



Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών
& Μηχανικών Υπολογιστών

**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΠΕΛΟΠΟΝΝΗΣΟΥ**

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ



ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΛΩΤΟΥ ΑΙΟΛΙΚΟΥ ΠΑΡΚΟΥ

DESCRIPTION OF FLOATING WIND FARM

ΑΠΕΡΓΗΣ Λ. ΑΝΤΩΝΙΟΣ - ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ, ΑΜ: 7305

ΚΟΛΛΙΑΣ Ι. ΧΡΗΣΤΟΣ, ΑΜ:7607

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΣΧΟΙΝΑΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ

ΠΑΤΡΑ 2023

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή

Πάτρα, Ημερομηνία:

ΕΠΙΤΡΟΠΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ

1. _____, Υπογραφή:

2. _____, Υπογραφή:

3. _____, Υπογραφή:

Υπεύθυνη Δήλωση Φοιτητών

Βεβαιώνουμε ότι είμαστε συγγραφείς αυτής της εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχαμε για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης έχουμε αναφέρει τις όποιες πηγές από τις οποίες έγινε χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε αυτές αναφέρονται ακριβώς είτε παραφρασμένες. Επίσης βεβαιώνουμε ότι αυτή η εργασία προετοιμάστηκε από εμάς προσωπικά ειδικά για τη συγκεκριμένη εργασία.

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας από το Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Πανεπιστημίου Πελοποννήσου δεν υποδηλώνει απαραίτητα και αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα εκ μέρους του Τμήματος.

Η παρούσα εργασία αποτελεί πνευματική ιδιοκτησία των φοιτητών Απέργη Αντωνίου – Κωνσταντίνου και Κόλλια Χρήστου που την εκπόνησαν. Στο πλαίσιο της πολιτικής ανοικτής πρόσβασης οι συγγραφείς/δημιουργοί εκχωρούν στο Πανεπιστήμιο Πελοποννήσου, μη αποκλειστική άδεια χρήσης του δικαιώματος αναπαραγωγής, προσαρμογής, δημόσιου δανεισμού, παρουσίασης στο κοινό και ψηφιακής διάχυσής τους διεθνώς, σε ηλεκτρονική μορφή και σε οποιοδήποτε μέσο, για διδακτικούς και ερευνητικούς σκοπούς, άνευ ανταλλάγματος και για όλο το χρόνο διάρκειας των δικαιωμάτων πνευματικής ιδιοκτησίας. Η ανοικτή πρόσβαση στο πλήρες κείμενο για μελέτη και ανάγνωση δεν σημαίνει καθ' οιονδήποτε τρόπο παραχώρηση δικαιωμάτων διανοητικής ιδιοκτησίας των συγγραφέων/δημιουργών ούτε επιτρέπει την αναπαραγωγή, αναδημοσίευση, αντιγραφή, αποθήκευση, πώληση, εμπορική χρήση, μετάδοση, διανομή, έκδοση, εκτέλεση, «μεταφόρτωση» (downloading), «ανάρτηση» (uploading), μετάφραση, τροποποίηση με οποιονδήποτε τρόπο, τμηματικά ή περιληπτικά της εργασίας, χωρίς τη ρητή προηγούμενη έγγραφη συναίνεση του συγγραφέα/δημιουργού. Οι συγγραφείς/δημιουργοί διατηρούν το σύνολο των ηθικών και περιουσιακών τους δικαιωμάτων.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα θέλαμε πρωτίστως να ευχαριστήσουμε βαθύτατα τον επιβλέποντα καθηγητή μας Νικόλαο Σχοινά του οποίου η συμβολή υπήρξε καθοριστική, προκειμένου να καταστεί δυνατή η πραγματοποίηση της πτυχιακής μας εργασίας. Τον ευχαριστούμε για όλο τον χρόνο και την καθοδήγηση που μας παρείχε καθ' όλη τη διάρκεια του παρόντος εγχειρήματος, αφού η βοήθεια του συνέβαλε ενεργά στην ολοκλήρωση του. Ευχαριστούμε επιπροσθέτως όλους τους καθηγητές του Τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών & Μηχανικών Υπολογιστών , για το εύρος γνώσεων και για τα εφόδια με τα οποία μας όπλισαν μέσα από τα χρόνια που φοιτήσαμε στο Τμήμα.

Θα θέλαμε επίσης να ευχαριστήσουμε από καρδιάς τις οικογένειες μας, τόσο για την ηθική, αλλά και για την οικονομική υποστήριξη που μας παρείχαν καθ' όλα τα χρόνια της φοίτησης μας αφού βοήθησαν σημαντικά στο να μπορέσουμε να κυνηγήσουμε και να κατακτήσουμε τους ακαδημαϊκούς μας στόχους.

Τέλος ένα μεγάλο ευχαριστώ στους ανθρώπους που συνέβαλαν πρακτικά αλλά και ψυχικά στο εγχείρημα και μας βοήθησαν στο να ολοκληρώσουμε την εργασίας μας.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Αντικείμενο της παρούσας πτυχιακής εργασίας είναι η περιγραφή πλωτού αιολικού πάρκου. Στο πρώτο κεφάλαιο, δίνεται η εισαγωγή στην εξέλιξη της αιολικής ενέργειας την τελευταία δεκαετία και οι προοπτικές για την επόμενη τετραετία. Στη συνέχεια, αναλύονται τα πλεονεκτήματα της υπεράκτιας αιολικής ενέργειας η εγκατάσταση των υπεράκτιων αιολικών πάρκων και η εξέλιξη της υπεράκτιας ανεμογεννήτριας. Το κύριο μέρος της εργασίας αποτελείται από τους τύπους θεμελίων των γεννητριών, τον σχεδιασμό θεμελίωσης, την δομή του πάρκου, τα στάδια κατασκευής και την ηλεκτρολογική διασύνδεση με τον δίκτυο. Τέλος παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν λαμβάνοντας υπόψη τα τεχνικά χαρακτηριστικά.

Λέξεις κλειδιά: αιολική ενέργεια, εγκατεστημένη ισχύς, δύναμη ανέμου, καλώδια τροφοδοσίας, θεμελίωση, συχνότητα, φορτίο, τοποθεσία, χωροθέτηση, μετάδοση HVDC.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ	II
ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	III
ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ	IV
ΠΙΝΑΚΑΣ ΕΙΚΟΝΩΝ	VII
ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ	VIII
ΠΙΝΑΚΑΣ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ	IX
ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΙΝΑΚΩΝ.....	X
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1	11
ΕΙΣΑΓΩΓΗ - ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΗΣ ΑΙΟΛΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΤΗΝ ΕΥΡΩΠΗ.....	11
1.1 Αιολικά πάρκα στην Ευρώπη	12
1.2 Προοπτικές για την τετραετία 2022-2026	14
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2	16
ΓΕΝΙΚΑ ΓΙΑ ΤΑ ΥΠΕΡΑΚΤΙΑ ΑΙΟΛΙΚΑ ΠΑΡΚΑ	16
2.1 Πλεονεκτήματα της υπεράκτιας αιολικής ενέργειας.....	16
2.2 Εγκατάσταση υπεράκτιων αιολικών πάρκων	17
2.3 Εξέλιξη των υπεράκτιων ανεμογεννητριών	17
2.4 Έρευνες υπεράκτιων τοποθεσιών	19
2.4.1 Έρευνες στο βυθό	19
2.4.2 Υπεράκτιες γεωφυσικές έρευνες	20
2.4.3 Υπεράκτιες Γεωτεχνικές Έρευνες Χώρου.....	21
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3	23
ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΣΤΗΡΙΞΗΣ ΥΠΕΡΑΚΤΙΩΝ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ	23
3.1 Εισαγωγή.....	23
3.2 Τύποι θεμελίων υπεράκτιων ανεμογεννητριών	24
3.3 Σχεδιασμός θεμελίωσης για υπεράκτιες ανεμογεννήτριες	26
3.4 Νέα σχέδια πλατφόρμας	29

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4	32
ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΥΠΕΡΑΚΤΙΟΥ ΑΙΟΛΙΚΟΥ ΠΑΡΚΟΥ	32
4.1 Εισαγωγή.....	32
4.2 Δομή ενός υπεράκτιου αιολικού πάρκου	35
4.3 Στάδια κατασκευής αιολικού πάρκου	36
4.3.1 Φάση ανάπτυξης	36
4.3.2 Προκατασκευαστική φάση	36
4.3.3 Φάση κατασκευής	37
4.4 Κατασκευή υπεράκτιου αιολικού πάρκου.....	38
4.4.1 Απαιτούμενος χρόνος για την κατασκευή	38
4.4.2 Τοποθεσία εγκατάστασης αιολικού πάρκου	38
4.5 Διαφορές με τη χωροθέτηση πλωτών υπεράκτιων αιολικών πάρκων ..	39
4.6 Προκλήσεις κατασκευής αιολικών υπεράκτιων πάρκων.....	39
4.6.1 Θαλάσσιες μεταφορές.....	39
4.6.2 Συντονισμός ομάδας.....	40
4.6.3 Φροντίδα για τα θαλάσσια οικοσυστήματα	40
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5	42
ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΙΚΗ ΔΙΑΣΥΝΔΕΣΗ ΥΠΕΡΑΚΤΙΟΥ ΑΙΟΛΙΚΟΥ ΠΑΡΚΟΥ ΜΕ ΤΟ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟ ΔΙΚΤΥΟ	42
5.1 Τα στάδια που ακολουθούνται για τη διασύνδεση του πάρκου με το δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας	42
5.1.1 Βήμα 1: Από τη θάλασσα στην ακτή χρησιμοποιώντας κατευθυντική διάτρηση.....	42
5.1.2 Βήμα 2: Το σημείο σύνδεσης/μετάβασης.....	43
5.1.3 Βήμα 3: Υπόγεια μετάδοση στον υποσταθμό	44
5.1.4 Βήμα 4: Σύνδεση στον υποσταθμό	45
5.2 . Τεχνικά χαρακτηριστικά τεχνολογιών διασύνδεσης του πάρκου στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας.....	46

5.3	Τυπικά Σχέδια και Χαρακτηριστικά Υπεράκτια Μεταφοράς Αιολικής Ενέργειας.....	48
5.3.1	Σχέδιο μετάδοσης εναλλασσόμενου ρεύματος συχνότητας ρεύματος για ηλεκτρικό δίκτυο συχνοτήτων που ακολουθούν υπεράκτια αιολικά πάρκα	48
5.3.2	. Σχέδιο μετάδοσης εναλλασσόμενου ρεύματος χαμηλής συχνότητας για υπεράκτια αιολικά πάρκα που ακολουθούν το δίκτυο χαμηλής συχνότητας	49
5.3.3	Σχέδιο μετάδοσης HVDC για Δίκτυο Συχνότητας Ισχύος-Ακολουθώντας Υπεράκτια Αιολικά Πάρκα.....	53
5.3.4	Σχέδιο μετάδοσης HVDC για αιολικά πάρκα μεσαίας συχνότητας που ακολουθούν υπεράκτια αιολικά πάρκα	56
5.3.5	Σχέδιο μετάδοσης εναλλασσόμενου ρεύματος χαμηλής συχνότητας για υπεράκτια αιολικά πάρκα που σχηματίζουν δίκτυο χαμηλής συχνότητας	59
5.3.6	Σχέδιο μετάδοσης HVDC για υπεράκτια αιολικά πάρκα μεσαίας συχνότητας	62
5.3.7	Σχέδιο μετάδοσης HVDC με Step-Up DC Transformer για ανεμογεννήτρια DC-Port συνδεδεμένη παράλληλα	64
5.3.8	Σχέδιο μετάδοσης HVDC για ανεμογεννήτριες DC-Port που συνδέονται σε σειρά	67
5.3.9	Περίληψη Τεχνικών Χαρακτηριστικών Διάφορων Σχημάτων.....	69
5.3.10	Συμπεράσματα	70
	BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	72

ΠΙΝΑΚΑΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 2.1	Ένα	υπεράκτιο	αιολικό		
πάρκο(https://www.iberdrola.com/sustainability/how-does-offshore-wind-energy-work)				16	
Εικόνα 2.2	Υπεράκτιο	αιολικό	πάρκο	Wikinger (Γερμανία), σε λειτουργία από τα τέλη του 2017.(https://www.iberdrola.com/sustainability/how-does-offshore-wind-energy-work)	18
Εικόνα 2.3		Σύγκριση		ανεμογεννητριών (https://www.iberdrola.com/sustainability/how-does-offshore-wind-energy-work)	18
Εικόνα 2.4	Έρευνα	HRG		(https://us.orsted.com/renewable-energy-solutions/offshore-wind/offshore-wind-farm-construction/offshore-site-investigations)	21
Εικόνα 2.5	Έρευνα	GTSI		(https://us.orsted.com/renewable-energy-solutions/offshore-wind/offshore-wind-farm-construction/offshore-site-investigations)	22
Εικόνα 3.1	Μια	τυπική	υπεράκτια	ανεμογεννήτρια (https://www.iberdrola.com/sustainability/how-does-offshore-wind-energy-work)	24
Εικόνα 3.2		Τύποι	θεμελίων	ανεμογεννητριών (https://www.iberdrola.com/sustainability/how-does-offshore-wind-energy-work)	26
Εικόνα 3.3	Τυπικά εξαρτήματα μιας υπερράκτης αιολικής κατασκευής με θεμελίωση μονού πυλώνα (https://www.iberdrola.com/sustainability/how-does-offshore-wind-energy-work)				28
Εικόνα 3.4	Νέες ιδέες σχεδίασης πλατφόρμας FOWT. (α) Αρχική σχεδίαση πλήρως βυθισμένης πλατφόρμας (β) Έννοια σχεδιασμού πλατφόρμας TELWIND [32] .(https://encyclopedia.pub/entry/39927)				30
Εικόνα 4.1	Σκάφος υποστήριξης ανοικτής θαλάσσης (ξενοδοχειακό πλοίο) που συνδέεται με διαδρόμους με τον ηλεκτρικό υποσταθμό του υπερράκτη αιολικού πάρκου Wikinger (Γερμανία) κατά τη διάρκεια ελιγμών θέσης σε λειτουργία (https://www.iberdrola.com/about-us/our-activity/offshore-wind-energy/offshore-wind-park-construction)				32
Εικόνα 4.2	Υπεράκτια εγκατάσταση του ηλεκτρικού υποσταθμού του υπερράκτη αιολικού πάρκου Saint-Brieuc (Γαλλία), βάρους περίπου 3.400 τόνων (https://www.iberdrola.com/about-us/our-activity/offshore-wind-energy/offshore-wind-park-construction)				33

Εικόνα 4.3	Άποψη από την κορυφή μιας υπεράκτιας τουρμπίνας ενός πλοίου εγκατάστασης που μεταφέρει σωρούς ανεμογεννητριών	https://www.iberdrola.com/about-us/our-activity/offshore-wind-energy/offshore-wind-park-construction	33
Εικόνα 4.4	Τελευταία βάση που τοποθετήθηκε από το σκάφος εγκατάστασης Bokalift στο υπεράκτιο αιολικό πάρκο East Anglia One στη Βόρεια Θάλασσα (Ηνωμένο Βασίλειο)	https://www.iberdrola.com/about-us/our-activity/offshore-wind-energy/offshore-wind-park-construction	34
Εικόνα 4.5	Δομή υπεράκτιου αιολικού πάρκου	https://www.iberdrola.com/about-us/our-activity/offshore-wind-energy/offshore-wind-park-construction	35
Εικόνα 5.1	Κατευθυντική διάτρηση	(https://us.orsted.com/renewable-energy-solutions/offshore-wind/offshore-wind-farm-construction/bringing-wind-power-ashore) ...	42
Εικόνα 5.2	Το σημείο σύνδεσης/μετάβασης του αιολικού πάρκου ε τη στεριά	(https://us.orsted.com/renewable-energy-solutions/offshore-wind/offshore-wind-farm-construction/bringing-wind-power-ashore) ...	43
Εικόνα 5.3	Υπόγεια όδευση του καλωδίου προς τον υποσταθμό	(https://us.orsted.com/renewable-energy-solutions/offshore-wind/offshore-wind-farm-construction/bringing-wind-power-ashore) ...	44
Εικόνα 5.4	Σύνδεση με τον υποσταθμό	(https://us.orsted.com/renewable-energy-solutions/offshore-wind/offshore-wind-farm-construction/bringing-wind-power-ashore) ...	45

ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 5.1	Σχέδιο μετάδοσης εναλλασσόμενου ρεύματος συχνότητας ισχύος για υπεράκτια αιολικά πάρκα που ακολουθούν το δίκτυο συχνότητας ισχύος. (https://www.mdpi.com/1996-1073/16/2/658)	48
Σχήμα 5.2	Σχέδιο μετάδοσης εναλλασσόμενου ρεύματος χαμηλής συχνότητας για υπεράκτια αιολικά πάρκα που ακολουθούν το δίκτυο χαμηλής συχνότητας. (https://www.mdpi.com/1996-1073/16/2/658)	50
Σχήμα 5.3	Τοπολογία και λειτουργική ισοδυναμία του M3C. (https://www.mdpi.com/1996-1073/16/2/658)	52
Σχήμα 5.4	Σχέδιο μετάδοσης HVDC για υπεράκτια αιολικά πάρκα μετά από δίκτυο συχνοτήτων ισχύος. (https://www.mdpi.com/1996-1073/16/2/658)	53

Σχήμα 5.5	Σχέδιο μετάδοσης HVDC για υπεράκτια αιολικά πάρκα μετά από δίκτυο μεσαίας συχνότητας. (https://www.mdpi.com/1996-1073/16/2/658)	56
<u>Σχήμα 5.6</u>	<u>Σχέδιο μετάδοσης AC χαμηλής συχνότητας για υπεράκτια αιολικά πάρκα που σχηματίζουν δίκτυο χαμηλής συχνότητας.</u> (https://www.mdpi.com/1996-1073/16/2/658)	60
Σχήμα 5.7	Στρατηγική ελέγχου σχηματισμού πλέγματος με ελεγκτή διπλού βρόχου μιας υπεράκτιας ανεμογεννήτριας. (https://www.mdpi.com/1996-1073/16/2/658)	60
Σχήμα 5.8	Σχέδιο 6: Σχέδιο μετάδοσης HVDC για υπεράκτια αιολικά πάρκα που σχηματίζουν δίκτυο μέσης συχνότητας. (https://www.mdpi.com/1996-1073/16/2/658)	62
Σχήμα 5.9	Δύο τεχνικές προσεγγίσεις για την κατασκευή μιας ανεμογεννήτριας DC-port. (α) την πρώτη τεχνική προσέγγιση· β) η δεύτερη τεχνική προσέγγιση. (γ) η συμβατική ανεμογεννήτρια AC-port. (https://www.mdpi.com/1996-1073/16/2/658)	65
Σχήμα 5.10	Σχέδιο μετάδοσης HVDC με μετασχηματιστή συνεχούς ρεύματος ανόδου για ανεμογεννήτρια θύρας DC συνδεδεμένη παράλληλα. (https://www.mdpi.com/1996-1073/16/2/658)	67
Σχήμα 5.11	Σχέδιο μετάδοσης σχήματος 8-HVDC για ανεμογεννήτρια θύρας DC συνδεδεμένη σε σειρά. (https://www.mdpi.com/1996-1073/16/2/658)	68

ΠΙΝΑΚΑΣ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ

Διάγραμμα 1.1	Νέες εγκαταστάσεις υπεράκτιων αιολικών πάρκων και αιολικών πάρκων στην ξηρά ανά χρόνο για το διάστημα 2012-2021 (https://www.iberdrola.com/sustainability/wind-power-evolution-europe)	11
Διάγραμμα 1.2	Ανάπτυξη των αιολικών πάρκων στην Ευρώπη για το χρονικό διάστημα 2012-221 (https://www.iberdrola.com/sustainability/wind-power-evolution-europe).	12
Διάγραμμα 1.3	Ποσοστό ετήσιας κάλυψης της ζήτησης της ηλεκτρικής ενέργειας από τον άνεμο για το 2021 (https://www.iberdrola.com/sustainability/wind-power-evolution-europe)	13

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 5-1	Σύνοψη οκτώ τυπικών σχημάτων διασύνδεσης[9]	47
Πίνακας 5-2 [9]	Σύνοψη τεχνικών χαρακτηριστικών διαφόρων σχημάτων.	70

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ - ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΗΣ ΑΙΟΛΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΤΗΝ ΕΥΡΩΠΗ

Σε μόλις μια δεκαετία, η αιολική ενέργεια αύξησε την ετήσια παραγωγή της στην Ευρώπη κατά 34,8%, φτάνοντας τη μέγιστη εγκατεστημένη ισχύ της το 2021, με συνολικά 17,4 GW νέων εγκαταστάσεων .

Οι χώρες που αύξησαν περισσότερο την αιολική τους ισχύ ήταν, με αυτή τη σειρά, το Ηνωμένο Βασίλειο, η Σουηδία, η Γερμανία, η Τουρκία και η Ολλανδία , σύμφωνα με στοιχεία της Ευρωπαϊκής Ένωσης Αιολικής Ενέργειας (WindEurope). Κατά τη διάρκεια εκείνου του έτους, ο άνεμος παρήγαγε 437 TWh, αρκετά για να καλύψει το 15% της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας της Ευρωπαϊκής Ένωσης (ΕΕ), εκ των οποίων το 12,2% προήλθε από υπεράκτια αιολική ενέργεια και το 2,8% από αιολική ενέργεια στην ξηρά.[1]

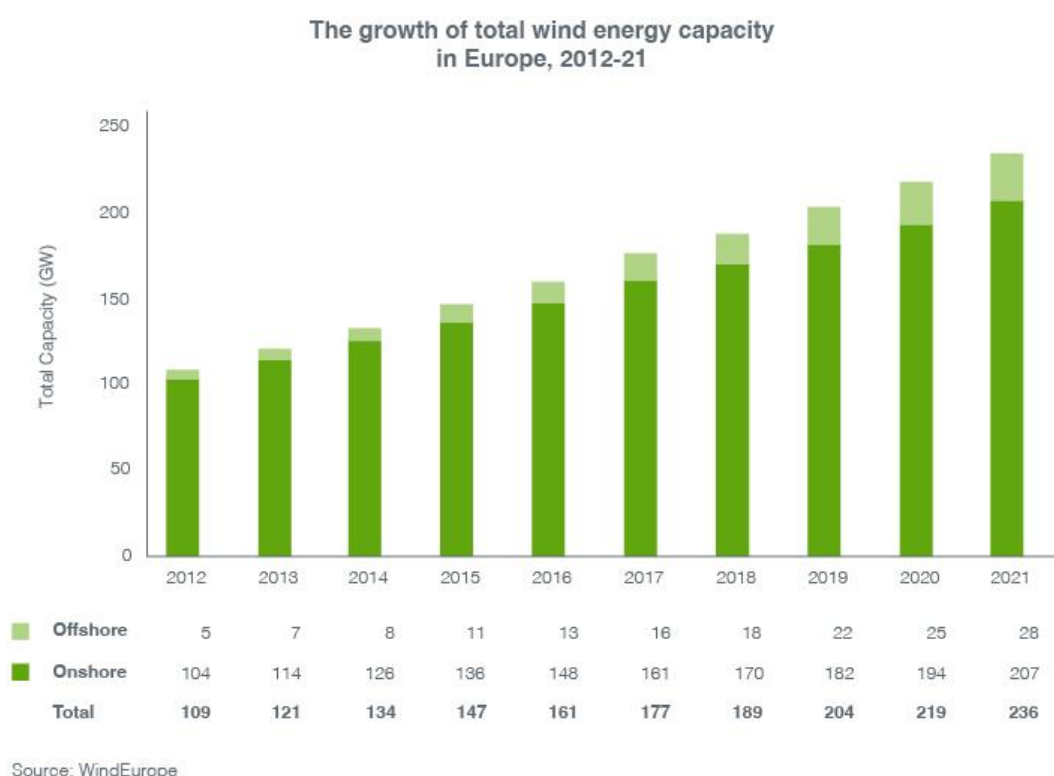


Source: WindEurope

Διάγραμμα 1.1 Νέες εγκαταστάσεις υπεράκτιων αιολικών πάρκων και αιολικών πάρκων στην ξηρά ανά χρόνο για το διάστημα 2012-2021 (<https://www.iberdrola.com/sustainability/wind-power-evolution-europe>)

1.1 Αιολικά πάρκα στην Ευρώπη

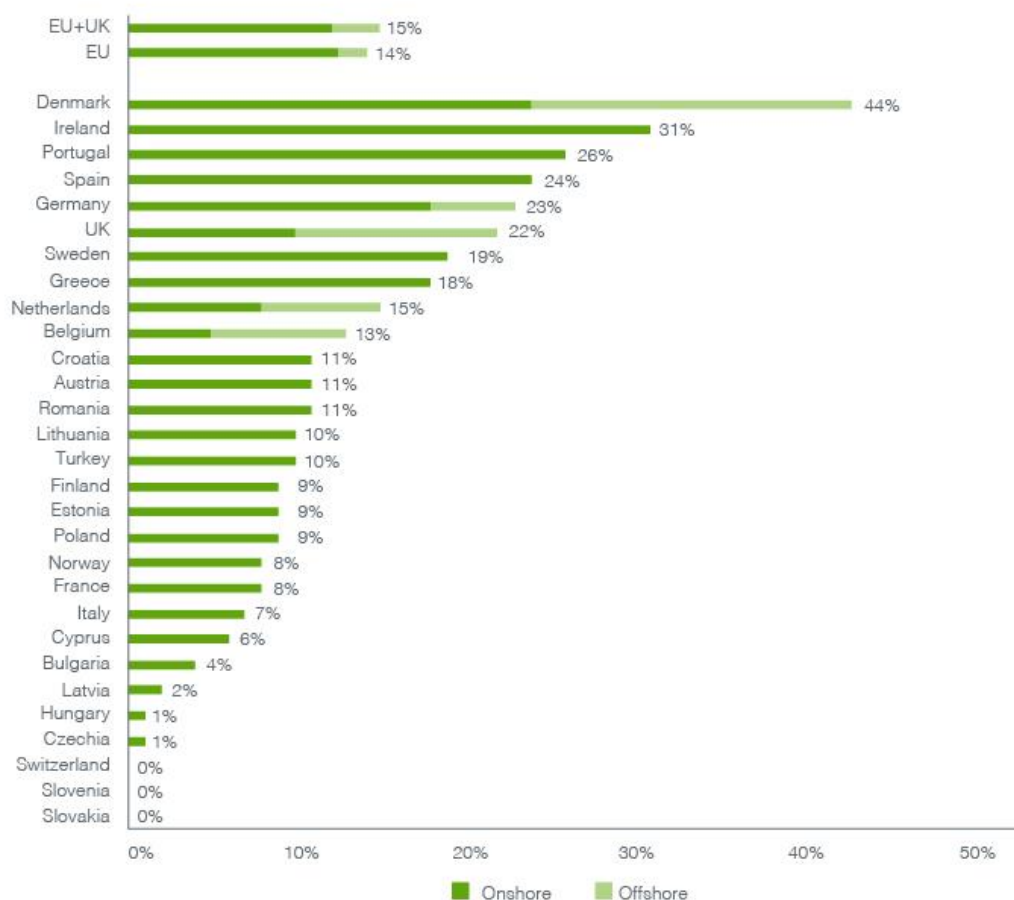
Το 2021, η συνολική εγκατεστημένη ισχύς έφτασε τα 235 GW, 7,7% περισσότερο από το 2020. Επιτεύχθηκαν συνολικά 207 GW από χερσαία αιολικά πάρκα και 28 GW από υπεράκτια αιολικά πάρκα. Με 64 GW, η Γερμανία συνεχίζει να ηγείται της παραγωγής αιολικής ενέργειας στην Ευρώπη, ακολουθούμενη από την Ισπανία (28 GW), το Ηνωμένο Βασίλειο (27 GW), τη Γαλλία (19 GW) και τη Σουηδία (12 GW).



Διάγραμμα 1.2 Ανάπτυξη των αιολικών πάρκων στην Ευρώπη για το χρονικό διάστημα 2012-2021 (<https://www.iberdrola.com/sustainability/wind-power-evolution-europe>)

Επιπλέον, η Δανία και η Ιρλανδία παρέμειναν οι χώρες με το υψηλότερο ποσοστό αιολικής ενέργειας στο ενεργειακό τους μείγμα, φτάνοντας το 44% και το 31% αντίστοιχα, της ετήσιας παραγωγής ενέργειας τους.[1]

Percentage of the average annual electricity demand covered by wind in 2021



Source: WindEurope

Διάγραμμα 1.3 Ποσοστό ετήσιας κάλυψης της ζήτησης της ηλεκτρικής ενέργειας από τον άνεμο για το 2021 (<https://www.iberdrola.com/sustainability/wind-power-evolution-europe>)

Στον τομέα αυτό, η τεχνολογία σημείωσε επίσης ένα νέο ρεκόρ: στις 6 Μαρτίου 2021, η Δανία κάλυψε σχεδόν το 100% της συνολικής ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας με αιολική ενέργεια . Οι ανεμογεννήτριες της σκανδιναβικής χώρας παρήγαγαν 98 GWh εκείνη την ημέρα, το 99% της κατανάλωσης ενέργειας. Το 2017 δοκιμάστηκε μια ανεμογεννήτρια ισχύος 9 MW, ικανή να παράγει 216.000 KWh σε μια μέρα, αρκετή για να καλύψει την ενεργειακή ζήτηση 22.000 νοικοκυριών για ένα χρόνο .

1.2 Προοπτικές για την τετραετία 2022-2026

Η αιολική ενέργεια θα είναι καίριας σημασίας για τα επόμενα πέντε χρόνια και θα επιτρέψει στις ευρωπαϊκές χώρες να προχωρήσουν σε ό,τι αφορά τη διαδικασία απαλλαγής από τις ανθρακούχες εκπομπές της οικονομίας και να συνεχίσουν την ενεργειακή μετάβαση. Η έκθεση *Wind Energy in Europe: Outlook to 2022-26*, που εκπονήθηκε από την WindEurope, προβλέπει ότι τα κράτη μέλη της ΕΕ πρέπει να επιτύχουν τον στόχο εγκατάστασης αιολικής ενέργειας 32 GW κάθε χρόνο, προκειμένου να επιτύχουν το στόχο του 40% της παραγωγής τους να προέρχεται από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας έως το 2030.

Σύμφωνα με τη μελέτη, η εγκατεστημένη ισχύς θα αυξάνεται κατά μέσο όρο κατά 17,6 GW ετησίως μεταξύ 2022 και 2026, χάρη στην ανάπτυξη έργων αιολικών πάρκων τόσο στην ξηρά όσο και στη θάλασσα. Έτσι, αναμένεται ότι, στο τέλος αυτής της περιόδου, η αιολική παραγωγή θα έχει αυξηθεί κατά 89 GW, φτάνοντας στο συνολικό αριθμό των 341 GW εγκατεστημένης ισχύος σε ολόκληρη την ήπειρο.

Η Γερμανία, η Ισπανία και το Ηνωμένο Βασίλειο θα συνεχίσουν να είναι οι χώρες με τον μεγαλύτερο στόλο ανεμογεννητριών στην Ευρώπη. Η ανάπτυξη θα επιβραδυνθεί στη Γερμανία και θα επιταχυνθεί στην Ισπανία και τη Σουηδία.

Ομοίως, οι ανεμογεννήτριες θα γίνονται όλο και πιο ισχυρές. Μέχρι το 2022, οι χερσαίες ανεμογεννήτριες αναμένεται να ξεπεράσουν τα 4 MW, ενώ τα υπεράκτια αιολικά πάρκα θα μπορούσαν να έχουν ισχύ άνω των 8 MW.

Εκτός από την έκθεση WindEurope που αναφέρθηκε παραπάνω, υπάρχουν και άλλες μελέτες που ενισχύουν την ιδέα ότι η αιολική ενέργεια θα διαδραματίσει βασικό ρόλο στην απαραίτητη ενεργειακή μετάβαση για την αντιμετώπιση των προκλήσεων της κλιματικής αλλαγής και την παραγωγή καθαρής ενέργειας.

Για παράδειγμα, το Ινστιτούτο Τεχνολογίας της Μασαχουσέτης, που θεωρείται ένα από τα καλύτερα φυτώρια ιδεών στον κόσμο, σε

συνεργασία με άλλα ιδρύματα, έχει αναπτύξει μια μελέτη .που επισημαίνει ποιοι θα είναι οι βασικοί παράγοντες για την ηλεκτρική ενέργεια του μέλλοντος : η απαλλαγή από τις ανθρακούχες εκπομπές, η καταπολέμηση της κλιματικής αλλαγής, οι νέες τεχνολογίες, η ψηφιοποίηση και η πρόοδος των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας είναι μόνο μερικά από αυτά. Επιβεβαιώθηκε επίσης από το Πανεπιστήμιο του Στάνφορντ: ένας κόσμος που θα οδηγείται 100% από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, κυρίως αιολική και ηλιακή, θα είναι δυνατός μέχρι το 2050.[1]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΓΕΝΙΚΑ ΓΙΑ ΤΑ ΥΠΕΡΑΚΤΙΑ ΑΙΟΛΙΚΑ ΠΑΡΚΑ

Η υπεράκτια αιολική ενέργεια είναι η καθαρή και ανανεώσιμη ενέργεια που λαμβάνεται με την εκμετάλλευση της δύναμης του ανέμου που παράγεται στην ανοιχτή θάλασσα, όπου φθάνει σε υψηλότερη και πιο σταθερή ταχύτητα από ό,τι στην ξηρά λόγω της απουσίας φραγμών. Προκειμένου να αξιοποιηθεί στο έπακρο αυτός ο πόρος, εγκαθίστανται μεγάλες κατασκευές που βρίσκονται στον βυθό της θάλασσας και είναι εξοπλισμένες με τις πιο πρόσφατες τεχνικές καινοτομίες. [2]



Εικόνα 2.1 Ένα υπεράκτιο αιολικό πάρκο(<https://www.iberdrola.com/sustainability/how-does-offshore-wind-energy-work>)

2.1 Πλεονεκτήματα της υπεράκτιας αιολικής ενέργειας

- Η υπεράκτια αιολική ενέργεια είναι ανανεώσιμη, απεριόριστη και μη ρυπογόνος.
- Υπάρχουν περισσότεροι αιολικοί πόροι υπεράκτιων παρά χερσαίων (έως και διπλάσιοι από ό,τι σε ένα μεσαίο χερσαίο αιολικό πάρκο).
- Όταν βρίσκεται στην υπεράκτια, η οπτική και ακουστική επίδραση είναι πολύ μικρή, επομένως μπορούν να

χρησιμοποιηθούν πολύ μεγαλύτερες περιοχές. Χάρη σε αυτό, τα υπεράκτια αιολικά πάρκα έχουν συνήθως αρκετές εκατοντάδες μεγαβάτ εγκατεστημένης ισχύος.

- Η ευκολία της θαλάσσιας μεταφοράς, η οποία έχει λίγους περιορισμούς όσον αφορά το φορτίο και τις διαστάσεις σε σύγκριση με τις χερσαίες μεταφορές, επέτρεψε στις υπεράκτιες ανεμογεννήτριες να φτάσουν σε πολύ μεγαλύτερες χωρητικότητες και μεγέθη μονάδων από τις χερσαίες ανεμογεννήτριες.[2]

2.2 Εγκατάσταση υπεράκτιων αιολικών πάρκων

Επί του παρόντος, τα υπεράκτια αιολικά πάρκα βρίσκονται σε ρηχά νερά (έως 60 μέτρα βάθος) και μακριά από τις ακτές, τις θαλάσσιες διαδρομές κυκλοφορίας, τις στρατηγικές ναυτικές εγκαταστάσεις και τους χώρους οικολογικού ενδιαφέροντος.

Σύμφωνα με την τελευταία έκθεση της WindEurope, της Ευρωπαϊκής Ένωσης Αιολικής Ενέργειας, *Offshore wind in Europe: trends and key statistics 2018*, που δημοσιεύτηκε τον Φεβρουάριο του 2019, τα ευρωπαϊκά αγροκτήματα έχουν μέσο βάθος 27,1 μέτρων (λίγο λιγότερο από το προηγούμενο έτος) και σε μέση απόσταση 33 km από την ακτή, σε αντίθεση με τον μέσο όρο των 41 km που καταγράφηκε στην έκθεση του 2017. Το Ηνωμένο Βασίλειο είναι η χώρα με την υψηλότερη εγκατεστημένη ισχύ στην Ευρώπη, με συνολικά το 44% του συνόλου των υπεράκτιων εγκαταστάσεων αιολικής ενέργειας (σε MW). Ακολουθούν η Γερμανία (34%), η Δανία (7%), το Βέλγιο (6,4%) και η Ολλανδία (6%). [2]

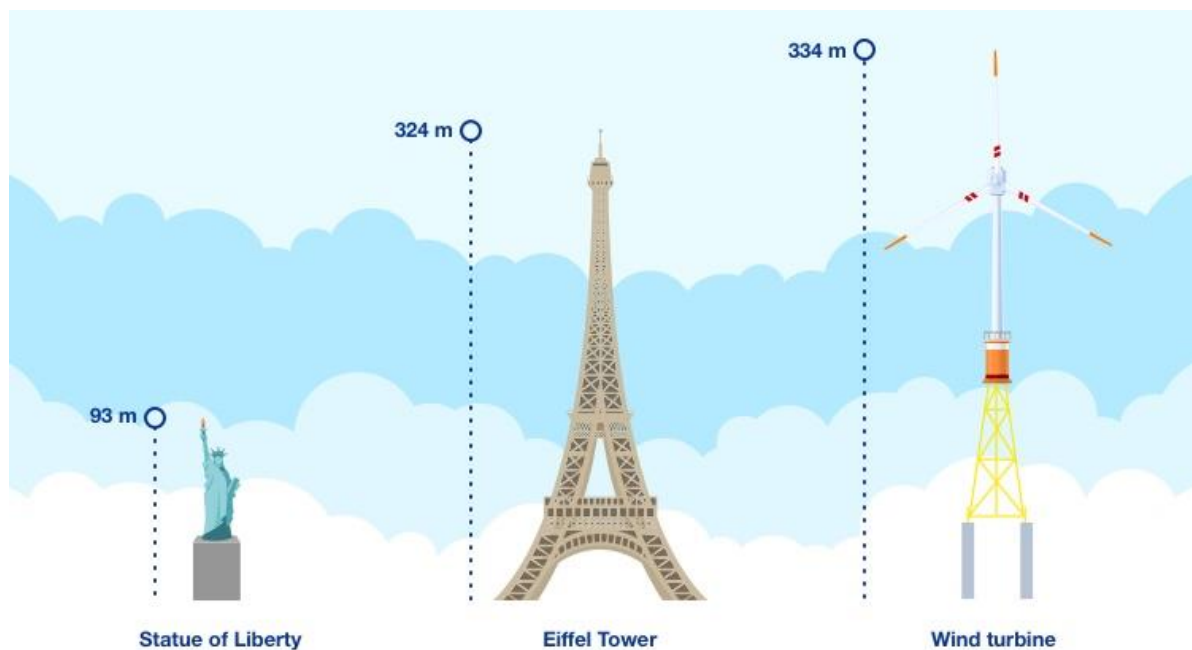
2.3 Εξέλιξη των υπεράκτιων ανεμογεννητριών

Η χωρητικότητα των ανεμογεννητριών στην ανοιχτή θάλασσα έχει αυξηθεί σημαντικά την τελευταία δεκαετία, σύμφωνα με την WindEurope *Offshore wind in Europe: οι τάσεις και τα βασικά στατιστικά στοιχεία* αναφέρουν το 2018 και φέτος άρχισαν να υλοποιούνται ανεμογεννήτριες με ισχύ σχεδόν 9 MW. Η μελέτη επισημαίνει ότι η μέση ισχύς των υπό κατασκευή υπεράκτιων αιολικών

πάρκων στην Ευρώπη είναι 561 MW, ενώ το 2018 η μέση ισχύς ανά ανεμογεννήτρια ήταν 6,8 MW, 15% μεγαλύτερη από το 2017. Μόνο μεταξύ 2007 και 2017, η ισχύς των ανεμογεννητριών αυξήθηκε κατά 102%.



Εικόνα 2.2 Υπεράκτιο αιολικό πάρκο Wikinger (Γερμανία), σε λειτουργία από τα τέλη του 2017. (<https://www.iberdrola.com/sustainability/how-does-offshore-wind-energy-work>)



Εικόνα 2.3 Σύγκριση ανεμογεννητριών (<https://www.iberdrola.com/sustainability/how-does-offshore-wind-energy-work>)

Η ανάπτυξη νέων τύπων θεμελίων που επιτρέπουν σε αυτές τις εγκαταστάσεις να βρίσκονται πιο μακριά από την ακτή και η συνεχής εξέλιξη στην ισχύ και το σχεδιασμό των ανεμογεννητριών είναι μερικές μόνο από την πρόοδο που θα δούμε τα επόμενα χρόνια. Αυτές οι εξελίξεις αναμφίβολα προμηνύουν ένα μακρύ και ευοίωνο μέλλον για τα υπεράκτια αιολικά πάρκα.[2]

2.4 Έρευνες υπεράκτιων τοποθεσιών

Ακριβώς όπως θα ερευνούσε κάποιος τη γη και το έδαφος πριν χτίσει ένα σπίτι, οι προγραμματιστές υπεράκτιων αιολικών ερευνούν τον βυθό και τη γεωλογία στις περιοχές μίσθωσης και κατά μήκος των προτεινόμενων διαδρομών καλωδίων, πριν κατασκευάσουν ένα υπεράκτιο αιολικό πάρκο.[3]

2.4.1 Έρευνες στο βυθό

Πριν από την κατασκευή, οι υπεράκτιες έρευνες χρησιμοποιούν μια ποικιλία μικρών μεσαίων και μεγαλύτερων υπεράκτιων σκαφών για να χαρτογραφηθεί ο υποθαλάσσιος βιότοπος προκειμένου να ελαχιστοποιηθούν τυχόν επιπτώσεις που μπορεί να έχει το έργο στη θαλάσσια ζωή.

Δύο από τους πιο συνηθισμένους τύπους δραστηριοτήτων έρευνας πριν από την κατασκευή είναι οι γεωφυσικές και οι γεωτεχνικές έρευνες. Και οι δύο έρευνες απαιτούν άδεια και έγκριση από ομοσπονδιακούς ή/και κρατικούς φορείς με βάση την τοποθεσία. Κατά τη διεξαγωγή εργασιών υπεράκτιων ερευνών, λαμβάνουμε τα ακόλουθα προστατευτικά μέτρα:

- **Ταχύτητες σκαφών:** Για να μειωθεί ο κίνδυνος αλληλεπίδρασης με θαλάσσια θηλαστικά και προστατευόμενα είδη, τα σκάφη έρευνας λειτουργούν με περιορισμό ταχύτητας 10 κόμβων κατά τη διέλευση και τις επιχειρήσεις.
- **Παρατηρητές επί του σκάφους:** Κατά τη διεξαγωγή εργασιών έρευνας, όλα τα πλοία έρευνας έχουν εκπαιδευτεί παρατηρητές

επί του σκάφους για να παρακολουθούν θαλάσσια θηλαστικά και προστατευόμενα είδη 24 ώρες την ημέρα. Οι παρατηρητές είναι εξοπλισμένοι με οπτική τεχνολογία, όπως η θερμική απεικόνιση, που ενισχύει την ικανότητα ανίχνευσης, ειδικά σε περιόδους χαμηλής ορατότητας. Οι παρατηρητές αναζητούν φάλαινες, δελφίνια, άλλα θαλάσσια θηλαστικά και προστατευόμενα είδη στην περιοχή του σκάφους. Με βάση τα ευρήματα, μπορεί να ζητηθεί αλλαγή πορείας του πάρκου με στόχο την αποφυγή όχλησης της θαλάσσιας ζωής λόγω εμποδίων ή θορύβου

2.4.2 Υπεράκτιες γεωφυσικές έρευνες

Διεξάγονται γεωφυσικές έρευνες υψηλής ανάλυσης (high-resolution geophysical HRG) για να χαρτογραφηθεί ο πυθμένας της θάλασσας και η γεωλογία κάτω από αυτή και για να εντοπισθούν αρχαιολογικοί πόροι και συντρίμια που αφήνουν άλλοι χρήστες των ωκεανών.

Ο εξοπλισμός που χρησιμοποιείται κατά τη διάρκεια αυτών των ερευνών περιλαμβάνει τόσο ακουστικό εξοπλισμό που χρησιμοποιεί ποικίλες συχνότητες ήχου όσο και παθητικούς αισθητήρες που δεν εκπέμπουν ήχο. Οι αισθητήρες είτε τοποθετούνται στο κύτος είτε ρυμουλκούνται πάνω από τον πυθμένα της θάλασσας πίσω από το σκάφος. Κατά τη διάρκεια των εργασιών, τα σκάφη συνήθως κινούνται με χαμηλή ταχύτητα, μεταξύ 2-4 κόμβων (3-5 mph) διέλευσης κατά μήκος ευθειών γραμμών έρευνας.

ανέμου λειτουργούν σε συχνότητες ανιχνεύσιμες από θαλάσσια θηλαστικά. Δεν αναμένεται τραυματισμός θαλάσσιων θηλαστικών ή προστατευόμενων ειδών από αυτές τις πηγές HRG, καθώς ο ήχος έχει αποδειχθεί ότι μειώνεται γρήγορα με την απόσταση



Εικόνα 2.4 Έρευνα HRG (<https://us.orsted.com/renewable-energy-solutions/offshore-wind/offshore-wind-farm-construction/offshore-site-investigations>)

Μόνο μερικές πηγές HRG που χρησιμοποιούνται σε υπεράκτιες έρευνες. Οι πηγές που χρησιμοποιούνται στον υπεράκτιο άνεμο που είναι ανιχνεύσιμες παράγουν πολύ χαμηλότερη ενέργεια και ταξιδεύουν πολύ μικρότερες αποστάσεις από το σκάφος από αυτές που χρησιμοποιούνται από τη βιομηχανία πετρελαίου και φυσικού αερίου για εξερεύνηση μίλια κάτω από τον πυθμένα της θάλασσας.

Οι όροι «σεισμικές δοκιμές» και «σεισμικές ανατινάξεις» αναφέρονται σε ισχυρές πηγές ήχου, όπως αεροβόλα που χρησιμοποιούνται στην εξερεύνηση πετρελαίου και φυσικού αερίου. Δεν χρησιμοποιούνται σε έρευνες υπεράκτιων ανέμων HRG.[3]

2.4.3 Υπεράκτιες Γεωτεχνικές Έρευνες Χώρου

Οι Γεωτεχνικές Έρευνες Τοποθεσιών (Geotechnical Site Investigations - GTSIs) συλλέγουν δεδομένα από έως και 60 μέτρα κάτω από τον πυθμένα της θάλασσας για να αξιολογήσουν τη μηχανική συμπεριφορά του εδάφους και των πετρωμάτων. Λαμβάνονται μετρήσεις των ιδιοτήτων του εδάφους, μαζί με φυσικά δείγματα εδάφους και πετρωμάτων, τα οποία στέλνονται για εργαστηριακές δοκιμές στην ξηρά. Τα GTSI δεν παράγουν σημαντικό ακουστικό θόρυβο και

επομένως δεν αποτελούν κίνδυνο για τα θαλάσσια θηλαστικά. Κατά την λήψη GTSI, το σκάφος παραμένει ακίνητο επί τόπου.[3]



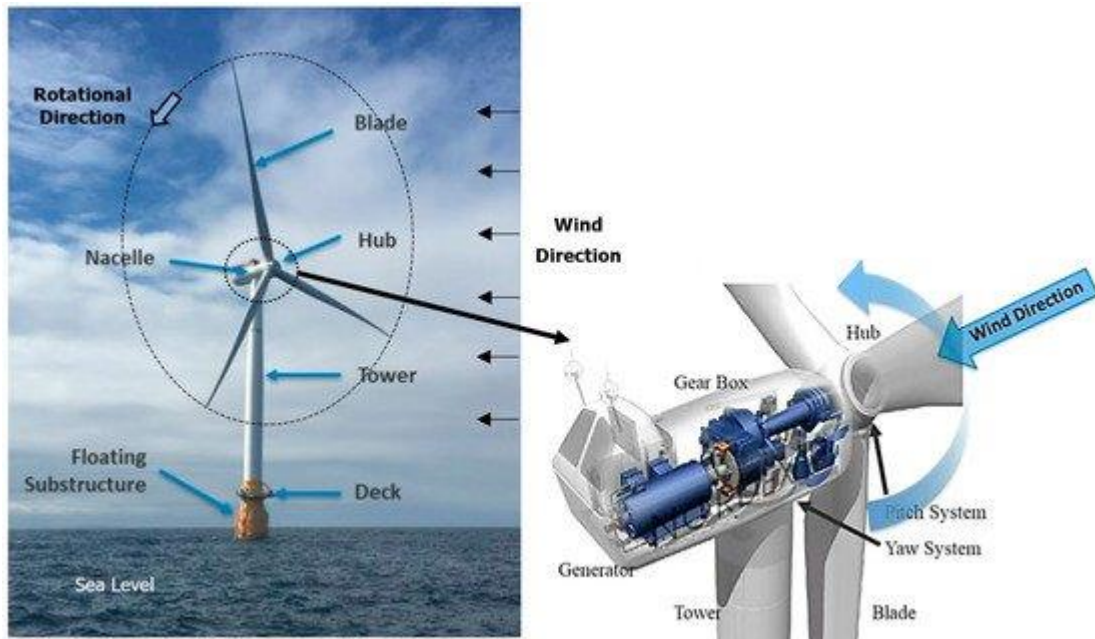
Εικόνα 2.5 Έρευνα GTSI (<https://us.orsted.com/renewable-energy-solutions/offshore-wind/offshore-wind-farm-construction/offshore-site-investigations>)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΣΤΗΡΙΞΗΣ ΥΠΕΡΑΚΤΙΩΝ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ

3.1 Εισαγωγή

Οι υπεράκτιες ανεμογεννήτριες προσφέρουν σημαντικά οφέλη σε σχέση με τις χερσαίες ανεμογεννήτριες. Ένα από τα βασικά οφέλη που προσφέρουν οι υπεράκτιες ανεμογεννήτριες είναι το συγκριτικά μεγαλύτερο μέγεθός τους, το οποίο μεταφράζεται σε χαμηλότερο κόστος παραγωγής ενέργειας. Άλλα οφέλη περιλαμβάνουν χαμηλότερες περιβαλλοντικές επιπτώσεις, περισσότερους διαθέσιμους πόρους αιολικής ενέργειας κ.λπ. Η κύρια δομή των υπεράκτιων ανεμογεννητριών δεν διαφέρει πολύ από τις χερσαίες ανεμογεννήτριες, όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.1. Οι περισσότερες εμπορικές υπεράκτιες ανεμογεννήτριες είναι μηχανές οριζόντιου άξονα με 3 πτερύγια αντίθετα ανέμου, όπου τα εξαρτήματα πάνω από το επίπεδο της θάλασσας περιλαμβάνουν πτερύγια δημιουργίας ροπής συνδεδεμένα με την πλήμνη, η οποία αποτελεί αναπόσπαστο μέρος της ατράκτου. Στο αυλάκι βρίσκεται ο κύριος άξονας, το κιβώτιο ταχυτήτων (αν υπάρχει) και η γεννήτρια. Τα καλώδια τροφοδοσίας περνούν από την ατράκτο μέσω του πύργου προς τη δομή στήριξης, η οποία έχει ένα εξωτερικό κατάστρωμα για να έχουν πρόσβαση οι χειριστές στον πύργο και μέχρι το ατράκτο. Αξίζει να σημειωθεί ότι για την υπεράκτια αιολική αξιοποίηση, προτιμώνται οι ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα έναντι των ανεμογεννητριών κατακόρυφου άξονα λόγω της υψηλότερης ικανότητας αιολικής αξιοποίησης (μεγαλύτερο εμπορικά προσιτό μέγεθος).[4]



Εικόνα 3.1 Μια τυπική υπεράκτια ανεμογεννήτρια (<https://www.iberdrola.com/sustainability/how-does-offshore-wind-energy-work>)

Η κύρια διαφορά μεταξύ χερσαίων και υπεράκτιων ανεμογεννητριών είναι ο τρόπος με τον οποίο υποστηρίζονται δομικά οι υπεράκτιες ανεμογεννήτριες

3.2 Τύποι θεμελίων υπεράκτιων ανεμογεννητριών

Η επιλογή θεμελίωσης για αυτές τις υπεράκτιες κατασκευές διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στη συνολική ιδέα σχεδιασμού για υπεράκτια αιολικά πάρκα. Υπάρχουν σημαντικές οικονομικές επιπτώσεις που συνδέονται με τις επιλογές που γίνονται. Συνήθως, τα θεμέλια αντιπροσωπεύουν το 16 έως 34% του συνολικού κόστους, ανάλογα με την τοποθεσία και το μέγεθος του αιολικού πάρκου.

Λόγω του τεράστιου μεγέθους ενός αιολικού πάρκου, θα υπάρχουν ποικίλες συνθήκες βυθού, συμπεριλαμβανομένου του βάθους του νερού και της απόστασης από την ακτή. Ως αποτέλεσμα, τα φορτία στα θεμέλια θα αλλάξουν και ιδανικά, ο καλύτερος σχεδιασμός θα είναι ο σχεδιασμός κάθε θεμελίωσης ξεχωριστά, γεγονός που θα οδηγήσει σε ένα προσαρμοσμένο σχέδιο θεμελίωσης για κάθε θέση στροβίλου. Ωστόσο, από οικονομική άποψη, είναι επιθυμητό να χρησιμοποιηθούν μόνο μερικοί τύποι θεμελίωσης για μείωση του κόστους και βελτίωση

της απόδοσης, επειδή η διαδικασία κατασκευής και εγκατάστασης μπορεί να πραγματοποιηθεί χρησιμοποιώντας την ίδια διάταξη εγκατάστασης.[5]

Επιπλέον, πολλές άλλες πτυχές πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά την επιλογή και το σχεδιασμό της βάσης για μια συγκεκριμένη τοποθεσία. Περιλαμβάνουν:

- Εύκολη εγκατάσταση κάτω από τις περισσότερες καιρικές συνθήκες
- Διαφορετικές συνθήκες βυθού
- Θέματα εγκατάστασης, συμπεριλαμβανομένων σκαφών και απαιτούμενου εξοπλισμού
- Τοπικοί περιβαλλοντικοί κανονισμοί (θόρυβος)

Ένας γενικός οδηγός για τους τύπους θεμελίωσης όσον αφορά το βάθος νερού θα μπορούσε να περιγραφεί ως εξής:

- Συνήθως, για παραθαλάσσιες περιοχές όπου το WD είναι μικρότερο από 30 μέτρα, μια βάση μονού πυλώνα θα ήταν η κατάλληλη και οικονομική επιλογή
- Προχωρώντας περαιτέρω και βαθύτερα μέχρι τα 60 μέτρα WD, θα ήταν κατάλληλες κατασκευές ικριώματος σε κουβάδες αναρρόφησης ή θεμέλια πασσάλων
- Σε βάθος μεγαλύτερο από 60 μέτρα τοποθετούνται κανονικά υπεράκτια πλωτά συστήματα, όπως η πλατφόρμα ποδιών τάνυσης, η ράβδος ή η ημι-υποβρύχια

Καθένας από τους τύπους θεμελίωσης θέτει διαφορετικά σεί τεχνικών προκλήσεων.

Στα σταθερά θεμέλια πρέπει να λαμβάνονται υπόψη τα παρακάτω:

- Σχεδιασμός πασσάλων για να αντέχει το περιβάλλον και τα δυναμικά φορτία από στροβιλισμούς
- Πολλαπλές συνθήκες σχεδιασμού βυθού που καλύπτουν το αιολικό πάρκο, τα δυναμικά φορτία και την εγκατάσταση

Τα πλωτά θεμέλια πρέπει να σχεδιάζονται για:

- Ασφαλή λειτουργία κάτω από ακραίες κινήσεις βήματος, κύλισης και ανύψωσης
- Σχεδιασμός σταθερότητας και δυναμική σύζευξη μεταφορικών και περιστροφικών κινήσεων πλατφόρμας και κινήσεων στροβίλου
- Δυναμική συμπεριφορά των καλωδίων πρόσδεσης
- Πλευστότητα για υποστήριξη πλήρους βάρους τουρμπίνας, πύργου και πλατφόρμας[5]



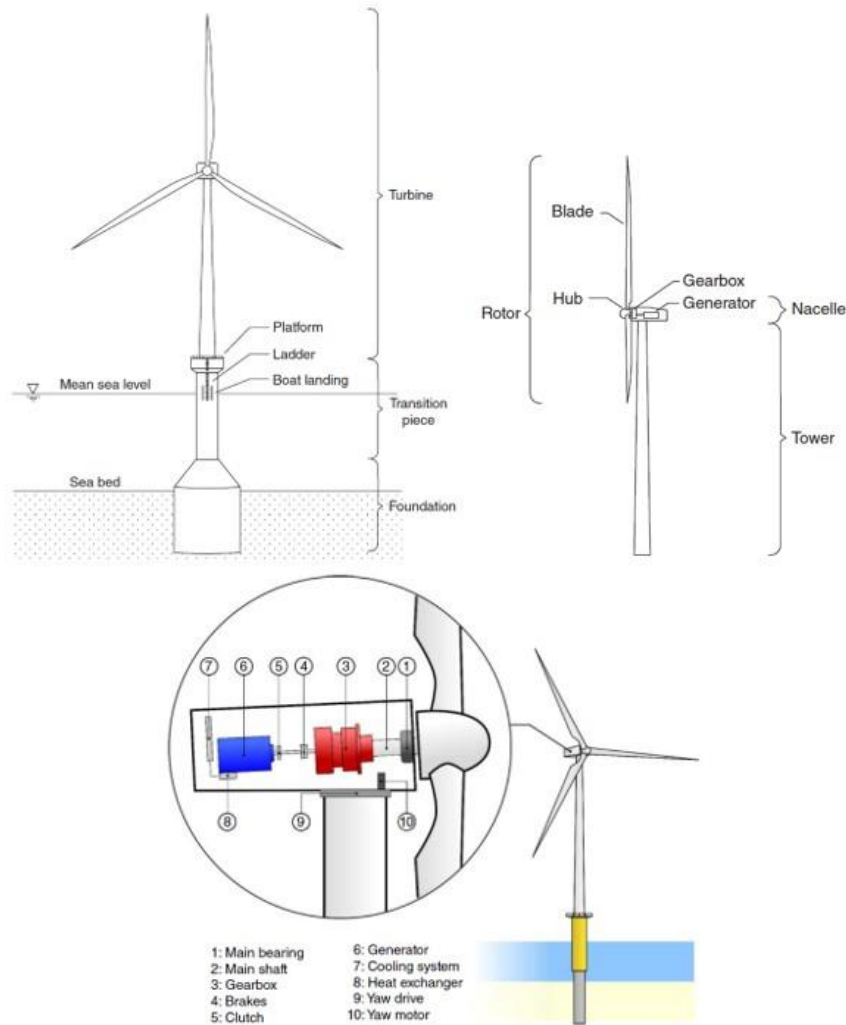
Εικόνα 3.2 Τύποι θεμελίων ανεμογεννητριών (<https://www.iberdrola.com/sustainability/how-does-offshore-wind-energy-work>)

3.3 Σχεδιασμός θεμελίωσης για υπεράκτιες ανεμογεννήτριες

Ο σχεδιασμός υπεράκτιων αιολικών κατασκευών ακολούθησε τον σχεδιασμό υπεράκτιων κατασκευών πετρελαίου και φυσικού αερίου. Στόχος της θεμελίωσης είναι η μεταφορά των φορτίων της υποδομής και της ανωδομής με ασφάλεια στο έδαφος. Τα φορτία στη θεμελίωση εξαρτώνται από το σύστημα θεμελίωσης.

Ενώ μπορεί να εφαρμοστεί η εμπειρία που αποκτήθηκε από τις υπεράκτιες δραστηριότητες πετρελαίου και φυσικού αερίου, είναι σημαντικό να επισημανθούν οι σημαντικές διαφορές μεταξύ αυτών των δύο τύπων κατασκευών. Αυτές οι διαφορές αξίζουν ιδιαίτερης προσοχής. Είναι πλέον ευρέως αποδεκτό ότι οι υπεράκτιες κατασκευές ανεμογεννητριών είναι μοναδικές στα χαρακτηριστικά τους. Η πιο σημαντική διαφορά σε σχέση με τις εγκαταστάσεις πετρελαίου και φυσικού αερίου βρίσκεται σε μεγάλης κλίμακας κατασκευές υπεράκτιων ανεμογεννητριών όπου μια βαριά περιστρεφόμενη μάζα τοποθετείται στην κορυφή του λεπτού πύργου. Οι δομές υπεράκτιων ανεμογεννητριών είναι δυναμικά ευαίσθητες, επειδή οι φυσικές συχνότητες αυτών των λεπτών κατασκευών είναι πολύ κοντά στις συχνότητες διέγερσης που επιβάλλονται από τα περιβαλλοντικά και μηχανικά φορτία.

Για τυπικούς στρόβιλους 3,6 MW, η πρώτη φυσική συχνότητα (ιδιοσυχνότητα) ολόκληρου του συστήματος είναι κοντά στα 0,3 Hz και για την αντίστοιχη τουρμπίνα 8 MW είναι 0,22 Hz. Η συχνότητα του ρότορα της ανεμογεννήτριας είναι στην περιοχή των 0,2 Hz. Τα τυπικά πτερύγια ανεμογεννητριών ζυγίζουν 30 τόνους, και ως αποτέλεσμα, 90 τόνοι περιστρέφονται στην κορυφή του πύργου. Από την άλλη πλευρά, οι φυσικές συχνότητες των υπεράκτιων πλατφορμών πετρελαίου και φυσικού αερίου είναι περισσότερες από 0,6 Hz και η πιο σημαντική κυκλική/δυναμική φόρτιση είναι το κύμα με συχνότητες 0,1 Hz (τυπική τιμή της Βόρειας Θάλασσας). Οι συχνότητες εξαναγκασμού δεν είναι πολύ κοντά στις φυσικές συχνότητες, καθιστώντας τις πλατφόρμες πετρελαίου και φυσικού αερίου λιγότερο ευαίσθητες στη δυναμική.[4]



Εικόνα 3.3 Τυπικά εξαρτήματα μιας υπεράκτιας αιολικής κατασκευής με θεμελίωση μονού πυλώνα (<https://www.iberdrola.com/sustainability/how-does-offshore-wind-energy-work>)

Η παραπάνω εικόνα δείχνει μια τυπική ανεμογεννήτρια που στηρίζεται σε μονό πυλώνα και μια σταθερή κατασκευή υπεράκτιου μανδύα που υποστηρίζεται από πασσάλους. Είναι πολύ σαφές ότι ο λόγος του οριζόντιου φορτίου προς το κατακόρυφο φορτίο είναι πολύ υψηλός στις υπεράκτιες ανεμογεννήτριες σε σύγκριση με δομές σταθερού μανδύα. Ως αποτέλεσμα, το μονόπυλο είναι ένα θεμέλιο που αντέχει τη στιγμή.

Ακολουθούν τα φορτία που πρέπει να ληφθούν υπόψη για τον σχεδιασμό υπεράκτιων ανεμογεννητριών:[5]

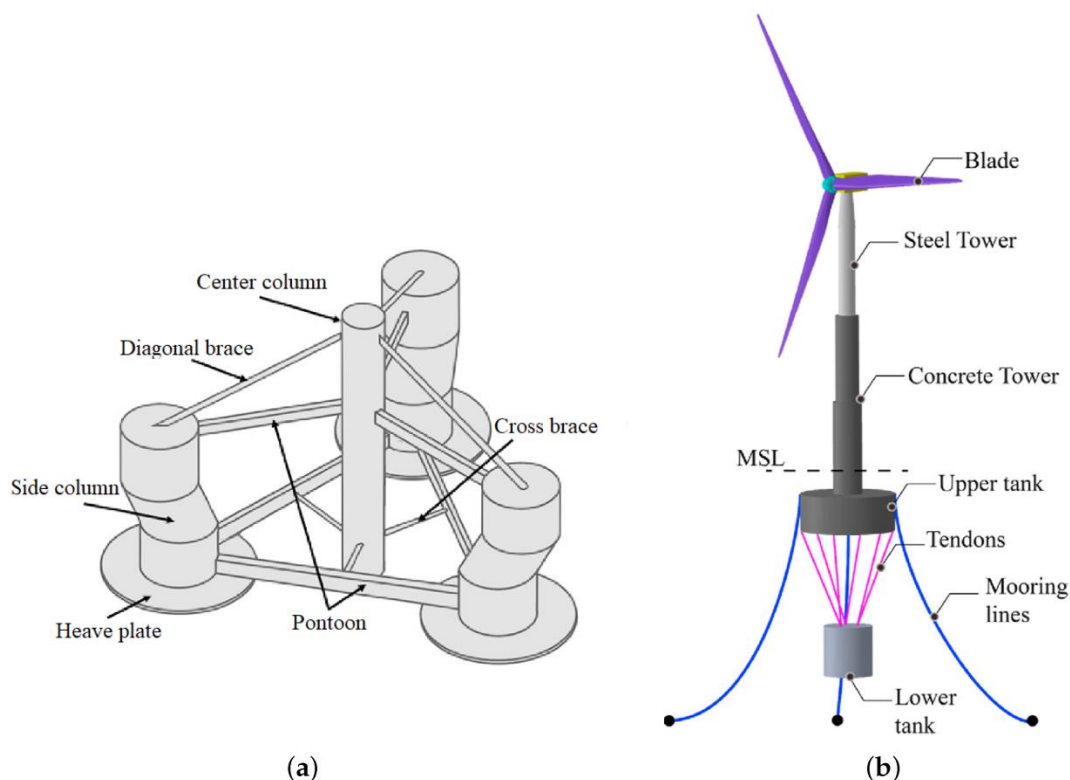
- Λειτουργικά φορτία ως αποτέλεσμα της λειτουργίας και του ελέγχου της ανεμογεννήτριας

- Αδράνεια και βαρυτικά φορτία (στατικά και δυναμικά φορτία) που δρουν στην ανεμογεννήτρια, που προκύπτουν από κραδασμούς, περιστροφή, βαρύτητα και σεισμική δραστηριότητα
- Αεροδυναμικά φορτία που προκαλούνται από τη ροή αέρα και την αλληλεπίδρασή του με τα ακίνητα και κινούμενα μέρη των ανεμογεννητριών
- Υδροδυναμικά φορτία που προκαλούνται από τη ροή του νερού και την αλληλεπίδρασή του με τις δομές θεμελίωσης (συμπεριλαμβανομένων των φορτίων κυμάτων, των φορτίων θραύσης κύματος και των φορτίων θαλάσσιου ρεύματος)
- Υδροστατικά φορτία που μπορεί να ισχύουν για κατασκευές τύπου κύτους
- Φορτία θαλάσσιου πάγου
- Σεισμικά φορτία
- Κρουστικά φορτία σκάφους

3.4 Νέα σχέδια πλατφόρμας

Τα τελευταία χρόνια, οι ερευνητές έχουν προτείνει νέες πλωτές πλατφόρμες που εκμεταλλεύονται τα δυνατά σημεία των υφιστάμενων ιδεών και τις συνδυάζουν για να επιτύχουν πιο οικονομικά σχέδια. Η ιδέα των πλήρως υποβρύχιων πλατφορμών χρησιμοποιεί κεκλιμένες πλευρικές στήλες που χρησιμοποιούνται για την αύξηση του επιπέδου νερού και συνεπώς της ροπής αδράνειας ελαχιστοποιώντας ταυτόχρονα το βύθισμα και την τάνυση στη δομή στήριξης. Μια πλήρως βυθιζόμενη πλωτή πλατφόρμα είναι παρόμοια με μια ημι-βυθιζόμενη, αλλά τα μεσαία μέρη των στηλών είναι κεκλιμένα προς τα έξω, ενώ το πάνω και το κάτω μέρος παραμένουν όρθια για να συνδεθούν με την κεντρική κολόνα μέσω ενός σετ εγκάρσιων στηριγμάτων και πλωτών. Αυτή η αλλαγή μειώνει το κέντρο βάρους της πλατφόρμας, ενώ ταυτόχρονα αυξάνει τη ροπή αδράνειας από την οποία οι ημι-βυθιζόμενες πλατφόρμες επιτυγχάνουν σταθερότητα. Η ανάλυση δυναμικής απόκρισης πλήρως υποβρύχιων πλατφορμών δείχνει ότι αυτός ο τύπος πλωτής πλατφόρμας έχει σχετικά καλύτερη συνολική δυναμική

απόδοση και το κόστος είναι 12,8 % χαμηλότερο από αυτό μιας ημι-βυθισμένης πλατφόρμας.



Εικόνα 3.4 Νέες ιδέες σχεδίασης πλατφόρμας FOWT. (α) Αρχική σχεδίαση πλήρως βυθισμένης πλατφόρμας (β) Έννοια σχεδιασμού πλατφόρμας TELWIND [32] .(<https://encyclopedia.pub/entry/39927>)

Το TELWIND είναι μια νέα πλωτή πλατφόρμα πολλαπλών σωμάτων που αναπτύχθηκε από την ESTEYCO SAP με μια πλατιά κυλινδρική πλατφόρμα και ένα κυλινδρικό σώμα έρματος που αιωρείται από έξι τένοντες . Η ράβδος του TELWIND αποτελείται από έναν τηλεσκοπικό πύργο και δύο ανεξάρτητα σώματα από σκυρόδεμα που συνδέονται με τένοντες ανάρτησης (Εικόνα 3.4). Το πάνω σώμα από σκυρόδεμα διατηρεί την άνωση, ενώ το κάτω σώμα από σκυρόδεμα χρησιμεύει ως σώμα έρματος. Ο τηλεσκοπικός πύργος επιτρέπει την υγρή ρυμούλκηση του προσυναρμολογημένου συστήματος, καθώς η αναδίπλωση στον πύργο παρέχει μια πιο σταθερή διαμόρφωση για τη δομή. Αυτή η πλωτή πλατφόρμα έχει σχεδιαστεί για να αντέχει στις δύσκολες μετωκεανικές συνθήκες. Από αυτή την άποψη, η δυναμική απόδοση του TELWIND δοκιμάστηκε τόσο πειραματικά όσο και αριθμητικά κάτω από διάφορες περιπτώσεις φορτίου ανέμου και κυμάτων. Για

αυτήν την πλωτή πλατφόρμα πολλαπλών σωμάτων, η δυναμική συμπεριφορά βρέθηκε να είναι ιδιαίτερα ευαίσθητη στην κατάσταση της υγείας των τενόντων.[6]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΥΠΕΡΑΚΤΙΟΥ ΑΙΟΛΙΚΟΥ ΠΑΡΚΟΥ

4.1 Εισαγωγή

Η αξιοποίηση της υπεράκτιας αιολικής ενέργειας απαιτεί την εγκατάσταση εντυπωσιακών υπεράκτιων αιολικών πάρκων με μεγάλες ανεμογεννήτριες εξοπλισμένες με την τελευταία λέξη της τεχνολογίας. Ο σχεδιασμός, η κατασκευή, η μεταφορά και η εγκατάσταση τέτοιων μεγα-κατασκευών υπεράκτιων είναι μια τεχνική πρόκληση, εξαιρετικά εκλεπτυσμένη με εμπειρία και απαιτεί μια διαδικασία που διαρκεί αρκετά χρόνια.[7]



Εικόνα 4.1 Σκάφος υποστήριξης ανοικτής θαλάσσης (ξενοδοχειακό πλοίο) που συνδέεται με διαδρόμους με τον ηλεκτρικό υποσταθμό του υπεράκτιου αιολικού πάρκου Wikingen (Γερμανία) κατά τη διάρκεια ελιγμών θέσης σε λειτουργία (<https://www.iberdrola.com/about-us/our-activity/offshore-wind-energy/offshore-wind-park-construction>)



Εικόνα 4.2 Υπεράκτια εγκατάσταση του ηλεκτρικού υποσταθμού του υπεράκτιου αιολικού πάρκου Saint-Brieuc (Γαλλία), βάρους περίπου 3.400 τόνων (<https://www.iberdrola.com/about-us/our-activity/offshore-wind-energy/offshore-wind-park-construction>)



Εικόνα 4.3 Άποψη από την κορυφή μιας υπεράκτιας τουρμπίνας ενός πλοίου εγκατάστασης που μεταφέρει σωρούς ανεμογεννητριών <https://www.iberdrola.com/about-us/our-activity/offshore-wind-energy/offshore-wind-park-construction>



Εικόνα 4.4 Τελευταία βάση που τοποθετήθηκε από το σκάφος εγκατάστασης Bokalift στο υπεράκτιο αιολικό πάρκο East Anglia One στη Βόρεια Θάλασσα (Ηνωμένο Βασίλειο) <https://www.iberdrola.com/about-us/our-activity/offshore-wind-energy/offshore-wind-park-construction>

Η κατασκευή των υπεράκτιων αιολικών πάρκων ξεκινά στη στεριά, πολλά χιλιόμετρα μακριά από το γεωγραφικό σημείο όπου θα εγκατασταθούν και αρκετά χρόνια πριν από την προγραμματισμένη ημερομηνία έναρξης λειτουργίας. Αυτές οι κατασκευές μεγάλης κλίμακας, σχεδιασμένες να εκμεταλλεύονται την αιολική ενέργεια από τη θάλασσα, έχουν ορισμένα πλεονεκτήματα έναντι των χερσαίων αιολικών πάρκων : μεγαλύτερη ταχύτητα ανέμου καθώς δεν συναντούν φυσικά εμπόδια, μικρότερη οπτική και ακουστική επίδραση καθώς βρίσκονται μακριά από την ακτή και λιγότερα περιορισμοί ως προς το μέγεθος των εξαρτημάτων χάρη στη θαλάσσια μεταφορά, μεταξύ άλλων. Ταυτόχρονα, οι υπεράκτιες αιολικές εγκαταστάσεις αποτελούν μια συναρπαστική τεχνική και μηχανική πρόκληση όσον αφορά την εγκατάσταση, τη θέση σε λειτουργία και τη συντήρηση, λόγω των ακραίων καιρικών συνθηκών που μπορεί να εκδηλωθούν στην ανοιχτή θάλασσα. [7]

4.2 Δομή ενός υπεράκτιου αιολικού πάρκου



Εικόνα 4.5 Δομή υπεράκτιου αιολικού πάρκου <https://www.iberdrola.com/about-us/our-activity/offshore-wind-energy/offshore-wind-park-construction>

- Στρατηγική τοποθεσία: Τα πάρκα βρίσκονται μακριά από δρόμους θαλάσσιας κυκλοφορίας, στρατιωτικές ζώνες και περιοχές οικολογικού ενδιαφέροντος.
- Υπεράκτιο αιολικό πάρκο: Βρίσκονται σε περιοχές με βάθος έως και 60 m - βαθύτερο εάν χρησιμοποιηθούν πλωτές βάσεις - και μπορούν να καλύψουν έκταση έως και 300 km².
- Υπεράκτιος ηλεκτρικός υποσταθμός: Όταν τα αιολικά πάρκα βρίσκονται πέρα από μια ορισμένη απόσταση από την ακτή, είναι απαραίτητο να εγκατασταθεί ένας υποσταθμός στη θάλασσα για

την αύξηση της τάσης προκειμένου να αποφευχθούν απώλειες ενέργειας.

- Σκάφη εγκατάστασης: Μεταφέρουν τα εξαρτήματα των ανεμογεννητριών - καθώς και τα θεμέλια και τα καλώδια - προσυναρμολογημένα όπου είναι δυνατόν, και περιέχουν τους γερανούς για εγκατάσταση στη θάλασσα
- Κτίριο λειτουργίας και συντήρησης: Βρίσκεται σε ένα κοντινό βιομηχανικό λιμάνι και εξυπηρετεί το υπεράκτιο αιολικό πάρκο καθ' όλη τη διάρκεια της ζωής του.
- Ηλεκτρικός υποσταθμός ξηράς: Μετατρέπει την ηλεκτρική ενέργεια, που μεταφέρεται μέσω υποθαλάσσιου καλωδίου, σε επίπεδα τάσης κατάλληλα για μεταφορά στο επίγειο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας.[7]

4.3 Στάδια κατασκευής αιολικού πάρκου

4.3.1 Φάση ανάπτυξης

Η πρώτη φάση κατά την εξέταση της κατασκευής ενός νέου υπεράκτιου αιολικού πάρκου είναι η φάση ανάπτυξης. Αυτή η περίοδος περιλαμβάνει, μεταξύ άλλων, διαδικασίες για τη διασφάλιση της βιωσιμότητας, της κερδοφορίας και του θετικού αντίκτυπου του έργου μας ενόψει της διαδικασίας υποβολής προσφορών, καθώς και της διαχείρισης των διαφόρων εμπλεκόμενων παραγόντων ή ενδιαφερομένων.

Αυτό περιλαμβάνει περιβαλλοντικό σχεδιασμό, σχεδιασμό τοποθεσίας, αξιολόγηση του αιολικού δυναμικού, αναθεώρηση τεχνολογίας και επιλογή εξαρτημάτων. Γίνονται επίσης μελέτες σκοπιμότητας και λαμβάνονται οι σχετικές άδειες, όπως άδειες σύνδεσης στο δίκτυο και οικοδομικές άδειες .

4.3.2 Προκατασκευαστική φάση

Αφού ολοκληρωθεί επιτυχώς η φάση ανάπτυξης, ακολουθεί η φάση προκατασκευής, η οποία περιλαμβάνει τον λεπτομερή σχεδιασμό της εγκατάστασης και τη στρατηγική κατασκευής της , καθώς και την

ανάπτυξη του επιλεγμένου χώρου. Στο σημείο αυτό καθορίζονται οι απαραίτητες συμβάσεις που θα απαιτήσουν διαφορετικούς προμηθευτές, κυρίως για την κατασκευή και εγκατάσταση των πολλαπλών εξαρτημάτων του υποσταθμού, των ανεμογεννητριών, των θεμελίων - ή πλωτών πλατφορμών για αιολικά πάρκα σε μεγαλύτερα βάθη - καθώς και τα καλώδια, σε διαφορετικά εργασιακά κέντρα (όπως ναυπηγεία) σε διάφορες χώρες. Τέλος, πραγματοποιείται και το οικονομικό κλείσιμο του έργου.[7]

4.3.3 Φάση κατασκευής

Η τελική φάση είναι τεράστια πρόκληση, καθώς πραγματοποιείται κυρίως offshore. Αποτελείται από την κατασκευή, εγκατάσταση, θέση σε λειτουργία και σύνδεση στο δίκτυο της εγκατάστασης ανανεώσιμων πηγών ενέργειας . Μερικά από τα σημαντικότερα ορόσημα της κατασκευής είναι:

- Η κατασκευή των διαφόρων εξαρτημάτων, μερικά από τα οποία είναι πολύ μεγάλα, σε ποικίλα εξειδικευμένα βιομηχανικά περιβάλλοντα και η μεταφορά τους στο καθορισμένο κέντρο Logistics κατά τη φάση κατασκευής.
- Οδήγηση των πασσάλων ως σημεία αγκύρωσης για τη στήριξη των θεμελίων των ανεμογεννητριών (που μπορεί να είναι ικριώματα ή μονόστηλοι).
- Τοποθέτηση των υποβρυχίων καλωδίων , που περιλαμβάνει καλώδια διαφορετικών διατομών, που συνδέουν τους στρόβιλους μεταξύ τους και τους στρόβιλους με τον υποσταθμό ηλεκτρικής ενέργειας στη θάλασσα.
- Η τοποθέτηση στα θεμέλια των μεταβατικών τεμαχίων και των πλήρων στροβίλων . Τα μεταβατικά κομμάτια ενώνουν το χιτώνιο ή το σωρό με τον πύργο της τουρμπίνας της ανεμογεννήτριας και η λειτουργία τους είναι να διασφαλίζουν την κατακόρυφότητα της και να στεγάζουν τον βοηθητικό εξοπλισμό της.

Συμπεριλαμβανομένων των υποβρύχιων και ορατών τμημάτων, μια ανεμογεννήτρια μπορεί να έχει ύψος πάνω από 270 μέτρα.

- Τοποθέτηση των μπουφάν και των πλαισίων ή επιφανειών που απαρτίζουν τον θαλάσσιο ηλεκτρικό υποσταθμό . Αυτό μπορεί να ζυγίζει περισσότερους από 8.000 τόνους στο σύνολό του.
- Στην περίπτωση των πλωτών αιολικών πάρκων , οι πλατφόρμες κατασκευάζονται στη στεριά, είτε σε ναυπηγεία είτε σε στρατόπεδα και εκτοξεύονται στη θάλασσα χρησιμοποιώντας ράμπες εκτόξευσης, ημι-βυθιζόμενες φορτηγίδες, ξηρές αποβάθρες ή πλωτές αποβάθρες. Μόλις εκτοξευθεί στο λιμάνι, η ανεμογεννήτρια συναρμολογείται. Η μονάδα που αποτελείται από τον πλωτήρα και την ανεμογεννήτρια ρυμουλκείται στην υπεράκτια τοποθεσία όπου συνδέονται τα αγκυροβόλια και τα καλώδια.
- Ενεργοποίηση του θαλάσσιου υποσταθμού για θέση σε λειτουργία . Εντατική εργασία για την οποία μερικές φορές στήνεται πλοίο-ξενοδοχείο δίπλα στην πλατφόρμα για να στεγάσει υπαλλήλους που εργάζονται σε βάρδιες.
- Τοποθέτηση του υπεράκτιου καλωδίου εξαγωγής στην ξηρά και η επακόλουθη σύνδεσή του από την ακτή στον χερσαίο υποσταθμό.[7]

4.4 Κατασκευή υπεράκτιου αιολικού πάρκου

4.4.1 Απαιτούμενος χρόνος για την κατασκευή

Ενώ η κατασκευή ενός χερσαίου αιολικού πάρκου μπορεί να διαρκέσει από 4 έως 8 χρόνια, λαμβάνοντας υπόψη όλες τις φάσεις της διαδικασίας, η κατασκευή ενός υπεράκτιου αιολικού πάρκου εκτιμάται ότι θα διαρκέσει μεταξύ 7 και 11 ετών . Τρία έως πέντε χρόνια είναι αφιερωμένα στη φάση ανάπτυξης, ένα έως τρία στην προκατασκευαστική φάση και δύο έως τέσσερα χρόνια στην κατασκευή.

4.4.2 Τοποθεσία εγκατάστασης αιολικού πάρκου

Τα υπεράκτια αιολικά πάρκα με σταθερά θεμέλια εγκαθίστανται σε ρηχά νερά - γενικά βάθους μεταξύ 30 και 60 μέτρων -, μακριά από την ακτή - όλο και περισσότερο σε απόσταση 70 χιλιομέτρων - και λαμβάνοντας υπόψη ότι οι τοποθεσίες τους δεν παρεμβαίνουν σε τακτικά δρομολόγια πλοίων, στρατηγικές εγκαταστάσεις ή περιοχές οικολογικού ενδιαφέροντος . Ένα υπεράκτιο αιολικό πάρκο στο σύνολό του μπορεί να καλύψει έκταση μεγαλύτερη από 300 km² (ισοδύναμη με το αρχιπέλαγος της Μάλτας).

Η αδιατάρακτη ροή των υπεράκτιων αιολικών έχει οδηγήσει σε ραγδαία αυξανόμενο ενδιαφέρον για αυτήν την τεχνολογία και την πρόοδο της μηχανικής στην περιοχή. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τα υπεράκτια αιολικά πάρκα να σχεδιάζονται ώστε να είναι όλο και μεγαλύτερα, να βρίσκονται όλο και πιο μακριά και σε όλο και πιο βαθιά νερά . Επιπλέον, ο αριθμός και η περιοχή των τοποθεσιών για τα χερσαία αιολικά πάρκα γίνεται όλο και πιο περιορισμένη[7]

4.5 Διαφορές με τη χωροθέτηση πλωτών υπεράκτιων αιολικών πάρκων

Αρχικά, το μεγαλύτερο δυναμικό των πλωτών υπεράκτιων αιολικών πάρκων βρισκόταν στο να μπορούν να τα εγκαταστήσουν σε βάθη που δεν μπορούσαν να φτάσουν τα σταθερά θεμέλια , για τεχνικούς λόγους ή λόγους κερδοφορίας. Ωστόσο, η γραμμή που διαιρεί το όριο βάθους μεταξύ ενός τύπου αιολικού πάρκου και του άλλου γίνεται σταδιακά θολή.

Από τη μια πλευρά, το βάθος των αιολικών πάρκων με σταθερές θεμελιώσεις αυξάνεται συνεχώς. Από την άλλη πλευρά, δοκιμάζονται νέες διαμορφώσεις που επιτρέπουν την εγκατάσταση πλωτών πλατφορμών σε ρηχά νερά , ως λύση για χώρους όπου οι συνθήκες του βυθού δεν ευνοούν την εγκατάσταση σταθερών εξέδρων.

4.6 Προκλήσεις κατασκευής αιολικών υπεράκτιων πάρκων

4.6.1 Θαλάσσιες μεταφορές

Η μεταφορά των εξαρτημάτων για τη συναρμολόγηση ενός αιολικού πάρκου δια θαλάσσης -και όχι οδικώς- σημαίνει ότι οι διαστάσεις των

εξαρτημάτων είναι μεγαλύτερες χωρίς δυνατότητα σύγκρουσης με άλλα στοιχεία. Ωστόσο, η μεταφορά τόσο μεγάλων και βαρέων στοιχείων διαθάλασσης απαιτεί εξειδικευμένα σκάφη για υπεράκτιες αιολικές επιχειρήσεις και μεγάλη ακρίβεια και εμπειρία κατά τη φόρτωσή τους.

Ακριβώς λόγω του μεγέθους των εξαρτημάτων που φτάνουν στη θύρα εγκατάστασης (ή στη θύρα λειτουργίας, αν όχι στη θύρα εγκατάστασης) ενός αιολικού πάρκου, αυτά τα μέρη δεν αποθηκεύονται πάντα στην ξηρά, αλλά μπορεί να παραμείνουν σε πλωτή αποθήκευση σε φορηγίδες. Τα σκάφη εγκατάστασης μεταφέρουν τα εξαρτήματα στην τοποθεσία του αιολικού πάρκου, προσυναρμολογημένα όποτε είναι δυνατόν - για παράδειγμα, το αυλάκι με τα τρία πτερύγια της ανεμογεννήτριας - για να ελαχιστοποιηθεί η υπεράκτια εργασία.

Επιπλέον, για να εγκαταστήσουν πασσάλους, μεταβατικά τεμάχια και στρόβιλους, αυτά τα πλοία εκτείνουν εκεί τα κάτω πόδια μέχρι να ακουμπήσουν σταθερά στον βυθό και να μπορούν να δουλέψουν με τον γερανό που είναι ενσωματωμένος στην τοποθέτηση των διαφορετικών στοιχείων.

4.6.2 Συντονισμός ομάδας

Η κατασκευή οποιουδήποτε υπεράκτιου αιολικού πάρκου είναι ένα πολυεθνικό και πολυπολιτισμικό **έργο**, στο οποίο μπορούν να συμμετέχουν περισσότερα από 1.500 άτομα από δεκάδες διαφορετικές εταιρείες. Όλα αυτά, σε συνδυασμό με γενικά αυστηρές προθεσμίες, υπογραμμίζουν τη ζωτική σημασία του καλού συντονισμού μεταξύ των ομάδων για να διασφαλιστεί ότι όλα κυλούν ομαλά, με την ασφάλεια στη θάλασσα και στην ανοικτή θάλασσα πάντα πρώτη προτεραιότητα.

4.6.3 Φροντίδα για τα θαλάσσια οικοσυστήματα

Η νομοθεσία που σχετίζεται με θέματα **διατήρησης της φύσης**, όπως ο έλεγχος του θορύβου κατά τις διαδικασίες γεώτρησης, ποικίλλει ανάλογα με τη χώρα στην οποία είναι εγκατεστημένο ένα αιολικό πάρκο. Άλλα σχετικά σημεία είναι η μετανάστευση πτηνών και ορισμένων ειδών ψαριών, για τα οποία χρησιμοποιούμε συστήματα παρακολούθησης, προκειμένου να αποτρέψουμε και να αποφύγουμε

τυχόν παρεμβολές κατά τη λειτουργία ή την εγκατάσταση, λαμβάνοντας υπόψη τις περιόδους φωλεοποίησης ή μετανάστευσης.[7]

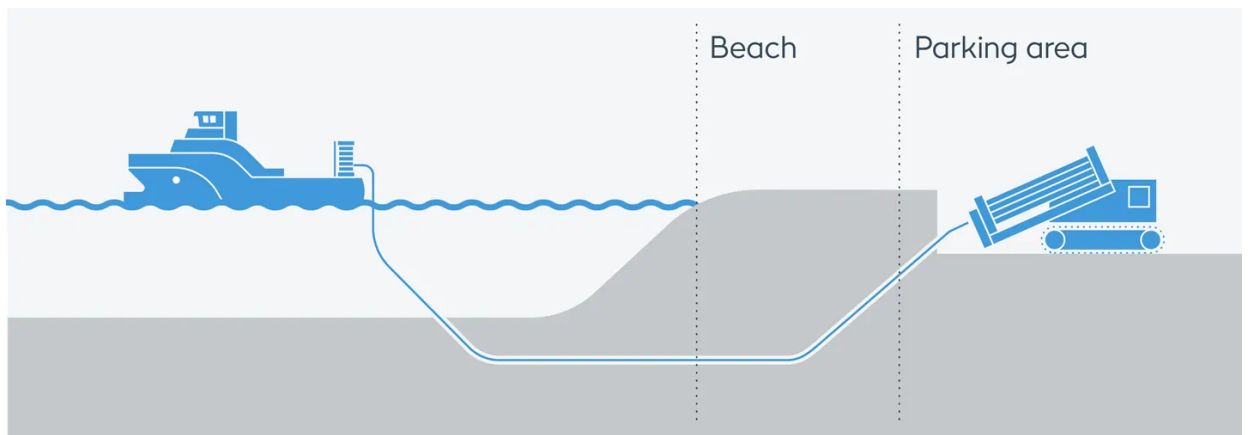
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΙΚΗ ΔΙΑΣΥΝΔΕΣΗ ΥΠΕΡΑΚΤΙΟΥ ΑΙΟΛΙΚΟΥ ΠΑΡΚΟΥ ΜΕ ΤΟ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟ ΔΙΚΤΥΟ

5.1 Τα στάδια που ακολουθούνται για τη διασύνδεση του πάρκου με το δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας

Για να πραγματοποιήσουμε τη σύνδεση του καλωδίου από τη θάλασσα στην ακτή, χρησιμοποιούμε είτε ανοιχτή κοπή τάφρου είτε οριζόντια κατευθυντική γεώτρηση για να τοποθετήσουμε το καλώδιο εξαγωγής κάτω από τον βυθό και την παραλία. Η κατευθυντική γεώτρηση μπορεί να επεκταθεί οπουδήποτε από μισό μίλι έως ένα μίλι στη θάλασσα.

5.1.1 Βήμα 1: Από τη θάλασσα στην ακτή χρησιμοποιώντας κατευθυντική διάτρηση



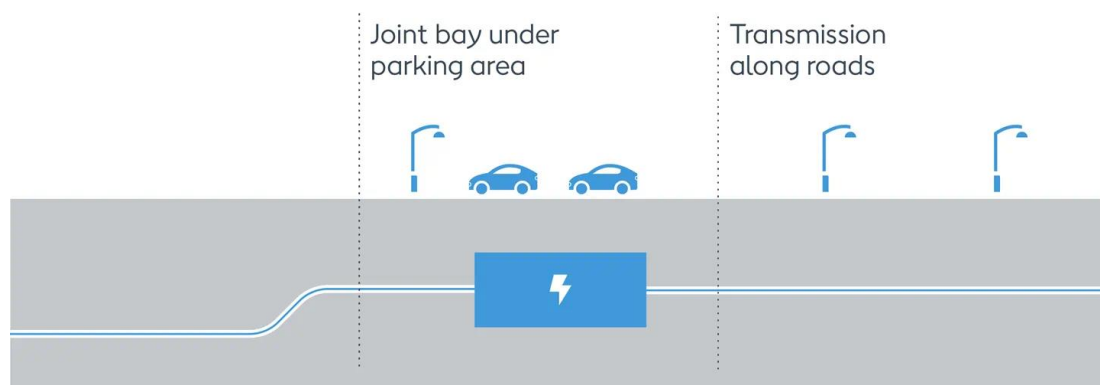
Εικόνα 5.1 Κατευθυντική διάτρηση (<https://us.orsted.com/renewable-energy-solutions/offshore-wind/offshore-wind-farm-construction/bringing-wind-power-ashore>)

Το πρώτο στάδιο είναι να περάσει ένα καλώδιο από τον πυθμένα της θάλασσας σε μια τοποθεσία σε μικρή απόσταση στο εσωτερικό. Για να τοποθετηθεί αυτό το καλώδιο στη θέση του, ανοίγεται μια τρύπα χρησιμοποιώντας μια τεχνική που ονομάζεται οριζόντια κατευθυντική διάτρηση.

Η τρύπα ξεκινά από ένα μικρό λάκκο πίσω από τους αμμόλοφους ή μια παραλία και στη συνέχεια επεκτείνεται χρησιμοποιώντας μια μηχανή γεωτρήσεων. Η γεώτρηση μπορεί να μετρηθεί και να ελεγχθεί με ακρίβεια, διατηρώντας την αρκετά κάτω από την επιφάνεια μέχρι η κεφαλή του τρυπανιού να βγει από τον βυθό της θάλασσας 600μέτρα έως 1500μέτρα έξω στη θάλασσα.

Στη συνέχεια, η κεφαλή του τρυπανιού τραβιέται προς τα πίσω μέσα από την τρύπα, φέρνοντας μαζί της έναν σωλήνα από ένα δοχείο εγκατάστασης καλωδίου. Μετά από αυτό, ένα καλώδιο μπορεί να τροφοδοτηθεί μέσω του σωλήνα, δημιουργώντας μια ασφαλή διαδρομή για την αιολική ενέργεια που θα βγει στην ξηρά.[8]

5.1.2 Βήμα 2: Το σημείο σύνδεσης/μετάβασης



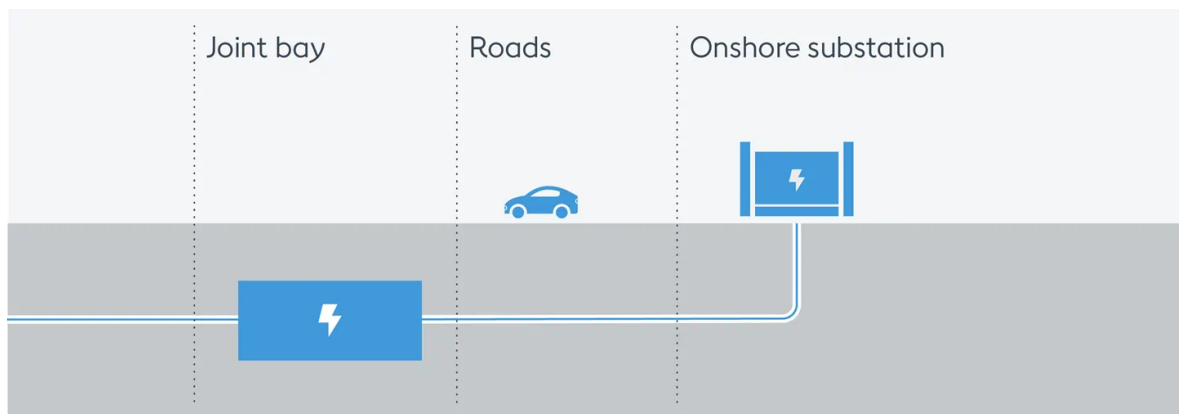
Εικόνα 5.2 Το σημείο σύνδεσης/μετάβασης του αιολικού πάρκου ε τη στεριά (<https://us.orsted.com/renewable-energy-solutions/offshore-wind/offshore-wind-farm-construction/bringing-wind-power-ashore>)

Η τοποθεσία του λάκκου γεώτρησης γίνεται από την αρχή του σημείου μετάβασης. Αυτό είναι ένα υπόγειο κουτί από σκυρόδεμα όπου το καλώδιο από κάτω από την παραλία ενώνεται με ένα καλώδιο που οδηγεί στον χερσαίο υποσταθμό πιο μέσα στην ενδοχώρα.

Η αρχή της μετάβασης κατασκευάζεται συνήθως σε χώρο στάθμευσης, τόσο για εύκολη πρόσβαση, όσο και για να μην προκαλείται καμία ζημιά στο φυσικό περιβάλλον.

Δεδομένου ότι στεγάζεται υπόγεια, το σημείο μετάβασης είναι σχεδόν αόρατο, εκτός από ορισμένα καλύμματα φρεατίων σε περίπτωση που χρειαστεί πρόσβαση στο μέλλον. Επιστρέφεται πάντα ο χώρος στάθμευσης στην ίδια ή καλύτερη κατάσταση από την αρχική, επομένως οποιαδήποτε διακοπή κατά την κατασκευή είναι μόνο προσωρινή.[8]

5.1.3 Βήμα 3: Υπόγεια μετάδοση στον υποσταθμό



Εικόνα 5.3 Υπόγεια όδευση του καλωδίου προς τον υποσταθμό (<https://us.orsted.com/renewable-energy-solutions/offshore-wind/offshore-wind-farm-construction/bringing-wind-power-ashore>)

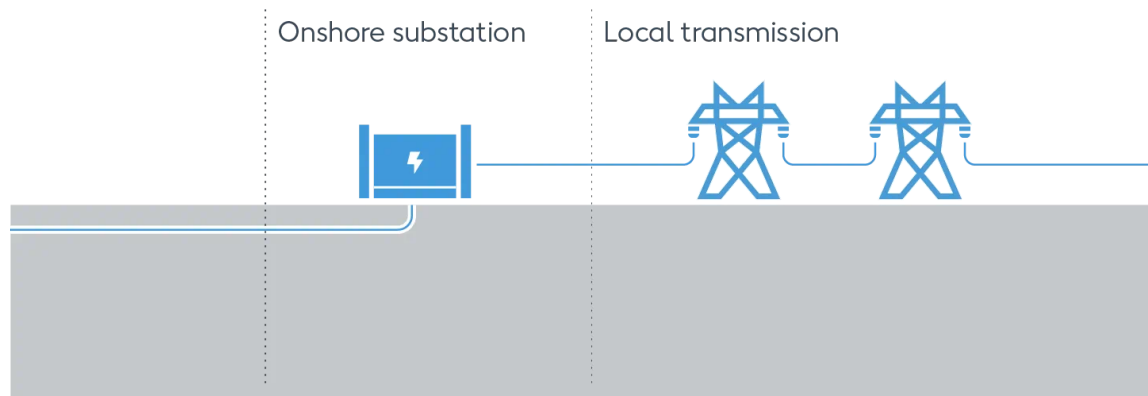
Ο χερσαίος υποσταθμός μετατρέπει την ισχύ που παράγεται από ένα υπεράκτιο αιολικό πάρκο στη σωστή τάση πριν την παραδώσει στο τοπικό δίκτυο, μετά την οποία μπορεί να σταλεί σε χιλιάδες νοικοκυριά και επιχειρήσεις.

Πριν από την κατασκευή ενός χερσαίου υποσταθμού, διενεργούνται εκτενείς περιβαλλοντικές, τεχνικές έρευνες και έρευνες σκοπιμότητας για να προσδιορισθεί η καλύτερη τοποθεσία για κατασκευή – διατηρώντας παράλληλα την περιβαλλοντική διαταραχή στο απόλυτο ελάχιστο..

Σε ό,τι αφορά την υπόγεια μετάδοση, ο χερσαίος υποσταθμός συνδέεται με τον σύνδεσμο μετάβασης (στο βήμα 2) μέσω μιας γραμμής μετάβασης (που περιέχει σωληνώσεις και καλώδια).

Ανάλογα με τη θέση του υποσταθμού, η γραμμή μπορεί να έχει μήκος αρκετά χιλιόμετρα. Και, όπως και με άλλους σωλήνες και καλώδια κοινής ωφέλειας, τείνει να τρέχει κατά μήκος κάτω από έναν δρόμο. [8]

5.1.4 Βήμα 4: Σύνδεση στον υποσταθμό



Εικόνα 5.4 Σύνδεση με τον υποσταθμό (<https://us.orsted.com/renewable-energy-solutions/offshore-wind/offshore-wind-farm-construction/bringing-wind-power-ashore>)

Το τελευταίο στάδιο για τη μεταφορά ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές από το υπεράκτιο αιολικό πάρκο στο δίκτυο διανομής είναι ο υποσταθμός. Εδώ βρίσκεται η φυσική σύνδεση και το ρεύμα μετατρέπεται στη σωστή τάση και συχνότητα που θα τροφοδοτηθεί στο δίκτυο.

Οι υποσταθμοί μπορεί να διαφέρουν σημαντικά ως προς τον τύπο, το μέγεθος και τη διάταξη. Συνήθως, μια τοποθεσία υποσταθμού θα καταλαμβάνει μια έκταση έξι έως εννέα στρεμμάτων, που αποτελείται από δύο έως οκτώ κτίρια, ύψους έως 15 μέτρων.

5.2 . Τεχνικά χαρακτηριστικά τεχνολογιών διασύνδεσης του πάρκου στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας

Ως σημαντικό μέρος της αιολικής ενέργειας, η υπεράκτια αιολική ενέργεια έχει τα πλεονεκτήματα της ισχυρής σταθερότητας, της μεγάλης ταχύτητας ανέμου, της υψηλής απόδοσης παραγωγής ενέργειας, της μη κατοχής γης και του μικρού θορύβου και της οπτικής επίδρασης. Από τώρα έως το 2050, η υπεράκτια αιολική ενέργεια θα γίνει ο πυρήνας της παγκόσμιας απαλλαγής από τις ανθρακούχες εκπομπές, αλλάζοντας το σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας από άποψη υποδομής και ευελιξίας και βελτιώνοντας την παραγωγή πράσινων καυσίμων όπως το υδρογόνο. Προς το παρόν, οι τεχνολογίες ολοκλήρωσης υπεράκτιας αιολικής ενέργειας που έχουν εφαρμοστεί με επιτυχία περιλαμβάνουν τη συμβατική μετάδοση εναλλασσόμενου ρεύματος συχνότητας ισχύος και τη μετάδοση υψηλής τάσης DC (HVDC) με βάση μετατροπέα πολλαπλών επιπέδων (MMC). Η συμβατική μετάδοση AC με συχνότητα ισχύος περιορίζεται από την απόσταση μετάδοσης, ενώ η μετάδοση HVDC που βασίζεται σε MMC περιορίζεται από το υψηλό κόστος επένδυσης και συντήρησης.

Από μακροσκοπική άποψη, υπάρχουν πολλές πιθανές τεχνολογίες για την ενοποίηση υπεράκτιας αιολικής ενέργειας, οι οποίες μπορούν να χωριστούν σύμφωνα με τρία τεχνικά χαρακτηριστικά: [9]

(1) Το πρώτο τεχνικό χαρακτηριστικό περιγράφει εάν η υπεράκτια ανεμογεννήτρια έχει μια ανεξάρτητη ικανότητα σχηματισμού πλέγματος, η οποία χωρίζεται σε δύο τύπους: την ανεμογεννήτρια που ακολουθεί το πλέγμα και την ανεμογεννήτρια που σχηματίζει πλέγμα.

(2) Το δεύτερο τεχνικό χαρακτηριστικό περιγράφει τα χαρακτηριστικά συχνότητας της τάσης και του ρεύματος εξόδου της υπεράκτιας ανεμογεννήτριας, η οποία μπορεί να είναι τεσσάρων τύπων: DC, εναλλασσόμενου ρεύματος χαμηλής συχνότητας, εναλλασσόμενου ρεύματος συχνότητας ισχύος ή εναλλασσόμενου ρεύματος μέσης συχνότητας.

(3) Το τρίτο τεχνικό χαρακτηριστικό περιγράφει τους τρόπους μετάδοσης του υπεράκτιου κυρίου καναλιού μετάδοσης υψηλής τάσης, το οποίο μπορεί να είναι τριών τύπων: DC, AC χαμηλής συχνότητας ή AC με συχνότητα ισχύος.

Σύμφωνα με τα παραπάνω τρία τεχνικά χαρακτηριστικά, μπορεί να επιτευχθεί μια μεγάλη ποικιλία σχεδίων ενοποίησης υπεράκτιας αιολικής ενέργειας. Ωστόσο, από την άποψη του κόστους, της αξιοπιστίας και της τεχνολογικής ωριμότητας, οκτώ τυπικά σχήματα, όπως παρατίθενται στον Πίνακα 1, έχουν προφανή χαρακτηριστικά. Στη συνέχεια εξετάζονται τα τεχνικά χαρακτηριστικά, τα βασικά προβλήματα και η τεχνική ωριμότητα αυτών των οκτώ υπεράκτιων προγραμμάτων παροχής αιολικής ενέργειας και προτείνεται η προτεινόμενη κατεύθυνση ανάπτυξης.

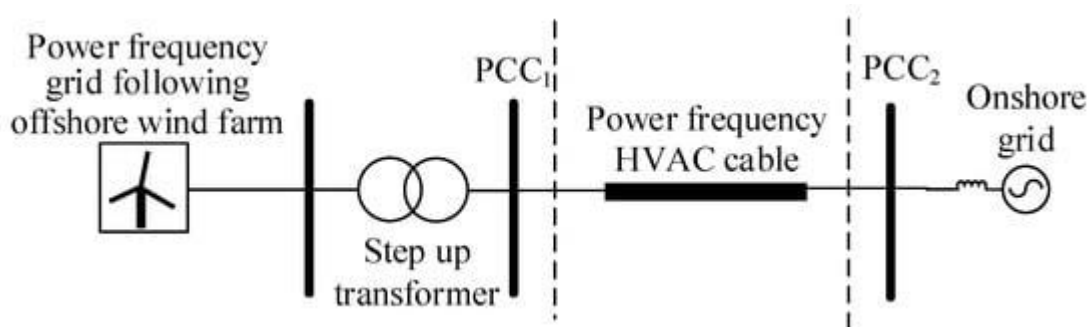
Πίνακας 5-1 Σύνοψη οκτώ τυπικών σχημάτων διασύνδεσης[9]

Σχήμα 1	Σχέδιο μετάδοσης εναλλασσόμενου ρεύματος συχνότητας ισχύος για υπεράκτια αιολικά πάρκα που ακολουθούν το δίκτυο συχνοτήτων ισχύος
Σχήμα 2	Σχέδιο μετάδοσης εναλλασσόμενου ρεύματος χαμηλής συχνότητας για υπεράκτια αιολικά πάρκα που ακολουθούν δίκτυο χαμηλής συχνότητας
Σχήμα 3	Σχέδιο μετάδοσης HVDC για υπεράκτια αιολικά πάρκα μετά από δίκτυο συχνοτήτων ισχύος
Σχήμα 4	Σχέδιο μετάδοσης HVDC για υπεράκτια αιολικά πάρκα που ακολουθούν δίκτυο μεσαίας συχνότητας
Σχήμα 5	Σχέδιο μετάδοσης εναλλασσόμενου ρεύματος χαμηλής συχνότητας για υπεράκτια αιολικά πάρκα που σχηματίζουν δίκτυο χαμηλής συχνότητας
Σχήμα 6	Σχέδιο μετάδοσης HVDC για υπεράκτια αιολικά πάρκα που σχηματίζουν δίκτυο μεσαίας συχνότητας
Σχήμα 7	Σχέδιο μετάδοσης HVDC με μετασχηματιστή ανόδου DC για ανεμογεννήτρια θύρας DC συνδεδεμένη παράλληλα
Σχήμα 8	Σχέδιο μετάδοσης HVDC για ανεμογεννήτρια θύρας DC συνδεδεμένη σε σειρά

5.3 Τυπικά Σχέδια και Χαρακτηριστικά Υπεράκτιας Μεταφοράς Αιολικής Ενέργειας

5.3.1 Σχέδιο μετάδοσης εναλλασσόμενου ρεύματος συχνότητας ρεύματος για ηλεκτρικό δίκτυο συχνοτήτων που ακολουθούν υπεράκτια αιολικά πάρκα

Η τυπική δομή του σχήματος μετάδοσης εναλλασσόμενου ρεύματος συχνότητας ισχύος για υπεράκτια αιολικά πάρκα που ακολουθούν το δίκτυο συχνοτήτων ισχύος φαίνεται στο Σχήμα 5.1 , το οποίο είναι ένα ευρέως διαδεδομένο σχέδιο ολοκλήρωσης υπεράκτιας αιολικής ενέργειας. Τα βασικά χαρακτηριστικά αυτού του σχήματος περιλαμβάνουν: [9]



Σχήμα 5.1 Σχέδιο μετάδοσης εναλλασσόμενου ρεύματος συχνότητας ισχύος για υπεράκτια αιολικά πάρκα που ακολουθούν το δίκτυο συχνοτήτων ισχύος. (<https://www.mdpi.com/1996-1073/16/2/658>)

(1) Η ανεμογεννήτρια υιοθετεί τον έλεγχο που ακολουθεί το δίκτυο και παρακολουθεί τη γωνία φάσης και τη συχνότητα της τάσης του διαύλου AC στην έξοδο της ανεμογεννήτριας με βάση τον βρόχο κλειδώματος φάσης (Phase Locked Loop - PLL) . Η τεχνολογία της ανεμογεννήτριας που ακολουθεί το δίκτυο είναι ώριμη και η αντιδιατακτική της ικανότητα είναι ισχυρή.

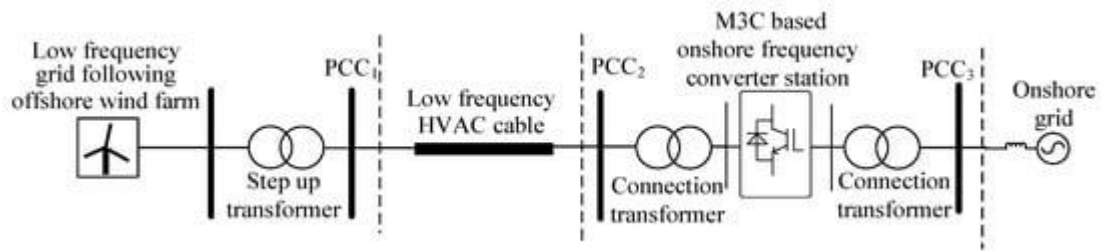
(2) Το χερσαίο δίκτυο AC παρέχει την τάση υποστήριξης για την ανεμογεννήτρια που ακολουθεί το δίκτυο. Η ισχύς στήριξης εκφράζεται συνήθως από τον λόγο βραχυκυκλώματος, ο οποίος ορίζεται ως ο λόγος της τριφασικής ικανότητας βραχυκυκλώματος του διαύλου AC του αιολικού πάρκου προς τη χωρητικότητα του αιολικού πάρκου. Δεδομένου ότι η πλήρως ονομαστική ανεμογεννήτρια μετατροπέα που

χρησιμοποιεί μια σύγχρονη γεννήτρια υιοθετείται ευρέως στο υπεράκτιο αιολικό πάρκο, η σύνδεση του οποίου με το δίκτυο AC επιτυγχάνεται από τον μετατροπέα στην πλευρά του δικτύου. η αλληλεπίδραση μεταξύ του μετατροπέα από την πλευρά του δικτύου και του δικτύου AC αντιπροσωπεύει την αλληλεπίδραση μεταξύ της ανεμογεννήτριας και του δικτύου AC. Σύμφωνα με τις απαιτήσεις αντοχής για τον μετατροπέα πηγής τάσης που ακολουθεί το δίκτυο που είναι συνδεδεμένος στο δίκτυο AC, ο λόγος βραχυκυκλώματος πρέπει να είναι μεγαλύτερος από κάποιο όριο για να λειτουργεί σταθερά. Η Task Force IEEE πιστεύει ότι ο λόγος βραχυκυκλώματος μικρότερος από 1,5 προς 2,0 θα προκαλέσει την αστάθεια του PLL, προκαλώντας την αστάθεια του αιολικού πάρκου που ακολουθεί το δίκτυο. Επιπλέον, το χερσαίο δίκτυο εναλλασσόμενου ρεύματος είναι ο χαλαρός δίαυλος του υπεράκτιου αιολικού πάρκου—δηλαδή, η ισχύς εξόδου από το υπεράκτιο αιολικό πάρκο είναι απεριόριστη, η οποία μπορεί να εξισορροπηθεί πλήρως από το χερσαίο δίκτυο.

(3) Υπό την επίδραση της χωρητικής επίδρασης του καλωδίου, παρουσιάζεται η υπέρταση και η μη ισορροπημένη κατανομή ρεύματος κατά μήκος του καλωδίου. Εάν δεν υπάρχει ενδιάμεση υπεράκτια πλατφόρμα που να παρέχει την αντιστάθμιση διακλάδωσης για το καλώδιο, η απόσταση μετάδοσης είναι γενικά εντός 80 km.

5.3.2 . Σχέδιο μετάδοσης εναλλασσόμενου ρεύματος χαμηλής συχνότητας για υπεράκτια αιολικά πάρκα που ακολουθούν το δίκτυο χαμηλής συχνότητας

Η τυπική δομή του συστήματος μετάδοσης εναλλασσόμενου ρεύματος χαμηλής συχνότητας για υπεράκτια αιολικά πάρκα που ακολουθούν το δίκτυο χαμηλής συχνότητας φαίνεται στο Σχήμα 5.2 . Η τεχνολογία του συστήματος βρίσκεται επί του παρόντος υπό ανάπτυξη.



Σχήμα 5.2 Σχέδιο μετάδοσης εναλλασσόμενου ρεύματος χαμηλής συχνότητας για υπεράκτια αιολικά πάρκα που ακολουθούν το δίκτυο χαμηλής συχνότητας. (<https://www.mdpi.com/1996-1073/16/2/658>)

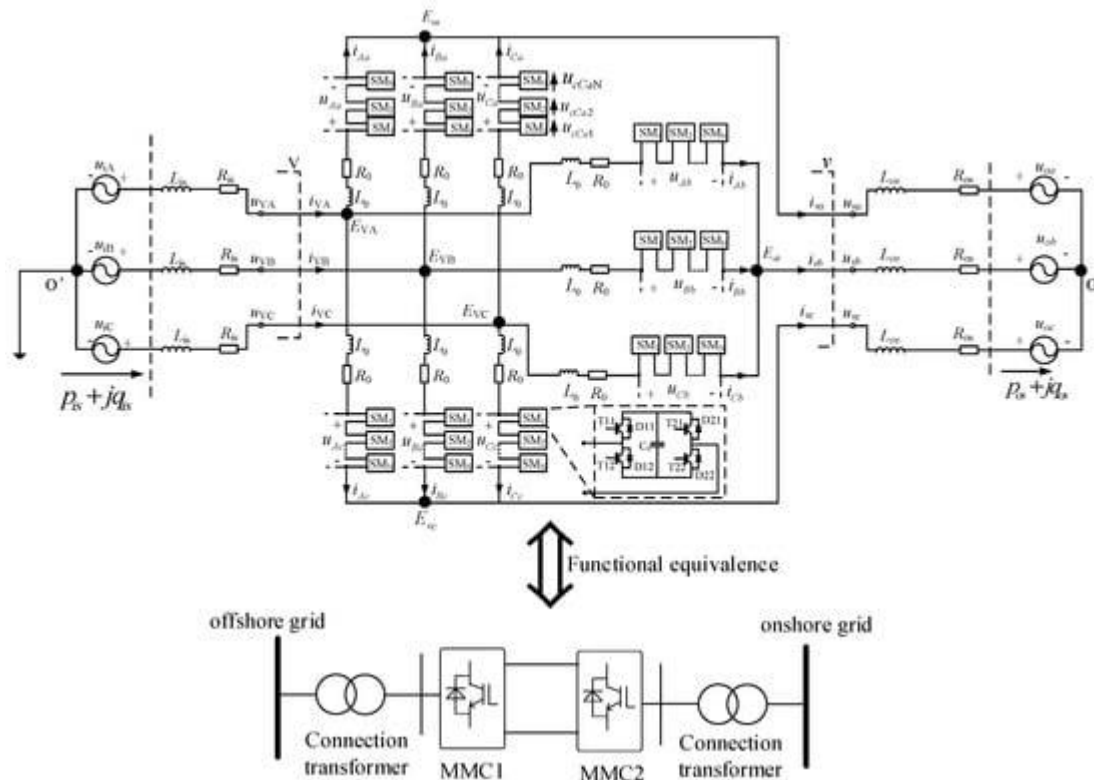
Σε σύγκριση με το σύστημα μετάδοσης εναλλασσόμενου ρεύματος συχνότητας ισχύος για υπεράκτια αιολικά πάρκα μετά από δίκτυα συχνότητας ισχύος, η θεμελιώδης διαφορά αυτού του συστήματος είναι ότι η μετάδοση AC χαμηλής συχνότητας υιοθετείται για τη μείωση της χωρητικής επίδρασης του καλωδίου. Η χωρητική επίδραση εξαρτάται από την χωρητική επιρροή, η οποία είναι ανάλογη με τη συχνότητα λειτουργίας. Έτσι, όταν η συχνότητα λειτουργίας μειώνεται, η χωρητική επίδραση μειώνεται ανάλογα. Με αυτόν τον τρόπο, η απόσταση μετάδοσης του καλωδίου μπορεί να επεκταθεί υιοθετώντας χαμηλή συχνότητα. Για παράδειγμα, όταν η συχνότητα λειτουργίας μειώνεται στα 20 Hz, το χωρητικό ρεύμα του καλωδίου μειώνεται σημαντικά και η απόσταση μετάδοσης του καλωδίου AC μπορεί να φτάσει περίπου τα 200 km, κάτι που μπορεί να εφαρμοστεί σε υπεράκτια μετάδοση αιολικής ενέργειας σε μεγάλες αποστάσεις. Επιπλέον, Η μετάδοση AC χαμηλής συχνότητας μπορεί επίσης να βελτιώσει την ικανότητα μεταφοράς ρεύματος του καλωδίου AC. Καθώς η συχνότητα μειώνεται, η επίδραση του δέρματος του αγωγού μειώνεται και η πυκνότητα μεταφοράς ρεύματος αυξάνεται.

Ωστόσο, η μετάδοση AC χαμηλής συχνότητας έχει επίσης ορισμένα μειονεκτήματα. Το κύριο πρόβλημα είναι ότι ο όγκος και το βάρος του μετασχηματιστή θα αυξηθούν. Η μείωση της συχνότητας σημαίνει ότι μειώνεται το φαινόμενο της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής. Για έναν μετασχηματιστή με την ίδια χωρητικότητα και το ίδιο επίπεδο τάσης, το τμήμα του πυρήνα σιδήρου πρέπει να αυξηθεί. Εκτιμάται προκαταρκτικά ότι όταν η συχνότητα λειτουργίας μειώνεται στα 16,66 Hz, για την ίδια χωρητικότητα και το ίδιο επίπεδο τάσης, ο όγκος και

το βάρος του μετασχηματιστή χαμηλής συχνότητας είναι περίπου 1,75 φορές μεγαλύτερο από εκείνο του μετασχηματιστή συχνότητας ισχύος .

Για το σύστημα μετάδοσης εναλλασσόμενου ρεύματος χαμηλής συχνότητας για υπεράκτια αιολικά πάρκα που ακολουθούν το δίκτυο χαμηλής συχνότητας, ο βασικός εξοπλισμός είναι η συσκευή διασύνδεσης που συνδέει το υπεράκτιο σύστημα εναλλασσόμενου ρεύματος χαμηλής συχνότητας και το χερσαίο σύστημα εναλλασσόμενου ρεύματος ισχύος-συχνότητας, το οποίο γενικά ονομάζεται μετατροπέας συχνότητας . Η τεχνική απαίτηση του μετατροπέα συχνότητας είναι να παρέχει τάση υποστήριξης με σταθερό πλάτος και συχνότητα για το υπεράκτιο δίκτυο εναλλασσόμενου ρεύματος, έτσι ώστε οι ανεμογεννήτριες να μπορούν να λειτουργούν στον τρόπο λειτουργίας που ακολουθεί το δίκτυο. Υπάρχουν λίγες τοπολογίες μετατροπέων συχνότητας που μπορούν να ικανοποιήσουν τις παραπάνω τεχνικές απαιτήσεις και η τρέχουσα ευρέως αποδεκτή τοπολογία μετατροπέα συχνότητας είναι ο αρθρωτός πολυεπίπεδος μετατροπέας μήτρας[9]

Η τοπολογία του M3C φαίνεται στο Σχήμα 5.3 . Η βασική του ανάλυση είναι σύνθετη , αλλά η λειτουργία του είναι απολύτως ισοδύναμη με δύο σπονδυλωτούς μετατροπείς πολλαπλών επιπέδων back-to-back (MMC). Ως εκ τούτου, οι αρχές ελέγχου απεικονίζονται με όρους δύο MMC back-to-back ως εξής.



Σχήμα 5.3 Τοπολογία και λειτουργική ισοδυναμία του M3C. (<https://www.mdpi.com/1996-1073/16/2/658>)

Το χερσαίο δίκτυο εναλλασσόμενου ρεύματος είναι ένα ενεργό ηλεκτρικό δίκτυο και είναι το χαλαρό λεωφορείο του συστήματος ολοκλήρωσης υπεράκτιων αιολικών πάρκων. Επομένως, το MMC2 που είναι συνδεδεμένο στο χερσαίο δίκτυο χρησιμοποιείται ως μετατροπέας εξισορρόπησης ισχύος για ολόκληρο το σύστημα, έτσι ώστε ο στόχος ελέγχου του MMC2 είναι να διατηρεί σταθερή την τάση DC. Αντίστοιχα με τον μετατροπέα M3C, η χερσαία πλευρά συχνότητας ισχύος του M3C βρίσκεται στη λειτουργία παρακολούθησης δικτύου και διατηρεί σταθερή τη μέση τάση όλων των πυκνωτών υπομονάδας των εννέα βραχιόνων στο M3C.

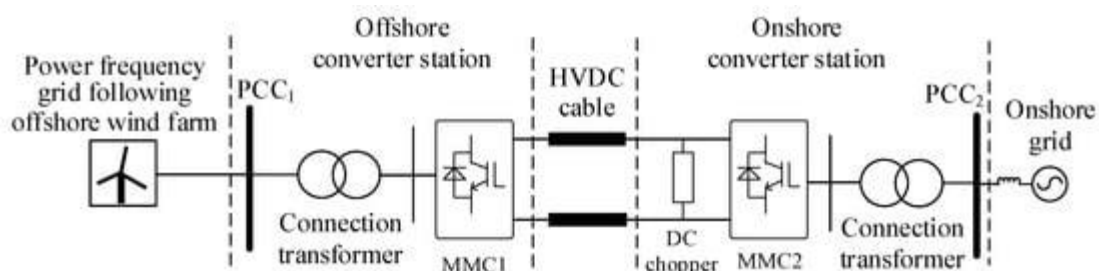
Δεδομένου ότι οι ανεμογεννήτριες βρίσκονται στη λειτουργία παρακολούθησης δικτύου, το MMC1 που είναι συνδεδεμένο στο υπεράκτιο δίκτυο AC πρέπει να παρέχει τάση υποστήριξης. Επομένως, το MMC1 πρέπει να ελέγχει το πλάτος της τάσης AC και τη σταθερά συχνότητας. Με αυτόν τον τρόπο, οι δύο βαθμοί ελέγχου ελευθερίας του MMC1 εξαντλούνται, επομένως δεν υπάρχει υπερβολικός βαθμός

ελευθερίας για τον έλεγχο της υπεράκτιας αιολικής ενέργειας που εισέρχεται στο MMC1. Έτσι, η υπεράκτια αιολική ενέργεια που εισέρχεται στο MMC1 εξισορροπείται από το MMC2. Όταν η τάση του διαύλου εναλλασσόμενου ρεύματος MMC2 πέσει λόγω σφάλματος εναλλασσόμενου ρεύματος στην ξηρά, το MMC2 μπορεί να χάσει την ικανότητα να εξισορροπεί την εισερχόμενη υπεράκτια αιολική ενέργεια, με αποτέλεσμα το πλεόνασμα ισχύος στο σύστημα DC και την υπέρταση. Σε αυτήν την περίπτωση, ο ελικόπτης AC θα πρέπει να εγκατασταθεί στο δίαυλο AC του MMC1 για να μειώσει την υπεράκτια αιολική ενέργεια που εισέρχεται στο MMC1. Για τον μετατροπέα συχνότητας M3C,

Το M3C είναι ο βασικός εξοπλισμός αυτού του συστήματος μετάδοσης και η ανάπτυξη ενός M3C υψηλής τάσης και μεγάλης χωρητικότητας είναι πολύ σημαντική. Δεδομένου ότι υπάρχει ώριμη εμπειρία στην ανάπτυξη του MMC υψηλής τάσης και μεγάλης χωρητικότητας, και το M3C μπορεί να θεωρηθεί ως επέκταση του MMC, αναμένεται να αναπτύξει με επιτυχία το M3C μεγάλης χωρητικότητας αξιοποιώντας ώριμες τεχνικές κατασκευής MMC. [9]

5.3.3 Σχέδιο μετάδοσης HVDC για Δίκτυο Συχνότητας Ισχύος-Ακολουθώντας Υπεράκτια Αιολικά Πάρκα

Η τυπική δομή του συστήματος μετάδοσης HVDC για υπεράκτια αιολικά πάρκα που ακολουθούν το δίκτυο συχνότητας ισχύος φαίνεται στο Σχήμα 5.4 . Το σύστημα χρησιμοποιείται ευρέως σε έργα μεταφοράς υπεράκτιων αιολικών HVDC σε όλο τον κόσμο. [9]



Σχήμα 5.4 Σχέδιο μετάδοσης HVDC για υπεράκτια αιολικά πάρκα μετά από δίκτυο συχνότητας ισχύος. (<https://www.mdpi.com/1996-1073/16/2/658>)

Το θεμελιώδες πλεονέκτημα της μετάδοσης HVDC για υπεράκτια αιολική ενέργεια είναι η μεγάλη απόσταση μετάδοσης και η μεγάλη ικανότητα μετάδοσης. Λόγω της χωρητικής επίδρασης του καλωδίου, η απόσταση μετάδοσης του συστήματος μετάδοσης AC με συχνότητα ισχύος είναι γενικά εντός 80 km. Υπάρχουν γενικά δύο διαθέσιμες τεχνολογίες για έργα μετάδοσης μεγάλων αποστάσεων: η μία είναι η τεχνολογία μετάδοσης HVDC και η άλλη είναι η τεχνολογία μετάδοσης AC χαμηλής συχνότητας. Όσον αφορά την τεχνολογική ωριμότητα, η τεχνολογία μετάδοσης HVDC είναι πιο ώριμη από την τεχνολογία μετάδοσης AC χαμηλής συχνότητας.

Τα τεχνικά χαρακτηριστικά του συστήματος μετάδοσης HVDC για υπεράκτια αιολικά πάρκα που ακολουθούν το δίκτυο συχνοτήτων ισχύος είναι τα εξής: [9]

(1) Ο υπεράκτιος μετατροπέας MMC1 πρέπει να υιοθετήσει τον έλεγχο σχηματισμού δικτύου για να παρέχει την τάση υποστήριξης, καθώς οι ανεμογεννήτριες βρίσκονται στη λειτουργία παρακολούθησης δικτύου. Η πιο κοινή στρατηγική είναι ο έλεγχος του πλάτους τάσης και της συχνότητας της σταθεράς διαύλου AC του σταθμού μετατροπέα, δηλαδή του σταθερού ελέγχου V/f . Με αυτόν τον τρόπο, η υπεράκτια τάση και συχνότητα καθορίζονται από το υπεράκτιο MMC1. Για τις ανεμογεννήτριες που ακολουθούν το δίκτυο, η τεχνολογία μετάδοσης HVDC που βασίζεται σε μετατροπέα γραμμής (LCC) για ενσωμάτωση υπεράκτιας αιολικής ενέργειας είναι απαράδεκτη, καθώς το ίδιο το LCC πρέπει να μετάγεται ενεργά - δηλαδή, το ίδιο το LCC πρέπει να λειτουργεί υπό την τάση υποστήριξης.

(2) Από την άποψη του ισοζυγίου ισχύος, ο υπεράκτιος μετατροπέας MMC1 είναι ο χαλαρός δίαυλος του υπεράκτιου δικτύου AC, του οποίου η λειτουργία είναι ισοδύναμη με τον δίαυλο εξισορρόπησης στον υπολογισμό της ροής ισχύος. Εάν η έννοια του υπολογισμού της ροής ισχύος χρησιμοποιείται για να περιγράψει τη συμπεριφορά σταθερής κατάστασης του υπεράκτιου αιολικού πάρκου που ακολουθεί το δίκτυο, ο κόμβος PQ (ή ο κόμβος PV) μπορεί να χρησιμοποιηθεί για

να περιγράψει την έξοδο της ανεμογεννήτριας, η οποία λειτουργεί στη σταθερή ενεργή ισχύ και λειτουργία σταθερής άεργου ισχύος (ή σταθερού πλάτους τάσης AC). Ο δίαυλος AC του MMC1 είναι ο χαλαρός δίαυλος του υπεράκτιου δικτύου εναλλασσόμενου ρεύματος—δηλαδή, το πλάτος της τάσης του είναι η καθορισμένη τιμή και η φάση τάσης του είναι η φάση αναφοράς του υπεράκτιου δικτύου AC. Με αυτόν τον τρόπο, ανεξάρτητα από το πώς αλλάζει η ενεργός ισχύς και η άεργος ισχύς των WT, όλη η ισχύς μπορεί να εξισορροπηθεί από το MMC1.

(3) Από την άποψη της εξισορρόπησης ισχύος, ο χερσαίος μετατροπέας MMC2 είναι ο χαλαρός δίαυλος του συστήματος HVDC. Το MMC2 ελέγχει την τάση DC του συστήματος HVDC ως σταθερή τιμή, πράγμα που σημαίνει ότι όλη η ενεργή ισχύς που εισέρχεται στο σύστημα HVDC μέσω του MMC1 αποστέλλεται στο χερσαίο δίκτυο AC από το MMC2. Ωστόσο, όταν παρουσιαστεί το χερσαίο σφάλμα AC, το MMC2 ενδέχεται να μην είναι σε θέση να ολοκληρώσει τη λειτουργία του ως σταθμός εξισορρόπησης ισχύος του συστήματος HVDC. Δεδομένου ότι η ισχύς εξόδου του MMC2 συσχετίζεται θετικά με το πλάτος τάσης του διαύλου AC MMC2. Όταν παρουσιαστεί το χερσαίο σφάλμα AC, η τάση του διαύλου AC MMC2 πέφτει, μειώνοντας την ικανότητα εξόδου ισχύος του MMC2. Αυτή τη στιγμή, η πλεονάζουσα ισχύς στο σύστημα HVDC πρέπει να καταναλώνεται από πρόσθετες συσκευές απαγωγής ενέργειας, διαφορετικά το σύστημα HVDC θα φέρει υπέρταση,

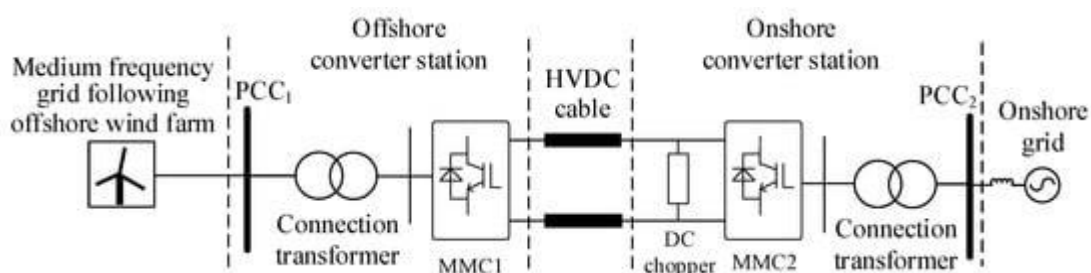
(4) Ένα άλλο πλεονέκτημα είναι η δυνατότητα πολυτερματικής υπεράκτιας μετάδοσης HVDC, η οποία επιτρέπει σε κάθε χερσαίο μετατροπέα να λειτουργεί ως ατομικά ελεγχόμενη γεννήτρια και όχι ως χαλαρός δίαυλος, βελτιώνοντας την ενσωμάτωση της αιολικής ενέργειας στα τοπικά δίκτυα.

(5) Επί του παρόντος, το κύριο μειονέκτημα του συστήματος μετάδοσης HVDC για υπεράκτια αιολικά πάρκα που ακολουθούν το δίκτυο συχνότητας ισχύος είναι ο μεγάλος όγκος και το βάρος της υπεράκτιας πλατφόρμας. Πώς να μειώσετε τον όγκο και το βάρος της

υπεράκτιας πλατφόρμας και του σταθμού μετατροπείας είναι η κύρια κατεύθυνση της τρέχουσας έρευνας

5.3.4 Σχέδιο μετάδοσης HVDC για αιολικά πάρκα μεσαίας συχνότητας που ακολουθούν υπεράκτια αιολικά πάρκα

Η τυπική δομή του συστήματος μετάδοσης HVDC για υπεράκτια αιολικά πάρκα που ακολουθούν δίκτυο μέσης συχνότητας φαίνεται στο Σχήμα 5.5 . Σε σύγκριση με το σχήμα μετάδοσης HVDC για υπεράκτια αιολικά πάρκα που ακολουθούν δίκτυα ισχύος, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.4 , αυτό το σχέδιο αλλάζει μόνο το υπεράκτιο δίκτυο συχνότητας ισχύος σε υπεράκτιο δίκτυο μεσαίας συχνότητας και τα υπόλοιπα είναι τα ίδια. [9]



Σχήμα 5.5 Σχέδιο μετάδοσης HVDC για υπεράκτια αιολικά πάρκα μετά από δίκτυο μεσαίας συχνότητας. (<https://www.mdpi.com/1996-1073/16/2/658>)

Τα τεχνικά χαρακτηριστικά του συστήματος μετάδοσης HVDC για υπεράκτια αιολικά πάρκα που ακολουθούν δίκτυο μέσης συχνότητας είναι τα εξής [10]:

(1) Το υπεράκτιο αιολικό πάρκο είναι το δίκτυο εναλλασσόμενου ρεύματος μεσαίας συχνότητας. Εφόσον οι ανεμογεννήτριες βρίσκονται στη λειτουργία παρακολούθησης δικτύου, το υπεράκτιο MMC1 πρέπει να παρέχει την τάση υποστήριξης μέσης συχνότητας για το υπεράκτιο δίκτυο AC. Έτσι, το MMC1 υιοθετεί τον σταθερό έλεγχο V / f και η συχνότητα f εδώ είναι μια μέση συχνότητα, όπως 150 Hz .

(2) Η υπεράκτια πλατφόρμα και ο σταθμός μετατροπείας μπορεί να είναι μικρότεροι. Δεδομένου ότι το υπεράκτιο MMC1 είναι συνδεδεμένο στο δίκτυο AC μέσης συχνότητας, η χωρητικότητα της υπομονάδας C μπορεί να μειωθεί σημαντικά, μειώνοντας έτσι τους όγκους και τα βάρη

των υπομονάδων και τελικά μειώνοντας τον όγκο και το βάρος της υπεράκτιας πλατφόρμας, εξοικονομώντας κόστος επένδυσης για η υπεράκτια πλατφόρμα και ο σταθμός μετατροπών. Η θεωρητική βάση είναι: ο λόγος διακύμανσης τάσης ε του πυκνωτή υπομονάδας είναι ευθέως ανάλογος με την ισοδύναμη χρονική σταθερά εκφόρτισης H και είναι αντιστρόφως ανάλογος με τη γωνιακή συχνότητα του συστήματος ω , δηλαδή, $\varepsilon = 1/(H\omega)$. Επιπλέον, το H είναι ανάλογο με την χωρητικότητα της υπομονάδας C . Επομένως, για το ίδιο ε , αν το ω αυξηθεί σε τρεις φορές την αρχική του τιμή, το H θα μειωθεί περίπου στο ένα τρίτο της αρχικής του τιμής, επομένως η υποαρθρωτή χωρητικότητα C πέφτει περίπου στο ένα τρίτο της αρχικής του τιμής.

(3) Οι ανεμογεννήτριες και οι μετασχηματιστές στο υπεράκτιο δίκτυο AC μπορεί να είναι μικρότεροι. Ο μετασχηματιστής AC λειτουργεί σύμφωνα με την αρχή της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής. Η επαγόμενη ηλεκτροκινητική δύναμη μπορεί να εκφραστεί ως:

$$E = 4,44 fN\Phi = 4,44 fNSB(1)$$

όπου

E είναι η πραγματική τιμή της επαγόμενης ηλεκτροκινητικής δύναμης,

f είναι η συχνότητα εναλλασσόμενου ρεύματος,

N είναι ο αριθμός των στροφών περιέλιξης,

Φ είναι το πλάτος μαγνητικής ροής,

S είναι η περιοχή διατομής του πυρήνα σιδήρου και

B είναι η μέγιστη μαγνητική πυκνότητα ροής.

Για την ίδια επαγόμενη ηλεκτροκινητική δύναμη E , εάν τα B και N διατηρούνται σταθερά, τότε το fS είναι σταθερό. Αυτό σημαίνει ότι αν η f αυξηθεί κατά τρεις φορές, το S μειώνεται στο 1/3 της αρχικής του αξίας. Επομένως, εάν η υπεράκτια ανεμογεννήτρια λειτουργεί σε μεσαία συχνότητα, η περιοχή διατομής του σιδήρου πυρήνα του

μετασχηματιστή μπορεί να μειωθεί, μειώνοντας έτσι τον όγκο και το βάρος του μετασχηματιστή.

(4) Η φέρουσα ικανότητα του υποθαλάσσιου καλωδίου μειώνεται και η απώλεια αυξάνεται. Σε σύγκριση με το υποβρύχιο καλώδιο συχνότητας ισχύος, καθώς αυξάνεται η συχνότητα, ενισχύεται το δερματικό αποτέλεσμα του μεταλλικού αγωγού, επομένως η φέρουσα ικανότητα του αγωγού θα μειωθεί και η απώλεια θα αυξηθεί. Σύμφωνα με την προκαταρκτική αξιολόγηση, υπό την προϋπόθεση ότι η δομή του καλωδίου διατηρείται αμετάβλητη και η μέση συχνότητα έχει ρυθμιστεί στα 150 Hz, για παράδειγμα, η αντίσταση μέσης συχνότητας αυξάνεται κατά περίπου 50% σε σύγκριση με την αντίσταση συχνότητας ισχύος. και η ικανότητα μεταφοράς της μεσαίας συχνότητας είναι περίπου 10% χαμηλότερη από αυτή της συχνότητας ισχύος. Εάν το καλώδιο έχει σχεδιαστεί σύμφωνα με τη μεσαία συχνότητα, τα προβλήματα της μείωσης της ικανότητας μεταφοράς και της αύξησης της απώλειας μπορούν να βελτιωθούν. Αυτό το σχήμα ανήκει συνολικά στο σύστημα μετάδοσης HVDC και η μέση συχνότητα εφαρμόζεται μόνο στο υπεράκτιο σύστημα συλλογής, το οποίο είναι γενικά εντός 30 km. Η τρέχουσα τάση είναι να χρησιμοποιείται καλώδιο εναλλασσόμενου ρεύματος 66 kV για την απευθείας σύνδεση των ανεμογεννητριών με τον υπεράκτιο σταθμό μετατροπής, αφήνοντας έξω την υπεράκτια πλατφόρμα ανύψωσης. Τα τρέχοντα υποθαλάσσια καλώδια AC των 220 kV και κάτω είναι καλώδια τριών πυρήνων. Για το καλώδιο τριών πυρήνων, το άθροισμα των τριφασικών ρευμάτων στο περίβλημα του καλωδίου είναι μηδέν, επομένως το ρεύμα κυκλοφορίας στο μανδύα είναι κοντά στο μηδέν υπό κανονικές συνθήκες, το οποίο είναι εντελώς διαφορετικό από το μονοπύρηνο καλώδιο. Επομένως,

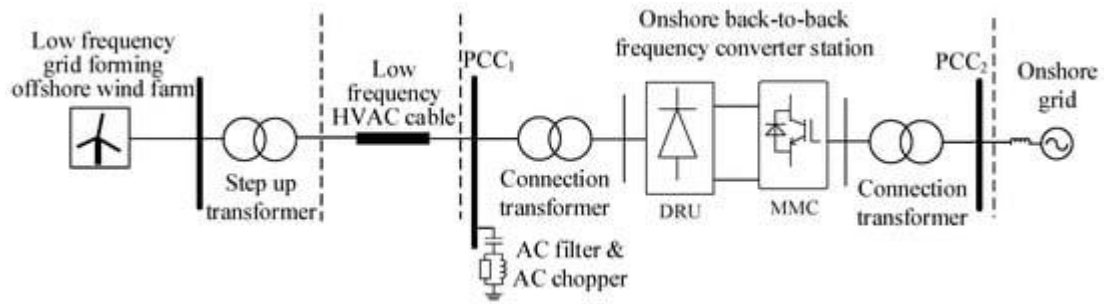
(5) Σε σύγκριση με το σύστημα μετάδοσης HVDC για υπεράκτια ολικά πάρκα που ακολουθούν δίκτυα συχνότητας ισχύος, η μόνη διαφορά είναι ότι το υπεράκτιο σύστημα συλλογής είναι ένα δίκτυο μέσης συχνότητας. Αν και δεν υπάρχει κανένα πρακτικό έργο που να βασίζεται σε αυτό το σχήμα, μπορεί να θεωρηθεί ότι αυτό το σχέδιο

είναι τεχνικά ώριμο και μπορεί να εφαρμοστεί στην πρακτική μηχανική.

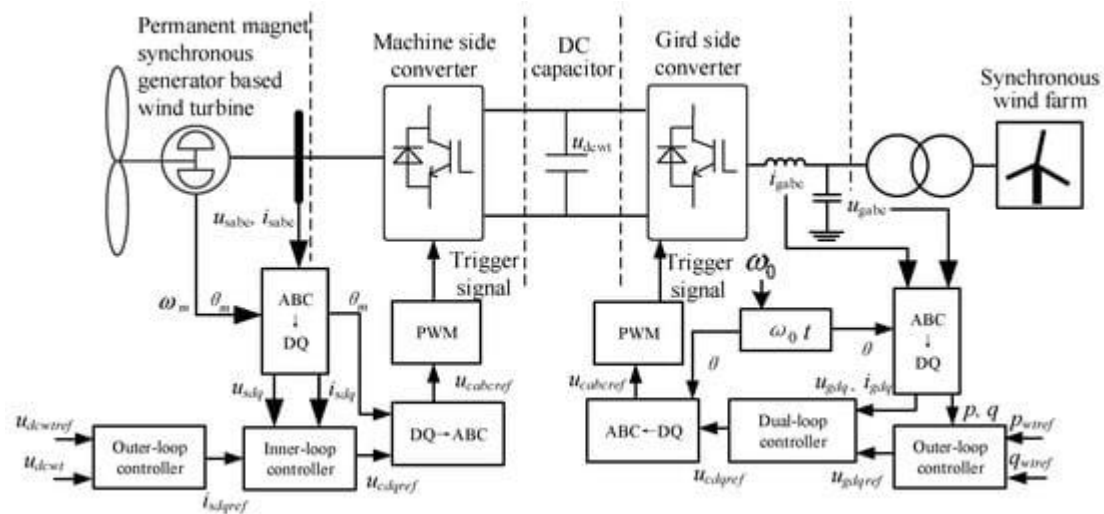
5.3.5 Σχέδιο μετάδοσης εναλλασσόμενου ρεύματος χαμηλής συχνότητας για υπεράκτια αιολικά πάρκα που σχηματίζουν δίκτυο χαμηλής συχνότητας

Τα εξωτερικά χαρακτηριστικά των ανεμογεννητριών που σχηματίζουν δίκτυο είναι πηγές τάσης που μπορούν να συνδεθούν τόσο με ενεργά όσο και με παθητικά δίκτυα. Όταν συνδέεται στο παθητικό δίκτυο, η ανεμογεννήτρια είναι η τάση υποστήριξης για το παθητικό δίκτυο. Εάν υιοθετηθεί η ανεμογεννήτρια που σχηματίζει δίκτυο χαμηλής συχνότητας, η υπεράκτια αιολική ισχύς μπορεί να μεταδοθεί μέσω του συστήματος AC χαμηλής συχνότητας. Ο μετατροπέας συχνότητας ξηράς μπορεί να είναι σε απλούστερη μορφή, όπως η μονάδα ανόρθωσης διόδου back-to-back (DRU) και MMC. [9]

Το τυπικό σχήμα μετάδοσης εναλλασσόμενου ρεύματος χαμηλής συχνότητας για υπεράκτια αιολικά πάρκα που σχηματίζουν δίκτυο χαμηλής συχνότητας φαίνεται στο Σχήμα 5.6. Το βασικό τεχνικό πρόβλημα αυτού του σχήματος είναι ο τρόπος σχεδιασμού του ελεγκτή ανεμογεννήτριας. Υπάρχουν δύο απαιτήσεις για τον ελεγκτή της ανεμογεννήτριας: (1) το πλάτος της τάσης και η συχνότητα της εξόδου της ανεμογεννήτριας είναι καθορισμένες τιμές. (2) όλες οι ανεμογεννήτριες που είναι συνδεδεμένες στο υπεράκτιο δίκτυο AC είναι συγχρονισμένες. Για την κύρια ανεμογεννήτρια με πλήρως ονομαστικό μετατροπέα, οι παραπάνω απαιτήσεις πραγματοποιούνται μέσω του συντονισμένου ελέγχου του μετατροπέα back-to-back της ανεμογεννήτριας, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.7.



Σχήμα 5.6 Σχέδιο μετάδοσης AC χαμηλής συχνότητας για υπεράκτια αιολικά πάρκα που σχηματίζουν δίκτυο χαμηλής συχνότητας. (<https://www.mdpi.com/1996-1073/16/2/658>)



Σχήμα 5.7 Στρατηγική ελέγχου σχηματισμού πλέγματος με ελεγκτή διπλού βρόχου μιας υπεράκτιας ανεμογεννήτριας. (<https://www.mdpi.com/1996-1073/16/2/658>)

Στο Σχήμα 5.7, οι στρατηγικές ελέγχου σχηματισμού πλέγματος του μετατροπέα από την πλευρά της μηχανής και του μετατροπέα από την πλευρά του δικτύου είναι εντελώς διαφορετικές από αυτές της ανεμογεννήτριας που ακολουθεί το δίκτυο. Ο μετατροπέας από την πλευρά της μηχανής της ανεμογεννήτριας που ακολουθεί το δίκτυο υιοθετεί τη στρατηγική ελέγχου μέγιστης ισχύος σημείου παρακολούθησης (MPPT), ενώ ο μετατροπέας από την πλευρά της μηχανής της ανεμογεννήτριας που σχηματίζει δίκτυο ελέγχει τη σταθερά τάσης του πυκνωτή DC. Ο μετατροπέας από την πλευρά του δικτύου της ανεμογεννήτριας που ακολουθεί το δίκτυο ελέγχει τη σταθερά τάσης του πυκνωτή DC, ενώ ο μετατροπέας από την πλευρά του δικτύου της ανεμογεννήτριας που σχηματίζει δίκτυο διατηρεί το πλάτος και τη συχνότητα της τάσης AC στις καθορισμένες τιμές.

Γενικά, ο ελεγκτής του μετατροπέα από την πλευρά του δικτύου αποτελείται από τρία στρώματα. Ο εξωτερικός ελεγκτής καθορίζει το πλάτος και τη συχνότητα της τάσης AC του διαύλου AC του μετατροπέα από την πλευρά του δικτύου με βάση τις αναφορές ενεργού και αέργου ισχύος. Ο τρόπος σχεδιασμού του εξωτερικού ελεγκτή είναι το βασικό τεχνικό πρόβλημα της ανεμογεννήτριας που σχηματίζει πλέγμα. Το 2015, η αναφορά βρήκε ότι το σχήμα ελέγχου του πλάτους ενεργού ισχύος-τάσης ($P - V$) και της συχνότητας άεργου ισχύος-τάσης ($Q - f$) είναι εφικτό, αλλά δεν εξήγησε γιατί αυτό το σχήμα είναι εφικτό. Με βάση την ανάλυση ευαισθησίας, αποδεικνύεται με αναφορά ότι $Q - f$ Το droop control πληροί τις βασικές αρχές του σχεδιασμού του ελεγκτή και έχει παγκόσμια προσαρμοστικότητα στον τομέα λειτουργίας. Σύμφωνα με τις απαιτήσεις παρακολούθησης μέγιστης ισχύος και ισορροπίας ισχύος, η αναφορά ενεργού ισχύος είναι η μέγιστη ισχύς της ανεμογεννήτριας. η αναφορά άεργου ισχύος μπορεί να οριστεί ως σταθερά, όπως μηδέν. Δεν υπάρχει διαφορά μεταξύ των εσωτερικών διπλών στρωμάτων του ελεγκτή μετατροπέα από την πλευρά του δικτύου και του συμβατικού ελέγχου πλάτους και συχνότητας τάσης AC, δηλαδή του συμβατικού ελέγχου V / f , που δεν θα επαναληφθεί εδώ.

Τα κύρια τεχνικά χαρακτηριστικά του συστήματος μετάδοσης εναλλασσόμενου ρεύματος χαμηλής συχνότητας για υπεράκτια αιολικά πάρκα που σχηματίζουν δίκτυο χαμηλής συχνότητας είναι τα εξής: [9]

(1) Λόγω των πλεονεκτημάτων του συστήματος μετάδοσης χαμηλής συχνότητας, η απόσταση μετάδοσης του υποθαλάσσιου καλωδίου AC μπορεί να επεκταθεί σε περίπου 200 km.

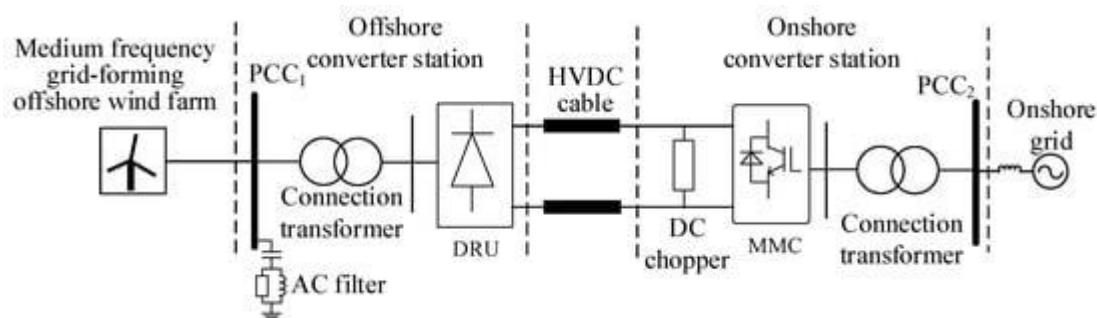
(2) Ο χερσαίος μετατροπέας συχνότητας μπορεί να υιοθετήσει το back-to-back DRU και MMC, καθώς οι υπεράκτιες ανεμογεννήτριες είναι πηγές τάσης που σχηματίζουν δίκτυο και το DRU μπορεί να λειτουργήσει. Το κόστος του back-to-back DRU και MMC είναι σημαντικά μειωμένο σε σύγκριση με το M3C.

(3) Η βασική τεχνολογία αυτού του σχεδίου είναι η κατασκευή της ανεμογεννήτριας που σχηματίζει πλέγμα χαμηλής συχνότητας και όλες οι ανεμογεννήτριες θα πρέπει να λειτουργούν συγχρονισμένα. Σε σύγκριση με την ανεμογεννήτρια ώριμης συχνότητας ισχύος που ακολουθεί το δίκτυο, η κύρια απαραίτητη αλλαγή είναι ο μετατροπέας από την πλευρά του δικτύου, συμπεριλαμβανομένου του κύριου κυκλώματος για προσαρμογή στη χαμηλή συχνότητα και του ελεγκτή του για προσαρμογή στις απαιτήσεις διαμόρφωσης δικτύου.

Απαιτούνται πολλές πτυχές έρευνας και ανάπτυξης και πρακτικών δοκιμών μηχανικής πριν από την κλίμακα και την τυποποιημένη εφαρμογή. Επιπλέον, δεδομένου ότι ο χερσαίος μετατροπέας συχνότητας υιοθετεί το DRU, η έναρξη λειτουργίας του υπεράκτιου αιολικού πάρκου δεν μπορεί να πραγματοποιηθεί από το DRU, επομένως είναι απαραίτητο να μελετηθεί το κατάλληλο σχέδιο εκκίνησης για το υπεράκτιο αιολικό πάρκο.

5.3.6 Σχέδιο μετάδοσης HVDC για υπεράκτια αιολικά πάρκα μεσαίας συχνότητας

Το σχήμα μετάδοσης HVDC για υπεράκτια αιολικά πάρκα που σχηματίζουν δίκτυο μέσης συχνότητας φαίνεται στο Σχήμα 5.8. Το βασικό τεχνικό πρόβλημα αυτού του σχεδίου είναι ο τρόπος σχεδιασμού του ελεγκτή ανεμογεννήτριας, ο οποίος είναι το ίδιο με το σύστημα μετάδοσης εναλλασσόμενου ρεύματος χαμηλής συχνότητας για υπεράκτια αιολικά πάρκα που σχηματίζουν δίκτυο χαμηλής συχνότητας και δεν θα επαναληφθεί εδώ.



Σχήμα 5.8 Σχέδιο 6: Σχέδιο μετάδοσης HVDC για υπεράκτια αιολικά πάρκα που σχηματίζουν δίκτυο μέσης συχνότητας. (<https://www.mdpi.com/1996-1073/16/2/658>)

Τα κύρια τεχνικά χαρακτηριστικά του συστήματος μετάδοσης HVDC για υπεράκτια αιολικά πάρκα που σχηματίζουν δίκτυο μέσης συχνότητας είναι τα εξής: [9]

(1) Η αξιοπιστία και η οικονομία του συστήματος έχουν βελτιωθεί σημαντικά λόγω του DRU σε σύγκριση με το υπεράκτιο MMC. Όσον αφορά την αξιοπιστία, η δίοδος δεν έχει κύκλωμα σκανδάλης, επομένως μπορεί να θεωρηθεί ως παθητικό εξάρτημα, όπως αντίσταση, επαγωγέας ή πυκνωτής, που είναι εύκολο να εγκατασταθεί σε κλειστή δομή. Αυτό είναι ιδιαίτερα ωφέλιμο για υπεράκτια περιβάλλοντα. Η αξιοπιστία του DRU είναι πολύ υψηλότερη από αυτή του MMC με κυκλώματα ελέγχου σκανδάλης. Το DRU επιτρέπει χρόνια χωρίς συντήρηση. Όσον αφορά την οικονομία, σε σύγκριση με το MMC, το DRU έχει προφανή πλεονεκτήματα σε κόστος, όγκο και βάρος, τα οποία δεν είναι της ίδιας τάξης μεγέθους. Έτσι, στο σύστημα μετάδοσης υπεράκτιων αιολικής ενέργειας HVDC, το σύστημα μετάδοσης HVDC για υπεράκτια αιολικά πάρκα που σχηματίζουν δίκτυο μέσης συχνότητας έχει προφανή πλεονεκτήματα. Επομένως, Οι συγγραφείς πιστεύουν ότι αυτό το σχέδιο είναι το προτιμώμενο σχέδιο για την ενσωμάτωση υπεράκτιων αιολικής ενέργειας σε μεγάλες αποστάσεις. Για την ενσωμάτωση υπεράκτιας αιολικής ενέργειας σε μεγάλες αποστάσεις, δεν υπάρχει άλλο σχέδιο που να είναι απλούστερο, πιο οικονομικό και πιο αξιόπιστο από αυτό το σχέδιο, επομένως αυτό το σχέδιο συνιστάται ιδιαίτερα.

(2) Η ονομαστική συχνότητα λειτουργίας των ανεμογεννητριών και του συστήματος συλλογής είναι η μέση συχνότητα (100–400 Hz), η οποία μπορεί να μειώσει σημαντικά τον όγκο και το βάρος του μετασχηματιστή DRU και του φίλτρου AC DRU και να βελτιώσει περαιτέρω την οικονομία του συστήματος.

(3) Εάν το υπεράκτιο σύστημα συλλεκτών υιοθετήσει τη μέση συχνότητα, η απόσταση μετάδοσης του υποθαλάσσιου καλωδίου θα μειωθεί. Ωστόσο, η εμβέλεια του υπεράκτιου συστήματος συλλογής είναι μικρή και η συντομευμένη απόσταση μετάδοσης του

υποθαλάσσιου καλωδίου δεν αποτελεί περιοριστικό παράγοντα. Επιπλέον, όσον αφορά τα προβλήματα της μείωσης του ρεύματος μεταφοράς και οι απώλειες αυξάνονται στο υποβρύχιο καλώδιο μέσης συχνότητας,

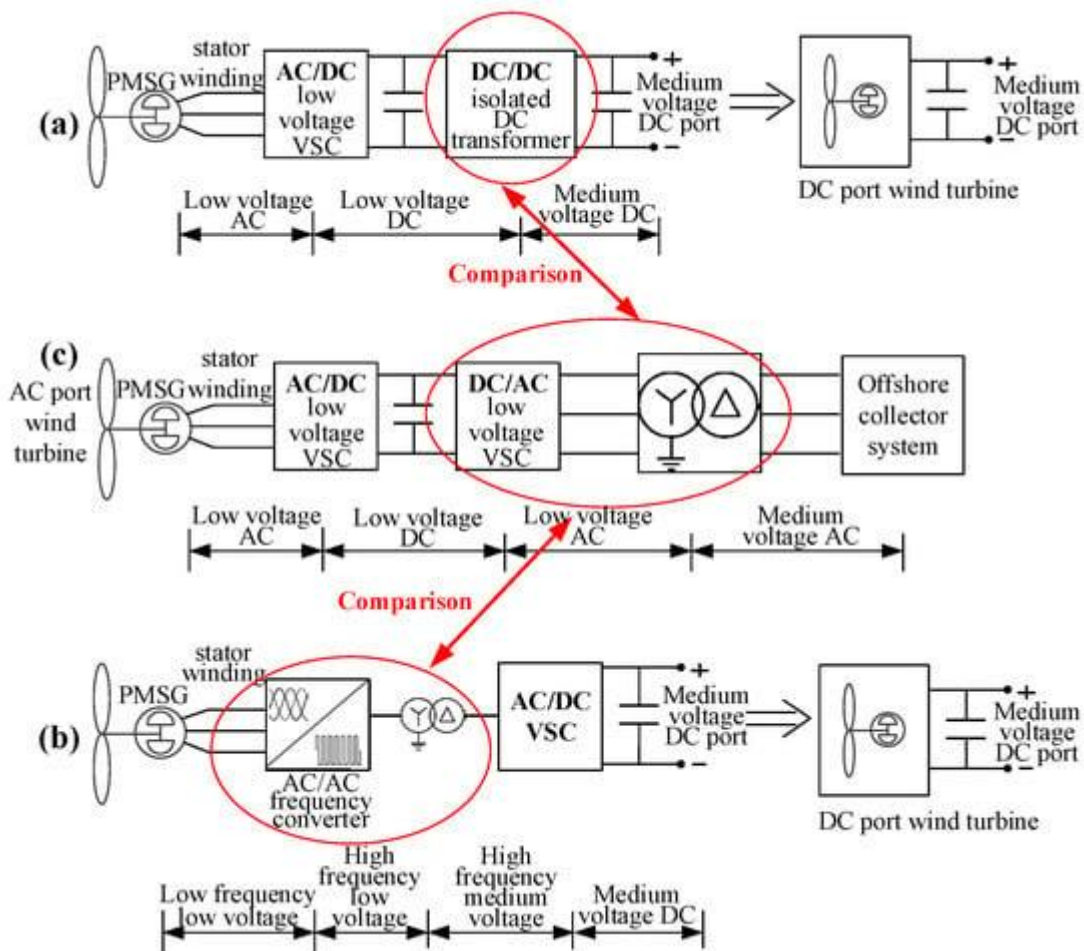
(4) Προς το παρόν, αυτό το σχήμα έχει ωριμάσει θεωρητικά αλλά στερείται πρακτικής μηχανικής επικύρωσης, επομένως πρέπει να δημιουργήσουμε δοκιμαστικά έργα για να επαληθεύσουμε την τεχνολογία. Σε σύγκριση με τις ώριμες ανεμογεννήτριες που ακολουθούν το δίκτυο συχνότητας ισχύος, οι κύριες απαραίτητες αλλαγές είναι στον μετατροπέα της πλευράς του δικτύου, συμπεριλαμβανομένου του κύριου κυκλώματος του, για να τον προσαρμόσει στο εύρος μεσαίας συχνότητας και στον ελεγκτή του για να τον προσαρμόσει στο δίκτυο. απαίτηση διαμόρφωσης. Επιπλέον, εφόσον ο υπεράκτιος σταθμός μετατροπέα υιοθετεί το DRU, η έναρξη λειτουργίας του υπεράκτιου αιολικού πάρκου δεν μπορεί να πραγματοποιηθεί από το DRU, επομένως είναι απαραίτητο να μελετηθεί ένα κατάλληλο σχέδιο εκκίνησης για το υπεράκτιο αιολικό πάρκο.

5.3.7 Σχέδιο μετάδοσης HVDC με Step-Up DC Transformer για ανεμογεννήτρια DC-Port συνδεδεμένη παράλληλα

Οι περισσότερες υπεράκτιες ανεμογεννήτριες είναι ανεμογεννήτριες με πλήρη βαθμολόγηση μετατροπέα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.7 . Όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.7 , η ισχύς εναλλασσόμενου ρεύματος που παράγεται από τον στάτορα της ανεμογεννήτριας μετατρέπεται πρώτα σε συνεχές ρεύμα μέσω του μετατροπέα της μηχανής, στη συνέχεια μετατρέπεται σε εναλλασσόμενο ρεύμα μέσω του μετατροπέα στην πλευρά του δικτύου και συνδέεται στο υπεράκτιο δίκτυο εναλλασσόμενου ρεύματος και στη συνέχεια μεταδίδεται στο χερσαίο δίκτυο μέσω του μετασχηματιστή ανόδου και του συστήματος HVDC.

Όταν υιοθετείται η μετάδοση HVDC, φαίνεται ότι υπάρχουν πολλοί μετασχηματισμοί AC/DC/AC. Ως εκ τούτου, είναι φυσικό να προταθεί

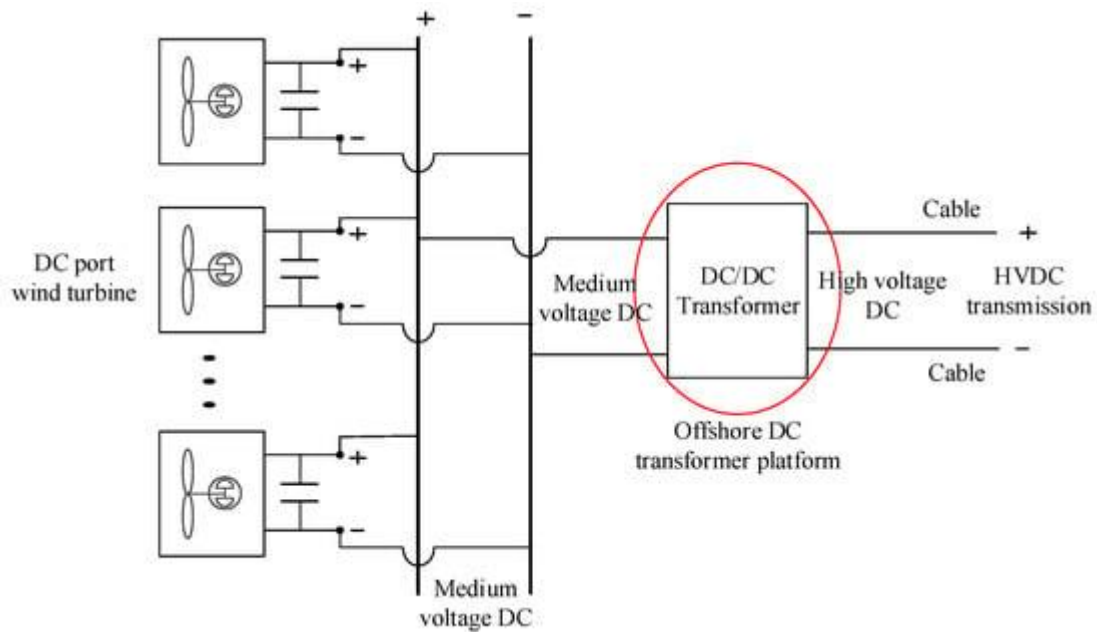
το σχέδιο του πλήρους συλλέκτη DC και του συστήματος μετάδοσης για υπεράκτια αιολική ενέργεια για τη μείωση των μετασχηματισμών AC/DC/AC και τη βελτίωση της απόδοσης μετάδοσης. Στην περίπτωση ενός πλήρους συλλέκτη DC και συστήματος μετάδοσης, η ανεμογεννήτρια πρέπει να κατασκευαστεί ως η ανεμογεννήτρια θύρας DC. Υπάρχουν δύο τυπικοί τεχνικοί τρόποι για την κατασκευή της ανεμογεννήτριας DC-port, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.9 a,b. η συμβατική ανεμογεννήτρια AC-port φαίνεται στο Σχήμα 5.9 c ως σημείο αναφοράς για σύγκριση. Οι κόκκινοι κύκλοι στο Σχήμα 5.9 αντιπροσωπεύουν τα διάφορα μέρη των δομών της ανεμογεννήτριας AC-port και της ανεμογεννήτριας DC-port. Τα βέλη υποδεικνύουν ότι πρέπει να γίνονται συγκρίσεις κόστους μεταξύ αυτών των δομικών μερών. [9]



Σχήμα 5.9 Δύο τεχνικές προσεγγίσεις για την κατασκευή μιας ανεμογεννήτριας DC-port. (α) την πρώτη τεχνική προσέγγιση· β) η δεύτερη τεχνική προσέγγιση. (γ) η συμβατική ανεμογεννήτρια AC-port. (<https://www.mdpi.com/1996-1073/16/2/658>)

Στο Σχήμα 5.9 η τεχνική προσέγγιση (α) χρησιμοποιεί τον απομονωμένο μετασχηματιστή DC/DC για να ανυψώσει τη θύρα DC χαμηλής τάσης (περίπου 2 kV) σε μια θύρα DC μέσης τάσης (περίπου 50 kV). η τεχνική προσέγγιση (β) χρησιμοποιεί τον μετατροπέα συχνότητας AC/AC για να μετατρέψει το AC χαμηλής συχνότητας σε AC υψηλής συχνότητας. Εάν μια ανεμογεννήτρια μονής θύρας AC που συνδέεται με ένα σύστημα συλλέκτη εναλλασσόμενου ρεύματος λαμβάνεται ως σημείο αναφοράς για σύγκριση, τότε το κόστος της ανεμογεννήτριας με θύρα DC και της ανεμογεννήτριας θύρας AC μπορεί να συγκριθεί στο επίπεδο του συστήματος συλλέκτη . Για την τεχνική προσέγγιση (α), δεν υπάρχει σημαντικό πλεονέκτημα κόστους του απομονωμένου μετασχηματιστή DC/DC σε σύγκριση με τον DC/AC χαμηλής τάσης VSC και τον μετασχηματιστή συχνότητας ισχύος. Για την τεχνική προσέγγιση (β), δεν υπάρχει προφανές πλεονέκτημα κόστους του μετατροπέα συχνότητας AC/AC και του μετασχηματιστή υψηλής συχνότητας σε σύγκριση με το VSC χαμηλής τάσης DC/AC και τον μετασχηματιστή συχνότητας ισχύος. Με αυτόν τον τρόπο, δεν υπάρχει προφανές πλεονέκτημα κόστους μεταξύ της ανεμογεννήτριας DC-port που είναι συνδεδεμένη στο σύστημα συλλέκτη DC και της ανεμογεννήτριας AC-port που είναι συνδεδεμένη στο σύστημα συλλέκτη AC. [9]

Όταν οι ανεμογεννήτριες με θύρα DC ενισχύονται παράλληλα από τον μετασχηματιστή DC και μεταδίδονται από το σύστημα μετάδοσης HVDC, η δομή τους φαίνεται στο Σχήμα 5.10.



Σχήμα 5.10 Σχέδιο μετάδοσης HVDC με μετασχηματιστή συνεχούς ρεύματος ανόδου για ανεμογεννήτρια θύρας DC συνδεδεμένη παράλληλα. (<https://www.mdpi.com/1996-1073/16/2/658>)

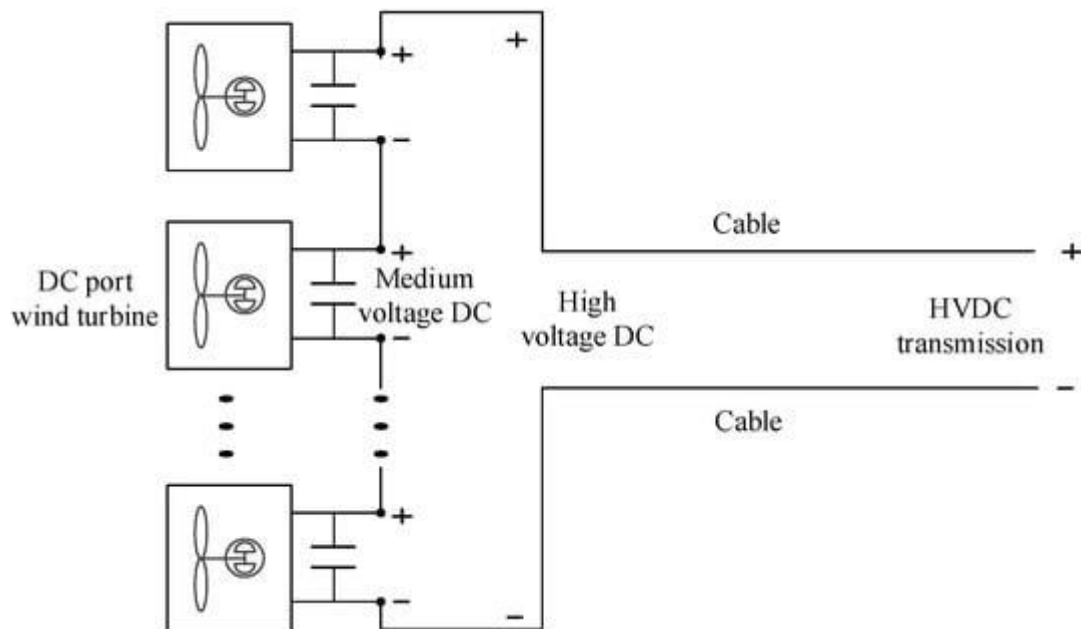
Εάν το σχήμα μετάδοσης HVDC για υπεράκτια αιολικά πάρκα που ακολουθούν το δίκτυο συχνότητας ισχύος χρησιμοποιείται ως σημείο αναφοράς για σύγκριση, ο μετασχηματιστής DC/DC και η υπεράκτια πλατφόρμα του στο Σχήμα 10 θα πρέπει να **συγκριθούν** με το MMC1 και την υπεράκτια πλατφόρμα του στο Σχήμα 5.4 . Σύμφωνα με την τρέχουσα αξιολόγηση τεχνολογίας, ο μετασχηματιστής DC/DC στο Σχήμα 5.10 δεν έχει προφανές πλεονέκτημα κόστους σε σύγκριση με τον MMC1 στο Σχήμα 5.4 .

Μετά από μια ολοκληρωμένη έρευνα του συστήματος συλλέκτη DC και του συστήματος μετάδοσης HVDC, το οικονομικό πλεονέκτημα του συστήματος μετάδοσης HVDC με έναν μετασχηματιστή συνεχούς ρεύματος συνεχούς ρεύματος για μια ανεμογεννήτρια θύρας DC που συνδέεται παράλληλα δεν είναι προφανές. [9]

5.3.8 Σχέδιο μετάδοσης HVDC για ανεμογεννήτριες DC-Port που συνδέονται σε σειρά

Προκειμένου να μειωθεί το κόστος εξοπλισμού του πλήρους συστήματος συλλέκτη DC και συστήματος μετάδοσης, αυτό το σχέδιο υιοθετεί την ανεμογεννήτρια θύρας DC σε σειρά για αύξηση τάσης,

αφαιρώντας έτσι τον ακριβό μετασχηματιστή DC/DC μεγάλης χωρητικότητας και την υπεράκτια πλατφόρμα στο Σχήμα 5.10 . Η βασική δομή φαίνεται στο Σχήμα 5.11. Τα ρεύματα εξόδου των ανεμογεννητριών με θύρα DC σε σειρά πρέπει να είναι σταθερά, επομένως οι τάσεις εξόδου κυμαίνονται ανάλογα με τις ισχύς εξόδου των ανεμογεννητριών. Το καλώδιο HVDC και ο χειρσαίος μετατροπέας πρέπει να είναι σχεδιασμένοι ώστε να επιτρέπουν μεταβλητή τάση καθώς η ταχύτητα του ανέμου και η ισχύς εξόδου ποικίλλουν. Εάν μια ανεμογεννήτρια δυσλειτουργεί, θα πρέπει να παρακαμφθεί για να διασφαλιστεί η μετάδοση ισχύος των υπόλοιπων ανεμογεννητριών. [9]



Σχήμα 5.11 Σχέδιο μετάδοσης σχήματος 8-HVDC για ανεμογεννήτρια θύρας DC συνδεδεμένη σε σειρά. (<https://www.mdpi.com/1996-1073/16/2/658>)

Στο Σχήμα 5.11 , για να απλοποιηθεί η ανάλυση, υποτίθεται ότι το αρνητικό καλώδιο βρίσκεται στο δυναμικό γείωσης και το θετικό καλώδιο είναι 500 kV. Με αυτόν τον τρόπο, οι τάσεις θετικού και αρνητικού πόλου της ανεμογεννήτριας DC-port που συνδέεται με το θετικό καλώδιο έχουν μεγέθη στο επίπεδο των 500 kV. Ας υποθέσουμε ότι η ανεμογεννήτρια DC-port είναι αυτή που φαίνεται στο Σχήμα 9 β. Η περιέλιξη από την πλευρά του δικτύου του μετασχηματιστή υψηλής συχνότητας στο Σχήμα 9b θα έχει τάση πόλωσης συνεχούς ρεύματος 500 kV, ενώ η περιέλιξη από την πλευρά της μηχανής του

μετασχηματιστή είναι κοντά στο δυναμικό γείωσης, πράγμα που σημαίνει ότι ο μετασχηματιστής υψηλής συχνότητας πρέπει να φέρει 500 kV τάσης συνεχούς ρεύματος μεταξύ της κύριας πλευράς και της δευτερεύουσας - πλαϊνές περιελίξεις. Για τον μετασχηματιστή με χωρητικότητα ανεμογεννήτριας, το κόστος είναι δυσανάλογο. Το κόστος είναι ο περιοριστικός παράγοντας.

Συμπερασματικά, αν και αυτό το σχήμα εξαλείφει τον μετασχηματιστή DC step-up στο σύστημα μετάδοσης HVDC, το κόστος κάθε ανεμογεννήτριας μπορεί να αυξηθεί σημαντικά και ο οικονομικός του ορθολογισμός δεν είναι προφανής. [9]

5.3.9 Περίληψη Τεχνικών Χαρακτηριστικών Διάφορων Σχημάτων

Για να δείξουμε διαισθητικά τα χαρακτηριστικά των διαφόρων υπεράκτιων σχημάτων μεταφοράς αιολικής ενέργειας που περιγράφονται παραπάνω, ο Πίνακας 5-2 συνοψίζει τα τεχνικά χαρακτηριστικά των οκτώ τυπικών σχημάτων που συζητήθηκαν στην προηγούμενη ενότητα. Ο Πίνακας 5-2 συγκρίνει την ικανότητα σχηματισμού δικτύου της ανεμογεννήτριας, τη συχνότητα της εξόδου της ανεμογεννήτριας, το κόστος και την πολυπλοκότητα της υπεράκτιας πλατφόρμας και του εξοπλισμού, τον τρόπο μετάδοσης του κύριου καναλιού μετάδοσης, το κόστος και την πολυπλοκότητα των χερσαίων συσκευών κ.λπ. Θεωρητικά, η πολυπλοκότητα της συσκευής συνδέεται στενά με την αξιοπιστία της και το κόστος λειτουργίας και συντήρησης. Όσο μεγαλύτερη είναι η πολυπλοκότητα, τόσο υψηλότερο είναι το κόστος λειτουργίας και συντήρησης και τόσο χαμηλότερη είναι η αξιοπιστία. Συγκεκριμένα, η τεχνολογική ωριμότητα κάθε σχεδίου δίνεται στον Πίνακα 5-2, ο οποίος μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως αναφορά για την τεχνολογική έρευνα και ανάπτυξη και επιλογή σχεδίων μηχανικής. [9]

Πίνακας 5-2 Σύνοψη τεχνικών χαρακτηριστικών διαφόρων σχημάτων. [9]

Κατηγορία	Έλεγχος Ανεμογεννητριών	Συχνότητα ανεμογεννητριών	Υπεράκτια πλατφόρμα και εξοπλισμός	Κόστος υπεράκτιας πλατφόρμας και εξοπλισμού	Πολυπλοκότητα υπεράκτιας πλατφόρμας και εξοπλισμού	Συχνότητα καναλιού μετάδοσης	Ευσκευή ξηράς	Κόστος χερσαίας συσκευής	Τυπική απόσταση μετάδοσης	Τεχνική ωριμότητα	Ακεραιότητα βιομηχανικής αλυσίδας	Πρακτική Εμπειρία Μηχανικού
Σχέδιο 1	Ακολουθεί πλέγμα	Συχνότητα ισχύος	Σταθμός αύξησης συχνότητας ισχύος	•	•	Συχνότητα ισχύος	/	0	0-80 χλμ	**** ***	**** ***	••
Σχέδιο 2	Ακολουθεί πλέγμα	Χαμηλή συχνότητα	Σταθμός ανύψωσης χαμηλής συχνότητας	••	•	Χαμηλή συχνότητα	Σταθμός μετατροπής συχνότητας M3C	**** ***	0-200 χλμ	***	•	Κανένας
Σχέδιο 3	Ακολουθεί πλέγμα	Συχνότητα ισχύος	Σταθμός ανορθωτή MMC συχνότητας ισχύος	**** •	**** •	DC	Σταθμός μετατροπής MMC συχνότητας ισχύος	**** •	απεριόριστος	**** ••	**** ••	•
Σχέδιο 4	Ακολουθεί πλέγμα	Μέση συχνότητα	Σταθμός ανορθωτή MMC μεσαίας συχνότητας	****	**** •	DC	Σταθμός μετατροπής MMC μεσαίας συχνότητας	****	απεριόριστος	**** •	•	Κανένας
Σχέδιο 5	Σχηματισμός πλέγματος	Χαμηλή συχνότητα	Σταθμός ανύψωσης χαμηλής συχνότητας	••	•	Χαμηλή συχνότητα	Μετατροπής συχνότητας DRU-MMC	**** ••	0-200 χλμ	•	•	Κανένας
Σχέδιο 6	Σχηματισμός πλέγματος	Μέση συχνότητα	Σταθμός ανορθωτή DRU μεσαίας συχνότητας	•••	•••	DC	Σταθμός μετατροπής MMC συχνότητας ισχύος	**** •	απεριόριστος	•	•	Κανένας
Σχέδιο 7	Όθρα DC	Παράλληλη ανεμογεννήτρια συνεχούς ρεύματος	Σταθμός ανύψωσης DC	**** •••	**** •••	DC	Σταθμός μετατροπής MMC συχνότητας ισχύος	**** •	απεριόριστος	•	•	Κανένας
Σχέδιο 8	Όθρα DC	Σειρά ανεμογεννήτρια DC	/	0	0	DC	Σταθμός μετατροπής MMC συχνότητας ισχύος	**** •	απεριόριστος	•	•	Κανένας

5.3.10 Συμπεράσματα

Οκτώ αντιπροσωπευτικά τεχνικά σχήματα συγκρίθηκαν ως προς την οικονομία, την αξιοπιστία και την τεχνολογική ωριμότητα και τα κύρια συμπεράσματα είναι τα ακόλουθα: [9]

(1) Επί του παρόντος, οι ώριμες τεχνολογίες για υπεράκτια μετάδοση αιολικής ενέργειας είναι το σύστημα μετάδοσης εναλλασσόμενου ρεύματος συχνότητας ισχύος για υπεράκτια αιολικά πάρκα που ακολουθούν το δίκτυο συχνότητας ισχύος και το σύστημα μετάδοσης HVDC για υπεράκτια αιολικά πάρκα που ακολουθούν το δίκτυο συχνότητας ισχύος.

(2) Σε σύγκριση με την ανεμογεννήτρια που σχηματίζει πλέγμα, η τεχνολογική ωριμότητα της ανεμογεννήτριας που ακολουθεί το δίκτυο είναι υψηλή. Ως εκ τούτου, το σύστημα μετάδοσης εναλλασσόμενου ρεύματος χαμηλής συχνότητας που βασίζεται σε M3C για υπεράκτια αιολικά πάρκα που ακολουθούν το δίκτυο χαμηλής συχνότητας και το

σύστημα μετάδοσης HVDC για υπεράκτια αιολικά πάρκα μεσαίας συχνότητας είναι τεχνολογίες με σχετικά μικρές δυσκολίες έρευνας και ανάπτυξης και η μηχανική Η έρευνα και ανάπτυξη εφαρμογών θα πρέπει να επιταχυνθεί.

(3) Το σύστημα μετάδοσης εναλλασσόμενου ρεύματος χαμηλής συχνότητας για υπεράκτια αιολικά πάρκα που σχηματίζουν δίκτυο χαμηλής συχνότητας μπορεί να υιοθετήσει το back-to-back DRU και MMC ως μετατροπέα συχνότητας, ο οποίος έχει οικονομικά πλεονεκτήματα, αλλά η τεχνολογία δεν είναι ακόμη ώριμη και χρειάζεται περαιτέρω ανάπτυξη.

(4) Το σύστημα μετάδοσης HVDC για υπεράκτια αιολικά πάρκα που σχηματίζουν δίκτυα μέσης συχνότητας είναι το προτιμώμενο σύστημα για υπεράκτια μεταφορά αιολικής ενέργειας. Σε σύγκριση με το σύστημα μετάδοσης HVDC που βασίζεται σε MMC, η οικονομία και η αξιοπιστία είναι πολύ ανώτερα. Επομένως, η ανάπτυξη αυτής της τεχνολογίας θα πρέπει να επιταχυνθεί.

(5) Από την άποψη της σύγκρισης κόστους, δύο είδη συστημάτων συλλέκτη και μετάδοσης πλήρους συνεχούς ρεύματος των ανεμογεννητριών του λιμένα DC παράλληλα και σε σειρά δεν έχουν εμφανή οικονομικά πλεονεκτήματα σε σύγκριση με τις υπάρχουσες τεχνολογίες.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] <https://www.iberdrola.com/sustainability/wind-power-evolution-europe>
- [2] <https://www.iberdrola.com/sustainability/how-does-offshore-wind-energy-work>
- [3] <https://us.orsted.com/renewable-energy-solutions/offshore-wind/offshore-wind-farm-construction/offshore-site-investigations>
- [4] <https://www.iberdrola.com/sustainability/how-does-offshore-wind-energy-work>
- [5] <https://blog.virtuosity.com/all-about-offshore-wind-turbine-foundations>
- [6] <https://encyclopedia.pub/entry/39927>
- [7] <https://www.iberdrola.com/about-us/our-activity/offshore-wind-energy/offshore-wind-park-construction>
- [8] <https://us.orsted.com/renewable-energy-solutions/offshore-wind/offshore-wind-farm-construction/bringing-wind-power-ashore>
- [9] <https://www.mdpi.com/1996-1073/16/2/658>