

## ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

### "Διαχείριση και Ενεργειακή Βελτιστοποίηση Συστημάτων"

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**«Κώδικες δικτύων και ρύθμιση συχνότητας μέσω  
υπεράκτιων αιολικών πάρκων»**

***«Grid codes and frequency control through offshore wind  
plants»***

Του Μεταπτυχιακού Φοιτητή

**Ταβουλάρη Νικόλαου**

Επιβλέπων: Σπύρος Τσιώλης, Καθηγητής Εφαρμογών,

Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών Τ.Ε

---

Αιγάλεω, Ιούνιος 2017

Copyright ©Ταβουλάρης Νικόλαος, 2017

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες στον επιβλέποντα καθηγητή μου κύριο Σπύρο Τσιώλη για την βοήθεια και την ιδιαίτερη κατανόηση που έδειξε στις ιδιαίτερες συνθήκες και απαιτήσεις κάτω από τις οποίες γράφτηκε η συγκεκριμένη εργασία, καθώς και στους υπόλοιπους καθηγητές του μεταπτυχιακού, για τις γνώσεις τους τις οποίες απλόχερα μοιράστηκαν μαζί μου. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου που όλα αυτά τα χρόνια μου προσέφεραν τα πάντα ώστε εγώ να είμαι συγκεντρωμένος στις υποχρεώσεις μου, μιας και που οι σπουδές μου τελειώνουν λογικά κάπου εδώ. Οι σπουδές, διότι η μάθηση δεν σταματά ποτέ. Τέλος, θα ήθελα να πω ένα μεγάλο ευχαριστώ και μπράβο στην γυναίκα μου Χριστίνα, η οποία με στήριξε πάρα πολύ όλα αυτά τα χρόνια που διήρκεσαν οι μεταπτυχιακές μου σπουδές, αναλαμβάνοντας σχεδόν πλήρως τις υποχρεώσεις της οικογένειας μας η οποία έχει την ευτυχία να περιλαμβάνει και δύο αξιολάτρευτα παιδιά από τα οποία στέρησα αρκετό χρόνο μαζί τους ώστε να ολοκληρώσω τις σπουδές μου. Την Κατερίνα και το Γιώργο. Στην οικογένειά μου λοιπόν αφιερώνω αυτή την εργασία από τα βάθη της καρδιά μου...

Αθήνα, Ιούλιος 2017  
Ταβουλάρης Νικόλαος

## Περίληψη

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η θεωρητική ανάλυση της λειτουργίας ενός αιολικού πάρκου και πιο συγκεκριμένα ενός υπεράκτιου αιολικού πάρκου και η συνεισφορά αυτού στην ρύθμιση της ποιότητας του δικτύου μέσω της εφεδρείας ισχύος. Πιο αναλυτικά, αρχικά γίνεται μια εισαγωγή στο τομέα των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ) αναφέροντας κάποια στατιστικά στοιχεία σε σχέση κυρίως με την εγκατεστημένη ισχύ σε παγκόσμιο, ευρωπαϊκό αλλά και εθνικό επίπεδο. Στοιχεία που αρχικά αφορούν γενικά όλες τις μορφές ΑΠΕ, καταλήγοντας στην αναφορά στοιχείων σε σχέση με την αιολική ενέργεια.

Περιγράφεται αναλυτικά η ανεμογεννήτρια, ξεκινώντας με μια ιστορική αναδρομή σχετικά με τις πρώτες μορφές εκμετάλλευσης του ανέμου από τον άνθρωπο. Έπειτα ακολουθεί μια ανάλυση όλων των χαρακτηριστικών του ανέμου καθώς και των μεθόδων που ακολουθούνται, όπως η κατανομή Weibull, ώστε να μπορεί να μετρηθεί ποιοτικά και να ελεγχθεί αν μπορεί να ευδοκιμήσει οικονομοτεχνικά η εγκατάσταση μιας ανεμογεννήτριας και κατ' επέκταση ενός αιολικού πάρκου σε ένα συγκεκριμένο γεωγραφικό σημείο. Στη συνέχεια περιγράφονται και συγκρίνονται τα είδη ανεμογεννητριών, για να καταλήξουμε στην λεπτομερή ανάλυση όλων των μερών μιας ανεμογεννήτριας οριζόντιου άξονα, η οποία και αποτελεί το πιο διαδεδομένο τύπο ανεμογεννήτριας αλλά και τον τύπο αυτό που χρησιμοποιείται κατά κόρον στα υπεράκτια αιολικά πάρκα. Στη συνέχεια έχουμε μια περιγραφή όλων αυτών των τύπων γεννητριών, συνεχούς και εναλλασσόμενου ρεύματος, που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή μιας ανεμογεννήτριας με αναφορά πέρα από τα χαρακτηριστικά τους και στα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα αυτών. Οι τεχνολογίες των γεννητριών αυτών και ο αεροδυναμικός έλεγχος μιας ανεμογεννήτριας, είναι οι τομείς με τους οποίους κλείνει το συγκεκριμένο κεφάλαιο

Εν συνεχεία, γίνεται πλήρης ανάλυση ενός υπεράκτιου αιολικού πάρκου το οποίο αποτελεί βασικό χαρακτηριστικό της συγκεκριμένης εργασίας. Η αρχή γίνεται με την περιγραφή του τί αποκαλείται υπεράκτιο αιολικό πάρκο και το πότε κρίνεται βιώσιμη η επένδυση και η εγκατάσταση ενός τέτοιου πάρκου και υπό ποιες προϋποθέσεις. Η βασική δυσκολία στην εγκατάσταση ενός τέτοιου τύπου αιολικού πάρκου είναι ο τρόπος πάκτωσης των ανεμογεννητριών μέσα στο υποθαλάσσιο περιβάλλον. Για αυτό και η αναφορά στους τρόπους πάκτωσης και τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα αυτών είναι αναλυτική. Πέρα από τα θετικά στοιχεία ενός υπεράκτιου αιολικού πάρκου, που ασφαλώς και έχουν να κάνουν κυρίως με το υψηλό αιολικό δυναμικό, υπάρχουν και αρνητικά, όπως η οπτική και η ακουστική όχληση στα οποία επίσης γίνεται αναφορά.

Οι κώδικες δικτύων αποτελούν αναγκαιότητα για την επίτευξη ομαλής σύνδεσης ενός υπεράκτιου αιολικού πάρκου με το ηπειρωτικό δίκτυο και την χρησιμοποίησή του στην σταθερότητα και την ποιότητα του δικτύου. Για αυτό ακριβώς το λόγο, στο κεφάλαιο που έπεται, γίνεται ανάλυση των κωδικών δικτύου ξεκινώντας από την ανάγκη γέννησής τους και

συνεχίζοντας με την αναφορά ξεχωριστά σε όλους τους κώδικες των χωρών με αυξημένη αιολική διείσδυση αλλά και στον ενιαίο ευρωπαϊκό κώδικα (ENTSO-E), τις τεχνικές απαιτήσεις που προβλέπονται για τα υπεράκτια αιολικά πάρκα καθώς και τις απαιτήσεις σχετικά με την ρύθμιση συχνότητας, τάσης και ανάγκης παραμονής σε σύνδεση στην περίπτωση σφάλματος στο δίκτυο.

Στη συνέχεια, έχουμε την θεωρητική ανάλυση των HVDC πολυτερματικών δικτύων η οποία ξεκινάει με την ιστορική αναδρομή στα δίκτυα HVDC και την ανάγκη ανάπτυξης αυτών. Έπειτα, γίνεται αναφορά στις τεχνικές οι οποίες χρησιμοποιούνται όπως η HVDC Classic και η HVDC Light καθώς και στα είδη των μετατροπέων, δηλαδή στους μετατροπείς πηγής ρεύματος [Current Source Converters- CSC-HVDC] καθώς και στους μετατροπείς πηγής τάσης [Voltage Source Converters- VSC-HVDC. Μεγαλύτερο βάρος ασφαλώς, δίνεται στο μετατροπέα πηγής τάσης λόγω του πλεονεκτήματος του άμεσου ελέγχου, συνέπεια του διακοπτικού στοιχείου που χρησιμοποιεί σε σχέση με τον μετατροπέα πηγής ρεύματος, το IGBT. Η ανάλυση των τεχνικών χαρακτηριστικών αυτών των μετατροπέων καθώς και τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα αυτών είναι αυτά που ακολουθούν στη συνέχεια, με τις τοπολογίες των πολυτερματικών δικτύων να έπονται δίνοντας έμφαση σε αυτές που έχουν μεγάλη απήχηση στις συνδέσεις υπεράκτιων αιολικών πάρκων. Κλείνοντας, αναφερόμαστε στους τρόπους συγχρονισμού ενός μετατροπέα με το υπόλοιπο δίκτυο.

Η εργασία αυτή κλείνει με το κεφάλαιο που στην ουσία αποτελεί το αντικείμενο αυτής της εργασίας, δηλαδή την αναφορά στην εφεδρεία και την ρύθμιση συχνότητας δικτύου μέσω αυτής. Αρχικά αναφερόμαστε στους τρόπους με τους οποίους πετυχαίνεται η εφεδρεία ισχύος σε επίπεδο ανεμογεννήτριας και ολόκληρου του αιολικού πάρκου. Στην συνέχεια αναφέρονται και τα πλεονεκτήματα που μπορεί να επιφέρει σε ένα αιολικό πάρκο η συμμετοχή του στην ρύθμιση του δικτύου για τον επενδυτή. Ο τρόπος με τον οποίο ρυθμίζεται η συχνότητα ενός δικτύου μέσω της εφεδρείας και πιο συγκεκριμένα η παροχή ενεργούς ισχύος στο δίκτυο ελέγχεται μέσω της αδρανειακής πρωτογενούς απόκρισης και της δευτερογενούς απόκριση συχνότητας ή αλλιώς αυτόματη ρύθμιση παραγωγής (AGC) από ένα σύστημα ελέγχου το οποίο είναι συνήθως κεντρικό σε επίπεδο αιολικού πάρκου ή σε επίπεδο ανεμογεννήτριας. Ακολουθούν τα είδη εφεδρείας όπως η Στρεφόμενη Εφεδρεία και η Ποσοστιαία Εφεδρεία καθώς και η τρόποι αποφόρτισης μιας ανεμογεννήτριας που δεν είναι άλλοι από τη μεταβολή της γωνίας βήματος (Pitch control) και τη μεταβολή της ταχύτητας περιστροφής του δρομέα της γεννήτριας.

#### **Λέξεις κλειδιά:**

Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, ανεμογεννήτρια, γεννήτρια παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, υπεράκτιο αιολικό πάρκο, κώδικες δικτύων, HVDC πολυτερματικό δίκτυο, εφεδρεία ισχύος, ρύθμιση συχνότητας.

## Executive Summary

This thesis investigates theoretically the operation of an offshore wind plant and the contribution of it in regulation of the quality of the grid, through power reserve. In particular, at the beginning of this thesis we have an introduction in the renewable energy resources with some statistics of the installed capacity worldwide, in Europe and finally in Greece.

The next chapter, analyzes the wind turbine, starting with an historical view of the first wind application in humanity. Then is the analysis of all the wind characteristics and methods that are used, such as the Weibull distribution, so that it can be measured the quality of the wind in a specific geographical point in order to have a verdict about if the installation of the wind plant is advantageous or not. The types of wind turbines are then described and compared in order to arrive at the detailed analysis of all parts of a wind turbine horizontal axis, which is the most common type of wind turbine and also the type used in the offshore wind farms. Then we have a description of all these types of DC and AC generators used to construct a wind turbine with reference to their characteristics and advantages and disadvantages. The technologies of these generators and the aerodynamic control of a wind turbine are the areas with which this chapter closes.

Then, take a full analysis of an offshore wind farm that is a key feature of this work. The beginning comes with the description of what is called offshore wind park and when you consider the investment and installation of such a park viable and under what conditions. The basic difficulty in installing such a wind farm is the way of anchoring wind turbines in the underwater environment. For this reason, reference to the methods of anchoring and their advantages and disadvantages is analytical. Apart from the positive elements of an offshore wind park, which certainly have to do with the high wind potential, there are also negative ones, such as visual and acoustic nuisances, which are also referred to.

Network codes are a necessity for achieving a smooth connection of an offshore wind park with the continental network and using it for network stability and quality. That is why, in the following chapter, an analysis of the network codes is made, starting with the need for their birth, and continuing with the petition separately in all codes of the countries with increased wind penetration. The technical requirements for offshore wind farms as well as the requirements for frequency, voltage and need for low-voltage ride through (LVRT).

After that, we have the theoretical analysis of HVDC multi-terminals networks, which starts with the historical retrospection of HVDC networks and the need to develop them. Also refer to the techniques used as HVDC Classic and HVDC Light as well as to the types of inverters, namely the Current Source Converters (CSC-HVDC) and the Voltage Source Converters (VSC) -HVDC. Big importance of course, is given to the voltage source converter due to the advantage of direct control, a consequence of the switching element it uses with respect to the power source converter, the IGBT. The analysis of the technical characteristics of these inverters as well as the advantages

and disadvantages of these converters are those that follow, with the topologies of the polyterminal networks being followed by emphasizing those that have a great impact on the offshore wind farms. At the end, we refer to ways to synchronize an inverter with the rest of the network.

This work closes with the chapter that is essentially the subject of this thesis, namely the reference to the reserve and the network frequency setting through it. Initially we are talking about ways to achieve the power reserve at wind turbine level and the entire wind farm, then mentioning the advantages for the investor that a wind park can bring by participating in network regulation. The way in which the frequency of a network through the reserve and more specifically the provision of active power to the grid is controlled by means of the inertial primary response and the secondary frequency response or otherwise AGC, by a control system which is usually central at wind farm level or at wind turbine level. Here are the backup types such as Turning Reserve and Percent Reserve and the modes of discharging a wind turbine that are not other than Pitch Control and the rotation speed change of the generator rotor.

**Keywords:**

Renewable energy sources, wind turbine, power generator, offshore wind park, network codes, HVDC multi-terminal network, power reserve, frequency setting.

# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Περίληψη .....	1
Executive Summary.....	3
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ .....	5
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 <sup>ο</sup> .....	8
«ΕΙΣΑΓΩΓΗ» .....	8
1.1 Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ).....	8
1.2 Αιολική Ενέργεια.....	11
1.2.1. Δημιουργία και χαρακτηριστικά ανέμου .....	11
1.3 Η αιολική ενέργεια στην Ελλάδα.....	15
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 <sup>ο</sup> .....	18
«ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ».....	18
2.1 Εισαγωγή στις ανεμογεννήτριες.....	18
2.1.1. Γενικά.....	18
2.1.2. Πυκνότητα ισχύος του ανέμου.....	19
2.2 Μεταβολή των χαρακτηριστικών του ανέμου .....	22
2.2.1. Μεταβολή με το χρόνο.....	22
2.2.2. Μεταβολή με το ύψος .....	24
2.3 Κατανομή Weibull.....	27
2.4 Πλεονεκτήματα-Μειονεκτήματα ανά κατηγορία ανεμογεννητριών .....	29
2.5 Περιγραφή ανεμογεννητριών οριζόντιου άξονα.....	32
2.4.1. Γενικά.....	32
2.6 Τεχνολογίες γεννητριών .....	37
2.5.1. Γενικά.....	37
2.5.2. Οι γεννήτριες συνεχούς ρεύματος (DC generators).....	39
2.5.3. Οι σύγχρονες γεννήτριες εναλλασσόμενου ρεύματος (AC synchronous generators) .....	40
2.5.4. Οι ασύγχρονες γεννήτριες εναλλασσόμενου ρεύματος (AC asynchronous generators).....	43
2.5.5. Οι γεννήτριες μαγνητικής αντίστασης WTG.....	48
2.7 Τεχνολογίες ανεμογεννητριών .....	49
2.6.1. Γενικά χαρακτηριστικά ανεμογεννητριών σταθερών και μεταβλητών στροφών .....	49
2.6.2. Ανεμογεννήτρια σταθερών στροφών – Τύπος Α.....	50
2.6.3. Ανεμογεννήτρια περιορισμένων μεταβλητών στροφών – Τύπος Β.....	51



2.6.4.	Ανεμογεννήτρια μεταβλητών στροφών με μερικώς ελεγχόμενο μετατροπέα– Τύπος Γ .....	52
2.6.5.	Ανεμογεννήτρια μεταβλητών στροφών με πλήρως ελεγχόμενο μετατροπέα– Τύπος Δ .....	54
2.8	Αεροδυναμικός έλεγχος ανεμογεννήτριας.....	55
2.7.1.	Έλεγχος γωνίας βήματος πτερυγίων - pitch control .....	55
2.7.2.	Παθητικός έλεγχος απώλειας στήριξης - passive stall control .....	56
2.7.3.	Ενεργητικός έλεγχος απώλειας στήριξης - passive stall control.....	57
2.7.4.	Λιγότερο διαδεδομένοι τρόποι ελέγχου της απώλειας στήριξης .....	58
	ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3° .....	59
	«ΥΠΕΡΑΚΤΙΑ ΑΙΟΛΙΚΑ ΠΑΡΚΑ».....	59
3.1	Γενικά .....	59
3.2	Θεμελίωση ανεμογεννητριών σε υπεράκτια αιολικά πάρκα.....	61
3.2.1.	Τύποι θεμελίωσης .....	61
3.2.2.	Βασικές διαφορές χερσαίου αιολικού πάρκου και υπεράκτιου αιολικού πάρκου .....	62
3.2.3.	Θεμελίωση με πάκτωση μονού μεταλλικού σωλήνα (Monopile).....	62
3.2.4.	Θεμελίωση Βαρύτητας (Concrete gravity base structure - GBS) .....	63
3.2.5.	Θεμελίωση με πάκτωση τρίποδου μεταλλικού σωλήνα (Tripod Foundation).....	64
3.2.6.	Θεμελίωση με πάκτωση τετράποδου μεταλλικού σωλήνα (Jacket Foundation) .....	65
3.3	Πλωτές κατασκευές έδρασης .....	65
3.3.1.	Τύποι πλωτής κατασκευής έδρασης ανεμογεννητριών.....	66
3.4	Τοπολογίες σύνδεσης υπεράκτιων αιολικών πάρκων .....	68
3.4.1.	Σύνδεση με HVAC.....	70
3.5	Περιβαντολογικές επιπτώσεις υπεράκτιων αιολικών πάρκων .....	71
3.5.1.	Οπτική όχληση.....	72
3.5.2.	Ακουστική όχληση.....	72
	ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4° .....	75
	«ΚΩΔΙΚΕΣ ΔΙΚΤΥΩΝ» .....	75
4.1	Εισαγωγή.....	75
4.2	Κώδικες χωρών με την μεγαλύτερη διεύθυνση αιολικής ενέργειας .....	77
4.3	ENTSO-e .....	81
4.4	Γενικά χαρακτηριστικά κωδικών δικτύου.....	82
4.5	Τεχνικές απαιτήσεις κωδικών στην διασύνδεση υπεράκτιων αιολικών πάρκων .....	82
4.5.1.	Σημείο Κοινής Σύνδεσης (PCC-Point of Common Connection).....	83
4.5.2.	Η ανάγκη για παραμονή σε σύνδεση – Ενεργός ισχύς .....	85

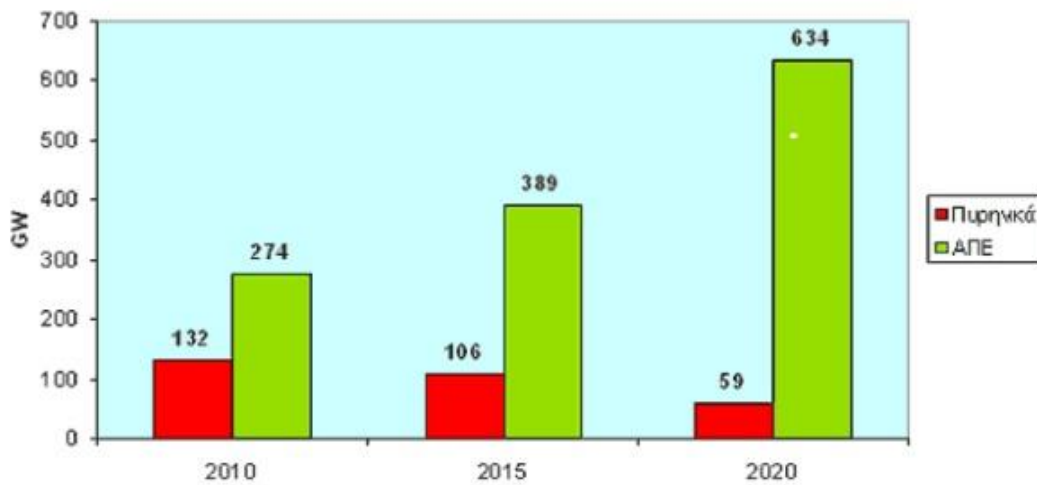
4.5.3.	Η ανάγκη για παραμονή σε σύνδεση – Άεργός ισχύς.....	87
4.5.4.	Σύνδεση ουδετέρου και διαστασιολόγηση μετασχηματιστών βάσει TenneT.....	88
4.5.5.	Συστήματα προστασίας.....	89
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5° .....		90
«Πολυτερματικά Δίκτυα HVDC ».....		90
5.1	Εισαγωγή.....	90
5.2	Μετατροπείς VSC-HVDC και CSC-HVDC.....	92
5.3	HVDC Τοπολογίες.....	95
5.4	Δομικές Συνιστώσες Δικτύου VSC – HVDC.....	105
5.4.1.	Εισαγωγικά .....	105
5.4.2.	Είδη μετατροπέων με βάση την λειτουργία τους σε σχέση με το δίκτυο.....	106
5.5	Μέθοδος συγχρονισμού με το δίκτυο SRF-PLL .....	109
5.5.1.	Εισαγωγικά .....	109
5.5.2.	Μέθοδος SRF PLL για συγχρονισμό μετατροπέα με το δίκτυο .....	110
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6° .....		113
«Εφεδρεία ισχύος και ρύθμιση συχνότητας».....		113
6.1	Εισαγωγή.....	113
6.2	Γενικά περί απόκριση συχνότητας .....	116
6.2.1.	Βασικές αρχές ρύθμισης συχνότητας.....	116
6.2.2.	Κίνητρα ελέγχου ενεργής ισχύος από ανεμογεννήτριες .....	118
6.2.3.	Αιολική βιομηχανία και έλεγχος ενεργούς ισχύος.....	119
6.3	Ρύθμιση συχνότητας δικτύου μέσω ανεμογεννητριών .....	120
6.3.1.	Γενικά.....	120
6.3.2.	Αδρανειακή και πρωτογενής απόκριση .....	122
6.3.3.	Δευτερογενής απόκριση συχνότητας ή αυτόματη ρύθμιση παραγωγής (AGC) .....	125
6.4	Εφεδρεία και αιολικά συστήματα .....	129
6.4.1.	Είδη εφεδρείας στα αιολικά πάρκα.....	129
6.4.2.	Τεχνικές αποφόρτισης των ανεμογεννητριών.....	131
Βιβλιογραφία .....		136

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1<sup>ο</sup>

## «ΕΙΣΑΓΩΓΗ»

### 1.1 Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ)

Είναι πλέον κάτι παραπάνω από γνωστό σε όλο σχεδόν τον υγιές σκεπτόμενο κόσμο πως η μοναδική λύση ώστε να σωθεί ο πλανήτης μας χωρίς παράλληλα να αλλάξει δραματικά η ποιότητα ζωής του ανεπτυγμένου κόσμου, είναι η στροφή στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ). Ως ΑΠΕ ορίζονται εκείνες οι ενεργειακές πηγές όπου βρίσκονται σε αφθονία στο πλανήτη γη με σημαντικότερες από αυτές ο ήλιος, το νερό και οι υδατοπτώσεις. Η στροφή προς αυτή τη κατεύθυνση θεωρείται αναγκαία για πολλούς και ποικίλους λόγους με έναν από αυτούς να αποτελεί και η μείωση της πυρηνικής ενέργειας όπως απεικονίζει και το σχήμα 1.1.

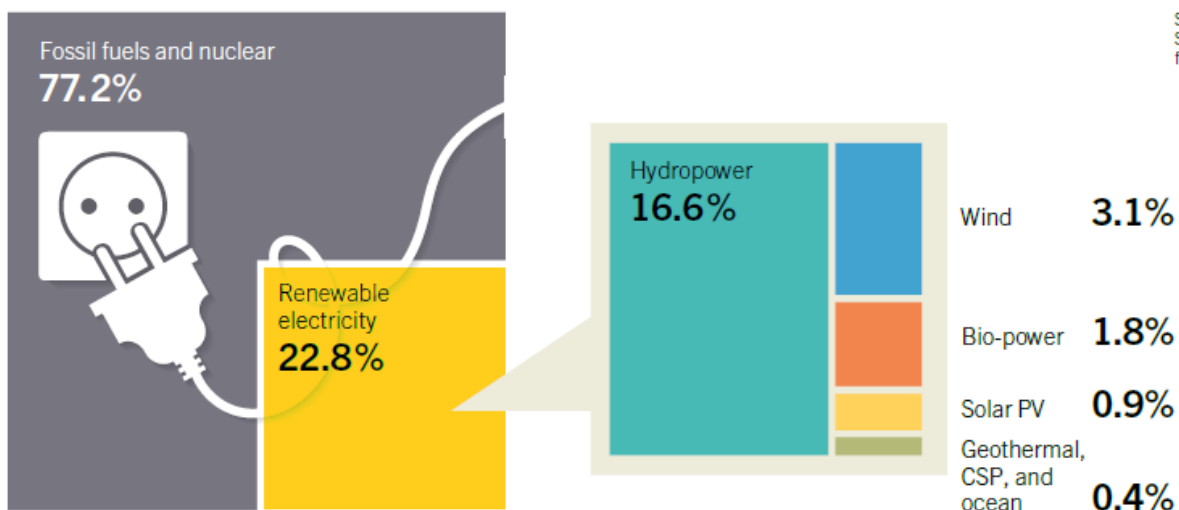


*Σχ. 1.1 Εξέλιξη εγκατεστημένης ισχύος πυρηνικών και ΑΠΕ σύμφωνα με το πλάνο της Greenpeace (Ενεργειακή επανάσταση)*

Ο πρώτος λόγος ασφαλώς είναι η αναγκαιότητα για νέες πηγές ενέργειας μιας και οι συμβατικές πηγές, όπως τα ορυκτά καύσιμα, έχουν ημερομηνία λήξεως. Αυτό σε συνδυασμό με την όλο και μεγαλύτερη ζήτηση για ηλεκτρική ενέργεια, το καθιστούν σχεδόν μονόδρομο. Τα διαθέσιμα κοιτάσματα ολοένα και λιγοστεύουν και οι διαδικασίες εξόρυξης αυτών ολοένα και δυσκολεύουν, απαιτώντας βαθύτερες και απαιτητικότερες εξορύξεις. Ασφαλώς και η τεχνολογία σήμερα καθιστά αυτές τις ενέργειες πιο εφικτές σε σχέση με τα παλαιότερα χρόνια και οι έρευνες νέων κοιτασμάτων δίνουν ακριβή αποτελέσματα εκεί που στο παρελθόν η απόφαση για τη

βιωσιμότητα ή μη του κοιτάσματος ήταν αμφίβολη. Δεν παύει όμως να είναι μια διαδικασία που χρόνο με το χρόνο γίνεται ασύμφορη και λιγότερο αποδοτική. Αντιθέτως, οι ΑΠΕ και κυρίως η αιολική και η ηλιακή ενέργεια, θεωρούνται ανεξάντλητες. Αυτό διότι οι «πηγές» τους είναι αποτέλεσμα της κίνησης της γης, της ηλιακής ακτινοβολίας, της ανομοιομορφίας του εδάφους. Συνεπώς, όσο αυτοί οι παράγοντες είναι σε ισχύ, οι ΑΠΕ θα μπορούν να τροφοδοτούν την ανθρωπότητα με ενέργεια. Μόνο το αιολικό δυναμικό του πλανήτη μας υπολογίζεται στα  $3,616 \times 10^9$  MW.

Ο δεύτερος λόγος είναι ο παράγοντας μόλυνση. Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ορυκτά καύσιμα, συμβάλλει σημαντικά στην αύξηση του φαινομένου του θερμοκηπίου με τις γνωστές πλέον σε όλους συνέπειες. Ήδη ο πλανήτης βιώνει αυτή την κλιματική αλλαγή. Περίπου 325.000.000 συνάνθρωποι ανά το κόσμο επηρεάζονται ήδη από τα καιρικά φαινόμενα συνέπεια των κλιματικών αλλαγών [1]. Φυσικά φαινόμενα όπως οι ανεμοστρόβιλοι που ήταν άγνωστα την Ελλάδα, κάνουν όλο και πιο συχνά την εμφάνιση τους. Επίσης, η καύση αυτών των ορυκτών, όπως ο λιγνίτης για παράδειγμα, αλλά και η εξόρυξη τους, θεωρούνται σημαντικός παράγοντας για την εμφάνιση σοβαρών προβλημάτων υγείας, κυρίως στις περιοχές που λαμβάνουν χώρα αυτές οι δραστηριότητες. Οι ΑΠΕ από την πλευρά τους, έχουν μηδενικό περιβαλλοντικό αντίκτυπο, τουλάχιστον κατά την λειτουργία τους. Χρησιμοποιώντας οικολογικά υλικά κατά την κατασκευή τους, τα οποία με το πέρας της λειτουργίας τους θα ακολουθήσουν την διαδικασία της ανακύκλωσης, ελαχιστοποιούμε το περιβαλλοντικό τους αποτύπωμα γενικά στο κύκλο ζωής τους.

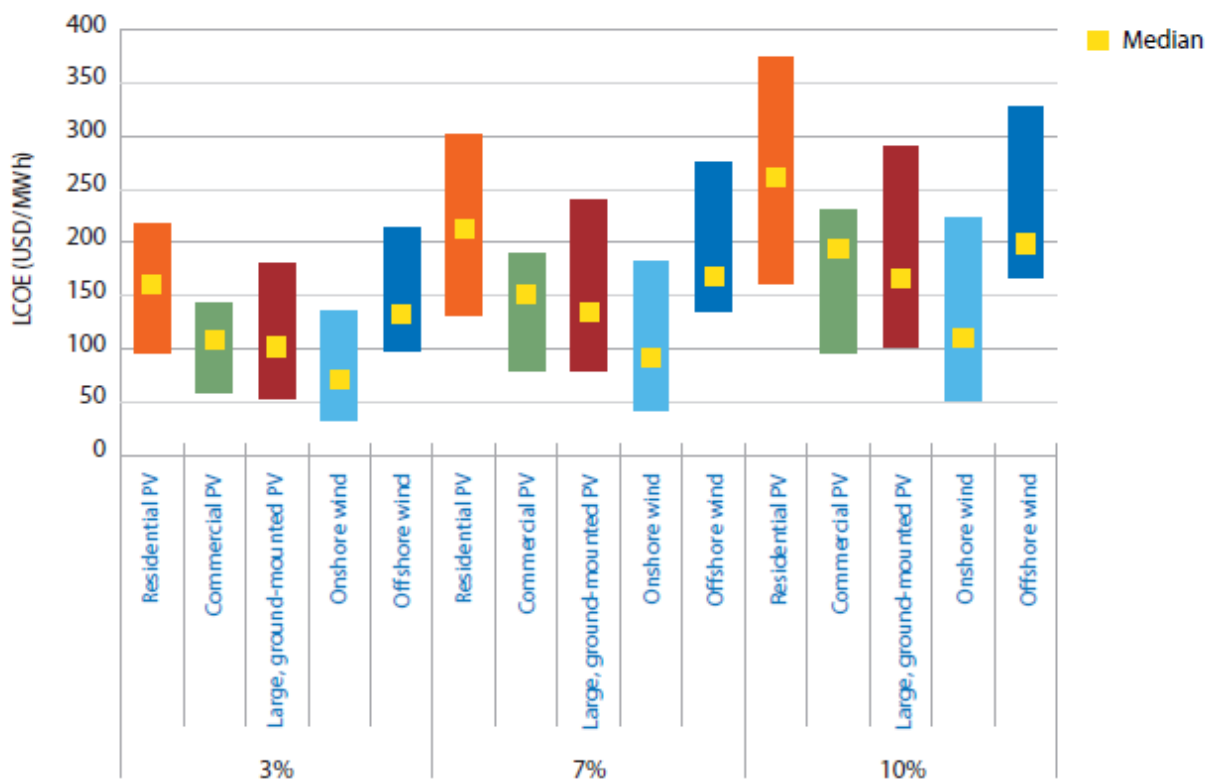


*Σχ 1.2. Εκτιμώμενο μερίδιο της παγκόσμιας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με βάση το είδος ΑΠΕ.*

Ως συνέπεια των παραπάνω, μπορούμε να αναφέρουμε σαν σημαντικό πλεονέκτημα των ΑΠΕ και κυρίως της αιολικής ενέργειας, την διαθεσιμότητά τους και την εφαρμογή τους στο

σύνολο των χωρών του πλανήτη. Είναι πολύ λίγες οι χώρες του πλανήτη που μπορούν να ισχυριστούν ότι στην επικράτειά τους δεν υπάρχει αιολικό δυναμικό ικανό για την λειτουργία αιολικού πάρκου. Ακόμα και αν δεν υπάρχει ή είναι πολύ μικρό, τότε σίγουρα κάποια άλλη μορφή ΑΠΕ θα έχει καλύτερη εφαρμογή όπως η ηλιακή ενέργεια για παράδειγμα. Στο σχήμα 1.2, περιγράφεται σχηματικά το εκτιμώμενο μερίδιο της παγκόσμιας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με βάση το είδος ΑΠΕ με το 22,8% της παγκόσμιας κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας να παρέχεται από ΑΠΕ με την αιολική να αποτελεί το 3,1%.

Επίσης, τα κράτη τα οποία καλύπτουν τις ενεργειακές τους ανάγκες από ΑΠΕ, μπορούν να θεωρηθούν ως ένα βαθμό ενεργειακά ανεξάρτητα. Όσο πιο μεγάλο είναι το ποσοστό της ενεργειακής ζήτησης που καλύπτεται μέσω ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, τόσο μεγαλύτερη είναι και η ενεργειακή τους ανεξαρτησία καθώς ανεξαρτητοποιεί έτσι το κόστος ενέργειας από τις διεθνείς διακυμάνσεις της τιμής των ορυκτών καυσίμων. Αυτό συμβάλει επίσης στην εξοικονόμηση πολύτιμων εθνικών πόρων χάρη στην υποκατάσταση εισαγόμενων ορυκτών καυσίμων.



Σχ 1.3. Παγκόσμια επίπεδα κόστους παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας για ηλιακά και αιολικά πάρκα

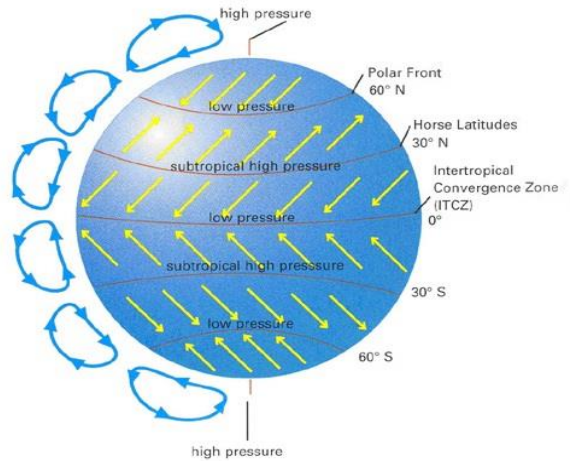
Η όλο και μεγαλύτερη ζήτηση για εγκατάσταση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, συμβάλλει στην μείωση του κόστους εγκατάστασης αυτών. Ασφαλώς η τιμή ανά εγκατεστημένο MW εξαρτάται και από άλλους παράγοντες όπως η τοπική διαθεσιμότητα των πόρων. Στη Γερμανία και στη Γαλλία σήμερα, τη φθηνότερη ενέργεια αποδεδειγμένα παράγουν τα αιολικά πάρκα [2]. Η τάση αυτή είναι αυξητική και οι χώρες όπου θα παράγουν την φθηνότερη ενέργεια οι ΑΠΕ ολοένα και θα αυξάνονται. Στο Σχήμα 1.3 φαίνεται το που κυμαίνονται τα κόστη εγκατάστασης ηλιακών και αιολικών πάρκων για τις διάφορες τεχνολογίες ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, δηλαδή τις τρεις κατηγορίες των ηλιακών φωτοβολταϊκών (κατοικίες, εμπορικά και μεγάλα, επί εδάφους) και τις δύο κατηγορίες του αιολικού (χερσαίες και υπεράκτιες). Η ανάλυση στο πλαίσιο αυτής της έκθεσης βασίζεται σε στοιχεία από 181 μονάδες σε 22 χώρες (συμπεριλαμβανομένης και τριών εκτός ΟΟΣΑ χωρών) και στην οποία μελετήθηκαν από οικονομικής άποψης δεκαεφτά (17) μονάδες φυσικού αερίου (δεκατρείς από αυτές συνδυασμένου κύκλου), ανεμογεννήτριες, τέσσερις (4) αεροστροβίλους ανοικτού κύκλου [OCGTs]), δεκατέσσερα (14) εργοστάσια άνθρακα, έντεκα (11) πυρηνικά εργοστάσια, τριάντα οχτώ (38) φωτοβολταϊκά πάρκα (PV) (12 οικιστικής κλίμακας, 14 εμπορικής κλίμακας, και 12 χερσαία μεγάλα), τέσσερα (4) ηλιακής θερμότητας (CSP), είκοσι ένα (21) παράκτια πάρκα αιολικής ενέργειας, δώδεκα (12) υπεράκτια πάρκα αιολικής ενέργειας, είκοσι οχτώ υδροηλεκτρικές μονάδες, έξι (6) γεωθερμικές μονάδες, έντεκα (11) μονάδες βιομάζας και μονάδες παραγωγής βιοαερίου και 19 συμπαραγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας (ΣΗΘ) διαφόρων τύπων.

Οι υπολογισμοί LCOE βασίζονται σε ένα μέσο όρο προσέγγισης του κόστους ζωής, χρησιμοποιώντας τη μέθοδο προεξοφλημένων ταμειακών ροών (DCF). Οι υπολογισμοί χρησιμοποιούν ένα συνδυασμό των γενικών όρων (ειδικών ανά χώρα), όπως συμφωνήθηκε από την ομάδα εμπειρογνομόνων EGC, για προβλεπόμενο κόστος της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.

## **1.2 Αιολική Ενέργεια**

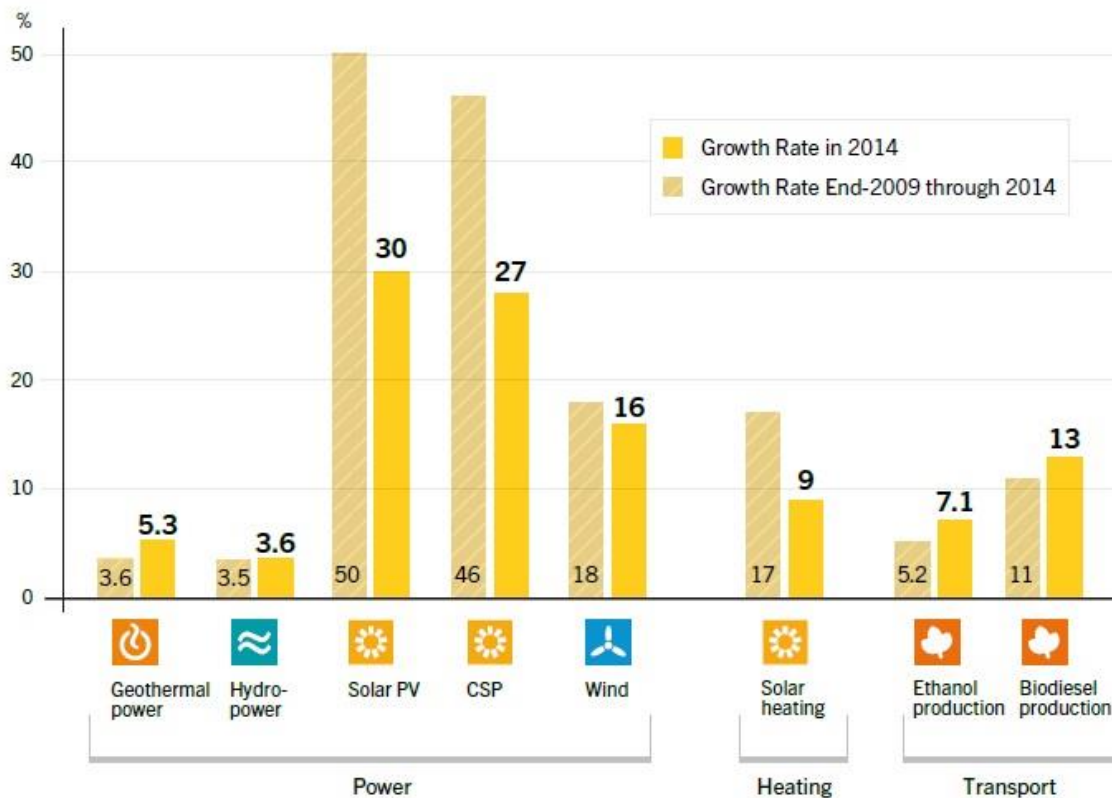
### **1.2.1. Δημιουργία και χαρακτηριστικά ανέμου**

Η θέρμανση της γης από τον ήλιο γίνεται με ανομοιόμορφο τρόπο. Σε κάθε σημείο της, η θερμότητα απορροφάτε από το έδαφος ή το νερό και με στη συνέχεια μεταφέρεται στον αέρα. Έτσι από την στιγμή που έχουμε σε διαφορετικές περιοχές πάνω στη γη, με διαφορετικές θερμοκρασίες αέρα, δημιουργούνται διαφορετικά αιολικά δυναμικά με αποτέλεσμα την κίνηση του αέρα. Η κίνηση αυτή του αέρα, ονομάζεται άνεμος ή αιολικό δυναμικό. Σε τοπικό επίπεδο, οι άνεμοι που δημιουργούνται από την διαφορά θερμοκρασίας του αέρα, ονομάζονται αύρες ή θερμικά. Σε παγκόσμια κλίμακα, οι διαφορές θερμοκρασίας μεταξύ των τροπικών και των πόλων, προκαλεί τους γνωστούς αληγείς ανέμους οι οποίοι απεικονίζονται γραφικά στο σχήμα 1.4.



Σχ 1.4. Αλληγείς άνεμοι

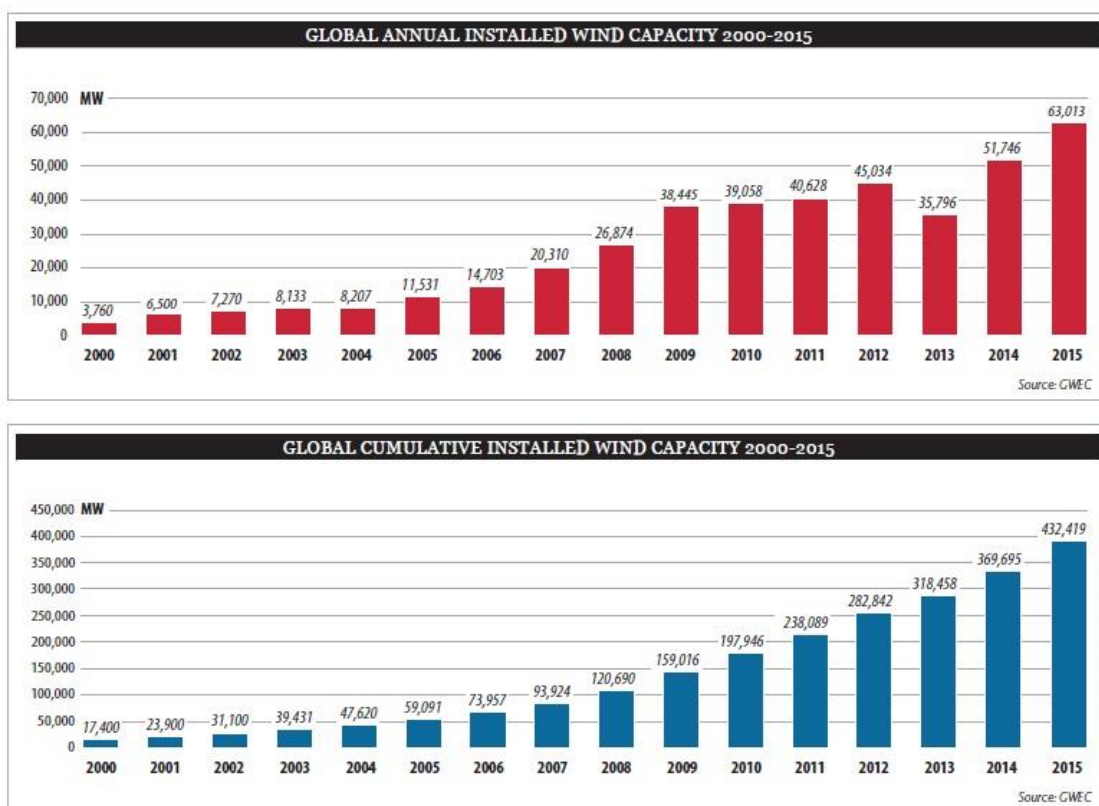
Οι άνεμοι αυτοί αποτελούν ένα μεγάλο εναλλάκτη θερμότητας μεταξύ των τροπικών και των πόλων της γης με αποτέλεσμα να αποτρέπεται η παραπάνω θέρμανση των τροπικών και η περαιτέρω ψύξη των πόλων. Τα χαρακτηριστικά του ανέμου, όπως η ταχύτητα και η κατεύθυνση επηρεάζονται και από άλλους παράγοντες όπως η περιστροφή της γης, τα τοπογραφικά χαρακτηριστικά και το είδος του εδάφους [9].



Σχ 1.5. Μέσος όρος ανάπτυξης διαφόρων μορφών ΑΠΕ την περίοδο 2009-2014 [3]

Η αιολική ενέργεια αποτελεί μαζί με την ηλιακή, τις πιο διαδεδομένες μορφές ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Ειδικότερα η αιολική ενέργεια ήταν η κύρια πηγή νέων παραγωγικών μονάδων ηλεκτρικής ενέργειας στην Ευρώπη και τις Ηνωμένες Πολιτείες το 2015, και η δεύτερη μεγαλύτερη στην Κίνα. Σε παγκόσμιο επίπεδο, είχαμε νέο ρεκόρ παγκόσμιας ετήσιας εγκατάστασης της τάξεως των 63 GW το οποίο προστέθηκε στην μέχρι εκείνη τη στιγμή παγκόσμια εγκατεστημένη αιολική ισχύ, δίνοντας το σύνολο των 433 GW περίπου στο τέλος του 2015. Στο σχήμα 1.5 απεικονίζεται ο μέσος όρος ανάπτυξης διαφόρων μορφών ΑΠΕ την περίοδο 2009-2014 με την αιολική ενέργεια να βρίσκεται στο 18% [3].

Η εκμετάλλευση της αιολικής ενέργειας είναι ένας τομέας γνωστός στο επιστημονικό κοινό εδώ και αρκετά χρόνια. Η αιολική ενέργεια ανήκει στις ήπιες ή ανανεώσιμες πηγές ενέργειας δεδομένου ότι αφενός δεν ρυπαίνει το περιβάλλον και αφετέρου είναι θεωρητικά ανεξάντλητη. Ο άνθρωπος από τα πολύ παλιά χρόνια χρησιμοποιούσε την αιολική ενέργεια για να καλυτερέψει το επίπεδο ζωής του. Χαρακτηριστικά παραδείγματα αποτελούν η πλεύση των καραβιών μέσω του ανέμου, τα γνωστά ιστιοφόρα, καθώς και οι ανεμόμυλοι.



**Σχ 1.6** Παγκόσμιες ετήσιες/αθροιστικές εγκατεστημένες ισχύεις αιολικών πάρκων [4]

Υπολογίζεται ότι στο 25% της επιφάνειας της γης και σε ύψος 10 m πάνω από το έδαφος επικρατούν άνεμοι μέσης ετήσιας ταχύτητας που ξεπερνά τα 5.1 m/sec. Σύμφωνα με τα σημερινά



δεδομένα, όταν η μέση ετήσια ταχύτητα του ανέμου ξεπερνά αυτήν την τιμή το αιολικό δυναμικό ενός τόπου θεωρείται ενεργειακά εκμεταλλεύσιμο και οι απαιτούμενες εγκαταστάσεις μπορούν να καταστούν οικονομικά βιώσιμες [5].

Όμως, στα πρώτα βήματα της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από αιολική, η τεχνολογία δεν ήταν σε τέτοιο βαθμό αποδοτική ώστε να γνωρίσει άμεσα ο κλάδος ραγδαία εξέλιξη. Ο μικρός βαθμός απόδοσης αλλά και το αβάσταχτο κόστος κατασκευής ήταν οι κύριοι λόγοι που απέτρεπαν την επένδυση στο τομέα αυτό. Με την πάροδο του χρόνου όμως και με δεδομένη την πίεση για στροφή σε εναλλακτικές πηγές ενέργειας, η επιστημονική κοινότητα έκανε τεράστια βήματα προόδου μετατρέποντας έτσι την αιολική ενέργεια σε ένα πολύ πρόσφορο πεδίο επένδυσης. Από τότε, κάθε χρόνο η εγκατεστημένη αιολική ισχύς αυξάνεται σχεδόν με αριθμητική πρόοδο με αποτέλεσμα σήμερα, χώρες όπως η Δανία, η Νικαράγουα, η Πορτογαλία και η Ισπανία, να παράγουν πάνω από το 20% της ηλεκτρικής τους ενέργειας από τον άνεμο. Ο ρυθμός αυτός ανάπτυξης σε ετήσιο επίπεδο αλλά και αθροιστικά περιγράφεται στο σχήμα 1.6 [3].

Τα τελευταία χρόνια, το κόστος κεφαλαίου της αιολικής ενέργειας μειώθηκε ραγδαία, όπως προαναφέραμε. Κύρια αιτία αυτού ήταν ο ανταγωνισμός των κατασκευαστών ανεμογεννητριών αλλά και η αύξηση της απόδοσης της ίδιας της μηχανής, η οποία έκανε την απόσβεση του κεφαλαίου σε πολύ μικρότερο χρονικό διάστημα. Η χερσαία εγκατάσταση αιολικής ισχύος, είναι πλέον σχεδόν ισότιμα αποδοτική ανά KWh σε σύγκριση με την παραγωγή από άνθρακα ή με αέριο ακόμα και χωρίς αντισταθμιστικά καθεστώτα στήριξης. Αυτό φυσικά δεν ισχύει ακόμη σε όλες τις χώρες της υφηλίου αλλά σε ένα μεγάλο μέρος της Ευρωπαϊκής Ένωσης (ΕΕ), την Αυστραλία, τη Βραζιλία, τη Χιλή, το Μεξικό, τη Νέα Ζηλανδία, τη Νότια Αφρική, τη Τουρκία και της Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής [3].

Σύμφωνα με το EWEA (European Wind Energy Association-EWEA), οι στόχοι της Ε.Ε για την αιολική ενέργεια μέχρι το 2020 είναι:

- Τα 230GW εγκατεστημένης ισχύος από τα οποία τα 40GW υπεράκτια
- Κάλυψη του 15.7–16.5% της Ευρωπαϊκής ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας.
- Παραγωγή 581 TWh ηλεκτρικής ενέργειας, ισοδύναμη με κατανάλωση 131 εκατ. μέσων Ευρωπαϊκών νοικοκυριών.
- Κάλυψη του 15.7–16.5% της Ευρωπαϊκής ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας.
- Ετήσιες εγκαταστάσεις 24.8 GW και ετήσιες επενδύσεις της τάξης των 26.6 δισ.€.
- Το 22.9% της ολικής ηλεκτρικής εγκατεστημένης ισχύος στην Ευρώπη να προέρχεται από αιολική ενέργεια.
- Αποφυγή 341.6 Mt CO<sub>2</sub>ετησίως
- Εξοικονόμηση κόστους καυσίμου 23.9 δισ.€ (υποθέτοντας κόστος πετρελαίου, όπως το προβλέπει ο IEA, ίσο με 97.4 \$ το βαρέλι) [13].

### 1.3 Η αιολική ενέργεια στην Ελλάδα

Η Ελλάδα αποτελεί μια από τις πρωτοπόρες χώρες στο τομέα εγκατάστασης της αιολικής ενέργειας. Η εγκατάσταση στην Κύθνο του πρώτου αιολικού πάρκου έγινε το 1982 και αποτελούταν από πέντε ανεμογεννήτριες των 20KW η κάθε μία η οποία σε συνδυασμό με γειτονικό φωτοβολταϊκό πάρκο της ίδια ισχύος και την γεννήτρια diesel του νησιού, αποτελούσε το πρώτο υβριδικό σύστημα wind-diesel-PV στον κόσμο. Με αυτό τον τρόπο επιτυγχάνεται έως και 25% διείσδυση στο δίκτυο του μη διασυνδεδεμένου αυτού νησιού [5].

Σήμερα στην Ελλάδα η εγκατεστημένη αιολική ισχύς φθάνει τα 2150,8MW από τα οποία 1828,2MW είναι σε διασυνδεδεμένο σύστημα, ενώ τα υπόλοιπα 322,6MW είναι σε μη διασυνδεδεμένα νησιά. Η κύρια στροφή της Ελλάδας στην αιολική ενέργεια έγινε το 2011 στα πλαίσια της λεγόμενης «πράσινης ανάπτυξης» όπου η τότε κυβέρνηση υπογράφει συμφωνία με κινέζικη εταιρία για τη δημιουργία αιολικού πάρκου της τάξεως των 200-300MW. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η κατασκευή του αιολικού πάρκου στη νήσο Κύθνο (σχήμα 1.7), συνολικής ισχύος 100KW 5 ανεμογεννήτριες τύπου MAN των 20kW η κάθε μία. Το Αιολικό πάρκο της Κύθνου αναφέρεται ως το πρώτο αιολικό πάρκο που δημιουργήθηκε στον κόσμο και το πρώτο στην Ευρώπη. Τώρα όμως, 30 χρόνια μετά την εγκατάστασή του, για το Αιολικό πάρκο Κύθνου έχει παρέλθει ο χρόνος λειτουργίας και καλής απόδοσης που μπορεί να προσφέρει και έτσι οι ανεμογεννήτριες είναι εκτός λειτουργίας.



*Σχ 1.7 Ανεμογεννήτριες 20KW στο πρώτο αιολικό πάρκο στην Ελλάδα στη νήσο Κύθνο*

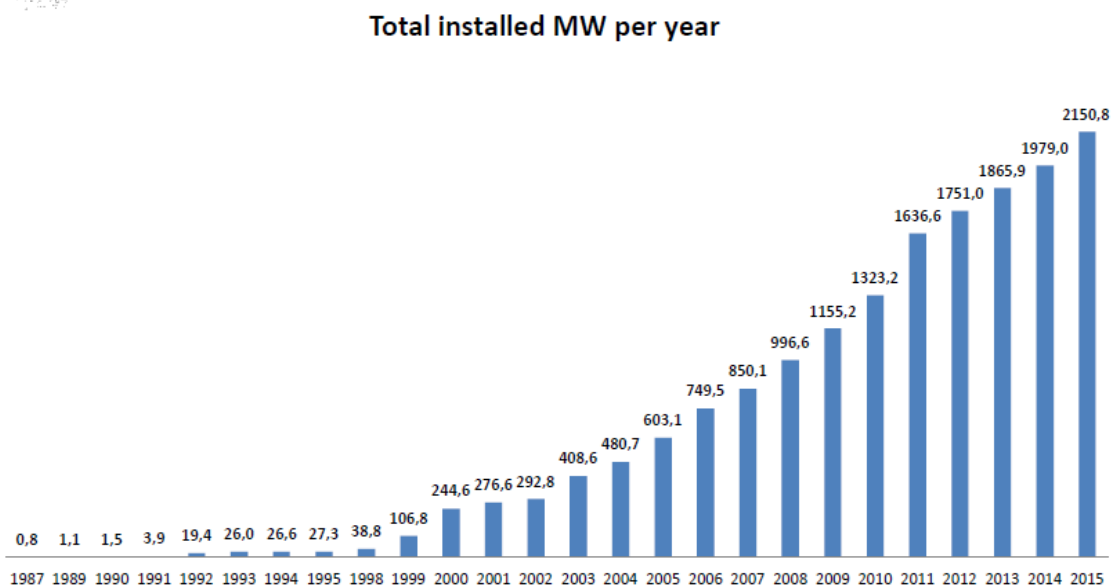
Το αιολικό δυναμικό της Ελλάδος θεωρείται από τα πιο πλούσια της Ευρώπης και όχι μόνο. Ασφαλώς, από τους παράγοντες που προαναφέραμε και που ευθύνονται για την δημιουργία αιολικού δυναμικού, αυτό που κάνει τη διαφορά για την χώρα μας είναι η μορφολογία του εδάφους και ειδικότερα αυτή στα πελάγη με τα διάσπαρτα νησιά να αποτελούν ιδανικά μέρη

εκμετάλλευσης του αιολικού δυναμικού. Επομένως, τα νησιά διεκδικούν πρωταρχική θέση στην εκμετάλλευση της αιολικής ενέργειας και για αυτό το λόγο ακριβώς από παλιότερα γινόταν εκμετάλλευση της αιολικής ενέργειας σε πολύ μεγαλύτερη κλίμακα απ' ό τι στην υπόλοιπη ηπειρωτική Ελλάδα. Πιο συγκεκριμένα, στα νησιά του Αιγαίου, ο μέσος όρος της ταχύτητας των ανέμων κυμαίνεται μεταξύ 7-11m/sec και ειδικότερα στα κεντρικά κυμαίνεται από 8m/sec έως και σε εξαιρετικές περιπτώσεις τα 12m/sec. Για να καταλάβουμε τη δυναμική αυτών των ταχυτήτων του ανέμου, 9,5m/sec ισοδυναμούν με 500W/m<sup>2</sup> [7].

Από την εκμετάλλευση της αιολικής ενέργειας, τα νησιά μας θα μπορούσαν να καλύψουν ενεργειακά ζητήματα σε πολύ μεγάλο βαθμό διότι έχουν το μεγαλύτερο μέρος του χρόνου πνοή ανέμου χωρίς εξεζητημένα φαινόμενα όπως τυφόνες για παράδειγμα. Σήμερα, το μεγαλύτερο μέρος των αναγκών τους, καλύπτεται από τοπικούς σταθμούς παραγωγής, κυρίως ντιζελογεννήτριες. Πολλά από αυτά τα νησιά, είναι διασυνδεδεμένα μεταξύ τους και τροφοδοτούνται από μεγαλύτερους σταθμούς οι οποίοι είναι εγκατεστημένοι σε ένα από τα νησιά αυτού του διασυνδεδεμένου συστήματος. Νησιά τα οποία είναι κοντά στην ηπειρωτική Ελλάδα, είναι διασυνδεδεμένα με αυτήν και σπάνια διαθέτουν τοπικούς σταθμούς παραγωγής. Σε μερικές περιπτώσεις απλά διαθέτουν και κάποιες άλλες μορφές ανανεώσιμες πηγών ενέργειας, όπως υδροηλεκτρική για παράδειγμα. Στο σχήμα 1.8 που ακολουθεί, απεικονίζεται η εγκατεστημένη αιολική ισχύς ανά έτος στην Ελλάδα, με το τέλος του 2015 να βρίσκει τη χώρα μας με εγκατεστημένη αιολική ισχύ στα 2150,8MW.



### HWEA Wind Energy Statistics – 2015



**Σχ 1.8.** Εγκατεστημένη αιολική ισχύς κατ' έτος στην Ελλάδα από το 1987 έως το 2015

Επίσης, οι δαπάνες για προμήθεια και εγκατάσταση των τοπικών αυτόνομων μονάδων παραγωγής, η μεταφορά καυσίμων, η λειτουργία και η συντήρηση των μονάδων αυτών, η ανάγκη για εφεδρεία για την εξυπηρέτηση μικρών φορτίων με μεγάλες μεταβολές και η ανάγκη επέκτασης του δικτύου σε απομακρυσμένες περιοχές, αυξάνουν υπέρμετρα το κόστος παραγωγής. Για αυτό το λόγο, περιοχές απομακρυσμένες με μικρή ανάγκη για φορτία ή μικρά νησιά απομακρυσμένα από την ηπειρωτική Ελλάδα όπου η εγκατάσταση τοπικού σταθμού είναι εξ αρχής απαγορευτική, μπορούν να καλύψουν κάλλιστα τις ανάγκες τους, τουλάχιστον σε φωτισμό, με μικρές ανεμογεννήτριες οι οποίες μπορούν να παράγουν και με πολύ μικρό αιολικό δυναμικό.

Η εγκατάσταση αιολικού πάρκου σε μη διασυνδεδεμένο νησί όπου λειτουργεί σταθμός DIESEL απαιτεί την δυνατότητα παράλληλης σύνδεσης μεταξύ τους. Σε αυτή την περίπτωση η εξοικονόμηση καυσίμου από τον τοπικό σταθμό παραγωγής αποτελεί πρωτεύον στόχο του αιολικού πάρκου, με τις μηχανές DIESEL να μπαίνουν υποστηρικτικά στις χρονικές περιόδους εκείνες όπου το αιολικό δυναμικό δεν είναι ικανό να καλύψει πλήρως τις ανάγκες σε φορτίο και να καλύπτουν τα φορτία αιχμής του νησιού [8].

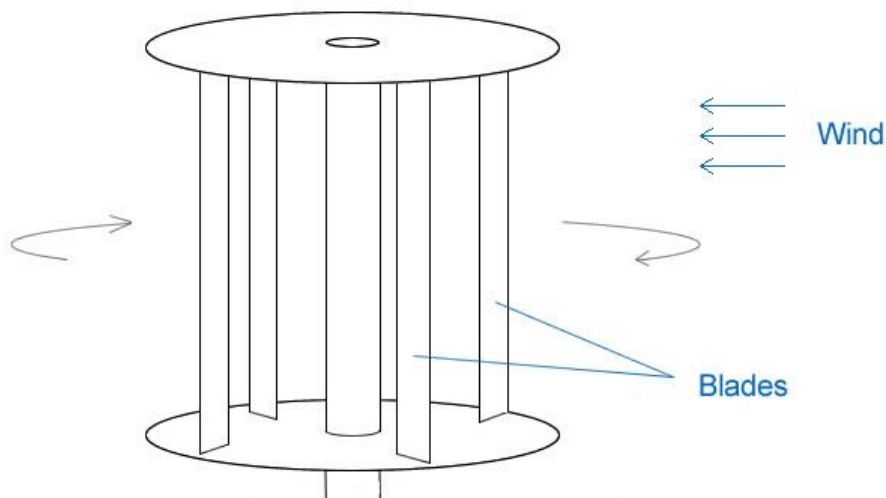
## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2<sup>ο</sup>

### «ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ»

#### 2.1 Εισαγωγή στις ανεμογεννήτριες

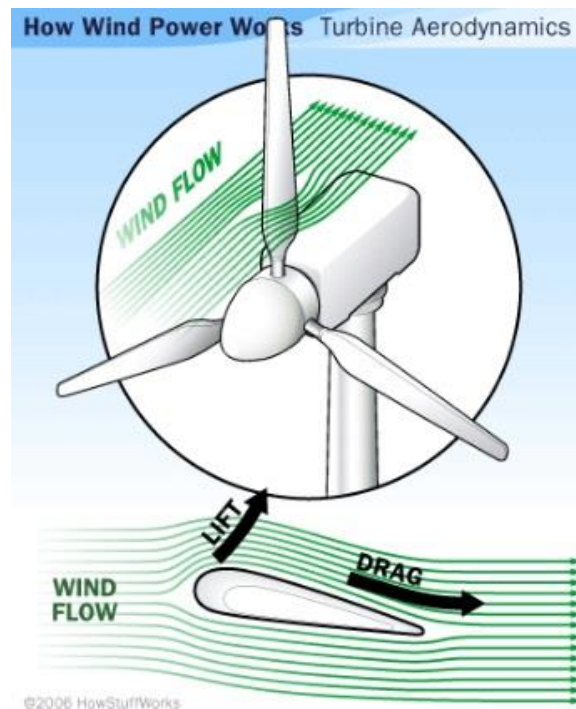
##### 2.1.1. Γενικά

Ως ανεμογεννήτριες αποκαλούνται οι μηχανές εκείνες οι οποίες μετατρέπουν την κίνηση του ανέμου, μέσω των πτερυγίων τους, σε κινητική ενέργεια στην είσοδο μιας γεννήτριας. Η γεννήτρια με την σειρά της, μετατρέπει να κινητική ενέργεια του ρότορα σε ηλεκτρική. Στην αρχική τους μορφή, η αιολική ενέργεια μετατρεπόταν σε κινητική και οι μηχανές αυτές δεν ήταν άλλες από τους γνωστούς σε όλους μας ανεμόμυλους, με την επιστημονική ονομασία «ανεμοκινητήρες». Από αρχαιοτάτων χρόνων υπήρχε χρήση των ανεμόμυλων και είχαν κυρίως εφαρμογή σε αγροτικές εφαρμογές. Η πιο εκτεταμένη χρήση των ανεμόμυλων έγινε από το 1880 μέχρι και τις αρχές του 2ου Παγκοσμίου πολέμου. Με το τέλος πολέμου, η χρήση τους μειώθηκε κυρίως λόγω της ανάπτυξης άλλων μορφών ενέργειας. Επίσης, οι νέες μορφές ενέργειας που αναπτύχθηκαν δεν είχαν τον στατικό χαρακτήρα όπως αυτή των αεροκινητήρων. Ο δεύτερος λόγος μείωσης των αεροκινητήρων ήταν η ανάπτυξη των εκτεταμένων ηλεκτρικών δικτύων με την δυνατότητα μεταφοράς ενέργειας από ακόμα πιο απομακρυσμένα μέρη.



Σχ 2.1. Εκμετάλλευση αντίστασης για παραγωγή έργου από τον άνεμο

Η μεγαλύτερη άνθιση στον τομέα της αιολικής ενέργειας ήρθε με την πετρελαϊκή κρίση την δεκαετία του 70'. Η ανάγκη για νέες μορφές ενέργειας οδήγησε σε ανάπτυξη των ανεμογεννητριών με σκοπό τη δημιουργία μηχανών με μεγάλο βαθμό απόδοσης στη μετατροπή της αιολικής ενέργειας σε ηλεκτρική, με ταυτόχρονη βλέψη για προστασία του περιβάλλοντος, αλλάζοντας πλέον τελείως τον καθαρά αγροτικό χαρακτήρα που είχαν μέχρι τότε. Χαρακτηριστική διαφορά στην αρχή λειτουργίας των ανεμόμυλων με τις ανεμογεννήτριες, είναι ο τρόπος κίνησης των πτερυγίων. Οι ανεμόμυλοι χρησιμοποιούσαν την αντίσταση που προβάλλει στον άνεμο το πτερύγιο (Σχήμα 2.1) ενώ οι ανεμογεννήτριες χρησιμοποιούν την άνωση που ασκείται επάνω στα πτερύγια ( Σχήμα 2.2). Η άνωση σε ένα πτερύγιο, μπορεί να γίνει υπερδεκαπλάσια της αντίστασης και αυτό αποτελεί την ειδοποιός διαφορά των σύγχρονων αεροκινητήρων με τους προκατόχους τους, ανεμόμυλους.



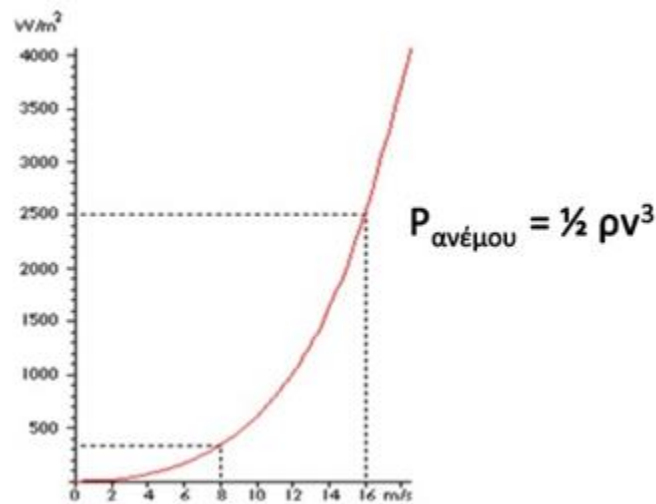
*Σχ 2.2. Εκμετάλλευση άνωσης για παραγωγή έργου από τον άνεμο.*

### **2.1.2. Πυκνότητα ισχύος του ανέμου**

Ο βαθμός απόδοσης  $C_p$  που χαρακτηρίζει τους απλούς ανεμοκινητήρες, ονομάζεται συντελεστής ισχύος και ορίζεται ως :

$$C_p = \frac{P}{\frac{1}{2} \rho V^3 A} \quad (2.1)$$

όπου P η ισχύς που αποδίδεται από τον ανεμοκινητήρα ως προς την ισχύ που έχει ο άνεμος ταχύτητας V και που περνάει από το πτερύγιο μετωπικής επιφάνειας A και ρ η πυκνότητα του αέρα. Ως πυκνότητα ισχύος του ανέμου, ορίζεται το ποσό της ενέργειας που διέρχεται από την επιφάνεια που σαρώνεται από τα πτερύγια της ανεμογεννήτριας, στην μονάδα του χρόνου. Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2.3, η ισχύς του ανέμου ανά τετραγωνικό μέτρο μετωπικής επιφάνειας είναι ανάλογη της ταχύτητας ανέμου εις τον κύβο.

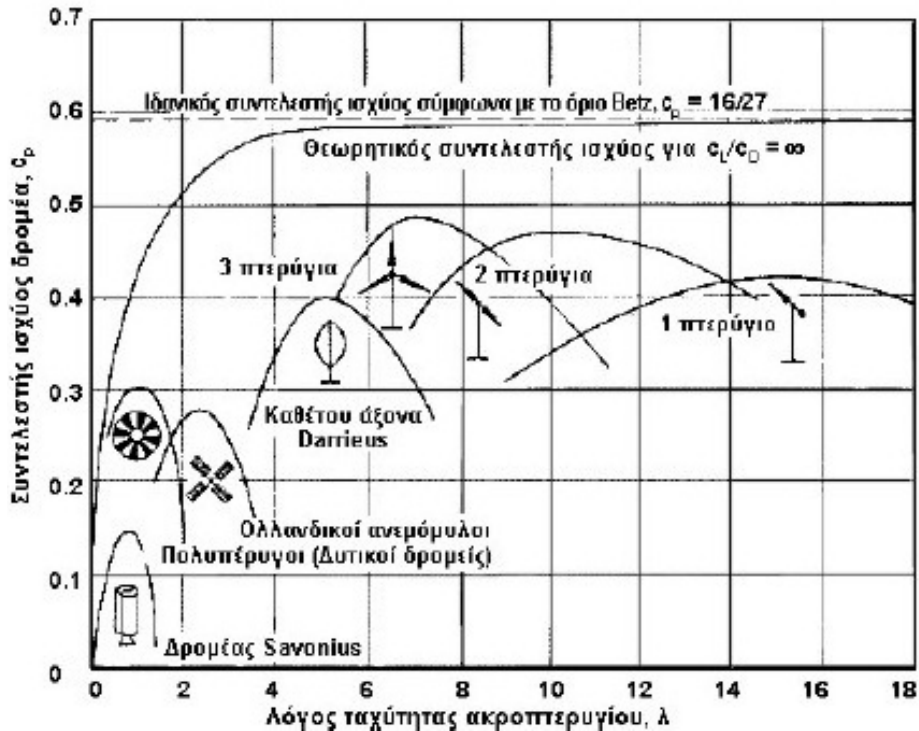


Σχ 2.3. Κυβική σχέση ισχύος και ταχύτητας ανέμου

Σε μία ανεμογεννήτρια, με γνωστά γεωμετρικά χαρακτηριστικά, ο συντελεστής ισχύος  $C_p$  αποτελεί μονοπαραμετρική συνάρτηση της αδιάστατης ταχύτητας  $\lambda$  ( $\lambda = \omega R/V$ ), όπου R η ακτίνα του δρομέα και  $\omega$  η γωνιακή ταχύτητά [8].

Η ανεμογεννήτρια όπως έχουμε προαναφέρει, μετατρέπει ένα ποσοστό της ενέργειας του αέρα σε κινητική στο ρότορα και κατά συνέπεια σε ηλεκτρική. Κατά συνέπεια, ένα ποσοστό της αιολικής ισχύς στο πτερύγιο, μετατρέπεται σε ηλεκτρική ισχύς στην έξοδο της ανεμογεννήτριας. Το ποσοστό αυτό καθορίζεται από τον συντελεστή  $C_p$ , οποίος ακόμα και αν πάρει τη θεωρητικά μέγιστη τιμή του ( $16/27=0,593$ ), δεν μπορεί να υπερβεί το όριο του Betz, δηλαδή το 59,3%.

$$P_{A/\Gamma} = \frac{C_p \cdot \rho \cdot A \cdot V^3 \cdot n_{H/M}}{2} \quad (2.2)$$

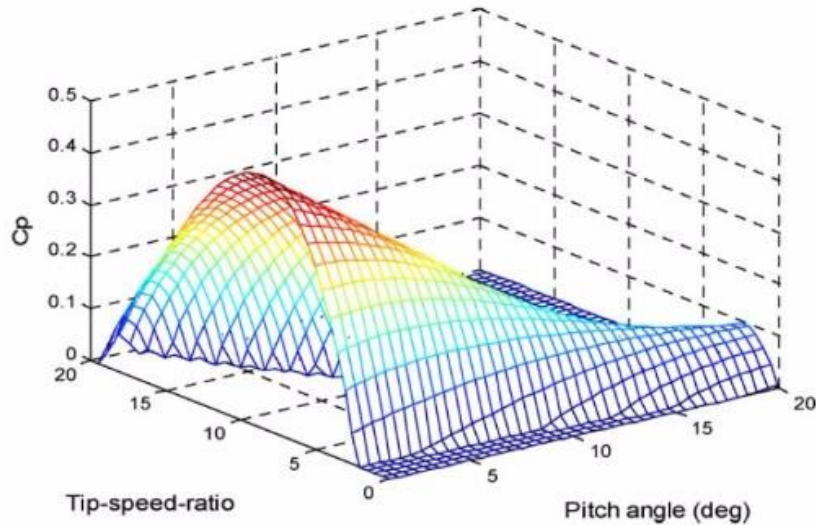


Σχ 2.4. Διαγράμματα  $C_p$ - $\lambda$  για μία πληθώρα διατάξεων /πτερυγίων  $A/G$

Εκτός από τις ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα, υπάρχουν και αυτές του κάθετου άξονα οι οποίες σε χρήση έχουν συντριπτικά μικρότερο βαθμό, απ' ότι αυτές του οριζοντίου. Ένας από τους λόγους εμφανίζεται γραφικά και στο Σχήμα 2.4, στο οποίο βλέπουμε ότι για ίδιο λόγο ταχύτητας ακροπτερυγίου  $\lambda$ , ο συντελεστής απόδοσης δρομέα  $C_p$ , είναι μεγαλύτερος στην οριζόντιου άξονα με τρία πτερύγια.

Αυτός ακριβώς ο τύπος ανεμογεννήτριας είναι και ο ποιο διαδεδομένος και αυτός που χρησιμοποιείται κατά κόρον στα μεγάλα αιολικά πάρκα τα τελευταία χρόνια αλλά και στις μέρες μας. Στο σχήμα 2.5 απεικονίζεται η τρισδιάστατη μορφή του συντελεστή  $C_p$  ανεμογεννήτριας οριζόντιου άξονα 2,5MW. Οι ανεμογεννήτριες κατακόρυφου άξονα θα μπορούσαμε να τις χαρακτηρίσουμε σαν ανεμογεννήτριες ειδικών καταστάσεων και εφαρμογών. Για παράδειγμα, ενδείκνυται να εγκαθίστανται ποιο κοντά στο έδαφος και συμπεριφέρονται καλύτερα στις απότομες αλλαγές της διεύθυνσης των ανέμων. Για αυτό ακριβώς το λόγο, μια από τις εφαρμογές τους είναι η εγκατάσταση τους σε ταράτσες μεγάλων κτηρίων όπου και δεν είναι επιθυμητό για διάφορους λόγους το μεγάλο ύψος του άξονα αλλά και όπου οι διευθύνσεις των ανέμων λόγω των παράπλευρων κτηρίων δεν είναι σταθερές.





Σχ 2.5. Τρισδιάστατη απεικόνιση του  $C_p$  ανεμογεννήτριας οριζώντιου 2,5MW.

## 2.2 Μεταβολή των χαρακτηριστικών του ανέμου

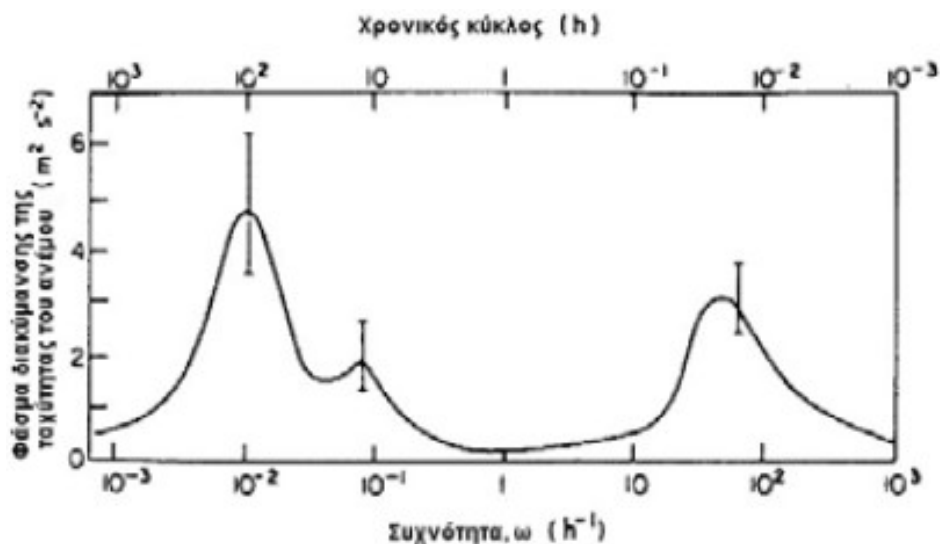
### 2.2.1. Μεταβολή με το χρόνο

Η πρόβλεψη της απόδοσης μιας ανεμογεννήτριας, για να μπορεί να προσεγγίσει όσο το δυνατόν με μεγαλύτερη ακρίβεια την πραγματική, (αυτή που θα έχει έπειτα από την εγκατάστασή της) θα πρέπει να είναι γνωστή η μέση ταχύτητα του ανέμου στην περιοχή αυτή αλλά και ο τρόπος που μεταβάλλεται η ταχύτητα του ανέμου με το χρόνο.

Σαν Μέση Ταχύτητα ανέμου ορίζεται το ολοκλήρωμα της συνάρτησης της ταχύτητας σε σε μια περίοδο  $T$  προς την περίοδο αυτή. Όπου  $T$ , το χρονικό διάστημα της περιόδου της οποίας θέλουμε να υπολογίσουμε την μέση τιμή.

$$V_m = \frac{1}{T} \int_{t_0 - \frac{T}{2}}^{t_0 + \frac{T}{2}} V(t) dt \quad (2.3)$$

Μετασχηματίζοντας μια μακρά χρονική σειρά ταχυτήτων του ανέμου στο πεδίο συχνότητας ως φάσμα ισχύος, μπορούμε να προσδιορίσουμε τη χρονική κλίμακα της ενέργειας του ανέμου. Οι μεταβολές διακρίνονται σε τρεις κατηγορίες, τη βραχεία (δευτερόλεπτα έως λεπτά), τη μέση (ώρες έως ημέρες) και τη μακρά (εβδομάδες έως έτη).

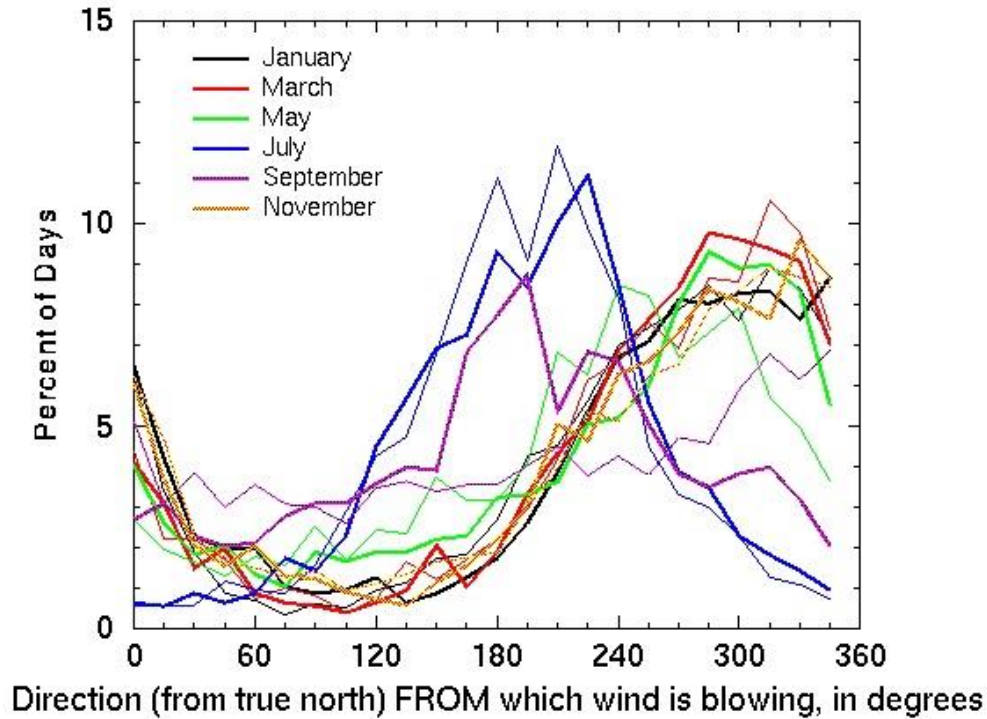


Σχ 2.6. Χαρακτηριστικό φάσμα διακύμανσης της ταχύτητας του ανέμου

Οι μεταβολές στη βραχεία κατηγορία, συνήθως δεν παίζουν πολύ σημαντικό ρόλο στην αξιολόγηση ενός αιολικού δυναμικού, παρά μόνο σε περιπτώσεις που ο άνεμος αλλάζει συνεχώς διεύθυνση. Σε αιολικές εγκαταστάσεις με αρκετές ανεμογεννήτριες, οι μεταβολές της ταχύτητας του ανέμου δεν επηρεάζουν το επίπεδο της παραγόμενης ισχύς του πάρκου, όπως συμβαίνει στα πάρκα με μία μόνο ανεμογεννήτρια. Ο λόγος που συμβαίνει κάτι τέτοιο είναι διότι η επίδραση από τις αλλαγές διεύθυνσης, τείνουν να εξαιρεθούν καθώς οι διαφορετικοί προσανατολισμού μηχανές, δέχονται ριπές ανέμου σε διαφορετικές χρονικές στιγμές. Αποτέλεσμα όλου αυτού είναι η μέση τιμή των μετρήσεων της ταχύτητας του ανέμου για μία αξιολόγηση πιθανής θέσης αιολικού πάρκου να ορίζεται μεταξύ δέκα λεπτών και μίας ώρας. Να προσθέσουμε ότι στην περίπτωση που σε μία θέση με συχνές μεταβολές διεύθυνσης των ανέμων έχουμε μια μόνο μηχανή, αυτή υπόκειται σε πρόσθετη φθορά στις συνιστώσες τις με αποτέλεσμα να έχει αυξημένες δαπάνες σε επισκευή και συντήρηση σε σχέση με την περίπτωση όπου συνυπήρχε στην ίδια θέση με περισσότερες μηχανές.

Οι μεταβολές στην μέση κατηγορία τώρα είναι πολύ σημαντικές για την αξιολόγηση του αιολικού δυναμικού. Όπως εμφανίζουν τα αρχεία των μετρήσεων των ανέμων, οι διακυμάνσεις της ταχύτητας μπορεί να διαρκούν μέχρι και αρκετές ημέρες. Από την άλλη μπορούμε να παρατηρήσουμε και ημερήσιες συμπεριφορές σε μια περιοχή, όπως την μεγιστοποίηση των ανέμων τις απογευματινές ώρες. Στο σχήμα 2.7 εμφανίζονται γραφικά οι χαρακτηριστικές μεταβολές της διεύθυνσης των ανέμων σε ποσοστό ανά ημέρα στη διάρκεια ενός έτους ανά δίμηνο.

## Reanalysis Daily 700-mb Wind Directions, 1958–98 35N/120W



Σχ 2.7. Χαρακτηριστικές μεταβολές της διεύθυνσης των ανέμων σε ποσοστό ανά ημέρα στη διάρκεια ενός έτους ανά δίμηνο.

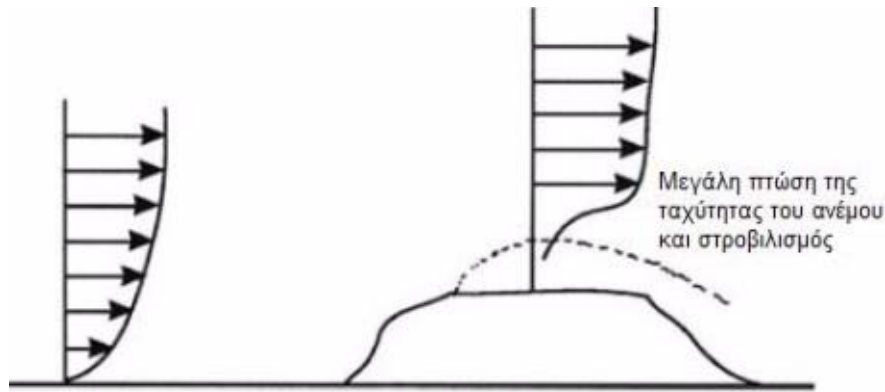
Σημαντικό επίσης ρόλο στην αξιολόγηση για την δυναμική μιας περιοχής έχουν οι μηνιαίες και οι εποχιακές μεταβολές. Ο βαθμός και ο χρόνος εμφάνισης των εποχιακών μεταβολών εξαρτώνται από την περιοχή. Η μέση ταχύτητα του ανέμου, μπορεί να διέπεται από σημαντικές διαφορές ακόμα και από έτος σε έτος. Για αυτό ακριβώς το λόγο, για να εξαχθεί εποχιακή συμπεριφορά του ανέμου απαιτείται τουλάχιστον ένα έτος μετρήσεων. Σε γενικές γραμμές πάντως, η εποχιακή συμπεριφορά μπορεί να υπολογιστεί με σχετικά καλή ακρίβεια και με 2 χρόνια μετρήσεων.

### 2.2.2. Μεταβολή με το ύψος

Η εξαγόμενη ισχύς μιας ανεμογεννήτριας είναι αποτέλεσμα πολλών παραγόντων. Οι φυσικοί παράγοντες που την επηρεάζουν είναι η κατανομή της ταχύτητας του ανέμου στη θέση που είναι τοποθετημένη η ανεμογεννήτρια, καθώς και η πυκνότητα του αέρα σε αυτή τη θέση. Τεχνικά, το μέγεθος του δρομέα και ο σχεδιασμός της ανεμογεννήτριας, είναι οι βασικοί

συντελεστές. Ειδικά στο σχεδιασμό, η επιλογή του ύψους του πυλώνα αποτελεί βαρόμετρο στην μετέπειτα απόδοση της ανεμογεννήτριας.

Η ταχύτητα του ανέμου είναι άμεσα συνδεδεμένη με το ύψος στο οποίο τη μετράμε. Πιο συγκεκριμένα, η ταχύτητα αυξάνεται με το ύψος και το φαινόμενο αυτό ονομάζεται διάτμηση του ανέμου. Το εν λόγω φαινόμενο εξαρτάται άμεσα από την ατμοσφαιρική μίξη και την τραχύτητα του εδάφους. Η ταχύτητα του ανέμου σε εδάφη με υψηλό βαθμό τραχύτητας, όπως για παράδειγμα είναι μια περιοχή όπου κατακλύζεται από δάση, είναι μικρότερη απ' ό,τι θα ήταν για παράδειγμα αν η περιοχή ήταν απλά πετρώδης με χαμηλή βλάστηση. Στις απότομες αλλαγές του εδάφους, όπως μια ακρογιαλιά ή ένα απότομο ύψωμα, η διάτμηση του ανέμου υπόκειται σε πολύ μεγάλες μειώσεις, ίσως και μηδενισμό. Στο σχήμα 2.8 βλέπουμε την ομαλή ροή της ταχύτητας σε ομαλό έδαφος με μικρό ύψος και πτώση ταχύτητας λόγω της απότομης μεταβολής του εδάφους η οποία πέρα από την πτώση ανέμου παρουσιάζει και στροβιλισμούς.



*Σχ 2.8. Απεικόνιση ομαλής ροής ταχύτητας σε ομαλό έδαφος με μικρό ύψος και πτώση ταχύτητας λόγω απότομης μεταβολής του εδάφους.*

Η πιο συνηθισμένη προσέγγιση της καθ' ύψος μεταβολής της ταχύτητας είναι η λογαριθμική

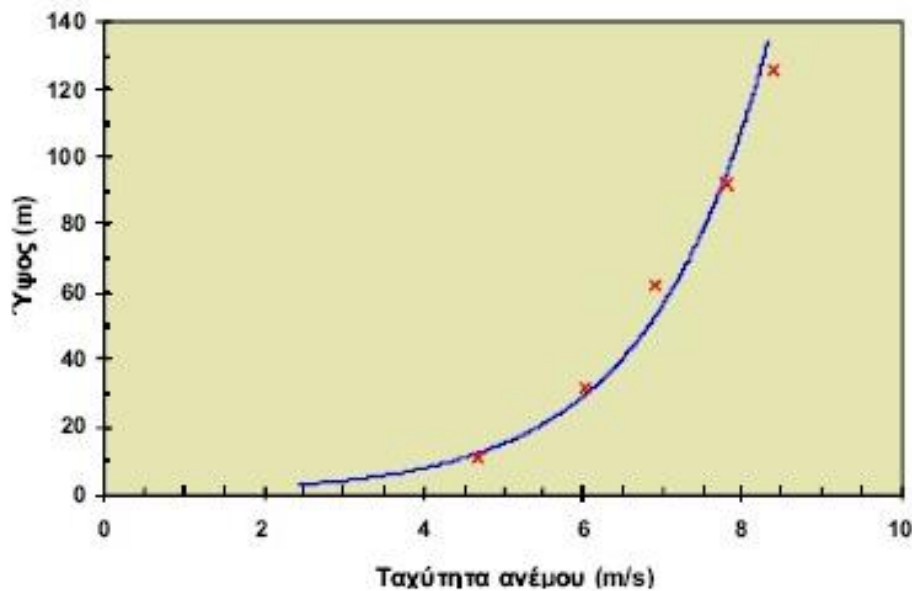
$$V = \frac{v\tau}{\kappa} * \ln \frac{h}{z_0} \quad (2.4)$$

όπου  $V$  είναι η ταχύτητα του ανέμου σε ύψος  $h$ ,  $v\tau$  η ταχύτητα τριβής,  $\kappa$  η σταθερά von Karman η οποία ισούται με 0.4 και  $Z_0$  το μήκος τραχύτητας του εδάφους το οποίο είναι διαθέσιμο μέσω πινάκων.

Η στιγμιαία ταχύτητα του ανέμου  $V$  ορίζεται ως το άθροισμα της μέσης ταχύτητας  $V_m$  και ενός μεταβαλλόμενου μεγέθους ταχύτητας  $v(t)$ :

$$V(t) = V_m + v(t) \quad (2.5)$$

Στο ύψος της πλήμνης μιας ανεμογεννήτριας το φαινόμενο της ατμοσφαιρικής μίξης προκαλεί αύξηση της ταχύτητας του ανέμου την ημέρα και μείωση την νύχτα. Η παρατήρηση αυτή είναι τόσο στοχευμένη χρονικά διότι η ατμοσφαιρική μίξη ακολουθεί ένα ημερήσιο κύκλο λόγω της ηλιακής θέρμανσης. Όσο μεγαλύτερο είναι όμως το ύψος της πλήμνης, τόσο μικραίνει η διαφορά στη ταχύτητα από την ημέρα στη νύχτα. Σε ύψος περίπου δέκα μέτρων (10μ), η διαφορά αυτή είναι αισθητή. Αντίθετα, στα πενήντα (50μ) με εξήντα (60μ) μπορούμε να πούμε ότι η διαφορά αυτή είναι σχεδόν ανεπαίσθητη. Στο σχήμα 2.9 απεικονίζεται η χαρακτηριστική ταχύτητας ανέμου σε σχέση με το ύψος της πλήμνης.

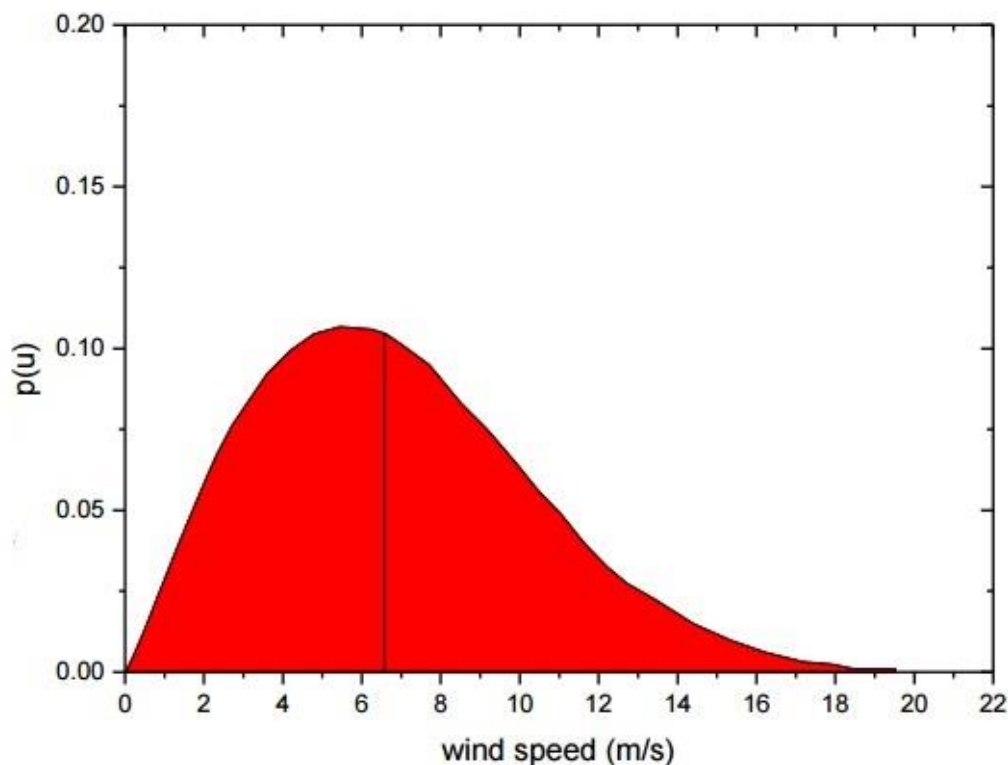


Σχ 2.9. Χαρακτηριστική ταχύτητας ανέμου σε σχέση με το ύψος

Από οικονομικής άποψης, οι μετρήσεις ανέμων σε μικρότερα ύψη είναι πιο συμφέρουσες. Με τη βοήθεια της εξίσωσης 2.4, μπορούμε να πραγματοποιήσουμε μετρήσεις σε χαμηλά ύψη και με κατάλληλες διορθώσεις να υπολογιστούν οι μεταβολές στην ευστάθεια της ταχύτητας σε ψηλότερα σημεία. Απαραίτητη προϋπόθεση για αυτού του είδους τις μετρήσεις, ώστε να έχουν επιτυχή αποτέλεσμα, είναι να μετρηθεί η διάτμηση του ανέμου σε διαφορετικές χρονικές στιγμές της ημέρας και σε διαφορετικές εποχές [9].

## 2.3 Κατανομή Weibull

Η ανάγκη για ασφαλή συμπεράσματα-αποτελέσματα στην μελέτη για την εγκατάσταση ή όχι μιας ανεμογεννήτριας σε μια συγκεκριμένη περιοχή είναι μείζονος σημασίας. Για αυτό το λόγο απαιτούνται μακροχρόνιες και αναλυτικές μετρήσεις. Δυστυχώς όμως, επειδή δεν υπάρχουν δεδομένα μακροχρόνιων αιολικών μετρήσεων σε όλες τις περιοχές όπου αποτελούν εν δυνάμει τόπο εγκατάστασης αιολικού πάρκου, οι μακροχρόνιες μελέτες που απαιτούνται καθώς και το κόστος αυτό, αποτελούν αποτρεπτικό παράγοντα για την επένδυση. Για το λόγο αυτό, η χρήση εμπειρικών μοντέλων αποτελεί σχεδόν μονόδρομο σε αυτές τις περιπτώσεις, οι οποίες αποτελούν και την πλειοψηφία. Τα εμπειρικά αυτά μοντέλα, έχουν τη δυνατότητα να περιγράφουν το αιολικό δυναμικό μιας περιοχής με αρκετά μεγάλη ακρίβεια λαμβάνοντας υπόψη μόνο ένα μικρό αριθμό παραμέτρων με σκοπό να εκτιμηθεί η ποιότητα της ενέργειας του ανέμου που μπορεί να δώσει η περιοχή.



*Σχ 2.10. Χαρακτηριστική κατανομή Weibull*

Η κατανομή Weibull αποτελεί ένα από αυτά τα εμπειρικά μοντέλα το οποίο περιγράφει ικανοποιητικά τα ανεμολογικά χαρακτηριστικά στις περιοχές της εύκρατης ζώνης και για ύψος μέχρι εκατό μέτρων (100μ).

Η μαθηματική έκφραση της κατανομής Weibull δίνεται από τη σχέση :

$$f(v) = \frac{dF(v)}{dv} = \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k} \quad (2.6)$$

απεικονίζεται από τη παραπάνω γραφική παράσταση του σχήματος 2.10 και εκφράζει την πιθανότητα η ταχύτητα του ανέμου  $V$  να βρίσκεται στην περιοχή  $V-dV/2$  και  $V+dV/2$ . Η  $c$  είναι η παράμετρος κλίμακας και συνδέεται με την μέση ταχύτητα σύμφωνα με την παρακάτω σχέση:

$$\bar{V} = c * \Gamma \left[ 1 + \frac{1}{K} \right] \quad (2.7)$$

Η  $k$  είναι η παράμετρος περιοχής μορφής και είναι αντιστρόφος ανάλογη της διακύμανσης  $\sigma^2$  των ταχυτήτων του ανέμου ως προς την μέση ταχύτητα:

$$\sigma^2 = c^2 \left[ \Gamma \left( 1 + \frac{2}{K} \right) - \left\{ \Gamma \left( 1 + \frac{1}{K} \right) \right\}^2 \right] \quad (2.8)$$

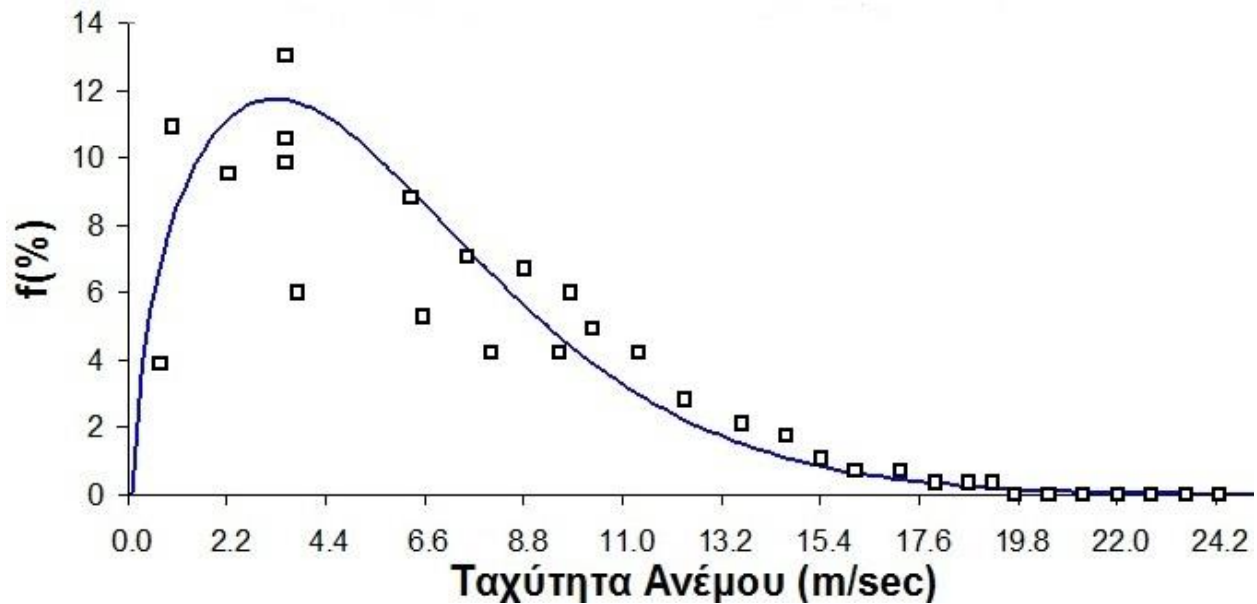
Όσο μεγαλύτερες είναι οι τιμές του  $k$ , τόσο μικρότερη είναι η διασπορά των ταχυτήτων του ανέμου, με αποτέλεσμα να υπάρχει μεγαλύτερη συγκέντρωση γύρω από τη μέση τιμή.

Η κατανομή Weibull για  $k=2$  είναι γνωστή ως κατανομή Rayleigh και δίνετε από την παρακάτω σχέση:

$$f(v) = \frac{\pi}{2} \left( \frac{v}{\bar{v}^2} \right) e^{-\frac{\pi}{4} \left( \frac{v}{\bar{v}} \right)^2} \quad (2.9)$$

Το πλεονέκτημα της κατανομής Rayleigh έναντι της Weibull είναι ότι με γνωστή τη μέση ταχύτητα του ανέμου σε μια περιοχή, προσδιορίζεται άμεσα η παράμετρος  $c$  της σχέσης η οποία καθορίζει τη μέση ταχύτητα ανέμου και μετράτε σε m/s, και την παράμετρο  $k$ . Επίσης, η κατανομή για  $k=3.5$  προσεγγίζει την κατανομή Gauss. Για να έχουμε και μια πιο χειροπιαστή εικόνα για τις τιμές της παραμέτρου  $k$  και της ελληνικής επικράτειας, για τα νησιά του Αιγαίου η τιμή της  $k$  κυμαίνεται από 1,4 μέχρι 2, ενώ σε μερικά νησιά όπως η Κρήτη, η τιμή κυμαίνεται γύρω στο 2,2 [10].

Στο σχήμα 2.11, απεικονίζονται τα αποτελέσματα μιας πειραματικής καμπύλης ταχύτητας ανέμου και πιθανότητα εμφάνισης των ανάλογων μεγεθών σε σύγκριση με τα αποτελέσματα που έδωσε η κατανομή Weibull για την ίδια περίπτωση. Τα αποτελέσματα μπορούν να θεωρηθούν αρκετά ικανοποιητικά αν και εμφανίζονται αρκετές αποκλίσεις σε μικρές και μεσαίες ταχύτητες.



Σχ 2.11. Σύγκριση πειράματος-θεωρίας για την κατανομή Weibull

## 2.4 Πλεονεκτήματα-Μειονεκτήματα ανά κατηγορία ανεμογεννητριών

Όπως έχουμε ήδη αναφέρει σε προηγούμενο σημείο, ο πρωτεύον διαχωρισμός στις ανεμογεννήτριες είναι ο διαχωρισμός σε κάθετου και οριζόντιου άξονα. Έχοντας αναλύσει σε προηγούμενα σημεία τα χαρακτηριστικά του ανέμου, θα επιχειρήσουμε μια αναφορά στα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα αυτών των δύο τύπων ώστε να κατανοήσουμε την επιλογή του τύπου που επικρατεί στις μέρες μας.

### Πλεονεκτήματα ανεμογεννήτριας κάθετου άξονα

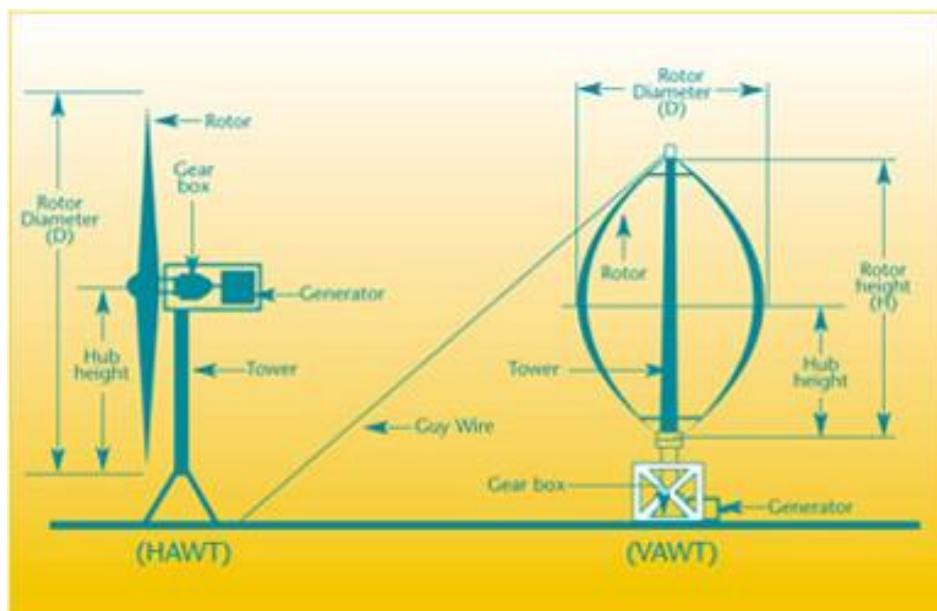
- ✓ Μπορεί να παράγει ενέργεια με οποιοδήποτε προσανατολισμό ανέμου.
- ✓ Δεν απαιτεί δυνατό μηχανικά πύργο στήριξης διότι η γεννήτρια, το κιβώτιο ταχυτήτων και γενικά όλα τα άλλα μέρη που την αποτελούν, είναι εγκατεστημένα στο έδαφος.
- ✓ Χαμηλό κόστος εγκατάστασης σε σχέση με του οριζόντιου άξονα.
- ✓ Χαμηλό κόστος παραγωγής σε σχέση με του οριζόντιου άξονα.
- ✓ Εφόσον δεν χρειάζεται στόχευση της μηχανής προς την κατεύθυνση του ανέμου, δεν χρειάζεται ο μηχανισμός κίνησης εκτροπής και ο έλεγχος βήματος.
- ✓ Εύκολη μεταφορά.



- ✓ Χαμηλό κόστος συντήρησης κυρίως λόγω του ότι τα επί μέρους μηχανικά κομμάτια της ανεμογεννήτριας είναι στο έδαφος αλλά και των λιγότερων μηχανικών μερών σε σχέση με του οριζόντιου άξονα.
- ✓ Μπορούν να εγκατασταθούν και σε αστικές περιοχές μιας και αντιδρούν καλύτερα στις απότομες αλλαγές των ανέμων που παρατηρούνται στις αστικές περιοχές από τα παραπλήσια κτήρια.
- ✓ Χαμηλός κίνδυνος για την ανθρώπινη ζωή και τα πουλιά, επειδή οι λεπίδες κινούνται σε σχετικά χαμηλή ταχύτητα.
- ✓ Χρειάζονται πολύ μικρότερη έκταση σε σχέση με τις οριζόντιες διότι πέρα από το μικρότερο εκτόπισμά τους, ο άνεμος που περνά μέσα από την κάθε μια, δεν δημιουργεί τόσες πολλές τύρβες ώστε να επηρεάζεται η επόμενη.
- ✓ Κατά τη διάρκεια θυελλωδών ανέμων, οι μονάδες αυτές είναι λιγότερο πιθανό να υποστούν βλάβη, από ό, τι παραδοσιακά οι οριζόντιου άξονα μονάδες.
- ✓ Λόγω κατακόρυφων πτερυγίων, είναι λιγότερο θορυβώδες.

#### Μειονεκτήματα ανεμογεννήτριας κάθετου άξονα

- ✓ Χαμηλός συντελεστής απόδοσης κυρίως λόγω του ότι ένα μόνο πτερύγιο τη φορά είναι μέσα στη πορεία του ανέμου και λόγω της επιπλέον οπισθέλκουσας (σε σχέση με του οριζόντιου άξονα) από την περιστροφή των πτερυγίων τους.
- ✓ Λόγω των πακτωμένων καλωδίων στήριξης της κορυφής του κατακόρυφου άξονα, ασκείται μια ώθηση προς τα κάτω κατά την εμφάνιση ριπών ανέμων και σε συνδυασμό με την ήδη υπάρχουσα πίεση από το βάρος του άξονα, απαιτεί τη δημιουργία γερής δομής στη βάση της.
- ✓ Χρειάζονται μια αρχική ώθηση για να ξεκινήσουν. Αυτή η ενέργεια προέρχεται από την ιδιοπαραγωγή τις περισσότερες φορές.
- ✓ Έχουν σχετικά υψηλή δόνηση επειδή η ροή του αέρα κοντά στο έδαφος δημιουργεί στροβιλισμούς.
- ✓ Λόγω των δονήσεων αυτών υπάρχει επιτάχυνση της φθοράς των μηχανικών του μερών, με αποτέλεσμα τη μείωση της περιόδου συντήρησης και κατά συνέπεια της αύξησης του κόστους.
- ✓ Για το λόγο για τον οποίο αυτός ο τύπος ανεμογεννήτριας είναι λιγότερο πιθανό να καταστραφεί από θυελλώδεις συνθήκες ανέμου, για τον ίδιο λόγο είναι περισσότερο πιθανό να τον βρούμε σταματημένο σε συνθήκες όπου η ανεμογεννήτρια οριζόντιου τύπου πιθανότατα θα ήταν σε παραγωγή.
- ✓ Λόγω του κάθετου προσανατολισμού των πτερυγίων, οι λεπίδες τείνουν να λυγίσουν και να στρίψουν λόγω της φυγόκεντρου δύναμης που αναπτύσσεται σε αυτά καθώς ο ρότορας γυρίζει όλο και πιο γρήγορα [11].



Σχ 2.12. Απεικόνιση ανεμογεννήτριας οριζόντιου και κάθετου άξονα.

#### Πλεονεκτήματα ανεμογεννήτριας οριζόντιου άξονα

- ✓ Υψηλότερος συνολικός βαθμός απόδοσης σε σχέση με του κάθετου άξονα.
- ✓ Παρότι είναι λιγότερο στιβαρή κατασκευή από αυτή του κάθετου άξονα, ο έλεγχος της γωνίας περυγίων τις κάνει πιο ανθεκτικές στους θυελλώδης ανέμους.
- ✓ Επίσης ο έλεγχος του βήματος των περυγίων συμβάλει στην μεγιστοποίηση του ποσού της ενέργειας πάνω στα περύγια, ανεξαρτήτου συνθήκων, ώρας και εποχής.
- ✓ Η βέλτιστη γωνία πρόσπτωσης του ανέμου στα περύγια, πέρα από τη μέγιστη απόδοση, είναι και τέτοια που συμβάλει στην μείωση των κραδασμών διότι η πίεση στα περύγια είναι συνεχής.
- ✓ Είναι ανεξάρτητες από εξωτερικές πηγές κατά την εκκίνησή τους.
- ✓ Η υψηλή βάση του πύργου βάζει τα περύγια σε υψηλότερα αιολικά δυναμικά.

#### Μειονεκτήματα ανεμογεννήτριας οριζόντιου άξονα

- ✓ Υψηλό κόστος εγκατάστασης
  - Λόγω της μεταφοράς των πυλώνων οι οποίοι μπορούν να φθάσουν και γύρω στα 100μ.

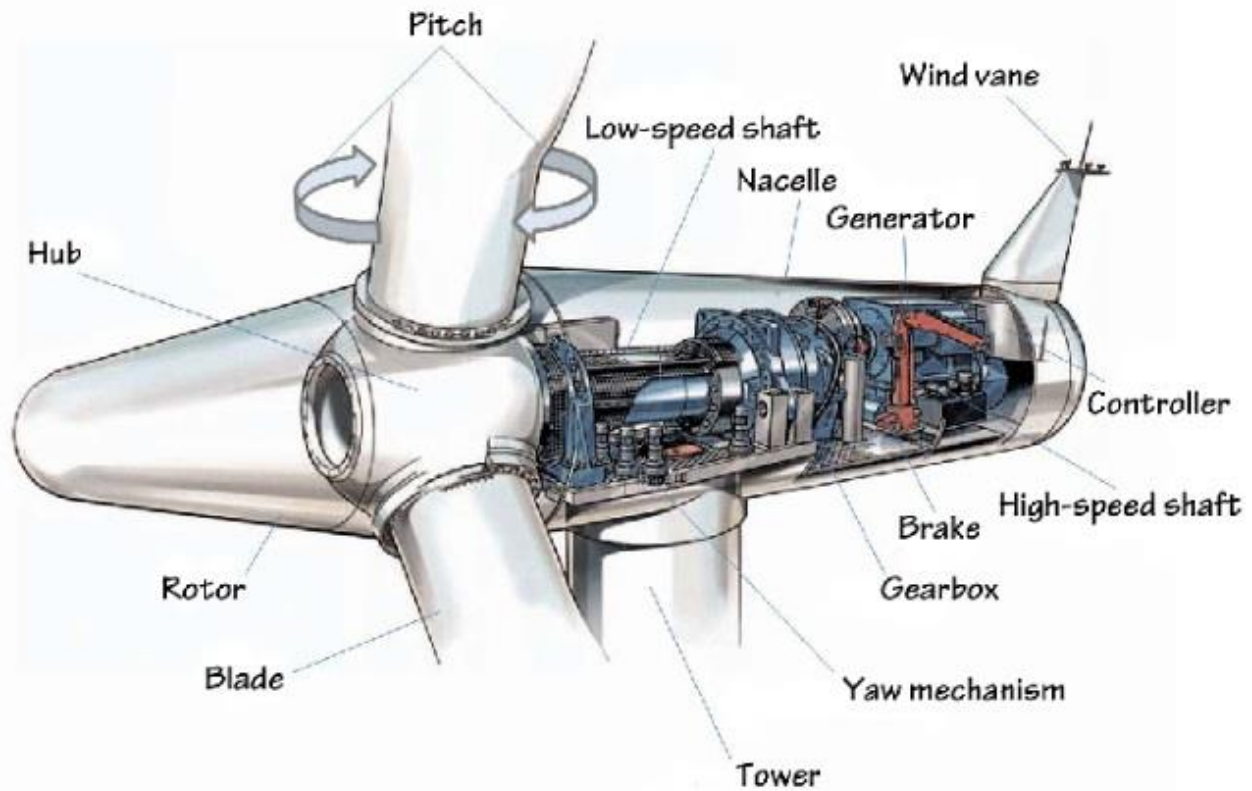
- Λόγω των ειδικών, πολύ ψηλών γερανών που απαιτούνται για την εγκατάσταση.
  - Λόγω του ογκώδους πύργου που απαιτείται ώστε να μπορεί να στηρίξει με ασφάλεια τα πτερύγια, τη γεννήτρια και το κιβώτιο ταχυτήτων καθώς και τα υπόλοιπα μηχανικά μέρη.
- ✓ Υψηλό κόστος συντήρησης.
  - ✓ Αλλοιώνουν την αισθητική του τοπίου
  - ✓ Προκαλούν ηχορύπανση στην περιοχή γύρω από την οποία είναι εγκατεστημένες και για αυτό το λόγο δεν εγκαθίστανται κοντά σε κατοικημένες περιοχές.
  - ✓ Λόγω του συστήματος ελέγχου του βήματος των πτερυγίων, δημιουργεί μια μεγαλύτερη πολυπλοκότητα στην κατασκευή της και την συντήρησή της.
  - ✓ Απαιτούν πολύ μεγάλη έκταση εδάφους σε σχέση με τον όγκο τους.
  - ✓ Δημιουργούν προβλήματα στη μετανάστευση των αποδημητικών πουλιών.
  - ✓ Δημιουργούν προβλήματα στη ναυσιπλοΐα στην περίπτωση που είναι εγκατεστημένες υπεράκτια.[11].

Το σύνολο των παραπάνω παραγόντων, θετικών και αρνητικών, έχουν οδηγήσει την μακρά πλειοψηφία των αιολικών πάρκων να αποτελείται από ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα. Θα λέγαμε ότι εκτός από ιδιαίτερες εφαρμογές, μόνο σε μικρής ισχύος έργα και σε ιδιαίτερες περιπτώσεις, όπως οι εγκατάσταση σε κατοικημένες περιοχές, βρίσκουν εφαρμογή οι ανεμογεννήτριες κάθετου άξονα. Για αυτό ακριβώς το λόγο, η συνέχεια της εργασίας αυτής θα αφορά τις ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα.

## **2.5 Περιγραφή ανεμογεννητριών οριζόντιου άξονα**

### **2.4.1. Γενικά**

Μπορεί με το πέρασμα του χρόνου να επικράτησε ο τύπος της ανεμογεννήτριας οριζόντιου άξονα αλλά σε καμία περίπτωση δεν μπορούμε να πούμε ότι τα μέρη μιας ανεμογεννήτριας είναι δεδομένα και ίδια για όλες. Αυτό, διότι δεν υφίσταται κάποια γενική μέθοδος για την ταξινόμηση των υποσυστημάτων των Α/Γ, οι συνιστώσες του σχήματος 2.13 θα μπορούσαν να διαιρεθούν σε τέσσερα (4) βασικά υποσυστήματα [14]. Σε αυτό το σημείο, θα προσπαθήσουμε λοιπόν να περιγράψουμε αυτά τα βασικά μέρη και στους διάφορους τύπους ανεμογεννητριών θα επεκταθούμε στη συνέχεια της εργασίας.



Σχ 2.13. Απεικόνιση βασικών μηχανικών μερών ανεμογεννήτριας [14]

Τα βασικά μέρη λοιπόν και βάσει του σχήματος 2.12, είναι τα εξής:

1. Ο πύργος (Tower)
2. Τα πτερύγια (Blades)
3. Ο ρότορας (Rotor)
4. Η άτρακτος (Nacelle)
5. Το ουραίο ανεμόμετρο (Wind vane)
6. Η γεννήτρια (Generator)
7. Ο ενεργοποιητής γωνίας βήματος (Pitch angle)
8. Η πλήμνη (Hub)
9. Η συσκευή προσανατολισμού εκτροπής (Yaw mechanism)
10. Το κιβώτιο ταχυτήτων (Gearbox)
11. Τα φρένα (Breaks)
12. Ο άξονας χαμηλής ταχύτητας (Low speed shaft)
13. Ο άξονας υψηλής ταχύτητας (High speed shaft)
14. Μετατροπέας ισχύος και ηλεκτρικός έλεγχος, συσκευές προστασίας και αποσύνδεσης (Controller)

## Πύργος

Ο πύργος μιας ανεμογεννήτριας υποστηρίζει την άτρακτο και την ανυψώνει σε τέτοιο σημείο όπου το αιολικό δυναμικό της περιοχής είναι τέτοιο ώστε να μπορεί να είναι συμφέρουσα η απόδοση της ανεμογεννήτριας. Πάνω στο πύργο στην ουσία στηρίζονται όλα τα μέρη της ανεμογεννήτριας και πέρα από της βαρυτικές δυνάμεις που ασκούνται πάνω του, ασκούνται και οι φυγόκεντρες δυνάμεις λόγω της περιστροφής των πτερυγίων. Για αυτό ακριβώς το λόγο η δομή του πύργου πρέπει να είναι πολύ ανθεκτική. Σε αυτό θα πρέπει να συνυπολογίσουμε και τις περιβαντολογικές επιπτώσεις πάνω του σε περιβάλλοντα συνήθως πολύ δύσκολα, όπου επικρατούν ακραίες καιρικές συνθήκες αρκετές φορές. Η αξία του πύργου μιας Α/Γ αποτελεί εν γένει περίπου το 20% της συνολικής τιμής.[9] Οι κύριοι τύποι πύργων είναι οι :

- Σταθεροί σωληνωτοί (οι οποίοι αποτελούν και τους ποιο διαδεδομένους)
- Σταθεροί δικτυωτοί
- Ανυψούμενοι πύργοι με επίτονους

## Πτερύγια

Τα πτερύγια αποτελούν την αρχή της μετατροπής της αιολικής ενέργειας αρχικά σε κινητική και στη συνέχεια σε ηλεκτρική. Για το λόγο αυτό το άνοιγμα των πτερυγίων, δηλαδή η διάμετρος του κύκλου που σχηματίζουν κατά την περιστροφή τους, είναι μεγάλο. Οι σημερινές ανεμογεννήτριες συνήθως έχουν τρία πτερύγια διότι περιστρέφονται με μικρότερη συχνότητα απ' ό,τι αυτή με δύο και κατά συνέπεια παράγει λιγότερο θόρυβο και είναι και λιγότερο χτυπητή στο ανθρώπινο μάτι. Οι έλικες κατασκευάζονται συνήθως χρησιμοποιώντας μια μήτρα από ψάθες υαλονήματος που είναι εμποτισμένη με ένα υλικό όπως ο πολυεστέρας (GRP = ενισχυμένη με γυάλινες ίνες πολυεστέρα). Ο πολυεστέρας έχει σκληρύνει εφόσον έχει εμποτιστεί το υαλόνημα. Εποξειδικά υλικά μπορεί να χρησιμοποιηθούν αντί του πολυεστέρα. Ομοίως η βασική μήτρα μπορεί να γίνει εξ ολοκλήρου ή εν μέρει από ίνες άνθρακα, το οποίο είναι ένα ελαφρύτερο, αλλά πιο δαπανηρό υλικό με υψηλή αντοχή. Wood-epoxy ελάσματα χρησιμοποιούνται επίσης για μεγάλα πτερύγια ρότορα. Πριν την συναρμολόγησή τους με τη πλήμνη, τα πτερύγια υπόκεινται σε εξονυχιστικές δοκιμές ώστε να βεβαιωθεί ότι η πλαστικοποίηση στο πτερύγιο είναι ασφαλής, δηλαδή ότι τα στρώματα του πτερυγίου του δρομέα δεν διαχωρίζονται (αποκόλληση). Επίσης, η δοκιμή επαληθεύει ότι οι ίνες δεν σπάνε κάτω από επαναλαμβανόμενη καταπόνηση. Στο σχήμα 2.14 απεικονίζεται ένα από τα τεστ αντοχής της ευκαμψίας ενός πτερυγίου.

## Ρότορας

Στην ουσία, ρότορας ονομάζεται το σύνολο της πλήμνης, των πτερυγίων και του άξονα. Για αυτό και ένας ρότορας μπορεί να είναι μονόπτερος, δίπτερος ή τρίπτερος, το οποίο είναι και το συνηθέστερο. Ο άξονας κατασκευάζεται από ενισχυμένο χάλυβα ώστε να αντέχει τα ασκούμενα

φορτία από την κινητική ενέργεια που μεταδίδεται μέσω των πτερυγίων. Επίσης, ο χάλυβας βοηθάει ώστε να μεταφέρει τις ισχυρές, μη μόνιμες ροπές, ενώ η έδραση του γίνεται σε δύο έδρανα ικανά να αντέξουν τόσο το βάρος του άξονα όσο και τα εξασκούμενα φορτία. Το σύνηθες εύρος ταχύτητας των ακροπτερυγίων είναι 50 με 70m/sec. Οι τρίπτερες ανεμογεννήτριες σε αυτή την ταχύτητα αποδίδουν καλύτερα σε σχέση με τις δίπτερες όπου και υπολείπονται κατά 2%. [16]



*Σχ 2.14. Τεστ αντοχής των υλικών κατασκευής πτερυγίου*

### Πλήμνη

Η πλήμνη είναι το σημείο στο οποίο ενώνονται τα πτερύγια και αυτή με την σειρά της ενώνεται με το δρομέα. Τα σημεία που υπάρχουν οι αναμονές για την σύνδεση με τα πτερύγια αποτελούνται από κοιλώματα με οπές για τις συνδέσεις τους, όπου τις περισσότερες φορές είναι με μορφή σχισμών ώστε να επιτρέπει την βελτιστοποίηση της γωνίας βήματος. Στις μεγάλες ανεμογεννήτριες, η πλήμνη είναι έτσι σχεδιασμένη ώστε να είναι προσβάσιμη από άνθρωπο εσωτερικά για να γίνεται έλεγχος και συντήρηση της σύνδεσης των ακροπτερυγίων. Η πλήμνη κατασκευάζεται συνήθως από όλκιμο σίδηρο. [16]

### Άτρακτος

Η άτρακτος είναι κατασκευασμένη από fiberglass. Οι έλεγχοι του κεντρικού άξονα μετάδοσης κίνησης, του κιβωτίου ταχυτήτων και του βήματος του πτερυγίου γίνεται μέσα σε αυτήν και πριν συναρμολογηθεί και στη συνέχεια να τοποθετηθεί επάνω στο πλαίσιο βάσης. Ο controller και οι ηλεκτρικές επικοινωνίες εγκαθίστανται ταυτόχρονα με την σύνδεση των πτερυγίων και την τοποθέτηση της άτρακτου στον πύργο.

### Ουραίο ανεμόμετρο

Το ουραίο ανεμόμετρο μετρά την ταχύτητα του ανέμου που επικρατεί στο ύψος την πλήμνης και επικοινωνεί με τη μονάδα εκτροπής (Yaw mechanism/drive) για να προσανατολίσει την

ανεμογεννήτρια σωστά σε σχέση με τον άνεμο ώστε να έχουμε την βέλτιστη απόδοση. Τα ηλεκτρικά σήματα του ανεμόμετρου χρησιμοποιούνται από τον ηλεκτρονικό ελεγκτή της ανεμογεννήτριας για να αρχίσει την λειτουργία της όταν η ταχύτητα του ανέμου ξεπεράσει μια ελάχιστη τιμή. Ο υπολογιστής σταματά τη λειτουργία της ανεμογεννήτριας αυτόματα αν η ταχύτητα του ανέμου υπερβεί ένα ανώτατο όριο προκειμένου να προστατεύσει την ανεμογεννήτρια και το περιβάλλον αυτής. [18]

### Ο ενεργοποιητής γωνίας βήματος

Ο ενεργοποιητής γωνίας βήματος (Pitch angle) είναι ο μηχανισμός που στρέφει τα πτερύγια στον άνεμο, αλλάζοντας τη γωνία τους, ώστε να μειώσει τις στροφές του ρότορα σε πολύ μεγάλες ταχύτητες ανέμου ή να τις αυξήσει λόγω χαμηλής ταχύτητας του ανέμου [18].

### Η συσκευή προσανατολισμού εκτροπής

Η συσκευή προσανατολισμού εκτροπής (Yaw mechanism), προσανατολίζει την ανεμογεννήτρια μέσα στην πορεία του ανέμου ώστε να έχουμε τη μέγιστη δυνατή απόδοση της και βάσει πάντα τις ενδείξεις που έχει λάβει από το ανεμόμετρο [18].

### Το κιβώτιο ταχυτήτων

Το κιβώτιο ταχυτήτων (Gearbox), συνδέει τον άξονα χαμηλής ταχύτητας με τον άξονα υψηλής ταχύτητας και αυξάνει τις ταχύτητες περιστροφής από περίπου 30-60 περιστροφές ανά λεπτό (rpm), σε περίπου 1,000-1,800 rpm. Αυτή είναι η ταχύτητα περιστροφής που απαιτείται από τις περισσότερες γεννήτριες για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Το κιβώτιο ταχυτήτων αποτελεί ένα δαπανηρό και βαρύ μέρος της ανεμογεννήτριας. Οι νεότερες ανεμογεννήτριες που διαθέτουν "σύστημα άμεσης μετάδοσης», λειτουργούν σε χαμηλότερες ταχύτητες περιστροφής και δεν χρειάζονται κιβώτια ταχυτήτων [18].

### Τα φρένα

Τα φρένα (Breaks) έχουν ως στόχο να σταματήσουν με μηχανική, ηλεκτρική ή υδραυλική υποστήριξη το ρότορα σε περίπτωση έκτακτης ανάγκης [18].

### Ο άξονας χαμηλής ταχύτητας

Ο άξονας χαμηλών στροφών (Low speed shaft) συνδέει την κεφαλή του ρότορα με το κιβώτιο ταχυτήτων. Σε ανεμογεννήτρια 1MW ο ρότορας περιστρέφεται σχετικά αργά, περίπου 19 με 30 περιστροφές ανά λεπτό (rpm). Το διαφορικό περιέχει σωλήνες για το υδραυλικό σύστημα ώστε να μπορεί να λειτουργήσει το αεροδυναμικό φρένο [15].

## Ο άξονας υψηλής ταχύτητας

Το διαφορικό υψηλών ταχυτήτων περιστρέφεται περίπου με 1500 στροφές ανά λεπτό (rpm) και οδηγεί την ηλεκτρική γεννήτρια. Το διαφορικό είναι εξοπλισμένο με ένα δισκόφρενο σε περίπτωση έκτακτης ανάγκης. Το μηχανικό φρένο χρησιμοποιείται σε περίπτωση που το αεροδυναμικό φρένο υποστεί βλάβη ή η ανεμογεννήτρια επισκευάζεται [15].

## Μετατροπέας ισχύος και ηλεκτρικός έλεγχος, συσκευές προστασίας και αποσύνδεσης

Ο Μετατροπέας ισχύος και ηλεκτρικός έλεγχος, συσκευές προστασίας και αποσύνδεσης (Controller) στην ουσία είναι ένας υπολογιστής ο οποίος σταματά τη λειτουργία της ανεμογεννήτριας αυτόματα αν η ταχύτητα του ανέμου υπερβεί ένα ανώτατο όριο προκειμένου να προστατεύσει την ανεμογεννήτρια και το περιβάλλον αυτής. Ορίζει την γωνία των πτερυγίων βάσει των σημάτων που λαμβάνει από το ανεμόμετρο. Ελέγχει το μετατροπέα ισχύος της ανεμογεννήτριας βάσει των σημάτων ελέγχου που λαμβάνει από το κέντρο ελέγχου της αρχής ηλεκτρισμού και γενικά αποτελεί το «μυαλό» της ανεμογεννήτριας ώστε να συμπεριφέρεται με ασφάλεια και βάσει των προτύπων που οφείλει να ακολουθεί [15].

## Γεννήτρια

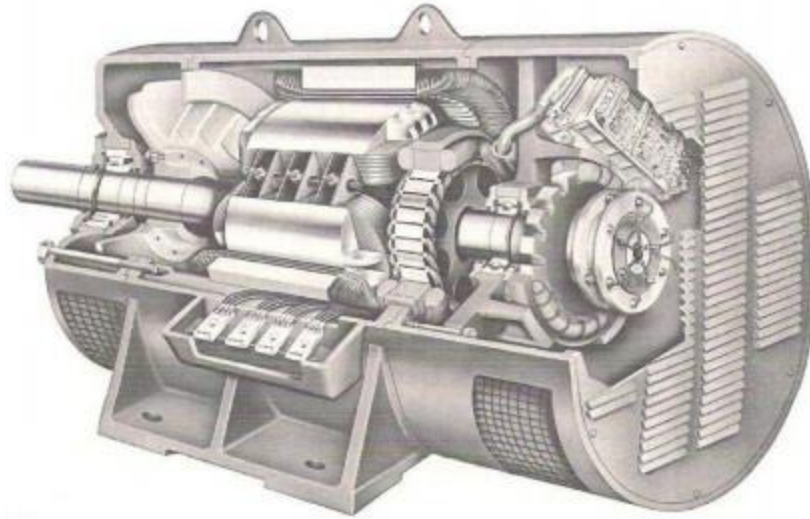
Η γεννήτρια (Generator) αποτελεί ίσως το πιο σημαντικό κομμάτι της ανεμογεννήτριας, διότι αυτή είναι που μετατρέπει τη μηχανική ενέργεια σε ηλεκτρική ενέργεια. Για αυτό το λόγο αλλά και γιατί χρησιμοποιούνται διάφοροι τύποι στις ανεμογεννήτριες, θα την αναλύσουμε εκτενέστερα παρακάτω [15].

## **2.6 Τεχνολογίες γεννητριών**

### **2.5.1. Γενικά**

Οι γεννήτριες στις ανεμογεννήτριες έχουν πιο ασυνήθιστο τρόπο λειτουργίας σε σύγκριση με τις άλλες μονάδες που βρίσκουμε σε διάφορες άλλες εφαρμογές στο ηλεκτρικό δίκτυο. Ο λόγος είναι ότι η γεννήτρια πρέπει να συνεργαστεί με μια πηγή ισχύος (ο ρότορας της ανεμογεννήτριας), η οποία παρέχει σε μεγάλο ποσοστό κυμαινόμενη μηχανική δύναμη (ροπή). Σε μεγάλες ανεμογεννήτριες (πάνω από 100-150 kW) η τάση που παράγεται από την γεννήτρια είναι συνήθως 690 V (τριφασικό εναλλασσόμενο ρεύμα - AC). Το παραγόμενο ρεύμα στέλνεται σε ένα μετασχηματιστή, συνήθως στο εσωτερικό του πύργου, για να αυξήσει την τάση του κάπου μεταξύ 10.000 και 30.000 βολτ, ανάλογα με το επίπεδο στο τοπικό ηλεκτρικό δίκτυο. Η συχνότητα για τις χώρες, πλην της Αμερικάνικης ηπείρου, είναι τα 50Hz.





*Σχ 2.14. Τομή σύγχρονης τριφασικής γεννήτριας που χρησιμοποιείται σε ανεμογεννήτριες*

Οι γεννήτριες κατά την λειτουργίας τους, ειδικά σε ζεστά κλίματα και ειδικά τα καλοκαίρια, είναι αναγκαίο να ψύχονται. Οι περισσότεροι κατασκευαστές αυτό το επιτυγχάνουν με τον εγκλεισμό της γεννήτριας σε ένα αγωγό όπου υπάρχει και ένας ανεμιστήρας μέσω του οποίου ψύχονται. Κάποιοι κατασκευαστές, χρησιμοποιούν υδρόψυκτα συστήματα. Αυτές οι κατασκευές είναι ασφαλώς πιο συμπαγής σε σχέση με το αερόψυκτο σύστημα και παρουσιάζουν μεγαλύτερο πλεονέκτημα στην απόδοση της γεννήτριας. Ασφαλώς, για την κατασκευή του υδρόψυκτου συστήματος, απαιτείται κάποιος εναλλάκτης θερμότητας (ψυγείο) ώστε να μπορεί να αποβάλλεται η θερμότητα από το ψυκτικό μέσο.

Ένας από τους παράγοντες που χαρακτηρίζει τις γεννήτριες, είναι η τεχνολογία παραγωγής. Δεν υπάρχει αποδεκτή βέλτιστη λύση από την ακαδημαϊκή κοινότητα και από την βιομηχανία που ασχολείται με αυτό το είδος. Όλα έχουν να κάνουν με την εφαρμογή και το που επιθυμούμε να την χρησιμοποιήσουμε, καθώς και με ποια θετικά στοιχεία θέλουμε να εκμεταλλευτούμε περισσότερο. Παραδοσιακά, τρεις είναι οι κύριοι τύποι γεννητριών σε αιολικές εφαρμογές. Αυτοί είναι οι :

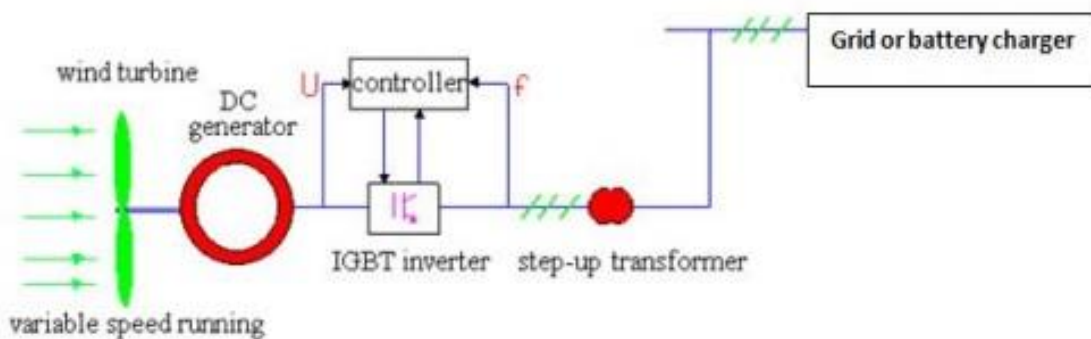
- Οι γεννήτριες συνεχούς ρεύματος (DC Generators)
- Οι σύγχρονες γεννήτριες εναλλασσόμενου ρεύματος (AC synchronous generators)
- Οι ασύγχρονες γεννήτριες εναλλασσόμενου ρεύματος (AC asynchronous generators)

Οι κάθε μία από τις παραπάνω, μπορεί να λειτουργήσει με σταθερές και μεταβλητές στροφές. Αυτό το χαρακτηριστικό είναι απαραίτητο για την λειτουργία των ανεμογεννητριών,

μιας και η φύση της αιολικής ενέργειας είναι μεταβαλλόμενη και οι μεταβλητές στροφές αποτελούν πλεονέκτημα ώστε να αποφεύγεται η φυσική καταπόνηση στα πτερύγια και στο σύστημα μετάδοσης της κίνησης. Επίσης οι μεταβλητές στροφές της γεννήτριας, βελτιώνουν την αεροδυναμική της συμπεριφορά αλλά και την συμπεριφορά της στις παροδικές ριπές από τον άνεμο.

### 2.5.2. Οι γεννήτριες συνεχούς ρεύματος (DC generators)

Σε συμβατικές μηχανές συνεχούς ρεύματος, το πεδίο είναι στο στάτη και ο οπλισμός είναι στο ρότορα. Ο στάτης περιλαμβάνει έναν αριθμό πόλων που διεγείρονται είτε με μόνιμους μαγνήτες, είτε με τυλίγματα πεδίου συνεχούς ρεύματος (DC). Αν η μηχανή είναι ηλεκτρικά διεγερμένη, τείνει να ακολουθήσει την λειτουργία της DC γεννήτριας με παράλληλο τύλιγμα. Ένα παράδειγμα του συστήματος ανεμογεννήτριας DC απεικονίζεται στο σχήμα 2.15 και αποτελείται από τα πτερύγια, μια γεννήτρια συνεχούς ρεύματος, ένα μετατροπέας με διπολικά τρανζίστορ μονωμένης πύλης (IGBT), ένα ελεγκτή, ένα μετασχηματιστή αύξησης και το δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας. Για τις DC γεννήτριες με παράλληλο τύλιγμα, το ρεύμα πεδίου (και ως εκ τούτου το μαγνητικό πεδίο) αυξάνει με την ταχύτητα λειτουργίας, ενώ η πραγματική ταχύτητα της ανεμογεννήτριας καθορίζεται από την ισορροπία μεταξύ της ροπής στα πτερύγια και της ροπής του φορτίου.



Σχ 2.15. Σύστημα DC γεννήτριας σε ανεμογεννήτρια.

Ο ρότορας περιλαμβάνει την περιέλιξη επαγωγής σε έναν οπλισμό που είναι συνδεδεμένος σε δακτυλίους ολίσθησης. Ηλεκτρική ισχύς εξάγεται μέσα από τα λεγόμενα καρβουνάκια (βούρτσες) που συνδέουν τον συλλέκτη όπου χρησιμοποιείται για να ανορθώσει το παραγόμενο εναλλασσόμενου ρεύματος στην έξοδο DC. Σαφώς, απαιτούν τακτική συντήρηση και είναι σχετικά δαπανηρές λόγω της χρήσης των συλλεκτών και βουρτσών. Σε γενικές γραμμές, οι DC

γεννήτριες αυτής της τεχνολογίας, δεν χρησιμοποιούνται ευρέως παρά μόνο σε μικρές ανεμογεννήτριες όπου το φορτίο είναι κοντά στη περιοχή εγκατάστασης της ανεμογεννήτριας και σε εφαρμογές φόρτισης μπαταριών.

### 2.5.3. Οι σύγχρονες γεννήτριες εναλλασσόμενου ρεύματος (AC synchronous generators)

Από τις αρχές του χρόνου της ανάπτυξης ανεμογεννητριών, καταβλήθηκαν σημαντικές προσπάθειες για να χρησιμοποιούνται σύγχρονες μηχανές τριών φάσεων. Οι σύγχρονες AC γεννήτριες ανεμογεννητριών, μπορούν να πάρουν σταθερή ή DC διέγερση είτε από μόνιμους μαγνήτες είτε από ηλεκτρομαγνήτες. Ως εκ τούτου ονομάζονται σύγχρονες γεννήτριες μόνιμων μαγνητών (PMSGs) και ηλεκτρικά διεγερμένες σύγχρονες γεννήτριες (EESGs), αντίστοιχα. Όταν ο ρότορας κινείται από την κίνηση των πτερυγίων από τον άνεμο, ένα τριφασικό ρεύμα παράγεται στις περιελίξεις στάτη που είναι συνδεδεμένο με το δίκτυο μέσω των μετασχηματιστών και των μετατροπέων ισχύος. Για σύγχρονες γεννήτριες σταθερών στροφών, η ταχύτητα περιστροφής του ρότορα θα πρέπει να διατηρείται ακριβώς στο ονομαστικό επίπεδο στροφών της σύγχρονης γεννήτριας. Διαφορετικά, ο συγχρονισμός θα χαθεί.



*Σχ 2.16. Τομή σύγχρονης γεννήτριας μόνιμων μαγνητών*

Οι σύγχρονες γεννήτριες, αποτελούν μια δοκιμασμένη τεχνολογία μηχανών, μιας και η απόδοσή τους στην παραγωγή ενέργειας έχει μελετηθεί και έχει ευρέως γίνει αποδεκτή μέσα από

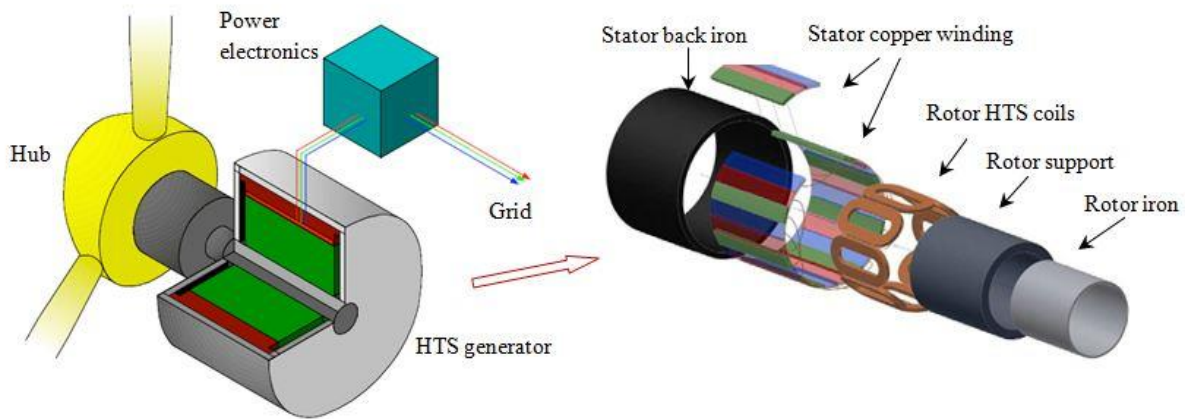
την πάροδο των χρόνων. Στην θεωρία, τα χαρακτηριστικά της άεργης ισχύος μια σύγχρονης γεννήτριας, μπορούν να ελεγχθούν μέσω των πεδίων της ηλεκτρικής διέγερσης. Επίσης, όταν χρησιμοποιούμε σύγχρονες γεννήτριες σταθερών στροφών, η μεταβλητή ταχύτητα ανέμου και οι απότομες ριπές, θα δημιουργήσουν ανάλογες διακυμάνσεις στην παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια, οι οποίες θα διοχετεύονταν στο δίκτυο που είναι συνδεδεμένη η ανεμογεννήτρια. Παρόλα αυτά, οι σύγχρονες γεννήτριες διακρίνονται για την χαμηλή επίδρασή τους από τέτοιες διακυμάνσεις ώστε η μετάδοση αυτών να μην απορροφάτε ηλεκτρικά. Κατά συνέπεια απαιτεί κάποιο έξτρα στοιχείο απόσβεση, δηλαδή ή το συγκρότημα του κιβωτίου ταχυτήτων να βρίσκεται πάνω σε ελατήρια και ή η χρήση αποσβεστήρων για την απορρόφηση των κραδασμών. Όταν συνδεθεί με το δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας, χρειάζεται λεπτούς χειρισμούς ώστε να συγχρονίσει την συχνότητά της. Οι σύγχρονες γεννήτριες είναι γενικά πιο πολύπλοκες, πιο δαπανηρές και πιο επιρρεπείς σε αποτυχία από τις επαγωγικές γεννήτριες. Σε περίπτωση που χρησιμοποιούνται ηλεκτρομαγνήτες στις σύγχρονες γεννήτριες, η ρύθμιση τάσης λαμβάνει χώρα μέσα σε αυτές, ενώ όταν χρησιμοποιούνται μηχανές με διέγερση από μόνιμους μαγνήτες, ο έλεγχος τάσης επιτυγχάνεται στο κύκλωμα μετατροπέα. Στις τελευταίες δεκαετίες, οι γεννήτριες μόνιμων μαγνητών έχουν χρησιμοποιηθεί κατά κόρων στις εφαρμογές ανεμογεννητριών λόγω της υψηλής πυκνότητας ισχύος τους και της χαμηλής μάζας. Συχνά αυτές οι μηχανές αναφέρονται ως οι σύγχρονες γεννήτριες μόνιμου μαγνήτη (ΣΓΜΝ) και θεωρούνται η ιδανική λύση σε μικρές ανεμογεννήτριες. Το εσωτερικό αυτής της γεννήτριας είναι λιτό και απλοϊκό σχετικά και απεικονίζεται στο σχήμα 2.16 [20].

Οι μόνιμοι μαγνήτες είναι εγκατεστημένοι στο ρότορα με σκοπό την δημιουργία σταθερού μαγνητικού πεδίου και η παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς προέρχεται από το στάτη μέσω του συλλέκτη, των δαχτυλιών ολίσθησης και των βουρτσών (καρβουνάκια). Η αρχή της λειτουργίας των γεννητριών μόνιμων μαγνητών, είναι παρόμοια με εκείνη των σύγχρονων γεννητριών εκτός του ότι γεννήτριες μόνιμων μαγνητών μπορεί να λειτουργήσουν ασύγχρονα. Τα πλεονεκτήματα της σύγχρονης γεννήτριας μόνιμου μαγνήτη περιλαμβάνουν την εξάλειψη του συλλέκτη, των δαχτυλιών ολίσθησης και των βουρτσών, έτσι ώστε οι μηχανές είναι να είναι στιβαρές, αξιόπιστες και απλές. Η σύγχρονη γεννήτρια μόνιμου μαγνήτη (ΣΓΜΝ) καταργεί τη περιέλιξη πεδίου (και τις συναφείς απώλειες ισχύος) αλλά κάνει τον έλεγχο πεδίου αδύνατο με αποτέλεσμα το κόστος της να είναι απαγορευτικά υψηλό για τις μεγάλες σε ισχύ μηχανές.

Λόγω της μεταβλητότητας της ταχύτητας του ανέμου, οι ΣΓΜΝ δεν μπορούν να παράγουν ηλεκτρική ενέργεια με σταθερή συχνότητα. Ως αποτέλεσμα, θα πρέπει να συνδέεται με το δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας μέσω AC/DC/AC μετατροπής, από μετατροπείς ισχύος. Δηλαδή, η παραγόμενη εναλλασσόμενη ισχύς (AC), με μεταβλητή συχνότητα και μέγεθος, πρώτα θα ανορθωθεί σε σταθερά συνεχής ισχύς (DC) και στη συνέχεια να μετατραπεί ξανά σε εναλλασσόμενη ισχύ (AC) με σταθερή συχνότητα μέγεθος. Το είδος γεννήτριας αυτό (ΣΓΜΝ) δύναται για να χρησιμοποιηθεί και για εφαρμογές άμεσης οδήγησης (Motor drive). Σε αυτή την περίπτωση, απαλλάσσουν την ανεμογεννήτρια από το κιβώτιο ταχυτήτων, το οποίο είναι

υπεύθυνο για ένα μεγάλο ποσοστό βλαβών στην ανεμογεννήτρια. Τέλος, θα πρέπει να έχουν μεγάλο αριθμό πόλων και να είναι μεγαλύτερες από τις όμοιες τους με κιβώτιο ταχυτήτων.

Μια πιθανή παραλλαγή των σύγχρονων γεννητριών είναι η υπεραγώγιμη γεννήτρια υψηλών θερμοκρασιών. Μία τέτοια γεννήτρια για ισχύ αρκετών MW και για χαμηλές στροφές σε υψηλές θερμοκρασίες (HTS), απεικονίζεται στο σχήμα 2.17. Η μηχανή αποτελείται από το στάτη, τη περιέλιξη χαλκού του στάτη, τα πηνία τομέα HTS, το πυρήνα του ρότορα, τη δομή στήριξης του ρότορα, το σύστημα ψύξης του ρότορα, το εξωτερικό ψυγείο, την ηλεκτρομαγνητική ασπίδα και τα αμορτισέρ, το ρουλεμάν, τον άξονα και τη στέγαση. Κατά τον σχεδιασμό της μηχανής, αποτελούν μεγάλη πρόκληση οι ρυθμίσεις του στάτη, του συστήματος ψύξης και του κιβωτίου ταχυτήτων, ώστε να διατηρηθούν τα HTS πηνία σε χαμηλή θερμοκρασία λειτουργίας.

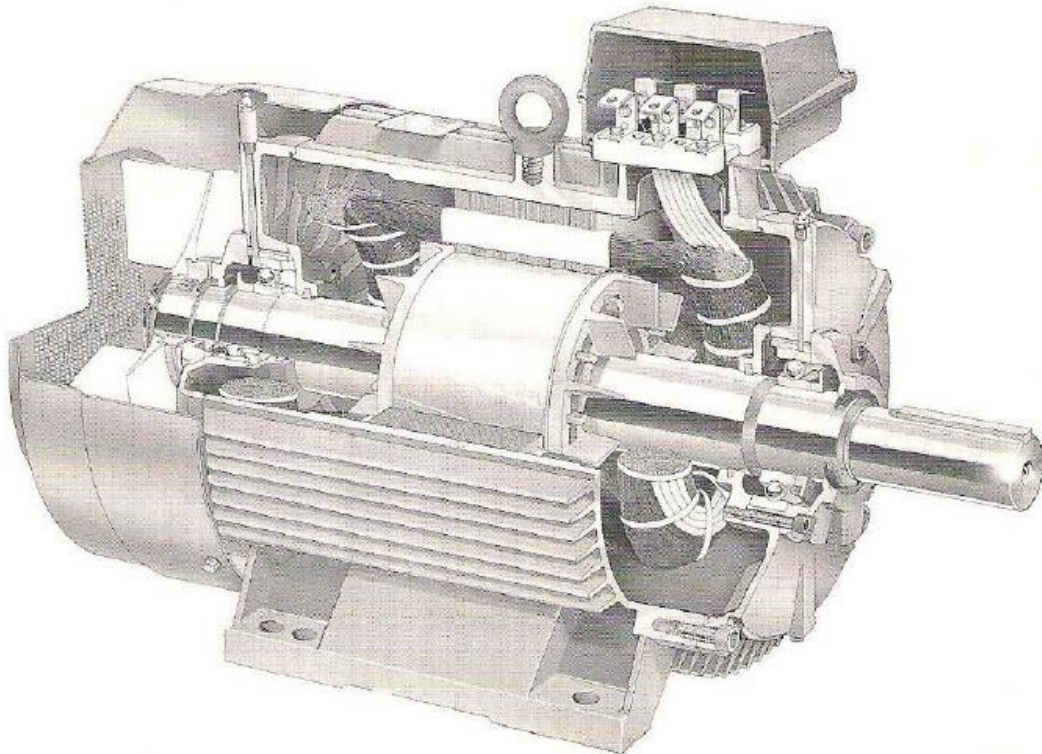


Σχ 2.17. Σύγχρονο σύστημα γεννήτριας HTS

Τα υπεραγώγιμα πηνία μπορούν να μεταφέρουν δέκα φορές περισσότερο ρεύμα από τα συμβατικά καλώδια χαλκού με αμελητέα αντίσταση και λιγότερες θερμικές απώλειες. Χωρίς αμφιβολία, η χρήση των υπεραγωγών θα εξαλείψει κάθε απώλεια του κυκλώματος ισχύος και την ικανότητα της υπεραγωγιμότητας να αυξάνει τη πυκνότητα ρεύματος που επιτρέπεται στα υψηλά μαγνητικά πεδία. Αυτό οδηγεί σε σημαντική μείωση της μάζας και του μεγέθους της ανεμογεννήτριας. Για αυτό ακριβώς το λόγο οι γεννήτριες με υπεραγώγιμα πηνία συμβάλλουν στη μείωση της χωρητικότητας και του βάρους τους και ταιριάζουν καλύτερα για εφαρμογές ανεμογεννητριών από 10MW και πάνω. Ωστόσο, υπάρχουν πολλές τεχνικές προκλήσεις να αντιμετωπιστούν ειδικά για τη μεγάλη διάρκεια ζωής και το χαμηλό κόστος συντήρησης των ανεμογεννητριών αυτών [21].

#### 2.5.4. Οι ασύγχρονες γεννήτριες εναλλασσόμενου ρεύματος (AC asynchronous generators)

Οι συμβατικές μονάδες παραγωγής χρησιμοποιούν σύγχρονες μηχανές ενώ στις σύγχρονες εφαρμογές ανεμογεννητριών χρησιμοποιούνται γεννήτριες επαγωγής. Αυτές οι γεννήτριες επαγωγής, διαχωρίζονται σε δύο είδη, στις επαγωγικές γεννήτριες σταθερών στροφών με κινητήρα βραχυκυκλωμένου δρομέα (FSIGs), η σύνθεση της οποίας απεικονίζεται στο σχήμα 2.18 και στις επαγωγικές γεννήτριες διπλής τροφοδοσίας με τυλιγμένο δρομέα (DFIGs), η σύνθεση της οποίας απεικονίζεται στο σχήμα 2.19.

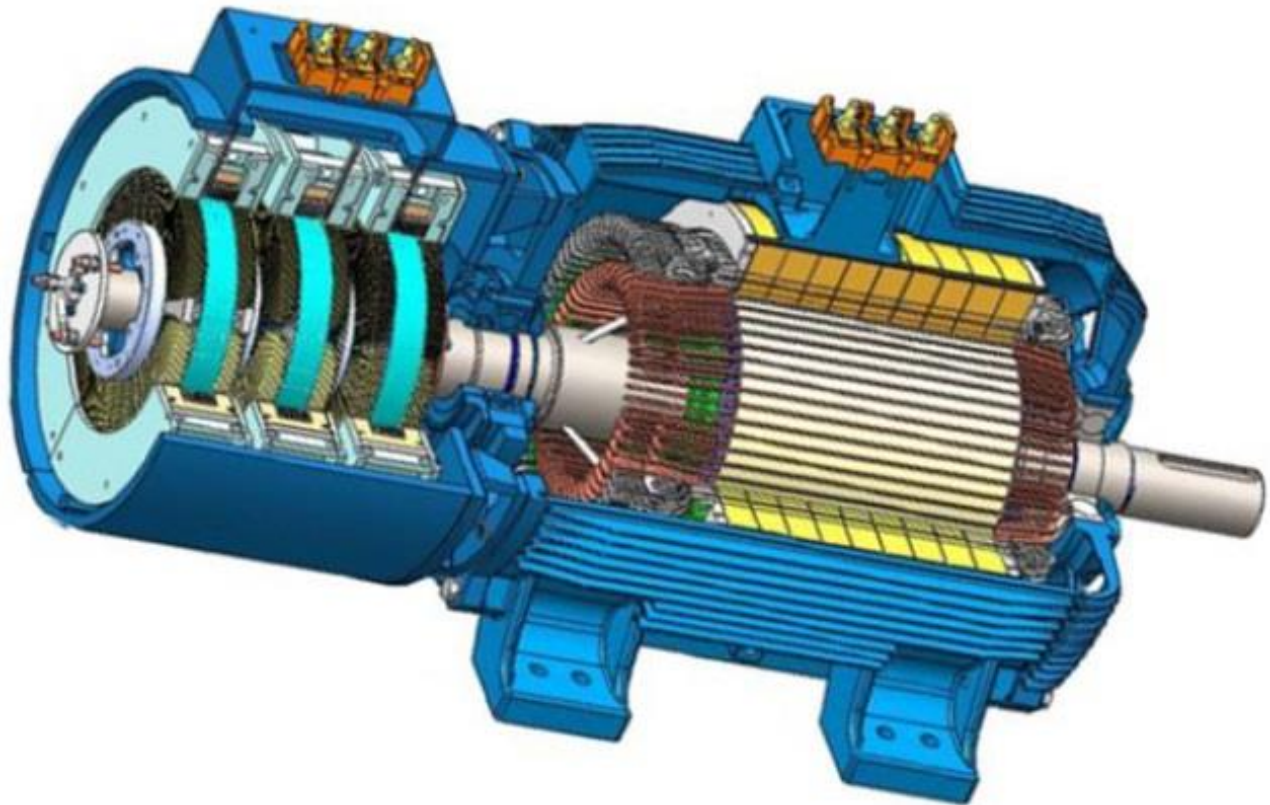


*Σχ 2.18. Επαγωγικές γεννήτριες σταθερών στροφών με κινητήρα βραχυκυκλωμένου δρομέα (FSIGs)*

Όταν παρέχεται μια τριφασική AC τροφοδοσία στο στάτη, δημιουργείται ένα περιστρεφόμενο μαγνητικό πεδίο σε όλο το διάκενο. Αν ο ρότορας περιστρέφεται με ταχύτητα διαφορετική από τη σύγχρονη ταχύτητα, δημιουργείται η λεγόμενη ταχύτητα ολίσθησης και το κύκλωμα του δρομέα είναι ενεργοποιημένο. Γενικά, οι γεννήτριες επαγωγής είναι απλές, αξιόπιστες, φθηνές και αρκετά ανεπτυγμένες. Έχουν υψηλό βαθμό απόδοσης και είναι ικανές να απορροφούν τις διακυμάνσεις της ταχύτητας του ρότορα και τα μεταβατικά φαινόμενα της μετάδοσης στην κίνηση. Ωστόσο, οι μηχανές επαγωγής απορροφούν άεργο ισχύ από το δίκτυο και έτσι χρειάζεται κάποια μορφή αντιστάθμισης της άεργου ισχύος, όπως η χρήση πυκνωτών ή

μετατροπέων ισχύος. Για επαγωγικές γεννήτριες σταθερών στροφών, ο στάτης συνδέεται με το δίκτυο μέσω ενός μετασχηματιστή και ο ρότορας είναι συνδεδεμένος με την ανεμογεννήτρια μέσω ενός κιβωτίου ταχυτήτων. Η ταχύτητα του ρότορα θεωρείται σταθερή. Στην ουσία, μεταβάλλεται μέσα σε ένα πολύ μικρό εύρος τιμών. Μέχρι το 1998, οι περισσότεροι κατασκευαστές ανεμογεννητριών χρησιμοποιούσαν επαγωγικές γεννήτριες σταθερών στροφών σε εφαρμογές τους μέχρι 1,5MW. Αυτές οι γεννήτριες συνήθως λειτουργούν σε 1500 στροφές ανά λεπτό (rpm) στα 50 Hz με κιβώτιο ταχυτήτων τριών σταδίων [23].

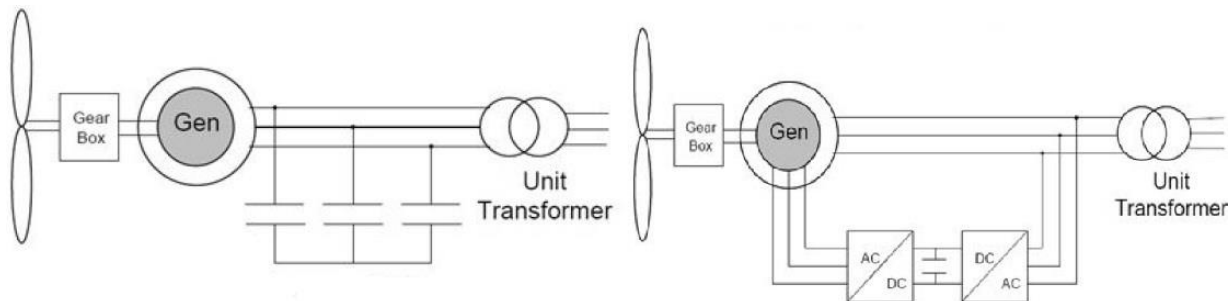
Οι κινητήρες επαγωγής με κλωβό (SCIGs), μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε ανεμογεννήτριες μεταβλητών στροφών, στον έλεγχο σύγχρονων μηχανών. Ωστόσο, η τάση εξόδου δεν μπορεί να ελεγχθεί εσωτερικά και η άεργος ισχύς πρέπει να παρέχεται εξωτερικά. Ασφαλώς και οι επαγωγικές γεννήτριες σταθερής ταχύτητας περιορίζονται στο να λειτουργούν μέσα σε ένα πολύ στενό εύρος διακριτών ταχυτήτων. Τα μειονεκτήματά τους είναι ο θόρυβος, η χαμηλή απόδοση και η αξιοπιστία. Έχει αποδειχθεί τα τελευταία χρόνια ότι αυτού του είδους οι μηχανές παρουσιάζουν μεγάλο αριθμό βλαβών και απαιτούν εντατική και κοστοβόρα συντήρηση.



*Σχ 2.19. Επαγωγική γεννήτρια διπλής τροφοδοσίας με τυλιγμένο δρομέα (DFIGs)*

Μέχρι τις αρχές της νέας χιλιετίας, οι επαγωγικοί κινητήρες κλωβού (SCIGs), αποτελούσαν την αιχμή του δόρατος στην αιολική βιομηχανία μέχρι να πάρουν τα ηνία οι επαγωγικές γεννήτριες διπλής τροφοδοσίας με τυλιγμένο δρομέα (DFIGs). Το ποσοστό εγκατάστασης των DFIGs στις νέες ανεμογεννήτριες, φθάνει σήμερα (και ίσως ξεπερνά) το 85% και σε ισχύς ανεμογεννητριών ίση και μεγαλύτερη των 5MW. Σε αυτό το είδος ανεμογεννήτριας, ο στάτης συνδέεται άμεσα με το δίκτυο μέσω των μετασχηματιστών και ο ρότορας είναι συνδεδεμένος με το δίκτυο μέσω μετατροπέων ισχύος με διαμόρφωση πλάτους (PWM). Οι μετατροπείς μπορούν να ελέγχουν τις μετατοπίσεις ρεύματος του κυκλώματος του δρομέα, τη συχνότητα και τη γωνία φάσης. Τέτοιες επαγωγικές γεννήτριες είναι σε θέση να λειτουργούν σε ένα ευρύ φάσμα ολίσθησης (συνήθως  $\pm 30\%$  από την σύγχρονη ταχύτητα). Ως αποτέλεσμα των παραπάνω είναι αυτού του είδους οι ανεμογεννήτριες να προσφέρουν πολλά πλεονεκτήματα, όπως υψηλή απόδοση ενέργειας, μείωση σε μηχανικές καταπονήσεις και διακυμάνσεις ισχύος, και δυνατότητα ελέγχου της άεργου ισχύος.

Στις επαγωγικές γεννήτριες, όλη η άεργη ισχύς παρέχεται από το δίκτυο ή από τοπικούς πυκνωτές. Όταν υπάρχουν πυκνωτές αντιστάθμισης του συντελεστή ισχύος, είναι πιθανό να προκαλέσουν αυτοδιέγερση. Επιπλέον, η απόσβεση κραδασμών μπορεί να οδηγήσει σε απώλειες ισχύος στο ρότορα ενώ δεν υπάρχει άμεσος έλεγχος της τάσης του τερματικού σταθμού (όπως η άεργη ισχύς), ούτε επιδέχεται ρεύματα σφάλματος.



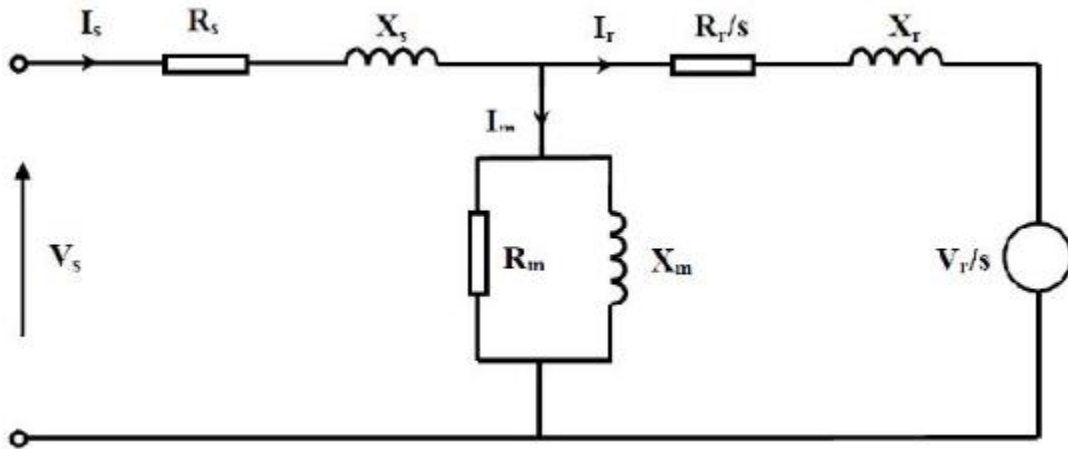
**Σχ 2.20.** Απεικόνιση δύο από τους τρόπους σύνδεσης μιας επαγωγικής γεννήτριας.

Όπως φαίνεται στο σχήμα 2.20 (β), ο ρότορας της γεννήτριας DFIG συνδέεται μηχανικά με την ανεμογεννήτρια μέσω ενός συστήματος μετάδοσης κίνησης, το οποίο μπορεί να περιέχει άξονες υψηλής και χαμηλής ταχύτητας, ρουλεμάν και ένα κιβώτιο ταχυτήτων. Ο ρότορας τροφοδοτείται από τους αμφίδρομους μετατροπείς τάσης-πηγής. Με αυτόν τον τρόπο, η ταχύτητα και η ροπή της DFIG μπορεί να ρυθμίζεται με έλεγχο της πλευράς του ρότορα μετατροπέα (RSC). Άλλο ένα χαρακτηριστικό τους είναι ότι οι γεννήτριες DFIG μπορεί να λειτουργήσουν με ταχύτητα μικρότερη της σύγχρονης αλλά και μεγαλύτερη αυτής. Ο στάτης μεταφέρει πάντα ισχύ στο δίκτυο, ενώ ο ρότορας μπορεί να χειριστεί την ισχύ και από τις δύο κατευθύνσεις. Το τελευταίο οφείλεται στο γεγονός ότι οι μετατροπείς PWM είναι ικανοί να προμηθεύουν τάση και



ρεύμα σε διαφορετικές γωνιακές φάσεις. Σε αυτήν την περίπτωση, η ενεργός ισχύς ρέει από το δίκτυο προς το ρότορα. Σε ταχύτητες κάτω από την σύγχρονη, ο μετατροπέας από την πλευρά του ρότορα (RSC) ενεργεί σαν ανορθωτής και από την πλευρά του δικτύου (GSC) σαν μετατροπέας. Κατά συνέπεια, η ενεργός ισχύς διέρχεται τόσο από το στάτη, όσο και από το ρότορα, προς το δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας.

Στη συνέχεια, θα προσπαθήσουμε να κάνουμε μια πιο λεπτομερή ανάλυση της πιο διαδεδομένης γεννήτριας στις εφαρμογές ανεμογεννητριών, την επαγωγική γεννήτρια διπλής τροφοδοσίας με τυλιγμένο δρομέα (DFIGs). Για να το επιτύχουμε αυτό θα πρέπει να κάνουμε την ανάλυση ανά φάση, χρησιμοποιώντας το ισοδύναμο κύκλωμα του σχήματος 2.21.



Σχ 2.21. Ισοδύναμο κύκλωμα επαγωγικής γεννήτριας διπλής τροφοδοσίας με τυλιγμένο δρομέα (DFIGs)

Από αυτό το σχήμα, μπορεί να γίνει κατανοητό ότι η DFIG διαφέρει από την συμβατική γεννήτρια επαγωγής στο κύκλωμα του δρομέα, όπου μια δεύτερη πηγή τάσης προστίθεται για την τροφοδοσία τάσης στο κύκλωμα του δρομέα. Ο πραγματικός έλεγχος d-q της DFIG είναι ανάλογος με το μέγεθος και τη φάση της εγχεόμενης τάσης στο κύκλωμα. Η μορφή της εξίσωσης για το κύκλωμα αυτό είναι:

$$\begin{bmatrix} V_s \\ V_r/s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + j(X_s + X_m) & -jX_m \\ -jX_m & R_r/s + j(X_r + X_m) \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

Η συνολική ισχύς εισόδου  $P_{in}$  είναι το σύνολο της ισχύς εισόδου  $P_{out}$  και της ισχύς απωλειών  $P_{loss}$ . Οι  $P_{loss}$  αποτελούνται από τις απώλειες στο στάτη  $P_{cu1}$ , τις απώλειες στο ρότορα  $P_{cu2}$ , τις απώλειες στον πυρήνα  $P$ , τις απώλειες παρεκτροπής ανέμου, τις απώλειες τριβής PWF και των τυχαίων απωλειών  $P_{stray}$ . Από τις παραπάνω, οι απώλειες  $P_{cu1}$ , είναι ανάλογη του τετραγώνου του

ρεύματος του στάτη  $I_s$ , ενώ οι απώλειες  $P_{cu2}$  ισούνται με το τετράγωνο του ρεύματος του δρομέα  $I_r$ . Οι παράπλευρες απώλειες  $P_{stray}$  χωρίζονται σε δύο μέρη, στην θεμελιώδη συνιστώσα που προέρχεται από την πλευρά του στάτη  $P_{fun}$  και την θεμελιώδη συνιστώσα που προέρχεται από την πλευρά του ρότορα  $P_{har}$ . Οπότε η  $P_{fun}$  είναι ανάλογη με  $I_s^2$  και η  $P_{har}$  με  $I_r^2$ . Οπότε, οι συνολικές απώλειες δίνονται από την παρακάτω σχέση:

$$P_{loss} = 3I_s^2(R_s + R_{fun}) + 3I_r^2(R_r + R_{har}) + P_{core} + P_{wf} \quad (2.11)$$

Για την βελτιστοποίηση της γεννήτριας DFIG, θα πρέπει να μελετώνται αριθμητικά και πειραματικά οι απώλειες της. Μια επιπλέον παράμετρος της βελτιστοποίησης, είναι το σημείο λειτουργίας της μηχανής. Το βέλτιστο σημείο λειτουργίας συμβαίνει όταν οι εξαρτώμενες απώλειες ισούνται με τις ανεξάρτητες/τυχαίες απώλειες της μηχανής. Ιδανικό στην σχεδίαση και τη λειτουργία της μηχανής, είναι να ταιριάζουν τα χαρακτηριστικά της με τα χαρακτηριστικά του ανέμου της περιοχής εγκατάστασης της ανεμογεννήτριας. Αυτό συμβαίνει με το «μεταφέρουμε» το βέλτιστο σημείο λειτουργίας της γεννήτριας κοντά στο επιχειρησιακό φορτίο που θα έχει η γεννήτρια σε αυτή την περιοχή.

Η ηλεκτρομαγνητική ροπή της γεννήτριας δίνεται από την σχέση:

$$T_e = \frac{3}{2}PL_m(i_{sq}i_{rd} - i_{sd}i_{rq}) \quad (2.12)$$

Ο βαθμός απόδοσης μιας DFIG είναι:

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{3V_{out} \cos \varphi_r}{6I_s(R_s + R_{fun} + R_r' + R_{har}) + 3V_{out} \cos \varphi_r} \quad (2.13)$$

Η απόδοση μπορεί να εκφραστεί ως συνάρτηση του ρεύματος φορτίου  $I_s$  και αυτή η συνάρτηση είναι συνεχής και μονότονη οπότε παρουσιάζει μέγιστο όταν :

$$\frac{\partial \eta}{\partial I_s} = 0 \quad (2.14)$$

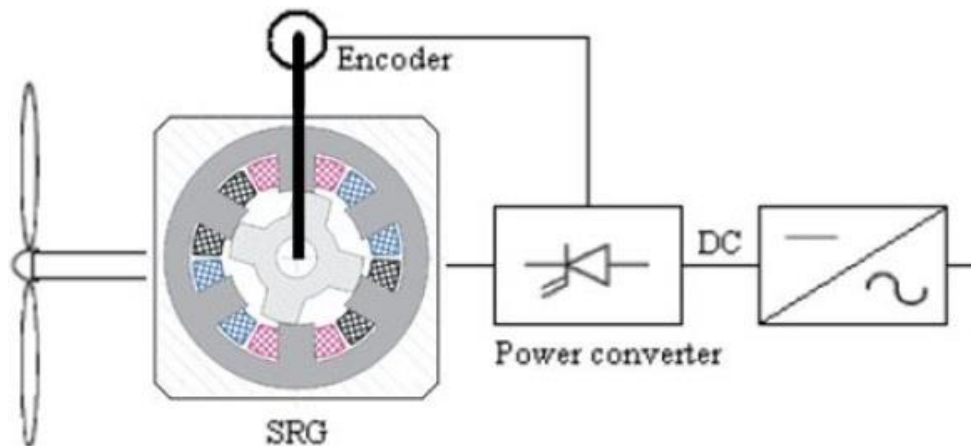
Παρακάτω η συνάρτηση της μέγιστης απόδοσης μιας DFIG:

$$P_{core} + P_{wf} = P_{cul} + P_{cu2} + P_{stray} \quad (2.15)$$

Στις DFIGs, η ενεργός ισχύς χρησιμοποιείται για να αξιολογηθεί η απόδοση ισχύος και η άεργος ισχύς είναι υπεύθυνη για την ηλεκτρική συμπεριφορά της στο δίκτυο. Η DFIG απαιτεί ορισμένες ποσότητες άεργος ισχύος ώστε να δημιουργήσει το μαγνητικό της πεδίο. Στην περίπτωση που ανεμογεννήτριας που είναι συνδεδεμένη στο δίκτυο, η γεννήτρια αποκτά τη ζητούμενη άεργος ισχύς από το ίδιο το δίκτυο. Σε περίπτωση μη διασυνδεδεμένων γεννητριών, η ζητούμενη άεργος ισχύς παρέχονται από εξωτερικές πηγές, όπως πυκνωτές ή μπαταρίες. [23][24][25].

### 2.5.5. Οι γεννήτριες μαγνητικής αντίστασης WTG

Κύριο χαρακτηριστικό των γεννητριών μαγνητικής αντίστασης WTGs είναι ο αθόρυβος στάτης και ρότορας που διαθέτουν. Καθώς περιστρέφεται ο ρότορας, η αντίσταση του μαγνητικού πεδίου που συνδέει το στάτη με το ρότορα, μεταβάλλεται και αυτό με τη σειρά του δημιουργεί επαγωγικά ρεύματα στο τύλιγμα του στάτη.



Σχ 2.22. Γραφική απεικόνιση μιας γεννήτριας μαγνητικής αντίστασης

Ο ρότορας μεταβλητής αντίστασης είναι κατασκευασμένος από πλαστικοποιημένα φύλλα χάλυβα και δεν έχει ηλεκτρικό πεδίο από περιελίξεις ή μόνιμους μαγνήτες. Ως αποτέλεσμα αυτού είναι οι WTGs να αποτελούν γεννήτριες που είναι εύκολο να κατασκευαστούν και να συναρμολογηθούν. Ένα προφανές χαρακτηριστικό είναι η υψηλή αξιοπιστία τους, επειδή μπορεί να λειτουργήσουν σε υψηλές θερμοκρασίες περιβάλλοντος. Επειδή η αντίσταση ροπής είναι μόνο ένα μέρος της ηλεκτρικής ροπής, ο ρότορας μαγνητικής αντίστασης είναι μεγαλύτερος απ' ότι στις γεννήτριες με ηλεκτρική διέγερση για δεδομένη ονομαστική ροπή. Αν η γεννήτρια είναι

συνδυασμένη με συστήματα άμεσης οδήγησης, τότε την κάνουν εξαιρετικά μεγάλη και βαριά με αποτέλεσμα να μην είναι πολύ διαδεδομένες στο τομέα των ανεμογεννητριών.

## 2.7 Τεχνολογίες ανεμογεννητριών

### 2.6.1. Γενικά χαρακτηριστικά ανεμογεννητριών σταθερών και μεταβλητών στροφών

Ως γνωστόν, οι ανεμογεννήτριες διαχωρίζονται σε αυτές όπου λειτουργούν με σταθερές στροφές και σε αυτές όπου λειτουργούν με μεταβλητές. Ασφαλώς και αυτό το χαρακτηριστικό έχει να κάνει κυρίως με το είδος της γεννήτριας που έχει εγκατασταθεί αλλά και με άλλους παράγοντες όπως το κιβώτιο ταχυτήτων και ο μετατροπέας ισχύος.

Οι ανεμογεννήτριες σταθερών στροφών λειτουργούν σε σταθερή ταχύτητα περιστροφής η οποία εξαρτάται από τη συχνότητα του δικτύου, το λόγω κιβωτίου και το είδος της γεννήτριας. Λόγω της σταθερής ταχύτητας περιστροφής, όλες οι μεταβολές στην ταχύτητα του ανέμου, μεταφέρονται στη ταχύτητα περιστροφής του ρότορα και από εκεί στην ηλεκτρική ισχύ που μεταφέρεται στο δίκτυο. Στα πλεονεκτήματα του συγκεκριμένου τύπου ανεμογεννήτριας συγκαταλέγεται το χαμηλό κόστος εγκατάστασης, κυρίως λόγω της απουσίας ηλεκτρονικού μετατροπέα ισχύος, η απλότητα της γεννήτριας και η αξιοπιστία τους κατά την περίοδο λειτουργίας. Στα αρνητικά τώρα, συγκαταλέγονται οι ισχυρές μηχανικές καταπονήσεις, ο χαμηλός συντελεστής ισχύος και η μεταβλητότητα στην ισχύ εξόδου.

Οι ανεμογεννήτριες μεταβλητών στροφών είναι αυτές που αποτελούν τον πλέον διαδεδομένο εγκατεστημένο τύπο ανεμογεννήτριας. Με το γνωστό ως tip speed ratio  $\lambda$  ( $\lambda = \omega R/V$ , με  $\omega$  να συμβολίζεται η ταχύτητα περιστροφής του άξονα,  $R$  η ακτίνα του πτερυγίου και  $V$  η ταχύτητα του ανέμου να παραμένει σταθερή, πετυχαίνουμε πλήρη προσαρμογή της ταχύτητας περιστροφής με την ταχύτητα του ανέμου ώστε το αποτέλεσμα να είναι πάντα το μέγιστο δυνατό (μέγιστος αεροδυναμικός συντελεστής  $C_p$ ). Εδώ, το μεγάλο μειονέκτημα των ανεμογεννητριών σταθερών στροφών, δηλαδή η μεταφορά της μεταβλητότητας της ταχύτητας του ανέμου στην ποιότητα ισχύος που εκχέεται στο δίκτυο, εξαλείφεται από το γεγονός ότι η μεταβαλλόμενη ταχύτητα του ανέμου μετατρέπεται σε διαφορετική ταχύτητα περιστροφής του άξονα, η οποία όμως όπως προαναφέραμε είναι τέτοια ώστε το  $\lambda$  να είναι σταθερό. Συνεπώς, καμιά μεταβολή στην ισχύ εξόδου. Οι ανεμογεννήτριες μεταβλητών στροφών συνδέονται στο δίκτυο με μετατροπείς είτε συχνότητας είτε ισχύος. Αυτοί οι μετατροπείς, ελέγχοντας τη ηλεκτρομαγνητική ροπή της γεννήτριας, ελέγχουν τη ταχύτητά του δρομέα. Στα θετικά των ανεμογεννητριών μεταβλητών στροφών, συγκαταλέγονται ο μεγάλος βαθμός απόδοσης, η καλύτερη ποιότητα παραγόμενης ισχύος και οι λιγότερες μηχανικές καταπονήσεις που συντελούν στη μείωση των βλαβών και της συχνότητας συντήρησής τους. Στα αρνητικά, έχουμε να παραθέσουμε το υψηλό κόστος εγκατάστασης, κυρίως λόγω των πολλών ηλεκτρονικών ισχύος που περιλαμβάνουν οι

διατάξεις που χρησιμοποιούν, οι απώλειες ισχύος σε αυτές την διατάξεις ηλεκτρονικών ισχύος αλλά και γενικά η πολυπλοκότητα τους.

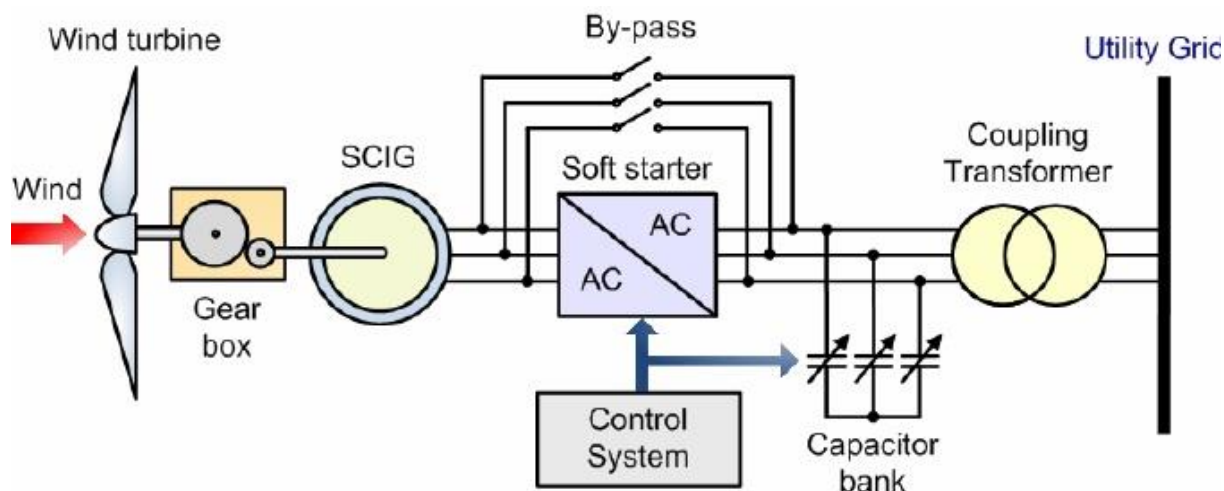
### 2.6.2. Ανεμογεννήτρια σταθερών στροφών – Τύπος A

Οι γεννήτριες σταθερών στροφών λειτουργούν με την ονομαστική ταχύτητα περιστροφής ανεξάρτητα του αιολικού δυναμικού, αρκεί αυτό να είναι πάνω από το κατώφλι εκκίνησης και κάτω από το ανώτατο δυναμικό λειτουργίας της μηχανής. Σε αυτό το τύπο ανεμογεννήτριας η γεννήτρια που χρησιμοποιείται συνήθως είναι επαγωγική βραχυκυκλωμένου κλωβού και συνδέεται απευθείας στο δίκτυο μέσω ενός μετασχηματιστή. Ο στάτης διαθέτει τριφασικά τυλίγματα ενώ ο ρότορας αποτελείται από ράβδους, χωρίς δακτυλίδες και ψήκτρες, οι οποίες είναι βραχυκυκλωμένες στα άκρα τους. Το μαγνητικό πεδίο του στάτη που δημιουργείται από τα τριφασικά τυλίγματα, στρέφεται στη σύγχρονη ταχύτητα της γεννήτριας δηλαδή  $n_s = 120f/p$ , όπου  $f=50\text{Hz}$  η συχνότητα του δικτύου και  $p$  ο αριθμός των πόλων της γεννήτριας. Ο δρομέας με τη σειρά του, περιστρέφεται με μια ταχύτητα  $n$  η οποία είναι λίγο μεγαλύτερη από τη σύγχρονη και κατά το μέγεθος της ολίσθησης η οποία ισούται με:

$$S = \frac{n_s - n}{n} \quad (2.16)$$

Παρόλο την ολίσθηση, η ανεμογεννήτριες αυτές θεωρούνται σταθερών στροφών διότι το ποσοστό της ολίσθησης δεν υπερβαίνει το 1% και για αυτό ακριβώς το λόγο η σύνδεση με το ηλεκτρικό δίκτυο δεν απαιτεί ηλεκτρονικό μετατροπέα ισχύος. Επίσης, στο δρομέα έχουμε την δημιουργία επαγωγικών ρευμάτων συχνότητας  $s * f$ . Από την αλληλεπίδραση των δύο μαγνητικών πεδίων, αυτό του στάτη και του δρομέα, έχουμε τη δημιουργία ηλεκτρομαγνητικής ροπής.

Τα τριφασικά τυλίγματα του στάτη, όπως είναι φυσιολογικό, απαιτούν τριφασική σύνδεση με το δίκτυο για να απορροφούν την απαιτούμενη άεργη ισχύς από αυτό ώστε να δημιουργούν την απαραίτητη διέγερσή τους. Λόγω της άεργους αυτής ισχύς, είναι απαραίτητη η εγκατάσταση συστοιχίας πυκνωτών πριν την σύνδεσή τους με το δίκτυο ώστε να επιτυγχάνεται εξομάλυνση του συντελεστή ισχύος. Η συστοιχία αυτή των πυκνωτών, πέρα από την εξομάλυνση της άεργους ισχύος, δημιουργεί και κάποια αρνητικά χαρακτηριστικά όπως οι βηματικές μεταβολές της ισχύς, τα μεταβατικά φαινόμενα κατά τη ζεύξη τους και η αργή απόκριση. Για όλα τα προαναφερθέντα, η εξομάλυνση του συντελεστή ισχύος μπορεί να επιτευχθεί είτε κεντρικά στο σύνολο του αιολικού πάρκου, είτε μεμονωμένα σε κάθε ανεμογεννήτρια με την χρήση STATCOMs. Τα STATCOMs, είναι συσκευές που παρέχουν συνεχώς μεταβαλλόμενη άεργη ισχύς βάσει των διακυμάνσεων της τάσης, υποστηρίζοντας τη σταθερότητα του συστήματος.

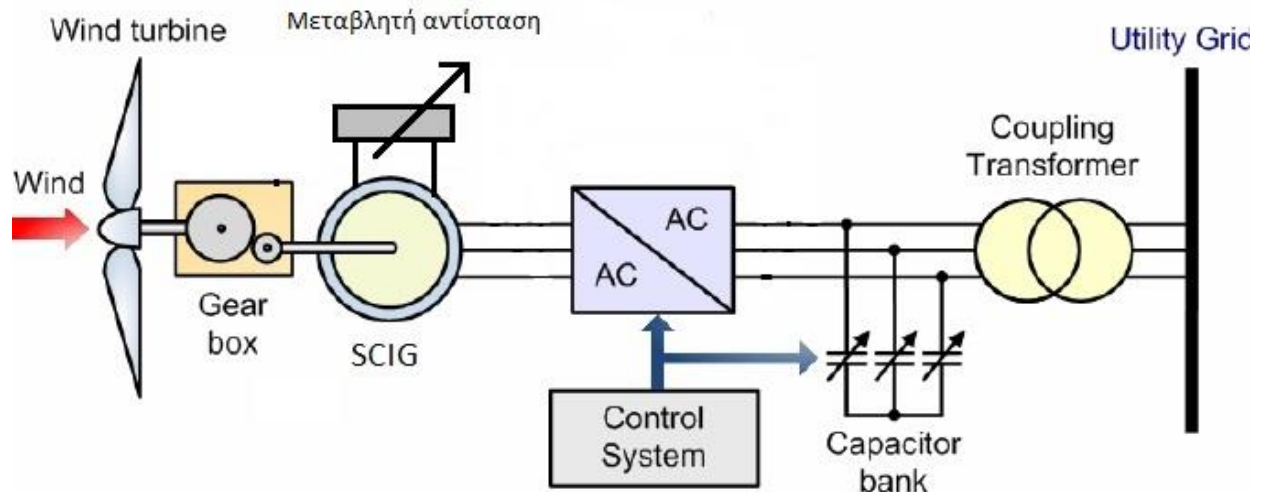


Σχ 2.23. Ανεμογεννήτριας σταθερών στροφών με επαγωγική μηχανή- Τύπος Α

Τα υψηλά ρεύματα εκκίνησης της γεννήτριας απαιτούν την χρήση μιας διάταξης για τον έλεγχο της ομαλής εκκίνησης αυτής και της σύνδεσής της με το δίκτυο. Ειδικά από την στιγμή που δεν υπάρχει ηλεκτρονικός μετατροπέας στην έξοδο προς το δίκτυο. Οι συγκεκριμένες διατάξεις ονομάζονται soft starter (ηλεκτρονικά ελεγχόμενος εκκινητής) και αποτελούνται στην ουσία από ένα σύστημα αντιπαράλληλων ημιαγωγών, συνήθως στις μέρες μας, IGBTs. Η διάταξη αυτή παρακάμπτεται όταν έχει παρέλθει η μεταβατική περίοδος της εκκίνησης μέσω ενός διακόπτη παράκαμψης (Bypass). Στο σχήμα 2.23 απεικονίζεται με όλα τα μέρη της, μια ανεμογεννήτρια σταθερών στροφών με επαγωγική μηχανή- Τύπου Α.

### 2.6.3. Ανεμογεννήτρια περιορισμένων μεταβλητών στροφών – Τύπος Β

Ο συγκεκριμένος τύπος ανεμογεννήτριας αποτελείται από ένα κιβώτιο ταχυτήτων πάνω στο οποίο είναι συνδεδεμένα τα περύγια, την ασύγχρονη γεννήτρια επαγωγής βραχυκυκλωμένου κλωβού με μεταβλητή αντίσταση δρομέα, τον ηλεκτρονικό ελεγχόμενο εκκινητή (soft starter) και την συστοιχία πυκνωτών για την εξομάλυνση του συντελεστή ισχύος. Η ανεμογεννήτρια τύπου Β χαρακτηρίζεται από ένα σύστημα ελέγχου της ολίσθησης. Πιο συγκεκριμένα, η επαγωγική γεννήτρια είναι τυλιγμένου δρομέα με τριφασικό τύλιγμα όπως ο στάτης. Ο δρομέας σε αυτή την περίπτωση απαιτεί την ύπαρξη δαχτυλίων και ψηκτρών (καρβουνάκια). Σύμφωνα με το σκεπτικό λειτουργίας της, η εξωτερική αντίσταση των τυλιγμάτων μεταβάλλεται έτσι ώστε να ελέγχεται η ταχύτητα περιστροφής του δρομέα  $n$  έτσι ώστε και βάσει της σχέσης 2.16 να ελέγχεται δυναμικά η ολίσθηση  $S$  ελέγχοντας έτσι καλύτερα τις διακυμάνσεις στην ισχύ εξόδου.



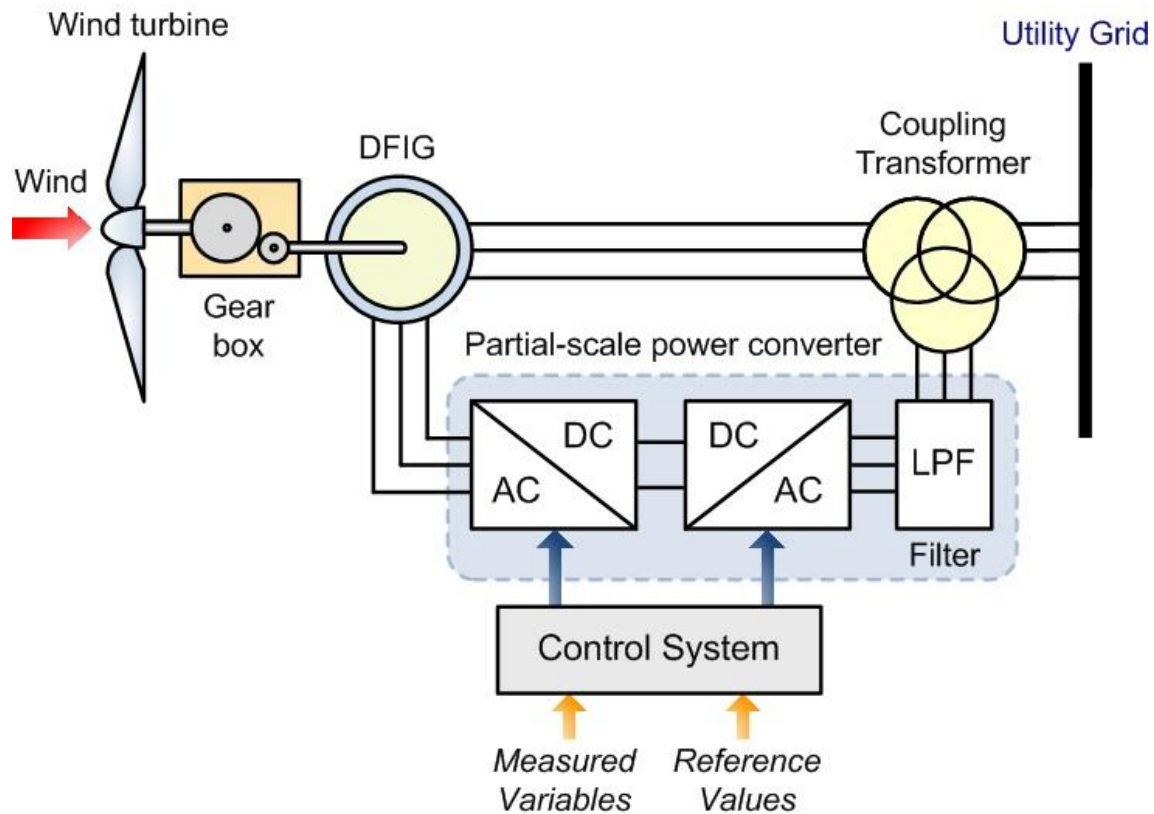
Σχ 2.24. Διάγραμμα ανεμογεννήτριας περιορισμένων μεταβλητών στροφών - Τύπου Β

Περιοριστικός παράγοντας σε όλο αυτό είναι το μικρό ποσοστό μεταβολής της ταχύτητας του δρομέα η οποία δεν μπορεί να ξεπεράσει το 10% της σύγχρονης ταχύτητας και για αυτό ακριβώς το λόγο ονομάζονται και ανεμογεννήτριες περιορισμένων μεταβλητών στροφών. Επίσης, λόγω της μικρής δυνατότητας μεταβολής των στροφών, ο έλεγχος ισχύος για ταχύτητες ανέμου πάνω από την ονομαστική γίνεται με έλεγχο βήματος έλικας. Το κύριο μειονέκτημά τους είναι οι περαιτέρω θερμικές απώλειες στο τύλιγμα του δρομέα με την μεταβλητή αντίσταση. Στο σχήμα 2.24 απεικονίζεται με όλα τα μέρη της, μια ανεμογεννήτρια περιορισμένων μεταβλητών στροφών - Τύπου Β.

#### 2.6.4. Ανεμογεννήτρια μεταβλητών στροφών με μερικώς ελεγχόμενο μετατροπέα– Τύπος Γ

Ο τύπος αυτός της ανεμογεννήτριας περιλαμβάνει γεννήτρια επαγωγής με τυλιγμένο δρομέα. Ο δρομέας συνδέεται στο δίκτυο μέσω μετατροπέα συχνότητας η ισχύος του οποίου η ισχύς φθάνει το 30% της ισχύος της ανεμογεννήτριας. Ενώ έχει και σαν κατώτατο διαχειριστικό όριο το -40% της ονομαστικής ισχύος της ανεμογεννήτριας. Ο μετατροπέας συνδέεται στο δίκτυο μέσω ενός αυτομετασχηματιστή και είναι υπεύθυνος για μια σειρά από ελέγχους και ρυθμίσεις οι οποίες είναι ζωτικής σημασίας για την σωστή λειτουργία της ανεμογεννήτριας. Καταρχήν παρέχει στην γεννήτρια την απαραίτητη διέγερση φροντίζοντας για την ομαλή της ζεύξη με το δίκτυο πετυχαίνοντας τιμή ρεύματος ίση με την ονομαστική. Έπειτα, είναι υπεύθυνος για τη ρύθμιση των στροφών, ρυθμίζοντας το ρεύμα στο δρομέα μέσω μεταβλητής αντίστασης. Επίσης, ελέγχει τον συντελεστή ισχύος στη μεριά του δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας και τέλος συγκρίνει τη συχνότητα του δικτύου με αυτή της ανεμογεννήτριας και τα αποσυνδέει σε περίπτωση που υπάρχει απόκλιση πέρα από αυτά που ορίζουν τα όρια.

Ο μετατροπέας που χρησιμοποιείται στην εν λόγω ανεμογεννήτρια αποτελείται από ένα ανορθωτή AC/DC και ένα αντιστροφέα DC/AC από την πλευρά του δικτύου, ο οποίος παρέχει τριφασικό ρεύμα. Και οι δύο χρησιμοποιούν ως γνωστόν αυτοανοιγόμενους ημιαγωγικούς διακόπτες, με τη μερίδα του λέοντος στις μέρες μας να καταλαμβάνουν τα IGBTs και σε δευτερεύοντα ρόλο τα θυρίστορ. Από την στιγμή που η γεννήτρια είναι επαγωγικού τύπου, ο ανορθωτής και ο αντιστροφέας διαχειρίζονται την τάση και όχι το ρεύμα. Από τα παραπάνω γίνεται επίσης κατανοητό ότι ο αντιστροφέας και ο ανορθωτής λόγω των αυτοανοιγόμενων ημιαγωγικών διακοπών, δεν απορροφούν άεργο ισχύ από το δίκτυο και μπορούν να χρησιμοποιηθούν για αμφίδρομη χρήση ανταλλαγής ενεργού και άεργου ισχύος. Στο σύνολο του τώρα ο μετατροπέας στην πλευρά του δικτύου αποτελεί μια πηγή τριφασικής τάσης ελεγχόμενου μέτρου και συχνότητας και από την πλευρά της γεννήτριας παρέχει την απαραίτητη διέγερση στο κύκλωμα του δρομέα με την παροχή άεργου ισχύος. Επίσης, ελέγχει την συνεχή τάση μεταξύ του ανορθωτή και του αντιστροφέα. Χαρακτηριστικά του μετατροπέα αυτού είναι η δυνατότητα ελέγχου της τάσης εξόδου και της συχνότητας, ο ρυθμιζόμενος συντελεστής ισχύος και η χαμηλή αρμονική παραμόρφωση μέσω μικρών φίλτρων χαμηλής διέλευσης (LPF filters) και PWM έλεγχο. Μια τέτοια γεννήτρια απεικονίζεται στο σχήμα 2.25 που ακολουθεί.



Σχ 2.25. Ανεμογεννήτρια μεταβλητών στροφών με μερικώς ελεγχόμενο μετατροπέα - Τύπου Γ.

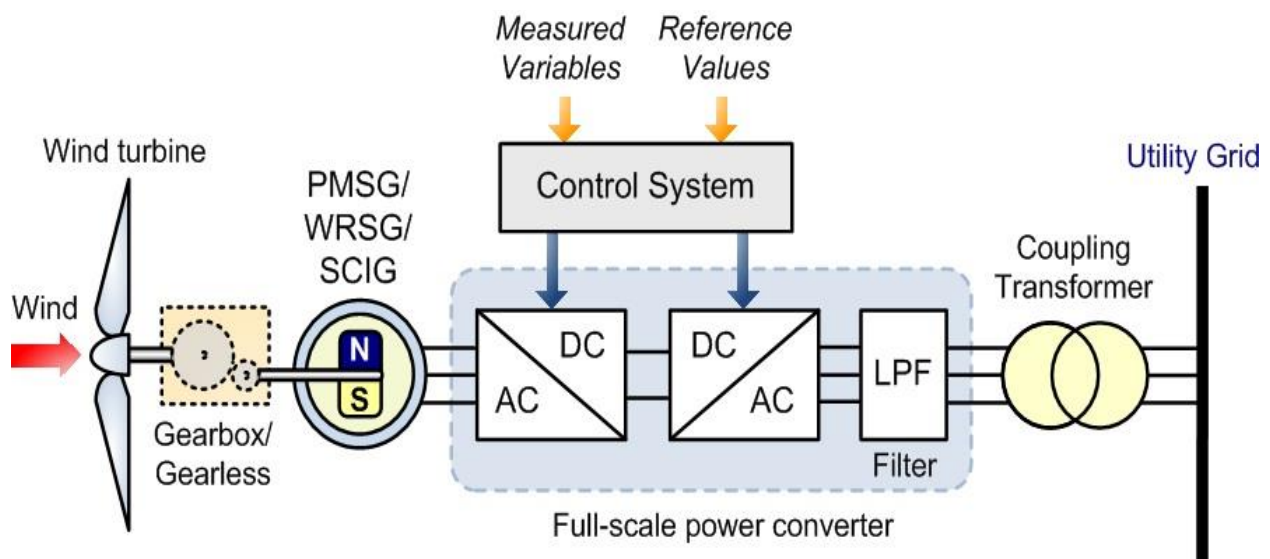


Απότομες μεταβολές στο στάτη μπορούν να προκαλέσουν αυξημένες τιμές τάσης και έντασης. Όμοια, αυξημένες τιμές τάσης και έντασης μπορεί να προκληθούν και από βραχυκυκλώματα από την πλευρά του δικτύου. Για αυτούς του λόγους, είναι εγκατεστημένες στην έξοδο του κυκλώματος του δρομέα, διατάξεις προστασίας από υπερεντάσεις και υπερτάσεις και αυτό επιτυγχάνεται με τη βραχυκύκλωση των ακροδεκτών του δρομέα.

Τα πλεονεκτήματα της ανεμογεννήτριας τύπου Γ είναι ο έλεγχος της άεργου ισχύος από την ίδια, ο ανεξάρτητος έλεγχος ενεργού και άεργου ισχύος, ο σχεδόν άριστος συντελεστής ισχύος από την πλευρά του δικτύου και η χαμηλή σχετικά τιμή του μετατροπέα λόγω του ότι η ονομαστική του ισχύς αποτελεί ένα ποσοστό της ονομαστικής ισχύς της ανεμογεννήτριας.

### 2.6.5. Ανεμογεννήτρια μεταβλητών στροφών με πλήρως ελεγχόμενο μετατροπέα– Τύπος Δ

Η βασική χαρακτηριστική διαφορά της ανεμογεννήτριας τύπου Δ με αυτής του τύπου Γ, είναι ότι ο μετατροπέας που χρησιμοποιείται είναι της ίδιας ονομαστικής ισχύος με αυτή της ανεμογεννήτριας, μεταφέροντας έτσι το σύνολο της παραγόμενης ισχύς της στο δίκτυο. Τα λοιπά χαρακτηριστικά του και η δομή του είναι κατά τ' άλλα ίδια με τον μετατροπέα που αναλύθηκε παραπάνω και που χρησιμοποιείται στην ανεμογεννήτρια μεταβλητών στροφών με μερικό έλεγχο. Στον τύπο Δ, η γεννήτρια μπορεί να είναι και σύγχρονη αλλά και ασύγχρονη. Στην περίπτωση της σύγχρονης γεννήτριας, η διέγερση είναι εσωτερική και συνεπώς ο μετατροπέας δεν χρειάζεται να παρέχει άεργο ισχύς στην γεννήτρια με αποτέλεσμα να μπορεί να αποτελεί απλά ένα ανορθωτή με διόδους ή ημιαγωγικούς διακόπτες (IGBTs).



Σχ 2.26. Ανεμογεννήτρια μεταβλητών στροφών με πλήρως ελεγχόμενο μετατροπέα– Τύπος Δ

Ένα επίσης διαφορετικό χαρακτηριστικό σε σχέση με τον μετατροπέα ανεμογεννήτριας τύπου Γ, είναι ο DC/DC μετατροπέας ανύψωσης που παρεμβάλλεται μεταξύ του ανορθωτή και του αντιστροφέα. Ο λόγος είναι η προσαρμογή της μεταβαλλόμενης (λόγω της εξάρτησης από την ταχύτητα περιστροφής των πτερυγίων) DC τάσης του ανορθωτή, στην σταθερή τιμή τάσης που ορίζουν τα άκρα της συστοιχία πυκνωτών που ονομάζονται Bulk capacitors και βάσει της οποίας γίνεται η μετατροπή DC/AC. Αυτός ο μετατροπέας DC/DC δεν έχει λόγο ύπαρξης στην διάταξη στην περίπτωση που ο ανορθωτής και ο αντιστροφέας είναι συνδεδεμένοι στον ίδιο ζυγό DC (Back to Back). Το συνεχές ρεύμα εξόδου του ανορθωτή, είναι ανάλογο του ρεύματος που διαρρέει το στάτη και το οποίο με την σειρά του είναι ανάλογο της ροπής της γεννήτριας. Συνεπώς ελέγχοντάς το συνεχές ρεύμα του ανορθωτή μέσω του μετατροπέας DC/DC, ελέγχουμε τη ροπή της γεννήτριας. Επίσης, η ροπή της γεννήτριας μπορεί να ελεγχθεί μέσω του ελέγχου της συνεχούς τάσης του ανορθωτή, από το μετατροπέα. Ο μετατροπέας εξόδου, ρυθμίζει την συνεχή τάση στην είσοδο του μέσω της ρύθμισης της ενεργούς αλλά και άεργους ισχύος που παρέχει στο δίκτυο.

Τα θετικά τώρα αυτού του τύπου ανεμογεννήτριας ο οποίος με πλήρη ελεγχόμενο μετατροπέα, αποτελεί την πιο διαδεδομένη (από πλευράς εύρος τιμών) ρύθμιση του συντελεστή ισχύος, είναι η πλήρης απομόνωση του μετατροπέα από το δίκτυο σε περίπτωση σφαλμάτων και αυτό λόγω της πλήρους ισχύος του σε σχέση με την ανεμογεννήτρια, ο έλεγχος συχνότητας και τέλος η ανεξαρτητοποίηση της συχνότητας της γεννήτριας από αυτή του δικτύου. Στα αρνητικά, το πιο βασικό είναι το πολύ υψηλό κόστος εγκατάστασης της χρήσης πλήρους μετατροπέα. Ένας τέτοιος τύπος ανεμογεννήτριας απεικονίζεται γραφικά στο σχήμα 2.26 [26].

## 2.8 Αεροδυναμικός έλεγχος ανεμογεννήτριας

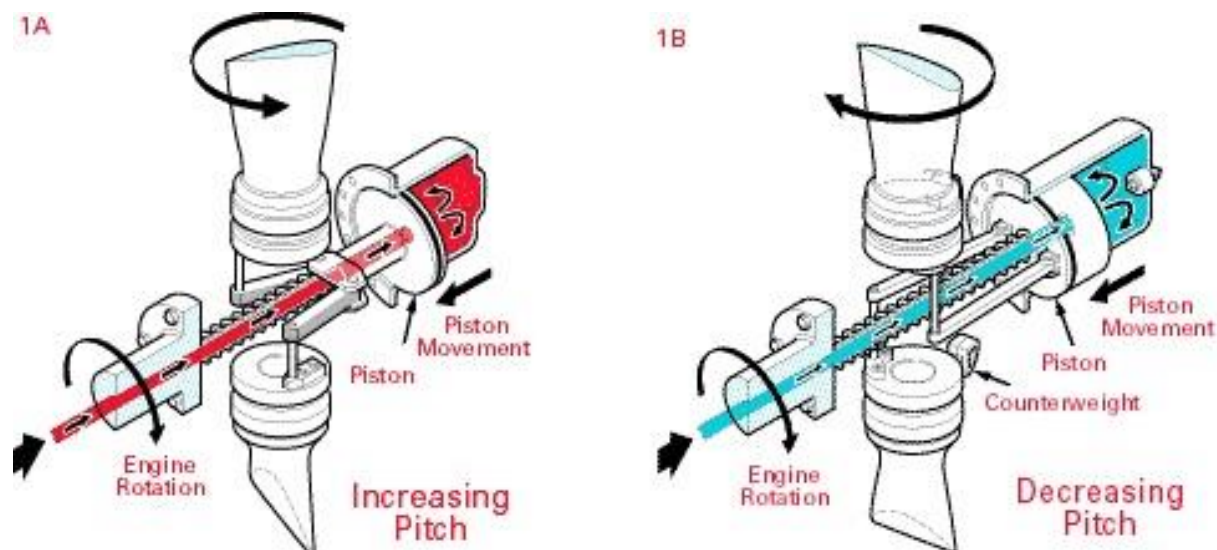
Οι ανεμογεννήτριες έχουν σχεδιαστεί για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας όσο το δυνατόν φθηνότερα. Ως εκ τούτου, οι ανεμογεννήτριες είναι σχεδιασμένες έτσι ώστε να παρέχουν τη μέγιστη απόδοση τους σε ταχύτητες ανέμου περίπου 15 μέτρα ανά δευτερόλεπτο (30 κόμβους ή 33 mph). Καμία ανεμογεννήτρια δεν είναι έτσι κατασκευασμένη ώστε να παράγει το μέγιστό της σε ισχυρούς ανέμους και ο λόγος ασφαλώς είναι διότι οι ισχυροί άνεμοι είναι σπάνιοι.

Σε περίπτωση ισχυρών ανέμων, είναι αναγκαίο να χάνουμε μέρος της περίσσειας ενέργειας του ανέμου, ώστε να αποφύγετε η καταστροφή της ανεμογεννήτριας. Ως εκ τούτου, όλες οι ανεμογεννήτριες έχουν σχεδιαστεί με κάποιο είδος ελέγχου της ισχύος. Υπάρχουν λοιπόν διάφοροι τρόποι για να γίνει αυτό με ασφάλεια στις σύγχρονες ανεμογεννήτριες.

### 2.7.1. Έλεγχος γωνίας βήματος πτερυγίων - pitch control

Σε μια ανεμογεννήτρια με έλεγχο γωνίας βήματος πτερυγίων, ο ηλεκτρονικός μετατροπέας ελέγχει την έξοδο της ανεμογεννήτριας αρκετές φορές το δευτερόλεπτο. Όταν η ισχύς εξόδου

υπερβεί τη μέγιστη τιμή, στέλνετε εντολή στο μηχανισμό βήματος του πτερυγίου που ρίχνει άμεσα τις στροφές, στρέφοντας τα πτερύγια του ρότορα έξω από τον άνεμο. Με τη πτώση της ταχύτητας του ανέμου, τα πτερύγια ξαναστρέφονται προς τον άνεμο. Τα πτερύγια, πρέπει να είναι σε θέση να περιστρέφονται γύρω από το άξονα τους και προς τις δύο φορές, ώστε να επιτυγχάνεται και αύξηση αλλά και μείωση της γωνίας, όπως απεικονίζεται επακριβώς και στο σχήμα 2.27.



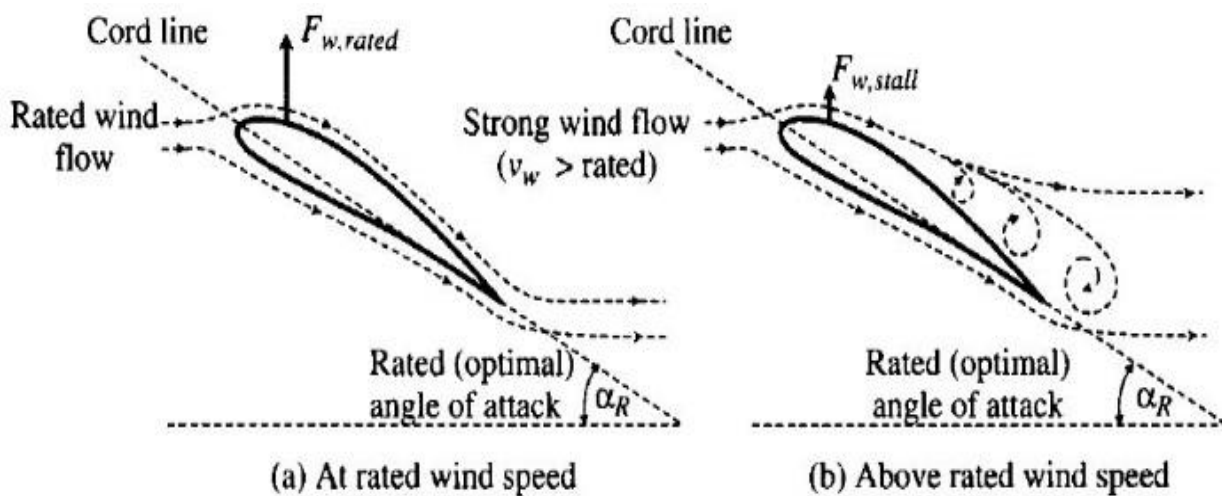
Σχ 2.27. Έλεγχος γωνίας βήματος – Αύξηση και μείωση γωνίας

Σε κανονικές συνθήκες λειτουργίας, το πτερύγιο στρέφεται ανά μία μοίρα τη φορά με τον ρότορα κανονικά σε περιστροφή. Η σχεδίαση ενός συστήματος ελέγχου γωνίας βήματος, είναι πολύ απαιτητική διότι θα πρέπει να επιτυγχάνει κάθε φορά τη σωστή γωνία ώστε να μην χάνεται διαθέσιμο αεροδυναμικό αλλά και να αποτρέπει τυχόν καταστροφικές συνέπειες για την ανεμογεννήτρια. Το σύστημα αυτό είναι συνήθως υδραυλικό.

### 2.7.2. Παθητικός έλεγχος απώλειας στήριξης - passive stall control

Σε μια ανεμογεννήτρια με παθητικό έλεγχο απώλειας στήριξης, τα πτερύγια είναι βιδωμένα στη πλήμνη με σταθερή γωνία. Όμως, ο σχεδιασμός του είναι τέτοιος ώστε σε υψηλές ταχύτητες ανέμου να δημιουργούνται στροβιλισμοί στην πλευρά του πτερυγίου του δρομέα, το οποίο δεν αντιμετωπίζει τον άνεμο. Αυτή η απώλεια στήριξης εμποδίζει την ανυψωτική δύναμη του πτερυγίου του δρομέα από το να ενεργεί επί του δρομέα. Όταν η πραγματική ταχύτητα του ανέμου είναι μέσα στην αυξητική περιοχή, η γωνία προσβολής του πτερυγίου του δρομέα θα αυξάνεται, μέχρι κάποια στιγμή να αρχίσει η απώλεια στήριξης. Σε μια τέτοιου είδους ανεμογεννήτρια, αν κοιτάξουμε προσεχτικά το πτερύγιο θα παρατηρήσουμε ότι στρέφεται ελαφρώς καθώς κινείται

κατά μήκος του διαμήκους άξονά του. Αυτό εν μέρει γίνεται προκειμένου να εξασφαλιστεί ότι η απώλεια στήριξης του πτερυγίου του δρομέα γίνεται βαθμιαία και όχι απότομα, όταν η ταχύτητα του ανέμου φτάσει την κρίσιμη τιμή του. Το βασικό πλεονέκτημα του ελέγχου απώλεια στήριξης είναι ότι αποφεύγει κινούμενα μέρη στο ίδιο το στροφέιο και ένα πολύπλοκο σύστημα ελέγχου εντός της ανεμογεννήτριας. Από την άλλη πλευρά, ο έλεγχος απώλεια στήριξης αντιπροσωπεύει ένα πολύ πολύπλοκο πρόβλημα στον αεροδυναμικό σχεδιασμό και αντιμετωπίζει σημαντικές σχεδιαστικές προκλήσεις όπως η αποφυγή της απώλεια στήριξης από δονήσεις. Περίπου τα δύο τρίτα των ανεμογεννητριών που έχουν εγκατασταθεί σήμερα στον κόσμο είναι με μηχανές που λειτουργούν με παθητικό έλεγχο απώλεια στήριξης, όπως απεικονίζεται και στο σχήμα 2.28 παρακάτω.



Σχ 2.28. Παθητικός έλεγχος απώλεια στήριξης

### 2.7.3. Ενεργητικός έλεγχος απώλεια στήριξης - passive stall control

Ολοένα και μεγαλύτερος είναι ο αριθμός των ανεμογεννητριών 1MW που κατασκευάζονται με ενεργό μηχανισμό έλεγχου ισχύος απώλεια στήριξης. Τεχνικώς, οι μηχανές με ενεργή απώλεια στήριξης μοιάζουν με μηχανές που χρησιμοποιούν ελεγχόμενη γωνία βήματος, δεδομένου ότι έχουν όμοια πτερύγια. Για να έχουμε μια αρκετά ικανοποιητική ροπή στρέψης σε χαμηλές ταχύτητες ανέμου, η ανεμογεννήτρια με ενεργητικό έλεγχο απώλεια, θα στρέψει τα πτερύγια τις σε τέτοια γωνία όπως θα έκανε και μια ανεμογεννήτρια με έλεγχο γωνία βήματος. Η διαφορά είναι ότι υπάρχουν συγκεκριμένα βήματα σεταρισμένα ανάλογα με το αιολικό δυναμικό του τόπου. Ωστόσο, όταν η μηχανή φτάνει την ονομαστική της ισχύ, υπάρχει μια σημαντική διαφορά από τις ανεμογεννήτριες με έλεγχο γωνία βήματος. Αν η γεννήτρια λοιπόν είναι έτοιμη να υπερφορτωθεί, η μηχανή θα ρίξει τα πτερύγια της προς την αντίθετη κατεύθυνση από ό, τι ανεμογεννήτριες με

έλεγχο γωνία βήματος. Με άλλα λόγια, θα αυξήσει τη γωνία προσβολής των πτερυγίων του ρότορα, προκειμένου τα πτερύγια να πάνε σε μια βαθύτερη απώλειας στήριξης, σπαταλώντας έτσι την πλεονάζουσα ενέργεια στον άνεμο. Ένα από τα πλεονεκτήματα της ενεργής απώλειας στήριξης είναι ότι μπορεί να ελέγχει την ισχύ εξόδου με μεγαλύτερη ακρίβεια απ' ό,τι με η παθητική απώλεια στήριξης, έτσι ώστε να αποφευχθεί η υπέρβαση της ονομαστικής ισχύος της μηχανής κατά τις υψηλές ταχύτητες ανέμου. Ένα άλλο πλεονέκτημα είναι ότι η μηχανή μπορεί να λειτουργήσει σχεδόν πάνω στην ονομαστική ισχύ, σε όλες τις υψηλές ταχύτητες ανέμου. Η συγκεκριμένη ανεμογεννήτρια θα έχει μια πτώση στην ισχύ εξόδου της σε υψηλότερες ταχύτητες ανέμου, όσο τα πτερύγια μπαίνουν σε βαθύτερη απώλεια στήριξης. Ο ενεργός έλεγχος απώλειας στήριξης προέρχεται είτε από υδραυλικό, είτε από ηλεκτρικό βηματικό κινητήρα. Το μεγάλο ερώτημα για αυτό το τύπο ελέγχου της απώλειας στήριξης, είναι αν αξίζει το οικονομικό κόστος της εγκατάστασης του[15].

#### **2.7.4. Λιγότερο διαδεδομένοι τρόποι ελέγχου της απώλειας στήριξης**

Ορισμένες παλαιότερες ανεμογεννήτριες χρησιμοποιούν πτερύγια για τον έλεγχο του ρεύματος του δρομέα, ακριβώς όπως τα πτερύγια των αεροσκαφών για να αλλάξουν τη γεωμετρία των λεπίδων τους για την παροχή επιπλέον δύναμη ανέλκυσης κατά την απογείωση. Μια άλλη θεωρητική δυνατότητα είναι η εν μέρει περιστροφή του ρότορα από τον άνεμο για να μειώσει την ισχύ. Αυτή η τεχνική του ελέγχου εκτροπής στην πράξη χρησιμοποιείται μόνο για στις μικρές ανεμογεννήτριες του 1 kW ή λιγότερο.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3<sup>ο</sup>

### «ΥΠΕΡΑΚΤΙΑ ΑΙΟΛΙΚΑ ΠΑΡΚΑ»

#### 3.1 Γενικά

Υπεράκτιο αιολικό πάρκο ονομάζεται εκείνο το αιολικό πάρκο του οποίου οι ανεμογεννήτριες δεν είναι τοποθετημένες σε χέρσο αλλά μέσα στο θαλάσσιο περιβάλλον δηλαδή στην υφαλοκρηπίδα. Η απόσταση των ανεμογεννητριών από το κοντινότερο σημείο σύνδεσης με το δίκτυο ορίζει και το χαρακτηρισμό ενός τέτοιου πάρκου σαν παράκτιο ή υπεράκτιο. Συγκεκριμένη τιμή απόστασης ασφαλώς δεν υπάρχει. Αν θα έπρεπε να ορίσουμε μια τάξη μεγέθους θα ήταν 20-30 χιλιόμετρα. Πάνω από αυτή την απόσταση θεωρητικά ένα αιολικό πάρκο καλείτε ως υπεράκτιο, όπως αυτό που απεικονίζεται στο σχήμα 3.1.



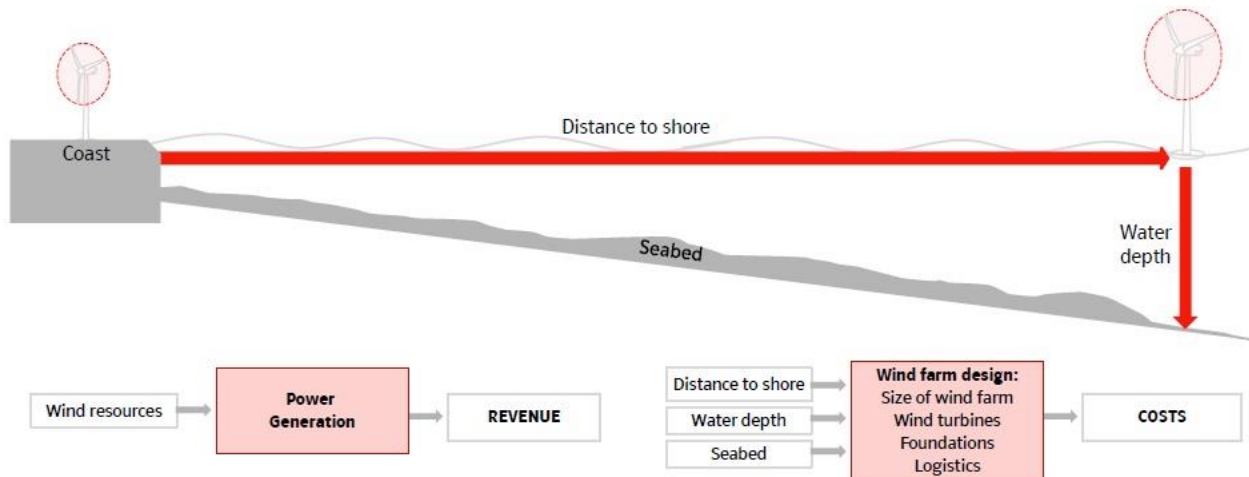
*Σχ 3.1. Υπεράκτιο αιολικό πάρκο*

Ο λόγος εγκατάστασης των ανεμογεννητριών μέσα στο νερό ασφαλώς δεν είναι άλλος από τα υψηλότερα αιολικά δυναμικά τα οποία επικρατούν στην επιφάνεια της θάλασσας σε σχέση με τα ηπειρωτικά. Η ομαλότητα της επιφάνειας της θάλασσας διατηρεί καλύτερη ποιότητα ανέμου, χωρίς πολλές αναταράξεις στη ροή του. Το συγκεκριμένο χαρακτηριστικό αποτελεί σημαντικό πλεονέκτημα για τα υπεράκτια πάρκα σε σχέση με τα χερσαία διότι επιτρέπουν στις ανεμογεννήτριες να έχουν μία σχετικά συνεχόμενη λειτουργία η οποία βοηθά στην μακροζωία των ανεμογεννητριών. Αυτό συμβαίνει διότι τα ηλεκτρονικά μέρη της γεννήτριας υπόκεινται σε λιγότερες διακοπές στην λειτουργία τους. Δηλαδή σε μικρότερο αριθμό επανεκκινήσεων.

Αρχικά η μεγαλύτερη πρόκληση σε αυτό το είδος εγκατάστασης δεν ήταν άλλος από την οικονομοτεχνική προσέγγιση της πάκτωσης των πυλώνων των ανεμογεννητριών μέσα στο νερό. Η μελέτη αυτή έδειξε ότι η εγκατάσταση ανεμογεννητριών πέρα του βάθους των 30 μέτρων περίπου, ξεκινά να γίνεται ασύμφορη. Ανάλογα πάντα την σύσταση του βυθού και την τοποθεσία, αυτό το όριο αλλάζει. Σε αυτό, ήρθαν να δώσουν λύση οι πλωτές εγκαταστάσεις ανεμογεννητριών με τεχνικές στις οποίες θα αναφερθούμε εκτενέστερα παρακάτω.

Η υπεράκτια αιολική ενέργεια έχει μεγαλύτερο ενεργειακό δυναμικό αλλά οι θαλάσσιες συνθήκες θέτουν μεγάλες προκλήσεις ώστε να παραδοθεί επιτυχώς ένα έργο. Ασφαλώς μιλάμε για τις καιρικές συνθήκες, τον άνεμο και τα κύματα τα οποία επηρεάζουν ιδιαίτερα το αποτέλεσμα. Έτσι, μια εντελώς νέα προσέγγιση για την αιολική ενέργεια έχει ανοίξει, από την άποψη της τεχνολογίας ανεμογεννητριών και την κλίμακα τους, τους τύπους θεμελίωσης, τις μεταφορές, την κατασκευή και τη συντήρηση.

Μετά από ένα πιλοτικό πρόγραμμα μακράς διάρκειας με γνώμονα την ανάπτυξη πριν από το 2001, η υπεράκτια αιολική ενέργεια έχει εξελιχθεί σε ένα από τα βασικά στοιχεία των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας βιομηχανιών στην Ευρωπαϊκή Ένωση.



Σχ 3.2. Απεικόνιση τεχνικών χαρακτηριστικών που καθορίζουν τη βιωσιμότητα ενός υπεράκτιου αιολικού πάρκου

Κάθε έργο της υπεράκτιας αιολικής ενέργειας έχει ιδιαίτερα χαρακτηριστικά τα οποία ποικίλουν ανάλογα με παράγοντες όπως το αιολικό δυναμικό, η συνοχή του πυθμένα, το βάθος του νερού και η απόσταση από την ακτή. Οι μηχανικοί του έργου επιλέγουν τον τύπο θεμελίων και των ανεμογεννητριών λαμβάνοντας υπόψη το αιολικό δυναμικό του ανέμου. Οι μεταφορές, η διαχείριση και η συντήρηση, εξαρτώνται άμεσα από την απόσταση από την ακτή. Ειδικά τα υπεράκτια αιολικά πάρκα τα οποία είναι εγκατεστημένα σε πολύ μεγάλες αποστάσεις από την ακτή, με συνέπεια πολύ μεγαλύτερο βάθος νερού, χρειάζονται μεγαλύτερες ανεμογεννήτριες και ένα υψηλότερο αντισταθμιστικό κόστος από την εκμετάλλευση της ενέργειας προκειμένου να εξισορροπήσει τα έξοδα και με τα έσοδα. Στο σχήμα 3.2 εμφανίζονται τα τεχνικά χαρακτηριστικά που καθορίζουν τη βιωσιμότητα ενός υπεράκτιου αιολικού πάρκου. Ο χρόνος υλοποίησης ενός υπεράκτιου αιολικού πάρκου, από την από την πάρση της απόφασης μέχρι την έναρξη του έργου, μπορεί να απαιτήσει μέχρι και 10 χρόνια συνεχούς εργασίας και απαιτεί μια σύνθετη διαχείριση του έργου.

Κάποια στατιστικά στοιχεία τα οποία αξίζει να γνωρίζουμε για τα αιολικά πάρκα, είναι τα παρακάτω:

- Μέχρι το 2010, πάνω από το 95% της παγκόσμιας εγκατεστημένης ισχύς υπεράκτιων αιολικών πάρκων, ήταν εγκατεστημένο στην Ευρώπη.
- Επιχειρήσεις κοινής ωφέλειας, κατέχουν το 90% της εγκατεστημένης υπεράκτιας αιολικής ισχύς που είναι εγκατεστημένο στην ΕΕ.
- Τα πρώτα υπεράκτια αιολικά πάρκα εκτός ΕΕ κατασκευάστηκαν στην Κίνα (100MW) και την Ιαπωνία (25 MW).
- Υπολογίζεται ότι η εγκατεστημένη αιολική ισχύς στην ΕΕ το 2020 θα είναι περίπου 40,000MW.

## **3.2 Θεμελίωση ανεμογεννητριών σε υπεράκτια αιολικά πάρκα**

### **3.2.1. Τύποι θεμελίωσης**

Συνήθως, στα υπεράκτια αιολικά πάρκα οι ανεμογεννήτριες είναι θεμελιωμένες στο βυθό της θάλασσας και λέμε συνήθως διότι τα τελευταία χρόνια όλο και πιο πολύ εξελίσσονται οι πλωτού τύπου ανεμογεννήτριες. Οι πιο διαδεδομένοι τύποι βάσεων για ένα υπεράκτιο αιολικό πάρκο είναι οι παρακάτω:

- Θεμελίωση με πάκτωση μονού μεταλλικού σωλήνα (Monopile)
- Θεμελίωση Βαρύτητας (Concrete gravity base structure - GBS)
- Θεμελίωση με πάκτωση τρίποδου μεταλλικού σωλήνα (Tripod Foundation)
- Θεμελίωση με πάκτωση τετράποδου μεταλλικού σωλήνα (Jacket Foundation)



Το βάθος του νερού και η σύσταση του βυθού καθορίζουν την επιλογή της θεμελίωσης. Μέχρι στιγμής, δεν υπάρχει κανένας τύπος θεμελίου κατάλληλος για όλα τα είδη και τις συνθήκες βυθού. Με μερίδιο 67% το 2010, η θεμελίωση με πάκτωση μονού μεταλλικού σωλήνα ήταν η πιο συχνά χρησιμοποιούμενη, με την θεμελίωση βαρύτητας να ακολουθεί με μερίδιο 30%. Σημαντικό ποσοστό της έρευνας σε αυτό το τομέα καταλαμβάνουν οι δοκιμές για νέους τρόπους εγκατάστασης των ανεμογεννητριών με τον πλωτό τύπο να αποτελεί την νεότερη εκδοχή.

### **3.2.2. Βασικές διαφορές χερσαίου αιολικού πάρκου και υπεράκτιου αιολικού πάρκου**

Κάποιες από τις σημαντικές διαφορές μεταξύ του χέρσου και του υπεράκτιου αιολικού πάρκου είναι οι εξής:

- Το αιολικό δυναμικό στη στεριά είναι 2000 ώρες αιχμής, την ώρα που στη θάλασσα είναι 4000 ώρες αιχμής.
- Στη στεριά είναι περιορισμένο το δυναμικό για την εγκατάσταση μεγάλων αιολικών πάρκων την ώρα που τα θαλάσσια πάρκα έχουν απεριόριστες χωροταξικές δυνατότητες.
- Το ύψος των επενδύσεων για χερσαία αιολικά πάρκα κυμαίνεται μεταξύ 30-40 εκατομμυρίων ευρώ ενώ στα υπεράκτια το αντίστοιχο εύρος είναι 1-3 δισεκατομμύρια ευρώ. Την ίδια ώρα, οι θαλάσσιες συνθήκες μπορεί να καταστήσουν το πάρκο μη προσβάσιμο για μέρες λόγω των πολύ μεγάλων κυματισμών που επικρατούν σε αυτές τις περιοχές, έχοντας να διανύσουμε αποστάσεις από 1-80 χιλιόμετρα.
- Στα χερσαία αιολικά πάρκα η πρόσβαση είναι σχεδόν αβέβαιη και οι συνθήκες που επικρατούν μπορεί να είναι ακραίες αλλά τις περισσότερες φορές είναι αντιμετωπίσιμες.
- Η εγκατάσταση των ανεμογεννητριών στα χερσαία αιολικά πάρκα είναι σχεδόν πάντα πανομοιότυπη σε όλες τις περιπτώσεις μιας και αποτελούνται από πρότυπα θεμέλια σε μπετόν σε στερεό έδαφος. Από την άλλη, η τοποθέτηση των ανεμογεννητριών σε θαλάσσιο περιβάλλον είναι διαφορετική και ανάλογη των συνθηκών εδάφους (άμμος, πηλός, ροκ) και της διάβρωσης. Ο τύπος θεμελίωσης εξαρτάται από το βάθος του νερού και του εδάφους (π.χ. monopiles, GBS, Tripod Foundation)

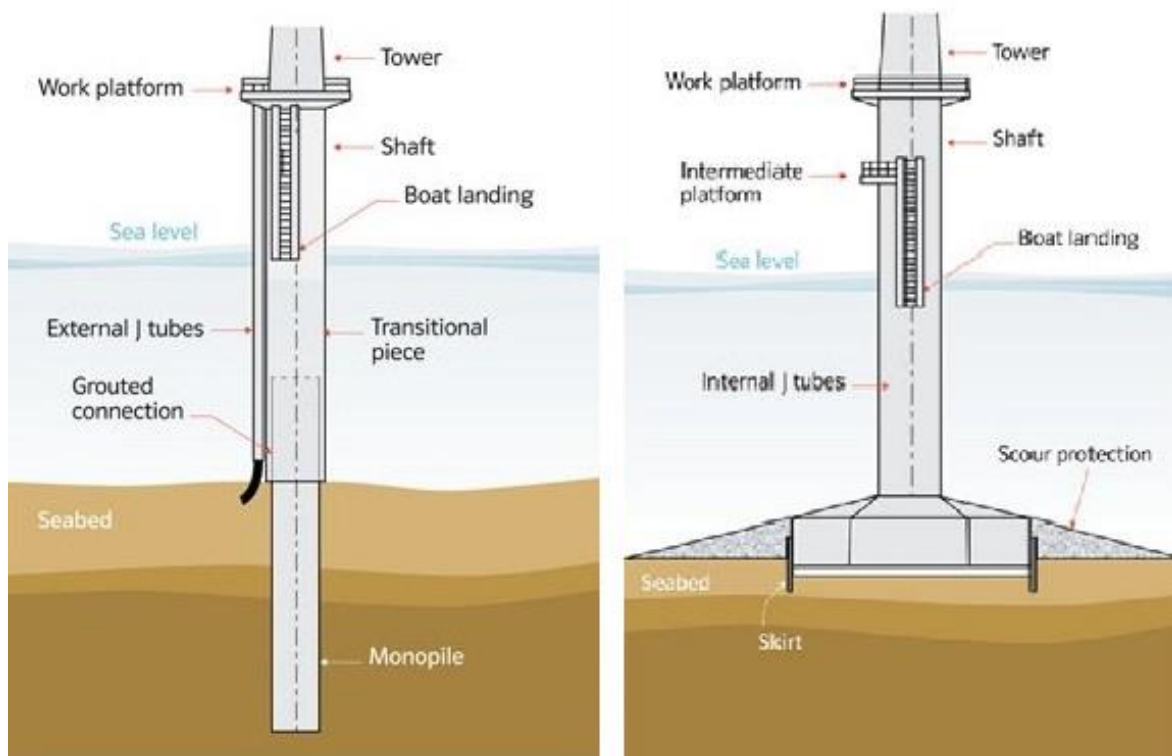
### **3.2.3. Θεμελίωση με πάκτωση μονού μεταλλικού σωλήνα (Monopile)**

Ο συγκεκριμένος τύπος θεμελίωσης αποτελείται από δύο διαφορετικής διαμέτρου προκατασκευασμένους χαλύβδινους κυλινδρικούς σωλήνες οι οποίοι είναι κολλημένοι μεταξύ

τους. Στην βάση βρίσκεται αυτός με τη μεγαλύτερη διάμετρο και από πάνω αυτός με την μικρότερη η οποία και αποτελεί το σημείο σύνδεσης του ιστού της ανεμογεννήτριας. Η διάμετρος στον πάτο της θεμελίωσης είναι περίπου 5-6μ λόγω των μεγάλων φορτίων που ασκούνται. Το μήκος πάκτωσης του σωλήνα βάσης μέσα στο βυθό φθάνει μέχρι και τα 30μ και το σύνολο του θεμελίου ζυγίζει περί τους 600 τόνους. Το συγκεκριμένο είδος θεμελίωσης, αποτελεί το πιο διαδεδομένο τύπο και χρησιμοποιείται σε βάθη όχι μεγαλύτερα από τα 25-30μ. Σε αυτό εδραιώνονται ανεμογεννήτριες το πολύ μέχρι 5MW και αυτό λόγω του μεγέθους τους φυσικά. Από την στιγμή που θα ξεκινήσουν οι διαδικασίες εγκατάστασης μιας μονοπολικής θεμελίωσης, χρειάζονται πλέον κάτι λιγότερο από 24 ώρες για την περάτωση της.

### 3.2.4. Θεμελίωση Βαρύτητας (Concrete gravity base structure - GBS)

Το είδος της θεμελίωσης αυτής αποτελείται από μια ογκώδη κυλινδρική βάση φτιαγμένη από σπλισμένο σκυρόδεμα η οποία μπορεί κάλλιστα να φτάσει το βάρος των 1400 τόνων με διάμετρο μέχρι και 30μ. Από αυτό το μέγεθος και πάνω, η θεμελίωση αυτή αρχίζει να θεωρείται οικονομολογικά ασύμφορη. Κατασκευάζεται στη στεριά και μεταφέρεται ή ρυμουλκείται με ειδικά διαμορφωμένα πλωτά μέσα στο σημείο της θεμελίωσης.

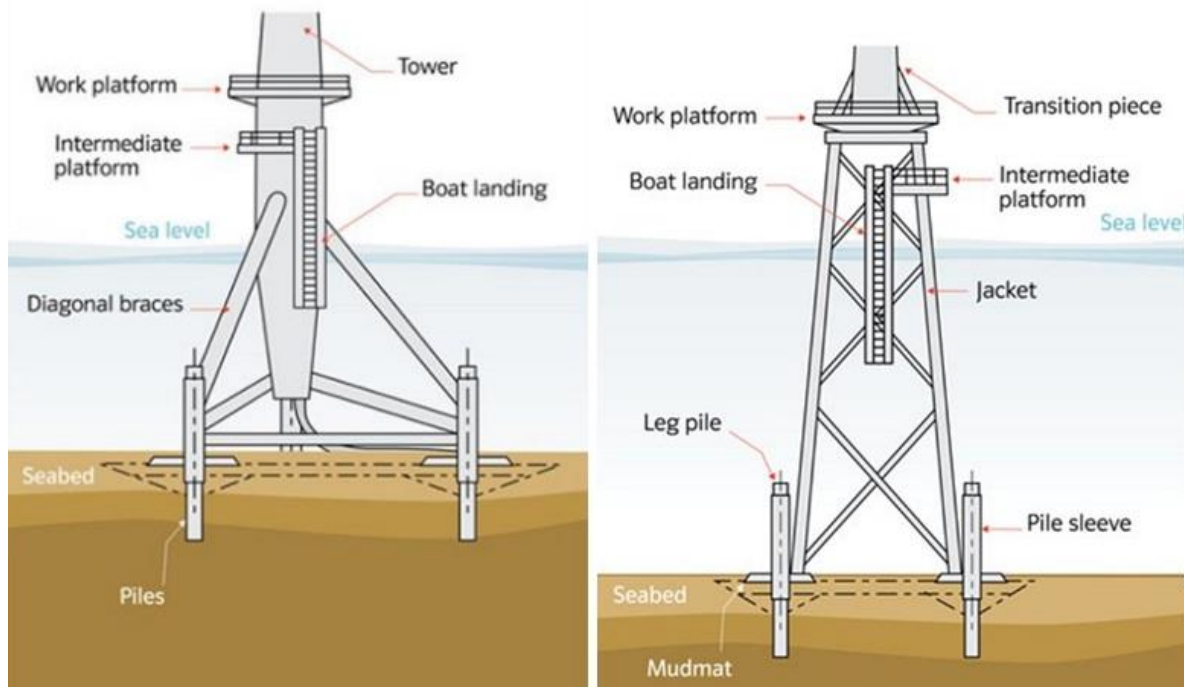


Σχ 3.3. Απεικόνιση θεμελίωσης βαρύτητας και μονοπολικής θεμελίωσης

Για να αυξηθεί το βάρος και η σταθερότητα, τα θεμέλια της βαρύτητας είναι συχνά γεμάτα με χαλίκι και πέτρες. Τα θεμέλια της βαρύτητας χρησιμοποιούνται κατά προτίμηση σε νερά με μέγιστο βάθος τα 30 μέτρα και εδραιώνουν ανεμογεννήτριες ισχύος μέχρι και 8MW. Και η Θεμελίωση με πάκτωση μονού μεταλλικού σωλήνα αλλά και η Θεμελίωση Βαρύτητας, απεικονίζονται σχηματικά στο σχήμα 3.3.

### 3.2.5. Θεμελίωση με πάκτωση τρίποδου μεταλλικού σωλήνα (Tripod Foundation)

Η θεμελίωση με πάκτωση μεταλλικού τριπόδου αποτελεί μια στιβαρή και βαριά μεταλλική κατασκευή η οποία μπορεί και να φθάσει ως και του 700 τόνους. Χρησιμοποιείτε για λίγο μεγαλύτερα βάθη από αυτά της θεμελίωσης βαρύτητας και της μονοπολικής θεμελίωσης, με μέγιστο τα 35-40μ. Η διαδικασία κατασκευής τους απαιτεί την συγκόλληση των μεταλλικών κομματιών της στη στεριά και τη μεταφορά τους με ειδικά ακτοπλοϊκά μέσα. Για την κατασκευή της βάσης του τριπόδου συγκολλούνται τρεις σωλήνες 30 μέτρων μήκους και βάρους μέχρι και 100 τόνων ο καθένας. Από την ώρα έναρξης των εργασιών θεμελίωσης, χρειάζονται συνήθως 2 με 3 ημέρες για την ολοκλήρωσή τους. Θεωρείται ως η πιο νέα μορφή θεμελίωσης και θα μπορούσαμε να πούμε ότι βρίσκεται στο τελικό στάδιο τελειοποίησης της μηχανικής τους δομής ώστε να ανταπεξέλθουν απροβλημάτιστα για την θεμελίωση ανεμογεννητριών στα υπεράκτια αιολικά πάρκα. Προορίζεται για την στήριξη μεγάλων σε ισχύ ανεμογεννητριών ως και 7-8MW.



Σχ 3.4. Απεικόνιση θεμελίωσης τριπόδου και τετράποδου μεταλλικού σωλήνα.

### **3.2.6. Θεμελίωση με πάκτωση τετράποδου μεταλλικού σωλήνα (Jacket Foundation)**

Η θεμελίωση με πάκτωση τετράποδου μεταλλικού σωλήνα, αποτελεί επίσης μια αναπτυσσόμενη λύση στην θεμελίωση των ανεμογεννητριών στα υπεράκτια αιολικά πάρκα με βάθος έως τα 45μ περίπου. Αποτελούνται από μια βαριά και στιβαρή μεταλλική τετράποδη κατασκευή η οποία μπορεί να ζυγίζει μέχρι και 500 τόνους και να έχει συνολικό ύψος 45 μέτρων περίπου. Λίγο παραπάνω από το βάθος στο οποίο είναι εγκατεστημένη.

Για την κατασκευή τους απαιτείται η συγκόλληση μεταξύ πολλών δοκών ενιαίου χάλυβα. Αποτελεί την τρίτη πιο διαδεδομένη μορφή θεμελίωσης έπειτα από αυτή την βαρύτητας και της μονοπολικής, ενώ αρκετά συχνά χρησιμοποιείται για την έδραση των μετασχηματιστών που χρησιμοποιούνται σε μερικά υπεράκτια αιολικά πάρκα. Στο σχήμα 3.4, απεικονίζονται σχηματικά η Θεμελίωση με πάκτωση τρίποδου μεταλλικού σωλήνα και η Θεμελίωση με πάκτωση τετράποδου μεταλλικού σωλήνα [27].

### **3.3 Πλωτές κατασκευές έδρασης**

Οι πλωτές κατασκευές έδρασης ανεμογεννητριών για υπεράκτια αιολικά πάρκα δημιουργούν όλο και περισσότερους υποστηρικτές. Ο λόγος ασφαλώς είναι η επιτυχία που δείχνουν να έχουν τα πειραματικά μοντέλα του είδους κατά την εφαρμογή. Τα σταθερά θεμέλια δείχνουν να αποτελούν πολύ αξιόπιστη λύση για τα ρηχά νερά. Η τάση όμως που οδηγούν διάφοροι λόγοι, για την ανάπτυξη των νέων υπεράκτιων αιολικών πάρκων όλο και πιο μακριά από την ακτή, δημιουργεί την ανάγκη ανάπτυξης νέου τρόπου εγκατάστασης και αυτός δεν είναι άλλος από τις πλωτές κατασκευές έδρασης.

Οι πλωτή υπεράκτια αιολική ενέργεια δείχνει να δίνει λύση σε παραδοσιακά προβλήματα των υπεράκτιων αιολικών πάρκων όπως οι πλωτές βαριές κατασκευές που χρησιμοποιούνται για την πάκτωση της οποιασδήποτε σταθερής θεμελίωσης. Οι πλωτές κατασκευές αυτή τη στιγμή αποτελούν οικονομικά πιο δαπανηρή επένδυση από τις σταθερές βάσεις. Αυτό το έξτρα κόστος όμως αναμένεται να αφαιρεθεί με την πάροδο του χρόνου διότι στην ουσία αποτελεί το τίμημα της μελέτης και της ανάπτυξης αυτής της νέας τεχνολογίας. Επίσης, το κόστος ανά τόνο παραμένει υψηλό και για τις σταθερές εδράσεις αλλά και για τις πλωτές, επειδή όμως οι σταθερές αποτελούν λύση μόνο για μικρά βάθη και οι πλωτές μπορούν να εγκατασταθούν και αρκετά βαθύτερα, στο μέλλον θα δημιουργήσει σημαντικό πλεονέκτημα έναντι των σταθερών και ο λόγος ασφαλώς είναι ότι μακρύτερα από την ακτή, το αιολικό δυναμικό είναι μεγαλύτερο. Άρα και η επένδυση θα έχει υψηλότερο βαθμό απόδοσης για τον επενδυτή. Το βάθος όμως δεν είναι ο μόνος λόγος χρησιμοποίησης πλωτής έδρασης. Η οπτική όχληση αποτελεί έναν επίσης καλό λόγο εγκατάστασης υπεράκτιων αιολικών πάρκων όσο το δυνατό μακρύτερα από την ακτή όπου η πλωτή εγκατάσταση αποτελεί μονόδρομο.

### 3.3.1. Τύποι πλωτής κατασκευής έδρασης ανεμογεννητριών

Τρεις είναι μέχρι στιγμής οι πιο διαδεδομένοι τύποι πλωτής εγκατάστασης με κριτήριο τον τρόπο κατασκευής του μέρους εκείνου της ανεμογεννήτριας που βρίσκεται κάτω από το νερό και απεικονίζονται στη σχήμα 3.5 και παρουσιάζονται εκτενέστερα παρακάτω.



*Σχ 3.5. Απεικόνιση τύπων πλωτής πλατφόρμας από αριστερά προς τα δεξιά : Ballast Stabilized-  
Buoyancy Stabilized-Mooring Line Stabilized*

#### **Ballast Stabilized**

Ο συγκεκριμένος τύπος πλωτής κατασκευής είναι πολύ απλός και βασίζεται στο γεγονός ότι η μάζα του συνόλου της κατασκευής κάτω από την επιφάνεια είναι μεγαλύτερη απ' ότι πάνω από αυτή. Για να αυξηθεί η βυθισμένη μάζα χρησιμοποιείται ποσότητα έρματος η οποία μπορεί να αποτελείται από χαλίκι, σιδηρομετάλλευμα ή σκυρόδεμα. Αυτό το χαρακτηριστικό είναι που τις κάνει αρκετά αδρανείς στο επιφανειακό κυματισμό. Πιο συγκεκριμένα, η επιτάχυνση είναι ίση με τη δύναμη που ασκείται σε ένα σώμα προς την μάζα του σώματος. Αν η εκτιθέμενη επιφάνεια της

ανεμογεννήτριας στον αέρα και τον επιφανειακό κυματισμό είναι σταθερή, τότε αν αυξήσουμε την μάζα της κατασκευής κάτω από την επιφάνεια έχουμε μικρότερη επιτάχυνση από τις προαναφερόμενες αιτίες.

Θα πρέπει να προσεχτεί ιδιαίτερα σε αυτή την κατασκευή η συχνότητα των κυμάτων και του αέρα της περιοχής εγκατάστασης να μην είναι κοντά στην ιδιοσυχνότητα της κατασκευής διότι τότε θα επέρθει το φαινόμενο του συντονισμού με αρνητικές συνέπειες για όλη την ανεμογεννήτρια. Αλλάζοντας λοιπόν την ποσότητα έρματος, μπορούμε να απομακρύνουμε την ιδιοσυχνότητα της κατασκευής από το εύρος των συχνοτήτων κυματισμού του αέρα και τις περιοχές.

Οι κατασκευές Ballast Stabilized αγκιστρώνονται στο βυθό είτε με συρματόσχοινα είτε με προ εντεταμένους τένοντες και μπορούν άνετα να εγκαταθούν μέχρι και σε βάθη των 100μ [32].

### **Buoyancy Stabilized**

Η συγκεκριμένη θεμελίωση χρησιμοποιεί μια σταθεροποιημένη πλωτή εξέδρα στην επιφάνεια της θάλασσας, προκειμένου να στηρίζει τις ανεμογεννήτριες. Η εξέδρα αυτή σταθεροποιείται με αλυσοειδή γραμμές πρόσδεσης οι οποίες συνδέονται με άγκυρες στο βυθό της θάλασσας. Επειδή μέρος της εξέδρας είναι πάνω από την επιφάνεια, δημιουργείται η λεγόμενη ίσαλος γραμμή η οποία την καθιστά ευάλωτη στον επιφανειακό κυματισμό. Για αυτό και το είδος αυτής της θεμελίωσης αυτή δεν έχει βρει ευρεία πρακτική χρήση ακόμα, λόγω της ευαισθησίας της σε μεγάλα κύματα και στις κινήσεις του νερού που δημιουργούνται από αυτά.

Οι μεγάλες προκλήσεις που πρέπει να αντιμετωπιστούν ώστε να κατασκευαστεί μια τέτοιου είδους πλωτή εγκατάσταση ανεμογεννήτριας, χωρίς να επηρεάζεται τόσο εύκολα η σταθερότητά της, είναι η ελαχιστοποίηση των φορτίων από τα κύματα στην κίνησή της και στα δομικά φορτία της εξέδρας. Οι εξέδρες αυτές έχουν πρωτοσχεδιαστεί για τη χρήση σε εφαρμογές εξόρυξης πετρελαίου και φυσικού αερίου αλλά η γυροσκοπική κίνηση των πτερυγίων την έκανε πιο δύσκολη την εφαρμογή της στην υπεράκτια αιολική ενέργεια [33].

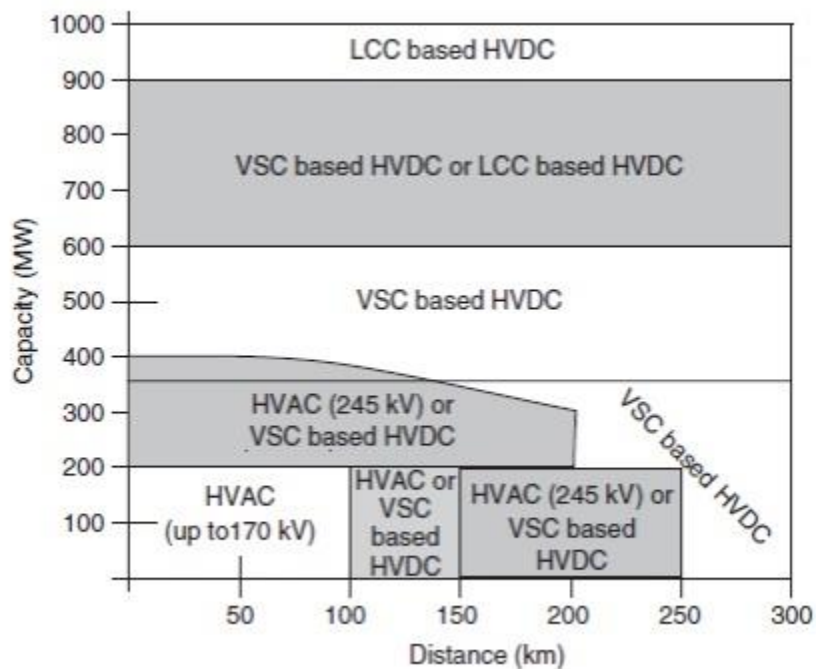
### **Mooring Line Stabilized**

Σε αυτό το είδος πλωτής θεμελίωσης η ευστάθεια επιτυγχάνεται μέσω προεντεταμένων τενόντων. Είναι αρκετά ελαφρότερες κατασκευές από αυτές του τύπου Ballast Stabilized και επιτρέπουν περισσότερη κίνηση στον πύργο. Αν οι κινήσεις του πύργου δεν ελέγχονται μπορούν να οδηγήσουν σε καταστροφικές επιπτώσεις για την ανεμογεννήτρια. Για την ώρα οι Mooring Line Stabilized πλωτές εδράσεις, απαιτούν εξαιρετικά ακριβά και βαριά κατασκευής θεμέλια ώστε να είναι σε θέση να αποτρέπουν την κίνηση από τους κυματισμούς αλλά και τις συνέπειες αυτών στην επιφάνεια της θάλασσας. Οι πλωτές αυτές θεμελιώσεις είναι επίσης γνωστές από την χρήση τους στην εξόρυξη πετρελαίου και φυσικού αερίου και γενικά έχουν παρουσιάσει καλή

υδροδυναμική συμπεριφορά, αποτρέποντας τις έντονες κινήσεις προνευστασμού (pitch) και περιστροφής (roll) της πλωτής ανεμογεννήτριας. Γενικά, μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε βάθη μέχρι και 200μ, πάντα όμως με το σωστό σχεδιασμό και την ορθή μελέτη της περιοχής [33].

### 3.4 Τοπολογίες σύνδεσης υπεράκτιων αιολικών πάρκων

Η διαδικασία σύνδεσης και ένωσης των αιολικών πάρκων με το υπόλοιπο ηπειρωτικό δίκτυο, αποτελεί σίγουρα ένα από τα μειονεκτήματά του. Είναι προφανές ότι η σύνδεση όλου του υπεράκτιου αιολικού πάρκου γίνεται μέσω ενός κεντρικού καλωδίου το οποίο θάβεται συνήθως στο βυθό ώστε να αποφεύγονται όσο το δυνατό οι φθορές. Σχετικά με το τρόπο σύνδεσης αυτών με το ηπειρωτικό δίκτυο, θα λέγαμε ότι είναι ανάλογος της ισχύος του πάρκου καθώς και της απόστασης αυτού από το ηπειρωτικό κομμάτι. Το σχήμα 3.5 μας δίνει μια εικόνα των τρόπων σύνδεσης ανάλογη της απόστασης από την ακτή και της ισχύος του πάρκου.



*Σχ 3.5. Σχεδιάγραμμα των τρόπων σύνδεσης υπεράκτιου αιολικού ανάλογα την ισχύ και την απόσταση από τη στεριά.*

Για τους παραπάνω λόγους και για την ανάγκη σύνδεσης με το δίκτυο μιας παραγωγικής μονάδας η οποία δεν προκαλεί διαταραχές και αναταράξεις στο υπάρχον ηλεκτρικό σύστημα, αναπτύχθηκαν αρκετοί τύποι σύνδεσης. Στο ηπειρωτικό αιολικό πάρκο, ο πιο δημοφιλής τρόπος

σύνδεσής του με το ηλεκτρικό δίκτυο είναι η AC σύνδεση και μάλιστα είναι διαφορετικός σε μικρής κλίμακας πάρκα απ' ότι σε μεγάλης. Επειδή τα υπεράκτια αιολικά πάρκα αποτελούν συνήθως πάρκα μεγάλης ισχύος, θα επικεντρωθούμε παρακάτω στους τρόπος σύνδεσης των μεγάλων χερσαίων αιολικών πάρκων αντίστοιχα με σκοπό να έχουμε μια καλύτερη σύγκριση με το τί ισχύει στα υπεράκτια.

	HVAC	LCC	VSC
Μέγιστη Ισχύς Συστήματος	200MW στα 150 kV 350MW στα 245 kV	≈1200 MW	350MW
Μέγιστο Επίπεδο Τάσης	245 kV	±500 kV	±150 kV
Επηρεάζεται η ικανότητα φόρτισης από την απόσταση ;	Ναι	Όχι	Όχι
Συνολικές Απώλειες Συστήματος	Εξαρτώνται από την απόσταση	2-3%	4-6%
Δυνατότητα Black Start	Ναι	Όχι	Ναι
Επίπεδο Σφαλμάτων	Υψηλό σε σχέση με HVDC	Χαμηλό σε σχέση με HVAC	Χαμηλό σε σχέση με HVAC
Δυνατότητα υποστήριξης του δικτύου	Περιορισμένη	Περιορισμένη	Μεγάλη
Έκταση που απαιτείται για τον υπεράκτιο υποσταθμό	Μικρή	Εξαρτάται από την ισχύ. Μεγαλύτερος μετατροπέας από VSC	Εξαρτάται από την ισχύ. Μικρότερος μετατροπέας από LCC αλλά μεγαλύτερη έκταση από HVAC

**Σχ 3.6** Πίνακας απεικόνισης των χαρακτηριστικών των τριών συνδέσεων υπεράκτιου αιολικού πάρκου με την στεριά.

Τα υπάρχοντα υπεράκτια αιολικά πάρκα όμοια χρησιμοποιούν κυρίως την AC σύνδεση και ο λόγος ασφαλώς είναι ότι δεν απέχουν πολύ από σημείο σύνδεσης και δεν αποτελούν μεγάλης ισχύος πάρκα. Επειδή όμως τα νέα αιολικά πάρκα σχεδιάζονται με διαφορετικά χαρακτηριστικά απ' ότι τα πρώτα του είδους, οι τρόποι σύνδεσης εξελίσσονται και αυτοί ανάλογα. Συνοψίζοντας, παρακάτω αναφέρονται οι τρεις ποιο διαδεδομένοι τρόποι σύνδεσης ενός υπεράκτιου αιολικού πάρκου με το ηπειρωτικό δίκτυο και στο πίνακα 3.6 παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά αυτών των τριών συνδέσεων υπεράκτιου αιολικού πάρκου με την στεριά:

- Σύνδεση με HVAC (High Voltage AC)

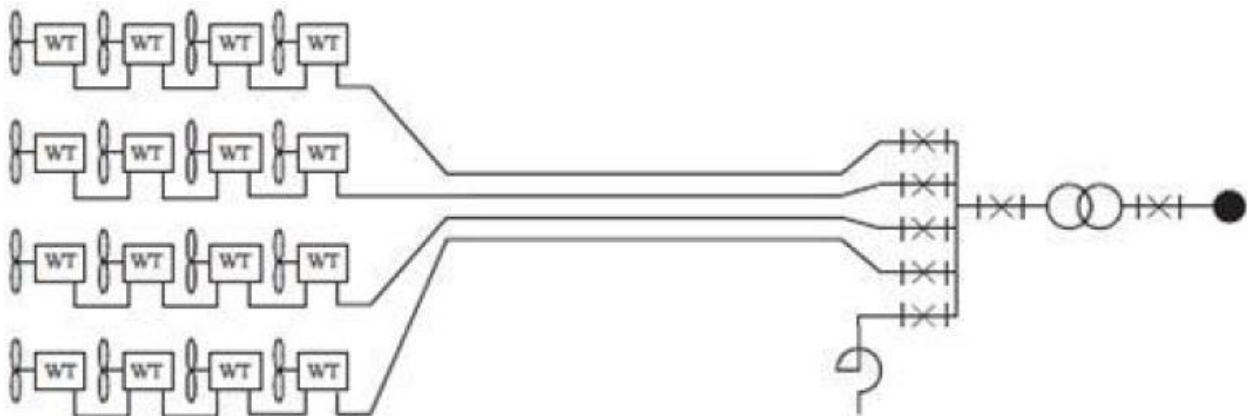


- Σύνδεση με LCC (Line Commutated Converter) βασισμένη σε HVDC (High Voltage DC)
- Σύνδεση με VSC (Voltage Source Converter) βασισμένη σε HVDC (High Voltage DC)

### 3.4.1. Σύνδεση με HVAC

Όπως έχουμε ήδη αναφέρει από τα προηγούμενα, η σύνδεση με υψηλής τάσης εναλλασσόμενου ρεύματος (HVAC) πέρα από την πιο διαδεδομένη μορφή μεταφοράς ενέργειας στα χερσαία αιολικά πάρκα, αποτελούσε και την αρχική μορφή μεταφοράς στα υπεράκτια αιολικά πάρκα. Τα πρώτα υπεράκτια αιολικά πάρκα ήταν μικρής ισχύος και σε κοντινή σχετικά απόσταση από τη στεριά. Για αυτό και η σύνδεση με HVAC δεν αποτελούσε πρόβλημα στην μεταφορά της ενέργειας από το αιολικό πάρκο και στην σύνδεσή του με αυτό.

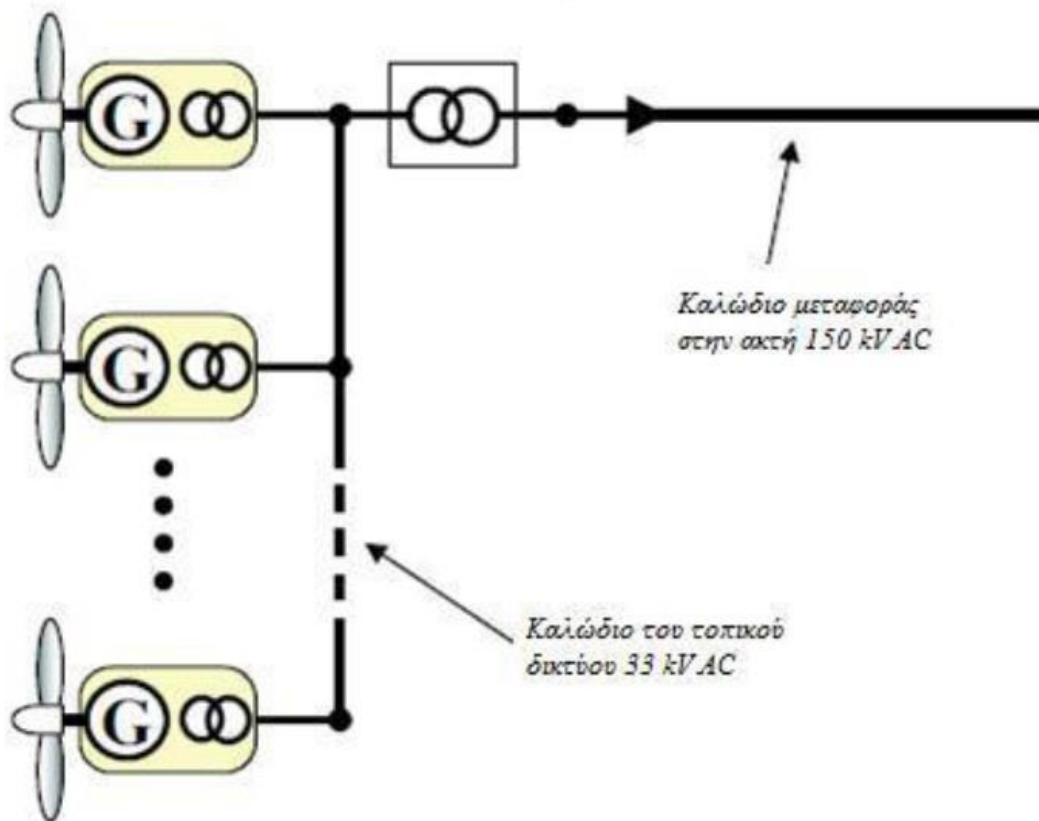
Ένα αιολικό πάρκο με μικρό αριθμό ανεμογεννητριών κατασκευάζονταν συνήθως με ακτινικό δίκτυο. Ποιο συγκεκριμένα, οι ανεμογεννήτριες συνδέονται μεταξύ τους σε σειρά, ανά ομάδες, με την καλωδίωση όλων αυτών των ομάδων να συνδέονται μεταξύ τους σε ένα κόμβο AC ο οποίος με τη σειρά του κατέληγε σε ένα υποσταθμό Μέσης Τάσης (Υ/Σ ΜΤ) ο οποίος ανύψωνε την τάση για την μεταφορά της ισχύος με τις μικρότερες δυνατές απώλειες, όπως ακριβώς αναπαριστάται στο σχήμα 3.7. Η σύνδεση αυτή αποτελεί την πιο συμφέρουσα οικονομικά λύση στα μικρής ισχύος πάρκα, είτε είναι χέρσα είτε υπεράκτια και σε μικρή απόσταση από την στεριά.



*Σχ 3.7 Τοπολογία μικρής ισχύος αιολικού πάρκου με σύνδεση AC*

Στα μεγαλύτερης ισχύος αιολικά πάρκα που χρησιμοποιούν AC σύνδεση, υπάρχει διαφορετική τοπολογία. Κάθε ανεμογεννήτρια συνδέεται με τις υπόλοιπες στα 33KV και όλες οι μαζί, καταλήγουν σε ένα κοινό κόμβο υποσταθμό ο οποίος μετασχηματίζει τη συνολική τη γραμμή

από τα 33KV στα 150KV για την μεταφορά της ισχύος στα ηπειρωτικά [28]. Η παραπάνω τοπολογία αναπαρίσταται γραφικά από το σχήμα 3.8 που ακολουθεί.



Σχ 3.8. Τοπολογία μεγάλης ισχύος αιολικού πάρκου με σύνδεση AC

### 3.5 Περιβαντολογικές επιπτώσεις υπεράκτιων αιολικών πάρκων

Η αιολική ενέργεια αδιαμφισβήτητα αποτελεί μια πράσινη παραγωγή ενέργειας αλλά αυτό δεν σημαίνει ότι δεν έχει και κάποιες αρνητικές επιπτώσεις σε ότι έχει να κάνει με το περιβάλλον αλλά και με την καθημερινή δραστηριότητα του ανθρώπου. Είτε το αιολικό πάρκο είναι εγκατεστημένο σε ηπειρωτικό έδαφος είτε στη θάλασσα. Κάποια από αυτά τα αρνητικά στοιχεία είναι κοινά σε αυτά τα δύο ήδη πάρκων και κάποια όχι.

Από οικολογικής άποψης, τα ρηγά νερά είναι συνήθως περιοχές με υψηλή οικολογική αξία και αποτελούν σημαντικά καταφύγια για αναπαραγωγή, ανάπαυση και για τα μεταναστευτικά πουλιά. Απαιτείται στενή συνεργασία και επικοινωνία από τις χώρες που γειτονεύουν με υπεράκτια αιολικά πάρκα ώστε να αποφεύγονται οι περιβαντολογικές επιπτώσεις από αυτά.

### 3.5.1. Οπτική όχληση

Τα υπεράκτια αιολικά πάρκα έχουν συνήθως περισσότερες και μεγαλύτερες ανεμογεννήτριες από τις χερσαίες εγκαταστάσεις. Ωστόσο, η οπτική επίδραση είναι μικρότερη λόγω της μεγαλύτερης απόστασης από την ακτογραμμή. Παρ' όλα αυτά, το παράκτιο τοπίο είναι συχνά μοναδικό και προσφέρει μερικά από τα πιο πολύτιμα θεάματα, έτσι απαιτείται ιδιαίτερη προσοχή στην επιλογή του σημείου εγκατάστασης αυτών. Η οπτική επίδραση των υπεράκτιων αιολικών πάρκων μπορεί να επηρεάσει τρεις συνιστώσες του θαλάσσιου τοπίου :

1. Ένα μέρος της θαλάσσιας περιοχής
2. Ένα μέρος της ακτογραμμής
3. Ένα μέρος της παραθαλάσσιας περιοχής.

Το πόσο τώρα επηρεάζει οπτικά ένα υπεράκτιο αιολικό πάρκο, εξαρτάται από τα παρακάτω:

- Θέση και μέγεθος του πάρκου
- Μέγεθος, υλικά και χρώματα των ανεμογεννητριών που χρησιμοποιήθηκαν σε αυτές
- Διάταξη και απόσταση των αιολικών πάρκων και των συναφών κατασκευών
- Τοποθεσία, διάσταση και μορφή των βοηθητικών στη ξηρά (υποσταθμός, πυλώνες, εναέριες γραμμές, υπόγεια καλώδια) και υπεράκτιες δομές (υποσταθμοί και ανεμόμετρα ιστών)
- Φώτα ναυσιπλοΐας και νυχτερινής πλοήγησης
- Πλωτά μέσα μεταφοράς και συντήρησης

Πρόσφατα, σε μια έρευνα για την οπτική όχληση (Bishop&Miller,2005) διαπίστωσαν ότι η απόσταση και η αντίθεση αποτελούν πολύ καλούς ανασταλτικούς παράγοντες για την οπτική όχληση. Η μελέτη, βασίζεται στο αιολικό πάρκο North Hoyle, σε απόσταση 7 χιλιομέτρων από την ακτή της Ουαλίας, και έδειξε ότι σε όλες τις ατμοσφαιρικές συνθήκες αλλά και τις συνθήκες φωτισμού (εκτός από θυελλώδη συνθήκες), οι οπτικές επιπτώσεις μειώθηκαν με την απόσταση. Ωστόσο, η οπτική επίδραση αυξάνεται με την αύξηση της αντίθεσης. Χρειάζεται περαιτέρω έρευνα για την ανάλυση της εξάρτησης της οπτικής επίδρασης από τον αριθμό των ανεμογεννητριών , καθώς και από τον προσανατολισμό και τη διανομή αυτών στο πάρκο [31].

### 3.5.2. Ακουστική όχληση

Τα υπεράκτια αιολικά πάρκα που βρίσκονται μακριά από τους ανθρώπινους οικισμούς, δεν επηρεάζονται από το θόρυβο που παράγεται από ανεμογεννήτριες. Ωστόσο, τα θαλάσσια ζώα θα μπορούσαν να επηρεαστούν από τον υποθαλάσσιο θόρυβο που παράγεται κατά την κατασκευή

και λειτουργία των ανεμογεννητριών. Τα οποιοδήποτε αποτελέσματα του θορύβου θα εξαρτηθούν από την ευαισθησία των ειδών που υπάρχουν και την ικανότητά τους να προσαρμόζονται σε αυτό. Οι διαδικασίες για τη μέτρηση του ακουστικού θορύβου υπεράκτιων ανεμογεννητριών θα πρέπει να περιλαμβάνει τα ακόλουθα:

- Χαρακτηριστικά ανεμογεννήτριας: ονομαστική ισχύς, διάμετρο ρότορα, άνοιγμα φτερών κτλ
- Τύπος θεμελίωσης, υλικό κατασκευής, βάθος θεμελίωσης κτλ
- Αποτελεσματική οδήγηση του πυλώνα κατά τη θεμελίωση και την ενεργειακής δόνηση για την πάκτωσή του
- Περίοδος φάσης κατασκευής και συχνότητα δόνησης χτυπημάτων
- Βάθος νερού στην περιοχή εγκατάστασης

Η ακουστική όχληση κατά την κατασκευή προέρχεται από τις μηχανές των σκαφών, τις ενέργειες για την πάκτωση των πυλώνων, τις εκρήξεις και την εγκατάσταση των ανεμογεννητριών. Μετρήσεις όπου διενεργούνται σε αυτή τη φάση του έργου (συνήθως από τα υπουργεία περιβάλλοντος) έχουν δείξει ότι σε επίπεδα αιχμής τα επίπεδα θορύβου έχουν φθάσει τα 193 dB στα 400 μέτρα από το πυλώνα (Βόρεια Θάλασσα) και τα 196 dB σε 300m από το πυλώνα (Βαλτική Θάλασσα). Οι μετρήσεις (Dr J. Nedwell & Mr D. Howell) έχουν καταγράψει και ακουστική όχληση σε επίπεδα 260dB κατά την φάση της κατασκευής και 178dB στο καλώδιο μεταφοράς σε απόσταση 100μ από την ανεμογεννήτρια. Αυτά τα υψηλά επίπεδα θορύβου, μπορεί να προκαλέσουν μόνιμη ή προσωρινή βλάβη στα συστήματα ακουστικής των ζώων στην περιοχή του εργοταξίου. Ωστόσο, δεν υπάρχει αρκετή επιστημονική γνώση για να καθορίσει τα ανώτατα όρια θορύβου ώστε να είναι εφικτές αυτές οι δραστηριότητες χωρίς συνέπειες στο κοντινό θαλάσσιο οικοσύστημα. Η στενή συνεργασία μεταξύ φυσικών, μηχανικών και βιολόγων είναι απαραίτητη ώστε με την σωστή μεταξύ τους πληροφόρηση, να παρθούν οι σχετικές αποφάσεις για την τυποποίηση των διαδικασιών μέτρησεων σε υπεράκτιες κατασκευές [29].

Επίσης, οι μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν κατά τη διάρκεια της κατασκευής του αιολικού πάρκου North Hoyle στο Ηνωμένο Βασίλειο δείχνουν ότι:

- Η κορυφή του θορύβου του πυλώνα κατά την σφυρηλάτηση και σε 5m βάθος ήταν 260 dB και στα 10μ βάθος ήταν 262 dB.
- Δεν υπήρχαν συγκεκριμένες κατευθύνσεις για την διάδοση του θορύβου.
- Η συμπεριφορά των θαλάσσιων θηλαστικών και ψαριών θα μπορούσε να επηρεαστεί αρκετά χιλιόμετρα μακριά από την τουρμπίνα.

Η συμπεριφορά των θαλάσσιων οργανισμών μπορεί να τροποποιηθεί λόγω του θορύβου, με αποτέλεσμα την αποφυγή της περιοχής κατά τη διάρκεια της κατασκευής. Οι πιθανές επιπτώσεις

στο θαλάσσιο οικοσύστημα εξαρτώνται από την ευαισθησία των ειδών που υπάρχουν στην περιοχή και έχει πτωτική τάση όταν ο θόρυβος μειώνεται στο τέλος της φάσης κατασκευής (ή στον παροπλισμό).

Υπάρχουν αρκετές ομάδες επιστημόνων όπου μελετάνε τρόπους μείωσης του θαλάσσιου οικοσυστήματος από τα υπεράκτια αιολικά πάρκα. Κάποιοι από τους υπό συζήτηση τρόπους είναι:

- Η ομαλή εκκίνηση της διαδικασίας εκκίνησης, αυξάνοντας αργά την ενέργεια του εκπεμπόμενου ήχου.
- Η επένδυση του εξωτερικού του πυλώνα με ένα στρώμα αέρα το οποίο μπορεί να μειώσει τον εκπεμπόμενο θόρυβο κατά 10-20 dB.
- Η επένδυση του εξωτερικού του πυλώνα το οποίο βρίσκεται πακτωμένο στο βυθό με ένα ακουστικά μονωτικό υλικό το οποίο μπορεί να μειώσει τον εκπεμπόμενο θόρυβο κατά 5-25 dB κατά την διάρκεια της λειτουργίας.
- Επέκταση του χρόνου πάκτωσης θα μπορούσε να μειώσει τα επίπεδα θορύβου 10-15 dB.
- Η χρησιμοποίηση ειδικών ακουστικών συσκευών όπου θα χρησιμοποιούνται στο να απομακρύνουν από την περιοχή εργασιών τα θηλαστικά κατά τη φάση κατασκευής.

Στην φάση της λειτουργίας, ο ήχος που παράγεται στο κιβώτιο ταχυτήτων και στη γεννήτρια, μεταδίδεται από το τοίχωμα του πύργου με αποτέλεσμα τη διάδοση του θορύβου υποβρυχίως. Οι μετρήσεις του θορύβου που εκπέμπεται στην ατμόσφαιρα από τις ανεμογεννήτριες και τους μετασχηματιστές έχουν δείξει αμελητέα συμβολή στο επίπεδο του υποβρυχίου θορύβου. Η υποθαλάσσια ακουστική όχληση από τις ανεμογεννήτριες δεν είναι υψηλότερη από το επίπεδο θορύβου του περιβάλλοντος στην περιοχή συχνοτήτων άνω του 1 kHz, αλλά είναι υψηλότερη κάτω από αυτή την τιμή. Ο θόρυβος μπορεί να έχει επιπτώσεις στη βενθική πανίδα, τα ψάρια και τα θαλάσσια θηλαστικά στην περιοχή των θεμελίων των ανεμογεννητριών [30].

Οι εκθέσεις για τις επιπτώσεις του θορύβου στα ψάρια έχουν δείξει μια σειρά από παρενέργειες, που ποικίλουν από φαινόμενα ένδειξης συμπεριφοράς αποφυγής μέχρι και σε φυσιολογικές συμπεριφορές. Οι αποφυγή αυτών των περιοχών από τα ψάρια κατά την περίοδο της διατροφής τους αλλά και την αναπαραγωγής τους, αποτελεί βασικό ενδεχόμενο. Επίσης, είναι πιθανών να αποφεύγονται οι εν λόγω περιοχές κατά τη περίοδο της μετανάστευσης κάποιων ειδών ψαριών διότι οι περιοχές που δημιουργήθηκαν τα πάρκα να αποτελούν μεταναστευτικά μονοπάτια. Μετρήσεις σε ανεμογεννήτρια 1.5MW που διετελέσε το Γερμανικό Ομοσπονδιακό Υπουργείο Περιβάλλοντος έχει δείξει ότι οι εκπομπές θορύβου σε λειτουργία αυτής της μηχανής, δεν βλάπτει το ακουστικό σύστημα των θαλάσσιων ειδών. Όσον αφορά τη συμπεριφορά, η ίδια μελέτη δήλωσε ότι δεν είναι σαφές αν ο θόρυβος από ανεμογεννήτριες έχει επίδραση στη θαλάσσια ζωή [31].

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4<sup>ο</sup>

### «ΚΩΔΙΚΕΣ ΔΙΚΤΥΩΝ»

#### 4.1 Εισαγωγή

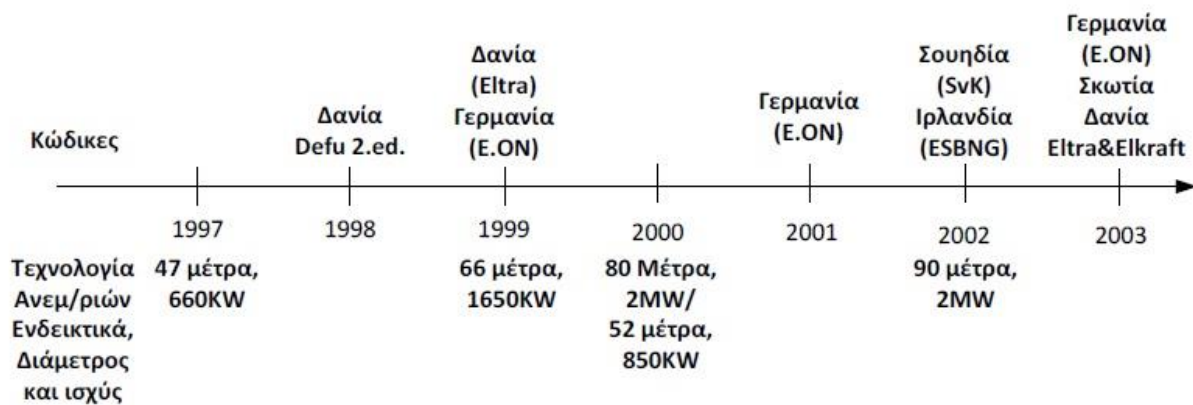
Οι κώδικες δεν αποτελούν κάτι νέο στο χώρο των ηλεκτρικών δικτύων. Η ανάγκη γέννησης αυτών των τεχνικών απαιτήσεων εμφανίστηκε μαζί με τα πρώτα σημαντικά προβλήματα στην ηλεκτροδότηση ανά το κόσμο, στα οποία οδήγησε η έλλειψη ακριβώς αυτών των απαιτήσεων οι οποίες θα διασφάλιζαν την αξιοπιστία του δικτύου. Στην δεκαετία του '60, η ραγδαία ανάπτυξη πολύ μεγάλων σταθμών παραγωγής (από 600MW και πάνω) και ο φόβος απώλειας ενός τέτοιου σταθμού, οδήγησαν στην ανάπτυξη αυτών των κανόνων και προτύπων με στόχο το να μπορεί να αντέξει ένα δίκτυο μία τέτοια απώλεια στο τομέα της παραγωγής. Πιο συγκεκριμένα, η απώλεια ενός μεγάλου σταθμού παραγωγής για ένα δίκτυο σήμαινε αυτόματα μεγάλες βυθίσεις στην τιμή της τάσης με αποτέλεσμα την αστάθεια του δικτύου και την καταστροφή πολλών καταναλωτικών συσκευών. Πλήγμα μεγάλο στην οικονομία και αξιοπιστία ενός δικτύου. Για αυτό και οι πρώτες απαιτήσεις αντοχής τάσης αποτελούσαν γεγονός. Με το καιρό, όλο και περισσότεροι κανόνες και απαιτήσεις εισερχόντουσαν στους κύκλους των εταιρειών ηλεκτρισμού με σκοπό την αξιοπιστία της ποιότητας της ηλεκτρικής ενέργειας ενός ΣΗΕ (Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας). Οι λεγόμενοι κώδικες διασύνδεσης δεν ήταν και πολύ αναλυτικοί και αποτελούσαν στην ουσία εμπειρικούς κανόνες καλής λειτουργίας. Λόγω της εσωτερικής τους χρήσης από τις εταιρίες ηλεκτρισμού, ήταν σχεδόν άγνωστοι στον υπόλοιπο ηλεκτρολογικό κόσμο.

Η αύξηση της διείσδυσης της αιολικής ενέργειας στα ηλεκτρικά δίκτυα, αποτελούσε πρόκληση για τη σταθερότητα ενός συστήματος διανομής της ηλεκτρικής ενέργειας. Για αυτό το σκοπό, οι χώρες που αποτέλεσαν τους πρωτοπόρους στο τομέα της αιολικής ενέργειας, αντιμετώπισαν και πρώτες τις δυσκολίες που εμφανίστηκαν. Για να αντιμετωπίσουν τις δυσκολίες αυτές προσαρμόσανε τους ήδη υπάρχοντες κώδικες από τις συμβατικές μονάδες παραγωγής ενέργειας σε μια σειρά από τεχνικές απαιτήσεις οι οποίες πρέπει να τηρούνται ώστε να μπορεί να συνδεθεί η αιολική μονάδα στο δίκτυο χωρίς να προκαλέσει οποιαδήποτε αστάθεια αρχικά αλλά και μελλοντικά να μπορεί να ενεργήσει πυροσβεστικά στην διαταραχή του δικτύου από κάποιο άλλο παράγοντα.

Λίγο πριν το 2000, αρχίζει αυτή η συσχέτιση των κωδικών δικτύου με τα αιολικά, με πρωτοπόρο χώρα τη Δανία. [34]. Αρχικά οι κώδικες σύνδεσης αφορούσαν την προστασία, το ρεύμα, τους περιορισμούς ισχύος και την ποιότητα ισχύος. Ακριβώς την ίδια περίοδο, η Δανία κοινοποιεί τα μελλοντικά της σχέδια σε σχέση με την υπεράκτια αιολική ενέργεια με τμηματική ετήσια εγκατάσταση τα 150MW και απώτερο στόχο το σύνολο των 3000MW. Πάνω σε αυτές τις

μελέτες γεννήθηκε και η ανάγκη για απαιτήσεις από το ηλεκτρικό σύστημα στο οποίο θα συνδεόταν το αιολικό πάρκο και για τα ηλεκτρολογικά χαρακτηριστικά λειτουργίας των ανεμογεννητριών. Αυτό συνέβη προκειμένου να μπορεί το αιολικό πάρκο να μένει συνδεδεμένο στο δίκτυο κατά την διάρκεια σφαλμάτων. Αυτή η ανάγκη για παραμονή σε σύνδεση, εγκυμονούσε το κίνδυνο της περαιτέρω φόρτισης, ήδη υπερφορτισμένων δικτύων, και την αύξηση της πιθανότητας για απώλεια μεγάλων συστημάτων παραγωγής. Η ανάγκη για παραμονή σε ένα τόπο με πολύ καλό αιολικό δυναμικό αλλά με μη ικανό δίκτυο μεταφοράς της ισχύς αυτού του μεγέθους, ήταν σύνηθες φαινόμενο και ήταν αυτό που ανέδειξε την αστάθεια ή και την κατάρρευση ακόμα της τάσης σε μείζον θέμα.

Ο γερμανικός TenneT-κώδικας υπεράκτιας διασύνδεσης είναι ο μόνος κώδικας στον κόσμο που αφορά αποκλειστικά υπεράκτιες διασυνδέσεις ενώ ο κώδικας μεταφοράς των 50Hz περιέχει μικρές αναφορές στα υπεράκτια πάρκα. Πρόσφατα, στη Μεγάλη Βρετανία, ο NGET κώδικας διασύνδεσης άρχισε να ενσωματώνει συγκεκριμένες απαιτήσεις για τα υπεράκτια πάρκα (προστέθηκαν άρθρα και αντιγράφηκαν κυρίως από τα αντίστοιχα συμβατικά αιολικά πάρκα). Στην Ευρώπη, ο κώδικας ENTSO-e, εισάγει ένα ολόκληρο κεφάλαιο αναφορικά με τις υπεράκτιες απαιτήσεις. Άλλες χώρες, όπως η Ισπανία, η Γαλλία κτλ. συζητούν σχετικές απαιτήσεις συγκεκριμένες για υπεράκτια αιολικά πάρκα. Στο σχήμα 4.1 που ακολουθεί παρακάτω, παρουσιάζεται το χρονοδιάγραμμα εξέλιξης των κωδίκων διασύνδεσης.



Σχ 4.1. Χρονοδιάγραμμα εξέλιξης κωδίκων διασύνδεσης

Οι τεχνολογίες των ανεμογεννητριών στην φάση της γέννησης της ανάγκης για έλεγχο της τάσης και της ισχύος του δικτύου, δεν βοηθούσε πολύ στον έλεγχο. Ο έλεγχος της ισχύος μέσω του αεροδυναμικής αποκόλλησης και μεταβλητού βήματος δεν ήταν αρκετά αποτελεσματικός. Αυτός είναι και ένας από τους λόγους ανάπτυξης των γεννητριών διπλής τροφοδότησης στάτη και δρομέα και γενικότερα της ανάπτυξης μηχανών με μεγαλύτερες δυνατότητες ελέγχου της λειτουργίας τους ώστε να μπορούν να συνεισφέρουν αποτελεσματικότερα στο θέμα της βύθισης τάσης αρχικά και αστάθειας του δικτύου γενικότερα. Η ανάγκη για παραμονή σε σύνδεση,

κάλυπτε περιπτώσεις όπως το σφάλμα δικτύου, το σφάλμα τάσης, τη βύθιση τάσης, το μηδενισμό τάσης και την υψηλή τάση.

Πέρα από την ανάγκη για χειρισμό και έλεγχο της τάσης, υπήρχε και οι ανάγκη για χειρισμό και έλεγχο της συχνότητας, καθώς και της πιστοποίησης των συστημάτων που συνεισφέρουν στο δίκτυο. Επίσης η έγχυση ρεύματος κατά την διάρκεια συμμετρικών και κυρίως ασύμμετρων σφαλμάτων, απαιτούσε επίσης λύση. Η ικανότητα αυτή αναφέρεται ως Fault Ride Through (FRT) ή Low Voltage Ride Through (LVRT). Σε κάποιες χώρες, εκτός από τα προαναφερθέντα, υπήρχε και η απαίτηση για την παροχή άεργου ισχύος. Όλα τα παραπάνω οδήγησαν στην προσπάθεια εναρμόνισης όλων αυτών των πολυσύνθετων απαιτήσεων μέσω των διαχειριστών συστήματος μεταφοράς, όπως είναι ο ENTSO-e για την Ευρώπη, σε συνεργασία και με άλλους φορείς όπως ο Ευρωπαϊκός Οργανισμός Αιολικής Ενέργειας (European Wind Energy Association-EWEA).

Οι ανάπτυξη κωδικών διασύνδεσης αντιμετώπισε πάρα πολλά προβλήματα και δυσκολίες στην πράξη, κυρίως στην εφαρμογή αλλά και στον σχεδιασμό αρχικά. Οι λόγοι είναι πολλοί, ένας από τους βασικότερους είναι ότι όλα τα ηλεκτρικά συστήματα και δίκτυα δεν είναι ίδια. Ειδικά από χώρα σε χώρα. Επίσης, τα βασικά προβλήματα σε κάθε σύστημα είναι και διαφορετικά. Σε ένα δίκτυο για παράδειγμα μπορεί να είναι η κατάρρευση της τάσης και σε ένα άλλο η αστάθεια στη συχνότητα. Οι κώδικες που προϋπήρχαν της προσπάθειας εναρμόνισής τους, ήταν πολύ διαφορετικοί σε δομή και τεχνικές απαιτήσεις ενώ κάποιιοι από αυτούς ήταν δυσνόητοι και ασαφείς. Κατά την δημιουργία των κωδικών, ήταν πολύ δύσκολο για τους διαχειριστές να προβλέψουν τι ακριβώς μπορεί να καλύψει ένα αιολικό πάρκο από την στιγμή που οι τεχνολογίες και κατά συνέπεια και τα χαρακτηριστικά αλλάζαν ραγδαία με αποτέλεσμα να γράφονταν με τέτοιο τρόπο που δημιουργούσαν πολλούς περιορισμούς στο τρόπο σχεδιασμού μιας ανεμογεννήτριας. Δεν πρέπει επίσης να ξεχνάμε ότι οι απαιτήσεις στις ανεμογεννήτριες ήταν πολύ μικρότερες αρχικά, απ' ότι είναι σήμερα για παράδειγμα. Για να λυθούν αυτού του είδους οι δυσκολίες, απαιτούνταν ένα εξαιρετικά πολύπλοκο μοντέλο προσομοίωσης, γεγονός που αποτελούσε επίσης σημαντικότατο πρόβλημα προς λύση [35].

Τέλος, πρέπει να σημειωθεί ότι περιπτώσεις όπως πολύ μεγάλα αιολικά πάρκα που είναι μακριά από την κατανάλωση (χαρακτηριστικές περιπτώσεις στην Κίνα και στις ΗΠΑ) θα πρέπει να «αναγκάσουν» τους διαχειριστές να καινοτομήσουν (όπως συμβαίνει με την περίπτωση του HVDC στην Ευρώπη). Κάποια κορεσμένα δίκτυα ακόμα και σε χώρες με χαμηλό επίπεδο διείσδυσης της αιολικής ενέργειας μπορούν να εγείρουν ζητήματα με δύσκολες απαιτήσεις (π.χ. η ποιότητα της ισχύος). Η κινητικότητα και πολυπλοκότητα των απαιτήσεων, πολύ συχνά, συμπίπτει με την κινητικότητα της αγοράς (π.χ. Κίνα, Μεγάλη Βρετανία).

## **4.2 Κώδικες χωρών με την μεγαλύτερη διείσδυση αιολικής ενέργειας**

Παρακάτω γίνεται μια σύντομη αναφορά στους κώδικες δικτύων των χωρών με τα μεγαλύτερα ποσά αιολικής διείσδυσης παγκοσμίως.



## **Βρετανικός κώδικας**

Ο Βρετανικός κώδικας αποτελεί ένα συνδυαστικό κώδικα όπου συνδυάζει τις απαιτήσεις από τα αιολικά πάρκα με αυτές των συμβατικών σταθμών παραγωγής. Αναφέρεται σε επίπεδα τάσεων της τάξεως από 32KV έως 400KV, ενώ σε μερικά φαινόμενα όπως η βύθιση τάσης αναφέρεται από 200KV και πάνω. Το 2006 έχουμε την αντικατάσταση των κωδικών της Σκωτίας και της Ουαλίας από τον λεγόμενο αγγλικό μέχρι εκείνη τη στιγμή, με αποτέλεσμα την δημιουργία του Βρετανικού όπου ισχύει και σε αυτές τις χώρες πλέον και είναι γνωστός ως NGET. Αποτελεί έναν από τους κώδικες με την μεγαλύτερη αξία στην εφαρμογή του διότι η Βρετανία ανήκει στις χώρες με πολύ ψηλό αιολικό δυναμικό και η διείσδυση αναμένεται τα ραγδαία [36].

## **Γερμανικός κώδικας**

Ο γερμανικός κώδικας της E.ON αποτελεί τον πιο καταρτισμένο κώδικα με την μεγαλύτερη ακρίβεια και πληρότητα στις τεχνικές του περιγραφές και απαιτήσεις. Περιλαμβάνει ασφαλώς και συμβατικές μονάδες παραγωγής αλλά και αιολικά πάρκα με σύνδεση στα 380, 220 και 110 kV. Υπάρχουν συχνές αναθεωρήσεις του, λόγω της συνεχούς και αυξημένης διείσδυσης αιολικών πάρκων στην χώρα συνεχόμενα τα τελευταία δέκα χρόνια [37].

## **Ιρλανδικός κώδικας**

Ο Ιρλανδικός κώδικας, σε αντίθεσή με τους δύο προαναφερθείς κώδικες, περιλαμβάνει ειδικές ξεχωριστές διατάξεις για τα αιολικά πάρκα και όχι σε συνδυασμό με τους συμβατικούς σταθμούς παραγωγής. Οι απαιτήσεις αναφέρονται σε επίπεδα τάσης 400, 220 και 110 kV. Αποτελεί εξίσου ένα πολύ ενδιαφέρον κώδικα μιας και η Ιρλανδία αποτελεί νησιωτική περιοχή με όλες τις ιδιαιτερότητες που μπορεί να έχει αυτό το χαρακτηριστικό. Τέλος, γίνεται αναφορά στο κώδικα αυτό και για την Βόρειος Ιρλανδία.

## **Κοινός κώδικας Δανίας/Φινλανδίας/Νορβηγίας/Σουηδίας (Nordic Grid Code)**

Ο συγκεκριμένος κώδικας θα μπορούσε να αποκαλεστεί και Σκανδιναβικός κώδικας λόγω των χωρών στους οποίους έχει ισχύ. Δεν περιλαμβάνει ειδικές απαιτήσεις για τα αιολικά πάρκα, παρόλο που το αιολικό δυναμικό και η διείσδυση στις συγκεκριμένες χώρες είναι υψηλό. Μέσα στο κώδικα αυτόν, σε ότι αφορά τα αιολικά πάρκα, υπάρχουν αναφορές στις ειδικές απαιτήσεις του κώδικα της Δανίας. Τα επίπεδα της τάσης στα οποία αναφέρεται ο κώδικας στα αιολικά πάρκα σύμφωνα με την Nordel connection Code Wind Turbines είναι τα 110 και 400 kV για τη Φινλανδία, τα 132-150-220 και 400 kV για τη Δανία, 132-300 και 400 kV για τη Νορβηγία και τα

220 και 400 kV για τη Σουηδία. Το σημείο σύνδεσης (Connection point) στο συγκεκριμένο κώδικα αποτελεί το σημείο που το αιολικό πάρκο συνδέεται με το δίκτυο. Οι γενικές απαιτήσεις που περιλαμβάνει ο κώδικας για τα αιολικά πάρκα ισχύουν για όλα τα πάρκα που είναι συνδεδεμένα στο διασυνδεδεμένο σύστημα αυτών των τεσσάρων χωρών, το λεγόμενο Nordic Grid και εφαρμόζονται στο σημείο σύνδεσης. Ο κάθε διαχειριστής μπορεί να αποφασίσει αν τα θεωρητικά μικρής ισχύος αιολικά πάρκα (κάτω των 100MW) απαλλάσσονται ή όχι από κάποιες απαιτήσεις που ορίζει ο κώδικας ανάλογα με τις επιπτώσεις και πάνω στη λειτουργία και την σταθερότητα του Nordic Grid [38].

### **Κώδικας Δανίας**

Στη Δανία, εκτός από τον κοινό κώδικα των Σκανδιναβικών χωρών, υπάρχει και μια ξεχωριστή αγγλική έκδοση που διέπει την σύνδεση αιολικών πάρκων σε τάση κάτω των 100KV. Ο κώδικας αυτός προέκυψε από την συνεργασία των δύο διαχειριστών δικτύου της χώρας, της Eltra (δυτική Δανία) και της Elkraft (ανατολική Δανία). Τα αιολικά πάρκα που υπακούουν σε αυτή την οδηγία είναι αυτά που έχουν συνδεθεί στο δίκτυο μετά από την 1/07/2004. Η οδηγία αυτή αποτελείται από απαιτήσεις που εφαρμόζονται σε όλα τα σημεία σύνδεσης αιολικών πάρκων και σε συμπληρωματικές απαιτήσεις οι οποίες εφαρμόζονται κατά περίπτωση. Πιο συγκεκριμένα, η περίπτωση που εφαρμόζονται οι συμπληρωματικές απαιτήσεις είναι όταν τα αιολικά πάρκα που πρόκειται να συνδεθούν στο δίκτυο, αποτελούνται από ανεμογεννήτριες ονομαστικής ισχύος ίσης ή μεγαλύτερης του 1MW. Γενικά, ο κώδικας της Δανίας αποτελεί έναν από τους πιο σημαντικούς μιας και η Δανία καλύπτει ένα πολύ μεγάλο ποσοστό της ηλεκτρικής ενέργειας που καταναλώνει από τα αιολικά πάρκα και ακόμα πιο ενδιαφέρον σημείο σε αυτό τον κώδικα, αποτελεί το μεγάλο ποσοστό διείσδυσης από υπεράκτια αιολικά πάρκα.

### **Κώδικας Βελγίου**

Το δίκτυο του Βελγίου διέπεται από τέσσερις διαφορετικούς κώδικες με σημείο αναφοράς την γεωγραφική περιοχή στην οποία εφαρμόζονται. Πρόκειται για τους κώδικες της Φλαμανδίας, της Βαλλονίας, των Βρυξελλών καθώς και των κοινό Ομοσπονδιακό Κώδικα. Ο Κώδικας του Συστήματος Μεταφοράς (Wallonia grid code for the local transmission system, CWaPE, Commission Wallone pour l'Énergie, 17/8/2006) περιλαμβάνει τις ειδικές απαιτήσεις για διατάξεις διεσπαρμένης παραγωγής και διατάξεις παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές.

### **Κώδικας Καναδά**

Ο κώδικας του Καναδά περιλαμβάνει απαιτήσεις οι οποίες είναι γραμμένες σε δύο διατάξεις, τον Κώδικα της Hydro-Quebec, και του Alberta Electric System Operator. Ο πρώτος περιγράφει

τις διατάξεις για σύνδεση άνω των 44KV και ο δεύτερος τις διατάξεις για σύνδεση αιολικού πάρκου άνω των 5MW και σε τάση άνω των 24KV με μέγιστο τα 69KW. Ο Alberta Electric System Operator εξέδωσε τον 2004 τον τελικό κώδικα Wind Power Facility Technical Requirements (Revision 0) και ένα συμπληρωματικό οδηγό, Wind Power Facility Guide to the Technical Requirements. Σε αυτό τον κώδικα ορίζεται ως σημείο σύνδεσης το υψηλότερο σημείο τάσης που συνδέεται το αιολικό [40].

## **Κώδικας ΗΠΑ**

Το 2003 η αρχή ρυθμιστικής ενέργειας των ΗΠΑ (Federal Energy Regulatory Commission - FERC), εξέδωσε οδηγία (Order 2003) όπου περιγραφόταν η διαδικασία σύνδεσης μεγάλων γεννητριών, της τάξεως των 20MW και άνω, στο σύστημα μεταφοράς. Η απόφαση αυτή έκδοσης της οδηγίας, πάρθηκε λαμβάνοντας υπόψη την ανομοιομορφία των διαφόρων απαιτήσεων και τεχνικών σύνδεσης νέων σταθμών παραγωγής, συμπεριλαμβανομένων και των αιολικών πάρκων. Όμως, δεν περιλάμβανε καμία διάκριση σε συμβατικούς σταθμούς παραγωγής με σύγχρονες γεννήτριες και σε αυτές που χρησιμοποιούνται στις ανεμογεννήτριες. Λόγω των παραπάνω, η αρμόδια αρχή εξέδωσε νέα οδηγία το 2004 (Order 2003A) η οποία δίνει την δυνατότητα στους κατασκευαστές ανεμογεννητριών να θέσουν τις τεχνικές ιδιαιτερότητες των ανεμογεννητριών και να προτείνουν μεταβολές με σκοπό την ασφάλεια και σταθερότητα του δικτύου αλλά και των αιολικών πάρκων. Το ίδιο χρόνο κιόλας, η AWEA (American Wind Energy Association) ανταποκρίθηκε και πρότεινε να ληφθούν υπόψη διάφορα ζητήματα που προκύπτουν κατά την σύνδεση των αιολικών πάρκων. Οι προτάσεις αυτές μετά από τις σχετικές συζητήσεις με την αρμόδια αρχή- FERC, οδήγησαν στην τελική έκδοση της οδηγίας τον Ιούνιο του 2005 η οποία αφορούσε τεχνικές απαιτήσεις σύνδεσης αιολικού για πάνω από 20MW [41].

## **Κώδικας Ελλάδος**

Αρχικά ο κώδικας δικτύου της Ελλάδος περιλάμβανε ειδικές τεχνικές σχεδιασμού και συμπεριφοράς μόνο για θερμικές και υδροηλεκτρικές μηχανές παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Οι απαιτήσεις αυτές είναι λεπτομερείς με ειδική αναφορά στα ξεχωριστά είδη μονάδων όπως του λιγνίτη, τις ατμοηλεκτρικές, τις ανθρακικές κα. Οι γενικές απαιτήσεις στα όρια ανοχής του δικτύου σε σχέση με την συχνότητα, την τάση, την ενεργή και την άεργη ισχύ, αποτελούν μια πολύ καλή έκδοση σε σχέση με τους προαναφερθέντες κώδικες παρότι αρχικά δεν περιλάμβανε τα αιολικά πάρκα Αυτό μέχρι που εκδόθηκε από την Αρχή Ρυθμιστικής Ενέργειας (ΡΑΕ) το Άρθρο 242 το οποίο αφορούσε τις προδιαγραφές σχεδιασμού και λειτουργίας για ανεμογεννήτριες και αιολικούς σταθμούς παραγωγής.

### 4.3 ENTSO-e

Η Οδηγία 2009/72 / ΕΚ του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου της 13ης Ιουλίου 2009, η οποία αφορά τους κοινούς κανόνες για την εσωτερική αγορά ηλεκτρικής ενέργειας, υπογραμμίζει την ανάγκη για αυξημένη και συντονισμένη συνεργασία μεταξύ όλων των διαχειριστών συστημάτων μεταφοράς μέσα στο ευρωπαϊκό δίκτυο ενέργειας (ENTSO-E) για τη δημιουργία των κωδικών δικτύου. Η οδηγία αυτή μπήκε σε εφαρμογή το Μάρτιο του 2011 και έχει ως σκοπό τη παροχή και την αποτελεσματική διαχείριση διαφανούς πρόσβασης στα δίκτυα μεταφοράς σε όλη την ΕΕ, την εξασφάλιση συντονισμένου και επαρκώς μακροπρόθεσμου προγραμματισμού και τη τεχνικώς ορθή εξέλιξη του συστήματος μεταφοράς στην Ευρωπαϊκή Κοινότητα, συμπεριλαμβανομένης της δημιουργίας δυνατοτήτων διασύνδεσης, με τη δέουσα μέριμνα για το περιβάλλον. Τα μέλη του οργανισμού στην ηπειρωτική Ευρώπη αποτελούν :

- Αυστρία: APG-Austrian Power Grid AG and Vorarlberger Übertragungsnetz Gmb
- Βέλγιο: Elia System Operator SA
- Βοσνία Ερζεγοβίνη: Nezavisni operator sustava u Bosni i Hercegovini
- Βουλγαρία: Electroenergien Sistemem Operator EAD
- Δανία (Δυτική): Energinet.dk
- Ελλάδα: Independent Power Transmission Operator SA
- Ελβετία: swissgrid ag
- Ιταλία: Terna - Rete Elettrica Nazionale SpA
- Γαλλία: Réseau de Transport d'Electricité
- Γερμανία: TransnetBW GmbH, TenneT TSO GmbH, Amprion GmbH, και 50Hertz Transmission GmbH
- Κροτία: HEP-Operator prijenosnog sustava d.o.o.
- Λουξεμβούργο: Creos Luxembourg S.A.
- Μαυροβούνιο: Crnogorski elektroprenosni sistem AD
- Ολλανδία: TenneT TSO B.V.
- Πολωνία: PSE Operator S.A.
- Πορτογαλία: Rede Eléctrica Nacional, S.A.
- ΠΓΔΜ: Transmission System Operator AD
- Σερβία: JP Elektromreža Srbije
- Σλοβενία: Elektro Slovenija d.o.o.
- Σλοβακία: Slovenska elektrizacna prenosova sustava, a.s.
- Τσεχία: CEPS a.s.
- Ρουμανία: C.N. Transelectrica S.A.
- Ισπανία: Red Eléctrica de España: S.A.
- Ουγγαρία: MAVIR Magyar Villamosenergia-ipari Átviteli Rendszerirányító Zártkörűen Működő Részvénytársaság

#### 4.4 Γενικά χαρακτηριστικά κωδικών δικτύου

Οι δημιουργία κωδικών έχει κάποια χαρακτηριστικά στοιχεία τα οποία διαμορφώνουν την δομή τους. Αυτά είναι :

- Η γεωγραφική περιοχή.  
Προσδιορίζει την γεωγραφική περιοχή που εφαρμόζεται ο κώδικας
- Το όριο της εγκατεστημένης ισχύος.  
Κανένας σχεδόν κώδικας από αυτούς που βρίσκετε σε εφαρμογή δεν έχει συγκεκριμένα όρια ισχύος. Οι περισσότεροι βέβαια αναφέρονται από τα 10MW και πάνω
- Η ονομαστική τάση του συστήματος.  
Όλοι σχεδόν οι κώδικες εμπεριέχουν αυτή την πληροφορία. Οι περισσότεροι αναφέρονται στο επίπεδο των 60-120kV και πάνω.
- Η ισχύς βραχυκυκλώσεως.  
Κάθε κώδικας ορίζει τα όρια της ισχύος βραχυκύκλωσης μέσα στα οποία θα ισχύουν πλήρως οι τεχνικές απαιτήσεις από τη μέγιστη ως την ελάχιστη τιμή.
- Το είδος της γείωσης.  
Δυστυχώς δεν αναφέρονται όλοι οι κώδικες στο σύστημα γείωσης του συστήματος που περιγράφουν, το οποίο παίζει πολύ σημαντικό ρόλο στις προστασίες.
- Προσδιορισμός του Κοινού Σημείου Σύνδεσης (PCC)  
Το Κοινό Σημείο Σύνδεσης (PCC) είναι πολύ σημαντικό όπως θα δούμε και παρακάτω διότι εκεί είναι που λαμβάνουν χώρα όλες οι τεχνικές απαιτήσεις του κώδικα. Παραδόξως, το PCC δεν περιγράφεται απ' όλους τους κώδικες.

#### 4.5 Τεχνικές απαιτήσεις κωδικών στην διασύνδεση υπεράκτιων αιολικών πάρκων

Εάν εγκαθιστούσαμε τα αιολικά πάρκα αποκλειστικά και μόνο για να μεγιστοποιήσουν την παραγωγή ενέργειας θα είχαν σημαντικούς περιορισμούς όσον αφορά :

- την τάση και τον έλεγχο της άεργου ισχύος
- τον έλεγχο συχνότητας και τις δυνατότητες σε ζητήματα ανοχής
- τη βύθισης τάσης (Fault-Ride-Through).

Αυτά είναι τα τρία βασικά σημεία που οι νέοι κώδικες δικτύου θα πρέπει να προσαρμοστούν και οι παλιοί να αναπροσαρμοστούν σε ότι αφορά την σύνδεση για αιολικό πάρκο. Το πιο ανησυχητικό πρόβλημα που καλούνται τα αιολικά πάρκα να αντιμετωπίσουν είναι μια ενδεχόμενη

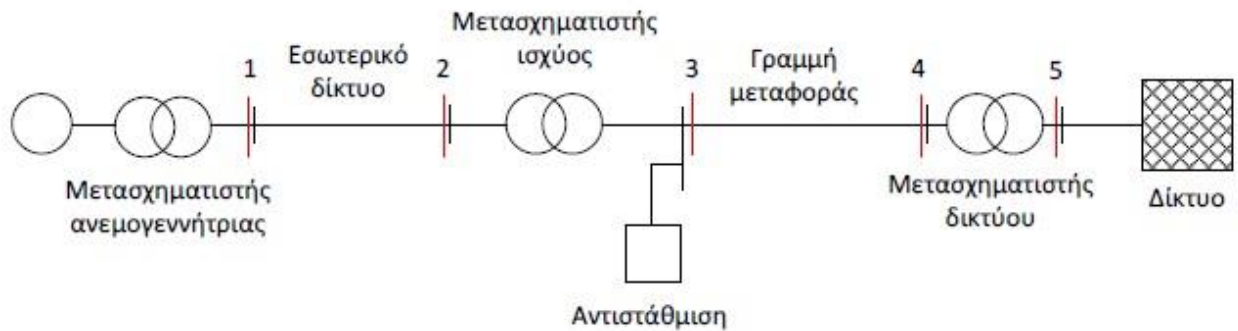
πτώση τάσης στο δίκτυο. Τα αποτελέσματα των παροδικών βλαβών μπορεί να διαδοθεί σε πολύ μεγάλες γεωγραφικές περιοχές και η αποσύνδεση των αιολικών πάρκων υπό συνθήκες σφάλματος θα μπορούσε να αποτελέσει σοβαρή απειλή για την ασφάλεια των δικτύων και την ασφάλεια του εφοδιασμού του δικτύου. Ο λόγος είναι διότι ένα μεγάλο ποσό της αιολικής ενέργειας θα μπορούσε να αποσυνδεθεί ταυτόχρονα με τη στιγμή που επέρχεται σφάλμα στη γραμμή με αποτέλεσμα να υπάρχουν καταστροφικές συνέπειες στη σταθερότητα του ΣΗΕ.

Οι νέοι κώδικες δικτύων ορίζουν ότι τα αιολικά πάρκα, πέρα από την έκχυση ενέργειας στο δίκτυο, θα πρέπει να συμβάλλουν στην ρύθμιση της ποιότητας του δικτύου αλλά και στην απόκριση σε περίπτωση σφάλματος, όπως ακριβώς πράττουν και οι συμβατικοί σταθμοί παραγωγής. Για αυτό το λόγο, οι νέοι κώδικες ορίζουν σαν τεχνική απαίτηση την παραμονή του αιολικού σταθμού παραγωγής σε σύνδεση, σε περίπτωση σφάλματος, με συγκεκριμένα όρια τάσης και συχνότητας και για όσο διάστημα είναι αυτό αναγκαίο, βάση του κώδικα. Σκοπός αυτού είναι να επανέρθει η φυσιολογική κατάσταση του ΣΗΕ χωρίς να παρατηρηθεί καμία ανωμαλία στην λειτουργία του ΣΗΕ ή αν αυτό δεν είναι εφικτό, να παρατηρηθούν μικρής έκτασης διαταραχές οι οποίες μπορεί να είναι εύκολα διαχειρίσιμες. Επίσης, απαιτείται τεχνικά από τα αιολικά πάρκα ο έλεγχος της τάσης και της άεργου ισχύος, η συμμετοχή τους στη ρύθμιση της συχνότητας μέσω μεταβολής της παραγόμενης ενεργούς ισχύος και γενικότερα θέματα που αφορούν την δυνατότητα ελέγχου της ενεργούς ισχύος. Ο γερμανικός κώδικας υπεράκτιας διασύνδεσης -TenneT- είναι ο μόνος κώδικας στον κόσμο που αφορά αποκλειστικά υπεράκτιες διασυνδέσεις και πάνω σε αυτόν ακολουθεί παρακάτω μια πιο λεπτομερή ανάπτυξη των τεχνικών απαιτήσεων.

#### **4.5.1. Σημείο Κοινής Σύνδεσης (PCC-Point of Common Connection)**

Οι τεχνικές απαιτήσεις ορίζονται στο Σημείο Κοινής Σύνδεσης (PCC-Point of Common Connection). Το σημείο αυτό δεν είναι συγκεκριμένο και μπορεί να διαφέρει από χώρα σε χώρα και από έργο σε έργο. Ένα κοινό σημείο σύνδεσης μπορεί επίσης να συμπίπτει με το σημείο εισόδου. Η διαφορά είναι ότι στο κοινό σημείο σύνδεσης θα πρέπει να τηρούνται αυστηρά οι ελάχιστες τεχνικές απαιτήσεις. Με λίγα λόγια, είναι διαφορετικές οι τεχνικές απαιτήσεις ενός αιολικού πάρκου στο σημείο κοινής σύνδεσης (PCC) και διαφορετικές στο σημείο εισόδου στο δίκτυο. Όσο πιο μεγάλο είναι ένα αιολικό πάρκο, τόσο πιο πολλά είναι τα πιθανά σημεία ενός PCC μεταξύ των ανεμογεννητριών και του σημείου εισόδου στο δίκτυο. Το σχήμα 4.2 απεικονίζει όλα τα πιθανά σημεία ενός χερσαίου αιολικού πάρκου μεγάλης ισχύος. Είναι πολύ διαφορετικό σε σχέση με τις ελάχιστες τεχνικές απαιτήσεις να έχει επιλεγεί σαν σημείο PCC το 1 σε σχέση με το 5. Ασφαλώς, διαφορετικές είναι και οι απαιτήσεις στα ενδιάμεσα σημεία. Παράδειγμα αποτελεί ο λόγος υπερμαγνήτισης (Ugrid/Fgrid) όπου μπορεί να ελεγχθεί πολύ πιο εύκολα στο σημείο 1 απ' ό τι στο σημείο 5. Ο λόγος είναι γιατί η τάση στο σημείο 1 μπορεί κάλλιστα να ελεγχθεί από την ανεμογεννήτρια (UWTG/Fgrid) έτσι ώστε ο λόγος μαγνήτισης να είναι σε επιθυμητά πλαίσια [34].

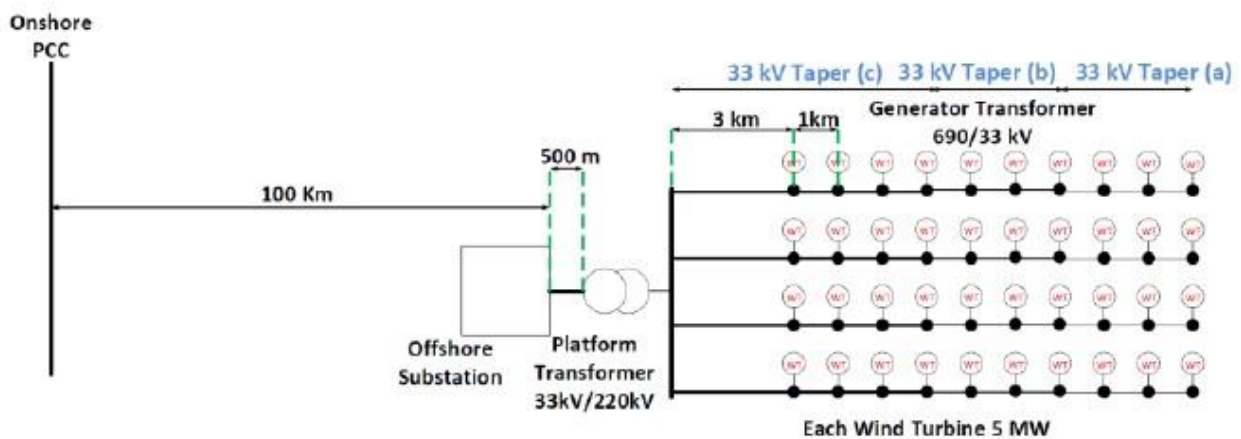
Σε ένα υπεράκτιο αιολικό πάρκο, το PCC βρίσκεται πάντα στο ηπειρωτικό σημείο. Το γερμανικό πρότυπο TenneT-κώδικας υπεράκτιας διασύνδεσης αποκαλεί το σημείο PCC σαν Grid Coupling Point (GCP) και το χαρακτηρίζει σαν το σημείο που συνδέεται το δίκτυο του αιολικού πάρκου με αυτό του ΣΗΕ. Επίσης, αναφέρεται και στο Grid Connection Point σαν το σημείο στο οποίο τα συστήματα του υπεράκτιου αιολικού πάρκου συνδέεται με το δίκτυο. Αυτό το σημείο δεν είναι άλλο από το τερματισμό του υπεράκτιου καλωδίου μεταφοράς στην χερσαία πλευρά του συστήματος.



**Σχ 4.2** Απεικόνιση πιθανών θέσεων Σημείου Κοινής Σύνδεσης (PCC-Point of Common Connection) σε μεγάλης ισχύος onshore αιολικό πάρκο.

Ο γερμανικός TenneT-κώδικας υπεράκτιας διασύνδεσης ορίζει τα παρακάτω όρια τάσης και συχνότητας στο Grid Connection Point:

- Ονομαστική τάση λειτουργίας τα 155KV με συνεχή λειτουργία στα 140-170KV. Στα μονοφασικά, υπάρχουν και άλλες ονομαστικές τιμές τάσης λειτουργίας οι οποίες όμως είναι από πριν συμφωνημένες με τον διαχειριστή δικτύου.
- Η ονομαστική συχνότητα για την υπεράκτια σύνδεση με το δίκτυο είναι 50 Hz. Ένα εκτεταμένο εύρος συχνοτήτων εφαρμόζεται στην περιοχή των 46,5 και 53,5 Hz με περιορισμό τα 10 δευτερόλεπτα.

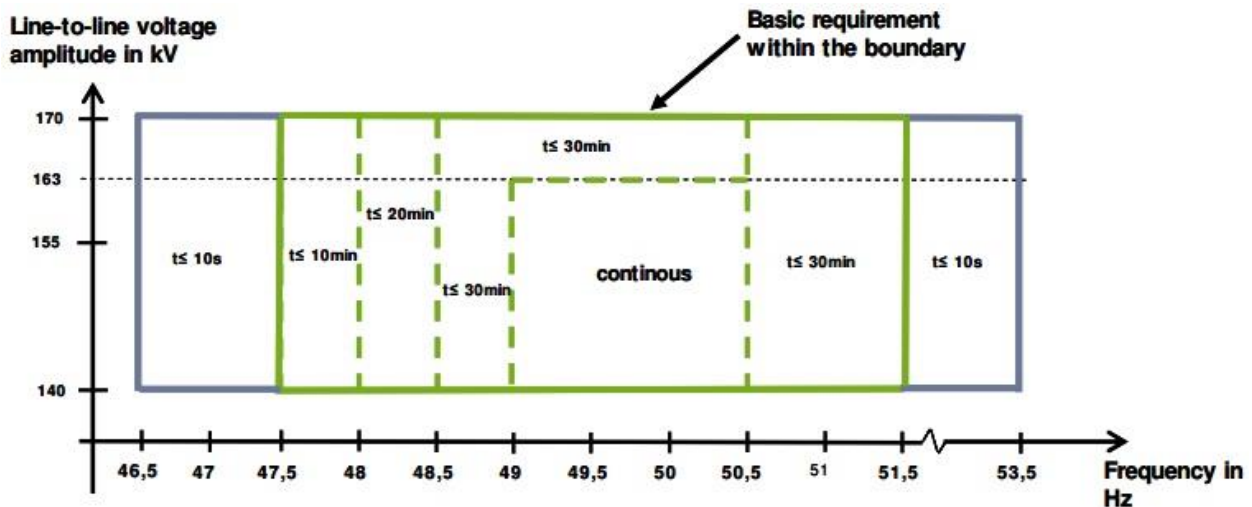


**Σχ 4.3** Απεικόνιση Σημείου Κοινής Σύνδεσης (PCC-Point of Common Connection) σε μεγάλης ισχύος offshore αιολικό πάρκο.

#### 4.5.2. Η ανάγκη για παραμονή σε σύνδεση – Ενεργός ισχύς

Όπως αναφέραμε και νωρίτερα, την παραμονή του αιολικού σταθμού παραγωγής σε σύνδεση, σε περίπτωση σφάλματος, με συγκεκριμένα όρια τάσης και συχνότητας και για όσο διάστημα είναι αναγκαία. Αυτά τα αναγκαία διαστήματα είναι καθορισμένα από τον εκάστοτε κώδικα. Οι περισσότεροι κώδικες ορίζουν κάποια διαστήματα τάσης V και συχνότητας F όπου η παραμονή μετά από σφάλμα στο δίκτυο είναι με συνεχή λειτουργία και κάποια διαστήματα τάσης V και συχνότητας F όπου απαιτείται λειτουργία για συγκεκριμένο χρονικό διάστημα.

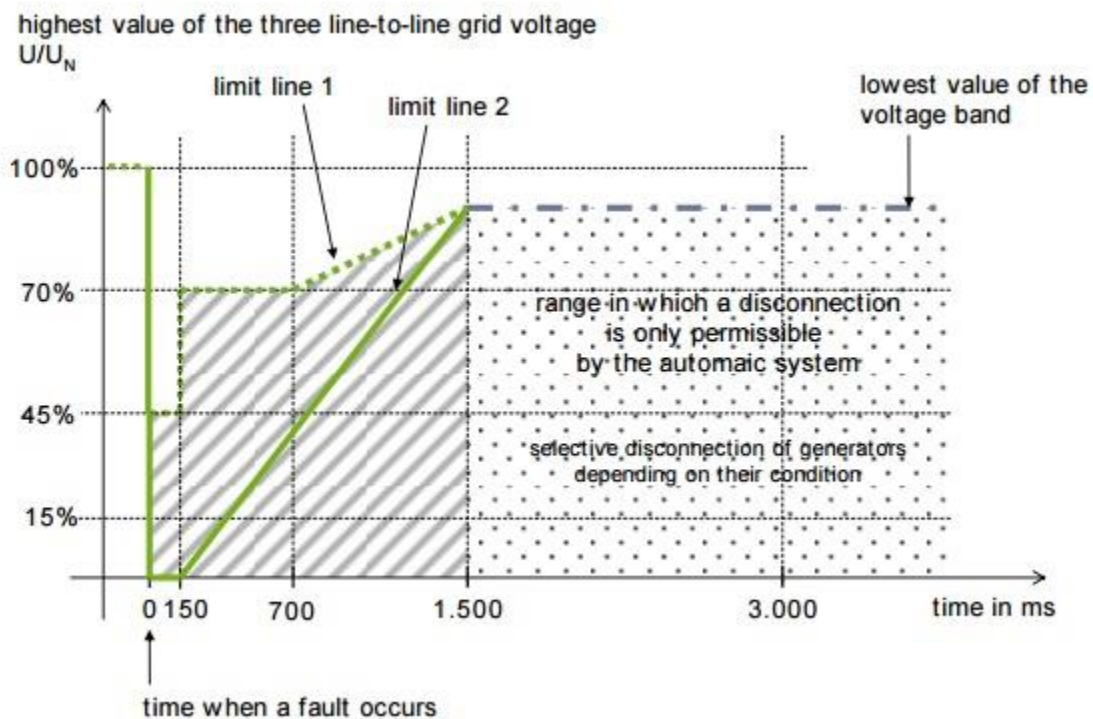
Όπως φαίνεται και από το σχήμα 4.4, τα όρια συνεχούς λειτουργίας ενός υπεράκτιου αιολικού πάρκου βάσει του TenneT σε σχέση με την συχνότητα, κυμαίνονται από 49Hz έως 50,5Hz και εφόσον την ίδια ώρα η τάση κυμαίνεται από 140KV έως 163KV. Στο ίδιο εύρος τάσης, η χρονική διάρκεια της αδιάληπτης λειτουργίας αλλάζει βάσει της τάσης, όπως ακριβώς φαίνεται και στο σχήμα, αλλά πάντα εφόσον η συχνότητα κυμαίνεται μεταξύ 46,5Hz έως 53,5Hz. Έξω από αυτά τα όρια το πάρκο οφείλει να αποκοπεί από το δίκτυο. Βέβαια, τα διαστήματα λειτουργίας στις περιοχές συχνότητας 46,5Hz έως 47,5Hz και 51,5Hz έως 53,5Hz είναι τις τάξεως το πολύ των 10 δευτερολέπτων, χρόνος καθυστέρησης που στην ουσία δίνεται για να διαπιστωθεί η παροδικότητα του φαινομένου ή όχι. Δεν υπάρχουν απαιτήσεις για τις περιοχές πέραν του μέγιστου διαστήματος τιμών της αντίστοιχης περιοχής συχνότητας. Παρ'όλα αυτά, υποτίθεται ότι η μέγιστη δυνατή ενεργός ισχύς είναι διαθέσιμη για να εκχυθεί στο δίκτυο την στιγμή που ζητηθεί. Μετά από μια διαταραχή με μηδενική παραμένουσα τάση στο σημείο σύνδεσης του δικτύου με το αιολικό πάρκο, θα πρέπει το πάρκο κατά τη σύνδεσή του να επανεκκινήσει με ένα μέγιστο ποσοστό ενέργειας 10% ανά λεπτό, της μέγιστης εγκατεστημένης ενεργούς ισχύος.



Σχ 4.4 Απαιτούμενη διάρκεια λειτουργίας ενός υπεράκτιου αιολικού πάρκου για διάφορες τιμές της τάσης στο σημείο σύνδεσης και της συχνότητας του δικτύου.



Η ικανότητα αδιάλειπτης λειτουργίας ενός αιολικού πάρκου κατά τη διάρκεια σφάλματος στο δίκτυο ονομάζεται Fault Ride Through (FRT) ή Low Voltage Ride Through (LVRT) και αφορά την ικανότητα του αιολικού πάρκου να στηρίζει το δίκτυο παρέχοντας ενεργό ισχύος ώστε να στηρίζει την τάση, μεταβάλλοντας ανάλογα και την άεργο ισχύος του. Για να μπορούν τα αιολικά πάρκα να είναι σε θέση να παρέχουν ανά πάσα στιγμή περισσότερη ποσότητα ενεργούς ισχύος, θα πρέπει να παράγουν υπό κανονικές συνθήκες λειτουργίας σε τιμή τάσης μικρότερης της ονομαστικής. Αυτό σε περίπτωση που παράγει υπό μέγιστο αιολικό δυναμικό. Επειδή αυτό είναι αδύνατο να ισχύει ανά πάσα στιγμή, οι ανεμογεννήτριες είναι υποχρεωμένες να παράγουν ισχύ πάντα σε επίπεδο μικρότερο από αυτό που μπορεί να δώσει η ανεμογεννήτρια βάσει του αιολικού δυναμικού που ισχύει την εκάστοτε στιγμή. Αυτό για να είναι σε θέση να δώσει στο δίκτυο έξτρα ενεργό ισχύς σε περίπτωση που χρειαστεί. Το φαινόμενο αυτό λέγεται εφεδρεία και θα αναλυθεί εκτενέστερα σε προσεχές κεφάλαιο της εργασίας.



*Σχ 4.5 Οριακές καμπύλες τάσης – χρόνου που καθορίζουν τις απαιτήσεις για την διατήρηση της σύνδεσης του αιολικού πάρκου σε περίπτωση σφάλματος στο δίκτυο*

Στο σχήμα 4.5, δίνονται ενδεικτικά οι οριακές καμπύλες λειτουργίας ενός χερσαίου αιολικού πάρκου σε περίπτωση σφάλματος. Το τριφασικό σφάλμα ή η συμμετρική πτώση τάσης στο δίκτυο στην περιοχή πάνω από τη γραμμή 1, δεν πρέπει να οδηγήσει σε αστάθεια του συστήματος ΣΗΕ

ή στην αποκοπή του πάρκου. Τα ακόλουθα ισχύουν εντός της σκιασμένης περιοχής και πάνω από το όριο της Γραμμής 2 του σχήματος 4.5:

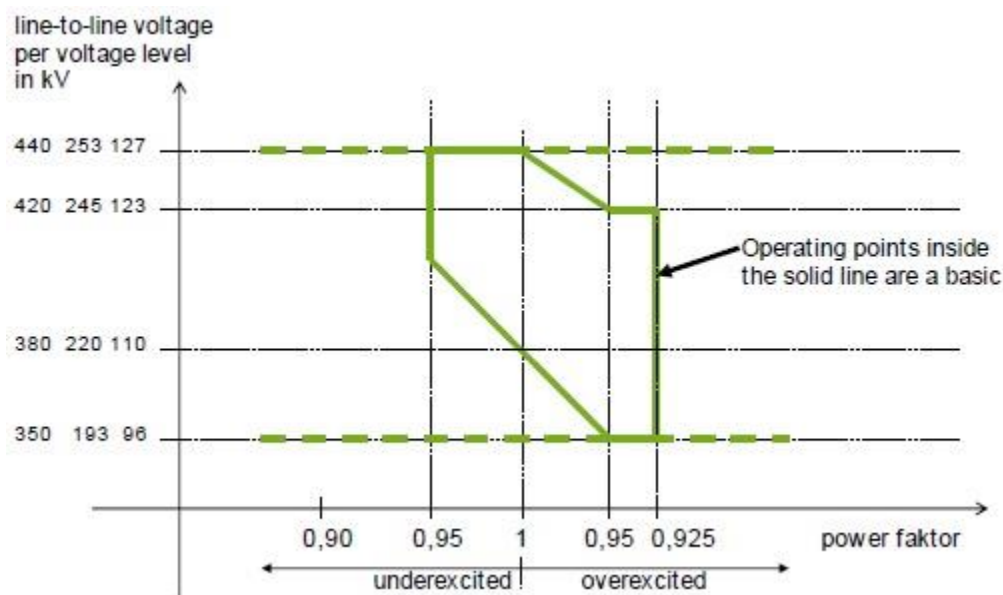
- Όλοι οι σταθμοί παραγωγής θα πρέπει να αντιμετωπίσουν το σφάλμα χωρίς αποσύνδεση από το δίκτυο. Εάν, λόγω του σχεδιασμού του δικτύου (ο σχεδιασμός του δικτύου περιλαμβάνει και τις γεννήτριες), μια παραγωγική μονάδα δεν μπορεί να εκπληρώσει αυτήν την απαίτηση, επιτρέπεται από τη σύμβαση με το διαχειριστή δικτύου να μετατοπίσει το όριο της γραμμής, μειώνοντας ταυτόχρονα το χρόνο επανασυγχρονισμού και εξασφαλίζοντας το ελάχιστο της άεργου ισχύος που τροφοδοτεί το σύστημα κατά τη διάρκεια του σφάλματος. Το ποσό της άεργου ισχύος και η επανεκκίνηση, πρέπει να είναι τέτοια ώστε να εκπληρώνονται οι τεχνικές απαιτήσεις στο σημείο σύνδεσης που ορίζει ο κώδικας.
- Εάν κατά τη διάρκεια του σφάλματος μια ανεμογεννήτρια έρθει σε ασταθή κατάσταση γιατί λειτούργησαν οι αυτοπροστασίες της, επιτρέπεται η προσωρινή διακοπή της από το σύστημα, με βάση πάντα αυτά που ορίζει ο διαχειριστής. Στην επανεκκίνηση, ο επανασυγχρονισμός πρέπει να επιτευχθεί σε 2 δευτερόλεπτα το πολύ και η ενεργής ισχύ πρέπει να εκχέεται στο δίκτυο με προοδευτικό τρόπο και με ένα ποσοστό μεταξύ 10% της ονομαστικής της ισχύς, με μέγιστο το 20% σε ειδικές περιπτώσεις.

Μια προσωρινή αποσύνδεση του αιολικού πάρκου όπως προαναφέραμε επιτρέπεται κάτω από το όριο της γραμμής 2. Έπειτα από συμφωνία με τον διαχειριστή και σε ειδικές περιπτώσεις, μπορεί να επιτραπεί χρόνος αποσύνδεσης πάνω από 2 δευτερόλεπτα και παροχή ενεργής ισχύος στο δίκτυο, έπειτα από το σφάλμα, με ποσοστό μεγαλύτερο του 10%. Γενικά όλα τα αιολικά πάρκα που δεν αποσυνδέονται κατά τη διάρκεια του σφάλματος θα πρέπει να ξεκινήσουν να παρέχουν ενεργό ισχύς με τον ρυθμό που προαναφέραμε και έπειτα από την εκκαθάριση του σφάλματος. Οι παραπάνω τεχνικές απαιτήσεις ισχύουν κυρίως στα χερσαία αιολικά πάρκα. Το ίδιο σκεπτικό αντιμετώπισης ισχύει και στα υπεράκτια. Αυτό που αλλάζει είναι τα όρια χρόνου και τα προαναφερθέντα ποσοστά ανάλογα με τον διαχειριστή δικτύου.

#### **4.5.3. Η ανάγκη για παραμονή σε σύνδεση – Άεργός ισχύς**

Κατά την παραμονή ενός αιολικού πάρκου σε σύνδεση με το δίκτυο για την στήριξή του γενικότερα, είναι αναγκαία από τον κώδικες η παροχή και άεργου ισχύος όχι μόνο σε περίπτωση σφάλματος, περίπτωση που θα αναλύσουμε σε μεταγενέστερο κεφάλαιο, αλλά και σε κατάσταση σταθερής λειτουργίας. Η ρύθμιση της άεργου ισχύος λαμβάνει χώρα στο Κοινό Σημείο Σύνδεσης (PCC). Στο σχήμα 4.6, απεικονίζεται ο συντελεστής ισχύος βάσει της άεργου ισχύος στο σύστημα, ανεξαρτήτως της τιμής της ενεργούς ισχύος και σε αναλογία πάντα με την τιμή της

τάσης του. Τα παραπάνω πάντα υπό την προϋπόθεση ότι βρισκόμαστε μέσα στα επιτρεπτά όρια της συχνότητας, δηλαδή μεταξύ 49.0 και 50.5 Hz, όπως ακριβώς ορίζεται και από το σχήμα 4.4. Όταν ο συντελεστής ισχύος είναι μικρότερος της μονάδας, δηλαδή είναι *underexcited*, σε κανονική λειτουργία, το αιολικό πάρκο καταναλώνει άεργο ισχύ, ενώ όταν είναι μεγαλύτερος της μονάδας, δηλαδή *overexcited*, το πάρκο παράγει άεργος ισχύς. Αυτή ακριβώς είναι και η λογική του ελέγχου της τάσης μέσω της άεργου ισχύος [43].



**Σχ 4.6** Απαιτούμενες ποσότητες άεργου ισχύος για διαφορετικά επίπεδα τάσης, ανεξάρτητα της ενεργούς ισχύος.

Σημειώνεται επίσης ότι όλα τα παραπάνω που αναφέρθηκαν σε αυτό το κεφάλαιο, αφορούν τις τεχνικές απαιτήσεις που οφείλουν να ικανοποιούν τα υπεράκτια αιολικά πάρκα στο σημείο σύνδεσης με το ηπειρωτικό δίκτυο, ανεξάρτητα με το αν η διασύνδεση πραγματοποιείται μέσω AC ή HVDC συστήματος μεταφοράς. Βέβαια στην περίπτωση HVDC διασύνδεσης υπάρχουν αρκετές ιδιαιτερότητες, με κυριότερη την πλήρη απομόνωση της υπεράκτιας πλευράς από τις μεταβολές της συχνότητας και της τάσης του δικτύου στο οποίο συνδέεται το πάρκο.

#### 4.5.4. Σύνδεση ουδέτερου και διαστασιολόγηση μετασχηματιστών βάσει TenneT

Το σύστημα σύνδεσης με το δίκτυο σε ένα υπεράκτιο αιολικό πάρκο, βάσει TenneT, συμπεριλαμβανομένων των μεταλλικών μερών που είναι συνδεδεμένα, λειτουργεί με χαμηλής αντίστασης ουδέτερο. Η αποσύνδεση της ακολουθίας μηδενικής φάσης, βελτιώνει τη συμμετρία

της τάσης μεταξύ γραμμής και γης κατά τη διάρκεια μικρών βραχυκυκλωμάτων και αποτρέπουν τη μετάδοση των μονών αρμονικών συνιστωσών. Όλα τα σημεία ουδετέρου στην μεριά της υψηλής τάσης του μετασχηματιστή, πρέπει να είναι γειωμένα χωρίς τη δυνατότητα μεταγωγής. Οι μετασχηματιστές YT / MT πρέπει να είναι εξοπλισμένοι στην πλευρά της υψηλής με ένα μεταγωγέα (tap changer) για την παροχή διακύμανσης +/- 13% με +/- 6 βήματα. Η λειτουργία του μετατροπέα θα πρέπει να συνδεθεί με ένα ελεγκτή που θα τον συνδέει με το δίκτυο. Και ο ηλεκτρολογικός σχεδιασμός αυτού του ελεγκτή αλλά και οι ρυθμίσεις σε αυτόν θα πρέπει να είναι συμφωνημένα με τον διαχειριστή του δικτύου. Μια σχέση μετάδοσης 155 / 31,5 kV είναι αυτή που συνιστάται κυρίως [42].

#### **4.5.5. Συστήματα προστασίας**

Θα πρέπει να υλοποιηθούν τουλάχιστον δύο ανεξάρτητα συστήματα προστασίας. Και τα δύο συστήματα προστασίας θα πρέπει να ενεργούν στη πρώτη χρονική ζώνη προστασίας κάτω από διαφορετικές αρχές προστασίας. Για αυτά τα δύο διαφορετικά συστήματα προστασίας θα πρέπει να υπάρχουν ξεχωριστές πλατφόρμες software και hardware. Επιπλέον, οι μετασχηματιστές και τα αντιδραστικά πηνία θα πρέπει να είναι εξοπλισμένα με ένα ρελέ Buchholz. Οι ζυγοί στους σταθμούς παραγωγής θα πρέπει να προστατεύονται στην πρώτη ζώνη χρονικής προστασίας. Οι χρόνοι εκκαθάρισης σύντομων σφαλμάτων θα πρέπει να πρέπει να διατηρούνται σε όλες τις ζώνες προστασίας. Σε περίπτωση αστοχίας διακόπτη, επίσης εντός της μονάδας παραγωγής, θα πρέπει να επιτευχθεί ένας χρόνος απενεργοποίησης στο όριο των 250ms. Επίσης, σε περίπτωση όπου στην αιολική μονάδα παρατηρηθεί άμεση διαμήκη ασυμετρία, πάνω από το 20% της ονομαστικής ισχύς, θα πρέπει αυτομάτως να εξαλειφθεί με χρόνο αποσύνδεσης το πολύ 500 ms. Ο σχεδιασμός και οι ρυθμίσεις αυτής της προστατευτικής λειτουργίας υπόκεινται σε έγκριση του διαχειριστή δικτύου [42].

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5<sup>ο</sup>

### «ΠΟΛΥΤΕΡΜΑΤΙΚΑ ΔΙΚΤΥΑ HVDC »

#### 5.1 Εισαγωγή

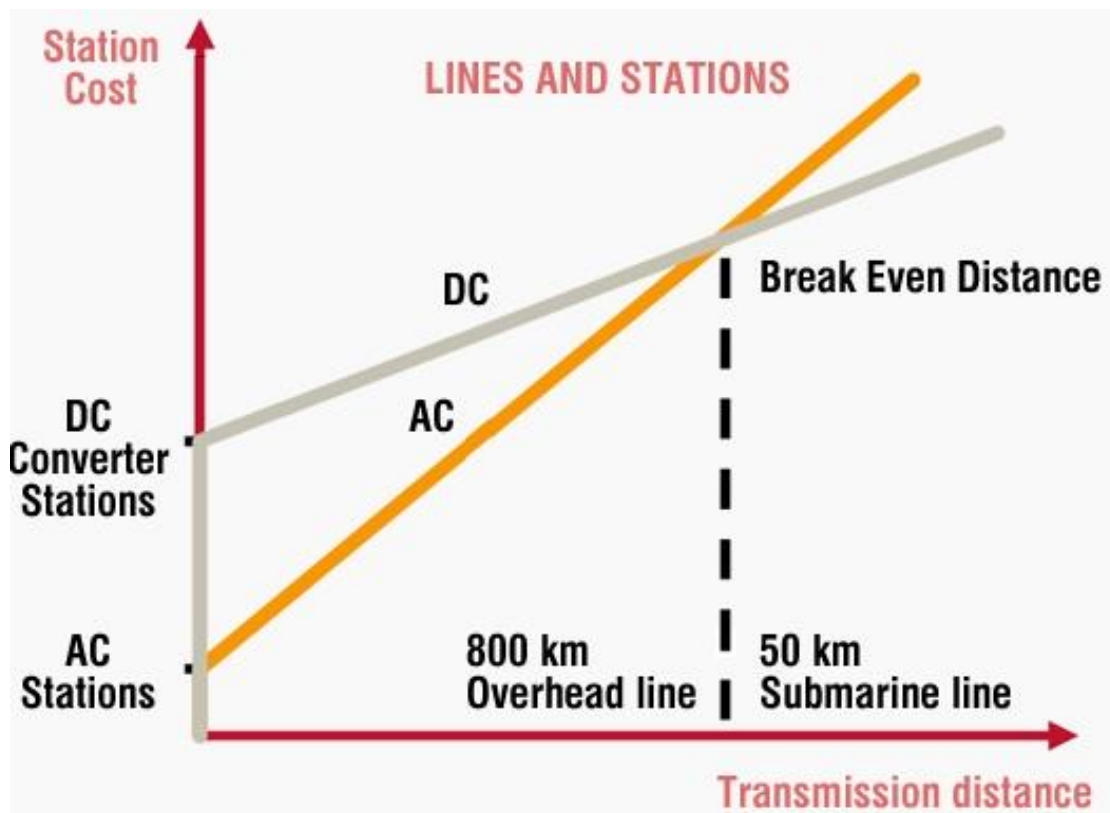
Η μετάδοση υψηλής τάσης συνεχούς ρεύματος (HVDC - High Voltage Direct Current) είναι μια ασφαλής και αποδοτική τεχνολογία που έχει σχεδιαστεί για να παραδώσει μεγάλες ποσότητες ηλεκτρικής ενέργειας σε μεγάλες αποστάσεις. Η τεχνολογία αυτή αναπτύχθηκε από μια Σουηδική εταιρεία, την ASEA, γύρω στο 1930. Η εταιρεία αυτή αποτελεί μια από τις μητρικές εταιρείες της σημερινής ABB. Αυτή η τεχνολογία ερχόταν σε αντίθεση με τα καθολικά διαδεδομένα έως τότε, δίκτυα μεταφοράς υψηλής εναλλασσόμενης τριφασικής τάσης. Για να στραφεί η έρευνα προς αυτή την τεχνολογία, υπήρχαν ασφαλώς κάποια γνωστά στον επιστημονικό κόσμο, πλεονεκτήματα της μεταφοράς της ηλεκτρικής ενέργειας με συνεχή τάση σε σχέση με την εναλλασσόμενη. Πλεονεκτήματα που αφορούσαν κυρίως τη μεταφορά σε μεγάλες αποστάσεις.

Επειδή η ενέργεια που καταναλώνουν τα φορτία ως επί το πλείστον ήταν και είναι η εναλλασσόμενη, ήταν αναγκαία η ανάπτυξη ενός μετατροπέα που θα μπορούσε να αντιστρέφει αποτελεσματικά την AC ηλεκτρική ενέργεια που παράγονταν στο σημείο της παραγωγής σε DC ηλεκτρική ενέργεια για τη μετάδοση αυτής και στη συνέχεια να μετατρέπεται πάλι σε AC στο άλλο άκρο της γραμμής, ώστε να μπορεί να εξυπηρετήσει τα φορτία. Αρχικά, γύρω στο 1950, μηχανικός της ASEA, βασιζόμενος πάνω στην τεχνολογία του τόξου υδραργύρου, είχε κατασκευάσει ήδη τον πρώτο τύπο μετατροπέα DC/AC στην ιστορία με αποτέλεσμα την πρώτη HVDC σύνδεση δικτύων η οποία αφορούσε τη νήσο Gotland με την σουηδική ενδοχώρα. Σε αυτά τα θετικά στοιχεία, αν συμπεριλάβουμε το αρνητικό στοιχείο του υψηλού κόστους κατασκευής και συντήρησης ενός μετατροπέα AC/DC, γεννιέται άμεσα το λογικό ερώτημα, από ποια απόσταση και πάνω είναι προτιμητέο το δίκτυο HVDC. Συνεπώς θα λέγαμε ότι υπάρχει ένα τυπικό όριο απόστασης από το οποίο κρίνεται τεχνοοικονομικά αποδοτικότερη η μεταφορά DC ρεύματος και αυτό κυμαίνεται περίπου στα 600-800 χιλιόμετρα για εναέρια μεταφορά και τα 50 για την υποθαλάσσια, στοιχεία που αναπαρίστανται γραφικά στο σχήμα 5.1.

Πιο αναλυτικά, το πιο σημαντικό πλεονεκτήματα της τεχνολογίας μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας μέσω HVDC σε αντιπαράθεση με αυτή της μεταφοράς τριφασικής εναλλασσόμενης τάσης, είναι όπως προαναφέραμε η μεταφορά του ίδιου ποσού ενέργειας σε πολύ μεγαλύτερη απόσταση. Αυτό σήμαινε κυρίως μεγάλη εξοικονόμηση πόρων αλλά και υλικού διότι πέρα από τη μεγαλύτερη τιμή της απόστασης σαν μήκος καλωδίου, υπήρχε και η ειδοποιός διαφορά ότι στην περίπτωση HVDC η γραμμή μεταφοράς ήταν μία ενώ στην HVAC- High Voltage Alternating Current μεταφορά, οι γραμμές μεταφοράς ήταν τρεις. Στην τεχνολογία HVDC όσο μεγαλύτερη

είναι η απόσταση μεταφοράς, τόσο λιγότερες είναι οι απώλειες και ο λόγος ασφαλώς είναι το μικρότερο συνολικό μήκος αγωγών στην μία περίπτωση από την άλλη.

Σημαντικό πλεονέκτημα της HVDC αποτελεί επίσης η δυνατότητα διασύνδεσης δύο μεταξύ τους ασύγχρονων δικτύων, με ασφάλεια. Τέτοια δίκτυα θα μπορούσαν να αποτελούν δύο διαφορετικά δίκτυα γειτονικών χωρών στα οποία υπάρχει ανάγκη για σύνδεση μεταξύ τους. Αυτό επιτυγχάνεται με τη μέθοδο Back-to-Back στην οποία θα αναφερθούμε αναλυτικότερα και παρακάτω σε αυτό το κεφάλαιο. Οι μεγάλες δυνατότητες ελεγχιμότητας που έχουν σε σχέση με ένα δίκτυο HVAC λόγω του εύκολου ελέγχου της ενεργούς ισχύος, αποτελεί ακόμα ένα πλεονέκτημα για την τεχνολογία HVDC. Όπως και η μη απαίτηση για άεργο αντιστάθμιση. Στοιχείο σημαντικό στην σχεδίαση ενός συστήματος μεταφοράς λαμβάνοντας υπόψη πέρα από το κατασκευαστικό και το οικονομικό και με μεγάλη σημασία στην υποθαλάσσια μεταφορά. Σαν τελευταίο σημαντικό στοιχείο ενός HVDC θα λέγαμε ότι αποτελεί η μικρή συμβολή σε δημιουργία ρευμάτων βραχυκύκλωσης στο δίκτυο ΣΗΕ στο οποίο συνδέεται.



Σχ 5.1 Οικονομική σύγκριση τεχνολογιών HVDC&HVAC σε σχέση με την απόσταση σε εναέρια και υποθαλάσσια μεταφορά.

Η αγορά HVDC αυξάνεται με ταχείς ρυθμούς και έχει γίνει ένα σημαντικό μέρος των πολλών δικτύων μεταφοράς παγκοσμίως, αν μη τι άλλο επειδή μπορεί να συνδεθεί απομακρυσμένα με πηγές ηλεκτρικής ενέργειας. Από τις πιο συχνές εφαρμογές τους αποτελούν οι μηδενικής εκπομπής παραγωγικοί σταθμοί όπως η υδροηλεκτρική ή η αιολική ενέργεια και η μεταφορά τους σε κέντρα φορτίου, όπου αυτό είναι αναγκαίο, εκατοντάδες ή ακόμη και χιλιάδες χιλιόμετρα μακριά. Μόλις εγκατασταθεί μια γραμμή HVDC σε ένα σύστημα μετάδοσης, συχνά αποτελεί τη ραχοκοκαλιά του ηλεκτρικού συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, διότι συνδυάζει την υψηλή αξιοπιστία με ένα μακρύ βιώσιμο δυναμικό.

Σήμερα υπάρχουν δύο βασικές τεχνολογίες. Η HVDC Classic, η οποία χρησιμοποιείται κυρίως για ηλεκτρικές μεταδόσεις σε μεγάλες αποστάσεις, χερσαίες ή υποθαλάσσιες, και για τη διασύνδεση των χωριστών δικτύων ηλεκτρικής ενέργειας όπου οι συμβατικές μέθοδοι AC δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν. Αυτή η κλασσική τεχνολογία HVDC έχει πάνω από 100 εγκαταστάσεις σε ισχύ ανά το κόσμο με συνήθης ονομαστική ισχύ άνω των 100MW ενώ πολλές από αυτές έχουν ισχύ μεταξύ 100 - 10000 MW.

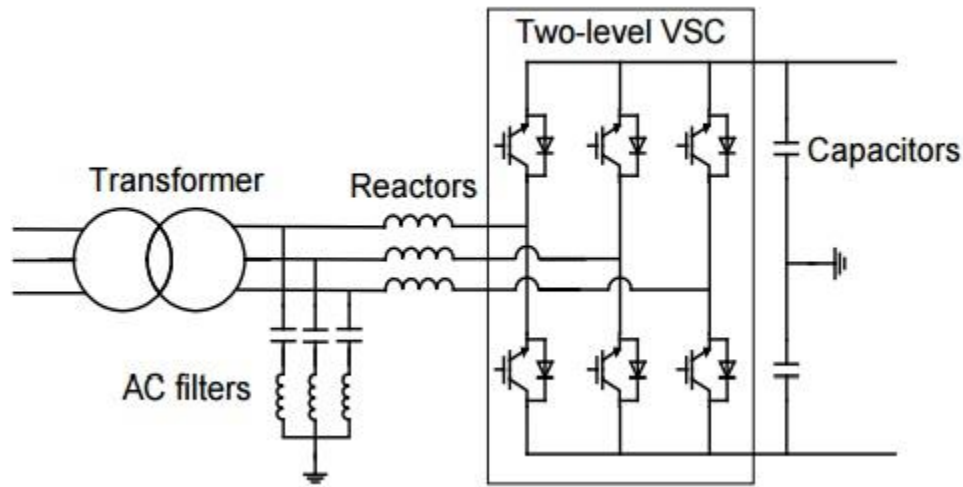
Η δεύτερη τεχνολογία είναι η HVDC Light, που αναπτύχθηκε από την ABB και ξεκίνησε το 1997 και αποτελεί μια προσαρμογή του κλασσικού HVDC δικτύου μεταφοράς σε ένα εύρος ισχύος από 50 - 2.500 MW, που μεταδίδονται μέσω εναέριων γραμμών μεταφοράς ή ορατά ή αόρατα με υπόγεια και υποθαλάσσια καλώδια με τη χρήση φιλικών προς το περιβάλλον υλικών. Χρησιμοποιείται για τις διασυνδέσεις δικτύου με υπεράκτιες παραγωγικές μονάδες όπως με αιολικά πάρκα και με πλατφόρμες πετρελαίου και φυσικού αερίου.

## 5.2 Μετατροπείς VSC-HVDC και CSC-HVDC

Οι μετατροπείς HVDC μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε CSC-HVDC μετατροπείς πηγής ρεύματος [Current Source Converters] και σε VSC-HVDC μετατροπείς πηγής τάσης [Voltage Source Converters]. Η πρώτη κατηγορία των μετατροπέων πηγής ρεύματος είναι και αυτή που χρησιμοποιείται κυρίως στη κατηγορία HVDC Classic.

Οι μετατροπείς πηγής ρεύματος (CSC) χρησιμοποιούν ως ημιαγωγό τα θυρίστορ την ίδια στιγμή που οι μετατροπείς πηγής τάσης (VSC) χρησιμοποιούν IGBT (Insulated-gate bipolar transistor). Κύρια διαφορά σε αυτό το χαρακτηριστικό είναι ότι οι ημιαγωγοί θυρίστορ είναι μερικώς ελεγχόμενοι (μετατροπέας φυσικής μεταγωγής line-commutated converter) ενώ τα IGBT είναι πλήρως ελεγχόμενα (αυτομεταγόμενος μετατροπέας, self-commutated converter). Δηλαδή, σε ένα μετατροπέα με IGBT, ελέγχεται πλήρως και η έναυση αλλά και η σβέση του ημιαγωγού. Επομένως, σε ένα μετατροπέα με IGBT υπάρχει πλήρης έλεγχος ανά πάσα στιγμή, με όλα τα θετικά αποτελέσματα που απορρέουν από αυτό. Έτσι, ένας μετατροπέας VSC δίνει τη δυνατότητα να ελέγχεται άμεσα και με ακρίβεια η ενεργός και η άεργος ισχύς του, με αποτέλεσμα να μπορούν να ρυθμιστούν ανάλογα με τις τιμές που ορίζει ο διαχειριστής του δικτύου. Αποτέλεσμα του

προαναφερθέν χαρακτηριστικού είναι ότι οι VSC-HVDC μπορούν να συνεισφέρουν στη ρύθμιση δικτύου και κυρίως στην ρύθμιση συχνότητας.



*Σχ 5.2 Τυπικό διάγραμμα ενός HVDC-VSC με δύο επίπεδα μετατροπέα*

Επίσης, ένα επιπλέον θετικό χαρακτηριστικό των IGBT σε σχέση με το θυρίστορ, είναι ότι τα IGBT αποτελούν ημιαγωγικά διακοπτικά στοιχεία διπλής κατεύθυνσης ενώ τα θυρίστορ είναι μονής. Δηλαδή, τα IGBT μπορούν να άγουν ρεύμα και προς τις δύο κατευθύνσεις. Στον μετατροπέα πηγής ρεύματος, η φορά των ρευμάτων στην πλευρά DC εξαρτάται από την πολικότητα του DC ρεύματος, η οποία είναι σταθερή ενώ η ροή ισχύος καθορίζεται από την πολικότητα της DC τάσης. Αντίθετα, στο μετατροπέα πηγής τάσης, σταθερή διατηρείται η DC τάση και η πολικότητα του DC ρεύματος είναι αυτή που καθορίζει τη φορά της ισχύος. Στην πρώτη περίπτωση του μετατροπέα ρεύματος, η DC πλευρά είναι συνδεδεμένη με ένα πηνίο μεγάλης αυτεπαγωγής ενώ στο μετατροπέα πηγής τάσης η DC πλευρά είναι συνδεδεμένη με ένα πυκνωτή μεγάλης χωρητικότητας. Για αυτό ακριβώς το λόγο, οι μετατροπείς πηγής ρεύματος δεν χρησιμοποιούνται σε τοπολογίες πολυτεματικών τοπολογιών αντίθετα με τους VSC-HVDC οι οποίοι αποτελούν μονόδρομο. Η αντιστροφή της φοράς της ισχύος σε ένα HVDC είναι ταχύτατη, της τάξης μερικών ms, λόγω της αντιστροφής της πολικότητας του DC ρεύματος που αναφέραμε και δεν επηρεάζει τον έλεγχο της άεργους ισχύος. Σε αυτό το χαρακτηριστικό βασίζεται η εμπλοκή μετατροπέα VSC-HVDC στη γρήγορη αποκατάσταση της λειτουργίας του δικτύου μετά από ολική σβέση (blackstart). Ένα επιπλέον θετικό χαρακτηριστικό των VSC-HVDC αποτελεί η δυνατότητα λειτουργίας τους σε χαμηλή ή μηδενική σχεδόν ισχύ. Με αυτό το τρόπο ένας μετατροπέας VSC-HVDC μπορεί να συνεισφέρει στην σταθεροποίηση ενός δικτύου σε περίπτωση σφάλματος, προσφέροντας στο δίκτυο την απαραίτητη άεργο ισχύ. Λόγω του χαρακτηριστικού αυτού μπορεί να στηρίζει αδύναμα δίκτυα και να συνεισφέρει στην ευστάθεια



μεγαλύτερων δικτύων AC. Συνοψίζοντας, θα λέγαμε ότι τα βασικά χαρακτηριστικά του VSC-HVDC περιλαμβάνουν τα παρακάτω, με μια σύγκριση των δύο αυτών μετατροπέων να παραθέτονται επίσης και στο σχήμα 5.3 :

- Ανεξάρτητος έλεγχος της ενεργούς και άεργους ισχύος,
- Υποστήριξη αδύναμων δικτύων και ικανότητα εκκίνησης μετά από ολική σβέσης
- Υψηλή δυναμική απόδοση,
- Πολύ-τερματική δυνατότητα

Characteristic	CSC-HVdc	VSC-HVdc
Converter	Line-commutated current-source.	Self-commutated voltage-source.
Switch	Thyristor: turn on capability only.	IGBT: turn-on and turn-off capabilities.
Age	Old: First commercial project in 1954.	New: First commercial project in 1999.
Projects Worldwide	146	15
Power Rating	up to 8000 MW	up to 1000 MW
Voltage Rating	up to $\pm 800$ kV	up to $\pm 320$ kV
Filters	Harmonic orders are low (e.g. 11-th and 13-th), hence high filtering efforts are needed.	Filters are tuned to higher frequencies and are, therefore, smaller and cheaper.
Footprint	Very high.	Lower.
Control	Always consume reactive power (two-quadrant operation).	Independent control of active and reactive power (four-quadrant operation).
AC Network Requirements	Needs a reasonably strong ac system to operate (high minimum short-circuit ratio, e.g. SCR > 3)	Can operate with a weak ac network or be used to feed islands and passive ac networks providing frequency control. Black start capability.
AC Faults	Presents commutation failure during ac faults. In case of repeated commutation failures the converter is blocked.	Can maintain active power transfer even under ac faults, fault-ride through capable.
DC Faults	Is capable of extinguishing dc-side faults via control actions.	Has no way of limiting dc-fault currents (because of the free-wheeling diodes), therefore dc breakers are needed.
Losses [% of Rated Power]	0.7%	1.5% (two-level) or 1.0% (multi-level)
Communication	Special arrangements are needed to coordinate the operation of converter stations.	Communication between the rectifier station and the inverter station in theory is not necessary. The control of each converter station operates in an independent way.
Multi-terminal Operation	Difficult since there is need for coordination between the converters (current order synchronisation) and power-flow reversal involves polarity changes through mechanical switches.	Easier to accomplish since there is little need for coordination between the interconnected converters and power-flow reversal does not involve mechanical switches.

*Σχ 5.3 Πίνακας σύγκρισης VSC-HVDC και CSC-HVDC*

Η VSC-HVDC χρησιμοποιείται συνήθως με μέθοδο ελέγχου Pulse-Wide Modulation (PWM). Μια νέα τοπολογία VSC, Modular Multilevel Converter (MMC) χρησιμοποιώντας κλιμακωτή λογική σύνδεση, είναι πιο ελκυστική για εφαρμογές στο δίκτυο λόγω κάποιων μοναδικών χαρακτηριστικών της, όπως π.χ. η καλή ημιτονοειδή κυματομορφή της τάσης εξόδου και η χαμηλή απώλεια μεταγωγής. Οι σημερινοί κατασκευαστές έχουν αναπτύξει νέες γενιές VSC με βάση την MMC οι οποίες εφαρμόζονται ήδη σε κάποια νέα έργα, κυρίως στις ΗΠΑ. Όντας ένας μετατροπέας πηγής τάσης με εξαναγκασμένη μεταγωγή, δεν χρειάζεται η εναλλασσόμενη τάση της πλευράς του δικτύου για να γίνει η μετατροπή. Εν τω μεταξύ, με την υιοθέτηση της μεθόδου ελέγχου PWM, έχει πολύ γρήγορη ταχύτητα απόκρισης, ιδιαίτερα κατά τη διάρκεια της παροδικής φάσης μετά από διαταραχές, συν το γεγονός ότι δεν παράγονται τέτοιου είδους αρμονικές που να χρειάζονται ακριβά φίλτρα AC.

Στα αρνητικά της τεχνολογίας μετατροπέων HVDC με μετατροπή πηγής τάσης, συμπεριλαμβάνεται ή όχι και τόσο υψηλή χωρητικότητα μεταφοράς ισχύος σε σχέση με ένα μετατροπέα πηγής ρεύματος. Στην περίπτωση της VSC η δυνατότητα ανέρχεται περίπου στα 1200MW, την στιγμή που στην CSC η ικανότητα μεταφοράς της ισχύος είναι περίπου 8000MW. Οι τιμές αυτές αναφέρονται σε εναέριες γραμμές μεταφοράς. Τα χαρακτηριστικά που μπλοκάρουν την εφαρμογή της VSC-HVDC τεχνολογίας ως αντικαταστάτρια μιας CSC-HVDC σε υψηλές τάσεις και ειδικά στη μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας είναι κυρίως το όριο της χωρητικότητας του IGBT. Επίσης, έχει μεγαλύτερες απώλειες σε σύγκριση με παρόμοια CSC συστήματα λόγω της υψηλής συχνότητας μεταγωγής του ελέγχου PWM. Οι απώλειες ισχύος έχουν μειωθεί σχεδόν στο μισό από το σύνηθες επίπεδο με την εισαγωγή των νέων VSC τοπολογιών και των μεθόδων διαμόρφωσης. Οι απώλειες αυτές, αναμένεται να μειωθούν ακόμα περισσότερο με την ανάπτυξη των ημιαγωγών. Η διαμόρφωση του συστήματος VSC-HVDC, χρησιμοποιώντας δύο επίπεδα VSC απεικονίζεται στο σχήμα 5.2 [44].

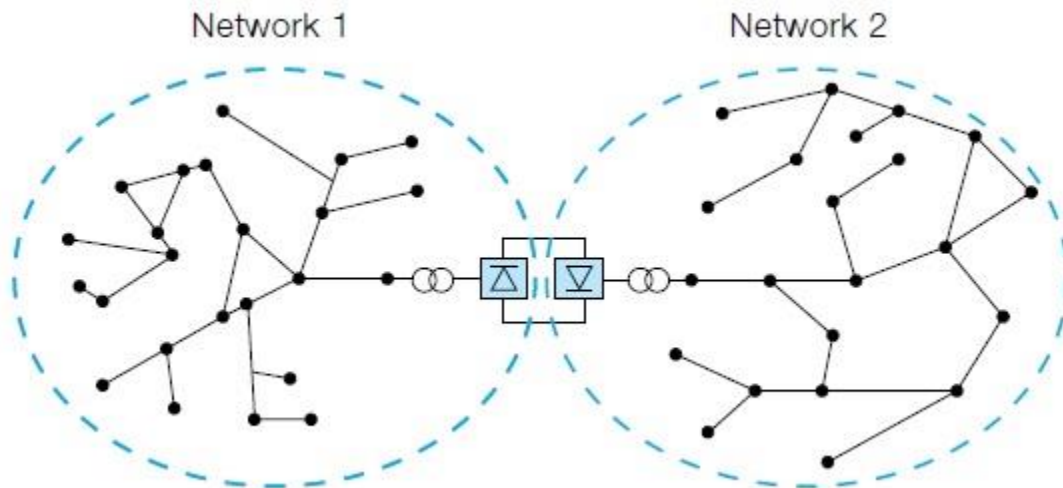
### 5.3 HVDC Τοπολογίες

Σε αυτή την υποενότητα ακολουθεί μια ανάλυση των τοπολογιών που χρησιμοποιούνται στα δίκτυα HVDC. Η τοπολογία που θα επιλεγεί σε κάθε εφαρμογή εξαρτάται από τις ανάγκες και τις απαιτήσεις της κάθε εφαρμογής.

#### Τοπολογία Back-to-Back

Όπως έχει ήδη αναφερθεί προγενέστερα, υπάρχει η τοπολογία Back-to-Back η οποία χρησιμοποιείται συνήθως σε σύνδεση μεταξύ δύο ασύγχρονων συστημάτων εναλλασσόμενου ρεύματος, τα οποία μπορεί να έχουν ίση ή διαφορετική συχνότητα και πρέπει να πραγματοποιηθεί χωρίς να υπάρχει καμία ανάγκη για γραμμές μεταφοράς ή καλωδιακές συνδέσεις. Σε αυτή την τοπολογία, τα διακοπτικά στοιχεία (IGBTs & Thyristors), ο εξοπλισμός ελέγχου, οι συσκευές

ψύξης και οι μετασχηματιστές και των δύο σταθμών μετατροπής, μπορούν να συνδυαστούν σε ένα ενιαίο χώρο. Δεδομένου ότι δεν υπάρχει καμία ανάγκη για καλώδια DC, συνήθως τα ρεύματα διατηρούνται σε υψηλά επίπεδα, ενώ οι τάσεις διατηρούνται σε χαμηλά. Πιο συγκεκριμένα, η τάση είναι σχετικά χαμηλή, περίπου 150kV ή λιγότερο διότι το κόστος των διακοπτικών στοιχείων σε ένα VSC-HVDC μετατροπέα είναι ανάλογο της τάσης. Επιπροσθέτως, δεν υπάρχει ανάγκη για μια τηλεπικοινωνιακή ζεύξη μεταξύ των δύο HVDC σταθμών μετατροπής, κάτι το οποίο είναι απαραίτητο στις άλλες τοπολογίες όπου υπάρχει απόσταση μεταξύ τους η οποία καλύπτεται από καλώδια DC. Αυτή, είναι μία διαφορά η οποία απλοποιεί πολύ τον εξοπλισμό ελέγχου στην Back-to-Back τοπολογία. Σε μικρές εφαρμογές Back-to-Back τοπολογιών, συνήθως κάτω από 500MW, χρησιμοποιούνται μονοπολικές διαμορφώσεις ενώ σε επίπεδα άνω των 500MW χρησιμοποιούνται διπολικές. Και για τις δύο αυτές διαμορφώσεις/τοπολογίες, θα αναφερθούμε εκτενέστερα παρακάτω. Περίπου το 25% όλων των συστημάτων μετάδοσης HVDC είναι Back-to-Back τοπολογίες χρησιμοποιώντας την τεχνολογία CSC-HVDC λόγω της υψηλής ικανότητας των θυρίστορ στα υψηλά ρεύματα διαρροής από το εσωτερικό τους και με αποτέλεσμα η μέση ισχύς να κυμαίνεται περίπου στα 480 MW και μέση τάση περίπου στα 160kV [44].

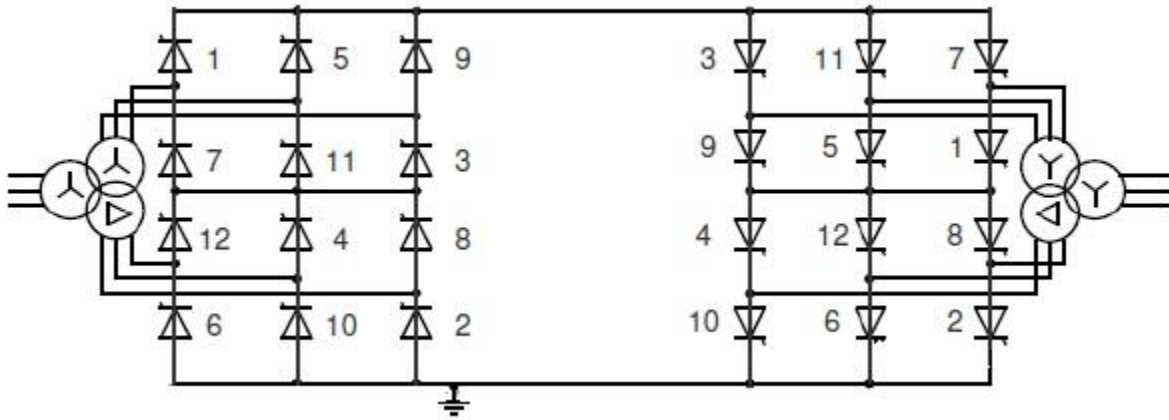


*Σχ 5.4 Back to Back τοπολογία σύνδεσης μετατροπέων HVDC*

Back-to-Back μετατροπείς εγκαθίστανται στις ανεμογεννήτριες μεταβλητών στροφών με ασύγχρονη γεννήτρια τυλιγμένου δρομέα καθώς και στις ανεμογεννήτριες με γεννήτριες μόνιμων μαγνητών, για την σύνδεσή τους με το δίκτυο. Επίσης, μέχρι το 2014, τη μεγαλύτερη εφαρμογή back-to-back τοπολογίας αποτελούσε η διασύνδεση του δικτύου της Σαουδικής Αραβίας (60Hz) με τα δίκτυα των Κουβέιτ, Μπαχρέιν, Ομάν και Εμιράτων (50Hz) [44][45].

Στο σχήμα 5.5 διακρίνουμε το διάγραμμα μιας Back to Back εφαρμογής με μετατροπείς πηγής ρεύματος και με δωδεκαπαλμική ανόρθωση. Όπως διακρίνουμε, οι διαμορφώσεις των

μετασχηματιστών στις δύο πλευρές είναι διαφορετικές ώστε να εισάγεται διαφορά φάσης και να μειώνεται το αρμονικό περιεχόμενο στην πλευρά AC.



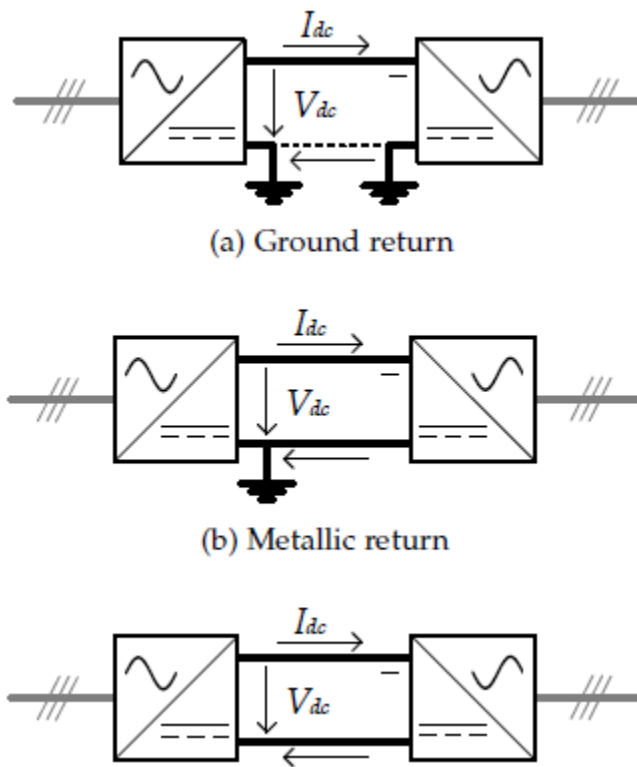
Σχ 5.5 Back to Back με μετατροπείς πηγής ρεύματος και με δωδεκαπαλμική ανόρθωση.

### Μονοπολικά συστήματα HVDC

Τα μονοπολικά συστήματα διαχωρίζονται σε συμμετρικά και ασύμμετρα. Η μονοπολική διάταξη είναι η πιο βασική HVDC τοπολογία μετάδοσης. Όπως υποδηλώνει και το ίδιο το όνομα, σε αυτή τη τοπολογία μόνο ένας πόλος, ως επί το πλείστον ο αρνητικός, χρησιμοποιείται για τη μείωση του φαινομένου της κορώνας. Το σχήμα 5.6(a) δείχνει τις πιθανές διαμορφώσεις της μονοπολικής μετάδοσης για συστήματα HVDC. Τα μονοπολικά συστήματα προτιμώνται σε πολύ μεγάλες αποστάσεις μετάδοσης είτε μέσω εναέριων γραμμών ή υποβρύχιων καλωδίων. Χρησιμοποιώντας για την επιστροφή του ρεύματος το έδαφος, μόνο ένα καλώδιο DC είναι αναγκαίο για την επίτευξη της μετάδοσης. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα, αυτό το ασύμμετρο μονοπολικό σύστημα να παρουσιάζει ένα πλεονέκτημα σε ότι έχει να κάνει το μειωμένο κόστος επένδυσης και τις απώλειες μετάδοσης. Επίσης, πλεονέκτημα αποτελεί η επέκταση σε ένα διπολικό σύστημα σε μεταγενέστερο στάδιο. Ωστόσο, σε εξαιρετικά κορεσμένες γεωλογικά περιοχές, σε περιοχές με υψηλή αντίσταση γείωσης και σε περιοχές όπου είναι πρόσφατη η διέλευση νερού μέσα από το έδαφος, μπορεί να μην είναι δυνατή η χρήση επιστροφής μέσω του εδάφους. Αυτό αποτελεί και το μειονέκτημα αυτής της τοπολογίας. Ένα ακόμα μειονέκτημα, αποτελεί η ανάγκη για αδειοδότηση χρήσης του εδάφους για αυτή τη λειτουργία, είτε για την συνεχή διέλευση DC ρεύματος, είτε για την χρήση των ηλεκτροδίων που θα πακτωθούν στο έδαφος. Επίσης, είναι πολύ πιθανή η μετάδοση AC σφαλμάτων από το δίκτυο μέσω του γειωμένου DC πόλου. Τέλος, στο μονοπολικό σύστημα μετάδοσης με επιστροφή μέσω εδάφους, είναι αναγκαίοι ειδικοί μετασχηματιστές, ικανοί να διαχειρίζονται υψηλές τάσεις DC.

Οπουδήποτε υπάρχει δυσκολία στην επιστροφή μέσω εδάφους λόγω περιβαλλοντικών φαινομένων ή μεταλλικών κατασκευών στην ευρύτερη περιοχή, τότε χρησιμοποιείται ένας μεταλλικός αγωγός όπως φαίνεται και στο σχήμα 5.6(b) . Αν η DC πλευρά είναι γειωμένη, ένα χαμηλής τάσης DC καλώδιο, χωρίς να είναι αναγκαστικά μονωμένο, είναι αρκετό για να επιτευχθεί σωστά η μετάδοση. Ωστόσο, κάθε φορά που η DC πλευρά του συστήματος μεταφοράς HVDC είναι γειωμένη, είναι επίσης αναγκαίοι ειδικοί μετασχηματιστές, ικανοί να διαχειρίζονται υψηλές DC τάσεις. Και με αυτό το ασύμμετρο μονοπολικό σύστημα, είναι πιθανή η επέκταση σε ένα διπολικό σύστημα σε μεταγενέστερο στάδιο. Στα αρνητικά της επιστροφής μέσω μεταλλικού αγωγού είναι η περιορισμένη ικανότητα μεταφοράς σε σχέση με ένα διπολικό σύστημα, στοιχείο που ισχύει και για την μονοπολική μετάδοση μέσω εδάφους.

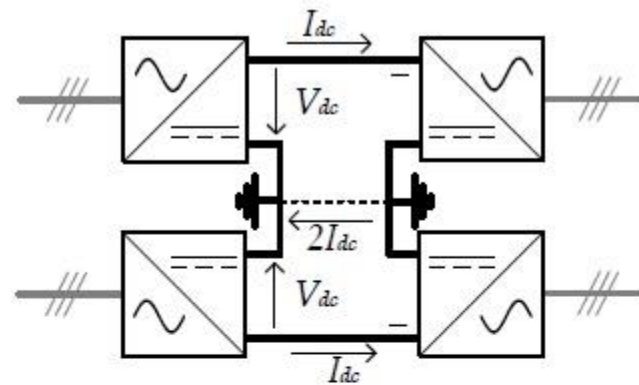
Μια συμμετρική διαμόρφωση μονοπολικής μετάδοσης απεικονίζεται στο σχήμα 5.6 (c). Αυτός ο συμμετρικός τρόπος μετάδοσης, χρησιμοποιείται για την αποφυγή των ειδικών μετασχηματιστών που απαιτούνται στα δύο προαναφερθέν ασύμμετρα μονοπολικά συστήματα. Σε αυτό το μονοπολικό σύστημα, πέρα από την αποφυγή των μετασχηματιστών, θετικό στοιχείο αποτελεί το γεγονός ότι δεν μπορεί να επηρεαστεί από σφάλματα στην AC πλευρά. Στα αρνητικά θα μπορούσαμε να αναφέρουμε την ανάγκη για δύο πλήρη απομονωμένα καλώδια DC, με άμεση συνέπεια την αύξηση του κόστους εγκατάστασης καθώς και την μειωμένη ικανότητα μεταφοράς σε σχέση με ένα διπολικό σύστημα [45][46].



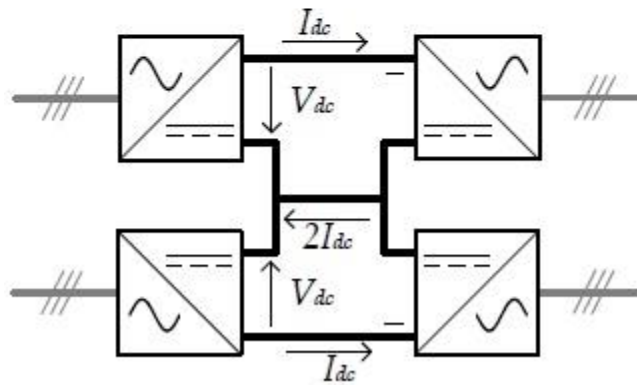
Σχ 5.6 Μονοπολικές τοπολογίες μετάδοσης HVDC

## Ομοπολικά συστήματα HVDC

Στις ομοπολικές τοπολογίες χρησιμοποιούνται δύο καλώδια DC τις ίδιας πολικότητας και όπως συμβαίνει ακριβώς και στις μονοπολικές τοπολογίες, αυτή που επιλέγεται περισσότερο είναι η αρνητική πολικότητα λόγω του μειωμένου φαινομένου της κορόνας και των ασθενέστερων ηλεκτρομαγνητικών εκπομπών σε περίπτωση εναέριας μεταφοράς. Το σχήμα 5.7 δείχνει δύο διαμορφώσεις του συστήματος μεταφοράς HVDC χρησιμοποιώντας την ομοπολική τοπολογία.



(a) Ground return

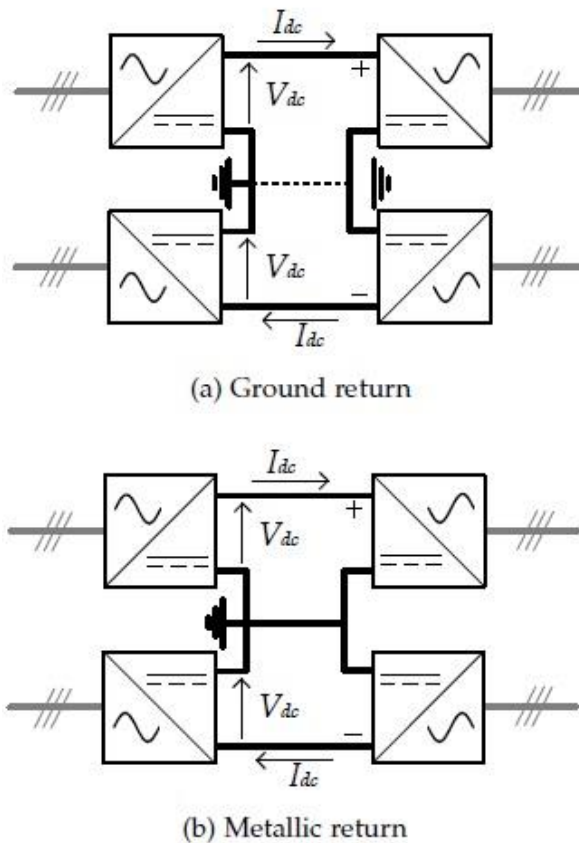


(b) Metallic return

Σχ 5.7 Ομοπολικές τοπολογίες HVDC

Με δεδομένο ότι οι πολικότητες και των δύο πόλων των αγωγών είναι όμοιες, αυτού του είδους η HVDC τοπολογία έχει το πλεονέκτημα του μειωμένου κόστους μόνωσης. Επιπλέον, δεν πάσχει από το κύριο μειονέκτημα της μονοπολικής τοπολογίας όπου σε περίπτωση που για παράδειγμα ένας μετατροπέας ή ένα HVDC καλώδιο, βγει εκτός λειτουργίας, τότε το σύστημα μετάδοσης βγαίνει επίσης εκτός. Εδώ σε αυτή την τοπολογία το σύστημα μετάδοσης θα παραμείνει ενεργό διότι ο δεύτερος πόλος μπορεί να συνεχίζει να λειτουργεί ανεξάρτητα,

χρησιμοποιώντας πλέον αναγκαστικά τη γη ως επιστροφή. Το κύριο μειονέκτημα με αυτή την ομοπολική διάταξη είναι ωστόσο η συνεχής ανάγκη ύπαρξης μιας διαδρομής επιστροφής και το υψηλό ρεύμα αυτής, το οποίο μπορεί να είναι ίσο με το διπλάσιο της ονομαστικής τιμής του σε κανονικές συνθήκες και όταν το ρεύμα από κάθε πόλο επιστρέφει από την ίδια διαδρομή. Η ομοπολική τοπολογία που απεικονίζεται στο σχήμα 5.7(a) δεν είναι συνήθως εφαρμοστέα λόγω των περιορισμών στα πολύ υψηλά ρεύματα εδάφους. Επομένως, η χρήση ενός μεταλλικού καλωδίου επιστροφής LVDC, όπως φαίνεται στο σχήμα 5.7(b), μάλλον θα πρέπει να ληφθεί πολύ σοβαρά υπόψη κατά το σχεδιασμό του συστήματος μεταφοράς.

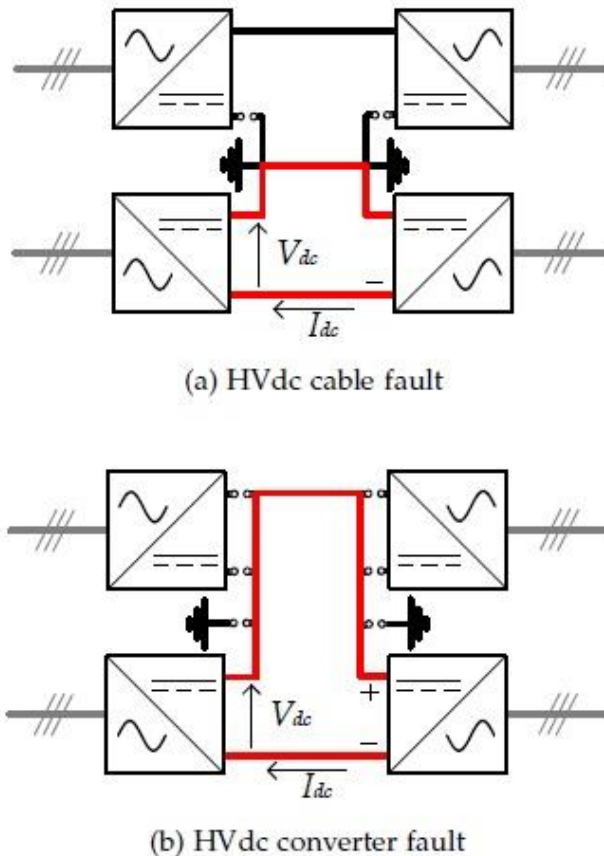


Σχ 5.8 Διπολικές τοπολογίες HVDC

### Διπολικά συστήματα HVDC

Για μια συγκεκριμένη ονομαστική ισχύ, η διπολική τοπολογία μεταφοράς HVDC είναι πιο ακριβή από την μονοπολική. Κατά συνέπεια, η διπολική τοπολογία είναι εφαρμόσιμη στην

περίπτωση όπου η ποσότητα μεταφερόμενης ισχύος είναι μεγαλύτερη από την χωρητικότητα του πόλου της μονοπολικής. Παρόλα αυτά, η διπολική απαιτεί την εγκατάσταση δύο καλωδίων HVDC με διαφορετική πολικότητα μεταφέροντας το DC ρεύμα και προς τις δύο κατευθύνσεις. Κατά την κανονική λειτουργία τα ρεύματα σε κάθε καλώδιο έχουν το ίδιο πλάτος, και δεν υπάρχει ρεύμα στη διαδρομή επιστροφής. Στο σχήμα 5.8 απεικονίζονται δύο συστήματα με HVDC με διπολική τοπολογία.



**Σχ 5.9** Διπολικές τοπολογίες HVDC σε περίπτωση σφάλματος σε HVDC αγωγό (α) και σε περίπτωση μετατροπείας (β)

Σε περίπτωση ανισορροπίας, τα ρεύματα διαχέονται προς το έδαφος αλλά αυτό μόνο στην περίπτωση όπου δεν υπάρχουν σχετικοί περιορισμοί, όπως ακριβώς φαίνεται και στο σχήμα 5.8(a) ή μέσω μεταλλικού αγωγού όπως φαίνεται στο 5.8(b). Το τρίτο καλώδιο μπορεί να έχει χαμηλή μόνωση (LVDC) και να χρησιμοποιείται σαν θωράκιση σε περίπτωση εναέριων γραμμών η οποίες συνήθως είναι διπολικές ή ομοπολικές. Επίσης, το καλώδιο αυτό μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για λόγους συμμετρίας στους πύργους στήριξης η οποίοι είναι μηχανικά σταθερότεροι σε περίπτωση στήριξης δύο καλωδίων.



Ακόμα κι αν δεν είναι απαραίτητο, η γείωση παρέχεται συχνά για την διπολική διαμόρφωση. Αρχικά, η απουσία μιας διαδρομής επιστροφής εδάφους θα σήμαινε χαμηλότερο κόστος εγκατάστασης αλλά θα αφαιρούσε το κυριότερο θετικό χαρακτηριστικό που είναι η δυνατότητα πλεονασμού, δηλαδή η ικανότητα να αντέχει σε διακοπές στη λειτουργία του. Αν δεν υπάρχει δίοδος επιστροφής, τότε ολόκληρο το HVDC σύστημα μεταφοράς θα μείνει εκτός σε περίπτωση σφάλματος.

Ωστόσο, αν μια διαδρομή γείωσης παρέχεται, η διπολική τοπολογία προσφέρει τη δυνατότητα πλεονασμού σε περίπτωση βλάβης σε ένα από τα HVDC καλώδια ή στους HVDC μετατροπείς. Το σχήμα 5.9 δείχνει την τρέχουσα πορεία με κόκκινο κατά τη διάρκεια απρόβλεπτων σφαλμάτων σε ένα διπολικό σύστημα μεταφοράς HVDC. Σε περίπτωση σφάλματος σε ένα αγωγό HVDC (Σχήμα 5.9a), το μισό σύστημα μεταφοράς θα είναι διαθέσιμο. Η πραγματική διαθεσιμότητα μεταφοράς μπορεί να υπερβαίνει και το 50% της συνολικής αλλά αυτό εξαρτάται από εναπομείναντα αγωγό και την ικανότητα υπερφόρτωσης του μετατροπέα. Σε περίπτωση αστοχίας του ενός μετατροπέα, υπάρχει η δυνατότητα λειτουργίας μονοπολικής τοπολογίας μεταφοράς HVDC (Σχήμα 5.9b) αλλά θα παρατηρηθεί μια μικρή διακοπή μέχρι οι άμεσης απόκρισης DC διακόπτες να παρακάμψουν το ελαττωματικό μετατροπέα [47].

### Πολυτερματικά δίκτυα

Η έλευση και η εδραίωση των μετατροπέων ρεύματος CSC-HVDC βοήθησε να αυξηθεί το ενδιαφέρον διασύνδεσης περισσότερων από δύο σταθμών μετατροπής για να σχηματίσει έτσι ένα πολυτερματικό δίκτυο DC. Το πρώτο πολυτερματικό δίκτυο HVDC κατασκευάστηκε στον Καναδά στη γραμμή μεταφοράς Hydro-Québec – New England. Αρχικά, το 1986, αποτελούσε ένα point-to-point δίκτυο μεταφοράς, διπολικό με 450 KV ονομαστική τάση και 690 MW ισχύς. Στη δεύτερη φάση, το 1990, προστέθηκαν άλλοι τρεις τερματικοί σταθμοί μετατρέποντάς το έτσι στο πρώτο πολυτερματικό δίκτυο στο κόσμο.

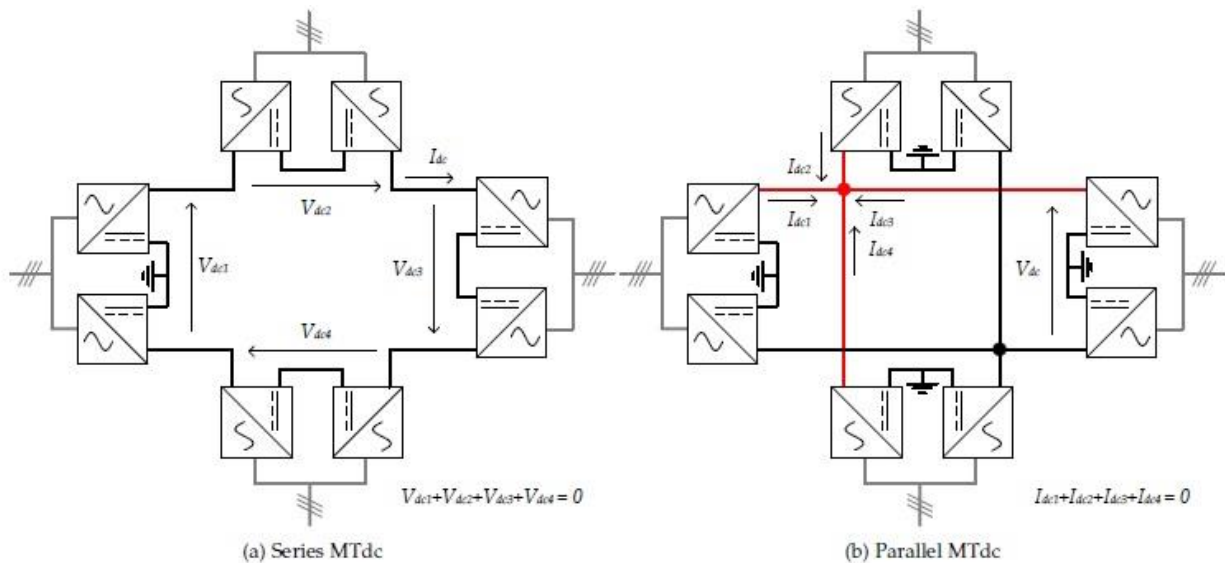
Η βιομηχανία HVDC έχει ήδη 3 δεκαετίες εμπειρίας πολυτερματικά δίκτυα συνεχούς ρεύματος υψηλής τάσης CSC-HVDC. Ωστόσο, από το 1990 κανένα άλλο σχέδιο με περισσότερα από τρία τερματικά δεν έχει κατασκευαστεί με την τεχνολογία HVDC βασιζόμενο σε μετατροπείς ρεύματος πηγής. Όσο αυξάνει ο αριθμός των μετατροπέων, των ανορθωτών και γενικότερα των τερματικών σταθμών σε ένα πολυτερματικό δίκτυο με CSC-HVDC μετατροπής, τόσο αυξάνεται και η πολυπλοκότητά του καθώς και η δυσκολία κεντρικού ελέγχου αυτού. Ένα πολυτερματικό δίκτυο ελέγχεται μέσω ενός κεντρικού ελεγκτικού συστήματος (master control) το οποίο είναι υπεύθυνο για τον συγχρονισμό και συντονισμό μεταξύ των τερματικών σταθμών. Αυτό επιτυγχάνεται με τηλεπικοινωνιακά μέσα τα οποία σε ένα μεγάλο σε αριθμό τερματικών δίκτυο, απαιτείται να είναι εξαιρετικά γρήγορα ώστε να μην υπάρχει κενό στην ανάλογη απόκριση σε κάθε χειρισμό. Η τηλεπικοινωνιακή σύνδεση απαιτείται για το συγχρονισμό των μετατροπέων με

τις τρέχουσες εντολές, για τις ταυτίσεις και τις δράσεις που απαιτούνται για τον καθαρισμό σφαλμάτων DC και την εκκίνηση του συστήματος μετά από μια διακοπή ρεύματος.

Η αυξημένη πολυπλοκότητα του κεντρικού ελέγχου (master control), η ανάγκη για γρήγορες συνδέσεις επικοινωνιών, το οποίο μπορεί να μην ήταν διαθέσιμο εκείνη την χρονική περίοδο και η αδυναμία να αλλάξει η κατεύθυνση του ρεύματος, αποτέλεσαν τους λόγους για τους οποίους τα πολυτερματικά δίκτυα HVDC που χρησιμοποιούνε CSC-HVDC μετατροπείς, δεν αναπτυχθήκαν περαιτέρω. Παρόλα αυτά, η συνολική εγκατεστημένη ισχύς αυξάνεται συνεχώς με χώρες όπως η Κίνα, η Ινδία και η Βραζιλία να ενσωματώνουν πηγές παραγωγής σε απομακρυσμένη τοποθεσία. Μόνο η Κίνα σχεδιάζει να κατασκευάσει περισσότερα από τριάντα HVDC συνδέσεις, μέχρι το 2030, οι οποίες ανέρχονται περίπου 270 GW.

Οι τοπολογίες στα πολυτερματικά δίκτυα μπορεί να χαρακτηριστούν από την τεχνολογία HVDC που χρησιμοποιείται στους τερματικούς σταθμούς.

- CSC-Multi Terminal DC: Όλοι οι σταθμοί χρησιμοποιούν μετατροπείς HVDC – CSC.
- VSC- Multi Terminal DC: Όλοι οι σταθμοί χρησιμοποιούν μετατροπείς HVDC – VSC.
- Υβριδικά- Multi Terminal DC: Οι τεχνολογίες μετατροπέων των τερματικών σταθμών είναι και HVDC - CSC αλλά και HVDC – VSC.



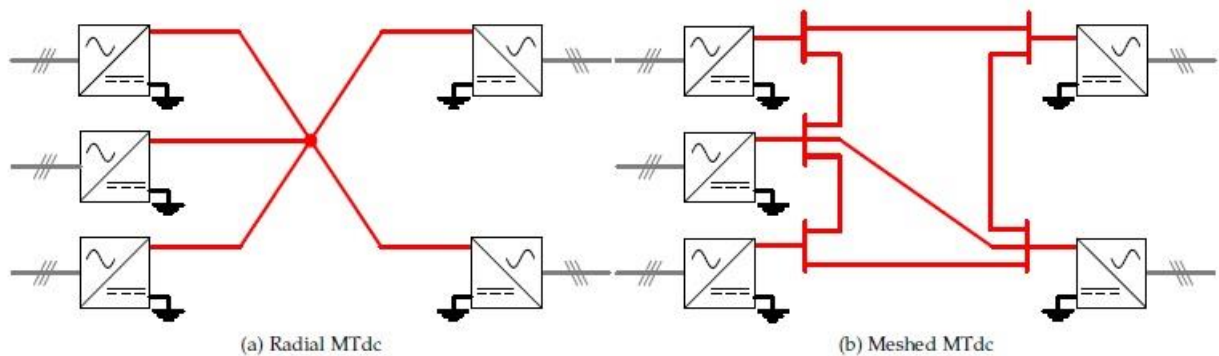
**Σχ 5.10** Πολυτερματικό δίκτυο HVDC διπολικών point-to-point τοπολογιών συνδεδεμένων σε (α) σε σειρά (β) παράλληλα

Οι τερματικοί σταθμοί μπορούν να συνδέονται είτε παράλληλα, είτε σε σειρά. Σε ένα πολυτερματικό δίκτυο όπου οι τερματικοί σταθμοί συνδέονται σε σειρά, όλοι οι σταθμοί

μοιράζονται το ίδιο ρεύμα DC ενώ οι τάσεις είναι ανάλογες της ισχύος που μεταφέρεται σε κάθε περίπτωση και της ισχύς σύνδεσης στο AC δίκτυο. Αυτού του είδους η πολυτερματική σύνδεση είναι γειωμένη σε ένα μόνο σημείο, το οποίο μπορεί να επιλεγεί αυθαίρετα αλλά θα επηρεάσει ανάλογα τις ανάγκες μόνωσης των διαφόρων σταθμών μετατροπέα. Ένα τέτοιο δίκτυο απεικονίζεται στο σχήμα 5.10(α).

Σε ένα πολυτερματικό δίκτυο όπου οι τερματικοί σταθμοί συνδέονται παράλληλα, οι τάσεις DC σε όλους τους τερματικούς σταθμούς είναι ίδιες και τα ρεύματα είναι ανάλογα της ισχύος που μεταφέρεται σε κάθε περίπτωση και της ισχύς σύνδεσης στο AC δίκτυο. Ένα τέτοιο δίκτυο απεικονίζεται στο σχήμα 5.10(b).

Οι παράλληλα συνδεδεμένοι πολυτερματικοί σταθμοί διαχωρίζονται επίσης στους ακτινωτά συνδεδεμένους και στους ακανόνιστα συνδεδεμένους. Στα συνδεδεμένα με ακτινωτή διαμόρφωση δίκτυα η αστοχία μιας DC γραμμής μεταφοράς θα οδηγούσε σε αστοχία ολόκληρο το δίκτυο τη στιγμή που στην ακανόνιστη διαμόρφωση η λειτουργία του δικτύου θα συνεχιζόταν αλλά με πολύ μεγαλύτερες απώλειες μεταφοράς από ότι στην κανονική λειτουργία. Στο σχήμα 5.11 απεικονίζεται η λειτουργία και η διαμόρφωση ενός δικτύου με ακτινωτή (α) και ενός με ακανόνιστη μορφή (b).



**Σχ 5.11** Πολυτερματικό δίκτυο HVDC με ακτινωτή (α) και ακανόνιστη (b) διαμόρφωση

Τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της σύνδεσης σε σειρά και της σύνδεσης παράλληλα δικτύων MTDC, παρατίθενται στον σχήμα 5.12. Μέχρι σήμερα, μόνο συστήματα με παράλληλη μετάδοση MTDC έχουν κατασκευαστεί [46][48].

Τα πολυτερματικά δίκτυα αποτελούν μεγάλο πλεονέκτημα της σύνδεσης υπεράκτιων αιολικών πάρκων διότι κάθε τέτοιο πάρκο απαιτεί την δημιουργία μιας HVDC γραμμής μεταφοράς. Με την ύπαρξη πολυτερματικού δικτύου στην ευρύτερη περιοχή, διευκολύνεται η σύνδεση του πάρκου λόγω της ήδη υπάρχουσας τερματικής εγκατάστασης στη μία πλευρά και μειώνεται κατά πολύ το κόστος εγκατάστασης. Η λογική της επέκτασης ήδη υπαρχόντων DC

δικτύων μπορεί να βρει εφαρμογή και στην περίπτωση της ηλεκτροδότησης των πλατφόρμων εξόρυξης πετρελαίου.

Characteristic	Series MTdc	Parallel MTdc
Power Flow Reversal	In CSC-MTdc power flow reversal can easily be achieved by inverting the converter voltages. With VSC-MTdc it would not be easy to invert the converters voltage polarity, thus power flow reversal would involve mechanical switches.	In CSC-MTdc the current direction cannot be inverted, hence, there is need for mechanical switches. In VSC-MTdc the current direction can easily be inverted, hence power flow reversal can be achieved via control actions.
HVdc Terminal Power Rating	Depends on converter voltage rating (cheaper for smaller powers).	Depends on converter current rating.
Losses	Higher losses, which can be minimised by always operating with the minimum current possible.	Lower losses.
Insulation	Is difficult in series connection as the voltages in the MTdc network vary.	All converters need to be insulated to the rated voltage.
DC Faults	A permanent fault in a transmission line would make the whole MTdc network unavailable.	A permanent fault in a transmission line would only make the affected terminal unavailable (in meshed MTdc networks normal operation is still possible).
AC Faults	Leads to overvoltages in the remaining terminals.	Leads to overcurrents in the remaining terminals.
Protection	In series CSC-MTdc, dc faults can be handled via control actions. VSC-MTdc will need dc breakers.	For clearing dc faults parallel MTdc networks will need dc breakers.

*Σχ 5.12 Τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της σύνδεσης σε σειρά και της σύνδεσης παράλληλα, δικτύων MTDC*

## 5.4 Δομικές Συνιστώσες Δικτύου VSC – HVDC

### 5.4.1. Εισαγωγικά

Η διατήρηση του ισοζυγίου ενεργού ισχύος, αποτελεί και το χαρακτηριστικότερο στοιχείο μιας HVDC μεταφοράς ισχύος. Πιο αναλυτικά, θα πρέπει η ενεργός ισχύς που εκχέεται στο onshore δίκτυο να είναι ίση με την παραγόμενη ενεργούς ισχύος των μετατροπέων στην offshore πλευρά του δικτύου. Στην περίπτωση που δεν τηρείται αυτό το ισοζύγιο, έχουμε εκφόρτιση ή φόρτιση των DC πυκνωτών των γραμμών με αποτέλεσμα την ταχύτατη μεταβολή της DC τάσης η οποία με την σειρά της ενεργοποιεί τις προστασίες της γραμμής. Γεγονός ανεπιθύμητο ασφαλώς και για αυτό το λόγο η ανάγκη πλήρους ελέγχου της ροής ισχύος και της DC τάσης του δικτύου και συνεπώς η απαίτηση για ένα αξιόπιστο και ευέλικτο σύστημα ελέγχου των μετατροπέων του

συστήματος είναι κάτι παραπάνω από απαραίτητη. Επειδή όπως προαναφέραμε, από τους δύο τύπους μετατροπέων αυτός που έχει το πλεονέκτημα του άμεσου ελέγχου λόγω των IGBTs είναι ο μετατροπέας VSC-HVDC (μετατροπείς πηγής τάσης), είναι και αυτός που χρησιμοποιείται κυρίως σε αυτές τις εφαρμογές και αυτός με τον οποίο θα ασχοληθούμε με μεγαλύτερη λεπτομέρεια σε αυτή την υποενότητα.

Για να ικανοποιηθούν οι παραπάνω έλεγχοι και χειρισμοί, χρησιμοποιείται ο λεγόμενος διανυσματικός έλεγχος. Ο έλεγχος αυτός έχει το χαρακτηριστικό του ανεξάρτητου ελέγχου της ενεργής και άεργης ισχύος με αποτέλεσμα να υπάρχει η δυνατότητα στήριξης συγκοινωνούντων δικτύων. Σε ότι αφορά τον έλεγχο της DC τάσης της HVDC γραμμής, αυτό επιτυγχάνεται με την υιοθέτηση της μεθόδου master-slave. Στην πράξη, αυτό σημαίνει ότι ο ένας από τους δύο μετατροπείς της γραμμής ελέγχει την τάση DC (master) και ο άλλος ελέγχει ή την ενεργό ισχύ ή την άεργη ή την AC τάση (slave). Με την ίδια μεθοδολογία master-slave, μπορεί να λειτουργήσει και ένα πολυτεματικό δίκτυο. Σε αυτή την περίπτωση υπάρχει βέβαια το μειονέκτημα του να αστοχήσει ο master μετατροπέας και να πέσει όλο το δίκτυο. Επίσης, είτε σε point-to-point σύνδεση, είτε σε πολυτεματική, μπορεί να απαιτηθεί από τον master μετατροπέα να απορροφήσει ισχύ μεγαλύτερη της ονομαστικής του και επειδή αυτό θα αποτραπεί από τις προστασίες του να αποσταθεροποιηθεί το σύστημα. Για τους προηγούμενους λόγους, προκρίνεται η λύση του ελέγχου της τάσης DC από παραπάνω από έναν μετατροπέα. Δηλαδή στην περίπτωση ενός point-to-point δικτύου και από τους δύο.

Κατά την εφαρμογή του διανυσματικού ελέγχου, απαιτείται η χρήση μετασχηματισμένων συνιστωσών του ηλεκτρικού ρεύματος στην πλευρά του εναλλασσόμενου δικτύου. Για την ακρίβεια, απαιτείται μετασχηματισμός των μεγεθών στο σύγχρονα στρεφόμενο πλαίσιο αναφοράς dq γνωστός ως μετασχηματισμός Park. Για να φτάσουμε όμως σε αυτή τη φάση, απαιτείται νωρίτερα μετασχηματισμός στο στατό (ακίνητο) πλαίσιο αναφοράς αβ γνωστός ως μετασχηματισμός Clarke. Για να γίνουν αυτοί οι μετασχηματισμοί απαιτείται να έχουμε τοπικές μετρήσεις από τα ηλεκτρικά μεγέθη και ειδικότερα της συχνότητας και της φάσης στο δίκτυο AC. Η ανάγκη για να είναι οι DC ποσότητες στα dq μεγέθη αλλά και για να είναι πλήρως ανεξάρτητες οι ενεργός και άεργος ισχύς, θα πρέπει να εισαχθεί μία μέθοδος συγχρονισμού του μετατροπέα με την τάση δικτύου όπως η SRF-PLL [Synchronous Reference Frame Phase Locked Loop]. Σε αυτές τις μεθόδους, θα αναφερθούμε λίγο εκτενέστερα παρακάτω.

#### **5.4.2. Είδη μετατροπέων με βάση την λειτουργία τους σε σχέση με το δίκτυο.**

Οι μετατροπείς ισχύος μπορούν να διαχωριστούν με βάση την λειτουργία τους σε σχέση με το δίκτυο σε :

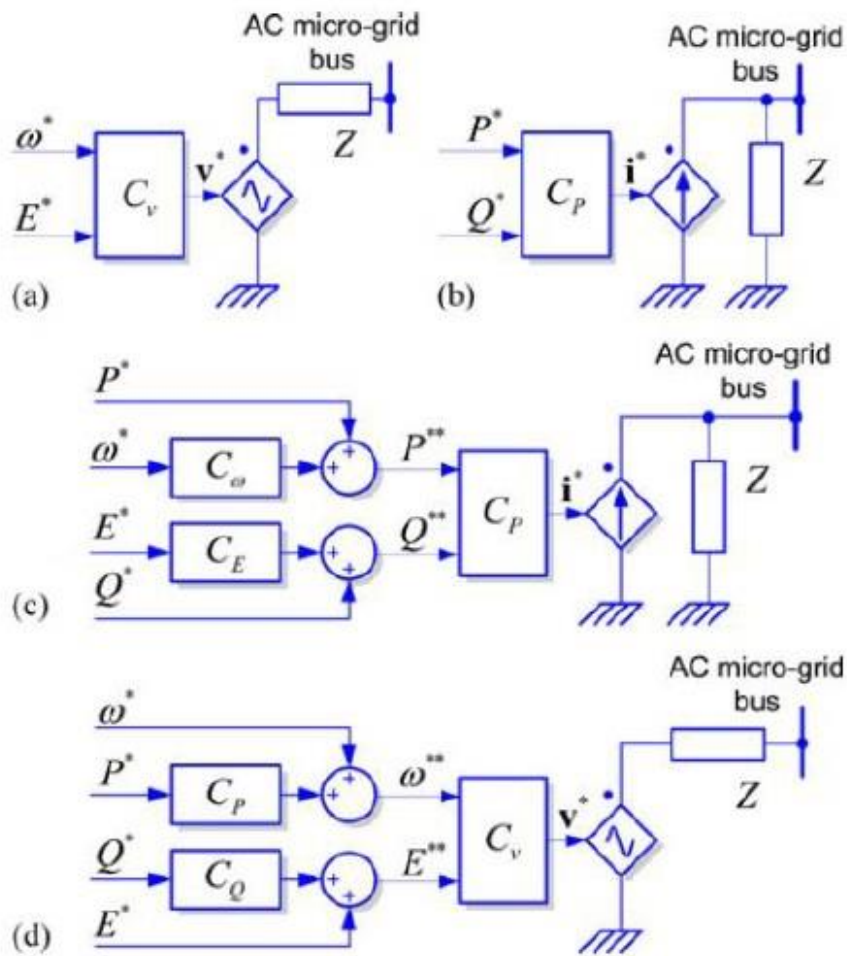
- Grid-forming
- Grid-feeding

➤ Grid-supporting

και απεικονίζονται σχηματικά και οι τρεις στο σχήμα 5.13 που ακολουθεί.

Grid-forming

Το είδος αυτού του μετατροπέα αναλαμβάνει να «φτιάξει» ένα το δίκτυο AC στο οποίο είναι συνδεδεμένος. Τέτοιου είδους μετατροπέα για παράδειγμα αποτελεί ένας από τους offshore μετατροπείς ενός υπεράκτιου αιολικού πάρκου που είναι συνδεδεμένο σε ένα νησί διότι καλείται να στήσει το δίκτυο του νησιού στην επιθυμητή τάση και συχνότητα.



**Σχ 5.13** Αναπαράσταση των τριών κατηγοριών μετατροπέων ισχύος ανάλογα με τη λειτουργία τους στο δίκτυο. (a) Grid-forming, (b) Grid-feeding, (c) Current-source-based grid-supporting και (d) Voltage-source-based grid-supporting

Ο μετατροπέας αυτός ελέγχεται μέσω κλειστού βρόχου και λειτουργεί σαν ιδανική πηγή AC τάσης με συγκεκριμένο πλάτος  $E^*$  και συχνότητα  $\omega^*$  και με μικρή αντίσταση εξόδου. Σε περίπτωση που είναι συνδεδεμένοι αρκετοί τέτοιοι μετατροπείς παράλληλα, επειδή η κατανομή της ισχύος είναι συνάρτηση της αντίστασης εξόδου τους, απαιτείται ιδιαίτερα ακριβής συγχρονισμός έτσι ώστε να λειτουργήσει με ορθότητα. Σε περίπτωση που ένας grid-forming μετατροπέας αποτελεί μέρος ενός μικροδικτύου, η τάση AC που διαμορφώνει, χρησιμοποιείται σαν αναφορά για τους υπόλοιπους grid-feeding μετατροπείς. Ο έλεγχος του μετατροπέα, πραγματοποιείται μέσω δύο διαδοχικών ελεγκτών στο πλαίσιο αναφοράς dq. Είσοδο σε αυτό το σύστημα ελέγχου, αποτελεί και η τάση αναφοράς  $E^*$  και η συχνότητα  $\omega^*$  που επιθυμεί να έχει το δίκτυο AC το οποίο επιθυμεί να στήσει. Ο εξωτερικός βρόγχος ελέγχει την τάση δικτύου στο σημείο αναφοράς ενώ ο εσωτερικός ελέγχει το ρεύμα που παρέχει ο μετατροπέας στην έξοδό του. Το ρεύμα αυτό με την σειρά του φορτίζει κατάλληλα ένα πυκνωτή ώστε να μπορεί να παρέχει την τάση αναφοράς. Το 5.13(α) απεικονίζει το είδος αυτού του μετατροπέα όπου με  $C_v$  περιγράφεται όλο το σύστημα ελέγχου και με  $Z$  η μη ιδανικότητα λειτουργίας του μετατροπέα[49][50].

### Grid-feeding

Αυτό το είδος μετατροπέα χρησιμοποιείται για την έκχυση ρεύματος σε ένα ήδη υπάρχον δίκτυο το οποίο δημιουργεί συνήθως ένας grid-forming μετατροπέας ή μια ασύγχρονη γεννήτρια με συγκεκριμένο πλάτος τάσης και συγκεκριμένη συχνότητα. Συνεπώς αποτελεί μια πηγή ρεύματος με μια υψηλή αντίσταση συνδεδεμένη παράλληλα (η εμφανιζόμενη στο σχήμα 5.13α ως  $Z$  και με την ερμηνεία της μη ιδανικότητας λειτουργίας του μετατροπέα) και ως τέτοια ελέγχεται από το σύστημα ελέγχου, ώστε να καθορίζεται μέσω των αναφορών ισχύος και να διαμορφώνει τις εγχύσεις ισχύος στο δίκτυο. Η φάση του ρεύματος έγχυσης, είναι αυτή που καθορίζει το είδος της ισχύος που εκχέεται, αν είναι δηλαδή ενεργός ή άεργος. Ο μετατροπέας grid-feeding, οφείλει να είναι σε πλήρη εναρμόνιση με την τάση του δικτύου σύνδεσης ώστε να μπορεί να έχει την δυνατότητα ελέγχου με ακρίβεια της ενεργού και της άεργου ισχύος που ανταλλάσσεται με το δίκτυο. Επίσης, μπορεί να ελέγχει την συχνότητα και το πλάτος της τάσεως ενός μικροδικτύου του οποίου μπορεί να αποτελούν μέρος μαζί με άλλους μετατροπείς του ίδιου είδους, με την ανάλογη προσαρμογή της έκχυσης ενεργού και άεργου ισχύος ( $P^*$  και  $Q^*$ ) που εκχέουν στο σύστημα. Σε αυτούς τους μετατροπείς, συμβαίνει συχνά να είναι εγκατεστημένος ελεγκτής MPPT (Maximum Power Point Tracking) ο οποίος είναι υψηλού τεχνολογικού επιπέδου και δημιουργεί αναφορές ενεργού και άεργου ισχύος μέσω μετρήσεων στο DC ώστε να μπορεί να πραγματοποιηθεί ο έλεγχός του. Αυτού του είδους ο ελεγκτής, χρησιμοποιείται ευρέως και στους μετατροπείς φωτοβολταϊκών αντιστροφών ώστε να επιτυγχάνεται η μέγιστη μετατροπή ανά πάσα στιγμή του DC ρεύματος σε AC. Ένας τέτοιος μετατροπέας grid-feeding, απεικονίζεται σε στο σχήμα 5.13 (b) στην απλουστευμένη του μορφή με το ονομαζόμενο  $C_p$  να αποτελεί το λεγόμενο σύστημα ελέγχου[49][50].

## Grid-supporting

Ο μετατροπέας αυτός ελέγχεται με δύο τρόπους, είτε ως μια πηγή τάσης με μια σύνθετη αντίσταση  $Z$  σε σειρά, είτε ως μια πηγή ρεύματος με μια σύνθετη αντίσταση  $Z$  παράλληλα. Και στις δύο περιπτώσεις, η  $Z$  αντιπροσωπεύει την μη ιδανική λειτουργία του μετατροπέα. Οι δύο αυτοί μετατροπείς, περιγράφονται σχηματικά στο σχήμα 5.13 (c) - πηγής ρεύματος και 5.13 (d) - πηγής τάσης. Ένας grid-supporting μετατροπέας και στις δύο περιπτώσεις ελέγχου, σκοπό έχει την ρύθμιση του πλάτους  $E^*$  και της συχνότητας  $\omega^*$  της τάσης του δικτύου μέσω του ελέγχου της άεργου και ενεργούς ισχύος αντίστοιχα. Στην περίπτωση της πηγής ρεύματος, οι μετατροπείς που είναι συνδεδεμένοι σε κάποιο μικροδίκτυο, έχουν ως στόχο την ρύθμιση της τάσης και της συχνότητας του δικτύου, πέρα ασφαλώς από τη τροφοδότηση του φορτίου με την απαραίτητη ισχύ. Στην περίπτωση πηγής τάσεως, όπου η πηγή τάσης βρίσκεται σε σειρά με μια σύνθετη αντίσταση, έχουμε στην ουσία το ισοδύναμο κύκλωμα μιας σύγχρονης γεννήτριας AC. Από αυτό συνεπάγεται ότι οι αναφορές ισχύος, άεργης και ενεργής, είναι συνάρτηση της τάσης δικτύου, της τάσης της ισοδύναμης πηγής και της σύνθετης αντίστασης  $Z$ . Ένας grid-supporting μετατροπέας, δεν χρειάζεται απαραίτητα την ύπαρξη ενός grid-forming μετατροπέα για να έχει ρόλο ρυθμιστή συχνότητας και τάσης σε ένα δίκτυο. Μπορεί εξίσου να τα ρυθμίζει είτε σε διασυνδεδεμένα συστήματα είτε σε απομονωμένη λειτουργία. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω ελεγκτών στατισμού και εικονικών αντιστάσεων εξόδου οι οποίες μεταβάλλουν δυναμικά τις παραμέτρους λειτουργίας τους, ανάλογα με τις συνθήκες δικτύου [49][50].

## **5.5 Μέθοδος συγχρονισμού με το δίκτυο SRF-PLL**

### **5.5.1. Εισαγωγικά**

Όπως έχουμε αναφέρει ήδη αρκετές φορές σε αυτή την εργασία, η όλο και μεγαλύτερη διείσδυση των ΑΠΕ στα υπάρχοντα δίκτυα ηλεκτρισμού επιβάλλει η διείσδυση αυτή να γίνει με τρόπο ομαλό χωρίς να διαταράσσει την ευστάθεια του συστήματος που δημιουργούσαν μέχρι το πρόσφατο παρελθόν συμβατικές μονάδες παραγωγής. Οι κώδικες δικτύων, όπως επίσης προαναφέραμε, επιβάλλουν τις απαιτήσεις που πρέπει να τηρούνται σχετικά με τη ευστάθεια του συστήματος, το συγχρονισμό των ΑΠΕ στο δίκτυο, την ανοχή στη βύθιση τάσης, την ποιότητα ισχύος και τον έλεγχο ενεργής και άεργης ισχύος. Αυτές οι απαιτήσεις του διαχειριστή, συνήθως επιτυγχάνονται μέσω του μετατροπέα από την πλευρά του δικτύου.

Αρκετές μέθοδοι έχουν προταθεί για συγχρονισμό δικτύου και είναι διαθέσιμες στη βιβλιογραφία. Αυτές οι μέθοδοι κυμαίνονται από απλές μέθοδοι που βασίζονται στην ανίχνευση των μηδενικών διελεύσεων της τάσης δικτύου, μέχρι τις πιο προηγμένες μεθόδους με τη μαθηματική επεξεργασία της τάσης του δικτύου με βάση τη μέτρηση PLL (Phase-Locked Loop). Σε ένα αδύναμο δίκτυο με σχετική αστάθεια, ο μετατροπέας θα αντιμετώπιζε δυσκολίες στον να



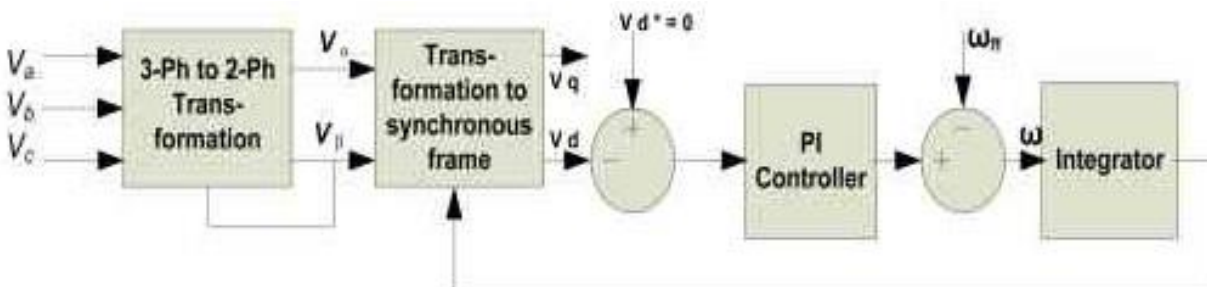
καθορίσει τις τιμές της φάσης και της συχνότητας. Με την ευρέως καθιερωμένη μέθοδο Synchronous Reference Frame (SRF) PLL παρακολουθείται εντεταμένα τόσο τη γωνία φάσης όσο και τη συχνότητα για την δημιουργία ορθών σημάτων αναφοράς ελέγχου για την ορθή λειτουργία του μετατροπέα. Η SRF PLL, αποτελεί μακράν την πιο διαδεδομένη μέθοδο και για αυτό το λόγο θα ασχοληθούμε μόνο με αυτή στην παρούσα εργασία.

Η κεντρική ιδέα του κλειδώματος της φάσης είναι η δημιουργία ενός σήματος του οποίου η γωνία φάσης είναι απόλυτα εξαρτώμενη από τη γωνία ενός σήματος αναφοράς. Ωστόσο, οι αναλογικές λύσεις που παρέχονται από τη τεχνική μέτρησης PLL, είναι συχνά μη ικανοποιητικές, κυρίως διότι η τάση δικτύου φιλτράρεται πριν τον ανιχνευτή φάσης, οπότε είναι αρκετά δύσκολο να αποφευχθεί η εισαγωγή διαφοράς φάσης της πραγματικής κυματομορφής σε σχέση με την φιλτραρισμένη. Για να αποφευχθεί αυτό το φαινόμενο έχουν εισαχθεί αρκετές ψηφιακές τεχνικές φιλτραρίσματος.

Σε αντίθεση, εφαρμογές όπως η Digital Sensor Processor (DSP) έχουν την μεγαλύτερη ανάπτυξη εδώ και δυο δεκαετίες. Η πεπερασμένη κρουστική απόκριση (Finite Impulse Response -FIR) είναι ένα φίλτρο από αυτά που έχουν μεγάλο ενδιαφέρον λόγω της γραμμικής απόκρισης φάσης που οδηγεί με ακρίβεια στην εκτίμηση φάσης. Ωστόσο, οι μέθοδοι οι οποίοι βασίζονται πάνω στη FIR μπορεί άνετα να χαρακτηριστούν δύσκολοι στην κατανόηση και πολύπλοκοι.

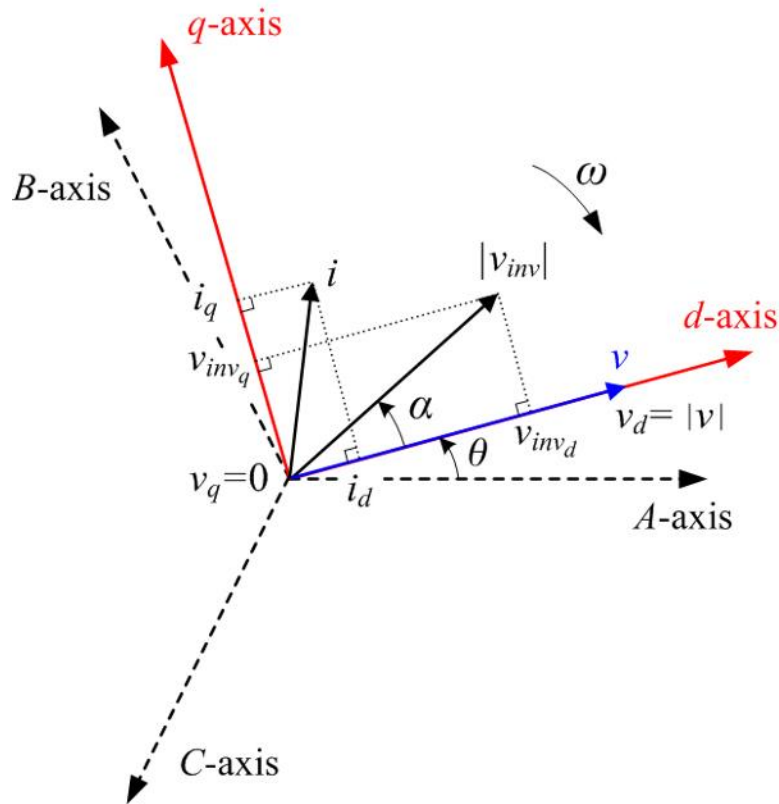
### 5.5.2. Μέθοδος SRF PLL για συγχρονισμό μετατροπέα με το δίκτυο

Η πιο διαδεδομένη τεχνολογία για το συγχρονισμό του μετατροπέα με την τάση του δικτύου είναι η διάταξη SRF-PLL ή αλλιώς PLL [Phase-Locked Loop]. Η βασική δομή του τριφασικού SRF PLL απεικονίζεται στο σχήμα 5.14. Για να ληφθούν οι πληροφορίες φάσης, οι φασικές τάσεις ( $V_a$ ,  $V_b$  και  $V_c$ ) δικτύου μετατρέπονται σε δύο φάσεις ( $V_\alpha$  και  $V_\beta$ ) με τη χρήση του μετασχηματισμού Clark και αυτές οι δύο φάσεις μετασχηματίζονται σαν μεγέθη στο σύγχρονο στρεφόμενο πλαίσιο αναφοράς dq, με τη χρήση του μετασχηματισμού Park. Η γωνία φάσης  $\theta$  παρακολουθείται από ένα σύγχρονα περιστρεφόμενο διάνυσμα τάσης κατά μήκος του άξονα q ή d μέσω ενός PI ελεγκτή.



Σχ 5.14 Βασική δομή ενός τριφασικού SRF PLL

Το σύγχρονα περιστρεφόμενο διάνυσμα τάσης στο χώρο, απεικονίζεται στο σχήμα 5.15.



Σχ 5.15 Σύγχρονα περιστρεφόμενο πλαίσιο αναφοράς

Η μήτρα μετασχηματισμού του διανύσματος της φάσεως της τάσης είναι :

$$T_{qd} = \begin{bmatrix} \sin \theta^* & \cos \theta^* \\ -\cos \theta^* & \sin \theta^* \end{bmatrix} \quad (5.1)$$

Όπου  $\theta$  είναι η εκτιμώμενη γωνία φάσης του PLL συστήματος. Πραγματοποιούμε τη μετατροπή χρησιμοποιώντας την εξίσωση :

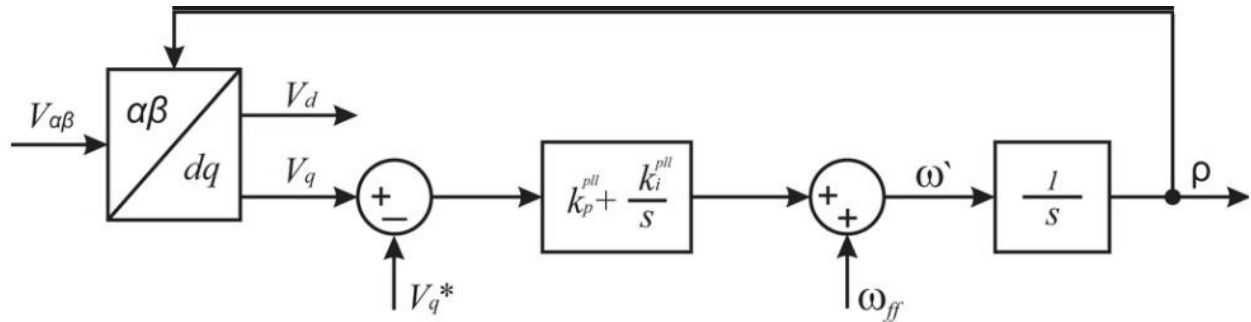
$$V_{qd} = T_{qd} * V_{\alpha\beta} \quad (5.2)$$

$$\begin{bmatrix} V_q \\ V_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin \theta^* & \cos \theta^* \\ -\cos \theta^* & \sin \theta^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_m \sin(\theta) \\ V_m \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (5.3)$$

Με την εφαρμογή του πολλαπλασιασμού πινάκων και μέσω τριγωνομετρικών τύπων παίρνουμε την εξίσωση 5.4

$$\begin{bmatrix} V_q \\ V_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_m \cos(\theta - \theta^*) \\ -V_m \sin(\theta - \theta^*) \end{bmatrix} \quad (5.4)$$

Η γωνία φάσης  $\theta$  εκτιμάται με  $\theta^*$  η οποία είναι πλήρως εξαρτώμενη από την εκτιμώμενη συχνότητα  $\omega^*$ . Η εκτιμώμενη συχνότητα είναι το άθροισμα της εξόδου του ελεγκτή PI και της τροφοδοτούμενης συχνότητας  $\omega_f$ . Το κέρδος του PI ελεγκτή είναι τέτοιο ώστε  $V_d=0$  όπως απεικονίζεται και στο σχήμα 5.16. Αν  $V_d=0$  τότε διάνυσμα τάσης στο χώρο συμπίπτει με τον άξονα q και η εκτιμώμενη συχνότητα  $\omega^*$  κλειδώνει στην ονομαστική συχνότητα του συστήματος  $\omega$  έτσι ώστε η εκτιμώμενη γωνία  $\theta^*$  να είναι ίση με τη γωνία  $\theta$  της φάσης.



Σχ 5.15 Απλοποιημένο σύστημα SRF PLL

Για παράδειγμα, σε περίπτωση που η τάση  $V_q$  είναι μεγαλύτερη του μηδενός, η φάση των τάσεων του δικτύου είναι μεγαλύτερη από την φάση του πλαισίου αναφοράς και προηγείται αυτής. Άρα στην είσοδο του ελεγκτή σε αυτή την περίπτωση το σήμα που δίνεται είναι θετικό και κατά συνέπεια ο ελεγκτής θα αυξήσει την ταχύτητα περιστροφής του πλαισίου, δηλαδή την συχνότητα, με σκοπό να συγχρονιστεί με την τάση του δικτύου. Σε περίπτωση μόνιμης κατάστασης, η είσοδος στον ελεγκτή PI είναι μηδενική, δηλαδή υπάρχει ήδη συγχρονισμός με την τάση του δικτύου.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6<sup>ο</sup>

### «ΕΦΕΔΡΕΙΑ ΙΣΧΥΟΣ ΚΑΙ ΡΥΘΜΙΣΗ ΣΥΧΝΟΤΗΤΑΣ»

#### 6.1 Εισαγωγή

Η αιολική βιομηχανία γνώρισε μεγάλους ρυθμούς ανάπτυξης κατά την τελευταία δεκαετία και οι ανεμογεννήτριες που έχουν εγκατασταθεί σε όλο τον κόσμο, αυξάνονται με συνεχείς ρυθμούς. Καθώς η αιολική ενέργεια γίνεται όλο και πιο διαδεδομένη, υπάρχει αυξανόμενο ενδιαφέρον για τον έλεγχο των ανεμογεννητριών ή γενικώς των αιολικών πάρκων, με τέτοιο τρόπο ώστε να ελαχιστοποιηθεί το κόστος της αιολικής ενέργειας. Αυτό μπορεί να γίνει με τον έλεγχο των γεννητριών ώστε να εξαγάγεται περισσότερη ενέργεια από τον άνεμο και τη μείωση των διαρθρωτικών φορτίων που μπορεί να προκαλέσουν βλάβη στα συστήματα. Αν και η αιολική ενέργεια αποτελεί ένα σχετικά μικρό ποσό της παγκόσμιας παραγωγής ενέργειας, υπάρχουν ορισμένες περιοχές που παράγουν ένα σημαντικό μέρος της ενέργειάς τους από τον άνεμο, όπως η Ισπανία, η Ιρλανδία και η Δανία. Οι αυξανόμενες διεισδύσεις της αιολικής ενέργειας στις χώρες αυτές αλλά και γενικότερα, έχει προκαλέσει το ενδιαφέρον σε ένα νέο κλάδο της έρευνας, με σκοπό τον έλεγχο των ανεμογεννητριών και της ανάπτυξης που επικεντρώνεται στη συμμετοχή αυτών στη ρύθμιση συχνότητας δικτύου.

Οι διαχειριστές των δικτύων απαιτούν συμβατικούς κανονισμούς λειτουργίας ώστε να διατηρηθεί η απαραίτητη ισορροπία μεταξύ της παραγωγής και του φορτίου, το οποίο με τη σειρά του ρυθμίζει τη συχνότητα του δικτύου. Μέχρι πρόσφατα, τα αιολικά πάρκα δεν ήταν μέσα στους σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας όπου παρείχαν πέρα από την παραγωγή ισχύος και υπηρεσίες ρύθμισης του δικτύου. Αυτό καθώς οι περισσότερες σύγχρονες ανεμογεννήτριες εγγενώς δεν παρέχουν οποιαδήποτε από τις υπηρεσίες ρύθμισης δικτύου που είναι διαθέσιμες με συμβατικές γεννήτριες. Τα επίπεδα διείσδυσης των ισχυρών ανέμων, έχουν οδηγήσει τους διαχειριστές των δικτύων μεταφοράς να επιβάλουν νέες απαιτήσεις για τη μελλοντική εγκατάσταση αιολικών πάρκων ώστε να είναι σε θέση να παρέχουν έλεγχο του ισοζυγίου της ισχύος και ρύθμιση της συχνότητας όταν υπάρχει διαθέσιμο άφθονο αιολικό δυναμικό.

Η ανάγκη που έχει γεννηθεί για την χρησιμοποίηση των ανεμογεννητριών στην ρύθμιση της ποιότητας και της ευστάθειας του δικτύου, έχει δώσει κίνητρο για νέες έρευνες στον τομέα της ανάπτυξης συστημάτων ελέγχου. Οι ανεμογεννήτριες δεν παρέχουν εγγενώς αυτές τις υπηρεσίες, αλλά μπορούν να το επιτύχουν αν και εφόσον συνδυαστούν με ένα σύστημα ελέγχου. Οι νέες απαιτήσεις των διαχειριστών του δικτύου έχουν αναγκάσει τους κατασκευαστές ανεμογεννητριών να αναπτύξουν και να εφαρμόσουν μεθοδολογίες ελέγχου για να παρέχουν τη δυνατότητα μεταβολής της ενεργούς ισχύος του αιολικού πάρκου. Οι εν εξελίξη έρευνες επικεντρώνονται στον

καθορισμό της ρύθμισης του άνω ορίου της συχνότητας διότι όπως φαίνεται είναι πιο πιθανό οι ανεμογεννήτριες να είναι πιο αποτελεσματικές στην παροχή τέτοιου είδους υπηρεσιών από ότι οι συμβατικές μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Τα πιθανά οφέλη από τη συνέχιση της ανάπτυξης των μεθόδων αυτών, είναι εξίσου σημαντικά από πρακτικής αλλά και οικονομικής άποψης και για τους διαχειριστές δικτύου αλλά και για τους επενδυτές.

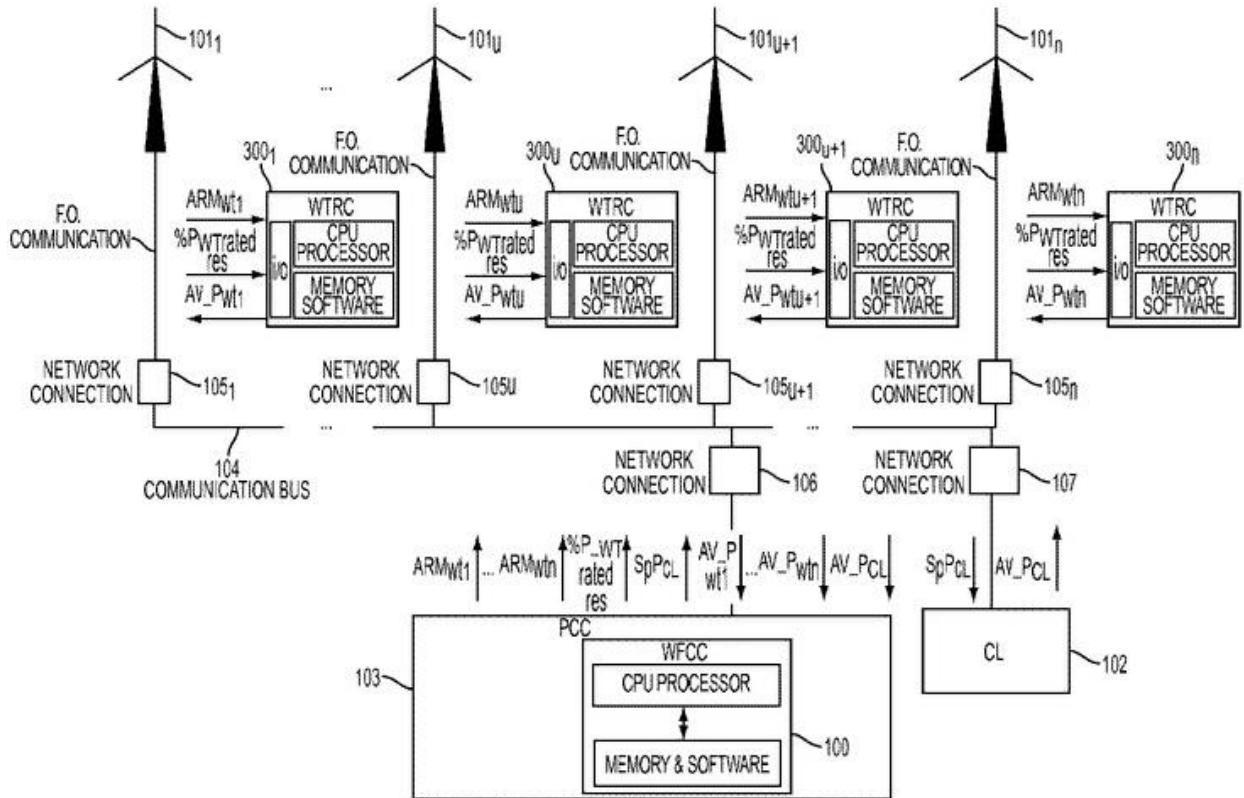
Η δυνατότητα μιας ανεμογεννήτριας να μπορεί να προσφέρει ανά πάσα στιγμή στο σύστημα ενεργός ισχύ, προϋποθέτει να διατηρεί συνεχώς κατά τη λειτουργία της μια ποσότητα ισχύος σαν εφεδρεία. Αυτό συνεπάγεται ότι ο σχεδιασμός λειτουργίας της ξεφεύγει εντελώς από το αρχικό μοντέλο, το οποίο προέβλεπε ασφαλώς τη μέγιστη δυνατή παραγωγή ενεργούς ισχύος μέσω και της τεχνολογίας μέγιστης απολαβής ισχύος MPPT (Maximum Power Point Tracking). Στην βιβλιογραφία, σαν τύποι εφεδρείας αναφέρονται η διατήρηση σταθερής ποσότητας εφεδρείας, η ποσοστιαία εφεδρεία και ο περιορισμός της ισχύος σε ένα καθορισμένο επίπεδο μικρότερο από το διαθέσιμο. Ο περιορισμός αυτός της ισχύος της ανεμογεννήτριας μπορεί να επιτευχθεί είτε μέσω ελέγχου της γωνίας pitch των πτερυγίων είτε με μεταβολή της ταχύτητας περιστροφής του δρομέα σε τιμές διαφορετικές από τη βέλτιστη ταχύτητα που ορίζεται από τον MPPT.

Με τον όρο απόκριση συχνότητας αναφερόμαστε στην δυνατότητα των ανεμογεννητριών να μεταβάλλουν την ενεργό ισχύ βάσει των μεταβολών της συχνότητας του δικτύου. Δεν έχουν όμως όλοι οι τύποι ανεμογεννητριών τη δυνατότητα αυτή. Εξαρτάται από την ηλεκτρική τους δομή και τα ηλεκτρικά τους χαρακτηριστικά. Οι ανεμογεννήτριες όπου για την σύνδεσή τους με το δίκτυο απαιτούν την αποδέσμευσή τους από τις μεταβολές συχνότητας μέσω ηλεκτρονικών μετατροπέων, όπως για παράδειγμα οι ανεμογεννήτριες μεταβλητών στροφών με επαγωγικές γεννήτριες διπλής τροφοδοσίας με τυλιγμένο δρομέα (DFIGs), δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν με την αυτή την ηλεκτρική δομή για την ρύθμιση της συχνότητας δικτύου. Ο λόγος ασφαλώς είναι η μη ανίχνευση των μεταβολών της συχνότητας. Για να μπορέσει να το πετύχει αυτό, θα πρέπει να εφοδιαστεί με συστήματα ελέγχου όπου θα ανιχνεύουν και θα ελέγχουν πιθανές μεταβολές τις συχνότητας. Οι διαδεδомένοι τρόποι ελέγχου της συχνότητας είναι ο έλεγχος στατισμού ή αλλιώς απόκριση ρυθμιστή στροφών και η αδρανειακή απόκριση.

Έστω ότι μια ανεμογεννήτρια διαθέτει τα κατάλληλα συστήματα ελέγχου ώστε να ανιχνεύσει μια μεταβολή στην συχνότητας του δικτύου, αυτό που θα πρέπει να αντιμετωπίσει είναι είτε το φαινόμενο της υπερσυχνότητας είτε της υποσυχνότητας. Στην πρώτη περίπτωση όπου θα χρειαστεί να μειώσει την ενεργό ισχύ της, τα πράγματα είναι εύκολα διότι αυτό επιτυγχάνεται μέσω του κατάλληλου ελέγχου. Το να μπορεί να δώσει όμως παραπάνω ισχύς, συνεπάγεται ότι πρέπει να έχει φροντίσει να υπάρχει η δυναμική για να γίνει κάτι τέτοιο. Να μην αξιοποιείται με λίγα λόγια όλο το αιολικό δυναμικό κρατώντας έτσι ένα τύπο εφεδρείας. Υπάρχει βέβαια και η λύση της αποθήκευσης η οποία όμως δεν αποτελεί αντικείμενο της εργασίας αυτής.

Η διαχείριση της ενεργού ισχύος αλλά και γενικά του συνόλου των χαρακτηριστικών μιας ανεμογεννήτριας, γίνεται σε επίπεδο πάρκου και όχι μεμονωμένα ανά ανεμογεννήτρια. Κύριο εξάρτημα για αυτή τη λειτουργία αποτελεί το κεντρικό σύστημα ελέγχου του αιολικού πάρκου. Σε αυτό φτάνουν όλα τα σήματα από το δίκτυο, το διαχειριστή και το αιολικό πάρκο. Στην ουσία

αποτελεί το μυαλό του συστήματος. Στο σχήμα 6.1 απεικονίζεται ένα τέτοιο σύστημα ελέγχου στο οποίο διακρίνονται η κεντρική μονάδα ελέγχου στην οποία φτάνουν όλα τα σήματα από το διαχειριστή και το αιολικό πάρκο, οι επιμέρους μονάδες ελέγχου της εκάστοτε ανεμογεννήτριας και η γραμμή επικοινωνίας (bus) μέσω της οποίας γίνεται η δοσοληψία των σημάτων αναφοράς. Η τηλεπικοινωνία αυτή μεταξύ της κεντρικής μονάδας και των επιμέρους μονάδων του διαχειριστή και των ανεμογεννητριών, αποτελεί ένα σύστημα SCADA.



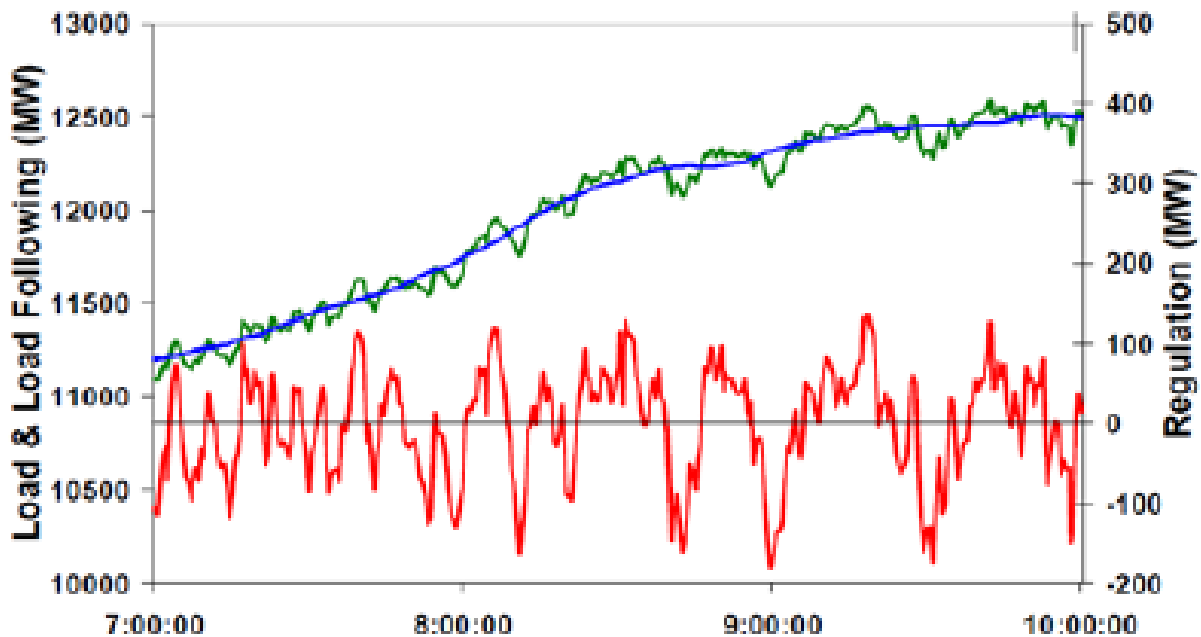
**Σχ 6.1** Σύστημα ελέγχου στο οποίο διακρίνονται η κεντρική μονάδα ελέγχου οι επιμέρους μονάδες ελέγχου της εκάστοτε ανεμογεννήτριας και η γραμμή επικοινωνίας (Bus).

Η διαχείριση τώρα της απόκρισης συχνότητας πέρα από κεντρικό επίπεδο, δηλαδή σε επίπεδο αιολικού πάρκου, μπορεί να γίνει και σε επίπεδο ανεμογεννήτριας. Κάθε περίπτωση έχει θετικά και αρνητικά στοιχεία. Στην πράξη όμως αυτό που καθορίζει το επίπεδο στο οποίο γίνεται η διαχείριση είναι ο διαχειριστής δικτύου κατά κύριο ρόλο και το είδος της απόκρισης που επιθυμούμε να πετύχουμε. Οι απαιτήσεις του διαχειριστή όπως έχουμε προαναφέρει σε προηγούμενο κεφάλαιο, εφαρμόζονται στο κοινό σημείο σύνδεσης του πάρκου με το ηπειρωτικό δίκτυο και για αυτό το λόγο, αυτή είναι και η μέθοδος που ακολουθείται συνήθως [51].

## 6.2 Γενικά περί απόκριση συχνότητας

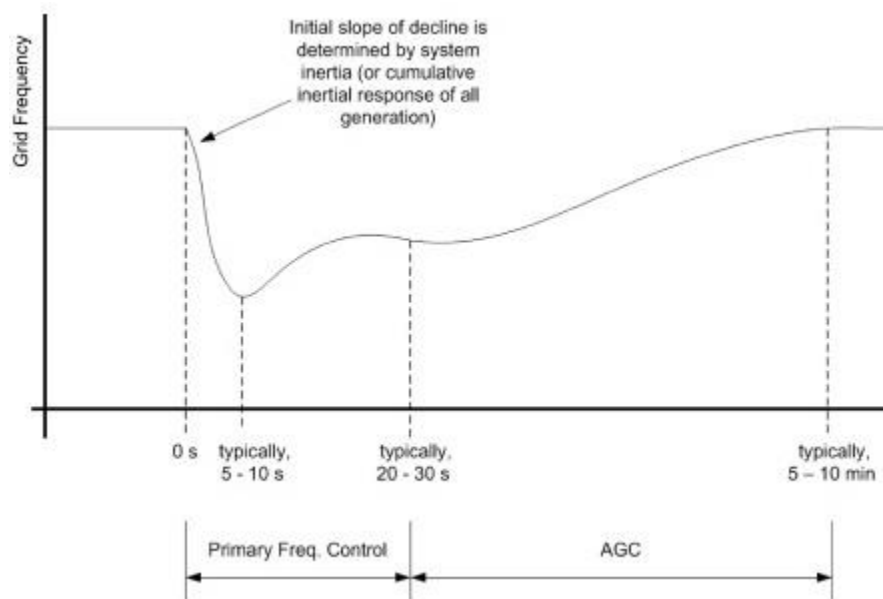
### 6.2.1. Βασικές αρχές ρύθμισης συχνότητας

Προκειμένου να διατηρηθεί στο δίκτυο μία επιθυμητή συχνότητα, είναι απαραίτητο η συνολική ενέργεια που παράγεται να είναι ίση με την ισχύ που καταναλώνεται από τα φορτία του συστήματος και από τις απώλειες στο δίκτυο. Αυτή η ισορροπία πρέπει να διατηρηθεί για την αντιμετώπιση των διακυμάνσεων του φορτίου και την ανεξέλεγκτη παραγωγή. Αν γενικά η παραγωγή υπερβαίνει το φορτίο, τότε η συχνότητα του δικτύου θα ανεβεί, ενώ εάν το συνολικό φορτίο υπερβαίνει την παραγωγή, τότε η συχνότητα του δικτύου θα πέσει. Ως εκ τούτου, η ρύθμιση που παρέχεται από τους συμβατικούς σταθμούς παραγωγής είναι διαθέσιμη από τους διαχειριστές δικτύου για να αντισταθμίσουν διακυμάνσεις και απρογραμμάτιστα γεγονότα όπως η απώλεια παραγωγής. Τέτοιους συμβατικούς σταθμούς αποτελούν οι ατμοηλεκτρική σταθμοί, Θερμικοί Σταθμοί με Μηχανές Εσωτερικής Καύσης (ΜΕΚ) και η ενέργεια που προέρχεται από αποθήκευση. Στο σχήμα 6.2 υπάρχει μια απεικόνιση της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας του ηλεκτρικού δικτύου (μπλε), του φορτίου (πράσινο) και του κανονισμού που απαιτείται (κόκκινο) για να τηρείται το ισοζύγιο ενέργειας.



Σχ 6.2 Απεικόνιση της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας του ηλεκτρικού δικτύου (μπλε), του φορτίου (πράσινο) και του κανονισμού που απαιτείται (κόκκινο) για να τηρείται το ισοζύγιο ενέργειας.

Γενικά, η απόκριση συχνότητας σε μεγάλες διαταραχές χωρίζεται σε δύο ξεχωριστά καθεστάτα ελέγχου, στην αδρανειακή, στην πρωτογενή και δευτερογενή απόκριση συχνότητας ή αυτόματη ρύθμιση παραγωγής (AGC). Αυτές οι ταξινομήσεις βασίζονται σε μεθόδους για την παροχή απόκρισης συχνότητας από τις συμβατικές γεννήτριες όπως η σύγχρονη γεννήτρια αδράνειας για αδρανειακή αντίδραση, οι γεννήτριες με ρυθμιστή στροφών για την πρωτογενή ανταπόκριση και αυτών που ο έλεγχός τους ανταποκρίνεται στις απαιτήσεις του διαχειριστή δικτύου για αυτόματη ρύθμιση παραγωγής (AGC). Στο σχήμα 6.3 απεικονίζονται σχηματικά τα όρια της αδρανειακής απόκρισης συχνότητας και της δευτερογενούς απόκρισης συχνότητας ή αυτόματης ρύθμισης παραγωγής (AGC).



**Σχ 6.3** Σχηματικά τα όρια της αδρανειακής απόκρισης συχνότητας και της δευτερογενούς απόκρισης συχνότητας ή αυτόματης ρύθμισης παραγωγής (AGC).

Η αδρανειακή αντίδραση ακολουθεί αμέσως μετά την εκδήλωση της μεταβολής της συχνότητας, με τον κύριο έλεγχο να εμφανίζεται συνήθως εντός του χρονικού πλαισίου των 20-30 δευτερόλεπτων και του δευτεροβάθμιου ελέγχου να εμφανίζεται εντός του χρονικού πλαισίου των 5-10 λεπτών. Η αδρανειακή αντίδραση καθορίζεται από τη φυσική αδράνεια των μεγάλων σύγχρονων γεννητριών, καθώς επιβραδύνουν ως απάντηση στην αυξημένη ζήτηση για ηλεκτρικό φορτίο κατά τη διάρκεια της απώλειας του συνολικού δυναμικού παραγωγής του δικτύου. Η σταθεροποίηση της συχνότητας εμφανίζεται στο δεύτερο χρονικό πλαίσιο όπου λαμβάνει χώρα η αντίδραση του ρυθμιστή στροφών ο οποίος όπως είπαμε ελέγχεται άμεσα από τον διαχειριστή δικτύου ο οποίος ενεργεί βάσει των μεταβολών που λαμβάνουν χώρα στο δίκτυο εκείνη τη στιγμή.



Η τελική ανταπόκριση στην οποία η συχνότητα αποκαθίσταται στην ονομαστική, ονομάζεται Αυτόματη Ρύθμιση Παραγωγή (AGC) και γίνεται από μεμονωμένους σταθμούς παραγωγής όπου ρυθμίζουν τα επίπεδα ισχύος τους για την αντιμετώπιση των αιτημάτων από το διαχειριστή του δικτύου [52].

### **6.2.2. Κίνητρα ελέγχου ενεργής ισχύος από ανεμογεννήτριες**

Έλεγχος ενεργής ισχύος (APC) είναι ο σκόπιμος έλεγχος της πραγματικής ισχύος εξόδου σε επίπεδο ανεμογεννήτριας ή αιολικού πάρκου, προκειμένου να βοηθήσει στην εξισορρόπηση της συνολικής ενέργειας που παράγεται στο δίκτυο με τη συνολική ισχύ που καταναλώνεται. Η ενεργός ισχύς είναι εκείνο το τμήμα της ροής ενέργειας το οποίο οδηγεί σε μια καθαρή μεταφορά ενέργειας και είναι αντίθετη με την άεργο ισχύ η οποία αντιστρέφει την κατεύθυνση πάνω από κάθε κύκλο, με μηδενική μεταφορά καθαρής ενέργειας. Ενώ άεργος ισχύς μπορεί να ελεγχθεί μέσω των ηλεκτρονικών ισχύος της γεννήτριας, ακόμα και όταν η γεννήτρια είναι εκτός παραγωγής, η πραγματική ισχύς ρυθμίζεται αλλάζοντας το πραγματικό ποσό της ισχύος που παρέχεται στο δίκτυο. Με τον τρόπο αυτό, ο ενεργός έλεγχος ισχύος (APC), μπορεί μέσω της αιολικής ενέργειας να παρέχει σημαντικές βοηθητικές υπηρεσίες στο ηλεκτρικό δίκτυο και να βοηθήσει στη διατήρηση της συχνότητας.

Όπως έχουμε αναφέρει και προγενέστερα, οι ανεμογεννήτριες δεν παρείχαν στο παρελθόν υπηρεσίες APC. Οι περισσότερες σύγχρονες γεννήτριες ανεμογεννητριών είναι αποσυνδεδεμένες από την συχνότητα του δικτύου, μέσω ηλεκτρονικών ισχύος. Ως εκ τούτου, η αδράνεια της γεννήτριας και η φτερωτή, δεν συμμετέχουν αυτομάτως στην αδρανειακή αντίδραση του δικτύου όπως πράττουν παραδοσιακά οι σύγχρονες γεννήτριες. Λόγω της αποσύνδεσης αυτής, η μεταβολή της συχνότητας δικτύου δεν προκαλεί αυτόματη ενεργοποίηση του ρυθμιστή στροφών που είναι εγκατεστημένος στις συμβατικές γεννήτριες.

Κατά συνέπεια, υπάρχουν δύο βασικά κίνητρα για να παρέχεται από τις ανεμογεννήτριες έλεγχος ενεργούς ισχύος. Το πρώτο κίνητρο είναι ότι η ρύθμιση είναι απαραίτητη για τη διατήρηση της συχνότητας δικτύου και επειδή η διείσδυση αιολικής ενέργειας την αυξάνει, με αυτό το τρόπο μπορεί να παρέχει υποστήριξη στη διατήρηση της απαιτούμενης ισορροπίας. Μια μελέτη του Lawrence Berkeley National Laboratory, περιγράφει μια πρόσφατη μείωση απόκρισης συχνότητας του δικτύου και δηλώνει ότι αν και η αύξηση της διείσδυσης του ανέμου δεν είναι η αιτία, η απόκριση συχνότητας θα μπορούσε να βελτιωθεί μέσω της αυξημένης χρήσης των δυνατοτήτων ελέγχου συχνότητας των ανεμογεννητριών [53]. Επιπλέον, μια πρόσφατη μελέτη από την IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), διαπίστωσε ότι αν και η χαμηλή έως μέτρια διείσδυση αιολικής ενέργειας (έως 20% της ετήσιας ζήτησης) δεν δημιουργεί κανένα σοβαρό τεχνικό εμπόδιο, τα υψηλότερα επίπεδα θα μπορούσαν να απαιτήσουν πρόσθετες επιλογές ευελιξίας, όπως η μεγαλύτερη χρήση της αιολικής εφεδρείας και ο έλεγχος της παραγωγής [54]. Καθώς αυξάνεται η διείσδυση της αιολικής ενέργειας, είναι δυνητικά αδύνατη η αποφυγή

ρύθμισης της παροχής της ενέργειας των γεννητριών. Σε πολύ υψηλά επίπεδα διείσδυσης αιολικής ενέργειας, καθίσταται αναγκαία για τις ανεμογεννήτριες η παροχή αυτών των υπηρεσιών, όπως ορίζουν αρκετοί από τους ευρωπαϊκούς φορείς δικτύου.

Σε χώρες και περιοχές με σχετικά απομονωμένα δίκτυα και σχετικά μεγάλα επίπεδα διείσδυσης αιολικής ενέργειας, η συμμετοχή στη ρύθμιση συχνότητας δικτύου από τις ανεμογεννήτριες και τα αιολικά πάρκα γενικότερα είναι ζωτικής σημασίας. Μια έκθεση του 2010, δείχνει ότι η αντικατάσταση των συμβατικών πηγών παραγωγής με ένα μεγάλο ποσοστό αιολικής ενέργειας δεν είναι σε θέση να ελέγξουν εύκολα την ενεργό ισχύ και μπορεί δυνητικά να έχουν σημαντικές επιπτώσεις στη σταθερότητα της συχνότητας δικτύου [55]. Αυτή η επίδραση είναι έντονη σε νησιωτικά συμπλέγματα με χαμηλά επίπεδα διασύνδεσης με άλλα δίκτυα, όπως τα ελληνικά νησιά. Η αναγκαιότητα της συμμετοχής στη ρύθμιση συχνότητας δικτύου των ανεμογεννητριών αντικατοπτρίζεται στις απαιτήσεις και τους κανονισμούς που θέτουν σε αιολικές εγκαταστάσεις οι διαχειριστές δικτύου σε περιοχές με υψηλά επίπεδα αιολικής διείσδυσης ή σε σχετικά απομονωμένα δίκτυα. Για παράδειγμα, στη Δανία οι διαχειριστές απαιτούν από τις εγκαταστάσεις αιολικής ενέργειας να είναι σε θέση να ακολουθούν μια εφεδρική ισχύ offset και να παρακολουθούν τα επίπεδα ισχύος αναφοράς που δημιουργούνται από το διαχειριστή του συστήματος [27].

Το δεύτερο κίνητρο για ενεργό τον έλεγχο της ισχύος από ανεμογεννήτριες είναι η δυνατότητα να αυξηθεί η κερδοφορία των εγκαταστάσεων αιολικής ενέργειας, επιτρέποντας τη συμμετοχή σε βοηθητικές αγορές υπηρεσιών. Μια πρόσφατη μελέτη από τη Kirby δείχνει μια δυναμική για τις εγκαταστάσεις αιολικής ενέργειας να αυξήσουν τα κέρδη τους με την παροχή υπηρεσιών ρύθμισης δικτύου [30].

### **6.2.3. Αιολική βιομηχανία και έλεγχος ενεργούς ισχύος**

Οι διάφορες απαιτήσεις για ενεργό έλεγχο της ισχύος που ορίζονται από τους διαχειριστές του δικτύου, δίνουν κίνητρο τεχνολογικής ανάπτυξης από στους κατασκευαστές ανεμογεννητριών. Οι νέες τεχνολογίες λαμβάνουν χώρα σε δύο σημεία, στην ανεμογεννήτρια και στη διαχείριση σαν αιολικό πάρκο γενικότερα. Οι τεχνολογίες που παρέχουν αδρανειακή απόκριση στα πρωτοβάθμιας και δευτεροβάθμιας κλίμακας φαινόμενα, έχουν αναπτυχθεί σε επίπεδο γεννήτριας. Για παράδειγμα, η Siemens έχει κατοχυρώσει με δίπλωμα ευρεσιτεχνίας μια μέθοδο για τη δυναμική τροποποίηση ενεργούς ισχύος εξόδου μιας ανεμογεννήτριας για την αντιμετώπιση αποκλίσεων στη συχνότητα του δικτύου σε αποκρίσεις χρόνου παρόμοιες με τις αδρανειακές και πρωτογενείς αποκρίσεις [60].

Οι μεθοδολογίες για την παρακολούθηση της διαθέσιμης ισχύος του άνεμου και η διατήρηση μιας συγκεκριμένης ποσότητας ενεργού ισχύος σαν απόθεμα είναι ευρεσιτεχνία τόσο της Mitsubishi και όσο και της Vestas. Η συμμετοχή στην πρωτοβάθμια και δευτεροβάθμια ρύθμιση επιτυγχάνεται με τον έλεγχο του βήματος ώστε να καθοριστεί ένα ποσοστό της

διαθέσιμης ισχύος ως ενεργό απόθεμα ενέργειας, η οποία μπορεί να αλλάξει προς τα πάνω ή προς τα κάτω, ανάλογα με τις διακυμάνσεις της, την συχνότητα του δικτύου.

Μέθοδοι για τον έλεγχο ενεργούς ισχύος από ολόκληρα πάρκα αιολικής ενέργειας, έχουν επίσης αναπτυχθεί. Ελέγχοντας την ενεργό ισχύ σε επίπεδο αιολικού πάρκου προσφέρουμε ταχύτερη απόκριση και ανάκτηση στις αποκλίσεις συχνότητας δικτύου από ό, τι μπορεί να επιτευχθεί με την εκτέλεση ενεργού ελέγχου ισχύος σε μεμονωμένες ανεμογεννήτριες. Αυτές οι τεχνολογικές μέθοδοι έχουν επικεντρωθεί στην παρακολούθηση και πρόβλεψη της διαθέσιμης ισχύος του άνεμου, έτσι ώστε η συνολική ενεργός ισχύος από το αιολικό πάρκο να είναι ελεγχόμενη. Επιπλέον, αυτές οι μέθοδοι, υποστηρίζουν την ανάπτυξη ευφυών στρατηγικών ώστε η ισχύς ανέμου, η παραγόμενη ισχύς και η συχνότητα, να επικοινωνείται μεταξύ των επιμέρους ανεμογεννητριών. Ένα παράδειγμα μιας τέτοιας στρατηγικής, αποτελεί η περίπτωση όπου στο σύνολο των ανεμογεννητριών ενός αιολικού πάρκου, ένα μέρος χρησιμοποιείται ως παρατηρητής ώστε να εκτιμάται η διαθέσιμη ισχύς και η συνολική ενεργός ισχύς εξόδου της εγκατάστασης να ορίζεται σε ποσοστό της εκτιμώμενης διαθέσιμης ισχύος.

Δύο Δανέζικες υπεράκτιες εγκαταστάσεις αιολικών πάρκων (Horns Rev και Nysted), είναι εφοδιασμένες με ενεργά συστήματα ελέγχου ισχύος, ικανά να ανταποκρίνονται στις εντολές των σημάτων αναφοράς του διαχειριστή και αυτόματα να ανταποκρίνονται στις διακυμάνσεις της συχνότητας του δικτύου. Στην βιβλιογραφία υπάρχει πλούσια ύλη με τεχνολογίες που έχουν σχεδιαστεί για να ανταποκριθούν στις απαιτήσεις των επιδόσεων που ορίζουν οι διαχειριστές δικτύων και επιτρέπουν τον έλεγχο της εξόδου της ενεργού ισχύος. Φαίνεται ότι τα τρέχοντα πρότυπα της βιομηχανίας για τη διατήρηση ενός σημείου αναφοράς της ενεργού ισχύος, πραγματοποιούνται με τη χρήση ελέγχου του βήματος με ένα σχετικά αργό ρυθμό, αφήνοντας την αδρανειακή και πρωτογενή απόκριση, να αντιμετωπίζονται με τον έλεγχο της γεννήτριας μέσω των ηλεκτρονικών ισχύος [61][55].

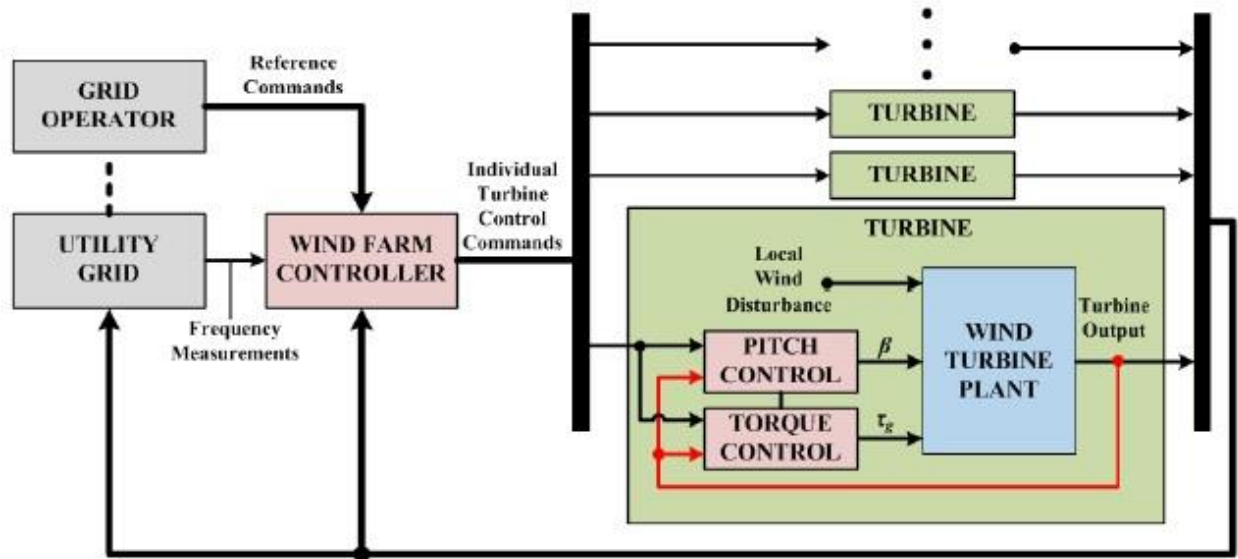
## **6.3 Ρύθμιση συχνότητας δικτύου μέσω ανεμογεννητριών**

### **6.3.1. Γενικά**

Σε αυτή την ενότητα γίνεται μια παρουσίαση της υπάρχουσας εφαρμογής του ελέγχου ενεργούς ισχύος (APC) μέσω ανεμογεννητριών καθώς και της εν εξέλιξη έρευνας που γίνεται σήμερα πάνω σε αυτό.

Τα δύο αυτά θέματα, συνοψίζονται σε ένα επειδή οι τρέχουσες μέθοδοι εφαρμογής της APC δεν δηλώνεται ρητά από τους κατασκευαστές ανεμογεννητριών. Το σχήμα 6.4 δείχνει ένα παράδειγμα ενός προτύπου διασύνδεσης ενός ελεγκτή εγκατάστασης αιολικής ενέργειας με το διαχειριστή συστήματος μεταφοράς ή τον φορέα εκμετάλλευσης του δικτύου, καθώς και τις επιμέρους ανεμογεννήτριες. Η κάθε ανεμογεννήτρια μπορεί να ακολουθεί το σήμα αναφοράς του ελεγκτή του αιολικού πάρκου, μεταβάλλοντας την δεδομένη ροπή της ανεμογεννήτριας εκείνη

την στιγμή καθώς και την γωνία βήματος των πτερυγίων (Pitch control). Η αύξηση της απόδοσης ενός συστήματος ελέγχου μιας ανεμογεννήτριας, μπορεί να είναι περίπλοκη λόγω ενός αριθμού παραγόντων. Σε αυτούς συμπεριλαμβάνεται η σύζευξη με τους υπάρχοντες βρόχους ελέγχου, η επιθυμία να περιοριστεί η χρήση της ενεργοποίησης των συστημάτων ελέγχου της ανεμογεννήτριας (περισσότερη χρήση σημαίνει περισσότερες φθορές, περισσότερες βλάβες και μεγαλύτερο κόστος συντήρησης) και των δομικών καταπονήσεων που επέρχονται σε αυτή, καθώς και η μεταβλητότητα του ανέμου.



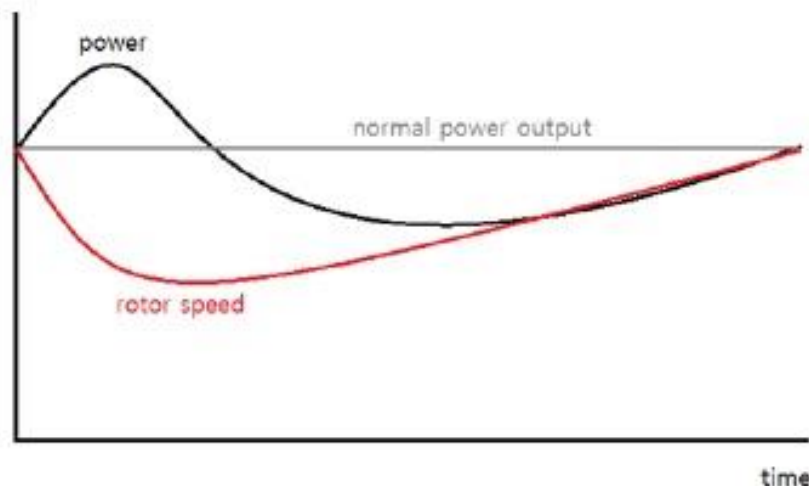
**Σχ 6.4** Μπλοκ διάγραμμα των μερών του συστήματος ελέγχου ενεργούς ισχύος σε ένα αιολικό πάρκο. Ο ελεγκτής της αιολικής μονάδας μπορεί να μετρήσει τη συχνότητα του δικτύου και να λαμβάνει σήματα ελέγχου ισχύος από τον φορέα εκμετάλλευσης του δικτύου και στη συνέχεια με τη σειρά του να παράγει μια αναφορά ισχύος για κάθε ανεμογεννήτρια του αιολικού πάρκου.

Αρκετοί ευρωπαϊκοί διαχειριστές δικτύων έχουν συμπεριλάβει τελευταία στους κώδικες την απαίτηση τα νέα αιολικά πάρκα να παρέχουν αδρανειακή απόκριση εξομοίωσης στις μεταβολές της συχνότητας και να εντοπίζει είτε τη δέλτα, είτε την απόλυτη τιμή του σήματος αναφοράς με μικρή απόκλιση. Οι νέες αυτές απαιτήσεις έχουν οδηγήσει τους κατασκευαστές ανεμογεννητριών να πετύχουν δύο στόχους στον έλεγχο της ενεργούς ισχύος. Ο πρώτος είναι ο «αυτόματος έλεγχος της συχνότητας», ο οποίος έχει σχεδιαστεί για να μιμηθεί την αδρανειακή αντίδραση των συμβατικών γεννητριών αμέσως μετά από ένα συμβάν μεταβολής της συχνότητας, σε περιορισμένο χρονικό όριο. Ο δεύτερος στόχος των ελεγκτών APC ικανοποιείται με την παρακολούθηση του σήματος αναφοράς ισχύος από το διαχειριστή σε μεγαλύτερες χρονικές κλίμακες. Οι ελάχιστες αυτές απαιτήσεις έχουν εκπληρωθεί από τους κατασκευαστές αλλά η συνεχιζόμενη έρευνα που πραγματοποιείται έχει ως στόχο τη βελτίωση της εφαρμογής αυτών των

ελεγκτών και τον προσδιορισμό της έκτασης των δυνατοτήτων ρύθμισης που μπορεί να παρέχουν οι ανεμογεννήτριες. Αυτές οι περιοχές της εν εξελίξει έρευνας, περιλαμβάνουν παραλλαγές των μεθόδων ελέγχου για την εφαρμογή της αδρανειακής ή της δευτερογενούς απόκρισης συχνότητας ή αυτόματης ρύθμισης παραγωγής (AGC). Ακόμη, περιλαμβάνουν προηγμένους ελεγκτές που συνδυάζουν έλεγχο ροπής και έλεγχο γωνίας βήματος, για την υλοποίηση του πρωτεύοντος ελέγχου κατά τη διάρκεια εκδηλώσεων μεταβολής της συχνότητας και της ανάλυσης των επιπτώσεων στην διάρκεια ζωής της ανεμογεννήτριας που προκαλούνται από την εφαρμογή ενεργών στρατηγικών ελέγχου της ισχύος. εδώ

### 6.3.2. Αδρανειακή και πρωτογενής απόκριση

Η αδρανειακή απόκριση εξομάλυνσης της συχνότητας, η οποία επίσης αναφέρεται ως αδρανειακός έλεγχος ή κινητική ενέργεια ελέγχου, τώρα απαιτείται από αρκετούς ευρωπαϊκούς κώδικες για να συνεισφέρει στη ρύθμιση της συχνότητας του δικτύου όταν υπάρχουν μεταβολές, όπως περιγράφεται και στο σχήμα 6.3. Η παρούσα απόκριση υλοποιείται σε επίπεδο ανεμογεννήτριας ή αιολικού πάρκου μετρώντας τη συχνότητα του ηλεκτρικού δικτύου και χρησιμοποιώντας ένα αλγόριθμο ελέγχου μεταβάλλει την ισχύ εξόδου για να αντισταθμίσει τις αποκλίσεις στην συχνότητα του δικτύου. Ο αδρανειακός έλεγχος γίνεται σε σύντομο χρονικό διάστημα συνήθως από τον έλεγχο της ροπής της γεννήτριας, έτσι μιμείται ο αδρανειακός τρόπος απόκρισης μιας συμβατικής γεννήτριας. Οι ανεμογεννήτριες έχουν την ικανότητα να παρέχουν περισσότερη αδρανειακή απόκριση από τις συμβατικές μονάδες παραγωγής λόγω της ταχύτητας με την οποία τα ηλεκτρονικά ισχύος ενεργοποιούν τις μεταβολές της ροπής μέσω των σημάτων αναφοράς.



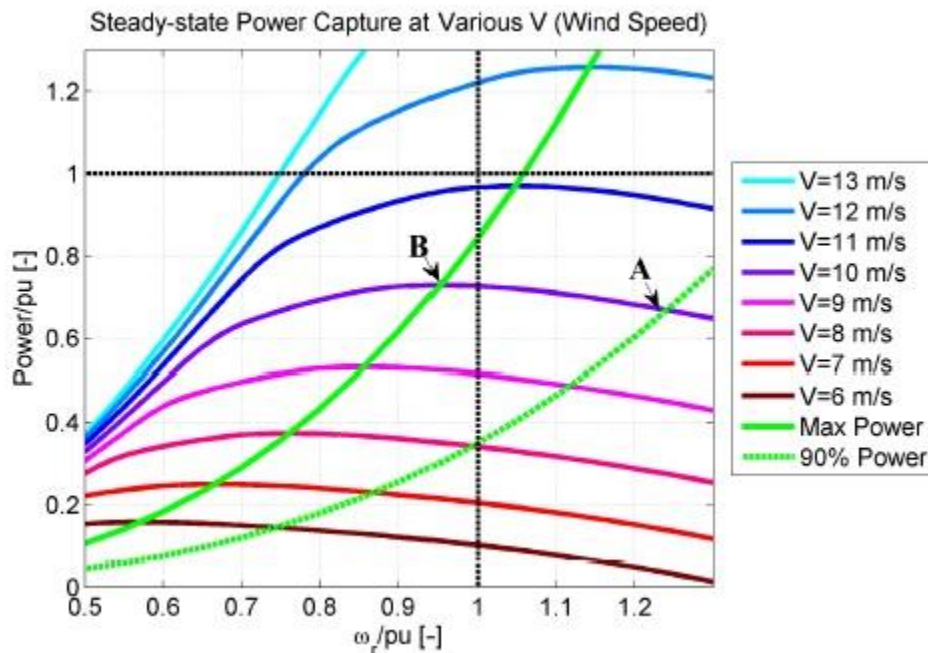
*Σχ 6.5 Αδρανειακή εξομείωση απόκρισης που δείχνει απότομη αύξηση ηλεκτρικής ενέργειας σε μακρά περίοδο ανάρρωσης.*

Η αδρανειακή απόκριση συνήθως παρέχει γρήγορες αυξήσεις ή μειώσεις στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μέσω ξαφνικών αυξήσεων ή μειώσεων της ροπής της γεννήτριας. Είναι πιο πιθανό σενάριο να αστοχήσει μια συμβατική γεννήτρια από το να πέσει ένα μεγάλο φορτίο από το δίκτυο και για αυτό το σενάριο που εξετάζεται σε αυτή την ενότητα είναι η ανάγκη για αύξηση της ισχύος της ανεμογεννήτριας και του πάρκου γενικότερα. Μια γρήγορη αύξηση στη ροπή της γεννήτριας θα προκαλέσει επιβράδυνση του ρότορα ενώ η ισχύς που θα παράγεται θα είναι πάνω από την συνήθη σε τέτοιες καταστάσεις, όπως φαίνεται στο σχήμα 6.5. Το μειονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι ο κίνδυνος της απώλειας στήριξης της ανεμογεννήτριας και προστιθέμενη φόρτωση για τα μηχανικά της μέρη. Αυτού του είδους η απόκριση χρησιμοποιείται για να αυξήσει την ισχύ βραχυπρόθεσμα και συχνά απαιτεί μια περίοδο ανάκτησης, όπως επίσης απεικονίζεται στο σχήμα 6.5. Η περίοδος ανάκτησης μπορεί να είναι προβληματική, δεδομένου ότι μπορεί να προκαλέσει στην ανεμογεννήτρια μείωση της ισχύος μετά την αδρανειακή απόκριση, η οποία θα μπορούσε να επηρεάσει εξίσου αρνητικά την συχνότητα του δικτύου. Ωστόσο, μια τελευταία έρευνα δείχνει ότι η αδρανειακή απόκριση από ανεμογεννήτριες μπορεί να είναι πιο αποτελεσματική από την αδρανειακή απόκριση από τις συμβατικές γεννήτριες στα εργοστάσια ηλεκτροπαραγωγής με καύση άνθρακα, τα οποία καλύπτουν ένα ευρύτερο φάσμα συχνοτήτων [62].

Υπάρχουν αρκετές προσεγγίσεις ώστε να εξαχθεί πρόσθετη ισχύ από τον ρότορα μιας γεννήτριας. Η προαναφερθείσα, όπου η άμεση απόκριση στην πτώση της τιμής της συχνότητας στο δίκτυο, προκαλεί επιβράδυνση αυτού και ονομάζεται συνήθως «Κινητική Ενέργεια Ελέγχου I (KEC I). Μια παραλλαγή αυτής όπου ονομάζεται «Κινητική Ενέργεια Ελέγχου II (KEC II), επιτρέπει στο ρότορα να επιταχύνει αρχικά προτού πιάσει την υψηλότερη τιμή της ροπής του. Το όφελος της KEC II είναι ότι η ισχύς της ανεμογεννήτριας και η ταχύτητα του ρότορα δεν πέφτουν κάτω από την συνήθη τιμή τους καθ' όλη την διάρκεια της αποκατάστασης της διαταραχής, εξαλείφοντας με αυτό το τρόπο την περίοδο αποκατάστασης. Ωστόσο, σε περίπτωση που η ανεμογεννήτρια λειτουργεί με την ονομαστική ισχύ και ενεργεί κατά αυτόν το τρόπο, μπορεί να προκληθεί μια προσωρινή μεν αλλά ανεπιθύμητη δε, υψηλή ταχύτητα περιστροφής. Ένα άλλο όχι και τόσο θετικό στοιχείο αυτής προσέγγισης είναι ότι η ταχύτητα απόκρισης μπορεί να μην είναι τόσο μεγάλη λόγω του υψηλού ρυθμού πτώσης της συχνότητας και του μεγέθους αυτής. Σε αυτή την περίπτωση μια προσέγγιση με την KEC I θα είχε λιγότερα αρνητικά αποτελέσματα [63].

Ενώ τα συμβατικά συστήματα με σύγχρονες γεννήτριες παρέχουν αυτόματα αδρανειακό έλεγχο και έχουν ρυθμιστή στροφών για πρωτογενή έλεγχο, η διάκριση μεταξύ της αδρανειακής και της πρωτογενούς απόκρισης είναι λιγότερο σαφής για τις ανεμογεννήτριες, χωρίς ρυθμιστή στροφών. Ενώ υπάρχουν αρκετοί μέθοδοι με τις οποίες επιτυγχάνεται πρωτογενούς απόκριση, δεν περιγράφονται πουθενά με λεπτομέρειες με αποτέλεσμα ο έλεγχος ενεργούς ισχύος να αποτελεί μια συνεχή περιοχή της έρευνας. Μία άλλη μέθοδος παραγωγής πρόσθετης ισχύος από την αδράνεια του ρότορα η οποία παράλληλα επιτρέπει την πρωτογενή απόκριση, αποτελεί η λειτουργία της ανεμογεννήτριας σε υψηλότερες στροφές από τις βέλτιστες για να διατηρείται ένα απόθεμα της διαθέσιμης ισχύος της αιολικής ενέργειας. Έτσι σε ένα φαινόμενο υποσυχνότητας του δικτύου, ο ελεγκτής αυξάνει τη ροπή του ρότορα μειώνοντας έτσι της στροφές της

ανεμογεννήτριας στο επιθυμητό επίπεδο σχέσης παραγωγής αιχμής και ταχύτητας ανεμογεννήτριας. Επομένως, οι διαχειριστές εφαρμόζουν αδρανειακή απόκριση και πρωτογενή απόκριση, παράγοντας περισσότερο ενεργός ισχύς για την αντιμετώπιση της προς ανίχνευσης υποσυχνότητας. Αυτό μπορεί να φανεί στο σχήμα 6.6, όπου αν και έχουν υποστεί μείωση κατά 10% στα 10 m / s ταχύτητα ανέμου και με τάση να φθάσει την ονομαστική ισχύ, η ανεμογεννήτρια θα ακολουθήσει μια πορεία από το σημείο A στο σημείο B. Ο έλεγχος της γωνίας βήματος (Pitch control) επίσης ενεργοποιείται για να μειώσει τις στροφές της ανεμογεννήτριας και συνεισφέρει στη πρωτεύον απόκριση. Όμως, δεν υπάρχει ζήτημα σταθερότητας που να προκύπτει από την αλληλεπίδραση μεταξύ της ροπής και των συνεχόμενων ελέγχων του βήματος της γωνίας, σε περιπτώσεις που τα φαινόμενα λαμβάνουν χώρα υπό σταθερό και ομοιόμορφο αιολικό δυναμικό. Στο σχήμα 6.6, η γραμμή της «Max Power» είναι η τροχιά της ανεμογεννήτριας που επιτυγχάνει μέγιστη σύλληψη ισχύος για κάθε ταχύτητα του ανέμου και η γραμμή «90% Power» είναι η τροχιά που αφήνει το 10% του αιολικού δυναμικού αδιάθετο μέσω του ελέγχου της ταχύτητας του ρότορα. Οι άξονες κανονικοποιούνται με τις ονομαστικές αξίες.



**Σχ 6.6** Διάφορες καμπύλες σύλληψης ισχύος σταθερής κατάστασης για δεδομένες ταχύτητες ανέμου.

Ο αδρανειακός και πρωτογενής έλεγχος που μπορεί να εφαρμοστεί σε επίπεδο αιολικού πάρκου, όπως έχουν δείξει αρκετές έρευνες, θα μπορούσε δυνητικά να ελαχιστοποιήσει τη συνολική απόκλιση της συχνότητας δικτύου και την ταχύτητα αποκατάστασης αυτής. Η πρωτογενής απόκριση στις διαταραχές της συχνότητας δικτύου με διαφορετικά επίπεδα

διείσδυσης αιολικών πάρκων, με ελεγκτές ενεργούς ισχύος, με συμμετοχή στην απόκριση συχνότητας των σταθμών αιολικής ενέργειας, μπορεί να αυξήσει σημαντικά την ευρωστία του δικτύου και να μειώσει τη μέγιστη απόκλιση της συχνότητας από την ονομαστική της τιμή κατά τη διάρκεια μιας διαταραχής. Το γεγονός αυτό επιβεβαίωσαν διάφορες έρευνες όπως αυτή των R. de Almeida and J. P. Lopes, “Participation of Doubly Fed Induction Wind Generators in System Frequency Regulation,” [64].

### 6.3.3. Δευτερογενής απόκριση συχνότητας ή αυτόματη ρύθμιση παραγωγής (AGC)

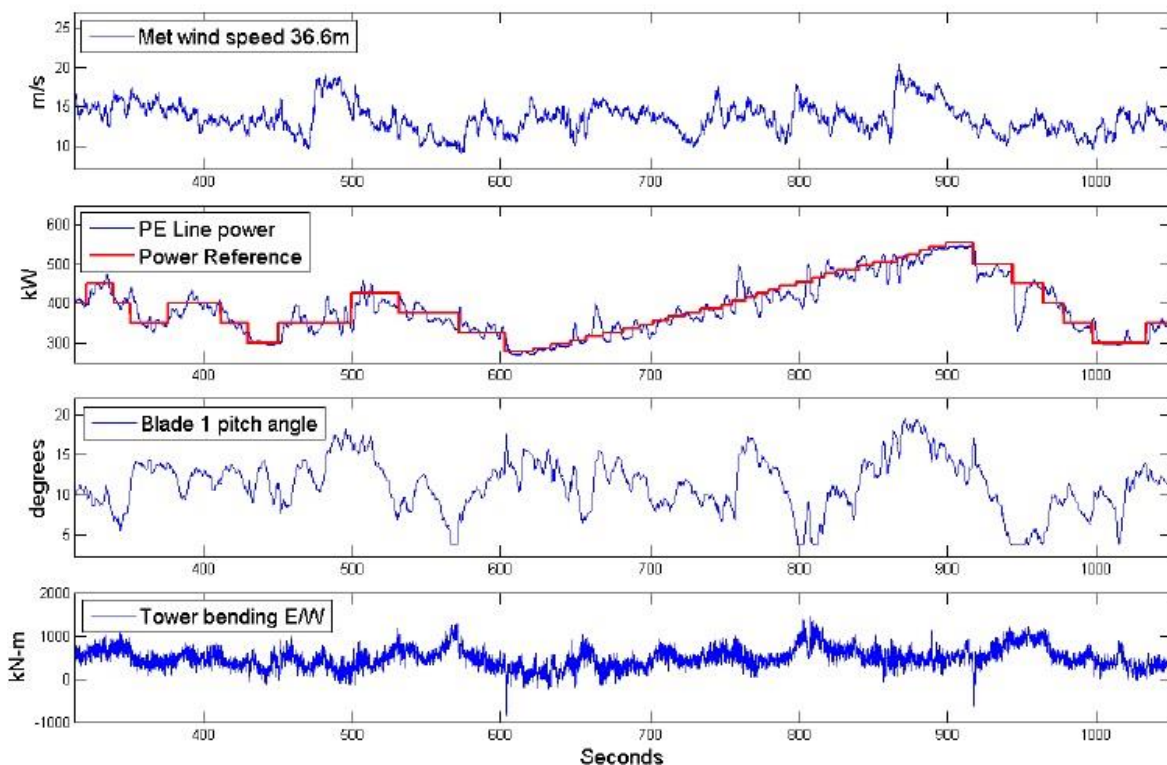
Σαν δευτερογενή απόκριση συχνότητας ονομάζουμε την μεταβολή στην παραγωγή ισχύος ενός συνόλου μονάδων παραγωγής, σύμφωνα με τις εντολές του διαχειριστή. Οι συμβατικές μονάδες παραγωγής συνήθως λαμβάνουν ένα απόλυτο σήμα αναφοράς από το διαχειριστή δεδομένου ότι η μονάδα αυτή πρέπει να μεταβάλει ανάλογα την εισροή καυσίμου ώστε να ανταποκριθεί στη ζήτηση ισχύος. Στη δευτερογενή απόκριση συχνότητας ή αυτόματη ρύθμιση παραγωγής (AGC), τα αιολικά πάρκα και οι ανεμογεννήτριες συγκεκριμένα, λαμβάνουν επίσης σήματα αναφοράς από το διαχειριστή βάσει των οποίων ενεργούν. Αυτά τα σήματα αναφοράς μπορεί να αποτελούν σήματα ελέγχου για την ισορροπία του δικτύου, σήματα που αφορούν ξεκάθαρα την αύξηση της ισχύος (εφόσον το αιολικό δυναμικό επιτρέπει κάτι τέτοιο) ή σήματα που αφορούν ποσοστό της διαθέσιμης αιολικής ενέργειας που πρέπει να εκμεταλλευτεί (σήματα ελέγχου Δέλτα). Χρησιμοποιώντας τον «έλεγχο δέλτα», εξασφαλίζεται ότι υπάρχει ένα ποσοστό των διαθέσιμων πηγών αιολικής ενέργειας ως εφεδρεία σε περίπτωση που ο διαχειριστής του συστήματος μεταφοράς απαιτήσει περισσότερη ισχύ. Συχνά στους κώδικες αναφέρεται μια κατώτερη τιμή στο ρυθμό με τον οποίο αυξάνεται η παροχή ισχύος στο δίκτυο ώστε να ανταποκριθεί στην ανάλογη ζήτηση του διαχειριστή. Με λίγα λόγια, ο ρυθμός με τον οποίο θα αυξηθεί ισχύς μέσω της εφεδρείας, είναι πολλές φορές συγκεκριμένος ή με συγκεκριμένο κατώτατο όριο.

#### AGC στο επίπεδο της ανεμογεννήτριας

Οι πιο δημοφιλείς μέθοδοι για την διατήρηση εφεδρείας στις ανεμογεννήτριες είναι ο έλεγχος γωνίας βήματος (Pitch angle control) και ο έλεγχος ροπής του ρότορα της γεννήτριας. Αυτές οι δύο μέθοδοι επιτυγχάνουν σκόπιμα υποβέλτιστη λειτουργία με χαμηλότερο  $C_p$  για να παρακολουθείτε η ισχύς του καθορισμένου σημείου που παρέχονται από το διαχειριστή του δικτύου. Και οι δύο αυτοί μέθοδοι, αποτελούν αξιόπιστη λύση στον πρωτεγενή και δευτερογενή έλεγχο μέσω ανεμογεννητριών. Επιπλέον, ένα παρόμοιο σύστημα ελέγχου που ονομάζεται "GE Wind CONTROL» δείχνει ότι η συνολική παραγωγή ενός ολόκληρου αιολικού πάρκου μπορεί να ελέγχεται για να παρέχει την επιθυμητή απόκριση από το διαχειριστή.



Μια άλλη πρόσφατη μελέτη, εξετάζει την άμεση απόκριση του ελέγχου ροπής του ρότορα και του ελέγχου της γωνίας βήματος, για άμεση απόκριση στην αλλαγή ενός απόλυτου σήματος αναφοράς από το διαχειριστή. Αν και αυτή η μελέτη προϋποθέτει ότι το απόλυτο σήμα αναφοράς που λαμβάνει η ανεμογεννήτρια είναι σήμα αυτόματης ρύθμισης παραγωγής (AGC), ένας πρωτεύον έλεγχος μπορεί να πραγματοποιηθεί από τον ηλεκτρονικό ελεγκτή, αν το σήμα αναφοράς της ισχύος αυξάνεται για να ανταποκριθεί στις μεταβολές της συχνότητας δικτύου. Η μελέτη έχει την ονομασία “Comparison and Testing of Active Power Control Strategies for Grid-connected Wind Turbines” και οι ελεγκτές που σχεδιάζονται βάσει αυτής συμπεριλαμβάνουν και μετρήσεις της ταχύτητας εντόπισης του σημείου ισχύος καθώς και της καταπόνησης που υφίστανται τα μηχανικά μέρη της ανεμογεννήτριας. Αυτό είναι ένα σημαντικό στοιχείο, αν και ένα μεγάλο μέρος της βιβλιογραφίας σχετικά με τους ελεγκτές της APC, παραμελεί τα φορτία που προκαλούνται στις ανεμογεννήτριες από το σύστημα ελέγχου.



**Σχ 6.7** Δεδομένα πεδίου της δοκιμής παρακολούθησης του σήματος αναφοράς της ισχύος μέσω του CART3, όπου φαίνεται το αιολικό δυναμικό την ώρα της μέτρησης, το σήμα αναφοράς ισχύος και η πραγματική έξοδος, η γωνία βήματος του ενός πτερυγίου και η ροπή κάμψης των πτερυγίων την κάθε στιγμή μέτρησης.

Είναι επίσης χρήσιμο να πραγματοποιούνται δοκιμές στο πεδίο οι οποίες θα επιβεβαιώνουν τη λειτουργικότητα ενός σχεδιασμένου συστήματος ελέγχου στο πεδίο. Το Εθνικό Κέντρο Τεχνολογίας Ανέμου NREL έχει τη δυνατότητα να δοκιμάζει ελεγκτές που αναπτύχθηκαν για τον έλεγχο τριών πτερυγίων (Advanced Research Turbine - CART3). Η δοκιμή ενός από τους ελεγκτές

σε πρωτογενή και δευτερογενή APC που αναπτύχθηκαν στην μελέτη “Comparison and Testing of Active Power Control Strategies for Grid-connected Wind Turbines” έλαβε χώρα σε CART3. Ο ελεγκτής APC μεταδίδει τις ανάλογες εντολές στον ενεργοποιητή CART3 ώστε να καλυφθεί η ζητούμενη ισχύς αναφοράς. Δεδομένα μίας από τις δοκιμές πεδίου, απεικονίζονται στο σχήμα 6.7. Αυτό το πείραμα δοκιμάζει ένα από τα αρχικά σχέδια ελέγχου ρύθμισης της μέγιστης ταχύτητας του ρότορα ώστε να ακολουθεί μια ισχύς αναφοράς. Η δεύτερη μέτρηση του σχήματος 6.7 απεικονίζει τη σύγκριση της μετρούμενης, με την απαιτούμενη τιμή εξόδου της ανεμογεννήτριας και φαίνεται ξεκάθαρα η πολύ καλή απόκριση του συστήματος ελέγχου στο σήμα αναφοράς της ισχύος. Από τα δεδομένα πεδίου φαίνεται ότι αυτό το αρχικό σχέδιο μπορεί να βελτιωθεί περαιτέρω, δεδομένου ότι οι υπερβολικές διακυμάνσεις φορτίου που παρατηρούνται κοντά στα 600 και 925 δευτερόλεπτα, οδηγούν τον ελεγκτή στον εντοπισμό αυτών των μεταβολών με εξίσου πολύ απότομο ρυθμό. Τα δεδομένα πεδίου της δοκιμής παρακολούθησης του σήματος αναφοράς της ισχύος μέσω του CART3, δείχνουν ότι οι ξαφνικές αλλαγές στην αναφορά ισχύος οδηγεί σε μεγαλύτερη ροπή κάμψης των πτερυγίων όπως απεικονίζεται στη τέταρτη μέτρηση του σχήματος 6.7 [65][66].

#### AGC στο επίπεδο αιολικού πάρκου

Όπως έχει ήδη αναφερθεί στην ενότητα 6.2.3, υπάρχουν ήδη αιολικά πάρκα που συνεισφέρουν στην υποστήριξη του δικτύου με τα οποία είναι συνδεδεμένα. Δύο από αυτά είναι τα υπεράκτια αιολικά πάρκα Horns Rev και Nysted στη Δανία. Πολλοί διαχειριστές δικτύων απαιτούν από τα αιολικά πάρκα να μπορούν να μεταβάλλουν την συνολική ενεργό ισχύς εξόδου τους. Για αυτό ακριβώς το λόγο, πολλές πρόσφατες έρευνες αλλά και έρευνες που είναι σε εξέλιξη, εξετάζουν τρόπους εφαρμογής αυτής της απαίτησης με τα μεγαλύτερα δυνατά ποσοστά επιτυχίας. Προσομοιώσεις με τη χρήση απλοποιημένων μοντέλων αιολικού πάρκου, έχουν χρησιμοποιηθεί σε μελέτες για τον έλεγχο των δυνατοτήτων των συστημάτων ελέγχου. Ένα σημαντικό τμήμα της έρευνας για την υλοποίηση AGC μέσω της αιολικής ενέργειας έχει πραγματοποιηθεί σε επίπεδο εγκαταστάσεων αιολικής ενέργειας και έχει επικεντρωθεί στην παρακολούθηση ενός σήματος αναφοράς ισχύος από το σύνολο της αιολικής εγκατάστασης, για την επίτευξη μιας συνολικής ενεργούς εφεδρείας. Για παράδειγμα, προτείνεται η χρήση ενός αναλογικού-ολοκληρωτικού ελεγκτή βρόγχου (proportional-integral-PI) σε επίπεδο αιολικού πάρκου με σκοπό τη διανομή των σημάτων αναφοράς της ισχύος, ξεχωριστά, σε κάθε ανεμογεννήτρια του πάρκου. Ασφαλώς και αυτά τα σήματα αναφοράς θα προκύπτουν βάσει του συνολικού σήματος αναφοράς του διαχειριστή δικτύου σε σχέση με την συνολική έξοδο της ενεργούς ισχύος ολόκληρου του αιολικού πάρκου. Κάθε μία από τις ανεμογεννήτριες χρησιμοποιεί ένα ενιαίο σύστημα διαχείρισης της γωνίας βήματος και της ροπής της γεννήτριας ώστε να επιτύχει να ικανοποιήσει τα ανάλογα σήματα αναφοράς ενεργούς ισχύος του PI ελεγκτή [67].

Μια άλλη μέθοδος ικανοποίησης των σημάτων αναφοράς ενεργούς ισχύος ενός αιολικού πάρκου προβλέπει δύο ελεγκτές σε επίπεδο αιολικού πάρκου. Έναν υψηλού επιπέδου ελεγκτή όπου επιβλέπει την μέση ταχύτητα ανέμου και προσαρμόζει το σημείο λειτουργίας ολόκληρου του πάρκου και ένα χαμηλότερου επιπέδου ελεγκτή όπου ελέγχει τις τοπικές επιπτώσεις του ανέμου και προσαρμόζει το σημείο λειτουργίας με βάση διαθέσιμη ισχύ σε κάθε ανεμογεννήτρια. Παρά το γεγονός ότι έχουν αναπτυχθεί εξελιγμένες μέθοδοι για την παρακολούθηση της αναφοράς ισχύος και τον έλεγχο της εξόδου της ενεργής ισχύος των εγκαταστάσεων αιολικής ενέργειας, η έρευνα των μεθόδων ελέγχου, ειδικά για συντονισμένη αδρανειακή και πρωτογενής απόκριση σε αποκλίσεις της συχνότητας του δικτύου, φαίνεται να μην είναι ευρέως αναπτυσσόμενη .

Οι προσομοιώσεις έχουν χρησιμεύσει στο να αναδεικνύουν τις ικανότητες των συστημάτων ελέγχου στον έλεγχο της ενεργής ισχύος ενός αιολικού πάρκου ή μιας μικρής ομάδας ανεμογεννητριών. Επίσης, μέσω των προσομοιώσεων έχει αποδειχθεί η αξιοπιστία των συστημάτων ελέγχου και πιο συγκεκριμένα της στρατηγικής που αυτοί χρησιμοποιούν στον έλεγχο της ενεργούς ισχύος σε περιπτώσεις όπου η λειτουργία εναλλάσσεται γρήγορα μεταξύ των καταστάσεων πλήρους ισχύος, κατάστασης ελέγχου ισορροπίας και τρόπων ελέγχου δέλτα. Μεγάλης χρονικής κλίμακας προσομοιώσεις, σε επίπεδο αρκετών ωρών, έχουν αναδείξει την ικανότητα πρόβλεψης της ενεργούς ισχύος και την ικανότητα του μεγέθους της εφεδρείας που μπορεί να κρατήσει ένα αιολικό πάρκο.

Οι πλήρεις δυνατότητες και η επιρροή που μπορεί να έχει ένας έλεγχος APC στο επίπεδο ενός αιολικού πάρκου, απαιτούν ακόμα μεγαλύτερες ικανότητες από τις μεθόδους εξομοίωσης. Εργαλεία προσομοίωσης που περιλαμβάνουν μοντέλα ανεμογεννήτριας υψηλής αξιοπιστίας και ικανότητας ελέγχου, όπως του NREL ο κωδικός FAST, συνήθως εξετάζουν μια μόνο ανεμογεννήτρια και όχι ολόκληρο αιολικό πάρκο. Ο κωδικός FAST περιλαμβάνει αεροδυναμικές μοντελοποιήσεις, βασίζεται στη θεωρία ορμής του πτερυγίου αλλά αυτό δεν αντιπροσωπεύει πολύ μεταγενέστερα αποτελέσματα που είναι σημαντικά στην εξομοίωση των αιολικών πάρκων στον άνεμο. Επιπλέον, είναι κοινή τακτική σε όλες τις προσομοιώσεις ελέγχου, η εισροή του ανέμου να είναι σταθερή και να μην παρουσιάζει απότομες ριπές και αυξομειώσεις όπως συμβαίνει αρκετές φορές στην πραγματικότητα. Εργαλεία προσομοίωσης που βασίζονται σε αυτού του είδους την τακτική αποτελούν στην ουσία αναξιόπιστα εργαλεία σε επίπεδο αιολικού πάρκου και αρκετά αξιόπιστα σε επίπεδο ανεμογεννήτριας. Ένα προηγμένο εργαλείο προσομοίωσης που ονομάζεται SOWFA (Simulator για Offshore Wind Εφαρμογές) επιτρέπει την προσομοίωση πολλαπλών μοντέλων ενεργοποιητή γραμμής FAST σε συνδυασμό με ένα CFD υπολογιστή (προσομοιώσεις υπολογιστικής ρευστοδυναμικής) ώστε να είναι σε θέση να υπολογίζει τη εξέλιξη των στροβιλωδών εισροών και να ειδοποιεί τις υπόλοιπες ανεμογεννήτριες για τους μεταγενέστερους ανέμους, αλληλοεπιδρώντας έτσι όλες μαζί μέσα σε ένα πάρκο. Παραλλαγές σε εισόδους ελέγχου για μεμονωμένες ανεμογεννήτριες θα προκαλέσουν διακυμάνσεις των κυματισμών που δημιουργήθηκαν και που πολλαπλασιάζεται με τον υπολογιστή CFD. Ως εκ τούτου, αυτός ο τύπος εργαλείου μπορεί ενδεχομένως να αποκαλύψει τις ευαισθησίες των προτεινόμενων συστημάτων APC σε μια μονάδα παραγωγής αιολικής ενέργειας [68].

## 6.4 Εφεδρεία και αιολικά συστήματα

### 6.4.1. Είδη εφεδρείας στα αιολικά πάρκα

Οι λόγοι για τους οποίους θα πρέπει μια ανεμογεννήτρια και κατ' επέκταση ένα αιολικό πάρκο να κρατάνε εφεδρεία ενεργούς ισχύος, έχουν αναφερθεί επιγραμματικά σε προηγούμενες ενότητες σε αυτή την εργασία. Κύριος λόγος για την διατήρηση της εφεδρείας αποτελεί η όλο και μεγαλύτερη απαίτηση από τους κώδικες δικτύου και κατ' επέκταση των διαχειριστών δικτύου για την συμμετοχή των αιολικών πάρκων στην ρύθμιση της συχνότητας δικτύου μέσω της αύξησης του ποσού της ενεργούς ισχύος στο σύστημα. Γενικά σαν εφεδρεία ορίζεται η λειτουργία της ανεμογεννήτριας σε σημείο μικρότερο από το μέγιστο δυνατό, ανεξάρτητα του διαθέσιμου αιολικού δυναμικού εκείνη την στιγμή. Σαν τύποι εφεδρείας ορίζονται η στρεφόμενη εφεδρεία ( spinning reserve/delta control) και ο περιορισμός της μέγιστης διαθέσιμης ισχύος σε σχέση με την μέγιστη δυνατή διαθέσιμη (derating/balance control).

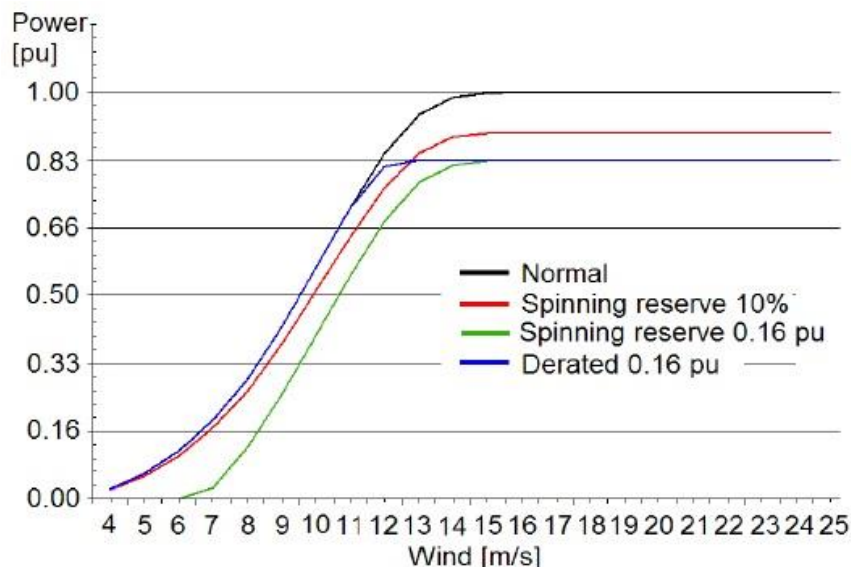
#### Στρεφόμενη εφεδρεία (spinning reserve/delta control)

Στη στρεφόμενη εφεδρεία η παραγόμενη ισχύς είναι μειωμένη πάντα κατά ένα συγκεκριμένο μέγεθος κάτω από την διαθέσιμη ισχύ. Η στρεφόμενη εφεδρεία μπορεί να είναι πάντα ένα σταθερό ποσό ισχύος κάτω από το διαθέσιμο (το οποίο ασφαλώς και διαφέρει ανάλογα το αιολικό δυναμικό) ή μπορεί να είναι ένα ποσοστό της εκάστοτε μέγιστης διαθέσιμης ισχύος. Από τον ορισμό της στρεφόμενης εφεδρείας γίνεται εύκολα κατανοητό ότι για αιολικό δυναμικό μεγαλύτερο από την ονομαστική ισχύ της ανεμογεννήτριας, η ανεμογεννήτρια λειτουργεί στην ονομαστική κατάσταση και η εφεδρεία μπορεί και να συμπίπτει με τον περιορισμό της μέγιστης ισχύος. Αυτή η λογική της σταθερής ποσότητας εφεδρείας δείχνει να είναι πιο κοντά στην φιλοσοφία της εφεδρείας των συμβατικών μονάδων παραγωγής και για αυτό μπορούμε να πούμε ότι είναι προτιμητέα σε σχέση με την ποσοστιαία εφεδρεία από τους διαχειριστές δικτύων. Επίσης, λόγω του σταθερού ποσού ισχύος σε εφεδρεία, είναι σε θέση να προσφέρουν προς πώληση επικουρικές υπηρεσίες.

#### Ποσοστιαία εφεδρεία (derating/balance control)

Όπως προαναφέραμε, η ποσοστιαία εφεδρεία είναι ο περιορισμός της ισχύος μιας ανεμογεννήτριας κατά ένα ποσοστό σε σχέση με τη μέγιστη διαθέσιμη εκείνη τη στιγμή. Θεωρείται πιο ασφαλής λύση σε σχέση με την στρεφόμενη εφεδρεία λόγω του ότι εξαρτάται άμεσα από τη μέγιστη διαθέσιμη ισχύ. Κατά την ποσοστιαία εφεδρεία, η ανεμογεννήτρια παράγει πάντα και για όλα τα αιολικά δυναμικά σε αντίθεση με την στρεφόμενη εφεδρεία όπου η παραγωγή μπορεί να είναι μηδενική ή και ακόμα αρνητική αν το αιολικό δυναμικό είναι πολύ

χαμηλό, όπως ακριβώς φαίνεται και στο σχήμα 6.8 μέσω της πράσινης γραμμής όπου για ταχύτητες ανέμου από 4m/sec έως 6m/sec η παραγωγή είναι μηδενική. Επειδή λοιπόν στην ποσοστιαία το ποσό της εφεδρείας είναι ανάλογο της ταχύτητας του ανέμου, το ποσό της ισχύος σε εφεδρεία αυξάνεται όσο αυξάνεται και το αιολικό δυναμικό. Αποτέλεσμα αυτού είναι να έχουμε μεταβαλλόμενο ποσό ισχύς σε εφεδρεία μέχρι την ονομαστική λειτουργία και σταθερό στην ονομαστική.



**Σχ 6.8** Γραφική απεικόνιση καμπύλων ισχύος σε λειτουργία MPPT (Μαύρη), ποσοστιαίας εφεδρείας (Κόκκινη), σταθερής ποσότητας εφεδρείας (πράσινη) και περιορισμού της μέγιστης παραγόμενης ισχύος (μπλε).

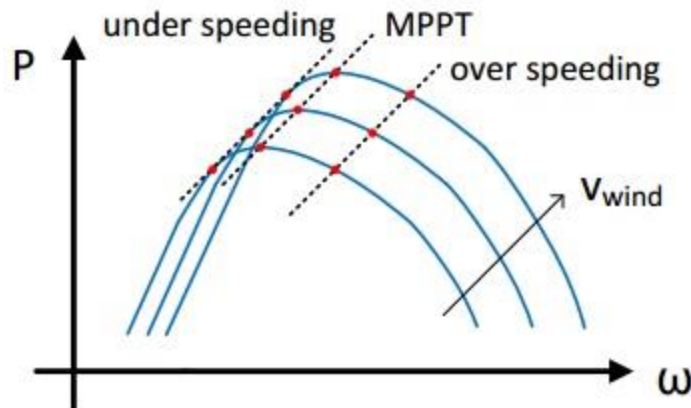
Για την λειτουργία περιορισμού της μέγιστης ισχύος ισχύει ότι και στην κανονική λειτουργία της ανεμογεννήτριας μέχρι την στιγμή που θα πιάσει το όριο ισχύος που έχει τεθεί ως περιορισμός. Από εκεί και πέρα, περιορίζεται και μένει σταθερή στο μέγιστο επιτρεπόμενο όριο ισχύος. Στο σχήμα 6.8, απεικονίζονται οι δύο προαναφερόμενοι τύποι εφεδρείας καθώς και η λειτουργία περιορισμού της μέγιστης ισχύος σε ένα συγκεκριμένο επίπεδο.

Για τον σχεδιασμό ενός συστήματος διατήρησης εφεδρείας και ρύθμισης της συχνότητας μέσω αυτού, είναι πολύ σημαντική η εκτίμηση της μέγιστης διαθέσιμης ισχύος. Επίσης, η εκτίμηση αυτή είναι εξίσου σημαντική ώστε να είναι γνωστή η απώλεια της ισχύος των ανεμογεννητριών ή του αιολικού πάρκου λόγω της εφεδρείας. Οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση της μέγιστης διαθέσιμης έχουν αναφερθεί σε προηγούμενες ενότητες [69].

### 6.4.2. Τεχνικές αποφόρτισης των ανεμογεννητριών

Σαν τεχνικές αποφόρτισης ανεμογεννητριών και κατ' επέκταση αιολικών πάρκων, ορίζονται εκείνες οι τεχνικές βάσει των οποίων λειτουργεί μια ανεμογεννήτρια ώστε να διατηρεί τη ζητούμενη εφεδρεία. Οι δύο βασικές μέθοδοι αποφόρτισης είναι η μεταβολή της γωνίας βήματος (Pitch control) και η μεταβολή της ταχύτητας περιστροφής του ρότορα της γεννήτριας. Η τελευταία χωρίζεται σε λειτουργία πάνω από την βέλτιστη ταχύτητα (overspeeding) και σε λειτουργία κάτω από την βέλτιστη ταχύτητα (underspeeding). Ασφαλώς και σε ορισμένες περιπτώσεις μπορεί να γίνει κάποιος συνδυασμός των δύο αυτών τεχνικών χωρίς κανένα τεχνικό περιορισμό.

Το μέγεθος που μεταβάλλεται ουσιαστικά κατά την αποφόρτιση μιας ανεμογεννήτριας ώστε να διατηρηθεί το ζητούμενο ποσό ισχύος σαν εφεδρεία, δεν είναι άλλο από τον αεροδυναμικό συντελεστή ισχύος  $C_p$ . Ο λόγος ασφαλώς είναι ότι ο  $C_p$  είναι ανάλογος της γωνίας pitch και της ταχύτητας που περιστρέφεται η ανεμογεννήτρια, δηλαδή ο ρότορας της γεννήτριας, λόγω της εξάρτησης από το λόγο πτερυγίου  $\lambda$ . Μεταβάλλοντας κατά τη λειτουργία μέγιστου αεροδυναμικού συντελεστή  $C_{pmax}$ , είτε τη γωνία βήματος, είτε τη ταχύτητα του ρότορα της γεννήτριας, είτε και τα δύο, έχουμε επιτύχει τη μείωση του συντελεστή σε  $C_p$  σε μικρότερο του  $C_{pmax}$  με τη διαφορά αυτή να αποτελεί το ποσό εφεδρείας της ανεμογεννήτριας. Στο σχήμα 6.9, φαίνεται η βασική φιλοσοφία όλων των μεθόδων αποφόρτισης.



**Σχ 6.9** Γραφική απεικόνιση των μεθόδων αποφόρτισης μιας ανεμογεννήτριας καθώς και του σημείου λειτουργία MPPT [71].

Γενικά, θα μπορούσαμε πολύ απλοϊκά να αναφέρουμε ότι οι μέθοδοι με τις οποίες να πετυχαίνουμε εφεδρεία είναι μέθοδοι που βασίζονται στην μη επίτευξη του βέλτιστου σημείου λειτουργίας. Η τεχνική της μεταβολής της ταχύτητας περιστροφής του ρότορα της γεννήτριας

μπορεί να επιτευχθεί μόνο μέσω ανεμογεννητριών μεταβλητών στροφών. Στη τεχνική αυτή, θεωρητικά η γωνία βήματος του πτερυγίου παραμένει σταθερή εκτός και αν μιλάμε για υβριδικές τεχνικές. Αυτό που μεταβάλλεται σε αυτή την τεχνική είναι οι στροφές με τις οποίες περιστρέφεται η ανεμογεννήτρια και πιο συγκεκριμένα ο ρότορας της ανεμογεννήτριας σε ταχύτητες μικρότερες ή μεγαλύτερες από την βέλτιστη ταχύτητα που ορίζεται μέσω της τεχνικής ελέγχου MPPT. Πιο συγκεκριμένα, όταν η ανεμογεννήτρια λειτουργεί στην ονομαστική ισχύ της και επιβραδυνθεί ο ρότορας, τότε στην ουσία απελευθερώνεται κινητική ενέργεια η οποία αποθηκεύεται στα κινούμενα μέρη της γεννήτριας. Αντίθετα, όταν επιταχύνουμε μια γεννήτρια με σκοπό να φθάσουμε την ονομαστική τιμή και να αυξήσουμε στην ουσία την ισχύ εξόδου, τότε καταναλώνουμε ενέργεια. Σε αυτή τη μέθοδο αποφόρτισης όπως γίνεται αντιληπτό από τα παραπάνω, υπάρχει ένα μεταβατικό στάδιο το οποίο τις περισσότερες φορές δεν είναι επιθυμητό και είναι ανάλογο της επιβράδυνσης.

Οι καμπύλες αποφόρτισης αποτελούν βασικό χαρακτηριστικό για να έχει επιτυχία η τεχνική overspeeding. Στην συμβατική λειτουργία μιας ανεμογεννήτριας το μέγιστο σημείο λειτουργίας, το οποίο και σε αυτή την περίπτωση είναι και το επιθυμητό, ορίζεται μέσω της όπτιμης καμπύλης ισχύος (MPPT) στο διάγραμμα ισχύος (P) – συχνότητας ( $\omega$ ). Για την αποφόρτιση μιας ανεμογεννήτριας τώρα, τα επιθυμητά σημεία λειτουργίας ορίζονται ανάλογα με το ζητούμενο ποσοστό εφεδρείας. Για κάθε εφεδρεία  $x$ , υπάρχει η ανάλογη καμπύλη αποφόρτισης η οποία μπορεί να έχει υπολογιστεί προγενέστερα ή να υπολογίζεται άμεσα την ώρα που ζητείται το ανάλογο ποσό εφεδρείας. Κατά συνέπεια, το ανάλογο σήμα αναφοράς που στέλνεται από το διαχειριστή στο μετατροπέα είναι αποτέλεσμα του ζητούμενου ποσού εφεδρείας  $x$ , του αιολικού δυναμικού εκείνη τη στιγμή και της ανάλογης καμπύλη αποφόρτισης. Εάν υποθέσουμε ότι  $P_{del}$  είναι το ποσό εφεδρείας που επιζητείται από το πάρκο/ανεμογεννήτρια και  $P_{opt}$  η ισχύς στο μέγιστο σημείο λειτουργίας, τότε σαν εφεδρεία καλείται :

$$P_{del} = P_{opt} (1-x) \quad (6.1)$$

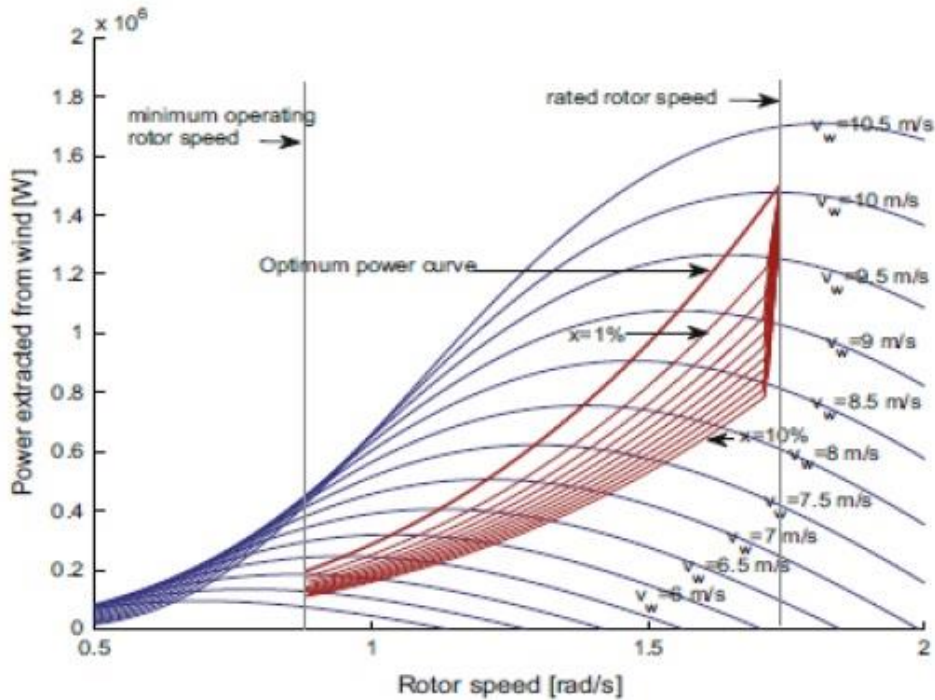
Από την προηγούμενη σχέση, εύκολα μπορεί να υπολογιστεί το ποσοστό αποφόρτισης  $x$  μιας και τα δύο ποσά ισχύος είναι γνωστά είτε μέσω υπολογισμού ( $P_{opt}$ ) είτε μέσω βούλησης ( $P_{del}$ ). Για κάθε επιθυμητό ποσό εφεδρείας  $x$  ο ανάλογος υποβέλτιστος συντελεστής ισχύος της ανεμογεννήτριας  $C_{pdel}$  ισούται με :

$$C_{pdel} = [P_{opt} (1-x)] / 0,5AU^3_w \quad (6.2)$$

Και επειδή κάθε συντελεστής ισχύος είναι ανάλογος της ταχύτητας του ανέμου, της ταχύτητας περιστροφής του δρομέα και της γωνίας pitch, ισχύει  $C_{pdel}(U_w, \omega, \beta)$ . Άρα, για κάθε γνωστή ταχύτητα ανέμου και με δεδομένη τη γωνία pitch, μπορούμε να υπολογίζουμε τη ανάλογη

γωνιακή ταχύτητα  $\omega$  η οποία αντιστοιχεί στον ανάλογο υποβέλτιστο αεροδυναμικό συντελεστή. Έτσι μπορούμε για κάθε δυνατή ταχύτητα ανέμου να φτιάξουμε τις αντίστοιχες καμπύλες αποφόρτισης στο πεδίο P- $\omega$  ένα παράδειγμα των οποίων απεικονίζεται παρακάτω στο σχήμα 6.10.

Ο τρόπος υπολογισμού των καμπύλων αποφόρτισης που περιεγράφηκε παραπάνω αφορά μόνο στη περίπτωση overspeeding. Σε περίπτωση ελέγχου γωνίας βήματος pitch ή συνδυασμό αυτής με overspeeding, η βασική φιλοσοφία υπολογισμού είναι η ίδια αλλά η διαδικασία διαφοροποιείται με τις επιλογές της γωνίας pitch και της γωνιακής ταχύτητας  $\omega$  να είναι η πιο βασική (Σχήμα 6.9).

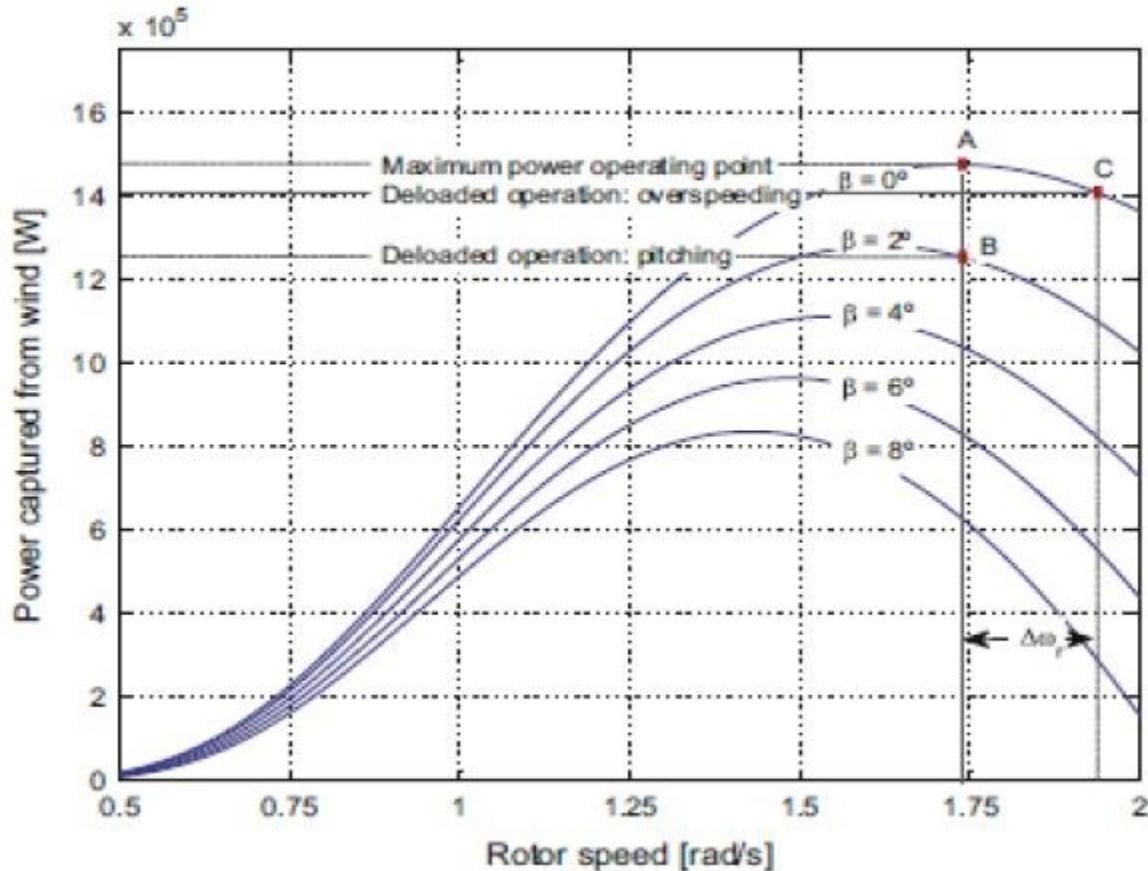


**Σχ 6.10** Καμπύλες αποφόρτισης για διάφορες ταχύτητες ανέμου  $U_w$  στο διάγραμμα ισχύος – γωνιακής ταχύτητας ρότορα  $\omega_r$ .

Η μέθοδος overspeeding αφορά κυρίως χαμηλές ταχύτητες ανέμου το πολύ μέχρι την τιμή όπου θα επέρχονται οι ονομαστικές στροφές της ανεμογεννήτριας. Ο λόγος είναι ότι για τις ταχύτητες ανέμου κοντά ή πάνω από την ονομαστική, η ταχύτητα περιστροφής που απαιτείται μπορεί να φθάσει ή ακόμα και να ξεπεράσει την ονομαστική ταχύτητα. Από την άλλη πλευρά, κύριο πλεονέκτημα της μεθόδου αποτελεί η άμεση απόκριση μέσω της δυναμικής του δρομέα αλλά και των ηλεκτρονικών ισχύος του μετατροπέα. Η άμεση απόκριση αυτή, μπορεί να έχει μεγάλη μηχανική καταπόνηση στο δρομέα για αυτό και τις περισσότερες φορές επιβάλλεται ένας συγκεκριμένος ρυθμός μεταβολής της ροπής. Επίσης, λόγω της αδράνειας του δρομέα, η ισχύς δεν μεταβάλλεται γραμμικά και οι μετρήσεις του ανέμου που απαιτούνται για τον καθορισμό της



μέγιστης διαθέσιμης ισχύς της ανεμογεννήτριας, καθιστούν κρίσιμο παράγοντα την αξιοπιστία και την ακρίβεια αυτών των μετρήσεων ανέμου.



**Σχ 6.11** Διάγραμμα ισχύος-ταχύτητας περιστροφής (P- $\omega$ ). Έλεγχος αποφόρτισης της Α/Γ με έλεγχο της γωνίας pitch και με τη μέθοδο overspeeding.

Στη μέθοδο μεταβολής της γωνίας βήματος (Pitch), η ταχύτητα της ανεμογεννήτριας μπορεί να παραμένει σταθερή και για αυτό ακριβώς το χαρακτηριστικό η εν λόγω μέθοδος είναι διαθέσιμη και στις ανεμογεννήτριες σταθερών αλλά και μεταβλητών στροφών. Το χαρακτηριστικό της σταθερής ταχύτητας είναι εμφανές και στο σχήμα 6.11 όπου απεικονίζονται στο διάγραμμα P- $\omega$  η αποφόρτιση μέσω overspeeding και μεταβολής της γωνίας βήματος. Ο ελεγκτής της γωνίας βήματος, δέχεται ανάλογα με τη μέθοδο αποφόρτισης τα ανάλογα σήματα αναφοράς, και υπολογίζει και μετατρέπει την γωνία βήματος ώστε να επιτευχθεί το επιθυμητό αποτέλεσμα εφεδρείας. Επίσης μπορεί αυξομειώνοντας την αεροδυναμική ισχύ να συμμετέχει στην ρύθμιση συχνότητας. Η μεταβολή της γωνίας βήματος μπορεί να συνδυαστεί και με την τεχνική overspeeding όταν η ταχύτητα περιστροφής είναι ίση ή μεγαλύτερη της ονομαστικής.

Στα αρνητικά τώρα της μεθόδου ελέγχου της γωνίας βήματος περιλαμβάνονται οι μηχανικές φθορές στο μηχανισμό ρύθμισης της γωνίας αλλά και των πτερυγίων από την συχνή χρήση του μηχανισμού. Επίσης αρνητικό στοιχείο σε αυτή τη μέθοδο αποτελεί η όχι και τόσο άμεση απόκριση στις μεταβολές της συχνότητας δικτύου λόγω του σερβομηχανισμού που μεταβάλλει τη γωνία pitch [70],[71].

## Βιβλιογραφία

- [1] Greenpeace , 24 Μαρτίου 2011  
[http://www.greenpeace.org/greece/el/news/exelixa\\_pyrinika\\_ape\\_eu/](http://www.greenpeace.org/greece/el/news/exelixa_pyrinika_ape_eu/)
- [2] Bloomberg New Energy Finance (BNEF), 2015  
<https://about.bnef.com/>
- [3] Global status reports  
<http://www.ren21.net/status-of-renewables/global-status-report/>
- [4] Global Wind Energy Council, Global Wind Statistics 2015, 10 Φεβρουαρίου 2016  
<http://www.gwec.net/>
- [5] ΕΛΕΤΑΕΝ  
[http://www.cres.gr/kape/publications/pdf/ENERGYRES\\_08/5th%20session/5.1\\_ELETAEN%20Faitatzoglou\\_ELETAEN.pdf](http://www.cres.gr/kape/publications/pdf/ENERGYRES_08/5th%20session/5.1_ELETAEN%20Faitatzoglou_ELETAEN.pdf)
- [6] ΚΑΠΕ, 1998  
<http://www.cres.gr/kape/index.htm>
- [7] Σ.ΤΣΙΩΛΗΣ Σημειώσεις ΑΠΕ\_I ΤΕΙ Πειραιά  
[http://images.google.de/imgres?imgurl=http://images.slideplayer.gr/19/6115379/slides/slide\\_17.jpg&imgrefurl=http://slideplayer.gr/slide/6115379/&h=720&w=960&tbnid=ILfqHF7p7WJ4IM:&vet=1&tbnh=90&tbnw=120&docid=6Bh4HeK1m0Po8M&usq=\\_ec2TM-b5d\\_Iy8IvwDoawqzg5Tlk=&sa=X&ved=0ahUKEwjZur3oqbrRAhVmLcAKHZ\\_qAtAQ9QEISjAH](http://images.google.de/imgres?imgurl=http://images.slideplayer.gr/19/6115379/slides/slide_17.jpg&imgrefurl=http://slideplayer.gr/slide/6115379/&h=720&w=960&tbnid=ILfqHF7p7WJ4IM:&vet=1&tbnh=90&tbnw=120&docid=6Bh4HeK1m0Po8M&usq=_ec2TM-b5d_Iy8IvwDoawqzg5Tlk=&sa=X&ved=0ahUKEwjZur3oqbrRAhVmLcAKHZ_qAtAQ9QEISjAH)
- [8] Γ.ΜΠΕΡΓΕΛΕΣ, « ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ», 2005
- [9] GNENG <http://gneng.blogspot.gr/>
- [10] Γ.ΛΕΥΘΕΡΙΩΤΗΣ, «Αιολική Ενέργεια & Ενέργεια του Νερού-Ενότητα 3: Ο άνεμος και οι ιδιότητές του», Πανεπιστήμιο Πατρών
- [11] Green - Mechanic  
<http://www.green-mechanic.com/2013/04/advantages-and-disadvantages-of.html>
- [12] Science Home Stuff Works  
<http://science.howstuffworks.com/environmental/green-science/wind-power3.htm>
- [13] EWEA : The European Wind Energy Association  
<http://www.ewea.org/>

[14] Bureau of labor Statistics

[https://www.bls.gov/green/wind\\_energy/](https://www.bls.gov/green/wind_energy/)

[15] Danish Wind Industry

<http://xn--drmsttre-64ad.dk/wp-content/wind/miller/windpower%20web/en/tour/manu/bladtest.htm>

[16] Vestas V V80-2.0MW [Βιβλίο] . – 2007kai

[17] How products are made

<http://www.madehow.com/>

[18] ENERGY.GOV Office of Energy Efficiency & Renewable Energy

<https://energy.gov/eere/wind/wind-energy-technologies-office>

[19] Διπλωματική εργασία Μαρούδα Διονύσιου- Συγκριτική ανάλυση αιολικών συστημάτων και έλεγχος ισχύος σε σύστημα με ΑΜΔΤ (Ασύγχρονη μηχανή διπλής τροφοδοσίας ) – Πάτρα 2008

[20] Wenping Cao, Ying Xie and Zheng Tan, «Wind Turbine Generator Technologies»

[21] Converteam, (2012). High Temperature Superconducting (HTS)- Converteam. online:

[http://www.converteam.com/converteam/1/doc/Markets/Energy\\_Wind/HTS\\_Datasheet](http://www.converteam.com/converteam/1/doc/Markets/Energy_Wind/HTS_Datasheet).

[22] Li, X., Zhou, y., Han, l., Zhang, D., Zhang, J., Qiu, Q., Dai, S., Zhang, Z., Xia, D.,Zhang, g., Lin, L., Xiao, l., Zhu, S., Bai, H. , Bian, B., Li, S., & Gao, W. (2011). “Design of a high temperature superconducting generator for wind power applications” IEEE Transactions on Applied Superconductivity Part: 2, 21(3), 1155-11580.

[23] Tazil, M., Kumar, V., Bansal, R. C., Kong, S., Dong, Z. Y., Freitas, W., & Mathur, H. D.(2010). «Three-phase doubly fed induction generators: an overview». IET Electric Power Applications, 4(2), 75-89.

[24] Bansal, R. C., Zobaa, A. F., & Saket, R. K. (2005). «Some issues related to power generation using wind energy conversion systems: an overview». Int. J. Emerging Electr .Power Syst., 3(2), Article 1070.

[25] Caratozzolo, P., Fossas, E., Pedra, J., & Riera, J. (2000). Dynamic modeling of an isolated system with DFIG. Eighth IEEE Int. Powe Electronics Congress Conf., 287-292

[26] Διπλωματική εργασία Έλενας Παυλίδου - «Συμμετοχή ανεμογεννήτριας αιολικού πάρκου υπό αποκοπή στη ρύθμιση φορτίου συχρότητας»- Αθήνα 2010

[27] E.ON Offshore Wind Energy Factbook, 2011

[28] Μ.Βραχίμης, Α.Ξωνίκης, Μ.Παπιγκιώτης «Υπεράκτιες ανεμογεννήτριες, ζητήματα διασύνδεσείς τους στο δίκτυο» Διπλωματική εργασία , ΑΠΘ, Τμήμα ΗΜΗΥ, 2010

- [29] Dr J. Nedwell & Mr D. Howell, “A review of offshore windfarm related underwater noise sources.”, Oct 2004
- [30] Greenpeace , 2005
- [31] Wind Energy – The Facts  
<https://www.wind-energy-the-facts.org/offshore-impacts.html>
- [32] Quora  
<https://www.quora.com>
- [33] Center for Wind Energy at James Madison University “Review of Options for Offshore Foundation Substructures”, August 2012
- [34] Vestas, “Grid Code Comparison Report”, εσωτερική τεχνική έκθεση, 2012
- [35] Διπλωματική εργασία, Μάριου Ζάγγα « Διερεύνηση τεχνικών απαιτήσεων κωδίκων συστήματος για τη διασύνδεση υπεράκτιων αιολικών σταθμών με τεχνολογία συνεχούς ρεύματος υψηλής τάσης (HVDC)» - 2014
- [36] THE SERVICED GRID CODE – ISSUE 3 REVISION 20, April 2007  
<file:///C:/Users/User/Downloads/Issue%203%20Revision%2020%20-%201%20April%202007.pdf>
- [37] Grid Connection Regulations for High and Extra High Voltage, E.ON Netz GmbH, 1η Απριλίου 2006)
- [38] Nordic Grid Code, 18 June 2004
- [39] ELTRA and ELKRAFT Transmission - individual efficiency requirements  
<http://energitilsynet.dk/el/afgoerelser/tilsynsafgoerelser/2004/6/>
- [40] Overview of Electricity Regulation in Canada  
[http://www.acc.com/\\_cs\\_upload/vl/membersonly/Article/946100\\_1.pdf](http://www.acc.com/_cs_upload/vl/membersonly/Article/946100_1.pdf)
- [41] Federal Energy Regulatory Commission  
<https://www.ferc.gov/>
- [42] “Requirements for Offshore Grid Connections in the Grid of TenneT TSO GmbH”, December 2012
- [43] Grid Code - High and extra high voltage - Tennes TSO GmbH, Status: 1st November 2015
- [44] ANDERS MANNIKOFF, ANDERS BERGMAN, “An Overview Introduction of VSC-HVDC: State-of-art and Potential Applications in Electric Power Systems” BOLOGNA 2011
- [45] ABB, “HVDC Light-It is time to connect”, December 2012

- [46] Rodrigo Teixeira Pinto, “Multi – Terminal DC Network System Integrations – Dynamics and Control”
- [47] J. Arrillaga, Y. Liu, and N. Watson, Flexible Power Transmission: The HVDC Options. Wiley, 2007, ISBN:9780470511855
- [48] K. Padiyar, HVDC Power Transmission Systems: Technology and System Interactions. Wiley Eastern Limited, 1990,ISBN: 9788122401028.
- [49] J. Rocabert, A. Luna, F. Blaabjerg, P. Rodriguez, ‘Control of Power Converters in AC Microgrids’, IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 27: 4734 – 4749, 2012.
- [50] Διπλωματική εργασία, Ορέστη Δ. Τζωρτζόπουλου «Μοντελοποίηση και Έλεγχος Πολυτερματικού Δικτύου HVDC για Συμβατότητα με τις Απαιτήσεις Κωδίκων Συστήματος», 2014
- [51] Jacob Aho, Andrew Buckspan, Jason Laks, Yunho Jeong, Fiona Dunne, and Lucy Pao, “Tutorial of Wind Turbine Control for Supporting Grid Frequency through Active Power Control”, University of Colorado 2012
- [52] B. Kirby, “Frequency Regulation Basics and Trends, ORNL/TM-2004/291,” Tech. Rep., 2004.
- [53] J. Eto, “Use of Frequency Response Metrics to Assess the Planning and Operating Requirements for Reliable Integration of Variable Renewable Generation. Lawrence Berkeley National Laboratory: Lawrence Berkeley National Laboratory. LBNL Paper LBNL4142E.” 2011. [Online]. Available: <http://escholarship.org/uc/item/0kt109pn>
- [54] R. Wiser, Z. Yang, M. Hand, O. Hohmeyer, D. Infield, P. H. Jensen, V. Nikolaev, M. O’Malley, and G. S. A. Zervos, “IPCC Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation: Wind Energy,” IPCC, Cambridge, UK and New York, NY, USA, Tech. Rep., 2011. [Online]. Available: <http://srren.ipcc-wg3.de/report>
- [55] A. D. Hansen, “Evaluation of power control with different electrical and control concepts of wind farms,” Project UpWind, Roskilde, Denmark, Tech. Rep., 2010.
- [58] “Wind Turbines Connected to Grids with Voltages Above 100kV: Technical regulation for the properties and the regulation for wind turbines,” Elkraft System and Eltra, Erritsø, Denmark, Tech. Rep., 2003.
- [59] B. Kirby, M. Milligan, and E. Ela, “Providing Minuteto-Minute Regulation from Wind Plants,” in 9th Annual International Workshop on Large-Scale Integration of Wind Power into Power Systems and Transmission Networks for Offshore Wind Power Plants, Quebec, Canada, 2010.
- [60] R. J. Nelson, “Frequency-responsive wind turbine output control,” U.S. Patent 0 001 318, Jan. 6, 2011.

- [61] J. A. S´anchez, A. C. Mayor, J. M. Lusarreta, J. P. Barbachano, S. S. Segura, D. S. L´opez, M. Z. Maeztu, L. M. Palomo, and J. L. Taberna, “Method of operation of a wind turbine to guarantee primary or secondary regulation in an electric grid,” U.S. Patent 0 057 445, Mar. 10, 2011.
- [62] P. Keung, P. Li, H. Banakar, and B. Ooi, “Kinetic Energy of Wind-Turbine Generators for System Frequency Support,” *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 24, no. 1, Feb. 2009.
- [63] I. Erlich and M. Wilch, “Primary Frequency Control by Wind Turbines,” in *IEEE Power and Energy Society General Meeting*, July 2010.
- [64] R. de Almeida and J. P. Lopes, “Participation of Doubly Fed Induction Wind Generators in System Frequency Regulation,” *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 22, pp. 944–950, 2007.
- [65] N. W. Miller and K. Clark, “Advanced Controls Enable Wind Plants to Provide Ancillary Services,” in *IEEE Power and Energy Society General Meeting*, July 2010.
- [66] Y. Jeong, “Comparison and Testing of Active Power Control Strategies for Grid-connected Wind Turbines,” Master’s thesis, Colorado School of Mines, 2011
- [67] A. Hansen, P. Sørensen, F. Iov, and F. Blaabjerg, “Centralised Power Control of Wind Farm with Doubly Fed Induction Generators,” *Renewable Energy*, vol. 31, pp. 935–951, 2006.
- [68] V. Spudić, M. Jelavić, M. Baotić, and N. Perić, “Hierarchical Wind Farm Control for Power-Load Optimization,” in *The Science of making Torque from Wind (Torque2010)*, 2010.
- [69] German Tarnowski, Philip Kjaer, Soren Dalsgaard, Anders Nyborg, “Regulation and Frequency Response Service Capability of Modern Wind Power Plants”, Vestas Wind Systems A/S, Denmark, IEEE, 2010.
- [70] Francisco Diaz-Gonzales, Melanie Hau, Andreas Sumper, Oriol Gomis-Bellmunt, “Participation of wind power plants in system frequency control: Review of grid code requirements and control methods”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, ScienceDirect, March 2014.
- [71] OLOV SOLBERG, “A New Wind Turbine Control Method to Smooth Power Generation”, Department of Energy and Environment Division of Electric Power Engineering, CHALMERS UNIVERSITY OF TECHNOLOGY, Goteborg, Sweden 2012