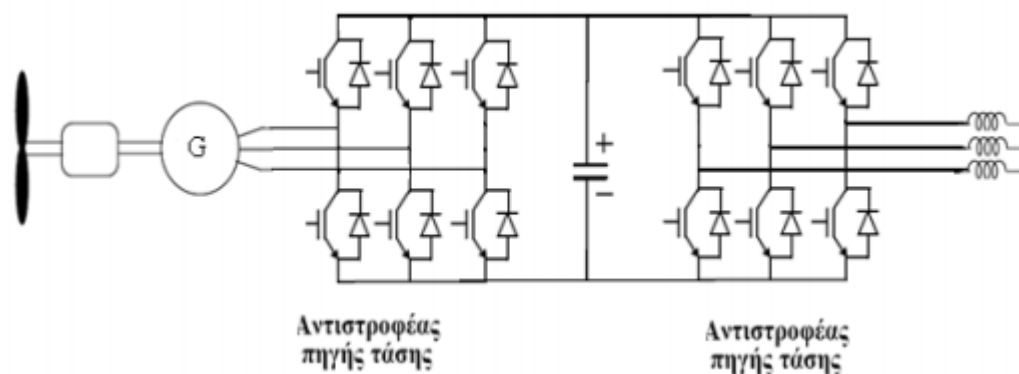
Υπάρχουν διάφοροι τύποι μετατροπέων που βρίσκουν εφαρμογή σε ανεμογεννήτριες οποίες συνδέονται στο δίκτυο. Το σχήμα 1.6.2.a δείχνει μια ανεμογεννήτρια μονίμων μαγνητών συνδεδεμένη στο δίκτυο μέσω μιας τριφασικής ανόρθωσης, ενός μετατροπέα ΣΡ/ΣΡ και ενός αντιστροφέα. Ο μετατροπέας ΣΡ/ΣΡ χρησιμοποιείται για τον έλεγχο στροφών της ανεμογεννήτριας με τέτοιο τρόπο ώστε να παίρνουμε στην έξοδο την μέγιστη δυνατή ηλεκτρική ισχύ (Maximum Power Point Tracking). Η τάση της γεννήτριας ανορθώνεται μέσω του ανορθωτή διόδων και στη συνέχεια ο μετατροπέας ΣΡ/ΣΡ ελέγχει το ρεύμα ελέγχοντας παράλληλα την ηλεκτρική ροπή οδηγώντας με τον τρόπο αυτό την ανεμογεννήτρια πάνω στην καμπύλη βέλτιστης αεροδυναμικής απόδοσης.



Σχήμα 1.6.2.a : Μετατροπέας ΕΡ/ΣΡ/ΕΡ με απλή ανόρθωση, μετατροπέα ανύψωσης τάσης και αντιστροφέα τύπου πηγής τάσης

Μια δεύτερη τοπολογία είναι η σύνδεση δύο όμοιων μετατροπέων τύπου πηγής τάσης (VSI – PWM). Η διάταξη αυτή είναι γνωστή και ως «back-to-back» μετατροπέας, σχήμα 1.6.2.β. Ο μετατροπέας από την πλευρά της γεννήτριας λειτουργεί ως ανόρθωση ενώ ο μετατροπέας από την πλευρά του δικτύου ως αντιστροφέας. Η ροή ισχύος σε αυτή τη διαμόρφωση μπορεί να είναι αμφίπλευρη. Για να επιτευχθεί

βέλτιστος έλεγχος της ισχύος εξόδου η συνεχής τάση πρέπει να ανορθωθεί σε επίπεδα υψηλότερα από τη τάση του δικτύου. Η ροή ισχύος προς το δίκτυο ελέγχεται από τον αντιστροφέα με τέτοιο τρόπο ώστε να κρατάτε η τάση του πυκνωτή σταθερή, ενώ ο έλεγχος του μετατροπέα της γεννήτριας γίνεται έτσι ώστε να οδηγούμε τη γεννήτρια σε ταχύτητες περιστροφής που να δίνουν βέλτιστη λειτουργία [11].



Σχήμα 1.6.2.β: Μετατροπέας ΕΡ/ΣΡ/ΕΡ με σύνδεση back-to-back αντιστροφέων

1.7 Ανοχή σε βυθίσεις τάσης και αποκρίσεις σε περίπτωση βύθισης τάσης του δικτύου

Σε ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας η εμφάνιση ενός σφάλματος σε ένα σημείο έχει ως επακόλουθο την βύθιση της τάσης σε απομακρυσμένες από το σημείο του σφάλματος περιοχές. Η διάρκεια τέτοιων βυθίσεων μπορεί να ποικίλει από 100ms έως 1-2sec. Η αντιμετώπιση τέτοιων διαταραχών από συμβατικές μονάδες παραγωγής είναι η παραμονή τους στο δίκτυο και η υποστήριξη της τάσης μέσω των ρυθμιστών τάσεως που επεμβαίνουν κατευθείαν στη διέγερση του συστήματος. Σε αντίθεση με τους συμβατικούς σταθμούς παραγωγής, αυτό που μέχρι σήμερα γινόταν όταν είχαμε μια βύθιση στην τάση ενός Α/Π ήταν η άμεση απομάκρυνση του από το δίκτυο. Αυτή η αντιμετώπιση δεν είχε καμία επίπτωση στο σύστημα δεδομένου ότι η διεύθυνση ήταν μικρή και απώλεια της ισχύος αφενός δεν δημιουργούσε διαταραχή στο σύστημα και αφετέρου αντισταθμίζονταν από τους συμβατικούς σταθμούς

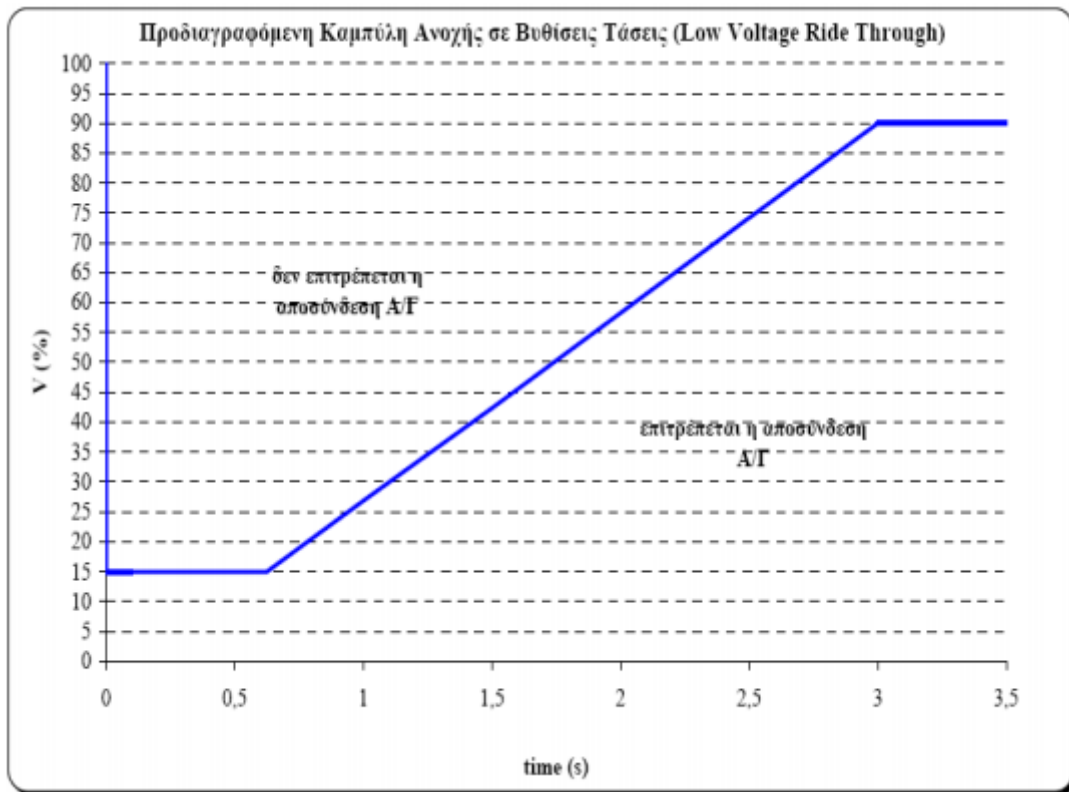
παραγωγής, ενώ συνέτρεχαν και τεχνικοί λόγοι που η άμεση απομάκρυνση των Α/Γ ήταν προτιμότερη και επιβεβλημένη.

Με την αυξανόμενη διείσδυση των Α/Π στο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας και την εγκατάσταση σταθμών αιολικής παραγωγής που φτάνουν έως και δεκάδες MW, η εμφάνιση τέτοιων διαταραχών και η άμεση απομάκρυνση των σταθμών από το δίκτυο θα έχει σημαντική επίπτωση στη μεταβατική ευστάθεια του δικτύου, λόγω της έλλειψης ισοζυγίου παραγωγής κατανάλωσης, που μπορεί να οδηγήσει ακόμα και σε ολική απώλεια ισχύος. Για τον λόγο αυτό υιοθετούνται νέοι σύγχρονοι κώδικες που περιγράφουν την συμπεριφορά των Α/Π σε τέτοιες διαταραχές. Οι κώδικες προβλέπουν συγκεκριμένες και αυστηρές απαιτήσεις για την ικανότητα παραμονής των Α/Γ σε λειτουργία υπό συνθήκες βύθισης της τάσης οι οποίες είναι γνωστές και ως (FaultRideThrough, FRT) ή (LowVoltageRideThrough, LVRT) και εκφράζονται υπό τη μορφή καμπύλης τάσης χρόνου. Στο σχήμα 1.7 φαίνεται η μορφή μιας τυπικής καμπύλης τάσης χρόνο .

Σύμφωνα με την καμπύλη αυτή, για βυθίσεις τάσης πάνω από το όριο που προδιαγράφεται, οι Α/Γ πρέπει να παραμένουν συνδεδεμένες στο δίκτυο ενώ η αποσύνδεση τους είναι επιτρεπτή μόνο σε βυθίσεις κάτω από το όριο. Η καμπύλη του σχήματος 1.7 είναι μια τυπική καμπύλη, η μορφή της οποίας εξαρτάται από τις ιδιαιτερότητες του κάθε συστήματος και για το λόγο αυτό κάθε χώρα έχει θεσπίσει δικές τις καμπύλες που περιγράφουν πλήρως την συμπεριφορά των Α/Π πάρκων που είναι συνδεδεμένα στο δίκτυο της.

Τέλος οι απαιτήσεις FRT που περιγράφονται αναλυτικά στους κώδικες δεν εξαντλούνται στις καμπύλες βύθισης τάσης, επιπλέον επιβάλλεται η ταχεία επαναφορά της ενεργού και αέργου ισχύος εξόδου του σταθμού στα προ της διαταραχής επίπεδα αμέσως μετά την επάνοδο της τάσης στα κανονικά επίπεδα λειτουργίας. Σε ορισμένους κώδικες επιβάλλεται η αυξημένη παραγωγή αέργου ισχύος από τις Α/Γ κατά τη διάρκεια της διαταραχής προκειμένου να γίνει υποστήριξη της τάσης συστήματος, συμπεριφορά που είναι όμοια με την

υπερδιέγερση των συμβατικών σύγχρονων γεννητριών που πραγματοποιείται από τους αυτόματους ρυθμιστές τάσης σε περίπτωση σφάλματος.



Σχήμα 1.7: Τυπική καμπύλη προδιαγραφών της ανοχής σε βυθίσεις της τάσης του δικτύου

ΚΕΦΑΛΑΙΟ2:

ΑΙΟΛΙΚΑΣΥΣΤΗΜΑΤΑ (ΔΟΜΗ ΚΑΙ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ)

2.1 ΒΑΣΙΚΟΙ ΤΥΠΟΙ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ

Οι ανεμογεννήτριες μπορούν να διαχωριστούν σε δύο βασικές κατηγορίες ανάλογα με τον τρόπο που περιστρέφεται ο ρότοράς τους. Η πρώτη κατηγορία είναι οι ανεμογεννήτριες οριζοντίου άξονα, δηλαδή εκείνες των οποίων ο ρότορας περιστρέφεται γύρω από έναν οριζόντιο άξονα. Η δεύτερη κατηγορία είναι οι ανεμογεννήτριες κατακόρυφου άξονα, δηλαδή εκείνες των οποίων ο ρότορας περιστρέφεται γύρω από έναν κάθετο άξονα. Οι ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα είναι οι πιο κοινές, ενώ οι ανεμογεννήτριες κατακόρυφου άξονα χρησιμοποιούνται λιγότερο συχνά [12].

2.1.1 Ανεμογεννήτριες Οριζόντιου Άξονα

Οι ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα είναι ο πιο απλός τύπος ανεμογεννήτριας που έχει μεγάλη ομοιότητα με αυτόν που μας έρχεται στο μυαλό όταν σκεφτόμαστε μια ανεμογεννήτρια. Η κατασκευαστική μορφή των ανεμογεννητριών οριζόντιου άξονα είναι παρόμοια με αυτή των ανεμόμυλων, που εκμεταλλεύονταν τον άνεμο για παραγωγή μηχανικής ενέργειας. Οι ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα έχουν στον ρότορά τους πτερύγια, των οποίων ο άξονας περιστροφής είναι οριζόντιος ως προς το έδαφος και σχεδόν παράλληλος στη ροή του ανέμου. Οι ανεμογεννήτριες αυτές χαρακτηρίζονται και κατηγοριοποιούνται με βάση τον αριθμό των πτερυγίων τους. Συγκεκριμένα εκείνες με ένα πτερύγιο ονομάζονται μονοπτέρυγες, εκείνες με δύο πτερύγια διπτέρυγες και οι υπόλοιπες με περισσότερα πτερύγια πολυπτέρυγες. Στο σχήμα 2.1.1 φαίνεται ένα παράδειγμα μιας τριπτέρυγης ανεμογεννήτριας οριζόντιου άξονα.



Σχήμα 2.1.1: Ανεμογεννήτρια οριζόντιου άξονα [13]

Οι ανεμογεννήτριες οριζοντίου άξονα έχουν τον κύριο άξονα του ρότορά τους και την γεννήτρια ηλεκτρικού ρεύματος τοποθετημένα στην κορυφή ενός πύργου, ενώ πάντα θα πρέπει να είναι στραμμένες προς τον άνεμο. Οι μικρές ανεμογεννήτριες προσανατολίζονται προς τον άνεμο μέσω ενός απλού ανεμοδείκτη, που τοποθετείται στην ίδια ευθεία με το ρότορα, ενώ οι μεγάλες ανεμογεννήτριες χρησιμοποιούν έναν αισθητήρα ανίχνευσης της διεύθυνσης του ανέμου σε συνδυασμό με ένα σερβοκινητήρα, ο οποίος στρέφει την ανεμογεννήτρια προς την κατεύθυνση του ανέμου. Οι περισσότερες μεγάλες ανεμογεννήτριες περιλαμβάνουν κιβώτιο ταχυτήτων που μετατρέπει την αργή περιστροφή του ρότορα σε μια ταχύτερη και πιο κατάλληλη για την οδήγηση ηλεκτρογεννήτριας.

Δεδομένου ότι ο πύργος προκαλεί αναταράξεις πίσω από αυτόν, η ανεμογεννήτρια συνήθως τοποθετείται είτε σε προσήνεμη διάταξη, δηλαδή μπροστά από τον πύργο στήριξης, είτε σε υπήνεμη διάταξη, δηλαδή πίσω από τον πύργο στήριξης, σε σχέση με την διεύθυνση του ανέμου. Τα στρεφόμενα πτερύγια συγκρατούνται ισχυρά ώστε να αποφευχθεί η ώθηση προς τον πύργο από ισχυρούς ανέμους. Ακόμη, τα πτερύγια τοποθετούνται σε σημαντική απόσταση μπροστά από τον πύργο και ορισμένες φορές με κλίση μέχρι ενός μικρού ποσοστού.

Ο υψηλός πύργος στήριξής τους, επιτρέπει την πρόσβαση σε ισχυρότερους ανέμους για περιοχές όπου υπάρχει μεταβολή της ταχύτητας του ανέμου ανάλογα με το ύψος. Σε κάποιες από αυτές τις περιοχές παρατηρείται ότι ανεβαίνοντας υψομετρικά κάθε 10m η ταχύτητα του ανέμου μπορεί να αυξηθεί κατά 20% και η ισχύς εξόδου κατά 34%. Ακόμη, οι ανεμογεννήτριες αυτές δε χρειάζονται πολύ υψηλές ταχύτητες ανέμου για να ξεκινήσουν να περιστρέφονται, άρα και με πολύ μικρές ταχύτητες ανέμου μπορούμε να έχουμε ικανοποιητικά αποτελέσματα. Επίσης, παρουσιάζουν υψηλό βαθμό απόδοσης, καθώς τα πτερύγια τους κινούνται κατακόρυφα και λαμβάνουν αεροδυναμική ισχύ κατά τη διάρκεια της πλήρους περιστροφής τους και τέλος η συναρμολόγησή τους είναι εύκολη.

Όμως, οι ανεμογεννήτριες οριζοντίου άξονα έχουν και σημαντικά μειονεκτήματα. Καταρχάς, απαιτείται η κατασκευή ενός πύργου στήριξης τεραστίων διαστάσεων ώστε να αντέχει το συνολικό βάρος των μεγάλων πτερυγίων, της γεννήτριας και του υπόλοιπου απαραίτητου εξοπλισμού. Επιπλέον, η γεννήτρια, ο άξονας του ρότορα, το κιβώτιο ταχυτήτων και το σύστημα φρένων πρέπει να ανυψωθούν στην κορυφή του πύργου, πράγμα που κάνει την κατασκευή των ανεμογεννητριών αυτών ιδιαίτερα ακριβή και πολύ δύσκολη. Επιπρόσθετα, χρειάζονται έναν ενεργό μηχανισμό που να ελέγχει την εκτροπή των πτερυγίων με σκοπό να τα στρέψει στην κατεύθυνση του ανέμου. Τέλος, είναι αναγκαία μια συσκευή πέδησης με σκοπό να σταματήσει την περιστροφή των πτερυγίων σε ισχυρούς ανέμους και έτσι να εμποδίσει την ενδεχόμενη καταστροφή της ανεμογεννήτριας [14].

2.1.2 Ανεμογεννήτριες Κατακόρυφου Άξονα

Οι ανεμογεννήτριες κατακόρυφου άξονα έχουν στον ρότορά τους πτερύγια των οποίων ο άξονας περιστροφής είναι κάθετος ως προς το έδαφος και κατακόρυφος στη ροή του ανέμου. Το κύριο πλεονέκτημα αυτής της διάταξης είναι ότι η μηχανή δεν χρειάζεται να είναι προσανατολισμένη προς τον άνεμο, αλλά μπορεί να περιστρέφεται από άνεμο οποιαδήποτε κατεύθυνσης κάθε χρονική στιγμή. Αυτό το πλεονέκτημα δίνει τη δυνατότητα αποτελεσματικής λειτουργίας χωρίς μηχανισμό προσανατολισμού σε τοποθεσίες όπου παρατηρείται έντονη μεταβλητότητα στην

κατεύθυνση του ανέμου ή υπάρχουν τυρβώδεις άνεμοι. Στο σχήμα 2.1.2 φαίνεται ένα παράδειγμα μιας ανεμογεννήτριας κατακόρυφου άξονα.



Σχήμα 2.1.2: Ανεμογεννήτρια κατακόρυφου άξονα [13]

Σε αυτές τις αιολικές μηχανές η ηλεκτρική γεννήτρια και ο υπόλοιπος βασικός εξοπλισμός μπορεί να τοποθετηθεί κοντά στο έδαφος. Άρα, αρκεί μια απλή κατασκευή με οικονομική σχεδίαση για τον πύργο στήριξης, ενώ μερικές φορές η ύπαρξη αυτού του πυλώνα είναι προαιρετική. Το πλεονέκτημα αυτό δίνει τη δυνατότητα εύκολης προσβασιμότητας στις ανεμογεννήτριες αυτές και καθιστά απλή τη διαδικασία συντήρησης των στρεφόμενων τμημάτων. Τέλος, ένα ακόμη αξιοσημείωτο πλεονέκτημα των ανεμογεννητριών κατακόρυφου άξονα είναι ότι απαιτούν χαμηλότερη ταχύτητα εκκίνησης από την τυπική των ανεμογεννητριών οριζοντίου άξονα.

Φυσικά δεν θα μπορούσαν να παραλείπονται τα μειονεκτήματα. Το σημαντικότερο τους πρόβλημα είναι ότι είναι αδύνατη η έναρξη της περιστροφής τους χωρίς εξωτερική παρέμβαση, διότι η ροπή εκκίνησης τους έχει πολύ υψηλή τιμή. Επομένως, για την αντιμετώπιση αυτής της κατάστασης είναι αναγκαία σε πρώτο στάδιο η λειτουργία τους σαν κινητήρες απορροφώντας ρεύμα από το δίκτυο. Επίσης, το

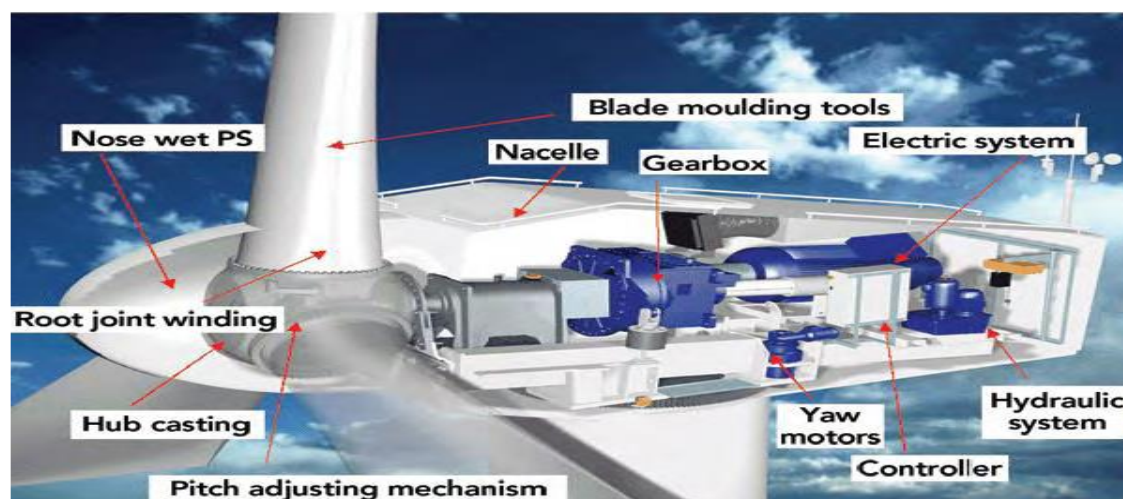
γεγονός ότι οι ανεμογεννήτριες κατακόρυφου άξονα δεν τοποθετούνται σε πύργους αλλά κυρίως κοντά στο έδαφος οδηγεί σε ένα σημαντικό μειονέκτημα.

Αξίζει να αναφερθεί ότι ανεμογεννήτριες κατακόρυφου άξονα διακρίνονται σε βασικές υποκατηγορίες που λέγονται Darrieus και Savonius αντιστοίχως.

Οι ανεμογεννήτριες τύπου Darrieus έχουν καλή απόδοση αλλά παράγουν μεγάλη ροπή κυματισμού που προκαλεί μείωση της αξιοπιστίας τους. Οι ανεμογεννήτριες τύπου Savonius έχουν εξαιρετική λειτουργία σε περιοχές όπου υπάρχουν τυρβώδεις άνεμοι και δυνατότητα εκκίνησης από μόνες τους, αλλά είναι λιγότερο αποδοτικές από τις συνηθισμένες ανεμογεννήτριες οριζοντίου άξονα λόγω της αεροδυναμικής τους αντίστασης [14].

2.2 Η ΔΟΜΗ ΤΩΝ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ

Η βασική δομή μιας ανεμογεννήτριας εμφανίζεται στο σχήμα 2.2. Τα βασικά υποσυστήματα που περιλαμβάνονται σε μια ανεμογεννήτρια είναι ο ρότορας, ο μηχανισμός ελέγχου του βήματος των πτερυγίων, η άτρακτος, το φρένο, ο άξονας χαμηλής ταχύτητας, το κιβώτιο ταχυτήτων, ο άξονας υψηλής ταχύτητας, η γεννήτρια, ο ηλεκτρονικός ελεγκτής, το ηλεκτρικό σύστημα, το σύστημα ψύξης, το υδραυλικό σύστημα, το ανεμόμετρο, ο ανεμοδείκτης, ο μηχανισμός περιστροφής της ατράκτου και ο πύργος.



Σχήμα 2.2: Τομή ατράκτου ανεμογεννήτριας [14]

Ο ρότορας αποτελείται από τα πτερύγια και την πλήμνη. Η πλήμνη είναι ένα μηχανικό εξάρτημα πάνω στο οποίο προσδένονται τα πτερύγια. Τα πτερύγια χρησιμοποιούν την αρχή της άντωσης για να μετατρέψουν την κινητική ενέργεια του ανέμου που δεσμεύουν σε μηχανική ενέργεια μέσω της περιστροφής τους γύρω από την πλήμνη. Ο αριθμός των πτερυγίων επηρεάζει την αεροδυναμική συμπεριφορά του ρότορα με τις περισσότερες ανεμογεννήτριες χρησιμοποιούν δύο ή τρία πτερύγια κατασκευασμένα από ενισχυμένο πολυεστέρα. Το μήκος των πτερυγίων μπορεί να φθάσει τα 80m και εξαρτάται από την απαιτούμενη ονομαστική ισχύ της ανεμογεννήτριας και το αιολικό δυναμικό της περιοχής εγκατάστασης τους.

Ο άξονας χαμηλής ταχύτητας, το κιβώτιο ταχυτήτων, και ο άξονας υψηλής ταχύτητας αποτελούν το σύστημα μετάδοσης κίνησης, ενώ το φρένο είναι το σύστημα πέδησης. Το σύστημα μετάδοσης κίνησης έχει τον άξονα χαμηλής ταχύτητας στην πλευρά του ρότορα και τον άξονα υψηλής ταχύτητας στην πλευρά της γεννήτριας. Ο άξονας χαμηλών στροφών είναι ο άξονας που συνδέει την πλήμνη με το κιβώτιο ταχυτήτων και είναι ο άξονας του ρότορα του ανεμοκινητήρα. Ο άξονας υψηλών στροφών ξεκινάει από το κιβώτιο ταχυτήτων και καταλήγει στη γεννήτρια, άρα στην ουσία αποτελεί το δρομέα της γεννήτριας. Ο σκοπός του κιβωτίου ταχυτήτων είναι να επιταχύνει το ρυθμό περιστροφής του ρότορα από μια χαμηλή τιμή (δεκάδες rpm) σε μια υψηλή τιμή (εκατοντάδες ή χιλιάδες rpm) που αρκούν για την οδήγηση μιας τυπικής γεννήτριας. Το φρένο αναλαμβάνει την πέδηση της ανεμογεννήτριας σε περιπτώσεις έκτακτης ανάγκης όπως σε ακραίες ταχύτητες ανέμου που έχουν ως συνέπεια την περιστροφή του ρότορα με υπερβολικά μεγάλες ταχύτητες και άρα κίνδυνο καταστροφής. Το είδος του φρένου που χρησιμοποιείται συνήθως είναι ένα μηχανικό δισκόφρενο το οποίο οδηγείται από υδραυλικά συστήματα. Το δισκόφρενο για να προστατεύσει τον ρότορα από υπερβολικά μεγάλες ταχύτητες σε συνθήκες υψηλού ανέμου επεμβαίνει αυτόματα στον άξονα του ρότορα και μειώνει την ταχύτητα περιστροφής του.

Η γεννήτρια μετατρέπει τη μηχανική ενέργεια του ρότορα σε ηλεκτρική ενέργεια και είναι τοποθετημένη στην κορυφή του πύργου. Όλες οι ανεμογεννήτριες χρησιμοποιούν επαγωγικές και σύγχρονες μηχανές που συνδέονται με ένα

μετασχηματιστή για την κατάλληλη προσαρμογή της παραγόμενης τάσης στο εκάστοτε δίκτυο.

Το ανεμόμετρο, ο ανεμοδείκτης και ο μηχανισμός περιστροφής της ατράκτου αποτελούν το σύστημα προσανατολισμού ενώ ο ηλεκτρονικός ελεγκτής και ο μηχανισμός ελέγχου του βήματος των πτερυγίων το σύστημα ελέγχου. Ο ηλεκτρονικός ελεγκτής είναι ένας μικροϋπολογιστής που εκτελεί διάγνωση βλαβών, ξεκινά και σταματάει την ανεμογεννήτρια και κάνει τις απαραίτητες ρυθμίσεις ανάλογα με τις μεταβολές του ανέμου με σκοπό τη δέσμευση της μέγιστης ισχύος από τον άνεμο. Το ανεμόμετρο μετρά την ταχύτητα του ανέμου και ο ανεμοδείκτης προσδιορίζει την κατεύθυνση του ανέμου. Ο μηχανισμός περιστροφής της ατράκτου αναλαμβάνει την περιστροφή της ατράκτου μέσω ενός σερβοκινητήρα ώστε να προσανατολίσει το ρότορα απέναντι στην κατεύθυνση του ανέμου. Τα σήματα μέτρησης του ανεμομέτρου αποστέλλονται στον ηλεκτρονικό ελεγκτή ώστε ανάλογα να εκκινήσει τη λειτουργία της ανεμογεννήτριας όταν η ταχύτητα του ανέμου γίνει μεγαλύτερη από μια ελάχιστη τιμή ή να διακόψει τη λειτουργία όταν ο άνεμος υπερβεί ένα ανώτατο όριο με σκοπό την προστασία της.

Ο πύργος στηρίζει όλη την παραπάνω ηλεκτρομηχανολογική εγκατάσταση της ατράκτου και κατασκευάζεται από χάλυβα και η ακαμψία του είναι σημαντικός παράγοντας στην απορρόφηση των κραδασμών που δημιουργούνται από το ρότορα. Όσο μεγαλύτερο είναι το ύψος του πύργου τόσο μεγαλύτερα ποσά αιολικής ενέργειας μπορεί να δεσμεύσει ο ρότορας της ανεμογεννήτριας. Οι δύο κύριοι τύποι πύργων που έχουν επικρατήσει είναι ο σωληνωτός και ο δικτυωτός [15].

2.3 ΑΕΡΟΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΩΝ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ

2.3.1 Δυναμική Άνωση και Αντίσταση των Πτερυγίων

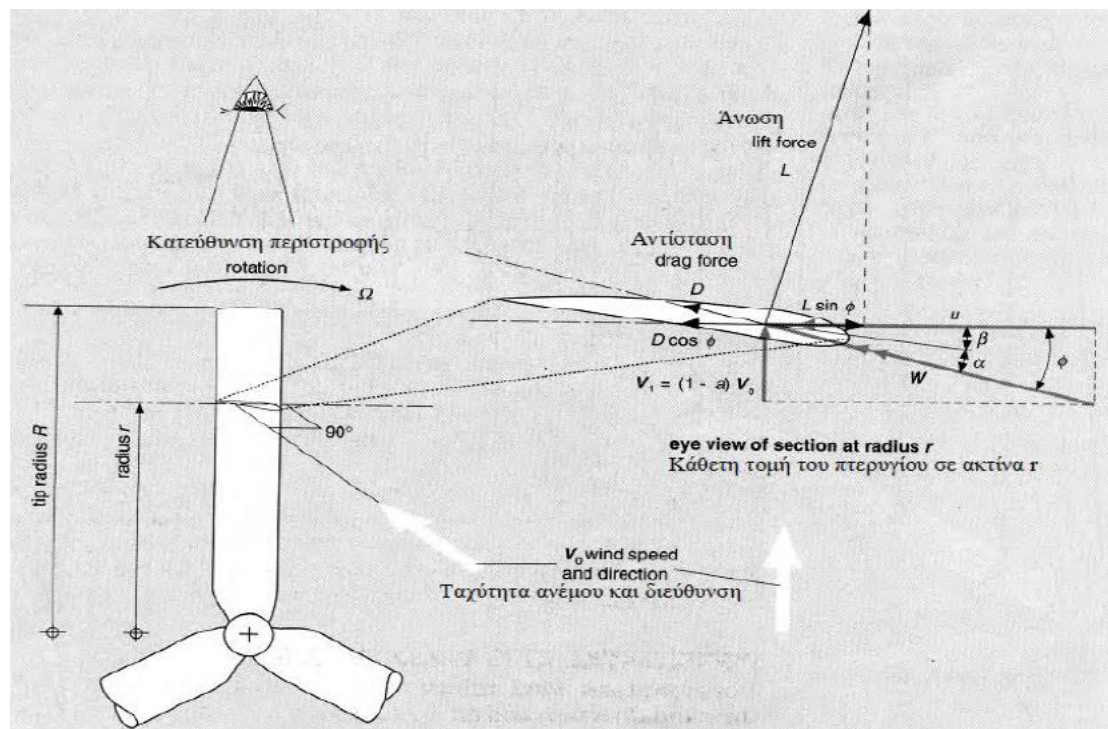
Για την κατανόηση της λειτουργίας των ανεμογεννητριών απαιτείται η επεξήγηση των αεροδυναμικών μεγεθών της δυναμικής άωσης και της αντίστασης. Γενικά, όταν μια επιφάνεια βρίσκεται εντός μιας ροής αέρα ασκείται σε αυτό μια δύναμη. Μπορούμε να θεωρήσουμε ότι η δύναμη αυτή αναλύεται σε δύο συνιστώσες κάθετες

μεταξύ τους, την δυναμική άνωση L και την αντίσταση D . Οπότε, η δυναμική άνωση είναι η δύναμη που δέχεται η επιφάνεια και είναι κάθετη στη κατεύθυνση του ανέμου και η αντίσταση η αντίστοιχη δύναμη παράλληλη στην κατεύθυνση του ανέμου. Η γωνία που σχηματίζει η επιφάνεια με τη διεύθυνση του αέρα ονομάζεται γωνία πρόσπτωσης. Αλλάζοντας τη γωνία πρόσπτωσης σε μία επιφάνεια επιτυγχάνουμε μεγιστοποίηση της δυναμικής άνωσης. Οι δυνάμεις της δυναμικής άνωσης και της αντίστασης περιγράφονται από αδιάστατους συντελεστές, C_L για την δυναμική άνωση και C_D για την αντίσταση. Αν θεωρήσουμε ότι σε επιφάνεια εμβαδού A προσπίπτει άνεμος ταχύτητας V και πυκνότητας αέρα ρ με γωνία πρόσπτωσης τότε για τα μέτρα της δυναμικής άνωσης L και της αντίστασης D ισχύουν οι παρακάτω σχέσεις:

$$L = 1/2 \cdot \rho \cdot A \cdot V^2 \cdot C_L$$

$$D = 1/2 \cdot \rho \cdot A \cdot V^2 \cdot C_D$$

Οι δυνάμεις της δυναμικής άνωσης και της αντίστασης βρίσκουν εφαρμογή και στα πτερύγια των ανεμογεννητριών. Στο σχήμα 2.3.1 φαίνεται το τμήμα ενός περιστρεφόμενου πτερυγίου μιας ανεμογεννήτριας οριζόντιου άξονα με αναπαράσταση των δυνάμεων και των ταχυτήτων που ασκούνται σε ένα ορισμένο σημείο του πτερυγίου μια τυχαία χρονική στιγμή:



Σχήμα 2.3.1: Διάγραμμα δυνάμεων και ταχυτήτων σε τμήμα πτερυγίου ανεμογεννήτριας [16]

Τα ιδανικά πτερύγια για τις ανεμογεννήτριες είναι εκείνα που εκμεταλλεύονται την δυναμική άνωση ώστε οι ανεμογεννήτριες να στρέφονται με υψηλή ταχύτητα και μικρή ροπή. Η κατεύθυνση με την οποία βλέπει το πτερύγιο τον άνεμο είναι αποτέλεσμα της ταχύτητας του ανέμου και της εφαπτομενικής ταχύτητας του πτερυγίου στη συγκεκριμένη θέση. Η εφαπτομενική ταχύτητα κατά μήκος του πτερυγίου v (m/sec) μεταβάλλεται ανάλογα με την τοπική ακτίνα r (m) σύμφωνα με τη σχέση, $v = \omega \cdot r$ όπου η γωνιακή ταχύτητα του πτερυγίου ω (rad/sec) παραμένει σταθερή. Η ταχύτητα του ανέμου στο πτερύγιο είναι η επ' άπειρον ταχύτητα του ανέμου μειωμένη κατά ένα συντελεστή a που υπολογίζει την επιβράδυνση της ροής λόγω της ανταλλαγής ενέργειας που λαμβάνει χώρα. Η σχετική γωνία πρόσπτωσης ϕ είναι η γωνία που σχηματίζει η σχετική ταχύτητα W με συγκεκριμένο σημείο του πτερυγίου και μετριέται από το επίπεδο περιστροφής του πτερυγίου. Η γωνία πρόσπτωσης α στο σημείο αυτό σχηματίζεται από τη χορδή του πτερυγίου και τη σχετική ταχύτητα W . Η γωνία βήματος β ορίζεται ως η διαφορά μεταξύ της σχετικής γωνίας πρόσπτωσης ϕ από τη γωνία πρόσπτωσης α , δηλαδή $\beta = \phi - \alpha$. Η πτέρυγα είναι σχεδιασμένη ώστε να περιστρέφεται σε ένα επίπεδο κάθετο στη διεύθυνση του

ανέμου. Αφού αναλύσουμε σε ένα σημείο του πτερυγίου την δυναμική άνοση και την αντίσταση, τις αφαιρούμε και η διαφορά τους μας δίνει την προωστική δύναμη που είναι η αιτία περιστροφής του πτερυγίου. Ομοίως, υπολογίζουμε τη συνολική δύναμη που ασκείται κατά την αξονική διεύθυνση [16]. Δηλαδή έχουμε:

$$F_{\text{προωσ}} = L \cdot \sin \varphi - D \cdot \cos \varphi$$

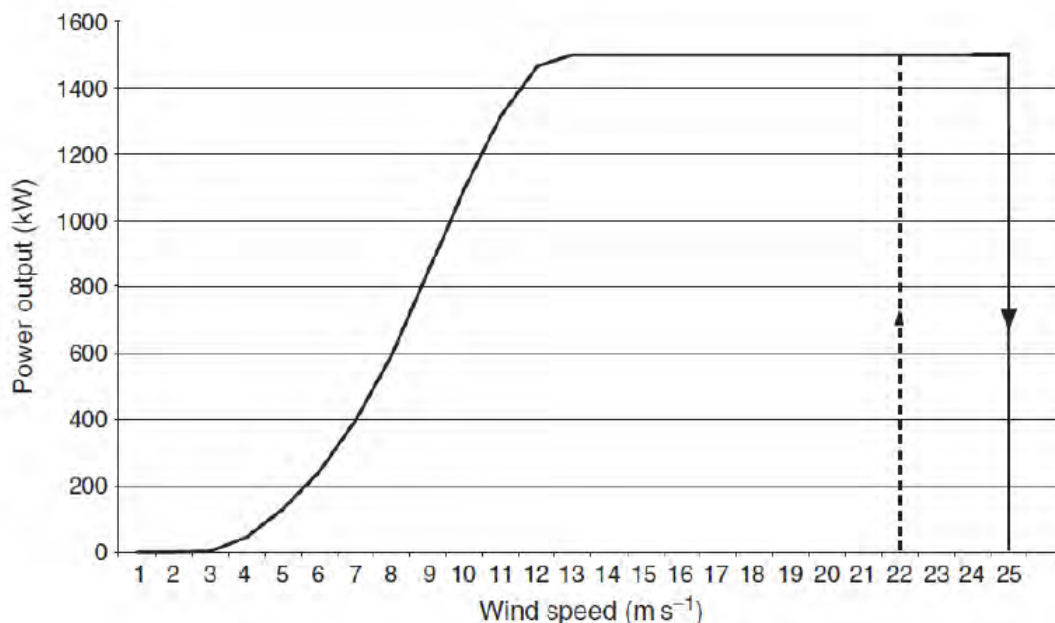
$$F_{\text{αξον}} = L \cdot \cos \varphi + D \cdot \sin \varphi$$

2.3.2 Αιολική Ισχύς

Η αιολική ισχύς, δηλαδή η στιγμιαία ισχύς του ανέμου, ορίζεται ως η συνολικά διαθέσιμη κινητική ενέργεια του ανέμου στη μονάδα του χρόνου. Αυτή η ισχύς μετατρέπεται σε μηχανική ισχύ μέσω του ρότορα της ανεμογεννήτριας, γεγονός που οδηγεί στη μείωση της ταχύτητας του αέρα. Αν θεωρήσουμε ότι σε επιφάνεια εμβαδού A προσπίπτει άνεμος ταχύτητας με πυκνότητα αέρα ρ τότε η αιολική ισχύς P προκύπτει από τη σχέση:

$$P = 1/2 \cdot \rho \cdot A \cdot v^3$$

Εφόσον η αιολική ισχύς είναι ανάλογη με την τρίτη δύναμη της ταχύτητας του ανέμου, μια αύξηση κατά 10% στην ταχύτητα του ανέμου συνεπάγεται μια αύξηση της αιολικής ισχύος κατά 30%. Η καμπύλη ισχύος-ταχύτητας ακολουθεί αυτή τη σχέση ανάμεσα στην ταχύτητα ένταξης και την ονομαστική ταχύτητα. Η ταχύτητα ένταξης είναι η ταχύτητα στην οποία η ανεμογεννήτρια αρχίζει να λειτουργεί και να παράγει ισχύ. Η ονομαστική ταχύτητα είναι η ταχύτητα στην οποία η ανεμογεννήτρια λειτουργεί με τα ονομαστικά της μεγέθη και παράγει ονομαστική της ισχύ. Μια ανεμογεννήτρια συνήθως φθάνει σε μια ταχύτητα ανέμου που κυμαίνεται σε ένα εύρος τιμών από 12 έως 16 m/sec ανάλογα με το είδος της κάθε ανεμογεννήτριας. Στο σχήμα 2.5 παρουσιάζεται η καμπύλη ηλεκτρικής ισχύος με την ταχύτητα ανέμου μιας ανεμογεννήτριας με ηλεκτρική ισχύ εξόδου 1500 kW.



Εικόνα 2.3.2 : Καμπύλη ισχύος-ταχύτητας ανεμογεννήτριας [15]

Για ταχύτητες ανέμου υψηλότερες από τις εκτιμούμενες η μέγιστη παραγόμενη ενέργεια θα περιοριστεί. Ως εκ τούτου, μια ανεμογεννήτρια θα παράγει μέσα σε ένα ορισμένο διάστημα ταχυτήτων που θα έχει το άνω όριο του στην ταχύτητα αποκοπής. Η ταχύτητα αποκοπής είναι εκείνη η ταχύτητα του ανέμου στην οποία η ανεμογεννήτρια και απομακρύνεται από την κύρια κατεύθυνση του ανέμου. Οι τυπικές τιμές της ταχύτητας αποκοπής κυμαίνονται σε ένα εύρος τιμών μεταξύ 20 και 25 m/sec.

Η καμπύλη ισχύος-ταχύτητας επηρεάζεται από την ατμοσφαιρική πίεση διότι για παράδειγμα μεταβάλλεται ανάλογα με το υψόμετρο και από αλλαγές στο αεροδυναμικό σχήμα των πτερυγίων λόγω πάγου και φθορών. Τώρα σε ότι αφορά την καμπύλη ισχύος-ταχύτητας των αιολικών πάρκων. Για παράδειγμα εάν οι ανεμογεννήτριες της πρώτης σειράς του πάρκου που έχουν κατεύθυνση παρατηρούνται ταχύτητες ανέμου 15 m/sec στις ανεμογεννήτριες της τελευταίας σειράς θα προσπίπτει άνεμος ταχύτητας μόνο 10 m/sec. Συνεπώς οι πρώτες ανεμογεννήτριες θα παράγουν 1500 kW, ενώ οι τελευταίες μόνο 1100 kW[15].

2.3.3 Αεροδυναμικός Συντελεστής Ισχύος

Στην πραγματικότητα μόνο ένα μέρος της συνολικής αιολικής ισχύος είναι δυνατόν να δεσμευτεί από μια ανεμογεννήτρια, διότι ο άνεμος απομακρύνεται από την περιοχή του ρότορα με κάποια ταχύτητα και τα πτερύγια εκτρέπουν ένα τμήμα του αέρα με αποτέλεσμα να παρακάμπτει την ανεμογεννήτρια και τελικά να μη τη διαπερνά. Το αδιάστατο μέγεθος που αντιπροσωπεύει το κλάσμα της ισχύος του ανέμου που δεσμεύεται από την ανεμογεννήτρια ονομάζεται αεροδυναμικός συντελεστής ισχύος.

Η απόδοση μιας ανεμογεννήτριας χαρακτηρίζεται από τον αεροδυναμικό συντελεστή ισχύος που ορίζεται ως ο λόγος της μηχανικής ισχύος που παράγεται από το ρότορα προς την αιολική ισχύ που δεσμεύεται από την ανεμογεννήτρια. Ο αεροδυναμικός συντελεστής ισχύος C_P ισούται με:

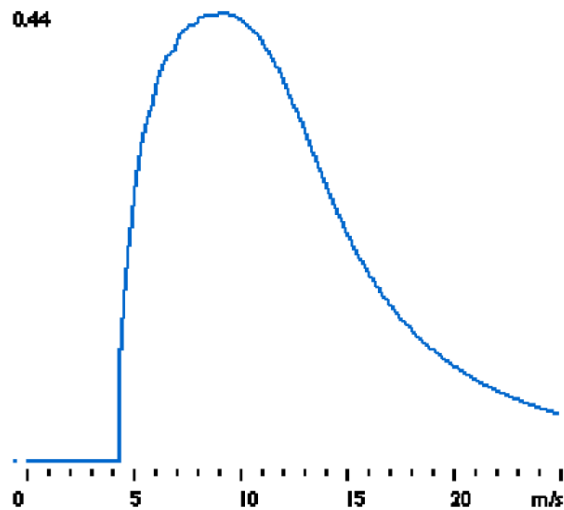
$$C_P = \frac{P_M}{P_A}$$

όπου P_M η μηχανική ισχύς και P_A η αιολική ισχύς.

Η μέγιστη θεωρητικά δυνατή τιμή του αεροδυναμικού συντελεστή ισχύος ονομάζεται όριο του Betz και έχει τιμή 0.593. Ο νόμος του Betz ουσιαστικά λέει ότι μόνο το 59% της κινητικής ενέργειας του ανέμου που δεσμεύεται από την ανεμογεννήτρια μπορεί να μετατραπεί σε μηχανική ενέργεια. Άρα, ο συντελεστής ισχύος δείχνει πόσο αποτελεσματικά μετατρέπεται η αιολική ενέργεια σε μηχανική από το ρότορα της ανεμογεννήτριας. Παρακάτω στο σχήμα 2.3.3 παρουσιάζεται ένα τυπικό διάγραμμα που παρουσιάζει τη μεταβολή του αεροδυναμικού συντελεστή ισχύος συναρτήσει της ταχύτητας του ανέμου.

Από το διάγραμμα παρατηρούμε ότι η μέση μηχανική απόδοση είναι περίπου λίγο πάνω από το 20%. Ωστόσο, βλέπουμε ότι η απόδοση παίρνει διάφορες τιμές, οι

οποίες εξαρτώνται από την τιμή της ταχύτητας του ανέμου. Συγκεκριμένα, η μέγιστη τιμή της απόδοσης είναι κοντά στο 44% που συμβαίνει για μια ταχύτητα ανέμου γύρω στα 9 m/sec. Επίσης, διακρίνουμε πως σε χαμηλές ταχύτητες του ανέμου η απόδοση δεν είναι σημαντική διότι δεν υπάρχουν μεγάλες ποσότητες αιολικής ενέργειας για να δεσμευτούν. Ακόμη, στις μεγάλες ταχύτητες ανέμου η ανεμογεννήτρια δεν πρέπει να λαμβάνει ποσότητα ενέργειας πέρα από την προκαθορισμένη, δηλαδή από την ονομαστική, πράγμα που καθορίζει τα μηχανικά φορτία στην κατασκευή. Το συμπέρασμα είναι πως η έννοια της απόδοσης έχει νόημα μόνο στις περιοχές εκείνες που η ταχύτητα του ανέμου είναι κατάλληλη ώστε η ανεμογεννήτρια να παράγει το μέγιστο δυνατό ποσό ισχύος.



Εικόνα 2.3.3: Διάγραμμα του αεροδυναμικού συντελεστή ισχύος με την ταχύτητα του ανέμου [17]

2.3.4 Λόγος Ταχύτητας Ακροπτερυγίου

Μια άλλη σπουδαία παράμετρος που αφορά την παραγόμενη ισχύ των ανεμογεννητριών είναι ο λόγος ταχύτητας ακροπτερυγίου που ορίζεται ως ο λόγος της γραμμικής ταχύτητας λόγω περιστροφής των ακροπτερυγίων προς την ταχύτητα του ανέμου. Αν συμβολίσουμε με v (m/sec) την ταχύτητα του ανέμου, u (m/sec) τη γραμμική ταχύτητα περιστροφής, ω (rad/sec) τη γωνιακή ταχύτητα περιστροφής του ακροπτερυγίου και r (m) την ακτίνα του, τότε ο λόγος ταχύτητας ακροπτερυγίου λ δίνεται από τη σχέση:

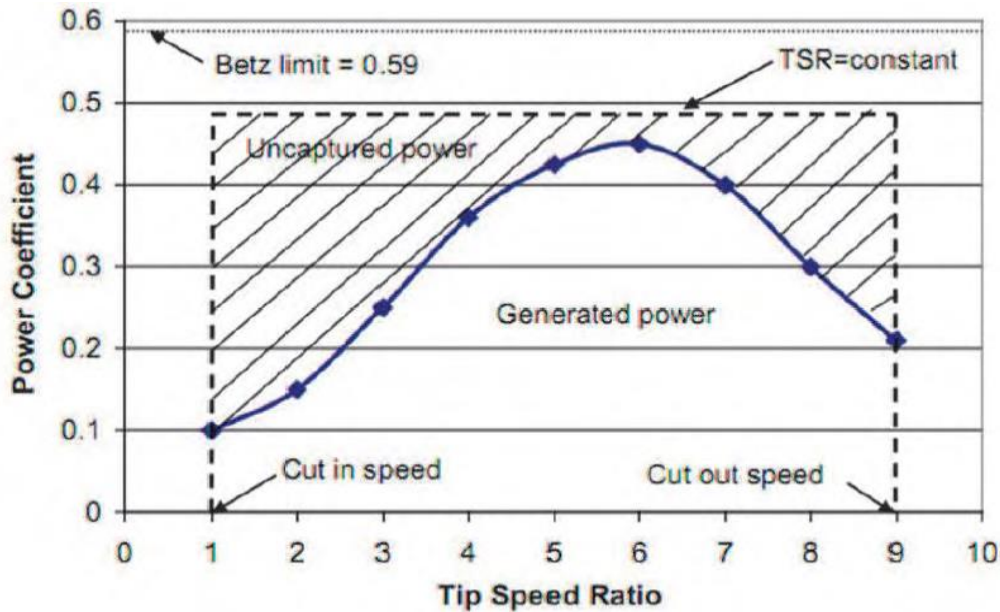
$$\lambda = \frac{v}{v} = \frac{\omega_r R}{v}$$

Εάν ο ρότορας περιστρέφεται με πολύ μικρή ταχύτητα επιτρέπει μεγάλη ποσότητα ανέμου να περάσει ανενόχλητη και έτσι δεν επιτρέπει τη δέσμευση της μέγιστης ισχύος από το ρότορα μέσα στα όρια του ορίου του Betz. Από την άλλη πλευρά, εάν ο ρότορας περιστρέφεται με πολύ μεγάλες ταχύτητες γίνεται για τον άνεμο ένας μεγάλος πλατύς δίσκος που δημιουργεί μεγάλη αντίσταση. Η τιμή του λόγου ταχύτητας ακροπτερυγίου εξαρτάται από τον τύπο της ανεμογεννήτριας, τον αριθμό των πτερυγίων και το είδος της αεροτομής. Γενικά, ο λόγος ταχύτητας ακροπτερυγίου των τριπτέρυγων ανεμογεννητριών κυμαίνεται σε ένα εύρος τιμών μεταξύ 6 και 8, ενώ η πιο ευρέως αναφερόμενη τιμή είναι κοντά στο 7.

Εκτός από τους παράγοντες που αναφέρθηκαν παρακάτω και κάποια άλλα θέματα επηρεάζουν την τιμή του λόγου ταχύτητας ακροπτερυγίου με τον οποίο πρέπει να σχεδιασθεί μια ανεμογεννήτρια. Γενικά, μια υψηλή τιμή του λόγου αυτού είναι επιθυμητή δεδομένου ότι βοηθά στην επίτευξη μιας υψηλής ταχύτητας για τον άξονα του ρότορα η οποία επιτρέπει την καλή απόδοση της γεννήτριας. Όμως, πολύ υψηλές τιμές του λόγου αυτού προκαλούν προβλήματα όπως μείωση της απόδοσης του ρότορα λόγω αύξησης της αντίστασης του ανέμου και των απωλειών στα ακροπτερύγια [18].

2.3.5 Μέγιστος Αεροδυναμικός Συντελεστής Ισχύος και Βέλτιστος Λόγος Ταχύτητας Ακροπτερυγίου

Ακολουθώντας, στο σχήμα 2.3.5 παρουσιάζεται το διάγραμμα του αεροδυναμικού συντελεστή ισχύος σαν συνάρτηση του λόγου ταχύτητας ακροπτερυγίου για μια ανεμογεννήτρια.



Εικόνα 2.3.5: Διάγραμμα του αεροδυναμικού συντελεστή ισχύος με τον λόγο ταχύτητας ακροπτερυγίου [17]

Παρατηρούμε ότι η δέσμευση της μέγιστης ισχύος συμβαίνει για μια βέλτιστη τιμή του λόγου ταχύτητας ακροπτερυγίου και συγκεκριμένα στο σημείο όπου η διαφορά ανάμεσα στον πραγματικό λόγο λειτουργίας (μπλε γραμμή) και στο σταθερό θεωρητικό λόγο (διακεκομμένη γραμμή) ελαχιστοποιείται. Η διαφορά αυτή ουσιαστικά παριστάνει την ισχύ που δε δεσμεύεται από την ανεμογεννήτρια και οφείλεται στις απώλειες λόγω τριβών, στο πεπερασμένο μέγεθος των πτερυγίων, στα κατασκευαστικά λάθη και στο γεγονός ότι η ανεμογεννήτρια δε δουλεύει με το βέλτιστο λόγο για κάθε τιμή της ταχύτητας του αέρα.

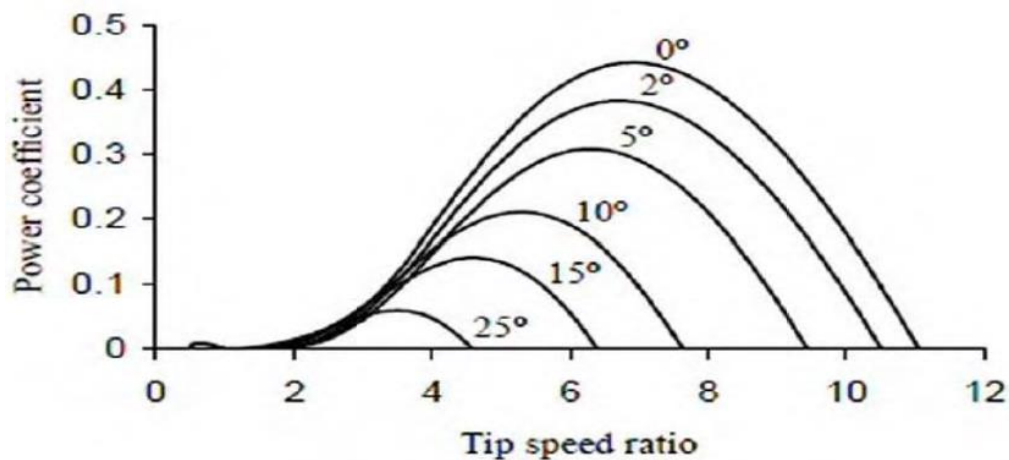
Όμως, ο αεροδυναμικός συντελεστής ισχύος δεν είναι μόνο συνάρτηση του λόγου ταχύτητας ακροπτερυγίων καθώς επηρεάζεται και από τη γωνία βήματος του πτερυγίου. Οπότε πρέπει η γωνιακή ταχύτητα του ρότορα για οποιαδήποτε ταχύτητα ανέμου να παίρνει τιμές που να βελτιστοποιούν το λόγο ταχύτητα και τη γωνία βήματος με σκοπό την επίτευξη της μέγιστης παραγόμενης ισχύος. Για συγκεκριμένες τιμές των λ και β υπολογίζεται η τιμή του $C_P(\lambda, \beta)$ από τον παρακάτω εκθετικό τύπο:

$$C_P(\lambda, \beta) = 0.22 \cdot \left(\frac{116}{\lambda_i} - 0.4\beta - 5 \right) \cdot e^{\left(-\frac{12.5}{\lambda_i} \right)}$$

όπου το λ_i υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1}$$

Στο γράφημα του σχήματος 2.3.6 παρουσιάζεται ο αεροδυναμικός συντελεστής ισχύος $C_P(\lambda, \beta)$ σα συνάρτηση του λόγου ταχύτητας ακροπτερυγίου λ και της γωνίας βήματος πτερυγίου β . Από το γράφημα διαπιστώνεται εύκολα πως η μέγιστη τιμή του αεροδυναμικού συντελεστή ισχύος αντιστοιχεί για γωνία βήματος πτερυγίου $\beta=0$. Από τη βέλτιστη αυτή τιμή του β βρίσκουμε τις βέλτιστες τιμές για τα C_P , λ_{opt} και λ_i που είναι $C_P=0.4832$, $\lambda_{opt}=0.6325$ και $\lambda_i=8.12$ [19].



Εικόνα 2.3.6: Διάγραμμα του αεροδυναμικού συντελεστή ισχύος με τον λόγο ταχύτητας ακροπτερυγίου για διαφορετικές γωνίες βήματος πτερυγίου [20]

2.3.6 Γωνία Βήματος Πτερυγίου

Στις ανεμογεννήτριες που εφαρμόζουν έλεγχο της γωνίας βήματος των πτερυγίων (pitch control), τα πτερύγια θα πρέπει να έχουν τη δυνατότητα να περιστρέφονται,

περιστρέφοντας είτε ολόκληρο το πτερύγιο είτε κάποιο τμήμα του γύρω από τον άξονα τους. Η περιστροφή αυτή θα πρέπει να γίνεται στην κατεύθυνση όπου πραγματοποιείται μείωση της γωνίας πρόσπτωσης της ροής του αέρα στην αεροτομή του πτερυγίου. Στην περίπτωση που η παραγωγή ενέργειας ξεπεράσει ένα ασφαλές επίπεδο, ο μηχανισμός έλεγχου της γωνίας των πτερυγίων αρχίζει να περιστρέφει τα πτερύγια με αργό ρυθμό έτσι ώστε να μειώνεται ο άνεμος που προσπίπτει πάνω τους. Στη συνέχεια όταν ελαττωθεί η ένταση του ανέμου τα πτερύγια επαναφέρονται στην αρχική τους θέση προκειμένου να γίνεται μεγαλύτερη πρόσπτωση του πάνω τους και άρα να επιτευχθεί μεγαλύτερη παραγωγή ενέργειας. Να αναφερθεί ότι για τον έλεγχο βήματος πτερυγίου χρησιμοποιούνται υδραυλικοί ή ηλεκτρικοί ενεργοποιητές [19].

2.3.7 Απώλεια Στήριξης

Στις ανεμογεννήτριες με παθητική απώλεια στήριξης τα πτερύγια είναι τοποθετημένα στον άξονα σε μια σταθερή γωνία. Η γεωμετρία των πτερυγίων είναι τέτοια ώστε να διασφαλίζεται από αεροδυναμική άποψη ότι σε μεγάλες ταχύτητες ανέμου θα εμφανιστούν στα πλάγια των πτερυγίων από την αντίθετη πλευρά πρόσπτωσης του ανέμου κάποιες αεροδυναμικές διαταραχές. Οι διαταραχές αυτές, δηλαδή δίνες και στροβιλισμοί του αέρα, αντισταθμίζουν τις δυνάμεις άντωσης στα πτερύγια και εμποδίζουν την αρνητική επίδραση τους στο ρότορα. Το αεροδυναμικό αυτό φαινόμενο ονομάζεται απώλεια στήριξης (stallcontrol). Οι αεροδυναμικές διαταραχές που προκαλούν την απώλεια στήριξης έχουν ως τελική συνέπεια τις διαρκείς αρνητικές ολισθήσεις στην ταχύτητα περιστροφής που περιγράφονται με τον όρο "στολάρισμα" (stalling). Κατά την απώλεια στήριξης το πτερύγιο στρέφεται με αργό ρυθμό κατά μήκος του άξονα του ώστε να είναι σίγουρο ότι όταν η ταχύτητα του ανέμου φθάσει την καθορισμένη ταχύτητα τα πτερύγια θα χάσουν την απώλεια στήριξης σταδιακά και όχι απότομα. Το βασικό πλεονέκτημα των ανεμογεννητριών που χρησιμοποιούν έλεγχο απώλειας στήριξης είναι ότι πάνω στο ρότορα τους δεν παρατηρούνται κινούμενα μέρη.

Κύριας σημασίας είναι το γεγονός ότι η μεταβολή της γωνίας στην απώλεια στήριξης γίνεται αντίθετα προς αυτή της γωνίας βήματος πτερυγίου. Τέλος, η στρέψη των

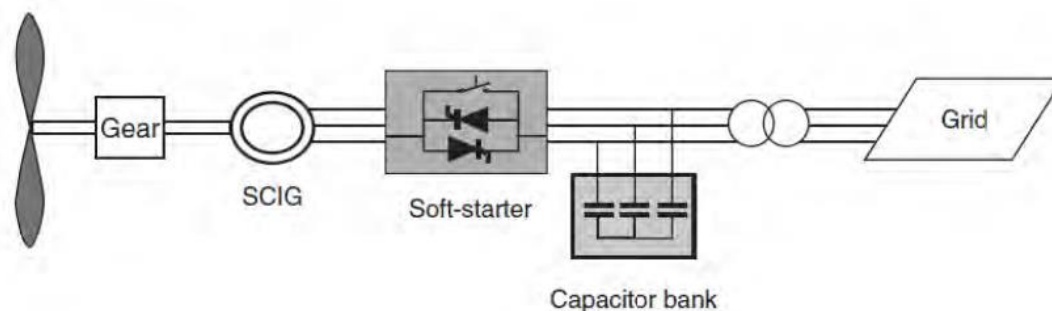
περυγίων στην απώλεια στήριξης γίνεται με χρήση υδραυλικών ή ηλεκτρικών μηχανισμών [19].

2.4 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ

2.4.1 Ανεμογεννήτριες Σταθερών Στροφών

Οι ανεμογεννήτριες σταθερών στροφών λειτουργούν αποκλειστικά με μια ονομαστική ταχύτητα περιστροφής ανεξάρτητα της ταχύτητας του ανέμου που προσπίπτει στα περύγια τους. Ο κυριότερος λόγος της εξάπλωσής τους είναι το χαμηλό κόστος που οφείλεται στο γεγονός ότι κατά τη σύνδεση τους με το δίκτυο δεν παρεμβάλλονται ηλεκτρονικοί μετατροπείς ισχύος. Επίσης πλεονεκτούν λόγω της απλότητας, της αξιοπιστίας και της στιβαρότητας τους. Όμως, μειονεκτούν λόγω των ισχυρών μηχανικών καταπονήσεων, της χαμηλής αεροδυναμικής απόδοσης, του χαμηλού συντελεστή ισχύος στην έξοδο της γεννήτριας και των μεταβατικών φαινομένων κατά την εκκίνηση.

Γενικά, η κύρια εκδοχή της ανεμογεννήτριας σταθερών στροφών χρησιμοποιεί μια επαγωγική μηχανή βραχυκυκλωμένου κλωβού, η οποία συνδέεται απευθείας στο δίκτυο μέσω ενός μετασχηματιστή. Η σύνδεση με το δίκτυο γίνεται χωρίς ηλεκτρονικό μετατροπέα ισχύος, άρα η ταχύτητα του δρομέα παραμένει σταθερή με μικρή απόκλιση από τη σύγχρονη ταχύτητα. Επειδή η επαγωγική μηχανή καταναλώνει πάντα άεργο ισχύ από το δίκτυο, η συνδεσμολογία της περιλαμβάνει και μια συστοιχία πυκνωτών, με σκοπό την αντιστάθμιση αέργου ισχύος. Μια πιο ομαλή σύνδεση στο δίκτυο επιτυγχάνεται με τη χρήση ενός ηλεκτρονικά ελεγχόμενου εκκινητή (soft-starter). Στο σχήμα 2.4.1 παρουσιάζεται το διάγραμμα των ανεμογεννητριών σταθερών στροφών:

Type A

Εικόνα 2.4.1: Διάγραμμα ανεμογεννήτριας σταθερών στροφών με επαγωγική μηχανή βραχυκυκλωμένου κλωβού [15]

Δύο βασικοί λόγοι για τους οποίους επιλέγεται η επαγωγική μηχανή είναι η αξιοπιστία της και το χαμηλό της κόστος. Επιπλέον, έχει κάποια αξιόλογα χαρακτηριστικά ως μηχανή που είναι ιδιαίτερα χρήσιμη στην εφαρμογή της στις ανεμογεννήτριες. Για παράδειγμα, η ασύγχρονη γεννήτρια παρουσιάζει ολίσθηση που κάνει πιο ομαλή τη σύνδεση της στο δίκτυο και έχει μεγάλη στιβαρότητα που επιτρέπει μια καλή συμπεριφορά σε υπερφορτίσεις. Σε ότι αφορά τα μειονεκτήματα της επαγωγική μηχανής το σημαντικότερο είναι ότι απορροφά άεργο ισχύ από το δίκτυο στο οποίο είναι συνδεδεμένη. Η ποσότητα της αέργου ισχύος που καταναλώνεται γίνεται μεγαλύτερη, όσο αυξάνεται η ποσότητα της ενεργού ισχύος που παράγεται. Οπότε χρησιμοποιούμε μια συστοιχία παράλληλων πυκνωτών για να κάνουμε αντιστάθμιση αέργου ισχύος έτσι ώστε η τιμή του συντελεστή ισχύος να είναι κοντά στη μονάδα.

Ανεξάρτητα από την τεχνική ελέγχου της ισχύος που χρησιμοποιεί μια ανεμογεννήτρια σταθερών στροφών, είναι αναπόφευκτο το γεγονός ότι οι διακυμάνσεις της ταχύτητας του ανέμου μετατρέπονται σε διακυμάνσεις της μηχανικής ροπής και συνεπώς σε διακυμάνσεις της ηλεκτρικής ισχύος. Στην περίπτωση ενός αδύναμου δικτύου αυτό μπορεί να αποφέρει διακυμάνσεις τάσης στο σημείο της σύνδεσης. Εξαιτίας αυτών των διακυμάνσεων τάσης, οι ανεμογεννήτριες σταθερών στροφών απορροφούν μεγάλες ποσότητες αέργου ισχύος από το βοηθητικό δίκτυο, εκτός βέβαια εάν υπάρχει μια συστοιχία πυκνωτών. Επομένως, το κύρια μειονεκτήματα της τεχνολογίας σταθερών στροφών είναι ότι οι ανεμογεννήτριες

αυτές δεν υποστηρίζουν κανέναν έλεγχο ταχύτητας, απαιτούν τη σύνδεση σε ένα ισχυρό δίκτυο και είναι χρειάζονται κατασκευή που να αντέχει τις ισχυρές μηχανικές καταπονήσεις.

Ανάλογα με την τεχνική έλεγχου της ισχύος που χρησιμοποιούν οι ανεμογεννήτριες σταθερών στροφών κατατάσσονται σε τρεις κατηγορίες. Έτσι έχουμε εκείνες που εφαρμόζουν έλεγχο απώλειας στήριξης, εκείνες με έλεγχο βήματος πτερυγίου και εκείνες με ενεργό έλεγχο απώλειας στήριξης. Ακολούθως αναφέρονται τα βασικά χαρακτηριστικά των τριών αυτών κατηγοριών.

Οι ανεμογεννήτριες σταθερής ταχύτητας με έλεγχο απώλειας στήριξης είναι ένας συμβατικός τύπος που χρησιμοποιήθηκε από πολλούς κατασκευαστές ανεμογεννητριών στη Δανία κατά τις δεκαετίες του 1980 και του 1990. Έχει γίνει πολύ δημοφιλής λόγω της σχετικά χαμηλής τιμής, την απλότητα και τη στιβαρότητα της. Οι ανεμογεννήτριες αυτές δεν μπορούν να πραγματοποιούν βοηθητική επανεκκίνηση, πράγμα που σημαίνει ότι η ισχύς εξόδου της δε μπορεί να ελεγχθεί κατά τη διάρκεια της διαδικασίας σύνδεσης.

Οι ανεμογεννήτριες σταθερής ταχύτητας με έλεγχο βήματος πτερυγίου έχουν επίσης εμφανιστεί στο εμπόριο των ανεμογεννητριών. Το κύρια πλεονεκτήματα τους είναι ότι παρέχουν τη δυνατότητα ελεξιμότητα της ισχύος, ελεγχόμενης επανεκκίνησης και διακοπής της λειτουργίας σε περιπτώσεις έκτακτης ανάγκης. Το μεγαλύτερο μειονέκτημα τους είναι ότι σε υψηλές ταχύτητες ανέμου, ακόμη και μικρές μεταβολές της ταχύτητας του ανέμου έχουν ως συνέπεια μεγάλες διακυμάνσεις στην ισχύ εξόδου. Σε αυτό συμβάλλει και το γεγονός ότι ο μηχανισμός ελέγχου του βήματος πτερυγίου δρα αρκετά γρήγορα ώστε να αποφεύγονται αυτές οι διακυμάνσεις. Μέσω του ελέγχου βήματος πτερυγίου σε μικρές μεταβολές του ανέμου μπορούν γίνουν οι κατάλληλες ρυθμίσεις, αλλά αυτό δεν είναι δυνατό στην περίπτωση ριπών ανέμου.

Οι ανεμογεννήτριες σταθερής ταχύτητας με ενεργό έλεγχο απώλειας στήριξης είναι ιδιαίτερα δημοφιλείς. Αυτός ο τύπος διατηρεί όλα τα χαρακτηριστικά της ποιότητας ισχύος των ανεμογεννητριών που ρυθμίζονται μέσω απώλειας στήριξης. Οι

βελτιώσεις βρίσκονται στην καλύτερη αξιοποίηση του συνολικού συστήματος, σαν αποτέλεσμα της χρήσης του ενεργού ελέγχου απώλειας στήριξης. Η εύκαμπτη σύνδεση των πτερυγίων στην πλήμνη επιτρέπει τη διακοπή λειτουργίας σε καταστάσεις έκτακτης ανάγκης και την επανεκκίνηση. Βέβαια, ένα μειονέκτημα είναι ότι είναι πιο ακριβές σε κόστος λόγω της υψηλής τιμής του μηχανισμού και του ελεγκτή που υποστηρίζουν τον ενεργό έλεγχο απώλειας στήριξης.

2.4.2 Ανεμογεννήτριες Μεταβλητών Στροφών

Τα τελευταία χρόνια οι ανεμογεννήτριες μεταβλητών στροφών έχουν επικρατήσει μεταξύ των εγκατεστημένων ανεμογεννητριών. Οι ανεμογεννήτριες μεταβλητών στροφών είναι σχεδιασμένες ώστε να επιτυγχάνουν τη μέγιστη αεροδυναμική απόδοση σε ένα ευρύ φάσμα ταχυτήτων ανέμου. Με την τεχνολογία των μεταβλητών στροφών έχει καταστεί δυνατή η συνεχής προσαρμογή της ταχύτητας περιστροφής του ρότορα (δηλαδή επιτάχυνση ή επιβράδυνση) ανάλογα με την ταχύτητα του αέρα. Με αυτό τον τρόπο ο λόγος ταχύτητας ακροπτερυγίου διατηρείται σταθερός σε μια προκαθορισμένη τιμή που αντιστοιχεί στο μέγιστο αεροδυναμικό συντελεστή ισχύος. Σε αντίθεση με την τεχνολογία σταθερών στροφών, οι ανεμογεννήτριες μεταβλητής ταχύτητας κρατούν τη ροπή σχεδόν σταθερή και οι μεταβολές του ανέμου απορροφώνται μέσω των αλλαγών στην ταχύτητα περιστροφής του ρότορα.

Το ηλεκτρικό σύστημα μιας ανεμογεννήτριας μεταβλητών στροφών είναι περισσότερο περίπλοκο από αυτό μιας ανεμογεννήτριας σταθερών στροφών. Η μηχανή που χρησιμοποιείται συνήθως είναι μια επαγωγική ή μια σύγχρονη γεννήτρια που συνδέεται στο δίκτυο μέσω ενός ηλεκτρονικού μετατροπέα ισχύος. Ο ηλεκτρονικός μετατροπέας ισχύος ελέγχει την ταχύτητα του δρομέα της γεννήτριας και άρα το ρότορα της ανεμογεννήτριας, ώστε να εξομαλύνει τις διακυμάνσεις της ισχύος που προκαλούνται από τις μεταβολές του ανέμου.

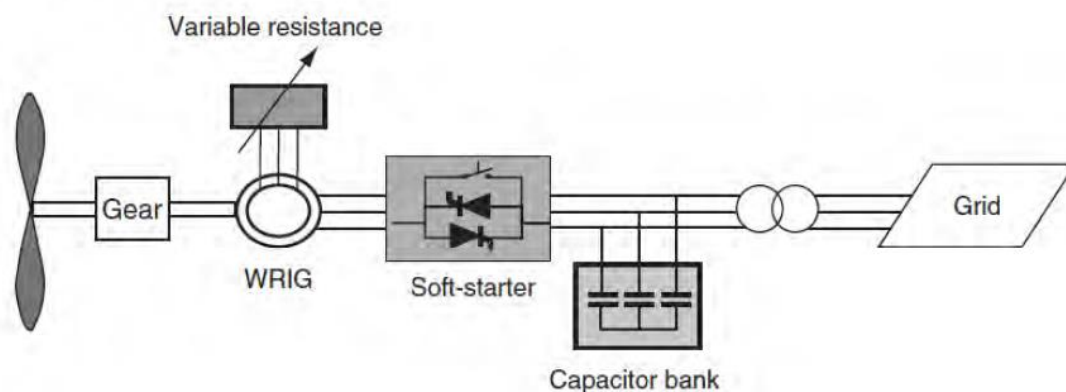
Τα πλεονεκτήματα της τεχνολογίας μεταβλητών στροφών είναι η δέσμευση μεγαλύτερων ποσοτήτων αιολικής ενέργειας, η βελτίωση της ποιότητας της παραγόμενης ισχύος και η μείωση των μηχανικών καταπονήσεων στο ρότορα. Τα

μειονεκτήματα είναι οι απώλειες στα ηλεκτρονικά ισχύος, η χρήση περισσότερων στοιχείων και η αύξηση του κόστους του εξοπλισμού λόγω των ακριβών ηλεκτρονικών ισχύος. Η εφαρμογή της τεχνολογίας μεταβλητών στροφών έχει δώσει τη δυνατότητα χρήσης διάφορων τύπων γεννητριών, με αποτέλεσμα να έχουμε μεγαλύτερη ελευθερία στα δυνατά σχήματα γεννητριών, μετατροπέων ισχύος και συστημάτων ελέγχου τους [15].

2.4.2.1 Ανεμογεννήτριες Περιορισμένων Μεταβλητών Στροφών

Το είδος αυτών των ανεμογεννητριών χρησιμοποιεί μια επαγωγική μηχανή δακτυλιοφόρου δρομέα που είναι απευθείας συνδεδεμένη με το δίκτυο. Ακόμη υπάρχει μια παράλληλη συστοιχία πυκνωτών που εκτελεί την αντιστάθμιση αέργου ισχύος. Μια πιο ομαλή σύνδεση με το δίκτυο μπορεί να επιτευχθεί με τη χρήση ενός ηλεκτρονικά ελεγχόμενου εκκινητή (soft-starter). Το διαφορετικό αυτής της εκδοχής είναι ότι ο δρομέας της γεννήτριας θα έχει μια επιπλέον μεταβλητή ηλεκτρική αντίσταση που μπορεί να ρυθμιστεί από έναν οπτικά ελεγχόμενο μετατροπέα τοποθετημένο στον άξονα του δρομέα. Έτσι, η συνολική αντίσταση του δρομέα είναι ελεγχόμενη και παράλληλα η οπτική ζεύξη εξαλείφει την ανάγκη για καθαρισμό και συντήρηση των δακτυλίων ολίσθησης. Εφόσον ρυθμίζουμε την αντίσταση του δρομέα παράλληλα ελέγχουμε και την ολίσθηση. Συνεπώς η ηλεκτρική ισχύς εξόδου της γεννήτριας είναι ελεγχόμενη. Το εύρος της δυναμικής ρύθμισης της ταχύτητας του δρομέα εξαρτάται από το μέγεθος της ηλεκτρικής αντίστασης του και κυμαίνεται έως 10% πάνω από τη σύγχρονη ταχύτητα. Η ενέργεια που προέρχεται από την εξωτερική μονάδα μετατροπής ισχύος απορρίπτεται ως απώλεια θερμότητας Βέβαια, βρέθηκε και μια εναλλακτική εκδοχή στην οποία χρησιμοποιούνται παθητικά στοιχεία αντί για ηλεκτρονικά ισχύος. Παρόλο που η εκδοχή αυτή επιτυγχάνει ολίσθηση 10% δεν παρέχει τη δυνατότητα ελέγχου της ολίσθησης.

Στο σχήμα 2.4.2.1 έχουμε το διάγραμμα των ανεμογεννητριών περιορισμένων μεταβλητών στροφών:

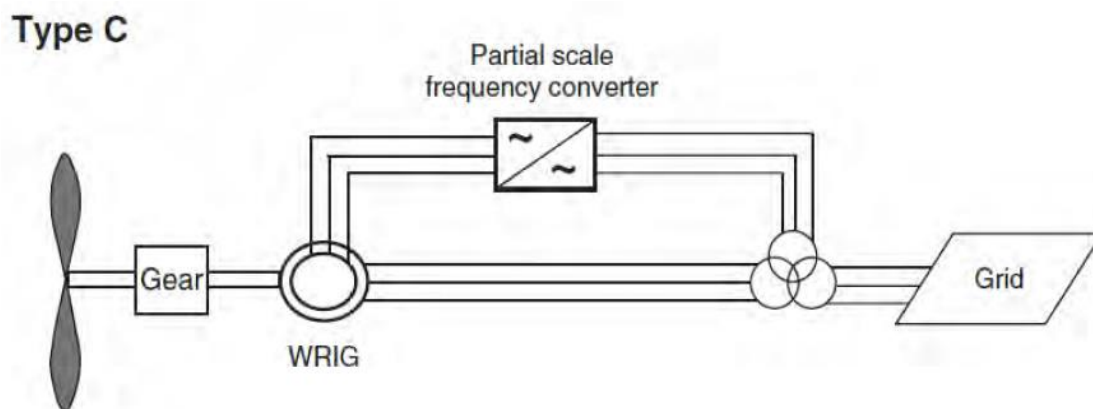
Type B

Εικόνα 2.4.2.1: Διάγραμμα ανεμογεννήτριας περιορισμένων μεταβλητών στροφών με επαγωγική μηχανή δακτυλιοφόρου δρομέα μεταβλητής αντίστασης[15]

2.4.2.2 Ανεμογεννήτριες Μεταβλητών Στροφών με Μερικώς Ελεγχόμενο Μετατροπέα Συχνότητας

Η εκδοχή αυτή που είναι γνωστή σαν επαγωγική γεννήτρια διπλής τροφοδοσίας περιλαμβάνει μια επαγωγική μηχανή δακτυλιοφόρου δρομέα σε συνδυασμό με ένα μερικώς ελεγχόμενο μετατροπέα συχνότητας που τοποθετείται στο κύκλωμα του δρομέα. Ο μερικώς ελεγχόμενος μετατροπέας συχνότητας αναλαμβάνει την αντιστάθμιση της αέργου ισχύος που απορροφάται από την επαγωγική γεννήτρια και την ομαλή σύνδεση της γεννήτριας στο δίκτυο. Οι ανεμογεννήτριες αυτού του είδους έχουν ένα πιο δυναμικό εύρος ρύθμισης ταχυτήτων που εξαρτάται από το μέγεθος του μετατροπέα. Συνήθως το εύρος ταχυτήτων εντάσσεται σε ένα διάστημα που ξεκινά από το -40% της σύγχρονης ταχύτητας και φτάνει στο +30% της σύγχρονης ταχύτητας. Επίσης, ο μετατροπέας μικρότερου μεγέθους καθιστά την εκδοχή αυτή πιο βέβαια, τα κύρια μειονεκτήματα είναι η χρήση δακτυλίων ολίσθησης και η ανάγκη προστασίας στην περίπτωση σφαλμάτων του δικτύου.

Στο σχήμα 2.4.2.2 παρουσιάζεται το διάγραμμα των ανεμογεννητριών μεταβλητών στροφών με μερικώς ελεγχόμενο μετατροπέα συχνότητας:



Εικόνα 2.4.2.2: Διάγραμμα ανεμογεννήτριας μεταβλητών στροφών με επαγωγική μηχανή δακτυλιοφόρου δρομέα και μερικώς ελεγχόμενο μετατροπέα συχνότητας [15]

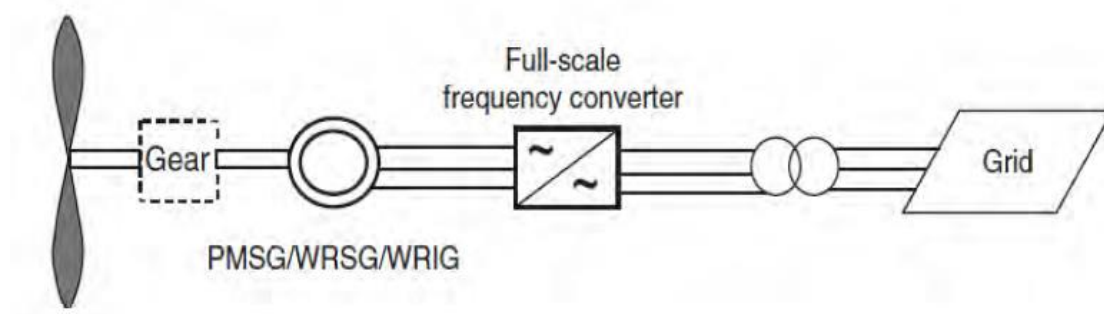
2.4.2.3 Ανεμογεννήτριες Μεταβλητών Στροφών με Πλήρως Ελεγχόμενο Μετατροπέα Συχνότητας

Η εκδοχή αυτή αντιστοιχεί στην περίπτωση των ανεμογεννητριών πλήρους μεταβλητής ταχύτητας, με τη γεννήτρια να συνδέεται στο δίκτυο μέσω ενός πλήρως ελεγχόμενου μετατροπέα συχνότητας. Ο μετατροπέας συχνότητας εκτελεί την αντιστάθμιση αέργου ισχύος και την ομαλότερη σύνδεση της γεννήτριας στο δίκτυο. Η διέγερση της γεννήτριας μπορεί να γίνεται είτε ηλεκτρικά, οπότε μιλάμε για επαγωγικές γεννήτριες δακτυλιοφόρου δρομέα, είτε μέσω μόνιμων μαγνητών, οπότε μιλάμε για σύγχρονες γεννήτριες μόνιμου μαγνήτη. Σε ορισμένες περιπτώσεις οι ανεμογεννήτριες αυτές δεν περιλαμβάνουν κιβώτιο ταχυτήτων, καθώς οδηγούνται κατευθείαν από μια πολυπολική μηχανή μεγάλης διαμέτρου.

Οι ανεμογεννήτριες μεταβλητών στροφών απαιτούν μια διάταξη ηλεκτρονικών ισχύος ικανή να προσαρμόζει τη συχνότητα και την τάση της γεννήτριας ώστε να γίνουν κατάλληλες για το δίκτυο [15]. Στο σχήμα 2.4.2.3 έχουμε το διάγραμμα των

ανεμογεννητριών μεταβλητών στροφών με πλήρως ελεγχόμενο μετατροπέα συχνότητας:

Type D



Εικόνα 2.4.2.3: Διάγραμμα ανεμογεννήτριας μεταβλητών στροφών με σύγχρονη μηχανή μόνιμου μαγνήτη και πλήρως ελεγχόμενο μετατροπέα συχνότητας [15]

2.5 ΤΑ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΑ ΙΣΧΥΟΣ ΣΤΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ

Οι ηλεκτρονικοί μετατροπείς ισχύος είναι συσκευές που χρησιμοποιούνται για να μετατρέψουν το ηλεκτρική ενέργεια από μια μορφή σε μια άλλη, όπως από εναλλασσόμενο σε συνεχές, από συνεχές σε εναλλασσόμενο, από μια τάση σε μια άλλη και από μια συχνότητα σε μια άλλη. Χρησιμοποιούνται όλο και πιο συχνά στα αιολικά συστήματα καθώς η τεχνολογία αναπτύσσεται και το κόστος ελαττώνεται. Για παράδειγμα μετατροπείς χρησιμοποιούνται στις ανεμογεννήτριες μεταβλητών στροφών, στους εκκινητές των γεννητριών και στα απομονωμένα δίκτυα. Ακολούθως παρουσιάζονται κάποιες βασικές διατάξεις ηλεκτρονικών ισχύος που εφαρμόζονται στην τεχνολογία των ανεμογεννητριών.

Οι μετατροπείς ισχύος είναι ηλεκτρονικές συσκευές και αποτελούνται από ένα ηλεκτρονικό σύστημα ελέγχου, το οποίο ενεργοποιεί και απενεργοποιεί τους ηλεκτρονικούς διακόπτες. Ορισμένα από τα βασικά ηλεκτρονικά στοιχεία ισχύος που

χρησιμοποιούνται στους μετατροπείς είναι οι δίοδοι ισχύος, το θυρίστορ, το GTO-θυρίστορ και τα τρανζίστορ ισχύος. Οι δίοδοι ισχύος λειτουργούν σε βαλβίδες που επιτρέπουν τη διέλευση του ρεύματος μόνο προς μια φορά. Τα θυρίστορ είναι στην ουσία δίοδοι που μπορούν να ενεργοποιηθούν από έναν εξωτερικό παλμό στην πύλη, αλλά απενεργοποιούνται από μια ανάστροφη τάση στα άκρα τους ή με μηδενισμό του ρεύματος που τα διαρρέει. Τα GTO-θυρίστορ είναι θυρίστορ που μπορούν να απενεργοποιηθούν όπως τα τρανζίστορ απαιτούν μια συνεχόμενη εφαρμογή του σήματος στην πύλη τους προκειμένου να παραμένουν ενεργοποιημένα. Ο όρος τρανζίστορ ισχύος αναφέρεται κυρίως σε δύο τύπους τρανζίστορ, το MOSFET ισχύος και το IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor). Σήμερα παρατηρείται μια συνεχώς αυξανόμενη χρήση των IGBT στα ηλεκτρονικά ισχύος [15].

2.5.1 Ανορθωτές

Οι ανορθωτές είναι ηλεκτρονικές συσκευές που μετατρέπουν το εναλλασσόμενο ρεύμα σε συνεχές. Στα αιολικά συστήματα μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως τμήμα του μετατροπέα των ανεμογεννητριών μεταβλητών στροφών και στη φόρτιση των μπαταριών των ανεμογεννητριών. Ένας απλός ανορθωτής χρησιμοποιεί ένα κύκλωμα με γέφυρα διόδων που μετατρέπει το εναλλασσόμενο ρεύμα σε διακυμάνσεις συνεχούς ρεύματος. Η είσοδος του κυκλώματος του ανορθωτή είναι τριφασικό εναλλασσόμενο ρεύμα και η έξοδος του συνεχές ρεύμα. Σε κάποιες περιπτώσεις είναι χρήσιμο να μπορούμε να μεταβάλλουμε την τάση εξόδου του ανορθωτή. Αυτό μπορεί να γίνει με έναν ελεγχόμενο ανορθωτή. Όταν χρησιμοποιούμε θυρίστορ τότε αυτό παραμένει σβηστό για ένα κλάσμα του κύκλου που αντιστοιχεί στη γωνία εναύσεως και μετά ανάβει. Η μέση τιμή της τάσης εξόδου από το θυρίστορ μειώνεται κατά το συνημίτονο της γωνίας εναύσεως [15].

2.5.2 Αντιστροφείς

Για να μετατρέψουμε το συνεχές ρεύμα σε εναλλασσόμενο χρησιμοποιούμε τους αντιστροφείς. Στα αιολικά συστήματα η συνεχής τάση μπορεί να προέρχεται από ανόρθωση εναλλασσομένου που παράγει μια ανεμογεννήτρια μεταβλητών στροφών ή από μια μπαταρία της. Οι σημερινοί αντιστροφείς είναι ηλεκτρονικοί και

κυκλωματικά αποτελούνται από ημιαγωγικά διακοπτικά στοιχεία και ένα κύκλωμα ελέγχου που συντονίζει τη μεταγωγή τους. Οι αντιστροφείς διαχωρίζονται σε δύο κύριες κατηγορίες, τους αντιστροφείς πηγής τάσης και τους αντιστροφείς πηγής ρεύματος. Οι αντιστροφείς πηγής τάσης τροφοδοτούνται από μια σταθερή πηγή συνεχούς τάσεως και εφαρμόζονται αρκετά στις ανεμογεννήτριες [15].

2.5.3 Μετατροπείς Συχνότητας

Ένας παραδοσιακός μετατροπέας συχνότητας αποτελείται από έναν ανορθωτή, έναν αντιστροφέα και έναν πυκνωτή. Από τις διάφορες τοπολογίες που υπάρχουν σήμερα για τους μετατροπείς συχνότητας, έχει αποδειχθεί πως οι διπλοί μετατροπείς ισχύος ac/dc/ac με IGBT στοιχεία, ή τοπολογία back-to-back όπως ονομάζεται, έχουν την καλύτερη εφαρμογή στις ανεμογεννήτριες. Ο back-to-back μετατροπέας είναι αμφίδρομος σε σχέση με τη ροή ενέργειας και αποτελείται από δύο συμβατικούς μετατροπείς πηγής τάσης με τρανζίστορ IGBT και PWM (PulseWidthModulation) διαμόρφωση στην παλμοδότηση που συνδέονται μεταξύ τους με dc-διασύνδεση μέσω ενός μεγάλου πυκνωτή. Ο μετατροπέας αυτός αν και εμφανίζει μεγαλύτερες διακοπτικές απώλειες λόγω της υψηλότερης διακοπτικής συχνότητας, αυξάνει πολύ την τάξη των αρμονικών της τάσης εξόδου με αποτέλεσμα τη μείωση της επίδραση τους.

Η αρχή λειτουργίας του PWM διαμορφωτή στηρίζεται στη σύγκριση ενός τριγωνικού φέροντος σήματος V_c υψηλής συχνότητας (5-10 kHz) με ένα ημιτονοειδές σήμα αναφοράς V_r συχνότητας ίσης με τη συχνότητα της τάσης την οποία θέλουμε στην έξοδο. Όταν η στιγμιαία τάση του V_r είναι μεγαλύτερη του V_c , η έξοδος του συγκριτή είναι θετικός παλμός, ενώ στην αντίθετη περίπτωση είναι αρνητικός παλμός. Μέσω του ημιτονοειδούς σήματος αναφοράς ελέγχεται το πλάτος και η συχνότητα του σήματος εξόδου. Αυξομειώνοντας το πλάτος του σήματος V_r , ρυθμίζεται η διάρκεια των παλμών εξόδου του διαμορφωτή και έτσι ελέγχεται το πλάτος της τάσης εξόδου του αντιστροφέα, ενώ μεταβάλλοντας τη συχνότητα του V_r ρυθμίζεται η συχνότητα της τάσης εξόδου του αντιστροφέα. Ο ίδιος μετατροπέας μπορεί να δουλέψει και με την τεχνική του ελέγχου ρεύματος σε βρόχο υστέρησης.

Σε αυτόν εφαρμόζεται PWM διαμόρφωση τάσης, αλλά ελέγχεται η κυματομορφή του ρεύματος, ώστε η έξοδος να είναι ένα ημιτονοειδές ρεύμα επιθυμητού πλάτους και συχνότητας. Η αρχή λειτουργίας της τεχνικής αυτής στηρίζεται στη σύγκριση του στιγμιαίου ρεύματος ανάδρασης κάθε φάσης με το αντίστοιχο ημιτονοειδές σήμα αναφοράς, ώστε η κυματομορφή του ρεύματος εξόδου να βρίσκεται πάντα μέσα στο εύρος υστέρησης που ορίζεται από το ανώτερο και το κατώτερο όριο σφάλματος. Επειδή ελέγχεται η στιγμιαία τιμή του ρεύματος, η τεχνική ελέγχου PWM ελέγχου ρεύματος σε βρόχο υστέρησης χρησιμοποιείται σε συστήματα οδήγησης βασισμένα σε λογικές διανυσματικού ελέγχου.

Σημαντικό είναι να αναφέρουμε τη βασική σχέση που συνδέει την ac με τη dc τάση στις δύο πλευρές του μετατροπέα σε σχέση προς το m , το λόγο του σήματος αναφοράς προς το πλάτος του φέροντος σήματος:

$$\hat{V}_s = m \frac{V_{dc}}{2}$$

όπου V_s είναι το πλάτος της ημιτονοειδούς εξόδου και V_{dc} η dc-τάση εξόδου.

Η τάση της dc-διασύνδεσης ορίζεται σε ένα επίπεδο υψηλότερο από το πλάτος της φασικής τάσης του δικτύου προκειμένου να επιτευχθεί πλήρης έλεγχος του ρεύματος του δικτύου. Ο πυκνωτής μεταξύ του αντιστροφέα και του ανορθωτή κάνει εφικτή την πλήρη αποσύζευξη του ελέγχου των δύο μετατροπέων, επιτρέποντας την ανεξάρτητη ρύθμιση στην πλευρά της γεννήτριας και στην πλευρά του δικτύου. Η ροή ισχύος στο μετατροπέα στην πλευρά του δικτύου ελέγχεται προκειμένου να διατηρεί σταθερή την τάση στον πυκνωτή και να διορθώνει το συντελεστή ισχύος, ενώ στην πλευρά της γεννήτριας ο έλεγχος εφαρμόζεται με τρόπο που να εξυπηρετεί τις ανάγκες μαγνήτισης και να οδηγεί κάθε φορά στην επιθυμητή ταχύτητα[15].

2.5.4 Ηλεκτρονικά Ελεγχόμενος Εκκινητής

Ο ηλεκτρονικά ελεγχόμενος εκκινητής (soft-starter) είναι μια απλή και φθηνή συσκευή ηλεκτρονικών ισχύος που χρησιμοποιείται στις ανεμογεννήτριες σταθερής ταχύτητας κατά τη διαδικασία σύνδεσης με το δίκτυο. Σκοπός τους είναι να μειώσουν τα μεταβατικά ρεύματα και συνεπώς να εξομαλύνουν τις διαταραχές στο δίκτυο. Το κύκλωμα του περιλαμβάνει από δύο θυρίστορ σε κάθε φάση σε αντιπαράλληλη σύνδεση. Η ομαλή σύνδεση της γεννήτριας στο δίκτυο επιτυγχάνεται προσαρμόζοντας τη γωνία εναύσεως των θυρίστορ. Η σχέση με τη γωνία εναύσεως και της ενίσχυσης που θα κάνει ο εκκινητής είναι έντονα γραμμική και εξαρτάται από το συντελεστή ισχύος του συνδεδεμένου στοιχείου. Μετά το μεταβατικό στάδιο, τα θυρίστορ παρακάμπτονται προκειμένου να μειωθούν οι απώλειες του συστήματος [19].

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΕΛΕΓΧΟΥ ΤΩΝ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ ΜΕΤΑΒΛΗΤΩΝ ΣΤΡΟΦΩΝ

3.1 ΣΥΣΤΗΜΑ ΕΛΕΓΧΟΥ ΤΩΝ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ ΜΕ ΕΠΑΓΩΓΙΚΗ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑ ΔΙΠΛΗΣ ΤΡΟΦΟΔΟΣΙΑΣ (DFIG)

Μια ανεμογεννήτρια έχει πολλαπλούς στόχους ελέγχου στους οποίους περιλαμβάνονται η δέσμευση της μέγιστης αιολικής ενέργειας για δεδομένη ταχύτητα ανέμου, ο έλεγχος της ανταλλαγής αέργου ισχύος με το δίκτυο, η ρύθμιση τάσης καθώς και η δυνατότητα αδιάλειπτης λειτουργίας υπό χαμηλή τάση ή σφάλμα. Επίσης, υπάρχουν και εσωτερικοί στόχοι ελέγχου όπως η ρύθμιση της συνεχούς τάσης διασύνδεσης που αφορά τις ανεμογεννήτριες με επαγωγική γεννήτρια διπλής τροφοδοσίας και τις ανεμογεννήτριες με πλήρως-ελεγχόμενους μετατροπείς. Στην ενότητα αυτή θα επικεντρωθούμε στον έλεγχο των αιολικών συστημάτων που χρησιμοποιούν επαγωγική γεννήτρια διπλής τροφοδοσίας χρησιμοποιώντας το μοντέλο στο d-q πλαίσιο αναφοράς το οποίο παρουσιάστηκε προηγουμένως. Η ανάλυση αυτή επιτρέπει την αποσύζευξη του ελέγχου της πραγματικής ισχύος (ή ροπής) από τον έλεγχο της αέργου ισχύος, δηλαδή οι δύο βασικές ελέγχου στις οποίες επικεντρωνόμαστε. Μέσω του ελέγχου των ρευμάτων που εκχέονται στο μετατροπέα της πλευράς του δρομέα, ελέγχουμε τα ρεύματα στην πλευρά του στάτη και συνεπώς η πραγματική και η αέργος ισχύς μπορούν να ελεγχθούν. Ο μετατροπέας στην πλευρά του δικτύου διευκολύνει την ανταλλαγή ισχύος μέσω του μετατροπέα του δρομέα και παρέχει επίσης επιπρόσθετη υποστήριξη αέργου ισχύος.

Η ανεμογεννήτρια με επαγωγική γεννήτρια διπλής τροφοδοσίας περιλαμβάνει δύο PWM μετατροπείς, τον μετατροπέα στην πλευρά του δρομέα και τον μετατροπέα στην πλευρά του δικτύου. Ο κεντρικός στόχος του ελέγχου του μετατροπέα στην πλευρά του δρομέα είναι η δέσμευση της μέγιστης δυνατής ισχύος από τον άνεμο σε

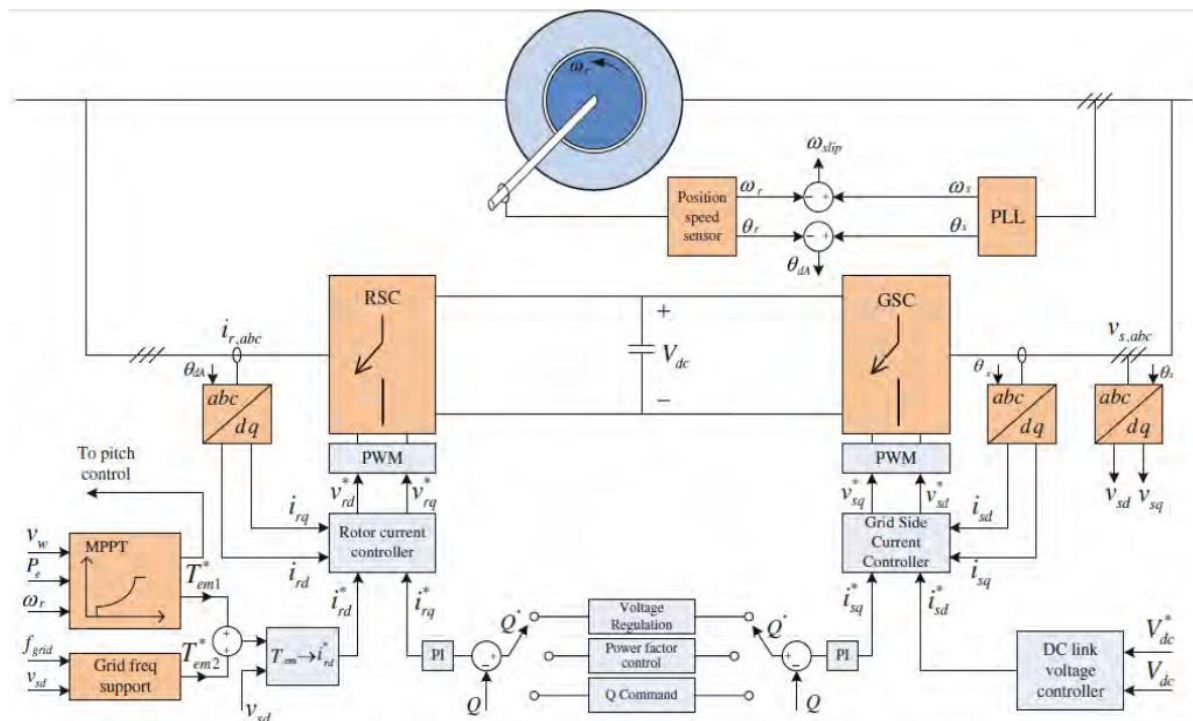
μια δεδομένη κατάσταση λειτουργίας, δηλαδή για συγκεκριμένη ταχύτητα ανέμου. Η ηλεκτρομαγνητική ροπή της ανεμογεννήτριας με DFIG ελέγχεται έτσι ώστε ο δρομέας να στρέφεται πάντα με τη βέλτιστη ταχύτητα που προκύπτει από τις χαρακτηριστικές ανίχνευσης της μέγιστης ισχύος. Η ροπή αναφοράς λαμβάνεται από τον βρόχο ελέγχου της ταχύτητας. Ο ελεγκτής του ρεύματος δρομέα του d-άξονα Id διασφαλίζει ότι η ροπή διατηρείται στην τιμή αναφοράς. Στον έλεγχο με προσανατολισμό στην τάση του δικτύου, η γωνία που απαιτείται για τον d-q μετασχηματισμό στο λαμβάνεται από την τάση του δικτύου χρησιμοποιώντας έναν βρόχο κλειδώματος φάσης (PLL). Η ροπή αναφοράς που λαμβάνεται από τον βρόχο ελέγχου ανίχνευσης μέγιστης ισχύος μπορεί να τροποποιηθεί σε καταστάσεις έκτακτης ανάγκης του συστήματος, όπου είναι αναγκαία η παροχή υποστήριξης τάσης στο δίκτυο με χρήση της αποθηκευμένης κινητικής ενέργειας στις ανεμογεννήτριες. Επιπλέον, τόσο η πραγματική όσο και η άεργος ισχύς στον στάτη μπορούν να ελεγχθούν ανεξάρτητα μέσω του ελέγχου των ρευμάτων που εκχέονται στον δρομέα. Με αυτό τον τρόπο είναι δυνατόν να παρέχεται ρύθμιση τάσης ή υποστήριξη αέργου ισχύος στο δίκτυο εντός των ονομαστικών μεγεθών του συστήματος. Το ρεύμα δρομέα του q-άξονα ελέγχεται με σκοπό να ελεγχθεί η άεργος ισχύς.

Σκοπός του ελέγχου του μετατροπέα στην πλευρά του δικτύου είναι η ρύθμιση της τάσης στη dc-διασύνδεση μέσω του ελέγχου της πραγματικής ισχύος. Ο έλεγχος της πραγματικής ισχύος πραγματοποιείται με τον έλεγχο της q-συνιστώσας του ρεύματος του μετατροπέα στην πλευρά του δικτύου. Η τάση ρυθμίζεται με κατάλληλο τρόπο ώστε να μην υπερβαίνει τις μέγιστες επιτρεπτές τάσεις των ηλεκτρονικών στοιχείων ισχύος των PWM μετατροπέων. Η άεργος ισχύς εξόδου του μετατροπέα στην πλευρά του δικτύου μπορεί να ελεγχθεί ανεξάρτητα με τον έλεγχο της q-συνιστώσας του ρεύματος του μετατροπέα στην πλευρά του δικτύου και παράλληλα μπορεί να εξασφαλιστεί λειτουργία με μοναδιαίο συντελεστή ισχύος.

Η ροπή αναφοράς ή η αναφορά της ενεργού ισχύος που χρησιμοποιείται στο έλεγχο της ανεμογεννήτριας DFIG λαμβάνεται κυρίως από τον έλεγχο του αεροδυναμικού τμήματος της ανεμογεννήτριας. Σκοπός του αεροδυναμικού ελέγχου είναι η επίτευξη της μέγιστης δέσμευσης ισχύος από τον άνεμο, καθώς ο ανεμοκινητήρα στρέφεται με

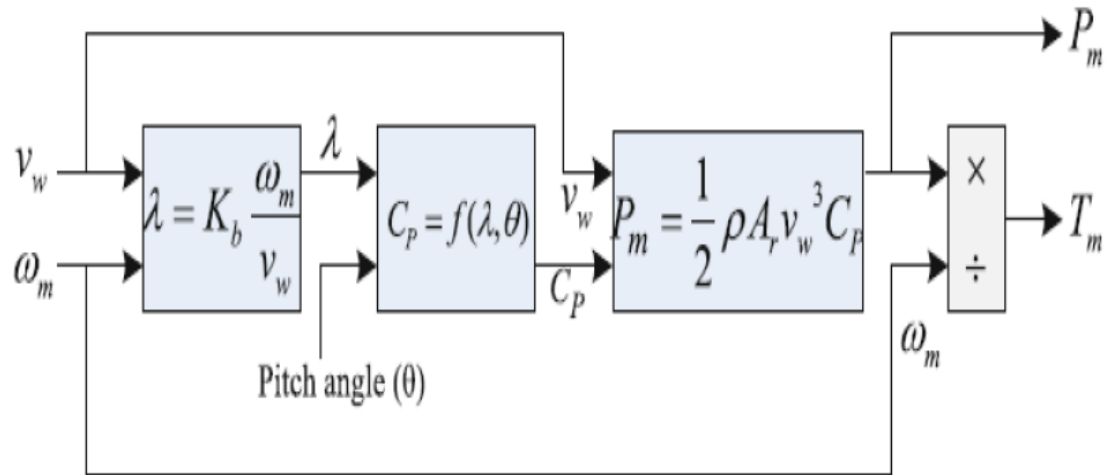
ταχύτητες εντός του επιτρεπόμενου εύρους ταχυτήτων και η επαγωγική γεννήτρια και οι μετατροπείς της λειτουργούν με ονομαστικά ρεύματα και τάσεις. Όταν η διαθέσιμη αιολική ισχύς γίνει μεγαλύτερη από την ονομαστική ισχύ της γεννήτριας, ενεργοποιείται ο έλεγχος βήματος πτερυγίου ώστε να περιορίσει την ισχύ και την ταχύτητα της ανεμογεννήτριας. Αν η διαθέσιμη αιολική ισχύς γίνει μικρότερη από την ονομαστική, τότε η ενεργός ισχύς ή η ροπή ελέγχονται με τεχνικές που εφαρμόζουν το αλγόριθμο εύρεσης του σημείου μέγιστης ισχύος.

Στο σχήμα 3.1 παρουσιάζεται το δομικό διάγραμμα του συνολικού συστήματος ελέγχου ενός αιολικού συστήματος με επαγωγική γεννήτρια διπλής τροφοδοσίας:



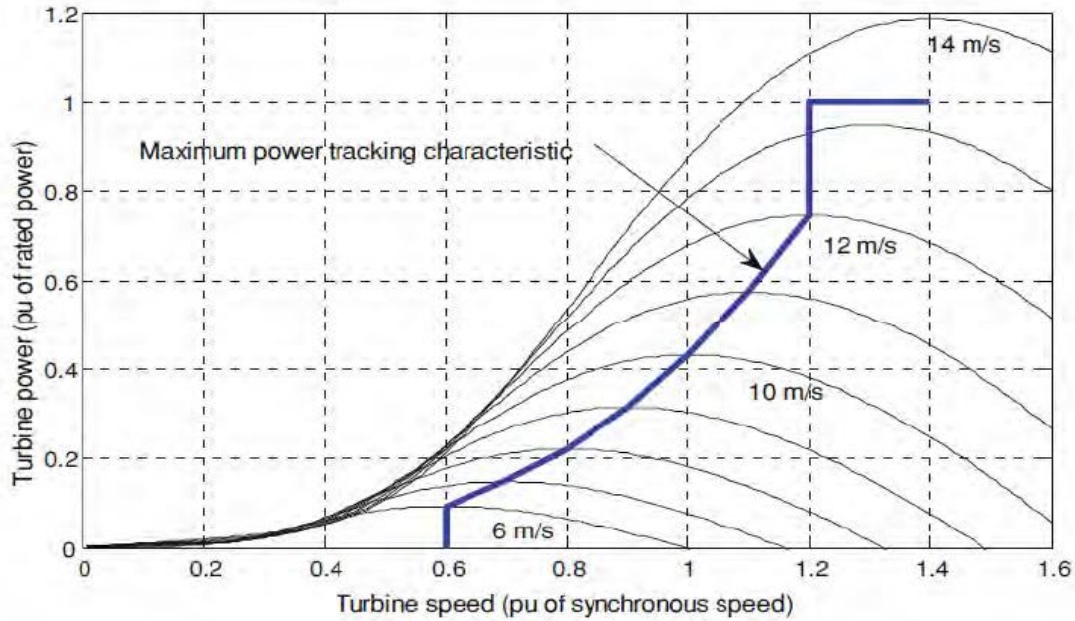
Εικόνα 3.1: Δομικό διάγραμμα του συνολικού συστήματος ελέγχου ενός αιολικού συστήματος με επαγωγική γεννήτρια διπλής τροφοδοσίας [21]

Το αεροδυναμικό μοντέλο βασισμένο στην ταχύτητα του ανέμου και στη γωνιακή ταχύτητα του ρότορα παρουσιάζεται στο σχήμα 3.2 ακολούθως:



Εικόνα 3.2: Δομικό διάγραμμα του αεροδυναμικού μοντέλου της ανεμογεννήτριας τύπου DFIG [21]

Η μηχανική ισχύς εξόδου εξαρτάται από τον αεροδυναμικό συντελεστή ισχύος C_p , ο οποίος είναι συνάρτηση του λόγου ταχύτητας ακροπερυγίου για δεδομένη γωνία βήματος. Η ταχύτητα του ρότορα της ανεμογεννήτριας ρυθμίζεται συνεχώς καθώς αλλάζει η ταχύτητα του ανέμου ώστε να διατηρούνται ο αεροδυναμικός συντελεστής στη βέλτιστη τιμή του και η ισχύς εξόδου στη μέγιστη τιμή της. Η χαρακτηριστική εύρεσης του σημείου μέγιστης ισχύος για δεδομένο τύπο ανεμογεννήτριας προκύπτει από το αεροδυναμικό μοντέλο και μπορεί να χρησιμοποιηθεί στον αεροδυναμικό έλεγχο. Ένα παράδειγμα μιας χαρακτηριστικής εύρεσης του σημείου μέγιστης ισχύος παρουσιάζεται στο σχήμα 3.3 παρακάτω:

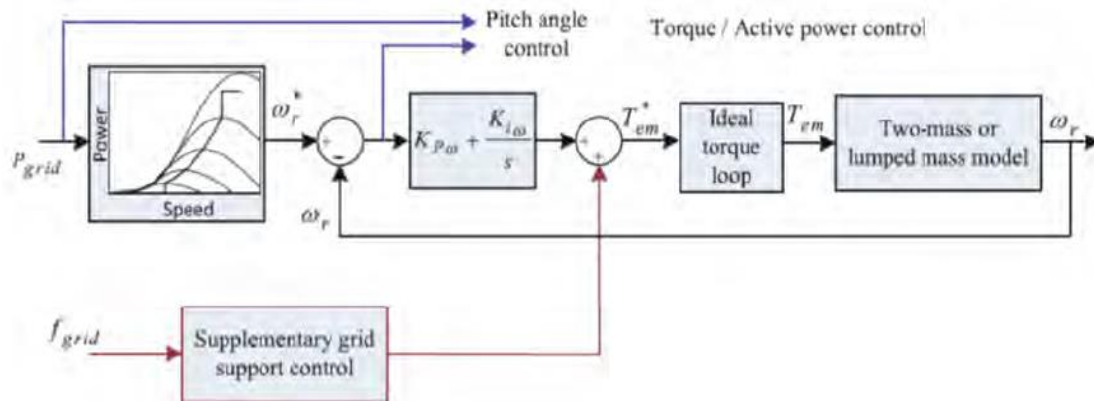


Σχήμα 3.3: Καμπύλη ισχύος-ταχύτητας ανεμογεννήτριας τύπου DFIG και χαρακτηριστική ανίχνευσης του σημείου μέγιστης ισχύος [21]

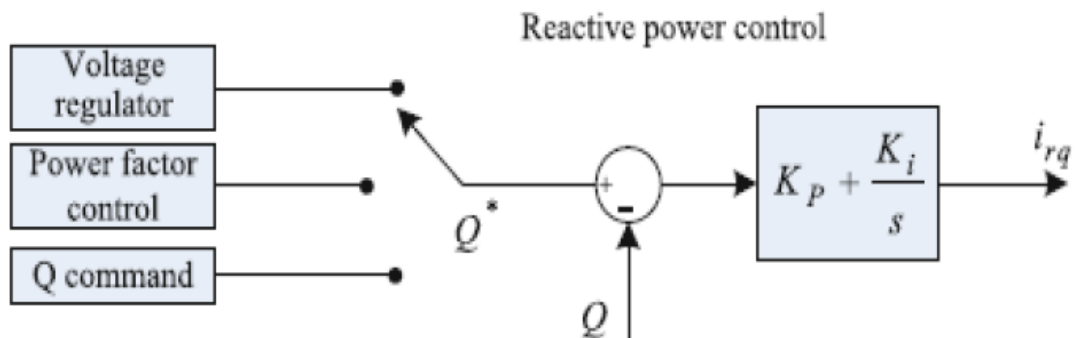
Μια ισοδύναμη μέθοδος αεροδυναμικού ελέγχου είναι να βρούμε την ταχύτητα αναφοράς του δρομέα από τη χαρακτηριστική εύρεσης του σημείου μέγιστης ισχύος σα συνάρτηση της μετρούμενης ηλεκτρικής ισχύος και να ρυθμίσουμε την ταχύτητα του δρομέα στην ταχύτητα αναφοράς μέσω ενός ελέγχου κλειστού βρόχου. Το διάγραμμα του ελέγχου της ταχύτητας δρομέα παρουσιάζεται στο σχήμα 3.4 παρακάτω. Η έξοδος του ελεγκτή ταχύτητας είναι η ροπή αναφοράς T_{em}^* , που χρησιμοποιείται για να προκύψει το ρεύμα αναφοράς του δρομέα στον d-άξονα. Για το σκοπό του σχεδιασμού του βρόχου ελέγχου ταχύτητας, η μετρούμενη ροπή T_{em} μπορεί να θεωρηθεί ότι ακολουθεί ιδανικά την T_{em}^* και για το λόγο αυτό ο ελεγκτής ταχύτητας χρειάζεται μόνο να διορθώσει τη συνάρτηση μεταφοράς.

Το διάγραμμα ελέγχου της αέργου ισχύος παρουσιάζεται στο σχήμα 3.5 παρακάτω. Η αέργου ισχύς αναφοράς λαμβάνεται από ένα βρόχο ελέγχου τάσης που ρυθμίζει την τάση στο σημείο διασύνδεσης με το δίκτυο ή μέσω μιας εντολής διόρθωσης του συντελεστή ισχύος ή μέσω μιας εντολής για υποστήριξη αέργου ισχύος όπως

παρουσιάζεται στο σχήμα. Το σφάλμα της αέργου ισχύος χρησιμοποιείται στον έλεγχο του ρεύματος δρομέα του q-άξονα i_{rq} [21].



Εικόνα 3.4: Δομικό διάγραμμα του βρόχου ελέγχου της ενεργού ισχύος [21]



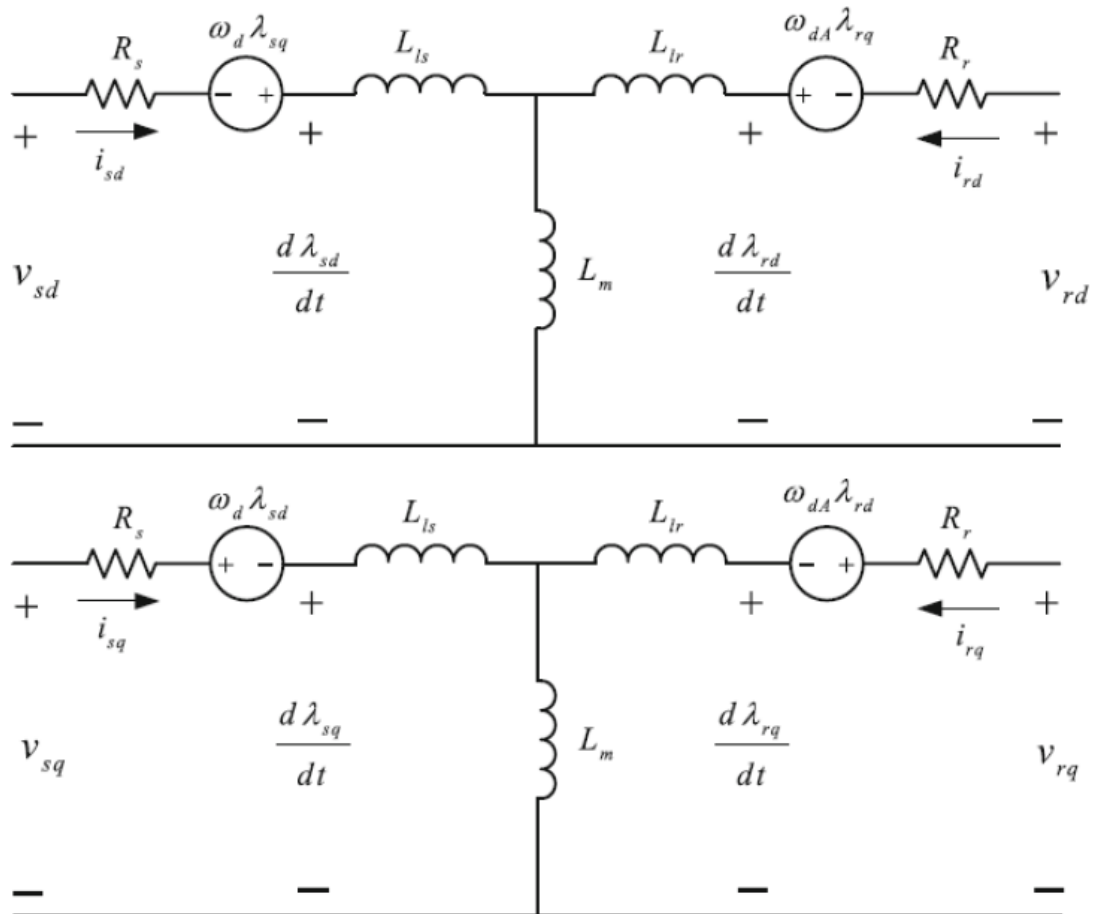
Εικόνα 3.5: Δομικό διάγραμμα του βρόχου ελέγχου της αέργου ισχύος [21]

3.1.1 Έλεγχος του Μετατροπέα στην Πλευρά του Δρομέα

Ο έλεγχος του μετατροπέα στην πλευρά του δρομέα γίνεται στο σύγχρονα στρεφόμενο πλαίσιο αναφοράς με τους d-άξονα και q-άξονα να στρέφονται με τη σύγχρονη ταχύτητα ω_s και τον q-άξονα να προηγείται του d-άξονα κατά 90° . Τα δυναμικά ισοδύναμα κυκλώματα της επαγωγικής γεννήτριας διπλής τροφοδοσίας στους δύο κάθετους άξονες παρουσιάζονται στο σχήμα 3.6 και για το επιλεγόμενο πλαίσιο αναφοράς ισχύουν οι σχέσεις:

$$\omega_d = \omega_s$$

$$\omega_{dA} = \omega_s - \omega_m = \omega_{slip}$$



Εικόνα 3.6: Δυναμικά ισοδύναμα κυκλώματα της επαγωγικής γεννήτριας διπλής τροφοδοσίας [21]

Για τον σχεδιασμό των ελεγκτών με ανατροφοδότηση του μετατροπέα της πλευράς του δρομέα μιας ανεμογεννήτριας τύπου DFIG είναι πρακτικό να χρησιμοποιήσουμε το μοντέλο μειωμένης τάξης της DFIG. Το μοντέλο μειωμένης τάξης αγνοεί τις αιφνίδιες μεταβολές στις πεπλεγμένες ροές του στάτη και τις θεωρεί σταθερές. Αυτή είναι μια βάσιμη υπόθεση για τον σκοπό του σχεδιασμού των ελεγκτών ροπής και

αέργου ισχύος για τον μετατροπέα της πλευράς του δρομέα με σχετικά μικρές διακυμάνσεις στην τάση του δικτύου. Οι εξισώσεις της τάσης του δρομέα, των πεπλεγμένων ροών και της ροπής παραμένουν εκφρασμένες στο μοντέλο μειωμένης τάξης.

Κατά την ανάλυση και τον έλεγχο στο d-q πλαίσιο αναφοράς υπάρχει πάντα η επιλογή για ευθυγράμμιση του d-άξονα ή του q-άξονα με ένα κατάλληλο σύγχρονα περιστρεφόμενο διάνυσμα χώρου. Συνήθως, για τον έλεγχο της DFIG χρησιμοποιούνται, είτε ο προσανατολισμός στη ροή του στάτη, είτε ο προσανατολισμός στην τάση του στάτη. Κατά τον έλεγχο με προσανατολισμό στη ροή του στάτη, ο d-άξονας είναι ευθυγραμμισμένος με το διάνυσμα χώρου της ροής του στάτη λ_s με αποτέλεσμα να ισχύουν οι σχέσεις $\lambda_{sq}=0$ και $\lambda_{sd}=\lambda_s$.

Επίσης, ο έλεγχος του μετατροπέα στην πλευρά του δικτύου συνήθως γίνεται χρησιμοποιώντας προσανατολισμό στην τάση στάτη, καθιστώντας ευκολότερη τη χρήση του ελέγχου με προσανατολισμό στην τάση στάτη και για τον έλεγχο στην πλευρά του δρομέα. Αφού αμεληθούν οι πτώσεις τάσης στις αντιστάσεις του στάτη, τα δύο είδη προσανατολισμού γίνονται παρόμοια. Και στα δύο είδη προσανατολισμού είναι δυνατόν να γίνει αποσύζευξη του ελέγχου της ενεργού ισχύος (ή της ροπής) και του ελέγχου της αέργου ισχύος. Η ανάλυση και ο σχεδιασμός του ελεγκτή στις παρακάτω ενότητες βασίζεται στον προσανατολισμό στην τάση του στάτη.

$$v_{sd} = \sqrt{2/3} |v_s|$$

$$v_{sq} = 0$$

Για εξισορροπημένες τάσεις δικτύου, το πλάτος του διανύσματος τάσης του στάτη v_{sd} ισούται με $\sqrt{2/3} V_{an}$ όπου V_{an} είναι η peak τιμή της φασικής τάσης και συνεπώς η v_{sd} ισούται επίσης με την rms τιμή της πολικής τάσης. Υποθέτοντας ότι η πτώση

τάσης στην αντίσταση του στάτη και επαγωγή σκέδασης του στάτη είναι αρκετά μικρές και αμελώντας τις μεταβολές της τάσης στάτη, τότε το διάνυσμα της ροής στάτη λ_s μπορεί να θεωρηθεί κατά προσέγγιση ότι καθυστερεί κατά 90° από το διάνυσμα της τάσης στάτη, δηλαδή το ευθυγραμμισμένο διάνυσμα με τον q-άξονα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να ισχύουν κατά προσέγγιση οι παρακάτω εκφράσεις, οι οποίες είναι επίσης συμφωνούν με τις προηγούμενες σχέσεις, θεωρώντας πάντα ως αμελητέες τις ωμικές πτώσεις τάσης.

$$\lambda_{sd} \approx 0$$

$$\lambda_{sq} \approx -|\lambda_s| \approx -v_s d \omega_s$$

Η ηλεκτρομαγνητική ροπή, η ενεργός ισχύς που εγχέεται στο δίκτυο και η άεργος ισχύς του στάτη μπορούν να ρυθμιστούν μέσω του ελέγχου των εγχεόμενων ρευμάτων του δρομέα. Κάνοντας τις προηγούμενες παραδοχές, ο έλεγχος με προσανατολισμό στην τάση στάτη μπορεί να αποδειχθεί ότι παρέχει αποσυζευγμένο έλεγχο μεταξύ ενεργού και αέργου ισχύος. Ειδικότερα, όπως προκύπτει παρακάτω, η ρύθμιση της ενεργού ισχύος γίνεται μέσω του ελέγχου του ρεύματος δρομέα στον d-άξονα i_{rd} και η ρύθμιση της αέργου ισχύος γίνεται μέσω του ελέγχου του ρεύματος δρομέα στον q-άξονα i_{rq} . Χρησιμοποιώντας τις σχέσεις μεταξύ ρευμάτων και πεπλεγμένων ροών, τα ρεύματα στάτη στον d-άξονα και q-άξονα υπολογίζονται ως εξής:

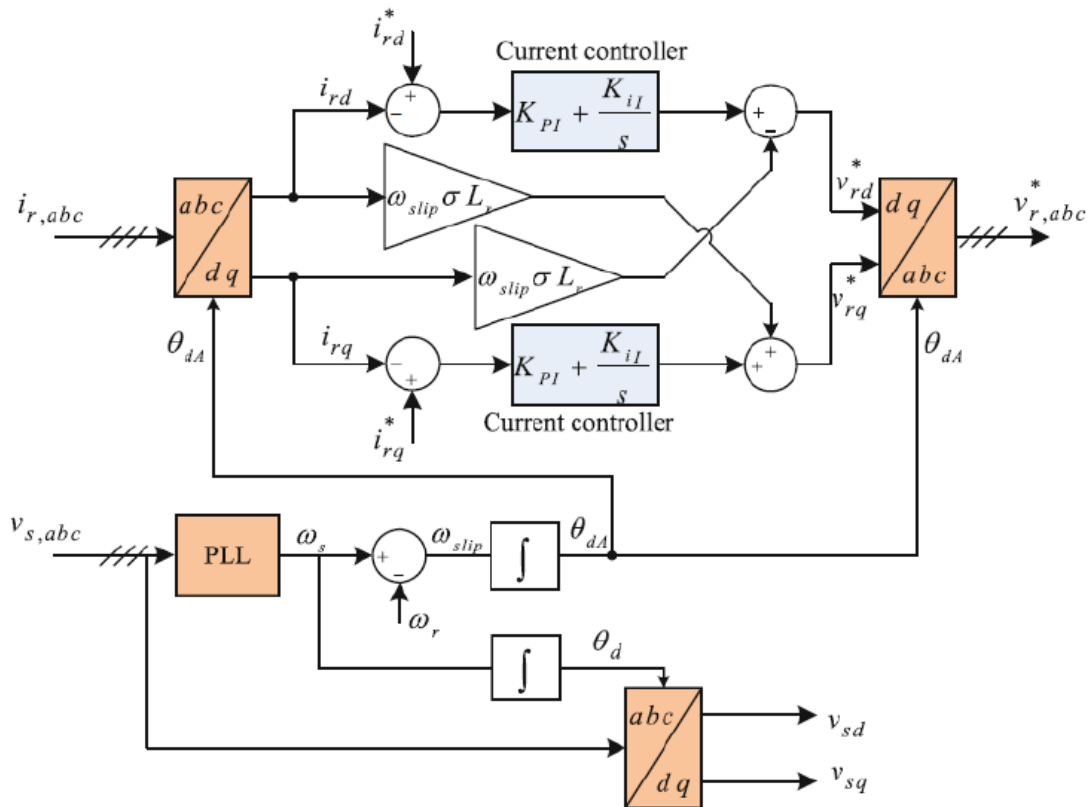
$$\begin{aligned} P_S &= v_{sd} i_{sd} = v_{sd} \left(\frac{\lambda_{sd}}{L_s} - \left(\frac{L_m}{L_s} \right) i_{rd} \right) \\ &= - \left(\frac{L_m}{L_s} \right) v_{sd} i_{rd} \end{aligned}$$

Όπως φαίνεται από την παραπάνω σχέση, η ενεργός ισχύς του στάτη ελέγχεται πλήρως από το ρεύμα δρομέα στον d-άξονα και είναι ανεξάρτητη από το ρεύμα δρομέα στον q-άξονα.

Η εξίσωση της ηλεκτρομαγνητικής ροπής στον έλεγχο με προσανατολισμό στην τάση στάτη απλοποιείται στην παρακάτω σχέση. Και πάλι, η ηλεκτρομαγνητική ροπή ελέγχεται μέσω του ρεύματος δρομέα στον d-άξονα και είναι ανεξάρτητη από το ρεύμα δρομέα στον q-άξονα.

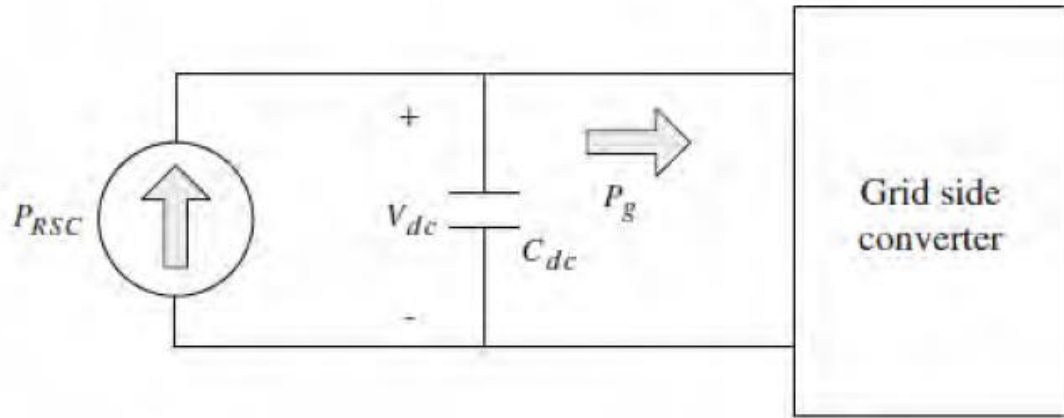
$$\begin{aligned}
 T_{em} &= \frac{p}{2} L_m (i_{sq} i_{rd} - i_{sd} i_{rq}) = \\
 &= \frac{p}{2} L_m \left[\left(\frac{\lambda_{sq}}{L_s} - \frac{L_m}{L_s} i_{rq} \right) i_{rd} - \left(\frac{\lambda_{sd}}{L_s} - \frac{L_m}{L_s} i_{rd} \right) i_{rq} \right] = \\
 &= -\frac{p}{2} \frac{1}{\omega_s} \frac{L_m}{L_s} v_{sd} i_{rd}
 \end{aligned}$$

Ένας αναλογικο-ολοκληρωτικός ελεγκτής (PI-controller) μπορεί να σχεδιαστεί για καθένα από τους δύο βρόχους ελέγχου με σκοπό να ρυθμίσει τις απλές συναρτήσεις μεταφοράς για δεδομένο εύρος ζώνης και περιθώριο φάσης. Εφόσον οι συναρτήσεις μεταφοράς των δύο βρόχων ελέγχου είναι παρόμοιες, οι ελεγκτές που θα σχεδιαστούν θα είναι και αυτοί παρόμοιοι (Σχήμα 3.7) [21].



Σχήμα 3.7: Δομικό διάγραμμα του συστήματος ελέγχου του μετατροπέα στην πλευρά του δρομέα[21]

Ένας απλός τρόπος για να ρυθμίσουμε την τάση στην dc-διασύνδεση σε εφαρμογές DFIG που οδηγούν σε γραμμικά μοντέλα είναι να ελέγξουμε το τετράγωνο της dc-τάσης. Για να σχεδιάσουμε τον ελεγκτή της dc τάσης θα θεωρήσουμε σταθερή την ενεργό ισχύ P_{RSC} που ρέει από τον μετατροπέα στην πλευρά του δικτύου προς την dc-διασύνδεση. Το παρακάτω κύκλωμα (Σχήμα 3.8), δείχνει την ενεργό ισχύ P_{RSC} που ρέει από τον μετατροπέα στην πλευρά του δρομέα και την ενεργό ισχύ P_g που ρέει προς τον μετατροπέα στην πλευρά του δικτύου.



Σχήμα 3.8: Κύκλωματικό ισοζύγιο ενεργού ισχύος στην dc-διασύνδεση [21]

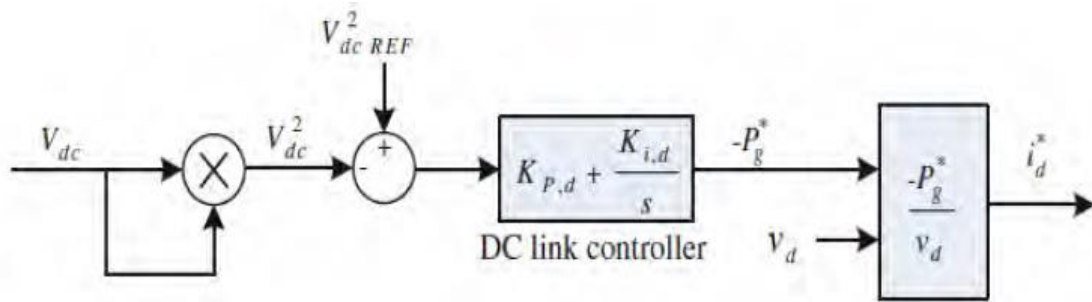
Αν βασιστούμε στην ενέργεια που αποθηκεύεται στον πυκνωτή της dc- διασύνδεσης θα πάρουμε τη σχέση:

$$\frac{1}{2} C_{dc} \frac{d}{dt} (V_{dc}^2) = P_{RSC} - P_g$$

Αν διαχειριστούμε την V_{dc}^2 ως μεταβλητή ελέγχου και θεωρήσουμε μηδενική διαταραχή στην P_{RSC} , τότε το μοντέλο μικρού σήματος προκύπτει με μετασχηματισμό της παραπάνω σχέσης στο πεδίο συχνότητας. Τελικά καταλήγουμε στη συνάρτηση μεταφοράς της παρακάτω σχέσης, που είναι δυνατόν να ρυθμιστεί μέσω ενός αναλογικού ή αναλογικο-ολοκληρωτικού ελεγκτή (P-controller ή PI-controller).

$$\frac{V_{dc}^2(s)}{-P_g(s)} = \frac{2}{sC_{dc}}$$

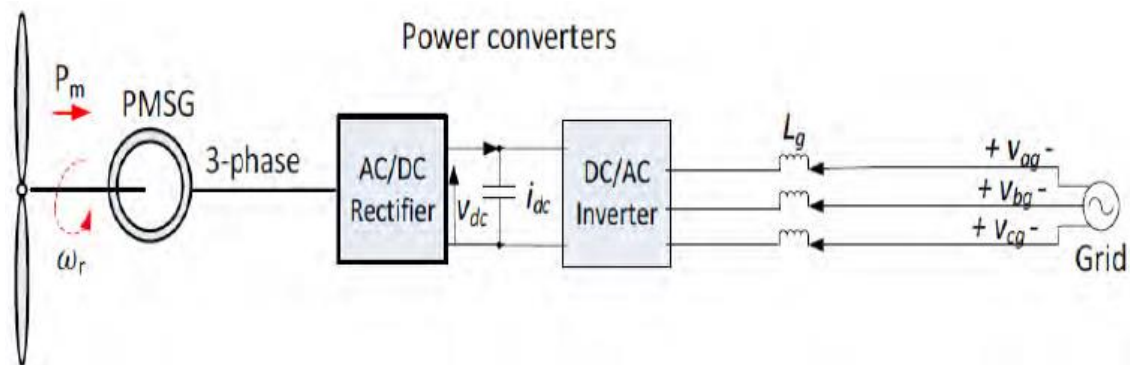
Στην τεχνική ελέγχου που εφαρμόζεται στη ρύθμιση της τάσης V_{dc} το τετράγωνο της μετρούμενης τάσης συγκρίνεται με την τάση αναφοράς ώστε να προκύψει η ενεργός ισχύς αναφοράς P_g^* και το ρεύμα αναφοράς $i_d^* = -P_g^*/e_d$ [21]. Παρακάτω έχουμε το δομικό διάγραμμα του ελεγκτή της τάσης στην dc-διασύνδεση (Σχήμα 3.9):



Σχήμα 3.9: Δομικό διάγραμμα του βρόχου ελέγχου της τάσης στην dc- διασύνδεση [21]

3.2 ΣΥΣΤΗΜΑ ΕΛΕΓΧΟΥ ΤΩΝ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ ΜΕ ΣΥΓΧΡΟΝΗ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑ ΜΟΝΙΜΟΥ ΜΑΓΝΗΤΗ (PMSG)

Κατά τον έλεγχο των ανεμογεννητριών με σύγχρονη γεννήτρια μόνιμου μαγνήτη, πρέπει να ελεγχθούν αυστηρά τρεις μεταβλητές του συστήματος. Αυτές είναι η μέγιστη ισχύς που παράγεται από τη σύγχρονη γεννήτρια για διαφορετικές ταχύτητες ανέμου, η ενεργός και άεργος ισχύς που διοχετεύεται στο δίκτυο και τάση της dc- διασύνδεσης του μετατροπέα back-to-back. Το επόμενο σχήμα (3.10), δείχνει μια άμεσα οδηγούμενη ανεμογεννήτρια τύπου PMSG συνδεδεμένη με το δίκτυο μέσω ενός μετατροπέα back-to-back.



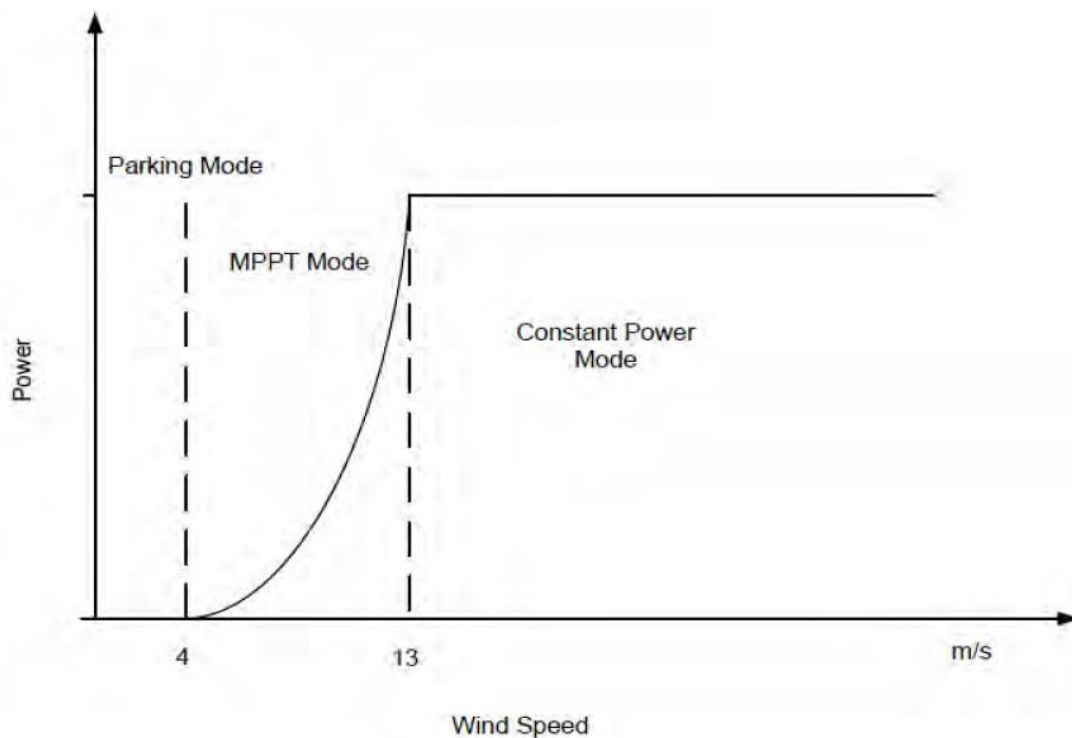
Σχήμα 3.10: Αιολικό σύστημα με άμεσα οδηγούμενη ανεμογεννήτρια τύπου PMSG και μετατροπέα back-to-back [20]

Στο παραπάνω αιολικό σύστημα ο μετατροπέας στην πλευρά της γεννήτριας ρυθμίζει την ταχύτητα της PMSG ώστε να εφαρμοσθεί ο έλεγχος με ανίχνευση του σημείου μεγίστης ισχύος (MPPT). Παράλληλα, ο μετατροπέας στην πλευρά του δικτύου

ελέγχει την ενεργό και άεργο ισχύ που διοχετεύεται στο δίκτυο. Στην ενότητα αυτή θα επικεντρωθούμε στις τεχνικές ελέγχου που εφαρμόζονται στον μετατροπέα στην πλευρά της γεννήτριας και στον μετατροπέα στην πλευρά του δικτύου.

3.2.1 Έλεγχος του Μετατροπέα στην Πλευρά της Γεννήτριας

Οι άμεσα οδηγούμενες ανεμογεννήτριες τύπου PMSG έχουν τη δυνατότητα να λειτουργούν περιστρεφόμενες σε ένα μεγάλο εύρος ταχυτήτων. Ανάλογα με την ένταση του ανέμου, οι ανεμογεννήτριες πρέπει να ελέγχονται ώστε να βρίσκονται σε τρεις διαφορετικές περιοχές λειτουργίας, όπως φαίνεται στην παρακάτω χαρακτηριστική ισχύος-ταχύτητας στο σχήμα 3.11:



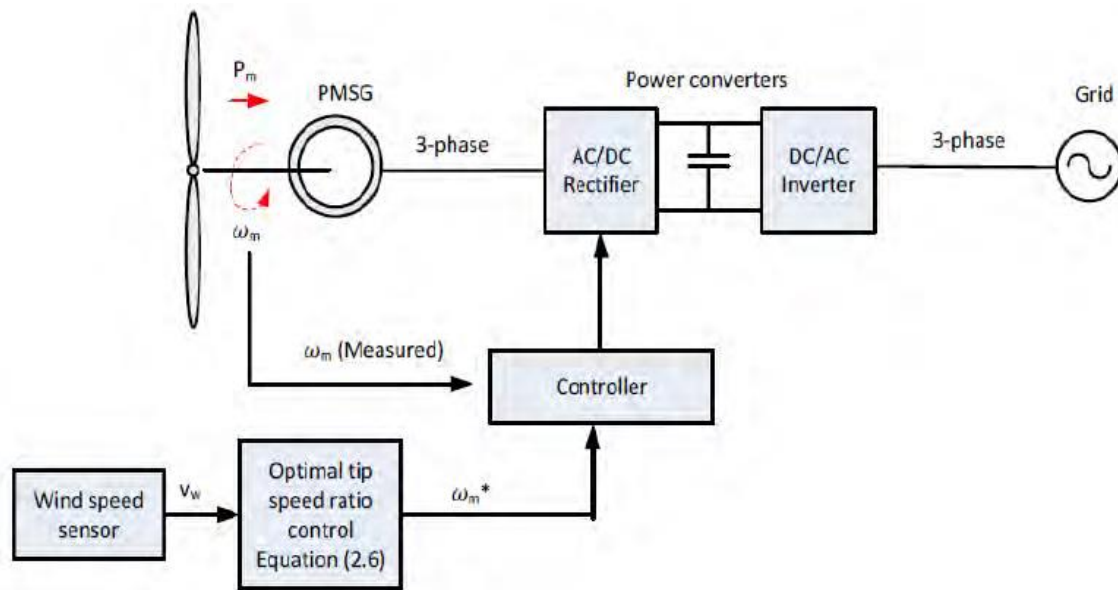
Σχήμα 3.11: Χαρακτηριστική ισχύος-ταχύτητας ανεμογεννήτριας PMSG και περιοχές λειτουργίας [20]

Η πρώτη περιοχή λειτουργίας είναι η στατική κατάσταση λειτουργίας (parkingmode). Η ανεμογεννήτρια βρίσκεται στην περιοχή αυτή όταν η ταχύτητα του ανέμου είναι μικρότερη από την ταχύτητα αποκοπής. Αυτό οφείλεται στο ότι η ηλεκτρική ισχύς που παράγεται από την PMSG είναι ανεπαρκής για να αντισταθμίσει τις εσωτερικές

απώλειες ισχύος του αιολικού συστήματος. Επομένως, η ανεμογεννήτρια τίθεται σε προσωρινή παύση λειτουργίας με τη βοήθεια μηχανικού φρένου. Η δεύτερη περιοχή λειτουργίας ονομάζεται λειτουργία με εύρεση του σημείου μέγιστης ισχύος (MPPT mode). Η ανεμογεννήτρια βρίσκεται στην περιοχή αυτή όταν η ταχύτητα του ανέμου είναι μεγαλύτερη από την ταχύτητα αποκοπής. Στην περιοχή αυτή έχουμε εκκίνηση λειτουργίας της ανεμογεννήτριας καθώς και παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος. Λόγω του γεγονότος ότι σε αυτή την περιοχή λειτουργίας η ταχύτητα του ανέμου είναι σε σχετικά χαμηλό εύρος, η αιολική ισχύς που δεσμεύεται είναι μικρότερη από την ονομαστική. Οπότε είναι αναγκαία η εφαρμογή του ελέγχου με εύρεση του σημείου μέγιστης ισχύος (MPPT) ώστε να εξασφαλιστεί η δέσμευση της μέγιστης ποσότητας αιολικής ισχύος. Η τρίτη περιοχή λειτουργίας είναι η κατάσταση λειτουργίας με σταθερή ισχύ (constantpowermode). Η ανεμογεννήτρια βρίσκεται στην περιοχή αυτή όταν η ταχύτητα του ανέμου γίνει μεγαλύτερη από την ονομαστική. Στην περιοχή αυτή η παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς θα αποκτήσει τιμή μεγαλύτερη από την ονομαστική εάν εξακολουθεί να βρίσκεται σε εφαρμογή ο έλεγχος MPPT. Σαν αποτέλεσμα, θα αυξηθεί η ηλεκτρική καταπόνηση στη γεννήτρια και στους μετατροπείς ισχύος, γεγονός που μπορεί να οδηγήσει σε καταστροφή. Επομένως, η γωνία βήματος πτερυγίων χρειάζεται κατάλληλο έλεγχο σε ισχυρούς ανέμους, ώστε να διατηρήσει την ανεμογεννήτρια εντός των ονομαστικών ορίων λειτουργίας.

Προκειμένου να ελέγξουμε τη μηχανική ισχύ που παράγεται για δεδομένη ταχύτητα ανέμου, ο μόνος ελέγξιμος όρος που μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε είναι ο αεροδυναμικός συντελεστής ισχύος. Από τη χαρακτηριστική του σχήματος 2.3.6 παρατηρούμε ότι οι διαφορετικές τιμές του αεροδυναμικού συντελεστή ισχύος αντιστοιχούν σε διαφορετικές γωνίες βήματος πτερυγίου. Για κάθε περίπτωση υπάρχει ένας βέλτιστος λόγος ταχύτητας ακροπτερυγίου, ο οποίος συμβάλλει σε ένα μέγιστο αεροδυναμικό συντελεστή ισχύος, που με τη σειρά του οδηγεί στη μέγιστη παραγόμενη ισχύ. Στην κατάσταση λειτουργίας με MPPT η γωνία βήματος πτερυγίου συνήθως διατηρείται στις μηδέν μοίρες. Προκειμένου να επιτευχθεί ο μέγιστος αεροδυναμικός συντελεστής ισχύος για μηδενική γωνία βήματος πτερυγίου, ο λόγος ταχύτητας ακροπτερυγίου πρέπει να ρυθμίζεται στη βέλτιστη τιμή. Ο έλεγχος του λόγου της ταχύτητας ακροπτερυγίου είναι στην ουσία ο έλεγχος της ταχύτητας του

δρομέα της PMSG. Στο παρακάτω σχήμα (3.12), παρουσιάζεται ένα απλοποιημένο διάγραμμα του ελέγχου του λόγου ταχύτητας ακροπερυγίου. Από το σχήμα παρατηρούμε ότι ένας αισθητήρας μετράει την ταχύτητα του ανέμου και μεταδίδει την πληροφορία αυτή σε έναν μικροελεγκτή. Από την πληροφορία αυτή μπορεί να υπολογιστεί η ταχύτητα αναφοράς της ανεμογεννήτριας σύμφωνα με τον βέλτιστο λόγο ταχύτητας ακροπερυγίου. Άρα, η ταχύτητα της ανεμογεννήτριας θα αποκτήσει την ταχύτητα αναφοράς κατά τη στατική κατάσταση και στη συνέχεια θα επιτευχθεί ο έλεγχος MPPT.

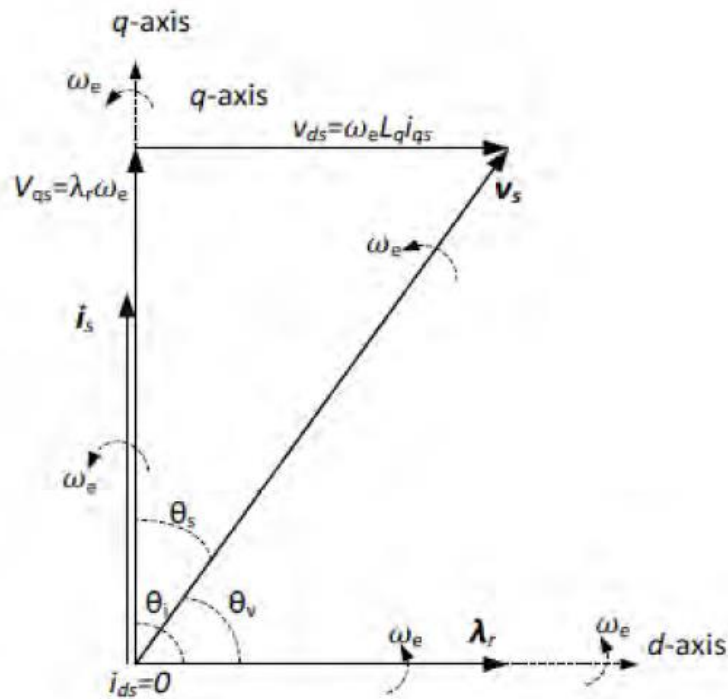


Σχήμα 3.12: Δομικό διάγραμμα του ελεγκτή βήματος περυγίων [20]

Ο έλεγχος με προσανατολισμό στο πεδίο (FieldOrientedControl – FOC) υπήρξε και εξακολουθεί να αποτελεί ένας σημαντικός παράγοντας στον έλεγχο των ανεμογεννητριών PMSG. Αυτό συμβαίνει διότι προσφέρει τη δυνατότητα να ελεγχθούν εύκολα οι PMSG σα μηχανές συνεχούς ρεύματος. Κατά τον έλεγχο με προσανατολισμό στο πεδίο οι d-q άξονες περιστρέφονται με τη ηλεκτρική γωνιακή ταχύτητα του δρομέα και ο d-άξονας είναι ευθυγραμμισμένος με το διάνυσμα της πεπλεγμένης ροής του δρομέα. Συνεπώς, η συνιστώσα του ρεύματος που παράγει αυτή τη ροή και η συνιστώσα του ρεύματος που παράγει τη ροπή είναι κατά μήκος του d-άξονα και q-άξονα αντίστοιχα. Επομένως, τα ρεύματα των d-q αξόνων μπορούν

να ελεγχθούν ανεξάρτητα μέσω δύο κλειστών βρόχων ελέγχου που βασίζονται στον FOC, ο οποίος έμμεσα ελέγχει την ταχύτητα και τη ροπή της PMSG.

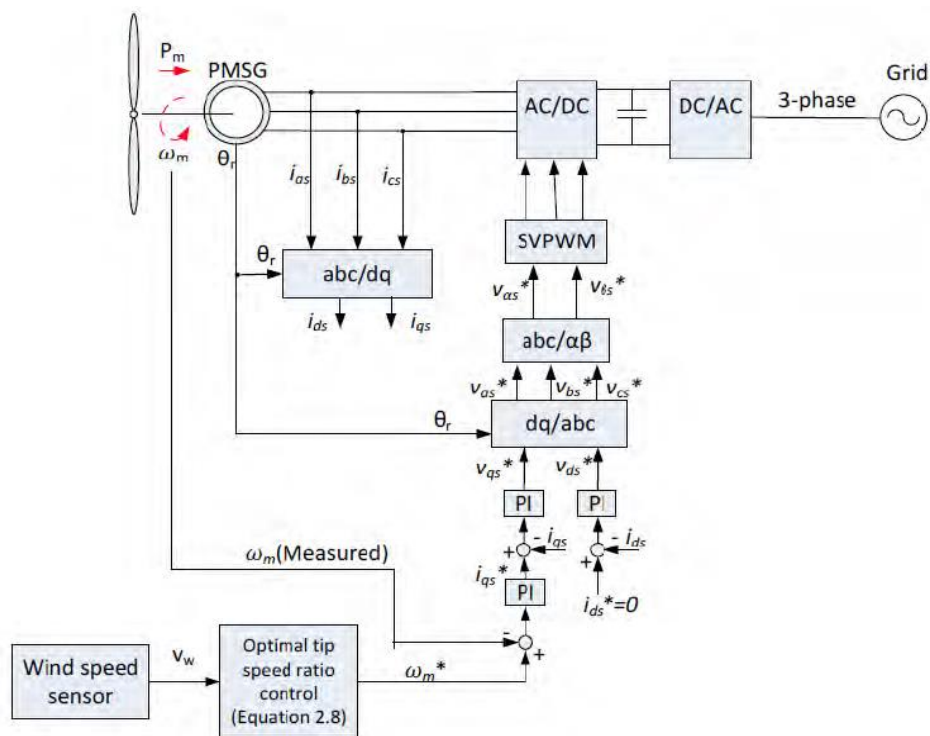
Η τεχνική ελέγχου που εφαρμόζεται στον μετατροπέα στην πλευρά της γεννήτριας είναι έλεγχος με προσανατολισμό στο πεδίο σε συνδυασμό με στρατηγική ανίχνευσης του σημείου μέγιστης ισχύος (MPPT). Το σχηματικό διάγραμμα του συστήματος ελέγχου του μετατροπέα στην πλευρά της γεννήτριας παρουσιάζεται στο σχήμα 3.13.



Σχήμα 3.13: Διανυσματικό διάγραμμα της τεχνικής του ελέγχου με προσανατολισμό στο πεδίο [20]

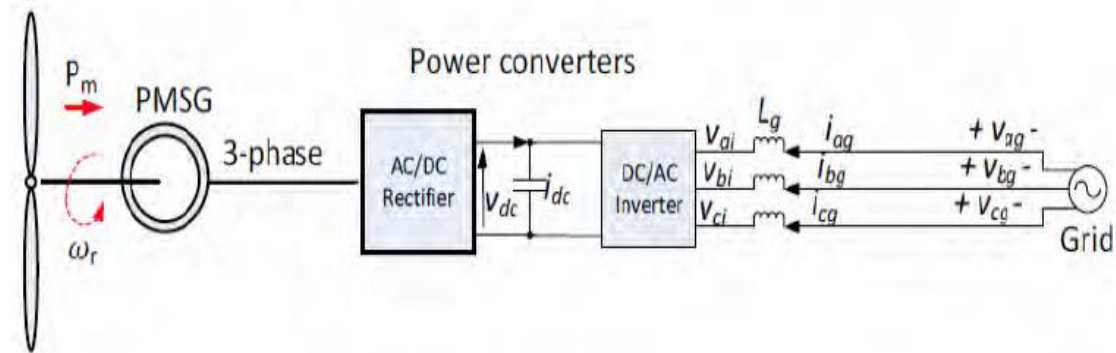
Το παραπάνω διάγραμμα ελέγχου περιλαμβάνει τρεις βρόχους ελέγχου, οι οποίοι είναι ο βρόχος ελέγχου ταχύτητας, ο βρόχος ελέγχου του ρεύματος του d-άξονα και ο βρόχος ελέγχου του ρεύματος του q-άξονα. Στον βρόχο ελέγχου ταχύτητας, η πραγματική ταχύτητα της ανεμογεννήτριας μετρούμενη από το τοποθετημένο στον άξονα του δρομέα, συγκρίνεται με την επιθυμητή ταχύτητα αναφοράς, η οποία με τη σειρά της προκύπτει από τον βέλτιστο λόγο ταχύτητας ακροπτερυγίου. Το σφάλμα μεταξύ πραγματικής και επιθυμητής ταχύτητας αναφοράς αποστέλλεται ως είσοδος

σε έναν PI-ελεγκτή, ο οποίος θα δώσει σαν έξοδο το ρεύμα αναφοράς στάτη του q-άξονα, ενώ θέτουμε πάντα το ρεύμα αναφοράς δρομέα του d-άξονα στο μηδέν. Προκειμένου να αποκτηθούν τα σήματα ανάδρασης των ρευμάτων, πραγματοποιείται μέτρηση και μετατροπή των τριφασικών ρευμάτων του στάτη στο d-q πλαίσιο αναφοράς με βάση τον μετασχηματισμό Park. Στη συνέχεια, οι τάσεις αναφοράς του στάτη μπορούν να αποκτηθούν από τους PI-ελεγκτές που χρησιμοποιούνται στους βρόχους ελέγχου των ρευμάτων. Το είδος της διαμόρφωσης που χρησιμοποιείται είναι η διαμόρφωση εύρους παλμού με διάνυσμα χώρου (SVPWM) διότι παράγει μικρότερη αρμονική παραμόρφωση στις τάσεις και στα ρεύματα στην έξοδο του στάτη και προσφέρει πιο αποτελεσματική χρήση της υποστηρικτικής συνεχούς τάσης από τη συμβατική ημιτονοειδή διαμόρφωση εύρους παλμών. Οι έξοδοι του μοντέλου SVPWM είναι έξι σήματα PWM, τα οποία ελέγχουν την κατάσταση ON/OFF των έξι διακοπών IGBT του μετατροπέα στην πλευρά της γεννήτριας [20]. Το διάγραμμα ελέγχου του μετατροπέα στην πλευρά της γεννήτριας είναι το ακόλουθο:



Σχήμα 3.14: Δομικό διάγραμμα του συστήματος ελέγχου του μετατροπέα στην πλευρά της γεννήτριας[20]

3.2.2 Έλεγχος του Μετατροπέα στην Πλευρά του Δικτύου



Σχήμα 3.15: Σύνδεση αιολικού συστήματος τύπου PMSG με το δίκτυο[20]

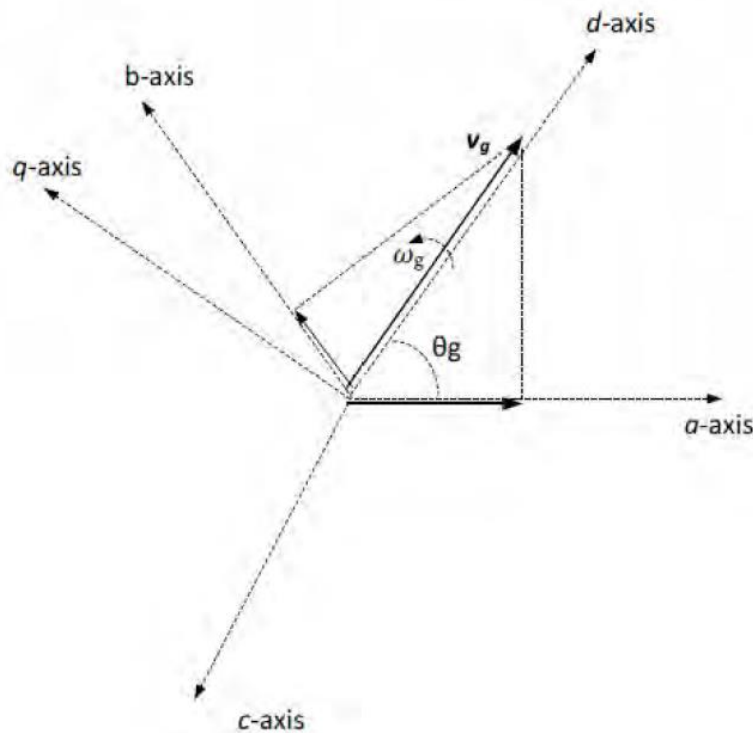
Όπου i_{ag} , i_{bg} και i_{cg} , τα ρεύματα των τριών φάσεων a, b και c του δικτύου αντίστοιχα, με τη φορά τους να καθορίζεται από τα βέλη πάνω στις γραμμές μεταφοράς. Έτσι, ακολουθώντας τη σύμβαση φορτίου/καταναλωτή, όταν ρεύματα του δικτύου είναι θετικά σημαίνει ότι η ηλεκτρική ισχύς ρέει από το δίκτυο της την ανεμογεννήτρια. Αντίθετα, όταν τα ρεύματα του δικτύου είναι αρνητικά σημαίνει ότι η ηλεκτρική ισχύς διοχετεύεται από την ανεμογεννήτρια στο δίκτυο. Στις κανονικές συνθήκες λειτουργίας της ανεμογεννήτριας τα ρεύματα του δικτύου είναι πάντα αρνητικά.

Ο κεντρικός στόχος του μετατροπέα στην πλευρά του δικτύου είναι ο έλεγχος της ενεργού και αέργου ισχύος. Οι εξισώσεις της ενεργού και αέργου ισχύος που διοχετεύεται στο δίκτυο γράφονται ως εξής:

$$P_g = \frac{3}{2} (v_{dg} i_{dg} + v_{qg} i_{qg})$$

$$Q_g = \frac{3}{2} (v_{qg} i_{dg} - v_{dg} i_{qg})$$

Όπου i_{dg} , i_{qg} είναι τα d-q ρεύματα δικτύου και v_{dg} , v_{qg} οι d-q τάσεις δικτύου. Παρατηρούμε στην εξίσωση της αέργου ισχύος οι d-q συνιστώσες των ρευμάτων και τάσεων είναι συζευγμένες σε μορφή εξωτερικού γινομένου, πράγμα που καθιστά δύσκολο τον έλεγχο της ενεργού και αέργου ισχύος και μειώνει τη δυναμική συμπεριφορά του μετατροπέα στην πλευρά του δικτύου. Προκειμένου να επιλύσουμε το πρόβλημα της σύζευξης εφαρμόζουμε στον μετατροπέα στην πλευρά του δικτύου έλεγχο με προσανατολισμό στην τάση του δικτύου στο σύγχρονα στρεφόμενο πλαίσιο αναφοράς. Συγκεκριμένα, ο d-άξονας του στρεφόμενου πλαισίου αναφοράς είναι ευθυγραμμισμένος με το χωρικό διάνυσμα της τάσης του δικτύου και η συνιστώσα στον q-άξονα του χωρικού διανύσματος της τάσης δικτύου είναι μηδενική.



Σχήμα 3.16: Διανυσματικό διάγραμμα του ελέγχου με προσανατολισμό στην τάση του δικτύου [20]

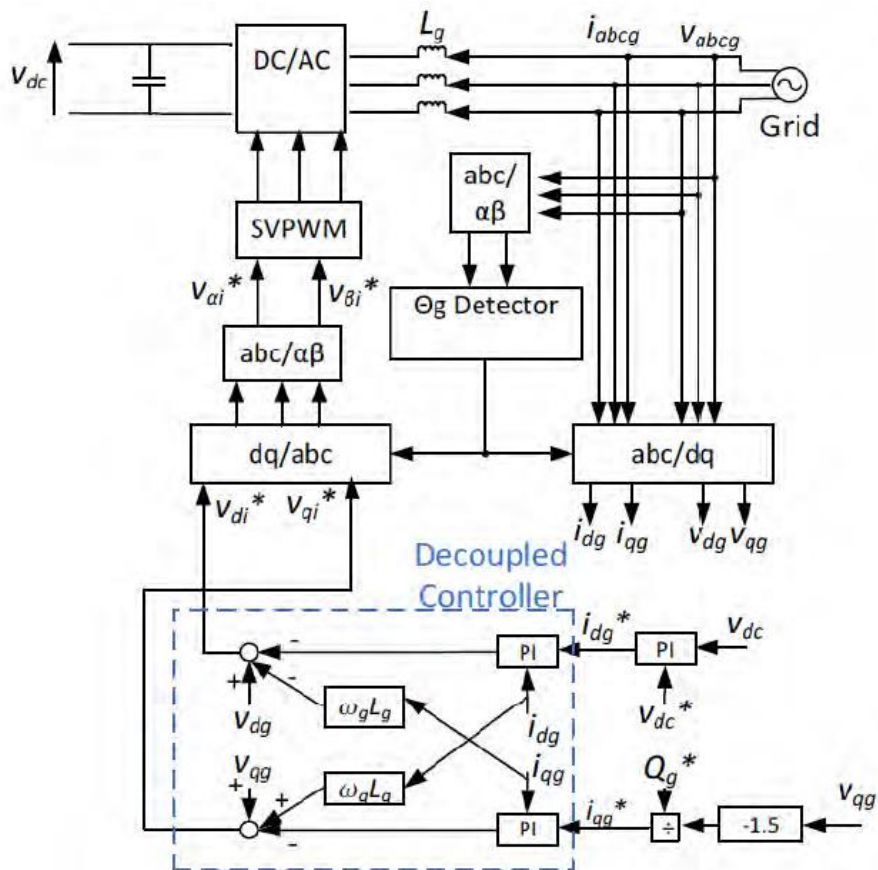
Αφού εφαρμόσουμε τον έλεγχο με προσανατολισμό στην τάση του δικτύου, οι εξισώσεις της ενεργού και αέργου ισχύος περιγράφονται από τις παρακάτω σχέσεις. Στις νέες εξισώσεις παρατηρούμε ότι η ενεργός και η αέργος ισχύς μπορούν να ελεγχθούν ανεξάρτητα. Η ενεργός ισχύς ελέγχεται μέσω του ελέγχου της d-

συνιστώσας του ρεύματος δικτύου και η άεργος ισχύς μέσω της q-συνιστώσας του ρεύματος δικτύου [20].

$$P_g = \frac{3}{2}(v_{dg}i_{dg}) = \frac{3}{2}v_{dc}i_{dc}$$

$$Q_g = -\frac{3}{2}v_{dg}i_{qg}$$

Όπου v_{dc} , i_{dc} η τάση και το ρεύμα στη dc-διασύνδεση [20]. Το διάγραμμα ελέγχου του μετατροπέα στην πλευρά του δικτύου είναι το ακόλουθο:



Σχήμα 3.17: Δομικό διάγραμμα του συστήματος ελέγχου του μετατροπέα στην πλευρά του δικτύου[20]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4:

ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΩΝ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ ΜΕΤΑΒΛΗΤΩΝ ΣΤΡΟΦΩΝ ΣΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

4.1 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΩΝ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ ΜΕΤΑΒΛΗΤΩΝ ΣΤΡΟΦΩΝ ΣΤΟΝ ΕΛΕΓΧΟ ΤΗΣ ΤΑΣΗΣ

4.1.1 Ο Έλεγχος Τάσης στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας

Η βασική λειτουργία ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας είναι η μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας από τις γεννήτριες στα φορτία. Προκειμένου να λειτουργήσει σωστά, είναι απαραίτητο η τάση να διατηρείται κοντά στην ονομαστική της τιμή, σε ολόκληρο το σύστημα. Παραδοσιακά, αυτό επιτυγχάνεται με συγκεκριμένους τρόπους για το σύστημα μεταφοράς και με άλλους για το σύστημα διανομής. Στα δίκτυα μεταφοράς, οι μεγάλοι σταθμοί διατηρούν τις τάσεις των ζυγών εντός των ορίων παρέκκλισης από τις ονομαστικές τιμές με αποτέλεσμα να είναι περιορισμένες οι συσκευές ελέγχου της τάσης. Αντίθετα, τα δίκτυα διανομής έχουν ενσωματωμένο ειδικό εξοπλισμό για τον έλεγχο της τάσης. Όταν υπάρχει διεσπαρμένη παραγωγή στο δίκτυο διανομής οι συνδεδεμένες γεννήτριες σπάνια εμπλέκονται στον έλεγχο της τάσης των ζυγών. Οι πιο συχνά χρησιμοποιούμενες συσκευές για τον έλεγχο της τάσης στα δίκτυα διεσπαρμένης παραγωγής είναι οι μετασχηματιστές με μεταβλητό λόγο μετασχηματισμού (tap changers), καθώς και στατικοί αντισταθμιστές αέργου ισχύος με πυκνωτές ή πηνία (switched capacitors or reactors). Με συνδυασμό των προαναφερθέντων μπορεί να διατηρηθεί η τάση όλων των ζυγών των δικτύων μεταφοράς και διεσπαρμένης παραγωγής εντός των επιθυμητών επιπέδων.

Ωστόσο, οι ραγδαίες σύγχρονες εξελίξεις θέτουν υπό αμφισβήτηση αυτή την κλασσική προσέγγιση. Μια από τις σπουδαιότερες είναι η αυξημένη χρήση ανεμογεννητριών στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Μέχρι τώρα, οι ανεμογεννήτριες επηρεάζουν τα ρεύματα και τις ροές ισχύος του δικτύου

δισπαρμένης παραγωγής στο οποίο συνδέονται. Επίσης, επηρεάζουν και τις τάσεις των ζυγών πράγμα που εξηγείται από το ότι οι τάσεις συσχετίζονται στενά με την ισχύ. Το γεγονός αυτό μπορεί να οδηγήσει σε προβλήματα εάν οι συσκευές που είναι ήδη εγκατεστημένες στο δίκτυο δισπαρμένης παραγωγής δεν είναι ικανές να αντισταθμίσουν την επίδραση των ανεμογεννητριών στις τάσεις των ζυγών. Εάν συμβαίνει αυτό, οι τάσεις ορισμένων ζυγών του δικτύου δισπαρμένης παραγωγής δε μπορούν να διατηρηθούν εντός των επιτρεπόμενων αποκλίσεων από τις ονομαστικές τιμές, οπότε πρέπει να ληφθούν τα αναγκαία μέτρα.

Ένα παρόμοιο πρόβλημα παρουσιάζεται όταν μεγάλα αιολικά πάρκα συνδέονται στο δίκτυο μεταφοράς. Το αιολικό πάρκο επηρεάζει και πάλι τις ροές ισχύος και τις τάσεις των ζυγών, αλλά αυτή τη φορά στο δίκτυο μεταφοράς. Βέβαια, στα δίκτυα αυτά οι τάσεις ελέγχονται κυρίως από τους μεγάλους συμβατικούς σταθμούς παραγωγής. Όμως, υπάρχει η περίπτωση η ικανότητα τους να ελέγχουν τις τάσεις στο δίκτυο μετάδοσης να μην επαρκής, οπότε δε μπορούν να αντισταθμίσουν την επίδραση των αιολικών πάρκων στις τάσεις των ζυγών. Σαν αποτέλεσμα, οι τάσεις των ζυγών δε μπορούν πλέον να διατηρούνται εντός των επιτρεπόμενων αποκλίσεων από τις ονομαστικές τιμές, άρα και πάλι πρέπει να ληφθούν τα απαραίτητα μέτρα.

Ο έλεγχος της τάσης σε ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας έχει ως βασικό σκοπό τη διατήρηση των τάσεων των ζυγών εντός των καθορισμένων ορίων. Η αναγκαιότητα του ελέγχου της τάσης οφείλεται στο ότι οι μετασχηματιστές, οι γραμμές και τα καλώδια, που θα αναφέρονται με τον όρο κλάδοι για λόγους ευκολίας, έχουν χωρητικότητα, αντίσταση και αυτεπαγωγή. Επειδή λοιπόν, οι κλάδοι έχουν χωρητικότητα, αντίσταση και αυτεπαγωγή η ροή ρεύματος από μέσα τους προκαλεί διαφορά δυναμικού ή τάση στα άκρα τους. Ωστόσο, παρά την ύπαρξη αυτή της διαφοράς δυναμικού στα άκρα των κλάδων, η τάση των ζυγών δεν επιτρέπεται να υπερβαίνει κατά πολύ την ονομαστική της τιμή (με εύρος που κυμαίνεται από 5% έως 10% της ονομαστικής τιμής).

Επίσης, είναι σημαντικό να τονιστεί ότι η τάση των ζυγών είναι μια τοπική μεταβλητή, σε αντίθεση με τη συχνότητα του δικτύου, η οποία είναι μια μεταβλητή

που αφορά συνολικά το σύστημα. Ως εκ τούτου, είναι αδύνατον να ελεγχθεί η τάση σε κάθε ζυγό του συστήματος όπως στην περίπτωση της συχνότητας. Όμως, μπορεί να ελεγχθεί η τάση μόνο σε συγκεκριμένο ζυγό ή στην τοπική του ζώνη. Η συγκεκριμένη παρατήρηση είναι εξαιρετικά σημαντική για να κατανοηθεί η επίδραση των αιολικών συστημάτων στον έλεγχο της τάσης.

Γενικά, υπάρχουν διάφοροι τρόποι για να επηρεαστεί η τάση των ζυγών του συστήματος. Οι τρόποι έχουν ουσιαστικές διαφορές μεταξύ των δικτύων μεταφοράς και των δικτύων διεσπαρμένης παραγωγής, διότι έχουν διαφορετικά χαρακτηριστικά και διαφορετικό πλήθος και τύπο συνδεδεμένων γεννητριών. Πιο συγκεκριμένα, τα δίκτυα μεταφοράς περιλαμβάνουν εναέριες γραμμές με πολύ χαμηλή αντίσταση. Η διαφορά τάσης στα άκρα μιας γραμμής με υψηλή επαγωγική αντίδραση X συγκρινόμενη με την ωμική της αντίσταση R , δηλαδή με χαμηλό λόγο R/X επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από τη ροή αέργου ισχύος μέσω της γραμμής. Εξαιτίας των χαρακτηριστικών των δικτύων μεταφοράς και των συνδεδεμένων γεννητριών τους, οι τάσεις των ζυγών ελέγχονται κατά κύριο λόγο μέσω της μεταβολής της παραγωγής ή της κατανάλωσης της αέργου ισχύος των γεννητριών που συνδέονται με το δίκτυο μεταφοράς. Οι γεννήτριες αυτές είναι εύκολα προσβάσιμες από τους διαχειριστές του συστήματος λόγω του μικρού τους αριθμού και της συνεχούς παρακολούθησής τους. Επίσης, είναι ιδιαίτερα ευέλικτες από λειτουργική άποψη και επιτρέπουν το συνεχή έλεγχο της παραγωγής αέργου ισχύος σε ένα μεγάλο εύρος.

Μερικές φορές χρησιμοποιείται ειδικός εξοπλισμός για το σκοπό αυτό, όπως ευέλικτα συστήματα μεταφοράς με εναλλασσόμενο ρεύμα (FACTS) και συστοιχίες πυκνωτών, που είναι ελεγχόμενες πηγές αέργου ισχύος. Ωστόσο, υπάρχουν διαφορές στον τρόπο παραγωγής της αέργου ισχύος και στην ακρίβεια και ταχύτητα του ελέγχου της παραγόμενης αέργου ισχύος.

Αντίθετα, τα δίκτυα διανεμημένης παραγωγής περιλαμβάνουν εναέριες γραμμές ή υπόγεια καλώδια, στα οποία η ωμική αντίσταση δεν είναι αμελητέα σε σύγκριση με την επαγωγική αντίδραση, δηλαδή έχουν πολύ υψηλότερο λόγο R/X σε σύγκριση με τις γραμμές μεταφοράς. Συνεπώς, η επίδραση της αέργου ισχύος στις τάσεις των

ζυγών είναι λιγότερη έντονη σε σχέση με τα δίκτυα μεταφοράς. Επιπρόσθετα, οι γεννήτριες που είναι συνδεδεμένες στα δίκτυα διεσπαρμένης παραγωγής δεν είναι πάντα ικανές να μεταβάλλουν την άεργο ισχύ στην έξοδο τους, ώστε να συμβάλλουν στον έλεγχο της τάσης. Επομένως, η τάση των ζυγών στα δίκτυα αυτά ελέγχεται κατά κύριο λόγο μέσω της μεταβολής του λόγου μετασχηματισμού του μετασχηματιστή που συνδέει το δίκτυο σε υψηλότερα επίπεδα τάσης και ενίοτε από συσκευές που παράγουν ή καταναλώνουν άεργο ισχύ, όπως πυκνωτές ή παράλληλους επαγωγούς. Σε γενικές γραμμές, τα δίκτυα διανομής προσφέρουν πολύ λιγότερες δυνατότητες ελέγχου της τάσης σε σχέση με τα δίκτυα μεταφοράς [15].

4.1.2 Ενεργός και Άεργος Ισχύς στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας

Στα δίκτυα εναλλασσομένου ρεύματος (ac) υπάρχει μια διαφορά φάσης μεταξύ του ημιτονοειδούς ρεύματος που παρέχεται από τη γεννήτρια και της τερματικής τάσης της γεννήτριας. Το μέγεθος αυτής της διαφοράς φάσης εξαρτάται από την αντίσταση, την αυτεπαγωγή και τη χωρητικότητα του δικτύου στο οποίο η γεννήτρια τροφοδοτεί την ισχύ, καθώς και από τα χαρακτηριστικά και το σημείο λειτουργίας της κάθε γεννήτριας. Στην περίπτωση της ac-παραγωγής, το ποσό της παραγόμενης ενέργειας δεν είναι ίσο με το γινόμενο της ενεργού (rms) τιμής της τάσης και του ρεύματος της γεννήτριας, όπως στη dc-παραγωγή. Συγκεκριμένα, το ποσό της παραγόμενης ενέργειας εξαρτάται τόσο από το πλάτος της τάσης και του ρεύματος, όσο και από το μέγεθος της διαφορά φάσης μεταξύ τους.

Το ρεύμα σε μια ac-γεννήτρια μπορεί να χωριστεί σε μια συνιστώσα που βρίσκεται σε φάση με την τερματική τάση και σε μια συνιστώσα που είναι μετατοπισμένη κατά 90° . Έχει αποδειχθεί ότι μόνο η συνιστώσα του ρεύματος που είναι σε φάση με την τάση τροφοδοτεί ισχύ στο δίκτυο. Επομένως, ορίζουμε την ενεργό ισχύ που ισούται με το γινόμενο της rms τιμής της συμφασικής τιμής του ρεύματος της γεννήτριας με την τερματική τάση της γεννήτριας. Η ενεργός ισχύς συμβολίζεται με P και μετριέται συνήθως σε MW.

Επιπλέον, ορίζουμε την άεργο ισχύ που ισούται με το γινόμενο της τάσης της πηγής και της άλλης συνιστώσας του ρεύματος. Η άεργος ισχύς συμβολίζεται με Q και μετριέται συνήθως σε $MVar$. Ουσιαστικά, η άεργος ισχύς προέρχεται από την ηλεκτρική και μαγνητική ενέργεια που αποθηκεύεται στους πυκνωτές και στα πηνία του δικτύου αντίστοιχα.

Μια άλλη σημαντική ποσότητα είναι ο συντελεστής ισχύος που συμβολίζεται με PF (powerfactor) και ορίζεται ως εξής:

$$PF = \cos \varphi = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}}$$

όπου φ είναι η διαφορά φάσης μεταξύ της τερματικής τάσης και του τερματικού ρεύματος σε rad . Αν η γωνία φ ισούται με μηδέν, τότε προφανώς το συνημίτονο $\cos \varphi$ ισούται με μονάδα και τότε η άεργος ισχύς είναι μηδενική και μόνο ενεργός ισχύς ανταλλάσσεται με το δίκτυο. Η κατάσταση αυτή αναφέρεται ως λειτουργία με μοναδιαίο συντελεστή ισχύος [15].

4.1.3 Επίδραση των Αιολικών Συστημάτων στα Συστήματα Μεταφοράς

Όταν αναφερόμαστε στην επίδραση των αιολικών συστημάτων στον έλεγχο τάσης, πρέπει να διακρίνουμε δύο κατηγορίες, την επίδραση στα συστήματα μεταφοράς και την επίδραση στα δίκτυα διανεμημένης παραγωγής. Στα δίκτυα μεταφοράς παραδοσιακά η ρύθμιση της τάσης γινόταν από τους συμβατικούς σταθμούς παραγωγής που περιλάμβαναν σύγχρονες γεννήτριες, αν και κάποιες φορές χρησιμοποιήθηκε ειδικός εξοπλισμός ρύθμισης της τάσης, όπως FACTS ή συστοιχίες πυκνωτών. Σήμερα όμως, η συνεισφορά των συμβατικών σταθμών παραγωγής στον έλεγχο της τάσης περιορίζεται και πλέον γίνεται δυσκολότερη η ρύθμιση της τάσης σε ολόκληρο το δίκτυο μετάδοσης μόνο από αυτούς. Οι διαχειριστές του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας αντιμετωπίζουν αρχικά το πρόβλημα μέσω της εγκατάστασης νέου εξοπλισμού ελέγχου της τάσης. Ακόμη, απαιτούν από τους νέους παραγωγούς να έχουν συστήματα παραγωγής και ρύθμισης της αέργου ισχύος, ανεξάρτητα από

την τεχνολογία που εφαρμόζουν. Το γεγονός αυτό σημαίνει ότι δε γίνεται καμία εξαίρεση ούτε για τα αιολικά πάρκα και ούτε για τις άλλες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, όπως γινόταν συχνά μέχρι σήμερα.

Τα αιολικά πάρκα που είναι αρκετά μεγάλα ώστε να συνδέονται στο δίκτυο μετάδοσης τείνουν να κατασκευάζονται σε απομακρυσμένες περιοχές ή σε υπεράκτιο επίπεδο, λόγω του μεγέθους τους και των επιπτώσεων τους στο φυσικό τοπίο. Δεδομένου ότι η τάση των ζυγών είναι μια τοπική ποσότητα, γίνεται δύσκολο να ελεγχθεί η τάση σε αυτές τις μακρινές τοποθεσίες από τους συμβατικούς σταθμούς που βρίσκονται οπουδήποτε αλλού στο δίκτυο. Επομένως, οι ανεμογεννήτριες πρέπει να έχουν τις δικές τους δυνατότητες για τον έλεγχο της τάσης, ώστε να είναι επιτυχής η σύνδεση τους στο δίκτυο.

Μια άλλη επίδραση των αιολικών συστημάτων στον έλεγχο της τάσης είναι ότι τα μεγάλα αιολικά πάρκα ίσως καταστήσουν αναγκαία την εγκατάσταση συσκευών ρύθμιση της τάσης στο δίκτυο μετάδοσης, ανεξάρτητα από την αυτόνομη ικανότητα ελέγχου της κάθε ανεμογεννήτριας. Δηλαδή, για να διασφαλιστεί ο ακριβής και ταχύς έλεγχος της τάσης πρέπει να ληφθούν πρόσθετα μέτρα, ακόμη κι αν οι ανεμογεννήτριες έχουν τις ίδιες δυνατότητες ελέγχου της τάσης με τις συμβατικές γεννήτριες [15].

4.1.4 Δυνατότητες Ελέγχου Τάσης από Ανεμογεννήτριες Μεταβλητών Στροφών

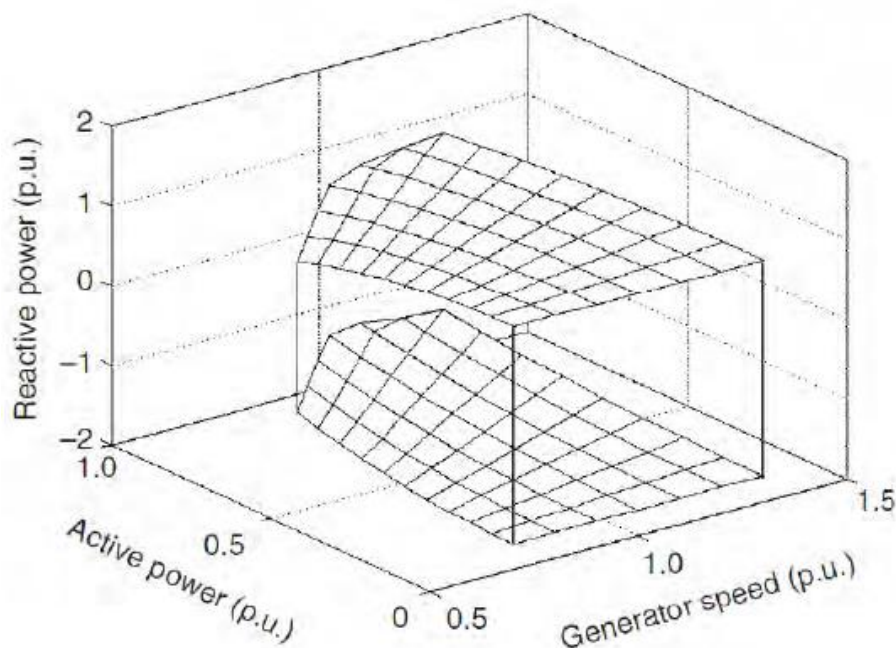
Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, η δυνατότητα ελέγχου της τάσης από τις ανεμογεννήτριες, που συγκροτούν τα μεγάλα αιολικά πάρκα και συνδέονται στο δίκτυο μεταφοράς, είναι απαραίτητη. Τα αιολικά πάρκα που συνδέονται σε απομακρυσμένες περιοχές αντιμετωπίζουν δυσκολίες στον έλεγχο της τάσης. Επίσης, έχει αποδειχθεί ότι το αποτέλεσμα της επίδρασης της κατανεμημένης παραγωγής των ανεμογεννητριών οδηγεί σε αύξηση του εύρους στο οποίο κυμαίνονται τα ρεύματα του δικτύου. Επειδή τα ρεύματα των κλάδων συνδέονται με τις τάσεις των κόμβων, προκαλείται και μια αύξηση του εύρους στο οποίο κυμαίνονται οι τάσεις. Οι ανεμογεννήτριες που έχουν τη δυνατότητα ελέγχου της τάσης μπορούν να

αντιμετωπίσουν αυτή την αρνητική επίδραση στο δίκτυο. Επομένως, είναι καθοριστικής σημασίας τόσο για τις ανεμογεννήτριες που συνδέονται στο σύστημα μεταφοράς, όσο και τις ανεμογεννήτριες που συνδέονται στο δίκτυο διανεμημένης παραγωγής να είναι ικανές να συνεισφέρουν στον έλεγχο της τάσης.

Στα συστήματα μεταφοράς και στα δίκτυα διανεμημένης παραγωγής οι τάσεις των ζυγών εξαρτώνται από την άεργο ισχύ, άρα οι τάσεις των ζυγών μπορούν να ελεγχθούν μέσω μεταβολών στην παραγωγή και κατανάλωση αέργου ισχύος των γεννητριών. Παράλληλα, οι τάσεις των κόμβων συσχετίζονται με τα ρεύματα των κλάδων καθώς και τα χαρακτηριστικά των κλάδων. Η συντριπτική πλειοψηφία των ανεμογεννητριών που εγκαθίστανται σήμερα χρησιμοποιούν συγκεκριμένους τύπους των ηλεκτρομηχανικών συστημάτων παραγωγής ενέργειας. Ο έλεγχος της τάσης μπορεί να πραγματοποιηθεί μόνο από τις ανεμογεννήτριες μεταβλητών στροφών και όχι από τις ανεμογεννήτριες σταθερών στροφών. Αυτό οφείλεται στο ότι οι ανεμογεννήτριες σταθερών στροφών έχουν επαγωγικές γεννήτριες βραχυκυκλωμένου κλωβού, οι οποίες καταναλώνουν και δεν παράγουν άεργο ισχύ. Έτσι, η ανταλλαγή αέργου ισχύος των ανεμογεννητριών αυτών με το δίκτυο δε μπορεί να ελεγχθεί και άρα δε μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον έλεγχο τάσης. Συνεπώς, θα εξετάσουμε τις δυνατότητες ελέγχου της τάσης των ανεμογεννητριών μεταβλητών στροφών, δηλαδή της επαγωγικής γεννήτριας διπλής τροφοδοσίας και της σύγχρονης γεννήτριας μόνιμου μαγνήτη.

Στην επαγωγική γεννήτρια διπλής τροφοδοσίας η άεργος ισχύς ελέγχεται από το ρεύμα του δρομέα. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, δεν υπάρχει μοναδική σχέση μεταξύ της αέργου ισχύος και άλλων ποσοτήτων, όπως η ταχύτητα του δρομέα και η ενεργός ισχύς. Δηλαδή, για συγκεκριμένη ταχύτητα του δρομέα και αντίστοιχη παραγόμενη ενεργού ισχύος μπορεί να παραχθεί ή να καταναλωθεί διαφορετική ποσότητα αέργου ισχύος.

Το σχήμα 4.1 απεικονίζει το εύρος λειτουργίας μιας επαγωγικής γεννήτριας διπλής τροφοδοσίας για ονομαστική τερματική τάση (1 p.u.).



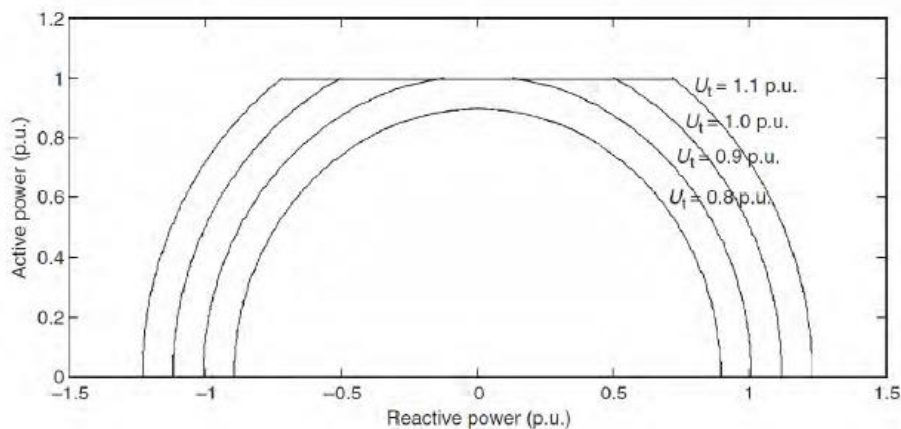
Σχήμα 4.1: Ενεργός και άεργος ισχύς επαγωγικής γεννήτρια διπλής τροφοδοσίας με παράμετρο την ταχύτητα δρομέα [15]

Το γράφημα δείχνει ότι η άεργος ισχύς επηρεάζεται σε μικρό βαθμό από την ταχύτητα του δρομέα και την παραγωγή ενεργού ισχύος, ακόμη κι αν δεν εξαρτάται άμεσα από αυτές τις ποσότητες. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι και η ροπή της γεννήτριας και η παραγωγή άεργου ισχύος εξαρτώνται άμεσα από το ρεύμα που εγχέει ο ηλεκτρονικός μετατροπέας στο δρομέα. Η συνιστώσα του ρεύματος που παράγει ροπή προκύπτει από την επιθυμητή ροπή που ο ελεγκτής ταχύτητας του δρομέα αποκομίζει από την πραγματική ταχύτητα του δρομέα. Το ρεύμα που είναι απαραίτητο για να δημιουργήσει την επιθυμητή ροπή καθορίζει με τη σειρά του τη χωρητικότητα του μετατροπέα που απομένει για να κυκλοφορήσει το ρεύμα που παράγει ή καταναλώνει άεργο ισχύ.

Στη σύγχρονη γεννήτρια μόνιμου μαγνήτη η ανταλλαγή της άεργου ισχύος με το δίκτυο δεν καθορίζεται από τις ιδιότητες της γεννήτριας, αλλά από τα χαρακτηριστικά του ηλεκτρονικού μετατροπέα ισχύος στην πλευρά του δικτύου. Η γεννήτρια είναι πλήρως αποσυνδεδεμένη από το δίκτυο, πράγμα που έχει σημαντικές συνέπειες στην

ανταλλαγή αέργου ισχύος μεταξύ γεννήτριας και δικτύου. Συγκεκριμένα, η ανταλλαγή αέργου ισχύος μεταξύ της γεννήτριας και του μετατροπέα στην πλευρά της γεννήτριας και η ανταλλαγή αέργου ισχύος μεταξύ του μετατροπέα στην πλευρά του δικτύου και του δικτύου είναι αποσυσζευγμένες. Αυτό σημαίνει ότι ο συντελεστής ισχύος της γεννήτριας και ο συντελεστής ισχύος στην πλευρά του δικτύου ελέγχονται ανεξάρτητα.

Το σχήμα 4.2 απεικονίζει το εύρος λειτουργίας μιας σύγχρονης γεννήτριας μόνιμου μαγνήτη με παράμετρο την τερματική της τάση.



Εικόνα 4.2: Ενεργός και άεργος ισχύς σύγχρονης γεννήτριας μόνιμου μαγνήτη με παράμετρο την τερματική τάση [15]

Στο γράφημα η ταχύτητα περιστροφής του δρομέα δε λαμβάνεται υπόψη, διότι εφόσον η γεννήτρια και το δίκτυο είναι πλήρως αποσυσζευγμένα, η ταχύτητα του δρομέα επηρεάζει ελάχιστα την αλληλεπίδραση της γεννήτριας με το δίκτυο. Επίσης, είναι δεδομένο ότι όταν η ανεμογεννήτρια λειτουργεί στην ονομαστική τάση και στην ονομαστική ισχύ, ο συντελεστής ισχύος κυμαίνεται στο 0.9 περίπου. Επιπρόσθετα, το διάγραμμα διευκρινίζει ότι η σύγχρονη γεννήτρια μόνιμου μαγνήτη επιτρέπει τον έλεγχο της αέργου ισχύος ή της τερματικής τάσης, επειδή πολλές τιμές της αέργου ισχύος αντιστοιχούν σε μία μόνο τιμή της ενεργού ισχύος. Τέλος, να σημειωθεί ότι οι παραπάνω καμπύλες υποδεικνύουν την οριοθέτηση της περιοχής λειτουργίας της σύγχρονης γεννήτριας μόνιμου μαγνήτη [15].

4.1.5 Επίδραση Παραγόντων στον Έλεγχο Τάσης

Όπως προαναφέρθηκε, μια ανεμογεννήτρια με δυνατότητες ελέγχου της τάσης μπορεί να ρυθμίσει την τάση των ζυγών ρυθμίζοντας το ποσό της αέργου ισχύος που παράγεται ή καταναλώνεται. Προκειμένου να ενεργοποιηθεί η δράση του ελέγχου πρέπει η τάση ενός συγκεκριμένου ζυγού να μετρηθεί και να οδηγηθεί στον ελεγκτή τάσης. Ο ελεγκτής, σύμφωνα με τη συνάρτηση μεταφοράς του, ρυθμίζει το ποσό της αέργου ισχύος που παράγεται ή καταναλώνεται. Γενικά, είναι ευκολότερο να αφήσουμε την ανεμογεννήτρια να ελέγξει τη δική της τερματική τάση, όμως μερικές φορές ελέγχει τη τάση σε κάποιο άλλο ζυγό σε οποιαδήποτε περιοχή του δικτύου, αν και αυτός ο ζυγός πρέπει να βρίσκεται κοντά στην ανεμογεννήτρια γιατί η τάση ζυγού είναι τοπική μεταβλητή. Όταν η μετρούμενη τάση έχει πολύ χαμηλή τιμή τότε η παραγόμενη αέργος ισχύς αυξάνεται, ενώ όταν η τάση είναι μεγάλη τότε η αέργος ισχύς μειώνεται.

Οι παράγοντες που επηρεάζουν τη σχέση μεταξύ του ποσού της αέργου ισχύος που παράγεται ή καταναλώνεται και του ρεύματος του δρομέα που ρυθμίζει το ποσό της αέργου ισχύος είναι διάφοροι. Ειδικότερα, ως αναφέρουμε τις παραμέτρους της γεννήτριας, την επιθυμητή τιμή στον ελεγκτή τάσης, την τιμή της σύνθετης αντίστασης των γραμμών μεταφοράς και τις ροές αέργου ισχύος στο διασυνδεδεμένο δίκτυο. Βέβαια, η ισχυρότερη επίδραση στον έλεγχο της τάσης των ανεμογεννητριών πραγματοποιείται από τις ροές αέργου ισχύος στο δίκτυο. Να αναφέρουμε ότι γενικά χρησιμοποιούνται παρόμοιοι τύποι γεννητριών, η επιθυμητή τερματική τάση είναι πάντα κοντά στη μονάδα και ο λόγος R/X έχει μικρότερη επιρροή στην τάση σε σχέση με την αέργο ισχύ. Επομένως, οι τρεις πρώτοι παράγοντες που αναφέρθηκαν έχουν ελάχιστη επίδραση στον έλεγχο τάσης, σε σύγκριση με την αέργο ισχύ που θεωρείται η σπουδαιότερη παράμετρος για τη ρύθμιση της τάσης από τις ανεμογεννήτριες [15].

4.2 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΩΝ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ ΜΕΤΑΒΛΗΤΩΝ ΣΤΡΟΦΩΝ ΣΤΗΝ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑ ΤΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Η μεταβατική συμπεριφορά των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας καθορίζεται κατά κύριο λόγο από τις γεννήτριες του. Παλαιότερα, το μεγαλύτερο μέρος της ηλεκτρικής ενέργειας παραγόταν από τις σύγχρονες γεννήτριες των συμβατικών σταθμών, οι οποίες συνδέονταν απευθείας στο δίκτυο. Η συμπεριφορά των γεννητριών αυτών υπό διάφορες συνθήκες έχει μελετηθεί εδώ και δεκαετίες, άρα οι επιπτώσεις τους στη λειτουργία του δικτύου είναι πλέον γνωστές. Σήμερα, η συμμετοχή των ανεμογεννητριών στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας είναι αυξανόμενη, άρα πρέπει να αναλυθεί η συμπεριφορά τους σε οποιοδήποτε φαινόμενο. Γενικά, οι ανεμογεννήτριες μεταβλητών στροφών συνδέονται στο δίκτυο μέσω ηλεκτρονικών μετατροπέων ισχύος, οπότε η αλληλεπίδραση τους με το δίκτυο διαφέρει από τις συμβατικές γεννήτριες. Συνεπώς, οι ανεμογεννήτριες επηρεάζουν τη μεταβατική συμπεριφορά του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας με διαφορετικό τρόπο από τις συμβατικές γεννήτριες. Επιπρόσθετα, υπάρχουν διαφορές στην αλληλεπίδραση με το δίκτυο των διαφόρων τύπων ανεμογεννητριών, άρα ο κάθε τύπος ανεμογεννήτριας πρέπει να εξεταστεί ξεχωριστά. Επομένως, η μελέτη της επίδρασης των ανεμογεννητριών στη μεταβατική συμπεριφορά του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας γίνεται απαραίτητη [22].

4.2.1 Ευστάθεια Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας

Η ευστάθεια των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας διερευνά τη συμπεριφορά ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας όταν υφίσταται διαταραχές που μεταβάλλουν το σημείο λειτουργίας τους. Παραδείγματα τέτοιων διαταραχών είναι οι μεταβολές συχνότητας λόγω αποσύνδεσης φορτίων, τα βυθίσματα τάσης εξαιτίας βραχυκυκλωμάτων και οι μεταβολές μηχανικής ισχύος. Οποιαδήποτε διαταραχή κι αν συμβεί, προκαλεί μεταβολές στη λειτουργία του συστήματος, που σημαίνει ότι σημαντικές μεταβλητές του συστήματος, όπως οι τάσεις των ζυγών, τα ρεύματα των γραμμών και οι ταχύτητες των ανεμογεννητριών αρχίζουν να αλλάζουν. Το σύστημα

για να θεωρηθεί ευσταθές πρέπει, αφού υποστεί μια διαταραχή και φθάσει σε μια νέα μόνιμη κατάσταση, όλες οι γεννήτριες και τα φορτία που συνδέονταν με το σύστημα πριν τη διαταραχή να διατηρήσουν τη σύνδεση τους και μετά τη διαταραχή. Αντίθετα, το σύστημα θεωρείται ασταθές αν σε μια νέα μόνιμη κατάσταση συμβεί αποσύνδεση κάποιων γεννητριών ή φορτίων.

Υπάρχουν δύο διαφορετικοί μέθοδοι προκειμένου να διερευνηθεί η μεταβατική συμπεριφορά του συστήματος, έτσι ώστε να διαπιστωθεί αν είναι ευσταθές ή ασταθές. Η πρώτη μέθοδος είναι η ανάλυση στο πεδίο του χρόνου που αλλιώς αναφέρεται και ως προσομοίωση δυναμικής συμπεριφοράς, προσομοίωση θεμελιώδους συχνότητας ή προσομοίωση μεταβατικής ηλεκτρομηχανικής συμπεριφοράς. Αυτή η μέθοδος προσεγγίζει τη συμπεριφορά του συστήματος που δέχεται μια διαταραχή μέσω της προσομοίωσης της απόκρισης του συστήματος, δηλαδή την ποσοτική εξέλιξη των μεταβλητών του στην πάροδο του χρόνου. Με αυτό τον τρόπο προκύπτει το συμπέρασμα για το αν το σύστημα είναι ευσταθές ή ασταθές. Στην περίπτωση της αστάθειας, μπορούν να σχεδιασθούν στρατηγικές για να πραγματοποιήσουν αλλαγές στην τοπολογία του συστήματος με τέτοιο τρόπο ώστε να ανακτηθεί η ευστάθεια με ελάχιστες συνέπειες για τα φορτία και τις γεννήτριες. Η δεύτερη μέθοδος είναι η ανάλυση στο πεδίο της συχνότητας, που επίσης αναφέρεται και ως ανάλυση μικρού σήματος ή ανάλυση ιδιοτιμών. Η ανάλυση στο πεδίο της συχνότητας μελετά μια γραμμικοποιημένη προσέγγιση του μοντέλου του συστήματος σε μια ορισμένη κατάσταση. Η γραμμικοποιημένη προσέγγιση καθιστά δυνατή την εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με την απόκριση του συστήματος στην αναλυόμενη κατάσταση αφού συμβούν αλλαγές στις μεταβλητές κατάστασης [15].

4.2.2 Μεταβατική Συμπεριφορά Ανεμογεννητριών Μεταβλητών Στροφών

Η μεταβατική συμπεριφορά των ανεμογεννητριών μεταβλητών στροφών διαφέρει ριζικά από εκείνη των ανεμογεννητριών σταθερών στροφών. Οι ανεμογεννήτριες μεταβλητών στροφών περιλαμβάνουν έναν ηλεκτρονικό μετατροπέα ισχύος ο οποίος εκτελεί την αποσύζευξη της μηχανικής συχνότητας του δρομέα από την ηλεκτρική συχνότητα του δικτύου. Αυτή η αποσύζευξη πραγματοποιείται όχι μόνο κατά τη

διάρκεια της κανονικής λειτουργίας, αλλά και κατά τη διάρκεια των διαταραχών καθώς και μετά από αυτές.

Τα ηλεκτρονικά στοιχεία ισχύος των μετατροπέων είναι ιδιαίτερα ευαίσθητα στα υπερρεύματα εξαιτίας των πολύ μικρών σταθερών χρόνου. Όταν συμβεί μια μείωση της τάσης στους ακροδέκτες της γεννήτριας το ρεύμα που διαρρέει τους ημιαγωγούς αυξάνεται με ταχύ ρυθμό. Ο ελεγκτής του ηλεκτρονικού μετατροπέα δειγματοληπτεί διάφορες ποσότητες, όπως τερματική τάση γεννητριών, ρεύμα μετατροπέα, συχνότητα δικτύου και άλλες, με υψηλή συχνότητα δειγματοληψίας της τάξης των kHz. Οπότε, όταν συμβεί ένα σφάλμα ο μετατροπέας το αντιλαμβάνεται ακαριαία και τότε η ανεμογεννήτρια αποσυνδέεται από το δίκτυο, ώστε να αποφευχθεί η καταστροφή του μετατροπέα.

Η υψηλή διείσδυση ποσοτήτων αιολικής ενέργειας από ανεμογεννήτριες μεταβλητών στροφών είναι ανεπιθύμητη λόγω των αρνητικών επιπτώσεων στο δίκτυο. Αν μια ανεμογεννήτρια μεταβλητών στροφών αποσυνδεθεί από το δίκτυο εξαιτίας ενός σχετικά μικρού βυθίσματος τάσης, τότε ένα μεγάλο ποσό της παραγόμενης ενέργειας ενδέχεται να χαθεί. Μια τέτοια κατάσταση μπορεί να προκύψει όταν συμβεί ένα σφάλμα στο δίκτυο μετάδοσης με υψηλή τάση, με αποτέλεσμα να προκληθεί ένα βύθισμα τάσης σε μια μεγάλη γεωγραφική περιοχή. Το γεγονός αυτό μπορεί να οδηγήσει σε σοβαρά προβλήματα που σχετίζονται με την ισορροπία ισχύος στη συγκεκριμένη περιοχή ελέγχου ή ακόμα και σε επίπεδο συστήματος.

Για το λόγο αυτό, οι εταιρείες ηλεκτρισμού με μεγάλη διείσδυση αιολικής ενέργειας έχουν αναθεωρήσει τις απαιτήσεις σύνδεσης στο δίκτυο για τις ανεμογεννήτριες και πλέον απαιτούν οι ανεμογεννήτριες να παραμένουν συνδεδεμένες με το δίκτυο κατά τη διάρκεια σφαλμάτων. Σήμερα, οι περισσότερες ανεμογεννήτριες μεταβλητών στροφών δεν είναι εξοπλισμένες με ελεγκτές ρεύματος που έχουν δυνατότητα λειτουργίας μετά από βυθίσματα τάσης. Όμως, η επίλυση των προβλημάτων που προκύπτουν από την αλληλεπίδραση των ανεμογεννητριών με το δίκτυο δεν γίνεται μόνο με την εγκατάσταση των κατάλληλων ελεγκτών ρεύματος.

Όταν εκκαθαριστεί το σφάλμα, οι ανεμογεννήτριες μεταβλητών στροφών πρέπει να συνεχίσουν την κανονική λειτουργία τους. Οι επιλογές για την επιστροφή στην κανονική λειτουργία είναι ποικίλες και δεν επηρεάζονται από τα εσωτερικά χαρακτηριστικά των γεννητριών. Για παράδειγμα, μια λύση θα ήταν η παραγωγή επιπλέον ποσοτήτων αέργου ισχύος όταν η τάση αρχίζει να αυξάνεται και πάλι, έτσι ώστε να επιταχυνθεί η αποκατάσταση της τάσης.

Η αποσύζευξη της μηχανικής συχνότητας του δρομέα και της ηλεκτρικής συχνότητας του δικτύου στις ανεμογεννήτριες μεταβλητών στροφών επηρεάζει την απόκριση των ανεμογεννητριών αυτών στις μεταβολές συχνότητας. Δηλαδή, αν η ηλεκτρική συχνότητα του δικτύου αλλάξει λόγω αναντιστοιχίας μεταξύ παραγωγής και φορτίου, η μηχανική συχνότητα του δρομέα δεν αλλάζει. Συγκεκριμένα, οι ηλεκτρονικοί μετατροπείς ισχύος αντισταθμίζουν τις αλλαγές στη ηλεκτρική συχνότητα του δικτύου και συνεπώς η μηχανική συχνότητα του δρομέα δεν επηρεάζεται. Επίσης, θα ήταν δυνατόν να εξοπλιστούν οι ανεμογεννήτριες μεταβλητών στροφών με επιπρόσθετους ελεγκτές, ώστε να μεταβάλλουν την ενεργό ισχύ της γεννήτριας ανάλογα με τη μετρούμενη τιμή της συχνότητας του δικτύου. Τότε η απόκρισή τους θα ήταν παρόμοια με την εσωτερική συμπεριφορά των γεννητριών που συνδέονται απευθείας με το δίκτυο, φυσικά εντός των ορίων που καθορίζονται από την πραγματική τιμή της ταχύτητας του ανέμου [15].

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η ανεμογεννήτρια μεταβλητών στροφών με επαγωγική γεννήτρια διπλής τροφοδοσίας περιλαμβάνει ηλεκτρονικό μετατροπέα ισχύος συνδεδεμένο στον δρομέα, ο οποίος μπορεί να ρυθμίσει την ταχύτητα του δρομέα με σκοπό τη μέγιστη εξαγωγή ισχύος από τον άνεμο και να ρυθμίσει την άεργο ισχύ που παρέχεται στο δίκτυο.

Η ανεμογεννήτρια μεταβλητών στροφών με σύγχρονη γεννήτρια μόνιμου μαγνήτη συνδέεται στο δίκτυο μέσω ηλεκτρονικών μετατροπέων ισχύος. Οι μετατροπείς αυτοί μπορούν να ρυθμίσουν την άεργο ισχύ που παρέχεται στο δίκτυο και να προσαρμόσουν την ταχύτητα του δρομέα ώστε η ανεμογεννήτρια να εξάγει τη μέγιστη ισχύ από τον άνεμο.

Οι ανεμογεννήτριες μεταβλητών στροφών με σύγχρονες γεννήτριες μόνιμου μαγνήτη και ηλεκτρονικούς μετατροπείς ισχύος, παρουσιάζουν περισσότερες δυνατότητες ελέγχου από τις ανεμογεννήτριες μεταβλητών στροφών με επαγωγικές γεννήτριες διπλής τροφοδοσίας (επαγωγικές γεννήτριες δακτυλιοφόρου δρομέα με ηλεκτρονικούς μετατροπείς ισχύος). Οι συγκεκριμένες δυνατότητες ελέγχου καθιστούν εφικτή τη βελτίωση της δυναμικής συμπεριφοράς των ανεμογεννητριών και συνεπώς την ενσωμάτωση των αιολικών πάρκων στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας. Συγκεκριμένα, μπορούν να βοηθήσουν στην αντιμετώπιση των διαταραχών που συμβαίνουν στο δίκτυο (όπως βυθίσματα τάσης, τριφασικά βραχυκυκλώματα κλπ.) με τις ανεμογεννήτριες να διατηρούν την ευστάθεια τους και τα αιολικά πάρκα να έχουν περιορισμένη επίδραση στο δίκτυο.

Η δυναμική συμπεριφορά της κάθε ανεμογεννήτριας εξαρτάται από τα συγκεκριμένα χαρακτηριστικά που διαθέτει και η αξιολόγηση της συμπεριφοράς της απαιτεί μια λεπτομερή ανάλυση λαμβάνοντας υπόψη κάποιους βασικούς παράγοντες. Στους παράγοντες αυτούς συμπεριλαμβάνονται μεταξύ άλλων οι ηλεκτρικές παράμετροι της μηχανής, η αριθμητική τιμή της σταθεράς αδράνειας, τα συστήματα προστασίας, η

ονομαστική ισχύς των ηλεκτρονικών μετατροπέων ισχύος και το σύστημα ελέγχου τους, η χρήση ενός γρήγορου ελέγχου βήματος πτερυγίων, καθώς και η ύπαρξη μεγάλων αντιστάσεων που καταναλώνουν μεγάλες ποσότητες ισχύος όταν συμβαίνουν βυθίσματα τάσης. Επιπρόσθετα, διάφορες συσκευές μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε συνδυασμό με τις ανεμογεννήτριες μεταβλητών στροφών, ώστε να βελτιώσουν τη δυναμική συμπεριφορά των αιολικών πάρκων. Παραδείγματα τέτοιων συσκευών είναι τα ευέλικτα συστήματα μεταφοράς με εναλλασσόμενο ρεύμα (FACTS) η κατανεμημένη παραγωγή στα δίκτυα διανομής, τα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας και οι συσκευές περιορισμού των ρευμάτων βραχυκύκλωσης.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] International Electrotechnical Commission (IEC), Grid Integration of large capacity Renewable Energy sources and use of large-capacity Electrical Energy Storage, October 2012
- [2] Ι. Καμπούρης, Διευθυντής ανάπτυξης συστήματος ΔΕΣΜΗΕ “ Εφαρμογές και προβλήματα διείσδυσης μεγάλης κλίμακας, Χαλκίδα 2009 ”
- [2.1] http://eletaen.gr/wp-content/uploads/2015/06/2015-June_-HWEA_Statistics_Greece.pdf
- [2.2] <http://eletaen.gr/wp-content/uploads/2017/10/174-%CE%95%CF%80%CE%B9%CF%83%CF%84%CE%BF%CE%BB%CE%AE-%CE%95%CE%9B%CE%95%CE%A4%CE%91%CE%95%CE%9D-%CF%83%CE%B5-%CE%91%CE%BD-%CE%A5%CE%A0%CE%95%CE%9D-%CE%B3%CE%B9%CE%B1-%CE%91%CE%A0-15-10-2017.pdf>
- [3] ΕΛΟΤ EN 61000.03.03:1996 Ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα (EMC) – Μέρος 3 : Όρια-Τμήμα2: όρια εκπομπής για αρμονικές ρεύματος
- [4] Σ. ΜΑΝΙΑΣ, “Ηλεκτρονικά Ισχύος”, Εκδόσεις Συμμεών, 2007.
- [5] S. Kim, and E. Kim, “PSCAD/EMTDC – Based modeling and analysis of a gearless variable speed wind turbine”, IEEE Trans. On Energy Conversion, Vol. 22, no. 2, pp. 421-430, June 2007
- [6] International Electrotechnical Commission (IEC), Grid Integration of large-capacity Renewable Energy sources and use of large-capacity Electrical Energy Storage, October 2012

[7] European Wind Energy Association (EWEA), Powering Europe: wind energy and the electricity grid, November 2010

[8] H. Slootweg, E. de Vries, “Fixed vs. Variable”, Renewable Energy World, January-February 2003

[9] ΕΛΟΤ EN 61000.03.03:1996 Ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα (EMC) – Μέρος 3: Όρια-Τμήμα2: όρια εκπομπής για αρμονικές ρεύματος

[10] Α. Χανιώτης, Διδακτορική διατριβή “ανάπτυξη, προσομοίωση και κατασκευή συστήματος ελέγχου ανεμογεννήτριας μεταβλητών στροφών με γεννήτρια μόνιμων μαγνητών για απομονωμένη και διασυνδεδεμένη λειτουργία”

[11] L. H. Hansen, L. Helle, F. Blaabjerg, E. Ritchie, S. Munk-Nielsen, H. Bindner, P. Sørensen, B. Bak-Jensen, “Conceptual survey of generators and power electronics for wind turbines”, Risø National Laboratory, Roskilde, Denmark, December 2001.

[12] <http://centurionenergy.net/types-of-wind-turbines>

[13] https://en.wikipedia.org/wiki/Wind_power

[14] <http://centurionenergy.net/types-of-wind-turbines>

[15] Thomas Ackermann, Wind power in power systems, John Willey and Sons, 2005

[16] Κάραλης Γεώργιος, Βασικές Γνώσεις Αιολικής Ενέργειας, Ακαδημία Ενέργειας, 2013

[17] https://en.wikipedia.org/wiki/Wind_power

[18] Magdi Ragheb and Adam M. Ragheb, Wind Turbines Theory - The Betz Equation and Optimal Rotor Tip Speed Ratio, 2011

[19] Αλεξανδρίδης Αντώνιος, Τεχνολογίες Ελέγχου στα Αιολικά Συστήματα, Πανεπιστήμιο Πατρών, 2010

[20] Nantao Huang, Simulation of Power Control of a Wind Turbine Permanent Magnet Synchronous Generator System, Master Thesis, Marquette University, August 2013

[21] Vijay Vittal, Raja Ayyanar, Grid Integration and Dynamic Impact of Wind Energy, Springer, 2013

[22] T.R. Ayodele, A.A. Jimoh, J.L Munda, J.T Agee, Challenges of Grid Integration of Wind Power on Power System Grid Integrity: A Review, INTERNATIONAL JOURNAL of RENEWABLE ENERGY RESEARCH, 2012