



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ

ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

Διασύνδεση Αιολικών Πάρκων

Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία

Ευαγγελία Β. Σακκά

Επιβλέπων: Φώτιος Πλέσσας

Ιούνιος 2025



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ

ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

Διασύνδεση Αιολικών Πάρκων

Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία

Ευαγγελία Β. Σακκά

Επιβλέπων: Φώτιος Πλέσσας

Ιούνιος 2025



UNIVERSITY OF THESSALY

SCHOOL OF ENGINEERING

DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND COMPUTER ENGINEERING

Interconnection of Wind Farms

MSc Thesis

Evangelia V. Sakka

Supervisor: Fotios Plessas

June 2025

Εγκρίνεται από την Επιτροπή Εξέτασης:

Επιβλέπων/πουσα	Φώτιος Πλέσσας Καθηγητής, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας
Μέλος	Δημήτριος Μπαργιώτας Καθηγητής, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας
Μέλος	Παναγιώτης Γκόνης Επίκουρος Καθηγητής, Τμήμα Τεχνολογιών Ψηφιακής Βιομηχανίας, Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών

ΥΠΕΥΘΥΝΗ ΔΗΛΩΣΗ ΠΕΡΙ ΑΚΑΔΗΜΑΪΚΗΣ ΔΕΟΝΤΟΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΠΝΕΥΜΑΤΙΚΩΝ ΔΙΚΑΙΩΜΑΤΩΝ

Με πλήρη επίγνωση των συνεπειών του νόμου περί πνευματικών δικαιωμάτων, δηλώνω ρητά ότι η παρούσα μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία, καθώς και τα ηλεκτρονικά αρχεία και πηγαίοι κώδικες που αναπτύχθηκαν ή τροποποιήθηκαν στα πλαίσια αυτής της εργασίας, αποτελούν αποκλειστικά προϊόν προσωπικής μου εργασίας, δεν προσβάλλουν οποιασδήποτε μορφής δικαιώματα διανοητικής ιδιοκτησίας, προσωπικότητας και προσωπικών δεδομένων τρίτων, δεν περιέχουν έργα/εισφορές τρίτων για τα οποία απαιτείται άδεια των δημιουργών/δικαιούχων και δεν είναι προϊόν μερικής ή ολικής αντιγραφής, οι πηγές δε που χρησιμοποιήθηκαν περιορίζονται στις βιβλιογραφικές αναφορές και μόνον και πληρούν τους κανόνες της επιστημονικής παράθεσης. Τα σημεία όπου έχω χρησιμοποιήσει ιδέες, κείμενο, αρχεία ή/και πηγές άλλων συγγραφέων αναφέρονται ευδιάκριτα στο κείμενο με την κατάλληλη παραπομπή και η σχετική αναφορά περιλαμβάνεται στο τμήμα των βιβλιογραφικών αναφορών με πλήρη περιγραφή. Δηλώνω επίσης ότι τα αποτελέσματα της εργασίας δεν έχουν χρησιμοποιηθεί για την απόκτηση άλλου πτυχίου. Αναλαμβάνω πλήρως, ατομικά και προσωπικά, όλες τις νομικές και διοικητικές συνέπειες που δύναται να προκύψουν στην περίπτωση κατά την οποία αποδειχθεί, διαχρονικά, ότι η εργασία αυτή ή τμήμα της δεν μου ανήκει διότι είναι προϊόν λογοκλοπής.

Η Δηλούσα

Σακκά Β. Ευαγγελία

DISCLAIMER ON ACADEMIC ETHICS AND INTELLECTUAL PROPERTY RIGHTS

Being fully aware of the implications of copyright laws, I expressly state that this MSc thesis, as well as the electronic files and source codes developed or modified in the course of this thesis, are solely the product of my personal work and do not infringe any rights of intellectual property, personality and personal data of third parties, do not contain work / contributions of third parties for which the permission of the authors / beneficiaries is required and are not a product of partial or complete plagiarism, while the sources used are limited to the bibliographic references only and meet the rules of scientific citing. The points where I have used ideas, text, files and / or sources of other authors are clearly mentioned in the text with the appropriate citation and the relevant complete reference is included in the bibliographic references section. I also declare that the results of the work have not been used to obtain another degree. I fully, individually and personally undertake all legal and administrative consequences that may arise in the event that it is proven, in the course of time, that this thesis or part of it does not belong to me because it is a product of plagiarism.

The Declarant

Sakka V. Evangelia

Ευχαριστίες

Με την παρούσα διπλωματική εργασία ολοκληρώνεται ο κύκλος σπουδών μου στο μεταπτυχιακό πρόγραμμα με τίτλο **Ευφυή Δίκτυα Ηλεκτρικής Ενέργειας (Smart Grid Energy Systems)**, του Τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας.

Σε όλη τη διάρκεια φοίτησής μου η συμβολή των καθηγητών μου υπήρξε αδιαμφισβήτητα καθοριστική, στους οποίους θα ήθελα να εκφράσω τις ειλικρινείς μου ευχαριστίες, για την υποστήριξη και βοήθειά τους στην ολοκλήρωση του στόχου μου.

Ιδιαίτερως θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα της παρούσας κύριο Φώτιο Πλέσσα για την επιστημονική και συμβουλευτική καθοδήγηση που μου προσέφερε.

Τέλος, ένα μεγάλο ευχαριστώ οφείλω στην οικογένειά μου για τη συμπαράσταση και την αμέριστη υπομονή τους, και ιδίως τις μικρές μου κόρες που με περίμεναν αδιαμαρτύρητα μέχρι να επιστρέψω στην οικογενειακή φωλιά. Σε αυτές, που ήταν η πηγή της δύναμης μου, αφιερώνω αυτό μου το εγχείρημα.

Διασύνδεση Αιολικών Πάρκων

Ευαγγελία Β. Σακκά

Περίληψη

Η εφαρμογή των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, και ιδιαίτερα της αιολικής ενέργειας, έχει αυξηθεί, ωστόσο, το ηλεκτρικό δίκτυο εγείρει πολλές προκλήσεις, μεταξύ των οποίων οι διακυμάνσεις της ισχύος εξόδου, καθώς η διέλευση χαμηλής τάσης σε περίπτωση συνθηκών σφάλματος βραχυκυκλώματος. Κατόπιν μιας συνοπτικής αναφοράς των βασικών αρχών αιολικής ενέργειας και παρουσίασης της διαδικασίας ηλεκτροπαραγωγής, των συνηθέστερων μορφών ανεμογεννητριών και τρόπων διασύνδεσης των σταθμών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, περιγράφονται οι κύριες μέθοδοι εξομάλυνσης τάσης και συχνότητας των αιολικών πάρκων. Ακόμη, ακολουθεί περιγραφή των τυπικών διαδικασιών αυτόματου εποπτείας/τηλεμετρίας μέσω απομακρυσμένων συστημάτων. Τέλος, παρουσιάστηκε συνοπτικά το πρωτοπόρο για την εποχή του υπεράκτιο αιολικό πάρκο του London Array, που ξεπέρασε σε χωρητικότητα κάθε άλλο πάρκο εκείνης της περιόδου και ταυτόχρονα ξεχώρισε για τον σχεδιασμό και καινοτόμα κατασκευή του. Μέσω της περιγραφής του αναδεικνύονται τα βέλτιστα σχεδιαστικά σημεία της κατασκευής που συνέβαλλαν στην επιτυχία του, και τέλος αξιολογούνται οι βασικές σχεδιαστικές λεπτομέρειες.

Λέξεις-κλειδιά:

Ανεμογεννήτρια, Αιολικό πάρκο, Όριο Betz, Ταχύτητα εκκίνησης, Ταχύτητα αποκοπής, Ηλεκτρονικά ισχύος, Συστήματα Ενεργειακής Αποθήκευσης, Flexible AC Transmission Systems, Static Var Compensators, Πυκνωτές, Σύστημα ελέγχου, Σύστημα εποπτείας και τηλεμετρίας

Interconnection of Wind Farms

Evangelia V. Sakka

Abstract

The integration of renewable energy sources, particularly wind energy, has increased significantly in recent years. Nevertheless, the electrical grid faces several challenges, including power output fluctuations and low voltage ride-through requirements during short-circuit fault conditions. This thesis provides a concise overview of the fundamental principles of wind energy, outlines the electricity generation process, and presents the most common types of wind turbines and interconnection methods for power generation stations. The main techniques for voltage and frequency stabilization in wind farms are systematically analyzed. Additionally, the study describes standard procedures for automatic monitoring and telemetry through remote systems. Finally, the thesis presents a brief case study of the pioneering London Array offshore wind farm, which, at the time of its commissioning, surpassed all other wind farms in capacity and distinguished itself through its innovative design and construction. Through its description, the best design points of the construction that contributed to its success are highlighted, and finally the key design details are evaluated.

Keywords:

Wind turbine, Wind farm, Betz Limit, Cut-in wind speed, Cut-out wind speed, Converters, Battery Energy Storage Systems, Flexible AC Transmission Systems, Static Var Compensators, Capacitors, Power controller, Supervisory Control and Data Acquisition

Πίνακας περιεχομένων

<i>Ευχαριστίες.....</i>	<i>xiii</i>
<i>Περίληψη.....</i>	<i>xv</i>
<i>Abstract</i>	<i>xvii</i>
<i>Πίνακας περιεχομένων.....</i>	<i>xix</i>
<i>Κατάλογος εικόνων</i>	<i>xxi</i>
<i>Κατάλογος σχημάτων.....</i>	<i>xxiii</i>
<i>Κατάλογος πινάκων</i>	<i>xxv</i>
<i>Συνομογραφίες.....</i>	<i>xxvii</i>
Κεφάλαιο 1 Εισαγωγή.....	1
1.1 Αντικείμενο της διπλωματικής	3
1.1.1 Συνεισφορά.....	4
1.2 Οργάνωση του τόμου	4
Κεφάλαιο 2 Βασικές Αρχές και Διαδικασία Ηλεκτροπαραγωγής.....	7
2.1 Θεμελιώδεις εξισώσεις υπολογισμού ταχύτητας ανέμου.....	7
2.2 Υπολογισμός διαθέσιμου αιολικού δυναμικού.....	10
2.3 Διαδικασία μετατροπής αιολικής ενέργειας σε ηλεκτρική	13
2.4 Ταξινόμηση Ανεμογεννητριών	25
2.4.1 Ταξινόμηση Α/Γ σε σχέση με τη θέση του άξονα	25
2.4.2 Ταξινόμηση Α/Γ αναλόγως της ταχύτητας περιστροφής του δρομέα.....	27
2.4.3 Ταξινόμηση Α/Γ αναλόγως της γεννήτριας.....	29
2.4.4 Ταξινόμηση Α/Γ αναλόγως της ύπαρξης κιβωτίου μετάδοσης ταχύτητας.....	29
2.4.5 Ταξινόμηση Α/Γ αναλόγως της ονομαστικής ισχύος	30
2.4.6 Βελτιστοποίηση απόδοσης με δυνατότητα συνδυασμού Α/Γ	31
Κεφάλαιο 3 Αιολικά πάρκα και Τρόποι Διασύνδεσης	39
3.1 Αιολικό δυναμικό στην Ελλάδα.....	39
3.2 Σύγκριση αιολικής και ηλιακής ενέργειας.....	42
3.3 Ταξινόμηση Αιολικών πάρκων	48
3.4 Τρόποι Διασύνδεσης Αιολικών πάρκων.....	54
3.4.1 Σύνδεση παραγωγών στο δίκτυο.....	55
3.4.2 Μικροδίκτυα και Διεσπαρμένη παραγωγή	58
Κεφάλαιο 4 Αντιμετώπιση συνεπειών εισροής Αιολικής παραγωγής στο δίκτυο.....	63
4.1 Ηλεκτρονικά ισχύος	63
4.1.1 Μετατροπείς DC-DC (συνεχούς σε συνεχές)	64
4.1.2 Μετατροπείς DC-AC ή αντιστροφείς (συνεχούς σε εναλλασσόμενο)	65
4.2 Συστήματα ενεργειακής αποθήκευσης	65

4.3 Πυκνωτές.....	67
4.4 Συστήματα ελέγχου ευστάθειας.....	68
4.5 Συστήματα Ελέγχου-Εποπτείας και Τηλεμετρίας	73
Κεφάλαιο 5 Περιγραφή του υπεράκτιου αιολικού πάρκου London Array	75
5.1 Ιστορικά στοιχεία	75
5.2 Εκτίμηση Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων.....	76
5.3 Τεχνική περιγραφή	76
5.3.1 Ανεμογεννήτριες και θεμελίωση	78
5.3.2 Καλώδια τύπου Array	81
5.3.3 Υπεράκτιοι υποσταθμοί.....	81
5.3.4 Καλώδια τύπου Export.....	82
5.3.5 Χερσαίος υποσταθμός	84
5.4 Λειτουργία και Συντήρηση	87
5.5 Σχολιασμός κατασκευής	88
Κεφάλαιο 6 Συμπεράσματα.....	93
Βιβλιογραφία.....	95

Κατάλογος εικόνων

Εικόνα 2.1: Παραδείγματα δημιουργίας ανέμων	12
Εικόνα 2.2: Διάταξη κυριότερων μερών μιας Α/Γ	14
Εικόνα 2.3: Η εταιρεία MingYang (Κίνα) κατασκεύασε πτερύγιο επίγειας Α/Γ με μήκος 107 m από υαλοβάμβακα που μειώνει το βάρος και αναβαθμίζει την αντοχή της [9].....	15
Εικόνα 2.4: Τυπικές διατάξεις πυλώνων Α/Γ. Παραδείγματα χαλύβδινου σωληνοειδούς προβόλου (α), δικτυωτού (β) και υβριδικού σωληνοειδούς προβόλου(γ)	19
Εικόνα 2.5: Λήψεις εφαρμογής στο πεδίο των διαφορετικών επιλογών θεμελίωσης μιας χερσαίας Α/Γ.....	19
Εικόνα 2.6: Δελτίο τεχνικών χαρακτηριστικών της Siemens Gamesa SWT-3.6-107.....	21
Εικόνα 2.7: Φωτογραφική λήψη τυπικής Α/Γ οριζόντιου (δεξιά) και κάθετου (αριστερά) άξονα	26
Εικόνα 2.8: Διάφορες όψεις μιας επαγωγικής γεννήτριας βραχυκυκλωμένου κλωβού ...	32
Εικόνα 2.9: Διάφορες όψεις μιας επαγωγικής γεννήτριας δακτυλιοφόρου δρομέα	34
Εικόνα 2.10: Παραδείγματα μορφής επαγωγικών γεννητριών διπλής τροφοδοσίας	36
Εικόνα 2.11: Διάφορες όψεις μιας σύγχρονης γεννήτριας μόνιμου μαγνήτη	38
Εικόνα 3.1: Κατανομή αιολικού δυναμικού στην Ελλάδα	39
Εικόνα 3.2: Εγκατεστημένη ισχύς αιολικών παραγωγής σε επίπεδο Περιφερειών.....	41
Εικόνα 3.3: Η παιδική χαρά Wikado στο Ρότερνταμ 1.200 m ² που κατασκευάστηκε από πέντε πτερύγια Α/Γ που είχαν απορριφθεί	46
Εικόνα 3.4: Παράκτιο πάρκο ισχύος 36 MW στη θέση Ερεσού ύψωμα Φούρκα Κεντρικής Μακεδονίας με 18 Α/Γ τύπου Gamesa G114 και έναρξη λειτουργίας το 2018	50
Εικόνα 3.5: Το Dogger Bank Wind Farm τριών φάσεων (Dogger Bank A, B και C) που θα έχει εγκατεστημένη ισχύ 3,6 GW και προβλέπεται να τροφοδοτεί έως και 6 εκατομμύρια σπίτια ετησίως.....	51
Εικόνα 3.6: Τυπικές διατάξεις έδρασης υπεράκτιων Α/Γ σε σχέση με το βάθος.....	52
Εικόνα 3.7: Τοποθέτηση Α/Γ σε πλωτή πλατφόρμα, η οποία στη συνέχεια στερεώνεται στον πυθμένα με καλώδια πρόσδεσης και ειδικά άγκιστρα.....	53
Εικόνα 3.8: Οι σχεδιαζόμενες υπεράκτιες αιολικές μονάδες στην Ελλάδα	54
Εικόνα 3.9: Απεικόνιση απευθείας σύνδεσης αδειοδοτημένου αιολικού πάρκου 4ων Α/Γ στο φαράγγι του Κοτσουφού Κρήτης [20]	56
Εικόνα 3.10: Απεικόνιση σύνδεσης μέσω υποσταθμού αδειοδοτημένου υβριδικού σταθμού 36MW στην κορυφογραμμή «Οξύ Κεφάλι» Κρήτης. Πρόκειται για αιολικό πάρκο με χρήση αναστρέψιμου υδροηλεκτρικού ως σύστημα αποθήκευσης [20]	57
Εικόνα 3.11: Τυπικές διατάξεις σύνδεσης υπεράκτιων αιολικών πάρκων στο δίκτυο	57
Εικόνα 5.1: Δορυφορική λήψη της εγκατάστασης του London Array, όπου αποτυπώνεται και το γειτονικό θαλάσσιο πάρκο Thanet.....	77
Εικόνα 5.2: Σκαρίφημα βασικής διάταξης του London Array [31]	78
Εικόνα 5.3: Λήψη των Α/Γ του London Array, διακρίνεται το κίτρινο μεταβατικό τμήμα. 79	
Εικόνα 5.4: Λήψη καθέλκυσης του πασσάλου θεμελίωσης (Monopile).....	80
Εικόνα 5.5: Πλήρως εγκατεστημένος υποσταθμός του London Array.....	82
Εικόνα 5.6: Λήψεις από τα διαφορετικά στάδια εγκατάστασης των καλωδίων Export στη λασπώδη περιοχή και στην ανοιχτή θάλασσα	83

Εικόνα 5.7: Λήψεις από την εγκατάσταση των καλωδίων Export κοντά στον κυματοθραύστη.....	84
Εικόνα 5.8: Υποσταθμός Cleve Hill (1).....	85
Εικόνα 5.9: Υποσταθμός Cleve Hill (2).....	87

Κατάλογος σχημάτων

Σχήμα 2.1: Πλάγια όψη ενός δίσκου ενεργοποίησης Α/Γ για την περίπτωση ομοιογενούς ροής αέρα.....	7
Σχήμα 2.2: Τυπική Μορφή Πολικού Διαγράμματος [7].....	11
Σχήμα 2.3: Χαρακτηριστική καμπύλη λειτουργίας μιας Α/Γ.....	22
Σχήμα 2.4: Σύγκριση πορείας της καμπύλης ισχύος και του συντελεστή ισχύος μιας Α/Γ σε σύγκριση με την ταχύτητα του αέρα	22
Σχήμα 2.5: Ελάχιστοι αναγκαίοι περιορισμοί απόστασης στην χωροθέτηση Α/Γ	24
Σχήμα 2.6: Επίδραση εμποδίου ύψους 20 m και μήκους 60 m σε Α/Γ ύψους 50 m τοποθετημένης σε απόσταση 300 m	25
Σχήμα 2.7: Κατασκευαστικές διαφορές Α/Γ οριζόντιου και κάθετου άξονα.....	27
Σχήμα 2.8: Τυπική διάταξη Α/Γ σταθερής ταχύτητας περιστροφής, όπου με N_s δηλώνεται η σύγχρονη ταχύτητα, με f_s η συχνότητα δικτύου και με p ο αριθμός των ζευγών των πόλων της Α/Γ.....	28
Σχήμα 2.9: Τυπική διάταξη Α/Γ μεταβλητής ταχύτητας περιστροφής, όπου με N_s δηλώνεται η σύγχρονη ταχύτητα, με f_s η συχνότητα δικτύου και με p ο αριθμός των ζευγών των πόλων της Α/Γ	29
Σχήμα 2.10: Η εξέλιξη των Α/Γ στην πάροδο του χρόνου.....	30
Σχήμα 2.11: Τυπική διάταξη μιας Α/Γ Τύπου-1, δηλαδή με επαγωγική γεννήτρια βραχυκυκλωμένου κλωβού.....	31
Σχήμα 2.12: Τυπική διάταξη μιας Α/Γ Τύπου-2, δηλαδή με επαγωγική γεννήτρια δακτυλιοφόρου δρομέα.....	33
Σχήμα 2.13: Τυπική διάταξη μιας Α/Γ Τύπου-3, δηλαδή με επαγωγική γεννήτρια διπλής τροφοδοσίας	35
Σχήμα 2.14: Τυπική διάταξη μιας Α/Γ Τύπου-4, δηλαδή με σύγχρονη γεννήτριας μόνιμου μαγνήτη	37
Σχήμα 3.1: Η ανάπτυξη της αιολικής ενέργειας στον Ελλαδικό χώρο από 1999 έως 2024.....	42
Σχήμα 3.2: Σύγκριση έκτασης αιολικών και φωτοβολταϊκών πάρκων ίδιας ισχύος 18 MW	44
Σχήμα 3.3: Τυπική διάταξη ενός μικροδικτύου (Πηγή Panasonic)	62
Σχήμα 4.1: Τυπική διάταξη ενός μοντέλου SVC & BESS.....	66
Σχήμα 4.2: Διάταξη συστήματος αποθήκευσης ενέργειας με χρήση υπερπυκνωτή αναφορικά με το (άνω) κύκλωμα ισχύος και το (κάτω) σύστημα ελέγχου.....	67
Σχήμα 4.3: Μονογραμμικό διάγραμμα ενός τυπικού συστήματος UIPC-ESS	68
Σχήμα 4.4: Προτεινόμενη διάταξη αιολικού πάρκου Α/Γ σύγχρονου μόνιμου μαγνήτη... ..	69
Σχήμα 4.5: Τυπική διάταξη αιολικού πάρκου συνδυαστικής τεχνολογίας Α/Γ	70
Σχήμα 4.6: Μοντέλο αυτόματου ελέγχου παραγωγής αιολικού σταθμού παραγωγής	72
Σχήμα 4.7: Διάταξη ενός ΣΕΕ	74
Σχήμα 5.1: Μονογραμμικό διάγραμμα εγκατάστασης.....	86

Κατάλογος πινάκων

Πίνακας 2.1: Χαρακτηριστικές τιμές απόδοσης συνιστωσών επιρροής και του ολικού βαθμού απόδοσης μιας Α/Γ	23
Πίνακας 2.2: Τιμές προσδιορισμού τύπου Α/Γ με βάσει την ισχύ εξόδου [10]	30
Πίνακας 5.1: Σχεδιαστικά σημεία βέλτιστης πρακτικής εφαρμογής.....	89

Συντομογραφίες

Α/Γ Ανεμογεννήτρια

ΑΔΜΗΕ Ανεξάρτητος Διαχειριστής Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας

ΑΠΕ Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας

ΑΣΠΗΕ Αιολικός Σταθμός Παραγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας

ΔΕΔΔΗΕ Διαχειριστής Ελληνικού Δικτύου Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας

κ.λ.π. και λοιπά

λ.χ. λόγου χάρη

π.χ. για παράδειγμα

ΜΤ Μέση τάση

ΣΕΕ Σύστημα Εποπτικού Ελέγχου

ΣΚΣ Σημείο κοινής σύνδεσης

ΣΣΔ Σημείο σύνδεσης δικτύου

ΥΤ Υψηλή τάση

ΥΥΤ Υπερυψηλή τάση

ΧΤ Χαμηλή τάση

AC Εναλλασσόμενη τάση

DC Συνεχής τάση

HDD Οριζόντια κατευθυνόμενη διάτρηση

SVC Στατικός VAR αντισταθμιστής

Κεφάλαιο 1 Εισαγωγή

Η αιολική ενέργεια αποτελεί την αρχαιότερη μορφή εκμετάλλευσης ενέργειας και συγκεκριμένα του πνέοντος ανέμου. Πρώτο ιστορικά αποδεικτικό στοιχείο αυτού είναι τα ιστία των πλοίων και αργότερα οι ανεμόμυλοι, που παράγουν μηχανικό έργο. Ο πνέοντας άνεμος εμπεριέχει σημαντικό ποσό κινητικής ενέργειας ως αποτέλεσμα της ασύμμετρης θέρμανσης της επιφάνειας της γης λόγω της ηλιακής ακτινοβολίας. Ακολουθώντας την εξέλιξη της τεχνολογίας η αιολική ενέργεια εδραιώθηκε στην ηλεκτροπαραγωγή, ως μια εναλλακτική πρόταση στην οικονομία του πετρελαίου, και ειδικότερα συγκαταλέγεται στις «καθαρές» μορφές ενέργειας.

Στο σύγχρονο πρόβλημα της ηλεκτροπαραγωγής των τελευταίων δεκαετιών, που επιβάλλεται η χρήση «καθαρών» πηγών ενέργειας με βασικό στόχο τη μείωση ως και την εξάλειψη των αέριων ρύπων, η αιολική ενέργεια αποτελεί μια ελκυστική λύση. Πληθώρα παραγόντων συνεπάγουν σε αυτό, όπως η δωρεάν και άφθονη παροχή της πρώτης ύλης (άνεμος), η μη εκπομπή ρύπων με τις δυσμενείς περιβαλλοντολογικές συνέπειες (φαινόμενο θερμοκηπίου), το χαμηλό κόστος συντήρησης των εγκαταστάσεων των αιολικών πάρκων, η ενίσχυση της τοπικής οικονομίας της πλησιέστερης περιοχής της λειτουργίας των πάρκων, καθώς και η συμβολή στην ενεργειακή ανεξαρτησία και ασφάλεια των μικρών και αναπτυσσόμενων χωρών.

Στον αντίποδα, κύριο αποτρεπτικό λόγο στο βαθμό εδραίωσης της διαδραματίζει τόσο το ιδιαίτερα υψηλό κόστος μελέτης, όσο και της αρχικής εγκατάστασης. Ο εντοπισμός των ευνοϊκότερων σημείων αιολικού δυναμικού απαιτεί χρόνο, και ειδικότερα οι μετρήσεις εκτίμησης του διαθέσιμου δυναμικού διαρκούν τουλάχιστον ένα έτος. Επιπρόσθετα, οι ενδεικνυόμενες περιοχές παρουσιάζουν δυσκολίες πρόσβασης, είτε πρόκειται για χερσαία είτε για αιολικά πάρκα, και απαιτούν πολυδάπανα έργα πολιτικού (γενικές διαμορφώσεις, βάσεις θεμελίωσης) αλλά και μηχανολόγου/ηλεκτρολόγου μηχανικού (δαπανηρός ηλεκτρομηχανολογικός εξοπλισμός, συστήματα τηλεμετρίας/ελέγχου).

Καθόλου αμελητέες είναι, επίσης, οι διακυμάνσεις της απόδοσης ισχύος οφειλόμενες στη μεταβαλλόμενη ένταση του ανέμου. Οι άνεμοι είναι αδύνατο να τιθασευτούν, ώστε να καλυφθούν οι απαιτήσεις σε ηλεκτρική ενέργεια εν τη γενέσει τους, που σημαίνει ότι η

λειτουργία των πάρκων είναι ανέφικτη σε περιόδους νηνεμίας ή ανεμοθύελλών ακόμη και αν οι ανάγκες του δικτύου σε καταναλώσεις το απαιτούν. Συνδυαστικά με το χαμηλό συντελεστή απόδοσης τους, περίπου 30%, μια αξιόλογη παραγωγή ισχύος προϋποθέτει μεγάλο αριθμό ανεμογεννητριών καλύπτοντας σημαντική επιφάνεια. Αξίζει, τέλος, να σημειωθεί το αντίκτυπο των αιολικών πάρκων στο περιβάλλον της όμορης περιοχής (σύνταξη μελέτης περιβαλλοντικών επιπτώσεων, οπτική όχληση, ηχορύπανση). Ωστόσο, σε συνδυασμό με τις άλλες μορφές ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ΑΠΕ) εξασφαλίζουν ένα ισορροπημένο και οικονομικό σύστημα προφέροντας προϊόν χαμηλότερου κόστους στον καταναλωτή.

Σημαντικά συμπεράσματα για την εξέλιξη της αιολικής ενέργειας δημοσίευσε η ένωση των ευρωπαϊκών αιολικών επιχειρήσεων WindEurope. Το 2024 διαπιστώθηκε ότι ο ρυθμός ανάπτυξης της αιολικής ενέργειας στην Ευρώπη όχι μόνο διατηρήθηκε σταθερός, αλλά μάλιστα ακολούθησε αυξητική πορεία, μιας και συνολικά αδειοδοτήθηκε μεγαλύτερος αριθμός αιολικών πάρκων από οποιαδήποτε προηγούμενη χρονιά περίπου συμφωνημένης ισχύος 37 GW. Η συνολική δυναμικότητα εγκατεστημένης αιολικής ενέργειας στην γηραιά ήπειρο αγγίζει περί τα 285 GW, από αυτά στη στεριά εντοπίζονται τα 248 GW, και μόνο τα 37 GW αφορούν υπεράκτια πάρκα. Ειδικότερα, αναλύοντας το μίγμα της ηλεκτρικής κατανάλωσης στην Ευρώπη το 2024, διαπιστώθηκε ότι το μερίδιο της αιολικής ενέργειας στη συνολική κατανάλωση προσέγγισε το 19% [1]. Όσον αφορά την κατανομή μεριδίων των διαφόρων πηγών ενέργειας (συμβατικοί σταθμοί, ΑΠΕ) στον χώρο της Ελλάδας, οι αρμόδιοι εθνικοί διαχειριστές ΔΕΔΔΗΕ/ΑΔΜΗΕ δημοσίευσαν ότι κατά τη διάρκεια του 2024 η αιολική ενέργεια συνείσφερε κατά 24,4% στην εγχώρια παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

Βάσει της ετήσιας στατιστικής έκθεσης παραγωγής αιολικής ενέργειας, που γνωστοποίησε η Ελληνική Επιστημονική Ένωση Αιολικής Ενέργειας, η συνολική εγκατεστημένη ισχύς προσέγγισε τα 5.355 MW στα τέλη του 2024 [2] και η εκτίμηση για την επόμενη διετία πλησιάζει τα 6,50 GW [3]. Αξίζει να σημειωθεί ότι ήδη κατά τα τέλη του 2024 βρίσκονταν σε φάση κατασκευής ή φάση λήψης αδειοδότησης νέα αιολικά πάρκα δυναμικότητας άνω των 1,1 GW, τα οποία στην πλειοψηφία τους έχουν χρονικό ορίζοντα σύνδεσης στο δίκτυο διάστημα 18 μηνών. Εάν στον αριθμό αυτό προστεθεί η ισχύς 300MW, που αναφέρεται σε νέους αιολικούς σταθμούς, που έχουν ευδοκιμήσει σε διαγωνισμούς και έχουν

κατατεθεί εγγυητικές καλής εκτέλεσης, διαφαίνεται ότι ο στόχος της επόμενης διετίας εύκολα θα ικανοποιηθεί και πιθανώς να ξεπεραστεί.

Παγκοσμίως, η συνολική ισχύς ΑΠΕ ανήλθε στα 4.448,00 GW, από τα οποία τα 1.283,00 GW αντιστοιχούν στην υδροηλεκτρική ενέργεια, τα 1.865,00 GW στην ηλιακή, τα 1.133 GW στην αιολική ενέργεια. Παρά την πρόοδο αυτή, η ανάπτυξη εξακολουθεί να υπολείπεται του ρυθμού που απαιτείται για την επίτευξη του στόχου για τριπλασιασμό της διεθνούς εγκατεστημένης ισχύος από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, καταλήγοντας να υπερβαίνει τα 11 TW μέχρι το 2030. Η διατήρηση του ρυθμού ανάπτυξης που παρατηρήθηκε το 2024 θα απέφερε μόνο 10,4 TW ανανεώσιμων πηγών ενέργειας έως το 2030, υπολείποντας κατά 0,8 TW από τον στόχο (72%), σύμφωνα με το International Renewable Energy Agency [4].

1.1 Αντικείμενο της διπλωματικής

Σημαντικό θέμα προβληματισμού που απασχολεί την παγκόσμια κοινότητα τις τελευταίες τουλάχιστον δύο δεκαετίες, αποτελεί η ανάπτυξη της παραγωγή καθαρής ηλεκτρικής ενέργειας, προκειμένου να ανταποκρίνονται εξ ολοκλήρου στα καθημερινά αυξημένα φορτία ζήτησης των καταναλωτών, και σύναμμα να αποτελέσουν τη λύση στην ανάγκη για πλήρη απαλλαγή από τις ορυκτές ύλες.

Στη παρούσα διπλωματική εργασία αναδεικνύεται η σημαντική συνεισφορά της αιολικής δύναμης στην ηλεκτροπαραγωγή από χρήση ΑΠΕ και το πρωταγωνιστικό ρόλο που δύναται να λάβει. Μέσω της περιγραφής της διαδικασίας μετατροπής της αιολικής ενέργειας σε ηλεκτρική σκοπός είναι να γίνει αντιληπτό ότι ο άνεμος που υπάρχει παντού στην ατμόσφαιρα μπορεί ευκολά, αποδοτικά και καθαρά να χρησιμοποιηθεί για την κάλυψη της ενεργειακής ζήτησης. Στη συνέχεια ειδική αναφορά γίνεται στους τρόπους εναρμόνισης της τάσης και της συχνότητας στις προκαθορισμένες τιμές του ηλεκτρικού δικτύου διασφαλίζοντας την ποιότητα της παραγωγής. Επισημαίνοντας τις βελτιώσεις της ποιότητας της παραχθείσας ενέργειας διαφαίνεται η ανάγκη του δικτύου τόσο για επέκταση όσο και για αναβάθμιση. Η ισχύουσα κατάσταση του δικτύου δυσχεραίνει τη λειτουργία τους, μιας και σε πολλές περιπτώσεις υποχρεώνονται οι σταθμοί παραγωγής να τίθενται εκτός λειτουργίας λόγω αδυναμίας απορρόφησης της ενέργειας. Για το τέλος, επιλέχθηκε η τεχνική περιγραφή ενός ήδη εγκατεστημένου και σε κανονική λειτουργία

ενός αιολικού πάρκου, προκειμένου να γίνει αντιληπτό το σύνολο των ενεργειών, εργασιών και υλικών που απαρτίζουν έναν αιολικό σταθμό παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.

1.1.1 Συνεισφορά

Η παρουσίαση του εγκατεστημένου αιολικού πάρκου αποτελεί και τη συνεισφορά της εν λόγω διπλωματικής εργασίας, προκειμένου μελετώντας τη διεθνή βιβλιογραφία να εξαχθούν οι βέλτιστες τεχνικές εφαρμογής που αφορούν στην υλοποίηση του. Εν ολίγοις, επισημαίνονται και αξιολογούνται οι αποτελεσματικές τεχνικές που έκριναν και εγγυήθηκαν την επιτυχία και την υψηλή απόδοση ,καθιστώντας το έργο ως πρότυπο.

Εμμέσως η μελέτη αυτού αφενός συμβάλλει στην εξοικείωση με τις διαδικασίες και στάδια μελέτης-κατασκευής αυτών των τύπων σταθμών παραγωγής και αφετέρου βοηθά στην κατανόηση της τεχνογνωσίας-τεχνολογίας που επιλέχθηκε στην κατασκευή ενός υπεράκτιου αιολικού πάρκου.

1.2 Οργάνωση του τόμου

Η παρούσα εργασία δομείται από 6 Κεφάλαια, και ακολουθεί σύντομη αναφορά περιεχομένου καθεμίας ενότητας.

Στο Κεφάλαιο 1 γίνεται μια σύντομη εισαγωγή στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με χρήση της αιολικής δύναμης και του ρυθμού ανάπτυξης της στην πάροδο του χρόνου, παρουσιάζοντας τους λόγους που συμβάλλουν στην ραγδαία εξάπλωση της.

Στο Κεφάλαιο 2 εν συντομία αναλύεται το θεωρητικό υπόβαθρο στο οποίο στηρίζεται η αιολική παραγωγή ενέργειας και περιγράφεται στο σύνολο του ολόκληρος ο μηχανισμός μετατροπής της αιολικής ενέργειας σε ηλεκτρική. Εν συνεχεία, παρουσιάζονται οι διάφορες ταξινομήσεις των ανεμογεννητριών δίνοντας περισσότερη έμφαση στους συνδυαστικούς τύπους για λογούς βελτιστοποίησης της απόδοσης αυτών.

Το Κεφάλαιο 3 αφιερώνεται στα αιολικά πάρκα και στις διαθέσιμες επιλογές σύνδεσης αυτών στο ηλεκτρικό δίκτυο. Μετά από ειδική αναφορά στο αιολικό δυναμικό της Ελλάδας ακολουθεί συγκριτική παράθεση της αιολικής και ηλιακής παραγωγής ενέργειας. Επίσης, γίνεται διάκριση αιολικών των πάρκων ανάλογα με τη θέση εγκατάστασης. Έμφαση δίνεται στις εναλλακτικές λειτουργίας των πάρκων, που μπορούν να είναι

συνδεδεμένα ή και μη, με μνεία στα πλεονεκτήματα των μικροδικτύων και της διεσπαρμένης παραγωγής.

Στο Κεφάλαιο 4 περιγράφονται οι ανεπιθύμητες κατά το ηλεκτρικό δίκτυο διακυμάνσεις της συχνότητας και τάσης που χαρακτηρίζουν την ηλεκτροπαραγωγή λόγω της αιολικής ενέργειας, και οι προτεινόμενοι τρόποι αντιμετώπισης αυτών. Μεταξύ των διαθέσιμων επιλογών βρίσκονται τα ηλεκτρονικά ισχύος, στα συστήματα ενεργειακής αποθήκευσης, οι πυκνωτές, τα συστήματα ελέγχου ευστάθειας και τέλος τα συστήματα ελέγχου-εποπτείας. Στην ενότητα αυτή αναλύονται οι προαναφερόμενοι τρόποι και παρατίθενται και συγκεκριμένες περιπτώσεις εφαρμογής.

Στο Κεφάλαιο 5 επιλέχθηκε να γίνει μια σύντομη περιγραφή της εγκατάστασης του υπεράκτιου πάρκου London Array, που αποτέλεσε καινοτομία τα χρόνια της κατασκευής του μιας και ήταν το πρώτο θαλάσσιο πάρκο τέτοιας χωρητικότητας.

Τέλος, στο Κεφάλαιο 6 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα κυριότερα συμπεράσματα της παρούσας εργασίας.

Κεφάλαιο 2 Βασικές Αρχές και Διαδικασία Ηλεκτροπαραγωγής

2.1 Θεμελιώδεις εξισώσεις υπολογισμού ταχύτητας ανέμου

Η αξιοποίηση της αιολικής ενέργειας επιτυγχάνεται με τη χρήση των γεννητριών, οι οποίες μηχανές αναλαμβάνουν να μετατρέψουν την κινητική ενέργεια του ανέμου. Τα στάδια της μετατροπής συνοψίζονται επιγραμματικά σε δύο, αρχικώς η περιστροφή της πτερωτής την μετατρέπει σε μηχανική ενέργεια (έργο), και εν συνεχεία η γεννήτρια ολοκληρώνει τη μετατροπή της σε ηλεκτρική.

Οι Α/Γ υπακούουν στην αρχή διατήρησης της μάζας σύμφωνα με την οποία η ποσότητα εισερχομένης μάζας αέρα ισούται με την εξερχόμενη ποσότητα μάζας αυτού. Η μέγιστη αναλογία αιολικής προς κινητική ενέργεια ορίζεται στα 16/27, σύμφωνα με το όριο του Betz [5], συνεπώς η θεωρητική παραγωγή ενέργειας δίνεται από τον ακόλουθο τύπο [6]:

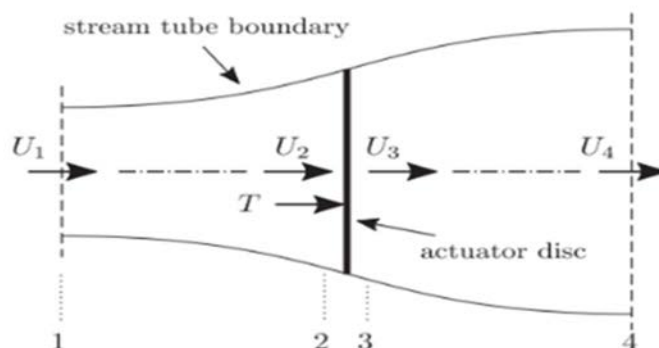
$$P = \frac{16}{27} * \frac{1}{2} * \rho * u^3 * A = \frac{8}{27} * \rho * u^3 * A \quad (1)$$

όπου:

A , το εμβαδό της επιφάνειας

u^3 , η ταχύτητα του πνέοντα ανέμου

ρ , η πυκνότητα του αέρα



Σχήμα 2.1: Πλάγια όψη ενός δίσκου ενεργοποίησης Α/Γ για την περίπτωση ομοιογενούς ροής αέρα

Η βασική αρχή λειτουργίας των Α/Γ στηρίζεται στο γεγονός ότι ο άνεμος πρέπει να επιβραδύνεται, καθώς μεταφέρεται μέρος της κινητικής του ενέργειας προς τον δίσκο ενεργοποίησης. Ως εκ τούτου, ορίζοντας τέσσερις ταχύτητες ανέμου κατά μήκος του άξονα της Α/Γ (Σχήμα 2.1), την U_1 ανάντη, την U_2 ανάντη φτάνοντας στο δίσκο, τη U_3 κατάντη αφήνοντας τον δίσκο και την U_4 κατάντη, εύκολα υπολογίζεται η δύναμη T από [5]:

$$T = A_2 * (p_2 - p_3) \quad (2)$$

όπου:

ρ , η πυκνότητα του αέρα

A_2 & A_3 , η επιφάνεια του δίσκου

Ο παραπάνω τύπος απλοποιείται ως εξής [5]:

$$T = m * (U_1 - U_4) \quad (3)$$

όπου, m η ροή της μάζας για την οποία ισχύει:

$$m = (\rho * A * U)_i$$

Η ταχύτητα του ανέμου μεταβάλλεται με το χρόνο καθώς και το ύψος του εδάφους. Η σχέση της με το ύψος είναι ανάλογη, και για την προσέγγιση της χρησιμοποιούνται συνήθως η λογαριθμική ή εκθετική κατανομή. Η ταχύτητα σε ύψος z περιγράφεται λογαριθμικά ως ακολούθως [6]:

$$U(z) = k_1 + \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) + k_2 \quad (4)$$

ή

$$\frac{U(z)}{U(z_1)} = \frac{\ln(z-z^*)/z_0}{\ln(z_1-z^*)/z_0} \quad (5)$$

όπου:

k_1 & k_2 , αριθμητικές σταθερές

z^* , ύψος μετατόπισης μηδενικού επιπέδου

z_0 , παράμετρος τραχύτητας εδάφους. Στην περίπτωση πολύπλοκου τοπογραφικού εξαρτάται και από τη διεύθυνση του ανέμου.

Με χρήση της εκθετικής κατανομής γράφεται [6]:

$$U(z) = U(z_r) * \left(\frac{z}{z_r}\right)^a \quad (6)$$

όπου:

a , εξαρτώμενη παράμετρος από την τραχύτητα τους εδάφους, δηλαδή το είδος του εδάφους (αμμώδες, αργιλώδες, πηλώδες), και τη διεύθυνση του πνέοντα ανέμου

Επισημαίνεται ότι η παράμετρος a λαμβάνει τιμές μεταξύ του 0,05, όταν πρόκειται για παγωμένες λείες επιφάνειες, και του 0,45 για επιφάνειες εντός αστικών περιοχών. Η εφαρμογή των εξισώσεων (4), (5) και (6) προϋποθέτουν αυξημένη προσοχή λόγω της δεδομένης αβεβαιότητας που εμπλέκεται κατά την εκτίμηση των παραμέτρων z_0 και a . Προκειμένου να περιοριστεί το περιθώριο σφάλματος κατά τον προσδιορισμό της καμπύλης ισχύος των Α/Γ, προτείνεται τα ανεμόμετρα να τοποθετούνται στο ύψος της πλήμνης της γεννήτριας. Ακόμη, συνιστάται να αποφεύγεται η χρήση εμπειρικών αναγωγικών σχέσεων, δηλαδή να μην γίνεται αναγωγή των μετρήσεων των χαρακτηριστικών του ανέμου στο υπό μελέτη ύψος λειτουργίας της Α/Γ. Η αναγωγή αυτή συνηθίζεται να ακολουθείται σχεδόν πάντα, μιας και οι μετρήσεις της ταχύτητας του ανέμου αναφέρονται συνήθως σε ύψος 10 m. Από τη διαδικασία μέτρησης της ταχύτητας προκύπτει ότι οι ευνοϊκότερες θέσεις για παραγωγή αιολικής ενέργειας είναι αυτές που έπονται επίπεδης επιφάνειας ή θαλάσσιου τμήματος αρκετών εκατοντάδων μέτρων.

Αναφορικά με τη διακύμανση της ταχύτητας του ανέμου βάσει του χρόνου επικαλούνται οι συναρτήσεις πυκνότητας πιθανότητας Weibull και Rayleigh. Η συνάρτηση Weibull περιγράφεται ως εξής [6]:

$$f(u) = \left(\frac{k}{c}\right) * \left(\frac{u}{c}\right)^{k-1} * e^{-\left(\frac{u}{c}\right)^k}, 0 < u < \infty \quad (7)$$

όπου:

k , η παράμετρος σχήματος που συνδέεται με την τυπική απόκλιση της ταχύτητας

c , η παράμετρος κλίμακας που συνδέεται με τη μέση ταχύτητα

Θεωρώντας $k = 2$ και $c = 2 * \bar{u} / \sqrt{\pi}$ προκύπτει η Rayleigh κατανομή:

$$f(u) = \frac{\pi * u}{2 * \bar{u}^2} * e \left[-\frac{\pi}{4} * \left(\frac{u}{\bar{u}} \right)^2 \right] \quad (8)$$

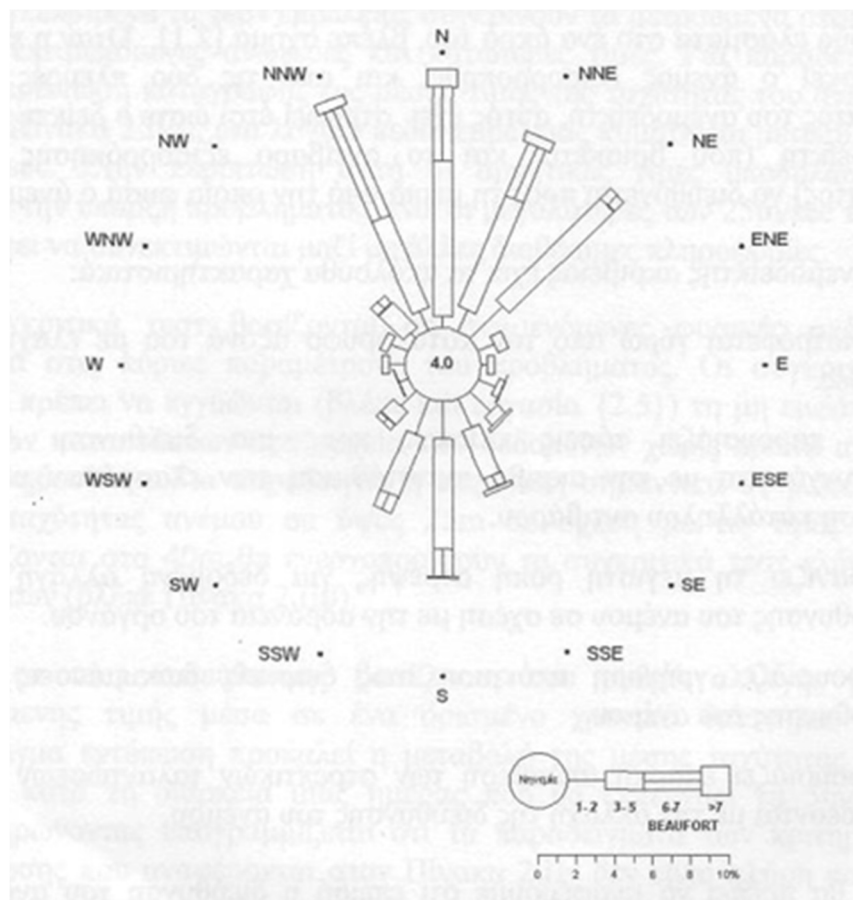
2.2 Υπολογισμός διαθέσιμου αιολικού δυναμικού

Ως γνωστόν ο άνεμος χαρακτηρίζεται από τη μεταβλητότητα του τόσο σε μέτρο, όσο και σε διεύθυνση, και ως απόρροια αυτού προκειμένου να εκτιμηθεί το διαθέσιμο αιολικό δυναμικό της εξεταζόμενης περιοχής ενδιαφέροντος, απαιτούνται πληθώρα αναλυτικών μετρήσεων της ταχύτητας και της διεύθυνσης, και μάλιστα για μεγάλες χρονικές περιόδους. Για τη λήψη μετρήσεων της έντασης του ανέμου συνηθίζεται να χρησιμοποιούνται ανεμόμετρα ή ανεμογράφοι. Τα ανεμόμετρα ταχύτητας αποτελούν την πιο κοινή κατηγορία ανεμόμετρων, τα οποία υπολογίζουν την ένταση του ανέμου στηριζόμενα στην ταχύτητα περιστροφής, την οποία επιβάλει ο άνεμος σε συγκεκριμένα τμήματα του οργάνου υποχρεώνοντας τα να περιστρέφονται. Ο αριθμός των περιστροφών είναι ουσιαστικά ο παράγοντας που καθορίζει την ταχύτητα του αέρα. Να σημειωθεί, τέλος, ότι βασικό χαρακτηριστικό των ανεμόμετρων είναι η αθροιστική τους λειτουργία, δηλαδή επιστρέφουν τις μέσες τιμές έντασης του πνέοντα ανέμου.

Για τον προσδιορισμό της διεύθυνσης του ανέμου επιλέγονται συνήθως ανεμοδείκτες. Ένας ανεμοδείκτης κατασκευάζεται από τον άξονα και τον βραχίονα, που φέρει ένα ή δύο ελάσματα. Ο άξονας τοποθετείται κατακόρυφα, και στο πάνω άκρο του βρίσκεται σε οριζόντια θέση ο βραχίονας που περιστρέφεται. Η στροφή του οργάνου οφείλεται στην πίεση που ασκεί ο άνεμος στις πλευρές του ελάσματος. Μάλιστα μόνο όταν αυτή εξισορροπείται, στρέφεται το όργανο ώστε ο δείκτης του να δείχνει τη διεύθυνση του αέρα, δηλαδή στρέφεται προς τη μεριά από την οποία φυσά ο άνεμος. Στον δείκτη του οργάνου να προστεθεί ότι υπάρχει το απαραίτητο αντίβαρο εξισορρόπησης.

Οι συλλεχθείσες καταγραφές επεξεργάζονται, ώστε να χαραχθεί το πολικό διάγραμμα ή αλλιώς ανεμολόγιο. Πρόκειται για ένα διάγραμμα (Σχήμα 2.2) που απεικονίζει τις συχνότητες επί τοις % συγκριτικά με το σύνολο των τιμών και ανάλογα με τη διεύθυνση

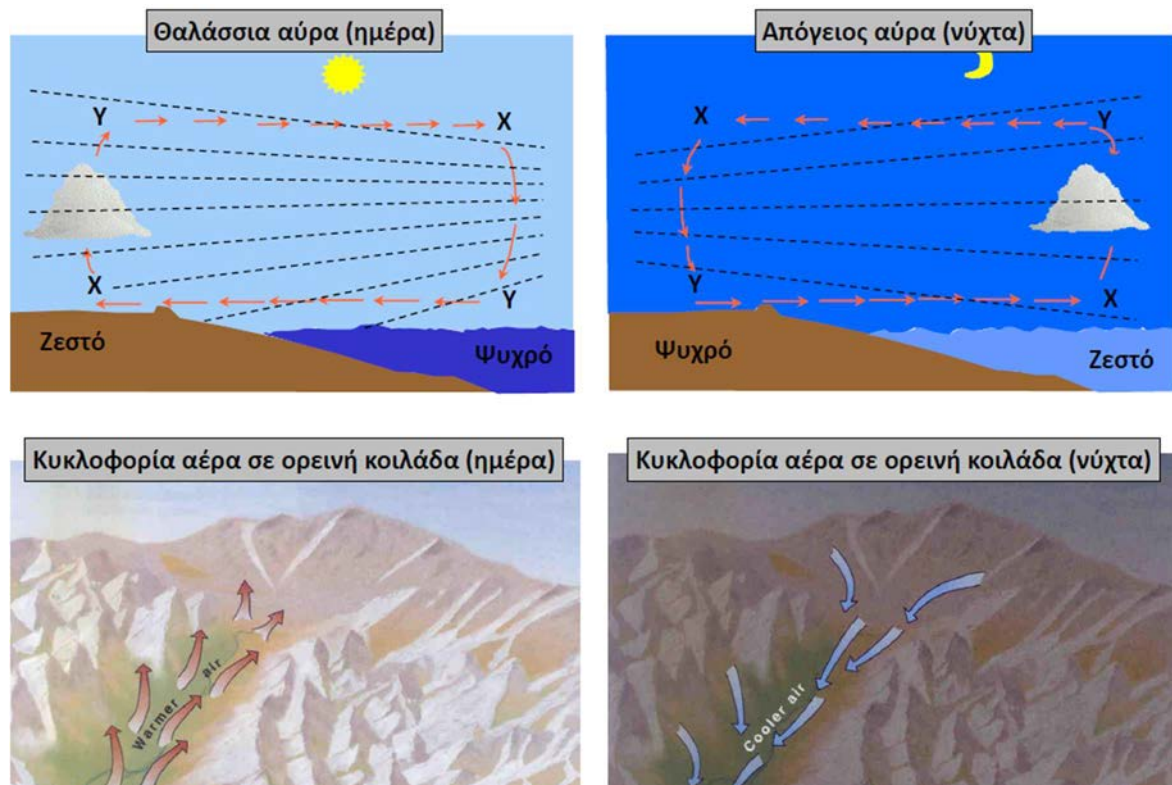
από την οποία φυσά ο αέρας (Ανατολή, Δύση, Βορράς και Νότος). Στην ίδια γραφική απεικόνιση είναι εφικτό, ακόμη, να δηλωθεί και η μέση ταχύτητα της εκάστοτε διεύθυνσης του αέρα. Επιπλέον, για μεγαλύτερη ακρίβεια προτιμάται ο υπό κλίμακα σχεδιασμός, ώστε να εμφανίζονται συνολικά τα διαστήματα έντασης του ανέμου προς κάθε διεύθυνση. Τέλος, στο κέντρο του πολικού διαγράμματος απεικονίζεται εντός κύκλου με συγκεκριμένη ακτίνα το ποσοστό % νηνεμίας, δηλαδή αναγράφεται η χρονική περίοδος κατά την οποία επικρατούν εντάσεις ανέμου μικρότερες των 2 m/sec ή και πλήρους άπνοιας.



Σχήμα 2.2: Τυπική Μορφή Πολικού Διαγράμματος [7]

Στα πλαίσια της διαδικασίας εκτίμησης του διαθέσιμου αιολικού δυναμικού μιας περιοχής, κύρια διεύθυνση ανέμου χαρακτηρίζεται αυτή η διεύθυνση που συμμετέχει με κατά ελάχιστο ποσοστό 10% στη συνολική αιολική ενέργεια. Όπως είναι αναμενόμενο, οι κύριες διευθύνσεις διαφέρουν ανά τοποθεσία, μιας και επηρεάζονται από παράγοντες όπως είναι ο προσανατολισμός των γεωγραφικών σχηματισμών (λόφοι, βουνά, κοιλάδες),

το είδος της υπάρχουσας βλάστησης, καθώς και την ύπαρξη ή μη κτηρίων (Εικόνα 2.1). Επιπρόσθετα, η κατεύθυνση του ανέμου με τη μεγαλύτερη συχνότητα εμφάνισης στην εξεταζόμενη περιοχή αποκαλείται επικρατούσα διεύθυνση. Εν αντιθέσει με την κύρια διεύθυνση του ανέμου, η επικρατούσα μεταβάλλεται με την εποχή του χρόνου [7].



Εικόνα 2.1: Παραδείγματα δημιουργίας ανέμων

Τα προαναφερθέντα όργανα μέτρησης παρέχουν ένα μεγάλο αριθμό N καταγραφών τόσο της τιμής του μέτρου της ταχύτητας U_i όσο και της διεύθυνσης του ανέμου φ_i , όπου $i=1,2,\dots,N$ για ένα χρονικό διάστημα Δt . Ωστόσο, η γνώση και μόνο της μέσης ταχύτητας του αέρα της υπο εξέτασης περιοχής, δεν αρκεί για τον προσδιορισμό του διαθέσιμου αιολικού δυναμικού της. Χρειάζονται επιπρόσθετα αναλυτικές πληροφορίες σχετικά με την πιθανότητα εμφάνισης των διαφορετικών τιμών ταχύτητας του ανέμου κατά τη διάρκεια του χρόνου (κατανομή πιθανότητας ανάπτυξης τιμών ταχύτητας), και ταυτόχρονα απαιτείται να είναι γνωστά τόσο τα χρονικά διαστήματα νηνεμίας όσο και οι ριπές του ανέμου στην περιοχή. Εύκολα προκύπτει το συμπέρασμα ότι για να εξαχθούν ασφαλή αποτελέσματα της διαδικασίας απαιτείται η καταγραφή μακροχρόνιων και αναλυτικών μετρήσεων. Παρόλα αυτά, το υψηλό κόστος σε συνδυασμό με την μακροπρόθεσμη χρονική διάρκεια για τη λήψη εκτεταμένων μετρήσεων, αναγκάζει στη χρήση εμπειρικών

ή ημιεμπειρικών μοντέλων, τα οποία έχουν την ικανότητα χρησιμοποιώντας σαφώς μικρότερο αριθμό καταγραφών, να περιγράψουν με κάποια σχετική ακρίβεια το διαθέσιμο αιολικό δυναμικό μιας περιοχής. Οι ευρύτερα χρησιμοποιούμενες αναλυτικές κατανομές πυκνότητας πιθανότητας είναι η κατανομή Weibull και η κατανομή Rayleigh, που αναφέρθηκαν στην ενότητα 2.2. Ουσιαστικό βήμα της προσαρμογής των αναλυτικών κατανομών πυκνότητας αποτελεί αρχικά η αναγωγή των μετρήσεων στο επιθυμητό ύψος, και στη συνέχεια η χρήση στατιστικών ελέγχων υποθέσεων προκειμένου να εντοπιστούν και να απορριφθούν τελικώς οι μη αποδέκτες μετρήσεις. Μόνο αφού αποκλειστούν οι μη αποδεκτές τιμές, μπορεί να χρησιμοποιηθεί το υπόλοιπο σύνολο των καταγραφών για την εκτίμηση της ετήσιας πιθανότητας κατανομής.

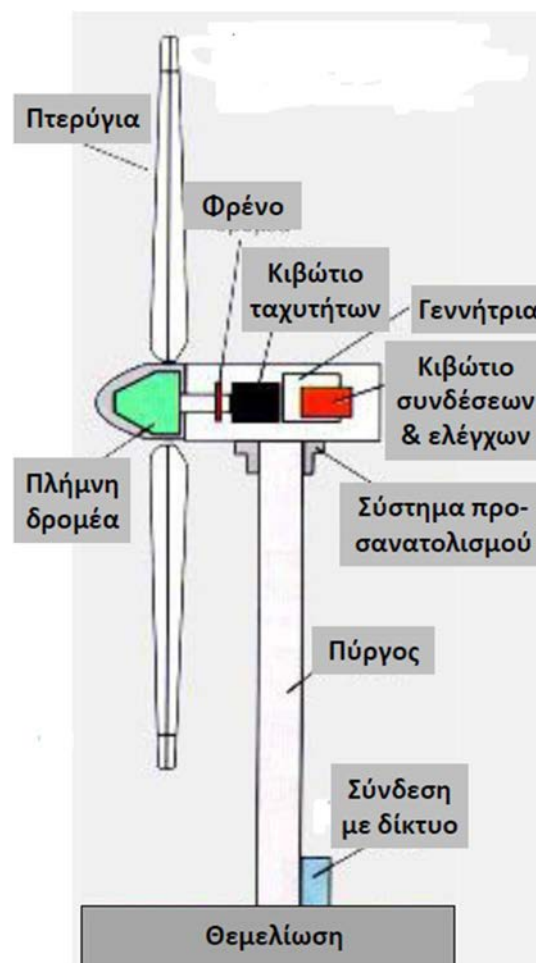
2.3 Διαδικασία μετατροπής αιολικής ενέργειας σε ηλεκτρική

Η τυπική διάταξη μιας ανεμογεννήτριας απαρτίζεται από τον δρομέα ή πτερωτή, το σύστημα μετάδοσης (κύριος άξονας και κιβώτιο ταχυτήτων), τη γεννήτρια, τον πύργο στήριξης πάνω στον οποίο βρίσκεται ο δρομέας, το σύστημα πέδησης ή δισκόφρενο και τέλος το σύστημα σύνδεσης-ελέγχου-αποθήκευσης της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας. Σε κάποιες περιπτώσεις συναντάται ακόμη ένα σύστημα προσανατολισμού ως προς τη διεύθυνση του ανέμου, που χρησιμοποιεί επί των πλείστων κατάλληλους αισθητήρες σε συνδυασμό με ένα σύστημα σερβομηχανισμού (πέδησης).

Ο τυπικός εξοπλισμός μιας Α/Γ οριζόντιου άξονα (Εικόνα 2.2) περιλαμβάνει λεπτομερώς τα κάτωθι [8]:

- **Δρομέας ή ρότορας ή πτερωτή ή στροφέιο:** αποτελείται από τα 2 ή 3 πτερύγια σε οριζόντια ή κατακόρυφη θέση, που συνδέονται στην πλήμνη, και από το ειδικό τεμάχιο σύνδεσης αυτού με τη γεννήτρια. Για την κατασκευή των πτερυγίων επιλέγονται υλικά, όπως ο ενισχυμένος πολυεστέρας, τα ελαφρά κράματα μετάλλων ή και συνδυασμός υλικών, λόγω χάρη χάλυβα και πολυμερικών, που θεωρείται και η καταλληλότερη λύση.
- **Σύστημα μετάδοσης κίνησης:** Απαρτίζεται τρία βασικά μέρη που είναι ο κύριος άξονας, τα έδρανά του και το κιβώτιο πολλαπλασιασμού στροφών, που εναρμονίζει την ταχύτητα περιστροφής του δρομέα με τη σύγχρονη ταχύτητα της γεννήτριας.

- **Ηλεκτρογεννήτρια:** Συνδέεται με την έξοδο του πολλαπλασιαστή κάνοντας χρήση είτε ελαστικού είτε υδραυλικού συνδέσμου.
- **Σύστημα πέδης:** Σύνηθες δισκόφρενο το οποίο εγκαθίσταται στον κεντρικό άξονα ή στον ίδιο τον άξονα της γεννήτριας.
- **Σύστημα προσανατολισμού:** Αναγκάζει τον άξονα περιστροφής να παραμένει διαρκώς παραλληλισμένος με τη διεύθυνση του ανέμου.
- **Ηλεκτρονικός πίνακας & πίνακας ελέγχου:** Εγκαθίστανται στη βάση του πύργου και περιλαμβάνουν υποσυστήματα μικροελεγκτών, που εγγυώνται την ομαλή και ασφαλή λειτουργία της Α/Γ σε όλες τις συνθήκες αέρα.
- **Πύργος (ή πυλώνας)**
- **Βάση στήριξης (ή θεμελίωση)**



Εικόνα 2.2: Διάταξη κυριότερων μερών μιας Α/Γ

Η διάμετρος του δρομέα είναι ένα από τα βασικά τεχνικά χαρακτηριστικά της Α/Γ. Κατά τον σχεδιασμό του πρέπει να συνυπολογίζεται ο άριστος συνδυασμός πολύπλευρων παραμέτρων, όπως είναι η ταχύτητα περιστροφής, η διάμετρος στροφείου, ο αριθμός των πτερυγίων, η κατανομή πλάτους πτερυγίου, η κατάλληλη αεροτομή, η συστροφή και το μέσο γεωμετρικό βήμα. Απώτερος σκοπός αυτού είναι η μεγιστοποίηση της παραγόμενης ισχύος και συνάμα η ελαχιστοποίηση του κόστους παραγωγής. Επιπρόσθετα, η διάμετρος του δρομέα εξαρτάται και από την ονομαστική ισχύ της Α/Γ αλλά και το αιολικό δυναμικό της ευρύτερης τοποθεσίας.

Η κατανομή του εύρους των πτερυγίων προκύπτει μέσω της διαδικασίας βελτιστοποίησης της αεροδυναμικής σχεδίασης του στροφείου, ενώ ο αριθμός των πτερυγίων εξαρτάται από το είδος χρήσης της Α/Γ. Σύμφωνα με τα ισχύοντα δεδομένα τα μεγέθη των πτερυγίων διακρίνονται σε τρεις τύπους βάσει του συνολικού μήκους, σε αυτά με μήκος πτερυγίου έως 16 m για Α/Γ έως 50 kW, σε αυτά με μήκος πτερυγίου έως 55 m για Α/Γ από 50 kW έως 1 MW, και τέλος σε αυτά με μήκος πτερυγίου άνω των 150 m για Α/Γ έως 8 MW όπως της Εικόνας 2.3.



Εικόνα 2.3: Η εταιρεία MingYang (Κίνα) κατασκεύασε πτερύγιο επίγειας Α/Γ με μήκος 107 m από υαλοβάμβακα που μειώνει το βάρος και αναβαθμίζει την αντοχή της [9]

Τα πτερύγια είναι ειδικά κατασκευασμένες αεροτομές, ώστε κατά μήκος τους να παρουσιάζουν συστροφή για λόγους αεροδυναμικής. Οι σύγχρονες Α/Γ διαθέτουν

περιστρεφόμενα πτερύγια με δυνατότητα ρύθμισης του βήματος περιστροφής, προκειμένου να επιτυγχάνεται ο στόχος μεγιστοποίησης της παραγόμενης ενέργειας. Ένα περιστρεφόμενο πτερύγιο Α/Γ δέχεται δύο δυνάμεις, μια από τον άνεμο που κινείται προς την κατεύθυνσή του, και μία που οφείλεται στη σχετική κίνηση του πτερυγίου καθώς αυτό περιστρέφεται. Δεδομένου ότι το πτερύγιο κινείται ταχύτερα στην άκρη από ό,τι κοντά στην πλήμνη του δρομέα, το πτερύγιο πρέπει να συστρέφεται κατά μήκος του για να διατηρούνται σωστές οι γωνίες. Μέχρι ένα σημείο η αύξηση της γωνίας πρόσπτωσης, δηλαδή της γωνίας που δημιουργείται μεταξύ πτερυγίου και αέρα, διορθώνει την άνωση λόγω της αυξημένης αντίστασης. Η συνεχή αύξηση της γωνίας πρόσπτωσης μπορεί όμως να οδηγήσει σε απώλεια στήριξης. Στην μη επιθυμητή κατάσταση αυτή, η ροή του ανέμου δεν ακουμπά την επάνω πλευρά του πτερυγίου, με αποτέλεσμα να δημιουργούνται στροβιλισμοί που καταστρέφουν την άνωση. Το κιβώτιο ταχυτήτων και ο κινητήρας επεμβαίνουν ρυθμίζοντας τον προσανατολισμό της Α/Γ, με τέτοιο τρόπο που τα πτερύγια διατηρούνται προς τη φορά του αέρα σε όλη τη διάρκεια της ηλεκτροπαραγωγής, και ταυτόχρονα να εκτρέπουν τον δρομέα, όταν πνέουν πολύ ισχυροί άνεμοι, για την αποφυγή βλαβών κλειδώνοντας τα πτερύγια στη θέση τους με χρήση ενός φρένου.

Το σύστημα μετάδοσης κίνησης περιλαμβάνει ένα μηχανικό σύστημα που μεταφέρει την κίνηση από τον άξονα του κινητήρα στη γεννήτρια. Οι τρόποι μετάδοσης της κίνησης από έναν άξονα (κινούσα άτρακτος) σε έναν άλλον (κινούμενη άτρακτος) επιτυγχάνεται είτε μέσω οδοντωτών τροχών (γρανάζια), είτε δια ιμάντων ή και δια της αλυσοκίνησης. Επισημαίνεται ότι και οι τρεις τρόποι ανήκουν στην κατηγορία των μειωτήρων.

Ως επί το πλείστον το σύστημα μετάδοσης βασίζεται σε δύο κύριους άξονες, ο πρώτος είναι ο λεγόμενος άξονας χαμηλής ταχύτητας που στρέφεται με την ταχύτητα του στροφείου και ο δεύτερος είναι ο άξονας υψηλών ταχυτήτων. Με τη βοήθεια του κιβωτίου ταχυτήτων η ταχύτητα περιστροφής ανυψώνεται και μεταφέρεται δια μέσω του άξονα υψηλών ταχυτήτων στη γεννήτρια. Αυτή η ανύψωση γίνεται με τέτοιο τρόπο, έτσι ώστε η ταχύτητα περιστροφής να ακολουθεί και να συμφωνεί με τον τύπο και τα τεχνικά χαρακτηριστικά της γεννήτριας, αλλά και με τη συχνότητα του AC ρεύματος του ηλεκτρικού δικτύου. Σημαντικοί παράγοντες επιλογής ενός κιβωτίου ταχυτήτων είναι η διάρκεια ζωής, ο βαθμός απόδοσης και ο θόρυβος λειτουργίας. Είναι δεδομένο ότι το κιβώτιο λειτουργεί διαρκώς με κρουστικά φορτία εξαιτίας της συνεχούς μεταβολής της

ισχύος του αέρα, γεγονός που έχει ως αποτέλεσμα την πρόωρη φθορά του υλικού κατασκευής αλλά και τη μείωση της διάρκειας ζωής του. Γι' αυτό, επιλέγονται να χρησιμοποιηθούν κιβώτια ταχυτήτων που διαθέτουν τόσο ονομαστική ισχύ όσο και ροπή πολύ μεγαλύτερες (σε τιμές) συγκριτικά με τα αντίστοιχα ονομαστικά μεγέθη της Α/Γ. Τέλος, να σημειωθεί ότι κατά τη διαδικασία ρύθμισης του πρέπει να συνυπολογισθούν οι ανάγκες του φορτίου σε ταχύτητα, ροπή αδράνειας, κ.λ.π.

Ο κινητήρας είναι κατασκευασμένος να κινείται σε συγκεκριμένες στροφές που εξαρτώνται από τον αριθμό των πόλων. Η χαμηλόστροφη κίνηση οδηγεί σε αυξημένο ρεύμα και επομένως αυτός υπερθερμαίνεται. Η μείωση των στροφών του κινητήρα και η προσαρμογή του στο φορτίο γίνεται μέσω των μειωτήρων. Ακόμη, και σε περιπτώσεις που οι άξονες του κινητήρα και του φορτίου δεν είναι στην ίδια ευθεία χρησιμοποιούνται πάλι μειωτήρες.

Εάν ο κινητήρας τροφοδοτεί μόνιμα τη γεννήτρια, τότε η ζεύξη γίνεται με ειδικό σύστημα συνδέσμου δύο τεμαχίων (κομπλέρ) που τοποθετούνται στους άξονες των δύο μηχανημάτων. Εάν ο κινητήρας τροφοδοτεί δύο διαφορετικές μηχανές που λειτουργούν με διακόπτες, τότε η ζεύξη γίνεται μαγνητικό τρόπο και τη χρησιμοποίηση ειδικών πηνίων.

Η αλυσοκίνηση είναι ανάλογη της μετάδοσης της κίνησης με ιμάντες, δίχως να εμφανίζεται το φαινόμενο της ολίσθησης. Για την ακρίβεια, η λειτουργία της στηρίζεται σε άξονες, αντί για τροχαλίες, που φέρουν ειδικού τύπου γρανάζια. Τα εν λόγω εμπλέκονται μέσω μιας ειδικά σχεδιασμένης αλυσίδας κίνησης υποχρεώνοντας το φορτίο να κινείται με σταθερές στροφές. Η αλυσοκίνηση κατά κανόνα επιλέγεται για χαμηλόστροφα συστήματα που η απόσταση μεταξύ των αξόνων είναι μεγάλη και μόνο για χαμηλές ταχύτητες, μιας και στην αντίθετη περίπτωση παρατηρείται το φαινόμενο φθοράς και αυξημένων τριβών.

Κοινό χαρακτηριστικό της κίνηση με χρήση ιμάντων είναι ότι ο κάθε άξονας διαθέτει από μια τουλάχιστον τροχαλία, και όλες αυτές μαζί καταλήγουν να συνδέονται δια μέσω του κατάλληλου ιμάντα. Για τη διασφάλιση της ορθής λειτουργίας είθισται ο κάτω κλάδος του ιμάντα να έλκει και ο πάνω να έλκεται. Συνοπτικά, η σχέση μετάδοσης της κίνησης δύναται να παρομοιαστεί με την κίνηση των οδοντωτών τροχών. Για την αποφυγή εμφάνισης φαινομένων ολίσθησης, πρέπει να δοθεί η δέουσα προσοχή ώστε ο ιμάντας να τανυστεί επαρκώς, δηλαδή να συγκρατείται δυνατά στις επιφάνειες των τροχαλιών, διότι μια

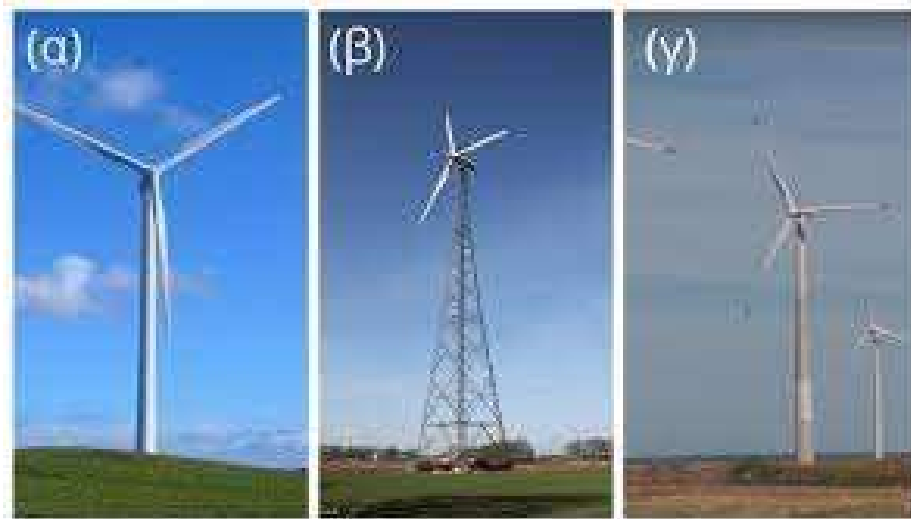
ενδεχόμενη ολίσθηση θα προκαλέσει μείωση των στροφών. Για τον αποκλεισμό εμφάνισης αυτού του φαινομένου χρησιμοποιούνται ειδικού τύπου τανυστήρες, που αυξάνουν τη γωνία επαφής του ιμάντα με τις τροχαλίες. Να σημειωθεί ότι η επιλογή ενός ιμάντα, και εν τέλει οι διαστάσεις των τροχαλιών, πραγματοποιείται με κριτήρια το πλάτος και το πάχος, τα οποία με τη σειρά τους καθορίζονται από το μέγεθος της μεταφερόμενης ισχύος.

Ο έλεγχος ισχύος επιτυγχάνεται είτε ρυθμίζοντας το βήμα της Α/Γ, είτε μέσω του αεροδυναμικού της σχεδιασμού που ελαχιστοποιεί τις επιπτώσεις του φαινομένου της απώλειας στήριξης. Κατά το φαινόμενο αυτό προκαλείται μείωση του συντελεστή άνωσης που παράγεται από το πτερύγιο, καθώς αυξάνεται η γωνία προσβολής πάνω από μια κρίσιμη τιμή. Η σχηματιζόμενη δίνη στην πλευρά αναρρόφησης του πτερυγίου προκαλεί αύξηση της γωνία προσβολής και την σταδιακή αποκόλληση της. Ως συνέπεια αυτού παρατηρείται διαχωρισμός της ροής στο πτερύγιο, και τελικώς απώλεια στήριξης. Ο αεροδυναμικός σχεδιασμός της Α/Γ εξασφαλίζει τη λειτουργία της στη βέλτιστη κατάσταση, που προσφέρει μέγιστη δυναμική άνωση καθώς και μέγιστη παραγόμενη ισχύ.

Ο πύργος ή πυλώνας ή άξονας της Α/Γ κατασκευάζεται από ειδικό ενισχυμένο χάλυβα, ώστε να μπορεί να ανταποκριθεί και να συγκρατεί ισχυρές στρεπτικές και καμπτικές ροπές. Έως το 1980 κατασκευάζονταν δικτυωτοί πυλώνες που αντικαταστάθηκαν από τους σωληνοειδείς μορφής ελευθέρου προβόλου. Οι τελευταίοι κατηγοριοποιούνται σε χαλύβδινους με μέγιστο πάχος χάλυβα 40 mm, σε υβριδικούς που συνδυάζουν τη χρήση σκυροδέματος και χαλύβδινης βάσης, και τέλος σε σύνθετους από ινοπλισμένα πολυμερή υλικά. Στην Εικόνα 2.4 αποτυπώνονται οι διαφορετικοί τύπου πυλώνων που ενδέχεται να χρησιμοποιηθούν. Αξίζει να σημειωθεί ότι το ύψος του πύργου επιδρά θετικά στην απόδοση της Α/Γ, αυξάνοντας το αιολικό διαθέσιμο δυναμικό. Για παράδειγμα, η ανά 20m αύξηση του ύψους μιας Α/Γ επιφέρει σχεδόν 5% αύξηση της παραγόμενης ενέργειας συγκριτικά με ένα πύργο ύψους 80 m.

Για τη θεμελίωση τους χρησιμοποιούνται δύο έδρανα, στις πλείστες των περιπτώσεων, κατάλληλα να δεχθούν και απορροφήσουν το βάρος της Α/Γ καθώς και τα ασκούμενα φορτία. Οι τυπικές διατάξεις θεμελίωσης διακρίνονται, όπως φαίνονται στην Εικόνα 2.5, στην εκτεταμένη θεμελίωση (πέδιλο) που μπορεί να είναι είτε ρηχή (καλύπτοντας μεγάλη

επιφάνεια) είτε βαθιά (θεμελίωση βαρύτητας), και στους πασσάλους που ενώνονται με κεφαλόδεσμο.



Εικόνα 2.4: Τυπικές διατάξεις πυλώνων Α/Γ. Παραδείγματα χαλύβδινου σωληνοειδούς προβόλου (α), δικτυωτού (β) και υβριδικού σωληνοειδούς προβόλου(γ)



Εικόνα 2.5: Λήψεις εφαρμογής στο πεδίο των διαφορετικών επιλογών θεμελίωσης μιας χερσαίας Α/Γ

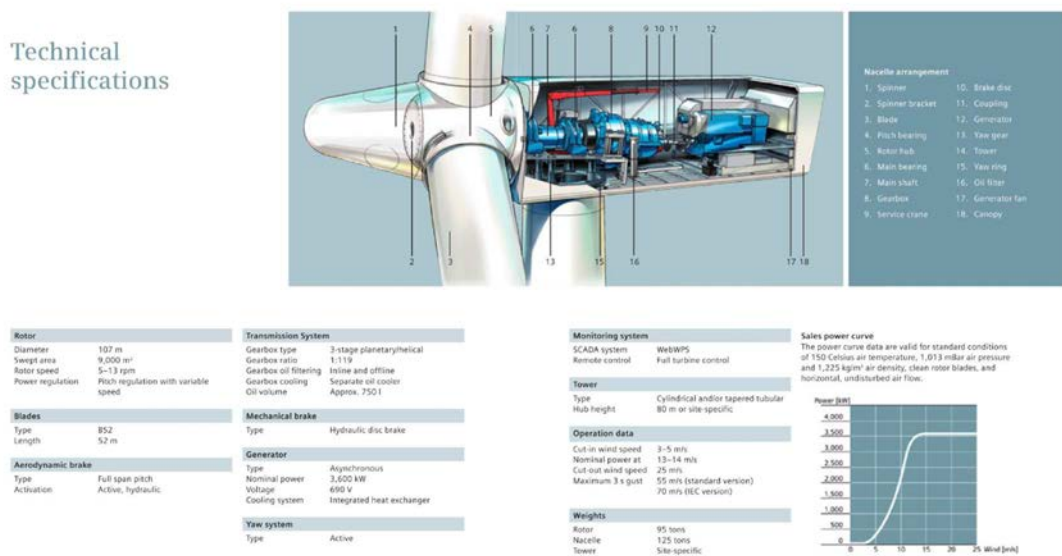
Αναφορικά με το σύστημα μετάδοσης, αν και με την εξέλιξη της τεχνολογίας αναπτύχθηκαν συστήματα που δεν το περιλαμβάνουν, αυτό απαρτίζεται από ένα κιβώτιο μετασχηματισμού της χαμηλής ταχύτητας περιστροφής του δρομέα σε υψηλότερες ταχύτητες, που είναι απαραίτητες για τη λειτουργία της ηλεκτρικής γεννήτριας. Υπάρχουν τρεις επιλογές κατασκευής για τον πύργο στήριξης που αποτελείται ή από ένα μεταλλικό σωλήνα (ενδείκνυται για μεγάλα συστήματα), ή από ένα μεταλλικό δικτύωμα ή από έναν στύλο οπλισμένου σκυροδέματος με ελάχιστο ύψος που απαραίτητα οφείλει να υπερβαίνει την ακτίνα του δρομέα.

Μια Α/Γ χαρακτηρίζεται από ορισμένα τεχνικά μεγέθη που την περιγράφουν και διευκολύνουν την επιλογή της, τα οποία αναφέρονται στο δελτίο τεχνικών χαρακτηριστικών που τη συνοδεύει (Εικόνα 2.6). Αυτά είναι τα κάτωθι [8]:

- **Κωδικοποίηση:** Αναφέρεται στην εμπορική ονομασία της Α/Γ, όπου δίνονται πληροφορίες για την τιμή της διαμέτρου της και της ονομαστικής της ισχύος (π.χ. V172 7,2 MW / 172m διάμετρος και 7,2 MW ονομαστική ισχύς).
- **Διάμετρος πτερωτής:** Αναγράφεται το ακριβές μήκος διαμέτρου της πτερωτής. Για να υπάρχει μια εικόνα της τάξης μεγέθους της σημειώνεται ότι μια κοινή Α/Γ ισχύος 0,5 MW διαθέτει διάμετρο πτερωτής 40 m και ύψος έως 50 m, ενώ μια Α/Γ ισχύος 3,0 MW έχει διάμετρο 80 m και ύψος έως 100 m.
- **Ύψος πυλώνα:** Καθορίζεται από τη διάμετρο της πτερωτής, και σε γενικές γραμμές εφαρμόζεται ο κανόνας του $1,0 < H/D < 1,5$ (Height/Diameter).
- **Πλήθος πτερυγίων:** Επί του πρακτέου, παρατηρείται επικράτηση των Α/Γ με τρία πτερύγια, μιας και τα λιγότερα πτερύγια πετυχαίνουν το ίδιο ενεργειακό αποτέλεσμα εκμεταλλευόμενα τη μεγαλύτερη ταχύτητα περιστροφής. Βέβαια, αυτό συνεπάγεται την παραγωγή περισσότερου θορύβου αλλά και πρόκληση φθορών, ωστόσο παρουσιάζουν σημαντικό πλεονέκτημα ως προς το αρχικό κόστος που είναι κατά πολύ μικρότερο. Στον αντίποδα, οι Α/Γ με παραπάνω από τρία πτερύγια διασφαλίζουν μεν ελάχιστα καλύτερη απόδοση, αλλά έχουν δε δυσανάλογα υψηλότερο κόστος.
- **Είδος πτερυγίων:** Η θεωρία ορίζει ότι τα πτερύγια οφείλουν να είναι ανθεκτικά αλλά ταυτόχρονα ελαφριά, για αυτό ούτε ο χάλυβας ούτε και το αλουμίνιο δεν

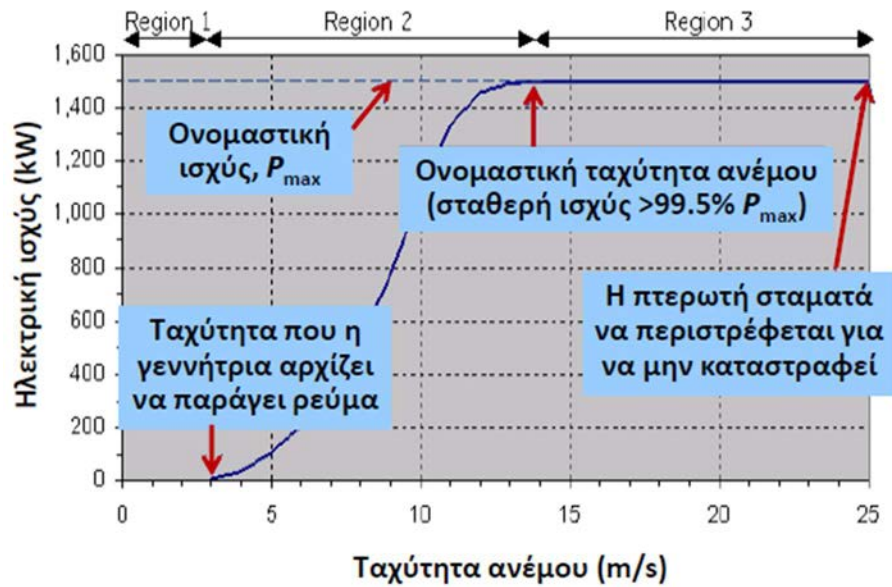
πληρούν τις ελάχιστες. Έτσι, επιλέχθηκε η χρήση ανθρακονημάτων και fiberglass που είναι ανθεκτικά και ευέλικτα. Τα πολύ συμπαγή σύνολα πτερυγίων, δηλαδή όταν επιλέγονται να χρησιμοποιηθούν πολλά ή φαρδιά πτερύγια, εξασφαλίζουν να μην το στόχο της γρήγορης εκκίνησης (από μικρές ταχύτητες ανέμου), αλλά για λόγους ασφάλειας και όχι μόνο πρέπει να τίθενται εκτός λειτουργίας στις μεγαλύτερες ταχύτητες.

- **Ονομαστική ταχύτητα περιστροφής:** Πληροφορεί για την ονομαστική ταχύτητα περιστροφής, η οποία συνδέεται με αρκετές παραμέτρους όπως η συχνότητα του ηλεκτρικού δικτύου και η αντοχή των πτερυγίων σε φυγόκεντρες τάσεις.
- **Καμπύλη ισχύος:** Συνοδεύεται από γραφική απεικόνιση της σχέσης ταχύτητας ανέμου και της αποδιδόμενης ηλεκτρικής ισχύος.

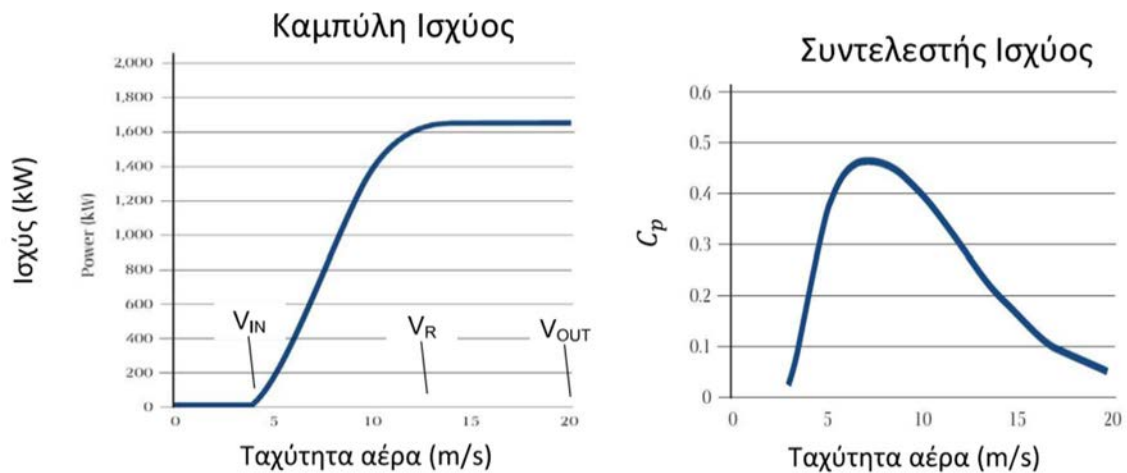


Εικόνα 2.6: Δελτίο τεχνικών χαρακτηριστικών της Siemens Gamesa SWT-3.6-107

Βάσει σχεδιασμού οι Α/Γ λειτουργούν σε ένα συγκεκριμένο εύρος ταχύτητας ανέμων, μεταξύ της ταχύτητα έναρξης/εκκίνησης και της ταχύτητας αποκοπής. Η ταχύτητα εκκίνησης, συνήθως, κυμαίνεται στα 4 με 5 m/s και σχετίζεται με την έναρξη παραγωγής ενέργειας, ενώ η ταχύτητα αποκοπής αφορά την ασφαλή λειτουργία αυτής και την προστασία από καταπονήσεις οφειλόμενες στις υψηλές ταχύτητες του πνέοντα ανέμου (Σχήμα 2.3).



Σχήμα 2.3: Χαρακτηριστική καμπύλη λειτουργίας μιας Α/Γ



Σχήμα 2.4: Σύγκριση πορείας της καμπύλης ισχύος και του συντελεστή ισχύος μιας Α/Γ σε σύγκριση με την ταχύτητα του αέρα

Συνιστάται η λειτουργία της με την ονομαστική ταχύτητα κατά την οποία επιτυγχάνεται η μέγιστη δυνατή απόδοση, η οποία διατηρείται σταθερή στις διακυμάνσεις του ανέμου με χρήση προβλεπόμενων απαραίτητων μηχανισμών (Σχήμα 2.4). Όπως προαναφέρθηκε, η απόδοση μιας Α/Γ δε δύναται να ξεπερνά το όριο του Betz [5]. Στην πραγματικότητα, ο πραγματικός βαθμός απόδοσης εντοπίζεται κάτω από το όριο Betz και εξαρτάται από την ταχύτητα του αέρα, το πλήθος και τη γωνία των πτερυγίων, αλλά και την ταχύτητα

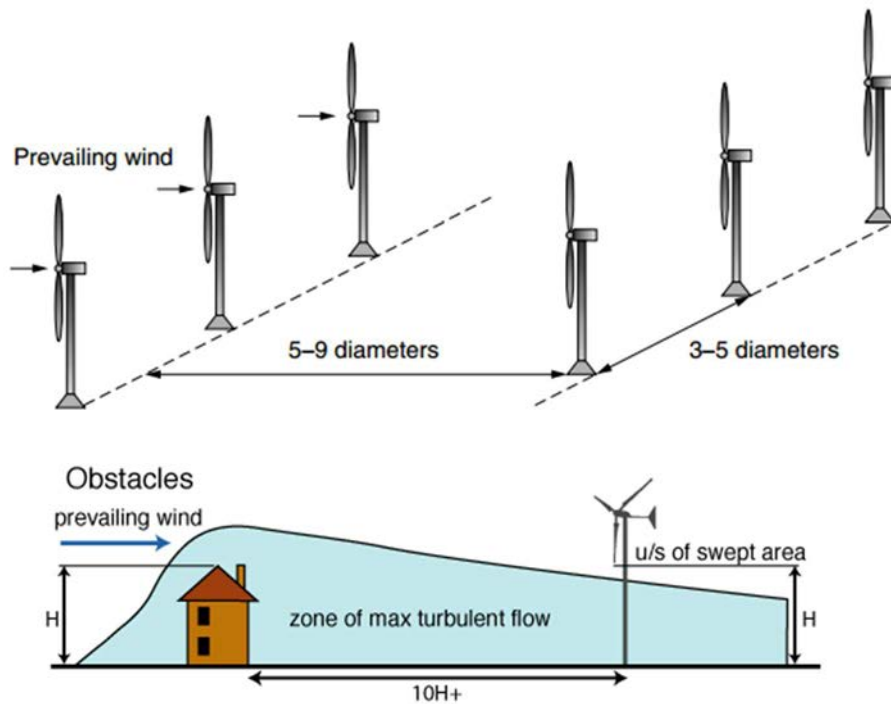
περιστροφής του ρότορα. Συνάμα, παρατηρούνται επιπρόσθετες απώλειες και κατά τη διαδικασία μετατροπής της κινητικής ενέργειας σε ηλεκτρική. Οπότε, ο ολικός βαθμός απόδοσης ή συντελεστής ισχύος καταλήγει να προκύπτει από την επίδραση περισσότερων συνιστωσών, ήτοι του ρότορα, του κιβωτίου ταχυτήτων, γεννήτριας και μετασχηματιστή (Πίνακας 2.1) [8]. Επισημαίνεται ότι ο βαθμός απόδοσης μειώνεται με την πάροδο του χρόνου, με ένα ρυθμό της τάξεως του 5% με 7% το έτος. Το ποσοστό αυτό διευκρινίζεται ότι αφορά Α/Γ παλαιότερων τεχνολογιών.

Πίνακας 2.1: Χαρακτηριστικές τιμές απόδοσης συνιστωσών επιρροής και του ολικού βαθμού απόδοσης μιας Α/Γ

Συνιστώσα	Βαθμός απόδοσης
Ρότορας	45-52% (<i>max</i> 59.3%)
Κιβώτιο ταχυτήτων	95-97%
Γεννήτρια	97-98%
Μετασχηματιστής	96-99%
Πλήρες σύστημα	40-45%

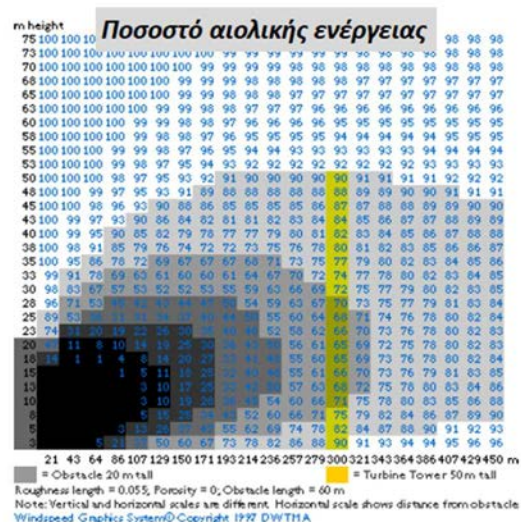
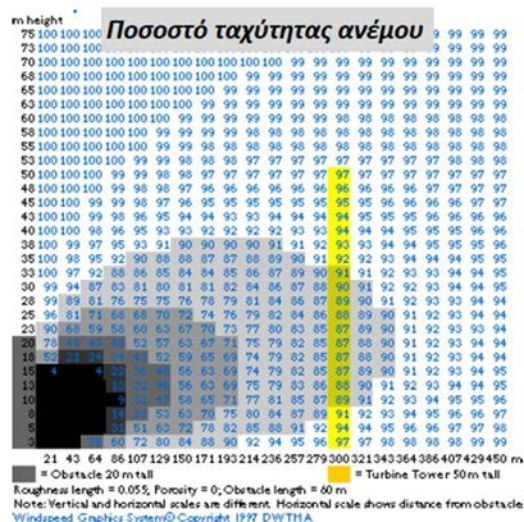
Η απόδοση μιας Α/Γ επηρεάζεται από το φαινόμενο τύρβης, το οποίο οφείλεται να συνυπολογίζεται κατά την εκπόνηση μελέτης εγκατάστασης ενός αιολικού πάρκου, και ουσιαστικά η καθεμία Α/Γ πρέπει να τοποθετηθεί στην ανάλογη απόσταση προκειμένου να μην βρίσκεται εντός της περιοχής σκίασης της άλλης. Γενικά, έχει παρατηρηθεί ότι οι απώλειες ενέργειας λόγω εμποδίων κυμαίνονται από 5% μέχρι 15%, και κατά κύριο λόγο προκαλούνται λόγω γειννίας μεταξύ των Α/Γ. Οι απώλειες σκίασης καθορίζονται συγκεκριμένα από τρεις παράγοντες, τις αποστάσεις μεταξύ των Α/Γ, τις σχετικές θέσεις εγκατάστασης των Α/Γ, καθώς και τις κύριες διευθύνσεις πνοής του ανέμου και τη συχνότητα με την οποία εμφανίζονται. Στα πλαίσια βελτιστοποίησης της λειτουργίας του πάρκου, με στόχο τη μεγιστοποίηση της παραγόμενης ισχύος, προτείνονται συγκεκριμένες αποστάσεις (Σχήμα 2.5) τόσο μεταξύ των ίδιων των Α/Γ, όσο και μεταξύ των σειρών τους. Ορίζεται ελάχιστη μεταξύ τους απόσταση μεγαλύτερη από 3 και ίση μέχρι 5 φορές από τη διάμετρο του δρομέα κάθετα στην επικρατούσα διεύθυνση, και μεγαλύτερη από 5 και ίση μέχρι 9 φορές τη διάμετρο του δρομέα ανά σειρά κατά τη διεύθυνση των επικρατούντων

ανέμων. Αναφορικά τώρα με ένα εμπόδιο στο έδαφος, διαπιστώθηκε ότι η Α/Γ πρέπει να τοποθετηθεί σε ελάχιστη απόσταση δεκαπλάσια του ύψους αυτού, προκειμένου να μην σκιάζει την Α/Γ και επιδρά αρνητικά στην παραγωγή της [8].



Σχήμα 2.5: Ελάχιστοι αναγκαίοι περιορισμοί απόστασης στην χωροθέτηση Α/Γ

Στο Σχήμα 2.6 περιγράφεται ο βαθμός επίδρασης ενός εμποδίου ύψους 20 m που βρίσκεται σε απόσταση 300 m από μια Α/Γ ύψους 50 m. Το ποσοστό ταχύτητας ανέμου μειώνεται από 97% σε 87%, δηλαδή μείωση τάξεως 10%, και ως αποτέλεσμα το ποσοστό της παραγόμενης αιολικής ενέργειας πέφτει σε 65% από 90%, ήτοι μείωση τάξεως 27%. Ευκόλως γίνεται κατανοητό ότι τα ποσοστά αυτά μείωσης δεν είναι αποδεκτά κυρίως για οικονομικούς λόγους, και έτσι ερμηνεύεται η τόσο μεγάλη βαρύτητα που δίνεται στη χωροθέτηση των Α/Γ σε σχέση με τα εμπόδια.



Σχήμα 2.6: Επίδραση εμποδίου ύψους 20 m και μήκους 60 m σε Α/Γ ύψους 50 m τοποθετημένης σε απόσταση 300 m

2.4 Ταξινόμηση Ανεμογεννητριών

Μια πρώτη κατηγοριοποίηση των ανεμογεννητριών στηρίζεται στη θέση του άξονα τους σε σχέση με την επιφάνεια της εγκατάστασής τους, και διακρίνονται σε οριζόντιου και κάθετου άξονα. Έχουν, βέβαια, χρησιμοποιηθεί και πρόσθετα κριτήρια ταξινόμησης των Α/Γ ως προς τα υποσυστήματά τους, με επικρατέστερα τα ακόλουθα τρία [10]:

- το είδος της ταχύτητας περιστροφής του δρομέα
- το είδος της γεννήτριας
- η ύπαρξη ή μη κιβωτίου μετάδοσης ταχύτητας
- την ονομαστική ισχύ

2.4.1 Ταξινόμηση Α/Γ σε σχέση με τη θέση του άξονα

Οι Α/Γ στις οποίες ο άξονας βρίσκεται σε παράλληλη θέση με το έδαφος ή τη θάλασσα επιφάνεια καλούνται οριζόντιου άξονα. Αυτές μπορούν να διακριθούν στις προσήνεμες

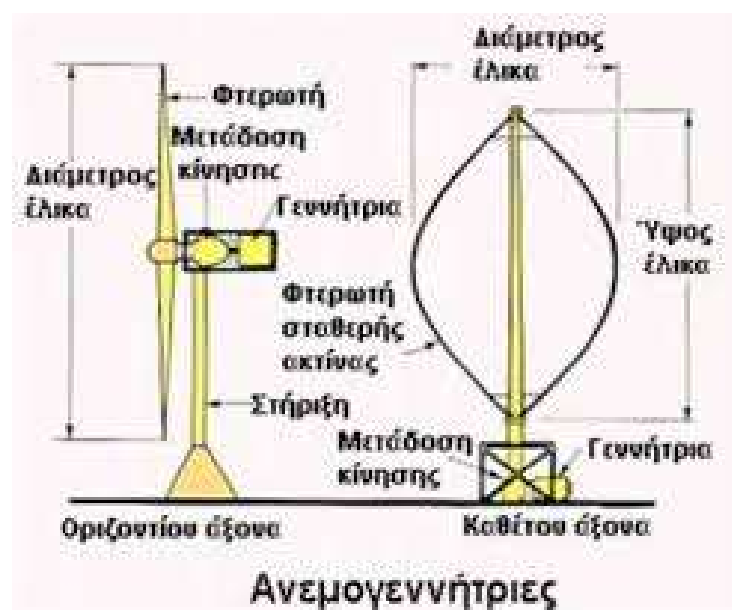
και στις υπήνεμες. Στην πρώτη περίπτωση, οι οποίες αποτελούν και το μεγαλύτερο ποσοστό, ο άνεμος συναντά τα πτερύγια και εν συνεχεία τον πυλώνα. Ο ρότορας βρίσκεται τοποθετημένος μακριά από τον πύργο και σε αντίθετη διεύθυνση από αυτήν του πνέοντα ανέμου, ως εκ τούτου απαιτείται ένας πρόσθετος μηχανισμός, είτε αισθητήρες είτε ένα καθοδηγητικό πτερύγιο, προκειμένου να αντισταθμιστούν οι συνέπειες της μη παραλληλότητας ρότορα και ανέμου. Στις υπήνεμες παρατηρείται το άκρως αντίθετο, ο πνέοντας αέρας συναντά αρχικά τον πυλώνα και έπειτα τα πτερύγια, οπότε και ο ρότορας βρίσκεται στην ίδια διεύθυνση με τον άνεμο. Κάθετου άξονα αποκαλούνται οι Α/Γ των οποίων τα πτερύγια είναι προσαρτημένα στην κορυφή και στον πυθμένα του δρομέα. Στην Εικόνα 2.7 βλέπουμε ένα παράδειγμα Α/Γ οριζόντιου άξονα σε παράθεση με μια κάθετου άξονα, και τέλος οι κατασκευαστικές τους διαφορές συνοψίζονται στο Σχήμα 2.7.



Εικόνα 2.7: Φωτογραφική λήψη τυπικής Α/Γ οριζόντιου (δεξιά) και κάθετου (αριστερά) άξονα

Οι Α/Γ οριζόντιου άξονα υπερτερούν έναντι αυτών του κάθετου άξονα. Λόγω του μεγάλου τους ύψους δύνανται και εκμεταλλεύονται ανέμους μεγάλων ταχυτήτων και συνδυαστικά με το υψηλό αεροδυναμικό συντελεστή, που τις χαρακτηρίζει, αποδίδουν καλύτερα και σε βέλτιστο βαθμό, ακόμη και αν οι Α/Γ κάθετου άξονα μπορούν να εκμεταλλευτούν τον πνέοντα άνεμο όλων των διευθύνσεων αλλά όχι μεγαλύτερης ταχύτητας. Οι τελευταίες λειτουργούν με χαμηλή ταχύτητα περιστροφής, το οποίο συνεπάγεται υψηλή ροπή

εκκίνησης και για το λόγο αυτό απαιτείται εξωτερική βοήθεια κατά τη φάση της εκκίνησης. Η συναρμολόγηση τους μπορεί να χαρακτηριστεί εξίσου εύκολη, ωστόσο το κόστος μεταφοράς, συνολικής κατασκευής και συντήρησης κυμαίνεται σε χαμηλότερα επίπεδα. Διευκρινίζεται στο σημείο αυτό ότι η γεννήτρια, κιβώτιο ταχυτήτων και λοιπά μέρη αυτών είναι τοποθετημένα στη βάση των Α/Γ. Πρόκειται για μια οικονομικότερη, απλούστερη και μη θορυβώδη κατασκευή, η οποία δεν απαιτεί τον πρόσθετο μηχανισμό περιστροφής των πτερυγίων που προαναφέρθηκε. Από την εφαρμογή τους αποδείχθηκε πως τα πτερύγια υφίστανται μεγάλη φθορά, δικαιολογημένης της 360 μοιρών περιστροφής τους, καθώς και ότι η διαδικασία μοντελοποίησης και σχεδιασμού είναι κατά πολύ δυσκολότερη.

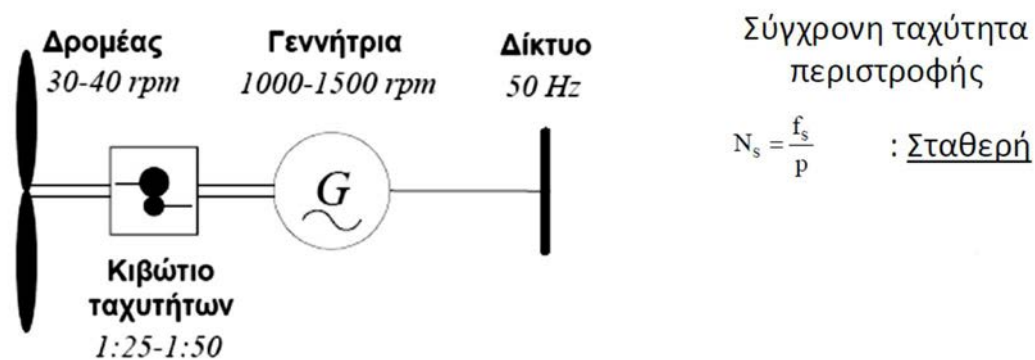


Σχήμα 2.7: Κατασκευαστικές διαφορές Α/Γ οριζόντιου και κάθετου άξονα

2.4.2 Ταξινόμηση Α/Γ αναλόγως της ταχύτητας περιστροφής του δρομέα

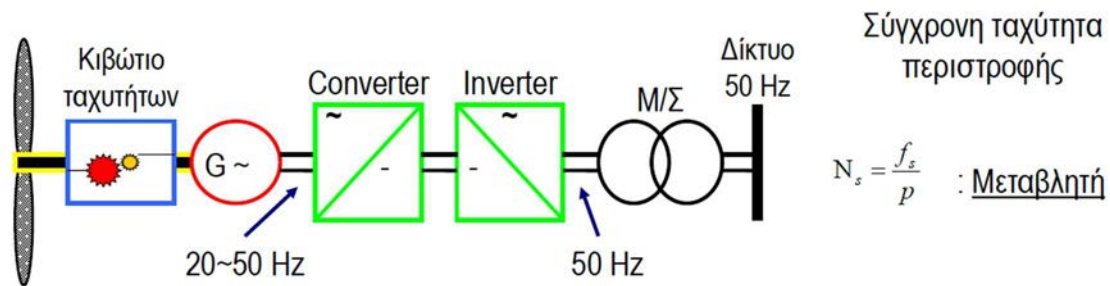
Οι Α/Γ σταθερών στροφών αποτέλεσαν την πρωταρχική μορφή συστημάτων μετατροπής αιολικής ενέργειας και κυριάρχησαν στην αγορά την περίοδο 1940 με 1970. Ο δρομέας σταθερών στροφών δε δύναται να στρέφεται συνεχώς, παρά μόνο για συγκεκριμένες τιμές του ανέμου, ήτοι έχουν περιορισμένο εύρος λειτουργίας, ωστόσο η ταχύτητα λειτουργίας διατηρείται σταθερή και ανεξάρτητη της κινητήριας ροπής. Η μορφή αυτή (Σχήμα 2.8) χαρακτηρίζεται ως η οικονομικότερη, αν και απαιτείται η κατασκευή

στιβαρότερων συστημάτων θεμελίωσης μιας και υποβάλλονται σε ισχυρές καταπονήσεις εξαιτίας του γεγονότος ότι ο χρόνος προσαρμογής στις διακυμάνσεις του πνέοντος ανέμου είναι μεγαλύτερος, ωστόσο δεν εξασφαλίζεται η μέγιστη απόδοση. Πρόσθετη εξοικονόμηση κόστους συντελεί η απουσία ηλεκτρονικών, ακόμη και στην περίπτωση που η ασύγχρονη γεννήτρια είναι δακτυλιοφόρου δρομέα, είθισται οι Α/Γ σταθερών στροφών να χρησιμοποιούν ασύγχρονες γεννήτριες, που αναγκαστικά η εξομάλυνση της παραγόμενης ισχύος επιτυγχάνεται μέσω εξωτερικών αντιστάσεων.



Σχήμα 2.8: Τυπική διάταξη Α/Γ σταθερής ταχύτητας περιστροφής, όπου με N_s δηλώνεται η σύγχρονη ταχύτητα, με f_s η συχνότητα δικτύου και με p ο αριθμός των ζευγών των πόλων της Α/Γ

Ο δρομέας μεταβλητών στροφών του Σχήματος 2.9, αντιθέτως, επιτρέπει εναλλαγές, και μάλιστα ομαλές, στην ταχύτητα περιστροφής γεγονός που συνεπάγεται τη διεύρυνση του εύρους λειτουργίας της Α/Γ με αποτέλεσμα να αποδίδουν σε μεγαλύτερο βαθμό. Προσαρμόζονται δίχως δυσκολία και χρονική καθυστέρηση (ταχεία ανταπόκριση) στις συνθήκες του ανέμου, γεγονός που μειώνει τις μηχανικές καταπονήσεις και δεν απαιτούνται οι εξαιρετικά στιβαρές κατασκευές των Α/Γ σταθερών στροφών, ωστόσο είναι επιτακτική η χρήση των δαπανηρών ηλεκτρονικών ισχύος. Πρόκειται για διατάξεις που διαχειρίζονται την ηλεκτρική ισχύ. Εν ολίγοις, μεταβάλλουν τα μεγέθη της τάσεως και την εντάσεως του ρεύματος καθώς και την κυματομορφή του τελευταίου, κατά τέτοιο τρόπο προκειμένου να επιτρέπεται και να διευκολύνεται η μεταφορά, η διανομή, η αποθήκευση και η κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας.



Σχήμα 2.9: Τυπική διάταξη Α/Γ μεταβλητής ταχύτητας περιστροφής, όπου με N_s δηλώνεται η σύγχρονη ταχύτητα, με f_s η συχνότητα δικτύου και με p ο αριθμός των ζευγών των πόλων της Α/Γ

2.4.3 Ταξινόμηση Α/Γ αναλόγως της γεννήτριας

Οι ασύγχρονες γεννήτριες αποδείχθηκαν η βέλτιστη επιλογή για τις Α/Γ σταθερών ταχυτήτων, εξαιτίας της δυνατότητας τους να διατηρούν το απαιτούμενο συγχρονισμό με το δίκτυο και να αποδίδουν στο μέγιστο βαθμό. Επιπρόσθετα, συμβάλλουν στο χαμηλό κόστος συντήρησης. Με την εξέλιξη της τεχνολογίας παρατηρήθηκε η προτίμηση των σύγχρονων γεννητριών στις Α/Γ μεταβλητών ταχυτήτων, οι οποίες εκ της κατασκευής τους χρησιμοποιούν ηλεκτρονικά ισχύος. Συνεπώς, τα ηλεκτρονικά ισχύος επιλύουν το πρόβλημα ελέγχου της άεργους ισχύος, της ηλεκτρικής πέδησης και της εκκίνησης.

2.4.4 Ταξινόμηση Α/Γ αναλόγως της ύπαρξης κιβωτίου μετάδοσης ταχύτητας

Το κιβώτιο ταχυτήτων ανυψώνει την ταχύτητα περιστροφής και επιτυγχάνει το διαχωρισμό της κίνησης σε χαμηλή και υψηλή. Η ταχύτητα περιστροφής του άξονα των Α/Γ κυμαίνεται σε ένα εύρος των 5 έως 30 στροφών το λεπτό, ενώ των γεννητριών από τις 750 έως τις 3600 στροφές το λεπτό. Ταξινομούνται στα παράλληλου άξονα και τα πλανητικά, με τα τελευταία να αποτελούν ναι μεν πιο πολύπλοκες κατασκευές αλλά δε το μικρό μέγεθος και χαμηλό κόστος τα καθιστούν τη βέλτιστη επιλογή σε Α/Γ μεγάλης ισχύος. Οι Α/Γ δίχως το κιβώτιο ταχυτήτων στηρίζονται αποκλειστικά στον ρότορα, ο οποίος διοχετεύει απευθείας κίνηση στην γεννήτρια (άμεσης μετάδοσης κίνηση). Η απουσία κιβωτίου ταχυτήτων συμβάλει στη μείωση των επιπέδων θορύβου λειτουργίας, και για το λόγω αυτό συνίσταται να μην χρησιμοποιούνται σε περιοχές με αυστηρούς περιορισμούς όπως για παράδειγμα σε κατοικήσιμες. Επιπροσθέτως, το κόστος

συντήρησης αυτών μειώνεται αισθητά μιας και τα περιστρεφόμενα μέρη των Α/Γ είναι λιγότερα σε αριθμό.

2.4.5 Ταξινόμηση Α/Γ αναλόγως της ονομαστικής ισχύος

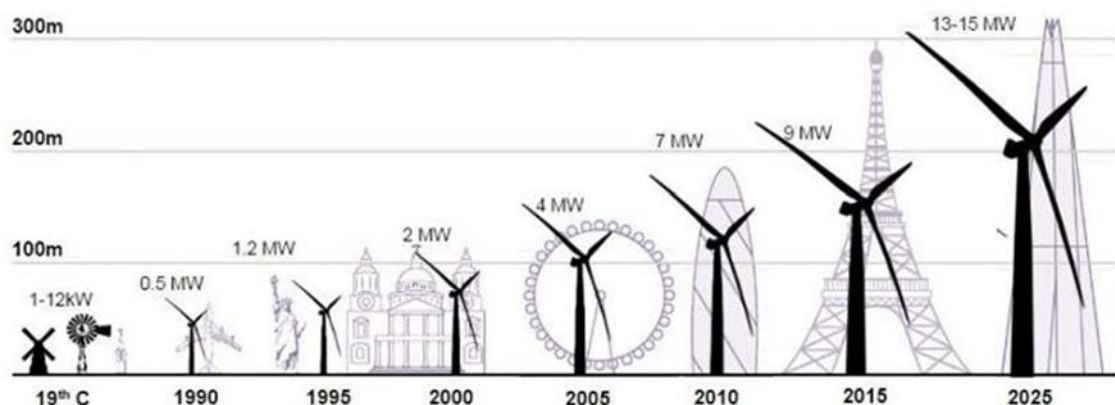
Οι Α/Γ δύναται να χωριστούν και με κριτήριο την ισχύ που παράγουν. Έτσι, ταξινομούνται ως εξής (Πίνακας 2.2):

- Micro, με ονομαστική ισχύ μικρότερη του 1 kW
- Μικρές, με ονομαστική ισχύ από 1 έως 50 kW
- Μεσαίες, με ονομαστική ισχύ από 50 έως 1.000 kW
- και Μεγάλες, με ονομαστική ισχύ μεγαλύτερη του 1 MW

Τώρα, το μέγεθος της Α/Γ καθορίζει και ορισμένα επιπλέον χαρακτηριστικά της, όπως είναι η διάμετρος του στροφείου, το ύψος του πύργου-πυλώνα αλλά και η επιφάνεια σάρωσης. Στο Σχήμα 2.10 αποτυπώνεται η εξέλιξη του μεγέθους αλλά και της απόδοσης μιας Α/Γ στην πάροδο του χρόνου.

Πίνακας 2.2: Τιμές προσδιορισμού τύπου Α/Γ με βάσει την ισχύ εξόδου [10]

Διάκριση (Μέγεθος) Α/Γ	Ισχύς εξόδου (kW)	Διάμετρος στροφείου(m)	Ύψος πύργου (m)	Επιφάνεια σάρωσης (m ²)
Micro	<1	<1	<5	<1
Μικρές	1-50	1-16	5-30	1-200
Μεσαίες	50-1.000	16-55	30-70	200-2.400
Μεγάλες	>1.000	>55	>70	>2.400



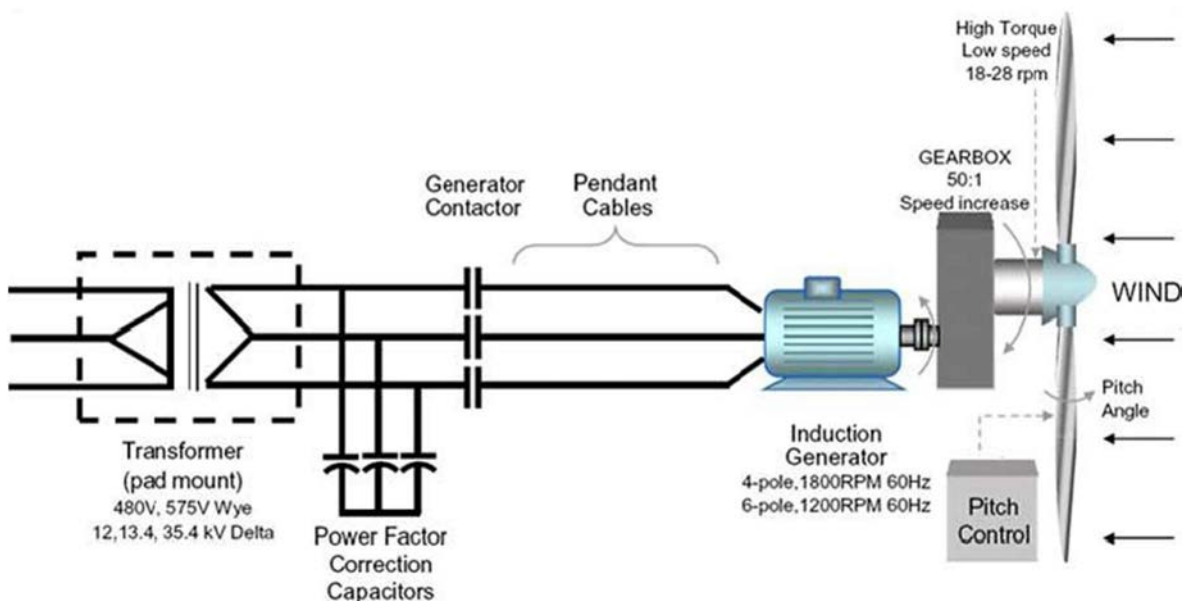
Σχήμα 2.10: Η εξέλιξη των Α/Γ στην πάροδο του χρόνου

2.4.6 Βελτιστοποίηση απόδοσης με δυνατότητα συνδυασμού Α/Γ

Η εξέλιξη της τεχνολογίας των Α/Γ, με στόχο να ικανοποιήσει τις όλο και αυξημένες απαιτήσεις ηλεκτροπαραγωγής μέσω των ΑΠΕ, καθώς και να επιλύσει με το πλέον βέλτιστο τρόπο καταστάσεις όπως απαιτήσεις δικτύου και κόστος κατασκευής, προτείνει συνδυαστικούς τύπους Α/Γ, όπως αυτοί που παρατίθενται [10]:

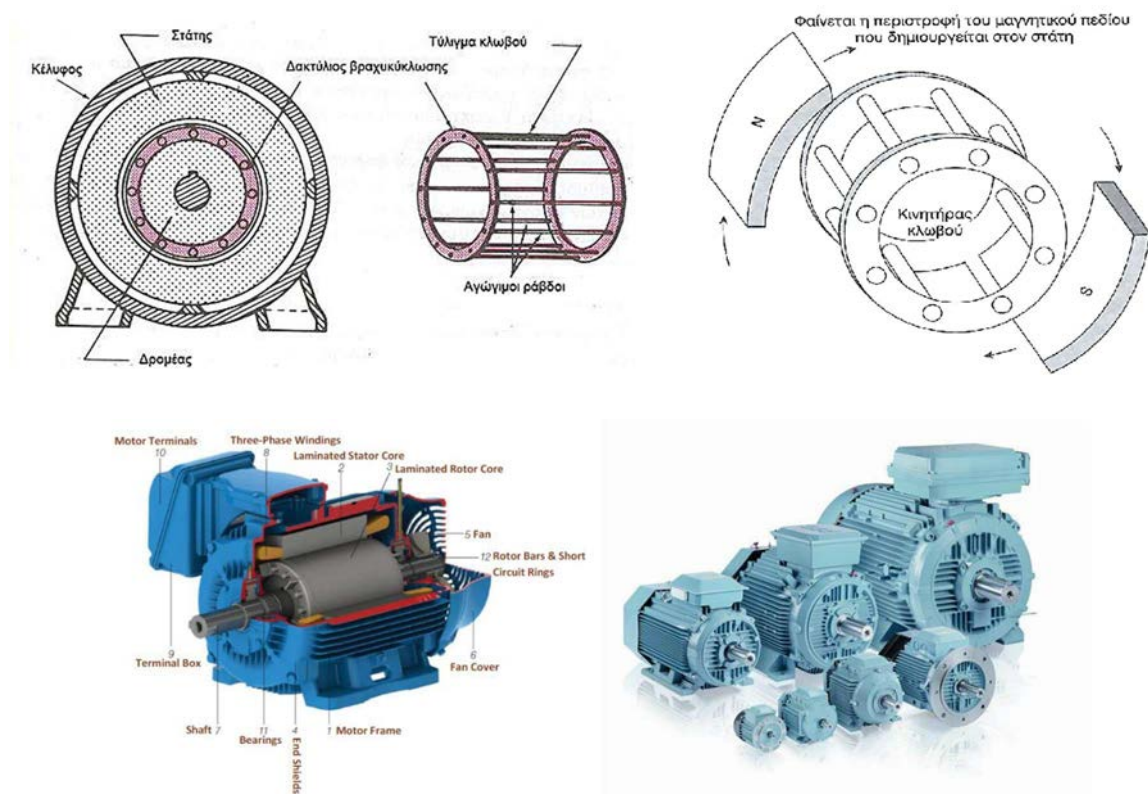
- Επαγωγική γεννήτρια βραχυκυκλωμένου κλωβού
- Επαγωγική γεννήτρια δακτυλιοφόρου δρομέα
- Επαγωγική γεννήτρια διπλής τροφοδοσίας
- Σύγχρονη γεννήτρια μόνιμου μαγνήτη

Η επαγωγική γεννήτρια βραχυκυκλωμένου κλωβού ή Α/Γ Τύπου-1 του Σχήματος 2.11 είναι μια μορφή Α/Γ σταθερής ταχύτητας με δυνατότητα να συνδεθεί άμεσα στο δίκτυο, και για τη λειτουργία της απαιτείται κιβώτιο ταχυτήτων. Τον τύπο αυτό χαρακτηρίζει η σταθερή ταχύτητα του δρομέα, η οποία σχεδόν προσεγγίζει τη σύγχρονη ταχύτητα, ωστόσο το γεγονός αυτό επηρεάζει την παραγομένη ισχύ καταγράφοντας ανυψώσεις της τάσης. Για αυτό, σε ορισμένες μηχανές παρατηρείται να εναλλάσσονται οι μαγνητικοί πόλοι προκειμένου να επιτευχθεί μεταβολή της ταχύτητας και τελικώς να εγγυάται η βέλτιστη παραγωγή.



Σχήμα 2.11: Τυπική διάταξη μιας Α/Γ Τύπου-1, δηλαδή με επαγωγική γεννήτρια βραχυκυκλωμένου κλωβού

Το βασικό πλεονέκτημα των Α/Γ Τυπου-1 είναι ότι οι δρομείς της γεννήτριας δεν απαιτούν ούτε διέγερση ούτε και ψήκτρες. Το πεδίο του στάτη μπορεί είτε να κινείται προς τα δεξιά, είτε να παραμένει σταθερό. Στην πρώτη περίπτωση, ο δρομέας του βραχυκυκλωμένου κλωβού μένει ακίνητος, ενώ στη δεύτερη βλέπουμε τον αγωγό να μετακινείται προς τα αριστερά τέμνοντας τις γραμμές του μαγνητικού πεδίου. Στον αγωγό τότε επιβάλλεται δύναμη με κατεύθυνση προς τα δεξιά, η οποία προσπαθεί να εξαναγκάσει τον δρομέα να προσεγγίσει το περιστρεφόμενο μαγνητικό πεδίο του στάτη. Κάθε φορά που ένας αγωγός μετακινείται μέσα σε μαγνητικό πεδίο, έχει ως αποτέλεσμα να αναπτύσσεται στα άκρα του μια ηλεκτρεγερτική δύναμη, και εάν επιτρέπεται, θα περάσει ρεύμα μέσα από αυτόν.

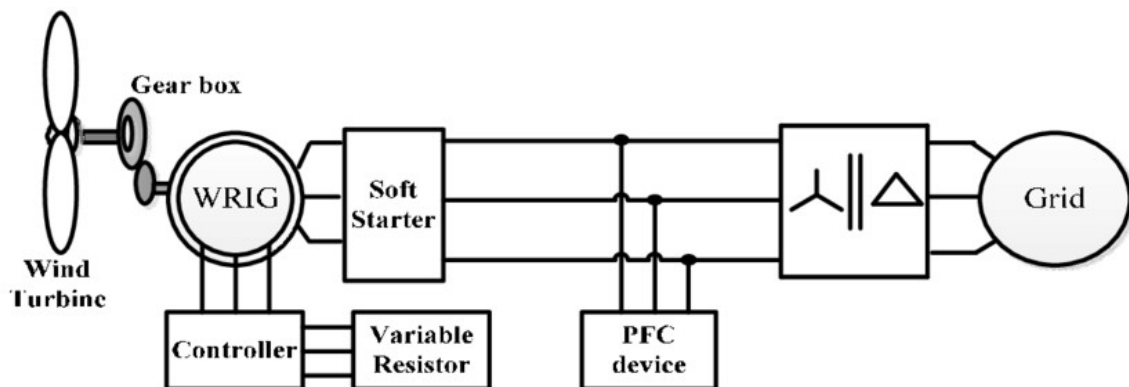


Εικόνα 2.8: Διάφορες όψεις μιας επαγωγικής γεννήτριας βραχυκυκλωμένου κλωβού

Όταν ο στάτης μιας επαγωγικής μηχανής Τυπου-1 δέχεται τριφασικό ρεύμα διέγερσης, τότε ο άξονας που είναι συνδεδεμένος στην Α/Γ, καθώς ο άνεμος ξεκινά να φυσά, θέτει σε λειτουργία το μηχάνημα αυξάνοντας τις στροφές του για να προσεγγίσει τη σύγχρονη ταχύτητά του. Όταν η ταχύτητα του ανέμου φτάσει στο σημείο να εξαναγκάσει τον άξονα της γεννήτριας σε υπέρβαση της σύγχρονης ταχύτητας, η επαγωγική μηχανή λειτουργεί

ως τριφασική γεννήτρια που τροφοδοτεί με ηλεκτρικό ρεύμα τις περιελίξεις του στάτη της. Να διευκρινιστεί στο σημείο αυτό ότι το τριφασικό ρεύμα μαγνήτισης παρέχεται από το δίκτυο. Παρόλα αυτά, υπάρχει και η δυνατότητα λειτουργίας της αυτοδιέγερσης της επαγωγικής γεννήτριας, όπου το ρεύμα προέρχεται από πυκνωτές. Στην Εικόνα 2.8 απεικονίζονται διάφορες όψεις μιας επαγωγικής γεννήτριας βραχυκυκλωμένου κλωβού.

Η επαγωγική γεννήτρια δακτυλιοφόρου δρομέα ή Α/Γ Τύπου-2 ανήκει στην κατηγορία Α/Γ μεταβλητής ταχύτητας. Η εν λόγω περιέχει μια ιδιαίτερη κατασκευή του δρομέα, που περιλαμβάνει ελαστοποιημένο τύπο με τριφασικό τύλιγμα συνδεσμολογίας αστέρα. Τα άκρα αυτού ψύχονται μέσω ψηκτρών και καταλήγουν ψυχόμενα στον κινητήρα, εξασφαλίζοντας τη μεταβολή της ταχύτητας που είναι ο επιθυμητός στόχος (Εικόνα 2.9).

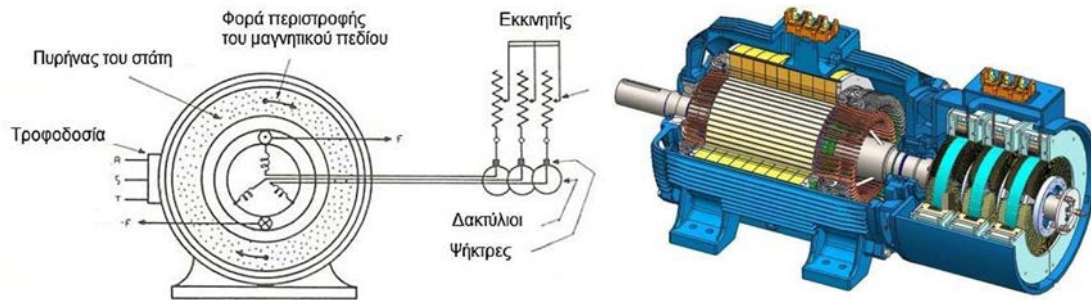


Σχήμα 2.12: Τυπική διάταξη μιας Α/Γ Τύπου-2, δηλαδή με επαγωγική γεννήτρια δακτυλιοφόρου δρομέα

Τα τυλίγματα της μηχανής δακτυλιοφόρου δρομέα συνδέονται με εξωτερικές αντιστάσεις μέσω των οποίων είναι εφικτή η ρύθμιση της ταχύτητας, και αυτό τις καθιστά μηχανές μεταβλητής ταχύτητας. Μια μηχανή αυτής της μορφής φέρει δρομέα πλήρως ελασματοποιημένο επί του οποίου τοποθετείται τριφασικό τύλιγμα από χαλκό, που στην ουσία είναι το κατοπτρικό είδωλο του τριφασικού τυλίγματος του στάτη με ίδιο αριθμό μαγνητικών πόλων. Διευκρινίζεται ότι το τύλιγμα του δρομέα είναι συνδεδεμένο κατά αστέρα, και τα τρία ελεύθερα άκρα του καταλήγουν σε τρία αγωγίδια, που βρίσκονται τοποθετημένα επάνω στον άξονα του δρομέα. Τα εν λόγω είναι μονωμένα τόσο μεταξύ τους όσο και σε σχέση με τον άξονα του δρομέα, και μέσω του συστήματος

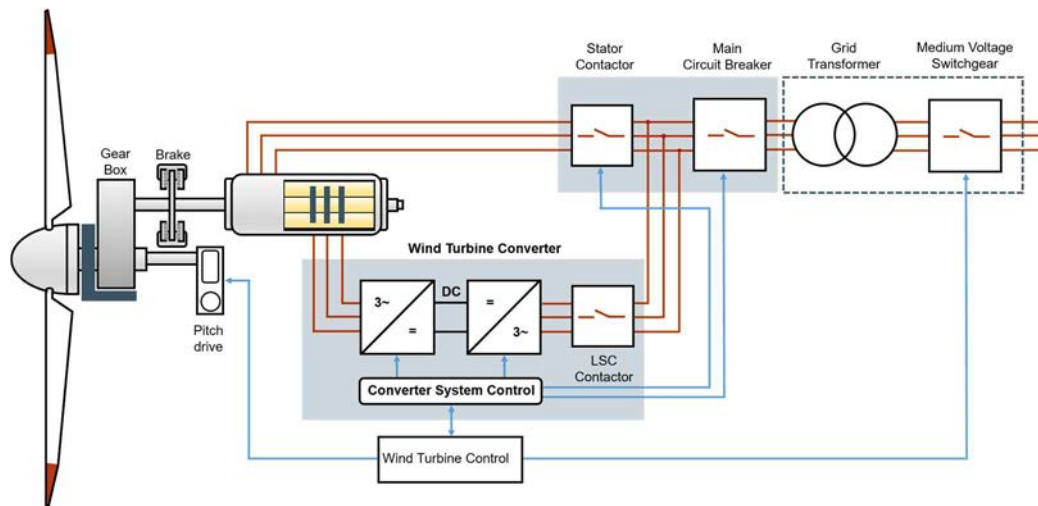
ψηκτρών καταλήγουν στο εξωτερικό πλαίσιο του κινητήρα. Η τεχνική αυτή κατασκευής του δρομέα επιτρέπει τη δυνατότητα επεξεργασίας της χαρακτηριστικής ροπής/στροφών της μηχανής, με στόχο την προσαρμογή του κινητήρα στις διάφορες συνθήκες φόρτισης.

Στο Σχήμα 2.12 δηλώνεται μια τυπική διάταξη συνδεσμολογίας μιας γεννήτριας αυτού του τύπου προκειμένου να ολοκληρωθεί η σύνδεση της με το δίκτυο.



Εικόνα 2.9: Διάφορες όψεις μιας επαγωγικής γεννήτριας δακτυλιοφόρου δρομέα

Μια ακόμη γεννήτρια μεταβλητής ταχύτητας είναι και η επαγωγική γεννήτρια διπλής τροφοδοσίας ή αλλιώς Α/Γ Τύπου-3 (Εικόνα 2.10). Διαφοροποιείται από αυτήν του δακτυλιοφόρου δρομέα, καθώς απαιτεί τη χρήση ενός back to back AC-DC-AC μετατροπέα. Ο ποθητός συγχρονισμός πεδίων του στάτη και του δρομέα και τελικώς άεργου και ενεργού ισχύος επιτυγχάνεται μέσω αυτού του μετατροπέα, ο οποίος δύναται να ελέγχει τα μεγέθη της συχνότητας και της φάσης του ρεύματος. Η διαδικασία αυτή στηρίζεται στο περιστρεφόμενο μαγνητικό πεδίο των περιελίξεων του στάτη, που η ταχύτητά τους επιτρέπεται να μην παραμένει ίση με τη σταθερή ταχύτητα αυτού.



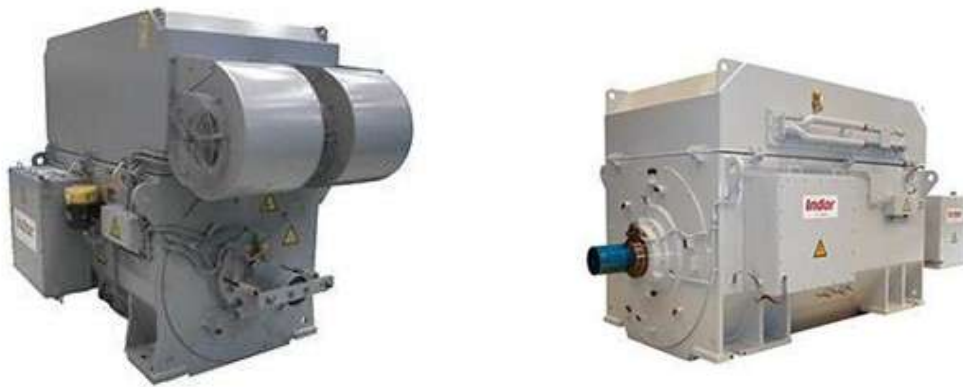
Σχήμα 2.13: Τυπική διάταξη μιας Α/Γ Τύπου-3, δηλαδή με επαγωγική γεννήτρια διπλής τροφοδοσίας

Η αρχή λειτουργίας της ορίζει ότι το περιστρεφόμενο μαγνητικό πεδίο του στάτη δημιουργείται από τις τριφασικές τάσεις του δικτύου, με άλλα λόγια η ισχύς που παράγει ο στάτης επιστρέφει στο δίκτυο. Αυτό επιτυγχάνεται ρυθμίζοντας κατάλληλα τον δρομέα, ώστε να επιτρέπεται η αμφίδρομη ροή ισχύος προς και από το δίκτυο. Ειδικότερα, όταν ο δρομέας στρέφεται με συχνότητα μικρότερη της σύγχρονης, τότε η λειτουργία της μηχανής παρομοιάζεται με αυτή του κινητήρα, δηλαδή επιβραδύνει την Α/Γ και απορροφά ενέργεια από το δίκτυο. Στην περίπτωση, όμως, που περιστρέφεται πιο γρήγορα από τη σύγχρονη ταχύτητα, τότε η ισχύς παράγεται από τον δρομέα και τροφοδοτείται πίσω στο δίκτυο.

Η παροχή AC τάσεων πίσω στον δρομέα στη συχνότητα ολίσθησης καθίσταται λόγω της ύπαρξης του back-to-back μετατροπέας. Επιπρόσθετα, αν οι τάσεις αντιταχθούν στην ηλεκτρεγερτική δύναμη του δρομέα, η γεννήτρια θα περιστραφεί πιο γρήγορα και η ισχύς θα παραδοθεί από τον δρομέα στο δίκτυο (υπερ-σύγχρονη). Από την άλλη, στην περίπτωση που προστίθενται στην ηλεκτρεγερτική δύναμη του δρομέα, τότε η ισχύς καταναλώνεται από τον δρομέα και η γεννήτρια περιστρέφεται πιο αργά (υπο-σύγχρονη).

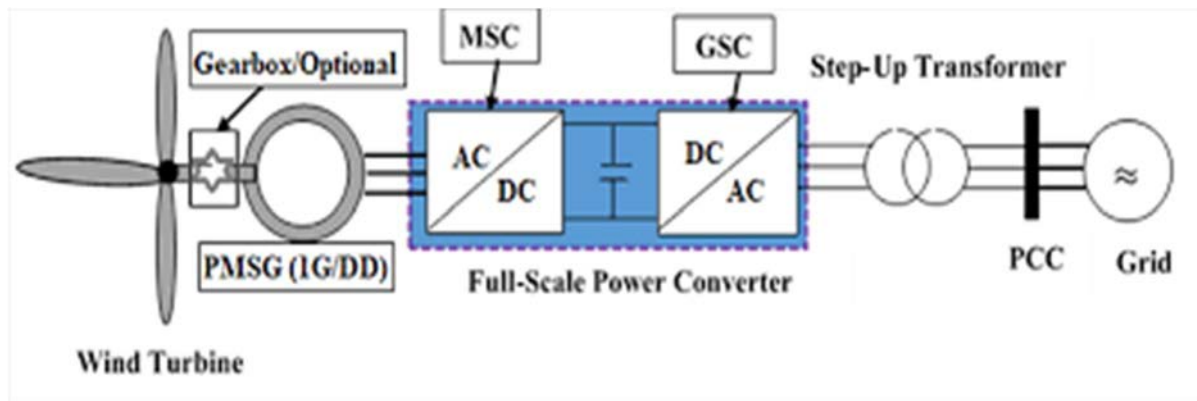
Όπως προαναφέρθηκε, ο μετατροπέας επεμβαίνει στην ταχύτητα περιστροφής διατηρώντας την σε ένα εύρος, που συνήθως κυμαίνεται από 40% περίπου κάτω έως 20% πάνω της σύγχρονης ταχύτητας. Επίσης, εκτός από τον έλεγχο της ταχύτητας, ο μετατροπέας ρυθμίζει τόσο την πραγματική ισχύς P όσο και την αέργο ισχύς Q , που ρέει

από τον στάτη προς το δίκτυο ανεξάρτητα από την ταχύτητα περιστροφής της γεννήτριας. Συνεπώς, ο ρόλος του μετατροπέα στην πλευρά του δρομέα είναι διπλός. Αρχικά, ελέγχει τη συχνότητα των ρευμάτων που ρέουν τα τυλίγματα του δρομέα, ώστε να εξασφαλίζεται διαρκώς ο επιθυμητός συγχρονισμός μεταξύ των μαγνητικών πεδίων του στάτη και του δρομέα, και ακόμη ελέγχει το μέγεθος αλλά και τη φάση των ρευμάτων που ρέουν στα τυλίγματα του δρομέα επιτηρώντας την ενεργό και άεργο ισχύς. Στο Σχήμα 2.13 δηλώνεται μια τυπική διάταξη συνδεσμολογίας μιας γεννήτριας Τύπου-3 προκειμένου να ολοκληρωθεί η σύνδεση της με το δίκτυο.



Εικόνα 2.10: Παραδείγματα μορφής επαγωγικών γεννητριών διπλής τροφοδοσίας

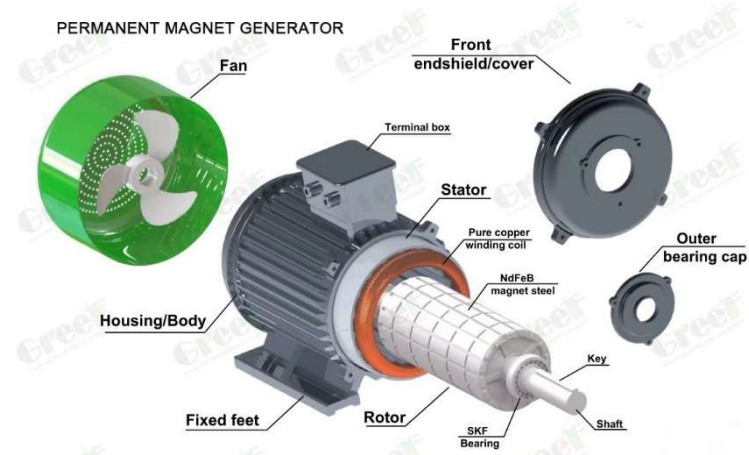
Ο πλέον προηγμένος τύπος της αγοράς, που προτιμάται στην κατασκευή υπεράκτιων πάρκων, αποτελεί η περίπτωση της σύγχρονης γεννήτριας μόνιμου μαγνήτη ή διαφορετικά Α/Γ Τύπου-4. Χαρακτηριστικό τους είναι η απουσία κιβωτίου ταχυτήτων, καθώς και ότι ο μετατροπέας συμβάλλει στην ανεξαρτοποίηση της ταχύτητας περιστροφής από τη σταθερή του δικτύου πετυχαίνοντας με αυτό τον τρόπο τη μέγιστη παραγωγή με ταυτόχρονη παροχή δυνατότητας ελέγχου του παραγόμενου ρεύματος. Σημειώνεται ότι ναι μεν το αρχικό κόστος κατασκευής είναι υψηλότερο, αλλά αντισταθμίζεται από τη μη συχνή απαίτησης συντήρησης.



Σχήμα 2.14: Τυπική διάταξη μιας Α/Γ Τύπου-4, δηλαδή με σύγχρονη γεννήτριας μόνιμου μαγνήτη

Ο μετατροπέας στην περίπτωση αυτή επιτρέπει την αποσύνδεση της ταχύτητας περιστροφής του δρομέα, δηλαδή να μην εξαρτάται από τη σταθερή συχνότητα του ηλεκτρικού δικτύου (Σχήμα 2.14). Ειδικότερα, στη λειτουργία μεταβλητής ταχύτητα ο μετατροπέας στην πλευρά του στάτη παράγει AC τάσεις και ρεύματα συχνότητας, που συμμορφώνονται με την ταχύτητα του δρομέα. Επίσης, ρυθμίζει το μέγεθος και τη φάση του ρεύματος του στάτη, προκειμένου να επιτυγχάνεται έλεγχος της ηλεκτρομαγνητικής ροπής της γεννήτριας με τελικό σκοπό η ταχύτητα του δρομέα να πλησιάζει αυτή που αντιστοιχεί στη μέγιστη παραγωγή ισχύος.

Στην Εικόνα 2.11 που ακολουθεί απεικονίζονται διάφορες όψεις και κατασκευαστικές λεπτομέρειες μια γεννήτριας μόνιμου μαγνήτη.

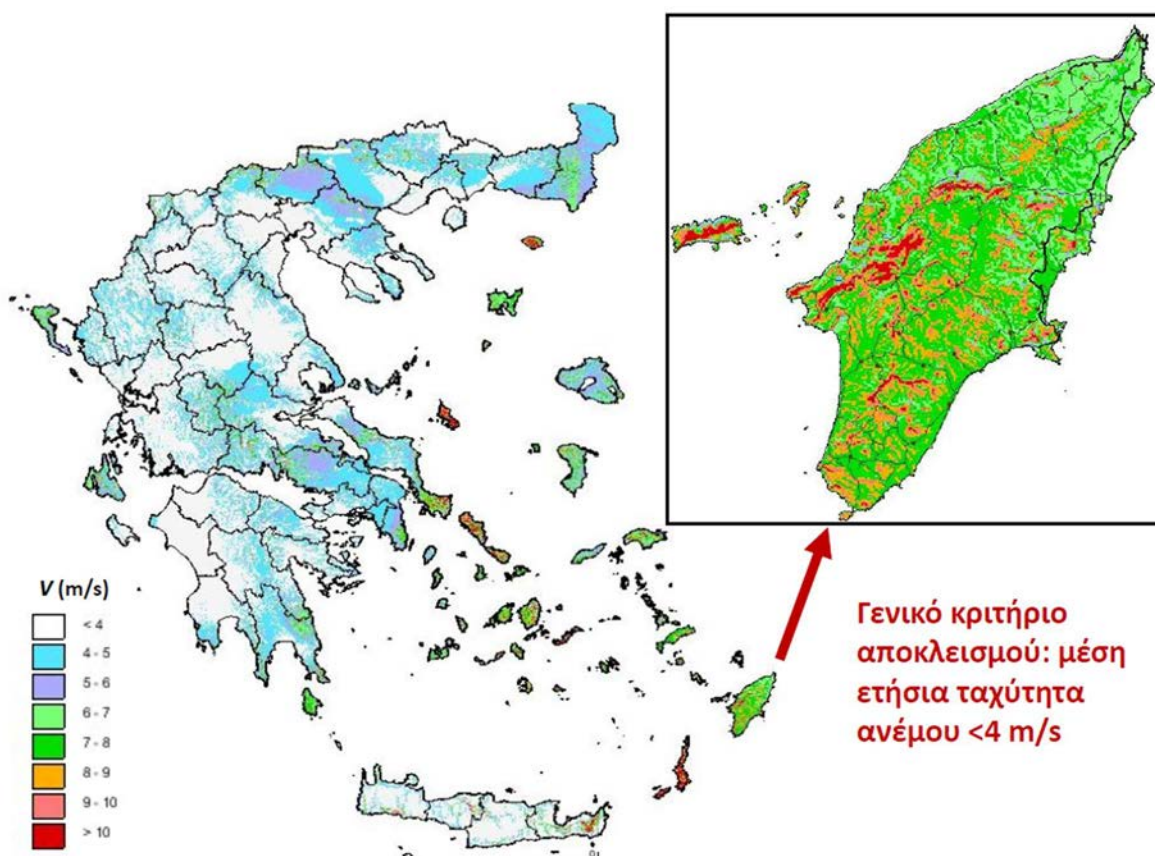


Εικόνα 2.11: Διάφορες όψεις μιας σύγχρονης γεννήτριας μόνιμου μαγνήτη

Κεφάλαιο 3 Αιολικά πάρκα και Τρόποι Διασύνδεσης

3.1 Αιολικό δυναμικό στην Ελλάδα

Η Ελλάδα διαθέτει το ισχυρότερο αιολικό δυναμικό σε σχέση με τις γειτονικές της χώρες και άλλες περιοχές της Μεσογείου. Ιδιαίτερα στα νησιά και στη θαλάσσια περιοχή του Αιγαίου, η ένταση των ανέμων συγκαταλέγεται στις υψηλότερες της Ευρώπης. Παρ' όλα αυτά, η αξιοποίηση αυτού του δυναμικού είναι περιορισμένη, καθώς η μέση ταχύτητα του ανέμου ξεπερνά το όριο των 4 m/s, γεγονός που δημιουργεί τεχνικές και λειτουργικές δυσκολίες στην εκμετάλλευσή του (Εικόνα 3.1).



Εικόνα 3.1: Κατανομή αιολικού δυναμικού στην Ελλάδα

Η Ελλάδα διαθέτει ένα σημαντικό ανταγωνιστικό πλεονέκτημα χάρη στο αξιόλογο αιολικό της δυναμικό. Εάν επενδύσει στην εκτεταμένη εγκατάσταση αιολικών πάρκων, θα μπορεί να παράγει μεγάλες ποσότητες ηλεκτρικής ενέργειας σε όλη τη διάρκεια της ημέρας, ακόμη και σε ώρες που τα φωτοβολταϊκά συστήματα των γειτονικών χωρών

υπολειτουργούν ή δεν λειτουργούν καθόλου, όπως κατά τις μη ηλιακές ώρες. Σε αυτές τις περιόδους, οι γειτονικές χώρες ενδέχεται να μην καλύπτουν τις ενεργειακές τους ανάγκες, αναζητώντας εισαγωγές από άλλες αγορές. Η Ελλάδα, εκμεταλλευόμενη την πλεονάζουσα αιολική ενέργεια, θα μπορεί να την εξάγει, αποκομίζοντας σημαντικά οικονομικά οφέλη. Έτσι, η προοπτική εκτεταμένης ανάπτυξης αιολικών πάρκων αποκτά ιδιαίτερη αξία, καθώς ενισχύει τη διασύνδεση της χώρας με διεθνή ηλεκτρικά δίκτυα και αυξάνει τις δυνατότητες εξαγωγών ηλεκτρικής ενέργειας [11].

Σύμφωνα με το Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας, η Ελλάδα ξεχωρίζει στη Μεσόγειο για το εξαιρετικό αιολικό της δυναμικό, με υψηλό συντελεστή αξιοποίησης που ξεπερνά το 50%. Αυτό το γεγονός αναμένεται να προσφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα τόσο στην οικονομία όσο και στην κοινωνία της χώρας. Το Εθνικό Σχέδιο για την Ανάπτυξη Υπεράκτιων Αιολικών Πάρκων, όπως παρουσιάζεται από την Ελληνική Εταιρεία Υδρογονανθράκων και Φυσικών Πόρων, προβλέπει 25 επιλεγμένες περιοχές συνολικής έκτασης περίπου 2.712 τετραγωνικών χιλιομέτρων, με εκτιμώμενη ελάχιστη ισχύ 12,4 GW. Μεταξύ των περιοχών που προορίζονται για την εγκατάσταση τέτοιων έργων περιλαμβάνονται τα Διαπόντια Νησιά στο Ιόνιο, ο Πατραϊκός Κόλπος, η Δυτική και Ανατολική Κρήτη, η Ρόδος, η Δονούσα, η Γυάρος, οι Άγιοι Απόστολοι στην Εύβοια και η Χίος. Η υλοποίηση αυτών των επενδύσεων θα επιτρέψει στην Ελλάδα να αναδειχθεί ως εξαγωγέας ηλεκτρικής ενέργειας, ενισχύοντας τον ρόλο της στην περιφερειακή αγορά ενέργειας. Η διαδικασία των διαγωνισμών για την εγκατάσταση των υπεράκτιων αιολικών πάρκων αναμένεται να ξεκινήσει το 2026, αφού πρώτα ολοκληρωθεί η συλλογή όλων των απαραίτητων δεδομένων για τις επιλεγμένες περιοχές [12].

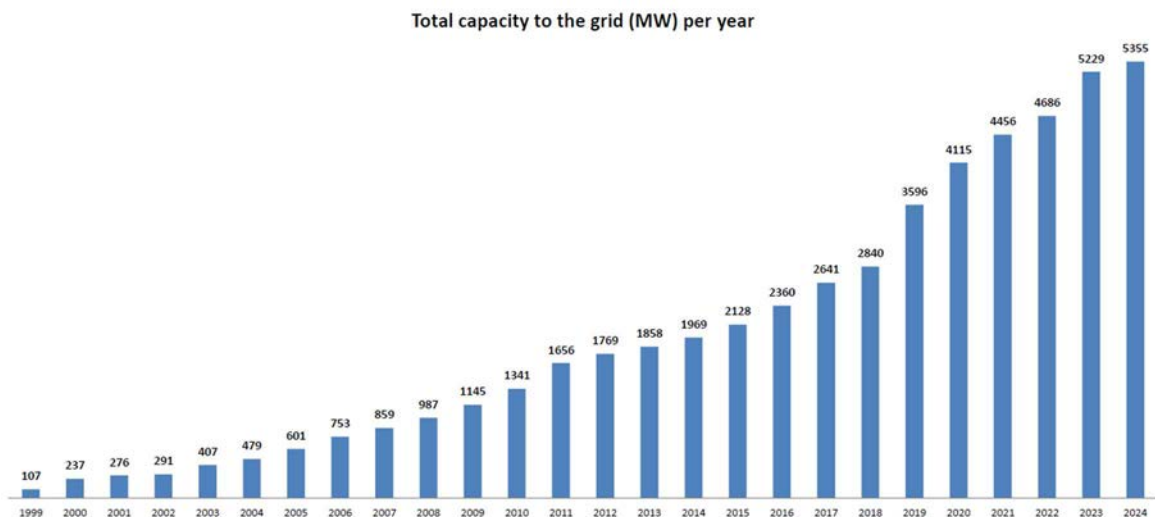
Σύμφωνα με τα πιο πρόσφατα δεδομένα, η συνολική αιολική ισχύς που ήταν διασυνδεδεμένη με το ηλεκτρικό δίκτυο της Ελλάδας στα τέλη του 2024 ανήλθε σε περίπου 5,4 GW (Σχήμα 3.1). Σε ό,τι αφορά την κατανομή ανά Περιφέρεια, η Στερεά Ελλάδα διατηρεί το προβάδισμα, φιλοξενώντας 2.346 MW, δηλαδή το 44% της συνολικής ισχύος. Ακολουθεί η Πελοπόννησος με 667 MW (12%) και η Ανατολική Μακεδονία-Θράκη με εγκατεστημένη ισχύ 535 MW (10%) (Εικόνα 3.2) [2].



Εικόνα 3.2: Εγκατεστημένη ισχύς αιολικών παραγωγής σε επίπεδο Περιφερειών

Κατά τη διάρκεια του 2024, το Ελληνικό Διασυνδεδεμένο Σύστημα κατέγραψε ως μέγιστη ωριαία συμμετοχή της αιολικής ενέργειας το 90,3%. Η εν λόγω επίδοση σημειώθηκε τις πρώτες πρωινές ώρες της Δευτέρας 8 Απριλίου (03:00 - 04:00). Σε ό,τι αφορά τη συνολική διάρκεια του έτους, για περίπου 2.575 ώρες, η αιολική ενέργεια κάλυψε πάνω από το 30% της συνολικής ζήτησης ηλεκτρικού ρεύματος. Επιπλέον, αν συνυπολογιστούν και τα

φωτοβολταϊκά, η συμμετοχή των δύο αυτών τεχνολογιών ξεπέρασε το 30% για 5.253 ώρες, ενώ για 2.618 ώρες η διείσδυση τους ήταν πάνω από 60%. Αξιοσημείωτο είναι ότι, για 306 ώρες εντός του 2024, η παραγωγή από αιολικά και φωτοβολταϊκά ξεπέρασε το 100% της ζήτησης, χωρίς το Εθνικό Διασυνδεδεμένο Σύστημα να αντιμετωπίσει λειτουργικά προβλήματα από αυτά τα υψηλά ποσοστά διείσδυση.



Σχήμα 3.1: Η ανάπτυξη της αιολικής ενέργειας στον Ελλαδικό χώρο από 1999 έως 2024

Στο πλαίσιο του Οικονομικού Φόρουμ των Δελφών 2025, ο Διευθύνων Σύμβουλος του ΔΕΔΔΗΕ, Αναστάσιος Μάνος, εξήρε τη σημαντική κλιμάκωση των επενδύσεων που υλοποιεί η εταιρεία, τονίζοντας ότι αυτή η στρατηγική οδηγεί σε μείωση του ενεργειακού κόστους για τους καταναλωτές, με τους λογαριασμούς να παρουσιάζουν πτώση έως και 32%. Όπως ανέφερε, το επενδυτικό πρόγραμμα του ΔΕΔΔΗΕ έχει αυξηθεί θεαματικά, φτάνοντας τα 824 εκατομμύρια ευρώ από 150 εκατομμύρια το 2019, ενώ η ανάπτυξη του δικτύου πραγματοποιείται με ετήσιο ρυθμό 0,9%, υπερβαίνοντας τον ευρωπαϊκό μέσο όρο του 0,7%.

3.2 Σύγκριση αιολικής και ηλιακής ενέργειας

Η βασική αξία των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας έγκειται στη δυνατότητά τους να λειτουργούν συμπληρωματικά. Κάθε χώρα οφείλει να σχεδιάζει το ενεργειακό της

σύστημα λαμβάνοντας υπόψη τα ιδιαίτερα γεωγραφικά και μορφολογικά χαρακτηριστικά της. Για την Ελλάδα, το ιδανικό ενεργειακό μείγμα προκύπτει από την ισόρροπη αξιοποίηση των δύο πιο ανεπτυγμένων τεχνολογιών με το υψηλότερο δυναμικό στη χώρα, ήτοι της αιολικής και της ηλιακής ενέργειας.

Τα αιολικά πάρκα αποτελούν τον κυριότερο μοχλό παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ΑΠΕ στη χώρα εδώ και πάνω από δύο δεκαετίες. Παράλληλα, η παραγωγή από φωτοβολταϊκά έχει αυξηθεί με διπλάσιο ρυθμό συγκριτικά με την αιολική τα τελευταία πέντε χρόνια, κυρίως λόγω του χαμηλότερου κόστους και της ταχύτερης υλοποίησης των ηλιακών εγκαταστάσεων. Αυτή η δυναμική ανάπτυξη αποτυπώνεται και στα πρόσφατα στοιχεία, όπου η συνδυασμένη συνεισφορά αιολικής και ηλιακής ενέργειας καλύπτει πλέον το μεγαλύτερο μέρος της ηλεκτροπαραγωγής στην Ελλάδα

Η αιολική και η ηλιακή ενέργεια αποτελούν ιδιαίτερα οικονομικές επιλογές για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, καθώς δεν απαιτούν δαπάνη για καύσιμα αφού ο ήλιος και ο άνεμος παρέχονται δωρεάν και σε αφθονία. Αξίζει να σημειωθεί πως ο άνεμος, στην ουσία, προέρχεται από την ηλιακή ενέργεια, αφού δημιουργείται από τη θέρμανση της ατμόσφαιρας από τον ήλιο, την περιστροφή της Γης και τις διαφοροποιήσεις στο ανάγλυφο του εδάφους. Εφόσον υπάρχει ηλιακή ακτινοβολία και πνέουν άνεμοι, η παραγόμενη ενέργεια μπορεί να αξιοποιείται για την ηλεκτροδότηση του δικτύου. Η βασική διαφορά ανάμεσα σε αυτές τις δύο τεχνολογίες έγκειται στο αρχικό κόστος εγκατάστασης.

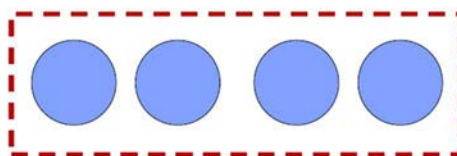
Το κεφαλαιουχικό κόστος για υπεράκτια αιολικά πάρκα κυμαίνεται από 1.300 έως 2.500 ευρώ ανά κιλοβάτ, ενώ τα χερσαία αιολικά έργα απαιτούν επενδύσεις της τάξης των 1.100 με 1.500 ευρώ ανά κιλοβάτ. Από την άλλη, το αντίστοιχο κόστος για φωτοβολταϊκά πάρκα ισχύος έως 1 MW ανέρχεται περίπου στα 800 ευρώ ανά κιλοβάτ, ενώ για έργα μεταξύ 1 και 10 MW το κόστος μειώνεται στα 600 ευρώ ανά κιλοβάτ, και για πάρκα άνω των 10 MW διαμορφώνεται κοντά στα 500 ευρώ ανά κιλοβάτ [14]. Τα ποσά αυτά αφορούν εγκαταστάσεις με σταθερές βάσεις και προκύπτουν από τη διαίρεση του συνολικού κόστους κατασκευής με την εγκατεστημένη ισχύ. Αξίζει να επισημανθεί ότι διάφοροι παράγοντες, όπως η τεχνολογία, η τοποθεσία και το μέγεθος του έργου, επηρεάζουν το συνολικό κόστος υλοποίησης μιας επένδυσης ΑΠΕ. Ειδικότερα, οι κατηγορίες που διαμορφώνουν το συνολικό κόστος κατασκευής είναι:

- το κόστος ανάπτυξης του έργου (μελέτες, αδειοδότηση, κόστος γης)
- το κόστος κατασκευής του έργου, το οποίο αναλύεται στις αντίστοιχες επιμέρους κατηγορίες κόστους προμήθειας εξοπλισμού, μεταφοράς κα εγκατάστασης
- το κόστος κατασκευής των έργων σύνδεσης
- το κόστος χρηματοδότησης του έργου, τόκους από βραχυπρόθεσμες δανειακές συμβάσεις, τις αποδόσεις των επενδύσεων, κ.λ.π.

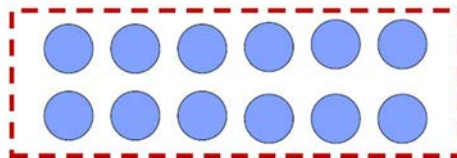
Επιπρόσθετα, η τοποθέτηση Α/Γ μπορεί να πραγματοποιηθεί σε ήδη καλλιεργούμενες εκτάσεις ή αγροτικά κτήματα, γεγονός που ενισχύει σημαντικά την οικονομική δραστηριότητα στην ύπαιθρο, όπου συχνά εντοπίζονται και οι πλέον κατάλληλες περιοχές λόγω των ευνοϊκών ανέμων. Οι γεωργοί και οι κτηνοτρόφοι διατηρούν τη δυνατότητα να αξιοποιούν τη γη τους, καθώς οι Α/Γ καταλαμβάνουν μόνο ένα μικρό μέρος της συνολικής έκτασης. Παράλληλα, οι εταιρείες που διαχειρίζονται τα αιολικά πάρκα καταβάλλουν αντίτιμο μισθώματος στους ιδιοκτήτες γης προσφέροντάς τους ένα επιπλέον εισόδημα. Σε αντίθεση με τα φωτοβολταϊκά συστήματα που απαιτούν αποκλειστική χρήση μεγάλων εκτάσεων εδάφους, οι ανεμογεννήτριες επιτρέπουν τη συνέχιση των αγροτικών δραστηριοτήτων. Για παράδειγμα, ένα φωτοβολταϊκό πάρκο ισχύος 18 MW χρειάζεται περίπου 370.000 m², ενώ ένα αιολικό πάρκο αντίστοιχης ισχύος απαιτεί μόνο 41.000 m² έως 43.000 m², δηλαδή σχεδόν οκτώ φορές μικρότερη έκταση για κάθε μονάδα εγκατεστημένης ισχύος (Σχήμα 3.2).

Έκταση Φ/Β πάρκου ισχύος 18 MW: 370 000 m²

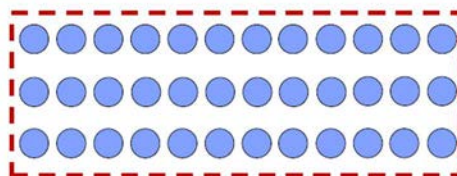
Τύπος: ENERCON E112
 Ισχύς: 4500 kW
 Διάμετρος: 114 m
 Αριθμός: 4
 Επιφάνεια: 40 828 m²



Τύπος: ENERCON E-66
 Ισχύς: 1500 kW
 Διάμετρος: 66 m
 Αριθμός: 12
 Επιφάνεια: 41 054 m²



Τύπος: VESTAS V-39
 Ισχύς: 500 kW
 Διάμετρος: 39 m
 Αριθμός: 36
 Επιφάνεια: 43 005 m²



Σχήμα 3.2: Σύγκριση έκτασης αιολικών και φωτοβολταϊκών πάρκων ίδιας ισχύος 18 MW

Επιπλέον, είναι σύνηθες οι περιοχές με το μεγαλύτερο αιολικό δυναμικό να βρίσκονται σε απομονωμένες τοποθεσίες, μακριά από τα αστικά κέντρα όπου υπάρχει η μεγαλύτερη ζήτηση για ηλεκτρική ενέργεια. Αυτό συνεπάγεται την ανάγκη κατασκευής νέων γραμμών μεταφοράς, ώστε να διοχετεύεται το παραγόμενο ρεύμα από τα αιολικά πάρκα προς τους καταναλωτές. Το σημαντικό κόστος που απαιτείται για την ανάπτυξη αυτών των υποδομών συχνά λειτουργεί αποτρεπτικά για την υλοποίηση αιολικών έργων, οδηγώντας αρκετούς επενδυτές να προτιμούν λύσεις ηλιακής ενέργειας. Τα φωτοβολταϊκά, αντίθετα, μπορούν να εγκατασταθούν σε αγροτικές εκτάσεις που βρίσκονται πιο κοντά στο υπάρχον δίκτυο μεταφοράς, μειώνοντας έτσι το κόστος σύνδεσης και διανομής.

Οι Α/Γ, πέρα από τα οφέλη τους, ενδέχεται να προκαλέσουν ηχητική όχληση και να επηρεάσουν την αισθητική του τοπίου, καθώς η παρουσία τους είναι έντονη, ειδικά σε φυσικά ή αγροτικά περιβάλλοντα. Αν και η αιολική ενέργεια θεωρείται γενικά φιλική προς το περιβάλλον, ο θόρυβος που παράγεται από τη λειτουργία των πτερυγίων και η οπτική τους επίδραση συχνά αποτελούν αντικείμενο έντονης κριτικής από περιβαλλοντικές οργανώσεις. Επιπλέον, η εγκατάσταση και λειτουργία των αιολικών πάρκων μπορεί να έχει συνέπειες για την τοπική πανίδα, καθώς έχουν καταγραφεί περιπτώσεις θανάτων πτηνών και νυχτερίδων λόγω σύγκρουσης με τις περιστρεφόμενες λεπίδες. Παρά τα παραπάνω, η πρόοδος στην τεχνολογία και ο προσεκτικός σχεδιασμός των πάρκων έχουν συμβάλει στη μείωση αυτών των επιπτώσεων. Όπως συμβαίνει με κάθε μορφή παραγωγής ενέργειας, η δημιουργία αιολικών εγκαταστάσεων μπορεί να μεταβάλει τα χαρακτηριστικά του οικοσυστήματος, επηρεάζοντας ενδεχομένως τη βιωσιμότητα των ειδών που ζουν στην περιοχή.

Ολοκληρώνοντας την αντιπαράθεση των δύο αυτών τεχνολογιών ηλεκτροπαραγωγής πρέπει να γίνει αναφορά στο σημαντικό της διαχείρισης των υλικών μετά το τέλος του κύκλου ζωής τους, που συνήθως διαρκεί περίπου 25 χρόνια. Τα πτερύγια, λόγω της σύνθετης δομής τους, δεν ανακυκλώνονται εύκολα και συχνά καταλήγουν σε ειδικά διαμορφωμένους χώρους ταφής. Για παράδειγμα, ένας τέτοιος χώρος βρίσκεται στον Ποταμό North Platte στο Κάσπερ του Ουαϊόμινγκ. Αντίθετα, άλλα μέρη της Α/Γ, όπως ο πύργος και ο μηχανισμός παραγωγής, μπορούν να ανακυκλωθούν σε μεγάλο βαθμό. Η περιβαλλοντικά υπεύθυνη διαχείριση των πτερυγίων αποτελεί αυξανόμενη πρόκληση, και ως εκ τούτου αναπτύσσονται νέες τεχνικές τόσο για την επαναχρησιμοποίησή τους σε

κατασκευαστικές εφαρμογές, όπως στην παιδική χαρά της Εικόνας 3.3, όσο και για την παραγωγή πτερυγίων από υλικά που διευκολύνουν την ανακύκλωση. Ενδεικτικά, εταιρείες όπως η Siemens Gamesa εργάζονται στην ανάπτυξη πτερυγίων από καινοτόμες ρητίνες, με στόχο την ευκολότερη διάσπασή τους και την ανακύκλωση των υλικών τους μετά το πέρας της λειτουργικής τους ζωής.



Εικόνα 3.3: Η παιδική χαρά Wikado στο Ρότερνταμ 1.200 m² που κατασκευάστηκε από πέντε πτερύγια Α/Γ που είχαν απορριφθεί

Στον αντίποδα, η ανακύκλωση των φωτοβολταϊκών πλαισίων συμβάλλει σημαντικά στη μείωση των αποβλήτων που καταλήγουν σε χώρους υγειονομικής ταφής. Μέσω της διαδικασίας αυτής, πολύτιμα υλικά όπως το γυαλί, το αλουμίνιο, το πλαστικό, ο χαλκός και το πυρίτιο ανακτώνται και επαναχρησιμοποιούνται, αποτρέποντας τη ρύπανση που θα προκαλούσαν αν αυτά τα υλικά απορρίπτονταν αδιακρίτως. Έτσι, προάγεται η προστασία του περιβάλλοντος και διατηρείται η οικολογική ισορροπία, καθώς μειώνονται οι επιπτώσεις από την εξόρυξη νέων πρώτων υλών χάρη στην ορθολογική διαχείριση των απορριμμάτων. Η αξιοποίηση των ανακυκλωμένων υλικών σε νέες εφαρμογές περιορίζει την ανάγκη για εξόρυξη επιπλέον φυσικών πόρων, δημιουργώντας έναν κύκλο βιώσιμης παραγωγής. Επιπλέον, η διαδικασία της ανακύκλωσης απαιτεί λιγότερη ενέργεια σε

σύγκριση με την παραγωγή υλικών από πρώτες ύλες, γεγονός που ενισχύει το περιβαλλοντικό όφελος και τη βιωσιμότητα.

Στον τομέα της αιολικής ενέργειας, μία από τις βασικές δυσκολίες που πρέπει να αντιμετωπιστεί είναι η αποδοχή από την κοινωνία. Η δημόσια στάση απέναντι στα αιολικά έργα επηρεάζεται από παράγοντες όπως τα οικονομικά οφέλη, οι περιβαλλοντικές ανησυχίες και ο βαθμός συμμετοχής της τοπικής κοινότητας. Η εις βάθος κατανόηση αυτών των παραμέτρων είναι απαραίτητη για την αντιμετώπιση των αντιδράσεων και την προώθηση της μετάβασης προς τις ΑΠΕ. Προσεγγίζοντας το πρόβλημα γίνεται ευκολά αντιληπτό ότι στηρίζεται σε τρία βασικά κινήματα, το Not-In-My-Backyard (NIMBY), το Wind In My Backyard (WIMBY) και το αποκαλούμενο Παράδοξο των ΑΠΕ [15].

Το φαινόμενο NIMBY αναφέρεται στην τοπική αντίδραση απέναντι στην εγκατάσταση αιολικών πάρκων, που συχνά πηγάζει από ανησυχίες σχετικά με την αισθητική αλλοίωση του τοπίου, τον θόρυβο και την πιθανή μείωση των τιμών των ακινήτων στην περιοχή. Η αντίσταση αυτή εντείνεται όταν οι κάτοικοι δεν συμμετέχουν ουσιαστικά στη διαδικασία λήψης αποφάσεων ή δεν διαπιστώνουν άμεσα οφέλη από την υλοποίηση τέτοιων έργων.

Σε αντίθεση με το NIMBY, το κίνημα Wind In My Backyard (WIMBY) προωθεί μια πιο θετική στάση, εστιάζοντας στη συμμετοχή της τοπικής κοινωνίας, στην παροχή οικονομικών κινήτρων και στη διαφάνεια του σχεδιασμού. Πρωτοβουλίες όπως το πρόγραμμα WIMBY της Ευρωπαϊκής Επιτροπής ενισχύουν αυτή την προσέγγιση, υπογραμμίζοντας ότι όταν οι τοπικές κοινωνίες αποκομίζουν συγκεκριμένα οφέλη, όπως είναι οι νέες θέσεις εργασίας, το μερίδιο στα έσοδα ή οι επενδύσεις στην περιοχή, είναι πιο πιθανό να στηρίξουν την ανάπτυξη της αιολικής ενέργειας.

Τέλος, το λεγόμενο Παράδοξο των ΑΠΕ, που παρατηρείται και στην Ελλάδα, αναδεικνύει ότι ακόμη και οργανώσεις που στηρίζουν θεωρητικά τις ΑΠΕ, συχνά αντιτίθενται σε αιολικά έργα λόγω τοπικών περιβαλλοντικών ανησυχιών. Αυτή η αντίφαση φανερώνει το χάσμα ανάμεσα στους παγκόσμιους περιβαλλοντικούς στόχους και στις τοπικές αντιδράσεις, τονίζοντας τη σημασία της διαφανούς διαδικασίας λήψης αποφάσεων και της ενεργούς συμμετοχής της κοινότητας.

3.3 Ταξινόμηση Αιολικών πάρκων

Για να αξιοποιηθεί πλήρως το αιολικό δυναμικό μιας περιοχής, εγκαθίσταται μεγάλος αριθμός Α/Γ που διασυνδέονται και λειτουργούν ως ενιαίο αιολικό πάρκο. Αυτή η προσέγγιση επιτρέπει τη μείωση του συνολικού κόστους, καθώς επιμερίζονται τα έξοδα που σχετίζονται με τις μελέτες σκοπιμότητας, τον προκαταρκτικό και τον τελικό σχεδιασμό, τα δικαιώματα χρήσης γης, τις απαιτούμενες άδειες, τη διαχείριση της κατασκευής, τη διασύνδεση με το ηλεκτρικό δίκτυο, καθώς και τα έργα υποδομής όπως βοηθητικά κτίρια, περιφράξεις και συστήματα ασφαλείας. Επιπλέον, το κόστος συντήρησης μειώνεται σημαντικά. Επειδή αυτοί οι παράγοντες δεν εξαρτώνται από το συνολικό μέγεθος της εγκατεστημένης ισχύος, το επενδυτικό και λειτουργικό κόστος ανά Α/Γ τελικά περιορίζεται.

Οι παράγοντες που καθορίζουν την εγκατάσταση ενός μεγάλου αιολικού πάρκου συνοψίζονται ως εξής:

- Θέση εγκατάστασης (Αιολικό δυναμικό, Πρόσβαση, Διαμόρφωση δικτύων υποδομής, Δίκτυα μεταφοράς κοντά στη θέση εγκατάστασης, Ιδιοκτησία των εδαφικών εκτάσεων)
- Τύπος και μέγεθος των Α/Γ (ονομαστική ισχύς)
- Αριθμός Α/Γ
- Συνοδευτικός εξοπλισμός και Η/Μ έργα
- Έργα υποδομής
- Περιβαλλοντικές επιπτώσεις

Ως αιολικό πάρκο ή Αιολικός Σταθμός Παραγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΑΣΠΗΕ) ορίζεται μια συστοιχία Α/Γ που μπορεί να βρίσκεται είτε στην ξηρά (χερσαίο ή παράκτιο) είτε στη θάλασσα (υπεράκτιο). Τα χερσαία αιολικά πάρκα τοποθετούνται σε εδάφη που απέχουν τουλάχιστον τρία χιλιόμετρα από την πλησιέστερη ακτογραμμή και συχνά κατασκευάζονται σε ορεινές περιοχές με μεγάλο υψόμετρο, ώστε να αξιοποιούνται οι υψηλότερες ταχύτητες ανέμου. Ωστόσο, υπάρχουν και περιπτώσεις εγκατάστασης σε πεδινές περιοχές, όπου δίνεται έμφαση στη βέλτιστη αξιοποίηση του διαθέσιμου αιολικού δυναμικού. Παράκτια αιολικά πάρκα (Εικόνα 3.4) αναπτύσσονται σε απόσταση μικρότερη των τριών χιλιομέτρων από την ακτή ή έως δέκα χιλιόμετρα μέσα στη θάλασσα.

Το κύριο πλεονέκτημά τους είναι οι ισχυροί άνεμοι που δημιουργούνται λόγω των θερμοκρασιακών διαφορών μεταξύ γης και θάλασσας, προσφέροντας έτσι αυξημένη απόδοση. Τα υπεράκτια αιολικά πάρκα, από την άλλη, εγκαθίστανται σε θαλάσσιες περιοχές, συνήθως πέραν των δέκα χιλιομέτρων από την ακτή, είτε με σταθερή θεμελίωση στον πυθμένα είτε ως πλωτές κατασκευές, αν και αυτή η τεχνολογία δεν έχει ακόμη ευρεία εφαρμογή στη χώρα μας. Συνοψίζοντας, η επιλογή της θέσης εγκατάστασης κάθε τύπου αιολικού πάρκου εξαρτάται από το αιολικό δυναμικό, τη μορφολογία του εδάφους ή του θαλάσσιου χώρου και τις τεχνικές απαιτήσεις της κάθε περιοχής.

Μέχρι τις αρχές της δεκαετίας του 2000, η παραγωγή αιολικής ενέργειας βασιζόταν αποκλειστικά σε χερσαίες και παράκτιες εγκαταστάσεις. Αυτό οφειλόταν κυρίως στο χαμηλότερο κόστος εγκατάστασης αυτών των μονάδων, γεγονός που επέτρεπε την ταχύτερη τοποθέτηση μεγαλύτερου αριθμού Α/Γ, καθώς και στις μειωμένες απώλειες κατά τη μεταφορά της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας, αφού οι αποστάσεις μέχρι τους τελικούς καταναλωτές ήταν σχετικά μικρές. Στην περίπτωση των υπεράκτιων αιολικών πάρκων, η διαδικασία μεταφοράς περιλαμβάνει επιπλέον το σκέλος της σύνδεσης με το ηπειρωτικό δίκτυο ηλεκτρισμού.

Παράλληλα, οι χερσαίες και παράκτιες αιολικές εγκαταστάσεις δεν μπορούν να λειτουργούν αδιάκοπα καθ' όλη τη διάρκεια του έτους, καθώς περιορίζονται από τεχνικούς περιορισμούς και περιόδους χαμηλής ή ανύπαρκτης έντασης ανέμων. Οι Α/Γ αυτών των πάρκων είναι σχεδιασμένες να λειτουργούν εντός συγκεκριμένων ορίων ταχύτητας ανέμου, τα οποία είναι χαμηλότερα σε σύγκριση με τις υπεράκτιες μονάδες, διότι η λειτουργία τους σε υψηλότερες ταχύτητες ενέχει αυξημένο κίνδυνο φθοράς ή βλαβών στον εξοπλισμό του σταθμού.



Εικόνα 3.4: Παράκτιο πάρκο ισχύος 36 MW στη θέση Ερεσού ύψωμα Φούρκα Κεντρικής Μακεδονίας με 18 Α/Γ τύπου Gamesa G114 και έναρξη λειτουργίας το 2018

Τα υπεράκτια πάρκα (Εικόνα 3.5) αποτελούν μια σχετικά νέα εναλλακτική στον τομέα της αιολικής ενέργειας. Παρά το γεγονός ότι το κόστος εγκατάστασής τους παραμένει υψηλότερο σε σύγκριση με τα χερσαία πάρκα, οι θαλάσσιοι σταθμοί διακρίνονται για τη μεγαλύτερη σταθερότητα και τη συνέπεια στην παραγωγή ενέργειας. Αυτό οφείλεται κυρίως στο ότι μπορούν να λειτουργούν σε υψηλότερες ταχύτητες ανέμου, που επικρατούν στους ωκεανούς κυρίως τις απογευματινές ώρες, περίοδος που συμπίπτει με την αυξημένη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας στο δίκτυο. Αντίθετα, στα χερσαία πάρκα οι μέγιστες ταχύτητες ανέμου παρατηρούνται συνήθως κατά τη διάρκεια της νύχτας. Επιπλέον, τα υπεράκτια πάρκα επωφελούνται από τις μικρότερες διακυμάνσεις στην ένταση του ανέμου, γεγονός που τα καθιστά πιο αποτελεσματικά και αξιόπιστα στην κάλυψη των ενεργειακών αναγκών του συστήματος.



Εικόνα 3.5: Το Dogger Bank Wind Farm τριών φάσεων (Dogger Bank A, B και C) που θα έχει εγκατεστημένη ισχύ 3,6 GW και προβλέπεται να τροφοδοτεί έως και 6 εκατομμύρια σπίτια ετησίως

Σε αυτό το σημείο, θα γίνει αναφορά στους τύπους έδρασης των Α/Γ ενός υπεράκτιου πάρκου. Ανατρέχοντας εντοπίζονται οι κάτωθι επιλογές της Εικόνας 3.6 [16]:

- Βάση βαρύτητας (Gravity base)
- Τρίποδα (Tripod)
- Μονού πυλώνα (Monopile)
- Δικτύωμα (Jacket)
- Συνδυασμός πύργου δικτυώματος και σωληνωτού (Combined Jacket and Tower)
- Πλωτή (Spray buoy)
- Ημιβυθισμένη πλατφόρμα (Semi submersible)

Ειδική μνεία αξίζει να γίνει στη διαδεδομένη επιλογή του μεμονωμένου πασσάλου (Monopile), η οποία αποτελεί τον πιο συχνά χρησιμοποιούμενο τύπο βάσης για υπεράκτιες Α/Γ. Αυτή η λύση εφαρμόζεται κυρίως σε περιοχές με μικρό βάθος νερού, κοντά στην ακτή, προσφέροντας πλεονεκτήματα όπως η ευκολότερη μεταφορά και εγκατάσταση, καθώς και χαμηλότερο κόστος συγκριτικά με άλλες τεχνικές θεμελίωσης. Επιπλέον, η περίπτωση του μεμονωμένου πασσάλου δεν απαιτεί σύνθετες εργασίες προετοιμασίας του εδάφους, γεγονός που επιταχύνει τη διαδικασία τοποθέτησης. Αξίζει

να σημειωθεί ότι με την πρόοδο της τεχνολογίας, η ισχύς που μπορεί να υποστηρίξει ο εν λόγω τύπος έχει αυξηθεί σημαντικά, με αποτέλεσμα σήμερα να σχεδιάζονται Monopile βάσεις για Α/Γ ισχύος έως και 10 MW [17]. Αυτοί είναι οι κύριοι λόγοι που καθιστούν την περίπτωση του monopile ως την πιο ελκυστική.



Εικόνα 3.6: Τυπικές διατάξεις έδρασης υπεράκτιων Α/Γ σε σχέση με το βάθος

Λόγω του καινοτόμου χαρακτήρα τους, αξίζει να γίνει ξεχωριστή αναφορά στην πλωτή έδραση ως εναλλακτική λύση που απεικονίζεται στην Εικόνα 3.7. Σε αντίθεση με τις συμβατικές υπεράκτιες Α/Γ που είναι σταθερά τοποθετημένες σε βάσεις στον θαλάσσιο πυθμένα, οι πλωτές εκδοχές στηρίζονται σε ειδικές πλωτές πλατφόρμες, οι οποίες παραμένουν στη θέση τους μέσω αγκυρώσεων. Αυτή η σχεδιαστική διαφοροποίηση επιτρέπει την εγκατάστασή τους σε μεγαλύτερα βάθη και σε μεγαλύτερη απόσταση από την ακτή, όπου οι άνεμοι είναι συχνά πιο σταθεροί και ισχυροί. Παρότι το κόστος κατασκευής τους είναι υψηλότερο, αυτό αντισταθμίζεται εν μέρει από το γεγονός ότι η συναρμολόγησή τους πραγματοποιείται στη στεριά και στη συνέχεια μεταφέρονται στη θαλάσσια περιοχή για την τελική τοποθέτηση.

Ωστόσο, οι πλωτές Α/Γ παρουσιάζουν μειωμένη σταθερότητα σε σύγκριση με τις παραδοσιακές σταθερές εγκαταστάσεις, καθώς υπόκεινται σε κινήσεις λόγω των κυμάτων και των καιρικών συνθηκών. Αυτή η ασταθής συμπεριφορά επηρεάζει αναπόφευκτα την

απόδοσή τους, αφού η μεταβαλλόμενη θέση της Α/Γ σε σχέση με τον άνεμο μπορεί να οδηγήσει σε διακυμάνσεις στην παραγόμενη ισχύ. Για τον λόγο αυτό, απαιτείται προσαρμογή όχι μόνο των πλωτών βάσεων, αλλά και του ίδιου του εξοπλισμού των Α/Γ, ώστε να ανταποκρίνονται αποτελεσματικά στις ιδιαίτερες συνθήκες λειτουργίας τους.

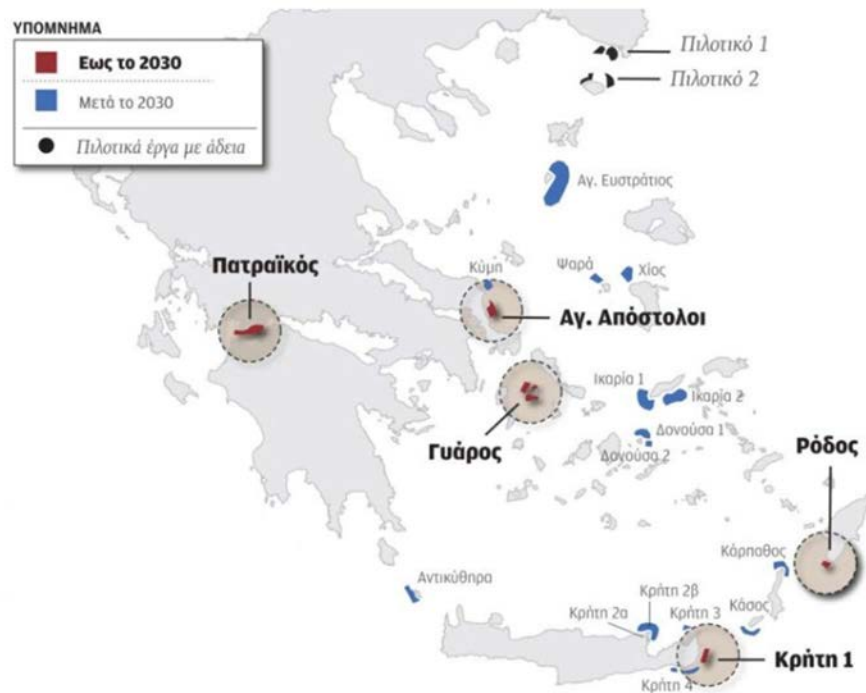


Εικόνα 3.7: Τοποθέτηση Α/Γ σε πλωτή πλατφόρμα, η οποία στη συνέχεια στερεώνεται στον πυθμένα με καλώδια πρόσδεσης και ειδικά άγκιστρα

Στην Ελλάδα, μέχρι σήμερα δεν έχει τεθεί σε λειτουργία κάποιο υπεράκτιο αιολικό πάρκο, αν και έχουν ήδη εκδοθεί δύο σχετικές άδειες για την περιοχή του Θρακικού Πελάγους. Η πρώτη άδεια, που ανήκει στην εταιρεία Θρακική Αιολική, αφορά την ανάπτυξη πάρκου με ισχύ 216 MW, ενώ η δεύτερη, που έχει εκδοθεί για την Αιολική Προβατά Τραϊανουπόλεως, προβλέπει εγκατάσταση ισχύος 400 MW στη θαλάσσια ζώνη νοτίως της Αλεξανδρούπολης και βόρεια της Σαμοθράκης. Τα έργα αυτά αναμένεται να λειτουργήσουν ως πρότυπα για την εγχώρια αγορά, με στόχο την ολοκλήρωσή τους έως το τέλος της δεκαετίας, συμβάλλοντας καθοριστικά στην υλοποίηση του Εθνικού Προγράμματος για την Ανάπτυξη Υπεράκτιων Αιολικών Πάρκων.

Σύμφωνα με το αναθεωρημένο Εθνικό Σχέδιο για την Ενέργεια και το Κλίμα (Εικόνα 3.8) , μέχρι το 2030 προβλέπεται η εγκατάσταση 1,9 GW υπεράκτιας αιολικής ισχύος, η οποία θα κατανέμεται σε πέντε έως έξι θαλάσσιες περιοχές, με κομβικό ρόλο να διαδραματίζει

η Κρήτη, ενώ υπό εξέταση βρίσκονται ακόμη περιοχές στην Εύβοια, την Αχαΐα, τη Ρόδο, τη Γυάρο και άλλες. [18]. Παράλληλα, μέχρι το 2050, τα υπεράκτια αιολικά προβλέπεται να καλύπτουν το ένα έβδομο της συνολικής εγκατεστημένης ισχύος της χώρας και να παρέχουν το 33% της απαιτούμενης ηλεκτρικής ενέργειας.



Εικόνα 3.8: Οι σχεδιαζόμενες υπεράκτιες αιολικές μονάδες στην Ελλάδα

3.4 Τρόποι Διασύνδεσης Αιολικών πάρκων

Η ενσωμάτωση διασκορπισμένων μονάδων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στα δίκτυα αυξάνεται διαρκώς, ως αποτέλεσμα τόσο της τεχνολογικής προόδου όσο και των μεταρρυθμίσεων στη δομή της αγοράς ηλεκτρισμού. Παρότι αυτή η τάση προσφέρει σημαντικά οφέλη, συχνά απαιτείται η ενίσχυση των δικτύων ή η εγκατάσταση νέων σημείων ελέγχου, γεγονός που μπορεί να συνεπάγεται υψηλό κόστος. Η διαδικασία σύνδεσης νέων σταθμών συναντά εμπόδια, τα οποία σχετίζονται κυρίως με τεχνικές απαιτήσεις και αξιολογήσεις, με το βάρος της συμμόρφωσης να μεταφέρεται συνήθως στους επενδυτές. Καθώς η ζήτηση για σύγχρονες εγκαταστάσεις αυξάνεται, γίνεται όλο και πιο αναγκαία η εφαρμογή διαφανών και απλών τεχνολογικών λύσεων.

Για να διαπιστωθεί αν ένα αιολικό πάρκο μπορεί να συνδεθεί στο υπάρχον ηλεκτρικό δίκτυο, απαιτείται η εκπόνηση μελέτης σύνδεσης από τον αρμόδιο διαχειριστή του συστήματος. Ο διαχειριστής αυτός χρειάζεται λεπτομερή τεχνικά στοιχεία σχετικά με τις ηλεκτρικές ιδιότητες των Α/Γ που θα χρησιμοποιηθούν, καθώς και αναλυτική περιγραφή του σχεδιαζόμενου αιολικού πάρκου και της συμβατότητάς του με το δίκτυο.

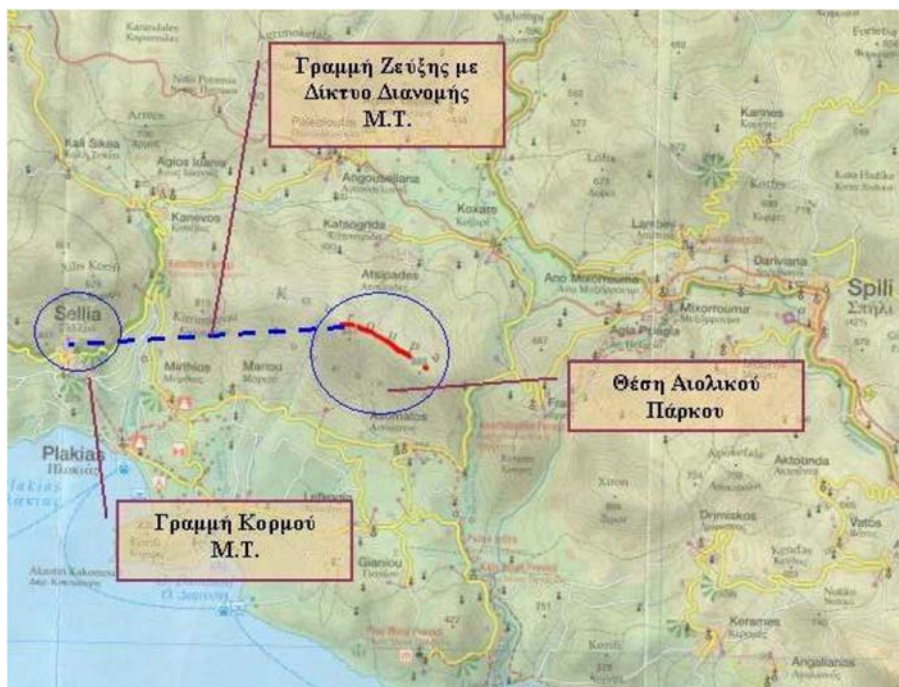
3.4.1 Σύνδεση παραγωγών στο δίκτυο

Ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας αποτελείται από το σύνολο των υποδομών και των τεχνολογικών μέσων που διασφαλίζουν τη συνεχή παροχή ηλεκτρικής ενέργειας στους καταναλωτές, με σταθερά χαρακτηριστικά τάσης και συχνότητας. Η δομή του συστήματος περιλαμβάνει τρία βασικά στάδια, την παραγωγή, τη μεταφορά και τη διανομή της ενέργειας. Στο στάδιο της παραγωγής, εντάσσονται οι διάφοροι σταθμοί ηλεκτροπαραγωγής, όπως είναι οι υδροηλεκτρικοί σταθμοί, οι αιολικοί σταθμοί και οι μονάδες βιομάζας, καθώς και οι υποσταθμοί ανύψωσης τάσης που είναι απαραίτητοι για τη μεταφορά του ρεύματος σε μεγάλες αποστάσεις, ώστε να περιορίζονται οι απώλειες ενέργειας κατά τη διαδρομή. Η μεταφορά πραγματοποιείται μέσω γραμμών υψηλής και υπερυψηλής τάσης (ΥΤ/ΥΥΤ), οι οποίες διοχετεύουν την παραγόμενη ενέργεια προς τα κέντρα διανομής μέσης τάσης (ΜΤ) ή σε μεγάλους καταναλωτές με ιδιόκτητους υποσταθμούς. Το δίκτυο διανομής αφορά το τελικό στάδιο, δηλαδή τη μεταφορά της ενέργειας από τα κέντρα διανομής στους τελικούς χρήστες. Αυτό γίνεται είτε απευθείας για τους πελάτες ΜΤ, είτε μέσω επιπλέον υποσταθμών που μειώνουν την τάση σε ΧΤ για τους οικιακούς και μικρούς καταναλωτές.

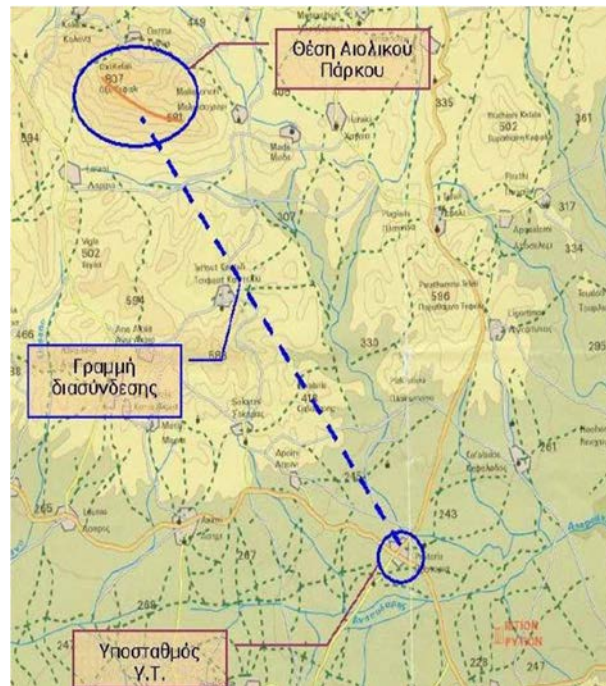
Το σημείο σύνδεσης στο δίκτυο (ΣΣΔ) είναι το σημείο του δικτύου ΧΤ ή ΜΤ όπου συνδέονται οι εγκαταστάσεις ενός παραγωγού και τοποθετείται πάντα στην έξοδο αυτών των εγκαταστάσεων. Εκεί εγκαθίσταται ο μετρητικός εξοπλισμός που καταγράφει την ενέργεια που αντλεί ο παραγωγός από το δίκτυο, αλλά και την ενέργεια που εγχέει σε αυτό. Η ροή της ενέργειας, είτε αφορά κατανάλωση είτε παραγωγή, πραγματοποιείται μέσω της ίδιας ηλεκτρικής παροχής. Το σημείο κοινής σύνδεσης (ΣΚΣ) ορίζεται ως το πλησιέστερο σημείο του δικτύου προς τις εγκαταστάσεις του παραγωγού, όπου είναι δυνατή η σύνδεση και άλλων χρηστών, είτε πρόκειται για καταναλωτές είτε για άλλους παραγωγούς. Το ΣΚΣ αποτελεί το σημείο αναφοράς για την αξιολόγηση των επιπτώσεων που προκαλεί η σύνδεση μιας νέας εγκατάστασης στο δίκτυο. Σε ορισμένες περιπτώσεις,

το ΣΣΔ και το ΣΚΣ διαφέρουν μεταξύ τους. Για παράδειγμα, όταν η σύνδεση γίνεται μέσω αποκλειστικής γραμμής, το ΣΣΔ βρίσκεται στο άκρο της γραμμής που είναι κοντά στον παραγωγό, ενώ το ΣΚΣ μπορεί να εντοπίζεται στο αντίθετο άκρο της ίδιας γραμμής.

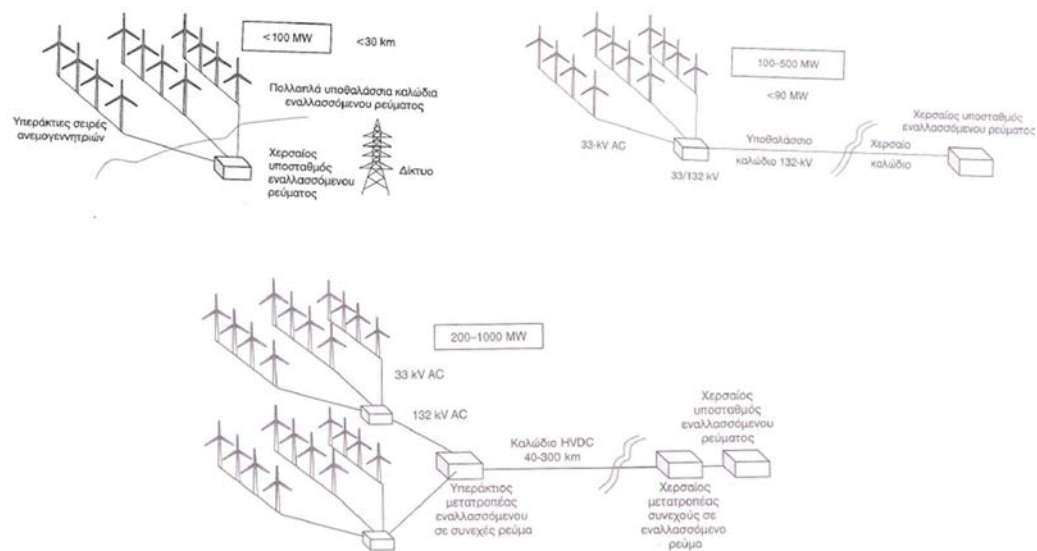
Σύμφωνα με την οδηγία διανομής Νο 120 του ΔΕΔΔΗΕ [19], υπάρχουν δύο βασικοί τρόποι διασύνδεσης σταθμών παραγωγής με το δίκτυο. Για αιολικά πάρκα με ισχύ έως 3,5 MW, είναι δυνατή η απευθείας σύνδεση στο δίκτυο MT (Εικόνα 3.9), εφόσον το δίκτυο μπορεί να υποστηρίξει το επιπλέον φορτίο. Για μεγαλύτερης ισχύος εγκαταστάσεις, προτείνεται η διασύνδεση μέσω υποσταθμού MT/ΥΤ (Εικόνα 3.10). Στην περίπτωση των υπεράκτιων αιολικών σταθμών, όταν η απόσταση από την ξηρά είναι μικρή, χρησιμοποιούνται καλώδια εναλλασσόμενου ρεύματος υψηλής τάσης (HVAC), ενώ για μεγαλύτερες αποστάσεις προτιμώνται καλώδια συνεχούς ρεύματος υψηλής τάσης (HVDC) (Εικόνα 3.11).



Εικόνα 3.9: Απεικόνιση απευθείας σύνδεσης αδειοδοτημένου αιολικού πάρκου 4ων Α/Γ στο φαράγγι του Κοτσουφού Κρήτης [20]



Εικόνα 3.10: Απεικόνιση σύνδεσης μέσω υποσταθμού αδειοδοτημένου υβριδικού σταθμού 36MW στην κορυφογραμμή «Οξύ Κεφάλι» Κρήτης. Πρόκειται για αιολικό πάρκο με χρήση αναστρέψιμου υδροηλεκτρικού ως σύστημα αποθήκευσης [20]



Εικόνα 3.11: Τυπικές διατάξεις σύνδεσης υπεράκτιων αιολικών πάρκων στο δίκτυο

Τα αιολικά πάρκα αξιολογούνται και με βάση τον τύπο των γεννητριών που τα απαρτίζουν, δηλαδή αν λειτουργούν με σταθερή ή μεταβλητή ταχύτητα, ώστε να διασφαλίζεται η ορθή

διασύνδεσή τους με το ηλεκτρικό δίκτυο. Στις Α/Γ σταθερής ταχύτητας, ο δρομέας περιστρέφεται με σταθερό αριθμό στροφών, ανεξάρτητα από τις μεταβολές στην ένταση του ανέμου. Η σύνδεσή τους με το δίκτυο πραγματοποιείται απευθείας μέσω μετασχηματιστή που προσαρμόζει την τάση της γεννήτριας στο επίπεδο του συστήματος μεταφοράς. Αντίθετα, στις Α/Γ μεταβλητής ταχύτητας, η περιστροφή του δρομέα προσαρμόζεται ανάλογα με την ταχύτητα του ανέμου και μπορεί να ελέγχεται ώστε να πληρούνται οι απαιτήσεις λειτουργίας. Σε αυτή την περίπτωση, η σύνδεση με το δίκτυο γίνεται μέσω μετατροπέα συχνότητας, ο οποίος επιτρέπει τη μετατροπή της παραγόμενης ενέργειας σε εναλλασσόμενο ρεύμα με συχνότητα ίση με αυτή του δικτύου. Το βασικό πλεονέκτημα της μεταβλητής ταχύτητας είναι ότι επιτυγχάνεται καλύτερη εκμετάλλευση της αιολικής ενέργειας, ιδιαίτερα σε χαμηλές ταχύτητες ανέμου, ενώ μειώνονται οι μηχανικές καταπονήσεις και αυξάνεται η διάρκεια ζωής του συστήματος.

3.4.2 Μικροδίκτυα και Διεσπαρμένη παραγωγή

Η έννοια της διεσπαρμένης παραγωγής αναφέρεται στη μικρής κλίμακας παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, η οποία λαμβάνει χώρα εντός του δικτύου διανομής ή κοντά στους τελικούς καταναλωτές, συχνά αξιοποιώντας τεχνολογίες ΑΠΕ. Η ενσωμάτωση τέτοιων μονάδων στο δίκτυο αποτελεί μια σύνθετη διαδικασία, η οποία διαφέρει σημαντικά από τη συμβατική προσέγγιση όπου η ηλεκτρική ενέργεια παράγεται σε κεντρικούς σταθμούς και μεταφέρεται μέσω των δικτύων μεταφοράς. Αυτή η διαφοροποίηση προκύπτει από τον τρόπο που έχουν σχεδιαστεί τα παραδοσιακά δίκτυα διανομής, τα οποία λειτουργούν κυρίως ως παθητικά, ακτινικά συστήματα.

Τα γενικότερα χαρακτηριστικά της διεσπαρμένης παραγωγής είναι:

- Μη κεντρικά σχεδιαζόμενη και αναπτυσσόμενη παραγωγή
- Απουσία κεντρικού προγραμματισμού λειτουργίας των μονάδων
- Η ισχύς των μονάδων που εγκαθίστανται δεν υπερβαίνει τα 50-100 MW
- Είναι συνδεδεμένη στο δίκτυο διανομής ανάλογα με το πώς ορίζεται για κάθε υπό μελέτη σύστημα

Ένα μικροδίκτυο ορίζεται ως ένα αυτόνομο ηλεκτρικό σύστημα, το οποίο μπορεί να λειτουργεί ανεξάρτητα, καλύπτοντας πλήρως τις ανάγκες ηλεκτροδότησης μιας συγκεκριμένης ομάδας καταναλωτών. Περιλαμβάνει αποκεντρωμένες μονάδες

παραγωγής ενέργειας (με ισχύ από μερικά kW έως 1-2 MW), συστήματα αποθήκευσης όπως μπαταρίες και πυκνωτές, καθώς και τα συνδεδεμένα ηλεκτρικά φορτία. Τα μικροδίκτυα θεωρούνται ως μια νέα μορφή ενεργειακών συστημάτων που αναμένεται να αποκτήσουν ιδιαίτερη σημασία στο μέλλον. Παρόλο που σχεδιάζονται για να λειτουργούν ανεξάρτητα από το κεντρικό δίκτυο, μπορούν να συνδεθούν με αυτό, επιτρέποντας την ανταλλαγή ενέργειας όταν αυτό κρίνεται απαραίτητο.

Τα μικροδίκτυα που βασίζονται σε ΑΠΕ αποτελούν τοπικά ενεργειακά συστήματα που έχουν τη δυνατότητα να λειτουργούν είτε αυτόνομα είτε σε συνεργασία με το ευρύτερο δίκτυο, αξιοποιώντας διάφορες μορφές ΑΠΕ, όπως η ηλιακή, η αιολική και η υδροηλεκτρική ενέργεια, σε συνδυασμό με τεχνολογίες αποθήκευσης. Σε αντίθεση με τα παραδοσιακά, κεντρικά διαχειριζόμενα δίκτυα που είναι πιο ευάλωτα σε βλάβες, τα μικροδίκτυα προσφέρουν μεγαλύτερη αξιοπιστία και ανθεκτικότητα, χάρη στη διαφοροποίηση των πηγών ενέργειας και στη δυνατότητα νησιδοποίησης, συνεχίζοντας την παροχή ενέργειας ακόμη και σε περιπτώσεις διακοπών ή έκτακτων περιστατικών.

Το μέγεθος ενός μικροδικτύου μπορεί να κυμαίνεται από μια μεμονωμένη κατοικία που αξιοποιεί ένα συνδυασμό φωτοβολταϊκών και γεννήτριας ντίζελ ή βιοκαυσίμων, μέχρι μεγαλύτερες εγκαταστάσεις, όπως ένα νοσοκομείο που χρησιμοποιεί κυψέλες καυσίμου για την κάλυψη των αναγκών του σε ηλεκτρισμό και ζεστό νερό, ή ακόμη και μια ολόκληρη πόλη που τροφοδοτείται από σταθμούς βιομάζας, αιολικά πάρκα και γεννήτριες ντίζελ. Ο συνδυασμός σύγχρονων τεχνολογιών συμπαραγωγής και ΑΠΕ μπορεί να καταστήσει το κόστος ηλεκτρικής ενέργειας σε ένα μικροδίκτυο ανταγωνιστικό σε σχέση με τα παραδοσιακά, κεντρικά δίκτυα διανομής.

Για απομονωμένες περιοχές, ειδικά εκείνες με περιορισμένη ή καθόλου πρόσβαση σε αξιόπιστα δίκτυα ηλεκτροδότησης, τα μικροδίκτυα ΑΠΕ αποτελούν μοναδική λύση για την παροχή βασικών υπηρεσιών, όπως η υγειονομική περίθαλψη, η εκπαίδευση και οι επικοινωνίες. Εκμεταλλευόμενες τους διαθέσιμους τοπικούς ανανεώσιμους πόρους, οι κοινότητες αυτές μπορούν να περιορίσουν την εξάρτησή τους από τα εισαγόμενα ορυκτά καύσιμα, να μειώσουν το ενεργειακό τους κόστος και να ενισχύσουν την ενεργειακή τους ανεξαρτησία και ασφάλεια. Επιπλέον, η χρήση μικροδικτύων που βασίζονται σε ΑΠΕ συμβάλλει στη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου και στη συγκράτηση των

επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής, προσφέροντας ταυτόχρονα σημαντικά περιβαλλοντικά οφέλη.

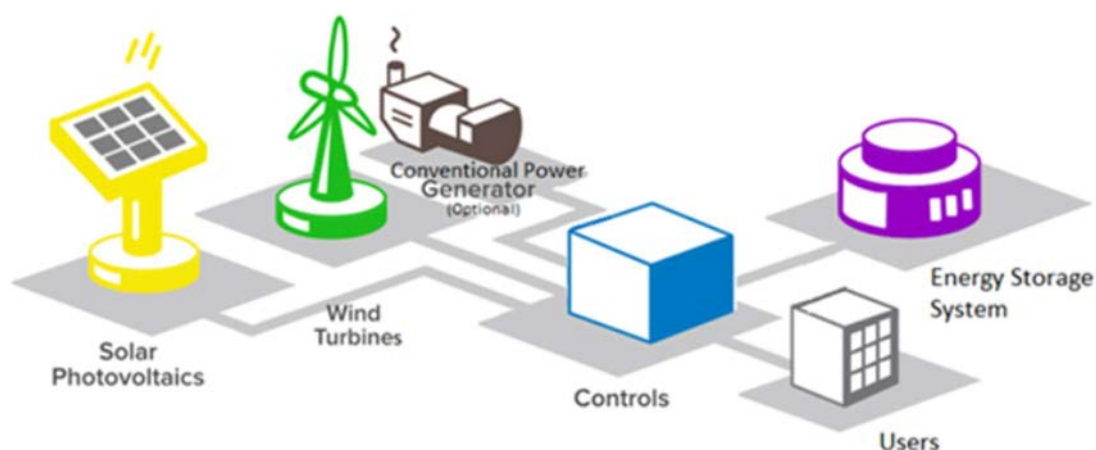
Το μέγεθος των μονάδων παραγωγής και των καταναλωτών που απαρτίζουν ένα μικροδίκτυο επηρεάζει τον τρόπο με τον οποίο αυτό διασυνδέεται τόσο με άλλα μικροδίκτυα όσο και με το κεντρικό ηλεκτρικό δίκτυο, καθορίζοντας αν η σύνδεση θα γίνει στη MT ή στη XT. Είναι σαφές πως η διασύνδεση στη MT απαιτεί μεγαλύτερη ισχύ. Ένα από τα βασικά χαρακτηριστικά των μικροδικτύων είναι η δυνατότητα κεντρικού και συντονισμένου ελέγχου, ώστε να λειτουργούν ως μία ενιαία μονάδα απέναντι στο ανάντη δίκτυο, με δικό τους σύστημα διαχείρισης, χωρίς να επιβαρύνουν τα συστήματα ελέγχου του ευρύτερου δικτύου [21].

Ένα από τα καινοτόμα χαρακτηριστικά των μικροδικτύων είναι η ικανότητά τους να λειτουργούν τόσο συνδεδεμένα με το κεντρικό δίκτυο, που αποτελεί και τη συνηθέστερη πρακτική, όσο και αυτόνομα ή νησιδοποιημένα, σε περίπτωση που διακοπεί η σύνδεση με το βασικό δίκτυο. Αυτή η ευελιξία επιτρέπει την αξιόπιστη και ποιοτική παροχή ηλεκτρικής ενέργειας στους καταναλωτές, ακόμη και σε περιπτώσεις διακοπής της κεντρικής τροφοδοσίας. Για να επιτευχθεί αυτό, ωστόσο, απαιτείται η ύπαρξη προηγμένων συστημάτων προστασίας, ελέγχου και επικοινωνίας, τα οποία διασφαλίζουν την ασφαλή απομόνωση και την αυτόνομη λειτουργία του μικροδικτύου. Η συνεχής εξέλιξη στους τομείς των τηλεπικοινωνιών και των συστημάτων ελέγχου καθιστά ολοένα και πιο εφικτή την τεχνική και οικονομική υλοποίηση αυτής της λειτουργίας.

Το κυριότερο γνώρισμα ενός μικροδικτύου είναι η δυνατότητά του να λειτουργεί κανονικά ως μέρος του ευρύτερου ηλεκτρικού δικτύου, αλλά και να μεταβαίνει αυτόματα σε αυτόνομη λειτουργία σε περίπτωση διαταραχών ή βλαβών στο ανάντη δίκτυο. Έτσι, από την πλευρά του κεντρικού δικτύου, το μικροδίκτυο αντιμετωπίζεται τόσο λειτουργικά όσο και εμπορικά ως ένα ενιαίο φορτίο ή ως μια συγκεντρωμένη μονάδα παραγωγής. Με τα κατάλληλα οικονομικά κίνητρα, μπορεί να παρέχει επικουρικές υπηρεσίες στο δίκτυο, ιδιαίτερα σε περιόδους αυξημένης ζήτησης ή σε τοπικό επίπεδο. Οι χρήστες που είναι συνδεδεμένοι σε ένα μικροδίκτυο έχουν τη δυνατότητα να καλύπτουν τις ηλεκτρικές τους ανάγκες με τον ίδιο τρόπο όπως και πριν, απολαμβάνοντας όμως υψηλότερη αξιοπιστία στην παροχή ενέργειας, βελτιωμένη ποιότητα ισχύος με σταθερότερη τάση, καθώς και πιο συμφέρουσες οικονομικές συνθήκες για την κάλυψη των ενεργειακών τους αναγκών [21].

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, το μικροδίκτυο έχει σχεδιαστεί ώστε να μπορεί να λειτουργεί τόσο συνδεδεμένο με το κεντρικό δίκτυο όσο και αυτόνομα σε περιπτώσεις ανάγκης. Όταν βρίσκεται σε παράλληλη λειτουργία με το ευρύτερο σύστημα ηλεκτροδότησης, δίνεται η δυνατότητα ανταλλαγής ενέργειας, δηλαδή το μικροδίκτυο μπορεί να διοχετεύει την πλεονάζουσα παραγωγή του στο δίκτυο ή να λαμβάνει ενέργεια από αυτό όταν οι τοπικές του μονάδες δεν επαρκούν για να καλύψουν τη ζήτηση. Επιπλέον, σε καθεστώς μόνιμης διασύνδεσης, το μικροδίκτυο μπορεί να συνεχίσει να τροφοδοτεί τους καταναλωτές του αξιοποιώντας τις δικές του πηγές σε περίπτωση που το κεντρικό δίκτυο παρουσιάσει βλάβη, χάρη στη δυνατότητα αυτόνομης λειτουργίας. Κατά τη λειτουργία του σε παράλληλη σύνδεση με το κεντρικό δίκτυο, είναι πρωταρχικής σημασίας το μικροδίκτυο να μην προκαλεί διαταραχές στο σύστημα. Αυτό συνεπάγεται ότι η ποιότητα της τάσης που παρέχει πρέπει να πληροί τις απαιτούμενες προδιαγραφές και η κατανάλωση ενέργειας να μην υπερβαίνει τα όρια ενός συνηθισμένου καταναλωτή. Σε πιο προχωρημένο επίπεδο, το μικροδίκτυο μπορεί να προγραμματιστεί ώστε να παρέχει υποστηρικτικές υπηρεσίες στο δίκτυο, όπως η απορρόφηση ή η παροχή ενεργού και άεργου ισχύος, ανάλογα με τις ανάγκες του συστήματος. Για να επιτευχθεί αυτό, απαιτείται συντονισμένη διαχείριση και επικοινωνία μεταξύ των συστημάτων ελέγχου του μικροδικτύου και του κεντρικού δικτύου [21].

Εν κατακλείδι, τα μικροδίκτυα ΑΠΕ συμβάλλουν σημαντικά στην αποκεντρωμένη παραγωγή και αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας, ενισχύουν τη διείσδυση των ΑΠΕ στα δίκτυα και περιορίζουν τις απώλειες που σχετίζονται με τη μεταφορά και τη διανομή ρεύματος. Στο Σχήμα 3.3 φαίνεται διαγραμματικά η διασύνδεση των βασικών μερών, δηλαδή ΑΠΕ, καταναλωτών, συστήματος αποθήκευσης ενέργειας και συστήματος ελέγχου για να κατασκευαστεί ένα μικροδίκτυο. Παρά τα σημαντικά οφέλη που προσφέρουν, η εξάπλωση των μικροδικτύων ΑΠΕ εξακολουθεί να συναντά εμπόδια, όπως το υψηλό αρχικό κόστος, η τεχνική πολυπλοκότητα και τα ρυθμιστικά πλαίσια. Παρ' όλα αυτά, η πρόοδος στις τεχνολογίες των ΑΠΕ, σε συνδυασμό με ευνοϊκές πολιτικές και διαθέσιμα χρηματοδοτικά εργαλεία, καθιστούν σταδιακά τα μικροδίκτυα πιο προσιτά και οικονομικά βιώσιμα.



Σχήμα 3.3: Τυπική διάταξη ενός μικροδικτύου (Πηγή Panasonic)

Καθώς οι προκλήσεις της κλιματικής αλλαγής και της ενεργειακής πρόσβασης παραμένουν ιδιαίτερα έντονες, τα μικροδίκτυα ΑΠΕ αναδεικνύονται ως καινοτόμες λύσεις για την υποστήριξη απομονωμένων ή ευάλωτων περιοχών. Μέσα από την αξιοποίηση των φυσικών ανανεώσιμων πόρων και την εφαρμογή προηγμένων τεχνολογικών λύσεων, είναι εφικτή η δημιουργία ανθεκτικών, βιώσιμων και ενεργειακά δίκαιων συστημάτων. Με αυτόν τον τρόπο, διασφαλίζεται ότι όλες οι κοινότητες θα έχουν πρόσβαση στα οφέλη της ενεργειακής μετάβασης προς ένα καθαρότερο και πιο ελπιδοφόρο μέλλον.

Κεφάλαιο 4 Αντιμετώπιση συνεπειών εισροής Αιολικής παραγωγής στο δίκτυο

Η αιολική ενέργεια αποτελεί μια διακοπτόμενη αιεφόρος μορφή των ΑΠΕ, η οποία δεν δύναται να παράγει κατά βούληση, και επίσης τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του αέρα προκαλούν δύο κύρια προβλήματα στην ηλεκτροπαραγωγή που οφείλουν να επιλυθούν. Οι διακυμάνσεις της ισχύος εξόδου, που οφείλονται κατά κύριο λόγο στις μεταβολές της ταχύτητας των πνεόντων ανέμων, συμβάλλουν στο να παρατηρούνται διακυμάνσεις της συχνότητας και τάσης του δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας. Και οι δύο προαναφερθείσες συνέπειες υποβαθμίζουν τη συνολική ποιότητα του συστήματος, και ενδέχεται να προκαλέσουν προβλήματα αστάθειας, ιδιαίτερα στα ευαίσθητα φορτία, όπως για παράδειγμα τρεμόπαιγμα τάσης, ανισορροπία φάσης τάσης, απότομες βουτιές και αντίστοιχοι άνοδοι τάσης, αρμονικά που αφορούν παραποιήσεις των ημιτονοειδών κυμάτων της τάσης και έντασης του ρεύματος.

Όλοι οι παραγωγοί ενέργειας υποχρεώνονται να ανταποκριθούν σε αυστηρές ελάχιστες προϋποθέσεις, προτού συνδεθούν στα ηλεκτρικά δίκτυα. Ειδικότερα, στον ελληνικό χώρο ο ΑΔΜΗΕ/ΔΕΔΔΗΕ ορίζει τις απαιτήσεις σχετικά με τα επιτρεπτά όρια του συντελεστή ισχύος, με τα οποία πρέπει να εναρμονίζεται η λειτουργία των Α/Γ, καθώς και για την ποσότητα της χωρητικότητας της αιολικής ενέργειας στην οποία μπορεί να λειτουργεί το πάρκο, ώστε να αποφευχθεί η αποσύνδεση αυτού από το δίκτυο. Επιπρόσθετα, υποχρεώνονται να τηρούν αυστηρά όρια συχνότητας και τάσης της παραγωγής που παρέχεται στο δίκτυο, μέσω εγκατάστασης συστήματος ελέγχου της συχνότητας. Η σύνδεση νέων σταθμών παραγωγής στο δίκτυο μπορεί να γίνει με τρεις τρόπους ή απευθείας μέσω διακόπτη, ή μέσω στατικού διακόπτη ή μέσω ηλεκτρονικών ισχύος. Ωστόσο, μόνο η περίπτωση των ηλεκτρονικών ισχύος αποτελεί ευέλικτη λύση για τον έλεγχο της ενεργούς(πραγματικής) και της άεργου ισχύος.

4.1 Ηλεκτρονικά ισχύος

Η χρήση των ηλεκτρονικών ισχύος (converters) είναι αναπόσπαστο τμήμα των αιολικών πάρκων και έχει επιλύσει πολλά προβλήματα διασύνδεσης τους με το δίκτυο, ενώ

ταυτόχρονα έχει δημιουργήσει νέα (αρμονικές). Για αυτό το λόγο συναντώνται συνδυαστικά και με άλλες εναλλακτικές επιλογές που εξασφαλίζουν τη βέλτιστη απόδοση του σταθμού παραγωγής και ευστάθεια του δικτύου. Ειδικότερα, είναι ηλεκτρονικά συστήματα που ρυθμίζουν την ισχύ και μετασχηματίζουν την τάση, την ένταση και την κυματομορφή του ρεύματος, έτσι ώστε να χρησιμοποιηθεί από τους σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής για να ολοκληρωθούν με επιτυχία τα επόμενα στάδια της μεταφοράς, της διανομής, της αποθήκευσης και της κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας.

Κατηγοριοποιούνται ανάλογα με τις μετατροπές που επιτελούν σε μετατροπείς συνεχούς σε συνεχές, διαφορετικής τάσης και έντασης (DC-DC), μετατροπείς εναλασσόμενου σε συνεχές (AC-DC ή ανορθωτικές διατάξεις), μετατροπείς εναλασσόμενου σε εναλασσόμενο διαφορετικού πλάτους (ρυθμιστές AC-AC ή μετασχηματιστές) και μετατροπείς συνεχούς σε εναλασσόμενο (DC-AC ή αντιστροφείς). Σημειώνεται ότι οι μετατροπές αυτές επιτυγχάνονται με την βοήθεια ηλεκτρονικών διατάξεων, οι οποίες χρησιμοποιούν ηλεκτρονικούς διακόπτες, όπως τρανζίστορ ισχύος, διόδους ισχύος, θυρίστορς [30]. Ακολουθεί σύντομη αναφορά των δύο συνηθέστερων κατηγοριών ηλεκτρονικών ισχύος.

4.1.1 Μετατροπείς DC-DC (συνεχούς σε συνεχές)

Η βασική λειτουργία όλων των τύπων μετατροπέων στηρίζεται στο άνοιγμα και κλείσιμο του διακόπτη (βασικού στοιχείου) στη συχνότητα των 50Hz (ή σε οποιαδήποτε άλλη επιθυμητή τιμή). Ωστόσο, η συγκεκριμένη κατηγορία στηρίζεται στους νόμους που απορρέουν από τη λειτουργία των ημιαγωγών, και όχι στο φαινόμενο της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής. Κατά τις φάσεις αυτές (αγωγής και μη) παράγεται τετραγωνικός παλμός (σταθερού ή και μη βήματος), που στη συνέχεια οδηγείται σε φιλτράρισμα προκειμένου να απομονωθεί μόνο η πρώτη αρμονική. Στόχος είναι η αποφυγή έγχυσης θορύβου στο σύστημα.

Στην περίπτωση που επιλέγεται αυξομείωση της τάσης, τότε μεταβάλλεται αναλόγως το βήμα του τετραγωνικού παλμού επεμβαίνοντάς στο χρόνο που άγει ή όχι ο διακόπτης. Διαμορφώνοντας το βήμα του παλμού, διαμορφώνεται και η επιθυμητή τάση. Η σωστή σχεδίαση ενός μετατροπέα DC-DC εξασφαλίζει ευστάθεια στο ηλεκτρικό δίκτυο.

4.1.2 Μετατροπείς DC-AC ή αντιστροφείς (συνεχούς σε εναλλασσόμενο)

Ομοίως, ο μετασχηματισμός αυτός δε μπορεί να χαρακτηριστεί ως ιδανικός, δηλαδή περιέχει ομοίως αρμονικές. Μέσω της σύγκρισης της κυματομορφής της ημιτονοειδούς γεννήτριας και αυτής μίας γεννήτριας τριγωνικού παλμού, είναι εφικτό να προσεγγίσουμε την ημιτονοειδή μορφή. Τα βήματα της διαδικασίας αυτής είναι τρία, αρχικά αντιστρέφεται η κυματομορφή της ημιτονοειδούς γεννήτριας, στη συνέχεια ένας πρώτος συγκριτής αντιπαραβάλλει την τριγωνική μορφή με αυτή της ημιτονοειδούς κυματομορφής δίνοντας θετικούς παλμούς και ένα δεύτερος συγκριτής παραβάλλει την τριγωνική μορφή με την ανεστραμμένη κυματομορφή της ημιτονοειδούς παράγοντας τώρα συμμετρικά αντίθετους παλμούς, και τέλος αυξομειώνεται το πλάτος του ημιτόνου ώστε να ληφθεί η επιθυμητή τάση και εύρος παλμού. Το πλάτος του παλμού διαμορφώνεται με χρήση φίλτρου και στόχος είναι η μείωση της συνολικής αρμονικής παραμόρφωσης του ρεύματος. Συνοψίζοντας, τα διακοπτικά στοιχεία επιτρέπουν τη ρύθμιση της τάσης στα επιθυμητά όρια (τιμές των κυματομορφών) και το φίλτρο (πηνίο και πυκνωτής) ρυθμίζουν τη συχνότητα, πλάτος παλμού μειώνοντας τη συνολική αρμονική παραμόρφωση.

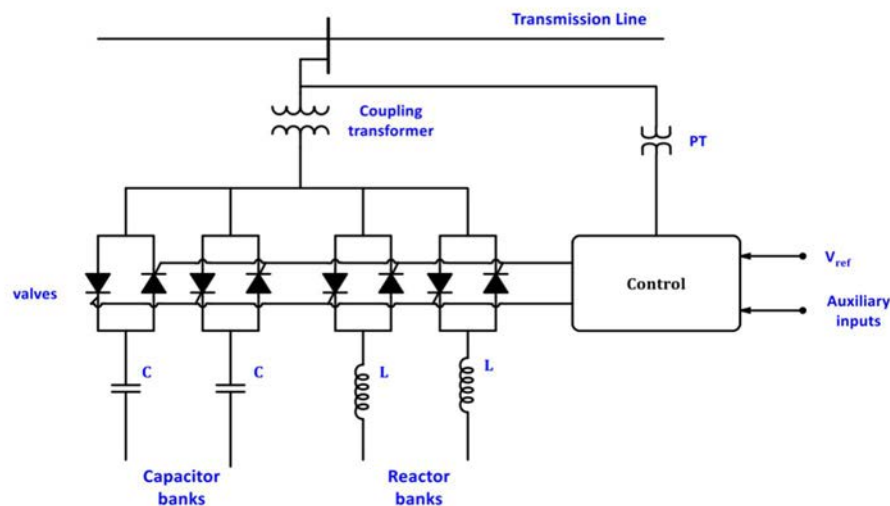
4.2 Συστήματα ενεργειακής αποθήκευσης

Οι σταθμοί ενεργειακής αποθήκευσης (Battery Energy Storage Systems-BESS) αποτελούν μια επιλογή για την εξασφάλιση της σταθερότητας σχετικά με τη συχνότητα και τη γενικότερη συνεισφορά ενός αιολικού πάρκου στο δίκτυο. Ο ρόλος τους συνοψίζεται στην αποθήκευση της πλεονάζουσας ποσότητας παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας στις κρίσιμες περιπτώσεις λειτουργίας, όπως είναι τα σφάλματα βραχυκυκλώματος και οι παροδικές διαταραχές [22].

Συνδυαστικά με τη χρήση ενός συστήματος ελέγχου, όπως τα Flexible AC Transmission Systems (FACTS), επιτυγχάνεται η απαιτούμενη βέλτιστη παραγωγή της εγκατάστασης. Πρόκειται για ηλεκτρονικές συσκευές που πραγματοποιούν έλεγχο, όσον αφορά την τάση και την ροή ενεργού ισχύος χρησιμοποιώντας παράλληλες και σειριακές διατάξεις. Τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα από την εφαρμογή τους είναι η αύξηση της δυνατότητας ελέγχου των ΑΠΕ, και ιδίως της αιολικής ενέργειας, η βελτίωση της ικανότητας μεταφοράς

ενέργειας, ο ακριβέστερος και ταχύτερος έλεγχος της τάσης και της συχνότητας, η ρύθμιση της ισχύος μετάδοσης για την αποφυγή φαινομένου υπερφόρτωσης ή του αντιθέτου [23].

Ο στατικός VAR αντισταθμιστής (Static Var Compensator-SVC) ανήκει στην κατηγορία των FACTS, και πρόκειται για μια αποτελεσματική, αξιόπιστη και ταχείας ανταπόκρισης συσκευή που εξαλείφει τις ανεπιθύμητες συνέπειες της μεταβολής της τάσης. Η λειτουργία του παρομοιάζεται με μια εικονική αντίσταση συνδεδεμένη παράλληλα με το φορτίο, με κύριο στόχο τη ρύθμιση του μεγέθους της τάσης του σημείου κοινής ζεύξης είτε καταναλώνοντας είτε παρέχοντας άεργο ισχύ. Το σημαντικότερο όφελος χρήσης ενός SVC είναι η διασφάλιση της σταθερότητας της τάσης, που επιτυγχάνεται με τέτοιο τρόπο που η τάση παραμένει σταθερή όσο μειώνεται η μέγιστη πτώση τάσης υπό συνθήκες σφάλματος. Αποτελείται από τρία μέρη, ένα Thyristor Controlled Reactor (TCR), ένα Thyristor Switched Capacitor (TSC) και μερικά φίλτρα. Ο TCR αποτελείται από τον αντιδραστήρα L τοποθετημένο σε σειρά με τη βαλβίδα θυρίστορ, ο οποίος ελέγχει τη βαλβίδα. Το ρεύμα μέσω του πυκνωτή TSC μπορεί να μεταβληθεί ελέγχοντας τις γωνίες πυροδότησης του θυρίστορ back to back, που είναι συνδεδεμένο σε σειρά με τον πυκνωτή [23]. Στο Σχήμα 4.1 απεικονίζονται διαγραμματικά τα βασικά μέρη του SVC.

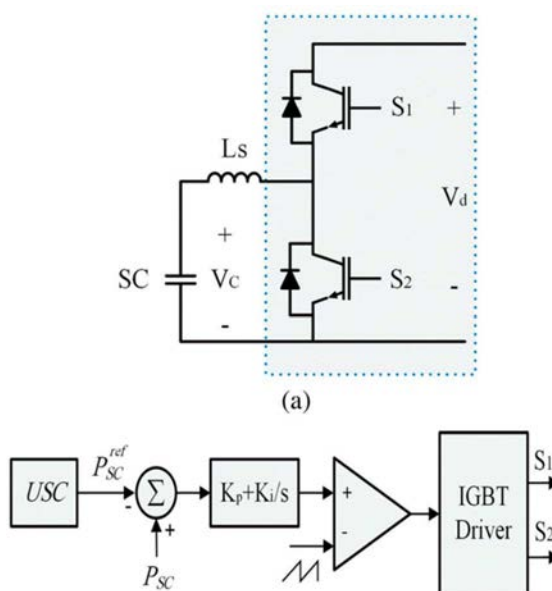


Σχήμα 4.1: Τυπική διάταξη ενός μοντέλου SVC

4.3 Πυκνωτές

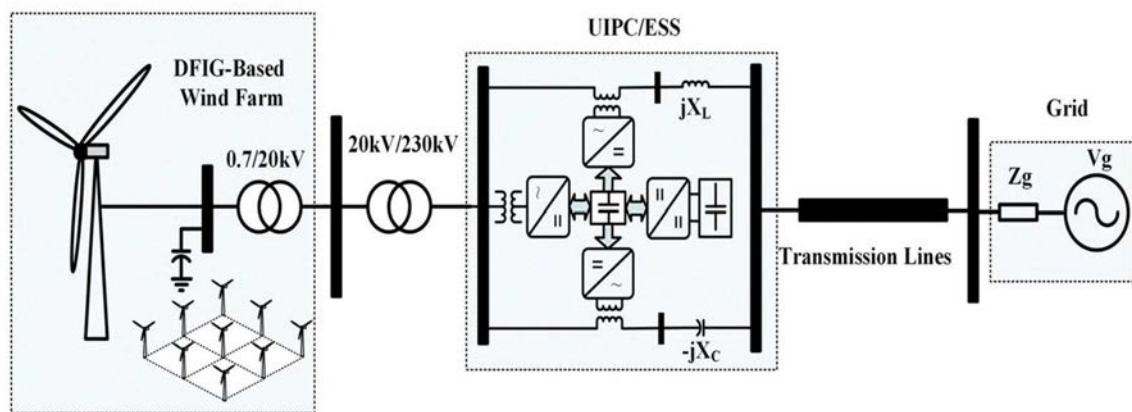
Οι πυκνωτές (capacitors) επιλέγονται στις Α/Γ προκειμένου να αντισταθμιστεί ο συντελεστής ισχύος της άεργου ισχύος και η επιλογή αυτών γίνεται υπολογίζοντας τη μέση άεργο ισχύς για συγκεκριμένο χρονικό διάστημα. Προτιμάται η σύνδεση πηνίου σε σειρά, ώστε κατά τη σύνδεση ή την αποσύνδεση των πυκνωτών να επιτυγχάνεται μείωση του ρεύματος, μιας και σε περίπτωση υπερτάσεων υπάρχει κίνδυνος υπερφόρτωσης και καταστροφής.

Συνδυαστικά με ένα σύστημα ενιαίου ελέγχου ενδιάμεσης φάσης (Unified inter-phase power controller-UIPC) προσφέρουν τη δυνατότητα ελέγχου της ροής ισχύος εξασφαλίζοντας την επιθυμητή σταθεροποίηση. Μια από τις εναλλακτικές προτείνει την αντικατάσταση των μετασχηματιστών από τρεις μετατροπείς πηγών τάσης, οι οποίοι μοιράζονται έναν κοινό πυκνωτή στη DC πλευρά τους (Σχήμα 4.2). Το UIPC είναι σε θέση να ελέγχει συνεχώς τη ροή ισχύος, καθώς και να περιορίζει τα ανεπιθύμητα ρεύματα βραχυκυκλώματος απομονώνοντας τη τάση σε συνθήκες σφάλματος [24].



Σχήμα 4.2: Διάταξη συστήματος αποθήκευσης ενέργειας με χρήση υπερπυκνωτή αναφορικά με το (άνω) κύκλωμα ισχύος και το (κάτω) σύστημα ελέγχου

Το σχήμα αυτό στηρίζεται σε ένα εποπτικό σύστημα γενικού ελέγχου, που παρακολουθεί τόσο τους controllers εξωτερικού βρόγχου του UIPC όσο και του συστήματος αποθήκευσης ενέργειας, και το οποίο συγκρίνει τις μεταβολές της παραγωγής με τις αναφορικές τιμές του δικτύου. Διευκρινίζεται ότι το σύστημα αποθήκευσης αποτελείται από έναν υπερπυκνωτή (super capacitor) και έναν αμφίδρομο DC-DC μετατροπέα ανύψωσης-υποβιβασμού τάσης (buck/boost converter), συνδεδεμένο με τον πυκνωτή του UIPC στην πλευρά του DC. Η κύρια λειτουργία του συνδυαστικού αυτού σχήματος είναι ο έλεγχος της ενεργής ισχύος εξόδου της παραγωγής σε σύγκριση με την αναφορική τιμή της ισχύος εξόδου (Σχήμα 4.3) [24].



Σχήμα 4.3: Μονογραμμικό διάγραμμα ενός τυπικού συστήματος UIPC-ESS

4.4 Συστήματα ελέγχου ευστάθειας

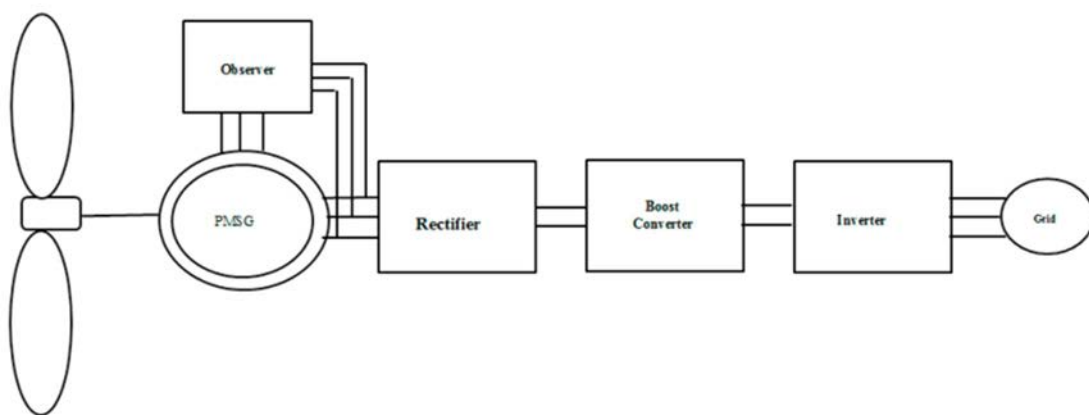
Με την εξέλιξη της τεχνολογίας διαπιστώθηκε πως η ενσωμάτωση συστημάτων ελέγχου στα αιολικά πάρκα, παρέχει την απαιτούμενη ευστάθεια της εγκατάστασης και ταυτόχρονα επιτυγχάνεται η μέγιστη απόδοση της, παράμετρος που σαφώς είναι μέγιστης σημασίας για τον επενδυτή.

Η σύγχρονη γεννήτρια μόνιμου μαγνήτη προτείνεται συνεχώς και σε συχνότερο βαθμό από ερευνητές για την ηλεκτροπαραγωγή, μιας και εξασφαλίζουν υψηλή απόδοση και σύναμμα υψηλό συντελεστή ισχύος, παραβλέποντας το ακριβό κόστος επένδυσης λόγω των δαπανηρών μαγνητών αλλά και του μετατροπέα ισχύος πλήρους κλίμακας. Επαναλαμβάνεται στο σημείο αυτό ότι ο μετατροπέας ισχύος είναι βασική προϋπόθεση

σύνδεσης με την οριοθετημένη τάση και συχνότητα του δικτύου. Αναπτύχθηκε ωστόσο και η υποχρέωση για περαιτέρω έλεγχο-επέμβαση της λειτουργίας των γεννητριών, προκειμένου να εξασφαλιστεί με βεβαιότητα η ευστάθεια του δικτύου μεγιστοποιώντας τα κέρδη.

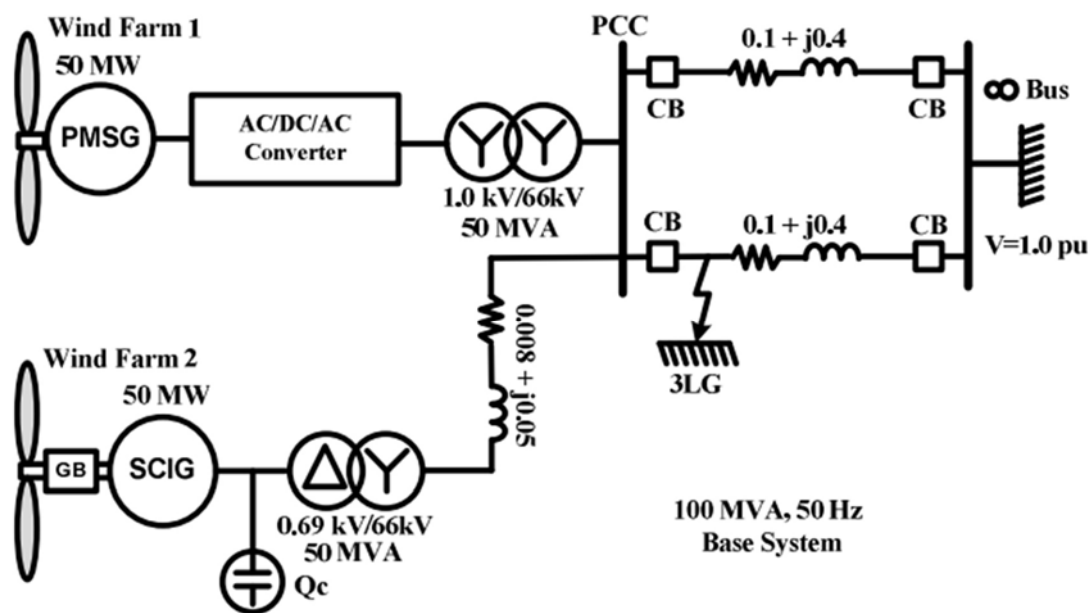
Σε ένα αιολικό πάρκο με αυτές τις Α/Γ προτείνεται η διάταξη να περιέχει ένα ηλεκτρονικό σύστημα που παρακολουθεί την ισχύ εξόδου της γεννήτριας και, αν αυτή υπερβεί τις προδιαγραφές, ρυθμίζει τη γωνία βήματος των πτερυγίων ώστε να απορρίψει μέρος του άνεμου (Σχήμα 4.4). Η μέθοδος αυτή αντιμετωπίζει το σήμα εισόδου, δηλαδή της ταχύτητας, ως γραμμικό και με εφαρμογή του τύπου του Ackermann διορθώνεται το σήμα. Επιτυγχάνεται η παραγόμενη τάση και ρεύμα της γεννήτριας να προσεγγίζουν την ημιτονοειδή μορφή, δηλαδή διορθώνεται η παραμόρφωση των κυματομορφών τους, ωστόσο το ρεύμα διατηρεί παραβολές που διορθώνονται προσθέτοντας ένα ακόμη βήμα ελέγχου [25].

Επιπρόσθετα, περιλαμβάνονται με σειρά σύνδεσης ένας ανορθωτής AC-DC, ένας μετατροπέας ενίσχυσης DC-DC και ένας μετατροπέας DC-AC που αυξάνει την τάση παραγωγής σε τιμή ίση με αυτή του δικτύου (Σχήμα 4.4). Διευκρινίζεται, πως ο ανορθωτής έχει μετατρέψει το ρεύμα AC σε DC μορφή, προκειμένου να ενισχυθεί, και κατόπιν να μετατραπεί ενισχυμένο πλέον σε AC μορφή για να διοχετευτεί στο δίκτυο [25].



Σχήμα 4.4: Προτεινόμενη διάταξη αιολικού πάρκου Α/Γ σύγχρονου μόνιμου μαγνήτη

Μια εναλλακτική επιλογή, με σκοπό την εξοικονόμηση του επενδυτικού κόστους, αποτελεί ο συνδυασμός της ακριβής αλλά αποδοτικής σύγχρονης γεννήτριας μόνιμου μαγνήτη με την οικονομικότερη επαγωγική γεννήτρια βραχυκυκλωμένου κλωβού. Η τελευταία διακρίνεται από ικανοποιητική απόδοση και χαμηλό κόστος συντήρησης, αλλά επηρεάζεται από τις μεταβολές του ανέμου θέτοντας σε κίνδυνο την ευστάθεια του δικτύου. Υπό συνθήκες μέγιστης ταχύτητας του ανέμου, η γεννήτρια καταναλώνει άεργο ισχύ από το δίκτυο, γεγονός που μεταβάλλει τον συντελεστή ισχύος, και για το λόγο αυτό επιβάλλεται η χρήση συστοιχίας πυκνωτών. Η εγκατάσταση ενός πάρκου τέτοιας μορφής απεικονίζεται στο παρακάτω σχήμα 4.5.



Σχήμα 4.5: Τυπική διάταξη αιολικού πάρκου συνδυαστικής τεχνολογίας Α/Γ

Η γεννήτρια μόνιμου μαγνήτη συνδέεται με έναν back to back μετατροπέα (AC-DC-AC) και έναν μετασχηματιστή τάσης, και στη συνέχεια σε ένα ηλεκτρονικό σύστημα ελέγχου, προτού καταλήξει στο δίκτυο. Η γεννήτρια βραχυκυκλωμένου κλωβού συνδέεται στο κιβώτιο ταχυτήτων και στη συστοιχία πυκνωτών όπως προαναφέρθηκε, ακολουθεί ένας μετασχηματιστής τάσης και καταλήγει στο σύστημα ελέγχου [26]. Το σύστημα ελέγχου περιλαμβάνει δύο βήματα ελέγχου, το πρώτο εφαρμόζεται επί της μεταβλητής ταχύτητας του δρομέα (γεννήτρια μόνιμου μαγνήτη) και το δεύτερο επί της σταθερής ταχύτητας του δρομέα (γεννήτρια βραχυκυκλωμένου κλωβού). Σκοπός του πρώτου ελεγκτή είναι η

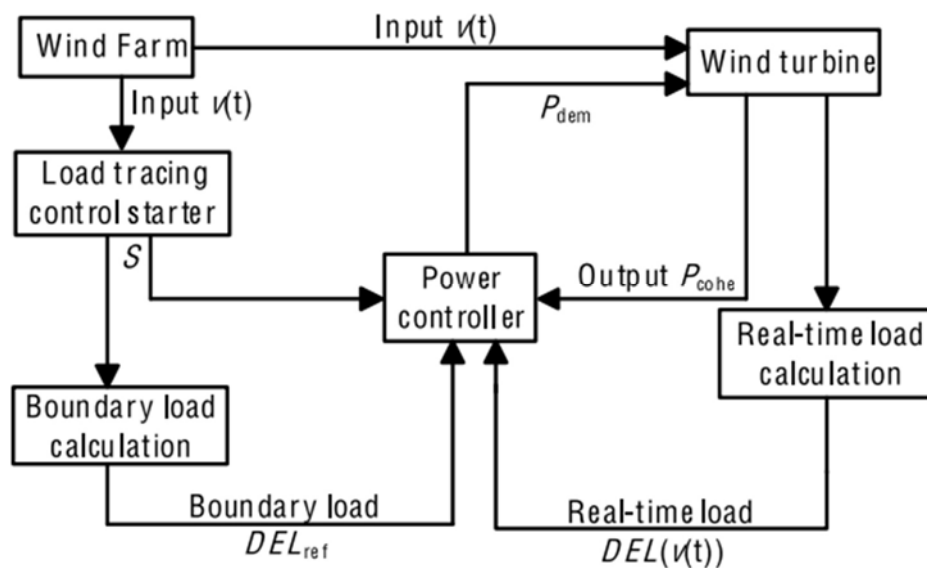
ρύθμιση της ταχύτητας περιστροφής της γεννήτριας μόνιμου μαγνήτη κάτω από την ονομαστική του τιμή και του δευτέρου ελεγκτή η ρύθμιση της ισχύος εξόδου της γεννήτριας βραχυκυκλωμένου κλωβού κάτω από την ονομαστική ισχύ [26]. Η λειτουργία του στηρίζεται σε έναν μετατροπέα στην πλευρά του ρότορα της γεννήτριας μόνιμου μαγνήτη (SSC) και σε ένα μετατροπέα στην πλευρά του δικτύου (GSC).

Ο SSC συνδέεται στον ρότορα της γεννήτριας και μετατρέπει την τριφασική AC παραγόμενη τάση σε DC, καθώς και οι αισθητήρες ελέγχου που στέλνουν τα σήματα στον SSC προκειμένου να εξομαλυνθούν οι διακυμάνσεις της τάσης. Σημειώνεται ότι η ταχύτητα του ρότορα της γεννήτριας υπολογίζεται μέσω της ταχύτητας του δρομέα (σήμα ελέγχου) [26].

Ο GSC συνδέεται στο δίκτυο μέσω ενός μετασχηματιστή με τους αισθητήρες ρεύματος και τάσης του δικτύου προσαρτώνται στην πλευρά υψηλής τάσης του μετασχηματιστή. Επίσης, στην υψηλή πλευρά τάσης καταμετράται η ροή ισχύος, ενώ η DC τάση ανιχνεύεται στον αντίστοιχο πυκνωτή. Στην περίπτωση σφάλματος δικτύου, η DC τάση αυξάνεται σημαντικά κυρίως λόγω της ανισορροπίας ισχύος μεταξύ SSC και GSC. Για την προστασία του κυκλώματος, ο ελεγκτής ενεργοποιεί κατάλληλο ψαλιδιστή (chopper). Ο βασικός στόχος είναι πρώτον η διατήρηση της τάσης του DC κυκλώματος προκειμένου να διασφαλιστεί η μεταφορά της ενεργού ισχύος της γεννήτριας μόνιμου μαγνήτη στο δίκτυο, και δεύτερον η διατήρηση της τάσης του δικτύου και ταυτόχρονα η αντιστάθμιση της άεργου ισχύος της γεννήτριας βραχυκυκλωμένου κλωβού [26].

Η τεχνολογία των αυτομάτων συστημάτων ελέγχου έχει ωριμάσει αρκετά και επιβάλλει την εξίσου ανάπτυξη των στρατηγικών ελέγχου. Αρχικά, στηρίχθηκαν στη γραμμική μείωση της καμπύλης ταχύτητας-ισχύς εξόδου. Συγκεκριμένα, όταν η ταχύτητα του ανέμου υπερβαίνει την ταχύτητα αποκοπής, το φέρων φορτίο μειώνεται περιορίζοντας γραμμικά την ισχύ εξόδου, και εξασφαλίζεται η ασφαλή λειτουργία των Α/Γ. Άλλη εναλλακτική χρησιμοποιεί τον τμηματικό γραμμικό έλεγχο, υιοθετώντας φθίνουσες καμπύλες ισχύος εξόδου διαφορετικών κλίσεων, και προσαρμόζοντας τη λειτουργία των Α/Γ στις δυσμενείς συνθήκες. Αυτές οι στρατηγικές έχουν βελτιώσει την απόδοση των αιολικών πάρκων σε έντονες συνθήκες ανέμου, ωστόσο δεν αξιοποιεί πλήρως τη δυνατότητα των τουρμπινών και προάγουν την αναξιοποίηση μεγάλης ποσότητας ανέμου [27].

Προτείνεται, η χρήση μοντέλου ενιαίου ελέγχου που δύναται να εξασφαλίσει ταυτόχρονα τη λειτουργία των Α/Γ εντός ασφαλών ορίων και τη διατήρηση της ισχύος εξόδου. Στηρίζεται στον υπολογισμό του φορτίου των τουρμπινών, ώστε η ισχύς εξόδου να ρυθμίζεται σε πραγματικό χρόνο, με στόχο την αποφυγή αποκοπής από το δίκτυο αλλά και κατανάλωσης ενέργειας της ίδιας παραγωγής. Η στρατηγική ενιαίου ελέγχου του Σχήματος 4.6 χωρίζεται σε τέσσερα βασικά μέρη, τον εκκινητή ανίχνευσης φορτίου που είναι και ο διακόπτης ελέγχου, τον υπολογισμό του οριακού φορτίου, τον υπολογισμό φορτίου σε πραγματικό χρόνο και τον ελεγκτή ισχύος. Υπολογίζονται τα όρια ασφαλείας του φορτίου για την τρέχουσα ταχύτητα ανέμου, καθώς και του πραγματικού φορτίου υπό την τρέχουσα ισχύ εξόδου, και στη συνέχεια ο ελεγκτής ανάλογα με τα σφάλματα αποστέλλει σήματα ρύθμισης ισχύος [27].



Σχήμα 4.6: Μοντέλο αυτόματου ελέγχου παραγωγής αιολικού σταθμού παραγωγής

Διαφορετική στρατηγική ελέγχου προτείνει σύστημα ελέγχου της συχνότητας σε δύο επίπεδα. Αρχικά, οι Α/Γ ομαδοποιούνται σύμφωνα με την τρέχουσα κατάσταση λειτουργίας και των επόμενων περιόδων, καθώς και τις τρέχουσες απαιτήσεις αύξησης ή μείωσης ισχύος, ώστε να επιτυγχάνεται η συμμόρφωση με το δίκτυο. Στη συνέχεια, οι Α/Γ συμμετέχουν στη διαμόρφωση της επιθυμητής συχνότητας, εφόσον έχει εντοπιστεί από το σύστημα η ικανότητα καθεμιάς εξ αυτών, γεγονός που εξαλείφει τα προβλήματα που

προκαλούνται από τη θεωρητική ισόποση και αναλογική κατανομή της χωρητικότητας του στροβίλου. Τέλος, σχεδιάζεται το μοντέλο του αναλογικού συντελεστή με βάση τη βελτιστοποιημένη συχνότητα. Κατά συνέπεια, η ομαλή διαμόρφωση της συχνότητας πραγματοποιείται χωρίς τροποποίηση της αρχικής δομής και επιτρέπονται εύκολες και απλές αναβαθμίσεις. Στηρίζεται στον έλεγχο της τάσης μέσω της διαφοράς της συχνότητας και στον ρυθμό μεταβολής αυτής. Εξομαλύνει αποτελεσματικά την ταχύτητα του ρότορα και κατά επέκταση την ισχύ εξόδου. Σημειώνεται ότι στο τελευταίο στάδιο διαμόρφωσης της συχνότητας, ο έλεγχος της τάσης πτώσης αντισταθμίζει την ανεπαρκή έξοδο και συμβάλλει στη μείωση της μέγιστης απόκλισης συχνότητας [28].

4.5 Συστήματα Ελέγχου-Εποπτείας και Τηλεμετρίας

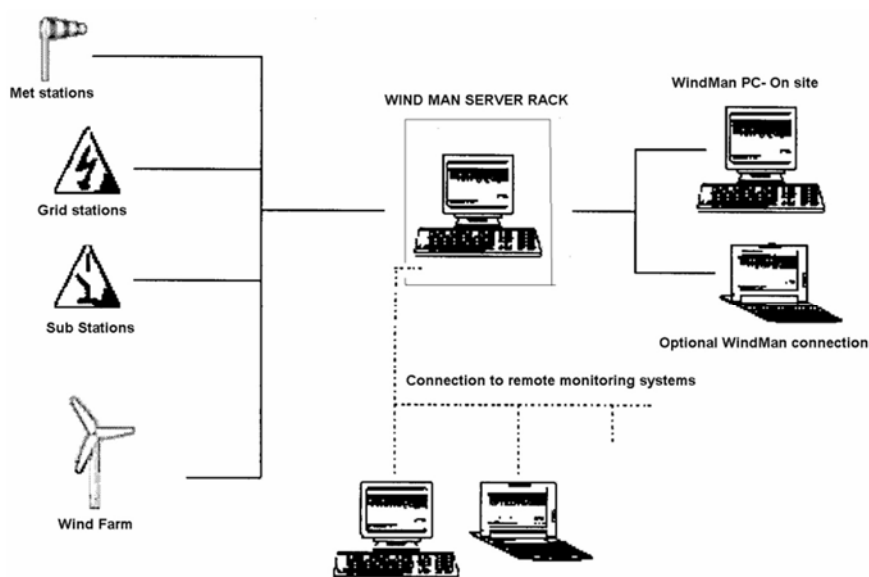
Κάθε αιολικό πάρκο υποχρεώνεται να εγκαταστήσει ένα σύστημα ελέγχου/εποπτείας και τηλεμετρίας (SCADA). Σκοπός είναι ο διαρκής έλεγχος ολόκληρης της διαδικασίας παραγωγής του σταθμού και η επισήμανση βλαβών ή σφαλμάτων, προκειμένου να εξασφαλιστεί η άριστη λειτουργία του. Ένα μέρος των συλλεγόμενων στοιχείων αποστέλλονται στην αίθουσα ελέγχου του ΑΔΜΗΕ (ΑΔΜΗΕ/ΔΝΕΜ/ΥΣ7-1) [29].

Η κύρια λειτουργία του συνοψίζεται στη συλλογή πληροφορίας από κρίσιμα σημεία της εγκατάστασης, την παρουσίαση αυτών σε οθόνες, την εκτύπωση αναφορών, την εφαρμογή τηλεχειρισμών και ρυθμίσεων, τη ρύθμιση της παραγωγής με χρήση Expert Systems και τη στατιστική επεξεργασία των πληροφοριών.

Σε κάθε σταθμό παραγωγής υπάρχει η υποχρέωση εγκατάστασης κατάλληλου Συστήματος Εποπτικού Ελέγχου (ΣΕΕ) όπως αυτός που περιγράφεται στο Σχήμα 4.7, με σκοπό την αποστολή (σε 24ωρη βάση) ενδείξεων, σημάτων και λειτουργικών μεγεθών του σταθμού προς την αίθουσα ελέγχου του ΑΔΜΗΕ. Επιπρόσθετα, το ΣΕΕ δέχεται εντολές από την αίθουσα ελέγχου. Οι ελάχιστες προδιαγραφές του ΣΕΕ αναλύονται επακριβώς στην προδιαγραφή καθώς και στη σύμβαση που συνάπτει ο παραγωγός με τον ΑΔΜΗΕ. Συνοψίζονται στην αποστολή της στιγμιαίας αποδιδόμενης ενεργού ισχύος, στιγμιαίας απορροφόμενης άεργου ισχύος, τάσης των ζυγών MT στην έξοδο, μέγιστης διαθέσιμης ισχύος, μέγιστης δυνατής ισχύος απόδοσης και την κατάσταση διακοπών και αποζευκτών. Ο ΑΔΜΗΕ διατηρεί το δικαίωμα αποστολής εντολών προς το ΣΕΕ, όπως

ένταξη ή αποκοπή του σταθμού, ρύθμιση τάσης αυτού, πρόγραμμα φορτίσεως επόμενης ημέρας.

Κάθε λογισμικό SCADA χρησιμοποιείται για τον έλεγχο ενός σταθμού και στηρίζεται σε ένα ολοκληρωμένο περιβάλλον εργασίας συμβατό συνήθως με Windows. Αναλόγως των απαιτήσεων προσφέρονται διάφορες εκδόσεις, που περιλαμβάνουν συνήθως την Α/Γ, τον υπολογιστή στο χώρο του σταθμού (server), τους μετεωρολογικούς σταθμούς και τους ηλεκτρικούς σταθμούς. Ο μετεωρολογικός σταθμός αποτελείται από ένα μετρητικό σύστημα της θερμοκρασίας, της πίεσης αέρα, της κατεύθυνσης και της ταχύτητα αέρα. Επίσης, περιλαμβάνει καταγραφικό και διάφορους αισθητήρες. Ο σταθμός δύναται να συλλέξει στοιχεία για τις καμπύλες ισχύος, και στην περίπτωση σύνδεσης με ανεμόμετρο επιτρέπεται η συγκέντρωση δεδομένων για τον προσδιορισμό των κατανομών ταχύτητας αέρα. Ο ηλεκτρικός σταθμός αναφέρεται σε μια μετρητική μονάδα της τάσης, του ρεύματος, της συχνότητας και του συντελεστή ισχύος σε ένα τριφασικό δίκτυο.



Σχήμα 4.7: Διάταξη ενός ΣΕΕ

Το ΣΕΕ αποτελεί πολύτιμο εργαλείο του παραγωγού και της εταιρείας που έχει αναλάβει την εποπτεία και συντήρηση του σταθμού. Μέσω αυτού δύναται να μεγιστοποιήσει και να εξασφαλίσει την αποδοτική λειτουργία του σταθμού.

Κεφάλαιο 5 Περιγραφή του υπεράκτιου αιολικού πάρκου

London Array

Όπως αναφέρθηκε, αν και στον ελλαδικό χώρο δεν υφίσταται εγκατεστημένη υπεράκτια αιολική μονάδα με τα σημερινά δεδομένα, έχουν ωστόσο ληφθεί πολιτικές αποφάσεις με στόχο την ανάπτυξη τους με αποτέλεσμα να έχουν λάβει άδεια κατασκευής δύο αιολικοί σταθμοί στο Θρακικό πέλαγος. Όπως είναι λογικό, η τεχνολογία αυτή είναι άγνωστη στον ελληνικό κατασκευαστικό κλάδο, και για αυτό αξίζει να περιγραφεί η εγκατάσταση του πάρκου London Array το οποίο μέχρι και το 2013 υπήρξε το μεγαλύτερο παγκοσμίως υπεράκτιο πάρκο.

5.1 Ιστορικά στοιχεία

Το 2001 η κυβέρνηση του Ηνωμένου Βασιλείου προχώρησε στη δημοσίευση της εργασίας με τίτλο *Future Offshore - A Strategic Framework for the Offshore Wind Industry*, με βασικό αντικείμενο μελέτης την υπόδειξη κατάλληλων θέσεων για την κατασκευή θαλάσσιων αιολικών πάρκων [30]. Μεταξύ των τριών προτεινόμενων τοποθεσιών βρισκόταν οι εξωτερικές εκβολές του ποταμού Τάμεση στο Κεντ, περίπου 11 χιλιόμετρα από το North Foreland.

Προς εκμετάλλευση της πιθανής θέσης η εταιρεία London Array Ltd, σχήμα που σήμερα αποτελείται από τη Renewables London Array Limited με 30% μερίδιο, τη Caisse de dépôt et placement du Québec με 25%, τη Greencoat UK Wind PLC με 25% και τη Masdar Energy UK Limited με 20%, στα τέλη του 2003 προχώρησε σε 50ετή μίσθωση εκμετάλλευσης της τοποθεσίας αλλά και περιοχής της καλωδιακής διαδρομής προς την ακτή από το βρετανικό στέμμα. Η ιδιοκτήτρια εταιρεία σύντομα υπέβαλε αίτηση έκδοσης πολεοδομικής άδειας, την οποία και έλαβε τον Δεκέμβριο του 2006, με εξαίρεση το έργο ανέγερσης του χερσαίου υποσταθμού που εγκρίθηκε τον επόμενο χρόνο [31].

Το έργο σχεδιάστηκε ώστε να λειτουργήσει σε δύο φάσεις, ωστόσο η δεύτερη φάση που στόχευε σε επαύξηση της ισχύος κατά 1.000 MW δεν έλαβε τις απαραίτητες εγκρίσεις. Τελικώς ακυρώθηκε εξαιτίας έντονων διαμαρτυριών περιβαλλοντικής οργάνωσης για τις πιθανές δυσμενείς επιπτώσεις στον τοπικό πληθυσμό θαλάσσιων πτηνών. Οι εργασίες

κατασκευής της πρώτης φάσης ξεκίνησαν τον Μάρτιο του 2011 και κατέληξαν να ολοκληρωθούν 27 μήνες που επιβεβαιώθηκε ως πλήρως λειτουργικός. Ο αιολικός σταθμός εγκαινιάστηκε τον Ιούλιο του 2013 από τον τότε πρωθυπουργό Ντέιβιντ Κάμερον.

5.2 Εκτίμηση Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων

Η διαδικασία αδειοδότησης του πάρκου περιλάμβανε, όπως συμβαίνει και στην Ελλάδα, την εκπόνηση μελέτης εκτίμησης περιβαλλοντικών επιπτώσεων των κατασκευαστικών εργασιών αλλά και λειτουργίας του έργου. Ομοίως, τέθηκε σε δημόσια διαβούλευση προκειμένου να ληφθούν υπόψη όλα τα πεδία ανησυχίας των εμπλεκόμενων φορέων και μερών.

Η πολυπλοκότητα του έργου διαμόρφωσε ένα ευρύ φάσμα περιβαλλοντικών παραγόντων προς εξέταση, που αφορούσαν και τα χερσαία αλλά και τα θαλάσσια στάδια του έργου. Ενδεικτικά, από τους βασικούς τομείς που συμπεριελήφθησαν στην έκθεση είναι οι παρακάτω [32]:

- Φυσικό περιβάλλον (ροή κυμάτων, παλιρροιακών ρευμάτων)
- Βιοποικιλότητα (πτηνά, ψάρια, θαλάσσια θηλαστικά, οικολογία βυθού)
- Ανθρώπινο περιβάλλον (ναυσιπλοΐα, αλιεία, υπηρεσίες κυκλοφορίας πλοίων, θόρυβος, οπτική όχληση)

Αφού αξιολογήθηκαν οι πιθανές επιπτώσεις και κρίθηκαν στην πλειοψηφία τους σχεδόν ελάχιστος σημασίας για το περιβάλλον, προέκυψε ότι ήταν επιτρεπτή η κατασκευή και λειτουργία του πάρκου. Ωστόσο, όπου εντοπίστηκαν περιπτώσεις με αρνητικό αντίκτυπο, προτάθηκαν οι ανάλογες παρεμβάσεις για την ελαχιστοποίηση τους. Συγκεκριμένα, η μελέτη περιβαλλοντικών επιπτώσεων περιλαμβάνει:

- Σχέδιο παρακολούθησης του θαλάσσιου περιβάλλοντος πριν από την κατασκευή
- Σχέδιο Οικολογικής Διαχείρισης

5.3 Τεχνική περιγραφή

Το υπεράκτιο πάρκο London Array τοποθετείται σε απόσταση 20 χιλιομέτρων από την ακτή και καλύπτει μια επιφάνεια περίπου 122 Km² (Εικόνα 5.1). Η ονομασία του οφείλεται στο γεγονός ότι η παραχθείσα ενέργεια τροφοδοτεί το δίκτυο της πόλης του Λονδίνου. Η

συνολική εγκατεστημένη ισχύς του σταθμού αγγίζει τα 630 MW που ισοδυναμεί με ετήσια καθαρή παραγωγή 2.500 GWh, και δύναται να τροφοδοτήσει τις ανάγκες σε ηλεκτρισμό σχεδόν 584.000 οικιών. Υπολογίστηκε, μάλιστα, ότι συμβάλλει στην πρόκληση μείωσης των εκπομπών του διοξειδίου του άνθρακα περιορίζοντας τα ετήσια δεδομένα κατά 900.000 τόνους. Το συνολικό κόστος κατασκευής του έργου αποτιμήθηκε στα 1,8 δισεκατομμύρια £, ενώ το σταθμισμένο κόστος του υπολογίστηκε στα 140 £/MWh.



Εικόνα 5.1: Δορυφορική λήψη της εγκατάστασης του London Array, όπου αποτυπώνεται και το γειτονικό θαλάσσιο πάρκο Thanet

Το πάρκο απαρτίζεται από 175 Α/Γ, δύο υπεράκτιους υποσταθμούς και έναν χερσαίο υποσταθμό στο Cleve Hill (Εικόνα 5.2). Για τη σύνδεση των υπεράκτιων με τον χερσαίο σταθμό χρησιμοποιήθηκαν τέσσερα υποθαλάσσια καλώδια. Η έναρξη των εργασιών κατασκευής σηματοδοτήθηκε με την τοποθέτηση των αρχικών θαλάσσιων θεμελίων τον Μάρτιο του 2011, και το αξιοσημείωτο είναι πως μέχρι εκείνη τη στιγμή δεν υπήρχε μεγαλύτερης ισχύος θαλάσσιο πάρκο.

Η προμηθεύτρια εταιρεία των Α/Γ ήταν η Siemens Wind Power, ενώ η προμήθεια και κατασκευή των θεμελίων αυτών (τύπου Mono pile) έγινε από την κοινοπραξία των Per Aarsleff και Bilfinger Berger Ingenieurbau GmbH. Οι εργασίες ανέγερσης των Α/Γ ανατέθηκαν στις εταιρείες MPI και A2SEA, οι οποίες χρησιμοποίησαν τα ίδια πλοία που

βοήθησαν στην θεμελίωση τους (MPI Adventure, Sea Worker και HLV Svanen). Ο σχεδιασμός και εγκατάσταση των υπεράκτιων υποσταθμών πραγματοποιήθηκε από την Future Energy, ενώ η Siemens Transmission & Distribution προχώρησε στην προμήθεια και τοποθέτηση του ηλεκτρολογικού εξοπλισμού του χερσαίου υποσταθμού. Τα υποθαλάσσια καλώδια τύπου Export και Array αγοράστηκαν από την Nexans και την JDR Cable Systems αντιστοίχως, και εγκαταστάθηκαν από την VSMC [30].

Στο λιμάνι του Ράμσγκεϊτ συγκροτήθηκε το κεντρικό εργοτάξιο κατασκευής των θαλάσσιων έργων που απασχολούσε προσωπικό περίπου 120 ατόμων. Συνολικά για την υλοποίηση του πάρκου απασχολήθηκαν 6.700 άτομα και χρησιμοποιήθηκαν 60 πλοία, και μάλιστα αποτιμήθηκε ότι χρειάστηκαν 5,5 εκατομμύρια ανθρωποώρες για την ολοκλήρωση των εργασιών [31].



Εικόνα 5.2: Σκαρίφημα βασικής διάταξης του London Array [31]

5.3.1 Ανεμογεννήτριες και θεμελίωση

Το London Array διαθέτει 175 Α/Γ τύπου Siemens Gamesa SWT 3,6/120 με ονομαστική ισχύ 3,6 MW, ταχύτητα εκκίνησης 3,5 m/s και ταχύτητα αποκοπής 25 m/s. Ο ρότορας έχει διάμετρο 120 m και συγκρατεί τρεις λεπίδες ειδικής κατασκευής συνδυασμού εποξειδικής ρητίνης και υαλοβάμβακα που καταλήγουν να σαρώνουν επιφάνεια έκτασης 11.300 m². Διαθέτουν τριβάθμιο ελικοειδές κιβώτιο ταχυτήτων και ασύγχρονη γεννήτρια. Κάθε Α/Γ

φέρει χαλύβδινο πυλώνα ύψους περίπου 90 μέτρων κωνικού σχήματος με συνολικό βάρος κατασκευής 435 tn [33].

Επιπρόσθετα, έχουν εξοπλιστεί με σύστημα προσανατολισμού προκειμένου να βελτιστοποιηθεί η απόδοση τους και ταυτόχρονα να ελαχιστοποιηθεί η καταπόνηση τους. Ειδικότερα, καθεμία λεπίδα των Α/Γ φέρει μηχανισμό κλίσης που προσαρμόζει τη γωνία της στις επικρατούσες συνθήκες του ανέμου. Είναι εφοδιασμένες με σύστημα ελέγχου-τηλεχειρισμού που εποπτεύουν τους κραδασμούς και την υγεία του εξοπλισμού διασφαλίζοντας την ομαλή και ασφαλή λειτουργία των Α/Γ.

Επίσης, έχει γίνει επιλεκτική εγκατάσταση φωτισμού και σήμανσης προκειμένου το πάρκο να γίνεται ευκολά αντιληπτό στα διερχόμενα πλοία και αεροπλάνα. Μάλιστα, προβλέφθηκε ότι η άκρη κάθε λεπίδας πρέπει να βρίσκεται πάντοτε 22 μέτρα ψηλότερα από την επιφάνεια της θάλασσας κατά τη διάρκεια της παλίρροια. Τέλος, έχουν διαταχθεί σε σειρές και στήλες με την μεταξύ τους απόσταση να κυμαίνεται από 650 έως 1.200 m, ώστε να αποφευχθούν οι περιπτώσεις αρνητικής επίδρασης-σκίασης [31].

Κατά τα γνωστά οι λεπίδες περιστρέφονται με τη δύναμη του άνεμου και θέτουν σε κίνηση τον ρότορα που τις συγκρατεί, ο οποίος στρέφει τον κύριο άξονα. Ακολούθως, η ταχύτητα περιστροφής του άξονα αυξάνεται μέσω του κιβώτιου ταχυτήτων, ώστε η γεννήτρια να μετατρέψει την αυξημένη κινητική ενέργεια σε ηλεκτρική. Ο μετασχηματιστής της Α/Γ ανυψώνει την ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται στα 33 KV προτού διοχετευτεί στους υπεράκτιους υποσταθμούς.



Εικόνα 5.3: Λήψη των Α/Γ του London Array, διακρίνεται το κίτρινο μεταβατικό τμήμα

Για τη θεμελίωση των Α/Γ επιλέχθηκε ο πιο διαδεδομένος τύπος βάσης, δηλαδή αυτός του μεμονωμένου πασσάλου (Monopile) (Εικόνα 5.4). Πρόκειται για κυλινδρική χαλύβδινη κατασκευή με μήκος περίπου 68 m, το πλάτος τους φτάνει σχεδόν 6 m και ζυγίζουν περίπου 650 tn. Στο άνω άκρος αυτού τοποθετήθηκε μεταβατικό τμήμα, προτού εδράσει η Α/Γ. Το κομμάτι αυτό φέρει κίτρινο χρώμα όπως φαίνεται και στην Εικόνα 5.3, ώστε να εντοπίζεται εύκολα και χρησιμοποιείται για την εκτέλεση των εργασιών συντήρησης. Έχει ύψος περίπου 28 m, και διαθέτει σκάλες καθώς και πλατφόρμα που διευκολύνει την πρόσβαση των τεχνικών συντήρησης [31]. Οι μηχανικοί του έργου πρότειναν και επέμεναν να ενισχυθεί ο τρόπος θεμελίωσης, μιας και είχαν αναφερθεί προγενέστερα προβλήματα ολίσθησης σε ισχυρές συνθήκες πνέοντων ανέμων. Ο νέος σχεδιασμός που τελικώς εγκρίθηκε αλλά και υιοθετήθηκε και σε μεταγενέστερες κατασκευές, αφορά στην προσθήκη ενός ελαφρώς κεκλιμένου κώνου στην κορυφή του πασσάλου. Αυτός βρίσκεται μέσα σε έναν ανεστραμμένο κώνο που τοποθετείται στο κάτω μέρος του μεταβατικού τμήματος. Μεταξύ των δυο επιφανειών γίνεται έγχυση μείγματος ουσιών, δηλαδή ένας τύπος εξειδικευμένου ενέματος.



Εικόνα 5.4: Λήψη καθέλκυσης του πασσάλου θεμελίωσης (Monopile)

5.3.2 Καλώδια τύπου Array

Τα υποθαλάσσια καλώδια που συνδέουν τις Α/Γ με τους υπεράκτιους υποσταθμούς μεταφέροντας την παραχθείσα ενέργεια αποκαλούνται καλώδια τύπου Array. Στο London Array έχουν θαφτεί στον πυθμένα 200 Km τέτοιων καλωδίων με βάρος 50 κιλά ανά μέτρο, τα οποία αντιστοιχίζονται σε 187 ανεξάρτητα τμήματα καλωδίων. Το μήκος αυτών προσαρμόστηκε στις προδιαγραφές της σύνδεσης που προορίζονταν, οπότε για αυτό το μήκος κάθε τμήματος κυμαίνεται από 720 m έως 3.100 m. Έχει δημιουργηθεί ένα υποθαλάσσιο δίκτυο καλωδίων που συνδέει μεταξύ τους έναν αριθμό Α/Γ, ώστε να καταλήξουν σε 12 μόνο τελικές συνδέσεις στους δύο υπεράκτιους υποσταθμούς [31].

Η τοποθέτηση των καλωδίων σε βάθος 1,5 m από τον βυθό πραγματοποιήθηκε μέσω εξειδικευμένων σκαφών και τηλεχειριζόμενων υποβρύχιων οχημάτων (ROV), που ελέγχονται από την επιφάνεια.

Τα καλώδια Array φέρουν τρεις πυρήνες για τη μεταφορά της ανυψωμένης στα 33 kV ενέργειας, και ταυτόχρονα διαθέτουν πυρήνες οπτικών ινών που εξυπηρετούν την απομακρυσμένη εποπτεία και έλεγχο των Α/Γ. Επίσης, να σημειωθεί ότι στα μη θαμμένα κομμάτια (θεμέλια Α/Γ και περιοχή υποσταθμών) τοποθετούνται προστατευτικοί σωλήνες έναντι του νερού ή σκόνης.

5.3.3 Υπεράκτιοι υποσταθμοί

Εντός της έκτασης που καταλαμβάνει το αιολικό πάρκο έχουν εγκατασταθεί δύο πανομοιότυποι υπεράκτιοι υποσταθμοί, σε απόσταση σχεδόν 6,5 Km ο ένας από τον άλλον (Εικόνα 5.5). Οι υποσταθμοί αποτελούν ζωτικής σημασίας μέρος του έργου μιας και συμβάλλουν στην αποτελεσματική και αποδοτική λειτουργία του. Αυτό το πετυχαίνουν μετατρέποντας την τάση από τα 33 KV στα 150 KV, προτού την διοχετεύσουν στον χερσαίο υποσταθμό. Είναι γνωστό πως η ανύψωση αυτή εξασφαλίζει τη μικρότερη δυνατή απώλεια ενέργειας που οφείλεται στη μεταφορά.

Η συναρμολόγηση τους πραγματοποιήθηκε στη στεριά και κατόπιν με πλοία μεταφέρθηκαν στην τελική θέση εγκατάστασης. Καταλαμβάνουν επιφάνεια 400 m², με ύψος που αγγίζει τα 22 m και έχουν βάρος 1.250 tn. Επίσης, να σημειωθεί ότι είναι μια κατασκευή με τρία επίπεδα καταστρωμάτων, που θεμελιώθηκε στον βυθό με μεμονωμένους πασσάλους (Monopile). Τέλος, για την ανύψωση τους στα μεταβατικά

τμήματα, που προαναφέρθηκαν και στην 5.3.1 υποενότητα, απαιτήθηκε η χρήση εξειδικευμένου πλωτού γερανού [31].



Εικόνα 5.5: Πλήρως εγκατεστημένος υποσταθμός του London Array

5.3.4 Καλώδια τύπου Export

Οι υπεράκτιοι υποσταθμοί συνδέονται με τον χερσαίο μέσω τεσσάρων καλωδίων υψηλής τάσης, εν ολίγοις τα καλώδια Export μεταφέρουν την ενέργεια στην ακτή κοντά στο δίκτυο διανομής. Τα καλώδια αυτά διακρίνονται για το μεγάλο τους βάρος, μιας και ξεπερνούν σε βάρος τους 4.500 tn. Τα συνθέτουν τρεις αγωγοί διατομής 630 mm² για το τρέχον μήκος, αλλά στα άκρα τους έχουν πυρήνα διατομής 800 mm². Παρόμοια με τα καλώδια Array διαθέτουν και αυτά πυρήνες οπτικών ινών.

Ομοίως, βρίσκονται θαμμένα στον θαλάσσιο βυθό σχεδόν 220 Km καλωδίων που τοποθετήθηκαν από εξειδικευμένη πλατφόρμα. Το καθένα από τα τέσσερα καλώδια διατρέχει συνεχές μήκος της τάξης των 50 Km, που ξεκινά από τον υπεράκτιο σταθμό και μέσω του κυματοθραύστη του ποταμού Swale καταλήγει στο φρεάτιο σύνδεσης του χερσαίου υποσταθμού (Εικόνα 5.6).

Οι εργασίες εγκατάστασης ξεκίνησαν από την ακτή και συγκεκριμένα από τη διαπαλιρροιακή ζώνη του ποταμού Swale, και αρχικά αφορούσαν τις εργασίες εξυγίανσης-

καθαρισμού της περιοχής του βυθού από όπου θα περνούσαν τα καλώδια. Στη συνέχεια, τοποθετήθηκαν αγωγοί κάτω από τον κυματοθραύστη του ποταμού (διάνοιξη οπών), και ένα βαρούλκο στην πλευρά του χερσαίου υποσταθμού τραβούσε τα καλώδια από το πλοίο πόντισης που βρίσκονταν εντός του ποταμού σε απόσταση 2 Km από την ανοιχτή θάλασσα. Στις λασπώδεις εκτάσεις επιλέχθηκε πρώτα να εναποθέσουν τα καλώδια και μετά να επιχωματωθούν εντός τάφρων που διένοιξαν αμφίβιοι εκσκαφείς. Στο υπόλοιπο της διαδρομής μέχρι τους υπεράκτιους σταθμούς προτιμήθηκε η ταυτόχρονη τοποθέτηση και ταφή των καλωδίων [31].

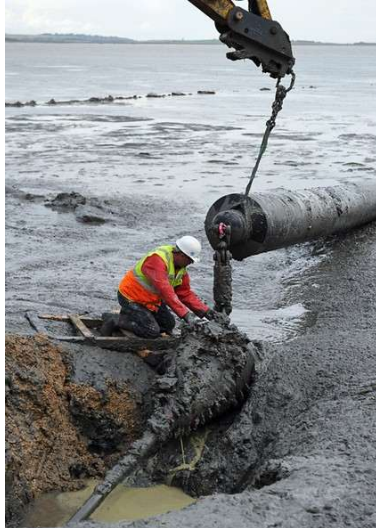


Εικόνα 5.6: Λήψεις από τα διαφορετικά στάδια εγκατάστασης των καλωδίων Export στη λασπώδη περιοχή και στην ανοιχτή θάλασσα

Να διευκρινιστεί ότι η μέθοδος που κρίθηκε κατάλληλη για την τοποθέτηση των καλωδίων μέσω του κυματοθραύστη είναι αυτή της οριζόντιας κατευθυνόμενης διάτρησης (HDD). Εν ολίγοις, αναφέρεται στην μη-εκσκαφή προκειμένου να εγκατασταθούν υπόγειες υποδομές δίχως να επηρεάζεται η εξωτερική επιφάνεια και απαιτεί ειδικό εξοπλισμό (Εικόνα 5.7). Επομένως, μετά τη διάνοιξη των οπών ακολουθήσε η τοποθέτηση βοηθητικών αγωγών από τους οποίους διέτρεξαν αργότερα τα καλώδια.

Η εγκατάσταση του πρώτου καλωδίου Export ολοκληρώθηκε περί τα τέλη του 2011, ακολούθησε το επόμενο αρχές του 2012 και τα υπόλοιπα δύο καλώδια υλοποιήθηκαν αργότερα μεν αλλά εντός του ίδιου έτους.

Συμπληρωματικά στο Σχήμα 5.1 παρατίθεται το μονογραμμικό διάγραμμα της εσωτερικής εγκατάστασης του θαλάσσιου πάρκου [31].



Εικόνα 5.7: Λήψεις από την εγκατάσταση των καλωδίων Export κοντά στον κυματοθραύστη

5.3.5 Χερσαίος υποσταθμός

Ο χερσαίος υποσταθμός του πάρκου βρίσκεται στο Cleve Hill (εξ ου και η ονομασία του) και επιλέχθηκε να κατασκευαστεί πλησίον της εναέριας γραμμής μεταφοράς Canterbury-Kemsley. Η αρχιτεκτονική σχεδίαση αυτού ανατέθηκε στην διεθνούς φήμης εταιρεία RMJM, η οποία επέλεξε να ενσωματώσει καλαίσθητα τον υποσταθμό σχεδιάζοντας έναν τοίχο ύψους 10 μέτρων από πάνελ και πτερύγια σκυροδέματος. Είναι επανδρωμένος με τον απαραίτητο εξοπλισμό, προκειμένου η παραχθείσα ηλεκτρική ενέργεια του London Array να διοχετευτεί στο εθνικό δίκτυο του Ηνωμένου Βασιλείου τροφοδοτώντας αποκλειστικά το δίκτυο του Λονδίνου (Εικόνα 5.8).



Εικόνα 5.8: Υποσταθμός Cleve Hill (1)

Όπως ήδη έχει περιγράψει, η ηλεκτρική ενέργεια μεταφέρεται στη στεριά με τέσσερα καλώδια υψηλής τάσης που διασχίζουν κάθετα και υπογείως τον κυματοθραύστη, και καταλήγουν στον υποσταθμό διασχίζοντας απόσταση 1 Km. Η ενέργεια που εισέρχεται στον υποσταθμό έχει ανυψωθεί στα 150 KV, ωστόσο προτού συνδεθεί στο δίκτυο πρέπει να ανυψωθεί εκ νέου στα 400 KV.

Τα βασικά μέρη του Cleve Hill απαρτίζουν τα παρακάτω στοιχεία (Σχήμα 5.1) [31]:

- Τέσσερις μετασχηματιστές
Κάθε μετασχηματιστής διαθέτει ατομικό περίβλημα περιορισμού του παραγόμενου θορύβου, καθώς Στον χώρο του υποσταθμού κατασκευάστηκε αντλιοστάσιο αλλά και δεξαμενή νερού για την προστασία του εξοπλισμού έναντι φωτιάς και πλημμύρας.
- Στατικός VAR αντισταθμιστής (SVC)
Ο κανόνας ορίζει την τάση της παραχθείσας ηλεκτρικής ενέργειας ενός σταθμού να εναρμονίζεται με τα όρια του εκάστοτε δικτύου μεταφοράς. Στην περίπτωση του London Array επιλέχθηκαν στατικοί VAR αντισταθμιστές για να διατηρούν την τάση εντός του επιτρεπτού εύρους σύνδεσης. Οι SVC στηρίζουν τη λειτουργία τους στην παραγωγή και κατανάλωση άεργου ισχύος από το δίκτυο, και εν ολίγοις ελέγχουν διαρκώς τη ροή άεργου ισχύος από και πίσω στο πάρκο. Στην περίπτωση που η τάση του πάρκου υποχωρήσει του καθορισμένου επιπέδου της, τότε θα παράγει άεργο ισχύ για να την ανυψώσει. Ακριβώς το αντίθετο θα συμβεί σε

ενδεχόμενη αύξηση της τάσης, που θα την επαναφέρει καταναλώνοντας ποσότητα έργου ισχύος.

- Φίλτρα ζεύξης

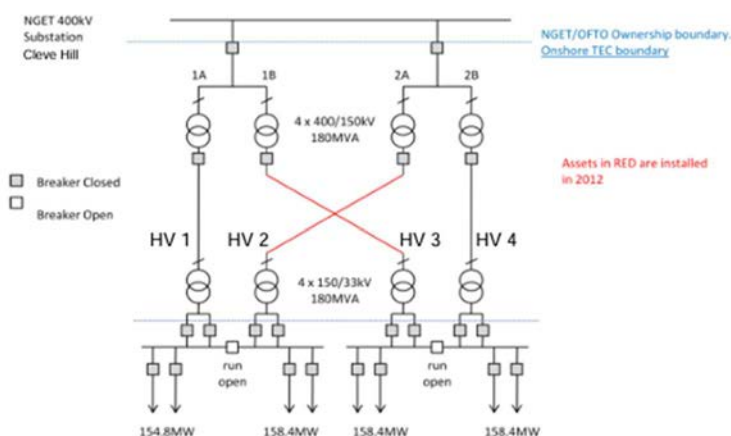
Ο υποσταθμός διαθέτει φίλτρα ζεύξης 150/400 KV που χρησιμοποιούνται απαραίτητα κατά τη σύνδεση φερεσύχων συσκευών, όπως των σταθμών παραγωγής, στις γραμμές μεταφοράς. Η χρήση τους εξασφαλίζει ότι η ισχύς που θα εξαχθεί στο δίκτυο θα είναι απαλλαγμένη, στο βαθμό του εφικτού, από αρμονικές υψηλού επιπέδου (συγκεκριμένα 3η, 5η και 7η) που επηρεάζουν την κυματομορφή της.

- Κτίριο ελέγχου

Πρόκειται για το χώρο όπου στεγάζεται το σύστημα ελέγχου/εποπτείας και τηλεμετρίας (SCADA) τόσο των Α/Γ όσο και των μετασχηματιστών με τα SVC.

- Εθνικός Υποσταθμός Δικτύου

Αναφέρεται στο σημείο σύνδεσης του πάρκου με το δίκτυο μεταφοράς, και ουσιαστικά είναι ένα συγκρότημα που περιλαμβάνει ένα κύκλωμα της εναέριας γραμμής, δύο υπόγεια καλώδια από τον χώρο του υποσταθμού και δύο διακόπτες 400KV που παρεμβάλλονται της σύνδεσης. Αυτός ο υποσταθμός κατασκευάστηκε, ανήκει και διαχειρίζεται από την National Grid που είναι ο διαχειριστής του συστήματος μεταφοράς [31].



Σχήμα 5.1: Μονογραμμικό διάγραμμα εγκατάστασης

Κατά την εκτέλεση των χωματουργικών εργασιών, που αφορούσαν την προετοιμασία και εξυγίανση του εδάφους, αλλά και των εργασιών εκσκαφής των θεμελίων προέκυψαν 150.000 m³ υλικών, κυρίως χώματος και βράχων. Το προϊόν αυτό αποφασίστηκε να χρησιμοποιηθεί στην κατασκευή αναχωμάτων προκειμένου να περιοριστεί η οπτική όχληση, και μάλιστα προχώρησαν στη φύτευση επί αυτών 10.000 δενδρυλλίων.

Επιπρόσθετα, προβλέπονταν η τοποθέτηση μόνιμης εξωτερικής περίφραξης της τοποθεσίας του υποσταθμού για την τήρηση των απαραίτητων κανόνων ασφαλείας και συνάμα πύλης για τον αυστηρό έλεγχο εισόδου των επισκεπτών-υπαλλήλων. Με άλλα λόγια, ο υποσταθμός του Cleve Hill διαθέτει συστήματα ασφαλείας όμοια με αυτά των υποσταθμών του εθνικού δικτύου. Έτσι, κατασκευάστηκε περίφραξη μήκους 4 Km και ύψους σχεδόν 2,5 m και τοποθετήθηκε χαλίκι και άσφαλτος για την αποφυγή δημιουργίας επικίνδυνων βηματικών τάσεων και τάσεων επαφής (Εικόνα 5.9). Τέλος, κατασκευάστηκε εσωτερική περίφραξη για να διαχωρίζονται τα διαφορετικά συγκροτήματα του υποσταθμού [31].



Εικόνα 5.9: Υποσταθμός Cleve Hill (2)

5.4 Λειτουργία και Συντήρηση

Το νομοθετικό πλαίσιο του Ηνωμένου Βασιλείου ορίζει ότι το σύνολο του εξοπλισμού που απαρτίζει το σύστημα μεταφοράς ενέργειας από τος Α/Γ μέχρι το εθνικό δίκτυο, ήτοι υπεράκτιοι και χερσαίοι σταθμοί μαζί με τις σχετικές καλωδιώσεις, δεν αποτελούν

πериουσία της ιδιοκτήτριας εταιρείας. Για το λόγο, αυτό πωλήθηκαν στην Blue Transmission η οποία ανέθεσε στην London Array τη λειτουργία και συντήρηση αυτών. Έτσι, η τελευταία είναι υπεύθυνη για τις εργασίες λειτουργίας και συντήρησης ολόκληρου του θαλάσσιου πάρκου.

Στην πόλη Ράμσγκεϊτ συγκροτήθηκε ομάδα 70 τεχνικών που εργάζονται σε καθεστώς βαρδιών, ώστε να εξασφαλίζεται η 24ώρη καθημερινή αδιάλειπτη παρακολούθηση του έργου δίχως εξαιρέσεις εορτών-αργιών. Αντικείμενο τους είναι η παροχή υπηρεσιών προγραμματισμένης-προληπτικής συντήρησης, αλλά και εργασιών επισκευής βλαβών. Η δουλειά τους είναι ιδιαίτερα απαιτητική, αν αναλογιστούμε ότι εργάζονται μέχρι και 8 ώρες σε μια Α/Γ ακολουθώντας συγκεκριμένο πρωτόκολλο ελέγχων για να διασφαλιστεί η άριστη λειτουργία τους.

5.5 Σχολιασμός κατασκευής

Ανεξάρτητα με την εύρεση της κατάλληλης τοποθεσίας από πλευράς αιολικού δυναμικού και την εξασφάλιση των απαιτούμενων αδειοδοτήσεων, το στάδιο σχεδιασμού ενός αιολικού πάρκου είναι ιδιαίτερα σημαντικό. Οι εκ φύσεως δυσκολίες εργασίας στην ανοιχτή θάλασσα και οι τεχνικές προκλήσεις που πρέπει να αντιμετωπιστούν, είναι παράγοντες που μπορούν ακόμη και να συμβάλλουν στην απόρριψη των υποδειγμένων από τη μελέτη θέσεων.

Η κατασκευή κάθε υπεράκτιου αιολικού πάρκου είναι μια πρόκληση, και το London Array δεν μπορούσε να είναι εξαίρεση. Η ομάδα σχεδιασμού και κατασκευής του London Array με την εμπειρία της κατάφερε να ανταποκριθεί στις απαιτήσεις που προέκυψαν κερδίζοντας την παγκόσμια αναγνώριση. Με τις επιλογές τους αποτέλεσαν τους οδηγούς των επόμενων γενεών ανάπτυξης των θαλάσσιων πάρκων. Η συνολική κατασκευή του London Array δεν πέτυχε απλά, αλλά ανέβασε τον κατασκευαστικό πήχη των μελλοντικών έργων.

Επιπρόσθετα, αξιοσημείωτη ήταν η ιδιαίτερη φροντίδα που υπέδειξαν για την προστασία τόσο του χερσαίου όσο και θαλάσσιου περιβάλλοντος ενεργώντας πάντα με γνώμονα τη φροντίδα της βιοποικιλότητας. Η ανάπτυξη του London Array πραγματοποιήθηκε με σκοπό τη διατήρηση ενός υγιούς θαλάσσιου και χερσαίου οικοσυστήματος.

Στον Πίνακα 5.1 που ακολουθεί συγκεντρωθήκαν σχεδιαστικά σημεία που συνέβαλαν, ώστε το έργο να αναγνωριστεί από την παγκόσμια κοινότητα ως καινοτόμο παράδειγμα κατασκευής.

Πίνακας 5.1: Σχεδιαστικά σημεία βέλτιστης πρακτικής εφαρμογής

Στάδιο	Σχολιασμός
Εργοτάξιο	Εγκαταστάθηκε στο λιμάνι του Ράμσγκεϊτ σε απόσταση σχεδόν 20 Km από την θαλάσσια έκταση του πάρκου. Η θέση του εξασφάλισε την εύκολη πρόσβαση του εξοπλισμού (μείωση κόστους έργων πρόσβασης), τη χρήση των υπαρχόντων υποδομών (μείωση δαπανών νέων συνδέσεων κ.λ.π.) και τη συνεχή συνεργασία με την τοπική κοινότητα (αποφυγή αντιπαραθέσεων και καθυστερήσεων). Επίσης, μπορούσε να καλύψει τις ανάγκες του ανθρώπινου δυναμικού που απασχολήθηκε κατά τη διάρκεια κατασκευής του (μείωση εργατικών δαπανών).
Α/Γ & Θεμελίωση	Τα βασικά μέρη των Α/Γ εν μέρει εξοπλίστηκαν στην στεριά. Όταν μεταφέρθηκαν στον πυλώνα τους, τοποθετήθηκε η εξοπλισμένη άτρακτος (το περίβλημα δηλαδή που περιέχει βασικά εξαρτήματα, όπως το κιβώτιο ταχυτήτων, τη γεννήτρια και τα χειριστήρια), η πλήμνη και τα τρία πτερύγια. Προτιμήθηκε ενίσχυση της θεμελίωσης με χρήση κωνικής σύνδεσης στην κορυφή των Monopile προς αποφυγή ολίσθησης. Η εναλλακτική αυτή σχεδιάστηκε εξ ολοκλήρου από την ομάδα κατασκευής και έλαβε πιστοποίηση και έγκριση για χρήση. Αποτελεί βέλτιστη πρακτική αντιμετώπισης προβλημάτων ολίσθησης, που αφορούν στους μεμονωμένους πασσάλους, εξαιτίας των διακυμάνσεων του βάθους νερού και του βυθού.

	Εναλλακτική πρόταση επιλογής τύπου Α/Γ θα μπορούσε να αποτελέσει η περίπτωση της σύγχρονης γεννήτριας μόνιμου μαγνήτη. Ναι μεν το αρχικό κόστος κατασκευής είναι υψηλότερο, αλλά αντισταθμίζεται από τη μη συχνή απαίτησης συντήρησης. Χαρακτηρίζεται από την απουσία κιβωτίου ταχυτήτων, διότι ο μετατροπέας αναλαμβάνει την ανεξαρτοποίηση της ταχύτητας περιστροφής από τη σταθερή του δικτύου πετυχαίνοντας τη μέγιστη δυνατή παραγωγή.
Χερσαίος Υποσταθμός	Επιλέχθηκε να κατασκευαστεί δίπλα στην εναέρια γραμμή μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας, ελαχιστοποιώντας το κόστος του έργου σύνδεσης με το εθνικό δίκτυο. Ο σχεδιασμός του έγινε με γνώμονα τη λιγότερη δυνατή όχληση στο περιβάλλον από άποψη οπτικής (βόρειος τοίχος με πτερύγια, δημιουργία αναχωμάτων) και θορύβου (πρόσθετα περιβλήματα Μ/Σ), προστασίας της πανίδας-χλωρίδας με τη φύτευση δενδρυλλίων.
Υπεράκτιοι Υποσταθμοί	Οι υποσταθμοί συναρμολογήθηκαν πλήρως στην ακτή, λόγω των ισχυρών άνεμων και των απρόβλεπτων θαλάσσιων συνθήκων. Εν συνεχεία, μεταφέρθηκαν και ανυψώθηκαν στις πλατφόρμες. Διαχωρίζοντας τις φάσεις συναρμολόγησης, οι εργασίες πραγματοποιούνταν παράλληλα κερδίζοντας σημαντικά και σε χρόνο.
Καλώδια τύπου Export	Η πρόκληση στην εγκατάσταση των καλωδιώσεων Export ήταν ο κυματοθραύστης του Cleve Hill. Η πιο διακριτική μέθοδος κρίθηκε πως είναι η διάνοιξη οπών μέσω αυτού (HDD, οριζόντια κατευθυνόμενη διάτρηση). Σε αυτήν και σε πολλές άλλες ακόμη διαδικασίες χρησιμοποιήθηκαν εξοπλισμός και τεχνικές που ήταν οι πιο εξελιγμένες για την εποχή τους.

Στατικός αντισταθμιστής VAR	Πρόκειται για μια αποτελεσματική, αξιόπιστη και ταχείας ανταπόκρισης συσκευή που εξαλείφει τις ανεπιθύμητες συνέπειες της μεταβολής της τάσης, είτε καταναλώνοντας είτε παρέχοντας άεργο ισχύ στο δίκτυο. Ενναλακτικά, συνδυαστικά και με τη χρήση ενός συστήματος ενεργειακής αποθήκευσης (BESS) θα επιτυγχάνονταν ανεξαρτοποίηση του SVC από το δίκτυο, εξασφάλιση της σταθερότητας σχετικά με τη συχνότητα (σφάλματα βραχυκύκλωσης, παροδικές διαταραχές) και θα καταλήγαμε σε ακόμη πιο βελτιστοποιημένη παραγωγή της εγκατάστασης.
Σκάφη	Κύριο σημείο της επιτυχίας ήταν η απόφαση να χρησιμοποιήσουν τα πιο σύγχρονα και εξειδικευμένα σκάφη τόσο για την εγκατάσταση των καλωδιώσεων όσο και για την υπόλοιπη κατασκευή (επανδρωμένα και μη). Οι ελαφρώς διαφορετικές προδιαγραφές τους προσέφεραν την ευελιξία που ήταν απαραίτητη κατά την εκτέλεση των διαφορετικών εργασιών.

Το London Array είναι χαρακτηριστικό παράδειγμα της συνδρομής των ΑΠΕ ώστε να αναστραφεί η πορεία της κλιματικής αλλαγής, και σύναμμα στη συμβολή τους για την επίτευξη της βιώσιμης ανάπτυξης. Συνεισφέρει σημαντικά στο μίγμα ΑΠΕ του Ηνωμένου Βασιλείου, αναδεικνύοντας την αιολική ενέργεια ως ένα αποδοτικό μέσο, μιας και παράγει άφθονη ηλεκτρική ενέργεια ικανή να ηλεκτροδοτήσει σε ετήσια βάση περισσότερους 500.000 οικιακούς καταναλωτές. Αξίζει να σημειωθεί ότι η ιδιοκτησία του London Array συνεχίζει να επιμένει στη συνεχή βελτίωση του πάρκου, γεγονός που το επικροτώ και συμμαρίζομαι, επιδιώκοντας να μειωθεί το ενεργειακό του αποτύπωμα, αν και η αιολική ενέργεια συγκαταλέγεται στις ΑΠΕ εκπέμπει ρύπους άνθρακα. Η χρήση της τεχνητής νοημοσύνης και έξυπνων αισθητήρων δύναται να παρατείνει το χρόνο ζωής του κατά 10 χρόνια, να εξασφαλίσει αποτελεσματικότερες συνθήκες λειτουργίας και να

πετύχει τελικώς την επιδιωκόμενη ελαχιστοποίηση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα σε ποσοστό περίπου 15%.

Επιπρόσθετα, η ιδιοκτησία του πάρκου επέλεξε να καλύψει τις νέες θέσεις εργασίας που δημιουργήθηκαν από την τοπική κοινότητα τονώνοντας οικονομικά την περιοχή. Ακόμη, ο σχεδιασμός και η λειτουργία του πάρκου αποτελεί πόλο έλξης επισκεπτών, γεγονός που και αυτό συμβάλλει στην οικονομική ανάπτυξη της περιοχής. Παρέχοντας οικονομικά κίνητρα και οφέλη στην κοινότητα, κατά προσωπική μου άποψη, δημιουργούνται περισσότερες πιθανότητες αгаστής συνεργασίας.

Το London Array μνημονεύεται, και δικαίως, κάθε φορά που σχεδιάζεται ένα έργο ΑΠΕ μεγάλης κλίμακας, εξαιτίας της καινοτομίας που το διέκρινε, των διεθνών επενδύσεων που επέφερε και το μήνυμα βιωσιμότητας που προάγει. Είναι μια εξαιρετική περίπτωση μοντέλου ανάπτυξης που αποδεικνύει εμπράκτως τα λαμπρά αποτελέσματα, τα οποία μπορούν να επιτευχθούν με τη σωστή συνεργασία και την αποφασιστικότητα για τη δημιουργία βιώσιμων έργων. Τα συστατικά αυτά κατά εμέ αποτελούν βασικά στοιχεία επιτυχούς σχεδιασμού και υλοποίησης οποιοδήποτε έργων.

Κεφάλαιο 6 Συμπεράσματα

Η ραγδαία ανάπτυξη της αιολικής ενέργειας τις τελευταίες δεκαετίες συμπαρέσυρε την ταχεία εξέλιξη στον κλάδο της συγκριμένης βιομηχανίας. Όπως διαπιστώθηκε και μέσω της παρούσας οι τύποι των Α/Γ συνεχώς εξελίσσονται, σχεδιάζονται αναθεωρημένες μορφές θεμελίωσης, εξετάζονται και δοκιμάζονται εναλλακτικές μορφές σύνδεσης, αναπτύσσονται προτάσεις βελτιστοποίησης της παραγωγής και των ποιοτικών χαρακτηριστικών της. Η πληθώρα αυτών έρχεται να καλύψει τις οποιεσδήποτε απαιτήσεις ενός κατασκευαστή όσο πολύπλοκες και να είναι. Παρόλα αυτά, ο σχεδιασμός ενός αιολικού πάρκου, χερσαίου ή υπεράκτιου, αποτελεί μαζί με την εκτίμηση αιολικού δυναμικού τα σημαντικότερα πρωταρχικά στάδια. Στη σημερινή εποχή, και κυρίως λόγω των δαπανών, εξετάζεται εκ των προτέρων η εύρεση της βελτιστοποιημένης εγγυημένης παραγωγής. Η τεχνολογία αλλά και η τεχνογνωσία των μηχανικών αποτελούν το μίγμα που μπορούν να πετύχουν το βέλτιστο αποτέλεσμα δεδομένων των εκάστοτε συνθήκων. Ο σχεδιασμός του κάθε πάρκου πρέπει να εναρμονίζεται με τις δυνατότητες της κάθε τοποθεσίας, τις δυσκολίες αυτής, το εθνικό δίκτυο και τέλος το οικονομικό όφελος. Στο London Array, που είχαν να αντιμετωπίσουν δύσκολες συνθήκες ανέμων και βυθού, επιλέχθηκε η χρήση προηγμένων τεχνολογιών σε βασικά σημεία, που αν και για την εποχή θα είχαν σαφώς μεγαλύτερο κόστος, συνέβαλαν να ολοκληρωθεί με ασφάλεια και γρήγορα το πάρκο και εξασφάλισαν την απόδοση του.

Στον ελληνικό χώρο που δεν έχουν προς το παρόν εγκατασταθεί υπεράκτιοι σταθμοί αξίζει κατά εμέ να αξιοποιηθούν περιοχές που μπορούν να προφέρουν ένα ισχυρό δυναμικό, σε τοποθεσίες σχετικά ευκολά προσβάσιμες από την ακτή, δίχως έντονες διακυμάνσεις βυθού, ώστε να επιτευχθεί από λιγότερα σε αριθμό πάρκα η μεγαλύτερη ισχύς, που δύναται να αξιοποιηθεί από το δίκτυο ή τις απαιτήσεις σε ενέργεια των κοντινών περιοχών. Η σπορά των χερσαίων πάρκων στην επικράτεια είναι τόσο έντονη σε βαθμό του το εθνικό δίκτυο (ΔΕΔΔΗΕ) επιβάλλει διαστήματα διακοπής λειτουργίας τους και εξετάζει την εγκατάσταση ιδιόκτητων συστημάτων απομακρυσμένου ελέγχου, ουσιαστικά τηλεχειριζόμενων διακοπών.

Βιβλιογραφία

- [1] <https://windeurope.org/intelligence-platform/statistics>
- [2] <https://eletaen.gr>
- [3] <https://energypress.gr/news/eletaen-sta-535-gw-i-egkatestimeni-ishys-ton-aiolikon-egkatastaseis-125-mw-2024>
- [4] <https://www.irena.org/Publications/2025/Mar/Renewable-capacity-statistics-2025>
- [5] Marcelo De Lellis, Romeu Reginatto, Ramiro Saraiva, Alexandre Trofino, *The Betz limit applied to Airborne Wind Energy*, Elsevier Ltd, [Contents lists available at ScienceDirect, Renewable Energy Volume 127 pages 32-40], November 2018, <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.04.034>
- [6] Ν. Ανδρίτσος, «Ενέργεια και Περιβάλλον»
- [7] Καλδέλλης Κ. Ιωάννης, *Διαχείριση της αιολικής ενέργειας*, 2η Έκδοση, Εκδόσεις Σταμούλη, 2005
- [8] Ανδρέας Ευστρατιάδης & Νίκος Μαμάσης, *Εισαγωγή στην Ενεργειακή Τεχνολογία*, Σχολής Πολιτικών Μηχανικών, Υδατικών Πόρων & Περιβάλλοντος, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2021
- [9] <https://www.theengineeringknowledge.com>
- [10] *Αιολική Παραγωγή Ενέργειας, Διεσπαρμένη Παραγωγή*, ΠΜΣ Ευφυή Δίκτυα Ηλεκτρικής Ενέργειας, 2023
- [11] <http://www.cres.gr/cres/index.html>
- [12] <https://ypen.gov.gr>
- [13] <https://def-x.delphiforum.gr/>
- [14] <https://www.spef.gr/index.php/el>
- [15] Russell McKenna, Johan Lilliestam, Heidi U. Heinrichs, Jann Weinand, Johannes Schmidt, Iain Staffell, Andrea N. Hahmann, Peter Burgherr, Arne Burdack, Monika Bucha, Ruihong Chen, Michael Klingler, Paul Lehmann, Jens Lowitzsch, Riccardo

Novo, James Price, Romain Sacchi, Patrick Scherhauser, Eva M. Schöll, Piero Visconti, Luis Ramirez Camargo, *System impacts of wind energy developments: Key research challenges and opportunities*, Joule 9, Published by Elsevier Inc, 2025, <https://doi.org/10.1016/j.joule.2024.11.016>

- [16] Kaynia A. M., *Seismic considerations in design of offshore wind turbines*, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2018
- [17] Velarde J., *Design of Monopile Foundations to Support the DTU 10 MW Offshore Wind Turbine*, M.Sc. Thesis, Norwegian University of Science and Technology, Norway 2016
- [18] <https://herema.gr/el/>
- [19] <https://deddie.gr/>
- [20] Εργαστήριο Αιολικής Ενέργειας και Σύνθεσης Ενεργειακών Συστημάτων, *Η Τεχνολογία των Αιολικών Πάρκων*, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Ελληνικό Μεσογειακό Πανεπιστήμιο (Τ.Ε.Ι. Κρήτης)
- [21] Διπλωματική εργασία Έλλης Ντάκου, *Οικονομικά και περιβαλλοντικά οφέλη των Μικροδικτύων με αυξημένη διείσδυση Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας*, Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών Και Μηχανικών Υπολογιστών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2011
- [22] David Wenzhong Gao, University of Denver USA, *Energy Storage for Sustainable Microgrid*, Chapter e4 pages e1-e68, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803374-6.00004-4>, Academic Press, 2015
- [23] Ramin Sakipour, Hamdi Abdi, *Voltage stability improvement of wind farms by self-correcting static volt-ampere reactive compensator and energy storage*, Elsevier Ltd, [Contents lists available at ScienceDirect, Electrical Power & Energy Systems 140 (2022) 108082], <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2022.108082>, 2022
- [24] M.A. Hajahmadi, G.B. Gharehpetian, M. Firouzi, Amjad Anvari-Moghaddam, F. Blaabjerg, *Output power smoothing of wind power plants using unified inter-phase power controller equipped with super-capacitor*, Elsevier Ltd, [Contents lists available at ScienceDirect, Journal of Energy Storage 54 (2022) 105209], <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.105209>, 2022

- [25] Chakrit Lertnuwat, Anant Oonsivilai, *Stability for Wind Turbine using Observer method with Permanent Magnet Synchronous Generator (PMSG)*, Elsevier Ltd, [Energy Procedia 138 (2017) 122-127], 2017
- [26] Marwan Rosyadi, S. M. Mueen, Rion Takahashi, Junji Tamura, *Voltage Stability Control of Wind Farm using PMSG based Variable Speed Wind Turbine*, IEEE Xplore, 2012
- [27] Wenqin Song, Yongcheng Liu, Zhuxiu Wang, Suyang Ding, Xiangning Lin, Zhongnan Feng, Zhengtian Li, *A novel wind turbine control strategy to maximize load capacity in severe wind conditions*, Elsevier Ltd, [Contents lists available at ScienceDirect, Energy Reports 8 (2022) 7773-7779], <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.06.005>, 2022
- [28] Hui Fan, Ming Tang, *A two-layer control strategy of the wind farm participating in grid frequency regulation*, Elsevier Ltd, Alexandria Engineering Journal (2022) 61, 6371–6381, <https://doi.org/10.1016/j.aej.2021.11.064>, 2021
- [29] <https://www.admie.gr>
- [30] <https://www.wikipedia.org/>
- [31] <https://londonarray.com/>
- [32] RPS Group Limited, *Environmental Statement, Non-Technical Summary London Array Limited*, June 2025, <https://londonarray.com/wp-content/uploads/2020/07/Non-technical-summary.pdf>
- [33] <https://en.wind-turbine-models.com/turbines/669-siemens-swt-3.6-120-offshore>