



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

Μοντελοποίηση και μελέτη υπεράκτιου αιολικού πάρκου

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Δημήτριος Ζήσης

Επιβλέπων: Χρήστος Αθ. Χριστοδούλου, Επίκουρος Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Οκτώβριος 2024



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΥΨΗΛΩΝ ΤΑΣΕΩΝ

Μοντελοποίηση και μελέτη υπεράκτιου αιολικού πάρκου

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Δημήτριος Ζήσης

Επιβλέπων: Χρήστος Αθ. Χριστοδούλου, Επίκουρος Καθηγητής ΕΜΠ

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 15^η Οκτωβρίου 2024.

.....
Χρήστος Αθ. Χριστοδούλου
Επικ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Ιωάννης Φ. Γκόνος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Βασιλική Κονταργύρη
Επικ. Καθηγήτρια ΠΑΔΑ

Αθήνα, Οκτώβριος 2024

.....

Δημήτριος Ζήσης

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

Copyright © Δημήτριος Ζήσης, 2024

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει ως σκοπό πρώτον την εκτεταμένη βιβλιογραφική επισκόπηση κυρίως των ηλεκτρικών δομών ενός υπεράκτιου αιολικού πάρκου και δεύτερον την μελέτη της απόκρισης των ηλεκτρικών μεγεθών μιας τοπολογίας υπεράκτιου αιολικού πάρκου σε σημαντικά μοντελοποιημένα σφάλματα με την βοήθεια του λογισμικού DigSilent PowerFactory.

Αρχικά γίνεται αναφορά στην επικρατούσα κατάσταση στο χώρο των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας με έμφαση στην αιολική και ειδικότερα στην υπεράκτια αιολική ενέργεια, καθώς και στους κλιματικούς στόχους που έχουν θέσει μεγάλο ποσοστό κρατών για επίτευξη του στόχου συγκράτησης του ρυθμού αύξησης της θερμοκρασίας του πλανήτη στον 1.5°C έως το 2050.

Έπειτα παρουσιάζονται δομικά μέρη, κυρίως ηλεκτρικά, ενός υπεράκτιου αιολικού πάρκου, συμπεριλαμβανομένης και της διασύνδεσής του με το δίκτυο της στεριάς. Στη συνέχεια μελετώνται τοπολογίες που έχουν ωριμάσει με το πέρασμα των χρόνων στην ανάπτυξη των υπεράκτιων αιολικών πάρκων, καθώς και τοπολογίες που είναι σε ερευνητικό στάδιο και έχουν τις περγαμηνές να κυριαρχήσουν στο μέλλον. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στην τεχνολογία HVDC-VSC, που πλέον βρίσκει ευρεία εφαρμογή, εξαιτίας της αυξημένης δυνατότητας που παρέχει να εναρμονίζεται στις απαιτήσεις των Διαχειριστών των Δικτύων Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας, οι οποίες ολοένα και αυστηροποιούνται.

Έπειτα παρουσιάζονται μοντελοποιημένα τα βασικά ηλεκτρικά μεγέθη και ακολούθως, αφού γίνει αναφορά στο λογισμικό DigSilent PowerFactory, με βάση το μοντέλο του υπεράκτιου αιολικού πάρκου που υπάρχει στην βιβλιοθήκη του λογισμικού, και με κατάλληλες τροποποιήσεις και εισαγωγής επιπλέον παραμέτρων και μεταβλητών που θα βοηθήσουν στην καλύτερη κατανόηση, μοντελοποιούνται βασικά σφάλματα και εκπονούνται διάφορες προσομοιώσεις. Οι προσομοιώσεις αυτές, έχουν τον σκοπό να παρουσιάσουν την συμπεριφορά του συνολικού συστήματος κατά την διάρκεια διαφόρων σφαλμάτων, που είναι κομβική για την μελέτη του ηλεκτρικού συστήματος και των προστασιών του και να οδηγήσουν όχι μόνο στην επαλήθευση της βιβλιογραφίας αλλά και να δώσουν ‘τροφή’ για μελλοντικές μελέτες.

Λέξεις κλειδιά: υπεράκτιο αιολικό πάρκο, DigSilent PowerFactory, HVDC-VSC, δίκτυο, μοντελοποίηση, σφάλματα, μελέτη, διασύνδεση, τοπολογίες, διαχειριστές δικτύων μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας

ABSTRACT

The objective of this thesis is twofold: first, to conduct an extensive literature review focusing primarily on the electrical structures of an offshore wind farm, and second, to study the response of electrical quantities in an offshore wind farm topology to significant modeled faults using the DIgSILENT PowerFactory software.

Initially, the thesis discusses the current state of renewable energy sources, with a particular emphasis on wind energy, specifically offshore wind energy. It also addresses the climate targets set by a significant number of countries aiming to limit the global temperature rise to 1.5°C by 2050.

The thesis then presents the structural components, primarily electrical, of an offshore wind farm, including its connection to the mainland grid. It examines mature topologies developed over the years for offshore wind farms as well as those still in the research stage with potential future dominance. Special emphasis is placed on HVDC-VSC technology, which is increasingly used due to its ability to meet the stricter requirements of Transmission System Operators.

Subsequently, the key electrical quantities are modeled, followed by a discussion of the DIgSILENT PowerFactory software. Based on the offshore wind farm model available in the software's library, and with appropriate modifications and the introduction of additional parameters and variables to enhance understanding, key faults are modeled, and various simulations are performed. These simulations aim to illustrate the behavior of the entire system during different fault scenarios, which is crucial for studying the electrical system and its protection mechanisms. Additionally, they not only serve to verify the literature but also provide valuable insights for future research.

Keywords: offshore wind farm, DigSilent PowerFactory, HVDC-VSC, grid, modeling, faults, study, interconnection, topologies, transmission system operators.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου σε όλους όσους με στήριξαν κατά τη διάρκεια των σπουδών μου και εκπόνησης της διπλωματικής μου εργασίας.

Πρώτα απ' όλα, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή, Χρήστο Χριστοδούλου, για την ευκαιρία που μου έδωσε να εκπονήσω την διπλωματική εργασία σε ένα θέμα που με ενδιέφερε πολύ, για την υποστήριξη του και για την επικοινωνία που είχαμε.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες απευθύνω επίσης στην Δρ. Βασιλική Κονταργύρη για την διαρκή βοήθειά της και την άμεση ανταπόκρισή της σε όλα τα θέματα που τις επικοινωνούσα όσον αφορά την εργασία, καθώς και στον υποψήφιο διδάκτορα Γεώργιο Πουλημένο για την καθοδήγηση που μου παρείχε στη συνεχή τριβή που είχαμε καθ' όλη την διάρκεια της εκπόνησης της εργασίας.

Ακόμη, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καλό φίλο και διδακτορικό στον τομέα ηλεκτρικής ισχύος του ΕΜΠ Χρήστο Νικολακάκο για τις εποικοδομητικές συζητήσεις που είχαμε πάνω στο αντικείμενο των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την σύντροφό μου Χριστίνα, για την στήριξη της στην προσπάθεια που έκανα να συνδυάσω τον πρωταθλητισμό και τις σπουδές μου για αρκετά χρόνια.

Περιεχόμενα

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	5
ABSTRACT	7
ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ	9
ΠΡΟΛΟΓΟΣ	12
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1	13
1.1	16
1.2 Απεξάρτηση από χώρες με παραγωγή ορυκτών καυσίμων	14
1.3 Αιολική ενέργεια	15
1.4 Υπεράκτια αιολική ενέργεια.	16
1.4.1 Υπεράκτια αιολική ενέργεια στην Ελλάδα.	17
1.4.2 Πλεονεκτήματα υπεράκτιας αιολικής ενέργειας.	17
1.4.3	23
1.5 Αντικείμενο και δομή εργασίας.	21
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2	22
2.1 Δομή αιολικών πάρκων (Α/Π).	22
2.2 Τεχνολογίες Α/Γ	23
2.2.1 Δομικά μέρη Α/Γ.	23
2.2.2 Ανάλυση των δύο κυρίαρχων τεχνολογιών Α/Γ.	25
2.2.3 Εξέλιξη Α/Γ και υπεράκτια αιολική ενέργεια.	26
2.3 Συλλεκτήρια συστήματα (collection systems) - AC	26
2.3.1 Radial topology.	27
2.3.2 Ring topology.	27
2.3.3 Star topology.	28
2.4 Συλλεκτήρια συστήματα συνεχούς ρεύματος – DC	29
2.4.1 Τοπολογία με παράλληλη διασύνδεση.	29
2.4.2 Τοπολογία DC με σύνδεση σε σειρά.	31
2.5 Σημείο συλλογής (Collecting point).	32
2.6 Γραμμές μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας.	33
2.7 Καλώδια	35
2.8 High Voltage Direct Current (HVDC) διασύνδεση.	36
2.8.1 Ιστορική αναδρομή HVDC.	37
2.8.2 Κύριες τεχνολογίες μετατροπής στην HVDC διασύνδεση.	39

2.8.2 Τοπολογίες τεχνολογίας Voltage Source Converter (VSC).	42
2.8.3 Σύγκριση μετατροπέα LCC με μετατροπέα VSC.	42
2.9 Σύγκριση HVAC μεταφοράς με HVDC μεταφορά.	42
2.9.1 Τεχνοοικονομικά κριτήρια.	43
2.9.2 Περιβαλλοντικές επιπτώσεις.	44
2.9.3	47
2.10 Διαμορφώσεις σταθμών μετατροπής τεχνολογίας HVDC-VSC.	47
2.10.1 Ασύμμετρη μονοπολική διαμόρφωση (Asymmetrical Monopole)	47
2.10.3 Διπολική διαμόρφωση (Bipolar).	48
2.11 Χαμηλή συχνότητα (Low frequency)	51
2.12	53
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. Μοντελοποίηση βασικών στοιχείων αιολικού πάρκου.	52
3.1 Ασύγχρονη γεννήτρια διπλής τροφοδότησης-DFIG (Τύπου III).	52
3.3.3 Δομικά στοιχεία μοντελοποίησης	53
3.3.4 Αεροδυναμικό μέρος-μηχανικό μέρος	53
3.3.5 Μοντελοποίηση ασύγχρονης γεννήτριας διπλής τροφοδότησης – DFIG.	54
3.3.7 Ηλεκτρικά στοιχεία HVDC μεταφοράς με μετατροπείς πηγής τάσης(VSC)	56
3.7.1 Μοντελοποίηση VSC	58
3.7.2 Δυναμικό μοντέλο VSC-HVDC	59
3.7.3 Μοντελοποίηση πηνίου εξομάλυνσης.	61
3.7.4 Μοντελοποίηση AC υπεραυτού φίλτρου (AC high pass filter).	61
3.7.5 Μοντελοποίηση DC χωρητικότητας (DC capacitor).	62
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4	63
4.1 Υπεράκτιο αιολικό π65	
4.2 PowerFactory	63
4.2.1 Μοντέλα A/Γ στο PowerFactory.	64
4.2.2 Ασύγχρονη μηχανή επαγωγής διπλής τροφοδότησης-DFIG στο PowerFactory.	64
4.2.3 Μετασχηματιστής τριών τυλιγμάτων στο PowerFactory.	65
4.2.4 Μετασχηματιστής δύο τυλιγμάτων στο PowerFactory.	66
4.2.5 PWM Μετατροπέας στο PowerFactory.	67
4.2.6 Sinusoidal Pulse Width Modulation (SPWM) τεχνική ελέγχου.	69

4.3	Μελέτη σφαλμάτων για το υπεράκτιο αιολικό πάρκο.	71
4.3.1	Βασικό μοντέλο υπεράκτιου A//Π στο PowerFactory.	71
4.3.2	Είδος εξεταστέων σφαλμάτων	74
4.3.3	Κύριες διαφορές μεταξύ AC και DC προστασιών.	75
4.3.4	Περίπτωση τριφασικού σφάλματος στον χερσαίο ζυγό (T_AC_onshore).	76
4.3.5	Περίπτωση σφάλματος πόλου-γης στην μέση του συνολικού μήκους της γραμμής μεταφοράς HVDC.	91
4.3.6	Περίπτωση τριφασικού σφάλματος σε σημείο του υπεράκτιου αιολικού πάρκου.	94
4.4	Συνολικός έλεγχος της HVDC διασύνδεσης.	104
4.4.1	Λειτουργία ελέγχου χερσαίου μετατροπέα.	104
4.4.2	Λειτουργία ελέγχου υπεράκτιου μετατροπέα.	106
	ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5	108
5.1	Συμπεράσματα	108
5.2	Μελλοντικές μελέτες.	113
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	114

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Το κίνητρο για την εκπόνηση εργασίας ήταν η επιθυμία για τριβή με μια τεχνολογία ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, την υπεράκτια αιολική, η οποία ακόμα δεν έχει αναπτυχθεί πρακτικά στην χώρα μας, είναι όμως στα μελλοντικά σχέδια. Θεωρώ ότι ο έντονος ρυθμός που κατασκευάζονται αυτό τον καιρό στην χώρα μας τεχνολογίες πιο ώριμες, όπως χερσαία αιολική και ηλιακή ενέργεια, έχει δημιουργήσει ένα κένο στην μελέτη και ανάπτυξη μιας τεχνολογίας που στο ελληνικό ανάγλυφο ταιριάζει αρκετά. Η υπεράκτια αιολική ενέργεια εκτός από την συμβολή της στον ενεργειακό μετασχηματισμό της χώρας, μπορεί να δώσει λύσεις τόσο στην τόνωση της νησιωτικότητας, όσο και σε εθνικά θέματα με γείτονες χώρες.

Ακόμη, η γοητεία που έχει η τεχνική πολυπλοκότητα της ανάπτυξης και διασύνδεσης ενός υπεράκτιου αιολικού πάρκου ήταν κάτι που με ενθουσίασε.

Ο σκόπος με την παρούσα διπλωματική εργασία είναι να σχηματιστεί ένα θεωρητικό υπόβαθρο γύρω από τις τεχνολογίες που επικρατούν στην υπεράκτια αιολική ενέργεια, που επικαλύπτονται σημαντικά με τις τεχνολογίες διασύνδεσης ηλεκτρικών συστημάτων (HVAC, HVDC) μεταξύ χωρών, νησιών κτλπ., και να παρουσιαστεί πως μοντελοποιούνται βασικά ηλεκτρικά στοιχεία ενός υπεράκτιου αιολικού πάρκου. Επίσης στηριζόμενοι στο βασικό μοντέλο “HVDC Connected Offshore Wind Farm” που έχει το PowerFactory να μοντελοποιηθούν βασικά σφάλματα που μπορούν να συμβούν σε σημεία εντός του υπεράκτιου αιολικού πάρκου, καθώς και σε σημεία στην διασύνδεση και ενσωμάτωσή του με το χερσαίο δίκτυο, και να μελετηθούν οι επιπτώσεις που επιφέρουν. Επίσης μελετώντας τις επιπτώσεις των σφαλμάτων θα γίνει αναφορά στις βασικές λειτουργίες των απαραίτητων ελέγχων που λαμβάνουν χώρα στους μετατροπείς και στις δυνατότητες που προσφέρουν, δίνοντας έμφαση στην αποσαφήνιση των μεγεθών που ελέγχονται σε κάθε περίπτωση, χωρίς όμως να είναι το βασικό αντικείμενο η εκπόνηση του ελέγχου. Παράλληλα θα παρουσιαστούν βασικές λειτουργίες του DigSilent PowerFactory μέσα από την τριβή με το λογισμικό, που αξίζει να αναφερθεί ότι είναι μέσα στα δύο πιο διαδεδομένα εργαλεία ανάλυσης ηλεκτρικών συστημάτων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

1.1 Κλιματικοί στόχοι και ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.

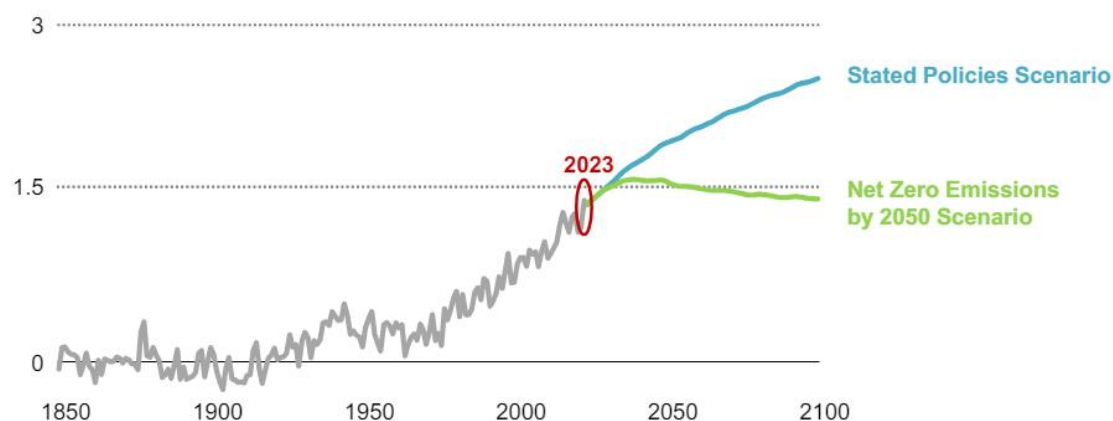
Σύμφωνα με την Διεθνή Οργάνωση Ενέργειας (IEA) ο πλανήτης βρίσκεται αντιμέτωπος με την κλιματική κρίση, της οποίας οι επιπτώσεις είναι καταστροφικές. Ένας αυξημένος αριθμός κρατών έχουν δεσμευτεί να επιτύχουν μηδενικές εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα έως το 2050, αντιπροσωπεύοντας περίπου το 70% των εκπομπών άνθρακα παγκοσμίως.

Η βιομηχανία παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας μαζί με τις μεταφορές και την θέρμανση αποτελούν το 73.2% των συνολικών εκπομπών CO₂. Επομένως, οι συμβατικοί σταθμοί παραγωγής που βασίζονται στην καύση ορυκτών καυσίμων όπως του φυσικού αερίου, του πετρελαίου και του άνθρακα θα πρέπει να αντικατασταθούν από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Η ενέργεια αυτή προέρχεται από φυσικούς πόρους ή από επαναφορτιζόμενες διαδικασίες. Στις μέρες μας οι διαθέσιμοι τύποι καθαρής ενέργειας είναι η ηλιακή ενέργεια, η αιολική ενέργεια, η υδροηλεκτρική ενέργεια, η ενέργεια από βιομάζα, η ενέργεια από γεωθερμία καθώς και η κυματική ενέργεια.

Θα απαιτηθεί λοιπόν ετήσια ανάπτυξη περίπου 1000 GW ανανεώσιμης ενέργειας για να επιτευχθούν οι κλιματικοί στόχοι, με κυριότερο στόχο την συγκράτηση της αύξησης της θερμοκρασίας κάτω των 2°C (ιδανικά να συγκρατηθεί στον 1.5°C) έως το 2050.

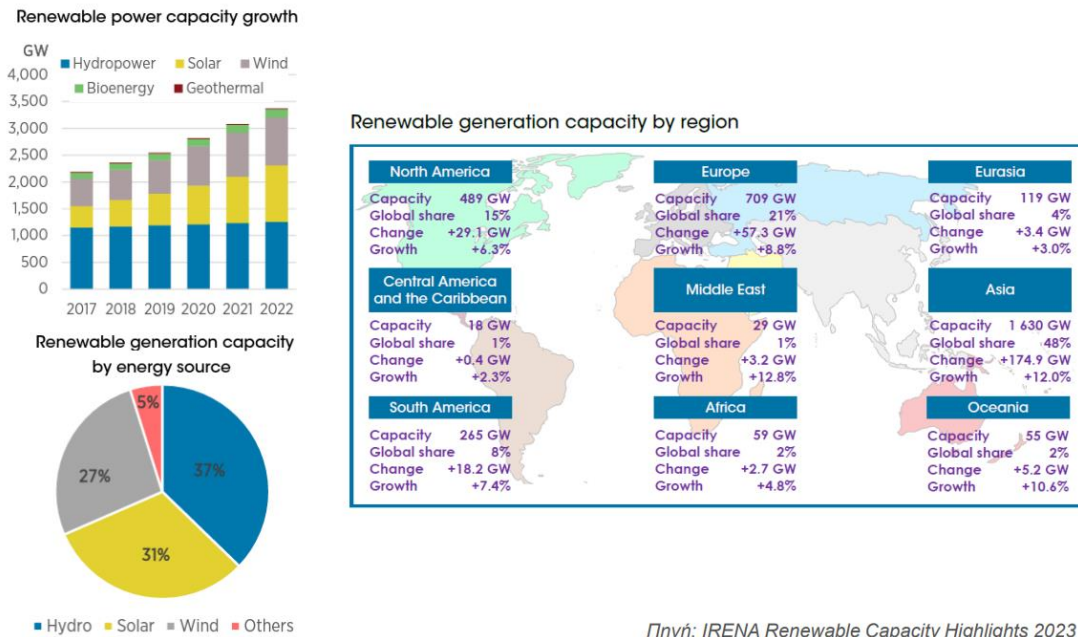
Στο παρακάτω διάγραμμα (εικόνα 1.1) παρουσιάζεται η πορεία της αύξησης της θερμοκρασίας από το 1850 και μετέπειτα, όπου σύμφωνα με τον παγκόσμιο οργανισμό ενέργειας (IEA), οι εκπομπές θα κορυφωθούν το 2025, ενώ η αύξηση της θερμοκρασίας θα συνεχιστεί για μερικά χρόνια ακόμα. Σε περίπτωση μη υλοποίησης των πολιτικών για μηδενικές εκπομπές το 2050 η αύξηση της θερμοκρασίας θα συνεχιστεί.

Είναι σαφές ότι η μόνη λύση για να συγκρατηθεί η αύξηση της θερμοκρασίας στον 1.5°C αποτελούν οι δράσεις προς τον στόχο για μηδενικές εκπομπές το 2050. [15]



Εικόνα 1.1 : Διάγραμμα αύξησης θερμοκρασίας με την πάροδο του χρόνου και συγκράτησή της στον 1.5 °C με την συμφωνία για μηδενικές εκπομπές το 2050.[15]

Σε αυτό το σημείο παρουσιάζεται η συνολική εγκατεστημένη ισχύ ΑΠΕ παγκοσμίως έως το 2022 (εικόνα 1.2).



Εικόνα 1.2: Συνολική εγκατεστημένη ισχύ ΑΠΕ παγκοσμίως.[2]

1.2 Απεξάρτηση από χώρες με παραγωγή ορυκτών καυσίμων

Εκτός από τους πολύ σημαντικούς κλιματικούς στόχους εξίσου σημαντικός στόχος είναι η απεξάρτηση από ορυκτά καύσιμα που προέρχονται κυρίως από χώρες που δεν ανήκουν στο δυτικό κόσμο. Ο πόλεμος στην Ουκρανία κυρίως, αλλά και οι συνεχείς εντάσεις στην Μέση Ανατολή γίνονται αιτία για αυξήσεις στις τιμές φυσικού αερίου και πετρελαίου, αποτέλεσμα το οποίο πρέπει να κρούσει τον κώδωνα του κινδύνου στους αρμόδιους φορείς ώστε να πράξουν γρήγορα με σκοπό να επιταχυνθεί η ενεργειακή μετάβαση και η απεξάρτηση από χώρες εκτός Ε.Ε.

1.3 Αιολική ενέργεια

Κυριαρχεί λοιπόν η υδροηλεκτρική ενέργεια, που η ανάπτυξή της εδραιώθηκε αρκετά χρόνια πριν. Αυτό όμως που είναι αξιοσημείωτο είναι η αύξηση της ηλιακής και

αιολικής ενέργειας, με την τελευταία να αποτελεί αντικείμενο μελέτης στην παρούσα εργασία και ειδικότερα θα ασχοληθούμε με την υπεράκτια αιολική ενέργεια.

Ο άνεμος βασίζεται στο ότι η Γη δεν επηρεάζεται το ίδιο σε όλο το πλάτος και μήκος της από την ηλιακή ακτινοβολία. Ειδικότερα, υπάρχουν περιοχές χαμηλής πίεσης όπου ο αέρας ζυγίζει λιγότερο και τείνει να ανέβει αφού είναι θερμότερος, και υπάρχουν και πιο ψυχρές περιοχές με υψηλή πίεση όπου ο αέρας είναι βαρύτερος και τείνει να κατέβει. Εξαιτίας λοιπόν της διακύμανσης της πίεσης του αέρα, ο τελευταίος κινείται με αποτέλεσμα να δημιουργείται ο άνεμος.

Η κινητική ενέργεια του ανέμου μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια στα αιολικά πάρκα όπου υπάρχουν δύο τύποι πάρκων που βασίζονται στην περιοχή που είναι εγκατεστημένα. Υπάρχουν λοιπόν τα χερσαία αιολικά πάρκα όπου αποτελούνται από ανεμογεννήτριες τοποθετημένες στην στεριά και τα θαλάσσια αιολικά πάρκα που αποτελούνται από ανεμογεννήτριες τοποθετημένες στην θάλασσα.

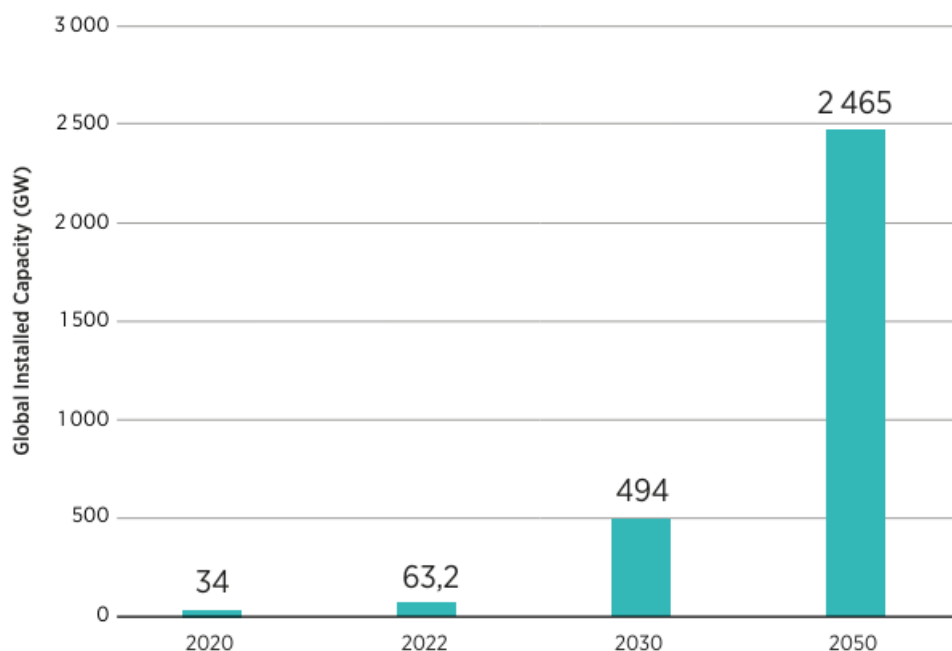
Ιστορικά η εκμετάλλευση του ανέμου πρωτοεμφανίστηκε πριν περίπου 3000 χρόνια κυρίως για την άντληση νερού και την άλεση σιτηρών. Στη συνέχεια εγκαταλείφθηκε για αρκετό χρονικό διάστημα αφού πλέον τα ορυκτά καύσιμα κυριάρχησαν, προσφέροντας μη στοχαστική παροχή ενέργειας. Γύρω στην δεκαετία του 1970 με αφορμή την τεράστια αύξηση στην τιμή του πετρελαίου, το ενδιαφέρον προς την αιολική ενέργεια επανήλθε. Από αυτό το χρονικό σημείο και έπειτα η αιολική ενέργεια ολοένα και αυξάνει την διείσδυσή της στο ενεργειακό μείγμα παγκοσμίως. [3]

Η αιολική ενέργεια έχει θεωρηθεί ως μια ανανεώσιμη πηγή “κλειδί” στην ενεργειακή μετάβαση της Ευρώπης. Καλύπτει περίπου το 17% της ζήτησης ηλεκτρικού ρεύματος και σε πολλές χώρες πολύ περισσότερο όπως στην Δανία-55%, Ιρλανδία-34%, Ηνωμένο Βασίλειο-28%, Πορτογαλία-26%, Γερμανία-26%, Ισπανία-25%. Μάλιστα σύμφωνα με την IEA, ο άνεμος θα αποτελεί την νούμερο ένα πηγή ενέργειας στη Ευρώπη ως το 2027, ενώ οι προβλέψεις της Κομισιόν είναι ότι το 2050 η αιολική ενέργεια θα καλύπτει το 50% της συνολικής ζήτησης των κρατών μελών της.

Τέλος να σημειωθεί ότι το ηλεκτρικό ρεύμα αποτελεί το 25% του συνολικού ενεργειακού μείγματος της Ευρώπης, ωστόσο ο στόχος είναι μέχρι το 2050 να αποτελεί το 57% και μάλιστα θα φτάσει το 75% συμπεριλαμβάνοντας έμμεσα την παραγωγή υδρογόνου από ανανεώσιμες πηγες. [1]

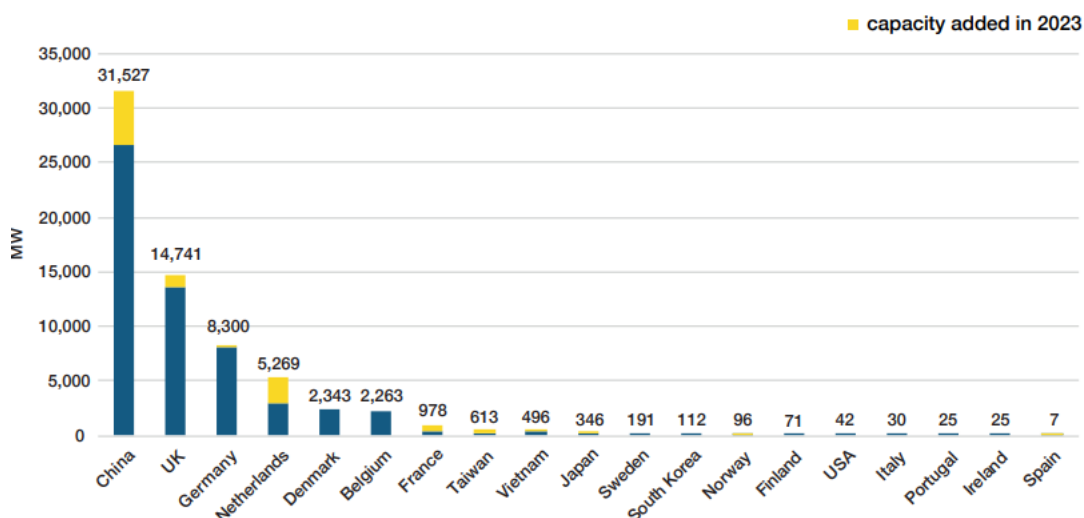
1.4 Υπεράκτια αιολική ενέργεια.

Μια τεχνολογία που αξιοποιεί στο έπακρο την αιολική ενέργεια, είναι τα υπεράκτια αιολικά πάρκα. Τα τελευταία χρόνια, κυρίως αναπτυγμένες χώρες, έχουν επικεντρωθεί στην ανάπτυξη των υπεράκτιων αιολικών πάρκων, με την εγκατεστημένη ισχύ αυτών να αυξάνεται εκθετικά σύμφωνα με τις προβλέψεις της παγκόσμιας με την IRENA (εικόνα 1.3).



Εικόνα 1.3: Προβλέψεις υπεράκτιας εγκατεστημένης ισχύς παγκοσμίως.[12]

Η αύξηση της εγκατεστημένης υπεράκτιας αιολικής ενέργειας είναι και θα είναι ραγδαία, με χώρες όπως η Κίνα, το Ηνωμένο Βασίλειο, η Γερμανία, η Ολλανδία, η Δανία, να πρωταγωνιστούν στην ανάπτυξη της συγκεκριμένης τεχνολογίας. (εικόνα 1.4)



Εικόνα 1.4: Εγκατεστημένη υπεράκτια αιολική ισχύ ανά χώρα. Με κίτρινο χρώμα η ισχύς που ενσωματώθηκε το 2023. [13]

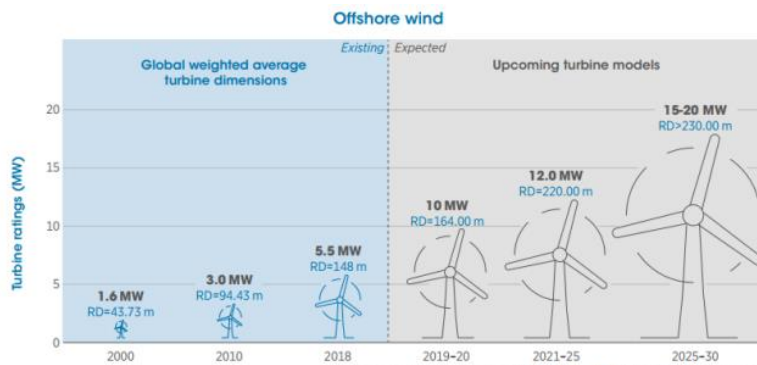
1.4.1 Υπεράκτια αιολική ενέργεια στην Ελλάδα.

Η χώρα μας ενώ συγκαταλέγεται στις χώρες με την μεγαλύτερη διείσδυση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στο ενεργειακό μείγμα, δεν έχει προς το παρόν αναπτύξει υπεράκτιο αιολικό πάρκο. Έχουν όμως δρομολογηθεί διεργασίες ώστε να επιτευχθούν οι στόχοι που έχουν τεθεί και αφορούν την ανάπτυξη υπεράκτιας αιολικής ισχύς 2 GW το 2030, που θα αποφέρει 7 TWh παραγόμενη ενέργεια. Αυτό θα έχει ως αποτέλεσμα αποφυγή 2,8 εκατομμυρίων τόνων διοξειδίου του άνθρακα και θα αντικαταστήσουν 1,1 bcm ποσότητα φυσικού αερίου. Ο μακροπρόθεσμος στόχος της Ελλάδας είναι το 2050 η εγκατεστημένη ισχύς υπεράκτιων αιολικών πάρκων να ξεπερνά τα 17 GW, που για να επιτευχθεί ο στόχος θα πρέπει κάθε χρόνο, από το 2030 και μετά, να εγκαθίστανται ισχύς 2-2,5 GW. [15]

1.4.2 Πλεονεκτήματα υπεράκτιας αιολικής ενέργειας.

Τα πλεονεκτήματα της εγκατάστασης αιολικών πάρκων στην θάλασσα είναι αρκετά, με κυριότερα την μεγαλύτερη ταχύτητα του ανέμου. Μικρές θεωρητικά αυξήσεις στην ταχύτητα του ανέμου επιφέρουν μεγάλες αυξήσεις στην παραγόμενη ενέργεια, ενδεικτικά μια Α/Γ σε ταχύτητα ανέμου 24 km/h μπορεί να παράξει διπλάσια ενέργεια από ότι μπορεί να παράξει σε ταχύτητα ανέμου 19 km/h.[17] Επιπλέον πλεονέκτημα των υπεράκτιων Α/Π είναι η μειωμένη τύρβη καθώς και την αποφυγή της όχλησης των κατοίκων, που κάποιες φορές έχει ως αποτέλεσμα την παρεμπόδιση υλοποίησης των χερσαίων αιολικών πάρκων. Υπάρχουν όμως και σημαντικές προκλήσεις που πρέπει να αντιμετωπιστούν για να καθιερωθεί η υπεράκτια αιολική ενέργεια μια ευρέως χρησιμοποιούμενη ανανεώσιμη πηγή ενέργειας καθ' όλο τον κόσμο. Μια από αυτές είναι η τρόπος θεμελίωσης των ανεμογεννητριών στην θάλασσα ανάλογα με το βάθος της. Σε ρηχά νερά η υλοποίηση των αιολικών πάρκων γίνεται με πακτωμένες στο βυθό ανεμογεννήτριες, ενώ σε βαθιές θάλασσας εγκαθίστανται πλωτές ανεμογεννήτριες, η ηλεκτρική διασύνδεση μεταξύ των Α/Γ μέσω καλωδίων καθώς και μια πολύ σημαντική παράμετρος για το κόστος των υπεράκτιων αιολικών πάρκων που είναι η αξιόπιστη μεταφορά ενέργειας από την θάλασσα στην στεριά με το λιγότερο δυνατό κόστος. Τέλος, αλλά όχι λιγότερης σημασίας είναι το αυξημένο κόστος εγκατάστασης και συντήρησης σε δομές μακριά από την στεριά.

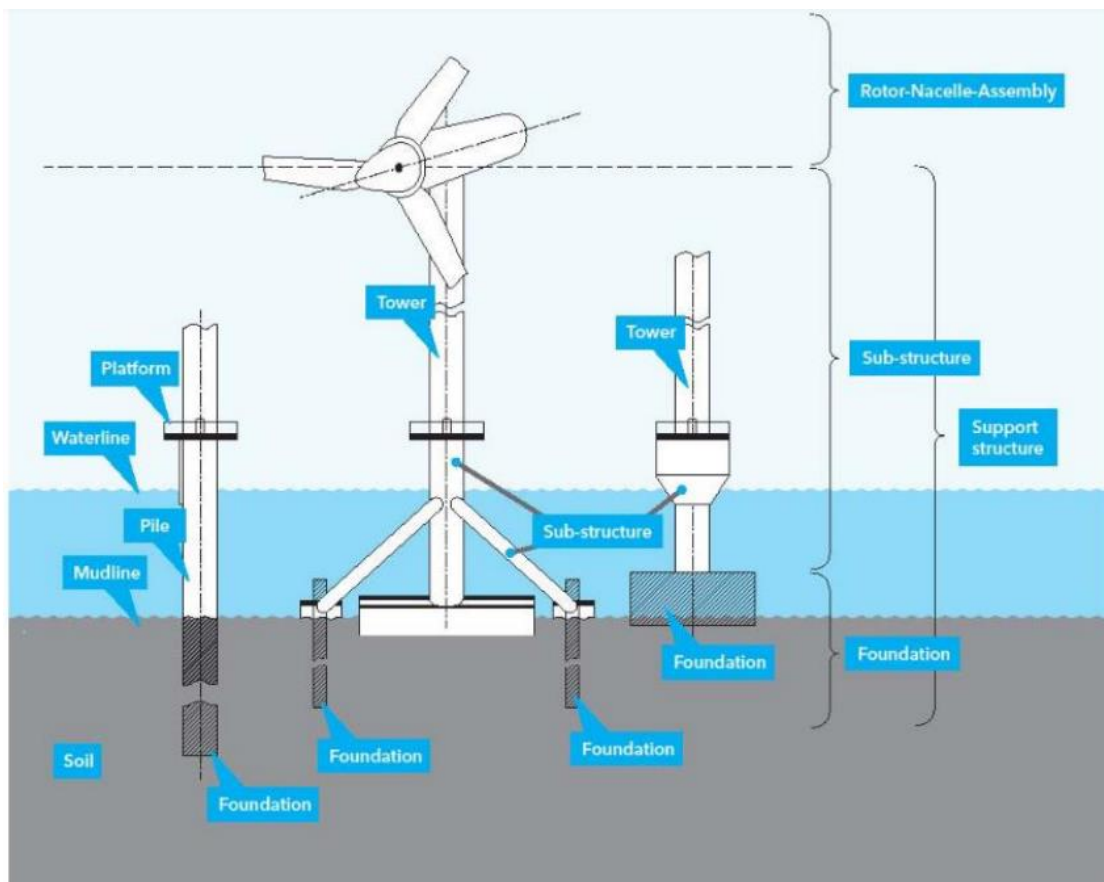
Εξαιτίας της αυξημένης δυνατότητας αξιοποίησης χώρου σε σχέση με τα χερσαία αιολικά πάρκα, το μέγεθος των ανεμογεννητριών είναι αρκετά μεγαλύτερο στα υπεράκτια πάρκα, παράγοντας μεγάλα ποσά καθαρής ενέργειας. Ενδεικτικά στην παρακάτω εικόνα (1.5) παρουσιάζεται η εξέλιξη του μεγέθους των υπεράκτιων Α/Γ τα τελευταία χρόνια. [4]



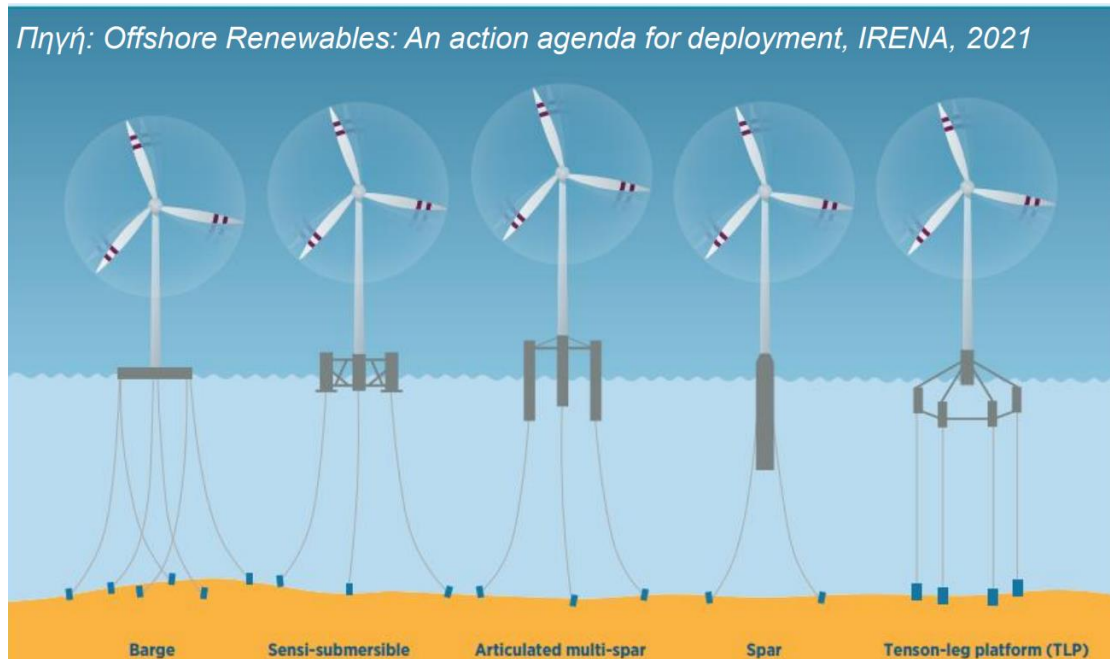
Πηγή: Future of wind – A Global Energy Transformation paper (IRENA)

Εικόνα 1.5: Εξέλιξη μεγέθους Α/Γ υπεράκτιων αιολικών πάρκων.[4]

Ένα επιπλέον δίλημμα για τους μελετητές των υπεράκτιων αιολικών πάρκων είναι ο τρόπος στερέωσης των ανεμογεννητριών, με τον πλέον διαδεδομένο τρόπο να είναι η πάκτωση στο βυθό της θάλασσας (εικόνα 1.6) που ενδείκνυται για ρηχά νερά, ενώ μια αναπτυσσόμενη τεχνολογία είναι οι πλωτές ανεμογεννήτριες (εικόνα 1.7), ικανή να δώσει λύση για στερέωση ανεμογεννητριών σε θάλασσες με βαθιά νερά.

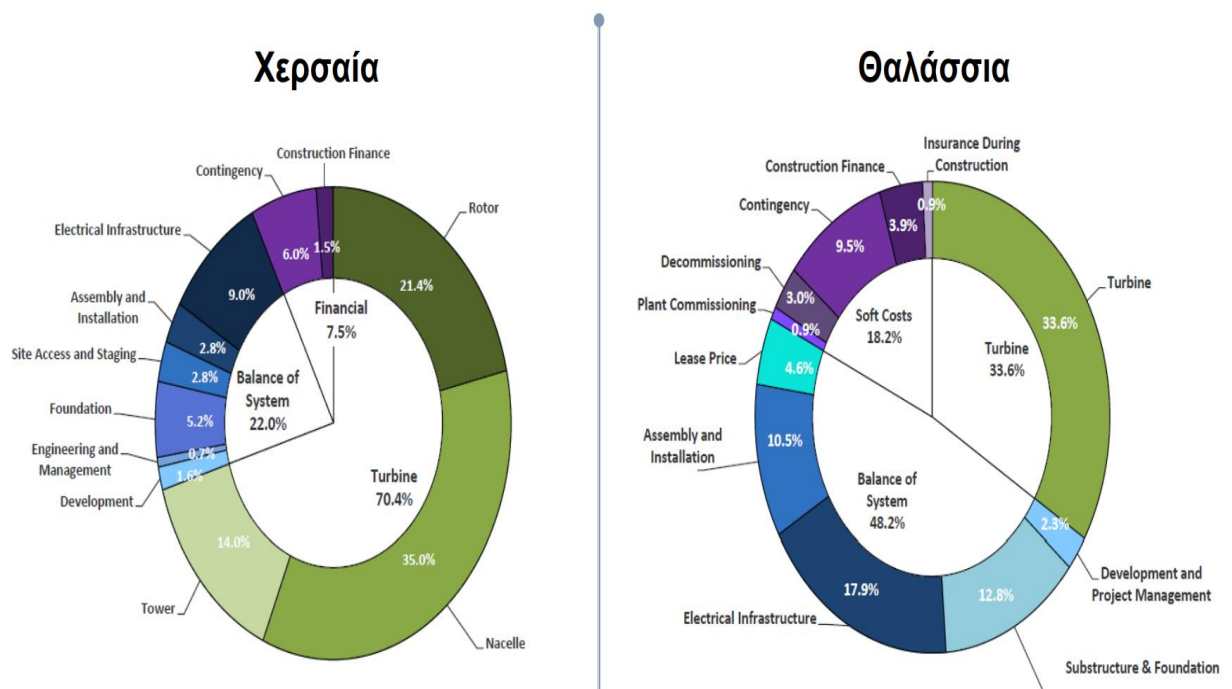


Εικόνα 1.6: Διαμορφώσεις και επιμέρους στοιχεία πακτωμένων ανεμογεννητριών.[2]



Εικόνα 1.7: Διαμορφώσεις πλωτών ανεμογεννητριών.[2]

Στις προσκλήσεις για την ανάπτυξη των υπεράκτιων αιολικών πάρκων που προαναφέραμε, ήταν η εγκατάσταση και η συντήρησή τους. Στην παρακάτω εικόνα 1.8 παρουσιάζονται οι διαφορές στα επιμέρους κόστη ανάπτυξης ανάμεσα στα χερσαία και υπεράκτια αιολικά πάρκα.

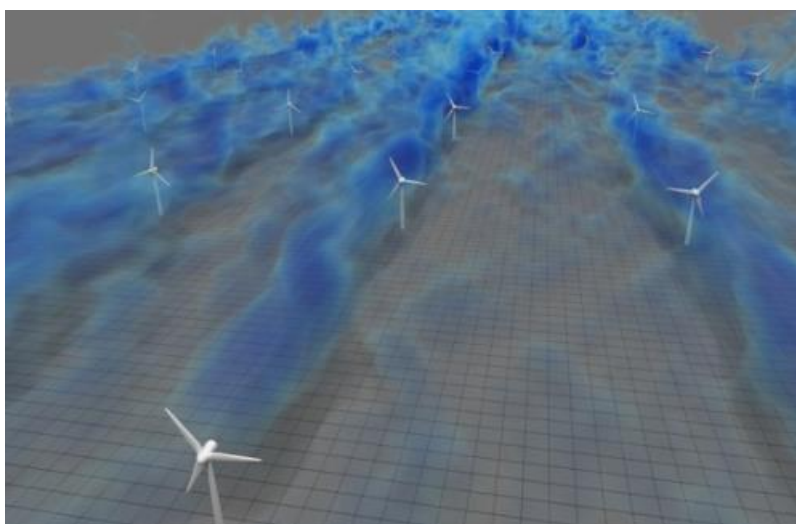


Σχήμα 1.8: Διαφορές στα επιμέρους κόστη εγκατάστασης και συντήρησης μεταξύ χερσαίων και υπεράκτιων αιολικών πάρκων.[2]

Παρατηρεί κάποιος ότι στα χερσαία αιολικά την ‘μερίδα του λέοντος’ στο κόστος λαμβάνει η ανεμογεννήτρια και τα υπόλοιπα κόστη είναι αρκετά χαμηλά. Αντίθετα στα θαλάσσια αιολικά το κόστος της ανεμογεννήτριας αποτελεί το 1/3 του συνολικού κόστους, με την εγκατάσταση, τις υποδομές και την συντήρηση να έχουν σημαντικό μερίδιο στο κόστος ανάπτυξης υπεράκτιων πάρκων.

1.4.3 Φαινόμενο εξασθένισης της έντασης του ανέμου (Wake Effect)

Επιπλέον παράμετροι που πρέπει να ληφθούν υπόψη στο σχεδιασμό ενός αιολικού πάρκου τόσο στην θάλασσα είναι η επίδραση γειτονικών τουρμπίνων που οδηγεί στην εξασθένιση της έντασης του ανέμου (wake effect) με αποτέλεσμα την μη πλήρη αξιοποίησή του για την παραγωγή ενέργειας (εικόνα 1.9). Πάνω στο φαινόμενο αυτό γίνονται μελέτες ώστε να τοποθετούνται οι Α/Γ με βέλτιστο τρόπο ώστε να μην υπάρχει μειωμένη παραγωγή ενέργειας εξαιτίας αυτού. Οι μελέτες έχουν οδηγήσει στο συμπέρασμα ότι η ελάχιστη απόσταση που πρέπει να ληφθεί υπόψιν μεταξύ Α/Γ στην επικρατούσα κατεύθυνση του ανέμου είναι 5-7 ρότορες με πιο δεδομένη την απόσταση των 7 ροτόρων.



Εικόνα 1.9: Η επίδραση του φαινομένου της εξασθένισης της έντασης του ανέμου (wake effect) σε ένα υπεράκτιο αιολικό πάρκο. [17]

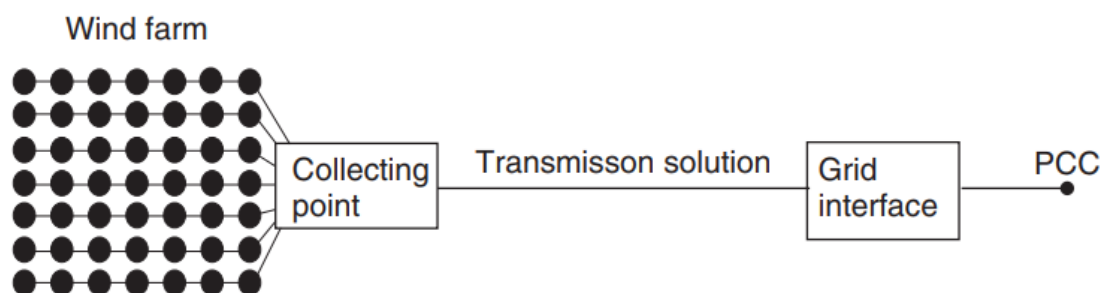
1.5 Αντικείμενο και δομή εργασίας.

Έχοντας δοθεί μια γενική εικόνα της αιολικής και κυρίως της υπεράκτιας αιολικής ενέργειας, επόμενο στάδιο είναι η παρουσίαση του σκοπού αυτής της εργασίας. Στην παρούσα εργασία θα ασχοληθούμε με τις ηλεκτρικές διασυνδέσεις υπεράκτιου Α/Π, καθώς και με την συμπεριφορά του Α/Π σε διάφορα σφάλματα και την επίδραση που έχουν αυτά τόσο εντός του πάρκου όσο και στο χερσαίο δίκτυο που έχει συνδεθεί. Αρχικά θα γίνει εκτενής βιβλιογραφική αναφορά στα υπάρχοντα σχήματα δομής των υπεράκτιων Α/Π, στις νέες τάσεις που αναπτύσσονται καθώς και στις προκλήσεις που τις ακολουθούν, δίνοντας έμφαση στην τεχνολογία HVDC-VSC που χρησιμοποιείται ολοένα και περισσότερο καθώς παρέχει καλύτερη ευελιξία στις ανάγκες για εναρμόνιση με τους κώδικες του δικτύου. Στη συνέχεια θα παρουσιαστεί το λογισμικό DigSilent PowerFactory, όπου θα γίνει η μοντελοποίηση υπεράκτιου Α/Π. Έπειτα θα προσομοιωθούν τα πιο επιδραστικά σφάλματα σε διάφορα σημεία του συνολικού συστήματος και θα μελετήσουμε τις επιπτώσεις αυτών στο ηλεκτρικό δίκτυο τόσο στη σύνδεση μεταξύ των Α/Γ όσο και στο υπόλοιπο δίκτυο. Κατά την διάρκεια της προσομοίωσης θα παρουσιαστούν αναλυτικά βήματα που χρησιμεύουν στην εκπόνηση προσομοιώσεων για την μελέτη σφαλμάτων στο περιβάλλον του PowerFactory. Τέλος θα εξαχθούν συμπεράσματα και θα επισημανθούν μελλοντικές μελέτες στηριγμένες σε αυτά.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

2.1 Δομή αιολικών πάρκων (Α/Π).

Σε αυτό το σημείο θα παρουσιαστεί η γενική δομή ενός υπεράκτιου αιολικού πάρκου. Ο σχεδιασμός καθώς και η επιλογή του τρόπου δομής του πάρκου είναι σύνθετη διαδικασία και απαιτεί ολιστική προσέγγιση και γνώση αρκετών σημαντικών παραμέτρων. Παρακάτω παρουσιάζεται η τυπική δομή και τα επιμέρους στοιχεία ενός υπεράκτιου αιολικού πάρκου (εικόνα. 2.1).



Εικόνα 2.1: Στοιχειώδης δομή υπεράκτιου Α/Π.[3]

Η ηλεκτρική ενέργεια στα υπεράκτια αιολικά πάρκα παράγεται από ανεμογεννήτριες που όπως αναφέραμε παραπάνω μετατρέπουν την κινητική ενέργεια του ανέμου σε ηλεκτρική. Στη συνέχεια οι Α/Γ και ο υπεράκτιος υποσταθμός συνδέονται σε δίκτυο Μέσης Τάσης με ποικίλες τυπολογίες. Έτσι λοιπόν η ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται από κάθε Α/Γ ενσωματώνεται στο δίκτυο ΜΤ. Έπειτα το επίπεδο τάσης ανυψώνεται σε Υψηλή Τάση (ΥΤ) ώστε να μειωθεί η διατομή του καλωδίου και να αποφευχθεί σημαντικός βαθμός απωλειών. Με αυτόν τον τρόπο μεταφέρεται αξιόπιστα και ασφαλή στο χερσαίο δίκτυο, μέσω υπεράκτιου συστήματος μεταφοράς. Αφού η μεταφερόμενη ενέργεια ‘υιοθετήσει’ τα χαρακτηριστικά του χερσαίου συστήματος μεταφοράς όπως τάση, συχνότητα και άεργο ισχύ συναντώντας έτσι τις απαιτήσεις των κωδίκων δικτύου του συστήματος, διασυνδέεται στο υπόλοιπο σύστημα. Συνοψίζοντας τα επιμέρους μέρη μιας τυπικής δομής ενός υπεράκτιου αιολικού πάρκου είναι οι Α/Γ, το συλλεκτήριο σύστημα, τον υπεράκτιο υποσταθμό όπου συλλέγεται η ηλεκτρική ενέργεια και λαμβάνει κατάλληλη μορφή ώστε να μεταφερθεί και τέλος το σύστημα μεταφοράς μέχρι την στεριά. Σε κάθε από τις παραπάνω δομές δεν υπάρχει πάγιος τρόπος προσέγγισης, εν αντιθέσει ο σχεδιαστής κάθε φορά έχει να επιλέξει το επίπεδο τάσης, την συχνότητα την επιλογή εναλλασσόμενου ή συνεχούς ρεύματος κ.α.

2.2 Τεχνολογίες Α/Γ

2.2.1 Δομικά μέρη Α/Γ.

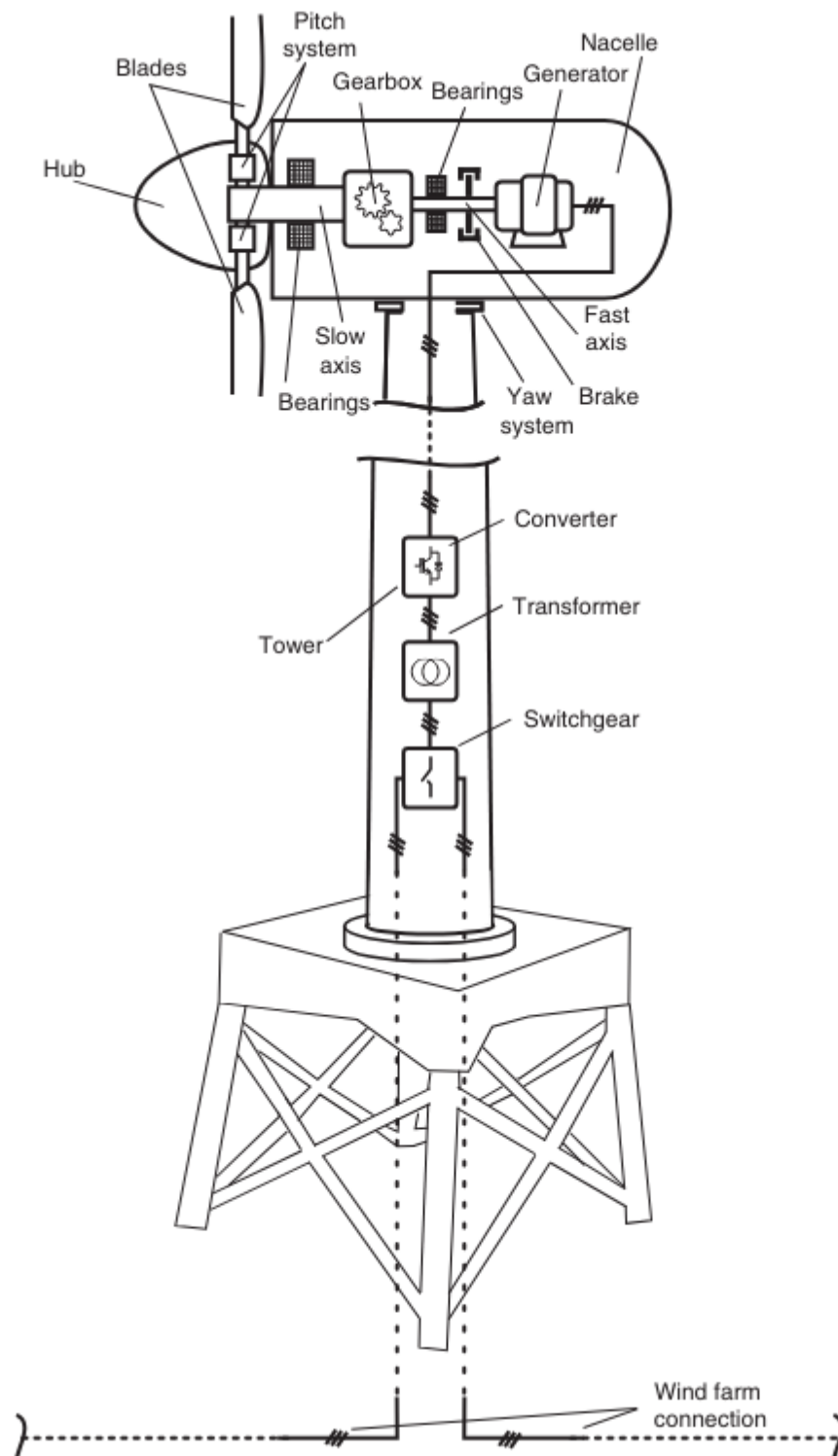
Στην εικόνα 2.2 παρουσιάζεται η ενδεικτική δομή μιας Α/Γ οριζόντιου άξονα.

Το βασικό στοιχείο της Α/Γ είναι ο ρότορας που συντίθενται από την πλήμνη (hub), τα πτερύγια (blades) και τον μηχανικό άξονα (mechanical shaft). Τα πτερύγια, τα οποία τοποθετούνται στην πλήμνη, λαμβάνουν την κινητική ενέργεια του ανέμου, η οποία με την σειρά της μεταφέρεται στην γεννήτρια μέσω του μηχανικού άξονα. Στα περίπτυγια τοποθετείται και το σύστημα pitch control, το οποίο ελέγχει την αεροδυναμική και συγκρατεί την Α/Γ εντός των αντοχών της. Επίσης δρα και σε περιπτώσεις όπου η κινητική ισχύς που λαμβάνεται είναι μεγαλύτερη από την επιθυμητή ηλεκτρική ισχύς, πχ για λόγους ευστάθειας ο διαχειριστής του ηλεκτρικού δικτύου στέλνει σήμα (set point) για να μειωθεί η παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς. Για καταστάσεις που θα πρέπει να διακοπεί η λειτουργία της Α/Γ υπάρχουν τα μηχανικά φρένα. Ένα επιπλέον δομικό στοιχείο της Α/Γ είναι το κιβώτιο ταχυτήτων (gearbox) όπου η αργή ταχύτητα του ρότορα προσαρμόζεται στην μεγάλη ταχύτητα της γεννήτριας. Σε ορισμένες διαμορφώσεις Α/Γ είναι δυνατόν να παραλειφθεί το κιβώτιο ταχυτήτων, εφόσον υπάρχει η δυνατότητα, μέσω πολλών πόλων και κατάλληλων ηλεκτρονικών ισχύος, η ηλεκτρική ταχύτητα της γεννήτριας να φτάσει το επίπεδο της ταχύτητας του ρότορα, μέσω κατάλληλου ελέγχου.

Η γεννήτρια που χρησιμοποιείται στη διαμόρφωση μιας Α/Γ είναι κυρίως είτε σύγχρονη είτε ασύγχρονη, και αναλόγως διαμορφώνονται και οι δομές των ηλεκτρονικών ισχύος που συνδέονται είτε στο ρότορα είτε στον στάτη. Μέσω των ηλεκτρονικών ισχύος η ταχύτητα της γεννήτριας μπορεί να ελεγχθεί και να έχει αποδοτικότερη απόκριση ισχύος σε διάφορες ταχύτητες ανέμου, και επίσης να υπάρχει καλύτερη ενσωμάτωση στο ηλεκτρικό δίκτυο.

Στη συνέχεια η παραγόμενη ισχύς συνδέεται στον μετασχηματιστή όπου η τάση αποκτά το επιθυμητό επίπεδο μεταφοράς, ενώ πριν η Α/Γ συνδεθεί στο υπόλοιπο δίκτυο υπάρχει ο αυτόματος διακόπτης που προσφέρει την κατάλληλη προστασία. [2], [19]

Η παραπάνω δομή της Α/Γ βρίσκει εφαρμογή τόσο στα χερσαία όσο και στα υπεράκτια αιολικά πάρκα. Η διαφορά είναι στον τρόπο της θεμελίωσής της, όπου στην στεριά θεμελιώνεται σε βάση από σκυρόδεμα, ενώ υποθαλασσία όπως αναλύθηκε σε προηγούμενη παράγραφο, υπάρχουν δύο κατηγορίες Α/Γ, οι πακτωμένες στο βυθό και οι πλωτές.



Εικόνα 2.2: Ενδεικτική δομή Α/Γ οριζόντιου άξονα. [19]

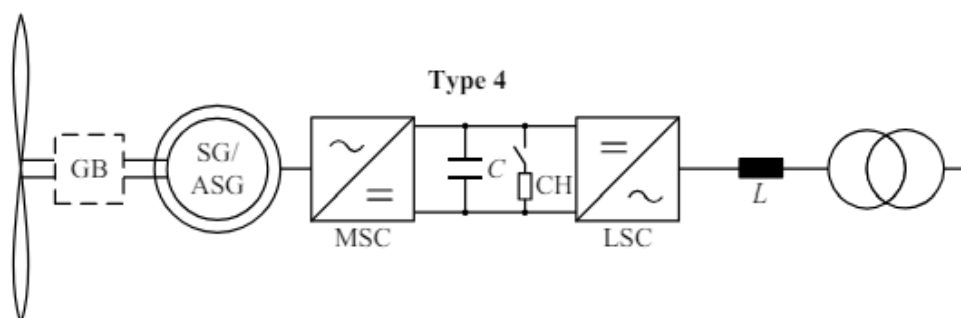
2.2.2 Ανάλυση των δύο κυρίαρχων τεχνολογιών Α/Γ.

Οι τεχνολογίες διαμόρφωσης των Α/Γ χωρίζονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες ανάλογα με δυνατότητα για έλεγχο των στροφών της, σε σταθερών στροφών και σε μεταβλητών στροφών.

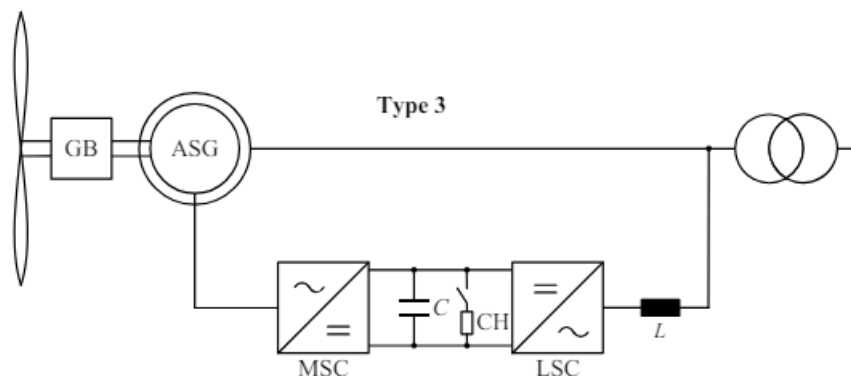
Η τεχνολογία των σταθερών στροφών ήταν η πρώτη που βρήκε εφαρμογή στην ανάπτυξη των Α/Π, πλέον όμως δεν αποτελεί προτιμητέα λύση διότι παρουσιάζει αρκετά μειονεκτήματα σε σχέση με την τεχνολογία των μεταβλητών στροφών, με κυριότερα πρώτον την μη δυνατότητα εναρμόνισης με τις απαιτήσεις του κώδικα του δικτύου, και δευτερον δεν είναι δυνατή η πλήρης αξιοποίηση του αιολικού δυναμικού.

Σε αυτό το σημείο θα αναφερθούμε στις τεχνολογίες των ανεμογεννητριών που χρησιμοποιούνται πλέον τόσο στα χερσαία, όσο και στα υπεράκτια αιολικά πάρκα, και είναι μεταβλητών στροφών έτσι ώστε να γίνεται καλύτερη αξιοποίηση της αεροδυναμικής των πτερυγίων σε σχέση με την ταχύτητα του ανέμου. Υπάρχουν λοιπόν δύο τύποι ανεμογεννητριών μεταβλητών στροφών που κυριαρχούν και η διαφορά τους εξαρτάται αν οι μετατροπείς που παρεμβάλλονται μεταξύ της τουρμπίνας και του υπόλοιπου δικτύου μπορούν να διακινήσουν την πλήρη ισχύ της Α/Γ, συνδέοντας τα ηλεκτρονικά ισχύος στον στάτη της μηχανής, Τύπου 4 (εικόνα 2.3), ή μπορούν να διακινήσουν ένα μέρος της συνολικής ισχύς της μηχανής, συνδέοντας τα ηλεκτρονικά ισχύος στον δρομέα, Τύπου 3 (εικόνα 2.4).

Περίληπτικά να τονίσουμε ότι η μηχανή Τύπου 4 προσφέρει καλύτερη ηλεκτρική συμπεριφορά σε σχέση με την εναρμόνιση με τους κώδικες του εκάστοτε διαχειριστή του συστήματος, είναι όμως πιο κοστοβόρα επιλογή σε σχέση με την Τύπου III, αφού τα ηλεκτρονικά ισχύος διαχειρίζονται μεγαλύτερη ισχύ.



Εικόνα 2.3: Δομή Α/Γ τύπου 4 (με μετατροπείς πλήρους ισχύος).[5]



Εικόνα 2.4: Δομή Α/Γ τύπου 3 (με μετατροπείς κλασματικής ισχύος).[5]

Αξίζει να σημειωθεί ότι στην διαμόρφωση Τύπου 4 δίνεται η δυνατότητα χρησιμοποίησης είτε σύγχρονης είτε ασύγχρονης γεννήτριας. Σε συνδυασμό με την επιλογή γεννήτριας διαμορφώνονται και τα ηλεκτρονικά ισχύος.

Δυνατότητα απαλοιφής του κιβωτίου ταχυτήτων (Gearbox) υπάρχει μόνο στην διαμόρφωση όπου επιλέγεται σύγχρονη γεννήτρια.

2.2.3. Εξέλιξη Α/Γ και υπεράκτια αιολική ενέργεια.

Η τεχνολογία των ανεμογεννητριών εξελίσσεται ταχεία τόσο ως προς το μέγεθος όσο και ως προς την παραγόμενη ισχύ. Τα τελευταία 20 χρόνια έχει αυξηθεί η διάμετρος του ρότορα της Α/Γ φτάνοντας τα 110 μέτρα, κάτι που οδηγεί σε εξαιρετικά αυξημένα επίπεδα παραγόμενης ενέργειας. Με αυτόν τον τρόπο με ελάχιστες Α/Γ είναι δυνατόν να παραχθεί σημαντική ποσότητα ενέργειας, μειώνοντας έτσι τις απαιτήσεις για αυξημένη χρήση γης, μειωμένο αριθμό καλωδίων, μειωμένο κόστος συντήρησης και εν κατακλείδι μειωμένο κόστος επένδυσης. Στα υπεράκτια αιολικά πάρκα λόγω του διαθέσιμου χώρου και χωρίς τους αυστηρούς περιορισμούς σε σχέση με τα χερσαία, χρησιμοποιούνται μεγάλες Α/Γ που αναφέραμε παραπάνω και με αυτό τον τρόπο η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στα υπεράκτια πάρκα είναι σαφώς μεγαλύτερη από τα χερσαία. Όσον αφορά τους τύπους των Α/Γ που ευρέως χρησιμοποιούνται στα υπεράκτια αιολικά πάρκα είναι δύο, η Τύπου 3 και η Τύπου 4.

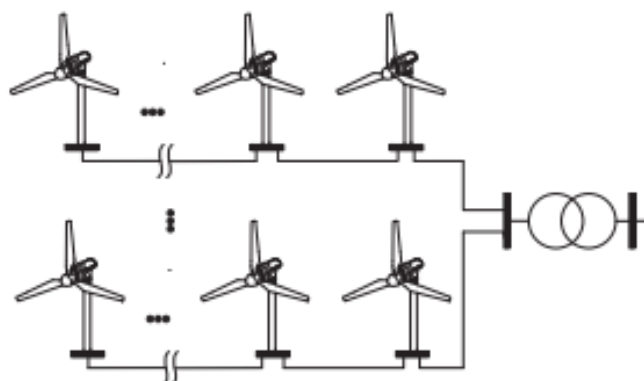
2.3 Συλλεκτήρια συστήματα (collection systems) - AC

Όλες οι Α/Γ ομαδοποιούνται σε διάφορα σχήματα του συλλεκτήριου συστήματος, το οποίο είναι ένα εσωτερικό δίκτυο μέσης τάσης (MT) που συνδέει όλες τις Α/Γ καθώς και το υπεράκτιο υποσταθμό. Ένα τυπικό δίκτυο εναλλασσόμενου ρεύματος μέσης τάσης (AC collection system) βρίσκεται συνήθως σε τάση 30KV ή 36KV και οι κύριες τοπολογίες παρουσιάζονται παρακάτω.

2.3.1 Radial topology.

Η συνηθέστερη και απλούστερη τοπολογία συλλεκτήριου συστήματος είναι η radial, όπου ένα μονό καλώδιο συνδέει μια ομάδα Α/Γ σειριακά. Ο αριθμός των Α/Γ που καταλήγουν σε έναν μετασχηματιστή εξαρτάται από τον περιορισμό της εγκατεστημένης ισχύος και από την ικανότητα μεταφοράς ρεύματος από το καλώδιο. Να σημειώσουμε ότι είναι η οικονομικότερη δομή συλλεκτήριου συστήματος εξαιτίας του μικρού συνολικού μήκους καλωδίου καθώς και από τον απλουστευμένο έλεγχο σε σχέση με τις παρακάτω δομές που θα αναλυθούν. Το μεγαλύτερο μειονέκτημα της συγκεκριμένης δομής είναι η χαμηλή αξιοπιστία, διότι σε πιθανό σφάλμα σε σημείο

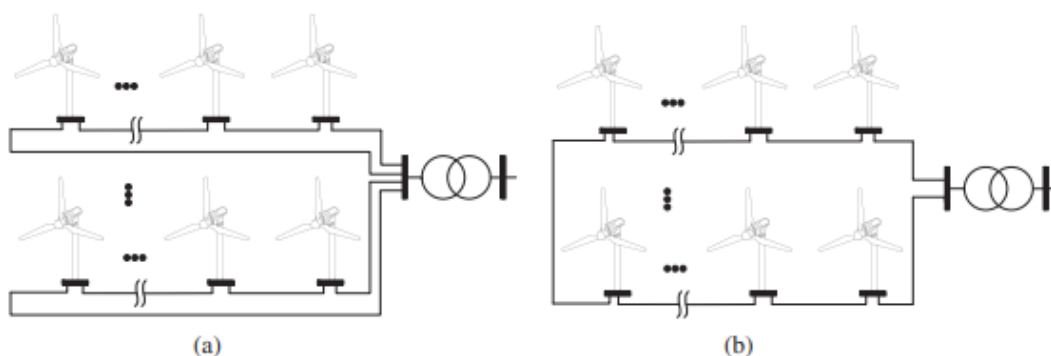
του καλωδίου ή σε διακόπτη ισχύος θα έχει ως αποτέλεσμα την αποκοπή όλων των κατάντη Α/Γ.



Εικόνα 2.5: Radial Topology. [8]

2.3.2. Ring topology.

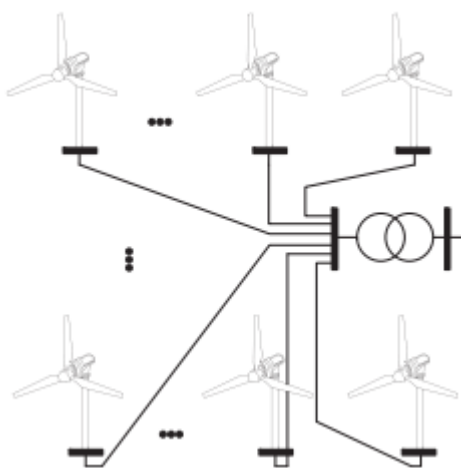
Στην τοπολογία ring η αξιοπιστία αυξάνεται με την χρήση επιπρόσθετων καλωδίων που σχηματίζουν βρόχο στο σημείο συλλογής. Υπάρχουν δύο τύποι string τοπολογιών όπως φαίνεται και στο σχήμα. Στη μια τοπολογία – single -sided ring, ο βρόχος σχηματίζεται προσθέτοντας ένα καλώδιο από την τελευταία Α/Γ μιας σειράς (string) ως το σημείο συλλογής, ενώ στην άλλη τοπολογία – double sided ring, ο βρόχος σχηματίζεται συνδέοντας τις τελευταίες Α/Γ κάθε σειράς μεταξύ τους. Έτσι, σε περίπτωση ενός σφάλματος, η ροή ισχύος μπορεί να ανακατευθυνθεί μέσω άλλης σειράς. Το κόστος όμως στις τοπολογίες αυτές αυξάνεται αρκετά αφού το μήκος των καλωδίων είναι μεγαλύτερο όπως και το μέγεθος αυτών είναι μεγαλύτερο ώστε να διαχειρίζονται ρεύματα δύο κατευθύνσεων.



Εικόνα 2.6: a) Single-sided ring, b) Double- sided ring Topology. [8]

2.3.3. Star topology.

Τελος η τοπολογία star προσφέρει την καλύτερη αξιοπιστία μεν, είναι όμως και η ακριβότερη δε. Κάθε Α/Γ συνδέεται, μέσω καλωδίου μειωμένου μεγέθους, στο σημείο συλλογής, συμβάλλοντας με αυτόν τον τρόπο στην αύξηση του συνολικού μήκους καλωδίου καθώς και του κόστος εγκατάστασης.



Εικόνα 2.7: Star topology . [8]

2.4 Συλλεκτήρια συστήματα συνεχούς ρεύματος – DC

Για την πληρότητα της παρουσίασης θα αναφερθούν συλλεκτήρια συστήματα και διαμορφώσεις σύνδεσης Α/Γ, που προς το παρόν δεν βρίσκουν εφαρμογή αλλά αποτελούν αντικείμενα έρευνας και μελέτης.

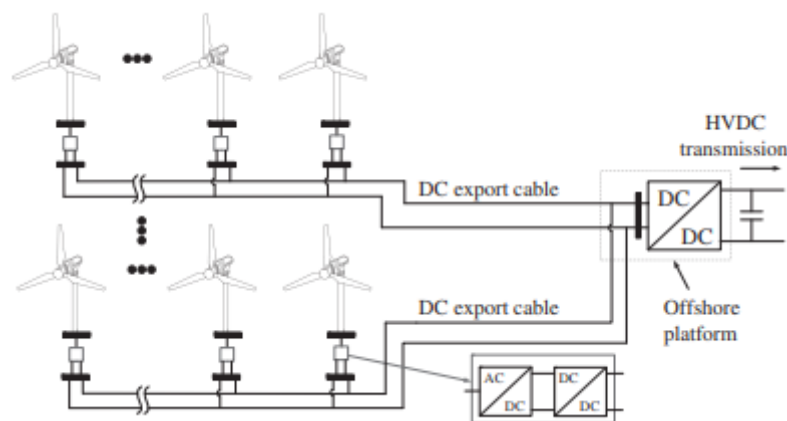
Ένα από τα συγκεκριμένα πεδία είναι το συλλεκτήριο δίκτυο συνεχούς ρεύματος, και οι τοπολογίες είναι παρόμοιες με εκείνες που αναλύθηκαν στο συλλεκτήριο δίκτυο AC. [20],[23]

2.4.1 Τοπολογία με παράλληλη διασύνδεση.

Στην τοπολογία με παράλληλη διασύνδεση κάθε Α/Γ διατηρεί σταθερή τάση στα άκρα της ενώ το ρεύμα που την διαπερνά εξαρτάται από τον αριθμό των Α/Γ που είναι συνδεδεμένες.

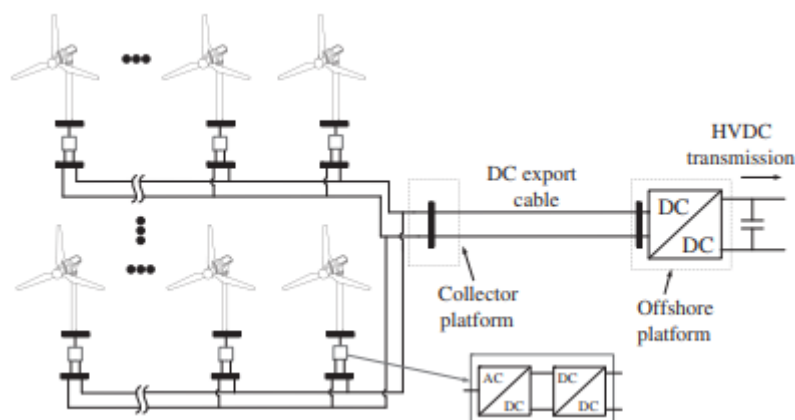
Υπάρχουν αρκετές τοπολογίες παράλληλης διασύνδεσης. Στην παρούσα εργασία θα αναφερθούν τέσσερις πιο συνηθισμένες:

- *Τοπολογία Α:* Παρουσιάζεται στην εικόνα 2.8, όπου η τάση εξόδου κάθε Α/Γ ανορθώνεται από έναν DC/DC μετατροπέα-ανορθωτή και στη συνέχεια η παραγόμενη συνολική ισχύς κάθε συστοιχίας μεταφέρεται μέσω των καλωδίων συνεχούς ρεύματος -DC μέσης τάσης κατευθείαν στον υπεράκτιο HVDC σταθμό. [19]



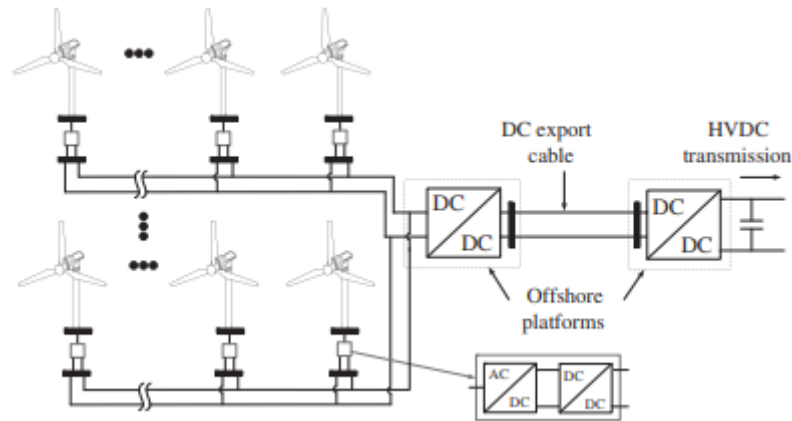
Εικόνα 2.8: Δομή Τοπολογίας Α. [19]

- *Τοπολογία Β:* Παρουσιάζεται στην εικόνα 2.9, όπου η μόνη διαφορά με την τοπολογία Α είναι ότι τα διασυνδετικά καλώδια συνεχούς ρεύματος- DC μέσης τάσης συγκεντρώνονται σε έναν υπεράκτιο σταθμό συλλογής πριν την εξαγωγή της συνολικής ισχύς στον υπεράκτιο HVDC σταθμό. [19]



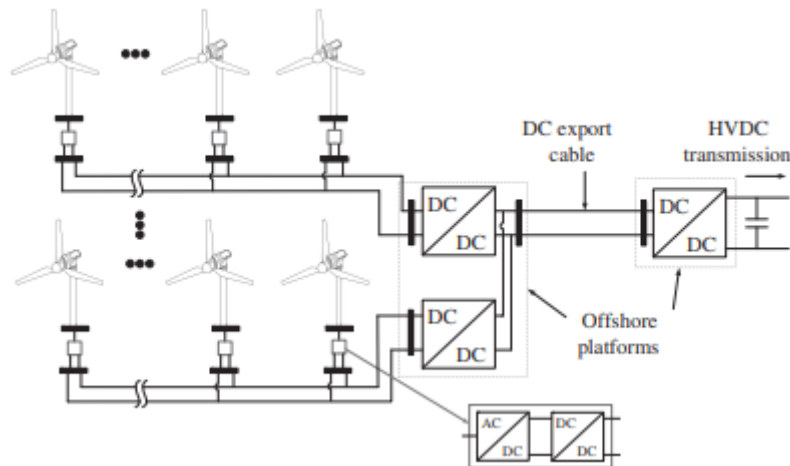
Εικόνα 2.9: Δομή τοπολογίας Β.[19]

- *Τοπολογία Γ*: Παρουσιάζεται στην εικόνα 2.10, όπου για την μείωση των απωλειών κατά την μεταφορά της ισχύος, εγκαθίσταται DC/DC μετατροπέας σε υπεράκτια πλατφόρμα όπου ανυψώνει την τάση DC πριν την μεταφορά στον υπεράκτιο HVDC σταθμό. Στην συγκεκριμένη τοπολογία η τάση της κάθε Α/Γ ανορθώνεται δύο φορές μέχρι τον υπεράκτιο HVDC σταθμό. [19]



Εικόνα 2.10: Δομή τοπολογίας Γ. [19]

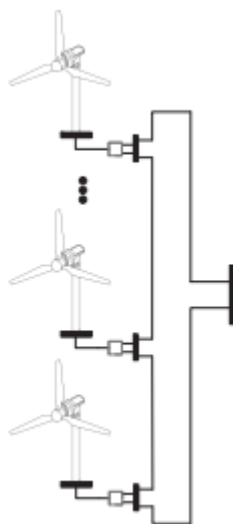
- *Τοπολογία Δ*: Παρουσιάζεται στην εικόνα 2.11, όπου κύριο επίτευγμα στην συγκεκριμένη τοπολογία είναι η αύξηση της αξιοπιστίας αφού κάθε συστοιχία Α/Γ συνδέεται σε ξεχωριστό DC/DC μετατροπέα στην υπεράκτια πλατφόρμα. Έχει όμως το μειονέκτημα ότι απαιτεί υπεράκτια πλατφόρμα αυξημένου μεγέθους. [19]



Εικόνα 2.11: Δομή τοπολογίας Δ. [19]

2.4.2 Τοπολογία DC με σύνδεση σε σειρά.

Στην τοπολογία με σύνδεση σε σειρά (εικόνα 2.12) κάθε Α/Γ μιας συστοιχίας διαρρέεται από κοινό ρεύμα, ενώ η τάση εξαρτάται από το συνολικό αριθμό των Α/Γ που συνδέονται στην συστοιχία. Κύριο μειονέκτημα της συγκεκριμένης τοπολογίας είναι η ανάγκη απαιτητικού ελέγχου.

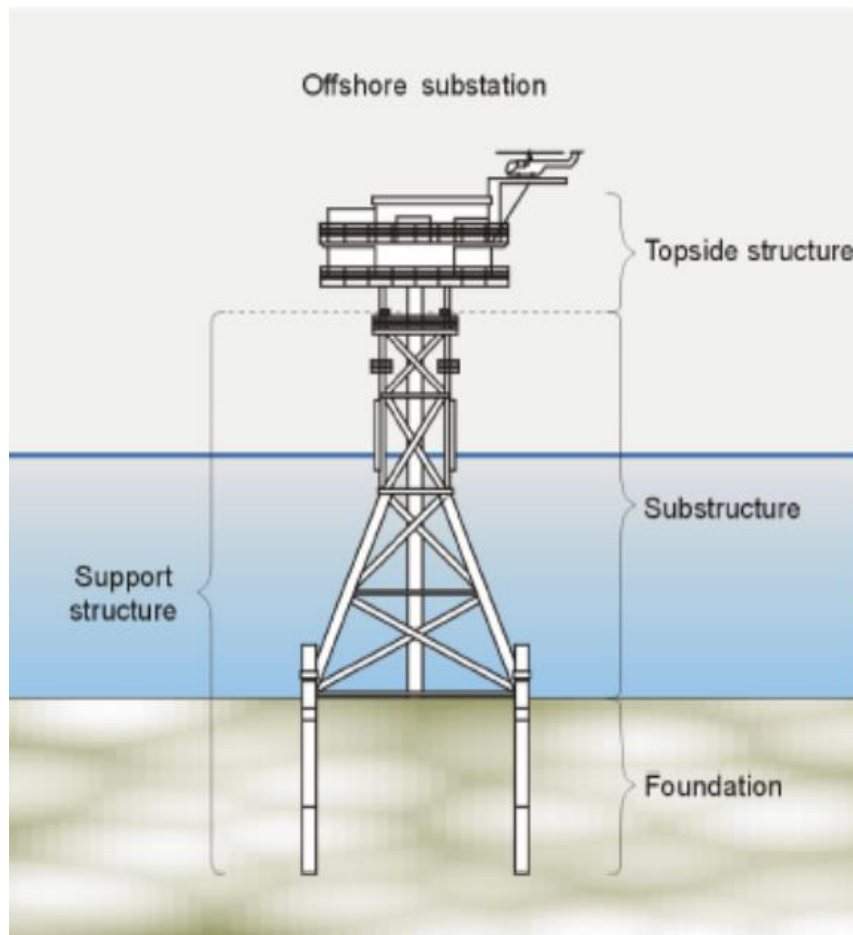


Εικόνα 2.12: Δομή τοπολογίας με σύνδεση σε σειρά.[19]

2.5 Σημείο συλλογής (Collecting point).

Όλη η ισχύς των ομαδοποιημένων Α/Γ συγκεντρώνεται στον υπεράκτιο υποσταθμό πριν εξαχθεί στο δίκτυο. Η δομή του υποσταθμού έχει αρκετά κοινά χαρακτηριστικά με τις πλατφόρμες που χρησιμοποιούνται στην βιομηχανία εξορύξεων πετρελαίου κ φυσικού αερίου. Παρακάτω παρουσιάζεται σχηματικά η δομή αυτή, όπου φαίνεται η θεμελιακή δομή (foundation), η υποδομή (substructure) κ τέλος στο πάνω μέρος αναπαριστάται μια τυπική δομή σε σχήμα ‘κουτιού’. Ο ηλεκτρικός εξοπλισμός που τοποθετείται πάνω στον υπεράκτιο εξοπλισμό διαφέρει ανάλογα με τον τρόπο που θα γίνει η μεταφορά της ισχύος στην στεριά. Έτσι λοιπόν υπάρχει ο HVAC υποσταθμός όπου μεταφέρεται η ισχύς με εναλλασσόμενο ρεύμα, αφού ανυψωθεί πρώτα η τάση από μέση σε υψηλή. Στον HVAC υποσταθμό λαμβάνουν χώρα διάφοροι τύποι μετασχηματιστών, είδη σύνθετων αντιστάσεων, διακόπτες μέσης και υψηλής τάσης, κατάλληλος εξοπλισμός προστασίας κλπ. Θα μπορούσαμε να πούμε ότι ο υπεράκτιος υποσταθμός HVAC περιλαμβάνει παρόμοιο ηλεκτρολογικό εξοπλισμό με χερσαίο

υποσταθμό μέσης/υψηλής τάσης. Όσον αφορά την περίπτωση να έχει επιλεγεί συνεχές ρεύμα για την μεταφορά, τότε υφίσταται HVDC υποσταθμός. Στον υποσταθμό HVDC ο κύριος σκοπός είναι η μετατροπή του εναλλασσόμενου ρεύματος (AC) σε συνεχές (DC). Επιπρόσθετα στοιχεία ηλεκτρολογικού εξοπλισμού είναι οι μετατροπείς ισχύος, DC φίλτρα, πηνία εξομάλυνσης. Να σημειωθεί επίσης ότι ο υπεράκτιος υποσταθμός μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν η βάση για την κατασκευή, συντήρηση και κάθε είδους επιθεώρησης του υπεράκτιου αιολικού πάρκου. [7]

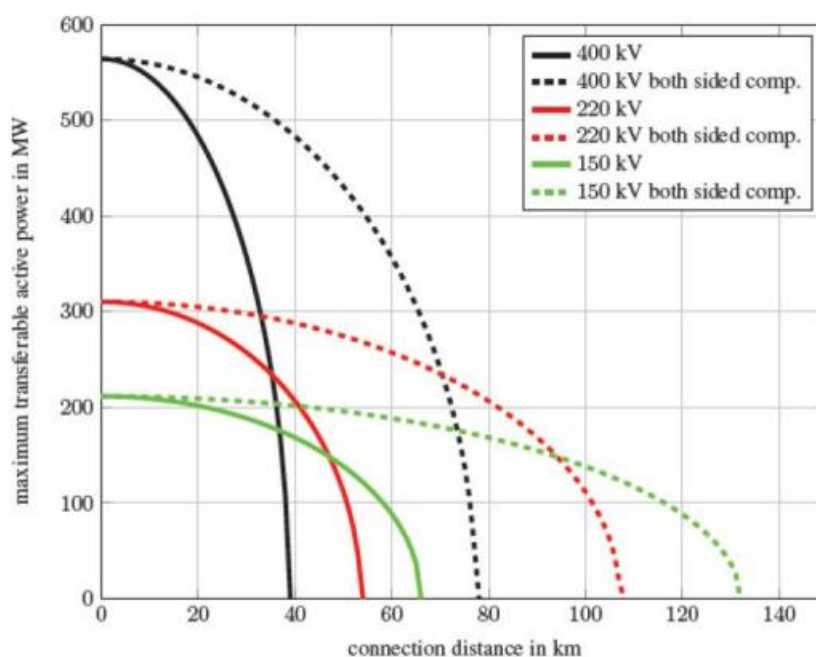


Εικόνα 2.13: Δομή υπεράκτιου υποσταθμού. [7]

Αιολικά πάρκα που βρίσκονται σε κοντινή απόσταση, 15 km από την στεριά, δύναται να μην απαιτούν υπεράκτιο υποσταθμό με μετασχηματιστή ανύψωσης εάν είναι μικρότερης εγκατεστημένης ισχύς από 100 MW ή η τάση στο εσωτερικό δίκτυο εναρμονίζεται με την τάση του δικτύου στο σημείο διασύνδεσης. Τέλος είναι σημαντικό να αναφέρουμε ότι σε περίπτωση που απαιτηθεί υπεράκτιος υποσταθμός, οι προδιαγραφές σχεδίασής του είναι η ύπαρξη χώρου που θα πρέπει να ισούται προσεγγιστικά με 200m^2 ανά 100 MW εγκατεστημένης ισχύος. Εάν η ισχύς είναι μεγάλη, ίσως χρειαστεί και δεύτερος υποσταθμός. [7]

2.6 Γραμμές μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας.

Ένα ζήτημα όπως αναφέραμε και παραπάνω, που απασχολεί τους μελετητές υπεράκτιων αιολικών πάρκων είναι ο τρόπος που θα γίνει η διασύνδεση του πάρκου με την στεριά. Αν η απόσταση αυτή ξεπερνάει τα 15 km παύει να υπάρχει η λύση της μεταφοράς σε επίπεδο μέσης τάσης, έτσι σίγουρα απαιτείται υπεράκτιος υποσταθμός που θα ανυψώσει την τάση σε υψηλή. Οι τιμές της υψηλής τάσης κυμαίνεται μεταξύ 110-550 KV. Στη συνέχεια σημαντική απόφαση του μελετητή είναι να η επιλογή εναλλασσόμενου ή συνεχούς ρεύματος. Καθοριστικοί παράμετροι σε αυτή την επιλογή παίζει η χωρητικότητα του καλωδίου που εξαρτάται από το συνολικό μήκος του AC καλωδίου και την εγκατεστημένη ισχύ. Αύξηση χωρητικότητας σημαίνει άεργο ισχύ που οδηγεί σε απώλειες ισχύος, αφού η ανάγκη για άεργο ισχύ μειώνει τον 'χώρο' για ενεργό. Για την επίλυση του παραπάνω προβλήματος, επιτακτική ανάγκη είναι η αντιστάθμιση αέργου ισχύος σε διάφορα σημεία κατά μήκος της γραμμής μεταφοράς, όμως σε αρκετές περιπτώσεις λόγω τεχνικών δυσκολιών η αντιστάθμιση είναι δυνατή μόνο στα δύο άκρα της γραμμής (εικόνα 2.14).



Εικόνα 2.14: Μέγιστη μεταφερόμενη ενεργό ισχύ σε σχέση με την απόσταση της σύνδεσης.[9]

Παρατηρούμε ότι περα τα 80 km, και με αντιστάθμιση αέργου στις δύο πλευρες, η λύση της HVAC μεταφοράς γίνεται αρκετά περιοριστική.

Έτσι λοιπόν για αποστάσεις 50 km και παραπάνω θα πρέπει να ληφθούν σοβαρά υπόψη οι απώλειες ισχύος που θα προκύψουν σε περίπτωση HVAC μεταφοράς. Στην περίπτωση που χρησιμοποιηθεί HVDC καλώδιο η κύρια διαφορά είναι ότι οι απώλειες ισχύος δεν αυξάνονται με το μήκος της γραμμής. Σίγουρα όμως έχουν ένα πιο

αυξημένο αρχικό κόστος. Γίνεται αντιληπτό λοιπόν ότι για υπεράκτια αιολικά πάρκα σε μεγάλη απόσταση από την στεριά η λύση της HVDC μεταφοράς είναι σε θέση να δώσει λύσεις. Ο παρακάτω τύπος μας δίνει ενδεικτικά την κρίσιμη απόσταση που πηγαίνουμε από χρήση HVAC σε HVDC:

$$L = \frac{I}{U \omega C'} \quad (2.1)$$

Όπου $\omega = 2\pi f$ είναι η γωνιακή ταχύτητα, C' η χωρητικότητα του καλωδίου ανά μονάδου μήκους, δίνεται από τις προδιαγραφές του κατασκευαστή, U η ονομαστική τάση του και I το ονομαστικό ρεύμα λειτουργίας του καλωδίου.[6]

2.7 Καλώδια

Εναλλασσόμενο Ρεύμα(AC)

Τόσο τα καλώδια των κυκλωμάτων μέσης τάσης στο συλλεκτήριο δίκτυο, όσο και τα καλώδια του συστήματος μεταφοράς υψηλής κυρίως τάσης, θάβονται στο βυθό της θάλασσας. Η AC ισχύς μεταφέρεται σε μεγάλο βαθμό από καλώδια τύπου Cross-linked polyethylene (XLPE) cables. Άλλη μια τεχνολογία που χρησιμοποιείται σε μικρότερο βαθμό είναι η High Temperature Superconducting(HTS), παρουσιάζει όμως περιορισμούς λόγω των κρυογονικών συστημάτων. Τα καλώδια μπορούν να έχουν μονό πυρήνα(single core) ή τριπλό πυρήνα (triple core) (εικόνα 2.15). Στην διαμόρφωση με τους τρεις πυρήνες να σημειώσουμε ότι τα μαγνητικά πεδία αλληλοαναιρούνται, με αποτέλεσμα την μείωση των απωλειών ισχύος. Επίσης το κόστος εγκατάστασης καλωδίου του τριπλού πυρήνα είναι λιγότερο από το κόστος με μονό πυρήνα. Στο μειωμένο κόστος εγκατάστασης του καλωδίου τριπλού πυρήνα συγκαταλέγεται και η τοποθέτηση οπτικής ίνας όπως φαίνεται στο σχήμα για την επικοινωνία, εξαιρίζοντας έτσι την ανάγκη για έξτρα τοποθέτηση καλωδίου οπτικής ίνας. Σε εφαρμογές υψηλής τάσης συνηθίζεται να χρησιμοποιούνται καλώδια μονού πυρήνα εξαιτίας της καλύτερης απαγωγής της θερμότητας, ενώ σε εφαρμογές μέσης τάσης κυρίως καλώδια τριπλού πυρήνα. Ένα άλλο πλεονέκτημα των καλωδίων μονού πυρήνα είναι η αντικατάσταση σε περίπτωση βλάβης ενός αγωγού, σε σχέση με τον τριπλό πυρήνα που θα πρέπει να αντικατασταθεί όλο το καλώδιο. [11],[17]

Συνεχές ρεύμα (DC)

Όσον αφορά τις διασυνδέσεις HVDC που βρίσκουν ευρεία εφαρμογή από το 1950 σε μεταφορά μεσαίας και μεγάλης ισχύος (100MW-1000MW), τα καλώδια που χρησιμοποιούνται συνήθως είναι δύο τύπων, τα XLPE που αναφέραμε παραπάνω και τα καλώδια Mass Impregnated (MI). Κύρια διαφορά μεταξύ των δύο τύπων καλωδίων είναι ότι τα MI επιλέγονται για πόντιση σε βαθύτερα νερά, περίπου με μέγιστο βάθος

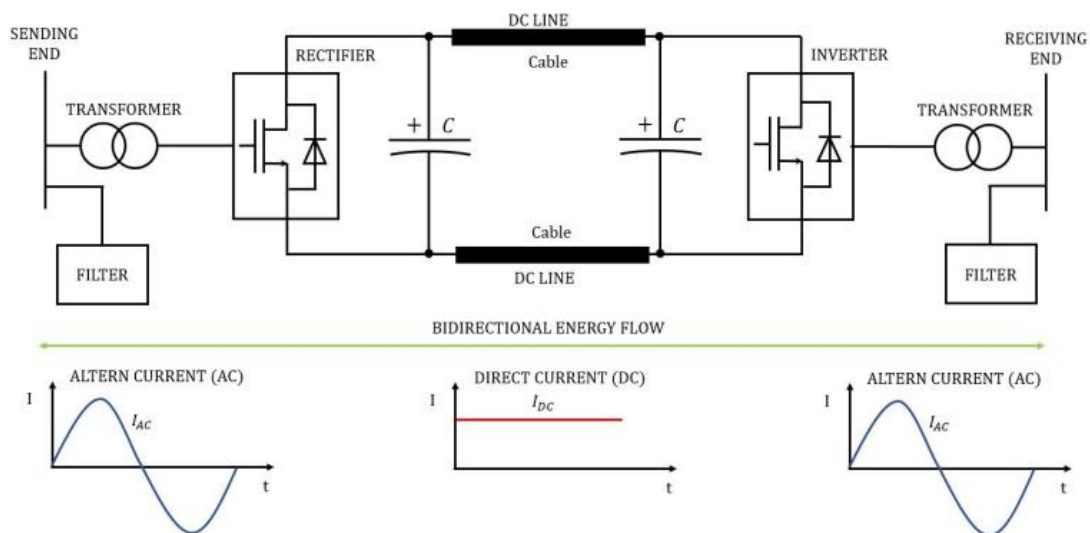
τα 1600μ., στο μάλλον θα αγγίζει τα 2000μ. Τα XLPE ποντίζονται σε μέγιστο βάθος έως 1000μ. Υπάρχει και ένας τρίτος τύπος καλωδίων, τα Self-contained fluid, που χρησιμοποιούνται σε περιπτώσεις μεταφοράς πολύ υψηλής τάσης αλλά σε κοντινές αποστάσεις, λόγω των υδραυλικών περιορισμών. [11]



Εικόνα 2.15: Single-core and three-core ABB XLPE cables.

2.8 HighVoltage Direct Current (HVDC) διασύνδεση.

Μια HVDC μεταφορά είναι ένα σύστημα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας με συνεχές ρεύμα σε υψηλή τάση. Ένας HVDC σύνδεσμος (link) πραγματοποιεί την διασύνδεση δύο τριφασικών συστημάτων AC μέσω ηλεκτρικής σύνδεσης συνεχούς ρεύματος (εικόνα 2.16). Στην περίπτωση ανάγκης μεταφοράς ισχύος με DC (συνεχές ρεύμα) μεταξύ δύο συστημάτων AC (εναλλασσόμενου ρεύματος), η μετατροπή AC-DC και αντίστροφα DC-AC, πραγματοποιείται σε σταθμούς μετατροπής. Οι σταθμοί βρίσκονται στα δύο άκρα της DC γραμμής μεταφοράς, και ο ένας κάνει την μετατροπή AC-DC (ανορθωτής) ώστε να γίνει η HVDC μεταφορά, και ο άλλος εκτελεί την μετατροπή DC-AC (αντιστροφέας) ώστε να γίνει η ενσωμάτωση στο εναλλασσόμενο σύστημα μεταφοράς της στεριάς. Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται μια ενδεικτική δομή HVDC διασύνδεσης. [19]



Εικόνα 2.16: Ενδεικτικό σχέδιο διασύνδεσης HVDC μεταξύ δύο σταθμών μετατροπής.[20]

Συνήθως, σε τέτοιες τοπολογίες ο ανορθωτής είναι το στοιχείο που διοχετεύει την ισχύ στο δίκτυο, στην περίπτωση μας την ισχύ από το υπεράκτιο αιολικό πάρκο, ενώ ο αντιστροφέας λαμβάνει την ισχύ, η οποία στην περίπτωση εγγέεται στο ηλεκτρικό δίκτυο. Αντίστροφη πορεία είναι μη συνηθισμένο φαινόμενο.

2.8.1 Ιστορική αναδρομή HVDC.

Η μεταφορά ηλεκτρικής ισχύος αρχικά γινόταν με την χρήση της τεχνολογίας συνεχούς ρεύματος (DC) όμως σύντομα αντικαταστάθηκε από την τεχνολογία εναλλασσόμενου ρεύματος (AC). Ο Thomas Edison ήταν εκείνος που έλαβε το βραβείο ευρεσιτεχνίας για την τεχνολογία συνεχούς ρεύματος.

Το μεγαλύτερο πρόβλημα που υπήρχε με την χρήση του συνεχούς ρεύματος ήταν ότι για μεγάλες αποστάσεις μεταφοράς ισχύος απαιτούνταν αγωγοί χαλκού μεγάλης διατομής, δεδομένου ότι το επίπεδο τάσης ήταν τα 110 V, λύση που ήταν πολύ κοστοβόρα και επίσης οι απώλειες ισχύος για την απαραίτητη απαγωγή θερμότητας ήταν σημαντικές.

Το 1886 ο George Westinghouse στηρίχθηκε στην θεωρία του Nikola Tesla και ίδρυσε την Westinghouse Electric, εταιρεία που χρησιμοποίησε για την μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας την τεχνολογία εναλλασσόμενου ρεύματος (AC). Ο εμπνευστής της ιδέας και υποστηρικτής της AC τεχνολογίας Nikola Tesla, υποστήριξε ότι η λύση για την αποδοτική μεταφορά ισχύος σε μεγάλες αποστάσεις επιτυγχάνεται με υψηλά επίπεδα τάσης έτσι ώστε να χρειάζεται χαμηλής έντασης ρεύμα, μειώνοντας έτσι τις απώλειες. Οι αναγκαίες αλλαγές στα επίπεδα της τάσης πραγματοποιούνταν, όπως και σήμερα, από τους μετασχηματιστές, τεχνολογία δοκιμασμένη και σχετικά οικονομική. Αντίθετα για την αλλαγή επιπέδων τάσης στην τεχνολογία DC απαιτούνται ηλεκτρονικά ισχύος, λύση που ειδικά παλιότερα δεν υφίσταται.

Ένας επιπλέον σημαντικός λόγος που βοήθησε στην επικράτηση του AC ρεύματος ήταν η δυνατότητα ενός απλού διακόπτη ισχύος να ‘ανοίξει’ το κύκλωμα αν χρειαστεί εύκολα αφού το εναλλασσόμενο ρεύμα περνάει από το μηδέν, σε αντίθεση με το συνεχές που έχει σταθερή τιμή και απαιτείται αυξημένη δυνατότητα απομόνωσης.

Εξαιτίας των παραπάνω πλεονεκτημάτων που αναφέρθηκαν, στις αρχές της δεκαετίας του 1890 η τεχνολογία εναλλασσόμενου ρεύματος κέρδισε την ‘μάχη’ και έτσι καθιερώθηκε έναντι του συνεχούς.

Αργότερα μπαίνοντας στον 19^ο αιώνα αναπτύχθηκαν τεχνολογίες όσον αφορά τις βαλβίδες τόξου υδραργύρου, που βοήθησαν στην μετατροπή AC-DC και αντίστροφα, φέρνοντας την τεχνολογία συνεχούς ρεύματος ξανά στο προσκήνιο. Η αλληλουχία των διαδικασιών που λάμβαναν χώρα στην μεταφορά με DC ρεύμα ήταν αρχικά η αύξηση στο επίπεδο της τάσης μέσω του κλασικού μετασχηματιστή, στην συνέχεια η μετατροπή AC-DC, και τέλος η αντίστροφη μετατροπή DC-AC.

Η πρώτη διασύνδεση με την χρήση τεχνολογίας HVDC έλαβε χώρα στη Σουηδία και συγκεκριμένα στην διασύνδεση του νησιού Gotland με το ηπειρωτικό σύστημα. Το υποβρύχιο καλώδιο που χρησιμοποιήθηκε ήταν μήκους 100 χιλιομέτρων, η μεταφερόμενη ισχύς 20 MW, το επίπεδο της τάσης 100 KV και το ονομαστικό ρεύμα 200 A. Η έκταση των σταθμών μετατροπής ήταν πολύ μεγάλη με αποτέλεσμα το κόστος συντήρησης να είναι αυξημένο.

Στη συνέχεια με την ανάπτυξη των θυρίστορ (thyristor) η απαιτούμενη έκταση των σταθμών μετατροπής μειώθηκε και μαζί και το κόστος. Η πρώτη διασύνδεση με την χρήση της τεχνολογίας των θυρίστορ πραγματοποιήθηκε το 1972, όπου διασυνδέθηκαν δύο ασύγχρονα συστήματα, Quebec and New Brunswick, με την ισχύς της διασύνδεσης να φτάνει τα 320 MW και το επίπεδο της τάσης να είναι ίσο με 160 KV.

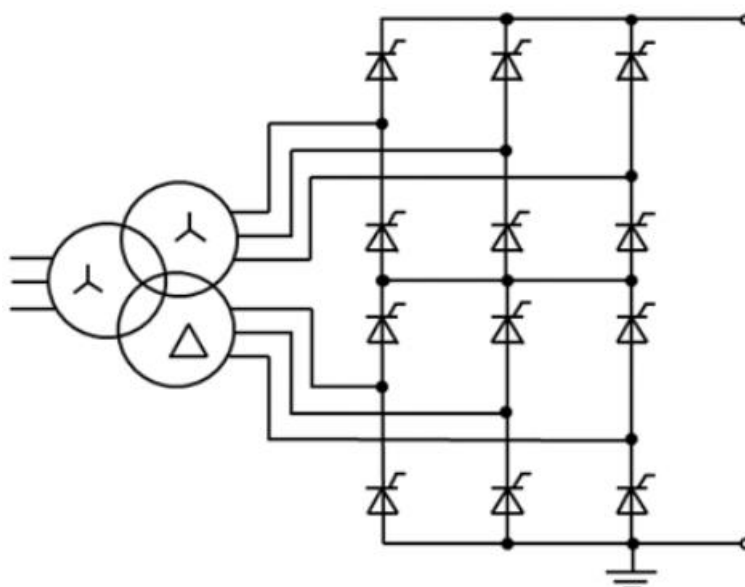
Μέχρι και το 2000 η τεχνολογία LCC (Line Commutated Converters) με θυρίστορ μονοπωλούσε στην αγορά. Στη συνέχεια η πρόοδος των ηλεκτρονικών ισχύος οδήγησε στην ανάπτυξη της VSC (Voltage Source Converters) τεχνολογίας και έτσι σήμερα υπάρχει η επιλογή του μελετητή να επιλέξει ανάμεσα στις δύο αυτές τεχνολογίες ανάλογα με τις ανάγκες του κάθε έργου. [19]

2.8.2 Κύριες τεχνολογίες μετατροπής στην HVDC διασύνδεση.

Οι τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται σε HVDC διασυνδέσεις στηρίζονται ουσιαστικά σε δύο είδη μετατροπέων, τους LLC (Line Commutated Converter- Μετατροπέας Φυσικής Μεταγωγής) και τους VSC (Μετατροπέας Πηγής Τάσης).

A) Μετατροπέας Φυσικής Μεταγωγής - Line Commutated Converter (LCC).

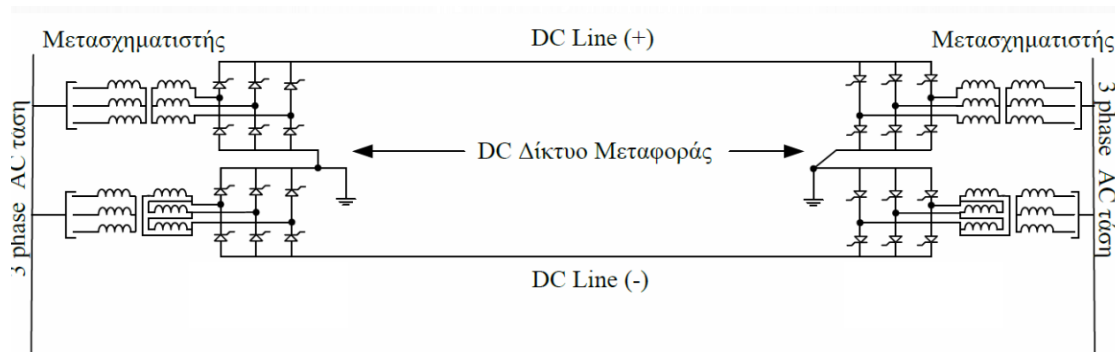
Η τεχνολογία HVDC-LCC αποτελεί την παλαιότερη τεχνολογία μεταφοράς με συνεχές ρεύμα και πρωτοεμφανίστηκε γύρω στο 1950. Μέχρι να εμφανιστεί η τεχνολογία HVDC-VSC, η HVDC-LCC κυριαρχούσε, ενώ μέχρι και σήμερα αποτελεί ίσως την καλύτερη επιλογή για διασυνδέσεις άνω των 800-1000 MW. Η τεχνολογία LCC βασίζεται στην χρήση κυρίως εξαπαλμικών μετατροπέων αποτελούμενων από θυρίστορ. Είναι γνωστό ότι στα θυρίστορ είναι δυνατή η ελεγχόμενη έναυση των ημιαγωγών όμως όχι η σβέση τους. Θα δούμε παρακάτω ότι αυτή είναι η κύρια διαφορά με την τεχνολογία VSC, όπου ο έλεγχος γίνεται και στην σβέση με την χρήση IGBT. Παρουσιάζεται παρακάτω ενδεικτικό σχήμα τοπολογίας μετατροπέα με θυρίστορ. Να σημειώσουμε ότι δύο εξαπαλμικοί μετατροπείς συνδέονται σε σειρά με αποτέλεσμα να δημιουργηθεί δωδεκαπαλμικός μετατροπέας. [10]



Εικόνα 2.17: Βασική τοπολογία μετατροπέα με θυρίστορ. [10]

Βασικό χαρακτηριστικό στα θυρίστορ είναι η κατανάλωση αέργου ισχύος, αφού πάντα η τάση προπορεύεται του ρεύματος. Έτσι λοιπόν θα πρέπει να υπάρχει αντιστάθμιση, η οποία στην HVDC LCC διασύνδεση επιτυγχάνεται συνήθως με STATCOM ή πυκνωτές και στους δύο σταθμούς μετατροπέων, στα δύο άκρα της γραμμής. Θα αναφερθούν παρακάτω, εφόσον παρουσιαστεί και η τεχνολογία VSC, επιπρόσθετα

πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της LCC τεχνολογίας. Στην παρακάτω εικόνα (2.18) παρουσιάζεται μια ενδεικτική δομή διασύνδεσης με τεχνολογία HVDC-LCC.

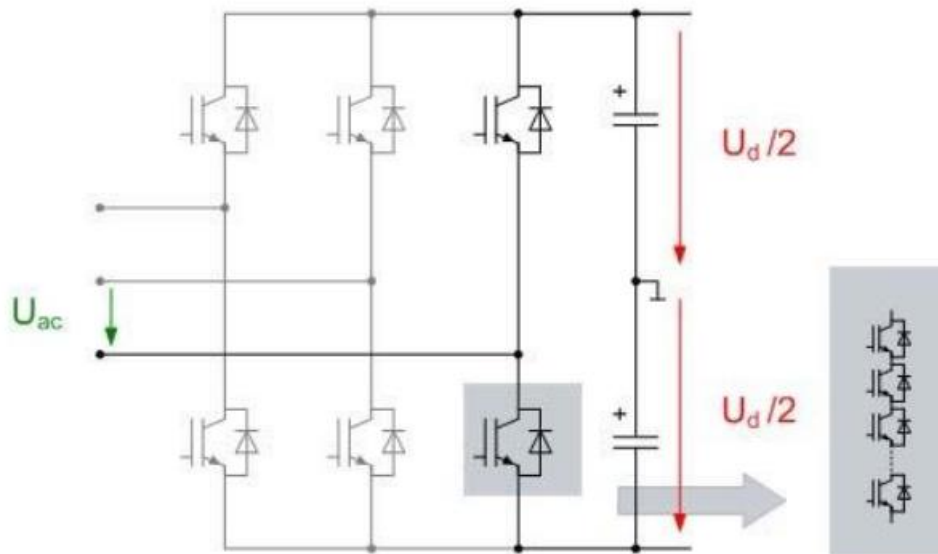


Εικόνα (2.18): Ενδεικτική δομή διασύνδεσης με τεχνολογία HVDC LCC. [28]

B) Μετατροπέας Πηγής Τάσης (Voltage Source Converter -VSC)

Η αρχή λειτουργίας του μετατροπέα VSC (πηγής τάσης) βασίζεται σε ελεγχόμενες συσκευές ημιαγωγών, με δυνατότητα έναυσης και σβέσης τους. Δίνεται λοιπόν η δυνατότητα για έλεγχο της μεταγωγής τους ανά πάσα στιγμή και μάλιστα χωρίς την ανάγκη ύπαρξης εξωτερικών πηγών, αλλά με χρήση βοηθητικής τάσης. Οι ελεγχόμενες συσκευές που χρησιμοποιούνται στην τεχνολογία VSC είναι συσκευές self-commutating, όπως GTO (Gate Turn-Off Thyristor) ή IGBT (Insulated Gate Bipolar Thyristor). Οι ημιαγωγοί αυτοί είναι ικανοί να ανοίγουν και να κλείνουν την ροή ρεύματος μέσω σημάτων ελέγχου.

Όπως προαναφέραμε οι εναλλαγές στην μεταγωγή των ημιαγωγών αυτών είναι πλήρως ελεγχόμενες, κάτι που δίνει την δυνατότητα για ανεξάρτητο έλεγχο ενεργού και αέργου ισχύος που είναι πολύ σημαντικό. Μπορούμε να πετύχουμε τις επιθυμητές τάσεις που χρειάζονται και επίσης οι παραπάνω διατάξεις είναι σε θέση να δημιουργήσουν δίκτυο από το ‘μηδέν’ (black-start), παρόμοια με μια σύγχρονη μηχανή. Επιπλέον, δεν απαιτείται η αναστροφή της πολικότητας για την αναστροφή της ισχύος, και τέλος τα φίλτρα που θα πρέπει να χρησιμοποιηθούν είναι μικρότερα σε σχέση με άλλες τεχνολογίες μετατροπέων. [10]

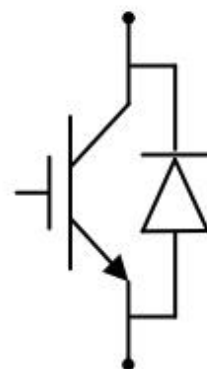
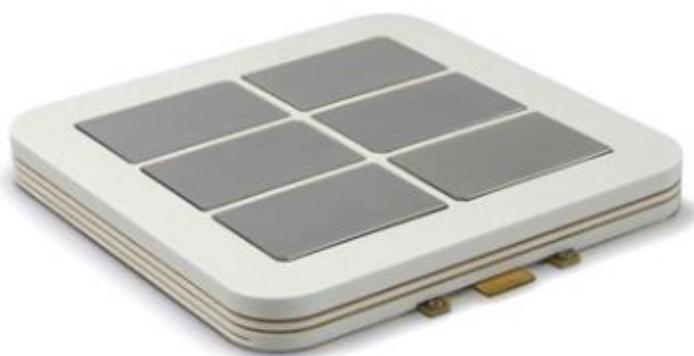


Εικόνα 2.18: Βασική τοπολογία μετατροπέα με IGBT. [10]

Το IGBT αποτελεί το κύριο στοιχείο ενός VSC μετατροπέα. Σχηματίζεται από BJT (Bipolar Junction Transistor) και ένα MOSFET(Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor).

Τα κύρια πλεονεκτήματα των IGBTs σε σχέση με τα θυρίστορ που χρησιμοποιούνται στην LCC τεχνολογία είναι τα εξής:

- Ενεργός έλεγχος (Active control) ανταλλαγής τάσης.
- Χαμηλή ενέργεια για τον έλεγχο της συσκευής.
- Ικανότητα διακοπής αγωγής ακόμα και σε βραχυκύκλωμα.
- Υψηλή διακοπτική συχνότητα, υψηλότερες συχνότητες γύρω στα 20kHz.



Εικόνα 2.19: Δομή IGBT4.5 kV [19]

2.8.2 Τοπολογίες τεχνολογίας Voltage Source Converter (VSC).

Αρχικά για την τεχνολογία HVDC-VSC χρησιμοποιήθηκε η τοπολογία δυο επιπέδων μετατροπέα (two level converter) όπου το αρμονικό περιεχόμενο δεν ήταν αμελητέο και για αυτό τον λόγο τα παθητικά φίλτρα ήταν αναγκαία ώστε να βελτιωθεί η ποιότητα ισχύος και η τάση που παράγεται να αφομοιωθεί σαν ημιτονοειδή. Επόμενο στάδιο ήταν οι μετατροπείς τριών επιπέδων (three level converter) όπου το αρμονικό περιεχόμενο μειώθηκε με αποτέλεσμα να μειωθεί και η ανάγκη για αυξημένα σε μέγεθος παθητικά φίλτρα. Σήμερα η αιχμή της τεχνολογίας είναι η πολυεπίπεδοι μετατροπείς (modular multi converter – MMC) όπου οι ευελιξία που παρέχει ο έλεγχος των πολλών βηματικών τάσεων που παράγονται από τους μετατροπείς είναι ικανή να δώσει σχεδόν ιδανικό ημίτονο τάσης μειώνοντας το αρμονικό περιεχόμενο. Αποτέλεσμα του μειωμένου αρμονικού περιεχομένου είναι η ανάγκη για μικρα παθητικά φίλτρα, το οποίο είναι και το βασικό πλεονέκτημα της τεχνολογίας αυτής. Κύριο μειονέκτημα της τεχνολογίας είναι οι διακοπτικές απώλειες αφού ο αριθμός των ημιαγωγικών στοιχείων που λαμβάνουν χώρα είναι μεγάλος. [18]

2.8.3 Σύγκριση μετατροπέα LCC με μετατροπέα VSC.

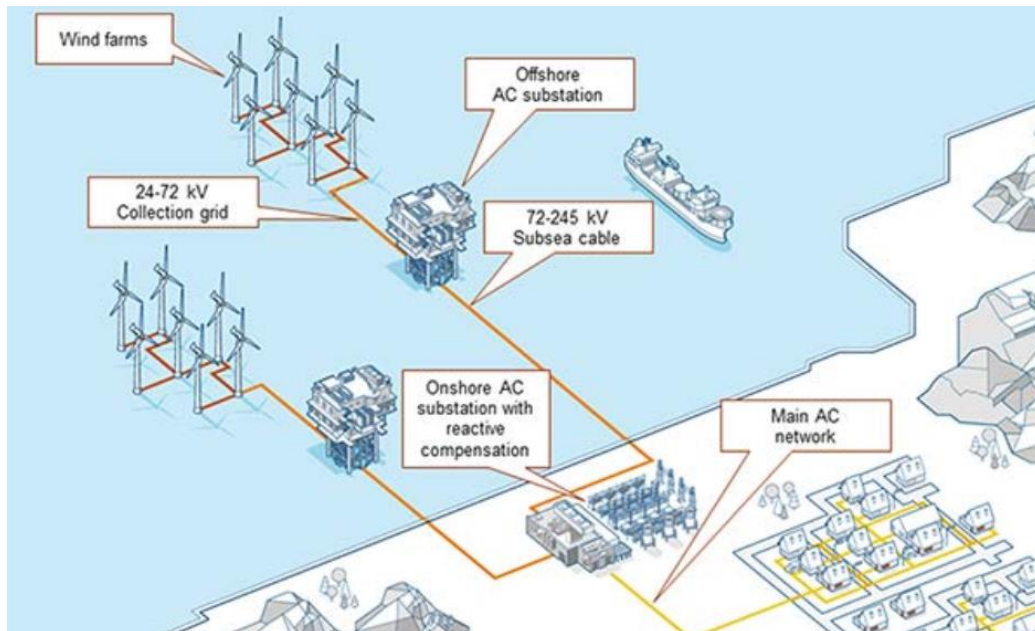
Σε αυτό το σημείο θα συγκρίνουμε τις δύο παραπάνω τεχνολογίες, LCC και VSC, παρουσιάζοντας πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα.

LCC	VSC
Μεγαλύτερη ισχύ και τάση	Ανεξάρτητος έλεγχος ενεργού-αέργου ισχύος
Χαμηλότερες απώλειες	Μικρότερος χώρος
Ωριμη και δοκιμασμένη τεχνολογία	Δυνατότητα δημιουργίας δικτύου
Χαμηλότερο κόστος	Σύνδεση με κάθε (και ασθενές) δίκτυο
Κατανάλωση αέργου ισχύος	Υψηλότερες απώλειες
Υψηλό αρμονικό περιεχόμενο	Δυνατότητα για χρήση XLPE καλωδίου
Μεγαλύτερο φίλτρα-περισσότερος χώρος	Μικρότερα φίλτρα
Σύνθετη αναστροφή ισχύος	Απλή αναστροφή ισχύος
Σταθερή πολικότητα συνεχούς ρεύματος	Σταθερή πολικότητα συνεχούς ρεύματος
Καλώδια βασισμένα στο λάδι	Δυνατότητα για χρήση XLPE καλωδίου
Απαίτηση για ισχυρό AC δίκτυο	Καλύτερη δυναμική απόκριση
Κίνδυνος αποτυχίας μεταγωγής	Ιδανική για παράλληλη σύνδεση ημιαγωγών

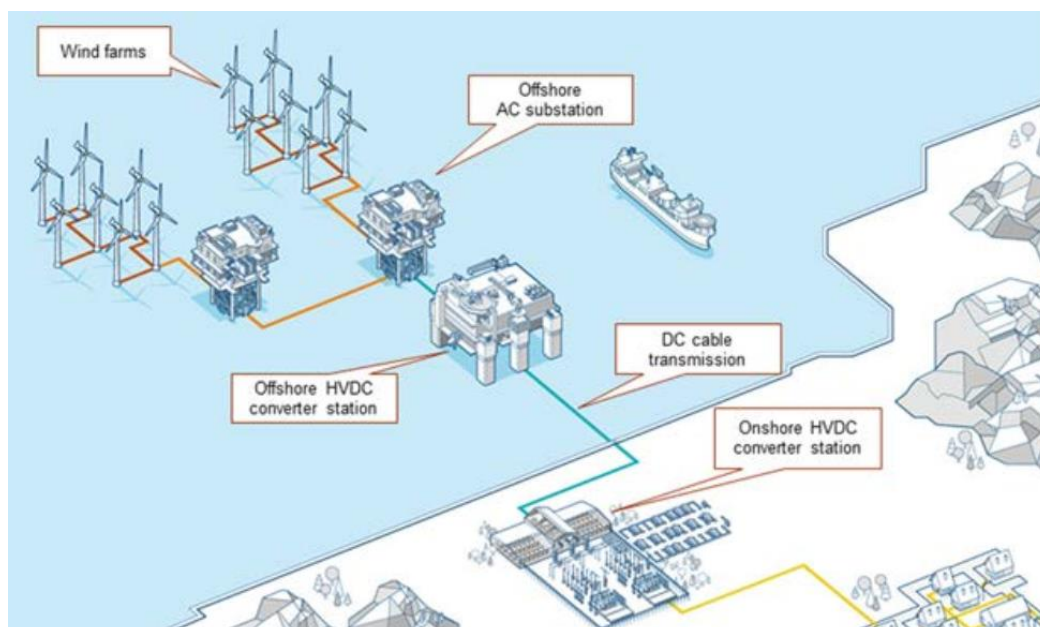
Πίνακας 2.1: Σύγκριση LCC με VSC.

2.9 Σύγκριση HVAC μεταφοράς με HVDC μεταφορά.

Αφού έγινε η ανάλυση των τεχνολογιών των δύο τύπων μεταφοράς, HVAC και HVDC, καθώς και των επιμέρους στοιχείων τους, είναι πλέον δυνατόν να γίνει ολιστική σύγκριση των τεχνολογιών αυτών, αφού πρώτα παρουσιαστούν δύο ενδεικτικές δομές των δύο συστημάτων.



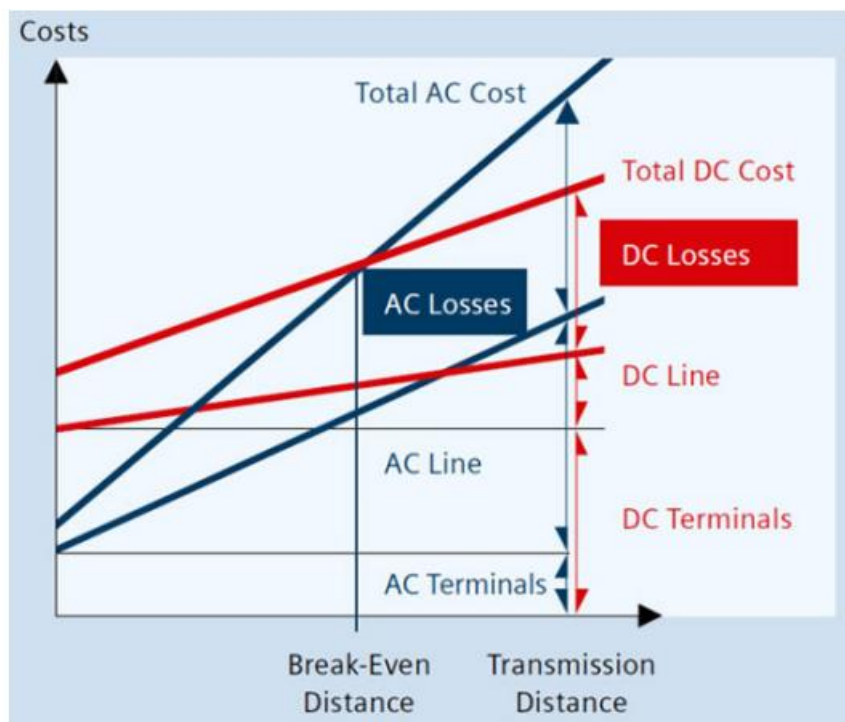
Εικόνα 2.20: HVAC διασύνδεση υπεράκτιου Α/Π.[9]



Εικόνα 2.21: HVDC διασύνδεση υπεράκτιου Α/Π.[9]

2.9.1 Τεχνοοικονομικά κριτήρια.

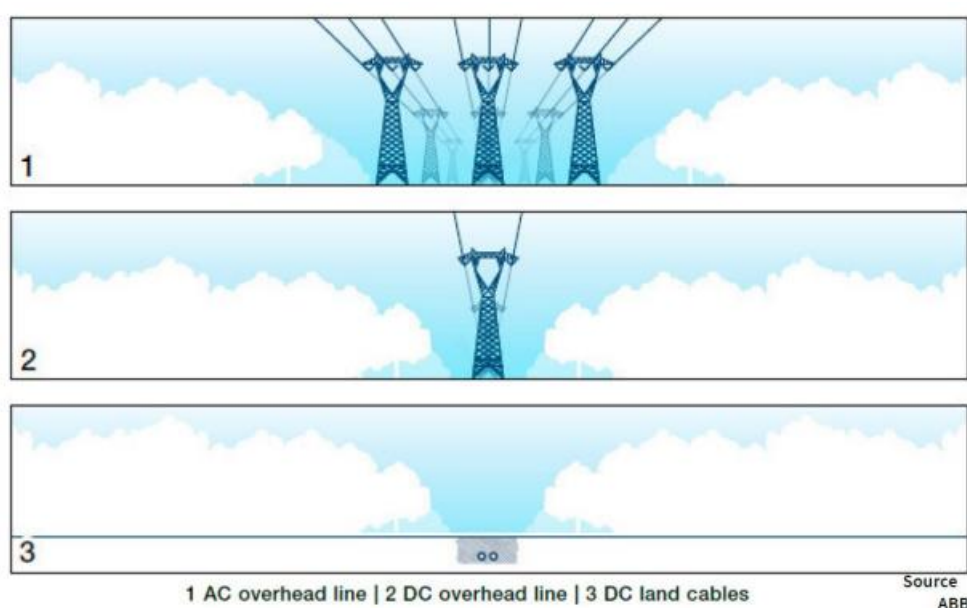
Όσον αφορά την οικονομική οπτική, αρχικά να πούμε ότι το αρχικό κόστος της AC μεταφοράς είναι χαμηλότερο σε σχέση με την DC. Αυτό συμβαίνει διότι το κόστος σταθμών υποσταθμών, μετασχηματιστών, προστασιών, κ.α. είναι υψηλότερο στην DC μεταφορά εξαιτίας της ύπαρξης του μετατροπέα ισχύος, ο οποίος είναι πολύ ακριβός, κάτι που στην AC μεταφορά δεν απαιτείται. Επίσης, το κόστος των γραμμών μεταφοράς AC αυξάνεται γρηγορότερα από ότι το κόστος μεταφοράς DC, εξαιτίας των παραπάνω αγωγών που απαιτούνται στην AC μεταφορά (τρεις αγωγοί ανά φάση στην AC μεταφορά, ενώ δύο αγωγοί για όλο το DC κύκλωμα). Ακόμη, λόγω των τεχνικών δυσκολιών που ειπώθηκαν παραπάνω (παραγωγή αέργου ισχύος), οι απώλειες των AC γραμμών αυξάνονται σημαντικά σε σχέση με την απόσταση, κάτι που κάνει την DC μεταφορά πιο συμφέρουσα για μεγάλες αποστάσεις. Παρακάτω παρουσιάζεται διάγραμμα που εκφράζει πως επιμερίζονται οι τρεις βασικοί παράγοντες (εξοπλισμός υποσταθμών-terminals, γραμμή μεταφοράς-line και απώλειες-losses) που καθορίζουν το κόστος σε σχέση με την αύξηση της απόστασης διασύνδεσης. Το κρίσιμο σημείο, που έχει καθιερωθεί στην αγγλική ορολογία ως break-even distance, καθορίζει το όριο της απόστασης που μετέπειτα από αυτό η μεταφορά DC είναι συμφέρουσα σε σχέση με την AC. Το σημείο αυτό για εναέριες γραμμές μεταφοράς είναι τα 600 km, ενώ για υπόγειες γραμμές μεταφοράς είναι περίπου πάνω από τα 50 km.



Εικόνα 2.22: Επιμερισμός κόστους μεταξύ AC και DC μεταφοράς.[37]

2.9.2 Περιβαλλοντικές επιπτώσεις.

Σημαντικός παράγοντας που πρέπει να ληφθεί υπόψιν είναι ο αντίκτυπος που έχει στο περιβάλλον η κάθε τεχνολογία. Στην διασύνδεση με DC μπορεί να μεταφερθεί ίδια ποσότητα ισχύος, χρησιμοποιώντας λιγότερους αγωγούς και λιγότερους πυλώνες, με αποτέλεσμα να απαιτείται λιγότερος χώρος προς χρήση, άρα και μείωση της όχλησης. Το παρακάτω σχήμα αναδεικνύει τα οφέλη της DC τεχνολογίας για διασυνδέσεις μεγάλων αποστάσεων. Να σημειωθεί ότι στην διασύνδεση με υπόγειες γραμμές μεταφοράς, η λύση AC δεν προτείνεται για μεγάλες αποστάσεις λόγω των τεχνικών δυσκολιών που έχουν αναφερθεί παραπάνω.



Εικόνα 2.23: Σύγκριση περιβαλλοντικού αντικτύπου μεταξύ AC και DC για διασύνδεση μεγάλων αποστάσεων.

2.9.3. Συμπεράσματα ολιστικής σύγκρισης HVAC και HVDC συστημάτων μεταφοράς.

Σύγκριση και σημαντικές διαφορές AC και DC.

- Όρια ευστάθειας: Η μεταφορά ισχύος μεταξύ δύο ζυγών σε ένα AC σύστημα, εξαρτάται από την διαφορά των γωνιών των ζυγών. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα η μέγιστη μεταφερόμενη ισχύς να περιορίζεται από την μεταβατική ευστάθεια του συστήματος. Αυτός ο περιορισμός δεν υφίσταται στην διασύνδεση DC.

- Έλεγχος ροής ισχύος: Ένας HVDC σύνδεσμος (link) δύναται να διατηρεί την ροή ισχύος ανεξάρτητα των ηλεκτρομηχανολογικών ταλαντώσεων που συμβαίνουν στο δίκτυο.
- Αντιστάθμιση γραμμών μεταφοράς: Σε μεγάλους μήκους εναέριες γραμμές μεταφοράς AC απαιτείται να υπάρχει αντιστάθμιση αέργου ισχύος ώστε να αυξηθεί η ικανότητα για μεταφορά ενεργού ισχύος. Για την αντιστάθμιση χρησιμοποιείται συνήθως συστοιχία πυκνωτών παράλληλα στις γραμμές μεταφοράς, ώστε να μειώσει την επίδραση των αυτεπαγωγών και να μειώσει την παραγωγή αέργου ισχύος στο τέλος της διασύνδεσης.
- Μειωμένη ανάγκη χώρου: Η διασύνδεση με DC απαιτεί λιγότερο χρόνο σε σχέση με την διασύνδεση AC.
- Οι απώλειες αντίστασης ενός AC καλωδίου είναι μεγαλύτερες από τις απώλειες, για ίδια μεταφορά ισχύος, από ότι σε ένα καλώδιο DC. Αντίθετα, η απώλειες στους σταθμούς μετατροπής είναι μεγαλύτερες στην HVDC τεχνολογία σε σχέση με τις απώλειες στους υποσταθμούς της HVAC τεχνολογίας.
- Η τεχνολογία HVDC είναι οικονομικότερη για μεγάλου μήκους διασυνδέσεις, αφού ναι μεν έχει μεγαλύτερο αρχικό κόστος επένδυσης και μεγαλύτερο κόστος εξοπλισμού(κυρίως σταθμού μετατροπής), αλλά έχει λιγότερες απώλειες στα καλώδια καθώς και μειωμένο κόστος καλωδίων αναλογικά με την αύξηση του μήκους.
- Τα μαγνητικά πεδία προερχόμενα από τις γραμμές μεταφοράς DC είναι αμελητέα σε σχέση με τα αντίστοιχα μαγνητικά πεδία στις γραμμές μεταφοράς AC.
- Μεταφορά μεγάλης ισχύος με υπόγεια ή υποθαλάσσια σε απόσταση μεγαλύτερης των 50 km είναι σχεδόν αδύνατη λόγω της ανάγκης για αντιστάθμιση αέργου ισχύος.
- Με την τεχνολογία DC είναι δυνατόν να διασυνδεθούν δύο ασύγχρονα ηλεκτρικά συστήματα, ενώ με την τεχνολογία AC είναι δυνατή μόνο διασύνδεση δύο σύγχρονων ηλεκτρικών συστημάτων.
- Το skin effect απουσιάζει στην τεχνολογία DC, όπως επίσης και οι απώλειες Corona είναι σημαντικά χαμηλότερες στην περίπτωση DC.

- Οι σταθμοί μετατροπής HVDC παράγουν αρμονικές, με αποτέλεσμα να απαιτούνται ακριβή φίλτρα.
- Ο έλεγχος στα HVDC συστήματα είναι δυσκολότερος σε σχέση με τα HVAC δίκτυο. Ο έλεγχος αυτός γίνεται περιπλοκότερος σε περίπτωση που υπάρχουν πολυεπίπεδοι μετατροπείς.
- Στην HVDC τεχνολογία δεν είναι δυνατός ο μετασχηματισμός της τάσης, όπως στην HVAC που επιτυγχάνεται σχετικά εύκολα από τους μετασχηματιστές.
- Στις HVDC μεταφορές απαιτείται να υπάρξει παραγωγή αέργου ισχύος στο τέλος της γραμμής ώστε να τροφοδοτηθεί το φορτίο.

Θα μπορούσε κανείς να συνοψίσει ότι η HVDC τεχνολογία είναι πολύ χρήσιμη για μεταφορά ισχύος σε μεγάλες αποστάσεις, είτε εναέρια είτε υποθαλάσσια. Επιπλέον, η HVDC τεχνολογία μπορεί να διασυνδέσει ασύγχρονα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας, κάτι που δεν ισχύει με την HVAC τεχνολογία. Από την άλλη πλευρά η HVAC τεχνολογία έχει πλεονεκτήματα στις μικρές και μεσαίες αποστάσεις, καθώς και στην εύκολη αλλαγή επιπέδου τάσεων (μέσω μετασχηματιστών), ενώ στην HVDC τεχνολογία απαιτείται σταθμός μετατροπής (αρκετά κοστοβόρα λύση). Έτσι λοιπόν η HVAC τεχνολογία είναι οικονομικά συμφέρουσα για αποστάσεις κάτω από 600-800 km αν αναφερόμαστε σε εναέρια γραμμές, κάτω από 80-120 km αν αναφερόμαστε σε υπόγειες, και τέλος κάτω από 50km αν αναφερόμαστε σε υποθαλάσσιες μεταφορές. [10], [19]

2.10 Διαμορφώσεις σταθμών μετατροπής τεχνολογίας HVDC-VSC.

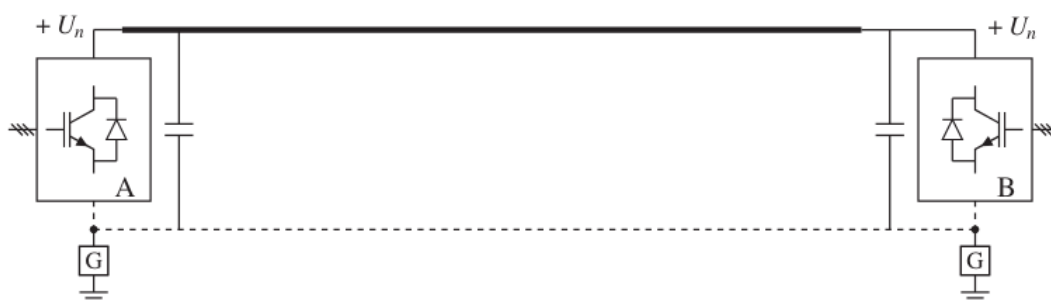
Οι κύριες διαμορφώσεις των σταθμών μετατροπής σε ένα HVDC-VSC σύστημα είναι τρεις: i) Ασύμμετρη μονοπολική διασύνδεση (Asymmetrical Monopole)
ii) Συμμετρική μονοπολική διασύνδεση (Symmetrical Monopole)
iii) Διπολική διασύνδεση (Bipolar)

2.10.1 Ασύμμετρη μονοπολική διαμόρφωση (Asymmetrical Monopole)

Η εικόνα 2.24 απεικονίζει την ασύμμετρη μονοπολική διασύνδεση. Για την διαμόρφωση αυτή απαιτείται ένας αγωγός υψηλής τάσης (είτε υποθαλάσσιος είτε εναέριος) καθώς και ένας ουδέτερος ο οποίος σε ένα σημείο είναι γειωμένος. Ο ουδέτερος αγωγός ή η μεταλλική επιστροφή έχουν την δυνατότητα μεταφοράς του

ονομαστικού ρεύματος του συστήματος ενώ η μόνωση τους είναι ελαφριά, κάτι που έχει ως αποτέλεσμα να την καθιστούν μια οικονομική λύση. Επίσης η ελαφριά μόνωση μειώνει την πιθανότητα διηλεκτρικής αστοχίας σε σχέση με τον αγωγό υψηλής τάσης. Να σημειωθεί ότι ο ουδέτερος αγωγός ή μεταλλική επιστροφή μπορεί να παραλειφθούν κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες που δίνουν την δυνατότητα στο σύστημα να είναι γειωμένο και στις δύο πλευρές.

Το μεγαλύτερο μειονέκτημα της συγκεκριμένης διαμόρφωσης είναι η χαμηλή αξιοπιστία, αφού σε τυχόν απώλεια κάποιου σημαντικού στοιχείου όπως ενός μετατροπέα είτε από κάποιο σφάλμα είτε από αναγκαία συντήρηση, οδηγεί σε ολική απώλεια του συστήματος. [19]



Εικόνα 2.24: Ασύμμετρη μονοπολική διαμόρφωση.[19]

2.10.2. Συμμετρική μονοπολική διαμόρφωση (Symmetrical Monopolar).

Η εικόνα 2.25 απεικονίζει την συμμετρική μονοπολική διασύνδεση, όπου απαιτούνται δύο αγωγοί υψηλής τάσης όπου ο καθένας μπορεί να μεταφέρει την ονομαστική ισχύ του συστήματος και επίσης είναι καλά μονωμένοι. Το DC μέρος των δύο τερματικών σταθμών του συστήματος συνδέεται με τον θετικό και τον αρνητικό πόλο, οι οποίοι λειτουργούν σε τάση ίσου μέτρου αλλά αντίθετης πολικότητας.

Το μεγαλύτερο πλεονέκτημα της συγκεκριμένης διαμόρφωσης είναι ότι σε περίπτωση σφάλματος ενός πόλου ως προς γη, η τάση του 'υγιή' πόλου θα διπλασιαστεί και θα μεταφερθεί μέσω αυτού η ονομαστική ισχύς του συστήματος.

Το μειονέκτημα όπως και στην ασύμμετρη διαμόρφωση είναι ότι σε περίπτωση απώλειας ενός κύριου στοιχείου του συστήματος όπως ένας σταθμός μετατροπής, θα υπάρξει ολική απώλεια του συστήματος. [19]

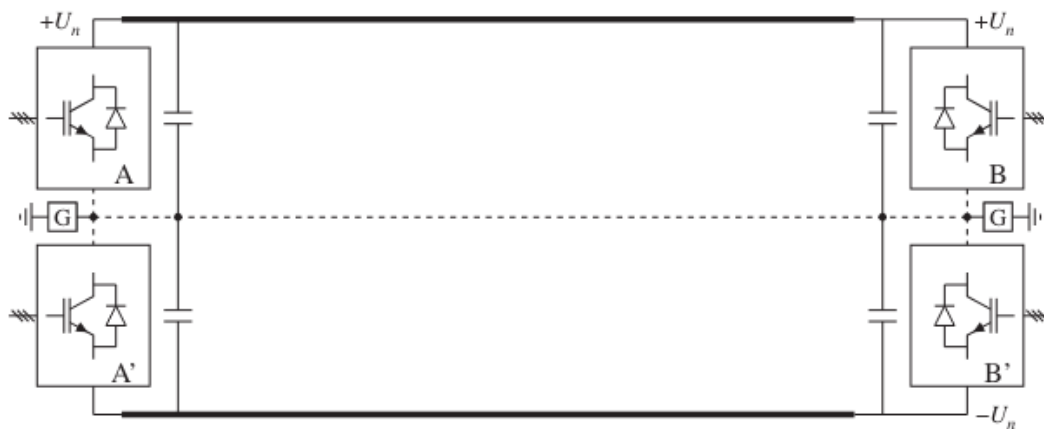


Εικόνα 2.25: Συμμετρική μονοπολική διαμόρφωση.[19]

2.10.3 Διπολική διαμόρφωση (Bipolar).

Η εικόνα 2.26 απεικονίζει την διπολική διασύνδεση, όπου στην ουσία απαρτίζεται από δύο ασύμμετρες διπολικές διασυνδέσεις έχοντας κοινό γειωμένο αγωγό. Κάθε πόλος συνδέεται με έναν μετασχηματιστή στην πλευρά AC, ενώ σε κάθε AC πλευρά συνδέονται παράλληλα δυο μετατροπείς, όπου ο ένας μετατροπέας συνδέεται σε δυναμικό θετικό ενώ ο άλλος σε αρνητικό δυναμικό.

Το μεγάλο πλεονέκτημα της συγκεκριμένης διαμόρφωσης είναι ότι οι δύο μετατροπείς της ίδιας πλευράς της διασύνδεσης μπορούν να λειτουργούν ανεξάρτητα, δίνοντας την δυνατότητα σε περίπτωση απώλειας ενός μετατροπέα να συνεχίσει να μεταφέρει το 50% της συνολικής ισχύος με την προϋπόθεση ότι έχει εγκατασταθεί μεταλλικός αγωγός επιστροφής ή ότι το σύστημα είναι γειωμένο και στις δύο πλευρές. Όταν συμβαίνει το παραπάνω ο εναπομείναντας μετατροπέας διακινεί την ηλεκτρική ισχύ όπως στην ασύμμετρη μονοπολική διαμόρφωση (Asymmetrical monopole configuration).

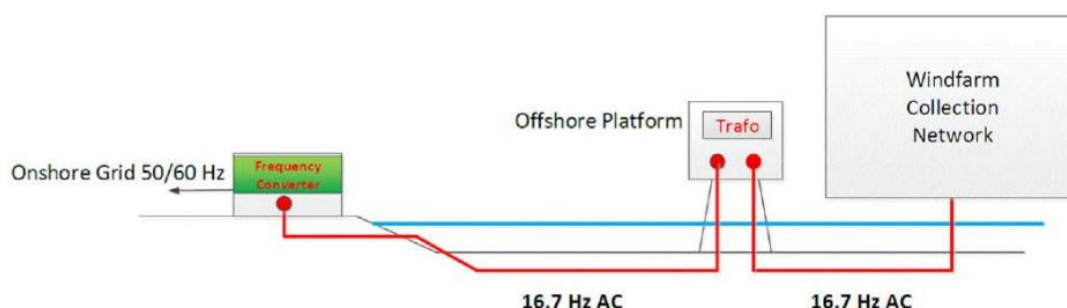


Εικόνα 2.26: Διπολική διαμόρφωση.[19]

2.11 Χαμηλή συχνότητα (Low frequency) εναλλασσόμενου ρεύματος AC.

Μια υποσχόμενη τεχνολογία που βρίσκεται σε ερευνητικό στάδιο είναι η μεταφορά ηλεκτρικής ισχύος εναλλασσόμενου ρεύματος (AC) σε χαμηλότερη συχνότητα από την συμβατική που είναι τα 50 ή 60 Hz , που συνήθως είναι τα 16.7 Hz (Εικόνα 2.27). Μπορεί να χρησιμοποιηθεί και στο δίκτυο εντός του Α/Π, αλλά μεγαλύτερα δυνητικά οφέλη έχει όταν χρησιμοποιηθεί για την εξαγωγή της παραγόμενης ισχύος στο δίκτυο

της στεριάς. Πρώτο πλεονέκτημα είναι η αποφυγή HVDC μετατροπέα, ο οποίος είναι κοστοβόρος.

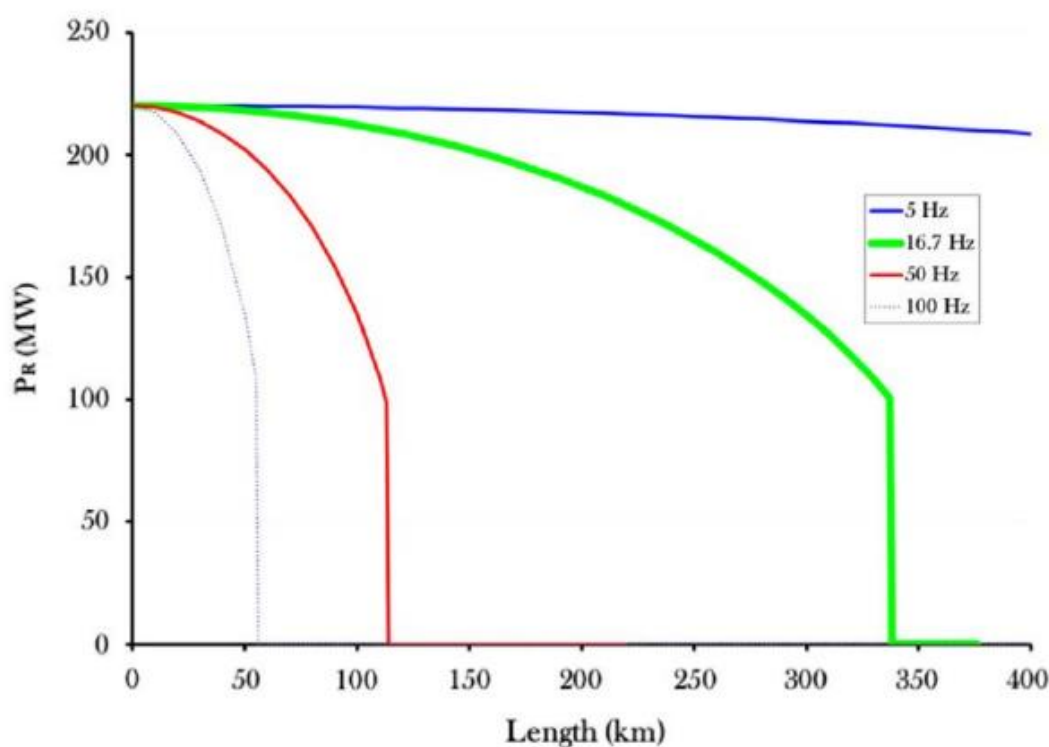


Εικόνα 2.27: Διασύνδεση υπεράκτιου Α/Π με χρήση LFAC. [9]

Δεύτερο πλεονέκτημα είναι ότι με την μειωμένη συχνότητα αυξάνεται η απόσταση που μπορεί να είναι αποδοτική μια διασύνδεση με HVAC, αφού μειώνεται σημαντικά το παραγόμενο χωρητικό άεργο ρεύμα και έτσι υπάρχει περισσότερος χώρος για μεταφορά ενεργού ισχύος. Στο χωρίο 2.6 της παρούσας εργασίας αναφέρεται αναλυτικά το φαινόμενο.

Ενδεικτικά ένα διάγραμμα ικανότητας μεταφοράς ισχύος διαφόρων συχνοτήτων σε σχέση με το μέγιστο μήκος της διασύνδεσης δίνεται στην εικόνα 2.28.

Είναι φανερό ότι όσο μικρότερη είναι η συχνότητα που επιλέγεται για την μεταφορά ισχύος τόσο αυξάνεται το μήκος της διασύνδεσης. [9], [30]



Εικόνα 2.28: Μεταφορική ικανότητα ενεργού ισχύος διαφόρων συχνοτήτων σε σχέση με το μέγιστο μήκος της διασύνδεσης. [9]

Το βασικό μειονέκτημα της τεχνολογίας χαμηλής συχνότητας είναι ότι απαιτείται αύξηση όγκου του εξοπλισμού AC και κυρίως των μετασχηματιστών. [9]

2.12 Εμβληματικά έργα υπεράκτιων Α/Π με HVDC διασύνδεση.

Με βάση τις ιστοσελίδες κυρίαρχων κατασκευαστών HVDC συστημάτων όπως η Hitachi Energy και η Siemens Energy, θα γίνει αναφορά σε έργα που βρίσκονται σε λειτουργία ή υπό κατασκευή που αφορούν υπεράκτια Α/Π με διασύνδεση HVDC.

Αρχικά, η Hitachi Energy έχει επιλεγεί να προμηθεύσει με το HVDC Light προϊόν της, που βασίζεται στην HVDC-VSC τεχνολογία, το μεγαλύτερο αιολικό πάρκο στον κόσμο σε απόσταση 130-190 km από την Βόρεια Ακτή της Αγγλίας με ονομασία ‘Dogger Bank’. Το έργο χωρίζεται σε τρία μέρη, ‘Dogger Bank A’, ‘Dogger Bank B’ και ‘Dogger Bank C’, όπου το πρώτο βρίσκεται σε λειτουργία από τον 2023, ενώ αναμένονται να ολοκληρωθεί συνολικά το 2026.

Η διαμόρφωση που χρησιμοποιείται είναι η Συμμετρική Μονοπολική (Symmetrical Monopole), η ισχύς που μεταφέρεται είναι 1200 MW (συνολικά), ενώ η τιμή της συνεχούς τάσης ανέρχεται στα ± 320 kV. [24]

Αξίζει να αναφερθεί και το πρώτο υπεράκτιο Α/Π που χρησιμοποιήθηκε HVDC τεχνολογία. Είναι το Α/Π με ονομασία ‘BorWin1’, βρίσκεται στη Βόρεια Θάλασσα σε απόσταση 125 km από την Γερμανία και ανήκει στον Διαχειριστή του Συστήματος Μεταφοράς της Γερμανίας, Tennet. Η μεταφερόμενη ισχύς στο δίκτυο της στεριάς είναι 400 MW, η τεχνολογία που χρησιμοποιήθηκε είναι η HVDC Light της Hitachi Energy, που αναφέρθηκε πιο πάνω, η διαμόρφωση είναι Συμμετρική Μονοπολική (Symmetrical Monopole) και το επίπεδο της συνεχούς τάσης τα ± 150 kV. [25]

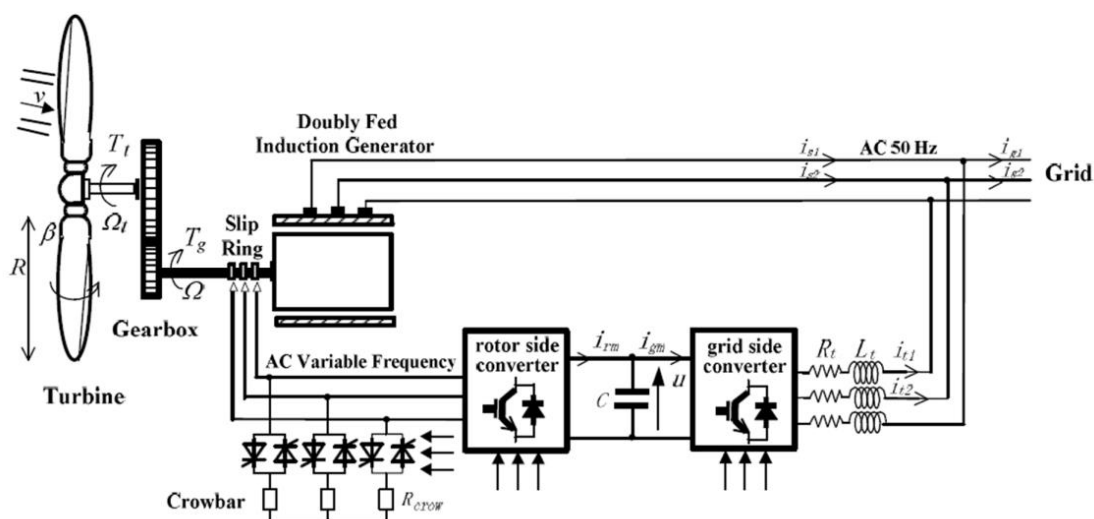
Η Siemens Energy στηρίζεται στο προϊόν HVDC Plus, που χρησιμοποιεί τεχνολογία HVDC-VSC, σε αντιστοιχία με το HVDC Light της Hitachi Energy. Με βάση τις λίστες αναφοράς των δύο κορυφαίων κατασκευαστών στα HVDC συστήματα, το συμπεραίνεται ότι οι μελλοντικές διασυνδέσεις βασιζόμενες στην τεχνολογία HVDC-VSC επικρατούν κατά κράτος της κλασσικής τεχνολογίας HVDC-LCC και δεύτερο συμπέρασμα είναι ότι για την διασύνδεση υπεράκτιων Α/Π κυριαρχεί η διαμόρφωση Συμμετρική Μονοπολική (Symmetrical Monopole). [26],[38]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. Μοντελοποίηση βασικών στοιχείων αιολικού πάρκου.

Έχοντας αναλυθεί τα σχήματα που βρίσκουν κατά κόρον εφαρμογή στην ανάπτυξη των υπεράκτιων αιολικών πάρκων, το επόμενο βήμα είναι η μοντελοποίησή του, ξεκινώντας από το βασικό συστατικό του πάρκου, την Α/Γ. Στο προηγούμενο κεφάλαιο παρουσιάστηκαν οι δύο τύποι Α/Γ που χρησιμοποιούνται πλέον στην ανάπτυξη των αιολικών πάρκων, επιλέγοντας για την μοντελοποίησή μας την Α/Γ τύπου ΙΙΙ, δηλαδή ασύγχρονη γεννήτρια διπλής τροφοδότησης-DFIG.

3.1 Ασύγχρονη γεννήτρια διπλής τροφοδότησης-DFIG (Τύπου ΙΙΙ).

Σε αυτό το σημείο θα παρουσιαστεί εκτενέστερα η διπλής τροφοδότησης επαγωγική γεννήτρια-DFIG, το οποίο είναι ένα από τα δημοφιλέστερα σχήματα διαμόρφωσης Α/Γ μεταβλητών στροφών (εικόνα 3.1). Βασικό συστατικό της διαμόρφωσης είναι ο back to back μετατροπέας πηγής τάσης που αποτελείται από δύο αμφίδρομης κατεύθυνσης μετατροπείς, οι οποίοι μοιράζονται το ίδιο DC link. Ο ένας μετατροπέας είναι συνδεδεμένος στο ρότορα της γεννήτριας επαγωγής μέσω δακτυλίου ολίσθησης (slip ring), ενώ ο άλλος συνδέεται στην πλευρά του δικτύου. Επίσης, το κιβώτιο ταχυτήτων αποτελεί μέρος της διαμόρφωσης αφού θα πρέπει να γίνει σύζευξη του άξονα και της γεννήτριας και να αντισταθμιστεί η διαφορά ταχυτήτων ανάμεσά τους. Τέλος, ο σημαντικότερος λόγος που επιλέγεται η παραπάνω Α/Γ είναι η επίτευξη λειτουργίας μεταβλητών στροφών με ηλεκτρονικά ισχύος που διακινούν περίπου το 30% της ονομαστικής παραγόμενης ισχύος της Α/Γ. [20]



Εικόνα 3.1 : Εκτενής αναπαράσταση ασύγχρονης γεννήτριας διπλής τροφοδότησης- DFIG.[20]

3.3.3 Δομικά στοιχεία μοντελοποίησης

Εκτός από την διαμόρφωση της Α/Γ που παρουσιάστηκε παραπάνω, η μοντελοποίησή μας βασίζεται στους εξής παράγοντες:

- Το μηχανικό σύστημα περιλαμβάνει την τουρμπίνα και το κιβώτιο ταχυτήτων.
- HVDC τεχνολογία για την διασύνδεση του υπεράκτιου αιολικού με το δίκτυο στην στεριά.
- Η γραμμή μεταφοράς συνδέεται με τον υπεράκτιο σταθμό μέσω ενός μετατροπέα πηγή τάσης (VSC HVDC) - Ανορθωτής
- Η γραμμή μεταφοράς συνδέεται με τον χερσαίο σταθμό μεταφοράς μέσω ενός μετατροπέα πηγή τάσης (VSC HVDC) – Αντιστροφέας
- Μετασχηματιστές και στις δύο πλευρές (υπεράκτια και χερσαία)
- Ελεγκτές και PLL αποτελούν στοιχεία του ηλεκτρικού συστήματος

3.3.4. Αεροδυναμικό μέρος-μηχανικό μέρος

Το αεροδυναμικό μοντέλο μας δίνει την σύζευξη που υπάρχει μεταξύ του ανέμου που «εισέρχεται» στην επιφάνεια του δρομέα και της μηχανικής ροπής που αναπτύσσεται στον άξονα της τουρμπίνας της Α/Γ. Στην περίπτωση Α/Γ μεταβλητών στροφών, όπως στο μοντέλο που θα εργαστούμε, το αεροδυναμικό μοντέλο μας δίνει την σύζευξη της γωνίας pitch (πτερυγίου) και της ροπής. Ο τύπος της ροπής είναι ο εξής [21],[22]:

$$T_a = \frac{\rho}{2} \pi R^3 \frac{C_P(\lambda, \beta)}{\lambda} v_w^3 \quad (3.1)$$

Και η ισχύς στον άξονα της τουρμπίνας:

$$P_a = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 C_P(\lambda, \beta) v_w^3 \quad (3.2)$$

Όπου λ : Λόγος ταχύτητας ακροπτερυγίου ($\lambda = \frac{\omega_r}{v_w} R$).

R : Ακτίνα του δρομέα της τουρμπίνας.

v_w : Η ταχύτητα του ανέμου.

ρ : Η πυκνότητα του ανέμου.

Και C_P ο αεροδυναμικός συντελεστής ροπής ο οποίος εξαρτάται από το λόγο ταχύτητας του ακροπτερυγίου λ και από την γωνία βήματος πτερυγίου (pitch) β .

Το σύστημα διέπεται από τις διαφορικές εξισώσεις των στρεφόμενων μαζών, την στρεφόμενη μάζα του δρομέα της Α/Γ και την στρεφόμενη μάζα της γεννήτριας που είναι μικρότερη σε σχέση με αυτή του δρομέα.

Η συνολική διαφορική εξίσωση που διέπει το μηχανικό μοντέλο εκφράζεται ως εξής:

$$J_r \frac{d\Omega_m}{dt} = T_a - T_g - D_r \Omega_m \quad (3.3)$$

J_r : Η συνολική αδράνεια του στρεφόμενου άξονα.

T_g : Η ροπή από το κιβώτιο ταχυτήτων.

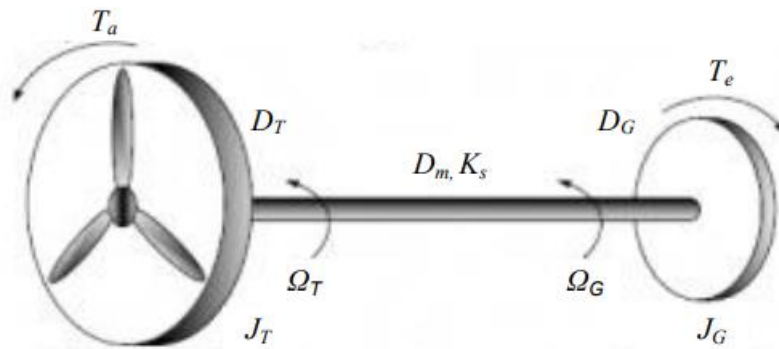
D_r : Ο συντελεστής απόσβεσης του στρεφόμενου άξονα.

Η αεροδυναμική ισχύς του αργού άξονα της τουρμπίνας μετατρέπεται στην γρήγορη του άξονα της γεννήτριας από το κιβώτιο ταχυτήτων. Η μετατροπή αυτή εκφράζεται από τον λόγο ταχυτήτων G και ορίζει την γωνιακή ταχύτητα της γεννήτριας Ω .

Ισχύουν οι μαθηματικές εκφράσεις:

$T_{em} = T_g/G$ και $\Omega_t = \Omega_m/G$, όπου T_{em} είναι η ηλεκτρομαγνητική ροπή της γεννήτριας.

Η παρακάτω εικόνα παρουσιάζει το μοντέλο των δύο μαζών και τον τρόπο που συνδέονται.



Εικόνα 3.2: Δύο μαζών στρεφόμενος άξονας Α/Γ.

D_T, D_G : επιμέρους αποσβέσεις άξονα της τουρμπίνας και άξονα της γεννήτριας.

Ω_T, Ω_G : επιμέρους γωνιακές ταχύτητες άξονα της τουρμπίνας(αργός) και άξονα της γεννήτριας(γρήγορος)

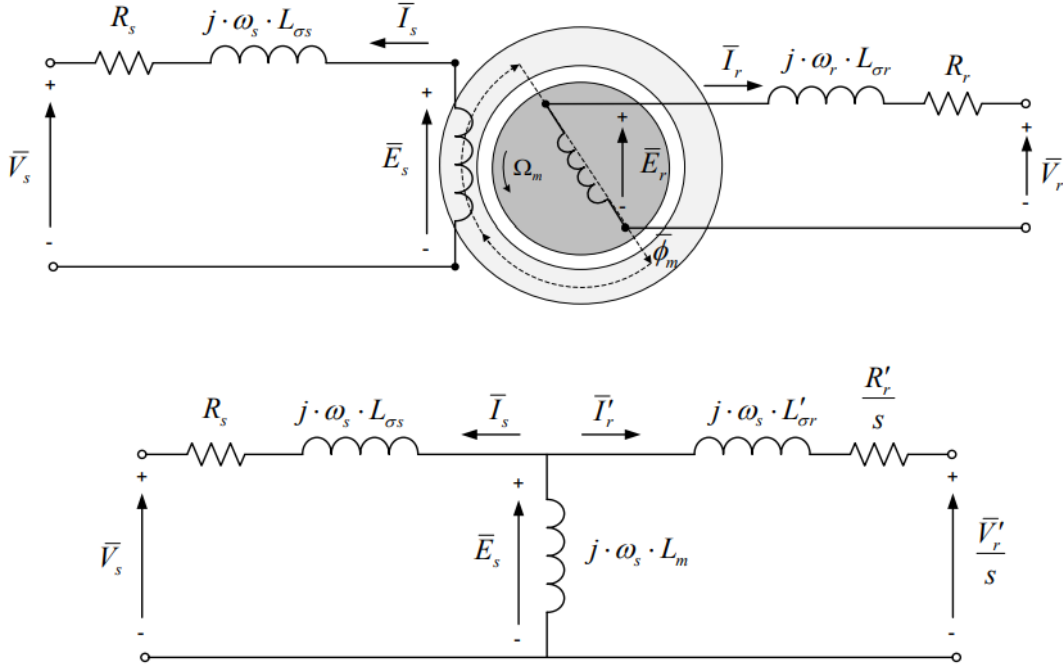
K_s : συντελεστής ελαστικότητας.

Ισχύει $D_r = D_T + D_G$

3.3.5 Μοντελοποίηση ασύγχρονης γεννήτριας διπλής τροφοδότησης – DFIG.

Η ασύγχρονη γεννήτρια διπλής τροφοδότησης-DFIG χρησιμοποιήθηκε για να υπάρχει έλεγχος των στροφών για καλύτερη αεροδυναμική συμπεριφορά, διαφέρει από τα υπόλοιπες διαμορφώσεις Α/Γ στο ότι παρέχει ισχύ στο δίκτυο μέσω των ακροδεκτών

του στάτη αλλά και μέσω των ακροδεκτών του δρομέα, αφού ο στάτης συνδέεται απευθείας στο δίκτυο, ενώ ο δρομέας μέσω back to back μετατροπέα.
Το ισοδύναμο κύκλωμα της γεννήτριας είναι το εξής:



Εικόνα 3.2: Ισοδύναμο κύκλωμα ασύγχρονης γεννήτριας διπλής τροφοδότησης-DFIG.

Μια λεπτομερής δυναμική συμπεριφορά της ασύγχρονης γεννήτριας διπλής τροφοδότησης, που αξίζει να σημειωθεί ότι αν βραχυκυκλωθεί ο δρομέας η απόκριση της μηχανής είναι ίδια με απλή μηχανή επαγωγής κλωβού σταθερής ταχύτητας, μπορεί να χαρακτηριστεί από τον δυναμικό μοντέλο 5^{ης} τάξης, μοντελοποιημένο σε σύγχρονο πλαίσιο αναφοράς δύο αξόνων d-q. [21]

Οι εξισώσεις είναι οι εξής:

$$\frac{d\psi_{sd}}{dt} = v_{sd} - R_s i_{sd} + \omega_s \psi_{sq}$$

$$\frac{d\psi_{sq}}{dt} = v_{sq} - R_s i_{sq} + \omega_s \psi_{sd}$$

$$\frac{d\psi_{rd}}{dt} = v_{rd} - R_r i_{rd} + \omega_r \psi_{rq}$$

$$\frac{d\psi_{rq}}{dt} = v_{rq} - R_r i_{rq} + \omega_r \psi_{rd}$$

Όπου v_{sd} , v_{sq} , v_{rd} και v_{rq} οι συνιστώσες τάσης στάτη και δρομέα στον d και q άξονα αντίστοιχα, i_{sd} , i_{sq} , i_{rd} και i_{rq} οι συνιστώσες ρεύματος στάτη και δρομέα στον d και q

άξονα αντίστοιχα, ψ_{sq} , ψ_{sd} , ψ_{rq} και ψ_{rd} οι μαγνητικές ροές στάτη και δρομέας σε συνιστώσες Park, ω_s η σύγχρονη γωνιακή ταχύτητα του στάτη και ω_r η γωνιακή ταχύτητα του δρομέα. [21]

Οι ροές ψ_{sq} , ψ_{sd} , ψ_{rq} και ψ_{rd} μπορούν να εκφραστούν ως εξής:

$$\begin{aligned}\psi_{sd} &= L_s i_{sd} + M i_{rd} \\ \psi_{sq} &= L_s i_{sq} + M i_{rq} \\ \psi_{rd} &= L_r i_{rd} + M i_{sd} \\ \psi_{rq} &= L_r i_{rq} + M i_{sq}\end{aligned}$$

Όπου L_s , L_r , M οι αυτεπαγωγές στάτη, δρομέα και μαγνήτισης αντίστοιχα.

Τέλος, ισχύει η ηλεκτρομαγνητική ροπή εκφράζεται ως:

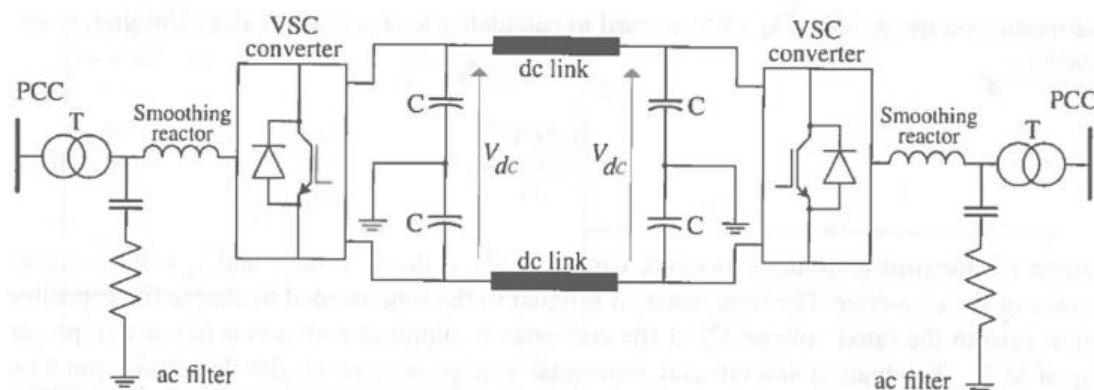
$$T_{em} = p(\psi_{sd} i_{sq} - \psi_{sq} i_{sd}) \quad (3.4),$$

με p τα ζεύγη των πόλων της μηχανής.

Σημαντικό να παρατηρήσουμε επίσης, ξεφεύγοντας από την δυναμική ανάλυση της μηχανής, ότι η ισχύς της ασύγχρονης μηχανής διπλής τροφοδότησης DFIG καθορίζεται ως ονομαστική ισχύ του στάτη, αφού παράγεται ισχύς στην σύγχρονη ταχύτητα της μηχανής.

3.3.7 Ηλεκτρικά στοιχεία HVDC μεταφοράς με μετατροπείς πηγής τάσης(VSC)

Στην σχήμα της εικόνα 3.3 παρουσιάζεται μια τυπική δομή HVDC μεταφοράς στηριζόμενη σε μετατροπείς πηγής τάσης.



Εικόνα 3.3: Τυπική δομή VSC-HVDC διασύνδεσης.[20]

Τα κύρια ηλεκτρικά στοιχεία της παραπάνω τοπολογίας που εγκαθίστανται τόσο στους υπεράκτιους όσο και στον χερσαίο υποσταθμό είναι τα εξής:

- **Μετατροπείς πηγής τάσης (VSC):** Χρησιμοποιώντας IGBT's διακοπτικές συσκευές είναι σε θέση να εξασφαλίσουν μέσω κατάλληλου ελέγχου των βαλβίδων τους, την επιθυμητή DC τάση. Οι διαμορφώσεις ποικίλουν ανάμεσα σε δύο επιπέδων, τριών επιπέδων ή σε πολυεπίπεδους μετατροπείς.
- **Μετασχηματιστές:** Χρησιμοποιούνται για να μετασχηματίσουν την τάση σε κατάλληλα επίπεδα. Για να μην εκτίθεται ο μετασχηματιστής σε περιεχόμενο αρμονικών ή σε συνιστώσα DC συνδέεται μεταξύ του πηνίου εξομάλυνσης και του μετασχηματιστή κατάλληλο φίλτρο.
- **Πηνίο εξομάλυνσης:** Χρησιμοποιείται ως αρμονικό φίλτρο, μειώνοντας αρμονικό περιεχόμενο τάσης και ρευμάτων καθώς επίσης περιορίζει και ρεύματα βραχυκύκλωσης. Επίσης διευκολύνει τον έλεγχο ενεργού και αέργου ισχύος.
- **Αρμονικό φίλτρο:** Υψηλοπερατό παθητικό φίλτρο που χρησιμοποιείται για την καταστολή αρμονικών μεγάλης τάξης, που προέρχονται από την υψηλή διακοπτική δραστηριότητα της διαμόρφωσης PWM του ελέγχου των IGBT's.
- **DC χωρητικότητες:** Δύο ίδιου μεγέθους χωρητικότητες χρησιμοποιούνται στις δύο άκρες της DC διασύνδεσης, με κύριο στόχο την διατήρηση της ισορροπίας ισχύος κατά τις μεταβατικές διαταραχές. Επίσης συμβάλλουν στην μείωση των αρμονικών στην DC πλευρά και στην μειωμένη κυμάτωση του dc link. Η διαστασιολόγηση τους είναι σημαντική και εξαρτάται από τα ονομαστικά μεγέθη του συστήματος και από την κυμάτωση που επιφέρει η διακοπτική συχνότητα των ημιαγωγών. Επίσης με την υπερδιαστασιολόγηση υπάρχει κίνδυνος αργής απόκρισης του συστήματος σε διάφορες καταστάσεις.
- **DC καλώδιο:** Ένα XLPE DC καλώδιο προτιμάται λόγω του μειωμένου βάρους, της ευελιξίας που προσφέρει καθώς και της καλής μηχανικής αντοχής.

Το δυναμικό μοντέλο που διέπει την λειτουργία της τυπικής δομής HVDC διασύνδεσης με μετατροπείς πηγής τάσης στηρίζεται στις επιμέρους δυναμικές συμπεριφορές των κυκλωματικών στοιχείων.

Ο μετατροπέας που βρίσκεται υπεράκτια από την πλευρά του αιολικού πάρκου από υπόθεση λειτουργεί σαν ανορθωτής, ενώ ο μετατροπέας που βρίσκεται στην στεριά από την πλευρά του δικτύου λειτουργεί από υπόθεση σαν αντιστροφέας.

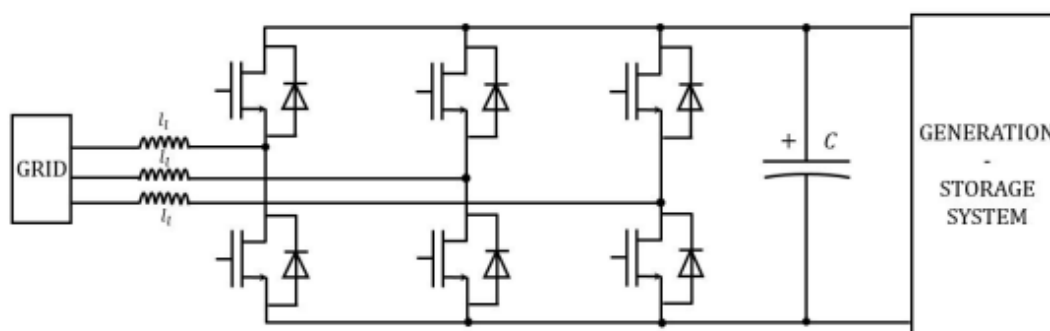


Εικόνα 3.4: AC φίλτρο στο σύστημα HVDC-Light της AB. [ABB]

3.7.1 Μοντελοποίηση VSC

Σημαντικό μέρος στην μελέτη και στον έλεγχο της HVDC διασύνδεσης είναι η μοντελοποίηση των δύο μετατροπέων HVDC-VSC που βρίσκονται εκατέρωθεν της γραμμής μεταφοράς.

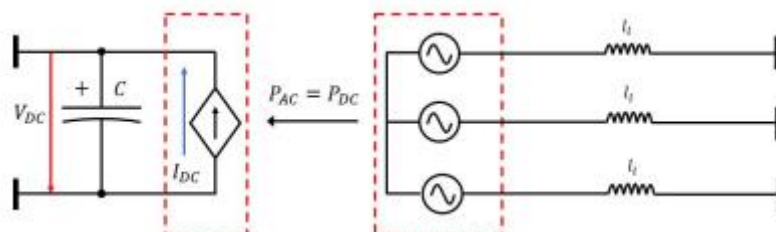
Ο μετατροπέας που χρησιμοποιείται ευρέως πλέον στις HVDC διασυνδέσεις είναι ο Πολυεπίπεδος Μετατροπέας -Modular Multilevel Converters (MMC), όμως για λόγους πρακτικότητας και απλότητας θα παρουσιαστεί το μοντέλο ενός μετατροπέα δύο επιπέδων (two level VSC), όπως παρουσιάζεται στην εικόνα 3.5.



Εικόνα 3.5: Τυπικό ηλεκτρικό σύστημα δίκτυο-μετατροπέα δύο επιπέδων-παραγωγής/αποθήκευσης.

Η μοντελοποίηση του μετατροπέα μπορεί να χωριστεί σε δύο μέρη, AC και DC, όπου θεωρείται ότι λειτουργούν ανεξάρτητα (decoupling), γεγονός που δίνει την

δυνατότητα απλουστευμένου ελέγχου και επίσης θεωρείται ότι ο μετατροπέας είναι ιδανικός, δηλαδή δεν υπάρχουν απώλειες κατά την μετατροπή. Η παρακάτω εικόνα 3.6 παρουσιάζει το μοντέλο του VSC μετατροπέα χωρίς απώλειες.



Εικόνα 3.6: Μοντέλο ιδανικού VSC.

Οι AC πλευρές του μετατροπέα μοντελοποιούνται ως τριφασικές πηγές τάσης με ένα πηνίο εξομάλυνσης που είναι απαραίτητο τόσο για να καταστείλει αρμονικό περιεχόμενο και να προστατέψει το δίκτυο που συνδέεται, όσο και να δώσει την δυνατότητα σύνδεσης δύο πηγών ίδιου τύπου, αφού ο μετατροπέας και το δίκτυο είναι πηγές τάσης.

Ο μετατροπέας θεωρήθηκε ιδανικός, άρα η ισχύς στην AC πλευρά θα ισούται με την ισχύ στην DC πλευρά. Στην DC πλευρά δεν υφίσταται άεργος ισχύς με αποτέλεσμα να ανταλλάσσεται μόνο ενεργός ισχύς μεταξύ των δύο μερών. Η συμπεριφορά αυτή μοντελοποιείται με μια εξαρτώμενη πηγή ρεύματος, στην DC πλευρά, που εξαρτάται από την τάση DC και την ανταλλασσόμενη ισχύς.

Η ένταση του ρεύματος DC ισούται με:

$$I_{DC} = \frac{P_{DC}}{V_{DC}} = \frac{P_{AC}}{V_{DC}} \quad (3.5)$$

Θα μπορούσε να παρατηρήσει κάποιος ότι υπό σταθερή DC τάση, όσο μεγαλύτερη είναι η ισχύς που ανταλλάσσεται, τόσο υψηλότερη είναι η ένταση του ρεύματος. [19]

3.7.2 Δυναμικό μοντέλο VSC-HVDC

Η εικόνα 3.7 παρουσιάζει μια τυπική δομή μοντέλου VSC-HVDC, όπου θεωρείται ότι VSC 1 λειτουργεί σαν ανορθωτής και ο VSC 2 σαν αντιστροφέας.

Τα ρεύματα AC i_{sa} , i_{sb} και i_{sc} θεωρούνται ότι ρέουν από μια εξωτερική πηγή AC στον VSC, ενώ οι AC τάσεις V_{sa} , V_{sb} , V_{sc} θεωρούνται ότι είναι ιδανικές ημιτονοειδείς κυματομορφές.

Τα ρεύματα i_{ca} , i_{cb} και i_{cc} και οι τάσεις V_{ca} , V_{cb} , V_{cc} αναφέρονται στους αντίστοιχους ακροδέκτες του VSC.

R_F , L_F , R_T , L_T είναι οι αντιστάσεις και αντιδράσεις της σύζευξης και του μετασχηματιστή σύζευξης.

Για την πλευρά DC, i_{dc} και V_{dc} είναι το ρεύμα και η τάση του DC link, ενώ το C είναι η χωρητικότητα του DC link.

Οι δυναμικές εξισώσεις για το είναι οι εξής [20]:

Για τον ανορθωτή:

$$\frac{di_{sabc}}{dt} = -\frac{R_1}{L_1} * i_{sabc} + \frac{1}{L_1} * (V_{sabc} - V_{cabc}) \text{ , όπου } R_1 = R_{T1} + R_{F1}$$

Και για τον αντιστροφέα:

$$\frac{di_{sabc}}{dt} = -\frac{R_2}{L_2} * i_{sabc} + \frac{1}{L_2} * (V_{sabc} - V_{cabc}) \text{ , όπου } R_2 = R_{T2} + R_{F2}$$

Στην απλοποίηση του μοντέλου που διευκολύνει και την διαδικασία του ελέγχου βοηθά ο μετασχηματισμός Park. Έτσι οι εξισώσεις μετασχηματίζονται ως εξής [20]:

$$\frac{di_{sd1}}{dt} = -\frac{R_1}{L_1} * i_{sd1} + \frac{1}{L_1} * (V_{sd1} - V_{cd1}) + \omega i_{sq1}$$

$$\frac{di_{sq1}}{dt} = -\frac{R_1}{L_1} * i_{sq1} + \frac{1}{L_1} * (V_{sq1} - V_{cq1}) + \omega i_{sd1} \text{ για την πλευρά του ανορθωτή και}$$

$$\frac{di_{sd2}}{dt} = -\frac{R_2}{L_2} * i_{sd2} + \frac{1}{L_2} * (V_{sd2} - V_{cd2}) + \omega i_{sq2}$$

$$\frac{di_{sq2}}{dt} = -\frac{R_2}{L_2} * i_{sq2} + \frac{1}{L_2} * (V_{sq2} - V_{cq2}) + \omega i_{sd2} \text{ για την πλευρά του αντιστροφέα.}$$

Οι εξισώσεις του ισοζυγίου ισχύος μεταξύ AC και DC πλευράς για τον ανορθωτή και για τον αντιστροφέα είναι οι εξής [20]:

$$V_{dc1} i_{dc} = \frac{3}{2} * (V_{cd1} i_{sd1} + V_{cq1} i_{sq1}) - C V_{dc1} \frac{dV_{dc1}}{dt} \text{ για τον ανορθωτή και}$$

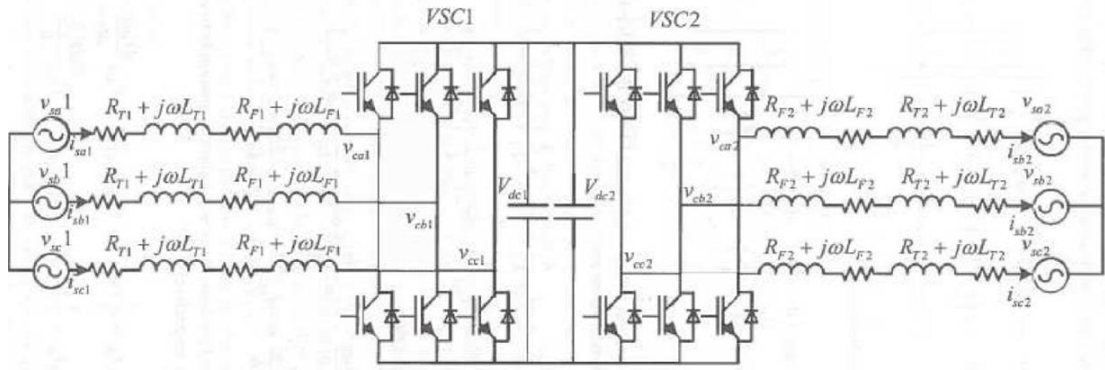
$$V_{dc2} i_{dc} = \frac{3}{2} * (V_{cd2} i_{sd2} + V_{cq2} i_{sq2}) - C V_{dc2} \frac{dV_{dc2}}{dt} \text{ για τον αντιστροφέα.}$$

Οι παραπάνω δυναμικές εξισώσεις μοντελοποιούν το VSC-HVDC.

Στο πεδίο του χρόνου οι ενεργός ισχύς και η άεργος αντίστοιχα μπορούν να εκφραστούν στιγμιαία ως εξής [20]:

$$p(t) = \frac{3}{2} * (V_d(t)i_d(t) + V_q(t)i_q(t)) \quad (3.6)$$

$$q(t) = \frac{3}{2} * (-V_d(t)i_q(t) + V_q(t)i_d(t)) \quad (3.7)$$



Εικόνα 3.7: Απεικόνιση τυπικής δομής μοντέλου HVDC-VSC-αλληλεπίδρασης με το υπόλοιπο δίκτυο.[36]

3.7.3 Μοντελοποίηση πηνίου εξομάλυνσης.

Το πηνίο εξομάλυνσης που αναφέρθηκε παραπάνω μοντελοποιείται ως εξής:

Η τυπική τιμή που παίρνει είναι 0.15 α.μ.

Χρησιμοποιώντας τους τύπους:

- Για την εύρεση των τιμών βάσης $I_b = \frac{S_b}{\sqrt{3}V_b}$ και $Z_b = \frac{V_b}{I_b}$
- Φασική τιμή αντίδρασης $X_{La} = 0,15 \text{ p.u.} * Z_b$
- Φασική τιμή αυτεπαγωγής $L_a = \frac{X_{La}}{\omega}$
- Άεργος ισχύς επαγωγικής αντίδρασης (X_{La}) $Q_{XLa} = I_a * X_{La}$
- Ρεύμα κυματισμού από κορυφή σε κορυφή (Peak-to-peak ripple current)
 $i_{ripple} = \frac{V_{dc}}{4 * L_a * f_{sw}}$ όπου f_{sw} η διακοπτική συχνότητα και V_{dc} η τάση DC από πόλο σε πόλο. [35]

3.7.4 Μοντελοποίηση AC υψιπερατού φίλτρου (AC high pass filter).

Η μοντελοποίηση του AC υψιπερατού φίλτρου είναι η εξής (δεύτερης τάξης):

- Χωρητικότητα $C_f = \frac{Q_f}{2 * \pi * f * V_L^2}$

- Αντίσταση $R_f = \frac{1}{2*\pi*f_{cut-off}*C_f}$
- Αυτεπαγωγή $L_f = m * R_f^2 * C_f$

Όπου Q_f η ονομαστική άεργος ισχύς του AC φίλτρου, $f_{cut-off}$ η συχνότητα αποκοπής του φίλτρου, V_L η πολική AC τάση, f η θεμελιώδης συχνότητα, και m η παράμετρος που συσχετίζει την καμπύλη της σύνθετης αντίστασης του φίλτρου σε σχέση με τη συχνότητα και τυπική τιμή είναι από 0,5 έως 2. [35]

3.7.5 Μοντελοποίηση DC χωρητικότητας (DC capacitor).

Η μοντελοποίηση της DC χωρητικότητας γίνεται ως εξής:

- Χωρητικότητα DC, $C_{DC} = \frac{2*S_{VSC}*E_s}{V_{DC}^2}$
- Ενέργεια προς ισχύς σε J/VA, $E_s = \frac{E_c}{S_{VSC}}$
- Ενέργεια χωρητικότητας, $E_c = \frac{1}{2} * C_{DC} * V_{DC}^2$

Η τυπική τιμή της E_s κυμαίνεται από 10kJ/MVA έως 50kJ/MVA, S_{VSC} η φαινόμενη ισχύς του μετατροπέα σε VA και η E_c σε J. [35]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

4.1 Υπεράκτιο αιολικό πάρκο στο PowerFactory και μελέτη σφαλμάτων.

Ένα από τα πιο σημαντικά ζητήματα σε κάθε δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας είναι η συμπεριφορά του σε διαφορετικά είδη σφαλμάτων, με κύριο στόχο την σωστή λειτουργία των συστημάτων προστασίας. Ειδικά σε ένα υπεράκτιο αιολικό πάρκο όπου οι ποσότητες ισχύος είναι μεγάλες με αποτέλεσμα η σωστή αλληλεπίδραση με το υπόλοιπο δίκτυο να είναι ζωτικής σημασίας, η μελέτη διαφόρων σφαλμάτων επιβάλλεται. Για το σκοπό αυτό στην παρούσα εργασία, θα εργαστούμε πάνω σε ένα τυπικό σύστημα υπεράκτιου αιολικού, το οποίο αποτελείται από τις ανεμογεννήτριες, τους μετατροπείς ισχύος και τους υπεράκτιους υποσταθμούς, στους οποίους περιλαμβάνονται οι step-up μετασχηματιστές, διάφορα είδη σύνθετων αντιστάσεων, φίλτρα, διακόπτες. Επίσης, το επιλεγόμενο σύστημα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας, που διασυνδέει το υπεράκτιο αιολικό πάρκο με το υπόλοιπο δίκτυο, έχει σημαντική επίδραση στην αποτελεσματικότητα ολόκληρου του συστήματος.

Το παραπάνω ηλεκτρικό σύστημα θα εφαρμοστεί στο λογισμικό DigSilent και συγκεκριμένα από το PowerFactory, και στη συνέχεια θα εξεταστούν τα πιο επιδραστικά σφάλματα τόσο στην AC όσο και στην DC πλευρά.

4.2 PowerFactory

Με την αυξημένη διείσδυση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στο συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας, η πολυπλοκότητα της μελέτης και του ελέγχου αυξάνεται σημαντικά. Απαραίτητο συστατικό στην αντιμετώπιση αυτών των προκλήσεων αποτελεί η προσομοίωση των συστημάτων σε εξελιγμένα υπολογιστικά προγράμματα. Η πολυπλοκότητα των υπολογισμών, που υλοποιούνται για μελέτες όπως ροής φορτίου, ευστάθειας του συστήματος, μεταβατικής συμπεριφοράς κ.α., απαιτεί χρήση ισχυρών αλγορίθμων.

Ένα από αυτά τα υπολογιστικά προγράμματα είναι το DigSilent PowerFactory. Το πρόγραμμα αυτό έχει την δυνατότητα προσομοίωσης μέσων τιμών και μεταβατικών φαινομένων και περιλαμβάνει μια βιβλιοθήκη από μοντέλα και ελεγκτές που είναι διαμορφωμένα με βάση τα διεθνή πρότυπα. Γεννήτριες, ζυγοί, σύνθετες αντιστάσεις, μετατροπείς, φορτία κ.α., μπορούν να μοντελοποιηθούν με βάση διαφορικές εξισώσεις που διέπουν την λειτουργία των στοιχείων, μη επιτρέποντας στο χρήστη να έχει πρόσβαση στις εξισώσεις αυτές, αλλά δίνοντας του την δυνατότητα να παραμετροποιήσει με τον τρόπο που επιθυμεί τα παραπάνω στοιχεία.

Στην περίπτωση όπου θέλουμε να χρησιμοποιήσουμε μοντέλα που δεν υπάρχουν στην βιβλιοθήκη του προγράμματος, δίνεται η δυνατότητα στο χρήστη, μέσω μιας γλώσσας δυναμικού προγραμματισμού (DPL), να δημιουργήσει δικά του που θα επικοινωνούν με τα προκαθορισμένα μοντέλα μέσω των εισόδων και των εξόδων τους.

4.2.1 Μοντέλα A/Γ στο PowerFactory.

Σύμφωνα με το πρότυπο IEC 61400-27-1, τέσσερα είδη ανεμογεννητριών (επτά μοντέλα) περιγράφονται και είναι διαθέσιμα στο DigSilent:

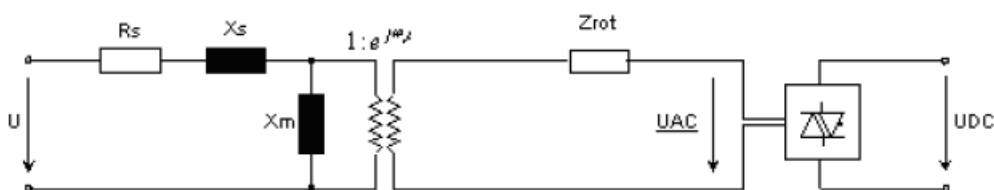
- Τύπος 1α (A/Γ με ασύγχρονη γεννήτρια άμεσα συνδεδεμένη στο δίκτυο)
- Τύπος 1β (A/Γ με ασύγχρονη γεννήτρια άμεσα συνδεδεμένη στο δίκτυο με pitch control)
- Τύπος 2 (A/Γ με ασύγχρονη γεννήτρια με μεταβλητή αντίσταση στο ρότορα, άμεσα συνδεδεμένη στο δίκτυο)
- Τύπος 3α (A/Γ με διπλής τροφοδότησης γεννήτρια επαγωγής- DFIG)
- Τύπος 3β (A/Γ με διπλής τροφοδότησης γεννήτρια επαγωγής-DFIG με crowbar)
- Τύπος 4α (A/Γ συνδεδεμένη στο δίκτυο μέσω μετατροπών ισχύος-FSC)
- Τύπος 4β (A/Γ συνδεδεμένη στο δίκτυο μέσω μετατροπών ισχύος-FSC με μηχανικό μοντέλο)

Στην μοντελοποίηση που θα εξετάσουμε στην παρούσα εργασία, χρησιμοποιείται η A/Γ τύπου 3β, δηλαδή διπλής τροφοδότησης γεννήτρια επαγωγής (DFIG) με crowbar. [32]

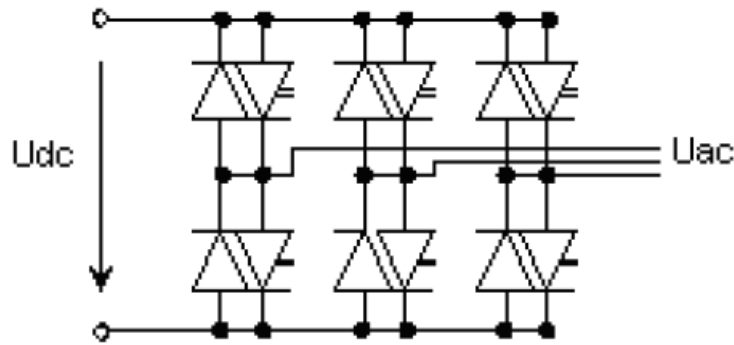
4.2.2 Ασύγχρονη μηχανή επαγωγής διπλής τροφοδότησης-DFIG στο PowerFactory.

Όπως αναφέρθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο στην ασύγχρονη μηχανή επαγωγής διπλής τροφοδότησης-DFIG, η τάση και η συχνότητα του ρότορα είναι ελεγχόμενα, αφού εφαρμόζεται έλεγχος PWM μέσω των δακτυλίων, και με αυτό τον τρόπο υπάρχει δυνατότητα ελέγχου ενεργού και αέργου ισχύος.

Στο Power Factory υπάρχουν δύο διαφορετικά μοντέλα DFIG, με και χωρίς ενσωματωμένο μετατροπέα ελέγχου PWM. Στην περίπτωσή μας χρησιμοποιείται το μοντέλο με ενσωματωμένο μετατροπέα PWM (εικόνα 4.1). [32]



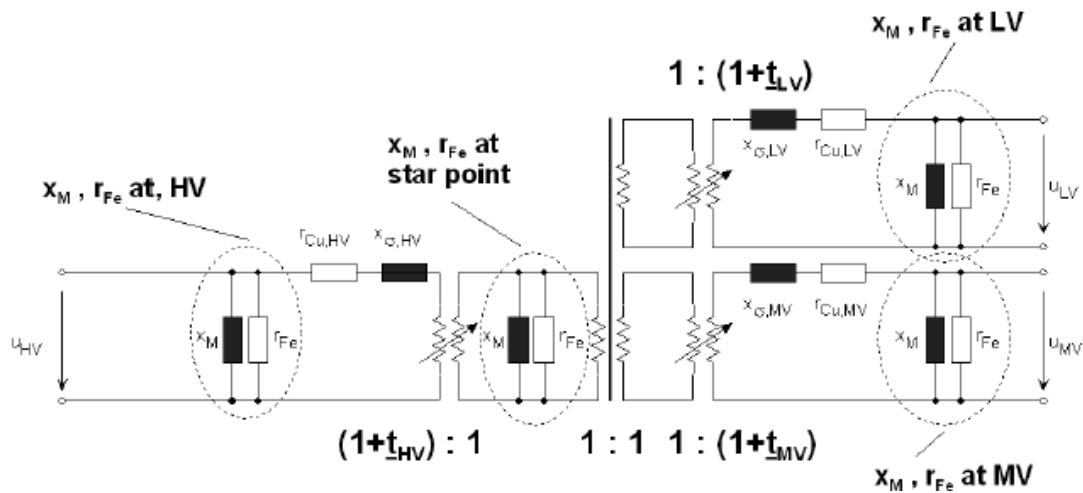
Εικόνα 4.1 : Ισοδύναμο κύκλωμα μοντέλου DFIG με ενσωματωμένο έλεγχο PWM.[32]



Εικόνα 4.2: Εφαρμογή PWM ελέγχου στην πλευρά του δρομέα.[32]

4.2.3 Μετασχηματιστής τριών τυλιγμάτων στο PowerFactory.

Ο μετασχηματιστής τριών τυλιγμάτων έχει τρεις θύρες και στο powerfactory υπάρχει προκαθορισμένο μοντέλο που τον αναπαριστά (εικόνα 4.3). Στην παρούσα μελέτη του υπεράκτιου αιολικού πάρκου γίνεται χρήση Μ/Σ ισχύος τριών τυλιγμάτων 240 MW 155/33 KV, με την συνδεσμολογία στην πλευρά υψηλής να είναι σε αστέρα με ουδέτερο (YN), ενώ οι δύο πλευρές στην μέση τάση είναι σε συνδεσμολογία τριγώνου (Delta). [32]



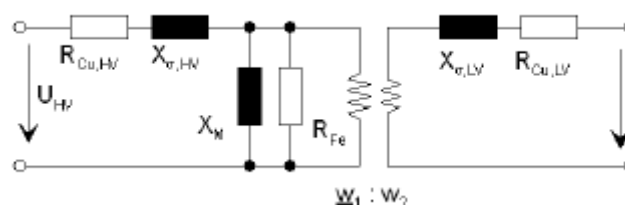
Εικόνα 4.3: Μοντέλο θετικής ακολουθίας μετασχηματιστή τριών τυλιγμάτων στο PowerFactory. [32]

Basic Data	Name: 240MVA_155_33kV	
Load Flow	Rated Power	
VDE/IEC Short-Circuit	HV-Side: 240, MVA	Rated Voltage
Complete Short-Circuit	MV-Side: 120, MVA	HV-Side: 155, kV
ANSI Short-Circuit	LV-Side: 120, MVA	MV-Side: 33, kV
IEC 61363	LV-Side: 33, kV	
DC Short-Circuit	Vector Group	
RMS-Simulation	HV-Side: YN	Phase Shift: 0, *30deg
EMT-Simulation	MV-Side: D	Phase Shift: 5, *30deg
Harmonics/Power Quality	LV-Side: D	Phase Shift: 5, *30deg
Protection	Name: YN0d5d5	
Optimal Power Flow	Hint: The short-circuit voltages refer to the corresponding min. rated Powers e.g. uk(HV-MV) is referred to the minimum of Sr(HV) and Sr(MV)	
Reliability	Positive Sequence Impedance	
Generation Adequacy	Short-Circuit Voltage uk	
Description	HV-MV: 13, %	Copper Losses
	MV-LV: 10, %	HV-MV: 30, kW
	LV-HV: 13, %	MV-LV: 20, kW
		LV-HV: 30, kW
	Zero Sequence Impedance	
	Short-Circuit Voltage uk0	
	HV-MV: 3, %	SHC-Voltage, Real Part
	MV-LV: 3, %	HV-MV: 0, %
	LV-HV: 3, %	MV-LV: 0, %
		LV-HV: 0, %

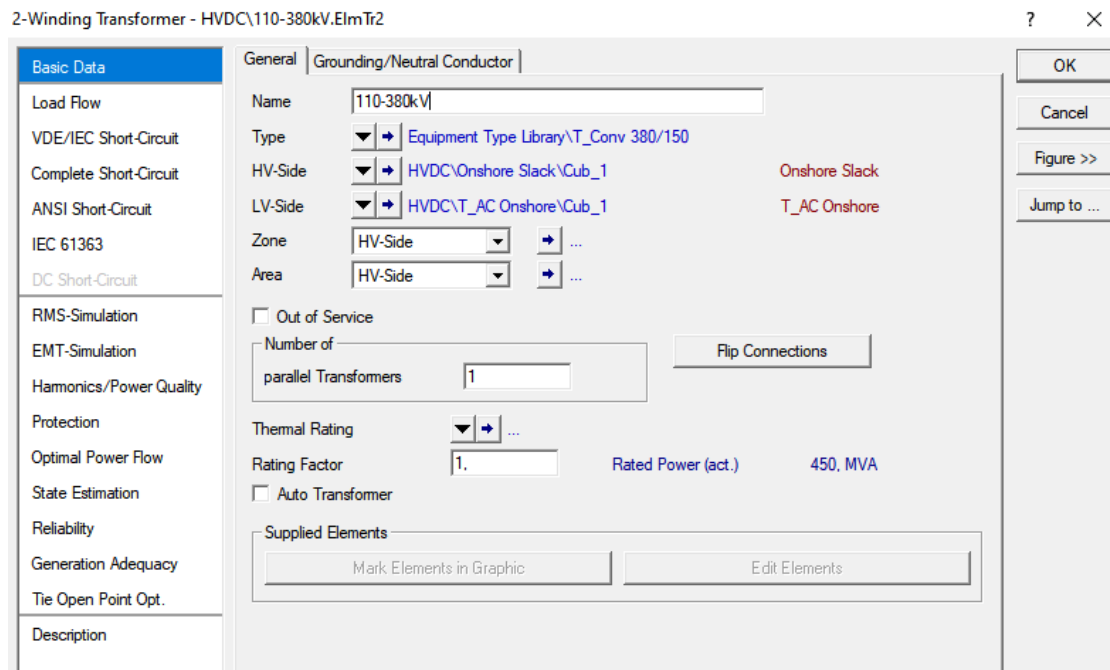
Εικόνα 4.4: Βασικά λειτουργικά χαρακτηριστικά του Μ/Σ τριών τυλιγμάτων που χρησιμοποιήθηκε στην μελέτη σε περιβάλλον Powerfactory.

4.2.4 Μετασχηματιστής δύο τυλιγμάτων στο PowerFactory.

Στην πλευρά του χερσαίου δικτύου στο μοντέλο της προσομοίωσης μας θα χρησιμοποιηθεί μετασχηματιστής δύο τυλιγμάτων.

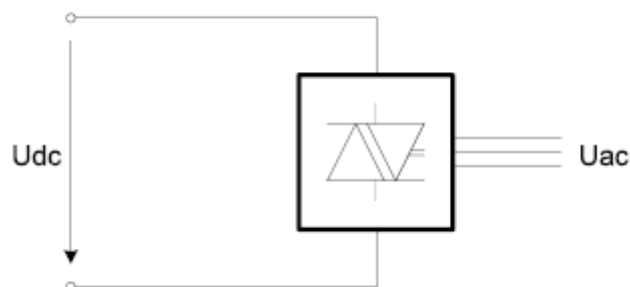


Εικόνα 4.5: Μοντέλο θετικής ακολουθίας μετασχηματιστή δύο τυλιγμάτων στο Powerfactory. [32]

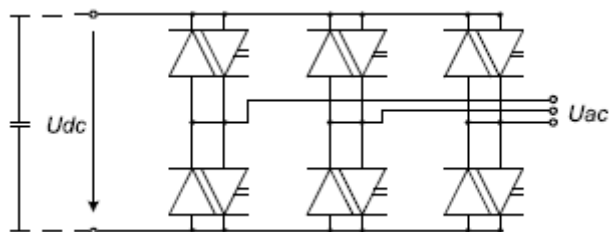


Εικόνα 4.6: Βασικά λειτουργικά χαρακτηριστικά του Μ/Σ δύο τυλιγμάτων που χρησιμοποιήθηκε στην μελέτη σε περιβάλλον Powerfactory.

4.2.5. PWM Μετατροπείας στο PowerFactory.



Εικόνα 4.7: Μοντέλο μετατροπείας PWM με δύο εισόδους DC στο PowerFactory.[32]



Εικόνα 4.8: Ισοδύναμο μοντέλο μετατροπέα PWM με δύο εισόδους DC σε συνδυασμό με DC χωρητικότητα στο PowerFactory.[32]

WM Converter/2 DC-Connections - HVDC\Conv_Offshore.ElmVsc

Basic Data	Name	Conv_Offshore		OK
Load Flow	Terminal AC	... Offshore Station\T_AC Offshore\Cub_2	T_AC Offshore	Cancel
VDE/IEC Short-Circuit	Terminal DC+	HVDC\T_DC_Offshore_pos\Cub_4	T_DC_Offshore_pc	Figure >>
Complete Short-Circuit	Terminal DC-	HVDC\T_DC_Offshore_neg\Cub_1	T_DC_Offshore_ne	Jump to ...
ANSI Short-Circuit	Zone	Terminal AC		
IEC 61363	Area	Terminal AC		
DC Short-Circuit	☐ Out of Service			
RMS-Simulation	Number of parallel Converters	1		
EMT-Simulation	Ratings Rated AC-Voltage: 155 kV Rated DC-Voltage (DC): 300 kV Rated Power: 450 MVA			
Hamonics/Power Quality	Modulation ☒ Sinusoidal PWM ☐ Rectangular PWM ☐ No Modulation			
Optimal Power Flow	Series Reactor Short Circuit Impedance: 10 % Copper Losses: 400 kW		No-Load Losses: 3000 kW	
Reliability	Model	HVDC\Offshore Controller		
Generation Adequacy				
Description				

Εικόνα 4.9: Βασικά λειτουργικά χαρακτηριστικά του υπεράκτιου μετατροπέα που χρησιμοποιήθηκε στην μελέτη σε περιβάλλον Powerfactory.

PWM Converter/2 DC-Connections - HVDC\Conv_Onshore.ElmVsc

Basic Data	Name	Conv_Onshore		OK
Load Flow	Terminal AC	HVDC\T_AC Onshore\Cub_3	T_AC Onshore	Cancel
VDE/IEC Short-Circuit	Terminal DC+	HVDC\T_DC_Onshore_pos\Cub_4	T_DC_Onshore_pc	Figure >>
Complete Short-Circuit	Terminal DC-	HVDC\T_DC_Onshore_neg\Cub_4	T_DC_Onshore_ne	Jump to ...
ANSI Short-Circuit	Zone	Terminal AC		
IEC 61363	Area	Terminal AC		
DC Short-Circuit	☐ Out of Service			
RMS-Simulation	Number of parallel Converters: 1			
EMT-Simulation	Ratings Rated AC-Voltage: 110. kV Rated DC-Voltage (DC): 300. kV Rated Power: 450. MVA			
Hamonics/Power Quality	Modulation ☒ Sinusoidal PWM ☐ Rectangular PWM ☐ No Modulation			
Optimal Power Flow	Series Reactor Short Circuit Impedance: 15. % Copper Losses: 400. kW			
Reliability	No-Load Losses: 3000. kW			
Generation Adequacy	Model: HVDC\Onshore Controller			
Description				

Εικόνα 4.10: Βασικά λειτουργικά χαρακτηριστικά του χερσαίου μετατροπέα που χρησιμοποιήθηκε στην μελέτη σε περιβάλλον Powerfactory.

4.2.6. Sinusoidal Pulse Width Modulation (SPWM) τεχνική ελέγχου.

Παραπάνω στην ονοματολογία των μετατροπέων χρησιμοποιήθηκε ο όρος SPWM – Sinusoidal Pulse Width Modulation, που αναφέρεται στην τεχνική ελέγχου του μετατροπέα. Στην SPWM διαμόρφωση σε έναν αντιστροφέα το επιθυμητό αποτέλεσμα είναι μια ημιτονοειδής έξοδος και να υπάρχει η δυνατότητα ελέγχου του πλάτους και της συχνότητάς της.

Η συχνότητα της τριγωνικής κυματομορφής καθορίζει την συχνότητα μετάβασης του αντιστροφέα και διατηρείται γενικά σταθερή, όπως και το πλάτος της κυματομορφής. Σε σχέση με το σχήμα της εικόνας 4.11, f_s συχνότητα της τριγωνικής κυματομορφής u_{tri} καθορίζει την συχνότητα με την οποία αλλάζουν κατάσταση οι διακόπτες του αντιστροφέα και λέγεται συχνότητα μετάβασης (switching frequency) ή φέρουσα συχνότητα (carrier frequency). Το σήμα ελέγχου $u_{control}$ χρησιμοποιείται για την διαμόρφωση της σχετικής διάρκειας αγωγής και έχει συχνότητα f_1 η οποία και είναι η θεμελιώδης συχνότητα της τάσης εξόδου του αντιστροφέα (συχνότητα διαμόρφωσης-modulating frequency).

Ο συντελεστής διαμόρφωσης πλάτους m_a ορίζεται ως [22]:

$$m_a = \frac{\hat{V}_{control}}{V_{tri}} \quad (4.1)$$

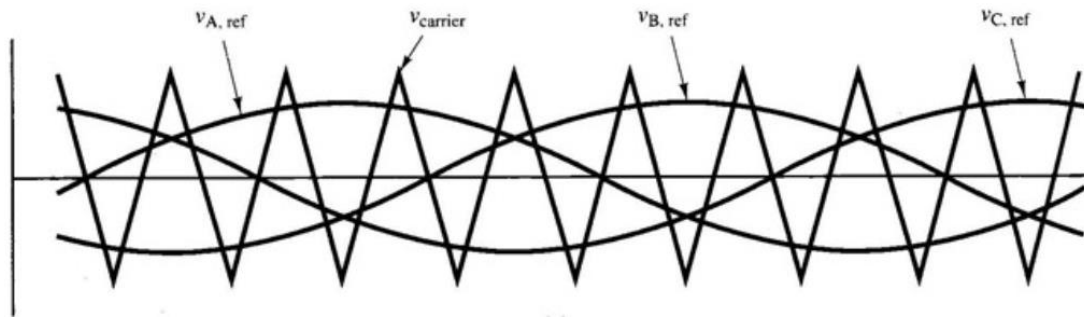
Όπου $\hat{V}_{tri}$ το πλάτος του τριγωνικού σήματος και διατηρείται γενικά σταθερό, ενώ $\hat{V}_{control}$ το πλάτος του σήματος ελέγχου.

Ο συντελεστής διαμόρφωσης συχνότητας m_f ορίζεται ως [22]:

$$m_f = \frac{f_s}{f_1} \quad (4.2)$$

Όπου f_s συχνότητα της τριγωνικής κυματομορφής u_{tri} , ενώ f_1 είναι η θεμελιώδης συχνότητα της τάσης εξόδου του αντιστροφέα.

Για την παραγωγή συμμετρικών τριφασικών τάσεων εξόδου σε μια επιθυμητή συχνότητα, συγκρίνεται η ίδια τριγωνική κυματομορφή με τρεις ημιτονοειδείς τάσεις ελέγχου, οι οποίες είναι κατά 120° εκτός φάσης, στην επιθυμητή συχνότητα, με μια τριγωνική κυματομορφή. Η συνεχής τάση εισόδου θεωρείται ουσιαστικά σταθερή.



Εικόνα 4.11: Τριφασικές κυματομορφές με διαμόρφωση SPWM.[22]

Τέλος, σε ένα ανορθωτή η διαδικασία της διαμόρφωσης SPWM είναι πιο απλή, αφού ένα σήμα ελέγχου $u_{control}$ (σταθερό ή αργά μεταβαλλόμενο με το χρόνο) συγκρίνεται με μια περιοδική τριγωνική κυματομορφή με σκοπό την παραγωγή των σημάτων μετάβασης. Ο έλεγχος της σχετικής διάρκειας των παλμών κατά αυτόν τον τρόπο, επιτρέπει τον έλεγχο της μέσης συνεχούς τάσης εξόδου. [22]

Η έξοδος της τάσης του τριφασικού αντιστροφέα βασισμένο σε PWM διαμόρφωση είναι η εξής:

$$V_{LL-rms} = \frac{\sqrt{3}}{2\sqrt{2}} * M * V_{DC} \quad (4.3)$$

Όπου V_{LL-rms} η πολική τάση rms που παράγει κάθε ημιγέφυρα, M ο είναι ο δείκτης διαμόρφωσης και αποτελεί την παράμετρο ελέγχου της τάσης εξόδου του μετατροπέα. Η τιμή του κυμαίνεται από 0 έως 1, ενώ για τιμές πάνω από 1 θεωρείται περιοχή υπερδιαμόρφωσης όπου ναι μεν μειώνονται οι διακοπτικές απώλειες και έχουμε την μέγιστη δυνατή θεμελιώδη συχνότητα, αλλά οι αρμονικές είναι μικρότερης τάξης και άρα φιλτράρονται πιο δύσκολα. [23], [35]

4.3 Μελέτη σφαλμάτων για το υπεράκτιο αιολικό πάρκο.

Σε αυτό το σημείο παρουσιάζεται το κύριο μέρος της εργασίας που είναι η προσομοίωση σφαλμάτων σε διάφορα σημεία του υπεράκτιου αιολικού πάρκου και οι επιπτώσεις που έχουν στην απόκριση των ηλεκτρικών ποσοτήτων που εκφράζονται τόσο στα υπεράκτια όσο και στα χερσαία μέρη του συνολικού συστήματος.

4.3.1 Βασικό μοντέλο υπεράκτιου Α//Π στο PowerFactory.

Για την προσομοίωση των σφαλμάτων το πρώτο βήμα είναι η μοντελοποίηση του υπεράκτιου αιολικού πάρκου.

Σε πρώτο στάδιο το βασικό μοντέλο είναι βασισμένο στην εφαρμογή του παραδείγματος του PowerFactory, στο οποίο όλα τα επιμέρους μέρη του πάρκου είναι μοντελοποιημένα σύμφωνα με τις προδιαγραφές που πρέπει να διέπουν την λειτουργία τους.

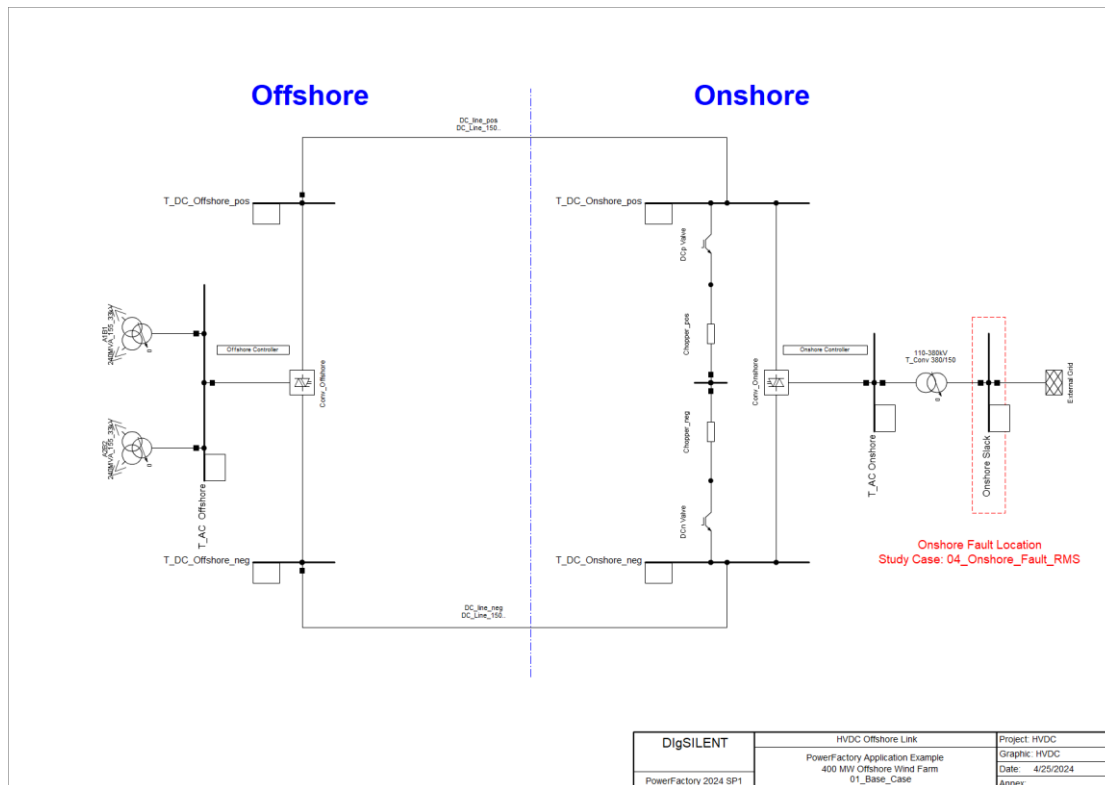
Το υπεράκτιο Α/Π του μοντέλου που θα μελετηθεί, αποτελείται συνολικά από 80 Α/Γ, οι οποίες συνδέονται με το χερσαίο δίκτυο μέσω Υψηλής Τάσης διασύνδεσης (HVDC). Στα δύο άκρα της διασύνδεσης υπάρχουν οι απαραίτητοι μετατροπείς ώστε να γίνονται οι μετασχηματισμοί του ρεύματος από εναλλασσόμενο σε συνεχές και αντίστροφα.

Η HVDC διασύνδεση μεταφέρει την ισχύ του Α/Π που είναι 400 MW και παράγεται από Α/Γ επαγωγής τύπου ΙΙΙ (DFIG). Η καθεμία Α/Γ έχει ονομαστική ενεργό ισχύ 5 MW.

Το μήκος της HVDC διασύνδεσης, δηλαδή η απόσταση μεταξύ των δύο μετατροπέων, είναι 100km και η υψηλή τάση του καλωδίου είναι 150kV.

Το χερσαίο δίκτυο στο οποίο συνδέεται το υπεράκτιο Α/Π είναι 380kV AC.

Η παρακάτω εικόνα 4.11 παρουσιάζει το μοντελοποιημένο HVDC σύστημα στο PowerFactory.



Εικόνα 4.11: Μονογραμμικό HVDC συστήματος μοντελοποιημένο στο PowerFactory.

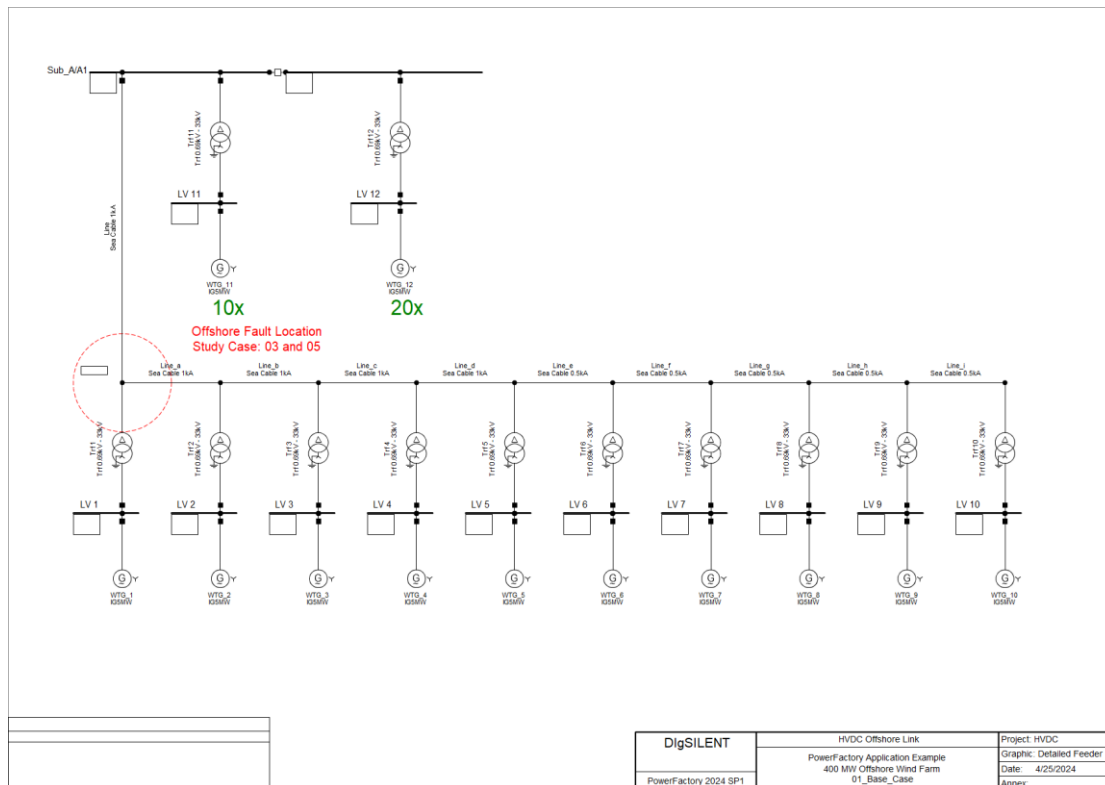
Από τις 80 συνολικά Α/Γ, οι 70 είναι ομαδοποιημένες για τους σκοπούς της προσομοίωσης, ενώ 10 είναι μοντελοποιημένες σαν ανεξάρτητες μηχανές.

Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζεται η ομαδοποίηση των 70 Α/Γ, καθώς και οι 10 ανεξάρτητες Α/Γ.

Οι 70 ΑΓ ομαδοποιούνται σε τέσσερα DFIG μοντέλα, όπου τα τρία μοντέλα εκπροσωπούν 20 Α/Γ συνδεδεμένες παράλληλα το καθένα, ενώ ένα μοντέλο εκπροσωπεί 10 Α/Γ συνδεδεμένες παράλληλα.

Το PowerFactory λοιπόν δίνει την δυνατότητα το κάθε μοντέλο να αποτελείται από στιβάδα μηχανών ίδιου τύπου, και στην περίπτωση που εξετάζουμε, η συνολική ενεργός ισχύς εξόδου είναι το άθροισμα των συνδεδεμένων παράλληλα Α/Γ κάθε συστοιχίας.

Η προσέγγιση της ομαδοποίησης εισάγει έναν συμβιβασμό, όπου μια λεπτομερής μελέτη πραγματοποιείται σε κλίμακα μεγάλης ισχύος, ενώ ταυτόχρονα το μέγεθος των στοιχείων του πάρκου είναι μειωμένο, συμβάλλοντας έτσι στην συντόμευση πολλών παραμετροποιήσεων.



Εικόνα 4.13: Μονογραμμικό διάγραμμα ζυγού του Α/Π που συνδέονται οι 10 ανεξάρτητες Α/Γ (detailed feeder).

4.3.2 Είδος εξεταστέων σφαλμάτων.

Η ανίχνευση των σφαλμάτων και η απομόνωσή τους είναι γεγονότα πολύ σημαντικά για την αξιόπιστη και ασφαλή λειτουργία ενός ηλεκτρικού συστήματος. Στην περίπτωση του υπεράκτιου αιολικού πάρκου η μελέτη σφαλμάτων είναι απαραίτητη ώστε να επιλεγούν σωστά οι ζώνες προστασίας, οι ικανότητες απομόνωσης των διακοπών και οι ρυθμίσεις των ηλεκτρονόμων με σκοπό την ευστάθεια του συστήματος.

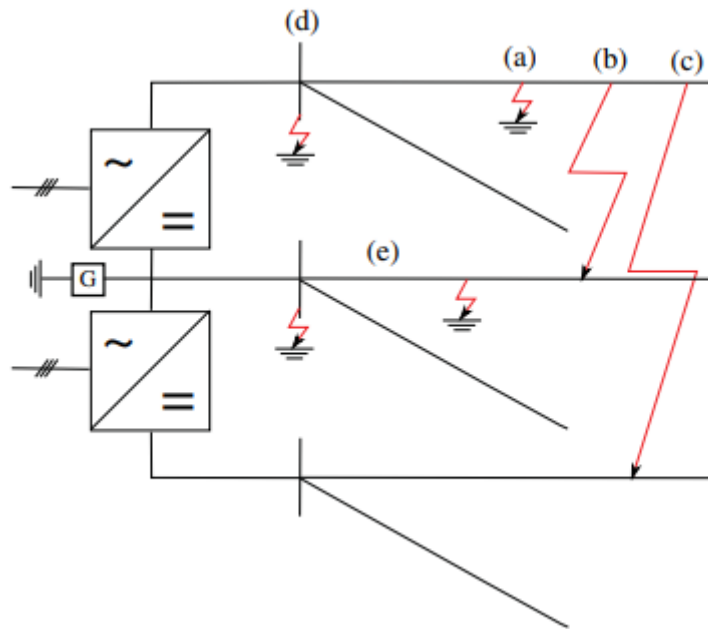
Τα σημαντικότερα σφάλματα σε ένα ηλεκτρικό σύστημα εναλλασσόμενου ρεύματος (AC) είναι τα τριφασικά και έπειτα τα διφασικά, ενώ σε ένα σύστημα μεταφοράς συνεχούς ρεύματος (DC) είναι τα σφάλματα μεταξύ πόλου και πόλου, δηλαδή θετικού και αρνητικού, το σφάλμα μεταξύ πόλου και ουδέτερου καθώς και το σφάλμα ενός εκ των δύο πόλων ως προς γη.

Για λόγους πληρότητας θα αναφερθούν τα AC σφάλματα που έχουν μελετηθεί αρκετά και είναι τα εξής:

- Τριφασικά (Συμμετρικό σφάλμα).
- Τριφασικά ως προς γη. (Συμμετρικό σφάλμα).
- Διφασικά (Ασύμμετρο σφάλμα).
- Διφασικά ως προς γη (Ασύμμετρο σφάλμα).

- Μονοφασικά ως προς γη (Ασύμμετρο σφάλμα).

Στο σημείο αυτό θα γίνει παρουσίαση των πιθανών σφαλμάτων στο DC σύστημα (εικόνα 4.14).



Εικόνα 4.14: Τύποι DC σφαλμάτων.[19]

Όπου:

- α) Σφάλμα πόλου-γης.
- β) Σφάλμα πόλου-ουδετέρου.
- γ) Σφάλμα πόλου-πόλου.
- δ) Σφάλμα ουδετέρου-γης.
- ε) Σφάλμα στον ζυγό DC.
-

Στην παρούσα εργασία θα μελετηθούν τριφασικά σφάλματα AC, ενώ στο σύστημα HVDC θα μελετηθεί το σφάλμα που συμβαίνει μεταξύ ενός πόλου, στην προκειμένη περίπτωση του θετικού, ως προς γη.

4.3.3 Κύριες διαφορές μεταξύ AC και DC προστασιών.

Αν και οι σκοποί των συστημάτων προστασίας AC και DC είναι πανομοιότυποι, υπάρχουν κάποιες δομικές διαφοροποιήσεις. Σε ένα δίκτυο AC ο χρόνος εκκαθάρισης ενός σφάλματος περιορίζεται από την ικανότητα των σύγχρονων γεννητριών να παραμείνουν συγχρονισμένες με το υπόλοιπο δίκτυο.

Σε ένα δίκτυο DC δεν υπάρχει αυτός ο παράγοντας για την ρύθμιση του χρόνου εκκαθάρισης σφάλματος, αλλά κυριαρχεί το μέλημα για την αποφυγή καταστροφών

του εξοπλισμού εξαιτίας των μεγάλων ρευμάτων. Οι περιορισμοί λοιπόν μπαίνουν από τα όρια των μετατροπών και τον DC διακοπών.

Επίσης κατά την διάρκεια ενός σφάλματος DC, η λειτουργία των μετατροπών μπλοκάρει για λόγους προστασίας των ημιαγωγικών στοιχείων, ως εκ τούτου χάνεται η δυνατότητα ελέγχου μέσω των μπλοκαρισμένων μετατροπών μέρους του δικτύου που επηρεάζεται. Όσο πιο πολλοί μετατροπείς επηρεάζονται, τόσο πιο αργή είναι η επανένταξή τους στο δίκτυο και τόσο πιο αργή είναι η επιστροφή στην κανονική λειτουργία.

Οι μέγιστοι χρόνοι εκκαθάρισης εν τέλει εξαρτώνται από το πόσο έχει επηρεαστεί το AC δίκτυο από το σφάλμα που συμβαίνει στην DC πλευρά. [19]

4.3.4 Περίπτωση τριφασικού σφάλματος στον χερσαίο ζυγό (T_AC_onshore).

Το βραχυκύκλωμα που συμβαίνει στο χερσαίο τμήμα του μοντέλου μας και συγκεκριμένα στο ζυγό που βρίσκεται στην στεριά πριν τον μετασχηματιστή, 'T_AC_Onshore', θα μελετηθεί σε αυτή την ενότητα. Εφαρμόζοντας την Root Mean Square (RMS)-Τετραγωνικής Ρίζας της Μέσης Τιμής-simulation μέθοδο, θα αναλύσουμε την ολιστική επίπτωση του βραχυκυκλώματος στο μοντέλο. Οι προσομοιώσεις RMS χρησιμοποιούν αναπαραστάσεις φασιθετών για τις τάσεις και τα ρεύματα, προκειμένου να λύσουν τις εξισώσεις του συστήματος ισχύος στο πεδίο της συχνότητας. Αυτή η προσέγγιση θεωρεί ότι το σύστημα λειτουργεί σε ψευδοστατική κατάσταση και μελετά αποτελεσματικά τη συμπεριφορά του σε μεγαλύτερα χρονικά διαστήματα και υπό συνθήκες μόνιμης κατάστασης.

Οι ενέργειες που θα πρέπει να ακολουθηθούν στο PowerFactory είναι να οριστεί αρχικά η μέθοδος προσομοίωσης, στην περίπτωσή μας όπως αναφέρθηκε είναι η RMS, στη συνέχεια να οριστεί η θέση που συμβαίνει το σφάλμα, καθώς και το είδος του σφάλματος.

Επιλέγοντας το εικονίδιο 'Edit Simulation Events', καθορίζονται τα γεγονότα (events) που θα εκτελεστούν (εικόνα 4.15).

Short-Circuit Event - ...mulation Events/Fault/Short-Circuit Event.EvtShc

☐ Out of Service

Execution Time

Absolute

hours 0 h

minutes 0 min

seconds 0, s

Object ▼ → HVDC\T_AC Onshore

Fault Type 3-Phase Short-Circuit ▼

Fault Impedance

Input Resistance, Reactance ▼

Resistance 0,01 Ohm Reactance 1, Ohm

OK

Cancel

Εικόνα 4.16: Καθορισμός τριφασικού βραχυκυκλώματος στο PowerFactory.

Short-Circuit Event - ...imulation Events/Fault\Clear Short-Circuit.EvtShc

☐ Out of Service

Execution Time

Absolute

hours 0 h

minutes 0 min

seconds 0,15 s

Object ▼ → HVDC\T_AC Onshore

Fault Type Clear Short-Circuit ▼

For EMT-Simulation only

Clear Short-Circuit At Zero Crossing ▼

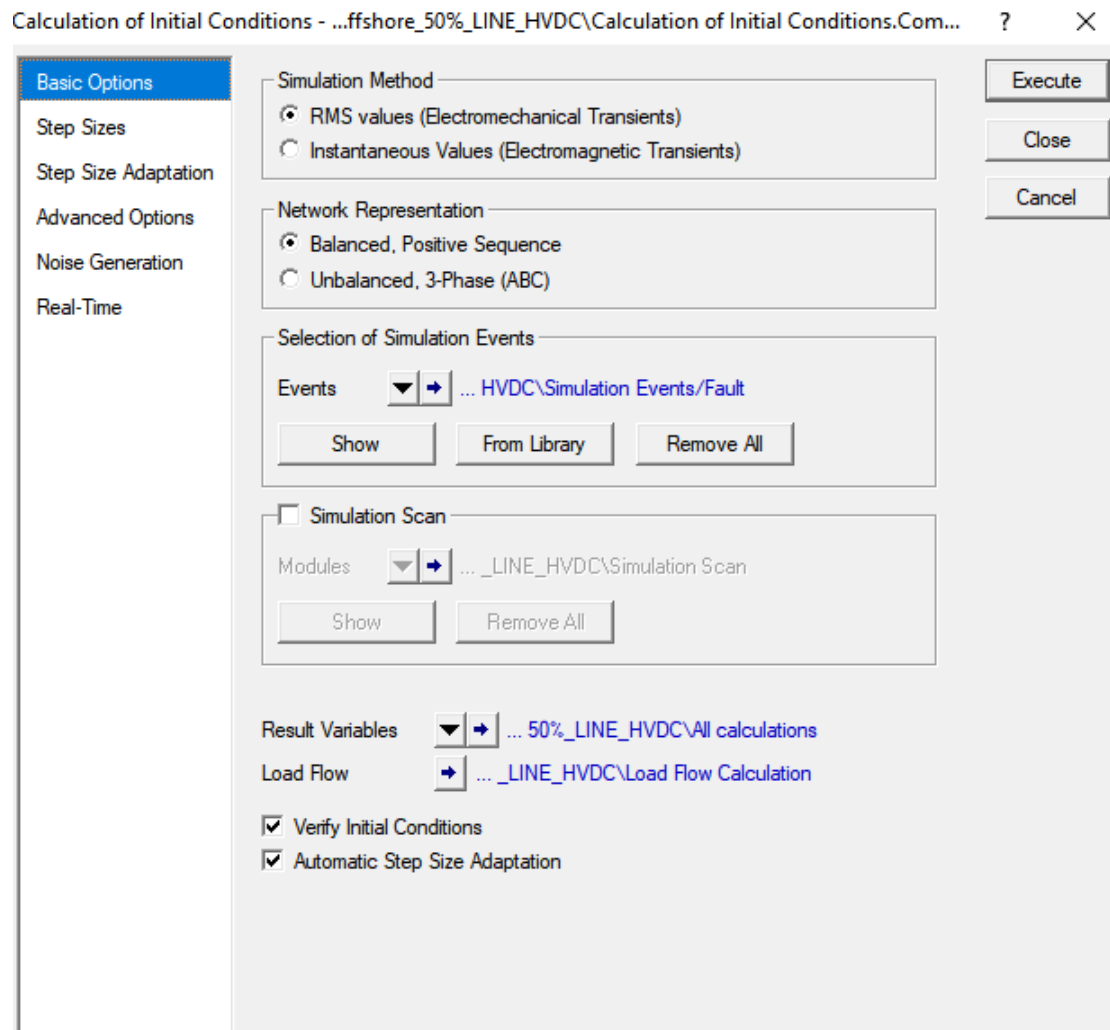
OK

Cancel

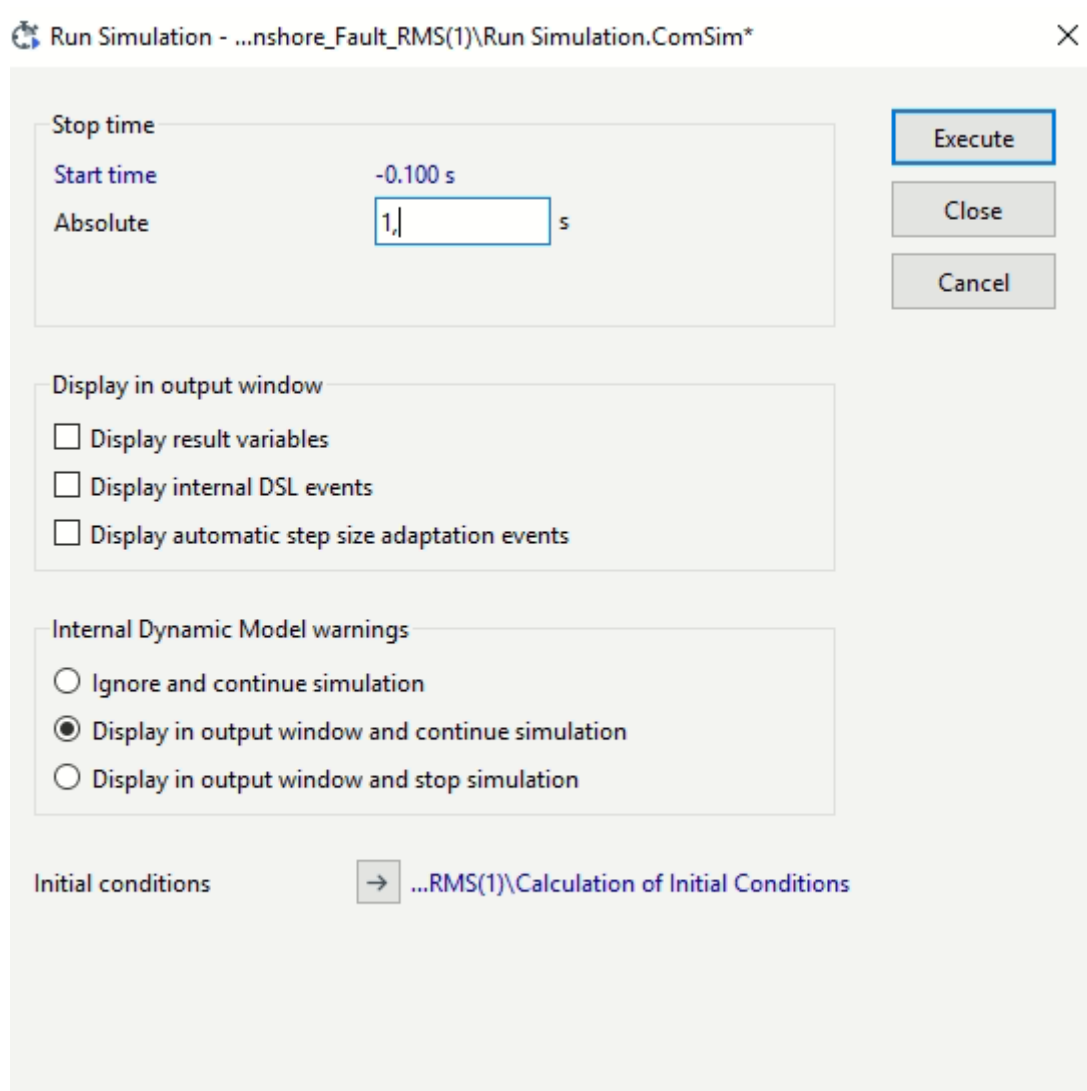
Εικόνα 4.17: Καθορισμός εκκαθάρισης σφάλματος στο powerfactory.

Στη συνέχεια για να ‘τρέξουμε’ την προσομοίωση αρχικά επιλέγουμε το εικονίδιο ‘Calculate Initial Conditions’ (εικόνα 4.18), ώστε να υπολογιστούν οι αρχικές συνθήκες του προβλήματος και έπειτα επιλέγουμε το εικονίδιο ‘Start Simulation’, έτσι ώστε να ξεκινήσει η προσομοίωση, καθορίζοντας και την χρονική διάρκεια που θα ‘τρέξει’ (εικόνα 4.19).

Όπως παρατηρεί κάποιος στην επιλογή ‘Calculate Initial Conditions’ καθορίζεται επιθυμητή μέθοδος της προσομοίωσης, στην προκειμένη περίπτωση RMS, και η παρουσίαση του μοντέλου του δικτύου, στην προκειμένη περίπτωση επιλογή συμμετρικό θετικής ακολουθίας.



Εικόνα 4.18: Καθορισμός αρχικών συνθηκών πριν την εκτέλεση της προσομοίωσης σε περιβάλλον PowerFactory.



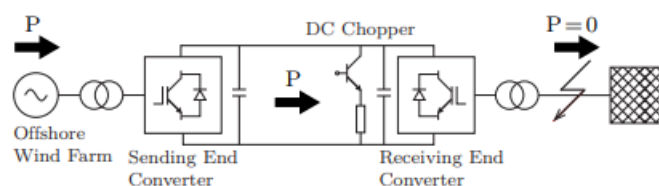
Εικόνα 4.19: Καθορισμός έναρξης και διάρκειας προσομοίωσης σε περιβάλλον PowerFactory.

Κύριος στόχος της εξέτασης του παραπάνω σφάλματος είναι να διευκρινιστεί αρχικά η συμπεριφορά του ηλεκτρικού μέρους του μοντέλου όπου δεν γίνεται το σφάλμα, δηλαδή το υπεράκτιο τμήμα (offshore wind farm) και στη συνέχεια η συμπεριφορά των δύο μετατροπέων (offshore και onshore) κατά την διάρκεια του σφάλματος, τόσο όσο το σφάλμα δεν έχει ‘καθαριστεί’, όσο και μετά την εκκαθάρισή του.

Για να συμβεί η εξέταση των ηλεκτρικών στοιχείων που προαναφέραμε στο PowerFactory πρέπει να εισαχθεί μέσω της επιλογής ‘insert’ διαγράμματα, που αναφέρονται ως ‘Virtual Instrument Panel’, και στη συνέχεια επιλέγοντας την επιθυμητή μεταβλητή, αποτυπώνεται η συμπεριφορά της.

Οι σημαντικότερες διαπιστώσεις είναι πρώτον, πως κατά την διάρκεια του σφάλματος το υπεράκτιο αιολικό πάρκο δεν επηρεάζεται, αφού η σύζευξη με το HVDC link θα μπορούσε κανείς να πει ότι απομονώνει τα δύο συστήματα (υπεράκτιο και χερσαίο) και δεύτερον ότι κατά την διάρκεια του σφάλματος, η παραγόμενη περίσσεια ενεργός

ισχύς που δεν μπορεί να μεταφερθεί στην στεριά μέσω του χερσαίου μετατροπέα, καταναλώνεται στο chopper.(εικόνα 4.20)

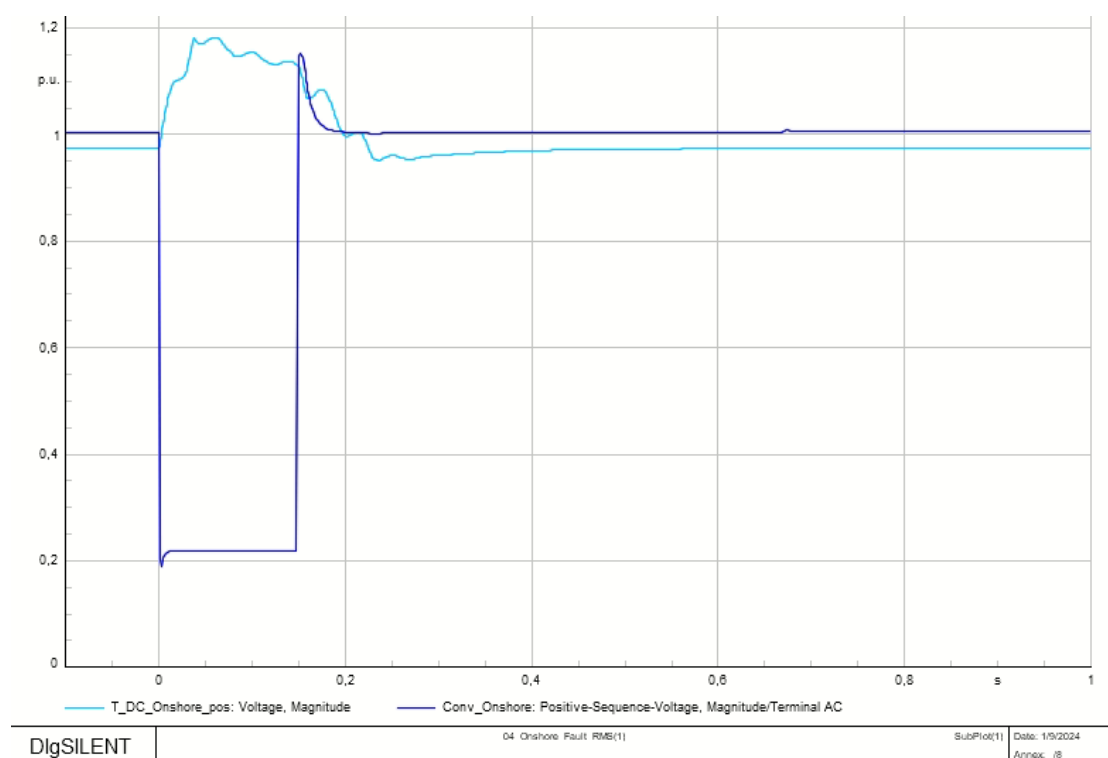


Εικόνα 4.20: Περίπτωση ενεργοποίησης του DC chopper σε περίπτωση σφάλματος στον χερσαίο ζυγό. [34]

Σε αυτό το σημείο θα εξεταστεί η συμπεριφορά του συστήματος κατά την διάρκεια του σφάλματος καθώς επίσης και εφόσον εκκαθαριστεί στα 0.15 δευτερόλεπτα .

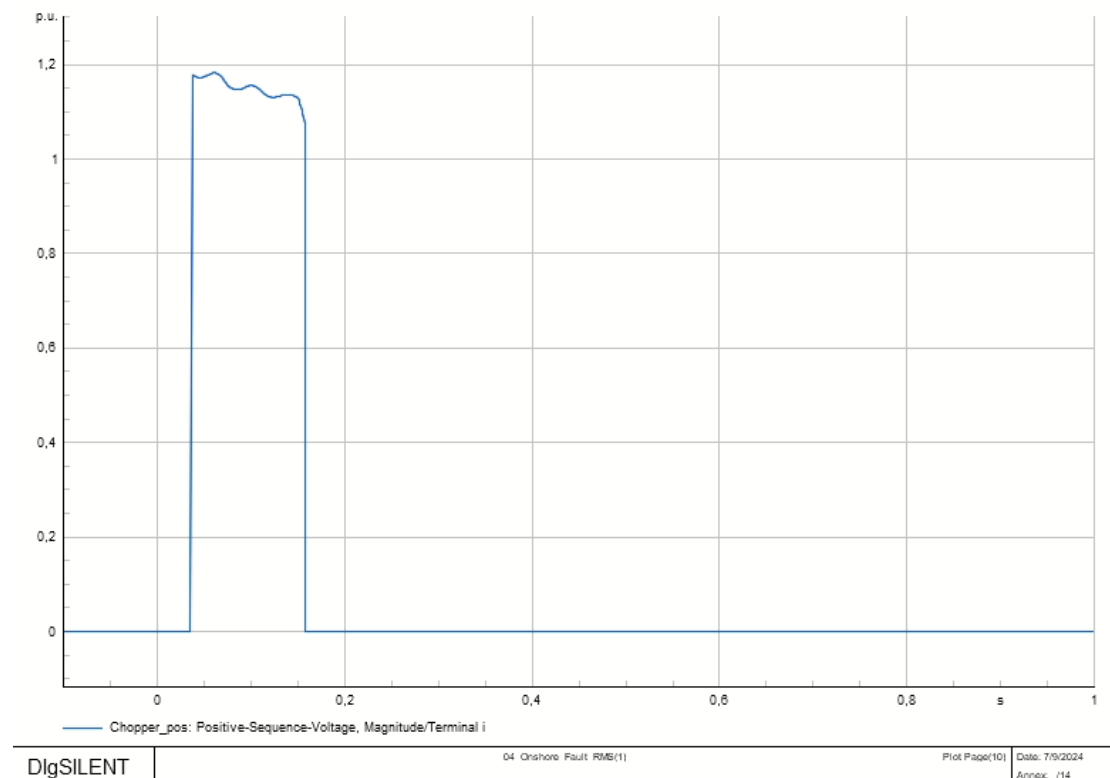
Προσθέτοντας λοιπόν ένα δεύτερο γεγονός-clear short circuit στα 0.15 δευτερόλεπτα, το σφάλμα εκκαθαρίζεται και η συμπεριφορά του συστήματος επανέρχεται σε κανονική λειτουργία.

Στην εικόνα 4.21 παρουσιάζεται στο διάγραμμα η DC τάση στις βαλβίδες αφού έχει ενεργοποιηθεί η αντίσταση του chopper, που μόλις το σφάλμα εκκαθαριστεί παύει να βρίσκεται σε λειτουργία. Επίσης παρουσιάζεται και η τάση του χερσαίου μετατροπέα, η οποία παίρνει πολύ χαμηλή τιμή εξαιτίας του σφάλματος στον ζυγό που συνδέεται.

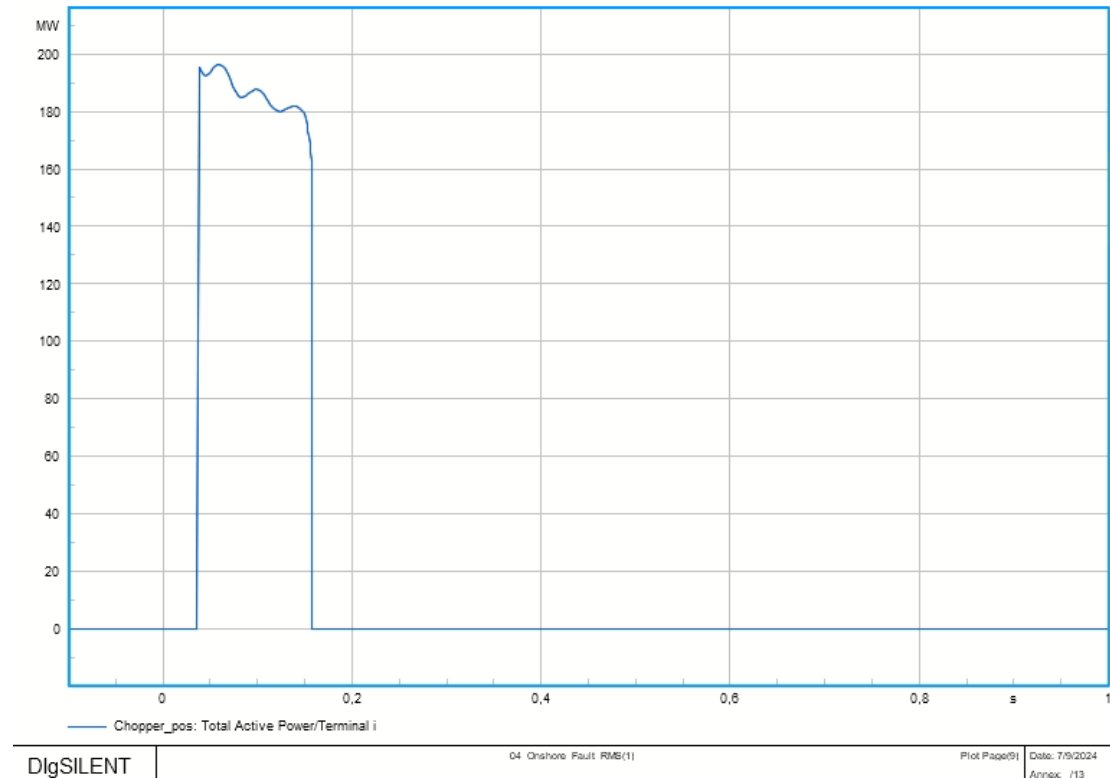


Εικόνα 4.21 : Απόκριση της τάσης του DC link και του χερσαίου μετατροπέα κατά την διάρκεια του σφάλματος με εκκαθάρισή του.

Στο διάγραμμα της εικόνας 4.22 φαίνεται η τιμή α.μ. της τάσης του chopper, όπου πριν το σφάλμα είναι μηδενική και την χρονική στιγμή που η τιμή της τάσης των βαλβίδων ξεπεράσει το 1,1 α.μ. όπως έχει καθοριστεί στον έλεγχο, το chopper ενεργοποιείται, καταναλώνοντας ενεργό ισχύ, όπως φαίνεται στο διάγραμμα της εικόνας 4.23.



Εικόνα 4.22 : Απόκριση της τάσης του chopper πριν,κατά και μετά την διάρκεια του σφάλματος.



Εικόνα 4.23 : Απόκριση της τάσης του chopper πριν,κατά την διάρκεια και μετά το σφάλμα.

Όπως προαναφέρθηκε στο chopper καταναλώνεται η ενέργεια που παράγεται από τις ανεμογεννήτριες, που εξαιτίας του σφάλματος στο ζυγό στην στεριά, δεν μπορεί να μεταφερθεί στο δίκτυο, με αποτέλεσμα να αυξάνεται η τάση DC.

Αξίζει να αναφερθεί ότι όπως και στον έλεγχο των ημιαγωγών στους μετατροπείς, έτσι και στην περίπτωση του chopper, οι βαλβίδες αποτελούν την καρδιά του ελέγχου, λαμβάνοντας και επεξεργάζοντας σήματα σε πολύ μικρό χρονικό διάστημα.

Η λειτουργία ελέγχου των βαλβίδων των choppers βασίζεται στην θετική και αρνητική DC τάση που δέχεται ως σήματα εισόδου. Εάν λοιπόν η τάση ξεπεράσει ένα ορισμένο όριο θα ενεργοποιηθούν οι αντιστάσεις του chopper, ενώ αντίθετα όταν η τάση πέσει κάτω από ένα ορισμένο όριο, οι βαλβίδες θα μπλοκάρουν την λειτουργία των αντιστάσεων. Στην εικόνα 4.24 παρουσιάζονται τα όρια της τάσης DC που έχουν εισαχθεί για τον έλεγχο της λειτουργίας του chopper σε περιβάλλον του PowerFactory. Σκοπός του DC chopper είναι να προστατέψει τα IGBT's των μετατροπέων, περιορίζοντας την τάση σε μια κατάλληλη τιμή

Η τιμή της κατάλληλης αντίστασης του chopper υπολογίζεται ως εξής [33], [34]:

$$R_{chopper} = (1,2 * V_{rated})^2 / P_{rated} \quad (4.4)$$

Στην περίπτωση της παρούσας προσομοίωσης λαμβάνοντας υπόψιν $V_{rated} = 150 \text{ kV}$ και $P_{rated} = 200 \text{ MW}$, θα πρέπει η τιμή αντίστασης του κάθε chopper να ισούται περίπου με 160Ω .

Η ελάχιστη τιμή της τάσης που ενεργοποιείται, μέσω των βαλβίδων η αντίσταση του chopper, είναι η 1.1 α.μ. και η μέγιστη τιμή λειτουργίας είναι η 1.2 α.μ. (εικόνα 4.24)

Τα βασικά χαρακτηριστικά του chopper καθώς και η ωμική αντίστασή του που λαμβάνεται υπόψη στην RMS προσομοίωση παρουσιάζονται στις εικόνες 4.25 και 4.26.

DSL Model - HVDC\Onshore Controller\ChopperControl.ElmDsl*

Basic Data

Description

General | Advanced 1 | Advanced 2 | Advanced 3

Name: ChopperControl

Type: ...verter Control\OnshoreChopperCtrl

Configuration Script: →

☐ Out of Service ☒ A-stable integration algorithm

	Parameter
UdcUpper Threshold for Chopper Connection [pu]	1,2
UdcLower Threshold for Chopper Disconnection [pu]	1,1

Export to Clipboard | Set to default | Show Diagram

OK

Cancel

Events

Arrays/Matrices

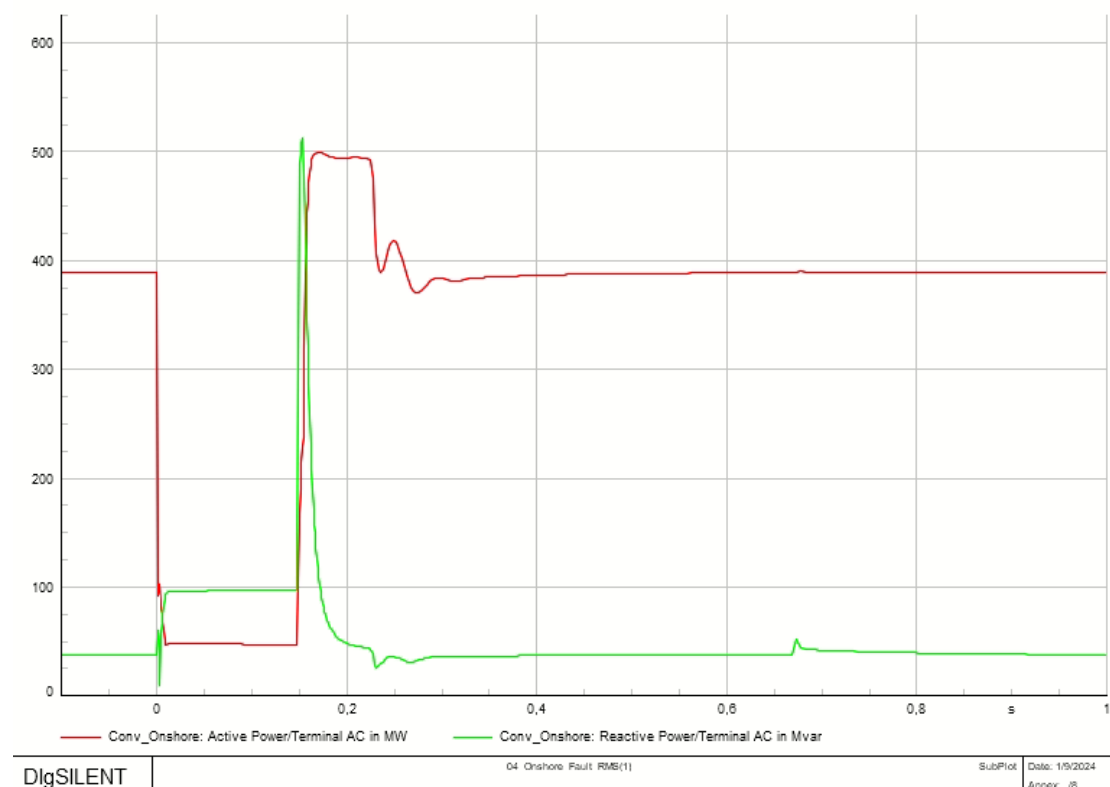
Εικόνα 4.24: Άνω και κάτω όρια λειτουργίας του chopper μέσω ελέγχου σε περιβάλλον PowerFactory.

Basic Data	Name: Chopper_pos	OK
Description	Terminal i: HVDC\T_DC_Chopper_pos\Cub_1 T_DC_Chopper_pos	Cancel
Load Flow	Terminal j: HVDC\Earth Onshore\Cub_1 Earth Onshore	Figure
Short-Circuit VDE/IEC	Zone: Terminal i	Jump to ...
Short-Circuit Complete	Area: Terminal i	
Short-Circuit ANSI	☐ Out of Service	
Short-Circuit IEC 61363	Ratings	
Short-Circuit DC	Rated Voltage: 150, kV (Line-Line Voltage)	
Simulation RMS	Rated Power: 1, MVA	
Simulation EMT	Thermal Rating:	
Power Quality/Harmonics	System Type: DC Phases: 1	
Reliability		
Hosting Capacity Analysis		
Power Park Energy Analysis		
Optimal Power Flow		

Εικόνα 4.25: Ονομαστικά μεγέθη λειτουργίας του chopper σε περιβάλλον PF.

Basic Data	☒ A-stable integration algorithm	OK
Description	☐ Variable inductance/reactance via input signals	Cancel
Load Flow	Inductance and Resistance	Figure
Short-Circuit VDE/IEC	Inductance, L: 0, mH	Jump to ...
Short-Circuit Complete	Resistance, R: 160, Ohm	
Short-Circuit ANSI		
Short-Circuit IEC 61363		
Short-Circuit DC		
Simulation RMS		
Simulation EMT		
Power Quality/Harmonics		
Reliability		
Hosting Capacity Analysis		
Power Park Energy Analysis		
Optimal Power Flow		

Εικόνα 4.26: Τιμή ωμικής αντίστασης chopper κατά την διάρκεια της RMS προσομοίωσης σε περιβάλλον PF.



Εικόνα 4.27 : Απόκριση της ενεργού και αέργου ισχύος και του χερσαίου μετατροπέα κατά την διάρκεια του σφάλματος με εκκαθάρισή του.

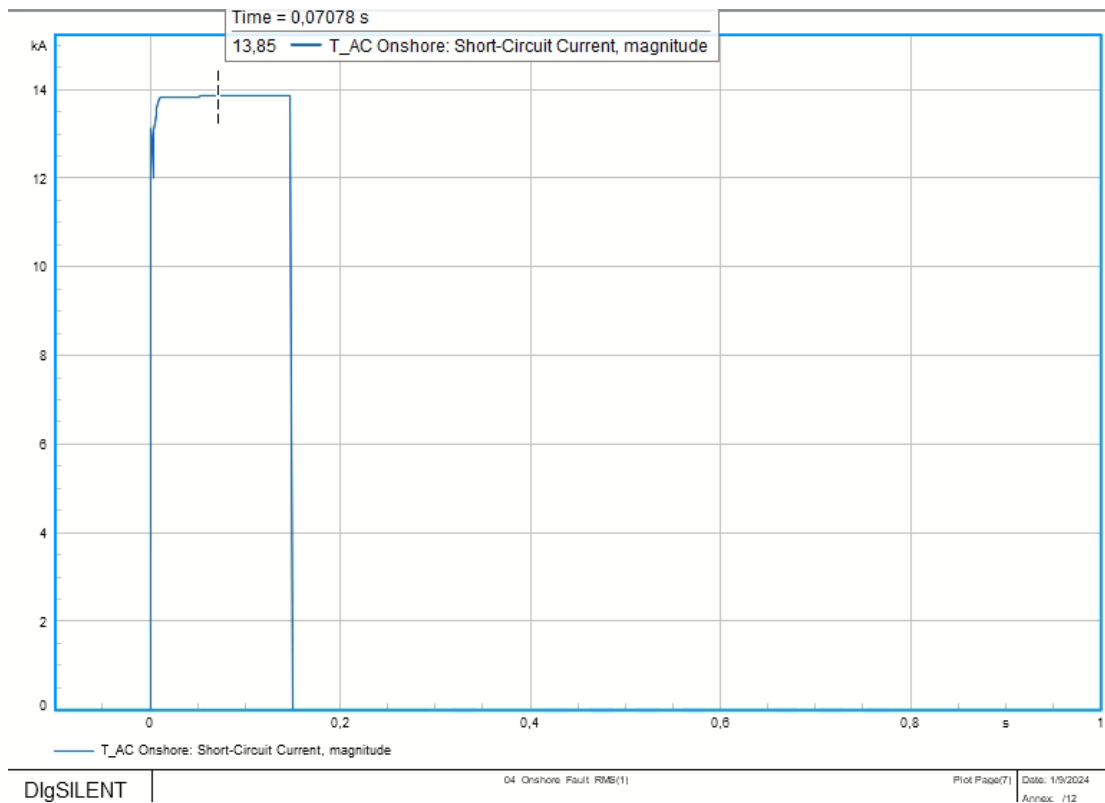
Στην εικόνα 4.27 αποτυπώνεται η αλλαγή στον έλεγχο του μετατροπέα στον χερσαίο σταθμό, όπου κατά την διάρκεια του σφάλματος «προτεραιοποιείται» ο έλεγχος αέργου ισχύος για να στηριχθεί η τάση, και η επαναφορά στην κανονική λειτουργία μετά την εκκαθάριση του σφάλματος, κάτι που φαίνεται στο διάγραμμα ‘Conv_Onshore: Active & Reactive Power/Terminal AC in MW’.

Αξίζει να αναφερθεί ότι το μεγάλο peak που παρατηρείται στο διάγραμμα της αέργου ισχύος οφείλεται στην λειτουργία του ελέγχου και στην ελάχιστη καθυστέρηση στην προσαρμογή των ελεγκτών στην νέα συνθήκη λειτουργίας, αφού η τάση επανέρχεται σε κανονικές συνθήκες και προτεραιοποιείται ξανά ο έλεγχος της ενεργού ισχύος.

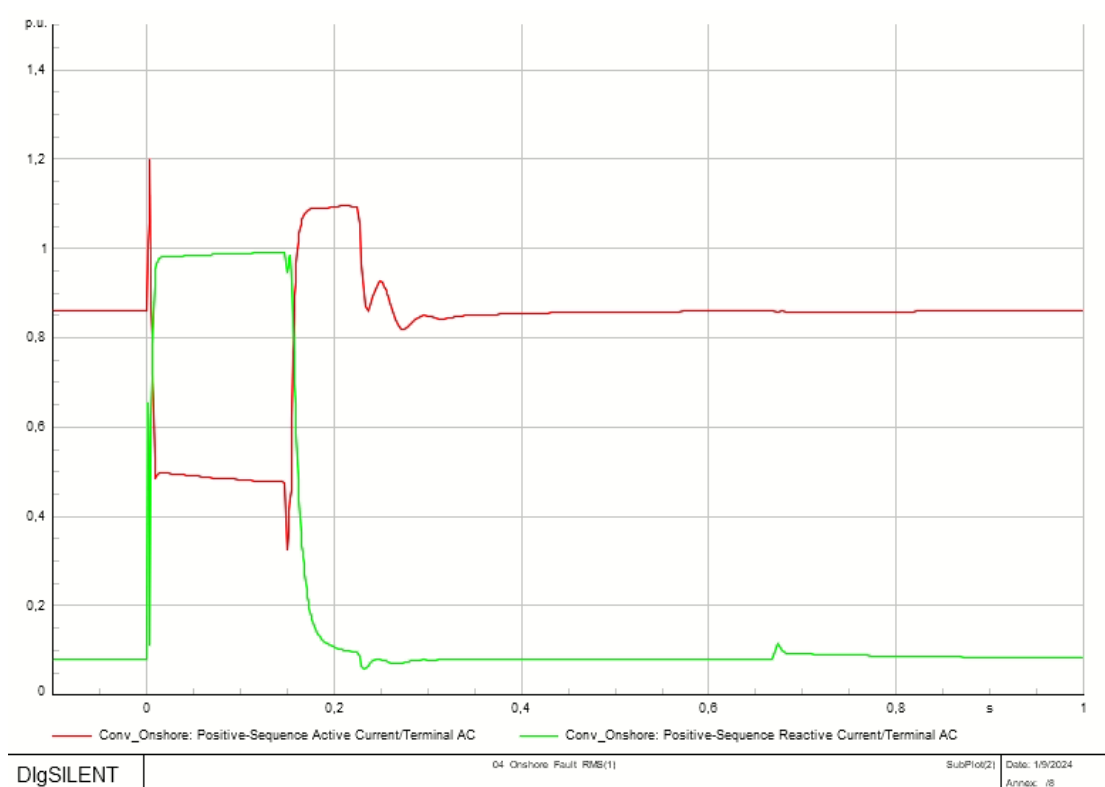
Ένα επιπλέον σημαντικό ηλεκτρικό μέγεθος για τον καθορισμό των προστασιών είναι ο υπολογισμός του ρεύματος βραχυκύκλωσης κατά την διάρκεια του σφάλματος.

Στην παρακάτω εικόνα 4.28 παρουσιάζεται το ρεύμα βραχυκύκλωσης (short-circuit) σε kA του ζυγού στην στεριά (T_AC_onshore), στον οποίον γίνεται και το σφάλμα. Το μέγιστο ρεύμα βραχυκύκλωσης στον χερσαίο ζυγό κατά την διάρκεια του σφάλματος αγγίζει την τιμή των 13.85 kA.

Στην εικόνα 4.29 παρουσιάζεται ευκρινέστατα η σημαντική αλλαγή του ενεργού και αέργου ρεύματος που πραγματοποιείται βάση του ελέγχου στον χερσαίο μετατροπέα.



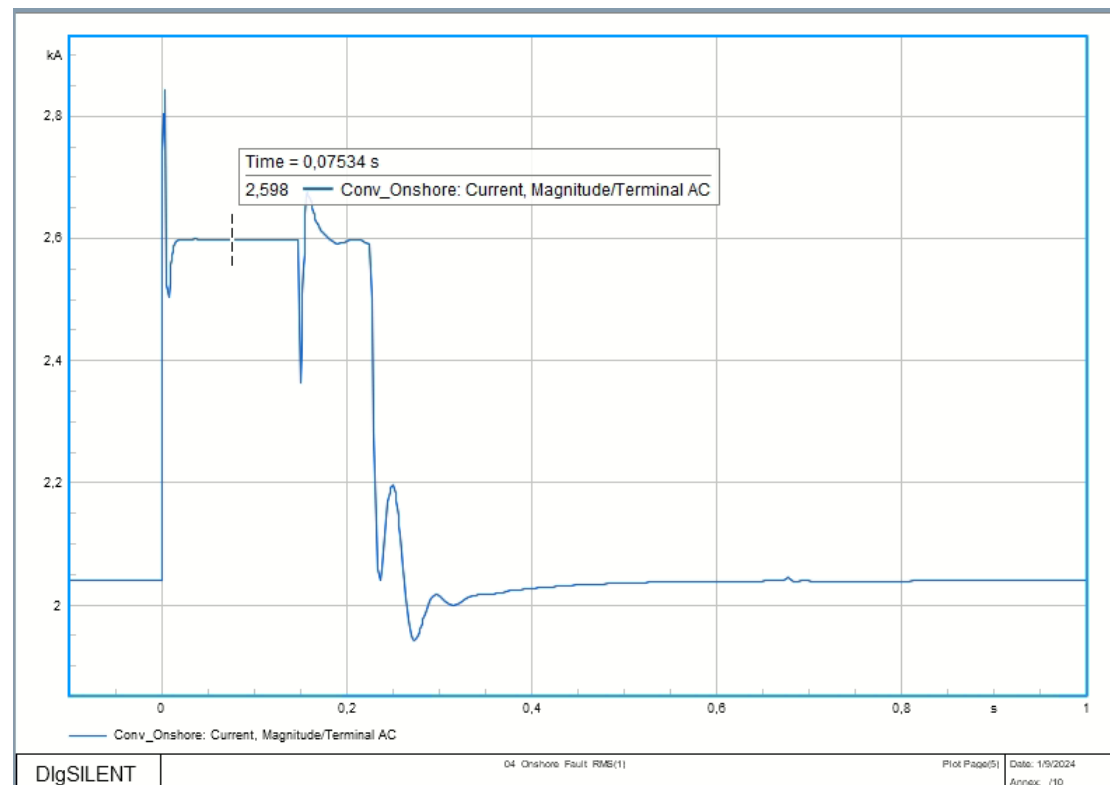
Εικόνα 4.28: Ρεύμα βραχυκύκλωσης του χερσαίου ζυγού ($T_{AC_onshore}$) κατά την διάρκεια του σφάλματος.



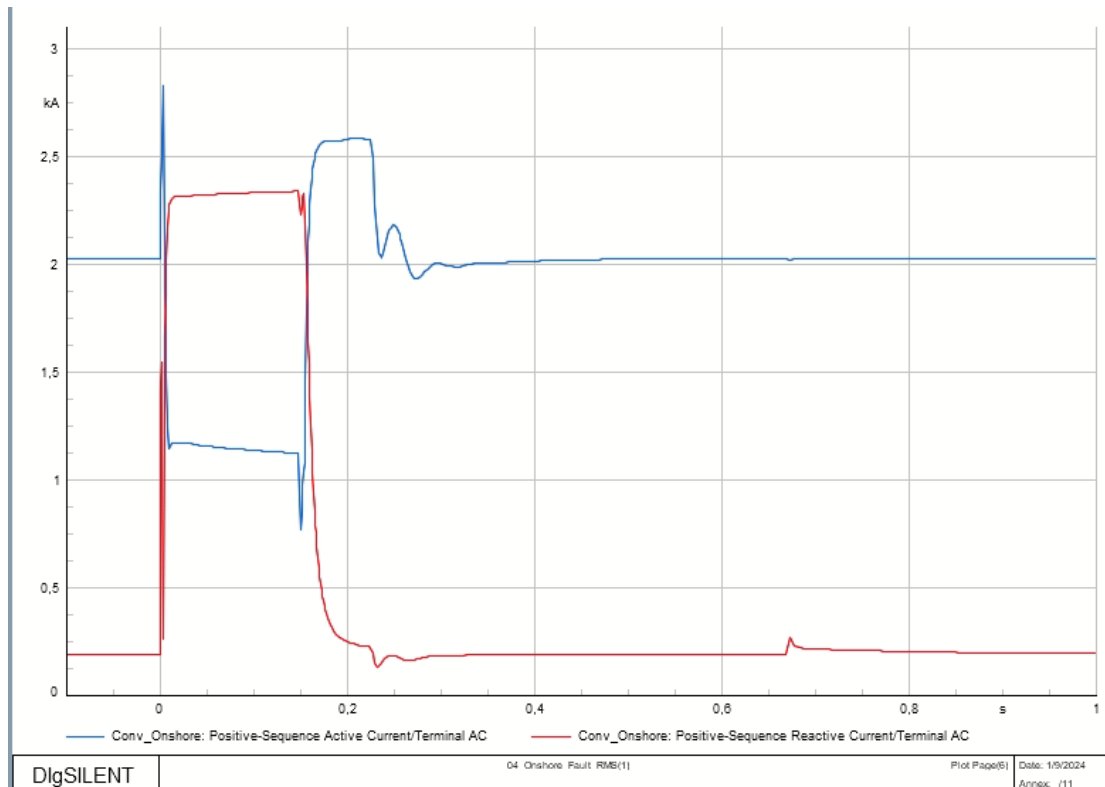
Εικόνα 4.29: Απόκριση του ενεργού και αέργου ρεύματος του χερσαίου μετατροπέα κατά την διάρκεια του σφάλματος σε α.μ.

Η συνολική συνεισφορά του χερσαίου μετατροπέα (Conv_Onshore) στην τροφοδότηση του σφάλματος όπως παρουσιάζεται στην εικόνα 4.30 είναι περίπου 2.6 kA όπου το μεγαλύτερο μέρος αποτελείται από άεργο ρεύμα (εικόνα 4.31), τιμή που από την θεωρία αποτελεί λογική για την συμβολή των μετατροπέων στην περίπτωση σφάλματος, αφού είναι μεταξύ 1 α.μ. και 1.5 α.μ.

Το υπόλοιπο ρεύμα βραχυκύκλωσης προέρχεται από τον χερσαίο μετασχηματιστή.



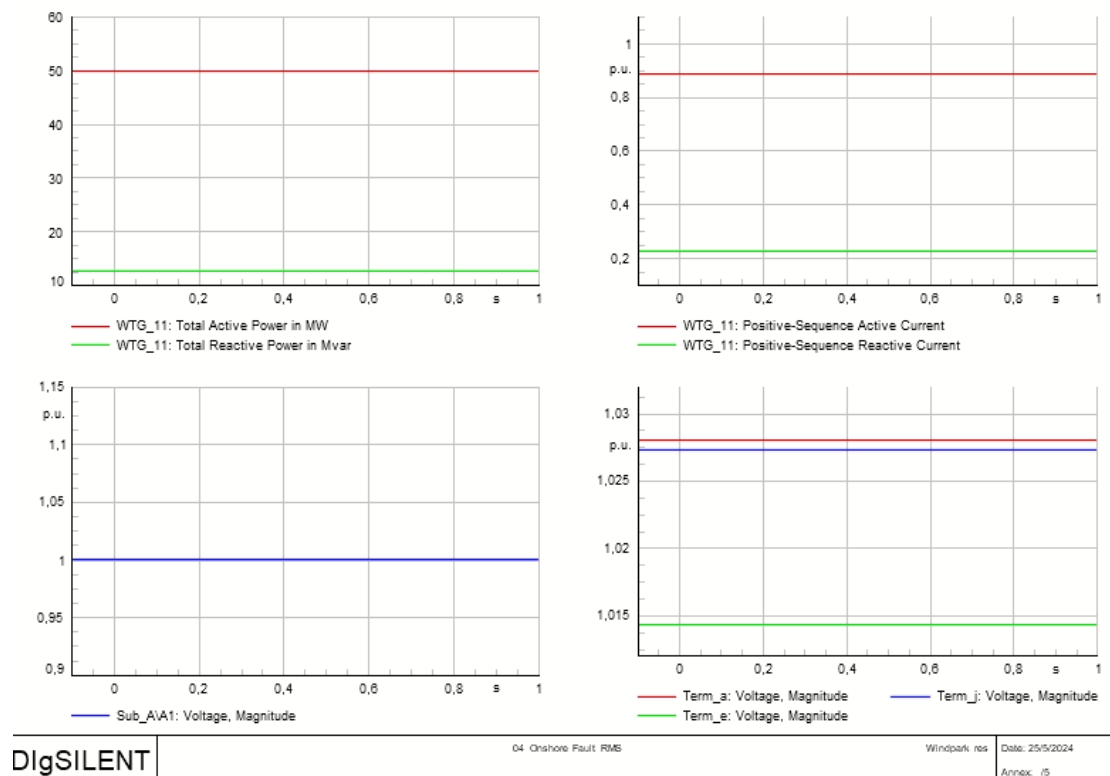
Εικόνα 4.30: Απόκριση συνολικού ρεύματος του χερσαίου μετατροπέα κατά την διάρκεια του σφάλματος.



Εικόνα 4.31: Απόκριση ενεργού και αέργου ρεύματος του χερσαίου μετατροπέα κατά την διάρκεια του σφάλματος σε kA.

Έχοντας παρουσιάσει την συμπεριφορά των δύο σταθμών μετατροπής, σε περίπτωση σφάλματος στον ζυγό που βρίσκεται στην στεριά, σειρά έχει να παρατεθούν τα διαγράμματα που επιβεβαιώνουν την μη επίδραση που έχει το σφάλμα στο υπεράκτιο αιολικό και ειδικότερα στις Α/Γ του Α/Π.

Παρατηρεί κάποιος ότι δεν υπάρχει επίδραση του σφάλματος στην πλευρά του συστήματος του Α/Π, συμπεριφορά αναμενόμενη αφού η HVDC διασύνδεση προσφέρει την απόζευξη των δύο συστημάτων, υπεράκτιο και χερσαίο, σε περιπτώσεις στιγμιαίων σφαλμάτων.



Εικόνα 4.32 : Συμπεριφορά A/Γ του A/Π σε σφάλμα στο ζυγό της στεριάς.

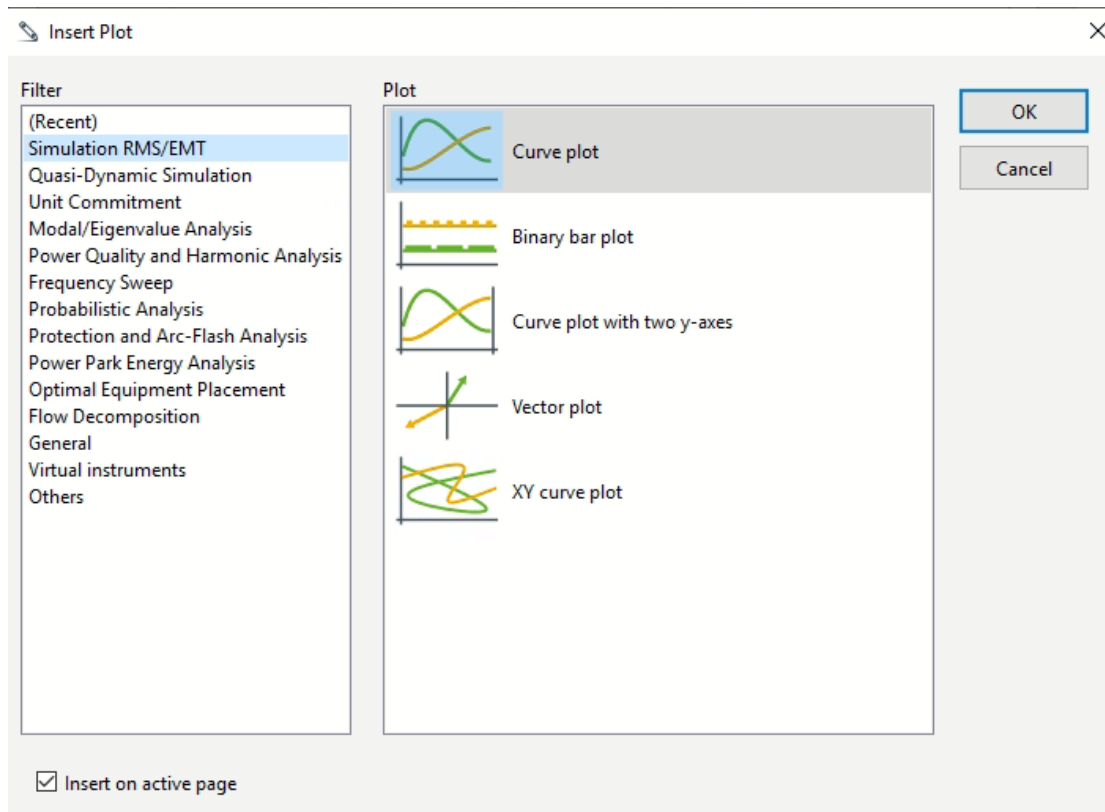
4.3.5 Περίπτωση σφάλματος πόλου-γης στην μέση του συνολικού μήκους της γραμμής μεταφοράς HVDC.

Σε αυτή την παράγραφο θα εξεταστεί η συμπεριφορά του συστήματος σε σφάλμα που λαμβάνει χώρα στο 50% του συνολικού μήκους της HVDC γραμμής μεταφοράς.

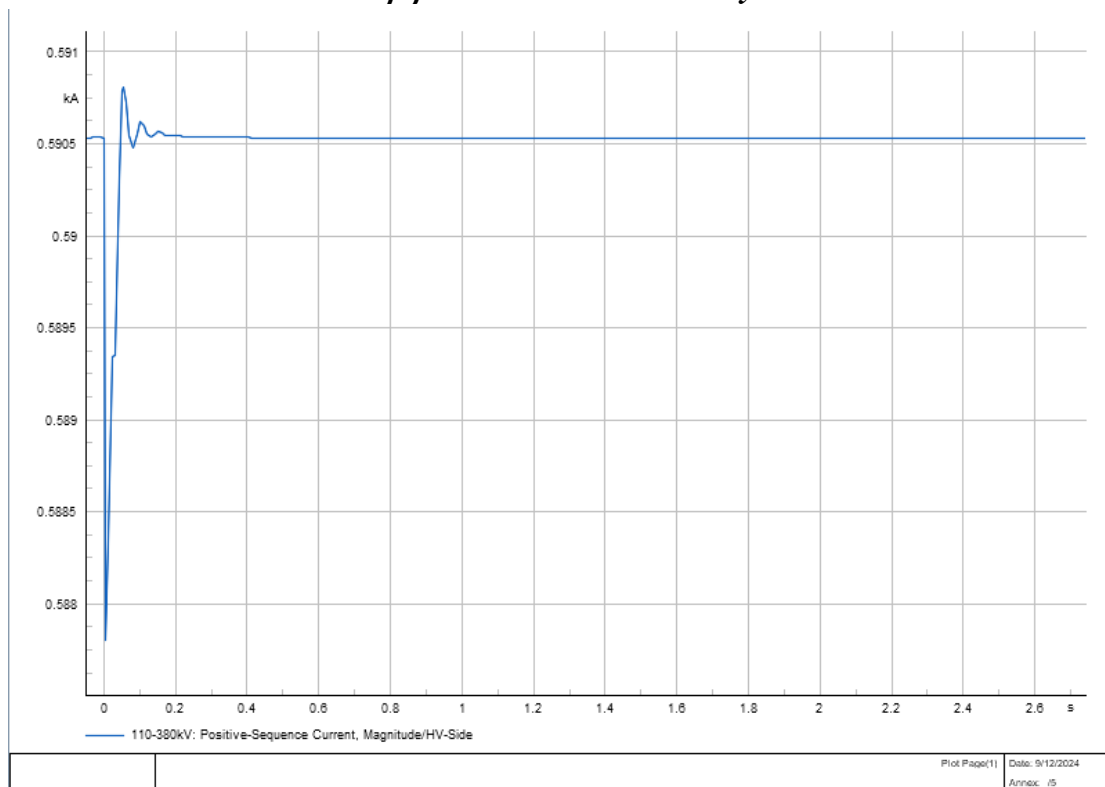
Θα εξεταστούν οι επιπτώσεις που έχει το σφάλμα πόλου-γης, που συμβαίνει στο θετικό πόλο της HVDC γραμμής μεταφοράς στο 0 sec, στους μετασχηματιστές τόσο στον υπεράκτιο ζυγό όσο και στον χερσαίο.

Θα εισάγουμε δύο νέα διαγράμματα (εικόνα 4.34) στο ‘study case’ του σφάλματος στην HVDC γραμμή, εισάγοντας τους δύο μετασχηματιστές ως τα στοιχεία που εξετάζονται και μεταβλητές το ρεύμα θετικής ακολουθίας στην πλευρά της υψηλής.

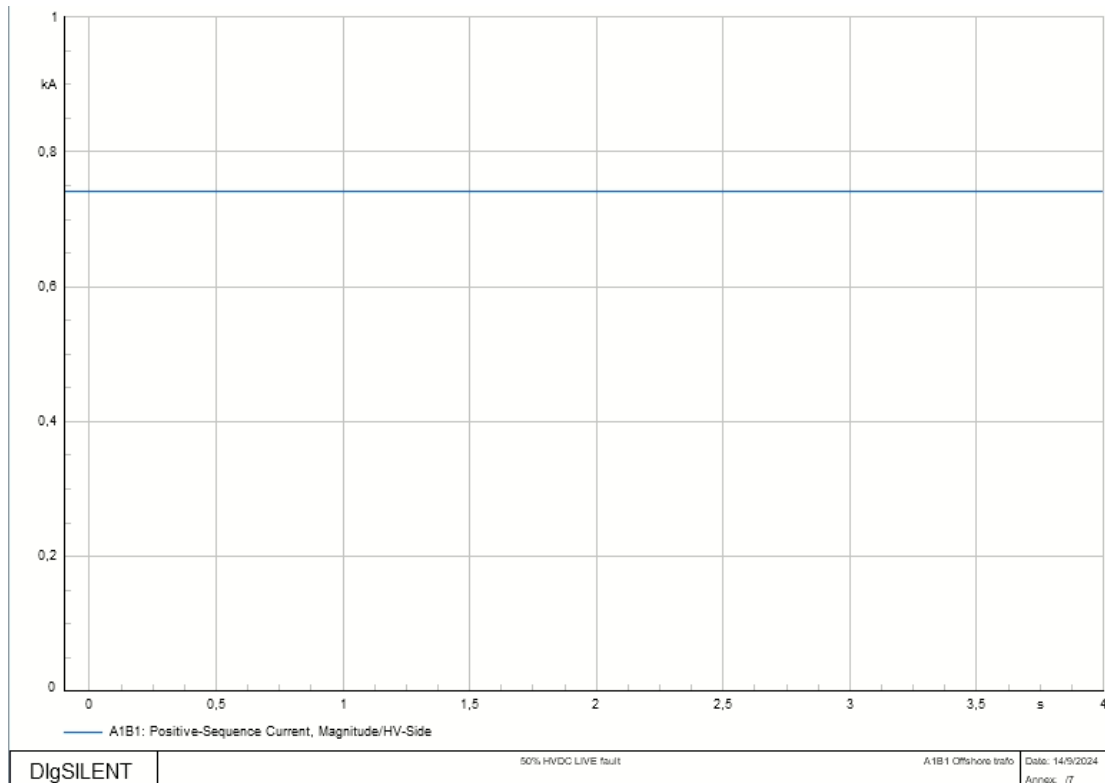
Το σφάλμα σε έναν πόλο στην περίπτωση DC στο περιβάλλον του Powerfactory δηλώνεται σαν μονοφασικό ως προς γη.



Εικόνα 4.34: Εισαγωγή νέου διαγράμματος για προσομοίωση RMS/EMT σε περιβάλλον του PowerFactory.



Εικόνα 4.35: Απόκριση ρεύματος θετικής ακολουθίας του χερσαίου Μ/Σ 110-380 KV στην πλευρά υψηλής, κατά την διάρκεια του σφάλματος.

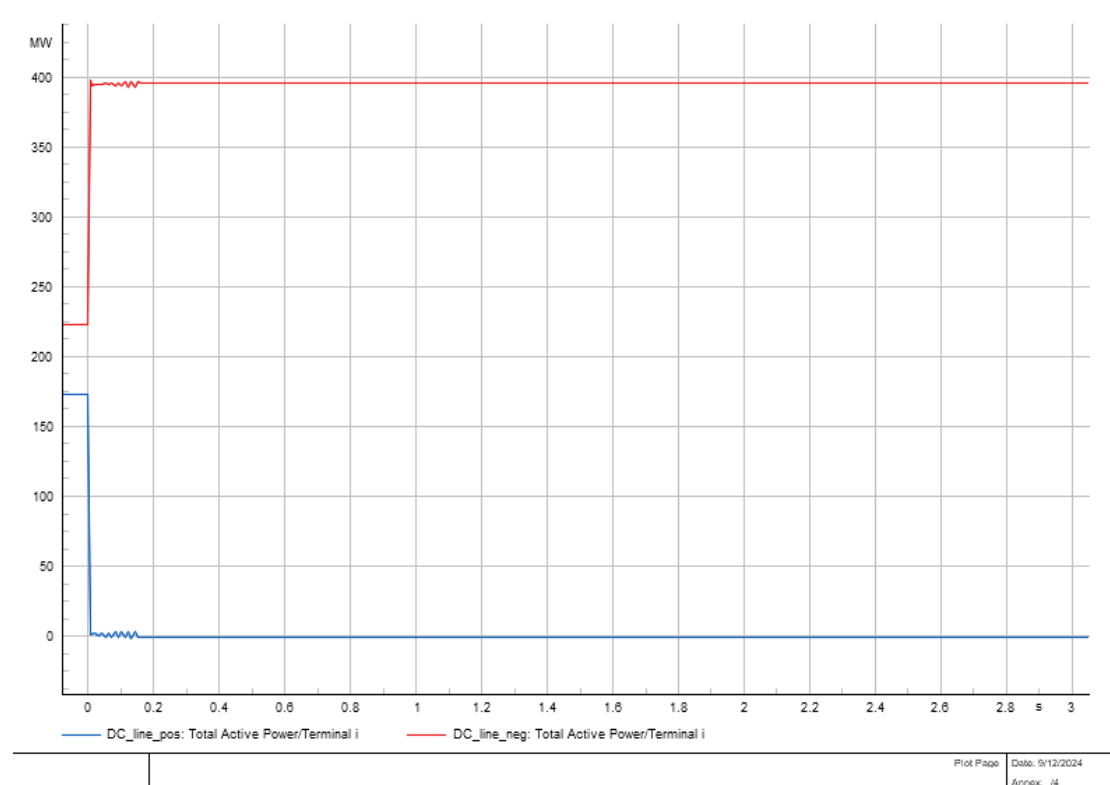


Εικόνα 4.36: Απόκριση ρεύματος θετικής ακολουθίας υπεράκτιου Μ/Σ 150-33 kV στην πλευρά υψηλής.

Παρατηρώντας τις αποκρίσεις των ρευμάτων στις δύο εκατέρωθεν πλευρές της HVDC γραμμής μεταφοράς όπου γίνεται το σφάλμα στα διαγράμματα των δύο παραπάνω εικόνων, συμπεραίνεται ότι στον χερσαίο μετασχηματιστή η επίπτωση είναι μεγαλύτερη σε σύγκριση με την επίπτωση στον υπεράκτιο Μ/Σ, που είναι σχεδόν ανύπαρκτη. Και στις δύο όμως περιπτώσεις το σφάλμα στην HVDC γραμμή δεν επηρέασε σε σημαντικό βαθμό το υπόλοιπο σύστημα, αποτέλεσμα του σωστού ελέγχου που πραγματοποιήθηκε από τους δύο ελεγκτές του υπεράκτιου και του χερσαίου μετατροπέων αντίστοιχα.

Στην παρακάτω εικόνα 4.37 παρουσιάζεται η αλλαγή που γίνεται κατά την διάρκεια του σφάλματος στους πόλους της γραμμής μεταφοράς και επιβεβαιώνει την θεωρία όσον αφορά την συμπεριφορά σε σφάλματα στη Συμμετρική μονοπολική διαμόρφωση (Symmetrical Monopole configuration).

Αρχικά το συνολικό ποσό της μεταφερόμενης ισχύος σχεδόν διαμοιραζόταν μεταξύ του θετικού πόλου και του αρνητικού πόλου της HVDC γραμμής μεταφοράς ενώ κατά την διάρκεια του σφάλματος στο θετικό πόλο με το σωστό έλεγχο, ο 'υγιής' αρνητικός πόλος διπλασιάζει την ισχύ που διακινεί και έτσι μεταφέρει εξ' ολοκλήρου την συνολική ισχύ.

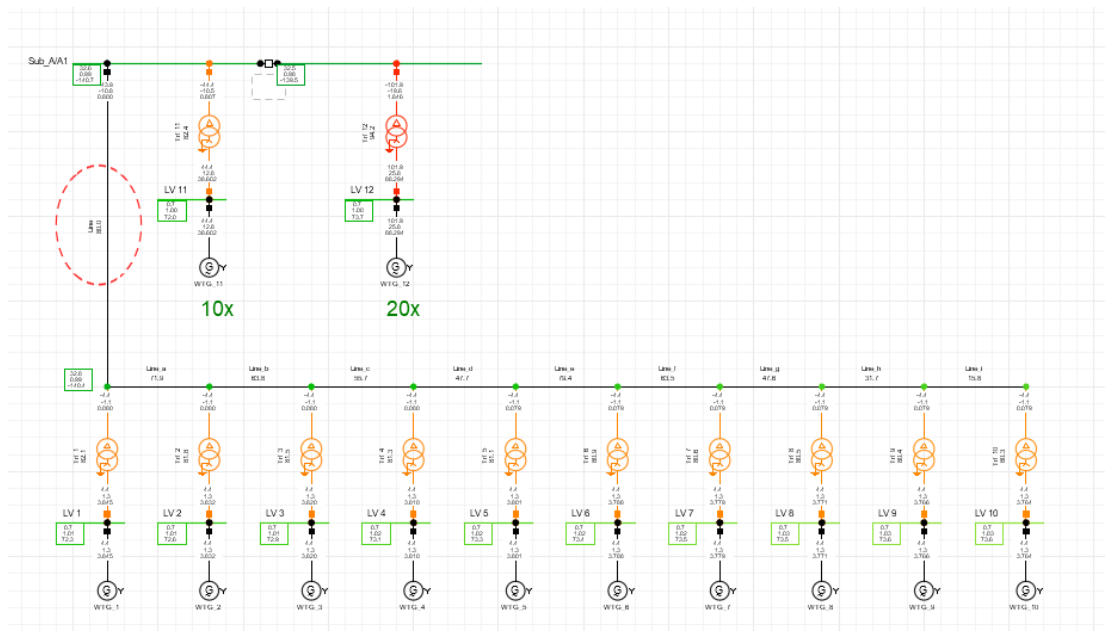


Εικόνα 4.37: Η ενεργός ισχύς των δύο πόλων DC κατά την διάρκεια του σφάλματος.

4.3.6 Περίπτωση τριφασικού σφάλματος σε σημείο του υπεράκτιου αιολικού πάρκου.

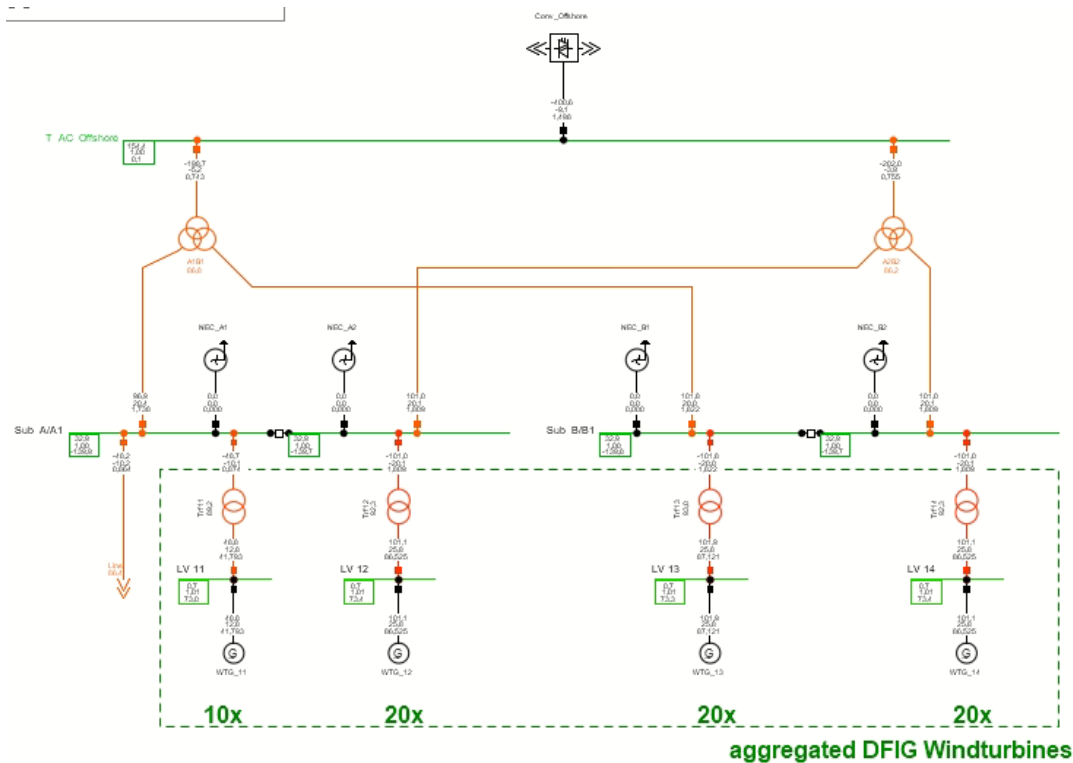
Στην παράγραφο αυτή θα εξεταστεί η συμπεριφορά του συστήματος σε σφάλμα που λαμβάνει χώρα σε σημείο του υπεράκτιου αιολικού πάρκου, και ειδικότερα στο 50% του συνολικού μήκους της γραμμής που ενώνει την συστοιχία των 10 ανεξάρτητα μοντελοποιημένων Α/Γ με τον ζυγό Sub_A/A1.

Στην παρακάτω εικόνα 4.38 του μοντέλου το σημείο αυτό είναι κυκλωμένο με έναν κόκκινο διακεκομμένο κύκλο. Αρχικά να σημειωθεί ότι θα χρησιμοποιηθεί η RMS μέθοδος προσομοίωσης, η οποία καθορίζεται στο PowerFactory επιλέγοντας το στοιχείο του κυκλώματος που επιθυμούμε να εξετάσουμε την συμπεριφορά του και στη συνέχεια με την εντολή ‘Define’ καθορίζουμε την μέθοδο RMS. Το επόμενο βήμα είναι οριστούν οι μεταβλητές που πρόκειται να μελετηθούν.

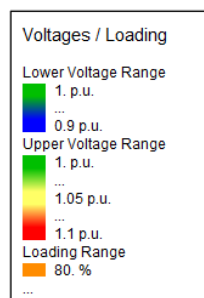


Εικόνα 4.38: Σημείον υπεράκτιου αιολικού πάρκου που συμβαίνει το τριφασικό βραχυκύκλωμα.

Οι επιπτώσεις του σφάλματος στις τάσεις και στις ενεργές ισχύες των επιμέρους ηλεκτρικών στοιχείων αποτυπώνονται με την χρήση κλίμακας χρώματος στις εικόνες 4.38 και 4.39 με την βοήθεια του πίνακα 4.40 της κλίμακας χρωμάτων παρακάτω. Ξεκινώντας από την συστοιχία των 10 ανεξάρτητων Α/Γ (εικόνα 4.38) παρατηρεί κάποιος το πορτοκαλί χρώμα των μετασχηματιστών εντός των Α/Γ, κάτι που υποδεικνύει την χαμηλή φόρτιση του σε σχέση με την ενεργό ισχύ, αφού ‘δίνεται χώρος’ στην άεργο ισχύς που προτεραιοποιείται μέσω του ελέγχου για την στήριξη της τάσης, κάτι το οποίο θα παρουσιαστεί παρακάτω πιο αναλυτικά μέσω διαγραμμάτων. Στη συνέχεια παρατηρείται το πορτοκαλί χρώμα του μετασχηματιστή στον ζυγό όπου συνδέεται η συστοιχία των 10 Α/Γ, το οποίο είναι αποτέλεσμα της μειωμένης ροής ενεργού ισχύος, αφού όπως προαναφέρθηκε, η παραγόμενη ενεργός ισχύ από της Α/Γ μειώνεται. Έτσι καταλαβαίνει κανείς ότι μειωμένη θα είναι η ενεργός ισχύς που θα μεταφερθεί και στο χερσαίο δίκτυο, όπως θα αναλυθεί και παρακάτω με διάγραμμα.



Εικόνα 4.39: Απεικόνιση του βαθμού της επιρροής του σφάλματος στην ενεργό ισχύ των ηλεκτρικών στοιχείων του υπεράκτιου δικτύου σε σχέση με τις ονομαστικές τους τιμές.



Πίνακας 4.40: Κλίμακα χρωμάτων σε σχέση με την τάση α.μ. και την φόρτιση των μετασχηματιστών σε περίπτωση σφάλματος.

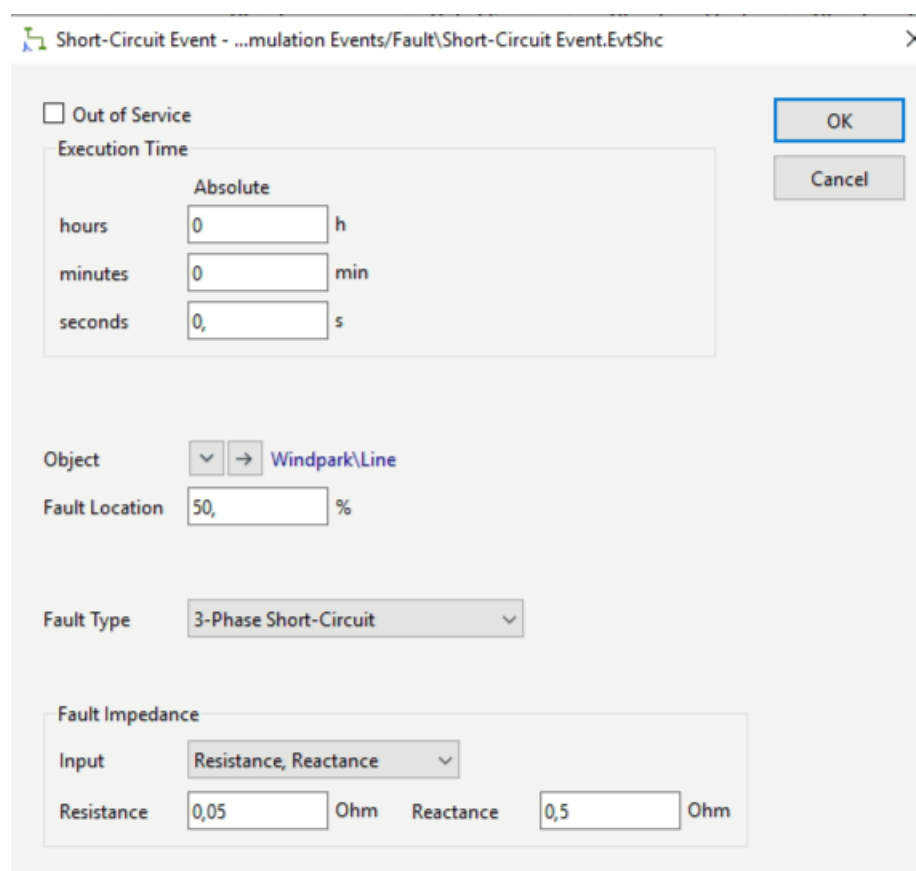
Το σφάλμα συμβαίνει στα '0.0' δευτερόλεπτα, και καθορίζεται στο PowerFactory με την επιλογή γεγονός βραχυκυκλώματος (short-circuit event) □ είδος σφάλματος (fault-type) □ τριφασικό βραχυκύκλωμα (3 phase short-circuit) και χρονική στιγμή που συμβαίνει το '0' δευτερόλεπτο. Μετά από '0.15' δευτερόλεπτα, πραγματοποιώντας ένα επιπλέον γεγονός, αλλά αυτή την φορά είδος σφάλματος □ καθαρισμός βραχυκυκλώματος (clear short-circuit).

Θα μελετηθεί η επίπτωση που έχει το σφάλμα που λαμβάνει χώρα στο δίκτυο εναλλασσόμενης (AC) μέσης τάσης 33kV, στο υπόλοιπο ηλεκτρικό σύστημα ξεκινώντας από τους δύο μετατροπείς, υπεράκτιο (Converter Offshore) και χερσαίο

(Converter Onshore), στην τάση του DC link (θετική και αρνητική), T_DC_Offshore_pos, T_DC_Onshore_pos καθώς και στον χερσαίο ζυγό T_AC_Onshore_pos.

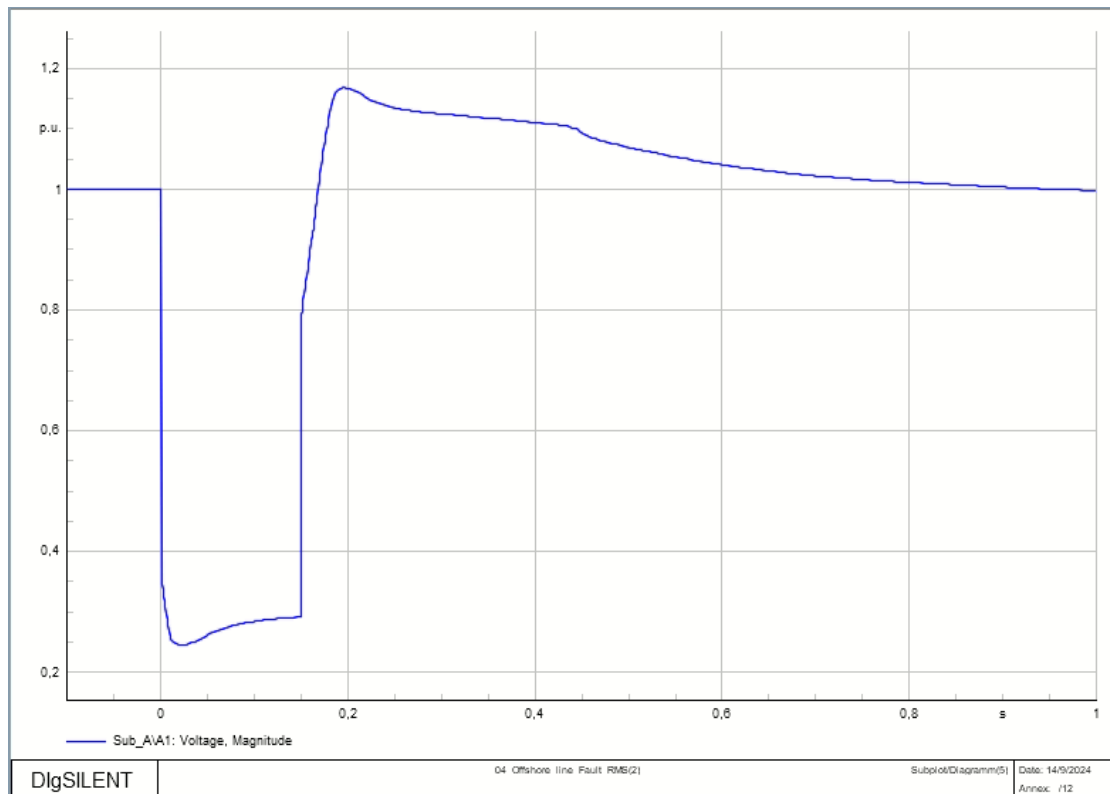
Ακόμη θα παρουσιαστεί η συμπεριφορά της A/Γ WTG 1, που είναι η πρώτη A/Γ της συστοιχίας που αποτελείται από τις 10 ανεξάρτητα μοντελοποιημένες μηχανές και επιπλέον βρίσκεται πιο κοντά στο σημείο του σφάλματος, καθώς της WTG 11, που έχουν μοντελοποιηθεί μαζί 10 ίδιες μηχανές.

Για την προσομοίωση οι τιμές του σφάλματος R (αντίσταση) και Xf (επαγωγική αντίδραση) που χρησιμοποιήθηκαν ήταν ίσες με 0,05 Ω και 0,5 Ω αντίστοιχα (εικόνα 4.41)



Εικόνα 4.41: Απόκριση της τάσης του ζυγού Sub_A/A1 σε σφάλμα στη γραμμή line του υπεράκτιου αιολικού πάρκου.

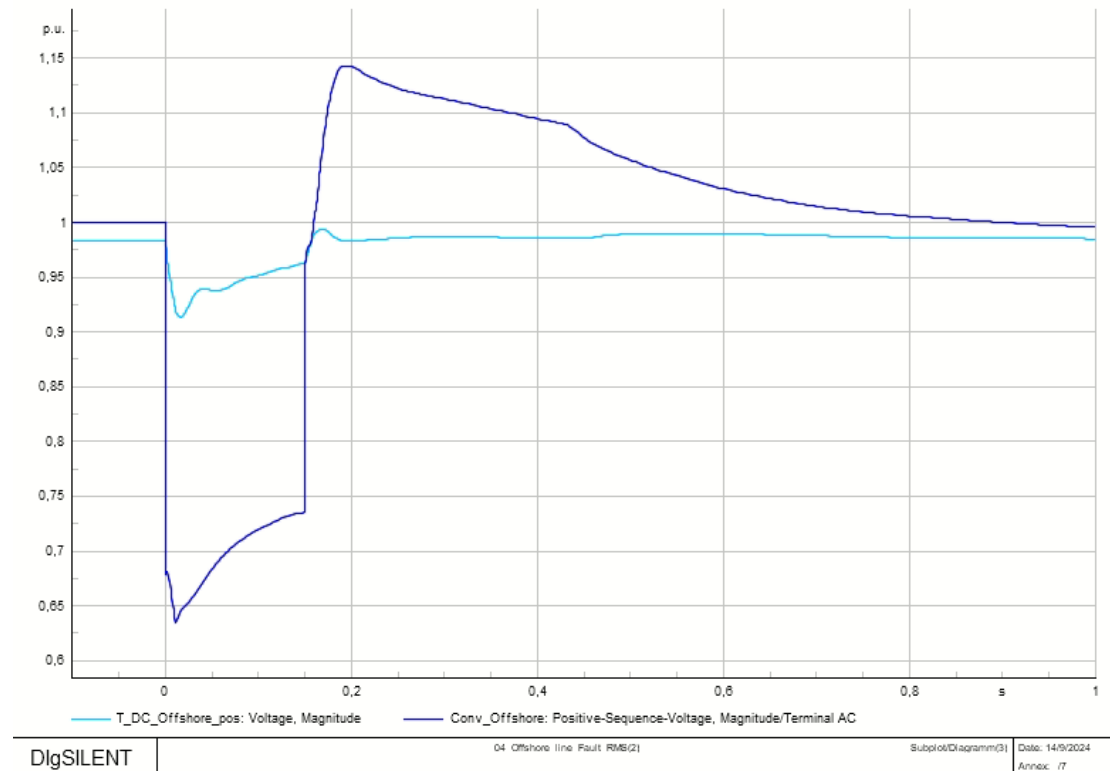
Αρχικά θα εξεταστεί η πτώση τάσης που προκαλείται στον ζυγό Sub_A/A1, ζυγός που συνδέεται η γραμμή όπου γίνεται το σφάλμα. Παρατηρεί κανείς στο παρακάτω διάγραμμα της εικόνας 4.42 την τιμή της τάσης να «πέφτει» λίγο κάτω από το 0,3 α.μ. την στιγμή του σφάλματος και να επανέρχεται σε κανονικά επίπεδα όταν το σφάλμα καθαρίσει.



Εικόνα 4.42: Απόκριση της τάσης του ζυγού *Sub_A/A1* σε σφάλμα στη γραμμή *line* του υπεράκτιου αιολικού πάρκου.

Η πτώση είναι σημαντική και ενδιαφέρον έχει να ελεγχθεί πόσο επηρεάζεται η τάση AC του υπεράκτιου μετατροπέα, δηλαδή η τάση πριν μετατραπεί σε συνεχής, καθώς και η τάση DC.

Όπως παρουσιάζεται στο διάγραμμα της εικόνας 4.43 η τάση AC μετατροπέα, Conv_Offshore: Positive-Sequence-Voltage, Magnitude/Terminal AC, φτάνει την τιμή 0,64 α.μ. ενώ η τάση T_DC_Offshore_pos: Voltage,Magnitude δεν πέφτει κάτω από το 0,92 α.μ.

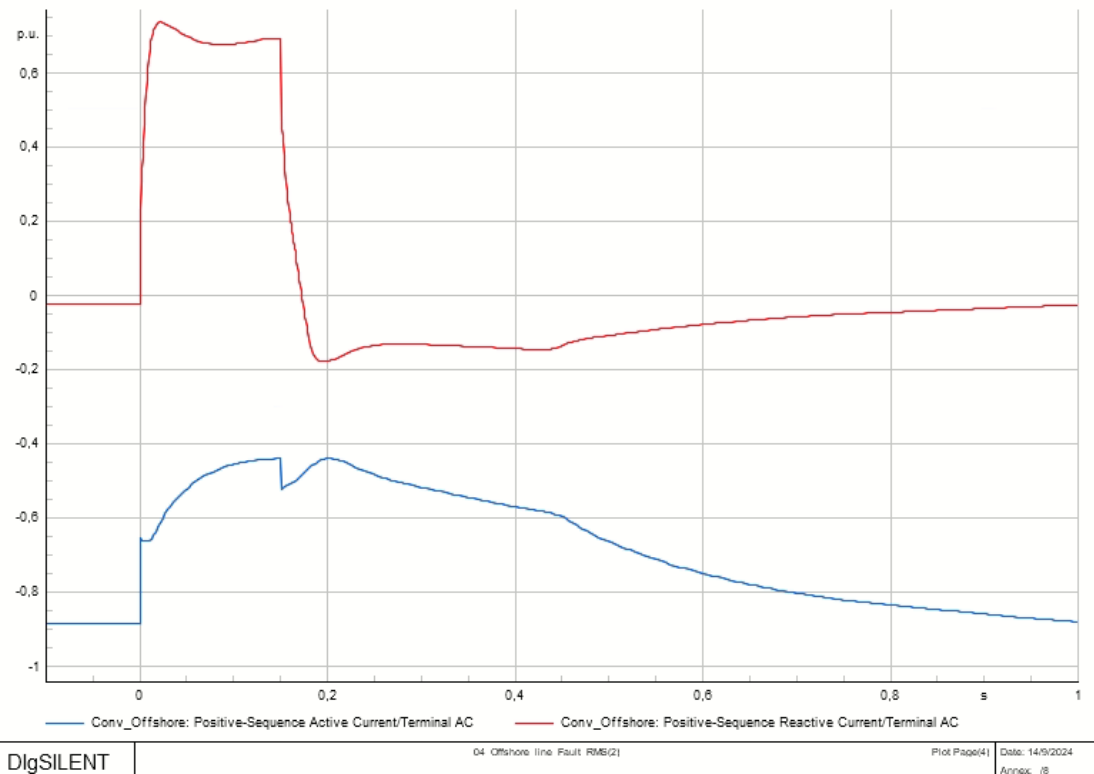


Εικόνα 4.43: Απόκριση της τάσης του υπεράκτιον ζυγού HVDC και της AC τάσης του υπεράκτιον μετατροπέα σε σφάλμα στη γραμμή line του υπεράκτιον αιολικού πάρκου.

Η χαμηλή επίπτωση που έχει το σφάλμα στην τάση HVDC έχει ως αποτέλεσμα να μην ενεργοποιηθούν οι προστασίες της γραμμής μεταφοράς και η διασύνδεση με την στεριά συνεχίζεται αδιάκοπα.

Όσον αφορά τον μετατροπέα, όπως παρουσιάζεται στο διάγραμμα της εικόνας 4.44, με την διαπίστωση της πτώσης τάσης γίνεται προτεραιοποίηση του αέργου ρεύματος που υπό κανονικές συνθήκες λειτουργίας η τιμή του είναι κοντά στο μηδέν, και την ίδια χρονική στιγμή η τιμή του ενεργού ρεύματος είναι κοντά στο 1 α.μ., ενώ κατά την διάρκεια του σφάλματος η τιμή του αέργου ρεύματος είναι περίπου στο 0,70 α.μ. ενώ παράλληλα η τιμή του ενεργού ρεύματος μειώνεται περίπου στο 0,45 α.μ.

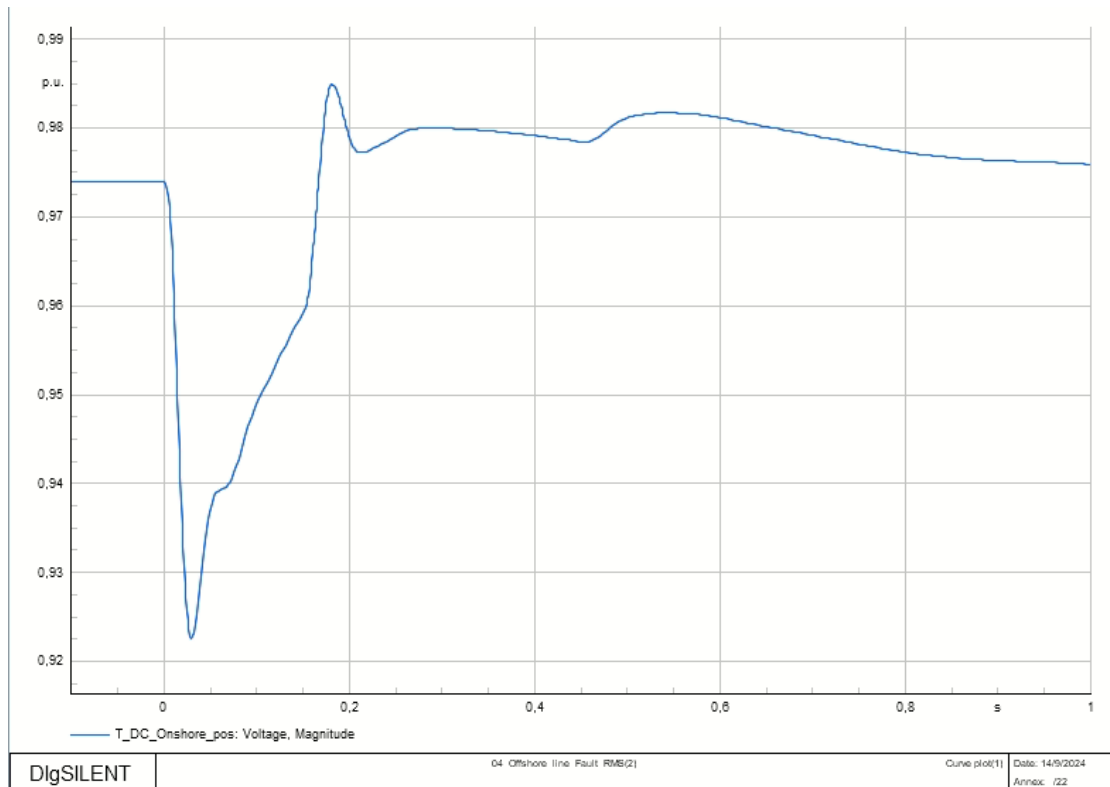
Μόλις το σφάλμα εκκαθαριστεί οι τιμές επανέρχονται σταδιακά στις τιμές κανονικής λειτουργίας.



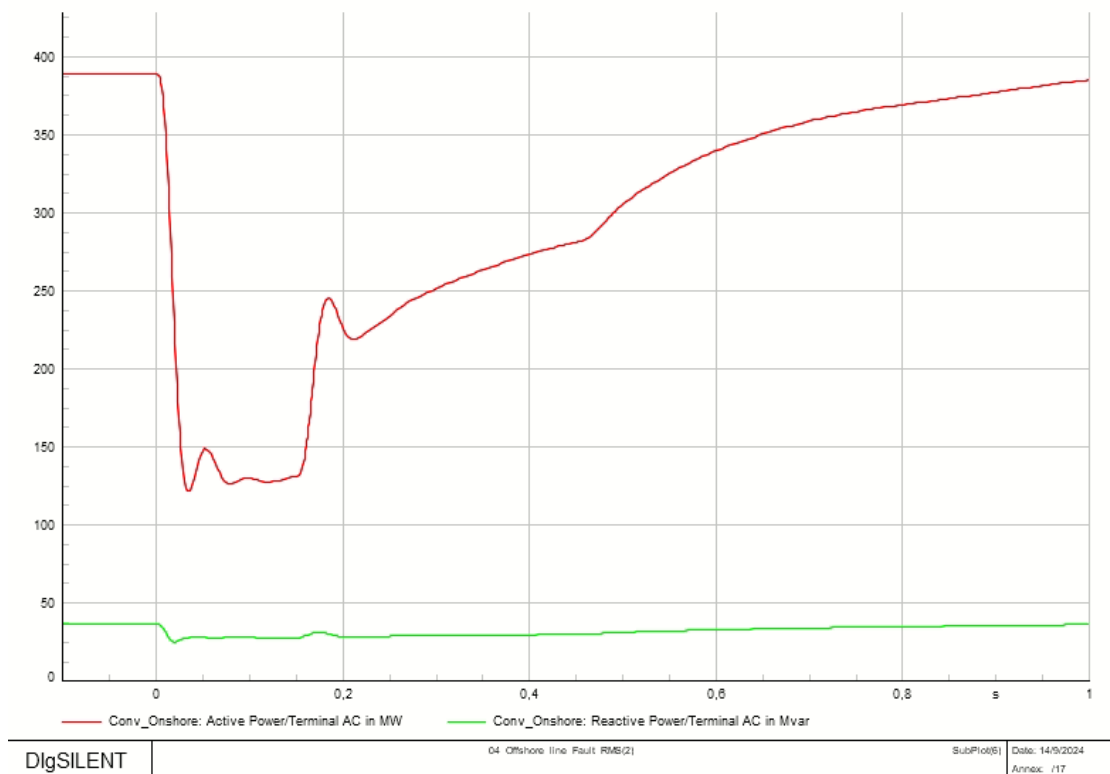
Εικόνα 4.44: Απόκριση ενεργού και αέργου ρεύματος α.μ. του υπεράκτιου μετατροπέα.

Αφού εξετάστηκε η συμπεριφορά των κύριων στοιχείων του συνολικού συστήματος, θα παρουσιαστεί η μικρή επίπτωση που επιφέρει ένα σημαντικό σφάλμα σε σημείο του υπεράκτιου αιολικού πάρκου, στη HVDC τάση του χερσαίου μέρους του συστήματος και κατ' επέκταση στο χερσαίο AC δίκτυο.

Στο διάγραμμα της εικόνας εικόνα 4.45 παρουσιάζεται η τάση HVDC στον υπεράκτιο ζυγό και οι στο διάγραμμα της εικόνας 4.46 οι αποκρίσεις ενεργού και αέργου ισχύος του χερσαίου μετατροπέα κατά την διάρκεια του σφάλματος. Όπως λοιπόν παρατηρεί κανείς δεν υπάρχει ουσιαστική επίπτωση στην άεργο ισχύ του χερσαίου μετατροπέα αφού η τάση HVDC δεν το «επιβάλλει» όπως παρουσιάζεται και στο διάγραμμα της εικόνας 4.46 παρακάτω, ενώ η τιμή της ενεργού ισχύος μειώνεται από 390 MW που είναι η ονομαστική, περίπου στα 130 MW κατά την διάρκεια του σφάλματος.



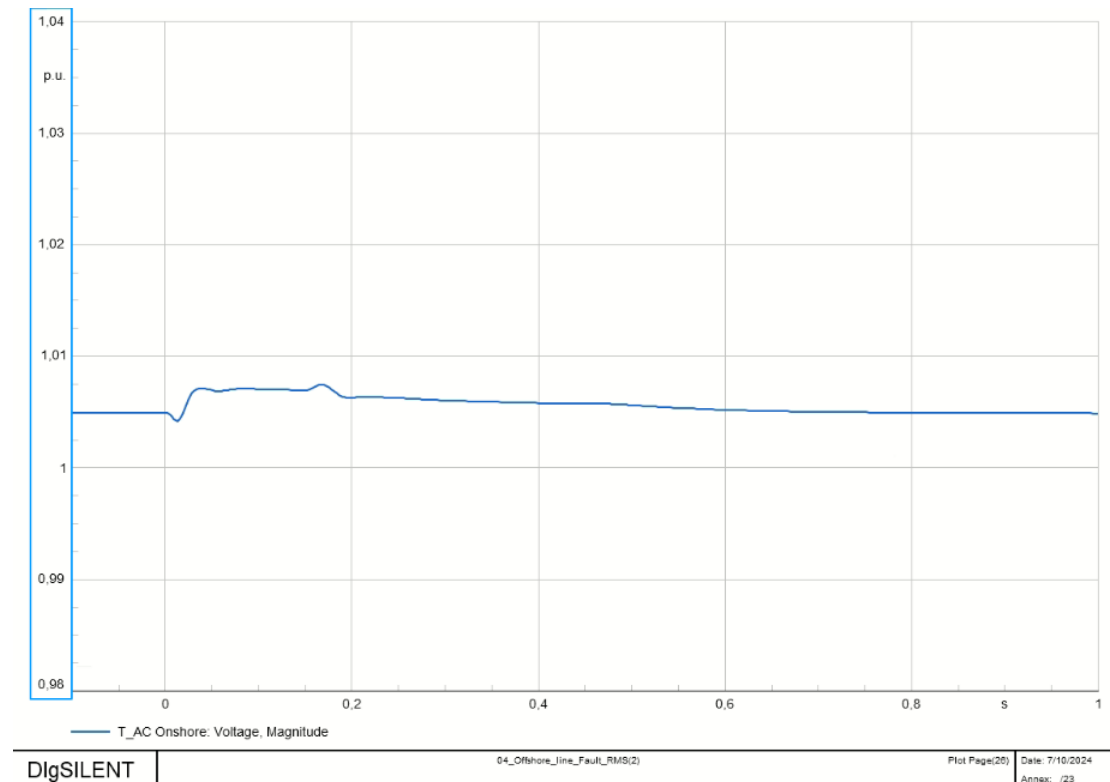
Εικόνα 4.45: Απόκριση της τάσης HVDC στο χερσαίο DC ζυγό κατά την διάρκεια του σφάλματος



Εικόνα 4.46: Απόκριση της ενεργού και αέργου ισχύος του χερσαίου μετατροπέα κατά την διάρκεια του σφάλματος.

Στην συνέχεια στο διάγραμμα της εικόνας 4.47 παρουσιάζεται η σχεδόν μηδαμινή επίπτωση του σφάλματος στην τάση AC του χερσαίου ζυγού μετά τον μετατροπέα και πριν τον μετασχηματιστή, T_AC_onshore: voltage, Magnitude.

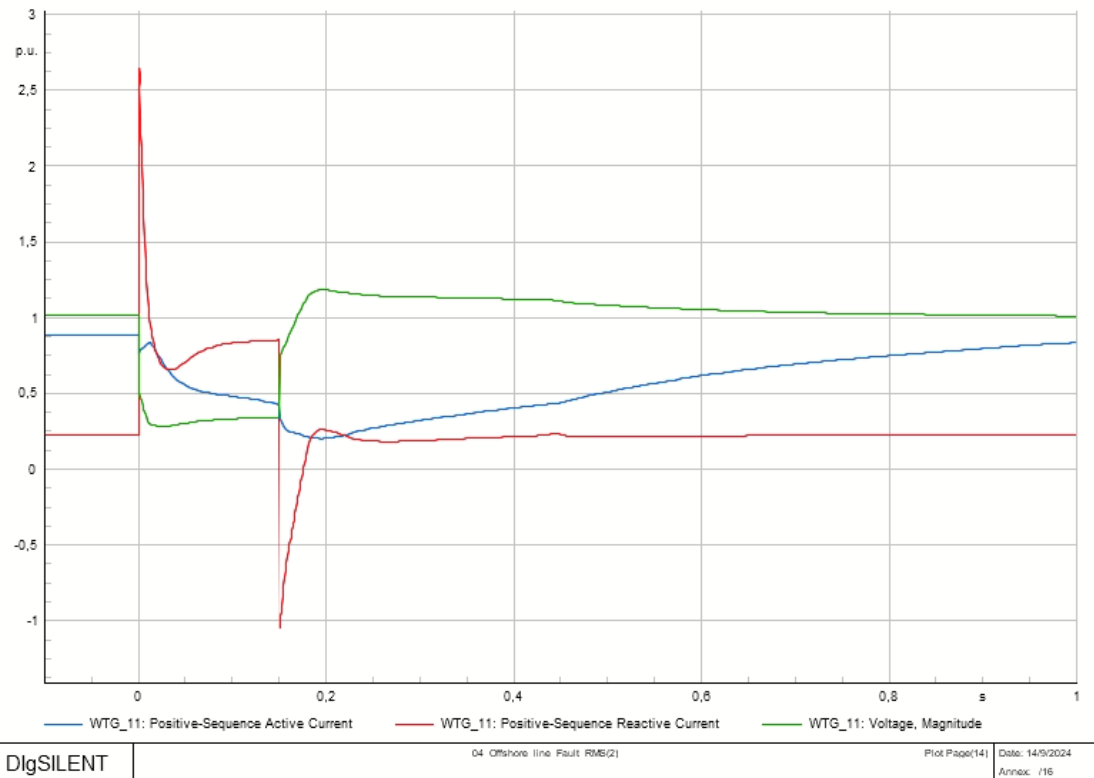
Παρατηρεί κάποιος στο διάγραμμα της εικόνας 4.46 ότι δεν υπάρχει ουσιαστική επίπτωση αφού η διακύμανση της τάσης περιορίζεται στο τρίτο δεκαδικό ψηφίο.



Εικόνα 4.47: Απόκριση της τάσης του χερσαίου ζυγού $T_AC_onshore$ κατά την διάρκεια του σφάλματος.

Ενδιαφέρον έχει και το πως συμπεριφέρονται οι Α/Γ κοντά στο σφάλμα.

Αρχικά εξετάζεται η συμπεριφορά της Α/Γ WTG 11 που συνδέεται στον ίδιο ζυγό κατά την διάρκεια του σφάλματος.



Εικόνα 4.48: Αποκρίσεις ενεργού, αέργου ρεύματος και τάσης της Α/Γ WTG 11 κατά την διάρκεια του σφάλματος.

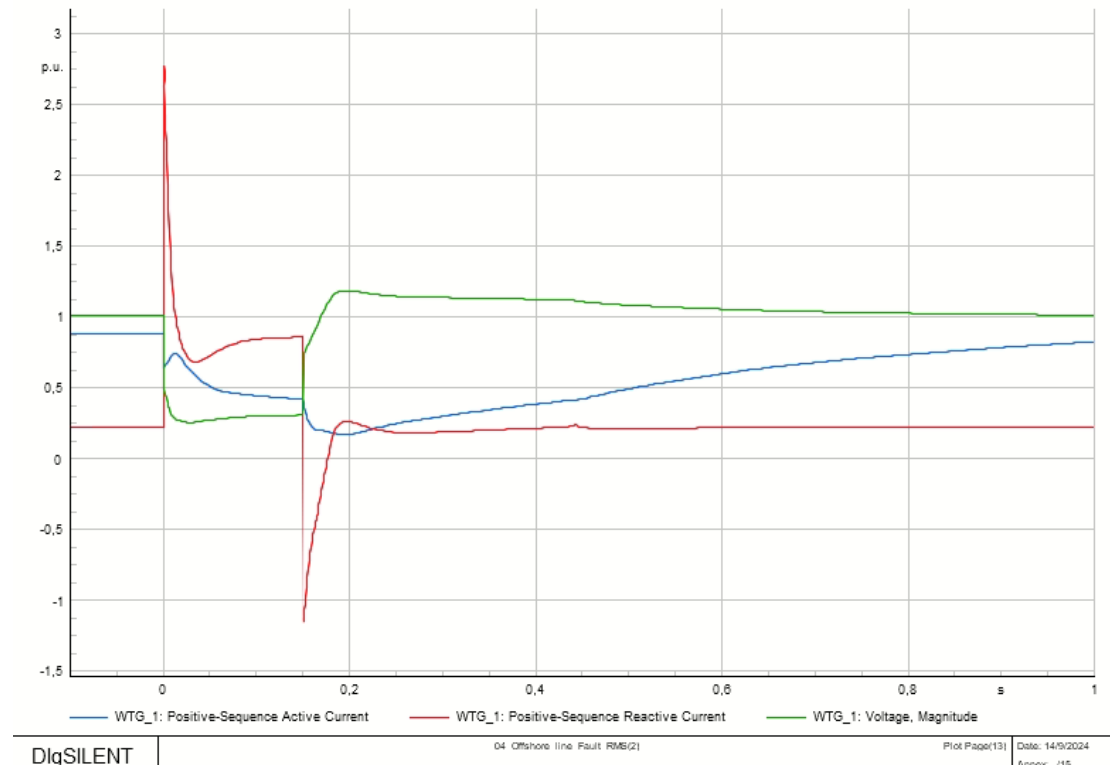
Στο διάγραμμα της εικόνας 4.48 παρουσιάζονται τάση, ενεργός και άεργος ισχύς της Α/Γ WTG 11 κατά την διάρκεια του σφάλματος.

Παρατηρείται λοιπόν ότι την χρονική στιγμή που γίνεται το σφάλμα και κατά την διάρκειά του, η τάση κυμαίνεται στο 0,3 α.μ., και μέσω του ελέγχου της Α/Γ προτεραιοποιείται η στήριξη της τάσης μέσω αύξησης της τιμής του αέργου ρεύματος, η οποία αυξάνεται από περίπου 0,25 α.μ., στο 0,75 α.μ., ενώ αντίθετη πορεία ακολουθεί η τιμή του ενεργού ρεύματος, πέφτοντας κάτω από το 0,45 α.μ. από 0,9 α.μ. σε συνθήκες κανονικής λειτουργίας.

Μόλις το σφάλμα εκκαθαριστεί οι τιμές σταδιακά επανέρχονται στις τιμές κανονικής λειτουργίας.

Πανομοιότυπη συμπεριφορά παρατηρείται και στην απόκριση της Α/Γ WTG 1 όπως παρουσιάζεται στο διάγραμμα της εικόνας 4.49.

Ο έλεγχος της Α/Γ WTG 1 λειτουργεί όπως ακριβώς λειτουργεί και ο έλεγχος της Α/Γ WTG 11 και οι τιμές των ηλεκτρικών μεγεθών είναι εξίσου ίδιες αφού έχουν και τα ίδια ονομαστικά χαρακτηριστικά.



Εικόνα 4.49: Αποκρίσεις ενεργού, αέργου ρεύματος και τάσης της Α/Γ WTG 1 κατά την διάρκεια του σφάλματος.

Να σημειωθεί ότι οι τιμές της αντίστασης και της επαγωγικής αντίδρασης παίζει σημαντικό ρόλο στην επίπτωση του σφάλματος στην τάση.

Γενικά μεγαλύτερες αντιστάσεις και επαγωγικές αντιδράσεις οδηγούν σε μικρότερη επίπτωση του βραχυκυκλώματος στην τιμή της τάσης.

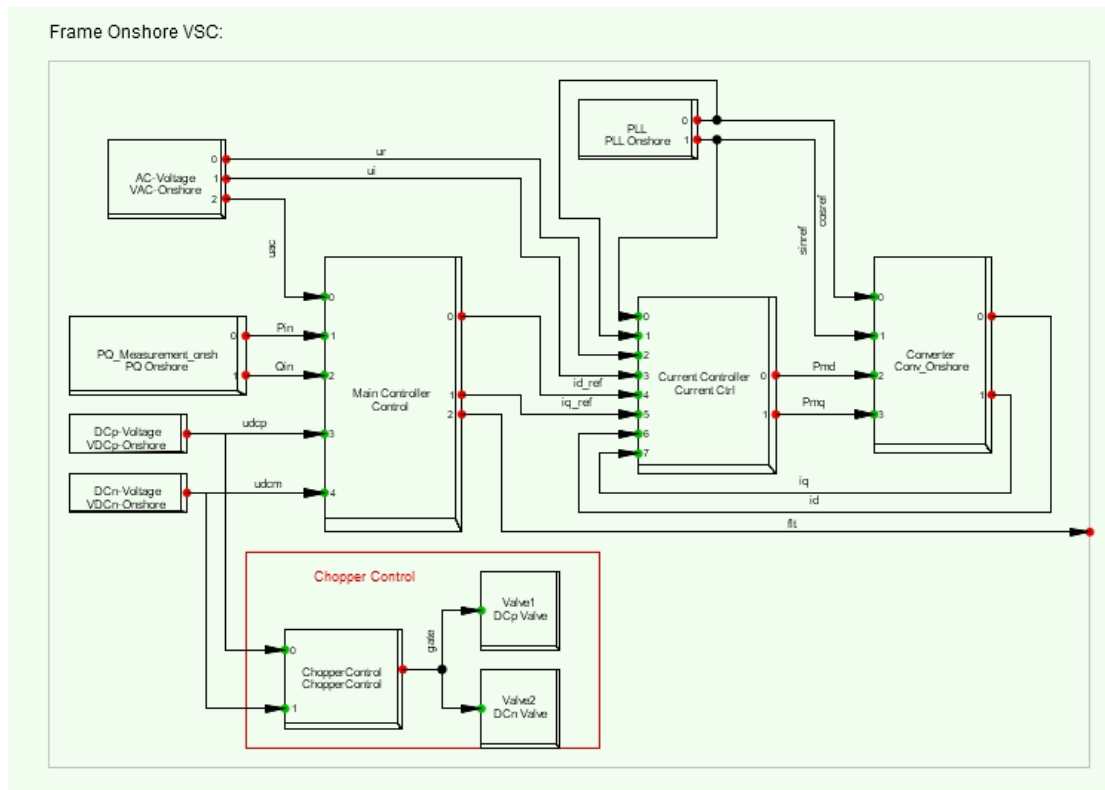
4.4 Συνολικός έλεγχος της HVDC διασύνδεσης.

Δομικό στοιχείο της λειτουργίας που εξετάστηκε παραπάνω είναι ο σωστός έλεγχος του συνολικού συστήματος. Συγκεκριμένα δύο βασικά σχήματα ελέγχου ελέγχουν την λειτουργία του υπεράκτιου μετατροπέα και την λειτουργία του χερσαίου μετατροπέα αντίστοιχα.

4.4.1 Λειτουργία ελέγχου χερσαίου μετατροπέα.

Ο έλεγχος του χερσαίου μετατροπέα αποτελείται από τρεις ελεγκτές (εικόνα 4.49) [31]:

- *Main controller*: Ο μετατροπέας είναι πηγής τάσης (VSC) άρα μπορούν να ελεγχθούν και η ενεργός και η άεργος ισχύς ανεξάρτητα. Κατά την κανονική λειτουργία προτεραιοποιείται ο έλεγχος του ενεργού ρεύματος, ενώ κατά την διάρκεια ενός σφάλματος προτεραιοποιείται ο έλεγχος του άεργου ρεύματος. Μέσω του ελέγχου του ενεργού ρεύματος ελέγχεται η τάση DC που είναι και ο κύριος στόχος του ελέγχου, ενώ ελέγχοντας το άεργο ρεύμα ο μετατροπέας μπορεί να διαμορφώσει την άεργο ισχύ όπως στην περίπτωση μας ή την τάση AC.
- *Current controller*: Ο ελεγκτής ρεύματος λαμβάνει ως αναφορά την επιθυμητή τιμή ρεύματος από τον κύριο ελεγκτή και διαμορφώνει το σωστό διαμοιρασμό του ρεύματος λαμβάνοντας υπόψη τους περιορισμούς.
- *Chopper controllers*: Το κύριο μέλημα του chopper ελεγκτή είναι να ελέγχει τις τάσεις, θετική και αρνητική, της HVDC μεταφοράς. Σε περίπτωση που η τιμή των τάσεων περάσει ένα όριο, ο ελεγκτής ενεργοποιεί τις DC βαλβίδες ώστε οι αντιστάσεις του chopper να καταναλώσουν την ισχύ που χρειάζεται. Ενώ μόλις η τιμή των τάσεων επιστρέψει εντός των ορίων, η λειτουργία των DC βαλβίδων απενεργοποιείται. Οι αντιστάσεις του chopper ενεργοποιούνται όταν συμβαίνει σφάλμα στον χερσαίο ζυγό του συστήματος, όπως έχει προαναφερθεί και στο χωρίο 4.2.1., ώστε η παραγόμενη ισχύς του υπεράκτιου Α/Π να ‘καταναλωθεί’.



Εικόνα 4.49: Δομή ελέγχου χερσαίου μετατροπέα VSC.

Βασικά στοιχεία των παραπάνω ελέγχων αποτελούν οι ΠΙ ελεγκτές αφού αποτελούν την «ραχοκοκαλιά» της επεξεργασίας των επιλεγμένων σημάτων.

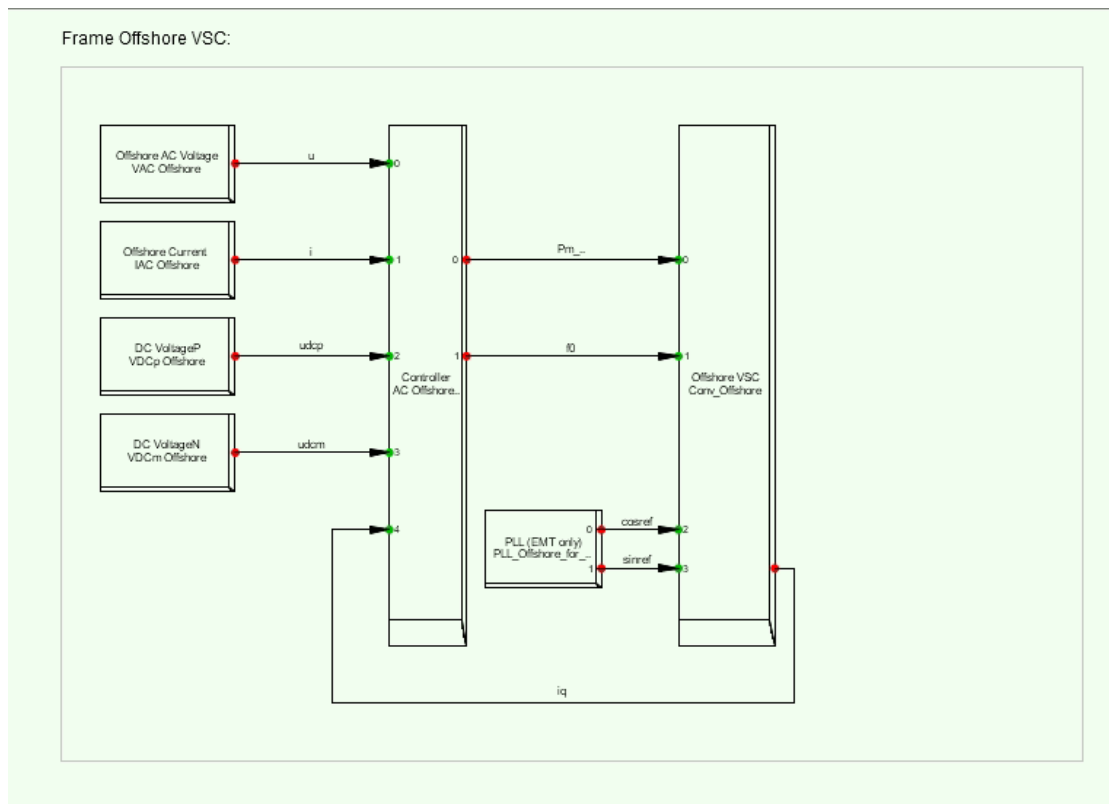
4.4.2 Λειτουργία ελέγχου υπεράκτιου μετατροπέα.

Η κύρια αποστολή του ελέγχου του υπεράκτιου μετατροπέα είναι η διατήρηση των ονομαστικών τιμών τάσης AC και συχνότητας του υπεράκτιου Α/Π. Για αυτό το λόγο μπορεί να θεωρηθεί ότι δημιουργεί την τάση του Α/Π. Έτσι λοιπόν λαμβάνοντας μετρήσεις της AC τάσης, του AC ρεύματος και των DC τάσεων (θετικής και αρνητικής) και με την βοήθεια ΠΙ ελεγκτών,, στέλνει τα κατάλληλα σήματα στις εισόδους για την PWM διαμόρφωση, ώστε να διαμορφωθεί το κατάλληλο άεργο ρεύμα.

Ο υπεράκτιος ελεγκτής έχει επιπλέον δύο λειτουργίες [31] (εικόνα 4.50):

1. Θέτει περιορισμό στην τιμή του αέργου ρεύματος σε περίπτωση σφάλματος στο υπεράκτιο δίκτυο, που έχει ως αποτέλεσμα την μείωση της τάσης του μετατροπέα.
2. Σε περιπτώσεις υψηλής τιμής της DC τάσης δίνεται μέσω ελέγχου η δυνατότητα για αύξηση της συχνότητας του υπεράκτιου δικτύου, κάτι που δίνει το

απαραίτητο σήμα στις ανεμογεννήτριες να μειώσουν την παραγόμενη ενεργό ισχύ τους και να διορθωθεί η ανωμαλία στην τάση DC.



Εικόνα 4.50: Δομή ελέγχου υπέρτακτιου μετατροπέα VSC.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

5.1 Συμπεράσματα

Η σωστή αξιοποίηση της υπεράκτιας αιολικής ενέργειας είναι ζωτικής σημασίας για την απανθρακοποίηση του ενεργειακού μείγματος τόσο στην ηλεκτροπαραγωγή όσο και στις μεταφορές μέσω της αξιοποίησης των μεγάλων ποσών καθαρής ενέργειας για ηλεκτρόλυση και παραγωγή πράσινου υδρογόνου.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετήθηκε εκτενώς το κομμάτι της ηλεκτροπαραγωγής και έμφαση δόθηκε στην μεταφορά της υπεράκτιας αιολικής ισχύος στο χερσαίο σύστημα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας.

Οι τοπολογίες διασύνδεσης εντός του υπεράκτιου αιολικού πάρκου όσο και ο τρόπος διασύνδεσής του με το υπόλοιπο χερσαίο δίκτυο ποικίλλουν και αποτελούν πρόκληση για τον μελετητή μηχανικό που θα πρέπει να λάβει υπόψη τεchnοοικονομικά κριτήρια για την βέλτιστη λύση.

Εξαιτίας της δυνατότητας για παραγωγή μεγάλων ποσοτήτων ενέργειας, αφού όπως προαναφέρθηκε το μέγεθος των Α/Γ είναι αυξημένο σε σχέση με τις Α/Γ στην στεριά, καθώς επίσης και η ποιότητα του αέρα καλύτερη, μεγάλη σημασία έχει η συμπεριφορά του συνολικού ηλεκτρικού συστήματος κατά την διάρκεια επιδραστικών σφαλμάτων, ώστε να αποφευχθούν τυχόν ανωμαλίες που θα έχουν αρνητική επίδραση τόσο στο χερσαίο ηλεκτρικό δίκτυο όσο και στα επιμέρους ηλεκτρικά μέρη του υπεράκτιου αιολικού πάρκου και της διασύνδεσης HVDC.

Έτσι λοιπόν μέσα από την προσομοίωση σφαλμάτων που πραγματοποιήθηκαν με την χρήση του προηγμένου λογισμικού PowerFactory της DigSilent, διαπιστώθηκαν ορισμένα συμπεράσματα.

Τα επιδραστικότερα σφάλματα στην διασύνδεση ενός υπεράκτιου αιολικού πάρκου μπορούν να συμβούν σε τρία δομικά στοιχεία του συνολικού συστήματος, χερσαίο ζυγό, διασύνδεση HVDC και υπεράκτιο πάρκο, και αυτά εξετάστηκαν.

- Πρώτο σφάλμα που εξετάστηκε ήταν τριφασικό σφάλμα AC στον χερσαίο ζυγό πριν τον μετασχηματιστή 110-380 kV. Το σφάλμα έλαβε χωρά την χρονική στιγμή '0' sec και εκκαθαρίστηκε την χρονική στιγμή '0.15' sec, με τα αποτελέσματα να δείχνουν ότι η παραγόμενη ισχύς που παράγεται στο υπεράκτιο αιολικό πάρκο, μεταφέρεται μέσω της HVDC διασύνδεσης, και δεν μπορεί να ενσωματωθεί στο χερσαίο δίκτυο μέσω του μετατροπέα εξαιτίας του σφάλματος, καταναλώνεται στις αντιστάσεις του chopper, ώστε να μην καταστραφούν τα IGBTs. Έτσι λοιπόν, όταν η τάση DC ξεπέρασε την τιμή 1,1 α.μ., μέσω ελέγχου, ενεργοποιήθηκαν οι αντιστάσεις του chopper, ενώ όταν το σφάλμα εκκαθαρίστηκε, δίνοντας την δυνατότητα μεταφοράς της ισχύος στο χερσαίο δίκτυο, η τάση DC επανέρχεται σε τιμές κανονικής λειτουργίας με αποτέλεσμα οι αντιστάσεις του chopper να απενεργοποιηθούν. Επίσης παρουσιάστηκε η δυνατότητα να στηριχθεί η τάση AC κατά την διάρκεια του

σφάλματος, από το χερσαίο μετατροπέα, αφού μέσω ελέγχου την στιγμή του σφάλματος, και της κατακόρυφης πτώσης της τάσης αγγίζοντας την τιμή 0.2 α.μ., προτεροποιείται το άεργο ρεύμα, η τιμή του οποίου υπό συνθήκες κανονικής λειτουργίας ήταν περίπου 0,10 α.μ., ενώ κατά την διάρκεια του σφάλματος παίρνει τιμή κοντά στο 1 α.μ. Η συνολική συνεισφορά του μετατροπέα στο ρεύμα βραχυκύκλωσης κατά την διάρκεια του σφάλματος είναι περίπου 2,6 α.μ., και αφού κατά την κανονική λειτουργία το ονομαστικό ρεύμα έχει τιμή 2,05 α.μ., εύκολα βγαίνει το συμπέρασμα ότι η τιμή του ρεύματος του μετατροπέα για την συμβολή στο ρεύμα βραχυκύκλωσης είναι περίπου 1,3 φορές μεγαλύτερο από το ονομαστικό. Τέλος όπως έδειξε η προσομοίωση, οι Α/Γ του υπεράκτιου Α/Π δεν επηρεάστηκαν από το σφάλμα στο χερσαίο ζυγό, αφού όπως αναφέρθηκε και στη θεωρία η διασύνδεση DC μεταξύ AC συστημάτων, δίνει την δυνατότητα σφάλματα μικρής διάρκειας που λαμβάνουν χώρα σε ένα δίκτυο AC να μην γίνονται αντιληπτά σε άλλο διασυνδεδεμένο δίκτυο AC με κατάλληλο έλεγχο.

Πίνακας 5.1: Σύνοψη αποτελεσμάτων των επιπτώσεων που έχει το σφάλμα στο χερσαίο μέρος σε σημαντικά ηλεκτρικά μεγέθη ολόκληρου του συστήματος.

	Πριν το σφάλμα.	Κατά την διάρκεια του σφάλματος.
Τάση AC χερσαίου μετατροπέα	1 α.μ.	0.2 α.μ.
Άεργο ρεύμα θετικής ακολουθίας χερσαίου μετατροπέα	0.1 α.μ.	0.97 α.μ.
Ενεργό ρεύμα θετικής ακολουθίας χερσαίου μετατροπέα	0.9 α.μ.	0.47 α.μ.
HVDC τάση (χερσαίο ζυγό)	0.97 α.μ.	1.1 α.μ.<VDC<1.2 α.μ.
Τάση AC υπεράκτιου μετατροπέα	1 α.μ.	1 α.μ.

- Δεύτερο σφάλμα που εξετάστηκε ήταν μονοπολικό σφάλμα DC ως προς Γη στο 50% της διασύνδεσης HVDC, με τα αποτελέσματα να δείχνουν ότι τα συστήματα ελέγχου των δύο μετατροπέων, χερσαίου και υπεράκτιου, μετριάζουν κατά πολύ τις επιπτώσεις του σφάλματος, αφού η συμμετρική

μονοπολική διαμόρφωση (symmetrical monopole configuration) παρέχει την δυνατότητα με χρήση κατάλληλου ελέγχου, να χρησιμοποιηθεί ο υγιής πόλος για την μεταφορά της συνολικής ισχύος σε περίπτωση σφάλματος στον άλλον πόλο, αρκεί ο κάθε πόλος να έχει διαστασιολογηθεί να μεταφέρει την ονομαστική παραγόμενη ισχύ του συστήματος. Όπως λοιπόν παρουσιάστηκε με τα κατάλληλα διαγράμματα, η ισχύς υπό κανονικές συνθήκες λειτουργίας ήταν διαμοιρασμένη σε 225 MW στον αρνητικό πόλο DC, και 175 MW στον θετικό πόλο, και από την στιγμή του σφάλματος στο DC πόλο, η ισχύς του υγιούς αρνητικού πόλου φτάνει τα 400 MW, όσο είναι και η συνολική ισχύς του συστήματος. Επίσης, η προσομοίωση έδειξε ότι η επίπτωση του σφάλματος και κατά συνέπεια η αλλαγή στον τρόπο που μεταφέρεται η ισχύς από το πάρκο στο χερσαίο δίκτυο, έχει ανεπαίσθητες συνέπειες στο ρεύμα (θετικής ακολουθίας) της υψηλής πλευράς του χερσαίου μετασχηματιστή 110-380 kV, αφού όπως παρουσιάστηκε στο διάγραμμα η τιμή του ρεύματος την στιγμή του σφάλματος από 0,5905 kA που ήταν υπό κανονικές συνθήκες λειτουργίας, παίρνει τιμή 0,5877 kA στιγμιαία και μετά το πέρας μεταβατικών φαινομένων επανέρχεται πάλι στην τιμή 0,5905 kA. Στην άλλη πλευρά του συστήματος, δηλαδή στο υπεράκτιο κομμάτι και τον έναν από τους δύο μετασχηματιστές 33-155 kV, η επίπτωση του σφάλματος στο ρεύμα θετικής ακολουθίας της πλευράς υψηλής, όπως έδειξε η προσομοίωση ήταν επί της ουσίας αμελητέα, αφού δεν είναι αισθητή η επίπτωση στα πρώτα δύο δεκαδικά ψηφία της τιμής του ρεύματος.

Πίνακας 5.2: Σύνοψη αποτελεσμάτων των επιπτώσεων που έχει το σφάλμα στον HVDC πόλο σε σημαντικά ηλεκτρικά μεγέθη ολόκληρου του συστήματος.

	Πριν το σφάλμα.	Κατά την διάρκεια του σφάλματος.
Ισχύς θετικού πόλου DC	175 MW	0
Ισχύς αρνητικού πόλου DC	225 MW	400 MW
Ρεύμα θετικής ακολουθίας χερσαίου Μ/Σ στην πλευρά υψηλής.	0.5905 kA	0.5877 kA.

Ρεύμα θετικής ακολουθίας υπεράκτιου M/Σ στην πλευρά υψηλής.	0.74 kA	0.74 kA
--	---------	---------

- Τρίτο είδος σφάλματος που εξετάστηκε ήταν το τριφασικό AC σφάλμα στην γραμμή διασύνδεσης της συστοιχίας των 10 A/Γ που μοντελοποιήθηκαν σαν ξεχωριστές μηχανές με τον ζυγό Sub_A/A1. Τα αποτελέσματα έδειξαν αρχικά ότι ένα αρκετά σημαντικό σφάλμα στο υπεράκτιο δίκτυο μέσης τάσης δεν ήταν ικανό να προκαλέσει άνοιγμα στους διακόπτες της γραμμής HVDC, αφού η πτώση τάσης που προκλήθηκε ήταν σχετικά μικρή. Συγκεκριμένα η τιμή της τάσης HVDC υπό κανονικές συνθήκες λειτουργίας είναι περίπου 0,975 α.μ., ενώ κατά την διάρκεια του σφάλματος στιγμιαία μειώθηκε στα 0,925 α.μ. Στη συνέχεια, και μέχρι το σφάλμα να εκκαθαριστεί στα '0,15' sec και να επιστρέψει το υπεράκτιο δίκτυο σε κανονικές συνθήκες λειτουργίας, η HVDC τάση «ακολουθεί» την AC τάση των ακροδεκτών του υπεράκτιου μετατροπέα, η οποία «στηρίζεται» με την προτεραιοποίηση του αέργου ρεύματος που ενεργοποιείται με το που διαπιστωθεί ότι η τιμή της τάσης ξεπερνά κάποιο κατώτατο όριο που έχει τεθεί. Όπως έδειξε η προσομοίωση, η τάση AC του υπεράκτιου μετατροπέα μειώνεται στιγμιαία λαμβάνοντας την τιμή 0,64 α.μ., από 1 α.μ. που είχε στην κανονική λειτουργία, προτεραιοποιώντας μέσω ελέγχου το άεργο ρεύμα, και κατά συνέπεια την άεργο ισχύ. Όπως παρουσιάστηκε με τα κατάλληλα διαγράμματα, η τιμή του αέργου ρεύματος (θετικής ακολουθίας) του μετατροπέα υπό κανονικές συνθήκες ήταν κοντά στο μηδέν, ενώ στην διάρκεια του σφάλματος κυμαίνεται στο 0,7 α.μ. Αντίθετα το ενεργό ρεύμα (θετικής ακολουθίας) μειώνεται από 0,9 α.μ. (απόλυτη τιμή) προ σφάλματος σε 0,45 α.μ. (απόλυτη τιμή) κατά την διάρκεια του σφάλματος και μέχρι την εκκαθάρισή του, αφού όπως προαναφέρθηκε μέσω ελέγχου δίνεται προτεραιότητα στο άεργο ρεύμα. Επίσης η προσομοίωση έδειξε την προτεραιοποίηση μέσω του ελέγχου του αέργου ρεύματος των A/Γ ώστε να στηριχθεί η τάση κατά την διάρκεια του σφάλματος. Συγκεκριμένα, ελέγχθηκαν οι 10 ομαδοποιημένες A/Γ που είναι συνδεδεμένες στον ζυγό όπου συνδέεται η γραμμή που συμβαίνει το σφάλμα, και η προσομοίωση έδειξε ότι κατά την διάρκεια του σφάλματος η τάση της A/Γ 11 (10 μαζί) κυμαίνεται στην τιμή 0,3 α.μ., ενώ ταυτόχρονα προτεραιοποιώντας το μέσω ελέγχου, η τιμή του αέργου ρεύματος από 0,25 α.μ. που ήταν σε κανονικές συνθήκες λειτουργίας αυξάνεται σε 0,75 α.μ. κατά την διάρκεια του σφάλματος μειώνοντας τον 'χώρο' στο ενεργό ρεύμα που η τιμή του από 0,9 α.μ., κατά την διάρκεια του σφάλματος κυμαίνεται στο 0,45 α.μ. Ίδια συμπεριφορά έχει και η A/Γ 1, που είναι η πρώτη μηχανή που συνδέεται η γραμμή στην οποία συμβαίνει το σφάλμα, από την κατάντη πλευρά, αφού έχουν μοντελοποιηθεί με τα ίδια χαρακτηριστικά με τα αποτελέσματα να έχουν αντίκτυπο στην εξαγόμενη προς το χερσαίο δίκτυο ενεργό ισχύ. Συγκεκριμένα, η προσομοίωση έδειξε ότι η ενεργός ισχύς που

‘φτάνει’ στον χερσαίο μετατροπέα κατά την διάρκεια του σφάλματος κυμαίνεται στο επίπεδο των 130 MW, από περίπου 390 MW που ήταν πριν το σφάλμα. Επίσης η επίπτωση στην τάση του υπεράκτιου μετατροπέα είναι ελάχιστη, αφού οι μικρές μεταβολές που παρατηρούνται έχουν επίπτωση στο τρίτο δεκαδικό ψηφίο της τιμής τάσης.

Πίνακας 5.3: Σύνοψη αποτελεσμάτων των επιπτώσεων που έχει το σφάλμα στο υπεράκτιο μέρος σε σημαντικά ηλεκτρικά μεγέθη ολόκληρου του συστήματος.

	Πριν το σφάλμα.	Κατά την διάρκεια του σφάλματος.
Τάση AC υπεράκτιου μετατροπέα	1 α.μ.	0.64 α.μ.
Άεργο ρεύμα θετικής ακολουθίας υπεράκτιου μετατροπέα	0	0.70 α.μ.
Ενεργό ρεύμα θετικής ακολουθίας χερσαίου μετατροπέα	0.9 α.μ.	0.45 α.μ.
HVDC τάση (υπεράκτιο ζυγό)	0.975 α.μ.	0.925 α.μ.
Τάση AC χερσαίου μετατροπέα	1.005α.μ.	1.007 α.μ.
Τάση AC Α/Γ 11	1 α.μ.	0.3 α.μ.
Τάση AC Α/Γ 1	1 α.μ.	0.3 α.μ.
Άεργο ρεύμα θετικής ακολουθίας Α/Γ 11	0.25 α.μ.	0.75 α.μ.
Ενεργό ρεύμα θετικής ακολουθίας Α/Γ 11	0.9 α.μ.	0.45 α.μ.
Άεργο ρεύμα θετικής ακολουθίας Α/Γ 1	0.25 α.μ.	0.75 α.μ.
Ενεργό ρεύμα θετικής ακολουθίας Α/Γ 11	0.9 α.μ.	0.45 α.μ.
Ενεργός ισχύς χερσαίου μετατροπέα	390 MW	130 MW
Άεργος ισχύς χερσαίου μετατροπέα	37.5 MW	35 MW

5.2 Μελλοντικές μελέτες.

Στην προσομοίωση μελετήθηκε αιολικό πάρκου 400 MW με τεχνολογία διασύνδεσης HVDC VSC και εξετάστηκε η απόκριση του συνολικού συστήματος σε σημαντικά βραχυκυκλώματα. Ενδιαφέρον θα είχε σε επόμενη διπλωματική εργασία να παρουσιαστεί η συμπεριφορά του ίδιου υπεράκτιου αιολικού πάρκου σε συγκεκριμένες απαιτήσεις συμμόρφωσης με αναθεωρημένους κώδικες των Διαχειριστών του δικτύου μεταφοράς, που επιβάλλουν οι ανάγκες της σωστής λειτουργίας του συστήματος με αυξανόμενη ενσωμάτωση ΑΠΕ. Επίσης, ενδιαφέρον έχει η μοντελοποίηση ηλεκτρικών διασυνδέσεων με χρήση DC τεχνολογίας εντός του υπεράκτιου πάρκου, όπως παρουσιάστηκε στην θεωρία της παρούσας εργασίας.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Επίσημη σελίδα WindEurope, ‘Wind Energy today’ [online], Διαθέσιμο <https://windeurope.org/about-wind/wind-energy-today/> [Πρόσβαση: Απρίλιος 2024].
- [2] Σελίδα του Μαθήματος 'Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας' [online], 2023-2024, Διαθέσιμο στον ιστότοπο: <https://helios.ntua.gr/course/view.php?id=905> [Πρόσβαση: Απρίλιος 2024].
- [3] Thomas Ackermann, “Wind Power in Power System”, ‘John Wiley and Sons, Ltd’, 2005.
- [4] Επίσημη σελίδα IRENA, ‘Trassition/Innovation’ [online], Διαθέσιμο: <https://www.irena.org/Energy-Transition/Innovation> [Πρόσβαση: Μάρτιος 2024].
- [5] Mohammad Suwan , “Modeling and Control of VSC-HVDC Connected Offshore Wind Farms”, Bachelor Thesis, University Duisburg-Essen, 2017.
- [6] Ainhua Sanchez Arrizabalaga, “Collection System Optimization for an Offshore Wind Power Plant”, Master Thesis, UPC, 2021.
- [7] S. Robak and R.M. Raczowski, “Substations for offshore wind farms: a review from the perspective of the needs of the Polish wind energy sector”, Bulletin of the Polish Academy of Sciences-technical Sciences, Vol. 66, No 4, 2018.
- [8] Research group of UPC, “Report on the evaluation of DC/DC converters, submarine cables and offshore substations on losses, cost, economy and reliability”, for Innovative tools for offshore wind and DC grids, 2018.
- [9] Nicolaos A. Cutululis, “Connection of offshore wind farms”, in 15th International ACDC 2019 tutorial 5th February 2019 – Coventry UK , 2019.
- [10] Μάριος Ζάγγας, “Διερεύνηση τεχνικών απαιτήσεων κωδίκων συστήματος για τη διασύνδεση υπεράκτιων αιολικών σταθμών με τεχνολογία συνεχούς ρεύματος υψηλής τάσης (HVDC)”, Διπλωματική εργασία, ΕΜΠ, 2014.
- [11] Das K., & Antonios Cutululis, “Offshore Wind Power Plant Technology Catalogue - Components of wind power plants, AC collection systems and HVDC systems”, DTU, 2017.

- [12] Επίσημα ιστοσελίδα IRENA, [“Enabling Frameworks for Offshore Wind scale up”](https://www.irena.org/). [Online], Διαθέσιμο στο ιστοτόπο: <https://www.irena.org/> [Πρόσβαση: Μάρτιος 2024]
- [13] “Global Offshore Wind Report” [Online]. Διαθέσιμο στον ιστότοπο: <https://wfo-global.org/wp-content/uploads/2024/04/WFO-Report-2024Q1.pdf> [Πρόσβαση: Φλεβάρης 2024]
- [14] Apostolos Petropoulos, “World Energy Outlook 2023”, [online] Διαθέσιμο στον ιστότοπο: https://helios.ntua.gr/pluginfile.php/249455/mod_resource/content/1/20231113_WEO_2023.pdf, Παρουσίαση στο μάθημα ΑΠΕ, ΕΜΠ, 2023.
- [15] Επίσημη σελίδα ΕΛΕΤΑΕΝ, ‘Θεσμικό πλαίσιο υπεράκτιων αιολικών πάρκων’ [online], Διαθέσιμο <https://eletaen.gr/wp-content/uploads/2024/01/2024-01-24-thesmiko-plaisio-owp-papastamatiou.pdf> [Πρόσβαση: Απρίλιος 2024].
- [16] Clara Fernandez i Clemente, “Development of an electrical sizing tool for an offshore wind farm”, Bachelor Thesis, UPC, Ιούνιος 2019.
- [17] Mario Ndreko, “Offshore wind power plants with VSC-HVDC transmission Grid code compliance optimization and the effect on high voltage ac transmission system”, Technische Universiteit Delft, 2017.
- [18] Víctor Silos Sánchez. “Control and Simulation of Power Converters for HVDC Grids”, Master’s Thesis, UPC, 2019.
- [19] Dirk Van Hertem, Oriol Gomis-Bellmunt, Jun Liang, ‘HVDC GRIDS For Offshore and Supergrid of the Future’, 2016, Εκδόσεις ‘John Wiley & Sons’.
- [20] Hisham Hasan Taleb, “Fault Analysis and Protection Design for Offshore Wind Farm Electrical System”, Master Thesis, Aalborg University, 2019.
- [21] Γεώργιος Ν. Πατσάκης, “Διερεύνηση Συμβατότητας με Κώδικες Συστήματος Θαλάσσιων Αιολικών Πάρκων Διασυνδεδεμένων μέσω Συνδέσμων HVDC”, Διπλωματική Εργασία, ΕΜΠ, 2013.
- [22] Mohan, Undeland, Robbins, “Εισαγωγή στα ηλεκτρονικά ισχύος”, 3^η Έκδοση.

[23] Σελίδα του μαθήματος ‘Ηλεκτρονική Ισχύος Ι [online], 2023-2024, Διαθέσιμο στον ιστότοπο: <https://helios.ntua.gr/course/view.php?id=863> [Πρόσβαση: Απρίλιος 2024].

[24] Επίσημα ιστοσελίδα Hitachi Energy, ‘Customer success stories’[Online]. Διαθέσιμο στον ιστότοπο: <https://www.hitachienergy.com/about-us/customer-success-stories/dogger-bank> [Πρόσβαση: Μάιος 2024]

[25] Επίσημα ιστοσελίδα Hitachi Energy, ‘Customer success stories’[Online]. Διαθέσιμο στον ιστότοπο: <https://www.hitachienergy.com/about-us/customer-success-stories/borwin1> [Πρόσβαση: Ιούνιος 2024]

[26] High-voltage direct current (HVDC) transmission solutions, Siemens Energy, References. [Online]. Διαθέσιμο στον ιστότοπο: <https://www.siemens-energy.com/>. [Πρόσβαση: Ιούνιος 2024]

[27] HVDC Classic Reference list, Hitachi Energy, 2024 [Online]. Διαθέσιμο στον ιστότοπο: <https://www.hitachienergy.com/>. [Πρόσβαση: Ιούνιος 2024]

[28] HVDC Plus Reference list, Hitachi Energy, 2024 [Online]. Διαθέσιμο στον ιστότοπο: <https://www.hitachienergy.com/>. [Πρόσβαση: Ιούνιος 2024]

[29] Padmavathi Lakshmanan , Ruijuan Sun, and Jun Liang, Senior Member, IEEE. “Electrical Collection Systems for Offshore Wind Farms: A Review”. Csee Journal of Power and Energy Systems, Vol. 7, No. 5, 2021.

[30] Hakan Acaroglu, Fausto Pedro García Marquez, “High voltage direct current systems through submarine cables for offshore wind farms: A life-cycle cost analysis with voltage source converters for bulk power transmission.” in Energy, Elsevier, 2022.

[31] HVDC Connected Offshore Wind Farm, DigSilent PowerFactory, User Manual [online], Διαθέσιμο στην επιφάνεια εργασίας του PowerFactory. [Πρόσβαση: Μάιος 2024]

[32] “Technical References of Models”, Appendix C from User Manual, DigSilent PowerFactory, Διαθέσιμο στην επιφάνεια εργασίας του PowerFactory. [Πρόσβαση: Ιούνιος 2024]

[33] S. K. Chaudhary, Student Member, IEEE, R. Teodorescu, Senior Member, IEEE, P. Rodriguez, Member, IEEE, and P. C. Kjaer Member, IEE, “Chopper Controlled Resistors in VSC-HVDC Transmission for WPP with Full-scale Converters.”, IEE Xplore, 2009.

[34] Christoph Nentwig, Student Member IEEE, Jens Haubrock, Senior Member IEEE, Robert H. Renner, Graduate Student Member, IEEE, Dirk Van Hertem, Senior Member, IEEE, “Application of DC Choppers in HVDC Grids”, IEE Xplore, 2016.

[35] M. Mohan, Student Member IEEE, K. Panduranga Vittal, Senior Member IEEE, “Modeling and Simulation Studies on Performance Evaluation of Three-Terminal VSC-HVDC Link Connected Offshore Wind Farms”, IEE Xplore, 2017.

[36] Anaya-Lara, O., Campos-Gaona, D., Moreno-Goytia, E., & Adam, G. “Offshore wind energy generation: control, protection, and integration to electrical systems”, John Wiley & Sons, 2014.

[37] Felipe Rocha Velloso De Almeida Perdosso, “Modelling and Methodology Applied of Evaluate Multi-infeed Performance of HVDC Transmission System”, Master Thesis, Escola Politecnica da USP, 2017.