



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

Έλεγχος Συγχρονισμού Ισχύος σε Συστήματα VSC- HVDC για Διασυνδέσεις με Πολύ Ασθενή Δίκτυα ΕΡ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Άγγελος Β. Τελλίδης

Επιβλέπων : Αντώνιος Αντωνόπουλος
Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π

Αθήνα, Σεπτέμβριος 2020



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

Έλεγχος Συγχρονισμού Ισχύος σε Συστήματα VSC- HVDC για Διασυνδέσεις με Πολύ Ασθενή Δίκτυα ΕΡ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Άγγελος Β. Τελλίδης

Επιβλέπων : Αντώνιος Αντωνόπουλος
Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 25^η Σεπτεμβρίου 2020.

.....
Αντώνιος Αντωνόπουλος
Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Αντώνιος Κλαδάς
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

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

Αθήνα, Σεπτέμβριος 2020

.....
Άγγελος Β. Τελλίδης

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

Copyright © Άγγελος Τελλίδης, 2020

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η τεχνολογία υψηλής τάσης συνεχούς ρεύματος (HVDC) αποτελεί την πλέον κατάλληλη επιλογή για τη μεταφορά υψηλών ποσοτήτων ηλεκτρικής ενέργειας κατά μήκος μεγάλων αποστάσεων. Στην επικράτηση της εν λόγω τεχνολογίας, ιδιαίτερα στη διασύνδεση απομονωμένων νησιωτικών συστημάτων, συνέβαλλαν τόσο οι μειωμένες απώλειες και η ευελιξία ελέγχου που αυτή παρουσιάζει, όσο και το μειωμένο κόστος εγκατάστασης.

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματεύεται τη μελέτη μίας διασύνδεσης HVDC, με τη χρήση μετατροπών τύπου πηγής τάσης (VSC), μεταξύ ενός ισχυρού και ενός πολύ ασθενούς δικτύου εναλλασσόμενου ρεύματος (EP), δίνοντας ιδιαίτερη έμφαση στην τεχνική ελέγχου που εφαρμόζεται στον μετατροπέα στην πλευρά του πολύ ασθενούς δικτύου.

Αρχικά, στα πλαίσια της παρούσας εργασίας πραγματοποιείται εκτενής ανάλυση της τεχνολογίας HVDC και των πλεονεκτημάτων που αυτή παρουσιάζει έναντι της αντίστοιχης τεχνολογίας εναλλασσόμενου ρεύματος (HVAC). Περαιτέρω, γίνεται αναφορά στα είδη των μετατροπών (μετατροπείς τύπου πηγής ρεύματος-μετατροπείς τύπου πηγής τάσης) που χρησιμοποιούνται στις εμπορικές εφαρμογές HVDC παγκοσμίως. Ιδιαίτερη έμφαση δε, δίνεται στην τεχνολογία των μετατροπών τύπου πηγής τάσης (VSC) και ειδικότερα στην κατηγορία των πολυεπίπεδων μετατροπών με τη χρήση υπομονάδων (MMC).

Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι κυριότερες τεχνικές ελέγχου που εφαρμόζονται σε μετατροπείς VSC εφαρμογών HVDC, με την ανάλυση να επικεντρώνεται σε μία σχετικά προσφάτως προτεινόμενη τεχνική ελέγχου, τον έλεγχο συγχρονισμού ισχύος (PSC).

Κατόπιν αποτύπωσης των απαραίτητων θεωρητικών στοιχείων που πλαισιώνουν την τεχνολογία HVDC, στην παρούσα εργασία μελετάται μία μονοπολική διασύνδεση VSC-HVDC μεταξύ ενός ισχυρού και ενός πολύ ασθενούς δικτύου (EP). Η υλοποίηση της μελέτης στηρίζεται στη σχεδίαση κατάλληλου μοντέλου προσομοίωσης με τη χρήση του λογισμικού MATLAB/Simulink. Μάλιστα, για μια πιο ρεαλιστική προσέγγιση επί του θέματος, τα χαρακτηριστικά και οι παράμετροι της υπό μελέτη διασύνδεσης επιλέγονται έτσι ώστε να ανταποκρίνονται, όσο το δυνατόν, στις πραγματικές τιμές της επικείμενης διασύνδεσης μεταξύ Αττικής και Κρήτης.

Στον μετατροπέα VSC στην πλευρά του πολύ ασθενούς δικτύου (Κρήτη), αφού παρουσιάζονται οι περιορισμοί που προκύπτουν κατά τη λειτουργία του συμβατικού διανυσματικού ελεγκτή ρεύματος, στη συνέχεια επιχειρείται η εφαρμογή του ελέγχου συγχρονισμού ισχύος. Τέλος, για την αξιολόγηση της ευσταθούς λειτουργίας του συστήματος, στο μοντέλο προσομοίωσης εξετάζονται διάφορα σενάρια τόσο υπό συνθήκες κανονικής λειτουργίας όσο και υπό συνθήκες σφάλματος και επ' αυτών εξάγονται τα απαραίτητα συμπεράσματα.

Λέξεις κλειδιά:

HVDC, μετατροπέας τύπου πηγής τάσης (VSC), ασθενές δίκτυο εναλλασσόμενου ρεύματος, διανυσματικός έλεγχος ρεύματος, διάταξη κλειδώματος φάσης (PLL) έλεγχος συγχρονισμού ισχύος (PSC), βρόχος συγχρονισμού ισχύος (PSL).

ABSTRACT

High-Voltage Direct-Current (HVDC) technology has become nowadays the most suitable option for bulk power transmission over long distances. Both the reduced power losses and the flexibility of control it presents, as well as the reduced installation cost, contributed to the predominance of this technology, especially concerning the interconnection of isolated island systems.

The main objective of this thesis is the study of an HVDC link, based on voltage source converters (VSC), interconnecting a strong and a very weak alternating current (ac) system, with particular emphasis upon the control technique applied to the converter of the latter.

Along the first part of the thesis, an extensive analysis of the fundamentals of HVDC transmission and its advantages over the respective ac technology (HVAC) is performed. Further reference is made to the different types of converters (Current Source Converters-Voltage Source Converters) used in commercial HVDC applications worldwide. Meanwhile major focus is given to the technology of VSC converters and especially to a certain type, i.e. the Modular Multilevel Converters (MMC).

Afterwards, the main control methods applied to VSC-HVDC systems are described, with particular emphasis placed on a novel control technique, namely, the so-called Power Synchronization Control (PSC).

After presenting the necessary theoretical background that frames HVDC technology, then a monopole VSC-HVDC link between a strong and a very weak ac system is considered. The investigation performed is based on the design of an appropriate simulation model via MATLAB / Simulink software. For a more realistic approach on the subject, the characteristics and parameters of the entire VSC-HVDC system are selected so as to correspond, as far as possible, to the actual values of the imminent VSC-HVDC link between Attica (mainland) and the island of Crete.

In the VSC connected to the very weak system (Crete), after demonstrating the fundamental limitations that arise from the application of the conventional Vector Current Controller (VCC), the implementation of the power-synchronization control is attempted. Finally, in order to evaluate the robust performance of the entire system, various simulations are performed and different scenarios are examined both under normal and fault operating conditions, and the appropriate conclusions are drawn.

Keywords:

HVDC, voltage source converter (VSC), weak ac system, vector current control (VCC), phase-locked loop (PLL), power synchronization control (PSC), power synchronization loop (PSL).

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου προς όλους αυτούς που με βοήθησαν, με οποιοδήποτε τρόπο, στην εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Ειδικότερα, ευχαριστώ θερμά τον επιβλέποντα της διπλωματικής μου εργασίας, Επίκουρο Καθηγητή κ. Αντώνιο Αντωνόπουλο, για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε με την ανάθεση του συγκεκριμένου θέματος, καθώς και για την συστηματική καθοδήγηση που μου παρείχε καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησής της εργασίας. Είμαι βαθύτατα ευγνώμων διότι χωρίς τις καίριες παρατηρήσεις του η περάτωση της εργασίας αυτής δε θα ήταν δυνατή.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω τον Υποψήφιο Διδάκτορα Βασίλειο Νικολακόπουλο για την πολύτιμη βοήθεια που μου παρείχε, ιδιαίτερα κατά τα πρώτα στάδια εκπόνησης της εργασίας.

Οφείλω ένα μεγάλο ευχαριστώ στους φίλους και συμφοιτητές μου για την πάσης φύσεως βοήθεια και τη στήριξη που μου παρείχαν καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας, και ειδικότερα στους Ηλία, Γιώργο, Κωνσταντίνο, και Κατερίνα.

Ευχαριστώ βαθύτατα τους γονείς μου που βρίσκονται δίπλα μου όλα αυτά τα χρόνια, στηρίζοντας κάθε μου επιλογή.

Τέλος θα ήθελα να αφιερώσω την περάτωση της διπλωματικής μου εργασίας στη μνήμη του φίλου μου Θοδωρή.

Άγγελος Β. Τελλίδης

Αθήνα, 25^η Σεπτεμβρίου 2020

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	5
ABSTRACT	7
ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ	9
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ	11
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	13
1.1 ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ.....	13
1.2 ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ.....	13
1.3 ΔΟΜΗ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ.....	15
2. ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ HVDC	17
2.1 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ.....	17
2.1.1 Εισαγωγή.....	17
2.1.2 AC εναντίων DC.....	17
2.1.3 Εμφάνιση και Εξέλιξη της Τεχνολογίας HVDC.....	18
2.2 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ HVDC ENANTI HVAC.....	19
2.3 ΤΥΠΟΙ ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΩΝ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ HVDC.....	22
2.3.1 Εισαγωγή.....	22
2.3.2 Μετατροπείς Τύπου Πηγής Ρεύματος.....	22
2.3.3 Μετατροπείς Τύπου Πηγής Τάσης.....	24
2.4 ΤΟΠΟΛΟΓΙΕΣ ΣΥΝΔΕΣΜΩΝ HVDC.....	29
2.4.1 Εισαγωγή.....	29
2.4.2 Τοπολογία Μονοπόλου.....	29
2.4.2.1 Τοπολογία Συμμετρικού Μονοπόλου.....	29
2.4.2.2 Τοπολογία Ασύμμετρου Μονοπόλου με Ηλεκτρόδια Γείωσης.....	30
2.4.2.3 Τοπολογία Ασύμμετρου Μονοπόλου με Γειωμένη Μεταλλική Επιστροφή.....	31
2.4.3 Τοπολογία Διπόλου.....	31
2.4.3.1 Τοπολογία Διπόλου με Ηλεκτρόδια Γείωσης.....	31
2.4.3.2 Τοπολογία Διπόλου με Γειωμένο Μεταλλικό Ουδέτερο.....	32
2.4.4 Τοπολογία Back-to-Back.....	32
2.4.5 Πολυτερματικά Δίκτυα.....	32

3. ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΕΛΕΓΧΟΥ ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ VSC-HVDC	35
3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	35
3.2 ΕΛΕΓΧΟΣ ΙΣΧΥΟΣ-ΓΩΝΙΑΣ.....	35
3.3 ΔΙΑΝΥΣΜΑΤΙΚΟΣ ΕΛΕΓΧΟΣ ΡΕΥΜΑΤΟΣ.....	39
3.4 ΕΛΕΓΧΟΣ ΣΥΓΧΡΟΝΙΣΜΟΥ ΙΣΧΥΟΣ.....	44
3.4.1 Εισαγωγή.....	44
3.4.2 Φυσικός Μηχανισμός Συγχρονισμού Ισχύος σε Συστήματα ΕΡ	46
3.4.3 Έλεγχος Συγχρονισμού Ισχύος Μετατροπέα VSC Συνδεδεμέ- νου σε Πολύ Ασθενές Δίκτυο ΕΡ.....	47
4. ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ - ΚΥΚΛΩΜΑΤΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΥΠΟ ΜΕΛΕΤΗ ΣΥΣΤΗ- ΜΑΤΟΣ VSC-HVDC.....	53
4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	53
4.2 ΣΥΝΔΕΣΜΟΣ ΣΡ.....	53
4.3 ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΙΣ VSC.....	54
4.3.1 Γενικά Χαρακτηριστικά Μετατροπέων VSC.....	54
4.3.2 Έλεγχος Ηπειρωτικού Μετατροπέα (Σταθμός Αττικής).....	57
4.3.3 Έλεγχος Υπεράκτιου Μετατροπέα (Σταθμός Κρήτης).....	60
4.4 ΠΗΝΙΑ ΔΙΑΣΥΝΔΕΣΗΣ - ΦΙΛΤΡΑ ΕΡ.....	65
4.5 ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΕΣ.....	66
4.6 ΔΙΚΤΥΑ ΕΡ.....	66
5. ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΥΠΟ ΜΕΛΕΤΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ-ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ..	67
5.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	67
5.2 ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΥΠΟ ΚΑΝΟΝΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ.....	67
5.3 ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΗ ΤΗΣ ΡΟΗΣ ΕΝΕΡΓΟΥ ΙΣΧΥΟΣ.....	78
5.4 ΑΠΟΚΡΙΣΗ ΣΕ ΣΦΑΛΜΑ ΣΤΟ ΠΟΛΥ ΑΣΘΕΝΕΣ ΔΙΚΤΥΟ ΕΡ.....	85
6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ-ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ.....	91
6.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	91
6.2 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	91
6.3 ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΜΕΛΕΤΗ.....	93
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	95
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ.....	101

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ

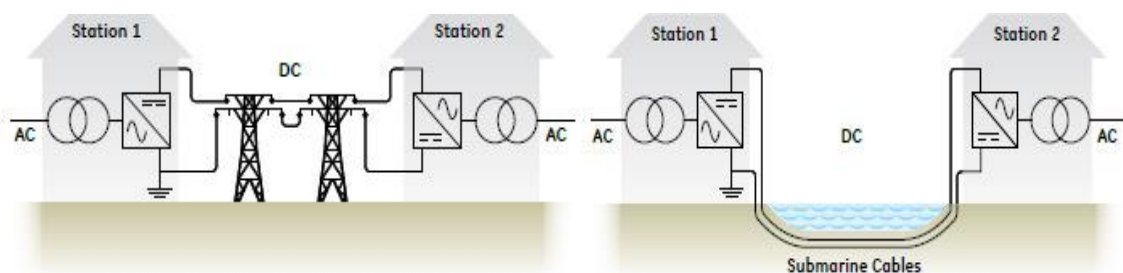
Η τεχνολογία διασύνδεσης υψηλής τάσης συνεχούς ρεύματος (HVDC), αποτελεί τα τελευταία χρόνια, ένα πολύ σημαντικό εργαλείο της βιομηχανίας ηλεκτρικής ενέργειας, για την επίτευξη μεταφοράς υψηλών ποσοτήτων ηλεκτρικής ισχύος σε μεγάλες αποστάσεις. Με αυτόν τον τρόπο όχι μόνο παραμερίζονται τα όποια μειονεκτήματα παρουσιάζει η αντίστοιχη τεχνολογία εναλλασσόμενου ρεύματος (HVAC), αλλά καθίσταται πλέον εφικτή και η διασύνδεση απομακρυσμένων θαλάσσιων αιολικών πάρκων όπως και η διακρατική σύνδεση μεταξύ συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας (ΣΗΕ), τα οποία λειτουργούν υπό διαφορετική συχνότητα (ασύγχρονα συστήματα). Στο Σχήμα 1.1 παρουσιάζεται σχηματικά μια διασύνδεση HVDC με δύο διαφορετικούς τρόπους υλοποίησης του συνδέσμου ΣΡ.

Από το 1954, όταν καταγράφεται η πρώτη εμπορική της εφαρμογή, η τεχνολογία HVDC έχει γνωρίσει αξιοσημείωτη εξέλιξη. Σε αυτό συνέβαλλε η κατασκευή των πρώτων πλήρως ελεγχόμενων διακοπτικών στοιχείων, που με τη σειρά της οδήγησε στην εμφάνιση των μετατροπένων τύπου πηγής τάσης (VSC). Το νέο αυτό είδος μετατροπένων ήρθε να αντικαταστήσει τους μετατροπείς τύπου πηγής ρεύματος (CSC ή LCC), οι οποίοι βάσιζαν τη λειτουργία τους σε ημι-ελεγχόμενα διακοπτικά στοιχεία, τα θυρίστορ. Έκτοτε, οι μετατροπείς τύπου VSC αποτελούν τη δεσπόζουσα τεχνολογία μετατροπένων, όσο αφορά το πλείστο των σύγχρονων εφαρμογών HVDC σε παγκόσμιο επίπεδο (συστήματα VSC-HVDC). Η στροφή του ερευνητικού ενδιαφέροντος από τη μέχρι πρότινος συμβατική τεχνολογία των μετατροπένων CSC προς αυτή των μετατροπένων VSC, δικαιολογείται απόλυτα από την πληθώρα πλεονεκτημάτων που η τελευταία έχει να επιδείξει, με εξέχον παράδειγμα τη δυνατότητα των συστημάτων VSC-HVDC να συνδέονται σε ασθενή δίκτυα εναλλασσόμενου ρεύματος (EP) [1].

Παρόλα αυτά, μελέτες των τελευταίων ετών, έχουν αναδείξει διάφορους προβληματισμούς σχετικά με τα σχήματα ελέγχου που εφαρμόζονται μέχρι στιγμής σε συστήματα VSC-HVDC συνδεδεμένα σε ασθενή δίκτυα. Συγκεκριμένα έχει αποδειχθεί πως τα εν λόγω σχήματα ελέγχου, δεν αποτελούν την καλύτερη επιλογή για τον έλεγχο των μετατροπένων VSC, και αυτό διότι δεν επιτυγχάνεται η βέλτιστη δυνατή απόδοση αυτών. Συνεπώς γίνεται αντιληπτό πως η αναζήτηση νέων τεχνικών ελέγχου που θα άπτονται των απαιτήσεων των συγκεκριμένων εφαρμογών καθίσταται επιτακτική.

1.2 ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας αποτελεί ο σχεδιασμός και η προσομοίωση ενός συστήματος VSC-HVDC, το οποίο θα υλοποιεί τη διασύνδεση μεταξύ ενός ισχυρού και ενός ασθενούς δικτύου εναλλασσόμενου ρεύματος. Ένα τέτοιο σύστημα δύναται να θεωρηθεί η επικείμενη διασύνδεση μεταξύ της Αττικής (ισχυρό δίκτυο) και της Κρήτης (πολύ ασθενές δίκτυο), η οποία έχει προγραμματιστεί να τεθεί σε λειτουργία έως το 2022 [2]. Για το λόγο αυτό, οι παράμετροι του υπό εξέταση συστήματος επιλέχθηκαν έτσι ώστε να ανταποκρίνονται στις πραγμα-



Σχήμα 1.1 Αριστερά: Διασύνδεση HVDC με χρήση εναέριου αγωγού, Δεξιά: Διασύνδεση HVDC με χρήση υποβρύχιου καλωδίου

τικές παραμέτρους της εν λόγω διασύνδεσης, με απώτερο σκοπό η παρούσα διπλωματική εργασία να λάβει το χαρακτήρα μίας πιο ρεαλιστικής επί του θέματος διερεύνησης. Αναλυτικότερα, η εργασία αυτή αναδεικνύει τους περιορισμούς που προκύπτουν όταν σε ένα τέτοιο σύστημα εφαρμόζεται η τεχνική του διανυσματικού ελέγχου ρεύματος στον μετατροπέα που βρίσκεται στην πλευρά του ασθενούς AC δικτύου. Οι περιορισμοί αυτοί οφείλονται κυρίως στη δυσλειτουργία που παρουσιάζει η διάταξη κλειδώματος φάσης (PLL), η οποία αποτελεί κομμάτι του κυκλώματος ελέγχου και είναι απαραίτητη για τον συγχρονισμό του μετατροπέα με το δίκτυο EP [3].

Συνεπώς για την επίτευξη της εύρυθμης λειτουργίας του συστήματος προτείνεται ένα νέο είδος ελέγχου, ο έλεγχος συγχρονισμού ισχύος (PSC), όπου πλέον ο συγχρονισμός του μετατροπέα με το δίκτυο επιτυγχάνεται μέσω μεταβατικών μεταβολών της εγγεόμενης ενεργού ισχύος. Η λειτουργία αυτή προσομοιάζει τον ενδογενή μηχανισμό συγχρονισμού μεταξύ δύο διασυνδεδεμένων σύγχρονων ηλεκτρικών μηχανών. Η νέα αυτή τεχνική ελέγχου βασίζει τη λειτουργία της σε δύο βρόχους ελέγχου, έναν εσωτερικό και έναν εξωτερικό. Ο πρώτος καθορίζει το μέτρο της τάσης εξόδου του μετατροπέα, ενώ ο δεύτερος καθορίζει τη γωνία της τάσης εξόδου του μετατροπέα και κατά συνέπεια την εγγεόμενη-απορροφούμενη ενεργό ισχύ.

Περαιτέρω, στα πλαίσια της εργασίας αυτής, υλοποιήθηκε μοντέλο προσομοίωσης συστήματος VSC-HVDC τοπολογίας συμμετρικού μονοπόλου στο λογισμικό MATLAB/Simulink. Όπως διατυπώθηκε και παραπάνω, οι παράμετροι του εν λόγω μοντέλου επελέγησαν έτσι ώστε να ανταποκρίνονται στις πραγματικές τιμές των παραμέτρων της επικείμενης διασύνδεσης Αθήνας-Κρήτης. Παρόλα αυτά σημειώνεται πως ενώ η προγραμματισμένη διασύνδεση αφορά τοπολογία διπόλου με ηλεκτροδία γείωσης, στα πλαίσια της διπλωματικής αυτής εργασίας μελετήθηκε ένα μοντέλο διασύνδεσης τοπολογίας συμμετρικού μονοπόλου. Η επιλογή της παραδοχής αυτής έχει να κάνει αρχικά, με το ότι η διασύνδεση συμμετρικού μονοπόλου θα αποτελέσει το πρωταρχικό στάδιο λειτουργίας του εν λόγω έργου μέχρι την τοποθέτηση των ηλεκτροδίων γείωσης [2]. Παράλληλα, με αυτόν τον τρόπο καθίσταται δυνατή η εξαγωγή ασφαλών συμπερασμάτων για τη λειτουργία του έργου στο σύνολο του, αποφεύγοντας όμως σε μεγάλο βαθμό την πολυπλοκότητα των προσομοιώσεων. Επιπλέον οι μετατροπείς που υλοποιήθηκαν στο μοντέλο προσομοίωσης επελέγησαν να είναι πολλαπλών επιπέδων και με πλήρες διακοπτικό μοντέλο, έτσι ώστε τα αποτελέσματα να είναι όσο το δυνατόν πιο ρεαλιστικά στις εξεταζόμενες κλίμακες χρόνου.

Τέλος, στο εν λόγω μοντέλο προσομοιώθηκαν διάφορα σενάρια προκειμένου να εξεταστεί η ευστάθεια του συστήματος, τόσο υπό συνθήκες κανονικής λειτουργίας

όσο και υπό συνθήκες πιθανών σφαλμάτων. Τα σενάρια αυτά αφορούσαν τα παρακάτω:

- Μεταφορά ενεργού ισχύος καθορισμένης τιμής δια μέσω του συνδέσμου HVDC
- Αντιστροφή της μεταφοράς ενεργού ισχύος εντός εύλογου χρονικού διαστήματος
- Απόκριση του συστήματος σε γενόμενο τριφασικό σφάλμα στην πλευρά του ασθενούς AC δικτύου

1.3 ΔΟΜΗ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Το περίγραμμα της παρούσας διπλωματικής εργασίας έχει ως εξής:

- Στο Κεφάλαιο 1, παρουσιάζονται ορισμένα βασικά εισαγωγικά στοιχεία, με σκοπό ο αναγνώστης να έχει μία πρώτη επαφή με το υπάρχον τεχνολογικό υπόβαθρο, στο οποίο στηρίζεται η διπλωματική αυτή εργασία. Στη συνέχεια παρουσιάζεται αναλυτικά, αυτό καθαυτό, το αντικείμενο της εργασίας καθώς και η δομή με την οποία αυτή διαρθρώνεται, στα κεφάλαια που την αποτελούν.
- Στο Κεφάλαιο 2, πραγματοποιείται μια εκτενής αναφορά σε χρήσιμα στοιχεία θεωρίας τα οποία σχετίζονται με την τεχνολογία HVDC. Συγκεκριμένα ο αναγνώστης, μέσω μίας ιστορικής αναδρομής που πραγματοποιείται, δύναται να ανατρέξει σε πληροφορίες για τα γεγονότα που οδήγησαν στην εμφάνιση της τεχνολογίας HVDC. Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι πλέον αξιοσημείωτες εμπορικές εφαρμογές της εν λόγω τεχνολογίας, καθώς και τα πλεονεκτήματα που αυτή παρουσιάζει έναντι της συμβατικής τεχνολογίας HVAC. Επιπλέον, στο παρόν κεφάλαιο, αναλύονται και συγκρίνονται οι δύο τύποι μετατροπών που χρησιμοποιούνται σε διασυνδέσεις HVDC (μετατροπείς VSC και μετατροπείς CSC), ενώ παράλληλα πραγματοποιείται μία επισκόπηση των διαφόρων τοπολογιών που χρησιμοποιούνται στις σύγχρονες εφαρμογές αυτού του τύπου. Τέλος, προς αποφυγή οποιασδήποτε σύγχυσης του αναγνώστη, γίνεται πλήρης αποσαφήνιση των κριτηρίων σύμφωνα με τα οποία κατηγοριοποιούνται τα δίκτυα εναλλασσόμενου ρεύματος σε ισχυρά, ασθενή και πολύ ασθενή.
- Στο Κεφάλαιο 3, παρουσιάζονται οι πλέον διαδεδομένες τεχνικές ελέγχου των μετατροπών για εφαρμογές HVDC. Επιπλέον παρουσιάζεται και αναλύεται ενδελεχώς ο έλεγχος συγχρονισμού ισχύος, που αποτελεί τη νέα προτεινόμενη τεχνική ελέγχου για εφαρμογές VSC-HVDC που συνδέονται σε ασθενή δίκτυα EP.
- Στο Κεφάλαιο 4, περιγράφεται η τοπολογία του υπό εξέταση συστήματος, καθώς και των διαφόρων διατάξεων που είναι υπεύθυνες για τον έλεγχο των μετατροπών.
- Στο Κεφάλαιο 5, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων στο λογισμικό MATLAB/Simulink, για τα διάφορα σενάρια που εξετάστηκαν.
- Στο Κεφάλαιο 6, εξάγονται τα συμπεράσματα της παρούσας διπλωματικής εργασίας, ενώ παράλληλα καταγράφονται προτάσεις για περαιτέρω μελέτη.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ HVDC

2.1 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ

2.1.1 Εισαγωγή

Η ιστορία του ανθρώπου τους τελευταίους αιώνες υπήρξε, χωρίς καμία αμφιβολία, άρρηκτα συνδεδεμένη με το φυσικό φαινόμενο του ηλεκτρισμού. Μολονότι η παρατήρηση του φαινομένου αυτού χρονολογείται από την προϊστορική εποχή, για πολλούς αιώνες η σχέση του ανθρώπου με τον ηλεκτρισμό κινούνταν σε αυστηρώς πειραματικά πλαίσια, υποκινούμενα κυρίως από αγνή επιστημονική περιέργεια.

Από τα τέλη του 19^{ου} αιώνα όμως, ο ηλεκτρισμός άρχισε να εισβάλλει ολοένα και περισσότερο στην καθημερινότητα του ανθρώπου, γεγονός που σηματοδοτήθηκε από την εγκατάσταση των πρώτων συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας (ΣΗΕ) σε πόλεις των ΗΠΑ. Τα πρώιμα αυτά συστήματα, απασχολούσαν κυρίως στη διανομή ηλεκτρικής ενέργειας για τη φωταγωγήση περιοχών περιορισμένης γεωγραφικής έκτασης, αντικαθιστώντας με αυτόν τον τρόπο τους λαμπτήρες πετρελαίου.

Κατόπιν, με την εμφάνιση των πρώτων ηλεκτρικών συσκευών, η ζήτηση της ηλεκτρικής ενέργειας παγκοσμίως, έλαβε ακόμα μεγαλύτερες διαστάσεις, με την εγκατάσταση τοπικών ΣΗΕ να διαδέχεται η μία την άλλη. Έκτοτε, και για πολλά ακόμα χρόνια, η τεχνολογία της διανομής ηλεκτρικής ενέργειας αποτέλεσε το πεδίο διαμάχης μεταξύ αξιόλογων επιστημόνων και εφευρετών, ως προς τον αποτελεσματικότερο τρόπο υλοποίησης της, ενώ γενικότερα δοκιμάστηκε ποικιλοτρόπως έως ότου επιτευχθεί η ωρίμανση της και η διάδοση της σε παγκόσμια κλίμακα, με τη μορφή που τη γνωρίζουμε σήμερα.

2.1.2 AC εναντίων DC

Το πρώτο δίκτυο διανομής ηλεκτρικής ενέργειας τέθηκε σε λειτουργία το Σεπτέμβριο του 1882 στην τοποθεσία Pearl Street της Νέας Υόρκης, από την εταιρία του Αμερικανού εφευρέτη Thomas A. Edison. Μέσα στον πρώτο μήνα λειτουργίας του εξυπηρετούσε 59 καταναλωτές σε ακτίνα 1.500 μέτρων με χαμηλή τάση λειτουργίας της τάξης των 110 V, ενώ μέχρι τον Δεκέμβριο του επόμενου έτους έφτασε να εξυπηρετεί 513 καταναλωτές [4].

Αυτό όπως και τα δεκάδες ακόμα δίκτυα αυτού του τύπου που ακολούθησαν, μετέφεραν ηλεκτρική ενέργεια δια μήκος αγωγών χαλκού, χρησιμοποιώντας συνεχές ρεύμα (dc). Αυτός ο τρόπος διανομής όμως, ήταν τόσο αναποτελεσματικός που καθιστούσε απόλυτα δεσμευτικό οι σταθμοί παραγωγής να βρίσκονται εντός της ακτίνας του ενός μιλίου, από τα φορτία τα οποία στόχευαν να τροφοδοτήσουν. Διαφαινόταν έτσι πως τα συστήματα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας θα εξελίσσονταν σε απομονωμένα δίκτυα, ικανά να εξυπηρετούν αποκλειστικά τις τοπικές ανάγκες ηλεκτρικής ισχύος. Με άλλα λόγια το σύνολο των πρώτων ΣΗΕ αποτέλεσε αυτό που πλέον αναφέρεται ως διανεμημένη παραγωγή στα συστήματα διανομής, όπου οι γεννήτριες που παράγουν την ηλεκτρική ενέργεια βρίσκονται κοντά στους καταναλωτές που την χρησιμοποιούν.

Οι περιορισμοί που παρουσίαζαν τα συστήματα τα οποία βάσιζαν τη λειτουργία τους στο συνεχές ρεύμα, ώθησαν άλλους εφευρέτες, (κάποιοι εκ των οποίων αποτέλεσαν παλαιούς συνεργάτες και εργαζόμενους του Edison) στην πρόταση ενός νέου συστήματος διανομής ηλεκτρικής ενέργειας. Το εν λόγω σύστημα, σε αντίθεση με τα συστήματα του Edison, βάσιζε τη λειτουργία του στο εναλλασσόμενο ρεύμα (ac).

Το πρώτο δίκτυο EP εγκαταστάθηκε τον Μάρτιο του 1886 στο Great Barrington της Μασαχουσέτης από τον εφευρέτη William Stanley, χρηματοδοτούμενο από τον επιχειρηματία George Westinghouse. Η λειτουργία του συστήματος αυτού, αν και είχε πειραματικό χαρακτήρα, αποτέλεσε ορόσημο για την εγκατάσταση μεγάλου αριθμού ανάλογων συστημάτων στις ΗΠΑ αλλά και σε πολλές άλλες χώρες της Ευρώπης. Το γεγονός αυτό οδήγησε σε μία μεγάλη διαμάχη, που έμεινε γνωστή στην ιστορία ως «Η μάχη των ρευμάτων», μεταξύ των συστημάτων ΣΡ που πρότεινε ο Edison και των αντίστοιχων συστημάτων EP που «εκπροσωπούσε» η επιχείρηση του Westinghouse.

Στα χρόνια που ακολούθησαν, η μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας μέσω εναλλασσόμενου ρεύματος και μάλιστα τριφασικού, είναι αυτή που τελικά επικράτησε. Στο γεγονός αυτό συνέβαλε η επινόηση των πρώτων σύγχρονων μετασχηματιστών, μέσω των οποίων η εναλλασσόμενη τάση μπορούσε να μετασχηματιστεί σε διαφορετικά επίπεδα. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα να επιτυγχάνεται η μεταφορά ηλεκτρικής ισχύος κατά μήκος μεγαλύτερων αποστάσεων. Επιπλέον, η φύση της κυματομορφής του εναλλασσόμενου ρεύματος καθιστούσε δυνατή τη διακοπή του ρεύματος από αποζεύκτες, όταν αυτό λάμβανε μηδενική τιμή (δύο φορές ανά κύκλο). Τέλος η ανακάλυψη των μηχανών επαγωγής από τον Nikola Tesla και η ευρεία χρήση αυτών, αποτέλεσε έναν επιπλέον παράγοντα που έπαιξε καθοριστικό ρόλο στην καθιέρωση των AC συστημάτων σε παγκόσμια κλίμακα.

Παρόλα αυτά τα DC συστήματα που αρχικά πρότεινε ο Edison, όπως αποδείχθηκε εκ των υστέρων, δεν είχαν πει ακόμα την τελευταία τους λέξη, και πολύ σύντομα θα απασχολούσαν εκ νέου την παγκόσμια βιομηχανία μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας.

2.1.3 Εμφάνιση και Εξέλιξη της Τεχνολογίας HVDC

Παρότι η επικράτηση των συστημάτων EP στη μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας παγκοσμίως υπήρξε καθολική, το επιστημονικό ενδιαφέρον για τα συστήματα ΣΡ δεν έπαψε να υποφώσκει. Ήδη από το 1890 γεννήθηκε η ιδέα της σύνδεσης σε σειρά μεγάλου αριθμού γεννητριών, με σκοπό την παραγωγή υψηλής συνεχούς τάσης, γεγονός που θα αντιμετώπιζε αποτελεσματικά το ανυπέρβλητο εμπόδιο της πτώσης τάσης, που παρουσίαζαν τα συστήματα διανομής ΣΡ έως τότε.

Ιθύνων νους της ιδέας αυτής υπήρξε ο Ελβετός μηχανικός René Thury. Προς τιμήν του, τα συστήματα που επινόησε έμειναν γνωστά στην ιστορία ως «Συστήματα Thury». Μέχρι τα τέλη του 1912 ήδη 11 συστήματα αυτού του τύπου είχαν εγκατασταθεί σε διάφορες χώρες της Ευρώπης, με χαρακτηριστικό παράδειγμα τη διασύνδεση μεταξύ των πόλεων Mountiers και Lyon της κεντρικής Γαλλίας, το 1906 [5]. Η εν λόγω διασύνδεση επεκτεινόταν σε μήκος 180 χιλιομέτρων και είχε τη δυνατότητα μεταφοράς 4,3 MW υπό τάση λειτουργίας της τάξης των 57,6 kV. Αναμφισβήτητα, τα «Συστήματα Thury» μπορούν να θεωρηθούν ως οι πρώτες εφαρμογές, που αποτέλεσαν τον πρόδρομο για την μετέπειτα εμφάνιση της τεχνολογίας HVDC.

Η πρώτη σύγχρονη εμπορική εφαρμογή HVDC τέθηκε σε λειτουργία το 1954. Το έργο αυτό συνέδεε την πόλη Västervik της ηπειρωτικής Σουηδίας με τη νήσο Gotland, μέσω υποβρύχιου συνδέσμου ΣΡ απόστασης 90 χιλιομέτρων και με μεταφορική ικανότητα της τάξης των 20 MW, υπό τάση 100 kV. Βέβαια εκείνη την εποχή, οι μετατροπείς που ήλεγχαν τη ροή της ισχύος στα άκρα του συνδέσμου ΣΡ, βάσιζαν την λειτουργία τους αποκλειστικά στις λυχνίες τόξου υδραργύρου και υπό αυτή την τεχνολογία εγκαταστάθηκαν 11 συνολικά εμπορικοί HVDC σύνδεσμοι παγκοσμίως μέχρι το 1972. Χαρακτηριστικά παραδείγματα αυτών αποτέλεσαν οι διασυνδέσεις, Sakuma στην Ιαπωνία το 1965 (125 kV, 300 MW) και Pacific DC Inertie στις ΗΠΑ το 1970 (± 400 kV, 1440 MW), και οι δύο εκ των οποίων υλοποιήθηκαν από την εταιρία ASEA (σημερινή ABB).

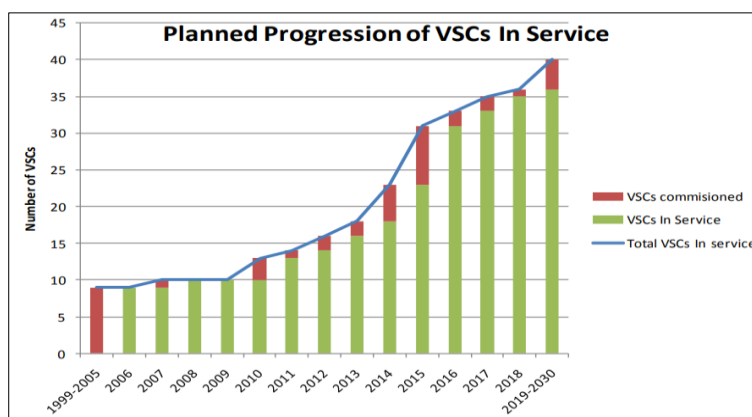
Στα χρόνια που ακολούθησαν τις πρώτες αυτές εφαρμογές HVDC, υπήρξε μεγάλο ερευνητικό ενδιαφέρον για την ανακάλυψη νέων ημιαγωγικών διακοπτικών στοιχείων. Εν τέλει, η εξέλιξη της τεχνολογίας στον τομέα αυτό οδήγησε στην εμφάνιση των θυρίστορ, που αποτέλεσαν του πρώτους ημι-ελεγχόμενους διακόπτες. Έτσι το 1970 τα πρώτα θυρίστορ τοποθετήθηκαν σε σειρά με τις λυχνίες τόξου υδραργύρου στους μετατροπείς της HVDC διασύνδεσης του Gotland, γεγονός που κατέστησε δυνατή την ανύψωση της τάσης του συνδέσμου στα 150 kV, με νέα μεταφορική ικανότητα αυτή των 30 MW.

Δύο χρόνια αργότερα, στο Eel River του Καναδά, κατασκευάστηκε η πρώτη HVDC διασύνδεση με μετατροπείς που λειτουργούσαν αποκλειστικά με θυρίστορ [6]. Το είδος των μετατροπέων αυτών αποτέλεσε τους μετατροπείς τύπου πηγής ρεύματος (CSC). Έκτοτε η νέα αυτή τεχνολογία οδήγησε σε δραματική αύξηση της διαθεσιμότητας των σταθμών HVDC, καθώς πλέον χαρακτηρίζονταν από απλούστερο σχεδιασμό συγκριτικά με την πρότερη τεχνολογία των λυχνιών τόξου υδραργύρου. Επιπλέον η συντήρηση των σταθμών δεν ήταν τόσο απαιτητική, ενώ παράλληλα για την εγκατάσταση τους απαιτούνταν λιγότερος χώρος για το ίδιο επίπεδο μεταφερόμενης ισχύος [7]. Χαρακτηριστικά παραδείγματα εγκατεστημένων εφαρμογών τύπου CSC-HVDC είναι η διασύνδεση Xiangjiaba-Shanghai στην Κίνα (± 800 kV, 6400 MW) και Rio Madeira στην Βραζιλία (± 600 kV, 6300 MW), που αποτελεί και τον μεγαλύτερο σε μήκος HVDC σύνδεσμο παγκοσμίως.

Σήμερα μολονότι ακόμα υφίστανται και σχεδιάζονται εφαρμογές τύπου CSC-HVDC, τα τελευταία χρόνια φαίνεται πως υπάρχει μία στροφή του ερευνητικού ενδιαφέροντος προς ένα νέο είδος τεχνολογίας, τους μετατροπείς τύπου πηγής τάσης (VSC). Οι μετατροπείς αυτοί πρωτοεμφανίστηκαν στις αρχές τις δεκαετίας του 1990 και η λειτουργία τους βασίστηκε στην ανακάλυψη των πρώτων πλήρως ελεγχόμενων διακοπών, των IGBTs. Έκτοτε, δεκάδες εφαρμογές VSC-HVDC εγκαταστάθηκαν παγκοσμίως, ενώ μέσα στα επόμενα χρόνια με τη σταδιακή ωρίμανση της, η τεχνολογία αυτή αναμένεται να αναλάβει ολοένα και μεγαλύτερο μερίδιο της αγοράς όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2.1. Τέλος στον Πίνακα 2.1 παρουσιάζεται μια επισκόπηση των πλέον αξιοσημείωτων εγκατεστημένων εφαρμογών VSC-HVDC παγκοσμίως και των χαρακτηριστικών αυτών.

2.2 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ HVDC ΕΝΑΝΤΙ HVAC

Τα AC συστήματα, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, ήταν αυτά που τελικά επικράτησαν στη διαμάχη που αφορούσε τον τρόπο διανομής της ηλεκτρικής ενέργειας. Στα χρόνια που ακολούθησαν παρόλα αυτά, η εξέλιξη των δικτύων και η ανάγκη για μεταφορά ακόμα υψηλότερων ποσοτήτων ενέργειας σε πολύ μεγάλες αποστά-



Σχήμα 2.1 Εξέλιξη των εγκατεστημένων εφαρμογών VSC-HVDC τα τελευταία χρόνια. Πηγή: [35 p.39]

Project Name	Year of Commission	Power rating	Number of circuits	AC voltage	DC voltage	Length of DC cables	Comments and reasons for choosing VSC-HVDC	Topology
Hellsjön, Sweden	1997	3 MW ±3 MVar	1	10 kV (both ends)	± 10 kV	10 km Overhead lines	Test transmission. Synchronous AC grid.	2-level
Gotland HVDC Light, Sweden	1999	50 MW -55 to +50 MVar	1	80 kV (both ends)	± 80 kV	2 × 70 km Submarine cables	Wind power (voltage support). Easy to get permission for underground cables.	2-level
Eagle Pass, USA	2000	36MW ±36 MVar	1	138 kV (both sides)	± 15.9 kV	Back-to-back HVDC Light station	Controlled asynchronous connection for trading. Voltage control. Power exchange.	3-level NPC
Tjæreborg, Denmark	2000	8 MVA 7.2 MW -3 to +4 MVar	1	10.5 kV (both sides)	± 9 kV	2 × 4.3 km Submarine	Wind power. Demonstration project. Normally synchronous AC grid with variable frequency control.	2-level
Terrenora Interconnection (Directlink), Australia	2000	180 MW -165 to +90 MVar	3	110 kV – Bungalora 132 kV – Mullumbimby	± 80 kV	6 × 59 km Underground cable	Energy trade. Asynchronous AC grid. Easy to get permission for underground cables.	2-level
MurrayLink, Australia	2002	220 MW -150 to +140 MVar	1	132 kV – Berri 220 kV – Red Cliffs	± 150 kV	2 × 180 km Underground cable	Controlled asynchronous connection for trading. Easy to get permission for underground cables.	3-level ANPC
CrossSound, USA	2002	330 MW ±150 MVar	1	345 kV – New- Heaven 138 kV – Shoreham	± 150 kV	2 × 40 km Submarine cables	Controlled synchronous connection for power exchange. Submarine cables.	3-level ANPC
Troll A offshore, Norway	2005	84 MW -20 to +24 MVar	2	132 kV – Kollsnes 56 kV - Troll	± 60 kV	4 × 70 km Submarine cables	Environment, CO ₂ tax. Long submarine cable distance. Compactness of converter on platform electrification.	2-level
Estlink, Estonia-Finland	2006	350 MW ±125 MVar	1	330 kV – Estonia 400 kV – Finland	± 150 kV	2 × 31 km Underground 2 × 74 km Submarine	Length of land cable, sea crossing and non-synchronous AC systems.	2-level
NORDE.ON 1, Germany	2009	400 MW	1	380 kV – Diele 170 kV – Borkum 2	± 150 kV	2 × 75 km Underground 2 × 128 km Submarine	Offshore wind farm to shore. Length of land and sea cables. Asynchronous system.	-----
Caprivi Link, Namibia	2009	300 MW	1	330 kV – Zambezi 400 kV – Gerus	350 kV	970 km Overhead lines	Synchronous AC grids. Long distance, weak networks	-----
Valhall offshore, Norway	2009	78 MW	1	300 kV – Lista 11 kV – Valhall	150 kV	292 km Submarine coaxial cable	Reduce cost and improve operation efficiency of the field. Minimize emission of green house gases.	2-level

Πίνακας 2.1 Σημαντικότερες εφαρμογές VSC-HVDC παγκοσμίως και τα χαρακτηριστικά αυτών. Πηγή: [32]

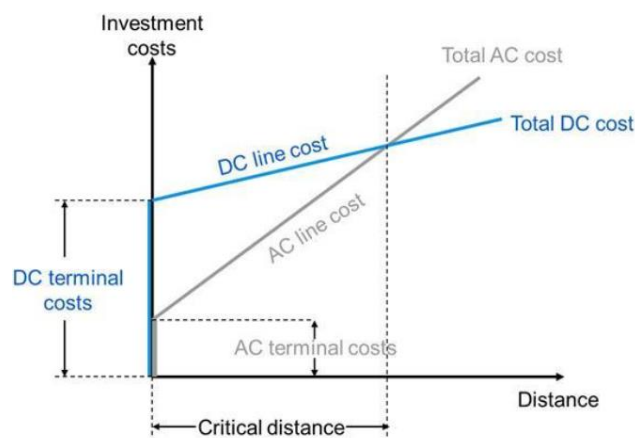
σεις, ανανέωσαν εκ νέου το ενδιαφέρον για τα συστήματα ΣΡ και συγκεκριμένα έφεραν στο προσκήνιο την τεχνολογία HVDC. Σε πλήθος εφαρμογών με συγκεκριμένα χαρακτηριστικά, είναι εύκολο να διαπιστωθεί πως η μεταφορά ισχύος μέσω της τεχνολογίας HVDC αποτελεί την πλέον συμφέρουσα λύση από τεχνοοικονομικής απόψεως και όχι μόνο.

Τα πλεονεκτήματα που προσφέρονται μέσω των εφαρμογών HVDC, σε σχέση με τις αντίστοιχες HVAC, συνοψίζονται στα παρακάτω σημεία:

- **Μεταφορά Ενέργειας Μέσω Αγωγών (απώλειες).** Τα χωρητικά ρεύματα που αναπτύσσονται κατά την μεταφορά ενέργειας με εναλλασσόμενο ρεύμα μέσω υπογείων ή υποβρυχίων αγωγών, αποτελούν τροχοπέδη για τη διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας σε απομακρυσμένους καταναλωτές. Ακόμα και όταν γίνεται λόγος για μέσες αποστάσεις (π.χ 50 km), οι απώλειες που προκαλούνται από τα χωρητικά ρεύματα μπορούν να είναι τόσο υψηλές που η ανάγκη για σταθμούς αντιστάθμισης της αέργου ισχύος κατά μήκος του αγωγού. να είναι

άκρως επιτακτική [8]. Παρόλα αυτά κάτι τέτοιο αποτελεί όχι μόνο μια δαπανηρή λύση αλλά πολλές φορές δεν είναι καν πρακτικό, όπως στην περίπτωση των υποβρύχιων αγωγών. Σε αντίθεση, η μεταφορά ενέργειας μέσω συνεχούς ρεύματος δεν χαρακτηρίζεται από την παρουσία χωρητικών ρευμάτων και έτσι οι παραπάνω περιορισμοί αίρονται. Επιπλέον κατά τη χρήση συνεχούς ρεύματος, οι απώλειες μεταφοράς περιορίζονται ακόμα περισσότερο λόγω της απουσίας του επιδερμικού φαινομένου και της μειωμένης επίδρασης του φαινομένου «Κορόνα» [9].

- *Μεταφορά Υψηλών Ποσοτήτων Ενέργειας σε Μεγάλες Αποστάσεις (κόστος).* Είναι γεγονός πως για την ίδια ποσότητα μεταφερόμενης ισχύος η τεχνολογία ΣΡ απαιτεί μικρότερο αριθμό γραμμών μεταφοράς σε σχέση με την αντίστοιχη ΕΡ. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα οι απώλειες που σχετίζονται με τους μετατροπείς μιας HVDC διασύνδεσης αλλά και το κόστος εγκατάστασης και συντήρησης αυτών, να αντισταθμίζονται και έτσι η επένδυση να αποδεικνύεται συμφέρουσα στο σύνολο της. Γίνεται βέβαια αντιληπτό πως τα οφέλη αυτά γίνονται εμφανή για HVDC συνδέσμους που ξεπερνούν κάποια κρίσιμη απόσταση, όπως φαίνεται ποιοτικά και στο Σχήμα 2.2. Η απόσταση αυτή, για εναέριες γραμμές μεταφοράς, είναι τυπικά μεταξύ των 500 και 800 km, αναλόγως μιας πληθώρας άλλων παραγόντων [10]-[12], ενώ για υποβρύχιους αγωγούς ως κρίσιμη απόσταση θεωρείται αυτή των 60 km [9].
- *Διασύνδεση Ασύγχρονων Δικτύων.* Η απευθείας σύνδεση μεταξύ AC δικτύων που χαρακτηρίζονται από διαφορετική συχνότητα λειτουργίας, αποτελεί εγχείρημα που είναι αδύνατο να υλοποιηθεί. Παρόλα αυτά, κάτι τέτοιο καθίσταται εφικτό μέσω της τεχνολογίας HVDC καθώς μέσω του συνδέσμου ΣΡ απαλείφεται το χαρακτηριστικό της συχνότητας. Με αυτόν τον τρόπο είναι δυνατή η διασύνδεση ασύγχρονων διακρατικών αλλά και διηπειρωτικών ακόμα δικτύων, συμβάλλοντας έτσι στην οικονομικότερη και πιο αξιόπιστη λειτουργία γειτνιαζόντων ΣΗΕ [1].
- *Συμβολή στην Ευστάθεια και στην Ελεγχιμότητα του Δικτύου.* Οι εφαρμογές HVDC και ειδικά αυτές που στηρίζονται στην τεχνολογία των μετατροπέων VSC (VSC-HVDC), χαρακτηρίζονται από την ικανότητα να ανταλλάσσουν άεργο ισχύ με το AC δίκτυο στο οποίο συνδέονται, ρυθμίζοντας έτσι την τάση του δικτύου στα επιθυμητά επίπεδα. Επίσης καθίσταται δυνατή η επιπλέον ελεγχόμενη έγχυση αέργου ισχύος σε περιπτώσεις σφαλμάτων στο AC δίκτυο, με αποτέλεσμα την ταχύτερη επαναφορά και την ισχυροποίηση της συνολικής ευστάθειας του δικτύου [9]. Επιπρόσθετα, στην περαιτέρω ευστάθεια του δικτύου συμβάλει και η δυνατότητα των HVDC συνδέσμων να χρησιμοποιηθούν για την απόσβεση ταλαντώσεων ισχύος χαμηλών συχνοτήτων που προκαλούνται σε AC δίκτυα [13]. Τέλος, μέσω της τεχνολογίας VSC-HVDC, επιτυγχάνεται ο ανεξάρτητος έλεγχος της ενεργού ισχύος, σε σύντομα μάλιστα χρονικά διαστήματα, γεγονός που καθιστά πλήρως αποτελεσματική την ανταλλαγή ισχύος μεταξύ γειτνιαζόντων δικτύων.
- *Ισχυροποίηση του Δικτύου.* Καθόσον γνωρίζουμε, η σύνδεση νέων μονάδων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας σε δίκτυα ΕΡ, τα καθιστά πιο στιβαρά και ικανά να εξυπηρετήσουν ακόμα μεγαλύτερο αριθμό καταναλωτών με αξιοπιστία. Από την άλλη η υλοποίηση τέτοιων συνδέσεων ενέχει κινδύνους σε θέματα διαστασιολόγησης των προστάσιων των υφιστάμενων δικτύων καθώς με



Σχήμα 2.2 Σύγκριση του κόστους επένδυσης των τεχνολογιών HVDC και HVAC, συναρτήσει του μήκους του αγωγού μεταφοράς. Πηγή: [34]

αυτόν τον τρόπο αυξάνονται τα ρεύματα βραχυκύκλωσης. Εν αντιθέσει, η διασύνδεση νέων σταθμών παραγωγής, μέσω της χρήσης HVDC συνδέσμων, δεν οδηγεί στην αύξηση των ρευμάτων βραχυκύκλωσης και έτσι μέσω της τεχνολογίας HVDC επιτυγχάνεται η περαιτέρω ισχυροποίηση των δικτύων EP [14].

- *Προστασία.* Τέλος, οι HVDC σύνδεσμοι, εφόσον συνδέουν διάφορα AC δίκτυα μεταξύ τους, μπορούν να λειτουργήσουν σαν μια δικλείδα ασφαλείας απέναντι στην ανεξέλεγκτη εξάπλωση διαδοχικών διακοπών λειτουργίας. Καθαυτόν τον τρόπο, ένα γενόμενο σφάλμα σε κάποιο δίκτυο δεν επηρεάζει την ομαλή λειτουργία των υπόλοιπων γειτονικών δικτύων [1].

2.3 ΤΥΠΟΙ ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΩΝ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ HVDC

2.3.1 Εισαγωγή

Οι εφαρμογές HVDC που εγκαθίστανται σήμερα σε παγκόσμιο επίπεδο, κάνουν χρήση δύο τύπων μετατροπέων, και κριτήριο διαχωρισμού αυτών αποτελεί το είδος των διακοπτικών στοιχείων που αυτοί χρησιμοποιούν. Πρώτοι εμφανίστηκαν οι μετατροπείς τύπου πηγής ρεύματος (CSC) οι οποίοι βασίζουν τη λειτουργία τους στα θυρίστορ, ενώ μετέπειτα ακολούθησαν οι μετατροπείς τύπου πηγής τάσης (VSC) οι οποίοι λειτουργούν με IGBTs. Παρακάτω αναλύονται τα δύο αυτά είδη μετατροπέων που χρησιμοποιούνται ευρέως στις σύγχρονες εφαρμογές HVDC.

2.3.2 Μετατροπείς Τύπου Πηγής Ρεύματος – Τεχνολογία CSC-HVDC

Οι μετατροπείς τύπου πηγής ρεύματος (CSC) αποτέλεσαν το πρώτο είδος μετατροπέων που χρησιμοποιήθηκε σε σύγχρονες εμπορικές εφαρμογές HVDC. Έκτοτε η τεχνολογία HVDC, που έκανε χρήση αυτού του είδους των μετατροπέων, χαρακτηρίστηκε ως τεχνολογία CSC-HVDC (ή συμβατική τεχνολογία HVDC) και κυριάρχησε για περισσότερο από 50 χρόνια. Τα πρώτα χρόνια οι μετατροπείς CSC βάσιζαν τη λειτουργία τους αποκλειστικά στις λυχνίες τόξου υδραργύρου. Από τις αρχές της δεκαετίας του 1970 όμως, η ανακάλυψη των θυρίστορ ήρθε να αντικαταστήσει τις λυχνίες τόξου υδραργύρου και να δώσει λύση στους περιορισμούς που αυτές έθεταν. Οι μετατροπείς CSC επίσης στη διεθνή βιβλιογραφία χαρακτηρίζονται και ως Line-Commutated Converters (LCC) λόγω του τρόπου με τον οποίο υλοποιείται η αγωγή των διακοπτικών στοιχείων [15].

Η βασική τοπολογία ενός μετατροπέα CSC, είναι η τριφασική γέφυρα εξαπαλμικής πλήρους ανόρθωσης, η οποία είναι γνωστή και ως γέφυρα τύπου Graetz. Η τοπολογία αυτή παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.3. Ο όρος εξαπαλμική, αποδίδεται στους έξι πιθανούς συνδυασμούς διακοπτικών καταστάσεων ανά περίοδο, οι οποίοι παράγουν μία συνεχή τάση με χαρακτηριστικό κυματισμό εξαπλάσιας συχνότητας της θεμελιώδους. Η τριφασική γέφυρα αποτελείται συνολικά από έξι βραχίονες (υποσκέλη), καθένας από τους οποίους δύναται να συγκροτείται από έναν αριθμό θυρίστορ, συνδεδεμένα σε σειρά. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να επιτυγχάνονται μεγαλύτερα επίπεδα συνεχούς τάσης.

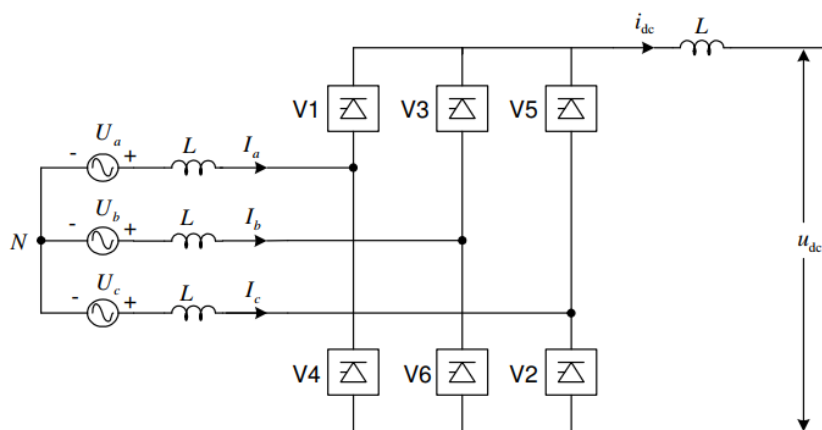
Σε πλήθος εφαρμογών, είναι σύνηθες για τους μετατροπείς CSC να αποτελούνται από δύο εξαπαλμικές γέφυρες συνδεδεμένες σε σειρά, με διαφορά φάσης των 30° στις τάσεις εισόδου μεταξύ τους. Αυτή η διαφορά φάσης επιτυγχάνεται με την παρέμβαση μετασχηματιστών μεταξύ του δικτύου και των εξαπαλμικών γεφυρών. Για τη μεν πρώτη η συνδεσμολογία είναι τύπου αστέρα-αστέρα (Y-Y), ενώ για τη δεύτερη είναι τύπου αστέρα-τριγώνου (Y-Δ). Η τοπολογία αυτή χαρακτηρίζεται ως δωδεκαπαλμική γέφυρα πλήρους ανόρθωσης και συμβάλει στην μείωση των αρμονικών του ρεύματος της πλευράς EP. Παράλληλα από την πλευρά ΣΡ επιτυγχάνονται ακόμα μεγαλύτερα επίπεδα τάσης και μείωση των αρμονικών αυτής [1].

Οι μετατροπείς CSC έχουν τη δυνατότητα μεταφοράς ενεργού ισχύος σε αμφίδρομη κατεύθυνση. Αυτό επιτυγχάνεται εφαρμόζοντας διαφορετικούς παλμούς έναυσης στα θυρίστορ κάθε βραχίονα. Για παλμούς έναυσης κάτω των 90° , ενεργός ισχύς μεταφέρεται από την πλευρά EP προς την πλευρά ΣΡ του μετατροπέα (λειτουργία ανορθωτή). Για παλμούς έναυσης μεταξύ των 90° και των 180° η συνεχής τάση εξόδου αλλάζει πολικότητα (αρνητική) και καθώς το ρεύμα του μετατροπέα, λόγω της φύσης των θυρίστορ, έχει τη δυνατότητα να ρέει μόνο προς μία πλευρά (από την πλευρά EP στην πλευρά ΣΡ), ενεργός ισχύς μεταφέρεται από την πλευρά EP στην πλευρά ΣΡ (λειτουργία αντιστροφέα).

Αν και η τεχνολογία CSC-HVDC έχει αποδειχτεί ιδιαίτερα αξιόπιστη, κυρίως λόγω της υψηλής μεταφορικής ικανότητας και των χαμηλών απωλειών ισχύος που χαρακτηρίζουν τα θυρίστορ [17], οι μετατροπείς CSC εξακολουθούν να εμφανίζουν κάποια αξιοσημείωτα μειονεκτήματα.

Αρχικά, η λειτουργία των μετατροπέων CSC είναι ιδιαίτερα ευπαθής στις διαταραχές του δικτύου EP στο οποίο αυτοί είναι συνδεδεμένοι. Συγκεκριμένα αποκλίσεις στο μέτρο ή στη φάση της τάσης του δικτύου, είναι ικανές να προκαλέσουν σφάλματα μεταγωγής μεταξύ των διακοπτικών στοιχείων του μετατροπέα [18]. Το γεγονός αυτό καθιστά επιτακτική την σύνδεση των μετατροπέων CSC σε ισχυρό δίκτυο EP. Το πόσο ισχυρό ή ασθενές χαρακτηρίζεται ένα AC δίκτυο, έχει να κάνει με το λόγο βραχυκύκλωσης (Short Circuit Ratio- SCR) που υφίσταται σε συγκεκριμένο σημείο του δικτύου. Συγκεκριμένα ως λόγος SCR ορίζεται ο λόγος της ισχύος βραχυκύκλωσης του δικτύου στο σημείο κοινής σύνδεσης (ΣΚΣ-PCC), προς την ονομαστική ισχύ του συνδέσμου. Ισχυρά χαρακτηρίζονται τα δίκτυα με λόγο SCR τιμής άνω του 3. Ασθενή χαρακτηρίζονται τα δίκτυα τα οποία έχουν λόγο SCR που κυμαίνεται μεταξύ των τιμών 2 και 3, ενώ για τιμές κάτω του 2 τα δίκτυα χαρακτηρίζονται ως πολύ ασθενή [19].

Επιπλέον οι μετατροπείς CSC απορροφούν διαρκώς άεργο ισχύ ανεξάρτητα με το αν βρίσκονται σε λειτουργία ανορθωτή ή αντιστροφέα. Ενδεικτικά, η κατανάλωση άεργου ισχύος από τους μετατροπείς, σε εφαρμογές CSC-HVDC, δύναται να φτάσει το 50% της ενεργού διακινούμενης ισχύος, αναλόγως των γωνιών έναυσης των



Σχήμα 2.3 Γέφυρα τύπου Graetz σε διασύνδεση τεχνολογίας CSC-HVDC. Πηγή: [15]

θυρίστορ [16]. Συνεπώς η εγκατάσταση μεγάλων πυκνωτών αντιστάθμισης στην είσοδο των μετατροπέων κρίνεται απαραίτητη, γεγονός που αυξάνει σε μεγάλο βαθμό το κόστος των εφαρμογών CSC-HVDC, ενώ παράλληλα η συνολική εγκατάσταση καταλαμβάνει ακόμα μεγαλύτερη έκταση.

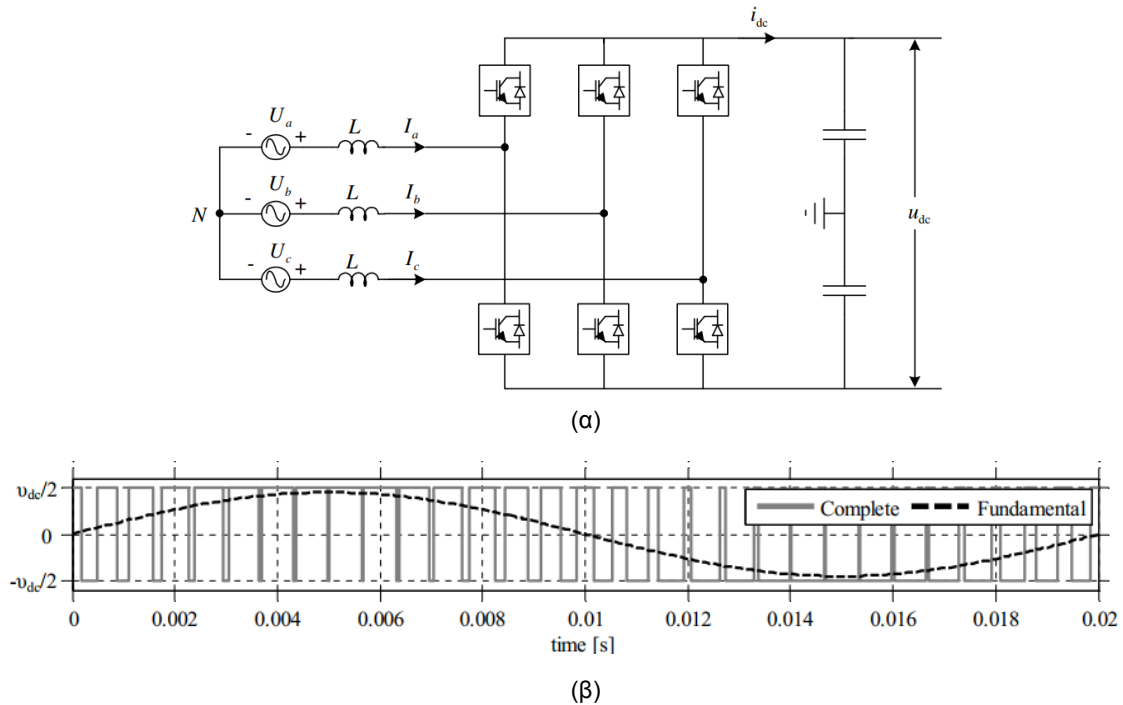
Κάποια εκ των προαναφερθέντων μειονεκτημάτων φαίνεται να μετριάζονται με τη χρήση της τεχνολογίας CCC-HVDC (Capacitor Commutated Converter) στην οποία χρησιμοποιούνται μετατροπείς που διαθέτουν πυκνωτές συνδεδεμένους σε σειρά μεταξύ των διακοπτικών στοιχείων του κάθε βραχίονα και των μετασχηματιστών [1].

2.3.3 Μετατροπείς Τύπου Πηγής Τάσης – Τεχνολογία VSC-HVDC

Οι μετατροπείς τύπου πηγής τάσης (VSC) αποτελούν την τελευταία εξέλιξη της τεχνολογίας των μετατροπέων που χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές HVDC (VSC-HVDC). Από την πρώτη της εμφάνιση το 1997, η τεχνολογία των μετατροπέων VSC έχει γνωρίσει αξιοσημείωτη εξέλιξη και η χρήση της σε διασυνδέσεις HVDC αυξάνεται ολοένα και περισσότερο.

Οι μετατροπείς VSC βασίζουν τη λειτουργία τους σε πλήρως ελεγχόμενους ημιαγωγικούς διακόπτες. Οι περισσότερες εκ των εφαρμογών VSC-HVDC διαθέτουν μετατροπείς που χρησιμοποιούν IGBTs, ενώ ελάχιστες είναι οι περιπτώσεις όπου χρησιμοποιούνται GTOs. Τα IGBTs αποτελούν αυτομεταγόμενους ημιαγωγικούς διακόπτες, δηλαδή η αγωγή αλλά και η σβέση τους επιτυγχάνεται με κατάλληλους παλμούς οδήγησης του ακροδέκτη πύλης και δεν εξαρτάται από την τάση του δικτύου EP. Με αυτόν τον τρόπο οι μετατροπείς VSC έχουν τη δυνατότητα να παράγουν τη δική τους ημιτονοειδή τάση μέσω της διαμόρφωσης εύρους παλμών (PWM), γεγονός που τους καθιστά ως την πλέον κατάλληλη επιλογή σε μεγάλο αριθμό διασυνδέσεων HVDC.

Η απλούστερη τοπολογία ενός τριφασικού μετατροπέα VSC είναι αυτή του μετατροπέα δύο επιπέδων που παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.4 (α). Στην ουσία αποτελεί τη γέφυρα τύπου Graetz, όπου ως διακόπτες αντί για θυρίστορ χρησιμοποιούνται IGBTs. Η τοπολογία αυτή υιοθετήθηκε ως επί το πλείστον από την εταιρία ABB και αποτέλεσε την πρώτη γενιά μετατροπέων VSC που χρησιμοποιήθηκε σε μεγάλο αριθμό εφαρμογών HVDC [20]. Η γέφυρα αποτελείται από έξι διακοπτικές θέσεις συνδεδεμένες με μία αντιπαράλληλη δίοδο ελεύθερης διέλευσης. Κάθε μία εκ των διακοπτικών θέσεων δύναται να αποτελείται από έναν αριθμό IGBTs συνδεδεμένα

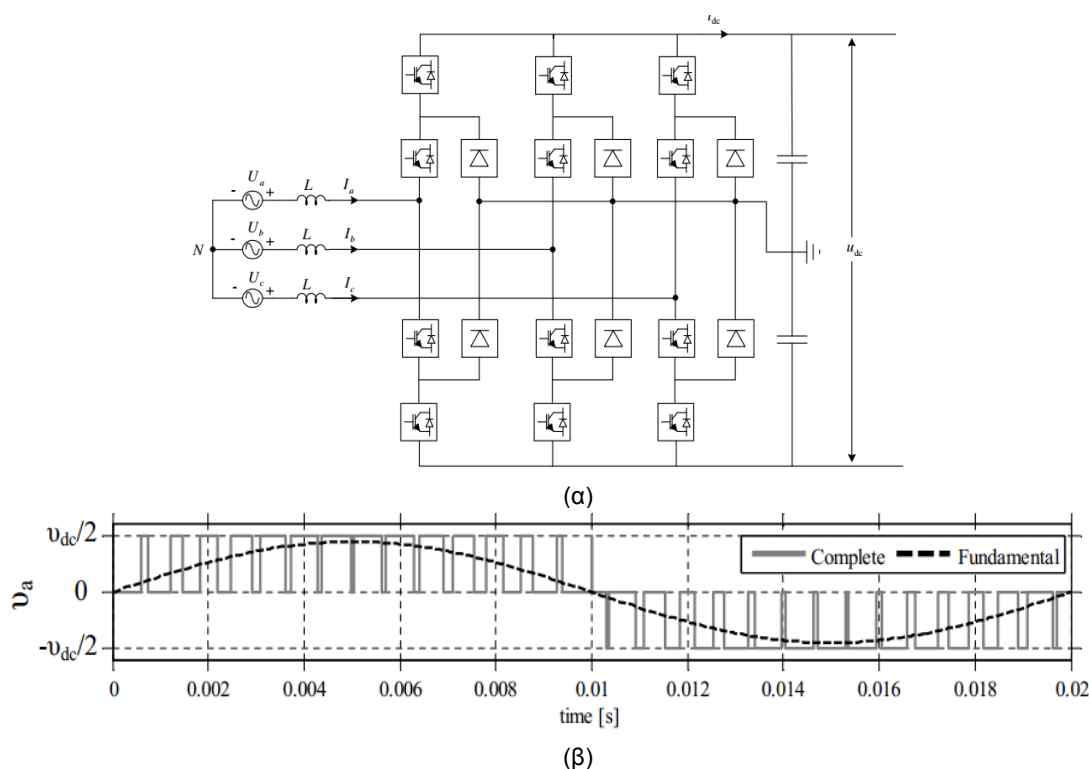


Σχήμα 2.4 (α) Μετατροπέας VSC δύο επιπέδων σε διασύνδεση τεχνολογίας VSC-HVDC, (β) AC τάση εξόδου (μίας φάσης) του μετατροπέα. Πηγή: [15,36]

σε σειρά, έτσι ώστε να επιτυγχάνονται ακόμα υψηλότερα επίπεδα συνεχούς τάσης. Ανά πάσα στιγμή στον ακροδέκτη κάθε φάσης, στην πλευρά ΕΡ του μετατροπέα, συνδέεται είτε το θετικό είτε το αρνητικό δυναμικό της συνεχούς τάσης. Με αυτό τον τρόπο παράγεται μία τετραγωνική κυματομορφή η οποία αποτελεί την εναλλασσόμενη τάση εξόδου του μετατροπέα. Η κυματομορφή αυτή της τάσης εξόδου, που παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.4 (β), κατόπιν χρήσης κατάλληλων φίλτρων, προσεγγίζει τη μορφή της επιθυμητής τάσης εξόδου ημιτονοειδούς μορφής. Παρόλα αυτά, ακόμα και μετά την επενέργεια των φίλτρων, η τάση εξόδου των μετατροπέων VSC δύο επιπέδων συνήθως εξακολουθεί να χαρακτηρίζεται από την έντονη παρουσία αρμονικών συστατικών. Τέλος σημειώνεται πως οι εν λόγω μετατροπείς απαιτούν υψηλή διακοπτική συχνότητα για τον έλεγχο των IGBTs, γεγονός που αυξάνει σε μεγάλο βαθμό τις απώλειες ισχύος κατά τη λειτουργία τους.

Οι μετατροπείς τριών επιπέδων αποτέλεσαν την επόμενη γενιά μετατροπέων VSC, που ήρθε να περιορίσει τα μειονεκτήματα που παρουσίαζε η αντίστοιχη τεχνολογία δύο επιπέδων. Στο Σχήμα 2.5 (α) παρουσιάζεται ένας τριφασικός μετατροπέας τριών επιπέδων με διόδους περιορισμού. Οι μετατροπείς αυτοί στην έξοδο τους, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2.5 (β), παράγουν τάση η οποία χαρακτηρίζεται από τρία επίπεδα, το θετικό και το αρνητικό δυναμικό της συνεχούς τάσης, καθώς και την ενδιάμεση τιμή αυτών (μηδενική τιμή). Αυτό επιτυγχάνεται μέσω της χρήσης διόδων περιορισμού (Diode-Clamped Converters).

Με αυτόν τον τρόπο το αρμονικό περιεχόμενο της τάσης εξόδου μειώνεται αισθητά σε σχέση με τους μετατροπείς δύο επιπέδων, ενώ παράλληλα μειώνεται η διακοπτική συχνότητα και άρα και οι απώλειες ισχύος που προέρχονται από αυτή. Όπως γίνεται αντιληπτό η φιλοσοφία της λειτουργίας των μετατροπέων τριών επιπέδων, μπορεί να επεκταθεί και για την υλοποίηση μετατροπέων με περισσότερα επίπεδα τάσης (πολυεπίπεδοι μετατροπείς), μειώνοντας έτσι περαιτέρω το αρμονικό περιε-

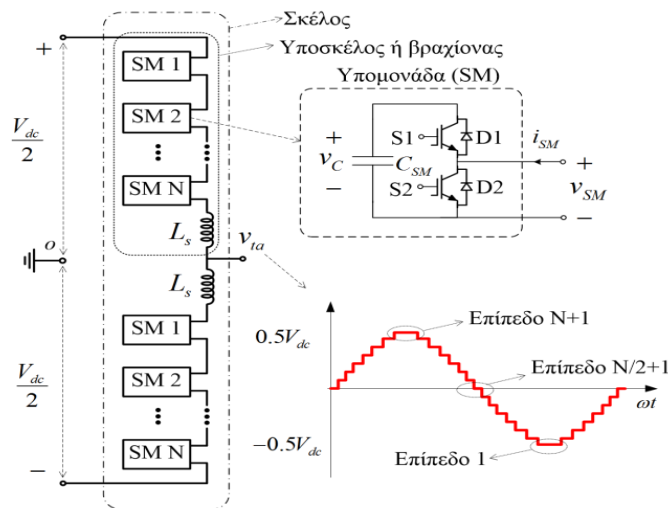


Σχήμα 2.5 (α) Μετατροπέας VSC τριών επιπέδων με διόδους περιορισμού, (β) AC τάση εξόδου (μίας φάσης) του μετατροπέα. Πηγή: [15,36]

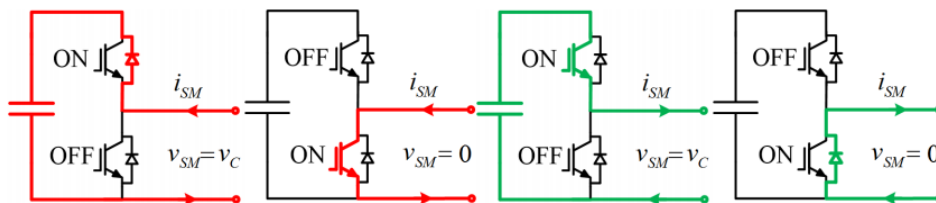
χόμενο της τάσης εξόδου και τις διακοπτικές απώλειες. Εντούτοις ο απαιτούμενος αριθμός διόδων καθώς και η πολυπλοκότητα του ελέγχου καθιστούν τους μετατροπέες αυτού του τύπου, με επίπεδα άνω των τριών, μη πρακτικούς για εφαρμογές HVDC [21].

Παρόλα αυτά, την τελευταία και πλέον δεκαετία ένα νέο είδος πολυεπίπεδων μετατροπέων, οι μετατροπέες MMC (Modular Multilevel Converter), έχουν προταθεί για χρήση σε εφαρμογές HVDC [22,23]. Στην ουσία οι μετατροπέες MMC αποτελούνται από επιμέρους μονοφασικούς μετατροπέες (υπομονάδες) συνδεδεμένους σε σειρά με ανεξάρτητες πηγές συνεχούς τάσης τροφοδοσίας [24]. Η δομή της μίας φάσης ενός τριφασικού μετατροπέα MMC παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.6. Όπως υποδεικνύεται και από την ονομασία τους, στους μετατροπέες αυτούς δεν υπάρχει μία κοινή χωρητικότητα στην πλευρά ΣΡ και έτσι καθεμία από τις υπομονάδες είναι συνδεδεμένη με έναν πυκνωτή. Επίσης κάθε υπομονάδα που απαρτίζει τον μετατροπέα MMC, αποτελείται από δύο διακόπτες και ανάλογα με την κατάσταση αγωγής αυτών, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2.7, διακρίνουμε τις παρακάτω περιπτώσεις:

- *S1 σε αγωγή και S2 σε αποκοπή.* Η υπομονάδα εισάγεται στο κύκλωμα και συνεπώς συνεισφέρει στην συνολική τάση εξόδου της φάσης (σκέλος) του μετατροπέα. Η χωρητικότητα εκφορτίζεται όταν το ρεύμα i_{SM} εξέρχεται από τον θετικό της ακροδέκτη και φορτίζεται όταν το ρεύμα εισέρχεται σε αυτόν, ρέοντας μέσω της διόδου ελεύθερης διέλευσης D1.
- *S2 σε αγωγή και S1 σε αποκοπή.* Η υπομονάδα απεντάσσεται από το κύκλωμα με αποτέλεσμα να μην συνεισφέρει στην συνολική τάση εξόδου



Σχήμα 2.6 Δομή της μίας φάσης και κυματομορφή της τάσης εξόδου του μετατροπέα MMC. Πηγή: [37]



Σχήμα 2.7 Οδοί διέλευσης ρεύματος της υπομονάδας ανάλογα με την αγωγή των διακοπών S1 και S2. Πηγή: [37]

της φάσης του μετατροπέα. Στην περίπτωση αυτή η τάση της χωρητικότητας δεν μεταβάλλεται καθώς δεν διαρρέεται από το ρεύμα i_{SM} .

- S1 και S2 σε αποκοπή. Η υπομονάδα είναι μπλοκαρισμένη και η τάση στα άκρα της δεν είναι ελεγχόμενη καθώς υπάρχει ελεύθερη διέλευση ρεύματος μέσω των διόδων D1 και D2.

Με αυτόν τον τρόπο οι μετατροπείς MMC δύναται να παράγουν τάση πολλαπλών επιπέδων σε κάθε φάση τους, ανάλογα με το πλήθος των υπομονάδων που εντάσσονται κάθε δεδομένη στιγμή στο κύκλωμα. Επιπλέον όσο μεγαλύτερος είναι ο αριθμός των υπομονάδων που διαθέτει ο μετατροπέας ανά βραχίονα, τόσο περισσότερα είναι τα συνολικά επίπεδα που χαρακτηρίζουν την κυματομορφή της τάσης εξόδου. Έτσι γίνεται αντιληπτό πως όταν ο συνολικός αριθμός των επιπέδων αυτών είναι αρκετά μεγάλος, οι μετατροπείς MMC παρουσιάζουν ελάχιστες αρμονικές συνιστώσες και έτσι η χρησιμοποίηση φίλτρων δεν κρίνεται απαραίτητη.

Πέραν της μείωσης του αρμονικού περιεχομένου της τάσης εξόδου, οι μετατροπείς MMC ενδείκνυνται για εφαρμογές υψηλής τάσης καθώς το πλάτος της τάσης εξόδου του μετατροπέα δύναται να αυξηθεί ανά πάσα στιγμή, με την εισαγωγή νέων υπομονάδων σε κάθε βραχίονα ενός ήδη υπάρχοντος μετατροπέα αυτού του είδους. Επιπλέον, οι μετατροπείς MMC που αποτελούνται από μεγάλο αριθμό υπομονάδων, χαρακτηρίζονται από πολύ χαμηλές διακοπτικές συχνότητες, γεγονός που καθιστά τις απώλειες ισχύος από την αγωγή και σβέση των διακοπτικών στοιχείων σχεδόν αμελητέες. Τέλος εξίσου σημαντικό θεωρείται το γεγονός πως σε περίπτωση βραχυκυκλώματος στην πλευρά ΣΡ του μετατροπέα, οι χωρητικότητες

των υπομονάδων δεν εκφορτίζονται απαραίτητα, γεγονός που επιτρέπει στο κύκλωμα ελέγχου την ταχύτερη απόσβεση του σφάλματος [23].

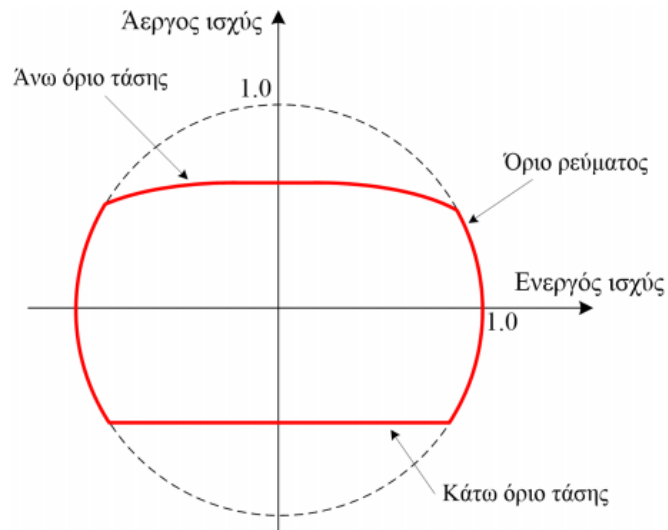
Ανεξαρτήτως της τοπολογίας που χρησιμοποιείται, ένας μετατροπέας VSC μπορεί να θεωρηθεί ως μία ιδανική πηγή τάσης η οποία παράγει τάση ημιτονοειδούς κυματομορφής και επιθυμητού μέτρου, φάσης και συχνότητας. Οι επιθυμητές αυτές τιμές προσδιορίζονται από το κύκλωμα ελέγχου του μετατροπέα, το οποίο παρόλα αυτά θα πρέπει να σχεδιάζεται με τέτοιο τρόπο, ώστε να λαμβάνονται υπόψη εγγενείς περιορισμοί ως προς τη μεταφορά ενεργού και αέργου ισχύος.

Ένας εκ των περιορισμών αυτών, αφορά τη μέγιστη ένταση του ρεύματος που μπορεί να ρέει μέσω των διακοπτικών στοιχείων του μετατροπέα. Έτσι λόγω του ότι, τόσο η ενεργός όσο και η άεργος ισχύς συμβάλλουν στον καθορισμό του μέτρου του ρεύματος του μετατροπέα, γίνεται αντιληπτό πως η ανάγκη αέργου ισχύος καθορισμένης τιμής (πχ. για την υποστήριξη της τάσης του ζυγού του μετατροπέα), περιορίζει την επιτρεπόμενη τιμή ενεργού ισχύος που μπορεί να διακινήθει από τον μετατροπέα και αντιστρόφως. Έτσι το μέτρο του ρεύματος δεν επιτρέπεται να υπερβεί σε καμία περίπτωση την ονομαστική του τιμή.

Ένας επιπλέον παράγοντας που περιορίζει ακόμα περισσότερο τη μεταφορά ενεργού και αέργου ισχύος είναι το μέγιστο και το ελάχιστο δυνατό πλάτος της τάσης εξόδου του μετατροπέα. Το μεν πρώτο, καθορίζεται από την τιμή της συνεχούς τάσης και τη μέγιστη τιμή του συντελεστή διαμόρφωσης, περιορίζοντας κατά αυτό τον τρόπο τη μέγιστη ικανότητα έγχυσης αέργου ισχύος. Το δε δεύτερο, καθορίζεται από την ελάχιστη επιθυμητή τιμή, διακινούμενης ενεργού ισχύος του μετατροπέα. Όπως φαίνεται παραστατικά στο Σχήμα 2.8, οι περιορισμοί που αναφέρονται παραπάνω, σχηματίζουν έναν γεωμετρικό όριο εντός του οποίου περιέχονται οι επιτρεπόμενες τιμές ενεργού και αέργου ισχύος ενός μετατροπέα VSC [25].

Οι μετατροπείς VSC, λόγω της τεχνολογίας των IGBTs, χαρακτηρίζονται από υψηλότερες απώλειες και χαμηλότερη ικανότητα διακίνησης ισχύος συγκριτικά με την με τη συμβατική τεχνολογία των μετατροπέων CSC. Παρόλα αυτά η τεχνολογία VSC-HVDC φαίνεται να μετριάζει, αν όχι να εξαλείφει πλήρως, πολλούς από τους εγγενείς περιορισμούς που παρουσιάζει η αντίστοιχη τεχνολογία CSC-HVDC. Αρχικά όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, η αγωγή των διακοπτικών στοιχείων ενός μετατροπέα VSC δεν εξαρτάται από την τάση του δικτύου EP και έτσι δεν παρατηρούνται σφάλματα μεταγωγής. Επίσης το γεγονός αυτό, καθιστά αυτό το είδος μετατροπέων ως την πλέον κατάλληλη επιλογή για τη μεταφορά ισχύος σε απομακρυσμένους μεμονωμένους καταναλωτές σε νησιδοποιημένα συστήματα, αλλά και σε ασθενή δίκτυα EP, που χαρακτηρίζονται από χαμηλή ισχύ βραχυκύκλωσης [26]. Επιπλέον οι μετατροπείς VSC αποτελούν την μοναδική επιλογή για την υλοποίηση διασύνδεσεων HVDC πολυτερματικών δικτύων, για τα οποία θα γίνει λόγος παρακάτω.

Πέραν των προαναφερθέντων, μέσω της τεχνολογίας VSC-HVDC επιτυγχάνεται ο πλήρως ανεξάρτητος έλεγχος της διακινούμενης ενεργού και αέργου ισχύος του μετατροπέα [1], σε αντίθεση με τους μετατροπείς CSC που χαρακτηρίζονται από συνεχή απορρόφηση αέργου ισχύος. Παράλληλα οι μετατροπείς VSC διακρίνονται για την ευκολία τους να αντιστρέφουν τη ροή της ενεργού ισχύος ταχύτατα, και δίχως να απαιτείται η αντιστροφή της πολικότητας της συνεχούς τάσης [27]. Τέλος οι εν λόγω μετατροπείς, φαίνεται να προτιμώνται και για λόγους εργονομίας καθώς



Σχήμα 2.8 Διάγραμμα επιτρεπόμενων τιμών ενεργού και αέργου ισχύος μετατροπέα VSC. Πηγή: [37]

η συνολική τους εγκατάσταση είναι πολύ μικρότερη σε όγκο σε σχέση με την αντίστοιχη εγκατάσταση των μετατροπέων CSC [28]. Τέλος, η δυναμική υποστήριξη τάσης που προσφέρουν οι μετατροπείς VSC στο ζυγό εξόδου τους, συμβάλλει στην γενικότερη ευστάθεια της τάσης του συστήματος [12].

2.4 ΤΟΠΟΛΟΓΙΕΣ ΣΥΝΔΕΣΜΩΝ HVDC

2.4.1 Εισαγωγή

Η εκάστοτε τοπολογία που επιλέγεται για την εγκατάσταση των συνδέσμων HVDC, κατατάσσει τις διασυνδέσεις αυτού του τύπου στις παρακάτω κατηγορίες [29] :

- Τοπολογία Μονοπόλου
- Τοπολογία Διπόλου
- Τοπολογία Back-to-Back
- Πολυτερματική Διασύνδεση

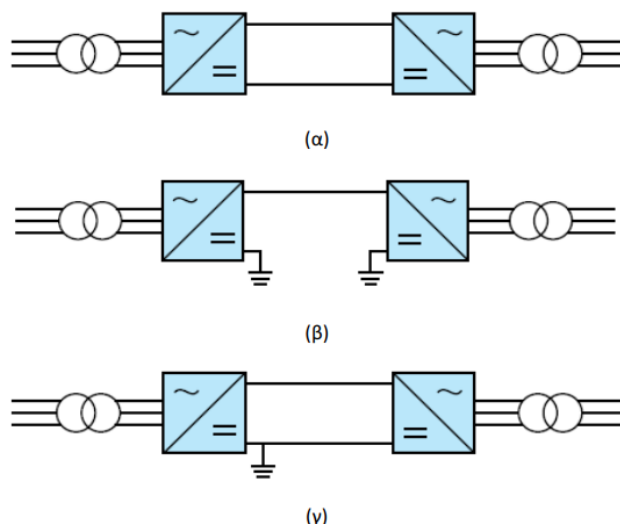
Καθεμία από τις παραπάνω τοπολογίες, με τις παραλλαγές που αυτή διαθέτει, έχει τα δικά της χαρακτηριστικά και παρουσιάζει τα δικά της πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα, όπως αυτά παρατίθενται εν συντομία, στις παραγράφους που ακολουθούν [20,29,30].

2.4.2 Τοπολογία Μονοπόλου

Η τοπολογία μονοπόλου χαρακτηρίζεται από την ύπαρξη δύο μετατροπέων, ένας στο κάθε άκρο της διασύνδεσης και τη σύνδεση μεταξύ τους με έναν πόλο μεταφοράς ισχύος. Η τοπολογία αυτή με τη σειρά της, διαχωρίζεται στις παραλλαγές που αναλύονται παρακάτω και η κυκλωματική τους αναπαράσταση παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.9.

2.4.2.1 Τοπολογία Συμμετρικού Μονοπόλου

Η τοπολογία αυτή χρησιμοποιεί δύο μονωμένους αγωγούς υψηλής τάσης για την διασύνδεση των μετατροπέων. Οι αγωγοί αυτοί, υπό κανονική λειτουργία, βρίσκονται υπό την ίδια τάση προς τη γη (η μισή ονομαστική συνεχής τάση των μετατροπέων) και σε αντίθετη πολικότητα.



Σχήμα 2.9 Κυκλωματική αναπαράσταση παραλλαγών τοπολογίας μονοπόλου. α) Συμμετρικό μονόπολο, β) Ασύμμετρο μονόπολο με ηλεκτρόδια γείωσης, γ) Ασύμμετρο μονόπολο με γειωμένη μεταλλική επιστροφή. Πηγή [20].

Η τοπολογία συμμετρικού μονοπόλου, ακριβώς λόγω του συμμετρικού της χαρακτήρα, δεν επιβαρύνει με καταπονήσεις τους μετασχηματιστές που παρεμβάλλονται μεταξύ των μετατροπέων και του δικτύου εξαιτίας συνεχών συνιστωσών του ρεύματος. Επίσης η τοπολογία αυτή χαρακτηρίζεται από την απουσία ροής συνεχούς ρεύματος ως προς τη γη. Τέλος στα πλεονεκτήματα συγκαταλέγεται και το γεγονός πως στην περίπτωση εμφάνισης κάποιου σφάλματος στο σύνδεσμο, αυτό δεν τροφοδοτείται με ρεύματα προερχόμενα από την πλευρά ΕΡ του μετατροπέα.

Παρόλα αυτά η ύπαρξη στην τοπολογία αυτή και δεύτερου αγωγού υψηλής τάσης, αυξάνει το κόστος της εγκατάστασης ενώ παράλληλα δεν συμβάλει στην εφεδρία του συστήματος, καθώς σε περίπτωση απώλειας ακόμα και ενός εκ των δύο αγωγών λόγω βλάβης, η διασύνδεση καθίσταται αυτομάτως μη λειτουργική.

2.4.2.2 Τοπολογία Ασύμμετρου Μονοπόλου με Ηλεκτρόδια Γείωσης

Στην τοπολογία αυτή χρησιμοποιείται ένας μόνο αγωγός υψηλής τάσης, καθώς η επιστροφή του ρεύματος πραγματοποιείται μέσω γειωμένων ηλεκτροδίων που βρίσκονται στους μετατροπείς. Με αυτό τον τρόπο η εν λόγω τοπολογία αποδεικνύεται οικονομικότερη συγκριτικά με αντίστοιχες τοπολογίες μονοπόλου όπου γίνεται χρήση και δεύτερου αγωγού. Στον οικονομικότερο χαρακτήρα της τοπολογίας αυτής συμβάλλουν και οι μειωμένες απώλειες που χαρακτηρίζουν τα ηλεκτρόδια γείωσης σε σχέση με διαμήκεις αγωγούς. Εξίσου σημαντικό θεωρείται και το γεγονός πως εφόσον απαιτηθεί, η τοπολογία αυτή δύναται με ευκολία να επεκταθεί σε τοπολογία διπόλου [30].

Από την άλλη δεν πρέπει να παραβλέπεται το γεγονός πως η τοπολογία αυτή λόγω του ασύμμετρου της χαρακτήρα, παρουσιάζει κάποια συνεχή συνιστώσα στις φασικές τάσεις εξόδου των μετατροπέων. Αυτό με τη σειρά του εγείρει σοβαρούς προβληματισμούς σχετικά με τις καταπονήσεις των μετασχηματιστών και χρήζει κατάλληλης σχεδίασης. Επίσης η εν λόγω τοπολογία χαρακτηρίζεται από τη συνεχή λειτουργία με ρεύματα υψηλής έντασης τα οποία αντλούνται μέσω των ηλεκτροδίων γείωσης. Τέλος, σημειώνεται πως σε περίπτωση εμφάνισης κάποιου σφάλματος στο σύνδεσμο, αυτό τροφοδοτείται με ρεύματα προερχόμενα από την πλευρά του δικτύου ΕΡ.

2.4.2.3 Τοπολογία Ασύμμετρου Μονοπόλου με Γειωμένη Μεταλλική Επι-στροφή

Η τοπολογία αυτή αποτελεί κατά μία έννοια μία παραλλαγή του συνδυασμού των δύο προαναφερθέντων τοπολογιών μονοπόλου. Συγκεκριμένα, πέρα από το μονωμένο αγωγό υψηλής τάσης χρησιμοποιείται και δεύτερος μεταλλικός αγωγός, ο οποίος όμως στο ένα άκρο του συνδέεται με τη γη. Έτσι η περίπτωση αυτή αποτελεί μία λιγότερο κοστοβόρα λύση συγκριτικά με αυτή του συμμετρικού μονοπόλου, ενώ παράλληλα περιορίζεται η συνεχής άντληση ρευμάτων υψηλής έντασης από τη γη. Παρόλα αυτά η εν λόγω τοπολογία εξακολουθεί να χαρακτηρίζεται από τα μειονεκτήματα που παρουσιάζει η τοπολογία συμμετρικού μονοπόλου και η τοπολογία ασύμμετρου μονοπόλου με ηλεκτρόδια γείωσης.

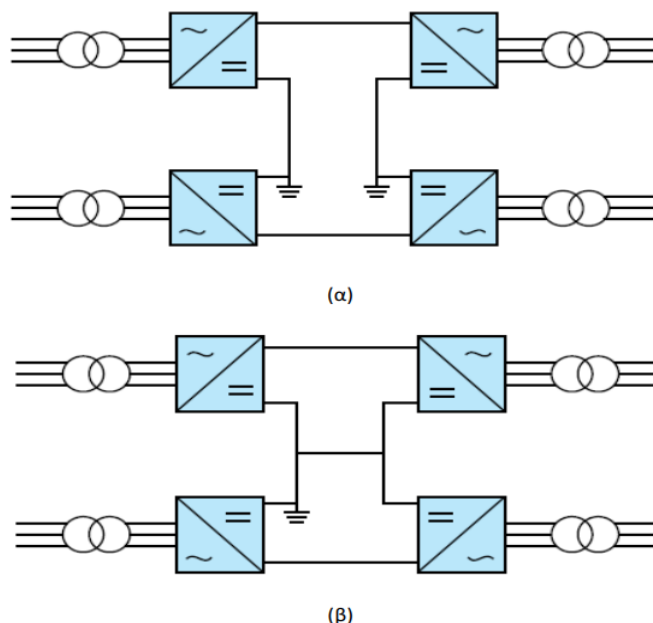
2.4.3 Τοπολογία Διπόλου

Η τοπολογία διπόλου χαρακτηρίζεται από την ύπαρξη τεσσάρων συνολικά μετατροπών (δύο σε κάθε άκρο της διασύνδεσης), οι οποίοι έχουν τη δυνατότητα να λειτουργούν εντελώς ανεξάρτητα. Μολονότι το κόστος αυτής της επιλογής λόγω του επιπλέον αριθμού των μετατροπών αυξάνει κατά πολύ, η τοπολογία διπόλου προτιμάται σε μεγάλο αριθμό εφαρμογών HVDC. Ο κύριος λόγος για το γεγονός αυτό είναι η εφεδρεία που παρέχεται, καθώς η διασύνδεση δύναται να συνεχίσει την λειτουργία της ακόμα και μετά την απώλεια ενός εκ των δύο πόλων που την αποτελούν. Βέβαια η τοπολογία χαρακτηρίζεται από ασυμμετρία γεγονός που την καθιστά εξίσου ευάλωτη στους περιορισμούς που παρουσιάζει η τοπολογία ασύμμετρου μονοπόλου. Παρακάτω αναλύονται εν συντομία, οι κυριότερες παραλλαγές της τοπολογίας διπόλου ενώ η κυκλωματική τους αναπαράσταση παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.10.

2.4.3.1 Τοπολογία Διπόλου με Ηλεκτρόδια Γείωσης

Η τοπολογία αυτή δύναται να θεωρηθεί ως μία παράλληλη σύνδεση δύο συστημάτων τοπολογίας ασύμμετρου μονοπόλου με ηλεκτρόδια γείωσης [29]. Με αυτόν τον τρόπο, ο ένας εκ των δύο πόλων, για κάθε ένα από τους τέσσερις μετατροπείς της διασύνδεσης, συνδέεται με τη γη ενώ ο έτερος αποτελεί μονωμένο αγωγό υψηλής τάσης που συνδέεται με τον αντίστοιχο μετατροπέα στο άλλο άκρο της διασύνδεσης. Έτσι γίνεται αντιληπτό πως για αγωγό με ονομαστική τάση και ονομαστικό ρεύμα δεδομένης τιμής, η εν λόγω τοπολογία δύναται να μεταφέρει τη διπλάσια ισχύ συγκριτικά με την αντίστοιχη τοπολογία ασύμμετρου μονοπόλου λόγω της ύπαρξης δύο πόλων μεταφοράς ισχύος.

Παράλληλα υπάρχει η δυνατότητα μεταφοράς ισχύος της ίδιας επιθυμητής τιμής με την αντίστοιχη τοπολογία ασύμμετρου μονοπόλου, με τη διαφορά πως σε περίπτωση όπου για λόγους σφάλματος ένας εκ των δύο πόλων τεθεί εκτός λειτουργίας, ο έτερος συνεχίζει τη μεταφορά ισχύος μισής τιμής. Από την άλλη, σε περιπτώσεις όπου δεν έχουμε ίδια επίπεδα φόρτισης στους μετατροπείς της διασύνδεσης, μεγάλα ρεύματα αντλούνται από τα ηλεκτρόδια γείωσης γεγονός το οποίο γενικά είναι ανεπιθύμητο. Το ίδιο συμβαίνει και στις περιπτώσεις σφάλματος, όπου η λειτουργία της διασύνδεσης βασίζεται σε έναν μόνο πόλο και τα ηλεκτρόδια γείωσης λειτουργούν ως οδός επιστροφής του ρεύματος.



Σχήμα 2.10 Κυκλωματική αναπαράσταση παραλλαγών τοπολογίας διπόλου. α) Δίπολο με ηλεκτρόδια γείωσης, β) Δίπολο με γειωμένο μεταλλικό ουδέτερο. Πηγή: [20].

2.4.3.2 Τοπολογία Διπόλου με Γειωμένο Μεταλλικό Ουδέτερο

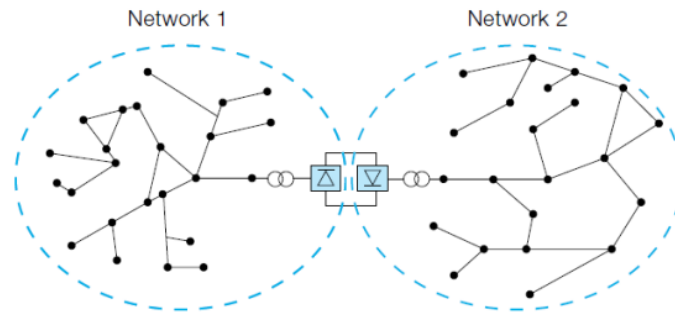
Η τοπολογία αυτή δύναται να θεωρηθεί ως μία παράλληλη σύνδεση δύο συστημάτων τοπολογίας ασύμμετρου μονοπόλου με γειωμένη μεταλλική επιστροφή. Σε αντίθεση με την προηγούμενη τοπολογία, εδώ δεν γίνεται απευθείας χρήση ηλεκτροδίων γείωσης, αλλά μεταξύ των μετατροπών του κάθε άκρου της διασύνδεσης υπάρχει ένας μεταλλικός αγωγός ο οποίος γειώνεται. Έτσι σε περιπτώσεις που έχουμε διαφορετικά επίπεδα φόρτισης στους μετατροπείς, όπως πχ. κατά την απώλεια ενός πόλου λόγω σφάλματος, η επιστροφή του ρεύματος ακολουθεί τον μεταλλικό αγωγό του ουδέτερου και δεν υλοποιείται μέσω της άντλησης ρευμάτων από τη γη.

2.4.4 Τοπολογία Back-to-Back

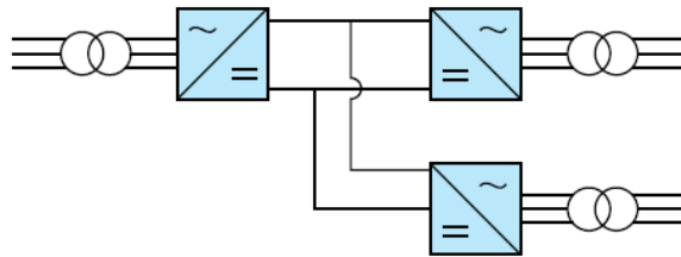
Η τοπολογία αυτή αποτελείται από δύο μετατροπείς οι οποίοι είναι εγκατεστημένοι στον ίδιο σταθμό. Λόγω της απευθείας σύνδεσης των δύο μετατροπών, γίνεται αντιληπτό πως στην εν λόγω τοπολογία η ύπαρξη ενός διαμήκη συνδέσμου ΣΡ πρακτικά δεν υφίσταται, όπως φαίνεται παραστατικά και στο Σχήμα 2.11. Οι διασυνδέσεις τοπολογίας back-to-back εφαρμόζονται μεταξύ ασύγχρονων δικτύων ΕΡ που χαρακτηρίζονται από διαφορετική συχνότητα λειτουργίας. Παράλληλα η εφαρμογή της τοπολογίας αυτής καθιστά δυνατή την «κατάτμηση» ενός πολύ ισχυρού AC δικτύου σε δύο επιμέρους δίκτυα με την ίδια συχνότητα λειτουργίας, επιτυγχάνοντας έτσι τη μείωση του ρεύματος βραχυκύκλωσης [20].

2.4.5 Πολυτερματικά Δίκτυα

Σε αντίθεση με τις προαναφερθείσες τοπολογίες που αποτελούν ακτινικές διασυνδέσεις (point-to-point), τα πολυτερματικά δίκτυα αφορούν τη διασύνδεση περισσότερων από δύο σταθμούς μετατροπών. Ένα παράδειγμα πολυτερματικού δικτύου σε τοπολογία συμμετρικού μονοπόλου παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.12. Τα δίκτυα αυτά αποτελούνται από μετατροπείς που συνδέονται μεταξύ τους σύμφωνα με τις τοπολογίες που παρουσιάστηκαν παραπάνω ή και με συνδυασμό αυτών.



Σχήμα 2.11 Τοπολογία διασύνδεσης Back-to-Back. Πηγή: [20].



Σχήμα 2.12 Πολυτερματικό δίκτυο τοπολογίας συμμετρικού μονοπόλου. Πηγή: [20].

Η υλοποίηση των πολυτερματικών δικτύων κατέστη ευκολότερη με την εμφάνιση των μετατροπών VSC. Οι εν λόγω μετατροπές προσφέρουν μεγαλύτερη ευελιξία όσο αφορά την αμφίδρομη ροή ενεργού ισχύος, χωρίς να απαιτείται η αντιστροφή της συνεχούς τάσης, με αποτέλεσμα τη δυνατότητα διασύνδεσης πολλαπλών κόμβων στο ίδιο σύστημα [31]. Τέλος, τα δίκτυα αυτά επιτρέπουν τη διασύνδεση απομακρυσμένων θαλάσσιων αιολικών πάρκων (ΘΑΠ) με το ηπειρωτικό δίκτυο ΕΡ, αλλά και τη διασύνδεση πολλαπλών επιμέρους δικτύων ΕΡ, θωρακίζοντας έτσι την αξιοπιστία του συστήματος συνολικά.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΕΛΕΓΧΟΥ ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΩΝ ΣΕ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ VSC-HVDC

3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ο έλεγχος των μετατροπέων VSC, που χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές HVDC, αποτελεί κατά βάση μία αρκετά πολύπλοκη διαδικασία. Παρόλα αυτά, η υλοποίηση του ελέγχου είναι ζωτικής σημασίας για την αυτόματη και αποτελεσματική λειτουργία των μετατροπέων σε κάθε πιθανή κατάσταση που δύναται να προκύψει βάση των εκάστοτε αναγκών του συστήματος. Με αυτόν τον τρόπο εδραιώνεται η εν γένει αξιοπιστία ενός συστήματος VSC-HVDC.

Οι τεχνικές ελέγχου που εφαρμόζονται σε μετατροπείς VSC αφορούν συνήθως δύο επίπεδα ελέγχου, το ανώτερο και το κατώτερο. Το ανώτερο επίπεδο ελέγχου αφορά την διαδικασία κατά την οποία, μέσω διαφόρων ελεγκτών, παράγονται κατάλληλα σήματα αναφοράς. Τα σήματα αυτά, που στην ουσία αποτελούν κυματομορφές τάσης, στη συνέχεια τροφοδοτούνται στον μετατροπέα και μέσω της εκάστοτε τεχνικής διαμόρφωσης που υιοθετείται έχουμε ως αποτέλεσμα την παραγωγή ηλεκτρικών μεγεθών επιθυμητής τιμής (μέτρο-γωνία τάσης, ρεύμα, ενεργός-άεργος ισχύς κ.α.). Το κατώτερο επίπεδο ελέγχου από την άλλη αφορά την αυτή καθαυτή διαδικασία της διαμόρφωσης, που υλοποιείται εντός των λογικών κυκλωμάτων του μετατροπέα, και του τρόπου με τον οποίο στη συνέχεια παλμοδοτούνται τα διακοπτικά στοιχεία.

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται οι πλέον διαδεδομένες τεχνικές ελέγχου ανωτέρου επιπέδου, που χρησιμοποιούνται σε συστήματα VSC-HVDC, καθώς και μία προτεινόμενη τεχνική ελέγχου για συστήματα, στα οποία ένα εκ των άκρων του συνδέσμου HVDC είναι συνδεδεμένο σε πολύ ασθενές δίκτυο ΕΡ.

3.2 ΕΛΕΓΧΟΣ ΙΣΧΥΟΣ-ΓΩΝΙΑΣ

Ο έλεγχος ισχύος-γωνίας, γνωστός εναλλακτικά και ως έλεγχος τάσης-γωνίας [38], αποτελεί την πλέον απλοποιημένη τεχνική ελέγχου για μετατροπείς VSC. Η βασική αρχή του ελέγχου αυτού βασίζεται στις παρακάτω σχέσεις, οι οποίες εκφράζουν την διακινούμενη ενεργό ισχύ P και άεργο ισχύ Q μεταξύ δύο ζυγών ενός δικτύου ΕΡ,

$$P = \frac{U_1 U_2 \sin\theta}{X} \quad (3.1)$$

$$Q = \frac{U_1^2 - U_1 U_2 \cos\theta}{X} \quad (3.2)$$

όπου U_1 και U_2 το μέτρο της τάσης του κάθε ζυγού, θ η διαφορά φάσης αυτών και X η αντίδραση της αυτεπαγωγής της γραμμής. Θεωρώντας τώρα πως ο ένας ζυγός αναπαριστά ένα δίκτυο ΕΡ και ο έτερος έναν μετατροπέα VSC που είναι συνδεδε-

μένος σε αυτό, οι παραπάνω σχέσεις μπορούν να περιγράψουν την ισχύ που ανταλλάσσεται μεταξύ του μετατροπέα VSC και του δικτύου. Συνεπώς εάν E είναι το μέτρο της τάσης του δικτύου και U_f το μέτρο της τάσης στο ζυγό των φίλτρων στην έξοδο του μετατροπέα, οι παραπάνω σχέσεις λαμβάνουν την ακόλουθη μορφή

$$P = \frac{E U_f \sin\theta}{X} \quad (3.3)$$

$$Q = \frac{E^2 - E U_f \cos\theta}{X} \quad (3.4)$$

Παρατηρώντας τις εν λόγω σχέσεις γίνεται αντιληπτό πως η ενεργός ισχύς, που ανταλλάσσεται μεταξύ του μετατροπέα VSC και του δικτύου, σχετίζεται κατά κύριο λόγο με τη γωνία θ . Συνεπώς μία πιθανή μεταβολή της γωνίας αυτής θα επιφέρει και μεταβολή στην τιμή της ενεργού ισχύος, που εγχέεται ή απορροφάται από τον μετατροπέα. Αντίστοιχα η τιμή της αέργου ισχύος, θεωρώντας πως το μέτρο της τάσης του δικτύου είναι πρακτικά αμετάβλητο, επηρεάζεται κυρίως από τη μεταβολή του μέτρου της τάσης εξόδου u_f του μετατροπέα. Βέβαια πρέπει να σημειωθεί πως η εκάστοτε τιμή εγχεόμενης και απορροφούμενης αέργου ισχύος, εξαρτάται από το συντελεστή διαμόρφωσης υπό τον οποίο λειτουργεί ο μετατροπέας [39]. Περαιτέρω, οι παραπάνω σχέσεις καταδεικνύουν πως η μεταβολή αποκλειστικά της γωνίας θ ή αντίστοιχα της τάσης U_f έχει ως αποτέλεσμα τη μεταβολή και της ενεργού αλλά και της αέργου ισχύος ταυτοχρόνως. Έτσι γίνεται αντιληπτό πως μέσω του ελέγχου ισχύος-γωνίας δεν δύναται να υλοποιηθεί ο ανεξάρτητος έλεγχος των δύο αυτών μεγεθών [40].

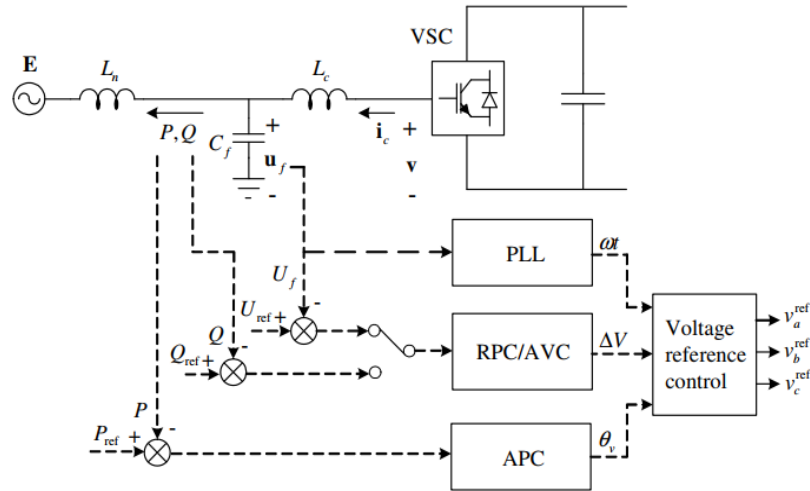
Στο Σχήμα 3.1 παρουσιάζεται το μονοφασικό ισοδύναμο κύκλωμα, συμπεριλαμβανομένων των διατάξεων ελέγχου (ελεγκτές), ενός μετατροπέα VSC στον οποίο εφαρμόζεται ο έλεγχος ισχύος-γωνίας. Αναλυτικότερα, οι ελεγκτές που πλαισιώνουν τη εν λόγω τεχνική ελέγχου παρουσιάζονται παρακάτω

- *Ελεγκτής Αέργου Ισχύος (RPC)*. Η διάταξη αυτή είναι υπεύθυνη για τον έλεγχο της αέργου ισχύος από και προς τον μετατροπέα, μέσω της μεταβολής του μέτρου της τάσης u_f στην έξοδο αυτού. Η μεταβολή αυτή υλοποιείται με τη χρήση ενός PI ελεγκτή και εφαρμόζοντας τον ακόλουθο νόμο ελέγχου

$$\Delta V = \left(k_p^Q + \frac{k_i^Q}{s} \right) (Q_{ref} - Q) \quad (3.5)$$

όπου ΔV είναι η μεταβολή του μέτρου της τάσης αναφοράς $U_{f ref}$, k_p^Q και k_i^Q τα κέρδη του PI ελεγκτή, Q η μετρούμενη αέργος ισχύς στην έξοδο του μετατροπέα και Q_{ref} η αντίστοιχη επιθυμητή τιμή αέργου ισχύος (αέργος ισχύς αναφοράς).

- *Ελεγκτής Εναλλασσόμενης Τάσης (AVC)*. Εναλλακτικά και εφόσον στην έξοδο του μετατροπέα απαιτείται ο έλεγχος της τάσης U_f , αντί του ελεγκτή



Σχήμα 3.1 Κύκλωμα ελέγχου μετατροπέα VSC στον οποίο εφαρμόζεται ο έλεγχος ισχύος-γωνίας. Πηγή:[15].

αέργου ισχύος, δύναται να γίνει χρήση ενός ελεγκτή εναλλασσόμενης τάσης. Ο νόμος ελέγχου που εφαρμόζεται είναι ο εξής

$$\Delta V = \left(k_p^U + \frac{k_i^U}{s} \right) (U_{f \text{ ref}} - U_f) \quad (3.6)$$

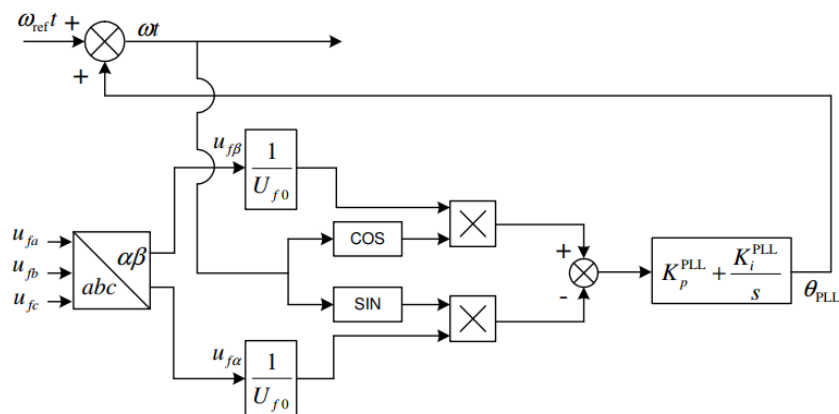
όπου ΔV είναι η μεταβολή του μέτρου της τάσης αναφοράς $U_{f \text{ ref}}$, και k_p^U και k_i^U τα κέρδη του PI ελεγκτή. Όπως φαίνεται ο εν λόγω ελεγκτής παρέχει την ίδια έξοδο με τον ελεγκτή αέργου ισχύος, με τη μόνη διαφορά ότι στην παρούσα περίπτωση στον PI ελεγκτή οδηγείται η διαφορά της μετρούμενης τιμής της τάσης U_f από την τάση αναφοράς $U_{f \text{ ref}}$.

- **Ελεγκτής Ενεργού Ισχύος (APC).** Η διάταξη αυτή είναι υπεύθυνη για τον έλεγχο της ενεργού ισχύος από και προς τον μετατροπέα, μέσω της μεταβολής της γωνίας της τάσης στην έξοδο αυτού. Η μεταβολή αυτή υλοποιείται με τη χρήση ενός PI ελεγκτή και εφαρμόζοντας τον ακόλουθο νόμο ελέγχου:

$$\theta_u = \left(k_p^P + \frac{k_i^P}{s} \right) (P_{\text{ref}} - P) \quad (3.7)$$

όπου θ_u είναι η μεταβολή της γωνίας της τάσης εξόδου u_f , k_p^P και k_i^P τα κέρδη του PI ελεγκτή, P η μετρούμενη ενεργός ισχύς στην έξοδο του μετατροπέα και P_{ref} η αντίστοιχη τιμή αναφοράς.

- **Διάταξη Κλειδώματος Φάσης (PLL).** Η διάταξη αυτή είναι υπεύθυνη για τον συγχρονισμό του μετατροπέα με το δίκτυο. Στο Σχήμα 3.2 παρουσιάζεται το κύκλωμα μίας διάταξης κλειδώματος φάσης, κατάλληλης για την εφαρμογή του ελέγχου ισχύος-γωνίας. Στο κύκλωμα αυτό γίνεται χρήση ενός PI ελεγκτή που έχει ως σκοπό τον περιορισμό του σφάλματος e μεταξύ της γωνιακής συχνότητας του δικτύου ω_g και της γωνιακής συχνότητας ω του μετατροπέα. Ο νόμος ελέγχου που εφαρμόζεται είναι ο εξής



Σχήμα 3.2 Διάταξη κλειδώματος φάσης (PLL) ελέγχου ισχύος-γωνίας. Πηγή:[15].

$$\theta_{PLL} = \left(k_p^{PLL} + \frac{k_i^{PLL}}{s} \right) e \quad (3.8)$$

όπου k_p^{PLL} και k_i^{PLL} τα κέρδη του PI ελεγκτή και θ_{PLL} η μεταβολή της φάσης που προστίθεται σε ένα σταθερό σήμα αναφοράς $\omega_{ref} t$ των 50 Hz, για τον τελικό καθορισμό της κυκλικής συχνότητας ωt του μετατροπέα (βλ. Σχήμα 3.2). Όσο αφορά το σφάλμα e , αυτό ορίζεται ως

$$e = (\omega_g - \omega)t \quad (3.9)$$

και κατόπιν χρήσης του μετασχηματισμού Clarke [36, pp. 203-205] καταλήγουμε στην ακόλουθη σχέση [15]

$$e \approx \frac{u_{f\beta}}{U_f} \cos \omega t - \frac{u_{f\alpha}}{U_f} \sin \omega t \quad (3.10)$$

η υλοποίηση της οποίας αποτυπώνεται στο κύκλωμα που παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.2.

Τα παραγόμενα σήματα από τις εξόδους των παραπάνω διατάξεων ελέγχου περνούν από μία τελική διάταξη ελέγχου (Voltage Reference Control) η οποία συνθέτει τις τρεις φάσεις των κυματομορφών της τάσης αναφοράς, όπως παρακάτω

$$v_a^{ref} = (U_{f ref} + \Delta V) \cos(\omega t + \theta_u) \quad (3.11)$$

$$v_b^{ref} = (U_{f ref} + \Delta V) \cos(\omega t + \theta_u - 120^\circ) \quad (3.12)$$

$$v_c^{ref} = (U_{f ref} + \Delta V) \cos(\omega t + \theta_u - 240^\circ) \quad (3.13)$$

όπου $U_{f ref}$ το μέτρο της τάσης αναφοράς στην έξοδο του μετατροπέα και κατά κανόνα, εφόσον δεν απαιτείται διαφορετικά, ισχύει $U_{f ref} = 1 \mu$. Τέλος οι παραπάνω κυματομορφές αναφοράς, μέσω της διαμόρφωσης PWM, έχουν ως αποτέλεσμα την παραγωγή των τριών φάσεων της τάσης εξόδου του μετατροπέα.

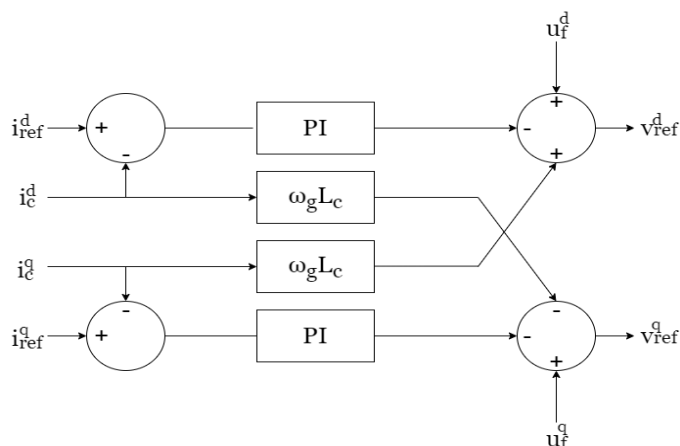
Η εφαρμογή του ελέγχου ισχύος-γωνίας αποτελεί μια θεωρητικά απλή και εύληπτη διαδικασία. Παρόλα αυτά η εφαρμογή της συγκεκριμένης τεχνικής ελέγχου σε συστήματα VSC-HVDC δεν είναι διαδεδομένη λόγω κάποιων σημαντικών περιορισμών που αυτή παρουσιάζει. Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω η εν λόγω τεχνική ελέγχου δεν επιτρέπει τον ανεξάρτητο έλεγχο της ενεργού και αέργου ισχύος, κάτι το οποίο, εν γένει, είναι επιθυμητό. Επιπλέον το εύρος ζώνης των ελεγκτών περιορίζεται σημαντικά από τις συχνότητες συντονισμού του δικτύου και ιδιαίτερα από τη ονομαστική συχνότητα λειτουργίας αυτού (50 Hz) [40]. Τέλος, η εφαρμογή του ελέγχου ισχύος-γωνίας δεν προβλέπει τον περιορισμό του ρεύματος που ρέει στα διακοπτικά στοιχεία του μετατροπέα. Το γεγονός αυτό είναι υψίστης σημασίας καθώς η λειτουργία των μετατροπέων γενικά είναι ιδιαίτερα ευάλωτη σε τιμές ρεύματος που ξεπερνούν την ονομαστική, φαινόμενο το οποίο συνήθως παρουσιάζεται κατά την εμφάνιση σφαλμάτων στο σύστημα [15].

3.3 ΔΙΑΝΥΣΜΑΤΙΚΟΣ ΕΛΕΓΧΟΣ ΡΕΥΜΑΤΟΣ

Ο διανυσματικός έλεγχος ρεύματος (Vector Current Control-VCC) αποτελεί την κυρίαρχη τεχνική έλεγχου που εφαρμόζεται σε μετατροπείς VSC. Αρχικά, η εν λόγω τεχνική χρησιμοποιήθηκε σε μετατροπείς που προορίζονταν για τον έλεγχο ηλεκτρικών μηχανών [41] αλλά πολύ γρήγορα βρήκε εφαρμογή και επικράτησε σε πλήθος εμπορικών συστημάτων VSC-HVDC [20]. Η επικράτηση αυτή οφείλεται πρωτίστως στον κατάλληλο σχεδιασμό του ελέγχου, μέσω του οποίου αίρεται ο περιορισμός που παρουσιαζόταν κατά την εφαρμογή του ελέγχου ισχύος-γωνίας και αφορούσε την αδυναμία ανεξάρτητου ελέγχου της ενεργού και της αέργου ισχύος του μετατροπέα.

Η βασική αρχή του διανυσματικού ελέγχου ρεύματος στηρίζεται στην ιδέα της αναπαράστασης ενός τριφασικού εναλλασσόμενου μεγέθους ως διάνυσμα σταθερού μέτρου και γωνίας, το οποίο τοποθετείται σε ένα στρεφόμενο $d - q$ πλαίσιο αναφοράς [36]. Η διαδικασία αυτή υλοποιείται με τη χρήση κατάλληλων μαθηματικών σχέσεων, που είναι γνωστές ως μετασχηματισμός Park. Με αυτόν τον τρόπο, το κύκλωμα ελέγχου πλέον καλείται να διαχειριστεί μεγέθη των οποίων ο εναλλασσόμενος «χαρακτήρας» απαλείφεται και λαμβάνουν ιδιότητες μεγεθών ΣΡ. Η διαχείριση αυτή καθιστά δυνατή τη χρήση PID ελεγκτών, με αποτέλεσμα την απλοποίηση της διαδικασίας του ελέγχου [24]. Τελικώς, τα μεγέθη αυτά, εφαρμόζοντας τον αντίστροφο μετασχηματισμό Park, επανέρχονται στην εναλλασσόμενη μορφή τους και αποτελούν τα σήματα αναφοράς με τα οποία τροφοδοτείται ο μετατροπέας.

Η δομή του διανυσματικού ελέγχου ρεύματος περιλαμβάνει αρχικά έναν αριθμό εξωτερικών ελεγκτών (εξωτερικός βρόχος ελέγχου), οι οποίοι είναι υπεύθυνοι για τον έλεγχο μεγεθών όπως η συνεχής τάση του συνδέσμου, η ενεργός και άεργος ισχύς στην έξοδο του μετατροπέα και το μέτρο της εναλλασσόμενης τάσης u_f . Για την υλοποίηση αυτού, στην έξοδο του εξωτερικού βρόχου ελέγχου παράγεται ένα ζεύγος $d - q$ συνιστωσών του ρεύματος αναφοράς i_{ref} . Κατόπιν, οι εν λόγω συνιστώσες i_{ref}^d και i_{ref}^q τροφοδοτούνται σε έναν εσωτερικό βρόχο ελέγχου (εσωτερικός ελεγκτής ρεύματος), ο οποίος είναι υπεύθυνος για την παραγωγή των αντίστοιχων συνιστωσών v_{ref}^d και v_{ref}^q που αποτελούν την τάση αναφοράς του μετατροπέα.



Σχήμα 3.3 Δομικό διάγραμμα εσωτερικού ελεγκτή ρεύματος

Ο νόμος ελέγχου που εφαρμόζεται στον εσωτερικό ελεγκτή ρεύματος (Internal Current Controller-ICC), για τον καθορισμό των $d - q$ συνιστωσών της τάσης αναφοράς, είναι ο ακόλουθος

$$v_{ref}^d = H_{LP}(s)u_f^d - F(s)(i_{ref}^d - i_c^d) + \omega_g L_c i_c^q \quad (3.14)$$

$$v_{ref}^q = H_{LP}(s)u_f^q - F(s)(i_{ref}^q - i_c^q) - \omega_g L_c i_c^d \quad (3.15)$$

όπου H_{LP} αποτελεί ένα χαμηλοπερατό φίλτρο που βελτιώνει την ικανότητα απόρριψης διαταραχών από τον ελεγκτή, $F(s)$ είναι η συνάρτηση μεταφοράς που εφαρμόζεται στο σφάλμα του ρεύματος, i_{ref} το ρεύμα αναφοράς, i_c το μετρούμενο ρεύμα στην έξοδο του μετατροπέα και L_c η αυτεπαγωγή του πηνίου διασύνδεσης. Ο όρος $\omega_g L_c i_c$ προορίζεται για την επίτευξη του πλήρως ανεξάρτητου ελέγχου της d συνιστώσας από την q συνιστώσα της τάσης αναφοράς. Η συνάρτηση μεταφοράς $F(s)$ στην ουσία αποτελεί έναν PI ελεγκτή, ο οποίος χαρακτηρίζεται από κέρδος αναλογικού μέλους $k_p = a_c L_c$ και κέρδος ολοκλήρωσης $k_i = a_c R_c$ [36]. Ο όρος a_c αποτελεί το επιθυμητό εύρος ζώνης κλειστού βρόχου του εσωτερικού ελεγκτή ρεύματος [15], ενώ ο όρος R_c αποτελεί την ωμική αντίσταση διασύνδεσης του μετατροπέα στο δίκτυο.

Στο Σχήμα 3.3 παρουσιάζεται το δομικό διάγραμμα του κυκλώματος που αποτελεί τον εσωτερικό ελεγκτή ρεύματος. Εν τέλει, οι συνιστώσες v_{ref}^d και v_{ref}^q μετασχηματίζονται σε τριφασική εναλλασσόμενη τάση αναφοράς, η οποία οδηγείται στο κύκλωμα διαμόρφωσης του μετατροπέα για την παραγωγή των κατάλληλων παλμών έναυσης των διακοπτικών στοιχείων.

Όπως γίνεται αντιληπτό από τα παραπάνω, για την αποτελεσματική λειτουργία του εσωτερικού ελεγκτή ρεύματος απαιτείται ο μετασχηματισμός των τριφασικών εναλλασσόμενων μεγεθών, της τάσης u_f και του ρεύματος i_c , στο $d - q$ πλαίσιο αναφοράς, σύμφωνα με το μετασχηματισμό Park [36, pp. 203-205]. Απαραίτητη προϋπόθεση για την υλοποίηση αυτού είναι η χρήση κατάλληλης διάταξης κλειδώματος φάσης (PLL), η οποία είναι υπεύθυνη για το συγχρονισμό του μετατροπέα με το δίκτυο. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω της χρήσης ενός PI ελεγκτή, ο οποίος επενεργεί στην τιμή της q συνιστώσας της τάσης u_f , καθιστώντας την μηδενική. Με αυτόν τον τρόπο, ο d άξονας του στρεφόμενου $d - q$ πλαισίου του μετατροπέα ταυτίζεται

με το διάνυσμα της τάσης u_f και ως εκ τούτου εξασφαλίζεται ο συγχρονισμός. Στο Σχήμα 3.4 παρουσιάζεται το δομικό διάγραμμα μίας διάταξης κλειδώματος φάσης που χρησιμοποιείται κατά την εφαρμογή του διανυσματικού ελέγχου ρεύματος. Επιπλέον, στο Σχήμα 3.5, για την πλήρη κατανόηση της λειτουργίας της διάταξης κλειδώματος φάσης, απεικονίζεται το $d - q$ πλαίσιο αναφοράς του μετατροπέα ως προς τα διανύσματα των τάσεων u_f , v και E .

Όσο αφορά τις $d - q$ συνιστώσες του ρεύματος αναφοράς i_{ref} που τροφοδοτούνται στον εσωτερικό ελεγκτή ρεύματος, αυτές, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, αποτελούν το προϊόν υπολογισμού ενός εξωτερικού βρόχου ελέγχου, η λειτουργία του οποίου βασίζεται στην παρακάτω ανάλυση:

Η ενεργός και άεργος ισχύς του μετατροπέα στο σύγχρονο $d - q$ πλαίσιο αναφοράς, θεωρώντας ανά μονάδα τιμές, υπολογίζονται μέσω των ακόλουθων σχέσεων

$$P = u_f^d i_c^d + u_f^q i_c^q \quad (3.16)$$

$$Q = u_f^q i_c^d - u_f^d i_c^q \quad (3.17)$$

Θεωρώντας τώρα πως η διάταξη κλειδώματος φάσης παρέχει τον συγχρονισμό του μετατροπέα, εξασφαλίζοντας πως ο d άξονας του στρεφόμενου $d - q$ πλαισίου ταυτίζεται με το διάνυσμα της τάσης u_f , τότε θα ισχύει ότι $u_f^q = 0$. Έτσι οι σχέσεις (3.16) και (3.17) αντίστοιχα μετασχηματίζονται ως εξής

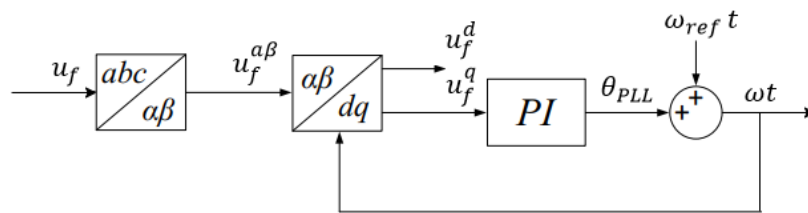
$$P = u_f^d i_c^d \quad (3.18)$$

$$Q = -u_f^d i_c^q \quad (3.19)$$

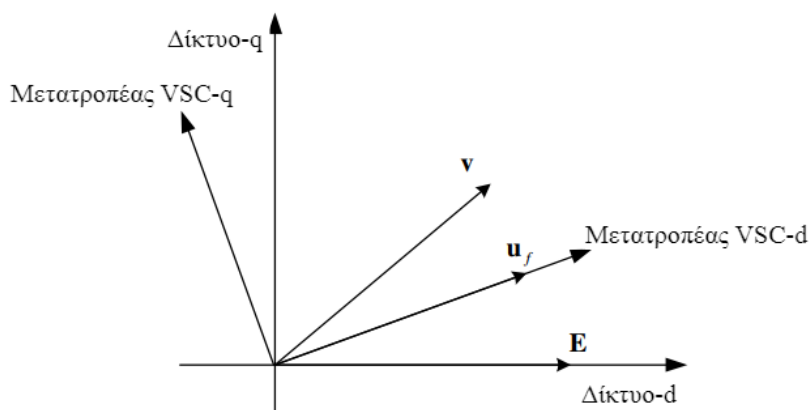
Από τις παραπάνω σχέσεις γίνεται αντιληπτό πως, μέσω της χρήσης του μετασχηματισμού Park και με τον κατάλληλο συγχρονισμό του μετατροπέα, επιτυγχάνεται η πλήρης ανεξαρτητοποίηση του ελέγχου της ενεργού και της άεργου ισχύος. Συγκεκριμένα, η ενεργός ισχύς δύναται να ελεγχθεί μέσω της d συνιστώσας του ρεύματος εξόδου του μετατροπέα, ενώ αντίστοιχα η άεργος ισχύς μέσω της q συνιστώσας. Βέβαια πρέπει να σημειωθεί πως η παραπάνω δήλωση, περί πλήρους ανεξάρτητου ελέγχου της ενεργού και της άεργου ισχύος, είναι αληθής υπό συγκεκριμένες προϋποθέσεις. Έτσι, το δίκτυο στο οποίο είναι συνδεδεμένος ο μετατροπέας θα πρέπει να χαρακτηρίζεται από υψηλή ισχύς βραχυκύκλωσης, γεγονός που συνιστά πως η τιμή της d συνιστώσας της τάσης u_f δεν θα πρέπει να παρουσιάζει μεταβολές στη μόνιμη κατάσταση, ώστε η συμβολή της στις σχέσεις (3.18)-(3.19) να μπορεί να θεωρηθεί σταθερή [15],[41].

Σύμφωνα με τα παραπάνω, η d συνιστώσα του ρεύματος αναφοράς καθορίζεται από την ενεργό ισχύ που εγγχεί ή απορροφά ο μετατροπέας και δύναται να υπολογιστεί με τη χρήση ενός PI ελεγκτή όπως παρακάτω

$$i_{ref}^d = \left(k_p^{id} + \frac{k_i^{id}}{s} \right) (P_{ref} - P) \quad (3.20)$$



Σχήμα 3.4 Δομικό διάγραμμα διάταξης κλειδώματος φάσης που χρησιμοποιείται κατά την εφαρμογή του διανυσματικού ελέγχου ρεύματος



Σχήμα 3.5 Στρεφόμενο $d - q$ πλαίσιο αναφοράς μετατροπέα VSC κατόπιν επενέργειας της διάταξης κλειδώματος φάσης

Εναλλακτικά, το ρεύμα αναφοράς i_{ref}^d μπορεί να καθοριστεί από τον έλεγχο της συνεχούς τάσης V_{dc} του μετατροπέα. Έτσι, κατά την εφαρμογή μιας διασύνδεσης HVDC ο μετατροπέας στο ένα άκρο της διασύνδεσης ελέγχει την ενεργό ισχύ, ενώ ο έτερος μετατροπέας στο άλλο άκρο αναλαμβάνει τον έλεγχο της συνεχούς τάσης του συνδέσμου. Ο ελεγκτής συνεχούς τάσης μπορεί να αποτελείται και αυτός με τη σειρά του από έναν PI ελεγκτή, ο οποίος επενεργεί πάνω στο σφάλμα της τιμής της συνεχούς τάσης αναφοράς $V_{dc ref}$ του συνδέσμου από την αντίστοιχη μετρούμενη τιμή V_{dc} [37], όπως παρακάτω

$$i_{ref}^d = \left(k_p^{id} + \frac{k_i^{id}}{s} \right) (V_{dc} - V_{dc ref}) \quad (3.21)$$

Παρόλα αυτά, κρίνεται σκόπιμο να αναφερθεί πως στην [42] προτείνεται μία διαφορετική σχεδίαση για τον ελεγκτή συνεχούς τάσης. Αυτό γίνεται διότι η επενέργεια στο σφάλμα $V_{dc} - V_{dc ref}$ θεωρείται πως έχει μη γραμμικό χαρακτήρα και η δυναμική κλειστού βρόχου του συστήματος εξαρτάται από το σημείο λειτουργίας μόνιμης κατάστασης $V_{dc,0}$. Το γεγονός αυτό αποφεύγεται σχεδιάζοντας τον ελεγκτή συνεχούς τάσης να επενεργεί τελικά στο σφάλμα $V_{dc ref}^2 - V_{dc}^2$. Έτσι, με τη χρήση ενός PI ελεγκτή αρχικά, υπολογίζεται η ενεργός ισχύς αναφοράς όπως παρακάτω

$$P_{ref} = \left(k_p^{id} + \frac{k_i^{id}}{s} \right) \frac{V_{dc ref}^2 - V_{dc}^2}{2} + H_{LP}(s)P_{dc} \quad (3.22)$$

όπου $H_{LP}(s)$ αποτελεί ένα χαμηλοπερατό φίλτρο, το οποίο επενεργεί στην ισχύ P_{dc} της πλευράς ΣΡ του μετατροπέα για την απόρριψη διαταραχών υψηλών συχνοτήτων. Κατόπιν, κάνοντας χρήση του αποτελέσματος που παράγεται από την

παραπάνω σχέση, η d συνιστώσα του ρεύματος αναφοράς δύναται να προσδιοριστεί μέσω της σχέσης

$$i_{ref}^d = \frac{P_{ref}}{H_{LP}(s)u_f^d} \quad (3.23)$$

όπου $H_{LP}(s)$ αποτελεί ένα χαμηλοπερατό φίλτρο που χρησιμοποιείται και πάλι για λόγους απόρριψης διαταραχών υψηλών συχνοτήτων.

Όσο αφορά την q συνιστώσα του ρεύματος αναφοράς, αυτή διαμορφώνεται σύμφωνα με την άεργο ισχύ στην έξοδο του μετατροπέα, μέσω της χρήσης ενός PI ελεγκτή, όπως παρακάτω

$$i_{ref}^q = \left(k_p^{iq} + \frac{k_i^{iq}}{s} \right) (Q_{ref} - Q) \quad (3.24)$$

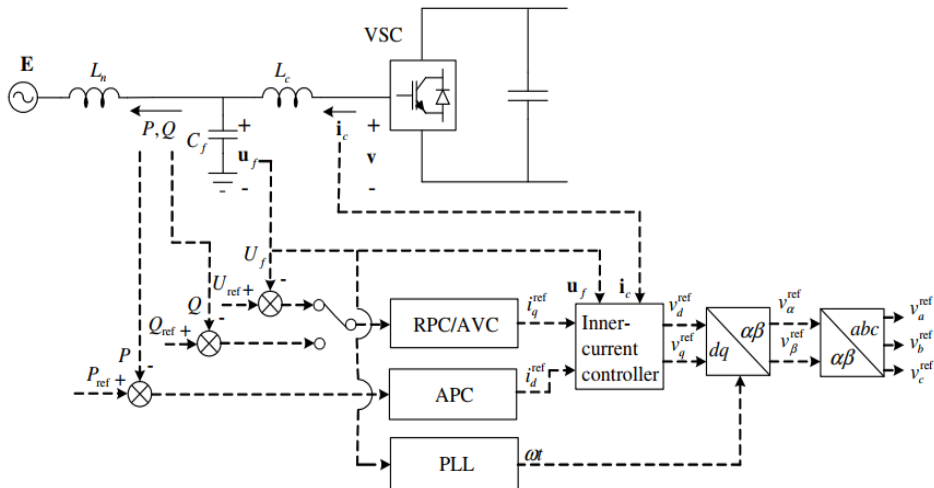
Εναλλακτικά, και σε περιπτώσεις που ο μετατροπέα είναι συνδεδεμένος σε ασθενές δίκτυο, αντί του ελέγχου της άεργου ισχύος προτιμάτε ο έλεγχος του μέτρου της εναλλασσόμενης τάσης u_f [41]. Έτσι, με την ίδια φιλοσοφία όπως και παραπάνω, ο νόμος ελέγχου που εφαρμόζεται είναι ο ακόλουθος

$$i_{ref}^q = \left(k_p^{iq} + \frac{k_i^{iq}}{s} \right) (U_{f ref} - U_f) \quad (3.25)$$

Σημειώνεται πως τα πρόσημα του αθροίσματος των όρων $U_{f ref}$ και U_f είναι κατά τέτοιο τρόπο, ώστε το θετικό σφάλμα $U_{f ref} - U_f$ να έχει ως αποτέλεσμα την απαίτηση για αρνητική άεργο ισχύ (εγχεόμενη από τον μετατροπέα) και κατά συνέπεια i_{ref}^q με θετικό πρόσημο. Στο Σχήμα 3.6 παρουσιάζεται το δομικό διάγραμμα του πλήρους κυκλώματος ελέγχου (εσωτερικός-εξωτερικός βρόχος ελέγχου) μετατροπέα VSC στον οποίο εφαρμόζεται ο διανυσματικός έλεγχος ρεύματος.

Περαιτέρω, το κύκλωμα του διανυσματικού ελέγχου ρεύματος συνήθως πλαισιώνεται και από άλλα επιμέρους κυκλώματα για την πλέον βελτιωμένη λειτουργία του ελέγχου, όπως ελεγκτή ρεύματος αρνητικής ακολουθίας, σχήματα anti-windup κ.α.

Κατά την εφαρμογή του διανυσματικού ελέγχου ρεύματος και εφόσον η λειτουργία του κυκλώματος ελέγχου χαρακτηρίζεται από μεγάλο εύρος ζώνης, οι $d - q$ συνιστώσες του ρεύματος που ρέει στις διακοπτικές θέσεις του μετατροπέα ακολουθούν ανά πάσα στιγμή τις τιμές των αντίστοιχων συνιστωσών αναφοράς (i_{ref}^d, i_{ref}^q) [15]. Έτσι, περιορίζοντας το μέτρο του ρεύματος αναφοράς i_{ref} επιβάλλεται και ο περιορισμός του πραγματικού ρεύματος του μετατροπέα. Το γεγονός αυτό, σε συνδυασμό με το ότι ο διανυσματικός έλεγχος ρεύματος επιτρέπει την απόρριψη συχνοτήτων συντονισμού που υπάρχουν στο δίκτυο, κάνει το συγκεκριμένο σχήμα ελέγχου να αντιπαρέρχεται των περιορισμών που αντιμετωπίζει η τεχνική ελέγχου ισχύος-γωνίας. Παρόλα αυτά, ένα πολύ σημαντικό μειονέκτημα της συγκεκριμένης τεχνικής ελέγχου είναι η μη αποδοτική λειτουργία που παρουσιάζει στην περίπτωση που σύνδεσμοι VSC-HVDC συνδέονται σε πολύ ασθενή δίκτυα EP.



Σχήμα 3.6 Δομικό διάγραμμα κυκλώματος ελέγχου μετατροπέα VSC στον οποίο εφαρμόζεται ο διανυσματικός έλεγχος ρεύματος. Πηγή:[15].

Ως εκ τούτου, για την αποδοτική λειτουργία τέτοιου είδους εφαρμογών, μία νέα τεχνική ελέγχου, ο έλεγχος συγχρονισμού ισχύος (PSC), έχει προταθεί.

3.4 ΕΛΕΓΧΟΣ ΣΥΓΧΡΟΝΙΣΜΟΥ ΙΣΧΥΟΣ

3.4.1 Εισαγωγή

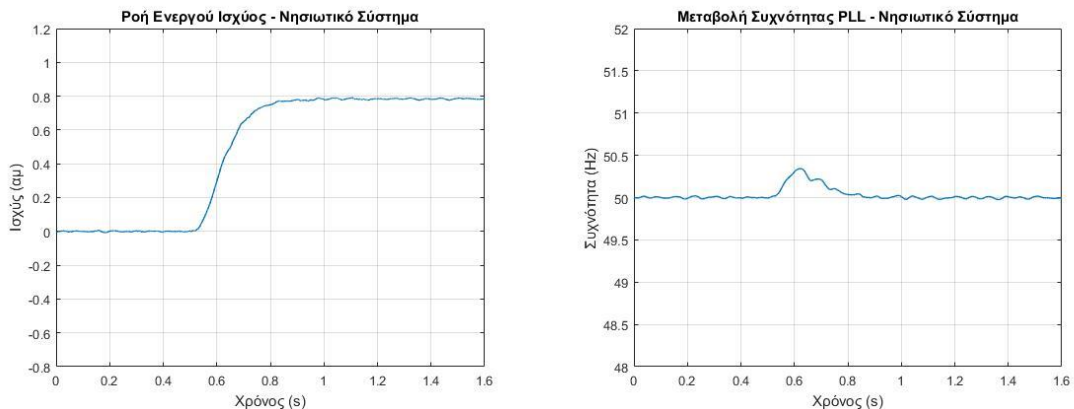
Όπως έχει ήδη αναφερθεί παραπάνω, οι μετατροπείς VSC αποτελούν την πλέον κατάλληλη επιλογή σε εφαρμογές HVDC, για τη μεταφορά ισχύος σε ασθενή δίκτυα EP [26]. Παρόλα αυτά, διάφοροι περιορισμοί εγείρονται σε περιπτώσεις που η διασύνδεση υλοποιείται σε πολύ ασθενή δίκτυα [46]. Οι εν λόγω περιορισμοί αποτελούν τροχοπέδη για την ορθή λειτουργία του διανυσματικού ελέγχου ρεύματος, που εφαρμόζεται ευρέως σε μετατροπείς συστημάτων VSC-HVDC.

Αρχικά, η προσπάθεια ελέγχου της εναλλασσόμενης τάσης μέσω του εξωτερικού βρόχου (ελεγκτής εναλλασσόμενης τάσης) είναι ικανή να οδηγήσει στην ασταθή λειτουργία του κυκλώματος ελέγχου του μετατροπέα [41]. Αξιοσημείωτα προβλήματα στην απόδοση του ελέγχου φαίνεται να δημιουργεί και η χαμηλόσυχνη συχνότητα συντονισμού, η οποία αλληλεπιδρά με τον εσωτερικό ελεγκτή ρεύματος [46], [47]. Παράλληλα, σε διάφορες μελέτες έχει αναφερθεί έως και μειωμένη ικανότητα στη μεταφορά ενεργού ισχύος κατά μήκος του συνδέσμου HVDC [3],[41].

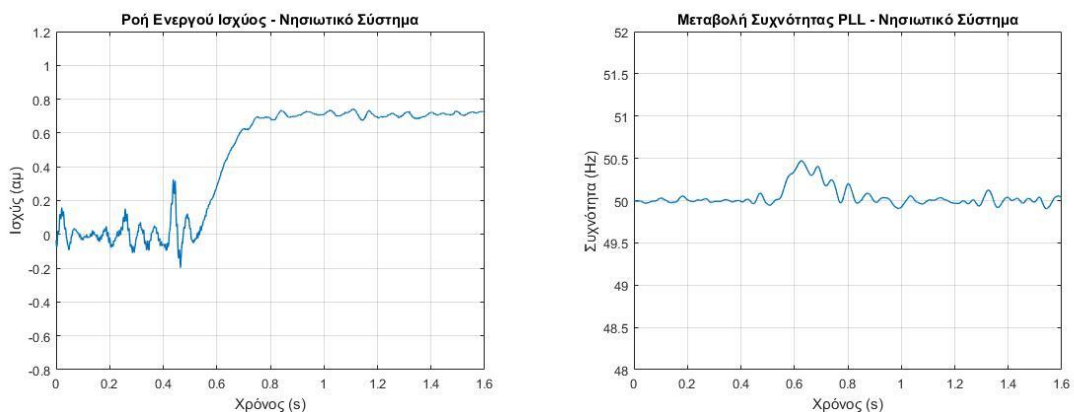
Επιπλέον, όπως αναφέρθηκε και στην ανάλυση του διανυσματικού ελέγχου ρεύματος, στην περίπτωση πολύ ασθενούς δικτύου ο ανεξάρτητος έλεγχος της ενεργού και της άεργου ισχύος (ή της εναλλασσόμενης τάσης) δεν είναι απόλυτα εφικτός (βλ. σελ. 29) [15]. Περαιτέρω, η επιλογή της τιμής του κέρδους ολοκλήρωσης (k_p^{id}) στον ελεγκτή ενεργού ισχύος δύναται να περιορίσει σημαντικά το εύρος ζώνης του ελεγκτή εναλλασσόμενης τάσης. Αντίστοιχα, οι όποιες μεταβολές στην τάση αναφοράς του ελεγκτή εναλλασσόμενης τάσης έχουν ως αποτέλεσμα την εμφάνιση ταλαντώσεων στην ενεργό ισχύ που εγχέει ο μετατροπέας [50]. Συνεπώς, συμπεραίνουμε πως η λειτουργία των εξωτερικών ελεγκτών του διανυσματικού ελέγχου ρεύματος είναι αλληλεξαρτούμενη και άρα ιδιαίτερη προσοχή χρειάζεται κατά την αρχική σχεδίαση των παραμέτρων τους.

Παρόλα αυτά, τα περισσότερα προβλήματα που αφορούν τη λειτουργία του διανυσματικού ελέγχου ρεύματος σε συνθήκες πολύ ασθενούς δικτύου φαίνεται να απορρέουν από τη μη αποδοτική λειτουργία της διάταξης κλειδώματος φάσης [41]. Αυτό γίνεται αντιληπτό ιδιαίτερα κατά τη διάρκεια μεταβατικών καταστάσεων λειτουργίας (πχ. έγχυση ενεργού ισχύος στο δίκτυο) και κατά την εμφάνιση σφαλμάτων στο σύστημα, που έχουν ως αποτέλεσμα την ανεξέλεγκτη μεταβολή της κυκλικής συχνότητας που εξάγεται από τη διάταξη κλειδώματος φάσης [50]. Έτσι, στην περίπτωση αυτή, η εν λόγω διάταξη αποδεικνύεται μη ικανή να «παρακολουθήσει» τη φάση της τάσης εξόδου του μετατροπέα, με αποτέλεσμα να μην επιτυγχάνεται ο απόλυτος συγχρονισμός αυτού με το δίκτυο [45],[48].

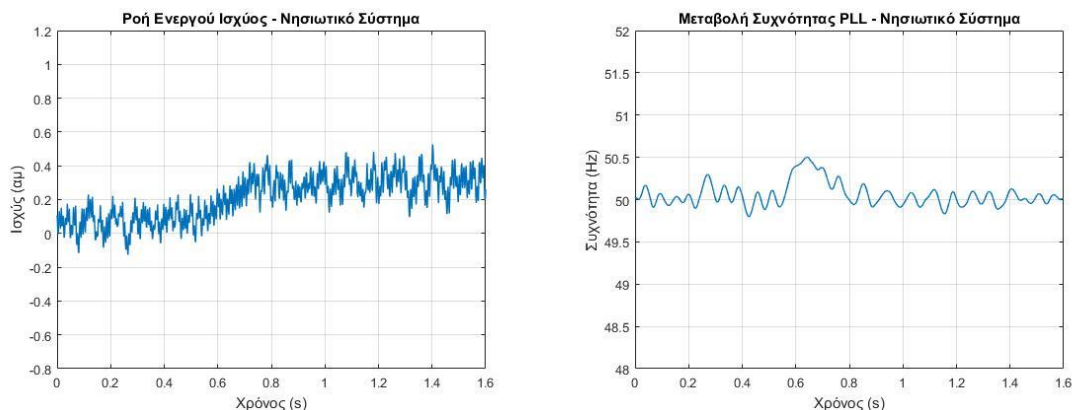
Στο Σχήμα 3.7 παρουσιάζεται η απόκριση ενός μετατροπέα, συνδεδεμένου σε ασθενές δίκτυο με ισχύς βραχυκύκλωσης $S_{sc} = 3000 \text{ MVA}$, στον οποίο εφαρμόζεται ο διανυσματικός έλεγχος ρεύματος και δίνεται εντολή για έγχυση ενεργού ισχύος τιμής 0.8 αμ . Παράλληλα, απεικονίζεται και η μεταβολή στη συχνότητα που εξάγεται από τη διάταξη κλειδώματος φάσης. Στο Σχήμα 3.8 και στο Σχήμα 3.9 παρουσιάζονται τα ίδια μεγέθη, με το σύστημα πλέον να χαρακτηρίζεται από ισχύς βραχυκύκλωσης $S_{sc} = 1500 \text{ MVA}$ και $S_{sc} = 1000 \text{ MVA}$ αντίστοιχα. Τα προβλήματα που προκύπτουν κατά τη λειτουργία του διανυσματικού ελέγχου ρεύματος και κατ' επέκταση της διάταξης κλειδώματος φάσης, υπό τόσο χαμηλές τιμές ισχύος βραχυκύκλωσης, είναι εμφανή. Ως εκ τούτου, ιδιαίτερη έμφαση έχει δοθεί στην έρευνα για την βελτιωμένη λειτουργία της διάταξης κλειδώματος φάσης ή ακόμα και την αντικατάσταση της από ένα πιο εξελιγμένο κύκλωμα συγχρονισμού.



Σχήμα 3.7 Ροή ενεργού ισχύος 0.8 αμ και μεταβολή της συχνότητας της διάταξης κλειδώματος φάσης σε νησιωτικό σύστημα με ισχύς βραχυκύκλωσης $S_{sc} = 3000 \text{ MVA}$.



Σχήμα 3.8 Ροή ενεργού ισχύος 0.8 αμ και μεταβολή της συχνότητας της διάταξης κλειδώματος φάσης σε νησιωτικό σύστημα με ισχύς βραχυκύκλωσης $S_{sc} = 1500 \text{ MVA}$.



Σχήμα 3.9 Ροή ενεργού ισχύος 0.8 αμ και μεταβολή της συχνότητας της διάταξης κλειδώματος φάσης σε νησιωτικό σύστημα με ισχύς βραχυκύκλωσης $S_{sc} = 1000 MVA$.

3.4.2 Φυσικός Μηχανισμός Συγχρονισμού Ισχύος σε Συστήματα ΕΡ

Σε εφαρμογές VSC-HVDC σε πολύ ασθενή δίκτυα η διάταξη κλειδώματος φάσης του κυκλώματος ελέγχου του μετατροπέα μπορεί να παραληφθεί, για τους λόγους που αναφέρθηκαν παραπάνω. Εναλλακτικά, το κύκλωμα ελέγχου δύναται να χρησιμοποιήσει έναν ενδογενή (φυσικό) μηχανισμό συγχρονισμού, που χαρακτηρίζει τα συστήματα ΕΡ. Με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται εξίσου ο συγχρονισμός του μετατροπέα με το δίκτυο.

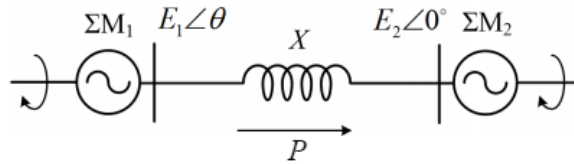
Για την πλήρη κατανόηση της λειτουργίας του μηχανισμού αυτού χρησιμοποιείται το παράδειγμα δύο σύγχρονων μηχανών (ΣM_1 και ΣM_2), διασυνδεδεμένων μέσω μιας επαγωγικής αντίδρασης X . Στο Σχήμα 3.10 παρουσιάζεται το μονοφασικό ισοδύναμο κύκλωμα του συστήματος αυτού. Η επαγωγική αντίδραση X αποτελεί το σύνολο των επιμέρους αντιδράσεων των δύο σύγχρονων μηχανών και της γραμμής μέσω της οποίας αυτές συνδέονται. Για την απλοποίηση της ανάλυσης οι ωμικές αντιστάσεις του συστήματος θεωρούνται αμελητέες. Αρχικά, θεωρούμε πως η ΣM_1 λειτουργεί ως γεννήτρια, ενώ η ΣM_2 λειτουργεί ως κινητήρας. Στη μόνιμη κατάσταση η ενεργός ισχύς που μεταφέρεται από την ΣM_1 στην ΣM_2 περιγράφεται από τη σχέση

$$P = \frac{E_1 E_2 \sin\theta}{X} \tag{3.26}$$

Όπου E_1, E_2 είναι οι ηλεκτρεγερτικές δυνάμεις (ΗΕΔ) της ΣM_1 και ΣM_2 αντίστοιχα και θ η διαφορά φάσης τους. Έστω τώρα ότι η μηχανική ισχύς P_{m2} της ΣM_2 μειώνεται για σύντομο χρονικό διάστημα και στη συνέχεια επανέρχεται στην αρχική της τιμή. Η προσωρινή αυτή μείωση θα έχει ως αποτέλεσμα ο δρομέας της ΣM_2 να επιταχυνθεί σύμφωνα με την ακόλουθη σχέση

$$P_{e2} - P_{m2} = H_2 \frac{d\omega_2^2}{dt} \tag{3.27}$$

όπου P_{e2} η ηλεκτρική ισχύς της ΣM_2 , ω_2 η ταχύτητα περιστροφής του δρομέα της και H_2 η σταθερά αδράνειας της. Η επιτάχυνση του δρομέα της ΣM_2 θα έχει ως ε-



Σχήμα 3.10 Μηχανισμός συγχρονισμού ισχύος μεταξύ διασυνδεδεμένων σύγχρονων μηχανών (ΣΜ).

πακόλουθο την μετατόπιση της φάσης της ΗΕΔ E_2 , κατά τρόπο που θα μειώσει τη διαφορά φάσης θ μεταξύ των ΗΕΔ E_1 και E_2 . Με τη σειρά της η μείωση της γωνίας θ , σύμφωνα με τη σχέση (3.26), θα επιφέρει μείωση στην ενεργό ισχύ που μεταφέρεται από τη ΣΜ₁ στη ΣΜ₂. Λόγω της μείωσης που προκαλείται κατ' αυτό τον τρόπο στην ηλεκτρική ισχύ P_{e1} , ο δρομέας της ΣΜ₁ θα επιταχυνθεί σύμφωνα με την ακόλουθη σχέση

$$P_{m1} - P_{e1} = H_1 \frac{d\omega_1^2}{dt} \quad (3.28)$$

όπου P_{m1} η μηχανική ισχύς της ΣΜ₁, ω_1 η ταχύτητα περιστροφής του δρομέα της και H_1 η σταθερά αδράνειας της. Η επιτάχυνση της ΣΜ₁ θα έχει ως αποτέλεσμα τη μετατόπιση της φάσης της ΗΕΔ E_1 , κατά τρόπο που θα αυξήσει τη διαφορά φάσης θ μεταξύ των ΗΕΔ E_1 και E_2 . Η αύξηση αυτή, τελικά, επαναφέρει τη διαφορά φάσης θ στην αρχική της τιμή, δηλαδή στην τιμή που αυτή είχε πριν προκληθεί η προσωρινή μείωση της μηχανικής ισχύος P_{m2} . Παράλληλα, η ταχύτητα περιστροφής της ΣΜ₁ προσαρμόζεται στην ταχύτητα περιστροφής της ΣΜ₂ και το σύστημα κατόπιν μιας σύντομης μεταβατικής κατάστασης, όπως αυτή περιεγράφηκε παραπάνω, μεταβαίνει σε κατάσταση ισορροπίας.

Η ανωτέρω διαδικασία δύναται να αποτελέσει στην ουσία έναν φυσικό μηχανισμό συγχρονισμού, όπου η διακινούμενη ενεργός ισχύς αναλαμβάνει το ρόλο του να συντονίζει το συγχρονισμό μεταξύ ενός μετατροπέα και του δικτύου. Με βάση τις αρχές που διατυπώθηκαν παραπάνω, στη συνέχεια παρουσιάζεται ο έλεγχος συγχρονισμού ισχύος, ο οποίος προτείνεται για μετατροπείς VSC που είναι συνδεδεμένοι σε πολύ ασθενή δίκτυα ΕΡ.

3.4.3. Έλεγχος Συγχρονισμού Ισχύος Μετατροπέα VSC Συνδεδεμένου σε Πολύ Ασθενές Δίκτυο ΕΡ.

Στην προηγούμενη υποενότητα παρουσιάστηκε ο ενδογενής μηχανισμός συγχρονισμού που διέπει ένα σύστημα διασυνδεδεμένων σύγχρονων μηχανών και οποίος βασίζεται στην μεταβατική ανταλλαγή ενεργού ισχύος μεταξύ αυτών. Η ίδια φιλοσοφία δύναται να υιοθετηθεί και από έναν μετατροπέα VSC που συνδέεται σε ένα πολύ ασθενές δίκτυο ΕΡ, έτσι ώστε να επιτευχθεί ο απαραίτητος συγχρονισμός με αυτό. Έτσι, η ανάγκη για τη χρήση διάταξης κλειδώματος φάσης δεν είναι πλέον απαραίτητη υπό φυσιολογικές συνθήκες λειτουργίας.

Γενικότερα, ο συγχρονισμός που επιτυγχάνεται μέσω της ανταλασσόμενης ενεργού ισχύος χαρακτηρίζεται από ρεύμα, το οποίο καθορίζεται από τις εκάστοτε διατάξεις που βρίσκονται συνδεδεμένες στο δίκτυο και η τιμή αυτού είναι μη προσδιορίσιμη [15]. Αυτός είναι και ο λόγος που ο έλεγχος συγχρονισμού ισχύος δεν δύναται να συνδυαστεί με την παρουσία ενός διανυσματικού ελεγκτή ρεύματος, καθώς ο δεύτερος, κατά κανόνα, απαιτεί ρεύμα αναφοράς συγκεκριμένης τιμής. Ως εκ τούτου, το κύκλωμα μέσω του οποίου εφαρμόζεται ο έλεγχος συγχρονισμού

ισχύος θα πρέπει να βασίζεται σε μία νέα σχεδίαση, η οποία θα εξυπηρετεί τη λειτουργία της εν λόγω τεχνικής ελέγχου.

Όπως θα αναλυθεί περαιτέρω, ο έλεγχος συγχρονισμού ισχύος συγκροτείται αρχικά από έναν εξωτερικό βρόχο συγχρονισμού ισχύος (PSL), ο οποίος ελέγχει την ενεργό ισχύ που εγχέει-απορροφά ο μετατροπέας. Επιπλέον, ένας δεύτερος βρόχος είναι υπεύθυνος για τον καθορισμό του μέτρου της τάσης εξόδου του μετατροπέα, ελέγχοντας με αυτόν τον τρόπο την άεργο ισχύ που αυτός εγχέει-απορροφά. Υπό την οπτική αυτή, μπορεί να θεωρηθεί πως η λειτουργία του ελέγχου συγχρονισμού ισχύος ακολουθεί, κατά κάποιον τρόπο, τη γενικότερη φιλοσοφία του ελέγχου ισχύος-γωνίας που αναλύθηκε σε προηγούμενη ενότητα [47]. Παρόλα αυτά, οι όποιες διαφοροποιήσεις, πέραν της μη χρήσης της διάταξης κλειδώματος φάσης, θα γίνουν σαφής στη συνέχεια της ανάλυσης.

Παρακάτω δίνεται η περιγραφή των βασικών διατάξεων που συγκροτούν το κύκλωμα ελέγχου μετατροπέα VSC, στον οποίο εφαρμόζεται ο έλεγχος συγχρονισμού ισχύος

- *Βρόχος Συγχρονισμού Ισχύος (PSL)*. Αποτελεί τον εξωτερικό βρόχο ελέγχου, που εξασφαλίζει τον συγχρονισμό του μετατροπέα VSC με το δίκτυο EP. Αυτό πραγματοποιείται μέσω της παραγωγής της γωνίας θ_u , η οποία κατόπιν προστίθεται σε ένα σταθερό σήμα αναφοράς $\omega_{ref} t$ των 50 Hz για τον τελικό καθορισμό της κυκλικής συχνότητας ωt του μετατροπέα ($\omega t = \omega_{ref} t + \theta_u$). Το παραγόμενο σήμα ωt , εν συνεχεία, αποτελεί την είσοδο για το σύνολο των μετασχηματισμών και αντίστροφων μετασχηματισμών Park, που πραγματοποιούνται από το κύκλωμα ελέγχου του μετατροπέα για τον έλεγχο διαφόρων ηλεκτρικών μεγεθών. Ο νόμος ελέγχου που εφαρμόζεται για τον καθορισμό της γωνίας θ_u είναι ο ακόλουθος

$$\theta_u = \left(\frac{k_i^P}{s} \right) (P_{ref} - P) \quad (3.29)$$

όπου k_i^P το κέρδος του ολοκληρωτικού ελεγκτή, P η μετρούμενη ενεργός ισχύς στην έξοδο του μετατροπέα και P_{ref} η αντίστοιχη τιμή αναφοράς αυτής. Μέσω της μεταβολής της γωνίας θ_u τελικά επιτυγχάνεται ο έλεγχος της ενεργού ισχύος που διακινείται από και προς τον μετατροπέα VSC.

- *Ελεγκτής Εναλλασσόμενης Τάσης (AVC)*. Η διάταξη αυτή είναι υπεύθυνη για τον έλεγχο του μέτρου της τάσης u_f στην έξοδο του μετατροπέα VSC. Τονίζεται πως στην περίπτωση που ο μετατροπέας είναι συνδεδεμένος σε πολύ ασθενές δίκτυο είναι ιδιαίτερα σημαντικό να επιτυγχάνεται η διατήρηση της τιμής αυτής στο 1 αμ. Ο νόμος ελέγχου που εφαρμόζεται είναι ο εξής

$$\Delta V = \left(\frac{k_i^U}{s} \right) (U_{f ref} - U_f) \quad (3.30)$$

όπου ΔV είναι η μεταβολή του μέτρου της τάσης u_f , k_i^U το κέρδος ολοκλήρωσης του I ελεγκτή, $U_{f ref}$ το μέτρο της τάσης αναφοράς $u_{f ref}$ και U_f το μέτρο της τάσης u_f .

- *Ελεγκτής Αέργου Ισχύος (RPC)*. Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, στην περίπτωση σύνδεσης ενός μετατροπέα VSC σε πολύ ασθενές δίκτυο προτιμάται η λειτουργία του ελεγκτή AVC, έτσι ώστε να επιτυγχάνεται η μέγιστη δυνατή υποστήριξη της τάσης του ζυγού στο ΣΚΣ. Παρόλα αυτά, εφόσον ο έλεγχος της αέργου ισχύος που εγχέεται-απορροφάται από τον μετατροπέα θεωρείται απαραίτητος, η έξοδος του ελεγκτή θα πρέπει να προστίθεται στην τάση αναφοράς $U_{f\ ref}$ και κατόπιν να επενεργεί ο ελεγκτής εναλλασσόμενης τάσης. Κατά αντιστοιχία με τον έλεγχο ισχύος-γωνίας, που παρουσιάστηκε σε προηγούμενη ενότητα, η διάταξη του ελεγκτή αέργου ισχύος υλοποιείται με τη χρήση ενός *PI* ελεγκτή, εφαρμόζοντας τον ακόλουθο νόμο ελέγχου:

$$\Delta U_{ref} = \left(k_p^Q + \frac{k_i^Q}{s} \right) (Q_{ref} - Q) \quad (3.31)$$

όπου ΔU_{ref} είναι η μεταβολή του μέτρου $U_{f\ ref}$ της τάσης αναφοράς, k_p^Q και k_i^Q τα κέρδη του *PI* ελεγκτή, Q η μετρούμενη άεργος ισχύς στην έξοδο του μετατροπέα και Q_{ref} η αντίστοιχη τιμή αναφοράς.

- *Ελεγκτής Συνεχούς Τάσης (DVC)*. Σε εφαρμογές VSC-HVDC ο μετατροπέας στο ένα άκρο της διασύνδεσης είναι υπεύθυνος για τον έλεγχο της ενεργού ισχύος, ενώ παράλληλα ο μετατροπέας που βρίσκεται στο άλλο άκρο ελέγχει τη συνεχή τάση του συνδέσμου, έτσι ώστε αυτή να διατηρείται σταθερή. Ο νόμος ελέγχου που εφαρμόζεται είναι ο ακόλουθος

$$P_{ref} = \left(k_p^{id} + \frac{k_i^{id}}{s} \right) \frac{V_{dc\ ref}^2 - V_{dc}^2}{2} \quad (3.32)$$

όπου k_p^{id} , k_i^{id} τα κέρδη του *PI* ελεγκτή, V_{dc} η τάση του συνδέσμου και $V_{dc\ ref}$ η αντίστοιχη τιμή αναφοράς, που εφόσον δεν απαιτείται διαφορετικά ισχύει $V_{dc\ ref} = 1 \alpha\mu$. Σημειώνεται πως η επενέργεια του ελεγκτή στο σφάλμα $V_{dc\ ref}^2 - V_{dc}^2$ αντί του σφάλματος $V_{dc} - V_{dc\ ref}$ υλοποιείται για τους ίδιους λόγους που αναφέρθηκαν και κατά την ανάλυση του ελεγκτή συνεχούς τάσης στον διανυσματικό έλεγχο ρεύματος.

Κατόπιν των παραπάνω, οι $d - q$ συνιστώσες της τριφασικής τάσης αναφοράς του μετατροπέα, καθορίζονται σύμφωνα τις ακόλουθες σχέσης

$$v_{ref}^d = (U_{f\ ref} + \Delta V) - H_{HP}(s)i_c^d \quad (3.33)$$

$$v_{ref}^q = -H_{HP}(s)i_c^q \quad (3.34)$$

όπου $U_{f\ ref}$ η τιμή αναφοράς του μέτρου της τάσης εξόδου του μετατροπέα ($U_{f\ ref} = 1\alpha\mu$), ΔV η έξοδος του ελεγκτή εναλλασσόμενης τάσης και $H_{HP}(s)$ ένα υπεραπλοποιημένο φίλτρο το οποίο χρησιμοποιείται για λόγους απόσβεσης διαταραχών. Η συνάρτηση μεταφοράς του εν λόγω φίλτρου εκφράζεται από τη σχέση

$$H_{HP}(s) = \frac{k_v s}{s + a_v} \quad (3.35)$$

όπου το κέρδος k_v καθορίζει το μέγεθος της απόσβεσης των διαταραχών, με τυπικές τιμές μεταξύ $0.2 \mu\text{m}$ και $0.6 \mu\text{m}$, ενώ η τιμή της μεταβλητή a_v πρέπει να επιλέγεται αρκετά χαμηλή, έτσι ώστε να καλύπτει όλες τις πιθανές συχνότητες συντονισμού του δικτύου [15]. Τυπικές τιμές είναι μεταξύ 30 rad/s και 50 rad/s .

Εν τέλει, οι μεταβλητές v_{ref}^d και v_{ref}^q , έτσι όπως διαμορφώνονται από τις σχέσεις (3.33)-(3.34), και κατόπιν του αντιστρόφου μετασχηματισμού Park, αποτελούν τις τρεις φάσεις της τάσης αναφοράς που τροφοδοτούν τον μετατροπέα. Εν συνέχεια, τα σήματα αυτά μέσω της διαμόρφωσης PWM παράγουν την τριφασική τάση εξόδου του μετατροπέα, ενώ η γωνία θ_u καθορίζει τη φάση στην οποία αυτή βρίσκεται, καθορίζοντας έτσι την ανταλλασσόμενη ενεργό ισχύ μεταξύ του μετατροπέα και του δικτύου.

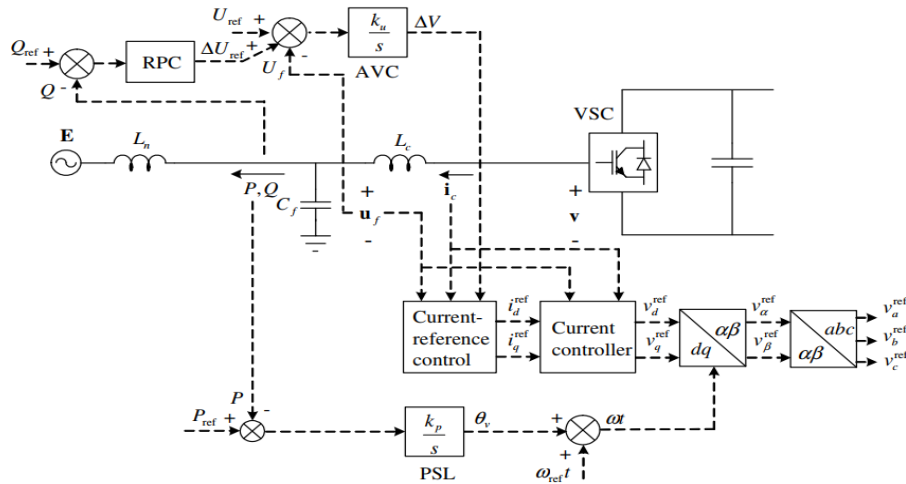
Μολονότι η υλοποίηση του ελέγχου συγχρονισμού ισχύος φαίνεται απλή, διάφοροι περιορισμοί εγείρονται κυρίως όσο αφορά την αντιμετώπιση, από το κύκλωμα ελέγχου, σφαλμάτων που δύναται να παρουσιαστούν ανά πάσα στιγμή στο δίκτυο EP. Συγκεκριμένα, το κύκλωμα ελέγχου, με τη μορφή που παρουσιάστηκε παραπάνω, δεν διαθέτει την ενδογενή ικανότητα να περιορίσει το ρεύμα το οποίο διαρρέει τα διακοπτικά στοιχεία του μετατροπέα. Το γεγονός αυτό είναι ζωτικής σημασίας σε περιπτώσεις σφαλμάτων, όπου το ρεύμα έχει την τάση να αυξάνεται με γρήγορο ρυθμό και να λαμβάνει τιμές πολλαπλάσιες της ονομαστικής. Αυτό, θέτει σε άμεσο κίνδυνο τα ημιαγωγικά στοιχεία στις διακοπτικές θέσεις του μετατροπέα και κατ' επέκταση απειλεί να θέσει τον ίδιο εκτός λειτουργίας.

Για το σκοπό αυτό, στη συνέχεια παρουσιάζεται μια μετατροπή πάνω στην αρχική σχεδίαση του κυκλώματος ελέγχου [46]. Η μετατροπή αυτή βασίζεται στην αρχή της αυτόματης μεταβίβασης του κυκλώματος ελέγχου σε λειτουργία περιορισμού του ρεύματος του μετατροπέα, όταν και για όσο χρόνο αυτό απαιτηθεί. Η υλοποίηση αυτού επιτυγχάνεται μέσω της χρήσης του διανυσματικού ελέγχου ρεύματος, ενώ παράλληλα μία εφεδρική διάταξη κλειδώματος φάσης παρέχει τον συγχρονισμό του μετατροπέα με το δίκτυο. Στο Σχήμα 3.11 παρουσιάζεται το δομικό διάγραμμα του κυκλώματος ελέγχου μετατροπέα VSC, στον οποίο εφαρμόζεται ο έλεγχος συγχρονισμού ισχύος, συμπεριλαμβανομένης και της εν λόγω μετατροπής.

Συνεπώς στην περίπτωση που το μέτρο του ρεύματος του μετατροπέα τείνει να ξεπεράσει τη μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή I_{max} , τότε οι $d - q$ συνιστώσες της τριφασικής τάσης αναφοράς του μετατροπέα θα πρέπει να καθορίζονται από τις σχέσεις (3.14)-(3.15), που παρουσιάστηκαν στην ανάλυση του διανυσματικού ελέγχου ρεύματος. Λαμβάνοντας τώρα υπόψη πως στις εφαρμογές ηλεκτρονικών υψηλής ισχύος η ωμική αντίσταση διασύνδεσης του μετατροπέα (R_c) είναι σχεδόν αμελητέα και άρα η συνάρτηση μεταφοράς $F(s)$ του PI ελεγκτή που επενεργεί στο σφάλμα $i_{ref}^{d/q} - i_c^{d/q}$ έχει μόνο το κέρδος αναλογικού μέλους ($k_p = a_c L_c$) [46], οι εν λόγω σχέσεις καταλήγουν όπως παρακάτω

$$v_{ref}^d = H_{LP}(s)u_f^d - a_c L_c(i_{ref}^d - i_c^d) + \omega_g L_c i_c^q \quad (3.36)$$

$$v_{ref}^q = H_{LP}(s)u_f^q - a_c L_c(i_{ref}^q - i_c^q) - \omega_g L_c i_c^d \quad (3.37)$$



Σχήμα 3.11 Δομικό διάγραμμα κυκλώματος ελέγχου μετατροπέα VSC στον οποίο εφαρμόζεται ο έλεγχος συγχρονισμού ισχύος. Πηγή:[15].

Η διαφοροποίηση με τον διανυσματικό έλεγχο ρεύματος είναι πως πλέον, οι $d - q$ συνιστώσες του ρεύματος αναφοράς i_{ref} στις παραπάνω εξισώσεις προέρχονται από τις ακόλουθες σχέσεις

$$i_{ref}^d = \frac{1}{a_c L_c} \{ -(V_o + \Delta V) + H_{HP}(s)i_c^d + H_{LP}(s)u_f^d + \omega_g L_c i_c^q \} + i_c^d \quad (3.38)$$

$$i_{ref}^q = \frac{1}{a_c L_c} \{ H_{HP}(s)i_c^q + H_{LP}(s)u_f^q - \omega_g L_c i_c^d \} + i_c^q \quad (3.39)$$

Αντικαθιστώντας τη σχέση (3.38) στη σχέση (3.36) και αντίστοιχα τη σχέση (3.39) στη σχέση (3.37), εύκολα γίνεται αντιληπτό πως καταλήγουμε στο νόμο ελέγχου των σχέσεων (3.33)-(3.34). Έτσι, υπό κανονικές συνθήκες λειτουργίας, έχουμε την αμιγή εφαρμογή του ελέγχου συγχρονισμού ισχύος. Από την άλλη, σε συνθήκες σφάλματος, όπου το ρεύμα του μετατροπέα τείνει να ξεπεράσει την μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή I_{max} , εφαρμόζεται αυτομάτως ο διανυσματικός έλεγχος ρεύματος.

Συνεπώς, στην περίπτωση αυτή μέσω δυναμικού κορεσμού δύναται να επιβληθεί ο περιορισμός στην τιμή των μεταβλητών i_{ref}^d και i_{ref}^q , έτσι ώστε ανά πάσα στιγμή να ισχύει η σχέση

$$|i_{ref}| = \sqrt{(i_{ref}^d)^2 + (i_{ref}^q)^2} < I_{max} \quad (3.40)$$

Εν τέλει, περιορίζοντας τα ρεύματα αναφοράς i_{ref}^d και i_{ref}^q επιτυγχάνεται και ο περιορισμός του πραγματικού ρεύματος που ρέει στον μετατροπέα, καθώς αυτό ακολουθεί κατά κανόνα τις αντίστοιχες τιμές αναφοράς [15].

Περισσότερο λεπτομερής ανάλυση σχετικά με το κύκλωμα του ελέγχου συγχρονισμού ισχύος θα ακολουθήσει στο επόμενο κεφάλαιο.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ - ΚΥΚΛΩΜΑΤΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΥΠΟ ΜΕΛΕΤΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ VSC-HVDC

4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

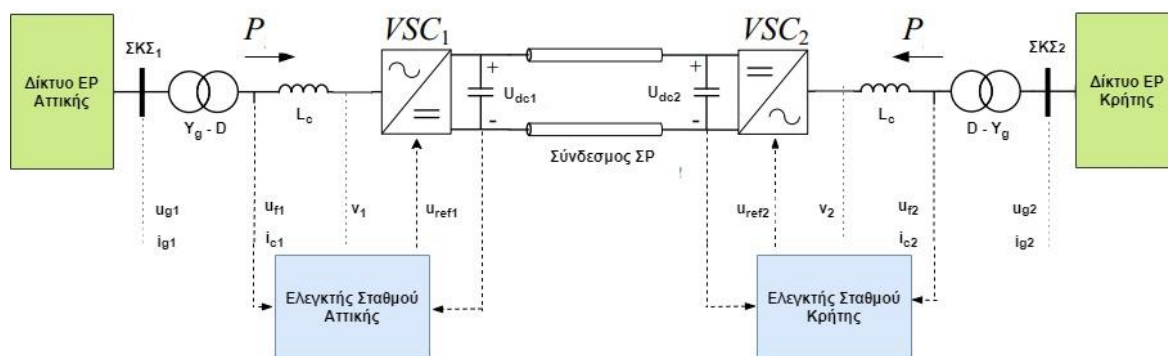
Στο παρόν κεφάλαιο πραγματοποιείται αναλυτική παρουσίαση της τοπολογίας του συστήματος VSC-HVDC που εξετάστηκε στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Όπως ήδη αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 1, οι παράμετροι του εξεταζόμενου συστήματος επιλέχθηκαν σύμφωνα με το αντίστοιχο Δεκαετές Πρόγραμμα Ανάπτυξης 2017-2026 του ΑΔΜΗΕ [2], έτσι ώστε να ανταποκρίνονται όσο το δυνατόν στην επικείμενη διασύνδεση VSC-HVDC που πρόκειται να πραγματοποιηθεί μεταξύ της Αττικής και της Κρήτης.

Στο σημείο αυτό, είναι σημαντικό να αναφερθεί πως η σχεδίαση του συστήματος βασίστηκε σε αντίστοιχο μοντέλο που υλοποιήθηκε από τον Βασίλειο Νικολακόπουλο, στη διπλωματική του εργασία με τίτλο «Μοντελοποίηση και Προσομοίωση Διασυνδέσεων HVDC Τοπολογίας Διπόλου» [27]. Παρόλα αυτά, οι διαφοροποιήσεις του εξεταζόμενου συστήματος της παρούσας εργασίας έγκεινται αρχικά στην τοπολογία μονοπόλου που χρησιμοποιήθηκε, έτσι ώστε να αποφευχθεί η πολυπλοκότητα των προσομοιώσεων, ενώ δεύτερον και σημαντικότερο, λήφθηκε υπόψη η πραγματική ισχύς βραχυκύκλωσης (S_{sc}) που παρουσιάζει το σύστημα της Κρήτης, γεγονός που το καθιστά ένα πολύ ασθενές δίκτυο EP. Ως εκ τούτου, η εφαρμογή του διανυσματικού ελέγχου ρεύματος (VCC) στον μετατροπέα που βρίσκεται στην πλευρά της Κρήτης πλέον δεν καθίσταται δυνατή και έτσι επιλέχθηκε η εφαρμογή του ελέγχου συγχρονισμού ισχύος (PSC).

Στο Σχήμα 4.1 παρουσιάζεται η επισκόπηση του συστήματος που μελετάται στην παρούσα εργασία. Σημειώνεται πως ο δείκτης «1» χρησιμοποιείται για μεγέθη που αφορούν την πλευρά του δικτύου της Αττικής, ενώ αντίστοιχα ο δείκτης «2» για μεγέθη που αφορούν την πλευρά του δικτύου της Κρήτης. Ο σχεδιασμός καθώς και η προσομοίωση της λειτουργίας του συστήματος πραγματοποιήθηκε με τη χρήση του λογισμικού MATLAB/Simulink, ενώ ο υπολογισμός του συνόλου των ηλεκτρικών μεγεθών έγινε στο ανά μονάδα σύστημα. Στις παρακάτω ενότητες ακολουθεί η αναλυτική περιγραφή των δομικών στοιχείων που αποτελούν το υπό εξέταση σύστημα VSC-HVDC, ενώ η παρουσίαση των παραμέτρων τους πραγματοποιείται συγκεντρωτικά στο Παράρτημα.

4.2 ΣΥΝΔΕΣΜΟΣ ΣΡ

Για το σύνδεσμο ΣΡ, που υλοποιεί τη διασύνδεση HVDC, επιλέχθηκε η τοπολογία συμμετρικού μονοπόλου, για τους λόγους που έχουν ήδη αναφερθεί παραπάνω. Έτσι, η διασύνδεση υλοποιήθηκε μέσω της χρήσης δύο μονωμένων αγωγών υψηλής τάσης, που εκτείνονται σε μήκος 389 km. Το μήκος αυτό αποτελεί τη συνολική απόσταση μεταξύ του σημείου σύνδεσης του δικτύου της Αττικής και του αντίστοιχου σημείου του δικτύου της Κρήτης. Ο πρώτος αγωγός βρίσκεται σε τάση +150 kV, ενώ ο δεύτερος (αγωγός επιστροφής) βρίσκεται σε τάση -150 kV, γεγονός που καθιστά την ονομαστική τάση λειτουργίας του συνδέσμου στα 300 kV.



Σχήμα 4.1 Επισκόπηση υπό μελέτη συστήματος VSC-HVDC.

Λόγω του ότι η επικείμενη διασύνδεση μεταξύ Αττικής και Κρήτης, σύμφωνα με τον ΑΔΜΗΕ, προορίζεται να έχει μεταφορική ικανότητα $2 \times 350 \text{ MW}$ (διπολική διασύνδεση), στα πλαίσια της παρούσας εργασίας επιλέχθηκε μονοπολική διασύνδεση με συνολική μεταφορική ικανότητα ισχύος 700 MW . Η τιμή αυτή φαίνεται πως είναι ικανή να καλύψει τις τρέχουσες ενεργειακές ανάγκες του νησιού, καθώς το μέγιστο ωριαίο φορτίο που έχει καταγραφεί ποτέ ανήλθε στα 635 MW [2]. Παράλληλα η εν λόγω διασύνδεση είναι σε θέση να καλύψει πιθανή εξαγωγή ενέργειας από την Κρήτη προς το ηπειρωτικό σύστημα, προερχόμενης από ανανεώσιμες πηγές.

Τέλος, για μία πιο ρεαλιστική προσέγγιση, στο μοντέλο προσομοίωσης επιλέχθηκε γραμμή μεταφοράς που υλοποιεί το π-ισοδύναμο κύκλωμα, με παραμέτρους που ανταποκρίνονται σε υποβρύχια καλώδια τύπου XLPE, τα οποία χρησιμοποιούνται ευρέως σε εμπορικές εφαρμογές HVDC [51]. Οι τιμές των παραμέτρων της γραμμής μεταφοράς παρατίθενται αναλυτικά στο Παράρτημα .

4.3 ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΙΣ VSC

4.3.1 Γενικά Χαρακτηριστικά Μετατροπέων VSC

Η διασύνδεση HVDC που εξετάστηκε στα πλαίσια της παρούσας εργασίας αποτελείται συνολικά από δύο μετατροπείς VSC, αριθμός που δικαιολογείται από την επιλογή της τοπολογίας μονοπόλου. Οι μετατροπείς VSC βρίσκονται τοποθετημένοι έκαστος σε κάθε άκρο του συνδέσμου ΣΡ και αποτελούν διατάξεις που επιτελούν τη μετατροπή της εναλλασσόμενης τάσης σε συνεχή και αντιστρόφως. Παράλληλα, μέσω των κυκλωμάτων ελέγχου από τα οποία συνοδεύονται επιτυγχάνουν τη μεταφορά ενεργού και αέργου ισχύος, σύμφωνα με τις απαιτήσεις του διαχειριστή του δικτύου.

Αμφότεροι οι μετατροπείς VSC που χρησιμοποιήθηκαν στο μοντέλο προσομοίωσης αποτελούν μετατροπείς πολλαπλών επιπέδων (MMC). Συγκεκριμένα, για κάθε μετατροπέα επιλέχθηκε ο αριθμός των δέκα επιπέδων, γεγονός που σημαίνει πως καθένας από αυτούς ανά φάση διαθέτει δέκα υπομονάδες σε κάθε βραχίονα (θετικό και αρνητικό). Ανά πάσα στιγμή σε κάθε φάση του μετατροπέα εμπλέκονται ακριβώς δέκα υπομονάδες ενώ οι υπόλοιπες παρακάμπτονται. Έτσι όταν στο ανά φάση κύκλωμα εμπλέκονται οι δέκα υπομονάδες του θετικού βραχίονα τότε η έξοδος του μετατροπέα στην πλευρά ΕΡ λαμβάνει την τιμή $+150 \text{ kV}$. Αντίστοιχα όταν στο ανά φάση κύκλωμα εμπλέκονται οι δέκα υπομονάδες του αρνητικού βραχίονα τότε η έξοδος του μετατροπέα στην πλευρά ΕΡ λαμβάνει την τιμή -150 kV . Το

μηδενικό επίπεδο είναι αποτέλεσμα εμπλοκής (στο ανά φάση κύκλωμα του μετατροπέα) πέντε υπομονάδων του θετικού βραχίονα και πέντε υπομονάδων του αρνητικού βραχίονα αντίστοιχα. Τα ενδιάμεσα επίπεδα στην κυματομορφή της τάσης εξόδου του μετατροπέα σχηματίζονται με κατάλληλη εμπλοκή και παράκαμψη υπομονάδων του θετικού και αρνητικού βραχίονα αντίστοιχα. Γενικότερα σε εμπροκικές εφαρμογές HVDC οι μετατροπείς που χρησιμοποιούνται χαρακτηρίζονται από περισσότερα των δέκα επιπέδων, αλλά παρόλα αυτά η επιλογή του συγκεκριμένου αριθμού επιπέδων έγινε με γνώμονα την απλοποίηση, ειδικότερα από πλευράς χρόνου, των προσομοιώσεων που εκτελέστηκαν.

Για κάθε υπομονάδα των μετατροπέων του μοντέλου προσομοίωσης επιλέχθηκε η συνδεσμολογία ημιγέφυρας (half-bridge). Σύμφωνα με αυτή, κάθε υπομονάδα εμπεριέχει μία χωρητικότητα, δύο διακοπτικά στοιχεία IGBTs και δύο διόδους ελεύθερης διέλευσης (βλ. Σχήμα 2.6). Η χωρητικότητα κάθε υπομονάδας καθορίστηκε σύμφωνα με την ακόλουθη σχέση [3],[52]

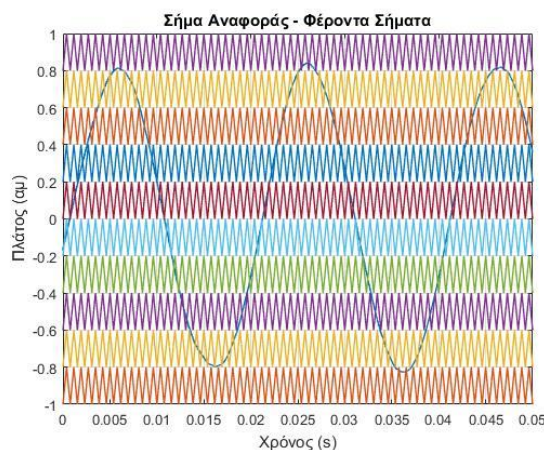
$$C_{sm} = \frac{2 S_N E_{sm}}{6 N_{arm} v_c^2} \quad (4.1)$$

όπου S_N η ονομαστική φαινόμενη ισχύς του μετατροπέα, E_{sm} η σταθερά χρόνου της υπομονάδας, N_{arm} το πλήθος των υπομονάδων ανά βραχίονα και v_c η τάση στα άκρα κάθε υπομονάδας. Επιλέγοντας την ονομαστική φαινόμενη ισχύς S_N των μετατροπέων στα 700 MVA, και τη σταθερά χρόνου E_{sm} στα 35 kJ/MVA, έτσι ώστε η κυμάτωση της τάσης κάθε υπομονάδας να μην υπερβαίνει το $\pm 10\%$, η χωρητικότητα C_{sm} υπολογίζεται σε 815 μF [27].

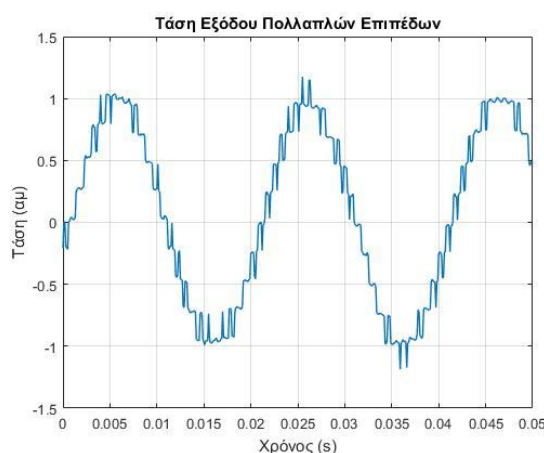
Για τη διαδικασία της διαμόρφωσης σε αμφότερους τους μετατροπείς VSC επιλέχθηκε η τεχνική διαμόρφωσης εύρους παλμών με μετάθεση φάσης (PD-PWM). Σύμφωνα με την εν λόγω τεχνική, τα κυκλώματα διαμόρφωσης των μετατροπέων είναι υπεύθυνα για την παραγωγή δέκα όμοιων τριγωνικών φερόντων σημάτων (όσα και τα επίπεδα λειτουργίας των μετατροπέων VSC) πλάτους 0.2 $\alpha\mu$. Τα φέροντα αυτά σήματα είναι ομοιόμορφα κατανομημένα στον κατακόρυφο άξονα (άξονας y) μεταξύ των τιμών +1 $\alpha\mu$ και -1 $\alpha\mu$, όπου και βρίσκεται το ημιτονοειδές σήμα της τάσης αναφοράς κάθε φάσης του μετατροπέα ($v_a^{ref}, v_b^{ref}, v_c^{ref}$).

Στο Σχήμα 4.2 αποτυπώνεται η διαδικασία αυτή για τη μία φάση της τριφασικής τάσης αναφοράς του μετατροπέα. Καθένα από τα τριγωνικά φέροντα συγκρίνεται με τις κατά τόπους τιμές της κυματομορφής της τάσης αναφοράς, με αποτέλεσμα την παραγωγή των κατάλληλων παλμών με τους οποίους τροφοδοτούνται οι ημιαγωγικοί διακόπτες του μετατροπέα. Μέσω της διαδικασίας αυτής συντίθεται τελικά η τάση εξόδου πολλαπλών επιπέδων των μετατροπέων VSC του μοντέλου, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.3.

Για την αποφυγή της ασύμμετρης φόρτισης των χωρητικότητων των υπομονάδων, έτσι ώστε να μην παρατηρούνται σημαντικές αποκλίσεις μεταξύ των τάσεων αυτών, η τεχνική διαμόρφωσης PD-PWM που εφαρμόζεται στους μετατροπείς του μοντέλου συνοδεύεται από μία επιπλέον κυκλωματική διάταξη. Η διάταξη αυτή είναι υπεύθυνη για την εξισορρόπηση των τάσεων των χωρητικότητων που συγκροτούν τις υπομονάδες των μετατροπέων VSC. Αυτό πραγματοποιείται μέσω της χρήσης ενός αλγορίθμου ο οποίος επιλέγει τις υπομονάδες που πρόκειται να εντα-



Σχήμα 4.2 Τάση αναφοράς και φέροντα σήματα κατά την τεχνική διαμόρφωσης PD-PWM.



Σχήμα 4.3 Τάση πολλαπλών επιπέδων στην έξοδο του μετατροπέα.

χθούν στο κύκλωμα του μετατροπέα κατόπιν ταξινόμησης τους ανάλογα με τη μετρούμενη τάση στα άκρα της κάθε χωρητικότητας και τη φορά με την οποία ρέει το ρεύμα τη δεδομένη στιγμή [27, pp.33-34].

Παρόλα αυτά, η ταξινόμηση των υπομονάδων του κάθε βραχίονα (άνω-κάτω) του μετατροπέα ενέχει έναν συμβιβασμό ο οποίος πρέπει να πραγματοποιηθεί. Έτσι από τη μία, η λιγότερο συχνή ταξινόμηση των υπομονάδων θα έχει ως αποτέλεσμα χαμηλότερη διακοπτική συχνότητα και άρα χαμηλότερες απώλειες ισχύος. Από την άλλη, η πιο συχνή ταξινόμηση θα οδηγήσει μεν σε υψηλότερη διακοπτική συχνότητα και άρα υψηλότερες απώλειες ισχύος, αλλά θα εξασφαλίσει την όσο το δυνατόν πιο ομοιόμορφη φόρτιση των χωρητικοτήτων των υπομονάδων. Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας η συχνότητα εκτέλεσης του αλγορίθμου f_b επιλέχθηκε στα 4 kHz , ενώ η διακοπτική συχνότητα f_s των μετατροπέων επιλέχθηκε στα 1.3 kHz .

Τέλος, σε κάθε βραχίονα, σε σειρά με τις υπομονάδες και πριν το σημείο σύνδεσης ΕΡ, υπάρχει μία αυτεπαγωγή L_s η οποία χρησιμεύει στον περιορισμό των ρευμάτων που ρέουν στον εσωτερικό βρόχο των μετατροπέων, ειδικότερα σε περιπτώσεις σφάλματος [37],[53]. Σε αντίθεση με τους μετατροπείς δύο και τριών επιπέδων, στους μετατροπείς πολλαπλών επιπέδων καθίσταται δυνατή η εισαγωγή αυτεπαγωγών σε σειρά με τα διακοπτικά στοιχεία καθώς ανά πάσα στιγμή υφίσταται

κυκλωματική σύνδεση μεταξύ του θετικού και του αρνητικού ακροδέκτη της συνεχούς τάσης με τον μεσαίο κόμβο όπου εφαρμόζεται η εναλλασσόμενη τάση εξόδου.

Οι δύο μετατροπείς που εμπεριέχονται στο μοντέλο προσομοίωσης της παρούσας εργασίας διαθέτουν κοινά χαρακτηριστικά και παραμέτρους, όπως αυτά διατυπώθηκαν στις παραπάνω παραγράφους, ανεξαρτήτως της γεωγραφικής τους τοποθέτησης στο υπό μελέτη σύστημα (Αττική ή Κρήτη). Παρόλα αυτά, ο μετατροπέας του σταθμού της Αττικής με τον αντίστοιχο του σταθμού της Κρήτης παρουσιάζουν σημαντικές διαφορές στη λειτουργία τους, όσο αφορά το κομμάτι του ελέγχου. Συγκεκριμένα, σε κάθε μετατροπέα έχει ανατεθεί ο έλεγχος (σε ανώτερο επίπεδο) συγκεκριμένων ηλεκτρικών μεγεθών της διασύνδεσης, ενώ παράλληλα, όπως έχει ήδη αναφερθεί, στους δύο σταθμούς εφαρμόζονται διαφορετικές τεχνικές ελέγχου.

Στις παραγράφους που ακολουθούν πραγματοποιείται αναλυτική περιγραφή της τοπολογίας, της λειτουργίας και των παραμέτρων που χαρακτηρίζουν το κύκλωμα ελέγχου του κάθε μετατροπέα της υπό μελέτη διασύνδεσης VSC-HVDC.

4.3.2 Έλεγχος Ηπειρωτικού Μετατροπέα (Σταθμός Αττικής)

Ο μετατροπέας που βρίσκεται στην πλευρά της Αττικής είναι επιφορτισμένος με τον έλεγχο (σε ανώτερο επίπεδο) της συνεχούς τάσης του συνδέσμου HVDC, εξασφαλίζοντας έτσι πως η τιμή αυτής δε θα παρεκκλίνει σημαντικά από την ονομαστική. Επιπλέον ο εν λόγω μετατροπέας είναι υπεύθυνος και για τον έλεγχο της αέργου ισχύος η οποία εγχέεται ή απορροφάται από το δίκτυο EP της Αττικής.

Για την υλοποίηση των προαναφερθέντων και λόγω του ότι το δίκτυο της Αττικής θεωρείται ένα πολύ ισχυρό δίκτυο EP, στον μετατροπέα της πλευράς αυτής εφαρμόστηκε ο διανυσματικός έλεγχος ρεύματος. Συνεπώς, ο μετατροπέας ρυθμίζει την εγχεόμενη-απορροφούμενη άεργο ισχύ και την τάση του συνδέσμου ΣΡ μέσω της τριφασικής τάσης αναφοράς ($v_a^{ref}, v_b^{ref}, v_c^{ref}$) που παράγεται από τον διανυσματικό ελεγκτή ρεύματος και εν συνεχεία τροφοδοτείται στο κύκλωμα διαμόρφωσης του μετατροπέα.

Οι τρεις φάσεις της τάσης αναφοράς του μετατροπέα v_a^{ref}, v_b^{ref} και v_c^{ref} προέρχονται από τον αντίστροφο μετασχηματισμό Park ο οποίος υλοποιείται στις αντίστοιχες $d - q$ συνιστώσες της τάσης αναφοράς (v_{ref}^d, v_{ref}^q). Η διαδικασία αυτή, όπως παρουσιάστηκε αναλυτικά και στην Ενότητα 3.3, πραγματοποιείται μέσω της χρήσης μιας κατάλληλης διάταξης κλειδώματος φάσης (PLL). Στο μοντέλο προσομοίωσης χρησιμοποιήθηκε μια τυπική τριφασική διάταξη κλειδώματος φάσης, η οποία πραγματοποιεί το συγχρονισμό του μετατροπέα με το δίκτυο μέσω της παρακολούθησης της φασικής τάσης u_{f1} (τάση στην έξοδο των φίλτρων στην πλευρά EP του μετατροπέα).

Μολονότι η λειτουργία της διάταξης κλειδώματος φάσης έχει αποδειχθεί ιδιαίτερα αποτελεσματική και αξιόπιστη υπό κανονικές συνθήκες λειτουργίας, σε ασύμμετρες συνθήκες λειτουργίας, που έχουμε την εμφάνιση τάσης αρνητικής ακολουθίας, η απόκριση της διάταξης αυτής κρίνεται μη ικανοποιητική. Ως εκ τούτου, στο μοντέλο προσομοίωσης, πριν τη διάταξη κλειδώματος φάσης, έχει προστεθεί ένα διπλό φίλτρο δευτέρας τάξης (Dual Second Order Generalized Integrators-DSOGI), το οποίο έχει τη δυνατότητα να εξάγει αποκλειστικά τη θετική ακολουθία της τάσης

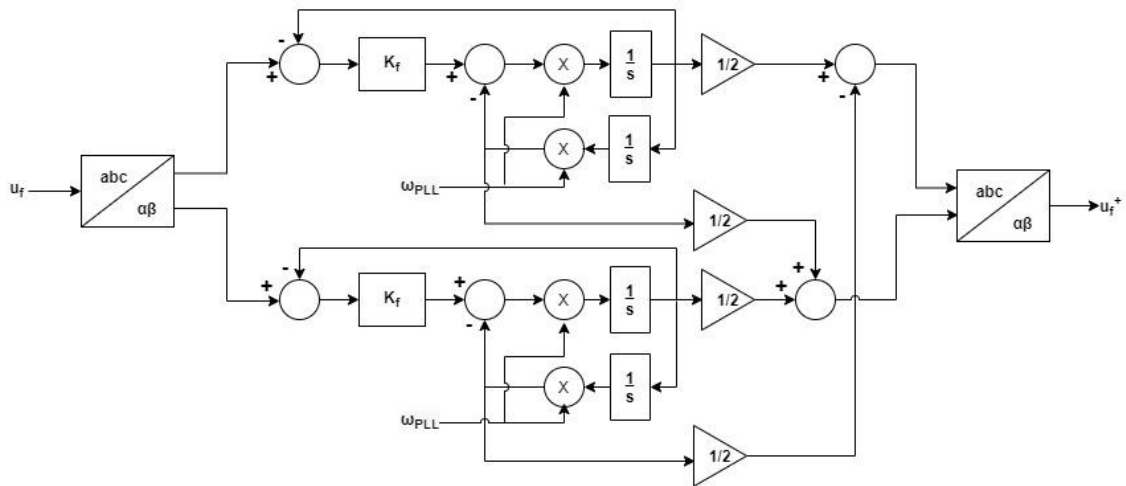
u_{f1} [43]. Στο Σχήμα 4.4 παρουσιάζεται το δομικό διάγραμμα του κυκλώματος που υλοποιεί το φίλτρο τύπου DSOGI. Στη συνέχεια η τάση αυτή, όπως αποτυπώνεται και στο Σχήμα 4.5, τροφοδοτείται στη διάταξη κλειδώματος φάσης, εξασφαλίζοντας με αυτόν τον τρόπο την αποτελεσματική λειτουργία αυτής [43].

Οι τάσεις αναφοράς v_{ref}^d, v_{ref}^q στο σύγχρονο πλαίσιο αναφοράς καθορίζονται από έναν εσωτερικό ελεγκτή ρεύματος, ακριβώς όπως αυτός παρουσιάστηκε στην Ενότητα 3.3 (βλ. Σχήμα 3.3). Στο εν λόγω κύκλωμα εμπεριέχονται PI ελεγκτές στους οποίους έχει επιβληθεί κορεσμός, έτσι ώστε η έξοδος τους να περιορίζεται μεταξύ τιμών αποδεκτού εύρους. Επιπλέον, για την αντιμετώπιση του φαινομένου «windup», στους εν λόγω ελεγκτές εφαρμόζεται η μέθοδος «back calculation». Το φαινόμενο «windup» εμφανίζεται σε PI ελεγκτές κατόπιν περιορισμού της εξόδου η οποία επέρχεται λόγω επιβολής κορεσμού. Έτσι σε περίπτωση που η τιμή αναφοράς λόγω του κορεσμού που επιβάλλεται δεν μπορεί να επιτευχθεί, στην είσοδο του ελεγκτή παρουσιάζεται συσσώρευση σφάλματος με αποτέλεσμα την μη επιθυμητή λειτουργία αυτού (ταλαντωτική συμπεριφορά) [54]. Η μέθοδος «back calculation» βασίζεται στην υπέρθεση ενός σήματος στην είσοδο του ολοκληρωτή του PI ελεγκτή. Το σήμα αυτό είναι το αποτέλεσμα της διαφοράς μεταξύ της τιμής του ελεγκτή μετά την επενέργεια του κορεσμού και της αντίστοιχης τιμής πριν την επενέργεια του κορεσμού. Το κύκλωμα που εκτελεί τη διαδικασία αυτή παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.6. Οι αναλυτικές τιμές των παραμέτρων του ελεγκτή παρατίθενται στο Παράρτημα.

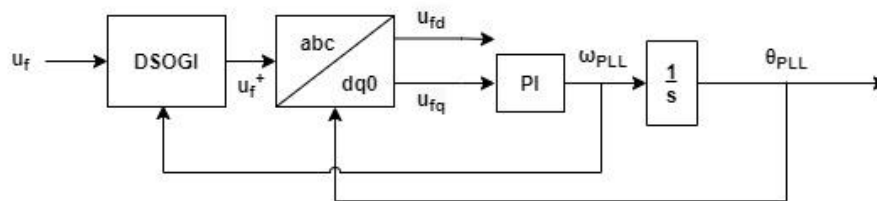
Πέραν του εσωτερικού ελεγκτή ρεύματος (θετικής ακολουθίας), στο μοντέλο έχει συμπεριληφθεί και ένας ελεγκτής ρεύματος αρνητικής ακολουθίας. Ο εν λόγω ελεγκτής έχει ως σκοπό την καταστολή των ρευμάτων αρνητικής ακολουθίας που εμφανίζονται στον μετατροπέα τόσο σε περιπτώσεις σφαλμάτων, όσο και σε περιπτώσεις σύνδεσης στο δίκτυο ασύμμετρων φορτίων.

Ο ελεγκτής δέχεται στην είσοδο του τα ρεύματα αρνητικής ακολουθίας i_{c-}^d και i_{c-}^q , τα οποία απομονώνονται από τα αντίστοιχες $d - q$ συνιστώσες του ρεύματος i_c ($i_c^d - i_c^q$) μέσω της χρήσης κατάλληλων φίλτρων εγκοπής (Notch Filters) [37]. Στη συνέχεια με τη χρήση PI ελεγκτών οι όροι i_{c-}^d και i_{c-}^q «οδηγούνται» προς τη μηδενική τιμή με αποτέλεσμα τον καθορισμό των όρων v_{ref-}^d και v_{ref-}^q . Κατόπιν οι $d - q$ συνιστώσες της τάσης αναφοράς αρνητικής ακολουθίας (v_{ref-}^d, v_{ref-}^q) μετασχηματίζονται στις μεταβλητές $v_{a-}^{ref}, v_{b-}^{ref}, v_{c-}^{ref}$ (αντίστροφος μετασχηματισμός Park) κάνοντας χρήση όμως της αρνητικής γωνίας που παράγεται από τη διάταξη κλειδώματος φάσης ($-\omega t$). Εν τέλει, οι τρεις φάσεις της τάσης αναφοράς αρνητικής ακολουθίας προστίθενται ανά φάση με τις αντίστοιχες τάσεις αναφοράς του ελεγκτή ρεύματος θετικής ακολουθίας ($v_a^{ref}, v_b^{ref}, v_c^{ref}$) και το αποτέλεσμα καθορίζει την τελική τριφασική τάση αναφοράς, με την οποία τροφοδοτείται στη συνέχεια το κύκλωμα διαμόρφωσης του μετατροπέα.

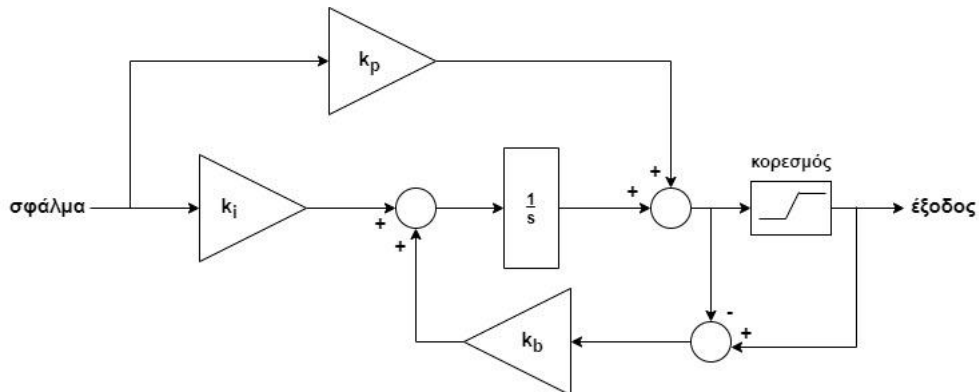
Τα ρεύματα αναφοράς i_{ref}^d και i_{ref}^q τα οποία τροφοδοτούνται στον εσωτερικό ελεγκτή ρεύματος είναι αποτέλεσμα του ελέγχου ανωτέρου επιπέδου που εκτελείται στον μετατροπέα που βρίσκεται στην πλευρά της Αττικής. Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, ο μετατροπέας αυτός είναι υπεύθυνος για τη ρύθμιση της τάσης του συνδέσμου ΣΡ και της αέργου ισχύος που εγχέεται-απορροφάται από το δίκτυο ΕΡ της Αττικής.



Σχήμα 4.4 Δομικό διάγραμμα φίλτρου δευτέρας τάξης τύπου DSOGI.



Σχήμα 4.5 Διάταξη κλειδώματος φάσης με τη χρήση φίλτρου δευτέρας τάξης τύπου DSOGI.



Σχήμα 4.6 PI ελεγκτής ακολουθούμενος από σχήμα «anti-windup» με τη χρήση της μεθόδου «back-calculation».

Συνοπτικά, σύμφωνα με όσα παρουσιάστηκαν στην Ενότητα 3.3, η τιμή του ρεύματος αναφοράς i_{ref}^d είναι υπεύθυνη για τον έλεγχο της τιμής της συνεχούς τάσης του συνδέσμου HVDC. Αυτό πραγματοποιείται μέσω της χρήσης ενός PI ελεγκτή στον οποίο τροφοδοτείται το σφάλμα μεταξύ της μετρούμενης τιμής της τάσης του συνδέσμου και της αντίστοιχης τιμής αναφοράς (1 αμ.). Στον PI ελεγκτή έχει επίσης επιβληθεί κορεσμός, ενώ εφαρμόζεται και σχήμα «anti-windup» μέσω της μεθόδου «back calculation», ακριβώς όπως και στους PI ελεγκτές του εσωτερικού ελεγκτή ρεύματος.

Περαιτέρω, ο εν λόγω PI ελεγκτής χαρακτηρίζεται και από λειτουργία «tracking». Η επιλογή αυτή εξασφαλίζει πως η έξοδος του PI ελεγκτή, η οποία στη συνέχεια υφίσταται δυναμικό κορεσμό μεταξύ των τιμών $i_{ref \ max}^d$ και $-i_{ref \ max}^d$ (μέγιστη τιμή ρεύματος i_{ref}^d), ακολουθεί την τελική τιμή του ρεύματος αναφοράς i_{ref}^d . Ο δυναμικός κορεσμός επενεργεί στον όρο i_{ref}^d σε περιπτώσεις εμφάνισης σφάλματος στο

δίκτυο, όπου η άεργος συνιστώσα του ρεύματος αναφοράς (i_{ref}^q) αυξάνεται σημαντικά με σκοπό να επιτευχθεί η υποστήριξη της τάσης του ζυγού στο ΣΚΣ. Στις περιπτώσεις αυτές είναι σημαντικό το μέτρο του ρεύματος του μετατροπέα να μην ξεπερνά την ονομαστική του τιμή. Ο υπολογισμός της τιμής του ρεύματος $i_{ref\ max}^d$ πραγματοποιείται δίνοντας προτεραιότητα στην άεργο συνιστώσα i_{ref}^q και μέσω της ακόλουθης σχέσης

$$i_{ref\ max}^d = \sqrt{(I_{max})^2 - (i_{ref}^q)^2} \quad (4.2)$$

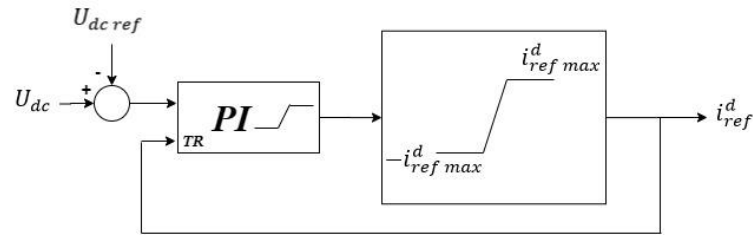
όπου I_{max} η μέγιστη τιμή του μέτρου του ρεύματος του μετατροπέα, με τιμή $I_{max} = 1.005 \alpha\mu$. Το δομικό διάγραμμα του κυκλώματος, που υλοποιεί τον έλεγχο της συνεχούς τάσης του συνδέσμου παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.7.

Όσο αφορά τη ρύθμιση της άεργου ισχύος που ο μετατροπέας της Απτικής εγχέει στο δίκτυο ή απορροφά από αυτό, αυτή υλοποιείται μέσω της q συνιστώσας του ρεύματος αναφοράς i_{ref} . Η τιμή της μεταβλητής i_{ref}^q καθορίζεται αρχικά από το αποτέλεσμα της διαίρεσης της άεργου ισχύος αναφοράς Q_{ref} (εντολή που δίνεται στον μετατροπέα), η οποία εφόσον δεν απαιτείται διαφορετικά έχει τιμή $0 \alpha\mu$, με τη d συνιστώσα της τάσης u_f . Το αποτέλεσμα αυτό στη συνέχεια τροφοδοτείται σε ένα σχήμα FRT (Fault Ride Through), που στην ουσία αποτελεί έναν αλγόριθμο ο οποίος διασφαλίζει την ικανότητα αδιάλειπτης λειτουργίας του συστήματος σε συνθήκες σφάλματος [27]. Στο Σχήμα 4.8 παρουσιάζεται το δομικό διάγραμμα του κυκλώματος που υλοποιεί τον έλεγχο της άεργου ισχύος στην έξοδο του μετατροπέα.

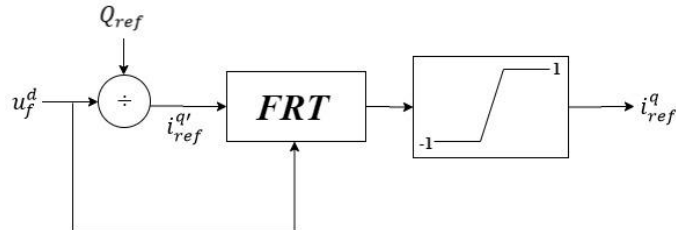
Ειδικότερα οι εντολές που εμπεριέχονται στον αλγόριθμο επενεργούν στη μεταβλητή i_{ref}^q , έτσι ώστε σε περίπτωση σφάλματος να επιτυγχάνεται η άμεση υποστήριξη της τάσης U_f . Αυτό υλοποιείται εντός 20 ms από την ανίχνευση του σφάλματος μέσω της έγχυσης άεργου ισχύος από τον μετατροπέα, η τιμή της οποίας είναι ανάλογη της πτώσης τάσης που παρουσιάζει η τάση U_f . Πιο συγκεκριμένα, η μεταβλητή i_{ref}^q αυξάνεται κατά $0.02 \alpha\mu$ για κάθε $0.01 \alpha\mu$ πτώση τάσης που παρουσιάζεται. Έτσι, σε περίπτωση που η βύθιση της τάσης U_f φτάσει το $0.5 \alpha\mu$ το σχήμα FRT δίνει εντολή για την παραγωγή άεργου συνιστώσας ρεύματος (i_{ref}^q) με τιμή $1 \alpha\mu$. Εφόσον κάτι τέτοιο συμβεί βέβαια, σύμφωνα με τη σχέση (4.2), η ανώτατη τιμή του όρου i_{ref}^d ανέρχεται σε μόλις $0.1 \alpha\mu$, γεγονός το οποίο όπως γίνεται αντιληπτό περιορίζει κατά πολύ τη δυνατότητα μεταφοράς ενεργού ισχύος του μετατροπέα. Η διαστασιολόγηση των εντολών που υλοποιεί το σχήμα FRT έγινε σύμφωνα με τον κώδικα συστήματος που χρησιμοποιείται από την «TenneT TSO GmbH» [55].

4.3.3 Έλεγχος Υπεράκτιου Μετατροπέα (Σταθμός Κρήτης)

Στον μετατροπέα που βρίσκεται στην πλευρά της Κρήτης, λόγω της χαμηλής ισχύος βραχυκύκλωσης που χαρακτηρίζει το νησί, δεν καθίσταται δυνατή η εφαρμογή του διανυσματικού ελέγχου ρεύματος. Έτσι, στον μετατροπέα εφαρμόστηκε η τεχνική του ελέγχου συγχρονισμού ισχύος, αντικείμενο που αποτελεί και το κυρίως θέμα διερεύνησης της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Η σχεδίαση του κυ-



Σχήμα 4.7 Δομικό διάγραμμα υλοποίησης του ελέγχου της συνεχούς τάσης του συνδέσμου.



Σχήμα 4.8 Δομικό διάγραμμα υλοποίησης του ελέγχου αέργου ισχύος στην έξοδο του μετατροπέα

κλώματος ελέγχου του μετατροπέα βασίστηκε σε όσα περιγράφηκαν στην Ενότητα 3.4, ενώ παράλληλα στο κύκλωμα προστέθηκε ένας αριθμός επικουρικών διατάξεων για την περαιτέρω βελτίωση της απόδοσης του μετατροπέα.

Ο μετατροπέας της πλευράς αυτής έχει επιφορτιστεί με τον έλεγχο (σε ανώτερο επίπεδο) της ενεργού ισχύος που διακινείται μέσω του συνδέσμου HVDC και παράλληλα είναι υπεύθυνος για τον έλεγχο της αέργου ισχύος που εγχέεται ή απορροφάται από το δίκτυο EP του νησιού.

Ο βρόχος συγχρονισμού ισχύος (PSL) αποτελεί τον εξωτερικό βρόχο ελέγχου που ρυθμίζει την ενεργό ισχύ που εγχέει-απορροφά ο μετατροπέας. Επιπλέον, μέσω του βρόχου αυτού επιτυγχάνεται και ο συγχρονισμός του μετατροπέα με το δίκτυο EP. Η διαφορά μεταξύ της ενεργού ισχύος αναφοράς (που αποτελεί την εντολή του διαχειριστή) και της ενεργού ισχύος, που μετριέται στην έξοδο των φίλτρων του μετατροπέα, οδηγείται σε έναν ολοκληρωτικό ελεγκτή (I ελεγκτής). Στον εν λόγω ελεγκτή, όπως και στους λοιπούς PI ελεγκτές που έχουν χρησιμοποιηθεί στο μοντέλο προσομοίωσης, έχει επιβληθεί κορεσμός, ενώ εφαρμόζεται και σχήμα «anti-windup» μέσω της μεθόδου «back calculation». Το αποτέλεσμα στην έξοδο του ολοκληρωτικού ελεγκτή είναι η γωνία θ_u , η οποία κατόπιν προστίθεται σε ένα σταθερό σήμα αναφοράς $\omega_{ref} t$ των 50 Hz για τον τελικό καθορισμό της κυκλικής συχνότητας ωt_{PSL} ($\omega t_{PSL} = \omega_{ref} t + \theta_u$). Η κυκλική συχνότητα ωt_{PSL} , υπό κανονικές συνθήκες λειτουργίας, αποτελεί και τη συχνότητα με την οποία πραγματοποιούνται οι μετασχηματισμοί και αντίστροφοι μετασχηματισμοί Park, εξασφαλίζοντας με αυτό τον τρόπο το συγχρονισμό του μετατροπέα με το δίκτυο.

Παράλληλα, στο κύκλωμα ελέγχου έχει προστεθεί και μία εφεδρική διάταξη κλειδώματος φάσης (back-up PLL), η λειτουργία της οποίας αναλύθηκε στην Ενότητα 3.3. Η διάταξη αυτή αναλαμβάνει να παρέχει το συγχρονισμό του μετατροπέα με το δίκτυο σε συνθήκες σφάλματος, όπου ο έλεγχος συγχρονισμού ισχύος δε δύναται να λειτουργήσει και ο διανυσματικός έλεγχος ρεύματος τίθεται σε εφαρμογή.

Όπως γίνεται αντιληπτό, η διαδικασία αυτή προϋποθέτει την ύπαρξη ενός αυτόματου μηχανισμού υπεύθυνου για την ορθή και έγκαιρη διάγνωση του σφάλματος. Σε

περίπτωση εμφάνισης σφάλματος στο δίκτυο (πχ. τριφασικό βραχυκύκλωμα) η διάγνωση στο μοντέλο προσομοίωσης πραγματοποιείται μέσω της συνεχούς παρακολούθησης του μέτρου της τάσης του δικτύου u_{g2} στην έξοδο του μετασχηματιστή. Εφόσον το μέτρο της τάσης πέσει κάτω από μία ορισμένη τιμή ($0.1 \alpha\mu$) τότε ένα σήμα C_{lim} που αρχικά έχει μηδενική τιμή λαμβάνει την τιμή 1. Το σήμα αυτό, για όσο χρόνο έχει την τιμή 1 αναθέτει το συγχρονισμό του μετατροπέα στη διάταξη κλειδώματος φάσης, ενώ όταν μηδενιστεί και άρα έχουμε εκκαθάριση του σφάλματος ο συγχρονισμός ανατίθεται εκ νέου στο βρόχο συγχρονισμού ισχύος.

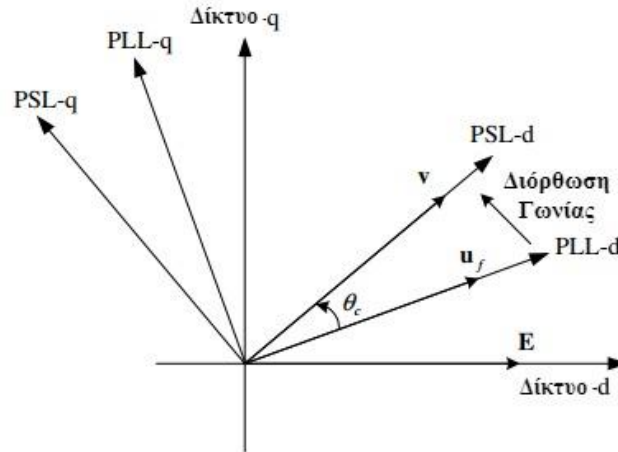
Στο σημείο αυτό, υπενθυμίζεται πως η διάταξη κλειδώματος φάσης εξασφαλίζει ότι ο d άξονας του στρεφόμενου $d - q$ πλαισίου του μετατροπέα ταυτίζεται με το διάνυσμα της τάσης u_f . Από την άλλη, ο βρόχος συγχρονισμού ισχύος επιτυγχάνει την ταύτιση του d άξονα του στρεφόμενου $d - q$ πλαισίου του μετατροπέα με το διάνυσμα v , που αποτελεί την τάση στην έξοδο του μετατροπέα (πριν το πηνίο σύνδεσης). Συνεπώς, γίνεται αντιληπτό πως οι παραγόμενες γωνίες από το βρόχο συγχρονισμού ισχύος (θ_u) και τη διάταξη κλειδώματος φάσης (θ_{PLL}) αντίστοιχα δεν έχουν την ίδια τιμή. Ως εκ τούτου, κατά την διάγνωση πιθανού σφάλματος στην πλευρά του δικτύου, όπου ο συγχρονισμός του μετατροπέα ανατίθεται από το βρόχο συγχρονισμού ισχύος στη διάταξη κλειδώματος φάσης, η διαφορά αυτή δημιουργεί μία απότομη μεταβολή στη γωνία του μετατροπέα. Κάτι τέτοιο όμως είναι μη επιθυμητό για την αρμονική λειτουργία του συστήματος.

Έτσι, για τη διασφάλιση της ομαλής μεταγωγής του συγχρονισμού από το βρόχο συγχρονισμού ισχύος στη διάταξη κλειδώματος φάσης χρησιμοποιείται ένα κύκλωμα το οποίο διορθώνει τη γωνία θ_{PLL} , έτσι ώστε ανά πάσα στιγμή να ακολουθεί την τιμή της γωνίας θ_u . Όπως παρουσιάζεται και στο Σχήμα 4.9, η διαφορά φάσης μεταξύ των d αξόνων των στρεφόμενων $d - q$ πλαισίων του βρόχου συγχρονισμού ισχύος και της διάταξης κλειδώματος φάσης εκφράζεται από τη γωνία θ_c . Ο υπολογισμός της γωνίας θ_c γίνεται μέσω της ακόλουθης σχέσης

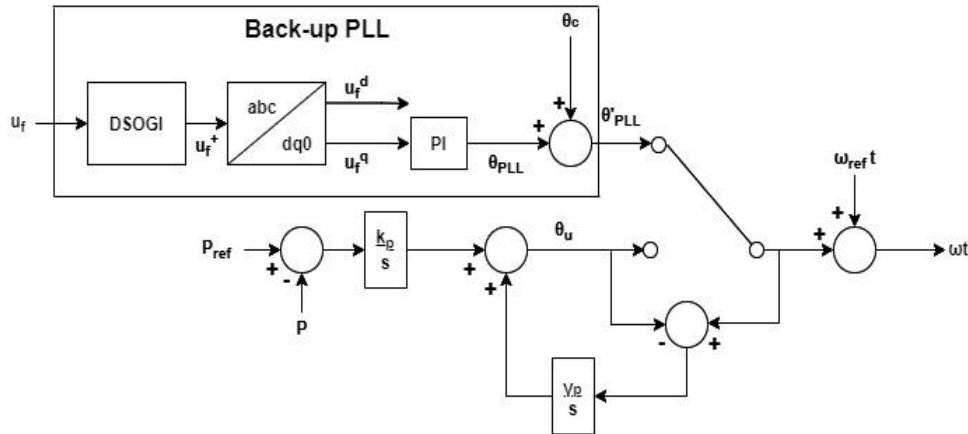
$$\theta_c = \arcsin\left(\frac{PX_c}{VU_f}\right) \approx \arcsin(PX_c) \quad (4.3)$$

Συνεπώς γίνεται αντιληπτό πως προσθέτοντας τη γωνία θ_c στη γωνία θ_{PLL} , η νέα γωνία θ'_{PLL} που προκύπτει εξαναγκάζεται στο να ακολουθεί την τιμή της γωνίας θ_u του βρόχου συγχρονισμού ισχύος.

Μετά την εκκαθάριση του σφάλματος, όταν και το σήμα C_{lim} μετατρέπεται από 1 σε 0, ο συγχρονισμός του μετατροπέα ανατίθεται και πάλι στο βρόχο συγχρονισμού ισχύος. Βέβαια, όταν αυτό είναι να συμβεί, η γωνία θ_u του βρόχου συγχρονισμού ισχύος πιθανότατα να μην έχει την ίδια τιμή με τη γωνία θ'_{PLL} . Αυτό συμβαίνει πρωτίστως λόγω του ότι κατά την εμφάνιση του σφάλματος η γωνία θ_u του βρόχου συγχρονισμού ισχύος παρουσιάζει απότομη αύξηση. Για το λόγο αυτό, στην έξοδο του βρόχου συγχρονισμού ισχύος προστέθηκε ένα σχήμα «anti-windup», όπως αυτό παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.10. Μέσω της προσθήκης αυτού και υπό την προϋπόθεση πως ο όρος γ_p χαρακτηρίζεται από υψηλή τιμή, θα ισχύει $\theta_u = \theta'_{PLL}$ και έτσι η μεταγωγή του συγχρονισμού από τη διάταξη κλειδώματος φάσης στο βρόχο συγχρονισμού ισχύος θα πραγματοποιείται με ομαλό τρόπο.



Σχήμα 4.9 Στρεφόμενα $d - q$ πλαίσια αναφοράς βρόχου συγχρονισμού ισχύος (PSL) και διάταξης κλειδώματος φάσης (PLL).



Σχήμα 4.10 Βρόχος συγχρονισμού ισχύος (PSL) με σχήμα «anti-windup» και εφεδρική διάταξη κλειδώματος φάσης (PLL).

Πέραν του βρόχου συγχρονισμού ισχύος, το κύκλωμα ελέγχου του μετατροπέα στην πλευρά της Κρήτης αποτελείται και από έναν εσωτερικό βρόχο, ο οποίος είναι υπεύθυνος για τη σύνθεση των τάσεων αναφοράς v_{ref}^d και v_{ref}^q . Μέσω του εσωτερικού βρόχου ελέγχου αρχικά καθορίζονται οι τιμές των ρευμάτων αναφοράς i_{ref}^d και i_{ref}^q σύμφωνα με τις σχέσεις (3.38)-(3.39). Οι όροι i_{ref}^d και i_{ref}^q αποκαλούνται ρεύματα αναφοράς καθώς οι $d - q$ συνιστώσες του ρεύματος που μετρούνται στην έξοδο του μετατροπέα (i_c^d, i_c^q) ακολουθούν τις τιμές αυτών. Βέβαια, πρέπει να σημειωθεί πως για να είναι αληθές αυτό ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δοθεί στην επιλογή της τιμής του όρου a_c που αποτελεί το επιθυμητό εύρος ζώνης κλειστού βρόχου του ελεγκτή ρεύματος.

Όπως παρατηρούμε, η έξοδος ΔV του ελεγκτή εναλλασσόμενης τάσης (AVC) συμβάλλει αποκλειστικά στον καθορισμό της d συνιστώσας του ρεύματος αναφοράς, ενώ αντίστοιχα η q συνιστώσα αφήνεται «ελεύθερη» να καθορισθεί από μετρούμενα ηλεκτρικά μεγέθη του συστήματος. Εναλλακτικά, με τη χρήση του ελεγκτή αέργου ισχύος (RPC), υπάρχει η δυνατότητα αντί της εναλλασσόμενης τάσης στην έξοδο των φίλτρων του μετατροπέα να ελέγξουμε την άεργο ισχύ που αυτός εγχέει-απορροφά από το δίκτυο. Παρόλα αυτά, αν και ο ελεγκτής αέργου ισχύος έχει συμπεριληφθεί στο μοντέλο προσομοίωσης, προτιμήθηκε το κύκλωμα να βρίσκεται

σε λειτουργία ελέγχου της εναλλασσόμενης τάσης, έτσι ώστε να παρέχεται η καλύτερη δυνατή υποστήριξη της τάσης στο ζυγό των φίλτρων του μετατροπέα.

Το ρεύμα αναφοράς i_{ref}^d , μετά τον καθορισμό της αρχικής του τιμής σύμφωνα με τη σχέση (3.38), υποβάλλεται σε δυναμικό κορεσμό μεταξύ των τιμών $i_{ref\ max}^d$ και $-i_{ref\ max}^d$ (μέγιστη τιμή ρεύματος i_{ref}^d). Έτσι, δίνοντας προτεραιότητα στο ρεύμα αναφοράς i_{ref}^q , η τιμή του οποίου αφήνεται ελεύθερη για να επιτυγχάνεται διαρκώς η βέλτιστη υποστήριξη της τάσης, ο υπολογισμός της τιμής του ρεύματος $i_{ref\ max}^d$ πραγματοποιείται μέσω της ακόλουθης σχέσης

$$i_{ref\ max}^d = \sqrt{(I_{max})^2 - (i_{ref}^q)^2} \quad (4.4)$$

Επιλέγοντας ο όρος I_{max} , που αποτελεί το μέγιστο επιτρεπτό μέτρο του ρεύματος του μετατροπέα, να έχει την τιμή 1.005 αμ εξασφαλίζεται πως οι $d - q$ συνιστώσες του ρεύματος αναφοράς θα διαμορφωθούν αναλόγως, έτσι ώστε να μην παρατηρηθεί υπέρβαση της τιμής αυτής. Εδώ σημειώνεται πως αν και η τιμή της μεταβλητής i_{ref}^q αφήνεται ελεύθερη όπως ειπώθηκε παραπάνω, παρόλα αυτά επιλέχθηκε να επιδέχεται κορεσμό μεταξύ των τιμών 0.8 αμ και -0.8 αμ. Η επιλογή αυτή έγινε έτσι ώστε στην περίπτωση σφάλματος όπου η τιμή του όρου i_{ref}^q αυξάνεται δραστικά, η απότομη αυτή αύξηση να μην οδηγεί το μέτρο του ρεύματος του μετατροπέα στην υπέρβαση της τιμή 1.005 αμ.

Όπως γίνεται αντιληπτό, ο κορεσμός των $d - q$ συνιστωσών του ρεύματος αναφοράς επιβάλλεται μόνο σε συνθήκες όπου το μέτρο αυτών πάει να υπερβεί τη μέγιστη επιτρεπτή τιμή I_{max} , ενώ υπό φυσιολογικές συνθήκες λειτουργίας οι τιμές των μεταβλητών i_{ref}^d και i_{ref}^q καθορίζονται ελεύθερα και σύμφωνα με τη διαδικασία που περιγράφηκε παραπάνω.

Στη συνέχεια, εντός του εσωτερικού βρόχου ελέγχου τα ρεύματα αναφοράς i_{ref}^d και i_{ref}^q μετατρέπονται σε τάσεις αναφοράς v_{ref}^d και v_{ref}^q , σύμφωνα με τις σχέσεις (3.36)-(3.37). Μετά τον καθορισμό τους, στον όρο v_{ref}^d επιβάλλεται δυναμικός κορεσμός μεταξύ των τιμών $v_{ref\ max}^d$ και $-v_{ref\ max}^d$ (μέγιστη τιμή τάσης v_{ref}^d), ακολουθώντας αντίστοιχη διαδικασία όπως ακριβώς συνέβη και με το ρεύμα αναφοράς i_{ref}^d . Έτσι, δίνοντας προτεραιότητα στην q συνιστώσα της τάσης αναφοράς, με την προϋπόθεση πως και αυτή επιδέχεται κορεσμό μεταξύ των τιμών 0.9 αμ και -0.9 αμ, ο υπολογισμός της τιμής της τάσης $v_{ref\ max}^d$ πραγματοποιείται μέσω της ακόλουθης σχέσης

$$v_{ref\ max}^d = \sqrt{(V_{max})^2 - (v_{ref}^q)^2} \quad (4.5)$$

όπου V_{max} η μέγιστη τιμή του μέτρου της τάσης αναφοράς.

Ο δυναμικός κορεσμός εφαρμόζεται έτσι ώστε το μέτρο της τριφασικής τάσης αναφοράς να μην ξεπερνά τη δεδομένη τιμή V_{max} . Δεδομένου ότι τα φέροντα τριγωνικά σήματα του κυκλώματος διαμόρφωσης κατέχουν συνολικό πλάτος 1 αμ, για το μοντέλο προσομοίωσης επιλέχθηκε η τιμή $V_{max} = 0.9$ αμ, με σκοπό ο συντελεστής

διαμόρφωσης πλάτους του μετατροπέα να μην υπερβαίνει την τιμή 0.9 αμ. Με αυτόν τον τρόπο αποφεύγεται η παρουσίαση φαινομένων υπερδιαμόρφωσης στον μετατροπέα, τα οποία εν γένει είναι μη επιθυμητά τόσο σε συνθήκες φυσιολογικής λειτουργίας του συστήματος όσο και σε συνθήκες σφάλματος.

Τέλος, στους όρους v_{ref}^d και v_{ref}^q , προτού αυτοί μετατραπούν μέσω του αντιστρόφου μετασχηματισμού Park στις τρεις φάσεις της τάσης αναφοράς $v_a^{ref}, v_b^{ref}, v_c^{ref}$, προστίθενται (ανά φάση) και οι τάσεις αναφοράς αρνητικής ακολουθίας $v_{a-}^{ref}, v_{b-}^{ref}, v_{c-}^{ref}$. Αυτές είναι αποτέλεσμα ενός ελεγκτή ρεύματος αρνητικής ακολουθίας, ο οποίος έχει συμπεριληφθεί στο κύκλωμα ελέγχου του μετατροπέα, ακριβώς όπως συνέβη και στον μετατροπέα στην πλευρά της Αττικής. Ο εν λόγω ελεγκτής έχει ως σκοπό την καταστολή των ρευμάτων αρνητικής ακολουθίας που εμφανίζονται στον μετατροπέα τόσο σε περιπτώσεις σφαλμάτων όσο και σε περιπτώσεις σύνδεσης στο δίκτυο ασύμμετρων φορτίων. Στην είσοδο του ο ελεγκτής δέχεται τα ρεύματα αρνητικής ακολουθίας i_{c-}^d και i_{c-}^q καθώς και τις τάσεις αρνητικής ακολουθίας v_{f-}^d και v_{f-}^q . Οι όροι αυτοί προέρχονται από τις αντίστοιχες $d - q$ συνιστώσες των μεγεθών θετικής ακολουθίας i_c και u_f , κάνοντας χρήση κατάλληλων φίλτρων εγκοπής (Notch Filters). Έτσι, ο καθορισμός των όρων v_{ref-}^d και v_{ref-}^q πραγματοποιείται σύμφωνα με τις σχέσεις

$$v_{ref-}^d = u_{f-}^d - a_c L_c (i_{ref-}^d - i_{c-}^d) + \omega_g L_c i_{c-}^q \quad (4.6)$$

$$v_{ref-}^q = u_{f-}^q - a_c L_c (i_{ref-}^q - i_{c-}^q) - \omega_g L_c i_{c-}^d \quad (4.7)$$

όπου τα ρεύματα αναφοράς αρνητικής ακολουθίας i_{ref-}^d και i_{ref-}^q τίθενται σε μηδενική τιμή. Κατόπιν οι $d - q$ συνιστώσες της τάσης αναφοράς αρνητικής ακολουθίας μετασχηματίζονται στις μεταβλητές $v_{a-}^{ref}, v_{b-}^{ref}, v_{c-}^{ref}$ (αντίστροφος μετασχηματισμός Park) με τη χρήση της αρνητικής γωνίας ($-\omega t$) που παράγεται από το βρόχο συγχρονισμού ισχύος (ή τη διάταξη κλειδώματος φάσης σε περίπτωση σφάλματος). Η αρνητική κυκλική συχνότητα οφείλεται στο γεγονός πως το $d - q$ πλαίσιο αναφοράς του ελεγκτή ρεύματος αρνητικής ακολουθίας στρέφεται με αντίθετη φορά από το αντίστοιχο πλαίσιο αναφοράς του μετατροπέα.

4.4 ΠΗΝΙΑ ΔΙΑΣΥΝΔΕΣΗΣ - ΦΙΛΤΡΑ ΕΡ

Όπως διατυπώθηκε και στην Υποενότητα 4.3.1, σε κάθε βραχίονα των μετατροπέων που συμπεριλαμβάνονται στο μοντέλο προσομοίωσης έχει τοποθετηθεί μία αυτεπαγωγή L_s , η οποία αποσκοπεί στον περιορισμό των ρευμάτων που ρέουν στον εσωτερικό βρόχο των μετατροπέων, ειδικότερα σε συνθήκες σφάλματος [37], [51]. Παρόλα αυτά, η αυτεπαγωγή L_s δύναται κάλλιστα να θεωρηθεί πως επιτελεί και το έργο του πηνίου διασύνδεσης μεταξύ του μετατροπέα και του δικτύου ΕΡ. Εντούτοις, στο μοντέλο προσομοίωσης μεταξύ των μετατροπέων και των δικτύων ΕΡ συμπεριλήφθηκαν ξεχωριστά πηνία διασύνδεσης (L_c), με απώτερο σκοπό να προσφέρουν ακόμα καλύτερο φιλτράρισμα του ρεύματος εξόδου του μετατροπέα, μειώνοντας καθαυτό τον τρόπο τον συντελεστή αρμονικής παραμόρφωσης (THD).

Από την άλλη, σημειώνεται πως στην έξοδο των μετατροπέων δεν έχουν συμπεριληφθεί πυκνωτές για το φιλτράρισμα της τάσης. Η επιλογή αυτή έγινε λόγω του

ότι αμφότεροι οι μετατροπείς του μοντέλου αποτελούν μετατροπείς πολλαπλών επιπέδων, γεγονός που (σε πραγματικές καταστάσεις) καθιστά την κυματομορφή της τάσης στο ΣΚΣ αποδεκτή από πλευράς αρμονικού περιεχομένου.

4.5 ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΕΣ

Στο υπό εξέταση σύστημα, μεταξύ των μετατροπέων και των δικτύων ΕΡ, τοποθετήθηκαν μετασχηματιστές προκειμένου να προσαρμοστεί η τάση των δικτύων ΕΡ στα επίπεδα τάσης λειτουργίας των μετατροπέων. Συγκεκριμένα, στην πλευρά του δικτύου της Αττικής ο μετασχηματιστής υποβιβάζει την υπερυψηλή τάση των 400 kV στο επίπεδο των 150 kV. Από την άλλη, στην πλευρά της Κρήτης ο μετασχηματιστής λειτουργεί με λόγο μετασχηματισμού 1, καθώς η διανομή ηλεκτρικής ενέργειας στο δίκτυο της Κρήτης πραγματοποιείται σε επίπεδο υψηλής τάσης (150 kV) και όχι υπερυψηλής (400 kV). Αμφότεροι οι μετασχηματιστές επελέγησαν με συνδεσμολογία αστέρα (γειωμένου)-τριγώνου, με το τρίγωνο να βρίσκεται στην πλευρά των μετατροπέων. Μέσω της συγκεκριμένης διασύνδεσης των μετασχηματιστών επιτυγχάνεται η καταστολή της 5^{ης} και 7^{ης} αρμονικής καθώς και των αρμονικών 3^{ης} τάξης [56]. Τέλος, η ονομαστική ισχύς των μετασχηματιστών επιλέχθηκε στα 700 MVA, ενώ οι παράμετροι του ισοδύναμου κυκλώματος του καθενός παρατίθενται αναλυτικά στο Παράρτημα.

4.6 ΔΙΚΤΥΑ ΕΡ

Το σύστημα που μελετήθηκε περιλαμβάνει τη διασύνδεση δύο δικτύων ΕΡ. Το δίκτυο της Αττικής χαρακτηρίζεται από ονομαστική τάση λειτουργίας 400 kV ενώ παράλληλα θεωρείται ισχυρό δίκτυο, καθώς η ισχύς βραχυκύκλωσης του είναι της τάξης των 20000 MVA. Από την άλλη, το νησιωτικό σύστημα της Κρήτης χαρακτηρίζεται από ονομαστική τάση 150 kV και θεωρείται ένα πολύ ασθενές δίκτυο. Η θεώρηση αυτή είναι αληθής καθώς λαμβάνοντας υπόψη πως η ισχύς βραχυκύκλωσης του δικτύου υπολογίζεται στα 1000 MVA και η συνολική ονομαστική διακινούμενη ισχύς στο σύνδεσμο ΣΡ επιλέχθηκε στα 700 MW, αυτό μας δίνει λόγο βραχυκύκλωσης 1.43 ($SCR < 2$). Το γεγονός του ιδιαίτερα χαμηλού λόγου βραχυκύκλωσης είναι και η αιτία που οδήγησε στην επιλογή της εφαρμογής του ελέγχου συγχρονισμού ισχύος στον μετατροπέα στην πλευρά της Κρήτης.

Τέλος, σημειώνεται πως στα πλαίσια του μοντέλου προσομοίωσης αμφότερα τα δίκτυα ΕΡ μοντελοποιήθηκαν ως τριφασικές πηγές τάσης, έχοντας ενσωματωμένη σύνθετη αντίσταση με λόγο επαγωγικής αντίδρασης προς ωμική αντίσταση (X/R) τιμής 10.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΥΠΟ ΜΕΛΕΤΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ- ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

5.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων του συστήματος VSC-HVDC, που εξετάστηκε στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Οι εν λόγω προσομοιώσεις πραγματοποιήθηκαν με τη χρήση του λογισμικού MATLAB/Simulink και έχουν ως σκοπό την αξιολόγηση της απόκρισης του υπό μελέτη συστήματος VSC-HVDC, όπως αυτό παρουσιάστηκε εκτενώς στο προηγούμενο κεφάλαιο (βλ. Κεφάλαιο 4). Οι καταστάσεις λειτουργίας που εξετάστηκαν αφορούν τόσο τη λειτουργία του συστήματος υπό κανονικές συνθήκες, όσο και τη συμπεριφορά αυτού σε συνθήκες σφάλματος. Αναλυτικότερα τα σενάρια τα οποία μελετήθηκαν περιλαμβάνουν τα παρακάτω:

- Μεταφορά ενεργού ισχύος καθορισμένης τιμής από το σύστημα της Αττικής στο σύστημα της Κρήτης, δια μέσω του συνδέσμου HVDC.
- Αντιστροφή της μεταφοράς ενεργού ισχύος (από την Κρήτη προς την Αττική) εντός εύλογου χρονικού διαστήματος
- Απόκριση του συστήματος σε γενόμενο τριφασικό σφάλμα στην πλευρά του πολύ ασθενούς δικτύου ΕΡ (σύστημα Κρήτης).

Η παρουσίαση των αποτελεσμάτων πραγματοποιείται με τη χρήση διαγραμμάτων μέσω του λογισμικού MATLAB, ενώ τα διάφορα ηλεκτρικά μεγέθη που παρουσιάζονται σε αυτά βρίσκονται σε ανά μονάδα τιμές. Για την ισχύ βάσης του συστήματος συνολικά επιλέχθηκε η τιμή $S_{base} = 700 \text{ MVA}$. Επιπλέον, για την τάση βάσης στο δίκτυο της Αττικής επιλέχθηκε η τιμή $V_{base1} = 400 \text{ kV}$, ενώ αντίστοιχα στο δίκτυο της Κρήτης επιλέχθηκε η τιμή $V_{base2} = 150 \text{ kV}$. Τέλος, για την τάση βάσης του συνδέσμου ΣΡ επιλέχθηκε η τιμή $V_{baseDC} = 300 \text{ kV}$.

Στις ενότητες που ακολουθούν πραγματοποιείται αναλυτική περιγραφή των αποτελεσμάτων που προέκυψαν, μέσω των προσομοιώσεων των διαφόρων καταστάσεων λειτουργίας (σενάρια) του υπό μελέτη συστήματος VSC-HVDC.

5.2 ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΥΠΟ ΚΑΝΟΝΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ

Στην παρούσα ενότητα εξετάζεται το σενάριο της κανονικής λειτουργίας του συστήματος, με τη μεταφορά ενεργού ισχύος από το δίκτυο της Αττικής στο νησιωτικό δίκτυο της Κρήτης. Η ενεργός ισχύς που μεταφέρεται είναι της τάξης του 0.8 αμ , τιμή που αντιστοιχεί σε 560 MW . Η μεταφορά ισχύος πραγματοποιείται μέσω της εντολής της ενεργού ισχύος αναφοράς P_{ref} , η οποία τίθεται στην τιμή 0.8 αμ και τροφοδοτείται στον βρόχο συγχρονισμού ισχύος του μετατροπέα της Κρήτης.

Στο σημείο αυτό σημειώνεται πως η σύμβαση φοράς της ισχύος που επιλέχθηκε είναι τέτοια ώστε θετική να θεωρείται η ισχύς που εγχέεται από τους μετατροπέεις προς τα συστήματα ΕΡ, ενώ αρνητική η ισχύς που απορροφούν οι μετατροπέεις

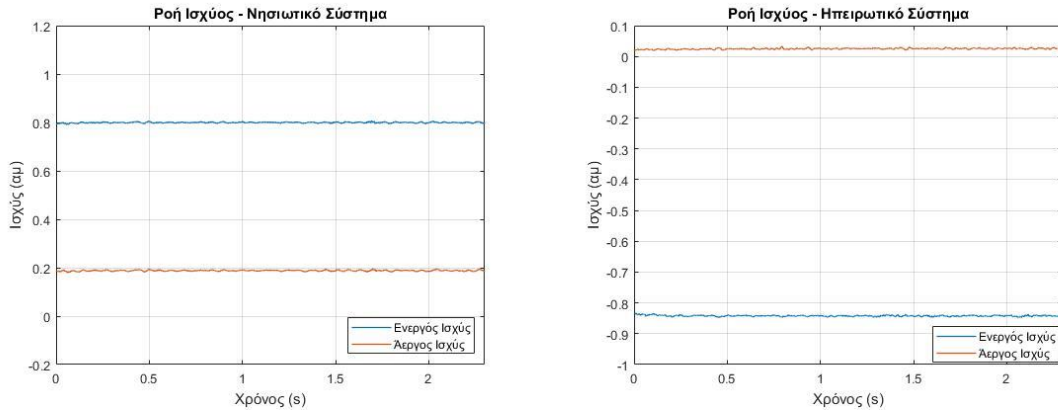
από αυτά. Αντίστοιχα, στην πλευρά ΣΡ (σύνδεσμος HVDC) θετική θεωρείται η ενεργός ισχύς που εξέρχεται από τους μετατροπείς προς τον σύνδεσμο ΣΡ, ενώ αρνητική η ενεργός ισχύς που εισέρχεται από τον σύνδεσμο ΣΡ στους μετατροπείς.

Στο Σχήμα 5.1 παρουσιάζονται τα διαγράμματα στα οποία αποτυπώνεται η ροή της ενεργού και της αέργου ισχύος στην έξοδο των μετατροπέων, τόσο στο νησιωτικό σύστημα της Κρήτης όσο και στο ηπειρωτικό σύστημα της Αττικής. Ξεκινώντας από το νησιωτικό σύστημα παρατηρούμε πως εξυπηρετείται η απαίτηση ενεργού ισχύος της τάξης του 0.8 αμ , η οποία ορίστηκε από την εντολή που δόθηκε στον μετατροπέα του σταθμού της Κρήτης μέσω της ενεργού ισχύος αναφοράς P_{ref} . Παράλληλα, παρατηρούμε πως ο μετατροπέας της πλευράς αυτής παρέχει άεργο ισχύ της τάξης του 1.9 αμ , έτσι ώστε να επιτευχθεί η υποστήριξη της τάσης του ζυγού στην έξοδο του.

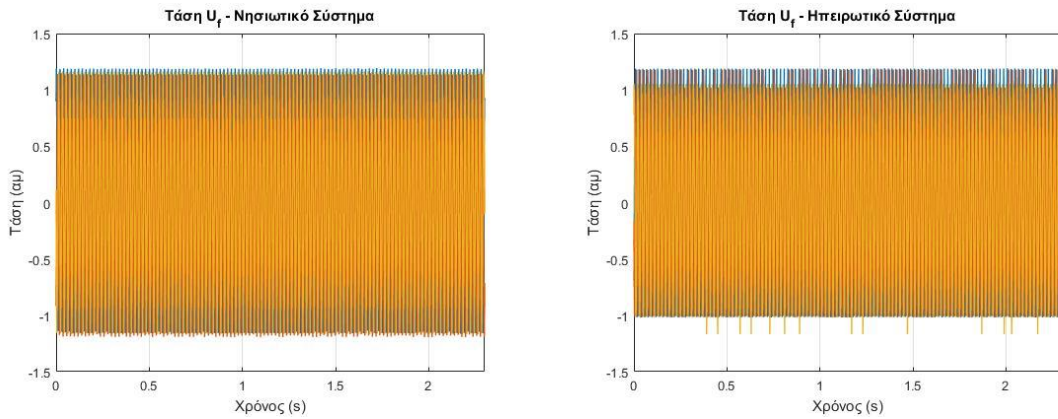
Στην πλευρά του ηπειρωτικού συστήματος παρατηρούμε ότι η ενεργός ισχύς που απορροφάται από τον μετατροπέα, έτσι ώστε να επιτευχθεί η μεταφορά ισχύος τιμής 0.8 αμ στο σύστημα της Κρήτης, είναι της τάξης του 0.84 αμ . Η απόκλιση μεταξύ των δύο αυτών τιμών δικαιολογείται απόλυτα αν ληφθεί υπόψη πως κατά μήκος του συνδέσμου HVDC παρουσιάζονται απώλειες ισχύος. Το γεγονός αυτό είναι πολύ σημαντικό καθώς γίνεται αντιληπτό πως η απαίτηση ενεργού ισχύος τιμής άνω του 0.95 αμ (ενδεικτικά) από το δίκτυο της Κρήτης πιθανότατα να μην δύναται να ικανοποιηθεί από το σύστημα της Αττικής. Και αυτό διότι κάτι τέτοιο θα σήμαινε πως το σύστημα της Αττικής θα έπρεπε να εγχύσει στο σύνδεσμο ΣΡ ενεργό ισχύ που θα ξεπερνούσε την τιμή του 1 αμ . Βέβαια αυτό θα ήταν μη υλοποιήσιμο καθώς το κύκλωμα ελέγχου του μετατροπέα είναι σχεδιασμένο κατά τρόπο που δεν επιτρέπει τη λειτουργία σε τιμές άνω των ονομαστικών, έτσι ώστε να μην τίθενται σε κίνδυνο τα δομικά στοιχεία του μετατροπέα.

Στο Σχήμα 5.2 παρουσιάζονται τα διαγράμματα της τριφασικής τάσης u_f στην έξοδο των φίλτρων των μετατροπέων, ενώ στο Σχήμα 5.3 αποτυπώνεται η τριφασική τάση u_g που αποτελεί την τάση στο ΣΚΣ (στο ζυγό εξόδου των μετασχηματιστών). Για την αξιολόγηση της ποιότητας των εν λόγω κυματομορφών από πλευράς αρμονικού περιεχομένου στο Σχήμα 5.4 και στο Σχήμα 5.5 παρουσιάζεται η ανάλυση FFT, που πραγματοποιείται μέσω του μετασχηματισμού Fourier για τις τάσεις u_f και u_g αντίστοιχα. Μέσω της ανάλυσης αυτής, για κάθε κυματομορφή τάσης στα δύο συστήματα υπολογίζεται ο συντελεστής αρμονικής παραμόρφωσης (THD).

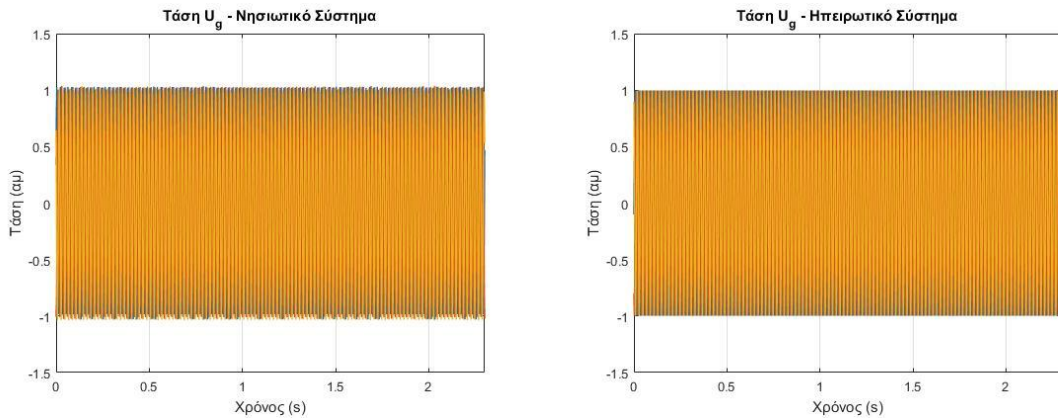
Τα αποτελέσματα καταδεικνύουν πως η τάση u_{g1} στο ΣΚΣ του συστήματος της Αττικής, παρουσιάζοντας συντελεστή αρμονικής παραμόρφωσης $THD = 0.41\%$, βρίσκεται εντός των αποδεκτών ορίων σύμφωνα με διεθνή πρότυπα [57]. Από την άλλη, η τάση u_{g2} στο ΣΚΣ του συστήματος της Κρήτης παρουσιάζει συντελεστή αρμονικής παραμόρφωσης $THD = 4.05\%$. Σε κάθε περίπτωση τονίζεται πως υπό πραγματικές συνθήκες, όπου ο αριθμός των επιπέδων των μετατροπέων θα ήταν δεκαπλάσιος σχεδόν από αυτόν που χρησιμοποιήθηκε στο μοντέλο προσομοίωσης (δέκα επίπεδα), η εν λόγω τάση θα χαρακτηριζόταν από πολύ χαμηλότερο συντελεστή αρμονικής παραμόρφωσης. Παρόλα αυτά, το υψηλό αρμονικό περιεχόμενο που παρουσιάζει η τάση στο ΣΚΣ της πλευράς αυτής σε σύγκριση με την αντίστοιχη τάση στο ηπειρωτικό δίκτυο αποτελεί γεγονός, τα αίτια του οποίου χρήζουν περαιτέρω διερεύνησης.



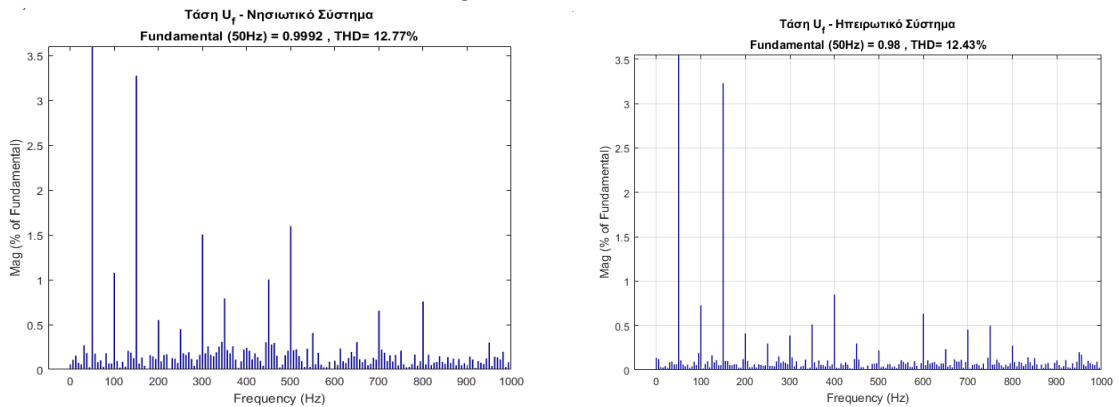
Σχήμα 5.1 Ροή ενεργού και αέργου ισχύος στην έξοδο των μετατροπών στην πλευρά ΕΡ.



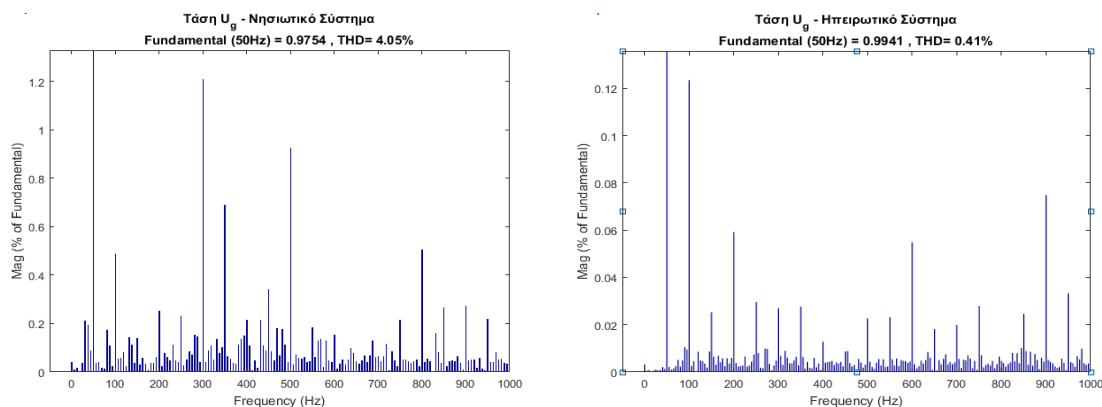
Σχήμα 5.2 Τριφασική τάση u_f στην έξοδο των φίλτρων των μετατροπών.



Σχήμα 5.3 Τριφασική τάση u_g στο ζυγό εξόδου των μετασχηματιστών (ΣΚΣ).



Σχήμα 5.4 Ανάλυση FFT και συντελεστής αρμονικής παραμόρφωσης (THD) της τάσης u_f .



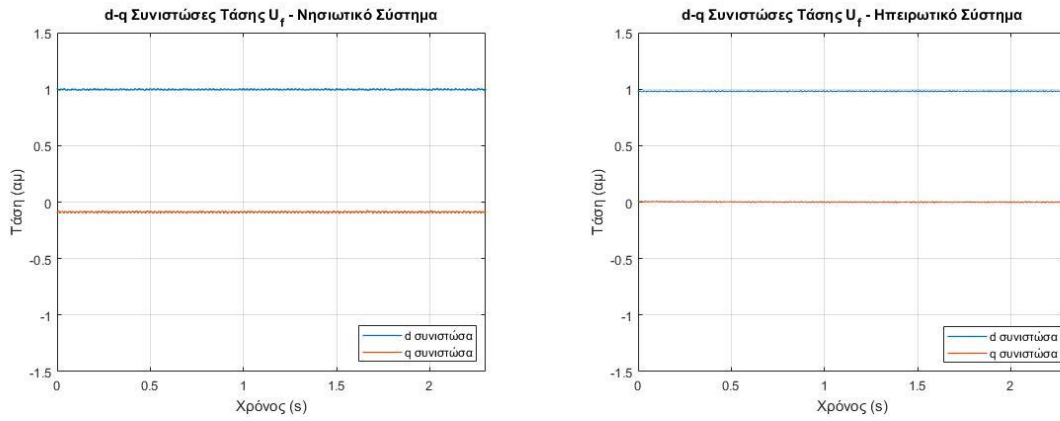
Σχήμα 5.5 Ανάλυση FFT και συντελεστής αρμονικής παραμόρφωσης (THD) της τάσης u_g .

Στο Σχήμα 5.6 παρουσιάζονται τα διαγράμματα στα οποία αποτυπώνονται οι $d - q$ συνιστώσες της τάσης u_f στην έξοδο των φίλτρων των μετατροπέων των δύο συστημάτων. Αρχικά στο νησιωτικό σύστημα παρατηρούμε πως η d συνιστώσα της τάσης u_{f2} έχει την τιμή $1 \mu\text{m}$, ενώ η q συνιστώσα δεν είναι μηδενική αλλά έχει την τιμή $-0.08 \mu\text{m}$. Το γεγονός αυτό είναι εύλογο καθώς, όπως ειπώθηκε και στην Υποενότητα 4.3.3, ο βρόχος συγχρονισμού ισχύος επιτυγχάνει την ταύτιση του d άξονα του στρεφόμενου $d - q$ πλαισίου του μετατροπέα με το διάνυσμα της τάσης v_2 και όχι με το διάνυσμα της τάσης u_{f2} . Συνεπώς σε κάθε περίπτωση θα ισχύει ότι $u_{f2}^q \neq 0$.

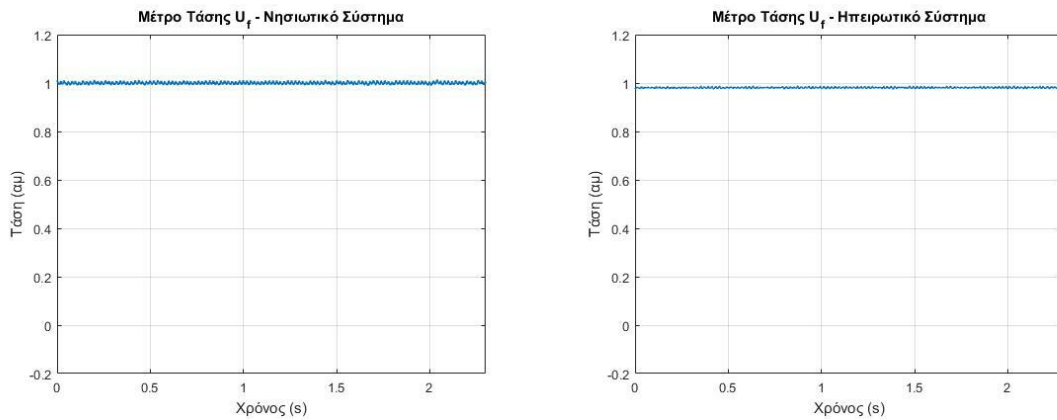
Από την άλλη, στην πλευρά του ηπειρωτικού συστήματος παρατηρούμε πως η q συνιστώσα της τάσης u_{f1} χαρακτηρίζεται από μηδενική τιμή, γεγονός που συνιστά και την ορθή λειτουργία της διάταξης κλειδώματος φάσης στον μετατροπέα της Αττικής. Τέλος η d συνιστώσα της τάσης u_{f1} χαρακτηρίζεται από τιμή $0.98 \mu\text{m}$ γεγονός το οποίο καθιστά και το μέτρο της τάσης u_{f1} να έχει την ίδια τιμή όπως φαίνεται και στο Σχήμα 5.7.

Η απόκλιση της τιμής του μέτρου U_{f1} από την ονομαστική τιμή ($1 \mu\text{m}$) είναι της τάξης του 2%, γεγονός που δεν αποτελεί ιδιαίτερο πρόβλημα καθώς, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.8, εξασφαλίζεται πως το μέτρο της τάσης στο ΣΚΣ (U_{g1}) έχει την τιμή $1 \mu\text{m}$. Στο σύστημα της Κρήτης τόσο η τιμή του μέτρου U_{f2} όσο και το μέτρο της τάσης στο ΣΚΣ (U_{g2}) έχουν την τιμή $1 \mu\text{m}$, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.7 και στο Σχήμα 5.8 αντίστοιχα.

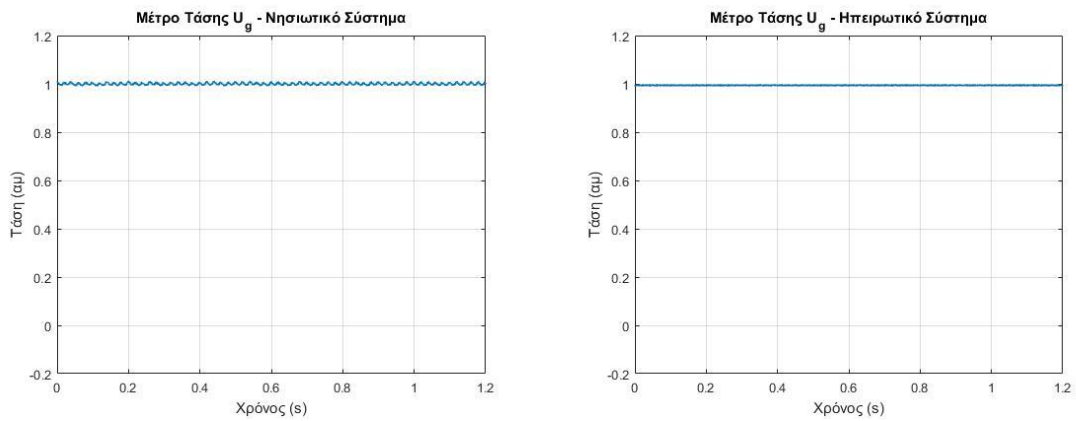
Στο Σχήμα 5.9 παρουσιάζονται τα διαγράμματα του τριφασικού ρεύματος εξόδου των μετατροπέων. Ακριβώς όπως πραγματοποιήθηκε παραπάνω με τις τάσεις u_f και u_g , για την αξιολόγηση της ποιότητας των κυματομορφών του ρεύματος i_c από πλευράς αρμονικού περιεχομένου, στο Σχήμα 5.10 παρουσιάζεται η ανάλυση FFT. Μέσω της ανάλυσης αυτής για κάθε κυματομορφή ρεύματος υπολογίζεται ο συντελεστής αρμονικής παραμόρφωσης (THD). Τα αποτελέσματα καταδεικνύουν πως το ρεύμα i_{c1} στην έξοδο του μετατροπέα της Αττικής, παρουσιάζοντας συντελεστή αρμονικής παραμόρφωσης $THD = 2.41\%$, βρίσκεται εντός των αποδεκτών ορίων σύμφωνα με διεθνή πρότυπα [57]. Το ίδιο ισχύει και για το ρεύμα i_{c2} στην έξοδο του μετατροπέα της Κρήτης, το οποίο παρουσιάζει συντελεστή αρμονικής παραμόρφωσης $THD = 1.1\%$



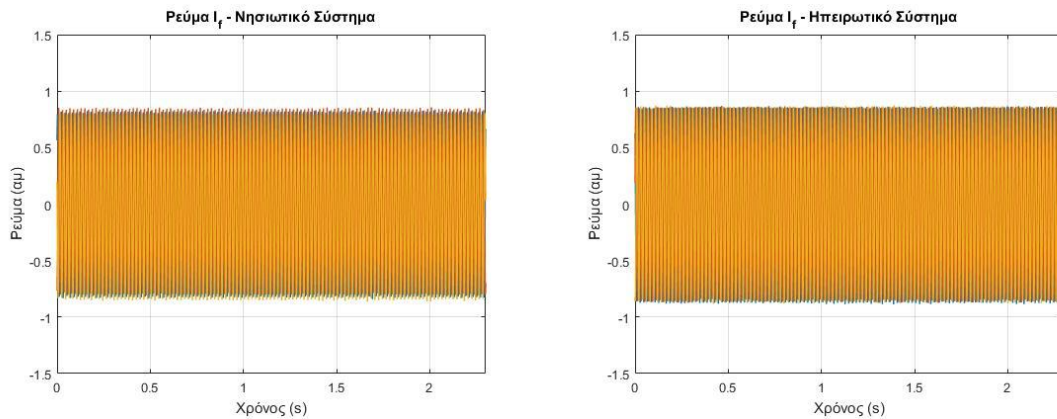
Σχήμα 5.6 $d - q$ συνιστώσες της τάσης u_f στην έξοδο των φίλτρων των μετατροπέων.



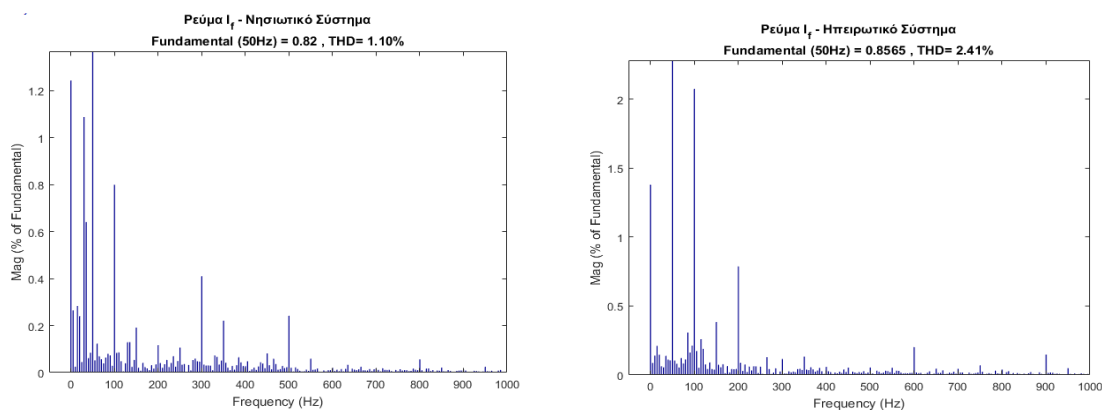
Σχήμα 5.7 Μέτρο της τάσης u_f στην έξοδο των φίλτρων των μετατροπέων.



Σχήμα 5.8 Μέτρο της τάσης u_g στο ζυγό εξόδου των μετασχηματιστών (ΣΚΣ).



Σχήμα 5.9 Τριφασικό ρεύμα i_c στην έξοδο των μετατροπέων.



Σχήμα 5.10 Ανάλυση FFT και συντελεστής αρμονικής παραμόρφωσης (THD) του ρεύματος i_c .

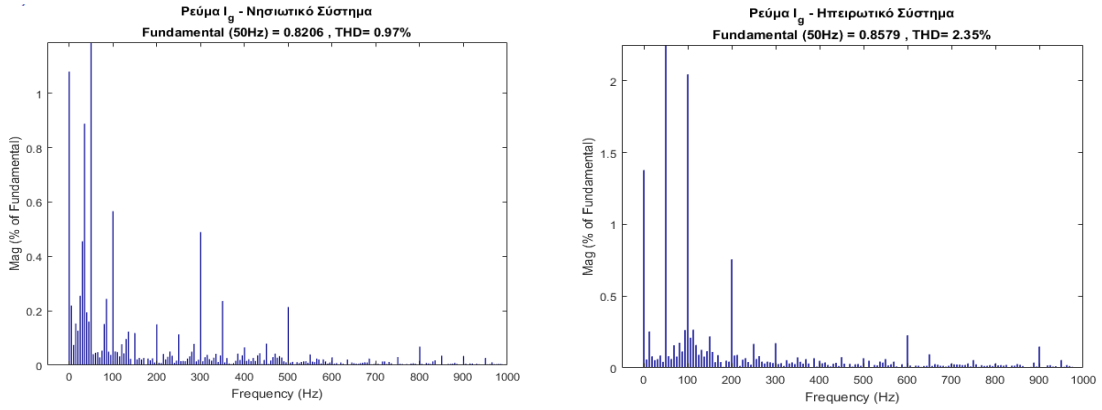
Περαιτέρω, στο Σχήμα 5.11 παρουσιάζεται η ανάλυση FFT του ρεύματος i_g (στο ΣΚΣ) που εγχέεται-απορροφάται από τα δίκτυα ΕΡ, όπου παρατηρούμε πως οι τιμές των συντελεστών αρμονικής παραμόρφωσης έχουν μειωθεί ακόμα περισσότερο.

Στο Σχήμα 5.12 παρουσιάζονται οι $d - q$ συνιστώσες του ρεύματος i_c των δύο συστημάτων. Στο ηπειρωτικό σύστημα παρατηρούμε πως, από τη στιγμή που η q συνιστώσα της τάσης u_{f1} είναι μηδενική και η d συνιστώσα είναι σχεδόν μοναδιαία, οι $d - q$ συνιστώσες του ρεύματος i_{c1} λαμβάνουν τιμές αντίστοιχες με τις τιμές της ενεργού και άεργου ισχύος (βλ. Σχήμα 5.1). Το ίδιο ισχύει αντίστοιχα και για το νησιωτικό σύστημα με τη διαφορά πως παρατηρείται μία απόκλιση μεταξύ της τιμής της q συνιστώσας του ρεύματος i_{c2} και της τιμής της άεργου ισχύος (βλ. Σχήμα 5.1), η οποία οφείλεται στη μη μηδενική τιμή που παρουσιάζει η q συνιστώσα της τάσης u_{f2} (βλ. Σχήμα 5.6).

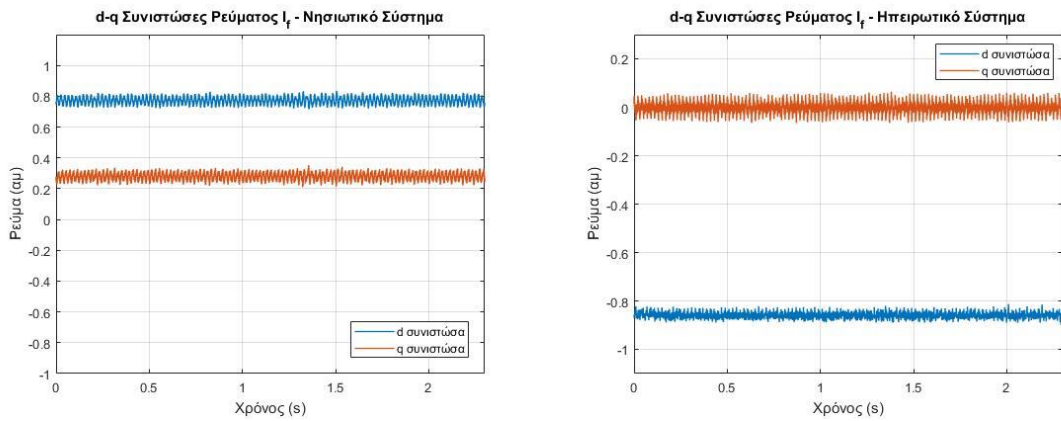
Περαιτέρω, παρατηρώντας το Σχήμα 5.13, συμπεραίνεται πως οι $d - q$ συνιστώσες του ρεύματος i_c των δύο συστημάτων ακολουθούν σχεδόν επακριβώς τις αντίστοιχες τιμές των $d - q$ συνιστωσών των ρευμάτων αναφοράς, που παράγονται από τα κυκλώματα ελέγχου των μετατροπών.

Στο Σχήμα 5.14 παρουσιάζονται τα διαγράμματα στα οποία αποτυπώνεται η τιμή του μέτρου του ρεύματος εξόδου των μετατροπών, όπου παρατηρούμε πως η τιμή αυτή δεν ξεπερνά σε καμία περίπτωση την ονομαστική. Με αυτόν τον τρόπο εξασφαλίζεται η ασφαλής λειτουργία των διακοπτικών στοιχείων και εν γένει των μετατροπών συνολικά.

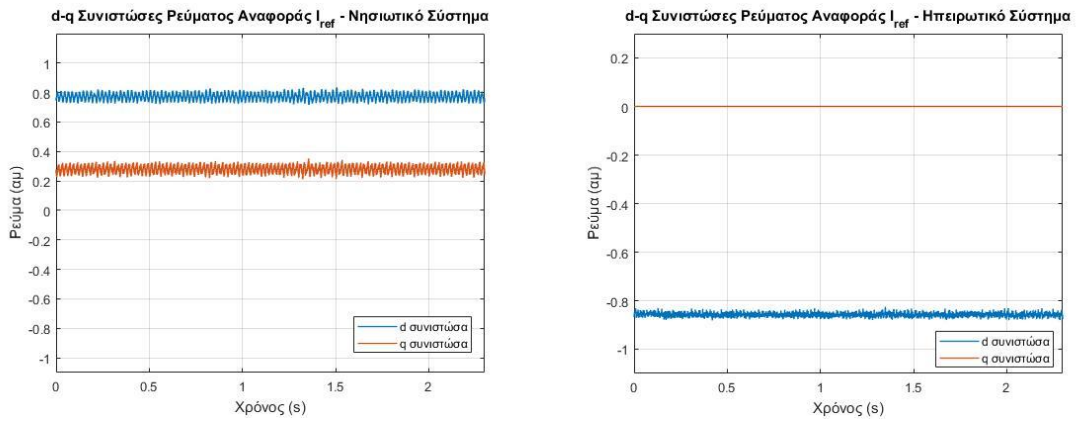
Στο Σχήμα 5.15 παρουσιάζονται οι $d - q$ συνιστώσες του ρεύματος αρνητικής ακολουθίας των δύο συστημάτων. Όπως αναμενόταν, παρατηρούμε πως στην κανονική λειτουργία του υπό εξέταση συστήματος οι συνιστώσες του ρεύματος αρνητικής ακολουθίας χαρακτηρίζονται από μηδενική σχεδόν τιμή.



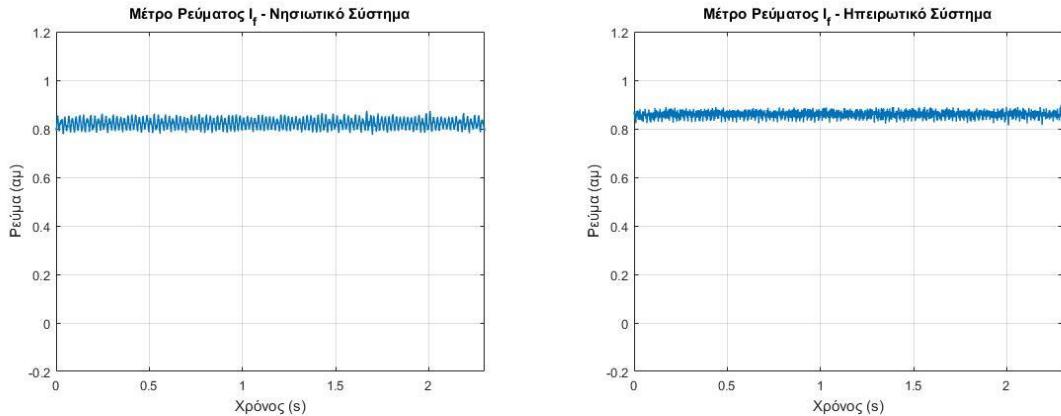
Σχήμα 5.11 Ανάλυση FFT και συντελεστής αρμονικής παραμόρφωσης (THD) του ρεύματος i_g .



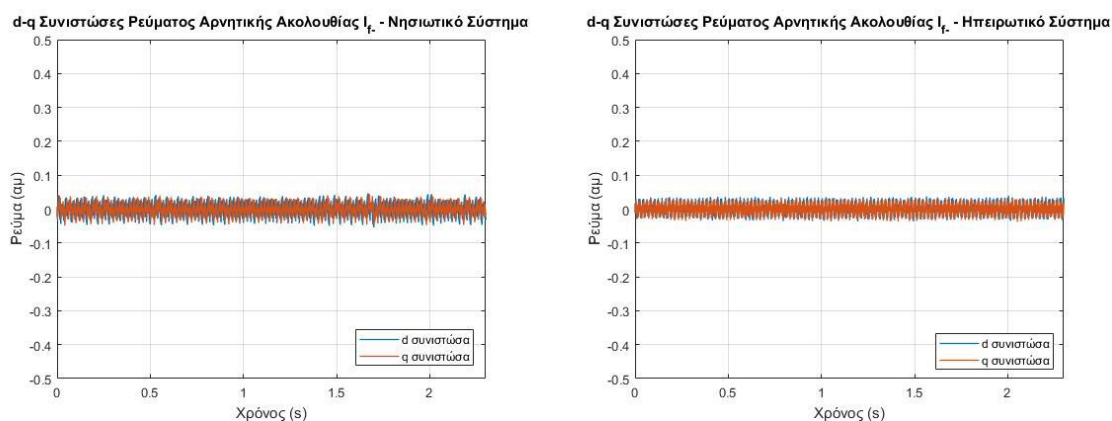
Σχήμα 5.12 $d - q$ συνιστώσες του ρεύματος i_c στην έξοδο των μετατροπέων.



Σχήμα 5.13 $d - q$ συνιστώσες του ρεύματος αναφοράς i_{ref} των μετατροπέων.



Σχήμα 5.14 Μέτρο του ρεύματος i_f στην έξοδο των μετατροπέων.

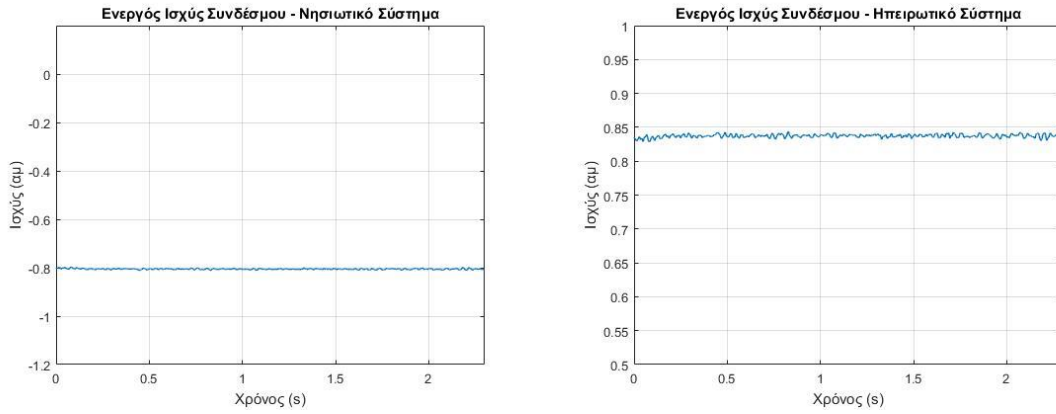


Σχήμα 5.15 $d - q$ συνιστώσες του ρεύματος αρνητικής ακολουθίας i_{f-} στην έξοδο των μετατροπών.

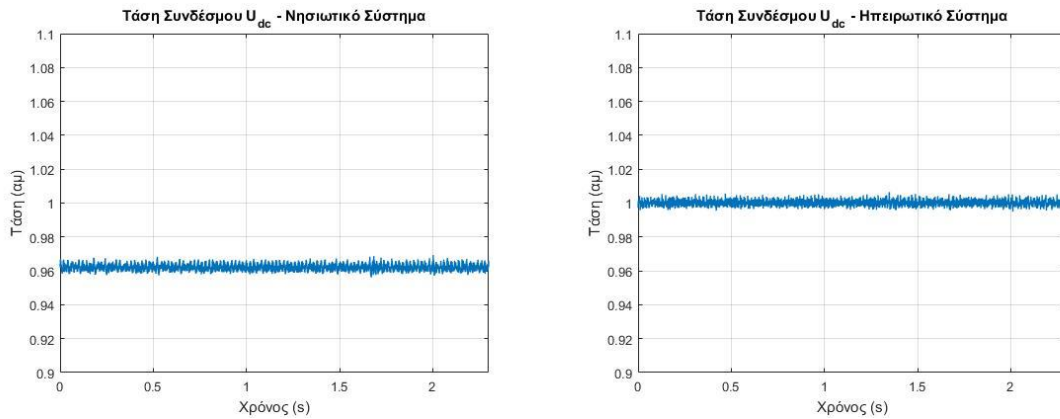
Στο Σχήμα 5.16 παρουσιάζονται τα διαγράμματα στα οποία αποτυπώνεται η ενεργός ισχύς που διακινείται μέσω του συνδέσμου ΣΡ. Σημειώνεται πως οι μετρήσεις που αφορούν το κάθε σύστημα (νησιωτικό-ηπειρωτικό) πραγματοποιήθηκαν στα άκρα του συνδέσμου, αμέσως μετά την έξοδο των μετατροπών στην πλευρά ΣΡ. Μεταξύ των τιμών της ενεργού ισχύος στα δύο διαγράμματα παρατηρούμε κάποια απόκλιση. Η απόκλιση αυτή, ακριβώς όπως παρουσιάστηκε και στο σχολιασμό της ροής ισχύος στην πλευρά ΕΡ (βλ. Σχήμα 5.1), οφείλεται στις απώλειες ισχύος κατά μήκος του συνδέσμου ΣΡ.

Στις εν λόγω απώλειες και άρα στην πτώση τάσης που παρουσιάζεται κατά μήκος του συνδέσμου ΣΡ οφείλεται και η απόκλιση των τιμών της συνεχούς τάσης του συνδέσμου, που παρουσιάζεται στα διαγράμματα του Σχήματος 5.17. Όπως παρατηρούμε στην πλευρά του ηπειρωτικού συστήματος, η τάση του συνδέσμου διατηρείται στην επιθυμητή τιμή του $1 \mu\text{m}$, καθώς υπενθυμίζεται πως ο μετατροπέας της πλευράς αυτής είναι επιφορτισμένος με τον έλεγχο της εν λόγω τάσης. Συνεπώς, γίνεται αντιληπτό πως η τιμή της τάσης στο έτερο άκρο του συνδέσμου (πλευρά νησιωτικού συστήματος) διαμορφώνεται ανάλογα με την πτώση τάσης που αυτός παρουσιάζει κατά μήκος του. Έτσι, στην παρούσα κατάσταση λειτουργίας, όπου έχουμε ροή ενεργού ισχύος από την πλευρά της Αττικής προς την πλευρά της Κρήτης, η τάση του συνδέσμου στην πλευρά του νησιωτικού συστήματος αναμένεται να έχει τιμή κάτω του $1 \mu\text{m}$. Όντως, σύμφωνα με το Σχήμα 5.17, η τιμή αυτή είναι της τάξης του $0.96 \mu\text{m}$, τιμή με απόκλιση από την ονομαστική κάτω του 5%.

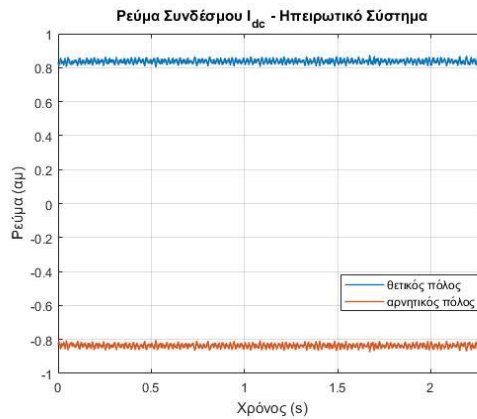
Τέλος στο Σχήμα 5.18 παρουσιάζεται το διάγραμμα στο οποίο αποτυπώνεται το ρεύμα του θετικού και του αρνητικού «πόλου» του συνδέσμου ΣΡ. Στο εν λόγω διάγραμμα παρατηρούμε πως η τιμή του ρεύματος δεν ξεπερνά σε καμία περίπτωση τη μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή του $1 \mu\text{m}$.



Σχήμα 5.16 Ροή ενεργού ισχύος μέσω του συνδέσμου ΣΡ.



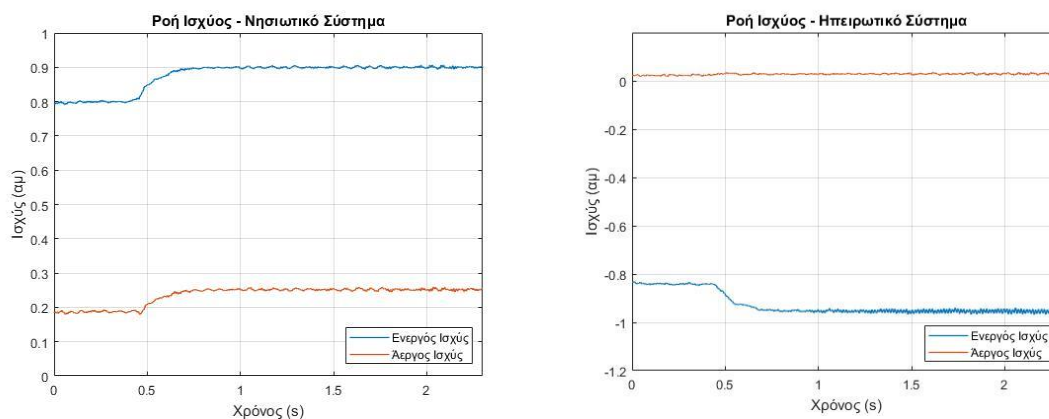
Σχήμα 5.17 Τάση U_{dc} του συνδέσμου μετρούμενη στην έξοδο των μετατροπέων στην πλευρά ΣΡ.



Σχήμα 5.18 Ρεύμα θετικού και αρνητικού «πόλου» συνδέσμου ΣΡ.

Στο σημείο αυτό και για λόγους πληρότητας, στο υπό μελέτη σύστημα εξετάζεται η δυνατότητα μεταφοράς ενεργού ισχύος 0.9 αμ , τιμή η οποία αντιστοιχεί περίπου στη μέγιστη ωριαία ζήτηση που έχει παρατηρηθεί ποτέ στο δίκτυο της Κρήτης.

Έτσι, τη χρονική στιγμή $t = 0.5 \text{ s}$ και ενώ το σύστημα λειτουργεί υπό μεταφορά ενεργού ισχύος 0.8 αμ προς την Κρήτη, στον μετατροπέα της πλευράς αυτής δίνεται η εντολή για αύξηση της ροής ισχύος κατά 0.1 αμ . Η πρόσθετη ζήτηση ενεργού ισχύος από το σύστημα της Κρήτης, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.19, ικανοποιείται εντός χρονικού διαστήματος μικρότερου των 0.25 s . Βέβαια, λόγω των απωλειών ισχύος στο σύνδεσμο ΣΡ, για την επίτευξη ισχύος τιμής 0.9 αμ στην πλευρά του δι-



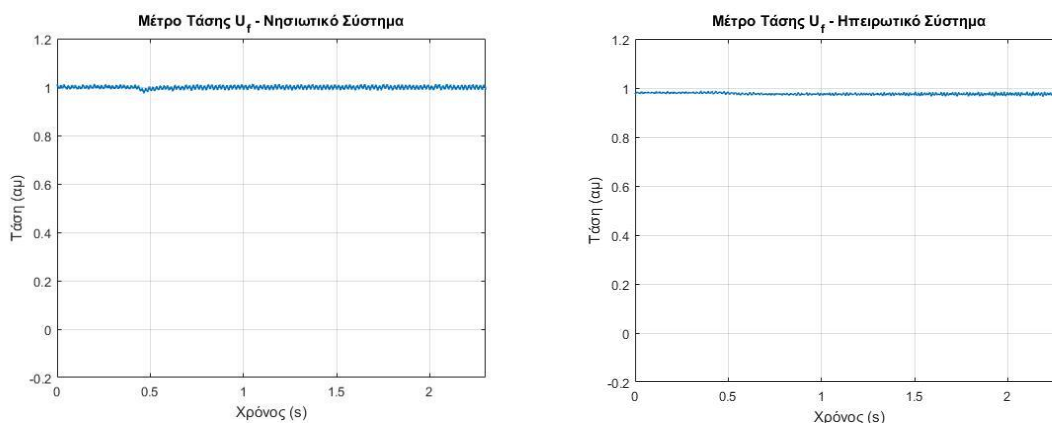
Σχήμα 5.19 Ροή ενεργού και αέργου ισχύος στην έξοδο των μετατροπέων στην πλευρά ΕΡ.

κτύου της Κρήτης, ο μετατροπέας στην πλευρά της Αττικής αναγκάζεται να εγχέει στο σύνδεσμο ενεργό ισχύ που πλησιάζει την τιμή του 0.95 αμ. Όπως θα δούμε παρακάτω, η λειτουργία των μετατροπέων υπό αυτές τις ανά μονάδα τιμές, με δεδομένη την υφιστάμενη διαστασιολόγηση του συστήματος, ενέχει ορισμένους περιορισμούς.

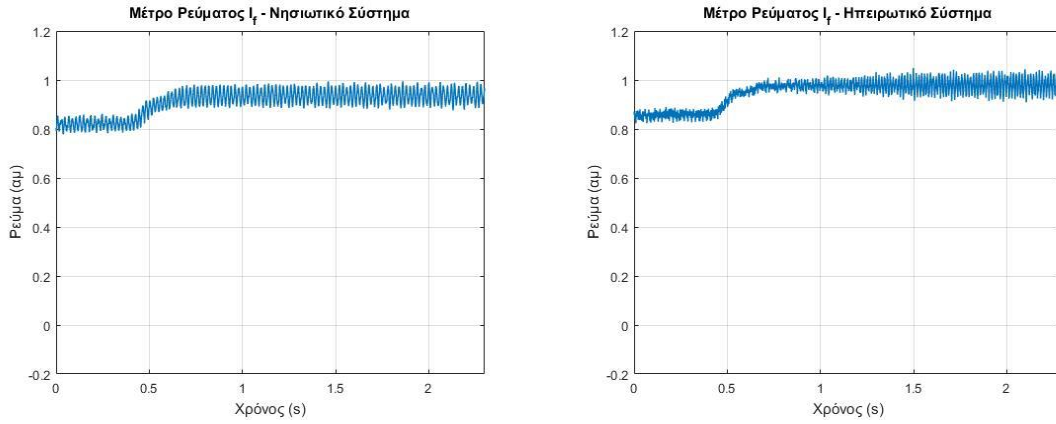
Στο Σχήμα 5.20 παρουσιάζεται το μέτρο της τάσης u_f στην έξοδο των φίλτρων των μετατροπέων, όπου παρατηρούμε πως η τιμή αυτού διατηρείται σχεδόν απόλυτα στο 1 αμ.

Στο Σχήμα 5.21 αποτυπώνεται η τιμή του μέτρου του ρεύματος i_c των μετατροπέων. Εξετάζοντας τα σχετικά διαγράμματα, παρατηρούμε πως κατά τη μεταφορά ενεργού ισχύος 0.9 αμ το μέτρο του ρεύματος στην πλευρά του νησιωτικού δικτύου πλησιάζει αλλά δεν ξεπερνά την ονομαστική τιμή. Από την άλλη στην πλευρά του ηπειρωτικού δικτύου παρατηρούμε πως το μέτρο του ρεύματος τείνει να ξεπεράσει την ονομαστική του τιμή. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα ο ελεγκτής του μετατροπέα της Αττικής να επιβάλει περιορισμό του ρεύματος, γεγονός που με την πάροδο του χρόνου οδηγεί σε ταλαντωτική συμπεριφορά. Σε κάθε περίπτωση σημειώνεται πως η άρση του περιορισμού αυτού συνιστά εκ νέου διαστασιολόγηση των παραμέτρων του συστήματος.

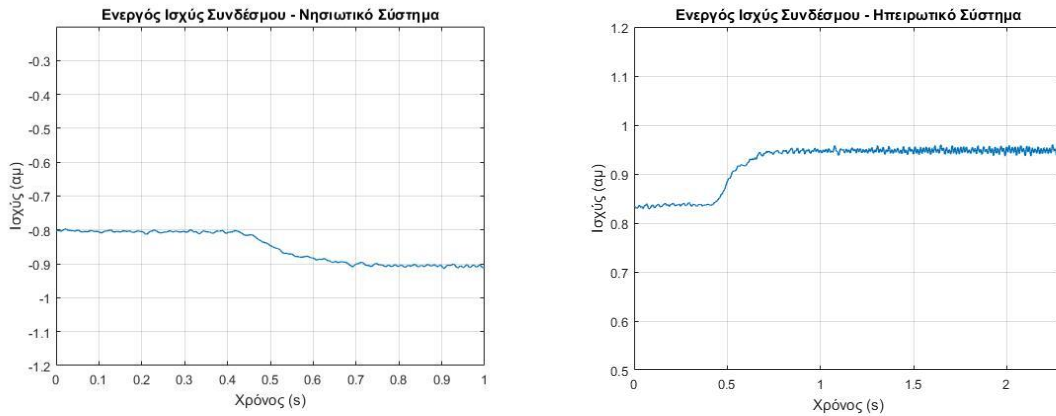
Στο Σχήμα 5.22 παρουσιάζονται τα διαγράμματα στα οποία αποτυπώνεται η ροή της ενεργού ισχύος του συνδέσμου ΣΡ. Τέλος στα Σχήματα 5.23-5.24 παρουσιάζονται η τιμή της συνεχούς τάσης και το ρεύμα του συνδέσμου αντίστοιχα.



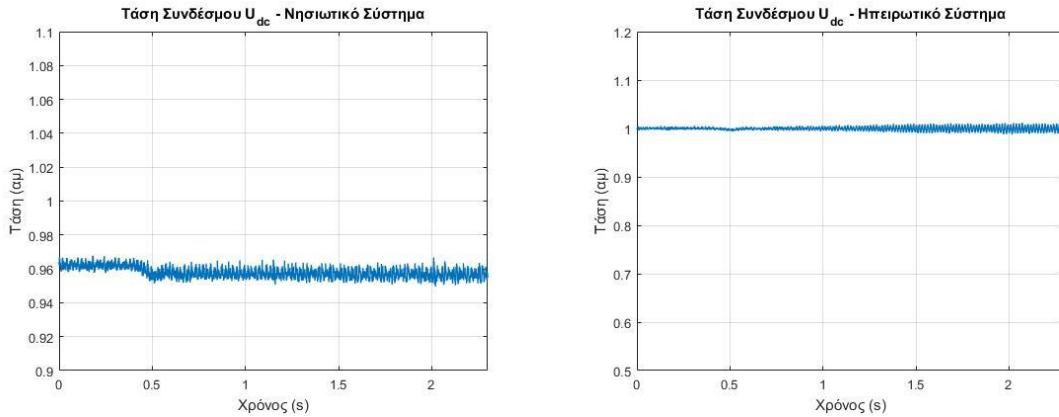
Σχήμα 5.20 Μέτρο της τάσης u_f στην έξοδο των φίλτρων των μετατροπέων.



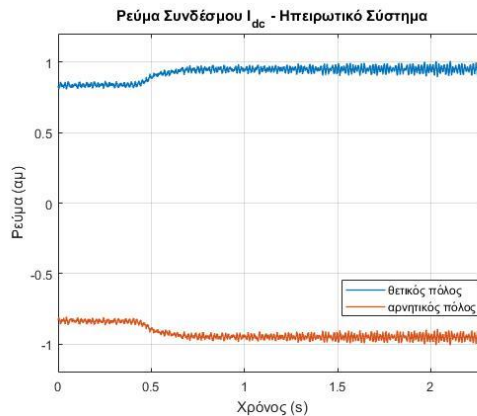
Σχήμα 5.21 Μέτρο του ρεύματος i_c στην έξοδο των μετατροπέων.



Σχήμα 5.22 Ροή ενεργού ισχύος μέσω του συνδέσμου ΣΡ.



Σχήμα 5.23 Τάση U_{dc} του συνδέσμου μετρούμενη στην έξοδο των μετατροπέων στην πλευρά ΣΡ.



Σχήμα 5.24 Ρεύμα θετικού και αρνητικού πόλου συνδέσμου ΣΡ.

5.3 ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΗ ΤΗΣ ΡΟΗΣ ΕΝΕΡΓΟΥ ΙΣΧΥΟΣ

Στην παρούσα ενότητα εξετάζεται το σενάριο της αντιστροφής της ροής ενεργού ισχύος, έτσι ώστε πλέον το δίκτυο της Κρήτης να τροφοδοτεί με ενεργό ισχύ το δίκτυο της Αττικής, μέσω της διασύνδεσης HVDC. Αρχικά, το υπό μελέτη σύστημα λειτουργεί υπό τις συνθήκες που περιγράφηκαν στην προηγούμενη ενότητα, δηλαδή υπό μεταφορά ενεργού ισχύος τιμής 0.8 αμ (560 MW) προς το νησιωτικό δίκτυο. Κατόπιν και σε χρόνο $t = 0.5 \text{ s}$ δίνεται εντολή στο μετατροπέα του σταθμού της Κρήτης για αντιστροφή της ροής ενεργού ισχύος, με σκοπό να επιτευχθεί η τροφοδότηση του ηπειρωτικού συστήματος της Αττικής με ισχύ ίδιας τιμής (0.8 αμ).

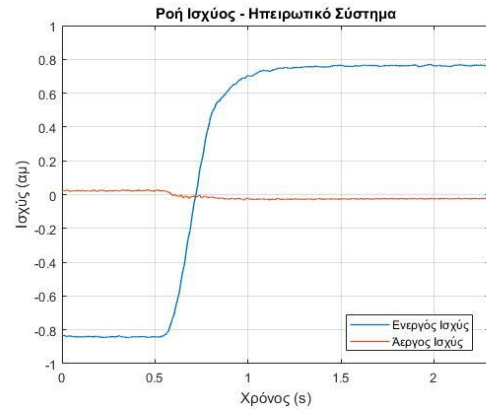
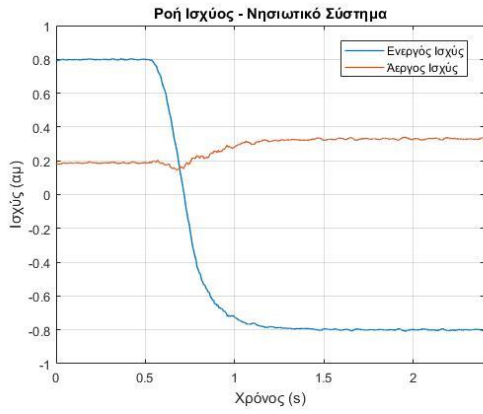
Στο Σχήμα 5.25 παρουσιάζονται τα διαγράμματα στα οποία αποτυπώνεται η ροή της ενεργού και της αέργου ισχύος στην έξοδο των μετατροπέων των δύο συστημάτων. Όπως παρατηρούμε αρχικά στην πλευρά του νησιωτικού συστήματος, τη χρονική στιγμή 0.5 s δίνεται η εντολή για βηματική αντιστροφή της ενεργού ισχύος. Έτσι, στο μετατροπέα της Κρήτης πλέον ορίζεται η ενεργός ισχύς αναφοράς P_{ref} με τιμή -0.8 αμ , τιμή η οποία τροφοδοτείται στο βρόχο συγχρονισμού ισχύος. Τελικά, η πλήρης αντιστροφή της ροής της ενεργού ισχύος ολοκληρώνεται εντός χρονικού διαστήματος περίπου 0.8 s , διάστημα που θεωρείται καθόλα εύλογο.

Στην πλευρά του ηπειρωτικού συστήματος παρατηρούμε πως η αντιστροφή της ενεργού ισχύος έχει ως αποτέλεσμα την έγχυση από τον μετατροπέα της Αττικής στο δίκτυο, ισχύος με τιμή που υπολείπεται κατά τι της επιθυμητής τιμής του 0.8 αμ . Ως εκ τούτου η ενεργός ισχύς που λαμβάνει το δίκτυο της Αττικής είναι της τάξης του 0.77 αμ και το γεγονός αυτό, όπως αναλύθηκε και παραπάνω, οφείλεται στις απώλειες ισχύος που εμφανίζονται κατά μήκος του συνδέσμου ΣΡ.

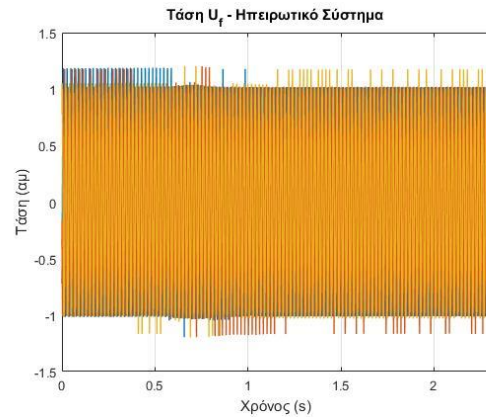
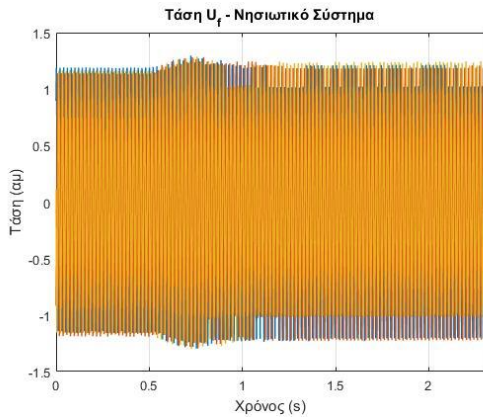
Παράλληλα, στο Σχήμα 5.25 παρατηρούμε πως, μετά το πέρας της αντιστροφής της ροής ενεργού ισχύος, ο μετατροπέας στο σταθμό της Κρήτης παρέχει ακόμα περισσότερη άεργο ισχύ, της τάξης του 0.32 αμ . Αυτό αποσκοπεί στην υποστήριξη της τάσης του ζυγού στην έξοδο του μετατροπέα. Από την άλλη, παρατηρούμε πως ο μετατροπέας του ηπειρωτικού δικτύου αρχίζει να απορροφά ένα μικρό ποσό αέργου ισχύος, της τάξης του 0.03 αμ , έτσι ώστε να αποφευχθούν φαινόμενα υπέρτασης στην τάση εξόδου.

Στο Σχήμα 5.26 παρουσιάζονται οι κυματομορφές της τριφασικής τάσης u_f στην έξοδο των φίλτρων των μετατροπέων, ενώ στο Σχήμα 5.27 αντίστοιχα φαίνεται η τριφασική τάση u_g , που αποτελεί την τάση στο ΣΚΣ (στο ζυγό εξόδου των μετασχηματιστών). Για την αξιολόγηση της ποιότητας των εν λόγω κυματομορφών από πλευράς αρμονικού περιεχομένου, μετά το πέρας της αντιστροφής της ροής ισχύος, στα Σχήματα 5.28-5.29 παρουσιάζεται η ανάλυση FFT. Μέσω της ανάλυσης αυτής υπολογίζεται ο συντελεστής αρμονικής παραμόρφωσης (THD) για τις τάσεις u_f και u_g αντίστοιχα, αμφότερων των συστημάτων.

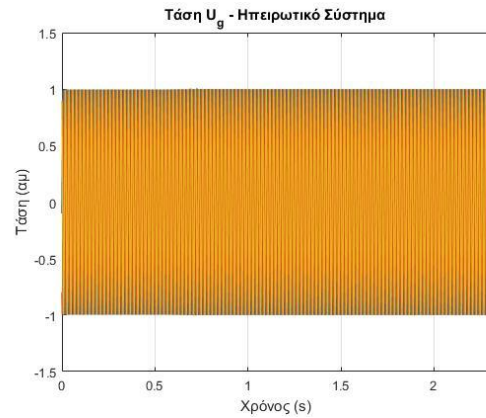
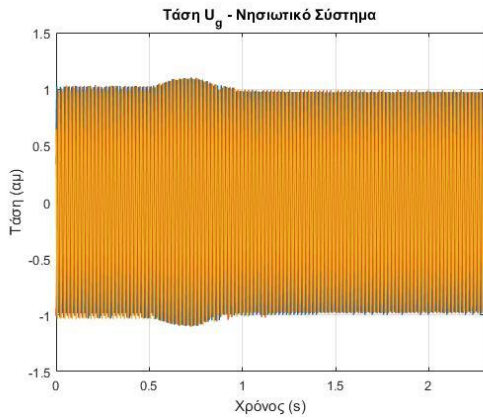
Τα αποτελέσματα καταδεικνύουν πως η τάση u_{g1} στο ΣΚΣ του συστήματος της Αττικής, παρουσιάζοντας συντελεστή αρμονικής παραμόρφωσης $THD = 0.41\%$, εξακολουθεί να βρίσκεται εντός των αποδεκτών ορίων σύμφωνα με διεθνή πρότυπα [57]. Από την άλλη η τάση u_{g2} στο ΣΚΣ του συστήματος της Κρήτης εξακολουθεί να χαρακτηρίζεται από υψηλό αρμονικό περιεχόμενο, παρουσιάζοντας συντελεστή αρμονικής παραμόρφωσης $THD = 4.09\%$.



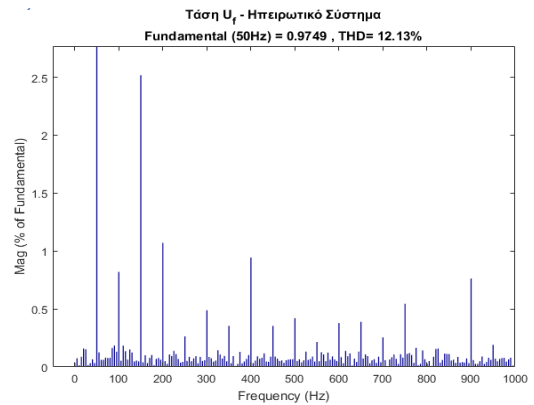
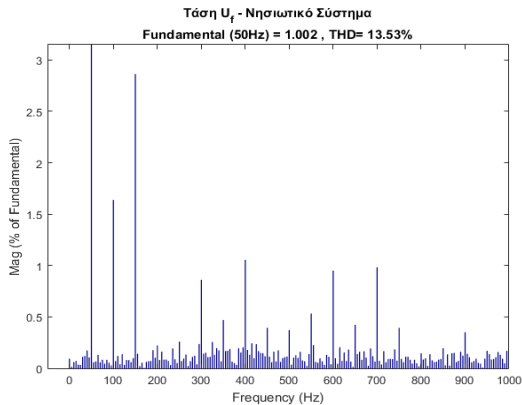
Σχήμα 5.25 Ροή ενεργού και αέργου ισχύος στην έξοδο των μετατροπέων στην πλευρά ΕΡ.



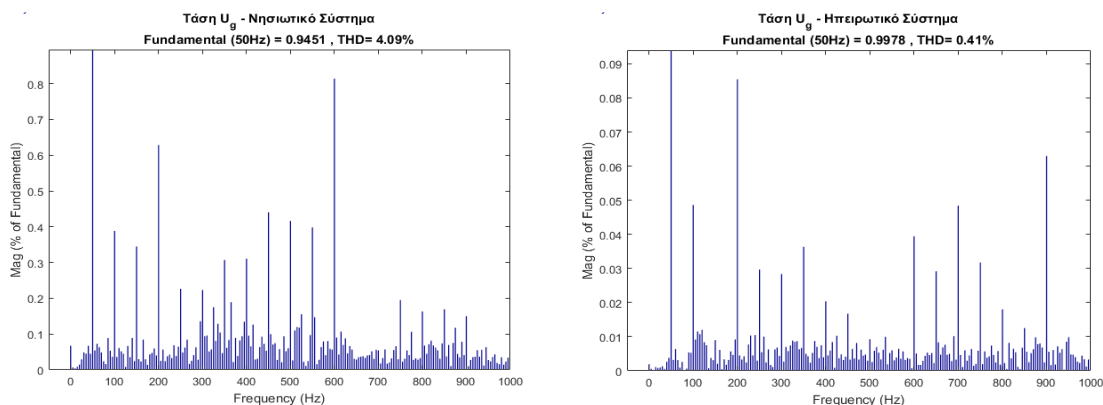
Σχήμα 5.26 Τριφασική τάση u_f στην έξοδο των φίλτρων των μετατροπέων.



Σχήμα 5.27 Τριφασική τάση u_g στο ζυγό εξόδου των μετασχηματιστών (ΣΚΣ).



Σχήμα 5.28 Ανάλυση FFT και συντελεστής αρμονικής παραμόρφωσης (THD) της τάσης u_f .



Σχήμα 5.29 Ανάλυση FFT και συντελεστής αρμονικής παραμόρφωσης (THD) της τάσης u_g .

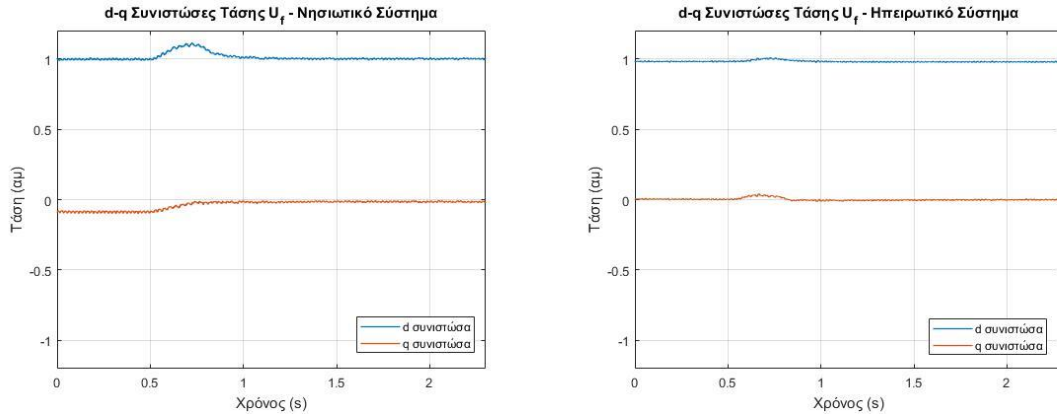
Στο Σχήμα 5.30 παρουσιάζονται τα διαγράμματα στα οποία αποτυπώνονται οι $d - q$ συνιστώσες της τάσης u_f στην έξοδο των φίλτρων των μετατροπέων των δύο συστημάτων. Στα σχετικά διαγράμματα παρατηρούμε πως η μόνη αλλαγή, μετά το πέρας της αντιστροφής της ροής ισχύος, εμφανίζεται στην q συνιστώσα της τάσης u_{f2} , η τιμή της οποίας μειώνεται στο 0.02 αμ.

Περαιτέρω, στο Σχήμα 5.31 και Σχήμα 5.32 παρουσιάζεται η τιμή του μέτρου των τάσεων u_f και u_g αντίστοιχα. Ειδικότερα για την τάση u_g στο ΣΚΣ των δύο συστημάτων παρατηρούμε πως, πλην μιας σύντομης μεταβατικής υπέρτασης που εμφανίζεται κατά την αντιστροφή της ροής ισχύος στο πολύ ασθενές δίκτυο της Κρήτης, διατηρείται η τιμή στα ονομαστικά επίπεδα του 1 αμ.

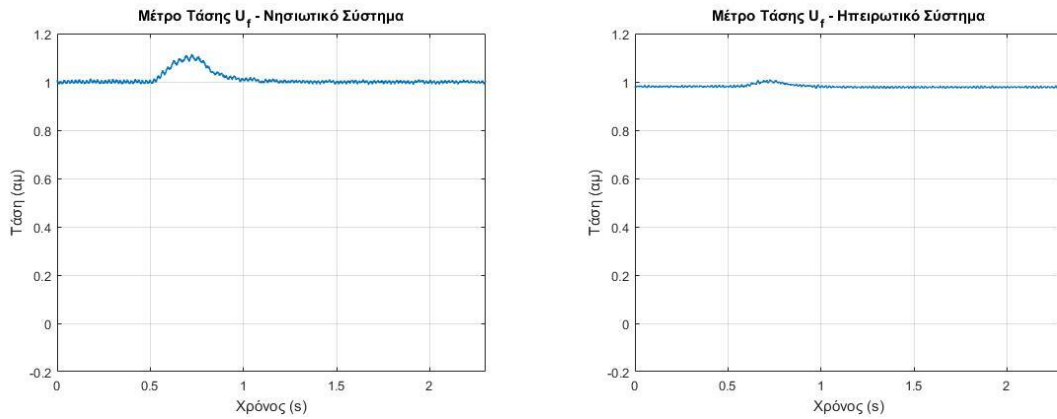
Στο Σχήμα 5.33 παρουσιάζονται οι κυματομορφές του τριφασικού ρεύματος εξόδου των μετατροπέων. Για την αξιολόγηση της ποιότητας των κυματομορφών του ρεύματος i_c από πλευράς αρμονικού περιεχομένου, μετά το πέρας της αντιστροφής της ροής ισχύος, στο Σχήμα 5.34 παρουσιάζεται η ανάλυση FFT. Μέσω της ανάλυσης αυτής για κάθε κυματομορφή ρεύματος υπολογίζεται ο συντελεστής αρμονικής παραμόρφωσης (THD). Τα αποτελέσματα καταδεικνύουν πως το ρεύμα i_{c1} στην έξοδο του μετατροπέα της Αττικής, παρουσιάζοντας συντελεστή αρμονικής παραμόρφωσης $THD = 1.95\%$, βρίσκεται εντός των αποδεκτών ορίων σύμφωνα με διεθνή πρότυπα [57]. Το ίδιο ισχύει και για το ρεύμα i_{c2} στην έξοδο του μετατροπέα της Κρήτης, το οποίο μετά το πέρας της αντιστροφής της ροής ισχύος παρουσιάζει συντελεστή αρμονικής παραμόρφωσης $THD = 0.98\%$.

Στο Σχήμα 5.35 παρουσιάζονται οι $d - q$ συνιστώσες του ρεύματος i_c στην έξοδο των μετατροπέων. Τόσο στο ηπειρωτικό όσο και στο νησιωτικό σύστημα παρατηρούμε πως οι εν λόγω συνιστώσες λαμβάνουν τιμές αντίστοιχες με τις τιμές της ενεργού και αέργου ισχύος που καταγράφονται στην έξοδο των μετατροπέων (βλ. Σχήμα 5.19).

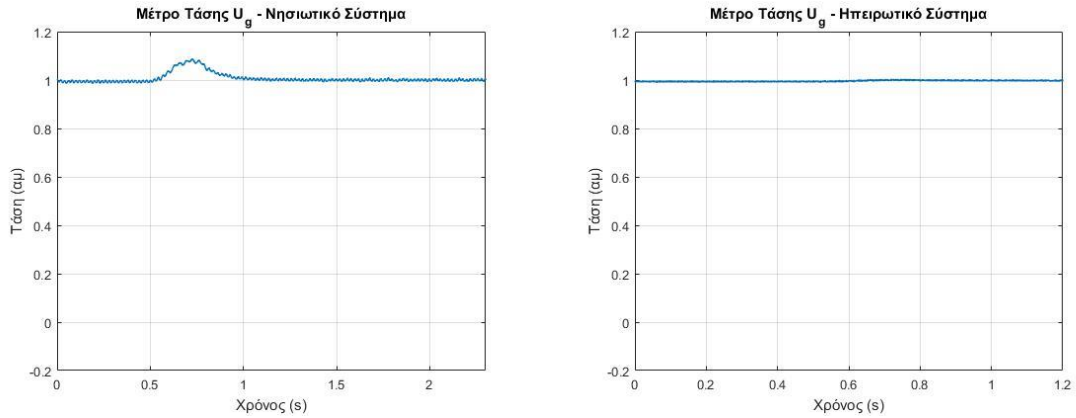
Περαιτέρω, παρατηρώντας το Σχήμα 5.36, συμπεραίνεται πως οι $d - q$ συνιστώσες του ρεύματος i_c των δύο συστημάτων ακολουθούν σχεδόν επακριβώς τις αντίστοιχες τιμές των $d - q$ συνιστωσών των ρευμάτων αναφοράς που παράγονται από τα κυκλώματα ελέγχου των μετατροπέων.



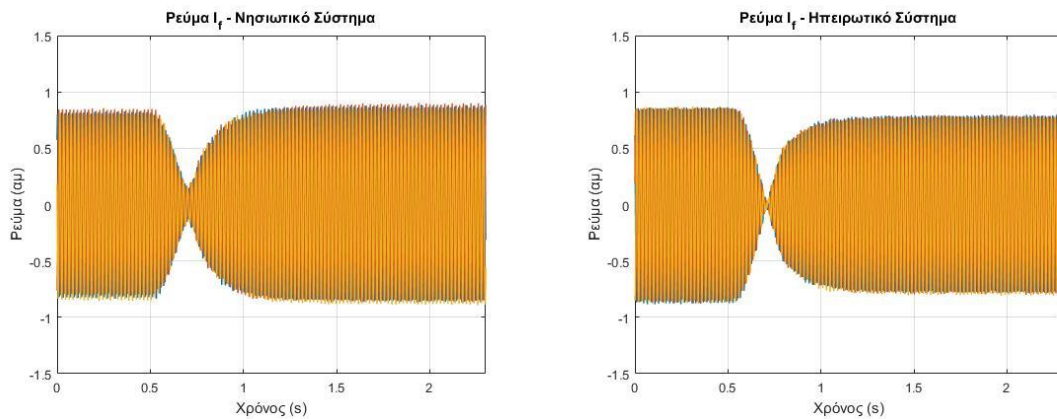
Σχήμα 5.30 d – q συνιστώσες της τάσης u_f στην έξοδο των φίλτρων των μετατροπέων.



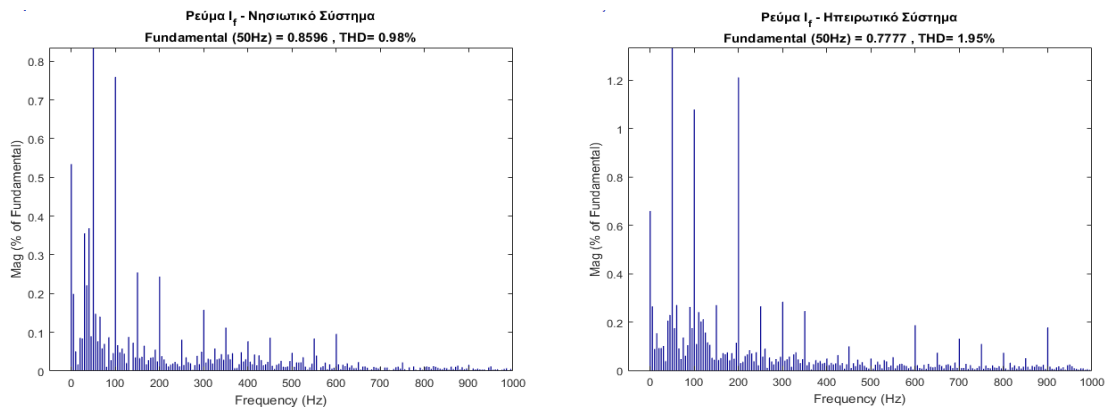
Σχήμα 5.31 Μέτρο της τάσης u_f στην έξοδο των φίλτρων των μετατροπέων.



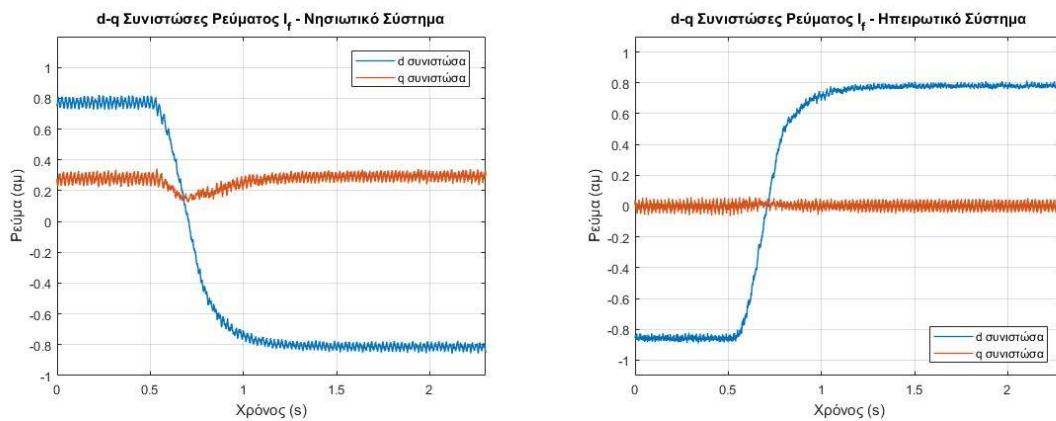
Σχήμα 5.32 Μέτρο της τάσης u_g στο ζυγό εξόδου των μετασχηματιστών (ΣΚΣ).



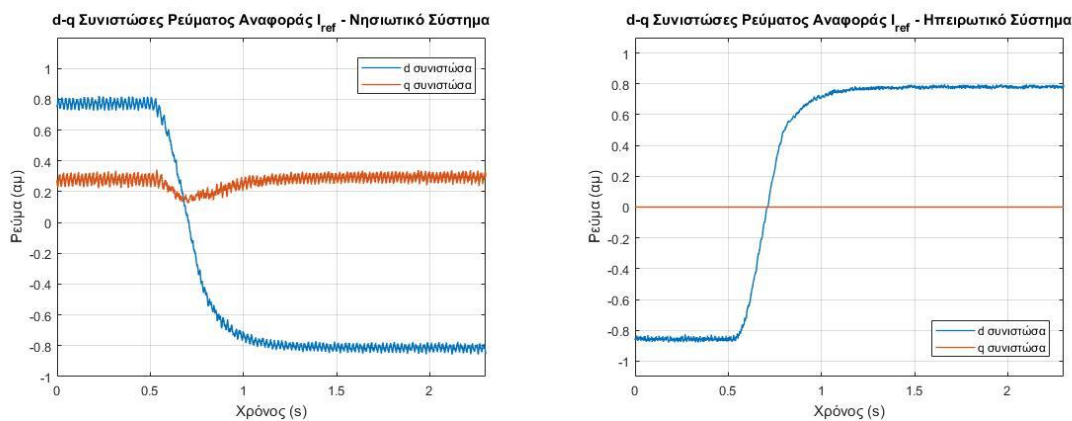
Σχήμα 5.33 Τριφασικό ρεύμα i_c στην έξοδο των μετατροπέων.



Σχήμα 5.34 Ανάλυση FFT και συντελεστής αρμονικής παραμόρφωσης (THD) του ρεύματος i_c .



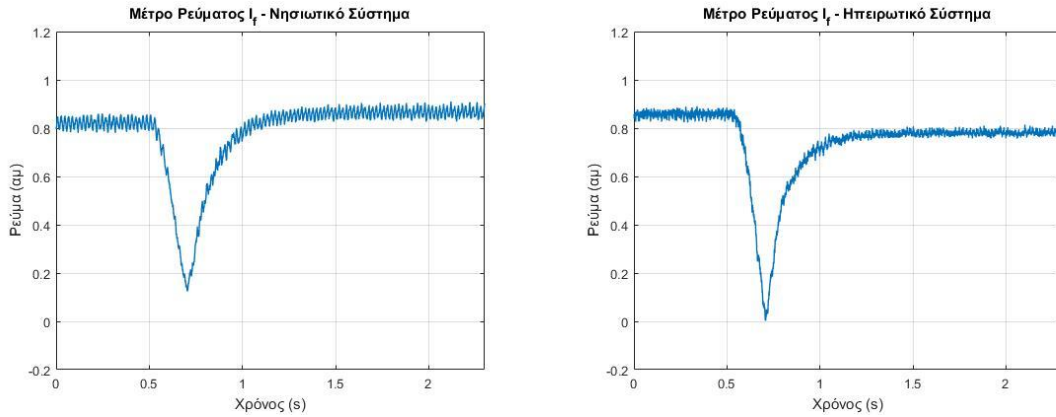
Σχήμα 5.35 $d - q$ συνιστώσες του ρεύματος i_c στην έξοδο των μετατροπών.



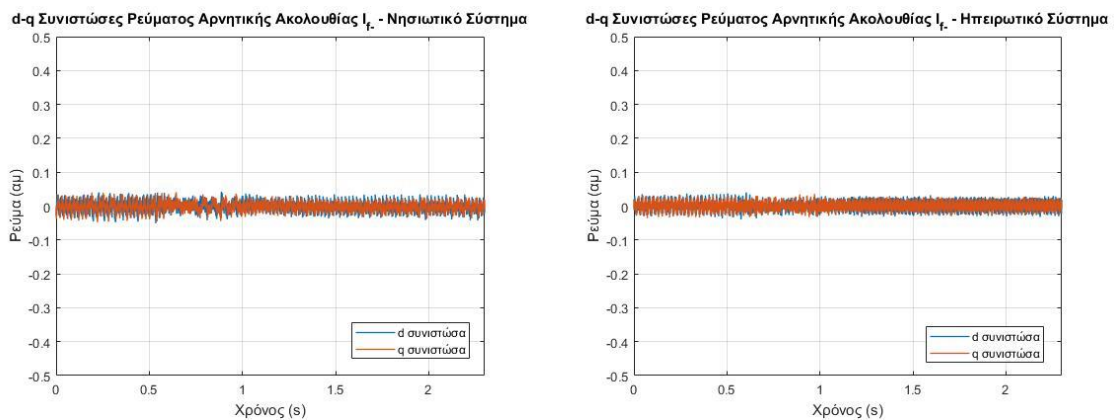
Σχήμα 5.36 $d - q$ συνιστώσες του ρεύματος αναφοράς i_{ref} των μετατροπών.

Στο Σχήμα 5.37 παρουσιάζονται τα διαγράμματα στα οποία αποτυπώνεται η τιμή του μέτρου του ρεύματος εξόδου των μετατροπών. Παρατηρούμε πως η τιμή αυτή δεν ξεπερνά σε καμία περίπτωση την ονομαστική, εξασφαλίζοντας με αυτόν τον τρόπο την ασφαλή λειτουργία των διακοπτικών στοιχείων των μετατροπών ακόμα και μετά την αντιστροφή της ροής ενεργού ισχύος.

Στο Σχήμα 5.38 παρουσιάζονται οι $d - q$ συνιστώσες του ρεύματος αρνητικής ακολουθίας των δύο συστημάτων. Όπως αναμενόταν, παρατηρούμε πως καθόλη



Σχήμα 5.37 Μέτρο του ρεύματος i_c στην έξοδο των μετατροπέων.

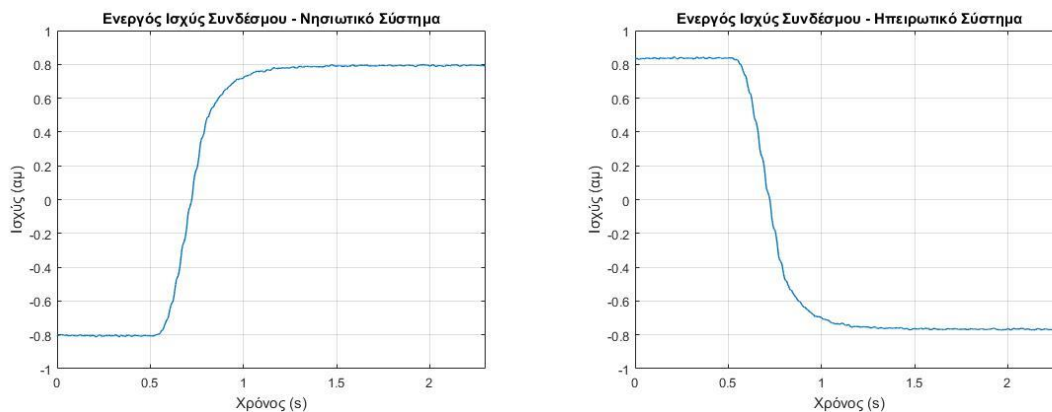


Σχήμα 5.38 $d - q$ συνιστώσες του ρεύματος αρνητικής ακολουθίας i_{c-} στην έξοδο των μετατροπέων.

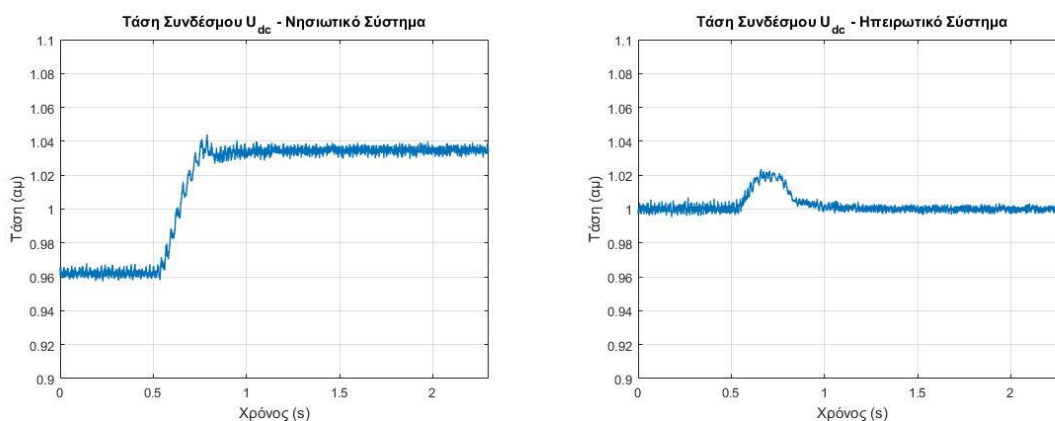
τη διάρκεια λειτουργίας του συστήματος και ανεξάρτητα από τη φορά ροής της ενεργού ισχύος, τα ρεύματα αρνητικής ακολουθίας χαρακτηρίζονται από σχεδόν μηδενική τιμή.

Στο Σχήμα 5.39 παρουσιάζονται τα διαγράμματα στα οποία αποτυπώνεται η ενεργός ισχύς που διακινείται μέσω του συνδέσμου ΣΡ της διασύνδεσης HVDC. Σημειώνεται πως οι μετρήσεις που αφορούν το κάθε σύστημα (νησιωτικό-ηπειρωτικό) πραγματοποιήθηκαν στα άκρα του συνδέσμου, αμέσως μετά την έξοδο των μετατροπέων στην πλευρά ΣΡ. Η απόκλιση που παρατηρείται μεταξύ των τιμών της ενεργού ισχύος στα δύο διαγράμματα οφείλεται στις απώλειες ισχύος κατά μήκος του συνδέσμου ΣΡ.

Στο Σχήμα 5.40 παρουσιάζονται τα διαγράμματα της συνεχούς τάσης του συνδέσμου. Παρατηρούμε πως ενώ στην πλευρά του ηπειρωτικού δικτύου η τάση του συνδέσμου διατηρείται στην τιμή $1 \mu\text{m}$ (πλην μιας ανεπαίσθητης μεταβατικής υπέρτασης κατά την αντιστροφή της ροής ισχύος), στην πλευρά του νησιωτικού δικτύου η τάση του συνδέσμου υπερβαίνει την ονομαστική τιμή και ανέρχεται σε $1.035 \mu\text{m}$. Υπενθυμίζεται πως πλέον ενεργός ισχύς μεταφέρεται από την πλευρά του νησιωτικού δικτύου προς την πλευρά του ηπειρωτικού. Ως εκ τούτου, δεδομένου της πτώσης τάσης που παρουσιάζεται κατά μήκος του συνδέσμου, η διατήρηση της τάσης στην ονομαστική τιμή στην πλευρά της Αττικής προϋποθέτει την κατά τι αυξημένη τιμή της τάσης στην πλευρά της Κρήτης.

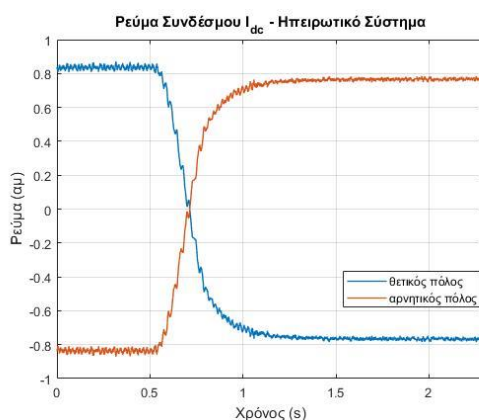


Σχήμα 5.39 Ροή ενεργού ισχύος μέσω του συνδέσμου ΣΡ.



Σχήμα 5.40 Τάση U_{dc} του συνδέσμου μετρούμενη στην έξοδο των μετατροπέων στην πλευρά ΣΡ.

Τέλος, στο Σχήμα 5.41 παρουσιάζεται το διάγραμμα στο οποίο αποτυπώνεται το ρεύμα του θετικού και του αρνητικού «πόλου» του συνδέσμου ΣΡ, όπου παρατηρείται η αντιστροφή της φοράς του ρεύματος κατόπιν της εντολής για την αντιστροφή της ροής ενεργού ισχύος. Επιπλέον επιβεβαιώνεται πως η τιμή του ρεύματος δεν ξεπερνά σε καμία περίπτωση την μέγιστή επιτρεπτή τιμή του 1 αμ.



Σχήμα 5.41 Ρεύμα θετικού και αρνητικού πόλου συνδέσμου ΣΡ.

5.4 ΑΠΟΚΡΙΣΗ ΣΕ ΣΦΑΛΜΑ ΣΤΟ ΠΟΛΥ ΑΣΘΕΝΕΣ ΔΙΚΤΥΟ ΕΡ

Στην παρούσα ενότητα εξετάζεται η απόκριση του συστήματος σε γενόμενο τριφασικό σφάλμα στην πλευρά του ασθενούς δικτύου ΕΡ (Κρήτη). Το τριφασικό σφάλμα (βραχυκύκλωμα των τριών φάσεων ως προς γη) προκαλείται τη χρονική στιγμή $t_1 = 0.2 \text{ s}$ και διαρκεί μέχρι τη χρονική στιγμή $t_2 = 0.4 \text{ s}$, ενώ το σύστημα λειτουργεί υπό συνθήκες μεταφοράς ενεργού ισχύος, τιμής 0.8 αμ , από το ηπειρωτικό σύστημα στο νησιωτικό.

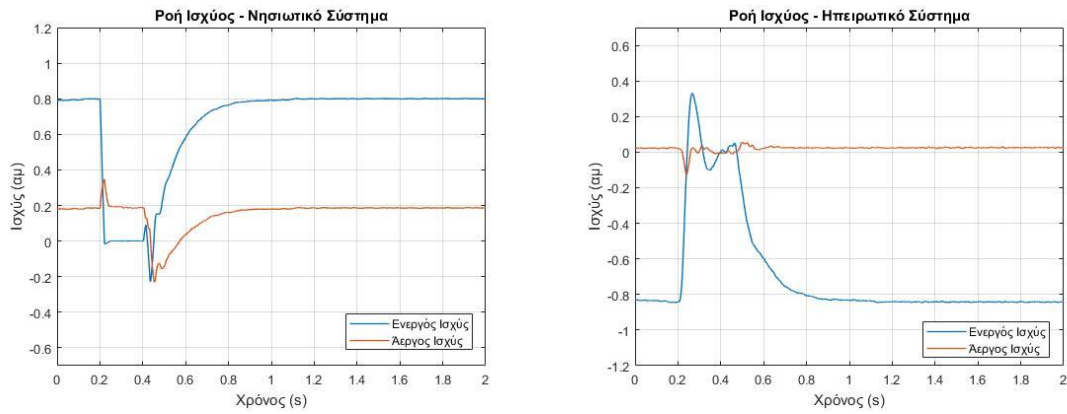
Στο Σχήμα 5.42 παρουσιάζονται τα διαγράμματα στα οποία αποτυπώνεται η ροή της ενεργού και της αέργου ισχύος στην έξοδο των μετατροπέων, τόσο στην πλευρά του νησιωτικού όσο και στην πλευρά του ηπειρωτικού συστήματος. Αρχικά, στο νησιωτικό σύστημα παρατηρούμε πως κατά την εμφάνιση του τριφασικού σφάλματος ($t_1 = 0.2 \text{ s}$) και έως το πέρας αυτού ($t_2 = 0.4 \text{ s}$) η ενεργός ισχύς που εγγχεί ο μετατροπέας στο δίκτυο της Κρήτης μηδενίζεται λόγω του βραχυκυκλώματος. Παράλληλα, ο μετατροπέας εξακολουθεί να παρέχει κάποιο ποσό αέργου ισχύος για την όσο το δυνατόν καλύτερη υποστήριξη της τάσης u_f στην έξοδο των φίλτρων. Βέβαια, όπως θα δούμε παρακάτω, το ποσό της αέργου ισχύος που παρέχεται από τον μετατροπέα κατά τη διάρκεια του σφάλματος περιορίζεται από το μέγιστο επιτρεπτό ρεύμα που δύναται να ρέει στα διακοπτικά στοιχεία αυτού.

Μετά το πέρας του σφάλματος τη χρονική στιγμή $t_2 = 0.4 \text{ s}$ παρατηρούμε πως, κατόπιν ενός σύντομου μεταβατικού διάρκειας περί των 0.03 s , πραγματοποιείται επαναφορά της λειτουργίας του συστήματος και η ενεργός ισχύς που εγγχεί ο μετατροπέας στο δίκτυο επανέρχεται ομαλά στα πρότερα επίπεδα (0.8 αμ). Σημειώνεται πως η πλήρης επαναφορά της εγγεόμενης ισχύος στην επιθυμητή τιμή πραγματοποιείται εντός χρονικού διαστήματος περίπου 0.45 s από την εκκαθάριση του σφάλματος.

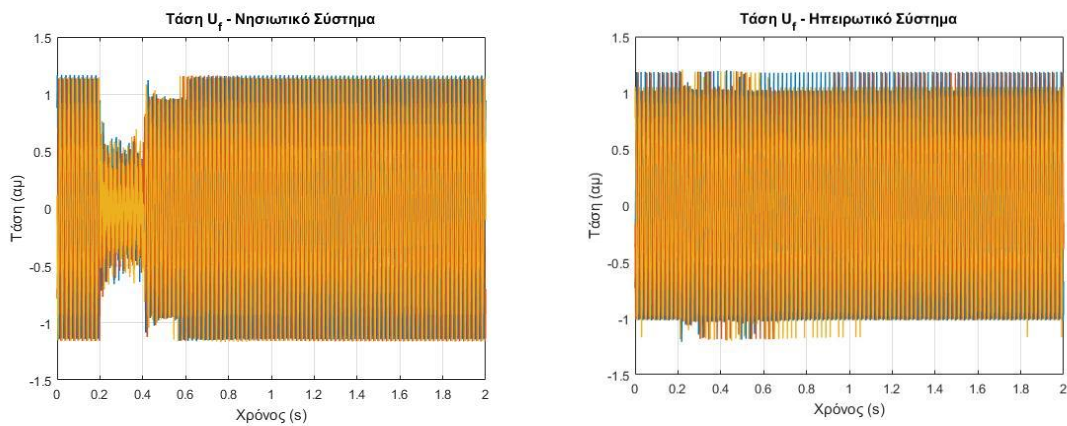
Στην πλευρά του ηπειρωτικού συστήματος παρατηρούμε πως η επενέργεια του σφάλματος, που προκαλείται στην πλευρά της Κρήτης, αφορά περισσότερο κάποια διακύμανση στην τιμή της ενεργού ισχύος πέριξ της μηδενικής, ενώ η αέργος ισχύς δεν μεταβάλλεται σημαντικά. Παρόλα αυτά η ενεργός ισχύς, μετά την εκκαθάριση του σφάλματος, επανέρχεται με ομαλό τρόπο στα επιθυμητά επίπεδα.

Στο Σχήμα 5.43 παρουσιάζονται οι κυματομορφές της τριφασικής τάσης u_f στην έξοδο των φίλτρων των μετατροπέων, ενώ στο Σχήμα 5.44 αποτυπώνεται η τριφασική τάση u_g που αποτελεί την τάση στο ΣΚΣ (στο ζυγό εξόδου των μετασχηματιστών). Παρατηρούμε πως η μεγαλύτερη βύθιση τάσης καταγράφεται στην τάση u_{g2} , λόγω του βραχυκυκλώματος που προκαλείται στο δίκτυο της Κρήτης το χρονικό διάστημα $0.2 \text{ s} < t < 0.4 \text{ s}$. Επιπλέον, φαίνεται πως η τάση u_{f2} εμφανίζει χαμηλότερη βύθιση καθώς ο μετατροπέας της Κρήτης κατά τη διάρκεια του σφάλματος παρέχει στην έξοδο του κάποιο ποσό αέργου ισχύος (Σχήμα 5.42). Παράλληλα στην πλευρά του ηπειρωτικού συστήματος παρατηρούμε πως οι κυματομορφές των τάσεων u_{f1} και u_{g1} δεν επηρεάζονται αισθητά από το γενόμενο σφάλμα.

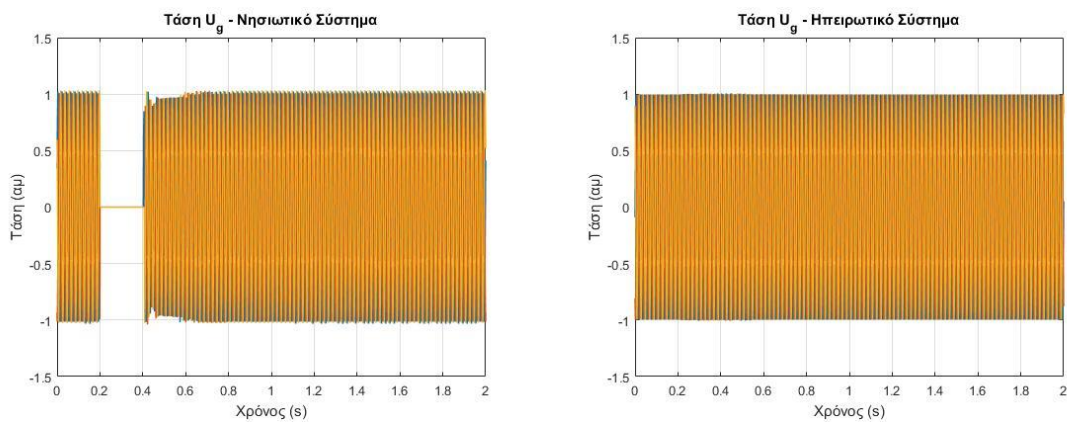
Οι παραπάνω διαπιστώσεις προκύπτουν και από την μελέτη των διαγραμμάτων που παρουσιάζονται στο Σχήμα 5.45 και Σχήμα 5.46 αντίστοιχα, στα οποία αποτυπώνεται το μέτρο των τάσεων u_f και u_g των δύο συστημάτων. Περαιτέρω στο Σχήμα 5.47 παρουσιάζονται οι $d - q$ συνιστώσες της τάσης u_f στην έξοδο των φίλτρων των δύο μετατροπέων.



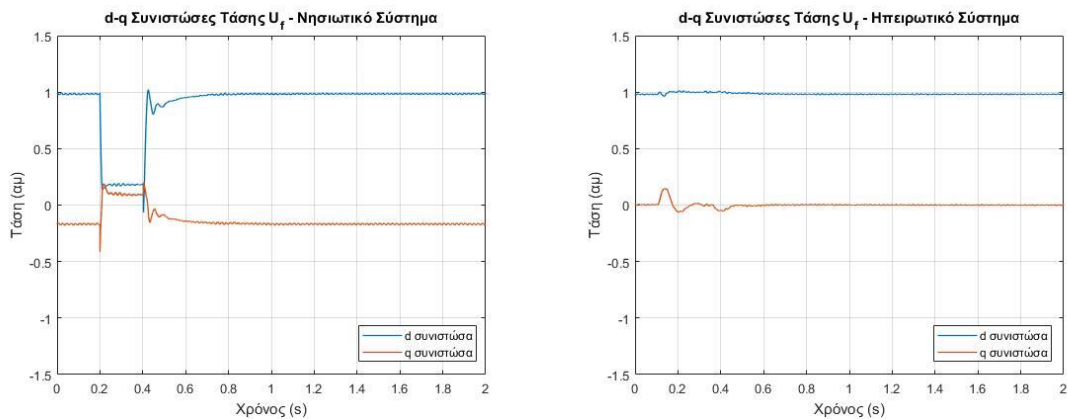
Σχήμα 5.42 Ροή ενεργού και αέργου ισχύος στην έξοδο των μετατροπέων στην πλευρά ΕΡ



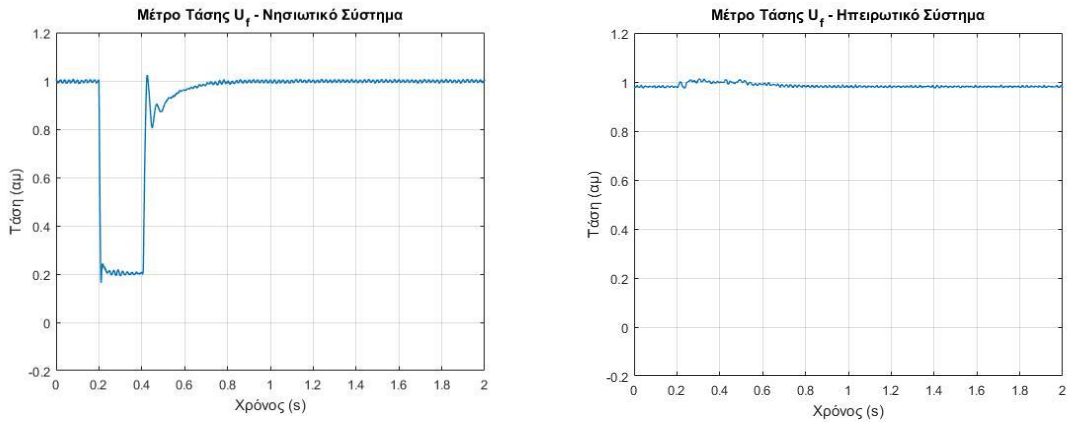
Σχήμα 5.43 Τριφασική τάση u_f στην έξοδο των φίλτρων των μετατροπέων.



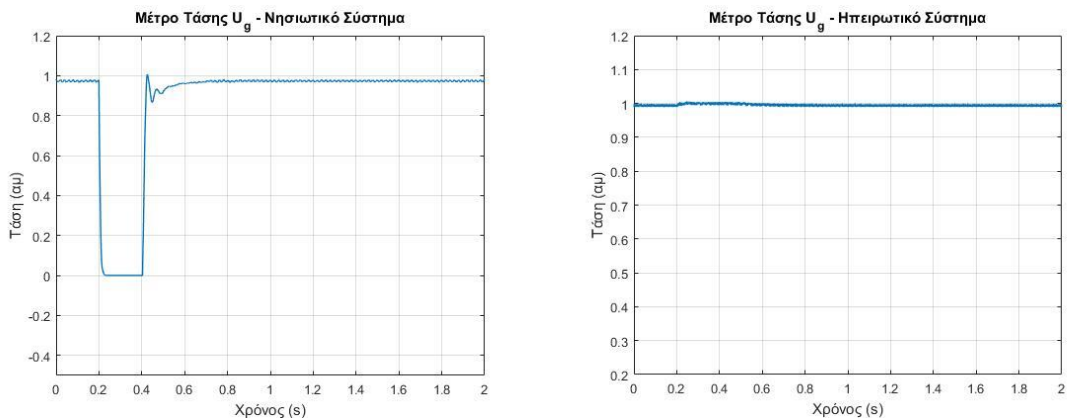
Σχήμα 5.44 Τριφασική τάση u_g στο ζυγό εξόδο των μετασχηματιστών (ΣΚΣ).



Σχήμα 5.45 $d - q$ συνιστώσες της τάσης u_f στην έξοδο των φίλτρων των μετατροπέων.



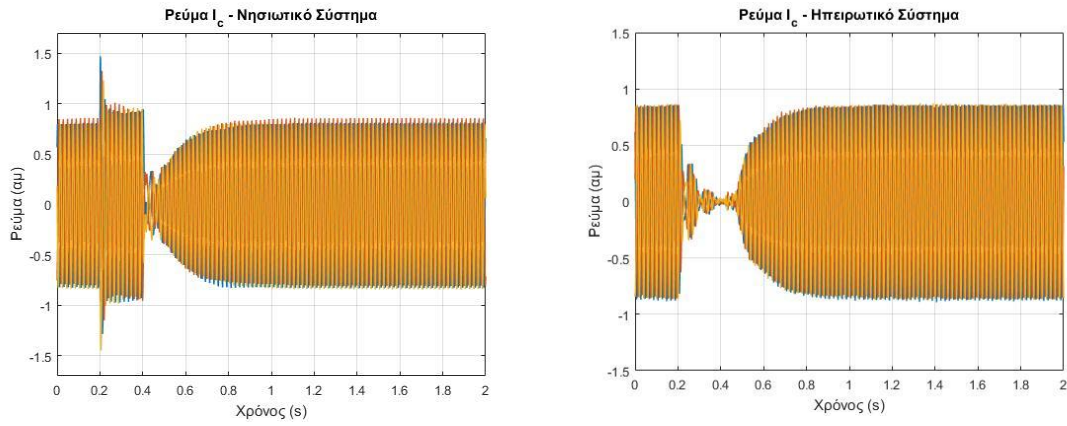
Σχήμα 5.46 Μέτρο της τάσης u_f στην έξοδο των φίλτρων των μετατροπέων.



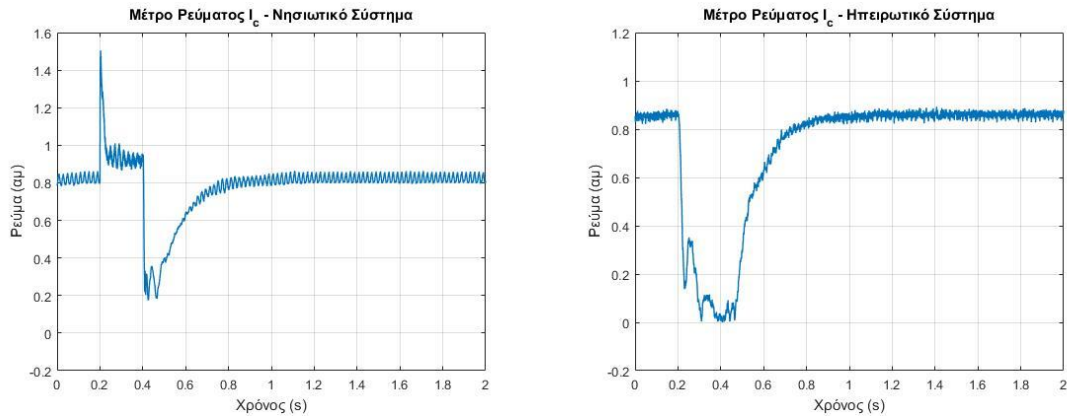
Σχήμα 5.47 Μέτρο της τάσης u_g στο ζυγό εξόδου των μετασχηματιστών (ΣΚΣ).

Στο Σχήμα 5.48 παρουσιάζονται οι κυματομορφές του τριφασικού ρεύματος εξόδου των μετατροπέων. Όπως παρατηρούμε και στο Σχήμα 5.49, όπου παρουσιάζεται το μέτρο του ρεύματος αυτού, η τιμή του σε δεδομένη χρονική στιγμή κατά τη διάρκεια του σφάλματος φαίνεται να ξεπερνά την ονομαστική, φτάνοντας περίπου έως την τιμή 1.5 αμ . Βέβαια η αιχμή υπερέντασης ρεύματος που εμφανίζεται είναι πολύ σύντομης διάρκειας, της τάξης των 0.02 s , γεγονός που δεν είναι ικανό να βλάψει τους ημιαγωγικούς διακόπτες του μετατροπέα. Μετά την εμφάνιση της εν λόγω υπερέντασης κατά την αρχική στιγμή πρόκλησης του σφάλματος, παρατηρούμε πως το μέτρο του ρεύματος του μετατροπέα λαμβάνει τιμές που δεν υπερβαίνουν την μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή του 1.005 αμ . Το γεγονός αυτό είναι αποτέλεσμα του δυναμικού κορεσμού που επενεργεί στα ρεύματα αναφοράς i_{ref}^d και i_{ref}^q του μετατροπέα της Κρήτης, περιορίζοντας την τιμή τους σύμφωνα με τη διαδικασία που περιγράφηκε στην Υποενότητα 4.3.3. Ο περιορισμός της τιμής των ρευμάτων αναφοράς κατά τη διάρκεια του σφάλματος φαίνεται στο Σχήμα 5.50, όπου παρουσιάζεται η μεταβολή της τιμής των μεταβλητών i_{ref}^d και i_{ref}^q .

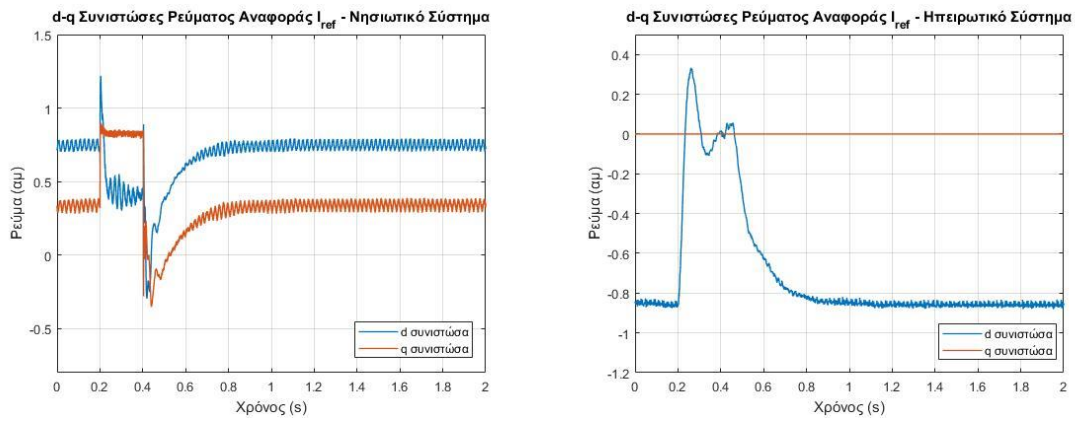
Στο Σχήμα 5.51 παρουσιάζονται οι $d - q$ συνιστώσες του ρεύματος i_c στην έξοδο των μετατροπέων. Παρατηρούμε πως οι εν λόγω συνιστώσες ακολουθούν σχεδόν επακριβώς τις αντίστοιχες τιμές των $d - q$ συνιστωσών του ρεύματος αναφοράς, που παράγονται από τα κυκλώματα ελέγχου των μετατροπέων. Το γεγονός αυτό είναι πολύ σημαντικό κατά τη διάρκεια του σφάλματος ιδιαίτερα στην πλευρά του νησιωτικού δικτύου, όπου παρατηρούμε πως ο περιορισμός των μεταβλητών i_{ref}^d



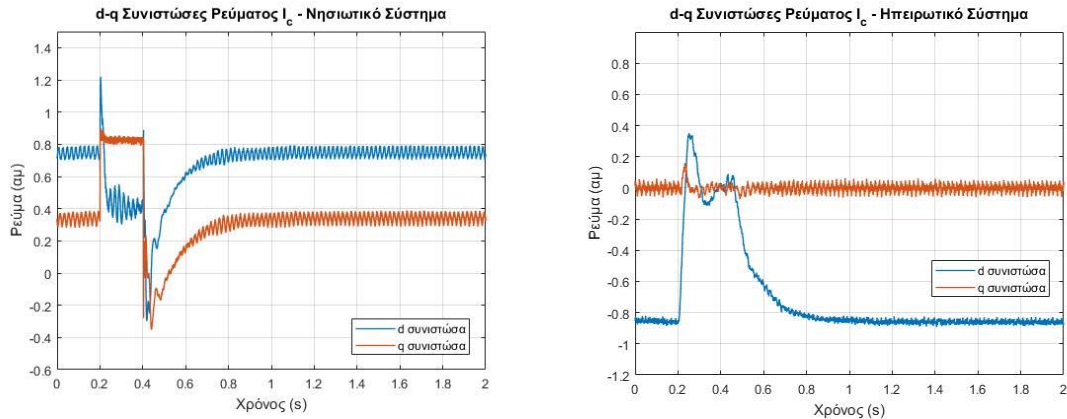
Σχήμα 5.48 Τριφασικό ρεύμα i_f στην έξοδο των μετατροπών.



Σχήμα 5.49 Μέτρο του ρεύματος i_f στην έξοδο των μετατροπών.



Σχήμα 5.50 $d - q$ συνιστώσες του ρεύματος αναφοράς i_{ref} των μετατροπών.



Σχήμα 5.51 $d - q$ συνιστώσες του ρεύματος i_f στην έξοδο των μετατροπών.

και i_{ref}^q στο κύκλωμα ελέγχου επιτυγχάνει και τον περιορισμό του πραγματικού ρεύματος i_c του μετατροπέα.

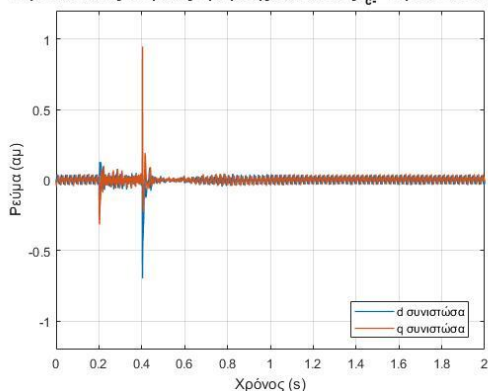
Στο Σχήμα 5.52 παρουσιάζονται οι $d - q$ συνιστώσες του ρεύματος αρνητικής ακολουθίας των δύο συστημάτων. Στην πλευρά του ηπειρωτικού δικτύου παρατηρούμε πως καθόλη τη διάρκεια λειτουργίας του συστήματος οι εν λόγω συνιστώσες χαρακτηρίζονται από σχεδόν μηδενική τιμή. Από την άλλη, στην πλευρά του νησιωτικού δικτύου παρατηρούμε πως τη χρονική στιγμή εμφάνισης και ιδιαίτερα εκκαθάρισης του σφάλματος εμφανίζονται υπερεντάσεις στις συνιστώσες αυτές. Βέβαια, οι εν λόγω υπερεντάσεις διαρκούν για εξαιρετικά σύντομο χρονικό διάστημα και εκ του αποτελέσματος δεν φαίνεται να επηρεάζουν δυσμενώς ούτε την αντιμετώπιση του σφάλματος από το σύστημα, αλλά ούτε και την επαναφορά αυτού στην πρότερη κατάσταση.

Στο Σχήμα 5.53 παρουσιάζονται τα διαγράμματα όπου αποτυπώνεται η ενεργός ισχύς που διακινείται μέσω του συνδέσμου ΣΡ, ενώ στο Σχήμα 5.54 φαίνεται η μεταβολή της συνεχούς τάσης αυτού. Η τάση του συνδέσμου κατά τη χρονική στιγμή εμφάνισης του σφάλματος και για διάστημα περίπου 0.06 s χαρακτηρίζεται από υπέρταση που φτάνει περίπου το επίπεδο του 8% πάνω από την ονομαστική τιμή. Παρόλα αυτά μετά την εκκαθάριση του σφάλματος η τάση του συνδέσμου επανέρχεται σύντομα στις προβλεπόμενες τιμές.

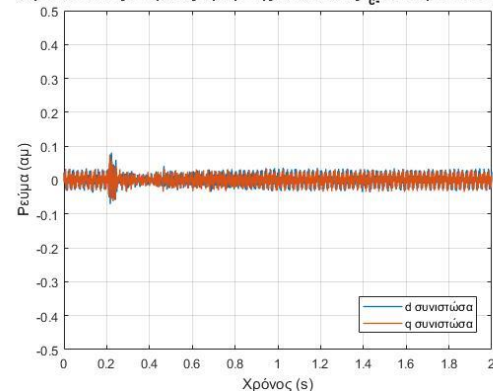
Στο Σχήμα 5.55 παρουσιάζεται το ρεύμα του συνδέσμου ΣΡ, όπου διαπιστώνεται πως η τιμή του δεν ξεπερνά σε καμία περίπτωση την μέγιστή επιτρεπτή τιμή του 1 αμ .

Τέλος στο Σχήμα 5.56 παρουσιάζεται το σήμα ωt , μέσω του οποίου επιτυγχάνεται ο συγχρονισμός του μετατροπέα της πλευρά της Κρήτης με το νησιωτικό δίκτυο ΕΡ. Τη χρονική στιγμή εμφάνισης του σφάλματος ($t_1 = 0.2\text{ s}$) παρατηρούμε πως η παραγωγή της γωνίας συγχρονισμού του μετατροπέα μεταπίπτει από το βρόχο συγχρονισμού ισχύος στη διάταξη κλειδώματος φάσης. Αντίστοιχα, με την εκκαθάριση του σφάλματος τη χρονική στιγμή $t_2 = 0.4\text{ s}$ ο συγχρονισμός του μετατροπέα ανατίθεται εκ νέου στον βρόχο συγχρονισμού ισχύος, ο οποίος αναλαμβάνει την επαναφορά της εγχεόμενης από τον μετατροπέα ενεργού ισχύος στο πρότερα επίπεδα.

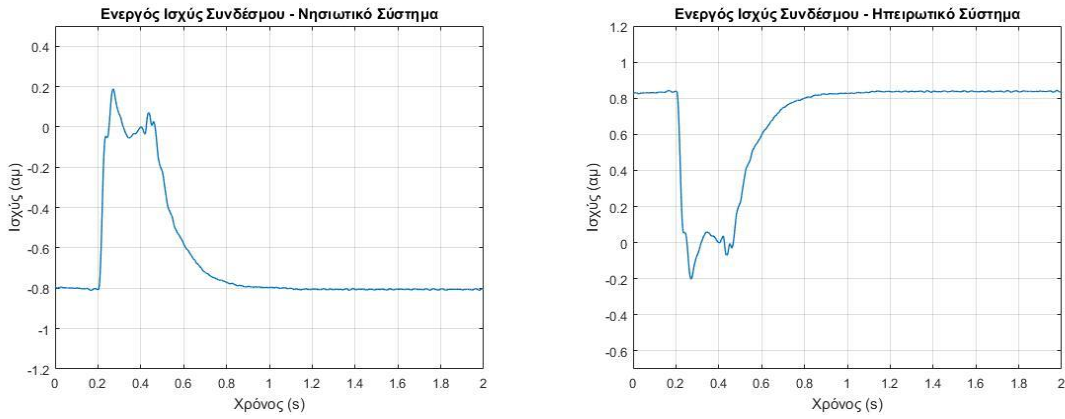
d-q Συνιστώσες Ρεύματος Αρνητικής Ακολουθίας i_{c-} - Νησιωτικό Σύστημα



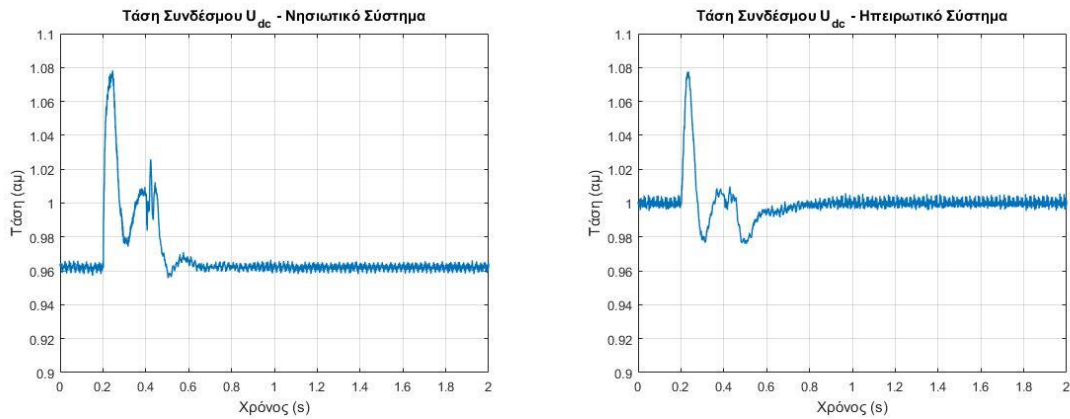
d-q Συνιστώσες Ρεύματος Αρνητικής Ακολουθίας i_{c-} - Ηπειρωτικό Σύστημα



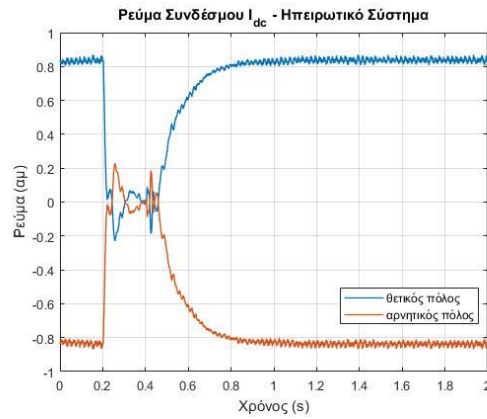
Σχήμα 5.52 $d - q$ συνιστώσες του ρεύματος αρνητικής ακολουθίας i_{f-} στην έξοδο των μετατροπέων.



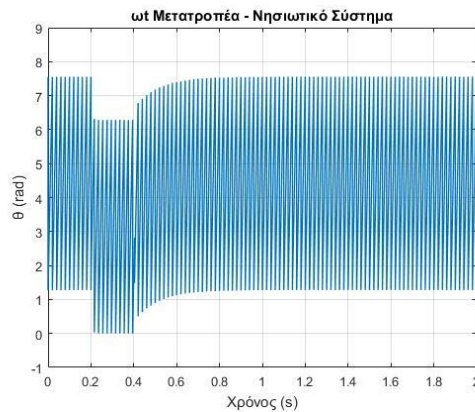
Σχήμα 5.53 Ροή ενεργού ισχύος μέσω του συνδέσμου ΣΡ.



Σχήμα 5.54 Τάση U_{dc} του συνδέσμου μετρούμενη στην έξοδο των μετατροπέων στην πλευρά ΣΡ.



Σχήμα 5.55 Ρεύμα θετικού και αρνητικού πόλου συνδέσμου ΣΡ.



Σχήμα 5.56 Μεταβολή της γωνίας συγχρονισμού του μετατροπέα στην πλευρά της Κρήτης με το χρόνο.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

6.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στα πλαίσια του κεφαλαίου αυτού παρουσιάζονται τα εν γένει συμπεράσματα τα οποία δύνανται να εξαχθούν από την παρούσα διπλωματική εργασία. Παράλληλα, για τον αναγνώστη που αναζητά μια περαιτέρω ενασχόληση με θέματα συναφή με το αντικείμενο της παρούσας εργασίας, παρατίθενται ορισμένες προτάσεις που θα μπορούσαν να αποτελέσουν αντικείμενο μελλοντικής έρευνας.

6.2 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Τα κυριότερα συμπεράσματα που προκύπτουν από την παρουσίαση των αποτελεσμάτων του προηγούμενου κεφαλαίου (βλ. Κεφάλαιο 5) συνοψίζονται στα κάτωθι σημεία:

- Η χρήση μετατροπών VSC στο μοντέλο προσομοίωσης απέδωσε τα πλεονεκτήματα που χαρακτηρίζουν τον συγκεκριμένο τύπο μετατροπών, όπως αυτά παρουσιάστηκαν στην Υποενότητα 2.3.3. Προπάντων όμως, ιδιαίτερα σημαντική για την υλοποίηση της παρούσας εργασίας αποτέλεσε η ικανότητα των εν λόγω μετατροπών να λειτουργούν όντας συνδεδεμένοι σε πολύ ασθενή δίκτυα EP, όπως το παράδειγμα του δικτύου της Κρήτης. Βέβαια για την επίτευξη αυτού, όπως θα αναφερθεί και παρακάτω, απαραίτητη ήταν η τροποποίηση της τεχνικής ελέγχου που εφαρμόστηκε στο μετατροπέα στην πλευρά του πολύ ασθενούς δικτύου, γεγονός που αποτέλεσε και το κυρίως θέμα διερεύνησης της παρούσας εργασίας.
- Η χρήση πολυεπίπεδων μετατροπών τύπου MMC καθιστά το αρμονικό περιεχόμενο της τάσης εξόδου ιδιαίτερα μειωμένο σε σχέση με αντίστοιχες εφαρμογές όπου χρησιμοποιούνται μετατροπείς δύο και τριών επιπέδων. Το γεγονός αυτό είναι πολύ σημαντικό καθώς με αυτόν τον τρόπο δύναται να αποφευχθεί η χρήση φίλτρων EP στην έξοδο των μετατροπών, περιορίζοντας έτσι τόσο το κόστος όσο και το μέγεθος της εγκατάστασης του σταθμού. Μάλιστα η ένταξη περισσοτέρων υπομονάδων στους μετατροπείς MMC είναι ικανή να περιορίσει ακόμα περισσότερο το αρμονικό περιεχόμενο της τάσης εξόδου, ενώ παράλληλα μειώνεται η διακοπτική συχνότητα των ημιαγωγικών στοιχείων και άρα και οι απώλειες ισχύος. Παρόλα αυτά, στο μοντέλο προσομοίωσης που χρησιμοποιήθηκε παρατηρήθηκε σημαντική απόκλιση στο αρμονικό περιεχόμενο της τάσης του δικτύου στην πλευρά της Κρήτης σε σύγκριση με την αντίστοιχη τάση στην πλευρά της Αττικής. Το γεγονός αυτό και ειδικότερα τα αίτια πρόκλησης του χρήζουν περαιτέρω διερεύνησης.
- Η διάταξη κλειδώματος φάσης (PLL) παρουσιάζει ικανοποιητική απόδοση για το συγχρονισμό του μετατροπέα της Αττικής με το ηπειρωτικό δίκτυο, που αποτελεί ισχυρό δίκτυο EP. Αντιθέτως, η διάταξη αυτή δεν δύναται να λειτουργήσει με ορθό τρόπο στον μετατροπέα του νησιωτικού δικτύου, καθώς αυτό αποτελεί ένα πολύ ασθενές δίκτυο EP. Η επίδραση της χαμηλής

ισχύος βραχυκύκλωσης, που εξ' ορισμού καθιστά το δίκτυο της Κρήτης πολύ ασθενές, γίνεται ιδιαίτερος αισθητή κατά την μεταβατική λειτουργία του συστήματος. Ως εκ τούτου, κάθε απόπειρα μεταφοράς ενεργού ισχύος έχει ως αποτέλεσμα την ανεξέλεγκτη μεταβολή της κυκλικής συχνότητας που εξάγεται από τη διάταξη κλειδώματος φάσης (βλ. Σχήμα 3.7). Έτσι η αδυναμία της διάταξης κλειδώματος φάσης να παρέχει τον απαραίτητο συγχρονισμό του μετατροπέα με το πολύ ασθενές δίκτυο δημιουργεί προβλήματα στην ευσταθή λειτουργία του συστήματος. Μάλιστα, σε πολύ χαμηλές τιμές ισχύος βραχυκύκλωσης, όπως αυτή των 1000 MVA που χαρακτηρίζει το σύστημα της Κρήτης, η μεταφορά ισχύος άνω του 0.4 αμ είναι πρακτικά ανέφικτη (βλ. Σχήμα 3.9) [46]. Με αφορμή τους προαναφερθέντες περιορισμούς, στην πλευρά του νησιωτικού δικτύου αναζητήθηκε ένα πιο αποτελεσματικό κύκλωμα συγχρονισμού.

- Η εφαρμογή του ελέγχου συγχρονισμού ισχύος φαίνεται να παρέχει σε ικανοποιητικό βαθμό την ικανότητα συγχρονισμού του μετατροπέα στην πλευρά της Κρήτης με το νησιωτικό δίκτυο. Ως εκ τούτου, από τα αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν στην Ενότητα 5.2, κρίνεται επιτυχής ο έλεγχος από τον μετατροπέα των διαφόρων ηλεκτρικών μεγεθών κατά την μεταφορά ενεργού ισχύος επιλεγμένης τιμής 0.8 αμ . Περαιτέρω, η προσπάθεια μεταφοράς προς το νησιωτικό σύστημα ενεργού ισχύος τιμής 0.9 αμ , που αποτελεί την μέγιστη ωριαία ζήτηση που έχει ποτέ παρατηρηθεί, φαίνεται εφικτή αν και προκύπτουν ορισμένα προβλήματα. Ειδικότερα, παρατηρείται ότι το ρεύμα του μετατροπέα στην πλευρά της Κρήτης κυμαίνεται σε τιμές λίγο πάνω από την ονομαστική, ενώ παράλληλα με την πάροδο του χρόνου παρουσιάζει ταλαντωτική συμπεριφορά. Παρόλα αυτά η εκ νέου διαστασιολόγηση των ονομαστικών χαρακτηριστικών του συστήματος δύναται να επιλύσει τέτοιου είδους ζητήματα.
- Οι μετατροπείς VSC διακρίνονται για την ευκολία τους να αντιστρέφουν τη ροή της ενεργού ισχύος ταχύτατα, δίχως να απαιτείται η αντιστροφή της πολικότητας της συνεχούς τάσης όπως στους μετατροπείς CSC [27]. Αυτό διαφαίνεται και από τα αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν στην Ενότητα 5.3, τα οποία καταδεικνύουν πως η πλήρης αντιστροφή της ροής ισχύος, τιμής 0.8 αμ , μεταξύ των δύο συστημάτων επιτυγχάνεται εντός χρονικού διαστήματος 0.8 s .
- Η απόκριση του συστήματος σε γενόμενο τριφασικό σφάλμα στην πλευρά του δικτύου της Κρήτης φαίνεται ικανοποιητική, καθώς το σύστημα επανέρχεται στην κανονική λειτουργία του αμέσως μετά την εκκαθάριση του σφάλματος. Παράλληλα κατά τη διάρκεια του σφάλματος δεν παρατηρείται σημαντική υπερένταση του ρεύματος του μετατροπέα, πλην μιας αιχμής του 1.5 αμ , που όμως είναι πολύ σύντομης διάρκειας (της τάξης των 0.02 s), γεγονός που δεν είναι ικανό να βλάψει τους ημιαγωγικούς διακόπτες του μετατροπέα. Απαραίτητη προϋπόθεση για την αποτελεσματική απόκριση του συστήματος είναι η μεταγωγή του συγχρονισμού του μετατροπέα από το βρόχο συγχρονισμού ισχύος στην εφεδρική διάταξη κλειδώματος φάσης (back-up PLL) για όσο χρόνο διαρκεί το σφάλμα. Παράλληλα, κατά το χρόνο αυτό, το κύκλωμα ελέγχου του μετατροπέα λειτουργεί τρόπον τινά ως διανυσματικός ελεγκτής ρεύματος, συνθέτοντας τεχνητά ρεύματα αναφοράς.

Κατόπιν, η τιμή των ρευμάτων αναφοράς περιορίζεται έτσι ώστε να αποφευχθούν φαινόμενα υπερέντασης του ρεύματος του μετατροπέα κατά τη διάρκεια του σφάλματος.

6.2 ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΜΕΛΕΤΗ

Το αντικείμενο μελέτης της παρούσας διπλωματικής εργασίας δύναται να επεκταθεί σε πληθώρα θεμάτων για περαιτέρω διερεύνηση, τα οποία κρίνεται σκόπιμο να αναφερθούν παρακάτω.

Αρχικά, όσο αφορά το μοντέλο προσομοίωσης της διασύνδεσης VSC-HVDC, σε αυτό για λόγους πληρότητας της μελέτης θα μπορούσε να συμπεριληφθεί και η διασύνδεση ΕΡ μεταξύ Πελοποννήσου και Κρήτης που έχει σχεδιαστεί από τον ΑΔΜΗΕ [2]. Η προσθήκη αυτή θα είχε ιδιαίτερο ενδιαφέρον για την απόκριση του συστήματος σε περιπτώσεις σφαλμάτων, τόσο στο δίκτυο της Κρήτης όσο και στο σύνδεσμο HVDC. Επιπλέον, με την προϋπόθεση της επιλογής τοπολογίας διπλού, στο μοντέλο προσομοίωσης θα μπορούσαν να μελετηθούν και επιπλέον καταστάσεις λειτουργίας του συστήματος, όπως η απόκριση αυτού σε σφάλματα στο σύνδεσμο ΣΡ.

Αναφορικά με την τεχνική ελέγχου που επιλέχθηκε στην πλευρά του νησιωτικού δικτύου, περαιτέρω διερεύνηση θα μπορούσε να πραγματοποιηθεί σχετικά με την τροποποίηση των παραμέτρων του συμβατικού διανυσματικού ελεγκτή ρεύματος, έτσι ώστε να καταστεί δυνατή η εφαρμογή του σε μετατροπείς που συνδέονται σε πολύ ασθενή δίκτυα ΕΡ [41]. Επιπλέον, μια διαφορετική προσέγγιση για την επίτευξη του ίδιου αποτελέσματος αφορά τη χρήση ενός τεχνητού ζυγού, μέσω του οποίου μειώνεται η επαγωγική αντίδραση του δικτύου (αύξηση της ισχύος βραχυκύκλωσης) όπως την αντιλαμβάνεται ο μετατροπέας [50].

Τέλος πέρα από τα πλαίσια υλοποίησης της διασύνδεσης VSC-HVDC μεταξύ Αττικής και Κρήτης, ιδιαίτερο επιστημονικό ενδιαφέρον παρουσιάζει το θέμα της υλοποίησης πολυτερματικών διασυνδέσεων HVDC σε ασθενή δίκτυα ΕΡ.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] M. Bahrman and B. Johnson, “The ABCs of HVDC Transmission Technologies,” *IEEE Power Energy Mag.*, vol. 5, no. 2, pp. 32–44, Mar./Apr. 2007.
- [2] “Δεκαετής Πρόγραμμα Ανάπτυξης Συστήματος Μεταφοράς 2017-2026,” ΑΔΜΗΕ, 2016.
- [3] M. Durrant, H. Werner, and K. Abbott, “Model of a VSC HVDC Terminal Attached to a Weak AC System,” in *Proc. IEEE Conference on Control Applications*, Istanbul, 2003.
- [4] A. Allerhand, “A Contrarian History of Early Electric Power Distribution,” *IEEE Power Energy Mag.*, vol. 105, no. 4, pp. 32–44, Apr. 2017.
- [5] E. W. Kimbark, “Direct Current Transmission,” *John Wiley & Sons, Inc.*, vol. I, 1971.
- [6] Patterson, W. A., “The Eel River HVDC Scheme — A 320 MW Asynchronous Interconnection between the New Brunswick Electric Power Commission and Hydro-Québec Employing Thyristor Valves,” *Canadian Electrical Engineering Journal*, vol. 2, no. 1, pp. 9–16, 1977.
- [7] M. Korytowski, “Uno Lahm the Father of HVDC Transmission,” *IEEE Power Energy Mag.*, vol. 15, no 5, pp. 98-99, Sept/Oct. 2017.
- [8] J. Arrillaga, “High Voltage Direct Current Transmission, 2nd Edition,” London, U.K, 1983.
- [9] Grant Jordon, “Review of HVDC Technology, Applications and Future Prospects,” 2017. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/320957010>
- [10] P Bowles, “AC-DC Economics and Alternatives- 1987 Panel Session Report,” *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 5, pp. 1241-1248, Nov. 1990.
- [11] G. Schmidt, “HVDC Transmission and the Environment,” in *Power Engineering Journal*, pp. 204-210, Oct. 1996.
- [12] M. P. Bahrman, “Overview of HVDC Transmission,” *IEEE IPES T&D, Power Systems Conference and Exposition*, 2006.
- [13] T. Smed and G. Andersson, “Utilizing HVDC to Damp Power Oscillations,” *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 8, no. 2, pp. 620–627, Apr 1993.
- [14] “HVDC Technical Advantages” [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://new.abb.com/systems/hvdc/why-hvdc/technical-advantages>
- [15] L. Zhang, “Modeling and Control of VSC-HVDC Links Connected to Weak AC Systems,” Ph.D. Thesis, Royal Institute of Technology, School of Electrical Engineering Electrical Machines and Power Electronics, Stockholm, 2010.

- [16] A. Persson and L. Carlsson, “New Technologies in HVDC Converter Design,” in *Proc. AC DC Power Transmiss.*, pp. 387–392, London, U.K., 1996.
- [17] “Offshore Transmission Technology Report,” European Network of Transmission System Operator for Electricity (ENTSO-E), Brussels, Belgium, Oct. 2012
- [18] C. V. Thio, J. B. Davies, and K. L. Kent, “Commutation Failures in HVDC Transmission Systems,” *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 11, no. 2, pp. 946–957, Apr. 1996.
- [19] “IEEE Guide for Planning DC Links Terminating at AC Locations Having Low Short-Circuit Capacities,” *IEEE Std. 1204*, 1997.
- [20] “HVDC Light It’s time to connect,” ABB Grid Systems – HVDC, Sweden, 2013.
- [21] J. Rodriguez, J.-S. Lai, and F. Z. Peng, “Multilevel Inverters: A Survey of Topologies, Controls, and Applications,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 49, no. 5, pp.724–738, Aug. 2002.
- [22] A. Lesnicar and R. Marquardt, “A New Modular Voltage Source Inverter Topology,” in *10th European Conference on Power Electronics and Applications-EPE 2003*, Toulouse, France, 2003.
- [23] S. Allebrod, R. Hamerski, and R. Marquardt, “New Transformerless, Scalable Modular Multilevel Converters for HVDC Transmission,” in *IEEE Power Electronics Specialists Conference - PESC 2008*, Rhodes, Greece, 2008.
- [24] Στέφανος Ν. Μανιάς, “*Ηλεκτρονικά Ισχύος*” Εκδόσεις Συμμεών, Αθήνα, 2014.
- [25] “It’s time to connect,” ABB Grid Systems – HVDC, Sweden, Feb. 2010.
- [26] Yang Zhou, Dao Zhuojian and Yu Fenwang, “The Development of HVDC Transmission System,” in *Third International Conference on Digital Manufacturing & Automation*, pp. 907-910, GuiLin, China, 2012.
- [27] Βασίλειος Νικολακόπουλος, “Μοντελοποίηση και Προσομοίωση Διασυνδέσεων HVDC Τοπολογίας Διπόλου,” Διπλωματική Εργασία, Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2018.
- [28] Dale Pudney and Luo Wei, “Voltage Source Converter Based HVDC,” in *Energize Energy Mag.*, Issue 61, pp. 33-36, Nov. 2012.
- [29] Nemanja Savić and Vladimir Katić, “Overview of the Configuration and Power Converters in High Voltage Direct Current Transmission Systems,” in *Proceedings of 4th International Conference on Electrical, Electronics and Computing Engineering*, Kladovo, Serbia, Jun. 2017.
- [30] Steven De Boeck, Pieter Tielens, Willem Leterme and Dirk Van Hertem, “Configurations and Earthing of HVDC Grids,” *IEEE Power & Energy Society General Meeting*, 2013.

- [31] Md Habibur Rahman, Lie Xu and Keith Bell, “DC Fault Protection of Multi-terminal HVDC Systems Using DC Network Partition and DC Circuit Breakers,” Department of Electronic & Electrical Engineering University of Strathclyde, Glasgow, U.K, 2015.
- [32] Nikolas Flourentzou, Vassilios G. Agelidis and Georgios D. Demetriades, “VSC-Based HVDC Power Transmission Systems: An Overview,” *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 24, Issue 3, Mar. 2009.
- [33] Oni, Oluwafemi & Mbangula, Kamati and Davidson, Inno, “A Review of LCC-HVDC and VSC-HVDC Technologies and Applications,” *Transactions on Environment and Electrical Engineering*, vol. 1, no. 3, 2016.
- [34] “Economic and Environmental Advantages of HVDC” [Ηλεκτρονικό] Available: <https://new.abb.com/systems/hvdc/why-hvdc/economic-and-environmental-advantages>
- [35] M. Hook and C. Jones, “Review of Worldwide Experience of Voltage Source Converter (VSC) High Voltage Direct Current (HVDC) Technology Installations,” *Sinclair Knight Merz*, New Castle, U.K, 2013.
- [36] G. Stamatiou, “Converter Interactions in VSC-based HVDC Systems,” Ph.D. Thesis, Chalmers University of Technology, Department of Energy and Environment, Gothenburg, 2015.
- [37] S. Nanou, “Συμβολή στην Ανάπτυξη Τεχνικών Ελέγχου για Συστήματα Διασύνδεσης Υψηλής Τάσης Συνεχούς Ρεύματος Τύπου Πηγής Τάσης (VSC-HVDC) Θαλάσσιων Αιολικών Πάρκων και Νησιών,” Διδακτορική Διατριβή, Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2016.
- [38] B. Shen, S. Wang, L. Fu and J. Liang, “Design and Comparison of Feasible Control Systems for VSC-HVDC Transmission System,” *2nd International Conference on Artificial Intelligence, Modelling and Simulation*, pp. 234-239, Madrid, Spain, 2014.
- [39] M. A. Hannan *et al.*, “Advanced Control Strategies of VSC Based HVDC Transmission System: Issues and Potential Recommendations,” in *IEEE Access*, vol. 6, pp. 78352-78369, 2018.
- [40] Y. Li, L. Luo, C. Rehtanz, S. Rüberg, and F. Liu, “Realization of Reactive Power Compensation Near the LCC-HVDC Converter Bridges by Means of an Inductive Filtering Method,” *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 27, no. 9, pp. 3908–3923, Sep. 2012.
- [41] G. Wu *et al.*, “Analysis and Design of Vector Control for VSC-HVDC Connected to Weak Grids,” in *CSEE Journal of Power and Energy Systems*, vol. 3, no. 2, pp. 115-124, Jun. 2017.
- [42] Lennart Harnefors, Massimo Bongiorno and Stefan Lundberg, “Input-Admittance Calculation and Shaping for Controlled Voltage-Source Converters,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 54, no. 6, Dec. 2007.
- [43] P. Rodriguez, A. Luna, R. S. Munoz-Aguilar, I. Etxeberria-Otadui, R. Teodorescu, and F. Blaabjerg, “A Stationary Reference Frame Grid Synchronization System for Three-

Phase Grid-Connected Power Converters under Adverse Grid Conditions,” *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 27, pp. 99-112, Jan. 2012.

[44] K. Ilves, S. Norrga, L. Harnefors and H. Nee, “On Energy Storage Requirements in Modular Multilevel Converters,” *IEEE Trans. on Power Electron.*, vol. 29, no. 1, pp. 77-88, Jan. 2014.

[45] Minxiao Han, Lingfei Xiong and Lei Wan, “Power-Synchronization Loop for Vector Current Control of VSC-HVDC Connected to Weak System,” *IEEE International Conference on Power System Technology (POWERCON)*, pp. 1-5, Auckland, New Zealand, 2012.

[46] L. Zhang, L. Harnefors and H. Nee, “Power-Synchronization Control of Grid-Connected Voltage-Source Converters,” in *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 25, no. 2, pp. 809-820, May 2010.

[47] M. A. Hannan et al., “Advanced Control Strategies of VSC Based HVDC Transmission System: Issues and Potential Recommendations,” in *IEEE Access*, vol. 6, pp. 78352-78369, 2018.

[48] H. Wang, H. Sun, M. Han and J. M. Guerrero, “Phase-Lock Loop of Grid-connected Voltage Source Converter Under Non-Ideal Grid Conditions,” *IEEE First International Conference on DC Microgrids (ICDCM)*, pp. 124-128, Atlanta, GA, USA, 2015.

[49] J. Z. Zhou, H. Ding, S. Fan, Y. Zhang and A. M. Gole, “Impact of Short-Circuit Ratio and Phase-Locked-Loop Parameters on the Small-Signal Behavior of a VSC-HVDC Converter,” *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 29, no. 5, pp. 2287-2296, Oct. 2014.

[50] M. F. M. Arani and Y. A. I. Mohamed, “Analysis and Performance Enhancement of Vector-Controlled VSC in HVDC Links Connected to Very Weak Grids,” *IEEE Trans. Power Sys.*, vol. 32, no. 1, pp. 684-693, Jan. 2017.

[51] “60-500 kV High Voltage Underground Power Cables, XLPE Insulated Cables,” [Ηλεκτρονικό] Available: https://www.nexans.com/Corporate/2013/60500_kV_High_Voltage_full_BD2.pdf

[52] “Guide for the Development of Models for HVDC Converters in a HVDC Grid,” *Technical Brochure 604, Cigre Working Group*, 2014.

[53] Makoto Hagiwara and Hirofumi Akagi, “Control and Experiment of Pulsewidth-Modulated Modular Multilevel Converters,” *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 24, no. 7, Jul. 2009.

[54] K. J. Astrom and L. Rundqwist, “Integrator Windup and How to Avoid It,” *American Control Conference*, pp. 1693-1698, Pittsburgh, PA, USA, 1989.

[55] “Grid Code- High and Extra High Voltage,” TenneT TSO GmbH, Germany, 2012.

[56] S. M. Kamal, M. S. Hamad, R. A. R. Hamdy and A. ElZawawi, “Influence of a Proposed Converter Transformer on Harmonic Suppression for HVDC Systems,” *Nineteenth International Middle East Power Systems Conference (MEPCON)*, pp. 1133-1137, Cairo, Egypt, 2017.

[57] McGranaghan and Beaulieu, "Update on IEC 61000-3-6: Harmonic Emission Limits for Customers Connected to MV, HV, and EHV," *IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition*, pp. 1158-1161, Dallas, TX, USA, 2006.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Στο παρόν παράρτημα παρατίθενται υπό τη μορφή πινάκων τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά των δομικών στοιχείων που απαρτίζουν το υπό μελέτη σύστημα, καθώς και οι παράμετροι των διαφόρων ελεγκτών που χρησιμοποιήθηκαν.

Παράμετρος	Τιμή
Μήκος	389 km
Ονομαστική Τάση	300 kV
Ονομαστική Ισχύς	700 MW
Είδος Τοπολογίας	Συμμετρικό Μονόπολο
Ωμική Αντίσταση	0.011 Ohm/km
Επαγωγική Αντίδραση	0.112 mH/km
Χωρητική Αντίδραση	0.185 μF/km

Πίνακας Π1. Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά συνδέσμου ΣΡ.

Παράμετρος	Τιμή
Ονομαστική Ισχύς	700 MVA
Ονομαστική Τάση Πλευράς ΕΡ Αττική	150 kV
Ονομαστική Τάση Πλευράς ΣΡ	300 kV
Αριθμός Επιπέδων	10
Χωρητικότητα Υπομονάδας C_{sm}	815 μF
Αυτεπαγωγή Σειράς Σκέλους L_s	33 mH
Αυτεπαγωγή Σύνδεσης στο Δίκτυο L_c	21.5 mH
Τεχνική Διαμόρφωσης	PD-PWM
Διακοπτική Συχνότητα f_s - Συχνότητα Φερόντων Σημάτων	1.3 kHz
Συχνότητα Αλγορίθμου Ταξινόμησης f_b	4 kHz

Πίνακας Π2. Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά μετατροπών.

Παράμετρος	Τιμή
Ονομαστική Τάση Δικτύου Αττικής	400 kV
Ονομαστική Τάση Δικτύου Κρήτης	150 kV
Ονομαστική Συχνότητα	50 Hz
Ισχύς Βραχυκύκλωσης Δικτύου Αττικής	20000 MVA
Ισχύς Βραχυκύκλωσης Δικτύου Κρήτης	1000 MVA
Λόγος Επαγωγικής Αντίδρασης προς Ωμική Αντίσταση (X/R)	10

Πίνακας Π3. Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά δικτύων ΕΡ.

Παράμετρος	Τιμή
Κέρδοι PI Ελεγκτή Ρεύματος	$0.4 + 0.4/0.005s$
Κέρδοι PI Ελεγκτή Ρεύματος Αρνητικής Ακολουθίας	$0.4 + 0.4/0.005s$
Κορεσμός PI Ελεγκτή Ρεύματος	$[-1, 1] \alpha\mu$
Κορεσμός PI Ελεγκτή Ρεύματος Αρνητικής Ακολουθίας	$[-1, 1] \alpha\mu$
Κέρδοι PI Ελεγκτή Συνεχούς Τάσης	$4.8 + 1/0.003s$
Κορεσμός PI Ελεγκτή Συνεχούς Τάσης	$[-1.005, 1.005] \alpha\mu$
Κέρδος Tracking Ελεγκτή Συνεχούς Τάσης	100
Κέρδος Σχήματος Anti-Windup Ελεγκτή Συνεχούς Τάσης	50
Κέρδοι PI Ελεγκτή Διάταξης Κλειδώματος Φάσης (PLL)	$50 + 1/0.01s$
Κέρδος K_f Φίλτρου Δευτέρας Τάξης DSOGI	1.4

Πίνακας Π4. Παράμετροι ελεγκτών μετατροπέα Αττικής.

Παράμετρος	Τιμή
Κέρδος I Ελεγκτή Βρόχου Συγχρονισμού Ισχύος (Ελεγκτής Ενεργού Ισχύος)	$2.1/0.3s$
Κέρδοι PI Ελεγκτή Εφεδρικής Διάταξης Κλειδώματος Φάσης (Back-up PLL)	$1.8 + 3.2/0.1s$
Κέρδος Σχήματος Anti-Windup Βρόχου Συγχρονισμού Ισχύος	425
Κέρδος K_f Φίλτρου Δευτέρας Τάξης DSOGI	1.5
Κλίση Περιοριστή (Rate Limiter) Εντολής Ενεργού Ισχύος	$2 \alpha\mu/0.3 sec$
Κέρδοι PI Ελεγκτή Αέργου Ισχύος	$10 + 1/0.1s$
Κλίση Περιοριστή (Rate Limiter) Εντολής Αέργου Ισχύος	$2 \alpha\mu/0.5 sec$
Κέρδος I Ελεγκτή Εναλλασσόμενης Τάσης	$3/0.1s$
Συχνότητα Αποκοπής (Ημίσειας Ισχύος) Υψιπερατού Φίλτρου Ρεύματος	150 Hz
Εύρος Ζώνης a_c Κλειστού Βρόχου Εσωτερικού Ελεγκτή Ρεύματος	$2500 rad/sec$

Πίνακας Π5. Παράμετροι ελεγκτών μετατροπέα Κρήτης.

Παράμετρος	Τιμή
Ονομαστική Ισχύς	700 MVA
Ονομαστική Τάση Μ/Σ Αττικής	400 kV/150 kV
Ονομαστική Τάση Μ/Σ Κρήτης	150 kV/150 kV
Επαγωγική Αντίδραση	0.12 αμ
Ωμική Αντίσταση	-

Πίνακας Π6. Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά μετασχηματιστών.