



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

Μοντελοποίηση και Προσομοίωση Διασυνδέσεων HVDC Τοπολογίας Διπόλου

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ Α. ΝΙΚΟΛΑΚΟΠΟΥΛΟΣ

Επιβλέπων Καθηγητής
Σταύρος Παπαθανασίου

Αθήνα, Ιούνιος 2018



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

Μοντελοποίηση και Προσομοίωση Διασυνδέσεων HVDC Τοπολογίας Διπόλου

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ Α. ΝΙΚΟΛΑΚΟΠΟΥΛΟΣ

Επιβλέπων: Σταύρος Παπαθανασίου
Καθηγητής ΕΜΠ

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 8^η Ιουνίου 2018

.....
Σταύρος Παπαθανασίου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Κωνσταντίνος Βουρνάς
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Πάυλος Γεωργιλάκης
Επικουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούνιος 2018

.....
Νικολακόπουλος Βασίλειος

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

Copyright © Βασίλειος Νικολακόπουλος, 2018.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

Περίληψη

Η τεχνολογία μεταφοράς ενέργειας με συστήματα Υψηλής Τάσης Συνεχούς Ρεύματος (HVDC) είναι πλέον η πιο διαδεδομένη και δόκιμη λύση για εφαρμογές υψηλής μεταφορικής ικανότητας, διασύνδεσης απομακρυσμένων ή ασύγχρονων συστημάτων, υπεράκτιων αιολικών πάρκων, νησιών κ.ά. Ο λόγος επικράτησης της τεχνολογίας HVDC οφείλεται στο γεγονός ότι υπερτερεί σημαντικά της αντίστοιχης τεχνολογίας εναλλασσόμενου ρεύματος (HVAC), όταν πρόκειται για τις παραπάνω εφαρμογές, λόγω των μειωμένων απωλειών, της ευελιξίας ελέγχου που παρουσιάζει, αλλά κυρίως λόγω του ότι αίρει τον περιορισμό ως προς τη μέγιστη απόσταση μεταφοράς που γενικά ισχύει στα HVAC συστήματα.

Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας πραγματοποιείται αναλυτική παρουσίαση της τεχνολογίας HVDC και των διαφόρων παραλλαγών που αυτή παρουσιάζει, με έμφαση στην ανάδειξη των πλεονεκτημάτων και των μειονεκτημάτων της. Παράλληλα γίνεται αναφορά και στην τεχνολογία μετατροπών πολλαπλών επιπέδων, με έμφαση στους μετατροπείς πολλαπλών επιπέδων με χρήση υπομονάδων (MMC), και στις διάφορες μεθόδους ελέγχου τέτοιων μετατροπών, τόσο σε επίπεδο παλμοδότησης, όσο και σε επίπεδο ελέγχου του μετατροπέα πάνω σε ένα AC δίκτυο.

Αφού έχει παρουσιαστεί το απαραίτητο θεωρητικό υπόβαθρο της τεχνολογίας HVDC, υλοποιείται μια ακτινική HVDC διασύνδεση τοπολογίας διπόλου, που δομείται με βάση πολυεπίπεδους μετατροπείς πηγής τάσης με χρήση υπομονάδων (MMC-VSC). Αν και ένα τέτοιο μοντέλο είναι γενικό και θα μπορούσε να εφαρμοστεί οπουδήποτε, ως παράδειγμα εφαρμογής για την επιλογή παραμέτρων της διασύνδεσης επιλέγεται η διασύνδεση της Κρήτης.

Σκοπός της μελέτης είναι η εξέταση της αδιάλειπτης λειτουργίας του διασυνδεδεμένου συστήματος σε συνθήκες σφάλματος, όπως υπαγορεύουν οι διεθνείς κώδικες συστήματος, αλλά και η ικανοποίηση του κριτηρίου αξιοπιστίας N-1 σε καταστάσεις σφάλματος, ή απώλειας τμημάτων του συστήματος.

Για την αξιολόγηση του συστήματος πραγματοποιήθηκαν προσομοιώσεις στο λογισμικό MATLAB/Simulink, χρησιμοποιώντας πλήρη διακοπτικά μοντέλα για τους μετατροπείς.

Λέξεις Κλειδιά:

HVDC, τοπολογία διπόλου, μετατροπέας τύπου πηγής τάσης (VSC), πολυεπίπεδος μετατροπέας με χρήση υπομονάδων (MMC), κώδικες συστήματος, αδιάλειπτη λειτουργία σε συνθήκες σφάλματος, διαθεσιμότητα σε συνθήκες N-1.

Abstract

High Voltage Direct Current (HVDC) power transmission technology is nowadays the state-of-the-art and the most widespread solution for applications such as bulk power transmission, interconnection of distant or asynchronous AC grids, offshore wind-farm and islands interconnection and others. Significant advantages of HVDC over alternating current technology (HVAC), such as lower losses, flexibility and controllability and the lack of limitations regarding the transmission distance, make this technology more suitable for such applications.

In this thesis, the basics of HVDC technology are first presented, as well as the main HVDC configurations and topologies, with emphasis on highlighting HVDC advantages and disadvantages. The theoretical analysis is extended to multilevel converters, with emphasis on Modular Multilevel Converters (MMC), and their control methods at low level (PWM pulsing) as well as at higher system level.

Then, a radial bipole VSC-HVDC link is considered, based on Modular Multilevel Converters (MMC). Although such a configuration is generic, the specific application it is applied is the Attica-Crete interconnection project.

The main purpose of this study is to evaluate the compatibility of the entire system with modern Grid Codes for HVDC interconnections, such as fault ride-through (FRT) capability, and operation at N-1 conditions. The system is modeled and simulated in MATLAB/Simulink software.

Key Words

HVDC, bipole topology, Voltage Source Converter (VSC), Modular Multilevel Converter (MMC), grid code compatibility, Fault Ride-Through (FRT), N-1 operation

Ευχαριστίες

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή κ. Σταύρο Παπαθανασίου για την καθοδήγησή του κατά τη διάρκεια της εκπόνησης της παρούσας διπλωματικής εργασίας, αλλά και για τη δυνατότητα που μου έδωσε να εργαστώ σε ένα τόσο επίκαιρο και ενδιαφέρον ερευνητικό πεδίο. Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω τον Διδάκτορα Σωτήριο Νάνου, η διατριβή του οποίου αποτέλεσε ένα εξαιρετικό βιβλιογραφικό υπόβαθρο για την εκπόνηση της διπλωματικής μου εργασίας, όπως επίσης και τον Διπλωματούχο Μηχανικό Διονύση Μουτεβελή. Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά όλους τους φίλους και συμφοιτητές, για την βοήθεια που μου παρείχαν κατά την κοινή μας αυτήν πορεία, ιδιαίτέρως δε τους Αλέξανδρο, Γιώργο, Μενέλαο και Μιχάλη.

Βασίλειος Νικολακόπουλος,
Αθήνα, 8^η Ιουνίου 2018

Περιεχόμενα

Περίληψη	vii
Abstract	ix
Ευχαριστίες	xi
Περιεχόμενα.....	xiii
Συνοψεύσεις - Ακρωνύμια	xv
Κατάλογος Πινάκων	xvii
Κατάλογος Σχημάτων	xix
1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
1.1 Ερευνητική Περιοχή	1
1.2 Κώδικες Συστήματος	2
1.2.1 Αδιάλειπτη Λειτουργία σε συνθήκες σφάλματος.....	2
1.2.2 Λειτουργία σε συνθήκες N-1.....	3
1.2.3 Έλεγχος Συχνότητας και ενεργού ισχύος	5
1.2.4 Ρύθμιση αέργου ισχύος	5
1.3 Επισκόπηση Βιβλιογραφίας	6
1.4 Αντικείμενο – Δομή Εργασίας	8
2 ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ HVDC.....	11
2.1 Ιστορική Αναδρομή	11
2.2 Πλεονεκτήματα HVDC – HVAC	13
2.3 Τεχνολογίες VSC-CSC HVDC.....	15
2.3.1 Μετατροπείς τύπου πηγής ρεύματος CSC.....	15
2.3.2 Μετατροπείς τύπου πηγής τάσης VSC.....	16
2.3.3 Σύνοψη	17
2.4 Τοπολογίες HVDC	19
2.4.1 Τοπολογίες Μονοπόλου.....	19
2.4.2 Τοπολογίες Διπόλου	21
2.4.3 Πολυτερματικό Δίκτυο - MTDC	22
2.4.4 Τοπολογία Back-to-Back.....	23
2.4.5 Σύνοψη	23
3 ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ VSC ΠΟΛΛΑΠΛΩΝ ΕΠΙΠΕΔΩΝ – ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΙΣ MMC	25
3.1 Επισκόπηση Τεχνολογιών Μετατροπών Πολλαπλών Επιπέδων	25
3.2 Τεχνολογία Μετατροπών MMC	28
3.3 Τεχνικές διαμόρφωσης PWM για μετατροπείς MMC	30
3.4 Αλγόριθμος εξισορρόπησης DC τάσης πυκνωτών για μετατροπείς MMC.....	33

3.5	Παραμετρική Ανάλυση συστήματος MMC-VSC	34
3.5.1	Επίδραση αριθμού επιπέδων, μεθόδου διαμόρφωσης και συχνότητας φέροντος στην αρμονική παραμόρφωση τάσης και ρεύματος εξόδου.	35
3.5.2	Επίδραση μεθόδου διαμόρφωσης, συχνότητας διαμόρφωσης και συχνότητας εφαρμογής αλγορίθμου εξισορρόπησης στη διακύμανση τάσης πυκνωτών, διακοπτική συχνότητα.	38
4	ΕΛΕΓΧΟΣ ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΩΝ ΣΕ VSC-HVDC ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ	41
4.1	Ταξινόμηση μετατροπών VSC ανάλογα με τη λειτουργία τους στο AC δίκτυο.	42
4.2	Σχήματα συγχρονισμού μετατροπών με το AC δίκτυο	43
4.3	Διανυσματικός έλεγχος ρευμάτων στο σύγχρονο πλαίσιο αναφοράς	44
5	ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ-ΤΟΠΟΛΟΓΙΑ-ΕΛΕΓΧΟΣ ΕΞΕΤΑΖΟΜΕΝΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ	47
5.1	Γενική Περιγραφή εξεταζόμενου συστήματος	47
5.2	Ηλεκτρική Τοπολογία Συστήματος	48
5.3	Ελεγκτής PWM με εξισορρόπηση τάσεων	50
5.4	Έλεγχος ρευμάτων στο σύγχρονο πλαίσιο αναφοράς – Συγχρονισμός με το δίκτυο	51
5.5	Έλεγχος DC τάσης-αέργου ισχύος ηπειρωτικού μετατροπέα	52
5.6	Έλεγχος ενεργού-αέργου ισχύος υπεράκτιου μετατροπέα	53
5.7	Ελεγκτές Εποπτείας	54
5.8	PI Controllers – Σχήματα Anti-Windup και Tracking	57
5.9	Πλήρες Διάγραμμα Ελέγχου Συστήματος	60
6	ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ – ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ	61
6.1	Μελετώμενα Σενάρια	61
6.2	Σενάριο 1: Αντιστροφή Ισχύος - Κανονική Λειτουργία	62
6.3	Σενάριο 2: AC σφάλματα δικτύου	68
6.4	Σενάριο 3: AC σφάλματα μετατροπέα	73
6.5	Σενάριο 4: DC σφάλματα καλωδίων	79
7	ΣΥΝΟΨΗ - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ	85
7.1	Ανακεφαλαίωση	85
7.2	Συμπεράσματα	86
7.3	Προτάσεις για περαιτέρω μελέτη	88
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	91
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α Μετασχηματισμός Park	95
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β Ηλεκτρικά Χαρακτηριστικά Εξεταζόμενου Συστήματος	98
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ Παράμετροι Ελεγκτών	99

Συντομεύσεις - Ακρωνύμια

AC	Alternating Current
APOD-PWM	Alternate Phase Opposition Disposition PWM
CD-PWM	Carrier Disposition PWM
CIGRE	Conseil International des Grands Réseaux Électriques (International Council for Large Electric Systems)
CPS-PWM	Phase Shifted Carriers PWM
CSC	Current Source Converter
DC	Direct Current
DCMI	Diode-Clamped Multilevel Inverter
ENTSO-E	European Network of Transmission System Operators for Electricity
FCMI	Flying-Capacitors Multilevel Inverter
FRT	Fault Ride-Through
HVAC	High Voltage Alternating Current
HVDC	High Voltage Direct Current
IEC	International Electrotechnical Commission
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor
LCC	Line Commutated Converters
MMC	Modular Multilevel Converters
MTDC	Multi-terminal Direct Current
NLC	Nearest Level Control
NPC	Neutral Point-Clamped
OHTL	Over Head Transmission Line
PD-PWM	Phase Disposition PWM
PLL	Phase Locked Loop
POD-PWM	Phase Opposition Disposition PWM
SCR	Short Circuit Ratio
SHE-PWM	Selective Harmonic Elimination
SPWM	Sinusoidal Pulse Width Modulation
SVPWM	Space Vector PWM
THD	Total harmonic Distortion
TSO	Transmission System Operator
VSC	Voltage Source Converter

ΑΔΜΗΕ	Ανεξάρτητος Διαχειριστής Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας
ΑΠΕ	Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας
ΔΠΑ	Δεκαετές Πρόγραμμα Ανάπτυξης
ΘΑΠ	Θαλάσσιο Αιολικό Πάρκο
ΚΥΤ	Κέντρο Υπερυψηλής Τάσης
Μ/Σ	Μετασχηματιστής
ΣΗΕ	Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας
ΣΚΣ	Σημείο Κοινής Σύνδεσης
ΥΤ	Υψηλή Τάση

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 2.1 Αναλυτική σύγκριση τεχνολογιών CSC & VSC-HVDC. Πηγές [18, pp. 19,35, 23, p. 47] ..	18
Πίνακας 2.2 Παραδείγματα σύγχρονων CSC-VSC HVDC συστημάτων. Πηγή: [18, p. 36]	19
Πίνακας 2.3 Σύγκριση Τοπολογιών HVDC.....	24
Πίνακας 3.1 Εξέλιξη Πολυεπίπεδων Μετατροπών VSC-HVDC. Πηγή: [8].....	25
 Πίνακας Π. 1 Ηλεκτρικά Χαρακτηριστικά συστήματος	98
Πίνακας Π. 2 Παράμετροι Ελεγκτών Συστήματος.....	99

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 1.1 Τυπική Καμπύλη τάσης-χρόνου για την απαίτηση αδιάλειπτης λειτουργίας - Κώδικας ENTSO-E για συνδέσμους HVDC. Πηγή: [12]	3
Σχήμα 1.2 Χαρακτηριστική τάσης-ρεύματος για τη ρύθμιση της άεργου συνιστώσας του ρεύματος σε συνθήκες σφάλματος – Γερμανικός κώδικας για τη σύνδεση ΘΑΠ. Πηγή: [12]	3
Σχήμα 1.3 Ετήσια στατιστικά HVDC συνδέσμων Βόρειας Θάλασσας για το έτος 2013. Πηγή: [14]	4
Σχήμα 1.4 Καμπύλη ρύθμισης ενεργού ισχύος συναρτήσει των μεταβολών στη συχνότητα – Κώδικας ENTSO-E για διασυνδέσεις HVDC. Πηγή: [12].....	5
Σχήμα 1.5 Όρια προφίλ U-Q/ P_{max} για τη ρύθμιση άεργου ισχύος – Κώδικας ENTSO-E. Πηγή: [10]	6
Σχήμα 2.1 Προγραμματισμένη Εξέλιξη συνδέσμων VSC-HVDC που βρίσκονται σε λειτουργία. Πηγή: [23, p. 39]	12
Σχήμα 2.2 Αναπαράσταση Προγραμματισμένων VSC-HVDC διασυνδέσεων ανά Επίπεδο Τάσης/Διακινούμενη Ισχύ και χρονιά θέσεως σε λειτουργία. Πηγή: [23, p. 38]	12
Σχήμα 2.3 Το Ηλεκτρικό Δίκτυο της Καλιφόρνια πριν και μετά το “Trans Bay Cable”. Πηγή: [5]	14
Σχήμα 2.4 Συγκριτικό κόστος επένδυσης HVDC-HVAC. Πηγή: [46]	15
Σχήμα 2.5 Τυπική CSC-HVDC τοπολογία. Πηγή: [18, p. 13]	16
Σχήμα 2.6 Τυπική VSC-HVDC τοπολογία. Πηγή: [8]	17
Σχήμα 2.7 Παραλλαγές Τοπολογίας Μονοπόλου για συστήματα HVDC. α) Συμμετρικό Μονόπολο, β) Ασύμμετρο Μονόπολο με Ηλεκτρόδια Γείωσης και γ) Ασύμμετρο Μονόπολο με Μεταλλική Επιστροφή . Πηγή: [3]	21
Σχήμα 2.8 Παραλλαγές Τοπολογίας Διπόλου για συστήματα HVDC. α) Δίπολο με Ηλεκτρόδια Γείωσης και β) Δίπολο με Μεταλλικό Ουδέτερο. Πηγή: [3]	22
Σχήμα 2.9 Παράδειγμα Πολυτερματικού Δικτύου βασιζόμενο σε τοπολογία Συμμετρικού Μονοπόλου. Πηγή: [3]	23
Σχήμα 2.10 Τοπολογία διασύνδεσης Back-to-Back. Πηγή: [3]	23
Σχήμα 3.1 Διαφορετικές Τοπολογίες Μετατροπών Πολλαπλών Επιπέδων. α) 3-Level DCMI. Πηγή: [12, β) 5-level FCMI. Πηγή: [22] και γ) 6-level MMC. Πηγή [12]	27
Σχήμα 3.2 Δομή φάσης πολυεπίπεδου MMC μετατροπέα. Πηγή: [12, p. 47]	28
Σχήμα 3.3 Ροή ρευμάτων υπομονάδας για τις περιπτώσεις «εισαγωγής» ή «παράκαμψης». Πηγή: [12, p. 47]	29
Σχήμα 3.4 Παραλλαγές μεθόδου PD-PWM για 8 επίπεδα, και συντελεστή διαμόρφωσης 0.8 και συχνότητα φέροντος 200 Hz. α) PD-PWM, β) POD-PWM, γ) APOD-PWM, δ) Saw-tooth CPS-PWM και ε) Triangular CPS-PWM	33
Σχήμα 3.5 Παραμετρική ανάλυση MMC: Κυρίαρχη αρμονική / #επιπέδων, μέθοδο και συχνότητα διαμόρφωσης.....	36
Σχήμα 3.6 Παραμετρική ανάλυση MMC: Πλάτος κυρίαρχης αρμονικής / #επιπέδων, μέθοδο και συχνότητα διαμόρφωσης	36
Σχήμα 3.7 Παραμετρική ανάλυση MMC: THD _v % / #επιπέδων, μέθοδο και συχνότητα διαμόρφωσης	37
Σχήμα 3.8 Παραμετρική ανάλυση MMC: THD _i % / #επιπέδων, μέθοδο και συχνότητα διαμόρφωσης	37
Σχήμα 3.9 Παραμετρική ανάλυση MMC: THD _i % / μέθοδο διαμόρφωσης, αριθμό επιπέδων και συχνότητα εξισορρόπησης	38
Σχήμα 3.10 Παραμετρική ανάλυση MMC: Διακύμανση τάσης πυκνωτών / μέθοδο, συχνότητα διαμόρφωσης και συχνότητα εξισορρόπησης	38

Σχήμα 3.11 Παραμετρική ανάλυση MMC: Διακοπτική συχνότητα υπομονάδας / μέθοδο, συχνότητα διαμόρφωσης και συχνότητα εξισορρόπησης	40
Σχήμα 4.1 Ιεραρχική δομή συστημάτων ελέγχου VSC-HVDC συστημάτων. Πηγή [17, p. 10]	41
Σχήμα 4.2 Διάταξη Κλειδώματος Φάσης - PLL	43
Σχήμα 4.3 Φίλτρο Εξαγωγής Θετικής ακολουθίας της τάσης δικτύου - DSOGI	43
Σχήμα 4.4 Διάταξη Κλειδώματος Φάσης με χρήση φίλτρου θετικής ακολουθίας 2 ^{ης} τάξης – DSOGI-PLL	44
Σχήμα 4.5 Διάγραμμα ελεγκτή ρεύματος θετικής και αρνητικής ακολουθίας	44
Σχήμα 5.1 Επισκόπηση εξεταζόμενου συστήματος	48
Σχήμα 5.2 Σχήμα Ελέγχου PD-PWM Με ταξινόμηση	51
Σχήμα 5.3 Ελεγκτής Ρεύματος Στο σύγχρονο πλαίσιο αναφοράς	52
Σχήμα 5.4 Ελεγκτής U_{dc} -Q ηπειρωτικού μετατροπέα με σχήμα FRT	53
Σχήμα 5.5 Ελεγκτής P-Q υπεράκτιου μετατροπέα με σχήμα FRT	54
Σχήμα 5.6 Ελεγκτής προστασίας έναντι DC υπερεντάσεων και AC σφαλμάτων με δυνατότητα μπλοκαρισμού μετατροπέα	55
Σχήμα 5.7 Ελεγκτής διαμοιρασμού ισχύος	57
Σχήμα 5.8 Ελεγκτής PI με back-calculation anti-windup σχήμα	58
Σχήμα 5.9 Απόκριση κορεσμένου PI ελεγκτή με και χωρίς σχήμα anti-windup	58
Σχήμα 5.10 Ελεγκτής PI με back-calculation και tracking σχήμα	59
Σχήμα 5.11 Πλήρης ελεγκτής συστήματος	60
Σχήμα 6.1 Σενάριο 1: Ροή ισχύος θετικού πόλου διασύνδεσης	63
Σχήμα 6.2 Σενάριο 1: Ροή ισχύος αρνητικού πόλου διασύνδεσης	63
Σχήμα 6.3 Σενάριο 1: DC τάσεις συνδέσμου	64
Σχήμα 6.4 Σενάριο 1: d-q συνιστώσες της τάσης (PS) και του ρεύματος (PS+NS) στην Κρήτη. Θετικός Πόλος	64
Σχήμα 6.5 Σενάριο 1: d-q συνιστώσες της τάσης (PS) και του ρεύματος (PS+NS) στην Αττική. Θετικός Πόλος	65
Σχήμα 6.6 Σενάριο 1: Φασικές Τάσεις κ' Ρεύματα δικτύου και μετατροπέα. Θετικός πόλος Κρήτης	66
Σχήμα 6.7 Σενάριο 1: Φασικές Τάσεις κ' Ρεύματα δικτύου και μετατροπέα. Αρνητικός πόλος Αττικής	66
Σχήμα 6.8 Σενάριο 1: Αρμονική ανάλυση τάσεων και ρευμάτων δικτύου και μετατροπέα. Θετικός πόλος Κρήτης	67
Σχήμα 6.9 Σενάριο 1: Αρμονική ανάλυση τάσεων και ρευμάτων δικτύου και μετατροπέα. Αρνητικός πόλος Αττικής	67
Σχήμα 6.10 Σενάριο 1: Ρεύματα Γείωσης, DC καλωδίων και τάση αγωγού μεταλλικής επιστροφής	68
Σχήμα 6.11 Σενάριο 2: Φασικές Τάσεις και Ρεύματα δικτύου και μετατροπέα. Θετικός πόλος Αττικής	69
Σχήμα 6.12 Σενάριο 2: Φασικές Τάσεις κ' Ρεύματα δικτύου και μετατροπέα. Θετικός πόλος Κρήτης	69
Σχήμα 6.13 Σενάριο 2: Ροή ισχύος θετικού πόλου διασύνδεσης	70
Σχήμα 6.14 Σενάριο 2: DC τάσεις συνδέσμου	71
Σχήμα 6.15 Σενάριο 2: d-q συνιστώσες της τάσης (PS) και του ρεύματος (PS+NS) στην Κρήτη. Θετικός Πόλος	72
Σχήμα 6.16 Σενάριο 2: d-q συνιστώσες της τάσης (PS) και του ρεύματος (PS+NS) στην Αττική. Θετικός Πόλος	72
Σχήμα 6.17 Σενάριο 2: Ρεύματα Γείωσης, DC καλωδίων και τάση αγωγού μεταλλικής επιστροφής	73
Σχήμα 6.18 Σενάριο 3: Φασικές Τάσεις και Ρεύματα δικτύου και μετατροπέα. Θετικός πόλος Κρήτης	74

Σχήμα 6.19 Σενάριο 3: Φασικές Τάσεις και Ρεύματα δικτύου και μετατροπέα. Θετικός πόλος Αττικής.....	75
Σχήμα 6.20 Σενάριο 3: Φασικές Τάσεις και Ρεύματα δικτύου και μετατροπέα. Αρνητικός πόλος Κρήτης.....	75
Σχήμα 6.21 Σενάριο 3: Φασικές Τάσεις και Ρεύματα δικτύου και μετατροπέα. Αρνητικός πόλος Αττικής.....	76
Σχήμα 6.22 Σενάριο 3: Ροή ισχύος θετικού πόλου διασύνδεσης.....	77
Σχήμα 6.23 Σενάριο 3: Ροή ισχύος αρνητικού πόλου διασύνδεσης.....	77
Σχήμα 6.24 Σενάριο 3: DC τάσεις συνδέσμου.....	78
Σχήμα 6.25 Σενάριο 3: Ρεύματα Γείωσης, DC καλωδίων και τάση αγωγού μεταλλικής επιστροφής.....	79
Σχήμα 6.26 Σενάριο 4: Τάσεις και Ρεύματα δικτύου και μετατροπέα. Θετικός πόλος Κρήτης.....	80
Σχήμα 6.27 Σενάριο 4: Τάσεις και Ρεύματα δικτύου και μετατροπέα. Θετικός πόλος Αττικής.....	80
Σχήμα 6.28 Σενάριο 4: Τάσεις και Ρεύματα δικτύου και μετατροπέα. Αρνητικός πόλος Κρήτης.....	81
Σχήμα 6.29 Σενάριο 4: Τάσεις και Ρεύματα δικτύου και μετατροπέα. Αρνητικός πόλος Αττικής.....	81
Σχήμα 6.30 Σενάριο 4: Ροή ισχύος θετικού πόλου διασύνδεσης.....	82
Σχήμα 6.31 Σενάριο 4: Ροή ισχύος αρνητικού πόλου διασύνδεσης.....	82
Σχήμα 6.32 Σενάριο 4: DC τάσεις συνδέσμου.....	83
Σχήμα 6.33 Σενάριο 4: Ρεύματα Γείωσης, DC καλωδίων και τάση αγωγού μεταλλικής επιστροφής.....	84
Σχήμα 7.1 Λειτουργία HVDC διασύνδεσης τοπολογίας διπόλου σε περίπτωση απώλειας μετατροπέα.....	87
Σχήμα 7.2 Λειτουργία HVDC διασύνδεσης τοπολογίας διπόλου σε περίπτωση απώλειας καλωδίου.....	87

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Ερευνητική Περιοχή

Η τεχνολογία Υψηλής Τάσης Συνεχούς Ρεύματος (HVDC), σαν λύση για εφαρμογές υψηλής μεταφορικής ικανότητας, είχε ήδη αναπτυχθεί ήδη από το 1954. Τα τελευταία χρόνια, όμως, παρατηρείται ένα ιδιαίτερα αυξημένο ενδιαφέρον στο ερευνητικό πεδίο της μεταφοράς ισχύος με συνεχή τάση.

Βασικό κίνητρο για την ανάπτυξη αυτού του ερευνητικού πεδίου αποτελεί η εξάπλωση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Η τεχνολογία HVDC φαντάζει ως ο πιο προσιτός και κατάλληλος τρόπος για την πραγματοποίηση διασυνδέσεων απομακρυσμένων υπεράκτιων αιολικών πάρκων με υποβρύχια καλώδια, όπως επίσης και διαφόρων θαλάσσιων σταθμών.

Ακόμα ένα ισχυρό κίνητρο είναι η ανάγκη διασύνδεσης συστημάτων διαφορετικών χωρών, σε μεγάλη απόσταση, κάτι που υπαγορεύεται από την αλλαγή στο τοπίο της αγοράς ενέργειας παγκοσμίως, με την ενοποίηση σε διακρατικό, ή ακόμα και διηπειρωτικό επίπεδο να θεωρείται αναγκαία.

Οι παραπάνω παράγοντες, αρκετοί ακόμα παράγοντες που αφορούν την βελτίωση της ευστάθειας και της αξιοπιστίας των ηπειρωτικών συστημάτων και γενικότερα τα σημαντικά πλεονεκτήματα της τεχνολογίας HVDC, έναντι της τεχνολογίας HVAC για τη μεταφοράς ενέργειας σε μεγάλες αποστάσεις, αποτέλεσαν σημαντικό κίνητρο για την ενασχόληση της ερευνητικής και βιομηχανικής κοινότητας με την τεχνολογία HVDC.

Ορόσημο για την τεχνολογία HVDC αποτέλεσε η ανάπτυξη των πλήρως ελεγχόμενων ημιαγωγικών διακοπών ισχύος (1990's), παραδείγματος χάριν τα IGBTs, τα οποία αντικατέστησαν τα ημieleγχόμενα Thyristors, γεγονός που σηματοδότησε την αλλαγή εποχής στις διασυνδέσεις HVDC και τη μετάβαση από τους μετατροπείς τύπου πηγής ρεύματος (CSC - Current Source Converters) στους μετατροπείς τύπου πηγής τάσης (VSC - Voltage Source Converters). Οι μετατροπείς VSC, σε αντίθεση με τους μετατροπείς CSC, δεν απαιτούν τη σύνδεση σε ήδη υπάρχον ισχυρό δίκτυο, αλλά μπορούν να λειτουργήσουν σαν αυτόνομη πηγή τάσης, γεγονός που τους καθιστά κατάλληλους για τη διασύνδεση νησιδοποιημένων και νησιωτικών συστημάτων.

Όπως γίνεται αντιληπτό από τα παραπάνω, η τεχνολογία HVDC παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον και για την Ελλάδα, η οποία διαθέτει πολλά θαλάσσια αιολικά πάρκα στην περιοχή του Αιγαίου, αλλά και πολλά νησιωτικά συστήματα που λειτουργούν μέχρι σήμερα αυτόνομα με θερμικές μονάδες παραγωγής. Χαρακτηριστικό παράδειγμα τέτοιας περίπτωσης αποτελεί η Κρήτη, για την οποία έχει προγραμματιστεί από τον ΑΔΜΗΕ [1] η διασύνδεση με την Αττική μέσω συνδέσμου HVDC. Ταυτόχρονα είναι υπό μελέτη η δημιουργία HVDC διασυνδέσεων που θα ενώνουν το ηπειρωτικό ΣΗΕ της Ελλάδας, με την Κρήτη, την Κύπρο και το Ισραήλ (EuroAsia Interconnector [2]).

Σήμερα τεχνολογικοί κολοσσοί, όπως η ABB [3] αλλά και η Siemens [4], [5] διαθέτουν δοκιμασμένα εμπορικά HVDC συστήματα σε λειτουργία, ενώ το ενδιαφέρον πλέον στρέφεται στην αντιμετώπιση άλλων προκλήσεων, όπως είναι η ανάπτυξη πολυτερματικών DC δικτύων (Multi-

Terminal DC Networks [6], [7]) και η ανάπτυξη συστημάτων προστασίας τέτοιων δικτύων με DC διακόπτες (DC Breakers [4], [8]).

1.2 Κώδικες Συστήματος

Ο κώδικας συστήματος είναι μια τεχνική προδιαγραφή, που ορίζει τις ελάχιστες τεχνικές προϋποθέσεις που πρέπει να πληροί οποιαδήποτε εγκατάσταση ή σταθμός παραγωγής που είναι συνδεδεμένος στο δίκτυο διανομής ή μεταφοράς. Ειδικά η διεύθυνση της διεσπαρμένης παραγωγής μέσω Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας, οδήγησε τους διαχειριστές στην αναθεώρηση και την επιβολή αυστηρότερων τεχνικών απαιτήσεων με σκοπό τη διασφάλιση της ευστάθειας του συστήματος σε συνθήκες διαταραχών.

Χαρακτηριστικό παραδείγματα κωδίκων συστήματος για τη σύνδεση σε δίκτυα υψηλής τάσης αποτελεί ο Γερμανικός κώδικας, που εκδίδεται από τον διαχειριστή Tennet TSO GmbH [9]. Επίσης ο Ευρωπαϊκός Σύνδεσμος Διαχειριστών ENTSO-E έχει εκδώσει ένα προσχέδιο κώδικα που αφορά ειδικά συνδέσμους HVDC [10].

Παρακάτω περιγράφονται συνοπτικά ορισμένες από τις πιο σημαντικές προδιαγραφές που θέτουν οι κώδικες συστήματος.

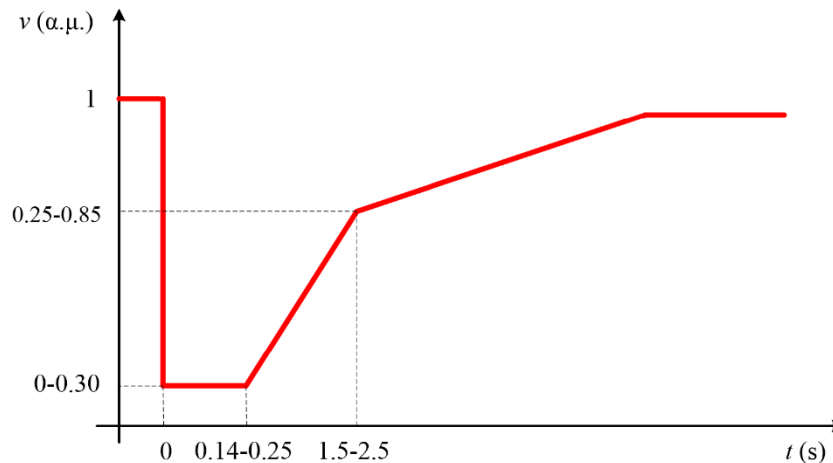
1.2.1 Αδιάλειπτη Λειτουργία σε συνθήκες σφάλματος

Από τις πιο βασικές απαιτήσεις των σύγχρονων κωδίκων είναι η ικανότητα αδιάλειπτης λειτουργίας σε συνθήκες σφάλματος (Fault Ride-Through - FRT). Η απαίτηση αυτή είναι σημαντική για την ευστάθεια του ΣΗΕ κατά την εμφάνιση σφαλμάτων, καθώς πιθανή αποσύνδεση σταθμών που διακινούν μεγάλες ποσότητες ισχύος θα δημιουργούσε πολύ ισχυρά μεταβατικά φαινόμενα, θέτοντας σε κίνδυνο τη μεταβατική ευστάθεια του ΣΗΕ.

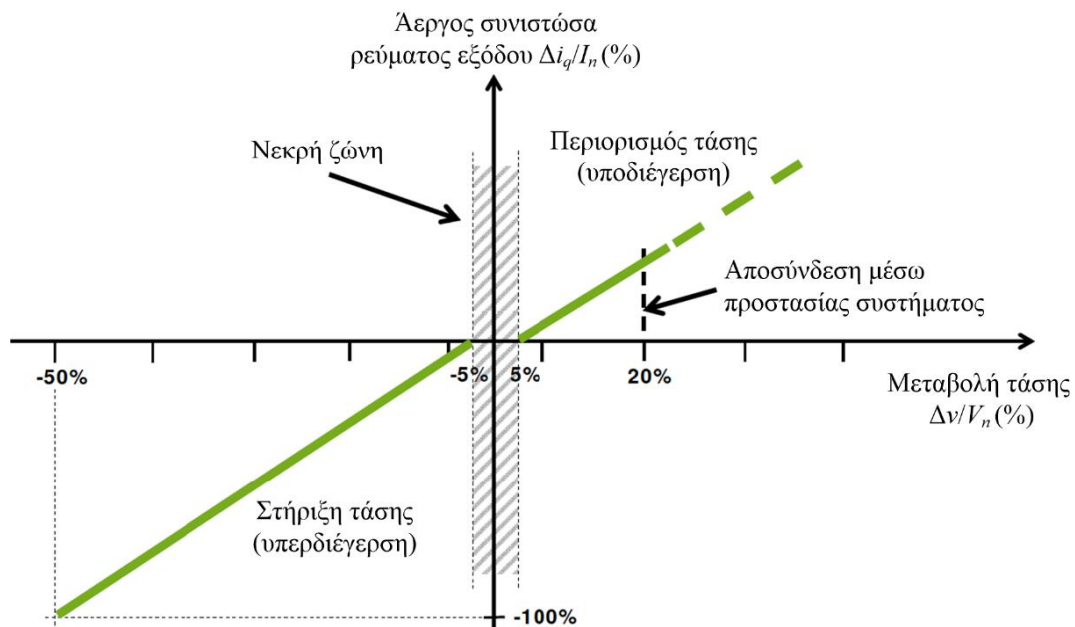
Σύμφωνα με την παραπάνω απαίτηση, κατά τη διάρκεια εμφάνισης σφαλμάτων στο δίκτυο οι μονάδες παραγωγής και οι σύνδεσμοι HVDC υποχρεούνται να παραμένουν συνδεδεμένοι, υπό την προϋπόθεση ότι η τάση δικτύου βρίσκεται πάνω από το όριο που προδιαγράφει η σχετική καμπύλη τάσης-χρόνου που υπαγορεύεται από τον εκάστοτε κώδικα. Στο Σχήμα 1.1 φαίνεται η καμπύλη τάσης χρόνου σύμφωνα με τον Κώδικα ENTSO-E για συνδέσμους HVDC [10].

Επιπλέον, κατά τη διάρκεια σφαλμάτων, επιβάλλεται από τους κώδικες η υποστήριξη τάσης με άμεση (εντός 20 ms από την ανίχνευση του σφάλματος) έγχυση άεργου συνιστώσας, η οποία πρέπει να είναι ανάλογη με την πτώση τάσης. Πιο συγκεκριμένα, όπως επιβάλλει ο Γερμανικός κώδικας [11], θα πρέπει η άεργος συνιστώσα του ρεύματος να αυξάνεται κατά 2% ανά 1% πτώσης τάσης, έτσι ώστε για βύθιση τάσης 50% να εγχέεται στο δίκτυο άεργη συνιστώσα ρεύματος 1 αμ, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.2.

Στη συγκεκριμένη εργασία έχει ληφθεί υπόψιν η χαρακτηριστική καμπύλη έγχυσης άεργου ρεύματος σε συνθήκες σφάλματος, η οποία έχει ενσωματωθεί στους ελεγκτές των μετατροπέων του συνδέσμου HVDC, ενώ όσον αφορά την καμπύλη τάσης-χρόνου έχει θεωρηθεί ότι ο σύνδεσμος παραμένει συνδεδεμένος ανεξαρτήτως της βύθισης τάσης του δικτύου.



Σχήμα 1.1 Τυπική Καμπύλη τάσης-χρόνου για την απαίτηση αδιάλειπτης λειτουργίας - Κώδικας ENTSO-E για συνδέσμους HVDC. Πηγή: [12]



Σχήμα 1.2 Χαρακτηριστική τάσης-ρεύματος για τη ρύθμιση της άεργου συνιστώσας του ρεύματος σε συνθήκες σφάλματος - Γερμανικός κώδικας για τη σύνδεση ΘΑΠ. Πηγή: [12]

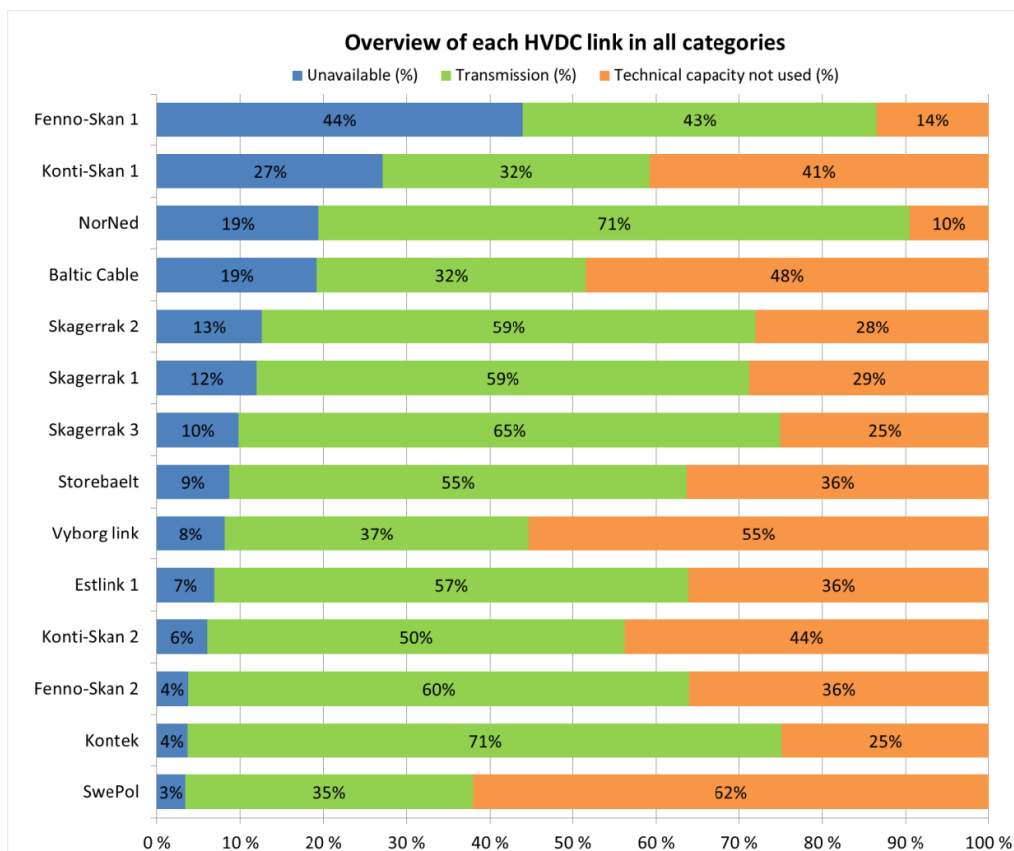
1.2.2 Λειτουργία σε συνθήκες N-1

Η αξιοπιστία αποτελεί βασική ζητούμενο για κάθε σύστημα. Ο όρος “λειτουργία N-1” ή “n-1 Criterion”, σύμφωνα με το λεξικό του ENTSO-E [13], σημαίνει την ικανότητα των στοιχείων που παραμένουν σε λειτουργία μετά την απώλεια ενός σημαντικού στοιχείου του συστήματος, π.χ. γραμμής μεταφοράς, γεννήτριας, Μ/Σ ή πόλου HVDC, να ανταπεξέλθουν στη νέα αυτήν κατάσταση, χωρίς να παραβιάζουν τα όρια ασφαλούς λειτουργίας του συστήματος, όπως τα επίπεδα τάσης και ρευμάτων.

Επίσης σύμφωνα με τον γερμανικό κώδικα για δίκτυα υψηλής τάσης [9, p. 5], κάθε σύνδεση στο δίκτυο θα πρέπει να είναι διαστασιολογημένη με τέτοιο τρόπο ώστε ο διαχειριστής να μπορεί να λειτουργεί τα δίκτυα σύμφωνα με το κριτήριο N-1. Το κριτήριο N-1 ικανοποιείται όταν μετά από σφάλμα σε ένα τμήμα του δικτύου δεν συμβαίνει κάτι από τα παρακάτω:

- Διαρκής παραβίαση των ορίων λειτουργίας του δικτύου (τάσεις λειτουργίας) και στρεσάρισμα του εξοπλισμού (ρεύματα λειτουργίας), που θέτουν σε κίνδυνο τη λειτουργία του συστήματος ή οδηγούν στην καταστροφή ή στη μείωση της διάρκειας ζωής του εξοπλισμού,
- Διαρκείς διακοπές παροχής, παρά την εισαγωγή των εφεδρικών μονάδων παραγωγής,
- Διαδοχική αποσύνδεση στοιχείων λόγω ενεργοποίησης προστασιών εξοπλισμού που δεν επηρεάζεται άμεσα από το σφάλμα, με συνέπεια να υπάρχει κίνδυνος διάδοσης του σφάλματος,
- Απώλεια ευστάθειας στους σταθμούς παραγωγής,
- Ανάγκη να διακοπεί η διακίνηση ισχύος

Στο παράδειγμα της διασύνδεσης της Κρήτης ο ΑΔΜΗΕ έχει θέσει ως αναγκαία προϋπόθεση της διασύνδεσης HVDC να λειτουργεί ανεξάρτητα τον θετικό και αρνητικό πόλο, ώστε να πληροί το κριτήριο N-1 [1, ρ. 84]. Η εκπλήρωση του παραπάνω κριτηρίου είναι ζωτικής σημασίας για την αξιοπιστία ενός συστήματος, και δη ενός συνδέσμου HVDC, όπου η απώλεια ενός πόλου μπορεί να βγάλει εκτός λειτουργίας το σύστημα για μεγάλο χρονικό διάστημα. Ενδεικτικά, σύμφωνα με στατιστικά στοιχεία του ENTSO-E, που αφορούν τη λειτουργία HVDC διασυνδέσεων στην Βόρεια Θάλασσα, κατά τη διάρκεια του έτους 2013 μεταφέρθηκαν συνολικά 34.3 TWh ηλεκτρικής ενέργειας μέσω των διασυνδέσεων HVDC. Ωστόσο, οι 65 διαταραχές που συνέβησαν αυτό το διάστημα απέτρεψαν την, εν δυνάμει, μεταφορά επιπλέον 2.7 TWh ενέργειας. Από αυτές, το μεγαλύτερο ποσοστό οφείλεται στην απώλεια τριών συνδέσμων, για δύο μήνες έκαστος, λόγω σφάλματος σε DC καλώδιο (Fenno-Skan 1 και Baltic Cable) ή σφάλματος στον σταθμό του μετατροπέα (NorNed - Eemshaven Station) [14].

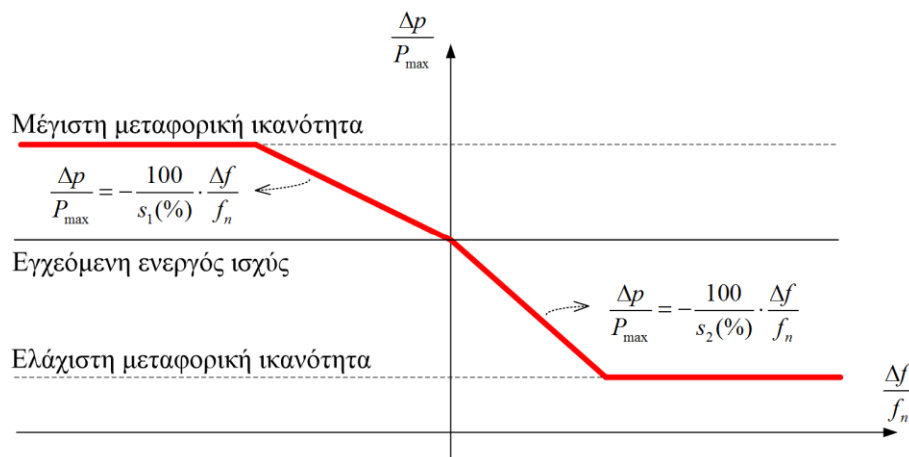


Σχήμα 1.3 Ετήσια στατιστικά HVDC συνδέσμων Βόρειας Θάλασσας για το έτος 2013. Πηγή: [14]

Στο Σχήμα 1.3 εικονίζονται τα συνολικά στατιστικά, τα οποία μαρτυρούν τη μεγάλη πιθανότητα σφάλματος που υπάρχει σε HVDC συστήματα. Ως εκ τούτου, η διασφάλιση της λειτουργίας σε συνθήκες N-1 είναι κρίσιμος παράγοντας για την αξιοπιστία ενός συστήματος HVDC. Στην παρούσα εργασία, όπως αναλύεται στα επόμενα κεφάλαια, εξετάζεται συστηματικά η επίδραση της απώλειας ενός πόλου της HVDC διασύνδεσης, και δυνατότητα της εξεταζόμενης τοπολογίας να λειτουργήσει με βάση το κριτήριο N-1.

1.2.3 Έλεγχος Συχνότητας και ενεργού ισχύος

Πέρα από την απαίτηση για αδιάλειπτη λειτουργία, οι κώδικες συστήματος απαιτούν από τις διασυνδέσεις HVDC να συμβάλουν στη ρύθμιση συχνότητας του δικτύου, όπως συμβαίνει με τις συμβατικές μονάδες παραγωγής. Πιο συγκεκριμένα, ο κώδικας ENTSO-E [10] υπαγορεύει τη μεταβολή έγχυσης ενεργού ισχύος στο δίκτυο, ανάλογα με τις συνθήκες συχνότητας, και μάλιστα επιβάλλοντας χρονικό πλαίσιο ενεργοποίησης [0.5-30 sec]. Όπως γίνεται αντιληπτό από το Σχήμα 1.4, η συμμόρφωση με τη συγκεκριμένη απαίτηση του διαχειριστή προϋποθέτει τη διαρκή λειτουργία σε επίπεδα φόρτισης μικρότερα από τα μέγιστα επιτρεπτά.

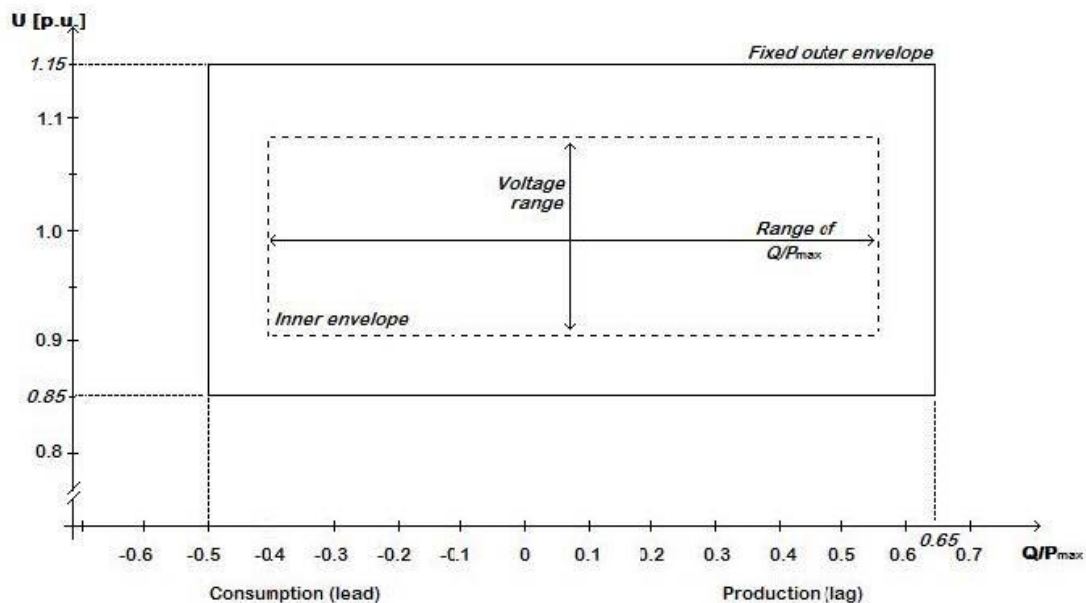


Σχήμα 1.4 Καμπύλη ρύθμισης ενεργού ισχύος συναρτήσει των μεταβολών στη συχνότητα – Κώδικας ENTSO-E για διασυνδέσεις HVDC. Πηγή: [12]

1.2.4 Ρύθμιση αέργου ισχύος

Μια ακόμα απαίτηση των κωδίκων συστήματος για διασυνδέσεις HVDC είναι η συμμετοχή στη ρύθμιση τάσης του ΣΗΕ, μέσω της προσαρμογής της εγγεόμενης αέργου ισχύος και του Συντελεστή Ισχύος (ΣΙ). Σύμφωνα με το προσχέδιο του κώδικα ENTSO-E για διασυνδέσεις HVDC, μια διασύνδεση HVDC θα πρέπει να μπορεί να λειτουργήσει σε οποιαδήποτε κατάσταση μέσα στην περιοχή που οριοθετεί η εσωτερική περιβάλλουσα που απεικονίζεται στο Σχήμα 1.5

Στην παρούσα εργασία έχει ενσωματωθεί στους ελεγκτές των μετατροπέων δυνατότητα προσαρμογής αέργου ισχύος με βάση εξωτερική εντολή, η οποία λαμβάνεται από τον διαχειριστή δικτύου (TSO).



Σχήμα 1.5 Όρια προφίλ U - Q/P_{max} για τη ρύθμιση αέργου ισχύος – Κώδικας ENTSO-E. Πηγή: [10]

1.3 Επισκόπηση Βιβλιογραφίας

Τα τελευταία χρόνια, η τεχνολογία HVDC έχει προσελκύσει έντονο ενδιαφέρον της διεθνούς ερευνητικής κοινότητας και, ως εκ τούτου, στην βιβλιογραφία συναντά κανείς πληθώρα δημοσιεύσεων που αφορούν καινοτόμες ιδέες στον χώρο, επισκόπηση και συγκριτική αξιολόγηση των ήδη υπάρχουσών ιδεών, τεχνικά κείμενα από επίσημους φορείς και κατασκευαστές, επίσημους κανονισμούς αλλά και κώδικες συστήματος, που αφορούν τα συστήματα HVDC.

Επίσης σημαντική ερευνητική δραστηριότητα στον χώρο αυτό παρουσιάζεται και στην Ελλάδα, με τεχνικές προκλήσεις που αφορούν τη διασύνδεση της Κρήτης να προσελκύουν το μεγαλύτερο ενδιαφέρον.

Αναλυτικά, στις [1, 15, 16] παρουσιάζονται μελέτες του ΑΔΜΗΕ για την επέκταση του συστήματος μεταφοράς, με τη διασύνδεση της Κρήτης σε δύο φάσεις, μέσω μιας διασύνδεσης HVDC και άλλης μίας διασύνδεσης HVAC, να αποτελεί το μεγαλύτερο και πιο σημαντικό έργο. Επίσης στην [17] παρουσιάζεται μια μελέτη που αφορά την επίδραση που θα είχε μια διασύνδεση HVDC στη δυναμική ευστάθεια του αυτόνομου συστήματος της Κρήτης.

Στην [2] παρουσιάζεται το τρέχον project EuroAsia Interconnector, ένα έργο κοινής ωφέλειας υπό την αιγίδα της Ευρωπαϊκής Ένωσης, που αποσκοπεί στη δημιουργία τριών HVDC διασυνδέσεων Αττικής-Κρήτης, Κρήτης-Κύπρου και Κύπρου-Ισραήλ, συνολικού μήκους πάνω από 1500 χιλιομέτρων και ισχύος 2000 MW.

Στις [3, 4, 5] παρουσιάζονται εμπορικές VSC-HVDC εμπορικές τεχνολογίες από τους κατασκευαστές ABB και Siemens, με την επωνυμία “HVDC Light”, “HVDC Plus” αντίστοιχα, καθώς επίσης και αναλυτική συγκριτική αξιολόγηση των συστημάτων HVDC έναντι στα αντίστοιχα συστήματα εναλλασσόμενου ρεύματος.

Στις αναφορές [16-18] παρουσιάζονται τεχνικά φυλλάδια των επιτροπών της CIGRE για HVDC τεχνολογίες. Η [18] αποτελεί μια διεξοδική μελέτη των συστημάτων HVDC τεχνοοικονομικής άποψης, ενώ στην [19] παρουσιάζεται ένας πλήρης οδηγός για τη μοντελοποίηση, τον έλεγχο και την προσομοίωση HVDC συστημάτων. Η [20] αποτελεί μια προσπάθεια να τυποποιηθούν τα επίπεδα τάσης στα συστήματα HVDC, όπως συμβαίνει και στα HVAC δίκτυα, κάτι που αποτελεί επιτακτική αναγκαιότητα, όσο η τεχνολογία οδεύει προς την υλοποίηση πολυτερματικών HVDC δικτύων.

Η ανάπτυξη βέλτιστων αλγορίθμων για τη ροή ισχύος και τον έλεγχο σε τέτοια δίκτυα παρουσιάζει επίσης ιδιαίτερο ενδιαφέρον, με αρκετές δημοσιεύσεις να προτείνουν σχετικά σχήματα ελέγχου [6, 7], ενώ στην [21] εξετάζεται η επίδραση της τοπολογίας των σταθμών HVDC στην αντιμετώπιση σφαλμάτων σε πολυτερματικά δίκτυα.

Στις [8, 22, 23, 24] γίνεται μια αναλυτική επισκόπηση της πιο μοντέρνας τρέχουσας HVDC τεχνολογίας, διασυνδέσεων HVDC που βρίσκονται ήδη σε λειτουργία, ή είναι προγραμματισμένες να πραγματοποιηθούν στο άμεσο μέλλον, ενώ επισημαίνονται σημεία-προκλήσεις που παραμένουν άλυτα, προς το παρόν στον, ερευνητικό χώρο των διασυνδέσεων HVDC, όπως για παράδειγμα η ανάπτυξη αξιόπιστων DC διακοπών που θα δώσουν ώθηση στην ανάπτυξη εύρωστων πολυτερματικών DC δικτύων.

Στις [9, 10, 11, 25] παρουσιάζονται σύγχρονοι κώδικες δικτύου, όπως είναι το προσχέδιο του κώδικα ENTSO-E, που θέτει τις απαιτήσεις για τη σύνδεση σταθμών HVDC στα δίκτυα υψηλής τάσης, ο γερμανικός κώδικας για δίκτυα υψηλής και υπέρ-υψηλής τάσης, απαιτήσεις του γερμανικού κώδικα για τη διασύνδεση αιολικών πάρκων και το πρότυπο της IEC που αφορά τα επιτρεπτά όρια αρμονικής παραμόρφωσης για εγκαταστάσεις συνδεδεμένες στα δίκτυα μέσης, υψηλής και υπέρ-υψηλής τάσης, ενώ στην [14] παρουσιάζονται στατιστικά στοιχεία του ENTSO-E από τη λειτουργία διασυνδέσεων HVDC στη Βόρεια θάλασσα σχετικά με τη χρησιμοποίηση, τη διαθεσιμότητα, και τη συχνότητα εμφανίσεων σφαλμάτων στον εξοπλισμό. Επίσης παρόμοια στατιστικά στοιχεία από τη CIGRE παρουσιάζονται στην [26].

Μεγάλο ενδιαφέρον παρουσιάζουν και ερευνητικές εργασίες που αφορούν τη συμβατότητα HVDC διασυνδέσεων αιολικών πάρκων με τους παραπάνω κώδικες. Πιο συγκεκριμένα, στις [27, 28] προτείνονται μέθοδοι περιορισμού της διακίνησης ισχύος ενός αιολικού πάρκου σε συνθήκες σφάλματος, τόσο με μεθόδους που βασίζονται στην αποστολή τηλεπικοινωνιακών σημάτων, όσο και σε μεθόδους ανεξάρτητες από τηλεπικοινωνιακά σήματα, όπως επίσης και στις [29, 30].

Στις [30-33] παρουσιάζονται μέθοδοι ελέγχου μετατροπών συνδεδεμένων σε δίκτυα AC τάσης. Πιο συγκεκριμένα στην [31] γίνεται ένας χαρακτηρισμός των μετατροπών, ανάλογα με τον εφαρμοζόμενο έλεγχο και τον ρόλο που επιτελούν στο AC δίκτυο (π.χ. Grid-Forming, Grid-Feeding, Grid-Supporting). Στην [32] δίνεται έμφαση στον συγχρονισμό στο δίκτυο μέσω εύρωστων συστημάτων PLL, ανθεκτικών σε διαταραχές δικτύου, ενώ στις [33, 34] προτείνεται επιπρόσθετα του καθιερωμένου ελεγκτή ρεύματος στο σύγχρονο πλαίσιο αναφοράς για VSC-HVDC μετατροπείς, ένας ελεγκτής αρνητικής και μηδενικής ακολουθίας ρεύματος για την αντιμετώπιση σφαλμάτων και ασύμμετρων καταστάσεων στο δίκτυο.

Στις αναφορές [35, 36] πραγματοποιείται μια επισκόπηση των τοπολογιών, και των μεθόδων ελέγχου PWM για πολυεπίπεδους MMC μετατροπείς και μελετάται η επίδραση των διαφόρων παραμέτρων στη λειτουργία του μετατροπέα, με έμφαση στην τάση των πυκνωτών. Στην [37] προτείνεται μια καινοτόμος μέθοδος ταξινόμησης δύο επιπέδων για την εξισορρόπηση των τάσεων

των πυκνωτών του MMC μετατροπέα, αλλά και των ρευμάτων ανακυκλοφορίας. Στην [38] προτείνεται, επίσης, μια μέθοδος διπλής ταξινόμησης με σκοπό την ελαχιστοποίηση της διακοπτικής συχνότητας, ενώ εξετάζεται η λειτουργία του μετατροπέα σε περίπτωση απώλειας μιας υπομονάδας του μετατροπέα.

Τέλος στα [39, 40, 41, 42, 43] παρουσιάζεται βασική θεωρία και παραδείγματα πάνω στο φαινόμενο wind-up σε ολοκληρωτές των PID ελεγκτών με κορεσμό, καθώς επίσης και μέθοδοι αποφυγής και αντιμετώπισης του παραπάνω φαινομένου, με σκοπό την ευσταθή και εύρωστη λειτουργία του ελεγκτή

1.4 Αντικείμενο – Δομή Εργασίας

Το θέμα της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μοντελοποίηση, ο έλεγχος και η προσομοίωση διασυνδέσεων VSC-HVDC τοπολογίας διπόλου. Μια πιθανή εφαρμογή αυτής τοπολογίας αποτελεί η διασύνδεση της Κρήτης με την Αττική, για αυτό τον λόγο παράμετροι του συστήματος επιλέχθηκαν με τέτοιο τρόπο, ώστε να ανταποκρίνονται όσο το δυνατόν καλύτερα στην πραγματικότητα και στο συγκεκριμένο παράδειγμα.

Σκοπός της εργασίας είναι να μελετηθούν και να αναδειχθούν τα πλεονεκτήματα, αλλά και τα μειονεκτήματα, της τοπολογίας διπόλου σε σχέση με τις κλασικές τοπολογίες συμμετρικού μονόπολου, και να εξεταστεί αν η παρούσα τοπολογία συμμορφώνεται με τις απαιτήσεις των σύγχρονων κωδίκων συστήματος για δίκτυα υψηλής τάσης. Ιδιαίτερως, δε, αν ικανοποιεί την απαίτηση αδιάλειπτης λειτουργίας σε συνθήκες σφάλματος, καθώς επίσης και το κριτήριο λειτουργίας σε συνθήκες N-1.

Η μελέτη διασυνδέσεων HVDC αποτελεί ένα θέμα που έχει προσελκύσει το ενδιαφέρον της επιστημονικής κοινότητας, και επομένως έχουν πραγματοποιηθεί πολλές μελέτες. Η διαφοροποίηση της συγκεκριμένης εργασίας έγκειται στην αναλυτική εξέταση της τοπολογίας διπόλου.

Στα πλαίσια αυτής της εργασίας πραγματοποιήθηκε αναλυτική υλοποίηση μοντέλου HVDC συνδέσμου τοπολογίας διπόλου στο λογισμικό MATLAB/Simulink, με πλήρες διακοπτικό μοντέλο. Το συγκεκριμένο μοντέλο HVDC συνδέσμου περιλαμβάνει όλα τα απαραίτητα στοιχεία ενός τέτοιου συστήματος, όπως είναι ζυγοί υψηλής τάσης, μετασχηματιστές, γραμμές μεταφοράς και μετατροπείς πολλών επιπέδων, οι οποίοι αποτελούν το επίκεντρο του παραπάνω συστήματος. Οι ελεγκτές του συστήματος σχεδιάστηκαν με τέτοιον τρόπο ώστε να ικανοποιούν κάποιες από τις βασικές απαιτήσεις των κωδίκων συστήματος, όπως περιγράφονται παραπάνω. Όσον αφορά τη μοντελοποίηση των μετατροπέων πολλών επιπέδων, πραγματοποιήθηκε με πλήρες διακοπτικό μοντέλο, ώστε τα αποτελέσματα να είναι όσο το δυνατόν πιο ρεαλιστικά στις εξεταζόμενες κλίμακες χρόνου.

Επίσης στα πλαίσια της εργασίας πραγματοποιήθηκαν προσομοιώσεις του παραπάνω μοντέλου, με σκοπό να εξεταστεί η ευστάθεια του συστήματος τόσο σε συνθήκες κανονικής λειτουργίας, όσο και σε συνθήκες σφάλματος. Πιο συγκεκριμένα, σε συνθήκες κανονικής λειτουργίας εξετάστηκε η ικανοποίηση απαιτήσεων που αφορούν έγχυση αρμονικών στο δίκτυο και η δυνατότητα αντιστροφής ισχύος του συνδέσμου (Σενάριο 1). Όσον αφορά τη λειτουργία υπό συνθήκες σφάλματος, εξετάστηκαν σενάρια σφάλματος στο ηπειρωτικό και νησιωτικό δίκτυο για να ελεγχθεί η ικανότητα αδιάλειπτης λειτουργίας του συνδέσμου (Σενάριο 2), αλλά και σενάρια σφαλμάτων του

ίδιου του μετατροπέα, όπως βραχυκυκλώματα στην AC πλευρά του μετατροπέα (Σενάριο 3) ή απώλεια ενός DC πόλου (Σενάριο 4), προκειμένου να ελεγχθεί αν το σύστημα ικανοποιεί το κριτήριο N-1.

Η εργασία διαρθρώνεται σε κεφάλαια ως εξής:

- Στο Κεφάλαιο 1 πραγματοποιείται μια εισαγωγή στην ερευνητική περιοχή, με βασικές πληροφορίες που αφορούν την τεχνολογία HVDC, το ενδιαφέρον που παρουσιάζει η τεχνολογία αυτή ιδιαίτερα για την Ελλάδα, καθώς επίσης και προκλήσεις που παραμένουν άλυτες μέχρι σήμερα. Επίσης γίνεται μια εισαγωγή στους κώδικες συστήματος και κάποιες από τις βασικές απαιτήσεις που αυτοί προδιαγράφουν. Στη συνέχεια παρουσιάζεται αναλυτικά η βιβλιογραφία της εργασίας, καθώς επίσης και το θέμα, ο σκοπός και η διάρθρωσή της.
- Στο Κεφάλαιο 2 πραγματοποιείται ιστορική αναδρομή και αναλυτική περιγραφή της τεχνολογίας HVDC. Παρουσιάζονται τα πλεονεκτήματα της τεχνολογίας HVDC έναντι της συμβατικής τεχνολογίας εναλλασσόμενου ρεύματος, και πραγματοποιείται σύγκριση μεταξύ διαφορετικών HVDC τεχνολογιών (VSC-CSC HVDC) και τοπολογιών.
- Στο Κεφάλαιο 3 παρουσιάζεται η τεχνολογία πολυεπίπεδων μετατροπέων, με έμφαση στην τεχνολογία μετατροπέων πολλαπλών επιπέδων με χρήση υπομονάδων (Modular Multi-Level Converters - MMC). Πραγματοποιείται παραμετρική προσομοίωση ενός MMC VSC μετατροπέα και εξετάζεται η επίδραση των διαφόρων παραμέτρων και μεθόδων ελέγχου των μετατροπέων στη διακοπτική συχνότητα κάθε υπομονάδας - και άρα στις απώλειες – στο αρμονικό περιεχόμενο των κυματομορφών εξόδου και στην ομοιόμορφη φόρτιση των υπομονάδων του μετατροπέα.
- Στο Κεφάλαιο 4 παρουσιάζονται οι πιο διαδεδομένες μέθοδοι ελέγχου μετατροπέων συνδεδεμένων σε AC δίκτυα, ανάλογα με τη φύση του δικτύου, καθώς επίσης και μέθοδοι που προτείνονται στη βιβλιογραφία για έλεγχο μετατροπέων υπό συνθήκες σφάλματος στο AC δίκτυο.
- Στο κεφάλαιο 5 περιγράφεται η τοπολογία του εξεταζόμενου συστήματος, και οι ελεγκτές που υλοποιήθηκαν.
- Στο Κεφάλαιο 6 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων για τα διάφορα σενάρια που μελετήθηκαν.
- Στο Κεφάλαιο 7 παρατίθενται τα συμπεράσματα της παρούσης εργασίας, καθώς επίσης και προτάσεις για περαιτέρω μελέτη.

2 ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ HVDC

2.1 Ιστορική Αναδρομή

Από την εποχή που πρωτοεμφανίστηκε ο Ηλεκτρισμός στα τέλη του 19^{ου} αιώνα τέθηκε το δίλημμα χρήσης συνεχούς ή εναλλασσόμενου ρεύματος. Το γεγονός ότι το AC παρουσιάζει κάποια σημαντικά πλεονεκτήματα, όπως ευκολία στην αλλαγή επιπέδου τάσης με χρήση Μ/Σ, ευκολία διακοπής μεγάλων ρευμάτων σε περιπτώσεις σφαλμάτων με διακόπτες, λόγω της εναλλασσόμενης φύσης της κυματομορφής, αλλά και την ευρεία χρήση των μηχανών επαγωγής τόσο στην παραγωγή, όσο και στην κατανάλωση, προέκριναν την τεχνολογία εναλλασσόμενου ρεύματος σαν την καταλληλότερη λύση για τη μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας.

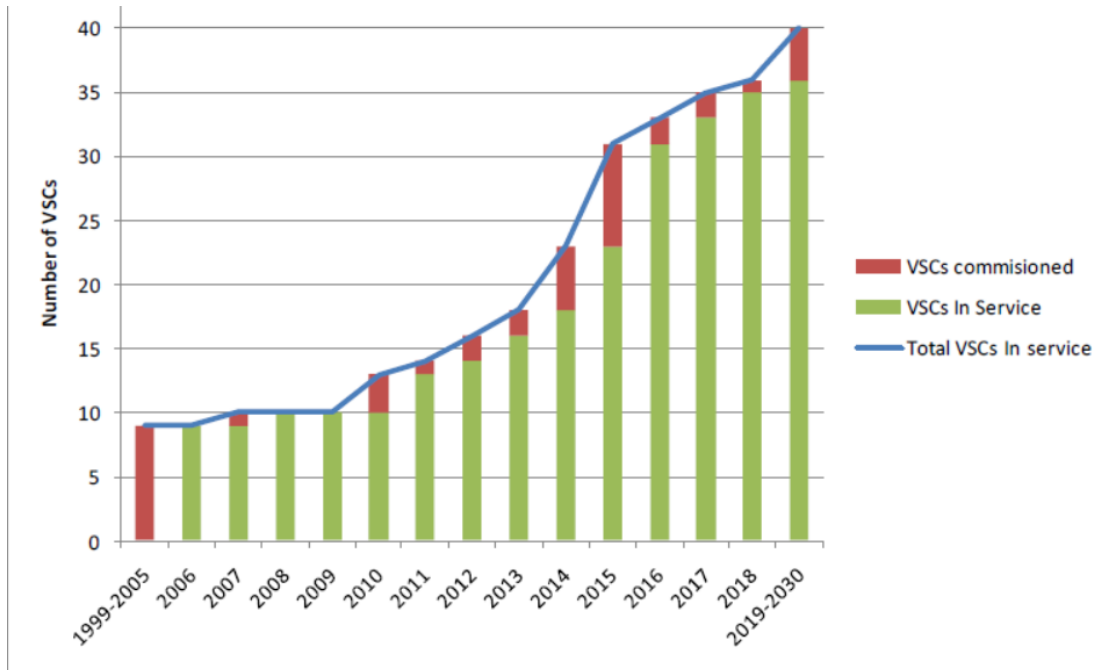
Παρόλα αυτά, ήδη από τις αρχές του 20^{ου} αιώνα χρησιμοποιήθηκαν DC συνδέσεις για τη μεταφορά ενέργειας παραγόμενη από πολλούς DC κινητήρες συνδεδεμένους σε σειρά. Χαρακτηριστικά παραδείγματα αποτελούν οι σύνδεσμοι Mountiers-Lyon (Γαλλία), επιπέδου 125 kV – 20 MW σε απόσταση 230 km, και Wilesden-Ironbridge (UK), επιπέδου 100 kV σε μήκος 2.5 km [8].

Η ευρεία ανάπτυξη όμως των συστημάτων HVDC ξεκίνησε με την εμφάνιση νέας τεχνολογίας που επέτρεπε την πιο εύκολη μετατροπή από AC σε DC και το αντίστροφο. Οι πρώτοι μετατροπείς εμφανίστηκαν στα τέλη της δεκαετίας του 1930, και χρησιμοποιούσαν ανορθωτές τόξου υδρογόνου. Με τη χρήση αυτής της τεχνολογίας δημιουργήθηκαν κάποιες δοκιμαστικές εγκαταστάσεις σε χώρες όπως η Γερμανία, Ηνωμένες Πολιτείες, Ρωσία, Ελβετία και Σουηδία, μέχρι να ωριμάσει η τεχνολογία και να εμφανιστούν οι πρώτες μοντέρνες εμπορικές διασυνδέσεις, με χαρακτηριστικά παραδείγματα τον σύνδεσμο Gotland 1, που λειτούργησε από το 1954 έως και το 1986, εκτεινόταν σε απόσταση 98 km και μετέφερε 30 MW σε επίπεδο τάσης ± 100 kV, και τον σύνδεσμο Μόσχας-Κασίρα που τέθηκε σε λειτουργία το 1951, και μετέφερε 30 MW σε απόσταση 100 km, χρησιμοποιώντας επίπεδο τάσης ± 100 kV [8, 3].

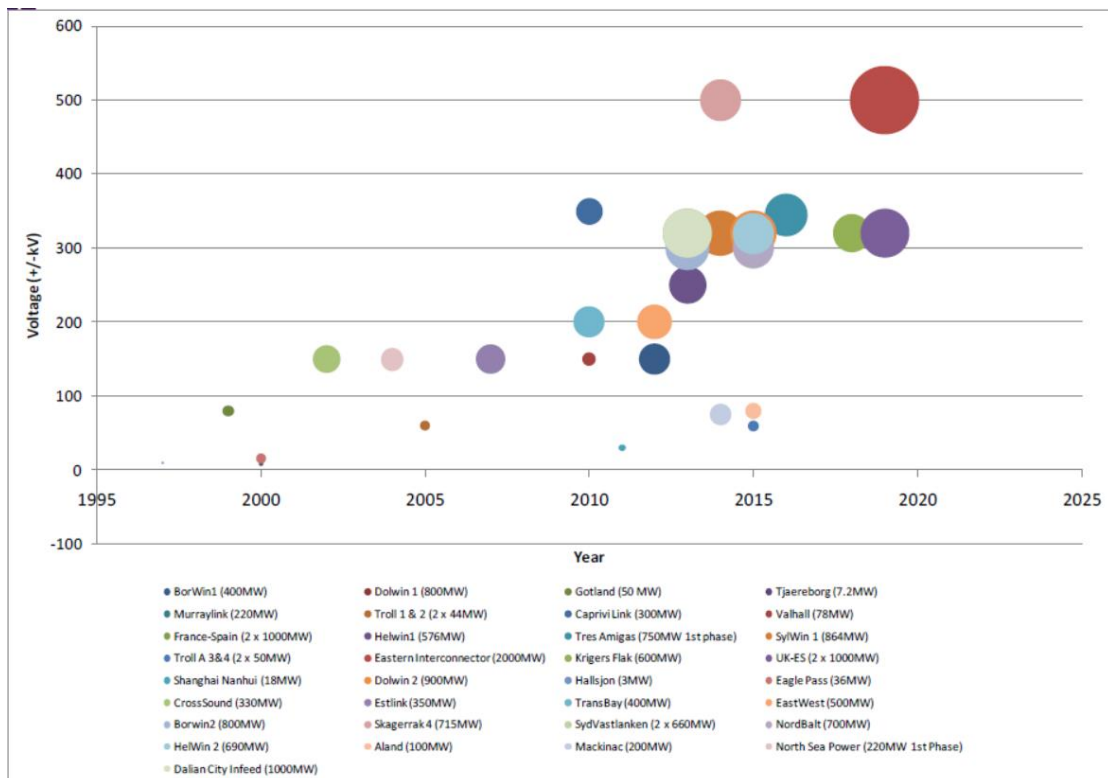
Τη δεκαετία του 1970 η εμφάνιση των Thyristors αντικατέστησε τους ανορθωτές τόξου υδρογόνου και η αναβάθμιση του συνδέσμου Goltand 1, ήταν από τα πρώτα έργα που χρησιμοποίησαν τη νέα αυτήν τεχνολογία, ενώ παράλληλα μέχρι και τις μέρες μας υλοποιήθηκαν πολλές διασυνδέσεις που στηρίζονται σε αυτήν την τεχνολογία. Χαρακτηριστικά παραδείγματα είναι οι σύνδεσμοι Yunnan-Guandong (5000 MW, ± 800 kV - Siemens) και Xianjiaba-Shangai (6400 MW - ABB) [8].

Το πιο σημαντικό, ίσως, βήμα για τη ραγδαία εξάπλωση της τεχνολογίας HVDC αποτέλεσε η παράλληλη ανάπτυξη των ηλεκτρονικών ισχύος στις αρχές της δεκαετίας του 1990, και η εμφάνιση, νέων, πλήρως ελεγχόμενων διακοπτών, όπως τα IGBT's (insulated Gate Bipolar Transistors). Η νέα αυτή τεχνολογία οδήγησε στη μετάβαση από τους μετατροπείς τύπου πηγής ρεύματος (CSC), που χρησιμοποιούν Thyristor, στους μετατροπείς τύπου πηγής τάσης (VSC), που χρησιμοποιούν IGBT's. Η νέοι αυτοί μετατροπείς παρουσιάζουν σημαντικά πλεονεκτήματα, κάτι που αποδεικνύεται από το γεγονός ότι πλέον καταλαμβάνουν το σημαντικότερο μερίδιο της αγοράς, αλλά και του ερευνητικού ενδιαφέροντος. Σήμερα μεγάλοι κατασκευαστικοί οίκοι διαθέτουν συστήματα HVDC που χρησιμοποιούν την τεχνολογία VSC, όπως για παράδειγμα η τεχνολογία HVDC Light της ABB [3], και η τεχνολογία HVDC Plus της Siemens [5].

Από το 1997, που τέθηκε σε λειτουργία η πρώτη VSC-HVDC διασύνδεση, μέχρι σήμερα, έχουν υλοποιηθεί δεκάδες ακόμα συνδέσεις, ενώ αρκετές ακόμα είναι προγραμματισμένες για το μέλλον, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.1. Επίσης η ανάπτυξη της τεχνολογίας οδηγεί στην αύξηση των επιπέδων DC τάσης αλλά και της διακινούμενης ισχύος.



Σχήμα 2.1 Προγραμματισμένη Εξέλιξη συνδέσεων VSC-HVDC που βρίσκονται σε λειτουργία. Πηγή: [23, p. 39]



Σχήμα 2.2 Αναπαράσταση Προγραμματισμένων VSC-HVDC διασυνδέσεων ανά Επίπεδο Τάσης/Διακινούμενη Ισχύ και χρονιά θέσεως σε λειτουργία. Πηγή: [23, p. 38]

2.2 Πλεονεκτήματα HVDC – HVAC

Όπως αναφέρθηκε ήδη, η μεταφορά ενέργειας με εναλλασσόμενο ρεύμα επικράτησε λόγω ορισμένων παραγόντων, όπως π.χ. η ευκολία αλλαγής επιπέδου τάσης με χρήση Μ/Σ. Όμως η αλλαγή στο τοπίο της μεταφοράς ενέργειας, η απαίτηση για διασυνδέσεις σε μεγάλες αποστάσεις και η εξέλιξη της τεχνολογίας έχουν οδηγήσει στην ανατροπή της παραπάνω αντίληψης.

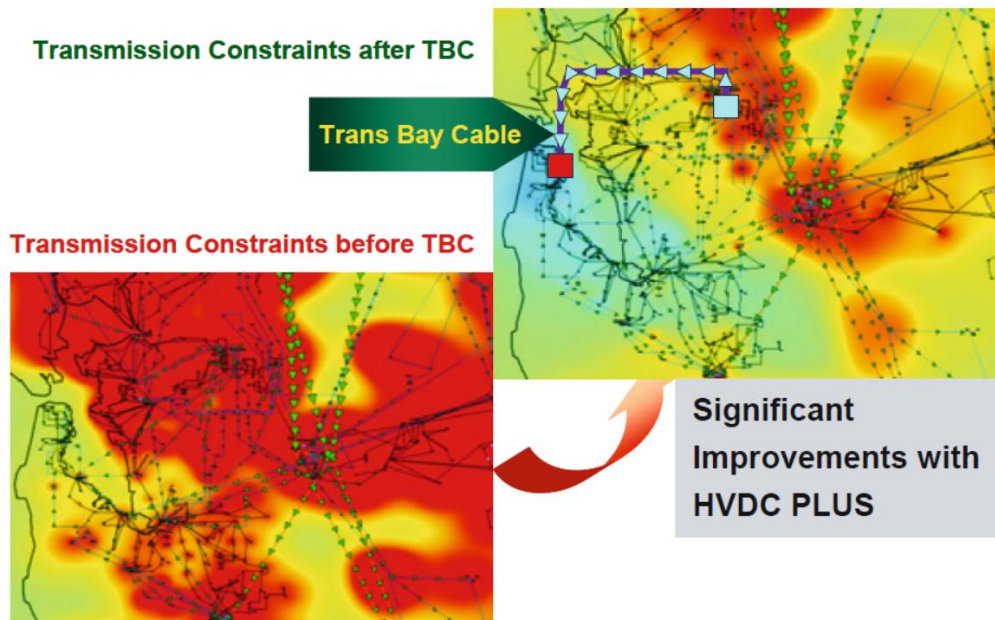
Σήμερα, η μεταφορά ενέργειας με δίκτυα HVDC είτε αποτελεί επιτακτική αναγκαιότητα από τεχνικής απόψεως, ή μπορεί να είναι προτιμητέα λόγω της ευελιξίας που προσφέρει, ή μπορεί να αποτελεί πιο συμφέρουσα και βιώσιμη επένδυση για την επέκταση των δικτύων [44].

Αναλυτικά τα βασικότερα πλεονεκτήματα της τεχνολογίας HVDC έναντι της HVAC συνοψίζονται στα παρακάτω:

- Μεταφορά ενέργειας σε μεγάλες Αποστάσεις.** Ίσως το μεγαλύτερο πλεονέκτημα μεταφοράς ισχύος με συνεχές ρεύμα αποτελεί η άρση του περιορισμού που ισχύει στις AC γραμμές μεταφοράς όσον αφορά ο μήκος τους. Τα χωρητικά και επαγωγικά στοιχεία των γραμμών μεταφοράς δημιουργούν την ανάγκη για ύπαρξη σταθμών αντιστάθμισης αέργου ισχύος, επιβάλλοντας με αυτόν τον τρόπο περιορισμό στο μέγιστο επιτρεπτό μήκος.
Από την άλλη μεριά, η μεταφορά ισχύος με συνεχή τάση, θεωρητικά, δεν εισάγει κανέναν περιορισμό στο μήκος μεταφοράς, καθιστώντας την τεχνολογία HVDC τη μόνη βιώσιμη λύση για μεταφορά ισχύος σε πολύ μεγάλες αποστάσεις. Στην πράξη θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψιν η αναμενόμενη πτώση τάσης στα καλώδια, ως ανασταλτικός παράγοντας για το μήκος μιας διασύνδεσης.
- Απώλειες στις γραμμές μεταφοράς.** Επιπρόσθετα των περιορισμών που εισάγουν ως προς το μήκος των γραμμών μεταφοράς, τα επαγωγικά και χωρητικά ρεύματα αυξάνουν σημαντικά τις απώλειες κατά μήκος των αγωγών, ενώ ταυτόχρονα δημιουργούν την ανάγκη υπερδιαστασιολόγησής τους.
Για μεγάλα μήκη γραμμών, η διαφορά απωλειών μεταξύ AC και DC αντισταθμίζουν τις απώλειες των μετατροπών, καθιστώντας, υπό αυτό το πρίσμα, τη μεταφορά ισχύος με γραμμές HVDC πιο αποδοτική ενεργειακά λύση.
- Σύνδεση ασύγχρονων δικτύων.** Με συμβατικές AC γραμμές μεταφοράς, η σύνδεση ασύγχρονων δικτύων εναλλασσόμενου ρεύματος είναι αδύνατο να πραγματοποιηθεί. Αντίθετα, λόγω του ασύγχρονου χαρακτήρα μιας HVDC διασύνδεσης, αυτό το σενάριο καθίσταται εφικτό, επιτρέποντας τη διασύνδεση δικτύων διαφορετικής συχνότητας ή επιπέδων τάσης. Συνεπώς η τεχνολογία HVDC μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη σύνδεση ασύγχρονων διακρατικών και διηπειρωτικών AC δικτύων.
- Ελεγχιμότητα και Ευστάθεια.** Η ευελιξία στον έλεγχο των μετατροπών στα άκρα μιας HVDC διασύνδεσης, ιδιαίτερα με τη χρήση της τεχνολογίας VSC-HVDC, μπορεί να βοηθήσει στην πιο εύρωστη λειτουργία των δικτύων, καθώς επίσης και στην αύξηση των περιθωρίων ευστάθειάς τους. Η έγχυση ελεγχόμενης αέργου ισχύος, ανεξαρτήτως της ροής της ενεργού ισχύος, μπορεί να συμβάλει στη ρύθμιση τάσης του δικτύου, ενώ προχωρημένες τεχνικές ελέγχου μπορούν να συμβάλουν στη ρύθμιση συχνότητας του δικτύου. Με αυτόν τον τρόπο οι διαχειριστές δικτύων

έχουν τη δυνατότητα να επιτρέψουν τη μεταφορά μεγαλύτερων ποσών ενέργειας από το ήδη υπάρχων AC δίκτυο.

Χαρακτηριστικό παράδειγμα, που τεκμηριώνει τα παραπάνω, αποτελεί το “Trans Bay Cable HVDC project” που συνέδεσε το San Francisco με το Pittsburg. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.3, η δημιουργία της HVDC διασύνδεσης βοήθησε στην αποσυμφόρηση και στην ενίσχυση της ασφάλειας και της αξιοπιστίας του δικτύου [5].

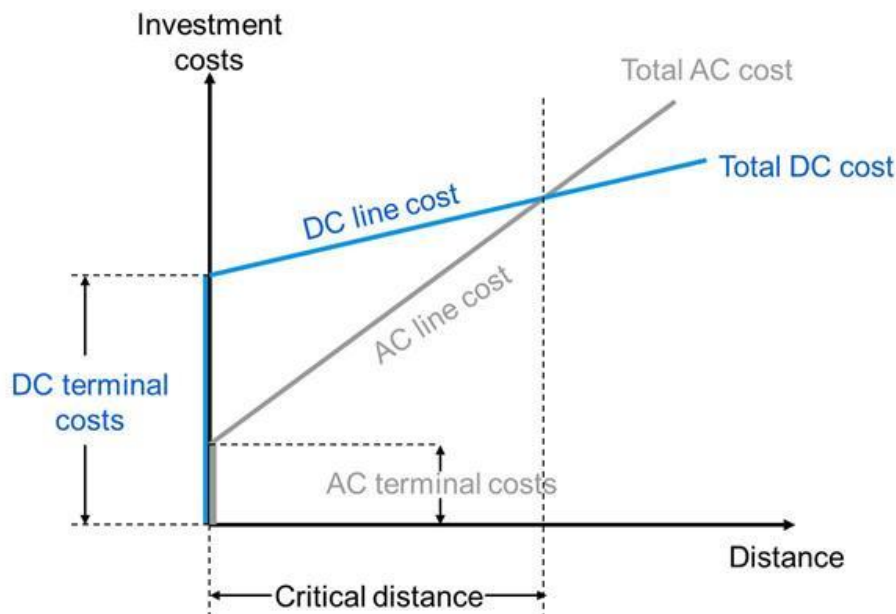


Σχήμα 2.3 Το Ηλεκτρικό Δίκτυο της Καλιφόρνια πριν και μετά το “Trans Bay Cable”. Πηγή: [5]

- **Ισχυροποίηση ΣΗΕ, χωρίς αύξηση ρευμάτων βραχυκύκλωσης.** Η σύνδεση μιας συμβατικής μονάδας παραγωγής σε ένα AC δίκτυο το καθιστά αυτόματα πιο ισχυρό, αλλά ταυτόχρονα αυξάνει τα ρεύματα βραχυκύκλωσης, δημιουργώντας προβλήματα όσον αφορά τις προστασίες. Αντίθετα, οι διασυνδέσεις HVDC δεν αυξάνουν τη στάθμη βραχυκύκλωσης στο σημείο κοινής σύνδεσης με το AC σύστημα. Επομένως, σε περιπτώσεις περιορισμών που οφείλονται στην διαστασιολόγηση των προστασιών, η διασύνδεση νέων σταθμών παραγωγής στο υπάρχον δίκτυο θα μπορούσε να πραγματοποιηθεί μέσω HVDC συνδέσμων [45].
- **Κόστος.** Για μια διασύνδεση δεδομένου μήκους και διακινούμενης ισχύος οι μελέτες βιωσιμότητας της επένδυσης θα πρέπει να λαμβάνουν υπόψιν τρεις βασικούς παράγοντες: α) το κόστος των σταθμών, β) το κόστος των γραμμών μεταφοράς και γ) το κόστος των απωλειών πάνω στις γραμμές μεταφοράς.

Είναι δεδομένο ότι το μεγαλύτερο κόστος για μια HVDC διασύνδεση είναι το κόστος των μετατροπέων, το οποίο υπερβαίνει κατά πολύ το κόστος ενός συμβατικού AC σταθμού. Αντίθετα το κόστος των γραμμών μεταφοράς για τη διακίνηση ίδιας ποσότητας ισχύος στην ίδια απόσταση είναι μεγαλύτερο για τα AC συστήματα (με το επιπρόσθετο κόστος για την εγκατάσταση αντιστάθμισης αέργου ισχύος να πρέπει να ληφθεί υπόψιν). Σε αυτό το κόστος προστίθεται και το κόστος των απωλειών πάνω στις AC γραμμές μεταφοράς. Ως εκ τούτου, υπάρχει μια κρίσιμη απόσταση στην οποία το κόστος των μετατροπέων ενός συστήματος HVDC αντισταθμίζεται από το κόστος των γραμμών μεταφοράς και των απωλειών, καθιστώντας την

επένδυση συστημάτων HVDC βιώσιμη και συμφέρουσα έναντι των συμβατικών AC συστημάτων, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2.4.



Σχήμα 2.4 Συγκριτικό κόστος επένδυσης HVDC-HVAC. Πηγή: [46]

2.3 Τεχνολογίες VSC-CSC HVDC

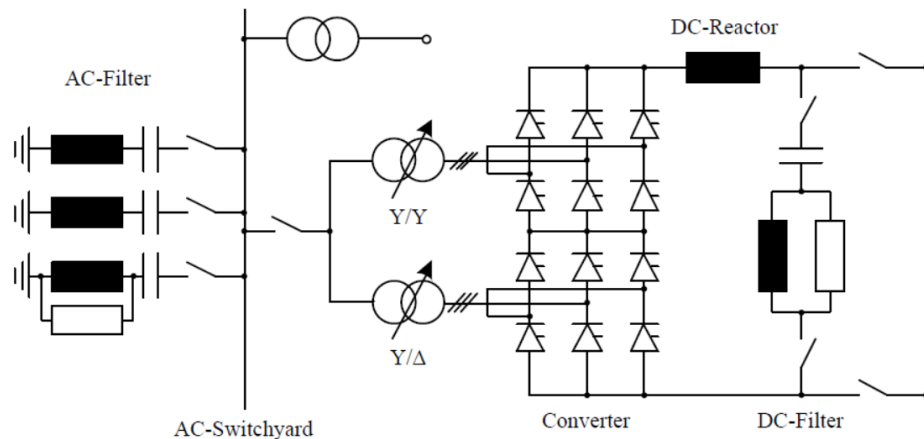
Όπως ήδη αναφέρθηκε στην παράγραφο 2.1, η τεχνολογία HVDC διακρίνεται, ανάλογα με τον τύπο των χρησιμοποιούμενων μετατροπών, σε δύο υποκατηγορίες: α) συμβατική τεχνολογία HVDC που στηρίζεται σε μετατροπείς τύπου πηγής ρεύματος, οι οποίοι χρησιμοποιούν Thyristor και β) HVDC τεχνολογία με μετατροπείς τύπου πηγής τάσης, οι οποίοι βασίζονται σε πλήρως ελεγχόμενους ημιαγωγικούς διακόπτες, και ειδικότερα IGBT's.

Οι μετατροπείς τύπου πηγής ρεύματος ήταν οι πρώτοι που εμφανίστηκαν και σήμερα χρησιμοποιούνται σπάνια σε νέες διασυνδέσεις HVDC, αφού σε μεγάλο βαθμό έχουν αντικατασταθεί από τους VSC μετατροπείς. Στις επόμενες παραγράφους αναλύονται οι δύο διαφορετικές τεχνολογίες, καθώς επίσης τα μειονεκτήματά και τα πλεονεκτήματα που αυτές παρουσιάζουν.

2.3.1 Μετατροπείς τύπου πηγής ρεύματος CSC

Η πιο απλή τοπολογία των μετατροπών CSC αποτελείται από κλασσικές 6-παλμικές γέφυρες ανόρθωσης με θυρίστορ. Λόγω των ψηλών επιπέδων τάσης που απαιτούνται για HVDC εφαρμογές, αλλά και των σχετικά χαμηλών τάσεων αντοχής ενός θυρίστορ, συνήθως κάθε σκέλος αποτελείται από πολλά θυρίστορ συνδεδεμένα σε σειρά.

Σύνηθες είναι να λειτουργούν οι CSC μετατροπείς με 12-παλμικές γέφυρες, συνδέοντας δύο κλασσικές 6-παλμικές γέφυρες σε σειρά, με διαφορά φάσης 30° και χρησιμοποιώντας κατάλληλους μετασχηματιστές Υ-Δ, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.5. Το πλεονέκτημα αυτής της τοπολογίας είναι η μείωση των AC αρμονικών ρευμάτων αλλά και των αρμονικών της DC τάσης.



Σχήμα 2.5 Τυπική CSC-HVDC τοπολογία. Πηγή: [18, p. 13]

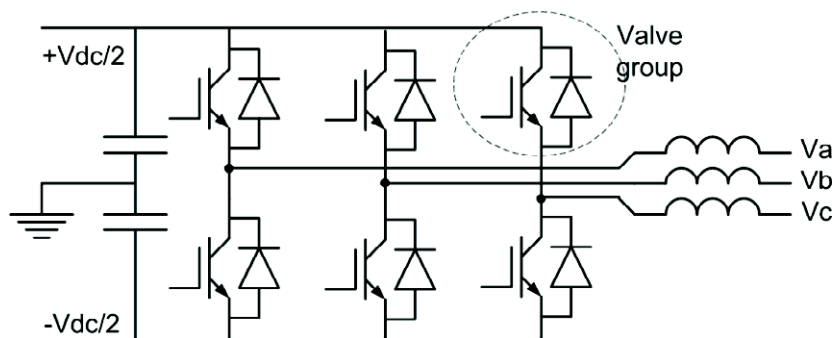
Το βασικότερο μειονέκτημα της τεχνολογίας CSC, είναι πως απαιτεί στο σημείο διασύνδεσης την ύπαρξη AC δικτύου, και μάλιστα αρκετά ισχυρού. Τα θυρίστορ δεν είναι πλήρως ελεγχόμενοι διακόπτες, αφού δεν δύνανται να διακόψουν το ρεύμα που τα διαρρέει, και η μεταγωγή τους εξαρτάται τόσο από τους παλμούς έναυσης, όσο και από την πόλωσή τους. Συνεπώς, η ύπαρξη σύγχρονης AC τάσης είναι απαραίτητη για τη μεταγωγή των διακοπών, κάτι που χαρακτηρίζει τους CSC μετατροπείς και ως Line Commutated Converters (LCC). Ενδεικτικά η ισχύς βραχυκύκλωσης στο σημείο σύνδεσης θα πρέπει να είναι τουλάχιστον 2-3 φορές μεγαλύτερη από τη διακινούμενη ισχύ [18, p. 19], προκειμένου ο μετατροπέας να λειτουργήσει χωρίς προβλήματα ευστάθειας.

Ο έλεγχος της ροής ισχύος σε τέτοιους μετατροπείς πραγματοποιείται με την προσαρμογή της γωνίας έναυσης των θυρίστορ. Δεδομένου ότι η ύπαρξη των θυρίστορ επιβάλλει μονόδρομη ροή ρεύματος, η αντιστροφή της ροής ισχύος απαιτεί την αντιστροφή της DC τάσης του συνδέσμου. Επίσης οι CSC μετατροπείς απαιτούν για τη λειτουργία τους άεργο ισχύ, κάτι που καθιστά απαραίτητη την ύπαρξη μεγάλων φίλτρων αντιστάθμισης στον AC σταθμό. Απαραίτητη κρίνεται και η χρήση φίλτρων στην DC πλευρά, λόγω των μεγάλων αρμονικών ρευμάτων.

Από την άλλη πλευρά, η τεχνολογία CSC-HVDC είναι ικανή να μεταφέρει μεγάλες ποσότητες ισχύος, με πολύ χαμηλές απώλειες, κάτι που την καθιστά, ακόμα και σήμερα, χρήσιμη για εφαρμογές που η ενεργειακή απόδοση έχει μεγάλη βαρύτητα.

2.3.2 Μετατροπείς τύπου πηγής τάσης VSC

Η βασικότερη διαφορά της τεχνολογίας VSC σε σχέση με την τεχνολογία CSC είναι η αντικατάσταση των ημieleγχόμενων θυρίστορ με πλήρως ελεγχόμενους διακόπτες. Συνήθως οι VSC μετατροπείς χρησιμοποιούν IGBT's, τα οποία είναι αυτομεταγόμενα, δηλαδή η σβέση τους και η έναυσή τους δεν εξαρτάται από την τάση δικτύου. Επομένως οι VSC-HVDC διασυνδέσεις δεν απαιτούν την ύπαρξη ισχυρού δικτύου, κάτι που τις καθιστά πιο ευέλικτες, και κατάλληλες για εφαρμογές διασύνδεσης ΘΑΠ και νησιδοποιημένων συστημάτων γενικότερα.



Σχήμα 2.6 Τυπική VSC-HVDC τοπολογία. Πηγή: [8]

Για τη σύνδεση ενός τέτοιου μετατροπέα σε ένα AC δίκτυο, όπως ισχύει εν γένει για τη σύνδεση δύο εναλλασσόμενων πηγών τάσης, απαιτούνται αυτεπαγωγές διασύνδεσης, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.6. Η ροή ενεργού, αλλά και αέργου ισχύος, πραγματοποιείται με τον έλεγχο της τάσης εξόδου του μετατροπέα μέσω τεχνικών διαμόρφωσης εύρους παλμών (Pulse Width Modulation - PWM) και σύμφωνα με τις κλασσικές σχέσεις μεταφοράς ισχύος σε AC δίκτυα.

$$p = \frac{V_{grid} \cdot V_{converter}}{X_R} \sin \delta \quad (2.1)$$

$$q = \frac{V_{grid} \cdot (V_{grid} - V_{converter} \cdot \cos \delta)}{X_R} \quad (2.2)$$

Από τις παραπάνω σχέσεις γίνεται εμφανές το πλεονέκτημα της τεχνολογίας VSC-HVCD να ελέγχει τη ροή τόσο της ενεργού όσο και της αέργου ισχύος, ανεξάρτητα τη μία από την άλλη, με μοναδικό περιορισμό τη διατήρηση του συνολικού ρεύματος σε επιτρεπτά επίπεδα, αλλά και τη διατήρηση του ισοζυγίου ισχύος στα δύο άκρα της διασύνδεσης. Ταυτόχρονα ο VSC μετατροπέας μπορεί να λειτουργεί με οποιονδήποτε συντελεστή ισχύος, και επομένως δεν απαιτεί την ύπαρξη επιπλέον φίλτρων αντιστάθμισης, μειώνοντας σημαντικά το κόστος αλλά και τον χώρο που απαιτείται για την εγκατάσταση.

Όσον αφορά την ύπαρξη αρμονικών, οι ψηλές συχνότητες διαμόρφωσης, αλλά και οι τεχνολογία των πολυεπίπεδων μετατροπέων (Κεφάλαιο 3) επιτρέπουν τη μείωση της αρμονικής παραμόρφωσης της τάσης και τη μετάθεση της κύριας αρμονικής συνιστώσας σε υψηλότερες συχνότητες. Τα φίλτρα που απαιτούνται για την εξάλειψη των παραπάνω αρμονικών είναι σημαντικά μικρότερα, και σε ορισμένες περιπτώσεις δεν είναι και απαραίτητα.

2.3.3 Σύνοψη

Όπως αναλύεται στις προηγούμενες παραγράφους, οι τεχνολογίες VSC και CSC παρουσιάζουν εγγενείς διαφορές στη δομή τους, και άρα προσφέρουν εντελώς διαφορετικές λειτουργικότητες. Από την οπτική του συστήματος, οι LCC-CSC HVDC διασυνδέσεις μοιάζουν με παθητικό στοιχείο, χωρίς να προσφέρουν δυνατότητες ελέγχου πέρα από τη ρύθμιση της ενεργού ισχύος. Αντίθετα, η τεχνολογία VSC-HVDC προσφέρει ανώτερες λειτουργίες στον εκάστοτε διαχειριστή του συστήματος μεταφοράς, όπως πλήρης και ανεξάρτητος έλεγχος ενεργού και αέργου ισχύος, βελτίωση της μεταβατικής ευστάθειας, σύνδεση σε αδύναμα δίκτυα, ικανότητα στήριξης τάσης κτλ.

Στον Πίνακα 2.1, παρουσιάζονται αναλυτικά τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της κάθε τεχνολογίας.

Functionality	LCC CSC-HVDC		VSC-HVDC	
Power Transmission	OHTL	Cable	OHTL	Cable
Maximum Voltage level	800 kV dc	500 kV dc	640 kV dc	600 kV dc
Maximum Power Rating	< 7500 MW		< 1600 MW	
Maximum Transmission Distance	Unlimited		Theoretically Unlimited (Voltage drop over line to be considered)	
Converter Station Footprint	200x120x20 m (600 MW)		120x50x11 m (550 MW)	
Active Power Control	Continuous, 10% minimum load		Continuous and fast, no technical minimum limit	
Reactive Power Control	50%-60% of converter power rating Cannot be controlled, Compensated by reactive power banks and harmonic filters		Fully Controllable, can provide or consume reactive power as required	
Power Reversal	DC Voltage Reversal		DC Current Reversal	
Susceptibility to commutation failures	AC system failures lead to commutation failures		VSC valves are self-commutating and commutation failures due to AC system fault or AC voltage disturbances do not occur	
Necessary Filter Equipment	High Demand		Low demand in PWM, not necessary with MultiLevel Topologies	
Grid Connection Requirements	Strong network, SCR> 2		Can supply Power to a passive network	
Multi Terminal Grids	Multi terminal Schemes require more complicated control schemes as power flow reversal is achieved through change of polarity, thus impacting on all connected converters		VSC are considered more appropriate for multi-terminal schemes as power flow reversal is achieved by changing current direction	
Black Start / Island Supply	Unavailable		Available	
Typical Power Loss in the two converter stations at full power	0.70%		1.2-1.4%	
Cost	Lower Cost per installed MW		As guide, 25% more expensive	

Πίνακας 2.1 Αναλυτική σύγκριση τεχνολογιών CSC & VSC-HVDC. Πηγές [18, pp. 19,35, 23, p. 47]

Συνοψίζοντας, οι δύο τεχνολογίες που αναλύονται στις προηγούμενες παραγράφους, παρουσιάζουν διαφορετικά πλεονεκτήματα, αλλά και μειονεκτήματα. Η τεχνολογία VSC δείχνει σήμερα να κερδίζει έδαφος σε εφαρμογές διασύνδεσης θαλάσσιων αιολικών πάρκων, ασύγχρονων και ασθενών ΣΗΕ με προβλήματα ευστάθειας και νησιδοποιημένων συστημάτων, λόγω της

ευελιξίας που προσφέρει στον έλεγχο ενεργού και αέργου ισχύος, τη συμβολή στη μεταβατική ευστάθεια των συστημάτων αλλά και την ικανότητα για black-start. Ταυτόχρονα αποτελεί μονόδρομο σε εφαρμογές πολυτερματικών δικτύων, καθώς επιτρέπει την αντιστροφή ροής ισχύος χωρίς να απαιτείται η αντιστροφή της πολικότητας της DC τάσης.

Αντίθετα, η τεχνολογία CSC-HVDC κυριαρχεί σε εφαρμογές διακίνησης μεγάλων ποσοτήτων ισχύος, σε πολύ υψηλά επίπεδα τάσης, όπου η απώλειες αποτελούν κρίσιμο παράγοντα, όπως αποδεικνύει και ο Πίνακας 2.2.

#	Name	Type	DC Voltage	Rated power	DC-Circuit	Commissioning Year
1	Caprivi Link	VSC	±350 kV	300 MW	OHTL	2009
2	BorWin 1	VSC	±150 kV	400 MW	Sea Cable	2009
3	Estlink	VSC	±150 kV	350 MW	Sea Cable	2006
4	Murraylink	VSC	±150 kV	220 MW	Land Cable	2002
5	Transbay	VSC	±200 kV	400 MW	Sea Cable	2010
6	Inelfe	VSC	±320 kV	2x1000 MW	Land Cable	2013
7	NorNed	CSC	±450 kV	700 MW	Sea Cable	2007
8	BritNed	CSC	±450 kV	1000 MW	Sea Cable	2011
9	Ballia-Bhiwadi	CSC	±500 kV	2500 MW	OHTL	2010
10	Hukunbeir-Liaonin	CSC	±500 kV	3000 MW	OHTL	2009
11	Yunnan-Guangdong	CSC	±800 kV	5000 MW	OHTL	2010
12	Xiangjiaba-Shanghai	CSC	±800 kV	6400 MW	OHTL	2010

Πίνακας 2.2 Παραδείγματα σύγχρονων CSC-VSC HVDC συστημάτων. Πηγή: [18, ρ. 36]

2.4 Τοπολογίες HVDC

Ανεξαρτήτως της χρησιμοποιούμενης τεχνολογίας μετατροπών, μπορούν να διακριθούν δύο βασικές τοπολογίες για συστήματα HVDC διασυνδέσεων: (α) τοπολογία μονοπόλου και (β) τοπολογία διπόλου. Κάθε τοπολογία μπορεί να διαθέτει διάφορες παραλλαγές, κυρίως ως προς το μονοπάτι επιστροφής του ρεύματος και την ύπαρξη ή όχι μεταλλικού αγωγού για τον σκοπό αυτό.

Επίσης πέρα από τις παραπάνω τοπολογίες, που αφορούν ακτινικές (point-to-point) διασυνδέσεις, η τεχνολογία HVDC συναντάται και σε πολυτερματικά δίκτυα (Multi Terminal DC - MTDC), καθώς επίσης και σε τοπολογίες Back-to-Back. Παρακάτω πραγματοποιείται αναλυτική περιγραφή κάθε τοπολογίας και των πλεονεκτημάτων που παρουσιάζει κάθε μια [3, 21].

2.4.1 Τοπολογίες Μονοπόλου

Στις τοπολογίες μονοπόλου, όπως υποδηλώνει και το όνομά τους, η διασύνδεση διαθέτει μόνο ένα πόλο μεταφοράς ισχύος, δηλαδή μόνο ένα μετατροπέα στο κάθε άκρο της διασύνδεσης. Στο Σχήμα 2.7 απεικονίζονται οι βασικές παραλλαγές της τοπολογίας μονοπόλου. Αυτές διακρίνονται σε:

α) Τοπολογία Συμμετρικού Μονοπόλου. Αυτή η τοπολογία χρησιμοποιεί δύο πλήρως μονωμένους αγωγούς υψηλής τάσης για την HVDC διασύνδεση, που συνήθως λειτουργούν σε

συμμετρικές ως προς γη τάσεις, αντίθετης πολικότητας. Ειδικά σε συστήματα VSC-HVDC, η DC πλευρά γειώνεται στη μεσαία λήψη των πυκνωτών σύνδεσης.

Η συμμετρία της τοπολογίας αυτής αποτελεί το σημαντικότερο πλεονέκτημά της, σε σχέση με μη συμμετρικές τοπολογίες, αφού δεν δημιουργεί DC καταπονήσεις στους μετασχηματιστές του AC δικτύου. Επίσης σημαντικό πλεονέκτημα αποτελεί το γεγονός ότι σε περιπτώσεις σφάλματος ως προς γη στην DC πλευρά, το σφάλμα δεν τροφοδοτείται με ρεύματα από την AC πλευρά.

Στα αρνητικά της τοπολογίας αυτής συγκαταλέγεται το αυξημένο κόστος, καθώς απαιτεί την ύπαρξη δύο πλήρως μονωμένων καλωδίων υψηλής τάσης, αλλά και η μειωμένη αξιοπιστία της, καθώς σε περίπτωση απώλειας ενός πόλου, ολόκληρη η HVDC διασύνδεση παύει να λειτουργεί.

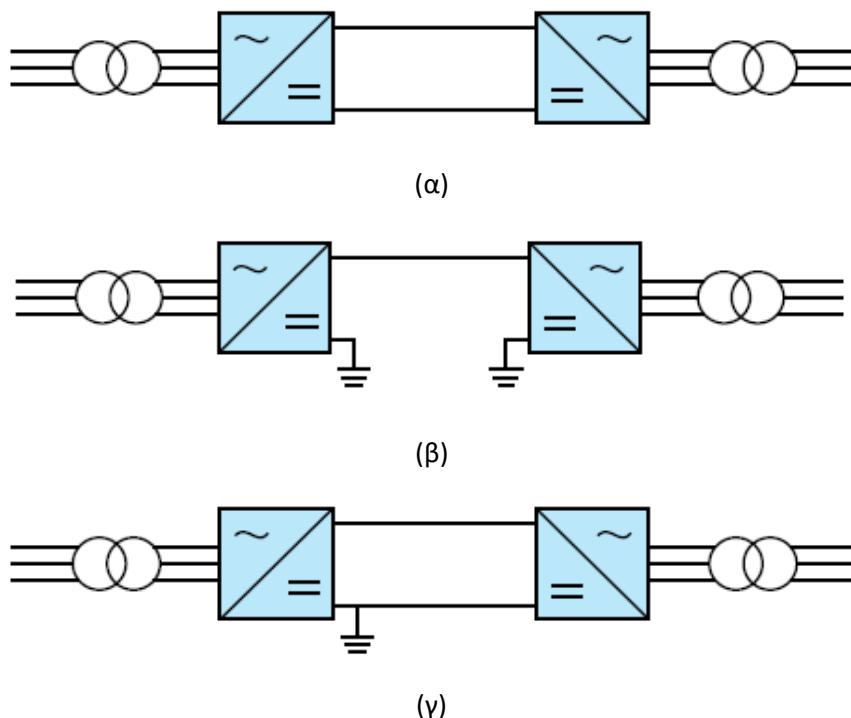
β) Τοπολογία Ασύμμετρου Μονοπόλου με Ηλεκτρόδια Γείωσης. Η τοπολογία χρησιμοποιεί για την DC διασύνδεση μόνο έναν αγωγό υψηλής τάσης, ενώ η επιστροφή του ρεύματος πραγματοποιείται μέσω ηλεκτροδίων γείωσης.

Προφανές πλεονέκτημα αυτής της τοπολογίας είναι η σημαντική μείωση του κόστους, αφού απαιτείται μόνο ένας αγωγός. Επίσης παρουσιάζει μειωμένες απώλειες, αφού τα ηλεκτρόδια γείωσης έχουν σημαντικά μειωμένη αντίσταση σε σχέση με έναν μεταλλικό αγωγό μεγάλου μήκους. Παράλληλα αυτή η τοπολογία είναι εύκολο να επεκταθεί σε τοπολογία διπόλου.

Το βασικότερο μειονέκτημα αυτής της τοπολογίας είναι η συνεχής λειτουργία με μεγάλα DC ρεύματα που προέρχονται από τη γη. Η συνεχής άντληση μεγάλων ρευμάτων μέσω γείωσης προκαλεί σημαντικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις, όπως διάβρωση μεταλλικών επιφανειών [18, p. 16], και σε αρκετές περιπτώσεις δεν είναι επιτρεπτή [20, p. 43]. Παράλληλα, η ασυμμετρία της τοπολογίας αυτής συνεπάγεται την ύπαρξη DC συνιστώσας στις φασικές τάσεις εξόδου του μετατροπέα, κάτι που έχει ως συνέπεια την απαίτηση για ειδική σχεδίαση των μετασχηματιστών για αντοχή σε DC καταπονήσεις. Ταυτόχρονα, βασικό μειονέκτημα αυτής της τοπολογίας είναι η τροφοδότηση DC σφαλμάτων με ρεύματα από την AC πλευρά. Τέλος, ως μονοπολική τοπολογία, προσφέρει μειωμένη αξιοπιστία.

γ) Τοπολογία Ασύμμετρου Μονοπόλου με Μεταλλική Επιστροφή. Αυτή η τοπολογία αποτελεί έναν συμβιβασμό μεταξύ των δύο παραπάνω τοπολογιών συμμετρικού μονοπόλου και ασύμμετρου μονοπόλου με ηλεκτρόδια γείωσης, καθώς για την επιστροφή δεν χρησιμοποιεί πλήρως μονωμένους αγωγούς υψηλής τάσης, αλλά ούτε και ηλεκτρόδια γείωσης. Αντίθετα, χρησιμοποιείται μεταλλικός αγωγός, γειωμένο στη μία άκρη της διασύνδεσης, ο οποίος δεν χρειάζεται να διαθέτει μόνωση για υψηλές τάσεις.

Αυτή η τοπολογία επομένως συνδυάζει μειωμένο κόστος, σε σχέση με το συμμετρικό μονόπολο, δεν απαιτεί μόνιμα ρεύματα γείωσης, ενώ διατηρεί όλα τα μειονεκτήματα της μονοπολικής, αλλά και ασύμμετρης τοπολογίας, τα οποία παρουσιάζονται παραπάνω.



Σχήμα 2.7 Παραλλαγές Τοπολογίας Μονόπολου για συστήματα HVDC. α) Συμμετρικό Μονόπολο, β) Ασύμμετρο Μονόπολο με Ηλεκτρόδια Γείωσης και γ) Ασύμμετρο Μονόπολο με Μεταλλική Επιστροφή . Πηγή: [3]

2.4.2 Τοπολογίες Διπόλου

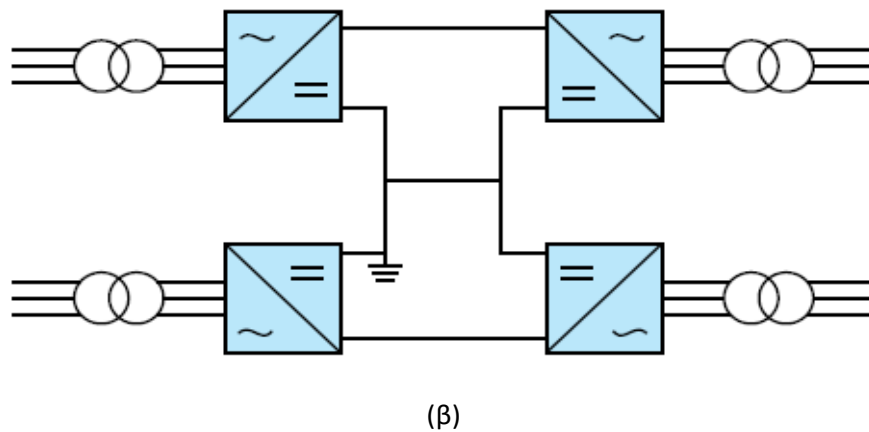
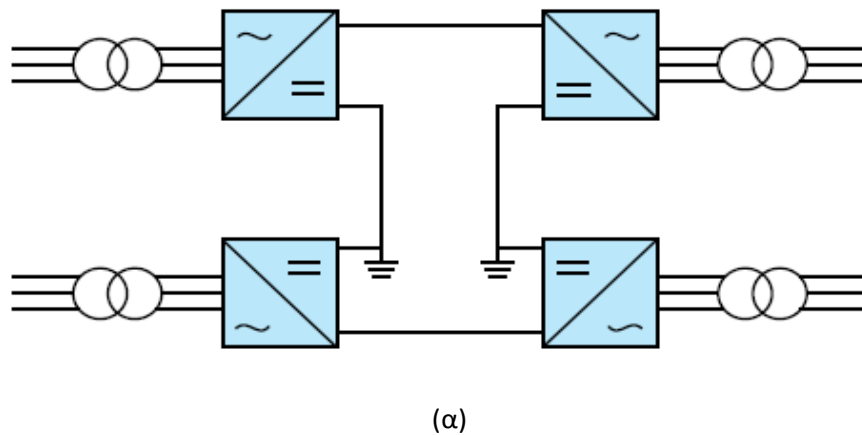
Σε αντίθεση με τις τοπολογίες μονοπόλου, ένα δίπολο διαθέτει δύο μετατροπείς σε κάθε άκρο της HVDC διασύνδεσης, οι οποίοι μπορούν να λειτουργούν ανεξάρτητα ο ένας από τον άλλον. Η τοπολογίες διπόλου προσφέρουν αυξημένη αξιοπιστία στο σύστημα, αφού ο ένας πόλος μπορεί να συνεχίσει να λειτουργεί κανονικά σε περίπτωση απώλειας του άλλου (N-1 λειτουργία), αλλά όμως έχουν σημαντικά μεγαλύτερο κόστος εγκατάστασης. Παράλληλα, η αναπόφευκτη ασυμμετρία που παρουσιάζει κάθε τοπολογία διπόλου, έχει ως συνέπεια τα αντίστοιχα προβλήματα που αναφέρονται και στις ασύμμετρες τοπολογίες μονοπόλου. Στο Σχήμα 2.8 απεικονίζονται οι δύο πιο συνήθεις παραλλαγές της τοπολογίας διπόλου.

α) Τοπολογία Διπόλου με Ηλεκτρόδια Γείωσης. Σε αυτήν την τοπολογία ο ένας πόλος του κάθε μετατροπέα είναι γειωμένος, ενώ ο άλλος συνδέεται με πλήρως μονωμένο αγωγό υψηλής τάσης. Όταν οι δύο μετατροπείς σε κάθε άκρο της διασύνδεσης λειτουργούν σε ίδια επίπεδα φόρτισης, τότε δεν υπάρχει ροή ρεύματος μέσω γείωσης. Αντίθετα, σε περιπτώσεις απώλειας ενός πόλου, το ρεύμα επιστροφής του πόλου που παραμένει σε λειτουργία αντλείται μέσω της γείωσης.

Επομένως στα θετικά αυτής της τοπολογίας συγκαταλέγεται η αξιοπιστία που προσφέρει, και η δυνατότητα λειτουργίας του ενός πόλου σε περίπτωση απώλειας του άλλου, με τίμημα το αυξημένο κόστος εγκατάστασης.

Παράλληλα, η τοπολογία αυτή απαιτεί άδεια για εγκατάσταση ηλεκτροδίων και προσωρινή άντληση ρευμάτων από τη γείωση, σε περιπτώσεις απώλειας ενός πόλου και γενικά σε συνθήκες ασύμμετρης φόρτισης των δύο πόλων, ενώ κληρονομεί και τα μειονεκτήματα ασύμμετρων

τοπολογιών, όπως καταπόνηση των μετασχηματιστών και τροφοδότηση DC σφαλμάτων από την AC πλευρά



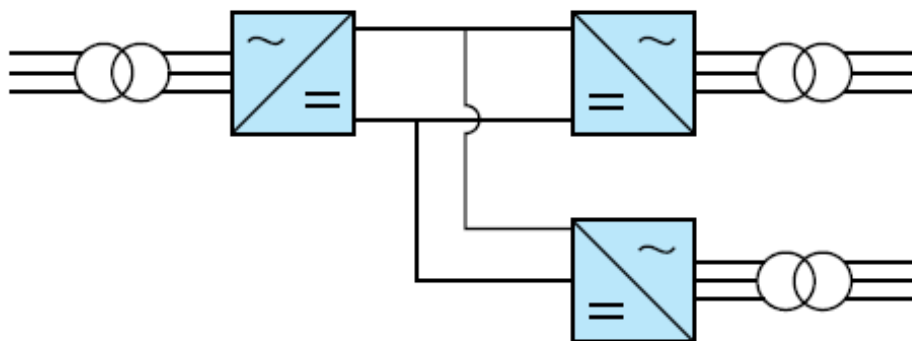
Σχήμα 2.8 Παραλλαγές Τοπολογίας Διπόλου για συστήματα HVDC. α) Δίπολο με Ηλεκτρόδια Γείωσης και β) Δίπολο με Μεταλλικό Ουδέτερο. Πηγή: [3]

β) Τοπολογία Διπόλου με Μεταλλικό Ουδέτερο. Η διαφορά αυτής της τοπολογίας με την τοπολογία διπόλου με ηλεκτρόδια γείωσης είναι η ύπαρξη αγωγού μέσης ή χαμηλής τάσης που χρησιμεύει για την επιστροφή των ρευμάτων σε συνθήκες ασύμμετρης φόρτισης.

Επομένως πλεονεκτεί έναντι της παραπάνω τοπολογίας ως προς περιβαλλοντικά θέματα, αφού δεν απαιτεί ρεύματα μέσω της γείωσης, αλλά μειονεκτεί ως προς το κόστος καθώς απαιτείται ένας επιπλέον αγωγός.

2.4.3 Πολυτερματικό Δίκτυο - MTDC

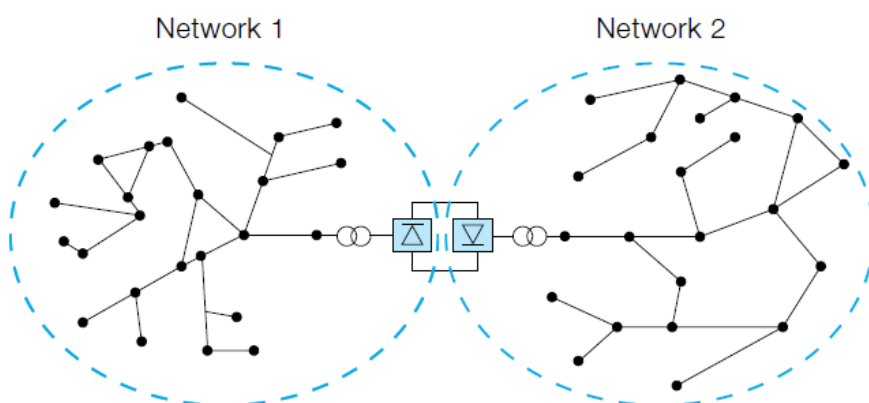
Τα πολυτερματικά δίκτυα αποτελούνται από περισσότερους από δύο τερματικούς σταθμούς συνδεδεμένους στην DC πλευρά. Ένα MTDC δίκτυο μπορεί να κατασκευαστεί από μετατροπείς συνδεδεμένους σε όλες τις παραπάνω τοπολογίες, ή και συνδυασμό αυτών. Αξίζει να αναφερθεί ότι πολυτερματικές διαμορφώσεις είναι δύσκολο να υλοποιηθούν με μετατροπείς CSC. Η εμφάνιση των μετατροπέων VSC έδωσε ώθηση σε αυτό το πεδίο, οδηγώντας σταδιακά προς την δημιουργία MTDC δικτύων με σκοπό τη διασύνδεση AC συστημάτων και ΘΑΠ. Στο Σχήμα 2.9 εικονίζεται ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα MTDC τριών τερματικών σταθμών, βασιζόμενο σε τοπολογία συμμετρικού μονοπόλου.



Σχήμα 2.9 Παράδειγμα Πολυτερματικού Δικτύου βασισμένο σε τοπολογία Συμμετρικού Μονοπόλου. Πηγή: [3]

2.4.4 Τοπολογία Back-to-Back

Στο Σχήμα 2.10 εικονίζεται μια HVDC διαμόρφωση Back-to-Back. Η τοπολογία αυτού του τύπου χρησιμοποιεί δύο μετατροπείς που βρίσκονται ο ένας κοντά στον άλλον, στον ίδιο σταθμό, χωρίς την ύπαρξη DC γραμμής μεταφοράς. Ένας σταθμός Back-to-Back HVDC χρησιμοποιείται για τη διασύνδεση δύο ασύγχρονων ΣΗΕ, αλλά και σε περιπτώσεις που υπάρχουν τεχνικές προκλήσεις όσον αφορά την ευστάθεια και την ευρωστία των συστημάτων.



Σχήμα 2.10 Τοπολογία διασύνδεσης Back-to-Back. Πηγή: [3]

2.4.5 Σύνοψη

Οι δύο βασικές τοπολογίες που παρουσιάστηκαν στις προηγούμενες παραγράφους είναι οι τοπολογίες Μονοπόλου και Διπόλου.

Η τοπολογία μονοπόλου και οι βασικές παραλλαγές της χαρακτηρίζονται από χαμηλότερο συγκριτικό κόστος, αφού απαιτείται η ύπαρξη μόνο ενός μετατροπέα σε κάθε τερματικό σταθμό. Το κόστος μπορεί να μειωθεί περαιτέρω, αφαιρώντας τον έναν αγωγό υψηλής τάσης, και αντικαθιστώντας τον με ηλεκτρόδια γείωσης ή με αγωγό χαμηλής τάσης, με τίμημα την ασύμμετρη διαμόρφωση, αλλά και περιβαλλοντικές συνέπειες άντλησης ρευμάτων από τα ηλεκτρόδια γείωσης.

Η τοπολογία διπόλου χαρακτηρίζεται από υψηλότερο κόστος εγκατάστασης, δεδομένου ότι απαιτεί δύο μετατροπείς σε κάθε άκρο της διασύνδεσης, αλλά προσφέρει αυξημένη αξιοπιστία.

Κάθε πόλος λειτουργεί ανεξάρτητα από τον άλλον, κάτι που δίνει τη δυνατότητα για λειτουργία σε συνθήκες N-1, δηλαδή απώλειας του ενός από τους δύο πόλους. Παράλληλα η ασύμμετρη φύση της τοπολογίας διπόλου έχει ως συνέπεια να υπάρχουν DC καταπονήσεις στους μετασχηματιστές, αλλά και να υπάρχει τροφοδότηση των σφαλμάτων ως προς γη στην DC πλευρά από την AC, και το αντίστροφο.

Στον Πίνακα 2.3 συνοψίζονται τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της κάθε τοπολογίας.

	Συμμετρικό Μονόπολο	Ασύμμετρο Μονόπολο με Ηλεκτρόδια Γείωσης	Ασύμμετρο Μονόπολο με Μεταλλική Επιστροφή	Δίπολο με Ηλεκτρόδια Γείωσης	Δίπολο με Μεταλλικό Ουδέτερο
Τοπολογία Μονοπόλου/Διπόλου	Μονόπολο	Μονόπολο (Δυνατότητα επέκτασης σε Δίπολο)	Μονόπολο (Δυνατότητα επέκτασης σε Δίπολο)	Δίπολο	Δίπολο
Αριθμός Αγωγών ΥΤ(ΜΤ)	2(0)	1(0)	1(1)	2(0)	2(1)
Αριθμός Μετατροπών σε κάθε άκρο	1	1	1	2	2
DC καταπονήσεις Μ/Σ	Όχι	Ναι	Ναι	Ναι	Ναι
Τροφοδότηση Σφαλμάτων DC από AC πλευρά	Όχι	Ναι	Ναι	Ναι	Ναι
Ρεύματα Γείωσης	Όχι	Μόνιμα	Όχι	Προσωρινά (Σε συνθήκες σφάλματος ή ασύμμετρης φόρτισης)	Όχι
Λειτουργία N-1	Όχι	Όχι	Όχι	Ναι	Ναι
Κόστος	3	1	2	4	5

Πίνακας 2.3 Σύγκριση Τοπολογιών HVDC

3 ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ VSC ΠΟΛΛΑΠΛΩΝ ΕΠΙΠΕΔΩΝ – ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΙΣ MMC

3.1 Επισκόπηση Τεχνολογιών Μετατροπών Πολλαπλών Επιπέδων

Όπως αναφέρθηκε στην παράγραφο 2.3.2, οι μετατροπείς τύπου VSC είναι ελεγχόμενες πηγές τάσης. Στην έξοδό τους εμφανίζουν κλάσμα, ή ολόκληρη την DC τάση που εφαρμόζεται στην είσοδό τους, συνθέτοντας με αυτόν τον τρόπο την εναλλασσόμενη τάση εξόδου. Ανάλογα με το πλήθος των ανεξάρτητων διακοπών που διαθέτει κάθε μετατροπέας, έχει τη δυνατότητα να εμφανίζει και διαφορετικό πλήθος διακριτών επιπέδων τάσης στην έξοδό του, προσεγγίζοντας με μεγαλύτερη ακρίβεια την επιθυμητή ημιτονική κυματομορφή, και ως εκ τούτου, περιορίζοντας το αρμονικό περιεχόμενο της κυματομορφής και την ανάγκη για μεγάλα AC φίλτρα.

Οι πρώτοι εμπορικοί μετατροπείς ήταν μετατροπείς δύο επιπέδων, δηλαδή εμφάνιζαν δύο επίπεδα τάσης στην έξοδό τους ($\pm U_{dc}/2$). Σταδιακά όμως στην αγορά εισήχθησαν μετατροπείς περισσοτέρων επιπέδων, δίνοντας τη δυνατότητα σημαντικής μείωσης του αρμονικού περιεχομένου με ταυτόχρονη μείωση της διακοπτικής συχνότητας και των απωλειών, όπως φαίνεται και στον Πίνακα 3.1. **Error! Reference source not found.**

Technology	Year first scheme commissioned	Converter Type	Typical Losses per converter (%)	Switching frequency (Hz)	Example Project
HVDC Light 1st Gen	1997	Two-Level	3	1950	Gotland
	2000	Three-level Diode NPC	2.2	1500	Eagle Pass
HVDC Light 2nd Gen	2002	Three-level Active NPC	1.8	1350	Murraylink
HVDC Light 3rd Gen	2006	Two-Level with OPWM	1.4	1150	Estlink
HVDC Plus	2010	MMC	1	<150 (ανά υπομονάδα)	Trans Bay Cable
HVDC MaxSine	2014	MMC	1	<150 (ανά υπομονάδα)	SuperStation
HVDC Light 4th Gen	2015	CTL	1	=>150 (ανά υπομονάδα)	Dolwin 2c

Πίνακας 3.1 Εξέλιξη Πολυεπίπεδων Μετατροπών VSC-HVDC από διάφορους κατασκευαστές. Πηγή: [8]

Οι πιο διαδεδομένες διαμορφώσεις μετατροπών πολλών επιπέδων, οι οποίες εμφανίζονται και με διάφορες παραλλαγές, είναι οι παρακάτω:

α) Πολυεπίπεδος Μετατροπέας με διόδους περιορισμού (Diode-Clamped Multilevel Inverter DCMI ή Neutral Point-Clamped NPC). Οι μετατροπείς n-επιπέδων αυτού του τύπου χρησιμοποιούν n-1 πυκνωτές για να διαιρέσουν την τάση εισόδου. Ο έλεγχος της τάσης εξόδου πραγματοποιείται με την κατάλληλη παλμοδότηση των $2 \cdot (n-1)$ ημιαγωγικών διακοπών κάθε σκέλους. Πέρα από τις διόδους ελεύθερης διέλευσης του κάθε ημιαγωγικού στοιχείου, η τοπολογία αυτή απαιτεί $2 \cdot (n-2)$

διόδους (εάν η τάση αποκοπής των διόδων απαιτείται να είναι η ίδια με αυτή των ημιαγωγικών στοιχείων απαιτείται η εν σειρά σύνδεση πολλών διόδων, ανεβάζοντας τον αριθμό των σε $(n-1)*(n-2)$ ανά φάση οι οποίες περιορίζουν-εξασφαλίζουν σταθερή τάση αποκοπής για κάθε ημιαγωγικό στοιχείο ίση με $U_{dc}/(n-1)$, από όπου προκύπτει και η ονομασία της τοπολογίας.

Αυτή η τοπολογία για μεγάλο αριθμό επιπέδων επιτυγχάνει χαμηλό αρμονικό περιεχόμενο, με διακοπτική συχνότητα κοντά στη θεμελιώδη, εξασφαλίζοντας μικρές απώλειες. Το βασικό της μειονέκτημα είναι ο αριθμός διόδων που απαιτείται, ο οποίος είναι ιδιαίτερα υψηλός, ακόμα και μη λειτουργικός [47, pp. 285-295].

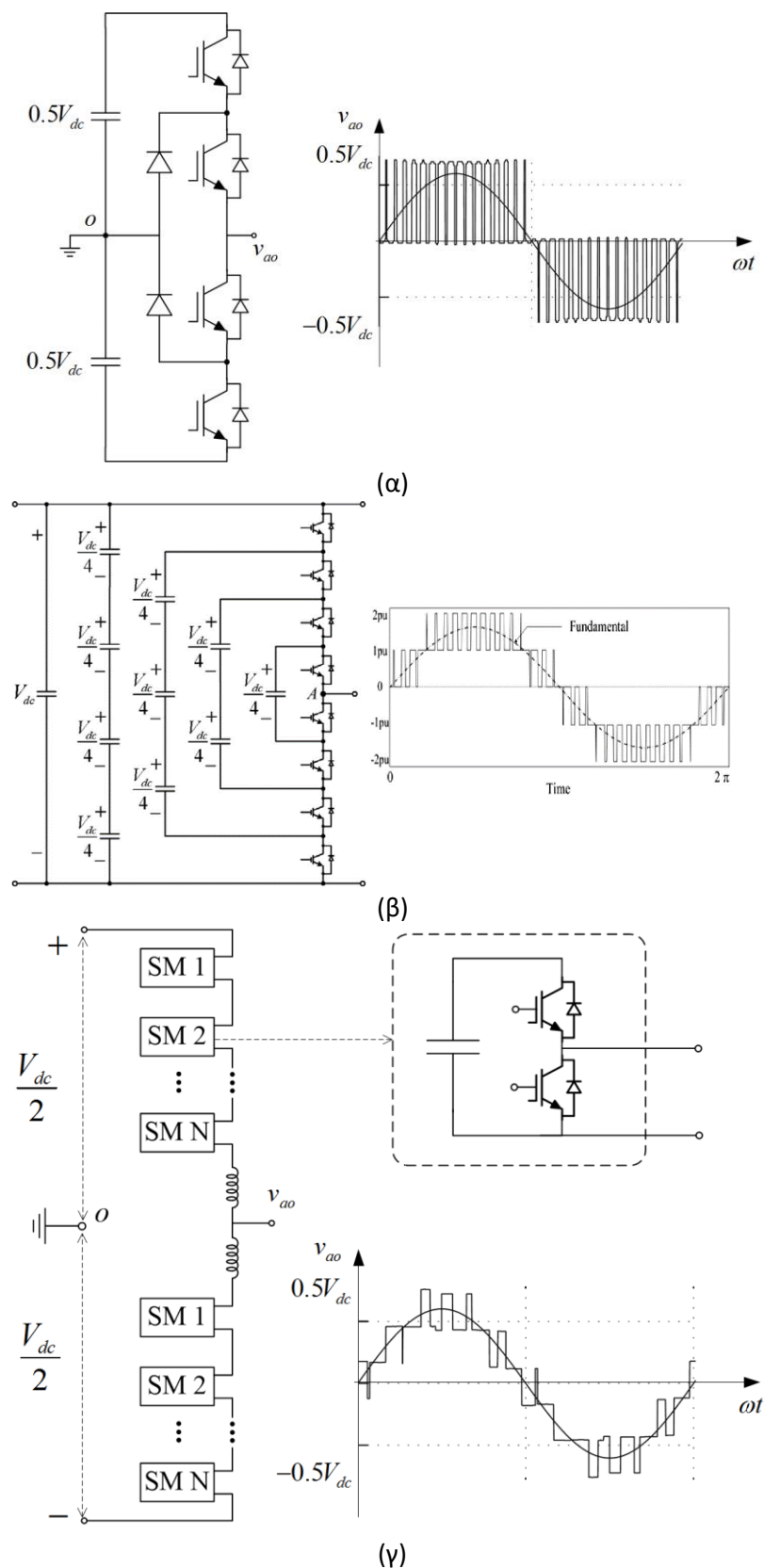
Στο Σχήμα 3.1α απεικονίζεται η μια φάση ενός μετατροπέα NPC 3 επιπέδων, καθώς επίσης και η κυματομορφή εξόδου της.

β) Πολυεπίπεδος Μετατροπέας με πλωτούς πυκνωτές περιορισμού (Flying-Capacitors Multilevel Inverter FCMI). Οι μετατροπείς FCMI n -επιπέδων, όπως και οι DCMΙ χρησιμοποιούν $n-1$ πυκνωτές για τη διαίρεση της DC τάσης. Τον ρόλο περιορισμού της τάσης αποκοπής για κάθε ημιαγωγικό στοιχείο αναλαμβάνουν συστοιχίες πυκνωτών συνδεδεμένες κλιμακωτά, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.1β. Οι πυκνωτές αιωρούνται μεταξύ των ζυγών τροφοδοσίας, από όπου λαμβάνει το όνομά της και η συγκεκριμένη τοπολογία. Για ένα μετατροπέα n -επιπέδων απαιτούνται ανά φάση $2*(n-1)$ ημιαγωγικά στοιχεία και $(n-1)*(n-2)/2$ πυκνωτές περιορισμού.

Στα πλεονεκτήματα αυτής της τοπολογίας, επιπλέον όσον αναφέρονται και στην προηγούμενη παράγραφο, συγκαταλέγεται η πληθώρα διακοπτικών καταστάσεων που δημιουργούν την ίδια τάση στην έξοδο, δίνοντας τη δυνατότητα για ομοιόμορφη τάση των πυκνωτών. Βασικό μειονέκτημα όμως αποτελεί ο μεγάλος αριθμός πυκνωτών που απαιτείται [47, pp. 295-304].

γ) Πολυεπίπεδος Μετατροπέας με χρήση υπομονάδων (Modular Multilevel Converter - MMC). Για εφαρμογές μέσης και υψηλής ισχύος, όπως διασυνδέσεις HVDC, η τοπολογία μετατροπέων πολλών επιπέδων με χρήση υπομονάδων αποτελεί την πιο μοντέρνα και ευρέως χρησιμοποιούμενη τεχνολογία πολυεπίπεδων μετατροπέων. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.1γ, ένας μετατροπέας MMC n επιπέδων αποτελείται από n υπομονάδες σε κάθε υποσκέλος κάθε φάσης, ή αλλιώς από $2*n$ υπομονάδες ανά φάση. Κάθε υπομονάδα αποτελείται από 2 ημιαγωγικά στοιχεία, συννηθέστερα IGBT's, με αντιπαράλληλες διόδους και έναν πυκνωτή σε συνδεσμολογία ημίσεος γέφυρας. Η κάθε υπομονάδα, ανάλογα με την παλμοδότησή της, μπορεί είτε να εμφανίζει στην έξοδό της την τάση του πυκνωτή είτε να παρακάμπτεται. Αναλυτική περιγραφή της λειτουργίας ενός τέτοιου μετατροπέα πραγματοποιείται στην παράγραφο 3.2.

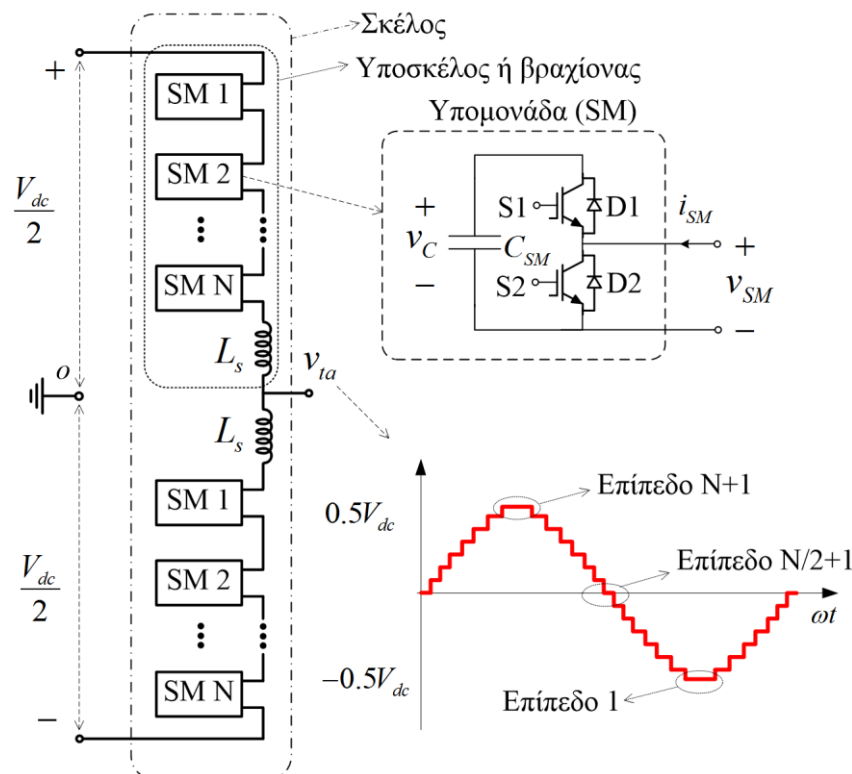
Στα βασικά πλεονεκτήματα αυτής της τοπολογίας συγκαταλέγεται η ευελιξία που προσφέρει για τον σχηματισμό οποιουδήποτε επιπέδου τάσης και η δυνατότητα να λειτουργεί ακόμα και αν κάποια υπομονάδα βγει εκτός λειτουργίας, παρακάμπτοντάς τη με ένα απλό διακόπτη. Επιπλέον δεν απαιτείται ύπαρξη DC πυκνωτών στον DC ζυγό, αφού οι αποθήκευση της ενέργειας πραγματοποιείται στους πυκνωτές κάθε υπομονάδας, ενώ για εφαρμογές όπου χρησιμοποιούνται πολλά επίπεδα (συνήθως 200+), επιτυγχάνεται πολύ μικρή παραμόρφωση με σχετικά χαμηλή διακοπτική συχνότητα ανά υπομονάδα και, ως εκ τούτου, η χρήση φίλτρων κρίνεται περιττή.



Σχήμα 3.1 Διαφορετικές Τοπολογίες Μετατροπών Πολλαπλών Επιπέδων. α) 3-Level DCM. Πηγή: [12], β) 5-level FCM. Πηγή: [22] και γ) 6-level MMC. Πηγή [12]

3.2 Τεχνολογία Μετατροπών MMC

Η τεχνολογία MMC βασίζεται στη χρήση πλήθους υπομονάδων (submodules – SMs) για τη σύνθεση μιας ημιτονοειδούς κυματομορφής τάσης. Πιο συγκεκριμένα, κάθε φάση (σκέλος) του μετατροπέα αποτελείται από δύο υποσκέλη (βραχίονες), το άνω και το κάτω. Κάθε υποσκέλος δομείται από N υπομονάδες συνδεδεμένες εν σειρά. Οι υπομονάδες αποτελούνται από δύο ημιαγωγικούς διακόπτες με αντιπαράλληλες διόδους και έναν πυκνωτή, σε συνδεσμολογία ημίσεος γέφυρας. Η κυκλωματική διάταξη μιας φάσης ενός MMC μετατροπέα N επιπέδων εικονίζεται στο Σχήμα 3.2



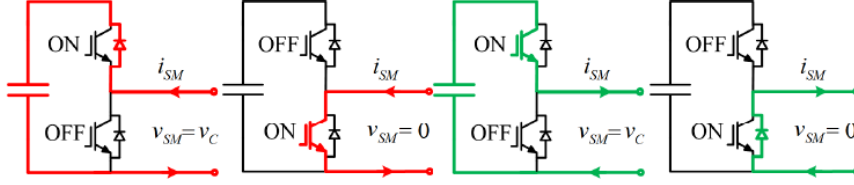
Σχήμα 3.2 Δομή φάσης πολυεπίεδου MMC μετατροπέα. Πηγή: [12, ρ. 47]

Οι τάσεις των πυκνωτών κάθε υπομονάδας χρησιμοποιούνται για τη σύνθεση της τάσης εξόδου, ανάλογα με το αν η υπομονάδα εντάσσεται στο κύκλωμα του βραχίονα ή παρακάμπτεται. Πιο συγκεκριμένα η τάση στα άκρα κάθε υπομονάδας μπορεί να είναι είτε μηδενική είτε ίση με την τάση του πυκνωτή του υποσκέλους. Συνολικά διακρίνονται τρεις επιτρεπτές διακοπτικές καταστάσεις:

- Εάν ο παλμός στην πύλη του διακόπτη $S1$ είναι ON και του διακόπτη $S2$ είναι OFF τότε η υπομονάδα εντάσσεται στο κύκλωμα, και η τάση στα άκρα της ισούται με την τάση του πυκνωτή. Εάν το ρεύμα i_{sm} , που εικονίζεται στο Σχήμα 3.2, είναι εισερχόμενο τότε ο πυκνωτής φορτίζεται, ενώ αν είναι εξερχόμενο εκφορτίζεται. Επίσης, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.3, η ροή του ρεύματος όταν αυτό είναι εισερχόμενο πραγματοποιείται μέσω της διόδου $D1$, ενώ όταν είναι εξερχόμενο πραγματοποιείται μέσω του διακόπτη $S1$.
- Εάν ο διακόπτης $S1$ είναι OFF και ο διακόπτης $S2$ είναι ON τότε η υπομονάδα παρακάμπτεται, και η τάση στα άκρα της είναι μηδενική. Σε αυτήν την κατάσταση ο πυκνωτής ούτε φορτίζεται ούτε εκφορτίζεται και η τάση στα άκρα του παραμένει σταθερή. Αντίστοιχα, η ροή του

ρεύματος όταν αυτό είναι εισερχόμενο πραγματοποιείται μέσω του διακόπτη S2, ενώ όταν είναι εισερχόμενο μέσω της διόδου ελεύθερης διέλευσης D2.

- Εάν κανένας από τους δύο διακόπτες δεν παλμοδοτείται, η υπομονάδα είναι μπλοκαρισμένη. Σε αυτήν την κατάσταση υπάρχει ελεύθερη διέλευση ρεύματος μέσω των διόδων, και η τάση στα άκρα της υπομονάδας δεν είναι άμεσα ελεγχόμενη.



Σχήμα 3.3 Ροή ρευμάτων υπομονάδας για τις περιπτώσεις «εισαγωγής» ή «παρακάμψης». Πηγή: [12, p. 47]

Εάν κάθε υπομονάδα θεωρηθεί σαν μια πηγή τάσης, που ελέγχεται από τον παλμό στην πύλη της και εμφανίζει στα άκρα της τάση 0, $v_c \approx \frac{U_{dc}}{N}$, εάν ο παλμός είναι 0 ή 1 αντίστοιχα, τότε η τάση κάθε υποσκέλους θα είναι:

$$v_{ανω,j} = \sum_{i=1}^N (S_{ανω,ij} \cdot v_{ανω,ij}) + L_s \cdot \frac{di_{ανω,j}}{dt} \quad (3.1)$$

$$v_{κάτω,j} = \sum_{i=1}^N (S_{κάτω,ij} \cdot v_{κάτω,ij}) + L_s \cdot \frac{di_{κάτω,j}}{dt} \quad (3.2)$$

, όπου $j = a, b, c$ είναι οι φάσεις του μετατροπέα. Από τις παραπάνω σχέσεις, και εφαρμόζοντας τον Νόμο Τάσεων Kirchhoff λαμβάνεται το εξής αποτέλεσμα για την τάση κάθε φάσης ως προς ένα ιδεατό σημείο λήψης “ο”, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.2:

$$v_{jo} = -v_{ανω,j} + \frac{V_{dc}}{2} = v_{κάτω,j} - \frac{V_{dc}}{2} \quad (3.3)$$

Λαμβάνοντας υπόψιν τις παραπάνω σχέσεις και το γεγονός ότι ο συνολικός αριθμός των εισαγόμενων υπομονάδων ανά φάση είναι ίσος με N, δηλαδή $\sum_{i=1}^N S_{ανω,ij} + \sum_{i=1}^N S_{κάτω,ij} = N$ διακρίνουμε τις εξής χαρακτηριστικές περιπτώσεις:

- Εάν παρακαμφθούν όλες οι υπομονάδες του κάτω υποσκέλους $v_{κάτω,j} = 0$, και ενταχθούν όλες οι υπομονάδες το άνω υποσκέλους $v_{ανω,j} = V_{dc}$, τότε η τάση στην έξοδο της φάσης είναι $V_{dc}/2$.
- Εάν ενταχθούν όλες οι υπομονάδες του κάτω υποσκέλους $v_{κάτω,j} = V_{dc}$, και παρακαμφθούν όλες οι υπομονάδες το άνω υποσκέλους $v_{ανω,j} = 0$, τότε η τάση στην έξοδο της φάσης είναι $-V_{dc}/2$.
- Εάν τόσο στο πάνω όσο και στο κάτω υποσκέλος είναι ενταγμένες οι μισές υπομονάδες τότε η τάση στην έξοδο της φάσης θα είναι 0.

Τα παραπάνω βασίζονται στην παραδοχή ότι οι τάσεις των πυκνωτών κάθε υπομονάδας είναι ισορροπημένες και περίπου ίσες μεταξύ τους. Αυτό, ανάλογα με την παραλλαγή της μεθόδου PWM

που χρησιμοποιείται, δεν είναι δεδομένο και για αυτό θα πρέπει να εφαρμόζεται κάποιος αλγόριθμος εξισορρόπησης, όπως περιγράφεται στις επόμενες παραγράφους.

3.3 Τεχνικές διαμόρφωσης PWM για μετατροπείς MMC

Το κατώτερο επίπεδο ελέγχου σε ένα σύστημα που περιέχει μετατροπείς VSC, ενός ή πολλών επιπέδων, είναι ο καθορισμός των παλμών των ημιαγωγικών στοιχείων. Ιδιαίτερα σε έναν πολυεπίπεδο μετατροπέα, το πρόβλημα αυτό αποκτά ιδιαίτερο ενδιαφέρον, καθώς τα διάφορα επίπεδα τάσης εξόδου μπορούν να επιτευχθούν με πολλούς τρόπους, καθιστώντας την παλμοδότηση των ημιαγωγικών στοιχείων ένα ενδιαφέρον πρόβλημα βελτιστοποίησης.

Στην βιβλιογραφία προτείνονται ποικίλες μέθοδοι διαμόρφωσης, οι οποίες αποτελούν γενίκευση κλασικών μεθόδων αντιστροφών δύο επιπέδων ή και καινούριες μεθόδους. Οι συνηθέστερες τεχνικές διαμόρφωσης για μετατροπείς πολλών επιπέδων χωρίζονται σε τέσσερις μεγάλες κατηγορίες [12, 35]:

- Τεχνικές ημιτονοειδούς διαμόρφωσης εύρους παλμών (Sinusoidal Pulse Width Modulation - SPWM) με πολλαπλά φέροντα (Carrier Disposition PWM - CD-PWM).
- Τεχνικές διαμόρφωσης εύρους παλμών με χρήση διανυσματικού χώρου του μετατροπέα (Space Vector PWM - Line Commutated Converters (LCC).)
- Τεχνικές διαμόρφωσης πλησιέστερου επιπέδου (Nearest Level Control - NLC)
- Τεχνικές διαμόρφωσης εύρους παλμών επιλεκτικής εξάλειψης αρμονικών. (Selective Harmonic Elimination PWM – SHE PWM)

Στη συνέχεια πραγματοποιείται μια συνοπτική παρουσίαση της μεθόδου SPWM με πολλαπλά φέροντα, η οποία υιοθετήθηκε στην παρούσα εργασία, καθώς επίσης και διάφορες παραλλαγές της.

Η μέθοδος διαμόρφωσης SPWM με πολλαπλά φέροντα για έναν μετατροπέα N επιπέδων βασίζεται στη σύγκριση μια ημιτονικής κυματομορφής αναφοράς, ξεχωριστής για κάθε φάση, που βρίσκεται στη θεμελιώδη συχνότητα f_n , με N κυματομορφές φέροντος οι οποίες βρίσκονται σε υψηλότερη συχνότητα f_s . Το επίπεδο της τάσης εξόδου προσδιορίζεται τελικά από το πλήθος των φερόντων που βρίσκονται κάτω από την κυματομορφή αναφοράς. Η παλμοδότηση κάθε υπομονάδας μπορεί να πραγματοποιηθεί είτε θεωρώντας ότι κάθε κυματομορφή φέροντος αντιστοιχεί σε μία υπομονάδα, είτε με πιο προχωρημένες τεχνικές βελτιστοποίησης και εξισορρόπησης της κυμάτωσης της τάσης των πυκνωτών, στις οποίες η επιλογή του πλήθους των υπομονάδων που εισάγονται στο κύκλωμα πραγματοποιείται με την εφαρμογή των εξισώσεων (3.1 κ' 3.2), αλλά και από μετρήσεις τάσεων και ρευμάτων στο κύκλωμα του μετατροπέα, όπως παρουσιάζεται στην παράγραφο 3.4

Ανάλογα με τη μορφή των κυματομορφών φέροντος οι μέθοδοι CD-PWM παρουσιάζουν διάφορες παραλλαγές, οι βασικότερες των οποίων εικονίζονται στο Σχήμα 3.4 και αναφέρονται εν συνεχεία:

α) Phase Disposition PWM – PD-PWM). Σε αυτήν τη μέθοδο χρησιμοποιούνται N όμοια τριγωνικά φέροντα πλάτους $2/N$, ομοιόμορφα μετατοπισμένα κατά τον άξονα y , ώστε να οριοθετούν την περιοχή διαμόρφωσης $[-1, 1]$ του ημιτονικού σήματος αναφοράς.

β) Phase Opposition Disposition PWM – POD-PWM). Και σε αυτήν την περίπτωση χρησιμοποιούνται N όμοια τριγωνικά φέροντα, ομοιόμορφα κατανεμημένα στον άξονα y . Οι κυματομορφές που βρίσκονται πάνω από τον άξονα x είναι σε συμφωνία φάσης, ενώ οι κυματομορφές που βρίσκονται κάτω από τον άξονα x είναι σε αντίθεση φάσης.

γ) Alternate Phase Opposition Disposition PWM – APOD-PWM). Στη μέθοδο APOD-PWM οι όμοιες τριγωνικές κυματομορφές φέροντος είναι ομοιόμορφα μετατοπισμένες κατά πλάτος, και βρίσκονται εναλλάξ ανά δύο σε συμφωνία ή αντίθεση φάσης.

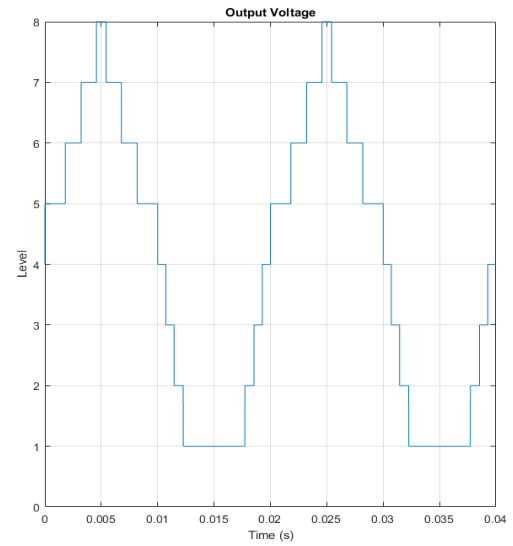
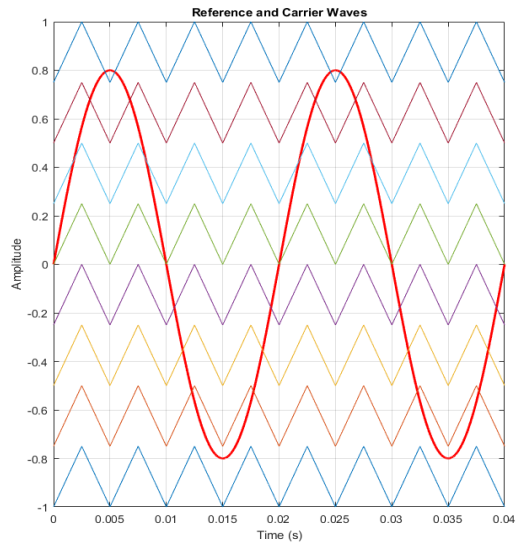
δ) Saw-tooth Phase Shifted Carriers PWM – Saw-tooth CPS-PWM). Σε αυτήν τη μέθοδο χρησιμοποιούνται N όμοιες κυματομορφές saw-tooth με πλάτος που εκτείνεται σε όλη την περιοχή διαμόρφωσης $[-1,1]$, και ολίσθηση φάσης $\frac{2\pi}{N}$.

ε) Triangular Phase Shifted Carriers PWM – Triangular CPS-PWM). Η μέθοδος αυτή είναι πανομοιότυπη με την παραπάνω, αλλά αντί για την κυματομορφή saw-tooth χρησιμοποιεί τριγωνική κυματομορφή.

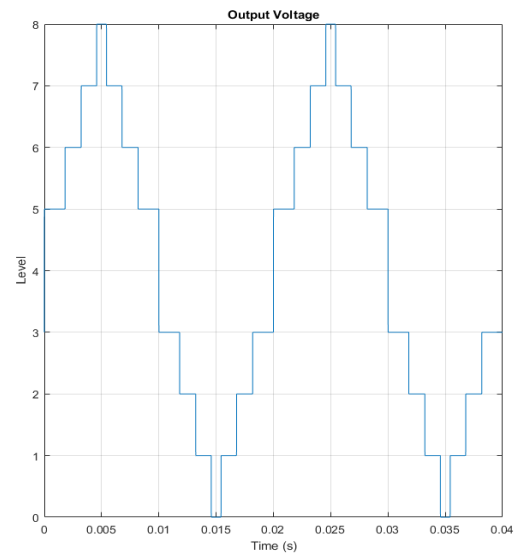
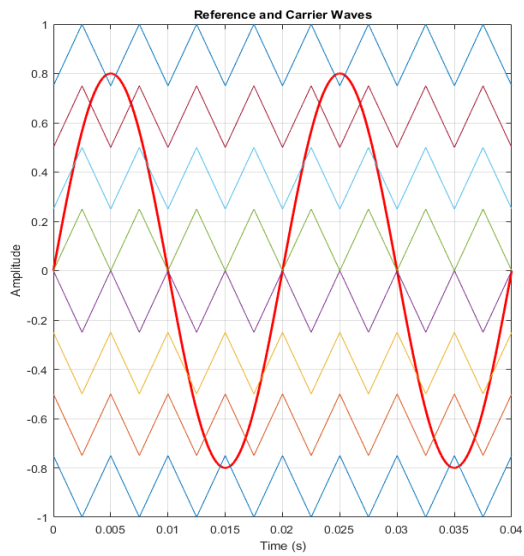
Οι μέθοδοι α)-γ) βασίζονται στη μετάθεση της κυματομορφής φέροντος στον άξονα y , με διάφορες παραλλαγές ως προς τη φάση της. Αντίθετα οι μέθοδοι δ) και ε) στηρίζονται στη μετάθεση της φάσης της κυματομορφής φέροντος, ενώ το πλάτος και η θέση της στον άξονα y παραμένουν σταθερά.

Για την ίδια συχνότητα φέροντος, οι μέθοδοι που βασίζονται στη μετάθεση της κυματομορφής κατακόρυφα οδηγούν σε πολύ μικρότερο αριθμό αλλαγών στην κυματομορφή εξόδου, σε σχέση με τις δύο μεθόδους που στηρίζονται στη μετάθεση της κυματομορφής οριζόντια. Αυτό έχει ως συνέπεια η κυρίαρχη αρμονική συνιστώσα να βρίσκεται σε χαμηλότερη συχνότητα για τις πρώτες. Πιο συγκεκριμένα, η κυρίαρχη αρμονικές συγκεντρώνονται γύρω από τη συχνότητα φέροντος, ενώ στην περίπτωση των φερόντων με μετάθεση φάσης οι κυρίαρχη αρμονική εμφανίζεται σε συχνότητα N φορές μεγαλύτερη από τη συχνότητα φέροντος. Ταυτόχρονα, η μεγάλη διακοπτική συχνότητα που παρουσιάζουν οι δεύτερες προκαλεί μεγαλύτερες απώλειες. Εν γένει, αν θεωρηθεί ίδια διακοπτική συχνότητα για τις δύο κατηγορίες, κάτι που σημαίνει εμφανώς μικρότερη συχνότητα φέροντος για τις CPS μεθόδους, οι μέθοδοι PD, POD και APOD οδηγούν σε μικρότερο αρμονικό περιεχόμενο, κάτι που τις καθιστά προτιμητέες για εφαρμογές μετατροπών MMC.

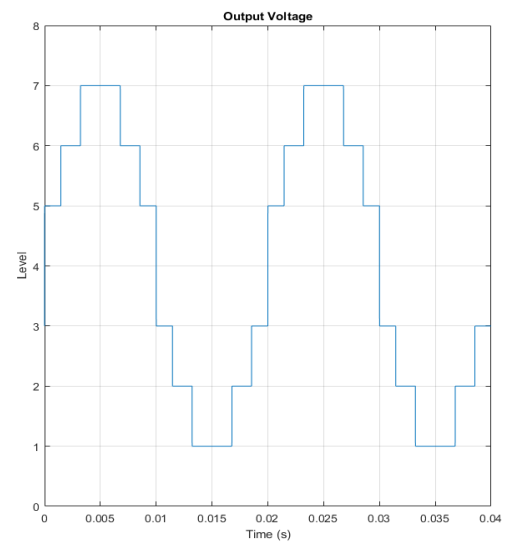
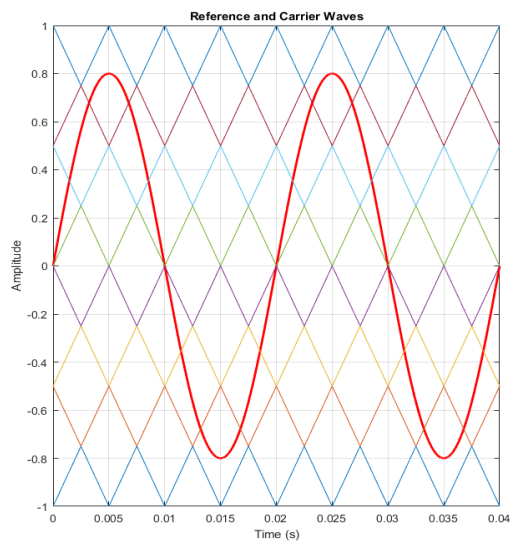
Βεβαίως στην περίπτωση που δεν υιοθετηθεί κάποια μέθοδος ταξινόμησης, αλλά θεωρηθεί 1-1 αντιστοιχία μεταξύ φερόντων και υπομονάδων, οι μέθοδοι CD, PD, POD και APOD οδηγούν σε ασύμμετρη φόρτιση των υπομονάδων και μεγάλες αποκλίσεις στις τάσεις των πυκνωτών. Αντίθετα οι μέθοδοι CPS, μπορούν να λειτουργήσουν ικανοποιητικά και χωρίς την ύπαρξη κάποιου αλγορίθμου εξισορρόπησης της τάσης των πυκνωτών. Όσον αφορά τη σύγκριση μεταξύ των μεθόδων PD, POD, APOD, όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα, ο αντικατοπτρισμός των κυματομορφών φέροντος μέσω της αντίθεσης φάσης που παρουσιάζουν οι μέθοδοι POD και APOD εξασφαλίζουν τη συμμετρία της κυματομορφής εξόδου.



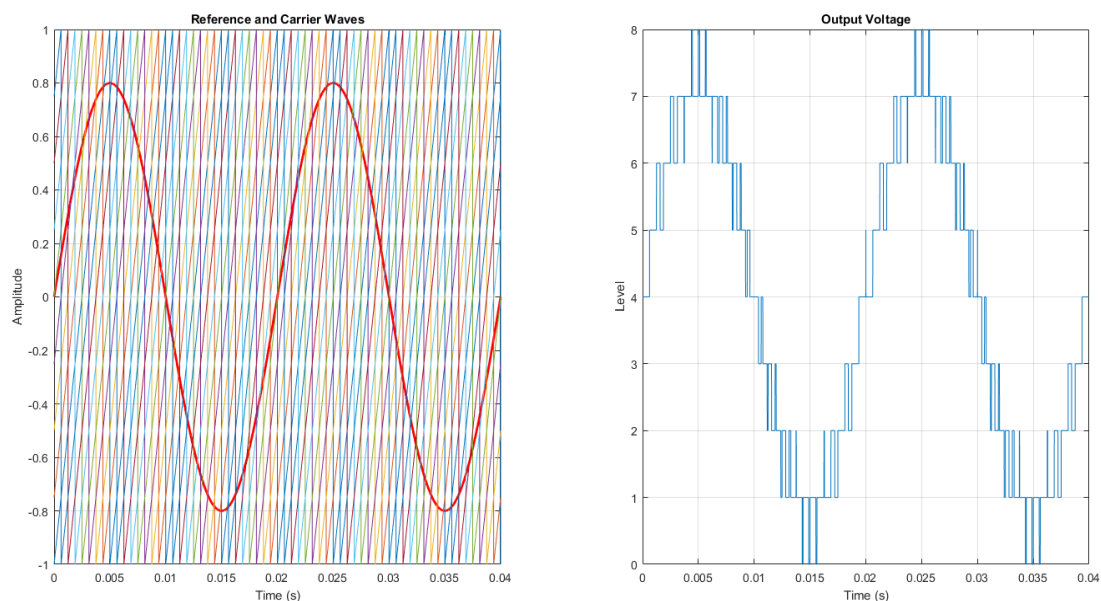
(α)



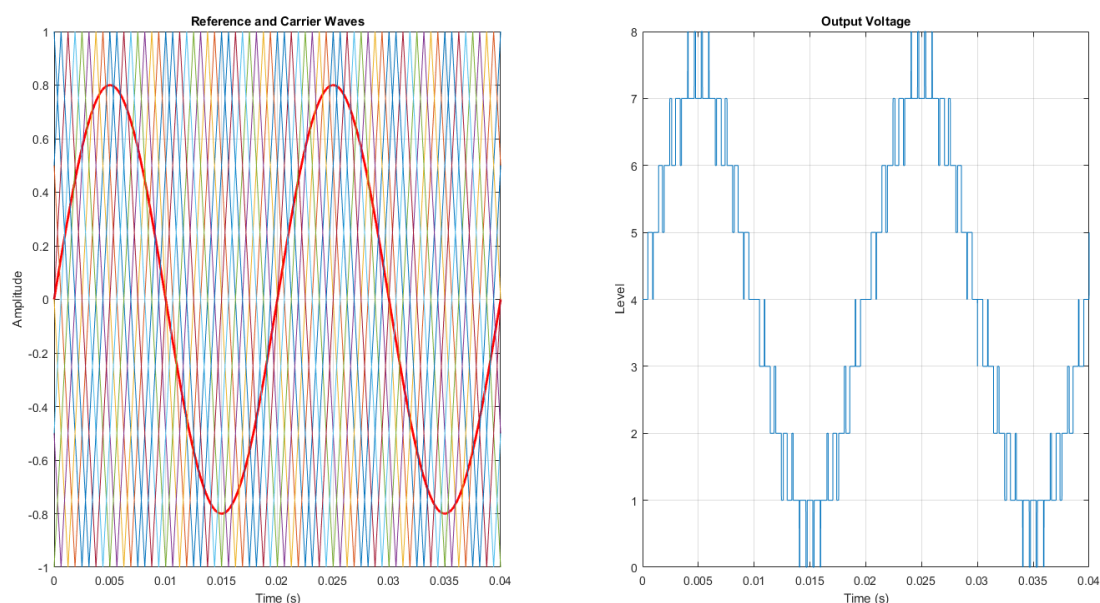
(β)



(γ)



(δ)



(ε)

Σχήμα 3.4 Παραλλαγές μεθόδου PD-PWM για 8 επίπεδα, και συντελεστή διαμόρφωσης 0.8 και συχνότητα φέροντος 200 Hz. α) PD-PWM, β) POD-PWM, γ) APOD-PWM, δ) Saw-tooth CPS-PWM και ε) Triangular CPS-PWM

3.4 Αλγόριθμος εξισορρόπησης DC τάσης πυκνωτών για μετατροπείς MMC

Σύμφωνα με όσα παρουσιάστηκαν στην προηγούμενη παράγραφο, η μέθοδοι διαμόρφωσης πολλές φορές δεν επαρκούν για τον πλήρη έλεγχο και την ικανοποιητική λειτουργία ενός μετατροπέα πολλών επιπέδων MMC. Σε επόμενο στάδιο, απαιτείται μια ακόμα δομή ελέγχου που επιτυγχάνει την εξισορρόπηση των τάσεων των πυκνωτών (Capacitor Voltage Balancing).

Στην βιβλιογραφία προτείνονται διάφορες μέθοδοι εξισορρόπησης, οι περισσότερες από τις οποίες βασίζονται στην εφαρμογή κάποιου αλγορίθμου ταξινόμησης [37, 38, 35]. Πιο συγκεκριμένα, οι προτεινόμενες μέθοδοι βασίζονται στην επιλογή των μονάδων προς ένταξη ανάλογα με την τάση

στα άκρα του κάθε πυκνωτή και τη φορά του ρεύματος, έτσι ώστε να αποφεύγονται φαινόμενα υπερφόρτισης ή αποφόρτισης μεμονωμένων μονάδων. Ένας τέτοιος αλγόριθμος μπορεί να εφαρμοστεί σε συνδυασμό με οποιαδήποτε μέθοδο διαμόρφωσης, και αποτελείται από τα παρακάτω βήματα:

- a) Καθορισμός του πλήθους των υπομονάδων του άνω ($n_{\text{άνω}}$) και του κάτω ($n_{\text{κάτω}}$) υποσκέλους που πρέπει να ενταχθούν στο κύκλωμα, σύμφωνα με το επίπεδο τάσης που υπαγορεύει η μέθοδος PWM, και με τον περιορισμό $n_{\text{άνω}} + n_{\text{κάτω}} = N$.
- b) Ταξινόμηση των μετρούμενων τάσεων στα άκρα του πυκνωτή των υπομονάδων του άνω και του κάτω υποσκέλους κάθε φάσης.
- c) Για κάθε υποσκέλος χωριστά:
 - I. Εάν το ρεύμα που διαρρέει το σκέλος είναι θετικό¹ (φόρτιση πυκνωτή), επιλογή των $n_{\text{άνω}}$ ($n_{\text{κάτω}}$) μονάδων με τις χαμηλότερες τάσεις.
 - II. Εάν το ρεύμα που διαρρέει το σκέλος είναι αρνητικό (εκφόρτιση πυκνωτή), επιλογή των $n_{\text{άνω}}$ ($n_{\text{κάτω}}$) μονάδων με τις υψηλότερες τάσεις.
- d) Καθορισμός των παλμών κάθε υπομονάδας σύμφωνα με το προηγούμενο βήμα.

Η συχνότητα εφαρμογής του βήματος b του παραπάνω αλγορίθμου προφανώς επιδρά στην αποτελεσματικότητα της εξισορρόπησης των τάσεων των πυκνωτών αλλά και στη διακοπτική συχνότητα της κάθε υπομονάδας. Πολύ αραιή εκτέλεση της ταξινόμησης οδηγεί σε χαμηλή διακοπτική συχνότητα, και άρα χαμηλότερες απώλειες, αλλά δεν εξασφαλίζει την ομοιόμορφη φόρτιση των πυκνωτών. Αντίθετα, η εκτέλεση του αλγορίθμου σε κάθε βήμα ελέγχου του μετατροπέα θα εξασφάλιζε, θεωρητικά, ίδια τάση σε κάθε υπομονάδα, αλλά θα αύξανε σε πολύ μεγάλο βαθμό τις απώλειες.

Επιπλέον, από τα παραπάνω γίνεται εμφανές ότι η διακοπτική συχνότητα κάθε υπομονάδας, εξαρτάται τόσο από τη συχνότητα των κυματομορφών φέροντος, όσο και από τη συχνότητα εφαρμογής του αλγορίθμου εξισορρόπησης.

Η επίδραση των παραπάνω παραμέτρων στη διακοπτική συχνότητα κάθε μονάδας, στη διακύμανση της τάσης των πυκνωτών καθώς επίσης και στο αρμονικό περιεχόμενο της κυματομορφής εξόδου μελετώνται στην επόμενη ενότητα.

3.5 Παραμετρική Ανάλυση συστήματος MMC-VSC

Η επιλογή παραμέτρων ελέγχου αλλά και αρχιτεκτονικής ενός συστήματος VSC-MMC αποτελεί ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης με πολλά trade-offs ανάμεσα στο κόστος, την ποιότητα ισχύος και τις διακοπτικές απώλειες.

Στην παρούσα παράγραφο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα παραμετρικών προσομοιώσεων ενός μετατροπέα VSC-MMC, ο οποίος θεωρήθηκε ότι τροφοδοτεί σταθερό φορτίο ονομαστικής ισχύος 200 MVA. Σκοπός της παραμετρικής ανάλυσης είναι η πειραματική διαπίστωση της επίδρασης παραμέτρων όπως ο αριθμός των επιπέδων του μετατροπέα, η μέθοδος και η συχνότητα διαμόρφωσης και η συχνότητα εφαρμογής του αλγορίθμου εξισορρόπησης στην ποιότητα ισχύος εξόδου του μετατροπέα αλλά και στη λειτουργία του μετατροπέα σε επίπεδο διακοπών και τάσεων πυκνωτών.

¹ Η σύμβαση για τη φορά των ρευμάτων εικονίζεται στο Σχήμα 3.2

Αναλυτικότερα, οι ελεύθερες παράμετροι της ανάλυσης είναι οι παρακάτω:

- Αριθμός επιπέδων MMC: {3, 5, 7, 10, 20}
- Μέθοδος PWM διαμόρφωσης: {PD – PWM, CPS – PWM}
- Συχνότητα διαμόρφωσης (Hz): {500 1000 1500 2000}
- Συχνότητα εφαρμογής αλγορίθμου ταξινόμησης (Hz): {Χωρίς, 1000, 5000}

Και οι εξαρτημένες παράμετροι αντίστοιχα:

- Συντελεστής THD% τάσης στην έξοδο του μετατροπέα (χωρίς φίλτρο)
- Συντελεστής THD% ρεύματος στην έξοδο του μετατροπέα (χωρίς φίλτρο)
- Τάξη (ως προς τη θεμελιώδη) και πλάτος κυρίαρχης αρμονικής τάσης.
- Τυπική Απόκλιση της τάσης πυκνωτών ενός υποσκέλους
- Μέση διακοπτική συχνότητα των κάθε υπομονάδας

Ακολουθεί η ανάλυση των αποτελεσμάτων για κάθε δυνατό σενάριο.

3.5.1 Επίδραση αριθμού επιπέδων, μεθόδου διαμόρφωσης και συχνότητας φέροντος στην αρμονική παραμόρφωση τάσης και ρεύματος εξόδου.

Στο Σχήμα 3.5 εικονίζεται η εξάρτηση της συχνότητας της κυρίαρχης αρμονικής ως προς τον αριθμό επιπέδων του μετατροπέα, τη μέθοδο διαμόρφωσης και τη συχνότητα διαμόρφωσης. Σημειώνεται ότι η τέταρτη ελεύθερη παράμετρος (συχνότητα εξισορρόπησης) δεν επηρεάζει σημαντικά τη συχνότητα κύριας αρμονικής για αυτό σε αυτήν την παράγραφο μπορεί να αγνοηθεί.

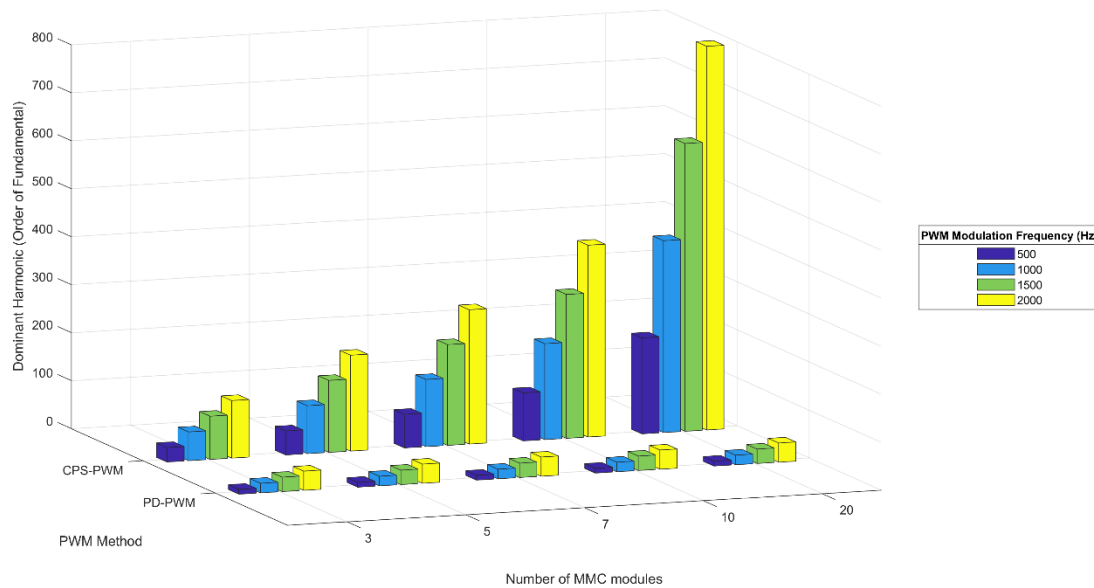
Από το σχήμα επιβεβαιώνονται τα θεωρητικά αναμενόμενα αποτελέσματα, αφού φαίνεται ότι η τάξη κυρίαρχης αρμονικής για τις περιπτώσεις των μεθόδων PD-PWM CPS-PWM αντίστοιχα δίνονται από τους τύπους:

$$N_{dominant,PD} = f_s/f_n \quad (3.4)$$

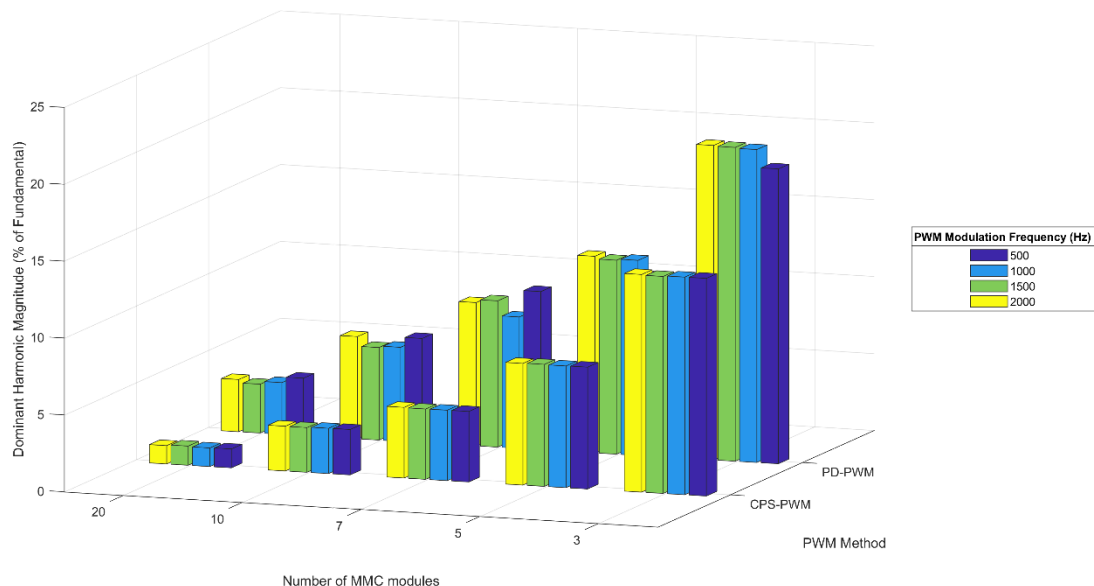
$$N_{dominant,CPS} = N \cdot f_s/f_n \quad (3.5)$$

Ενδιαφέρον παρουσιάζει το γεγονός ότι στην περίπτωση της μεθόδου PD-PWM ο αριθμός των επιπέδων του μετατροπέα δεν μεταθέτει τη συχνότητα της κυρίαρχης αρμονικής. Επίσης εμφανές γίνεται ότι για την ίδια διακοπτική συχνότητα και τον ίδιο αριθμό επιπέδων, η συχνότητα κυρίαρχης αρμονικής που προκύπτει χρησιμοποιώντας την CPS-PWM μέθοδο είναι υπερπολλαπλάσια συγκριτικά με την PD-PWM μέθοδο.

Στο Σχήμα 3.6 απεικονίζεται το πλάτος της κυρίαρχης αρμονικής, ως κλάσμα της θεμελιώδους, σε συνάρτηση με τις παραπάνω μεταβλητές. Από το συγκεκριμένο γράφημα γίνεται εμφανές ότι συχνότητα διαμόρφωσης δεν επηρεάζει σημαντικά το πλάτος της κυρίαρχης αρμονικής. Αντίθετα το πλάτος μειώνεται σημαντικά με την αύξηση των επιπέδων του μετατροπέα. Επίσης σημειώνεται πως και ως προς το πλάτος, αλλά και την τάξη, της κυρίαρχης αρμονικής η μέθοδος CPS-PWM υπερτερεί.



Σχήμα 3.5 Παραμετρική ανάλυση MMC: Κυρίαρχη αρμονική / #επιπέδων, μέθοδο και συχνότητα διαμόρφωσης

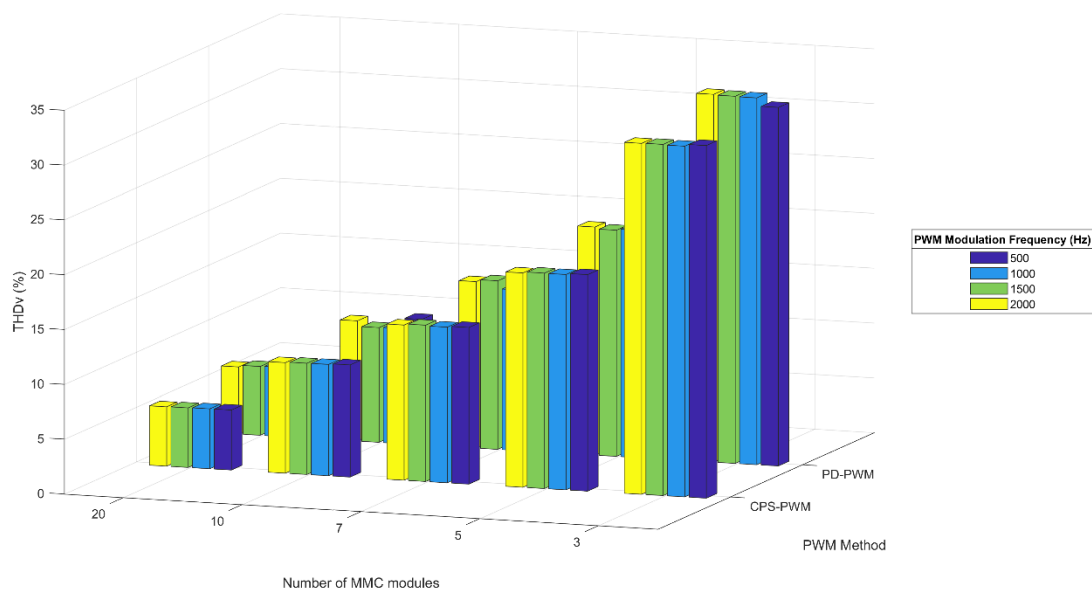


Σχήμα 3.6 Παραμετρική ανάλυση MMC: Πλάτος κυρίαρχης αρμονικής / #επιπέδων, μέθοδο και συχνότητα διαμόρφωσης

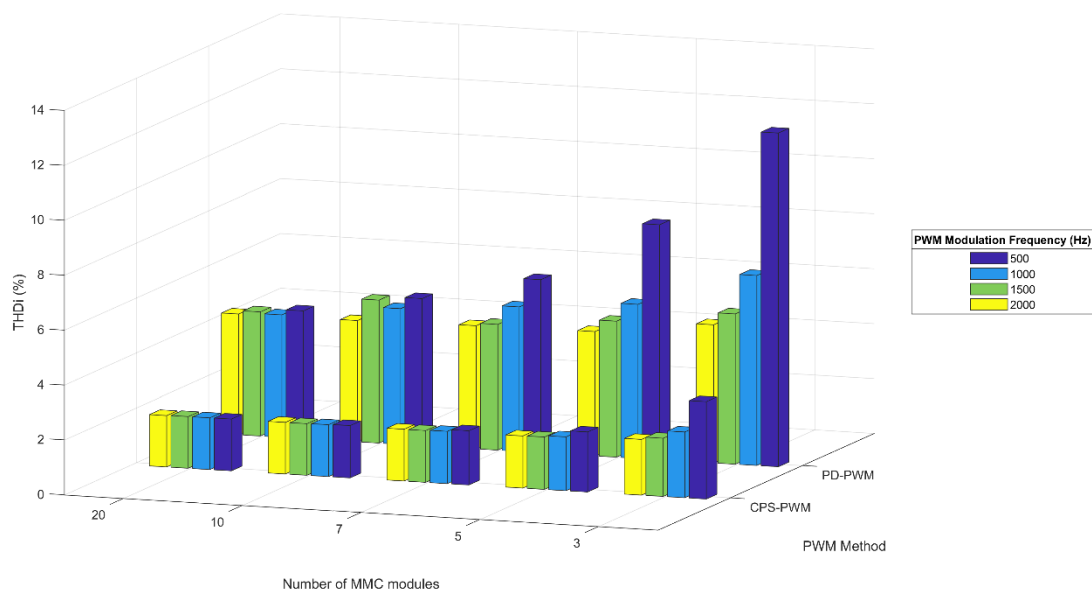
Με βάση τα παραπάνω, αναμένεται ο συντελεστής ολικής αρμονικής παραμόρφωσης της τάσης ($THD_v\%$) να μειώνεται μόνο αυξάνοντας τον αριθμό των επιπέδων (λόγω μείωσης πλάτους αρμονικών βλ. Σχήμα 3.6), ενώ ο συντελεστής ολικής αρμονικής παραμόρφωσης ρεύματος ($THD_i\%$) να μειώνεται τόσο με την αύξηση των επιπέδων του μετατροπέα (και πάλι λόγω μείωσης του πλάτους των αρμονικών τάσης), αλλά και με την αύξηση της διακοπτικής συχνότητας, που καθιστά ευκολότερο το φιλτράρισμα από ένα χαμηλοπερατό φίλτρο².

Οι παραπάνω ισχυρισμοί επιβεβαιώνονται από το Σχήμα 3.7 και Σχήμα 3.8 αντίστοιχα. Αξίζει να σημειωθεί ότι όσον αφορά τον συντελεστή παραμόρφωσης της τάσης η μέθοδος CPS υπερτερεί, λόγω μικρότερου πλάτους θεμελιώδους, αλλά όχι με μεγάλη διαφορά, κάτι που συμβαίνει στην περίπτωση του $THD_i\%$, όπου σημαντικό ρόλο παίζει και η τάξη των αρμονικών.

² Σημειώνεται ότι το σύστημα προσομοιώθηκε χωρίς την ύπαρξη φίλτρων, αλλά η αυτεπαγωγή σύνδεσης και η επαγωγική φύση του φορτίου λειτουργούν ως χαμηλοπερατά φίλτρα.



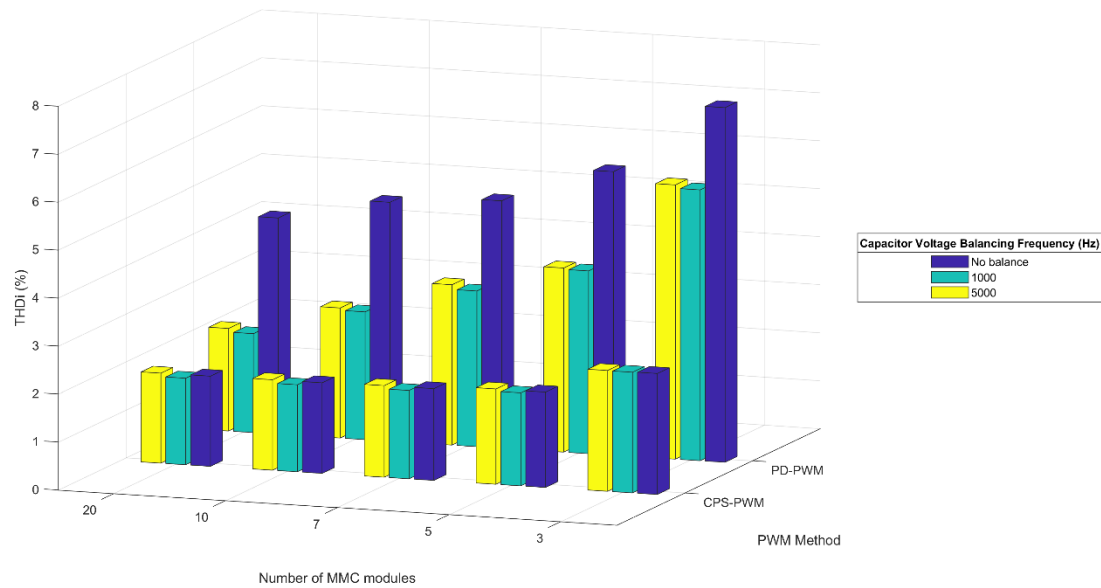
Σχήμα 3.7 Παραμετρική ανάλυση MMC: THDv% / #επιπέδων, μέθοδο και συχνότητα διαμόρφωσης



Σχήμα 3.8 Παραμετρική ανάλυση MMC: THDi% / #επιπέδων, μέθοδο και συχνότητα διαμόρφωσης

Σημαντικό αποτέλεσμα είναι και το γεγονός ότι ακόμα και χωρίς την ύπαρξη φίλτρων, όσο αυξάνεται ο αριθμός των επιπέδων ενός μετατροπέα τα επίπεδα THDv% και THDi% βρίσκονται σε ικανοποιητικά επίπεδα και εντός των ορίων που υπαγορεύονται από τους διεθνείς κανονισμούς και πρότυπα. Ενδεικτικά, για δίκτυα υψηλής και υπερυψηλής τάσης, σύμφωνα με το πρότυπο IEC 61000-3-6 [25] ο συντελεστής THDv% δεν θα πρέπει να ξεπερνάει το 3%. Για το συγκεκριμένο παράδειγμα στην περίπτωση 20 επιπέδων με τη μέθοδο PD-PWM η συντελεστής THDv% είναι περίπου 6%. Λαμβάνοντας υπόψιν ότι σε σημερινά συστήματα ο αριθμός των επιπέδων ξεπερνά τα 200 [8], τότε η παράλειψη φίλτρων εξόδου αποτελεί έναν απολύτως ρεαλιστικό στόχο.

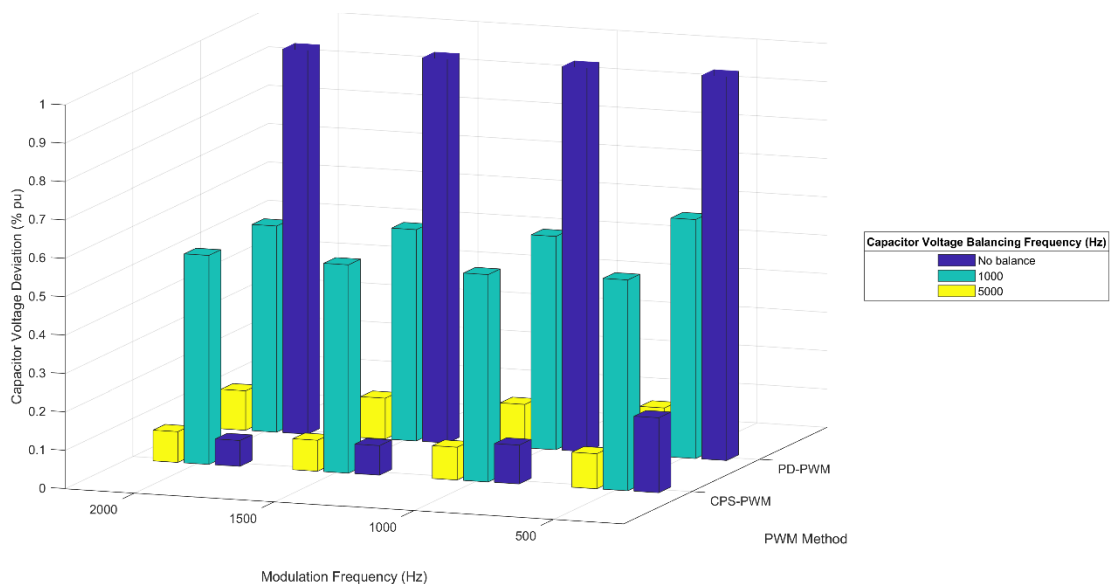
Τέλος, στο Σχήμα 3.9 παρουσιάζεται ένα γράφημα που απεικονίζει τη μέση τιμή, ως προς όλες τις συχνότητες διαμόρφωσης, του συντελεστή THDi%, συναρτήσει του αριθμού των επιπέδων του μετατροπέα, της μεθόδου διαμόρφωσης και της συχνότητας εξισορρόπησης. Από το σχήμα φαίνεται η επίδραση της μεγάλης διακύμανσης της τάσης των πυκνωτών στην ποιότητα ισχύος εξόδου του μετατροπέα, η οποία παρατηρείται στην περίπτωση PD-PWM χωρίς εξισορρόπηση.



Σχήμα 3.9 Παραμετρική ανάλυση MMC: THDi% / μέθοδο διαμόρφωσης, αριθμό επιπέδων και συχνότητα εξισορρόπησης

3.5.2 Επίδραση μεθόδου διαμόρφωσης, συχνότητας διαμόρφωσης και συχνότητας εφαρμογής αλγορίθμου εξισορρόπησης στη διακύμανση τάσης πυκνωτών, διακοπτική συχνότητα.

Σε αυτό το σενάριο ως ανεξάρτητες μεταβλητές λογίζονται η μέθοδος και η συχνότητα διαμόρφωσης και η συχνότητα εφαρμογής του αλγορίθμου ταξινόμησης. Τα μεγέθη που μελετώνται είναι η διακύμανση των τάσεων των πυκνωτών και η μέση διακοπτική συχνότητα ανά υπομονάδα. Ο αριθμός των επιπέδων του μετατροπέα θεωρείται ότι δεν επηρεάζει σημαντικά τα αποτελέσματα, καθώς τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται είναι ανηγμένα σε κάθε υπομονάδα.



Σχήμα 3.10 Παραμετρική ανάλυση MMC: Διακύμανση τάσης πυκνωτών / μέθοδο, συχνότητα διαμόρφωσης και συχνότητα εξισορρόπησης

Στο Σχήμα 3.10 απεικονίζεται η διακύμανση της τάσης των πυκνωτών (%) σε συνάρτηση με τη μέθοδο διαμόρφωσης, τη συχνότητα των φερόντων διαμόρφωσης και τη συχνότητα εφαρμογής του αλγορίθμου ταξινόμησης.

Σημειώνεται ότι για λόγους ευκρίνειας των τιμών το διάγραμμα εμφανίζεται σε εύρος [0-1%] ενώ η τιμή για την περίπτωση PD-PWM χωρίς ταξινόμηση λαμβάνει τιμές πολύ μεγαλύτερες, της τάξης 25%.

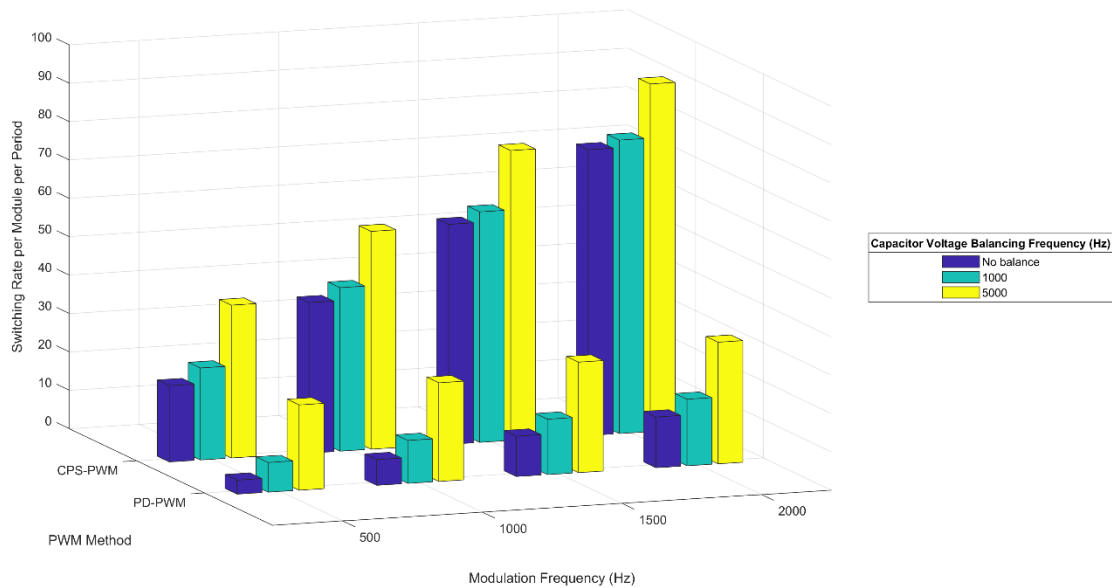
Το γεγονός αυτό υποδηλώνει την επιτακτική αναγκαιότητα εφαρμογής αλγορίθμου ταξινόμησης στη μέθοδο διαμόρφωσης PD-PWM, κάτι που δεν απαιτείται στη μέθοδο CPS-PWM. Η διαφορά αυτή έγκειται στο γεγονός ότι οι κυματομορφές φέροντος στην πρώτη περίπτωση δεν καταλαμβάνουν πλάτος ίσο με την περιοχή διαμόρφωσης $[-1,1]$, αλλά είναι μετατοπισμένες και κλιμακωμένες στον άξονα y . Επομένως, οι υπομονάδες που αντιστοιχούν σε κυματομορφές φέροντος που βρίσκονται πιο ψηλά στον άξονα y χρησιμοποιούνται σπανιότερα σε σχέση με αυτές που βρίσκονται χαμηλότερα, οδηγώντας σε ασύμμετρη φόρτιση.

Αντίθετα στη μέθοδο CPS-PWM όλες οι κυματομορφές φέροντος εκτείνονται σε όλο το εύρος της περιοχής διαμόρφωσης, με αποτέλεσμα οι αντίστοιχες υπομονάδες να χρησιμοποιούνται το ίδιο συχνά, οδηγώντας στατιστικά, έστω και με μη ελεγχόμενο τρόπο, σε συμμετρική φόρτιση.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει το γεγονός ότι σε περίπτωση εφαρμογής κάποιου αλγορίθμου ταξινόμησης, η διακύμανση της τάσης των πυκνωτών παύει να έχει εξάρτηση από τη μέθοδο διαμόρφωσης, αλλά εξαρτάται μόνο από τη συχνότητα εφαρμογής του αλγορίθμου. Όπως είναι αναμενόμενο, αυξάνοντας τη συχνότητα εφαρμογής, μειώνεται σημαντικά η διακύμανση. Σε κάθε περίπτωση, με μία σχετικά χαμηλή συχνότητα εξισορρόπησης, στη συγκεκριμένη περίπτωση περίπου 1 kHz, η διακύμανση της τάσης βρίσκεται σε ικανοποιητικά επίπεδα της τάξης του 0.5% α. μ..

Στο Σχήμα 3.11 απεικονίζεται η μέση διακοπτική συχνότητα των υπομονάδων ενός υποσκέλους συναρτήσει της μεθόδου διαμόρφωσης και της συχνότητας των φερόντων διαμόρφωσης. Από το σχήμα αυτό επιβεβαιώνεται πως η μέθοδος CPS-PWM παρουσιάζει μεγαλύτερες διακοπτικές συχνότητες, για ίδια συχνότητα φερόντων, σε σχέση με τη μέθοδο PD-PWM. Χαρακτηριστικά, η διακοπτική συχνότητα της μεθόδου CPS για συχνότητα φερόντων 500 Hz – χωρίς την εφαρμογή αλγορίθμου εξισορρόπησης, είναι ελάχιστα μικρότερη σε σχέση με την αντίστοιχη τιμή της μεθόδου PD-PWM με συχνότητα φερόντων 2000 Hz και συχνότητα εφαρμογής αλγορίθμου εξισορρόπησης 5000 Hz, και μεγαλύτερη από την τιμή της μεθόδου PD-PWM με συχνότητα φερόντων 2000 Hz και συχνότητα εφαρμογής αλγορίθμου εξισορρόπησης 1000 Hz.

Από τα παραπάνω καθίσταται σαφές ότι η μέθοδος CPS, ακόμα και με χαμηλές συχνότητες διαμόρφωσης παρουσιάζει μεγάλη διακοπτική συχνότητα ανά υπομονάδα, και οδηγεί σε μεγάλες απώλειες. Αυτό την καθιστά σχεδόν απαγορευτική για εφαρμογές MMC VSV-HVDC, όπου συνήθως προτιμώνται μέθοδοι PD-PWM.



Σχήμα 3.11 Παραμετρική ανάλυση MMC: Διακοπτική συχνότητα υπομονάδας / μέθοδο, συχνότητα διαμόρφωσης και συχνότητα εξισορρόπησης

Ιδιαίτερα σημαντικό συμπέρασμα που προκύπτει από το παραπάνω σχήμα είναι η σχέση που πρέπει να έχει η συχνότητα διαμόρφωσης και η συχνότητα εφαρμογής του αλγορίθμου εξισορρόπησης.

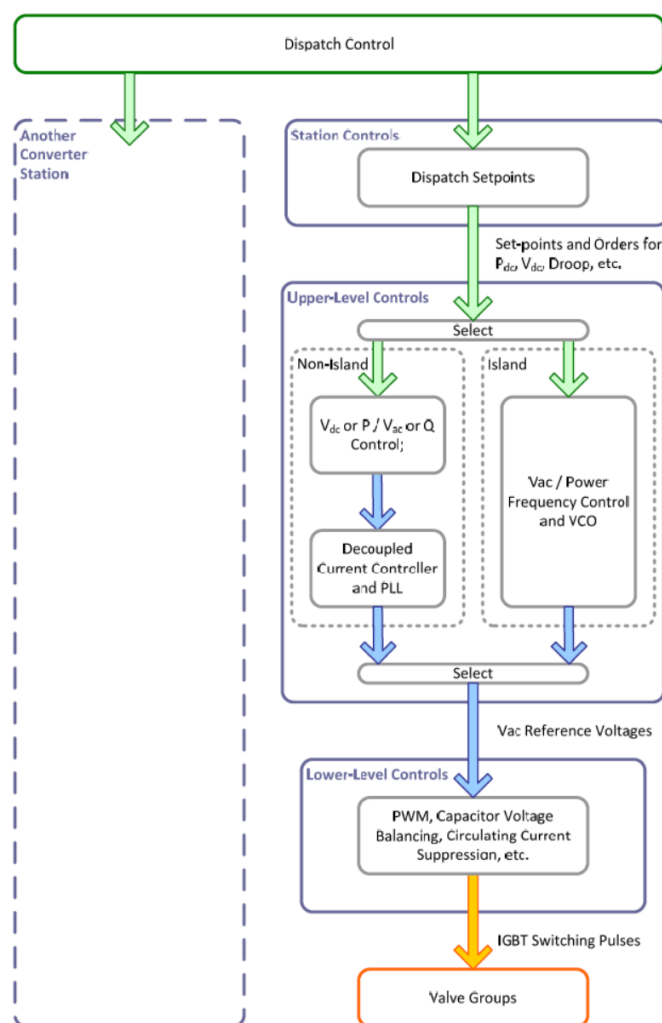
Πιο συγκεκριμένα, παρατηρείται ότι στην περίπτωση PD-PWM η διακοπτική συχνότητα κάθε υπομονάδας όταν εφαρμόζεται αλγόριθμος ταξινόμησης με συχνότητα 5000 Hz, παρουσιάζει μικρή εξάρτηση από τη συχνότητα διαμόρφωσης. Αυτό συμβαίνει διότι στην τελική διακοπτική συχνότητα επιδρά με μεγαλύτερη βαρύτητα η μέγιστη από τις δύο συχνότητες, ειδικά όταν αυτές διαφέρουν σημαντικά. Στο συγκεκριμένο παράδειγμα, αυτό σημαίνει ότι θα μπορούσε να επιλεγεί υψηλότερη συχνότητα διαμόρφωσης, επιτυγχάνοντας με αυτόν τον τρόπο καλύτερο αρμονικό περιεχόμενο, διατηρώντας, παράλληλα, τη διακοπτική συχνότητα κάθε υπομονάδας περίπου σταθερή.

Μια καλή εμπειρική μέθοδος για τη σωστή επιλογή των δύο συχνοτήτων, εξισορρόπησης και διαμόρφωσης, είναι να επιλεγεί η συχνότητα εξισορρόπησης, με βάση τα επιθυμητά επίπεδα διακύμανσης και απωλειών, και στη συνέχεια να επιλεγεί για τη συχνότητα διαμόρφωσης η μέγιστη τιμή για την οποία για την οποία η διακοπτική συχνότητα παραμένει περίπου αμετάβλητη. Με αυτόν τον τρόπο εξασφαλίζεται ο βέλτιστος συνδυασμός διακοπτικών απωλειών εξισορρόπησης των τάσεων των πυκνωτών και μετάθεσης της κυρίαρχης αρμονικής σε υψηλότερες συχνότητες.

4 ΕΛΕΓΧΟΣ ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΩΝ ΣΕ VSC-HVDC ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ

Ο έλεγχος ενός μετατροπέα VSC για HVDC συστήματα είναι αρκετά πολύπλοκος, και μια καθολική αντιμετώπιση του προβλήματος αυτού είναι, μάλλον, μη πρακτική. Αντίθετα ο έλεγχος που απαιτείται για έναν τέτοιο μετατροπέα μπορεί να ταξινομηθεί σε τέσσερα ιεραρχικά επίπεδα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.1. Το κατώτερο επίπεδο (Low-Level Control) αφορά τον έλεγχο του μετατροπέα σε επίπεδο διαμόρφωσης και παλμοδότησης των διακοπών, κάτι που μελετάται στην προηγούμενη ενότητα. Το αμέσως επόμενο επίπεδο στη ιεραρχία ελέγχου (Upper-Level Controls) αφορά τον έλεγχο του μετατροπέα και τον προσδιορισμό των κυματομορφών αναφοράς της μεθόδου PWM, με σκοπό τον συγχρονισμό στο δίκτυο και την επίτευξη επιθυμητών τιμών (setpoints) ενεργού ή αέργου ισχύος, τάσης και συχνότητας δικτύου, DC τάσης κ.ά. Οι συγκεκριμένες επιθυμητές τιμές καθορίζονται από το επίπεδο που αφορά τον έλεγχο του σταθμού σαν ένα αυτόνομο υποσύστημα. Τέλος στην κορυφή της πυραμίδας ελέγχου ενός συστήματος HVDC έχει ο Διαχειριστής συστήματος, ο οποίος καθορίζει τις ροές ισχύος, και επιβλέπει τη λειτουργία όλων των επιμέρους σταθμών.

Σκοπός του παρόντος κεφαλαίου είναι να παρουσιάσει τις διάφορες μεθόδους ελέγχου του ανώτερου επιπέδου ελέγχου (Upper-Level Controls) του μετατροπέα, και τον χαρακτηρισμό του τελευταίου του ανάλογα με τον ρόλο που επιτελεί στο AC δίκτυο.



Σχήμα 4.1 Ιεραρχική δομή συστημάτων ελέγχου VSC-HVDC συστημάτων. Πηγή [17, p. 10]

4.1 Ταξινόμηση μετατροπών VSC ανάλογα με τη λειτουργία τους στο AC δίκτυο.

Στα βασικά πλεονεκτήματα των μετατροπών VSC, όπως αυτά αναφέρθηκαν στην παράγραφο 2.3, συγκαταλέγεται το γεγονός ότι μπορούν να λειτουργήσουν ανεξάρτητα από την ύπαρξη ή όχι ισχυρού AC δικτύου στο σημείο σύνδεσης. Μάλιστα ένας μετατροπέας μπορεί να δημιουργήσει από μόνος του ένα AC δίκτυο, λειτουργώντας ως ανεξάρτητη πηγή τάσης, προκειμένου να τροφοδοτήσει απομακρυσμένα παθητικά συστήματα. Ανάλογα με τη μέθοδο ελέγχου και τον ρόλο που επιτελεί ο μετατροπέας σε ένα AC δίκτυο μπορεί να χαρακτηριστεί ως εξής [31]:

α) Μετατροπείς Grid-Forming. Οι μετατροπείς αυτού του τύπου, όπως δηλώνει και το όνομά τους, είναι κατάλληλοι για λειτουργία σε κατάσταση νησιδοποίησης και την τροφοδότηση παθητικών συστημάτων. Λειτουργούν σαν ιδανικές πηγές τάσεις, χαμηλής αντίστασης εξόδου, καθορισμένου πλάτους και συχνότητας. Οι grid-forming μετατροπείς, λόγω του ότι διαμορφώνουν οι ίδιοι την τάση του δικτύου, δεν απαιτούν κάποιο σχήμα συγχρονισμού. Εξαίρεση στο παραπάνω αποτελεί η περίπτωση παράλληλης σύνδεσης στο ίδιο δίκτυο πολλών μετατροπών αυτού του τύπου, όπου θα πρέπει ο συγχρονισμός μεταξύ τους να είναι πολύ ακριβής.

Ο έλεγχος τέτοιων μετατροπών πραγματοποιείται με χρήση PID ελεγκτών για τη ρύθμιση της τάσης στο μετασχηματισμένο πλαίσιο Park (Βλ. ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α) και τη χρήση ενός ταλαντωτή για την παραγωγή των κυματομορφών αναφοράς για τον έλεγχο του χαμηλότερου επιπέδου.

β) Μετατροπείς Grid-feeding. Σε αντίθεση με τους Grid-Forming μετατροπείς ο ρόλος των μετατροπών αυτής της κατηγορίας είναι τα τροφοδοτούν ένα ήδη υπάρχον AC δίκτυο με ισχύ. Μπορούν, δηλαδή, να αναπαρασταθούν σαν μία πηγή ρεύματος παράλληλα συνδεδεμένη στο δίκτυο. Είναι προφανές ότι η τάση εξόδου των μετατροπών θα πρέπει να είναι συγχρονισμένη με την τάση δικτύου, κάτι που καθιστά απαραίτητη την ύπαρξη συστήματος συγχρονισμού μεγάλης ακρίβειας. Πολλοί Grid-feeding μετατροπείς μπορούν να συνδέονται, παράλληλα, στο ίδιο δίκτυο χωρίς περιορισμούς.

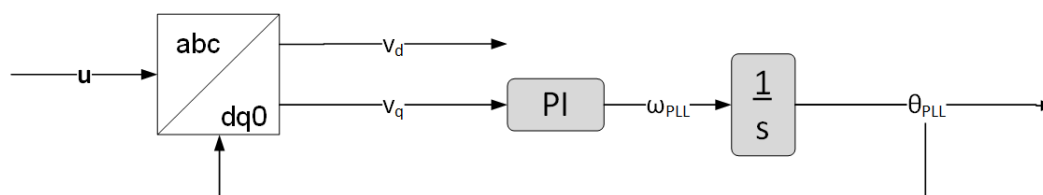
Βασικά στοιχεία του ελέγχου τέτοιων μετατροπών αποτελεί η διάταξη συγχρονισμού με το δίκτυο (Phase Locked Loop - PLL), και ο ελεγκτής ρεύματος στο σύγχρονο πλαίσιο αναφοράς. Σημειώνεται ότι οι μετατροπείς που υλοποιήθηκαν στη συγκεκριμένη εργασία είναι τύπου grid-feeding, και οι παραπάνω διατάξεις ελέγχου περιγράφονται λεπτομερώς στη συνέχεια.

γ) Μετατροπείς Grid-supporting. Οι grid-supporting μετατροπείς αποτελούν ένα συνδυασμό των δύο προαναφερθέντων τύπων, υπό την έννοια ότι ο ρόλος τους στο AC δίκτυο είναι να εγχέουν ενεργό και άεργο ισχύ, με ελεγχόμενο τρόπο, ενώ ταυτόχρονα να συμβάλουν στη ρύθμιση της τάσης και της συχνότητας του δικτύου στα επιθυμητά μεγέθη. Οι μετατροπείς αυτού του τύπου μπορούν να λειτουργήσουν είτε ως πηγές τάσης, συμμετέχοντας στη ρύθμιση της τάσης και της συχνότητας σε ήδη υπάρχον δίκτυο ή και σε νησιδοποιημένα συστήματα, είτε ως πηγές ρεύματος εγχέοντας ισχύ στο δίκτυο, και συμβάλλοντας στη ρύθμιση της τάσης και της συχνότητας του δικτύου έμμεσα μέσω της έγχυσης αέργου ή ενεργού ισχύος αντίστοιχα.

Ο έλεγχος αυτών των μετατροπών πραγματοποιείται με την ενσωμάτωση χαρακτηριστικών καμπυλών droop τάσης και συχνότητας στο σχήμα ελέγχου.

4.2 Σχήματα συγχρονισμού μετατροπών με το AC δίκτυο

Οι αλγόριθμοι και τα σχήματα συγχρονισμού με το δίκτυο είναι θεμελιώδη ζητήματα όσον αφορά το έλεγχο μετατροπών που συνδέονται στο δίκτυο. Τα περισσότερα σχήματα ελέγχου βασίζονται σε μετρούμενα μεγέθη, όπως η συχνότητα, η φάση και η τάση του δικτύου. Επομένως είναι σημαντικό να μπορούν να εκτιμηθούν σωστά οι παραπάνω παράμετροι τόσο σε συνθήκες κανονικής λειτουργίας, όσο και συνθήκες σφάλματος. Τα περισσότερα σχήματα συγχρονισμού με το δίκτυο βασίζονται στην κλασική διάταξη κλειδώματος φάσης (PLL) που εικονίζεται στο Σχήμα 4.2.

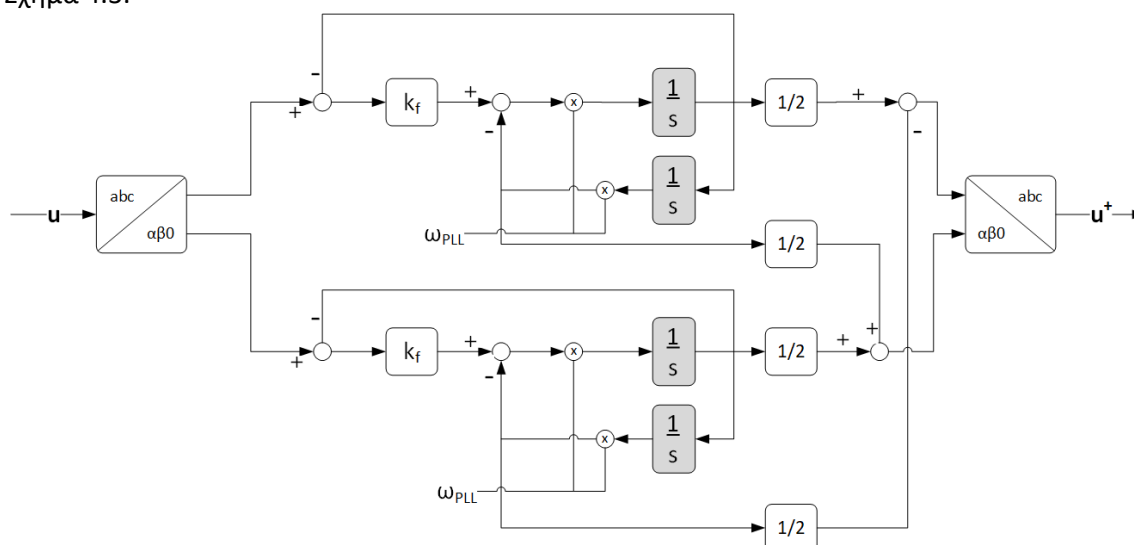


Σχήμα 4.2 Διάταξη Κλειδώματος Φάσης - PLL

Η παραπάνω διάταξη έχει ως αρχή λειτουργίας τον συγχρονισμό της φάσης του δικτύου με τη φάση του στρεφόμενου πλαισίου αναφοράς του μετασχηματισμού PARK (βλ. ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α). Αυτό επιτυγχάνεται με τον μηδενισμό της q συνιστώσας της τάσης του δικτύου στο σημείο κοινής σύνδεσης με χρήση ενός PI ελεγκτή.

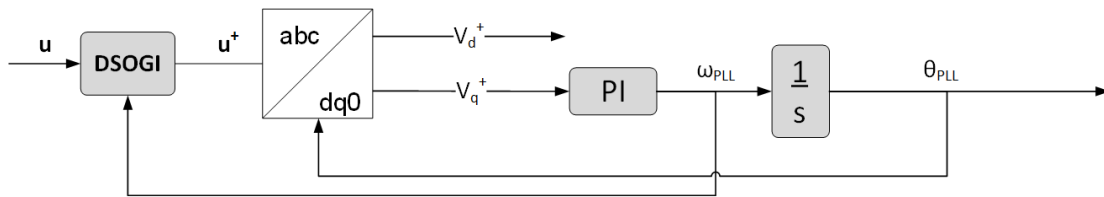
Η παραπάνω διάταξη είναι ιδιαίτερα αποτελεσματική, και λειτουργεί ικανοποιητικά σε συνθήκες κανονικές λειτουργίας, εκτιμώντας ταυτόχρονα τη φάση, τη συχνότητα, αλλά και την d συνιστώσα της τάσης του δικτύου. Όμως, σε καταστάσεις ασύμμετρων σφαλμάτων η αρνητική ακολουθία της τάσης του δικτύου δημιουργεί ταλαντώσεις στην απόκριση του συστήματος και οδηγεί στον αποσυγχρονισμό του μετατροπέα.

Για την αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος, στην βιβλιογραφία προτείνονται διάφορες μέθοδοι φιλτραρίσματος της τάσης δικτύου με σκοπό την εξαγωγή της θετικής ακολουθίας, η οποία ακολούθως τροφοδοτείται στη διάταξη PLL. Μία από αυτές είναι η χρήση ενός διπλού φίλτρου δευτέρου βαθμού (Dual Second Order Generalized Integrators - DSOGI) [31, 32], το οποίο εικονίζεται στο Σχήμα 4.3.



Σχήμα 4.3 Φίλτρο Εξαγωγής θετικής ακολουθίας της τάσης δικτύου - DSOGI

Ο Συνδυασμός των δύο συστημάτων σχηματίζει τη διάταξη DSOGI-PLL (Σχήμα 4.4) η οποία εκτιμά τις παραμέτρους του δικτύου ικανοποιητικά, τόσο σε κανονική λειτουργία όσο και σε συνθήκες σφάλματος.

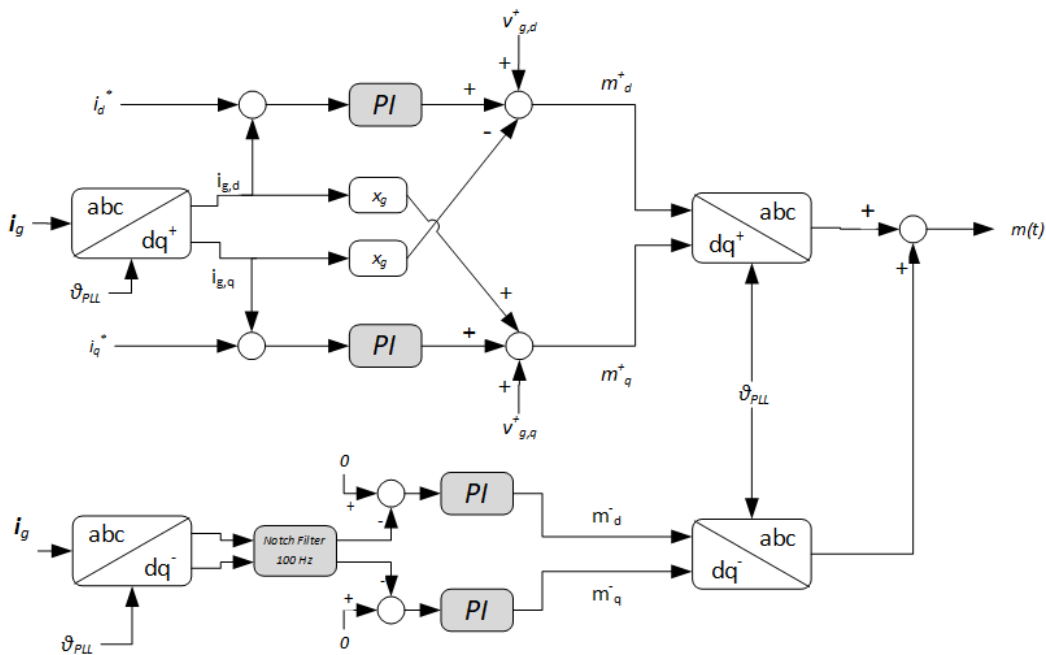


Σχήμα 4.4 Διάταξη Κλειδώματος Φάσης με χρήση φίλτρου θετικής ακολουθίας 2^{ης} τάξης – DSOGI-PLL

4.3 Διανυσματικός έλεγχος ρευμάτων στο σύγχρονο πλαίσιο αναφοράς

Η πιο διαδεδομένη μέθοδος ελέγχου grid-feeding μετατροπέων είναι ο διανυσματικός έλεγχος των ρευμάτων στο σύγχρονο πλαίσιο αναφοράς. Το βασικό πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι η δυνατότητα ανεξάρτητου ελέγχου της ενεργού και αέργου ισχύος που εγχέει ο μετατροπέας στο δίκτυο, με την κατάλληλη ρύθμιση των d,q συνιστωσών ρεύματος του μετατροπέα, όπως θεμελιώνεται θεωρητικά στο ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α. Προϋπόθεση για να ισχύουν τα παραπάνω είναι ο μετατροπέας να είναι συγχρονισμένος με το δίκτυο, δηλαδή να λειτουργεί σε στρεφόμενο πλαίσιο αναφοράς του οποίου ο άξονας d να είναι ευθυγραμμισμένος με τον φασιθέτη της τάσης του δικτύου, κάτι που επιτυγχάνεται μέσω του συστήματος PLL.

Ο συγκεκριμένος εκλεκτής δέχεται σαν είσοδο τα επιθυμητά ρεύματα στους άξονες d και q του στρεφόμενου πλαισίου αναφοράς, και δίνει στην έξοδό του τις κυματομορφές αναφοράς των τριών φάσεων που χρησιμοποιεί ο ελεγκτής PWM του μετατροπέα. Οι εντολές αναφοράς προέρχονται από κάποιον εξωτερικό ελεγκτή που ρυθμίζει την τάση του δικτύου, την ενεργό ή άεργο ισχύ ή ακόμα και την DC τάση του HVDC συνδέσμου.



Σχήμα 4.5 Διάγραμμα ελεγκτή ρεύματος θετικής και αρνητικής ακολουθίας

Ωστόσο, η χρήση απλού διανυσματικού ελέγχου δεν επαρκεί για τον αποτελεσματικό έλεγχο των ρευμάτων αρνητικής ακολουθίας, όπως τεκμηριώνεται στις [12, 33, 34]. Ρεύματα αρνητικής ακολουθίας εμφανίζονται στον μετατροπέα σε συνθήκες σφάλματος και, για την καταστολή τους, κρίνεται αναγκαία η χρήση δύο πανομοιότυπων ελεγκτών ρεύματος στο σύγχρονο πλαίσιο, έναν για τα ρεύματα θετικής ακολουθίας, και έναν για τα ρεύματα αρνητικής ακολουθίας. Σημειώνεται ότι για τον υπολογισμό του μετασχηματισμού PARK της αρνητικής ακολουθίας, χρησιμοποιείται η αντίθετη φάση δικτύου ($-\theta_{PLL}$), σε συνδυασμό με ένα φίλτρο εγκοπής (Notch Filter), που χρησιμεύει για την απόζευξη του ελεγκτή αρνητικής ακολουθίας (NS Controller) από τον ελεγκτή θετικής ακολουθίας (PS Controller).

Το διάγραμμα βαθμίδων του διπλού ελεγκτή ρεύματος στο σύγχρονο πλαίσιο αναφοράς δίνεται στο Σχήμα 4.5. Οι τάσεις $v_{g,d}^+$ και $v_{g,q}^+$ είναι οι dq συνιστώσες της τάσης δικτύου στο σημείο κοινής σύνδεσης (ΣΚΣ), το ρεύμα i_g είναι το εγχεόμενο ρεύμα του μετατροπέα στο δίκτυο, ενώ x_g είναι συνολική σύνθετη αντίσταση σύνδεσης του μετατροπέα στο δίκτυο. Όλα τα μεγέθη είναι στο σύστημα ανά μονάδα (per unit - pu).

5 ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ-ΤΟΠΟΛΟΓΙΑ-ΕΛΕΓΧΟΣ ΕΞΕΤΑΖΟΜΕΝΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

5.1 Γενική Περιγραφή εξεταζόμενου συστήματος

Στην παρούσα εργασία μελετάται ένας MMC VSC-HVDC σύνδεσμος τοπολογίας διπόλου, ο οποίος υλοποιήθηκε και προσομοιώθηκε στο λογισμικό MATLAB/Simulink. Η παραμετροποίηση, η διαστασιολόγηση και η τοπολογία του συστήματος πραγματοποιήθηκε με τέτοιο τρόπο ώστε να ανταποκρίνεται, σε κάποιο βαθμό, στα δεδομένα του προβλήματος της Κρήτης όσον αφορά την ικανότητα μεταφοράς ισχύος, τα χαρακτηριστικά μεγέθη των ΣΗΕ στα σημεία σύνδεσης (επίπεδα τάσης και στάθμες βραχυκύκλωσης) και το μήκος των DC γραμμών μεταφοράς.

Πιο συγκεκριμένα η διασύνδεση έχει τα εξής χαρακτηριστικά:

- **Ικανότητα Ισχύος 2x500 MW.** Στην περίπτωση της Κρήτης η μέγιστη ωριαία ζήτηση είναι περίπου 635 MW [1, p. 77], ενώ σύμφωνα με το Δεκαετές Πρόγραμμα Ανάπτυξης 2014-2013 η διασύνδεση της Κρήτης θα πραγματοποιηθεί με διπολικό HVDC συνολικής ισχύος 700 MW. Το παρόν σύστημα είναι υπερδιαστασιολογημένο, συγκριτικά με το παράδειγμα της Κρήτης, καθώς θεωρήθηκε ότι το σύστημα λειτουργεί με εφεδρεία ισχύος 0.5 αμ.
- **Μήκος Διασύνδεσης 380 km,** σύμφωνα με το ΔΠΑ 2014-2023 [16].
- **Επίπεδα τάσης 400 kV κ' 150 kV.** Σύμφωνα με το σχέδιο του ΑΔΜΗΕ, η διασύνδεση θα πραγματοποιηθεί μεταξύ του δικτύου υπερυψηλής τάσης της Αττικής (ΚΥΤ Κουμουνδούρου ή Αχαρνών – 400 kV) και του δικτύου υψηλής τάσης της Κρήτης (Λινοπεράματα - 150kV). Οι στάθμες βραχυκύκλωσης για το ΚΥΤ Αχαρνών είναι περίπου 20000 MVA, ενώ ενδεικτικές τιμές της ισχύος βραχυκύκλωσης του σημείου σύνδεσης στην Κρήτη αποτελούν οι στάθμες του δικτύου 150 kV της Ν. Πελοποννήσου (περίπου 1000 MVA). [15]

Για την υλοποίηση του συστήματος χρησιμοποιήθηκαν τέσσερις όμοιοι MMC μετατροπείς 10 επιπέδων. Σημειώνεται ότι σε συνήθεις εφαρμογές οι μετατροπείς αυτού του τύπου χρησιμοποιούν πολύ περισσότερα επίπεδα, όπως έχει ήδη αναφερθεί παραπάνω, αλλά η υπολογιστική πολυπλοκότητα καθιστά πολύ χρονοβόρα την προσομοίωση περισσότερων μονάδων με ένα πλήρες διακοπτικό μοντέλο.

Η φιλοσοφία ελέγχου του συστήματος βασίζεται στον έλεγχο grid-feeding μετατροπέων. Πιο συγκεκριμένα, οι ελεγκτές των μετατροπέων στην πλευρά του AC δικτύου 1 (δίκτυο της Κρήτης) ρυθμίζουν την ενεργό και άεργο ισχύ που εγχέουν στο δίκτυο (*PQ Control*) με βάση εξωτερική εντολή, αλλά και την απόκριση των FRT σχημάτων, ενώ οι μετατροπείς στην πλευρά του AC δικτύου 2 (δίκτυο της Αττικής) καθορίζουν την ισχύ που εγχέουν στο σύστημα μέσω της ρύθμισης της DC τάσης του συνδέσμου, ώστε αυτή να παραμένει στην ονομαστική τιμή της. Παράλληλα ρυθμίζουν την και την άεργο ισχύ με βάση τα σχήματα και της χαρακτηριστικές FRT (*V_{dc} – Q Control*)

Τα συστήματα ελέγχου των 2 σταθμών επικοινωνούν με το διαχειριστή συστήματος, ο οποίος ορίζει τις επιθυμητές τιμές (Setpoints), αλλά και μεταξύ τους για την αποστολή τηλεπικοινωνιακών σημάτων, με σκοπό την εσωτερική διαχείριση της ροής ισχύος. Όλα τα τηλεπικοινωνιακά σήματα θεωρήθηκε ότι παρουσιάζουν καθυστέρηση διάδοσης της τάξης των 40 ms.

Σημειώνεται ότι η σύμβαση που ακολουθείται για την αρίθμηση των AC δικτύων, των σταθμών και των μεγεθών του κάθε σταθμού είναι εξής:

- Το AC δίκτυο 1 είναι το δίκτυο στην πλευρά του νησιωτικού συστήματος (Κρήτη) ενώ το AC δίκτυο 2 είναι το δίκτυο στην πλευρά του ηπειρωτικού συστήματος (Αττική).
- Οι σταθμοί στις άκρες του συνδέσμου ακολουθούν τον ακόλουθο συμβολισμό:

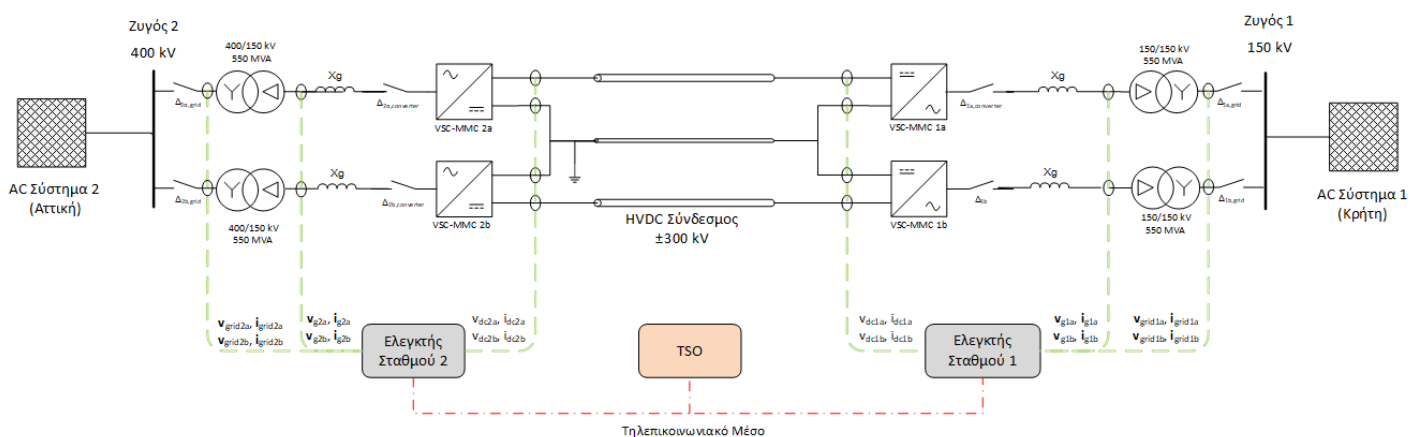
$StationXy$, όπου

$X = \{1,2\}$ συμβολίζει το AC σύστημα στο οποίο συνδέεται ο σταθμός και

$y = \{a, b\}$ συμβολίζει τον θετικό ή αρνητικό πόλο της DC διασύνδεσης

- Παρόμοιο συμβολισμό ακολουθούν και τα μετρούμενα ηλεκτρικά μεγέθη που σχετίζονται με τον κάθε σταθμό (τάσεις, ρεύματα, ισχύς κτλ.)

Η επισκόπηση του εξεταζόμενου συστήματος εικονίζεται στο Σχήμα 5.1, ενώ αναλυτική περιγραφή της ηλεκτρικής τοπολογίας του συστήματος αλλά και των σχημάτων ελέγχου πραγματοποιείται στις επόμενες παραγράφους. Οι παράμετροι των ελεγκτών, αλλά οι τιμές των ηλεκτρικών χαρακτηριστικών των συστημάτων παρουσιάζονται λεπτομερώς στο ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β και στο ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ, αντίστοιχα.



Σχήμα 5.1 Επισκόπηση εξεταζόμενου συστήματος

5.2 Ηλεκτρική Τοπολογία Συστήματος

Όπως φαίνεται και στο παραπάνω σχήμα, το υπό μελέτη σύστημα είναι μια ακτινική HVDC διασύνδεση, τοπολογίας διπόλου με μεταλλική επιστροφή. Η γείωση του αγωγού μεταλλικής επιστροφής πραγματοποιείται στη μεριά του σταθμού 2, ο οποίος εφαρμόζει έλεγχο $V_{dc} - Q$, για να μην επηρεάζεται ο ελεγκτής DC τάσης από πιθανή πτώση τάσης πάνω στον αγωγό. Τα κεντρικά στοιχεία του κυκλώματος περιγράφονται στη συνέχεια:

α) Μετατροπείς MMC-10 επιπέδων. Ο πυρήνας του συστήματος αποτελείται από τέσσερις MMC μετατροπείς, 10 επιπέδων έκαστος, οι οποίοι λειτουργούν σε επίπεδα τάσης 300 kV ($[0, -300]$ kV και $[-300, 0]$ kV για τους πόλους a και b αντίστοιχα). Όπως εξηγείται στην παράγραφο 3.2 και στο Σχήμα 3.2 κάθε μετατροπέας αποτελείται από 10 υπομονάδες εν σειρά με μια αυτεπαγωγή L_s . Ο ρόλος της αυτεπαγωγής αυτής είναι να περιορίζει τα ρεύματα ανακυκλοφορίας και τα ρεύματα σφάλματος του μετατροπέα, ενώ ταυτόχρονα λειτουργεί και σαν αυτεπαγωγή σύνδεσης μεταξύ του μετατροπέα και του AC δικτύου.

Σημειώνεται ότι η χρήση αυτεπαγωγών εν σειρά με το υποσκέλους του μετατροπέα είναι εφικτή σε ένα μετατροπέα MMC, καθώς πάντα υφίσταται κυκλωματική σύνδεση των δύο DC πόλων με τον

μεσαίο κόμβο όπου εφαρμόζεται η AC τάση εξόδου. Ως εκ τούτου υπάρχει συνεχής ροή ρεύματος σε κάθε κλάδο, σε αντίθεση με ότι συμβαίνει σε κλασσικούς μετατροπείς δύο επιπέδων, όπου το AC σημείο σύνδεση συνδέεται εναλλάξ στον θετική ή τον αρνητικό DC πόλο [12, p. 51].

Όσον αφορά τις χωρητικότητες της κάθε υπομονάδας, αυτές επιλέγονται με βάση το κριτήριο η κυμάτωση της τάσης κάθε υπομονάδας να μην ξεπερνά το $\pm 10\%$, ή αλλιώς η σταθερά χρόνου κάθε υπομονάδας να είναι στο εύρος $30 - 40 \text{ kJ/MVA}$. Σύμφωνα με την [19, p. 132] η σχέση υπολογισμού της χωρητικότητας του πυκνωτή είναι η παρακάτω:

$$C_{sm} = \frac{2 \cdot S_n \cdot E_{MMC}}{6 \cdot N_{arm} \cdot v_c^2}$$

, όπου S_n η ονομαστική ισχύς του μετατροπέα, E_{MMC} η παραπάνω σταθερά χρόνου, N_{arm} το πλήθος των υπομονάδων ανά υποσκέλος και v_c η τάση στα άκρα κάθε υπομονάδας. Για το συγκεκριμένο σύστημα επιλέχθηκε σταθερά χρόνου 35 kJ/MVA , οπότε η χωρητικότητα του πυκνωτή υπολογίζεται περίπου στα $640 \mu\text{F}$.

β) Αυτεπαγωγές σύνδεσης. Όπως αναφέρθηκε ήδη οι μετατροπείς MMC περιέχουν πηνία σε κάθε υποσκέλος τους, τα οποία θα επέτρεπαν την απευθείας σύνδεσή τους στο δίκτυο. Υπό αυτήν την έννοια, οι αυτεπαγωγές L_g , δεν είναι απαραίτητες σε ένα τέτοιο σύστημα και μπορούν να παραλειφθούν εντελώς [19, p. 33]. Στη συγκεκριμένη περίπτωση χρησιμοποιούνται με σκοπό και το φιλτράρισμα του ρεύματος εξόδου του μετατροπέα.

γ) Μετασχηματιστές. Κάθε σταθμός μετατροπέα χρησιμοποιεί τον δικό του μετασχηματιστή για τη σύνδεση στο δίκτυο υψηλής (Μ/Σ 150/150 kV) και υπερυψηλής τάσης (Μ/Σ 150/400 kV). Όλοι οι μετασχηματιστές είναι ονομαστικής ισχύος 550 MVA.

Λόγω της DC συνιστώσας που περιέχουν οι φασικές τάσεις εξόδου του μετατροπέα, οι οποίες οφείλονται στον ασύμμετρο χαρακτήρα της τοπολογίας διπόλου (βλ. παράγραφο 2.4.2), στην πλευρά των μετατροπέων ο μετασχηματιστής δεν μπορεί να είναι σε συνδεσμολογία γειωμένου αστερά. Για αυτό το λόγω επιλέγεται Μ/Σ συνδεσμολογίας Δ/Υ, με το τρίγωνο (πρωτεύον τύλιγμα) να βρίσκεται στην πλευρά του μετατροπέα, και τον γειωμένο αστέρα στην πλευρά του δικτύου.

δ) AC συστήματα. Το AC σύστημα 1 θεωρείται ότι είναι το νησιωτικό σύστημα που κατά κύριο λόγο τροφοδοτείται με ισχύ από το ηπειρωτικό AC σύστημα 2. Το σύστημα 1 έχει ονομαστική τάση 150 kV και ισχύ βραχυκύκλωσης 4000 MVA, ενώ το σύστημα 2 έχει ονομαστική τάση 400 kV και ισχύ βραχυκύκλωσης 20000 MVA. Και τα δύο συστήματα μοντελοποιούνται σαν τριφασικές πηγές τάσεις με ενσωματωμένη σύνθετη αντίσταση λόγου $X/R = 10$.

Σημειώνεται ότι η στάθμη βραχυκύκλωσης που επιλέχθηκε για την Κρήτη είναι αρκετά μεγαλύτερη από την εκτιμώμενη (περίπου 1000 MVA). Αυτή ή ανακουλουθία οφείλεται στην κακή απόκριση του κλασσικού συστήματος συγχρονισμού με το δίκτυο, όταν αυτό είναι αρκετά ασθενές, με συνέπεια να απαιτείται πιο ακριβές σύστημα συγχρονισμού, η σχεδίαση του οποίου ξεπερνά τους βασικούς σκοπούς και επιδιώξεις της συγκεκριμένης εργασίας.

ε) Γραμμές μεταφοράς. Οι γραμμές μεταφοράς αποτελούνται από 2 αγωγούς υψηλής τάσης μήκους 380 km, που λειτουργούν στα $\pm 300 \text{ kV}$, και έναν αγωγό μέσης τάσης, επίσης μήκους 380 km, που λειτουργεί σαν μονοπάτι επιστροφής του ρεύματος. Ο αγωγός επιστροφής, ιδανικά,

λειτουργεί σε μηδενική τάση, αφού το ένα άκρο του είναι γειωμένο, και διαρρέεται από μηδενικό ρεύμα. Για την υλοποίηση των γραμμών μεταφοράς χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο του Simulink για γραμμές μεταφοράς, που υλοποιεί το π-ισοδύναμο κύκλωμα. Οι παράμετροι του π-ισοδύναμου κυκλώματος επιλέχθηκαν έτσι ώστε να ανταποκρίνονται στις τεχνικές προδιαγραφές εμπορικών υποβρυχίων καλωδίων XLPE που χρησιμοποιούνται κατά κόρον σε HVDC εφαρμογές [48].

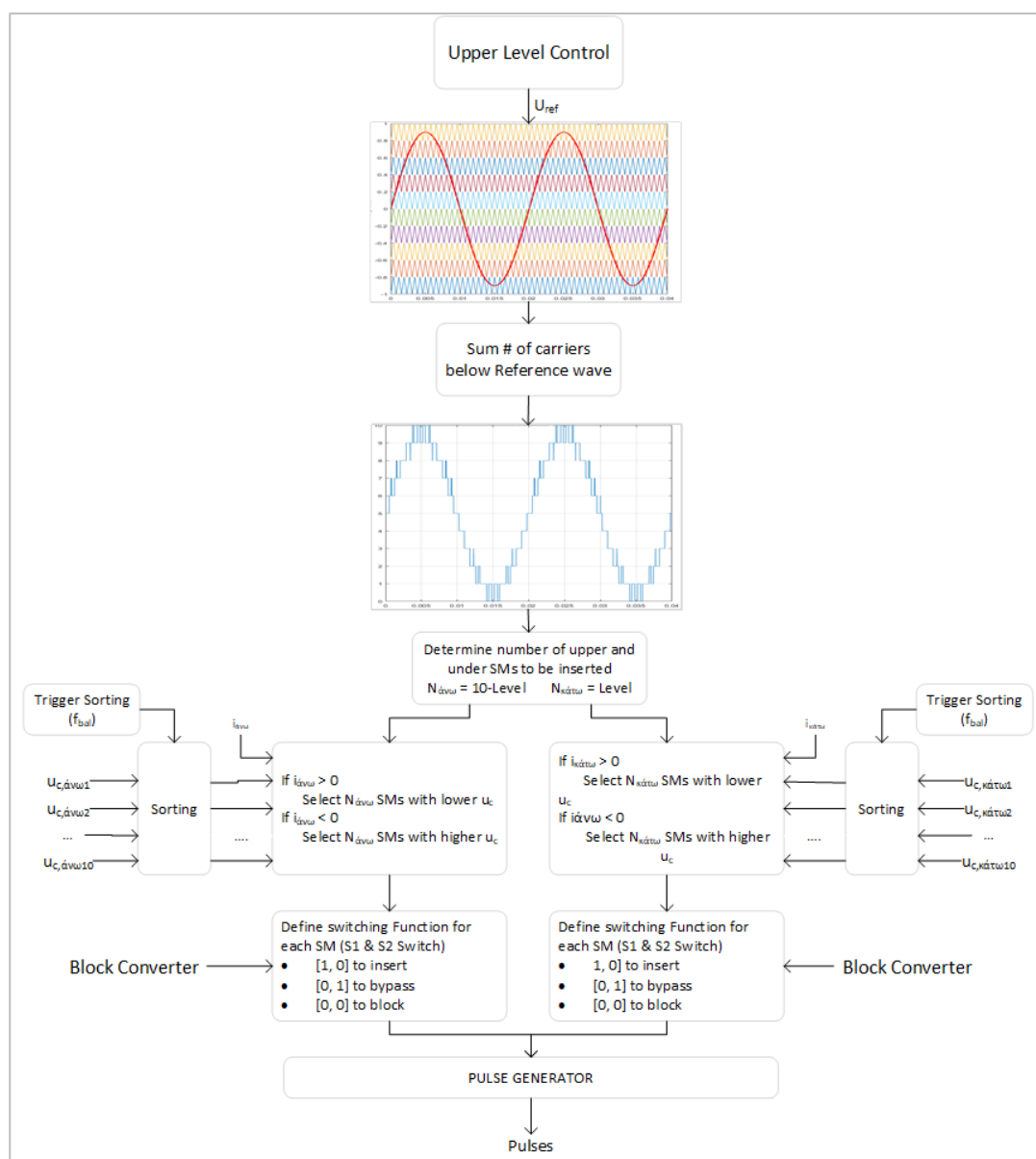
στ) AC διακόπτες (CB). Ο κάθε υποσταθμός της HVDC διασύνδεσης περιλαμβάνει δύο διακόπτες απομόνωσης. Ο ένας τοποθετείται στην έξοδο του μετατροπέα και ο δεύτερος τοποθετείται στην έξοδο του Μ/Σ, στο σημείο κοινής σύνδεσης με το AC δίκτυο. Οι δύο αυτοί διακόπτες χρησιμοποιούνται για να απομονώσουν το σύστημα σε περίπτωση σφαλμάτων. Ο διακόπτης του μετατροπέα αποτρέπει την τροφοδότηση σφαλμάτων μεταξύ της AC και της DC πλευράς του μετατροπέα, ενώ ο διακόπτης του Μ/Σ αποτρέπει την τροφοδότηση σφαλμάτων του υποσταθμού από το AC δίκτυο.

5.3 Ελεγκτής PWM με εξισορρόπηση τάσεων

Όπως αναλύεται στην Παράγραφο 3.3, στην βιβλιογραφία παρουσιάζονται πολλές παραλλαγές μεθόδων διαμόρφωσης για πολυεπίπεδους μετατροπείς. Στη συγκεκριμένη εργασία υιοθετήθηκε η μέθοδος PD-PWM. Υπενθυμίζεται ότι η μέθοδος αυτή είναι απαραίτητο να συνδυάζεται με μια μέθοδο εξισορρόπησης των τάσεων των πυκνωτών, προκειμένου να μην παρουσιάζονται φαινόμενα υπερφόρτισης ή υποφόρτισης συγκεκριμένων μονάδων.

Η μέθοδος εξισορρόπησης που χρησιμοποιείται είναι απλή ταξινόμηση της τάσης με συχνότητα f_{bal} και επιλογή των εισαγόμενων μονάδων σύμφωνα με τον αλγόριθμο που παρουσιάζεται στην παράγραφο 3.4.

Το πλήρες σχήμα ελέγχου διαμόρφωσης εύρους παλμών και εξισορρόπησης της τάσης των πυκνωτών για ένα σκέλος (φάση) του μετατροπέα εικονίζεται στο Σχήμα 5.2. Σημειώνεται ότι στον ελεγκτή έχει ενσωματωθεί και λειτουργία μπλοκαρίσματος του μετατροπέα, με ταυτόχρονη εντολή ανοίγματος των AC διακοπών για την απομόνωση του μετατροπέα από το δίκτυο.



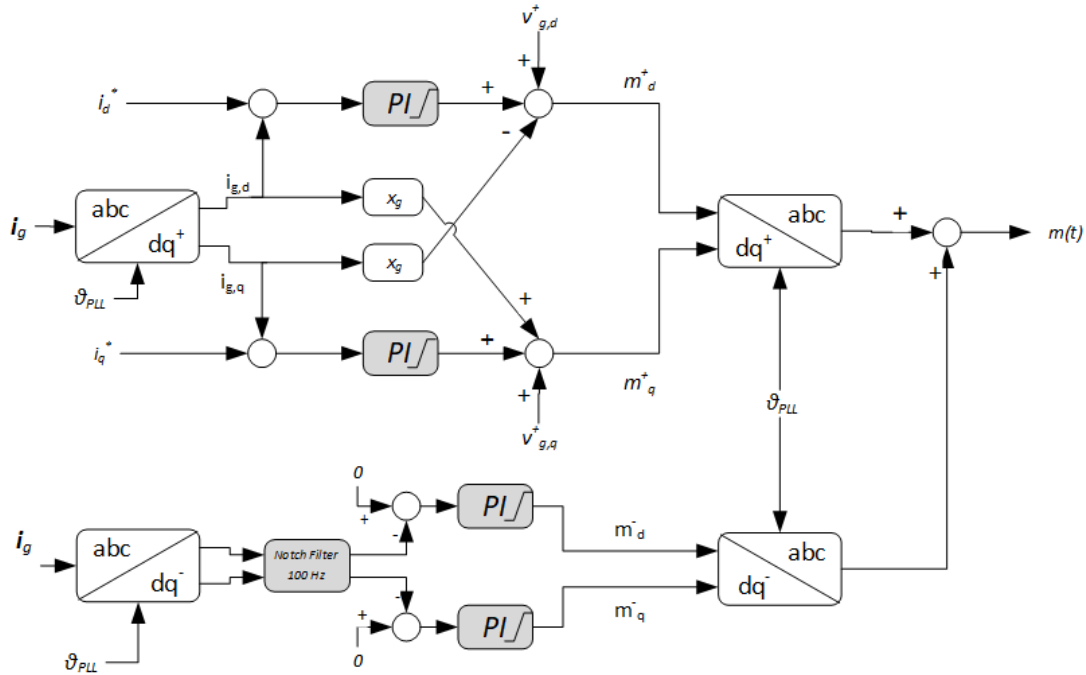
Σχήμα 5.2 Σχήμα Ελέγχου PD-PWM Με ταξινόμηση

5.4 Έλεγχος ρευμάτων στο σύγχρονο πλαίσιο αναφοράς – Συγχρονισμός με το δίκτυο

Μετά τον έλεγχο του μετατροπέα σε επίπεδο παλμοδότησης, όπως παρουσιάστηκε παραπάνω, σε δεύτερο επίπεδο ελέγχου, χρησιμοποιείται ο ελεγκτής ρεύματος θετικής και αρνητικής ακολουθίας στο σύγχρονο πλαίσιο αναφοράς. Η αναλυτική περιγραφή και τεκμηρίωση αυτού του ελεγκτή πραγματοποιήθηκε στην παράγραφο 4.3. Σημειώνεται ότι κάθε PI ελεγκτής του σχήματος ελέγχου διαθέτει κορεσμό, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα, με σκοπό να περιορίζεται η έξοδος σε αποδεκτό εύρος τιμών. Οι αναλυτικές παράμετροι του ελεγκτή παρουσιάζονται στο ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ.

Για τον συγχρονισμό με το δίκτυο χρησιμοποιείται ένας κλασσικός ελεγκτής PLL, σε συνδυασμό με DSOGI φίλτρα δεύτερης τάξης για την εξαγωγή της θετικής ακολουθίας της τάσης δικτύου, επίσης σύμφωνα με τα όσα παρουσιάζονται στην παράγραφο 4.2.

Ο ελεγκτής που εικονίζεται στο παρακάτω σχήμα απαιτεί σαν είσοδο τις μετασχηματισμένες dq συνιστώσες της θετικής ακολουθίας της τάσης δικτιού ($v_{g,d}^+$ και $v_{g,q}^+$) στο σημείο σύνδεσης³, καθώς επίσης και το ρεύμα i_g . Επίσης απαιτείται ο προσδιορισμός των επιθυμητών συνιστωσών του ρεύματος στο πλαίσιο dq (i_d^* και i_q^*), ο οποίος πραγματοποιείται από ανώτερο επίπεδο ελέγχου ($PQ - Control$ ή $V_{dc}Q Control$). Τα ανώτερα αυτά επίπεδα ελέγχου παρουσιάζονται στις επόμενες παραγράφους.



Σχήμα 5.3 Ελεγκτής Ρεύματος Στο σύγχρονο πλαίσιο αναφοράς

5.5 Έλεγχος DC τάσης-αέργου ισχύος ηπειρωτικού μετατροπέα

Οι μετατροπείς που βρίσκονται στην πλευρά του AC δικτύου 2 (Ηπειρωτικό δίκτυο Αττικής) πραγματοποιούν, σε ανώτερο επίπεδο, ρύθμιση της DC τάσης του HVDC συνδέσμου, ελέγχοντας παράλληλα με ανεξάρτητο τρόπο την εγχεόμενη στο δίκτυο άεργο ισχύ.

Η ρύθμιση της τάσης του DC συνδέσμου πραγματοποιείται με έναν PI ελεγκτή, στον οποίο έχει ενσωματωθεί και λειτουργία Tracking. Όπως θα παρουσιαστεί στην παράγραφο 5.8 η λειτουργία Tracking επιτρέπει τη μεταβολή της δυναμικής του συστήματος μέσω μιας επιπλέον εισόδου. Στη συγκεκριμένη περίπτωση η μεταβολή της δυναμικής του συστήματος είναι χρήσιμη σε περιπτώσεις που η έξοδος του PI ελεγκτή ψαλιδίζεται δυναμικά στο διάστημα $[-I_{d,max}, I_{d,max}]$, έτσι ώστε η έξοδος του ελεγκτή να ταυτίζεται με την τελική εντολή i_d^* . Ο ψαλιδισμός της εξόδου του PI ελεγκτή μπορεί να συμβεί κυρίως σε συνθήκες σφάλματος, όπου η άεργος συνιστώσα ρεύματος μεγαλώνει σημαντικά, λόγω του σχήματος FRT για την υποστήριξη της τάσης. Η ομαλή ανάκαμψη μετά την εκκαθάριση του σφάλματος, χωρίς απότομες βηματικές αλλαγές στην εντολή i_d^* , απαιτεί η δυναμική του ελεγκτή να ταυτίζεται με την πραγματική κατάσταση του συστήματος.

³ Σημειώνεται ότι το σημείο σύνδεσης στο οποίο πραγματοποιείται ο έλεγχος δεν είναι το ΣΚΣ, αλλά το πρωτεύον του Μ/Σ, όπως εικονίζεται στο Σχήμα 5.1.

Η τιμή $I_{d,max}$ υπολογίζεται έτσι ώστε να διατηρείται το συνολικό ρεύμα στη μέγιστη επιτρεπτή τιμή, με προτεραιότητα στην άεργο συνιστώσα ρεύματος.

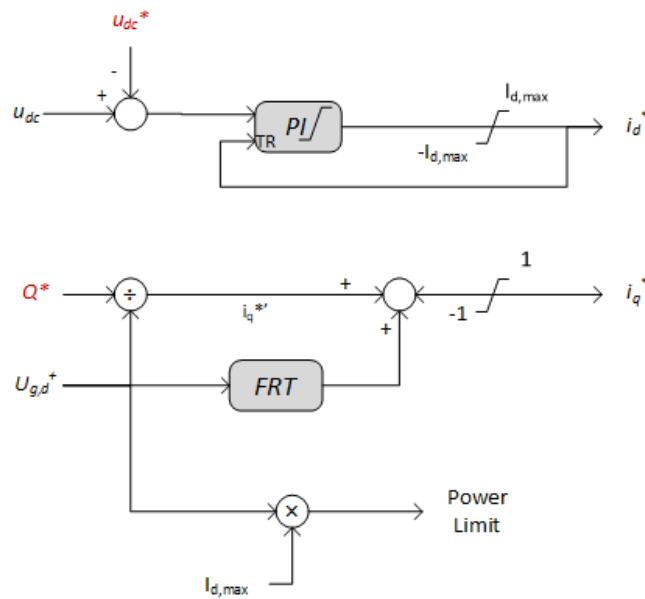
$$I_{d,max} = \sqrt{I_{max}^2 - i_q^{*2}}$$

Όσον αφορά τον έλεγχο της άεργου συνιστώσας ρεύματος, αυτή προσαρμόζεται με βάση μια εξωτερική εντολή Q^* , σε συνδυασμό με το σχήμα FRT το οποίο υλοποιεί τη χαρακτηριστική του Σχήμα 1.2 για την υποστήριξη της τάσης σε συνθήκες σφάλματος.

Τέλος, ο ελεγκτής, με βάση τα μετρούμενα μεγέθη του δικτύου, εξάγει ένα σήμα (*Power Limit*) που αφορά τη μέγιστη δυνατή ισχύ που μπορεί να απορροφήσει ανά πάσα στιγμή. Το σήμα αυτό, όπως θα περιγράψει και στη συνέχεια, χρησιμεύει για τον ορισμό των εντολών ισχύος των μετατροπέων στην πλευρά του AC συστήματος 1, και υπολογίζεται σύμφωνα με τον παρακάτω τύπο:

$$PowerLimit = U_{g,d}^+ \cdot I_{d,max}$$

Το σχήμα ελέγχου για τη ρύθμιση της DC τάσης και της άεργου ισχύος για τους μετατροπείς του σταθμού 2 (σταθμός Αττικής) παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.4.



Σχήμα 5.4 Ελεγκτής U_{dc} - Q ηπειρωτικού μετατροπέα με σχήμα FRT

5.6 Έλεγχος ενεργού-άεργου ισχύος υπεράκτιου μετατροπέα

Οι μετατροπείς που βρίσκονται στην πλευρά του AC δικτύου 1 (υπεράκτιο δίκτυο Κρήτης) πραγματοποιούν ρύθμιση της ενεργού και άεργου ισχύος που εγχέουν στο δίκτυο, με βάση εξωτερικές εντολές αναφοράς.

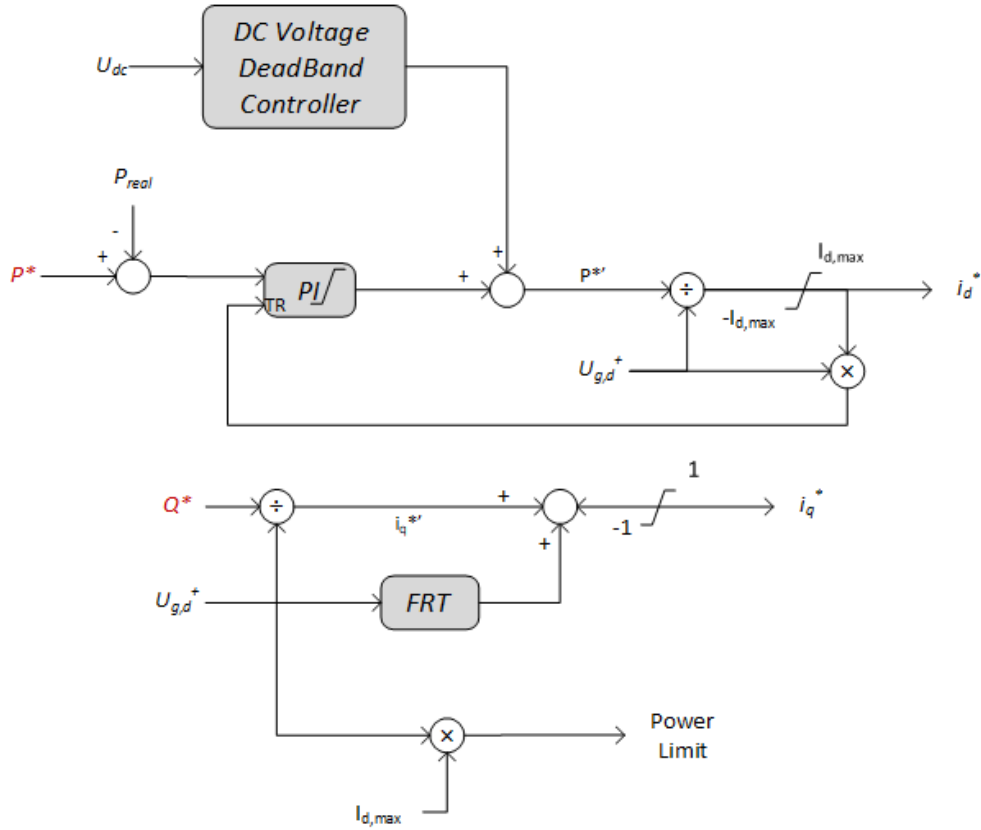
Ο ελεγκτής άεργου ισχύος, συμπεριλαμβανομένου του σχήματος FRT και του σήματος μέγιστης δυνατής απορροφούμενης ισχύος, είναι πανομοιότυπος με τον αντίστοιχο ελεγκτή που παρουσιάστηκε παραπάνω, και για αυτό το λόγο δεν θα αναλυθεί περαιτέρω. Όσον αφορά τη ρύθμιση της ενεργού ισχύος, αυτή πραγματοποιείται με χρήση ενός PI ελεγκτή, που επίσης

περιλαμβάνει λειτουργία Tracking, με σκοπό τα όσα αναφέρθηκαν και στην προηγούμενη παράγραφο.

Στην έξοδο του PI ελεγκτή υπερτίθεται και η έξοδος ενός DeadBand ελεγκτή για την DC τάση, όπως προτείνεται στην [19]. Σκοπός του ελεγκτή αυτού είναι η άμεση προσαρμογή της ισχύος του μετατροπέα σε περίπτωση που η DC τάση του συνδέσμου βγει έξω από μια περιοχή (νεκρή ζώνη), συμβάλλοντας στην FRT λειτουργία του συνδέσμου, χωρίς να απαιτείται τηλεπικοινωνιακό σήμα. Η έξοδος του ελεγκτή DeadBand προσδιορίζεται από την παρακάτω συνάρτηση:

$$f(x) = \begin{cases} (U_{dc} - U_{dc_max_db}) \cdot U_{dc_kp_db}, & U_{dc} > U_{dc_max_db} \\ (U_{dc_max_db} - U_{dc}) \cdot U_{dc_kp_db}, & U_{dc} < U_{dc_min_db} \\ 0, & U_{dc_min_db} \leq U_{dc} \leq U_{dc_max_db} \end{cases}$$

, όπου οι παράμετροι $U_{dc_max_db}$ και $U_{dc_min_db}$ οριοθετούν το άνω και κάτω άκρο της νεκρής ζώνης για την DC τάση, και η παράμετρος $U_{dc_kp_db}$ είναι το κέρδος του ελεγκτή.



Σχήμα 5.5 Ελεγκτής P-Q υπεράκτιου μετατροπέα με σχήμα FRT

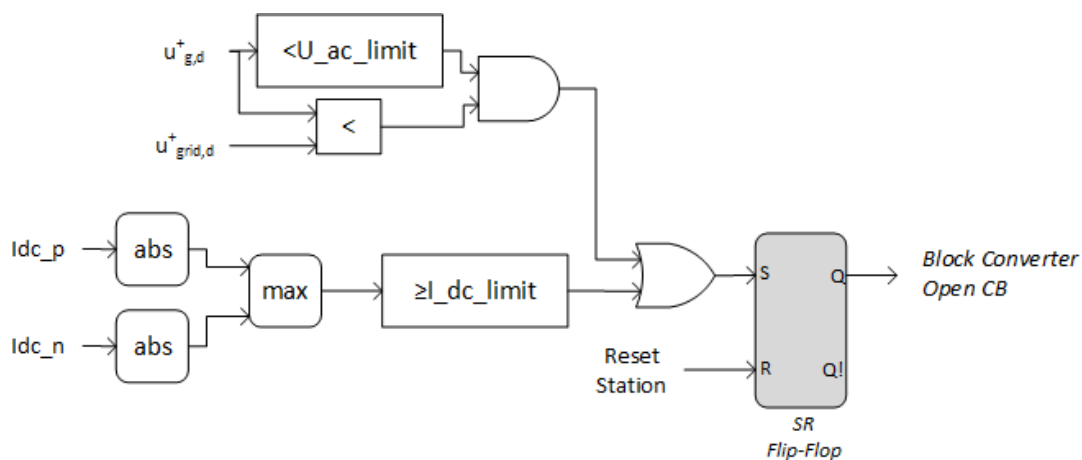
5.7 Ελεγκτές Εποπτείας

Στο συνολικό σχήμα ελέγχου που προτείνεται στη συγκεκριμένη εργασία έχει εισαχθεί και ένα τελευταίο ιεραρχικό επίπεδο ελέγχου, με σκοπό την ομαλή λειτουργία του συνδέσμου, την

αντιμετώπιση σφαλμάτων αλλά και την βέλτιστη κατανομή ισχύος στους δύο πόλους της HVDC διασύνδεσης.

Πιο συγκεκριμένα, στους ελεγκτές των σταθμών ενσωματώνεται και ένας ελεγκτής εποπτείας. Στην περίπτωση του σταθμού που εφαρμόζει $U_{dc}Q$ έλεγχο ο ρόλος του ελεγκτή περιορίζεται στην ανίχνευση σφαλμάτων με σκοπό το μπλοκάρισμα του αντίστοιχου μετατροπέα. Στην περίπτωση του σταθμού που εφαρμόζει PQ έλεγχο ο ελεγκτής-επόπτης, πέρα από την ανίχνευση σφαλμάτων, αναλαμβάνει και την κατανομή της διακινούμενης ισχύος μεταξύ των δύο πόλων, λαμβάνοντας υπόψιν τη μέγιστη ικανότητα απορρόφησης ισχύος του κάθε μετατροπέα, σύμφωνα με τα σήματα των αντίστοιχων ελεγκτών που παρουσιάζονται στις προηγούμενες παραγράφους.

Στο Σχήμα 5.6 παρουσιάζεται ο ελεγκτής ανίχνευσης σφάλματος, ο οποίος επιτηρεί το ρεύμα στην DC πλευρά του μετατροπέα, αλλά και την d συνιστώσα των τάσεων πριν και μετά τον Μ/Σ. Εάν το DC ρεύμα ξεπεράσει τη μέγιστη επιτρεπτή τιμή του, η οποία καθορίζεται κυρίως από την αντοχή των ημιαγωγικών στοιχείων, ή η τάση στην πλευρά του μετατροπέα πέσει κάτω από μια προκαθορισμένη τιμή και ταυτόχρονα έχει χαμηλότερη τιμή από την αντίστοιχη τάση στην πλευρά του δικτύου (αυτή η συνθήκη σηματοδοτεί εσωτερικό AC σφάλμα του σταθμού, μεταξύ του μετατροπέα και του Μ/Σ του) τότε μπλοκάρεται ο αντίστοιχος μετατροπέας, απενεργοποιώντας τους παλμούς όλων των διακοπών του, ενώ παράλληλα αποσυνδέεται από το AC δίκτυο, μέσω των τριφασικών AC διακοπών (για το άνοιγμα του διακόπτη έχει θεωρηθεί ότι απαιτούνται περίπου 50ms). Η επανένταξη του συστήματος σε λειτουργία, μετά την εκκαθάριση του σφάλματος πραγματοποιείται με την ενεργοποίηση ενός εξωτερικού σήματος “Reset Station”. Για την υλοποίηση ου ελεγκτή αυτού χρησιμοποιείται ένα SR Flip-Flop.



Σχήμα 5.6 Ελεγκτής προστασίας έναντι DC υπερεντάσεων και AC σφαλμάτων με δυνατότητα μπλοκαρίσμού μετατροπέα

Στο Σχήμα 5.7 παρουσιάζεται ο ελεγκτής κατανομής ισχύος ανάμεσα στους δύο πόλους, ο οποίος βρίσκεται στο ανώτατο στάδιο στην ιεραρχία ελέγχου των μετατροπέων που συνδέονται στο AC σύστημα 1. Ο ελεγκτής αυτός χρησιμοποιεί δεδομένα και από τους τέσσερις σταθμούς, προκειμένου να διανείμει κατάλληλα τη διακινούμενη ισχύ. Τα δεδομένα που έρχονται από τον σταθμό που βρίσκεται στο απέναντι άκρο της διασύνδεσης (Αττική) έχει θεωρηθεί ότι λαμβάνονται με καθυστέρηση 40 ms, λόγω του τηλεπικοινωνιακού μέσου μετάδοσης. Η καθυστέρηση διάδοσης της πληροφορίας δεν αποτελεί κρίσιμο παράγοντα για την ευστάθεια του συστήματος, αφού ο ελεγκτής αυτός δεν συμβάλει στην FRT λειτουργία παρά μόνο δημιουργεί τις εντολές αναφοράς ισχύος για τα επόμενα στάδια ελέγχου.

Επίσης η ανανέωση των εντολών δεν είναι απαραίτητο να πραγματοποιείται σε συνεχή βάση, αλλά αρκεί ο αλγόριθμος διαμοιρασμού της ισχύος να εκτελείται ανά τακτά χρονικά διαστήματα, σε πιο μεγάλη κλίμακα χρόνου. Στη συγκεκριμένη περίπτωση έχει επιλεγθεί μια συχνότητα εκτέλεσης 25 Hz έτσι ώστε να ανανεώνονται οι εντολές μία φορά σε κάθε δύο περιόδους.

Η εντολή ισχύος για κάθε έναν από τους δύο πόλους προσδιορίζεται σύμφωνα με τον παρακάτω αλγόριθμο, ο οποίος εκφράζεται σε ψευδογλώσσα.

Power Sharing Algorithm

Αρχικοποίηση

$$P_{pole,a}^* = P_{total}^*/2,$$

$$P_{pole,b}^* = P_{total}^*/2$$

Αν είναι μπλοκαρισμένος ο πόλος a και δεν είναι μπλοκαρισμένος ο πόλος b

$$P_{pole,a}^* = 0$$

$$P_{pole,b}^* = \text{minimum}(P_{total}^*, P_{max,pole_b})$$

Αλλιώς Αν είναι μπλοκαρισμένος ο πόλος a και δεν είναι μπλοκαρισμένος ο πόλος b

$$P_{pole,a}^* = \text{minimum}(P_{total}^*, P_{max,pole_a})$$

$$P_{pole,b}^* = 0$$

Αλλιώς Αν είναι μπλοκαρισμένοι και οι δύο πόλοι

$$P_{pole,a}^* = 0, P_{pole,b}^* = 0$$

Αλλιώς

$$\Delta Pa = \text{abs}(P_{pole,a}^*) - P_{max,pole_a}$$

$$\Delta Pb = \text{abs}(P_{pole,b}^*) - P_{max,pole_b}$$

Αν $\Delta Pa > 0 \wedge \Delta Pb \leq 0$

$$P_{pole,a}^* = P_{pole,a}^* - \text{sign}(P_{total}^*) \cdot \Delta Pa$$

$$P_{pole,b}^* = P_{pole,b}^* + \text{sign}(P_{total}^*) \cdot \Delta Pa$$

Αλλιώς Αν $\Delta Pa \leq 0 \wedge \Delta Pb > 0$

$$P_{pole,a}^* = P_{pole,a}^* + \text{sign}(P_{total}^*) \cdot \Delta Pb$$

$$P_{pole,b}^* = P_{pole,b}^* - \text{sign}(P_{total}^*) \cdot \Delta Pb$$

Αλλιώς Αν $\Delta Pa > 0 \wedge \Delta Pb > 0$

$$P_{pole,a}^* = P_{pole,a}^* - \text{sign}(P_{total}^*) \cdot \Delta Pa$$

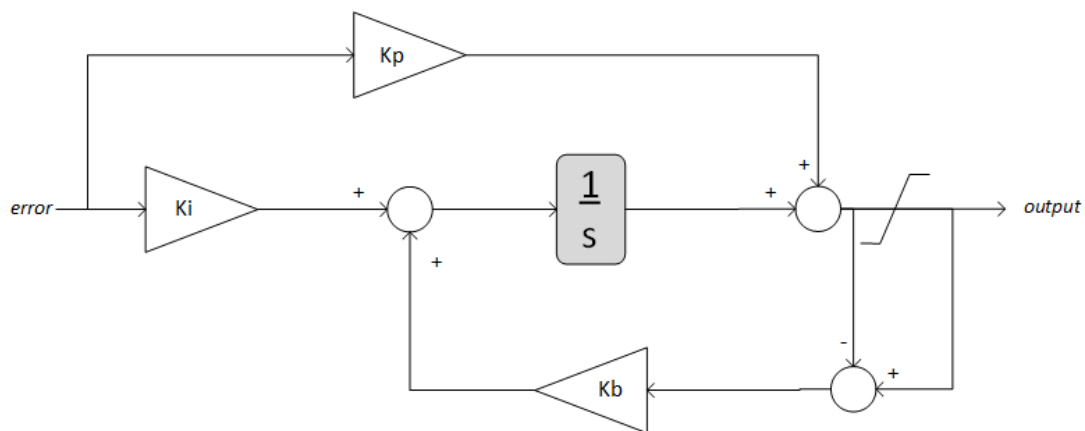
$$P_{pole,b}^* = P_{pole,b}^* - \text{sign}(P_{total}^*) \cdot \Delta Pb$$

Τέλος Αν

Τέλος Αν

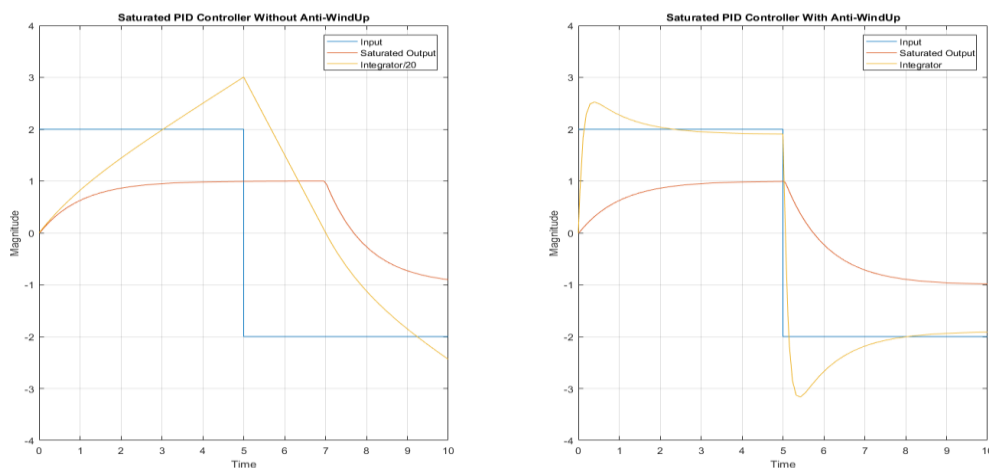
αποτέλεσμα η εντολή αναφοράς να μην μπορεί να επιτευχθεί, συσσωρεύοντας σφάλμα στην είσοδο του ελεγκτή, με αποτέλεσμα, σε βάθος χρόνου, η τιμή στην έξοδο του ολοκληρωτή να μεγαλώνει πολύ (θεωρητικά να απειρίζεται). Το φαινόμενο αυτό έχει σημαντικές επιδράσεις στη λειτουργία του ελεγκτή και μπορεί να οδηγήσει σε μη επιθυμητή απόκριση, ακόμα και ταλαντωτική συμπεριφορά. Στην βιβλιογραφία προτείνονται διάφορες μέθοδοι για αντιμετώπιση του φαινομένου αυτού (anti-windup μέθοδοι) [40, 42, 41]. Η μέθοδος που υλοποιήθηκε στη συγκεκριμένη εργασία είναι η “back-calculation” η οποία στηρίζεται στην υπέρθεση ενός νέου σήματος στην είσοδο του ολοκληρωτή, το οποίο αφαιρεί από τον ολοκληρωτή τη διαφορά εξόδου του ελεγκτή πριν και μετά τον κορεσμό, σταθμίζοντάς την κατάλληλα με ένα κέρδος K_b , όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.8

Είναι προφανές ότι όταν η έξοδος του ελεγκτή δεν υφίσταται κορεσμό η συνεισφορά του σχήματος anti-windup είναι μηδενική.



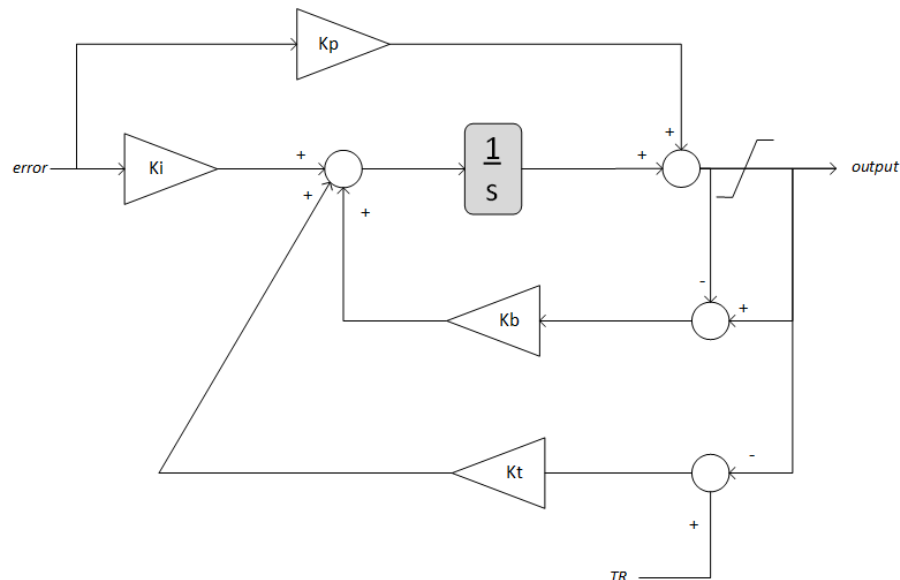
Σχήμα 5.8 Ελεγκτής PI με back-calculation anti-windup σχήμα

Στο Σχήμα 5.9 εικονίζεται η απόκριση ενός PI ελεγκτή, ο οποίος υφίσταται κορεσμό, χωρίς (αριστερά) και με (δεξιά) τη χρήση σχήματος anti-windup. Στο αριστερό σχήμα, η συσσωρευση σφάλματος οδηγεί σε μεγάλες τιμές στην έξοδο του ολοκληρωτή, με αποτέλεσμα το σύστημα να μην ανταποκρίνεται γρήγορα σε αλλαγές στην εντολή εισόδου. Αντίθετα, στο δεξιό σχήμα, η δυναμική κατάσταση του ολοκληρωτή δεν αποκτά μεγάλες τιμές, και η απόκριση του συστήματος είναι εμφανώς πιο ικανοποιητική.



Σχήμα 5.9 Απόκριση κορεσμένου PI ελεγκτή με και χωρίς σχήμα anti-windup

Στη συγκεκριμένη εργασία, πέρα από το σχήμα anti-windup για τους PI ελεγκτές, έχει χρησιμοποιηθεί και ένα σχήμα tracking. Στο σχήμα αυτό, η έξοδος του ελεγκτή ακολουθεί την τιμή της επιπλέον εισόδου (tracking - TR) με δυναμικό τρόπο, δηλαδή αφαιρώντας από τον ολοκληρωτή τη διαφορά της εξόδου του ελεγκτή και της τιμής της επιπλέον εισόδου, σταθμισμένη με ένα κέρδος K_t , όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.10.

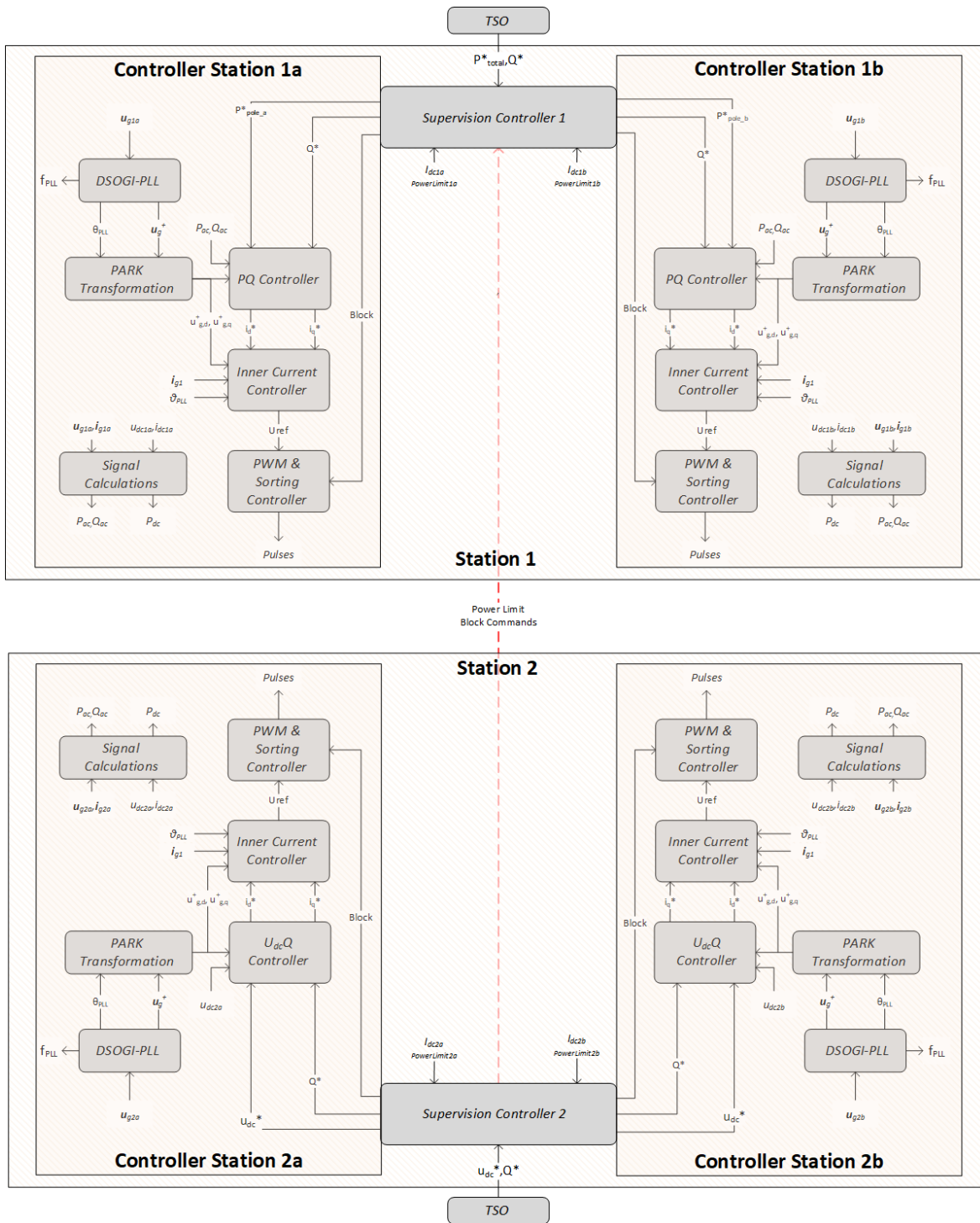


Σχήμα 5.10 Ελεγκτής PI με *back-calculation* και *tracking* σχήμα

Η επιπλέον είσοδος tracking, όπως παρουσιάζεται στις προηγούμενες παραγράφους, έχει ενσωματωθεί στους PI ελεγκτές της DC τάσης και της ισχύος. Η έξοδος των παραπάνω ελεγκτών, πέρα από τον εγγενή περιορισμό στα πλαίσια που υπαγορεύονται από τις ηλεκτρικές αντοχές του εξοπλισμού, υφίστανται και δυναμικό κορεσμό στο διάστημα $[-I_{d,max}, I_{d,max}]$ που οφείλεται στην προτεραιότητα έγχυσης αέργου ισχύος μέσω των σχημάτων FRT. Επομένως σε καταστάσεις σφάλματος, που η άεργος συνιστώσα ρεύματος i_q είναι σημαντική, η έξοδος του PI ελεγκτή μπορεί να μην ανταποκρίνεται στην τελική εντολή αναφοράς του συνολικού σχήματος ελέγχου, δημιουργώντας φαινόμενα «εξωγενούς» windup. Για την ομαλή λειτουργία κατά τη διάρκεια τέτοιων καταστάσεων, αλλά κυρίως για την ομαλή ανάκαμψη από αυτές, κρίνεται σκόπιμο να χρησιμοποιηθεί η μέθοδος tracking για τη ρύθμιση της εξόδου του PI ελεγκτή στην τιμή που ανταποκρίνεται στην τελική εντολή αναφοράς.

Είναι προφανές ότι, όπως συμβαίνει και στην περίπτωση του σχήματος anti-windup, σε συνθήκες όπου δεν υπάρχει κορεσμός της εξόδου από τον δυναμικό περιοριστή, η είσοδος tracking ταυτίζεται με την έξοδο του ελεγκτή, οπότε η συνεισφορά του σχήματος είναι μηδενική.

5.9 Πλήρες Διάγραμμα Ελέγχου Συστήματος



Σχήμα 5.11 Πλήρες ελεγκτής συστήματος

6 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ – ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

6.1 Μελετώμενα Σενάρια

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων του υπό μελέτη συστήματος. Οι προσομοιώσεις πραγματοποιήθηκαν με τη χρήση του λογισμικού MATLAB/Simulink και εξετάζουν τη λειτουργία του συστήματος τόσο κάτω από κανονικές συνθήκες, όσο και υπό συνθήκες σφάλματος, με σκοπό να αξιολογηθεί η τοπολογία, αλλά και τα σχήματα ελέγχου που χρησιμοποιήθηκαν.

Πιο αναλυτικά, τα σενάρια που εξετάζονται είναι τα εξής:

α) Σενάριο 1: Αντιστροφή Ισχύος-Κανονική Λειτουργία. Σε αυτό το σενάριο μελετάται η απόκριση του συστήματος σε αντιστροφή της ροής ισχύος από 0.9 αμ (ροή ισχύος από την Αττική προς την Κρήτη) σε -0.9 αμ, με σκοπό να εξεταστεί η ευστάθεια της τάσης του DC συνδέσμου αλλά και των ελεγκτών του συστήματος. Η συγκεκριμένη αντιστροφή πραγματοποιείται ομαλά σε διάστημα 400 ms. Παράλληλα, μετά το πέρας της αντιστροφής ισχύος, εξετάζονται και χαρακτηριστικά που αφορούν την κανονική λειτουργία το συνδέσμου, όπως είναι η αρμονική παραμόρφωση των τάσεων και των ρευμάτων στο ΣΚΣ.

β) Σενάριο 2: AC σφάλματα δικτύου. Όπως ήδη έχει αναφερθεί, η σχεδίαση των ελεγκτών πραγματοποιήθηκε με σκοπό να ικανοποιούν κάποια από τα κριτήρια που απαιτούν οι διαχειριστές δικτύου για αδιάλειπτη λειτουργία (FRT). Σε αυτό το σενάριο ελέγχεται η συμπεριφορά του συστήματος, όταν αυτό λειτουργεί υπό συνθήκες πλήρους φόρτισης, σε ασύμμετρα σφάλματα των AC δικτύων της Αττικής και της Κρήτης, τα οποία οδηγούν σε σημαντική βύθιση τάσης ενώ ταυτόχρονα περιορίζουν την ικανότητα μεταφοράς ισχύος του συνδέσμου. Σκοπός είναι να διαπιστωθεί εάν τα σχήματα ελέγχου που υλοποιήθηκαν εξασφαλίζουν τη μεταβατική ευστάθεια και την αδιάλειπτη λειτουργία της διασύνδεσης, διατηρώντας παράλληλα σε ανεκτά επίπεδα ηλεκτρικά μεγέθη όπως οι DC τάση και τα ρεύματα του μετατροπέα.

γ) Σενάριο 3: AC σφάλματα μετατροπέα. Στο τρίτο σενάριο εξετάζεται η επίδραση που μπορεί να έχει στο AC δίκτυο ένα σφάλμα στην AC πλευρά του μετατροπέα, το οποίο υποχρεώνει τον ένα πόλο της διασύνδεσης να βγει εκτός λειτουργίας, έστω και προσωρινά. Ενδιαφέρον σε αυτό το σενάριο παρουσιάζει η συμπεριφορά του υγιούς πόλου, αλλά και η απόκριση του συστήματος στα μεταβατικά φαινόμενα σύζευξης και απόζευξης.

δ) Σενάριο 4: DC σφάλματα καλωδίων. Σε μια HVDC διασύνδεση νησιωτικών συστημάτων υπάρχει σημαντική πιθανότητα τραυματισμού των DC υποβρυχίων καλωδίων, κάτι που μπορεί να θέσει εκτός λειτουργίας τον σύνδεσμο για μεγάλο χρονικό διάστημα, μέχρι να αποκατασταθεί το σφάλμα. Για αυτό τον λόγο, σε αυτό το σενάριο εξετάζεται η απώλεια του ενός πόλου της διασύνδεσης λόγω σφάλματος ως προς γη του DC καλωδίου στο μέσο του μήκους του. Όπως και στην προηγούμενη περίπτωση, ενδιαφέρον παρουσιάζει η μεταβατική απόκριση κατά την εμφάνιση του σφάλματος, αλλά και η μετέπειτα λειτουργία του υγιούς πόλου.

Στις επόμενες παραγράφους παρουσιάζονται λεπτομερώς τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων για καθένα από τα παραπάνω σενάρια, συνοδευόμενα από τον απαραίτητο σχολιασμό.

6.2 Σενάριο 1: Αντιστροφή Ισχύος - Κανονική Λειτουργία

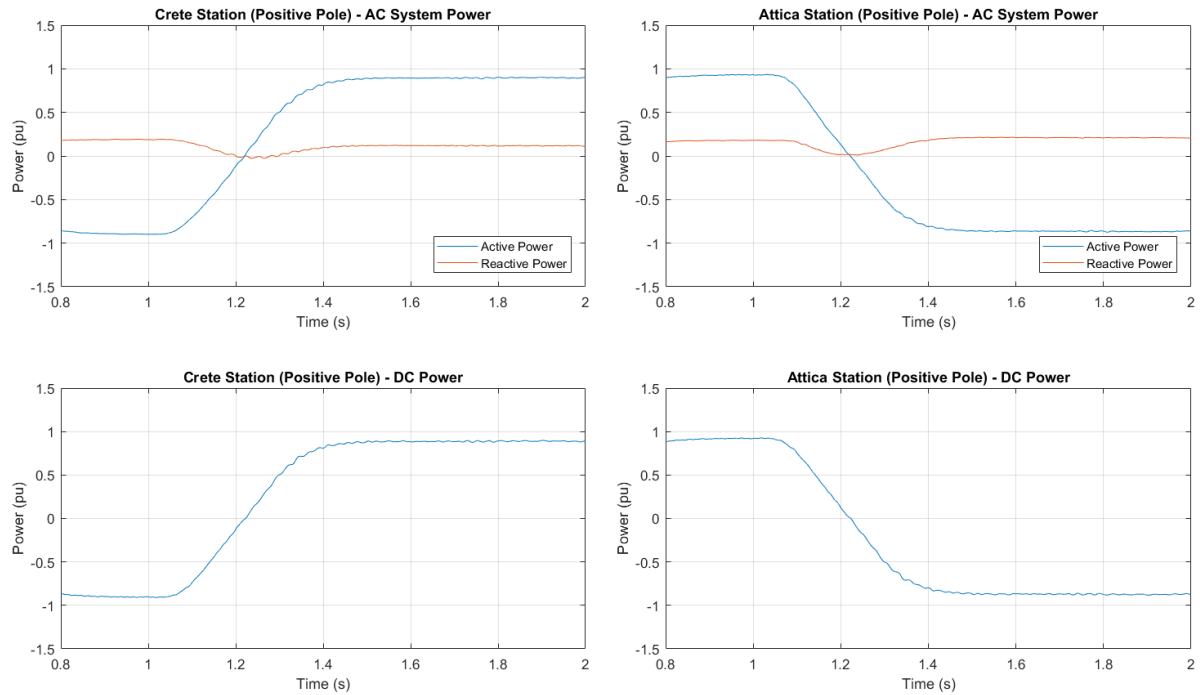
Στο σενάριο αυτό θεωρήθηκε ότι, αρχικά, το AC δίκτυο της Αττικής τροφοδοτεί το AC δίκτυο της Κρήτης με ισχύ 0.9 α.μ. , δηλαδή 450 MW ανά πόλο. Σε διάστημα περίπου 400 ms πραγματοποιείται αντιστροφή της ροής ισχύος, έτσι ώστε το δίκτυο της Κρήτης να τροφοδοτεί το δίκτυο της Αττικής με ισχύ 0.9 α.μ. . Η αντιστροφή ισχύος πραγματοποιείται ταυτόχρονα και στους δύο πόλους του συστήματος, όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.1 και στο Σχήμα 6.2.

Σημειώνεται ότι η σύμβαση που ακολουθείται για τη θετική φορά της ισχύος είναι τέτοια, ώστε θετική να είναι η ισχύς που παρέχει ένα σύστημα στα υπόλοιπα. Επομένως θετική ισχύς για το AC δίκτυο σημαίνει ροή από το AC δίκτυο προς τον μετατροπέα, και αντίστοιχα θετική ισχύς στην DC πλευρά σημαίνει ότι ο μετατροπέας τροφοδοτεί με ισχύ το DC σύνδεσμο.

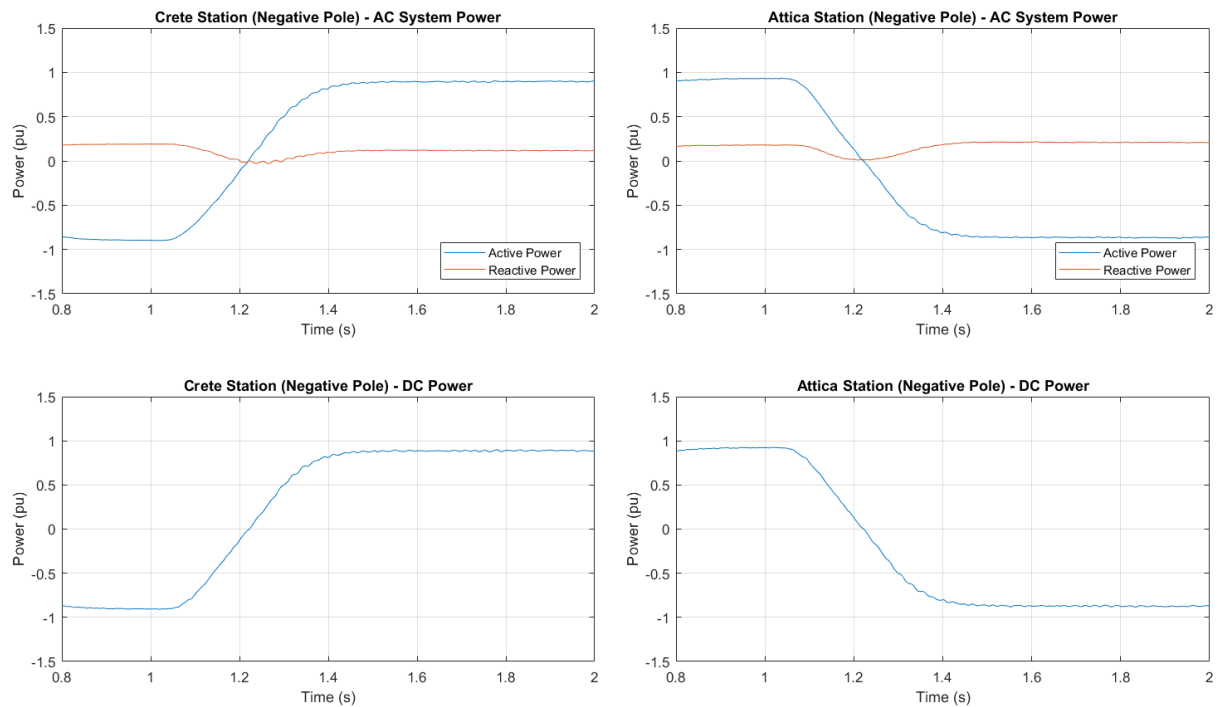
Από τα παρακάτω σχήματα επιβεβαιώνεται η ομαλή λειτουργία του συστήματος κατά την αντιστροφή της ισχύος, κάτι που ήταν αναμενόμενο θεωρητικά, αφού η τεχνολογία VSC-HVDC έχει ως βασικό πλεονέκτημα τη δυνατότητα ταχείας αντιστροφής ισχύος, όπως αναφέρεται στην ενότητα 2.3. Επίσης, από τα αποτελέσματα επιβεβαιώνεται ότι το σχήμα ελέγχου που εφαρμόζεται στους μετατροπείς του σταθμού της Αττικής προσαρμόζει την ισχύ του κάθε μετατροπέα ταχέως, ώστε αυτή να ταυτίζεται με την ισχύ του αντίστοιχου μετατροπέα του συστήματος της Κρήτης.

Η αποτελεσματικότητα και η σωστή ρύθμιση των κερδών του εν λόγω ελεγκτή αποδεικνύεται και από τις DC τάσεις του συνδέσμου κατά την αντιστροφή ισχύος, όπως αυτές παρουσιάζονται στο Σχήμα 6.3. Με την εκκίνηση της αντιστροφής ισχύος, η DC τάση των μετατροπέων στη μεριά της Αττικής παρουσιάζει μια μικρή υπέρταση, η οποία «ενεργοποιεί» τον PI ελεγκτή της τάσης για να αναπροσαρμόσει την εντολή ισχύος του, έτσι ώστε να επαναφέρει την τάση στην ονομαστική τιμή της. Η αντίστοιχη DC τάση στη μεριά των μετατροπέων της Κρήτης παρουσιάζει μικρή απόκλιση από την ονομαστική τιμή της, λόγω της πτώσης τάσης πάνω στα DC καλώδια, η οποία εξαρτάται από τη διακινούμενη ισχύ, και το μήκος της διασύνδεσης (στη συγκεκριμένη περίπτωση 380 km). Σε κάθε περίπτωση, κατά την αντιστροφή ισχύος, οι DC τάσεις και των δύο σταθμών παραμένουν εντός αποδεκτών ορίων ($\pm 5\%$).

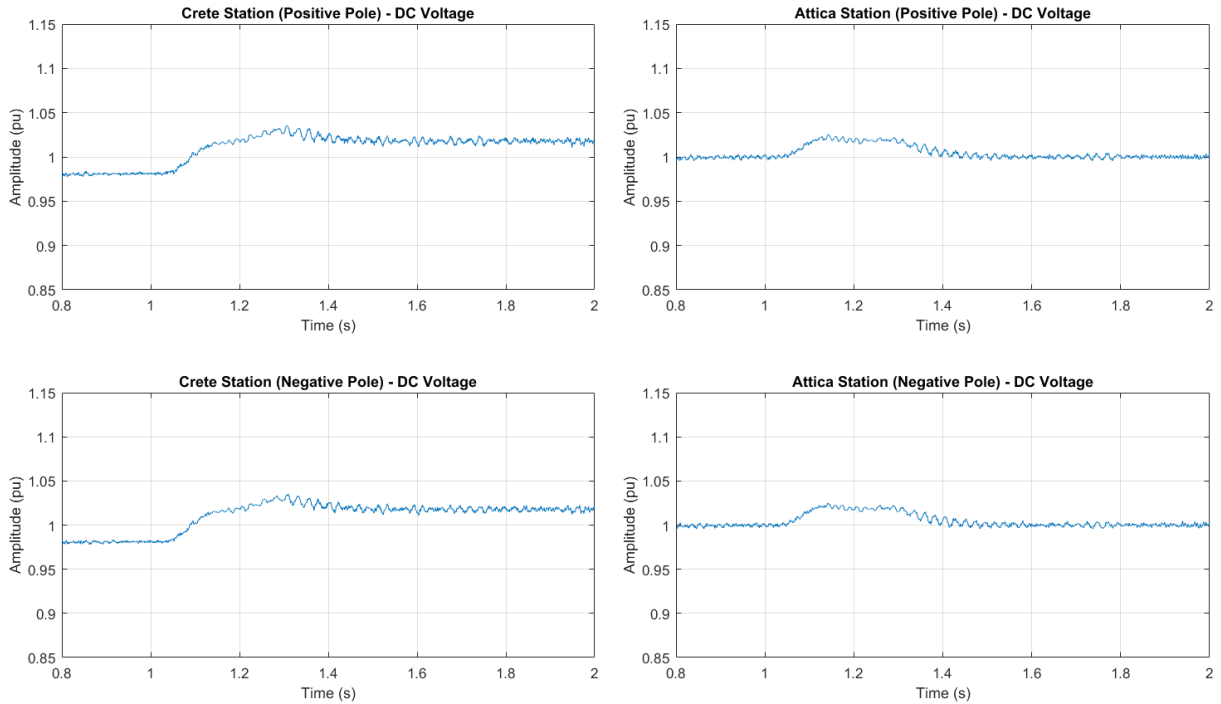
Επίσης από τα σχήματα που ακολουθούν διαπιστώνεται ότι οι δύο πόλοι της διασύνδεσης παρουσιάζουν παρόμοια συμπεριφορά. Για τον λόγο αυτό στη συνέχεια παρουσιάζονται γραφήματα που αφορούν μόνο τον ένα (έστω το θετικό) πόλο.



Σχήμα 6.1 Σενάριο 1: Ροή ισχύος θετικού πόλου διασύνδεσης

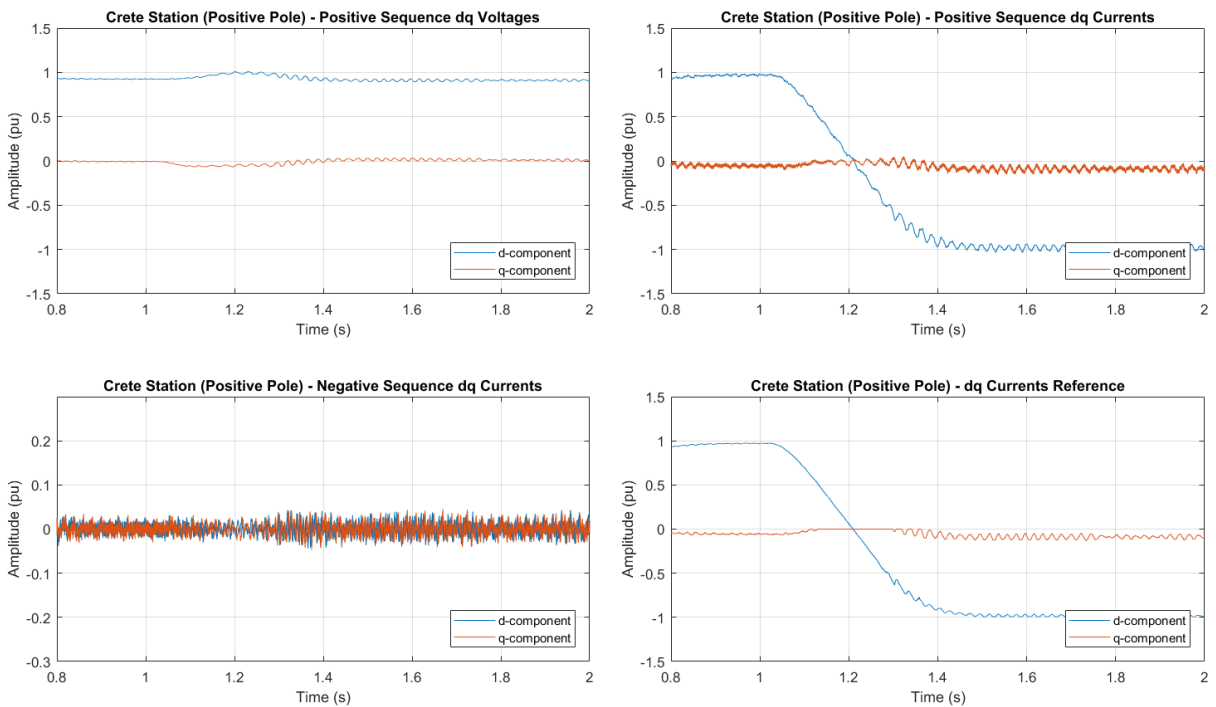


Σχήμα 6.2 Σενάριο 1: Ροή ισχύος αρνητικού πόλου διασύνδεσης

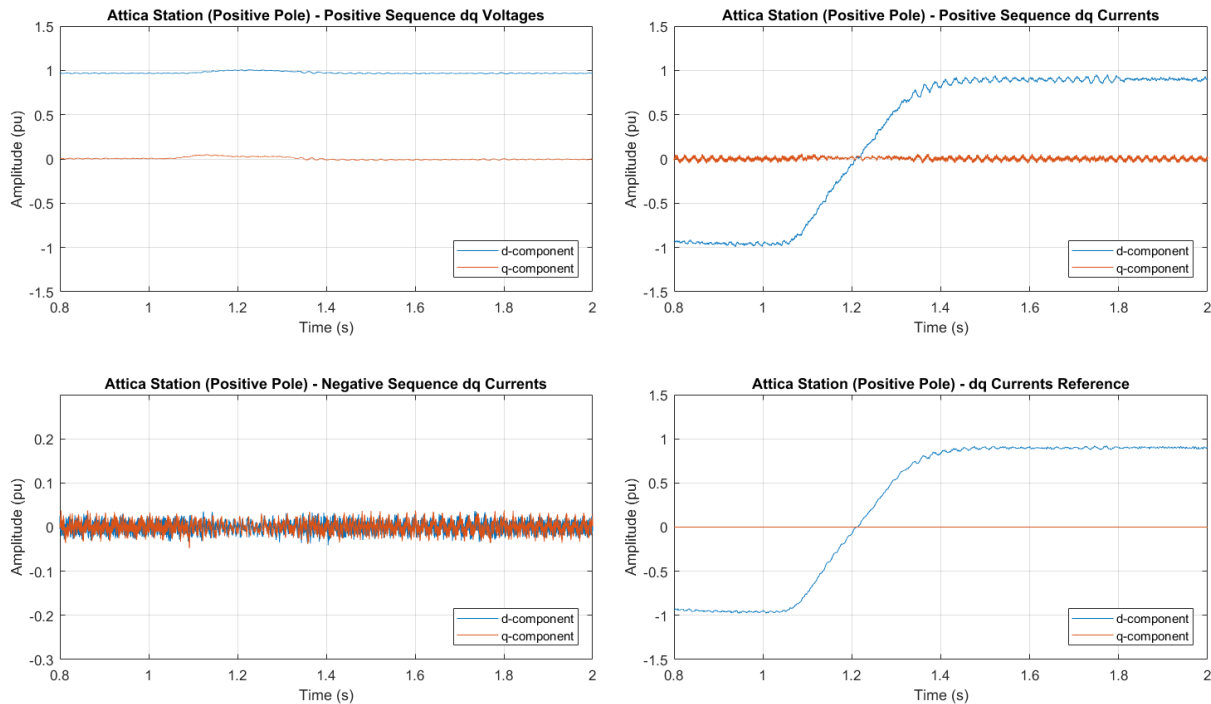


Σχήμα 6.3 Σενάριο 1: DC τάσεις συνδέσμου

Στο Σχήμα 6.4 παρουσιάζονται οι d-q συνιστώσες της θετικής ακολουθίας της τάσης δικτύου καθώς επίσης και η θετική και αρνητική ακολουθία των ρευμάτων του μετατροπέα του (μαζί με τις αντίστοιχες εντολές αναφοράς) για τον θετικό πόλο στην πλευρά της Κρήτης. Στο Σχήμα 6.5 παρουσιάζονται τα αντίστοιχα μεγέθη για την πλευρά της Αττικής.



Σχήμα 6.4 Σενάριο 1: d-q συνιστώσες της τάσης (PS) και του ρεύματος (PS+NS) στην Κρήτη. Θετικός Πόλος

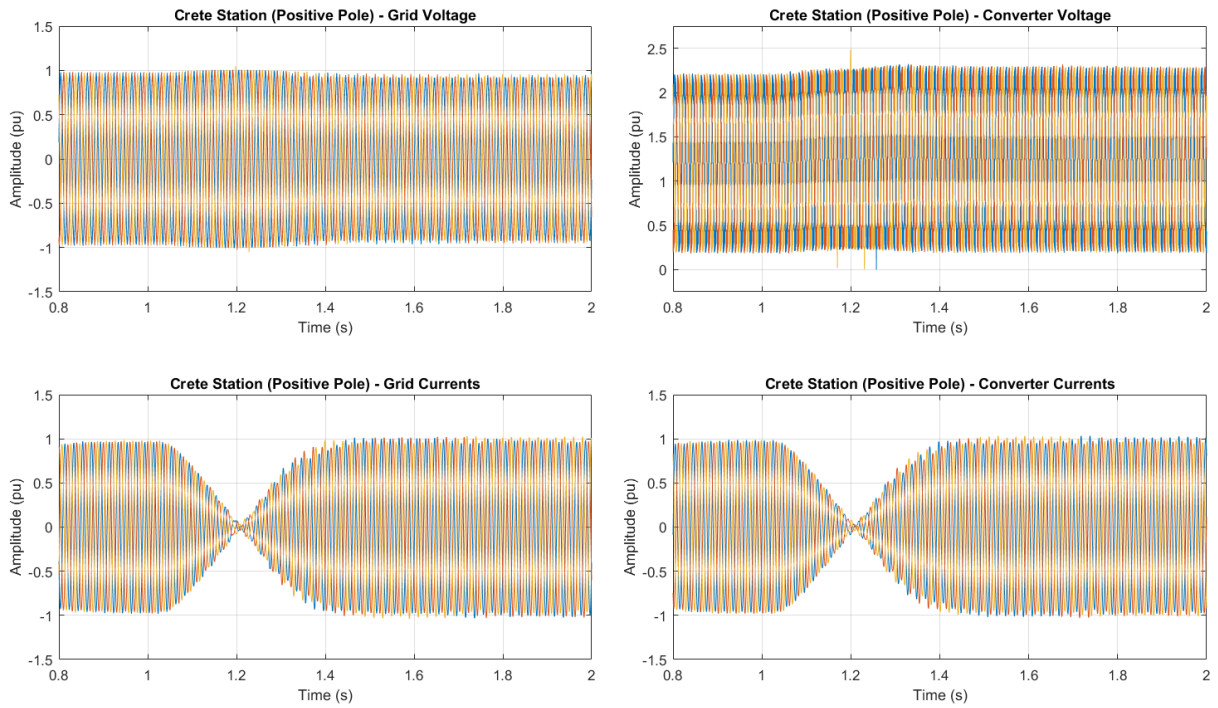


Σχήμα 6.5 Σενάριο 1: d-q συνιστώσες της τάσης (PS) και του ρεύματος (PS+NS) στην Αττική. Θετικός Πόλος

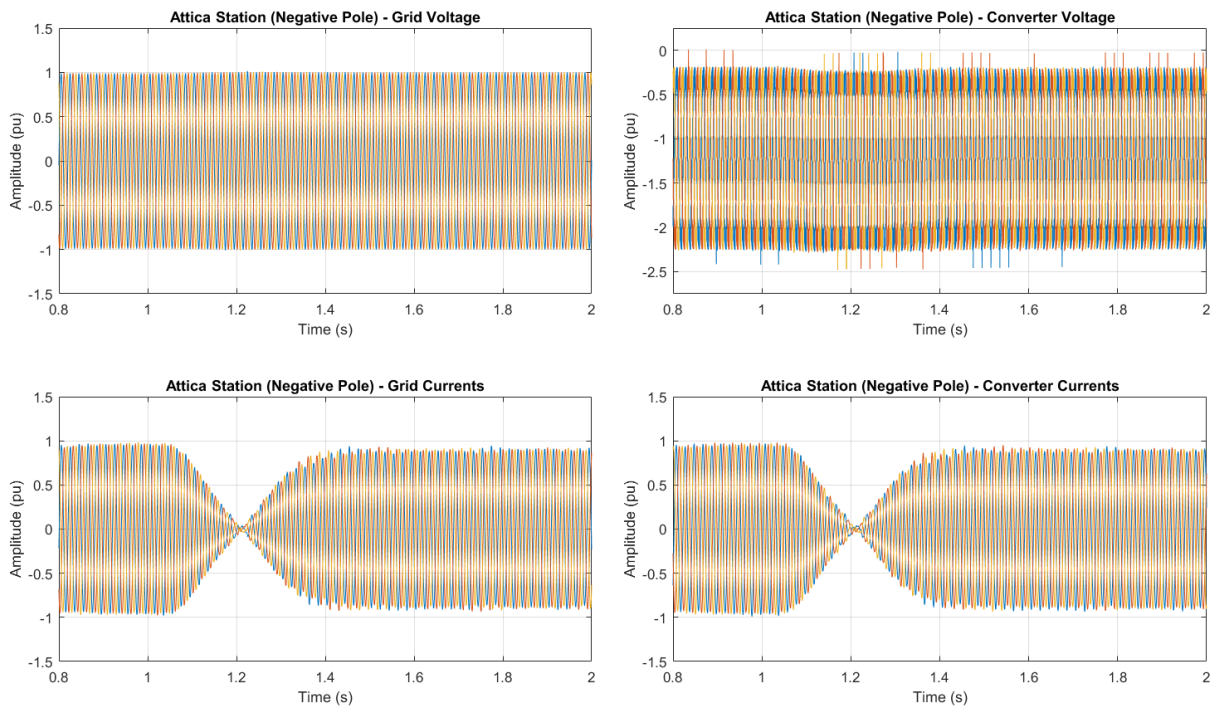
Από τα παραπάνω σχήματα επιβεβαιώνεται και ο ανεξάρτητος έλεγχος ενεργού και αέργου ισχύος, λόγω του ανεξάρτητου ελέγχου των δύο συνιστωσών του ρεύματος, υπό την προϋπόθεση ότι ο έλεγχος πραγματοποιείται σε σύγχρονο πλαίσιο αναφοράς με άξονα ευθυγραμμισμένο με τη φάση δικτύου (μηδενική q συνιστώσα της τάσης). Τα ρεύματα αρνητικής ακολουθίας, όπως αναμένεται λόγω της συμμετρίας του συστήματος, είναι μηδενικά με μικρή κυμάτωση.

Στα επόμενα σχήματα εικονίζονται οι κυματομορφές τάσης και ρεύματος στην πλευρά του δικτύου, αλλά και στην έξοδο του μετατροπέα. Επίσης στο Σχήμα 6.8 και στο Σχήμα 6.9 απεικονίζεται το αρμονικό περιεχόμενο των παραπάνω κυματομορφών, τόσο για την πλευρά της Κρήτης, όσο και για την πλευρά της Αττικής. Από τα αποτελέσματα αυτά γίνεται εμφανές ότι η ροή αντιστροφή ισχύος δεν έχει καμία επίδραση στην τάση δικτύου, παρά μόνο μια μικρή πτώση τάσης που οφείλεται στον προσωρινό μηδενισμό του ρεύματος και της ισχύος. Επίσης, σημαντικό είναι να παρατηρηθεί η DC συνιστώσα των φασικών τάσεων στην έξοδο του μετατροπέα, κάτι που είναι συνέπεια της ασυμμετρίας που παρουσιάζει η τοπολογία διπόλου. Η πολικότητα της DC συνιστώσας είναι θετική για τον θετικό πόλο και αρνητική για τον αρνητικό. Η ύπαρξη της DC συνιστώσας, όπως έχει ήδη αναφερθεί, δημιουργεί καταπονήσεις στον Μ/Σ, αλλά και δυσχεραίνει την αντιμετώπιση σφαλμάτων στην AC ή την DC πλευρά του μετατροπέα.

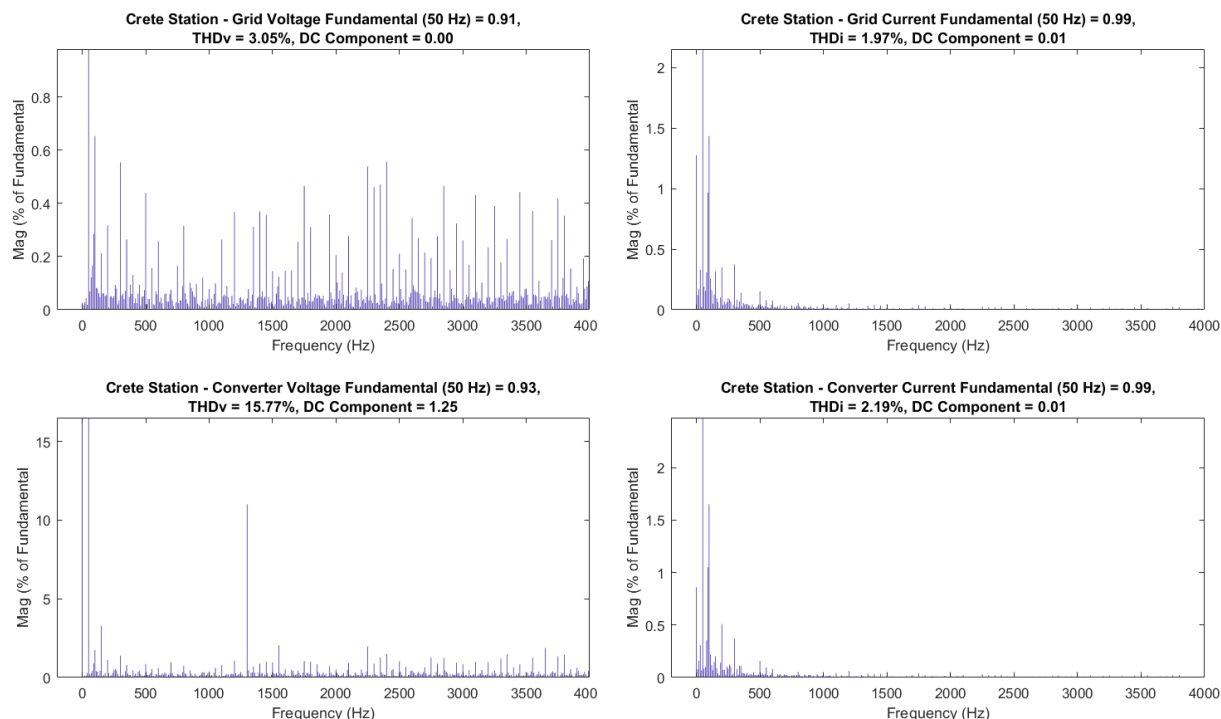
Η χρησιμοποίηση πολυεπίπεδων μετατροπέων πετυχαίνει ικανοποιητικές τιμές για τον συντελεστή THD τάσης και ρεύματος στο δίκτυο, ακόμα και χωρίς την ύπαρξη φίλτρων, κάτι που αποδεικνύεται από το Σχήμα 6.8 και το Σχήμα 6.9. Πιο συγκεκριμένα, ειδικά στο δίκτυο της Αττικής, το οποίο είναι πολύ ισχυρό, ο συντελεστής THD τάσης είναι κάτω από 1%, ενώ ο αντίστοιχος συντελεστής στην Κρήτη είναι περίπου 3%, όντας οριακά αποδεκτός σύμφωνα με τα πρότυπα [25]. Αξίζει δε να σημειωθεί ότι το αποτέλεσμα αυτό έχει ληφθεί για πολύ μικρό επιπέδων (10) σε σχέση με σύγχρονες εφαρμογές MMC VSC-HVDC, όπου χρησιμοποιούνται πάνω από 100 επίπεδα. Με βάση τα παραπάνω, δικαιολογείται η μη χρησιμοποίηση φίλτρων.



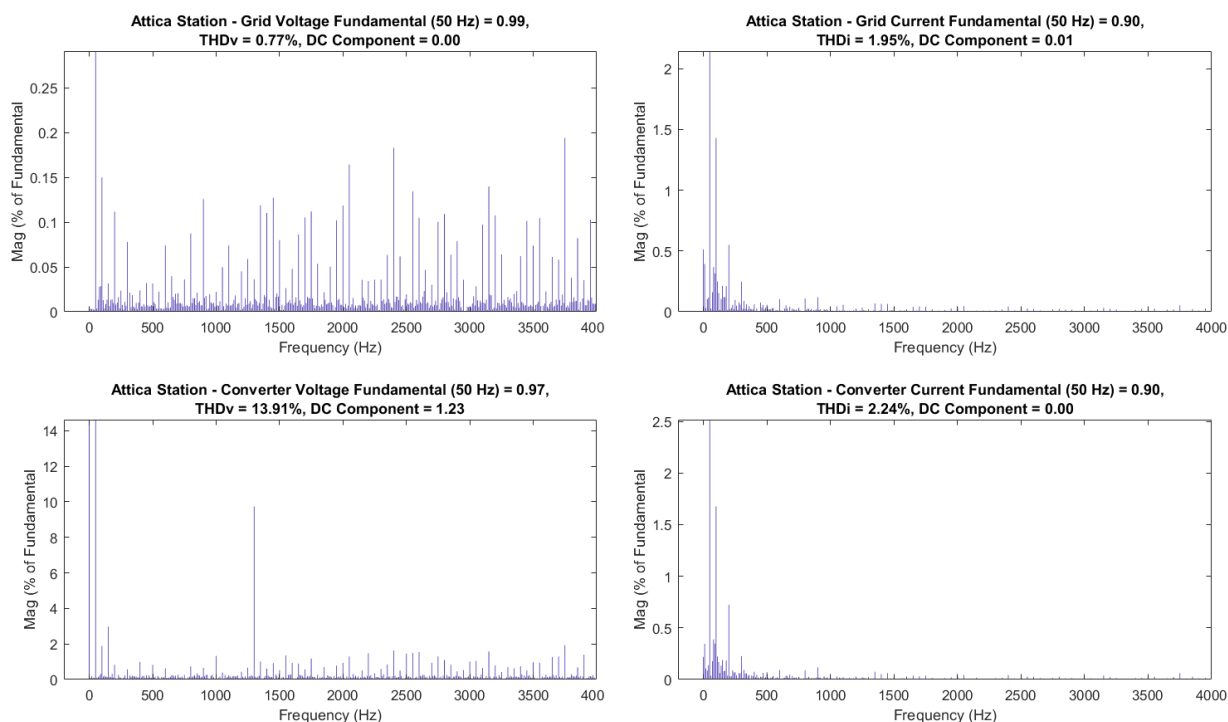
Σχήμα 6.6 Σενάριο 1: Φασικές Τάσεις κ' Ρεύματα δικτύου και μετατροπέα. Θετικός πόλος Κρήτης



Σχήμα 6.7 Σενάριο 1: Φασικές Τάσεις κ' Ρεύματα δικτύου και μετατροπέα. Αρνητικός πόλος Αττικής



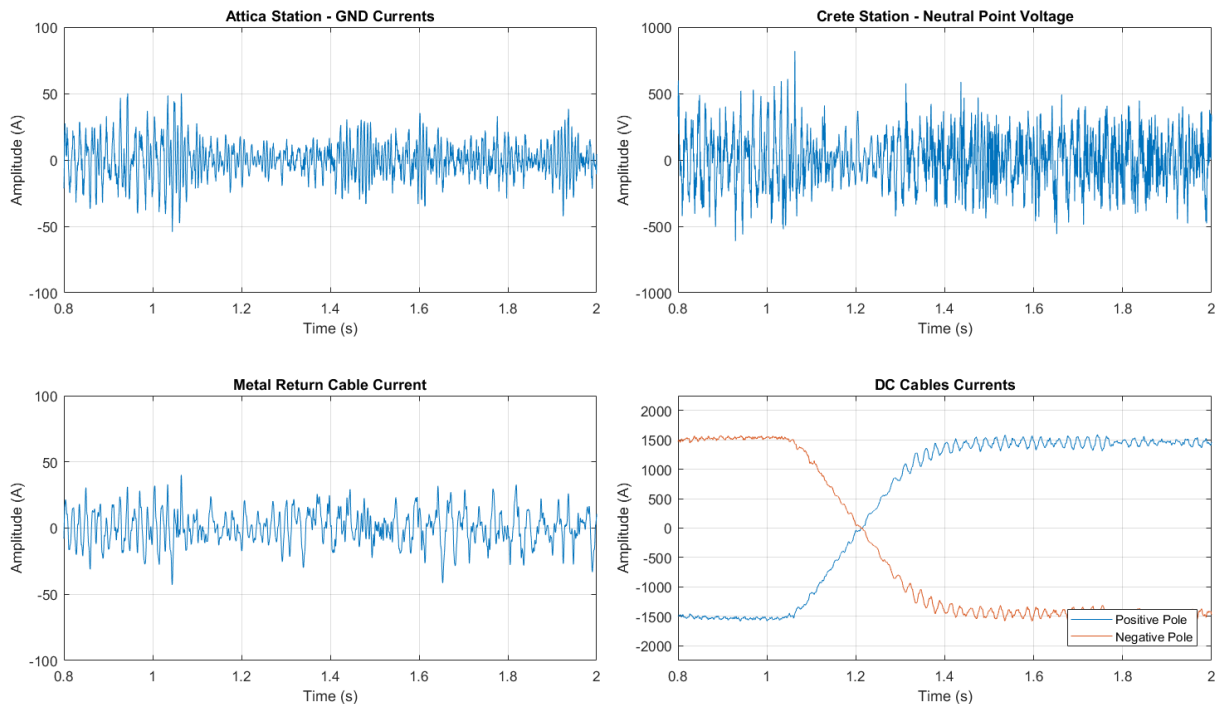
Σχήμα 6.8 Σενάριο 1: Αρμονική ανάλυση τάσεων και ρευμάτων δικτύου και μετατροπέα. Θετικός πόλος Κρήτης



Σχήμα 6.9 Σενάριο 1: Αρμονική ανάλυση τάσεων και ρευμάτων δικτύου και μετατροπέα. Αρνητικός πόλος Αττικής

Τέλος, στο Σχήμα 6.10 εικονίζονται τα ρεύματα των καλωδίων υψηλής τάσης, το ρεύμα και η τάση του μεταλλικού αγωγού επιστροφής και το ρεύμα γείωσης του σταθμού της Αττικής. Αξίζει να σημειωθεί ότι σε συνθήκες συμμετρικής φόρτισης των δύο πόλων, όπως συμβαίνει στο μελετώμενο σενάριο, ο αγωγός μεταλλικής επιστροφής ουσιαστικά δεν συνεισφέρει στη διακίνηση ισχύος, παρά

μόνο απορροφά μικρά ρεύματα, της τάξεως μερικών δεκάδων Ampere. Ως εκ τούτου, η πτώση τάσης στα άκρα πολύ μικρή. Παράλληλα, σχεδόν αμελητέα είναι και τα ρεύματα γείωσης.



Σχήμα 6.10 Σενάριο 1: Ρεύματα Γείωσης, DC καλωδίων και τάση αγωγού μεταλλικής επιστροφής

6.3 Σενάριο 2: AC σφάλματα δικτύου

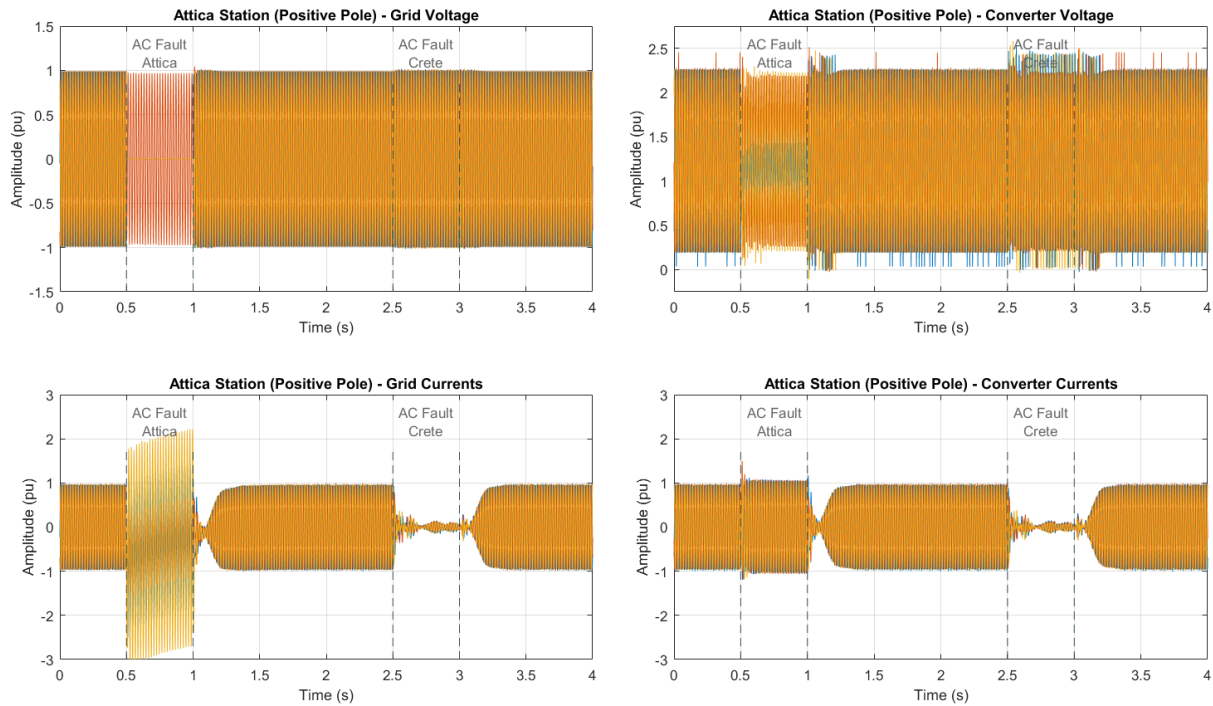
Στο σενάριο αυτό μελετάται η συμπεριφορά του συστήματος υπό συνθήκες σφαλμάτων στα AC δίκτυα της Κρήτης και της Αττικής, τα οποία προκαλούν σημαντική βύθιση τάσης. Κατά τη διάρκεια των σφαλμάτων θεωρείται ότι το σύστημα βρίσκεται σε πλήρη φόρτιση, με ροή ισχύος 0.9 α.μ., δηλαδή 450 MW ανά πόλο, από την Αττική στην Κρήτη.

Πιο συγκεκριμένα, κατά το διάστημα 0.5 – 1 sec πραγματοποιείται ασύμμετρο σφάλμα μεταξύ δύο φάσεων και γης στο AC δίκτυο της Αττικής. Το σφάλμα αυτό έχει ως συνέπεια να υπάρξει βύθιση τάσης στο σημείο σύνδεσης περίπου 0.5 αμ. Παρομοίως, κατά το διάστημα 2.5 – 3 sec πραγματοποιείται ασύμμετρο σφάλμα μεταξύ δύο φάσεων και γης στο σύστημα της Κρήτης, προκαλώντας και πάλι βύθισης τάσης περίπου 0.5 αμ.

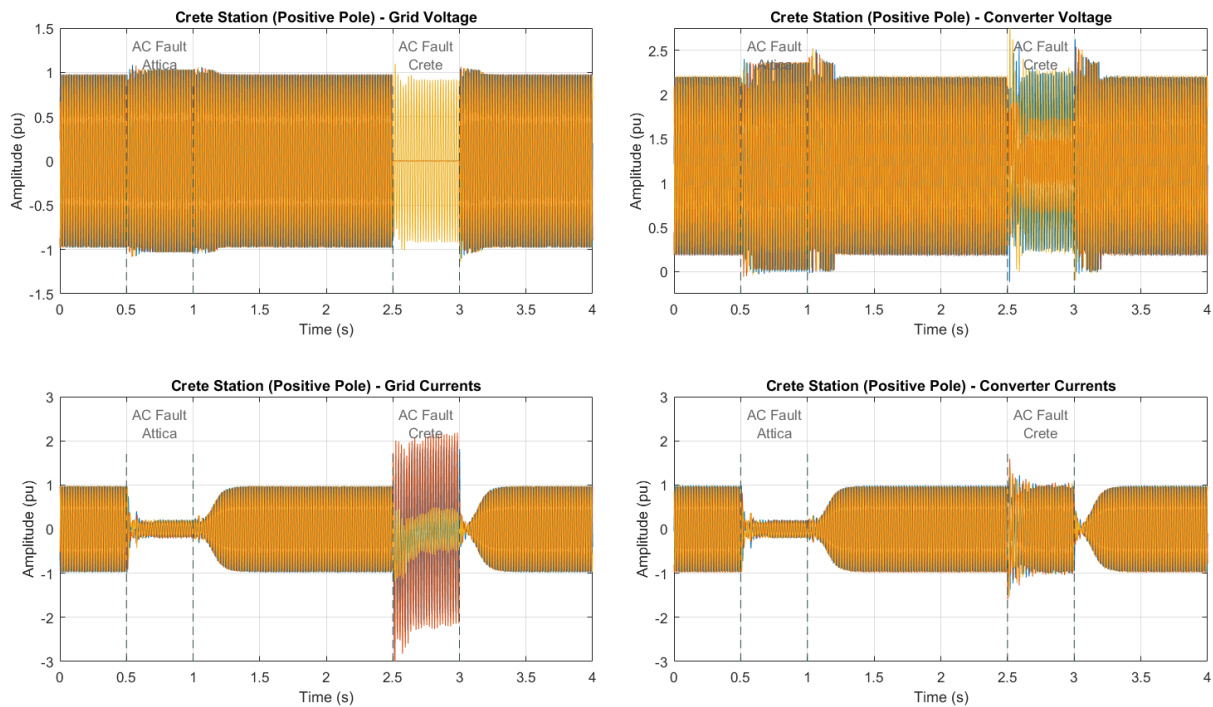
Στα παρακάτω γραφήματα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης του σεναρίου. Σημειώνεται ότι λόγω συμμετρίας των συνθηκών, ως προς τους δύο πόλους, η απόκριση των μετατροπών του κάθε άκρου είναι παρόμοια. Για τον λόγο αυτό παρουσιάζονται τα αποτελέσματα μόνο για τον ένα πόλο – έστω τον θετικό.

Στο Σχήμα 6.11 και στο Σχήμα 6.12 εικονίζονται οι τάσεις και τα ρεύματα του δικτύου και των μετατροπών του θετικού πόλου της διασύνδεσης στην πλευρά της Αττικής και της Κρήτης αντίστοιχα. Από τις κυματομορφές γίνεται φανερό ότι ένα ασύμμετρο σφάλμα που συμβαίνει στη μία πλευρά της διασύνδεσης δεν επηρεάζει σημαντικά την άλλη. Ειδικά στην περίπτωση σφάλματος στην πλευρά της Κρήτης, στο δίκτυο της Αττικής, που είναι πιο ισχυρό, δεν εμφανίζεται καμία διαταραχή, ενώ στην περίπτωση σφάλματος στην Αττική στο σύστημα της Κρήτης εμφανίζεται μικρή

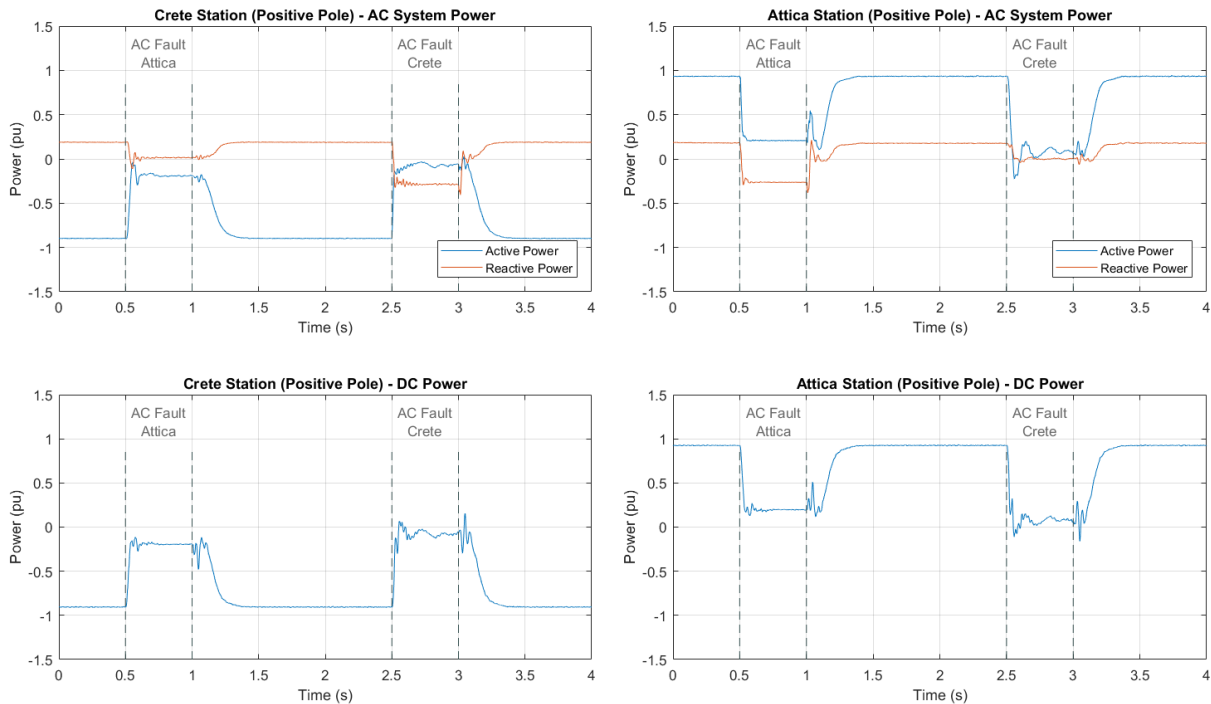
διαταραχή στην τάση του δικτύου. Όσον αφορά τα ρεύματα, παρατηρείται ότι στην πλευρά του μετατροπέα διατηρούν τη συμμετρία τους, παρά τον ασύμμετρο χαρακτήρα του σφάλματος, κάτι που οφείλεται στην ενσωμάτωση ελεγκτή ρεύματος αρνητικής ακολουθίας, αλλά υπάρχει ασύμμετρη συνιστώσα, όπως επίσης και υπερένταση (2 αμ), στην πλευρά του δευτερεύοντος του Μ/Σ.



Σχήμα 6.11 Σενάριο 2: Φασικές Τάσεις και Ρεύματα δικτύου και μετατροπέα. Θετικός πόλος Αττικής



Σχήμα 6.12 Σενάριο 2: Φασικές Τάσεις κ' Ρεύματα δικτύου και μετατροπέα. Θετικός πόλος Κρήτης



Σχήμα 6.13 Σενάριο 2: Ροή ισχύος θετικού πόλου διασύνδεσης

Από τα παραπάνω γραφήματα φαίνεται ότι το σύστημα μπορεί να συνεχίσει να λειτουργεί υπό συνθήκες σφάλματος στα AC δίκτυα και των δύο πλευρών, ικανοποιώντας με αυτόν τον τρόπο την απαίτηση των σύγχρονων κωδίκων συστήματος για αδιάλειπτη λειτουργία. Επιπρόσθετα, επίσης όπως απαιτούν οι κώδικες συστήματος για διασυνδέσεις HVDC, τα σχήματα ελέγχου FRT, που παρουσιάστηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο, προσαρμόζουν άμεσα την εγχεόμενη ενεργό και άεργο ισχύ έτσι ώστε να συμβάλουν στην υποστήριξη της τάσης. Πιο αναλυτικά, κατά την εμφάνιση σφάλματος σε κάποιο από τα δύο δίκτυα οι μετατροπείς το αντίστοιχου άκρου προσαρμόζουν την άεργο συνιστώσα του ρεύματός τους σύμφωνα με τη χαρακτηριστική καμπύλη του γερμανικού κώδικα που εικονίζεται στο Σχήμα 1.2. Παράλληλα, λόγω της έγχυσης αέργου ισχύος και της βύθισης τάσης στο AC δίκτυο, κατά τη διάρκεια του σφάλματος μειώνεται η ικανότητα διακίνησης ενεργού ισχύος. Στη συνέχεια πραγματοποιείται αναλυτική περιγραφή των σχημάτων ελέγχου και τη λειτουργία τους σε συνθήκες σφάλματος σε κάποιο από τα δύο δίκτυα.

α) Σφάλμα στο δίκτυο της Αττικής: Στο Σχήμα 6.13 εικονίζεται η ροή ισχύος του θετικού πόλου της διασύνδεσης. Κατά τη διάρκεια του σφάλματος στην πλευρά της Αττικής (0.5 – 1 sec), ο μετατροπέας αυτής της πλευράς εγχεί στο δίκτυο άεργο ισχύ, ενώ παράλληλα περιορίζει τη ροή ενεργού ισχύος, ώστε να διατηρήσει το συνολικό ρεύμα στην ονομαστική τιμή.

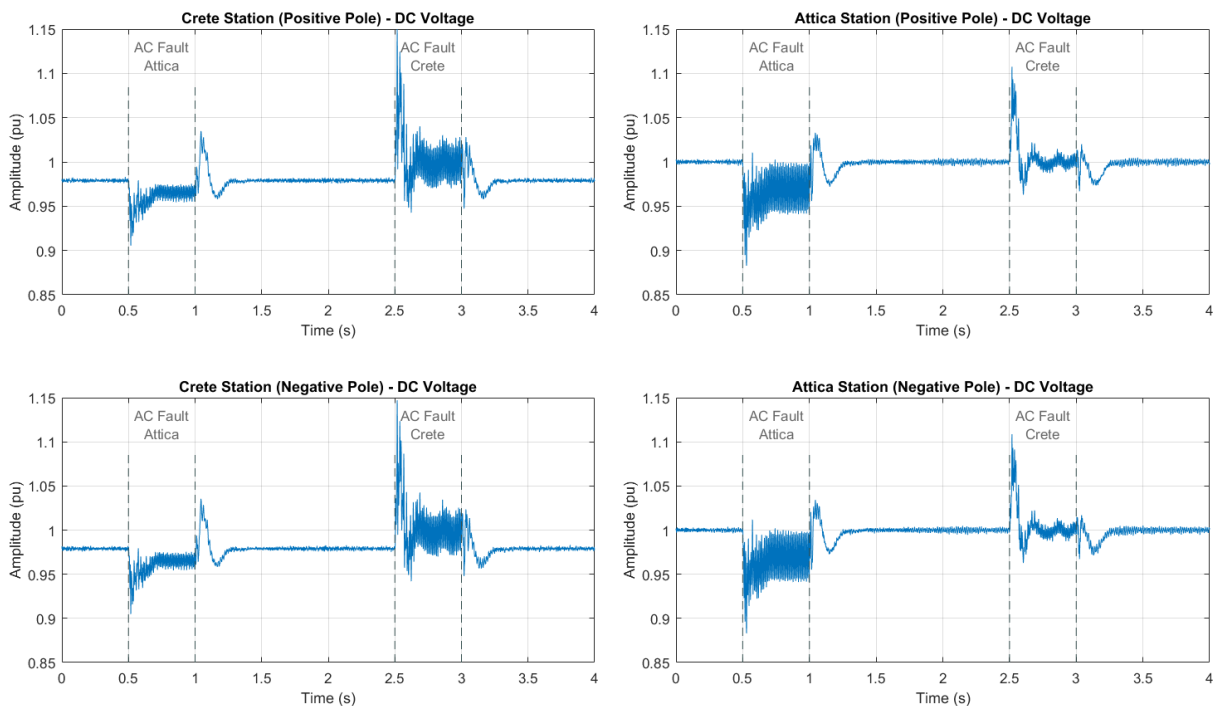
Ταυτόχρονα, ο μετατροπέας στο άκρο της Κρήτης προσαρμόζει την ισχύ που απορροφά. Η προσαρμογή της απορροφούμενης ισχύος από τον μετατροπέα στην πλευρά της Κρήτης πραγματοποιείται με την ενεργοποίηση του ελεγκτή DC deadband που παρουσιάστηκε στην παράγραφο 5.6. Ο ελεγκτής αυτός, όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.14 εξασφαλίζει τη διατήρηση της DC τάσης μέσα στα όρια της νεκρής ζώνης, με εξαίρεση την αρχική εκδήλωση του μεταβατικού φαινομένου το οποίο προκαλεί μια υπόταση της τάξεως 10%.

Στο Σχήμα 6.15 και στο Σχήμα 6.16 εικονίζονται οι dq συνιστώσες της θετικής ακολουθίας τάσεων και ρευμάτων, καθώς και η αρνητική ακολουθία των ρευμάτων το μετατροπέα. Από το Σχήμα 6.16,

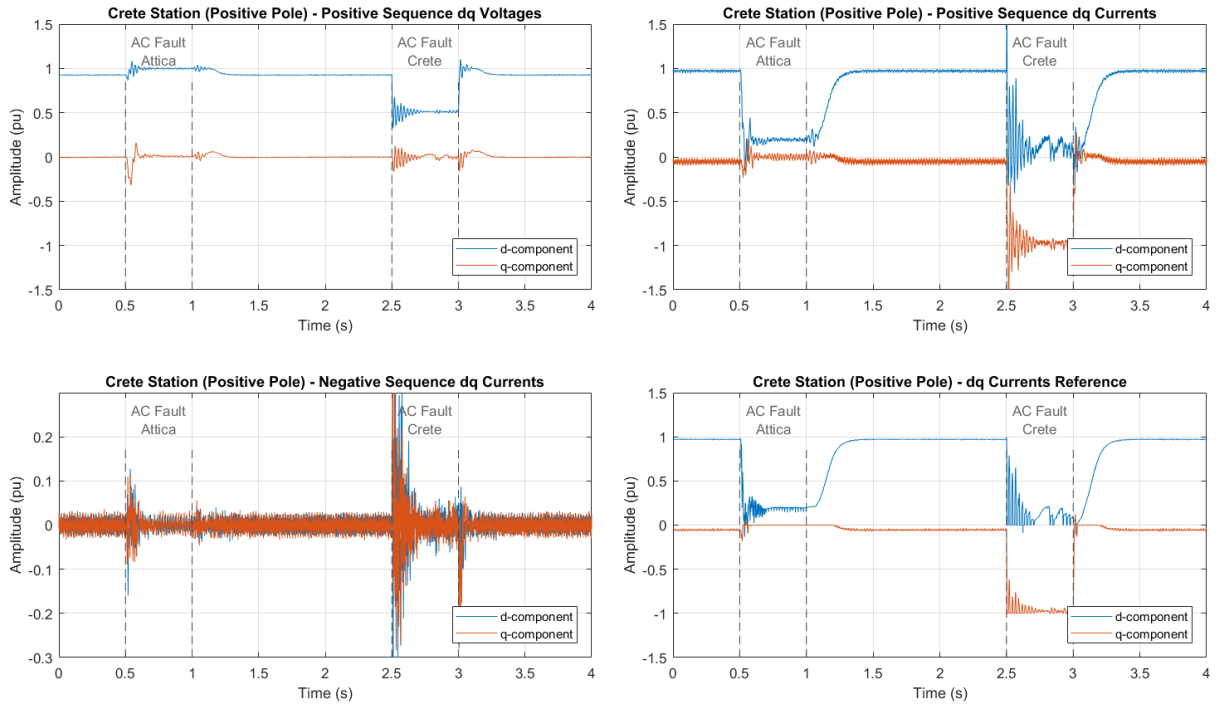
που αφορά την πλευρά της Αττικής, διαπιστώνεται η ικανοποιητική λειτουργία του συστήματος συγχρονισμού με το δίκτυο (DSOGI-PLL), καθώς η μετρούμενη τάση δικτύου στην πλευρά της Αττικής κατά τη διάρκεια του σφάλματος δεν παρουσιάζει καμία διαταραχή. Παράλληλα, φαίνεται η ρύθμιση της αέργου συνιστώσας του ρεύματος περίπου στο -0.9 αμ για βύθιση τάσης περίπου στο 45%, σύμφωνα με την καμπύλη του γερμανικού κώδικα. Τέλος επιβεβαιώνεται ότι ο ελεγκτής ρεύματος αρνητικής ακολουθίας περιορίζει τα ρεύματα αρνητικής ακολουθίας, παρά την ασυμμετρία των τάσεων του δικτύου.

β) Σφάλμα στο δίκτυο της Κρήτης: Κατά τη διάρκεια σφάλματος στην πλευρά της Κρήτης, και πάλι, πραγματοποιείται ταχεία ρύθμιση της αέργου συνιστώσας ρεύματος και περιορισμός της δυνατότητας απορρόφησης ενεργού ισχύος. Παράλληλα, ο ελεγκτής DC τάσης στην πλευρά της Αττικής προσαρμόζει την εγχεόμενη ισχύ του ώστε να διατηρηθεί η DC τάση του συνδέσμου στην ονομαστική τιμή της. Σε γενικές γραμμές, το σύστημα παρουσιάζει παρόμοια συμπεριφορά και σε αυτήν την περίπτωση σφάλματος. Εξάιρεση αποτελεί η αποτελεσματικότητα του συστήματος DSOGI-PLL. Όπως παρατηρείται από το Σχήμα 6.15, η d συνιστώσα της τάσης θετικής ακολουθίας παρουσιάζει ταλαντώσεις στην αρχή του μεταβατικού φαινομένου, δημιουργώντας αντίστοιχες ταλαντώσεις και στην απόκριση του ελεγκτή ρεύματος. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι το σύστημα της Κρήτης είναι λιγότερο ισχυρό από το αντίστοιχο της Αττικής, οπότε ίσως απαιτείται πιο ακριβές σύστημα συγχρονισμού.

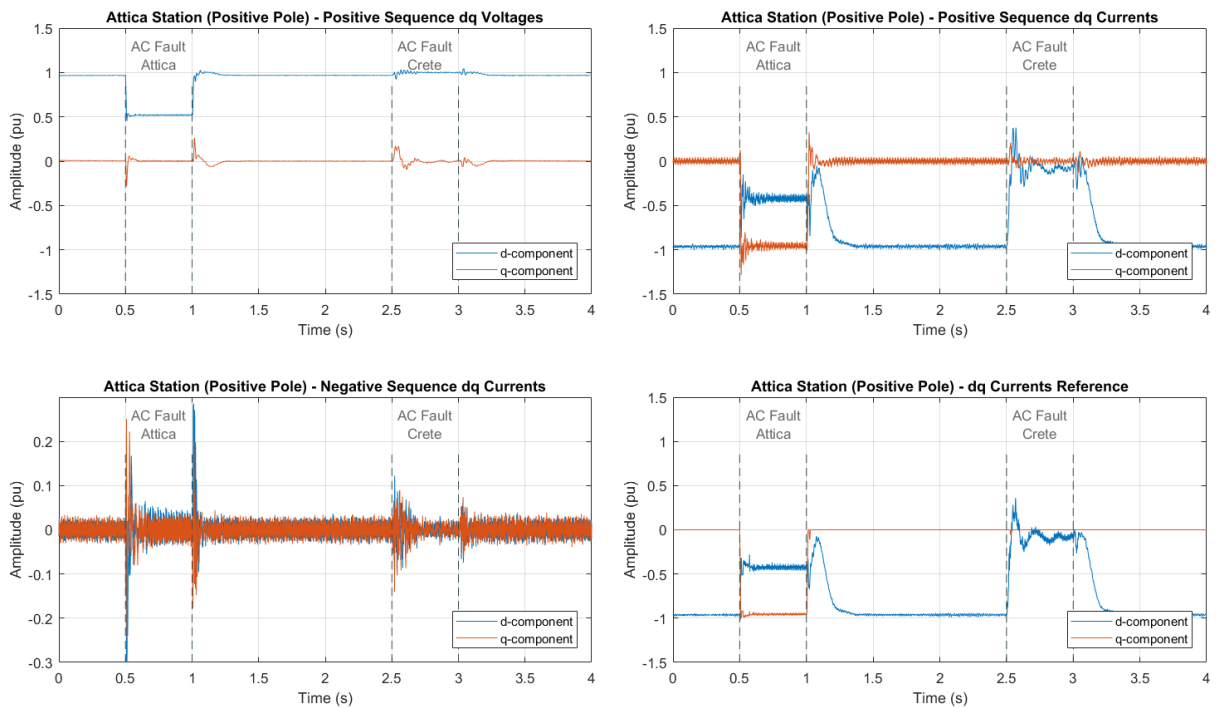
Όσον αφορά τη συμπεριφορά του DC τμήματος του συστήματος κατά τη διάρκεια σφαλμάτων στα AC συστήματα, όπως φαίνεται από το Σχήμα 6.14 και το Σχήμα 6.17 η DC τάση και τα DC ρεύματα παρουσιάζουν μια AC κυμάτωση συχνότητας 100 Hz, λόγω της ασυμμετρίας των τάσεων εξόδου του μετατροπέα. Επίσης παρατηρείται ότι διατηρείται η συμμετρία φόρτισης των δύο πόλων της διασύνδεσης, διατηρώντας τα ρεύματα γειώσεως και μεταλλικού αγωγού σε αμελητέες τιμές (μερικές δεκάδες Ampere).



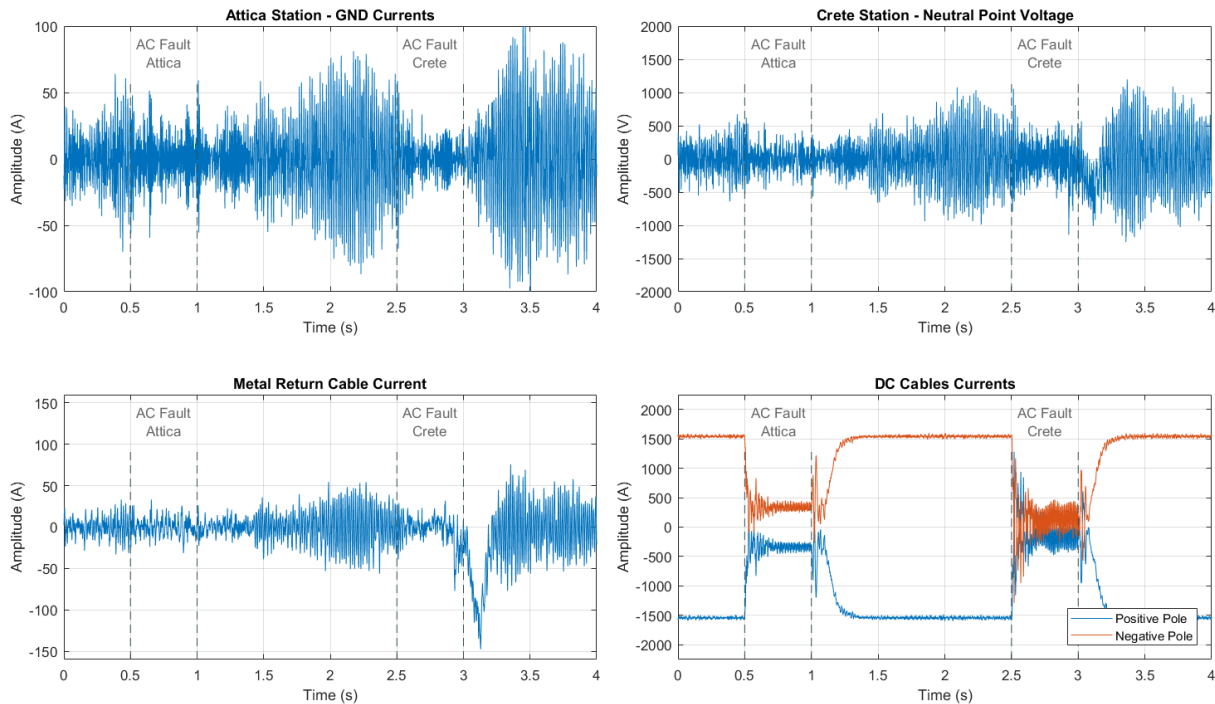
Σχήμα 6.14 Σενάριο 2: DC τάσεις συνδέσμου



Σχήμα 6.15 Σενάριο 2: d-q συνιστώσες της τάσης (PS) και του ρεύματος (PS+NS) στην Κρήτη. Θετικός Πόλος



Σχήμα 6.16 Σενάριο 2: d-q συνιστώσες της τάσης (PS) και του ρεύματος (PS+NS) στην Αττική. Θετικός Πόλος



Σχήμα 6.17 Σενάριο 2: Ρεύματα Γείωσης, DC καλωδίων και τάση αγωγού μεταλλικής επιστροφής

6.4 Σενάριο 3: AC σφάλματα μετατροπέα

Στην προηγούμενη παράγραφο εξετάστηκε η ικανότητα αδιάλειπτης λειτουργίας του συνδέσμου κατά τη διάρκεια σφαλμάτων στα AC συστήματα της Αττικής και της Κρήτης. Σε αυτήν την παράγραφο μελετάται η επίδραση πιθανών σφαλμάτων ενός μετατροπέα στη λειτουργία του συνδέσμου, αλλά και στην ευστάθεια των AC συστημάτων. Κύριο μέλημα είναι να εξεταστεί αν το σύστημα ικανοποιεί το κριτήριο λειτουργίας σε συνθήκες N-1, δηλαδή αν σε περίπτωση σφάλματος σε κάποιο μετατροπέα, το υγιές τμήμα του συστήματος μπορεί να συνεχίσει να λειτουργεί, και μάλιστα αναλαμβάνοντας όλο το φορτίο.

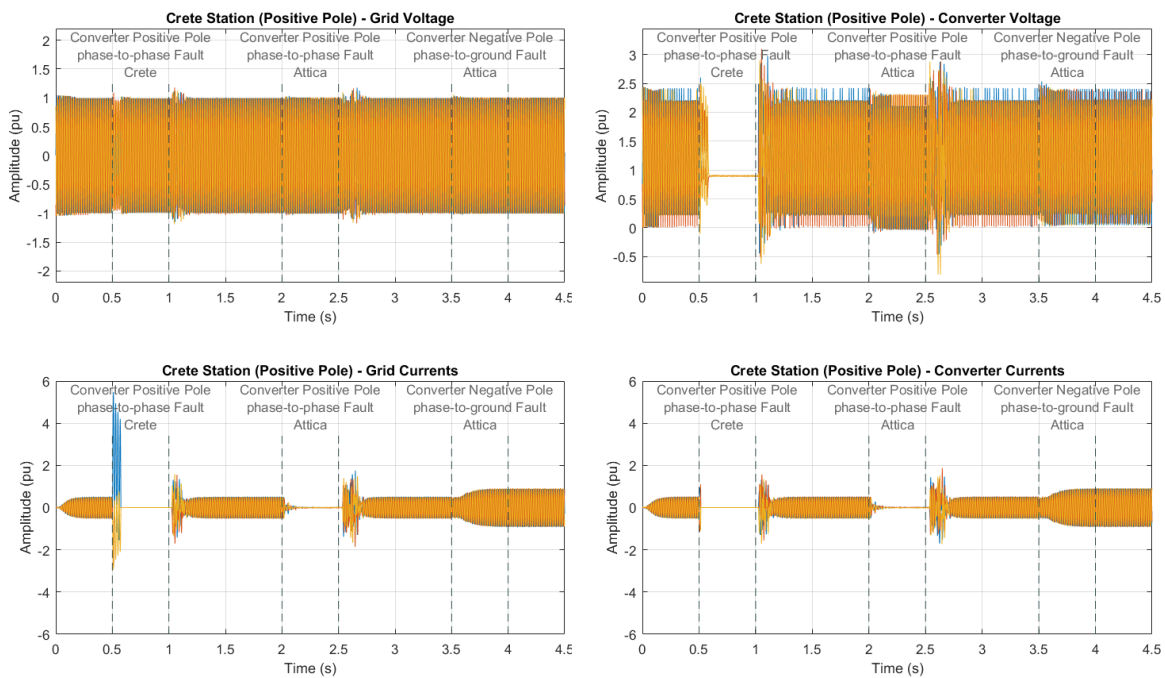
Στο σενάριο αυτό θεωρήθηκε ότι το σύστημα λειτουργεί με εφεδρεία ισχύος 50%, δηλαδή υπάρχει ροή ισχύος 0.5 αμ - δηλαδή 250 MVA ανά πόλο, από την Αττική προς την Κρήτη. Κατά τη διάρκεια λειτουργίας εξετάζονται τρία διαφορετικά AC σφάλματα, τα οποία συμβαίνουν ανάμεσα στον μετατροπέα και στον Μ/Σ. Στο διάστημα [0.5, 1] sec πραγματοποιείται σφάλμα μεταξύ δύο φάσεων στον μετατροπέα του θετικού πόλου, στην πλευρά της Κρήτης. Στο διάστημα [2, 2.5] sec πραγματοποιείται και πάλι AC σφάλμα μεταξύ δύο φάσεων στον μετατροπέα του θετικού πόλου, στην πλευρά της Αττικής. Τέλος στο διάστημα [3.5, 4] sec πραγματοποιείται σφάλμα μεταξύ μιας φάσης και της γης στον μετατροπέα του αρνητικού πόλου της διασύνδεσης στην πλευρά της Αττικής.

Σε κάθε ένα σφάλμα από τα παραπάνω ο αντίστοιχος μετατροπέας μπλοκάρει ακαριαία από τον ελεγκτή του Σχήμα 5.6, ενώ με καθυστέρηση 50 ms ανοίγουν και οι δύο διακόπτες απομόνωσης, που εικονίζονται στο Σχήμα 5.1, με σκοπό να απομονωθεί το σφάλμα τόσο από την AC πλευρά, δηλαδή από το HVAC δίκτυο, όσο και από την DC πλευρά, δηλαδή το HVDC δίκτυο.

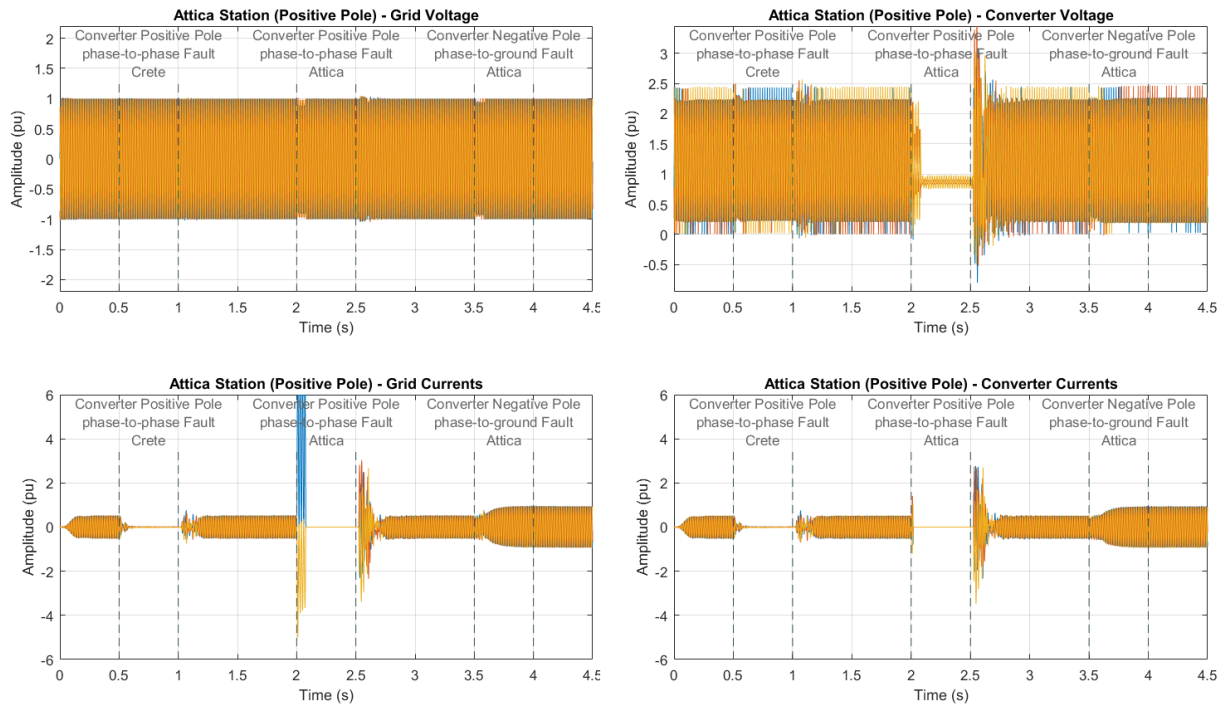
Κατά τη διάρκεια που ο μετατροπέας βρίσκεται εκτός λειτουργίας η διακινούμενη ισχύς του αντιστοιχού πόλου μηδενίζεται, ενώ ο ελεγκτής του Σχήμα 5.7 προσαρμόζει τις εντολές ισχύος, έτσι ώστε ο υγιής πόλος να αναλάβει ολόκληρο το φορτίο του συστήματος, ήτοι $1 \text{ αμ} - 500 \text{ MVA}$

Μετά την εκκαθάριση των σφαλμάτων οι μετατροπείς επανασυνδέονται στο δίκτυο, και σταδιακά αναλαμβάνουν και πάλι το ανάλογο φορτίο.

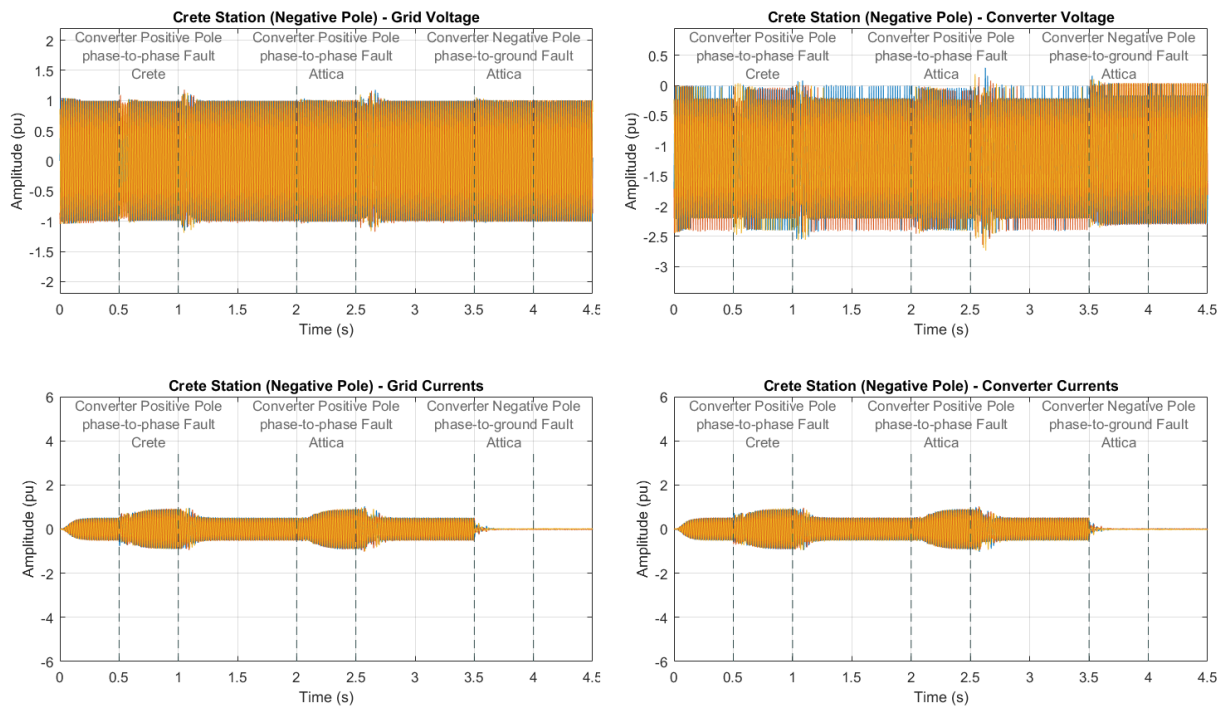
Στα επόμενα σχήματα εικονίζονται οι τάσεις δικτύου και μετατροπέα και για τους δύο πόλους της διασύνδεσης, στην πλευρά της Κρήτης και στην πλευρά της Αττικής οι διακινούμενες ισχύς των δύο πόλων, DC τάσεις του συνδέσμου και του αγωγού επιστροφής.



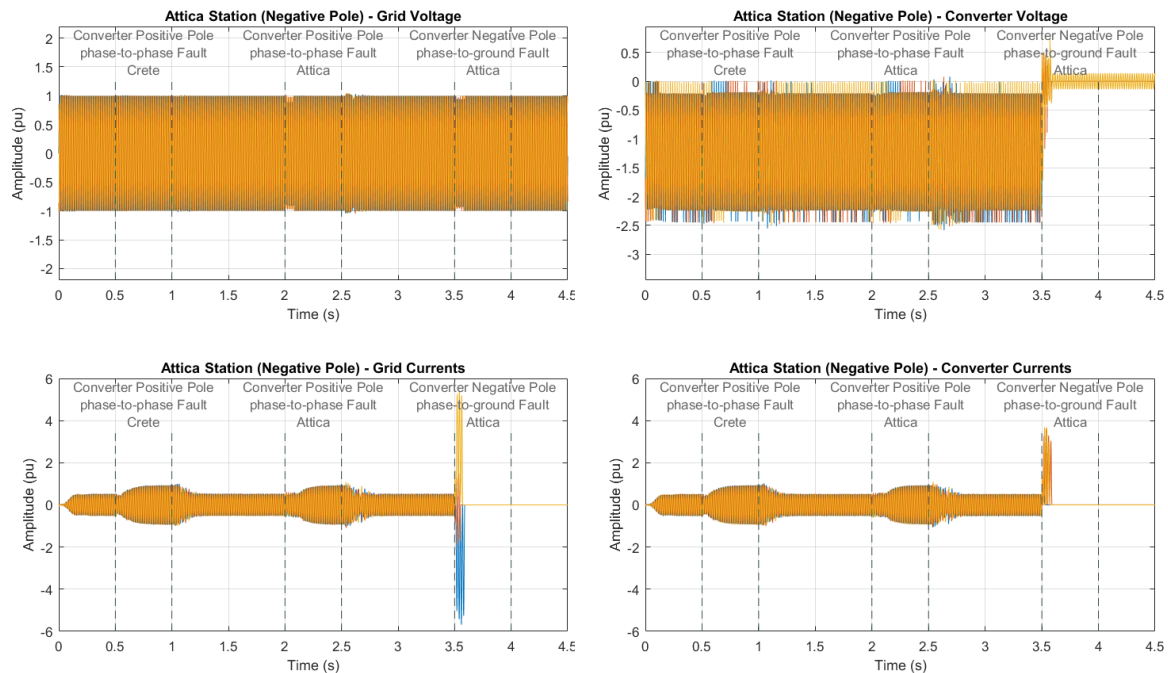
Σχήμα 6.18 Σενάριο 3: Φασικές Τάσεις και Ρεύματα δικτύου και μετατροπέα. Θετικός πόλος Κρήτης



Σχήμα 6.19 Σενάριο 3: Φασικές Τάσεις και Ρεύματα δικτύου και μετατροπέα. Θετικός πόλος Αττικής



Σχήμα 6.20 Σενάριο 3: Φασικές Τάσεις και Ρεύματα δικτύου και μετατροπέα. Αρνητικός πόλος Κρήτης



Σχήμα 6.21 Σενάριο 3: Φασικές Τάσεις και Ρεύματα δικτύου και μετατροπέα. Αρνητικός πόλος Αττικής

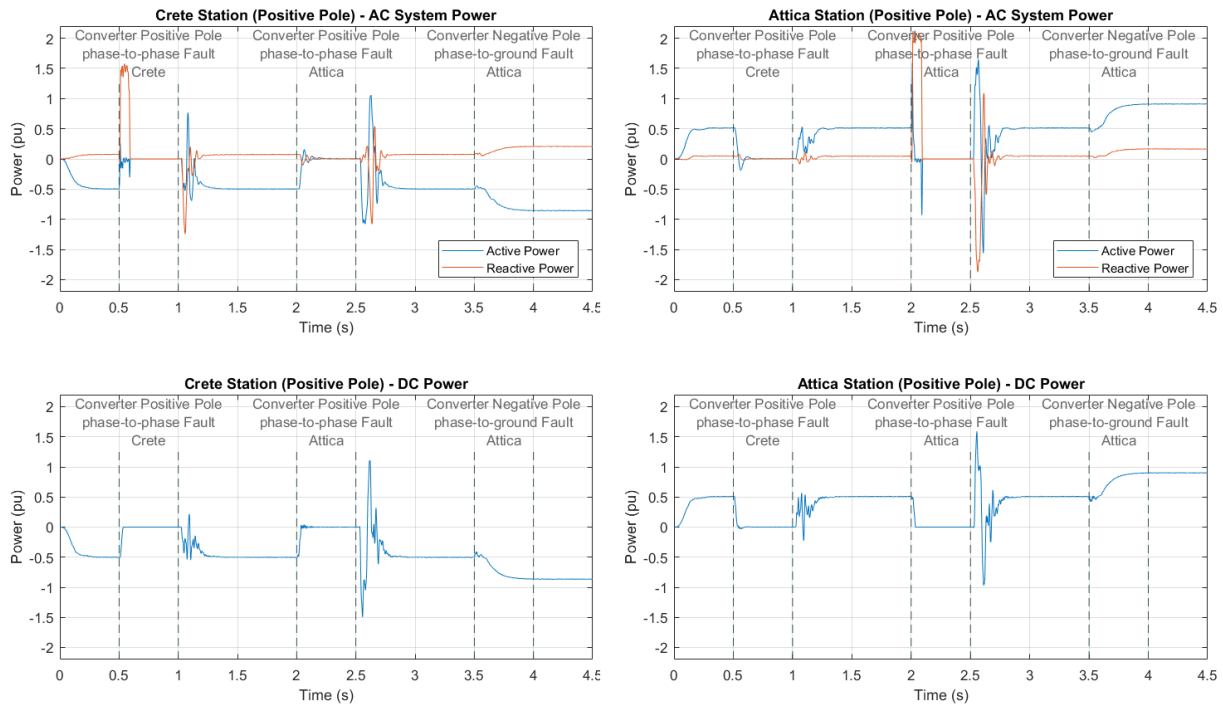
Από τις κυματομορφές των AC μεγθών που εικονίζονται στα σχήματα 6.18-21 γίνεται εμφανές ότι τα σφάλματα μεταξύ φάσεων και τα σφάλματα μεταξύ φάσης και γης έχουν εντελώς διαφορετική συμπεριφορά. Στην περίπτωση των σφαλμάτων μεταξύ φάσεων υπάρχει πλήρης έλεγχος των ρευμάτων του μετατροπέα, όπως επίσης και των ρευμάτων στην DC πλευρά του μετατροπέα. αλλά το σφάλμα τροφοδοτείται από το AC δίκτυο με ρεύματα της τάξεως 5 αμ.

Αντίθετα σε περίπτωση σφάλματος φάσης προς γη, λόγω της DC συνιστώσας που υπάρχει στις φασικές τάσεις του μετατροπέα, εμφανίζονται μεγάλα DC ρεύματα στον μετατροπέα, τα οποία τροφοδοτούνται από τη γείωση της DC πλευράς. Μάλιστα, το μπλοκάρισμα του μετατροπέα δεν αρκεί για τον περιορισμό των ρευμάτων αυτών, καθώς, ανάλογα τη φορά ισχύος και τον υπό σφάλμα πόλο, η ροή των DC ρευμάτων πραγματοποιείται μέσω των διόδων ελεύθερης διέλευσης. Επομένως το σφάλμα συνεχίζει να εκδηλώνεται μέχρι να ανοίξει ο AC διακόπτης που αποσυνδέει τον μετατροπέα από τον Μ/Σ.

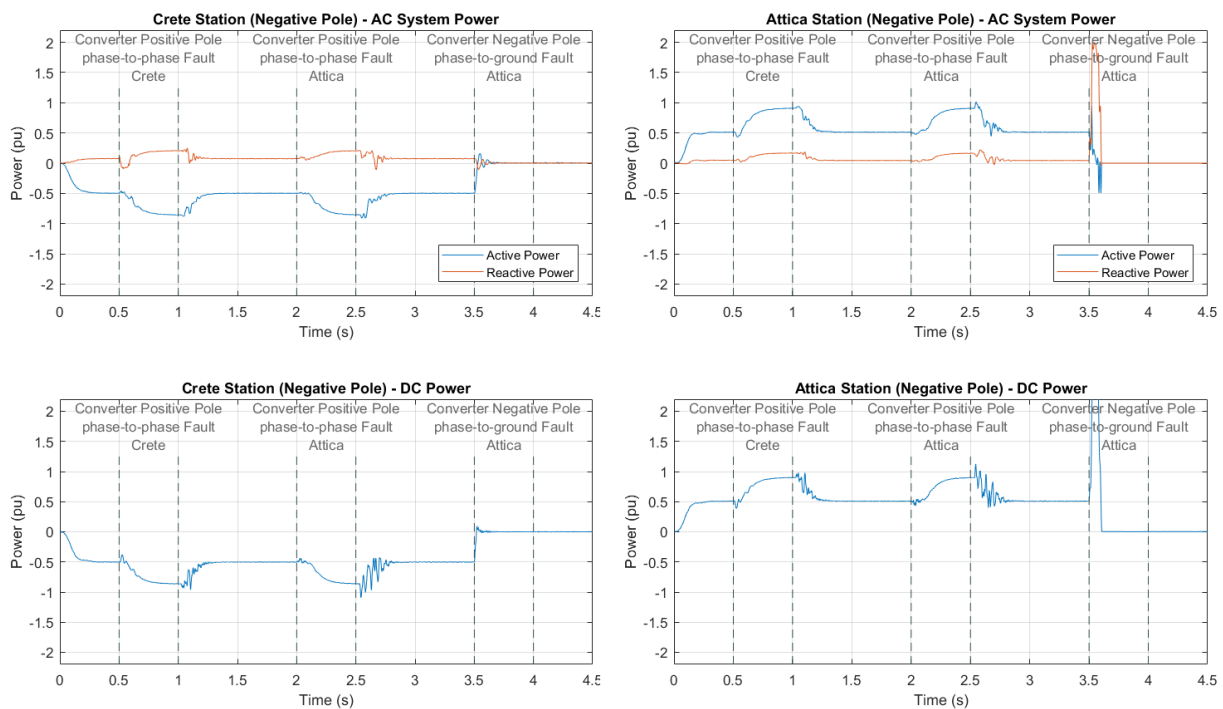
Αξίζει να σημειωθεί ότι η εκδήλωση τέτοιων σφαλμάτων είναι πιο έντονη στην περίπτωση σφάλματος στην Αττική, λόγω της εγγύτητας της γείωσης στο σημείο του σφάλματος. Αντίθετα, η αντίσταση του αγωγού επιστροφής βοηθάει στη μείωση των ρευμάτων σφάλματος στο άκρο της Κρήτης. Στα παρουσιαζόμενα σχήματα δεν εικονίζεται σφάλμα ως προς γη στην πλευρά της Κρήτης, καθώς μελετάται μόνο το σενάριο χειρότερης περίπτωσης.

Στο Σχήμα 6.22 και στο Σχήμα 6.23 εικονίζεται η ροή ισχύος στους δύο πόλους, θετικό και αρνητικό αντίστοιχα, της διασύνδεσης. Από τα σχήματα παρατηρείται ότι κατά την εκδήλωση του σφάλματος σε έναν πόλο, η ροή ισχύος στον άλλο πόλο πραγματοποιείται ανεξάρτητα, χωρίς πρόβλημα. Μάλιστα σε διάστημα περίπου 250 ms ο υγιής πόλος έχει αναλάβει τη συνολική φόρτιση, επιτυγχάνοντας τη λειτουργία N-1.

Από την άλλη μεριά, τα μεταβατικά φαινόμενα σύζευξης που προκαλούνται κατά την επανασύνδεση ενός πόλου μετά την εκκαθάριση του σφάλματος δημιουργούν μια σύντομη διαταραχή στην ισχύ του επανασυνδεδεμένου πόλου, πριν αυτός αναλάβει και πάλι την ισχύ που του αναλογεί. Η διάρκεια αυτής της διαταραχής είναι περίπου 200 ms , αλλά, και πάλι, αξίζει να σημειωθεί ότι ο υγιής πόλος επηρεάζεται ελάχιστα από αυτήν.

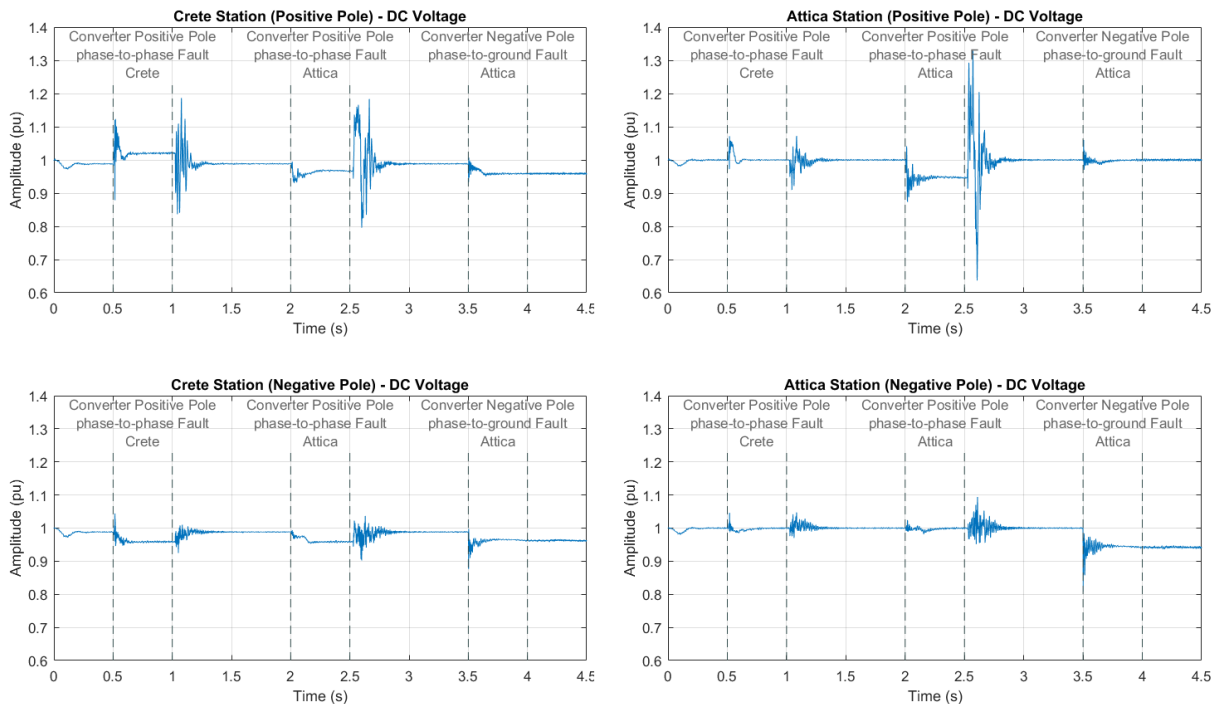


Σχήμα 6.22 Σενάριο 3: Ροή ισχύος θετικού πόλου διασύνδεσης



Σχήμα 6.23 Σενάριο 3: Ροή ισχύος αρνητικού πόλου διασύνδεσης

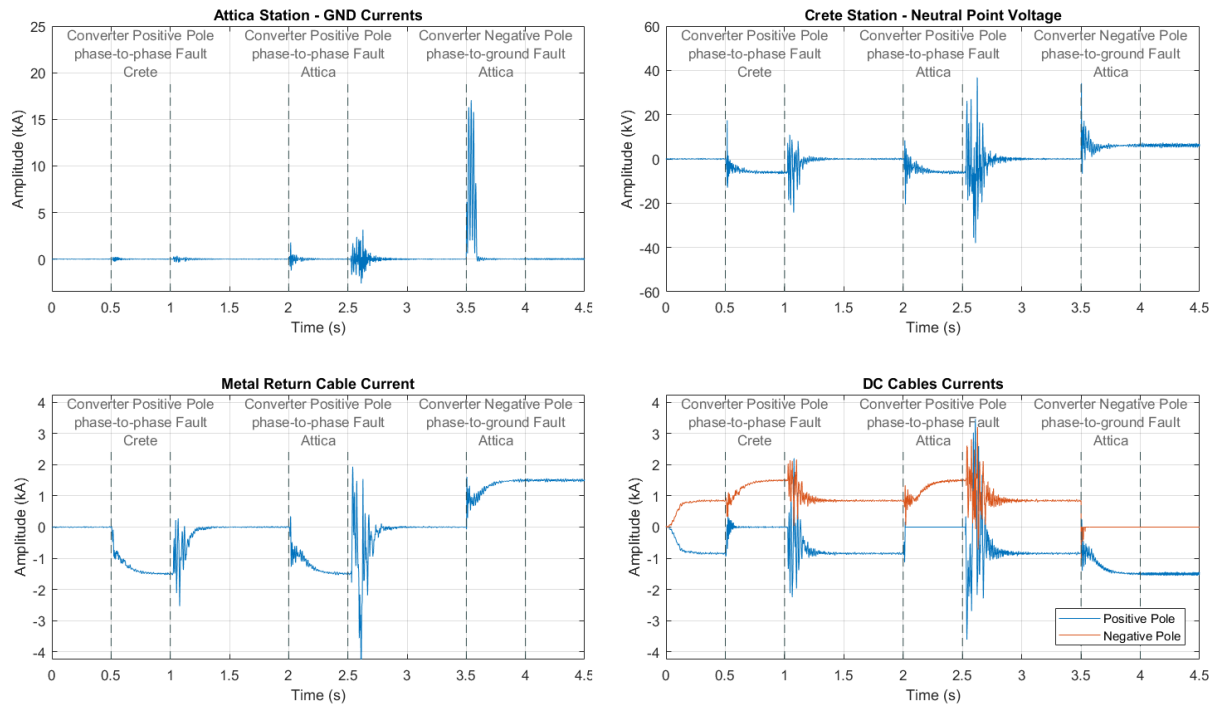
Στο Σχήμα 6.24 εικονίζονται οι DC τάσεις του συνδέσμου. Από το σχήμα αυτό φαίνεται ότι τα μεταβατικά φαινόμενα σύζευξης και απόζευξης δημιουργούν στιγμιαία διαταραχή στην DC τάση του συνδέσμου. Η διαταραχή αυτή είναι εντονότερη σε περιπτώσεις σφάλματος στην Αττική ($\pm 20\%$ έναντι $\pm 10\%$) για τον λόγο που αναφέρθηκε και παραπάνω, δηλαδή λόγω της εγγύτητας του σημείου γείωσης στο σφάλμα. Σε κάθε περίπτωση η τάση ρυθμίζεται και πάλι στην ονομαστική της τιμή σε μικρό χρόνο.



Σχήμα 6.24 Σενάριο 3: DC τάσεις συνδέσμου

Τέλος στο Σχήμα 6.25 εικονίζονται οι τάσεις και τα ρεύματα γειώσεων και μεταλλικής επιστροφής. Στο σχήμα αυτό τεκμηριώνεται το γεγονός ότι τα σφάλματα φάσης ως προς γη τροφοδοτούνται και από την DC πλευρά. Μάλιστα το ρεύμα που δημιουργείται είναι αρκετά μεγάλο ($15 \text{ kA} \sim 7 \text{ pu}$), κάτι το οποίο δημιουργεί ερωτηματικά για την αντοχή των στοιχείων του μετατροπέα, και ειδικά των διόδων ελεύθερης διέλευσης. Σημειώνεται δε, το ρεύμα αυτό συνεχίζει να αυξάνει ακόμα και μετά το μπλοκάρισμα του μετατροπέα, μέχρι να ανοίξει ο AC διακόπτης ($\sim 50 \text{ ms}$).

Σε αυτό το σενάριο ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει και η εξέταση του αγωγού επιστροφής, καθώς υπάρχει ασυμμετρία στη φόρτιση των δύο πόλων. Όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα, κατά τη διάρκεια που ένας μετατροπέας είναι εκτός λειτουργίας και το σύστημα λειτουργεί μόνο με έναν πόλο, η επιστροφή του ρεύματος πραγματοποιείται μέσω του αγωγού μεταλλικής επιστροφής. Η ροή ρεύματος μέσω το αγωγού έχει ως συνέπεια να υπάρξει πτώση τάσης, η οποία οδηγεί σε ασυμμετρία των DC τάσεων των δύο πόλων στην πλευρά της Κρήτης. Η πτώση τάσης, για πλήρη φόρτιση, είναι της τάξεως των $5 \text{ kV} \sim 1.5\%$, κάτι που κρίνεται ανεκτό για τη λειτουργία του συνδέσμου. Επίσης, κατά τη διάρκεια των μεταβατικών φαινομένων, παρατηρείται ότι στον αγωγό επιστροφής εμφανίζονται αρκετά υψηλές υπερτάσεις, της τάξεως των $\pm 40 \text{ kV}$. Αυτό το γεγονός, δεδομένου ότι ο αγωγός αυτός είναι αγωγός μέσης ή και χαμηλής τάσης, θα πρέπει να ληφθεί υπόψη κατά τη σχεδίαση των μονώσεων.



Σχήμα 6.25 Σενάριο 3: Ρεύματα Γείωσης, DC καλωδίων και τάση αγωγού μεταλλικής επιστροφής

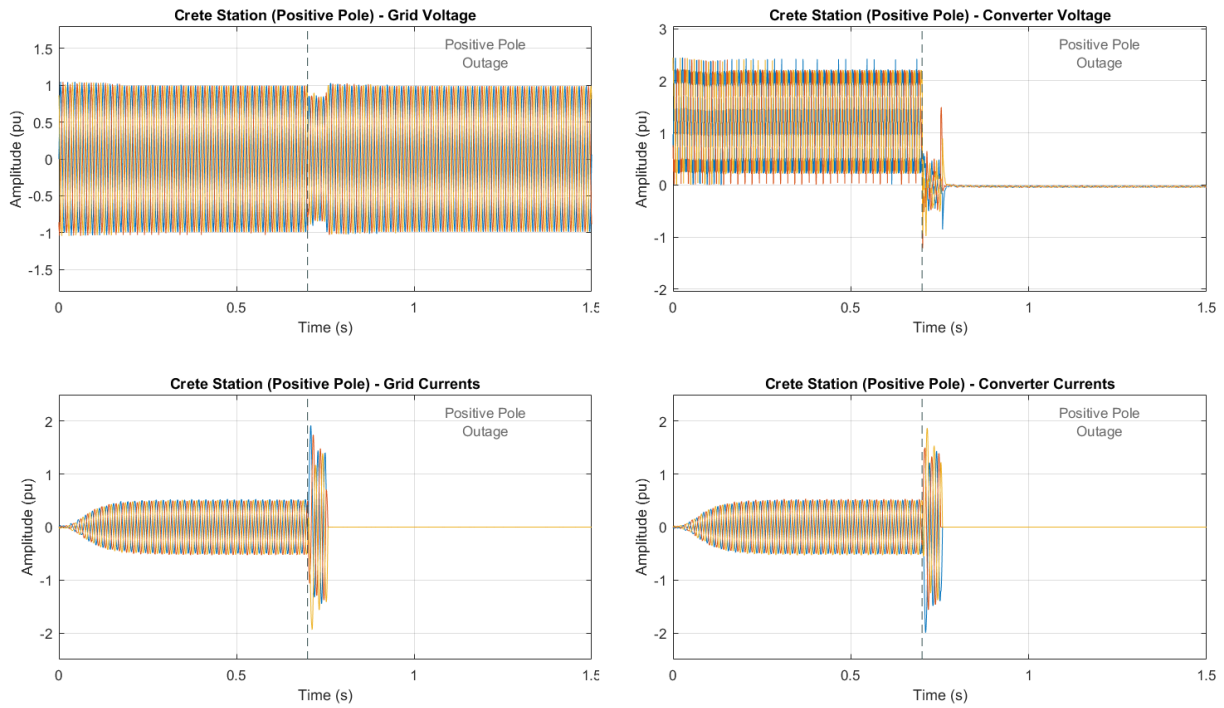
6.5 Σενάριο 4: DC σφάλματα καλωδίων

Το τελευταίο σενάριο που μελετήθηκε αφορά την απώλεια του ενός πόλου λόγω βραχυκυκλώματος στο υποβρύχιο DC καλώδιο. Σκοπός της διερεύνησης αυτού του σεναρίου είναι να μελετηθεί η μεταβατική ευστάθεια του συστήματος κατά την εμφάνιση του σφάλματος, αλλά και τη δυνατότητα συνέχισης της λειτουργίας μέσω του υγιούς πόλου.

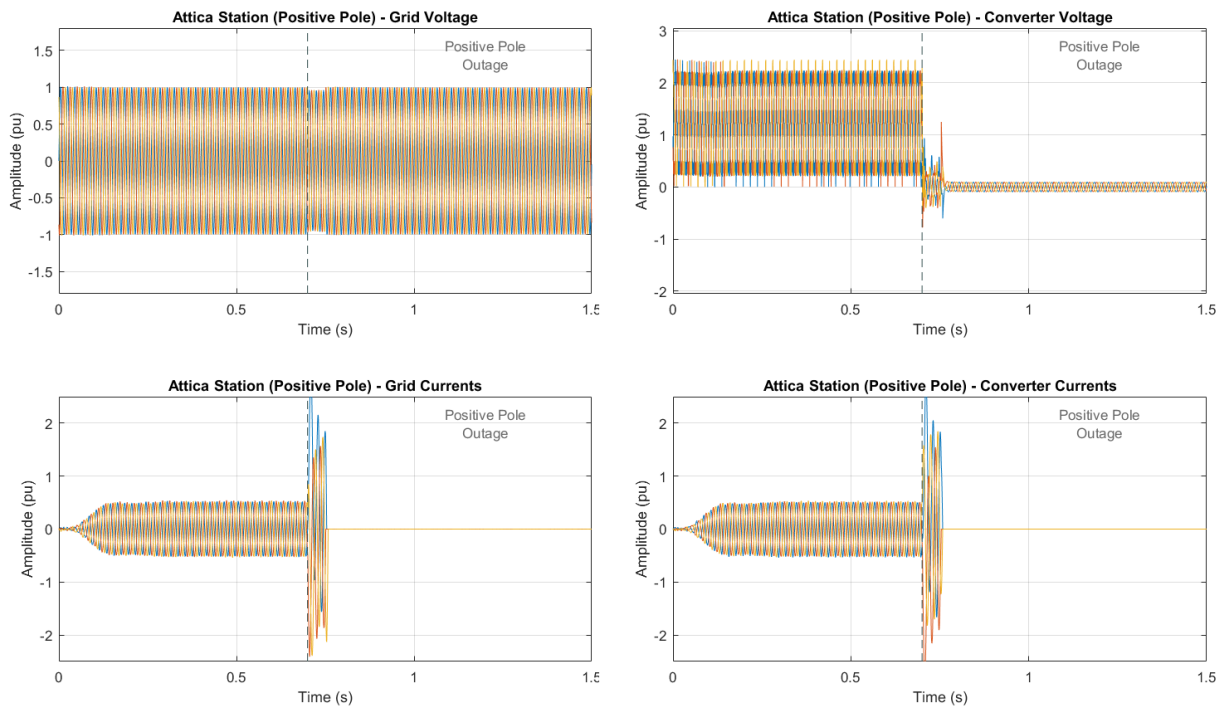
Οι συνθήκες πριν την εμφάνιση του σφάλματος είναι ίδιες με αυτές που μελετήθηκαν στο Σενάριο 3, δηλαδή θεωρείται ότι το σύστημα λειτουργεί με ροή ισχύος 0.5 αμ από την Αττική προς την Κρήτη. Το σφάλμα συμβαίνει στο μέσο του αγωγού υψηλής τάσης του θετικού πόλου της διασύνδεσης και προκαλεί την απώλεια του συγκεκριμένου πόλου, καθώς απαιτείται να αποσυνδεθούν οι μετατροπείς και στα δύο άκρα της διασύνδεσης.

Στα επόμενα σχήματα (6.26-6.29) εικονίζονται οι τάσεις και τα ρεύματα του δικτύου και του μετατροπέα σε καθένα από τους τέσσερις σταθμούς. Όπως γίνεται εμφανές, το σφάλμα στην DC πλευρά του θετικού πόλου τροφοδοτείται και από την AC πλευρά, δημιουργώντας υπερένταση της τάξεως 2 αμ. Η υπερένταση αυτή προκαλεί μια μικρή βύθιση τάσης στο AC δίκτυο, περίπου 10% στην Κρήτη και 5% στην Αττική, η οποία διαρκεί λιγότερο από 50 ms, έως να ανοίξει ο AC διακόπτης και να απομονωθεί το σφάλμα. Πέρα από την παραπάνω βύθιση της τάσης το AC σύστημα δεν υφίσταται κάποια άλλη διαταραχή.

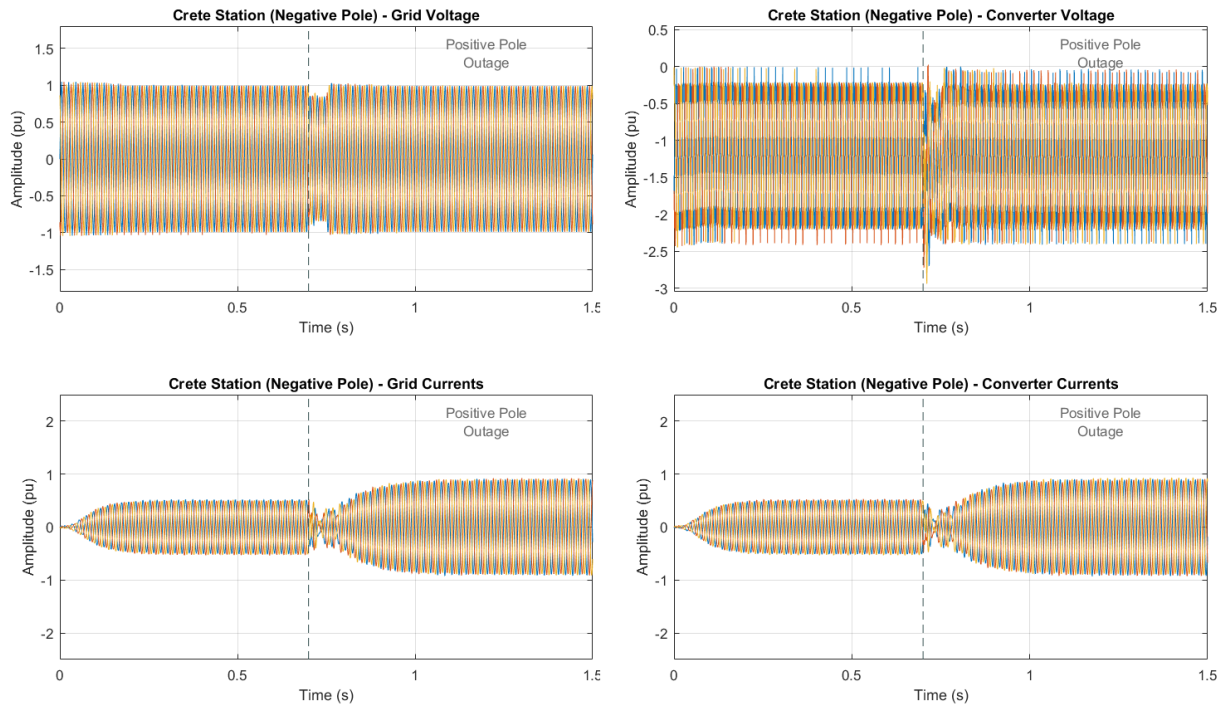
Στο Σχήμα 6.30 και στο Σχήμα 6.31 εικονίζεται η ροή ισχύος στους δύο πόλους του συνδέσμου. Όπως και στην περίπτωση της απώλειας ενός μετατροπέα, ο υγιής πόλος της διασύνδεσης παρουσιάζει μια μεταβατική διαταραχή διάρκειας περίπου 50 ms, μέχρι να απομονωθεί το σφάλμα, και στη συνέχεια αναλαμβάνει τη συνολική φόρτιση, επιτυγχάνοντας τη λειτουργία N-1.



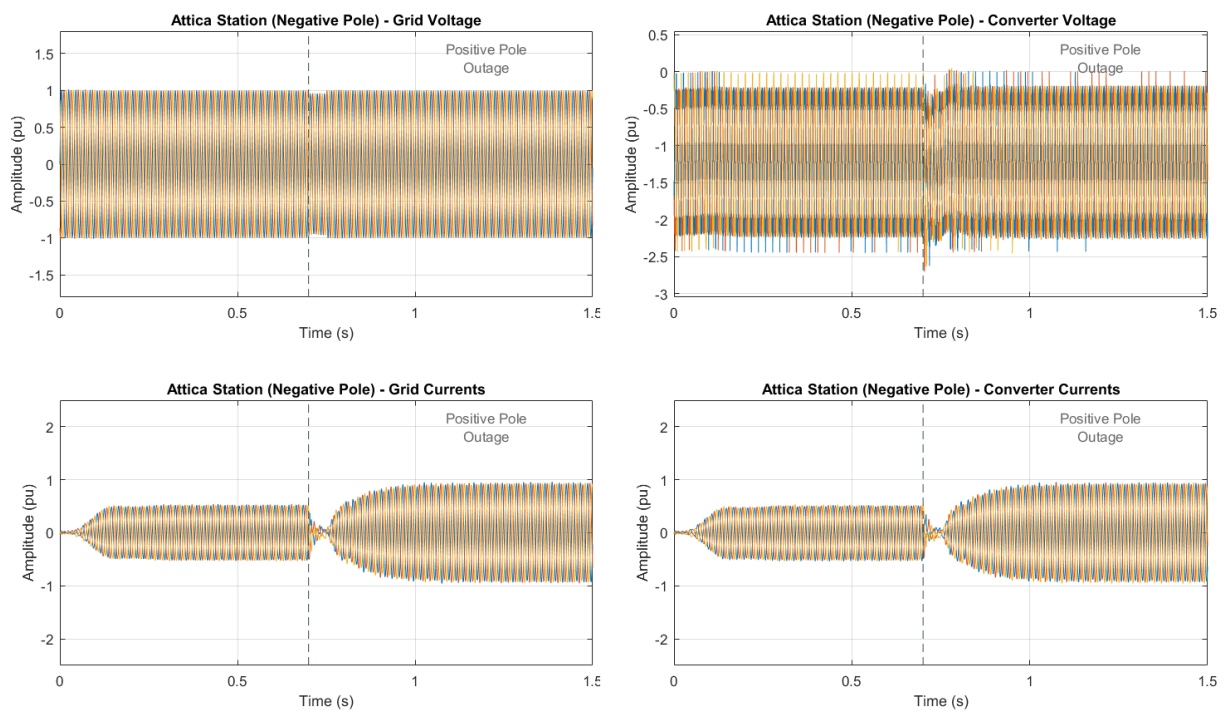
Σχήμα 6.26 Σενάριο 4: Τάσεις και Ρεύματα δικτύου και μετατροπέα. Θετικός πόλος Κρήτης



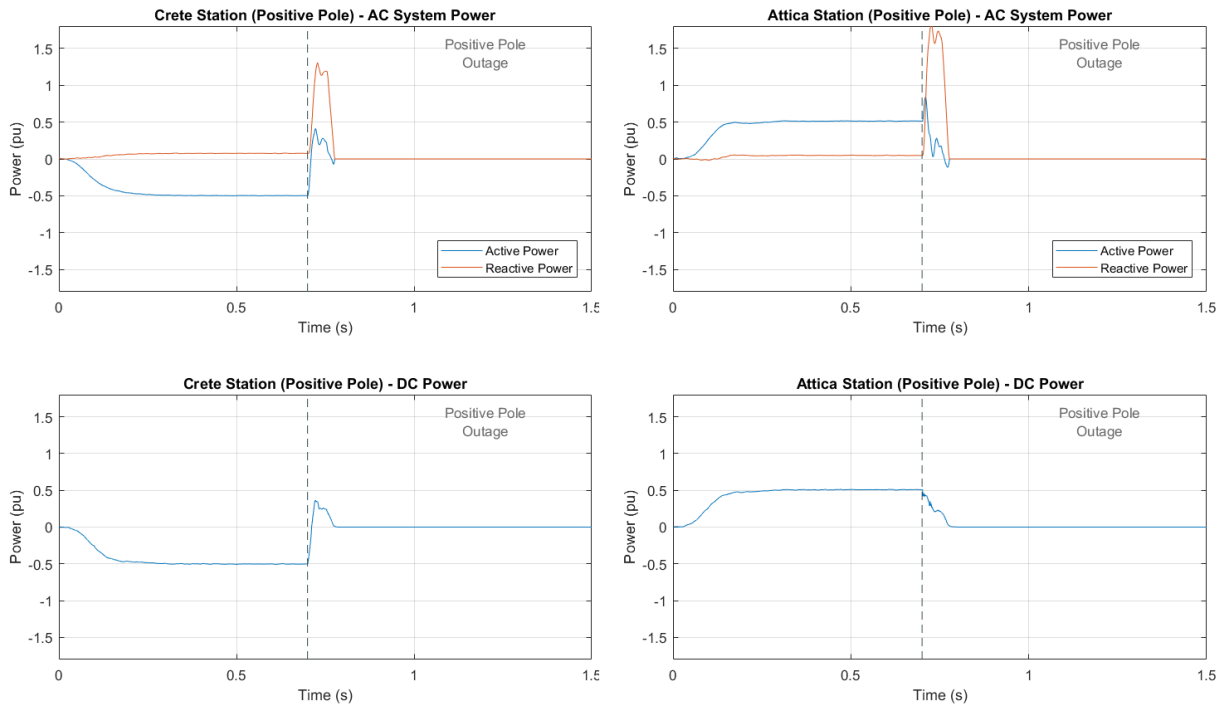
Σχήμα 6.27 Σενάριο 4: Τάσεις και Ρεύματα δικτύου και μετατροπέα. Θετικός πόλος Αττικής



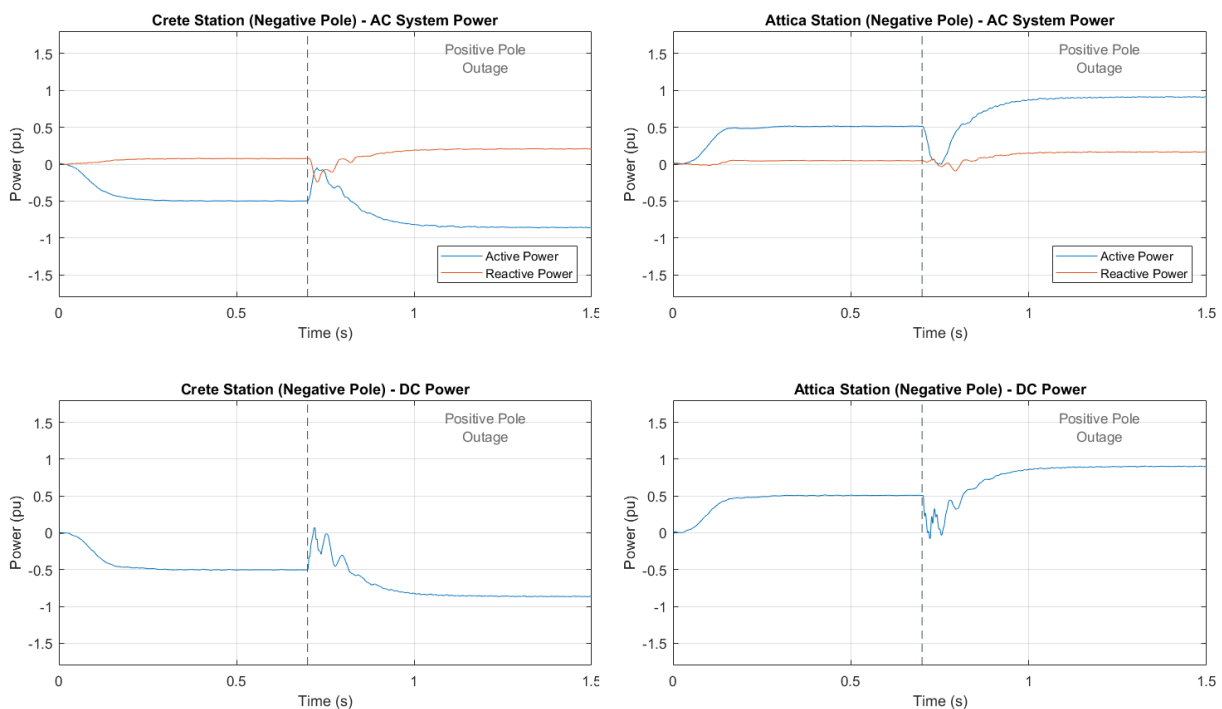
Σχήμα 6.28 Σενάριο 4: Τάσεις και Ρεύματα δικτύου και μετατροπέα. Αρνητικός πόλος Κρήτης



Σχήμα 6.29 Σενάριο 4: Τάσεις και Ρεύματα δικτύου και μετατροπέα. Αρνητικός πόλος Αττικής



Σχήμα 6.30 Σενάριο 4: Ροή ισχύος θετικού πόλου διασύνδεσης

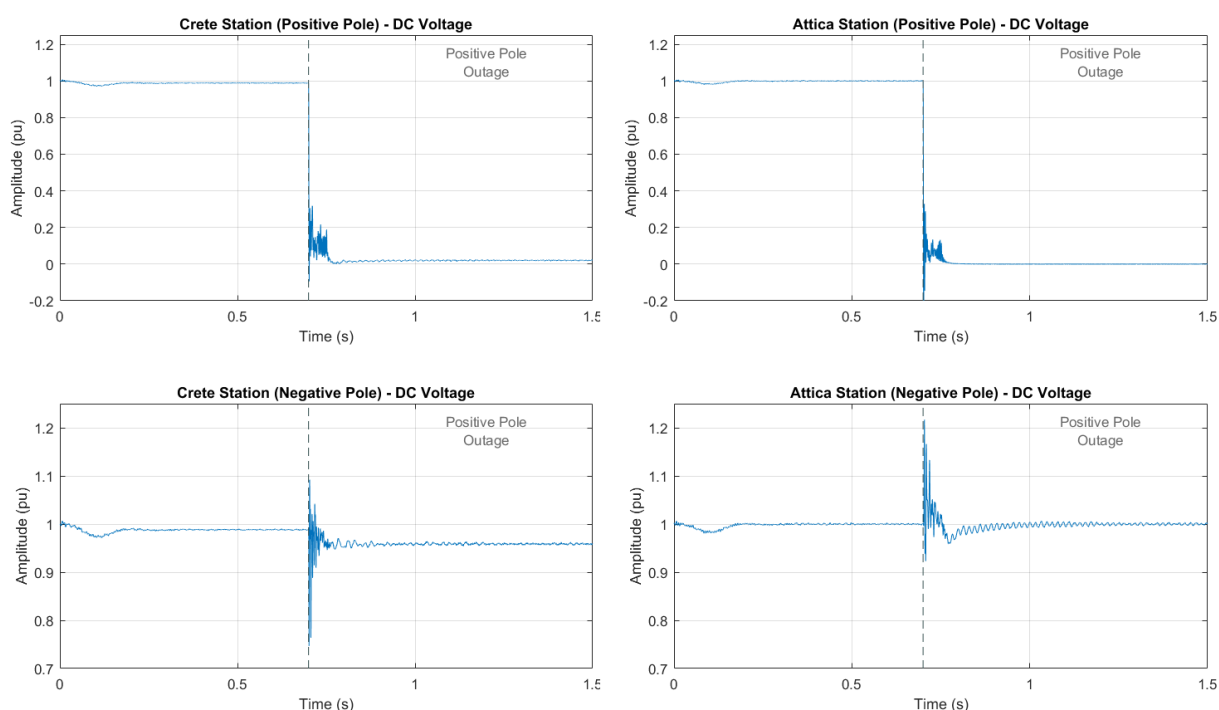


Σχήμα 6.31 Σενάριο 4: Ροή ισχύος αρνητικού πόλου διασύνδεσης

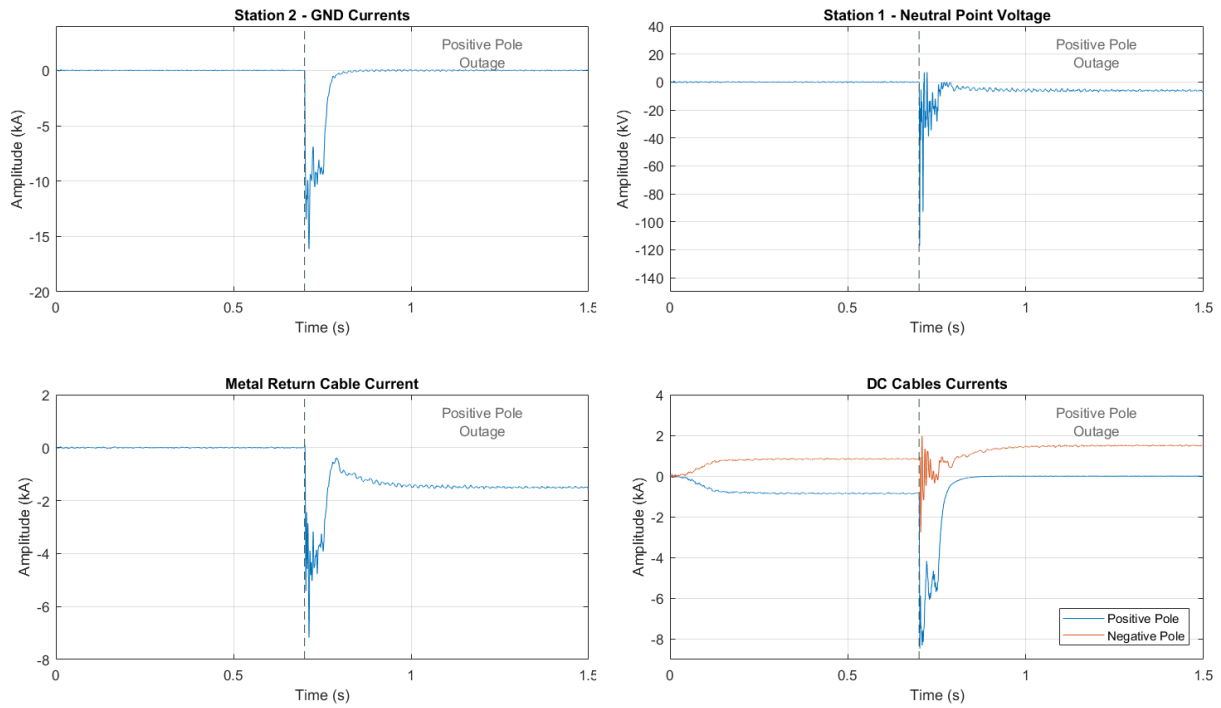
Στο Σχήμα 6.32 εικονίζονται οι DC τάσεις του θετικού και αρνητικού πόλου σε κάθε άκρο της διασύνδεσης. Στον θετικό πόλο, ο οποίος υφίσταται το βραχυκύκλωμα, όπως αναμένεται, εμφανίζεται πολύ απότομος μηδενισμός της DC τάσης. Ταυτόχρονα, η τάση στον αρνητικό πόλο της

διασύνδεσης παρουσιάζει διαταραχή περίπου 20% της ονομαστικής τιμής της, αλλά όμως σε διάστημα μικρότερο των 100ms επανέρχεται στην επιθυμητή τιμή. Αξίζει να σημειωθεί ότι λόγω πλήρους φόρτισης του ενός πόλου, μετά την απομόνωση του σφάλματος, παρατηρείται αρκετά μεγάλη πτώση τάσης στο καλώδιο υψηλής τάσης στην πλευρά της Κρήτης, περίπου ~5%.

Στο Σχήμα 6.33 παρουσιάζονται τα ρεύματα γείωσης και αγωγού επιστροφής, καθώς επίσης και τη DC τάση του τελευταίου. Από αυτό το σχήμα παρατηρείται και πάλι εμφανίζονται στιγμιαία πολύ μεγάλα ρεύματα γείωσης ($> 15 \text{ kA}$), όπως επίσης και στον αγωγό επιστροφής, όπου παρατηρείται ρεύμα αιχμής περίπου 4 φορές το ονομαστικό. Επίσης, σημαντικό είναι να παρατηρηθεί ότι η υπέρταση του αγωγού μέσης τάσης κατά τη διάρκεια, και μέχρι την απομόνωση του σφάλματος είναι πολύ υψηλή, φθάνοντας περίπου το 40% των επιπέδων τάσης λειτουργίας του συνδέσμου ($\sim 120 \text{ kV}$), προκαλώντας και πάλι προβλήματα που αφορούν τις μονώσεις του αγωγού μέσης τάσης. Μετά την απομόνωση του σφάλματος, το σύστημα συνεχίζει να λειτουργεί με επιστροφή ρεύματος μέσω το αγωγού μέσης τάσης. Παρά την ασύμμετρη φόρτιση των δύο πόλων, η ύπαρξη αγωγού επιστροφής έχει ως συνέπεια να μην υπάρχουν ρεύματα γειώσεως, κάτι που αποτελεί σημαντικό πλεονέκτημα της επιλεγείσας τοπολογίας.



Σχήμα 6.32 Σενάριο 4: DC τάσεις συνδέσμου



Σχήμα 6.33 Σενάριο 4: Ρεύματα Γείωσης, DC καλωδίων και τάση αγωγού μεταλλικής επιστροφής

7 ΣΥΝΟΨΗ - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

7.1 Ανακεφαλαίωση

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μοντελοποίηση, ο έλεγχος και η προσομοίωση της λειτουργίας ενός VSC-HVDC συνδέσμου τοπολογίας διπόλου, ο οποίος να ικανοποιεί θεμελιώδεις απαιτήσεις Κωδίκων, όπως είναι η αδιάλειπτη λειτουργία σε συνθήκες σφάλματος, και να διασφαλίζει συνέχεια της λειτουργίας κατόπιν εσωτερικών σφαλμάτων (λειτουργία N-1). Η επιλογή της τοπολογίας, της φιλοσοφίας ελέγχου και των παραμέτρων του συστήματος πραγματοποιήθηκε με κριτήριο να ανταποκρίνεται σε κάποιον βαθμό στα δεδομένα διασύνδεσης της Κρήτης, όπως αυτή έχει προγραμματιστεί από τον ΑΔΜΗΕ [1].

Αν και το συγκεκριμένο πεδίο έρευνας, της μεταφοράς ισχύος με δίκτυα HVDC, συγκεντρώνει έντονο ενδιαφέρον τα τελευταία χρόνια, η συγκεκριμένη εργασία παρουσιάζει στοιχεία πρωτοτυπίας, καθώς μελετάται λεπτομερώς η τοπολογία διπόλου, τα πλεονεκτήματα που αυτή παρουσιάζει, αλλά και προβλήματα που τη χαρακτηρίζουν, λόγω της ασυμμετρίας της, όπως αναφέρεται στην παράγραφο 2.4.

Η μοντελοποίηση του συστήματος πραγματοποιήθηκε στο λογισμικό MATLAB/Simulink. Για τους πολυεπίδεδους μετατροπείς MMC χρησιμοποιήθηκε πλήρες διακοπτικό μοντέλο, προκειμένου η απόκριση του συστήματος να είναι όσο το δυνατόν πιο ρεαλιστική, ακόμα και σε πολύ μικρή κλίμακα χρόνου. Επίσης στο Κεφάλαιο 3.5 πραγματοποιήθηκε παραμετρική ανάλυση για έναν μετατροπέα MMC, προκειμένου να διαπιστωθεί η επίδραση διαφόρων παραμέτρων, όπως ο αριθμός των επιπέδων, η μέθοδος διαμόρφωσης, η συχνότητα διαμόρφωσης και η συχνότητα εξισορρόπησης των τάσεων, στην απόκριση του μετατροπέα αλλά και στις απώλειες που αυτός παρουσιάζει.

Ο έλεγχος του συστήματος διαρθρώνεται σε τέσσερα ιεραρχικά επίπεδα, όπως παρουσιάζεται στο Κεφάλαιο 5. Στα πρώτα δύο επίπεδα, οι ελεγκτές που χρησιμοποιήθηκαν, PWM έλεγχος μετατροπέα και έλεγχος ρευμάτων στο σύγχρονο πλαίσιο αναφοράς, αποτελούν την πλέον αποδεκτή και ευρέως διαδεδομένη μέθοδο ελέγχου για μετατροπείς VSC-HVDC [8]. Στο επόμενο επίπεδο ελέγχου, έλεγχος PQ και $V_{dc}Q$, η σχεδίαση των ελεγκτών πραγματοποιήθηκε με τέτοιο τρόπο ώστε το σύστημα να ικανοποιεί βασικές απαιτήσεις των σύγχρονων Κωδίκων συστήματος, όπως η απαίτηση αδιάλειπτης λειτουργίας (FRT) και η λειτουργία N-1. Μάλιστα ο έλεγχος FRT που υιοθετήθηκε δεν απαιτεί την ύπαρξη τηλεπικοινωνιακού μέσου, αλλά δρα άμεσα και ανεξάρτητα σε κάθε σταθμό. Τηλεπικοινωνιακές μέθοδοι και αποστολή σημάτων χρησιμοποιήθηκαν μόνο για τον έλεγχο του συστήματος στο υψηλότερο ιεραρχικό επίπεδο, δηλαδή για τον προσδιορισμό των εντολών ισχύος σε κάθε πόλο του συστήματος.

Οι προσομοιώσεις του συστήματος πραγματοποιήθηκαν στο λογισμικό MATLAB/Simulink, και αφορούν διάφορες συνθήκες λειτουργίας. Πιο αναλυτικά μελετήθηκε η συμπεριφορά του συστήματος σε συνθήκες κανονικής λειτουργίας, σε καταστάσεις ταχείας αντιστροφής ισχύος, αλλά και σε περιπτώσεις σφαλμάτων στα AC δίκτυα, στους μετατροπείς και στα DC καλώδια. Σε κάθε μία από αυτές τις περιπτώσεις εξετάστηκαν χαρακτηριστικά του συστήματος όπως η ποιότητα ισχύος, η μεταβατική ευστάθεια, η ικανότητα FRT με ταυτόχρονη υποστήριξη τάσης, και η δυνατότητα λειτουργίας N-1 σε περίπτωση απώλειας ενός μετατροπέα, ή ενός DC πόλου.

Στις επόμενες παραγράφους παρουσιάζονται τα βασικά συμπεράσματα που προκύπτουν από τη μελέτη και την προσομοίωση του συστήματος, καθώς επίσης και προτάσεις για επέκταση της συγκεκριμένης εργασίας και μελλοντική έρευνα.

7.2 Συμπεράσματα

Από τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων του συστήματος όπως παρουσιάζονται στο Κεφάλαιο 6, αλλά και από τη διερεύνηση της παραγράφου 3.5 προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα:

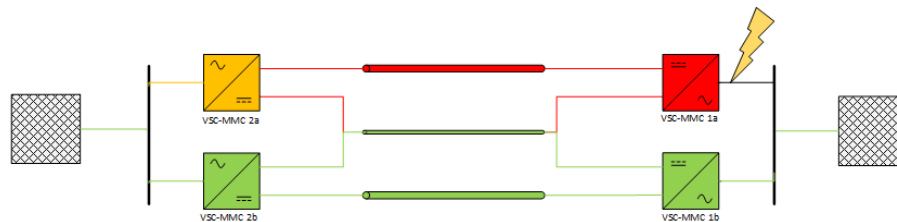
- Η χρήση πολυεπίπεδων μετατροπένων, και ειδικότερα μετατροπένων MMC, για εφαρμογές HVDC παρουσιάζει σημαντικά πλεονεκτήματα. Το σημαντικότερο πλεονέκτημα είναι το γεγονός ότι μπορούν να παρουσιάσουν πολύ μικρό αρμονικό περιεχόμενο στην έξοδό τους, δίνοντας τη δυνατότητα απόλειψης των AC φίλτρων. Όπως παρουσιάζεται στην παράγραφο 3.5, ο συντελεστής THD της τάσης σε τέτοιους μετατροπείς μειώνεται σημαντικά καθώς αυξάνεται ο αριθμός των επιπέδων, χωρίς να απαιτείται πολύ υψηλή διακοπτική συχνότητα. Μάλιστα, η μέθοδος PD-PWM που χρησιμοποιήθηκε διατηρεί τη διακοπτική συχνότητα κάθε υπομονάδας σε επίπεδα λίγο πάνω από τη θεμελιώδη συχνότητα. Ωστόσο, βασικό μειονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι η απαίτηση ύπαρξης αλγορίθμου εξισορρόπησης της τάσης των πυκνωτών, ώστε να επιτευχθεί ίδια φόρτιση για κάθε υπομονάδα.
- Η κλασική μέθοδος συγχρονισμού με το δίκτυο μέσω διάταξης κλειδώματος φάσης (PLL), σε συνδυασμό με τη χρησιμοποίηση φίλτρων δεύτερης τάξης για την εξαγωγή της θετικής ακολουθίας της τάσης δικτύου, παρουσιάζουν ικανοποιητική απόκριση ακόμα και σε συνθήκες διαταραχών στο AC δίκτυο, εξασφαλίζοντας ακριβή εκτίμηση της φάσης του δικτύου. Ωστόσο, όπως αναφέρεται και στην παράγραφο 6.3β, η αποτελεσματικότητα αυτού του σχήματος εξαρτάται και από την ισχύ βραχυκύκλωσης του δικτύου στο σημείο σύνδεσης. Ενδεικτικά, η μεταβατική απόκριση σε συνθήκες σφάλματος στην πλευρά της Κρήτης παρουσιάζει μικρές ταλαντώσεις, σε αντίθεση με την περίπτωση σφάλματος στην πλευρά της Αττικής, όπου το δίκτυο είναι πιο ισχυρό.
- Ο ελεγκτής ρεύματος στο σύγχρονο πλαίσιο αναφοράς είναι η πλέον κατάλληλη λύση για τον ανεξάρτητο έλεγχο της ροής ενεργού και αέργου ισχύος στο δίκτυο σε συνθήκες κανονικής λειτουργίας. Επιπλέον, η ενσωμάτωση του ελεγκτή ρεύματος αρνητικής ακολουθίας καθιστά το σύστημα ευσταθές και ελέγξιμο ακόμα και σε συνθήκες ασύμμετρων σφαλμάτων. Όπως φαίνεται από τις κυματομορφές των ρευμάτων που εικονίζονται στο Κεφάλαιο 6, τα ρεύματα του μετατροπέα διατηρούν τη συμμετρία τους και τη μέγιστη τιμή τους στο 1 αμ παρά την ασυμμετρία της τάσης στην έξοδο του μετατροπέα, η οποία οφείλεται σε κάποιο βραχυκύκλωμα.

Εξαίρεση στα παραπάνω αποτελεί η περίπτωση AC σφαλμάτων προς γη στην πλευρά του μετατροπέα και DC σφαλμάτων, όπου ο ελεγκτής αδυνατεί να ελέγξει τα ρεύματα σφάλματος που ανταλλάσσονται μεταξύ της AC και DC πλευράς.

- Ο έλεγχος του συστήματος σε ανώτερο επίπεδο, και τα σχήματα FRT, εξασφαλίζουν την αδιάλειπτη λειτουργία του συστήματος. Ειδικότερα, όπως παρουσιάζεται στην παράγραφο 6.3, η διασύνδεση εξακολουθεί να λειτουργεί κατά τη διάρκεια AC σφαλμάτων, τόσο στο δίκτυο της Αττικής όσο και στο δίκτυο της Κρήτης, ενεργοποιώντας παράλληλα και την

υποστήριξη τάσης μέσω έγχυσης άεργου συνιστώσας ρεύματος, όπως επιβάλλεται από τους Κώδικες. Παράλληλα, απουσία τηλεπικοινωνιακών σημάτων, επιτρέπει την ταχεία προσαρμογή του συστήματος, έτσι ώστε να εξασφαλίζεται η διατήρηση της DC τάσης του συνδέσμου σε επίπεδα $\pm 10\%$. Μάλιστα μετά τα πρώτα 100 ms από την εμφάνιση του σφάλματος η τάση περιορίζεται ακόμα περισσότερο, στα όρια που ορίζει ο ελεγκτής deadband της DC τάσης.

- Στην παράγραφο 6.4 επιβεβαιώνεται ότι το βασικό πλεονέκτημα της τοπολογίας διπόλου είναι η ανεξάρτητη λειτουργία των δύο πόλων, δίνοντας τη δυνατότητα λειτουργίας N-1. Πιο συγκεκριμένα, σε περίπτωση απώλειας ενός μετατροπέα οι υπόλοιποι μετατροπείς μπορούν να συνεχίσουν τη λειτουργία τους ανεξάρτητα, όπως εικονίζεται στο επόμενο σχήμα. Οι μετατροπείς του υγιούς πόλου συνεχίζουν να διακινούν ενεργό ισχύ, ενώ ο μετατροπέας του υπό σφάλμα πόλου, που βρίσκεται στο απέναντι άκρο της διασύνδεσης, μπορεί να συνεχίσει να λειτουργεί ανεξάρτητα σαν ενεργός αντισταθμιστής (STATCOM).

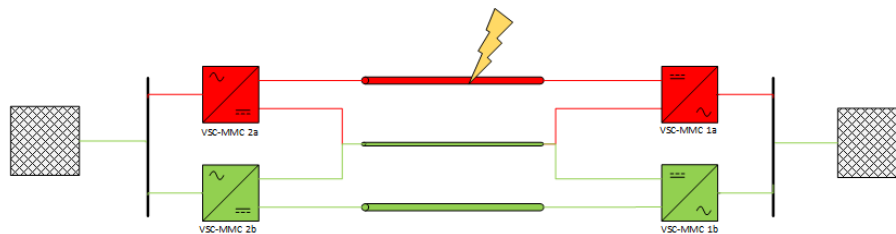


Legend: Active Power Flow, STATCOM, Outage

Σχήμα 7.1 Λειτουργία HVDC διασύνδεσης τοπολογίας διπόλου σε περίπτωση απώλειας μετατροπέα

Μάλιστα σημαντικό συμπέρασμα είναι το γεγονός ότι, εάν η διασύνδεση έχει διαστασιολογηθεί έτσι ώστε να έχει επαρκή εφεδρεία ισχύος, δηλαδή έχει προβλεφθεί ο σύνδεσμος να λειτουργεί σε συνθήκες φόρτισης έως 50% της ονομαστική ικανότητας, τότε ο υγιής πόλος, σε πολύ μικρό χρόνο, της τάξεως των 250 ms, μπορεί να αναλάβει το φορτίο του απολεσθέντος πόλου, διατηρώντας τη συνολική διακινούμενη ισχύ σταθερή, στα επίπεδα προ του σφάλματος.

- Παρόμοια συμπεράσματα προκύπτουν και από τα αποτελέσματα της παραγράφου 6.5, όπου μελετάται η απώλεια ενός DC καλωδίου. Και σε αυτήν την περίπτωση, ο υγιής πόλος συνεχίζει να λειτουργεί κανονικά, αναλαμβάνοντας τη συνολική φόρτιση του συνδέσμου, με τη διαφορά ότι σε αυτήν την περίπτωση πρέπει να αποσυνδεθούν και οι δύο μετατροπείς στα άκρα του καλωδίου υπό σφάλμα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 7.2.



Legend: Active Power Flow, Outage

Σχήμα 7.2 Λειτουργία HVDC διασύνδεσης τοπολογίας διπόλου σε περίπτωση απώλειας καλωδίου

- Στις παραπάνω περιπτώσεις, λόγω της απώλειας του ενός πόλου, η επιστροφή των ρευμάτων στην DC πλευρά πραγματοποιείται μέσω του μεταλλικού αγωγού επιστροφής. Όπως φαίνεται και από τα αντίστοιχα σχήματα, το πλεονέκτημα της τοπολογίας αυτής, έναντι της τοπολογίας διπόλου με ηλεκτρόδια γείωσης, είναι τα πολύ μικρά ρεύματα γείωσης, ακόμα και στην παραπάνω περίπτωση ασύμμετρης φόρτισης. Ταυτόχρονα, η πτώση τάσης στον αγωγό επιστροφής κρίνεται ανεκτή, καθώς είναι της τάξεως των $5\text{ kV} \sim 1.6\%$. Ωστόσο, τα μεταβατικά φαινόμενα κατά την εκδήλωση σφαλμάτων προκαλούν σημαντικές υπερτάσεις στον αγωγό επιστροφής, της τάξεως των 100 kV , κάτι που δημιουργεί την ανάγκη κατάλληλης μόνωσής του.
- Η τοπολογία διπόλου εξασφαλίζει, μεν, την ικανότητα λειτουργίας N-1, αλλά από την άλλη συνοδεύεται από ορισμένα προβλήματα. Το γεγονός ότι, αναπόφευκτα, όλες οι τοπολογίες διπόλου είναι ασύμμετρες έχει ως αποτέλεσμα στη φασική τάση εξόδου του μετατροπέα να εμφανίζεται DC συνιστώσα. Ως εκ τούτου, αφενός δημιουργείται καταπόνηση στους Μ/Σ, αλλά κυρίως υπάρχει τροφοδότηση σφαλμάτων μεταξύ της DC και της AC πλευράς, όπως αναπτύχθηκε στις παραγράφους 6.4 και 6.5, με μεγάλα DC ρεύματα τα οποία θέτουν σε κίνδυνο τα ημιαγωγικά στοιχεία. Αξίζει να σημειωθεί ότι σε περίπτωση σφάλματος μεταξύ φάσεων στην AC πλευρά του μετατροπέα δεν υπάρχει τροφοδότηση του σφάλματος από την DC πλευρά, περιορίζοντας τα ρεύματα σφάλματος του μετατροπέα στα ονομαστικά μεγέθη.

7.3 Προτάσεις για περαιτέρω μελέτη

Το αντικείμενο μελέτης της παρούσας εργασίας περιλαμβάνει πολλά θέματα τα οποία χρήζουν περαιτέρω διερεύνησης. Τα θέματα αυτά αφορούν τόσο την εξέλιξη της τεχνολογίας VSC-HVDC, όσο και λεπτομερέστερα ζητήματα που αφορούν τη διασύνδεση της Κρήτης.

Βασική επέκταση της συγκεκριμένης εργασίας θα μπορούσε να είναι η πιο ακριβής μοντελοποίηση του ΣΗΕ της Κρήτης και της παράλληλης AC διασύνδεσης που επίσης έχει προγραμματιστεί από τον ΑΔΜΗΕ [1], με σκοπό τη μελέτη της μεταβατικής συμπεριφοράς του συστήματος σε περίπτωση σφαλμάτων, και ειδικά σε περίπτωση απώλειας του ενός πόλου. Παρόμοια δουλειά έχει πραγματοποιηθεί στην [49], για HVDC διασύνδεση τοπολογίας συμμετρικού μονόπολου, χωρίς όμως να μελετηθούν σφάλματα στους μετατροπείς ή κατά μήκος της HVDC διασύνδεσης.

Παράλληλα θα μπορούσε να τροποποιηθεί το σχήμα ελέγχου των μετατροπέων έτσι ώστε να μπορεί να λειτουργήσει και σε περιπτώσεις νησιδοποίησης του συστήματος της Κρήτης. Μια τέτοια μέθοδος ελέγχου είναι η μέθοδος Power Synchronization Control (PSC) που προτείνεται στην [12].

Όπως προκύπτει από την ανάλυση που πραγματοποιήθηκε στην παρούσα εργασία, η τοπολογία διπόλου έχει ως βασικό μειονέκτημα την τροφοδότηση σφαλμάτων από την DC στην AC πλευρά, και αντίστροφα, τα οποία προκαλούν μεγάλα DC ρεύματα που είναι δύσκολο να διακοπούν με συμβατικούς AC διακόπτες. Ως εκ τούτου, ενδιαφέρουσα επέκταση θα ήταν η εξέταση της δυνατότητας χρησιμοποίησης γρήγορων DC διακοπών. Καινοτόμες λύσεις DC διακοπών προτείνονται ήδη στην αγορά από κατασκευαστές, όπως η ABB [50] και η Siemens [4], αλλά οι λύσεις αυτές απέχουν πολύ από το να χαρακτηριστούν δοκιμασμένες και αποδοτικές.

Άλλη ενδιαφέρουσα προέκταση της παρούσας εργασίας θα ήταν η μελέτη πολυτερματικής διασύνδεσης με χρήση της τοπολογίας διπόλου. Βεβαίως, λόγω της πολυπλοκότητας προσομοίωσης πολλών πολυεπίπεδων μετατροπών, για να πραγματοποιηθεί προσομοίωση ενός πολυτερματικού δικτύου, είναι αναγκαίο να αναπτυχθεί μοντέλο μέσης τιμής, όπως αυτά που προτείνονται στην βιβλιογραφία [12], που όμως να λαμβάνει υπόψιν την ασυμμετρία της τοπολογίας.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] «Δεκαετής Πρόγραμμα Ανάπτυξης Συστήματος Μεταφοράς 2017-2026,» 2016. [Ηλεκτρονικό]. Available: http://www.admie.gr/fileadmin/groups/EDAS_DSS/MASM/DPA_2017-2026_Final/DPA_2017-2026.pdf.
- [2] «Ηλεκτρική Διασύνδεση EuroAsia Interconnector,» October 2017. [Ηλεκτρονικό]. Available: <http://www.euroasia-interconnector.com/>.
- [3] «HVDC Light It's time to connect,» 2013. [Ηλεκτρονικό]. Available: <http://new.abb.com/docs/default-source/ewea-doc/hvdc-light.pdf>.
- [4] «High Voltage Direct Current Transmission - Proven Technology for Power Exchange,» 2011. [Ηλεκτρονικό]. Available: https://www.energy.siemens.com/ru/pool/hq/power-transmission/HVDC/HVDC_Proven_Technology.pdf.
- [5] M. Davies, M. Dommaschk, J. Dorn, J. Lang, D. Retzmann και D. Soerangr, «HVDC PLUS - Basics and Principle of Operation,» 2009. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.energy.siemens.com/br/pool/br/transmissao-de-energia/transformadores/hvdc-plus-basics-and-principle-of-operation.pdf>.
- [6] M. Wang και M. Barnes, «Power Flow Algorithms for Multi-Terminal VSC-HVDC With Droop Control,» *IEEE Transactions on Power Systems*, τόμ. 29, αρ. 4, pp. 1721 - 1730, 2014.
- [7] A. Egea-Alvarez, J. Beerten, D. Van Hertem και O. Gomis-Bellmunt, «Primary and secondary power control of multiterminal HVDC grids,» σε *AC and DC Power Transmission (ACDC 2012), 10th IET International Conference*, 2012.
- [8] M. Barnes και A. Beddard, «Voltage Source Converter HVDC Links - The state of the Art and Issues Going Forward,» *Energy Procedia*, τόμ. 24, pp. 108-122, 2012.
- [9] «Grid Code - High and extra high voltage,» TenneT TSO GmbH, Germany, 2012.
- [10] «ENTSO-E Draft Network Code on High Voltage Direct Current Connections and DC-connected Power Park Modules,» ENTSO-E, Brussels, 2015.
- [11] «Requirements for Offshore Grid Connections in the Grid,» TenneT TSO GmbH, Germany, 2012.
- [12] S. Nanou, «Συμβολή στην Ανάπτυξη Τεχνικών Ελέγχου για Συστήματα Διασύνδεσης Υψηλής Τάσης, Συνεχούς Ρεύματος, Τύπου Πηγής Τάσης (VSC-HVDC) Θαλάσσιων Αιολικών Πάρκων και Νησιών,» Ph. D Thesis, School of Electrical & Computer Engineer, NTUA, Athens, 2016.
- [13] «ENTSO-E business glossary,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://docstore.entsoe.eu/data/data-portal/glossary/Pages/home.aspx>.
- [14] «Nordic HVDC Utilization and Unavailability Statistics,» ENTSO-E, Brussels, 2014.
- [15] «Μελέτη Ανάπτυξης Συστήματος μεταφοράς 2008-2012,» Ιούλιος 2008. [Ηλεκτρονικό]. Available: http://www.rae.gr/old/K1/MASM2008-2012_draft.pdf.

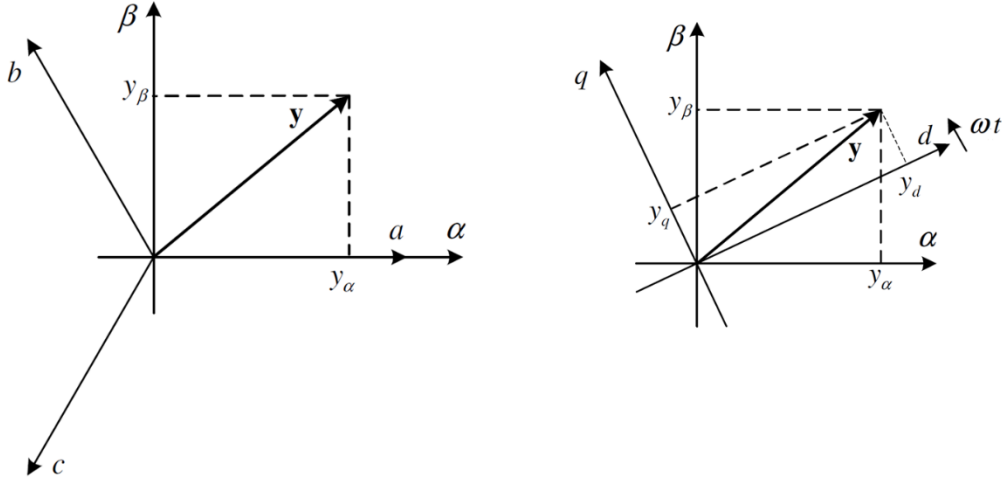
- [16] «Δεκαετής Πρόγραμμα Ανάπτυξης Συστήματος Μεταφοράς 2014-2023,» 2014. [Ηλεκτρονικό]. Available: http://www.admie.gr/uploads/media/DPA_2015-2024_Prokatarktiko_Schedio_Kyrio_teychos.pdf.
- [17] D. Petropoulos, Voumvoulakis και N. Hatziaargyriou, «Dynamic stability analysis of HVDC interconnection of autonomous power system of Crete island,» σε *MedPower*, Athens, 2014.
- [18] «Voltage Source Converter (VSC) HVDC for Power Transmission - Economic Aspects and Comparison with other AC and DC Technologies,» σε *Technical Brochure 492, Cigre Session B4-46*, 2014.
- [19] «Guide for the Development of Models for HVDC Converters in a HVDC Grid,» σε *Technical Brochure 604, Cigre Working Group B4.57*, 2014.
- [20] «Recommended Voltages for HVDC Grids,» σε *Technical Brochure 684, Cigre Session B4/C1.65*, 2017.
- [21] E. Kontos, R. Texeira Pinto, S. Rodrigues και P. Bauer, «Impact of HVDC Transmission System Topology on Multiterminal DC Network Faults,» *IEEE Transactions on Power Delivery*, τόμ. 30, αρ. 2, pp. 844-852, April 2015.
- [22] N. Florentzou, V. Agelidis και G. Demetriades, «VSC-Based Power Transmission Systems: An Overview,» *IEEE Transactions on Power Electronics*, τόμ. 24, αρ. 3, pp. 592-602, 2009.
- [23] M. Hook και C. Jones, «Review of Worldwide Voltage Source Converter (VSC) High Voltage Direct Current (HVDC) Technology Installations,» Sinclair Knight Merz (SKM), 2013.
- [24] M. Ardelean και P. Minnebo, «HVDC Submarine Power Cables,» σε *Joint Research Center*, 2015.
- [25] M. McGranchan, «Update on IEC 61000-3-6: Harmonic Emission Limits for Customers Connected to MV, HV, and EHV,» σε *Transmission and Distribution Conference and Exhibition, 2005/2006 IEEE PES*, Dallas, 2006.
- [26] M. Bennet, N. Dhaliwal και A. Leirbukt, «A Survey of the Reliability of HVDC Systems Throughout the World During 2009 – 2010,» Cigre B4-113, Paris, 2012.
- [27] S. Nanou και S. Papathanasioou, «Evaluation of a communication-based fault ride-through scheme for offshore wind farms connected through high-voltage DC links based on voltage source converter,» *IET Renewable Power Generation*, τόμ. 9, αρ. 8, pp. 882-891, 2015.
- [28] S. Nanou, G. Patsakis και S. Papathnasiou, «Assessment of communication-independent grid code compatibility solutions for VSC–HVDC connected offshore wind farms,» *Electric Power Systems Research*, τόμ. 121, pp. 38-51, 2015.
- [29] B. Silva, C. Moreira και H. Leite, «Control Strategies for AC Fault Ride Through in Multiterminal HVDC Grids,» *IEEE Transactions on Power Delivery*, τόμ. 29, αρ. 1, pp. 395-405, 2014.
- [30] S. M. Mueeen, R. Takahashi και J. Tamura, «Operation and Control of HVDC-Connected Offshore Wind Farm,» *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, τόμ. 1, αρ. 1, pp. 30-37, 2010.

- [31] J. Rocabert, A. Luna και F. Blaabjerg, «Control of Power Converters in AC Microgrids,» *IEEE Transactions on Power Electronics*, τόμ. 27, αρ. 11, pp. 4734 - 4749, 2012.
- [32] P. Rodriguez, A. Luna και R. S. Munoz-Angular, «A Stationary Reference Frame Grid Synchronization System for Three-Phase Grid-Connected Power Converters Under Adverse Grid Conditions,» *IEEE Transactions on Power Electronics*, τόμ. 27, αρ. 1, pp. 99-112, 2012.
- [33] M. Guan και Z. Xu, «Modeling and Control of a Modular Multilevel Converter-Based HVDC System Under Unbalanced Grid Conditions,» *IEEE Transactions on Power Electronics*, τόμ. 27, αρ. 12, pp. 4858-4867, 2012.
- [34] D. Siemaszko, «Positive and negative sequence control for power converters under weak unbalanced networks,» σε *Electrical Systems for Aircraft, Railway and Ship Propulsion (ESARS)*, Bologna, Italy, 2012.
- [35] S. Debnath, S. Qin, Bahrani και B, «Operation, Control, and Applications of the Modular Multilevel Converter: A Review,» *IEEE Transactions on Power Electronics*, τόμ. 30, αρ. 1, pp. 37-53, 2015.
- [36] A. Hassanpoor, S. Norrga και H.-P. Nee, «Evaluation of different carrier-based PWM methods for modular multilevel converters for HVDC application,» σε *IECON 2012 - 38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society*, Montreal, QC, Canada, 2014.
- [37] R. Lizana F., M. A. Perez και J. Rodriguez, «DC voltage balance control in a modular multilevel cascaded converter,» σε *2012 IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, Hangzhou, China, 2012.
- [38] G. T. Son, H.-J. Lee και T. S. Nam, «Design and Control of a Modular Multilevel HVDC Converter With Redundant Power Modules for Noninterruptible Energy Transfer,» *IEEE Transactions on Power Delivery*, τόμ. 27, αρ. 3, pp. 1611-1619, 2012.
- [39] K. J. Astrom και I. Runqwis, «Integrator Windup and How to Avoid It,» σε *American Control Conference*, Pittsburgh, PA, USA, 1989.
- [40] A. Ghoshal και V. John, «Anti-windup, Proportional resonant control, PI control, current control,» σε *National Power Electronics Conference*, Roorkee, India, 2010.
- [41] F. Padula, V. Antonio και M. Pagnoni, «On the anti-windup schemes for fractional-order PID controllers,» σε *Proceedings of 2012 IEEE 17th International Conference on Emerging Technologies & Factory Automation*, Krakow, Poland, 2013.
- [42] H.-B. Shin και J.-G. Park, «Anti-Windup PID Controller With Integral State Predictor for Variable-Speed Motor Drives,» *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, τόμ. 59, αρ. 3, pp. 1509-1516, 2012.
- [43] S. Kumar και R. Negi, «A comparative study of PID tuning methods using anti-windup controller,» σε *2nd International Conference on Power, Control and Embedded Systems*, Allahabad, India, 2012.
- [44] «Why HVDC?,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <http://new.abb.com/systems/hvdc/why-hvdc>.

- [45] «HVDC Technical advantages,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <http://new.abb.com/systems/hvdc/why-hvdc/technical-advantages>.
- [46] «HVDC Economic and environmental advantages,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <http://new.abb.com/systems/hvdc/why-hvdc/economic-and-environmental-advantages>.
- [47] Σ. Μανιάς, Ηλεκτρονικά Ισχύος, Αθήνα: ΣΥΜΕΩΝ, 2014.
- [48] «60-500 kV High Voltage Underground Power Cables, XLPE insulated cables,» [Ηλεκτρονικό]. Available: https://www.nexans.com/Corporate/2013/60-500_kV_High_Voltage_full_BD2.pdf.
- [49] Δ. Μουτεβελής, «Μοντελοποίηση και Έλεγχος Συστημάτων VSC-HVDC για Διασυνδέσεις Νησιών - Εφαρμογή στην Κρήτη,» Διπλωματική Εργασία, Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών κ' Μηχανικών Υπολογιστών, ΕΜΠ, Αθήνα, 2017.
- [50] M. Callavik, A. Blomberg, J. Häfner και B. Jacobson, «The Hybrid HVDC Breaker, An innovation breakthrough enabling reliable HVDC grids,» *ABB Grid Systems, Technical Paper*, 2012.
- [51] Σ. Μανιάς, Βιομηχανικά Ηλεκτρονικά, Αθήνα: ΣΥΜΕΩΝ, 2013.
- [52] P. Kundur, N. Balu και M. Lauby, *Power System Stability and Control*, McGraw-Hill Education, 1994.
- [53] J. Grainger, W. Stevenson και G. Chang, *Power System Analysis*, McGraw-Hill Education, 2016.
- [54] Κ. Βουρνάς και Γ. Κονταξής, Εισαγωγή στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας, Αθήνα: Εκδόσεις ΣΥΜΜΕΤΡΙΑ, 2010.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α Μετασχηματισμός Park

Σε ένα ηλεκτρικό δίκτυο οι τάσεις και τα ρεύματα είναι τριφασικά εναλλασσόμενα μεγέθη, που εξαρτώνται από τη συχνότητα λειτουργίας. Ο έλεγχος ενός μετατροπέα με απευθείας χρήση αυτών των μεγεθών θα αποτελούσε ένα πολύ δύσκολο και πολύπλοκο πρόβλημα, ενώ θα ήταν αδύνατη η χρήση των πλέον διαδεδομένων PID ελεγκτών, οι οποίοι είναι χρήσιμοι για την εξάλειψη σφαλμάτων σε DC μεγέθη. Για τον λόγο οι εναλλασσόμενες κυματομορφές τάσεων και ρευμάτων δικτύου μετασχηματίζονται σε συνεχή σταθερά μεγέθη με τη χρήση του μετασχηματισμού Park.



Σχήμα Α. 1 Μετασχηματισμός τριφασικών μεγεθών στο στατό α-β πλαίσιο αναφοράς (αριστερά) και από το στατό α-β στο στρεφόμενο d-q πλαίσιο αναφοράς. Πηγή: [12, p. 205]

Όπως φαίνεται στο παραπάνω σχήμα, οποιαδήποτε τριφασική μεταβλητή y_{abc} ενός εναλλασσόμενου μεγέθους μπορεί να μετασχηματιστεί είτε σε ένα στατό πλαίσιο α-β, στο οποίο αναπαρίσταται μέσω ενός διασύνσματος δύο χρονικά μεταβαλλόμενων μεγεθών (μετασχηματισμός Clarke), είτε σε ένα στρεφόμενο πλαίσιο αναφοράς d-q, στο οποίο αναπαρίσταται μέσω δύο συνεχών, υπό την προϋπόθεση ότι το πλαίσιο στρέφεται με τη συχνότητα του δικτύου, μεγεθών (μετασχηματισμός Park). Οι εξισώσεις του ορθού και του αντίστροφου μετασχηματισμού Park δίνονται παρακάτω:

$$T_{dq0} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta + 2\pi/3) \\ -\sin \theta & -\sin(\theta - 2\pi/3) & -\sin(\theta + 2\pi/3) \\ 1/2 & 1/2 & 1/2 \end{bmatrix}$$

$$T_{dq0}^{-1} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 1 \\ \cos(\theta - 2\pi/3) & -\sin(\theta - 2\pi/3) & 1 \\ \cos(\theta + 2\pi/3) & -\sin(\theta + 2\pi/3) & 1 \end{bmatrix}$$

, όπου θ είναι η φάση το δικτύου που υπολογίζεται ως το ολοκλήρωμα της γωνιακής συχνότητας $\int \omega dt$. Όπως γίνεται εμφανές, σε ένα συμμετρικό τριφασικό σύστημα το άθροισμα των τριφασικών μεταβλητών είναι πάντα μηδέν, οπότε και η Τρίτη συνιστώσα του μετασχηματισμού Park θα είναι μηδενική.

Ο μετασχηματισμός Clarke αποτελεί υποπερίπτωση του μετασχηματισμού Park στην περίπτωση που το πλαίσιο στρέφεται με μηδενική συχνότητα, δηλαδή $\theta = 0$.

Ένας μετασχηματισμός συνιστωσών θα πρέπει να διατηρεί και το αναλλοίωτο της μεταφερόμενης ισχύος. Η στιγμιαία ισχύς ενός τριφασικού συστήματος εκφράζεται ως εξής:

$$p_{abc} = v \cdot i = [v_a \ v_b \ v_c] \cdot \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = v_a i_a + v_b i_b + v_c i_c$$

Από την παραπάνω εξίσωση και τη χρήση του αντίστροφου μετασχηματισμού Park λαμβάνουμε τα εξής:

$$\begin{aligned} p_{abc} &= [v_a \ v_b \ v_c] \cdot \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = (T_{dq0}^{-1}(v_{dq0}))^T \cdot T_{dq0}^{-1}(i_{dq0}) = (T_{dq0}^{-1} \cdot v_{dq0})^T \cdot T_{dq0}^{-1} \cdot i_{dq0} \\ &= v_{dq0}^T \cdot (T_{dq0}^{-1})^T \cdot T_{dq0}^{-1} \cdot i_{dq0} = v_{dq0}^T \cdot \begin{bmatrix} \frac{3}{2} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{3}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 3 \end{bmatrix} \cdot i_{dq0} = \frac{3}{2} (v_d i_d + v_q i_q + 2v_0 i_0) \\ &= p_{dq0} \end{aligned}$$

Αντίστοιχα για την άεργο ισχύ ισχύει:

$$\begin{aligned} q_{abc} &= \frac{1}{\sqrt{3}} ((v_b - v_c)i_a + (v_c - v_a)i_b + (v_a - v_b)i_c) = \frac{1}{\sqrt{3}} \left(\begin{bmatrix} 0 & 1 & -1 \\ 1 & 0 & 1 \\ 1 & -1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \right)^T \cdot \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \\ &= \frac{1}{\sqrt{3}} [v_a \ v_b \ v_c] \cdot \begin{bmatrix} 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \\ 1 & -1 & 0 \end{bmatrix}^T \cdot \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \\ &= \frac{1}{\sqrt{3}} (T_{dq0}^{-1}(v_{dq0}))^T \begin{bmatrix} 0 & -1 & 1 \\ 1 & 0 & -1 \\ -1 & 1 & 0 \end{bmatrix} T_{dq0}^{-1} \cdot i_{dq0} \\ &= \frac{1}{\sqrt{3}} v_{dq0}^T \cdot (T_{dq0}^{-1})^T \begin{bmatrix} 0 & -1 & 1 \\ 1 & 0 & -1 \\ -1 & 1 & 0 \end{bmatrix} T_{dq0}^{-1} \cdot i_{dq0} \\ &= \frac{1}{\sqrt{3}} v_{dq0}^T \cdot \begin{bmatrix} 0 & -\frac{3\sqrt{3}}{2} & 0 \\ \frac{3\sqrt{3}}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot i_{dq0} = \frac{1}{\sqrt{3}} [v_d \ v_q \ v_0] \begin{bmatrix} -\frac{3\sqrt{3}}{2} i_q \\ \frac{3\sqrt{3}}{2} i_d \\ 0 \end{bmatrix} \\ &= \frac{3}{2} (v_d i_q - v_q i_d) = q_{dq0} \end{aligned}$$

Οι σταθερές που εμφανίζονται στις παραπάνω εξισώσεις δηλώνουν την ανάγκη επιλογής κατάλληλης βάσης ισχύος και τάσης στο ανά μονάδα σύστημα. Εάν σαν βάση επιλεχθεί το πλάτος των φασικών κυματομορφών τάσης και ρεύματος τότε ισχύουν τα εξής:

$$V_{b,dq} = V_{\phi}^{peak} = \sqrt{\frac{2}{3}} V_{\pi}^{rms}, \text{ και } I_{b,dq} = I_{\gamma\rho}^{peak} = \sqrt{\frac{2}{3}} \frac{S_b}{V_{\pi}^{rms}} =$$

τότε ισχύει ότι:

$$S_{b,dq} = V_{dq} I_{dq} = \frac{2}{3} S_b$$

Άρα οι εξισώσεις ισχύος στο πλαίσιο dq θεωρώντας το ανά μονάδα σύστημα γίνονται:

$$\begin{aligned} p_{dq0}^{pu} &= v_d^{pu} i_d^{pu} + v_q^{pu} i_q^{pu} + 2v_0^{pu} i_0^{pu}, \\ q_{dq0}^{pu} &= v_d^{pu} i_q^{pu} - v_q^{pu} i_d^{pu} \end{aligned}$$

Από τις παραπάνω εξισώσεις θεμελιώνεται η αρχή ανεξαρτήτου ελέγχου ροής ενεργού και αέργου ισχύος. Απαραίτητη προϋπόθεση για να συμβεί αυτό είναι το στρεφόμενο πλαίσιο αναφοράς να λειτουργεί με τον άξονα d ευθυγραμμισμένο με τον φασιθέτην της τάσης δικτύου, ή αλλιώς να είναι μηδενική η q συνιστώσα της τάσης δικτύου, κάτι που επιτυγχάνεται μέσω του συστήματος συγχρονισμού με το δίκτυο.

Υπό τις παραπάνω προϋποθέσεις, με την επιπλέον παραδοχή ότι το σύστημα είναι συμμετρικό, οι ισχύς υπολογίζεται με τους παρακάτω τελικούς τύπους:

$$p_{dq0}^{pu} = v_d^{pu} i_d^{pu}, \quad q_{dq0}^{pu} = v_d^{pu} i_q^{pu}$$

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β Ηλεκτρικά Χαρακτηριστικά Εξεταζόμενου Συστήματος

Παράμετρος	Τιμή
Ονομαστική Συχνότητα AC δικτύων	50 Hz
Ισχύς βραχυκύκλωσης ΣΗΕ Αττικής	20000 MVA
Ισχύς βραχυκύκλωσης ΣΗΕ Κρήτης	4000 MVA
Ονομαστική τάση δικτύου Αττικής	400 kV
Ονομαστική τάση δικτύου Κρήτης	150 kV
Ονομαστική Τάση Εξόδου μετατροπών	150 kV
Βάση ισχύος (S_b)	500 MVA
Ονομαστική ισχύς μετατροπών	500 MVA
Ονομαστική ισχύς μετασχηματιστών	550 MVA
Αυτεπαγωγή σύνδεσης με το Δίκτυο	0.15 αμ
Αντίσταση σύνδεσης με το Δίκτυο	0.0015 αμ
Ονομαστική τάση DC συνδέσμου	± 300 kV
Μήκος HVDC συνδέσμου	380 km
Αντίσταση DC καλωδίου	0.011 Ω/km
Αυτεπαγωγή DC καλωδίου	0.112 mH/km
Χωρητικότητα DC καλωδίου	0.185 μF/km
Αριθμός υπομονάδων μετατροπέα MMC	10
Χωρητικότητα υπομονάδας μετατροπέα	640 μF
Αυτεπαγωγή σειράς σκέλους μετατροπέα	33 mH

Πίνακας Π. 1 Ηλεκτρικά Χαρακτηριστικά συστήματος

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ Παράμετροι Ελεγκτών

Παράμετρος	Τιμή
PI ελεγκτής ρεύματος	$0.4+0.4/0.005s$
Κορεσμός PI ελεγκτή ρεύματος	$[-1, 1] pu$
Κέρδος anti-windup ελεγκτή ρεύματος	25
PI ελεγκτής DC τάσης	$4.8+1/0.003s$
Κορεσμός PI ελεγκτή DC τάσης	$[-1.05, 1.05] pu$
Κέρδος anti-windup ελεγκτή DC τάσης (k_b)	50
Κέρδος tracking ελεγκτή DC τάσης (k_t)	100
PI ελεγκτής ενεργού ισχύος	$0+1/0.667s$
Κορεσμός PI ελεγκτή ενεργού ισχύος	$[-1, 1] pu$
Κέρδος anti-windup ελεγκτή ενεργού ισχύος (k_b)	250
Κέρδος tracking ελεγκτή ενεργού ισχύος (k_t)	100
Κλίση rate limiter εντολής ενεργού ισχύος	$2pu / 0.3 sec$
Κλίση rate limiter εντολής άεργου ισχύος	$2pu / 0.5 sec$
Άνω όριο ελεγκτή DC deadband ($U_{dc_max_db}$)	1.04 pu
Κάτω όριο ελεγκτή DC deadband ($U_{dc_min_db}$)	0.96 pu
Κέρδος ελεγκτή DC deadband ($U_{dc_kp_db}$)	10
PI ελεγκτής PLL	$50+1/0.01s$
Κέρδος k_f φίλτρων DSOGI	1.4
Μέθοδος PWM διαμόρφωσης μετατροπών MMC	PD-PWM
Συχνότητα φερόντων διαμόρφωσης (f_s)	1300 Hz
Συχνότητα εφαρμογής αλγορίθμου ταξινόμησης (f_{bal})	4000 Hz
Συχνότητα εκτέλεσης ελεγκτή διαμοιρασμού ισχύος ($f_{supervision}$)	25 Hz
Καθυστέρηση τηλεπικοινωνιακών σημάτων ελεγκτή εποπτείας	40 ms
Άνω όριο DC ρεύματος μετατροπέα για μπλοκάρισμα (I_{DC_Limit})	2 pu
Κάτω όριο AC τάσης στο ΣΚΣ για μπλοκάρισμα (U_{AC_Limit})	0.7 pu
Βήμα προσομοίωσης	100 μs
Δειγματοληψία ελεγκτή συστήματος	100 μs

Πίνακας Π. 2 Παράμετροι Ελεγκτών Συστήματος