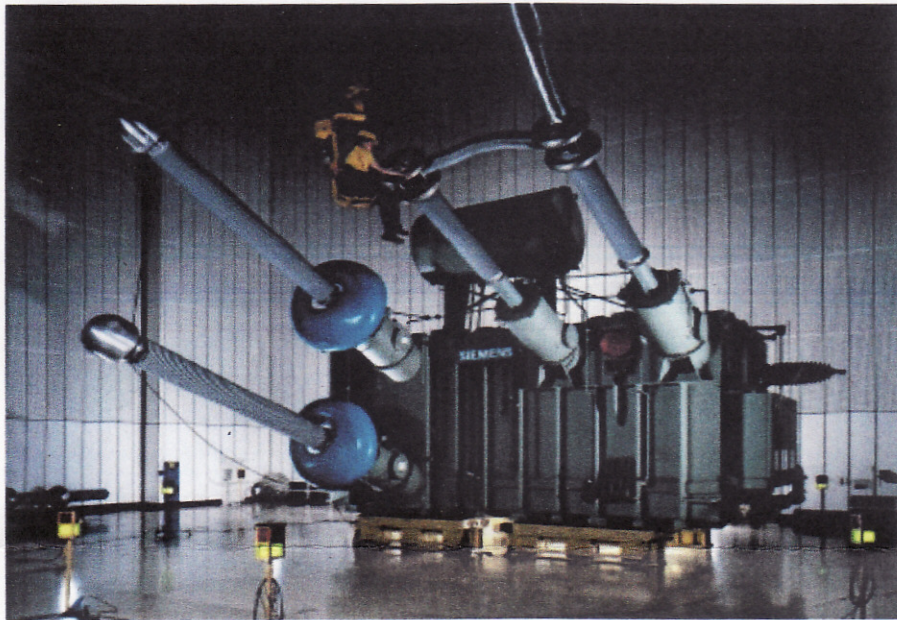




Α.Τ.Ε.Ι. ΠΕΙΡΑΙΑ
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Τ.Ε

Η/Γ
893

“ΜΕΤΑΦΟΡΑ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΜΕ ΥΨΗΛΗ ΣΥΝΕΧΗ ΤΑΣΗ”



Επιβλέπων Καθηγητής:
Σπουδαστής:

Δρ Κωνσταντίνος Ψωμόπουλος
Βασίλης Ιατρόπουλος **ΑΜ: 29566**

ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ
ΤΕΙ ΠΕΙΡΑΙΑ

Πειραιάς
ΜΑΙΟΣ -2014



• Α.Τ.Ε.Ι. ΠΕΙΡΑΙΑ

Α.Τ.Ε.Ι. ΠΕΙΡΑΙΑ

ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Τ.Ε

“ΜΕΤΑΦΟΡΑ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΜΕ ΣΥΝΕΧΗ ΥΨΗΛΗ ΤΑΣΗ”

**Πειραιάς
ΜΑΙΟΣ -2014**

Copyright © Α. Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Πειραιά

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 Α. Τεχνολογικού Εκπαιδευτικού Ιδρύματος Πειραιά.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Ένα μεγάλο ευχαριστώ στον Καθηγητή μου Δρ. Κωνσταντίνο Ψωμόπουλο για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγηση στη δημιουργία της πτυχιακής.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Ευχαριστίες	1
Περιεχόμενα	2
Λίστα σχημάτων	5
Λίστα πινάκων	7
Summary	8
Πρόλογος	9
1^ο Κεφάλαιο “ΜΕΤΑΦΟΡΑ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΜΕ ΥΨΗΛΗ ΤΑΣΗ ”	11
1.1 Ηλεκτρική ενέργεια	11
1.2 Πρώτη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας	11
1.2.1 Πρώτη παραγωγή με συνεχή τάση	11
1.2.2 Τύποι μεταφοράς ενέργειας	12
1.2.3 Στοιχεία γραμμών μεταφοράς	14
1.3 Ο ηλεκτρισμός στην Ελλάδα	14
1.3.1 Έφτασε ο ηλεκτρισμός στην Ελλάδα	14
1.3.2 Ίδρυση ΔΕΗ	15
1.3.3 Δημιουργία του ΑΔΜΗΕ	15
2^ο Κεφάλαιο “ΥΨΗΛΗ ΣΥΝΕΧΗ ΤΑΣΗ”	16
2.1 Ιστορική αναδρομή	16
2.1.1 Εναρξη μεταφοράς	16
2.2 Καινούργια αρχή για το DC	17
2.2.1 Διασύνδεση Gotland	18
2.3 Τα πρώτα συστήματα HVDC	20
2.3.1 Η νέα εποχή των HVDC συστημάτων μεταφοράς	22
2.3.2 Τα HVDC Συστήματα Μεταφοράς Σήμερα	23
3^ο Κεφάλαιο “ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΜΕ HVDC ”	25
3.1 Καλώδια για HVDC	25
3.2 Τύποι καλωδίων	25
3.2.1 Καλώδια ελαίου (Oil-filled cables, OF)	26
3.2.2 Καλώδια αερίου υπό πίεση (Gas-pressurized cables)	27
3.2.3 Καλώδια χαρτιού εμβαπτισμένου σε λάδι (Mass-impregnated Cables, MI)	27
3.2.4 Καλώδιο δικτυωμένου πολυαιθυλενίου- XLPE	29
3.3 Σύγκριση καλωδίων με εναέριες γραμμές μεταφοράς (EGM)	30
3.3.2 Λιγότερη έκταση χρησιμοποιούμενης γης	30
3.3.3 Απουσία θορύβου	31
3.3.4 Ηλεκτρομαγνητικά Πεδία	31
3.3.5 Διευλευση EGM	31
3.3.6 Αισθητική Παρεμβολή	31
3.4 Διαφορά HVDC με HVAC για μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας με υπόγεια ή υποθαλάσσια καλώδια	32
3.5 Πύλώνες και χρήση γης	33
3.5.2 Χρήση γης για μεταφορά	33
3.5.3 Οπτικές Επιπτώσεις	36
3.5.4 Συμπεράσματα	38
4^ο Κεφάλαιο “ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΜΕ HVDC”	40
4.1 Σύστημα Μεταφοράς HVDC	40
4.2 Τμήματα Υποσταθμού HVDC	41
4.2.1 Μετατροπείς (Converters)	41
4.2.2 Γέφυρα 12-παλμών	41

4.2.3	Μετατροπείς Φυσικής Μεταγωγής (Line-Commutated Current Source Converter, CSC)	43
4.2.4	Μετατροπείς Μεταγωγής μέσω Πυκνωτών (Capacitor Commutated Converters, CCC)	46
4.2.5	Μετατροπείς Εξαναγκασμένης Μεταγωγής (Self-Commutated)	48
4.3	ΦΙΛΤΡΑ	49
4.3.1	AC Φίλτρα	50
4.3.2	DC Φίλτρα	51
4.4	Μετασχηματιστές Μετατροπέων (Converter Transformers)	52
4.5	Αυτεπαγωγές Εξομάλυνσης (Smoothing reactors)	54
4.6	Απαγωγοί υπερτάσεων (High Voltage Surge Arresters)	56
4.7	Σύστημα Ελέγχου (HVDC Control)	59
4.7.1	Συνολικό σύστημα ελέγχου [Overall System Control]	60
4.7.2	Κύριος έλεγχος (Master (Bipole) Control)	60
4.7.3	Έλεγχος πόλων (Pole Control)	60
5^ο	Κεφάλαιο “ ΚΑΤΗΓΟΡΟΠΟΙΗΣΗ ΤΩΝ HVDC ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ”	61
5.1	Back-to-back διασύνδεση	61
5.2	Μεταφορά δύο τερματικών (Two-Terminal)	62
5.3	Μονοπολική Σύνδεση	62
5.4	Διπολική διασύνδεση	63
5.5	Διπολική διασύνδεση με χρήση της γης ως επιστροφή	63
5.6	Διπολική διασύνδεση με χρήση μεταλλικής επιστροφής	65
5.7	Διπολική διασύνδεση χωρίς επιστροφή	65
5.8	Διπολική διασύνδεση σε HVDC συστήματα στα $\pm 800\text{kV}$	66
6^ο	Κεφάλαιο “ΕΠΙΔΡΑΣΕΙΣ ΣΤΟ HVDC”	68
6.1	Ευστάθεια και αξιοπιστία	68
6.2	Περιβαλλοντικά χαρακτηριστικά	68
6.2.1	Επιδράσεις από ηλεκτρικά πεδία	69
6.2.2	Επιδράσεις από μαγνητικά πεδία	70
6.2.3	Παρεμβολές στις επικοινωνίες	70
6.2.4	Θόρυβος	71
6.2.5	Ρεύματα Εδάφους και φαινόμενα διάβρωσης	71
6.2.6	Χρήση γης για εγκατάσταση υποσταθμών και γραμμών μεταφοράς	72
6.2.7	Οπτικές επιδράσεις	72
6.2.8	Άλλου είδους επιδράσεις	73
6.3	Μειονεκτήματα των HVDC συστημάτων μεταφοράς ενέργειας	73
6.4	Σύγκριση μεταξύ HVDC και HVAC συστημάτων μεταφοράς	74
6.4.1	Κόστος μεταφοράς ισχύος στα HVDC και HVAC συστήματα μεταφοράς	74
7^ο	ΚΕΦΑΛΑΙΟ “ΔΙΑΣΥΝΔΕΣΗΣ ΜΕ HVDC”	78
7.1	Gotland	78
7.2	Jeju	79
7.3	Ελλάδα-Ιταλία	80
7.4	Ευρώπη	81
7.5	Ρωσία	83
7.5.1	Διασύνδεση Ρωσία-Ιαπωνία	84
7.5.2	Διασύνδεση Ρωσία-Κίνα	85
7.5.3	Διασύνδεση της Σιβηρίας με την Ανατολική Ρωσία	85
7.6	Αμερική	85
7.6.1	Βόρεια Αμερική	86
7.6.2	Διασύνδεση Hydro Quebec $\pm 450\text{kV}$ HVDC	86
7.6.3	Διασύνδεση Nelson River $\pm 500\text{kV}$ HVDC	87
7.6.4	Νότια Αμερική	87
7.7	Ασία	88

7.8	Κίνα	88
Βιβλιογραφία.....	Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.	

ΛΙΣΤΑ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 1.1 William Stanley.....	12
Σχήμα 1.2 Πυλώνες Υπερυψηλής Τάσης.....	13
Σχήμα 1.3 Μετασχηματιστής Υποβιβασμού 20KV/0.4KV	13
Σχήμα 2.1 Σύστημα ανόρθωσης 1950's-2012's.....	16
Σχήμα 2.2 Thomas Edison -Nikola Tesla.....	17
Σχήμα 2.3 Διάγραμμα της εγκατάστασης Thury 1889.....	18
Σχήμα 2.4 Σύνδεσης της Σουηδίας με το νησί Gotland.....	19
Σχήμα 2.6 Σύστημα ανόρθωσης 1954 για το νησί Gotland	20
Σχήμα 2.7 Νέα Ζηλανδία μεταξύ των Βόρειων και των Νότιων νησιών.....	21
Σχήμα 2.8 Διασύνδεση Μοζαμβίκης και της Νοτίου Αφρικής.....	22
Σχήμα 3.1 Καλώδια ελαίου	28
Σχήμα 3.2 Καλώδια αερίου υπό πίεση	28
Σχήμα 3.3 Καλώδια χαρτιού εμβαπτισμένου σε λάδι.....	29
Σχήμα 3.4 Διαδρομή καλωδίου σε βάθος 1000 μέτρα	30
Σχήμα 3.5 Σύνδεση της Ισπανίας με τη Μαγιόρκα.....	30
Σχήμα 3.6 Καλώδιο XLPE	31
Σχήμα 3.7 Σύστημα Γείωσης σε σταθμό	34
Σχήμα 3.8 Πυλώνας μεταφοράς HVDC.....	35
Σχήμα 3.9 Διπολικός πυλώνας HVDC 500KV	36
Σχήμα 3.10 Μεταφορά ενέργειας 3000MW στα 300KV με HVAC (αριστερά) και με HVDC (δεξιά).....	36
Σχήμα 3.11 Μεταφορά στα 800KV με HVAC (αριστερά) και HVDC (δεξιά).....	37
Σχήμα 3.12 Μεταφορά με HVDC μέσα από κατοικημένες περιοχές	38
Σχήμα 3.13 Τύποι πυλώνων τετραπολικών γραμμών	39
Σχήμα 4.1 Απεικόνιση Μεταφοράς HVDC 1000MW στα 500KV.....	40
Σχήμα 4.2 Κτήριο εγκατάστασης σταθμός HVDC	41
Σχήμα 4.3 Γέφυρα 12-παλμών με δύο Μ/Σ.....	43
Σχήμα 4.4 Γέφυρα 12-παλμών με ένα Μ/Σ.....	44
Σχήμα 4.5 Γέφυρα 12-πάλμων με Θυρίστορ.....	45
Σχήμα 4.6 Συμβατικός HVDC μετατροπέας φυσικής μεταγωγής.....	46
Σχήμα 4.7 Αντιστάθμιση άεργου ισχύος σε συμβατικό HVDC σταθμό μετατροπής.....	46
Σχήμα 4.8 Μετατροπέας μεταγωγής μέσω πυκνωτών	47
Σχήμα 4.9 Μονογραμμικό διάγραμμα CCC με ac φίλτρο συνεχώς συντονιζόμενο	48
Σχήμα 4.10 Ελεγχόμενος μετατροπέας πυκνωτών σε σειρά.....	49
Σχήμα 4.11 Μετατροπέας εξαναγκασμένης μεταγωγής με PWM.....	50
Σχήμα 4.12 AC φίλτρο	51
Σχήμα 4.13 DC φίλτρο	53
Σχήμα 4.14 Τυπικές συνδεσμολογίες μετασχηματιστών μετατροπέων	54
Σχήμα 4.15 Μετασχηματιστές Μετατροπέα	55
Σχήμα 4.16 Αυτεπαγωγή εξομάλυνσης ξηρού τύπου	56
Σχήμα 4.17 Αυτεπαγωγή εξομάλυνσης τύπου ελαίου	57
Σχήμα 4.18 Απαγωγοί υπερτάσεων σε HVDC σύστημα	58
Σχήμα 4.19 Συμπεριφορά απαγωγού πορσελάνης σε βραχυκύκλωμα	58

Σχήμα 4.20 Μονογραμμικό διάγραμμα HVDC υποσταθμού με τις κατάλληλες θέσεις των απαγωγών υπερτάσεων.....	60
Σχήμα 4.21 Μπλοκ-διάγραμμα της δομής των επιπέδων ελέγχου σε ένα HVDC.....	61
σύστημα μεταφοράς	61
Σχήμα 5.1 Back-to-back Διασύνδεση.....	61
Σχήμα 5.2 Μονοπολική διασύνδεση	63
Σχήμα 5.3 Διπολική διασύνδεση	63
Σχήμα 5.4 Διπολική διασύνδεση με χρήση της γης ως επιστροφή	65
Σχήμα 5.5 Περίπτωση σφάλματος στον ένα πόλο	65
Σχήμα 5.6 Περίπτωση σφάλματος σε κάποιον μετατροπέα του ενός πόλου.....	66
Σχήμα 5.7 Διπολική διασύνδεση με χρήση μεταλλικής επιστροφής	66
Σχήμα 5.8 Διπολική διασύνδεση χωρίς επιστροφή	67
Σχήμα 5.9 Διπολική διασύνδεση με ένα μόνο μετατροπέα 12-παλμών ανά πόλο	67
Σχήμα 6.1 Διαμόρφωση κόστους HVDC και HVAC συστημάτων ανάλογα με το.....	76
μήκος των γραμμών μεταφοράς (Ανάλυση κόστους από την SIEMENS)	76
Σχήμα 6.2 Μεταβολή του κόστους HVDC και HVAC συστήματος σε σχέση με το μήκος των γραμμών μεταφοράς.....	77
Σχήμα 6.3 Διάγραμμα της κατανομής του κόστους κατασκευής ενός HVDC	78
υποσταθμού	78

ΛΙΣΤΑ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 4.1 Είδη απαγωγών υπερτάσεων σε HVDC υποσταθμό	58
Πίνακας 7.1 Παγκόσμιες Διασύνδεσεις	96

SUMMARY

The subject of this thesis is the theoretical analysis of the structure and function of HVDC energy transfer systems, and identify the advantages, disadvantages and applications.

Environmental constraints are expected to play an important role in the future development of electric power systems. Moreover, the interconnection of large wind farms with weak couplings AC, when there is sufficient reserve power from conventional sources, increases the possibility of creating serious problems to the safety of a system. In the future, more and more of the installed power will be connected directly to the distribution (distributed generation), which requires new applications at electronic power in order to control the flow of cargo, reduce losses and avoid congestion on transmission lines, the loop flows and voltage stability problems.

High Voltage Direct Current Systems - HVDC), Voltage - Sourced Converters - VSC and Flexible AC Transmission Systems - FACTS increase the carrying capacity and stability system and help to avoid successive disturbances.

Untill today, applications for VSC HVDC and FACTS are based primarily on conversion of two or three levels. The multilevel VSC provide advantages that concern the dynamic performance of the system and the effect of harmonics. For these reasons, a new technology has developed Modular Multilevel Converter - MMC, which refers to as HVDC, SVC, and provides significant advantages for high voltage applications.

Keywords: HIGH VOLTAGE DC SYSTEMS, HV CONVERTER, HV CABLES, HV RECTIFIERS

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Αντικείμενο της εργασίας αυτής είναι η θεωρητική ανάλυση της διάρθρωσης και της λειτουργίας των HVDC συστημάτων μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας, καθώς και ο προσδιορισμός των πλεονεκτημάτων, των μειονεκτημάτων και των εφαρμογών τους.

Περιβαλλοντικοί περιορισμοί αναμένεται να διαδραματίσουν σημαντικό ρόλο στο μέλλον στην ανάπτυξη των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας. Επιπλέον, η διασύνδεση μεγάλων αιολικών πάρκων με ασθενείς AC ζεύξεις, όταν δεν υπάρχει επαρκής εφεδρεία ισχύος από συμβατικές πηγές, αυξάνει το ενδεχόμενο δημιουργίας σοβαρών προβλημάτων στην ασφάλεια ενός συστήματος συνολικά.

Στο μέλλον, ολοένα και μεγαλύτερο μέρος της εγκαταστημένης ισχύος θα συνδέεται απευθείας στη διανομή (κατανεμημένη παραγωγή), γεγονός που απαιτεί νέες εφαρμογές ηλεκτρονικών ισχύος, προκειμένου να ελεγχθεί η ροή του φορτίου, να μειωθούν οι απώλειες και να αποφευχθούν η συμφόρηση στις γραμμές μεταφοράς (line congestion), οι κυκλικές ροές (loop flows) και τα προβλήματα ευστάθειας τάσης.

Τα συστήματα Συνεχούς Ρεύματος Υψηλής Τάσεως (High Voltage Direct Current – HVDC), οι Μετατροπείς Πηγής Τάσης (Voltage-Sourced Converters – VSC) και τα Ευέλικτα Συστήματα Μεταφοράς Εναλλασσόμενου Ρεύματος (Flexible AC Transmission Systems – FACTS) αυξάνουν την ικανότητα μεταφοράς και την ευστάθεια του συστήματος και βοηθούν στην αποφυγή διαδοχικών διαταραχών. Έως σήμερα, οι VSC για εφαρμογές HVDC και FACTS βασίζονται κυρίως σε μετατροπείς δύο ή τριών επιπέδων. Οι VSC, πολλαπλών επιπέδων, παρέχουν πλεονεκτήματα σε ότι αφορά τη δυναμική απόδοση του συστήματος και την επίδραση των αρμονικών. Για αυτούς τους λόγους, αναπτύχθηκε μια νέα τεχνολογία Αρθρωτού Πολυεπίπεδου Μετατροπέα (Modular Multilevel Converter – MMC), η οποία αναφέρεται ως HVDC και SVC, και

παρέχει σημαντικά πλεονεκτήματα για τις εφαρμογές υψηλής τάσης.

Λέξεις κλειδιά: ΣΥΣΤΗΜΑ ΥΨΗΛΗΣ ΣΥΝΕΧΗΣ ΤΑΣΗΣ, ΚΑΛΩΔΙΑ ΥΨΗΛΗΣ ΣΥΝΕΧΗΣ ΤΑΣΗΣ, ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΑΣ ΥΨΗΛΗΣ ΣΥΝΕΧΗΣ ΤΑΣΗ, ΑΝΩΡΘΟΤΕΣ ΥΨΗΛΗΣ ΣΥΝΕΧΗΣ ΤΑΣΗΣ, ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΗΣ ΥΨΗΛΗΣ ΤΑΣΗΣ

1^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ

“ΜΕΤΑΦΟΡΑ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΜΕ ΥΨΗΛΗ ΤΑΣΗ”

1.1 Ηλεκτρική ενέργεια

Σήμερα γνωρίζουμε τη μεγάλη σημασία της ηλεκτρικής ενέργειας για την ανάπτυξη της οικονομίας και της κοινωνίας σε όλες τις χώρες του κόσμου. Η ηλεκτρική ενέργεια χαρακτηρίζεται από οικονομικότητα, μεγάλη ασφάλεια, υψηλή ποιότητα και ήπια συμπεριφορά στο περιβάλλον κατά την κατανάλωσή της. Αυτές οι αντιλήψεις άρχισαν να διαμορφώνονται στα τέλη του 19ου αιώνα, όταν η διανομή ηλεκτρικής ενέργειας άρχισε να ξεπερνάει την ευρύτερη γειτονιά του εργοστασίου παραγωγής και να επεκτείνεται σε αστικά διαμερίσματα και ολόκληρες πόλεις, κάποια στιγμή δε και υπεραστικά.

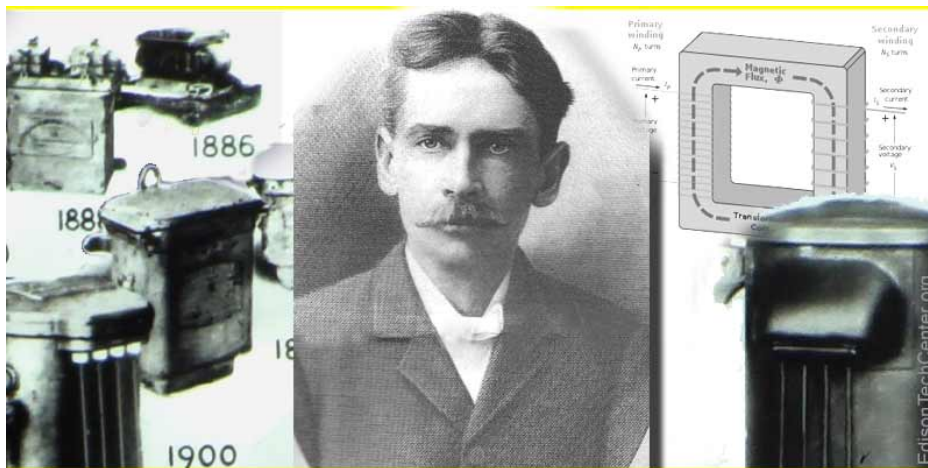
1.2 Πρώτη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας

Το 1881 άρχισε να λειτουργεί η πρώτη μονάδα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στο Godalming της Αγγλίας, μεταξύ Λονδίνου και Πόρτσμουθ, με ισχύ 746 kW. Η πόλη αυτή απέκτησε και τον πρώτο δημόσιο ηλεκτρικό φωτισμό, αρχικά με 3 λάμπες βολταϊκού τόξου και 7 λάμπες πυρακτώσεως και αργότερα με 4 και 27 λάμπες αντίστοιχα. Η γεννήτρια ήταν μονοφασική της εταιρίας Siemens που παρείχε 250V/12A με 1.200 στροφές ανά λεπτό. Η κίνηση της γεννήτριας προερχόταν από δύο υδρόμυλους και λειτουργούσε μόνο σε εποχή κανονικών βροχοπτώσεων, γιατί δεν ήταν δυνατόν να ελεγχθεί επαρκώς η ροή νερού στο ποτάμι που διέτρεχε την πόλη

1.2.1 Πρώτη παραγωγή με συνεχή τάση

Για να λυθεί το πρόβλημα της μεταφοράς της ηλεκτρικής ενέργειας σε μεγάλες αποστάσεις, ο William Stanley κατασκεύασε το πρώτο επαγωγικό πηνίο, που αποτέλεσε τον προάγγελο του σύγχρονου (ηλεκτρικού) μετασχηματιστή καθώς και το πρώτο πλήρες σύστημα υψηλής τάσης μεταφοράς εναλλασσόμενου ρεύματος, το οποίο αποτελείται από γεννήτριες,

μετασχηματιστές και υψηλής τάσης γραμμές μεταφοράς, που αποτέλεσε τη βάση της σύγχρονης διανομής ηλεκτρικής ενέργειας. Έτσι όλη η ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται στους σταθμούς παραγωγής, αρχικά μεταφέρεται σε κοντινούς μετασχηματιστές που μετατρέπουν τη χαμηλή τάση της ηλεκτρικής ενέργειας σε υψηλή. Με αυτόν τον τρόπο, η ηλεκτρική ενέργεια μεταφέρεται με τις γραμμές μεταφοράς σε πολύ μεγάλες αποστάσεις με λιγότερες απώλειες, καθώς οι σταθμοί παραγωγής είναι συνήθως μακριά από μεγάλα αστικά κέντρα. Το δίκτυο μεταφοράς μεταφέρει την ηλεκτρική ενέργεια στους υποσταθμούς μέσης και χαμηλής τάσης, στους οποίους μετατρέπεται η τάση της ηλεκτρικής ενέργειας από υψηλή σε μέση και χαμηλή τάση, προκειμένου με τη βοήθεια εναέριων γραμμών να διανεμηθεί σε βιομηχανίες που χρησιμοποιούν μέση τάση και σε σπίτια που χρησιμοποιούν χαμηλή τάση.



Σχήμα 1.1 William Stanley

1.2.2 Τύποι μεταφοράς ενέργειας

Έχουμε δύο τύπους δικτύου, ανάλογα με την τάση της ηλεκτρικής ισχύος που διακινεί, το Δίκτυο (Σύστημα) Μεταφοράς και το Δίκτυο Διανομής.

Το Δίκτυο Μεταφοράς, μεταφέρει την ηλεκτρική ισχύ από τους σταθμούς παραγωγής στους υποσταθμούς μεταφοράς. Η μεταφορά γίνεται σε υψηλή τάση, μέσω του δικτύου υψηλής τάσης (150kV) και υπερυψηλής (400kV) για να μειωθούν οι απώλειες ισχύος, όταν οι αποστάσεις είναι μεγάλες.



Σχήμα 1.2 Πυλώνες Υπερυψηλής Τάσης

Οι γραμμές Μεταφοράς δεν μπορούν να τροφοδοτήσουν άμεσα τους καταναλωτές που χρησιμοποιούν χαμηλή τάση (220/380V) αλλά φθάνουν μέχρι ορισμένα σημεία, τους υποσταθμούς μεταφοράς, όπου γίνεται υποβιβασμός της τάσης στη μέση τάση, δηλαδή στα 20kV του δικτύου. Οι υποσταθμοί αποτελούν κόμβους στο δίκτυο του ηλεκτρισμού. Από αυτά τα σημεία όπου βρίσκονται οι υποσταθμοί μεταφοράς, αρχίζουν οι γραμμές διανομής, που καταλήγουν στους υποσταθμούς διανομής όπου γίνεται υποβιβασμός της μέσης τάσης στη χαμηλή τάση που χρησιμοποιούν οι περισσότεροι καταναλωτές.



Σχήμα 1.3 Μετασχηματιστής Υποβιβασμού 20KV/0.4KV

1.2.3 Στοιχεία γραμμών μεταφοράς

Τα συστατικά στοιχεία των γραμμών μεταφοράς είναι:

- Πυλώνες ή πύργοι, στους οποίους στηρίζονται οι αγωγοί των εναέριων γραμμών
- Μονωτήρες, μέσω των οποίων αναρτώνται στους πυλώνες οι αγωγοί γραμμών
- Αγωγοί, κυρίως από χαλκό και αλουμίνιο.

Το δίκτυο Διανομής, περιλαμβάνει:

- το δίκτυο διανομής μέσης τάσης (20kV) που μεταφέρει την ηλεκτρική ενέργεια από τους υποσταθμούς μεταφοράς στους υποσταθμούς διανομής.
- το δίκτυο διανομής χαμηλής τάσης (220/380V) που μεταφέρει την ηλεκτρική ενέργεια από τους υποσταθμούς διανομής στους καταναλωτές

1.3 Ο ηλεκτρισμός στην Ελλάδα

1.3.1 Έφτασε ο ηλεκτρισμός στην Ελλάδα

Το έτος 1889 «έφτασε» ο ηλεκτρισμός στην Ελλάδα. Σύμφωνα με τα ιστορικά στοιχεία της ΔΕΗ Α.Ε., η «Γενική Εταιρεία Εργοληψιών» κατασκεύασε στην Αθήνα, στην οδό Αριστείδου, την πρώτη μονάδα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Το πρώτο κτίριο που φωτίζεται είναι τα Ανάκτορα και πολύ σύντομα ο ηλεκτροφωτισμός επεκτείνεται στο σημερινό ιστορικό κέντρο της πόλης. Τον ίδιο χρόνο ηλεκτροδοτείται επίσης η Θεσσαλονίκη, η οποία ανήκει ακόμα στην Οθωμανική Αυτοκρατορία. Η «Βελγική Εταιρεία» αναλαμβάνει απ' τις τουρκικές αρχές το φωτισμό και την τροχοδρόμηση της πόλης με την κατασκευή εργοστασίου παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Δέκα χρόνια αργότερα κάνουν την εμφάνισή τους στην Ελλάδα οι πολυεθνικές εταιρείες ηλεκτρισμού.

Η αμερικανική εταιρεία Thomson-Houston με τη συμμετοχή της Εθνικής Τράπεζας ιδρύουν την «Ελληνική Ηλεκτρική Εταιρεία» που αναλαμβάνει την ηλεκτροδότηση μεγάλων ελληνικών πόλεων. Μέχρι το 1929 θα έχουν ηλεκτροδοτηθεί 250 πόλεις με πληθυσμό άνω των 5.000 κατοίκων.

1.3.2 Ίδρυση ΔΕΗ

Τον Αύγουστο του 1950 ιδρύθηκε η ΔΕΗ και ως εκ τούτου, οι δραστηριότητες παραγωγής, μεταφοράς και διανομής της ηλεκτρικής ενέργειας συγκεντρώθηκαν σε ένα δημόσιο φορέα. Η ΔΕΗ αμέσως στρέφεται προς την αξιοποίηση των εγχώριων πηγών ενέργειας ενώ ξεκινά και η ενοποίηση των δικτύων μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας σε ένα εθνικό διασυνδεδεμένο Σύστημα. Τα πλούσια λιγνιτικά κοιτάσματα του ελληνικού υπεδάφους που είχαν νωρίτερα εντοπισθεί, άρχισαν να εξορύσσονται και να χρησιμοποιούνται ως καύσιμη ύλη στις λιγνιτικές μονάδες ηλεκτροπαραγωγής που δημιουργούσε η ΔΕΗ. Παράλληλα, η Επιχείρηση ξεκίνησε την αξιοποίηση της δύναμης των υδάτων με την κατασκευή υδροηλεκτρικών σταθμών στα μεγάλα ποτάμια της χώρας

1.3.3 Δημιουργία του ΑΔΜΗΕ

Η ΔΕΗ Α.Ε. δραστηριοποιείται ως Παραγωγός και είναι ο κύριος Προμηθευτής ηλεκτρικής ενέργειας. Κατέχει (στοιχεία 2013) περίπου το 75% της εγκατεστημένης ισχύος των θερμοηλεκτρικών σταθμών ηλεκτροπαραγωγής στην ηπειρωτική Ελλάδα συμπεριλαμβάνοντας στο ενεργειακό της μείγμα λιγνιτικούς, υδροηλεκτρικούς και πετρελαϊκούς σταθμούς, καθώς και σταθμούς φυσικού αερίου, αλλά και μονάδες ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ΑΠΕ). Παράγοντας σχεδόν το 50% της ηλεκτρικής της παραγωγής από λιγνίτη, είναι ο 2ος μεγαλύτερος παραγωγός ηλεκτρικής ενέργειας από λιγνίτη στην Ευρωπαϊκή Ένωση. Προμηθεύει περίπου το 98% (στοιχεία 2013) της καταναλισκόμενης ηλεκτρικής ενέργειας. Τέλος, σύμφωνα με την πρόσφατη ελληνική νομοθεσία (ν. 4001/2011) παραμένει στην ιδιοκτησία της το δίκτυο διανομής συνολικού μήκους 217.000 χλμ.(στοιχεία 2009), ενώ η κυριότητα του εθνικού συστήματος μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας μήκους 11.650 χλμ. μεταβιβάζεται στον ΑΔΜΗΕ Α.Ε..

2^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ

“ΥΨΗΛΗ ΣΥΝΕΧΗΣ ΤΑΣΗ”

2.1 Ιστορική αναδρομή

Η ιστορική εξέλιξη των συστημάτων HVDC παρουσιάζει ένα ιδιαίτερο ενδιαφέρον, καθώς τα μεγαλύτερα και σημαντικότερα βήματα στην εξέλιξή τους έχουν πραγματοποιηθεί τις τελευταίες δεκαετίες. Η μεταφορά με συνεχή τάση ξεκινάει από την εποχή του Edison. Στη τότε εποχή η μεταφορά με συνεχή τάση ήταν δύσκολή και ασύμφορη λόγω έλλειψη της τεχνολογίας σε αντίθεση με την σημερινή εποχή που η τεχνολογία βοηθάει στην συνεχή εξέλιξη της μεταφοράς με συνεχή τάση που σιγά σιγά κατακτάει όλο και πιο μεγάλο έδαφος.

2.1.1 Έναρξη μεταφοράς

Η έναρξη της μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας βρίσκεται στις αρχές του 1880 μέσω της χρήσης συνεχούς τάσης. Η πρώτη μεγάλου μήκους μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας έγινε το 1882 μέσω συνεχούς ρεύματος, στη σύνδεση Miesbach-Munich, στην οποία είχαμε

Σχήμα 2.1 Σύστημα ανόρθωσης 1950's-2012's

μεταφ
ορά

ισχύος 2.5kW.

Ο ανταγωνισμός όμως, μεταξύ Thomas Edison, υποστηρικτή της χρήσης της DC τάσης, και των Nikola Tesla και George Westinghouse, οι οποίοι θεωρούσαν πιο συμφέρουσα τη χρήση της εναλλασσόμενης τάσης για την μεταφορά ενέργειας, γνωστός και ως “War of currents”, περί τα τέλη του 1880, ανέδειξε σαν μεγάλο νικητή το AC ρεύμα.

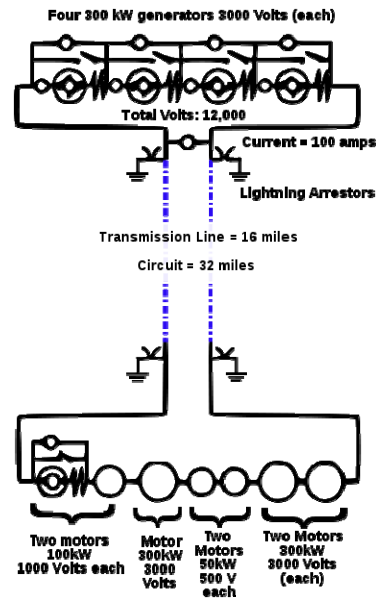


Σχήμα 2.2 Thomas Edison -Nikola Tesla

Αυτό είχε σαν αποτέλεσμα να καθυστερήσει η ανάπτυξη των DC συστημάτων, αφού δόθηκε ιδιαίτερη βαρύτητα στην ανάπτυξη των εφαρμογών της AC τάσης. Τελικά, η δυνατότητα καθοδήγησης των DC τάσεων, και κατά συνέπεια η χρήση τους σε διάφορες εφαρμογές, δεν έγινε εφικτή παρά μόνο όταν υπήρξε και η αντίστοιχη ανάπτυξη ηλεκτρονικών συσκευών μεγάλης ισχύος, όπως διόδων ατμών υδραργύρου (mercury arc valves), θυρίστωρς, διπολικό τρανζίστορ με μονωμένη πύλη (insulated-gate bipolar transistors, IGBTs), υψηλής μεταφορικής ικανότητας τρανζίστορ μεταλλικών οξειδίων ημιαγωγών με επίδραση πεδίου (power metal-oxide-semiconductor field-effect transistors, MOSFETs) και θυρίστωρ με σβέση ελεγχόμενη από την πύλη (gate turn-off thyristors, GTOs).

2.2 Καινούργια αρχή για το DC

Το 1889, μία αρχική μέθοδος HVDC μεταφοράς, την οποία είχε αναπτύξει ο ελβετός μηχανικός Rene Thury, τέθηκε σε εφαρμογή στην Ιταλία από την εταιρία Acquedotto De Ferrari-Galliera. Το σύστημα αυτό χρησιμοποιούσε συνδεδεμένα σε σειρά ζεύγη κινητήρων-γεννητριών με σκοπό την αύξηση της τάσης και μετέφερε 630kW στα 14kV DC σε μια απόσταση 16 μιλίων.



Σχήμα 2.3 Διάγραμμα της εγκατάστασης Thury 1889

Το επόμενο σημαντικό έργο ήταν η γραμμή σύνδεσης Mountiers-Lyon στη Γαλλία, η οποία λειτούργησε από το 1906 έως και το 1936. Η γραμμή αυτή συνέδεε τον υδροηλεκτρικό σταθμό Mountiers, ο οποίος περιελάμβανε 8 γεννήτριες συνδεδεμένες σε σειρά, μεταφέροντας 8600kW σε απόσταση 200km με τάση ανάμεσα στους πόλους 150kV. Μέχρι το 1913 τέθηκαν σε εφαρμογή 15 συστήματα Thury με τάσεις που έφταναν τα 100kV DC και τα οποία λειτούργησαν μέχρι και το 1930. Το υψηλό κόστος συντήρησης καθώς και οι μεγάλες απώλειες σε ενέργεια, οδήγησαν στην απόσυρση των συστημάτων αυτών, τα οποία δεν κατάφεραν να έχουν μμεγάλη εμπορική επιτυχία. Η επόμενη εποχή των HVDC συστημάτων μεταφοράς ξεκίνησε όταν είχαμε την ανάπτυξη της διόδου ατμού υδραργύρου. Το 1941 για την πόλη του Βερολίνου σχεδιάστηκε μια σύνδεση με θαμμένα καλώδια 60MW, +/- 200kV, 115km. Το σχέδιο αυτό όμως, δεν υλοποιήθηκε ποτέ και τελικά ο εξοπλισμός μεταφέρθηκε στη Σοβιετική Ένωση, όπου και τέθηκε σε λειτουργία το 1951 (σύνδεση Moscow-Kashira)

2.2.1 Διασύνδεση Gotland

Η εισαγωγή των διόδων ατμού υδραργύρου σε εμπορικές εφαρμογές ξεκίνησε το 1954 με το σχέδιο σύνδεσης της Σουηδίας με το νησί Gotland.



Σχήμα 2.4 Σύνδεσης της Σουηδίας με το νησί Gotland.

Από την τεχνολογία των υπάρχοντων AC συστημάτων μόνο ένα μικρό μέρος τους μπορούσε να χρησιμοποιηθεί στο νέο αυτό DC σύστημα. Έτσι, ήταν αναγκαία η ανάπτυξη εντελώς νέων τεχνολογιών, η οποία και ξεκίνησε να πραγματοποιείται υπό την επίβλεψη των Dr. Erich Uhlmann και Dr. Harry Forsell στις αρχές του 1950. Επειδή το Gotland ήταν νησί, ήταν απαραίτητη η χρήση υποθαλάσσιων DC καλωδίων. Έτσι, στο «κλασσικό» καλώδιο που είχε ως μόνωση εμβαπτισμένο χαρτί και το οποίο χρησιμοποιούνταν από το 1895 για λειτουργία στα 10kV AC, πραγματοποιήθηκαν αλλαγές με σκοπό την εξέλιξή του, οι οποίες θα έδιναν τη δυνατότητα χρήσης του πλέον ως υποθαλάσσιο καλώδιο στα 100kV DC.



Figure 1: Mercury valves used in the Gotland HVDC transmission inaugurated in 1954

Σχήμα 2.6 Σύστημα ανόρθωσης 1954 για το νησί Gotland

Τελικά το 1954, μετά από 4 χρόνια καινοτόμου δράσης αποπερατώθηκε και τέθηκε σε λειτουργία η HVDC σύνδεση Gotland με ονομαστικά στοιχεία 20MW, 200A και 100kV. Η σύνδεση αυτή λειτούργησε με μεγάλη επιτυχία για 28 χρόνια μέχρι την τελική κατάργησή της το 1986. Εν τω μεταξύ δύο νέες συνδέσεις μεταξύ του νησιού και της Σουηδίας έχουν τεθεί σε λειτουργία, η μία το 1983 και η άλλη το 1987.

2.3 Τα πρώτα συστήματα HVDC

Στη δεκαετία του 1950 οι αρχές ενέργειας της Μ.Βρετανίας και της Γαλλίας συμφώνησαν στο σχεδιασμό ενός συστήματος μεταφοράς ενέργειας μέσω της θάλασσας της Μάγχης και διάλεξαν επίσης την HVDC μεταφορά, αυτή τη φορά για μία σύνδεση των 160MW.

Κατά τη δεκαετία του 1960 πολλές ήταν οι νέες συνδέσεις HVDC που υλοποιήθηκαν:

- Νέας Ζηλανδίας μεταξύ των Βόριων και των Νότιων νησιών (1965)
- Διασύνδεση Ιταλίας-Σαρδηνίας (1965)
- Vancouver Island link στον Καναδά (1968)

Το 1967 μία από τις διόδους ατμού υδραργύρου στη σύνδεση Gotland αντικαταστάθηκε με μία συστοιχία θυρίστορ. Ήταν η πρώτη φορά που γινόταν χρήση τέτοιου είδους συστοιχίας και μετά από δοκιμαστική λειτουργία ενός έτους έγινε αντικατάσταση όλων των διόδων ατμού υδραργύρου με συστοιχίες θυρίστορ αυξάνοντας έτσι την ικανότητα μεταφοράς της γραμμής σύνδεσης κατά 50%.

Παράλληλα μετά την διεξαγωγή δοκιμών στα καλώδια της σύνδεσης, παρατηρήθηκε ότι ήταν δυνατή η αύξηση της τάσης μεταφοράς από τα 100kV στα 150kV. Το νέο βελτιωμένο αυτό σύστημα μεταφοράς στα 150kV τέθηκε σε λειτουργία την άνοιξη του 1970, μετά την σύνδεση σε σειρά των νέων συστοιχιών θυρίστορ με τις υπάρχουσες διόδους αμιού υδραργύρου.

Σημαντικό ρόλο στην εξελικτική πορεία των HVDC συστημάτων μεταφοράς έπαιξε και η κατασκευή της Pacific HVDC Intertie (PDCI), μεταξύ των σταθμών Sylmar στο Calif και του Celilo Converter Station in The Dalles στο Oregon. Ο σχεδιασμός του PDCI ξεκίνησε στις αρχές του 1960 και η συμφωνία για την υλοποίηση του σχεδίου αυτού υπογράφηκε το 1964 και περιελάμβανε την κατασκευή σύνδεσης μεταφορικής ικανότητας 1440MW στα +/- 400kV και 1600A. Η κατασκευή των 846 μιλίων της μεταφορικής γραμμής γινόταν παράλληλα με την κατασκευή των τερματικών σταθμών και ακολουθούσε την πορεία που φαίνεται στην εικόνα. Το σύστημα των διόδων του PDCI ήταν αρκετά μεγαλύτερο από αυτό που είχε χρησιμοποιηθεί στη σύνδεση Gotland.



Σχήμα 2.7 Νέα Ζηλανδία μεταξύ των Βόρειων και των Νότιων νησιών

Το 1970 οι εργασίες κατασκευής του PDCI διακόπηκαν λόγω ενός μεγάλου σεισμού που έγινε στο Sylmar. Παρόλ' αυτά το έργο συνεχίστηκε και μετά τη λειτουργία του άρχισαν να φαίνονται τα πλεονεκτήματα που αυτό προσέφερε. Η εποχιακή ανταλλαγή ενέργειας ήταν ένα από τα σημαντικότερα, καθώς ο βορράς είχε να προσφέρει πλεόνασμα ηλεκτρικής ενέργειας το καλοκαίρι και την άνοιξη, την οποία την είχε ανάγκη ο νότος για να καλύψει τις ανάγκες του σε φορτίο, λόγω της χρήσης κλιματιστικών. Αντίστοιχα, τον χειμώνα ο βορράς

μπορούσε να καλύψει τα φορτία του για θέρμανση, εφόσον υπήρχε πλεόνασμα ηλεκτρικής ενέργειας στο νότο.

Μετά από προσεκτική μελέτη και τροποποίηση του σχεδιασμού του μετατροπέα, το 1977 επιτεύχθηκε αύξηση της μεταφορικής ικανότητας του συστήματος διασύνδεσης στα 2000A και 1600MW. Το 1984 τοποθετήθηκαν πρόσθετοι μετατροπείς και συστοιχίες υδρόψυκτων θυρίστορ (water cooling), γεγονός που είχε σαν αποτέλεσμα η ονομαστική λειτουργία του PDCI πλέον να γίνεται στα +/-500kV, 2000A και 2000MW. Μία περαιτέρω αύξηση της μεταφορικής ικανότητας της σύνδεσης στα 3100MW πραγματοποιήθηκε το 1989 με την προσθήκη παράλληλων μετατροπέων.

2.3.1 Η νέα εποχή των HVDC συστημάτων μεταφοράς

Στα μέσα του 1970, η Brown Boveri (BBC), η οποία αργότερα συγχωνεύτηκε με την ASEA για να δημιουργήσουν την ABB τελικά, συνεργάστηκε με την SIEMENS και την AEG για να κατασκευάσουν την HVDC σύνδεση Cahora Bassa (1920MW) μεταξύ της Μοζαμβίκης και της Νοτίου Αφρικής. Η ίδια ομάδα αργότερα κατασκεύασε και την σύνδεση Nelson River 2 στον Καναδά, η οποία ήταν και η πρώτη που χρησιμοποίησε υδρόψυκτες HVDC διόδους.

Ένα από τα μεγαλύτερα HVDC σύστημα μεταφοράς είναι η HVDC σύνδεση Itaipu στη Βραζιλία στα +/-600kV. Το σχέδιο αυτό ανατέθηκε στη σύμπραξη ASEA-PROMON το 1979 και ολοκληρώθηκε τελικά μετά από αρκετά στάδια το 1984, όπου και τέθηκε σε λειτουργία. Η διασύνδεση αυτή παίζει σημαντικό ρόλο στην ενεργειακή σκηνή της Βραζιλίας, καθώς προμηθεύει με ένα μεγάλο ποσό ενέργειας την πόλη του Σάο Πάολο. Το επίπεδο πολυπλοκότητας του σχεδίου αυτού ήταν αρκετά υψηλό και έπαιξε έναν σημαντικό ρόλο για την ανάπτυξη της νέας εποχής των HVDC συστημάτων μεταφοράς



Σχήμα 2.8 Διασύνδεση Μοζαμβίκης και της Νοτίου Αφρικής

Στα τέλη του 1980 και στις αρχές του 1990, το σχέδιο για την κατασκευή της σύνδεσης Quebec-New England αποτέλεσε ένα ακόμα σημαντικό σταθμό στην εξέλιξη των HVDC συστημάτων, επειδή αυτή ήταν και η πρώτη φορά που χρησιμοποιήθηκε πολυτεματικό HVDC σύστημα μεταφοράς.

Βέβαια, παράλληλα με την ανάπτυξη και εξέλιξη των τερματικών σταθμών παρουσιαζόταν αντίστοιχα και βελτίωση στα καλώδια HVDC. Τα πιο ισχυρά HVDC υποθαλάσσια καλώδια σήμερα είναι της τάξεως των 700 με 800MW στα 450 με 500kV και έχουν μορφές αντίστοιχες με αυτές που φαίνονται στις εικόνες.



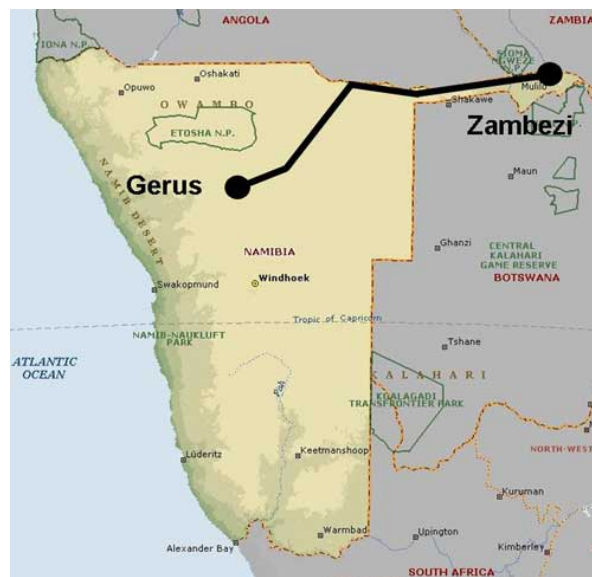
Σχήμα 2.9 Καλώδια XLPE HVDC

2.3.2 Τα HVDC Συστήματα Μεταφοράς Σήμερα

Ένα από τα πιο πρόσφατα στάδια εξέλιξης των HVDC συστημάτων ήταν η εισαγωγή των μετατροπέων μεταγωγής μέσω πυκνωτών (capacitor commutated converters, CCC) και ήταν ουσιαστικά η πρώτη βασική αλλαγή που έγινε στην τεχνολογία του αρχικού συστήματος HVDC του 1954. Το πρώτο πρόγραμμα που υλοποιήθηκε με την χρήση των CCC ήταν ο back-to-back σταθμός Garabi στη διασύνδεση Βραζιλίας - Αργεντινής.

Μία άλλη μεγάλη καινοτομία στα συστήματα HVDC ήταν και η αντικτάσταση των θυρίστορ με μετατροπείς εξαναγκασμένης μεταγωγής (voltage source converters, VSC). Η αλλαγή όμως αυτή θα έπρεπε να συνοδευτεί από μία γενικότερη αλλαγή στο σχεδιασμό των HVDC συστημάτων.

Το 1994, η ABB επικέντρωσε το αναπτυξιακό της έργο στους VSC μετατροπείς με ένα έργο, που σκοπό είχε την εφαρμογή δύο μετατροπέων βασιζόμενων σε IGBTs, σε ένα μικρής κλίμακας σύστημα HVDC. Τελικά, το 1997 μετά από αρκετά πειράματα και μελέτες το πρώτο VSC HVDC (HVDC Light) σύστημα τέθηκε σε λειτουργία μεταξύ των σταθμών Hellsjoeen και Graengenberg στη Σουηδία. Επίσης, μέσα στο 2010 θα τεθεί σε λειτουργία και η πρώτη HVDC Light διασύνδεση που θα χρησιμοποιεί εναέριες DC γραμμές μεταφοράς, στη σύνδεση Caprivi στη Ναμίμπια.



Σχήμα 2.10 Σύνδεση Caprivi στη Ναμίμπια

3^ο Κεφάλαιο

“ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΜΕ HVDC ”

3.1 Καλώδια για HVDC

Είναι γεγονός ότι στις περισσότερες εφαρμογές που απαιτούν μεταφορά μεγάλων ποσοτήτων ενέργειας σε μεγάλες αποστάσεις, είναι απαραίτητη η χρήση DC καλωδίων, λόγω του ότι δεν υπάρχει σε αυτά περιορισμός του μήκους τους εξαιτίας της ανάπτυξης επαγωγικών ρευμάτων, σε αντίθεση με τα AC καλώδια.

Επιπλέον, σε πολλές περιπτώσεις στη σημερινή εποχή, η χρήση εναέριων γραμμών μεταφοράς για τη μεταφορά της ενέργειας, που είναι και η πιο συμφέρουσα λύση, συναντάει εμπόδια λόγω της αντίδρασης των κατοίκων των περιοχών. Η οπτική ενόχληση που αυτές προκαλούν στους κατοίκους, έχει σαν αποτέλεσμα η επιλογή της χρήσης εναέριων γραμμών μεταφοράς να είναι και ο κύριος λόγος καθυστέρησης ενός έργου.

Έτσι, με βάση τα παραπάνω, η ανάπτυξη των DC καλωδίων τα τελευταία χρόνια κρίθηκε απαραίτητη για την αντίστοιχη ανάπτυξη των HVDC διασυνδέσεων.

3.2 Τύποι καλωδίων

Γενικά, για την ανάπτυξη των DC καλωδίων χρησιμοποιήθηκε η πείρα που υπήρχε σχετικά με τα AC καλώδια, γι' αυτό και ο σχεδιασμός τους μοιάζει πολύ με αυτόν των AC καλωδίων. Μέχρι στιγμής έχουν αναπτυχθεί τέσσερις τύποι DC καλωδίων ανάλογα με το είδος της μόνωσης που αυτά έχουν:

1. Καλώδια ελαίου (Oil-filled cables, OF)
2. Καλώδια αερίου υπό πίεση (Gas-pressurized cables, GP)
3. Καλώδια χαρτιού εμβαπτισμένου σε λάδι (Mass-impregnated cables, MI)
4. Καλώδια δικτυωμένου πολυαιθυλενίου (Cross-linked Polyethylene, XLPE)

Τα τρία πρώτα αναφέρονται και ως στερεά καλώδια (solid cables), ενώ το τελευταίο είδος αποτελεί την πιο πρόσφατη καινοτομία στον τομέα της ανάπτυξης των καλωδίων.

3.2.1 Καλώδια ελαίου (Oil-filled cables, OF)

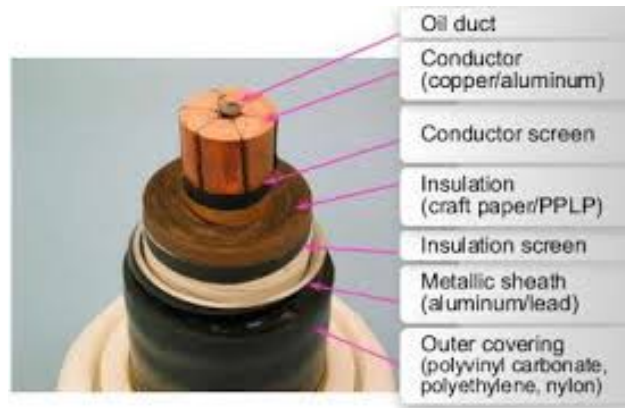
Αποτελούν μία πολύ καλή κατηγορία DC καλωδίων και αναπτύχθηκαν αρχικά για χρήση στη στεριά. Παρουσιάζουν καλύτερα χαρακτηριστικά σε σχέση με άλλους τύπους καλωδίων, όπως για παράδειγμα η μόνωσή τους μπορεί να αντέξει σε μεγαλύτερες φορτίσεις λειτουργίας σε σχέση με την αντίστοιχη αντοχή των MI καλωδίων.

Προβλήματα που αφορούν αυτό τον τύπο καλωδίου, σχετίζονται με τη ροή του λαδιού κατά μήκος του καλωδίου, γεγονός που περιορίζει το μέγιστο μήκος τους στα 100km. Επιπλέον, η πιθανότητα διαρροής λαδιού αποτελεί επίσης ένα ακόμα μειονέκτημά τους σε σχέση με τα περιβαλλοντικά χαρακτηριστικά τους.

Ο τύπος αυτός προσφέρει μεταφορική ικανότητα που φτάνει τα 1000MW στα 600kV και θα μπορεί να είναι δυνατή η χρήση του και σε υποθαλάσσιες εφαρμογές όταν λυθούν ζητήματα που αφορούν την παροχή του λαδιού σε μεγάλες αποστάσεις.

Εφαρμογές των OF καλωδίων αποτελούν:

- Το πέρασμα του κόλπου της Aqaba. Τον Μάιο-Ιούνιο του 1997 τέσσερα καλώδια ελαίου εγκαταστάθηκαν κατά μήκος του κόλπου της Aqaba, σε βάθος 850m και με τάση λειτουργίας στα 420kV όταν βρίσκονται υπό AC τάση και στα 400kV υπό DC τάση. Τα καλώδια αυτά προς το παρόν λειτουργούν σαν AC καλώδια με μεταφορική ικανότητα 550MW, η οποία μπορεί να φτάσει τα 2000MW εάν η λειτουργία τους αλλάξει σε DC.
- Η διασύνδεση Ισπανίας-Μαρόκου. Η πρώτη διασύνδεση Ισπανίας-Μαρόκου πραγματοποιήθηκε το 1997 και αποτελούνταν από τέσσερα καλώδια εγκατεστημένα σε μέγιστο βάθος 615m. Ένα συμβόλαιο για την εγκατάσταση άλλων τριών επιπλέον καλωδίων, τα οποία θα λειτουργούν στα 420kV AC ή στα 450kV DC, υπογράφηκε το 2003. Στην AC λειτουργία η μεταφορική ικανότητα είναι 700MW, ενώ στη DC λειτουργία αυτή γίνεται 2000MW.



Σχήμα 3.1 Καλώδιο ελαίου

3.2.2 Καλώδια αερίου υπό πίεση (Gas-pressurized cables)

Αυτός ο τύπος καλωδίων μπορεί να αντέχει σε αρκετά υψηλές φορτίσεις λειτουργίας, γι' αυτό και χρησιμοποιείται σε εφαρμογές όπου η μεταφορά ενέργειας γίνεται σε μεγάλες αποστάσεις και σε μεγάλα βάθη. Λόγω μεγάλων δυσκολιών στην κατασκευή τους, τα καλώδια αερίου υπό πίεση δεν χρησιμοποιούνται για DC διασυνδέσεις από τη δεκαετία του '60.



Σχήμα 3.2 Καλώδια αερίου υπό πίεση

3.2.3 Καλώδια χαρτιού εμβαπτισμένου σε λάδι (Mass-impregnated Cables, MI)

Η πλειοψηφία των καλωδίων που κατασκευάζονταν στις αρχικές HVDC εφαρμογές ήταν MI καλώδια. Η κατασκευή τους μοιάζει αρκετά με αυτή των OF καλωδίων, μόνο που σε αυτή

την περίπτωση γύρω από τον βασικό αγωγό τοποθετούνται πολλά στρώματα εμβαπτισμένου χαρτιού για μόνωση. Στη συνέχεια γύρω από το καλώδιο τοποθετούνται στρώματα από ασπίδες, αντιδιαβρωτικές προστασίες και οπλισμούς, με σκοπό να προστατεύσουν το καλώδιο από την επίδραση του περιβάλλοντος



Σχήμα 3.3 Καλώδια χαρτιού εμβαπτισμένου σε λάδι

Τα πλεονεκτήματα αυτού του τύπου καλωδίου είναι η απλή δομή, η άνετη κατασκευή και η συντήρησή του σε χαμηλό κόστος. Λόγω της απουσίας ροής λαδιού και της ψύξης που προσφέρει το νερό της θάλασσας, τα καλώδια αυτά μπορούν να χρησιμοποιούνται για υποθαλάσσια μεταφορά ενέργειας σε μεγάλες αποστάσεις.

Μπορούν να τοποθετούνται σε βάθος που φτάνει τα 1000m κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας και δεν υπάρχει περιορισμός στο μήκος τους. Η μεταφορική ικανότητα του συστήματος μπορεί να περιοριστεί μόνο από τη θερμοκρασία που αναπτύσσεται στον αγωγό. Πρέπει να τονίσουμε επίσης, ότι στα MI καλώδια, σε αντίθεση με τα OF, δεν υπάρχει ο κίνδυνος διαρροής λαδιού στο περιβάλλον.

Μια πολύ σημαντική εφαρμογή των MI καλωδίων είναι και αυτή της διασύνδεσης της Ισπανίας με τη Μαγιόρκα. Σε αυτή την περίπτωση, μία HVDC 400MW διπολική διασύνδεση, η οποία αποτελείται δύο HVDC MI καλώδια στα 250kV και μία ξεχωριστή μεταλλική επιστροφή με αγωγό XLPE, ενώνει την κυρίως χώρα της Ισπανίας με το νησί της Μαγιόρκας. Βασική πρόκληση στη συγκεκριμένη εφαρμογή ήταν το μεγάλο βάθος του δρόμου που θα έπρεπε να ακολουθήσει η διασύνδεση. Οι παρακάτω εικόνες δείχνουν το δρόμο αυτό και όπως φαίνεται περίπου το 50% της διαδρομής που έπρεπε να ακολουθηθεί, βρίσκεται σε βάθος μεγαλύτερο των 1000m.



Σχήμα 3.4 Διαδρομή καλωδίου σε βάθος 1000 μέτρα



Σχήμα 3.5 Σύνδεση της Ισπανίας με τη Μαγιόρκα.

3.2.4 Καλώδιο δικτυωμένου πολυαιθυλενίου- XLPE

Παλαιότερα τα DC καλώδια που χρησιμοποιούνταν για τις HVDC διασυνδέσεις ανήκαν στις προηγούμενες κατηγορίες. Όμως, τα OF καλώδια δεν ήταν κατάλληλα για μεγάλες αποστάσεις, λόγω της ανάγκης ανανέωσης του ελαίου, και τα MI καλώδια δεν μπορούσαν να μεταφέρουν μεγάλες ποσότητες ισχύος, εξαιτίας της σχετικά χαμηλής ανθεκτικότητάς τους στη θερμοκρασία. Έτσι λοιπόν, ήταν αναγκαία η κατασκευή ενός τύπου καλωδίου που θα ξεπερνούσε αυτού του είδους τα εμπόδια και θα ήταν το πλέον κατάλληλο για τις μεγάλες HVDC διασυνδέσεις. Οπότε κατασκευάστηκε το καλώδιο δικτυωμένου πολυαιθυλενίου (XLPE).

Όταν ένα καλώδιο διαρέεται από DC ρεύμα τα προβλήματα που προκύπτουν είναι τα εξής:

- Παραγωγή θερμότητας στη μόνωση λόγω του ρεύματος.
- Ανάπτυξη τοπικού υψηλού ηλεκτρικού πεδίου λόγω της φόρτισης.

Έτσι, λοιπόν, τα DC XLPE καλώδια καλούνται να αντιμετωπίσουν αυτά τα προβλήματα. Η μόνωση που αυτά έχουν, πρώτον προσφέρει μεγάλη αντίσταση για τη μείωση του ρεύματος διαρροής και κατά συνέπεια τη μείωση των απωλειών Joule, και δεύτερον οδηγεί σε απουσία τοπικών υψηλών ηλεκτρικών πεδίων.

Γενικά, τα DC XLPE καλώδια σχεδιάζονται για να μπορούν να ικανοποιούν τις απαιτήσεις ονομαστικού ρεύματος και τάσης για μια συγκεκριμένη μεταφορική ικανότητα της διασύνδεσης και για συγκεκριμένες συνθήκες λειτουργίας. Επιπλέον, η αναμενόμενη διάρκεια ζωής των HVDC XLPE καλωδίων είναι μεγαλύτερη σε σχέση με την αντίστοιχη των AC XLPE. Συγκρινόμενα με τους άλλους τύπους καλωδίων, αυτά δεν περιέχουν λάδι, οπότε δεν υπάρχει και κίνδυνος διαρροής στο περιβάλλον, και είναι γενικά πιο εύκαμπτα, γεγονός που διευκολύνει τη διέλευσή τους από εμπόδια.



Σχήμα 3.6 Καλώδιο XLPE

3.3 Σύγκριση καλωδίων με εναέριες γραμμές μεταφοράς (ΕΓΜ)

Η χρήση υπόγειων καλωδίων DC προσφέρει κάποια πλεονεκτήματα συγκριτικά με τη χρήση εναέριων γραμμών μεταφοράς AC. Αυτά είναι τα παρακάτω:

3.3.2 Λιγότερη έκταση χρησιμοποιούμενης γης

Στην περίπτωση μιας εναέριας AC γραμμής μεταφοράς, η διέλευσή της απαιτεί να μην υπάρχουν σε πλάτο 60m ούτε κτίρια, ούτε ψηλά δέντρα, ενώ αντίστοιχα στην περίπτωση υπόγειου DC καλωδίου δεν υπάρχουν τόσο αυστηροί περιορισμοί.

3.3.3 Απουσία θορύβου

Ενώ στην περίπτωση των εναέριων γραμμών μεταφοράς παρουσιάζεται θόρυβος εξαιτίας του φαινομένου κορώνα, ο οποίος αυξάνεται όταν οι καιρικές συνθήκες ευνοούν την υγρασία, κατά τη χρήση υπόγειων καλωδίων δεν παρατηρείται κάποια επίδραση θορύβου σε γειτονικές εγκαταστάσεις.

3.3.4 Ηλεκτρομαγνητικά Πεδία

Τα ηλεκτρομαγνητικά πεδία που παρουσιάζονται δίπλα στις περιοχές διέλευσης των ΕΓΜ περιορίζουν τη χρήση τους και μειώνουν την αξία της γης δημιουργώντας έτσι προβλήματα στους ιδιοκτήτες. Επιπλέον, πρέπει να λαμβάνονται και κάποια μέτρα προστασίας για τον περιορισμό των επιπτώσεων αυτών των ηλεκτρομαγνητικών πεδίων. Αντίθετα, στην περίπτωση των καλωδίων τα πεδία που μετρώνται στην επιφάνεια του εδάφους είναι πολύ μικρότερα σε σχέση με το αντίστοιχο ηλεκτρομαγνητικό πεδίο της γης, οπότε δεν υπάρχει ανάγκη λήψης κατάλληλων μέτρων.

3.3.5 Διέλευση ΕΓΜ

Η διέλευση των ΕΓΜ πολλές φορές είναι αναγκαίο να γίνεται και μέσα από δάση. Έτσι, λοιπόν, για να μπορέσει να ανοιχτεί ο κατάλληλος δρόμος (Right-of-Way) θα πρέπει να κοπεί ένα μέρος του δάσους, το οποίο αποτελεί μία σημαντική αποθήκη CO₂, γεγονός που είναι από μόνο του ζημιογόνο για το περιβάλλον.

3.3.6 Αισθητική Παρεμβολή

Η αισθητική παρέμβαση και η μείωση της αξίας της γης που βρίσκεται κοντά στις ΕΓΜ, αποτελούν επίσης ένα από τα μειονεκτήματά τους.

Ενδεικτικά αναφέρουμε ότι κατά μήκος μιας ΕΓΜ 400km σε κάθε 500m:

- Υπάρχουν δύο ιδιοκτησίες σε απόσταση 1000m από την ΕΓΜ, οι οποίες χάνουν περίπου το 4% της αξίας τους
- Υπάρχουν τρεις ιδιοκτησίες σε απόσταση 2000m από την ΕΓΜ, οι οποίες χάνουν περίπου το 2% της αξίας τους

Όπως μπορούμε να δούμε, λοιπόν, είναι εύλογες οι όποιες αντιδράσεις μπορεί να εμφανίζονται κατά το σχεδιασμό και την κατασκευή των ΕΓΜ, γεγονός που μπορεί να καθυστερήσει την υλοποίηση του έργου και δεν συμβαίνει στην περίπτωση των υπόγειων καλωδίων.

3.4 Διαφορά HVDC με HVAC για μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας με υπόγεια ή υποθαλάσσια καλώδια.

Τα υπόγεια και υποθαλάσσια καλώδια παρουσιάζουν αυξημένη χωρητικότητα, λόγω του ότι οι αγωγοί τους περιβάλλονται από ένα λεπτό στρώμα μόνωσης και μία μεταλλική θωράκιση.

Στην περίπτωση που οι αγωγοί διαρρέονται από εναλλασσόμενο ρεύμα, αυτές οι χωρητικότητες φαίνονται σαν να είναι παράλληλα με το φορτίο. Επιπρόσθετο ρεύμα πρέπει να διαρρέει τον αγωγό, για να φορτίσει την χωρητικότητα του καλωδίου (χωρητικό ρεύμα φόρτισης), γεγονός που προκαλεί πρόσθετες απώλειες στους αγωγούς. Επιπλέον, η ύπαρξη ενός διηλεκτρικού στοιχείου στη μόνωση του αγωγού που καταναλώνει ενέργεια, έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση των απωλειών.

Αντιθέτως, στην περίπτωση όπου χρησιμοποιούμε συνεχές ρεύμα, η χωρητικότητα του καλωδίου φορτίζεται μόνο όταν έχουμε μεταβολή της τάσης και δεν απαιτείται χωρητικό ρεύμα φόρτισης στη μόνιμη κατάσταση.

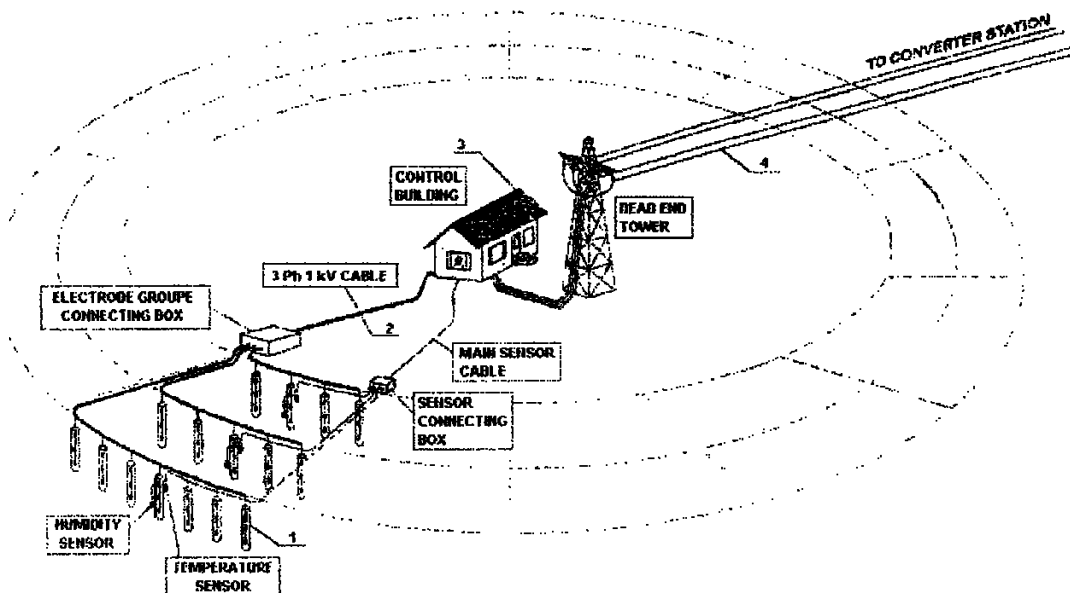
Στα μακριά υποθαλάσσια καλώδια AC σχεδόν όλο το ρεύμα που διαρρέει τους αγωγούς χρησιμοποιείται για την φόρτιση των χωρητικοτήτων των καλωδίων και για αυτό το λόγο περιορίζεται το επιτρεπόμενο μήκος των καλωδίων εναλλασσόμενου ρεύματος. Στα DC υποθαλάσσια καλώδια δεν υπάρχει ανάλογο πρόβλημα και γι' αυτό δεν υπάρχει και κάποιος περιορισμός στην απόσταση μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας.

Σε περιπτώσεις σύνδεσης μεγάλων αποστάσεων με καλώδια, όπως η σύνδεση απομακρυσμένων ανεμογεννητριών με το δίκτυο, η χρήση HVDC συστημάτων μεταφοράς κρίνεται ως η μοναδική λύση.

3.5 Πυλώνες και χρήση γης

3.5.2 Χρήση γης για μεταφορά

Το πιο σημαντικό που σχετίζεται από περιβαλλοντικής πλευρά με την κατασκευή γραμμής μεταφοράς είναι η μετατροπή της χρήσης γης για το σύστημα μετάδοσης. Οι απαιτήσεις της γης ανά μονάδα δυναμικότητας υποσταθμών μεταφοράς για HVAC και HVDC είναι σχεδόν οι ίδιες, επειδή οι ίδιοι οι μετατροπείς καταλαμβάνουν συγκριτικά μικρές εκτάσεις. Σε περιπτώσεις, όμως όπου είναι εγκαταστάστημενες γείωσεις για την τρέχουσα απόδοση μέσω του εδάφους είναι απαραίτητη, επιπρόσθετη χρήση γης για τις εγκαταστάσεις γείωσης και για τη γραμμή μεταφοράς από τον υποσταθμό στις εγκαταστάσεις γείωσης προσθέσετε στη συνολική έκταση γης που απαιτείται.



Σχήμα 3.7 Σύστημα Γείωσης σε σταθμό

Το μεγαλύτερο ποσοστό της γης που χρησιμοποιείται για τα συστήματα μετάδοσης συνεχούς ρεύματος υψηλής τάσης ή HVAC χρησιμοποιείται για την εναέρια γραμμή μεταφοράς. Με τον όρο "χρήση γης" εννοούμε την συνολική έκταση που χρησιμοποιείται για τους πύργους, αλλά συμπεριλαμβάνεται και η μεταφορά της γραμμής δεξιάς διελεύσεως. Σε δασώδεις περιοχές πρέπει να λαμβάνεται υπόψη το μέρος του δάσους που πρέπει να κοπεί για να δοθεί στην γραμμή μεταφοράς δεξιάς διέλευσης.

Η έκταση της χρήσης γης, ως ο κύριος οικολογικός δείκτης του συστήματος μεταφοράς, εξαρτάται ως επί το πλείστον από την αξιοπιστία του συστήματος ως προς τη γραμμή. Ανάλογα με τη μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή, με βάση μία πιθανή εκτίμηση, της διακοπής του ρεύματος έκτακτης ανάγκης στην υποδοχή ενός τμήματος του συστήματος μεταφοράς, το σύστημα μετάδοσης HVDC μπορεί να υλοποιηθεί ως μια διπολική γραμμή, ως τετραπολική γραμμή με κυκλώματα που βρίσκονται σε ένα πύργο, ως δύο διπολικές γραμμές σε ένα διάδρομο ή, τέλος, ως δύο διπολικές γραμμές που βρίσκονται σε διαφορετικούς διαδρόμους. Σε κάθε μία από αυτές τις περιπτώσεις, η χρήση της γης ανά MW της μεταδιδόμενης ισχύος είναι αρκετά διαφορετική.



Σχήμα 3.8 Πυλώνες μεταφοράς HVDC

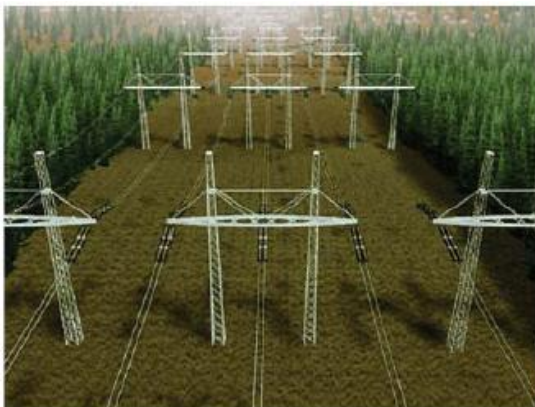
Για την εκτίμηση των απόλυτων τιμών της χρήσης της γης, μπορούν να παρουσιαστούν ως παράδειγμα τα ακόλουθα στοιχεία για ένα έργο χρησιμοποιώντας ± 500 kV, σύστημα μετάδοσης 2000MW διπολική HVDC με την τρέχουσα "μεταλλική επιστροφή".

Σε αυτή την περίπτωση, η περιοχή του υποσταθμού του μετατροπέα του συστήματος μετάδοσης φτάνει περίπου τα 90.000m². Ο χώρος που απαιτείται για τη γραμμή μεταφοράς δεξιάς διελεύσεως υπολογίζεται στα 100.000m² ανά χιλιόμετρο μήκους γραμμής .



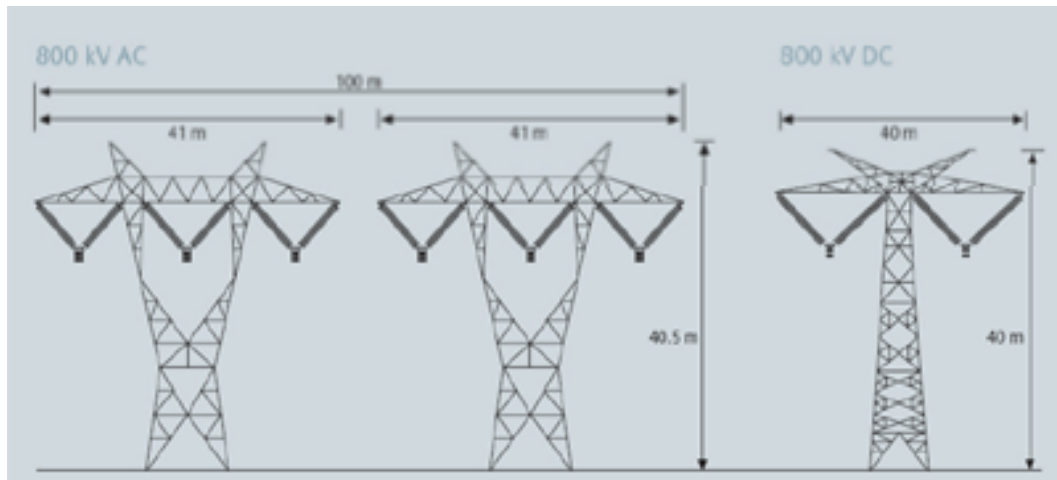
Σχήμα 3.9 Διπολικός πύλωνας HVDC 500KV

Μία πρόχειρη συγκριτική εκτίμηση για εναέριες γραμμές μεταφοράς HVDC και HVAC δείχνει ότι σε περίπτωση ίσης δυναμικότητας μεταφοράς υπολογίζονται για κάθε τεχνολογία, οι απαιτήσεις για αξιοπιστία, το κόστος των περιβαλλοντικών μέτρων, η συνολική περιοχή χρήσης γης, η γραμμή δεξιάς διελεύσεως για μια γραμμή μεταφοράς συνεχούς ρεύματος υψηλής τάσης είναι 1,5 φορές λιγότερο (περίπου τα δύο τρίτα του) από ότι χρειάζεται για ισοδύναμη γραμμή HVAC. Ανάλογα με τις συγκεκριμένες συνθήκες, η αναλογία αυτή μπορεί να είναι μεγαλύτερη από ή περίπου ίση με το 1 .



Franja de servidumbre para el caso 500 KV HVAC y \pm 500 HVDC para transportar 3000 MW

Σχήμα 3.10 Μεταφορά ενέργειας 3000MW στα 300KV με HVAC (αριστερά) και με HVDC (δεξιά)



Σχήμα 3.11 Μεταφορά στα 800KV με HVAC (αριστερά) και HVDC (δεξιά)

Το πλεονέκτημα ενός συστήματος HVDC από ένα σύστημα HVAC εξαρτάται από τα προαναφερόμενα οικολογικά πλεονεκτήματα, αλλά και στην ικανότητα των συστημάτων HVDC να παρέχουν συνεχή μεταφορά ισχύος μέσω ενός πόλου μίας διπολικής γραμμής ακόμη και σε όταν ο δεύτερος πόλος μεταφέρεται κατά τη διάρκεια μιας έκτακτης ανάγκης. Λαμβάνοντας υπόψη το μεγάλο μήκος της γραμμής και την ανάγκη να διασχίσουν πυκνοκατοικημένες περιοχές, εθνικά πάρκα και δάση με πολύτιμα είδη δέντρων, η διαφορά στη χρήση της γης μεταξύ των δύο επιλογών φαίνεται να είναι αρκετά σημαντική.

3.5.3 Οπτικές Επιπτώσεις

Όταν γραμμές μεταφοράς διασχίζουν κατοικημένες περιοχές και ιδίως των εθνικών θέρετρων, πάρκων και άλλων περιοχών όπου η διατήρηση του φυσικού τοπίου αποτελεί σημαντικό στοιχείο, τίθενται ειδικές απαιτήσεις που αφορούν τις διαστάσεις της γραμμής μεταφοράς. Για παράδειγμα, μερικές φορές είναι απαραίτητο να περιοριστεί το ύψος των πύργων σε σχέση με το ύψος των δέντρων σε δασώδεις περιοχές, έτσι ώστε η ίδια η γραμμή μεταφοράς να είναι σε μεγάλο βαθμό κρυμμένη. Ειδικές απαιτήσεις εφαρμόζονται στη συνέχεια για τον σχεδιασμό της αισθητικής της γραμμής.

Σε περιπτώσεις όπου υπάρχουν ιδιαίτερα δύσκολες αισθητικές απαιτήσεις, μονωτικά συνδετήρια τμήματα που πρέπει να χρησιμοποιηθούν στα καλώδια, αυτό έχει σαν αποτέλεσμα τη αύξηση του κόστους ενός έργου μεταφοράς ενέργειας.

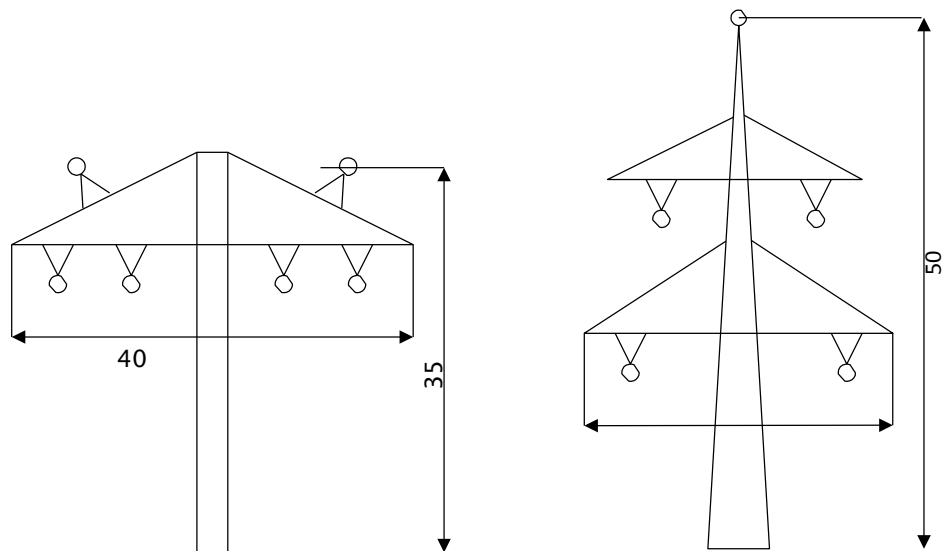


Σχήμα 3.12 Μεταφορά με HVDC μέσα από κατοικημένες περιοχές

Σε περιπτώσεις όπου χρησιμοποιούνται μόνο εναέριες γραμμές, το μήκος που πρέπει να πάρει η διαδρομή πρέπει να αυξάνεται, προστατευόμενες περιοχές πρέπει να αποφεύγονται, ή διαφορετικά πρέπει να σχεδιαστούν όλα διαφορετικά. Οι αλλαγές αυτές, επίσης, συνήθως οδηγούν στην αύξηση του κόστους της γραμμής.

Οι γραμμές μεταφοράς συνεχούς ρεύματος υψηλής τάσης γενικά προσφέρουν πολλά πλεονεκτήματα από την άποψη της οπτικής όχλησης σε σχέση με τις γραμμές HVAC της ίδιας δυναμικότητας. Γραμμές μεταφοράς συνεχούς ρεύματος υψηλής διπολικής τάσης έχουν δύο αγωγούς και λόγω αυτού είναι πιο απλές στο σχεδιασμό σε σχέση με τη δομή μιας γραμμής HVAC τριών φάσεων. Οι γραμμές HVDC απαιτούν μικρότερα ύψη πύργων σε σύγκριση με τις γραμμές HVAC της ίσης ικανότητας και συγκρίσιμα επίπεδα τάσης.

Σε περίπτωση που χρησιμοποιούνται τετραπολικές γραμμές HVDC, οι πύργοι μπορεί να σχεδιαστούν ως επίπεδοι ή πύργοι με 2 τραβέρσες, ανάλογα με τις ειδικές συνθήκες του διαδρόμου μεταφοράς. Στο Σχήμα 3.13 φαίνεται μια σχηματική άποψη των τύπων αυτών των πύργων για μια γραμμή ± 500 kV συνεχούς ρεύματος υψηλής τάσης, με κατά προσέγγιση τις διαστάσεις του πύργου. Υπάρχουν επιλογές στον σχεδιασμό ενός πύργου ανάλογα με τις ειδικές απαιτήσεις της γραμμής



Σχήμα 3.13 Τύποι πυλώνων τετραπολικών γραμμών

Σε κάθε περίπτωση, ωστόσο, που οι διαστάσεις των πύργων της τετραπολικής γραμμής είναι μικρότερες σε σύγκριση από εκείνες τις γραμμές του HVAC διπλού κυκλώματος. Σχηματικά παρουσιάζονται οι δύο εναλλακτικές λύσεις για την κατασκευή των ± 500 kV HVDC τετραπολικών πύργων γραμμών μεταφοράς: με ένα (επίπεδο πύργο) ή δύο βραχίονες.

3.5.4 Συμπεράσματα

Εάν υπάρχει ανάγκη για χρήση ένθετων καλωδίων για την προστασία των αισθητικών αξιών σε ορισμένες περιοχές, οι γραμμές HVDC έχουν οικονομικότερα πλεονεκτήματα σε σύγκριση με τις γραμμές HVAC, ενώ το καλώδιο συνεχούς ρεύματος υψηλής τάσης είναι σημαντικά φθηνότερο από το καλώδιο HVAC της ίδιας δυναμικότητας. Εάν το μήκος που

πρέπει να ταφεί το καλώδιο είναι σημαντικό, στην περίπτωση των καλωδίων HVAC, είναι αναγκαίο να αντισταθμιστεί το πλεόνασμα στην ικανότητα φόρτισης του θαμμένου καλωδίου.

Εκτός από τα αισθητικά ζητήματα, μπορεί επίσης να εμφανιστεί η ανάγκη να συμπεριληφθούν (θαμμένα) ένθετα καλωδίου σε μια γραμμή σε περιπτώσεις όπου συναντιόνται διάφορα εμπόδια στη δρομολόγηση μιας γραμμής μεταφοράς. Είναι δυνατόν, για παράδειγμα, τεθούν τα καλώδια σε σήραγγες σιδηροδρόμου που διασχίζουν ορεινούς όγκους. Σε όλες αυτές τις περιπτώσεις, οι πιο απλή δομή των καλωδίων HVDC προσφέρει πλεονεκτήματα για τα συστήματα μεταφοράς HVDC.

Οι γραμμές μεταφοράς συνεχούς ρεύματος υψηλής τάσης γενικά προσφέρουν πολλά πλεονεκτήματα από την άποψη της οπτικής όχλησης σε σχέση με τις γραμμές HVAC της ίδιας δυναμικότητας. Γραμμές μεταφοράς συνεχούς ρεύματος υψηλής διπολικής τάσης έχουν δύο αγωγούς και ήδη λόγω αυτού είναι πιο απλό στο σχεδιασμό σε σχέση με τη δομή τριών φάσεων μιας γραμμής HVAC. Οι γραμμές HVDC απαιτούν μικρότερους σε ύψος πύργους σε σύγκριση με τις γραμμές HVAC της ίσης ικανότητας και συγκρίσιμα επίπεδα τάσης.

Κατά τη διάρκεια σχεδιασμού του έργου της μεταφοράς της γραμμής HVDC, θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη σχεδόν τα ίδια χαρακτηριστικά των περιβαλλοντικών επιπτώσεων που εξετάζονται στο σχεδιασμό ενός έργου γραμμής μεταφοράς HVAC. Αυτά τα χαρακτηριστικά περιλαμβάνουν επιρροές από ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία, ραδιοφωνικές παρεμβολές, θόρυβο - ήχο, την ταχεία διάβρωση των μεταλλικών εγκαταστάσεων που οφείλονται σε ηλεκτρικά ρεύματα που βρίσκονται στο έδαφος, την αποξένωση από την γη (αλλαγή χρήσης) που συμπεριλαμβάνει την χωροθέτηση των πυλώνων και των υποσταθμών της γραμμής μεταφοράς. Επίσης, οι πιθανές αλλαγές της χρήσης της γης που είναι κάτω και δίπλα σε εναέριες γραμμές μεταφοράς. Σε ορισμένες περιπτώσεις επίσης πρέπει να ληφθούν υπόψη οι οπτικές επιπτώσεις των γραμμών.

Ο συνδυασμός των διαφόρων ειδικών φυσικών χαρακτηριστικών και των σχετικών τεχνικών πτυχών που σχετίζονται με την κατασκευή και τη λειτουργία της γραμμής, οι γραμμές μεταφοράς συνεχούς ρεύματος υψηλής τάσης έχουν πλεονεκτήματα σε σχέση με τις γραμμές μεταφοράς HVAC στην πλειοψηφία των δεικτών περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Αυτά τα πλεονεκτήματα επιτρέπουν να βελτιωθούν οι περιβαλλοντικές επιδόσεις με χαμηλότερο κόστος κατά την εγκατάσταση γραμμών HVDC, σε σχέση με τις γραμμές HVAC. Η αξία των αλλαγών των χρήσεων γης μπορεί να ληφθεί ως γενικός δείκτης για την συγκριτική ανάλυση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων των γραμμών μεταφοράς HVDC και HVAC της ίδιας σχετικής ικανότητας. Με βάση μια πρόχειρη εκτίμηση, αυτή η αναλογία είναι 1,5 υπέρ των

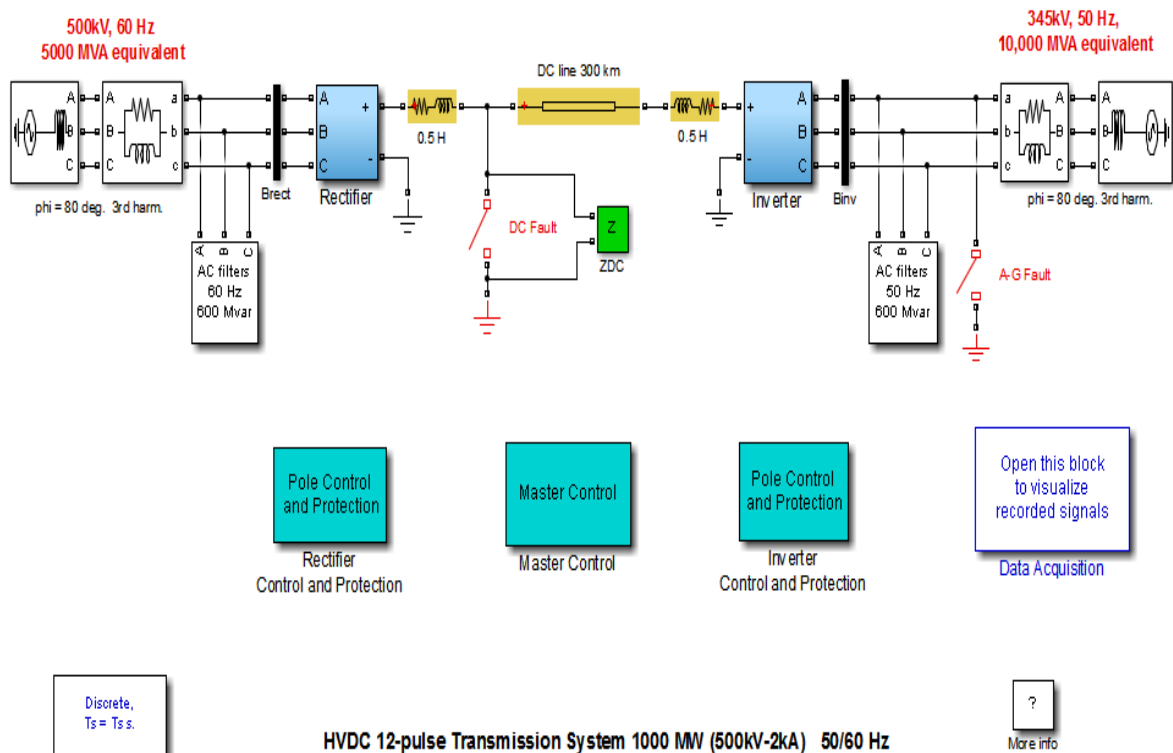
γραμμών μεταφοράς συνεχούς ρεύματος υψηλής τάσης (χαμηλότερο κόστος). Έτσι, από οικολογική άποψη, ένα σύστημα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας HVDC στο σύνολό της είναι προτιμότερο από ένα σύστημα που χρησιμοποιούν αποκλειστικά HVAC γραμμές μεταφοράς .

4^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ

“ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΜΕ HVDC”

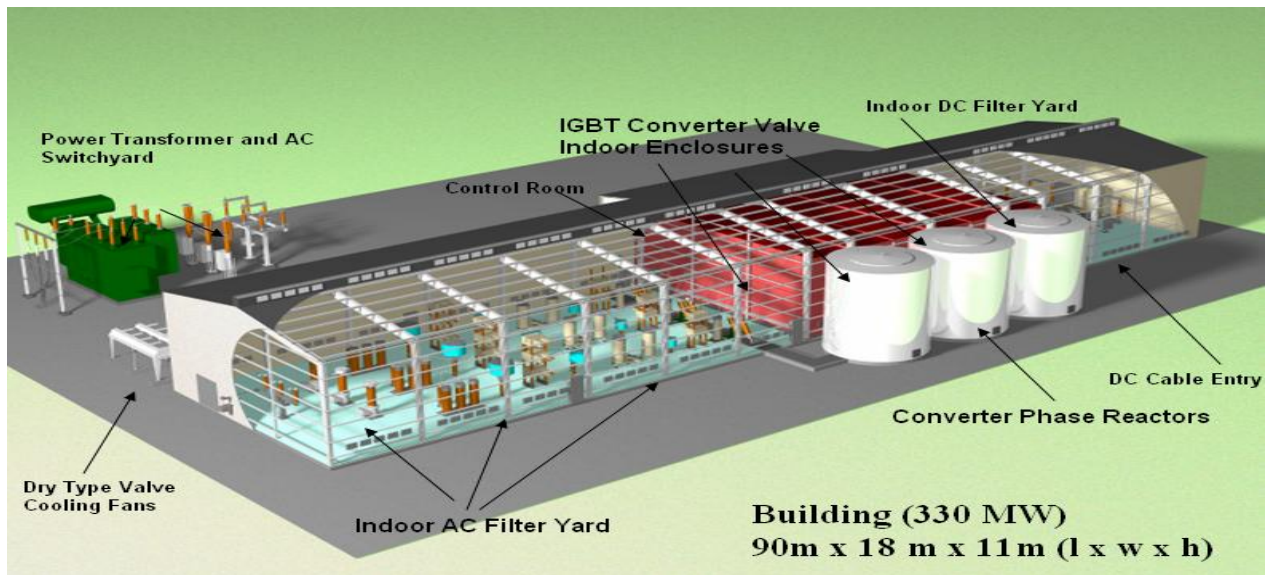
4.1 Σύστημα Μεταφοράς HVDC

Στα άκρα κάθε HVDC συστήματος μεταφοράς υπάρχουν οι σταθμοί μετατροπής του συστήματος. Ανάλογα με τις ανάγκες του έργου που καλείται να εξυπηρετήσει το HVDC σύστημα, προσδιορίζεται και η τοπολογία του σταθμού μετατροπής, που στη γενική μορφή της μοιάζει με αυτή της εικόνας



Σχήμα 4.1 Απεικόνιση Μεταφοράς HVDC 1000MW στα 500KV

Παρακάτω, παρουσιάζονται και αναλύονται τα επιμέρους τμήματα που αποτελούν έναν υποσταθμό



Σχήμα 4.2 Κτήριο εγκατάστασης σταθμός HVDC

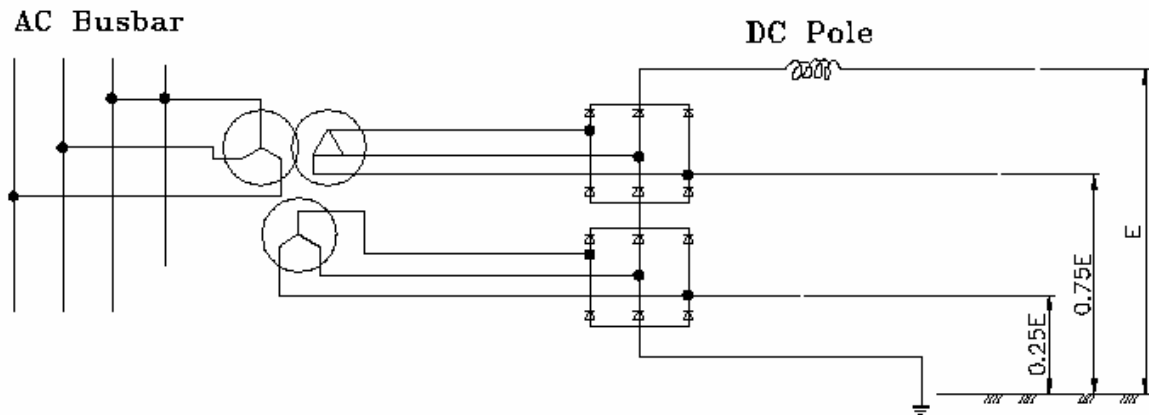
4.2 Τμήματα Υποσταθμού HVDC

4.2.1 Μετατροπείς (Converters)

Αδιαμφισβήτητα, οι μετατροπείς που χρησιμοποιούνται στον υποσταθμό αποτελούν το σημαντικότερο κομμάτι του, εφόσον μέσω αυτών γίνεται η μετατροπή της ac τάσης σε dc, όπου έχουμε λειτουργία ανορθωτή (rectifier), και της dc τάσης σε ac, όπου και έχουμε λειτουργία αντιστροφέα (inverter).

4.2.2 Γέφυρα 12-παλμών

Η βασική τοπολογία μετατροπέων που χρησιμοποιείται σήμερα είναι η τριφασική γέφυρα 12-παλμών.



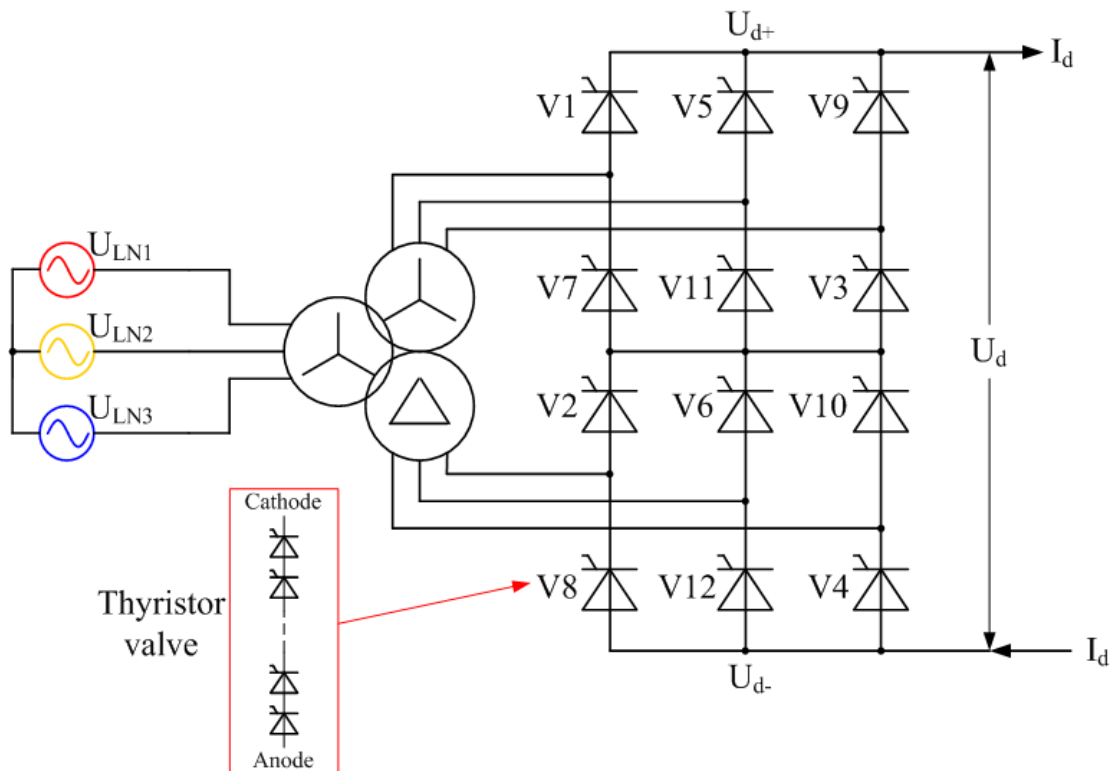
Σχήμα 4.3 Γέφυρα 12 - παλμών με δύο Μ/Σ

Κάθε γέφυρα 12-παλμών αποτελείται από δύο γέφυρες μετατροπής 6-παλμών (Graetz bridge), οι οποίες συνδέονται σε σειρά στη dc πλευρά τους. Επιπλέον στην ac πλευρά υπάρχει μια διαφορά φάσης 30 μοιρών στην τροφοδοσία των γεφυρών 6-παλμών, η οποία επιτυγχάνεται τροφοδοτώντας τη μία γέφυρα μέσω ενός μετασχηματιστή σε συνδεσμολογία αστέρα στο δευτερεύον και τροφοδοτώντας την άλλη γέφυρα 6-παλμών, μέσω ενός μετασχηματιστή με συνδεσμολογία τριγώνου στο δευτερεύον. Πρέπει εδώ να τονίσουμε ότι είναι δυνατόν να υπάρχουν είτε δύο μετασχηματιστές (ο ένας σε συνδεσμολογία Y/Y και ο άλλος σε Y/Δ), όπως φαίνεται στην εικόνα 4.3, είτε ένας μετασχηματιστής με δύο τυλίγματα στο δευτερεύον (το ένα σε σύνδεση Y και το άλλο σε Δ, όπως φαίνεται στην εικόνα 4.4). Αυτός ο τρόπος σύνδεσης, συνδέει τις δύο γέφυρες 6-παλμών σε σειρά στη dc πλευρά και παράλληλα στην ac πλευρά, έτσι ώστε να έχουμε από τη μία υψηλές dc τάσεις και από την άλλη περιορισμό των αρμονικών των ac ρευμάτων και της κυμάτωσης της dc τάσης. Έτσι, προκύπτει η γέφυρα 12-παλμών

Ανάλογα με το είδος των ημιαγωγικών διακοπών ισχύος που χρησιμοποιούνται στην γέφυρα προκύπτουν και τα διάφορα είδη μετατροπέων που εφαρμόζονται στους υποσταθμούς. Έτσι λοιπόν, έχουμε τις εξής κατηγορίες μετατροπέων:

- Φυσικής μεταγωγής, οπότε χρησιμοποιούνται συστοιχίες θυρίστορ (Line-Commutated Current Source Converter, CSC)

- Μεταγωγής μέσω πυκνωτών, όπου παρεμβάλλονται πυκνωτές σε σειρά μεταξύ των μετασηματιστών και των μετατροπέων (Capacitor Commutated Converter, CCC)
- Εξαναγκασμένης μεταγωγής, όπου χρησιμοποιούνται GTOs ή IGPTs (Self-Commutated Voltage Source Converter, VSC)



Σχήμα 4.4 Γέφυρα 12-παλμών με ένα Μ/Σ

4.2.3 Μετατροπείς Φυσικής Μεταγωγής (Line-Commutated Current Source Converter, CSC)

Στην περίπτωση των μετατροπέων φυσικής μεταγωγής οι ημιαγωγικοί διακόπτες ισχύος που χρησιμοποιούνται στη γέφυρα 12-παλμών είναι τα θυρίστορ. Το θυρίστορ είναι ένας

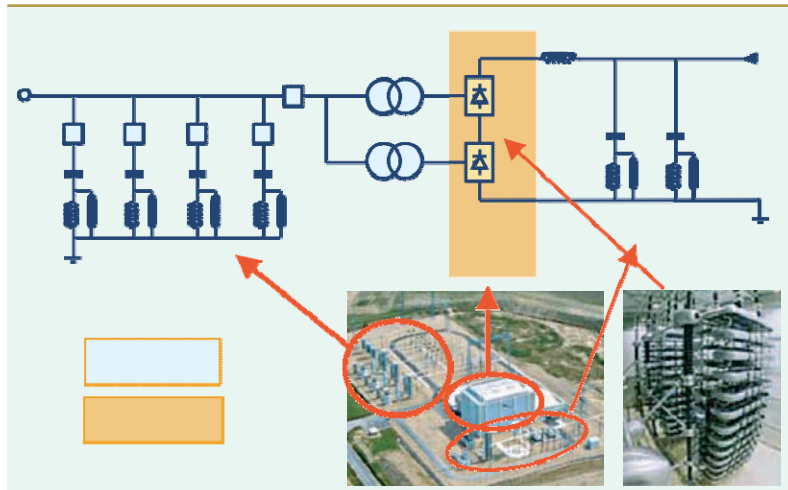
ελεγχόμενος ημιαγωγικός διακόπτης, ο οποίος μπορεί να αντέξει σε αρκετά υψηλά ρεύματα (4000 A) και είναι ικανός να διακόψει πολύ υψηλές τάσεις (μέχρι 10kV). Συνδέοντας πολλά θυρίστορ σε σειρά είναι δυνατόν να χτίσουμε μία μονάδα θυρίστορ, η οποία μπορεί να λειτουργεί σε αρκετά υψηλές τάσεις (μερικές εκατοντάδες kV).



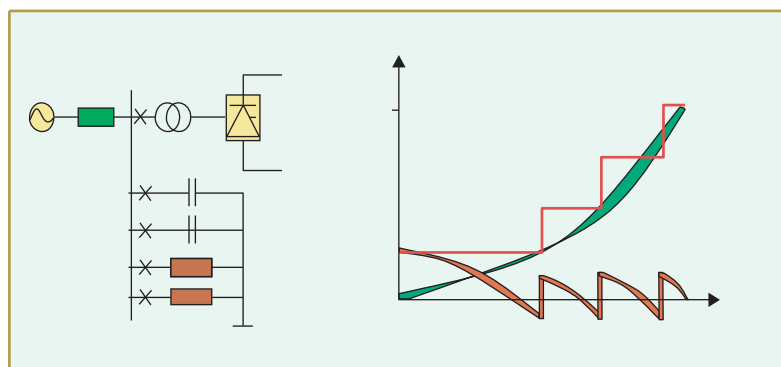
Σχήμα 4.5 Γέφυρα 12-πάλμων με Θυρίστορ

Η μονάδα των θυρίστορ λειτουργεί υπό την συχνότητα του δικτύου (50Hz ή 60Hz) και είναι δυνατός ο έλεγχος του επιπέδου της παραγόμενης dc τάσης, μέσω του ελέγχου της γωνίας έναυσης των θυρίστορ. Αυτός είναι και ο βασικός τρόπος με τον οποίο μπορούμε να ελέγξουμε τη ροή της μεταφερόμενης ισχύος γρήγορα και αποτελεσματικά.

Οι μετατροπείς φυσικής μεταγωγής (CSCs) εξαρτώνται από την ac τάση του συστήματος για την ικανοποιητική τους λειτουργία, και αυτό επειδή για να λειτουργήσουν είναι απαραίτητο η ac τάση να προηγείται του ac ρεύματος. Αυτό σημαίνει, ότι η διαδικασία της μετατροπής απαιτεί κατανάλωση άεργου ισχύος.

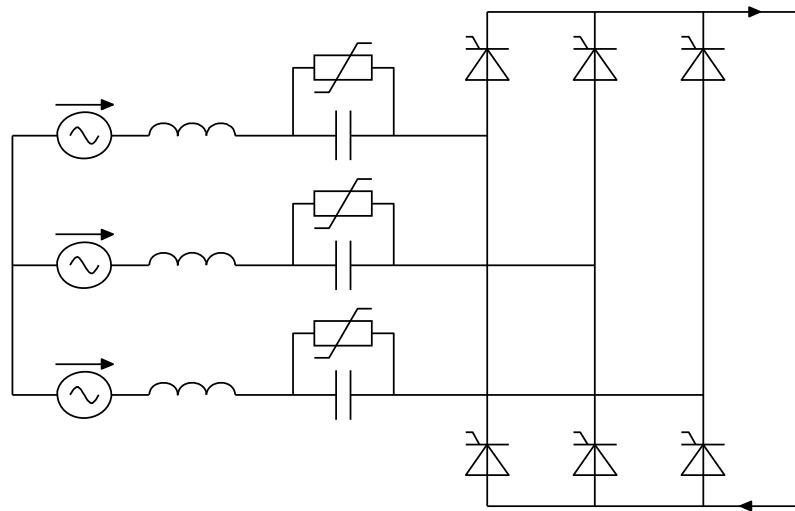


Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, η διαδικασία της μετατροπής απαιτεί κατανάλωση άεργου ισχύος. Αυτή η απαιτούμενη άεργος ισχύς παρέχεται στο σύστημα μέσω των ac φίλτρων τα οποία φαίνονται σαν χωρητικότητες στην θεμελιώδη συχνότητα ή μέσω πυκνωτών αντιστάθμισης, οι οποίοι είναι ένα ουσιαστικό κομμάτι του σταθμού μετατροπής. Αυτή η έλλειψη άεργου ισχύος θα πρέπει να παραμένει μέσα σε ορισμένα επίπεδα, έτσι ώστε να διατηρείται η επιθυμητή κυμάτωση της ac τάσης μέσα στο επιτρεπόμενο όριο. Γενικά, όσο πιο αδύναμο είναι το ac σύστημα ή όσο πιο μακριά από τη γεννήτρια βρίσκεται ο μετατροπέας, τόσο πιο «σφιχτή» πρέπει να είναι η ανταλλαγή άεργου ισχύος, έτσι ώστε να έχουμε κυμάτωση της τάσης μέσα στα επιθυμητά πλαίσια.

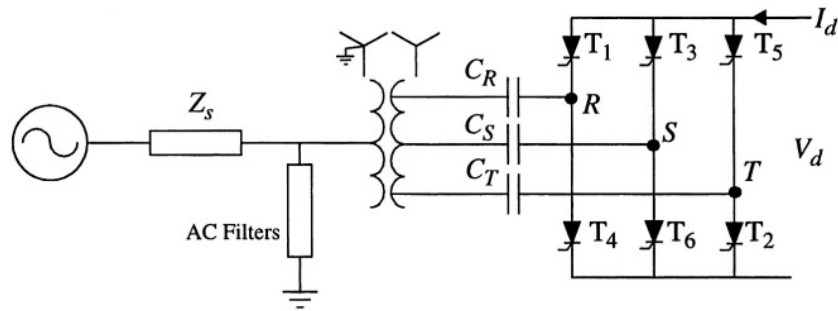


4.2.4 Μετατροπείς Μεταγωγής μέσω Πυκνωτών (Capacitor Commutated Converters, CCC)

Η κατηγορία αυτή των μετατροπέων αποτελεί μία βελτίωση των μετατροπέων φυσικής μεταγωγής, η οποία εμφανίστηκε στα τέλη της δεκαετίας του '90 κυρίως για αδύναμα συστήματα back-to-back εφαρμογών. Στους μετατροπείς μεταγωγής μέσω πυκνωτών έχουμε τη χρήση πυκνωτών μεταγωγής, οι οποίοι τοποθετούνται σε σειρά μεταξύ του μετασχηματιστή (ή των μετασχηματιστών) του μετατροπέα και των μονάδων των θυρίστορ.



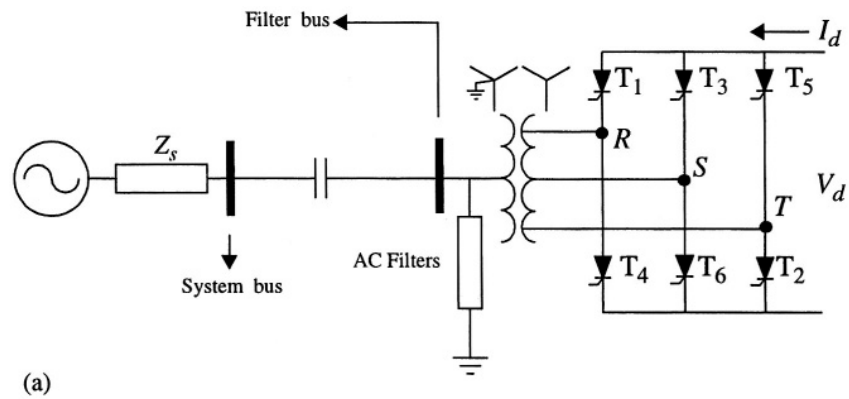
Οι πυκνωτές μεταγωγής παρέχουν άεργο ισχύ στον μετατροπέα ανάλογη του φορτίου του. Έτσι, λοιπόν, καλύπτουν την ανάγκη αντιστάθμισης άεργου ισχύος στον μετατροπέα, αποκλείοντας με αυτόν τον τρόπο την ανάγκη χρήσης πυκνωτών αντιστάθμισης και μεγάλων συστοιχιών φίλτρων για τον ίδιο σκοπό. Παρόλ' αυτά, η χρήση των φίλτρων είναι απαραίτητη για την μείωση των αρμονικών, αλλά σε αυτήν την περίπτωση αντί για συστοιχίες φίλτρων με βαθμονόμηση πολλών MVar χρησιμοποιούνται νέα ενεργά dc φίλτρα και ac φίλτρα συνεχώς συντονιζόμενα (continuously tuned). Τέλος, η μη χρήση συστοιχιών φίλτρων έχει σαν αποτέλεσμα να μειώνεται σε σημαντικό βαθμό ο χώρος που απαιτείται για την εγκατάσταση του HVDC υποσταθμού.



Σχήμα 4.9 Μονογραμμικό διάγραμμα CCC με ac φίλτρο συνεχώς συντονιζόμενο

Άλλα επιπρόσθετα πλεονεκτήματα που προσφέρει η χρήση των πυκνωτών μεταγωγής είναι:

- Αύξηση της ανεκτικότητας σε πτώση τάσης στο 15-20% χωρίς την πρόκληση σφάλματος μεταγωγής, εφόσον οι πυκνωτές αποτελούν μία πηγή αντιστάθμισης της τάσης σε συνδυασμό με την τάση του ac ζυγού.
- Βελτίωση της σταθερότητας του μετατροπέα.
- Μείωση της ονομαστικής ισχύος των μετασχηματιστών του μετατροπέα που χρησιμοποιούνται, λόγω της μείωσης της άεργου ισχύος που ρέει διαμέσου αυτών.
- Δυνατότητα αύξησης της ονομαστικής ισχύος σε περιοχές όπου το ac δίκτυο βρίσκεται κοντά στο όριο σταθερότητας του.
- Τέλος, η τοποθέτηση των πυκνωτών μεταγωγής μπορεί να γίνει, εκτός από την προαναφερθήσα τοπολογία, στην πλευρά του μετασχηματιστή του μετατροπέα προς το ac σύστημα και τότε η τοπολογία είναι γνωστή ως ελεγχόμενος μετατροπέας πυκνωτών σε σειρά (controlled series capacitor converter, CSCC)



(a)

Σχήμα 4.10 Ελεγχόμενος μετατροπέας πυκνωτών σε σειρά

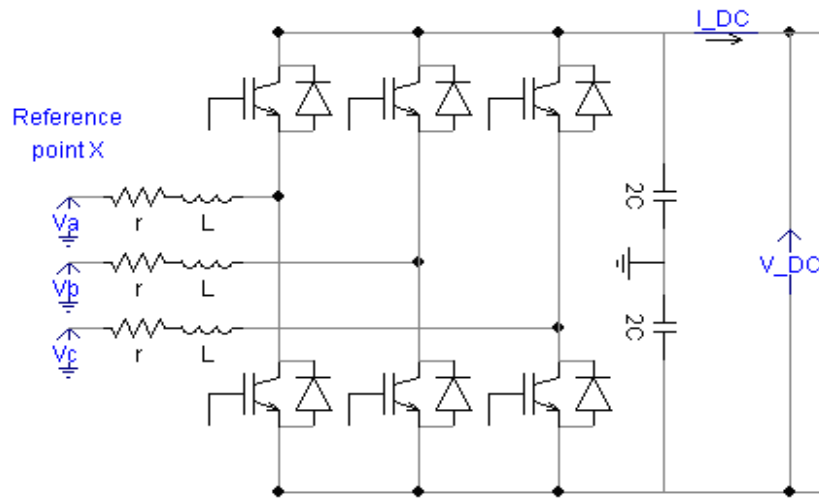
Ως εφαρμογές των μετατροπέων μεταγωγής μέσω πυκνωτών έχουμε τις διασυνδέσεις Garabi και Rapid City Tie. Η διασύνδεση Garabi μεταξύ Βραζιλίας και Αργεντινής αποτελείται από 4X550MW παράλληλες συνδέσεις CCC, ενώ η Rapid City Tie από 2X100MW παράλληλες συνδέσεις CCC.

4.2.5 Μετατροπείς Εξαναγκασμένης Μεταγωγής (Self-Commutated)

Τα HVDC συστήματα μεταφοράς που χρησιμοποιούν μετατροπείς εξαναγκασμένης μεταγωγής (VSCs) με διαμόρφωση εύρους παλμών (Pulse Width Modulation, PWM), γνωστούς και ως “HVDC Light” ή “HVDC Plus”, εισήχθησαν στην αγορά στα τέλη της δεκαετίας του '90. Λόγω της μεγάλης ανάπτυξης των VSCs καθώς και των πολλών πλεονεκτημάτων που προσφέρει η χρήση τους, τείνει να αντικατασταθεί σε μεγάλο βαθμό η χρήση των συμβατικών HVDC μετατροπέων (CSCs και CCCs).

Στους VSCs γίνεται χρήση ελεγχόμενων ημιαγωγικών διακοπών, όπως διπολικών τρανζίστορ με μονωμένη πύλη (IGBTs, Insulated Gate Bipolar Transistors) και θυρίστορ με σβέση ελεγχόμενη από την πύλη (GTOs, Gate Turn-Off Thyristos). Αυτό συνιστά και την βασική διαφορά ανάμεσα στους VSCs και τους συμβατικούς μετατροπείς που χρησιμοποιούν θυρίστορ, αφού στην περίπτωση των VSCs μπορεί να γίνει όχι μόνο έναυση αλλά και σβέση των IGBTs και των GTOs με χρήση σημάτων

στην πύλη τους κατά τη διάρκεια που αυτά διαρρέονται από ρεύμα. Έτσι, λοιπόν, δεν παρουσιάζεται ανάγκη για μια ενεργή τάση μεταγωγής από το συνδεδεμένο δίκτυο



Σχήμα 4.11 Μετατροπέας εξαναγκασμένης μεταγωγής με PWM

Τα IGBTs όταν πολώνονται ορθά μπορούν να άγουν προς μία μόνο κατεύθυνση, αλλά η χρήση μιας διόδου συνδεδεμένης αντιπαράλληλα με το IGBT, προσφέρει τη δυνατότητα στον μετατροπέα να άγει ρεύμα και προς τις δύο κατευθύνσεις. Επίσης, τα IGBTs έχουν μεγάλη σύνθετη αντίσταση πύλης και γι'αυτό απαιτείται μικρή ποσότητα ενέργειας για τη μετάβασή τους. Επιπλέον, οι διακόπτες λειτουργούν σε μία μέση συχνότητα περίπου 1kHz και ανοίγο-κλείνουν με τέτοιο τρόπο, ώστε οι κατώτερες αρμονικές να απαλείφονται. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, να απαιτούνται φίλτρα μόνο για την απαλοιφή αρμονικών υψηλότερων συχνοτήτων.

Η λειτουργία του μετατροπέα επιτυγχάνεται μέσω της χρήσης διαμόρφωσης εύρους παλμών (PWM). Με την PWM διαμόρφωση επιτρέπεται η ταυτόχρονη μεταβολή του πλάτους και της φάσης της ac τάσης εξόδου του αντιστροφέα, έχοντας ως είσοδο σταθερή dc τάση. Συνεπώς, με αυτόν τον τρόπο είναι δυνατός ο έλεγχος της ενεργού και της άεργου ισχύος του συστήματος ξεχωριστά, που είναι και το βασικότερο πλεονέκτημα των VSCs.

4.3 ΦΙΛΤΡΑ

Η χρήση των ηλεκτρονικών ισχύος στους μετατροπείς έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία αρμονικών, γεγονός που προκαλεί προβλήματα. Για την αποφυγή της διάχυσης αυτών

των αρμονικών στο ac δίκτυο, γίνεται χρήση φίλτρων στην AC και την DC πλευρά τις διασύνδεσης.

4.3.1 AC Φίλτρα

Βασικός σκοπός των ac φίλτρων είναι η αποτροπή διάχυσης αρμονικών του ρεύματος στο AC δίκτυο, με στόχο τη μείωση του ποσοστού διαταραχής της τάσης στο σημείο κοινής διασύνδεσης, καθώς και την ελάττωση των τηλεφωνικών παρεμβολών στο συνδεδεμένο ac δίκτυο. Επιπλέον, τα ac φίλτρα παρέχουν άεργο ισχύ με σκοπό την αντιστάθμιση της άεργου ισχύος που καταναλώνεται στους HVDC μετατροπείς στη θεμελειώδη συχνότητα.



Σχήμα 4.12 AC φίλτρο

Στην περίπτωση της γέφυρας 6-παλμών, οι χαρακτηριστικές αρμονικές ρεύματος που παράγονται είναι τάξεως $6n \pm 1$. Αντίστοιχα, κατά τη λειτουργία μετατροπέα με γέφυρα 12-παλμών έχουμε παραγωγή αρμονικών ρεύματος τάξεως $12n \pm 1$. Τα AC φίλτρα συνήθως συντονίζονται για τις 11^η, 13^η, 23^η και 25^η αρμονικές σε γέφυρα 12-παλμών. Ο συντονισμός στην 5^η και 7^η αρμονική απαιτείται στην περίπτωση όπου υπάρχει γέφυρα 6-παλμών. Οι αμοιλικές εμφανίζονται κυρίως στα ac ρεύματα εφόσον η ac τάση εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το ac δίκτυο.

Όσον αφορά την αντιστάθμιση άεργου ισχύος, στην περίπτωση των CCC μετατροπέων η άεργος ισχύς αντισταθμίζεται από τη σύνδεση πυκνωτών σε σειρά ανάμεσα στους μετατροπείς και τους μετασχηματιστές του μετατροπέα.

Αυτό συνεπάγεται τη μη αναγκαιότητα χρήσης του απαραίτητου εξοπλισμού στα ac φίλτρα για αντιστάθμιση, έχοντας σαν αποτέλεσμα τη μείωση της περιοχής που απαιτείται για τη δημιουργία ενός HVDC σταθμού με CCC. Επίσης, στην περίπτωση χρήσης VSC μετατροπέων εκτός του ότι δεν υπάρχει ανάγκη αντιστάθμισης άεργου ισχύος, οι αρμονικές ρευμάτων στην ac πλευρά συνδέονται άμεσα στη συχνότητα της PWM διαμόρφωσης. Έτσι, λοιπόν, ο αριθμός των φίλτρων που απαιτούνται μειώνεται δραματικά σε σύγκριση με όταν έχουμε χρήση μετατροπέων φυσικής μεταγωγής.

Επιπροσθέτως, πρέπει να αναφερθούμε και στη χρήση ενεργών ac φίλτρων. Ενώ τα παθητικά φίλτρα στην ac πλευρά παρουσιάζουν μία αναξιопιστία, εξαιτίας της διαφοράς απόδοσης των αρμονικών σε ένα πραγματικό σύστημα απ'ότι σε ένα σύστημα προσομοίωσης για υπολογισμούς, τα ενεργά φίλτρα παρουσιάζουν κάποια πλεονεκτήματα.

Τα ενεργά φίλτρα :

- Καλύπτουν μια ευρεία περιοχή αρμονικών
- Δεν επηρεάζονται από μεταβολές της θερμοκρασίας
- Δεν απαλείφουν άλλες αρμονικές πέρα από τις δικές τους
- Παρέχουν μεγάλες διακυμάνσεις στις αντιδράσεις των ac συστημάτων
- Υποβαθμίζουν ασύγχρονες ταλαντώσεις
- Είναι γενικά μικρότερου μεγέθους σε σχέση με τα παθητικά φίλτρα

4.3.2 DC Φίλτρα

Μερικές από τις αρμονικές που δημιουργούν οι μετατροπείς συστήματα μπορεί να προκαλέσουν παρεμβολές στα τηλεπικοινωνιακά συστήματα. Έτσι, λοιπόν, σε περίπτωση που ο σταθμός μετατροπής συνδέεται σε DC σύστημα με εναέριες γραμμές μεταφοράς κρίνεται απαραίτητη η χρήση DC φίλτρων στην DC πλευρά.

Οι αρμονικές τάσης που παράγονται από γέφυρα 6-παλμών είναι τάξης $6n$ και αντίστοιχα από γέφυρα 12-παλμών τάξης $12n$. Τα dc φίλτρα περιορίζουν την κυμάτωση στην τάση εξόδου, ενώ το DC ρεύμα εξομαλύνεται κυρίως από τις αυτεπαγωγές εξομάλυνσης που υπάρχουν.

Όσον αφορά τα ενεργά DC φίλτρα, αυτά είναι ένας τρόπος να ικανοποιηθούν οι αρκετά αυστηρές απαιτήσεις για τα επίπεδα παρεμβολών των dc γραμμών. Η γενικότερη ιδέα είναι ο συνδυασμός ενός ενεργού dc φίλτρου με ένα μικρό τμήμα παθητικού dc φίλτρου.

Πρέπει να τονίσουμε ότι σε περιπτώσεις που έχουμε χρήση μόνο καλωδίου, και όχι εναέριας γραμμής DC, καθώς και στην back-to-back διασύνδεση, δεν είναι απαραίτητη η χρήση dc φίλτρων.



Σχήμα 4.13 DC φίλτρο

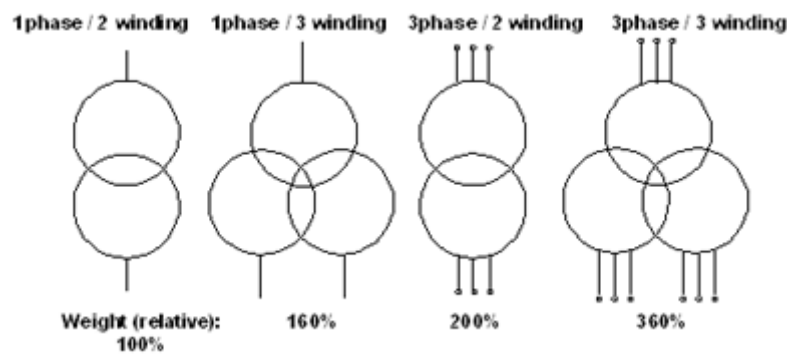
4.4 Μετασχηματιστές Μετατροπέων (Converter Transformers)

Ένας μετασχηματιστής μετατροπέα τοποθετείται ανάμεσα στο ac δίκτυο και στη γέφυρα του μετατροπέα, και εξυπηρετεί ορισμένες λειτουργίες. Οι βασικές λειτουργίες που εξυπηρετεί είναι:

- Η προσφορά ac τάσεων από δύο ξεχωριστά κυκλώματα με σχετική διαφορά φάσης 30 ηλεκτρικών μοιρών, με σκοπό τη μείωση των αρμονικών χαμηλής τάξης, κυρίως της 5^{ης} και 7^{ης} τάξης.
- Γαλβανική απομόνωση μεταξύ του AC και του DC συστήματος, με στόχο να αποτρέψει τη dc συνιστώσα να εισέλθει στο AC σύστημα.

- Ύπαρξη επαγωγικής αντίδρασης στην AC πλευρά, με σκοπό τη μείωση των ρευμάτων βραχυκύκλωσης καθώς και τον έλεγχο της αύξησης του ρεύματος στο μετατροπέα κατά τη μεταγωγή.

Ένας μετασχηματιστής μπορεί να έχει συνδεσμολογία μίας φάσης (single-phase arrangement) ή συνδεσμολογία τριών φάσεων (three-phase arrangement). Έτσι, λοιπόν, για έναν μετατροπέα 12-παλμών οι τυπικές συνδεσμολογίες των μετασχηματιστών μπορεί να είναι: έξι μετασχηματιστές 1-φάσης 2-τυλιγμάτων (single-phase two-winding), τρεις μετασχηματιστές 1-φάσης 3-τυλιγμάτων (single-phase three-winding), δύο μετασχηματιστές 3-φάσεων 2-τυλιγμάτων (three-phase two-winding) και ένας μετασχηματιστής 3-φάσεων 3-τυλιγμάτων (three-phase three-winding).



Σχήμα 4.14 Τυπικές συνδεσμολογίες μετασχηματιστών μετατροπέων

Η συνδεσμολογία του μετασχηματιστή εξαρτάται από τις απαιτήσεις για τάση, τα ονομαστικά στοιχεία του μετασχηματιστή, τις συνθήκες μεταφοράς καθώς και από τη διάταξη του σταθμού του μετατροπέα. Επιπλέον, ανάλογα με τη συνδεσμολογία που χρησιμοποιείται, αλλάζει και το βάρος του μετασχηματιστή. Παρακάτω δίνεται διάγραμμα που παρουσιάζει τα διάφορα βάρη των μετασχηματιστών ανάλογα με τη συνδεσμολογία τους

Σε περιπτώσεις όπου έχουμε μεσαία ικανότητα φόρτισης και επίπεδο τάσης, συνήθως επιλέγεται μετασχηματιστής 3-φάσεων, με σκοπό να μειωθεί το υλικό που χρησιμοποιείται, η έκταση που είναι απαραίτητη για την εγκατάστασή του και οι απώλειες, κυρίως σε λειτουργία χωρίς φορτίο. Αντίστοιχα, σε λειτουργία με μεγάλη φόρτιση και σε υψηλή τάση, προτιμώνται μετασχηματιστές 1-φάσης, κυρίως χωρίς περιορισμούς στη μεταφορά. Όσον

αφορά τις απώλειες του μετασχηματιστή, αυτές χωρίζονται σε δύο ομάδες, τις απώλειες υπό φορτίο και τις απώλειες σε αφόρτιστη λειτουργία.



Σχήμα 4.15 Μετασχηματιστές Μετατροπέα

Τέλος, κάποια χαρακτηριστικά που κάνουν έναν μετασχηματιστή μετατροπέα να διαφέρει από έναν τυπικό μετασχηματιστή ισχύος εναλλασσόμενου ρεύματος είναι τα εξής:

- Το δευτερεύον του Μ/Σ αποτελείται από ένα σετ τυλιγμάτων σε συνδεσμολογία αστέρα και από ένα σετ σε συνδεσμολογία τριγώνου.
- Τα τυλίγματα του δευτερεύοντος υπόκεινται σε dc ανάστροφες τάσεις.
- Ο πυρήνας εκτίθεται σε μικρές ποσότητες dc ρεύματος και πρέπει να μπορεί να τις αντέξει.
- Η διαφορά ανάμεσα στις αντιδράσεις μεταξύ των φάσεων πρέπει να είναι μικρότερη του 5%.

4.5 Αυτεπαγωγές Εξομάλυνσης (Smoothing reactors)

Οι αυτεπαγωγές εξομάλυνσης συνήθως περιλαμβάνονται σε κάθε πόλο του σταθμού μετατροπής και συνδέονται σε σειρά στην έξοδο των μετατροπέων. Οι αυτεπαγωγές παρουσιάζουν κάποια σημαντικά χαρακτηριστικά όπως τα παρακάτω :

- Εξομάλυνση του dc ρεύματος, με σκοπό την αποφυγή ασυνέχειας του ρεύματος σε χαμηλά επίπεδα μεταφοράς ισχύος.

- Μείωση της συχνότητας εμφάνισης σφαλμάτων μεταγωγής.
- Αποτελούν επιπρόσθετα τμήματα των DC φίλτρων που χρησιμοποιούνται για την εξομάλυνση των αρμονικών και την μείωση των παρεμβολών σε ασύρματα δίκτυα επικοινωνίας.

Οι αυτεπαγωγές εξομάλυνσης χωρίζονται σε ξηρού τύπου (dry/air-type), και σε ελαίου τύπου (oil-type).



Σχήμα 4.16 Αυτεπαγωγή εξομάλυνσης ξηρού τύπου

Τα πλεονεκτήματα που προσφέρει μία ξηρού τύπου αυτεπαγωγή είναι τα εξής:

- Η εγκατάστασή της γίνεται στην πλευρά της υψηλής τάσης και γι'αυτό ως ενίσχυση μόνο μονωτήρες από πορσελάνη πρέπει να ληφθούν υπ'όψιν, βελτιώνοντας έτσι την αξιοπιστία της μόνωσης.
- Από μόνη της αυτού του είδους η αυτεπαγωγή εξομάλυνσης δεν μπορεί να προκαλέσει ούτε πυρκαγιά ούτε περιβαλλοντικές επιπτώσεις.
- Μόνο αναστροφή της πολικότητας της τάσης μπορεί να προκαλέσει φορτίσεις στους μονωτήρες που χρησιμοποιούνται σαν ενίσχυση.
- Εφόσον δεν υπάρχουν κατασκευές με πυρήνα από σίδηρο, φαινόμενα μαγνητικού κορεσμού δεν μπορούν να εμφανιστούν σε περιπτώσεις σφαλμάτων, διατηρώντας έτσι συνεχώς την ίδια αντίδραση.

Αντίστοιχα, τα πλεονεκτήματα που παρουσιάζουν οι αυτεπαγωγές εξομάλυνσης ελαίου είναι τα παρακάτω:

- Λόγω της ύπαρξης κατασκευών με πυρήνα από σίδηρο, αυξάνεται η αντίδραση της αυτεπαγωγής.
- Αυτό το σύστημα μόνωσης είναι εύκολα υλοποιήσιμο πολύ αξιόπιστο.
- Η αυτεπαγωγή εξομάλυνσης ελαίου τοποθετείται στο έδαφος, προσφέροντας με

αυτόν τον τρόπο πολύ καλή αντισεισμική απόδοση.



4.6 Απαγωγοί υπερτάσεων

Ο εξοπλισμός που χρησιμοποιείται σε διαφόρων ειδών υπερτάσεις. Αυτές μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας, που προσβάλλουν τα συστήματα εντός του HVDC συστήματος, το οποίο περιλαμβάνει και τη διακοπτική λειτουργία των HVDC μετατροπέων. Επιπλέον, υπερτάσεις μπορεί να προκληθούν και από εσωτερικά ή εξωτερικά σφάλματα που είναι πιθανό να συμβούν στο HVDC σύστημα.

Έτσι, λοιπόν, με σκοπό να προστατευθεί ο εξοπλισμός από τις πιθανές υπερτάσεις χρησιμοποιούνται απαγωγοί υπερτάσεων μέσα στο σύστημα. Βασικός στόχος των απαγωγέων είναι να μειώνεται η τάση κατά μήκος των συσκευών του εξοπλισμού και να διατηρείται αυτή σε επίπεδο χαμηλότερο από το βασικό επίπεδο μόνωσης του εξοπλισμού. Αυτό επιτυγχάνεται με την παράλληλη σύνδεση στα άκρα του εξοπλισμού, στοιχείων που έχουν εξαιρετικά μη-γραμμικές χαρακτηριστικές ρεύματος και τάσης.

Σε αντίθεση με τους συνηθισμένους απαγωγούς, των οποίων η βαθμονόμηση βασίζεται στις υπερτάσεις από κεραυνούς, από διακοπές ή από προσωρινές υπερτάσεις, στην περίπτωση των εκτροπέων που χρησιμοποιούνται στα HVDC συστήματα, η βαθμονόμηση γίνεται με βάση τις υπερτάσεις σε συνθήκες σφαλμάτων ή τις εσωτερικές υπερτάσεις. Υπάρχουν σήμερα στην αγορά δύο είδη απαγωγών υπερτάσεων.



Σχήμα 4.18 Απαγωγοί υπερτάσεων σε HVDC σύστημα

Οι απαγωγοί πορσελάνης και οι απαγωγοί με μόνωση πολυμερή. Βασική διαφορά αυτών των δύο απαγωγών είναι η συμπεριφορά τους σε κατάσταση βραχυκυκλώματος. Ένας απαγωγός πορσελάνης υπάρχει κίνδυνος να θρυμματιστεί σε περίπτωση που διέλθει μέσα από αυτόν μεγάλο ρεύμα βραχυκύκλωσης.

Αντίθετα, ένας απαγωγός από πολυμερή απλά παρουσιάζει στην επιφάνειά του σημάδια ότι έχει καεί. Επιπλέον, ένα άλλο πλεονέκτημά του είναι και οι αυξημένες μηχανικές αντοχές του, γι' αυτό και χρησιμοποιείται σε περιπτώσεις με υψηλή πιθανότητα σεισμού.



Σχήμα 4.19 Συμπεριφορά απαγωγού πορσελάνης σε βραχυκύκλωμα

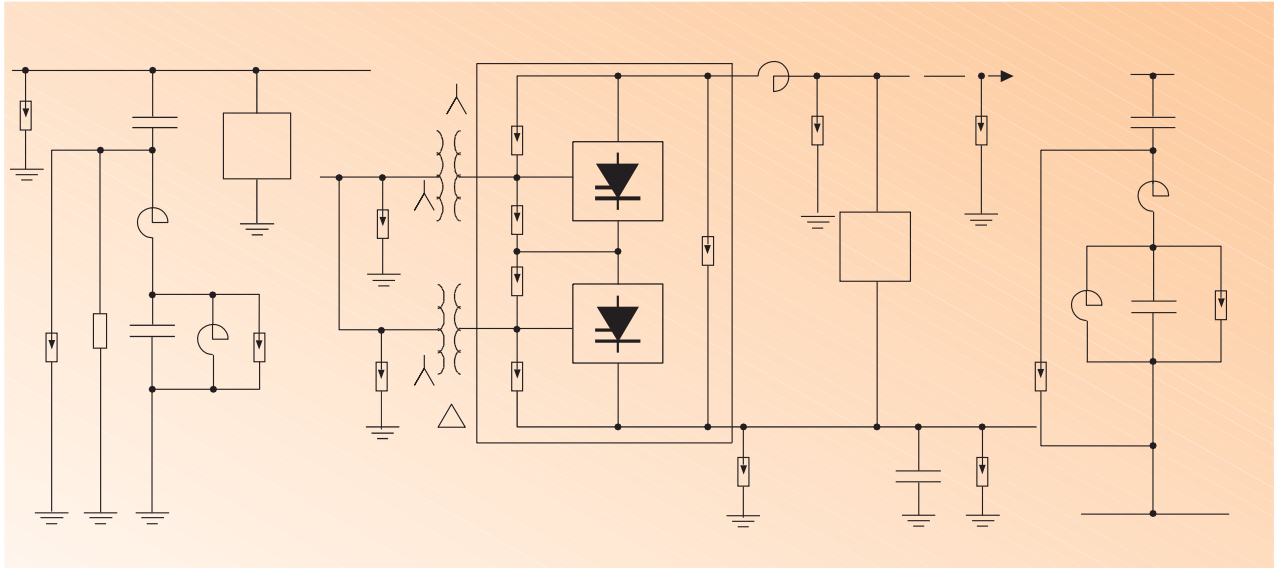
Σε ένα HVDC σύστημα, εφόσον αυτό περιλαμβάνει στοιχεία εξοπλισμού διαφορετικής τάσης λειτουργίας, θα πρέπει να χρησιμοποιούνται αντίστοιχα και διαφορετικοί απαγωγοί υπερτάσεων.

Τα είδη των απαγωγών που εμφανίζονται στον HVDC υποσταθμό δίνονται παρακάτω στον πίνακα:

Arrester Type	Location	Main Task
AC bus arrester 'A'	The ZnO arrester will be installed close to and secondary the converter transformer line transformer	Limit the overvoltages on the primary side bushing side of the converter
AC filter bus busbar against arrester 'Aa' banks	The ZnO arrester will be installed at the lightning surges	Protect the AC filters busbar of the AC filter
Valve-arrester 'V' respect to	3-pulse commutation group	The main events to be considered with arrester discharge currents and energies are: a) Switching surges from the AC system through converter transformer b) Ground fault between valve and HV bushing of converter transformer during rectifier operation
Converter group arrester 'C'	12-pulse converter group	Protection against overvoltages from the AC and DC side
DC bus arrester 'D'	At the HV smoothing reactor and the reactor and at the DC lines switchyard) against	They will protect the smoothing converter station (e.g. DC overvoltages coming from the DC side
Neutral DC bus terminal of arrester 'E' equipment	Neutral DC bus	The neutral bus arresters protect the LV the 12-pulse group and the neutral bus
AC filter arrester arresters consists 'Fac' harmonic voltages.	AC filter	The operating voltage for the AC filter of low fundamental frequency and Overvoltages can occur transiently during faults
DC filter arrester arresters consists 'Fdc' voltages.	DC filter	The operating voltage for the DC filter of low DC component and harmonic Overstresses may occur transiently during DC bus fault to ground

Πίνακας 4.1 Είδη απαγωγών υπερτάσεων σε HVDC υποσταθμό

Επίσης, παρατίθεται και ένα μονογραμμικό διάγραμμα του HVDC υποσταθμού που δείχνει πού τοποθετούνται οι κατάλληλοι εκτροπείς



Γενικά, για να εξασφαλιστεί η σωστή λειτουργία των απαγωγών πρέπει αυτοί να υπόκεινται σε ένα σύνολο ελέγχων. Υπάρχουν κάποιοι γενικοί έλεγχοι που πρέπει να γίνονται σε όλους τους απαγωγούς και πέρα από αυτό, ανάλογα με το σύστημα στο οποίο αυτοί χρησιμοποιούνται γίνονται και δευτερεύοντες έλεγχοι.

4.7 Σύστημα Ελέγχου (HVDC Control)

- Το σύστημα ελέγχου ενός HVDC συστήματος μεταφοράς έχει ως κύριο στόχο τις εξής λειτουργίες:
- Τον έλεγχο της έναρξης και της παύσης λειτουργίας του HVDC συστήματος.
- Τον έλεγχο της ικανότητας μεταφοράς ισχύος του συστήματος, καθώς και την κατεύθυνση της μεταφοράς ενέργειας.
- Τον έλεγχο των μη φυσιολογικών λειτουργιών των μετατροπέων και των διαταραχών που προκαλούνται από τη διασύνδεση των AC συστημάτων.
- Την προστασία των συσκευών σε περίπτωση εμφάνισης σφαλμάτων.

Για να γίνει δυνατή η υλοποίηση των προαναφερθέντων λειτουργιών, το σύστημα ελέγχου χωρίζεται συνήθως σε τέσσερα μέρη που τοποθετούνται ιεραρχικά από το ανώτερο προς το κατώτερο. Αυτά είναι τα παρακάτω:

4.7.1 Συνολικό σύστημα ελέγχου [Overall System Control]

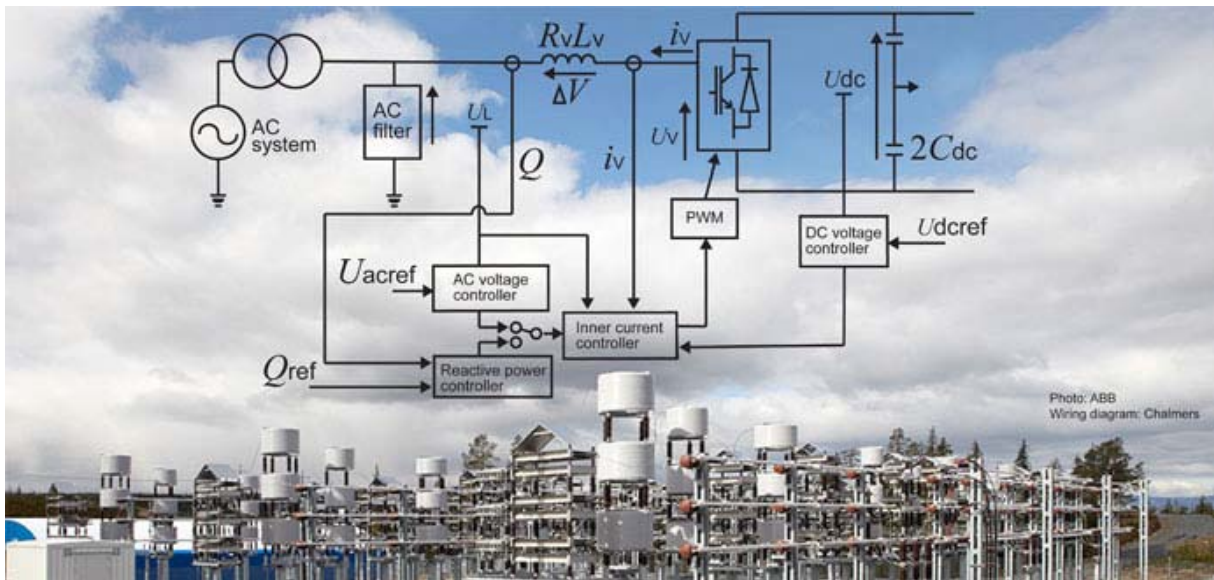
Είναι το ανώτερο επίπεδο ελέγχου σε ένα HVDC σύστημα και μέσα στις λειτουργίες του περιλαμβάνεται ο έλεγχος της αναστροφής της ροής ισχύος, όπως και ο έλεγχος και η σταθεροποίηση της συχνότητας του AC συστήματος.

4.7.2 Κύριος έλεγχος (Master (Bipole) Control)

Αυτό το σύστημα ελέγχου χρησιμοποιείται για να ελέγχει δύο πόλους ταυτόχρονα σε ένα διπολικό HVDC σύστημα μεταφοράς, με στόχο να συντονίζει και να ελέγχει τις διπολικές λειτουργίες μέσω εντολών.

4.7.3 Έλεγχος πόλων (Pole Control)

Ο έλεγχος πόλων υπάρχει για τον έλεγχο ενός πόλου μόνο. Σε περίπτωση που έχουμε διπολικό HVDC σύστημα, εάν ο ένας πόλος απομονωθεί λόγω σφάλματος πρέπει ο άλλος πόλος να είναι σε θέση να λειτουργήσει ανεξάρτητα και να ολοκληρώνει τις βασικές λειτουργίες ελέγχου. Ετσι, λοιπόν, ένα σύστημα ελέγχου πόλου είναι τελείως ανεξάρτητο από τα υπόλοιπα και πρέπει να μπορεί να λειτουργεί αυτόνομα.



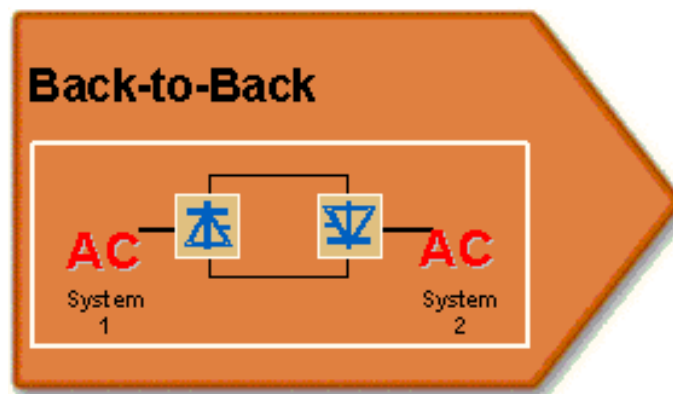
5^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ

“ΚΑΤΗΓΟΡΟΠΟΙΗΣΗ ΤΩΝ HVDC ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ”

Τα HVDC συστήματα μεταφοράς μπορούν να χωριστούν σε επιμέρους κατηγορίες, ανάλογα με το είδος της σύνδεσης των μετατροπέων και των υποσταθμών, από τα οποία αποτελούνται, όπως παρουσιάζονται παρακάτω.

5.1 Back-to-back διασύνδεση

Ο τύπος αυτός χρησιμοποιείται στην περίπτωση όπου θέλουμε να συνδέσουμε δύο AC δίκτυα, τα οποία βρίσκονται στην ίδια τοποθεσία ή μέσα στον ίδιο υποσταθμό. Στην Back-to-back διασύνδεση δεν χρησιμοποιείται γραμμή ή καλώδιο μεταφοράς ανάμεσα στους μετατροπείς.



Σχήμα 5.1 Back-to-back Διασύνδεση

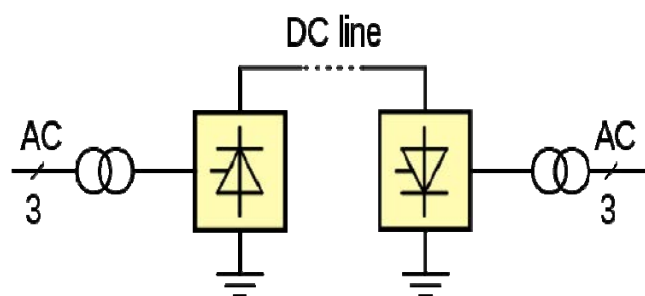
Η χρήση αυτού του τύπου διασύνδεσης προτιμάται κυρίως όταν θέλουμε να συνδέσουμε δύο ασύγχρονα δίκτυα, όπως στην περίπτωση της Ιαπωνίας όπου έχουμε την σύνδεση δικτύων με συχνότητες 50Hz και 60Hz αντίστοιχα. Επίσης, η Back-to-back διασύνδεση χρησιμοποιείται και στην περίπτωση όπου τα δίκτυα που θέλουμε να συνδέσουμε έχουν διαφορετική φιλοσοφία στον τρόπο ελέγχου τους.

5.2 Μεταφορά δύο τερματικών (Two-Terminal)

Σε αυτού του είδους τη μεταφορά έχουμε τη σύνδεση δύο απομακρυσμένων AC δικτύων και η HVDC διασύνδεση που χρησιμοποιείται μπορεί να είναι είτε μονοπολική, είτε διπολική.

5.3 Μονοπολική Σύνδεση

Αποτελεί τον πιο απλό και φθηνό τρόπο διασύνδεσης. Στην μονοπολική διασύνδεση οι δύο μετατροπείς συνδέονται με έναν μόνο αγωγό. Συνήθως ως αγωγός επιστροφής χρησιμοποιείται η γη ή η θάλασσα. Υπάρχουν όμως και μερικές περιοχές, όπου οι συνθήκες δεν επιτρέπουν αυτού του είδους την επιστροφή. Τέτοιες είναι πυκνοκατοικημένες περιοχές ή περιοχές με υψηλή αντίσταση εδάφους. Έτσι, λοιπόν, σε αυτές τις περιπτώσεις έχουμε σαν επιστροφή έναν μεταλλικό αγωγό.



Σχήμα 5.2 Μονοπολική διασύνδεση

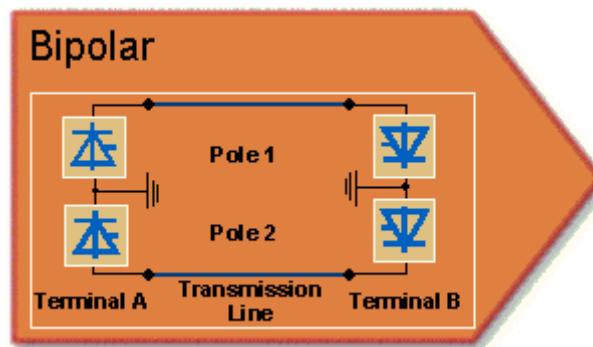
Οι κυριότερες ανησυχίες που υπάρχουν για αυτόν τον τρόπο διασύνδεσης οφείλονται στην πιθανότητα :

- Μέρος του ρεύματος επιστροφής να ρέει σε γειτονικούς μεταλλικούς αγωγούς, όπως σωλήνες ύδρευσης ή φυσικού αερίου, και με αυτόν τον τρόπο να προκαλέσει τη διάβρωσή τους.
- Το μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο που δημιουργείται, μπορεί να επηρεάσει και να προκαλέσει διαταραχές σε ηλεκτρονικά συστήματα πλοήγησης πλοίων και άλλες ηλεκτρονικές συσκευές, καθώς και στους έμβιους οργανισμούς των γύρω περιοχών.

5.4 Διπολική διασύνδεση

Είναι η πιο ευρέως χρησιμοποιούμενη διασύνδεση και αυτή που χρησιμοποιείται κυρίως στις περιπτώσεις όπου έχουμε συστήματα εναέριων γραμμών.

Στην διπολική διασύνδεση συνδυάζονται δύο μονοπολικά συστήματα άρα έχουμε τη χρήση δύο αγωγών, εκ των οποίων το ένα λειτουργεί με τάση θετικής πολικότητας και το άλλο με τάση αρνητικής πολικότητας.



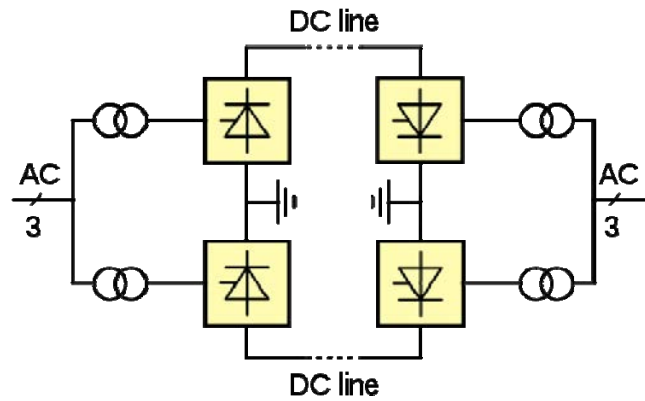
Σχήμα 5.3 Διπολική διασύνδεση

Παρόλο που το κόστος κατασκευής της διπολικής διασύνδεσης είναι μεγαλύτερο σε σχέση με τη μονοπολική, αυτή προσφέρει τα παρακάτω πλεονεκτήματα :

- Μείωση των απωλειών λόγω του ρεύματος επιστροφής και των επιδράσεων στο περιβάλλον.
- Σε περίπτωση σφάλματος στη μία γραμμή μπορούμε να εξακολουθούμε να έχουμε λειτουργία της σύνδεσης ως μονοπολική.

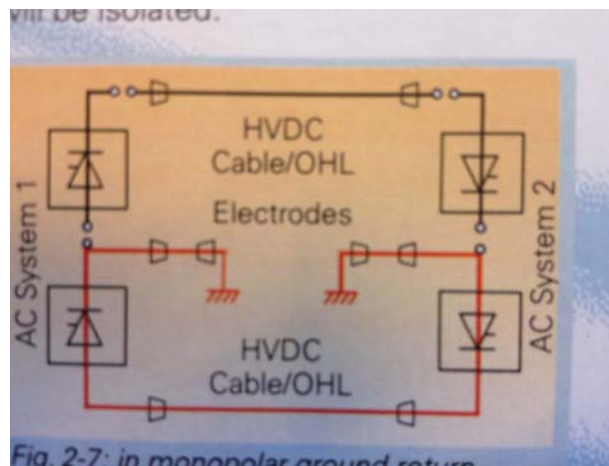
5.5 Διπολική διασύνδεση με χρήση της γης ως επιστροφή

Αυτή είναι και η πιο συχνά χρησιμοποιούμενη κατηγορία διασύνδεσης. Το σύστημα αυτό προσφέρει μία αυξημένη ελαστικότητα με σκοπό κυρίως, τη δυνατότητα λειτουργίας του και στις περιπτώσεις όπου έχουμε μειωμένη μεταφορική ικανότητα λόγω σφαλμάτων ή κατά τη διάρκεια της συντήρησης του.



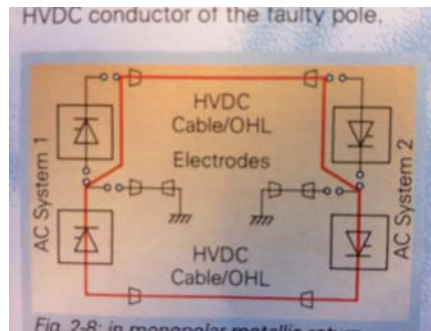
Σχήμα 5.4 Διπολική διασύνδεση με χρήση της γης ως επιστροφή

Σε περίπτωση σφάλματος στον ένα πόλο, μπορούμε να έχουμε τη λειτουργία του άλλου πόλου (σαν μονοπολική διασύνδεση), ο οποίος θα χρησιμοποιεί την γείωση ως επιστροφή και έτσι να καταφέρουμε να απομονώσουμε το σφάλμα όπως βλέπουμε στην εικόνα.



Σχήμα 5.5 Περίπτωση σφάλματος στον ένα πόλο

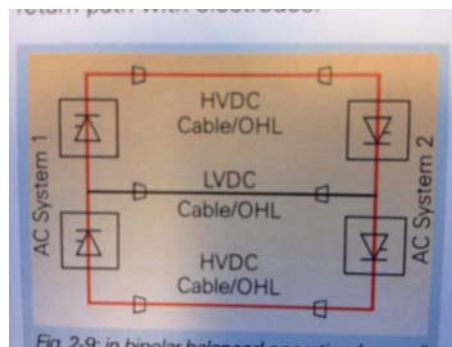
Όταν παρατηρείται σφάλμα σε κάποιον μετατροπέα του ενός πόλου, θα εξακολουθήσουμε να έχουμε όπως και πριν τη λειτουργία του δεύτερου πόλου σαν σε μονοπολική διασύνδεση. Σε αυτή όμως την περίπτωση, αντί να έχουμε ως επιστροφή τη γη, χρησιμοποιούμε ως μεταλλική επιστροφή το καλώδιο του πόλου, στο μετατροπέα του οποίου εμφανίστηκε το σφάλμα, όπως δείχνει και το σχήμα της εικόνας



Σχήμα 5.6 Περίπτωση σφάλματος σε κάποιον μετατροπέα του ενός πόλου

5.6 Διπολική διασύνδεση με χρήση μεταλλικής επιστροφής

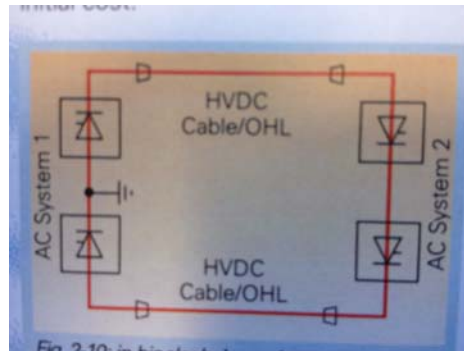
Εάν υπάρχουν περιορισμοί σχετικά με τη χρήση της γης ως επιστροφή ή σε περίπτωση όπου η απόσταση μεταφοράς είναι σχετικά μικρή μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένας αγωγός LVDC (Low Voltage DC) ως επιστροφή στην περίπτωση της μονοπολικής λειτουργίας



Σχήμα 5.7 Διπολική διασύνδεση με χρήση μεταλλικής επιστροφής

5.7 Διπολική διασύνδεση χωρίς επιστροφή

Σε αυτήν τη διασύνδεση δεν χρησιμοποιείται ούτε η γη, ούτε κάποιος άλλος μεταλλικός αγωγός ως επιστροφή. Αυτή η διασύνδεση δίνει και το μικρότερο αρχικό κόστος κατασκευής. Μονοπολική λειτουργία είναι εφικτή σε περίπτωση σφάλματος σε κάποιον από τους μετατροπείς, αλλά όχι και στην περίπτωση σφάλματος σε κάποια από τις γραμμές HVDC που υπάρχουν.

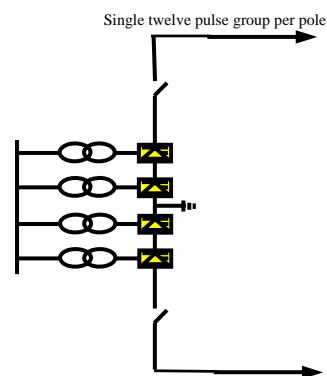


Σχήμα 5.8 Διπολική διασύνδεση χωρίς επιστροφή

5.8 Διπολική διασύνδεση σε HVDC συστήματα στα $\pm 800\text{kV}$

Ένα πολύ σημαντικό κομμάτι των HVDC συστημάτων μεταφοράς είναι αυτό των HVDC συστημάτων των $\pm 800\text{kV}$. Στην πράξη δεν έχουν εφαρμοστεί ακόμα συστήματα $\pm 800\text{kV}$, αλλά αναμένεται με μεγάλο ενδιαφέρον η κατασκευή του πρώτου από αυτά, στην Κίνα, που έχει τεθεί σε λειτουργία από το 2011.

Η θεωρητική μελέτη αυτού του είδους συστημάτων μέχρι τώρα, έχει δείξει ότι αυτά μπορούν να θεωρηθούν αρκετά ελκυστικά για μεταφορά ισχύος μεγαλύτερης των 6000MW και σε απόσταση πάνω από 1000km . Επιπλέον ως κατάλληλο είδος διασύνδεσης για την υλοποίησή τους μπορεί να επιλεγεί μόνο διπολική διασύνδεση με μετατροπείς 12-παλμών



Η επιλογή της κατάλληλης διπολικής διασύνδεσης προσδιορίζεται με βάση τα παρακάτω στοιχεία :

- Το ποσό της ενέργειας που θα πρέπει να μεταφέρεται

- Την απόσταση στην οποία θα γίνεται η μεταφορά
- Τα επιμέρους στάδια διεκπεραίωσης του προγράμματος
- Το ποσό της ενέργειας που θα πρέπει να μεταφέρεται σε κάθε επιμέρους στάδιο
- Τις απαιτήσεις αξιοπιστίας και διαθεσιμότητας
- Την αξιολόγηση των απωλειών

Γενικά, προτιμότερη θεωρείται η χρήση περισσότερων του ενός μετατροπέα ανά πόλο, κυρίως λόγω:

- Της μείωσης των διαταραχών σε σφάλματα της αύξησης της αξιοπιστίας και της διαθεσιμότητας της μεταφοράς
- Των περιορισμών που τίθενται για το μέγεθος και το βάρος των μετασχηματιστών των μετατροπέων

Γενικά, σε αντίθεση με τη σημείο-προς-σημείο διασύνδεση, η οποία περιορίζεται σε ανταλλαγή ενέργειας μεταξύ δύο μονο σημείων, τα MTDC συστήματα δίνουν τη δυνατότητα σύνδεσης όλων των ενδιαφερόμενων τερματικών σταθμών σε ένα κοινό δίκτυο μεταφοράς. Αυτό, όμως θα έχει σαν αποτέλεσμα να πρέπει να αναπτυχθεί ένα πιο περίπλοκο σύστημα ελέγχου, σε σχέση με τη σημείο-προς-σημείο διασύνδεση, γεγονός που ενδέχεται να επηρεάσει την διαθεσιμότητα ενέργειας. Σύμφωνα, όμως, με μελέτες που έχουν γίνει, η επίδραση του συστήματος ελέγχου στην διαθεσιμότητα ενέργειας ενός MTDC συστήματος παραμένει ίδια με εκείνη ενός συστήματος σημείο-προς-σημείο. Επίσης, ο βασικός εξοπλισμός DC διακοπών παραμένει ίδιος περίπου και στις δύο περιπτώσεις.

Ενδιαφέρουσα είναι η σύγκριση των δύο αυτών συστημάτων σε περίπτωση σφάλματος, όσον αφορά την ικανότητα μεταφοράς. Στην περίπτωση ενός σημείο-προς-σημείο συστήματος ένα σφάλμα στη γραμμή μεταφοράς θα είχε ως αποτέλεσμα απώλεια 100% της μεταφορικής ικανότητας. Αντίθετα, τα MTDC συστήματα επηράζονται λιγότερο από ένα τέτοιου είδους σφάλμα. Αυτό συμβαίνει επειδή σε μια τέτοια περίπτωση θα είχαμε διακοπή της μεταφοράς ενέργειας μόνο μεταξύ των τερματικών που θα εμφανιζόταν το σφάλμα.

6^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ

“ΕΠΙΔΡΑΣΕΙΣ ΣΤΟ HVDC”

6.1 Ευστάθεια και αξιοπιστία

Είναι γνωστό ότι η ευστάθεια και η αξιοπιστία σε ένα σύστημα αποτελούν βασικά στοιχεία και για να μπορεί το σύστημα να λειτουργεί ορθά, θα πρέπει και τα δύο να βρίσκονται μέσα σε αποδεκτά όρια. Η χρήση των HVDC συστημάτων οδήγησε σε μία περαιτέρω αύξηση της αξιοπιστίας και της ευστάθειας των συστημάτων μεταφοράς ενέργειας. Αυτό οφείλεται κυρίως στη δυνατότητα ελέγχου της ροής ενέργειας που υπάρχει στα HVDC συστήματα.

Γενικά, η ευστάθεια στη μεταφορά (transient stability) αναφέρεται στην ικανότητα του συστήματος να μπορεί να διατηρεί τη σταθερή του κατάσταση και να συνεχίζει μια καλή μεταφορά ενέργειας παρά τις ξαφνικές εξωτερικές επιδράσεις που αυτό μπορεί να δέχεται, όπως βραχυκυκλώματα στις γραμμές μεταφοράς ή σφάλματα γης.

Αντίστοιχα, η αξιοπιστία ενός συστήματος έγκειται στην πιθανότητα ότι το σύστημα θα εκτελέσει τις προκαθορισμένες λειτουργίες του κάτω από δεδομένες συνθήκες.

Τα συστήματα ελέγχου που χρησιμοποιούνται στις HVDC διασυνδέσεις, επειδή παρουσιάζουν σχετικά γρήγορες αποκρίσεις και παρέχουν τη δυνατότητα ελέγχου της ροής ενέργειας, της τάσης και της συχνότητας, τείνουν να αυξάνουν την ευστάθεια και την αξιοπιστία του συστήματος ισχύος στο σύνολό του.

Επιπλέον, ακόμα και σε περιπτώσεις όπου έχουμε HVAC σύστημα, η σύνδεση παράλληλα σε αυτό ενός HVDC συστήματος, δηλαδή η δημιουργία ενός υβριδικού συστήματος, έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της αξιοπιστίας του ολικού συστήματος

6.2 Περιβαλλοντικά χαρακτηριστικά

Η ευρεία χρήση HVDC συστημάτων μεταφοράς ενέργειας, λόγω των πλεονεκτημάτων που αυτά προσφέρουν, έχει οδηγήσει και στην περαιτέρω μελέτη και σύγκριση των περιβαλλοντικών τους χαρακτηριστικών με τα αντίστοιχα των HVAC συστημάτων.

Οι πιθανές επιδράσεις στο περιβάλλον από τις HVDC εφαρμογές περιλαμβάνουν τα παρακάτω:

- Επιδράσεις από ηλεκτρικά πεδία.
- Επιδράσεις από μαγνητικά πεδία.
- Παρεμβολές στις τηλεπικοινωνίες (Radio interference).
- Θόρυβος.
- Ρεύματα εδάφους και φαινόμενα διάβρωσης.
- Χρήση γης για εγκατάσταση υποσταθμών και γραμμών μεταφοράς, η οποία πιο πριν χρησιμοποιούταν για άλλους σκοπούς.
- Οπτικές επιδράσεις.
- Άλλου είδους επιδράσεις.

Τα παραπάνω χαρακτηριστικά πρέπει να ληφθούν υπ'όψιν κατά τη διαδικασία σχεδιασμού και κατασκευής ενός HVDC συστήματος μεταφοράς.

Μερικά από αυτά μπορούν να θεωρηθούν ως πλεονεκτήματα των HVDC συστημάτων, ενώ αντίθετα κάποια άλλα λαμβάνονται ως μειονεκτήματα τους.

6.2.1 Επιδράσεις από ηλεκτρικά πεδία

Η ευρεία χρήση HVDC συστημάτων μεταφοράς ενέργειας, λόγω των πλεονεκτημάτων που αυτά προσφέρουν, έχει οδηγήσει και στην περαιτέρω μελέτη και σύγκριση των περιβαλλοντικών τους χαρακτηριστικών με τα αντίστοιχα των HVAC συστημάτων.

Είναι γνωστό, ότι το ηλεκτρικό πεδίο που προκαλείται από μία HVDC γραμμή μεταφοράς συνίσταται από το πεδίο που προκαλείται από την τάση στη γραμμή μεταφοράς και από το πεδίο στο χώρο που δημιουργείται από τη φόρτιση που προκαλεί το φαινόμενο κορώνα πάνω στη γραμμή μεταφοράς.

Εχούν γίνει διάφορες έρευνες πάνω στις επιδράσεις του ηλεκτρικού αυτού πεδίου, με τις πρώτες από αυτές να έχουν διαξαχθεί στο ινστιτούτο IREQ (Institut de Recherche d'Hydro-Quebec, Quebec, Canada). Το μεγαλύτερο μέρος αυτών των ερευνών διεξήχθη στο πειραματικό τμήμα της γραμμής μεταφοράς του NIPT (High Voltage Direct Current Power Transmission Research Institute, St.Petersburg, Russia) και τα αποτελέσματα έδειξαν

ότι κάτω από μία γραμμή μεταφοράς HVDC δεν παρατηρούνται οι τυπικές επιδράσεις στους ανθρώπους που συναντάμε στην περίπτωση των HVAC γραμμών μεταφοράς.

Επιπλέον, έγιναν και μετρήσεις για τη ροή ιοντικού ρεύματος που διέρχεται από έναν άνθρωπο, όταν αυτός στέκεται κάτω από μία HVDC γραμμή των $\pm 1000\text{kV}$ και όταν στέκεται κάτω από μία HVAC γραμμή των 1150kV . Τα πειράματα αυτά έδειξαν ότι η διαφορά ανάμεσα στα ρεύματα των δύο περιπτώσεων είναι της τάξης του 100 (2-3 μA για την HVDC γραμμή και 0.2mA για την HVAC γραμμή).

Επιπροσθέτως, σε μεγάλες μηχανές που τοποθετήθηκαν κάτω από τις HVDC γραμμές μεταφοράς δεν παρατηρήθηκε φόρτισή τους σε επίπεδα επικίνδυνα για τον άνθρωπο. Αντίθετα, αν αντίστοιχου μεγέθους μηχανές τοποθετούνταν κάτω από HVAC γραμμές μεταφοράς, θα αναπτύσσονταν σε αυτές επαγωγικά ρεύματα που μπορεί να ήταν και επικίνδυνα σε πολλές περιπτώσεις

6.2.2 Επιδράσεις από μαγνητικά πεδία

Γενικά, οι επιδράσεις από τα μαγνητικά πεδία που δημιουργούνται από HVDC γραμμές μεταφοράς δεν έχουν μελετηθεί σε πολύ μεγάλο βαθμό. Παρόλ' αυτά, είναι γνωστό ότι το μαγνητικό πεδίο που δημιουργείται κάτω από αυτές είναι της τάξεως του φυσικού μαγνητικού πεδίου της γης. Λόγω αυτού του γεγονότος δεν αποτελούν κίνδυνο για την υγεία του ανθρώπου.

Αυτού του είδους η επίδραση προκύπτει από τις εκκενώσεις κορώννα που παρατηρούνται γύρω από την επιφάνεια των αγωγών, και δημιουργείται μόνο στους αγωγούς με θετική τάση. Στην περίπτωση, όμως, των HVAC γραμμών μεταφοράς οι παρεμβολές στις τηλεπικοινωνίες παράγονται και από τις τρεις φάσεις, γι' αυτό και οι απώλειες κορώννα στα HVAC συστήματα είναι αρκετά μεγαλύτερες από τα αντίστοιχα HVDC.

6.2.3 Παρεμβολές στις επικοινωνίες

Αυτού του είδους η επίδραση προκύπτει από τις εκκενώσεις κορώννα που παρατηρούνται γύρω από την επιφάνεια των αγωγών, και δημιουργείται μόνο στους αγωγούς με θετική τάση. Στην περίπτωση, όμως, των HVAC γραμμών μεταφοράς οι παρεμβολές στις τηλεπικοινωνίες παράγονται και από τις τρεις φάσεις, γι' αυτό και οι απώλειες κορώννα στα HVAC συστήματα

είναι αρκετά μεγαλύτερες από τα αντίστοιχα HVDC. Επιπλέον, πρέπει να τονιστεί ότι υπάρχει διαφορά ανάμεσα στις HVDC και HVAC γραμμές και ως προς την επίδραση που έχουν οι καιρικές συνθήκες στην παραγωγή των παρεμβολών στις τηλεπικοινωνίες. Σε συνθήκες βροχής, παρατηρείται αύξηση της τάξεως των 10dB του επιπέδου των παρεμβολών στην περίπτωση των HVAC γραμμών, ενώ αντίθετα στην περίπτωση των HVDC γραμμών έχουμε μείωση των αντίστοιχων παρεμβολών στις τηλεπικοινωνίες.

6.2.4 Θόρυβος

Ο θόρυβος ίσως είναι η σημαντικότερη παράμετρος κατά το σχεδιασμό των συστημάτων μεταφοράς ενέργειας.

Στους HVDC υποσταθμούς η κύρια πηγή θορύβου είναι οι μετασχηματιστές των μετατροπέων, ενώ στις γραμμές μεταφοράς ο θόρυβος που παράγεται αποτελείται από υψηλές συχνότητες. Συνήθως, σε καιρικές συνθήκες με βροχή το επίπεδο θορύβου που παράγεται από HVDC γραμμές μειώνεται, σε αντίθεση με το αντίστοιχο που παράγεται από HVAC γραμμές, το οποίο αυξάνεται.

Τα περισσότερα μέσα που χρησιμοποιούνται για τη μείωση του θορύβου είναι αρκετά ακριβά και είναι τα ίδια και στους δύο τύπους γραμμών.

6.2.5 Ρεύματα Εδάφους και φαινόμενα διάβρωσης

Έχει προαναφερθεί ότι ένα βασικό πλεονέκτημα των διπολικών HVDC συστημάτων μεταφοράς είναι η δυνατότητά τους να συνεχίζουν να μεταφέρουν ενέργεια ακόμα και σε συνθήκες σφάλματος στον ένα πόλο. Για να μπορέσει να γίνει αυτό και να συνεχιστεί η μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας μέσω του ενός πόλου θα πρέπει να εξασφαλίζεται κάθε φορά ένας δρόμος επιστροφής του ρεύματος.

Ένας τρόπος είναι με χρήση της γης ως επιστροφή. Σε αυτή την περίπτωση παρατηρούνται κάποιες ιδιαιτερότητες. Από τη μία πλευρά, εάν δεν συνδέονται με κάποιο τρόπο τα συστήματα γείωσης των HVDC υποσταθμών τότε οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις περιορίζονται γύρω από την περιοχή που είναι εγκατεστημένες οι γειώσεις των υποσταθμών. Από την άλλη πλευρά, εάν υπάρχει υπόγεια σύνδεση των δύο γειώσεων με κάποιο αγωγό, το ρεύμα επιστρέφει από εκεί. Έτσι, μπορεί να δημιουργηθεί ηλεκτρική διάβρωση αυτού του αγωγού, η οποία εξαρτάται από το επίπεδο της ηλεκτρικής του μόνωσης καθώς και από τις τιμές του ρεύματος που διέρχεται από αυτόν.

Εξαιτίας της ασυμμετρίας που δημιουργείται στη διπολική διασύνδεση, το ρεύμα που διέρχεται από το έδαφος είναι της τάξης του 1-3% του ονομαστικού. Αυτό το ρεύμα μπορεί να προκαλέσει διάβρωση του εδάφους, η οποία με τη σειρά της μειώνει τη γονιμότητα του εδάφους και οδηγεί σε μείωση της ποιότητας του νερού και κατ'επέκταση στην παραγωγικότητα των υδάτινων οικοσυστημάτων.

6.2.6 Χρήση γης για εγκατάσταση υποσταθμών και γραμμών μεταφοράς

Η έννοια «χρήση γης» αναφέρεται στη συνολική έκταση γης που χρησιμοποιείται για την εγκατάσταση των υποσταθμών, των πύργων στήριξης και των γραμμών μεταφοράς του συστήματος. Πρέπει να γίνεται μία προσεκτική μελέτη κατά τον σχεδιασμό τόσο των HVDC, όσο και των HVAC συστημάτων, αφού ο χώρος που απαιτείται και στα δύο είναι περίπου ίδιος και ιδιαίτερα στις περιπτώσεις των δασών όπου πρέπει να κοπούν δέντρα για να ανοιχτεί δρόμος για τη διέλευση (right-of-way) των γραμμών μεταφοράς. Μία εκτίμηση της γης που απαιτείται για την εγκατάσταση εναέριων HVDC και HVAC γραμμών μεταφοράς, δείχνει ότι για τη μεταφορά ίσης ποσότητας ενέργειας, οι απαιτήσεις αξιοπιστίας και το κόστος των περιβαλλοντικών μέτρων και η συνολική έκταση γης και η περιοχή διέλευσης των γραμμών σε μία HVDC γραμμή μεταφοράς είναι 1.5 φορά μικρότερη σε σχέση με αυτά που απαιτούνται για μία HVAC γραμμή μεταφοράς.

6.2.7 Οπτικές επιδράσεις

Η οπτική επίδραση των HVDC συστημάτων αποτελεί και ένα μεγάλο πλεονέκτημά τους. Τα διπολικά HVDC συστήματα χρησιμοποιούν δύο αγωγούς σε σχέση με τα τριφασικά HVAC και επίσης για την ίδια δυνατότητα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας, το ύψος των πυλώνων των HVDC γραμμών μεταφοράς είναι μικρότερο σε σχέση με το αντίστοιχο των HVAC.

Επιπλέον, ανάλογα με τη μορφολογία της περιοχής απ'όπου διέρχονται οι γραμμές μεταφοράς, το ύψος και το πλάτος των πυλώνων μπορεί να ποικίλει.

6.2.8 Άλλου είδους επιδράσεις

Εκτός από τις προαναφερθείσες επιδράσεις προς το περιβάλλον υπάρχουν και διάφορες άλλες.

Μία από αυτές είναι η εκπομπή θετικά φορτισμένων ιόντων O_3 , N_2 και ελεύθερων ηλεκτρονίων από τις DC γραμμές μεταφοράς. Οι εκπομπές αυτές οφείλονται κυρίως στο φαινόμενο κορώνα που παρατηρείται στις γραμμές και σύμφωνα με μακροχρόνιες μετρήσεις που έλαβαν χώρα, σε διάφορα σημεία κατά μήκος της διασύνδεσης του Nelson River στον Καναδά, φάνηκε ότι δεν υπάρχει λόγος ανησυχίας για βλαβερές συνέπειες προς τον άνθρωπο. Επιπλέον, πρέπει να γίνει αναφορά και στις επιδράσεις στη βιοποικιλότητα και στην άγρια ζωή ορισμένων περιοχών, οι οποίες επηρεάζονται από τη διέλευση των γραμμών μεταφοράς και την εγκατάσταση πύργων στήριξης.

Τέλος, τα έργα που λαμβάνουν τόπο κατά την κατασκευή ενός δικτύου μπορεί να επηρεάσουν ακόμα και ιθαγενείς πληθυσμούς ορισμένων περιοχών, στους οποίους μπορεί να ζητηθεί να μετοικήσουν ή να καταστραφούν σημαντικά ιστορικά μνημεία τους. Η επίδραση σε μνημεία αρχαιολογικής, ιστορικής ή θρησκευτικής σημασίας προέρχεται κυρίως από τη διέλευση υπόγειων καλωδίων σε κοντινές αποστάσεις από αυτά.

6.3 Μειονεκτήματα των HVDC συστημάτων μεταφοράς ενέργειας

Ένα βασικό μειονέκτημα των HVDC συστημάτων είναι το αυξημένο κόστος κατασκευής που παρουσιάζουν οι υποσταθμοί μετατροπής. Συνήθως, σε μικρές αποστάσεις μεταφοράς οι απώλειες λόγω της ύπαρξης των μετατροπέων είναι μεγαλύτερες σε σχέση με αυτές ενός HVAC συστήματος.

Επιπλέον, οι μετατροπείς απαιτούν και πρόσθετη άεργο ισχύ τόσο στη διαδικασία της ανόρθωσης, όσο και στη διαδικασία αντιστροφής της τάσης. Γενικά, σε κάθε μετατροπέα η άεργος ισχύς που καταναλώνεται μπορεί να φτάνει μέχρι και το 50% της ονομαστικής τιμής της ενεργού ισχύος της HVDC διασύνδεσης.

Παραμένοντας στους μετατροπείς, ένα άλλο μειονέκτημα των HVDC συστημάτων που σχετίζεται με την ύπαρξή τους είναι η παραγωγή αρμονικών ρεύματος και τάσης τόσο στην DC, όσο και στην AC πλευρά. Οι απώλειες λόγω των αρμονικών, καθώς και η χρήση φίλτρων στην AC πλευρά και αυτεπαγωγών εξομάλυνσης στη DC πλευρά για την εξάλειψή τους, προκαλούν μια περαιτέρω αύξηση του κόστους λειτουργίας και κατασκευής ενός HVDC συστήματος. Λόγω της έλλειψης φυσικού μηδενισμού του ρεύματος στη DC πλευρά

ενός HVDC συστήματος, η διακοπή του κυκλώματος είναι σχετικά δύσκολη. Αυτό δεν αποτελεί σημαντικό πρόβλημα στην περίπτωση μιας μόνης HVDC διασύνδεσης. Στην περίπτωση όμως, όπου αναφερόμαστε σε πολυτεμαχικά HVDC συστήματα, η δυσκολία κατασκευής DC διακοπών (DC circuit breakers) αποτελεί ένα κύριο μειονέκτημα.

Τέλος, οι HVDC γραμμές μεταφοράς έχουν συνήθως ένα πιο περίπλοκο και ακριβό σύστημα ελέγχου και επίσης το γεγονός ότι δεν είναι δυνατός ο απευθείας μετασχηματισμός της DC τάσης, αλλά πρέπει αυτός να γίνεται στην ac πλευρά του συστήματος, αποτελούν κάποια επιπλέον μειονεκτήματα ενός HVDC συστήματος.

6.4 Σύγκριση μεταξύ HVDC και HVAC συστημάτων μεταφοράς

Τα HVDC και HVAC συστήματα μεταφοράς παρουσιάζουν διαφορές μεταξύ τους. Η σύγκριση μεταξύ αυτών των δύο συστημάτων δεν είναι απλή και όταν συμβαίνει πρέπει να λάβουμε υπ' όψιν τους παρακάτω παράγοντες:

- Τα οικονομικά στοιχεία της μεταφοράς ισχύος και στα δύο συστήματα.
- Τα τεχνικά χαρακτηριστικά καθενός από τα δύο συστήματα και πως αυτά επηρεάζουν την απόδοσή τους.
- Τη σταθερότητα και την αξιοπιστία των δύο συστημάτων.
- Τα περιβαλλοντικά χαρακτηριστικά των δύο συστημάτων

6.4.1 Κόστος μεταφοράς ισχύος στα HVDC και HVAC συστήματα μεταφοράς

Το συνολικό κόστος ενός συστήματος μεταφοράς αποτελείται από το κεφάλαιο της επένδυσης στον σταθμό μετατροπής και τις γραμμές μεταφοράς, καθώς και από την αξία των απωλειών ισχύος. Όλοι, όμως, αυτοί οι παράγοντες είναι δύσκολο να υπολογιστούν, γεγονός που κάνει την οικονομική σύγκριση των συστημάτων αρκετά περίπλοκη.

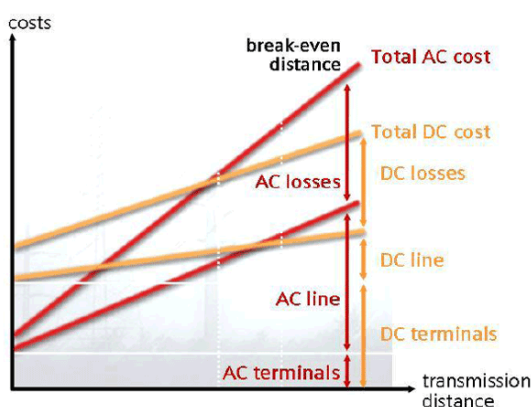
Γενικά, το κόστος για την κατασκευή ενός HVDC υποσταθμού είναι μεγαλύτερο σε σχέση με το αντίστοιχο για έναν HVAC υποσταθμό. Επιπλέον, για μια δεδομένη ποσότητα μεταφερόμενης ισχύος το κόστος του σταθμού μετατροπής αυξάνεται ανάλογα με την τάση

κάτω από την οποία θα γίνεται η μεταφορά, ενώ την ίδια στιγμή η γραμμή μεταφοράς παρουσιάζει ένα ελάχιστο κόστος για μια δεδομένη τάση.

Επίσης, στην περίπτωση ενός HVAC συστήματος οι απώλειες στη γραμμή μεταφοράς είναι μεγαλύτερες σε σχέση με ένα HVDC σύστημα.

Αυτό συμβαίνει, πρώτον επειδή μία HVAC γραμμή μεταφοράς χρειάζεται περισσότερους αγωγούς για τη μεταφορά της ίδιας ισχύος σε σύγκριση με μία HVDC γραμμή μεταφοράς και άρα οι απώλειες θα είναι μεγαλύτερες στο HVAC σύστημα. Δεύτερον, επειδή οι απώλειες κορώνα είναι μεγαλύτερες σε ένα HVAC σύστημα μεταφοράς.

Παρακάτω δίνεται ένα διάγραμμα σχετικά με το πώς διαμορφώνεται το κόστος των HVDC και HVAC συστημάτων μεταφοράς ανάλογα με το μήκος της γραμμής μεταφοράς που χρησιμοποιείται



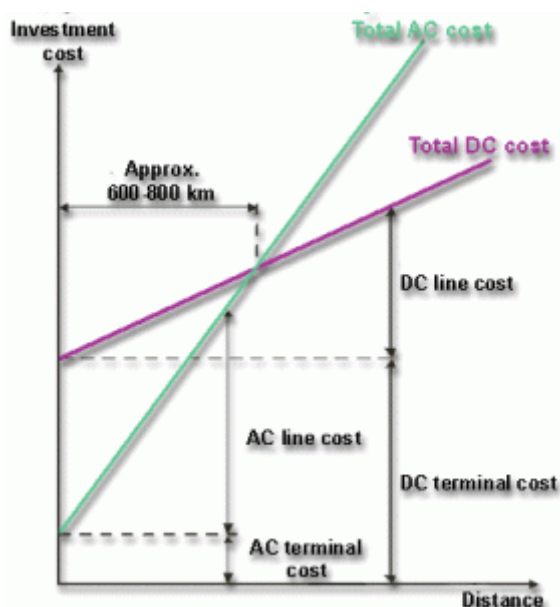
Όπως μπορούμε να δούμε, υπάρχει μία κρίσιμη απόσταση (break-even distance) στην οποία τα κόστη και των δύο συστημάτων είναι ίσα, ενώ πέρα από αυτήν το κόστος ενός HVDC συστήματος είναι χαμηλότερο από το αντίστοιχο του HVAC συστήματος. Η κρίσιμη αυτή απόσταση συνήθως βρίσκεται μεταξύ των 500 - 800km όταν αναφερόμαστε σε εναέριες γραμμές, ενώ δεν ξεπερνάει τα 80km στην περίπτωση που χρησιμοποιούνται υποθαλάσσια καλώδια. Πριν από αυτή την απόσταση φαίνεται να είναι φθηνότερο το HVAC σύστημα μεταφοράς

Αυτό οφείλεται σε διάφορους παράγοντες

- Αρχικά, οι HVDC υποσταθμοί είναι ακριβότεροι. Το αυξημένο κόστος των σταθμών HVDC οφείλεται κυρίως στην κατασκευή των HVDC σταθμών μετατροπής.

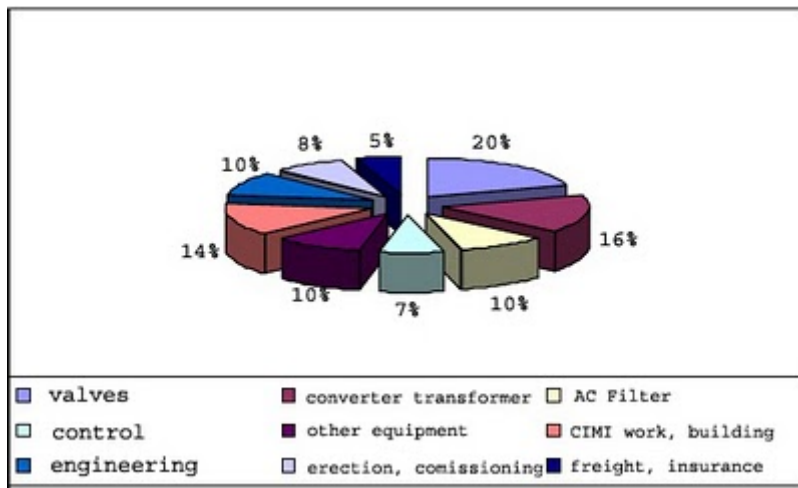
- Επιπλέον, στα HVDC συστήματα μεταφοράς δεν είναι απαραίτητη η αντιστάθμιση άεργου ισχύος κατά μήκος της γραμμής μεταφοράς. Αντίθετα, στα HVAC συστήματα η αντιστάθμιση άεργου ισχύος είναι αναγκαία σχεδόν σε κάθε 200 -250km.
- Τέλος, οι γραμμές μεταφοράς των HVDC συστημάτων έχουν μεγαλύτερο κόστος εγκατάστασης και μικρότερο κόστος λειτουργίας, ενώ αντίθετα, αυτές των HVAC συστημάτων έχουν χαμηλό κόστος εγκατάστασης και υψηλό κόστος λειτουργίας.

Πρέπει να τονιστεί επίσης και το γεγονός ότι το κόστος ενός HVDC συστήματος σε σχέση με το μήκος των γραμμών μεταβάλλεται λιγότερο σε σχέση με την αντίστοιχη μεταβολή του κόστους ενός HVAC συστήματος



Σχήμα 6.2 Μεταβολή του κόστους HVDC και HVAC συστήματος σε σχέση με το μήκος των γραμμών μεταφοράς

Γενικά, το κόστος κατασκευής ενός HVDC υποσταθμού επιμερίζεται όπως φαίνεται στο σχήμα 6.3. Το μεγαλύτερο ποσοστό του κόστους κατασκευής οφείλεται στους μετατροπείς και στους μετασχηματιστές των μετατροπέων (περίπου το 35-40% του συνολικού κόστους κατασκευής). Επιπλέον, τα ποσοστά αυτά δεν μεταβάλλονται σε μεγάλο βαθμό κατά τη μεταβολή της τάσης λειτουργίας ή της μεταφερόμενης ισχύος



7^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ

“ΔΙΑΣΥΝΔΕΣΗΣ ΜΕ HVDC”

7.1 Gotland

Η πρώτη τροφοδότηση νησιού με HVDC διασύνδεση ήταν αυτή του νησιού Gotland το 1954 στη Σουηδία. Αρχικά το νησί ήταν αυτόνομο όσον αφορά την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, λόγω της ύπαρξης ενός σταθμού παραγωγής ενέργειας στην περιοχή του Slite, ο οποίος κάλυπτε τις ενεργειακές ανάγκες του νησιού. Όμως, το υψηλό κόστος παραγωγής ενέργειας οδηγούσε και σε αυξημένες τιμές της ενέργειας στο νησί σε σχέση με τις αντίστοιχες τιμές που υπήρχαν στο κύριο μέρος της Σουηδίας, γεγονός που προκαλούσε μείωση των επιχειρηματικών επενδύσεων στο νησί και κατά συνέπεια ανεργία και μείωση του πληθυσμού.

Η κυβέρνηση της Σουηδίας για να διορθώσει εν μέρει τα προβλήματα αυτά αποφάσισε την κατασκευή της HVDC διασύνδεσης το 1950.



Σχήμα 7.1 Σύνδεσης της Σουηδίας με το νησί Gotland.

Το 1954 τέθηκε σε λειτουργία η διασύνδεση, ενώ το 1970 αυτή αναβαθμίστηκε όταν στους μετατροπείς χρησιμοποιήθηκαν thyristors για πρώτη φορά στην ιστορία. Το 1983 τοποθετήθηκε και ένα δεύτερο καλώδιο μεταξύ των πόλεων Västervik και Ygne, στο οποίο η ονομαστική τάση ήταν 150kV και η ικανότητα μεταφοράς ισχύος έφτανε τα 130MW.

Η νέα αυτή σύνδεση ονομάστηκε Gotland 2, λειτουργούσε ανεξάρτητα από την αρχική Gotland 1 και αυτές οι δύο μαζί μπορούσαν πλέον να καλύπτουν το συνολικό φορτίο του νησιού. Επιπλέον, οι σταθμοί παραγωγής ενέργειας που λειτουργούσαν μέχρι τότε καταργήθηκαν και θα λειτουργούσαν μόνο σε περίπτωση ανάγκης. Το 1985 το φορτίο αυξήθηκε στα 147MW και έτσι οι ερευνητές προβλέποντας μια περαιτέρω αύξησή του τα επόμενα χρόνια αποφάσισαν να κατασκευάσουν μία ακόμα HVDC διασύνδεση για να τροφοδοτεί το νησί, τη Gotland 3.

Πλέον η συνολική μεταφορική ικανότητα φτάνει τα 260MW, ενώ η σύνδεση Gotland 1 έχει καταργηθεί.

7.2 Jeju

Μια ακόμα ενδιαφέρουσα περίπτωση σύνδεσης νησιού με το δίκτυο είναι και αυτή του νησιού Jeju στην Κορέα. Η ιδιαιτερότητα αυτού του συστήματος, έγκειται στο γεγονός ότι η ροή ισχύος μέσω της HVDC διασύνδεσης καθορίζεται από τις ενεργειακές ανάγκες του νησιού.

Το νησί Jeju είναι το μεγαλύτερο νησί της Κορέας, στο οποίο υπάρχουν πολλές δυνατότητες δημιουργίας αιολικών πάρκων στο μέλλον. Παρόλ' αυτά όμως, το νησί αυτό προσφέρεται για τουριστική δραστηριότητα εφόσον έχει πολλά ενδιαφέροντα αξιοθέατα. Έτσι λοιπόν, η κατασκευή είτε θερμικών, είτε πυρηνικών σταθμών παραγωγής ενέργειας στο νησί είναι πολύ δύσκολη και άρα η μόνη συμφέρουσα λύση που απομένει, με σκοπό τη σωστή και ικανοποιητική τροφοδότησή του, είναι η διασύνδεσή του με το κύριο χερσαίο δίκτυο της Κορέας.

Η ανισότητα μεταξύ προσφοράς και ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας καλύπτεται μέσω της HVDC διασύνδεσης με το κύριο χερσαίο δίκτυο. Η παραγωγή ενέργειας από τα αιολικά πάρκα που υπάρχουν στο νησί δεν μπορεί να προσδιοριστεί με ακρίβεια, γιατί κάθε φορά υπάρχουν μεγάλες αποκλίσεις του ανέμου και κατ' επέκταση της παραγόμενης ενέργειας. Άρα η HVDC διασύνδεση δεν καλύπτει μόνο τις ανάγκες του φορτίου, αλλά προσφέρει μία επιπλέον σταθερότητα στο δίκτυο της περιοχής.

Πρόσφατα θεωρήθηκε αναγκαίο να κατασκευαστεί και μία δεύτερη HVDC γραμμή σύνδεσης, η οποία θα τεθεί σε λειτουργία παράλληλα με την αρχική από το 2013 και με μεταφορική ικανότητα 400MW. Αυτή η κατασκευή κρίθηκε απαραίτητη, λόγω της μεγάλης

εξάρτησης που παρουσιάζει το Jeju από τις HVDC γραμμές και μετά από την εμπειρία ενός βραχυκυκλώματος που συνέβη στις 1 Απριλίου του 2006.



7.3 Ελλάδα-Ιταλία

Η κατασκευή της HVDC διασύνδεσης μεταξύ Ελλάδας και Ιταλίας αποτελεί ένα αρκετά σημαντικό έργο. Η διασύνδεση αυτή του ιταλικού και του ελληνικού AC δικτύου επιτυγχάνεται μέσω ενός υποθαλάσσιου DC καλωδίου, το οποίο διασχίζει το στενό του Οντάριο. Επιπλέον, η σύνδεση είναι μονοπολική με επιστροφή μέσω της θάλασσας, με ονομαστική τάση 400kV, ονομαστικό ρεύμα 1250A και μεταφορική ικανότητα στα 500MW. Η ροή ισχύος μπορεί να γίνει και προς τις δύο κατευθύνσεις, μεταξύ του υποσταθμού στη Galatina (Ιταλία) και του υποσταθμού στον Άραχθο (Ελλάδα).



Βασικοί στόχοι που μπόρεσαν να επιτευχθούν με την υλοποίηση αυτού του έργου είναι:

- Η διασύνδεση της νότιας Ιταλίας με την Ελλάδα, η οποία αποτελούσε και την τελευταία χώρα της ΕΕ που βρισκόταν εκτός του κοινοτικού δικτύου.
- Η είσοδος στο ευρωπαϊκό δίκτυο μεταφοράς νέων πιθανών παραγωγών ηλεκτρικής ενέργειας από την Ελλάδα, την Αλβανία και την Τουρκία.
- Η σημαντική συνεισφορά στην υλοποίηση του σχεδίου του «Δαχτυλιδιού της Μεσογείου» (“Mediterranean ring”).

Επίσης, υπάρχουν και κάποια επιπλέον αναμενόμενα κέρδη που πρόκειται να εμφανιστούν από τη λειτουργία της διασύνδεσης, όπως :

- Η μείωση του κόστους λειτουργίας των δικτύων, καθώς και της κατανάλωσης πετρελαίου.
- Η αύξηση της αξιοπιστίας και των δύο δικτύων, εφόσον θα μπορεί να υπάρξει μια αμοιβαία υποστήριξη τους σε περιπτώσεις σφαλμάτων ή αυξημένου φορτίου.

7.4 Ευρώπη

Η Ένωση για την Οργάνωση της Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας (Union of the Coordination of the Transmission of Electricity - UCTE) ιδρύθηκε το 1951 στη Δυτική

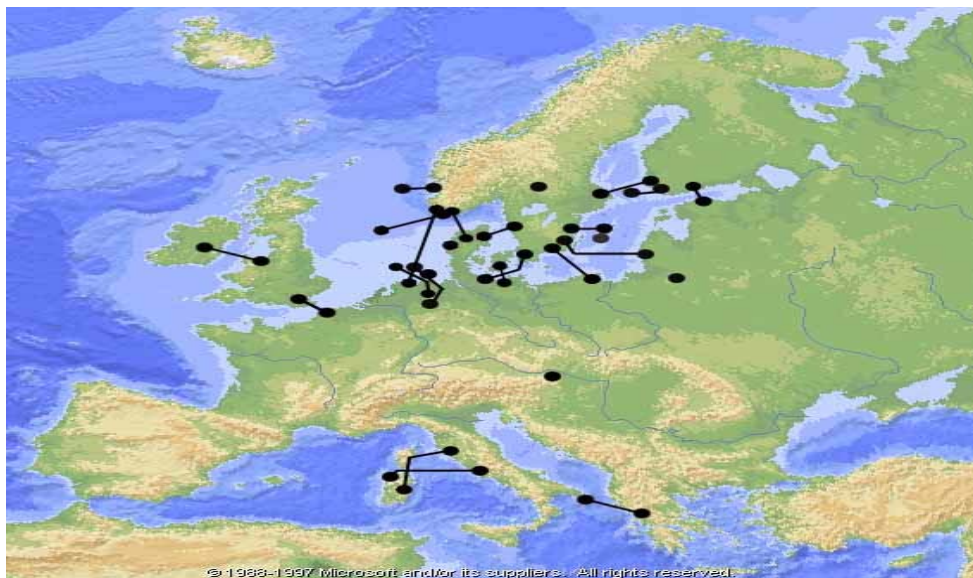
Ευρώπη, με στόχο τη βέλτιστη χρήση της διαθέσιμης παραγόμενης ενέργειας. Στην αρχή περιελάμβανε τις χώρες της Κεντρικής Ευρώπης, αλλά στη συνέχεια επεκτάθηκε και στην Ισπανία, την Πορτογαλία, την Ελλάδα και την πρώην Γιουγκοσλαβία. Για κάποιο χρονικό διάστημα η νοτιο-ανατολική πλευρά της Ευρώπης αποκόπηκε από την ένωση λόγω του πολέμου, αλλά μετά το 1994 έγινε ξανά μέρος του συστήματος. Επίσης, από το 1995 το Κεντρικό σύστημα, το οποίο περιλαμβάνει τα ενεργειακά συστήματα των χωρών της Ανατολικής Ευρώπης, συγχρονίστηκε με αυτό της UCTE.

Στην πορεία το σύστημα της UCTE συνδέθηκε και με άλλα γειτονικά συστήματα της Ευρώπης και με το ηλεκτρικό σύστημα μεταφοράς ενέργειας της Βόρειας Αφρικής, μέσω μίας σχετικά αδύναμης AC υποθαλάσσιας διασύνδεσης. Τελικά, το 2008 μετά τη συνένωσή του με τους αντίστοιχους οργανισμούς ATSOI (Association of the Transmission System Operators of Ireland), BALTSO (Baltic Transmission System Operators), ETSO (European Transmission System Operators), NORDEL (Association of TSOs from Norway, Finland, Denmark, Sweden and Iceland) και UKTSOA (UK Transmission System Operators Association) προέκυψε ένας ενιαίος ευρωπαϊκός οργανισμός η ENTSOE (European Network of Transmission System Operators of Electricity).

Στις 28 Ιουνίου του 2010, εκδόθηκε από την ENTSO-E μία μελέτη που αφορά έναν δεκαετή σχεδιασμό της ανάπτυξης του δικτύου της Ευρώπης. Κύριοι στόχοι του προγράμματος αυτού είναι:

- Υλοποίηση της ενεργειακής πολιτικής που ακολουθεί η ΕΕ, απελευθέρωση της αγοράς ενέργειας και σύνδεση μεγάλων ποσοτήτων ΑΠΕ στο κεντρικό δίκτυο μεταφοράς ενέργειας, διατηρώντας το υψηλό επίπεδο ασφάλειας του συστήματος.
- Αντιμετώπιση μεγάλου αριθμού προβλημάτων, που μπορεί να προέρχονται από την περιπλοκότητα και την ιδιαιτερότητα των νομικών συστημάτων των χωρών που συμμετέχουν στο πρόγραμμα, και τα οποία μπορεί να καθυστερήσουν την υλοποίησή του.
- Διασφάλιση των οικονομικών πόρων που απαιτούνται για την επίτευξη της αναμενόμενης προόδου του προγράμματος μέσα στο προσχεδιασμένο χρονικό διάστημα.

Το σημερινό ευρωπαϊκό ηλεκτρικό δίκτυο αποτελείται από επτά κύρια σύγχρονα συνδεδεμένα υποσυστήματα, πέντε εκ των οποίων είναι διασυνδεδεμένα μεταξύ τους και μπορούν να ανταλλάξουν ενέργεια μέσω μίας ή περισσότερων HVDC διασυνδέσεων, ενώ τα άλλα δύο υποσυστήματα (της Ιρλανδίας και της Κύπρου) είναι απομονωμένα. Ένα από τα σημαντικά προγράμματα που βρίσκεται στο τελικό στάδιο μελέτης είναι η διασύνδεση της Τουρκίας στο ηπειρωτικό σύστημα μεταφοράς ενέργειας της Ευρώπης, μέσω τριών DC γραμμών 400kV, εκ των οποίων η μία θα διέρχεται από της Ελλάδα και οι άλλες δύο από τη Βουλγαρία. Η διασύνδεση αυτή θα βοηθήσει την επέκταση του συστήματος στην Τουρκία, καθώς και την προσαρμογή νέων θερμικών και αιολικών σταθμών παραγωγής ενέργειας στην περιοχή. Επιπλέον, ο σχεδιασμός αυτής της διασύνδεσης δημιούργησε και την ανάγκη επέκτασης του δικτύου των 400kV στην περιοχή της Β.Ελλάδας και της νοτιοανατολικής Βουλγαρίας.



7.5 Ρωσία

Η Ρωσία ως πρωτοπόρος στη χρήση των HVDC διασυνδέσεων, αποτελείται από έναν ικανοποιητικό αριθμό διασυνδέσεων σε όλη την έκτασή της. Κάποιες από αυτές αναφέρονται παρακάτω

7.5.1 Διασύνδεση Ρωσία-Ιαπωνία

Οι βασικοί λόγοι για τους οποίους δημιουργήθηκε η διασύνδεση Ρωσίας Ιαπωνίας δίνονται παρακάτω.

Από την πλευρά της Ιαπωνίας:

- Οι προβλέψεις για μία μεγάλη αύξηση της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας.
- Η ύπαρξη πολλών ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και η δυνατότητα εκμετάλλευσής τους.
- Η μείωση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα.

Από την πλευρά της Ρωσίας:

- Η ανάπτυξη της οικονομίας και των υποδομών της περιοχής, συμπεριλαμβανομένης και της δημιουργίας νέων θέσεων εργασίας
- Σταθερή εισροή ισχυρού συναλλάγματος στα κρατικά έσοδα.
- Ενίσχυση της αξιοπιστίας της προσφοράς ηλεκτρικής ενέργειας στους καταναλωτές στο νησί Sakhalin.
- Βελτίωση της δομής των εξαγωγών της Ρωσίας.

Από την πλευρά και των δύο χωρών:

- Αμοιβαία βοήθεια σε περιπτώσεις έκτακτης ανάγκης.
- Ανάπτυξη και εφαρμογή των νέων τεχνολογικών επιτευγμάτων στη παραγωγή νέου εξοπλισμού και σε συστήματα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας σε μεγάλες αποστάσεις.

Το πρώτο στάδιο σχεδιασμού της διασύνδεσης αυτής περιελάμβανε τη σύνδεση του θερμικού σταθμού συνδυασμένου κύκλου στο νησί Sakhalin, με τα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας του Honshu και Hokkaido.

Το δεύτερο στάδιο σχεδιασμού της διασύνδεσης περιλαμβάνει ένα πολυτεματικό σύστημα, που ξεκινάει από διάφορους θερμικούς σταθμούς στις εκβολές του ποταμού Λένα και καταλήγει στην Ιαπωνία δια μέσου του νησιού Sakhalin, με μία ενδιάμεση σύνδεση στο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας του Khabarovsk

7.5.2 Διασύνδεση Ρωσία-Κίνα

Ο παρακάτω χάρτης δείχνει την HVDC γραμμή διασύνδεσης που ξεκινάει από τον ποταμό Angara, μέσω της Μογγολίας και καταλήγει στην Κίνα, κοντά στο Πεκίνο. Σε αυτό το μέρος της Ρωσίας υπάρχουν αρκετοί και μεγάλοι θερμοκοί σταθμοί, γεγονός που κάνει τη διασύνδεση αυτή ικανή να μπορεί να προμηθεύει την Βόρεια Κίνα με σχετικά φθηνή ενέργεια, χωρίς όμως να επηρεάζεται και από πιθανά σφάλματα που μπορεί να προκύπτουν στο κινέζικο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας. Η μεταφορική ικανότητα της διασύνδεσης είναι 3000MW σε επίπεδο τάσης $\pm 600\text{kV}$.

7.5.3 Διασύνδεση της Σιβηρίας με την Ανατολική Ρωσία

Η διασύνδεση αυτή είναι γνωστή και ως “HVDC Bus”. Αρχικά είχε ξεκινήσει σαν ένας τρόπος υλοποίησης της ιδέας διασύνδεσης του Ειρηνικού με τον Ατλαντικό Ωκεανό, στην πορεία όμως περιορίστηκε σαν μία διασύνδεση συγκέντρωσης και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας.

Ισχύς της τάξεως των 15-20GW συγκεντρώνεται από την περιοχή Tugurskaya, η οποία στη συνέχεια μπορεί να προμηθεύσει καταναλωτές στην Ανατολική Ρωσία και σε άλλες χώρες γειτονικές. Η διασύνδεση αποτελείται από δύο διπολικές HVDC γραμμές μεταφοράς στα $\pm 750\text{kV}$, οι οποίες καλύπτουν απόσταση 2500km.

7.6 Αμερική

Στην περίπτωση της ηπείρου της Αμερικής συναντάμε αρκετές διασυνδέσεις οι οποίες παρουσιάζουν ενδιαφέρον τόσο για τα κατασκευαστικά τους χαρακτηριστικά, όσο και τους λόγους κατασκευής τους



7.6.1 Βόρεια Αμερική

Η Β.Αμερική είναι χωρισμένη σε διάφορα μεγάλα διασυνδεδεμένα συστήματα που μπορεί να λειτουργούν ασύγχρονα. Στο εσωτερικό τους αυτά τα συστήματα μπορούν να συνδέονται κυρίως με back-to-back διασυνδέσεις, με HVDC γραμμές μεταφοράς.

Επιπλέον, αυτά τα μεγάλα συστήματα συνδέονται μεταξύ τους είτε με απλές HVDC διασυνδέσεις, είτε με υβριδικές. Σημαντικό είναι να αναφερθεί το blackout που σημειώθηκε το 2003 στις ΗΠΑ και τον Καναδά και περιορίστηκε στις σύγχρονες περιοχές μόνο, ενώ το δίκτυο Κεμπέκ/Καναδά, που ήταν συνδεδεμένο με τα γειτονικά συστήματα μέσω υβριδικής HVDC διασύνδεσης, δεν επηρεάστηκε.

7.6.2 Διασύνδεση Hydro Quibec $\pm 450\text{kV}$ HVDC

Από τις πιο σημαντικές HVDC διασυνδέσεις που υπάρχουν στην περιοχή της Β.Αμερικής είναι αυτή μεταξύ του Quibec και της New England, η οποία ξεκίνησε από ένα πεντα-

τερματικό σύστημα και εξελίχθηκε σε ένα σύστημα, το οποίο μπορεί να λειτουργήσει είτε με τρία τερματικά, είτε με δύο ξεχωριστά συστήματα των δύο τερματικών το καθένα.

Βασικός στόχος αυτής της διασύνδεσης είναι να παρέχει μία ασύγχρονη διασύνδεση, μεταφορικής ικανότητας 2000MW, μεταξύ του σταθμού Radison στο υδροηλεκτρικό σύμπλεγμα του James Bay στο North Quibec και του σταθμού Sandy Pond στη New England. Η διασύνδεση διέρχεται επίσης από τον ενδιάμεσο σταθμό του Nicolet στο Quibec και το μήκος της γραμμής μεταφοράς φτάνει τα 1200km, η οποία είναι κυρίως εναέρια εκτός από ένα μικρό τμήμα της που διασχίζει τον ποταμό St-Lawrence και υποθαλάσσιο καλώδιο. Η διασύνδεση τέθηκε σε λειτουργία το 1990.

7.6.3 Διασύνδεση Nelson River $\pm 500\text{kV}$ HVDC

Η διασύνδεση του Nelson River στον Καναδά, έχει ως σκοπό τη μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας από τους υδροηλεκτρικούς σταθμούς που βρίσκονται στην περιοχή του Nelson River, στην πόλη Winnipeg, καλύπτοντας απόσταση 900km. Η HVDC διασύνδεση αποτελείται από δύο διπολικές διασυνδέσεις.

Το Δίπολο 1 χρησιμοποιεί mercury-arc valves, με ονομαστικά στοιχεία 1688MW, $\pm 463.5\text{kV}$, 1800A και τέθηκε σε λειτουργία το 1977. Το Δίπολο 2 αντίστοιχα χρησιμοποιεί thyristor valves, με ονομαστικά στοιχεία 1800MW, $\pm 500\text{kV}$, 1800A. Η αρχική τάση λειτουργίας του ήταν στα $\pm 250\text{kV}$ το 1978, ενώ η λειτουργία στην πλήρη ονομαστική του ισχύ ξεκίνησε το 1985. Οι αρχικές mercury-arc valves που χρησιμοποιήθηκαν στο Δίπολο 1 αντικαταστάθηκαν τελικά με thyristors το 1993.

7.6.4 Νότια Αμερική

Στην περιοχή της Ν.Αμερικής βρίσκεται ίσως η πιο εντυπωσιακή HVDC διασύνδεση στον κόσμο, η σύνδεση Itaipu στη Βραζιλία που σχεδιάστηκε το 1979. Η σύνδεση αυτή έχει μεταφορική ικανότητα 6300MW και τάση λειτουργίας $\pm 600\text{kV}$, που είναι και από τις υψηλότερες στον κόσμο. Ο υδροηλεκτρικός σταθμός Itaipu αποτελεί μία ένωση της Βραζιλίας και της Παραγουάης με συνολική εγκατεστημένη ισχύ 12600MW, το 28% της οποίας μεταφέρεται στη Νοτιοανατολική Βραζιλία. Λόγω της διαφοράς στη συχνότητα στις δύο χώρες, η μισή παραγωγή ενέργειας γίνεται στα 50Hz (Παραγουάη) και η άλλη μισή στα 60Hz (Βραζιλία). Διάφορες μελέτες έδειξαν ότι η βέλτιστη λύση για τη μεταφορά ενέργειας

είναι μία υβριδική λειτουργία του συστήματος. Η μισή από τη μεταφερόμενη ενέργεια θα παράγεται από το σύστημα του υδροηλεκτρικού σταθμού των 60Hz και θα μεταφέρεται μέσω AC γραμμών μεταφοράς, εφόσον το σύστημα της Βραζιλίας είναι στα 60Hz. Η άλλη μισή ποσότητα της μεταφερόμενης ενέργειας θα παράγεται από το σύστημα των 50Hz και θα μεταφέρεται μέσω HVDC γραμμών μεταφοράς, ενώ μία μικρή ποσότητα του συστήματος των 50Hz θα μεταφέρεται στην Παραγουάη. Οι μελέτες επίσης έδειξαν ότι οι βέλτιστες τάσεις για τη μεταφορά ενέργειας είναι τα 750kV AC και τα ± 600 kV DC.

Η HVDC διασύνδεση αποτελείται από δύο διπολικές γραμμές μεταφοράς, η καθεμία μήκους 800km περίπου, οι οποίες ακολουθούν διαφορετικές διαδρομές, που απέχουν μεταξύ τους τουλάχιστον 10km. Το πρώτο στάδιο της διασύνδεσης τέθηκε σε λειτουργία το 1984, ενώ οι τελευταίες εργασίες ολοκληρώθηκαν το Σεπτέμβριο του 1990.

7.7 Ασία

Η Ασία αποτελεί ένα από τα πιο χαρακτηριστικά παραδείγματα ανάπτυξης υβριδικών HVDC διασυνδέσεων. Στην Κίνα και την Ινδία η κατασκευή υβριδικών συστημάτων μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας αποτελεί το κύριο κομμάτι του δικτύου τους.

7.8 Κίνα

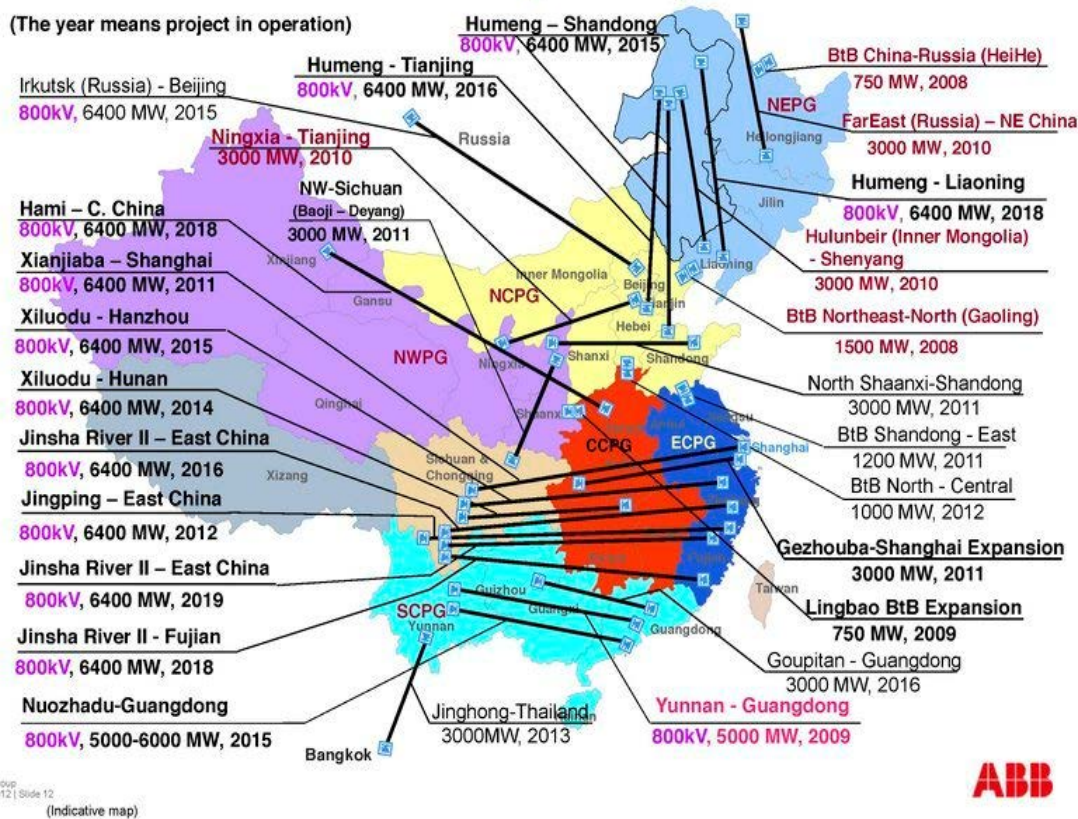
Η Κίνα είναι μια από τις χώρες με την γρηγορότερη αύξηση της ζήτησης σε ηλεκτρική ενέργεια. Τα τελευταία χρόνια αυτή η αύξηση της ζήτησης φτάνει μέχρι και το 230% (από το 1990 μέχρι το 2000 η ζήτηση αυξήθηκε από τα 135GW στα 319GW). Επιπλέον πολλές από τις πηγές ενέργειας της χώρας βρίσκονται σε απομακρυσμένα σημεία, οι υδάτινες σε κεντρικές και νότιες περιοχές, ενώ οι πηγές άνθρακα στο βορρά. Έτσι, λοιπόν, οι μεγάλες αποστάσεις που απαιτούνται να καλυφθούν για τη μεταφορά της ενέργειας, οδήγησαν στη διαμόρφωση επτά επιμέρους μικρότερων ανεξάρτητων ενεργειακών συστημάτων και κάποιων ακόμα μικρότερων τοπικού χαρακτήρα σε μέρη όπου ο πληθυσμός είναι αρκετά μικρός. Αυτός ο τοπικός διαχωρισμός του ενεργειακού συστήματος της Κίνας φαίνεται στον παρακάτω χάρτη.

Τα επτά αυτά υποσυστήματα ενώνονται σε τρία μεγαλύτερα τα οποία είναι τα εξής

- Το Βόρειο δίκτυο
- Το Κεντρικό δίκτυο και
- Το Νότιο δίκτυο.

Επίσης, το Βόρειο δίκτυο συνδέεται μέσω HVDC και με το ρωσικό δίκτυο μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας, ενώ το νότιο με το σύστημα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας της Ταυλάνδης

Planned Future HVDC Projects by 2020 in China









Μία από τις βασικές διασυνδέσεις που υπάρχουν στην Κίνα σήμερα είναι το διπολικό HVDC σύστημα Gui-Guang με ικανότητα μεταφοράς ισχύος 3000MW στα±500kV και σε απόσταση 980km, το οποίο κατασκευάστηκε για την ενίσχυση της μεταφερόμενης ισχύος από τη δύση στην ανατολή. Το σύστημα αυτό είναι ενσωματωμένο στο υπάρχον AC δίκτυο, ενώ μαζί με αυτό υπάρχει και ένα ακόμα HVDC σύστημα, το Tian-Guang, που βρίσκεται

ήδη σε λειτουργία. Τα δύο αυτά συστήματα πρέπει να τονίσουμε ότι λειτουργούν παράλληλα με το AC δίκτυο.

Λόγω των μεγάλων αποστάσεων μεταφοράς, το AC δίκτυο υποβάλλεται σε πολύ μεγάλες διαταραχές μετά από σφάλματα, κοντά στα όρια σταθερότητάς του. Η ύπαρξη όμως, των δύο HVDC διασυνδέσεων προσφέρει μία αυξημένη προστασία της σταθερότητάς του. Επιπροσθέτως, μετά από αδειοδότηση κατασκευής και μιας τρίτης HVDC γραμμής στην ίδια περιοχή, θα μπορούν να μεταφέρονται επιπλέον 3000MW από τους υδροηλεκτρικούς και τους θερμικούς σταθμούς της Δυτικής Κίνας σε απόσταση 1225km, στα αστικά και βιομηχανικά κέντρα του Guangdong

Παρακάτω παρουσιάζεται πίνακας με το σύνολο των έργων παγκοσμίως.

Name	Converter Station 1	Converter Station 2	Total Length (Cable/Pole) (Km)	Volt (kV)	Power (MW)	Year	Type
Cahora Bassa	Mozambique - Songo  15°36'41"S 32°44'59"E	South Africa - Apollo  25°55'11"S 28°16'34"E	1420 (0/1420)	533	1920	1979	Thyr
Inga-Shaba	Democratic Republic of Congo - Kolwezi  10°39'27"S 25°27'08"E	Democratic Republic of Congo - Inga  05°31'27"S 13°36'39"E	1700 (0/1700)	500	560	1982	Thyr
Caprivi Link	Namibia - Gerus  20°18'53"S 16°27'9"E	Namibia - Zambezi  17°30'6"S 24°13'20"E	950 (950/0)	350	300	2010	IGBT

Name	Converter		Total Length (Cable/Pole) (km)	Volt (kV)	Power (MW)	Year	Type
	station 1	station 2					
Ballia - Bhiwadi	India - Ballia  26°04'16"N83°42'48"E	India - Bhiwadi  28°11'0"N 76°48'58"E	800 (0/800)	500	2500	2010	Thyr
Xiangjiaba-Shanghai	China - Fulong  28°32'47"N104°25'04"E	China - Fengxia  30°55'32"N121°46'16"E	1980 (0/1980)	800	6400	2010	Thyr
Yunnan - Guangdong	China - Yunnan province	China - Zengcheng  23°15'19"N113°40'44"E	1418 (0/1418)	800	5000	2010	Thyr
Qinghai - Tibet	China - Geermu  36°21'20"N95°11'05"E	China - Lhasa  29°52'39"N91°11'44"E	1038 (0/1038)	400	1500	Scheduled 2012	Thyr
Ningdong - Shangdong	China - Yinchuan  38°06'56"N106°30'55"E	China - Qingdao  36°18'41"N119°52'53"E	1335 (0/1335)	660	4000	2011	Thyr
Ningxia - Tianjing	China - Ningxia	China - Tianjing			3000	2010	Thyr
Baoji - Denyang	China - Baoji	China - Denyang  31°19'22"N104°34'51"E		500	3000	2010	Thyr
Qinghai - Tibet	China - Geermu	China - Lhasa	1038 (0/1038)	400	1500	Scheduled 2012	Thyr
Hulunbeir - Liaoning	China - Hulunbeir  48°31'04"N119°43'30"E	China - Shenyang  41°07'25"N122°46'44"E	920 (0/920)	500	3000	2010	Thyr
North Shaanxi - Shandong	China	China			3000	2011	Thyr
Hubei - Shanghai	China - Jingmen  30°49'21"N112°07'15"E	China - Fenjing  30°52'00"N121°00'58"E	970 (0/970)	500	3000	2011	Thyr
Sumatera - Java	Indonesia - Java	Indonesia - Sumatera	700 (700/0)	500	3000	Under construction	Thyr
Jindo - Jeju	Korea- Jeju	Korea - Jindo	105 (105/0)	250	400	2011	Thyr
Nanhui Wind Farm Integration	China	China	8.4 (8.4/0)	30	18	2011	IGBT
Jinping - Sunan	China	China	2090 (0/2090)	800	7200	2013	Thyr
Mundra - Haryana	India - Mundra  22°49'46"N69°33'22"E	India - Mohindergarh  28°21'40"N76°12'56"E	960 (0/960)	500	2500	Under construction 2012	Thyr
Xiluodo - Guangdong	China - Zhaotong	China - Conghua	1286 (0/1286)	500	6400	2013	Thyr
Jinhong - Thailand	China	Thailand			3000	2013	Thyr
Dalian City Infeed	China - Dalian North	China - Dalian South	43 (43/0)	320	1000	2013?	Thy
Xiluodo - Hunan	China	China		800	6400	2014?	Thyr
North-East Agra	India - Agra  27°05'01"N78°04'22"E	India - Biswanath	1728 (0/1728)	800	6000	Planned commissioning	Thyr
Naoao Multi-terminal VSC HVDC	China	China	32 (10/32)	+/-160	200/100/50	2013	IEGT/IGBT
Zhoushan Multi-terminal DC	China	China	134 (134/0)	200	400	?	IGBT
Humeng - Shandong	China	China		800	6400	2015	Thyr
Xiluodo - Hanzhou	China	China		800	6400	2015	Thyr








Name	Converter		Total Length (Cable/Pole) (km)	Volt (kV)	Power (MW)	Year	Type
	station 1	station 2					
Ballia - Bhiwadi	India - Ballia  26°04'16"N83°42'48"E	India - Bhiwadi  28°11'0"N 76°48'58"E	800 (0/800)	500	2500	2010	Thyr
Xiangjiaba-Shanghai	China - Fulong  28°32'47"N104°25'04"E	China - Fengxia  30°55'32"N121°46'16"E	1980 (0/1980)	800	6400	2010	Thyr
Yunnan - Guangdong	China - Yunnan province	China - Zengcheng  23°15'19"N113°40'44"E	1418 (0/1418)	800	5000	2010	Thyr
Qinghai - Tibet	China - Geermu  36°21'20"N95°11'05"E	China - Lhasa  29°52'39"N91°11'44"E	1038 (0/1038)	400	1500	Scheduled 2012	Thyr
Ningdong - Shangdong	China - Yinchuan  38°06'56"N106°30'55"E	China - Qingdao  36°18'41"N119°52'53"E	1335 (0/1335)	660	4000	2011	Thyr
Ningxia - Tianjing	China - Ningxia	China - Tianjing			3000	2010	Thyr
Baoji - Denyang	China - Baoji	China - Denyang  31°19'22"N104°34'51"E		500	3000	2010	Thyr
Qinghai - Tibet	China - Geermu	China - Lhasa	1038 (0/1038)	400	1500	Scheduled 2012	Thyr
Hulunbeir - Liaoning	China - Hulunbeir  48°31'04"N119°43'30"E	China - Shenyang  41°07'25"N122°46'44"E	920 (0/920)	500	3000	2010	Thyr
North Shaanxi - Shandong	China	China			3000	2011	Thyr
Hubei - Shanghai	China - Jingmen  30°49'21"N112°07'15"E	China - Fenjing  30°52'00"N121°00'58"E	970 (0/970)	500	3000	2011	Thyr
Sumatera - Java	Indonesia - Java	Indonesia - Sumatera	700 (700/0)	500	3000	Under construction	Thyr
Jindo - Jeju	Korea- Jeju	Korea - Jindo	105 (105/0)	250	400	2011	Thyr
Nanhui Wind Farm Integration	China	China	8.4 (8.4/0)	30	18	2011	IGBT
Jinping - Sunan	China	China	2090 (0/2090)	800	7200	2013	Thyr
Mundra - Haryana	India - Mundra  22°49'46"N69°33'22"E	India -  Mohindergarh 28°21'40"N76°12'56"E	960 (0/960)	500	2500	Under construction 2012	Thyr
Xiluodo - Guangdong	China - Zhaotong	China - Conghua	1286 (0/1286)	500	6400	2013	Thyr
Jinhong - Thailand	China	Thailand			3000	2013	Thyr
Dalian City Infeed	China - Dalian North	China - Dalian South	43 (43/0)	320	1000	2013?	Thy
Xiluodo - Hunan	China	China		800	6400	2014?	Thyr
North-East Agra	India - Agra  27°05'01"N78°04'22"E	India - Biswanath	1728 (0/1728)	800	6000	Planned commissioning	Thyr
Naoao Multi-terminal VSC HVDC	China	China	32 (10/32)	+/-160	200/100/50	2013	IEGT/IGBT
Zhoushan Multi-terminal DC	China	China	134 (134/0)	200	400	?	IGBT
Humeng - Shandong	China	China		800	6400	2015	Thyr
Xiluodo - Hanzhou	China	China		800	6400	2015	Thyr

Name	Converter station 1	Converter station 2	Total Length (Cable/Pole) (km)	Volt (kV)	Power (MW)	Year	Type
Irkutsk - Beijing	Russia - Irkutsk	China - Beijing		800	6400	2015	Thyr
Nuozhadu - Guangdong	China	China		800	6400	2015	Thyr
Jinsha River II - East China	China	China		800	6400	2016	Thyr
Goupitan - Guangdong	China	China			3000	2016	Thyr
Humeng - Liaoning	China	China		800	6400	2018	Thyr
Hami - Central	China	China		800	6400	2018	Thyr
Jinsha River II -	China	China		800	6400	2018	Thyr
Humeng - Liaoning	China	China		800	6400	2018	Thyr
Bakun HVDC	Malaysia - Similajau	Malaysia - Bentong	1700 (670/1030)	500	?	?	Thyr
Shanghai - Shensi	Shanghai - China	Shensi - China	123 (63/60)	50	?	?	Thyr

Name	Converter station 1	Converter station 2	Cable (km)	Overhead	Volt (kV)	Power (MW)	Year	Ref
Miesbach-Munich Power	Germany - Miesbach	Germany - Munich		58	2	0.0025	1882	
Gorzente River - Genoa DC transmission	Italy - Gorzente River	Italy - Genoa	?	?	6	?	1889	
La Chaux-de-Fonds DC transmission scheme	Switzerland - ?	Switzerland - ?	?	?	14	?	1897	
St. Maurice - Lausanne DC transmission	Switzerland - St. Maurice	Switzerland - Lausanne	?	?	22	3.7	1899	
Lyon-Moutiers DC transmission scheme	France - Lyon	France - Moutiers	10	190	±75	30	1906	
Wilesden-Ironbridge DC transmission scheme	UK - Wilesden	UK - Ironbridge	22.5	?	100	?	1910	
Chambéry DC transmission scheme	France - ?	France - ?	?	?	150	?	1925	
HVDC Zurich-Wettingen	Switzerland - Wettingen 47°27'25"N 8°19'1"	Switzerland - Zurich		20	50	0.5	1939	
HVDC Charlottenburg-Lehrte-Misburg	Germany - Berlin-Moabit	Germany - Berlin-Charlottenburg		4.6	100	14	1942	
Lehrte-Misburg HVDC	Germany - Lehrte 52°22'54"N 9°55'03"E	Germany - Hannover/Misburg	?		80	16	1944	
Elbe-Project	Germany, Vockerode 51°50'40"N 12°21'50"E	Germany - Berlin, Marienfelde 52°25'49"N 13°22'42"E	115	0	200	60	1945	
HVDC Trollhattan-Merud	Sweden - Trollhattan	Sweden - Merud		50	45	6.5	1946	
Moscow-Kashira	Russia - Moscow 55°39'32"N 37°38'16"	Russia - Kashira	100		200	30	1951	[1]

Name	Converter station 1	Converter station 2	Cable (km)	Overhead	Volt (kV)	Power (MW)	Year
Tjæreborg	 Denmark - Tjæreborg/Enge 55°26'52"N 8°35'34"E	 Denmark - Tjæreborg/Substation 55°28'07"N 8°3'36"E	4.3		9	7	2000
Italy-Greece	 Greece - Arachthos 39°11'00"N 20°57'48"E	 Italy - Galatina 40°9'53"N 18°7'49"E	200	110	400	500	2001
Moyle	 UK - Auchencrosh 55°04'10"N 4°58'50"W	 UK - N. Ireland - Ballycronan More 54°50'34"N 5°46'11"W	63.5		250	250	2001
HVDC Troll	 Norway - Kollsnes 60°33'01"N 4°50'26"E	 Norway - Offshore platform Troll A 60°40'00"N 3°40'00"E	70		60	80	2004
Estlink	 Estonia - Harku 59°23'5"N 24°33'37"E	 Finland - Espoo 60°12'14"N 24°33'06"E	105		150	350	2006
NorNed	 Netherlands - Eemshaven 53°26'4"N 6°51'57"E	 Norway - Feda 58°16'58"N 6°51'55"E	580		450	700	2008
SAPEI	 Italy - Latina 41°25'47"N 12°48'25"E	 Italy - Fiume Santo 40°50'29"N 8°18'21"E	440		500	1000	2009*
NordE.ON 1	 Germany - Diele 53°7'31"N 7°18'33"E	 Germany - Borkum 2 platform 54°21'15"N 6°01'30"E	203		150	400	2009
HVDC Valhall	 Norway - Lista 58°04'37"N 6°46'29"E	Norway - Valhall, Offshore platform	292		150	78	2009
BritNed	 UK - Grain 51°26'24"N 0°43'0"E	 Netherlands - Maasvlakte 51°57'27"N 4°01'17"E	245		450	1000	2010*
Storebælt	 Denmark - Fraugde 55°22'01"N 10°30'25"E	 Denmark - Herslev 55°31'53"N 11°19'01"E	56		400	600	2010*
Cometa	 Spain - Morvedre 39°38'28"N 0°14'7"W	 Spain - Santa Ponsa 39°32'2"N 2°30'21"E	247		250	400	2011*
Fenno-Skan 2	 Finland - Rauma 61°09'07"N 21°37'32"E	 Sweden - Finnbole 60°25'30"N 17°3'42"E	200	103	500	800	2011
HVDC BorWin2	 Germany - Diele 53°7'30"N 7°18'29"E	 Germany - BorWin Beta platform 54°21'18"N 6°01'30"E	200		300	800	2012
East West Interconnector	 Ireland - Woodland 53°28'16"N 6°34'3"W	 UK - Shotton, Wales 53°13'38"N 3°4'22"W	130			500	2012
HVDC DolWin1	 Germany - Heede 52°58'57"N 7°15'26"E	 Germany - DolWin Alpha platform 53°59'42"N 6°25'16"E	165		320	800	2013
HVDC HelWin1	 Germany - Büttel 53°55'01"N 9°13'55"E	 Germany - HelWin Alpha platform 54°27'07"N 7°44'20"E	130		250	576	2013
Fenno-Skan 1 Upgrade	Sweden - Finnbole	Finland - Rauma	200 km	33 km	±400 kV	500	2013
HVDC SylWin1	 Germany - Büttel 53°55'01"N 9°13'55"E	 Germany - SylWin Alpha platform 55°03'47"N 7°14'28"E	205		320	864	2014
Estlink 2	 Estonia - Püssi 59°22'13"N 27°04'05"E	 Finland - Anttila 60°22'36"N 25°22'01"E	157	14	450	650	2014
INELFE	 France - Baixas 42°43'56"N 2°48'14"E	 Spain - Santa Llogaia 42°13'59"N 2°56'39"E	64		±320	2000	2014

Name	Converter station 1	Converter station 2	Cable (km)	Overhead	Volt (kV)	Power (MW)	Year
Gotland 1	 Sweden - Västervik 57°43'41"N 16°38'51"E	 Sweden - Yigne 57°35'13"N 18°11'44"E	98		200	20	1954
Cross-Channel	 France - Echingen 50°41'48"N 1°38'21"E	 UK - Lydd 50°54'54"N 0°56'50"E	64		100	160	1961
Volgograd-Donbass	 Russia - Volzhskaya 48°49'34"N 44°40'20"E	 Ukraine - Mikhailovskaya 48°39'13"N 38°33'56"E		475	400	750	1964
Konti-Skan 1	 Denmark - Vester Hassing 57°3'46"N 10°5'24"E	 Sweden - Stenkullen 57°48'15"N 12°19'13"E	87	89	250	250	1965
SACO1	 Italy - Suvereto 43°3'10"N 10°41'42"E (before 1992: Italy - San Dalmazio 43°15'43"N 10°55'05"E)	 France- Lucciana 42°31'40"N 9°26'59"E ; Codrongianos, Italy 40°39'7"N 8°42'48"E	365	118	200	200	1965
Kingsnorth	 UK - Kingsnorth 51°25'11"N 0°35'46"W	 UK - London- Beddington 51°22'23"N 0°7'38"W	85		266	320	1975
Kingsnorth	UK - Kingsnorth	 UK - London- Willesden 51°32'03"N 0°15'29"W	111		-266	320	1975
Cross-Skagerrak 1+2	 Denmark - Tjele 56°28'44"N 9°34'1"E	 Norway - Kristiansand 58°15'36"N 7°53'55"E	130	100	250	500	1977
Gotland 2	 Sweden - Västervik 57°43'41"N 16°38'51"E	 Sweden - Yigne 57°35'13"N 18°11'44"E	92.9	6.6	150	130	1983
Cross-Channel (new)	 France - Les Mandarins 50°54'11"N 1°47'5"E	 UK - Sellindge 51°6'21"N 0°58'32"E	72		270	2000	1986
Gotland 3	 Sweden - Västervik 57°43'41"N 16°38'51"E	 Sweden - Yigne 57°35'13"N 18°11'44"E	98		150	130	1987
Konti-Skan 2	 Denmark - Vester, Hassing 57°3'46"N 10°5'24"E	 Sweden - Lindome 57°36'24"N 12°6'40"E	87	60	285	300	1988
Fenno-Skan	 Finland - Rauma 61°09'07"N 21°37'32"E	 Sweden - Dannebo 60°24'14"N 18°08'10"E	200	33	400	500	1989
SACO2	 Italy - Suvereto 43°3'10"N 10°41'42"E (before 1992: Italy - San Dalmazio 43°15'43"N 10°55'05"E)	 France- Lucciana 42°31'40"N 9°26'59"E ; Codrongianos, Italy 40°39'7"N 8°42'48"E	118	304	200	300	1992
Cross-Skagerrak 3	 Denmark - Tjele 56°28'44"N 9°34'1"E	 Norway - Kristiansand 58°15'36"N 7°53'55"E	130	100	350	500	1993
Baltic Cable	 Germany - Lübeck- Herrenwyk 53°53'46"N 10°48'9"E	 Sweden - Kruseberg 55°30'1"N 13°8'45"E	250	12	450	600	1994
Kontek	 Denmark - Bjæverskov 55°27'1"N 12°0'27"E	 Germany - Bentwisch 54°6'3"N 12°13'1"E	170		400	600	1996
Hellsjön-Grängesberg	 Sweden - Hellsjön 60°02'50"N 15°08'52"E	 Sweden - Grängesberg 60°03'53"N 14°59'39"E		10	180	3	1997
Visby-Nas	 Sweden - Nas 57°05'58"N 18°14'27"E	 Sweden - Visby 57°37'29"N 18°21'18"E	70		80	50	1999
SwePol	 Poland - Wierzbiecin 54°30'8"N 16°53'28"E	 Sweden - Störnö 56°9'11"N 14°50'29"E	245	0	450	600	2000

Name	Converter station 1	Converter station 2	Total Length (Cable/Pole) (km)	Volt (kV)	Power (MW)	Year	Type
Skagerrak 4	Norway - Kristiansand	Denmark - Tjele	244		±500 kV	700	2014
SydVästlänken	Norway–Hallsberg	Sweden - Barkeryd ; Sweden - Hurva	197	63	300	2x720	2013-2015
LitPol Link	Lithuania - Alytus	Poland - Elk		160	±70 kV	500	2015
Åland - Finland	Åland - Ytterby	Finland - Nådendal	158		±80 kV	100	2015
Troll A 3&4	Norway - Kollsnes	Norway - Troll A 3&4 platform	4x70 km		±66 kV	100	2015
Western HVDC Link	UK - Hunterston	UK - Connah's Quay	414		600	2000	2015
HVDC NordBalt	 Sweden - Nybro 56°46'1"N 15°51'35"E	 Lithuania - Klapeida 55°40'54"N 21°15'29"E	450		300	700	2015
HVDC DolWin2	 Germany - Heede 52°58'52"N 7°15'26"E	 Germany - DolWin Bets platform 53°58'41"N 6°55'23"E	135		320	900	2015
HVDC HelWin2	 Germany - Büttel 53°55'01"N 9°13'55"E	 Germany - HelWin Beta platform 54°27'11"N 7°44'20"E	130		320	690	2015
HVDC Finland - Åland	Finland - Ytterby	 Finland - Nådendal 60°27'49"N 22°03'49"E	158		±80	100	2015
Shetland HVDC Connection	UK - Upper Kergord Valley	UK - Blackhillock	345		?	550	2016
HVDC Italy-Croatia	Italy - Candia	Croatia - Konjsko					2017

Πίνακας 7.1 Παγκόσμιες Διασύνδεσεις

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Koldby, M. Hyttinen, Challenges on the Road to an Offshore HVDC Grid, Nordic Wind Power Conference 2009, Bornholm Denmark 2009
- [2] F. Dijkhuizen, S. Norrga, Large Scale Wind Integration of HVDC, EVER 2011, Monaco, 2011
- [3] P. Jones, L. Stenius, The Challenges of Offshore Power System Construction Troll A, Electrical Power Delivered Successfully to an Oil and Gas Platform in the North Sea, EWEC, 2006
- [4] B. Westman, S Gilje, M Hyttinen, Valhall Re-development Project, Power from Shore, PCIP Europe, 2010
- [5] J. Kreusel, The future is now, ABB Review, pp 40-44, 4/2008
- [6] B. Jacobson, P. Karlsson, G. Asplund, L. Harnefors, T. Jonsson, VSC-HVDC Transmission with Cascaded Two-Level Converters, B4-110, CIGRE 2010
- [7] <http://www.abb.com/hvdc>, search e.g. North East – Agra or Dolwin 1
- [8] M. Callavik, C. Yuen, J. Åhström, HVDC Supergrids for Continental Wide Power Balancing, 10th International Workshop on Large Scale Integration of Wind Power, October 2011
- [9] C. M. Franck, HVDC Circuit Breakers: A Review Identifying Future Research Needs, IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY, VOL. 26, NO. 2, APRIL 2011
- [10] J. Häfner, B. Jacobson, Proactive Hybrid HVDC Breakers - A key innovation for reliable HVDC grids, B4 0264, CIGRE Bologna 2011
- [11] P. Kreutzkamp, J. De Decker, N. Picot, OffshoreGrid: Techno-Economic Model for Future Offshore Electricity Transmission, 10 Int. Workshop on Large Scale Integration of Wind, 2011 <http://atlanticwindconnection.com>
- [12] R. Marquardt, “Modular multilevel converter: a universal concept for HVDC-Networks and extended dc
- [13] bus-applications,” Proc. of IEEE International Power Electronics Conference, IPEC ECCE Asia, Japan, June 2010.
- [14] [2] N. Ahmed, A. Haider, D. Van Hertem, L. Zhang, and H.-P. Nee, “Prospects and challenges of future HVDC

- [15] SuperGrids with modular multilevel converters,” Proc. of EPE 2011, Birmingham, UK, 30 Aug.-1 Sept.2011.
- [16] S. Allebrod, R. Hamerski, and R. Marquardt R, “New transformerless, scalable modular multilevel for HVDC transmission,” Proc. of IEEE Power Electronics SpecialisConference (PESC),Rhodes, Greece, June 15-19, 2008.
- [17] M. Winkelkemper, A. Korn, and P. Steimer, “A modular direct converter for transformerless rail interties,”in Proc. IEEE ISIE, 2010, pp. 562–567.
- [18] L. Ängquist, A. Haider, H.-P. Nee, and H. Jiang, “Open-loop approach to control a modular multilevel frequency converter,” Proc. of EPE 2011, Birmingham, UK, 30 Aug.-1 Sept. 2011.
- [19] M. Hagiwara and H. Akagi, “Control and experiment of pulsewidth-modulated modular multilevel convertes,” IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 24, Issue 7 2009, pp. 1737-1746.
- [20] A. Lesnicar and R. Marquardt, “An innovative modular multilevel converter topology suitable for a wide power range,” Proc. of IEEE PowerTech, Bologna, Italy, June 23-26, 2003.
- [21] A. Hassanpoor, S. Norrga, H.-P. Nee, L. Angquist, "Evaluation of different carrier based PWM methods for modular multilevel converters for HVDC application," IECON 2012 - 38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society , vol., no., pp.388,393, 25-28 Oct. 2012.
- [22] K. Ilves, A. Antonopoulos, S. Norrga, H.-P. Nee, “A new modulation method for the modular multilevel allowing fundamental switching frequency,” International Conference on Power Electronics -ECCE Asia 2011, Jeju, Korea, June 2011.
- [23]
- [24] Bahrman M.P. : “Overview of HVDC transmission”. Power Systems Conference and Exposition, 2006. PSCE '06, 2006 IEEE PES , Oct. 29 2006-Nov. 1 2006 , p.18 - 23, Atlanta, GA.
- [25] Δημουλιάς Χ. : “Σημειώσεις για τις Σύγχρονες Μηχανές”. 2009.
- [26] [Koshcheev L.A. : “Basic principles of interstate electrical power links organization in North-East Asia”. High Voltage Direct Current Power Transmission Resaerch Institute, St-Petersburg. Workshop on Grid Interconnections in Northeast Asia, May 14, 2001.

- [30] Koshcheev L.A. : “Environmental Characteristics of HVDC Overhead Transmission Lines”. 3rd Workshop on Power Grid Interconnection in Northeast Asia, Vladivostok, Russia, September 30-October 3, 2003.
- [31] Larruskain D.M., Zamora I., Mazon A.J., Abarategui O., Monasterio J. : “Transmission and Distribution Networks: AC versus DC”. Department of Electrical Engineering, University of the Basque Country-Bilbao, Spain.
http://www.solarec-egypt.com/resources/Larruskain_HVAC_to_HVDC.pdf
- [32] Williams J.H.:“International Best Practices for Assessing and
- [33] Reducing the Environmental Impacts of High-Voltage Transmission Lines”. 3rd Workshop on Power Grid Interconnection in Northeast Asia, Vladivostok, Russia, September 30-October 3, 2003.
- [34] Limbo B.S. : “Effect of AC/DC line length on the stability of the AC/DC interconnection”. Department of Electrical Engineering, University of Cape Town, 23 October 2006.
- [35] Woodford D.A.:“HVDC Transmission”.1998.
<https://pscad.com/resource/File/Library/BasisPrinciplesofHVDC.pdf>
- [36] Straka V. : “Future of HVDC Power Grid in Europe”. WM0908TU, Technics and Future, Delft University of Technology..
- [37] <http://ocw.tudelft.nl/fileadmin/ocw/courses/TechnicsandFuture/res00013/HVDC.pdf>
- [38] Asplund G., Estrøm U., Wu D. : “Advantage of HVDC transmission at 800kV”. 14th ISH as Keynote Lecture, Beijing, China, August 25-28, 2005.
- [39] Drobik T.:“High-voltage direct current transmission lines”. IEEEConference Publishing ul.Pulaskiego 32/13 ,Poland <http://eeeic.eu/proc/papers/69.pdf>
- [40]] Kondjamba P.A.: “Investigation of the feasibility of HVDC transmission to supply Western Cape”. University of Cape Town, 2006.
- [41] Rudervall R., Charpentier J.P., Sharma R. : “High Voltage Direct Current(HVDC) Transmission Systems Technology Review Paper”.
- [42] http://www.twolf.com/pub/energy/technology_abb.pdf
- [43] Kim C., Sood V.K., Jang G., Lim S., Lee S. : “HVDC Transmission”.
- [44] John Wiley & Sons (Asia)Pte Ltd, 2009.
- [45] Lucas J.R.:“High Voltage Direct Current Transmission”.2001.
- [46] Http://www.elect.mrt.ac.lk/HV_Chap11.pdf.
- [47] Andersen B.R.:“HVDC Transmission- Opportunities andChallenges”. IEEE ACDC Conference 2006, Keynote.

- [48] <http://en.wikipedia.org/wiki/HVDC>
- [49] Asplund G. : “Sustainable energy systems with HVDC transmission”. Power Engineering Society General Meeting, vol. 2, pages 2299-2303.
- [50] IEEE. [www.trec-uk.org.uk/reports/HVDCGunnar Asplund ABB.pdf](http://www.trec-uk.org.uk/reports/HVDCGunnar%20Asplund%20ABB.pdf)..
- [51] Bergdahl B., Dass R. : “AC-DC Harmonic Filters for Three Gorges-Changzhou $\pm 500\text{kV}$ HVDC Project”.[http://www05.abb.com/global/scot/scot221.nsf/veritydisplay/b20a071fd73b9f8ac1256fda004aeabe/\\$File/ICPS01AC-DC.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot221.nsf/veritydisplay/b20a071fd73b9f8ac1256fda004aeabe/$File/ICPS01AC-DC.pdf)
- [52] Lucas J.R. : “High Voltage Direct Current Transmission”.2001.
- [53] [Http://www.elect.mrt.ac.lk/HV_Chap11.pdf](http://www.elect.mrt.ac.lk/HV_Chap11.pdf).
- [54] Li J. : “High Voltage Direct Current Transmission”. Helsinki University of Technology, Master thesis for the degree of Master of Science, Espoo, January 2009.
- [55] Bisewski B., Atmuri R. : “Considerations for the Application of $\pm 800\text{kV}$ HVDC Transmission From a System Perspective”. International Workshop for $\pm 800\text{kV}$ HVDC Systems, February 25-26, 2005, New Delhi.
- [56] Westerweller Th., Price J.J: “Basslink HVDC Interconnector - System Design Considerations”. AC and DC Power Transmission,2006, ACDC 2006. The 8th IEE International Conference on 28-31March 2006 , p.121 – 124
- [57] Steinfeld K., Gøhler R., Pepper D. : “High Voltage Surge Arresters for Protection of Series Compensation and HVDC Converter Stations”. 4th International Conference on Power Transmission and Distribution Technology, 2003.
- [58] Drobik T.:“High-voltage direct current transmission lines”. IEEE Conference Publishing ul.Pulaskiego 32/13, Poland.
- [59] <http://eeeic.eu/proc/papers/69.pdf>
- [60] Asplund G., Carlsson L. : “ABB - from pioneer to world leader”. ABB Review 4/2008, 59-64.
- [61] Litzenberger W. : “A short history of the Pacific HVDC Intertie”. Power Systems Conference and Exposition, 2006. PSCE '06, 2006 IEEE PES, Oct. 29 2006-Nov. 1 2006, p.24 - 27 ,Atlanta, GA.
- [62] Rudervall R., Charpentier J.P., Sharma R. : “High Voltage Direct Current (HVDC) Transmission Systems Technology Review Paper”

ΜΑΙΟΣ-2014