

Εθνικό Μετσοβίο Πολύτεχνειο Σχολή Ηλεκτρολογών Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών Τομέας Ηλεκτρικής Ισχύος

Συγκριτική μελέτη δικτύων συνεχούς ρεύματος έναντι μεταβατικών φαινομένων

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Ιωάννης Α. Καρλής

Επιβλέπων: Χρήστος Αθ. Χριστοδούλου, Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Οκτώβριος 2024



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ Σχολή Ηλεκτρολογών Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών Τομέας Ηλεκτρικής Ισχύος

Συγκριτική μελέτη δικτύων συνεχούς ρεύματος έναντι μεταβατικών φαινομένων

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Ιωάννης Α. Καρλής

Επιβλέπων: Χρήστος Αθ. Χριστοδούλου, Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 21^η Οκτωβρίου 2024

..... Χρήστος Αθ. Χριστοδούλου

Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

..... Ιωάννης Φ. Γκόνος

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Γεώργιος Ι. Τσεκούρας

.....

Αναπληρωτής Καθηγητής ΠΑ.Δ.Α.

Αθήνα, Οκτώβριος 2024

.....

Ιωάννης Α. Καρλής

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

Copyright © Ιωάννης Καρλής, 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.

<u>Περίληψη</u>

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η συγκριτική μελέτη υποθαλάσσιων συστημάτων μεταφοράς εναλλασσόμενου και συνεχούς ρεύματος έναντι μεταβατικών φαινομένων. Για τον σκοπό αυτόν, χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό PowerFactory της DIgSILENT. Αργικά, κατασκευάστηκε ένα μοντέλο συστήματος μεταφοράς εναλλασσόμενου ρεύματος που αποτελείται από ένα φωτοβολταϊκό και πέντε σύγχρονες γεννήτριες για την παραγωγή ισχύος, έξι φορτία κατανάλωσης, τέσσερις ζυγούς υψηλής τάσης και πέντε γραμμές μεταφοράς. Στη συνέχεια, αντικαταστάθηκαν οι γραμμές μεταφοράς σε ξεγωριστές περιπτώσεις από συστήμα συνεχούς ρεύματος, HVDC-LCC και HVDC-VSC, δημιουργώντας έξι καινούργια συστήματα μεταφοράς. Εξήχθησαν αποτελέσματα από προσομοιώσεις ροής φορτίου σε συνθήκες σταθερής κατάστασης, υπολογίζοντας την ενεργό και άεργο ισχύ, το μεγέθος τάσης, το μέγεθος ρεύματος, τις απώλειες και τη φόρτιση γραμμών μεταφοράς. Πραγματοποιήθηκαν προσομοιώσεις βραχυκυκλώματος στους ζυγούς του δικτύου σε συνθήκες σταθερής κατάστασης υπολογίζοντας την αρχική ισχύ βραχυκυκλώματος (S_{kss}) , το αρχικό ρεύμα βραχυκυκλώματος (I_{kss}) και το μέγιστο ρεύμα βραχυκυκλώματος (i_p), καθώς και προσομοιώσεις έκτακτης ανάγκης στις γραμμές μεταφοράς και τις γεννήτριες, ώστε να μελετηθεί η μέγιστη ικανότητα μεταφοράς ισχύος και μέγιστη φόρτιση του συστήματος, σε περίπτωση βλάβης στο σύστημα. Ακολούθως έγινε σύγκριση των προσομοιώσεων. Τέλος, προέκυψαν συμπεράσματα για την απόδοση των συστημάτων και έγιναν κάποιες προτάσεις για μελλοντική έρευνα.

Λέξεις κλειδιά:

HVAC, HVDC-LCC, HVDC-VSC, Ανάλυση ροής φορτίου, Βραχυκυκλώματα

<u>Abstract</u>

The purpose of this thesis is the comparative study of alternating current and direct current submarine transmission systems against transient phenomena. For this purpose, DIgSILENT's PowerFactory software was used. Initially, a model of an AC transmission system consisting of on PV and five synchronous generators for power generation, six consumption loads, four high voltage busbars and five transmission lines was constructed. The transmission lines were then replaced in separate cases by DC, HVDC-LCC and HVDC-VSC systems. Results were extracted from load flow simulations under steady state conditions, calculating active and reactive power, voltage magnitude, current magnitude, losses and line loading. Short circuit simulations on the network busbars under steady state conditions are carried out by calculating the initial short circuit power (S_{kss}), the initial short circuit current (I_{kss}) and the maximum short circuit current (i_p). Contingency simulations on transmission lines and generators are carried out to study the maximum power transmission capacity and maximum system loading, in case of system failure and then compared. Finally, conclusions were drawn on the performance of the systems and some suggestions were made for future research.

Keywords:

HVAC, HVDC-LCC, HVDC-VSC, Load flow analysis, Short circuits

<u>Περιεχόμενα</u>

<u>Κεφάλαιο 1</u>: Εισαγωγή

1.1.	Ιστορική ανδρομή	10
1.2.	Ηλεκτρικό ρεύμα	10
1.3.	Σύστημα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας	11
	1.3.1. Εναλλασσόμενο ρεύμα υψηλής τάσης (HVAC)	12
	1.3.2. Συνεχές ρεύμα υψηλής τάσης (HVDC)	13
	1.3.3. HVDC vs HVAC	13
	1.3.4. Φαινόμενα σε συστήματα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας	15
1.4.	Ροή φορτίου, σφάλματα	15
1.5.	Απώλειες	16
1.6.	Ανάλυση εξαρτημάτων HVDC	17
1.7.	Τύποι συνδέσεων συστημάτων HVDC	19
1.8.	Διαμόρφωση HVDC	20

Κεφάλαιο 2: Θεωρητικό υπόβαθρο

2.1.	Περιπτώσεις που χρησιμοποιούνται τα υποθαλάσσια συστήματα	22
2.2.	Υποθαλάσσια συστήματα μεταφοράς για υπεράκτια αιολικά πάρκα	22
	2.2.1. Εναλλασσόμενο ρεύμα υψηλής τάσης σε υποθαλάσσια συστήματα	23
	2.2.2. Συνεχές ρεύμα υψηλής τάσης σε υποθαλάσσια συστήματα	23
	2.2.3. Σύγκριση μεταξύ AC, DC-LCC, DC-VSC	25
2.3.	Ανάλυση υποθαλάσσιων καλωδίων	26
	2.3.1. Είδη καλωδίων	26
	2.3.2. Τύποι αγωγών	28
	2.3.3. Συστήματα μόνωσης	29
	2.3.4. Προστασία νερού	31
	2.3.5. Θωράκιση	31
2.4.	Εγκατάσταση καλωδίων	31
	2.4.1. Σκάφος τοποθέτησης καλωδίων	31
	2.4.2. Φόρτωση καλωδίων στο πλοίο	34
	2.4.3. Εκφόρτωση καλωδίων από το πλοίο	35
	2.4.4. Τοποθέτηση καλωδίων στο βυθό	36
	2.4.5. Σύνδεση καλωδίων	37
	2.4.6. Προστασία καλωδίων από κινδύνους σφάλματος	38
2.5.	Φαινόμενα στα καλώδια	38
2.6.	Συντήρηση	40
2.7.	Συστήματα σε λειτουργία	40

Κεφάλαιο 3: Λογισμικό PowerFactory της DIgSILENT

3.1.	Το πρόγραμμα PowerFactory της DIgSILENT	42
0.1.		•

3.2.	Ανάλυση ροής φορτίου	42
	3.2.1. Μέθοδος ροής φορτίου ΑC	43
	3.2.2. Μέθοδος ροής φορτίου DC	45
	3.2.3 Έλεγχος ενεργής ισχύος	45
	3.2.4. Έλεγχος άεργης ισχύος	46
3.3.	Ανάλυση βραχυκυκλώματος	47
	3.3.1. Μέθοδος IEC 60909/VDE 0102	47
	3.3.2. Μέθοδος ANSI	48
	3.3.3. Ολοκληρωμένη μέθοδος (υπέρθεσης)	
	3.3.4. Μέθοδος ΙΕС 61363	
	3.3.5. Μέθοδος ΙΕС 61660	
	3.3.6. Μέθοδος ANSI/IEEE 946	
3.4.	Περιβάλλον του PowerFactory	49
	3.4.1. Κύριο παράθυρο	49
	3.4.2. Εκτέλεση υπολογισμού ροής φορτίου	51
	3.4.3. Εκτέλεση υπολογισμού βραχυκυκλώματος	
	· · · · · · ·	

Κεφάλαιο 4: Προσομοιώσεις και αποτελέσματα

Μελέτη στο PowerFactory	53
Συστήματα μελέτης	53
Ανάλυση ροής φορτίου	68
Ανάλυση βραχυκυκλώματος	75
Ανάλυση έκτακτης ανάγκης (contingency analysis)	80
Τοποθέτηση συστημάτων HVDC-LCC και HVDC-VSC στο σύστημα	85
4.6.1. Αντικατάσταση γραμμής «Line 1» HVDC-LCC 2	85
4.6.2. Αντικατάσταση γραμμής «Line 1» HVDC-VSC 2	87
4.6.3. Ανάλυση ροής φορτίου συστημάτων HVDC-LCC 2 και HVDC 2	C-VSC
4.6.4. Αντικατάσταση γραμμής «Line 3» HVDC-LCC 3	92
4.6.5. Αντικατάσταση γραμμής «Line 3» HVDC-VSC 3	94
4.6.6. Ανάλυση ροής φορτίου συστημάτων HVDC-LCC 3 και HVDC	C-VSC
4.6.7. Ανάλυση βραχυκυκλώματος συστημάτων HVDC-LCC 2, HVDC 2, HVDC-LCC 3 και HVDC-VSC 3	C-VSC 100
	Μελέτη στο PowerFactory Συστήματα μελέτης Ανάλυση ροής φορτίου Ανάλυση βραχυκυκλώματος Ανάλυση έκτακτης ανάγκης (contingency analysis) Τοποθέτηση συστημάτων HVDC-LCC και HVDC-VSC στο σύστημα 4.6.1. Αντικατάσταση γραμμής «Line 1» HVDC-LCC 2 4.6.2. Αντικατάσταση γραμμής «Line 1» HVDC-VSC 2 4.6.3. Ανάλυση ροής φορτίου συστημάτων HVDC-LCC 2 και HVDC 2 4.6.4. Αντικατάσταση γραμμής «Line 3» HVDC-LCC 3 4.6.5. Αντικατάσταση γραμμής «Line 3» HVDC-VSC 3 4.6.6. Ανάλυση ροής φορτίου συστημάτων HVDC-LCC 3 και HVDC 3 4.6.7. Ανάλυση βραχυκυκλώματος συστημάτων HVDC-LCC 2, HVDC 2, HVDC-LCC 3 και HVDC-VSC 3

Κεφάλαιο 5: Συμπεράσματα και μελλοντική έρευνα

5.1.	Συμπεράσματα	108
5.2.	Μελλοντική έρευνα	109

βιβλιογραφία110

Πρόλογος

Το αντικείμενο της παρούσας εργασίας είναι η συγκριτική μελέτη συστημάτων συνεχούς ρεύματος και εναλλασσόμενου ρεύματος. Η μελέτη διενεργείται μέσω προσομοιώσεων, χρησιμοποιώντας το λογισμικό PowerFactory της DIgSILENT. Εξετάζονται η ανάλυση ροής φορτίου, ο υπολογισμός των απωλειών, ο υπολογισμός βραχυκυκλωμάτων και η κατάσταση έκτακτης ανάγκης N-1(contingency analysis), δηλαδή η ικανότητα του συστήματος να διατηρεί τη λειτουργία του σε κανονική κατάσταση σε περίπτωση ενός μεμονωμένου συμβάντος έκτακτης ανάγκης, όπως η απώλεια γραμμής μεταφοράς, σε υποθαλάσσια συστήματα μεταφοράς υψηλής τάσης. Η σύγκριση γίνεται μεταξύ συστημάτων που χρησιμοποιούνται γραμμές μεταφοράς και συστήματα συνεχούς ρεύματος (HVDC-LCC και HVDC-VSC).

Το πρώτο κεφάλαιο αποτελεί την εισαγωγή της εργασίας. Αρχικά γίνεται ιστορική αναδρομή για τη δημιουργία των συστημάτων μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας. Έπειτα, αναλύονται τα βασικά χαρακτηριστικά, τα πλεονεκτήματα, τα μειονεκτήματα και τα εξαρτήματα ενός συστήματος μεταφοράς συνεχούς τάσης.

Το δεύτερο κεφάλαιο περιλαμβάνει το θεωρητικό υπόβαθρο της εργασίας. Αναφέρονται περιπτώσεις και συνθήκες που χρησιμοποιούνται υποθαλάσσια συστήματα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας, περιγράφοντας αναλυτικά τα πλεονεκτήματα, τα μειονεκτήματα και τα χαρακτηριστικά των εξαρτημάτων που συνθέτουν ένα σύστημα. Επιπλέον, περιγράφεται η διαδικασία εγκατάστασης των καλωδίων και τα φυσικά φαινόμενα που δημιουργούν εμπόδια και κινδύνους κατά την τοποθέτησή τους στον βυθό της θάλασσας.

Στο τρίτο κεφάλαιο περιγράφεται το λογισμικό PowerFactory. Περιγράφονται οι διαφορετικοί μέθοδοι που περιέχει το λογισμικό για την ανάλυση ροής φορτίου και την ανάλυση βραχυκυκλώματος, καθώς και πληροφορίες για το περιβάλλον του λογισμικού που συναντά ένας χρήστης. Επιπλεόν, παρουσιάζεται ο τρόπος με τον οποίο γίνονται οι προσομοιώσεις με τα αντίστοιχα «παράθυρα» του προγράμματος.

Στο τέταρτο κεφάλαιο αναλύονται τα συστήματα μεταφοράς στα οποία γίνονται οι προσομοιώσεις, με τις πληροφορίες των στοιχείων που συνθέτουν τα προς μελέτη ηλεκτρικά συστήματα. Γίνονται όλες οι μετρήσεις ροής φορτίου, βραχυκυκλώματος και έκτακτης ανάγκης και συγκρίνονται τα αποτελέσματα μεταξύ τους.

Στο πέμπτο και τελευταίο κεφάλαιο παραθέτονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την ανάλυση των αποτελεσμάτων των μετρήσεων, καθώς και κάποιες προτάσεις για μελλοντική έρευνα στον τομέα των υποθαλάσσιων συστημάτων μεταφοράς.

<u>Κεφάλαιο 1</u>

Εισαγωγή

1.1. Ιστορική αναδρομή

Στα τέλη του 19^{ου} αιώνα, οι εφευρέτες Thomas Edison και Nikola Tesla βρέθηκαν αντιμέτωποι στην διαμάχη, για το αν θα χρησιμοποιηθεί συνεχές ρεύμα (DC) ή εναλλασσόμενο ρεύμα (AC) στα συστήματα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας. Η μεταξύ τους διαφωνία έμεινε γνωστή ως «Ο πόλεμος των ρευμάτων» [1].

Ο Thomas Edison ανέπτυξε ένα σύστημα παραγωγής και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας συνεχούς ρεύματος, με σκοπό επιχειρήσεις και κατοικίες να μπορούν να χρησιμοποιήσουν τη νέα του εφεύρεση, τη λάμπα. Το πρόβλημα που αντιμετώπισε με το συνεχές ρεύμα, ήταν η δυσκολία μετατροπής του σε υψηλότερες ή χαμηλότερες τάσεις [1].

Ο Nikolas Tesla παρουσίασε το εναλλασσόμενο ρεύμα ως τη λύση στο πρόβλημα του Thomas Edison. Με τη χρήση του μετασχηματιστή κατάφερε να μετατρέψει εύκολα την τάση σε δίκτυα εναλλασσόμενου ρεύματος σε διαφορετικά επίπεδα. Λόγω των περιορισμένων δυνατοτήτων της τεχνολογίας εκείνης της εποχής στα ηλεκτρονικά ισχύος και στους μετατροπείς τάσης, επικράτησε το εναλλασσόμενο ρεύμα [1].

1.2. Ηλεκτρικό ρεύμα

Το συνεχές ρεύμα (direct current, DC) (Εικόνα 1.1), έχει την ιδιότητα να ρέει σε σταθερή κατεύθυνση μέσω αγωγών και ημιαγωγών. Χρησιμοποιείται για τη φόρτιση μπαταριών, όπως του κινητού τηλεφώνου και του φορητού υπολογιστή, καθώς επίσης σε μεγάλα τροφοδοτικά για ηλεκτρονικά συστήματα και κινητήρες [2].



Εικόνα 1.1: Συνεχής τάση (θετική ή αρνητική), 1 χωρίς κυματισμό, 2 με κυματισμό [3]

Το εναλλασσόμενο ρεύμα (alternating current, AC) (Εικόνα 1.2), σε αντίθεση με το συνεχές, έχει την ιδιότητα να μεταβάλλει την ένταση και την κατεύθυνση ροής του, εμπρός και πίσω, περιοδικά. Είναι η μορφή τροφοδοσίας ηλεκτρικής ενέργειας σε επιχειρήσεις και κατοικίες, που χρησιμοποιείται για τη σύνδεση συσκευών σε μία πρίζα τοίχου, όπως ηλεκτρική κουζίνα, ψυγείο, κλιματιστικό και πλυντήριο [2].



Εικόνα 1.2: Εναλλασσόμενη τάση τετραγωνικής και ημιτονοειδούς μορφής [3]

1.3. Σύστημα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας

Με το σύστημα μεταφοράς παρέχεται ηλεκτρική ενέργεια από σταθμούς παραγωγής σε δίκτυα διανομής που βρίσκονται σε κατοικημένες περιοχές. Ο συνδυασμός ηλεκτροπαραγωγής, συστήματος μεταφοράς και διανομής, καθώς και υποσταθμοί που μετασχηματίζουν την ένταση τάσης σε τέσσερις κατηγορίες 1.Χαμηλή (<1kV) 2.Μέση (1kV-35kV) 3.Υψηλή (35kV-230kV) 4.Υπερυψηλή (>230kV), σχηματίζουν το **ηλεκτρικό δίκτυο** (Εικόνα 1.5) [3].

Για τη μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας χρησιμοποιούνται αγώγιμα καλώδια με δύο τρόπους. Ο πρώτος τρόπος είναι με **εναέριες γραμμές** (Εικόνα 1.3), οι οποίες βρίσκονται συνήθως εκτός κατοικημένων περιοχών και αποτελούν το μεγαλύτερο μέρος ενός συστήματος μεταφοράς. Για τη στήριξη των καλωδίων τοποθετούνται πυλώνες σε απόσταση από 150m έως 500m μεταξύ τους. Οι εναέριες γραμμές είναι εκτεθειμένες σε καιρικά φαινόμενα (χιονοπτώσεις, καταιγίδες) και η βλάστηση μπορεί να προκαλέσει σφάλματα στις γραμμές, για παράδειγμα ένα κλαρί δέντρου να ακουμπήσει στα καλώδια και να δημιουργηθεί βραχυκύκλωμα, οπότε η συντήρησή τους αποτελεί πρόκληση. Ο δεύτερος τρόπος είναι με **υπόγειες γραμμές** (Εικόνα 1.4). Είναι συμπληρωματικές των εναέριων γραμμών και τοποθετούνται όπου δεν είναι εφικτό να χρησιμποποιηθούν οι εναέριες γραμμές, δηλαδή σε κατοικημένες περιοχές και υποθαλάσσια δίκτυα [4].

Οι γραμμές μεταφοράς υψηλής τάσης, ανάλογα με τη συνολική απόσταση που διανύουν, διακρίνονται σε χαμηλού εύρους (<50km), μεσαίου εύρους (50km – 150km) και μεγάλου εύρους (>150km) [4].



Εικόνα 1.3: Εναέριες γραμμές [3]

Εικόνα 1.4: Υπόγειες γραμμές [3]



Εικόνα 1.5: Επισκόπηση ενός πλήρους συστήματος μεταφοράς [4]

1.3.1. Εναλλασσόμενο ρεύμα υψηλής τάσης (ΗVAC)

Το σύστημα μεταφοράς εναλλασσόμενου ρεύματος υψηλής τάσης (Εικόνα 1.6) είναι ο κυρίαρχος τρόπος μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας μέχρι στιγμής.

Τα κύρια εξαρτήματα του συστήματος είναι οι μετασχηματιστές, οι αγωγοί και οι μονωτήρες.

Από τον σταθμό παραγωγής, με τη βοήθεια ενός τριφασικού μετασχηματιστή, η τιμή της τάσης αυξάνεται σε υψηλή, επιτρέποντας τη μεταφορά ενέργειας με λιγότερες απώλειες, και τελικά στην πλευρά διανομής, η τιμή της τάσης μειώνεται σε μέση ή χαμηλή από έναν τριφασικό μετασχηματιστή, για να μπορεί να καταναλωθεί από επιχειρήσεις και κατοικίες [5].



Εικόνα 1.6: Σύστημα μεταφοράς εναλλασσόμενου ρεύματος [4]

1.3.2. Συνεχές ρεύμα υψηλής τάσης (HVDC)

Το σύστημα μεταφοράς συνεχούς ρεύματος υψηλής τάσης (Εικόνα 1.7) χρησιμοποιείται σε περιοχές όπου η ενέργεια μεταδίδεται σε πολύ μεγάλες αποστάσεις ή για τη διασύνδεση πάρκων παραγωγής από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (αιολικά, φωτοβολταϊκά) σε υπάρχον δίκτυο μεταφοράς.

Τα κύρια εξαρτήματα του συστήματος είναι μετατροπείς DC σε DC, ανορθωτές AC σε DC, αντιστροφείς DC σε AC και αγώγιμες γραμμές μεταφοράς.

Στις δύο πλευρές του συστήματος μεταφοράς είναι τοποθετημένοι είτε μετατροπείς, είτε ανορθωτές και αντιστροφείς, ώστε να είναι δυνατή η μετατροπή τάσης από συνεχής σε εναλλασσόμενη και αντίστροφα, ανάλογα την περίπτωση που χρησιμοποιείται το δίκτυο [5].



Εικόνα 1.7: Σύστημα μεταφοράς συνεχούς ρεύματος [5]

1.3.3. HVDC vs HVAC

Στο σύστημα μεταφοράς συνεχούς ρεύματος το συνολικό κόστος των αγώγιμων γραμμών μεταφοράς είναι μικρότερο από το αντίστοιχο για το εναλλασσόμενο ρεύμα, διότι για την ίδια ικανότητα μεταφοράς, απαιτούνται δύο αγωγοί και τρεις αγωγοί αντίστοιχα. Όμως, το κόστος εγκατάστασης σταθμών μετατροπής για τη λειτουργία του συστήματος συνεχούς ρεύματος, είναι πολύ υψηλό συγκριτικά με την τοποθέτηση μετασχηματιστών στην περίπτωση του εναλλασσόμενου ρεύματος.

Το παρακάτω γράφημα (Εικόνα 1.8) αποτυπώνει τη σχέση απόσταση-κόστους, δηλαδή ανάλογα με την απόσταση μεταφοράς υψηλής τάσης, ποιός τύπος συστήματος (HVDC ή HVAC) είναι οικονομικότερος [5].



Εικόνα 1.8: Γράφημα απόσταση-κόστος για συστήματα μεταφοράς [5]

Συγκρίνοντας τα δύο είδη μεταφοράς υψηλής τάσης (HVDC και HVAC), προκύπτουν τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα του συστήματος μεταφοράς συνεχούς ρεύματος υψηλής τάσης (HVDC) [6].

Πλεονεκτήματα:

- Μικρότερος αριθμός αγωγών και μονωτήρων στις γραμμές μεταφοράς, οπότε μειώνεται το κόστος και ταυτόχρονα οι απώλειες ισχύος του συστήματος.
- Απαιτεί λιγότερη απόσταση μεταξύ φάσης και εδάφους.
- Οι πυλώνες στήριξης είναι φθηνότεροι.
- Ελάχιστες απώλειες corona.
- Χρησιμοποιεί επιστροφή γείωσης, εάν παρουσιαστεί σφάλμα σε έναν πόλο, ο άλλος πόλος συμπεριφέρεται σαν ανεξάρτητο κύκλωμα.
- Έχει τη δυνατότητα να διασυνδέει δύο υποσταθμούς με διαφορετικές συχνότητες λειτουργίας.
- > Δεν υπάρχει το skin effect στις γραμμές, λόγω της απώλειας συχνότητας.
- > Δεν παράγει ούτε απορροφά άεργο ισχύ.

Μειονεκτήματα:

- Υψηλό κόστος τοποθέτησης και συντήρησης υποσταθμών μετατροπής.
- Οι ανορθωτές και οι αντιστροφείς παράγουν αρμονικές, οι οποίες μπορούν να μειωθούν χρησιμοποιώντας ενεργά φίλτρα, τα οποία κοστίζουν ακριβά.
- Εάν ένα σφάλμα λάβει χώρα στον υποσταθμό εναλλασσόμενου ρεύματος, είναι πιθανό να προκαλέσει διακοπή ρεύματος στον κοντινότερο υποσταθμό συνεχούς ρεύματος.
- Οι αντιστροφείς έχουν περιορισμένη ικανότητα υπερφόρτωσης.
- Για την προστασία του συστήματος, τοποθετούνται διακόπτες κυκλώματος, αυξάνοντας το συνολικό κόστος.
- Δεν χρησιμοποιούνται μετασχηματιστές για την αλλαγή στα επίπεδα τάσης.
- Χρειάζεται η τοποθέτηση ενεργού συστήματος ψύξης στους σταθμούς μετατροπής, για τον περιορισμό των απωλειών θερμότητας.
- Οι σύνδεσμοι του συστήματος είναι περίπλοκοι στον σχεδιασμό τους.
- Οι διακόπτες κυκλώματως συνεχούς ρεύματος έχουν περιορισμένες δυνατότητες διακοπής ρεύματος του σφάλματος, επειδή βασίζονται στη διαδικασία σβέσης τόξου.
- Διάβρωση σε επιστροφή εδάφους σε γειτονικές μεταλλικές εγκαταστάσεις (ηλεκτροχημική διάβρωση και βηματική τάση)

1.3.4. Φαινόμενα σε συστήματα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας

Στεμματοειδής εκκενώσεις (Corona): Στην περίπτωση που αυξηθεί η τάση μεταξύ του σημείου στηρίξεως του μονωτήρα και του αγωγού της γραμμής, δεν θα γίνει διάσπαση του στερεού μονωτικού, αλλά διάσπαση του στρώματος του αέρα που περιβάλλει το στερεό διηλεκτρικό του μονωτήρα. Όταν η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου στην επιφάνεια των αγωγών μιας εναέριας γραμμής υπερβεί μια τιμή, τότε στο



Εικόνα 1.9: Στεματοειδής εκκένωση [7]

παρά τον αγωγό στρώμα του αέρα γίνεται έναρξη ηλεκτρικών εκκενώσεων (Εικόνα 1.9), οι οποίες συνεπάγουν απώλειες ενέργειας [7].

Επιδερμικό φαινόμενο (Skin effect): Όταν η ένταση του εναλλασσόμενου ρεύματος σε έναν αγωγό αλλάζει, μεταβάλλεται και το μαγνητικό πεδίο. Ενώ όλα τα ηλεκτρόνια θα πρέπει να αισθάνονται την ίδια δύναμη κάθε στιγμή, τα μεταβαλλόμενα πεδία δημιουργούν αντίθετες Εικόνα 1.10: Επιδερμικό φαινόμενο [8] δυνάμεις και αναπτύσσονται δινορεύματα που



ακυρώνουν τμήματα της κύριας ροής ρεύματος. Τα δινορεύματα ακυρώνουν το «θετικό» ρεύμα που ρέει προς την αναμενόμενη κατεύθυνση, δημιουργώντας μια περιοχή μηδενικού αθροίσματος (Εικόνα 1.10). Καθώς αυξάνεται η συχνότητα, αυτή η νεκρή ζώνη μεγαλώνει και ωθεί θετικό ρεύμα στα άκρα του αγωγού μειώνοντας τη περιοχή όπου μπορεί να ρέει ρεύμα [8].

Αρμονικές: Κατά τη διάρκεια της λειτουργίας των συστημάτων, πολλές φορές δημιουργούνται τάσεις και ρεύματα υψηλότερων συχνοτήτων, λόγω της ύπαρξης μη γραμμικών φορτίων και των διατάξεων των ημιαγωγικών στοιχείων (Εικόνες 1.11, 1.12). Οι συχνότητες που αποτελούν ακέραια πολλαπλάσια της θεμελιώδους συγνότητας ονομάζονται αρμονικές [9].



Εικόνα 1.11: Αρμονικές τάσεις εναλλασσόμενου ρεύματος [9]



Εικόνα 1.12: Αρμονικές τάσεις μετατροπέα συστήματος συνεχούς ρεύματος [9]

1.4. Ροή φορτίου, σφάλματα

Ροή φορτίου: Η μελέτη ροής φορτίου, είναι μια αριθμητική ανάλυση της ροής ηλεκτρικής ενέργειας σε ένα διασυνδεδεμένο σύστημα. Οι παράμετροι που προκύπτουν από την ανάλυση του συστήματος σε κανονική λειτουργία και σε περίπτωση σφάλματος, είναι οι τάσεις, γωνίες τάσης, πραγματική ισχύς και άεργος ισχύς. Είναι σημαντική η μελέτη ροής φορτίου, για τον προσδιορισμό της βέλτιστης λειτουργίας των υπαρχόντων συστημάτων και τον σχεδιασμό μελλοντικής τους επέκτασης [10].

Σφάλματα: Σε ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας, σφάλμα ονομάζεται οποιοδήποτε μη φυσιολογικό ηλεκτρικό ρεύμα. Στα συστήματα ισχύος, οι προστατευτικές συσκευές μπορούν να ανιχνεύσουν συνθήκες σφάλματος και να ενεργοποιήσουν διακόπτες κυκλώματος και άλλες συσκευές για να περιοριστούν οι βλάβες. Τα σφάλματα κατηγοριοποιούνται σε δύο είδη, τα ασύμμετρα και τα συμμετρικά [11].

Ένα ασύμμετρο σφάλμα δεν επηρεάζει εξίσου κάθε μία από τις φάσεις. Τύποι ασύμμετρων σφαλμάτων είναι:

Διφασικό σφάλμα (Line-to-line fault): βραχυκύκλωμα μεταξύ των γραμμών, που προκαλείται από ιονισμό αέρα ή όταν οι γραμμές έρχονται σε φυσική επαφή [11].

Μονοφασικό σφάλμα ως προς γη (Line-to-ground fault): βραχυκύκλωμα μίας γραμμής και γείωσης, που συχνά προκαλείται από φυσική επαφή, για παράδειγμα λόγω κεραυνών [11].

Διφασικό σφάλμα ως προς γη (Double line-to-ground fault): δύο γραμμές έρχονται σε επαφή με το έδαφος και η μία με την άλλη, λόγω καιρικών συνθηκών όπως καταιγίδες [11].

Ένα συμμετρικό σφάλμα επηρεάζει εξίσου κάθε μία από τις φάσεις. Δύο είδη συμμετρικών σφαλμάτων είναι 1)τριφασικό σφάλμα (line to line to line) (L-L-L) 2)τριφασικό σφάλμα ως προς γη (line to line to line to ground) (L-L-L-G) [11].

1.5. <u>Απώλειες</u>

Απώλειες: Κατά τη διάρκεια μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας μέσω αγωγών, ένα μέρος της ισχύος χάνεται. Για τον περιορισμό των απωλειών, αυξάνεται η τιμή της τάσης (V) κατά τη μεταφορά, με αποτέλεσμα να μειωθεί η τιμή του ρεύματος (I) για την ίδια τιμή ισχύος (P). Για μεγαλύτερη τιμή ρεύματος, αυξάνεται αντίστοιχα και η παραγόμενη θερμότητα, δηλαδή αυξάνονται οι απώλειες. Για τις απώλειες γραμμής μεταφοράς υπάρχουν τρεις κατηγορίες [5].

Απώλειες αντίστασης γραμμής: Απώλεια ισχύος αντίστασης είναι όταν χάνεται ηλεκτρική ισχύς λόγω της αντίστασης ενός αγωγού. Όταν οποιοσδήποτε τύπος ηλεκτρικής ενέργειας συναντά οποιαδήποτε αντίσταση, η ηλεκτρική ενέργεια μετατρέπεται σε θερμότητα και αυτό προκαλεί πτώση τάσης στους αγωγούς [5].

Χωρητικές απώλειες γραμμής: Οι χωρητικές απώλειες εμφανίζονται μόνο σε κυκλώματα εναλλασσόμενου ρεύματος και είναι ένας τύπος απώλειας άεργου ισχύος [5].

Επαγωγικές απώλειες γραμμής: Οι επαγωγικές απώλειες είναι απώλειες ισχύος που συμβαίνουν όταν ένα μαγνητικό πεδίο δημιουργείται και διασπάται επανειλημμένα σε ένα καλώδιο. Όταν το εναλλασσόμενο ρεύμα εναλλάσσεται, φορτίζει έναν παρασιτικό επαγωγέα (ένα ηλεκτρικό στοιχείο που αποθηκεύει ενέργεια σε ένα μαγνητικό πεδίο) που δημιουργείται από το καλώδιο, δημιουργώντας ένα μαγνητικό πεδίο που διασπάται και αλλάζει κατεύθυνση επανειλημμένα. Όταν η ισχύς αποθηκεύεται σε αυτά τα μαγνητικά πεδία, δεν τροφοδοτείται από φορτία, γεγονός που καθιστά έναν τύπο απώλειας γραμμής [5].

1.6. <u>Ανάλυση εξαρτημάτων HVDC</u>

Τα κύρια εξαρτήματα που απαρτίζουν ένα σύστημα μεταφοράς υψηλής τάσης συνεχούς ρεύματος είναι 1. Σταθμοί μετατροπής 2. Ηλεκτρόδια 3. Πηνία εξομάλυνσης 4. Γραμμές συνεχούς ρεύματος 5. Φίλτρα 6. Πηγή άεργου ισχύος 7. Διακόπτης κυκλώματος [12] [13] [15].

1. Σταθμοί μετατροπής

Σε κάθε σύστημα HVDC τοποθετούνται σταθμοί μετατροπής στις δύο άκρες του, που αποτελούνται από ανορθωτές και αντιστροφείς. Οι **ανορθωτές** μετατρέπουν το εναλλασσόμενο ρεύμα σε συνεχές ρεύμα (AC to DC), ενώ οι **αντιστροφείς** έχουν αντίθετη λειτουργία μετατρέποντας το συνεχές ρεύμα σε εναλλασσόμενο (DC to AC). Οι σταθμοί μετατροπής είναι σχεδιασμένοι να λειτουργούν και ως ανορθωτές και ως αντιστροφείς [12] [13] [15].

2. Ηλεκτρόδια

Τα ηλεκτρόδια είναι αγωγοί που συνδέουν το σύστημα με τη γη. Σε συστήματα HVDC μεγάλων αποστάσεων χρησιμοποιείται επιστροφή εδάφους ή θάλασσας για το ρεύμα επιστροφής συνεχούς ρεύματος. Το ηλεκτρόδιο γείωσης διαχωρίζεται από το σταθμό μετατροπέα έτσι ώστε το ρεύμα που επιστρέφει μέσω του ηλεκτροδίου γείωσης να μην προκαλεί διάβρωση τμημάτων του σταθμού που έρχονται σε επαφή με τη γη [12] [13] [15].

3. Πηνίο εξομάλυνσης

Το πηνίο εξομάλυνσης είναι ένα ψυχόμενο πηνίο γεμάτο λάδι με μεγάλη επαγωγή (το φαινόμενο της ανάπτυξης διαφοράς δυναμικού στα άκρα ενός αγωγού, η οποία λαμβάνει χώρα όταν μεταβάλλεται η μαγνητική ροή που διέρχεται από την επιφάνεια που ο συγκεκριμένος αγωγός ορίζει). Συνδέεται σε σειρά με τον μετατροπέα πριν από το φίλτρο DC και εξυπηρετούν τους ακόλουθους σκοπούς [12] [13] [15].

- Εξομαλύνουν τις διακυμάνσεις του συνεχούς ρεύματος.
- Μειώνουν τις αρμονικές τάσης και ρεύματος στις γραμμές συνεχούς ρεύματος.
- Περιορίζουν το ρεύμα σφάλματος στη γραμμή συνεχούς ρεύματος.
- Αποτρέπονται οι αστοχίες μεταγωγής στους μετατροπείς με την εξομάλυνση των πηνίων αυτών, μειώνοντας τον ρυθμό ανόδου της τάσης της γραμμής συνεχούς ρεύματος στη γέφυρα όταν μειώνεται η απευθείας επιβαλλόμενη τάση μίας άλλης συνδεδεμένης σε σειρά πηγής.
- Μειώνουν την απότομη αύξηση της τάσης και του ρεύματος από τη γραμμή συνεχούς ρεύματος, με αποτέλεσμα να μειώνονται οι τάσεις στα ηλεκτρονικά διακοπτικά στοιχεία του μετατροπέα και στις προστατευτικές διατάξεις έναντι υπέρτασης.
- 4. Γραμμές συνεχούς ρεύματος

Εναέριοι ή υπόγειοι αγωγοί που μεταφέρουν ηλεκτρική ισχύ [12] [13] [15].

5. Φίλτρα

Στους μετατροπείς HVDC παράγονται αρμονικές AC και DC. Για τον περιορισμό των αρμονικών χρησιμοποιούνται φίλτρα AC, DC και υψηλής συχνότητας [12] [13] [15].

- Το φίλτρο AC είναι κύκλωμα RLC συνδεδεμένο μεταξύ φάσης και γείωσης. Προσφέρει χαμηλές αντιστάσεις στις αρμονικές συχνότητες, με αποτέλεσμα τα αρμονικά ρεύματα AC να περνούν στη γη. Επιπλέον, παρέχει μία άεργο ισχύ που απαιτείται για τη λειτουργία των μετατροπέων [12] [13] [15].
- Το φίλτρο DC συνδέεται μεταξύ του πόλου και του ουδέτερου. Εκτρέπει τις αρμονικές DC στη γη και τις εμποδίζει να εισέλθουν σε γραμμές DC [12] [13] [15].
- Το φίλτρο υψηλής συχνότητας τοποθετείται μεταξύ του μετασχηματιστή μετατροπέα και του ζυγού AC του σταθμού. Ελαχιστοποιεί τον θόρυβο και τις παρεμβολές που δημιουργούνται σε χαμηλές συχνότητες [12] [13] [15].
- 6. Πηγή άεργου ισχύος

Για τις λειτουργίες των μετατροπέων απαιτείται άεργος ισχύς. Τα φίλτρα AC παρέχουν εν μέρει άεργη ισχύ. Η επιπλέον τροφοδοσία μπορεί να ληφθεί από συστήματα αντιστάθμισης ισχύος (var) (συσκευή που αντισταθμίζει την άεργο ισχύ του φορτίου που είναι συνδεδεμένο σε ένα σύστημα ισχύος) [12] [13] [15].

7. Διακόπτης κυκλώματος

Ο διακόπτης κυκλώματος είναι μία συσκευή μεταγωγής που διακόπτει τη ροή συνεχούς ρεύματος. Υπάρχουν τρία είδη διακοπτών κυκλώματος HVDC [12] [13] [15].

Οι μηχανικοί διακόπτες εφαρμόζονται κυρίως στη μέση τάση. Η αρχή λειτουργίας τους βασίζεται στη δημιουργία ενός μηδενικού ρεύματος χρησιμοποιώντας κύκλωμα συντονισμού. Οι μηχανικοί διακόπτες χωρίζονται σε δύο κατηγορίες [12] [13] [15].

Οι παθητικοί διακόπτες (Εικόνα 1.13), ένας κλάδος που αποτελείται από έναν επαγωγέα σε σειρά με πυκνωτή συνδέεται παράλληλα με έναν διακόπτη ισχύος SF₆ (εξαφθοριούχου θείου). Ένα τέτοιο κύκλωμα μπορεί να χάσει τη σταθερότητά του υπό ορισμένες συνθήκες, με αποτέλεσμα να αναπτυχθούν μεγάλες ταλαντώσεις μέχρι να δημιουργηθούν



Εικόνα 1.13: Παθητικός διακόπτης [21]

μηδενικά ρεύματα και το ηλεκτρικό τόξο σβήσει. Όταν το ηλεκτρικό τόξο σβήσει τελείως, ο πυκνωτής αρχίζει να φορτίζει έως ότου η μη γραμμική αντίσταση MOV (Metal Oxide Varistor) ελέγξει το ρεύμα και περιορίσει την τάση σε ένα συγκεκριμένο επίπεδο [12] [13] [15].

Οι ενεργοί διακόπτες (Εικόνα 1.14) χρησιμοποιούνται για τη δημιουργία ρεύματος μηδενικής διέλευσης όταν το επίπεδο του ρεύματος σφάλματος είναι πάνω από το όριο αστάθειας. Η δομή ενός ενεργού διακόπτη είναι η τοποθέτηση ενός προφορτισμένου πυκνωτή



Εικόνα 1.14: Ενεργός διακόπτης [21]

στο βοηθητικό κύκλωμα όταν το μήκος του ηλεκτρικού τόξου και η πίεση εκτόνωσης στο διακόπτη κυκλώματος SF₆ είναι επαρκής [12] [13] [15].

Οι διακόπτες στερεάς κατάστασης (Εικόνα 1.15) αποτελούνται από δύο ή περισσότερα ηλεκτρονικά διακοπτικά στοιχεία στερεάς κατάστασης υψηλής τάσης που διακόπτουν το ρεύμα σφάλματος πολύ πιο γρήγορα από τους μηχανικούς διακόπτες, διότι δεν απαιτείται η διέλευση μηδενικού ρεύματος. Ο κύριος διακόπτης υποστηρίζεται από έναν παράλληλο απαγωγέα υπέρτασης, για την αποφυγή ζημιάς

απαγωγέα υπέρτασης, για την αποφυγή ζημιάς από υπέρταση των ηλεκτρονικών διακοπτικών στοιχείων, στο χρόνο διακοπής ρεύματος σφάλματος. Στη διάρκεια κανονικής λειτουργίας το ρεύμα ρέει μέσω των ηλεκτρονικών διακοπτικών στοιχείων, ενώ στην περίπτωση σφάλματος τα ηλεκτρονικά διακοπτικά στοιχεία απενεργοποιούνται και εμποδίζεται η ροή του ρεύματος. Ένα παράλληλο MOV είναι συνδεδεμένο για να περιοριστεί η τάση στα ηλεκτρονικά διακοπτικά στοιχεία του διακόπτη. Τέλος, η αξιοπιστία τους είναι πολύ μικρότερη συγκριτικά με αυτή των μηχανικών διακοπτών [12] [13] [15].

Οι υβριδικοί διακόπτες (hybrid switches) (Εικόνα 1.16) συνδυάζουν τους μηχανικούς διακόπτες και τους διακόπτες στερεάς κατάστασης, με αποτέλεσμα να αξιοποιούν τα πλεονεκτήματά τους, δηλαδή ταχύτερο χρόνο λειτουργίας, υψηλότερη ικανότητα διακοπής ρεύματος και λιγότερες απώλειες ισχύος. Στην κανονική λειτουργία τους χρησιμοποιείται μία διαδρομή χαμηλής σύνθετης αντίστασης για το ρεύμα και στην περίπτωση

σφάλματος το ρεύμα ανακατευθύνεται σε ένα ηλεκτρονικό διακοπτικό στοιχείο υψηλής τάσης στερεάς κατάστασης [12] [13] [15].

1.7. Τύποι συνδέσεων συστημάτων ΗVDC

Ένα σύστημα μετατροπής HVDC μπορεί να διαταχθεί με δίαφορους τρόπους, με σκοπό την αποτελεσματική του λειτουργία. Οι γέφυρες του μετροπέα διατάσσονται είτε μονοπολικά, είτε διπολικά, είτε ομοπολικά [14] [15].

Στη μονοπολική σύνδεση (Εικόνα 1.17), ένας από τους ακροδέκτες του ανορθωτή είναι γειωμένος και ο άλλος είναι συνδεδεμένος σε γραμμή μεταφοράς. Για την επιστροφή γείωσης μπορεί να εγκατασταθεί ένας μεταλλικός αγωγός επιστροφής μεταξύ των δύο άκρων της γραμμής μεταφοράς [14] [15].



Εικόνα 1.17: Μονοπολική σύνδεση [14]



Εικόνα 1.15: Διακόπτης στερεάς κατάστασης [21]



Εικόνα 1.16: Υβριδικός διακόπτης [21]

Στη διπολική σύνδεση (Εικόνα 1.18) χρησιμοποιούνται δύο αγωγοι. Ενώ το κόστος γραμμής μεταφοράς είναι υψηλότερο από μία μονοπολική σύνδεση με αγωγό επιστροφής, τα πλεονεκτήματα της διπολικής σύνδεσης, όπως είναι αμελητέο ρεύμα γείωσης και η λειτουργία κατά τη διάρκεια σφάλματος, την καθιστούν βέλτιστη επιλογή για συστήματα HVDC [14] [15].



Εικόνα 1.18: Διπολική σύνδεση [14]

Στην **ομοπολική** σύνδεση (Εικόνα 1.19) μπορούν να λειτουργήσουν δύο αγωγοί με την ίδια πολικότητα με γείωση ή μεταλλική επιστροφή. Έχει το πλεονέκτημα του μειωμένου κόστους μόνωσης, αλλά τα μειονεκτήματα της επιστροφής γης υπερτερούν [14] [15].



Εικόνα 1.19: Ομοπολική σύνδεση [14]

1.8. Διαμόρφωση ΗVDC

Η διαμόρφωση ενός συστήματος HVDC εξαρτάται από τη λειτουργία και την τοποθεσία του σταθμού μετατροπέα. Υπάρχουν τρία είδη συστημάτων.

«**Back-to-back**»: Οι δύο σταθμοί μετατροπέων βρίσκονται στην ίδια περιοχή και συνήθως στο ίδιο κτίριο (Εικόνα 1.20). Δεν απαιτείται γραμμή μεταφοράς ή καλώδιο μεταξύ των σταθμών και μπορούν να συνδεθούν είτε μονοπολικά, είτε διπολικά [5].



Εικόνα 1.20: Back to back HVDC σύστημα [22]

Σημείο προς σημείο (Point to point): Χρησιμοποιείται όταν είναι εφικτό να μεταφερθεί ηλεκτρική ενέργεια μέσω γραμμής μεταφοράς συνεχούς ρεύματος από μία γεωγραφική θέση σε μία άλλη (Εικόνα 1.21). Είναι το πιο σύνηθες σύστημα στην μεταφορά συνεχούς ρεύματος υψηλής τάσης, διότι μπορεί να συνδέσει δύο ασύγχρονα συστήματα [5].



Εικόνα 1.21: Point to point HVDC σύστημα [22]

Πολυτερματικό σύστημα (Multiterminal system): Διασυνδέει περισσότερους από δύο σταθμούς μετατροπέων, μπορεί να διαμορφωθεί σε σειρά, παράλληλα ή υβριδικά (Εικόνα 1.22) [5].



Εικόνα 1.22: Multi terminal HVDC σύστημα [22]

Θεωρητικό υπόβαθρο

2.1. Περιπτώσεις που χρησιμοποιούνται τα υποθαλάσσια συστήματα

Η μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας διαμέσου της θάλασσας αποτελεί σημαντικό κομμάτι της παγκόσμιας ενεργειακής διασύνδεσης (global energy interconnection, GEI). Διότι ο παγκόσμιος πληθυσμός αυξάνεται και η τεχνολογία αναπτύσσεται, αυξάνονται και οι απαιτήσεις κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας. Επιπλέον, οι στόχοι της Ευρωπαϊκής Ένωσης για την παραγωγή καθαρής ενέργειας, με σκοπό την προστασία του πλανήτη, καθιστούν απαραίτητη την παραγωγή ενέργειας από υπεράκτιες αιολικά και ηλιακά πάρκα. Τα υποθαλάσσια καλώδια είναι ο μόνος τρόπος να μεταφερθεί η παραγόμενη ενέργεια που βρίσκεται σε μεγάλη απόσταση από τη στεριά, πίσω στη στεριά. Επίσης, χρησιμοποιούνται για τη διασύνδεση νησιών και χωρών, για την τροφοδοσία ενέργειας σε τοποθεσίες οι οποίες είτε δεν παράγουν ηλεκτρική ενέργεια, είτε παράγουν λιγότερη ενέργεια από την απαιτούμενη [16] [17].

2.2. Υποθαλάσσια συστήματα μεταφοράς για υπεράκτια αιολικά πάρκα

Η υπεράκτια αιολική ενέργεια παρουσιάζει πολλά πλεονεκτήματα σε σύγκριση με την αιολική ενέργεια στην ξηρά. Οι μέσες ταχύτητες του ανέμου στην ανοικτή θάλασσα είναι υψηλότερες και η μεταβλητότητα της αιολικής ενέργειας είναι χαμηλότερη από την αιολική ενέργεια στην ξηρά, η οπτική και ακουστική τους επίδραση είναι συνήθως χαμηλότερη από την ξηρά, καθώς τοποθετούνται σε απομακρισμένες περιοχές στον ωκεανό και μπορούν να εγκατασταθούν μεγαλύτερες ανεμογεννήτριες [18].

Η ταχύτητα του υπεράκτιου ανέμου συνήθως αυξάνεται με την απόσταση από την ακτή, αυξάνοντας έτσι την παραγόμενη ισχύ. Ωστόσο, το υψηλότερο κόστος εγκατάστασης και το κόστος συντήρησης υπεράκτιων σταθμών αιολικής ενέργειας μακριά από την ακτή εξισορροπούν τα οφέλη υψηλότερης παραγωγής ενέργειας. Ανάλογα με την απόσταση που βρίσκονται οι σταθμοί από τη στεριά, τοποθετείται και το αντίστοιχο σύστημα μεταφοράς είτε HVAC, είτε HVDC (Εικόνα 2.1) [18].



Εικόνα 2.1: Κόστος συστημάτων AC και DC ανάλογα με την απόσταση μεταφοράς [18]

2.2.1. Εναλλασσόμενο ρεύμα υψηλής τάσης σε υποθαλάσσια συστήματα

Τα συστήματα μεταφοράς εναλλασσόμενου ρεύματος υψηλής τάσης για υπεράκτιους (Εικόνα χρησιμοποιήθηκαν αιολικούς σταθμούς 2.2), περισσότερες στις εγκαταστάσεις μέχρι το 2010. Οι κύριοι λόγοι που επικράτησαν ήταν ο εύκολος σχεδιασμός του συστήματος, η χρήση μετασχηματιστών για την αλλαγή επιπέδων τάσης και η εύκολη συντήρησή τους. Όμως, παρουσιάστηκαν προβλήματα κατά τη λειτουργία του συστήματος, η υψηλή χωρητικότητα των υποβρυχίων καλωδίων σε συνδυασμό με τη χαμηλή ειδική αντίσταση του νερού προκάλεσε διάφορα ηλεκτρομαγνητικά δυναμικά και παροδικά προβλήματα, όπως η παραμόρφωση του συστήματος της τάσης λόγω προβλήματος συντονισμού. Η υψηλή χωρητικότητα προκαλεί μεγάλα ρεύματα φόρτισης, με αποτέλεσμα τη μείωση ικανότητας μεταφοράς ενεργού ισχύος και την ανάγκη μεταφοράς άεργου ισχύος σε μεγάλες αποστάσεις [18].

Ένα ΗVAC σύστημα αποτελείται από τα εξής μέρη:

1) Υπεράκτιος υποσταθμός μετατροπής επιπέδου τάσης, από 30-36kV στα 132-400kV.

2) Υποβρύχια καλώδια μεταφοράς εναλλασσόμενου ρεύματος τριών πυρήνων.

3) Μονάδες αντιστάθμισης και στις δύο πλευρές του συστήματος, όπως στατικούς VAR αντισταθμιστές (SVC) ή στατικούς σύγχρονους αντισταθμιστές (STATCOM).

4) Χερσαίος υποσταθμός μετατροπής επιπέδου τάσης.



Εικόνα 2.2: Σύστημα μεταφοράς ΗVAC για υπεράκτιο αιολικό πάρκο [18]

2.2.2. Συνεχές ρεύμα υψηλής τάσης σε υποθαλάσσια συστήματα

Τα συστήματα μεταφοράς συνεχούς ρεύματος υψηλής τάσης για υπεράκτιους αιολικούς σταθμούς (Εικόνα 2.3), αποτελούν τη βέλτιστη οικονομικά επιλογή για αποστάσεις μεγαλύτερες των 50-70 km [18].

Ένα HVDC σύστημα αποτελείται από τα εξής μέρη:

- 1) Υπεράκτιος υποσταθμός μετατροπής επιπέδου τάσης.
- 2) Ανορθωτής ΑC/DC.
- 3) Φίλτρα AC και DC για περιορισμό αρμονικών χαμηλής τάσης.

4) Φίλτρο DC ρεύματος. Αυτό εξαλείφει την πιθανότητα διακοπής ρεύματος υπό συνθήκες ελάχιστου φορτίου, περιορίζοντας τα ρεύματα σφάλματος DC και επίσης μειώνει τις αρμονικές ρεύματος στο καλώδιο DC.

- 5) Υποβρύχια καλώδια DC.
- 6) Αντιστροφέας DC/AC.
- 7) Χερσαίος υποσταθμός μετατροπής επιπέδου τάσης.



Εικόνα 2.3: Σύστημα μεταφοράς HVDC για υπεράκτιο αιολικό πάρκο [18]

Αυτή τη στιγμή χρησιμοποούνται δύο διαφορετικές τεχνολογίες μετατροπέων HVDC (Εικόνα 2.4). Μετατροπείς με μεταγωγή γραμμής (Line-commutated converters, LCCs) με βάση θυρίστορ και μετατροπείς πηγής τάσης (voltage-source converters, VSCs) με βάση διπολικό τρανζίστορ επαφής μονωμένης πύλης (insulated gate bipolar transistors, IGBTs) [18].

Technology	LCCs	VSCs
Semiconductor	Thyristor	IGBT
Control	Turn on	Turn on/off
Power control	Active	Active & Reactive
AC filters	Yes	No
Blackstart capability	No	Yes

Μετατροπείς με μεταγωγή γραμμής (Line Commutated Converters, LCC)

Χρησιμοποιεί θυρίστορ που επιτρέπουν τον έλεγχο μόνο ενεργού ισχύος. Επιπλεόν, έχει φίλτρα AC, αλλά δεν έχει τη δυνατότητα επαναφοράς σε λειτουργία ενός σταθμού ηλεκτρικής ενέργειας ή ενός τμήματος ενός ηλεκτρικού δικτύου μεταφοράς για την ανάκαμψη από ολική ή μερική διακοπή λειτουργίας. Επιτρέπει μεγαλύτερη χωρητικότητα και όταν η ροή ισχύος αντιστρέφεται, τότε αντιστρέφεται η πολικότητα στο καλώδιο HVDC [15].

Μετατροπείς πηγής τάσης (Voltage Source Converters, VSC)

Επιτρέπει τον έλεγχο ενεργού και άεργου ισχύος και μπορεί να ενεργοποιείται με τη χρήση τρανζίστορ IGBT, το οποίο με τη σειρά του επιτρέπει οι διαδικασίες μετατροπής στον μετατροπέα ισχύος να λειτουργούν ανεξάρτητα από την τάση του δικτύου. Έχει τη δυνατότητα επαναφοράς σε λειτουργία ενός σταθμού ηλεκτρικής ενέργειας ή ενός τμήματος ενός ηλεκτρικού δικτύου μεταφοράς για την ανάκαμψη από ολική ή μερική

διακοπή λειτουργίας, αλλά όχι φίλτρα AC. Η χωρητικότητα είναι χαμηλή και πιο ευέλικτη και δεν χρειάζεται να αντιστραφεί η πολικότητα όταν αντιστρέφεται η ροή ισχύος [15].

2.2.3. Σύγκριση μεταξύ AC, DC-LCC, DC-VSC [15]

AC

<u>Πλεονεκτήματα:</u>

- Δεν χρειάζεται μετατροπή
- Εύκολη συντήρηση
- Μεγάλη διαθεσιμότητα

<u>Μειονεκτήματα:</u>

- Μεγάλο βάρος καλωδίων
- Περιορίζεται στα 50-150 χλμ
- Απαιτητικός έλεγχος ενεργού και άεργου ισχύος
- Απαιτείται αποζημίωση για άεργο ισχύ

DC-LCC

<u>Πλεονεκτήματα:</u>

- Μικρότερος αριθμός καλωδίων
- Χαμηλό βάρος καλωδίων
- Ελάχιστες απώλειες
- Καλός έλεγχος ισχύος
- Πολύ υψηλή επίπεδα ισχύος μεταφοράς
- Μεγάλο μήκος των καλωδίων

<u>Μειονεκτήματα:</u>

- Απαιτεί ισχυρά δίκτυα ΑC
- Δεν μπορεί να τροφοδοτήσει διαφορετικά φορτία κατανάλωσης από ίδια πηγή
- Για αντιστροφή ροής πρέπει να αντιστραφεί η πολικότητα
- Καταλαμβάνει μεγάλο χώρο
- Απαιτεί ειδικό εξοπλισμό, όπως φίλτρα

DC-VSC

<u>Πλεονεκτήματα:</u>

- Μπορεί να τροφοδοτήσει μεμονωμένα φορτία μέσης ισχύος (πλατφόρμες άντλησης πετρελαίου, αιολικά πάρκα, μικρά νησιά)
- Σύντομος χρόνος παράδοσης

- Καταλαμβάνει μικρό χώρο
- Έχει μικρή περιβαλλοντική επίπτωση
- Για την αντιστροφή ροής δεν υπάρχει αντιστροφή πολικότητας
- Συγκεκριμένος εξοπλισμός

<u>Μειονεκτήματα:</u>

- Υψηλές απώλειες μετατροπής
- Περιορισμένη ισχύς
- Νέα τεχνολογία με περιορισμένο χρόνο εφαρμογής

2.3. Ανάλυση υποθαλάσσιων καλωδίων

Το υποθαλάσσιο περιβάλλον επιβάλλει κάποιες απαιτήσεις στα καλώδια μεταφοράς, όπως για παράδειγμα να έχουν μεγάλο μήκος χωρίς ενδιάμεσες συνδέσεις, υψηλό επίπεδο αξιοπιστίας, αντοχή σε τριβή και διάβρωση, αντοχή στις καταπονήσεις κατά την τοποθέτηση, ελαχιστοποίηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων και ελαχιστοποίηση της διείσδυσης του νερού σε περίπτωση βλάβης [15].

2.3.1 <u>Είδη καλωδίων</u>

Τα υποθαλάσσια καλώδια διακρίνονται σε τρία είδη, τα καλώδια **τριών πυρήνων**, τα καλώδια **δύο πυρήνων** και τα **ομοαξονικά** καλώδια [23].

Καλώδια τριών πυρήνων

Τα υποθαλάσσια καλώδια **τριών πυρήνων** (Εικόνα 2.5) χρησιμοποιούνται κυρίως σε συστήματα μεταφοράς μέσης τάσης και συνήθως επικαλύπτονται με μόνωση XLPE (cross-linked polyethylene). Οι πυρήνες των καλωδίων είναι παρόμοιοι με εκείνους που χρησιμοποιούνται στα καλώδια ξηράς και υπάρχουν πολλές διαφορετικές σχεδιαστικές εναλλακτικές που χρησιμοποιούνται στα συστήματα αυτής της κατηγορίας. Η επικάλυψη με κατασκευαστικά στρώματα μπορεί να γίνει είτε σε κάθε πυρήνα μεμονωμένα, είτε στους τρεις πυρήνες ταυτόχρονα. Τα καλώδια τριών πυρήνων τοποθετούνται σε συστήματα HVAC, ώστε να μειωθεί ο αριθμός των καλωδίων από τρία σε ένα [23].



Εικόνα 2.5: Καλώδιο ΗVAC τριών πυρήνων [24]

<u>Καλώδια δύο πυρήνων</u>

Τα υποθαλάσσια καλώδια **δύο πυρήνων** (Εικόνα 2.6) χρησιμοποιούνται σε συτήματα μεταφοράς HVDC. Τα επίπεδα καλώδια δύο πυρήνων μπορούν να λυγιστούν εύκολα αλλά προς μία κατεύθυνση, κάτι το οποίο καθιστά τις διαδικασίες της κατασκευής, της μεταφοράς και της εγκατάστασης δύσκολες, απαιτώντας σημαντικές επενδύσεις στον εξοπλισμό [23].



Εικόνα 2.6: Καλώδιο HVDC δύο πυρήνων [23]

Ομοαξονικό καλώδιο

Τα υποθαλάσσια **ομοαξονικά** (Εικόνα 2.7) καλώδια έχουν χρησιμοποιούνται για την επίτευξη ομόκεντρων καλωδίων, ακόμη και σε πολυφασικά συστήματα δύο ή τριών φάσεων [23].



Εικόνα 2.7: Ομοαξονικό καλώδιο HVDC [23]

2.3.2. <u>Τύποι αγωγών</u>

Οι αγωγοί των υποθαλάσσιων καλωδίων μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας είναι κατασκευασμένοι από χαλκό ή αλουμίνιο. Ο χαλκός είναι πιο ακριβός από το αλουμίνιο, όμως έχει μεγαλύτερη ικανότητα μεταφοράς ρεύματος, οπότε επιτρέπει μικρότερη διατομή του καλωδίου συγκριτικά με ένα καλώδιο αλουμινίου. Επίσης, λόγω της μικρότερης διατομής απαιτεί λιγότερο υλικό για τα εξωτερικά στρώματα, όπως σύρματα μολύβδου και χάλυβα. Επιπλέον, το αλουμίνιο έχει περιορισμένη αντοχή στη διάβρωση από το θαλασσινό νερό, ωστόσο, όταν το νερό μπορεί να προκαλέσει διάβρωση στον αγωγό, έχει ήδη διεισδύσει στο καλώδιο και είναι απαραίτητη η αντικατάστασή του. Σε ένα υποθαλάσσιο σύστημα είναι δυνατό να χρησιμοποιηθούν συνδυασμοί καλωδίων χαλκού και αλουμινίου, όπως για παράδειγμα χάλκινοι αγωγοί στο υποβρύχιο τμήμα και αγωγοί αλουμινίου στο χερσαίο τμήμα, διότι οι αγωγοί χαλκού και αλουμινίου μπορούν να ενωθούν μεταξύ τους. Εκτός από το υλικό που κατασκευάζεται ένας αγωγός, υπάρχουν και διαφορετικά σχήματα αγωγών [23] [25].

Ο συμπαγής αγωγός (Εικόνα 2.8) αποτελείται από ένα ενιαίο μεγάλο σύρμα. Η κατασκεύη του είναι εύκολη και ο αγωγός έχει φυσικά καλή διαμήκη στεγανότητα που είναι σημαντική για τα υποθαλάσσια καλώδια. Η διατομή των συμπαγών αγωγών περιορίζεται στα 400mm², οπότε δεν χρησιμοποιούνται σε καλώδια που μεταφέρουν ρεύματα τάσης μεγαλύτερης των 150kV, τα οποία έχουν μεγαλύτερες διατομές. Συμπαγείς αγωγοί εντοπίζονται σε καλώδια χαμηλής τάσης με τρεις ή τέσσερις πυρήνες σε ένα καλώδιο [23] [25].

Ο αγωγός από μεμονωμένα στρογγυλά σύρματα (Εικόνα 2.8) χρησιμοποιείται στις περισσότερες περιπτώσεις των υποβρύχιων καλωδίων. Τα σύρματα τοποθετούνται σε στρώσεις, όπου συμπιέζονται με τη δράση καλουπιών ή κυλίνδρων, με αποτέλεσμα να μειωθούν τα διάκενα μεταξύ των συρμάτων. Η συμπίεση των συρμάτων μειώνει την ηλεκτρική αγωγιμότητα του υλικού, λόγω της ψυχρής διαδικασίας που υποβάλλεται, αλλά οι αγωγοί με συμπιεσμένα στρογγυλά σύρματα αξιοποιούνται σε εφαρμογές και AC και DC [23] [25].

Ο αγωγός διατομής κυκλικού τομέα (Εικόνα 2.8) αποτελείται από διατομές σύρματος σε σχήμα κυκλικού τομέα. Τα σύρματα εφαρμόζουν τέλεια μεταξύ τους δημιουργώντας έναν κυκλικό αγωγό με πολύ λεία επιφάνεια. Η διαμόρφωση του αγωγού γίνεται χωρίς ψυχρή επεξεργασία και δεν μειώνεται η αγωγιμότητα του υλικού. Τέτοιου είδους αγωγοί εφαρμόζονται σε περιπτώσεις μεγάλων HVDC υποθαλάσσιων καλωδίων [23] [25].

Αγωγός για καλώδια με λάδι ή υγρά (Εικόνα 2.8). Τα καλώδια γεμίζονται με λάδι χαμηλού ιξώδους και περιέχουν έναν κεντρικό δίαυλο στον συρμάτινο αγωγό, για να επιτραπεί η ροή λαδιού με τη βοήθεια της θερμικής διαστολής και της παροχής πίεσης από το τερματικό σημείο των καλωδίων. Μία αυλακωτή επιφάνεια ανάμεσα στα καλώδια βοηθά στην επαρκή ροή λαδιού μεταξύ της μόνωσης και του κεντρικού αγωγού [23] [25]. Ο αγωγός Milliken (Εικόνα 2.8) περιέχει μεμονωμένους υποαγωγούς από στρογγυλά σύρματα, τα οποία είναι τυλιγμένα σε σχήμα τραπεζίου και ταυτόχρονα στριμμένα. Ένας αριθμός από αυτούς τους υποαγωγούς τοποθετούνται σε έναν στρογγυλό αγωγό και όσο περισσότεροι είναι οι υποαγωγοί τόσο μειώνεται το επιδερμικό φαινόμενο (skin effect) στο καλώδιο. Ένας αγωγός Milliken μπορεί να έχει ή όχι έναν κεντρικό αγωγό ή κεντρικό σύρμα. Κάθε μεμονωμένο σύρμα αλλάζει την ακτινική του θέση από κοντά στο κέντρο σε μακριά από το κέντρο καθώς προχωρά κατά μήκος του αγωγού. Για να μειωθεί ακόμα περισσότερο το επιδερμικό φαινόμενο στο ποθετείται μονωτικό χαρτί στα μεμονωμένα σύρματα. Οι αγωγοί Milliken χρησιμοποιούνται σε καλώδια διατομής μεγαλύτερης από 1200mm² [23] [25].



Εικόνα 2.8: Σχέδια διαφορετικών τύπων αγωγών [23]

2.3.3. Συστήματα μόνωσης

Μεταξύ των επιφανειών των συρμάτων στον αγωγό, τοποθετείται μονωτικό υλικό για προστασία από τις ακραίες διαφορές δυναμικού. Η μόνωση πρέπει να αντέχει στις υψηλές θερμορασίες και τη γήρανση, ώστε να διαρκέσει όλη την προγραμματισμένη διάρκεια ζωής του. Οι πιο συνηθισμένοι τύποι μόνωσης είναι το διασταυρωμένο πολυαιθυλένιο (Cross-Linked Polyethylene (XLPE)) και η διαποτισμένη μόνωση χαρτιού (Mass-Impregnated Paper (MI)). Για συστήματα HVDC, το καλώδιο με μόνωση XLPE μπορεί να λειτουργήσει σε μέγιστη τάση 320kV, οπότε είναι πιο κατάλληλο για έργα που απαιτούν λιγότερη ενέργεια. Ενώ το καλώδιο με μόνωση MI είναι ικανό να εφαρμοστεί έως 600kV [24].

Το καλώδιο **XLPE** (Εικόνα 2.9) αποτελείται από την επικάλυψη του αγωγού από ημιαγώγιμο υλικό πάχους 1-2 mm για να δημιουργηθεί μία λεία επιφάνεια. Το ημιαγώγιμο στρώμα δημιουργείται από την ανάμειξη συμπολυμερών με βάση το πολυαιθυλένιο (PE) και αιθάλης. Η επικάλυψη με ημιαγώγιμο υλικό καλύπτεται από τη μόνωση. Πάνω από τη μόνωση βρίσκεται η μονωτική επιφάνεια, η οποία είναι ένα νέο στρώμα ημιαγώγιμης ένωσης, όπου ο τύπος του υλικού εξαρτάται από το επίπεδο τάσης του συστήματος και αν ειναι για AC ή DC [24].



Το καλώδιο **MI** (Εικόνα 2.10) έχει παρόμοια διαμόρφωση με το καλώδιο XLPE. Για να εξαλειφθούν ανομοιομορφίες, τυλίγονται γύρω από τον αγωγό λεπτά στρώματα ημιαγώγιμου χαρτιού μαύρου άνθρακα. Για μόνωση, χαρτί υψηλής πυκνότητας εμποτίζεται με λάδι και στη συνέχει στεγνώνει. Χάρτινες λωρίδες 20 mm είναι τυλιγμένες ελικοειδώς γύρω από τον αγωγό με ένα κενό άκρου 2 mm μεταξύ των λωρίδων για κάθε στροφή, ώστε να επιτρέπεται κάποια κίνηση των λωρίδων κατά την κάμψη. Έπειτα, τοποθετείται η επόμενη λωρίδα χαρτιού πάνω από το τελευταίο κενό άκρου, καλύπτοντάς το. Για την προστασία της μόνωσης, ένα νέο στρώμα ημιαγώγιμου χαρτιού τοποθετείται έξω από τη μόνωση χαρτιού [24].



Εικόνα 2.10: Μόνωση ΜΙ [26]

2.3.4. Προστασία νερού

Η διηλεκτρική μόνωση πρέπει να προστατεύεται από την εισροή νερού και υγρασίας για να διατηρείται η διηλεκτρική αντοχή. Διάφορα μέταλλα όπως αλουμίνιο, μόλυβδος και χαλκός χρησιμοποιούνται για τη δημιουργία μεταλλικής θωράκισης για προστασία από την εισροή νερού. Η μεταλλική θωράκιση λειτουργεί ως αγωγός για τα χωρητικά ρεύματα και πρέπει να είναι ρυθμισμένο, ώστε να αντέχει το ρεύμα βραχυκυκλώματος [23] [24].

2.3.5. <u>Θωράκιση</u>

Ένα στρώμα από χαλύβδινο σύρμα εφαρμόζεται ελικοειδώς για τη μηχανική αντοχή και την προστασία του καλωδίου. Είναι σημαντικό κάθε καλώδιο να έχει σχεδιαστεί, ώστε να αντέχει τις στατικές και τις δυναμικές δυνάμεις ρεύματος στις οποίες εκτίθεται. Επίσης, πρέπει να είναι ανθεκτικό στην πίεση και στα φορτία που προκαλούνται από τα εργαλεία κατά την εγκατάσταση και σε φορτία από αλιευτικά εργαλεία και άγκυρες που βρίσκονται στον βυθό. Ανάμεσα στα στρώματα του σύρματος υπάρχει ένα λεπτό στρώμα συνθετικής ταινίας για τη μείωση της τριβής. Για αντιδιαβρωτική προστασία, τα χαλύβδινα σύρματα είναι επικαλυμμένα με ψευδάργυρο. Τέλος, μία δεύτερη προστασία είναι ένα στρώμα πίσσας και δύο στρώσεις μαύρου πολυπροπυλένιου νήματος που δεν σαπίζει, για να μην ξεπλυθεί η πίσσα [23] [24].

2.4. Εγκατάσταση καλωδίων

Κάθε εγκατάσταση υποθαλάσσιων καλωδίων είναι ξεχωριστή, καθώς υπάρχουν πολλές μεταβλητές που αλλάζουν ανάλογα τα χαρακτηριστικά της εγκατάστασης. Αρχικά, επιλέγεται μία διαδρομή για να τοποθετηθούν τα καλώδια είτε αυτά είναι ένα συνεχές καλώδιο μεγάλου μήκους, είτε είναι με πολλαπλές συνδέσεις, κάτι το οποίο επηρεάζει την τελική απόφαση. Επιπλέον, οι συνθήκες του περιβάλλοντος και η γεωγραφική τοποθεσία είναι παράγοντες που ερευνώνται για την κατάλληλη επιλογή χαρακτηριστικών των καλωδίων και τοποθέτησης των τερματικών σταθμών του συστήματος [27].

2.4.1. Σκάφος τοποθέτησης καλωδίων

Το σκάφος τοποθέτησης καλωδίων μπορεί να είναι ένα πλοίο ειδικά κατασκευασμένο για την τοποθέτηση και την επισκευή υποθαλάσσιων καλωδίων (Εικόνα 2.11) ή μια φορτηγίδα (Εικόνα 2.12) που έχει μετατραπεί προσωρινά. Οι φορτηγίδες δεν έχουν δική τους πρόωση, οπότε βασίζονται σε ρυμουλκά για το ταξίδι μεταφοράς. Παράγοντες που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά την επιλογή ενός σκάφους είναι η ικανότητα μεταφοράς φορτίου, οι δυνατότητες ελιγμών, ο χώρος στο κατάστρωμα για τον εξοπλισμό και το μέγεθος του χώρου πληρώματος [23] [24].



Εικόνα 2.11: Πλοίο τοποθέτησης καλωδίων [23]



Εικόνα 2.12: Φορτηγίδα τοποθέτησης καλωδίων [23]

Η διατήρηση της σωστής θέσης του σκάφους στη θάλασσα είναι ζωτικής σημασίας στη διαδικασία τοποθέτησης καλωδίων. Υπάρχουν μεγάλα κύματα και ισχυρά ρεύματα στους ωκεανούς που ωθούν το σκάφος να μετατοπιστεί από τη θέση του. Επίσης, κατά την απελευθέρωση του καλωδίου στον βυθό δημιουργείται μία δύναμη τάσης από το βάρος του καλωδίου, η οποία θα τραβήξει το σκάφος προς τα πίσω. Αν δεν βρίσκεται το σκάφος στη σωστή θέση, το καλώδιο μπορεί να καταλήξει σε διαφορετική υποθαλάσσια θέση από την αναμενόμενη, προκαλώντας του ζημιά. Οι φορτηγίδες υποβοηθούνται από **ισχυρά ρυμουλκά ή ρυμολκά με χρήση άγκυρας**, για να τραβήξουν το σκάφος αντίθετα από την κατεύθυνση που το ωθεί η τάση του βυθιζόμενου καλωδίου. Τα περισσότερα καινούρια πλοία χρησιμοποιούν **σύστημα δυναμικής θέσης** με πολλαπλούς προωθητές, τα οποία ελέγχουν τη θέση του πλοίου με τη χρήση GPS για την ακριβέστερη διατήρησή της [25].

Τα καλώδια αποθηκεύονται σε μεγάλα καρούλια και μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως μέσο αποθήκευσης στην ακτή και στο σκάφος. Σε κάθε διαδικασία τοποθέτησης πρέπει να μεταφέρεται όσο το δυνατόν περισσότερο καλώδιο για τη μείωση των δαπανών του έργου. Υπάρχουν τρείς τρόποι αποθήκευσης των καλωδίων, το **καρουζέλ** (turntables), τα **σταθερά καρούλια καλωδίων** και τα **τύμπανα καλωδίων** [24] [27].

Το καρουζέλ (Εικόνα 2.13) έχει κατακόρυφο άξονα και μπορεί να αποθηκεύσει ομοιόμορφα τα μεγαλύτερα από τα καλώδια ρεύματος, τα οποία λόγω της στρεπτικής τους ακαμψίας δεν μπορούν να αποθηκευτούν σε σταθερό καρούλι. Τα καλώδια τοποθετούνται σε οριζόντια στρώματα ξεκινώντας από το κάτω στρώμα. Ένας άλλος τρόπος τοποθέτησης καλωδίων είναι σε καρουζέλ που έχουν κωνικό κεντρικό σημείο και τι καλώδιο τυλίγεται σε ομόκεντρα στρώματα προς τα πάνω και προς τα κάτω υπό συνεχή τάση του καλωδίου. Υπάρχουν σκάφη που μπορούν να εξοπληστούν με δύο ανεξάρτητα καρουζέλ και να μεταφέρουν δύο καλώδια ταυτόχρονα [24].

Τα **σταθερά καρούλια καλωδίων** (Εικόνα 2.14) είναι κυκλικά ή επιμήκη, τα οποία χρησιμοποιούνται για εύκαμπτα καλώδια. Το καλώδιο φορτώνεται με τη βοήθεια ενός βραχίονα τοποθέτησης που βρίσκεται σε σημαντικό ύψος πάνω από το καρούλι. Κατά την φόρτωση είναι σημαντικό να διατηρείται μία ελάχιστη εσωτερική διάμετρος περιέλιξης που καθορίζεται από τον κατασκευαστή του. Την ίδια στιγμή πρέπει να παρέχονται στηρίγματα για την αποτροπή ολίσθησης του καλωδίου από το βάρος της στοίβας που δημιουργείται [24].

Τα τύμπανα καλωδίων (Εικόνα 2.15) χρησιμοποιούνται σε έργα με μικρό μήκος καλωδίων. Συνήθως τα συστήματα που συνδέουν υπεράκτια αιολικά πάρκα έχουν μήκος καλωδίων 800 m, τα οποία μπορούν να εγκατασταθούν από φορτηγίδες εξοπλισμένες με τύμπανα καλωδίων [24].



Εικόνα 2.13: Καρουζέλ [24]



Εικόνα 2.14: Σταθερό καρούλι [25]



Εικόνα 2.15: Τύμπανο [24]

Οι εντατήρες καλωδίων (Εικόνα 2.17) ή γραμμικές μηχανές (Εικόνα 2.16), είναι απαραίτητες για κάθε κίνηση των καλωδίων επί του σκάφους και για την εφαρμογή τάνυσης κατά την τοποθέτηση. Πολλές γραμμικές μηχανές αποτελούνται από ζεύγη τροχών τα οποία ανοίγουν και κλείνουν με ελεγχόμενη πίεση για να πιάσουν το καλώδιο. Η κίνηση στους τροχούς είναι τις περισσότερες φορές υδραυλική. Το πρώτο άκρο του καλωδίου διέρχεται από τη γραμμική μηχανή η οποία βρίσκεται σε κατάσταση που τραβάει. Όταν το καλώδιο βυθίζεται στο νερό η γραμμική μηχανή βρίσκεται σε λειτουργία πέδησης. Πολλά μηχανήματα μπορούν να ελέγξουν την ταχύτητα και την τάση του καλωδίου. Επίσης, οι γραμμικές μηχανές είναι διαθέσιμες με ιμάντες αντί για τροχούς, με ονομασία κάμπιες [24] [27].



Εικόνα 2.16: Γραμμική μηχανή [24]



Εικόνα 2.17: Caterpillar (κάμπια) [24]

2.4.2. Φόρτωση καλωδίων στο πλοίο

Τα υποβρύχια καλώδια κάθε μήκους μεταφέρονται σε τύμπανα καλωδίων, τα οποία απαιτούν ρυμουλκά με επίπεδη επιφάνεια για τη χερσαία μεταφορά τους ή φορτηγό πλοίο στην περίπτωση που το εργοστάσιο κατασκευής βρίσκεται κοντά σε λιμάνι. Η προμήθεια των καλωδίων γίνεται με δύο τρόπους. Η προμήθεια σε τύμπανα προκομμένων καλωδίων, το οποίο προϋποθέτει την ενημέρωση του εργοστασίου για τα μήκη των καλωδίων, και η αποστολή του καλωδίου σε καρουζέλ, όπου τα μήκη των καλωδίων κοβόνται κατά την τοποθέτηση. Για τη φόρτωση μεγάλου μήκους καλωδίου, το πλοίο φορτώνει το καλώδιο απευθείας από το εργοστάσιο σε ένα κομμάτι (Εικόνα 2.18). Από το εργοστασιακό καρουζέλ το καλώδιο περνάει από μία γραμμική μηχανή και ένας βραχίονας τοποθέτησης μεταφέρει το καλώδιο στο καρουζέλ του πλοίου [24].



Εικόνα 2.18: Φόρτωση καλωδίων στο πλοίο [24]

2.4.3. Εκφόρτωση καλωδίων από το πλοίο

Η εκφόρτωση των καλωδίων τροφοδοσίας απαιτεί τον περισσότερο εξοπλισμό και τον περισσότερο χρόνο από όλες τις εργασίες του έργου. Το έργο ξεκινά από το σημείο προσγειάλωσης του καλωδίου στην ακτή. Μερικές φορές δημιουργείται μία ανοιχτή τάφρος στην παραλία (Εικόνα 2.19), όπου το σημείο εισόδου σταθεροποιείται με φράγματα. Η τάφρος ενώνει τη θαλάσσια είσοδο με τη χερσαία τοποθεσία που ενώνεται το υποθαλάσσιο καλώδιο με το χερσαίο. Κατά τη διάρκεια έλξης, το καλώδιο οδηγείται με οδηγούς κυλίνδρων μέσα στην τάφρο. Μία άλλη μέθοδος διέλευσης της ζώνης της παραλίας είναι η χρήση κλειστών σωλήνων. Η οριζόντια κατευθυνόμενη διάτρηση, είναι η διαδικασία όπου αναγείρεται σταθμός γεώτρησης στη χερσαία πλευρά της παραλίας, για να ανοίξει μία τρύπα κάτω από την περιοχή της παραλίας με προκαθορισμένη καμπυλότητα, η οποία είναι επενδεδυμένη με χαλύβδινους ή πλαστικούς σωλήνες για να περάσουν τα καλώδια. Όταν οι εργασίες στο χερσαίο τμήμα ολοκληρωθούν, το πλοίο πλησιάζει το σημείο προσγειάλωσης του καλωδίου στην ακτή. Εκεί τοποθετείται ένα βαρούλκο. Ένα σύρμα έλξης από το βαρούλκο μεταφέρεται στο πλοίο και συνδέεται στην άκρη του καλωδίου, ώστε να τοποθετηθεί το καλώδιο, στο οποίο εφαρμόζονται πλωτές συσκεύες για να επιπλέει (Εικόνα 2.20). Όταν το άκρο του καλωδίου φτάσει την ακτή, οι πλωτές συσκευές αφαιρούνται και το καλώδιο βυθίζεται στην προκαθορισμένη θέση του. Στην παραλία προορισμού το πλοίο πλησιάζει στην παραλία για να τοποθετηθεί το τελευταίο κομμάτι του καλωδίου εφαρμόζοντας την ίδια διαδικασία [23] [24].

Η διαδικασία στην περίπτωση τοποθέτησης καλωδίων σε υπεράκτιες πλατφόρμες είναι διαφορετική. Οι υπεράκτιες κατασκευές με σταθερά θεμέλια φέρουν σωλήνες που φτάνουν από τον πυθμένα της θάλασσας μέχρι την πάνω πλευρά της πλατφόρας. Στο πάνω άνοιγμα του σωλήνα βρίσκεται ένα βαρούλκο για να τραβήξει το καλώδιο, ενώ το κάτω άνοιγμα βρίσκεται πάνω ή κάτω από το επίπεδο του βυθού. Το πλοίο πλησιάζει το κάτω άνοιγμα του σωλήνα και ένα σύρμα έλξης από το βαρούλκο μέσω του σωλήνα τραβά το καλώδιο στο πάνω μέρος της πλατφόρμας [23] [24].





Εικόνα 2.19: Κατασκευή τάφρου στην παραλία [23]

Εικόνα 2.20: Πλωτές συσκευές στο καλώδιο [23]

2.4.4. Τοποθέτηση καλωδίων στο βυθό

Η τοποθέτηση ενός καλωδίου στο βυθό της θάλασσας προϋποθέτει τη συνεργασία μεμονωμένων κινητήρων και εξοπλισμού για να επιτευχθεί το αποτέλεσμα (Εικόνα 2.21). Ένα από τα σημαντικότερα προβλήματα που πρέπει να αντιμετωπιστεί είναι η διατήρηση της σωστής τάσης του καλωδίου, συντονίζοντας τις ταχύτητες του σκάφους και των εντατήρων κατά την απελευθέρωση του καλωδίου. Όταν η τάση είναι πολύ υψηλή μπορεί να προκαλέσει βλάβη στο καλώδιο, ενώ, όταν η τάση είναι πολύ χαμηλή μπορεί να προκαλέσει διαμήκη συμπίεση στο καλώδιο, καταστρέφοντας τα εσωτερικά του στρώματα. Επίσης, η πολύ χαμηλή τάση στο βυθό είναι πιθανό να δημιουργήσει μικρή ακτίνα κάμψης στο καλώδιο καταστρέφοντάς το ή να προκαλέσει βρόχο, αντί να στρωθεί σε ευθεία γραμμή. Στην περίπτωση που η τοποθέτηση γίνεται σε ρηγά νερά, ο υπολογισμός της τάσης του καλωδίου υπολογίζεται από τη γωνία αναχώρησης του καλωδίου, το βάθος του νερού και το μήκος που εφάπτεται στον βυθό. Σε πολύ βαθιά νερά, η γωνία αναχώρησης αλλάζει ελάχιστα, καθώς πηγαίνει ευθεία προς τα κάτω. Για να εντοπιστεί η θέση του καλωδίου στο βυθό και η θέση του σε σχέση με το σκάφος, γρησιμοποιείται ένα τηλεδιαγειριζόμενο όγημα εξοπλισμένο με κάμερα και συσκευή εντοπισμού θέσης. Οι συνθήκες του περιβάλλοντος επηρεάζουν τη διαδικασία τοποθέτησης και απαιτείται η αλλαγή ταχύτητας του σκάφους και της απελευθέρωσης του καλωδίου. Όταν υπάρχουν κύματα, το σύστημα δυναμικής θέσης μειώνει τις πλευρικές κινήσεις, όμως το σκάφος εξακολουθεί να έχει κινήσεις ανύψωσης αλλάζοντας συνεχώς την τάση του καλωδίου, μεταβάλλοντας τη θέση του στο βυθό. Κάθε φορά που αλλάζει το βάθος του νερού και ο επίπεδος βυθός γίνεται κλίση, οι παράμετροι υπολογισμού της τάσης αλλάζουν. Όταν βρίσκεται ένα εμπόδιο στη διαδρομή, το καλώδιο τοποθετείται γύρω από αυτό σε μία στροφή, προσέχοντας να μην ξεπεραστεί η ελάχιστη ακτίνα κάμψης του καλωδίου [28].



Εικόνα 2.21: Μεταβλητές που επηρεάζουν την τοποθέτηση του καλωδίου [28]
2.4.5. Σύνδεση καλωδίων

Στις περιπτώσεις που το μήκος της διαδρομής δεν μπορεί να καλυφθεί από ένα καλώδιο είναι απαραίτητη η σύνδεση καλωδίων στην ανοιχτή θάλασσα. Τα δύο συνδεδεμένα καλώδια πρέπει να χειρίζονται ταυτόχρονα με τον σύνδεσμο (Εικόνα 2.22), ώστε να μην υπάρξει υπερβολική κάμψη ή τάση και τα καλώδια να μην κολλήσουν σε άλλες κατασκευές επί του πλοίου. Η κατάσταση στον βυθό επηρεάζει την απόφαση για το ποιο είδος συνδέσμου θα χρησιμοποιηθεί. Οι σύνδεσμοι πρέπει να προετοιμάζονται σε ειδικά κατασκευασμένα εργαστήρια επί του πλοίου, τα οποία είναι εξοπλισμένα με κλιματισμό, εγκαταστάσεις ξήρανσης αέρα, ανύψωση και χειρισμό καλωδίων [24].

Μερικές φορές δεν είναι δυνατή η άμεση σύνδεση δύο καλωδίων μεταξύ τους και πρέπει να βυθιστεί το άκρο του πρώτου τοποθετημένου καλωδίου με κατάλληλη κάλυψη, ώστε να ανακτηθεί αργότερα χωρίς να έχει υποστεί φθορές. Το πλοίο επιστρέφει στο λιμάνι για να πάρει το επόμενο καλώδιο και μετά φτάνει στο τέλος της διαδρομής του πρώτου καλωδίου. Εκεί, το πρώτο καλώδιο ανακτάται και συνδέεται με το δεύτερο στο εργαστήριο σύνδεσης. Αυτή η ρύθμιση απαιτεί το πλήρες δεύτερο καλώδιο να περνά μέσα από το εργαστήριο σύνδεσης, εκτός εάν αυτό μπορεί να αφαιρεθεί μετά τη σύνδεση [24].

Σε άλλες περιπτώσεις, ενώ έχουν τοποθετηθεί και τα δύο καλώδια, βρίσκονται στον πυθμένα με την κατάλληλη προστασία, χωρίς να είναι συνδεδεμενα μεταξύ τους, λόγω πιθανών καιρικών φαινομένων που εμπόδισαν τη διαδικασία σύνδεσης. Όπως προηγουμένως, οι άκρες των καλωδίων μεταφέρονται στο εργαστήριο σύνδεσης στο πλοίο και εκεί γίνεται η σύνδεση τους. Το πλοίο πρέπει να παραμείνει σταθερό κατά τη διάρκεια της λειτουργίας σύνδεσης, για να διευκολύνει τη διαδικασία [23].

Οι σύνδεσμοι διασφαλίζουν τη σωστή επαφή των αγωγών, των επικαλύψεων μόνωσης και της θωράκισης των δύο καλωδίων. Μπορεί να είναι εύκαμπτοι ή άκαμπτοι και ανάλογα τις περιβαλλοντικές συνθήκες της περιοχής που τοποθετείται η γραμμή επιλέγεται και ο καταλληλότερος σύνδεσμος [15].



Εικόνα 2.22: Σχέδιο συνδέσμου καλωδίων [15]

2.4.6. Προστασία καλωδίων από κινδύνους σφάλματος

Ένα καλώδιο μετά την εγκατάστασή του πρέπει να προστατευτεί από ανθρώπινες και φυσικές απειλές. Η πρώτη προστασία εφαρμόζεται κατά την κατασκευή του καλωδίου με τη θωράκιση, την προστασία νερού και τις μονώσεις. Έπειτα, η διαδρομή που θα τοποθετηθεί το καλώδιο είναι απαραίτητο να σχεδιαστεί με τέτοιο τρόπο, ώστε να αποφεύγονται απότομες πλαγιές, γκρεμοί και μεγάλες πέτρες, έστω και αν αυτή να μην είναι η συντομότερη. Το έδαφος του βυθού της θάλασσας είναι διαφορετικό ανά περιοχή, δηλαδή μπορεί να είναι πολύ σκληρό για να δημιουργηθεί μία τάφρος ή πολύ μαλακό που το καλώδιο κινδυνεύει να βυθιστεί πιο βαθιά από τον αρχικό σχεδιασμό. Στις αλιευτικές ζώνες υπάρχει κίνδυνος τα καλώδια να υποστούν ζημιές από άγκυρες ή από μηχανότρατες, όπως να καταστραφεί η θωράκιση του καλωδίου, εάν μία άγκυρα γατζωθεί πάνω του. Ένας τρόπος προστασίας του καλωδίου σε αυτές τις περιπτώσεις είναι το θάψιμο του καλωδίου με τη βοήθεια θαλάσσιου αρότρου (Εικόνα 2.23) που δημιουργεί μία τάφρο για να εισαγάγει το καλώδιο. Τέλος, στις περιπτώσεις που το θάψιμο του καλωδίου δεν επιτρέπεται, τοποθετείται στρώμα από σκυρόδεμα (Εικόνα 2.24) μετά την εγκατάσταση του καλωδίου [23] [24].



Εικόνα 2.23: Θαλάσσιο άροτρο [23]



Εικόνα 2.24: Στρώμα από σκυρόδεμα [24]

2.5. Φαινόμενα στα καλώδια

Η χωρική κατανομή ηλεκτρικών φορτίων επηρεάζει το ρεύμα μόνιμης κατάστασης. Σε συνθήκες υψηλής τάσης, η δημιουργία και συσσώρευση χωρικών φορτίων στα διηλεκτρικά, αλλάζουν την κατανομή του ηλεκτρικού πεδίου. Επίσης, χωρικά φορτία μπορούν να συσσωρευτούν και σε στρερεά διηλεκτρικά, εάν η πυκνότητα φόρτισης χώρου είναι πολύ υψηλή, η τοπική ένταση πεδίου μπορεί να υπερνικήσει την αντοχή διασπασης του διηλεκτρικού και να οδηγήσει σε αστοχία διηλεκτρικού, επιταχύνοντας τη γήρανση και την υποβάθμιση του καλωδίου [25].

Η κατανομή ηλεκτρικού πεδίου στα καλώδια συνεχούς ρεύματος εξαρτάται από την κατανομή της ειδικής αντίστασης όγκου συνεχούς ρεύματος για πολυμερή υλικά. Επειδή η αντίσταση εξαρτάται από τη θερμοκρασία, η κατανομή του ηλεκτρικού πεδίου εξαρτάται και αυτή από τη θεροκρασία. Επιπλέον, η κατανομή του ηλεκτρικού πεδίου εξαρτάται από το ρεύμα φορτίου. Λόγω της ειδικής αντίστασης όγκου, στην περίπτωση που το καλώδιο είναι υπό τάση συνεχούς ρεύματος αλλά χωρίς ρεύμα

φορτίου, η κατανομή του ηλεκτρικού πεδίου στα καλώδια DC είναι διαφορετική από τα καλώδια AC και το υψηλότερο ηλεκτρικό πεδίο εμφανίζεται στο εσωτερικό μέρος του αγωγού [25].

Κατά τη διαδικασία κατασκευής, μπορεί να σχηματιστούν κενά ή κοιλότητες γεμάτες με αέριο στη μόνωση. Είναι επίσης δυνατό να σχηματιστούν με τη διαστολή και συστολή των υλικών του καλωδίου λόγω βραχυκυκλώματος. Τα κενά έχουν μεγαλύτερη ηλεκτρική καταπόνηση, σε σύγκριση με το μεγαλύτερο μέρος της μόνωσης, αλλά το αέριο μέσα στο κενό έχει χαμηλότερη αντοχή σε διάσπαση. Όταν η ηλεκτρική καταπόνηση στα κενά υπερβεί την αντοχή διάσπασης του αερίου στο εσωτερικό, μπορούν να συμβούν μερικές εκκενώσεις. Οι μερικές εκκενώσεις αποδυναμώνουν τη μόνωση οδηγώντας τη σε καταστροφή. Υπάρχει η πιθανότητα οι μερικές εκκενώσεις να οδηγήσουν στην ανάπτυξη δέντρων προκαλώντας την καταστροφή του καλωδίου [25].

Ο δενδρίτης είναι ένα προκαταρκτικό φαινόμενο καταστροφής διηλεκτρικού. Μπορεί να συμβεί υπό εναλλασσόμενο ρεύμα, συνεχές ρεύμα και παλμικές τάσεις. Εμφανίζεται στα περισσότερα στερεά διηλεκτρικά προκαλώντας τεράστιο πρόβλημα. Στο ξηρό διηλεκτρικό, οι ηλεκτρικοί δενδρίτες (Εικόνα 2.25.α) μπορούν να πολλαπλασιαστούν λόγω υψηλής αποκλίνουσας ηλεκτρικής καταπόνησης υπό ορισμένες συνθήκες όπως μεταλλικές ή ημιαγώγιμες ακαθαρσίες και κενά. Στον ηλεκτρικό δενδρίτη υπάρχουν δύο διακριτές περίοδοι. Πρώτα είναι η περίοδος επώασης, κατά τη διάρκεια της, καμία μετρήσιμη μερική εκκένωση δεν μπορεί να προσδιοριστεί, αλλά εμφανίζεται μία φιγούρα που μοιάζει με δενδρίτη. Η δεύτερη περίοδος είναι η διάρκεια που ο δενδρίτης μεγαλώνει στη μόνωση και ένα μεγάλο μέγεθος μερικής εκκένωσης μπορεί να μετρηθεί. Οι δενδρίτες νερού (Εικόνα 2.25.b) εμφανίζονται σε καλώδια με μόνωση πολυμερών που εκτίθενται στο νερό τα οποία έχουν απορροφήσει υγρασία. Η δημιουργία δενδριτών νερού αρχικοποιείται σε χαμηλότερη τιμή ηλεκτρικής καταπόνησης από αυτή των ηλεκτρικών δενδριτών, και προχωρά πιο αργά χωρίς ανιχνεύσιμες μερικές εκκενώσεις. Όλα αρχίζουν να αναπτύσσονται από σημεία που έχουν υψηλό επίπεδο ηλεκτρικής καταπόνησης και είναι πηγές υγρασίας ή ατμών υγρασίας, που προέρχονται από εξωτερικές πηγές ή υπάρχουν ήδη στο διηλεκτρικό από τη διαδικασία κατασκευής. Αν το νερό εξατμιστεί από τους δενδρίτες, τότε γίνονται αόρατα και στην περίπτωση που η μόνωση εκτεθεί σε νερό ή υδρατμούς ο δενδρίτης θα απορροφήσει ξανά νερό. Τέλος, οι ηλεκτροχημικοί δενδρίτες είναι δενδρίτες νερού που περιέχουν μέταλλα ή ιόντα, τα οποία διεισδύουν στο διηλεκτρικό υπό ηλεκτρική καταπόνηση. Αυτοί οι δενδρίτες είναι μονίμως ορατά και το χρώμα τους εξαρτάται από τη χημεία των ιόντων και των υλικών του διηλεκτρικού [25].



Εικόνα 2.25: (a) Ηλεκτρικός δενδρίτης (b) Δενδρίτης νερού [25]

Η διέγερση του καλωδίου προκαλείται από υψηλές υπερτάσεις. Η μέθοδος προστασίας είναι η αργή άνοδος της τάσης του συστήματος, για να αποτραπούν οι ταλαντώσεις του κυκλώματος συντονισμού σειράς που σχηματίζονται από χωρητικότητες καλωδίων και επαγωγές σταθμών [25].

Στα συστήματα συνεχούς ρεύματος υψηλής τάσης σε λειτουργία, **αλλάζει η κατεύθυνση της ροής ισχύος** όταν αντιστρέφεται η πολικότητα της τάσης. Το καλώδιο πρέπει να είναι σχεδιασμένο να αντέχει την αυξημένη τάση στο διηλεκτρικό. Η λύση είναι η εφαρμογή διακοπτών, για την αντιστροφή κατεύθυνσης του ρεύματος [25].

Η ταχεία μείωση του μεταδιδόμενου ρεύματος μειώνει την τάση στο καλώδιο, η οποία προκαλεί τον σχηματισμό κοιλοτήτων που αποτελεί κίνδυνο δημιουργίας μερικών εκκενώσεων, όμως αυτό δεν είναι αποδεκτό για συστήματα μεταφοράς HVDC [25].

Τα καλώδια, λόγω των υψηλών τάσεων και ρευμάτων, επηρεάζονται από **ηλεκτρική**, **θερμική** και **μηχανική καταπόνηση**, προκαλώντας μείωση της απόδοσής τους [25].

2.6. <u>Συντήρηση</u>

Για τη βέλτιστη λειτουργία του καλωδίου πρέπει να ελέγχεται και να συντηρείται περιοδικά. Αυτό περιλαμβάνει τον έλεγχο για πιθανό σχίσιμο ή φθορά, αποτύπωση της καλωδιακής όδευσης προκειμένου να ελεγχθεί η ευστάθεια του βυθού και πιθανές γεωδυναμικές διεργασίες που μπορούν να απειλήσουν την ακεραιότητα του καλωδίου και την προληπτική αντικατάσταση των εξαρτημάτων του καλωδίου όταν υπάρχουν σημάδια φθοράς. Η επέμβαση γίνεται με εξειδικευμένα σκάφη με κατάλληλο εξοπλισμό [15].

2.8. Συστήματα σε λειτουργία

Το σύστημα **NorNed** (Εικόνα 2.26) είναι ένα υποθαλάσσιο HVDC καλώδιο διπολικής σύνδεσης μεταξύ Νορβηγίας και Ολλανδίας, το οποίο συνδέει τα ηλεκτρικά δίκτυα των δύο χωρών. Έχει μήκος 580 χλμ., ικανότητα μεταφοράς ισχύος 700 MW και τάση 450 kV. Τέθηκε σε λειτουργία το 2007 και είχε συνολικό κόστος 600 εκατομμύρια.



Εικόνα 2.26: Υποθαλάσσιο HVDC καλώδιο μεταξύ Νορβηγίας και Ολλανδίας [15]

Το σύστημα **SA.PE.I.** (Εικόνα 2.27) είναι ένα υποθαλάσσιο HVDC καλώδιο διπολικής σύνδεσης μεταξύ Σαρδηνίας και Ιταλικής χερσονήσου. Έχει μήκος 420 χλμ., ικανότητα μεταφοράς ισχύος 1000 MW και τάση 500 kV. Τέθηκε σε λειτουργία το 2012 και είχε συνολικό κόστος 730 εκατομμύρια.



Εικόνα 2.27: Υποθαλάσσιο HVDC καλώδιο μεταξύ Σαρδηνίας και χερσονήσου [15]

Το σύστημα **Kii Channel** (Εικόνα 2.28) είναι ένα υποθαλάσσιο HVDC καλώδιο διπολικής σύνδεσης στην Ιαπωνία. Έχει μήκος 50 χλμ., ικανότητα μεταφοράς ισχύος 1400 MW και τάση 250 kV. Τέθηκε σε λειτουργία το 2000.



Εικόνα 2.28: Υποθαλάσσιο HVDC καλώδιο στην Ιαπωνία [15]

Κεφάλαιο 3

Λογισμικό PowerFactory της DIgSILENT

3.1. Το πρόγραμμα PowerFactory της DIgSILENT

Για την ολοκλήρωση της διπλωματικής εργασίας, έγινε προσομοίωση ενός υπαρκτού σε λειτουργία συτήματος μεταφοράς συνεχούς ρεύματος υψηλής τάσης με υποθαλάσσια καλώδια. Χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό PowerFactory 15.1 της DIgSILENT (**Dig**ital **SI**muLation of Electrical **NeT**works), για να γίνουν οι απαραίτητες μετρήσεις **ροής φορτίου**, **απωλειών** και **σφαλμάτων** του συστήματος. Το PowerFactory είναι ένα υπολογιστικό πρόγραμμα για την ανάλυση συστημάτων μεταφοράς, διανομής και βιομηχανικής ηλεκτρικής ενέργειας, με σκοπό τον σχεδιασμό και τη βελτιστοποίηση λειτουργίας των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας. Το πρόγραμμα λειτουργεί με μία ενιαία βάση δεδομένων, με τα απαιτούμενα δεδομένα για όλον τον εξοπλισμό ενός συστήματος ισχύος. Με αυτόν τον τρόπο, είναι δυνατό να εκτελεστούν όλες οι συναρτήσεις προσομοίωσης ισχύος μέσα σε ένα ενιαίο περιβάλλον προγράμματος.

3.2. Ανάλυση ροής φορτίου

Οι υπολογισμοί ροής φορτίου εφαρμόζονται σε συστήματα ισχύος σε μόνιμη κατάσταση. Με τον υπολογισμό ροής φορτίου καθορίζονται οι ροές ενεργού και άεργου ισχύος για όλους τους κλάδους και το μέτρο και η γωνία τάσης για όλους τους κόμβους. Οι κύριες περιοχές για την εφαρμογή των υπολογισμών μπορούν να χωριστούν σε **μόνιμες** και **μεταβατικές**. Στην προσομοίωση μόνιμων συνθηκών είναι γνωστά η παραγωγή ενεργού ισχύος των γεννητριών και τα φορτία, οπότε αρκεί ο υπολογισμός ροής φορτίου για την κατανάλωση της ενεργού και άεργου ισχύος όλων των φορτίων. Ο υπολογισμός θα πρέπει να αντιπροσωπεύει μία συνθήκη συστήματος στην οποία κανένα από τα όρια των διακλαδώσεων ή της γεννήτριας δεν παραβιάζονται. Στην προσομοίωση συνθηκών σφάλματος δεν μπορεί να υποτεθεί ότι ολόκληρο το σύστημα λειτουργεί εντός ορίων. Τα μοντέλα υπολογισμού πρέπει να προσομοιώνουν σωστά τις συνθήκες που αποκλίνουν από την μόνιμη λειτουργία. Σε πολλές εφαρμογές το ισοζύγιο ενεργού και άεργου ισχύος δεν μπορεί να καθοριστεί από έναν μόνο κλάδο, οπότε πρέπει να ληφθούν υπόψη πιο ρεαλιστικές αναπαραστάσεις των μηχανισμών ελέγχου ενεργού και άεργου ισχύος

Οι μέθοδοι υπολογισμού που παρέχονται από τη λειτουργία ανάλυσης ροής φορτίου του PowerFactory επιτρέπουν την ακριβή αναπαράσταση οποιουδήποτε συστήματος μίας, δύο και τριών φάσεων AC και/ή DC.

Το εργαλείο ροής φορτίου αναπαριστά με ακρίβεια μη ισορροπημένα φορτία, παραγωγή, δίκτυα, συστήματα HVDC, φορτία DC, ρυθμιζόμενες ταχύτητες, για όλα τα επίπεδα τάσης AC και DC.

Οι απώλειες είναι το πιο σημαντικό αποτέλεσμα της αντίστασης των γραμμών μεταφοράς και των καλωδίων. Η αντίσταση του αγωγού εξαρτάται και από τη θερμοκρασία λειτουργίας του αγωγού. Για να πραγματοποιηθεί τέτοιου είδους ανάλυση, υπάρχει επιλογή εξάρτησης από θερμοκρασία, όπου καθορίζεται η τιμή της θερμοκρασίας έτσι, ώστε να καθορίζεται η αντίσταση του αγωγού σύμφωνα με αυτή.

Για την ανάλυση πολύπλοκων δικτύων μεταφοράς, όπου μόνο η ροή της ενεργού ισχύος λαμβάνεται υπόψη, προσφέρεται μία πρόθετη μέθοδος ροής φορτίου, η οποία καθορίζει τις ροές ενεργού ισχύος και τις γωνίες τάσης εντός του δικτύου.

Ένας υπολογισμός ροής φορτίου καθορίζει το μέγεθος της τάσης (V), τη γωνία της τάσης (θ) των κόμβων, τη ροή ενεργού (P) και άεργου ισχύος (Q) στους κλάδους. Οι κόμβοι χαρακτηρίζονται με δύο από αυτές τις τέσσερις ποσότητες, και ταξινομούνται ως εξής:

PV ζυγός παραγωγής: Καθορίζονται η ενεργός ισχύς και η ενεργός τιμή της τάσης. Χρησιμοποιούνται για να αναπαραστήσουν γεννήτριες και συγχρονους συμπυκνωτές των οποίων η ενεργή ισχύς και η ενεργός τιμή τάσης ελέγχονται.

PQ ζυγός φορτίου: Καθορίζονται η ενεργός και άεργος ισχύς. Χρησιμοποιούνται για να αντιπροσωπεύουν φορτία και μηχανές με σταθερές τιμές ισχύος.

Slack κόμβος (ζυγός ταλάντωσης): Η ενεργός τιμή και η γωνία της τάσης είναι σταθερά. Στους υπολογισμούς ροής φορτίου ο ζυγός ταλάντωσης εκτελεί την εξισορρόπηση ισχύος στο σύστημα.

Device κόμβοι: ειδικοί κόμβοι που χρησιμοποιούνται για την αναπαράσταση συσκευών, όπως μετατροπείς HVDC, με συγκεκριμένες συνθήκες ελέγχου.

3.2.1. Μέθοδος ροής φορτίου ΑC

Στο PowerFactory οι εξισώσεις που χρησιμοποιούνται για την αναπαράσταση των αναλυόμενων δικτύων υλοποιούνται χρησιμοποιώντας δύο διαφορετικές συνθέσεις. 1)Newton-Raphson (current equations) και 2)Newton-Raphson (power equations, classical). Και στις δύο συνθέσεις προκύπτουν μη γραμμικά συστήματα εξισώσεων τα οποία πρέπει να επιλυθούν με επαναληπτική μέθοδο. Το PowerFactory χρησιμοποιεί Newton-Raphson ως μη γραμμική λύση. Για μεγάλα συστήματα μεταφοράς ο αλγόριθμος Newton-Raphson χρησιμοποιεί τη διατύπωση «εξισώσεις ισχύος». Τα συστήματα μεταφοράς και ειδικότερα τα μη ισορροπημένα συστήματα μεταφοράς συγκλίνουν καλύτερα χρησιμοποιώντας τη διατύπωση «εξισώσεις ρεύματος». Το πρόγραμμα εφαρμόζει έναν εξωτερικό βρόγο, όταν το χαρακτηριστικό ελέγχου του αυτόματου μεταγωγέα λήψεων μετασχηματιστή λαμβάνεται υπόψη. Μόλις οι επαναλήψεις Newton-Raphson συγκλίνουν σε μία λύση εντός της καθορισμένης αντοχής, εφαρμόζεται ο εξωτερικός βρόχος προκειμένου να επιτευχθούν αυτές οι τιμές στόχοι. Οι ενέργειες που γίνονται από τον εξωτερικό επαναληπτικό βρόχο είναι η αύξηση ή μείωση ενδιάμεσων λήψεων και ο περιορισμός ή η επιβολή σύγχρονων μηγανών σε/από όρια μέγιστης/ελάχιστης άεργης ισχύος. Μόλις γίνουν οι παραπάνω ενέργειες, λαμβάνει χώρα μία νέα επανάληψη ροής φορτίου Newton-Raphson για τον προσδιορισμό του νέου σημείου λειτουργίας του δικτύου. (Εικόνες 3.1 και 3.2)



Εικόνα 3.1: Σύστημα εξαγωγής εξισώσεων για επίλυση προβλημάτων ροής φορτίου

Η αγωγιμότητα υπολογίζεται ως εξής:

$$y = \frac{1}{r+jx} = g + jb \tag{3.1}$$

Όπου \mathbf{g} είναι το πραγματικό μέρος του στοιχείου της μήτρας αγωγιμοτήτων, ενώ το \mathbf{b} είναι το φανταστικό μέρος του στοιχείου της μήτρας αγωγιμοτήτων.

$$Y_{km} = -y_{km} = -g_{km} - jb_{km}$$
(3.2)

Οι επαναληπτικές εξισώσεις ροής φορτίου στο ζυγό k ορίζονται ως εξής:

$$\Delta P_k^{(n)} = P_k - V_k^{(n)^2} \left[g_k + \sum_{m \neq k} (g_{skm} + g_{km}) \right] + V_k^{(n)} \sum_{m \neq k} V_m^{(n)} \left[g_{km} \cos(\delta_k^{(n)} - \delta_m^{(n)}) + b_{km} \sin(\delta_k^{(n)} - \delta_m^{(n)}) \right]$$
(3.3)

$$\Delta Q_{k}^{(n)} = Q_{k} + V_{k}^{(n)^{2}} \bigg[b_{k} + \sum_{m \neq k} (b_{skm} + b_{km}) \bigg] + V_{k}^{(n)} \sum_{m \neq k} V_{m}^{(n)} \bigg[g_{km} \sin(\delta_{k}^{(n)} - \delta_{m}^{(n)}) - b_{km} \cos(\delta_{k}^{(n)} - \delta_{m}^{(n)}) \bigg]$$
(3.4)

Όπου V_k είναι το μέγεθος τάσης του ζυγού k, P_k είναι η ενεργός ισχύς του ζυγού k, Q_k είναι η άεργος ισχύς του ζυγού k και δ είναι η γωνία τάσης.

<u>Μέθοδος Newton -Raphson</u>:

$$\begin{bmatrix} \Delta \mathbf{P}^{(n)} \\ \Delta \mathbf{Q}^{(n)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H & N \\ J & L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta^{(n+1)} \\ \Delta \mathbf{V}^{(n+1)} / \mathbf{V}^{(n)} \end{bmatrix}$$
(3.5)

$$H_{km} = \frac{\partial \Delta P_k}{\partial \Delta \theta_m}$$
(3.6)

$$N_{km} = \frac{\partial \Delta P_k}{\partial \Delta V_m}$$
(3.7)

$$J_{km} = \frac{\partial \Delta Q_k}{\partial \Delta \theta_m}$$
(3.8)

$$L_{km} = \frac{\partial \Delta Q_k}{\partial \Delta V_m} \tag{3.9}$$



Εικόνα 3.2: Μήτρα αγωγιμοτήτων

3.2.2. Μέθοδος ροής φορτίου DC

Η μέθοδος ροής φορτίου DC μπορεί να χρησιμοποιηθεί και σε συστήματα AC, όπως σε περιπτώσεις που χρειάζεται η διενέργεια ταχείας ανάλυσης σε πολύπλοκα δίκτυα μεταφοράς όπου το μόνο που χρειάζεται είναι μία λογική προσέγγιση της ροής ενεργού ισχύος. Στη συγκεκριμένη μέθοδο, το μη γραμμικό σύστημα που προκύπτει από τις εξισώσεις απλοποιείται, λόγω της κυρίαρχης σχέσης που υπάρχει μεταξύ γωνίας τάσης και ροής ενεργού ισχύος σε δίκτυα υψηλής τάσης. Έτσι προκύπτει ένα σύνολο γραμμικών εξισώσεων, όπου οι γωνίες τάσης των ζυγών σχετίζονται άμεσα με τη ροή ενεργού ισχύος μέσω της αντίδρασης των επιμέρους στοιχείων. Η ροή φορτίου δεν απαιτεί επαναληπτική διαδικασία και επομένως η ταχύτητα υπολογισμού αυξάνεται. Τέλος, λαμβάνεται υπόψη μόνο η ροή ενεργού ισχύος, οπότε δεν προκύπτουν απώλειες.

3.2.3. Έλεγχος ενεργής ισχύος

Το εργαλείο υπολογισμού ροής φορτίου του PowerFactory παρέχει ενεργούς μηχανισμούς εξισορρόπησης ισχύος που αντιπροσωπεύουν περισσότερο την πραγματικότητα των δικτύων μεταφοράς. Αυτοί οι μηχανισμοί εφαρμόζονται σε σταθερή κατάσταση και είναι οι εξής:

Ως κατανομή φορτίου (dispatched): Το PowerFactory προσφέρει τη δυνατότητα εξισορρόπησης μέσω ενός ή μίας ομάδας φορτίων. Άλλες μέθοδοι εξισορρόπησης περιλαμβάνουν την εξέταση της συμμετοχής όλων των σύγχρονων γεννητριών σύμφωνα με την προγραμματισμένη ενεργή ισχύς τους.

Σύμφωνα με τη δευτεροβάθμια ρύθμιση (secondary control): Στην περίπτωση που παρουσιαστεί ανισορροπία μεταξύ των προγραμματισμένων τιμών ενεργής ισχύος κάθε μονάδας παραγωγής και των φορτίων συν τις απώλειες, η πρωτεύουσα ρύθμιση θα προσαρμόσει την παραγωγή ενεργού ισχύος κάθε μονάδας οδηγώντας σε κατάσταση υπερσυχνότητας ή υποσυχνότητας. Στη συνέχεια, η δευτεροβάθμια ρύθμιση συχνότητας θα επαναφέρει τη συχνότητα στην ονομαστική της τιμή, έχοντας καθοριστεί η βέλτιστη οικονομικά παραγωγή που παρέχεται από κάθε μονάδα.

Σύμφωνα με τον πρωτεύουσα ρύθμιση συχνότητας (primary control): έπειτα από μία διαταραχή, οι ελεγκτές των μονάδων που συμμετέχουν στην πρωτεύουσα ρύθμιση θα μεταβάλλουν την ισχύ του στροβίλου τους και θα οδηγήσουν τη συχνότητα στην ονομαστική της τιμή. Η αλλαγή στην ισχύ της γεννήτριας είναι ανάλογη με την απόκλιση συχνότητας και χωρίζεται μεταξύ των συμμετεχουσών μονάδων, ανάλογα με το κέρδος (K_{pf}) των κύριων ελεγκτών τους. Η τροποποιημένη ενεργός ισχύς κάθε γεννήτριας υπολογίζεται από την ακόλουθη εξίσωση:

•
$$P_i = P_{i-dispatch} + \Delta P_i$$
 (3.10)

Όπου, P_i είναι η τροποποιημένη ενεργή ισχύς της γεννήτριας *i*, $P_{i-dispatch}$ είναι η αρχική αποστολή ενεργού ισχύος της γεννήτριας και ΔP_i είναι η αλλαγή ενεργού ισχύος στη γεννήτρια *i*. Η αλλαγή ενεργού ισχύος κάθε γεννήτριας καθορίζεται από την αντίστοιχη κύρια τιμή κέρδους ελεγκτή της γεννήτριας *i* και τη συνολική απόκλιση συχνότητας (Δf).

•
$$\Delta P_i = K_{pf-i} \cdot \Delta f$$
 (3.11)

Η συνολική απόκλιση συχνότητας υπολογίζεται ως εξής:

•
$$\Delta f = \Delta P_{Tot} / \sum K_{pf}$$
 (3.12)

Όπου, το Δ*P*_{Tot} αντιστοιχεί στο άθροισμα αλλαγής ενεργού ισχύος κάθε γεννήτριας.

•
$$\Delta PTot = \sum_{j=1}^{n} \Delta Pj$$
 (3.13)

Σύμφωνα με τις αδράνειες των στρεφόμενων μηχανών: Αμέσως μετά από μία διαταραχή, η ελλείπουσα/υπερβολική ισχύς αποδίδεται από την κινητική ενέργεια που είναι αποθηκευμένη στην περιστρεφόμενη μάζα των στροβίλων. Αυτό οδηγεί σε επιβράδυνση/επιτάχυνση και συνεπώς σε μείωση/αύξηση της συχνότητας του συστήματος. Η συμβολή της κάθε μεμονωμένης γεννήτριας ως προς τη συνολική πρόσθετη ισχύ που απαιτείται είναι ανάλογη με την αδράνειά της. Σε αυτήν την περίπτωση η ισορροπία ισχύος καθορίζεται από όλες τις γεννήτριες. Ατομικές εισφορές στο ισοζύγιο είναι ανάλογες με τη σταθερά χρόνου αδράνειας/επιτάχυνσης κάθε γεννήτριας. Μαθηματικά αυτή η σχέση περιγράφεται ως εξής:

•
$$P_i = P_{i-dispatch} + \Delta P_i$$
 (3.14)

•
$$\Delta P_i = K_{pf-i} \cdot \Delta f$$
 (3.15)

Η *Kpf-i* είναι η παράμετρος απολαβής αδράνειας της γεννήτριας *i*, η οποία υπολογίζεται ως:

•
$$K_{pf-i} = J \cdot \omega_n \cdot 2\Pi$$
 (3.16)

Όπου, J είναι η στρεφόμενη ροπή της αδράνειας, ω_n είναι η ονομαστική μηχανική γωνιακή ταχύτητα, S_n είναι η ονομαστική φαινόμενη ισχύς της γεννήτριας και T_{ags} είναι η σταθερά χρόνου επιτάχυνσης με ονομαστική τιμή S_n .

3.2.4. Έλεγχος άεργης ισχύος

Τα αποθέματα άεργου ισχύος των σύγχρονων γεννητριών σε δίκτυα μεταφοράς χρησιμοποιούνται για να ελέγχεται το επίπεδο τάσης σε συγκεκριμένους ζυγούς του συστήματος και για τον έλεγχο της ανταλλαγής άεργου ισχύος με γειτονικές ζώνες δικτύου. Ο ρυθμιστής τάσης των γεννητριών έχει ένα σημείο ρύθμισης τάσης που μπορεί να ρυθμιστεί είτε χειροκίνητα, είτε από έναν αυτόματο ελεγκτή σταθμού. Αυτός ο αυτόματος ελεγκτής σταθμού συνδυάζει πολλές πηγές άεργου ισχύος για τον έλεγχο της τάσης σε ένα ζυγό.

3.3. Ανάλυση βραχυκυκλώματος

Κάποιες από τις αιτίες που μπορεί να προκαλέσουν βραχυκύκλωμα είναι η εκκένωση κεραυνού σε εκτεθειμένο εξοπλισμό, πρόωρη γήρανση της μόνωσης, ατμοσφαιρικό ή βιομηχανικό αλάτι σε μονωτήρες, αστοχία εξοπλισμού, ακατάλληλη λειτουργία του συστήματος. Οι υπολογισμοί βραχυκυκλώματος εκτελούνται στο στάδιο του σχεδιασμού, αλλά και της λειτουργίας του συστήματος, χρησιμοποιώντας μεθόδους που απαιτούν λιγότερο λεπτομερή μοντελοποίηση δικτύου, οι οποίες εφαρμόζουν εκτιμήσεις ακραίων περιπτώσεων. Για υπολογισμούς ΑC βραχυκυκλωμάτων χρησιμοποιούνται οι μέθοδοι IEC 60909/VDE 0102, ANSI, IEC 61363 και για DC βραχυκυκλώματα οι IEC 61660, ANSI/IEEE 946. Ο υπολογισμός βραχυκυκλωμάτων στο PowerFactory προσομοιώνει μεμονωμένα σφάλματα καθώς και πολλαπλά σφάλματα απεριόριστης πολυπλοκότητας.

Παραδείγματα εφαρμογής ανάλυσης βραχυκυκλώματος κατά τον σχεδιασμό του συστήματος είναι η διασφάλιση ότι δεν γίνεται υπέρβαση της καθορισμένης ικανότητας βραχυκυκλώματος του εξοπλισμού με την επέκταση και ενίσχυση του συστήματος, η ρύθμιση διατάξεων προστασίας, η διαστασιολόγηση συστημάτων γείωσης, η επαλήθευση επαρκούς ικανότητας ισχύος επιπέδου σφάλματος σε σημεία φορτίου και ο έλεγχος επιτρεπόμενων θερμικών ορίων καλωδίων και γραμμών μεταφοράς.

Παραδείγματα εφαρμογής ανάλυσης βραχυκυκλώματος κατά τη λειτουργία του συστήματος είναι η διασφάλιση ότι δεν γίνεται υπέρβαση των ορίων βραχυκυκλώματος με την επαναδιαμόρφωση του συστήματος, ο καθορισμός των ρυθμίσεων του ρελέ προστασίας, ο υπολογισμός θέσης σφάλματος για προστατευτικά ρελέ, η ανάλυση σφαλμάτων συστήματος και η ανάλυση πιθανής αμοιβαίας παρεμβολής παράλληλων γραμμών κατά τη διάρκεια σφλμάτων συστήματος.

Για υπολογισμούς βραχυκυκλωμάτων σε συστήματα σε λειτουργία, οι ακριβείς συνθήκες λειτουργίας του συστήματος είναι γνωστές. Εάν η ακρίβεια του υπολογισμού σύμφωνα με τις μεθόδους προσέγγισης είναι ανεπαρκής, τότε εφαρμόζεται η μέθοδος υπέρθεσης. Αυτή η μέθοδος υπολογίζει τα αναμενόμενα ρεύματα βραχυκυκλώματος στο δίκτυο με βάση την υπάρχουσα κατάσταση λειτουργίας του δικτύου.

3.3.1. <u>Μέθοδος IEC 60909/VDE 0102</u>

Η μέθοδος IEC 60909/VDE 0102 χρησιμοποιεί μία ισοδύναμη πηγή τάσης στον ζυγό με σφάλμα και είναι απλοποίηση της μεθόδου υπέρθεσης. Πραματοποιείται υπολογισμός βραχυκυκλώματος χωρίς να απαιτείται υπολογισμός ροής φορτίου και ο ορισμός των πραγματικών συνθηκών λειτουργίας. Οι απλουστεύσεις που εφαρμόζονται είναι οι ονομαστικές συνθήκες να θεωρούνται για ολόκληρο το δίκτυο $U \ i = U_{n, i}$, τα ρεύματα φορτίου παραμελούνται IOp = 0, χρησιμοποιείται ένα απλουστευμένο δίκτυο προσωμοίωσης χωρίς να λαμβάνονται τα φορτία υπόψη στα θετικά και αρνητικά δίκτυα ακολουθίας και τέλος εφαρμόζεται ένας συντελεστής διόρθωσης c στη τάση του ζυγού με το σφάλμα.

3.3.2. <u>Μέθοδος ANSI</u>

Η μέθοδος **ANSI** παρέχει τις διαδικασίες για τον υπολογισμό των ρευμάτων βραχυκυκλώματος στα ακόλουθα πρότυπα.

Η ANSI C37.010 περιγράφει λεπτομερώς τη διαδικασία για τον εξοπλισμό που εφαρμόζεται σε συστήματα μέσης και υψηλής τάσης, λαμβάνοντας υπόψη την ταξινόμηση των γεννητριών είτε ως τοπικές, είτε ως απομακρυσμένες ανάλογα με την τοποθεσία σφάλματος, καθώς και την συμβολή του κινητήρα.

Η ANSI 37.13 περιγράφει τη διαδικασία για διακόπτες ισχύος που εφαρμόζονται σε συστήματα χαμηλής τάσης, εστιάζοντας στα ρεύματα πρώτου κύκλου και στο σημείο σφάλματος.

3.3.3. Ολοκληρωμένη μέθοδος (υπέρθεσης)

Η μέθοδος υπέρθεσης είναι μία ακριβής μέθοδος υπλογισμού. Τα ρεύματα σφάλματος του βραχυκυκλώματος προσδιορίζονται από την επικάλυψη μίας ροής φορτίου υγιούς κατάστασης πριν από την έναρξη βραχυκυκλώματος, με μία κατάσταση όπου όλες οι τάσεις τροφοδοσίας ρυθμίζονται στο μηδέν και η τάση λειτουργίας συνδέεται στη θέση σφάλματος.

3.3.4. <u>Μέθοδος IEC 61363</u>

Η μέθοδος IEC 61363 παρέχει διαδικασίες για τον υπολογισμό ρευμάτων βραχυκυκλώματος σε τριφασικές ακτινικές ηλεκτρικές εγκαταστάσεις AC σε πλοία και σε κινητήρες, και σε σταθερές υπεράκτιες μονάδες. Ορίζει μόνο μεθόδους υπολογισμού για βραχυκυκλώματα τριών φάσεων. Το PowerFactory υπολογίζει ένα ισοδύναμο μηχάνημα που τροφοδοτείται απευθείας από το σημείο βραχυκυκλώματος. Αυτό το μηχάνημα συνοψίζει όλα τα «ενεργά» και «μη ενεργά» στοιχεία του δικτύου.

3.3.5. <u>Μέθοδος IEC 61660</u>

Η μέθοδος **IEC 61660** υπολογίζει ρεύματα βραχυκυκλώματος σε DC βοηθητικά συστήματα σε σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής και υποσταθμούς. Ορίζει εξισώσεις και ισοδύναμα κυκλώματα που προσεγγίζουν την εξαρτώμενη από τον χρόνο συνεισφορά σφάλματος διαφορετικών πηγών συνεχούς ρεύματος, καθώς επίσης ορίζει και διορθωτικούς παράγοντες και μεθόδους προσέγγισης για τον προσδιορισμό του συνολικού ρεύματος βραχυκυκλώματος συνεχούς ρεύματος στο σημείο σφάλματος. Το PowerFactory υπολογίζει το συνολικό ρεύμα σφάλματος DC λαμβάνοντας υπόψη όλες τις πηγές συνεχούς ρεύματος που τροφοδοτούνται στη θέση βραχυκυκλώματος.

3.3.6. <u>Μέθοδος ANSI/IEEE 946</u>

Η μέθοδος **IEEE 946** είναι μία συνιστώμενη πρακτική για τον σχεδιασμό συστημάτων DC βοηθητικής ισχύος για πυρηνικούς και μη πυρηνικούς σταθμούς παραγωγής. Παρέχει καθοδήγηση σχετικά με την επιλογή εξοπλισμού, συμπλεριλαμβανομένων των χαρακτηρισμών, των διασυνδέσεων, των οργάνων, του ελέγχου και της προστασίας.

3.4. <u>Περιβάλλον του PowerFactory</u>

3.4.1. Κύριο παράθυρο

Τα βασικά χαρακτηριστικά του κύριου παραθύρου (Εικόνα 3.3) είναι τα παρακάτω:

- Περιλαμβάνει μία περιγραφή της έκδοσης του PowerFactory και εικονίδια για ελαχιστοποίηση, μεγιστοποίηση/επαναφορά, αλλαγή μεγέθους και κλείσιμο του παραθύρου.
- Η γραμμή του κύριου μενού (Εικόνα 3.4) περιλαμβάνει επιλογές αναπτυσσόμενων μενού.
- Η κύρια γραμμή εργαλείων περιλαμβάνει εντολές και άλλα εικονίδια.
- Ο γραφικός επεξεργαστής εμφανίζει διαγράμματα μονής γραμμής, διαγράμματα μπλοκ και/ή γραφικές παραστάσεις προσομοίωσης του ενεργού έργου. Τα δίκτυα και τα μοντέλα προσομοίωσης που μελετώνται, μπορούν να τροποποιηθούν απευθείας με την τοποθέτηση και σύνδεση στοιχείων.
- Με δεξί κλικ σε ένα αντικείμενο, εμφανίζεται ένα περιβάλλον με πολλές πιθανές ενέργειες.
- Με διπλό κλικ σε ένα αντικείμενο εμφανίζεται ένα παράθυρο επεξεργασίας του αντικειμένου από τον χρήστη, ρυθμίζοντας τις παραμέτρους που ορίζουν το αντικείμενο.
- Ο διαχειριστής δεδομένων είναι η άμεση διεπαφή με τη βάση δεδομένων και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την επεξεργασία μίας ομάδας επιλεγμένων αντικειμένων σε μορφή πίνακα.
- Το παράθυρο εξόδου που εμφανίζεται στο κάτω μέρος του παραθύρου του PowerFactory, δεν μπορεί να κλείσει αλλά μπορεί να ελαχιστοποιηθεί.
- Το παράθυρο επισκόπησης έργου εμφανίζεται από προεπιλογή στην αριστερή πλευρά του κύριου παραθύρου μεταξύ της κύριας γραμμής εργαλείων και του παραθύρου εξόδου. Εμφανίζει μία επισκόπηση του έργου που επιτρέπει στον χρήστη να αξιολογήσει την κατάσταση του έργου διευκολύνοντας την αλληλεπίδραση με τα δεδομένα του έργου.



Εικόνα 3.3: Κύριο παράθυρο



Figure 3.4: Γραμμή μενού



Εικόνα 3.5: Γραμμή εργαλείων

Η γραμμή εργαλείων (Εικόνα 3.5) αποτελείται από τα εξής εικονίδια:

- Ανοιγμα της διαχείρισης δεδομένων
- Επεξεργασία σχετικών αντικειμένων για υπολογισμό
- Ημερομηνία/Ωρα υπολογισμού
- Επεξεργασία
- Επαλήθευση δεδομένων
- Υπολογισμός ροής φορτίου
- Υπολογισμός βραχυκυκλώματος
- Επεξεργασία βραχυκυκλωμάτων
- Εκτέλεση σεναρίων
- Ανάλυση υπολογισμού εξόδου
- Τεκμηρίωση δεδομένων συσκευής
- Σύγκριση αποτελεσμάτων
- Επεξεργασία σύγκρισης αποτελεσμάτων
- Ενημέρωση βάσης δεδομένων
- Αποθήκευση σεναρίου λειτουργίας
- Διακοπή
- Επαναφορά υπολογισμού
- Ακύρωση εντολής
- Ρυθμίσεις χρήστη
- Μεγιστοποίηση παραθύρου γραφικών
- Μεγιστοποίηση παραθύρου εξόδου
- Αλλαγή εργαλειοθήκης

3.4.2. Εκτέλεση υπολιγισμού ροής φορτίου

Για να ξεκινήσει ο υπολογισμός ροής φορτίου πατάμε το εικονίδιο \clubsuit ή επιλέγουμε Calculation \rightarrow Load Flow από το κύριο μενού και εμφανίζεται το παρακάτω παράθυρο (Εικόνες 3.6 και 3.7).

Basic Options Calculation Method Execute Active Power Control Advanced Options (* AC Load Row, unbalanced, 3phase (ABC)) Cole Advanced Options (* AC Load Row, unbalanced, 3phase (ABC)) Cole Cole Outputs (* AC Load Row, unbalanced, 3phase (ABC)) Cole Cole Cole Outputs (* AC Load Row, unbalanced, 3phase (ABC)) (* Cole Cole	Load Flow Calculation - Study C	Cases\01_Base_Case\Load Flow Calculation.ComLdf	? ×
	Load Flow Calculation - Study C Basic Options Active Power Control Advanced Options Iteration Control Outputs Load/Generation Scaling Low Voltage Analysis Advanced Simulation Options	assex01_Base_Case\Load Flow Calculation.ComLdf Calculation Method C Ac Load Flow, unbalanced, positive sequence C Ac Load Flow, unbalanced, 3-phase (ABC) C DC Load Flow (mear) Reactive Power Control V Automatic Tap Adjust of Transformers Automatic Tap Adjust of Transformers Consider Reactive Power Linits Consider Reactive Power Linits Scaling Factor Temperature Dependency: Lne./Cable Resistances C	? X Execute Close Cancel
		Scaling Factor for Night Storage Heaters 100. %	

Εικόνα 3.6: Παράθυρο εντολών ροής φορτίου

Σε αυτό το παράθυρο υπάρχει πρόσβαση σε όλες τις επιλογές που σχετίζονται με την ανάλυση ροής φορτίου και δίνεται η δυνατότητα επιλογής στον χρήστη.



Εικόνα 3.7: Κύριο παράθυρο μετά από ανάλυση ροής φορτίου

3.4.3. Εκτέλεση υπολιγισμού βραχυκυκλώματος

Για να ξεκινήσει ο υπολογισμός βραχυκυκλώματος πατάμε το εικονίδιο ^ℓ ή επιλέγουμε Calculation → Short-Circuit από το κύριο μενού και εμφανίζεται το παρακάτω παράθυρο (Εικόνες 3.8 και 3.9). Η τιμή για το «Break Time» χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του ρεύματος ενός διακόπτη και έχει οριστεί στα 0.1 δευτερόλεπτα. Ενώ η τιμή «Fault Clearing Time» απαιτείται για το ισοδύναμο θερμικό ρεύμα (Ith) και έχει οριστεί στο 1 δευτερόλεπτο.

		2
Short-Circuit Calculation	n - Study Cases\01_Base_Case\Short-Circuit Calculation.ComShc	r x
Basic Options	Method IEC 60909 Published 2001	Execute
Advanced Options	Fault Type Single Phase to Ground	Close
Verification	Calculate Max. Short-Circuit Currents	Cancel
	Max. Voltage Tolerance for LV-Systems 6 💌 %	
	Short-Circuit Duration	Contents
	Break Time 0.1 s Used Break Time global 💌	
	Fault Clearing Time (Ith) 1. s	
	Fault Impedance	
	Presistance, Ri Jo. Orimi	
	Reactance, Ar ju. Onm	
	Fault Location	
	At User Selection	
	User Selection 150-33kV Offshore Station\Sub_A\A1	
	Show Output	
	Command Study Cases \01_Base_Case \Output of Results	
	Shows Fault Locations with Feeders	

Εικόνα 3.8: Παράθυρο εντολών βραχυκυκλώματος

Σε αυτό το παράθυρο υπάρχει πρόσβαση σε όλες τις επιλογές που σχετίζονται με την ανάλυση βραχυκυκλώματος και δίνεται η δυνατότητα επιλογής στον χρήστη.

	1							DIgS	ILENT	Proje	ct:		
								15.	1.6	Date:	11/20/2	023	
Fault Locat: Short-Circu	ions wi it Calc	th Feeder ulation /	s Method	: IEC 60	909		Single	Phase to	Ground	/ Max.	Short-Ci	.rcuit Cur	rrents
Asynchronou. Always C	s Motor onsider	s ed		Gr: Con 	id Identif Automatic nductor Te User Def:	fication c emperature ined	No	Short- Bre Fau c-Volt Use 	Circuit ak Time lt Clear age Fact r Define	Duratio ing Tim or d	n e (Ith)	0. 1. No	.10 s .00 s
Grid: 150-3	3kV Off	shore St	System S	Stage: 15	0-33kV Off	Esho				Annex	:	/ 1	
		rtd.V. [kV]	Vc [kV]	ltage [deg]	c- Factor	Sk" [MVA/MVA]	Ik' [kA/kA]	[deg]	ip [kA/k	A]	Ib [kA]	Sb [MVA]	EFF [-]
Sub_A													
	A B C	33.00	0.00 36.30 36.30	0.00 -150.00 150.00	1.10	0.09 MVA 0.00 MVA 0.00 MVA	0.00 kA 0.00 kA 0.00 kA	-88.97 0.00 0.00	0.0 0.0 0.0	1 kA 0 kA 0 kA	0.00 0.00 0.00	0.09 0.00 0.00	0.00 1.73 1.73
Line		Term_b			A B	0.49 MVA 0.51 MVA	0.03 kA 0.03 kA	-90.25 -90.01	0.0	6 kA 6 kA			
					С	0.51 MVA	0.03 kA	-89.93	0.0	6 kA			
Trf(10)		LV(10)			A B C	0.01 MVA 0.01 MVA 0.01 MVA	0.00 kA 0.00 kA 0.00 kA	96.60 -87.02 -79.92	0.0 0.0 0.0	0 kA 0 kA 0 kA			
 A1B1 		T_AC O	ffs Sub	_В	A B C	0.03 MVA 0.02 MVA 0.02 MVA	0.00 kA 0.00 kA	86.50 -90.74	0.0	0 kA 0 kA 0 kA			
NEC_A1					AB	0.53 MVA 0.53 MVA	0.03 kA 0.03 kA	90.00	0.0	6 kA 6 kA			
					С	0.53 MVA	0.03 kA	90.00	0.0	6 KA			

Εικόνα 3.9: Ανάλυση βραχυκυκλώματος που εμφανίζεται μετά την εκτέλεση

<u>Κεφάλαιο 4</u>

Προσομοιώσεις και αποτελέσματα

4.1. Μελέτη στο PowerFactory

Σκοπός της μελέτης είναι η σύγκριση μεταξύ δικτύων εναλλασσόμενου ρεύματος υψηλής τάσης και συνεχούς ρεύματος υψηλής τάσης, ως προς τα μεταβατικά φαινόμενα, τη ροή φορτίου και τα σφάλματα.

Η **ανάλυση ροής** φορτίου γίνεται σε συνθήκες μόνιμης κατάστασης και υπολογίζονται η ενεργός και η άεργος ισχύς, οι ενεργές τιμές τάσης, οι ενεργές τιμές ρεύματος, οι απώλειες και φόρτιση γραμμών μεταφοράς.

Η ανάλυση βραχυκυκλώματος γίνεται στους ζυγούς του δικτύου σε συνθήκες μόνιμης κατάστασης και υπολογίζονται η αρχική ισχύς βραχυκυκλώματος (S_{kss}), το αρχικό ρεύμα βραχυκυκλώματος (I_{kss}) και το μέγιστο ρεύμα βραχυκυκλώματος (i_p).

Η ανάλυση έκτακτης ανάγκης (contingency analysis) γίνεται στις γραμμές μεταφοράς και τις γεννήτριες, ώστε να μελετηθεί η μέγιστη ικανότητα μεταφοράς ισχύος και μέγιστη φόρτιση του συστήματος, σε περίπτωση βλάβης στο σύστημα.

4.2. Συστήματα μελέτης

Το σύστημα που χρησιμοποιήθηκε για τις προσομοιώσεις είναι ένα υποθαλάσσιο σύστημα μεταφοράς εναλλασσόμενου ρεύματος, συνολικής παραγωγής ισχύος 2.714 MVA και κατανάλωσης 1.499,8 MW και 375 Mvar, όπως φαίνεται στην εικόνα 4.1. Οι παράμετροι των στοιχείων εμφανίζονται στις εικόνες 4.2 - 4.29.

<u>Παραγωγή</u>:

- ΡΗ (φωτοβολταϊκό): 180 MVA, 15,9kV, συντελεστής ισχύος: 1
- SG1 (σύγχρονη γεννήτρια): 450 MVA, 16,5 kV, συντελεστής ισχύος 0,9
- SG2 (σύγχρονη γεννήτρια): 450 MVA, 16,5 kV, συντελεστής ισχύος 0,9
- SG3 (σύγχρονη γεννήτρια): 592 MVA, 18 kV, συντελεστής ισχύος 0,9
- SG4 (σύγχρονη γεννήτρια): 592 MVA, 18 kV, συντελεστής ισχύος 0,9
- SG5 (σύγχρονη γεννήτρια): 450 MVA, 16,5 kV, συντελεστής ισχύος 0,9

<u>Κατανάλωση</u>:

Load 1 (φορτίο): 418.6 MW 104.6 Mvar

Load 2 (φορτίο): 61 MW 15.3 Mvar

Load 3 (fortío): 348.8 MW 87.2 Mvar

Load 4 (φορτίο): 348.8 MW 87.2 Mvar

Load 5 (*poptio*): 261.6 MW 65.4 Mvar

Load 6 (φορτίο): 61 MW 15.3 Mvar

<u>Γραμμές μεταφοράς AC</u>:

400 kV, R_L=0.023 Ω /km, X_L=0.25 Ω /km, R₀=0.2 Ω /km, X₀=1 Ω /km.

Line 1 (γραμμή): 100 km

Line 2 (γραμμή): 100 km

Line 3 (γραμμή): 110 km

Line 4 (γραμμή): 200 km

Line 5 (γραμμή): 200 km

<u>Ζυγοί</u>:

Οι ζυγοί (Busbars) BB1, BB2, BB3, BB4 έχουν τάση 400kV.

Οι ζυγοί μέσης τάσης (Internal Nodes) IN1, IN2, IN5 έχουν τάση 16.5kV, οι IN3, IN4 έχουν τάση 18kV και ο IN έχει τάση 15.9kV.



Εικόνα 4.1: Σύστημα ΗVAC

Αναλυτικά στοιχεία γεννητριών και φορτίων:

<u>Φωτοβολταϊκό</u>:

Στις εικόνες 4.2 και 4.3 φαίνονται τα βασικά στοιχεία και τα στοιχεία ροής φορτίου του φωτοβολταϊκού. Το φωτοβολταϊκό είναι τριφασικής τεχνολογίας, έχει ονομαστική φαινόμενη ισχύ 180MVA και σενάριο ότι παράγει ενεργό ισχύ 120MW.

Name PH		
Terminal 💌 🔿 🖸	arid\IN 15.9kV\Cub_1	IN 15.9kV
Zone 🔸		
Area 🏓		
Out of Service		
Technology	3PH 💌	
Category	Photovoltaic 💌	
Number of		
parallel Machines	1	
Ratings		_
Nominal Apparent I	Power 180. MVA	
Power Factor	1.	
Model		

	ine		Local Voltage Cont	roller	Power Factor	-
			Corresponding Bus	Type:	PQ	
xternal Secondary (Controller	▼ →				
xternal Station Cont	troller	▼ →				
Dispatch			Capability C	urve		
Input Mode	Default	•				
Active Power	120.	MW	qmin/-1.	00 1.00	w 9	max/ 1.00
Reactive Power	0	Myar		0.66	87 (0.00/ 0.87)	1.00
Voltage	1		/	0.33	33	\backslash
ónale	0	dea				
Droop	1	- 2	-1.000	-0.333	0.333	1.000.00
Dioop	1	^o				
Prim. Frequency Bia	as 0.	MW/Hz				
Prim. Frequency Bi Reactive Power Op Capability Curve Min1. Max. 1.	as 0.	MW/Hz its -180. [180.	Mvar Scaling F Mvar Scaling F	actor (min.) actor (max.)	100.	x x
Prim. Frequency Bit Reactive Power Op Capability Curve Min. 1. Max. 1. Active Power Oper	as 0. perational Lim P.u. p.u. p.u. ational Limits	MW/Hz its -180. [180.	Mvar Scaling F Mvar Scaling F	actor (min.) actor (max.)	100. 100.	% %
Prim. Frequency Bi Reactive Power Op Capability Curve Min. 1. Max. 1. Active Power Oper Min. 0.	as 0. perational Lim P.U. p.U. p.U. MW	MW/Hz its -180. [180.	Mvar Scaling F Mvar Scaling F	actor (min.) actor (max.)	100. 100.	2
Prim. Frequency Bit Reactive Power Op Capability Curve Min. [-1. Max. [1. Active Power Open Min. [0. Max. [9999.	as 0. perational Lim V MW p.u. p.u. p.u. MW MW	MW/Hz its -180. [180.	Mvar Scaling F Mvar Scaling F	actor (min.) actor (max.) Pn	100. 100.	2
Prim. Frequency Bia Reactive Power Op Capability Curve Min. [-1. Max.] Active Power Open Min. [0. Max.] 9999. Active Power: Rati	as 0. perational Lim p.u. p.u. p.u. ational Limits MW MW	MW/Hz its [-180. [180.	Mvar Scaling F Mvar Scaling F	actor (min.) actor (max.) Pn	100. 100. 180. MW	% %

Εικόνα 4.2: Βασικά στοιχεία φωτοβολταϊκού

Εικόνα 4.3: Στοιχεία ροής φορτίου φωτοβιλταϊκού

<u>Γεννήτρια 1</u>:

Στις εικόνες 4.4, 4.5, 4.6 και 4.7 φαίνονται τα βασικά στοιχεία, τα στοιχεία ροής φορτίου και τα στοιχεία βραχυκυκλώματος της σύγχρονης γεννήτριας 1 (SG1). Η γεννήτρια 1 έχει ονομαστική φαινόμενη ισχύ 450MVA, ονομαστική τάση 16.5kV, συντελεστή ισχύος 0.9 και σενάριο ότι παράγει ενεργό ισχύ 340MW. Οι αντιδράσεις σύγχρονης μηχανής είναι xd = 1.82 α.μ. (ανά μονάδα) και xq = 1.35 α.μ. και η αντίσταση στάτη είναι 0.001 α.μ..

Spinning if circuit-breaker is open Reference Machine	Mode of Local Voltage Controller Power Factor
Corresponding Bus Type: PV External Secondary Controller • • External Station Controller • • Dispatch Input Mode Default •	Capability Curve
Active Power 340. MW Reactive Power 0. Mvar Votage 1.01 p.u. Angle 0. deg Prim. Frequency Bias 500. MW/Hz	qmin-100 1000 qmax 100 0,000 x 1000 0,000
Mass Image: Power Operational Limits Capability Curve ▼ ● □ Use limits specified in type Min. -1. p.u. Image: Power Operational Limits	Mvar Scaling Factor (min.) 100. % Mvar Scaling Factor (max.) 100. %
Active Power Operational Limits Min. 50. Max. 9999.	Pn 405. MW
Active Power: Rating Max. 405. MW Rating Factor	or 1. Pn 405. MW

Name Synchronou	s Machine 1	
Nominal Apparent Power	450. MVA	
Nominal Voltage	16.5 kV	
Power Factor	0.9	
Connection	YN 💌	

Εικόνα 4.5: Βασικά στοιχεία της γεννήτριας 1

Εικόνα 4.4: Στοιχεία ροής φορτίου της γεννήτριας 1

Synchronous Re	actances					
xd	1.82	p.u.				
xq	1.35	p.u.				
Reactive Power	Limits	-				
Minimum Value	-0.5	р.и. 🗖				
Maximum Value	0.5	p.u.				
Zero Sequence	Data		- Negative Sequer	nce Data		
Reactance x0	0.1	p.u.	Reactance x2	0.2	p.u.	
Resistance r0	0.	p.u.	Resistance r2	0.	p.u.	

Εικόνα 4.6: Στοιχεία ροής φορτίου της γεννήτριας 1

turated value valu
tor Resistance
r
Negative Sequence Data Negative Sequence Data acclance x0 0.1 p.u. Resistance r2 0.2 p.u. Resistance r2 0.2 p.u. range fed short-circuit crowed of short-circuit 12 p.u.
actance x0 0.1 p.u. Restance x2 0.2 p.u. residence r0 0. p.u. Resistance r2 0. p.u. range fed short-circut
sistance r0 0. p.u. Resistance r2 0. p.u.
r single fed short-circuit

Εικόνα 4.7: Στοιχεία βραχυκυκλώματος της γεννήτριας 1

<u>Γεννήτρια 2</u>:

Στις εικόνες 4.8, 4.9, 4.10 και 4.11 φαίνονται τα βασικά στοιχεία, τα στοιχεία ροής φορτίου και τα στοιχεία βραχυκυκλώματος της σύγχρονης γεννήτριας 2 (SG2). Η γεννήτρια 2 έχει ονομαστική φαινόμενη ισχύ 450MVA, ονομαστική τάση 16.5kV, συντελεστή ισχύος 0.9 και σενάριο ότι παράγει ενεργό ισχύ 350MW. Οι αντιδράσεις σύγχρονης μηχανής είναι xd = 1.82 α.μ. (ανά μονάδα) και xq = 1.35 α.μ. και η αντίσταση στάτη είναι 0.001 α.μ..



Εικόνα 4.8: Στοιχεία ροής φορτίου της γεννήτριας 2

Nominal Apparent Power 450. MVA Nominal Voltage 165 kV Power Factor 0.9 Connection YN Y	1.4		
Nominal Voltage 16.5 kV Power Factor 0.3 Connection YN T	Nominal Apparent Power	450.	MVA
Power Factor 0.9 Connection YN	Nominal Voltage	16.5	kV
Connection Y11 💌	Power Factor	0.9	
	Connection	YN 💌	

Εικόνα 4.9: Βασικά στοιχεία της γεννήτριας 2

Synchronous Re	actances					
xd	1.82	p.u.				
xq	1.35	p.u.				
Reactive Power	Limits	-				
Minimum Value	-0.5	p.u. 🗖				
Maximum Value	0.5	p.u.				
Zero Sequence	Data		-Negative Seque	nce Data		
Reactance x0	0.1	p.u.	Reactance x2	0.2	p.u.	
Resistance r0	0.	p.u.	Resistance r2	0.	p.u.	

Εικόνα 4.10: Στοιχεία ροής φορτίου της γεννήτριας 2

turated value valu
ator Resistance
r 0.001 p.u. exo Sequence Data exotance x0 0.1 p.u. Reactance x2 0.2 p.u. Resistance r2 0. p.u. r angle fed short circut exopocal of short circut ratio (xdtat) 1.2 p.u.
Negative Sequence Data Negative Sequence Data exclame x0 0.1 p.u. reside fed abot circuit reingued of abot circuit ratio (xdeat) 1.2 p.u.
eactance x0 0.1 p.u. Reactance x2 0.2 p.u. esistance r0 0. p.u. Resistance r2 0. p.u. rsingle fed short-circuit responsed if short-circuit ratio (xdisat) 1.2 p.u. p.u.
esistance r0 0. p.u. Resistance r2 0. p.u. r single fed short-circuit sciprocal of short-circuit ratio (xdisat) 1.2 p.u.
rr single fed short-circuit sciprocal of short-circuit ratio (xdsat)

Εικόνα 4.11: Στοιχεία βραχυκυκλώματος της γεννήτριας 2

<u>Γεννήτρια 3</u>:

Στις εικόνες 4.12, 4.13, 4.14 και 4.15 φαίνονται τα βασικά στοιχεία, τα στοιχεία ροής φορτίου και τα στοιχεία βραχυκυκλώματος της σύγχρονης γεννήτριας 3 (SG3). Η γεννήτρια 3 έχει ονομαστική φαινόμενη ισχύ 592MVA, ονομαστική τάση 18kV, συντελεστή ισχύος 0.9 και σενάριο ότι παράγει ενεργό ισχύ 266.6133MW. Οι αντιδράσεις σύγχρονης μηχανής είναι xd = 2.30 α.μ. (ανά μονάδα) και xq = 2 α.μ. και η αντίσταση στάτη είναι 0.001 α.μ..



Εικόνα 4.12: Στοιχεία ροής φορτίου της γεννήτριας 3

Name Syn	nchronous M	Nachine 3		
Nominal Apparent	Power	592.	MVA	
Nominal Voltage		18.	kV	
Power Factor		0.9		
Connection		YN 🔻		

Εικόνα 4.13: Βασικά στοιχεία της γεννήτριας 3

saturateu value xu sat	10.2	p.u.		- Induction of the	
Stator Resistance		_ +	T		
str	0.001	p.u.	_		
Zero Sequence Data			Negative Seque	nce Data	
Reactance x0	0.1	p.u.	Reactance x2	0.2	p.u.
Resistance r0	0.	p.u.	Resistance r2	0.	
Reciprocal of short-circi	uit ratio (xdsat)	l	1.2 p.u. Salient Pole Series 1	•	

Εικόνα 4.14: Στοιχεία ροής φορτίου της γεννήτριας 3

Εικόνα 4.15: Στοιχεία βραχυκυκλώματος της γεννήτριας 3

<u>Γεννήτρια 4</u>:

Στις εικόνες 4.16, 4.17, 4.18 και 4.19 φαίνονται τα βασικά στοιχεία, τα στοιχεία ροής φορτίου και τα στοιχεία βραχυκυκλώματος της σύγχρονης γεννήτριας 4 (SG4). Η γεννήτρια 4 έχει ονομαστική φαινόμενη ισχύ 592MVA, ονομαστική τάση 18kV, συντελεστή ισχύος 0.9 και σενάριο ότι παράγει ενεργό ισχύ 320MW. Οι αντιδράσεις σύγχρονης μηχανής είναι xd = 2.30 α.μ. (ανά μονάδα) και xq = 2 α.μ. και η αντίσταση στάτη είναι 0.001 α.μ..

Spinning if circuit-b Reference Machin Corresponding Bus Typ	reakerisop e be: PV	en	Mode of Local Voltage Controller C Power Factor C Voltage
External Secondary Co External Station Contro Dispatch Input Mode Active Power Reactive Power Voltage Angle Prim. Frequency Blas Reactive Power Ope Comp	Introller		Capability Curve
Use limits specifie Min. 1. Max. 1.	p.u.	-592. 592.	Mvar Scaling Factor (min.) 100. % Mvar Scaling Factor (max.) 100. %
Active Power Operat Min. 50. Max. 9999.	MW MW		Pn 532.8 MW
Active Power: Rating Max. 532.8	MW	Rating Factor	1. Pn 532.8 MW

Εικόνα 4.16: Στοιχεία ροής φορτίου της γεννήτριας 4

Name Synchron	ious Machine 4		
Nominal Apparent Power	592.	MVA	
Nominal Voltage	18.	kV	
Power Factor	0.9		
Connection	YN 💌		

Εικόνα 4.17: Βασικά στοιχεία της γεννήτριας 4

Synchronous Reactances ad 23 p.u. xq 2 p.u. Advective Power Lints Minimum Value 0.5 p.u. Maximum Value 0.5 p.u. Zero Sequence Data Reactance x0 0.1 p.u. Reactance x2 0.2 p.u. Resistance r2 0. p.u.						
xd 2.3 p.u. Reactive Power Limits Minimum Value 0.5 p.u. Maximum Value 0.5 p.u. Reconsequence Data Resolutione Data Resolutione NO 0.1 p.u. Resistance xO 0.1 p.u. Resistance xO 0.1 p.u. Resistance r2 0. p.u.	Synchronous Re	actances				
xq 2 pu. Reactive Power Limits Maximum Value 05 pu. Zero Sequence Data Reactance x0 01 pu. Resistance r0 01 pu. Resistance r2 02 pu. Resistance r2 02 pu.	xd	2.3	p.u.			
Reactive Power Limits	xq	2.	p.u.			
Minimum Value 0.5 p.u. Macmum Value 0.5 p.u. Zero Sequence Data Reactance x0 0.1 p.u. Resistance x2 0.2 p.u. Resistance r2 0. p.u.	Reactive Power	Limits	a			
Maximum Value 0.5 p.u. Zero Sequence Data Resistance x0 0.01 p.u. Resistance x2 0.2 p.u. Resistance r2 0. p.u.	Minimum Value	-0.5	р.и. 🗖			
Zero Sequence Data Reactance x0 0.1 p.u. Resistance r0 0.1 p.u. Resistance r2 0. p.u.	Maximum Value	0.5	p.u.			
Reactance x0 0.1 p.u. Resistance r0 0. p.u. Resistance r2 0. p.u.	Zero Sequence [Data		Negative Seque	nce Data	
Pesistance r0 0. p.u. Pesistance r2 0. p.u.	Reactance x0	0.1	p.u.	Reactance x2	0.2	p.u.
	Resistance r0	0.	p.u.	Resistance r2	0.	p.u.

Εικόνα 4.18: Στοιχεία ροής φορτίου της γεννήτριας 4

Ator Resistance tr			_		Pendanasa	
ator Resistance	aturated value xd"s	at 0.2	p.u.	i ik insteau or	neaularices	
Image: sectance x0 0.1 p.u. restance x0 0.1 p.u. Reactance x2 0.2 p.u. residance r0 0. p.u. Readtance r2 0. p.u. residance r1 1.2 p.u. p.u. restrance r2 0. p.u.	Stator Resistance					
aro Sequence Data Negative Sequence Data eactance x0 0.1 p.u. estance r0 0. p.u. Reactance x2 0.2 p.u. range fed short-circuit record at short-circuit ratio (rdsst) 1.2 p.u. column Turn (Frage) Saleert Pole Sected 1 1	str	0.001	p.u			
eadance x0 0.1 p.u. Readance x2 0.2 p.u. esistance r0 0. p.u. Residence x2 0.2 p.u. range fed short-circuit p.u. Residence x2 0.2 p.u. eclorecal of short-circuit p.u. P.u. P.u. P.u. eclorecal of short-circuit/ratio (videat) T.2 p.u. P.u.	Zero Sequence Data			Negative Seque	nce Data	
esistance r0 0. p.u. Resistance r2 0. p.u. vr angle fed short-circuit eclorecial of short-circuit ratio (videat) 1.2 p.u. eclorecial of short-circuit ratio (videat) 5.5 5.5 1.2 p.u.	Reactance x0	0.1	p.u.	Reactance x2	0.2	p.u.
vr single fed short-circuit.	Resistance r0	0.	p.u.	Resistance r2	0.	p.u.
				,		

Εικόνα 4.19: Στοιχεία βραχυκυκλώματος της γεννήτριας 4

<u>Γεννήτρια 5</u>:

Στις εικόνες 4.20, 4.21, 4.22 και 4.23 φαίνονται τα βασικά στοιχεία, τα στοιχεία ροής φορτίου και τα στοιχεία βραχυκυκλώματος της σύγχρονης γεννήτριας 5 (SG5). Η γεννήτρια 5 έχει ονομαστική φαινόμενη ισχύ 450MVA, ονομαστική τάση 16.5kV, συντελεστή ισχύος 0.9 και σενάριο ότι παράγει ενεργό ισχύ 100MW. Οι αντιδράσεις σύγχρονης μηχανής είναι xd = 1.82 α.μ. (ανά μονάδα) και xq = 1.35 α.μ. και η αντίσταση στάτη είναι 0.001 α.μ..



Εικόνα 4.20: Στοιχεία ροής φορτίου της γεννήτριας 5

Name Sy	ynchronous I	Machine 2]
Nominal Apparent	t Power	450.	MVA	
Nominal Voltage		16.5	kV	
Power Factor		0.9		
Connection		YN 🔻		

Εικόνα 4.21: Βασικά στοιχεία της γεννήτριας 5

xd 182 р.υ. xq 135 р.υ. Reactive Power Links Minimum Value 05 р.υ. Zero Sequence Data Reactance x0 0.1 р.υ. Resistance r0 0. р.υ. Resistance r2 0. р.υ.	Synchronous Re	actances				
xq 135 p.u. Reactive Power Limits Minimum Value 05 p.u. Maximum Value 05 p.u. Zero Sequence Data Reactance x0 0.1 p.u. Resistance r2 0.2 p.u. Resistance r2 0. p.u.	xd	1.82	p.u.			
Reactive Power Limits	xq	1.35	p.u.			
Minimum Value 0.5 p.u. 2 Maximum Value 0.5 p.u. 2 Zero Sequence Data	Reactive Power	Limits	-			
Maximum Value 0.5 p.u. Zero Sequence Data Reactance x0 01 p.u. Resistance r0 0. p.u. Resistance r2 0. p.u.	Minimum Value	-0.5	p.u. 💌			
Zero Sequence Data Participation Negative Sequence Data Reactance x0 0.1 p.u. Resistance r0 0. p.u. Resistance r2 0. p.u.	Maximum Value	0.5	p.u.			
Reactance x0 0.1 p.u. Reactance x2 0.2 p.u. Resistance r0 0. p.u. Resistance r2 0. p.u.	Zero Sequence	Data		-Negative Seque	nce Data	
Resistance r0 0. p.u. Resistance r2 0. p.u.	Reactance x0	0.1	p.u.	Reactance x2	0.2	p.u.
	Resistance r0	0.	p.u.	Resistance r2	0.	p.u.

Subtransient Reactance ady-State Shc. Current saturated value xd"sat 0.2 p.u. Ik instead of Reactances Stator Resistance ۲ 0.001 p.u. Zero Sequence Data nce Data Reactance x0 Reactance x2 0.2 p.u. Resistance r0 0 D.U. Resistance r2 0. For single fed short-circuit ciprocal of short-circuit ratio (xdsat) Machine Type IEC909/IEC60909 Salient Pole Series 1 💌

Εικόνα 4.22: Στοιχεία ροής φορτίου της γεννήτριας 5 Φορτίο 1:

Εικόνα 4.23: Στοιχεία βραχυκυκλώματος της γεννήτριας 5

Στην εικόνα 4.24 φαίνονται τα στοιχεία ροής φορτίου για το φορτίο 1. Καταναλώνει ενεργό ισχύ 418.56MW και έχει συντελεστή ισχύος 0.97.

Input Mode	P, cos(phi)	-
Balanced/Unbalanced	Balanced	•
Operating Point		Actual Values
Active Power	418.56 MW	418.56 MW
Power Factor	0.9701425 ind. 💌	0.9701425
Voltage	1. p.u.	
Scaling Factor	1.	1.
Adjusted by Load	Scaling Zone Scalin	ig Factor: 1.

Εικόνα 4.24: Στοιχεία ροής φορτίου για το φορτίο 1

<u>Φορτίο 2</u>:

Στην εικόνα 4.25 φαίνονται τα στοιχεία ροής φορτίου για το φορτίο 2. Καταναλώνει ενεργό ισχύ 61.04MW και έχει συντελεστή ισχύος 0.97.

Input Mode	P, cos(phi)	•	
Balanced/Unbalanced	Balanced	-	
Operating Point			Actual Values
Active Power	61.04 M	W	61.04 MW
Power Factor	0.9701425 ir	nd. 🔻	0.9701425
Voltage	1. p.	u.	
Scaling Factor	1.		1.
Adjusted by Load	Scaling	Zone Scaling Factor:	1.

Εικόνα 4.25: Στοιχεία ροής φορτίου για το φορτίο 2

<u>Φορτίο 3</u>:

Στην εικόνα 4.26 φαίνονται τα στοιχεία ροής φορτίου για το φορτίο 3. Καταναλώνει ενεργό ισχύ 348.80MW και έχει συντελεστή ισχύος 0.97.

Input Mode	P, cos(ph	i) 🔽	
Balanced/Unbalanced	Balanced	•	
Operating Point			Actual Values
Active Power	348.8	MW	348.8 MW
Power Factor	0.9701425	ind. 💌	0.9701425
Voltage	1.	p.u.	
Scaling Factor	1.		1.
Adjusted by Load	Scaling	Zone Scaling Factor:	1.

Εικόνα 4.26: Στοιχεία ροής φορτίου για το φορτίο 3

Στην εικόνα 4.27 φαίνονται τα στοιχεία ροής φορτίου για το φορτίο 4. Καταναλώνει ενεργό ισχύ 348.80MW και έχει συντελεστή ισχύος 0.97.

Input Mode	P, cos(ph	i) 🔻	
Balanced/Unbalanced	Balanced	•	
Operating Point			Actual Values
Active Power	348.8	MW	348.8 MW
Power Factor	0.9701425	ind. 💌	0.9701425
Voltage	1.	p.u.	
Scaling Factor	1.		1.
Adjusted by Load	Scaling	Zone Scaling Factor:	1.

Εικόνα 2.27: Στοιχεία ροής φορτίου για το φορτίο 4

<u>Φορτίο 5</u>:

Στην εικόνα 4.28 φαίνονται τα στοιχεία ροής φορτίου για το φορτίο 5. Καταναλώνει ενεργό ισχύ 261.6MW και έχει συντελεστή ισχύος 0.97.

Input Mode	P, cos(phi) 💌	
Balanced/Unbalanced	Balanced	•	
Operating Point			Actual Values
Active Power	261.6	MW	261.6 MW
Power Factor	0.9701426	ind. 💌	0.9701426
Voltage	1.	p.u.	
Scaling Factor	1.		1.
Adjusted by Load	Scaling	Zone Scaling Fact	or: 1.

Εικόνα 4.28: Στοιχεία ροής φορτίου για το φορτίο 5

<u>Φορτίο 6</u>:

Στην εικόνα 4.29 φαίνονται τα στοιχεία ροής φορτίου για το φορτίο 6. Καταναλώνει ενεργό ισχύ 61.04MW και έχει συντελεστή ισχύος 0.97.

Input Mode	P, cos(phi)	•	
Balanced/Unbalanced	Balanced	•	
Operating Point			Actual Values
Active Power	61.04 N	1W	61.04 MW
Power Factor	0.9701425	ind. 💌	0.9701425
Voltage	1. p	.u.	
Scaling Factor	1.		1.
Adjusted by Load	Scaling	Zone Scaling Factor:	1.

Εικόνα 4.29: Στοιχεία ροής φορτίου για το φορτίο 6

Για τη συγκριτική μελέτη δικτύων, στο σύστημα εναλλασσόμενου ρεύματος εφαρμόστηκαν μετατροπές.

Στην πρώτη περίπτωση αντικαταστάθηκαν οι γραμμές μεταφοράς Line 4 και Line 5, με διπολικό σύστημα συνεχούς ρεύματος με μετατροπείς PWM, τύπου HVDC-VSC, εικόνα 4.30.

Στη δεύτερη περίπτωση αντικαταστάθηκαν οι γραμμές μεταφοράς Line 4 και Line 5, με διπολικό σύστημα συνεχούς ρεύματος με ανορθωτή και αντιστροφέα, τύπου HVDC-LCC, εικόνα 4.37.

<u>Γραμμές μεταφοράς DC</u>:

500 kV, R_L =0.01 Ω /km, X_L =0.1 Ω /km.

DC Line 1 (γραμμή): 200 km

DC Line 2 (γραμμή): 200 km

HVDC-VSC 1:

Στο σύστημα HVDC-VSC χρησιμοποιούνται μετατροπείς PWM. Μετατρέπουν την εναλλασσόμενη τάση 400kV σε συνεχή τάση 500kV και αντίστροφα με διπολική συνδεσμολογία. Οι παράμετροι εμφανίζονται στις εικόνες 4.31 – 4.36.



Εικόνα 4.30: Σύστημα HVDC-VSC 1

Αναλυτικά στοιχεία τεχνολογίας VSC:

Οι μετατροπείς 1 και 2 είναι τύπου PWM, μετατρέπουν εναλλασσόμενη τάση 400kV σε συνεχή τάση 500kV με φαινόμενη ισχύ 400MVA, εικόνες 4.31 – 4.34.

Μετατροπέας 1:

Name PWM Conve	rter 1	
Terminal AC 🛛 🔫 🗕 Grid	BB3 400kV\Cub_5	BB3 400kV
Terminal DC+ 💌 🔸 Grid	IN1 250kV DC\Cub_3	IN1 250kV DC
Terminal DC- Grid Zone Terminal AC Area Terminal AC	IN3 250kV DC\Cub_2	IN3 250kV DC
Out of Service Number of parallel Converters	1	
Ratings Rated AC-Voltage Rated DC-Voltage (DC) Rated Power	400. kV 500. kV 400. MVA	Modulation © Sinusoidal PWM C Rectangular PWM C No Modulation
Series Reactor Short Circuit Impedance Copper Losses	15. % 200. kW	No-Load Losses 0. kW

Εικόνα 4.31: Βασικά στοιχεία μετατροπέα 1

Μετατροπέας 2:

Name PWM Conve	arter 2	
Terminal AC 💌 🔸 Grid	BB4 400kV\Cub_4	BB4 400kV
Terminal DC+ 💌 🔶 Grid	VIN2 250kV DC\Cub_1	IN2 250kV DC
Terminal DC- 💌 🔶 Grid	VN4 250kV DC\Cub_1	IN4 250kV DC
Zone Terminal AC	• •	
Area Terminal AC	· · ·	
Cut of Service		
Number of		
parallel Converters	1	
Ratings		Modulation
Rated AC-Voltage	400. kV	 Sinusoidal PWM
Rated DC-Voltage (DC)	500. kV	C Rectangular PWM
Rated Power	400. MVA	No Modulation
Series Reactor		
Short Circuit Impedance	10. %	No-Load Losses 0. kW
	100 kW	

Εικόνα 4.33: Βασικά στοιχεία μετατροπέα 2

IN2 250kV DC

IN1 250kV DC

10. Oh

<u>Γραμμή DC 1</u>:

DC Line

Terminal i Terminal i

2

G

Cable

-|+|

Type Terminal

Terminal j

Cut of Service

parallel Lines

Length of Line Derating Factor

Laying

roe of Line

Line Model

C Lumped Parameter (PI)

Distributed Parameter

Sections/Line Loads

Parameters Thermal Rating

Zone

Area

· + ·

•

	1			
DC Voltage Setpoint	1.	p.u.		
Reactive Power Setpoint	0.	Mva	-	
Controlled Flow	-	•		
External Station Controller	-	•		
				Capability Curve
Reactive Power Limits				
Capability Curve 🛛 💌	٠			qmin/-1.00 10 9 qmax/ 1.00
Min. 1.	p.u.	-400.	Mvar	1.00
Max. 1.	p.u.	400.	Mvar	0.5-
Scaling Factor (min.)		100.	7.	0.00/(0.00)
Scaling Factor (max.)		100.	%	-10 -0.5 0.0 0.5 10
Setpoint for DC Load Flo	w			-0.5-
Active Power Setpoint	JO.	MVV		pmin
Controlled Days	-			-1.00

Εικόνα 3.32: Στοιχεία ροής φορτίου μετατροπέα 1

Control Martin

0.1.111.1	M. D.	7	
Control Mode	Vac-phi	<u> </u>	
AC Voltage Setpoint	1. p	ш.	
Phase Setpoint	0. d	eg	
Controlled Node (AC)	▼ +		
External Station Controller	▼ +		
- Pasatius Pause Limita			Capability Curve
Creative Fower Links	a 1		
Capability Curve •	· · · ·		qmin/-1.00 10 qmax/-1.00 pmax
Min. 1.	p.u. -400.	Mvar	1.00
Max. 1.	p.u. 400.	Mvar	0.5
Scaling Factor (min.)	100.	%	0.00/0.00)
Scaling Factor (max.)	100.	%	-10 -0.5 00 0.5 10
			-0.5
Setpoint for DC Load How	<i>"</i>		
Active Power Setpoint	JO. N	IW	pmin 100
Controlled Row	•		1.00

Εικόνα 4.34: Στοιχεία ροής φορτίου μετατροπέα 2

<u>Γραμμή DC 2</u>:

Number of		Hesulting Values	
parallel Lines	2	Rated Current (act.) Pos. Sen. Impedance. Z1	4. kA 10.04988.0hm
Parameters Thermal Rating Length of Line Derating Factor Laying	▼	Pos. Seq. Impedance, Angle Pos. Seq. Resistance, R1 Pos. Seq. Resistance, R1 Zero Seq. Resistance, R0 Zero Seq. Resistance, R0 Earth-Fault Current, Ice Earth-Fault Current, Ice Earth Factor, Magnitude Farth Factor, Magnitude	84.28941 deg 1. Ohm 10. Ohm 0. Ohm 0. A 0.3333333 180. deg
ype of Line	Cable		
Line Model			
Cumped Paramet	er (PI)		
C Distributed Param	eter		
Sections/Line	Loads		

Οι γραμμές μεταφοράς έχουν μήκος 200km και τάση 500kV, εικόνες 4.35 - 4.36.

Εικόνα 4.35: Βασικά στοιχεία γραμμής DC 1

Εικόνα 4.36: Βασικά στοιχεία γραμμής DC 2

HVDC-LCC 1:

Στο σύστημα HVDC-LCC χρησιμοποιούνται ανορθωτές και αντιστροφείς. Μετατρέπουν την εναλλασσόμενη τάση 400kV σε συνεχή τάση 521.78kV και αντίστροφα με διπολική συνδεσμολογία. Οι παράμετροι εμφανίζονται στις εικόνες 4.38 – 4.43.



Αναλυτικά στοιχεία τεχνολογίας LCC:

Ανορθωτής:

Ο ανορθωτής μετατρέπει εναλλασσόμενη τάση 400kV σε συνεχή τάση 521.7833kV, εικόνες 4.38 – 4.39.

Firing Angle (alpha-)Control		
Control-Characteristic	Vdc	•
Voltage Setpoint	1.	p.u.
Automatic Firing Angle Control		
Actual Firing Angle	15.	deg
Minimum Firing Angle	0.	deg
Maximum Firing Angle	180.	deg
Minimum Extinction Angle	0.	deg
Converter Transformer		
Tap-Changer	Fixed Tap	-
Actual Winding Ratio	1.	p.u.
Commutation Reactance	0.	Ohm
Phase Shift	0.	*30deg
Setpoint for DC Load Flow		

Name Rectifier]
Ratings			J
Rated AC Voltage	400.	kV	-
Rated DC-Voltage (DC)	521.7833	kV	
Rated Active Power	1043.567	MW	
Rated DC-Current	2.	kA	
Nominal Turns-Ratio (t2/t1)	1.		
Nominal Firing Angle	15.	deg	
Nominal Firing Angle Diode-/Thyristor Converter Thyristor C Diode	15.	deg	
Nominal Firing Angle Diode-/Thyristor Converter Thyristor Diode Converter Transformer	15.	deg	
Nominal Firing Angle Diode / Thyristor Converter Thyristor Diode Converter Transformer U Bult-In Transformer	15.	deg	
Nominal Fring Angle Diode / Thyristor Converter Thyristor Thyristor Diode Converter Transformer Diult-In Transformer Minimum Turns-Ratio	0.9	p.u.	

Εικόνα 4.38: Στοιχεία ροής φορτίου ανορθωτή

Εικόνα 4.39: Βασικά στοιχεία ανορθωτή

Αντιστροφέας:

Ο αντιστροφέας μετατρ
έπει συνεχή τάση 521.7833kV σε εναλλασσόμενη τάση 400kV, εικόνε
ς4.40-4.41.

Firing Angle (alpha-)Control		_
Control-Characteristic	P	•
Power-Setpoint	600.	MW
Automatic Firing Angle Contr	ol	
Actual Firing-Angle	15.	deg
Minimum Firing Angle	0.	deg
Maximum Firing Angle	180.	deg
Minimum Extinction Angle	0.	deg
Tap-Changer	Fixed Tap	-
Tap-Changer Actual Winding Ratio	Fixed Tap	▼ p.u.
Tap-Changer Actual Winding Ratio Commutation Reactance	Fixed Tap	p.u.
Tap-Changer Actual Winding Ratio Commutation Reactance Phase Shift	Fixed Tap 1. 0. 0.	p.u. Ohm *30deg
Tap Changer Actual Winding Ratio Commutation Reactance Phase Shift Setpoint for DC Load Row	Fixed Tap 1. 0. 0.	р.и. Оhm *30deg

Εικόνα 4.40: Στοιχεία ροής φορτίου αντιστροφέα

<u>Γραμμή DC 1</u>:

<u>Γραμμή DC 2</u>:

Name Inverter

Rated AC Voltage Rated DC-Voltage (DC) Rated Active Power Rated DC-Current

Nominal Turns-Ratio (t2/t1)

Nominal Firing Angle

Diode-/Thyristor Converter Thyristor Diode Converter Transformer W Built-In Transformer

Minimum Turns-Ratio

Maximum Turns-Ratio

Οι γραμμές μεταφοράς έχουν μήκος 200km και τάση 500kV, εικόνες 4.42 – 4.43.

Name	DC Line 1		
Туре	Equipment Type Library\Line Type	(5)	
Teminal i	➡ Grid\IN2 250kV DC\Cub_2	IN2 250kV D	с
Teminal j	Grid/JN1 250kV DC/Cub_2	IN1 250kV D	с
Zone	Teminal i 🔹 🔸		
Area	Teminal i 🔹 🔸		
Out of Service			
- Number of		Resulting Values	
parallel Lines	2	Rated Current (act.)	4. kA
	1-	Pos. Seq. Impedance, Z1	10.04988 Ohm
Parameters		Pos. Seq. Impedance, Angle	84.28941 deg
Thermal Rating	▼ +	Pos. Seq. Resistance, HT	1. Onm
1	200	Zero Seq. Resistance, AT	0. Ohm
Length of Line	200. Km	Zero Seg. Reactance, X0	0. Ohm
Derating Factor	1.	Earth-Fault Current, Ice	0. A
Laying	Ground	Earth Factor, Magnitude	0.3333333
		Earth Factor, Angle	180. deg
Type of Line	Cable		
Line Model			
C Lumped Para	meter (PI)		
C Distributed P	arameter		
Sections/L	ine Loads		

Εικόνα 4.42: Βασικά στοιχεία γραμμής DC 1

44 250k V DC 43 250k V DC
14 250k V DC 13 250k V DC
14 250kV DC 13 250kV DC
N3 250kV DC
) 4. kA
1ce, Z1 10.04988 Ohm
nce R1 1 Ohm
nce, X1 10. Ohm
nce, R0 0. Ohm
nce, X0 0. Ohm
:, Ice 0. A
ntude 0.33333333 e 180. dea

Εικόνα 4.43: Βασικά στοιχεία γραμμής DC 2

۲

400. KV 521.7833 KV 547 MW

kA

deg

p.u.

p.u.

2.

1.

0.9

1.1

Εικόνα 4.41: Βασικά στοιχεία αντιστροφέα

Μετατροπέας PWM για το σύστημα VSC:

Ο μετατροπέας που χρησιμοποιήθηκε για το σύστημα είναι τύπου PWM με δύο DC συνδέσμους, όπως φαίνεται στην εικόνα 4.44. Ο ένας σύνδεσμος είναι συνδεδεμένος με έναν ζυγό με θετκή πόλωση 250 kV και ο άλλος σύνδεσμος είναι συνδεδεμένος με έναν ζυγό με αρνητική πόλωση -250 kV. Η διαφοράς τάσης μεταξύ των ζυγών είναι 250 kV – (-250 kV) = 500 kV. Η ονομαστική τάση του διπολικού συνδέσμου εκφράζεται $\omega_{\rm c} \pm 500$ kV.



Εικόνα 4.44: Μετατροπέας PWM με δύο DC συνδέσμους

Οι εξισώσεις του μοντέλου προέρχονται από το κύκλωμα σύμφωνα με την παρακάτω εικόνα 4.45. Το κύκλωμα αποτελείται από ηλεκτρονικά διακοπτικά στοιχεία με τη δυνατότητα απενεργοποίησης, οι οποίες είναι συνήθως GTO ή IGBT.



Εικόνα 4.45: Κύκλωμα μετατροπέα

Στη θεμελιώδη συχνότητα, ο ιδανικός μετατροπέας με χαμηλές απώλειες μπορεί να μοντελοποιηθεί από μία πηγή τάσης εναλλασσόμενου ρεύματος ελεγχόμενης τάσης συνεχούς ρεύματος που διατηρεί την ενεργή ισχύ μεταξύ της πλευράς εναλλασσόμενου ρεύματος και συνεχούς ρεύματος.

Η διατήρηση ενεργού ισχύος μεταξύ της πλευράς εναλλασσόμενου και συνεχούς ρεύματος προκύπτει από την παρακάτω εξίσωση.

•
$$P_{AC} = R_e(U_{AC}I^*_{AC}) = U_{DC}I_{DC} = P_{DC}$$
 (4.1)

Οι μεταβλητές των εξισώσεων ορίζονται ως εξής:

UAC: εναλλασσόμενη τάση

U_{DC}: συνεχής τάση

 $I^*_{\rm AC}$: συζευγμένη μιγαδική τι
μή της φάσης εναλλασσόμενου ρεύματος

I_{DC}: συνεχές ρεύμα P_{DC}: συνεχής ισχύς P_{AC}: εναλλασσόμενη ισχύς

Μετατροπέας με ενσωματωμένο μετασχηματιστή για το σύστημα LCC:

Ο ανορθωτής είναι ένας ανορθωτής διόδου πλήρους γέφυρας που ανορθώνει την τριφασική εναλλασσόμενη τάση σε μία τάση συνεχούς ρεύματος έξι παλμών, εικόνα 4.46.



Εικόνα 4.46: Μετατροπέας HVDC με συμπεριλαμβανομένη κατασκευή μετασχηματιστή

Το μοντέλο του μετατροπέα αποτελείται από έξι διατεταγμένα θυρίστορ ισχύος, εικόνα 4.47. Τα ηλεκτρονικά διακοπτικά στοιχεία μπορούν να ενεργοποιηθούν από ένα εξωτερικό σήμα ελέγχου, αλλά σβήνουν μόνο όταν το ρεύμα που ρέει γίνει αρνητικό.



Εικόνα 4.47: Λεπτομερές κύκλωμα με αντίδραση μεταγωγής και DC αντίδραση

Οι εξισώσεις του μετατροπέα θυρίστορ και του ανορθωτή διόδου είναι πανομοιότυπες εάν ο ανορθωτής διόδου θεωρηθεί ως μη ελεγχόμενος μετατροπέας θυρίστορ, επομένως η γωνία πυροδότησης «a» ορίζεται στο μηδέν.

Κατά τη διάρκεια σταθερής κατάστασης, ο μετατροπέας μπορεί να μοντελοποιηθεί ως φορτίο με σταθερή ενεργό και άεργο ισχύ.

Η μεταφερόμενη ισχύς συνεχούς ρεύματος του συστήματος υψηλής τάσης συνεχούς ρεύματος δίνεται από τον τύπο:

•
$$P_d = U_d \cdot I_d$$
 (4.2)

Η συνεχής τάση του ιδανικού και μη ελεγχόμενου μετατροπέα, χωρίς φορτίο, ονομάζεται ιδανική άμεση τάση χωρίς φορτίο, η οποία ορίζεται ως εξής:

•
$$Udc = \frac{3 \cdot \sqrt{2}}{\pi} \cdot ULL$$
 (4.3)

Όπου Ull είναι η εναλλασσόμενη τάση που παρέχεται στον σταθμό μετατροπέα.

Ο ανορθωτής κατά τη μετατοπή της εναλλασσόμενης τάσης σε συνεχή, αφαιρεί την πτώση τάσης που προκύπτει από τα υλικά από τα οποία έχει κατασκευαστεί ο ανορθωτής και άλλες απώλειες. Οπότε, η ιδανική συνεχής τάση είναι 540 kV, ενώ με βάση τον υπολογισμό του προγράμματος προκύπτει 521.7833 kV, γιατί υπολογίζει απώλειες εξοπλισμού.

4.3. Ανάλυση ροής φορτίου

Η ανάλυση ροής φορτίου πραγματοποιήθηκε με τη μέθοδο «AC Load Flow». Οι μετρήσεις γίνονται στις γραμμές μεταφοράς **Line 4** και **DC Line 1** των συστημάτων. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων καταγράφονται στους πίνακες 4.1 - 4.5.

200km	HVAC	HVDC-LCC	HVDC-VSC
Απώλειες ενεργού ισχύος (MW)	2.37	1.45	1.32
Φόρτιση γραμμής (%)	43	30.10	28.70
Απώλειες συστήματος (MW)	15.44	15.42	13.64

Πίνακας 4.1: Ανάλυση ροής φορτίου γραμμών Line 4 και DC Line 1 (200km)

Πίνακας 4.2: Πτώση τάσης γραμμών Line 4 και DC Line 1 (200km)

200km	HVAC	HVDC-LCC	HVDC-VSC
Τάση σημείου i γραμμής (kV)	408.11	249.96	249.94
Τάση σημείου j γραμμής (kV)	405.22	248.75	248.80

Πίνακας 4.3: Φόρτιση (%) γεννητριών και φωτοβολταϊκού

Φόρτιση (%)	HVAC	HVDC-LCC	HVDC-VSC
PH	66.70	66.70	66.70
SG1	76.50	82.20	78.70
SG2	77.80	80.90	78.70
SG3	48.50	54.30	48.10
SG4	54.30	58.30	55.60
SG5	22.30	49.10	29.20

Φόρτιση (%)	HVAC	HVDC-LCC	HVDC-VSC
Line 1	68.80	75.20	69.60
Line 2	14.10	16.50	14.60
Line 3	61.30	68.60	62.80

Πίνακας 4.4: Φόρτιση (%) των υπολοίπων γραμμών μεταφοράς

Πίνακας 4.5: Απώλειες ενεργού ισχύος (MW) των υπολοίπων γραμμών μεταφοράς

Απώλειες ενεργού ισχύος (MW)	HVAC	HVDC-LCC	HVDC-VSC
Line 1	3.22	3.82	3.32
Line 2	0.12	0.16	0.12
Line 3	4.08	5.02	4.26

Με την αντικατάσταση των γραμμών μεταφοράς με γραμμές συνεχούς τάσης, παρατηρείται μείωση των απωλειών ενεργού ισχύος στη γραμμή του συστήματος HVDC-LCC κατά 39% και στη γραμμή του συστήματος HVDC-VSC κατά 44%. Επιπλέον, μειώνονται η φόρτιση των γραμμών κατά 30% και 33% αντίστοιχα και οι συνολικές απώλειες του συστήματος.

Επίσης, μειώνεται σημαντικά η πτώση τάσης των γραμμών όταν χρησιμοποιείται σύστημα συνεχούς τάσης, έχοντας διαφορά στην τάση του συστήματος AC από το ένα άκρο της γραμμής στο άλλο, 2.89kV, ενώ στο HVDC-LCC 1.21kV και στο HVDC-VSC 1.14kV.

Οι μετατροπείς του συστήματος HVDC-LCC καταναλώνουν άεργο ισχύ για να λειτουργήσουν. Ο ανορθωτής απαιτεί 165.20 Mvar και ο αντιστροφέας 191.40 Mvar. Λόγω της αυξημένης κατανάλωσης ισχύος από τους μετατροπείς του συστήματος HVDC-LCC, η φόρτιση των γεννητριών και των γραμμών μεταφοράς AC, καθώς και οι απώλειες ενεργού ισχύος των γραμμών μεταφοράς AC, καταγράφουν μεγαλύτερες τιμές συγκριτικά με τα άλλα δύο συστήματα επηρεάζοντας τις συνολικές απώλειες του συστήματος.

Οι μετατροπείς του συστήματος HVDC-VSC καταναλώνουν και αυτοί ισχύ, ο μετατροπέας 1 απαιτεί 0.42 MW και ο μετατροπέας 2 απαιτεί 0.21 MW. Η ισχύς αυτή είναι σημαντικά λιγότερη από την ισχύ που απαιτεί το σύστημα HVDC-LCC, αλλά αρκετή ώστε να αυξήσει τις τιμές φόρτισης γεννητριών, εκτός της γεννήτριας «SG 3», και γραμμών μεταφοράς AC και τις απώλειες ενεργού ισχύος των γραμμών μεταφοράς AC, συγκριτικά με το αρχικό σύστημα HVAC.

Συνολικά τα συστήματα HVDC, έχουν καλύτερη απόδοση στις αναλύσεις ροής φορτίου, μειώνοντας τις απώλειες ενεργού ισχύους στα συστήματα, με το σύστημα HVDC-VSC να υπερτερεί έναντι του συστήματος HVDC-LCC.

Η διαφορά στις συνολικές απώλειες συστήματος μεταξύ HVDC-LCC και HVDC-VSC, προκύπτει από την αυξημένη κατανάλωση που απαιτούν ο ανορθωτής και ο αντιστροφέας του συστήματος HVDC-LCC, προκαλώντας αυξημένη ροή ισχύος στις γραμμές μεταφοράς AC του συστήματος, δημιουργώντας περισσότερες απώλειες.

Παραμετροποίηση:

Για να ελεχθεί η καλύτερη απόδοση του συστήματος συνεχούς ρεύματος μεταβάλλεται το μήκος των γραμμών μεταφοράς Line 4, Line 5 του συστήματος HVAC και DC Line 1, DC Line 2 των συστημάτων HVDC-LCC και HVDC-VSC από 200 km σε 50 km, σε 400 km και σε 800 km και ελέγχονται οι απώλειες ισχύος, η φόρτιση των γραμμών και η πτώση τάσης, πίνακες 4.6 - 4.11.

Πίνακας 4.6: Ανάλυση ροής φορτίου γραμμών Line 4 και DC Line 1 (50km)

50 km	HVAC	HVDC-LCC	HVDC-VSC
Απώλειες ενεργού ισχύος (MW)	0.60	0.36	0.33
Φόρτιση γραμμής (%)	42	30	28.60

Πίνακας 4.7: Πτώση τάσης γραμμών Line 4 και DC Line 1 (50km)

50 km	HVAC	HVDC-LCC	HVDC-VSC
Τάση σημείου i γραμμής (kV)	401.89	249.99	250.22
Τάση σημείου j γραμμής (kV)	401.29	249.69	249.93

Οι απώλειες ενεργού ισχύος στη γραμμή μεταφοράς, όταν έχει μήκος 50km, με την τοποθέτηση συστήματος HVDC-LCC μειώνονται κατά 40% και με HVDC-VSC κατά 45%. Επίσης, η φόρτιση γραμμής μειώνεται κατά 28% και 31% αντίστοιχα και η πτώση τάσης είναι χαμηλή σε όλα τα συστήματα.

Πίνακας 4.8: Ανάλυση ροής φορτίου γραμμών Line 4 και DC Line 1 (400km)

400 km	HVAC	HVDC-LCC	HVDC-VSC
Απώλειες ενεργού ισχύος (MW)	4.67	3.50	2.67
Φόρτιση γραμμής (%)	45.20	30.30	28.90

Πίνακας 4.9: Πτώση τάσης γραμμών Line 4 και DC Line 1 (400km)

400 km	HVAC	HVDC-LCC	HVDC-VSC
Τάση σημείου i γραμμής (kV)	417.56	250.07	249.92
Τάση σημείου j γραμμής (kV)	410.67	247.71	247.61

Οι απώλειες ενεργού ισχύος στη γραμμή μεταφοράς, όταν έχει μήκος 400km, με την τοποθέτηση συστήματος HVDC-LCC μειώνονται κατά 25% και με HVDC-VSC κατά

42%. Επίσης, η φόρτιση γραμμής μειώνεται κατά 32% και 36% αντίστοιχα. Η διαφορά στην τάση στο σύστημα AC είναι 6.89kV και στα συστήματα HVDC-LCC και HVDC-VSC είναι 2.36kV και 2.31kV αντίστοιχα.

800 km	HVAC	HVDC-LCC	HVDC-VSC
Απώλειες ενεργού ισχύος (MW)	9.38	5.99	5.44
Φόρτιση γραμμής (%)	53.10	30.60	29.10

Πίνακας 4.10: Ανάλυση ροής φορτίου γραμμών Line 4 και DC Line 1 (800km)

Πίνακας 4.11: Πτώση τάσης γραμμών Line 4 και DC Line 1 (800km)

800 km	HVAC	HVDC-LCC	HVDC-VSC
Τάση σημείου i	441.20	249.99	250.03
γραμμής (kV)			
Τάση σημείου j	423.26	245.10	245.36
γραμμής (kV)			

Οι απώλειες ενεργού ισχύος στη γραμμή μεταφοράς, όταν έχει μήκος 800km, με την τοποθέτηση συστήματος HVDC-LCC μειώνονται κατά 36% και με HVDC-VSC κατά 42%. Επίσης, η φόρτιση γραμμής μειώνεται κατά 42% και 45% αντίστοιχα. Η διαφορά στην τάση στο σύστημα AC είναι 17.94kV και στα συστήματα HVDC-LCC και HVDC-VSC είναι 4.89kV και 4.67kV αντίστοιχα.

Επιβεβαιώνοντας τη θεωρία, το σύστημα εναλλασσόμενου ρεύματος δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί για υποθαλάσσια συστήματα μεγάλων αποστάσεων, καθώς αυξάνονται οι απώλειες γραμμών σε σημαντικό βαθμό. Σε αντίθεση, το σύστημα συνεχούς ρεύματος αποτελεί τη βέλτιστη επιλογή, καθώς οι απώλειες αυξάνονται αναλογικά με το μήκος της γραμμής και η φόρτιση παραμένει σε σταθερά επίπεδα ελαχιστοποιώντας την πτώση τάσης, με το σύστημα HVDC-VSC να είναι αποδοτικότερο από το HVDC-LCC σε κάθε περίπτωση.

Τα αποτελέσματα ροής φορτίου επαληθεύτηκαν με βάση τη βιβλιογραφία [29].

Στην εικόνα 4.48 φαίνεται η προσομοίωση ροής φορτίου για το σύστημα HVAC.

Στην εικόνα 4.49 φαίνεται η προσομοίωση ροής φορτίου για το σύστημα HVDC-LCC.

Στην εικόνα 4.50 φαίνεται η προσομοίωση ροής φορτίου για το σύστημα HVDC-VSC.



Εικόνα 4.48: Ροή φορτίου συστήματος ΗVAC


Εικόνα 4.49: Ροή φορτίου συστήματος HVDC-LCC



Εικόνα 4.50: Ροή φορτίου συστήματος HVDC-VSC

4.4. Ανάλυση βραχυκυκλώματος

Για την ανάλυση βραχυκυκλώματος εφαρμόζεται τριφασικό βραχυκύκλωμα στους κόμβους με τάση 400kV. Σε κάθε κόμβο εφαρμόζεται ξεχωριστά σενάριο βραχυκυκλώματος.

Η ανάλυση γίνεται με το πρότυπο ΙΕС 60909.

Τα αποτελέσματα υπολογισμού αρχικής ισχύος βραχυκυκλώματος, αρχικού ρεύματος βραχυκυκλώματος και μέγιστου ρεύματος βραχυκυκλώματος αναγράφονται συγκεντρωτικά στους πίνακες 4.12 – 4.14.

HVAC:

Στην εικόνα 4.51 φαίνονται τα αναλυτικά αποτελέσματα των μετρήσεων βραχυκυκλώματος του συστήματος ΗVAC στον κόμβο «BB1 400 kV».

Fa Sh	ult Locations wi ort-Circuit Calc	th Feeders ulation /	Method	: IEC (50909		3	-Phase	Short-Circuit	/ Ma	x. Short-	Circuit (Currents	I
As De 	ynchronous Motor Always Consider caying Aperiodic Using Method	s ed Component	(idc) B		Grid Ide Autom Conducto User	ntification atic r Temperature Defined	No		Short-Circu Break Tin Fault Cl c-Voltage F User Def	it Durat me earing T actor ined	ion 'ime (Ith)		0.10 s 1.00 s No	
Gr	id: Grid	s	ystem S	Stage: (Grid	I				Ann	ex:	/ :	1	1
 		rtd.V. [kV]	Vo: [kV]	ltage [deg]	c- Factor	Sk" [MVA/MVA]	I [kA/kA]	k" [deg]	ip [kA/kA]	Ib [kA]	Sb [MVA]	Ik [kA]	Ith [kA]	I
 BB1 	400kV Transformer Transformer 1 Line 1 Line 2 Transformer 2	400.00 IN 15.9k IN1 16.5 BB3 400k BB2 400k IN2 16.5	0.00 V kV V V kV	0.00	1.10	7519.94 MVA 185.56 MVA 1698.71 MVA 1642.34 MVA 2295.85 MVA 1698.71 MVA	10.85 kA 0.27 kA 2.45 kA 2.37 kA 3.31 kA 2.45 kA	-88.57 95.50 90.45 92.15 92.05 90.45	28.72 kA 0.71 kA 6.49 kA 6.27 kA 8.77 kA 6.49 kA	10.24	7095.73	10.59	11.24	

Εικόνα 4.51: Προσομοίωση βραχυκυκλώματος στον κόμβο «BB1 400kV» του συστήματος HVAC

Στην εικόνα 4.52 φαίνονται τα αναλυτικά αποτελέσματα των μετρήσεων βραχυκυκλώματος του συστήματος ΗVAC στον κόμβο «BB2 400 kV».

													_
Fault Locations wi Short-Circuit Calc	th Feeders ulation / M	lethod :	IEC 609(09		3	-Phase S	Short-Circuit	/ Ma	x. Short-C	ircuit C	urrents	1
Asynchronous Motor Always Consider Decaying Aperiodic Using Method 	s ed Component	(idc) B	Grid 2 Cond T	d Identifica Automatic ductor Tempe Jser Defined	ation rature 1	No	 	Short-Circui Break Tin Fault Cle c-Voltage Fa User Defi	t Durat ae aring T actor .ned	ion ime (Ith)		0.10 s 1.00 s No	
Grid: Grid	Sy	/stem Sta	ge: Grid	1 1	I				Ann	ex:	/ 1		I
	rtd.V. [kV]	Volta [kV] [ge deg] Fac	c- Sk ctor [MVA/	r" 'MVA]	I [kA/kA]	k" [deg]	ip [kA/kA]	Ib [kA]	Sb [MVA]	Ik [kA]	Ith [kA]	1
 BB2 400kV Transformer 3 Transformer 4 Line 2 Line 3	400.00 IN3 18kV IN4 18kV BB1 400kV BB3 400kV	0.00 7 7	0.00 1.	.10 7862.0 2146.2 2146.2 2080.3 1490.0	01 MVA 22 MVA 22 MVA 33 MVA 08 MVA	11.35 kA 3.10 kA 3.10 kA 3.00 kA 2.15 kA	-88.79 90.44 90.44 92.09 92.17	30.15 kA 8.23 kA 8.23 kA 7.98 kA 5.71 kA	10.64	7372.82	11.16	11.78	

Εικόνα 4.52: Προσομοίωση βραχυκυκλώματος στον κόμβο «BB2 400kV» του συστήματος HVAC

Στην εικόνα 4.53 φαίνονται τα αναλυτικά αποτελέσματα των μετρήσεων βραχυκυκλώματος του συστήματος ΗVAC στον κόμβο «BB3 400 kV».

Fault Locations w Short-Circuit Cal	vith Feeders .culation / Method :	IEC 60909			-Phase S		/ Ma	x. Short-C	ircuit Cu	 Irrents
Asynchronous Moto Always Conside Decaying Aperiodi Using Method 	prs red .c Component (idc) B	Grid Ide Autom Conducto User 1	ntification atic r Temperature Defined	No	 	Short-Circui Break Tim Fault Cle c-Voltage Fa User Defi	t Durat e aring T ctor ned	ion 'ime (Ith)	0 1 1	 .10 s .00 s 0
Grid: Grid	System Sta	ge: Grid	 I				Ann	ex:	/ 1	I
	rtd.V. Volta [kV] [kV] [ige c- [deg] Factor	Sk" [MVA/MVA]	I [kA/kA]	k" [deg]	ip [kA/kA]	Ib [kA]	Sb [MVA]	Ik [kA]	Ith [kA]
 BB3 400kV Line 1 Line 3 Line 4 Line 5	400.00 0.00 BB1 400kV BB2 400kV BB4 400kV BB4 400kV	0.00 1.10	6320.08 MVA 2501.31 MVA 2450.78 MVA 684.07 MVA 684.07 MVA	9.12 kA 3.61 kA 3.54 kA 0.99 kA 0.99 kA	-87.89 92.32 92.30 91.39 91.39	23.88 kA 9.45 kA 9.26 kA 2.58 kA 2.58 kA	8.91	6175.35	8.95	9.40

Εικόνα 4.53: Προσομοίωση βραχυκυκλώματος στον κόμβο «BB3 400kV» του συστήματος HVAC

Στην εικόνα 4.54 φαίνονται τα αναλυτικά αποτελέσματα των μετρήσεων βραχυκυκλώματος του συστήματος ΗVAC στον κόμβο «BB4 400 kV».

Fault Locations w Short-Circuit Cal	ith Feeders culation / 1	Method	: IEC (50909		3	-Phase S	hort-Circuit	/ Ma	x. Short-C	ircuit Cu	irrents	1
Asynchronous Moto Always Conside Decaying Aperiodi Using Method 	ers ered .c Component	(idc) B	0 	Grid Ide Autom Conducto User	ntification Matic r Temperature Defined	No	 	Short-Circui Break Tin Fault Cle c-Voltage Fa User Defi	it Durat me earing T actor ined	ion ime (Ith)	0 1 N	.10 s .00 s	
Grid: Grid	S	ystem S	tage: (Grid					Ann	ex:	/ 1		ī
 	rtd.V. [kV]	Vol [kV]	.tage [deg]	c- Factor	Sk" [MVA/MVA]	I [kA/kA]	k" [deg]	ip [kA/kA]	Ib [kA]	Sb [MVA]	Ik [kA]	Ith [kA]	1
 BB4 400kV Line 4 Line 5 Transformer 5 Shunt/Filter	400.00 BB3 400k BB3 400k IN5 16.5	0.00 V V KV	0.00	1.10	4600.18 MVA 1451.51 MVA 1451.51 MVA 1698.71 MVA 0.00 MVA	6.64 kA 2.10 kA 2.10 kA 2.45 kA 0.00 kA	-87.61 93.53 93.53 90.45 0.00	17.30 kA 5.46 kA 5.46 kA 6.39 kA 0.00 kA	6.39	4425.20	6.54	6.83	

Εικόνα 4.54: Προσομοίωση βραχυκυκλώματος στον κόμβο «BB4 400kV» του συστήματος HVAC

HVDC-LCC:

Στην εικόνα 4.55 φαίνονται τα αναλυτικά αποτελέσματα των μετρήσεων βραχυκυκλώματος του συστήματος HVDC-LCC στον κόμβο «BB1 400 kV».

Fault Locations w Short-Circuit Cal	vith Feeders Culation / M	Method : I	EC 60909		3	-Phase S	hort-Circuit	/ Ma	x. Short-C	ircuit Cu	rrents	1
Asynchronous Moto Always Conside Decaying Aperiodi Using Method 	ors red .c Component	(idc) B	Grid Ide Autom Conducto User 	entification Matic or Temperature Defined	No	 	Short-Circui Break Tim Fault Cle c-Voltage Fa User Defi	t Durat earing T actor .ned	ion ime (Ith)	0 1 N	.10 s .00 s	
Grid: Grid	Sy	ystem Stag	e: Grid	I				Ann	ex:	/ 1		1
 	rtd.V. [kV]	Voltage [kV] [de	e c- eg] Factor	Sk" [MVA/MVA]	I [kA/kA]	k" [deg]	ip [kA/kA]	Ib [kA]	Sb [MVA]	Ik [kA]	Ith [kA]	1
 BB1 400kV Transformer Transformer 1 Line 2 Transformer 2 Line 1	400.00 IN 15.9KV IN1 16.5k BB2 400KV IN2 16.5k BB3 400KV	0.00 0 7 cV 7 cV 7	.00 1.10	6618.19 MVA 185.56 MVA 1698.71 MVA 2056.79 MVA 1698.71 MVA 979.42 MVA	9.55 kA 0.27 kA 2.45 kA 2.97 kA 2.45 kA 1.41 kA	-88.77 95.50 90.45 91.85 90.45 91.85	25.36 kA 0.71 kA 6.51 kA 7.88 kA 6.51 kA 3.75 kA	8.93	6186.89	9.29	9.91	

Εικόνα 4.55: Προσομοίωση βραχυκυκλώματος στον κόμβο «BB1 400kV» του συστήματος HVDC-LCC

Στην εικόνα 4.56 φαίνονται τα αναλυτικά αποτελέσματα των μετρήσεων βραχυκυκλώματος του συστήματος HVDC-LCC στον κόμβο «BB2 400 kV».

Fault Locations wi Short-Circuit Calc	th Feeders ulation / N	fethod	: IEC 6	50909		3	-Phase S	hort-Circuit	/ Ma	x. Short-C	Circuit C	urrents
Asynchronous Motor Always Consider Decaying Aperiodic Using Method 	s ed Component	(idc) B	G 	Grid Ide Autom Conducto User	ntification atic r Temperature Defined	No		Short-Circui Break Tim Fault Cle c-Voltage Fa User Defi	t Durat e aring I ctor ned	ion ime (Ith)		0.10 s 1.00 s No
Grid: Grid	S	ystem S	tage: G	Grid	 I				Ann	ex:	/ 1	
 	rtd.V. [kV]	Vol [kV]	tage [deg]	c- Factor	Sk" [MVA/MVA]	I [kA/kA]	k" [deg]	ip [kA/kA]	Ib [kA]	Sb [MVA]	Ik [kA]	Ith [kA]
 BB2 400kV Transformer 3 Transformer 4 Line 2 Line 3	400.00 IN3 18kV IN4 18kV BB1 400kV BB3 400kV	0.00 7 7	0.00	1.10	6954.65 MVA 2146.22 MVA 2146.22 MVA 1803.78 MVA 858.94 MVA	10.04 kA 3.10 kA 3.10 kA 2.60 kA 1.24 kA	-89.01 90.44 90.44 91.88 91.88	26.76 kA 8.26 kA 8.26 kA 6.94 kA 3.31 kA	9.32	6455.48	9.84	10.44

Εικόνα 4.56: Προσομοίωση βραχυκυκλώματος στον κόμβο «BB2 400kV» του συστήματος HVDC-LCC

Στην εικόνα 4.57 φαίνονται τα αναλυτικά αποτελέσματα των μετρήσεων βραχυκυκλώματος του συστήματος HVDC-LCC στον κόμβο «BB3 400 kV».

Fau Sho	ult Locations wit ort-Circuit Calcu	th Feeders	Method	: IEC (60909		3	-Phase S	Short-Circuit	/ Ma	x. Short-	Circuit	Current	 s
Asy Dec 	ynchronous Motors Always Considere caying Aperiodic Using Method	ed Component	(idc) B		Grid Ide Autom Conducto User	ntification atic r Temperature Defined	No		Short-Circui Break Tim Fault Cle c-Voltage Fa User Defi 	t Durat we aring T actor ned	ion ime (Ith)		0.10 s 1.00 s No	
Gr:	id: Grid	S	ystem S	tage: (Grid					Ann	ex:	/	1	I
 		rtd.V. [kV]	Vol: [kV]	tage [deg]	c- Factor	Sk" [MVA/MVA]	I [kA/kA]	k" [deg]	ip [kA/kA]	Ib [kA]	Sb [MVA]	Ik [kA]	Ith [kA	1
 BB3 	400kV Line 3 Line 1 Rectifier	400.00 BB2 400k BB1 400k IN1 250k	0.00 V V V IN3	0.00 250kV	1.10	4952.09 MVA 2450.78 MVA 2501.31 MVA 0.00 MVA	7.15 kA 3.54 kA 3.61 kA 0.00 kA	-87.69 92.30 92.32 0.00	18.65 kA 9.23 kA 9.42 kA 0.00 kA	7.05	4881.61	6.98	3 7.3	6

Εικόνα 4.57: Προσομοίωση βραχυκυκλώματος στον κόμβο «BB3 400kV» του συστήματος HVDC-LCC

Στην εικόνα 4.58 φαίνονται τα αναλυτικά αποτελέσματα των μετρήσεων βραχυκυκλώματος του συστήματος HVDC-LCC στον κόμβο «BB4 400 kV».

Fault Locations wit Short-Circuit Calcu	th Feeders	Method	: IEC (50909		3	-Phase S	Short-Circuit	/ Ma	x. Short-	-Circuit	Currents	
Asynchronous Motor: Always Consider Decaying Aperiodic Using Method 	s ed Component	(idc) B		Grid Ide Autom Conducto User	ntification atic r Temperature Defined	No		Short-Circui Break Tim Fault Cle c-Voltage Fa User Defi	t Durat e aring T ctor ned	ion ime (Ith)		0.10 s 1.00 s No	
Grid: Grid	S	ystem S	tage: (Grid	1				Ann	ex:	/	1	1
	rtd.V. [kV]	Vol [kV]	tage [deg]	c- Factor	Sk" [MVA/MVA]	I [kA/kA]	k" [deg]	ip [kA/kA]	Ib [kA]	Sb [MVA]	Ik [kA]	Ith [kA]	I
 BB4 400kV Inverter Transformer 5 Shunt/Filter	400.00 IN2 250k IN5 16.5	0.00 V IN4 kV	0.00 250kV	1.10	1698.71 MVA 0.00 MVA 1698.71 MVA 0.00 MVA	2.45 kA 0.00 kA 2.45 kA 0.00 kA	-89.55 0.00 90.45 0.00	6.59 kA 0.00 kA 6.59 kA 0.00 kA	2.05	1418.66	1.55	5 2.23	

Εικόνα 4.58: Προσομοίωση βραχυκυκλώματος στον κόμβο «BB4 400kV» του συστήματος HVDC-LCC

HVDC-VSC:

Στην εικόνα 4.59 φαίνονται τα αναλυτικά αποτελέσματα των μετρήσεων βραχυκυκλώματος του συστήματος HVDC-VSC «BB1 400 kV».

Fa Sh	ault Locations wi nort-Circuit Calc	th Feeders ulation /	Method	: IEC (60909		3	-Phase S	Short-Circuit	/ Ma	x. Short-	Circuit	Currents	3
As De 	synchronous Motor Always Consider caying Aperiodic Using Method	s ed Component	(idc) B		Grid Ide Autom Conducto User	entification Matic or Temperature Defined	No		Short-Circui Break Tim Fault Cle c-Voltage Fa User Defi	t Durat e aring T ctor ned	ion ime (Ith)		0.10 s 1.00 s No	
G1	rid: Grid	S	ystem S	tage: (Grid	 I				Ann	ex:	/	1	1
 		rtd.V. [kV]	Vol [kV]	tage [deg]	c- Factor	Sk" [MVA/MVA]	I [kA/kA]	k" [deg]	ip [kA/kA]	Ib [kA]	Sb [MVA]	Ik [kA]	Ith [kA]	
 BB] 	1 400kV Transformer Transformer 1 Line 2 Transformer 2 Line 1	400.00 IN 15.9k IN1 16.5 BB2 400k IN2 16.5 BB3 400k	0.00 V kV V kV V	0.00	1.10	6719.07 MVA 185.56 MVA 1698.71 MVA 2083.53 MVA 1698.71 MVA 1053.68 MVA	9.70 kA 0.27 kA 2.45 kA 3.01 kA 2.45 kA 1.52 kA	-88.68 95.50 90.45 91.93 90.45 92.18	25.71 kA 0.71 kA 6.50 kA 7.97 kA 6.50 kA 4.03 kA	9.08	6290.44	9.26	; 10.05	; ;

Εικόνα 4.59: Προσομοίωση βραχυκυκλώματος στον κόμβο «BB1 400kV» του συστήματος HVDC-VSC

Στην εικόνα 4.60 φαίνονται τα αναλυτικά αποτελέσματα των μετρήσεων βραχυκυκλώματος του συστήματος HVDC-VSC «BB2 400 kV».

Fault Locations wi Short-Circuit Calc	th Feeders ulation / M	ethod : IE	C 60909		3	-Phase S	Short-Circuit	/ Mai	. Short-	Circuit	Currents	; ;
Asynchronous Motor Always Consider Decaying Aperiodic Using Method 	s ed Component	(idc) B	Grid Ide Autom Conducto User 	entification matic or Temperature Defined	No		Short-Circui Break Tim Fault Cle c-Voltage Fa User Defi 	t Durat: e aring T: ctor ned	ion ime (Ith)		0.10 s 1.00 s No	
Grid: Grid	sy	stem Stage	: Grid	1				Anne	ex:	/	1	1
	rtd.V. [kV]	Voltage [kV] [de	c- g] Factor	Sk" [MVA/MVA]	I [kA/kA]	k" [deg]	ip [kA/kA]	Ib [kA]	Sb [MVA]	Ik [kA]	Ith [kA]	1
 BB2 400kV Transformer 3 Transformer 4 Line 2 Line 3	400.00 IN3 18kV IN4 18kV BB1 400kV BB3 400kV	0.00 0.	00 1.10	7056.59 MVA 2146.22 MVA 2146.22 MVA 1834.86 MVA 929.97 MVA	10.19 kA 3.10 kA 3.10 kA 2.65 kA 1.34 kA	-88.92 90.44 90.44 91.97 92.23	27.12 kA 8.25 kA 8.25 kA 7.05 kA 3.57 kA	9.47	6560.46	9.82	10.59	

Εικόνα 4.60: Προσομοίωση βραχυκυκλώματος στον κόμβο «BB2 400kV» του συστήματος HVDC-VSC

Στην εικόνα 4.61 φαίνονται τα αναλυτικά αποτελέσματα των μετρήσεων βραχυκυκλώματος του συστήματος HVDC-VSC «BB3 400 kV».

I	Fault Locations wit Short-Circuit Calcu	h Feeders lation / M	Method :	IEC 6	50909		3	-Phase S	Short-Circuit	/ Ma	x. Short	-Circuit	Currents	1
	Asynchronous Motors Always Considere Decaying Aperiodic Using Method	d Component	(idc) B	0 	Grid Ide Autom Conducto User	entification natic or Temperature Defined	No		Short-Circui Break Tim Fault Cle c-Voltage Fa User Defi	t Durat e aring T actor .ned	ion ime (Ith))	0.10 s 1.00 s No	
I	Grid: Grid	SJ	ystem St	age: 0	Grid					Ann	ex:	/	1	1
I I		rtd.V. [kV]	Volt [kV]	age [deg]	c- Factor	Sk" [MVA/MVA]	I [kA/kA]	[k" [deg]	ip [kA/kA]	Ib [kA]	Sb [MVA]	Ik [kA]	Ith [kA]	1
 E 	3B3 400kV Line 3 PWM Converter 1 Line 1	400.00 BB2 400k IN1 250k BB1 400k	0.00 V V IN3 V	0.00 250kV	1.10	5090.41 MVA 2450.78 MVA 138.56 MVA 2501.31 MVA	7.35 kA 3.54 kA 0.20 kA 3.61 kA	-87.60 92.30 -84.29 92.32	19.15 kA 9.22 kA 0.52 kA 9.41 kA	7.25	5019.93	6.98	3 7.56	

Εικόνα 4.61: Προσομοίωση βραχυκυκλώματος στον κόμβο «BB3 400kV» του συστήματος HVDC-VSC

Στην εικόνα 4.62 φαίνονται τα αναλυτικά αποτελέσματα των μετρήσεων βραχυκυκλώματος του συστήματος HVDC-VSC «BB4 400 kV».

Fault Locations wit Short-Circuit Calcu	th Feeders ulation /	Method	: IEC @	60909		3	-Phase (Short-Circuit	/ Ma	x. Short-	Circuit C	urrents
Asynchronous Motor: Always Considere Decaying Aperiodic Using Method 	s ed Component	(idc) B	0 0 	Grid Ide Autom Conducto User	entification natic or Temperature Defined	No		Short-Circui Break Tim Fault Cle c-Voltage Fa User Defi	t Durat e aring T ctor ned	ion ime (Ith)		0.10 s 1.00 s No
Grid: Grid	S	ystem S	tage: (Grid					Ann	ex:	/ 1	
 	rtd.V. [kV]	Vol [kV]	tage [deg]	c- Factor	Sk" [MVA/MVA]	I [kA/kA]	k" [deg]	ip [kA/kA]	Ib [kA]	Sb [MVA]	Ik [kA]	Ith [kA]
 BB4 400kV PWM Converter 2 Transformer 5 Shunt/Filter	400.00 IN2 250% IN5 16.5	0.00 V IN4 kV	0.00 250kV	1.10	1836.74 MVA 138.56 MVA 1698.71 MVA 0.00 MVA	2.65 kA 0.20 kA 2.45 kA 0.00 kA	-89.16 -84.29 90.45 0.00	7.58 kA 0.49 kA 6.59 kA 0.00 kA	2.45	1695.79	1.55	2.30

Εικόνα 4.62: Προσομοίωση βραχυκυκλώματος στον κόμβο «BB4 400kV» του συστήματος HVDC-VSC

Πίνακας 4.12: Αρχική ισχύς βραχυκυκλώματος (Sk'')

Σύστημα	BB1 400kV	BB2 400kV	BB3 400kV	BB4 400kV
HVAC	7519.94 MVA	7862.01 MVA	6320.08 MVA	4600.18 MVA
HVDC-LCC	6618.19 MVA	6954.65 MVA	4952.09 MVA	1698.71 MVA
HVDC-VSC	6719.07 MVA	7056.59 MVA	5090.41 MVA	1836.74 MVA

Πίνακας 4.13: Α	ργικό	ρεύμα	βραγυκυκλώματος ([I k''])
	N	p 0 0 p 00		,	,

Σύστημα	BB1 400kV	BB2 400kV	BB3 400kV	BB4 400kV
HVAC	10.85 kA	11.35 kA	9.12 kA	6.64 kA
HVDC-LCC	9.55 kA	10.04 kA	7.15 kA	2.45 kA
HVDC-VSC	9.70 kA	10.19 kA	7.35 kA	2.65 kA

Σύστημα	BB1 400kV	BB2 400kV	BB3 400kV	BB4 400kV
HVAC	28.72 kA	30.15 kA	23.88 kA	17.30 kA
HVDC-LCC	25.36 kA	26.76 kA	18.65 kA	6.59 kA
HVDC-VSC	25.71 kA	27.12 kA	19.15 kA	7.58 kA

Και τα δύο συστήματα HVDC παρουσιάζουν μείωση στις τιμές ισχύος και ρεύματος του βραχυκυκλώματος σε κάθε κόμβο, συγκριτικά με το αρχικό σύστημα HVAC.

Στον κόμβο «BB1 400kV» οι τιμές μειώθηκαν κατά 11.99% για το σύστημα HVDC-LCC και 10.64% για το σύστημα HVDC-VSC.

Στον κόμβο «BB2 400kV» οι τιμές μειώθηκαν κατά 11.54% για το σύστημα HVDC-LCC και 10.24% για το σύστημα HVDC-VSC.

Στον κόμβο «BB3 400kV» οι τιμές μειώθηκαν κατά 21.64% για το σύστημα HVDC-LCC και 19.45% για το σύστημα HVDC-VSC. Στον κόμβο «BB4 400kV» παρουσιάστηκε η μεγαλύτερη μείωση, τάξης του 63.07% για το σύστημα HVDC-LCC και 60% για το σύστημα HVDC-VSC.

Ο κόμβος «BB4 400kV» τροφοδοτείται άμεσα από το σύστημα HVDC, προκαλώντας μεγάλη μείωση στις τιμές του βραχυκυκλώματος, επιβεβαιώνοντας την καλύτερη προστασία του συστήματος από βραχυκύκλωμα με τη χρήση συστημάτων συνεχούς τάσης.

Τα αποτελέσματα βραχυκυκλώματος επαληθεύτηκαν με βάση τη βιβλιογραφία [29].

4.5. <u>Ανάλυση έκτακτης ανάγκης (contingency analysis)</u>

Η ανάλυση έκτακτης ανάγκης είναι μία μαθηματική μέθοδος για την πρόβλεψη αστοχίας του εξοπλισμού και τη λήψη διορθωτικών μέτρων πριν το σύστημα εισέλθει σε ασταθή κατάσταση.

HVAC:

Στην περίπτωση του συστήματος εναλλασσόμενου ρεύματος πραγματοποιείται βλάβη στη γραμμή μεταφοράς «Line 5». Το σύστημα συνεχίζει να βρίσκεται σε σταθερή κατάσταση, με τα φορτία να τροφοδοτούνται κανονικά. Η γραμμή μεταφοράς «Line 4» λειτουργεί με μεγαλύτερη φόρτιση από τις κανονικές συνθήκες, με φόρτιση γραμμής 84.8% και ισχύ μεταφοράς 288.3 MW. Οι γραμμές μεταφοράς «Line 1», «Line 2» και «Line 3» έχουν φόρτιση 68.9 %, 14.7 %, 62.2 % και ισχύ μεταφοράς 477.40 MW, 87.8 MW, 516.20 MW αντίστοιχα. Δηλαδή, στις γραμμές μεταφοράς του συστήματος αυξάνεται η φόρτιση τους, μειώνεται η ισχύς που μεταφέρεται με αποτέλεσμα να αυξάνονται οι απώλειες του συστήματος. Οι γεννήτριες του συστήματος παρουσιάζουν την ίδια συμπεριφορά με τις γραμμές, αυξάνεται η φόρτισή τους, εικόνα 4.63.

HVDC-LCC:

Στη περίπτωση του συστήματος συνεχούς ρεύματος HVDC-LCC πραγματοποιείται βλάβη στη γραμμή μεταφοράς «DC Line 2». Το σύστημα συνεχίζει να βρίσκεται σε σταθερή κατάσταση, με τα φορτία να τροφοδοτούνται κανονικά. Το σύστημα HVDC-LCC δεν χρησιμοποιείται για την τροφοδοσία των φορτίων, καθώς σε κάθε ζυγό υπάρχουν γεννήτριες που παράγουν αρκετή ισχύ για να τροφοδοτήσουν τα φορτία μέχρι να διορθωθεί η βλάβη, εικόνα 4.64.

HVDC-VSC:

Στη περίπτωση του συστήματος συνεχούς ρεύματος HVDC-VSC πραγματοποιείται βλάβη στη γραμμή μεταφοράς «DC Line 2». Το σύστημα παραμένει ανεπηρέαστο, καθώς κατά τη διάρκεια της βλάβης διατηρείται η ίδια ροή ισχύος στο σύστημα και όλες οι γραμμές και οι γεννήτριες λειτουργούν όπως στις κανονικές συνθήκες, εικόνα 4.65.

<u>Συμπέρασμα</u>:

Το σύστημα HVDC-VSC ανταποκρίνεται καλύτερα σε συνθήκες βλάβης μίας γραμμής. Ενώ και τα τρία συστήματα είναι ικανά να ανταπεξέλθουν σε τέτοιες περιπτώσεις, πραγματοποιώντας τη μεταφορά ισχύος με σταθερή κατάσταση, στο HVAC σύστημα επηρρεάζονται όλα τα στοιχεία του συστήματος με αποτέλεσμα να υπάρχει μεγαλύτερη φθορά και απώλειες ισχύος.

Τα αποτελέσματα ανάλυσης έκτακτης ανάγκης επαληθεύτηκαν με βάση τη βιβλιογραφία [29].

Στην εικόνα 4.63 φαίνεται η προσομοίωση βλάβης για το σύστημα HVAC.

Στην εικόνα 4.64 φαίνεται η προσομοίωση βλάβης για το σύστημα HVDC-LCC.

Στην εικόνα 4.65 φαίνεται η προσομοίωση βλάβης για το σύστημα HVDC-VSC.



Εικόνα 4.63: Προσομοίωση βλάβης στη γραμμή «Line5» του συστήματος ΗVAC



Εικόνα 4.64 Προσομοίωση βλάβης στη γραμμή «DC Line 2» του συστήματος HVDC-LCC



Εικόνα 4.65: Προσομοίωση βλάβης στη γραμμή «DC Line 2» του συστήματος HVDC-VSC

4.6. <u>Τοποθέτηση συστημάτων HVDC-LCC και HVDC-VSC στο σύστημα</u>

Στο σύστημα HVAC, οι γραμμές μεταφοράς «Line 1» και «Line 3» μεταφέρουν μεγάλο φορτίο ισχύος και παρουσιάζουν σημαντικές απώλειες. Θα αντικατασταθούν ξεχωριστά, με συστήματα HVDC-LCC και HVDC-VSC ώστε να μελετηθεί ποια γραμμή μεταφοράς είναι η ιδανική να λειτουργεί με συνεχές ρεύμα για την καλύτερη απόδοση του συστήματος, εικόνες 4.66, 4.73, 4.82, 4.89.

4.6.1. Αντικατάσταση γραμμής «Line 1» HVDC-LCC 2

Οι παράμετροι εμφανίζονται στις εικόνες 4.67 – 4.72.



Εικόνα 4.66: Σύστημα HVDC-LCC 2

Αναλυτικά στοιχεία τεχνολογίας LCC:

Ανορθωτής:

Ο ανορθωτής μετατρέπει εναλλασσόμενη τάση 400kV σε συνεχή τάση 521.7833kV, εικόνες 4.67 – 4.68.

Firing Angle (alpha-)Control		_
Control-Characteristic	Vdc	•
Voltage Setpoint	1.	p.u.
Automatic Firing Angle Control		
Actual Firing-Angle	15.	deg
Minimum Firing Angle	0.	deg
Maximum Firing Angle	180.	deg
Minimum Extinction Angle	0.	deg
Actual Winding Ratio	1.	p.u.
Actual Winding Natio	ji.	p.u.
Commutation Reactance	0.	Ohm
Phase Shift	0.	*30deg
Setpoint for DC Load How		

lame Rectifier			
Ratings			-
Rated AC Voltage	400.	kV	-
Rated DC-Voltage (DC)	521.7833	kV	
Rated Active Power	1043.567	MW/	
Rated DC-Current	2.	kA	
Nominal Turns-Ratio (t2/t1)	1.		
Nominal Firing Angle	15.	deg	
Diode-/Thyristor Converter Thyristor Diode			
Converter Transformer			
Built-In Transformer			
Minimum Turns-Ratio	0.9	p.u.	
Maximum Turns-Ratio	1.1	p.u.	

Εικόνα 4.67: Στοιχεία ροής φορτίου ανορθωτή

Εικόνα 4.68: Βασικά στοιχεία ανορθωτή

Αντιστροφέας:

Ο αντιστροφέας μετατρ
έπει συνεχή τάση 521.7833kV σε εναλλασσόμενη τάση 400kV, εικόνε
ς 4.69 – 4.70.

Firing Angle (alpha-)Control		
Control-Characteristic	P	·
Power-Setpoint	460.	MW
Automatic Firing Angle Control		
Actual Firing-Angle	15.	deg
Minimum Firing Angle	0.	deg
Maximum Firing Angle	180.	deg
Minimum Extinction Angle	0.	deg
Actual Winding Ratio	1.	р.и.
Commutation Reactance	0.	Ohm
Phase Shift	0.	*30deg

Name Inverter Ratings • Rated AC Voltage 400 ٨V 521.7833 kV Rated DC-Voltage (DC) MW Rated Active Power
Rated DC-Current 1043.567 2. kA Nominal Turns-Ratio (t2/t1) 1 15. Nominal Firing Angle deg Diode-/Thyristor Converter
 Thyristor
 Thyristor
 Diode - Converter Transformer -Built-In Transformer 0.9 Minimum Turns-Ratio p.u. Maximum Turns-Ratio 1.1 p.u.

Εικόνα 4.70: Βασικά στοιχεία αντιστροφέα

Εικόνα 4.69: Στοιχεία ροής φορτίου αντιστροφέα

<u>Γραμμή DC 1</u>:

<u>Γραμμή DC 2</u>:

Οι γραμμές μεταφοράς έχουν μήκος 100km και τάση 500kV, εικόνες 4.71 – 4.72.

Name	DC Line 1		
Туре	Equipment Type Library\Line Type(5)	
Terminal i	✓	IN2 250k)	/ DC
Terminal j	Grid\IN1 250kV DC\Cub_1	IN1 250k)	/ DC
Zone	Teminal i 🔹 🔹		
Area	Teminal i 🔹 🔸		
Cut of Service			
- Number of		Resulting Values	
parallel Lines	1	Rated Current (act.) Pos. Seq. Impedance, Z1	2. kA 10.04988 Ohm
Parameters		Pos. Seq. Impedance, Ang	le 84.28941 deg
Thermal Bating	T +	Pos. Seq. Resistance, R1	1. Ohm
		Zero Seg. Reactance, AT	10. Ohm
Length of Line	100. km	Zero Seg. Reactance, X0	0. Ohm
Derating Factor	1.	Earth-Fault Current, Ice	0. A
Laying	Ground	Earth Factor, Magnitude Earth Factor, Angle	0.3333333 180. deg
Type of Line	Cable		
Line Model			
Lumped Para	meter (PI)		
C Distributed P	arameter		
Sections/L	ine Loads		

Εικόνα 4.71: Βασικά στοιχεία γραμμής DC 1

Name	DC Line 2		
Туре	► → Equipment Type Library\Line Type	e(5)	
Terminal i	Grid/JN4 250kV DC/Cub_5	IN4 250kV D	с
Terminal j	➡ Grid\\N3 250kV DC\Cub_1	IN3 250kV D	c
Zone Area	Teminal i • … Teminal i • …		
Cut of Service			
Number of		Resulting Values	
parallel Lines	1	Rated Current (act.) Pos. Seq. Impedance, Z1	2. kA 10.04988 Ohm
Parameters		Pos. Seq. Impedance, Angle	84.28941 deg
Themal Rating	▼ →	Pos. Seq. Resistance, HI Pos. Seq. Reactance, X1	1. Ohm 10. Ohm
Length of Line	100 km	Zero Seq. Resistance, R0	0. Ohm
Denting Forder	1	Zero Seq. Reactance, X0	0. Ohm
Derating Pactor	1.	Earth-Fault Current, Ice	0. A
Laying	Ground	Earth Factor, Magnitude Earth Factor, Angle	0.3333333 180. deg
Type of Line	Cable		
Line Model			
• Lumped Par	ameter (PI)		
C Distributed F	'arameter		
Sections/	Line Loads		

Εικόνα 4.72: Βασικά στοιχεία γραμμής DC 2

4.6.2. Αντικατάσταση γραμμής «Line 1» HVDC-VSC 2



Οι παράμετροι εμφανίζονται στις εικόνες 4.74 – 4.79.

Εικόνα 4.73: Σύστημα HVDC-VSC 2

Αναλυτικά στοιχεία τεχνολογίας VSC:

Οι μετατροπείς 1 και 2 είναι τύπου PWM, μετατρέπουν εναλλασσόμενη τάση 400kV σε συνεχή τάση 500kV με φαινόμενη ισχύ 400MVA, εικόνες 4.74 – 4.77.

Μετατροπέας 1:

Name PWM Converter 1	Control Mode P-Q 💌 🗌 Wind Gen	nerator Model
Terminal AC		
Teminal DC+		
Teminal DC-		
Zone Terminal AC 💌 🌩	Active Power Setpoint -460. MW	
Area Terminal AC 💌 🔸	Reactive Power Setpoint 0. Mvar	
Out of Service	Controlled Flow	
- Number of	External Station Controller 📃 🛨	
parallel Converters 1	Reactive Power Limits	ability Curve
Ratings Modulation Rated AC-Votage 400. kV Rated AC-Votage (DC) 500. kV Rated Power 400. MV/A Series Reactor 500. KV Shot Circuit Impedance 15. % Copper Losses 200. KW	Capability Curve ↓ Min. -1. p.u. 400. Max. 1. p.u. 400. Mvar Scaling Factor (mn.) Scaling Factor (max.) Toto. % Scaling Factor (max.) Scaling Factor (max.)	qmin-1.00 + 0 + qmax 1,89 1.00 -10 - 0.5 + 0 + 0.5 + 10 -10 - 0.5 + 0 + 0.5 + 10 + 0 x (0.001-1.15) + 1.00

Εικόνα 4.74: Βασικά στοιχεία μετατροπέα 1

Εικόνα 4.75: Στοιχεία ροής φορτίου μετατροπέα 1

Μετατροπέας 2:

DWIN Count	2		
Name PWM Convert	er 2		
Terminal AC	B3 400k V\Cub_6	BB3 400kV	
Terminal DC+ 💌 → Grid\II	V2 250kV DC\Cub_3	IN2 250kV DC	
Terminal DC- 💌 → Grid\II	V4 250kV DC\Cub_1	IN4 250kV DC	
Zone Terminal AC	▼ ◆ …		
Area Terminal AC	•		
Out of Service			
Number of			
parallel Converters	1		
Ratings		Modulation	
Rated AC-Voltage	400. kV	 Sinusoidal PWM 	
Rated DC-Voltage (DC)	500. kV	C Rectangular PWM	
Rated Power	400. MVA	C No Modulation	
Series Reactor			
Short Circuit Impedance	10. %	No-Load Losses 0. kW	
Copper Losses	100. kW		
Model 🔶			

Εικόνα 4.76: Βασικά στοιχεία μετατροπέα 2

Control Mode	Vdc-Q	-	
DC Voltage Setpoint	1. ,	p.u.	
Reactive Power Setpoint	0.	Mvar	
Controlled Flow	▼ →		
External Station Controller	▼ →		
			Capability Curve
Reactive Power Limits	1		(0.00/1.15)
Capability Curve 🔽	•		qmin/-1.00 9 qmax/ 1.00
Min. 1.	p.u400.	Mvar	1.00
Max. 1.	p.u. 400.	Mvar	0.5-
Scaling Factor (min.)	100.	%	
Scaling Factor (max.)	100.	%	-10 -0.5 00 0.5 10
Setpoint for DC Load Flow			-0.5-
Active Power Setpoint	460.	MW	pmin
Controlled Flow]		-1.00

Εικόνα 4.77: Στοιχεία ροής φορτίου μετατροπέα 2

<u>Γραμμή DC 1</u>:

<u>Γραμμή DC 2</u>:

Οι γραμμές μεταφοράς έχουν μήκος 100km και τάση 500kV, εικόνες 4.78 – 4.79.

Name	DC Line 1		
Туре	Equipment Type Library\Line Type	5)	
Terminal i	Grid\IN2 250kV DC\Cub_2	IN2 250kV D	с
Terminal j	Grid\IN1 250kV DC\Cub_2	IN1 250kV D	с
Zone	Teminal i 💌 🔹		
Area	Teminal i 💌 🔹		
Out of Service Number of		Resulting Values	
parallel Lines	1	Rated Current (act.)	2. kA
pordier brice	P	Pos. Seq. Impedance, Z1	10.04988 Ohm
Parameters		Pos. Seq. Impedance, Angle	84.28941 deg
Thermal Rating	▼ +	Pos. Seq. Resistance, R1 Res. Seq. Resistance, X1	1. Ohm
Length of Line	100 km	Zero Seg. Resistance, R0	0. Ohm
congar or circ		Zero Seq. Reactance, X0	0. Ohm
Derating Factor	<u>р.</u>	Earth-Fault Current, Ice	0. A
Laying	Ground	Earth Factor, Magnitude Earth Factor, Angle	0.3333333 180. deg
Type of Line	Cable		
Line Model			
Cumped Para	ameter (PI)		
C Distributed P	arameter		
Sections/L	Line Loads		

Type Terminal i	Equipment Type Library\Line Type Ged\IN4.250kV DC\Cub. 3	(5) IN4 2505V D	r
Terminal		ING 250KV D	с с
reminal j	Gind (INV3 250KV DC (CUB_4	1143 Z50K V D	
Zone			
Area	Teminal i 🔄 🛨		
Out of Service	•		
Number of		Resulting Values	
parallel Lines	1	Rated Current (act.)	2. kA
		Pos. Seq. Impedance, Z I Res. Seq. Impedance, Z I	10.04988 Onn 94.29941 dog
Parameters		Pos Seg Resistance R1	1 Ohm
Thermal Rating	▼ →	Pos. Seg. Reactance, X1	10. Ohm
Length of Line	100. km	Zero Seq. Resistance, R0	0. Ohm
	-	Zero Seq. Reactance, X0	0. Ohm
Derating Factor	, hr	Earth-Fault Current, Ice	0. A
Laying	Ground	Earth Factor, Magnitude	0.3333333
Type of Line - Line Model	Cable		100.069
• Lumped Pa	rameter (PI)		
C Distributed	Parameter		

Εικόνα 4.78: Βασικά στοιχεία γραμμής DC 1

Εικόνα 4.79: Βασικά στοιχεία γραμμής DC 2

4.6.3. Ανάλυση ροής φορτίου συστημάτων HVDC-LCC 2 και HVDC-VSC 2

Η ανάλυση ροής φορτίου πραγματοποιήθηκε με τη μέθοδο «AC Load Flow». Οι μετρήσεις γίνονται στις γραμμές μεταφοράς Line 1 και DC Line 1/2 των συστημάτων HVAC, HVDC-LCC 2 και HVDC-VSC 2. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων καταγράφονται στους πίνακες 4.15 - 4.18.

Πίνακας 4.15: Ανάλυση β	ροής φορτίου [,]	γραμμών Line 1	l και DC Line 1/2
-------------------------	---------------------------	----------------	-------------------

	HVAC	HVDC-LCC 2	HVDC-VSC 2
Απώλειες ενεργού ισχύος (MW)	3.22	1.70	1.68
Φόρτιση γραμμής (%)	68.80	46.20	45.80

Φόρτιση (%)	HVAC	HVDC-LCC 2	HVDC-VSC 2
PH	66.70	66.70	66.70
SG1	76.50	82.30	77.20
SG2	77.80	81	78
SG3	48.50	48.60	48.30
SG4	54.30	56.60	54.30
SG5	22.30	28.90	22.30

Πίνακας 4.16: Φόρτιση (%) γεννητριών και φωτοβολταϊκού

Πίνακας 4.17: Φόρτιση (%) των υπολοίπων γραμμών μεταφοράς

Φόρτιση (%)	HVAC	HVDC-LCC 2	HVDC-VSC 2
Line 2	14.10	18.30	15
Line 3	61.30	64.60	63.70
Line 4	43	45.50	42.50
Line 5	43	45.50	42.50

Πίνακας 4.18: Απώλειες ενεργού ισχύος (MW) των υπολοίπων γραμμών μεταφοράς

Απώλειες ενεργού	HVAC	HVDC-LCC 2	HVDC-VSC 2
ισχύος (MW)			
Line 2	0.12	0.17	0.11
Line 3	4.08	4.53	4.37
Line 4	2.37	2.59	2.33
Line 5	2.37	2.59	2.33

Οι απώλειες ενεργού ισχύος στη γραμμή μεταφοράς, με την τοποθέτηση συστήματος HVDC-LCC μειώνονται κατά 47% και με HVDC-VSC κατά 47.80%. Επίσης, η φόρτιση γραμμής μειώνεται κατά 32% και 33% αντίστοιχα.

Οι μετατροπείς του συστήματος HVDC-LCC καταναλώνουν άεργο ισχύ για να λειτουργήσουν. Ο ανορθωτής απαιτεί 170.18 Mvar και ο αντιστροφέας 171.16 Mvar. Λόγω της αυξημένης κατανάλωσης ισχύος από τους μετατροπείς του συστήματος HVDC-LCC, η φόρτιση των γεννητριών και των γραμμών μεταφοράς AC, καθώς και οι απώλειες ενεργού ισχύος των γραμμών μεταφοράς AC, καταγράφουν μεγαλύτερες τιμές συγκριτικά με τα άλλα δύο συστήματα.

Οι μετατροπείς του συστήματος HVDC-VSC καταναλώνουν και αυτοί ισχύ, ο μετατροπέας 1 απαιτεί 0.26 MW και ο μετατροπέας 2 απαιτεί 0.13 MW. Η ισχύς αυτή είναι σημαντικά λιγότερη από την ισχύ που απαιτεί το σύστημα HVDC-LCC και αυξάνει ελάχιστα τις τιμές φόρτισης γεννητριών «SG1» και «SG2» και γραμμών μεταφοράς AC «Line 1» και «Line 2» και τις απώλειες ενεργού ισχύος της γραμμής μεταφοράς AC «Line 3», συγκριτικά με το αρχικό σύστημα HVAC.

Στην εικόνα 4.80 φαίνεται η προσομοίωση ροής φορτίου για το σύστημα HVDC-LCC 2. Στην εικόνα 4.81 φαίνεται η προσομοίωση ροής φορτίου για το σύστημα HVDC-LCC 2.



Εικόνα 4.80: Ροή φορτίου συστήματος HVDC-LCC 2



Εικόνα 4.81: Ροή φορτίου συστήματος HVDC-VSC 2

4.6.4. Αντικατάσταση γραμμής «Line 3» HVDC-LCC 3

Οι παράμετροι εμφανίζονται στις εικόνες 4.83 – 4.88.



Εικόνα 4.82: Σύστημα HVDC-LCC 3

Αναλυτικά στοιχεία τεχνολογίας LCC:

Ανορθωτής:

Ο ανορθωτής μετατρέπει εναλλασσό
μενη τάση 400kV σε συνεχή τάση 521.7833kV, εικόνες 4.83 – 4.84.

Firing Angle (alpha-)Control		
Control-Characteristic	Vdc -	•
/oltage Setpoint	1.	p.u.
 Automatic Firing Angle Control 		
Actual Firing-Angle	15.	deg
Vinimum Firing Angle	0.	deg
Maximum Firing Angle	180.	deg
Vinimum Extinction Angle	0.	deg
lap-Changer Actual Winding Ratio	Fixed Tap	▼
Fap-Changer Actual Winding Ratio	Fixed Tap	▼
Commutation Reactance	0.	Ohm
Phase Shift	0.	*30deg
Phase Shift	0.	*30deg
Phase Shift Setpoint for DC Load Flow	0.	*30deg

ridango		_ *
Rated AC Voltage	400.	kV –
Rated DC-Voltage (DC)	521.7833	кV
Rated Active Power	1043.567	MW
Rated DC-Current	2.	kA
Nominal Turns-Ratio (t2/t1)	1.	
	10	dea
Diode-/Thyristor Converter	J 15.	ueg
Nominal Hing Angle Diode-/Thyristor Converter Thyristor Diode	115.	ueg
Nominal Hing Angle	15.	Jog
Nominal Hing Ange Diode-/Thyristor Converter Thyristor Thyristor Diode Converter Transformer Unit-In Transformer	15.	
Nominal Hing Ange Diode-/Thyristor Converter Thyristor Diode Converter Transformer Unitrin Transformer Minimum Tums-Ratio	0.9	р.u.

Εικόνα 4.83: Στοιχεία ροής φορτίου ανορθωτή

Εικόνα 4.84: Βασικά στοιχεία ανορθωτή

Αντιστροφέας:

Ο αντιστροφέας μετατρέπει συνεχή τάση 521.7833kV σε εναλλασσόμενη τάση 400kV, εικόνες 4.85 - 4.86.

> Name Inverter Ratings

Rated AC Voltage

Rated DC-Voltage (DC)

Rated Active Power Rated DC-Current

Diode-/Thyristor Converter Thyristor C Diode Converter Transformer 🔽 Built-In Transformer

Minimum Turns-Ratio

Maximum Turns-Ratio

Nominal Turns-Ratio (t2/t1) Nominal Firing Angle

400.

15.

0.9

1.1

Εικόνα 4.86: Βασικά στοιχεία αντιστροφέα

521.7833 kV 1043.567 MW

1. 2.

- Firing Angle (alpha-)Control			
Control-Characteristic	P	-	
Power-Setpoint	600.	MW	
Automatic Firing Angle Co	ntrol		
Actual Firing-Angle	15.	deg	
Minimum Firing Angle	0.	deg	
Maximum Firing Angle	180.	deg	
Minimum Extinction Angle	0.	deg	
Converter Transformer Tap-Changer	Fixed Tap		
Converter Transformer	Fixed Tap	-	
Converter Transformer Tap-Changer Actual Winding Ratio	Fixed Tap	p.u.	
Converter Transformer Tap-Changer Actual Winding Ratio Commutation Reactance	Fixed Tap 1.	p.u.	
Conveter Transformer Tap-Changer Actual Winding Ratio Commutation Reactance Phase Shift	Fixed Tap 1. 0.	p.u. p.u. Ohm *30deg	
Conveter Transformer Tap-Changer Actual Winding Ratio Commutation Reactance Phase Shift - Secount for DC Load Row	Fixed Tap 1. 0. 0.	p.u. Dhm *30deg	

Εικόνα 4.85: Στοιχεία ροής φορτίου αντιστροφέα

<u>Γραμμή DC 1</u>:

<u>Γραμμή DC 2</u>:

Οι γραμμές μεταφοράς έχουν μήκος 110km και τάση 500kV, εικόνες 4.87 – 4.88.

Name	DC Line 1		
Туре	Equipment Type Library\Line Type(5	5)	
Terminal i	Grid\IN2 250kV DC\Cub_2	IN2 250kV D	c
Teminal j	Grid\IN1 250kV DC\Cub_2	IN1 250kV D	c
Zone	Teminal i 🔹 🔸		
Area	Terminal i 🔹 🔸		
Out of Service		Resulting Values	214
parallel Lines	1	Rated Current (act.) Pos. Seq. Impedance, Z1 Pos. Seq. Impedance, Angle	2. kA 11.05486 Ohm 84.28941 deg
Parameters	-1-1	Pos. Seq. Resistance, R1	1.1 Ohm
Thermal Rating	• •	Pos. Seq. Reactance, X1	11. Ohm
Length of Line	110. km	Zero Seq. Resistance, R0	0. Ohm
Derating Factor	1.	Zero Seq. Reactance, XU	0. Ohm
Laying	Ground	Earth Factor, Magnitude Earth Factor, Angle	0.3333333 180. deg
Type of Line	Cable		
Line Model			
 Lumped Para 	meter (PI)		
C Distributed Pa	arameter		
Sections/L	ine Loads		

Εικόνα 4.87: Βασικά στοιχεία γραμμής DC 1

Name	DC Line 2		
Туре	Equipment Type Library\Line Type	e(5)	
Terminal i	▼ ➡ Grid\IN4 250kV DC\Cub_3	IN4 250kV D	c
Teminal j	➡ Grid\IN3 250kV DC\Cub_4	IN3 250kV D	с
Zone	Teminal i 🔹 🔹		
Area	Teminal i 🔹 🔹		
C Out of Service			
Number of		Resulting Values	
parallel Lines	1	Rated Current (act.)	2. kA
		Pos. Seq. Impedance, Z1	11.05486 Ohm
Parameters		Pos. Seq. Impedance, Angle Pos. Seq. Pasistance, P1	04.20341 deg
Thermal Rating	▼	Pos Sen Reactance X1	11 Ohm
Length of Line	110 km	Zero Seg. Resistance, R0	0. Ohm
Deliger of Dife	ITTO. NII	Zero Seg. Reactance, X0	0. Ohm
Derating Factor	1.	Earth-Fault Current, Ice	0. A
Laving	Ground	Earth Factor, Magnitude	0.3333333
	dicting	Earth Factor, Angle	180. deg
Type of Line	Cable		
Line Model			
• Lumped Para	ameter (PI)		
C Distributed P	arameter		
	ino Londo		
Line Model C Lumped Para C Distributed P	ameter (PI) arameter		

Εικόνα 4.88: Βασικά στοιχεία γραμμής DC 2

۲

kV

kA

deg

p.u.

p.u.

4.6.5. Αντικατάσταση γραμμής «Line 3» HVDC-VSC 3

ŝĜ IN5 16.5kV Â • •





Εικόνα 4.89: Σύστημα HVDC-VSC 3

Αναλυτικά στοιχεία τεχνολογίας VSC:

Οι μετατροπείς 1 και 2 είναι τύπου PWM, μετατρέπουν εναλλασσόμενη τάση 400kV σε συνεχή τάση 500kV με φαινόμενη ισχύ 400MVA, εικόνες 4.90 – 4.93.

Μετατροπέας 1:

Name PWM Conve	rter 1		
Terminal AC 💌 → Grid	BB2 400kV\Cu	ib_6	BB2 400kV
Terminal DC+ 💌 🔶 Grid	JN1 250kV DC	\Cub_3	IN1 250kV DC
Terminal DC- 💌 🔿 Grid	IN3 250kV DC	Cub_2	IN3 250kV DC
Zone Terminal AC	-	•	
Area Terminal AC	•		
Out of Service			
Number of			
parallel Converters	1		
Ratings			Modulation
Rated AC-Voltage	400.	kV	 Sinusoidal PWM
Rated DC-Voltage (DC)	500.	kV	C Rectangular PWM
Rated Power	400.	MVA	No Modulation
Series Reactor			
Short Circuit Impedance	15.	%	No-Load Losses 0. kW
Copper Losses	200.	kW	

P-Q Wind Generator Model -Control Mode Active Power Setpoint -600 Reactive Power Se Controlled Flow -**~**|**+**| e Power Limits ity Curve **v**|+ Min 0. Max. Scaling Factor (min.) Scaling Factor (max. Setpoint for DC Load Flo -600 Active Power Setpoint MM Controlled Flow

Εικόνα 4.90: Βασικά στοιχεία μετατροπέα 1

Εικόνα 4.91: Στοιχεία ροής φορτίου μετατροπέα 1

Μετατροπέας 2:

dor 2	
DDD 4001100 1 0	550 (07)/
BB3 400kV/Cub_6	BB3 400k V
IN2 250kV DC\Cub_3	IN2 250kV DC
IN4 250kV DC\Cub_1	IN4 250kV DC
▼	
• •	
1	
12	
	Modulation
400. kV	 Sinusoidal PWM
500. kV	C Rectangular PWM
400. MVA	C No Modulation
10. %	No-Load Losses 0. kW
100 FW	
	ter 2 BB3 400×VCub_5 BB3 400×VCub_6 3 IN4 250×V DC'Cub_1

Εικόνα 4.92: Βασικά στοιχεία μετατροπέα 2

Control Mode Vdc Q I DC Votage Seport 1. p.u. Reactive Power Setpoint 0. Mvar Controlled Pow I II. p.u. Reactive Power Lints 0. Controlled Pow III. Capability Curve III. Reactive Power Lints 0. Mvar Max. 1. p.u. 4400. Mvar Max. 1. p.u. 4400. Mvar Max. 1. p.u. 4400. Mvar Scaling Factor (im.) 100. % Controlled Pow III.

Εικόνα 4.93: Στοιχεία ροής φορτίου μετατροπέα 2

IN4 250kV DC IN3 250kV DC

2. kA

<u>Γραμμή DC 1</u>:

<u>Γραμμή DC 2</u>:

Οι γραμμές μεταφοράς έχουν μήκος 110km και τάση 500kV, εικόνες 4.94 – 4.95.

ame 🛛	DC Line 1		
ype	Equipment Type Library\Line Type	e(5)	
eminal i	Grid\IN2 250kV DC\Cub_2	IN2 250kV D	c
Terminal j	Grid\IN1 250kV DC\Cub_2	IN1 250kV D	c
Zone	Teminal i 🔹 🔹		
Area	Teminal i 💌 🔸		
Out of Service			
Number of		Resulting Values	
parallel Lines	1	Rated Current (act.)	2. kA
		Pos. Seq. Impedance, Z1 Pos. Seq. Impedance, Angle	11.05486 Ohm 84.28941 deg
Parameters		Pos. Seq. Resistance, R1	1.1 Ohm
Thermal Rating	▼ →	Pos. Seq. Reactance, X1	11. Ohm
Length of Line	110. km	Zero Seq. Resistance, R0	0. Ohm
Derating Factor	1.	Zero Seq. Reactance, X0	0. Ohm
Laying	Ground	Earth Factor, Magnitude	0.3333333
		Earth Factor, Angle	180. deg
ype of Line	Cable		
Line Model			
• Lumped Param	ieter (PI)		
C Distributed Par	ameter		
Sections/Lin	ie Loads		

Εικόνα 4.94: Βασικά στοιχεία γραμμής DC 1

Εικόνα 4.95: Βασικά στοιχεία γραμμής DC 2

4.6.6. <u>Ανάλυση ροής φορτίου συστημάτων HVDC-LCC 3 και HVDC-VSC 3</u>

Η ανάλυση ροής φορτίου πραγματοποιήθηκε με τη μέθοδο «AC Load Flow». Οι μετρήσεις γίνονται στις γραμμές μεταφοράς Line 3 και DC Line 1/2 των συστημάτων HVAC, HVDC-LCC 3 και HVDC-VSC 3. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων καταγράφονται στους πίνακες 4.19 - 4.22.

Πίνακας 4.19: Ανάλυση	ροής	φορτίου	γραμμών	Line 3	και DC	Line	1/2
------------------------------	------	---------	---------	--------	--------	------	-----

	HVAC	HVDC-LCC 3	HVDC-VSC 3
Απώλειες ενεργού ισχύος (MW)	4.08	3.18	3.14
Φόρτιση γραμμής (%)	61.30	60.10	59.60

Φόρτιση (%)	HVAC	HVDC-LCC 3	HVDC-VSC 3
PH	66.70	66.70	66.70
SG1	76.50	80.90	76.40
SG2	77.80	80	77.80
SG3	48.50	50.30	48.10
SG4	54.30	59.60	54.50
SG5	22.30	32.10	22.30

Πίνακας 4.20: Φόρτιση (%) γεννητριών και φωτοβολταϊκού

Πίνακας 4.21: Φόρτιση (%) των υπολοίπων γραμμών μεταφοράς

Φόρτιση (%)	HVAC	HVDC-LCC 3	HVDC-VSC 3
Line 1	68.80	58.50	57.40
Line 2	14.10	5.30	4.20
Line 4	43	46.30	42.50
Line 5	43	46.30	42.50

Πίνακας 4.22: Απώλειες ενεργού ισχύος (MW) των υπολοίπων γραμμών μεταφοράς

Απώλειες ενεργού	HVAC	HVDC-LCC 3	HVDC-VSC 3
ισχύος (MW)			
Line 1	3.22	2.32	2.22
Line 2	0.12	0	0
Line 4	2.37	2.67	2.33
Line 5	2.37	2.67	2.33

Οι απώλειες ενεργού ισχύος στη γραμμή μεταφοράς, με την τοποθέτηση συστήματος HVDC-LCC μειώνονται κατά 22% και με HVDC-VSC κατά 23%. Επίσης, η φόρτιση γραμμής μειώνεται κατά 1% και 2% αντίστοιχα.

Οι μετατροπείς του συστήματος HVDC-LCC καταναλώνουν άεργο ισχύ για να λειτουργήσουν. Ο ανορθωτής απαιτεί 226.58 Mvar και ο αντιστροφέας 209.80 Mvar. Λόγω της αυξημένης κατανάλωσης ισχύος από τους μετατροπείς του συστήματος HVDC-LCC, η φόρτιση των γεννητριών αυξήθηκε. Οι γραμμές μεταφοράς AC «Line 1» και «Line 2» παρουσίαζουν μείωση στην φόρτισή τους και στις απώλειες ισχύος, καθώς το μεγαλύτερο μερος ισχύος για τη λειτουργία του ανορθωτή και του αντιστροφέα, καλύπτεται από τις γεννήτριες «SG 3», «SG 4» και «SG 5», αυξάνοντας τη φόρτιση και τις απώλειες ισχύος των γραμμών μεταφοράς AC «Line 4» και «Line 5».

Οι μετατροπείς του συστήματος HVDC-VSC καταναλώνουν και αυτοί ισχύ, ο μετατροπέας 1 απαιτεί 0.44 MW και ο μετατροπέας 2 απαιτεί 0.21 MW. Η ισχύς αυτή είναι σημαντικά λιγότερη από την ισχύ που απαιτεί το σύστημα HVDC-LCC και οι τιμές φόρτισης γεννητριών παραμένουν στα ίδια επίπεδα με αυτά του συστήματος HVAC. Οι γραμμές μεταφοράς AC έχουν μειωμένη φόρτιση και απώλειες ενεργού ισχύος συγκριτικά με το αρχικό σύστημα HVAC.

Στην εικόνα 4.96 φαίνεται η προσομοίωση ροής φορτίου για το σύστημα HVDC-LCC 3. Στην εικόνα 4.97 φαίνεται η προσομοίωση ροής φορτίου για το σύστημα HVDC-VSC 3.



Εικόνα 4.96: Ροή φορτίου συστήματος HVDC-LCC 3



Εικόνα 4.97: Ροή φορτίου συστήματος HVDC-VSC 3

Σε όλες τις περιπτώσεις που αντικαθιστάται ένα σύστημα εναλλασσόμενου ρεύματος με ένα σύστημα συνεχούς, οι απώλειες μειώνονται. Στον πίνακα 4.23 καταγράφονται οι συνολικές απώλειες κάθε συστήματος.

HVDC-LCC 1: Αντικατάσταση γραμμών «Line 4» και «Line 5».

HVDC-LCC 2: Αντικατάσταση γραμμών «Line 1».

HVDC-LCC 3: Αντικατάσταση γραμμών «Line 3».

HVDC-VSC 1: Αντικατάσταση γραμμών «Line 4» και «Line 5».

HVDC-VSC 2: Αντικατάσταση γραμμών «Line 1».

HVDC-VSC 3: Αντικατάσταση γραμμών «Line 3».

Σύστημα	Συνολικές απώλειες (MW)
HVAC	15.44
HVDC-LCC 1	15.42
HVDC-LCC 2	14.93
HVDC-LCC 3	14.23
HVDC-VSC 1	13.64
HVDC-VSC 2	14.10
HVDC-VSC 3	13.29

Πίνακας 4.23: Συνολικές απώλειες συστημάτων

Σε κάθε περίπτωση που έγινε τοποθέτηση συστημάτων HVDC-LCC και HVDC-VSC παρατηρήθηκε η υπεροχή των συστημάτων συνεχούς τάσης και πιο συγκεκριμένα του συστήματος HVDC-VSC. Οι απώλειες ενεργού ισχύος, η φόρτιση και η πτώση τάσης της γραμμής μεταφοράς μειώνονται σημαντικά με αποτέλεσμα συνολικά το σύστημα να γίνεται αποδοτικότερο με χαμηλότερη πιθανότητα φθοράς. Για το συγκεκριμένο σύστημα που μελετήθηκε ο σύνδεσμος που παρουσιάζει τις χαμηλότερες συνολικές απώλειες είναι το HVDC-VSC 3.

Τα αποτελέσματα ροής φορτίου επαληθεύτηκαν με βάση τη βιβλιογραφία [29].

4.6.7. <u>Ανάλυση βραχυκυκλώματος συστημάτων HVDC-LCC 2, HVDC-VSC 2,</u> <u>HVDC-LCC 3 και HVDC-VSC 3</u>

Για την ανάλυση βραχυκυκλώματος εφαρμόζεται τριφασικό βραχυκύκλωμα στους κόμβους με τάση 400kV στα συστήματα HVDC-LCC 2, HVDC-VSC 2, HVDC-LCC 3, HVDC-VSC 3. Σε κάθε κόμβο εφαρμόζεται ξεχωριστά σενάριο βραχυκυκλώματος.

Η ανάλυση γίνεται με το πρότυπο ΙΕС 60909.

Τα αποτελέσματα αναγράφονται συγκεντρωτικά στους πίνακες 4.24 – 4.26 και 4.27 – 4.29.

HVDC-LCC 2:

Στην εικόνα 4.98 φαίνονται τα αναλυτικά αποτελέσματα των μετρήσεων βραχυκυκλώματος του συστήματος HVDC-LCC 2 στον κόμβο «BB1 400 kV».

	Mater			. 120	 2214 Tda				Shart Circuit					-
A1	Lways Consider	ed			Autom	atic			Break Tir	ne ne	.1011	0	.10 s	i
 Decay	/ing Aperiodic	Component	(idc) B		Conducto	r Temperature Defined	No		Fault Cle c-Voltage Fa	earing T actor ined	lime (Ith)	1	.00 s	1
1				i										i
Grid:	: Grid	s	ystem S	Stage: (Grid	 I				Anr	nex:	/ 1		1
		rtd.V. [kV]	Vol [kV]	tage [deg]	c- Factor	Sk" [MVA/MVA]	I [kA/kA]	k" [deg]	ip [kA/kA]	Ib [kA]	Sb [MVA]	Ik [kA]	Ith [kA]	1
 BB1 40 Tr)0kV ransformer	400.00 IN 15.9k	0.00 V	0.00	1.10	6639.91 MVA 185.56 MVA	9.58 kA 0.27 kA	-88.36	25.28 kA 0.71 kA	9.07	6285.01	9.32	9.91	1
Tr Li Tr	ransformer 1 ine 2 ransformer 2 ectifier	IN1 16.5 BB2 400k IN2 16.5 IN1 250k	kV V kV V TN≏	2501-0		1698.71 MVA 3058.64 MVA 1698.71 MVA	2.45 kA 4.41 kA 2.45 kA	90.45 92.73 90.45	6.47 kA 11.64 kA 6.47 kA					111

Εικόνα 4.98: Προσομοίωση βραχυκυκλώματος στον κόμβο «BB1 400kV» του συστήματος HVDC-LCC 2

Στην εικόνα 4.99 φαίνονται τα αναλυτικά αποτελέσματα των μετρήσεων βραχυκυκλώματος του συστήματος HVDC-LCC 2 στον κόμβο «BB2 400 kV».

Fa Sh	ault Locations wi nort-Circuit Calc	th Feeders	Method	: IEC (60909		3	-Phase S	Short-Circuit	/ Ma	x. Short-(Circuit C	 urrents
As De 	synchronous Motor Always Consider ccaying Aperiodic Using Method	rs red Component	(idc) B		Grid Ide Autom Conducto User	entification Matic or Temperature Defined	No		Short-Circu: Break Til Fault Cle c-Voltage Fa User Def:	it Durat ne earing T actor ined	ion ime (Ith)		 0.10 s 1.00 s No
G1	rid: Grid	S	ystem	Stage: (Grid	I				Ann	ex:	/ 1	
 		rtd.V. [kV]	Vo [kV]	ltage [deg]	c- Factor	Sk" [MVA/MVA]	I [kA/kA]	k" [deg]	ip [kA/kA]	Ib [kA]	Sb [MVA]	Ik [kA]	Ith [kA]
 BB2 	2 400kV Transformer 3 Transformer 4 Line 2 Line 3	400.00 IN3 18kV IN4 18kV BB1 400k BB3 400k	0.00 V V	0.00	1.10	7790.74 MVA 2146.22 MVA 2146.22 MVA 2372.49 MVA 1126.71 MVA	11.24 kA 3.10 kA 3.10 kA 3.42 kA 1.63 kA	-88.77 90.44 90.44 92.25 92.07	29.87 kA 8.23 kA 8.23 kA 9.10 kA 4.32 kA	10.56	7314.07	11.07	 11.67

Εικόνα 4.99: Προσομοίωση βραχυκυκλώματος στον κόμβο «BB2 400kV» του συστήματος HVDC-LCC 2

Στην εικόνα 4.100 φαίνονται τα αναλυτικά αποτελέσματα των μετρήσεων βραχυκυκλώματος του συστήματος HVDC-LCC 2 στον κόμβο «BB3 400 kV».

Fault Locations w Short-Circuit Cal	tith Feeders culation / Method :	IEC 60909		3	-Phase S	Short-Circuit	/ Ma	x. Short-C	ircuit Cu	 1rrents
Asynchronous Moto Always Conside Decaying Aperiodi Using Method 	rs red c Component (idc) B	Grid Ider Autom Conductor User 1 	ntification atic r Temperature Defined	No		Short-Circui Break Tim Fault Cle c-Voltage Fa User Defi	t Durat e aring T ctor ned	ion ime (Ith)	(]]	 0.10 s 1.00 s No
Grid: Grid	System Sta	ge: Grid	 I				Ann	ex:	/ 1	
	rtd.V. Volta [kV] [kV] [ge c- deg] Factor	Sk" [MVA/MVA]	I [kA/kA]	k" [deg]	ip [kA/kA]	Ib [kA]	Sb [MVA]	Ik [kA]	Ith [kA]
 BB3 400kV Line 3 Inverter Line 5 Line 4	400.00 0.00 BB2 400kV IN2 250kV IN4 2 BB4 400kV BB4 400kV	0.00 1.10 50kV	4627.49 MVA 3259.85 MVA 0.00 MVA 684.07 MVA 684.07 MVA	6.68 kA 4.71 kA 0.00 kA 0.99 kA 0.99 kA	-87.32 93.22 0.00 91.39 91.39	17.33 kA 12.21 kA 0.00 kA 2.56 kA 2.56 kA	6.57	4553.22	6.59	6.86

Εικόνα 4.100: Προσομοίωση βραχυκυκλώματος στον κόμβο «BB3 400kV» του συστήματος HVDC-LCC 2

Στην εικόνα 4.101 φαίνονται τα αναλυτικά αποτελέσματα των μετρήσεων βραχυκυκλώματος του συστήματος HVDC-LCC 2 στον κόμβο «BB4 400 kV».

Fa Sh	ult Locations with ort-Circuit Calcu	th Feeders ulation /	Method	: IEC @	50909		3	-Phase S	Short-Circuit	/ Ma	x. Short-(Circuit Cu	irrents	1
As De 	ynchronous Motor Always Consider caying Aperiodic Using Method		Grid Ide Autom Conducto User	ntification atic r Temperature Defined	No		Short-Circui Break Tin Fault Cle c-Voltage Fa User Defi	Short-Circuit Duration Break Time Fault Clearing Time (Ith) c-Voltage Factor User Defined						
Gr	id: Grid	S	ystem S	Stage: (Grid	I				Ann	ex:	/ 1		I
1		rtd.V. [kV]	Vo: [kV]	Ltage [deg]	c- Factor	Sk" [MVA/MVA]	I [kA/kA]	k" [deg]	ip [kA/kA]	Ib [kA]	Sb [MVA]	Ik [kA]	Ith [kA]	I
 BB4 	400kV Transformer 5 Line 5 Line 4 Shunt/Filter	400.00 IN5 16.5 BB3 400k BB3 400k	0.00 kV V V	0.00	1.10	3922.46 MVA 1698.71 MVA 1112.73 MVA 1112.73 MVA 0.00 MVA	5.66 kA 2.45 kA 1.61 kA 1.61 kA 0.00 kA	-87.61 90.45 93.86 93.86 0.00	14.76 kA 6.39 kA 4.19 kA 4.19 kA 0.00 kA	5.41	3747.48	5.60	5.83	

Εικόνα 4.101: Προσομοίωση βραχυκυκλώματος στον κόμβο «BB4 400kV» του συστήματος HVDC-LCC 2

HVDC-VSC 2:

Στην εικόνα 4.102 φαίνονται τα αναλυτικά αποτελέσματα των μετρήσεων βραχυκυκλώματος του συστήματος HVDC-VSC 2 στον κόμβο «BB1 400 kV».

Fai	ult Locations wit ort-Circuit Calcu	h Feeders	Method	: IEC (60909		3	-Phase S	Short-Circuit	/ Ma	x. Short-	Circuit	Currents	1
As; De(Asynchronous Motors Always Considered Decaying Aperiodic Component (idc) Using Method B				Grid Ide Autom Conducto User	entification Natic or Temperature Defined	No		Short-Circui Break Tim Fault Cle c-Voltage Fa User Defi	t Durat e aring T actor .ned	ion ime (Ith)		0.10 s 1.00 s No	
Gr:	id: Grid	s	ystem S	tage: (Grid	I				Ann	ex:	/	1	1
 		rtd.V. [kV]	Vol [kV]	.tage [deg]	c- Factor	Sk" [MVA/MVA]	I [kA/kA]	k" [deg]	ip [kA/kA]	Ib [kA]	Sb [MVA]	Ik [kA]	Ith [kA]	I
 BB1 	400kV Transformer Transformer 1 Line 2 Transformer 2 PWM Converter 1	400.00 IN 15.9k IN1 16.5 BB2 400k IN2 16.5 IN1 250k	0.00 V kV V kV kV V IN3	0.00 250kV	1.10	6806.96 MVA 185.56 MVA 1698.71 MVA 3087.54 MVA 1698.71 MVA 138.56 MVA	9.82 kA 0.27 kA 2.45 kA 4.46 kA 2.45 kA 0.20 kA	-88.24 95.50 90.45 92.81 90.45 -84.29	25.86 kA 0.70 kA 6.45 kA 11.73 kA 6.45 kA 0.53 kA	9.31	6453.60	9.27	10.15	

Εικόνα 4.102: Προσομοίωση βραχυκυκλώματος στον κόμβο «BB1 400kV» του συστήματος HVDC-VSC 2

Στην εικόνα 4.103 φαίνονται τα αναλυτικά αποτελέσματα των μετρήσεων βραχυκυκλώματος του συστήματος HVDC-VSC 2 στον κόμβο «BB2 400 kV».

Fault Locations wi Short-Circuit Calc	th Feeders ulation / Me	thod : IEC	60909		3	-Phase S	Short-Circuit	/ Ma	x. Short-	Circuit C	 urrents	
Asynchronous Motor Always Consider Decaying Aperiodic Using Method 	s ed Component (Grid Ide Autom Conducto User	entification Natic or Temperature Defined	No	 	Short-Circuit Duration Break Time Fault Clearing Time (Ith) c-Voltage Factor User Defined			0.10 s 1.00 s No		
Grid: Grid	Sys	tem Stage:	Grid					Ann	ex:	/ 1	I	
 	rtd.V. [kV] [Voltage kV] [deg	c-] Factor	Sk" [MVA/MVA]	I [kA/kA]	k" [deg]	ip [kA/kA]	Ib [kA]	Sb [MVA]	Ik [kA]	Ith [kA]	
 BB2 400kV Transformer 3 Transformer 4 Line 2 Line 3	400.00 0 IN3 18kV IN4 18kV BB1 400kV BB3 400kV).00 0.01	0 1.10	7942.08 MVA 2146.22 MVA 2146.22 MVA 2432.10 MVA 1218.71 MVA	11.46 kA 3.10 kA 3.10 kA 3.51 kA 1.76 kA	-88.65 90.44 90.44 92.41 92.45	30.39 kA 8.21 kA 8.21 kA 9.31 kA 4.66 kA	10.79	7472.79	11.00	 11.88 	

Εικόνα 4.103: Προσομοίωση βραχυκυκλώματος στον κόμβο «BB2 400kV» του συστήματος HVDC-VSC 2

Στην εικόνα 4.104 φαίνονται τα αναλυτικά αποτελέσματα των μετρήσεων βραχυκυκλώματος του συστήματος HVDC-VSC 2 στον κόμβο «BB3 400 kV».

Fault Locations with Feeders Short-Circuit Calculation / Method	: IEC 60909		3-Pha	ase Short-Circuit	/ Ma:	x. Short-C	ircuit Cu	 rrents
Asynchronous Motors Always Considered Decaying Aperiodic Component (idc) Using Method B 	Grid Ide Auton Conducto User 	entification natic or Temperature Defined	No	Short-Circui Break Tin Fault Cle c-Voltage Fa User Defi 	t Durat me aring T actor ined	ion ime (Ith)	0 1 N	 .10 s .00 s 0
Grid: Grid System S	tage: Grid	I			Ann	ex:	/ 1	I
rtd.V. Vol [kV] [kV]	tage c- [deg] Factor	Sk" [MVA/MVA]	Ik" [kA/kA] [c	ip deg] [kA/kA]	Ib [kA]	Sb [MVA]	Ik [kA]	Ith [kA]
IB3 400kV 400.00 0.00 I Line 3 BB2 400kV FWM Converter 2 IN2 250kV IN4 I Line 4 BB4 400kV IN4 I Line 5 BB4 400kV IN4	0.00 1.10 250kV	4779.93 MVA 3273.93 MVA 138.56 MVA 684.07 MVA 684.07 MVA	6.90 kA -87 4.73 kA 93 0.20 kA -84 0.99 kA 91 0.99 kA 91	7.21 17.87 kA 3.26 12.24 kA 4.29 0.52 kA 1.39 2.56 kA 1.39 2.56 kA	6.79	4705.65	6.55	 7.08

Εικόνα 4.104: Προσομοίωση βραχυκυκλώματος στον κόμβο «BB3 400kV» του συστήματος HVDC-VSC 2

Στην εικόνα 4.105 φαίνονται τα αναλυτικά αποτελέσματα των μετρήσεων βραχυκυκλώματος του συστήματος HVDC-VSC 2 στον κόμβο «BB4 400 kV».

Fault Locations w Short-Circuit Cal	with Feeder: lculation /	s Method	: IEC	60909		3	-Phase S	Short-Circuit	/ Ma	x. Short-C	Circuit (Currents	I
Asynchronous Moto Always Conside Decaying Aperiod: Using Method 	ors ered ic Component	t (idc) B		Grid Identification Automatic Conductor Temperature User Defined 				Short-Circui Break Tim Fault Cle c-Voltage Fa User Defi	Short-Circuit Duration Break Time Fault Clearing Time (Ith) c-Voltage Factor User Defined				
Grid: Grid	:	System :	Stage: (Grid	I				Ann	ex:	/ 1	1	1
	rtd.V. [kV]	Vo: [kV]	ltage [deg]	c- Factor	Sk" [MVA/MVA]	I [kA/kA]	k" [deg]	ip [kA/kA]	Ib [kA]	Sb [MVA]	Ik [kA]	Ith [kA]	1
 BB4 400kV Line 4 Line 5 Transformer 5 Shunt/Filter	400.00 BB3 4001 BB3 4001 IN5 16.9	0.00 kV kV 5kV	0.00	1.10	3992.31 MVA 1147.73 MVA 1147.73 MVA 1698.71 MVA 0.00 MVA	5.76 kA 1.66 kA 1.66 kA 2.45 kA 0.00 kA	-87.52 93.98 93.98 90.45 0.00	15.00 kA 4.31 kA 4.31 kA 6.38 kA 0.00 kA	5.51	3817.35	5.53	5.93	

Εικόνα 4.105: Προσομοίωση βραχυκυκλώματος στον κόμβο «BB4 400kV» του συστήματος HVDC-VSC 2

Σύστημα	BB1 400kV	BB2 400kV	BB3 400kV	BB4 400kV
HVAC	7519.94 MVA	7862.01 MVA	6320.08 MVA	4600.18 MVA
HVDC-LCC 2	6639.91 MVA	7790.74 MVA	4627.49 MVA	3922.46 MVA
HVDC-VSC 2	6806.96 MVA	7942.08 MVA	4779.93 MVA	3992.31 MVA

Πίνακας 4.24: Αρχική ισχύς βραχυκυκλώματος (Sk'')

Πίνακας 4.25: Αρχικό ρεύμα βραχυκυκλώματος (Ιk'')

Σύστημα	BB1 400kV	BB2 400kV	BB3 400kV	BB4 400kV
HVAC	10.85 kA	11.35 kA	9.12 kA	6.64 kA
HVDC-LCC 2	9.58 kA	11.24 kA	6.68 kA	5.66 kA
HVDC-VSC 2	9.82 kA	11.46 kA	6.90 kA	5.76 kA

Πίνακας 4.26: Μέγιστο ρεύμα βραχυκυκλώματος (ip)

Σύστημα	BB1 400kV	BB2 400kV	BB3 400kV	BB4 400kV
HVAC	28.72 kA	30.15 kA	23.88 kA	17.30 kA
HVDC-LCC 2	25.28 kA	29.87 kA	17.33 kA	14.76 kA
HVDC-VSC 2	25.86 kA	30.39 kA	17.87 kA	15 kA

Και τα δύο συστήματα HVDC παρουσιάζουν μείωση στις τιμές ισχύος και ρεύματος του βραχυκυκλώματος σε κάθε κόμβο, συγκριτικά με το αρχικό σύστημα HVAC.

Στον κόμβο «BB1 400kV» οι τιμές μειώθηκαν κατά 11.70% για το σύστημα HVDC-LCC και 9.48% για το σύστημα HVDC-VSC.

Στον κόμβο «BB2 400kV» οι τιμές μειώθηκαν κατά 0.90% για το σύστημα HVDC-LCC, ενώ αυξήθηκαν κατά 1% για το σύστημα HVDC-VSC.

Στον κόμβο «BB3 400kV» οι τιμές μειώθηκαν κατά 26.78% για το σύστημα HVDC-LCC και 24.36% για το σύστημα HVDC-VSC.

Στον κόμβο «BB4 400kV» οι τιμές μειώθηκαν κατά 14.73% για το σύστημα HVDC-LCC και 13.21% για το σύστημα HVDC-VSC.

Ο κόμβος «BB3 400kV» τροφοδοτείται άμεσα από το σύστημα HVDC, προκαλώντας μεγάλη μείωση στις τιμές του βραχυκυκλώματος, επιβεβαιώνοντας την καλύτερη προστασία του συστήματος από βραχυκύκλωμα με τη χρήση συστημάτων συνεχούς τάσης.

Τα αποτελέσματα βραχυκυκλώματος επαληθεύτηκαν με βάση τη βιβλιογραφία [29].

HVDC-LCC 3:

Στην εικόνα 4.106 φαίνονται τα αναλυτικά αποτελέσματα των μετρήσεων βραχυκυκλώματος του συστήματος HVDC-LCC 3 στον κόμβο «BB1 400 kV».

Fa Sh	ult Locations wi ort-Circuit Calc	th Feeders	Method	: IEC (60909		3	-Phase S	hort-Circuit	/ Ma	x. Short-C	Circuit C	urrents	1
As De 	Asynchronous Motors Always Considered Decaying Aperiodic Component (idc) Using Method B 				Grid Ide Autom Conducto User	entification Matic or Temperature Defined	No		Short-Circu: Break Tin Fault Cle c-Voltage Fr User Def:	it Durat me earing T actor ined	ion ime (Ith)	1	0.10 s 1.00 s No	
Gr	id: Grid	s	ystem (Stage: (Grid	 I				Ann	lex:	/ 1		1
 		rtd.V. [kV]	Vo: [kV]	ltage [deg]	c- Factor	Sk" [MVA/MVA]	I [kA/kA]	k" [deg]	ip [kA/kA]	Ib [kA]	Sb [MVA]	Ik [kA]	Ith [kA]	I
 BB1 	400kV Transformer Transformer 1 Line 2 Transformer 2 Line 1	400.00 IN 15.9k IN1 16.5 BB2 400k IN2 16.5 BB3 400k	0.00 V kV V kV kV	0.00	1.10	7391.29 MVA 185.56 MVA 1698.71 MVA 2664.53 MVA 1698.71 MVA 1145.09 MVA	10.67 kA 0.27 kA 2.45 kA 3.85 kA 2.45 kA 1.65 kA	-88.53 95.50 90.45 92.27 90.45 92.02	28.21 kA 0.71 kA 6.48 kA 10.17 kA 6.48 kA 4.37 kA	10.08	6982.47	10.40	11.04	

Εικόνα 4.106: Προσομοίωση βραχυκυκλώματος στον κόμβο «BB1 400kV» του συστήματος HVDC-LCC 3

Στην εικόνα 4.107 φαίνονται τα αναλυτικά αποτελέσματα των μετρήσεων βραχυκυκλώματος του συστήματος HVDC-LCC 3 στον κόμβο «BB2 400 kV».

Fa Sh	ault Locations with Nort-Circuit Calcu	Method	: IEC (60909		3	-Phase S	Short-Circuit	/ Ma	x. Short-	Circuit	Currents	 3	
As De 	Asynchronous Motors Always Considered Decaying Aperiodic Component (idc) Using Method B 				Grid Identification Automatic Conductor Temperature User Defined 				Short-Circui Break Tim Fault Cle c-Voltage Fa User Defi	t Durat e aring T ctor ned	ion ime (Ith)	0.10 s 1) 1.00 s No		
G1	rid: Grid	s	ystem S	tage: (Grid					Ann	ex:	/	1	I
l I		rtd.V. [kV]	Vol [kV]	tage [deg]	c- Factor	Sk" [MVA/MVA]	I [kA/kA]	k" [deg]	ip [kA/kA]	Ib [kA]	Sb [MVA]	Ik [kA]	Ith [kA]	
 BB2 	2 400kV Line 2 Rectifier Transformer 3 Transformer 4	400.00 BB1 400k IN1 250k IN3 18kV IN4 18kV	0.00 V V IN3	0.00 250kV	1.10	7116.29 MVA 2825.21 MVA 0.00 MVA 2146.22 MVA 2146.22 MVA	10.27 kA 4.08 kA 0.00 kA 3.10 kA 3.10 kA	-88.65 92.73 0.00 90.44 90.44	27.23 kA 10.81 kA 0.00 kA 8.21 kA 8.21 kA	9.66	6695.81	10.11	10.65	 5

Εικόνα 4.107: Προσομοίωση βραχυκυκλώματος στον κόμβο «BB2 400kV» του συστήματος HVDC-LCC 3

Στην εικόνα 4.108 φαίνονται τα αναλυτικά αποτελέσματα των μετρήσεων βραχυκυκλώματος του συστήματος HVDC-LCC 3 στον κόμβο «BB3 400 kV».

Fa Sh	ault Locations wit nort-Circuit Calcu	th Feeders lation / N	Method	: IEC	60909		3	-Phase S	hort-Circuit	/ Ma	x. Short-	Circuit	Currents	1
As De 	Asynchronous Motors Always Considered Decaying Aperiodic Component (idc) Using Method B				Grid Ide Autom Conducto User	ntification atic r Temperature Defined	No	 	Short-Circui Break Tim Fault Cle c-Voltage Fa User Defi		0.10 s 1.00 s No			
G1	rid: Grid	Sj	ystem S	tage: (Grid					Ann	ex:	/	1	1
 		rtd.V. [kV]	Vol [kV]	tage [deg]	c- Factor	Sk" [MVA/MVA]	I [kA/kA]	k" [deg]	ip [kA/kA]	Ib [kA]	Sb [MVA]	Ik [kA]	Ith [kA]	1
 BB3 	3 400kV Line 1 Inverter Line 4 Line 5	400.00 BB1 400k IN2 250k BB4 400k BB4 400k	0.00 V V IN4 V	0.00 250kV	1.10	4672.69 MVA 3305.04 MVA 0.00 MVA 684.07 MVA 684.07 MVA	6.74 kA 4.77 kA 0.00 kA 0.99 kA 0.99 kA	-87.33 93.20 0.00 91.39 91.39	17.50 kA 12.38 kA 0.00 kA 2.56 kA 2.56 kA	6.64	4598.42	6.60	6.93	

Εικόνα 4.108: Προσομοίωση βραχυκυκλώματος στον κόμβο «BB3 400kV» του συστήματος HVDC-LCC 3

Στην εικόνα 4.109 φαίνονται τα αναλυτικά αποτελέσματα των μετρήσεων βραχυκυκλώματος του συστήματος HVDC-LCC 3 στον κόμβο «BB4 400 kV».

Fault Locations wi Short-Circuit Calc	th Feeders	Method	: IEC (60909		3	Phase S	Short-Circuit	/ Ma	x. Short-C	ircuit Cu	 Irrents
Asynchronous Motor Always Consider Decaying Aperiodic Using Method 	s ed Component	; (idc) B	(Grid Ide Autom Conducto User	ntification Natic Pr Temperature Defined	No		Short-Circui Break Tim Fault Cle c-Voltage Fa User Defi	t Durat me earing T actor .ned	ion 'ime (Ith)	0 1 N	 .10 s .00 s 0
Grid: Grid	S	System	Stage: (Grid	 I				Ann	ex:	/ 1	I
 	rtd.V. [kV]	Vo: [kV]	ltage [deg]	c- Factor	Sk" [MVA/MVA]	I [kA/kA]	k" [deg]	ip [kA/kA]	Ib [kA]	Sb [MVA]	Ik [kA]	Ith [kA]
 BB4 400kV Transformer 5 Line 4 Line 5 Shunt/Filter	400.00 IN5 16.5 BB3 400k BB3 400k	0.00 5kV cV cV	0.00	1.10	3943.43 MVA 1698.71 MVA 1123.21 MVA 1123.21 MVA 0.00 MVA	5.69 kA 2.45 kA 1.62 kA 1.62 kA 0.00 kA	-87.61 90.45 93.86 93.86 0.00	14.83 kA 6.39 kA 4.23 kA 4.23 kA 0.00 kA	5.44	3768.45	5.60	5.86

Εικόνα 4.109: Προσομοίωση βραχυκυκλώματος στον κόμβο «BB4 400kV» του συστήματος HVDC-LCC 3

HVDC-VSC 3:

Στην εικόνα 4.110 φαίνονται τα αναλυτικά αποτελέσματα των μετρήσεων βραχυκυκλώματος του συστήματος HVDC-VSC 3 στον κόμβο «BB1 400 kV».

Fa Sh	ult Locations wi ort-Circuit Calc	th Feeders: ulation /	8 Method	: IEC	60909		3	-Phase S	Short-Circuit	/ Ma	ax. Short-(Circuit (Currents	I
As	ynchronous Motor	:5		1	Grid Ide	entification			Short-Circu	it Durat	tion		0.10 -	ļ
1	Always Consider	ea			Auton	atic			Break III	ne namina 7	Cime (Tth)		1.00 0	4
I De	caving Ameriodic		(ide)		Conducto	r Temperature			c-Voltage E	earing i	time (itn)		1.00 5	÷
1 200	Using Method	, component	B		User	Defined	No		User Def	ined			No	÷
i –			-	i i										i
Gr	id: Grid	5	System :	Stage:	Grid	l				Anr	lex:	/	1	1
1		rtd.V.	Vo	ltage	c-	Sk"	I	k"	ip	Ib	Sb	Ik	Ith	1
i –		[kV]	[kV]	[deg]	Factor	[MVA/MVA]	[kA/kA]	[deg]	[kA/kA]	[kA]	[MVA]	[kA]	[kA]	i
1														I
BB1	400kV	400.00	0.00	0.00	1.10	7465.49 MVA	10.78 kA	-88.46	28.46 kA	10.19	7060.04	10.36	11.15	I
1	Transformer	IN 15.91	cV			185.56 MVA	0.27 kA	95.50	0.71 kA					
	Transformer 1	IN1 16.5	5kV			1698.71 MVA	2.45 kA	90.45	6.48 kA					
1	Line 2	BB2 4003	cV			2690.86 MVA	3.88 kA	92.34	10.26 kA					
1	Transformer 2	IN2 16.5	5kV			1698.71 MVA	2.45 kA	90.45	6.48 kA					
1	Line 1	BB3 4001	cV			1193.05 MVA	1.72 kA	92.22	4.55 kA					

Εικόνα 4.110: Προσομοίωση βραχυκυκλώματος στον κόμβο «BB1 400kV» του συστήματος HVDC-VSC 3

Στην εικόνα 4.111 φαίνονται τα αναλυτικά αποτελέσματα των μετρήσεων βραχυκυκλώματος του συστήματος HVDC-VSC 3 στον κόμβο «BB2 400 kV».

Fa Sì	ault Locations wit hort-Circuit Calcu	h Feeders lation / M	lethod	: IEC (60909		3	-Phase S	Short-Circuit	/ Ma	x. Short-	Circuit	Currents	 3
As De 	synchronous Motors Always Considere ecaying Aperiodic Using Method	d Component	(idc) B		Grid Ide Autom Conducto User	ntification atic r Temperature Defined	No		Short-Circui Break Tim Fault Cle c-Voltage Fa User Defi	t Durat e aring T ctor ned	ion ime (Ith)		0.10 s 1.00 s No	
G1	rid: Grid	SJ	/stem S	tage: (Grid	 I				Ann	ex:	/	1	I
 		rtd.V. [kV]	Vol [kV]	tage [deg]	c- Factor	Sk" [MVA/MVA]	I [kA/kA]	k" [deg]	ip [kA/kA]	Ib [kA]	Sb [MVA]	Ik [kA]	Ith] [kA]	
 BB2 	2 400kV Transformer 3 Transformer 4 Line 2 PWM Converter 1	400.00 IN3 18kV IN4 18kV BB1 400kV IN1 250kV	0.00 7 7 IN3	0.00 250kV	1.10	7202.29 MVA 2146.22 MVA 2146.22 MVA 2842.18 MVA 69.28 MVA	10.40 kA 3.10 kA 3.10 kA 4.10 kA 0.10 kA	-88.59 90.44 90.44 92.78 -84.29	27.53 kA 8.20 kA 8.20 kA 10.86 kA 0.26 kA	9.79	6782.78	10.09	9 10.77	 7

Εικόνα 4.111: Προσομοίωση βραχυκυκλώματος στον κόμβο «BB2 400kV» του συστήματος HVDC-VSC 3

Στην εικόνα 4.112 φαίνονται τα αναλυτικά αποτελέσματα των μετρήσεων βραχυκυκλώματος του συστήματος HVDC-VSC 3 στον κόμβο «BB3 400 kV».

Fault Locations with Feeders Short-Circuit Calculation / Method	: IEC 60909	3-Phase S	Short-Circuit / Max.	Short-Circuit	 Currents
Asynchronous Motors Always Considered Decaying Aperiodic Component (idc) Using Method B 	Grid Identification Automatic Conductor Temperature User Defined 	I No I	Short-Circuit Duratic Break Time Fault Clearing Tim c-Voltage Factor User Defined	on ne (Ith)	0.10 s 1.00 s No
Grid: Grid System S	Stage: Grid		Annex	.: /	1
rtd.V. Vo [kV] [kV]	ltage c- Sk" [deg] Factor [MVA/MVA]	Ik" [kA/kA] [deg]	ip Ib [kA/kA] [kA]	Sb Ik [MVA] [kA]	Ith [kA]
 BB3 400kV 400.00 0.00 FWM Converter 2 IN2 250kV IN- Line 4 BB4 400kV Line 5 BB4 400kV Line 1 BB1 400kV	0.00 1.10 4749.17 MVA 4 250kV 69.28 MVA 684.07 MVA 684.07 MVA 3312.35 MVA	6.85 kA -87.27 0.10 kA -84.29 0.99 kA 91.39 0.99 kA 91.39 4.78 kA 93.23	17.77 kA 6.75 4 0.26 kA 2.56 kA 2.56 kA 12.39 kA	1674.90 6.58	; 7.04

Εικόνα 4.112: Προσομοίωση βραχυκυκλώματος στον κόμβο «BB3 400kV» του συστήματος HVDC-VSC 3

Στην εικόνα 4.113 φαίνονται τα αναλυτικά αποτελέσματα των μετρήσεων βραχυκυκλώματος του συστήματος HVDC-VSC 3 στον κόμβο «BB4 400 kV».

Fa Sh	ult Locations wi ort-Circuit Calo	th Feeders ulation /	Method	: IEC	60909		3	-Phase S	hort-Circuit	/ Ma	x. Short-C	ircuit C	urrents	1
As De 	ynchronous Motor Always Consider caying Aperiodic Using Method	red Component	; (idc) B		Grid Ide Autom Conducto User	ntification Natic r Temperature Defined	No	 	Short-Circui Break Tim Fault Cle c-Voltage Fa User Defi	t Durat e aring T ctor ned	ion ime (Ith)	1	0.10 s 1.00 s No	
Gr	id: Grid	5	System S	Stage: (Grid	 I				Ann	ex:	/ 1		1
		rtd.V. [kV]	Vo] [kV]	Ltage [deg]	c- Factor	Sk" [MVA/MVA]	I [kA/kA]	k" [deg]	ip [kA/kA]	Ib [kA]	Sb [MVA]	Ik [kA]	Ith [kA]	1
 BB4 	400kV Line 4 Line 5 Transformer 5 Shunt/Filter	400.00 BB3 400) BB3 400) IN5 16.9	0.00 cV cV 5kV	0.00	1.10	3978.42 MVA 1140.75 MVA 1140.75 MVA 1698.71 MVA 0.00 MVA	5.74 kA 1.65 kA 1.65 kA 2.45 kA 0.00 kA	-87.56 93.92 93.92 90.45 0.00	14.95 kA 4.29 kA 4.29 kA 6.39 kA 0.00 kA	5.49	3803.45	5.56	5.91	

Εικόνα 4.113: Προσομοίωση βραχυκυκλώματος στον κόμβο «BB4 400kV» του συστήματος HVDC-VSC 3

Σύστημα	BB1 400kV	BB2 400kV	BB3 400kV	BB4 400kV
HVAC	7519.94 MVA	7862.01 MVA	6320.08 MVA	4600.18 MVA
HVDC-LCC 3	7391.29 MVA	7116.29 MVA	4672.69 MVA	3943.43 MVA
HVDC-VSC 3	7465.49 MVA	7202.29 MVA	4749.17 MVA	3978.42 MVA

Πίνακας 4.27: Αρχική ισχύς βραχυκυκλώματος (Sk'')

Πίνακας 4.28: Αρχικό ρεύμα βραχυκυκλώματος (Ιk'')

Σύστημα	BB1 400kV	BB2 400kV	BB3 400kV	BB4 400kV
HVAC	10.85 kA	11.35 kA	9.12 kA	6.64 kA
HVDC-LCC 3	10.67 kA	10.27 kA	6.74 kA	5.69 kA
HVDC-VSC 3	10.78 kA	10.40 kA	6.85 kA	5.74 kA

Σύστημα	BB1 400kV	BB2 400kV	BB3 400kV	BB4 400kV
HVAC	28.72 kA	30.15 kA	23.88 kA	17.30 kA
HVDC-LCC 3	28.21 kA	27.23 kA	17.50 kA	14.83 kA
HVDC-VSC 3	28.46 kA	27.53 kA	17.77 kA	14.95 kA

Πίνακας 4.29: Μέγιστο ρεύμα βραχυκυκλώματος (ip)

Και τα δύο συστήματα HVDC παρουσιάζουν μείωση στις τιμές ισχύος και ρεύματος του βραχυκυκλώματος σε κάθε κόμβο, συγκριτικά με το αρχικό σύστημα HVAC.

Στον κόμβο «BB1 400kV» οι τιμές μειώθηκαν κατά 1.70% για το σύστημα HVDC-LCC και 0.70% για το σύστημα HVDC-VSC.

Στον κόμβο «BB2 400kV» οι τιμές μειώθηκαν κατά 9.40% για το σύστημα HVDC-LCC και 8.39% για το σύστημα HVDC-VSC.

Στον κόμβο «BB3 400kV» οι τιμές μειώθηκαν κατά 26.06% για το σύστημα HVDC-LCC και 24.85% για το σύστημα HVDC-VSC.

Στον κόμβο «BB4 400kV» οι τιμές μειώθηκαν κατά 14.27% για το σύστημα HVDC-LCC και 13.51% για το σύστημα HVDC-VSC.

Ο κόμβος «BB3 400kV» τροφοδοτείται άμεσα από το σύστημα HVDC, προκαλώντας μεγάλη μείωση στις τιμές του βραχυκυκλώματος, επιβεβαιώνοντας την καλύτερη προστασία του συστήματος από βραχυκύκλωμα με τη χρήση συστημάτων συνεχούς τάσης.

Τα αποτελέσματα βραχυκυκλώματος επαληθεύτηκαν με βάση τη βιβλιογραφία [29].

Σε περίπτωση τριφασικού σφάλματος στους κόμβους υψηλής τάσης σε όλα τα συστήματα που μελετήθηκαν, τα συστήματα με τεχνολογία HVDC παρουσιάζουν μείωση στις τιμές ισχύος και ρεύματος βραχυκυκλώματος ή παρέμειναν στο ίδιο επίπεδο σε ελάχιστες περιπτώσεις, συγκριτικά με το HVAC.

Η σημαντικότερη μείωση στις τιμές του βραχυκυκλώματος παρουσιάστηκε στην περίπτωση που ο κόμβος με τα φορτία, τοφοδοτείται άμεσα από σύστημα συνεχούς τάσης.

Όταν συμβαίνει βραχυκύκλωμα σε σύστημα VSC, οι μετατροπείς PWM συμβάλλουν στο αρχικό ρεύμα και στο μέγιστο ρεύμα βραχυκυκλώματος λειτουργώντας ως πηγή ρεύματος, αυξάνοντας έτσι και την αρχική ισχύ βραχυκυκλώματος. Αυτός είναι ο λόγος για τον οποίο παρατηρούνται μεγαλύτερες τιμές στις μετρήσεις των συστημάτων VSC συγκριτικά με τις τιμές των συστημάτων LCC.

<u>Κεφάλαιο 5</u>

Συμπεράσματα και μελλοντική έρευνα

5.1. Συμπεράσματα

Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων με τη χρήση του Power Factory, επιβεβαίωσαν τη θεωρία για τη σύγκριση συνδέσμων εναλλασσόμενου ρεύματος και συνεχούς ρεύματος για υποθαλάσσια συστήματα μεταφοράς υψηλής τάσης.

Σε όλες τις μετρήσεις ροής φορτίου που έγιναν, το σύστημα HVDC-VSC υποδεικνύεται η βέλτιστη επιλογή συγκριτικά με γραμμές μεταφοράς AC και το σύστημα HVDC-LCC.

Το σύστημα HVDC-LCC, ενώ μειώνει τις απώλειες ισχύος μεταφοράς του συστήματος, απαιτεί μεγάλο οικονομικό κόστος για την τοποθέτηση ανορθωτών και αντιστροφέων, οι οποίοι καταναλώνουν πολύ άεργο ισχύ, με αποτέλεσμα να επιβαρύνονται οι γεννήτριες παραγωγής και να αυξάνονται οι απώλειες των γραμμών μεταφοράς AC, λόγω της αυξημένης κατανάλωσης ισχύος των μετατροπέων.

Τα συστήματα HVDC έχουν μεγαλύτερη ικανότητα μεταφοράς ισχύος από τα συστήματα HVAC και τη δυνατότητα μεταφοράς ισχύος σε μεγάλες υποθαλάσσιες αποστάσεις.

Σε περίπτωση βλάβης από φθορά ή εξωτερικών παραγόντων και καιρικών φαινομένων, στις γραμμές μεταφοράς ενός συστήματος HVDC, διατηρείται η ροή φορτίου σταθερή χωρίς να επηρεάσει τα υπόλοιπα στοιχεία του συστήματος μέχρι να αποκατασταθεί η βλάβη.

Σε περίπτωση βραχυκυκλώματος, το σύστημα HVDC παρέχει προστασία στο σύστημα με τη χρήση διακοπτών κυκλώματος, προστατεύοντας το σύστημα από υπέρταση και φθορές που μπορούν να προκληθούν στις γραμμές μεταφοράς και στις μονώσεις τους, με το σύστημα HVDC-LCC να είναι η καλύτερη επιλογή, καθώς παρουσιάζει τις χαμηλότερες τιμές ρεύματος και ισχύος βραχυκυκλώματος στους κόμβους όπου τα φορτία τροφοδοτούνται άμεσα από το σύστημα HVDC, όμως οι διακόπτες είναι μεγάλοι σε όγκο και ακριβοί.

Σε συστήματα που απαιτείται η χρήση υποθαλάσσιων καλωδίων είναι ευκολότερη η τοποθέτηση καλωδίων DC, καθώς υπάρχει η δυνατότητα το μήκος του καλωδίου να ξεπερνά τα 150 χιλιόμετρα, το οποίο είναι το μέγιστο μήκος για ένά AC καλώδιο, μειώνοντας το κόστος και το χρόνο για την τοποθέτηση συνδέσμων καλωδίων.

Το κόστος κατασκευής μίας γραμμής μεταφοράς DC είναι χαμηλότερο από της γραμμής AC, διότι στην περίπτωση της AC τοποθετούνται τρεις αγωγοί με τον καθένα να έχει τη μόνωσή του, ενώ στη γραμμή DC χρειάζεται μόνο ένας αγωγός αν έχει επιστροφή γείωσης.
5.2. <u>Μελλοντική έρευνα</u>

Για την ανάπτυξη και βελτίωση υποθαλλάσσιων συστημάτων συνεχούς ρεύματος υψηλής τάσης μπορούν να γίνουν οι παρακάτω μελέτες:

- Έρευνα για τη βελτίωση αντοχής και μείωση κόστους του μονωτικού υλικού των καλωδίων.
- Έρευνα για τη βελτίωση διακοπτών κυκλώματος σε περίπτωση σφάλματος.
- Μελέτη για τη βέλτιστη διαδρομή και χρονικής περιόδου για την τοποθέτηση των καλωδίων.
- Βελτίωση των συνδέσμων των καλωδίων για ευκολότερη τοποθέτηση και μεγαλύτερη αντοχή.
- Σχεδιασμός πλοίου για τη μεταφορά και τοποθέτηση κάθε είδους καλωδίου χωρίς υποβοήθεια.
- Μελέτη για τη μείωση απωλειών ισχύος στους σταθμούς μετατροπής.

Βιβλιογραφία

[1] McPherson, Stephanie Sammartino. *War of the Currents: Thomas Edison vs Nikola Tesla*. Twenty-First Century Books, 2012.

[2] Arrillaga, Jos. High voltage direct current transmission. No. 29. Iet, 1998.

[3] Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων, Τόμεας Ηλεκτρικής Ισχύος, ΣΗΜΜΥ ΕΜΠ, Συμπληρωματικές Σημειώσεις για το Μάθημα "Παραγωγή Υψηλών Τάσεων". Αθήνα 2008.

[4] Taso, Emir. *DC distribution systems*. MS thesis. UiT Norges arktiske universitet, 2017.

[5] Pillay, Caleb Jordache, Musasa Kabeya, and Innocent E. Davidson. "Transmission systems: HVAC vs HVDC." *5th NA International Conference on Industrial Engineering and Operations Management*. Vol. 10. 2020.

[6] Meah, Kala, and Sadrul Ula. "Comparative evaluation of HVDC and HVAC transmission systems." *2007 IEEE Power Engineering Society General Meeting*. IEEE, 2007.

[7] Van Veldhuizen, E. M., and W. R. Rutgers. "Corona discharges: fundamentals and diagnostics." *Invited paper, Proc. Frontiers in Low Temp. Plasma Diagn. IV, Rolduc, Netherlands* (2001): 40-49.

[8] Dwight, Herbert Bristol. "Skin effect in tubular and flat conductors." *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers* 37.2 (1918): 1379-1403.

[9] Arrillaga, Jos, and Neville R. Watson. *Power system harmonics*. John Wiley & Sons, 2004.

[10] Mirza, Zarka, and Neeraj Gupta. "Load Flow Analysis of HVAC HVDC System." 2022 2nd International Conference on Emerging Frontiers in Electrical and Electronic Technologies (ICEFEET). IEEE, 2022.

[11] Eltamaly, Ali M., et al. "HVDC over HVAC transmission system: fault conditions stability study." *International Journal of Research Studies in Electrical and Electronics Engineering (IJRSEEE)* 5.1 (2019): 24-37.

[12] Setreus, Johan, and Lina Bertling. "Introduction to HVDC technology for reliable electrical power systems." *Proceedings of the 10th International Conference on Probablistic Methods Applied to Power Systems*. IEEE, 2008.

[13] Padiyar, K. R. *HVDC power transmission systems: technology and system interactions*. New Age International, 1990.

[14] Kamalapur, G. D., and Keerti Arakeri. "A Comparative Study of Monopolar and Bipolar HVDC Transmission Systems." *Eur. J. Adv. Eng. Technol* 7 (2020): 21-26.

[15] Ardelean, Mircea, and Philip Minnebo. "HVDC submarine power cables in the world." *Joint Research Center* (2015).

[16] Wang, Weiwang, et al. "Failure of submarine cables used in high-voltage power transmission: Characteristics, mechanisms, key issues and prospects." *IET Generation, Transmission & Distribution* 15.9 (2021): 1387-1402.

[17] Zhao, Xiaoling, et al. "Technical and economic demands of HVDC submarine cable technology for global energy interconnection." *Global Energy Interconnection* 3.2 (2020): 120-127.

[18] Fernández-Guillamón, Ana, et al. "Offshore wind power integration into future power systems: Overview and trends." *Journal of Marine Science and Engineering* 7.11 (2019): 399.

[19] Mathur, R. Mohan, and Rajiv K. Varma. *Thyristor-based FACTS controllers for electrical transmission systems*. John Wiley & Sons, 2002.

[20] Sheng, Kuang, Barry W. Williams, and Stephen J. Finney. "A review of IGBT models." *IEEE transactions on Power Electronics* 15.6 (2000): 1250-1266.

[21] Mohammadi, Fazel, et al. "HVDC circuit breakers: A comprehensive review." *IEEE Transactions on Power Electronics* 36.12 (2021): 13726-13739.

[22] Makarov, Yuri V., et al. *Models and methods for assessing the value of HVDC and MVDC technologies in modern power grids*. No. PNNL-26640. Pacific Northwest National Lab.(PNNL), Richland, WA (United States), 2017.

[23] Worzyk, Thomas. Submarine power cables: design, installation, repair, environmental aspects. Springer Science & Business Media, 2009.

[24] Våbenø, Louise. *Design, installation and operation of high voltage cables at sea*. MS thesis. University of Stavanger, Norway, 2017.

[25] Chengyan, Duan, and Duan Chengyan. "Cable Systems for HVDC Power Transmission." (2018).

[26] Bysani, Sucheth Krishna Kumar. "Study of Diamond Folds in Mass-Impregnated (MI) Cables." (2021).

[27] Axelsson, T. "Submarine cable laying and installation services for the offshore alternative energy industry." *3U Technologies. Available at: http://www. 3utech. com/sites/3utech. com/files/Energy% 20Ocean* (2008).

[28] VASILESCU, Valeriu-Florian, and Dumitru DINU. "INSTALLATION OF SUBMARINE CABLES IN THE OFFSHORE WIND INDUSTRY AND THEIR IMPACT ON THE MARINE ENVIRONMENT." *Journal of Marine Technology & Environment* 1 (2021).

[29] Saadeh, Osama, Baher Abu Sba, and Zakariya Dalala. "Power System Analysis of Moving from HVAC to HVDC in the Presence of Renewable Energy Resources." *Journal of Electrical and Computer Engineering* 2023.1 (2023): 8527308.