

ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΔΥΤΙΚΗΣ ΕΛΛΑΔΑΣ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Τ.Ε.
ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΣΠΟΥΔΩΝ
«ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΩΝ ΠΗΓΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ»

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΑΝΑΛΥΤΙΚΗ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΚΑΙ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ
ΣΤΟ SIMULINK ΜΙΑΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ ΥΠΟ
ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΒΡΑΧΥΚΥΚΛΩΜΑΤΟΣ.
ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΕ ΥΠΕΡΑΚΤΙΟ ΑΙΟΛΙΚΟ ΠΑΡΚΟ.**



ΦΟΙΤΗΤΗΣ: ΠΟΤΑΜΙΑΝΟΣ ΣΠΥΡΙΔΩΝ
ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΣΧΟΙΝΑΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ

ΠΑΤΡΑ 2016

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Το παρόν τεύχος αποτελεί τη Διπλωματική Εργασία που εκπονήθηκε στο Μεταπτυχιακό Πρόγραμμα Σπουδών του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών Τ.Ε. του Τεχνολογικού Εκπαιδευτικού Ιδρύματος Δυτικής Ελλάδας, με τίτλο: «Συστήματα Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας». Πραγματεύεται τη μελέτη της συμπεριφοράς ενός υπεράκτιου αιολικού πάρκου σε συνθήκες βραχυκυκλώματος.

Αρχικά, περιγράφονται γενικά τα υπεράκτια αιολικά πάρκα, οι τρόποι σύνδεσής τους και η διασύνδεσή τους με το σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας. Στη συνέχεια, δίνεται ιδιαίτερη έμφαση στα διάφορα πιθανά σφάλματα του δικτύου και κυρίως στα βραχυκυκλώματα. Τέλος, με τη βοήθεια του προγράμματος SIMULINK, πραγματοποιούνται προσομοιώσεις για τη μελέτη της συμπεριφοράς ενός υπεράκτιου αιολικού πάρκου όταν συμβαίνει βραχυκύκλωμα.

Σε αυτό το σημείο θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον Επιβλέποντα Καθηγητή μου κ. Νικόλαο Σχοινά, Επίκουρο Καθηγητή του Τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών Τ.Ε., χωρίς του οποίου την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγηση δε θα ήταν δυνατό να πραγματοποιηθεί η συγκεκριμένη Εργασία.

Ποταμιάνος Σπυρίδων
Πάτρα 2016

Υπεύθυνη Δήλωση Φοιτητή: Ο κάτωθι υπογεγραμμένος φοιτητής έχω επίγνωση των συνεπειών του Νόμου περί λογοκλοπής και δηλώνω υπεύθυνα ότι είμαι συγγραφέας αυτής της Διπλωματικής Εργασίας, έχω δε αναφέρει στην Βιβλιογραφία μου όλες τις πηγές τις οποίες χρησιμοποίησα και έλαβα ιδέες ή δεδομένα. Δηλώνω επίσης ότι, οποιοδήποτε στοιχείο ή κείμενο το οποίο έχω ενσωματώσει στην εργασία μου προερχόμενο από Βιβλία ή άλλες εργασίες ή το διαδίκτυο, γραμμένο ακριβώς ή παραφρασμένο, το έχω πλήρως αναγνωρίσει ως πνευματικό έργο άλλου συγγραφέα και έχω αναφέρει ανελλιπώς το όνομά του και την πηγή προέλευσης.

Ο φοιτητής
Ποταμιάνος Σπυρίδων

.....
(Υπογραφή)

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα Διπλωματική Εργασία αναφέρεται στην προσομοίωση ενός υπεράκτιου αιολικού πάρκου σε συνθήκες βραχυκυκλώματος. Τα υπεράκτια αιολικά πάρκα, είναι αιολικά πάρκα που βρίσκονται εγκατεστημένα στη θάλασσα και σε μεγάλη απόσταση από την ακτή, όπου το αιολικό δυναμικό είναι τεράστιο. Η Διπλωματική Εργασία αποτελείται από πέντε Κεφάλαια.

Στο Πρώτο Κεφάλαιο γίνεται μια σύντομη περιγραφή των υπεράκτιων αιολικών πάρκων και αναφέρονται τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματά τους, όπως και οι επιπτώσεις από την κατασκευή και τη λειτουργία τους. Επίσης, παρουσιάζεται η υπεράκτια αιολική ενέργεια σε παγκόσμιο επίπεδο.

Στο Δεύτερο Κεφάλαιο παρουσιάζονται οι τρόποι με τους οποίους μπορεί να γίνει η σύνδεση των αιολικών πάρκων. Συγκεκριμένα, υπάρχουν τρεις διαφορετικοί τρόποι σύνδεσης, εναλλασσόμενου ρεύματος, εναλλασσόμενου ρεύματος/ συνεχούς ρεύματος και συνεχούς ρεύματος, οι οποίοι αναλύονται.

Στο Τρίτο Κεφάλαιο συζητάται η διασύνδεση των υπεράκτιων αιολικών πάρκων με το σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας. Αναλύονται η απαραίτητη τάση για τη μεταφορά και τη διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας και τα κύρια συστήματα μετατροπής ισχύος των ανεμογεννητριών. Επιπλέον δίνεται μια περιγραφή των υποβρύχιων καλωδίων και των συστημάτων εναλλασσόμενου ρεύματος υψηλής τάσης - hvac (high voltage alternative current) και συνεχούς ρεύματος υψηλής τάσης - hvdc (high voltage direct current). Στη συνέχεια συγκρίνονται οι αγωγοί τεχνολογίας συνεχούς ρεύματος και τεχνολογίας εναλλασσόμενου ρεύματος. Ακόμα, παρουσιάζονται οι υπεράκτιοι σταθμοί μετατροπής ac/dc και το σύστημα ελέγχου scada.

Στο Τέταρτο Κεφάλαιο γίνεται εκτενής αναφορά στα σφάλματα του δικτύου, δίνοντας έμφαση στα βραχυκυκλώματα. Δίνονται οι κανονισμοί για τον υπολογισμό των ρευμάτων βραχυκύκλωσης και το επίπεδο ισχύος βραχυκυκλώματος. Έπειτα, μελετώνται οι μέθοδοι για την παραμονή σε λειτουργία, ανεμογεννήτριας με γεννήτρια επαγωγής διπλής τροφοδότησης κατά τη διάρκεια βύθισης τάσης.

Στο Πέμπτο Κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τις προσομοιώσεις στο SIMULINK. Μελετήθηκε ένα υπεράκτιο αιολικό πάρκο συνολικής ισχύος 9 MW, το οποίο αποτελείται από 6 ανεμογεννήτριες ισχύος 1.5 MW η καθεμία, σε συνθήκες βραχυκυκλώματος.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ.....	
ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ.....	
ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	
1 ΥΠΕΡΑΚΤΙΑ ΑΙΟΛΙΚΑ ΠΑΡΚΑ.....	1
1.1 ΓΕΝΙΚΑ.....	1
1.2 ΥΠΕΡΑΚΤΙΑ ΑΙΟΛΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΣΕ ΠΑΓΚΟΣΜΙΟ ΕΠΙΠΕΔΟ.....	4
1.3 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΥΠΕΡΑΚΤΙΩΝ ΑΙΟΛΙΚΩΝ ΠΑΡΚΩΝ.....	5
1.4 ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΑΠΟ ΤΗΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΚΑΙ ΤΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΕΝΟΣ ΥΠΕΡΑΚΤΙΟΥ ΑΙΟΛΙΚΟΥ ΠΑΡΚΟΥ.....	6
2 ΤΡΟΠΟΙ ΣΥΝΔΕΣΗΣ ΑΙΟΛΙΚΩΝ ΠΑΡΚΩΝ.....	9
2.1 ΓΕΝΙΚΑ.....	9
2.1.1 ΑΙΟΛΙΚΑ ΠΑΡΚΑ ΜΕ ΣΥΝΔΕΣΗ ΕΝΑΛΛΑΣΣΟΜΕΝΟΥ ΡΕΥΜΑΤΟΣ 10	
2.1.2 ΑΙΟΛΙΚΑ ΠΑΡΚΑ ΜΕ ΣΥΝΔΕΣΗ ΕΝΑΛΛΑΣΣΟΜΕΝΟΥ ΡΕΥΜΑΤΟΣ/ ΣΥΝΕΧΟΥΣ ΡΕΥΜΑΤΟΣ.....	12
2.1.3 ΑΙΟΛΙΚΑ ΠΑΡΚΑ ΜΕ ΣΥΝΔΕΣΗ ΣΥΝΕΧΟΥΣ ΡΕΥΜΑΤΟΣ.....	12
3 ΔΙΑΣΥΝΔΕΣΗ ΤΩΝ ΥΠΕΡΑΚΤΙΩΝ ΑΙΟΛΙΚΩΝ ΠΑΡΚΩΝ ΜΕ ΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ.....	17
3.1 ΓΕΝΙΚΑ.....	17
3.2 ΑΠΑΡΑΙΤΗΤΗ ΤΑΣΗ ΓΙΑ ΤΗ ΜΕΤΑΦΟΡΑ ΚΑΙ ΤΗ ΔΙΑΝΟΜΗ ΤΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ.....	19
3.3 ΚΥΡΙΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΜΕΤΑΤΡΟΠΗΣ ΙΣΧΥΟΣ ΤΩΝ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ.....	19
3.3.1 ΕΠΑΓΩΓΙΚΗ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑ ΔΙΠΛΗΣ ΤΡΟΦΟΔΟΤΗΣΗΣ (DOUBLY FED INDUCTION GENERATOR – DFIG).....	21

3.3.1.1	Η DFIG ως γεννήτρια σε υποσύγχρονες ταχύτητες	23
3.3.1.2	Η DFIG ως γεννήτρια σε υπερέσύγχρονες ταχύτητες.....	24
3.3.2	ΜΗΧΑΝΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΚΙΝΗΣΗΣ	24
3.3.3	ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΕΠΑΓΩΓΙΚΗΣ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ ΔΙΠΛΗΣ ΤΡΟΦΟΔΟΤΗΣΗΣ	25
3.3.3.1	Εξισώσεις της τάση και της ροής	26
3.3.3.2	Εξίσωση της ροπής	27
3.3.3.3	Το ανα μονάδα σύστημα.....	27
3.4	ΥΠΟΒΡΥΧΙΑ ΚΑΛΩΔΙΑ	28
3.4.1	ΣΥΣΤΗΜΑ ΕΝΑΛΛΑΣΣΟΜΕΝΟΥ ΡΕΥΜΑΤΟΣ ΥΨΗΛΗΣ ΤΑΣΗΣ - HVAC (HIGH VOLTAGE ALTERNATIVE CURRENT)	29
3.4.1.1	ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΕΝΑΛΛΑΣΣΟΜΕΝΟΥ ΡΕΥΜΑΤΟΣ ΥΨΗΛΗΣ ΤΑΣΗΣ - HVAC (HIGH VOLTAGE ALTERNATIVE CURRENT)	29
3.4.2	ΣΥΣΤΗΜΑ ΣΥΝΕΧΟΥΣ ΡΕΥΜΑΤΟΣ ΥΨΗΛΗΣ ΤΑΣΗΣ - HVDC (HIGH VOLTAGE DIRECT CURRENT)	30
3.4.2.1	ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΩΝ ΑΓΩΓΩΝ ΣΤΑΘΕΡΟΥ ΡΕΥΜΑΤΟΣ ΥΨΗΛΗΣ ΤΑΣΗΣ HVDC	31
3.4.2.2	ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΣΥΝΕΧΟΥΣ ΡΕΥΜΑΤΟΣ ΥΨΗΛΗΣ ΤΑΣΗΣ - HVDC (HIGH VOLTAGE DIRECT CURRENT)	31
3.4.2.3	ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΤΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΣΥΝΕΧΟΥΣ ΡΕΥΜΑΤΟΣ ΥΨΗΛΗΣ ΤΑΣΗΣ - HVDC (HIGH VOLTAGE DIRECT CURRENT).....	32
3.4.2.4	ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΤΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ VSC - HVDC	34
3.4.2.5	ΣΤΑΘΜΟΣ VSC-HVDC	35
3.4.2.6	ΤΟΠΟΛΟΓΙΕΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ HVDC	36
3.5	ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕΤΑΞΥ ΑΓΩΓΩΝ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΣΥΝΕΧΟΥΣ ΡΕΥΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΕΝΑΛΛΑΣΣΟΜΕΝΟΥ ΡΕΥΜΑΤΟΣ	39
3.6	ΥΠΕΡΑΚΤΙΟΙ ΣΤΑΘΜΟΙ ΜΕΤΑΤΡΟΠΗΣ AC/DC	40
3.7	ΣΥΣΤΗΜΑ ΕΛΕΓΧΟΥ SCADA.....	40
4	ΣΦΑΛΜΑΤΑ ΤΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ - ΒΡΑΧΥΚΥΚΛΩΜΑΤΑ	43
4.1	ΓΕΝΙΚΑ.....	43
4.2	ΒΡΑΧΥΚΥΚΛΩΜΑΤΑ.....	45

4.2.1	ΚΑΝΟΝΙΣΜΟΙ ΓΙΑ ΤΟΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟ ΤΩΝ ΡΕΥΜΑΤΩΝ ΒΡΑΧΥΚΥΚΛΩΣΗΣ	46
4.2.2	ΕΠΙΠΕΔΟ ΙΣΧΥΟΣ ΒΡΑΧΥΚΥΚΛΩΜΑΤΟΣ	46
4.3	ΜΕΘΟΔΟΙ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΑΡΑΜΟΝΗ ΣΕ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ, ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ ΜΕ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑ ΕΠΑΓΩΓΗΣ ΔΙΠΛΗΣ ΤΡΟΦΟΔΟΤΗΣΗΣ ΚΑΤΑ ΤΗ ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΒΥΘΙΣΗΣ ΤΑΣΗΣ	47
5	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ	51
6	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	67
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	69

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η μείωση των αποθεμάτων των ορυκτών καυσίμων και η πετρελαϊκή κρίση του 1973 υπήρξε η αφορμή για την ανάπτυξη των τεχνολογιών ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Με τον όρο Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ) ορίζονται εκείνες οι πηγές ενέργειας, οι οποίες υπάρχουν σε αφθονία στο φυσικό περιβάλλον, είναι ανεξάντλητες και έχουν το σημαντικό πλεονέκτημα πως δεν μολύνουν το περιβάλλον. Συγκεκριμένα, η ΟΔΗΓΙΑ 2001/77/ΕΚ ορίζει ως Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ) τις μη ορυκτές ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, δηλαδή την αιολική, την ηλιακή και τη γεωθερμική ενέργεια, την ενέργεια κυμάτων, την παλιρροϊκή ενέργεια, την υδραυλική ενέργεια, τα αέρια τα εκλυόμενα από χώρους υγειονομικής ταφής, από εγκαταστάσεις βιολογικού καθαρισμού και τα βιοαέρια.

Η αιολική ενέργεια προέρχεται από τον άνεμο και αξιοποιείται με τη χρήση ανεμογεννητριών. Η ηλιακή ενέργεια, όπως υποδηλώνει και το όνομά της, προέρχεται από τον ήλιο και μπορεί να χρησιμοποιηθεί στα φωτοβολταϊκά, στα ενεργητικά και στα παθητικά ηλιακά συστήματα. Γεωθερμία είναι η φυσική θερμική ενέργεια της Γης, η οποία υπάρχει λόγω της μεγαλύτερης θερμοκρασίας που επικρατεί στο εσωτερικό του πλανήτη. Η βιομάζα είναι η θερμική ή χημική ενέργεια που μπορεί να παραχθεί από τα υλικά που προέρχονται από ζωντανούς οργανισμούς.

Σύμφωνα με τον Ν 2773/1999, παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας από ΑΠΕ είναι η Ηλεκτρική Ενέργεια η οποία προέρχεται από:

1. Την εκμετάλλευση Αιολικής ή Ηλιακής Ενέργειας ή βιομάζας ή Βιοαερίου.
2. Την εκμετάλλευση Γεωθερμικής Ενέργειας, εφόσον το δικαίωμα εκμετάλλευσης του σχετικού Γεωθερμικού Δυναμικού έχει παραχωρηθεί στον ενδιαφερόμενο, σύμφωνα με τις ισχύουσες κάθε φορά διατάξεις.
3. Την εκμετάλλευση της Ενέργειας από την Θάλασσα.
4. Την εκμετάλλευση Υδάτινου Δυναμικού με Μικρούς Υδροηλεκτρικούς Σταθμούς μέχρι 10 MW.
5. Συνδυασμό των ανωτέρω.
6. Τη Συμπαράγωγή, με χρήση των Πηγών Ενέργειας, των (1) και (2) και συνδυασμό τους.

Οι Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας παρουσιάζουν το πλεονέκτημα πως είναι ανεξάντλητες σε αντίθεση με τα ορυκτά καύσιμα τα αποθέματα των οποίων μειώνονται συνεχώς. Επίσης, είναι εγχώριες επομένως κάθε χώρα μπορεί να είναι ενεργειακά ανεξάρτητη σε μεγαλύτερο ποσοστό χρησιμοποιώντας τις ΑΠΕ. Επειδή είναι διεσπαρμένες σε ολόκληρη τη χώρα δίνεται η δυνατότητα κάλυψης των αναγκών σε απομακρυσμένες περιοχές. Τέλος, δεν εκπέμπουν ρύπους, οι οποίοι είναι βλαβεροί για το περιβάλλον.

Η πιο ανεπτυγμένη από τις τεχνολογίες Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας είναι η αιολική ενέργεια. Επειδή το αιολικό δυναμικό υπεράκτια είναι τεράστιο, υπάρχει μια τάση τα τελευταία χρόνια στην Ευρώπη να εγκαθίστανται όλο και περισσότερες υπεράκτιες ανεμογεννήτριες. Το αιολικό δυναμικό είναι τεράστιο στις Σκανδιναβικές κυρίως χώρες και σε μερικές περιοχές στη Μεσόγειο, πολλές από τις οποίες είναι τα ελληνικά νησιά.

1 ΥΠΕΡΑΚΤΙΑ ΑΙΟΛΙΚΑ ΠΑΡΚΑ

1.1 ΓΕΝΙΚΑ

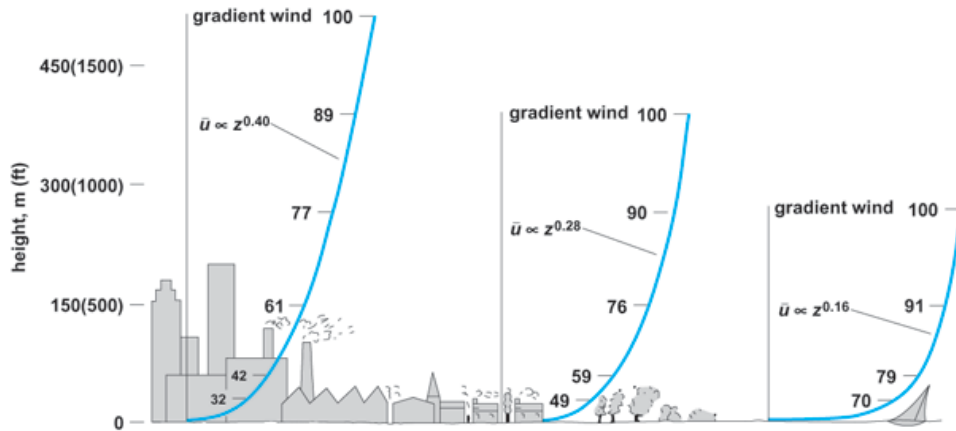
Μέχρι τις μέρες μας, η πλειοψηφία των αιολικών πάρκων είναι εγκατεστημένη σε περιοχές με κατάλληλο αιολικό δυναμικό στην ξηρά. Τα τελευταία χρόνια γίνεται μια σημαντική προσπάθεια αύξησης της παραγωγής ενέργειας από την αιολική ενέργεια με τα υπεράκτια αιολικά πάρκα (offshore wind farms), τα οποία είναι αιολικά πάρκα εγκατεστημένα σε θαλάσσιες περιοχές, όπως φαίνεται στην Εικόνα 1.1.



Εικόνα 1.1: Φωτογραφία υπεράκτιου αιολικού πάρκου (rene, 2016)

Με αυτό τον τρόπο αυξάνονται κατά πολύ οι περιοχές οι οποίες είναι κατάλληλες για τη δημιουργία αιολικών πάρκων. Ειδικότερα σε μικρές χώρες, όπως είναι η Ελλάδα, αυξάνονται κατά πολύ οι διαθέσιμες περιοχές για την δημιουργία αιολικών πάρκων καθώς οι κατάλληλες περιοχές στο ηπειρωτικό μέρος χώρας είναι σαφώς πολύ λιγότερες από τις αντίστοιχες θαλάσσιες. Σημαντικό είναι το γεγονός πως η ταχύτητα του ανέμου στην επιφάνεια της

θάλασσας είναι αρκετά μεγαλύτερη από την αντίστοιχη στην ξηρά, λόγω της αυξημένης τριβής της επιφάνειας του εδάφους, γεγονός που οδηγεί τις υπερράκτιες ανεμογεννήτριες να λειτουργούν με αισθητά μεγαλύτερη απόδοση (Εικόνα 1.2).



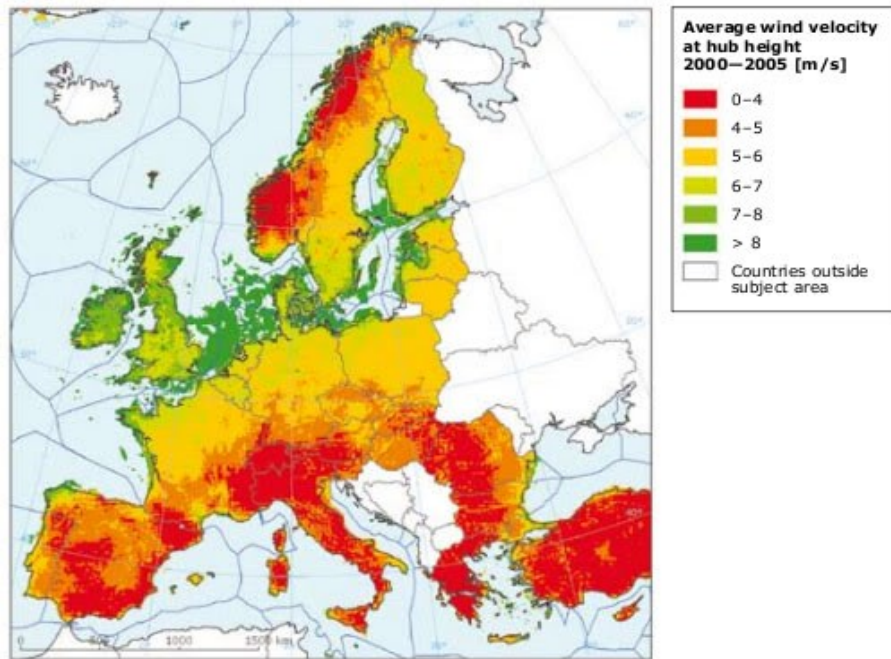
Εικόνα 1.2: Μεταβολή του ανέμου πανω από επιφάνειες διαφορετικής τραχύτητας

Η ανάπτυξη των τεχνολογιών της υπερράκτιας αιολικής ενέργειας είναι σημαντική για την ευρωπαϊκή ενεργειακή πολιτική που αφορά τη μείωση των ρύπων κατά 80 % σε σχέση με τα αντίστοιχα επίπεδα του 1990, μέχρι το 2050 (Αnon., 2016). Αρχικά, το αιολικό δυναμικό είναι τεράστιο, με την Ευρωπαϊκή Ένωση Αιολικής Ενέργειας (European Wind Energy Association – EWEA) να αναμένει η εγκατεστημένη υπερράκτια αιολική ισχύς το 2030 να φτάνει τα 150 GW, η οποία θα παρέχει το 14% της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας στην Ευρώπη ((EWEA), 2011).

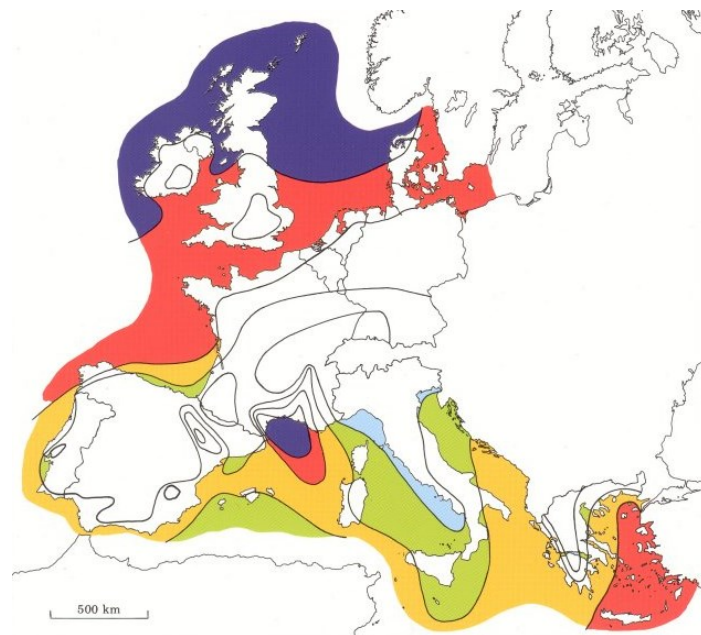
Η υπερράκτια αιολική ενέργεια έχει τη δυνατότητα να γίνει ένας σημαντικός πυλώνας του μελλοντικού ευρωπαϊκού ενεργειακού συστήματος, συμβάλλοντας στην επίτευξη των στόχων της πολιτικής για την κλιματική αλλαγή, την ενεργειακή ασφάλεια και την οικονομικά προσιτή ενέργεια. Επίσης, επειδή η συγκεκριμένη τεχνολογία είναι στα πρώτα στάδια ανάπτυξης της, μπορούν να αξιοποιηθούν πολλές επιχειρηματικές ευκαιρίες, συμβάλλοντας έτσι στην πράσινη οικονομική ανάπτυξη.

Παρόλο που επιλογή της κατάλληλης περιοχής για την εγκατάσταση υπερράκτιου αιολικού πάρκου είναι πιο εύκολη συγκριτικά με την επιλογή μιας ηπειρωτικής περιοχής, δεν σημαίνει πως γίνεται αυθαίρετα. Τα βασικά κριτήρια που πρέπει να πληρεί μια περιοχή ώστε τελικά να κατασκευαστεί σε εκείνη ένα υπερράκτιο αιολικό πάρκο διαφέρουν από χώρα σε χώρα. Πιο συχνό κριτήριο είναι το βάθος, η απόσταση από την ακτή και η ικανοποιητική ταχύτητα του ανέμου. Στην περίπτωση που η περιοχή της ακτής είναι προστατευόμενη είναι πολύ σημαντικό να ληφθεί υπόψη η οπτική όχληση από την ακτή.

Στην Εικόνα 1.3 παρουσιάζεται η μέση ταχύτητα του ανέμου στο κέντρο του ρότορα της ανεμογεννήτριας στην ηπειρωτική Ευρώπη και στην Εικόνα 1.4 το υπερράκτιο αιολικό δυναμικό της Ευρώπης σε διάφορα ύψη.



Εικόνα 1.3: Μέση ταχύτητα του ανέμου στην ηπειρωτική Ευρώπη (ΕΕΑ, 2009)



Wind resources over open sea (more than 10 km offshore) for five standard heights									
10 m		25 m		50 m		100 m		200 m	
ms ⁻¹	Wm ⁻²	ms ⁻¹	Wm ⁻²	ms ⁻¹	Wm ⁻²	ms ⁻¹	Wm ⁻²	ms ⁻¹	Wm ⁻²
> 8.0	> 600	> 8.5	> 700	> 9.0	> 800	> 10.0	> 1100	> 11.0	> 1500
7.0-8.0	350-600	7.5-8.5	450-700	8.0-9.0	600-800	8.5-10.0	650-1100	9.5-11.0	900-1500
6.0-7.0	250-300	6.5-7.5	300-450	7.0-8.0	400-600	7.5- 8.5	450- 650	8.0- 9.5	600- 900
4.5-6.0	100-250	5.0-6.5	150-300	5.5-7.0	200-400	6.0- 7.5	250- 450	6.5- 8.0	300- 600
< 4.5	< 100	< 5.0	< 150	< 5.5	< 200	< 6.0	< 250	< 6.5	< 300

Εικόνα 1.4: Μέση ταχύτητα του ανέμου στα χωρικά ύδατα της Ευρώπης (ΕΕΑ, 2009)

1.2 ΥΠΕΡΑΚΤΙΑ ΑΙΟΛΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΣΕ ΠΑΓΚΟΣΜΙΟ ΕΠΙΠΕΔΟ

Το υπεράκτιο αιολικό δυναμικό είναι τεράστιο και θα μπορούσε να καλύψει επτά φορές την ενεργειακή ζήτηση στην Ευρώπη και τέσσερις φορές στις Ηνωμένες Πολιτείες. Επειδή τα υπεράκτια αιολικά πάρκα είναι μια σχετικά νέα τεχνολογία, αναμένεται να μειωθεί το κόστος και να εξελιχθεί η τεχνολογία, ώστε στο προσεχές μέλλον να είναι πιο αποτελεσματική και πιο ανταγωνιστική οικονομικά.

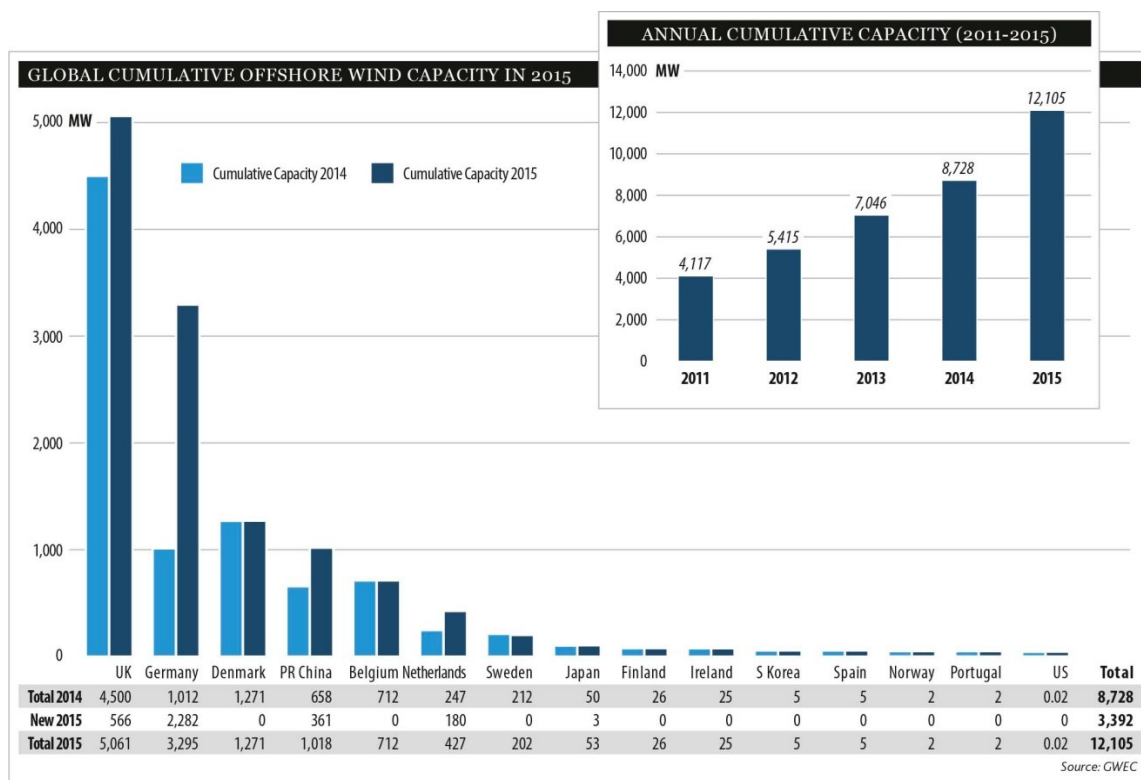
Έχουν περάσει είκοσι ένα χρόνια από την κατασκευή του πρώτου υπεράκτιου αιολικού πάρκου Vindeby, συνολικής ισχύος 5MW, στη Δανία. Το 2015, η εγκατεστημένη αιολική ισχύς σε παγκόσμιο επίπεδο από υπεράκτια αιολικά πάρκα φτάνει τα 4620 MW (Ernst and Young, 2015), η οποία είναι μόλις το 2% της συνολικής εγκατεστημένης αιολικής ισχύος. Περισσότερο από το 90% των υπεράκτιων αιολικών πάρκων βρίσκεται εγκατεστημένο στη βόρεια Ευρώπη, στη Βόρεια, τη Βαλτική και Ιρλανδική θάλασσα, και τη θάλασσα της Μάγχης, ενώ τα υπόλοιπα βρίσκονται κυρίως στην ανατολική ακτή της Κίνας.

Η Ιαπωνία, η Κορέα, οι Ηνωμένες Πολιτείες, ο Καναδάς, η Ταϊβάν και η Ινδία δείχνουν έντονο ενδιαφέρον για την δημιουργία υπεράκτιων αιολικών πάρκων στα χωρικά τους ύδατα. Σύμφωνα με προβλέψεις, υπάρχει η δυνατότητα να εγκατασταθούν από το 2020 σε όλο τον κόσμο υπεράκτιες εγκαταστάσεις αιολικής ενέργειας συνολικής ισχύος 80 GW, με το 75% αυτών να βρίσκονται στην Ευρώπη.

Στην Ευρώπη υπάρχουν πλήρως διασυνδεδεμένα 56 υπεράκτια αιολικά πάρκα σε δέκα χώρες, συνολικής ισχύος 4336 MW. Το Ηνωμένο Βασίλειο και η Δανία παραμένουν οι δύο μεγαλύτερες αγορές για την υπεράκτια αιολική ενέργεια στην Ευρώπη, και ακολουθούν το Βέλγιο, η Ολλανδία, η Γερμανία, η Σουηδία, η Φινλανδία και η Ιρλανδία.

Η υπεράκτια αιολική ενέργεια αποτελεί τον σημαντικότερη πηγή ενέργειας για τη δέσμευση της Ευρώπης που έχει ως στόχο να προέρχεται το 20% της τελικής κατανάλωσης ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές. Μέχρι σήμερα, είναι υπό κατασκευή στην Ευρώπη σχεδόν 6 GW υπεράκτιας αιολικής ισχύος, έχουν εγκριθεί άλλα 17 GW, και υπάρχουν σχέδια για ακόμη 114 GW. Τα επόμενα τέσσερα χρόνια αναμένεται να εγκατασταθούν στην Ευρώπη ακόμα 16,2 GW υπεράκτιας αιολικής ισχύος, το μεγαλύτερο ποσοστό των οποίων θα βρίσκεται στη Βόρεια Θάλασσα.

Κατά το 2015 εγκαταστάθηκαν στην Ευρώπη υπεράκτιες ανεμογεννήτριες συνολικής ισχύος 3,018.5 MW, παρουσιάζοντας αύξηση της τάξεως του 108,3% σε σχέση με το 2014 και είναι η μέγιστη ετήσια αύξηση ισχύος που έχει πραγματοποιηθεί έως σήμερα. Συγκεκριμένα, κατά τη διάρκεια του 2015, κατασκευάστηκαν συνολικά 22 υπεράκτια αιολικά πάρκα στην Ευρώπη. Στην Εικόνα 1.5 παρουσιάζεται η συνολική παγκόσμια εγκατεστημένη υπεράκτια αιολική ισχύς μέχρι και το 2015.



Εικόνα 1.5: Παγκόσμια εγκατεστημένη υπεράκτια αιολική ισχύς μέχρι το 2015 (GWEC, 2016)

1.3 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΥΠΕΡΑΚΤΙΩΝ ΑΙΟΛΙΚΩΝ ΠΑΡΚΩΝ

Τα υπεράκτια αιολικά πάρκα, όταν συγκριθούν με τα αντίστοιχα ηπειρωτικά, παρουσιάζουν αρκετά πλεονεκτήματα, τα οποία μεταξύ άλλων είναι:

- Αυξημένη απόδοση των υπεράκτιων ανεμογεννητριών. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι οι ταχύτητες του ανέμου στον θαλάσσιο χώρο είναι πολύ υψηλότερες από αυτές στην ξηρά και στο ότι η τύρβη του ανέμου είναι μικρότερη στη θάλασσα επειδή η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ της θάλασσας και της ατμόσφαιρας είναι μειωμένη. Σε μεγάλα υπεράκτια αιολικά πάρκα που βρίσκονται εγκατεστημένα στην Δανία, έχει βρεθεί πως η ενέργεια που παράγουν είναι έως και 80 % μεγαλύτερη από ένα ηπειρωτικό πάρκο, σε περιοχή με αντίστοιχο αιολικό δυναμικού.
- Εύκολη μεταφορά της ενέργειας στις μεγάλες πόλεις, η πλειοψηφία των οποίων βρίσκεται κοντά στις ακτές.

- Αυξημένη διάρκεια ζωής που οφείλεται στην μικρότερη καταπόνησή τους.
- Οι εκτάσεις στον θαλάσσιο χώρο είναι άφθονες, συνεχείς και έχουν μεγάλο εμβαδόν.
- Δεν έχουν αρνητικές επιπτώσεις στο ανθρώπινο περιβάλλον επειδή απέχουν αρκετά από τις ακτές.
- Δεν αλλοιώνουν τις ακτές.

Εκτός όμως από τα πλεονεκτήματα, παρουσιάζουν και κάποια μειονεκτήματα τα οποία αναφέρονται παρακάτω.

- Μεγαλύτερο κόστος κατασκευής, της τάξεως του 50 %, από το αντίστοιχο κόστος ενός ηπειρωτικού αιολικού πάρκου. Τα μεγάλα κεφάλαια που απαιτούνται για την εγκατάσταση του στο βυθό καθώς και η σύνδεσή του μέσω υπογείου καλωδίου με το χερσαίο ηλεκτρικό δίκτυο ευθύνονται για το αυξημένο κόστος.
- Οι ανεμογεννήτριες πρέπει να είναι πιο ανθεκτικές, επειδή στις υπερράκτιες περιοχές είναι πιο συχνές οι θύελλες, τα κύματα είναι πανύψηλα και το αλμυρό νερό έχει ως αποτέλεσμα να επικρατούν ισχυρά διαβρωτικές συνθήκες.
- Αυξημένο κόστος όχι μόνο κατάσκευής αλλά και συντήρησης, το οποίο αυξάνεται αναλογικά με την αύξηση του βάθους του νερού και της αύξησης της απόστασης από την ακτή.

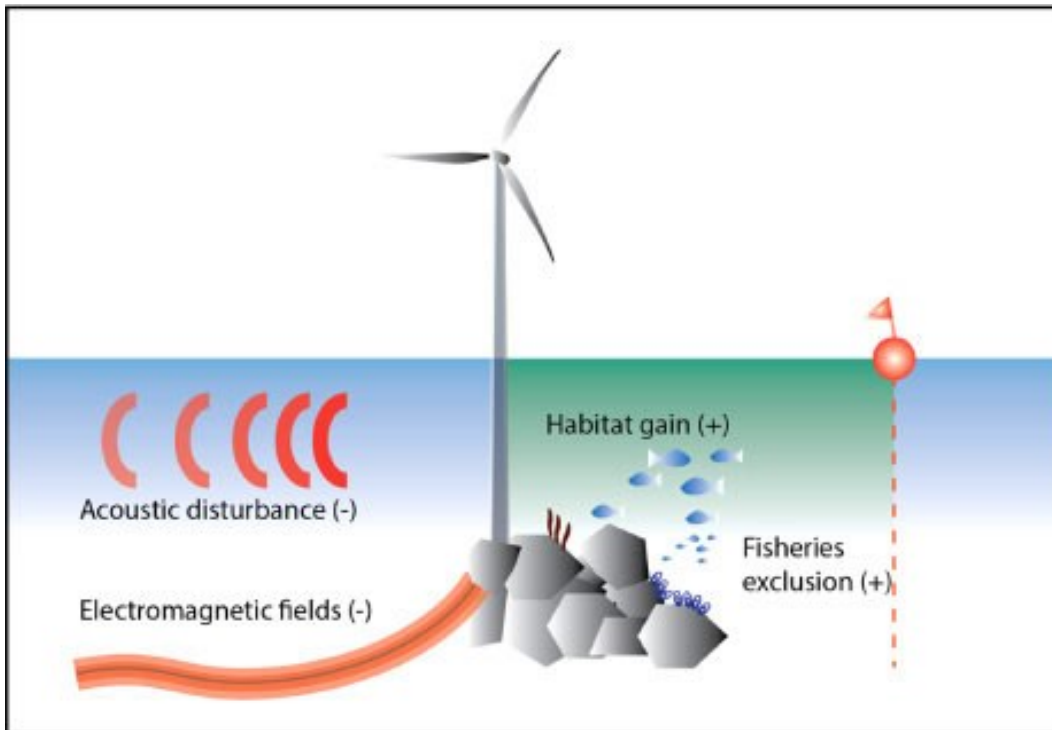
1.4 ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΑΠΟ ΤΗΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΚΑΙ ΤΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΕΝΟΣ ΥΠΕΡΑΚΤΙΟΥ ΑΙΟΛΙΚΟΥ ΠΑΡΚΟΥ

Η κατασκευή αρχικά και η λειτουργία ενός υπερράκτιου αιολικού πάρκου στη συνέχεια, έχουν επιπτώσεις στο οικοσύστημα (Bergström et al., 2014), οι οποίες είναι:

- Μετά από χρόνια, τα θεμέλια των ανεμογεννητριών είναι πολύ πιθανό να λειτουργήσουν ως τεχνητοί ύφαλοι. Αυτό θα αυξήσει την θαλάσσια χλωρίδα και επομένως τον αριθμό των ψαριών στην συγκεκριμένη περιοχή. Η ενδεχόμενη αύξηση του αριθμού των ψαριών ίσως οδηγήσει σε αύξηση του πλήθους των πουλιών με αποτέλεσμα να κινδυνεύουν να συγκρουστούν με τις ανεμογεννήτριες περισσότερα πουλιά.
- Όσον αφορά συγκεκριμένα τα μεταναστευτικά πουλιά, δεν κινδυνεύουν μόνο από τις πιθανές συγκρούσεις με τις ανεμογεννήτριες, αλλά υπάρχει και ο κίνδυνος να αποπροσανατολιστούν από τον φωτισμό των ανεμογεννητριών κατά την διάρκεια της νύχτας, ο οποίος είναι υποχρεωτικός.
- Σε περιοχές όπου γίνεται εγκατάσταση υπερράκτιων αιολικών πάρκων μπορεί να αλλοιωθεί το φυσικό περιβάλλον και να μειωθούν οι ζωντανοί οργανισμοί που ζούσαν μέχρι εκείνη τη

στιγμή στις συγκεκριμένες περιοχές. Αυτό είναι ως αποτέλεσμα των υποθαλάσσιων θεμελιώσεων, των διαφόρων συστημάτων αγκίστρωσης, των υλικών που χρησιμοποιούνται για την προστασία της ανεμογεννήτριας από διάβρωση, για τον καθαρισμό και τη συντήρησή της, καθώς επίσης και του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου που δημιουργείται κατά τη λειτουργία της.

- Για την αποφυγή των ανεμογεννητριών, τα πλοία είναι αναγκασμένα να χαράξουν νέες πορείες, και υπάρχει έτσι το ενδεχόμενο αύξησης του κόστους των θαλάσσιων μεταφορών.
- Το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο που δημιουργείται από τη λειτουργία των ανεμογεννητριών είναι πολύ πιθανό να επηρεάσει τόσο τα ραντάρ των πλοίων όσο και τον έλεγχο εναέριας κυκλοφορίας.
- Οι δονήσεις των ανεμογεννητριών συνήθως προκαλούν υποβρύχιο θόρυβο της τάξεως των 80-150 dB, σε μήκη κύματος που βρίσκονται εντός του ακουστικού φάσματος τόσο των ψαριών όσο και των θηλαστικών.



Εικόνα 1.6: Κύριες επιπτώσεις μιας υπεράκτιας ανεμογεννήτριας κατά τη φάση λειτουργίας της (Bergström et al., 2014)

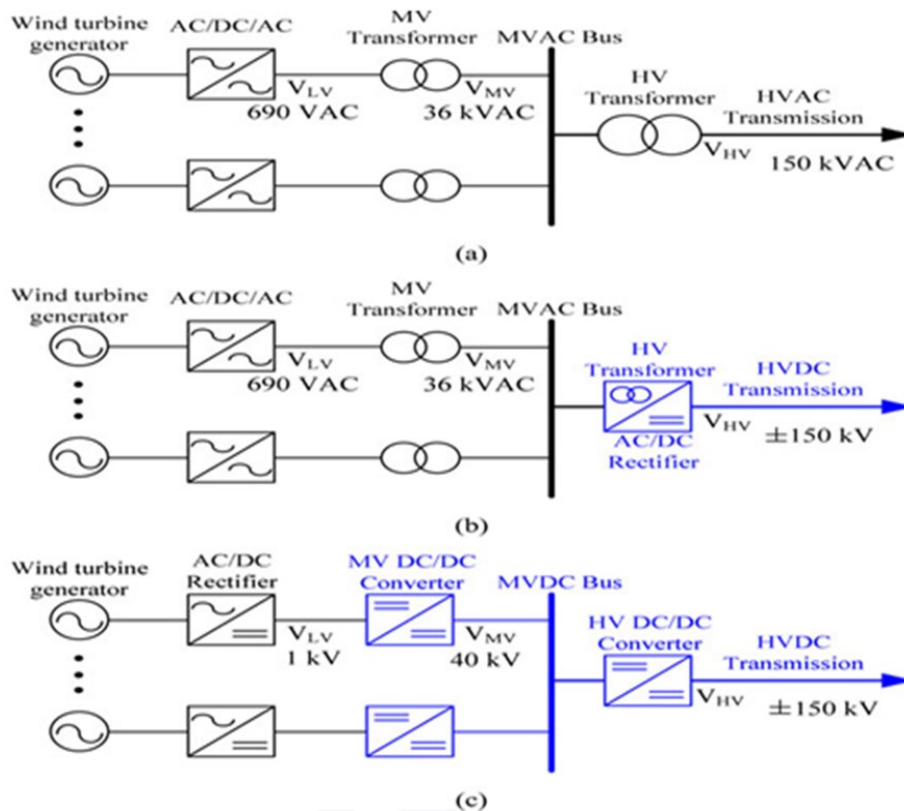
2 ΤΡΟΠΟΙ ΣΥΝΔΕΣΗΣ ΑΙΟΛΙΚΩΝ ΠΑΡΚΩΝ

2.1 ΓΕΝΙΚΑ

Οι τρόποι σύνδεσης των αιολικών πάρκων είναι ποικίλλοι (Εικόνα 2.1), καθώς τα περισσότερα αιολικά πάρκα παρουσιάζουν διάφορες ιδιαιτερότητες και πρέπει παρόλα αυτά να συνδέονται στο δίκτυο χωρίς προβλήματα, όπως είναι οι διακυμάνσεις και οι αναταραχές. Αυτές οι συνδεσμολογίες είναι:

- Αιολικά πάρκα με σύνδεση εναλλασσόμενου ρεύματος
- Αιολικά πάρκα με σύνδεση εναλλασσόμενου ρεύματος / συνεχούς ρεύματος
- Αιολικά πάρκα με σύνδεση συνεχούς ρεύματος

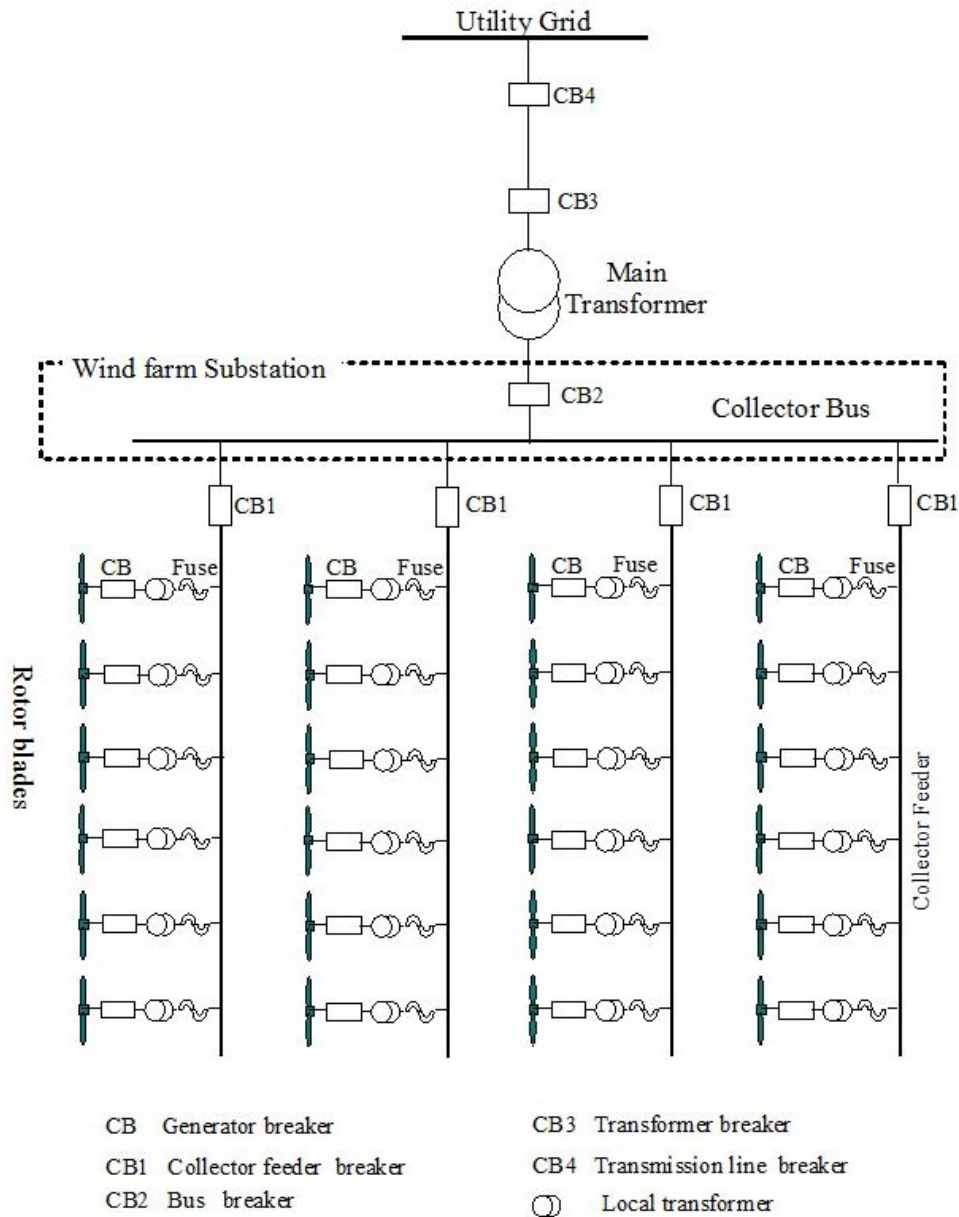
Στις παρακάτω παραγράφους αναλύεται ξεχωριστά κάθε τρόπος σύνδεσης.



Εικόνα 2.1: •Αιολικά πάρκα με σύνδεση εναλλασσόμενου ρεύματος (a), εναλλασσόμενου ρεύματος / συνεχούς ρεύματος (b) και συνεχούς ρεύματος (c)

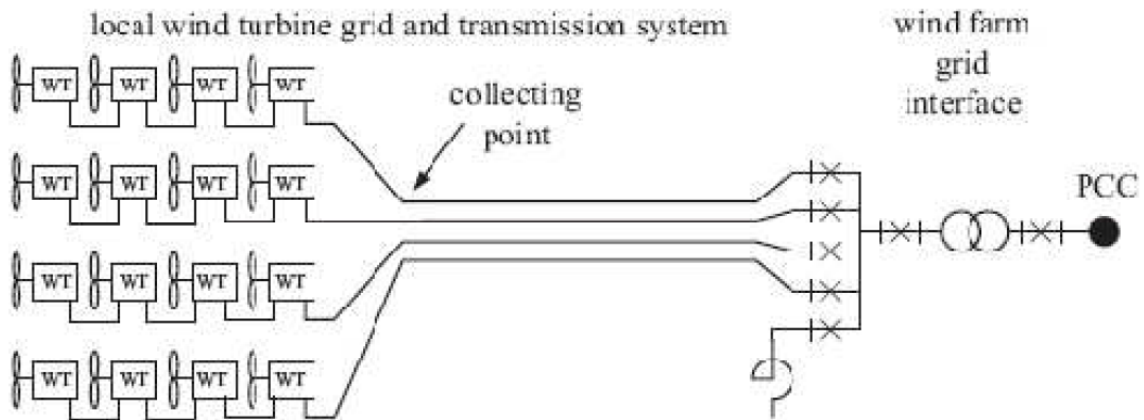
2.1.1 ΑΙΟΛΙΚΑ ΠΑΡΚΑ ΜΕ ΣΥΝΔΕΣΗ ΕΝΑΛΛΑΣΣΟΜΕΝΟΥ ΡΕΥΜΑΤΟΣ

Με αυτόν τον τρόπο σύνδεσης έχουν λειτουργήσει τα περισσότερα ηπειρωτικά αιολικά πάρκα. Ανάλογα με την ισχύ του κάθε πάρκου, δηλαδή εάν το αιολικό πάρκο είναι μεγάλης ή μικρής ισχύος, ακολουθείται διαφορετική τακτική σύνδεσης για λόγους καθαρά οικονομικούς. Στην Εικόνα φαίνεται αυτή η τοπολογία (Kawady and Nahhas, 2013).



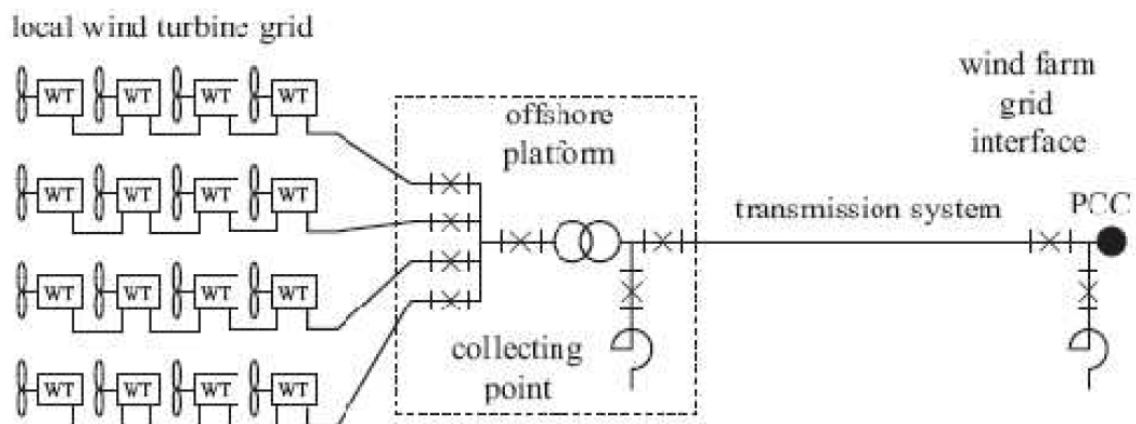
Εικόνα 2.2: Τοπολογία αιολικού πάρκου με σύνδεση εναλλασσόμενου ρεύματος

Σε ένα αιολικό πάρκο το οποίο αποτελείται από μικρό αριθμό ανεμογεννητριών, χρησιμοποιείται ακτινικό δίκτυο για τη σύνδεση των ανεμογεννητριών μεταξύ τους αλλά και για τη διασύνδεσή τους με το δίκτυο (Εικόνα 2.4). Σε αυτή την τοπολογία, τοποθετείται σε όλες τις ανεμογεννήτριες της γραμμής ένα καλώδιο σε σειρά και ο κόμβος φτάνει στο μετασχηματιστή. Με αυτό τον τρόπο, όλες οι ανεμογεννήτριες είναι συνδεδεμένες ταυτόχρονα τόσο μεταξύ τους όσο και με το δίκτυο, επομένως αυτή η λύση είναι οικονομικά συμφέρουσα σε μικρά αιολικά πάρκα.



Εικόνα 2.3: Τοπολογία μικρού αιολικού πάρκου εναλλασσόμενου ρεύματος

Όταν πρόκειται να εγκατασταθεί ένα αιολικό πάρκο μεγάλης ισχύος ακολουθείται διαφορετικός τρόπος σύνδεσης. Και σε αυτή την τοπολογία κάθε σειρά από ανεμογεννήτριες συνδέεται σε έναν κόμβο, όμως υπάρχει η διαφορά πως κάθε ανεμογεννήτρια επικοινωνεί ξεχωριστά (Εικόνα 2.5). Με αυτό τον τρόπο υπάρχει ένα εσωτερικό δίκτυο του οποίου η τάση μέχρι τον κόμβο είναι χαμηλότερη. Μετά τον κόμβο υπάρχει ένας μετασχηματιστής για την ανόρθωση της τάσης ώστε να είναι εφικτή η σύνδεση των εσωτερικών δικτύων μεταξύ τους πριν την τελική διασύνδεσή τους με το δίκτυο διανομής.

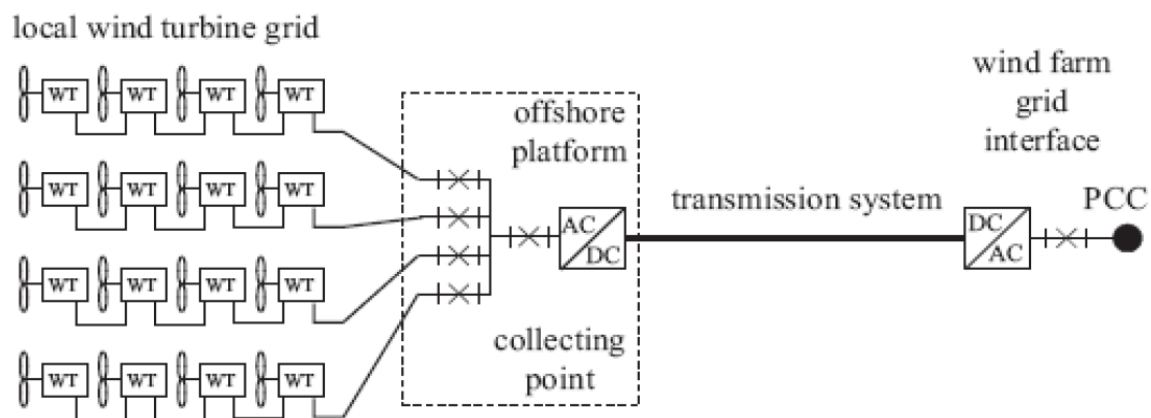


Εικόνα 2.4: Τοπολογία μεγάλου αιολικού πάρκου εναλλασσόμενου ρεύματος

2.1.2 ΑΙΟΛΙΚΑ ΠΑΡΚΑ ΜΕ ΣΥΝΔΕΣΗ ΕΝΑΛΛΑΣΣΟΜΕΝΟΥ ΡΕΥΜΑΤΟΣ/ ΣΥΝΕΧΟΥΣ ΡΕΥΜΑΤΟΣ

Αυτή η τοπολογία χρησιμοποιείται στις περιπτώσεις εκείνες όπου η ενέργεια μεταφέρεται από τα αιολικά πάρκα σε κάποιο αρκετά απομακρυσμένο σημείο ή σε περιπτώσεις όπου το τοπικό δίκτυο είναι σχετικά ανίσχυρο. Αυτός ο τρόπος σύνδεσης μοιάζει αρκετά με τη σύνδεση εναλλασσόμενου ρεύματος που αναφέρθηκε προηγουμένως.

Σε αυτή την τοπολογία, το δίκτυο με σύνδεση εναλλασσόμενου ρεύματος των ανεμογεννητριών είναι εντελώς ανεξάρτητο από το δίκτυο διανομής. Μεταξύ των δύο δικτύων υπάρχει μια γραμμή συνεχούς ρεύματος, η οποία ελέγχει τα μεταφερόμενα μεγέθη (Εικόνα 2.6). Αποτέλεσμα αυτής της παρεμβολής είναι η ποιοτικότερη μεταφορά ισχύος. Το κόστος εγκατάστασης αυτής της τοπολογίας δεν διαφέρει από το κόστος της τοπολογίας εναλλασσόμενου ρεύματος, καθώς χρησιμοποιείται ένα διπολικό καλώδιο συνεχούς ρεύματος και το μόνο επιπλέον κόστος είναι αυτό των μετατροπών.



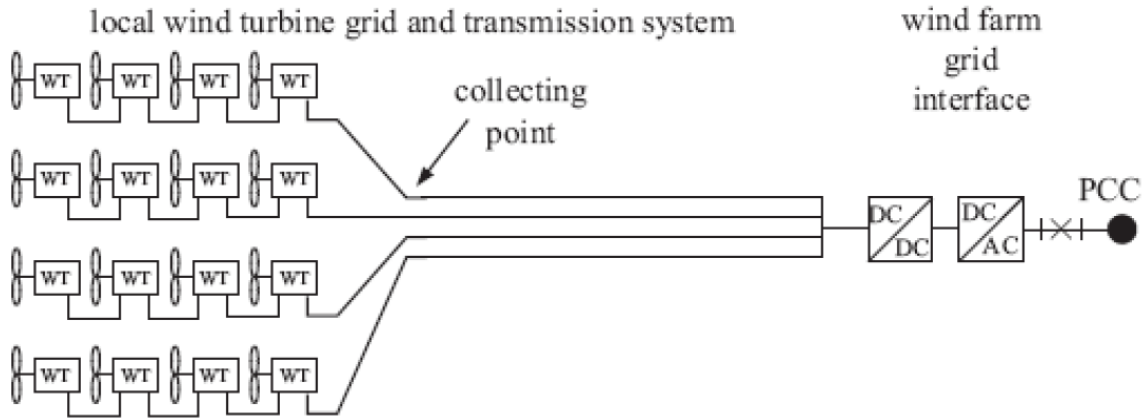
Εικόνα 2.5: Τοπολογία αιολικού πάρκου με σύνδεση εναλλασσόμενου ρεύματος/συνεχούς ρεύματος

2.1.3 ΑΙΟΛΙΚΑ ΠΑΡΚΑ ΜΕ ΣΥΝΔΕΣΗ ΣΥΝΕΧΟΥΣ ΡΕΥΜΑΤΟΣ

Όσον αφορά τα αιολικά πάρκα με σύνδεση συνεχούς ρεύματος, υπάρχουν τρεις διαφορετικές τοπολογίες. Η πρώτη τοπολογία εφαρμόζεται στα μικρά πάρκα, η δεύτερη στα μεγάλα και η τρίτη αφορά τη σύνδεση αιολικών πάρκων σε σειρά.

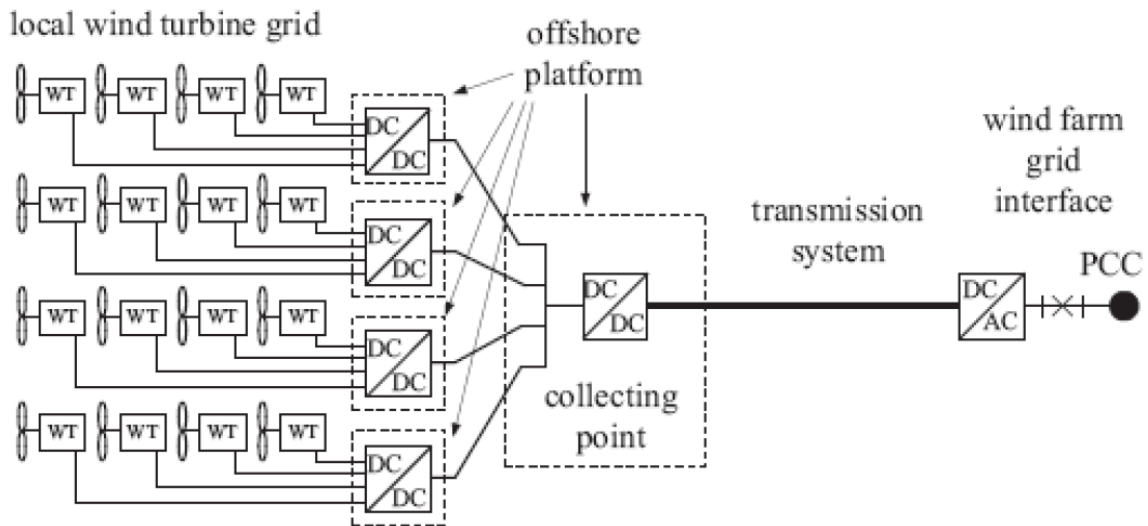
Η σύνδεση συνεχούς ρεύματος των μικρών αιολικών πάρκων (Εικόνα 2.7) δεν διαφέρει από την αντίστοιχη σύνδεση εναλλασσόμενου ρεύματος. Η μόνη διαφορά είναι πως ο μετασχηματιστής της σύνδεσης εναλλασσόμενου ρεύματος

αντικαθίσταται από έναν μετατροπέα συνεχούς και έναν αντιστροφέα. Επίσης, σε κάθε ανεμογεννήτρια πρέπει να χρησιμοποιείται ένας ανορθωτής τάσης. Παρόλο που υπάρχουν αυτές οι μικρές διαφορές, το κόστος εγκατάστασης είναι το ίδιο και για τις δυο τοπολογίες.



Εικόνα 2.6: Τοπολογία μικρού αιολικού πάρκου συνεχούς ρεύματος

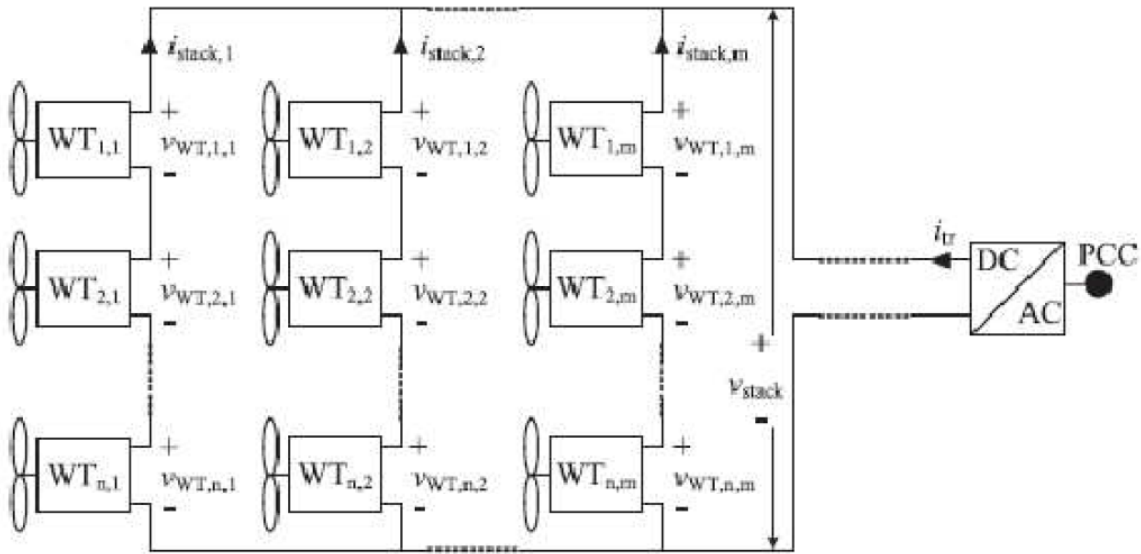
Στην περίπτωση των μεγάλων αιολικών πάρκων (Εικόνα 2.7), η κύρια διαφορά από την αντίστοιχη σύνδεση εναλλασσόμενου ρεύματος είναι η αλλαγή στον αριθμό των βαθμίδων συνεχούς ρεύματος που είναι απαραίτητες μέχρι το τελικό στάδιο του αντιστροφέα. Ένας μετατροπέας, για να καταφέρει να συνδεθεί στον αντιστροφέα, πρέπει να έχει τάση της τάξεως των 20 με 40 kV. Αυτό σημαίνει στην πράξη, πως για τιμές κοντά στα 5 kV είναι απαραίτητη η ύπαρξη ενός επιπρόσθετου σταδίου μετατροπής.



Εικόνα 2.7: Τοπολογία μεγάλου αιολικού πάρκου συνεχούς ρεύματος

Η τρίτη τοπολογία, δηλαδή η σύνδεση αιολικών πάρκων σε σειρά, προκύπτει όπως υποδηλώνει και το όνομά της από την τοποθέτηση σε σειρά κατάλληλου αριθμού ανεμογεννητριών, ώστε να φτάσουν την ονομαστική τάση του αντιστροφέα (Εικόνα 2.8). Σε αυτή την τοπολογία, συνδέονται σε σειρά ένας n αριθμός ανεμογεννητριών, και για να προκύψει η επιθυμητή ισχύς συνδέονται παράλληλα m σειρές.

Με αυτό τον τρόπο σύνδεσης μειώνεται αισθητά το κόστος επειδή δεν είναι απαραίτητα ενδιάμεσα στάδια μετατροπής. Για να είναι ικανός ο τελικός αντιστροφέας να καλύπτει τις ανάγκες, το εύρος λειτουργίας του μέχρι την ονομαστική του τιμή θα πρέπει να είναι μεγάλο. Επίσης, οι μετατροπείς των ανεμογεννητριών θα πρέπει να είναι ικανοί να δουλεύουν σε μεγάλες τάσεις, ώστε στην περίπτωση που θα παρουσιάσει βλάβη μια ανεμογεννήτρια μιας σειράς να συνεχίζεται η λειτουργία του πάρκου χωρίς πρόβλημα.



Εικόνα 2.8: Τοπολογία αιολικού πάρκου συνεχούς ρεύματος με σύνδεση των ανεμογεννητριών σε σειρά

Η ονομαστική τάση εξόδου $v_{WT,x,y}$ μιας ανεμογεννήτριας δίνεται από τη σχέση:

$$v_{WT,nom} = \frac{v_{stack}}{n} \quad (2.1)$$

$$P_{s,y} = \frac{1}{n} \sum_{x=1}^n P_{out,x,y} \quad (2.2)$$

$$i_{stack,y} = \frac{\sum_{x=1}^n P_{out,x,y}}{v_{stack}} = \frac{P_{s,y}}{v_{WT,nom}} \quad (2.3)$$

$$v_{WT,x,y} = v_{WT,nom} \frac{P_{out,x,y}}{P_{s,y}} \quad (2.4)$$

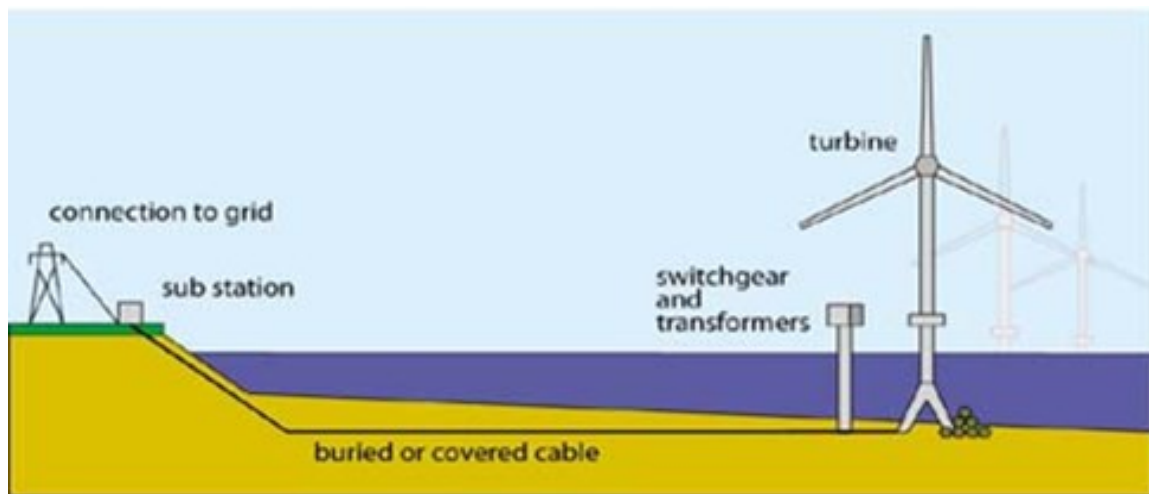
Όπου το x παίρνει τιμές από 1 έως n , το y από 1 έως m , $v_{WT,nom}$ είναι η ονομαστική τάση εξόδου μιας ανεμογεννήτριας σε V , $i_{stack,y}$ το ρεύμα σε μια σειρά σε A , $P_{out,x,y}$ η ισχύς εξόδου της ανεμογεννήτριας x στη σειρά y και $P_{s,y}$ η μέση παραγόμενη ισχύς της σειράς y .

Από τις παραπάνω εξισώσεις προκύπτει πως εάν μια ή περισσότερες ανεμογεννήτριες αποσυνδεθούν, τότε το επίπεδο της τάσης των ανεμογεννητριών που απομένουν σε σύνδεση αυξάνεται. Για αυτό το λόγο πρέπει να είναι ικανές να δουλεύουν σε μεγάλες τάσεις.

3 ΔΙΑΣΥΝΔΕΣΗ ΤΩΝ ΥΠΕΡΑΚΤΙΩΝ ΑΙΟΛΙΚΩΝ ΠΑΡΚΩΝ ΜΕ ΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

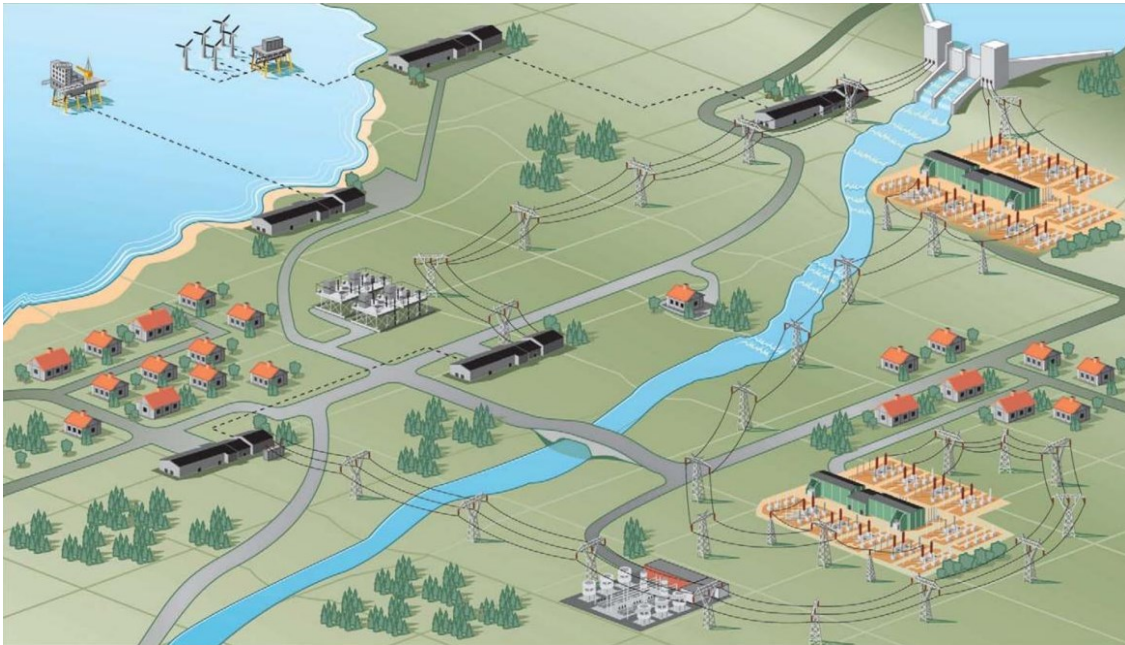
3.1 ΓΕΝΙΚΑ

Η ηλεκτρική ενέργεια η οποία παράγεται από τα υπεράκτια αιολικά πάρκα στις περισσότερες των περιπτώσεων μεταφέρεται στο Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας. Επειδή ο άνεμος παρουσιάζει ασταθή συμπεριφορά, κρίνεται απαραίτητο για τη σταθερή λειτουργία του δικτύου η εξισορρόπηση της ισχύος του δικτύου με το μεταβαλλόμενο φορτίο του δικτύου ανά πάσα στιγμή.



Εικόνα 3.1: Διασύνδεση των υπεράκτιων ανεμογεννητριών με το σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας

Το ηλεκτρικό σύστημα περιλαμβάνει μεταξύ άλλων λειτουργίες που αφορούν τον έλεγχο τόσο της τάσης όσο και της ισχύος και την προστασία. Η θεμελιώδης αρχή, η οποία διέπει την λειτουργία του ηλεκτρικού συστήματος, είναι ο έλεγχος της τάσης. Αυτό σημαίνει με άλλα λόγια πως θα πρέπει η παραγόμενη ισχύς να προσαρμόζεται με το φορτίο του δικτύου. Υπάρχουν διάφοροι τρόποι για την σταθεροποίηση της τάσης, όπως είναι για παράδειγμα η εισαγωγή της αέργου ισχύος, η αντιστάθμιση της μειωμένης τάσης στις γραμμές μετάδοσης, ή η προσαρμογή της τάσης κατευθείαν στην πηγή. Όσον αφορά τις ανεμογεννήτριες, η μεγαλύτερη δυνατή εκμετάλλευση του ανέμου καθώς επίσης και η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας υπό σταθερή τάση και συχνότητα, επιτυγχάνεται με την προσαρμογή των στροφών.



Εικόνα 3.2: Παράδειγμα διασύνδεσης υπεράκτιου αιολικού πάρκου με το σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας (Jones and Westman, 2007)

Σε γενικές γραμμές, η τάση λειτουργίας των ανεμογεννητριών είναι σχετικά χαμηλή, συγκεκριμένα τις περισσότερες φορές είναι της τάξης του 1 kV, γεγονός που δεν επιτρέπει τη σύνδεση των ανεμογεννητριών όχι μόνο μεταξύ τους, αλλά ακόμα και με το δίκτυο με το οποίο πρόκειται να συνδεθούν. Η τάση ανορθώνεται και πέρνει τιμές από 10 έως και 35 kV με τη βοήθεια ενός μετασχηματιστή ανόρθωσης τάσης. Σε κάθε ανεμογεννήτρια αντιστοιχεί από ένας τέτοιος μετασχηματιστής.

Επίσης, σε κάθε μια ανεμογεννήτρια υπάρχει ένας διακόπτης, ο οποίος είναι απαραίτητος για να αποφευχθεί η νησιδοποίηση σε περίπτωση βραχυκυκλώματος. Νησιδοποίηση είναι η κατάσταση εκείνη κατά την οποία λειτουργεί μόνο ένα μικρό τμήμα του δικτύου, χωρίς να είναι συνδεδεμένο στο κύριο σύστημα, υπάρχει όμως τοπική ισορροπία μεταξύ παραγωγής – φορτίου. Επειδή η νησιδοποιημένη περιοχή είναι επικίνδυνη για το τεχνικό προσωπικό που είναι υπεύθυνο για την επισκευή, εξαιτίας των τάσεων και των συχνοτήτων που δεν βρίσκονται στα επιτρεπτά όριά τους, η κατάσταση αυτή δεν είναι επιθυμητή.

Τα τρία βασικά υποσυστήματα, τα οποία πρέπει να περιλαμβάνει ο σχεδιασμός των μεγάλων αιολικών πάρκων για να είναι ολοκληρωμένος είναι τα εξής:

1. οι ανεμογεννήτριες
2. η εσωτερική δομή
3. η σύνδεση στο δίκτυο

Συνήθως, τα μεγάλα αιολικά πάρκα συνδέονται σε υψηλότερες τάσεις συγκριτικά με τις ανεμογεννήτριες που λειτουργούν μεμονωμένα, καθώς

παράγουν περισσότερη ηλεκτρική ενέργεια. Τα αντίστοιχα δίκτυα υψηλής τάσης δεν είναι τόσο πυκνά όσο τα δίκτυα χαμηλής τάσης και επομένως, σε πολλές περιπτώσεις είναι αναγκαία η κάλυψη μεγάλης απόστασης μέχρι το σημείο εκείνο στο οποίο γίνεται η σύνδεση στο δίκτυο (Sathyajith, 2006).

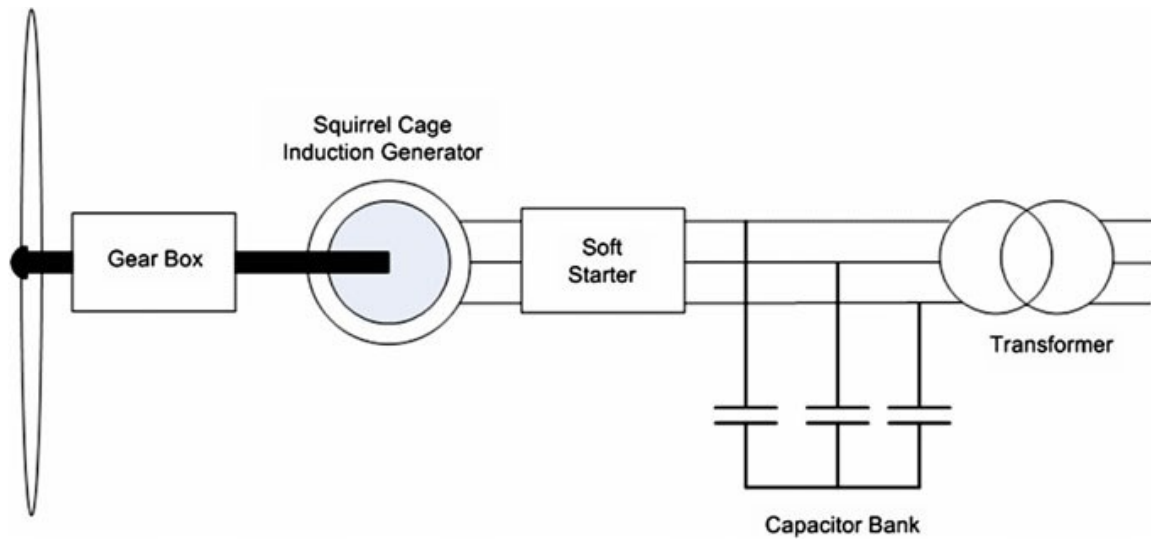
3.2 ΑΠΑΡΑΙΤΗΤΗ ΤΑΣΗ ΓΙΑ ΤΗ ΜΕΤΑΦΟΡΑ ΚΑΙ ΤΗ ΔΙΑΝΟΜΗ ΤΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Η μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας γίνεται σε υψηλές τιμές της τάσεως, οι οποίες κυμαίνονται από 110 kV έως και 1.1 MV, ώστε να ελαχιστοποιούνται οι απώλειες σε μεγάλες αποστάσεις. Όσον αφορά τη διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας, επειδή αυτή γίνεται σε μικρότερες αποστάσεις, οι τιμές των τάσεων είναι χαμηλές, μεταξύ των 190 V και 50 kV, αρκετές όμως ώστε να είναι μειωμένες οι απώλειες.

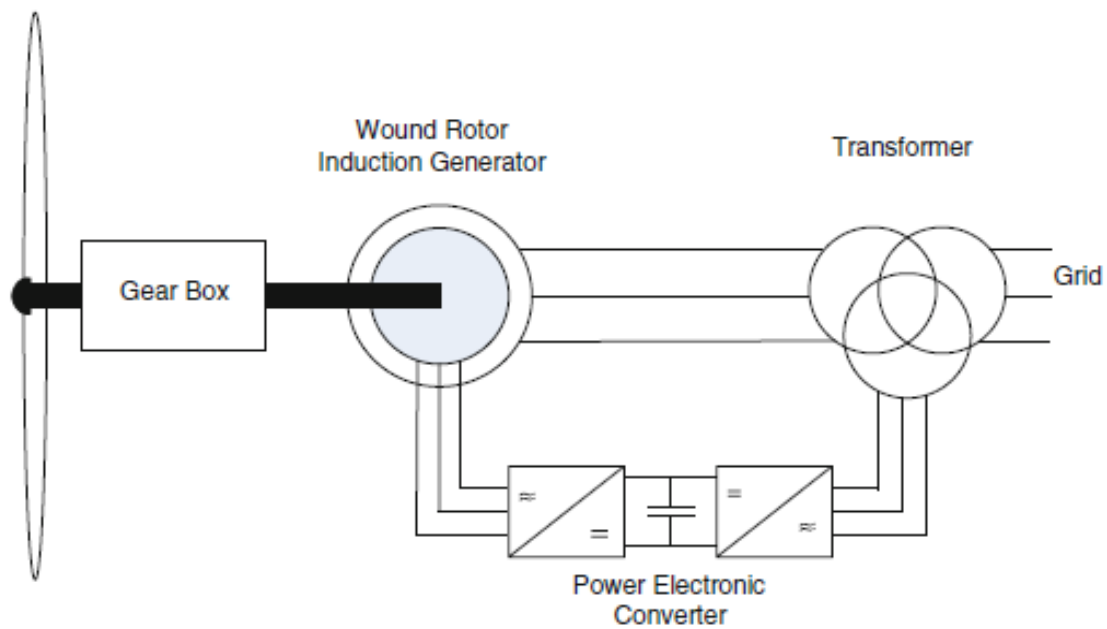
3.3 ΚΥΡΙΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΜΕΤΑΤΡΟΠΗΣ ΙΣΧΥΟΣ ΤΩΝ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ

Τα κύρια συστήματα μετατροπής ισχύος των ανεμογεννητριών είναι τα εξής:

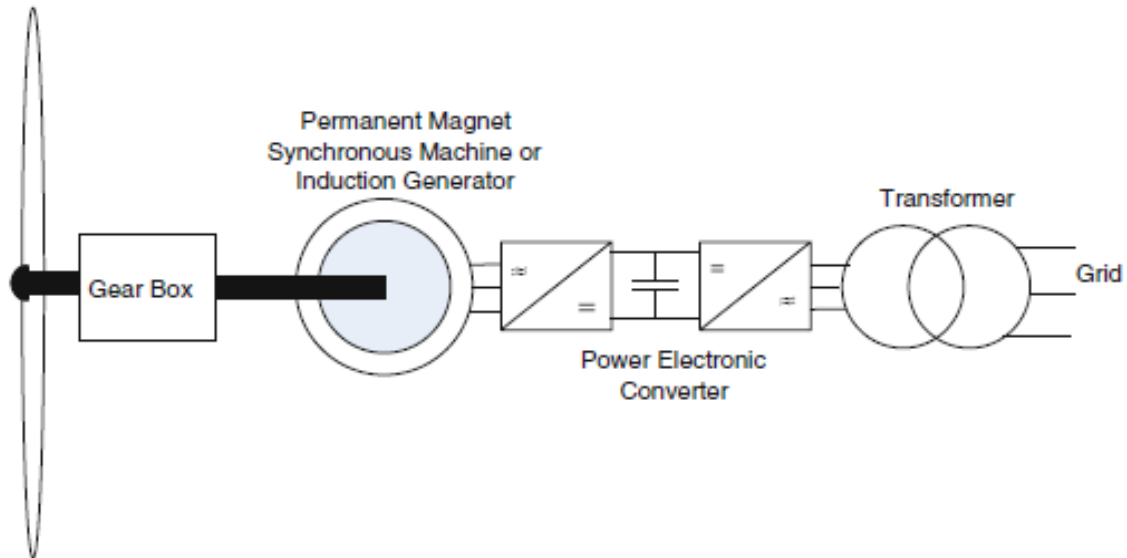
1. Επαγωγική γεννήτρια και κιβώτιο ταχυτήτων, τα οποία είναι άμεσα συνδεδεμένα με το δίκτυο.
2. Επαγωγική γεννήτρια διπλής τροφοδοτήσεως (doubly fed) και κιβώτιο ταχυτήτων, στο οποίο ο στάτορας είναι άμεσα συνδεδεμένος με το δίκτυο, ενώ ο ρότορας χρειάζεται έναν μετατροπέα για να καταφέρει να συνδεθεί.
3. Σύγχρονη γεννήτρια χωρίς κιβώτιο ταχυτήτων (direct drive), η οποία συνδέεται στο δίκτυο με τη βοήθεια ενός ηλεκτρονικού μετατροπέα ισχύος. Οι σύγχρονες ανεμογεννήτριες είναι άμεσης οδήγησης (direct drive), δηλαδή δεν έχουν κιβώτιο ταχυτήτων, γεγονός που τις καθιστά πιο αξιόπιστες και αυξάνεται η απόδοσή τους.



Εικόνα 3.3: Επαγωγική γεννήτρια και κιβώτιο ταχυτήτων άμεσα συνδεδεμένα με το δίκτυο



Εικόνα 3.4: Επαγωγική γεννήτρια διπλής τροφοδοτήσεως

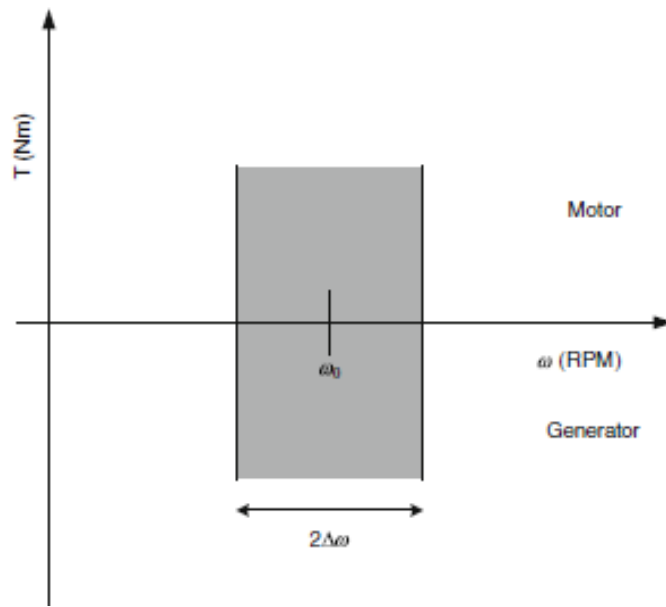


Εικόνα 3.5: Σύγχρονη γεννήτρια χωρίς κιβώτιο ταχυτήτων (direct drive)

3.3.1 ΕΠΑΓΩΓΙΚΗ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑ ΔΙΠΛΗΣ ΤΡΟΦΟΔΟΤΗΣΗΣ (DOUBLY FED INDUCTION GENERATOR – DFIG)

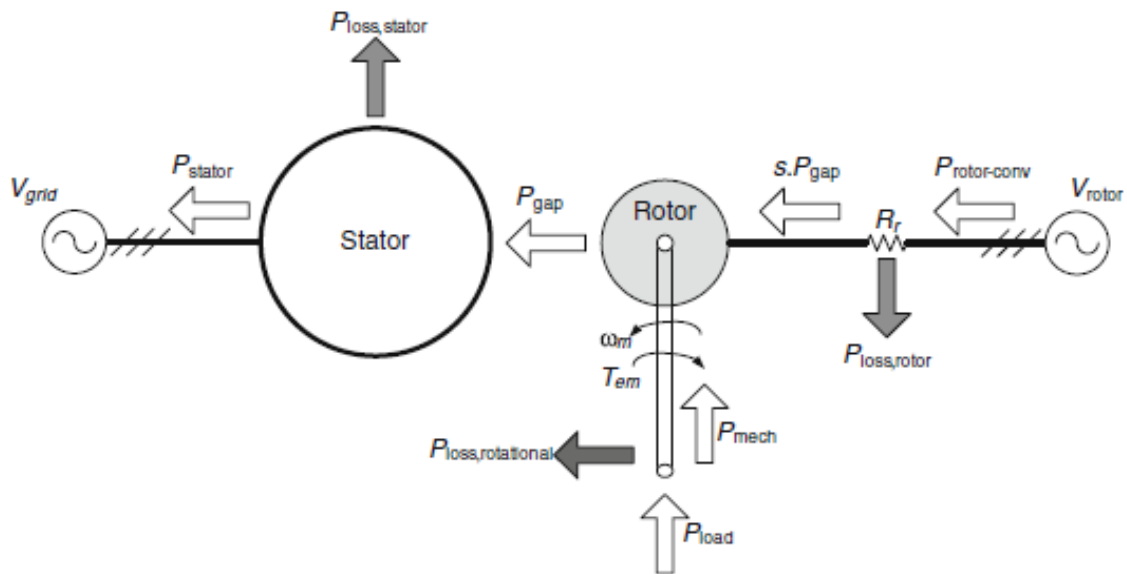
Η επαγωγική γεννήτρια διπλής τροφοδότησης είναι σήμερα η πιο ευρέως χρησιμοποιούμενη τεχνολογία, γνωρίζοντας διεθνή αποδοχή (Pai and Stankovic, 2013). Οι ανεμογεννήτριες που χρησιμοποιούν επαγωγική γεννήτρια διπλής τροφοδότησης (DFIG) παρέχουν μια βιώσιμη λύση για τις διαμορφώσεις μεταβλητής ταχύτητας, οι οποίες απαιτούν ταχύτητες οι οποίες κυμαίνονται περίπου στο $\pm 30\%$ της σύγχρονης ταχύτητας.

Ο πρώτος περιορισμός που αφορά αυτό το εύρος διακύμανσης της ταχύτητας είναι ότι η ισχύς του μετατροπέα περιορίζεται για να χειριστεί ένα κλάσμα (20-30%) της συνολικής ισχύος. Σε αυτό τον τύπο γεννήτριας, το κύκλωμα του στάτη της DFIG είναι άμεσα συνδεδεμένο με το δίκτυο. Το κύκλωμα του ρότορα συνδέεται μέσω δακτυλίων ολίσθησης σε ένα μετατροπέα back-to-back που αποτελείται από δύο μετατροπείς, έναν μετατροπέα στη πλευρά της μηχανής και έναν στην πλευρά του δικτύου. Μεταξύ των δύο μετατροπέων τοποθετείται ένας πυκνωτής DC για την αποθήκευση ενέργειας, ο οποίος επίσης περιορίζει τις διακυμάνσεις της τάσης. Η ροπή της DFIG, αλλά και ο συντελεστής ισχύος στους ακροδέκτες του στάτορα ελέγχονται με τη χρήση μετατροπέα στην πλευρά της μηχανής. Ο μετατροπέας που υπάρχει στην πλευρά του δικτύου ελέγχει την τάση. Η χαρακτηριστική ροπής-ταχύτητας της DFIG ανεμογεννήτριας φαίνεται στην Εικόνα 3.6.

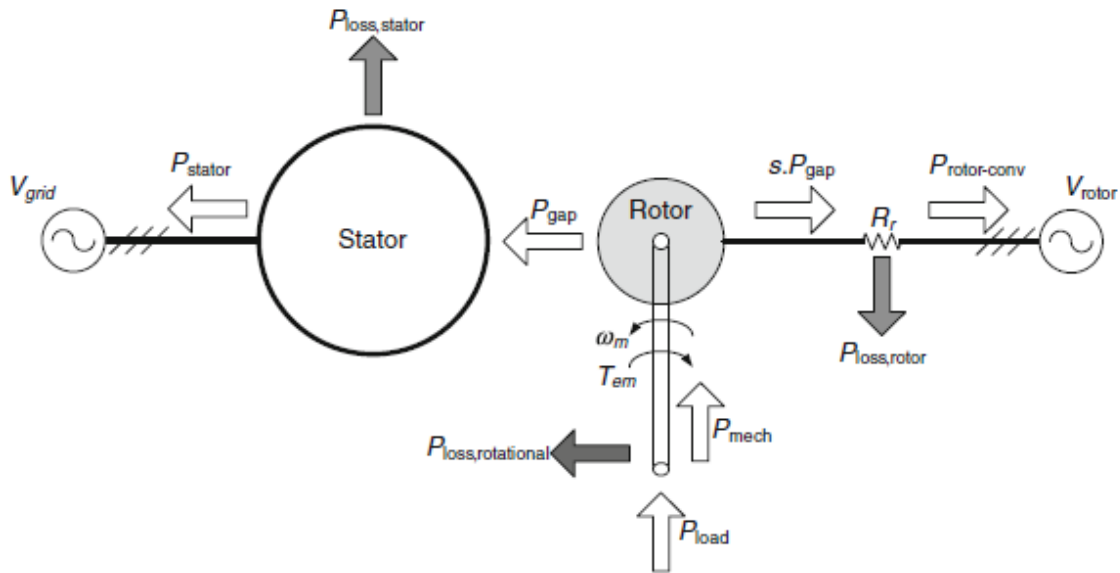


Εικόνα 3.6: Χαρακτηριστική ροπής-ταχύτητας της DFIG ανεμογεννήτριας (Pai and Stankovic, 2013)

Όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 3.6, η μηχανή DFIG μπορεί να λειτουργήσει είτε ως κινητήρας ή ως γεννήτρια, τόσο σε υποσύγχρονες όσο και σε υπερσύγχρονες ταχύτητες. Για τις περιπτώσεις που η DFIG λειτουργεί ως γεννήτρια, οι διαμορφώσεις της πραγματικής ροής ηλεκτρικής ενέργειας στα διάφορα κυκλώματα της μηχανής απεικονίζονται στις Εικόνες 3.7 και 3.8.



Εικόνα 3.7: Ανταλλαγή ισχύος της DFIG σε υποσύγχρονες ταχύτητες (Pai and Stankovic, 2013)



Εικόνα 3.8: Ανταλλαγή ισχύος της DFIG σε υπερσύγχρονες ταχύτητες (Pai and Stankovic, 2013)

3.3.1.1 Η DFIG ως γεννήτρια σε υποσύγχρονες ταχύτητες

Η Εικόνα 3.8 απεικονίζει τις πραγματικές ανταλλαγές ηλεκτρικής ενέργειας και τις συνακόλουθων απώλειες όταν η DFIG λειτουργεί ως κινητήρας σε υποσύγχρονη ταχύτητα. Η ολίσθηση s της μηχανής είναι θετική και δίνεται από τη σχέση:

$$s = \frac{n_s - n_r}{n_s} \quad (3.1)$$

Όπου:

n_r : η ταχύτητα του ρότορα σε στροφές το λεπτό (rpm)

$n_s = 160f/p$: η σύγχρονη ταχύτητα (rpm)

f : η ηλεκτρική συχνότητα του ρεύματος του στάτορα

p : ο αριθμός των πόλων

$$n_r = (1 - s)n_s = \left(1 - \frac{f_r}{f}\right)n_s \quad (3.2)$$

Όπου f_r η συχνότητα του ρεύματος του ρότορα.

Η ηλεκτρομαγνητική ροπή T_{em} δίνεται από τη σχέση

$$T_{em} = \frac{P_{gap}}{\omega_{syn}} \quad (3.3)$$

Όπου P_{gap} είναι η ισχύς που μεταφέρεται μέσω του κενού αέρα και $\omega_{\text{syn}} = 2\pi f$ η σύγχρονη συχνότητα σε radians/s.

Η μηχανική ισχύς P_{mech} δίνεται από τη σχέση:

$$P_{\text{mech}} = (1 - s)P_{\text{gap}} = \left(1 - \frac{f_r}{f}\right)P_{\text{gap}} \quad (3.4)$$

3.3.1.2 Η DFIG ως γεννήτρια σε υπερσύγχρονες ταχύτητες

Η Εικόνα 3.9 απεικονίζει τις πραγματικές ανταλλαγές ηλεκτρικής ενέργειας όταν η DFIG λειτουργεί ως γεννήτρια σε υπερσύγχρονη ταχύτητα. Η ολίσθηση s της μηχανής είναι αρνητική. Η ταχύτητα του ρότορα δίνεται από τη σχέση:

$$n_r = (1 - s)n_s = \left(1 + \frac{f_r}{f}\right)n_s \quad (3.5)$$

Και η μηχανική ισχύς P_{mech} δίνεται από τη σχέση:

$$P_{\text{mech}} = (1 - s)P_{\text{gap}} = \left(1 + \frac{f_r}{f}\right)P_{\text{gap}} \quad (3.6)$$

3.3.2 ΜΗΧΑΝΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΚΙΝΗΣΗΣ

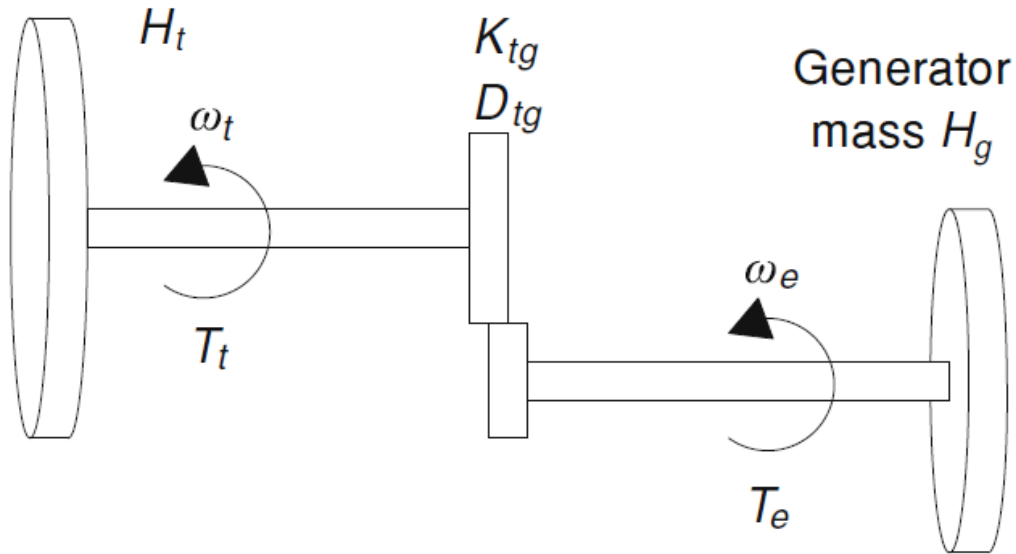
Το σύστημα μετάδοσης κίνησης της ανεμογεννήτριας αποτελείται από τις περιστρεφόμενες μάζες, το hub, το κιβώτιο ταχυτήτων, τους συνδετικούς άξονες και την γεννήτρια. Το λεπτομερές μοντέλο είναι ένα μοντέλο έξι μαζών (Muyeen et al., 2009). Για τις μελέτες του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας (Cigré, 2007), ένα μοντέλο δύο-μαζών είναι επαρκές, καθώς μπορεί να αποτυπώσει τις επιπτώσεις της ανεμογεννήτριας και της γεννήτριας.

Οι εξισώσεις της κίνησης που προκύπτουν από την εφαρμογή του νόμου της κίνησης του Νεύτωνα για την κάθε μάζα και τον κάθε άξονα είναι οι εξής:

$$\begin{cases} T_e - D_{tg}(\omega_e - \omega_t) - K_{tg}(\theta_m - \theta_t) = 2H_g\dot{\omega}_e \\ D_{tg}(\omega_e - \omega_t) + K_{tg}(\theta_e - \theta_t) - T_t = 2H_t\dot{\omega}_t \end{cases} \quad (3.7)$$

Όπου ω_e και ω_t είναι οι ανα μονάδα ταχύτητες της γεννήτριας και της ανεμογεννήτριας αντίστοιχα, $(\theta_e - \theta_t)$ είναι η γωνία συστροφής του άξονα, H_g και H_t οι αδράνειες της γεννήτριας και της ανεμογεννήτριας αντίστοιχα, K_{tg} και D_{tg} η δυσκαμψία του άξονα και ο συντελεστής απόσβεσης, T_t η ροπή της ανεμογεννήτριας και T_e η ηλεκτρική ροπή.

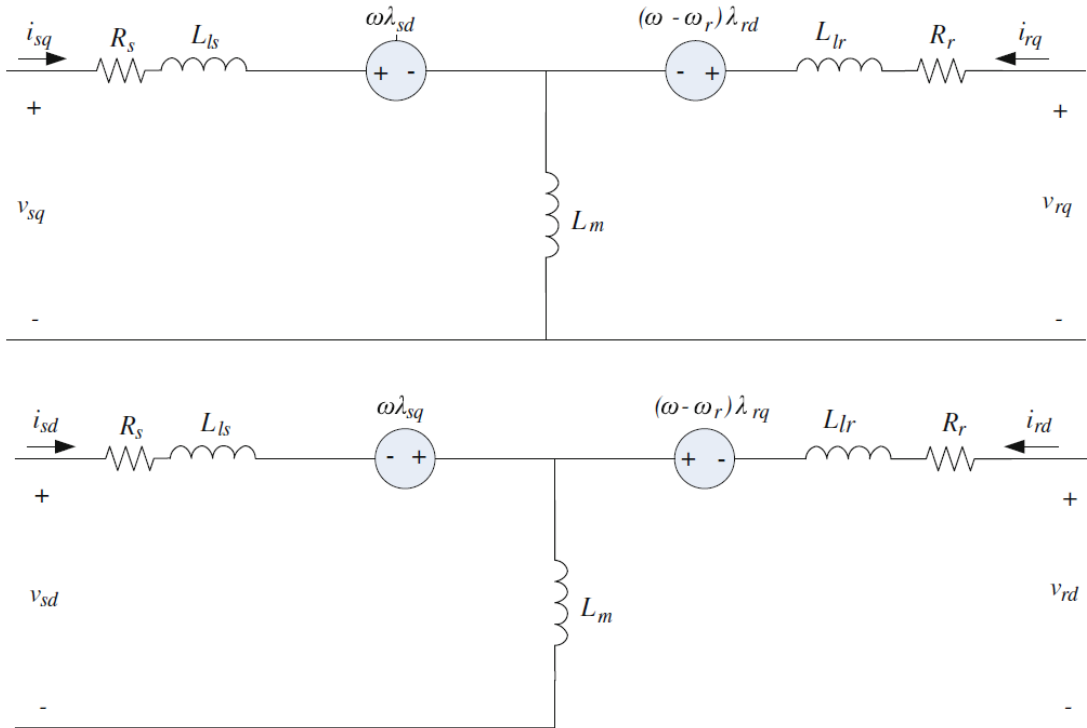
Wind Turbine Mass



Εικόνα 3.9: Μοντέλο δύο-μαζών για την προσομοίωση του συστήματος μετάδοσης κίνησης της ανεμογεννήτριας (Pai and Stankovic, 2013)

3.3.3 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΕΠΑΓΩΓΙΚΗΣ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ ΔΙΠΛΗΣ ΤΡΟΦΟΔΟΤΗΣΗΣ

Το μαθηματικό μοντέλο της επαγωγικής γεννήτριας που χρησιμοποιείται πιο συχνά, αναπτύσσεται στο πλαίσιο αναφοράς $d - q$. Το ισοδύναμο κύκλωμα του μοντέλου παρουσιάζεται στην Εικόνα 3.10. v_{sq} και v_{sd} είναι οι τάσεις του στάτορα, v_{rq} και v_{rd} είναι οι τάσεις του ρότορα που αναφέρεται στην πλευρά του στάτορα, λ_{sq} και λ_{sd} είναι οι ροές του στάτορα και λ_{rq} και λ_{rd} οι ροές του ρότορα αναφέρονται στην πλευρά του στάτορα, i_{sq} και i_{sd} είναι τα ρεύματα του στάτορα και του i_{rq} και i_{rd} είναι τα ρεύματα του ρότορα που αναφέρονται στην πλευρά του στάτη, R_s είναι η αντίσταση του στάτορα, R_r είναι η αντίσταση του ρότορα που αναφέρεται στην πλευρά του στάτορα, L_{ls} , L_{lr} είναι τα επαγωγικά πηνία διαρροής του στάτορα και του στάτορα που αναφέρεται στο ρότορα, L_m είναι η κοινή επαγωγή, ω είναι η ταχύτητα του πλαισίου αναφοράς και ω_r είναι η ηλεκτρική συχνότητα του ρότορα. Εδώ, χρησιμοποιείται η σύμβαση του κινητήρα, πράγμα που σημαίνει ότι το ρεύμα που εισέρχεται στη μηχανή είναι θετικό, ενώ το ρεύμα που εξέρχεται από τη μηχανή είναι αρνητικό, και το πλαίσιο αναφοράς $d - q$ ορίζεται με τον q-άξονα να προηγείται του d-άξονα κατά 90 μοίρες.



Εικόνα 3.10: Το ισοδύναμο κύκλωμα του μοντέλου της επαγωγικής γεννήτριας (Pai and Stankovic, 2013)

3.3.3.1 Εξισώσεις της τάση και της ροής

Παρακάτω παρουσιάζονται οι είναι εξισώσεις της τάσης και της ροή της DFIG για τη σύμβαση του κινητήρα, με όλες τις ποσότητες από την πλευρά του ρότορα να αναφέρονται στην πλευρά του στάτορα.

$$v_{sq} = R_s i_{sq} + \omega \lambda_{sd} + \dot{\lambda}_{sq} \quad (3.8)$$

$$v_{sd} = R_s i_{sd} + \omega \lambda_{sq} + \dot{\lambda}_{sd} \quad (3.9)$$

$$v_{rq} = R_r i_{rq} + (\omega - \omega_r) \lambda_{rd} + \dot{\lambda}_{rq} \quad (3.10)$$

$$v_{rd} = R_r i_{rd} + (\omega - \omega_r) \lambda_{rq} + \dot{\lambda}_{rd} \quad (3.11)$$

$$\lambda_{sq} = L_s i_{sq} + L_m i_{rq} \quad (3.12)$$

$$\lambda_{sd} = L_s i_{sd} + L_m i_{rd} \quad (3.13)$$

$$\lambda_{rq} = L_r i_{rq} + L_m i_{sq} \quad (3.14)$$

$$\lambda_{rd} = L_r i_{rd} + L_m i_{sd} \quad (3.15)$$

Όπου $L_s = L_{ls} + L_m$, $L_r = L_{lr} + L_m$

3.3.3.2 Εξίσωση της ροπής

Η ηλεκτρομαγνητική ροπή της μηχανής περιστρεφόμενου πεδίου δίνεται από τη σχέση:

$$T_e = \frac{3p}{2} L_m (i_{sq} i_{rd} - i_{sd} i_{rq}) \quad (3.16)$$

3.3.3.3 Το ανά μονάδα σύστημα

Με βάση το ανά μονάδα σύστημα, οι εξισώσεις τάσης, οι εξισώσεις ροής, και η εξίσωση ροπής της μηχανής περιστρεφόμενου πεδίου μπορούν να εκφραστούν σε μοναδιαίο σύστημα, όπως παρακάτω:

$$v_{sq} = R_s i_{sq} + \omega \lambda_{sd} + \frac{1}{\omega_{base}} \dot{\lambda}_{sq} \quad (3.17)$$

$$v_{sd} = R_s i_{sd} - \omega \lambda_{sq} + \frac{1}{\omega_{base}} \dot{\lambda}_{sd} \quad (3.18)$$

$$v_{rq} = R_r i_{rq} + (\omega - \omega_r) \lambda_{rd} + \frac{1}{\omega_{base}} \dot{\lambda}_{rq} \quad (3.19)$$

$$v_{rd} = R_r i_{rd} - (\omega - \omega_r) \lambda_{rq} + \frac{1}{\omega_{base}} \dot{\lambda}_{rd} \quad (3.20)$$

$$\lambda_{sq} = L_s i_{sq} + L_m i_{rq} \quad (3.21)$$

$$\lambda_{sd} = L_s i_{sd} + L_m i_{rd} \quad (3.22)$$

$$\lambda_{rq} = L_r i_{rq} + L_m i_{sq} \quad (3.23)$$

$$\lambda_{rd} = L_r i_{rd} + L_m i_{sd} \quad (3.24)$$

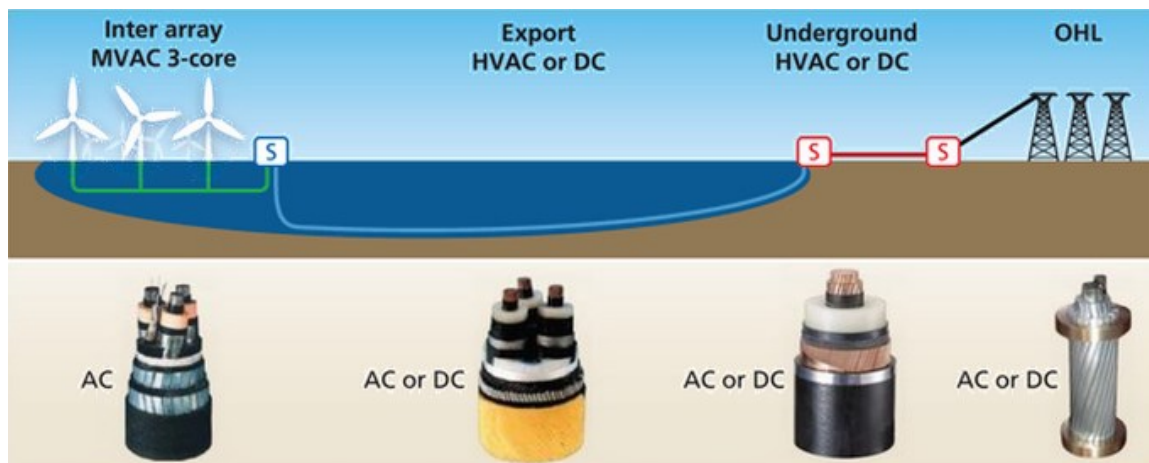
$$T_e = L_m (i_{sq} i_{rd} - i_{sd} i_{rq}) \quad (3.25)$$

3.4 ΥΠΟΒΡΥΧΙΑ ΚΑΛΩΔΙΑ

Η μεταφορά του εναλλασσόμενου ρεύματος από τα απομακρυσμένα υπεράκτια αιολικά πάρκα, δηλαδή από αυτά που βρίσκονται σε απόσταση μεγαλύτερη των 60 Km από την ακτή, δεν είναι δυνατή και για αυτό ευθύνεται η χωρητικότητα του καλωδίου. Μια συμφέρουσα λύση για τα μεγάλα υπεράκτια αιολικά πάρκα είναι η σύνδεσή τους με το δίκτυο με σύνδεση συνεχούς ρεύματος.

Οι απώλειες των συνδέσεων συνεχούς ρεύματος ανά μήκος αγωγού είναι πολύ μικρότερες από τις αντίστοιχες απώλειες εναλλασσόμενου ρεύματος. Οι απώλειες είναι πολύ σημαντικές, καθώς αυξημένες απώλειες σημαίνουν αυξημένο λειτουργικό κόστος. Επομένως, παρόλο που η αρχική επένδυση για μια σύνδεση συνεχούς ρεύματος είναι μεγαλύτερη, για υπεράκτια αιολικά πάρκα τα οποία βρίσκονται σε μια αρκετά μακρινή απόσταση από την ακτή, προτιμάται η σύνδεση συνεχούς ρεύματος έναντι της σύνδεσης εναλλασσόμενου ρεύματος, επειδή είναι μειωμένο το λειτουργικό κόστος.

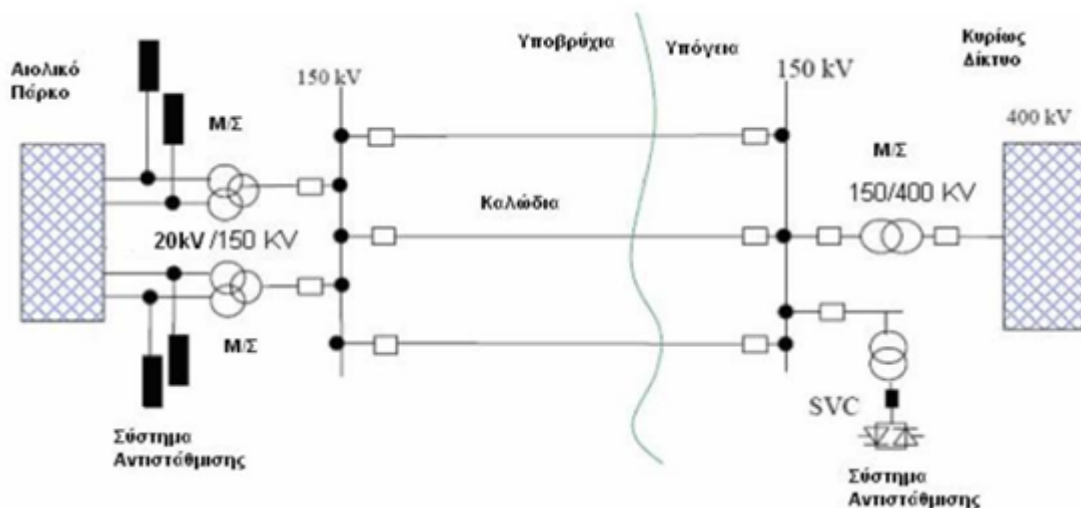
Η διαφορά στο κόστος της αρχικής επένδυσης οφείλεται στο κόστος των μετατροπών ισχύος. Το κόστος των καλωδίων σε μια σύνδεση συνεχούς ρεύματος είναι μικρότερο, καθώς είναι απαραίτητα δυο καλώδια και όχι τρία που απαιτούνται σε μια αντίστοιχη σύνδεση εναλλασσόμενου ρεύματος και επίσης είναι μειωμένες οι ανάγκες σε μόνωση για την ίδια ονομαστική τάση. Πρέπει να σημειωθεί πως σε ένα καλώδιο εναλλασσόμενου ρεύματος μεγάλου μήκους, το άεργο ρεύμα περιορίζει το μήκος του καλωδίου (Offshorewindenergy, 2016).



Εικόνα 3.11: Υποβρύχια καλώδια (renewableenergyworld, 2016)

3.4.1 ΣΥΣΤΗΜΑ ΕΝΑΛΛΑΣΣΟΜΕΝΟΥ ΡΕΥΜΑΤΟΣ ΥΨΗΛΗΣ ΤΑΣΗΣ - HVAC (HIGH VOLTAGE ALTERNATIVE CURRENT)

Ένα σύστημα εναλλασσόμενου ρεύματος υψηλής τάσης - HVAC (High Voltage Alternative Current) αποτελείται από μετασχηματιστές οι οποίοι χρησιμοποιούνται είτε για την ανύψωση είτε για τον υποβιβασμό της τάσης και βρίσκονται στα δύο άκρα της γραμμής μεταφοράς. Επίσης, περιέχει αγωγούς οι οποίοι μπορεί να είναι εναέριοι, υπόγειοι, υποβρύχιοι ή κάποιος συνδυασμός τους. Ακόμα, υπάρχουν τόσο στα δύο άκρα της γραμμής μεταφοράς όσο και ενδιάμεσα διάφορα συστήματα αντιστάθμισης, όπως είναι τα πηνία αντιστάθμισης, τα SVC και τα Statcoms.



Εικόνα 3.12: Τυπικό παράδειγμα HVAC γραμμής από αιολικό πάρκο (Κοροβέσης, 2009)

3.4.1.1 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΕΝΑΛΛΑΣΣΟΜΕΝΟΥ ΡΕΥΜΑΤΟΣ ΥΨΗΛΗΣ ΤΑΣΗΣ - HVAC (HIGH VOLTAGE ALTERNATIVE CURRENT)

Πλεονεκτήματα

Αρχικά, το σύστημα εναλλασσόμενου ρεύματος υψηλής τάσης - HVAC (High Voltage Alternative Current) αποτελεί την παλαιότερη τεχνολογία που χρησιμοποιείται για τη μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας, είναι επομένως και το πιο διαδεδομένο τρόπο. Επίσης, η μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας με το σύστημα HVAC είναι αρκετά αξιόπιστη. Όσον αφορά τον εξοπλισμό που απαιτείται, αυτός είναι αρκετά απλός, ειδικά όταν πρόκειται για μικρές αποστάσεις και για εναέριες γραμμές μεταφοράς. Τέλος, στην περίπτωση που η γραμμή συνδέεται σε ισχυρό δίκτυο, δηλαδή σε γραμμή μεταφοράς μεγάλης ισχύος, το κόστος της επένδυσης είναι αρκετά χαμηλό.

Μειονεκτήματα

Ένα από τα σημαντικότερα μειονεκτήματα του συστήματος HVAC είναι τα προβλήματα που προκύπτουν από την άεργο ισχύ που δημιουργείται όταν η μεταφορά γίνεται είτε με υπόγεια είτε με υποβρύχια καλώδια. Επίσης, η άεργος ισχύς που παράγεται είναι ανάλογη του μήκους του καλωδίου επειδή με αυτό τον τρόπο αυξάνεται η χωρητικότητα του. Ένα ακόμα μειονέκτημα είναι τα συστήματα αντιστάθμισης της άεργου ισχύος, τα οποία είναι απαραίτητα τόσο στα δύο άκρα της γραμμής μεταφοράς όσο και σε ενδιάμεσα τμήματα.

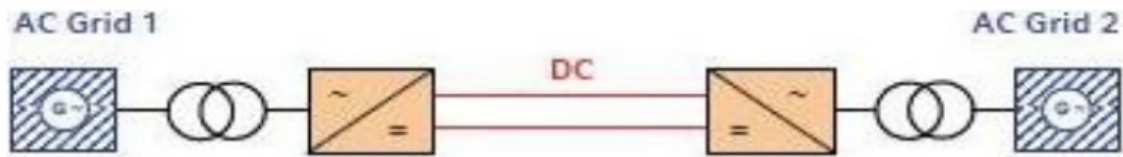
Σε αυτά τα συστήματα μεταφοράς είναι απαραίτητο να κατασκευαστούν πυλώνες για τις εναέριες γραμμές μεταφοράς, γεγονός που οδηγεί όχι μόνο σε ανάγκη μεγάλων εκτάσεων γης αλλά και σε οπτική όχληση, η οποία καλό είναι να αποφεύγεται. Ενδεχόμενα σφάλματα των δικτύων που είναι συνδεδεμένα με σύνδεση εναλλασσόμενου ρεύματος είναι δυνατόν να μεταφερθούν σε γειτονικά δίκτυα, ακόμα και εάν αυτά τα δίκτυα ανήκουν σε γειτονικές χώρες.

Όταν τα σφάλματα είναι έντονα, υπάρχει πάντα ο κίνδυνος της νησιδοποίησης, της κατάστασης που περιγράφηκε αναλυτικά προηγουμένως. Στις ακραίες περιπτώσεις, όπου τα σφάλματα είναι έντονα και δεν υπάρχουν μέτρα για την αντιμετώπισή τους, μπορεί ακόμα να γίνει γενική διακοπή παροχής ρεύματος. Όταν πρόκειται για παραγωγή η οποία είναι καταμεμημένη, δηλαδή για μονάδες μικρού μεγέθους, των οποίων η παραγωγή δεν προβλέπεται και οι οποίες βρίσκονται συνδεδεμένες σε δίκτυο το οποίο δεν είναι αρκετά ισχυρό, τα προβλήματα είναι πιο έντονα.

3.4.2 ΣΥΣΤΗΜΑ ΣΥΝΕΧΟΥΣ ΡΕΥΜΑΤΟΣ ΥΨΗΛΗΣ ΤΑΣΗΣ - HVDC (HIGH VOLTAGE DIRECT CURRENT)

Ένα σύστημα συνεχούς ρεύματος υψηλής τάσης - HVDC (High Voltage Direct Current) λειτουργεί ως εξής. Αρχικά, η ηλεκτρική ενέργεια παραλαμβάνεται από ένα τριφασικό δίκτυο εναλλασσόμενου ρεύματος και μετατρέπεται σε έναν σταθμό μετατροπής (converter station) σε συνεχές ρεύμα. Στη συνέχεια, αυτό το ρεύμα μεταφέρεται στο σημείο λήψης μέσω των αγωγών συνεχούς ρεύματος υψηλής τάσης. Τέλος, μετατρέπεται πάλι σε εναλλασσόμενο ρεύμα σε έναν σταθμό μετατροπής, ο οποίος είναι συνδεδεμένος σε δίκτυο εναλλασσόμενου ρεύματος.

Στους σταθμούς μετατροπής υπάρχουν ηλεκτρονικές ημιαγώγιμες βαλβίδες υψηλής τάσης οι οποίες χρησιμοποιούνται για την μετατροπή της υψηλής τάσης από εναλλασσόμενο σε συνεχές και από συνεχές σε εναλλασσόμενο. Η μετατροπή του ρεύματος με τη βοήθεια αυτών των βαλβίδων γίνεται ομαλά και ελέγχεται με τη βοήθεια υπολογιστών. Αυτό σημαίνει πως η μεταφερόμενη ενέργεια μπορεί να ελεγχθεί πλήρως, κάτι που δεν είναι δυνατό να επιτευχθεί στα συστήματα εναλλασσόμενου ρεύματος υψηλής τάσης.



Εικόνα 3.13: Σύστημα συνεχούς ρεύματος υψηλής τάσης – HVDC (Κοροβέσης, 2009)

3.4.2.1 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΩΝ ΑΓΩΓΩΝ ΣΤΑΘΕΡΟΥ ΡΕΥΜΑΤΟΣ ΥΨΗΛΗΣ ΤΑΣΗΣ HVDC

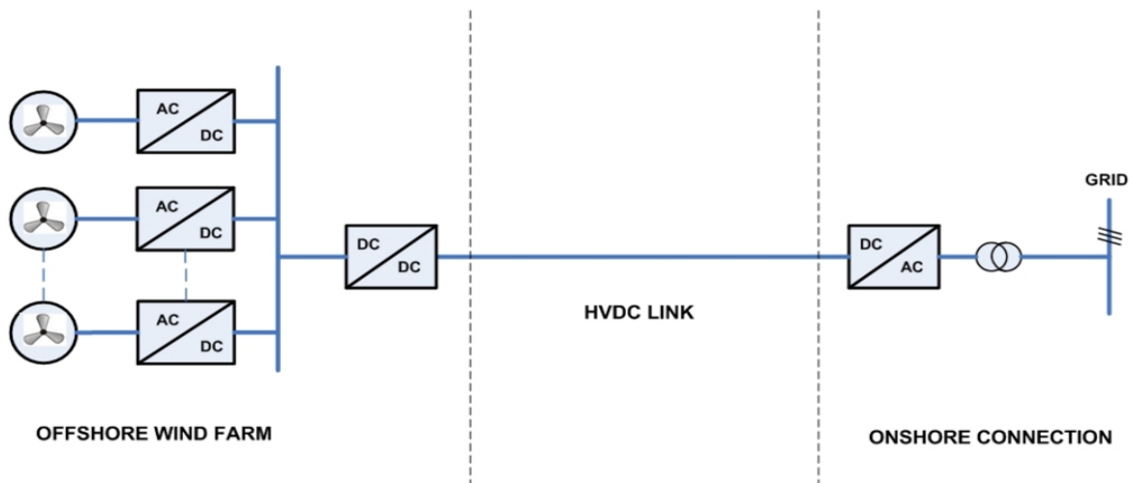
Οι αγωγοί σταθερού ρεύματος υψηλής τάσης HVDC λειτουργούν με διπολικό τρόπο. Αυτό σημαίνει πως υπάρχει ένας αγωγός η πολικότητα του οποίου είναι θετική και ένας δεύτερος αγωγός η πολικότητα του οποίου είναι αρνητική. Το μονωτικό υλικό που τους περιβάλλει είναι πολυμερές, γεγονός που το καθιστά ανθεκτικό και εύρωστο. Επειδή παρουσιάζουν ιδιαίτερα μεγάλη αντοχή και ελαστικότητα, είναι δυνατόν να εγκατασταθούν σε μεγάλα βάθη και με μικρό κόστος. Ένα επιπλέον σημαντικό στοιχείο τους είναι πως δεν δημιουργούν ηλεκτρικά πεδία ούτε επηρεάζουν τους θαλάσσιους οργανισμούς επειδή δεν περιέχουν τοξικά ή λάδια. Γενικά, δεν παρουσιάζουν αρνητικές επιπτώσεις για το περιβάλλον και αφού περάσει ο χρόνος ζωής τους είναι δυνατόν να αντικατασταθούν και να ανακυκλωθούν.

3.4.2.2 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΣΥΝΕΧΟΥΣ ΡΕΥΜΑΤΟΣ ΥΨΗΛΗΣ ΤΑΣΗΣ - HVDC (HIGH VOLTAGE DIRECT CURRENT)

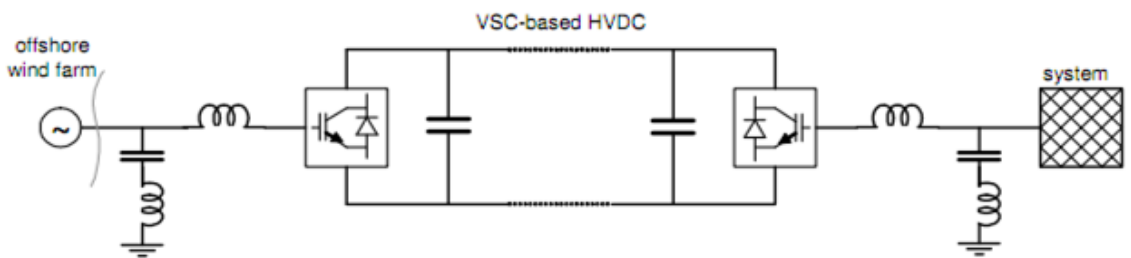
Βασικό πλεονέκτημα του συστήματος συνεχούς ρεύματος υψηλής τάσης – HVDC είναι πως είναι ικανό να μεταφέρει μόνο ενέργεια και καθόλου σφάλματα. Ακόμα, οι απώλειες ισχύος σε τέτοιου είδους συστήματα είναι ελάχιστες. Συγκεκριμένα, κάθε σταθμός μετατροπής παρουσιάζει απώλειες περίπου ίσες με 0,6% και ο αγωγός μεταφοράς συνεχούς ρεύματος παρουσιάζει απώλειες από 0,3 έως και 0,4% ανά 100km. Επίσης, εξαιτίας του φαινομένου της αέργου ισχύος, δεν υπάρχει όριο στην απόσταση μεταφοράς. Τέλος, επειδή η δομή των συστημάτων είναι συγκεντρωτική, είναι πιο εύκολη η διαδικασία συντήρησης.

3.4.2.3 ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΤΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΣΥΝΕΧΟΥΣ ΡΕΥΜΑΤΟΣ ΥΨΗΛΗΣ ΤΑΣΗΣ - HVDC (HIGH VOLTAGE DIRECT CURRENT)

Τα συστήματα HVDC ταξινομούνται σε δύο κατηγορίες, με βάση τον τύπο των μετατροπέων που χρησιμοποιούν. Η πρώτη κατηγορία είναι τα συστήματα HVDC Classic ή αλλιώς CSC-HVDC, τα οποία χρησιμοποιούν μετατροπείς πηγής ρεύματος (Current Source Converters – CSC) και η δεύτερη κατηγορία είναι τα συστήματα VSC-HVDC τα οποία χρησιμοποιούν μετατροπείς πηγής τάσης (Voltage Source Converters – VSC).



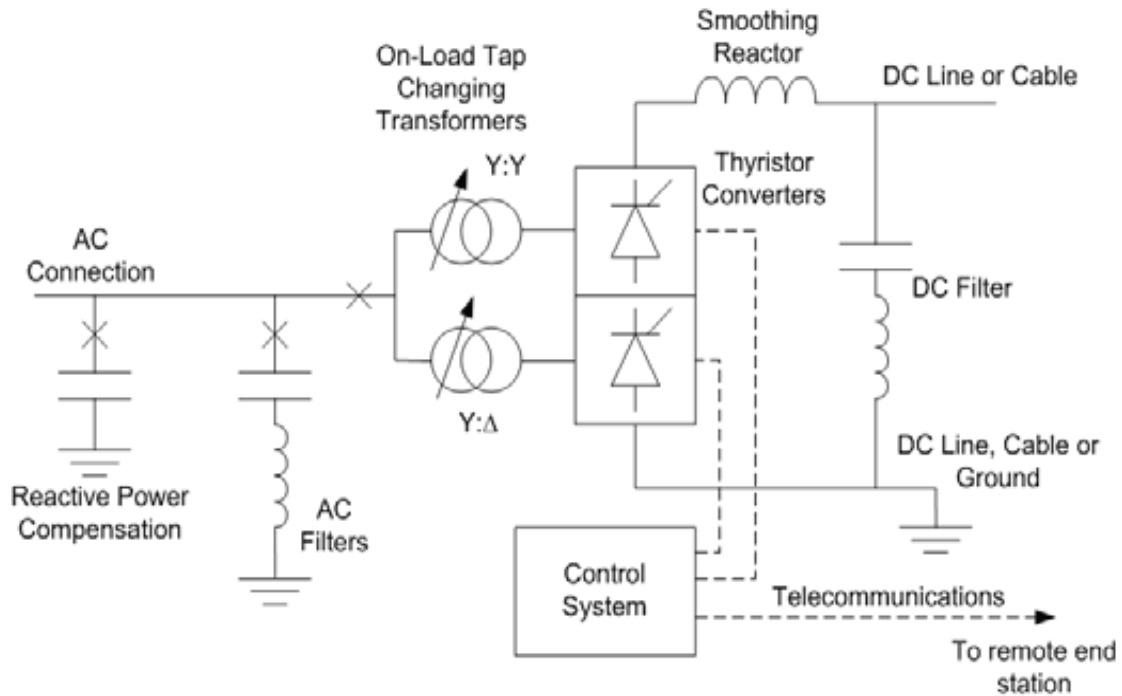
Εικόνα 3.14: Σύστημα HVDC Classic ή αλλιώς CSC-HVDC



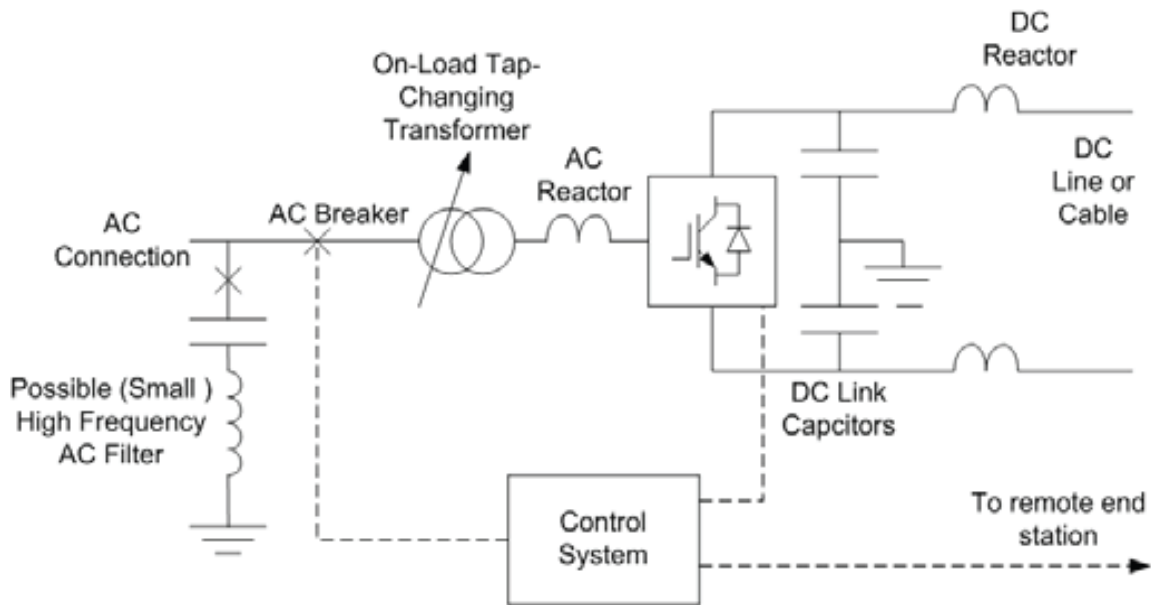
Εικόνα 3.15: Συστήματα VSC-HVDC τα οποία χρησιμοποιούν μετατροπείς πηγής τάσης

Η κύρια διαφορά ανάμεσα σε αυτούς τους δύο μετατροπείς είναι πως ο μετατροπέας των συστημάτων CSC-HVDC χρησιμοποιεί ως ημιαγωγικό στοιχείο το θυρίστορ ενώ ο μετατροπέας των συστημάτων VSC-HVDC χρησιμοποιεί ως ημιαγωγικό στοιχείο το IGBT. Η μεταγωγή του θυρίστορ είναι μερικώς ελεγχόμενη, με άλλα λόγια είναι μετατροπέας φυσικής μεταγωγής (line-commutated converter), ενώ η μεταγωγή του IGBT είναι πλήρως ελεγχόμενη,

είναι δηλαδή αυτομεταγόμενος μετατροπέας (self-commutated converter). Μια άλλη βασική διαφορά μεταξύ των δύο ημιαγωγικών στοιχείων που είναι σημαντική στις εφαρμογές HVDC είναι πως το θυρίστορ είναι στοιχείο μόνης κατεύθυνσης σε αντίθεση με το στοιχείο IGBT το οποίο είναι διπλής κατεύθυνσης, γεγονός που σημαίνει πως μπορεί να άγει ρεύμα και προς τις δύο κατευθύνσεις.



Εικόνα 3.16: Μετατροπέας πηγής ρεύματος (Current Source Converter – CSC) (Barnes and Beddard, 2012)



Εικόνα 3.17: Μετατροπέας πηγής τάσης (Voltage Source Converters – VSC)
(Barnes and Beddard, 2012)

Ακόμα, στον μετατροπέα των συστημάτων CSC-HVDC, η πολικότητα του συνεχούς ρεύματος είναι σταθερή και αυτό έχει ως αποτέλεσμα τον καθορισμό της κατεύθυνσης της ροής ισχύος από την πολικότητα της συνεχούς τάσης. Η πλευρά DC του μετατροπέα είναι συνδεδεμένη σε σειρά με ένα πηνίο του οποίου η αυτεπαγωγή είναι μεγάλη. Από την άλλη, στον μετατροπέα των συστημάτων VSC-HVDC η πολικότητα της συνεχούς τάσης παραμένει σταθερή και ως αποτέλεσμα ο καθορισμός της κατεύθυνσης της ισχύος γίνεται από την πολικότητα του DC συνεχούς ρεύματος. Σε αυτά τα συστήματα, η DC πλευρά του μετατροπέα είναι συνδεδεμένη παράλληλα με έναν πυκνωτή ή χωρητικότητα του οποίου είναι μεγάλη.

3.4.2.4 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΤΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ VSC - HVDC

Τα κύρια πλεονεκτήματα των συστημάτων VSC-HVDC παρουσιάζονται συνοπτικά σε αυτή την παράγραφο. Αρχικά, επειδή με τον μετατροπέα VSC μπορεί να γίνει ανεξάρτητος έλεγχος τόσο της ενεργού όσο και της αέργου ισχύος σε σχετικά μικρό χρονικό διάστημα, αυτές μπορούν να ρυθμιστούν από τον διαχειριστή του συστήματος εναλλασσόμενου ρεύματος στις επιθυμητές τιμές τους. Με αυτόν τον τρόπο, το σύστημα HVDC συμβάλλει στην ρύθμιση της συχνότητας του δικτύου στο οποίο συνδέεται ή ακόμα και στη ρύθμιση της εναλλασσόμενης τάσης στο σημείο σύνδεσης. Επίσης, επειδή ο μετατροπέας είναι ικανός να λειτουργήσει σε πολύ χαμηλή ή ακόμα σε κάποιες περιπτώσεις σε μηδενική ενεργό ισχύ, μπορεί σε δυσμενείς περιπτώσεις κάποιου σφάλματος να

δώσει προτεραιότητα στην παροχή αέργου ισχύος, με σκοπό να διατηρηθεί η τάση του δικτύου.

Εξαιτίας όλων των παραπάνω, συμπεραίνεται πως ένα σύστημα VSC-HVDC μπορεί σε απλές περιπτώσεις να συνδεθεί και να στηρίξει αδύναμα δίκτυα. Σε πιο πολύπλοκες περιπτώσεις μεγαλύτερων συστημάτων, μπορεί αφού συνδεθεί να βελτιώσει τη λειτουργία και την ευστάθεια τους, δηλαδή την ευστάθεια όχι μόνο της τάσης αλλά και της συχνότητας αλλά και να βοηθήσει στην απόσβεση των ηλεκτρομηχανικών ταλαντώσεων. Επίσης, πρέπει να σημειωθεί πως εξαιτίας της αντιστροφής της πολικότητας του συνεχούς ρεύματος, η συγκεκριμένη τεχνολογία αντιστρέφει την ισχύ σε λίγα μόλις ms, χωρίς να επηρεάζεται ο έλεγχος της αέργου ισχύος στην επιθυμητή τιμή. Τέλος, ένα σύστημα VSC-HVDC είναι ικανό να αποκαταστήσει τη λειτουργία του δικτύου μετά από ολική σβέση (black- start) μέσα σε πολύ λίγο χρόνο.

Δεν θα πρέπει να παραληφθούν και τα μειονεκτήματα των συγκεκριμένων συστημάτων. Συγκριτικά με τα συστήματα CSC-HVDC τα οποία μπορούν να μεταφέρουν ισχύ της τάξεως των 8000 MW, τα συστήματα VSC-HVDC μπορούν να μεταφέρουν πολύ μικρότερη ισχύ, της τάξεως των 1200 MW. Κάποια άλλα μειονεκτήματα αυτής της τεχνολογίας είναι το αυξημένο κόστος κατά 10-15%., οι μεγαλύτερες απώλειες διακοπής εξαιτίας της εφαρμογής της τεχνικής PWM και η μικρότερη ικανότητα υπερφόρτισης.

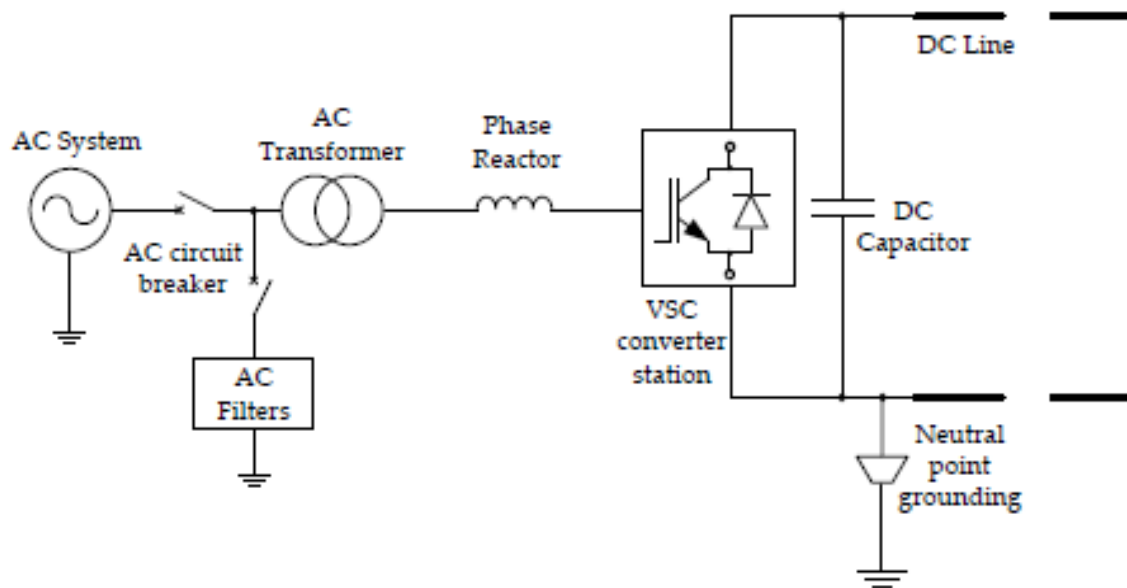
3.4.2.5 ΣΤΑΘΜΟΣ VSC-HVDC

Τα τελευταία χρόνια αναπτύσσονται ραγδαία οι μετατροπείς πολλαπλών επιπέδων, οι οποίοι αυξάνουν την τάση και την ονομαστική ικανότητα ισχύος των σταθμών. Το γεγονός αυτό επιδρά θετικά στην εξέλιξη των συστημάτων VSC-HVDC. Οι μετατροπείς που χρησιμοποιούνταν μέχρι πρότινος σε αυτές τις εφαρμογές ήταν δύο ή τριών επιπέδων. Μετατροπέας δύο επιπέδων είναι ο μετατροπέας εκείνος ο οποίος έχει στην DC πλευρά του τάση V και με τη βοήθεια της μεθόδου PWM παράγει φασική εναλλασσόμενη τάση εξόδου επιπέδων $+V DC / 2$ και $-V DC / 2$.

Σε υψηλές συχνότητες εμφανίζονται διακοπτικές απώλειες και περιορίζονται οι ονομαστικές τιμές του ρεύματος και της τάσης των ημιαγωγών. Επομένως, σε εφαρμογές όπου απαιτούνται υψηλές τάσεις και υψηλή ισχύς, υπάρχουν περιορισμοί που αφορούν τη λειτουργία των αντιστροφών δύο ή τριών επιπέδων.

Οι μετατροπείς πολλαπλών επιπέδων είναι οι μετατροπείς εκείνοι οι οποίοι παράγουν τάση με μεγάλο αριθμό επιπέδων. Αυτοί οι μετατροπείς είναι ικανοί να πετύχουν υψηλές τάσεις ενώ παράλληλα μειώνουν τη διακοπτική συχνότητα και το αρμονικό περιεχόμενο της παραγόμενης τάσης.

Με την αύξηση των απαιτήσεων της μεταφορικής ικανότητας τα τελευταία χρόνια, δεν είναι πλέον επαρκές το επίπεδο τάσης που μπορεί να χρησιμοποιηθεί σήμερα, το οποίο είναι της τάξης των 500 kV. Για αυτό το λόγο γίνεται μια προσπάθεια για τη δημιουργία συνδέσμων HVDC που θα λειτουργούν σε τάση της τάξης των 800 kV και οι οποίοι ονομάζονται Ultra HVDC.



Εικόνα 3.18: Τυπικό διάγραμμα ενός σταθμού VSC-HVDC (Pinto, 2014)

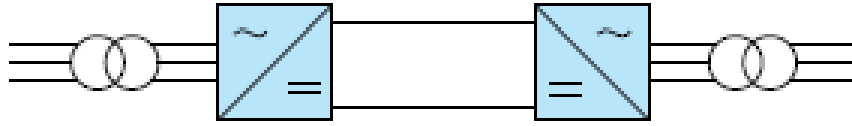
3.4.2.6 ΤΟΠΟΛΟΓΙΕΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ HVDC

Οι ανάγκες καθώς και οι απαιτήσεις της κάθε εφαρμογής ξεχωριστά είναι αυτές που καθορίζουν την ακριβή τοπολογία ενός συστήματος HVDC. Η διασύνδεση δυο δικτύων τα οποία είναι ασύγχρονα μεταξύ τους γίνεται με την τοπολογία back-to-back. Σε αυτή την τοπολογία, οι δύο μετατροπείς βρίσκονται στον ίδιο σταθμό και μεταξύ τους δεν υπάρχει ενδιάμεσος σύνδεσμος DC μεγάλου μήκους.

Τα μονοπολικά συστήματα HVDC αποτελούν την πρώτη γενική κατηγορία τοπολογιών και χωρίζονται σε δύο υποκατηγορίες, τα συμμετρικά και τα ασύμμετρα.

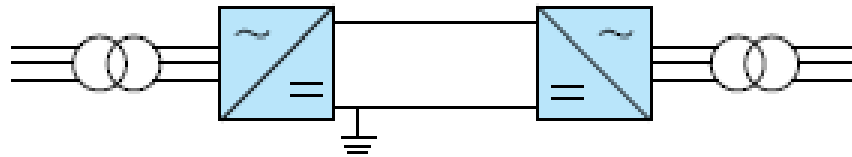
Στο συμμετρικό μονοπολικό σύστημα, όπως είναι εμφανές από την Εικόνα 3.19, η σύνδεση των δύο μετατροπέων πραγματοποιείται με έναν συμμετρικό πόλο θετικής-αρνητικής τάσης DC. Μέχρι σήμερα, έχει γίνει χρήση της συγκεκριμένης τοπολογίας σε πολλές υποβρύχιες διασυνδέσεις. Στο συμμετρικό μονοπολικό σύστημα η επιστροφή γίνεται μέσω της γης. Αντίθετα, στο ασύμμετρο μονοπολικό σύστημα πραγματοποιείται είτε μεταλλική επιστροφή, είτε επιστροφή μέσω της γης με χρήση ηλεκτροδίων γείωσης.

Symmetric monopole



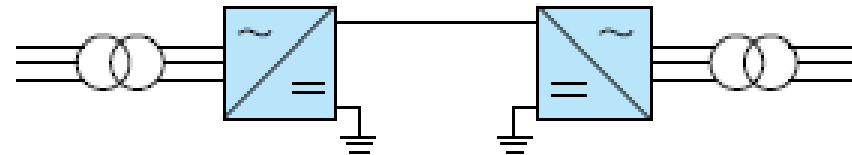
Εικόνα 3.19: Συμμετρικό μονοπολικό σύστημα (ABB, 2012)

Asymmetric monopole, Metallic return



Εικόνα 3.20: Ασύμμετρο μονοπολικό σύστημα με μεταλλική επιστροφή (ABB, 2012)

Asymmetric monopole, Ground return

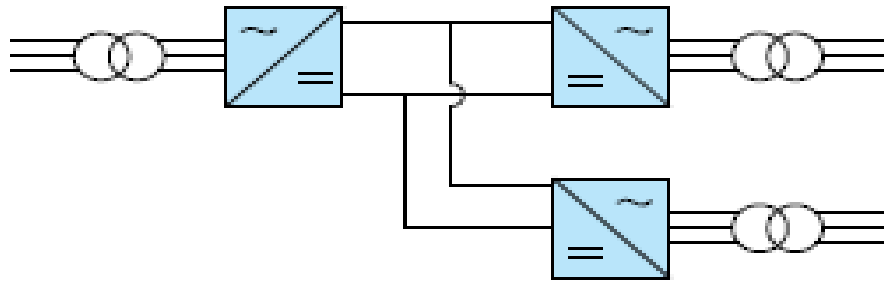


Εικόνα 3.21: Ασύμμετρο μονοπολικό σύστημα με επιστροφή μέσω της γης με χρήση ηλεκτροδίων γείωσης (ABB, 2012)

Η σύνδεση δύο μονοπολικών συστημάτων μεταξύ τους έχουν ως αποτέλεσμα τη δημιουργία της δεύτερης κατηγορίας, η οποία είναι τα διπολικά συστήματα HVDC. Για να είναι δυνατή η ένωση θα πρέπει οι δύο πόλοι να είναι συμμετρικοί και να μπορούν να μεταφέρουν την ίδια ισχύ. Και σε αυτή την κατηγορία η επιστροφή μπορεί να γίνει με δύο τρόπους, οι οποίοι είναι με μεταλλικό ουδέτερο ή μέσω της γης. Στην περίπτωση εκείνη όπου ο ένας πόλος, είτε λόγω βλάβης είτε λόγω συντήρησης, βγεί εκτός λειτουργίας, δεν σταματά η λειτουργία και του δεύτερου πόλου. Αυτός λειτουργεί ανεξάρτητα, με την επιστροφή να γίνεται μέσω της γης. Από τη σύγκριση μεταξύ μονοπολικών και διπολικών συστημάτων προκύπτει πως η μεταφορική ικανότητα των δεύτερων είναι διπλάσια από των πρώτων.

Η τρίτη κατηγορία τοπολογίας είναι η πολυτερματική τοπολογία ή το πολυτερματικό δίκτυο και δημιουργείται όταν υπάρχουν περισσότερα από δύο τερματικά. Πλεονέκτημα της συγκεκριμένης τοπολογίας είναι η ευελιξία στη διαμόρφωση της. Οι τερματικοί σταθμοί μπορούν να συνδέονται είτε σε σειρά, δηλαδή θα διαρρέονται από το ίδιο συνεχές ρεύμα, είτε παράλληλα, δηλαδή θα έχουν την ίδια τάση στα άκρα τους.

Multi-terminal

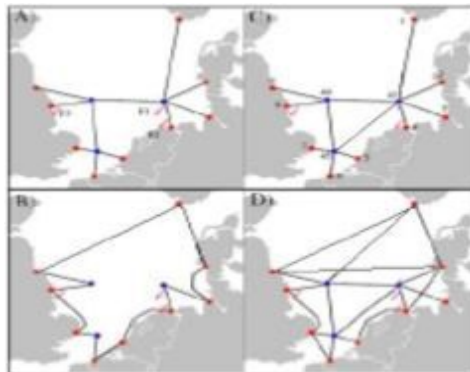


Εικόνα 3.22: Πολυτερματική τοπολογία με παράλληλη σύνδεση (ABB, 2012)

Η πολυτερματική τοπολογία χρησιμοποιείται για τη διασύνδεση μεταξύ περισσότερων από δύο AC δικτύων, τα οποία μπορεί να είναι νησιωτικά δίκτυα καθώς επίσης και για τη διασύνδεση υπεράκτιων αιολικών πάρκων με το δίκτυο. Συγκεκριμένα, η διασύνδεση κάθε υπεράκτιου αιολικού πάρκου επιτυγχάνεται με μια αποκλειστική γραμμή μεταφοράς HVDC. Αυτό σημαίνει πως για κάθε νέο υπεράκτιο αιολικό πάρκο που εγκαθίσταται, είναι απαραίτητο να κατασκευάζεται μια νέα γραμμή μεταφοράς HVDC, αυξάνοντας έτσι τόσο το κόστος όσο και τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Η πολυτερματική τοπολογία επιτρέπει τη σύνδεση του μετατροπέα κάθε καινούργιου υπεράκτιου αιολικού πάρκου στην κοντινότερη ήδη υπάρχουσα DC γραμμή. Έτσι, μειώνεται όχι μόνο το κόστος αλλά και οι απώλειες, αφού χρησιμοποιούνται λιγότεροι μετατροπείς.

Ανάλογα με τη διαμόρφωσή της στο χώρο, η πολυτερματική τοπολογία μπορεί να είναι:

- A. ακτινική
- B. Βροχοειδής
- C. απλό πλέγμα
- D. έντονο πλέγμα

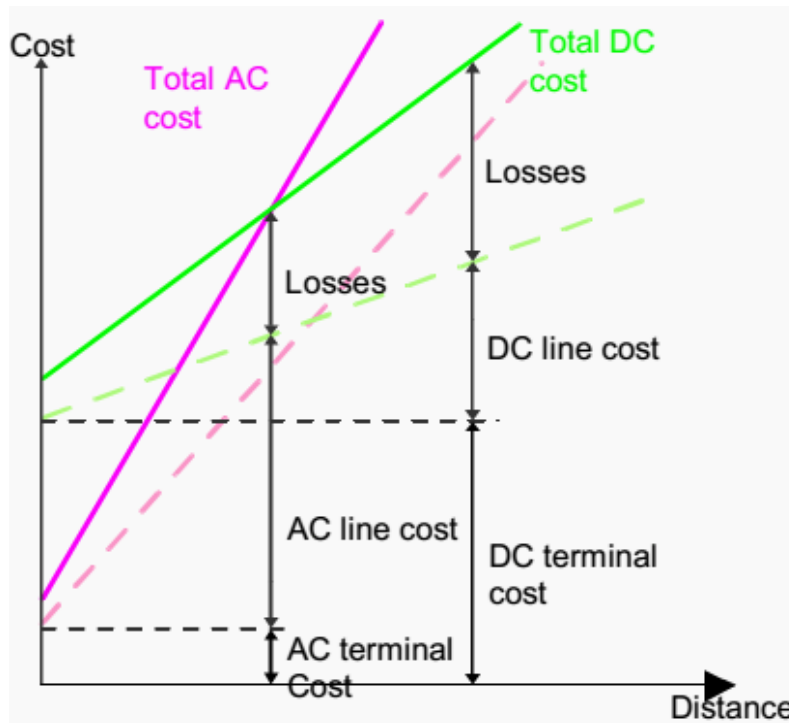


Εικόνα 3.23: Τρόποι διαμόρφωσης της πολυτερματικής τοπολογίας (ABB, 2012)

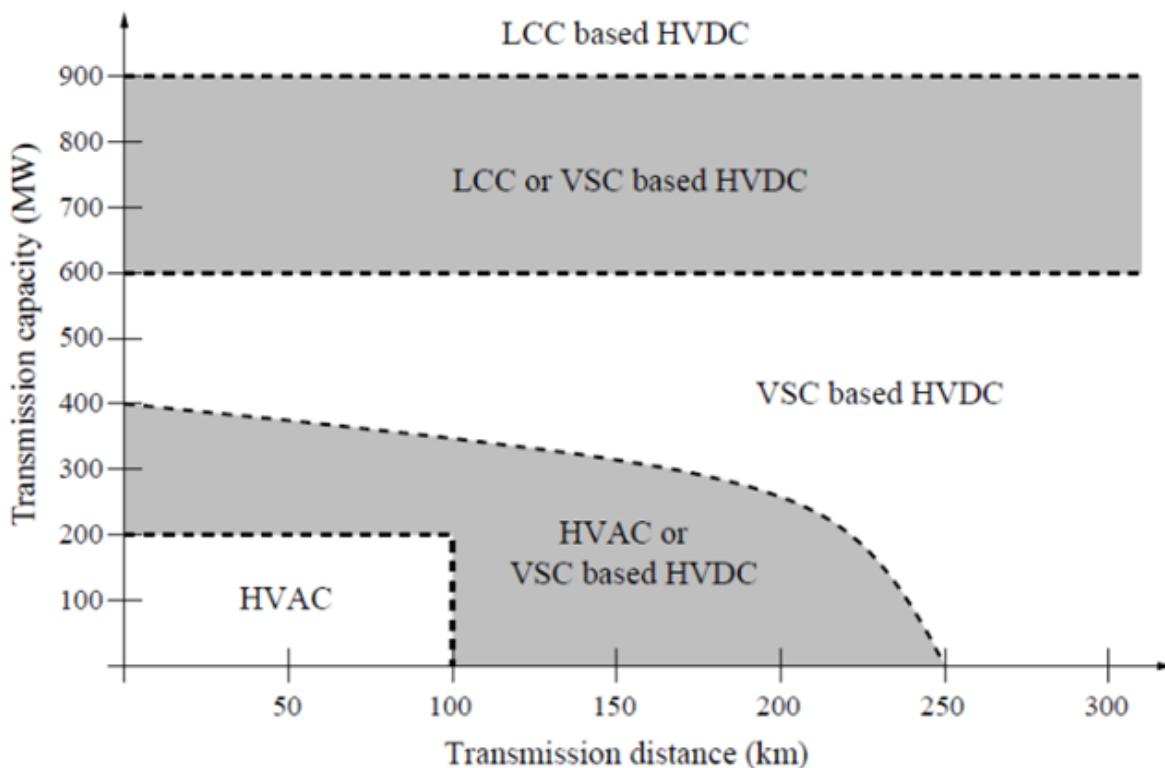
3.5 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕΤΑΞΥ ΑΓΩΓΩΝ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΣΥΝΕΧΟΥΣ ΡΕΥΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΕΝΑΛΛΑΣΣΟΜΕΝΟΥ ΡΕΥΜΑΤΟΣ

Από την σύγκριση της αναλυτικής περιγραφής που έγινε παραπάνω για τους αγωγούς των δυο τεχνολογιών, συνεχούς και εναλλασσόμενου ρεύματος, προέκυψαν τα παρακάτω συμπεράσματα. Οι αγωγοί συνεχούς ρεύματος δεν έχουν κάποιο όριο για το μήκος τους, σε αντίθεση με τους αγωγούς εναλλασσόμενου ρεύματος, η χωρητικότητα των οποίων περιορίζει το πρακτικό μήκος τους. Επίσης, για την τεχνολογία των αγωγών συνεχούς ρεύματος δεν είναι απαραίτητοι οι ενδιάμεσοι σταθμοί, ενώ στους αγωγούς εναλλασσόμενου ρεύματος είναι απαραίτητη η αντιστάθμιση της άεργου ισχύος.

Οι αγωγοί συνεχούς ρεύματος δεν αυξάνουν τη χωρητικότητα του δικτύου εναλλασσόμενου ρεύματος, ενώ οι αγωγοί της άλλης τεχνολογίας εμφανίζουν μεγαλύτερες απώλειες ισχύος. Οι αγωγοί συνεχούς ρεύματος παρουσιάζουν επίσης τα πλεονεκτήματα έναντι των άλλων, πως έχουν μεγαλύτερο χρόνο ζωής και μικρότερο βάρος για την ίδια μεταφορική ικανότητα. Τέλος, οι αγωγοί εναλλασσόμενου ρεύματος έχουν και το μειονέκτημα πως λόγω μεγέθους είναι δύσκολοι στη διαχείριση.



Εικόνα 3.24: Συγκριτικό διάγραμμα των τεχνολογιών HVDC και HVAC σχετικό με το κόστος και τις απώλειες



Εικόνα 3.25: Χρήση συστημάτων υψηλής τάσης ανάλογα με την ισχύ και την απόσταση

3.6 ΥΠΕΡΑΚΤΙΟΙ ΣΤΑΘΜΟΙ ΜΕΤΑΤΡΟΠΗΣ AC/DC

Η ύπαρξη ενός υπεράκτιου υποσταθμού στο αιολικό πάρκο κρίνεται απαραίτητη στις περιπτώσεις εκείνες όπου η τάση που χρησιμοποιείται για τη διασύνδεση με τη στεριά είναι μεγαλύτερη από 33 kV. Επειδή η συγκεκριμένη κατασκευή είναι μεγάλου μεγέθους, χρειάζεται προσωπικό το οποίο θα την ελέγχει συνεχώς. Ο εσωτερικός εξοπλισμός των υπεράκτιων υποσταθμών είναι ακριβότερος από τον αντίστοιχο των χερσαίων μηχανισμών διανομής και επίσης είναι απαραίτητη πρόσθετη προστασία από το εξωτερικό περιβάλλον.

3.7 ΣΥΣΤΗΜΑ ΕΛΕΓΧΟΥ SCADA

Το σύστημα SCADA είναι εκείνο το σύστημα το οποίο συνδέει με ένα κεντρικό υπολογιστή τα επιμέρους τμήματα ενός υπεράκτιου αιολικού πάρκου, δηλαδή τις ανεμογεννήτριες, τον υποσταθμό και τους μετεωρολογικούς σταθμούς. Με τη βοήθεια αυτού του συστήματος δίνεται στον διαχειριστή η δυνατότητα να μπορεί να επιβλέπει τη συμπεριφορά όλων των ανεμογεννητριών

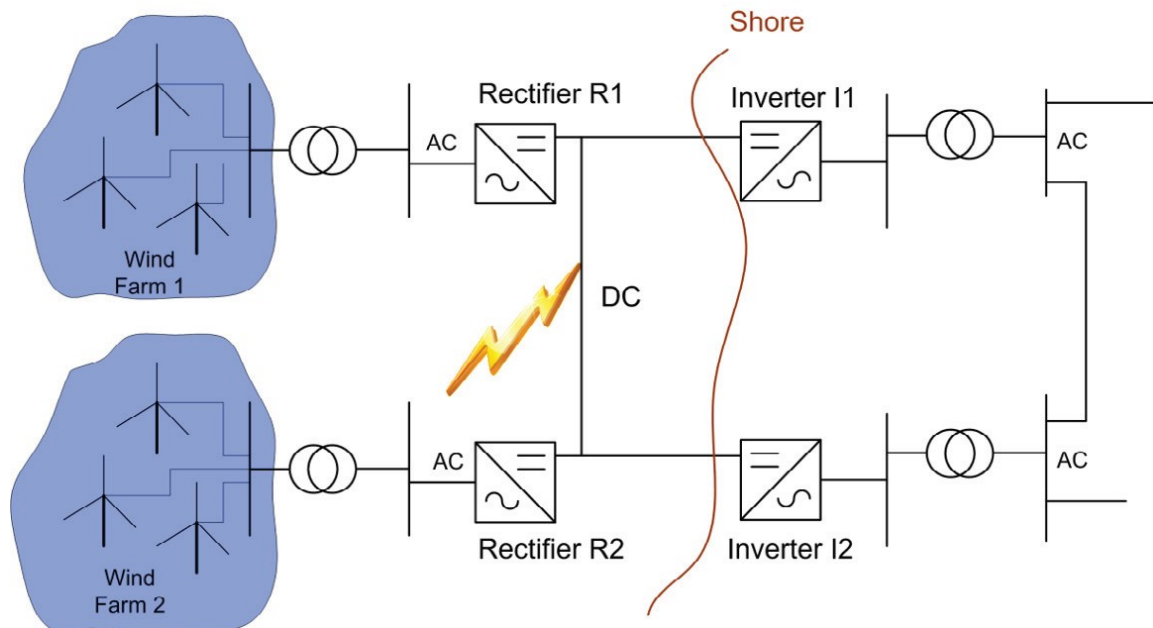
και γενικότερα του αιολικού πάρκου ως σύνολο. Ο υπολογιστής αποθηκεύει σε ένα αρχείο όλες τις ενέργειες και έτσι ο διαχειριστής καθορίζει με μεγαλύτερη ευκολία τις διορθωτικές ενέργειες που πρέπει να γίνουν. Επίσης, είναι δυνατή η καταγραφή της ενεργειακής απόδοσης, της διαθεσιμότητας και των σημάτων σφάλματος ή βλάβης. Πρέπει να σημειωθεί επίσης πως ανά πάσα στιγμή ο διαχειριστής να ελέγξει το αιολικό πάρκο με την βοήθεια του συστήματος SCADA (Aquaret, 2016).

4 ΣΦΑΛΜΑΤΑ ΤΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ - ΒΡΑΧΥΚΥΚΛΩΜΑΤΑ

4.1 ΓΕΝΙΚΑ

Κάποιο ενδεχόμενο σφάλμα στο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας ή κάποιο βραχυκύκλωμα, οδηγεί σε βύθιση τάσης στο σημείο εκείνο όπου συνέβη. Η βύθιση μπορεί να συμβεί είτε σε μια από τις φάσεις είτε σε περισσότερες, γεγονός που εξαρτάται από τον τύπο του βραχυκυκλώματος. Σε ορισμένες περιπτώσεις η βύθιση τάσης είναι δυνατό να εξαπλωθεί στη γειτονική περιοχή. Ο χρόνος κατά τον οποίο λειτουργούν τα συστήματα προστασίας του συστήματος είναι υπεύθυνος για τη διάρκεια της βύθισης τάσης, η οποία είναι συνήθως λίγα δέκατα του δευτερολέπτου.

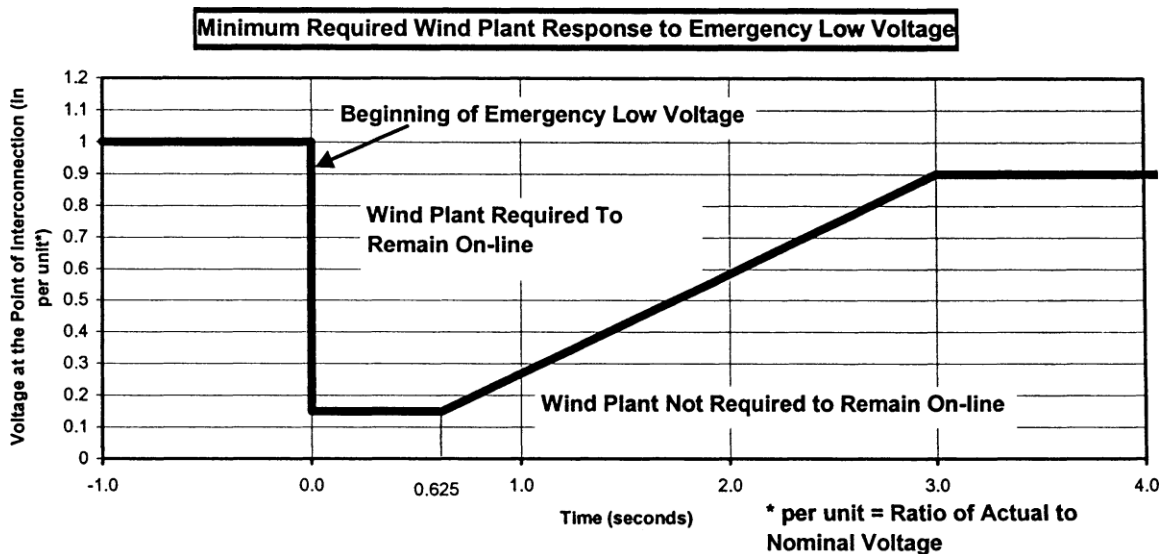
Αποτέλεσμα της βύθισης τάσης είναι η διαφορά ανάμεσα στη μηχανική ισχύ εισόδου και στην ηλεκτρική ισχύ εξόδου. Οι ρυθμιστές στροφών των σύγχρονων γεννητριών βοηθούν στην αντιμετώπιση τέτοιων καταστάσεων καθώς τις υποχρεώνουν να παραμένουν συγχρονισμένες όταν συμβαίνει βύθιση τάσης.



Εικόνα 4.1: Βραχυκύκλωμα σε υπεράκτιο αιολικό πάρκο (Barnes and Beddard, 2012)

Μέχρι πρόσφατα, σε περιπτώσεις σφάλματος, οι ανεμογεννήτριες για να προστατευθούν αποσυνδέονταν από το σύστημα, χωρίς αυτό να αποτελεί μεγάλο πρόβλημα αφού η ισχύς τους ήταν σχετικά μικρή. Με τα σημερινά δεδομένα ισχύος, η αποσύνδεση από το δίκτυο θα οδηγούσε σε μεγάλη απώλεια, της τάξης των εκατοντάδων MW, με αρνητικό αντίκτυπο στην αξιοπιστία του συστήματος.

Υπό συνθήκες βύθισης τάσης προβλέπονται αυστηρές απαιτήσεις για τη δυνατότητα παραμονής των ανεμογεννητριών σε λειτουργία. Αυτές οι απαιτήσεις παρουσιάζονται σε μορφή διαγραμμάτων της τάσης συναρτήσει του χρόνου και ονομάζονται Low Voltage Ride-Through (LVRT) Capability. Στην καμπύλη τάσης – χρόνου υπάρχει ένα όριο βύθισης τάσης το οποίο καθορίζει την σύνδεση των ανεμογεννητριών με το δίκτυο. Οι ανεμογεννήτριες πρέπει να παραμένουν συνδεδεμένες στο δίκτυο πάνω από το όριο αυτό, ενώ μπορούν να αποσυνδεθούν όταν η τάση είναι μικρότερη από το συγκεκριμένο όριο. Η τάση που παρουσιάζεται στο διάγραμμα είναι η τάση στο σημείο διασύνδεσης με το δίκτυο.



Εικόνα 4.2: Προτεινόμενη καμπύλη τάσης – χρόνου Low Voltage Ride-Through (LVRT) Capability (FERC, 2005)

Ο κατακόρυφος άξονας του διαγράμματος αντιστοιχεί στο λόγο της πραγματικής τιμής της τάσης προς την ονομαστική της και ο οριζόντιος στον χρόνο. Για χρόνο πριν τα 0.0 sec, η τάση που φαίνεται στο διάγραμμα είναι η ονομαστική τάση του μετασχηματιστή, και τα 0.0 sec είναι η στιγμή εκείνη που πέφτει η τάση. Η εγκατάσταση θα πρέπει να συνεχίσει να λειτουργεί στην περίπτωση που για χρόνο μικρότερο των 0.625 sec η τάση παραμένει μεγαλύτερη από το 15 % της ονομαστικής τάσης ή στην περίπτωση που η τάση μέσα σε 3 sec από τη βύθιση της γίνει ίση με το 90 % της ονομαστικής τάσης, με την προϋπόθεση να μην είναι μικρότερη από την ελάχιστη τάση. Οι τιμές του

συγκεκριμένου διαγράμματος διαφέρουν ανάλογα με τον κανονισμό της κάθε χώρας και γίνεται ανανέωση τους συχνά.

Εκτός από τις παραπάνω απαιτήσεις που αφορούν την βύθιση τάσης, υπάρχουν επιπλέον απαιτήσεις που αφορούν τον ρυθμό ανόδου της ισχύος για την επαναφορά της ενεργού και της αέργου ισχύος, αφού αποκατασταθεί η τάση σε επιτρεπτά επίπεδα. Ακόμα υπάρχουν κώδικες που επιβάλλουν σε καταστάσεις σφαλμάτων την παραγωγή αέργου ρεύματος, με σκοπό να υποστηριχθεί η τάση και να αποκατασταθεί το σύστημα σε μικρότερο χρόνο. Αυτό επιτυγχάνεται στις συμβατικές μονάδες παραγωγής με τη βοήθεια των συστημάτων διέγερσης που διαθέτουν και από τη δυνατότητα αποθήκευσης ενέργειας στο μαγνητικό τους πεδίο.

4.2 ΒΡΑΧΥΚΥΚΛΩΜΑΤΑ

Τα επίπεδα βραχυκύκλωσης ενός δικτύου ενδέχεται να αυξηθούν ως αποτέλεσμα της σύνδεσης ενός αιολικού πάρκου σε αυτό. Είναι πολύ σημαντική η γνώση του μέγιστου και του ελάχιστου ρεύματος βραχυκύκλωσης σε κάθε σημείο σφάλματος, ώστε να επιλεγθούν και να ρυθμιστούν σωστά οι κατάλληλες προστατευτικές διατάξεις. Η γνώση του μέγιστου ρεύματος βραχυκύκλωσης είναι αναγκαία για την επιλογή των διακοπτικών και ασφαλιστικών στοιχείων καθώς και της μηχανικής αντοχής του εξοπλισμού, επειδή κατά τη διάρκεια του βραχυκυκλώματος υπάρχουν ισχυρά ρεύματα που προκαλούν ηλεκτροδυναμικά φαινόμενα. Από την άλλη, πρέπει να είναι γνωστό το ελάχιστο ρεύμα βραχυκύκλωσης, για την επιλογή κατάλληλων ασφαλιστικών στοιχείων.

Τα βασικά χαρακτηριστικά των βραχυκυκλωμάτων είναι η διάρκειά τους και η προέλευσή τους. Όσον αφορά τη διάρκεια, μπορούν να είναι είτε μεταβατικά είτε μόνιμης κατάστασης. Ένα βραχυκύκλωμα μπορεί να προκληθεί από κάποια μηχανική αιτία, όπως είναι για παράδειγμα κάποιο σπάσιμο στους αγωγούς ή κάποια τυχαία επαφή δυο στοιχείων μεταξύ τους, από κεραυνό ή από κάποιο πρόβλημα στη μόνωση εξαιτίας διαβρωτικού περιβάλλοντος, υγρασίας ή υπερθέρμανσης.

Τα βραχυκυκλώματα ταξινομούνται σε τρεις κατηγορίες, τα μονοφασικά, τα διφασικά και τα τριφασικά. Τα μονοφασικά είναι αυτά που εμφανίζονται πιο συχνά, σε ποσοστό περίπου 80% και είναι μεταξύ φάσης και γης. Τα διφασικά εμφανίζονται σε ποσοστό 15% και είναι μεταξύ φάσεων, είτε με είτε χωρίς επαφή γης. Τα τριφασικά βραχυκυκλώματα είναι αυτά που εμφανίζονται πιο σπάνια, σε ποσοστό 5%.

Ανάλογα με τον τύπο, τη διάρκεια και τη θέση του βραχυκυκλώματος είναι διαφορετικές και οι επιπτώσεις τους. Το πιο συχνό αποτέλεσμα από ένα βραχυκύκλωμα είναι η δημιουργία ηλεκτρικού τόξου στο σημείο του βραχυκυκλώματος. Από το ηλεκτρικό τόξο μπορεί να προκληθούν διάφορα προβλήματα, από καταστροφή των μονώσεων και λιώσιμο των αγωγών, μέχρι πιο σοβαρά όπως είναι η πυρκαγιά ή ακόμα και θανατηφόρα ατυχήματα. Τα ισχυρά ρεύματα που ακολουθούν το βραχυκύκλωμα καταπονούν τον εξοπλισμό.

Συγκεκριμένα, οι ηλεκτρικοί ζυγοί καταστρέφονται, τα καλώδια αποσυνδέονται και ο ηλεκτρικός εξοπλισμός υπερθερμαίνεται.

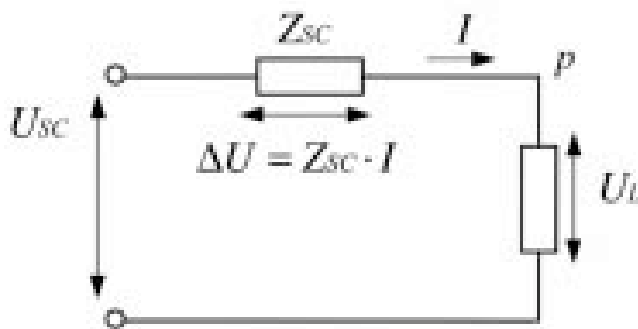
Επίσης, τα βραχυκυκλώματα ενδέχεται να προκαλέσουν διαταραχές και στα υπόλοιπα κυκλώματα του δικτύου. Είναι ικανά να προκαλέσουν παράσιτα σε κυκλώματα τηλεπικοινωνιών και ελέγχου, βυθίσεις τάσης ή ακόμα και διακοπές της τάσης μέχρι την εκκαθάριση του σφάλματος. Επειδή σε περιπτώσεις βραχυκυκλώματος λειτουργούν οι ασφαλιστικές διατάξεις μπορεί να διακοπεί η ηλεκτροδότηση ή σε ακραίες περιπτώσεις να γίνει ολικό black out.

4.2.1 ΚΑΝΟΝΙΣΜΟΙ ΓΙΑ ΤΟΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟ ΤΩΝ ΡΕΥΜΑΤΩΝ ΒΡΑΧΥΚΥΚΛΩΣΗΣ

Ο υπολογισμός των ρευμάτων βραχυκύκλωσης γίνεται σύμφωνα με αντίστοιχα διεθνή πρότυπα καθώς δεν υπάρχει ελληνικός κανονισμός. Σε όλα γενικά τα ηλεκτρικά δίκτυα μέχρι 230 kV εφαρμόζεται ο διεθνής κανονισμός IEC 909. το συγκεκριμένο πρότυπο βασίζεται στο θεώρημα Thevenin, υπολογίζοντας μια ισοδύναμη πηγή στο σημείο του σφάλματος και τα αντίστοιχα ρεύματα βραχυκύκλωσης. Το σύνολο των στοιχείων του δικτύου, δηλαδή οι σύγχρονες και ασύγχρονες στρεφόμενες μηχανές, οι γραμμές μεταφοράς και οι μετασχηματιστές αντικαθίστανται από τις ισοδύναμες τους σύνθετες αντιστάσεις. Είναι αρκετά ακριβής μέθοδος για εφαρμογή σε πολύπλοκα δίκτυα, έχει όμως το μειονέκτημα πως απαιτείται πλήθος υπολογισμών.

4.2.2 ΕΠΙΠΕΔΟ ΙΣΧΥΟΣ ΒΡΑΧΥΚΥΚΛΩΜΑΤΟΣ

Ενα μέτρο της αντοχής του δικτύου αποτελεί το επίπεδο ισχύος ενός βραχυκυκλώματος σε συγκεκριμένο σημείο στο δίκτυο, το οποίο επιδρά σημαντικά στο δίκτυο χωρίς όμως να επηρεάζει την ποιότητα ισχύος. Αυτό το επίπεδο ισχύος σχετίζεται άμεσα με την ικανότητα που έχει το ηλεκτρικό δίκτυο να απορροφά ενδεχόμενες διαταραχές. Το ισοδύναμο κύκλωμα κάθε σημείου p του δικτύου παρουσιάζεται στην Εικόνα 4.3.



Εικόνα 4.3: Ισοδύναμο κύκλωμα κάθε σημείου p του δικτύου (Energie, 2001)

Σε αρκετά μακρινή απόσταση από το σημείο p , η τάση θεωρητικά παραμένει σταθερή, με άλλα λόγια δεν επηρεάζεται από τις συνθήκες που επικρατούν στο σημείο p . Το επίπεδο ισχύος του βραχυκυκλώματος υπολογίζεται από τη σχέση

$$S_{sc} = \frac{U_{sc}}{Z_{sc}} \quad (4.1)$$

Όπου S_{sc} το επίπεδο ισχύος του βραχυκυκλώματος σε MVA, U_{sc} η τάση στο απομακρυσμένο σημείο και Z_{sc} η σύνθετη αντίσταση της γραμμής. Όταν στο σημείο p υπάρξει μια μεταβολή είτε φορτίου είτε παραγωγής, αυτό σημαίνει πως αυτόματα μεταβάλλεται στο ρεύμα της γραμμής, γεγονός που οδηγεί σε πτώση τάσης ΔU στη σύνθετη αντίσταση της γραμμής. Η τάση στο σημείο p είναι μειωμένη και αυτό έχει ως αποτέλεσμα να αντιμετωπίζουν πρόβλημα οι υπόλοιποι καταναλωτές οι οποίοι είναι συνδεδεμένοι σε εκείνο το σημείο.

Από το ισοδύναμο κύκλωμα κάθε σημείου p του δικτύου είναι εμφανές, πως όταν είναι μικρή η σύνθετη αντίσταση της γραμμής Z_{sc} και παράλληλα το δίκτυο είναι ισχυρό, η τάση στο σημείο p δεν παρουσιάζει μεγάλες διακυμάνσεις. Στην αντίθετη περίπτωση, δηλαδή όταν η σύνθετη αντίσταση της γραμμής Z_{sc} είναι μεγάλη, παρουσιάζονται μεγάλες διακυμάνσεις στις τάσεις.

4.3 ΜΕΘΟΔΟΙ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΑΡΑΜΟΝΗ ΣΕ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ, ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ ΜΕ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑ ΕΠΑΓΩΓΗΣ ΔΙΠΛΗΣ ΤΡΟΦΟΔΟΤΗΣΗΣ ΚΑΤΑ ΤΗ ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΒΥΘΙΣΗΣ ΤΑΣΗΣ

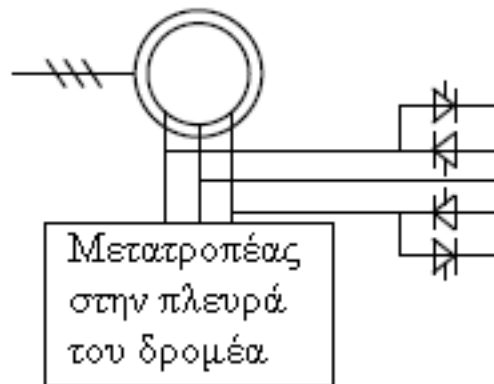
Στις περιπτώσεις εκείνες που υπάρχουν μεγάλες βυθίσεις τάσης στο δίκτυο όπου βρίσκεται συνδεδεμένη γεννήτρια επαγωγής διπλής τροφοδότησης, τα ρεύματα που προκύπτουν είναι μεγάλα. Οι υψηλές τιμές των ρευμάτων προκαλούν προβλήματα στους μετατροπείς, καθώς τα ημιαγωγικά στοιχεία τους είναι ιδιαίτερα ευαίσθητα. Μέχρι τώρα, υπό τέτοιες συνθήκες αποσυνδέονταν οι ανεμογεννήτριες για να μην καταστραφούν. Η προστασία του μετατροπέα επιτυγχάνεται με τη χρήση του κυκλώματος crowbar, το οποίο βραχυκυκλώνει τον δρομέα και περιορίζει τις τάσεις.

Η κατασκευή του crowbar είναι δυνατό να γίνει με ποικίλους τρόπους, όπως είναι η αντιπαράλληλη σύνδεση θυρίστορ μεταξύ των φάσεων ή η χρήση μιας γέφυρας διόδων και ενός θυρίστορ. Η γέφυρα διόδων χρησιμοποιείται για την ανόρθωση των φασικών ρευμάτων και το θυρίστορ για τον έλεγχο της βραχυκύκλωσης.

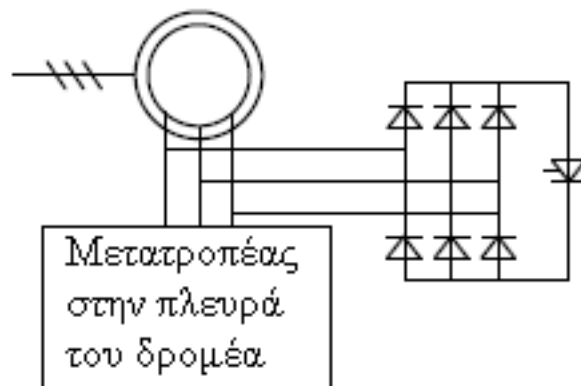
Υπάρχουν επίσης τα active crowbars, τα οποία είναι ικανά να κόβουν το ρεύμα βραχυκύκλωσης ακριβώς τη στιγμή εκείνη που αυτό απαιτείται. Τα active crowbars αποτελούνται από μία γέφυρα διόδων και έναν ημιαγωγικό διακόπτη IGBT, ο οποίος είναι πλήρως ελεγχόμενος. Σε σειρά με το IGBT είναι συνδεδεμένος ένας μικρός αντιστάτης, η λειτουργία του οποίου είναι ο περιορισμός του ρεύματος που εισέρχεται στο δρομέα. Όταν οι τιμές του

ρεύματος του δρομέα ή της DC τάσης είναι μεγαλύτερες από την τιμή του ορίου προστασίας, τότε ξεκινά να λειτουργεί το κύκλωμα.

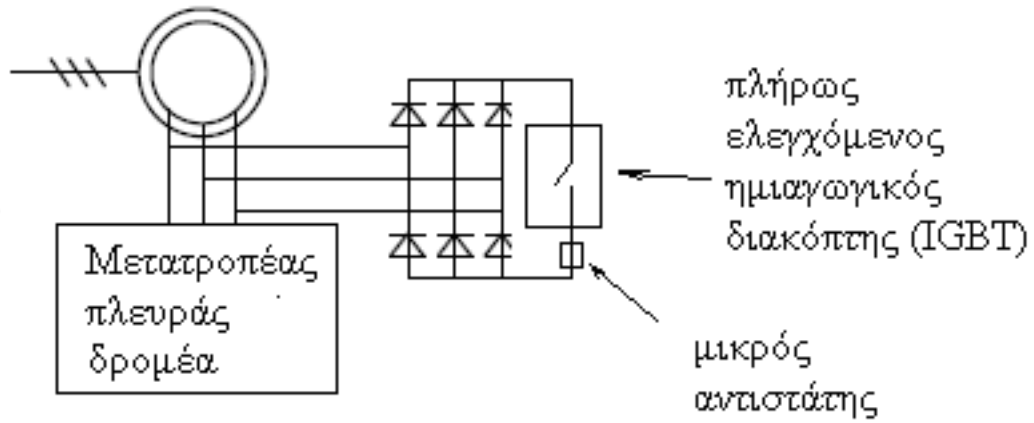
Ένας ακόμη τρόπος για την προστασία μιας γεννήτριας επαγωγής διπλής τροφοδότησης σε συνθήκες βύθισης τάσης είναι η κατάλληλη διαστασιοποίηση του μετατροπέα που υπάρχει στην πλευρά της μηχανής, με σκοπό τον έλεγχο του εισερχόμενου ρεύματος. Επίσης, χρησιμοποιούνται ημιαγωγικοί διακόπτες στο στάτη για την παροδική αποσύνδεση του στην περίπτωση που το μεταβατικό ρεύμα που ανιχνεύεται είναι μεγάλο (Niiranen, 2004).



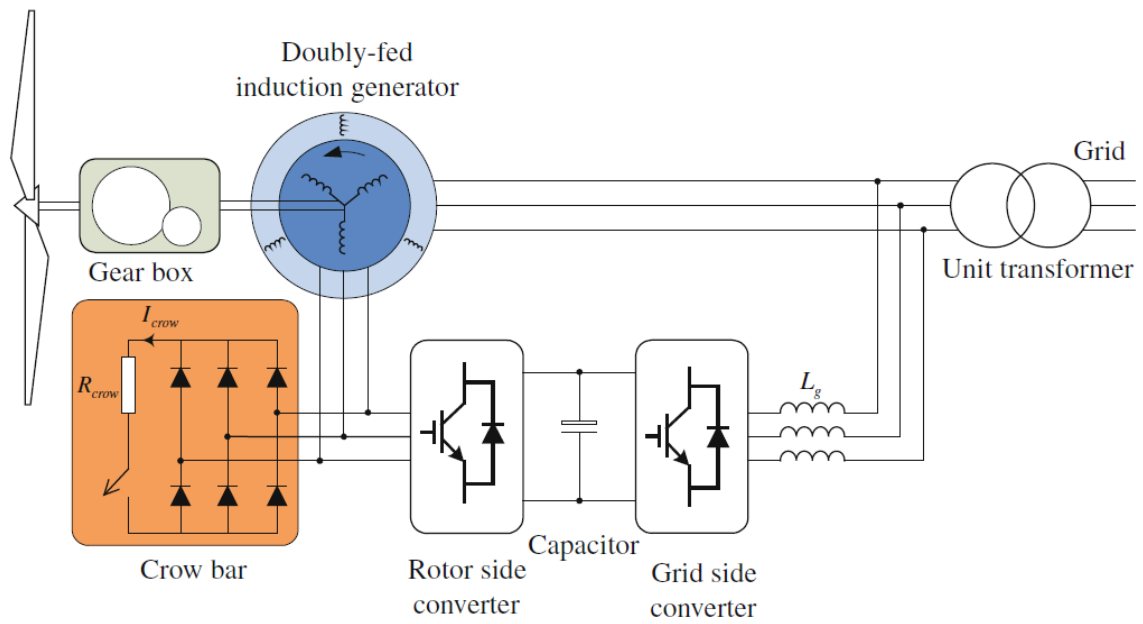
Εικόνα 4.4: Crowbar με αντιπαράλληλα θυρίστορ



Εικόνα 4.5: Crowbar με γέφυρα διόδων



Εικόνα 4.6: Active crowbar

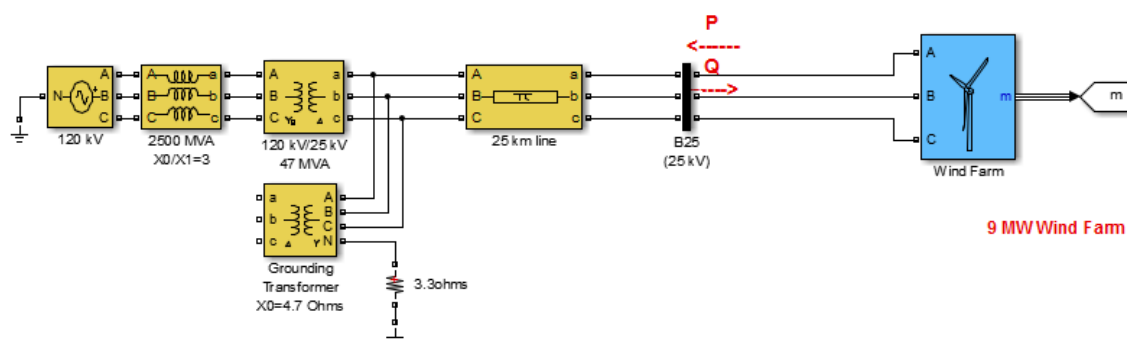


Εικόνα 4.7: Active crowbar σε επαγωγική γεννήτρια διπλής τροφοδότησης

5 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Οι προσομοιώσεις πραγματοποιήθηκαν με τη βοήθεια του SIMULINK, μιας προέκτασης του λογισμικού MATLAB που ρόλος της είναι η μοντελοποίηση, η εξομοίωση και η ανάλυση δυναμικών συστημάτων. Η μοντελοποίηση γίνεται μέσα από ένα γραφικό περιβάλλον διεπαφής (GUI) σε αντίθεση με την πληκτρολόγηση στο παράθυρο εντολών του MATLAB. Υποστηρίζει γραμμικά και μη γραμμικά συστήματα που διαμορφώνονται στο συνεχή χρόνο, το δειγματικό ή διακριτό χρόνο ή ένα συνδυασμό συνεχή και δειγματικού.

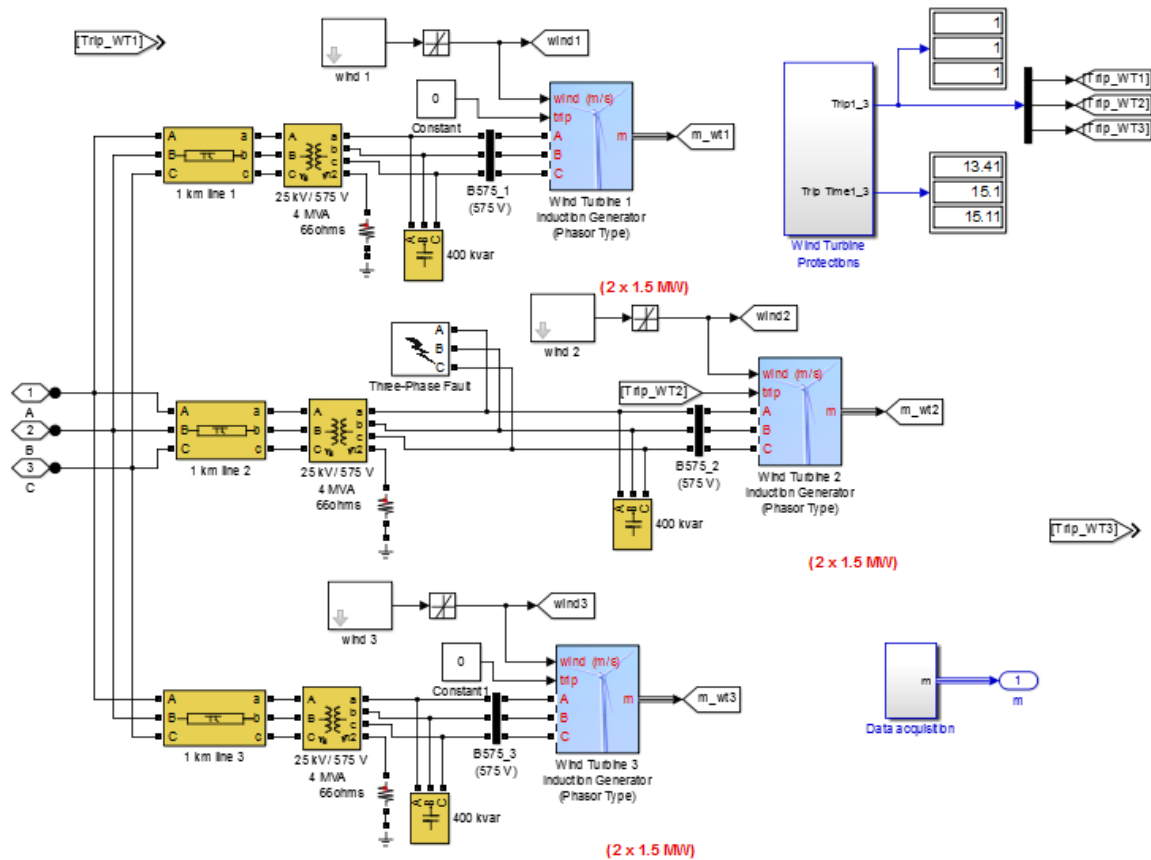
Το σύστημα που χρησιμοποιήθηκε για τις προσομοιώσεις στο SIMULINK του MATLAB παρουσιάζεται στην Εικόνα 5.1.



Εικόνα 5.1: Μοντέλο προσομοίωσης αιολικού πάρκου στο SIMULINK

Πρόκειται για ένα υπεράκτιο αιολικό πάρκο συνολικής ισχύος 9 MW, το οποίο αποτελείται από 6 ανεμογεννήτριες ισχύος 1.5 MW η καθεμία. Η γραμμή μεταφοράς έχει μήκος 25 km. Η ισχύς που εξάγεται από το αιολικό πάρκο οδηγείται σε ένα δίκτυο υψηλής τάσης 120 kV.

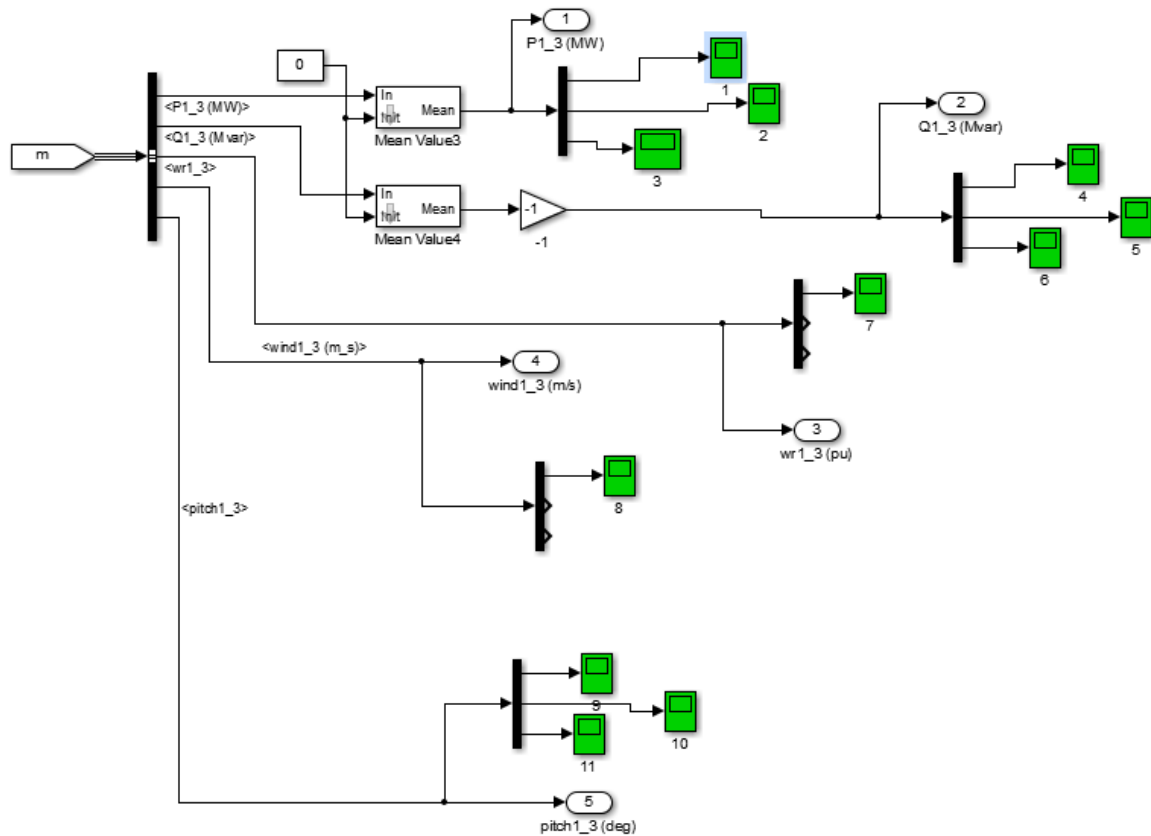
Στην Εικόνα 5.2 παρουσιάζεται αναλυτικά η τοπολογία του υπεράκτιου αιολικού πάρκου, όπου φαίνεται και το σφάλμα που εφαρμόζεται. Το σφάλμα είναι ένα τριφασικό βραχυκύκλωμα (Three – Phase Fault) το οποίο τοποθετείται στη γραμμή μεταφοράς όπως φαίνεται στην Εικόνα 5.2.



Εικόνα 5.2: Αναλυτικό μοντέλο προσομοίωσης αιολικού πάρκου στο SIMULINK, όπου φαίνονται οι ανεμογεννήτριες και το σημείο βραχυκυκλώματος

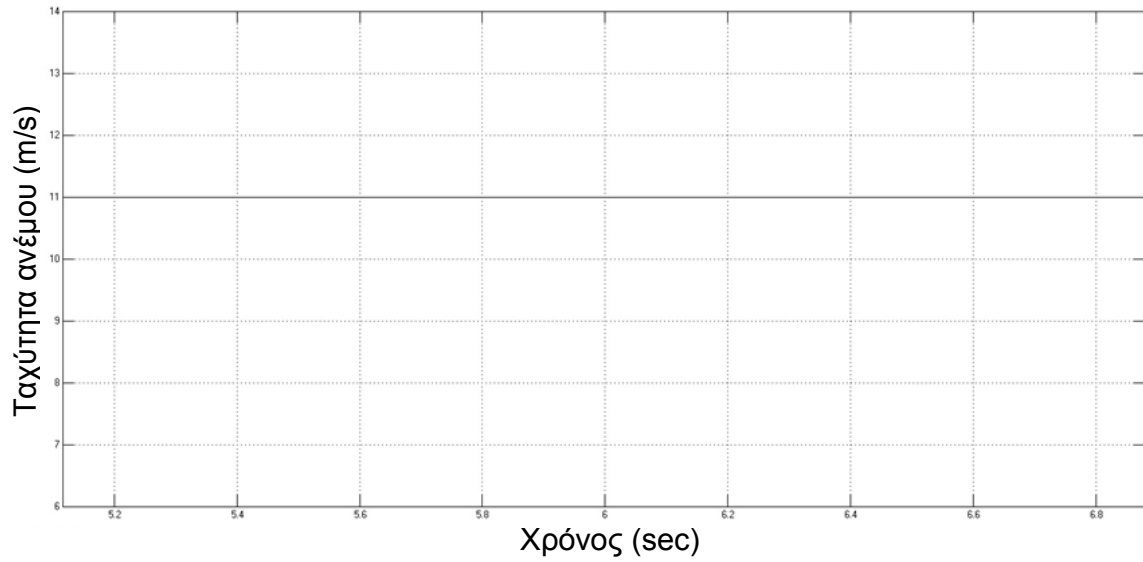
Τέλος, όσον αφορά την προσομοίωση, στην Εικόνα 5.3 παρουσιάζονται τα καταγραφικά όργανα που χρησιμοποιήθηκαν, για την μέτρηση της ενεργού ισχύος σε MW (P1_3), της αέργου ισχύος σε MVar (Q1_3) και της ταχύτητας του ανέμου σε m/s (Wind1_3).

Στο παραπάνω δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας εφαρμόστηκε βραχυκύκλωμα τη στιγμή $t = 15 \text{ sec}$ και προσομοιώθηκαν οι αποκρίσεις του συστήματος ώστε να βγουν ασφαλή συμπεράσματα σχετικά με τη δυναμική συμπεριφορά του υπεράκτιου αιολικού πάρκου καθώς και των ανεμογεννητριών με επαγωγική γεννήτρια διπλής τροφοδοσίας μεμονωμένα. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης παρουσιάζονται παρακάτω σε μορφή διαγραμμάτων.

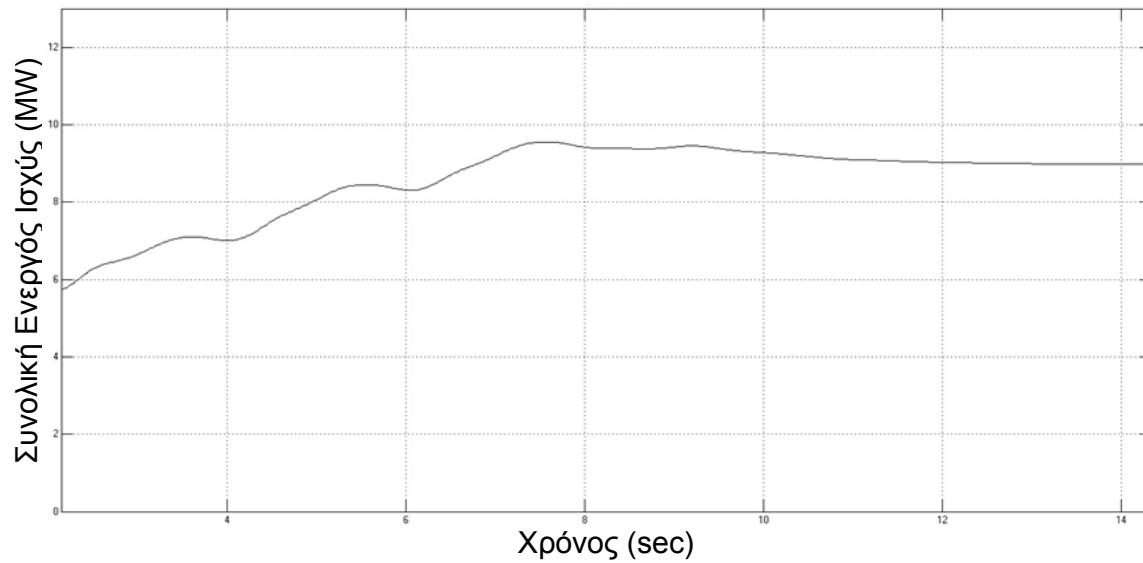


Εικόνα 5.3: Καταγραφικά όργανα στο SIMULINK

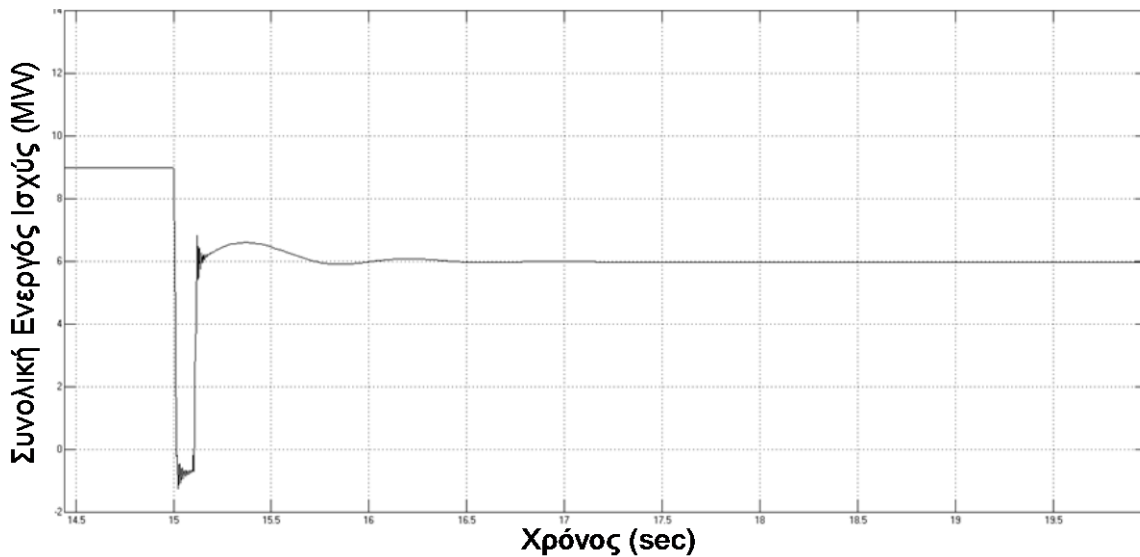
Στην Εικόνα 5.4 παρουσιάζεται η βηματική μεταβολή του ανέμου που εφαρμόστηκε για τις προσομοιώσεις. Αρχικά, για τα δυο πρώτα δευτερόλεπτα η ταχύτητα του ανέμου είναι ίση με 8 m/sec και παραμένει σταθερή. Στη συνέχεια, για τα επόμενα τρία δευτερόλεπτα αυξάνεται γραμμικά, μέχρι η τιμή της να γίνει ίση με 11 m/sec. Από τον χρόνο $t = 5$ sec και μετά, η ταχύτητα παραμένει σταθερή, ίση με 11 m/sec.



Εικόνα 5.4: Μεταβολή της ταχύτητας του ανέμου συναρτήσει του χρόνου



Εικόνα 5.5: Μεταβολή της συνολικής ενεργού ισχύος του υπεράκτιου αιολικού πάρκου P (MW) συναρτήσει του χρόνου, πριν το βραχυκύκλωμα



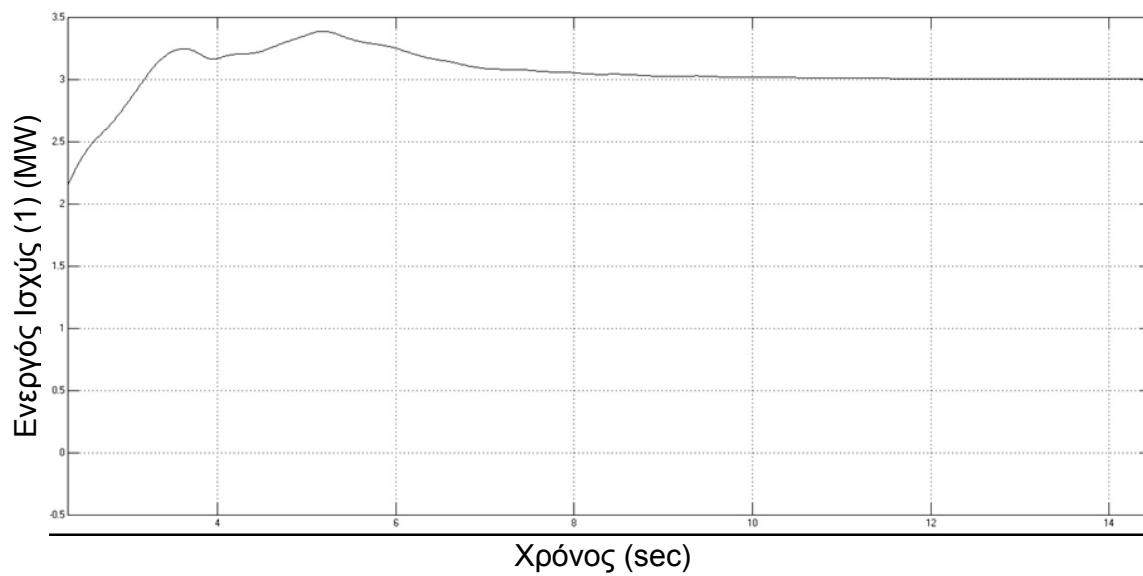
Εικόνα 5.6: Μεταβολή της συνολικής ενεργού ισχύος του υπεράκτιου αιολικού πάρκου P (MW) συναρτήσει του χρόνου, μετά το βραχυκύκλωμα

Στην Εικόνα 5.5 και στην Εικόνα 5.6 παρουσιάζεται η μεταβολή της συνολικής ενεργού ισχύος του υπεράκτιου αιολικού πάρκου συναρτήσει του χρόνου, πριν και μετά το βραχυκύκλωμα, αντίστοιχα. Αρχικά, η ισχύς του αιολικού πάρκου αυξάνεται με την αύξηση της ταχύτητας του ανέμου και σταθεροποιείται στα 9 MW στα 11 δευτερόλεπτα.

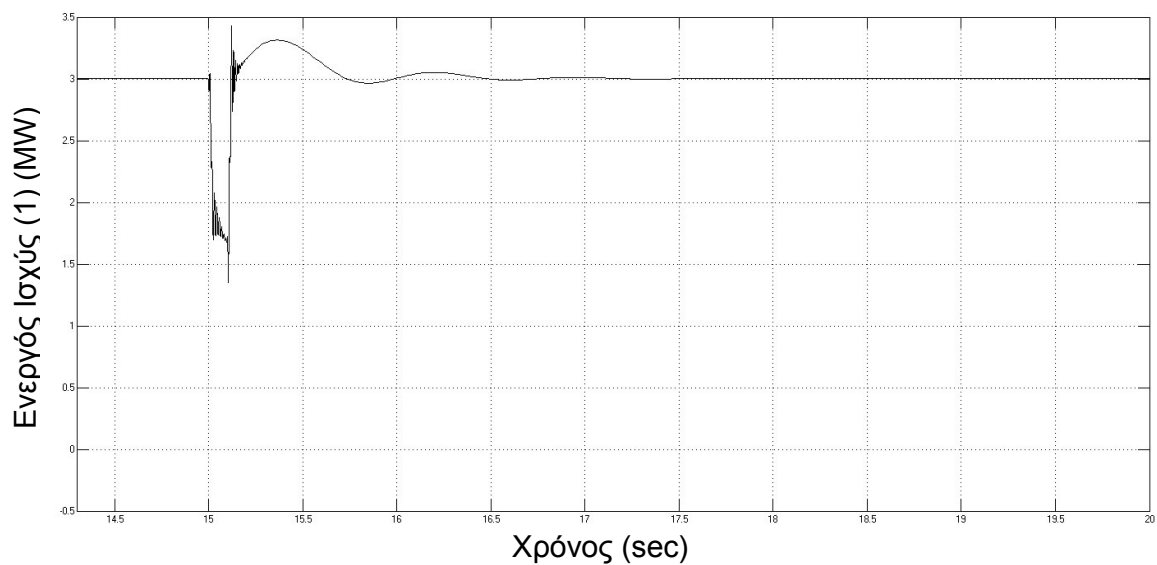
Τη στιγμή που εφαρμόζεται το βραχυκύκλωμα, η συνολική ισχύς του αιολικού πάρκου μειώνεται κατακόρυφα και μετά από ένα χρονικό διάστημα περίπου ίσο με 0,1 sec σταθεροποιείται στα 6 MW, αφού πλέον οι ($2 \times 1,5$ MW) ανεμογεννήτριες βρίσκονται εκτός λειτουργίας.

Στις Εικόνες 5.7 έως 5.12 παρουσιάζεται η ενεργός ισχύς που μετρήθηκε για την κάθε ομάδα ανεμογεννητριών ($2 \times 1,5$ MW). Και οι τρεις ομάδες παρουσιάζουν σχεδόν την ίδια συμπεριφορά για το χρονικό διάστημα πριν την εφαρμογή του βραχυκυκλώματος και μετά από 10 περίπου δευτερόλεπτα η ενεργός ισχύς τους σταθεροποιείται στα 3 MW.

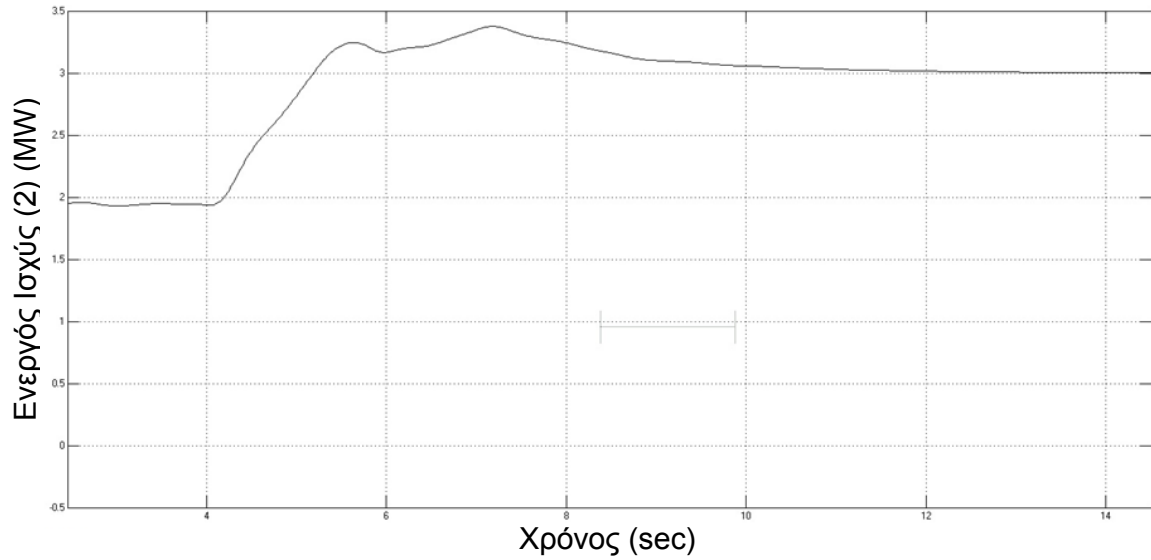
Τη στιγμή που εφαρμόζεται το βραχυκύκλωμα, η ενεργός ισχύς μειώνεται αισθητά και στις τρεις περιπτώσεις. Η ενεργός ισχύς της πρώτης και της τρίτης ομάδας παρουσιάζουν ακριβώς την ίδια συμπεριφορά, αφού αυξάνεται μέσα σε κλάσματα του δευτερολέπτου, παρουσιάζει κάποιες διακυμάνσεις και τελικά σταθεροποιείται στα 3 MW για $t = 17$ sec. Η ενεργός ισχύς της δεύτερης ομάδας ανεμογεννητριών μετά την εφαρμογή του βραχυκυκλώματος μηδενίζεται, όπως ήταν αναμενόμενο.



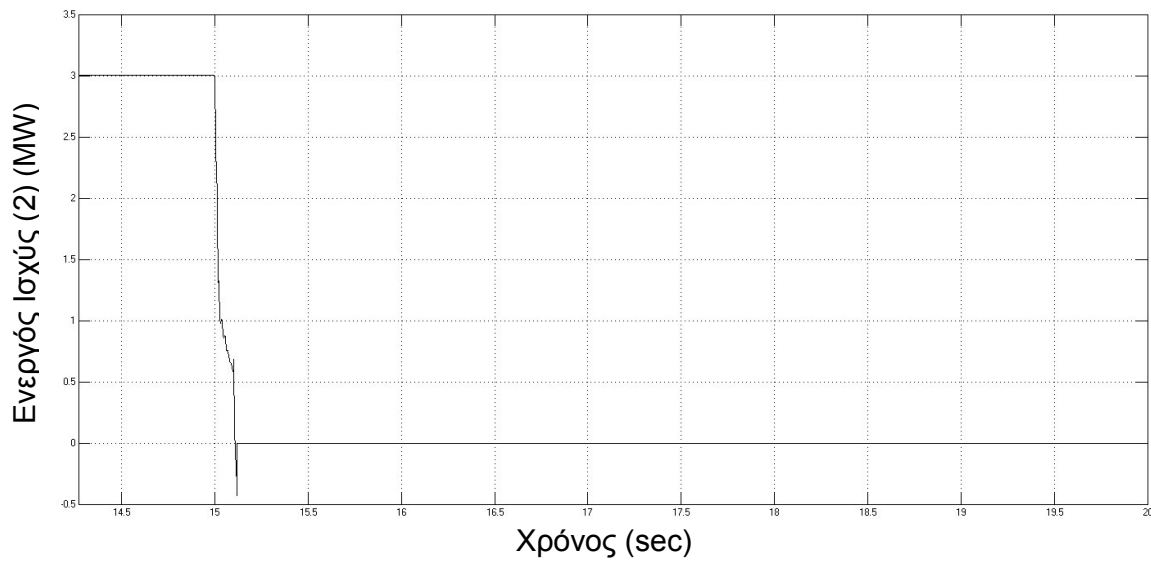
Εικόνα 5.7: Μεταβολή της ενεργού ισχύος της πρώτης ομάδας ανεμογεννητριών πριν το βραχυκύκλωμα



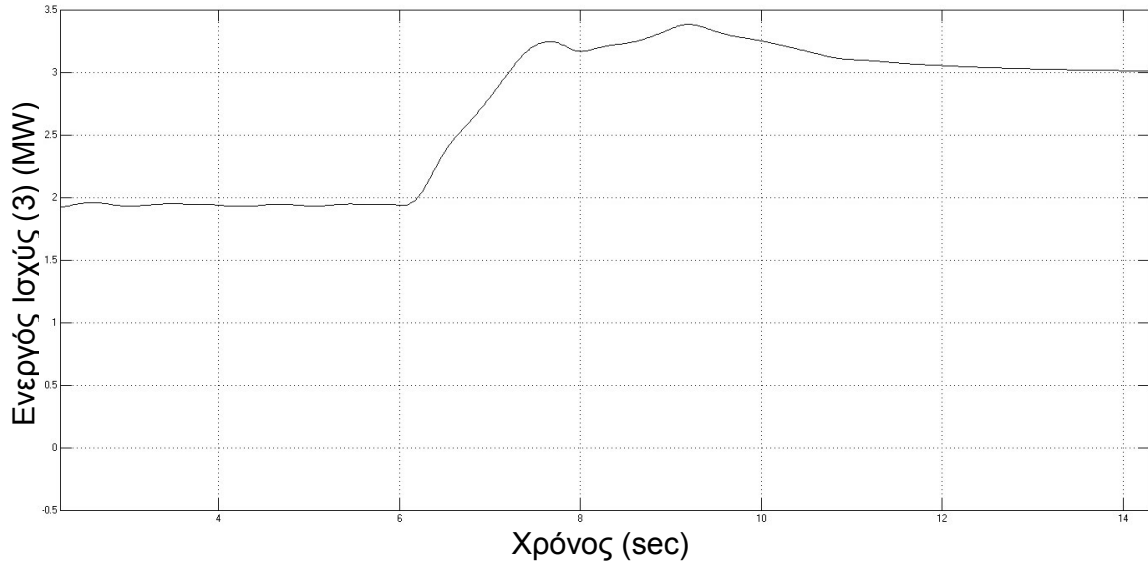
Εικόνα 5.8: : Μεταβολή της ενεργού ισχύος της πρώτης ομάδας ανεμογεννητριών πριν το βραχυκύκλωμα



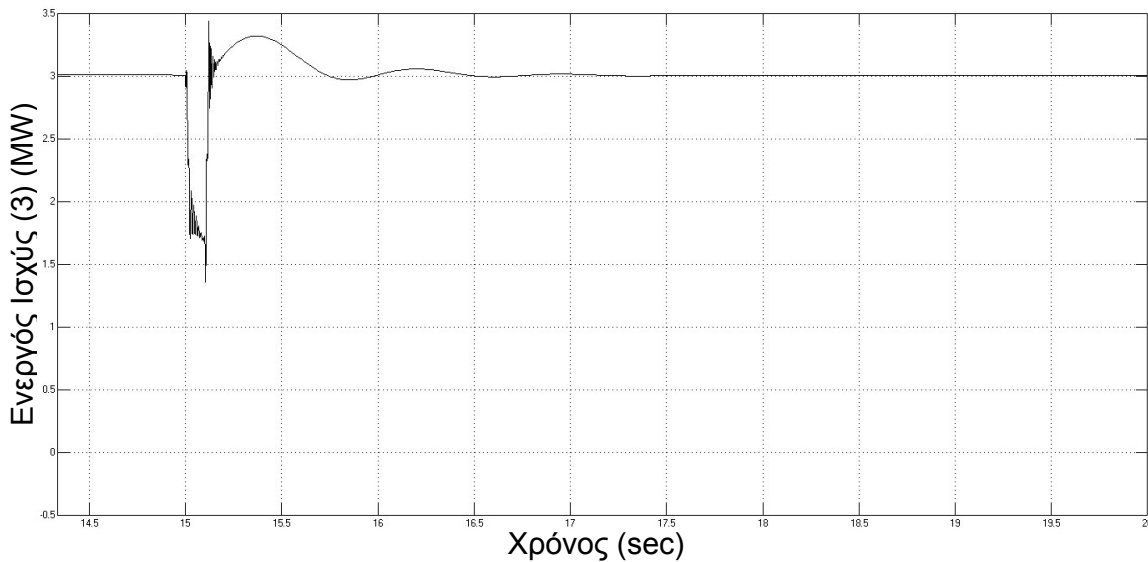
Εικόνα 5.9: Μεταβολή της ενεργού ισχύος της δεύτερης ομάδας ανεμογεννητριών πριν το βραχυκύκλωμα



Εικόνα 5.10: Μεταβολή της ενεργού ισχύος της δεύτερης ομάδας ανεμογεννητριών μετά το βραχυκύκλωμα



Εικόνα 5.11: Μεταβολή της ενεργού ισχύος της τρίτης ομάδας ανεμογεννητριών πριν το βραχυκύκλωμα



Εικόνα 5.12: Μεταβολή της ενεργού ισχύος της τρίτης ομάδας ανεμογεννητριών μετά το βραχυκύκλωμα

Στις Εικόνες 5.13 και 5.14 δίνονται τα διαγράμματα της αέργου ισχύος του υπεράκτιου αιολικού πάρκου συναρτήσει του χρόνου, για τις δύο καταστάσεις, δηλαδή πριν και μετά το βραχυκύκλωμα, αντίστοιχα.

Όσον αφορά την άεργο ισχύ του αιολικού πάρκου παρατηρείται μια μείωση της τα πρώτα 2 δευτερόλεπτα της προσομοίωσης και στα επόμενα

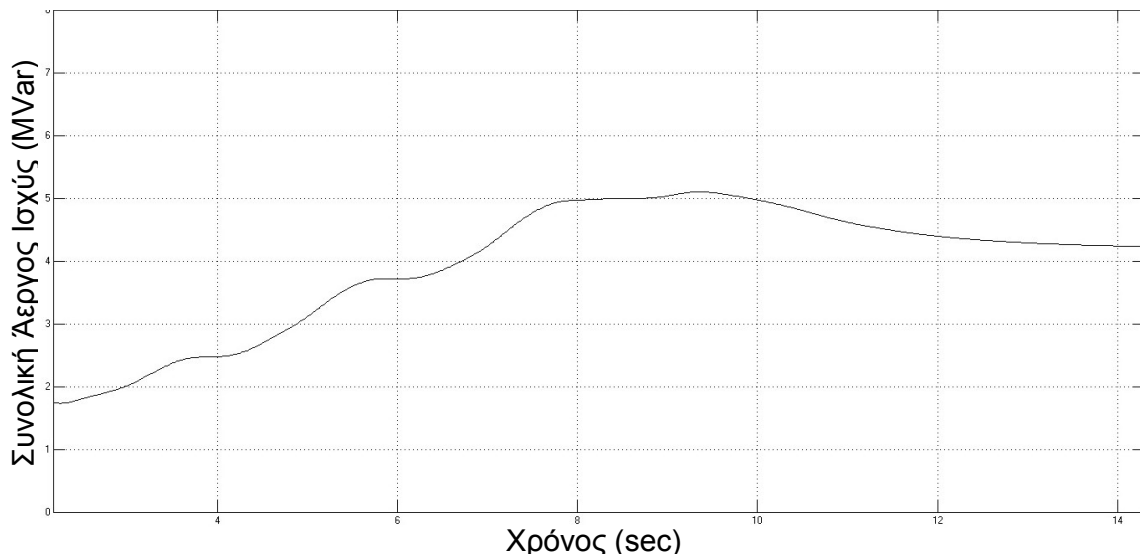
δευτερόλεπτα αυξάνεται σταδιακά με την αύξηση της ταχύτητας του ανέμου. Τελικά, σταθεροποιείται μετά από τα 12 δευτερόλεπτα περίπου στα 4,2 MVar.

Τη στιγμή που συμβαίνει το βραχυκύκλωμα, η συνολική αέργος ισχύς του αιολικού πάρκου αυξάνεται κατακόρυφα και παραμένει σε αυτή την υψηλή τιμή περίπου για 0,1 sec. Στη συνέχεια μειώνεται πιο ομαλά για να φτάσει περίπου την τιμή των 2,1 MVar, όπου και σταθεροποιείται στα 17 δευτερόλεπτα.

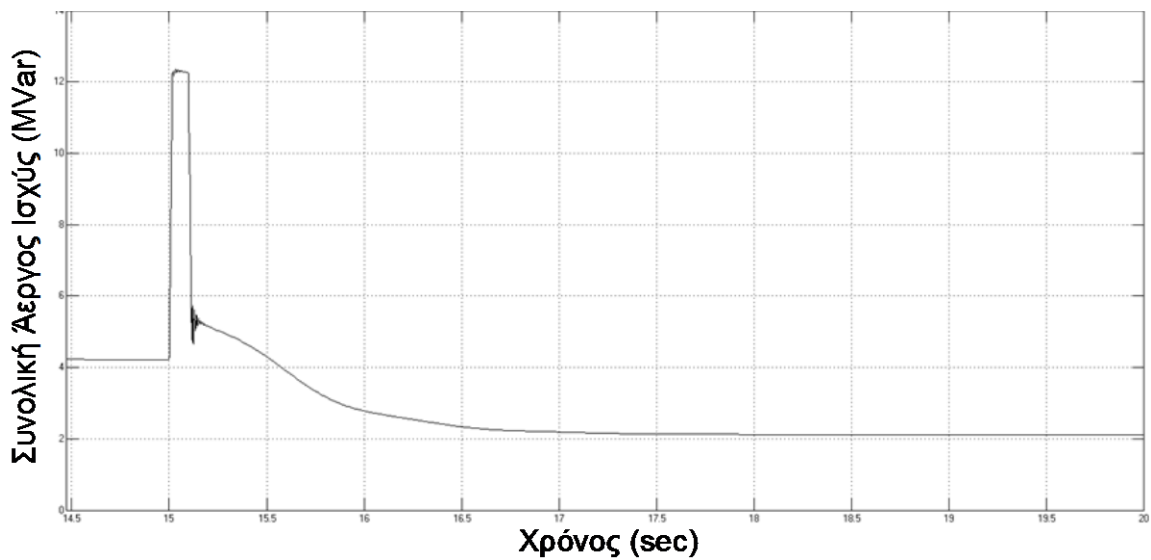
Στις Εικόνες 5.15 έως 5.20 δίνονται τα διαγράμματα της αέργου ισχύος για την κάθε ομάδα ανεμογεννητριών ($2 \times 1,5$ MW) ξεχωριστά, τόσο πριν όσο και μετά το βραχυκύκλωμα. Από τα τρία αυτά διαγράμματα μπορούν να ληφθούν σημαντικά συγκριτικά αποτελέσματα για τις τρεις ομάδες.

Οι τρεις ομάδες παρουσιάζουν σχεδόν την ίδια συμπεριφορά στη μεταβολή της αέργου ισχύος για το χρονικό διάστημα πριν την εφαρμογή του βραχυκυκλώματος, όπως συνέβη και στην περίπτωση της ενεργού ισχύος.

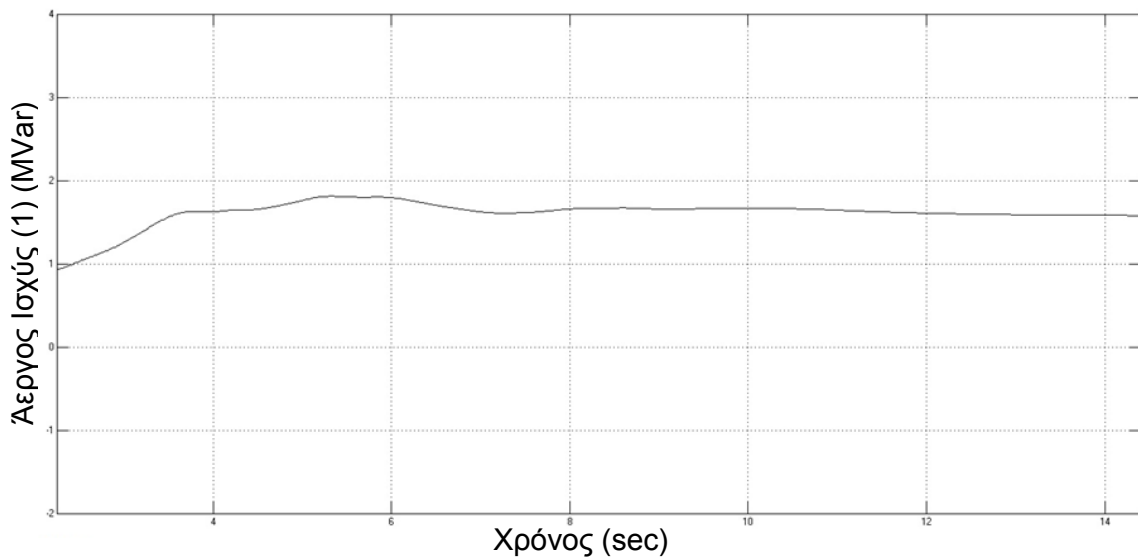
Τη στιγμή που εφαρμόζεται το βραχυκύκλωμα, η αέργος ισχύς μειώνεται και στις τρεις περιπτώσεις. Πιο συγκεκριμένα, η αέργος ισχύς της πρώτης και της τρίτης ομάδας μειώνεται απότομα και μέσα σε κλάσματα του δευτερολέπτου αυξάνεται. Στη συνέχεια, μειώνεται με μικρότερο ρυθμό και τελικά σταθεροποιείται στα 1,5 MVar για $t = 17$ sec. Μετά την εφαρμογή του βραχυκυκλώματος, η αέργος ισχύς της δεύτερης ομάδας ανεμογεννητριών μηδενίζεται.



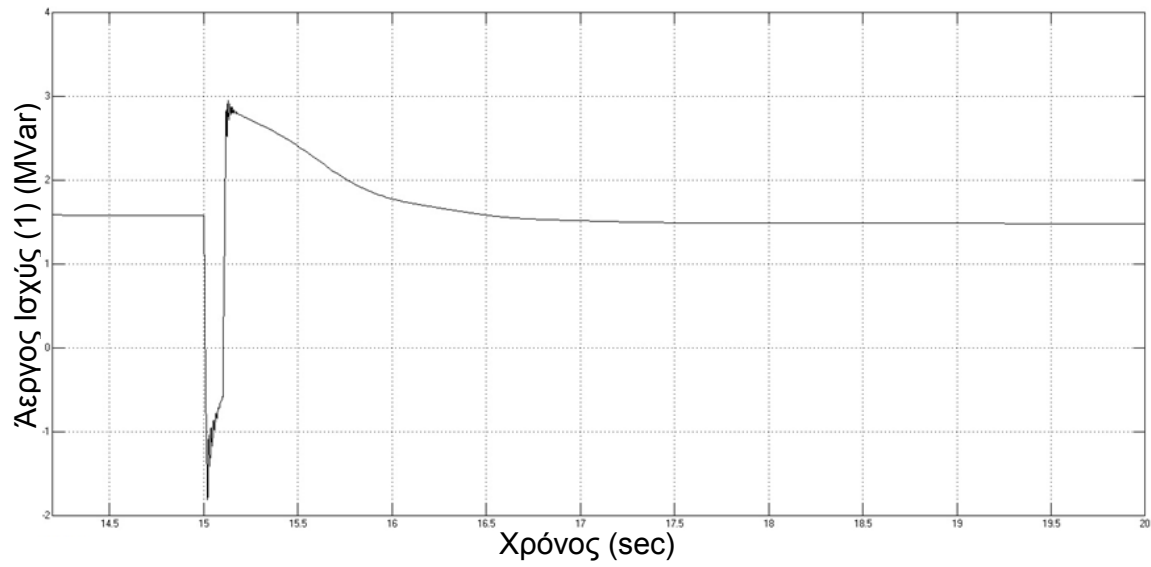
Εικόνα 5.13: Μεταβολή της συνολικής αέργου ισχύος του υπεράκτιου αιολικού πάρκου Q (MVar) συναρτήσει του χρόνου, πριν το βραχυκύκλωμα



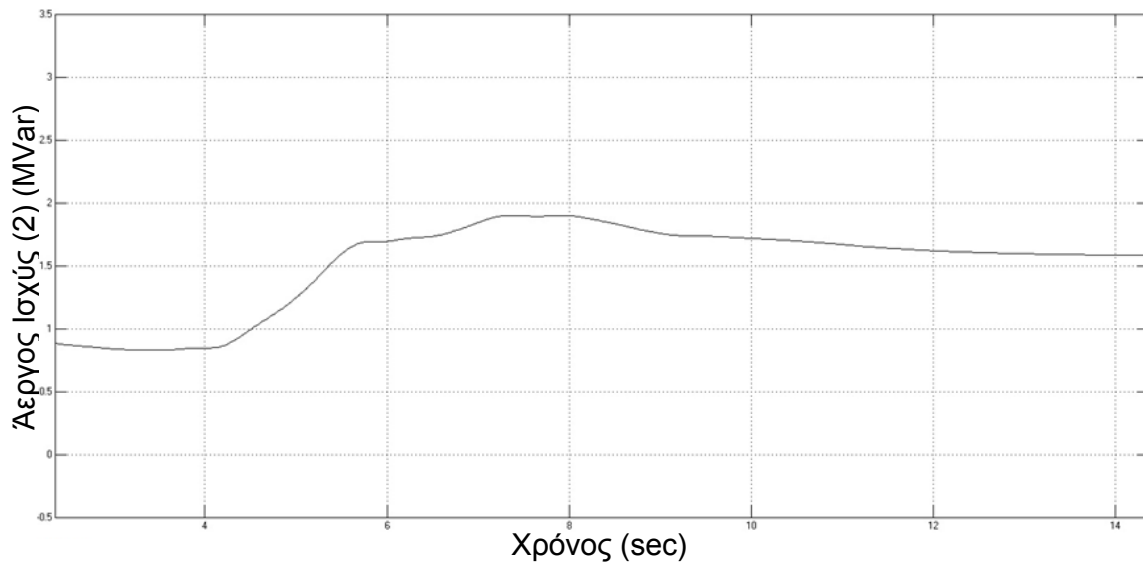
Εικόνα 5.14: Μεταβολή της συνολικής αέργου ισχύος του υπεράκτιου αιολικού πάρκου Q (MVar) συναρτήσει του χρόνου, μετά το βραχυκύκλωμα



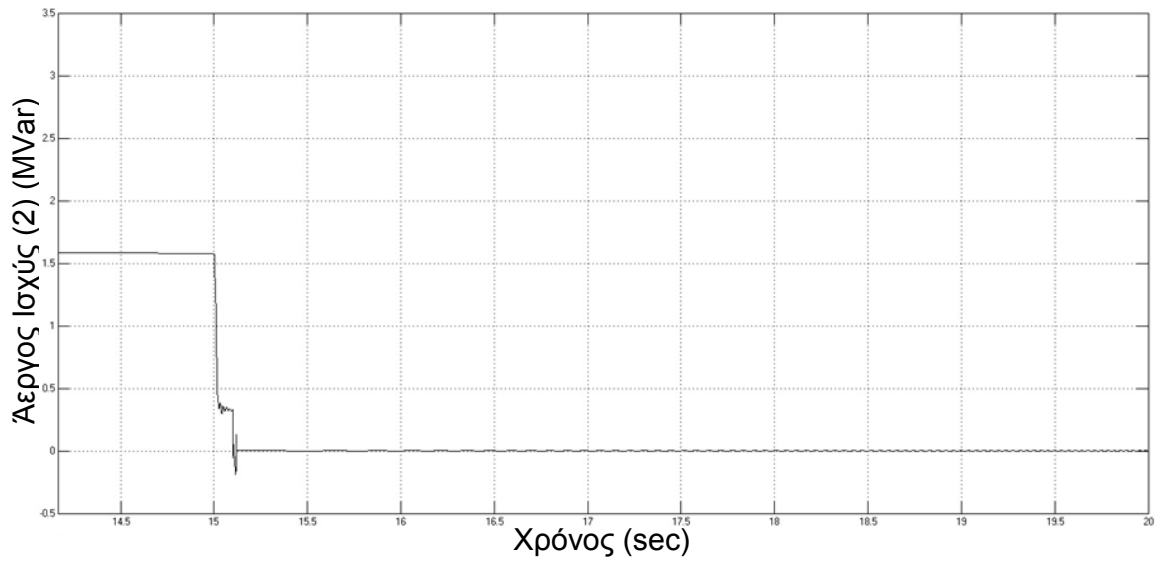
Εικόνα 5.15: Μεταβολή της αέργου ισχύος της πρώτης ομάδας ανεμογεννητριών πριν το βραχυκύκλωμα



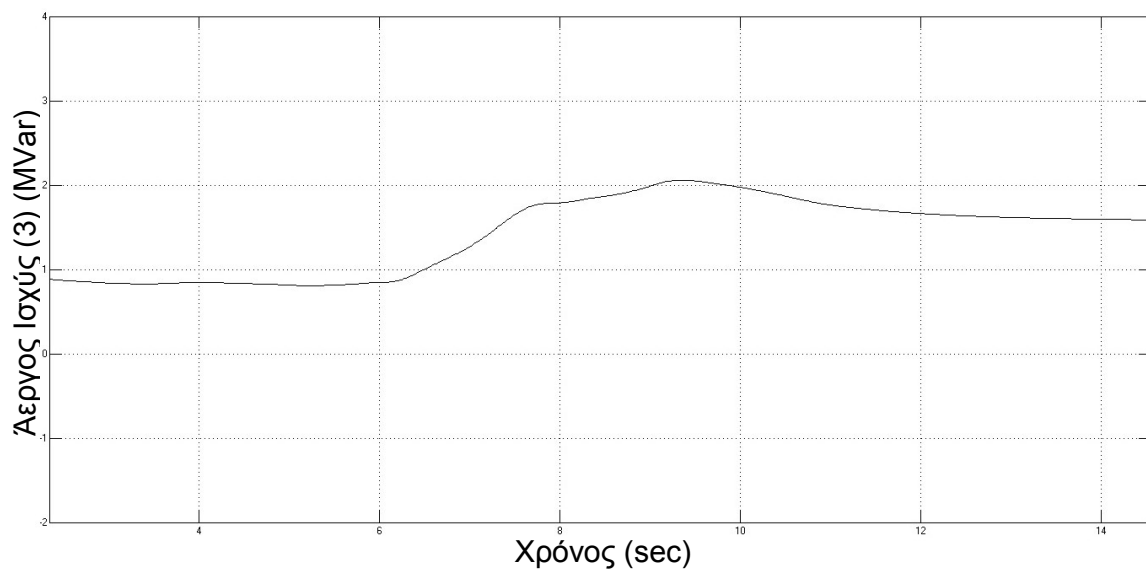
Εικόνα 5.16: Μεταβολή της αέργου ισχύος της πρώτης ομάδας ανεμογεννητριών μετά το βραχυκύκλωμα



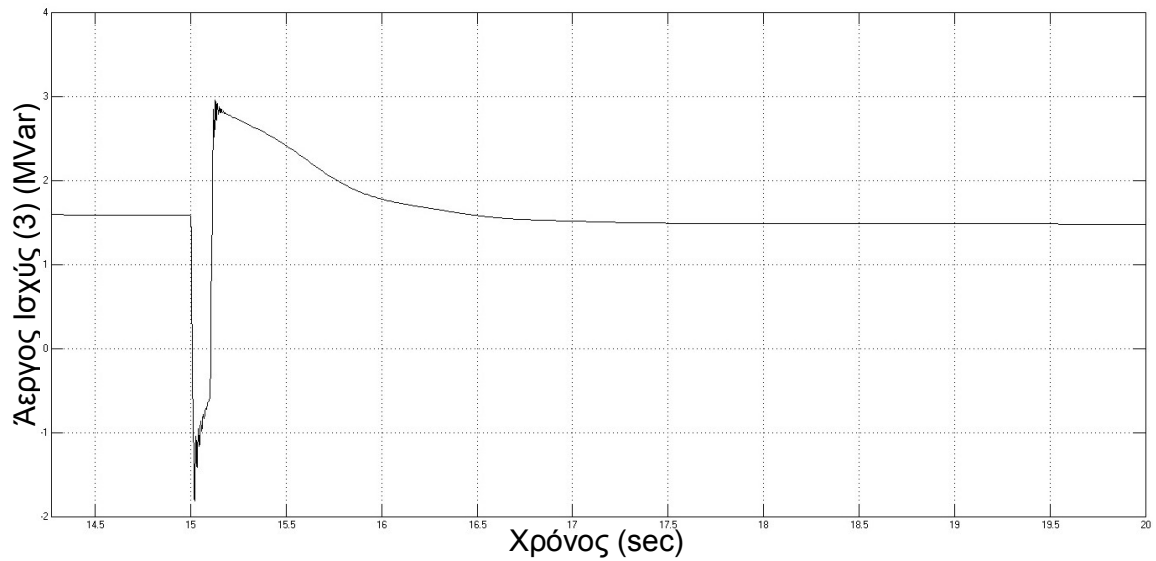
Εικόνα 5.17: Μεταβολή της αέργου ισχύος της δεύτερης ομάδας ανεμογεννητριών πριν το βραχυκύκλωμα



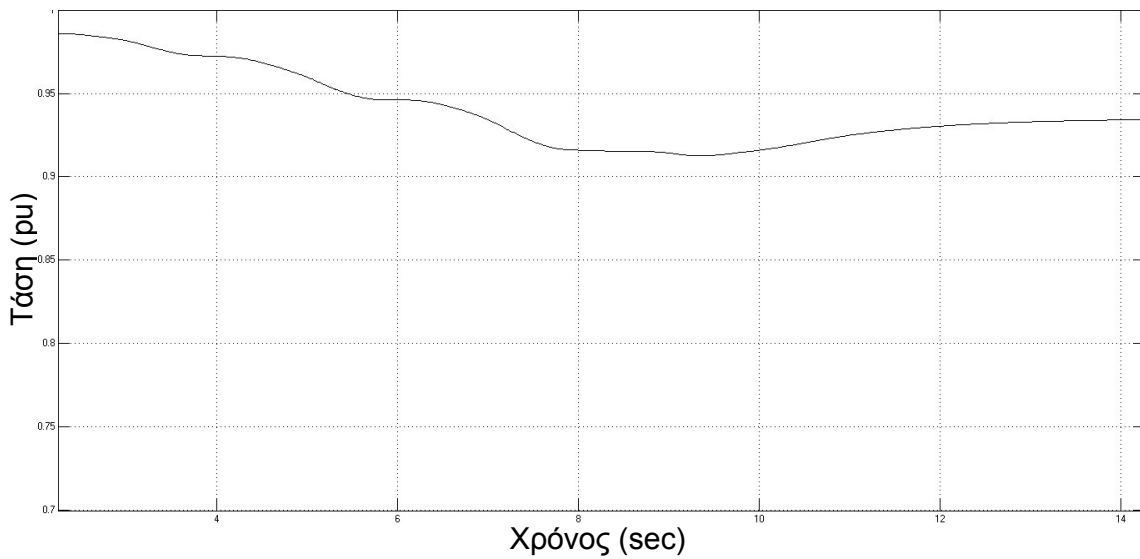
Εικόνα 5.18: Μεταβολή της αέργου ισχύος της δεύτερης ομάδας ανεμογεννητριών μετά το βραχυκύκλωμα



Εικόνα 5.19: Μεταβολή της αέργου ισχύος της τρίτης ομάδας ανεμογεννητριών πριν το βραχυκύκλωμα

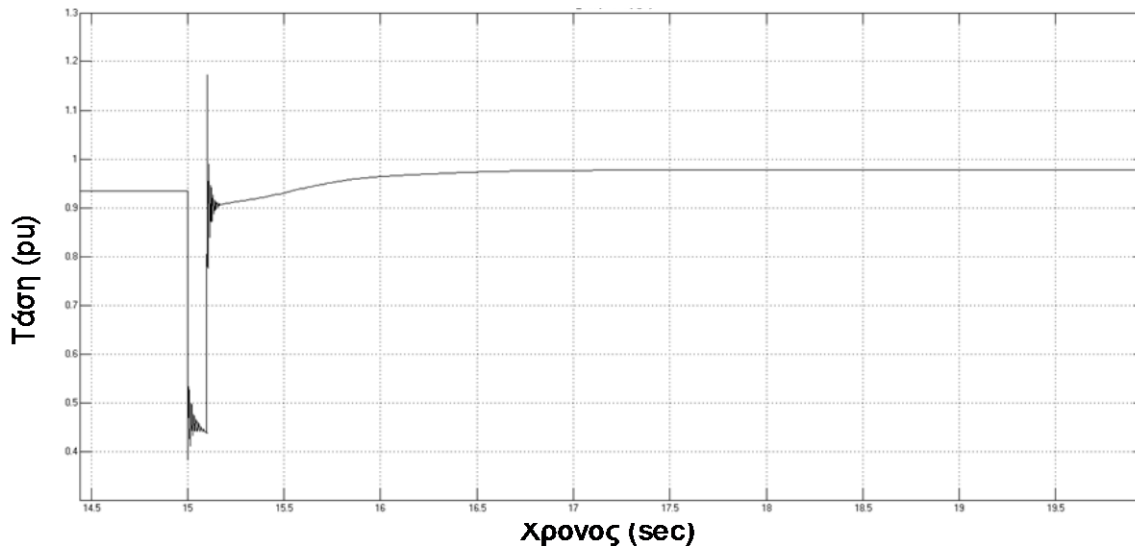


Εικόνα 5.20: Μεταβολή της αέργου ισχύος της τρίτης ομάδας ανεμογεννητριών μετά το βραχυκύκλωμα



Εικόνα 5.21: Μεταβολή της τάσης του υπεράκτιου αιολικού πάρκου V (pu) συναρτήσει του χρόνου, πριν το βραχυκύκλωμα

Η Εικόνα 5.21 απεικονίζει τη μεταβολή της τάσης του υπεράκτιου αιολικού πάρκου V (pu) συναρτήσει του χρόνου, πριν το βραχυκύκλωμα. Η τάση V (pu) αυξάνεται τα δυο πρώτα δευτερόλεπτα, μετά παρουσιάζει κάποιες μικρές διακυμάνσεις και τελικά σταθεροποιείται μετά τα 12 sec, στην τιμή 0,935.

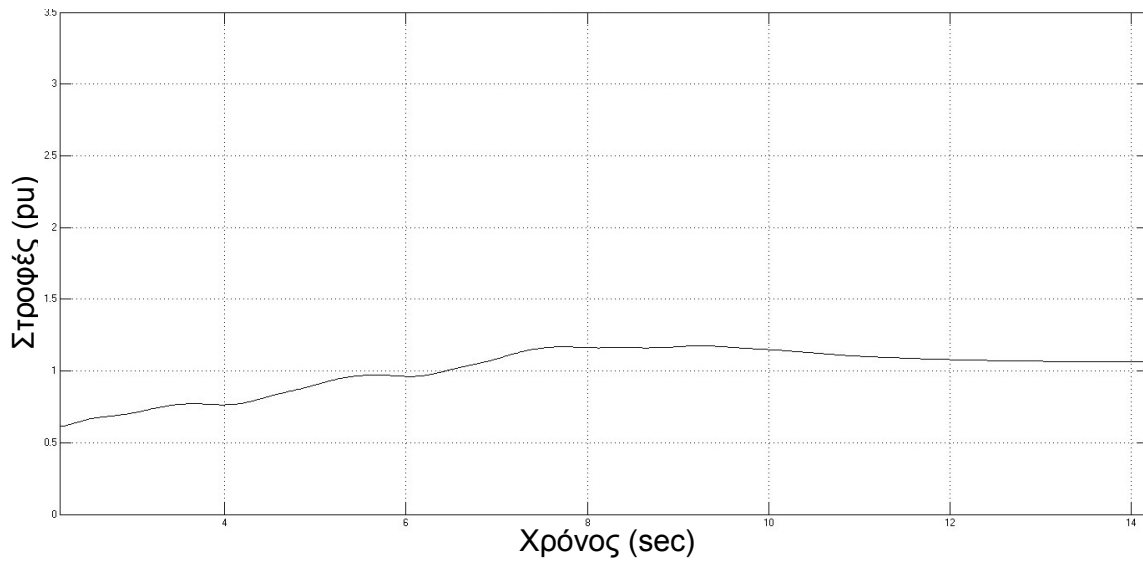


Εικόνα 5.22: Μεταβολή της τάσης του υπεράκτιου αιολικού πάρκου V (pu) συναρτήσεως του χρόνου, μετά το βραχυκύκλωμα

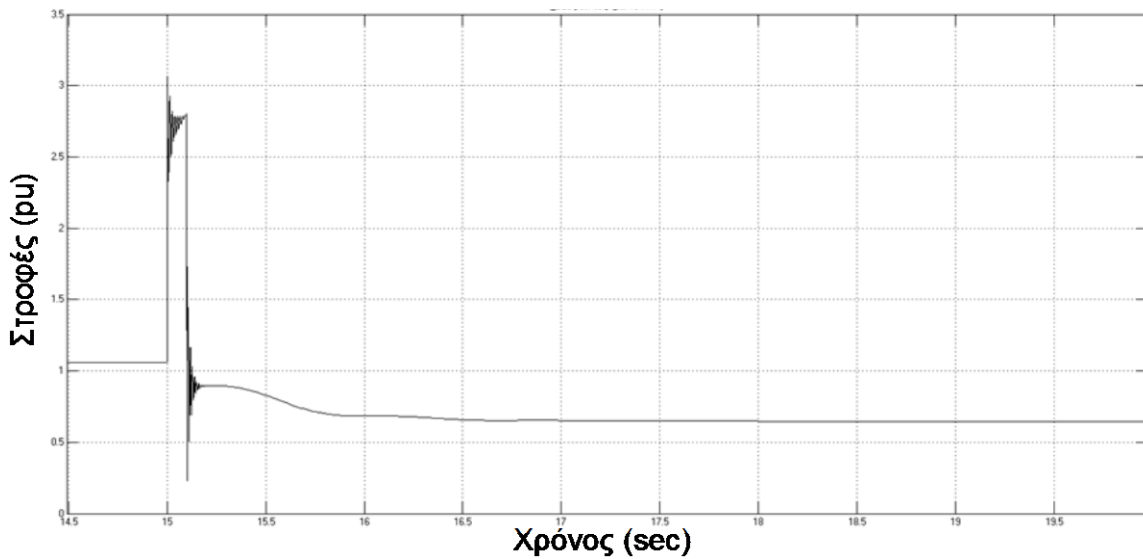
Αντίστοιχα, στην Εικόνα 5.22 παρουσιάζεται η μεταβολή της τάσης του υπεράκτιου αιολικού πάρκου V (pu) συναρτήσεως του χρόνου, μετά το βραχυκύκλωμα. Στα 15 sec, δηλαδή τη στιγμή που συμβαίνει το βραχυκύκλωμα, η τάση V (pu) μειώνεται απότομα, παρουσιάζει αρκετές διακυμάνσεις σε πολύ μικρό χρόνο, στη συνέχεια αυξάνεται κατακόρυφα και παρουσιάζει πάλι κάποιες μικρές διακυμάνσεις έως ότου σταθεροποιηθεί στα 17 sec, στην τιμή 0,98.

Η Εικόνα 5.23 δείχνει τη μεταβολή των στροφών της ανεμογεννήτριας (pu) συναρτήσεως του χρόνου πριν το βραχυκύκλωμα. Παρατηρούνται έντονες διακυμάνσεις τα πρώτα δύο δευτερόλεπτα, στη συνέχεια οι στροφές αυξάνονται ως αποτέλεσμα της αύξησης της ταχύτητας του ανέμου και τελικά σταθεροποιούνται στην τιμή 1,1.

Από την Εικόνα 5.24 που απεικονίζει τη μεταβολή των στροφών της ανεμογεννήτριας (pu) συναρτήσεως του χρόνου μετά το βραχυκύκλωμα είναι εμφανής μια κατακόρυφη αύξηση των στροφών τη στιγμή του βραχυκυκλώματος, φθάνουν στην τιμή 2,75 και έπειτα μειώνονται απότομα, ακολουθούν κάποιες μικρές διακυμάνσεις και μετά μια ομαλή μείωση, για να σταθεροποιηθούν τελικά στην τιμή 0,65.



Εικόνα 5.23: Μεταβολή των στροφών της ανεμογεννήτριας (rpm) συναρτήσει του χρόνου, πριν το βραχυκύκλωμα



Εικόνα 5.24: Μεταβολή των στροφών της ανεμογεννήτριας (rpm) συναρτήσει του χρόνου, μετά το βραχυκύκλωμα

6 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Από τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων στο SIMULINK, που αφορούν ένα υπεράκτιο αιολικό πάρκο συνολικής ισχύος 9 MW, στο οποίο εφαρμόζεται ένα τριφασικό βραχυκύκλωμα, προέκυψαν σημαντικά συμπεράσματα. Στα πλαίσια της συγκεκριμένης μελέτης, η μεταβολή του ανέμου θεωρήθηκε βηματική. Η ελάχιστη τιμή της ήταν τα 8 m/sec και αυξήθηκε γραμμικά, μέχρι τη μέγιστη τιμή της, τα 11 m/sec.

Από τα διαγράμματα της συνολικής ενεργού ισχύος του υπεράκτιου αιολικού πάρκου συναρτήσει του χρόνου, πριν το βραχυκύκλωμα, προέκυψε ότι η ισχύς του αιολικού πάρκου αυξάνεται με την αύξηση της ταχύτητας του ανέμου, μέχρι που σταθεροποιείται στα 9 MW. Τη στιγμή που εφαρμόζεται το βραχυκύκλωμα, η συνολική ενεργός ισχύς του αιολικού πάρκου μειώνεται κατακόρυφα και μετά από ένα χρονικό διάστημα περίπου ίσο με 0,1 sec σταθεροποιείται στα 6 MW, αφού λόγω του βραχυκυκλώματος οι (2×1,5 MW) ανεμογεννήτριες βρίσκονται εκτός λειτουργίας.

Μελετώντας την ενεργό ισχύ για την κάθε ομάδα ανεμογεννητριών ξεχωριστά, παρατηρήθηκε πως για το χρονικό διάστημα πριν την εφαρμογή του βραχυκυκλώματος και μετά από 10 περίπου δευτερόλεπτα η ενεργός ισχύς τους σταθεροποιείται στα 3 MW. Όταν εφαρμόζεται το βραχυκύκλωμα, η ενεργός ισχύς μειώνεται αισθητά και στις τρεις περιπτώσεις, στη συνέχεια όμως ανακτάται για τις ομάδες εκείνες που δεν εφαρμόστηκε βραχυκύκλωμα στη γραμμή μεταφοράς τους. Η ενεργός ισχύς της ομάδας ανεμογεννητριών με το βραχυκύκλωμα στη γραμμή μεταφοράς τους μηδενίστηκε μετά την εφαρμογή του βραχυκυκλώματος.

Η άεργος ισχύς του αιολικού πάρκου αυξήθηκε σταδιακά με την αύξηση της ταχύτητας του ανέμου και τελικά σταθεροποιήθηκε σε μια τιμή. Τη στιγμή του βραχυκυκλώματος, αυξήθηκε κατακόρυφα και παρέμεινε σε αυτή την υψηλή τιμή για κλάσματα του δευτερολέπτου, μέχρι να μειωθεί ξανά και να φθάσει στη μισή της αρχικής τιμής της. Από τα διαγράμματα για την άεργο ισχύ συναρτήσει του χρόνου για την κάθε ομάδα ανεμογεννητριών, συμπεράναμε πως η άεργος ισχύς των ανεμογεννητριών χωρίς βραχυκύκλωμα στη γραμμή μεταφοράς τους μειώνεται απότομα και μέσα σε κλάσματα του δευτερολέπτου αυξάνεται. Η άεργος ισχύς της ομάδας ανεμογεννητριών όπου συνέβη το βραχυκύκλωμα μηδενίστηκε.

Από τη μεταβολή της τάσης του υπεράκτιου αιολικού πάρκου V (pu) συναρτήσει του χρόνου παρατηρήθηκε πως μετά το βραχυκύκλωμα η τάση αφού έπεσε και επανήλθε, σταθεροποιήθηκε σε μεγαλύτερη τιμή. Όσον αφορά τις στροφές της ανεμογεννήτριας, η επίδραση του βραχυκυκλώματος ήταν πολύ σημαντική καθώς αυτές μειώθηκαν σχεδόν στο μισό.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Ernst, Young, 2015. *Offshore Wind in Europe: Walking the Tightrope to Success*.

(EWEA), E. W. E. A., 2011. *Wind in Our Sails: The Coming of Europe's Offshore Wind Energy Industry : 2011*. Brussels.

Αnon. [Ηλεκτρονικό] Available at:

http://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2050/index_en.html,

[Πρόσβαση 4 Απρίλιος 2016].

Aquaret, n.d. *Aquaret website*. [Ηλεκτρονικό], Available at: www.aquaret.com, [Πρόσβαση Απρίλιος 2016].

Barnes, M., Beddard, A., 2012. Voltage Source Converter HVDC Links – The State of the Art and Issues Going Forward. *Energy Procedia*, Τόμος 24, pp. 108-122.

Bergström L., Kautsky L., Malm T., Rosenberg R., Wahlberg M., Astrand Capetillo N., Wilhelmsson D., 2014. Effects of offshore wind farms on marine wildlife—a generalized impact assessment. *Environmental Research Letters*, 9(3), pp. 1-12.

Cigré, 2007. *Modeling and dynamic behavior of wind generation as it relates to*, s.l.: C4.601, Working Group.

EEA, 2009. *Europe's onshore and offshore wind energy potential*, s.l.: European Environmental Agency.

Energie, 2001. *Wind Turbine Grid Connection and Interaction*, Germany : Deutsches Windenergie-Institut GmbH .

FERC, 2005. *Federal Register*. [Ηλεκτρονικό], Available at: <https://www.federalregister.gov/articles/2005/01/31/05-1693/interconnection-for-wind-energy-and-other-alternative-technologies>,

[Πρόσβαση Απρίλιος 2016].

GWEC, 2016. *Global Wind Energy Council*. [Ηλεκτρονικό], Available at: <http://www.gwec.net/global-figures/graphs/>, [Πρόσβαση Φεβρουάριος 2016].

Jones,P., Westman, B., 2007. *renewableenergyfocus*. [Ηλεκτρονικό], Available at: <http://www.renewableenergyfocus.com/view/3567/hvdc-transmission-from-energy-source-to-consumer/>, [Πρόσβαση Μάρτιος 2016].

Kawady T.A., Nahhas A.M., 2013. Modeling Issues of Grid-Integrated Wind Farms for Power System Stability Studies, Modeling and Control Aspects of Wind Power Systems. Στο: A. A. H. H. Muyeen S. M., επιμ. *Modeling and Control Aspects of Wind Power Systems*. s.l.:s.n., p. 212.

Muyeen, S.M., Tamura, J., Murata, T. , 2009. *Stability augmentation of a grid-connected wind farm*. Berlin: Springer.

Niiranen, J., 2004. *Voltage dip ride through of a doubly-fed generator equipped with an active crowbar*. Gothenburg, Sweden, Nordic Wind Power Conference.

Offshorewindenergy, n.d. *Offshorewindenergy website*. [Ηλεκτρονικό], Available at: http://www.offshorewindenergy.org/caowee/indexpages/Offshore_technology.php [Πρόσβαση Απρίλιος 2016].

Pai, M.A., Stankovic, A.M., 2013. *Power Electronics and Power Systems*. New York: Springer.

Pinto, R., 2014. *Multi-Terminal DC Networks, System Integration, Dynamics and Control*. s.l.:s.n.

renewableenergyworld, n.d. *renewableenergyworld*. [Ηλεκτρονικό], Available at: <http://www.renewableenergyworld.com/rea/news/article/2013/12/subsea-cables-bring-offshore-wind-power-to-the-people>, [Πρόσβαση Απρίλιος 2016].

reve, 2016. *reve*. [Ηλεκτρονικό], Available at: <http://www.evwind.es/>, [Πρόσβαση Μάρτιος 2016].

Sathyajith, M., 2006. *Wind Energy fundamentals, resource analysis and economics*.. Berlin: Springer.

ABB, 2012. *HVDC Light, It's time to connect*, s.l.: ABB Company.

Κοροβέσης, Ε., 2009. Δίκτυα Διασύνδεσης (Νότιος Εύβοια). Ερέτρια Εύβοια.