



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

**Έλεγχος αντιστροφέα φωτοβολταϊκών συστημάτων για
υποστήριξη του δικτύου σε συμμετρικά και ασύμμετρα
σφάλματα**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Κωνσταντίνος Χ. Γάλλος

Επιβλέπων : Σταύρος Παπαθανασίου
Αν. Καθηγητής Ε.Μ.Π

Αθήνα, Σεπτέμβριος 2016



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

**Έλεγχος αντιστροφέα φωτοβολταϊκών συστημάτων για
υποστήριξη του δικτύου σε συμμετρικά και ασύμμετρα
σφάλματα**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Κωνσταντίνος Χ. Γάλλος

Επιβλέπων : Σταύρος Παπαθανασίου
Αν. Καθηγητής Ε.Μ.Π

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την Αυγούστου 2016.

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

.....
Στέφανος Μανιάς
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Αντώνιος Κλαδάς
Καθηγητής Ε.Μ.Π

Αθήνα, Σεπτέμβριος 2016

.....
Κωνσταντίνος Χ. Γάλλος

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

Copyright © Κωνσταντίνος Χ. Γάλλος, 2016

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.

Ευχαριστίες

Με την ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας, θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου σε όσους με βοήθησαν κατά τη διάρκειά της, συντελώντας καθοριστικά στην εκπόνησή της.

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον καθηγητή μου κ. Σταύρο Παπαθανασίου για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε, αναθέτοντάς μου το συγκεκριμένο θέμα, το οποίο βρήκα ιδιαίτερος ενδιαφέρον, καθώς και για την πολύπλευρη καθοδήγηση και στήριξή του μέχρι την ολοκλήρωση της εργασίας.

Επίσης, ευχαριστώ ιδιαίτερος το διδάκτορα κ. Γεώργιο Καμπίτση για την άψογη συνεργασία που είχαμε σε όλη τη διάρκεια της εργασίας, τις πολύτιμες συμβουλές του, καθώς και την ουσιαστική συνεισφορά του στη λήψη των πειραματικών μετρήσεων.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου και τους φίλους μου για τη στήριξη που μου παρείχαν όλα αυτά τα χρόνια.

Περίληψη

Στην παρούσα διπλωματική εργασία εξετάζονται εναλλακτικές στρατηγικές ελέγχου ενός αντιστροφέα φωτοβολταϊκών συστημάτων για την υποστήριξη του δικτύου σε συμμετρικά και ασύμμετρα σφάλματα. Προς αυτήν την κατεύθυνση, μελετώνται τέσσερις διαφορετικές τεχνικές ελέγχου και πραγματοποιείται σύγκριση μεταξύ τους, έτσι ώστε να αναδειχθεί η καταλληλότερη, σύμφωνα με τους πιο πρόσφατους κώδικες δικτύου.

Αρχικά, παρουσιάζονται αναλυτικά οι απαιτήσεις των σύγχρονων κωδίκων δικτύου για τη συμπεριφορά των σταθμών παραγωγής κατά τη διάρκεια σφαλμάτων, με έμφαση στις σχετικές απαιτήσεις του ENTSO-E, ενώ γίνεται αναφορά και στους κανονισμούς διαχειριστών επιμέρους ευρωπαϊκών χωρών. Η έλλειψη συγκεκριμένων απαιτήσεων για τον τρόπο αντιμετώπισης των ασύμμετρων σφαλμάτων, αφήνει περιθώρια αναζήτησης εναλλακτικών μορφών υποστήριξης.

Στη συνέχεια πραγματοποιείται περιγραφή των διατάξεων που απαρτίζουν τη φωτοβολταϊκή μονάδα παραγωγής, στις οποίες συντελείται η εφαρμογή των ελέγχων, ενώ παρουσιάζονται και ορισμένα βασικά στοιχεία θεωρίας, τα οποία είναι απαραίτητα για να κατανοήσουμε τη συνεισφορά του συνολικού συστήματος στην υποστήριξη του δικτύου κατά τη διάρκεια σφαλμάτων.

Περνώντας στο κομμάτι του ελέγχου, εξετάζονται τρεις εναλλακτικοί τύποι διατάξεων κλειδώματος φάσης (PLL), οι οποίοι είναι απαραίτητοι για το συγχρονισμό της μονάδας με το δίκτυο και επιλέγεται ο πιο αποδοτικός, βάσει προσομοιώσεων. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται οι εξεταζόμενες στρατηγικές ελέγχου ρευμάτων του αντιστροφέα και περιγράφονται αναλυτικά τα κριτήρια λειτουργίας τους σε συνθήκες σφάλματος του δικτύου. Η επιβεβαίωση της ορθής λειτουργίας τους και η σύγκρισή τους επιτυγχάνεται, επίσης, μέσω προσομοιώσεων, για μία κοινή τοπολογία δικτύου και σύνδεση της φωτοβολταϊκής εγκατάστασης στην πλευρά της Μέσης Τάσης.

Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων επιβεβαιώνονται πειραματικά σε διάταξη μικρής ισχύος του εργαστηρίου Ηλεκτρικών Μηχανών και Ηλεκτρονικών Ισχύος του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, όπου επαληθεύεται η λειτουργία των τριών διατάξεων PLL και της στρατηγικής που επιλέχθηκε ως καταλληλότερη για εφαρμογή σε όλους τους τύπους σφαλμάτων του δικτύου. Τέλος, ακολουθούν τα συμπεράσματα από τη συνολική διερεύνηση που πραγματοποιήθηκε στην εργασία.

Λέξεις κλειδιά

Έλεγχος ρευμάτων αντιστροφέα, PQ έλεγχος, βύθιση τάσης, ασύμμετρα σφάλματα, κώδικες δικτύου, υποστήριξη τάσης, συστήματα συγχρονισμού, διάταξη κλειδώματος φάσης PLL, LC φίλτρο, συμμετρικές συνιστώσες.

Abstract

In the current diploma thesis different control strategies of a voltage-source inverter for photovoltaic systems are examined. These strategies provide support to the grid during symmetrical and asymmetrical voltage sags. To this end, four different techniques are studied and compared in order to find the most appropriate for application, according to the current grid codes.

In the beginning, the technical requirements of the grid codes published by the ENTSO-E are introduced, focusing especially on the way power plants support grid during voltage sags. Furthermore, there is a reference to similar requirements set by the operators of particular European countries. However, these requirements do not define exactly the control scheme during asymmetrical faults, so different strategies can be proposed.

Then, the devices which compose the photovoltaic power plant are analyzed. These devices are responsible for the application of the control methods. In addition, some parts of theory are included in order to understand how the system provides support to the grid during voltage sags.

As far as the control methods are concerned, initially, three types of Phase Locked Loop controllers (PLL) are examined, which are responsible for the synchronization of the power plant to the grid. The most appropriate controller is selected according to simulation results. Afterwards, the inverter current control methods are presented and their function is described during grid faults. The desired response is verified also by using simulation results for a common grid topology, in which the photovoltaic power plant is connected to the Medium Voltage side and then a comparison between them is conducted.

The simulation results are confirmed experimentally, after application of the three types of PLL and the selected current control method to a low power-rate inverter of the Laboratory of Electric Machines and Power Electronics, of the National Technical University of Athens (NTUA). Finally, the conclusions of the whole investigation are presented.

Key words

Inverter current control, PQ control, voltage sag, asymmetrical faults, grid codes, voltage support, synchronization systems, Phase Locked Loop (PLL), LC filter, symmetrical components.

Πίνακας περιεχομένων

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	13
1.1 Κώδικες δικτύου.....	13
1.2 Αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας.....	16
1.3 Δομή της διπλωματικής εργασίας.....	17
2 ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΘΕΩΡΙΑΣ	19
2.1 Μοντελοποίηση συστήματος.....	19
2.1.1 Φωτοβολταϊκή γεννήτρια	19
2.1.2 DC/DC μετατροπέας ισχύος	20
2.1.3 Τριφασικός αντιστροφέας πηγής τάσης δύο επιπέδων	21
2.1.4 Φίλτρο εξόδου LC.....	22
2.2 Λειτουργία αντιστροφέα για παροχή ενεργού και αέργου ισχύος στο δίκτυο.....	24
2.3 Θεωρία συμμετρικών συνιστωσών τριφασικού συστήματος	26
2.3.1 Περιγραφή μεθόδου	26
2.3.2 Διαδικασία υπολογισμού συμμετρικών συνιστωσών	28
2.4 Υποστήριξη της τάσης του δικτύου μέσω παροχής αέργου ισχύος	29
3 ΣΥΣΤΗΜΑ ΣΥΓΧΡΟΝΙΣΜΟΥ ΜΕ ΤΟ ΔΙΚΤΥΟ	31
3.1 Διάταξη κλειδώματος φάσης στο σύγχρονα στρεφόμενο πλαίσιο αναφοράς (SRF-PLL) 31	
3.2 Διάταξη κλειδώματος φάσης με χρήση προσαρμοστικών φίλτρων δευτέρας τάξεως (DSOGI-PLL)	32
3.2.1 Υπολογισμός θετικής ακολουθίας στο $\alpha\beta$ πλαίσιο αναφοράς.....	32
3.2.2 Γεννήτρια παραγωγής κάθετων διανυσμάτων με χρήση προσαρμοστικού φίλτρου δευτέρας τάξεως (SOGI-QSG).....	33
3.2.3 Τελική δομή διάταξης DSOGI-PLL	34
3.3 Διάταξη κλειδώματος φάσης με χρήση δύο σύγχρονα στρεφόμενων πλαισίων αναφοράς (DSRF-PLL).....	35
3.3.1 Αναπαράσταση ασύμμετρου συστήματος τάσεων σε δύο σύγχρονα στρεφόμενα πλαίσια αναφοράς	35
3.3.2 Δίκτυο απόζευξης των δύο σύγχρονα στρεφόμενων πλαισίων αναφοράς (Decoupling Network)	37
3.3.3 Τελική δομή διάταξης DSRF-PLL.....	39

3.4 Σύγκριση των τριών διαφορετικών τύπων PLL	41
3.4.1 Μεταβολή της συχνότητας.....	41
3.4.2 Συμμετρικές βυθίσεις τάσεως.....	42
3.4.3 Ασύμμετρες βυθίσεις τάσεως	42
3.4.4 Αρμονική παραμόρφωση της τάσης	43
3.5 Επιλογή διάταξης PLL για συμμετοχή στο σύστημα ελέγχου της φωτοβολταϊκής εγκατάστασης.....	44
4 ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΕΣ ΕΛΕΓΧΟΥ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΕΑ.....	47
4.1 Έλεγχος ρευμάτων θετικής ακολουθίας αντιστροφή (PSCC).....	48
4.1.1 Γενική περιγραφή συστήματος ελέγχου	48
4.1.2 Έλεγχος ρευμάτων αντιστροφή.....	49
4.1.3 Έλεγχος ενεργού και αέργου ισχύος αντιστροφή	50
4.1.4 Έλεγχος σε συνθήκες σφάλματος του δικτύου	52
4.1.4.1 Έλεγχος άεργου συνιστώσας ρεύματος	52
4.1.4.2 Περιορισμός ενεργού ισχύος Φ/B μονάδας	53
4.1.4.3 Εφαρμογή φίλτρου σχισμής στην τάση του DC link της διάταξης.....	54
4.2 Ανεξάρτητος έλεγχος ρευμάτων τριών φάσεων αντιστροφή (IPCC)	55
4.2.1 Γενική περιγραφή συστήματος ελέγχου	56
4.2.2 Τροποποιημένο σύστημα συγχρονισμού με χρήση μονοφασικών PLL.....	56
4.2.3 Παραγωγή ρευμάτων αναφοράς	57
4.2.3.1 Περιορισμός ενεργών ρευμάτων αντιστροφή	58
4.2.3.2 Απόρριψη μηδενικής ακολουθίας από τα ρεύματα αναφοράς	59
4.2.3.3 Εφαρμογή δεύτερου περιορισμού ρευμάτων	60
4.2.4 Περιορισμός ενεργού ισχύος εισόδου.....	61
4.3 Έλεγχος ρευμάτων αντιστροφή σε δύο σύγχρονα στρεφόμενα πλαίσια αναφοράς (DDSRF-CC)	61
4.3.1 Γενική δομή συστήματος ελέγχου	62
4.3.2 Εντοπισμός τάσης αρνητικής ακολουθίας του δικτύου	63
4.3.2 Έλεγχος ρευμάτων αντιστροφή.....	64
4.3.3 Έλεγχος ισχύος αντιστροφή	67
4.3.3.1 Μέθοδος 1 ^η : Επιλογή αναφορών ρεύματος για μείωση της τάσης αρνητικής ακολουθίας του δικτύου	67
4.3.3.2 Μέθοδος 2 ^η : Επιλογή αναφορών ρεύματος για μείωση της κυμάτωσης της τάσης στο DC link	71

5 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΙΣ ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΩΝ ΕΛΕΓΧΟΥ	75
5.1 Εξεταζόμενη τοπολογία δικτύου	75
5.2 Μόνιμη κατάσταση λειτουργίας	75
5.3 Απόκριση σε σφάλματα του δικτύου	76
5.3.1 Απόκριση σε τριφασικό σφάλμα.....	77
5.3.1.1 Έλεγχος ρευμάτων θετικής ακολουθίας αντιστροφή (PSCC).....	77
5.3.1.2 Ανεξάρτητος έλεγχος ρευμάτων τριών φάσεων αντιστροφή (IPCC)	80
5.3.1.3 Έλεγχος ρευμάτων αντιστροφή σε δύο σύγχρονα στρεφόμενα πλαίσια αναφοράς (DDSRF-CC).....	83
5.3.1.3.1 Μέθοδος 1 ^η : Περιορισμός ενεργού ισχύος σύμφωνα με τους ισπανικούς κώδικες	84
5.3.1.3.2 Μέθοδος 2 ^η : Περιορισμός ενεργού ισχύος για τήρηση των θερμικών ορίων	85
5.3.2 Απόκριση σε μονοφασικό σφάλμα	86
5.3.2.1 Έλεγχος ρευμάτων θετικής ακολουθίας αντιστροφή (PSCC).....	86
5.3.2.2 Ανεξάρτητος έλεγχος ρευμάτων τριών φάσεων αντιστροφή (IPCC)	89
5.3.2.3 Έλεγχος ρευμάτων αντιστροφή σε δύο σύγχρονα στρεφόμενα πλαίσια αναφοράς (DDSRF-CC).....	93
5.3.2.3.1 Μέθοδος 1 ^η : Επιλογή αναφορών ρεύματος για μείωση της τάσης αρνητικής ακολουθίας του δικτύου	93
5.3.2.3.2 Μέθοδος 2 ^η : Επιλογή αναφορών ρεύματος για μείωση της κυμάτωσης της τάσης στο DC link	96
5.4 Συγκριτική μελέτη στρατηγικών ελέγχου.....	99
6 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ	103
6.1 Περιγραφή πειραματικής διάταξης	103
6.1.1 Φωτοβολταϊκή συστοιχία.....	103
6.1.2 Μετατροπέας ισχύος.....	104
6.1.3 Τριφασική ελεγχόμενη γεννήτρια.....	106
6.2 Πειραματική εφαρμογή εξεταζόμενων συστημάτων συγχρονισμού PLL.....	106
6.3 Πειραματική επιβεβαίωση ορθής λειτουργίας ελέγχου ρευμάτων θετικής ακολουθίας (PSCC)	107
6.3.1 Απόκριση σε συμμετρικό σφάλμα	108
6.3.2 Απόκριση σε ασύμμετρο σφάλμα.....	111

7 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	115
7.1 Ανασκόπηση της εργασίας.....	115
7.2 Στοιχεία συμβολής της εργασίας	117
7.3 Θέματα για περαιτέρω διερεύνηση.....	117
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ	119
Π.1 Μετασχηματισμοί Clarke και Park.....	119
Π.1.1 Μετασχηματισμός στο στατό πλαίσιο αναφοράς $\alpha\beta$ (Clarke)	119
Π.1.2 Μετασχηματισμός στο σύγχρονα στρεφόμενο πλαίσιο αναφοράς dq (Park)	120
Π.2 Παράμετροι μοντελοποιημένου συστήματος	122
Βιβλιογραφία	125

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Κώδικες δικτύου

Η αύξηση του ποσοστού συμμετοχής των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ΑΠΕ) στη συνολική παραγωγή του δικτύου σε συνδυασμό με την εξέλιξη της τεχνολογίας των ηλεκτρονικών μετατροπέων ισχύος, έχουν καταστήσει τον έλεγχο ορθής λειτουργίας τους σημαντικό πεδίο διερεύνησης. Για το σκοπό αυτό τα τελευταία χρόνια δημιουργήθηκαν Κώδικες Δικτύου οι οποίοι εξασφαλίζουν την ομαλή λειτουργία και την ευστάθεια του δικτύου, λαμβάνοντας υπόψη ότι οι εν λόγω μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής μπορούν να παίξουν καθοριστικό ρόλο στον έλεγχο και τη ρύθμισή του.

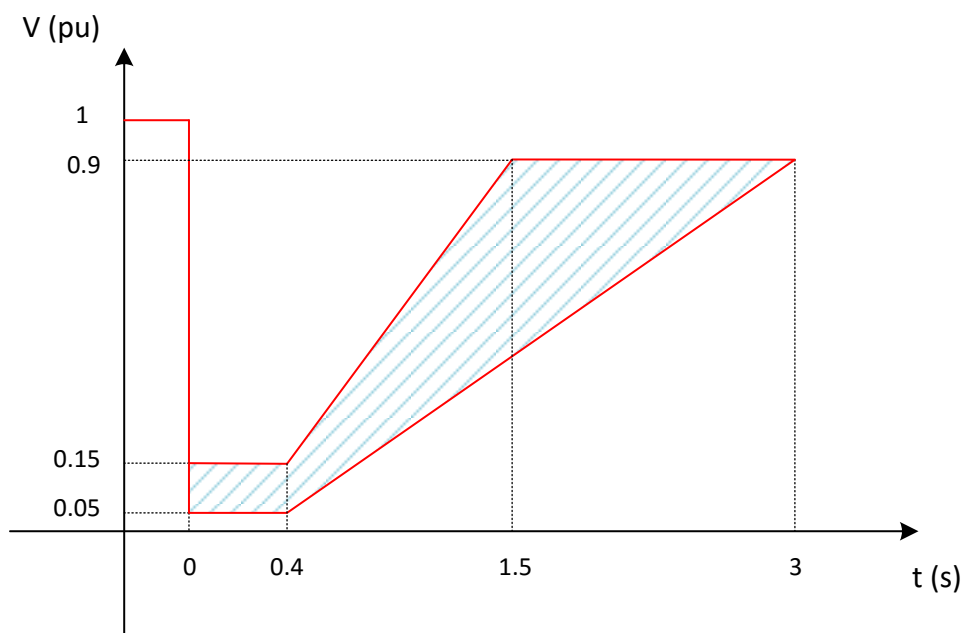
Πιο συγκεκριμένα, σε ένα δίκτυο στο οποίο παρατηρείται μεγάλη διείσδυση σταθμών παραγωγής ΑΠΕ είναι απαραίτητο οι σταθμοί αυτοί να τηρούν ορισμένες τεχνικές προδιαγραφές παρόμοιες με αυτές των συμβατικών μονάδων παραγωγής, προς ρύθμιση της τάσης, της συχνότητας και, εν γένει, της δυναμικής συμπεριφοράς του δικτύου [1]. Το πιο πρόσφατο θεσμικό πλαίσιο με το οποίο πρέπει να συμμορφώνονται οι παραγωγοί των ευρωπαϊκών δικτύων δημιουργήθηκε από τον ENTSO-E (European Network of Transmission System Operators for Electricity) το 2012 [2].

Ένα σημαντικό μέρος των συγκεκριμένων κανονισμών αναφέρεται στην ανάγκη συμμετοχής των σταθμών παραγωγής μεγάλης ισχύος στη ρύθμιση της τάσης καθώς και στην υποστήριξη του δικτύου σε περίπτωση σφαλμάτων. Και στις δύο περιπτώσεις ο διαχειριστής του δικτύου διατηρεί το δικαίωμα να απαιτήσει έγχυση αέργου ισχύος στο σημείο κοινής σύνδεσης (ΣΚΣ) της μονάδας παραγωγής με το δίκτυο, που συνήθως βρίσκεται στην πλευρά υψηλής τάσης του μετασχηματιστή ανύψωσης του σταθμού. Στην παρούσα εργασία θα μας απασχολήσει το κομμάτι των κωδίκων που αναφέρεται σε ενεργειακά πάρκα τύπου Β, για τα οποία το ΣΚΣ βρίσκεται σε επίπεδο τάσης μικρότερο των 110kV και η εγκατεστημένη ισχύς τους ορίζεται έως 1MW.

Η έννοια της ρύθμισης της τάσης αφορά τις κανονικές συνθήκες λειτουργίας του δικτύου, όπου ο αρμόδιος διαχειριστής μπορεί να απαιτήσει από ορισμένους παραγωγούς κατάλληλο έλεγχο προς αντιμετώπιση των αργών μεταβολών της τάσης που παρατηρούνται στο δίκτυο διανομής. Στην περίπτωση αυτή οι σταθμοί παραγωγής συμμετέχουν στη διόρθωση της τάσης παρέχοντας μικρές ποσότητες αέργου ισχύος προς το δίκτυο, στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας τους.

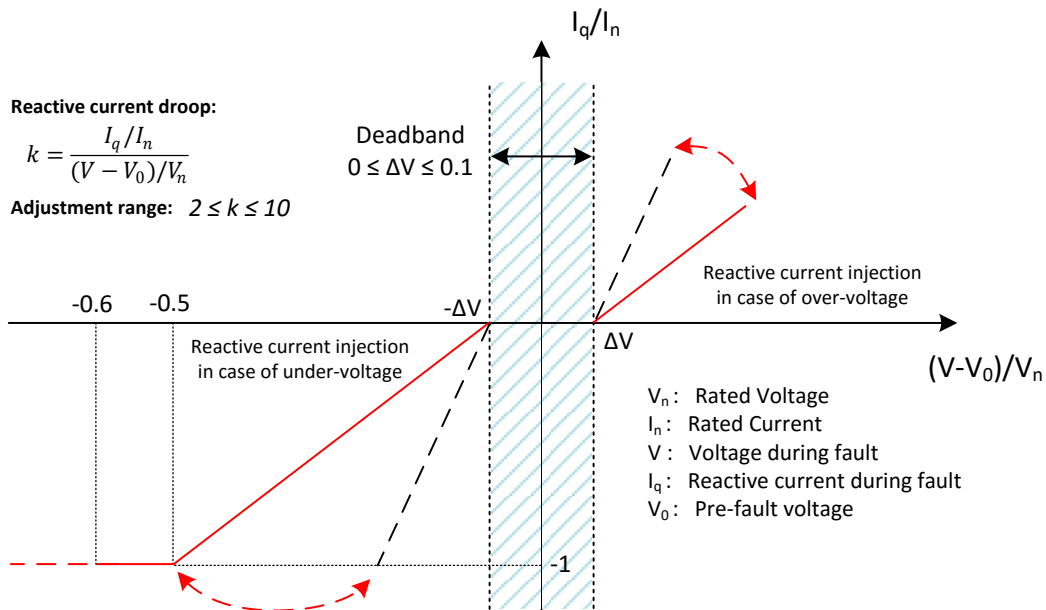
Όσον αφορά την υποστήριξη του δικτύου σε περίπτωση σφαλμάτων, η οποία συχνά αναφέρεται ως Low Voltage Ride-Through (LVRT), βασικός στόχος των κανονισμών είναι η αποφυγή της μαζικής άμεσης αποσύνδεσης των σταθμών ΑΠΕ, καθώς σε αυτήν την περίπτωση και ειδικότερα αν το ποσοστό της παραγωγής που προέρχεται από τους συγκεκριμένους σταθμούς είναι μεγάλο, θα μπορούσε να προκληθεί ακόμα και κατάρρευση του δικτύου. Για το λόγο αυτό ο αρμόδιος διαχειριστής θα πρέπει να παρέχει μια καμπύλη τάσης-χρόνου από την οποία θα προκύπτουν οι συνθήκες για τις οποίες οι σταθμοί οφείλουν να παραμένουν συνδεδεμένοι στο δίκτυο, συνεχίζοντας ομαλά τη λειτουργία τους μετά την παρέλευση της διαταραχής. Το προφίλ της συγκεκριμένης καμπύλης φαίνεται στο σχήμα 1.1-1. Από το συγκεκριμένο σχήμα ορίζεται το κατώτερο όριο

της μικρότερης πολικής τάσης στο ΣΚΣ για το οποίο η μονάδα παραγωγής πρέπει να παραμείνει συνδεδεμένη σε αυτό πριν, κατά τη διάρκεια και μετά το σφάλμα. Το κατώτερο όριο μπορεί να οριστεί από οποιαδήποτε καμπύλη εντός της γραμμοσκιασμένης περιοχής. Σε περίπτωση που η τάση στο ΣΚΣ πέσει πιο κάτω από αυτήν την καμπύλη τότε ο παραγωγός δεν υποχρεούται να παραμείνει συνδεδεμένος στο δίκτυο.



Σχήμα 1.1-1: Προφίλ υποστήριξης του δικτύου κατά τη διάρκεια σφαλμάτων για μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής και ενεργειακά πάρκα. Παρέχεται η καμπύλη τάσης-χρόνου από την οποία προκύπτουν τα όρια παραμονής των μονάδων στο δίκτυο σε περίπτωση βύθισης τάσης.

Εκτός από τις απαιτήσεις που αναφέρθηκαν παραπάνω, στους συγκεκριμένους κώδικες γίνεται αναφορά στην ανάγκη για επιπλέον υποστήριξη του δικτύου σε περίπτωση συμμετρικών σφαλμάτων. Πιο συγκεκριμένα, ο αρμόδιος διαχειριστής του δικτύου μπορεί να απαιτήσει την άμεση έγχυση άεργων ρευμάτων στην πλευρά χαμηλής τάσης του μετασχηματιστή ανύψωσης, σε περίπτωση που η απόκλιση της τάσης στην έξοδο του αντιστροφέα της μονάδας κατά τη διάρκεια ενός συμμετρικού σφάλματος ξεπεράσει ένα συγκεκριμένο κατώφλι. Το κατώφλι αυτό μπορεί να πάρει οποιαδήποτε τιμή μεταξύ 0-10% της ονομαστικής τιμής της τάσης στο συγκεκριμένο σημείο και επιλέγεται από τον αρμόδιο διαχειριστή. Μόλις το όριο αυτό ξεπεραστεί, απαιτείται η έγχυση άεργου ρεύματος τουλάχιστον 2% του ονομαστικού για κάθε μεταβολή 1% της τάσης στην έξοδο του αντιστροφέα, όπως φαίνεται και στο σχήμα 1.1-2. Η μονάδα παραγωγής πρέπει να είναι ικανή να εγχέει τα άεργα ρεύματα σε χρονικό διάστημα μικρότερο των 40ms μετά την εμφάνιση του σφάλματος, που αποτελεί και το μέγιστο χρόνο απόκρισης του ελέγχου που θα εφαρμοστεί.



Σχήμα 1.1-2: Πλάνο υποστήριξης της τάσης του δικτύου μέσω έγχυσης άεργων ρευμάτων στο ΣΚΣ κατά τη διάρκεια σφαλμάτων.

Από το παραπάνω σχήμα γίνεται εμφανές ότι σε μεγάλα σφάλματα είναι δυνατόν να απαιτηθεί άεργο ρεύμα ίσο με το 100% του ονομαστικού ή και μεγαλύτερο, αν αυτό είναι τεχνικώς εφικτό. Όπως γίνεται αντιληπτό, η έγχυση άεργων ρευμάτων μπορεί να προκαλέσει αντίστοιχη μείωση της παροχής ενεργού ισχύος προς το δίκτυο, λόγω μείωσης της ενεργού συνιστώσας ρεύματος, έτσι ώστε να τηρούνται τα θερμικά όρια του αντιστροφέα κάθε μονάδας. Μετά το πέρας του σφάλματος ο διαχειριστής του δικτύου είναι υπεύθυνος να καθορίσει το μέγιστο επιτρεπτό χρονικό διάστημα το οποίο θα μεσολαβήσει από τη χρονική στιγμή που η τάση στα άκρα του αντιστροφέα θα επανέλθει στο 85% της ονομαστικής της τιμής μέχρι η ενεργός ισχύς να φτάσει στο 90% του επιπέδου της ισχύος προ σφάλματος. Το συγκεκριμένο χρονικό διάστημα, σύμφωνα με τους κώδικες, μπορεί να πάρει οποιαδήποτε τιμή μεταξύ του εύρους 0.5 και 10s.

Όσον αφορά τα ασύμμετρα σφάλματα, τα οποία αποτελούν το μεγαλύτερο ποσοστό σφαλμάτων στο δίκτυο, οι ευρωπαϊκοί κώδικες που αναφέρθηκαν παραπάνω δεν είναι το ίδιο κατατοπιστικοί. Πιο συγκεκριμένα, παρουσιάζεται η ανάγκη υποστήριξης του δικτύου μέσω έγχυσης άεργων ρευμάτων, όπως ακριβώς και στην περίπτωση των συμμετρικών σφαλμάτων, χωρίς ωστόσο να αναφέρεται κάποια συγκεκριμένη στρατηγική. Παρ' όλα αυτά γίνεται αναφορά ότι ο αρμόδιος διαχειριστής του δικτύου διατηρεί το δικαίωμα να απαιτήσει έγχυση ασύμμετρων ρευμάτων προς το δίκτυο κατά τη διάρκεια ενός ασύμμετρου σφάλματος.

Βασιζόμενοι στους ευρωπαϊκούς κώδικες δικτύου, οι διαχειριστές του δικτύου κάθε χώρας επιβάλλουν τελικά ένα αντίστοιχο σύνολο τεχνικών απαιτήσεων οι οποίες πρέπει να τηρούνται από τις μονάδες παραγωγής που συνδέονται σε αυτό. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελούν οι γερμανικοί κώδικες δικτύου για το δίκτυο της μέσης τάσης [3], [4], οι οποίοι μάλιστα διακρίνονται για την αυστηρότητά τους. Ωστόσο και στους συγκεκριμένους κώδικες η αναφορά για τα ασύμμετρα σφάλματα περιορίζεται σε μία πολύ συγκεκριμένη απαίτηση, σύμφωνα με την οποία πρέπει τα άεργα ρεύματα που εγχέονται

για την υποστήριξη του δικτύου να μην προκαλούν ανύψωση της τάσης στο ΣΚΣ μεγαλύτερη από το 10% της ονομαστικής τιμής, στις φάσεις που δεν παρουσιάζουν σφάλμα.

Τέλος, ορισμένοι κώδικες, όπως είναι για παράδειγμα οι ισπανικοί (REE) [5], [6], απαιτούν συγκεκριμένο πλάνο και για τη ρύθμιση των ενεργών ρευμάτων κατά τη διάρκεια βυθίσεων τάσης, παράλληλα με την παροχή άεργων ρευμάτων που είδαμε παραπάνω, απ' όπου προκύπτει περιορισμός της ενεργού ισχύος για τις συγκεκριμένες συνθήκες. Η συγκεκριμένη τακτική μπορεί να έχει νόημα για την εξασφάλιση περιθωρίου, όσον αφορά τα θερμικά όρια του αντιστροφέα, όπως θα δούμε και στη συνέχεια.

1.2 Αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας

Ένα σημαντικό κομμάτι της σύγχρονης βιβλιογραφίας έχει ασχοληθεί με την ανάπτυξη κατάλληλων στρατηγικών ελέγχου στους αντιστροφείς των σταθμών ΑΠΕ, προκειμένου να εξασφαλιστεί η αδιάλειπτη λειτουργία του συστήματος και η υποστήριξη του δικτύου σε συνθήκες σφάλματος, σύμφωνα με τους κώδικες που παρουσιάστηκαν παραπάνω. Στην παρούσα διπλωματική εργασία θα ασχοληθούμε μόνο με την υποστήριξη σε σοβαρά σφάλματα, ενώ δε θα μας απασχολήσει η ρύθμιση της τάσης για μικρές μεταβολές που συμβαίνουν σε κανονικές συνθήκες λειτουργίας, καθώς και η συμμετοχή στη ρύθμιση της συχνότητας.

Μία σημαντική πρόκληση που προκύπτει έχει να κάνει με τα ασύμμετρα σφάλματα, για τα οποία η ελλιπής αναφορά των σύγχρονων κωδίκων δικτύου καθιστά σαφές ότι ο έλεγχος των μονάδων παραγωγής προς υποστήριξη τέτοιων σφαλμάτων είναι ακόμα υπό διερεύνηση. Το γεγονός αυτό αναδεικνύει τη σπουδαιότητα της μελέτης των συγκεκριμένων σφαλμάτων, ειδικά αν αναλογιστούμε ότι εμφανίζονται πολύ πιο συχνά σε σχέση με τα συμμετρικά σφάλματα. Ωστόσο, τα τελευταία εξακολουθούν να αποτελούν τον πιο σοβαρό τύπο σφαλμάτων, εξαιτίας των μεγάλων ποσοτήτων άεργου ισχύος που απαιτούνται για την αντιμετώπισή τους και προϋποθέτουν την ύπαρξη ελεγκτών οι οποίοι θα αποκρίνονται με αποδοτικό και άμεσο τρόπο.

Στόχος της συγκεκριμένης εργασίας είναι η διερεύνηση στρατηγικών ελέγχου ενός αντιστροφέα φωτοβολταϊκών συστημάτων, οι οποίες θα εξασφαλίζουν την ομαλή λειτουργία του συστήματος σε κανονικές συνθήκες λειτουργίας του δικτύου, ενώ παράλληλα θα έχουν καθολική εφαρμογή για υποστήριξη σε όλους τους τύπους σφαλμάτων, σύμφωνα με τους υπάρχοντες κανονισμούς. Προς αυτήν τη κατεύθυνση θα παρουσιαστούν τέσσερις ξεχωριστές στρατηγικές, οι οποίες παρέχουν υποστήριξη του δικτύου σε συμμετρικές βυθίσεις τάσης, ενώ πληρούν διαφορετικά κριτήρια στην περίπτωση υποστήριξης των ασύμμετρων σφαλμάτων. Η σύγκρισή τους θα πραγματοποιηθεί μέσω κατάλληλης προσομοίωσης, για μία κοινή τοπολογία δικτύου, στην οποία μία Φ/Β μονάδα ισχύος 100kW συνδέεται στο επίπεδο της Μέσης Τάσης, με χρήση μετασχηματιστή ανύψωσης. Η καταλληλότερη στρατηγική θα εφαρμοστεί πρακτικά σε μία πειραματική διάταξη μικρής ισχύος, προκειμένου να επαληθευτεί η ορθή λειτουργία της.

1.3 Δομή της διπλωματικής εργασίας

Η παρούσα εργασία αποτελείται συνολικά από επτά κεφάλαια. Στο πρώτο έγινε μία παρουσίαση των σύγχρονων κωδίκων δικτύου για ενεργειακά πάρκα μεγάλης ισχύος, η οποία επικεντρώθηκε στην υποστήριξη των σφαλμάτων, ενώ παρουσιάστηκαν και τα κίνητρα εκπόνησης της εργασίας.

Στο δεύτερο κεφάλαιο παρουσιάζεται αναλυτικά η εξεταζόμενη διάταξη από το σημείο της παραγωγής μέχρι την πλευρά του δικτύου, ενώ εμπεριέχονται και ορισμένα στοιχεία θεωρίας τα οποία είναι απαραίτητα για την κατανόηση της υποστήριξης του δικτύου σε σφάλματα.

Στο τρίτο κεφάλαιο εξετάζονται τρεις διαφορετικές τοπολογίες συστήματος συγχρονισμού PLL, το οποίο αποτελεί βασικό κομμάτι για την υλοποίηση των ελέγχων και καταλήγουμε μέσω προσομοιώσεων στο πιο αποδοτικό, το οποίο θα εφαρμοστεί επί της ουσίας σε όλες τις επόμενες στρατηγικές.

Στο τέταρτο κεφάλαιο γίνεται μία παρουσίαση των εξεταζόμενων στρατηγικών ελέγχου του αντιστροφέα, όπου εξηγούνται τα κριτήρια υλοποίησής τους και περιγράφεται αναλυτικά η διαδικασία εφαρμογής τους.

Στο πέμπτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων που έγιναν για τις παραπάνω στρατηγικές και επιχειρείται να γίνει μία σύγκριση μεταξύ τους, κυρίως στην περίπτωση των ασύμμετρων σφαλμάτων, όπου παρουσιάζουν ουσιαστικές διαφορές.

Στο έκτο κεφάλαιο δίνονται τα πειραματικά αποτελέσματα από την εφαρμογή των τριών τύπων PLL και της επιλεγείσας στρατηγικής ελέγχου σε διάταξη μικρής ισχύος του εργαστηρίου Ηλεκτρικών Μηχανών και Ηλεκτρονικών Ισχύος.

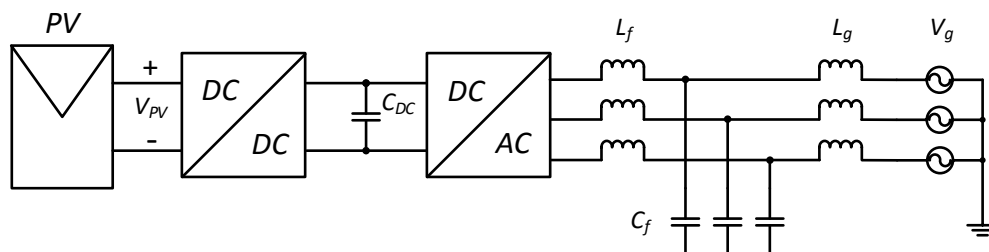
Στο έβδομο κεφάλαιο αναφέρονται ορισμένα βασικά συμπεράσματα από την εκπόνηση της εργασίας και παρουσιάζονται τα στοιχεία πρωτοτυπίας της, καθώς και θέματα για περαιτέρω διερεύνηση.

Τέλος, τα παραρτήματα εμπεριέχουν στοιχεία γενικότερης θεωρίας, καθώς και τις τιμές των παραμέτρων που χρησιμοποιήθηκαν κατά τη μοντελοποίηση της εξεταζόμενης διάταξης και του συνολικού συστήματος ελέγχου.

2 ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΘΕΩΡΙΑΣ

2.1 Μοντελοποίηση συστήματος

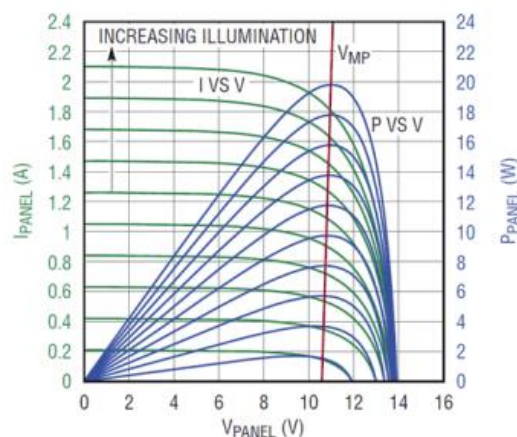
Η τοπολογία της Φ/Β εγκατάστασης ισχύος 100kW με την οποία θα ασχοληθούμε στην παρούσα εργασία φαίνεται στο σχήμα 2.1-1. Παρατηρώντας από την πλευρά του Φ/Β προς το δίκτυο διακρίνουμε την ύπαρξη ενός DC/DC μετατροπέα ισχύος ο οποίος είναι υπεύθυνος για την ανύψωση ή τον υποβιβασμό της τάσης των Φ/Β πλαισίων, ενός αντιστροφέα που είναι υπεύθυνος για τον μετασχηματισμό των τάσεων και τον έλεγχο ισχύος του συστήματος και τέλος ενός LC φίλτρου το οποίο περιορίζει τις αρμονικές που προκύπτουν από τα διακοπτικά στοιχεία του αντιστροφέα. Να σημειωθεί ότι για τις ανάγκες της θεωρητικής ανάλυσης που θα πραγματοποιηθεί, το δίκτυο μπορεί να αναπαρασταθεί με ένα ισοδύναμο κύκλωμα κατά Thevenin, στο οποίο η πηγή τάσης αναπαριστά την τάση του δικτύου, ενώ η ισοδύναμη αντίσταση του δικτύου μπορεί να αναπαρασταθεί με μία αυτεπαγωγή, λόγω της έντονης επαγωγικής συμπεριφοράς του στην πλευρά της Μέσης Τάσης την οποία θα εξετάσουμε.



Σχήμα 2.1-1: Εξεταζόμενη τοπολογία Φ/Β εγκατάστασης.

2.1.1 Φωτοβολταϊκή γεννήτρια

Η Φ/Β εγκατάσταση στο συγκεκριμένο σύστημα λειτουργεί ως πηγή παροχής ενεργού ισχύος προς το δίκτυο, της οποίας η απόδοση εξαρτάται από την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας και την ενεργό επιφάνεια των πλαισίων. Πιο συγκεκριμένα όλα τα Φ/Β πλαίσια παρουσιάζουν ορισμένες τεχνικές προδιαγραφές οι οποίες περιγράφονται από τις χαρακτηριστικές τάσης-ρεύματος και τάσης-ισχύος εξόδου, όπως αυτές που φαίνονται στο σχήμα 2.1-2. Στο συγκεκριμένο σχήμα μπορούμε να παρατηρήσουμε την έντονη εξάρτηση των συγκεκριμένων χαρακτηριστικών από τις μεταβολές της ακτινοβολίας του ήλιου, την οποία αναφέραμε προηγουμένως, ενώ η τάση εξόδου των Φ/Β πλαισίων φαίνεται να παραμένει σχετικά σταθερή. Αυτός είναι ο λόγος για τον οποίο η Φ/Β εγκατάσταση για τις ανάγκες προσομοιώσεων μπορεί να αναπαρασταθεί από μία ανεξάρτητη πηγή ρεύματος υπό σταθερή τάση, της οποίας η τιμή μεταβάλλεται ανάλογα με την παροχή ενεργού ισχύος προς το δίκτυο. Η συγκεκριμένη τακτική θα ακολουθηθεί και στις προσομοιώσεις της συγκεκριμένης εργασίας για απλοποίηση του συστήματος.



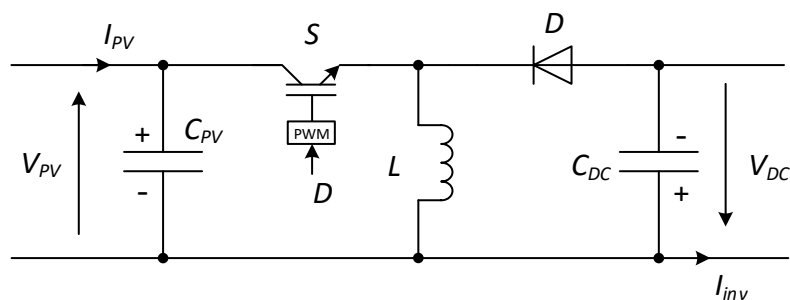
Σχήμα 2.1-2: Χαρακτηριστικές τάσης-ρεύματος και τάσης-ισχύος εξόδου Φ/Β πλαισίων συναρτήσεως ηλιακής ακτινοβολίας [7].

2.1.2 DC/DC μετατροπέας ισχύος

Κατά τη σύνδεση μίας Φ/Β εγκατάστασης στο δίκτυο είναι απαραίτητη η ύπαρξη ενός DC/DC μετατροπέα ισχύος ο οποίος ευθύνεται κυρίως για τον καθορισμό μιας σταθερής DC τάσης στην είσοδο του αντιστροφέα, ενώ παράλληλα πραγματοποιεί και τον έλεγχο της μέγιστης απολαβής ισχύος από τα Φ/Β (Maximum Power Point Tracking), επιτηρώντας την τάση στην έξοδο τους. Το πρώτο σκέλος πραγματοποιείται με την εφαρμογή του κατάλληλου τύπου μετατροπέα. Αυτό σημαίνει πως αν η τάση στην έξοδο των Φ/Β είναι μικρότερη από αυτή που είναι απαραίτητη για να λειτουργήσει ο αντιστροφέας τότε απαιτείται η ύπαρξη ενός μετατροπέα ο οποίος θα προκαλεί αύξηση τις συγκεκριμένης τάσης (boost converter). Αντίστοιχα, αν η τάση των Φ/Β είναι μεγαλύτερη από την επιθυμητή, τότε χρησιμοποιείται ένας μετατροπέας υποβιβασμού (buck converter). Στην πράξη τις περισσότερες φορές χρησιμοποιούνται μετατροπείς οι οποίοι έχουν δυνατότητα τόσο αύξησης όσο και υποβιβασμού της τάσης των Φ/Β (buck-boost converter), έτσι ώστε να καλύπτεται όλο το φάσμα της λειτουργίας τους. Ο συγκεκριμένος τύπος μετατροπέα, για τη λειτουργία του οποίου είναι απαραίτητη η ύπαρξη ενός διακοπτικού στοιχείου, φαίνεται στο σχήμα 2.1-3 και χαρακτηρίζεται από την επόμενη σχέση:

$$\frac{V_{dc}}{V_{pv}} = \frac{D}{1-D} \quad (2.1)$$

Όπου ο παράγοντας D υποδηλώνει το duty cycle του διακοπτικού στοιχείου του μετατροπέα και παίρνει τιμές από 0 έως 1.



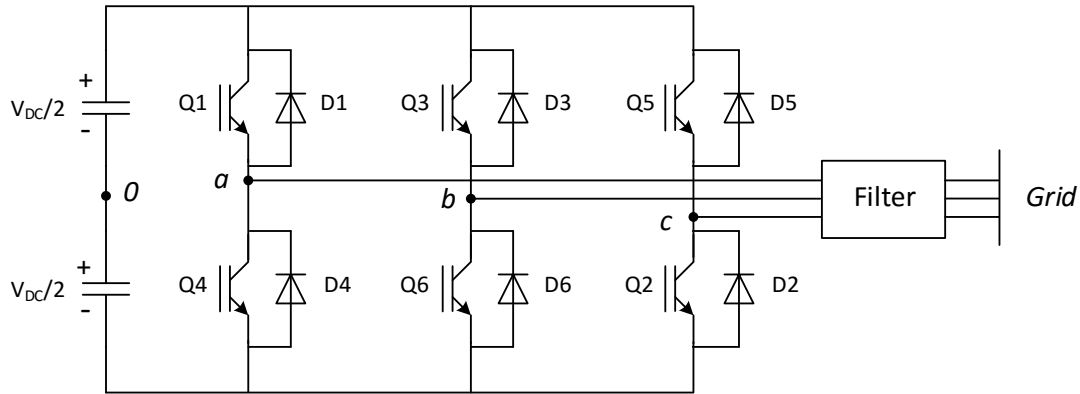
Σχήμα 2.1-3: Ηλεκτρικό κύκλωμα μετατροπέα αύξησης-υποβιβασμού τάσης (buck-boost converter).

Περνώντας στο δεύτερο σκέλος της λειτουργίας του συγκεκριμένου μετατροπέα, ο καθορισμός του σημείου λειτουργίας της μέγιστης απολαβής ισχύος (MPP) επιτυγχάνεται καθορίζοντας επί της ουσίας την τάση στην είσοδό του, η οποία ισοδυναμεί με αυτή στην έξοδο των Φ/Β πλαισίων V_{pv} . Η συγκεκριμένη λειτουργία είναι μέρος μίας ευρύτερης στρατηγικής ελέγχου, η οποία εντοπίζει την τάση για την οποία μεγιστοποιείται η ισχύς των Φ/Β για συγκεκριμένες συνθήκες και δεδομένου της σταθερής τάσης στην έξοδο του μετατροπέα V_{dc} , επηρεάζει το duty cycle του διακοπτικού στοιχείου D , για να επιτευχθεί η παραπάνω τιμή, με βάση τη σχέση (2.1). Ο λόγος για τον οποίο επιλέγεται ο καθορισμός της τάσης των Φ/Β πλαισίων για την επίτευξη της μέγιστης ισχύος έχει να κάνει με τη σχετική σταθερότητα της συγκεκριμένης μεταβλητής σε διαφορετικές συνθήκες, σε σχέση με το ρεύμα εξόδου το οποίο μεταβάλλεται πολύ πιο έντονα, όπως είδαμε και στο σχήμα 2.1-2 στην προηγούμενη ενότητα. Σε κάθε περίπτωση η λειτουργία του παραπάνω μετατροπέα δε θα μας απασχολήσει στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, καθώς η αναπαράστασή του θα περιοριστεί στις μεταβολές της πηγής ρεύματος της Φ/Β εγκατάστασης που αναφέραμε προηγουμένως, κυρίως σε περιπτώσεις περιορισμού της ενεργού ισχύος.

2.1.3 Τριφασικός αντιστροφέας πηγής τάσης δύο επιπέδων

Η τοπολογία του αντιστροφέα ο οποίος θα χρησιμοποιηθεί στη συγκεκριμένη περίπτωση για τη διασύνδεση της Φ/Β εγκατάστασης με το δίκτυο δίνεται στο σχήμα 2.1-4. Πρόκειται για έναν τριφασικό αντιστροφέα δύο επιπέδων τύπου πηγής τάσης ο οποίος αποτελείται από έξι διακοπτικά στοιχεία με αντιπαράλληλες διόδους, προκειμένου να επιτυγχάνεται αμφίπλευρη ροή ισχύος. Με κατάλληλη παλμοδότηση των παραπάνω διακοπών, ο συγκεκριμένος μετατροπέας ευθύνεται για την εναλλαγή της τάσης από συνεχή σε εναλλασσόμενη μορφή, τέτοια ώστε η θεμελιώδης αρμονική συνιστώσα στην έξοδό του να έχει συχνότητα ίδια με αυτή του δικτύου. Παράλληλα, στο συγκεκριμένο μετατροπέα επιτελείται ο έλεγχος της ενεργού και αέργου ισχύος που εγχέεται προς το δίκτυο, ρυθμίζοντας κατάλληλα το πλάτος και τη φάση της φασικής τάσης στα άκρα του, όπως θα δούμε και στη συνέχεια. Η συγκεκριμένη λειτουργία αποτελεί το βασικό αντικείμενο της παρούσας εργασίας, όπου θα γίνει διερεύνηση διαφορετικών στρατηγικών ελέγχου κατά τη διάρκεια σφαλμάτων.

Η τεχνική διαμόρφωσης που θα χρησιμοποιηθεί για τον ορισμό του εύρους των παλμών οδήγησης των διακοπτικών στοιχείων είναι η ευρύτατα διαδεδομένη SPWM (Sinusoidal Pulse Width Modulation), στην οποία οι αναφορές των τριών τάσεων εξόδου του αντιστροφέα συγκρίνονται με ένα τρίγωνο αναφοράς υψηλής συχνότητας (διακοπτική συχνότητα) και το αποτέλεσμα της σύγκρισης χρησιμοποιείται για τον ορισμό των παλμών, παράγοντας τελικά την επιθυμητή παλμική τάση στην έξοδο.

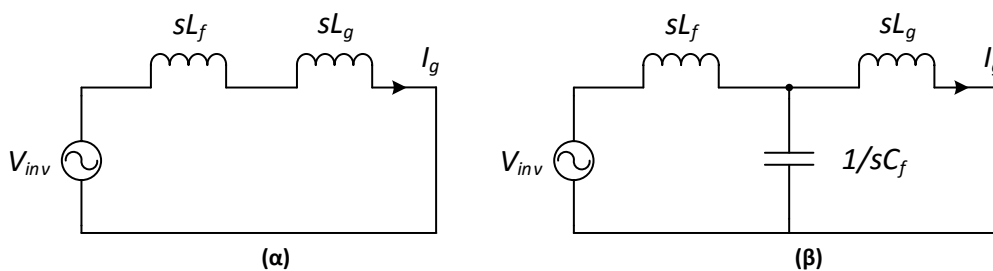


Σχήμα 2.1-4: Τριφασικός αντιστροφέας πηγής τάσης δύο επιπέδων.

2.1.4 Φίλτρο εξόδου LC

Στην έξοδο του αντιστροφέα είναι απαραίτητη η χρήση ενός φίλτρου το οποίο θα καταστέλλει τις αρμονικές που εισάγονται στο ρεύμα εξόδου εξαιτίας της παλμικής μορφής της αντίστοιχης τάσης. Σε διατάξεις της τάξεως των δεκάδων kW και άνω, η χρήση φίλτρου L για την απόρριψη των συγκεκριμένων αρμονικών δεν θεωρείται ιδανική λύση, λόγω της μεγάλης τιμής αυτεπαγωγών που απαιτείται και επομένως λόγω κόστους. Σε αυτές τις περιπτώσεις προτιμάται η χρήση LC φίλτρων τα οποία πετυχαίνουν αποδοτικότερη μείωση των αρμονικών με μειωμένες τιμές αυτεπαγωγών και πυκνωτών [8]. Ο τρόπος σύνδεσης του συγκεκριμένου φίλτρου στην έξοδο του αντιστροφέα παρουσιάστηκε αναλυτικά στο σχήμα 2.1-1.

Η αποδοτικότητα του συγκεκριμένου φίλτρου μπορεί να εξηγηθεί συγκρίνοντάς το με το απλό φίλτρο L , υπολογίζοντας για μεγάλες συχνότητες το ρεύμα στην έξοδο τους σε σχέση με την τάση στα άκρα του αντιστροφέα, σύμφωνα με το σχήμα 2.1-5. Στο συγκεκριμένο σχήμα έχουμε βραχυκυκλώσει την πηγή τάσης του δικτύου θεωρώντας ότι δεν παράγει αρμονικές, επομένως τα ρεύματα για τις δύο περιπτώσεις υπολογίζονται με βάση τις σχέσεις (2.2).



Σχήμα 2.1-5: Απλοποιημένο ισοδύναμο κύκλωμα αντιστροφέα δικτύου με χρήση (α) L φίλτρου και (β) LC φίλτρου.

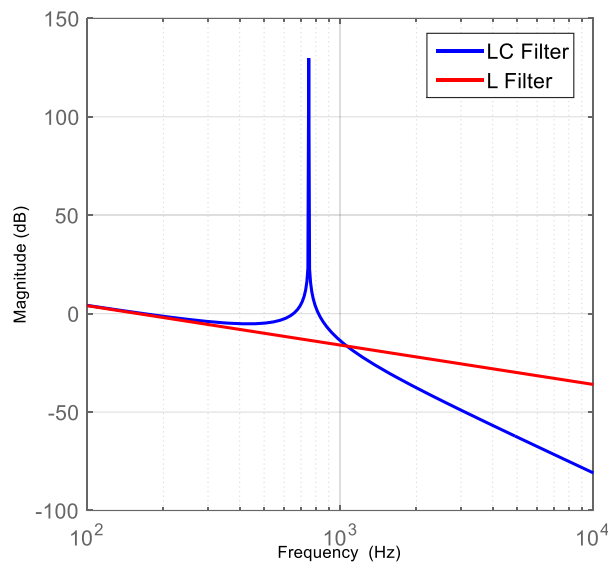
$$L \text{ φίλτρο: } \frac{I_g}{V_{inv}} = \frac{1}{s(L_f + L_g)} \quad (2.2)$$

$$LC \text{ φίλτρο: } \frac{I_g}{V_{inv}} = \frac{1}{s(L_f + L_g) + s^3 L_f L_g C_f}$$

Από τις παραπάνω σχέσεις μπορούμε να εξαγάγουμε τα διαγράμματα Bode των δύο φίλτρων, χρησιμοποιώντας τις ίδιες τιμές αυτεπαγωγής, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.1-6.

Παρατηρούμε ότι το LC φίλτρο παρουσιάζει συντονισμό για μία συγκεκριμένη συχνότητα και στη συνέχεια απορρίπτει τις αρμονικές της τάσεως του αντιστροφέα πολύ πιο έντονα σε σχέση με το απλό L φίλτρο. Το γεγονός αυτό καθιστά το συγκεκριμένο φίλτρο ιδανικό για εφαρμογές μεγάλης ισχύος, όπου συνήθως υπάρχει η ανάγκη απόρριψης αρμονικών σε χαμηλότερες συχνότητες, λόγω μειωμένης διακοπτικής συχνότητας του αντιστροφέα. Ωστόσο, πρέπει να φροντίσουμε ώστε η συχνότητα συντονισμού, η οποία υπολογίζεται στη σχέση (2.3), να παραμένει εντός ενός εύρους συχνοτήτων από το δεκαπλάσιο της συχνότητας του δικτύου έως το μισό της διακοπτικής συχνότητας [9]. Με αυτόν τον τρόπο αποφεύγουμε προβλήματα ευστάθειας του συστήματος και εξασφαλίζουμε την ορθή λειτουργία του.

$$\omega_{res} = \sqrt{\frac{L_f + L_g}{L_f L_g C_f}} \quad (2.3)$$



Σχήμα 2.1-6: Διαγράμματα Bode των συναρτήσεων μεταφοράς του ρεύματος εξόδου ως προς την τάση του αντιστροφέα για την περίπτωση του L και του LC φίλτρου.

Για τον υπολογισμό της αυτεπαγωγής L_f του φίλτρου, βασική προϋπόθεση αποτελεί η συγκεκριμένη τιμή να μην ξεπερνά το 10% της βασικής τιμής της αυτεπαγωγής του δικτύου, έτσι ώστε να περιορίσουμε την πτώση τάσης στα άκρα της και παράλληλα να βελτιώσουμε τη δυναμική απόκριση του συστήματος [10]. Αντίστοιχα, η τιμή της χωρητικότητας του φίλτρου C_f δεν πρέπει να ξεπερνά περίπου το 5% της αντίστοιχης βασικής τιμής, έτσι ώστε να μη μειώνεται σημαντικά ο συντελεστής ισχύος της διάταξης στις ονομαστικές συνθήκες [9]. Οι βασικές τιμές των αντιστάσεων του δικτύου υπολογίζονται σύμφωνα με τις επόμενες σχέσεις, δεδομένου ότι η βασική τιμή της τάσης στην πλευρά του φίλτρου είναι 400V, ενώ ως βάση ισχύος επιλέγεται η ονομαστική του αντιστροφέα, δηλαδή 100kW.

$$Z_b = \frac{V_b^2}{S_b} = 1.6\Omega \quad (2.4)$$

$$L_b = \frac{Z_b}{\omega} = 5.093mH \quad (2.5)$$

$$C_b = \frac{1}{\omega Z_b} = 1.989mF \quad (2.6)$$

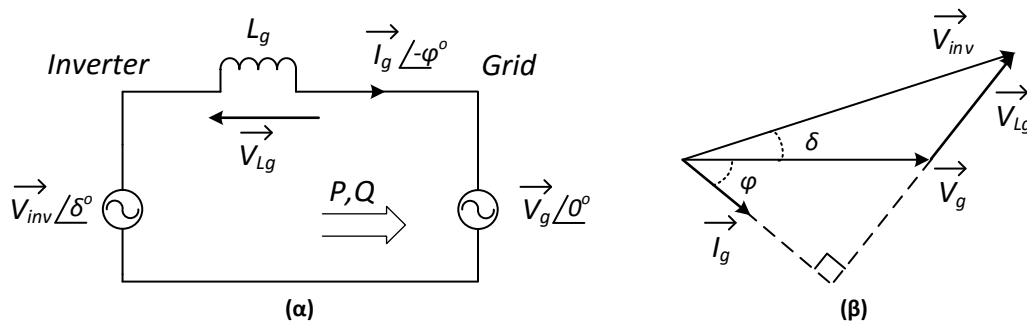
Έχοντας δεδομένα τα παραπάνω και φροντίζοντας παράλληλα η συχνότητα συντονισμού να τηρεί τα επιθυμητά όρια, καταλήγουμε στις τελικές τιμές των στοιχείων L_f και C_f του φίλτρου. Επίσης, για να εξασφαλιστεί η ευστάθεια του συστήματος λόγω συντονισμού είναι απαραίτητη και η σύνδεση μίας αντίστασης R_d σε σειρά με τον πυκνωτή του φίλτρου, προκειμένου να επιτευχθεί απόσβεση των ταλαντώσεων που διεγείρονται στη συγκεκριμένη συχνότητα [10]. Αυξανόμενη της συγκεκριμένης αντίστασης μειώνονται οι ανεπιθύμητες ταλαντώσεις, ωστόσο η τιμή της περιορίζεται από την ανάγκη να μην υπάρχουν θερμικές απώλειες μεγαλύτερες του $k_{los} = 0.2\%$ της ονομαστικής ισχύος του αντιστροφέα, όπως φαίνεται και στη συνέχεια:

$$P_{los} = 3I_{cap}^2 R_d < k_{los} * P_n \quad (2.7)$$

Τέλος, οι ανεπιθύμητες ταλαντώσεις που διεγείρονται από το συντονισμό του φίλτρου μπορούν να περιοριστούν με την εφαρμογή μίας αποδοτικής στρατηγικής ελέγχου στα ρεύματα του αντιστροφέα [11], [12]. Στις στρατηγικές οι οποίες θα παρουσιαστούν στη συνέχεια, ο έλεγχος που εξασφαλίζει τον παραπάνω περιορισμό εφαρμόζεται στα ρεύματα των πυκνωτών του φίλτρου εξόδου του αντιστροφέα I_{cap} , όπως θα αναλύσουμε και σε επόμενο κεφάλαιο.

2.2 Λειτουργία αντιστροφέα για παροχή ενεργού και αέργου ισχύος στο δίκτυο

Είδαμε παραπάνω ότι με τον κατάλληλο έλεγχο του αντιστροφέα ρυθμίζεται η ενεργός και η άεργος ισχύς που εγχέεται προς το δίκτυο. Για να γίνει αυτό περισσότερο κατανοητό, στο σχήμα 2.2-1 παρουσιάζεται το ισοδύναμο μονοφασικό κύκλωμα από την έξοδο του φίλτρου του αντιστροφέα έως την πλευρά του δικτύου, για το οποίο ισχύουν οι συμβάσεις που αναφέραμε προηγουμένως, καθώς και το αντίστοιχο διανυσματικό διάγραμμα λειτουργίας.



Σχήμα 2.2-1: (α) Ισοδύναμο μονοφασικό κύκλωμα αντιστροφέα-δικτύου και (β) διανυσματικό διάγραμμα λειτουργίας.

Θεωρώντας τις τάσεις και τα ρεύματα στην έξοδο του φίλτρου του αντιστροφέα απαλλαγμένα από αρμονικές, υπολογίζουμε αρχικά το ρεύμα που ρέει προς το δίκτυο σύμφωνα με την επόμενη σχέση:

$$\vec{I}_g = \frac{\vec{V}_{inv} - \vec{V}_g}{j\omega L_g} \quad (2.8)$$

Με βάση το συγκεκριμένο ρεύμα υπολογίζεται η φαινόμενη ισχύς που εγχέεται προς το δίκτυο, σύμφωνα με την ακόλουθη σχέση:

$$\vec{S} = \vec{V}_g * \vec{I}_g^* = P + jQ \quad (2.9)$$

Όπου:

$$P = \frac{\hat{V}_g \hat{V}_{inv} \sin \delta}{\omega L_g} \quad (2.10)$$

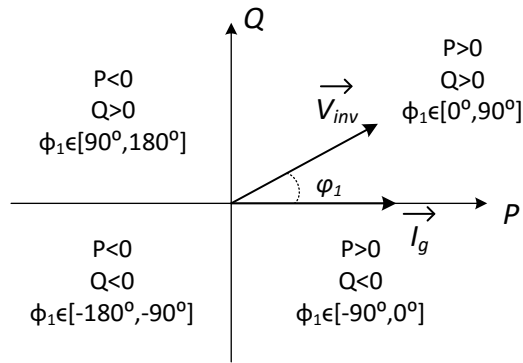
$$Q = \hat{V}_g * \frac{\hat{V}_{inv} \cos \delta - \hat{V}_g}{\omega L_g}$$

Από τις παραπάνω σχέσεις γίνεται εμφανής η εξάρτηση της ενεργού ισχύος από τη γωνία της τάσης εξόδου του αντιστροφέα σε σχέση με την τάση του δικτύου, όπως επίσης και της αέργου ισχύος από τη σχέση των πλατών των δύο τάσεων [13], [14]. Επίσης υπάρχει μία κρίσιμη γωνία $\delta_c = 90^\circ$ για την οποία μεγιστοποιείται η ενεργός ισχύς που εγχέεται προς το δίκτυο και αν αυτή ξεπεραστεί, τότε το σύστημα οδηγείται σε αστάθεια.

Ακόμη, γνωρίζουμε ότι η φάση του ρεύματος εξόδου του αντιστροφέα I_g σε σχέση με την τάση εξόδου V_{inv} υπολογίζεται με βάση την επόμενη σχέση:

$$\varphi_1 = \arctan\left(\frac{Q}{P}\right) \quad (2.11)$$

Όπου $\varphi_1 = \delta + \varphi$. Επομένως συμπεραίνουμε ότι με αντίστοιχο τρόπο μπορούμε να ελέγξουμε τη ροή ενεργού και αέργου ισχύος προς το δίκτυο μεταβάλλοντας τη συγκεκριμένη γωνία, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.2-2. Η συγκεκριμένη τακτική είναι και αυτή που ακολουθείται στην πράξη, καθώς θεωρείται πολύ πιο αποδοτικός τρόπος για να ρυθμίσουμε τα ρεύματα εξόδου του αντιστροφέα, όπως θα δούμε και στη συνέχεια.



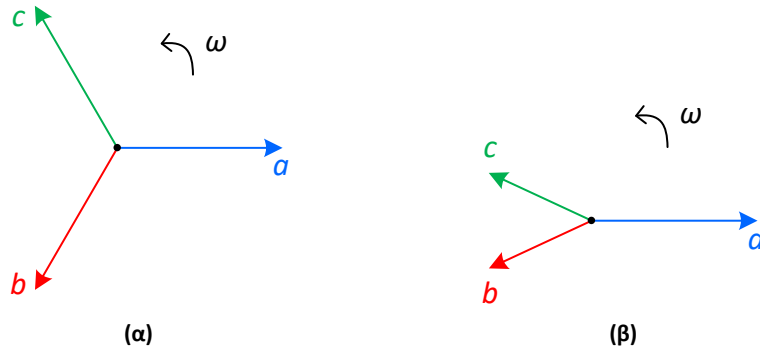
Σχήμα 2.2-2: Ροή ενεργού και αέργου ισχύος συναρτήσει της γωνίας φ_1 μεταξύ τάσης και ρεύματος εξόδου.

2.3 Θεωρία συμμετρικών συνιστωσών τριφασικού συστήματος

Σε συστήματα ελέγχου όπως αυτά που θα μελετήσουμε στην παρούσα εργασία είναι επιθυμητό οι τάσεις και τα ρεύματα τα οποία θέλουμε να ρυθμίσουμε να είναι απολύτως συμμετρικά, ώστε να μπορούν να τα διαχειριστούν με αποδοτικό τρόπο οι αντίστοιχοι ελεγκτές. Προφανώς η φύση του δικτύου είναι τέτοια ώστε η απόλυτη συμμετρία να μην είναι εφικτή ακόμα και σε κανονικές συνθήκες, πόσο μάλλον κατά τη διάρκεια σφαλμάτων. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιείται η μέθοδος των συμμετρικών συνιστωσών, με την οποία επιτυγχάνεται η ανάλυση ενός ασύμμετρου τριφασικού συστήματος σε ένα γραμμικό συνδυασμό τριών συμμετρικών συστημάτων [15]. Τα συστήματα αυτά αναφέρονται με τον όρο θετική, αρνητική και μηδενική ακολουθία. Η ανάλυση ενός συστήματος ενέργειας στο πεδίο των συμμετρικών συνιστωσών είναι πολύ πιο απλή, καθώς οι αντίστοιχες ακολουθιακές εξισώσεις είναι γραμμικώς ανεξάρτητες, αν το υπό εξέταση κύκλωμα είναι συμμετρικό.

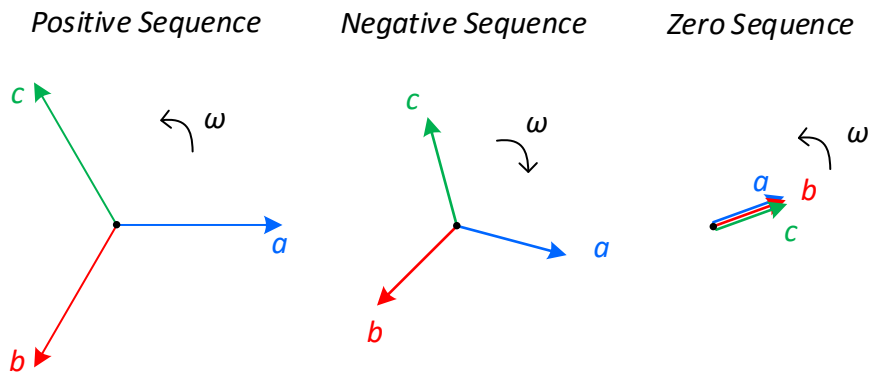
2.3.1 Περιγραφή μεθόδου

Ένα συμμετρικό τριφασικό σύστημα μπορεί να αναπαρασταθεί στο χώρο με τρία στρεφόμενα διανύσματα (φασιδέτες) τα οποία στρέφονται με συχνότητα ίδια με αυτή του συστήματος και παρουσιάζουν διαφορά φάσης 120° , όπως φαίνεται και στο σχήμα 2.3-1(α). Το πλάτος των συγκεκριμένων διανυσμάτων, το οποίο είναι κοινό, ισοδυναμεί με το πλάτος των τριών συνιστωσών του συστήματος. Σε καταστάσεις ασυμμετρίας τα διανύσματα αυτά, είτε παύουν να έχουν το ίδιο πλάτος, είτε παρατηρείται ολίσθηση φάσης σε ένα ή και περισσότερα διανύσματα, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.3-1(β).



Σχήμα 2.3-1: Διανυσματική αναπαράσταση τριφασικού συστήματος. (α) Συμμετρικό σύστημα και (β) ασύμμετρο σύστημα.

Σε ένα ασύμμετρο σύστημα τάσεων η συνιστώσα θετικής ακολουθίας είναι αυτή η οποία στρέφεται με την ίδια ακολουθία φάσεων, όπως και το αρχικό σύστημα (θετική φορά). Αντίστοιχα η συνιστώσα αρνητικής ακολουθίας θα στρέφεται με την αντίθετη ακολουθία φάσεων (αρνητική φορά), ενώ στην περίπτωση της μηδενικής ακολουθίας οι τρεις συνιστώσες έχουν την ίδια φάση, όπως παρατηρούμε και στο σχήμα 2.3-2. Αν προσθέσουμε τις ίδιες φάσεις σε κάθε μία από τις τρεις συμμετρικές συνιστώσες θα πάρουμε προφανώς το αντίστοιχο διάνυσμα στο αρχικό ασύμμετρο σύστημα. Με αυτόν τον τρόπο είναι δυνατόν να αναλύσουμε τις φασικές τάσεις και τα ρεύματα ενός μη ιδανικού συστήματος ενέργειας, το οποίο χαρακτηρίζεται από κάποιο βαθμό ασυμμετρίας υπό κανονικές συνθήκες ή έχει υποστεί κάποιο ασύμμετρο σφάλμα, σε τρεις ανεξάρτητες συμμετρικές πηγές τάσης και ρεύματος, οι οποίες είναι πιο εύκολο να διαχειριστούν.



Σχήμα 2.3-2: Διανυσματική αναπαράσταση συμμετρικών συνιστωσών.

Στη συγκεκριμένη εργασία θα θεωρήσουμε ότι το σύστημά μας υπό κανονικές συνθήκες είναι απολύτως συμμετρικό, οπότε τα συστήματα τάσεων και ρευμάτων που το χαρακτηρίζουν αποτελούνται μόνο από συνιστώσες θετικής ακολουθίας. Οι συνιστώσες αρνητικής και μηδενικής ακολουθίας εμφανίζονται μόνο κατά τη διάρκεια σφαλμάτων. Σε ασύμμετρες καταστάσεις οι ποσότητες αρνητικής ακολουθίας συνυπάρχουν με αυτές της θετικής, ενώ σε σφάλματα ως προς γη εμφανίζονται και οι τρεις συμμετρικές συνιστώσες. Ωστόσο επειδή η διάταξη του αντιστροφέα που μελετάμε δεν περιλαμβάνει αγωγό ουδετέρου, οι συνιστώσες μηδενικής ακολουθίας μπορούν να αγνοηθούν, οπότε ασχολούμαστε με τον έλεγχο των άλλων δύο συμμετρικών συνιστωσών.

2.3.2 Διαδικασία υπολογισμού συμμετρικών συνιστωσών

Αν θεωρήσουμε ένα τριφασικό σύστημα τάσεων το οποίο παριστάνεται με όρους φασιθετών, οι τρεις φάσεις μπορούν να αναπαρασταθούν με ένα διάνυσμα το οποίο δίνεται από την επόμενη σχέση:

$$V_{abc} = \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{a,0} \\ V_{b,0} \\ V_{c,0} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_{a,1} \\ V_{b,1} \\ V_{c,1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_{a,2} \\ V_{b,2} \\ V_{c,2} \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

Οι δείκτες 0,1 και 2 υποδηλώνουν τις συνιστώσες μηδενικής, θετικής και αρνητικής ακολουθίας αντίστοιχα.

Οι τάσεις των τριών συμμετρικών συνιστωσών διαφέρουν μόνο ως προς τις γωνίες τους, όπου λόγω της συμμετρίας τους η διαφορά είναι 120° ανά δύο. Αν θεωρήσουμε ότι ο παράγοντας $a = e^{j2\pi/3}$ προκαλεί ολίσθηση της φάσης ενός φασιθέτη κατά 120° προπορείας, μπορούν να υπολογιστούν οι τρεις φάσεις των τριών συμμετρικών συνιστωσών, σύμφωνα με τις επόμενες σχέσεις:

$$\begin{aligned} V_0 &\equiv V_{a,0} = V_{b,0} = V_{c,0} \\ V_1 &\equiv V_{a,1} = aV_{b,1} = a^2V_{c,1} \\ V_2 &\equiv V_{a,2} = a^2V_{b,2} = aV_{c,2} \end{aligned} \quad (2.13)$$

Όπου για τον παράγοντα a ισχύει:

$$a^3 = e^{j2\pi} = 1 \rightarrow a^2 = a^{-1} \quad (2.14)$$

Ο συνδυασμός των σχέσεων (2.12) και (2.13) μας επιτρέπει να υπολογίσουμε τη σχέση μεταξύ του τριφασικού συστήματος τάσεων και των συμμετρικών συνιστωσών σύμφωνα με την επόμενη σχέση:

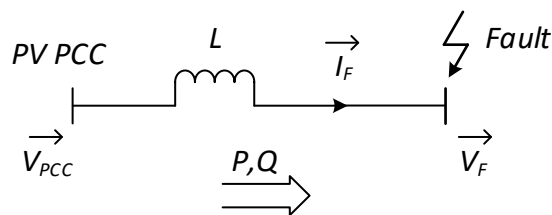
$$V_{abc} = \begin{bmatrix} V_0 \\ V_0 \\ V_0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_1 \\ a^2V_1 \\ aV_1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_1 \\ aV_2 \\ a^2V_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} V_0 \\ V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} = \mathbf{A} * V_{012} \quad (2.15)$$

Επομένως, με αντιστροφή της παραπάνω σχέσης είναι δυνατόν να υπολογίσουμε τις συμμετρικές συνιστώσες ενός τριφασικού συστήματος, με τον τρόπο που φαίνεται στη συνέχεια:

$$V_{012} = \mathbf{A}^{-1}V_{abc} = \frac{1}{3} * \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

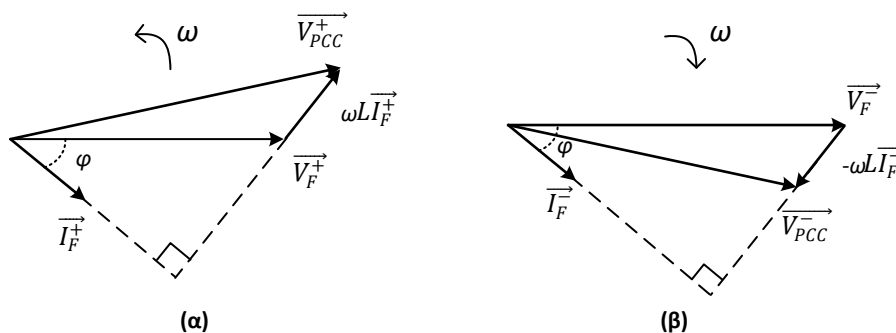
2.4 Υποστήριξη της τάσης του δικτύου μέσω παροχής αέργου ισχύος

Λαμβάνοντας υπόψη τους κώδικες δικτύου οι οποίοι παρουσιάστηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο και με βάση τη θεωρία των συμμετρικών συνιστωσών, στη συγκεκριμένη παράγραφο θα επιχειρήσουμε να εξηγήσουμε πώς η έγχυση αέργου ισχύος, η οποία απαιτείται κατά τη διάρκεια σφαλμάτων, επιδρά στην υποστήριξη της τάσης του δικτύου. Ένα βασικό χαρακτηριστικό της ανάλυσης που θα ακολουθήσει στη συνέχεια είναι η επαγωγική συμπεριφορά του δικτύου στην πλευρά της Μέσης Τάσης, την οποία εξετάζουμε, όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως. Η παραπάνω εκδοχή μας επιτρέπει να αναπαραστήσουμε το τμήμα του δικτύου ανάμεσα στο ΣΚΣ του αντιστροφέα και το σημείο που επισυμβαίνει το σφάλμα ως μία ισοδύναμη επαγωγή, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.4-1.



Σχήμα 2.4-1: Μονοφασικό ισοδύναμο κύκλωμα του δικτύου μεταξύ ΣΚΣ και σημείου σφάλματος.

Σε ένα συμμετρικό σφάλμα, η τάση στο σημείο που πραγματοποιείται το σφάλμα αποτελείται μόνο από τη συνιστώσα θετικής ακολουθίας. Αν προκαλέσουμε την έγχυση άεργων επαγωγικών ρευμάτων (η τάση προηγείται του ρεύματος) θετικής ακολουθίας προς το συγκεκριμένο σημείο, τότε τα ρεύματα θα είναι συμμετρικά και θα ισχύει το διανυσματικό διάγραμμα του σχήματος 2.4-2(α). Από το συγκεκριμένο σχήμα συμπεραίνουμε ότι ρεύματα αυτής της μορφής προκαλούν αύξηση της τάσης θετικής ακολουθίας στο ΣΚΣ του αντιστροφέα, εξαιτίας της πτώσης τάσης πάνω στην ισοδύναμη επαγωγική αντίσταση του δικτύου. Από τη συγκεκριμένη λειτουργία προκαλείται ουσιαστικά ομοιόμορφη αύξηση των τριών φάσεων στην πλευρά της υψηλής τάσης του μετασχηματιστή αύξησης του αντιστροφέα, ο οποίος αποτελεί το ΣΚΣ της Φ/Β μονάδας και επομένως πραγματοποιείται η επιθυμητή διόρθωση της τάσης [16]. Να σημειωθεί ότι τα άεργα ρεύματα που απαιτούνται σε αυτήν την περίπτωση από τους κώδικες δικτύου είναι αναλογικά της πτώσης τάσης που παρατηρείται.



Σχήμα 2.4-2: Διανυσματική αναπαράσταση υποστήριξης της τάσης του δικτύου με έγχυση άεργων ρευμάτων. (α) Διανυσματικό διάγραμμα θετικής ακολουθίας και (β) αρνητικής ακολουθίας.

Κατά τη διάρκεια ασύμμετρων βυθίσεων τάσης, όπως είδαμε και παραπάνω, προκαλείται η εμφάνιση τάσης αρνητικής ακολουθίας στο σημείο του σφάλματος, λόγω της ασυμμετρίας που εισάγεται. Σε αυτήν την περίπτωση προβλέπεται η υποστήριξη με έγχυση αέργου ισχύος, η οποία με κατάλληλο έλεγχο είναι δυνατόν να επηρεάσει και τις δύο συμμετρικές συνιστώσες της τάσης. Πιο συγκεκριμένα, αν παράλληλα με τα άεργα επαγωγικά ρεύματα θετικής ακολουθίας, που αναφέραμε προηγουμένως, επιλέξουμε να γίνει και έγχυση άεργων χωρητικών ρευμάτων (το ρεύμα προηγείται της τάσης) αρνητικής ακολουθίας, τότε υπάρχει δυνατότητα περιορισμού της τάσης αρνητικής ακολουθίας στο σημείο του σφάλματος, όπως φαίνεται και στο σχήμα 2.4-2(β). Στο συγκεκριμένο σχήμα τα διανύσματα των τάσεων και των ρευμάτων στρέφονται με φορά αντίστροφη από τα αντίστοιχα της θετικής ακολουθίας, ενώ η μείωση της τάσης στο ΣΚΣ επιτυγχάνεται και πάλι λόγω της πώσης τάσης στην επαγωγική αντίσταση του δικτύου. Να σημειωθεί επίσης ότι λόγω της συνύπαρξης και των δύο συμμετρικών συνιστωσών, τα ρεύματα στην έξοδο του αντιστροφέα θα είναι ασύμμετρα.

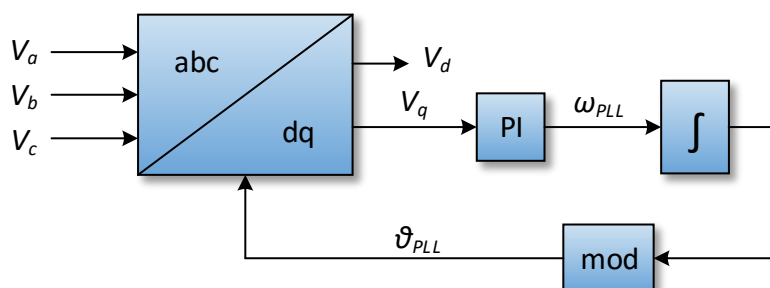
Με την παραπάνω λογική έγχυσης αέργου ισχύος προκαλείται ουσιαστικά ταυτόχρονα ανύψωση και εξισορρόπηση της τάσης στο ΣΚΣ, η οποία φαντάζει ιδανική για την υποστήριξη τέτοιων σφαλμάτων [17]. Οι κώδικες δικτύου προβλέπουν την υποστήριξη του δικτύου με αυτόν τον τρόπο, αν λάβουμε υπόψη μας ότι δίνουν τη δυνατότητα έγχυσης ασύμμετρων ρευμάτων σε ασύμμετρα σφάλματα, ενώ παράλληλα αναφέρουν ρητά να μην ξεπεραστούν τα άνω όρια της τάσης, το οποίο επιτυγχάνεται μέσω της εξισορρόπησης. Ωστόσο, επειδή δεν παρουσιάζεται κάποια στρατηγική καθορισμού των ρευμάτων αρνητικής ακολουθίας, στις τεχνικές ελέγχου που θα παρουσιαστούν στη συνέχεια θα καθορίσουμε τα άεργα ρεύματα θετικής ακολουθίας σύμφωνα με τον κανονισμό που ισχύει για τα συμμετρικά σφάλματα και σε ορισμένες από αυτές θα προσπαθήσουμε να εκμεταλλευτούμε τα θερμικά όρια του αντιστροφέα για να εγχέουμε και άεργα ρεύματα αρνητικής ακολουθίας, επιδιώκοντας παράλληλα κατά το δυνατόν μικρότερη μείωση της ενεργού ισχύος.

3 ΣΥΣΤΗΜΑ ΣΥΓΧΡΟΝΙΣΜΟΥ ΜΕ ΤΟ ΔΙΚΤΥΟ

Ένα από τα πιο βασικά ζητήματα για τη σύνδεση ενός μετατροπέα ισχύος με το δίκτυο αποτελεί η επιλογή του κατάλληλου συστήματος συγχρονισμού. Με την έννοια του συγχρονισμού εννοούμε το σωστό εντοπισμό της φάσης του δικτύου έτσι ώστε να ρυθμιστεί κατάλληλα η τάση εξόδου του αντιστροφέα και να πραγματοποιηθεί η σύνδεσή του με το δίκτυο. Τα συστήματα τα οποία αναλαμβάνουν τη συγκεκριμένη λειτουργία, τα οποία αναφέρονται συχνά και ως διατάξεις κλειδώματος φάσης (Phase Locked Loop – PLL), είναι επίσης υπεύθυνα για την ορθή λειτουργία των στρατηγικών ελέγχου, όπως αυτές που θα εξετάσουμε στη συνέχεια και γι' αυτό το λόγο έχουν μελετηθεί από ένα σημαντικό μέρος της σύγχρονης βιβλιογραφίας [18]–[24]. Στο παρόν κεφάλαιο θα παρουσιαστούν τρεις διαφορετικοί τύποι PLL [25] και θα εκτιμηθεί μέσω προσομοίωσης η απόκρισή τους σε διαταραχές του δικτύου.

3.1 Διάταξη κλειδώματος φάσης στο σύγχρονα στρεφόμενο πλαίσιο αναφοράς (SRF-PLL)

Το πιο απλό σύστημα που μπορεί να επιλεγεί για το συγχρονισμό με ένα τριφασικό δίκτυο είναι η διάταξη κλειδώματος φάσης στο σύγχρονα στρεφόμενο (dq) πλαίσιο αναφοράς (Synchronous Reference Frame PLL). Η συγκεκριμένη διάταξη δέχεται σαν είσοδο τις τάσεις των τριών φάσεων στην έξοδο του αντιστροφέα και τις μετασχηματίζει κατά Park στο dq πλαίσιο αναφοράς. Η γωνία που χρησιμοποιείται κατά τον μετασχηματισμό αυτό προκύπτει από τη χρήση ενός PI ελεγκτή ο οποίος ρυθμίζει κατάλληλα την q -συνιστώσα της τάσης ώστε να παραμένει μηδενική. Η έξοδος του PI μας δίνει τη συχνότητα του δικτύου, ενώ από την d συνιστώσα προκύπτει το πλάτος της τάσης. Η σχηματική απεικόνιση της συγκεκριμένης διάταξης φαίνεται στο σχήμα 3.1-1. Στην ουσία με τη συγκεκριμένη λογική ελέγχου πετυχαίνουμε το dq πλαίσιο αναφοράς του μετασχηματισμού να στρέφεται με τη συχνότητα του δικτύου ευθυγραμμίζοντας το διάνυσμα της τάσης με τον d άξονα.



Σχήμα 3.1-1: Σχηματικό διάγραμμα απλού SRF-PLL.

Το συγκεκριμένο σύστημα ενώ λειτουργεί καλά για ένα συμμετρικό σύστημα τάσεων, δεν έχει την αναμενόμενη απόδοση σε περίπτωση ασύμμετρων καταστάσεων, όπως για

παράδειγμα κατά τη διάρκεια ενός ασύμμετρου σφάλματος. Το γεγονός αυτό οφείλεται στην εμφάνιση ταλαντώσεων διπλάσιας συχνότητας σε σχέση με αυτή του δικτύου (100Hz) στις dq συνιστώσες της τάσης, λόγω ύπαρξης της συνιστώσας αρνητικής ακολουθίας. Οι παραπάνω ταλαντώσεις δεν μπορούν να ελεγχθούν κατάλληλα από τον PI ελεγκτή της διάταξης, καθώς λειτουργεί ικανοποιητικά μόνο για DC μεγέθη. Το αποτέλεσμα θα είναι η εμφάνιση παρόμοιων ταλαντώσεων διπλάσιας συχνότητας στην έξοδο του ελεγκτή, δηλαδή στη συχνότητα που εντοπίζει το σύστημα.

Ανάλογη δυσλειτουργία παρατηρείται και κατά την εμφάνιση αρμονικών συνιστωσών στο συμμετρικό σύστημα τάσεων που δέχεται σαν είσοδο το SRF-PLL, καθώς το εύρος ζώνης του συγκεκριμένου συστήματος κλειστού βρόχου δεν είναι συνήθως ικανό να τις απορρίψει με αποδοτικό τρόπο.

Το πρόβλημα των ταλαντώσεων σε ασύμμετρες καταστάσεις του δικτύου μπορεί να αντιμετωπιστεί με τη χρήση εναλλακτικών συστημάτων συγχρονισμού των οποίων η λειτουργία βασίζεται στον εντοπισμό της τάσης θετικής ακολουθίας του δικτύου. Προς αυτήν την κατεύθυνση, στη συνέχεια παρουσιάζονται δύο διαφορετικά PLL τα οποία λειτουργούν ικανοποιητικά για τις συγκεκριμένες συνθήκες, ενώ εξετάζεται η συμπεριφορά τους σε περίπτωση αρμονικής παραμόρφωσης του δικτύου.

3.2 Διάταξη κλειδώματος φάσης με χρήση προσαρμοστικών φίλτρων δευτέρας τάξεως (DSOGI-PLL)

3.2.1 Υπολογισμός θετικής ακολουθίας στο $\alpha\beta$ πλαίσιο αναφοράς

Η χρήση της θετικής ακολουθίας στα συστήματα συγχρονισμού θεωρείται ο πιο αποδοτικός τρόπος για τον εντοπισμό της συχνότητας, καθώς το σύστημα τάσεων του δικτύου δεν είναι απολύτως συμμετρικό ούτε σε κανονικές συνθήκες λειτουργίας, πόσο μάλλον κατά τη διάρκεια σφαλμάτων. Η συνιστώσα θετικής ακολουθίας ενός γενικευμένου τριφασικού διανύσματος τάσεων $V_{abc} = [V_a \ V_b \ V_c]^T$ δίνεται με βάση τον ακόλουθο τύπο:

$$V_{abc}^+ = [V_a^+ \ V_b^+ \ V_c^+]^T = [T_+] * V_{abc} , \quad (3.1)$$

$$[T_+] = \frac{1}{3} * \begin{bmatrix} 1 & a & a^2 \\ a^2 & 1 & a \\ a & a^2 & 1 \end{bmatrix}, \quad a = e^{j\frac{2\pi}{3}}$$

Ο παράγοντας a προκαλεί μετατόπιση φάσης κατά 120° , καθώς το διάνυσμα των τάσεων παριστάνεται με όρους φασιθετών. Επιπλέον, γνωρίζουμε ότι η αποτύπωση ενός τριφασικού συστήματος στο $\alpha\beta$ πλαίσιο αναφοράς δίνεται από τον επόμενο τύπο:

$$V_{\alpha\beta} = [V_\alpha \ V_\beta]^T = [T_{\alpha\beta}] * V_{abc} , \quad (3.2)$$

$$[T_{\alpha\beta}] = \frac{2}{3} * \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix}$$

Λαμβάνοντας υπόψη τις παραπάνω εξισώσεις, ο υπολογισμός της τάσης θετικής ακολουθίας στο $\alpha\beta$ πλαίσιο αναφοράς γίνεται ως εξής:

$$\begin{aligned} V_{\alpha\beta}^+ &= [T_{\alpha\beta}] * V_{abc}^+ = [T_{\alpha\beta}] * [T_+] * V_{abc} = [T_{\alpha\beta}] * [T_+] * [T_{\alpha\beta}]^{-1} * V_{\alpha\beta} \\ &= \frac{1}{2} * \begin{bmatrix} 1 & -q \\ q & 1 \end{bmatrix} * V_{\alpha\beta}, \quad q = e^{-j\frac{\pi}{2}} \end{aligned} \quad (3.3)$$

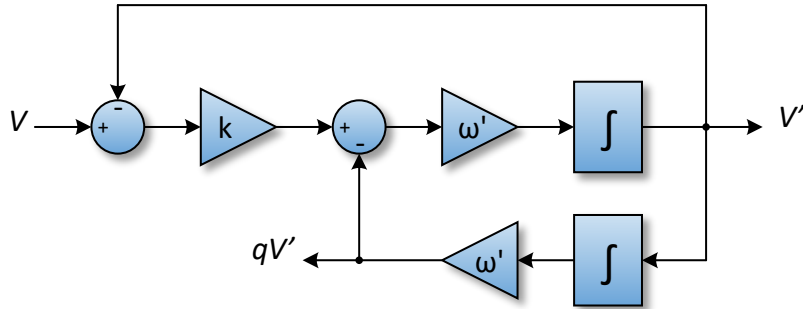
Στην παραπάνω εξίσωση ο παράγοντας q προκαλεί καθυστέρηση φάσης 90° . Η γνώση των κάθετων διανυσμάτων των τάσεων που απαιτεί η διαδικασία υπολογισμού της θετικής ακολουθίας στο $\alpha\beta$ πλαίσιο συνιστά και το ουσιαστικό πλεονέκτημά της έναντι της αντίστοιχης διαδικασίας στο abc πλαίσιο, όπου απαιτείται η γνώση των μετατοπισμένων διανυσμάτων κατά 120° (σχέση 3.1). Το γεγονός αυτό οφείλεται στην ύπαρξη συστημάτων ικανών να προκαλέσουν ολίσθηση φάσης κατά 90° (συστήματα παραγωγής κάθετων διανυσμάτων), παρά κατά 120° . Ένα ακόμα σημαντικό πλεονέκτημα της συγκεκριμένης μεθόδου αποτελεί ο μεγαλύτερος βαθμός απόρριψης αρμονικών συνιστωσών που εισάγει [26].

3.2.2 Γεννήτρια παραγωγής κάθετων διανυσμάτων με χρήση προσαρμοστικού φίλτρου δευτέρας τάξεως (SOGI-QSG)

Για να ολοκληρωθεί ο σωστός εντοπισμός της θετικής ακολουθίας των τάσεων του δικτύου απαιτείται ο καθορισμός του κατάλληλου συστήματος παραγωγής κάθετων διανυσμάτων. Οι απομονωτές μεταφοράς καθυστέρησης (transport delay buffers) είναι μια γνωστή τακτική που θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για την καθυστέρηση των τάσεων κατά 90° . Γνωστή μέθοδος επίσης για την παράγωγή κάθετων διανυσμάτων είναι η εφαρμογή φίλτρων πρώτης τάξεως τα οποία χρησιμοποιούνται αποκλειστικά για ολίσθηση φάσης. Ωστόσο οι συγκεκριμένες τεχνικές δεν είναι προσαρμοστικές ως προς τη συχνότητα και δεν περιορίζουν καθόλου τις αρμονικές συνιστώσες που δέχονται στην είσοδό τους, γεγονός το οποίο θα μπορούσε να προκαλέσει σοβαρά σφάλματα κατά τον υπολογισμό της θετικής ακολουθίας.

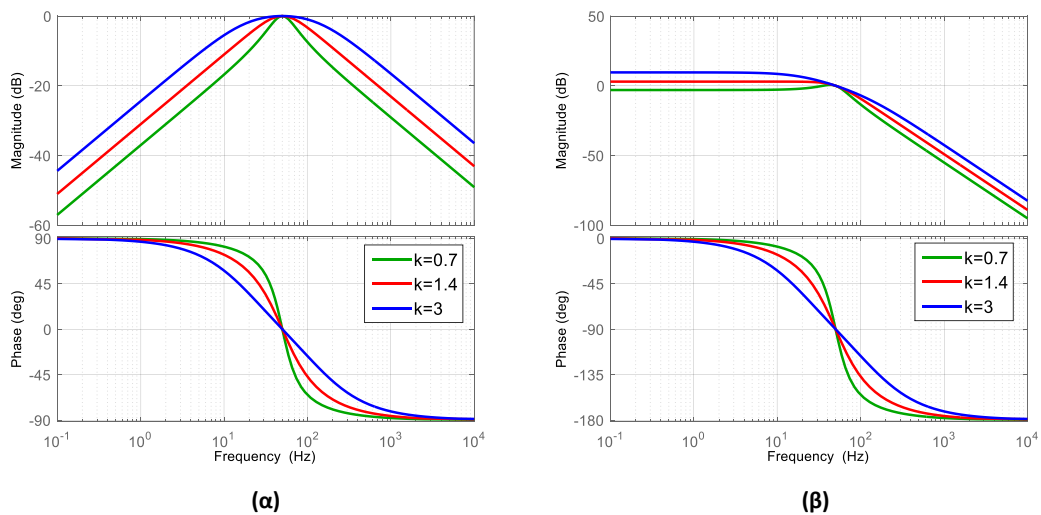
Για το λόγο αυτό χρησιμοποιείται η γεννήτρια παραγωγής κάθετων διανυσμάτων με χρήση προσαρμοστικών φίλτρων δευτέρας τάξεως (Second Order Generalized Integrator for Quadrature Signals Generation – SOGI-QSG) [26]. Η δομή του συγκεκριμένου φίλτρου φαίνεται στο σχήμα 3.2-1, ενώ οι χαρακτηριστικές συναρτήσεις μεταφοράς δίνονται από τους επόμενους τύπους:

$$\begin{aligned} D(s) &= \frac{V'}{V}(s) = \frac{k\omega's}{s^2 + k\omega's + \omega'^2} \\ Q(s) &= \frac{qV'}{V}(s) = \frac{k\omega'^2}{s^2 + k\omega's + \omega'^2} \end{aligned} \quad (3.4)$$



Σχήμα 3.2-1: Σχηματική αναπαράσταση γεννήτριας παραγωγής κάθετων διανυσμάτων SOGI-QSG.

Ο παράγοντας k αποτελεί το συντελεστή απόσβεσης του συγκεκριμένου φίλτρου και ο παράγοντας ω' τη συχνότητα συντονισμού. Η εφαρμογή της πρώτης εκ των δύο εξισώσεων προκαλεί το φιλτράρισμα του σήματος στην είσοδο του συγκεκριμένου φίλτρου από την εμφάνιση αρμονικών, ενώ η δεύτερη προκαλεί φιλτράρισμα και καθυστέρηση φάσης 90° , όπως αποδεικνύεται και από τα διαγράμματα Bode του σχήματος 3.2-2. Παρατηρώντας το διάγραμμα της απόκρισης πλάτους γίνεται εμφανές ότι όσο μικρότερη είναι η τιμή του συντελεστή απόσβεσης τόσο μεγαλύτερη είναι η επιλεκτικότητα του φίλτρου ως προς τη συχνότητα και κατ' επέκταση τόσο μεγαλύτερη η απόρριψη των αρμονικών. Αντίθετα, από το διάγραμμα απόκρισης φάσης συμπεραίνουμε ότι η μείωση του συγκεκριμένου συντελεστή προκαλεί πιο έντονες αποκλίσεις της φάσης κοντά στη συχνότητα συντονισμού, αυξάνοντας το χρόνο απόκρισης του συστήματος.



Σχήμα 3.2-2: Διαγράμματα Bode γεννήτριας παραγωγής κάθετων διανυσμάτων SOGI-QSG για διάφορες τιμές του παράγοντα k . (α) Διάγραμμα συνάρτησης $D(s)$ και (β) διάγραμμα συνάρτησης $Q(s)$.

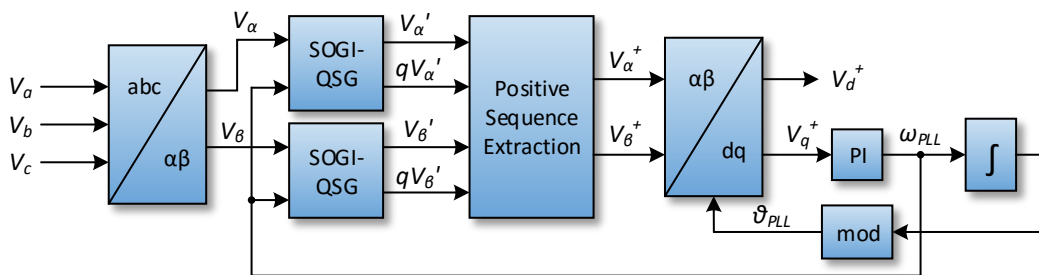
3.2.3 Τελική δομή διάταξης DSOGI-PLL

Η γεννήτρια παραγωγής κάθετων διανυσμάτων μπορεί να εφαρμοστεί στις $\alpha\beta$ συνιστώσες της τάσης του δικτύου, οπότε προκύπτουν τελικά δύο ζεύγη κάθετων συνιστωσών, δηλαδή V_α', qV_α' και V_β', qV_β' . Εφαρμόζοντας στη συνέχεια τη σχέση (3.3) μπορεί να υπολογιστεί τελικά η θετική ακολουθία της τάσης του δικτύου στο $\alpha\beta$ πλαίσιο. Το συγκεκριμένο σύστημα εντοπισμού, επί της ουσίας λειτουργεί ως ζωνοπερατό φίλτρο

για τη θετική ακολουθία τάσεων και ως ζωνοφρακτικό για την αρνητική ακολουθία, ενώ παρουσιάζει πολύ καλή συμπεριφορά στην απόρριψη των αρμονικών.

Βασική προϋπόθεση για την ορθή λειτουργία του παραπάνω συστήματος αποτελεί η κατάλληλη ρύθμιση της συχνότητας συντονισμού του SOGI-QSG, ώστε να ταυτίζεται με τη συχνότητα της τάσης του δικτύου. Οποιαδήποτε απόκλιση μεταξύ των δύο αυτών συχνοτήτων θα προκαλέσει απόκλιση στο πλάτος και τη φάση των σημάτων εξόδου των γεννητριών παραγωγής κάθετων διανυσμάτων και επομένως θα επηρεάσει αρνητικά την λειτουργία του συνολικού συστήματος.

Το πρόβλημα προσαρμογής στη συχνότητα λύνεται με την προσθήκη ενός SRF-PLL το οποίο θα δέχεται ως είσοδο τη θετική ακολουθία των τάσεων στο $\alpha\beta$ πλαίσιο, θα τις μετασχηματίζει στο dq πλαίσιο κατά Park και θα παράγει στην έξοδό του τη συχνότητα του δικτύου, η οποία τροφοδοτείται μέσω ενός βρόχου ανάδρασης στην είσοδο των γεννητριών SOGI-QSG. Το τελικό σύστημα, το οποίο φαίνεται στο σχήμα 3.2-3, αποτελεί ουσιαστικά μία νέα διάταξη PLL η οποία ονομάζεται DSOGI-PLL (Dual SOGI), λόγω της χρήσης δύο γεννητριών παραγωγής κάθετων διανυσμάτων [26].



Σχήμα 3.2-3: Σχηματικό διάγραμμα DSOGI-PLL.

Το συγκεκριμένο PLL λειτουργεί αποδοτικά ακόμα και σε περιπτώσεις ασυμμετρίας του δικτύου, εξαιτίας της χρήσης της θετικής ακολουθίας των τάσεων, η οποία εξακολουθεί να στρέφεται με τη συχνότητα του δικτύου, διατηρώντας παράλληλα τη συμμετρία της. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα οι dq συνιστώσες των τάσεων να παραμένουν DC μεγέθη και επομένως να μπορούν να ελεγχθούν κατάλληλα από τους PI ελεγκτές της διάταξης. Παράλληλα η χρήση των προσαρμοστικών φίλτρων δευτέρας τάξεως εξασφαλίζει την ορθή λειτουργία του συστήματος σε περίπτωση αρμονικής παραμόρφωσης της τάσης του δικτύου.

3.3 Διάταξη κλειδώματος φάσης με χρήση δύο σύγχρονα στρεφόμενων πλαισίων αναφοράς (DSRF-PLL)

3.3.1 Αναπαράσταση ασύμμετρου συστήματος τάσεων σε δύο σύγχρονα στρεφόμενα πλαίσια αναφοράς

Κατά τη διάρκεια ασύμμετρων καταστάσεων του δικτύου κάθε φασική τάση μπορεί να αναπαρασταθεί σαν άθροισμα θετικής, αρνητικής και μηδενικής ακολουθίας, σύμφωνα με τον επόμενο τύπο:

$$V_i = V^{+1} \cos\left(\omega t - k \frac{2\pi}{3}\right) + V^{-1} \cos\left(-\omega t - k \frac{2\pi}{3} + \varphi^{-1}\right) + V^0 \cos(\omega t + \varphi^0) \quad (3.5)$$

όπου οι δείκτες +1, -1 και 0 υποδηλώνουν τις τρεις συμμετρικές συνιστώσες, φ^{-1} και φ^0 είναι οι αρχικές φάσεις της αρνητικής και της μηδενικής ακολουθίας σε σχέση με τη θετική και $k = 0,1,2$ για τις φάσεις $i = a,b,c$ αντίστοιχα. Η μηδενική ακολουθία τάσεων προκύπτει σε σφάλματα με τη γη.

Αν μετασχηματίσουμε το παραπάνω σύστημα τάσεων στο $\alpha\beta$ πλαίσιο κατά Clarke, οι τάσεις που θα προκύψουν θα εξακολουθούν να περιλαμβάνουν συνιστώσες τόσο θετικής όσο και αρνητικής ακολουθίας, ενώ αμελείται η μηδενική ακολουθία τάσεων, οπότε προκύπτει η ακόλουθη σχέση:

$$V_{(\alpha\beta)} = \begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} = V_{(\alpha\beta)}^{+1} + V_{(\alpha\beta)}^{-1} = V^{+1} \begin{bmatrix} \cos(\omega t) \\ \sin(\omega t) \end{bmatrix} + V^{-1} \begin{bmatrix} \cos(-\omega t + \varphi^{-1}) \\ \sin(-\omega t + \varphi^{-1}) \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

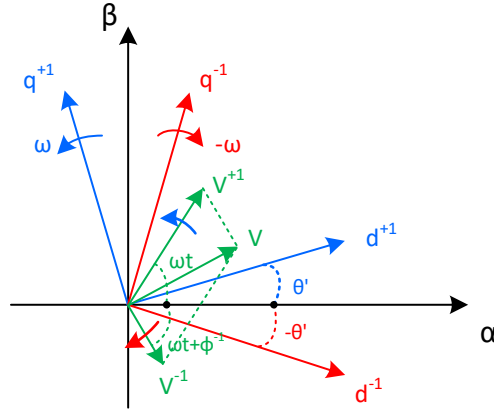
Στην ουσία με το συγκεκριμένο μετασχηματισμό προκύπτουν δύο διανύσματα τάσεων τα οποία στρέφονται και τα δύο με τη συχνότητα του δικτύου, αλλά με αντίθετες φορές $(+\omega, -\omega)$.

Η ιδιαιτερότητα της συγκεκριμένης διάταξης PLL σε σχέση με το απλό SRF-PLL είναι η αναπαράσταση του διανύσματος της τάσης σε δύο στρεφόμενα πλαίσια αναφοράς: το dq^{+1} το οποίο στέφεται με αντιωρολογιακή φορά και έχει αρχική γωνιακή θέση θ' και το dq^{-1} το οποίο στρέφεται με ωρολογιακή φορά και έχει αρχική γωνιακή θέση $-\theta'$ [27]. Η αναπαράσταση των διανυσμάτων τάσεων και των πλαισίων αναφοράς φαίνεται στο σχήμα 3.3-1. Εφαρμόζοντας τον μετασχηματισμό Park μπορούμε να αναπαραστήσουμε τις συνιστώσες των τάσεων στα δύο αυτά πλαίσια αναφοράς, σύμφωνα με τις ακόλουθες σχέσεις:

$$V_{(dq)}^{+1} = \begin{bmatrix} V_d^{+1} \\ V_q^{+1} \end{bmatrix} = [T_{dq}^{+1}] * V_{(\alpha\beta)} = V^{+1} \begin{bmatrix} \cos(\omega t - \theta') \\ \sin(\omega t - \theta') \end{bmatrix} + V^{-1} \begin{bmatrix} \cos(-\omega t + \varphi^{-1} - \theta') \\ \sin(-\omega t + \varphi^{-1} - \theta') \end{bmatrix}$$

$$V_{(dq)}^{-1} = \begin{bmatrix} V_d^{-1} \\ V_q^{-1} \end{bmatrix} = [T_{dq}^{-1}] * V_{(\alpha\beta)} = V^{+1} \begin{bmatrix} \cos(\omega t + \theta') \\ \sin(\omega t + \theta') \end{bmatrix} + V^{-1} \begin{bmatrix} \cos(-\omega t + \varphi^{-1} + \theta') \\ \sin(-\omega t + \varphi^{-1} + \theta') \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

$$[T_{dq}^{+1}] = [T_{dq}^{-1}]^T = \begin{bmatrix} \cos(\theta') & \sin(\theta') \\ -\sin(\theta') & \cos(\theta') \end{bmatrix}$$



Σχήμα 3.3-1: Διανυσματική αναπαράσταση συμμετρικών συνιστωσών τάσεων σε δύο σύγχρονα στρεφόμενα πλαίσια αναφοράς.

Οι παραπάνω εξισώσεις απλοποιούνται σημαντικά αν καταφέρουμε να ευθυγραμμίσουμε το dq^{+1} πλαίσιο με το διάνυσμα της τάσης θετικής ακολουθίας V^{+1} , έτσι ώστε να πετύχουμε $\theta' \approx \omega t$, όπως φαίνεται στη συνέχεια:

$$V_{(dq)}^{+1} = V^{+1} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} + V^{-1} \begin{bmatrix} \cos(-2\omega t + \varphi^{-1}) \\ \sin(-2\omega t + \varphi^{-1}) \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

$$V_{(dq)}^{-1} = V^{+1} \begin{bmatrix} \cos(2\omega t) \\ \sin(2\omega t) \end{bmatrix} + V^{-1} \begin{bmatrix} \cos(\varphi^{-1}) \\ \sin(\varphi^{-1}) \end{bmatrix}$$

Σύμφωνα με τις τελευταίες εξισώσεις, οι σταθεροί όροι σε κάθε πλαίσιο συνεισφέρουν στον υπολογισμό του πλάτους της τάσης θετικής και αρνητικής ακολουθίας, ενώ οι ταλαντώσεις διπλάσιας συχνότητας σε σχέση με αυτή του δικτύου (2ω) είναι αποτέλεσμα σύζευξης των διανυσμάτων της τάσης με τα αντίθετα στρεφόμενα πλαίσια αναφοράς. Οι συγκεκριμένες ταλαντώσεις φαντάζουν ανεπιθύμητες για την επίτευξη του συγχρονισμού με το δίκτυο, καθώς καθιστούν ανέφικτη τη χρήση PI ελεγκτή, όπως και στην περίπτωση του απλού SRF-PLL. Η χρήση βαθυπερατού φίλτρου για τον περιορισμό τους δεν αποτελεί ιδανική λύση, καθώς σε αυτήν την περίπτωση δεν γίνεται ακριβής εντοπισμός της τάσης θετικής ακολουθίας του δικτύου και επίσης η δυναμική απόκριση του συστήματος θα ήταν εξαιρετικά αργή.

3.3.2 Δίκτυο απόζευξης των δύο σύγχρονα στρεφόμενων πλαισίων αναφοράς (Decoupling Network)

Μια αποδοτική τεχνική για την απόζευξη των δύο στρεφόμενων πλαισίων, που θα έχει ως αποτέλεσμα την εξάλειψη των ταλαντώσεων διπλάσιας συχνότητας, προκύπτει αν υποθέσουμε ένα σύστημα τάσεων το οποίο αναλύεται σε δύο γενικευμένες συνιστώσες που στρέφονται με ταχύτητες $n\omega$ και $m\omega$, όπου τα n και m μπορεί να είναι είτε θετικά είτε αρνητικά. Το συγκεκριμένο σύστημα τάσεων αναπαρίσταται από τις ακόλουθες εξισώσεις:

$$V_{(\alpha\beta)} = \begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} = V_{(\alpha\beta)}^n + V_{(\alpha\beta)}^m = V^n \begin{bmatrix} \cos(n\omega t + \varphi^n) \\ \sin(n\omega t + \varphi^n) \end{bmatrix} + V^m \begin{bmatrix} \cos(m\omega t + \varphi^m) \\ \sin(m\omega t + \varphi^m) \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

Στη συνέχεια θεωρούμε δύο στρεφόμενα πλαίσια αναφοράς dq^n και dq^m , με αρχικές γωνιακές θέσεις $n\theta'$ και $m\theta'$ αντίστοιχα, όπου το θ' είναι η γωνία του σύγχρονα στρεφόμενου πλαισίου dq^{+1} . Το σύστημα τάσεων που αναφέρθηκε προηγουμένως μπορεί να εκφραστεί στα δύο αυτά στρεφόμενα πλαίσια με τις εξής εξισώσεις:

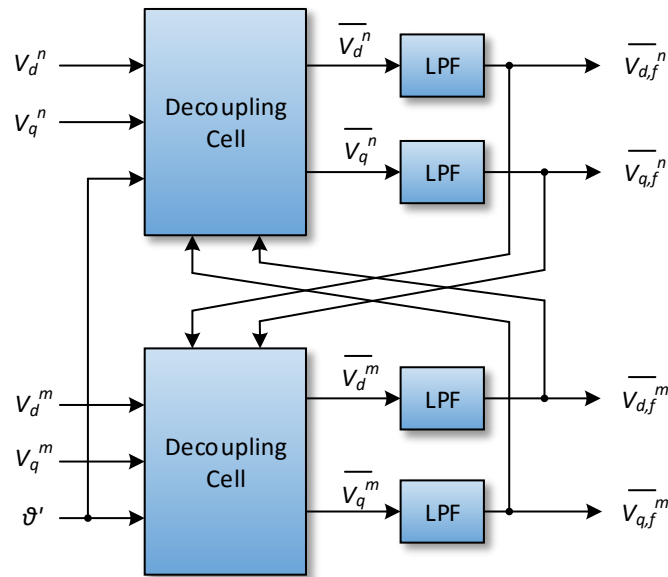
$$\begin{aligned} V_{(dq)}^n &= \begin{bmatrix} V_d^n \\ V_q^n \end{bmatrix} = V^n \begin{bmatrix} \cos\varphi^n \\ \sin\varphi^n \end{bmatrix} + V^m \cos\varphi^m \begin{bmatrix} \cos((n-m)\omega t) \\ -\sin((n-m)\omega t) \end{bmatrix} \\ &+ V^m \sin\varphi^m \begin{bmatrix} \sin((n-m)\omega t) \\ \cos((n-m)\omega t) \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (3.10)$$

$$\begin{aligned} V_{(dq)}^m &= \begin{bmatrix} V_d^m \\ V_q^m \end{bmatrix} = V^m \begin{bmatrix} \cos\varphi^m \\ \sin\varphi^m \end{bmatrix} + V^n \cos\varphi^n \begin{bmatrix} \cos((n-m)\omega t) \\ \sin((n-m)\omega t) \end{bmatrix} \\ &+ V^n \sin\varphi^n \begin{bmatrix} -\sin((n-m)\omega t) \\ \cos((n-m)\omega t) \end{bmatrix} \end{aligned}$$

Παρατηρώντας τους παραπάνω μετασχηματισμούς προκύπτει ότι το πλάτος των ταλαντώσεων στο ένα πλαίσιο αναφοράς ισούται με τις σταθερές τιμές των τάσεων (μέσες τιμές) στο δεύτερο πλαίσιο. Η εξαγωγή των σταθερών όρων από τις παραπάνω εξισώσεις μπορεί να γίνει με την εφαρμογή ενός συστήματος το οποίο θα υλοποιεί τις ακόλουθες σχέσεις:

$$\begin{aligned} \overline{V_d^n} &= V_d^n - u_1 * \overline{V_{d,f}^m} - u_2 * \overline{V_{q,f}^m} \\ \overline{V_q^n} &= V_q^n + u_2 * \overline{V_{d,f}^m} - u_1 * \overline{V_{q,f}^m} \\ \overline{V_d^m} &= V_d^m - u_1 * \overline{V_{d,f}^n} + u_2 * \overline{V_{q,f}^n} \\ \overline{V_q^m} &= V_q^m - u_2 * \overline{V_{d,f}^n} - u_1 * \overline{V_{q,f}^n} \end{aligned} \quad (3.11)$$

Όπου: $u_1 = \cos((n-m)\omega t)$, $u_2 = \sin((n-m)\omega t)$ και $\overline{V_{dq,f}^n}$, $\overline{V_{dq,f}^m}$ οι φιλτραρισμένες μέσες τιμές των τάσεων. Το παραπάνω σύστημα, το οποίο υλοποιείται με τη χρήση βαθυπερατών φίλτρων πρώτης τάξης, φαίνεται στο σχήμα 3.3-2. Για την ορθή λειτουργία του είναι απαραίτητη η γνώση της γωνίας $\theta' = \omega t$, η οποία αναφέρθηκε παραπάνω. Στην ουσία οι δύο πρώτες σχέσεις λειτουργούν ως ένα σύστημα για την εξαγωγή της τάσης στο dq^n πλαίσιο αναφοράς, ενώ οι δύο τελευταίες για την εξαγωγή της τάσης στο dq^m πλαίσιο. Τα δύο παραπάνω συστήματα (Decoupling Cells) λειτουργούν συνδυαστικά και συνιστούν το δίκτυο απόζευξης των δύο στρεφόμενων πλαισίων (Decoupling Network) [27].



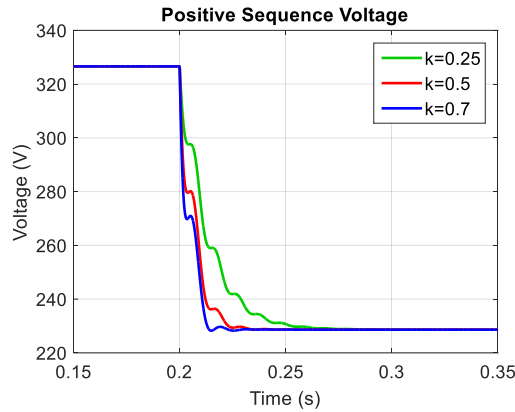
Σχήμα 3.3-2: Δομικό διάγραμμα δικτύου απόζευξης δύο στρεφόμενων πλαισίων αναφοράς.

3.3.3 Τελική δομή διάταξης DSRF-PLL

Η παραπάνω γενίκευση μπορεί εύκολα να αναχθεί και στην περίπτωση των δύο σύγχρονα στρεφόμενων πλαισίων αναφοράς, για $n = 1$ και $m = -1$, οπότε με την εφαρμογή ενός αντίστοιχου Decoupling Network στις τάσεις των σχέσεων (3.8) προκύπτουν τελικά οι τάσεις θετικής και αρνητικής ακολουθίας του δικτύου. Πιο συγκεκριμένα, αν εφαρμόσουμε βηματικά ένα διάνυσμα τάσης, αποτελούμενο από συνιστώσες θετικής και αρνητικής ακολουθίας, στο συγκεκριμένο δίκτυο και θεωρώντας $\varphi^{+1} = \varphi^{-1} = 0$, θα προκύψει το εκτιμώμενο πλάτος της τάσης θετικής ακολουθίας σύμφωνα με τη σχέση:

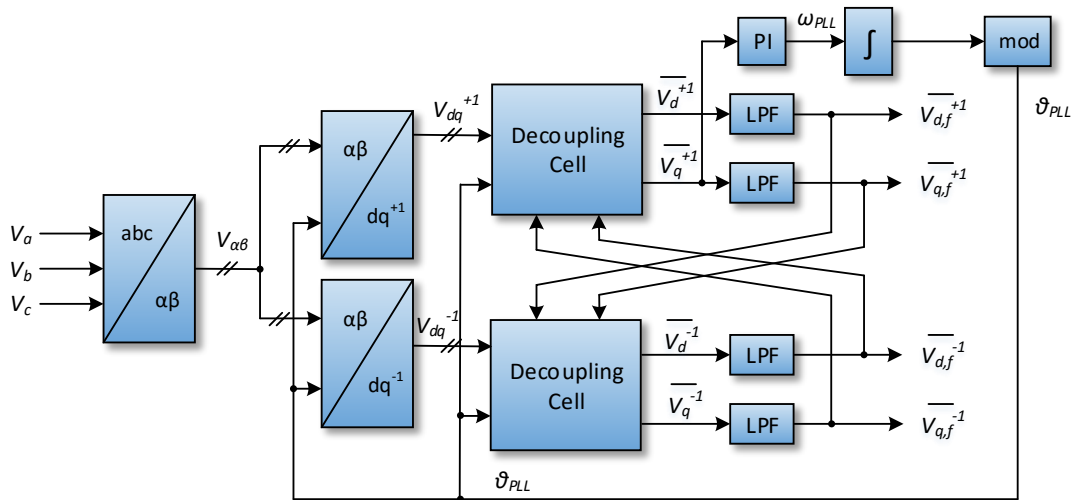
$$\begin{aligned} \overline{V_d^{+1}} = & V^{+1} - \left\{ V^{+1} \cos(\omega t) \cos(\omega t \sqrt{1-k^2}) \right. \\ & \left. - \frac{1}{\sqrt{1-k^2}} (V^{+1} \sin(\omega t) - kV^{-1} \cos(\omega t)) \sin(\omega t \sqrt{1-k^2}) \right\} e^{-k\omega t} \end{aligned} \quad (3.12)$$

Στην παραπάνω σχέση ο παράγοντας k είναι ο λόγος της συχνότητας αποκοπής των βαθυπερατών φίλτρων προς τη συχνότητα του δικτύου. Παρατηρούμε ότι οι ταλαντωτικοί όροι που προκύπτουν από το συγκεκριμένο σύστημα μειώνονται εκθετικά σύμφωνα με τον συγκεκριμένο παράγοντα και τελικά επιτυγχάνεται ακριβής εκτίμηση του πλάτους της τάσης θετικής ακολουθίας. Όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή του k τόσο πιο γρήγορη είναι η απόκριση του συστήματος. Ωστόσο ο παράγοντας αυτός δεν μπορεί να πάρει αρκετά μεγάλες τιμές, γιατί ενδέχεται να προκληθούν υποαποσβενούμενες ταλαντώσεις ($k > 1$) ή ακόμα και αστάθεια στο σύστημα. Ένα αποδεκτό εύρος τιμών είναι μεταξύ 0.5 και 1, ενώ η ιδανικότερη συμπεριφορά από πλευράς ευστάθειας και γρήγορης απόκρισης του συστήματος παρατηρείται για $k = 0.7$. Η απόκριση του Decoupling Network στην περίπτωση μονοφασικού σφάλματος και για διάφορες τιμές του k φαίνεται παραστατικά στο σχήμα 3.3-3, όπου επαληθεύονται όσα αναφέρθηκαν προηγουμένως.



Σχήμα 3.3-3: Απόκριση δικτύου απόζευξης στον εντοπισμό της τάσης θετικής ακολουθίας, κατά τη διάρκεια μονοφασικού σφάλματος 10%.

Με την εφαρμογή της συγκεκριμένης μεθόδου ανίχνευσης συμμετρικών συνιστωσών προκύπτει μια νέα διάταξη PLL, απαλλαγμένη από τις ταλαντώσεις διπλάσιας συχνότητας λόγω ασυμμετρίας, η οποία λειτουργεί με τη χρήση δύο σύγχρονα στρεφόμενων πλαισίων αναφοράς (Double Synchronous Reference Frame PLL) [27], όπως φαίνεται στο σχήμα 3.3-4.



Σχήμα 3.3-4: Σχηματικό διάγραμμα DSRF-PLL.

Η συγκεκριμένη διάταξη εφαρμόζει τη λογική ελέγχου του κλασσικού SRF-PLL, εφαρμοσμένου στην τάση θετικής ακολουθίας του δικτύου, όπως αυτή ανιχνεύεται με τη χρήση του Decoupling Network. Η γωνία που εντοπίζεται από το συγκεκριμένο PLL ανατροφοδοτείται τόσο για το μετασχηματισμό των τάσεων στα δύο στρεφόμενα πλαίσια αναφοράς (dq^{+1} και dq^{-1}) όσο και στα Decoupling Cells για την απόζευξη των δύο πλαισίων, καθιστώντας τη διάταξη προσαρμοστική σε μεταβολές της συχνότητας.

3.4 Σύγκριση των τριών διαφορετικών τύπων PLL

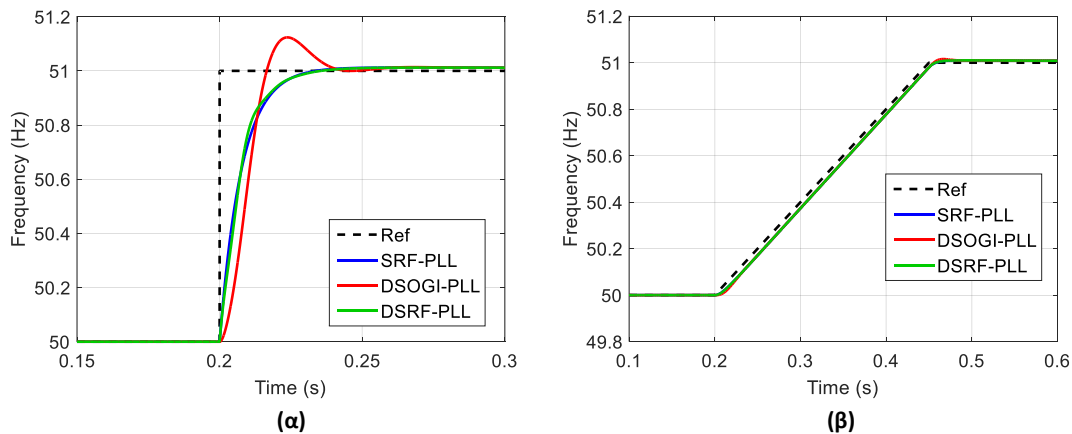
Στη συγκεκριμένη παράγραφο θα πραγματοποιηθεί σύγκριση των τριών διατάξεων PLL που παρουσιάστηκαν παραπάνω, έτσι ώστε να επιλέξουμε το καταλληλότερο, προκειμένου να εξασφαλίσουμε την κατά το δυνατόν πιο αποδοτική λειτουργία των ελέγχων που θα εφαρμοστούν στη συνέχεια. Προς αυτήν την κατεύθυνση τα τρία PLL θα εξεταστούν ως προς την απόκριση τους σε μη ιδανικές συνθήκες, όπως είναι για παράδειγμα οι μεταβολές της συχνότητας, τα συμμετρικά και ασύμμετρα σφάλματα, καθώς επίσης και οι αρμονικές του δικτύου. Οι προσομοιώσεις, με βάση τις οποίες θα γίνει η εκτίμηση των συγκεκριμένων διατάξεων, έγιναν με χρήση του προγράμματος Simulink του Matlab.

Πριν προχωρήσουμε στην παρουσίαση των αποτελεσμάτων, θεωρείται σκόπιμο να αναφέρουμε ότι οι προσομοιώσεις πραγματοποιήθηκαν κάτω από τις ίδιες ακριβώς συνθήκες. Ενδεικτικά αναφέρουμε ότι επιλέχθηκε να γίνουν σε διακριτό χρόνο με συχνότητα δειγματοληψίας $f_{sim} = 20kHz$, κοινή μέθοδο ολοκλήρωσης (Trapezoidal Method), ενώ χρησιμοποιήθηκαν και τα ίδια κέρδη για τους PI ελεγκτές εντοπισμού της γωνίας ($K_p = 0.4$, $K_i = 0.7$).

Τέλος να προσθέσουμε ότι ο συντελεστής απόσβεσης k του DSOGI-PLL επιλέχθηκε να πάρει την τιμή 1.4, καθώς σε αυτήν την περίπτωση το σύστημα παρουσίαζε ικανοποιητικά χαρακτηριστικά από πλευράς χρόνου απόκρισης και περιορισμού υπερπήδησης στον εντοπισμό της συχνότητας, όπως περιμέναμε και από τη μορφή των διαγραμμάτων Bode που παρουσιάστηκαν παραπάνω. Αντίστοιχα ο παράγοντας k της διάταξης DSRF-PLL πήρε την τιμή 0.7, λόγω του πιο γρήγορου εντοπισμού της τάσης θετικής ακολουθίας. Η επιλογή της συγκεκριμένης τιμής ερμηνεύεται σε συχνότητα αποκοπής $f_c = 35Hz$, όσον αφορά τα βαθυπερατά φίλτρα που χρησιμοποιούνται στο δίκτυο απόζευξης της διάταξης.

3.4.1 Μεταβολή της συχνότητας

Στο επόμενο σχήμα παρουσιάζεται η απόκριση των τριών τύπων PLL για μεταβολές της συχνότητας από τα 50 στα 51Hz, τόσο βηματικά όσο και σε μορφή ράμπας. Τέτοιες διαταραχές παρατηρούνται στο δίκτυο όταν διαταράζεται το ισοζύγιο ενεργού ισχύος, οπότε η μονάδα παραγωγής πρέπει να παραμένει συνδεδεμένη εντοπίζοντας άμεσα τη νέα συχνότητα.

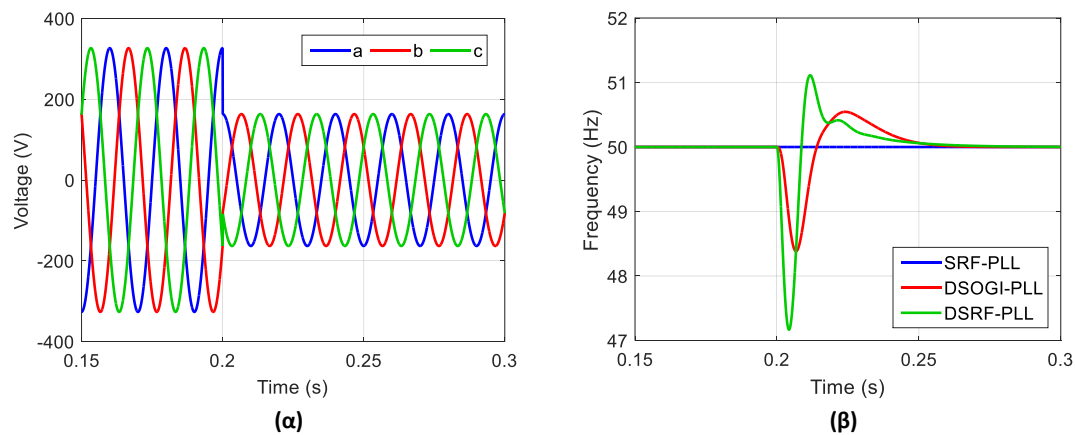


Σχήμα 3.4-1: Απόκριση διατάξεων PLL σε περίπτωση μεταβολής της συχνότητας. (α) Βηματική μεταβολή και (β) Μεταβολή σε μορφή ράμπας.

Παρατηρώντας το πρώτο γράφημα συμπεραίνουμε ότι το SRF-PLL και το DSRF-PLL εντοπίζουν τη συχνότητα με τον ίδιο ακριβώς τρόπο, σε χρονικό διάστημα μικρότερο των 40ms. Το DSOGI-PLL παρουσιάζει ελάχιστα πιο αργή απόκριση, ενώ παρουσιάζει και μια μικρή υπερπήδηση της συχνότητας κατά 0.1Hz περίπου. Επίσης οι τρεις διατάξεις επιδεικνύουν ταυτόσημη συμπεριφορά στην περίπτωση της ομαλής μεταβολής της συχνότητας (τύπου ράμπας), την οποία εντοπίζουν με αποδοτικό τρόπο. Να σημειωθεί ότι η συγκεκριμένη μεταβολή ανταποκρίνεται περισσότερο σε ρεαλιστικές διαταραχές της συχνότητας του δικτύου.

3.4.2 Συμμετρικές βυθίσεις τάσεως

Στη συνέχεια παρουσιάζεται η συμπεριφορά των τριών διατάξεων σε περίπτωση συμμετρικής βύθισης της τάσης του δικτύου στο 50% της ονομαστικής της τιμής.



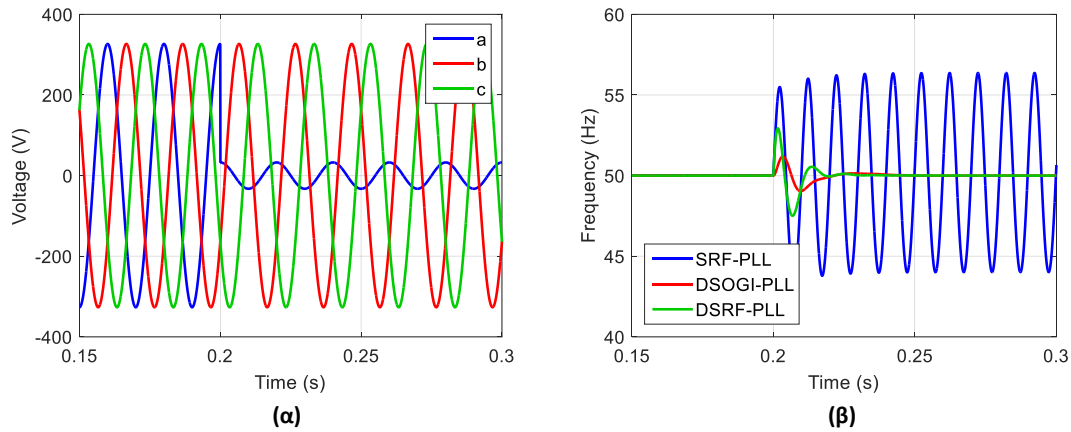
Σχήμα 3.4-2: Απόκριση διατάξεων PLL σε συμμετρικό σφάλμα. (α) Συμμετρική βύθιση τάσης και (β) Απόκριση συχνότητας.

Παρατηρούμε ότι το SRF-PLL παραμένει ανεπηρέαστο κατά τη διάρκεια του σφάλματος και εντοπίζει τη συχνότητα του δικτύου με ιδανικό τρόπο. Η συμπεριφορά αυτή οφείλεται στο γεγονός ότι σε ένα συμμετρικό σφάλμα το σύστημα τάσεων περιλαμβάνει μόνο τη συνιστώσα θετικής ακολουθίας, η οποία μπορεί να ελεγχθεί κατάλληλα από τον PI ελεγκτή, χωρίς περεταίρω ανάλυση του συστήματος.

Αντίθετα, το DSOGI-PLL και το DSRF-PLL παρουσιάζουν μία μεταβατική συμπεριφορά τη χρονική στιγμή που πραγματοποιείται το σφάλμα, η οποία εισάγεται από τα συστήματα εντοπισμού της θετικής ακολουθίας που χρησιμοποιούν (DSOGI-QSG, Decoupling Network). Οι δύο αυτές διατάξεις φαίνεται πως αποκρίνονται στο ίδιο χρονικό διάστημα (~50ms), με το DSRF-PLL να παρουσιάζει μεγαλύτερη υπερπήδηση της συχνότητας (2.8Hz) σε σχέση με το DSOGI-PLL (1.6Hz).

3.4.3 Ασύμμετρες βυθίσεις τάσεως

Τα συγκεκριμένα σφάλματα εμφανίζονται πιο συχνά στο δίκτυο σε σχέση με τις συμμετρικές βυθίσεις τάσης και επομένως η ορθή λειτουργία του συστήματος συγχρονισμού σε αυτήν την περίπτωση παίζει σημαντικό ρόλο. Παρακάτω φαίνεται η απόκριση των τριών τύπων PLL σε ένα ασύμμετρο σφάλμα κατά το οποίο η τάση της φάσης *a* υποχωρεί στο 10% της ονομαστικής της τιμής.



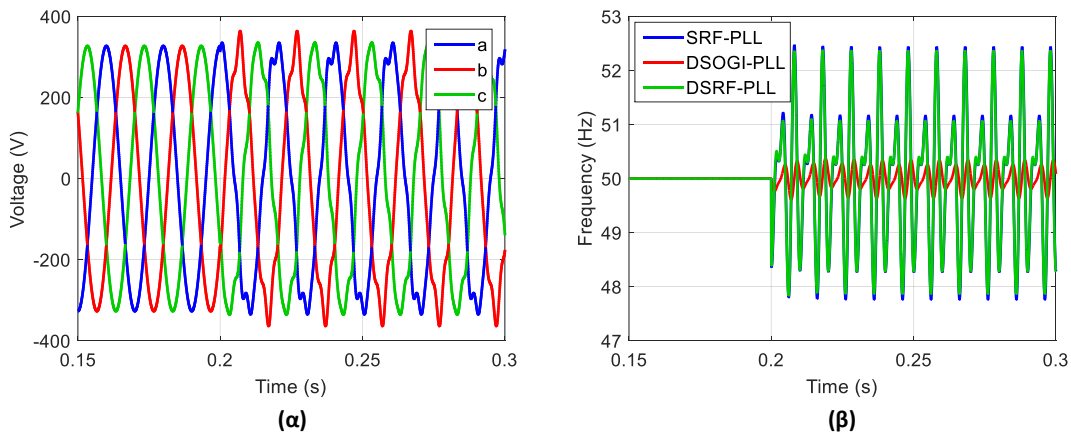
Σχήμα 3.4-3: Απόκριση διατάξεων PLL σε ασύμμετρο σφάλμα. (α) Ασύμμετρη βύθιση τάσης και (β) Απόκριση συχνότητας.

Από τα παραπάνω γραφήματα γίνεται εμφανής η επίδραση της συνιστώσας αρνητικής ακολουθίας, που εμφανίζεται κατά τη διάρκεια του ασύμμετρου σφάλματος, στη συχνότητα που εντοπίζει το SRF-PLL, καθώς εισάγονται ταλαντώσεις συχνότητας διπλάσιας του δικτύου (100Hz), όπως περιμέναμε και από την ανάλυση που κάναμε προηγουμένως. Οι ταλαντώσεις αυτές καθιστούν τη λειτουργία της συγκεκριμένης διάταξης μη αποδεκτή για ασύμμετρες καταστάσεις του δικτύου.

Από την άλλη, οι δύο διατάξεις που βασίζονται στον εντοπισμό της τάσης θετικής ακολουθίας καταφέρνουν να μείνουν σχετικά ανεπηρέαστες από την ασυμμετρία του δικτύου, εντοπίζοντας τη συχνότητα σε χρονικό διάστημα μικρότερο των 30ms. Ομοίως με την περίπτωση του συμμετρικού σφάλματος, το DSRF-PLL εμφανίζει μεγαλύτερη υπερπήδηση κατά τον εντοπισμό της συχνότητας (2.9Hz) σε σχέση με το DSOGI-PLL (1.2Hz).

3.4.4 Αρμονική παραμόρφωση της τάσης

Η μη γραμμική φύση ορισμένων φορτίων του δικτύου προκαλεί την εμφάνιση αρμονικών περιττής κυρίως τάξης (3^{ης}, 5^{ης}, κτλ.) σε αυτό, οι οποίες επηρεάζουν τη λειτουργία του συστήματος συγχρονισμού. Στη συνέχεια φαίνεται η απόκριση των τριών διατάξεων PLL σε περίπτωση εμφάνισης αρμονικών 5^{ης} και 7^{ης} τάξης στην τάση του δικτύου, με πλάτος 7% και 5% της ονομαστικής τιμής αντίστοιχα.



Σχήμα 3.4-4: Απόκριση διατάξεων PLL σε αρμονική παραμόρφωση του δικτύου. (α) Παραμόρφωση συστήματος τάσεων και (β) Απόκριση συχνότητας.

Από το παραπάνω γράφημα γίνεται σαφής η ικανότητα περιορισμού της επίδρασης των αρμονικών συνιστωσών στον εντοπισμό της συχνότητας από το DSOGI-PLL. Ο περιορισμός οφείλεται στην επίδραση των προσαρμοστικών φίλτρων δευτέρας τάξεως, τα οποία έχουν την ικανότητα να συντονίζουν στη θεμελιώδη συνιστώσα της τάσης του δικτύου και να απορρίπτουν τις υπόλοιπες αρμονικές. Για το λόγο αυτό παρατηρείται μόνο μια μικρή κυμάτωση στη συχνότητα με πλάτος περίπου 0.35Hz, η οποία ασφαλώς δεν εμποδίζει την ομαλή λειτουργία του συστήματος.

Αντίθετα, το SRF-PLL και το DSRF-PLL φαίνεται να επηρεάζονται σε σημαντικό βαθμό από την ύπαρξη των αρμονικών, καθώς δεν εφαρμόζουν κάποια ιδιαίτερη τεχνική για τον περιορισμό τους, με αποτέλεσμα την ύπαρξη κυμάτωσης στον εντοπισμό της συχνότητας με πλάτος περίπου 2.5Hz. Η συγκεκριμένη κυμάτωση είναι απαγορευτική για ένα σύστημα συγχρονισμού, δεδομένου ότι η τάση του δικτύου παραμορφώνεται αρκετά συχνά από τέτοιες αρμονικές. Στην περίπτωση του SRF-PLL μεγαλύτερος περιορισμός των αρμονικών επιτυγχάνεται μόνο με μείωση του εύρους ζώνης του συστήματος, το οποίο θα είχε αρνητικό αντίκτυπο στην απόκρισή του. Το ίδιο ισχύει και για το DSRF-PLL, το οποίο εμφανίζει ελάχιστα καλύτερη συμπεριφορά, λόγω της χρήσης βαθυπερατών φίλτρων στο δίκτυο απόζευξης. Επειδή ωστόσο η q συνιστώσα της τάσης που ελέγχεται από το σύστημα λαμβάνεται πριν την εφαρμογή του φίλτρου, η συγκεκριμένη διάταξη δεν έχει τα αναμενόμενα αποτελέσματα.

3.5 Επιλογή διάταξης PLL για συμμετοχή στο σύστημα ελέγχου της φωτοβολταϊκής εγκατάστασης

Με βάση την παρουσίαση των διατάξεων και τις συγκρίσεις που πραγματοποιήθηκαν παραπάνω μπορούμε να επιλέξουμε ένα σύστημα συγχρονισμού κατάλληλο για τον εντοπισμό της συχνότητας τόσο σε κανονικές συνθήκες όσο και σε περιπτώσεις σφαλμάτων και αρμονικής παραμόρφωσης της τάσης του δικτύου. Από την προσομοίωση που έγινε προκύπτει ότι το SRF-PLL, παρόλο που συμπεριφέρεται ιδανικά στις μεταβολές της συχνότητας και για συμμετρικό σύστημα τάσεων, δεν λειτουργεί ικανοποιητικά σε περιπτώσεις ασυμμετρίας και αρμονικής παραμόρφωσης του δικτύου.

Το πρόβλημα που προκύπτει στα ασύμμετρα σφάλματα φαίνεται πως λύνουν οι άλλες δύο διατάξεις (DSOGI-PLL και DSRF-PLL), οι οποίες βασίζονται σε συστήματα εντοπισμού της τάσης θετικής ακολουθίας και επομένως απορρίπτουν τις ταλαντώσεις διπλάσιας συχνότητας που εισάγει η συνιστώσα αρνητικής ακολουθίας. Επίσης, η συμπεριφορά τους είναι αποδεκτή τόσο σε μεταβολές της συχνότητας όσο και σε περίπτωση συμμετρικών σφαλμάτων, αν και στην τελευταία περίπτωση θα επιθυμούσαμε λίγο πιο γρήγορη απόκριση (<40ms), η οποία μπορεί να επιτευχθεί με καλύτερη ρύθμιση των κερδών.

Ωστόσο οι συγκεκριμένες διατάξεις διαφέρουν σημαντικά ως προς τον τρόπο που αντιμετωπίζουν την αρμονική παραμόρφωση της τάσης του δικτύου. Σύμφωνα με τα γραφήματα που παρουσιάστηκαν παραπάνω το DSOGI-PLL επιδεικνύει εμφανώς καλύτερη συμπεριφορά, καθώς δεν προκαλεί μεγάλες κυματώσεις στη συχνότητα που να οδηγούν το σύστημα εκτός αποδεκτών ορίων. Μία ακόμη διαφορά εντοπίζεται στη μέγιστη απόκλιση

από τη συχνότητα εντοπισμού κατά τη διάρκεια των μεταβατικών φαινομένων, όπου το DSOGI-PLL υπερισχύει και πάλι.

Σύμφωνα με τα παραπάνω και αν αναλογιστούμε τη μη ιδανική συμπεριφορά που επιδεικνύει η τάση του δικτύου, ακόμα και σε κανονικές συνθήκες, καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι το DSOGI-PLL πληροί όλα τα κριτήρια για την εφαρμογή του σε ένα σύστημα ελέγχου, όπως αυτά που θα μελετήσουμε στη συνέχεια. Για το λόγο αυτό η συγκεκριμένη διάταξη θα χρησιμοποιηθεί σε όλες τις προσομοιώσεις που θα ακολουθήσουν.

4 ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΕΣ ΕΛΕΓΧΟΥ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΕΑ

Σύμφωνα με τους κώδικες που αναφέρθηκαν παραπάνω, η σωστή υποστήριξη του δικτύου σε περίπτωση βυθίσεων τάσης επιτυγχάνεται με την έγχυση αέργου ισχύος στο ΣΚΣ της μονάδας παραγωγής με το δίκτυο, που συνήθως είναι η πλευρά υψηλής τάσης ενός μετασχηματιστή ανύψωσης. Για να συμβεί αυτό πρέπει να γίνει κατάλληλος έλεγχος στον αντιστροφέα ισχύος της μονάδας, έτσι ώστε να εγχέει τα επιθυμητά άεργα ρεύματα στην έξοδό του.

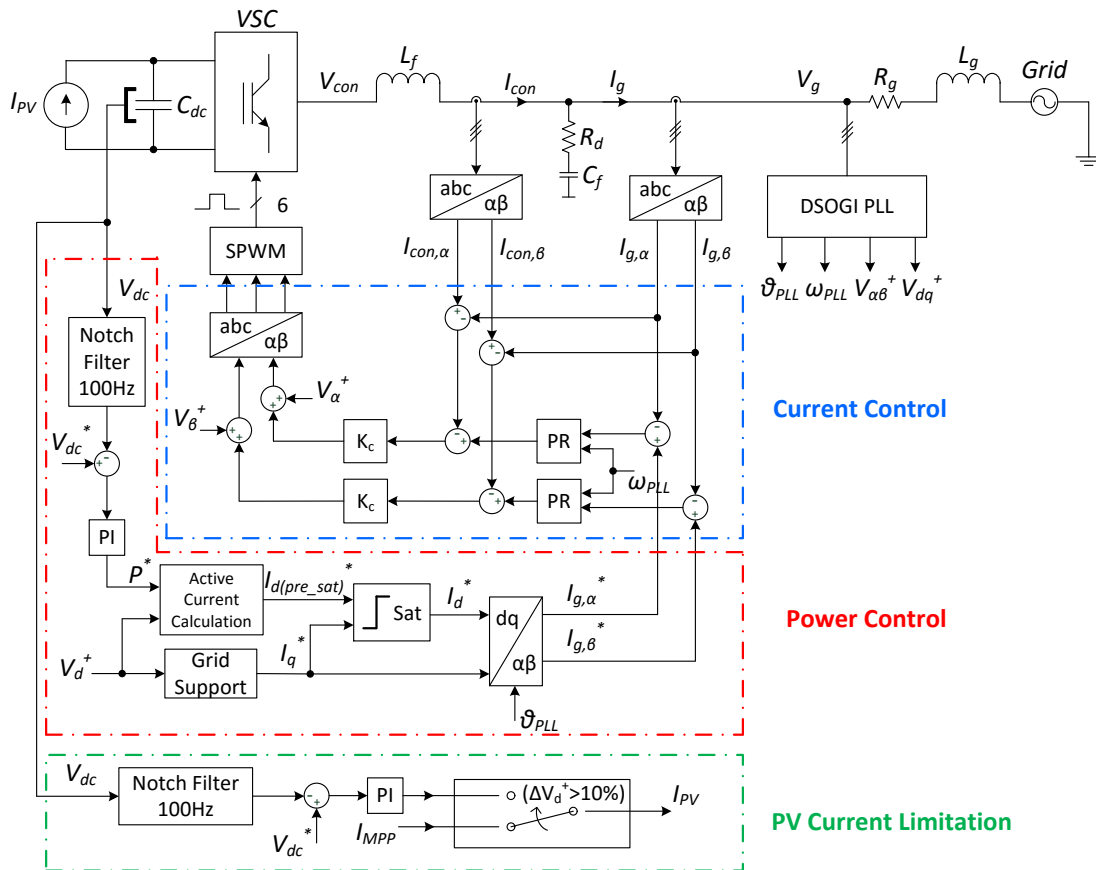
Στην περίπτωση των συμμετρικών σφαλμάτων είδαμε ότι τα άεργα ρεύματα θετικής ακολουθίας είναι ικανά να προσφέρουν την κατάλληλη υποστήριξη, καθώς μπορούν να προκαλέσουν αύξηση της τάσης θετικής ακολουθίας στο ΣΚΣ της μονάδας. Ωστόσο κατά την εμφάνιση ασύμμετρων σφαλμάτων θα μπορούσαν να ληφθούν επιπλέον μέτρα προκειμένου να επιτευχθεί παράλληλα η μείωση της αρνητικής ακολουθίας της τάσης και επίσης να μην ξεπεραστούν τα όρια στις φάσεις που δεν παρουσιάζουν σφάλμα, πάνω από το 10% της ονομαστικής τιμής. Η συμπεριφορά αυτή είναι δυνατόν να επιτευχθεί με έγχυση άεργων ασύμμετρων ρευμάτων που περιλαμβάνουν συνιστώσες τόσο θετικής όσο και αρνητικής ακολουθίας. Το πλήθος των αναφορών οι οποίες μελετούν τον ιδανικό τρόπο υποστήριξης του συγκεκριμένου τύπου σφαλμάτων [28]–[37] αναδεικνύουν τη σπουδαιότητα του ζητήματος.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τέσσερις διαφορετικές στρατηγικές ελέγχου ρευμάτων οι οποίες εξασφαλίζουν την υποστήριξη του δικτύου σε συμμετρικές βυθίσεις τάσης και επιδεικνύουν διαφορετική συμπεριφορά κατά τη διάρκεια εμφάνισης ασύμμετρων σφαλμάτων. Η πρώτη μέθοδος προκαλεί την έγχυση άεργων ρευμάτων θετικής ακολουθίας τόσο σε συμμετρικά όσο και σε ασύμμετρα σφάλματα, πετυχαίνοντας μόνο αύξηση της θετικής ακολουθίας τάσεων. Η δεύτερη πραγματοποιεί ανεξάρτητο έλεγχο των ρευμάτων των τριών φάσεων, ο οποίος εξασφαλίζει την παροχή αέργου ισχύος κυρίως στις φάσεις που επηρεάζονται από το σφάλμα, εξασφαλίζοντας ότι κατά τη διάρκεια μίας ασύμμετρης βύθισης τάσης δεν θα παρουσιαστεί υπέρταση στις φάσεις που δεν έχουν υποστεί κάποιο σφάλμα. Η τρίτη και η τέταρτη μέθοδος λειτουργούν σε δύο στρεφόμενα πλαίσια αναφοράς, ελέγχοντας ρεύματα τόσο θετικής όσο και αρνητικής ακολουθίας. Η διαφοροποίησή τους εισάγεται στον τρόπο καθορισμού των αναφορών ρεύματος σε ασύμμετρες καταστάσεις, όπου στην πρώτη στόχος είναι η μείωση της τάσης αρνητικής ακολουθίας του δικτύου και στη δεύτερη ο περιορισμός της κυμάτωσης της τάσης στο DC link.

4.1 Έλεγχος ρευμάτων θετικής ακολουθίας αντιστροφέα (PSCC)

4.1.1 Γενική περιγραφή συστήματος ελέγχου

Η γενική δομή της συγκεκριμένης στρατηγικής ελέγχου (Positive Sequence Current Control) παρουσιάζεται στο σχήμα 4.1-1. Σε κανονικές συνθήκες του δικτύου η μέθοδος αυτή αποτελείται από δύο επίπεδα ελέγχου, όπου το πρώτο καθορίζει τα ρεύματα στην έξοδο του LC φίλτρου του αντιστροφέα και το δεύτερο το επίπεδο της ενεργού και αέργου ισχύος που εγχέει ο αντιστροφέας προς το δίκτυο. Πιο συγκεκριμένα, ο έλεγχος ρευμάτων αποτελεί ουσιαστικά τον εσωτερικό βρόχο ανάδρασης του συστήματος, στον οποίο γίνεται και χρήση των ρευμάτων των πυκνωτών C_f του LC φίλτρου. Ο έλεγχος αυτός εξασφαλίζει τις αναφορές της τάσης εξόδου του αντιστροφέα, οι οποίες είναι απαραίτητες για την τροφοδότηση των παλμών στα διακοπτικά στοιχεία με χρήση της τεχνικής SPWM. Ο καθορισμός της ενεργού ισχύος επιτυγχάνεται με την εφαρμογή ενός εξωτερικού βρόχου ανάδρασης ο οποίος ελέγχει την DC τάση του αντιστροφέα και τροφοδοτεί τον εσωτερικό βρόχο με την επιθυμητή αναφορά της ενεργού συνιστώσας ρεύματος. Στις συγκεκριμένες συνθήκες η αναφορά της αέργου συνιστώσας ρεύματος επιλέγεται να είναι μηδενική, καθώς δεν απαιτείται υποστήριξη του δικτύου.



Σχήμα 4.1-1: Δομικό διάγραμμα στρατηγικής ελέγχου ρευμάτων θετικής ακολουθίας αντιστροφέα PSCC.

Σε περίπτωση εμφάνισης σφαλμάτων υλοποιείται η διάταξη υποστήριξης του δικτύου (Grid Support), η οποία καθορίζει εκ νέου την αναφορά της άεργου συνιστώσας ρεύματος, που δίνεται ως είσοδος στον εσωτερικό βρόχο ανάδρασης, ανάλογα με το επίπεδο της τάσης θετικής ακολουθίας του δικτύου. Η τάση αυτή εξάγεται από το σύστημα συγχρονισμού, το οποίο επιλέχθηκε να είναι το DSOGI-PLL και δέχεται σαν είσοδο την τριφασική τάση στην έξοδο του LC φίλτρου του αντιστροφέα. Με αυτόν τον τρόπο πετυχαίνεται η έγχυση άεργου ισχύος κατά τη διάρκεια βυθίσεων τάσης, σύμφωνα με τις απαιτήσεις των κωδίκων δικτύου. Επίσης ενεργοποιείται ένα επιπλέον επίπεδο ελέγχου το οποίο εξασφαλίζει τον περιορισμό της ενεργού ισχύος, ελέγχοντας και πάλι την DC τάση, έτσι ώστε να μην ξεπεραστούν τα θερμικά όρια των διακοπτικών στοιχείων του αντιστροφέα.

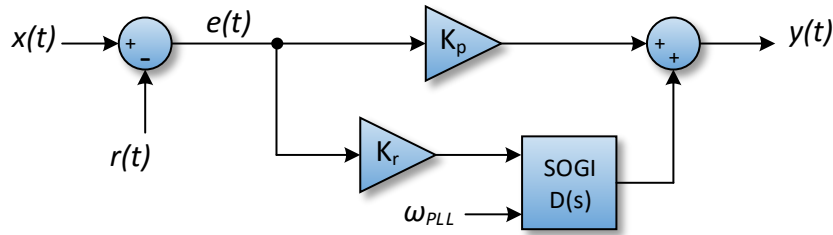
4.1.2 Έλεγχος ρευμάτων αντιστροφέα

Στη συγκεκριμένη τεχνική ο έλεγχος των ρευμάτων πραγματοποιείται στο $\alpha\beta$ πλαίσιο αναφοράς, επομένως τόσο τα μετρούμενα ρεύματα όσο και οι αναφορές ρευμάτων πρέπει να μετασηματιστούν κατά Clarke. Αξίζει να αναφέρουμε ότι η ίδια διαδικασία θα μπορούσε να πραγματοποιηθεί και στο dq πλαίσιο με τη χρήση PI ελεγκτών. Επίσης, η χρήση LC φίλτρου στην έξοδο του αντιστροφέα απαιτεί την εφαρμογή μίας αποδοτικής τεχνικής ελέγχου, έτσι ώστε να εξασφαλίσουμε την ευστάθεια του συστήματος και να αποφύγουμε τις αρνητικές επιδράσεις που μπορεί να επιφέρει ο συντονισμός του φίλτρου. Αυτό επιτυγχάνεται με την εφαρμογή δύο βρόχων ελέγχου, όπου στον εξωτερικό ρυθμίζεται το ρεύμα στην έξοδο του LC φίλτρου του αντιστροφέα, ενώ στον εσωτερικό το ρεύμα που ρέει στους πυκνωτές του φίλτρου [38]–[40].

Η εναλλασσόμενη μορφή των ρευμάτων καθιστά απαγορευτική πλέον την χρήση PI ελεγκτών, οι οποίοι θα προκαλούσαν σφάλμα μόνιμης κατάστασης, καθώς λειτουργούν ικανοποιητικά μόνο για DC μεγέθη. Επομένως στον εξωτερικό βρόχο ανάδρασης χρησιμοποιούνται PR ελεγκτές (Proportional-Resonant), οι οποίοι παρουσιάζουν την ίδια απόκριση συχνότητας με τους PI, μετατοπισμένη όμως σε συγκεκριμένη συχνότητα συντονισμού [41], [42]. Η συνάρτηση μεταφοράς των συγκεκριμένων ελεγκτών είναι η ακόλουθη:

$$G_{PR}(s) = K_p + \frac{2 * K_r * s}{s^2 + \omega^2} \quad (4.1)$$

Από την παραπάνω σχέση γίνεται εμφανές ότι οι PR ελεγκτές αποτελούνται από έναν αναλογικό όρο και έναν όρο συντονισμού, ο οποίος εμφανίζει άπειρο κέρδος στη συχνότητα συντονισμού. Στο συγκεκριμένο σύστημα ως συχνότητα συντονισμού επιλέγεται η συχνότητα του δικτύου, η οποία τροφοδοτείται από το DSOGI-PLL, καθιστώντας τον έλεγχο προσαρμοστικό σε μεταβολές της συχνότητας. Στην πράξη η εφαρμογή των συγκεκριμένων ελεγκτών γίνεται με τη χρήση προσαρμοστικού φίλτρου δευτέρας τάξεως SOGI στον όρο συντονισμού, σύμφωνα με το επόμενο σχήμα:



Σχήμα 4.1-2: Εφαρμογή PR ελεγκτή στο σύστημα ελέγχου ρευμάτων.

Τα μετρούμενα ρεύματα στην έξοδο του LC φίλτρου και τα ρεύματα αναφοράς που προκύπτουν από ανώτερο επίπεδο ελέγχου οδηγούνται στην είσοδο των PR ελεγκτών οι οποίοι με τη σειρά τους καθορίζουν τα ρεύματα αναφοράς των πυκνωτών του φίλτρου που τροφοδοτούνται ως είσοδος στον εσωτερικό βρόχο ελέγχου. Εκεί συγκρίνονται με τα πραγματικά ρεύματα των πυκνωτών και με τη χρήση ενός απλού αναλογικού κέρδους K_c παράγεται τελικά η αναφορά της τάσης εξόδου του αντιστροφέα. Το συγκεκριμένο κέρδος εξασφαλίζει την απόσβεση των ταλαντώσεων που διεγείρονται λόγω του συντονισμού του LC φίλτρου, χωρίς ωστόσο να επηρεάζει τη δυναμική απόκριση και την ακρίβεια του εξωτερικού βρόχου ελέγχου [38].

Καθοριστικό ρόλο στη ταχύτητα απόκρισης του εν λόγω ελεγκτή, ειδικότερα σε συνθήκες σφάλματος του δικτύου, παίζει και η εφαρμογή της πρόσω-τροφοδότησης (feed-forward) της τάσης θετικής ακολουθίας του δικτύου, όπως αυτή προκύπτει από το DSOGI-PLL, για τον καθορισμό των τελικών σημάτων αναφοράς της τάσης. Η συγκεκριμένη τεχνική επιταχύνει τη ρύθμιση του επιθυμητού εγχεόμενου ρεύματος και αποτρέπει τυχόν υπερεντάσεις που μπορεί να προκληθούν στα διακοπτικά στοιχεία, για τις συγκεκριμένες συνθήκες λειτουργίας.

4.1.3 Έλεγχος ενεργού και άεργου ισχύος αντιστροφέα

Η τήρηση του ισοζυγίου ισχύος, έτσι ώστε η ενεργός ισχύς που παράγεται από τα φωτοβολταϊκά να εγχέεται προς το δίκτυο, επιτυγχάνεται με την επιτήρηση της τάσης του DC link στην είσοδο του αντιστροφέα. Μία ενδεχόμενη αύξηση της ισχύος εισόδου που παράγεται από τη Φ/Β εγκατάσταση χωρίς ταυτόχρονη απορρόφηση από το δίκτυο θα προκαλούσε υπέρταση στο DC link του αντιστροφέα και θα είχε ως αποτέλεσμα την αποσύνδεση της μονάδας για λόγους προστασίας. Αντίστοιχα, σε περίπτωση παροχής περισσότερης ενεργού ισχύος σε σχέση με αυτή που παράγεται θα παρατηρηθεί υπόταση στο DC link της διάταξης. Προφανώς μία τέτοια συμπεριφορά δεν είναι αποδεκτή, καθώς ο αντιστροφέας πρέπει να είναι σε θέση να εγγχεί πάντα τη διαθέσιμη ισχύ προς το δίκτυο, διατηρώντας παράλληλα σταθερή την τάση στο DC link.

Για το λόγο αυτό η συγκεκριμένη τάση ρυθμίζεται να ακολουθεί μία σταθερή τιμή αναφοράς με τη χρήση ενός PI ελεγκτή ο οποίος θα παρέχει στην έξοδό του την ενεργό ισχύ αναφοράς που πρέπει να εγχυθεί προς το δίκτυο, έτσι ώστε να εξασφαλιστεί το ισοζύγιο ισχύος. Αντίστοιχα, η άεργος ισχύς αναφοράς για κανονικές συνθήκες λειτουργίας του δικτύου επιλέγεται να είναι μηδενική, καθώς σε αυτήν την περίπτωση υποθέτουμε ότι δε γίνεται υποστήριξη της τάσης.

Αν μετασχηματίσουμε κατά Park τις τάσεις και τα ρεύματα στην έξοδο του LC φίλτρου του αντιστροφέα, με χρήση της φάσης που εξασφαλίζει η εφαρμογή του DSOGI-

PLL, ο υπολογισμός της ενεργού και αέργου ισχύος γίνεται σύμφωνα με τους επόμενους τύπους:

$$P = \frac{3}{2} * (V_d I_d + V_q I_q) \quad (4.2)$$

$$Q = \frac{3}{2} * (V_q I_d - V_d I_q)$$

Από τις παραπάνω σχέσεις προκύπτουν οι αναφορές των ρευμάτων στην έξοδο του αντιστροφέα στο dq πλαίσιο αναφοράς ως εξής:

$$I_d^* = \frac{2}{3} * \frac{P^* V_d + Q^* V_q}{V_d^2 + V_q^2} \quad (4.3)$$

$$I_q^* = \frac{2}{3} * \frac{P^* V_q - Q^* V_d}{V_d^2 + V_q^2}$$

Όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενο κεφάλαιο, ο συγχρονισμός του αντιστροφέα με το δίκτυο επιτυγχάνεται ευθυγραμμίζοντας τον d άξονα του dq πλαισίου αναφοράς με το χωρικό διάνυσμα της τάσης στην έξοδο του φίλτρου, οδηγώντας επί της ουσίας σε μηδενισμό της q συνιστώσας της τάσης. Επομένως οι σχέσεις (4.3) παίρνουν την ακόλουθη μορφή:

$$I_d^* = \frac{2}{3} * \frac{P^*}{V_d} \quad (4.4)$$

$$I_q^* = -\frac{2}{3} * \frac{Q^*}{V_d}$$

Με βάση τις τελευταίες σχέσεις γίνεται εμφανής η απόζευξη μεταξύ των d και q συνιστωσών του ρεύματος, η οποία επιτυγχάνεται με τέτοιο τρόπο ώστε η d συνιστώσα να καθορίζει την ενεργό ισχύ που εγχέεται προς το δίκτυο και η q συνιστώσα την άεργο ισχύ αντίστοιχα. Για το λόγο αυτό οι δύο συγκεκριμένες συνιστώσες αναφέρονται συχνά και ως ενεργός και άεργος συνιστώσα ρεύματος.

Επομένως ο PI ελεγκτής που ρυθμίζει την DC τάση στην είσοδο του αντιστροφέα θα μπορούσε να εξάγει απευθείας την ενεργό συνιστώσα ρεύματος, εξαιτίας της αναλογικότητάς της με την ενεργό ισχύ που παρέχεται στο δίκτυο. Ωστόσο, στο παραπάνω σύστημα η συγκεκριμένη συνιστώσα προκύπτει με εφαρμογή της πρώτης εκ των σχέσεων (4.4) και με χρήση της τάσης θετικής ακολουθίας V_d^+ , η οποία προκύπτει από το σύστημα συγχρονισμού της διάταξης και για κανονικές συνθήκες λειτουργίας ισούται με την πραγματική τάση του δικτύου V_d . Η χρήση της συγκεκριμένης τάσης οφείλεται στο γεγονός ότι σε ασύμμετρες καταστάσεις εμφανίζονται ταλαντώσεις συχνότητας διπλάσιας του δικτύου στην πραγματική τάση, όπως θα δούμε και στη συνέχεια, οι οποίες είναι ανεπιθύμητες. Αντίστοιχα, ο μηδενισμός της αέργου συνιστώσας ρεύματος ικανοποιεί τη

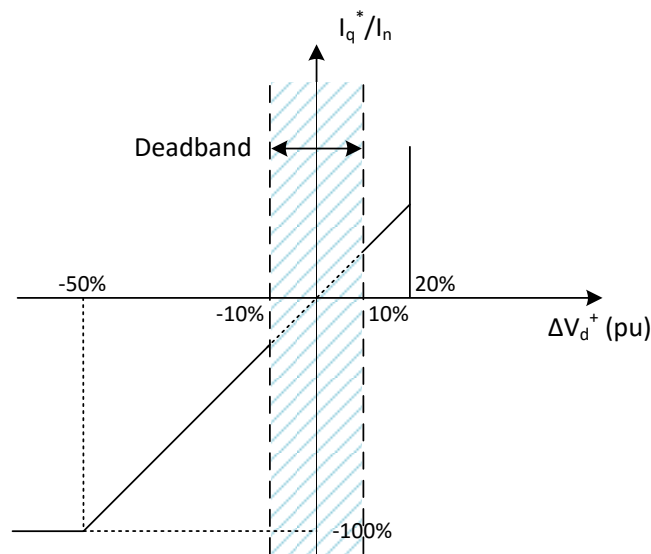
μηδενική παροχή αέργου ισχύος προς το δίκτυο. Μετασχηματίζοντας τις συγκεκριμένες συνιστώσες από το dq στο $\alpha\beta$ πλαίσιο αναφοράς, με χρήση του αντίστροφου μετασχηματισμού Park, εξάγουμε τελικά τις αναφορές ρεύματος οι οποίες οδηγούνται στον ελεγκτή ρευμάτων του αντιστροφέα, που αποτελεί και τον εσωτερικό βρόχο ανάδρασης του συνολικού συστήματος.

4.1.4 Έλεγχος σε συνθήκες σφάλματος του δικτύου

Η λειτουργία του ελέγχου που αναλύθηκε έως τώρα αφορά τις κανονικές συνθήκες λειτουργίας του δικτύου. Σε περίπτωση εμφάνισης σφαλμάτων πρέπει να προστεθούν επιπλέον επίπεδα ελέγχου τα οποία θα εξασφαλίζουν την ορθή λειτουργία του αντιστροφέα, σύμφωνα με τους κώδικες του δικτύου. Η λειτουργία αυτή εστιάζει στην κατάλληλη αναδιαμόρφωση της ενεργού και αέργου ισχύος που εγχέεται προς το δίκτυο, χωρίς να παρουσιαστεί πρόβλημα αποσύνδεσης της διάταξης, εξαιτίας υπέρτασης στο DC link ή υπερέντασης στα ημιαγωγικά στοιχεία του αντιστροφέα. Επιπλέον εισάγεται και η έννοια του φίλτρου σχισμής (notch filter), το οποίο εφαρμόζεται στην DC τάση του αντιστροφέα και είναι υπεύθυνο για την απόρριψη της κυμάτωσης που προκύπτει σε ασύμμετρες καταστάσεις.

4.1.4.1 Έλεγχος αέργου συνιστώσας ρεύματος

Βασική απαίτηση των κωδίκων, οι οποίοι παρουσιάστηκαν στο πρώτο κεφάλαιο, αποτελεί η έγχυση αέργων ρευμάτων σε περίπτωση που παρατηρηθεί βύθιση τάσης μεγαλύτερη από ένα κατώφλι, το οποίο στη συγκεκριμένη εργασία επιλέγεται να είναι το 10% της ονομαστικής τιμής της τάσης του δικτύου. Η συγκεκριμένη απαίτηση αφορά τις συμμετρικές βυθίσεις τάσεις, ωστόσο εμείς θα επεκτείνουμε την εφαρμογή της και για τα ασύμμετρα σφάλματα, εισάγοντας την τάση θετικής ακολουθίας του δικτύου ως ελεγχόμενο επίπεδο τάσης, όπως παρέχεται από το PLL του συστήματος. Τα αέρια ρεύματα αναφοράς σε αυτή την περίπτωση επιλέγονται με βάση το ακόλουθο σχήμα:



Σχήμα 4.1-3: Ρύθμιση αέργου συνιστώσας ρεύματος αναφοράς ανάλογα με την πτώση της τάσης θετικής ακολουθίας, για υποστήριξη του δικτύου.

Από το παραπάνω διάγραμμα γίνεται εμφανές ότι η άεργος συνιστώσα του ρεύματος ορίζεται σε ποσοστό του ονομαστικού ρεύματος I_n , το οποίο ρέει για ονομαστική ισχύ της μονάδας, ονομαστική τάση του δικτύου και μοναδιαίο συντελεστή ισχύος. Επίσης, επιλέγεται 2% συνεισφορά άεργου ρεύματος για κάθε 1% πτώση τάσης, που αποτελεί και το κατώτατο όριο των κωδίκων δικτύου. Η τελική σχέση υπολογισμού της άεργου συνιστώσας ρεύματος αναφοράς δίνεται από τον επόμενο τύπο:

$$\frac{I_q^*}{I_n} = 2 * \frac{V_d^+ - V_n}{V_n} \quad (4.5)$$

Να σημειωθεί ότι εντός της νεκρής ζώνης όπου η τάση θετικής ακολουθίας παρουσιάζει πτώση μικρότερη του 10%, επιλέγεται να μην παρέχεται υποστήριξη προς το δίκτυο, επομένως μηδενίζεται κατά τα γνωστά η άεργος συνιστώσα ρεύματος και εφαρμόζεται ο έλεγχος που ίσχυε για τις κανονικές συνθήκες λειτουργίας.

4.1.4.2 Περιορισμός ενεργού ισχύος Φ/Β μονάδας

Σε σοβαρά σφάλματα του δικτύου, όπου απαιτείται η έγχυση μεγάλου ποσού άεργου ισχύος, είναι δυνατόν να ξεπεραστούν τα θερμικά όρια των διακοπτικών στοιχείων του αντιστροφέα αν δεν εφαρμοστεί κατάλληλος έλεγχος περιορισμού της ενεργού συνιστώσας ρεύματος. Σε τέτοιες περιπτώσεις δίνεται πάντα προτεραιότητα στην έγχυση άεργου ισχύος, σύμφωνα με τη στρατηγική που αναφέρθηκε προηγουμένως, ενώ παράλληλα γίνεται προσαρμογή της ενεργού ισχύος που παράγεται από τη μονάδα, έτσι ώστε να μην ξεπεραστούν αυτά τα όρια.

Η διαδικασία αυτή ολοκληρώνεται σε δύο στάδια. Στο πρώτο, έχοντας δεδομένο το επίπεδο της άεργου συνιστώσας ρεύματος, επιλέγεται το ανώτατο όριο της ενεργού συνιστώσας σύμφωνα με τον επόμενο τύπο:

$$I_{d,max}^* = \sqrt{I_{max,th}^2 - I_q^{*2}} \quad (4.6)$$

Στη συγκεκριμένη σχέση ο όρος $I_{max,th}$ αναφέρεται στο πλάτος του μέγιστου ρεύματος που μπορούν να αντέξουν τα ημιαγωγικά στοιχεία του αντιστροφέα για σύντομο χρονικό διάστημα, όση είναι και η διάρκεια των σφαλμάτων στην πραγματικότητα. Η ισχύς της παραπάνω σχέσης οφείλεται στη σχέση καθετότητας που υπάρχει μεταξύ των dq συνιστωσών, οπότε το συνολικό ρεύμα εξόδου του αντιστροφέα μπορεί να υπολογιστεί εύκολα από την τετραγωνική ρίζα του αθροίσματός τους, σε συμμετρικές καταστάσεις. Όταν η τιμή του ρεύματος στην έξοδο του αντιστροφέα ξεπεράσει το παραπάνω θερμικό όριο, θα εφαρμοστεί περιορισμός της ενεργού συνιστώσας ρεύματος με βάση τη σχέση (4.6), προκαλώντας μείωση στην ενεργό ισχύ που εγχέει ο αντιστροφέας προς το δίκτυο.

Σε αυτήν την περίπτωση πρέπει να υπάρξει κατάλληλη μέριμνα έτσι ώστε να μειωθεί αντίστοιχα και η ενεργός ισχύς που παράγει η Φ/Β μονάδα, καθώς σε διαφορετική περίπτωση θα προκληθεί υπέρταση στο DC link της διάταξης, λόγω της συσσώρευσης ισχύος. Η λειτουργία αυτή πραγματοποιείται στο δεύτερο στάδιο της διαδικασίας περιορισμού με την εφαρμογή ενός συστήματος ελέγχου το οποίο για τις συγκεκριμένες συνθήκες θα προκαλεί μετακίνηση της καμπύλης των φωτοβολταϊκών από το σημείο της μέγιστης απολαβής ισχύος (MPP) σε άλλο μικρότερης ισχύος. Στο πραγματικό σύστημα η

μετακίνηση αυτή επιτυγχάνεται με αύξηση της τάσης των Φ/B προς την πλευρά της τάσης ανοιχτοκύκλωσης, με επιτήρηση της τάσης στο DC link και κατάλληλη παλμοδότηση του διακοπτικού στοιχείου του DC/DC μετατροπέα ισχύος.

Στο δικό μας σύστημα, όπου η διάταξη πριν από το DC link έχει αναπαρασταθεί με μία ιδανική πηγή ρεύματος, ο περιορισμός αυτός επιτυγχάνεται με έλεγχο του ρεύματος της συγκεκριμένης πηγής με τη χρήση ενός PI ελεγκτή ο οποίος ρυθμίζει στην είσοδό του τη DC τάση του αντιστροφέα, έτσι ώστε να διατηρεί σταθερή την ονομαστική της τιμή. Η συγκεκριμένη λειτουργία ενεργοποιείται μόνο όταν η τάση θετικής ακολουθίας του δικτύου παρουσιάσει πτώση τάσης μεγαλύτερη του 10% της ονομαστικής τιμής, δηλαδή για συνθήκες σφάλματος, ενώ σε διαφορετική περίπτωση ορίζεται το ρεύμα της μέγιστης παροχής ισχύος I_{MPP} , που ισχύει για την παροχή της ονομαστικής ισχύος της μονάδας σε κανονικές συνθήκες του δικτύου.

4.1.4.3 Εφαρμογή φίλτρου σχισμής στην τάση του DC link της διάταξης

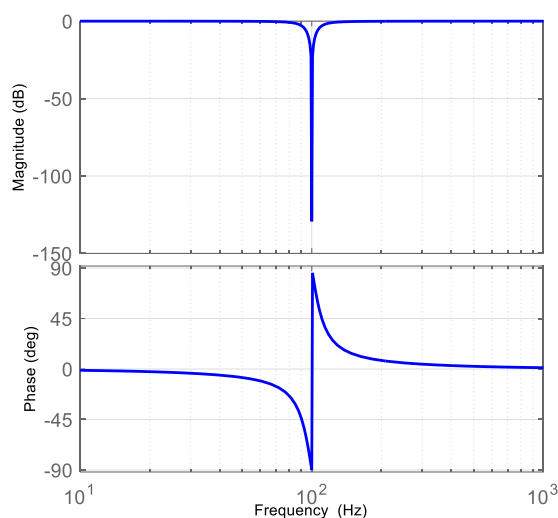
Όπως θα δούμε και στη συνέχεια, σε ασύμμετρες καταστάσεις του δικτύου η εμφάνιση συνιστωσών αρνητικής ακολουθίας στις τάσεις εξόδου του αντιστροφέα προκαλούν ταλαντώσεις συχνότητας διπλάσιας του δικτύου (100Hz) στην ενεργό ισχύ που εγχέεται προς το δίκτυο. Οι συγκεκριμένες ταλαντώσεις μεταφέρονται και στην τάση του DC link της διάταξης, λόγω του ισοζυγίου ισχύος που εφαρμόζεται στο συγκεκριμένο σημείο και επομένως επιβαρύνουν τον έλεγχο που πραγματοποιείται για την εξαγωγή της αναφοράς της ενεργού συνιστώσας ρεύματος I_d^* , καθώς και του ρεύματος της πηγής στην είσοδο του αντιστροφέα I_{PV} , τα οποία επιθυμούμε να έχουν σταθερή τιμή. Επιπλέον, οι PI ελεγκτές που χρησιμοποιούνται στις παραπάνω περιπτώσεις λειτουργούν ικανοποιητικά μόνο για DC μεγέθη.

Για το λόγο αυτό κρίνεται σκόπιμη η εφαρμογή ενός φίλτρου το οποίο θα αποκόπτει πλήρως τις ταλαντώσεις διπλάσιας συχνότητας και θα επιτρέπει τη μετάδοση των DC μεγεθών, που είναι απαραίτητα για τον έλεγχο. Στην παρούσα εργασία το συγκεκριμένο ρόλο αναλαμβάνει ένα φίλτρο σχισμής (notch filter), του οποίου η συνάρτηση μεταφοράς δίνεται στη συνέχεια [43]:

$$F(s) = \frac{s^2 + \omega_c^2}{s^2 + \frac{\omega_c}{Q}s + \omega_c^2} \quad (4.7)$$

Όπου ω_c είναι η συχνότητα αποκοπής του φίλτρου και $Q = \omega_c / \omega_{3dB}$ ο λόγος μεταξύ της συχνότητας αποκοπής και του εύρους 3dB. Στη συγκεκριμένη εφαρμογή η συχνότητα που θέλουμε να αποκόψουμε είναι τα 100Hz, ενώ ο παράγοντας Q επιλέχθηκε να πάρει την τιμή 5.

Το διάγραμμα Bode του φίλτρου για τις συγκεκριμένες παραμέτρους φαίνεται στο σχήμα 4.1-4. Παρατηρούμε ότι όντως κατά την εφαρμογή του απορρίπτονται πλήρως όλα τα μεγέθη συχνότητας 100Hz, ενώ για τις DC ποσότητες εφαρμόζεται μοναδιαίο κέρδος. Επομένως, με αυτόν τον τρόπο πετυχαίνουμε τελικά την εξαγωγή σταθερών ρευμάτων και την ορθή λειτουργία του ελέγχου ακόμα και σε ασύμμετρες καταστάσεις και παρά τις ταλαντώσεις διπλάσιας συχνότητας που εισάγονται στο DC link της διάταξης.



Σχήμα 4.1-4: Διαγράμματα Bode φίλτρου σχισμής (notch filter) με συχνότητα αποκοπής στα 100Hz.

4.2 Ανεξάρτητος έλεγχος ρευμάτων τριών φάσεων αντιστροφέα (IPCC)

Σε περίπτωση εμφάνισης σφαλμάτων στο δίκτυο, η στρατηγική που παρουσιάστηκε στην προηγούμενη παράγραφο δίνει τη δυνατότητα έγχυσης άεργων ρευμάτων θετικής ακολουθίας μόνο. Τα ρεύματα αυτά προκαλούν αύξηση της τάσης θετικής ακολουθίας του δικτύου, λόγω της επαγωγικής συμπεριφοράς που παρουσιάζει και επομένως ομοιόμορφη ανύψωση της τάσης των τριών φάσεων. Η συγκεκριμένη συμπεριφορά γίνεται πιο έντονη όταν το δίκτυο στο σημείο σύνδεσης με τη μονάδα παραγωγής είναι ασθενές και χαρακτηρίζεται από μεγάλη ισοδύναμη επαγωγική αντίσταση.

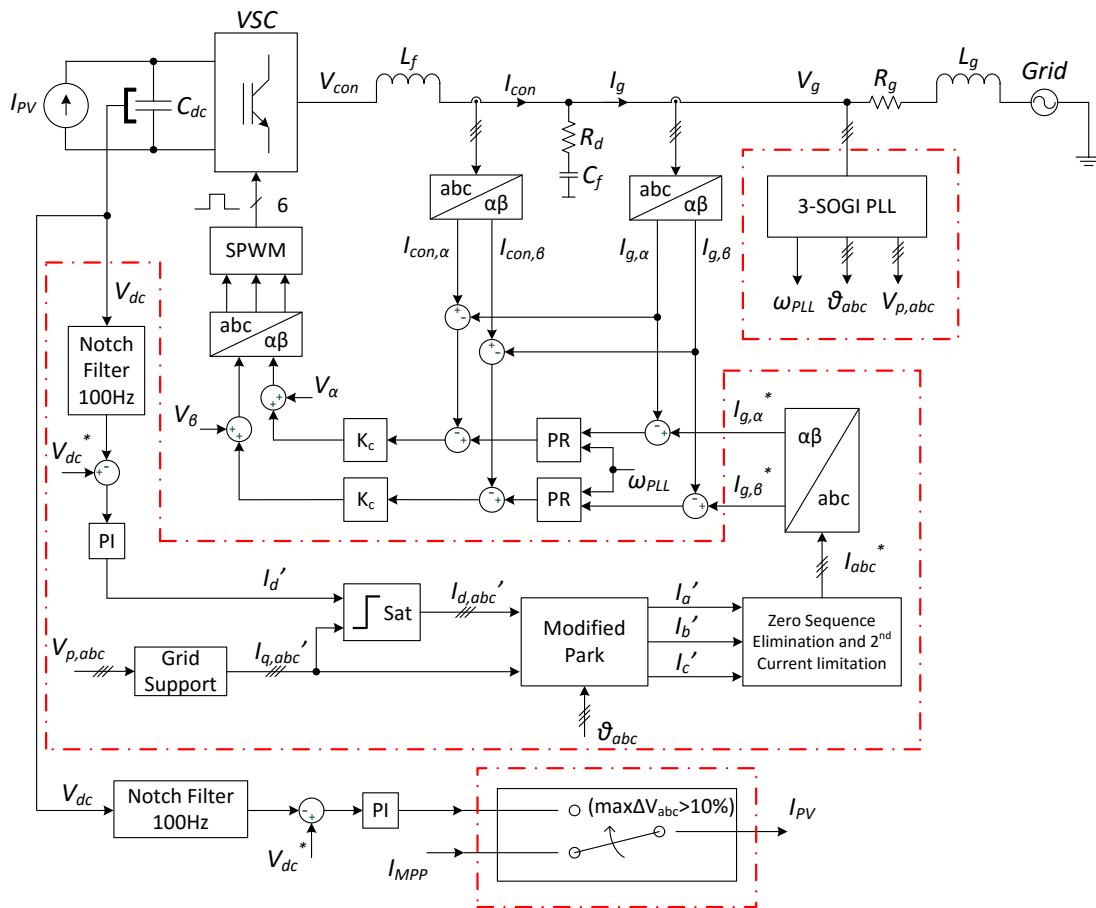
Το δίκτυο συνήθως αποκτά τέτοια χαρακτηριστικά σε αποκεντρωμένες περιοχές και νησιά, όπου έχει σχεδιαστεί για να εξυπηρετεί σχετικά μικρά φορτία και κυρίως στο επίπεδο της Μέσης και της Χαμηλής Τάσης [44], [45]. Προκειμένου να ικανοποιηθούν οι απαιτήσεις των καταναλωτών σε αυτές τις περιπτώσεις χρησιμοποιούνται μεγάλες σε μήκος γραμμές μεταφοράς οι οποίες χαρακτηρίζονται από μεγαλύτερη επαγωγική αντίσταση και είναι αυτές που προκαλούν την ασθενή συμπεριφορά του δικτύου. Λαμβάνοντας υπόψη ότι οι μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής εγκαθίστανται συνήθως σε τέτοιες περιοχές, γίνεται κατανοητό ότι η παραπάνω συμπεριφορά αποτελεί συχνό φαινόμενο.

Προκύπτει επομένως ένα ουσιαστικό πρόβλημα κατά την εμφάνιση ασύμμετρων σφαλμάτων στο δίκτυο, καθώς με την εφαρμογή της προηγούμενης στρατηγικής ελέγχου θα προκληθεί ανύψωση της τάσης ακόμα και σε μία φάση η οποία ενδεχομένως να μην παρουσιάζει σφάλμα. Η συγκεκριμένη ανύψωση είναι δυνατόν να ξεπεράσει τα όρια του 10% της ονομαστικής τιμής της τάσης, γεγονός που αντιτίθεται στις απαιτήσεις των γερμανικών κωδίκων δικτύου. Για το λόγο αυτό, στη συγκεκριμένη παράγραφο προτείνεται μία νέα τεχνική ελέγχου η οποία ελέγχει τα ρεύματα των τριών φάσεων στην έξοδο του αντιστροφέα με ανεξάρτητο τρόπο και προκαλεί έγχυση ασύμμετρων ρευμάτων κατά τη διάρκεια ασύμμετρων βυθίσεων τάσης, με στόχο την υποστήριξη κυρίως των φάσεων που

παρουσιάζουν σφάλμα [46]. Η συγκεκριμένη συμπεριφορά μπορεί να απαιτηθεί από τον αρμόδιο διαχειριστή του δικτύου αν το κρίνει κατάλληλο, όπως τονίζεται και από τους κανονισμούς του ENTSO-E που παρουσιάστηκαν παραπάνω.

4.2.1 Γενική περιγραφή συστήματος ελέγχου

Η δομή του ανεξάρτητου ελέγχου ρεύματος των τριών φάσεων (Individual Phase Current Control) παρουσιάζεται στο σχήμα 4.2-1. Σε σχέση με τη στρατηγική ελέγχου ρευμάτων θετικής ακολουθίας που παρουσιάστηκε προηγουμένως, εισάγονται διαφοροποιήσεις στη λειτουργία της διάταξης PLL, στη διαδικασία υπολογισμού των επιθυμητών ρευμάτων αναφοράς (εξωτερικός βρόχος ελέγχου), καθώς και στα κριτήρια περιορισμού της ενεργού ισχύος εισόδου από τη συστοιχία των φωτοβολταϊκών. Στο σχήμα διακρίνονται οι παραπάνω διαφοροποιήσεις με κόκκινο χρώμα, ενώ η ανάλυσή τους θα γίνει στις επόμενες παραγράφους. Ο έλεγχος των ρευμάτων γίνεται και πάλι στο $\alpha\beta$ πλαίσιο, στο οποίο όπως θα δούμε και στη συνέχεια δίνεται η δυνατότητα έγχυσης ασύμμετρων ρευμάτων.

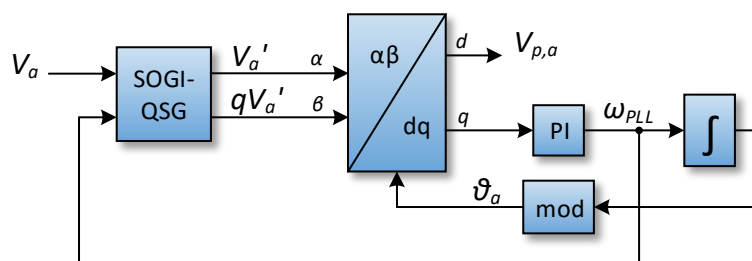


Σχήμα 4.2-1: Δομικό διάγραμμα ανεξάρτητου ελέγχου ρευμάτων αντιστροφή IPCC.

4.2.2 Τροποποιημένο σύστημα συγχρονισμού με χρήση μονοφασικών PLL

Για την υλοποίηση του συγκεκριμένου συστήματος ελέγχου απαιτείται η χρήση μίας διάταξης PLL η οποία θα εξασφαλίζει τον εντοπισμό της γωνίας και του πλάτους της τάσης

κάθε φάσης ξεχωριστά. Για το σκοπό αυτό κρίνεται κατάλληλη η χρήση τριών μονοφασικών PLL τα οποία θα είναι προσαρμοστικά ως προς τη συχνότητα και θα εξασφαλίζουν τον εντοπισμό των παραπάνω μεγεθών. Οι προηγούμενες ιδιότητες επιτυγχάνονται με την εφαρμογή της διάταξης PLL του σχήματος 4.2-2 [47], η οποία παρουσιάζεται για τον εντοπισμό της γωνίας και του πλάτους της τάσης της φάσης a , αλλά εφαρμόζεται με πανομοιότυπο τρόπο και για τις άλλες δύο φάσεις.



Σχήμα 4.2-2: Σχηματικό διάγραμμα μονοφασικού PLL με χρήση γεννήτριας παραγωγής κάθετων διανυσμάτων (1ph-SOGI-PLL).

Στη συγκεκριμένη διάταξη γίνεται εφαρμογή της γεννήτριας παραγωγής κάθετων διανυσμάτων με χρήση προσαρμοστικών φίλτρων δευτέρας τάξεως (SOGI-QSG), η οποία παρουσιάστηκε και αναλύθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο. Καθεμία από τις τρεις φασικές τάσεις, οι οποίες μετρούνται στην έξοδο του φίλτρου του αντιστροφέα, οδηγείται στην είσοδο του SOGI-QSG, οπότε παράγεται ένα φιλτραρισμένο και ένα κάθετο σήμα της τάσης. Τα δύο αυτά σήματα μπορούμε να υποθέσουμε ότι δημιουργούν ένα στρεφόμενο διάνυσμα το οποίο στρέφεται με τη συχνότητα της τάσης που δέχεται το SOGI-QSG στην είσοδό του και επομένως μπορούν να αναπαρασταθούν στο $\alpha\beta$ πλαίσιο αναφοράς, όπου η α συνιστώσα ταυτίζεται με το φιλτραρισμένο σήμα της τάσης εισόδου και η β συνιστώσα με το κάθετο σήμα.

Δεδομένου ότι οι δύο συνιστώσες χαρακτηρίζονται από το ίδιο πλάτος, μπορούμε να θεωρήσουμε ότι αναπαριστούν ένα συμμετρικό τριφασικό σύστημα τάσεων. Επομένως μπορούν να μετασχηματιστούν κατάλληλα στο dq πλαίσιο αναφοράς και να γίνει η εφαρμογή της λογικής ελέγχου του SRF-PLL, χωρίς την ύπαρξη ταλαντώσεων διπλάσιας συχνότητας (100Hz). Με αυτόν τον τρόπο πετυχαίνεται τελικά ο εντοπισμός της γωνίας και της συχνότητας της εκάστοτε φάσης, ενώ προκύπτει και το αντίστοιχο πλάτος της τάσης, το οποίο ταυτίζεται με τη d συνιστώσα του συστήματος τάσεων. Η ανατροφοδότηση της εντοπισμένης κυκλικής συχνότητας στη γεννήτρια SOGI-QSG εξασφαλίζει την προσαρμοστικότητα του τελικού μονοφασικού συστήματος PLL (1phase SOGI-PLL) σε μεταβολές της συχνότητας.

4.2.3 Παραγωγή ρευμάτων αναφοράς

Στη συγκεκριμένη στρατηγική η ενεργός συνιστώσα των ρευμάτων αναφοράς I_d' καθορίζεται απευθείας από την έξοδο του PI ελεγκτή ο οποίος εφαρμόζεται στην τάση του DC link του αντιστροφέα, εξαιτίας της άμεσης σχέσης της με την ενεργό ισχύ, όπως αναφέραμε και στην προηγούμενη παράγραφο. Κατά τα γνωστά το notch filter εφαρμόζεται στην DC τάση πριν τη διαδικασία του ελέγχου, προκειμένου να απορριφθούν οι ταλαντώσεις διπλάσιας συχνότητας.

Η πρώτη σημαντική διαφοροποίηση εισάγεται στον τρόπο υπολογισμού της άεργης συνιστώσας των ρευμάτων αναφοράς, όπου πλέον δεν χρησιμοποιείται ως κριτήριο το επίπεδο της τάσης θετικής ακολουθίας του δικτύου V_d^+ , αλλά το πλάτος των τάσεων των τριών φάσεων στην έξοδο του αντιστροφέα $V_{p,a}$, $V_{p,b}$ και $V_{p,c}$, όπως προκύπτουν από τη διάταξη PLL που παρουσιάστηκε παραπάνω. Επί της ουσίας εφαρμόζεται ο κανονισμός υποστήριξης του δικτύου που παρουσιάστηκε στο σχήμα 4.1-3 με χρήση του μεγέθους της πτώσης τάσης που παρατηρείται σε κάθε φάση, οπότε τελικά προκύπτουν τρεις αναφορές άεργων συνιστωσών ρεύματος $I'_{q,abc}$ σύμφωνα με τον επόμενο τύπο:

$$\frac{I'_{q,x}}{I_n} = 2 * \frac{V_{p,x} - V_n}{V_n}, \quad x \in \{a, b, c\} \quad (4.8)$$

Η προηγούμενη σχέση εφαρμόζεται μόνο όταν η πτώση τάσης στην εκάστοτε φάση ξεπεράσει τα όρια του 10% της ονομαστικής τάσης. Σε διαφορετική περίπτωση οι τρεις αναφορές παίρνουν μηδενική τιμή, καθώς δεν απαιτείται η υποστήριξη της αντίστοιχης φάσης.

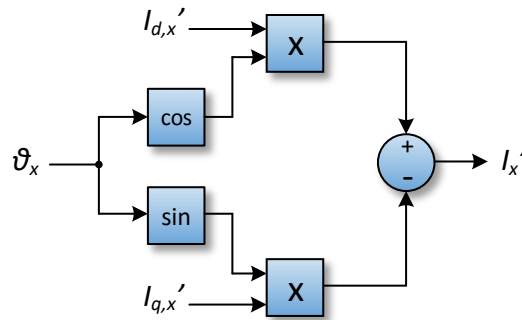
4.2.3.1 Περιορισμός ενεργών ρευμάτων αντιστροφέα

Με δεδομένες τις παραπάνω τιμές άεργων συνιστωσών μπορεί να εφαρμοστεί πλέον περιορισμός της ενεργού συνιστώσας ανεξάρτητα σε κάθε φάση, έτσι ώστε να μην ξεπεραστούν τα θερμικά όρια του αντιστροφέα. Ο συγκεκριμένος περιορισμός πραγματοποιείται σύμφωνα με την επόμενη σχέση:

$$I'_{d,x} = \begin{cases} I'_d, & \text{αν } \sqrt{I'_d{}^2 + I'_{q,x}{}^2} \leq I_{max,th} \\ \sqrt{I_{max,th}^2 - I'_{q,x}{}^2}, & \text{αν } \sqrt{I'_d{}^2 + I'_{q,x}{}^2} > I_{max,th} \end{cases} \quad (4.9)$$

Ο όρος $I_{max,th}$ είναι ο ίδιος με την προηγούμενη τεχνική και αφορά το πλάτος του μέγιστου επιτρεπτού ρεύματος που μπορούν να αντέξουν τα διακοπτικά στοιχεία για μικρό χρονικό διάστημα, ενώ ο συντελεστής x εκπροσωπεί τις φάσεις a , b και c . Από την παραπάνω σχέση γίνεται εμφανές ότι σε περίπτωση υπέρβασης των ορίων του αντιστροφέα κατά τη διάρκεια ενός σφάλματος, δίνεται και πάλι προτεραιότητα στην έγχυση άεργων ρευμάτων σύμφωνα με τη σχέση (4.8), ενώ οι ενεργές συνιστώσες προσαρμόζονται στις συγκεκριμένες συνθήκες με στόχο την τήρηση των συγκεκριμένων ορίων.

Τελικά, μετά την εφαρμογή του περιορισμού προκύπτουν τρεις αναφορές ενεργών και τρεις αναφορές άεργων συνιστωσών ρεύματος, μία για κάθε φάση. Οι συγκεκριμένες αναφορές δίνονται σε έναν "τροποποιημένο" αντίστροφο μετασχηματισμό Park, απ' όπου προκύπτουν οι αναφορές ρευμάτων σε κάθε φάση. Στην ουσία πρόκειται για το γνωστό μετασχηματισμό από dq σε abc πλαίσιο, με τη διαφορά ότι για την εξαγωγή του ρεύματος αναφοράς κάθε φάσης χρησιμοποιούνται διαφορετικά dq μεγέθη, καθώς και διαφορετική γωνία. Ο τρόπος υπολογισμού των ρευμάτων, στον οποίο χρησιμοποιούνται και οι γωνίες της τάσης των τριών φάσεων του δικτύου όπως προκύπτουν από το PLL του συστήματος, φαίνεται στο επόμενο σχήμα, όπου ο δείκτης x υποδηλώνει μία από τις φάσεις a , b και c .



Σχήμα 4.2-3: Τροποποιημένος αντίστροφος μετασχηματισμός Park.

4.2.3.2 Απόρριψη μηδενικής ακολουθίας από τα ρεύματα αναφοράς

Ο ανεξάρτητος τρόπος υπολογισμού των ρευμάτων αναφοράς των τριών φάσεων προκαλεί την εμφάνιση συνιστώσας μηδενικής ακολουθίας κατά τη διάρκεια κυρίως των ασύμμετρων σφαλμάτων. Η ύπαρξη της συγκεκριμένης συνιστώσας σημαίνει ότι το άθροισμα των τριών ρευμάτων είναι μη μηδενικό και επομένως πρέπει να εξασφαλιστεί η ροή του διαμέσου του κυκλώματος γείωσης. Ωστόσο στο σύστημα αντιστροφέα τριών αγωγών που εξετάζουμε το κύκλωμα γείωσης είναι ανοιχτό και επομένως δεν υποστηρίζεται η ύπαρξη της συγκεκριμένης συνιστώσας. Για το λόγο αυτό η συνιστώσα μηδενικής ακολουθίας πρέπει να απορριφθεί από τις αναφορές ρευμάτων.

Η παραπάνω λειτουργία μπορεί να επιτευχθεί με την εφαρμογή ενός μετασχηματισμού Clarke ($abc/\alpha\beta$) στις αναφορές ρευμάτων. Ο συγκεκριμένος μετασχηματισμός, όπως έχει εξηγηθεί και σε προηγούμενο κεφάλαιο, αμελεί την ύπαρξη της συνιστώσας μηδενικής ακολουθίας, καθώς η αναπαράσταση του διανύσματος ρεύματος στο $\alpha\beta$ πλαίσιο είναι ίδια με ή χωρίς την ύπαρξη της συγκεκριμένης συνιστώσας.

Ένας ισοδύναμος τρόπος απόρριψης της μηδενικής ακολουθίας πετυχαίνεται αν αφαιρέσουμε από τις αναφορές των ρευμάτων των τριών φάσεων το ένα τρίτο του κοινού ρεύματος σύμφωνα με τον επόμενο τύπο:

$$\begin{aligned}\bar{I}_a &= I'_a - k_a I_0 \\ \bar{I}_b &= I'_b - k_b I_0 \\ \bar{I}_c &= I'_c - k_c I_0\end{aligned}\tag{4.10}$$

Όπου:

$$\begin{aligned}I_0 &= I'_a + I'_b + I'_c \\ k_a &= k_b = k_c = 1/3\end{aligned}$$

Σε συμμετρικές καταστάσεις το κοινό ρεύμα θα είναι μηδενικό ή πολύ μικρό. Αντίθετα, κατά τη διάρκεια ασύμμετρων σφαλμάτων το ίδιο ρεύμα παίρνει πολύ μεγάλες τιμές, επομένως εφαρμόζοντας τις παραπάνω εξισώσεις οι νέες αναφορές ενδέχεται να διαφέρουν σημαντικά σε σχέση με τις αρχικές τιμές. Αυτό μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα να αυξηθούν σημαντικά οι άεργες συνιστώσες ρευμάτων στις φάσεις που δεν παρουσιάζουν σφάλμα και επομένως σε ένα ασθενές δίκτυο να προκύψει αύξηση του επιπέδου της τάσης πάνω από τα όρια.

Μία εναλλακτική πρόταση για να αποφευχθεί το παραπάνω πρόβλημα είναι να μεταβάλουμε τις αρχικές αναφορές των ρευμάτων ανάλογα με την έγχυση άεργων ρευμάτων που παρατηρείται σε κάθε φάση, διατηρώντας αμετάβλητες τις φάσεις στις οποίες δεν είναι επιθυμητή η υποστήριξη του δικτύου. Για παράδειγμα αν σε ένα ασύμμετρο σφάλμα δεν παρατηρείται βύθιση της τάσης στη φάση a , ο συντελεστής k_a της σχέσης (4.10) θα πρέπει να πάρει μηδενική τιμή και η συνιστώσα μηδενικής ακολουθίας των ρευμάτων απορρίπτεται τελικά μεταβάλλοντας τις αναφορές ρευμάτων στις άλλες δύο φάσεις, ορίζοντας τέτοιες τιμές στους συντελεστές k_b και k_c έτσι ώστε $k_b + k_c = 1$. Στη συγκεκριμένη εφαρμογή θα επιλέξουμε να απορρίψουμε το κοινό ρεύμα κατά το ίδιο ποσοστό από όλες τις φάσεις που παρουσιάζουν σφάλμα, επομένως για το παραπάνω παράδειγμα θα επιλέγαμε $k_b = k_c = 1/2$.

4.2.3.3 Εφαρμογή δεύτερου περιορισμού ρευμάτων

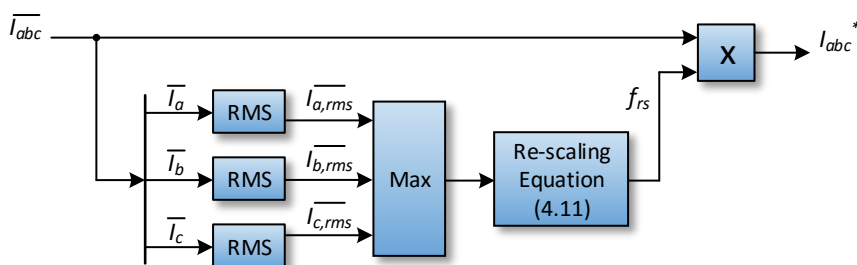
Η διαδικασία απόρριψης της συνιστώσας μηδενικής ακολουθίας θα προκαλέσει μεταβολές στα πλάτη των νέων ρευμάτων αναφοράς οι οποίες ενδεχομένως να οδηγήσουν εκ νέου σε κατάσταση υπερρεύματος. Προκειμένου να παραμείνουμε εντός θερμικών ορίων αντιστροφέα μετά και το πέρας της παραπάνω διαδικασίας εφαρμόζεται ένας δεύτερος περιοριστής ρευμάτων στις αναφορές που προκύπτουν μετά την απόρριψη του κοινού ρεύματος. Στα πλαίσια του συγκεκριμένου περιορισμού γίνεται μέτρηση αρχικά της rms τιμής των τριών παραπάνω αναφορών. Το μέγιστο ρεύμα που προκύπτει από τις τρεις φάσεις $\bar{I}_{max-rms}$ συγκρίνεται με την rms τιμή του θερμικού ορίου του αντιστροφέα $I_{rms,th}$ και σε περίπτωση που το υπερβεί όλα τα ρεύματα πολλαπλασιάζονται με έναν παράγοντα f_{rs} ο οποίος προκύπτει από την επόμενη σχέση:

$$f_{rs} = \begin{cases} 1, & \text{αν } \bar{I}_{max-rms} \leq I_{rms,th} \\ \frac{I_{rms,th}}{\bar{I}_{max-rms}}, & \text{αν } \bar{I}_{max-rms} > I_{rms,th} \end{cases} \quad (4.11)$$

Η παραπάνω διαδικασία φαίνεται αναλυτικά στο σχήμα 4.2-4. Τα ρεύματα που προκύπτουν από αυτό το δεύτερο στάδιο περιορισμού υπολογίζονται σύμφωνα με την επόμενη σχέση.

$$I_{abc}^* = f_{rs} * \bar{I}_{abc} \quad (4.12)$$

Τα ρεύματα αυτά αποτελούν τις τελικές αναφορές ρευμάτων, οι οποίες στη συνέχεια μετασχηματίζονται στο $\alpha\beta$ πλαίσιο αναφοράς μέσω Clarke και οδηγούνται στον εσωτερικό βρόχο ελέγχου ρευμάτων, όπου γίνεται η ρύθμιση των ρευμάτων στην έξοδο του αντιστροφέα με χρήση PR ελεγκτών, όπως ακριβώς και στην περίπτωση της στρατηγικής ελέγχου ρευμάτων θετικής ακολουθίας.



Σχήμα 4.2-4: Δεύτερος περιορισμός ρευμάτων για τήρηση των θερμικών ορίων του αντιστροφέα.

4.2.4 Περιορισμός ενεργού ισχύος εισόδου

Σε περίπτωση σοβαρών σφαλμάτων, ο περιορισμός των ενεργών ρευμάτων σύμφωνα με τη διαδικασία που παρουσιάστηκε παραπάνω πρέπει να συνοδεύεται από έναν αντίστοιχο περιορισμό στην ενεργό ισχύ της Φ/Β εγκατάστασης, προκειμένου να εξασφαλιστεί η ομαλή λειτουργία του συστήματος. Στην προηγούμενη στρατηγική ο συγκεκριμένος περιορισμός εξασφαλιζόταν με την εφαρμογή ενός PI ελεγκτή στην τάση του DC link της διάταξης ο οποίος στην έξοδό του ρύθμιζε το ρεύμα της πηγής ρεύματος που στη συγκεκριμένη εργασία υποκαθιστά το σύστημα το οποίο προηγείται του DC link. Η εφαρμογή του συγκεκριμένου ελέγχου γινόταν σε περίπτωση που η πτώση της τάσης θετικής ακολουθίας του δικτύου ξεπερνούσε το 10% της ονομαστικής τάσης, σε διαφορετική περίπτωση αποδιδόταν το ρεύμα της ονομαστικής ισχύος από τη Φ/Β εγκατάσταση (I_{MPP}).

Η μόνη διαφοροποίηση η οποία εισάγεται στη συγκεκριμένη στρατηγική είναι ότι η τάση θετικής ακολουθίας του δικτύου παύει να είναι το κριτήριο εφαρμογής του συγκεκριμένου ελέγχου. Αντ' αυτού τα πλάτη των τάσεων των τριών φάσεων στην έξοδο του αντιστροφέα, όπως προκύπτουν από το PLL που παρουσιάστηκε παραπάνω, εισάγονται στη διαδικασία ελέγχου και ελέγχεται το μέγεθος της πτώσης τάσης σε καθεμία από αυτές. Η ρύθμιση της πηγής ρεύματος με την εφαρμογή PI ελέγχου πλέον εφαρμόζεται αν η μεγαλύτερη από τις πτώσεις τάσεις αυτές ξεπεράσει το 10% της ονομαστικής τάσης του δικτύου και επομένως υπάρχει παροχή αέργου ισχύος προς το δίκτυο.

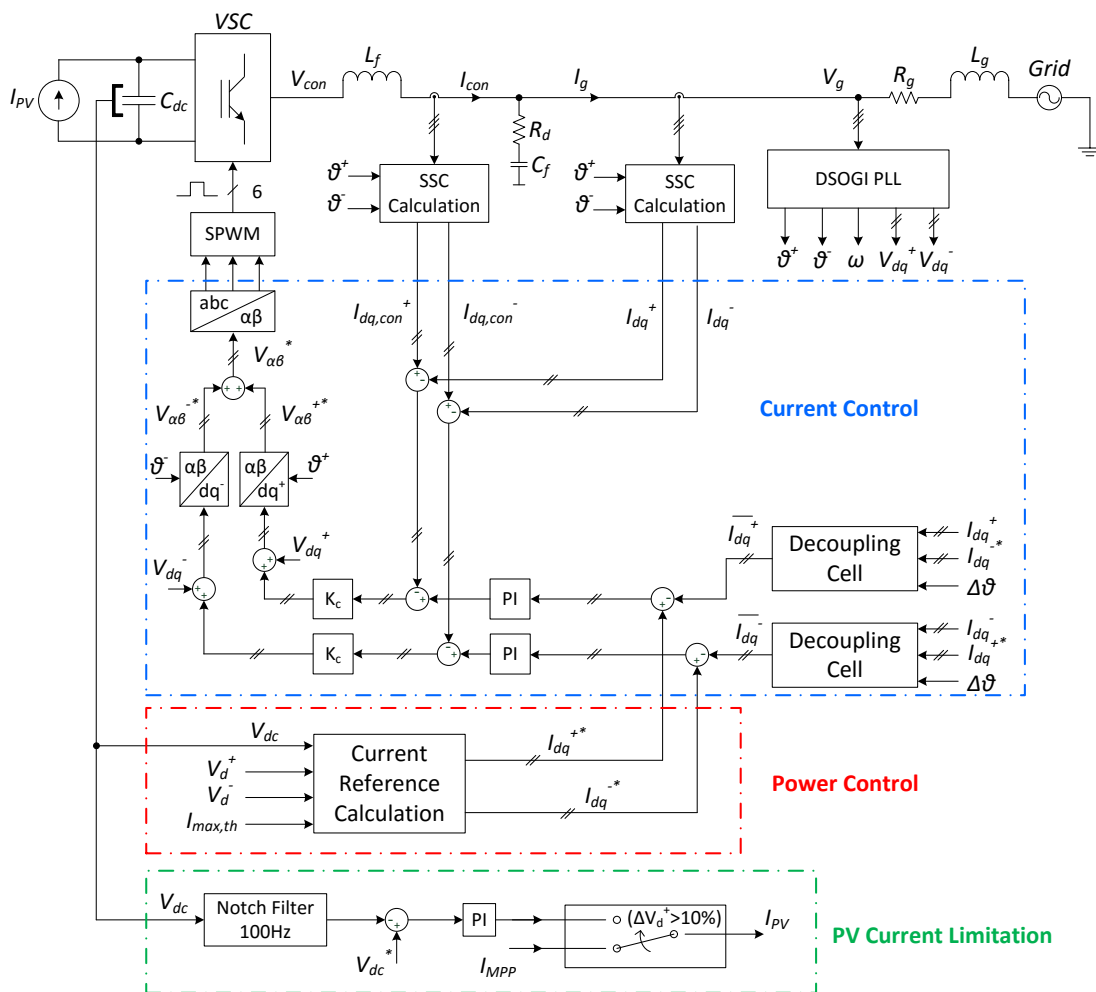
4.3 Έλεγχος ρευμάτων αντιστροφέα σε δύο σύγχρονα στρεφόμενα πλαίσια αναφοράς (DDSRF-CC)

Σε περίπτωση εμφάνισης ασύμμετρων σφαλμάτων στο δίκτυο προκαλείται η ύπαρξη τάσης αρνητικής ακολουθίας σε αυτό και ο έλεγχος ρευμάτων αρνητικής ακολουθίας μπορεί να είναι απαραίτητος, προκειμένου να επιτευχθεί μείωση της συγκεκριμένης τάσης, σύμφωνα με τους κώδικες του δικτύου. Η τεχνική του ανεξάρτητου ελέγχου ρευμάτων, που εξετάστηκε στην προηγούμενη ενότητα, προκαλεί την έγχυση τέτοιων ρευμάτων επιτηρώντας την πτώση τάσης και παράγοντας τις αναφορές ρευμάτων ανεξάρτητα σε κάθε φάση. Ωστόσο, είναι απαραίτητη η ύπαρξη μίας στρατηγικής η οποία θα ελέγχει άμεσα τις συνιστώσες θετικής και αρνητικής ακολουθίας των ρευμάτων στην έξοδο του αντιστροφέα, με βάση συγκεκριμένα κριτήρια. Η συγκεκριμένη λειτουργία επιτυγχάνεται με την τεχνική ελέγχου ρευμάτων σε δύο αποζευγμένα σύγχρονα στρεφόμενα πλαίσια αναφοράς

(Decoupled Double Synchronous Reference Frame Current Control) [48], η οποία παρουσιάζεται στη συνέχεια.

4.3.1 Γενική δομή συστήματος ελέγχου

Η γενική εικόνα του συγκεκριμένου συστήματος ελέγχου δίνεται στο σχήμα 4.3-1. Όπως και στις δύο προηγούμενες στρατηγικές, μπορεί να γίνει διαχωρισμός του συστήματος σε δύο βασικούς βρόχους ελέγχου, αυτόν του ελέγχου ισχύος (εξωτερικός βρόχος ανάδρασης), απ' όπου προκύπτουν οι αναφορές των επιθυμητών ρευμάτων αναφοράς και αυτόν του ελέγχου ρευμάτων (εσωτερικός βρόχος ανάδρασης), απ' όπου προκύπτουν οι αναφορές της τάσης εξόδου του αντιστροφέα. Οι δύο βρόχοι διαφέρουν σημαντικά ως προς την υλοποίησή τους σε σχέση με τις δύο άλλες τεχνικές και θα παρουσιαστούν αναλυτικά στη συνέχεια.



Σχήμα 4.3-1: Δομικό διάγραμμα ελέγχου αντιστροφέα σε δύο σύγχρονα στρεφόμενα πλαίσια αναφοράς DDSRF-CC.

Για να λειτουργήσει το συγκεκριμένο σύστημα είναι απαραίτητος ο εντοπισμός της τάσης αρνητικής ακολουθίας στην έξοδο του LC φίλτρου του αντιστροφέα, καθώς και της γωνίας της συγκεκριμένης τάσης, ο οποίος πραγματοποιείται από το DSOGI-PLL με τον τρόπο που θα εξηγηθεί παρακάτω. Τέλος, εφαρμόζεται και ένας ακόμη έλεγχος για τον περιορισμό της ισχύος εισόδου από τη Φ/Β μονάδα, σε περίπτωση που ξεπεραστούν τα

θερμικά όρια του αντιστροφέα, κατά τη διάρκεια σφάλματος. Ο συγκεκριμένος έλεγχος εφαρμόζεται κατά τα γνωστά επιτηρώντας την τάση θετικής ακολουθίας του δικτύου και πραγματοποιώντας PI έλεγχο στην τάση του DC link της διάταξης σε περίπτωση που η συγκεκριμένη τάση μειωθεί περισσότερο από το 10% της ονομαστικής τιμής.

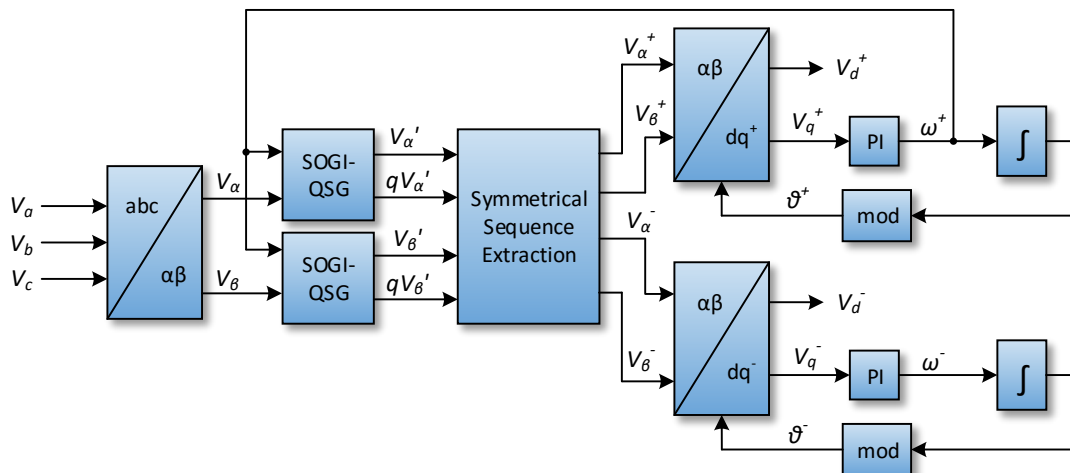
4.3.2 Εντοπισμός τάσης αρνητικής ακολουθίας του δικτύου

Σε αντιστοιχία με την ανάλυση που έγινε στην ενότητα 3.2.1 για τον εντοπισμό της τάσης θετικής ακολουθίας του δικτύου στο $\alpha\beta$ πλαίσιο αναφοράς, με παρόμοιο τρόπο υπολογίζεται και η τάση αρνητικής ακολουθίας στο ίδιο πλαίσιο σύμφωνα με τη σχέση:

$$V_{\alpha\beta}^- = \frac{1}{2} * \begin{bmatrix} 1 & q \\ -q & 1 \end{bmatrix} * V_{\alpha\beta}, \quad q = e^{-j\frac{\pi}{2}} \quad (4.13)$$

Στην παραπάνω σχέση γίνεται χρήση των μεγεθών που προκύπτουν από την γεννήτρια παραγωγής κάθετων διανυσμάτων DSOGI-QSG, η οποία εφαρμόζεται στις συνιστώσες α και β του συστήματος τάσεων του δικτύου.

Το διάνυσμα της τάσης αρνητικής ακολουθίας που προκύπτει μπορεί να εισαχθεί σε ένα SRF-PLL, όπως αυτό που χρησιμοποιείται για τον εντοπισμό της συχνότητας του δικτύου, προκειμένου να εντοπιστεί η γωνία της συγκεκριμένης τάσης. Αυτό επιτυγχάνεται κατά τα γνωστά μέσω μετασχηματισμού του διανύσματος της τάσης στο dq πλαίσιο αναφοράς και ρυθμίζοντας την q συνιστώσα να παραμένει μηδενική με τη χρήση ενός PI ελεγκτή. Η d συνιστώσα θα ισούται πλέον με το πλάτος της τάσης αρνητικής ακολουθίας του δικτύου, ενώ στην έξοδο του PI ελεγκτή προκύπτει η επιθυμητή γωνία. Στην ουσία πρόκειται για ευθυγράμμιση του d άξονα του στρεφόμενου πλαισίου αναφοράς με το διάνυσμα της τάσης αρνητικής ακολουθίας και με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται ο έλεγχος της γωνίας. Όπως γίνεται κατανοητό, το παραπάνω σύστημα μπορεί εύκολα να ενσωματωθεί στην κλασική διάταξη DSOGI-PLL, η οποία πλέον εκτός από τη γωνία και το πλάτος της τάσης θετικής ακολουθίας του δικτύου θ^+ και V_d^+ , μπορεί να εντοπίζει και τα αντίστοιχα μεγέθη της τάσης αρνητικής ακολουθίας θ^- και V_d^- . Το τελικό σύστημα συγχρονισμού που προκύπτει φαίνεται στο σχήμα 4.3-2.



Σχήμα 4.3-2: Εντοπισμός συμμετρικών συνιστωσών τάσεων με χρήση DSOGI-PLL.

Οι γωνίες που προκύπτουν από το συγκεκριμένο DSOGI-PLL χρησιμοποιούνται αρχικά έτσι ώστε να μετασχηματιστούν κατά Park τα μετρούμενα ρεύματα στην έξοδο του αντιστροφέα, καθώς και αυτά που ρέουν στους πυκνωτές του LC φίλτρου, σύμφωνα με τους επόμενους τύπους:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} I_d^+ \\ I_q^+ \end{bmatrix} &= [T_{dq}^+] * \begin{bmatrix} I_\alpha \\ I_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta^+ & \sin\theta^+ \\ -\sin\theta^+ & \cos\theta^+ \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} I_\alpha \\ I_\beta \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} I_d^- \\ I_q^- \end{bmatrix} &= [T_{dq}^-] * \begin{bmatrix} I_\alpha \\ I_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta^- & \sin\theta^- \\ -\sin\theta^- & \cos\theta^- \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} I_\alpha \\ I_\beta \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (4.14)$$

Από τους παραπάνω μετασχηματισμούς (SSC Calculation) προκύπτουν τελικά οι συμμετρικές συνιστώσες των συγκεκριμένων ρευμάτων σε δύο σύγχρονα στρεφόμενα πλαίσια αναφοράς (dq^+ και dq^-), οι οποίες θα χρησιμοποιηθούν στη συνέχεια, κατά τον έλεγχο των ρευμάτων.

4.3.2 Έλεγχος ρευμάτων αντιστροφέα

Στη συγκεκριμένη στρατηγική επιθυμούμε τη ρύθμιση των ρευμάτων θετικής και αρνητικής ακολουθίας ώστε να πάρουν τις τιμές που θα καθοριστούν από ανώτερο επίπεδο ελέγχου. Για το λόγο αυτό θα εφαρμοστούν δύο βρόχοι ελέγχου ρευμάτων, ένας για κάθε συμμετρική συνιστώσα. Επίσης, η άμεση σχέση της ενεργού και αέργου ισχύος που εγχέεται προς το δίκτυο με τις dq συνιστώσες ρεύματος καθιστά πιο απλή την επιλογή των αναφορών ρεύματος στο dq πλαίσιο αναφοράς. Συνεπώς ο έλεγχος ρευμάτων επιλέγεται να πραγματοποιηθεί σε δύο σύγχρονα στρεφόμενα πλαίσια αναφοράς, ένα για τα ρεύματα θετικής ακολουθίας του δικτύου (dq^+) και ένα για τα ρεύματα αρνητικής ακολουθίας (dq^-). Τα δυο παραπάνω πλαίσια συγχρονίζονται με τις γωνίες της τάσης θετικής και αρνητικής ακολουθίας του δικτύου, οι οποίες προκύπτουν από το DSOGI-PLL.

Σε περίπτωση ασυμμετρίας, η τάση του δικτύου στο $\alpha\beta$ πλαίσιο αναφοράς μπορεί να αναλυθεί ως εξής:

$$V_{\alpha\beta} = V_{\alpha\beta}^+ + V_{\alpha\beta}^- = V^+ \begin{bmatrix} \cos(\omega t + \varphi^+) \\ \sin(\omega t + \varphi^+) \end{bmatrix} + V^- \begin{bmatrix} \cos(-\omega t + \varphi^-) \\ \sin(-\omega t + \varphi^-) \end{bmatrix} \quad (4.15)$$

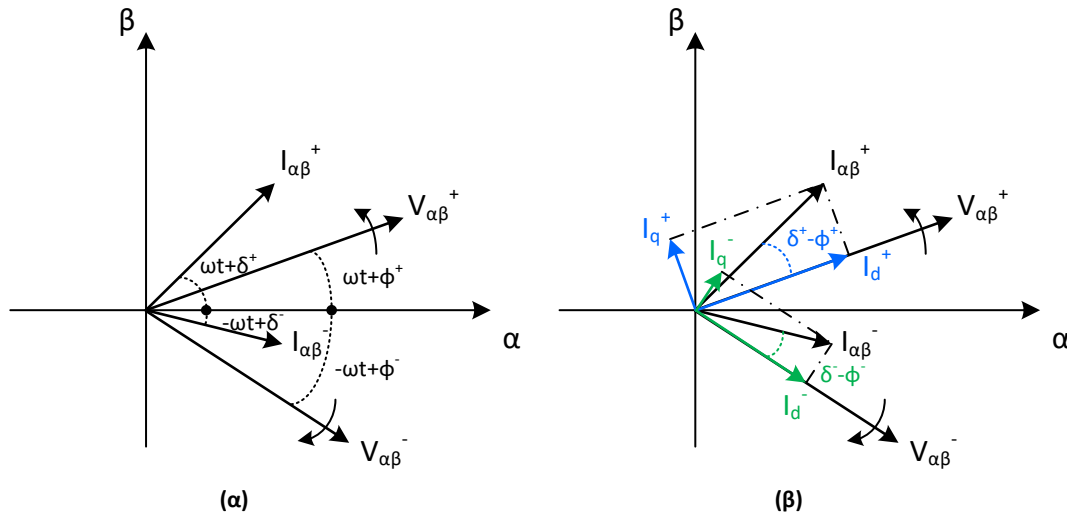
Επομένως, οι γωνίες θ^+ και θ^- που εντοπίζονται από το DSOGI-PLL θα πάρουν επί της ουσίας τις παρακάτω τιμές:

$$\begin{aligned} \theta^+ &= \omega t + \varphi^+ \\ \theta^- &= -\omega t + \varphi^- \end{aligned} \quad (4.16)$$

Κατά αναλογία τα ρεύματα στην έξοδο του αντιστροφέα υπολογίζονται με τον ακόλουθο τρόπο:

$$I_{\alpha\beta} = I_{\alpha\beta}^+ + I_{\alpha\beta}^- = I^+ \begin{bmatrix} \cos(\omega t + \delta^+) \\ \sin(\omega t + \delta^+) \end{bmatrix} + I^- \begin{bmatrix} \cos(-\omega t + \delta^-) \\ \sin(-\omega t + \delta^-) \end{bmatrix} \quad (4.17)$$

Η αναπαράσταση των συμμετρικών συνιστωσών των τάσεων και των ρευμάτων που παρουσιάστηκαν παραπάνω στο $\alpha\beta$ πλαίσιο αναφοράς φαίνεται αναλυτικά στο σχήμα 4.3-3(α).



Σχήμα 4.3-3: Αναπαράσταση συμμετρικών συνιστωσών τάσεων και ρευμάτων στο $\alpha\beta$ πλαίσιο αναφοράς

Η εφαρμογή των σχέσεων (4.14), με τις οποίες επιτυγχάνεται στην ουσία ο μετασχηματισμός των ρευμάτων στα δύο σύγχρονα στρεφόμενα πλαίσια αναφοράς, στη σχέση (4.17) με χρήση των γωνιών των σχέσεων (4.16), έχει ως αποτέλεσμα οι συμμετρικές συνιστώσες των ρευμάτων να πάρουν την ακόλουθη μορφή:

$$I_{dq}^+ = \begin{bmatrix} \bar{I}_d^+ \\ \bar{I}_q^+ \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \bar{I}_d^- \cos(\theta^+ - \theta^-) + \bar{I}_q^- \sin(\theta^+ - \theta^-) \\ -\bar{I}_d^- \sin(\theta^+ - \theta^-) + \bar{I}_q^- \cos(\theta^+ - \theta^-) \end{bmatrix} \quad (4.18)$$

$$I_{dq}^- = \begin{bmatrix} \bar{I}_d^- \\ \bar{I}_q^- \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \bar{I}_d^+ \cos(\theta^- - \theta^+) + \bar{I}_q^+ \sin(\theta^- - \theta^+) \\ -\bar{I}_d^+ \sin(\theta^- - \theta^+) + \bar{I}_q^+ \cos(\theta^- - \theta^+) \end{bmatrix}$$

Όπου:

$$\bar{I}_d^+ = I^+ \cos(\delta^+ - \varphi^+)$$

$$\bar{I}_q^+ = I^+ \sin(\delta^+ - \varphi^+)$$

$$\bar{I}_d^- = I^- \cos(\delta^- - \varphi^-)$$

$$\bar{I}_q^- = I^- \sin(\delta^- - \varphi^-)$$

(4.19)

Τα ρεύματα που προκύπτουν από τις σχέσεις (4.18) αποτελούνται από σταθερούς και ταλαντωτικούς όρους. Οι σταθεροί όροι οι οποίοι δίνονται από τις σχέσεις (4.19) ισοδυναμούν με τις προβολές των διανυσμάτων των ρευμάτων θετικής και αρνητικής ακολουθίας πάνω στα αντίστοιχα διανύσματα της τάσης, όπως φαίνεται και στο σχήμα 4.3-3(β) και επομένως συνδέονται άμεσα με την ενεργό και την άεργο ισχύ που εγχέεται προς το δίκτυο. Από την άλλη πλευρά οι ταλαντωτικοί όροι είναι αποτέλεσμα σύζευξης των

διανυσμάτων των ρευμάτων με τα αντίθετα στρεφόμενα πλαίσια αναφοράς. Αυτό σημαίνει πως τα ρεύματα θετικής ακολουθίας προκαλούν ταλαντώσεις στις dq συνιστώσες των ρευμάτων αρνητικής ακολουθίας και ανάποδα. Η συχνότητα των συγκεκριμένων ταλαντώσεων είναι διπλάσια της συχνότητας του δικτύου (2ω) και προκύπτει από τη διαφορά των γωνιών των δύο στρεφόμενων πλαισίων, σύμφωνα με τις επόμενες σχέσεις:

$$\begin{aligned}\theta^+ - \theta^- &= \omega t + \varphi^+ - (-\omega t + \varphi^-) = 2\omega t + \Delta\varphi \\ \theta^- - \theta^+ &= -\omega t + \varphi^- - (\omega t + \varphi^+) = -2\omega t - \Delta\varphi\end{aligned}\quad (4.20)$$

Όπου:

$$\Delta\varphi = \varphi^+ - \varphi^-$$

Δεδομένου ότι ο έλεγχος των ρευμάτων θα πραγματοποιηθεί στο dq πλαίσιο αναφοράς, οι αναφορές των ρευμάτων θα είναι DC σήματα και επομένως οι συγκεκριμένες ταλαντώσεις θα προκαλέσουν ένα μόνιμο σφάλμα συχνότητας 2ω , το οποίο δεν μπορεί να απορριφθεί από τους PI ελεγκτές που θα χρησιμοποιηθούν. Η εφαρμογή βαθυπερατών φίλτρων για μείωση των ταλαντώσεων θα καθυστερούσε σημαντικά τη δυναμική απόκριση του συστήματος και θα μείωνε την ακρίβειά του. Για το λόγο αυτό επιλέγεται η εφαρμογή ενός δικτύου απόζευξης (Decoupling Network) των δύο πλαισίων, παρόμοιο με αυτό που χρησιμοποιήθηκε για την υλοποίηση του DSRF-PLL σε προηγούμενη ενότητα, το οποίο μπορεί να περιορίσει τις ανεπιθύμητες ταλαντώσεις υπολογίζοντας το πλάτος και τη φάση τους.

Πιο συγκεκριμένα, από τις σχέσεις (4.18) μπορούμε να συμπεράνουμε ότι το πλάτος των ταλαντώσεων των ρευμάτων θετικής ακολουθίας ισούται με τις σταθερές (μέσες) τιμές των ρευμάτων αρνητικής ακολουθίας και ανάποδα. Επίσης, η φάση των ταλαντώσεων υπολογίστηκε στις σχέσεις (4.20) χρησιμοποιώντας τις γωνίες των δύο στρεφόμενων πλαισίων. Έχοντας υπόψη ότι οι PI ελεγκτές έχουν την ικανότητα να ρυθμίσουν το μόνιμο σφάλμα ώστε να έχει μηδενική μέση τιμή μπορούμε να υποθέσουμε ότι σε πρώτη φάση μπορούν να ελέγξουν τις dq συνιστώσες των πραγματικών ρευμάτων, έτσι ώστε η μέση τιμή τους να ισούται με τις αναφορές των ρευμάτων. Αυτό σημαίνει ότι κατά την εφαρμογή του ελέγχου, οι ταλαντώσεις που θα προκύψουν στα πραγματικά ρεύματα πρακτικά θα έχουν το πλάτος των αναφορών ρεύματος στο αντίθετα στρεφόμενο πλαίσιο αναφοράς. Επομένως το δίκτυο απόζευξης θα μπορούσε να εφαρμοστεί με τους επόμενους τύπους:

$$\begin{aligned}\begin{bmatrix} \overline{I_d^+} \\ \overline{I_q^+} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} I_d^+ \\ I_q^+ \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} I_d^{-*} \cos(\theta^+ - \theta^-) + I_q^{-*} \sin(\theta^+ - \theta^-) \\ -I_d^{-*} \sin(\theta^+ - \theta^-) + I_q^{-*} \cos(\theta^+ - \theta^-) \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} \overline{I_d^-} \\ \overline{I_q^-} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} I_d^- \\ I_q^- \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} I_d^{+*} \cos(\theta^- - \theta^+) + I_q^{+*} \sin(\theta^- - \theta^+) \\ -I_d^{+*} \sin(\theta^- - \theta^+) + I_q^{+*} \cos(\theta^- - \theta^+) \end{bmatrix}\end{aligned}\quad (4.21)$$

Τα τελικά σήματα που προκύπτουν από την παραπάνω σχέση $\overline{I_{dq}^+}$ και $\overline{I_{dq}^-}$ είναι απαλλαγμένα από τις ανεπιθύμητες ταλαντώσεις και μπορούν πλέον να ρυθμιστούν από τους PI ελεγκτές ώστε να πάρουν τις τιμές των αναφορών που θα προκύψουν από το επίπεδο του ελέγχου ισχύος, στο οποίο θα αναφερθούμε στη συνέχεια.

Προκειμένου να αποφύγουμε τις αρνητικές επιδράσεις λόγω συντονισμού του LC φίλτρου του αντιστροφέα, θα πρέπει να εισάγουμε και έναν εσωτερικό βρόχο ελέγχου ρευμάτων που θα ρυθμίζει τα ρεύματα που ρέουν στους πυκνωτές του φίλτρου, όπως έγινε και στις δύο προηγούμενες στρατηγικές. Αυτό σημαίνει ότι η έξοδος των PI ελεγκτών που ρυθμίζουν τα ρεύματα εξόδου του αντιστροφέα θα πρέπει να παράγει τις αντίστοιχες αναφορές των ρευμάτων των πυκνωτών του φίλτρου στα δύο σύγχρονα στρεφόμενα πλαίσια. Τα ρεύματα αυτά συγκρίνονται με τα πραγματικά ρεύματα, τα οποία έχουν μετασχηματιστεί καταλλήλως με εφαρμογή των σχέσεων (4.14) και το σφάλμα τους οδηγείται στην είσοδο ενός νέου ελεγκτή, ο οποίος λειτουργεί με τη χρήση ενός απλού αναλογικού κέρδους K_C .

Από την έξοδο του συγκεκριμένου ελεγκτή προκύπτουν τελικά οι αναφορές της τάσης εξόδου του αντιστροφέα στα δύο στρεφόμενα πλαίσια αναφοράς V_{dq}^{+*} και V_{dq}^{-*} , όπου χρησιμοποιείται και η τεχνική της πρόσω-τροφοδότησης (feed-forward) των dq συνιστωσών των τάσεων θετικής και αρνητικής ακολουθίας, όπως ανιχνεύονται από το DSOGI-PLL, για πιο γρήγορη απόκριση. Στη συνέχεια αφού γίνει ο μετασχηματισμός των δύο συμμετρικών συνιστωσών των αναφορών των τάσεων από τα δύο στρεφόμενα πλαίσια αναφοράς στο $\alpha\beta$ πλαίσιο (dq^+ σε $\alpha\beta$ και dq^- σε $\alpha\beta$) με χρήση των γωνιών θ^+ και θ^- αντίστοιχα (αντίστροφος Park), οι δύο συμμετρικές συνιστώσες προστίθενται και μετασχηματίζονται στο abc πλαίσιο με αντίστροφο μετασχηματισμό Clarke. Η τελική αναφορά της τάσης δίνεται ως είσοδος στην τεχνική διαμόρφωσης παλμών των ημιαγωγικών στοιχείων SPWM, όποτε παράγεται τελικά η επιθυμητή τάση εξόδου του αντιστροφέα.

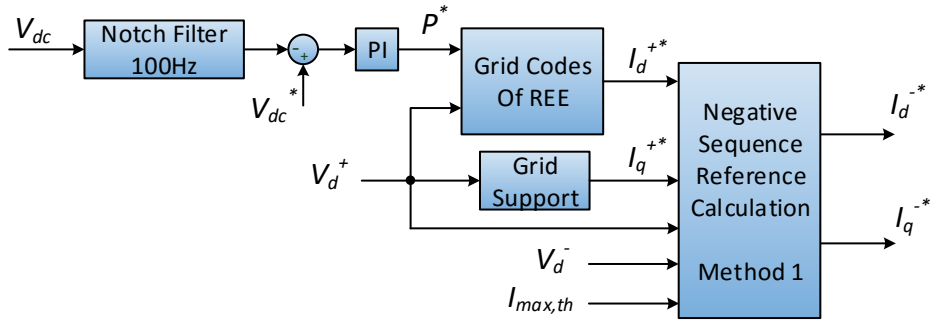
4.3.3 Έλεγχος ισχύος αντιστροφέα

Στη συγκεκριμένη στρατηγική θα ακολουθηθούν δύο τακτικές με βάση τις οποίες θα καθοριστούν τα ρεύματα αναφοράς, τα οποία δίνονται ως είσοδος στη συνέχεια στον έλεγχο ρευμάτων. Στην πρώτη θα εκμεταλλευτούμε ένα μέρος των ρευμάτων του αντιστροφέα, έτσι ώστε σε περίπτωση ασύμμετρων σφαλμάτων να υπάρχει δυνατότητα έγχυσης αέργου ισχύος αρνητικής ακολουθίας, η οποία συμβάλλει στη μείωση της τάσης αρνητικής ακολουθίας του δικτύου. Στη δεύτερη, κριτήριο επιλογής των αναφορών είναι ο περιορισμός των ταλαντώσεων διπλάσιας συχνότητας (2ω) που εμφανίζεται στην ενεργό ισχύ και κατ' επέκταση στην τάση του DC link του αντιστροφέα κατά τη διάρκεια ασύμμετρων σφαλμάτων. Φυσικά κατά την εφαρμογή και των δύο τακτικών φροντίζουμε έτσι ώστε να τηρούνται πλήρως οι κώδικες δικτύου, οι οποίοι κατά κύριο λόγο απαιτούν την υποστήριξη της τάσης θετικής ακολουθίας του δικτύου με έγχυση άεργων ρευμάτων θετικής ακολουθίας.

4.3.3.1 Μέθοδος 1^η: Επιλογή αναφορών ρεύματος για μείωση της τάσης αρνητικής ακολουθίας του δικτύου

Οι αναφορές των κωδικών δικτύου περί δυνατότητας έγχυσης ασύμμετρων ρευμάτων σε ασύμμετρα σφάλματα και τήρησης των άνω ορίων της τάσης στις φάσεις που δεν παρουσιάζουν σφάλμα, καθιστούν απαραίτητη την ύπαρξη μίας στρατηγικής ελέγχου η οποία θα πετυχαίνει έγχυση άεργων ρευμάτων αρνητικής ακολουθίας επιπλέον με τα αντίστοιχα ρεύματα θετικής ακολουθίας, προς υποστήριξη του δικτύου. Με αυτόν τον τρόπο, όπως είδαμε και σε προηγούμενο κεφάλαιο, επιτυγχάνεται η αύξηση της τάσης

θετικής ακολουθίας του δικτύου, ενώ παράλληλα μειώνεται η αντίστοιχη τάση αρνητικής ακολουθίας, όποτε τελικά δεν προκαλείται ομοιόμορφη ανύψωση της τάσης όλων των φάσεων. Μία τέτοια λειτουργία θεωρείται ιδανική για την αντιμετώπιση των ασύμμετρων σφαλμάτων [49]. Στη συγκεκριμένη παράγραφο θα δούμε πως μπορούμε να καθορίσουμε τις αναφορές των ρευμάτων εξόδου του αντιστροφέα στα δύο σύγχρονα στρεφόμενα πλαίσια αναφοράς, προκειμένου να επιτύχουμε την παραπάνω συμπεριφορά. Το σύστημα ελέγχου το οποίο παράγει τις συγκεκριμένες αναφορές ρευμάτων φαίνεται στο σχήμα 4.3-4 και αποτελεί τον εξωτερικό βρόχο ελέγχου του συνολικού συστήματος.



Σχήμα 4.3-4: Σύστημα υπολογισμού ρευμάτων αναφοράς (εξωτερικός βρόχος ελέγχου) για περιορισμό της τάσης αρνητικής ακολουθίας του δικτύου.

Αρχικά, οι συνιστώσες θετικής ακολουθίας ρευμάτων στο dq^+ πλαίσιο αναφοράς μπορούν να οριστούν με παρόμοιο τρόπο, όπως στις δύο προηγούμενες στρατηγικές. Η μόνη διαφοροποίηση που εισάγεται έχει να κάνει με τον περιορισμό της ενεργού συνιστώσας ρευμάτων I_d^{+*} , όταν προκύπτει κάποιο σφάλμα στο δίκτυο. Πιο συγκεκριμένα, κατά τη διάρκεια της κανονικής λειτουργίας η ενεργός συνιστώσα υπολογίζεται κανονικά με βάση την ενεργό ισχύ αναφοράς που προκύπτει από την έξοδο του PI ελεγκτή της τάσης στο DC link, σύμφωνα με το γνωστό τύπο, που επαναλαμβάνεται εδώ για λόγους ευκολίας:

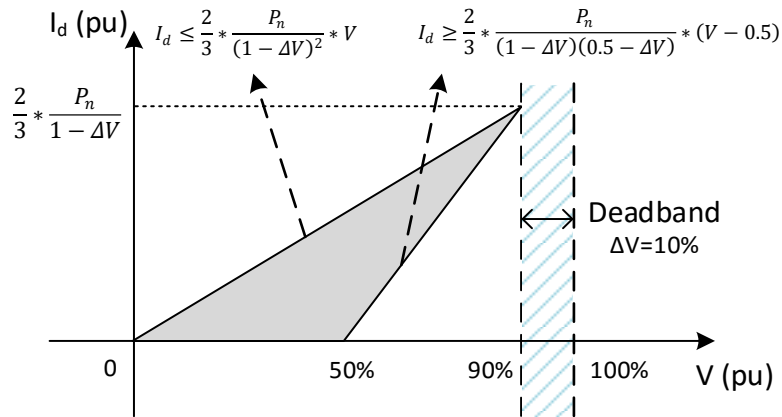
$$I_d^{+*} = \frac{2}{3} * \frac{P^*}{V_d^+} \quad (4.22)$$

Ωστόσο, σε καταστάσεις σφάλματος επιλέξαμε να περιορίσουμε τα ενεργά ρεύματα σύμφωνα με τους ισπανικούς κώδικες δικτύου [5], που αναφέρθηκαν στο πρώτο κεφάλαιο, αναλογικά με την πτώση της τάσης θετικής ακολουθίας, όπως φαίνεται στον επόμενο τύπο:

$$I_d^{+*} = \frac{2}{3} * \frac{P_n}{(V_n - 0.1 * V_n)^2} * V_d^+ \quad (4.23)$$

Όπου V_n η ονομαστική τιμή της τάσης του δικτύου και P_n η ονομαστική τιμή της ισχύος της Φ/Β εγκατάστασης. Η εφαρμογή των ισπανικών κωδίκων δικτύου στην ενεργό συνιστώσα των ρευμάτων εξόδου του αντιστροφέα φαίνεται παραστατικά στο σχήμα 4.3-5, όπου χρησιμοποιούνται τα ανά μονάδα μεγέθη. Ο περιορισμός που εφαρμόστηκε στην εξεταζόμενη μέθοδο είναι ο μικρότερος δυνατός που απαιτούν οι συγκεκριμένοι κώδικες και παριστάνεται από την εξωτερική καμπύλη του σχήματος. Ομοίως με τους κώδικες υποστήριξης της τάσης μέσω παροχής άεργων ρευμάτων, ο συγκεκριμένος περιορισμός

ενεργοποιείται μόνο εφόσον η τάση θετικής ακολουθίας παρουσιάσει βύθιση μεγαλύτερη από το 10% της ονομαστικής τιμής.



Σχήμα 4.3-5: Περιορισμός της ενεργού συνιστώσας ρεύματος ανάλογα με την πτώση τάσης που παρατηρείται, σύμφωνα με τους ισπανικούς κώδικες δικτύου.

Στόχος της εφαρμογής του παραπάνω περιορισμού ενεργού ισχύος είναι η δημιουργία περιθωρίου ως προς τα θερμικά όρια του αντιστροφέα, έτσι ώστε πέρα από τον ορισμό άεργων ρευμάτων θετικής ακολουθίας, ο οποίος γίνεται κατά τα γνωστά σύμφωνα με τους ευρωπαϊκούς κώδικες δικτύου, να εγχέονται και άεργα ρεύματα αρνητικής ακολουθίας, τα οποία συμβάλλουν στη μείωση της τάσης αρνητικής ακολουθίας του δικτύου.

Η παραπάνω λειτουργία επιτυγχάνεται με τον κατάλληλο ορισμό των αναφορών των ρευμάτων αρνητικής ακολουθίας, ο οποίος θα γίνει στο αρνητικά στρεφόμενο πλαίσιο αναφοράς dq^- , όπου εξακολουθεί να υπάρχει αντιστοιχία μεταξύ dq συνιστωσών και παροχής ενεργού και αέργου ισχύος, λόγω συγχρονισμού του συγκεκριμένου πλαισίου με την τάση αρνητικής ακολουθίας. Δεδομένου ότι δεν επιθυμούμε την παροχή ενεργού ισχύος με χρήση ρευμάτων αρνητικής ακολουθίας, η d συνιστώσα των συγκεκριμένων ρευμάτων I_d^- επιλέγεται να είναι μηδενική. Επιπλέον γνωρίζουμε ότι λόγω της καθετότητας των dq συνιστωσών σε ένα στρεφόμενο πλαίσιο, το συνολικό ρεύμα θετικής ακολουθίας που εγχέεται προς το δίκτυο υπολογίζεται με βάση την επόμενη σχέση:

$$I^+ = \sqrt{I_d^{+2} + I_q^{+2}} \quad (4.24)$$

Επίσης οι φάσεις των ρευμάτων θετικής και αρνητικής ακολουθίας σε σχέση με τις αντίστοιχες τάσεις, οι οποίες θεωρείται ότι έχουν μηδενικές αρχικές φάσεις ($\varphi^+ = \varphi^- = 0$), δίνονται από τους επόμενους τύπους:

$$\delta^+ = \arctan\left(\frac{I_q^+}{I_d^+}\right) \quad (4.25)$$

$$\delta^- = \arctan\left(\frac{I_q^-}{I_d^-}\right)$$

Οι σχέσεις (4.24) και (4.25) μπορούν να υπολογιστούν για την περίπτωση των αναφορών ρευμάτων θετικής ακολουθίας που ορίστηκαν παραπάνω (I_d^{+*} και I_q^{+*}) και αν σκεφτούμε ότι η επιθυμητή μείωση της τάσης αρνητικής ακολουθίας επιτυγχάνεται με την έγχυση των αντίστοιχων χωρητικών άεργων ρευμάτων, δηλαδή: $\delta^- = -90^\circ$. Αυτό σημαίνει ότι τα ρεύματα αρνητικής ακολουθίας πρέπει να προηγούνται των αντίστοιχων τάσεων κατά 90° στο αντίστοιχο στρεφόμενο πλαίσιο αναφοράς.

Για να εξασφαλιστεί η τήρηση των μέγιστων επιτρεπτών ορίων ρεύματος του αντιστροφέα και αν σκεφτούμε ότι δεν υπάρχει κάποια σχέση καθετότητας μεταξύ των συνιστωσών ρεύματος στα δύο στρεφόμενα πλαίσια, υπολογίζουμε αρχικά τα πλάτη των ρευμάτων σύμφωνα με τις επόμενες σχέσεις:

$$I_{a,peak} = \sqrt{I^{+2} + I^{-2} + 2I^+I^- \cos \alpha}$$

$$I_{b,peak} = \sqrt{I^{+2} + I^{-2} + 2I^+I^- \cos \left(\alpha - \frac{2\pi}{3} \right)} \quad (4.26)$$

$$I_{c,peak} = \sqrt{I^{+2} + I^{-2} + 2I^+I^- \cos \left(\alpha + \frac{2\pi}{3} \right)}$$

Όπου: $\alpha = -(\delta^+ + \delta^-)$.

Επομένως για να μην ξεπεραστούν τα θερμικά όρια του αντιστροφέα πρέπει:

$$I_{max} = \max\{I_{a,peak}, I_{b,peak}, I_{c,peak}\} \leq I_{max,th} \quad (4.27)$$

Δεδομένου του ρεύματος θετικής ακολουθίας που προέκυψε από τη σχέση (4.24), όπως και της γωνίας α που υπολογίστηκε παραπάνω, μπορούμε να υπολογίσουμε το πλάτος του μέγιστου επιτρεπόμενου ρεύματος αρνητικής ακολουθίας I^- , σύμφωνα με την επόμενη σχέση [50]:

$$I^{-*} = -I^{+*} \cos \left(\alpha + k \frac{4\pi}{3} \right) + \sqrt{(I^{+*})^2 \left[\cos^2 \left(\alpha + k \frac{4\pi}{3} \right) - 1 \right] + I_{max,th}^2} \quad (4.28)$$

Όπου:

$$k = \begin{cases} 0, & -\pi/3 \leq \alpha < \pi/3 \\ 1, & \pi/3 \leq \alpha < \pi \\ -1, & \pi \leq \alpha < 5\pi/3 \end{cases}$$

Λαμβάνοντας υπόψη ότι το σύνολο του συγκεκριμένου ρεύματος θα χρησιμοποιηθεί για μείωση της τάσης αρνητικής ακολουθίας του δικτύου, η παραπάνω τιμή αποδίδεται τελικά στην άεργο συνιστώσα του ρεύματος αρνητικής ακολουθίας, σύμφωνα με την ακόλουθη σχέση:

$$I_q^{-*} = I^{-*} * \sin(\delta^-) = I^{-*} * \sin(-90^\circ) = -I^{-*} \quad (4.29)$$

Η αναφορά που προκύπτει από την προηγούμενη σχέση δίνεται ως είσοδος στον εσωτερικό βρόχο ελέγχου (έλεγχος ρευμάτων), μόνο εφόσον η ασυμμετρία της τάσης ξεπεράσει κάποια όρια τα οποία καθορίζονται από ένα δείκτη ασυμμετρίας n . Ο συγκεκριμένος δείκτης υπολογίζεται με χρήση του πλάτους της τάσης θετικής και αρνητικής ακολουθίας, όπως προκύπτουν από το DSOGI-PLL, σύμφωνα με την επόμενη σχέση:

$$n = \frac{V^-}{V^+} = \frac{V_d^-}{V_d^+} \quad (4.30)$$

Αν ο παραπάνω δείκτης ξεπεράσει την τιμή 0.02, τότε θεωρείται ότι παρουσιάζεται σοβαρό σφάλμα ασυμμετρίας στο δίκτυο και επομένως πρέπει να εγχυθούν άεργα ρεύματα αρνητικής ακολουθίας. Σε διαφορετική περίπτωση και οι δύο συνιστώσες αρνητικής ακολουθίας ορίζονται μηδενικές.

Έχοντας εξασφαλίσει τελικά όλες τις επιθυμητές αναφορές ρεύματος στα δύο στρεφόμενα πλαίσια, οι συγκεκριμένες τιμές οδηγούνται στην είσοδο του συστήματος ελέγχου ρευμάτων οπότε εξασφαλίζεται η κατάλληλη παροχή ισχύος και η υποστήριξη του δικτύου με βάση τα κριτήρια που τέθηκαν παραπάνω.

4.3.3.2 Μέθοδος 2^η: Επιλογή αναφορών ρεύματος για μείωση της κυμάτωσης της τάσης στο DC link

Σε ασύμμετρες καταστάσεις του δικτύου, η ενεργός και άεργος ισχύς που εγχέονται προς αυτό περιλαμβάνουν ταλαντώσεις συχνότητας διπλάσιας από αυτή του δικτύου (2ω). Οι ταλαντώσεις αυτές προκύπτουν με βάση τις εξισώσεις υπολογισμού στιγμιαίας ισχύος στο $\alpha\beta$ πλαίσιο αναφοράς, οι οποίες δίνονται στη συνέχεια:

$$P = \frac{3}{2}(V_\alpha I_\alpha + V_\beta I_\beta) \quad (4.31)$$

$$Q = \frac{3}{2}(V_\beta I_\alpha - V_\alpha I_\beta)$$

Αν στις παραπάνω εξισώσεις εισάγουμε τις τάσεις και τα ρεύματα που υπολογίστηκαν στις σχέσεις (4.15) και (4.17), θεωρώντας $\varphi^+ = \varphi^- = 0$, τότε προκύπτουν οι ακόλουθες εξισώσεις για τις στιγμιαίες ισχύεις:

$$P(t) = \frac{3}{2} * \{V^+ I^+ \cos(-\delta^+) + V^- I^- \cos(-\delta^-) + V^+ I^- \cos(2\omega t - \delta^-) + V^- I^+ \cos(-2\omega t - \delta^+)\} \quad (4.32)$$

$$Q(t) = \frac{3}{2} * \{V^+ I^+ \sin(-\delta^+) + V^- I^- \sin(-\delta^-) + V^+ I^- \sin(2\omega t - \delta^-) + V^- I^+ \sin(-2\omega t - \delta^+)\}$$

Η ταλάντωση της στιγμιαίας ενεργού ισχύος έχει ως αποτέλεσμα την ύπαρξη αντίστοιχων ταλαντώσεων στο DC link της διάταξης, κατά την προσπάθεια να επιτευχθεί η τήρηση του ισοζυγίου ισχύος. Το συγκεκριμένο θέμα έχει γίνει αντικείμενο μελέτης στη σύγχρονη βιβλιογραφία [51]–[53], όπου μελετάται η ανάπτυξη στρατηγικών ελέγχου με

στόχο την απόρριψη των συγκεκριμένων ταλαντώσεων. Το βασικό επιχείρημα της συγκεκριμένης μελέτης είναι ότι οι ταλαντώσεις αυτές μπορούν να προκαλέσουν διακυμάνσεις στη θερμοκρασία των ηλεκτρολυτικών πυκνωτών του DC link της διάταξης, οι οποίες περιορίζουν τη διάρκεια ζωής τους. Επομένως με την εφαρμογή των παραπάνω στρατηγικών, προστατεύεται βραχυπρόθεσμα το DC link από υπερτάσεις, ενώ σε βάθος χρόνου αυξάνεται η αξιοπιστία του αντιστροφέα, λόγω του περιορισμού των διακυμάνσεων. Στη στρατηγική ελέγχου που εξετάζουμε στη συγκεκριμένη ενότητα μπορεί να επιτευχθεί περιορισμός των ταλαντώσεων 2ω με κατάλληλη επιλογή των αναφορών ρεύματος θετικής και αρνητικής ακολουθίας, τηρώντας παράλληλα τα θερμικά όρια του αντιστροφέα [54].

Με βάση τη σχέση (4.32), το πλάτος της κυμάτωσης της στιγμιαίας ενεργού ισχύος μπορεί να εκφραστεί από την ακόλουθη σχέση:

$$|\Delta p| = \frac{3}{2} * \sqrt{|p_{cos}|^2 + |p_{sin}|^2} \quad (4.33)$$

$$\begin{aligned} \text{Όπου: } |p_{cos}| &= V^+ I^- \cos(-\delta^-) + V^- I^+ \cos(\delta^+) \\ |p_{sin}| &= V^+ I^- \sin(-\delta^-) + V^- I^+ \sin(\delta^+) \end{aligned}$$

Επομένως, η γωνία των ρευμάτων αρνητικής ακολουθίας δ^- για την οποία προκύπτει η ελάχιστη κυμάτωση της ενεργού ισχύος, μπορεί να εντοπιστεί με παραγωγή της παραπάνω σχέσης ως προς τη συγκεκριμένη γωνία και εξίσωση με το μηδέν, σύμφωνα με την επόμενη σχέση:

$$\frac{d|\Delta p|}{d\delta^-} = 0 \quad \text{και} \quad \frac{d^2|\Delta p|}{d(\delta^-)^2} > 0 \quad (4.34)$$

Από την προηγούμενη διαδικασία προκύπτει η επιθυμητή σχέση μεταξύ των φάσεων των ρευμάτων θετικής και αρνητικής ακολουθίας, όπως φαίνεται στη συνέχεια:

$$\delta^+ + \delta^- = -\pi \quad (4.35)$$

Με εφαρμογή των παραπάνω γωνιών, η σχέση (4.33) απλοποιείται ως εξής:

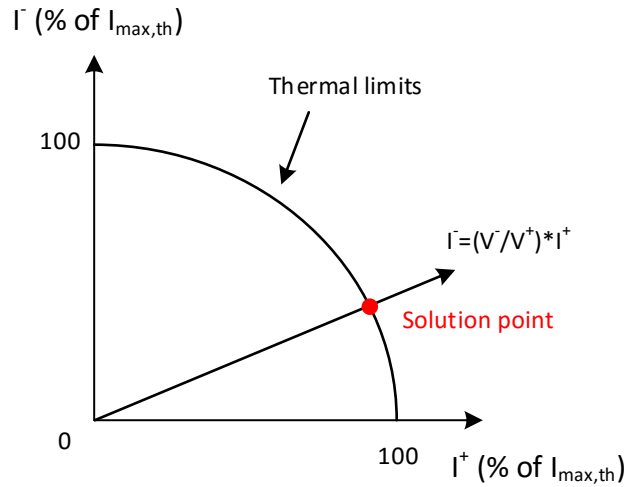
$$|\Delta p| = \sqrt{(V^- I^+ - V^+ I^-)^2} \quad (4.36)$$

Από τη συγκεκριμένη σχέση προκύπτει ότι ο μηδενισμός της κυμάτωσης της ενεργού ισχύος είναι εφικτός όταν τα ρεύματα θετικής και αρνητικής ακολουθίας χαρακτηρίζονται από την επόμενη σχέση:

$$I^- = \frac{V^-}{V^+} * I^+ \quad (4.37)$$

Ο συνδυασμός της σχέσης (4.37) με τη σχέση (4.28) που παρουσιάστηκε στην προηγούμενη ενότητα έχει ως αποτέλεσμα τον εντοπισμό του επιθυμητού σημείου λειτουργίας, όπου τηρούνται τα θερμικά όρια του αντιστροφέα, ενώ παράλληλα

περιορίζονται οι ταλαντώσεις 2ω στο DC link. Η σχηματική τους απεικόνιση σε άξονες (I^+, I^-) φαίνεται στο σχήμα 4.3-6, όπου το επιθυμητό σημείο λειτουργίας απεικονίζεται ως το σημείο τομής των δύο παραστάσεων.



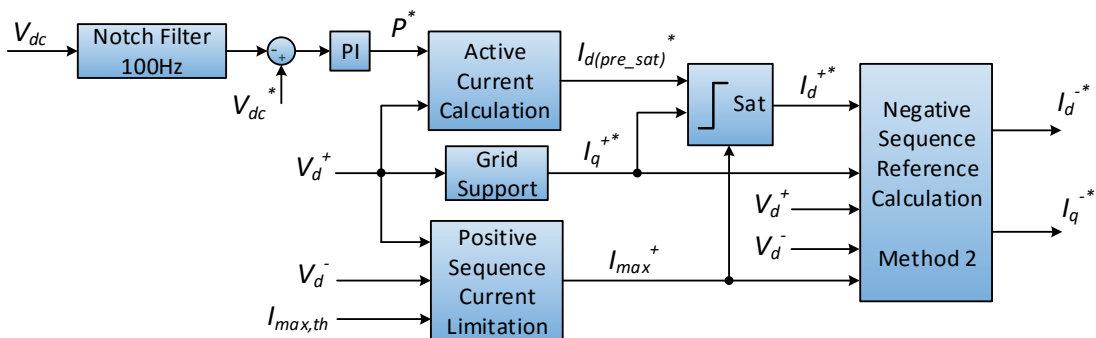
Σχήμα 4.3-6: Σημείο λειτουργίας για μείωση της κυμάτωσης της τάσης στο DC link και τήρηση των θερμικών ορίων του αντιστροφέα

Από την επίλυση του συστήματος των δύο παραπάνω σχέσεων προκύπτει τελικά το μέγιστο επιτρεπτό ρεύμα θετικής ακολουθίας, όπως φαίνεται παρακάτω:

$$I_{max}^+ = \frac{I_{max,th}}{\sqrt{\left(\frac{V^-}{V^+}\right)^2 + 2\left(\frac{V^-}{V^+}\right)\cos\left(a+k\frac{4\pi}{3}\right) + 1}} \quad (4.38)$$

Όπου οι συντελεστές α και k είναι οι ίδιοι με αυτούς που υπολογίστηκαν στην προηγούμενη ενότητα.

Με βάση τους παραπάνω υπολογισμούς, οι αναφορές των ρευμάτων θετικής και αρνητικής ακολουθίας στα δύο σύγχρονα στρεφόμενα πλαίσια προκύπτουν όπως φαίνεται στο σχήμα 4.3-7.



Σχήμα 4.3-7: Υπολογισμός ρευμάτων αναφοράς στα δύο σύγχρονα στρεφόμενα πλαίσια με στόχο τον περιορισμό της κυμάτωσης της τάσης στο DC link (εξωτερικός βρόχος ελέγχου).

Αρχικά, έχοντας ορίσει το ανώτερο όριο του ρεύματος θετικής ακολουθίας από τη σχέση (4.38), μπορούν να υπολογιστούν οι αναφορές των ρευμάτων θετικής ακολουθίας,

όπως στις προηγούμενες περιπτώσεις, για εξισορρόπηση της τάσης στο DC link και υποστήριξη της τάσης θετικής ακολουθίας και στη συνέχεια να εφαρμοστεί περιορισμός της ενεργού συνιστώσας αν ξεπεραστεί το συγκεκριμένο όριο, όπως φαίνεται στην επόμενη σχέση:

$$I_d^{+*} = \begin{cases} I_{d(pre_sat)}^* , & \text{αν } \sqrt{I_d^{+*2} + I_q^{+*2}} \leq I_{max}^+ \\ \sqrt{I_{max}^{+2} - I_q^{+*2}} , & \text{αν } \sqrt{I_d^{+*2} + I_q^{+*2}} > I_{max}^+ \end{cases} \quad (4.39)$$

Έχοντας καθορίσει πλήρως τις συνιστώσες ρεύματος θετικής ακολουθίας, υπολογίζεται αρχικά το πλάτος του ρεύματος αρνητικής ακολουθίας I^- από τη σχέση (4.37) με χρήση του ρεύματος που προκύπτει από τη σχέση (4.38), ενώ στη συνέχεια υπολογίζεται και η φάση του ως προς την αντίστοιχη τάση, όπως φαίνεται στη συνέχεια:

$$(\delta^+)^* = \arctan\left(\frac{I_q^{+*}}{I_d^{+*}}\right) \quad (4.40)$$

$$(\delta^-)^* = -\pi - \delta^+$$

Η εφαρμογή της δεύτερης από τις δύο σχέσεις εξασφαλίζει τον περιορισμό της κυμάτωσης στο DC link, σύμφωνα με την ανάλυση που έγινε παραπάνω. Τέλος, το ρεύμα αρνητικής ακολουθίας που υπολογίστηκε προηγουμένως αποδίδεται στις δύο αντίστοιχες συνιστώσες στο dq^- πλαίσιο αναφοράς, σύμφωνα με τις επόμενες σχέσεις:

$$I_d^{-*} = (I^-)^* * \cos(\delta^-)^* \quad (4.41)$$

$$I_q^{-*} = (I^-)^* * \sin(\delta^-)^*$$

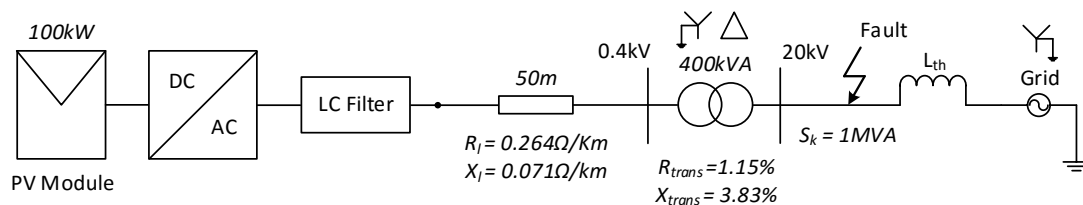
Οι αναφορές που υπολογίστηκαν με την παραπάνω μέθοδο, πέρα από την τήρηση των ορίων του αντιστροφέα και τον περιορισμό των ταλαντώσεων στην ενεργό ισχύ, πετυχαίνουν και μείωση της τάσης αρνητικής ακολουθίας του δικτύου, λόγω των χωρητικών ρευμάτων αρνητικής ακολουθίας που προκύπτουν, όπως θα φανεί και στις προσομοιώσεις που θα γίνουν στο επόμενο κεφάλαιο.

5 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΙΣ ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΩΝ ΕΛΕΓΧΟΥ

Στο παρόν κεφάλαιο θα εξεταστεί η ορθή λειτουργία των στρατηγικών ελέγχου που παρουσιάστηκαν προηγουμένως μέσω κατάλληλων προσομοιώσεων, με χρήση του λογισμικού Simulink του Matlab. Οι προσομοιώσεις θα πραγματοποιηθούν για μία κοινή τοπολογία δικτύου, η οποία θα παρουσιαστεί στη συνέχεια και θα εξεταστεί αναλυτικά η απόκριση των συστημάτων ελέγχου στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας και σε καταστάσεις σφάλματος του δικτύου. Στο τέλος του κεφαλαίου θα πραγματοποιηθεί σύγκριση μεταξύ των στρατηγικών και θα αποφασιστεί η καταλληλότερη με βάση τη συμβατότητά τους με τους κώδικες του δικτύου, καθώς και τα πλεονεκτήματα που προσφέρουν.

5.1 Εξεταζόμενη τοπολογία δικτύου

Στο σχήμα 5.1-1 παρουσιάζεται η τοπολογία του υπό εξέταση δικτύου, με βάση το οποίο έγιναν οι προσομοιώσεις. Όπως αναφέραμε και σε προηγούμενο κεφάλαιο, θα μελετήσουμε τις στρατηγικές ελέγχου για μία Φ/Β εγκατάσταση ονομαστικής ισχύος 100kW η οποία συνδέεται στο επίπεδο της Μέσης Τάσης των 20kV με τη χρήση ενός μετασχηματιστή ανύψωσης 0.4/20kV ισχύος 400kVA. Μεταξύ της εξόδου του αντιστροφέα και του μετασχηματιστή παρεμβάλλεται γραμμή μεταφοράς μήκους 50m, ενώ το δίκτυο κατά τα γνωστά έχει αναπαρασταθεί με το ισοδύναμο του κατά Thevenin και με αμιγώς επαγωγική συμπεριφορά. Προκειμένου να εκτιμήσουμε τις στρατηγικές ως προς τη συμμετοχή τους στην υποστήριξη της τάσης του δικτύου κατά τη διάρκεια σφαλμάτων, προσομοιώσαμε το δίκτυο ώστε να είναι εξαιρετικά ασθενές, με στάθμη βραχυκύκλωσης 1MVA, δηλαδή δέκα φορές την ονομαστική ισχύ του αντιστροφέα. Οι τιμές που χρησιμοποιήθηκαν για την αναπαράσταση του συγκεκριμένου συστήματος, καθώς και οι τιμές των παραμέτρων των συστημάτων ελέγχου, δίνονται αναλυτικά στο παράρτημα που βρίσκεται στο τέλος της εργασίας.



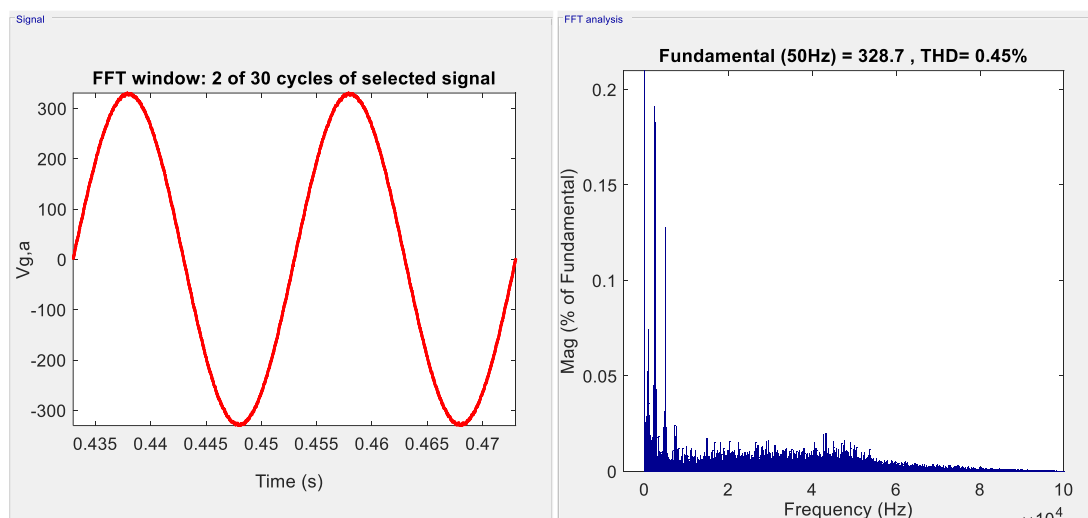
Σχήμα 5.1-1: Εξεταζόμενη τοπολογία στο δίκτυο της μέσης τάσης.

5.2 Μόνιμη κατάσταση λειτουργίας

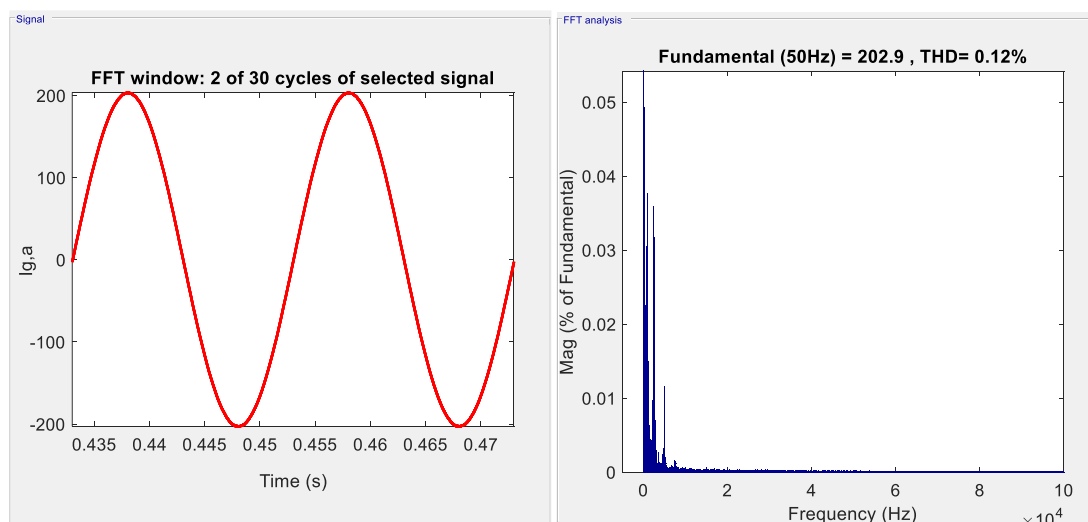
Στα πλαίσια εξέτασης των τεσσάρων στρατηγικών ελέγχου στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας του δικτύου, στη συνέχεια θα παρουσιαστούν οι κυματομορφές της τάσης και

του ρεύματος σε μία φάση στην έξοδο του αντιστροφέα, όταν εγχέεται η ονομαστική ισχύς προς το δίκτυο, ενώ θα πραγματοποιηθεί και ανάλυση του αρμονικού τους περιεχομένου, ώστε να εξασφαλιστεί ότι το επίπεδο της αρμονικής παραμόρφωσης THD (Total Harmonic Distortion) δεν ξεπερνάει τα όρια του 5%, όπως ορίζεται από του κώδικες.

Τα συγκεκριμένα χαρακτηριστικά ήταν κοινά κατά την εφαρμογή και των τεσσάρων μεθόδων και το αποτέλεσμά τους παρατηρείται από τα σχήματα 5.2-1 και 5.2-2, απ' όπου προκύπτει ότι ο συντελεστής αρμονικής παραμόρφωσης της τάσης είναι $THD_V = 0.45\%$, ενώ ο αντίστοιχος του ρεύματος είναι $THD_I = 0.12\%$, τιμές οι οποίες είναι ιδιαίτερα μικρές.



Σχήμα 5.2-1: Αρμονικό περιεχόμενο φασικής τάσης στην έξοδο του φίλτρου του αντιστροφέα.



Σχήμα 5.2-2: Αρμονικό περιεχόμενο ρεύματος στην έξοδο του φίλτρου του αντιστροφέα.

5.3 Απόκριση σε σφάλματα του δικτύου

Στη συγκεκριμένη ενότητα θα παρουσιαστεί η συμπεριφορά των εξεταζόμενων στρατηγικών σε τριφασικό και μονοφασικό σφάλμα στην πλευρά της μέσης τάσης του δικτύου. Η εκτίμηση των αποτελεσμάτων θα γίνει με βάση την ικανότητα αδιάλειπτης

λειτουργίας της Φ/Β εγκατάστασης, η οποία εξασφαλίζεται από την τήρηση των ορίων υπέρτασης στο DC link, καθώς και των θερμικών ορίων του αντιστροφέα. Στην παρούσα εργασία ως όριο υπέρτασης έχει επιλεγθεί τα 750V, ενώ τα θερμικά όρια έχουν καθοριστεί έτσι ώστε τα ρεύματα εξόδου του αντιστροφέα να μην παίρνουν τιμή μεγαλύτερη από 1.25 φορές το ονομαστικό. Επίσης θα εξεταστεί η συμβατότητα των μεθόδων ελέγχου με τους ευρωπαϊκούς κώδικες δικτύου, όπου θα ληφθούν σοβαρά υπόψη οι επεκτάσεις που δίνονται στην περίπτωση των ασύμμετρων σφαλμάτων, τα οποία εμφανίζονται πιο συχνά από τα συμμετρικά.

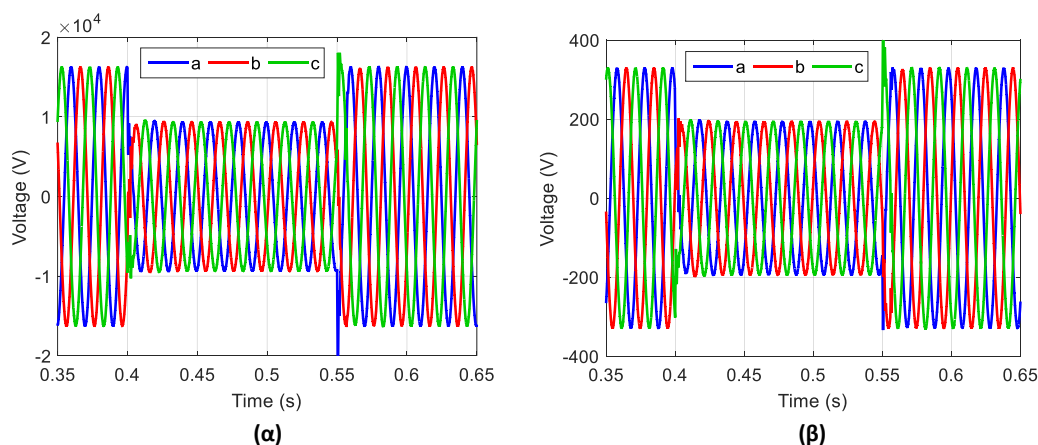
Τα σφάλματα θα πραγματοποιηθούν στο ζυγό των 20kV που βρίσκεται στην πλευρά υψηλής τάσης του μετασχηματιστή ανύψωσης και αποτελεί το ΣΚΣ της Φ/Β μονάδας με το δίκτυο, ενώ η διάρκειά τους θα είναι 150ms. Η μονάδα θα παρέχει την ονομαστική της ισχύ (100kW) προς το δίκτυο πριν συμβεί το σφάλμα, γεγονός που θεωρείται και το δυσμενέστερο σενάριο για την ανάγκη περιορισμού της ενεργού ισχύος στα πλαίσια υποστήριξης με άεργο ισχύ κατά τη διάρκεια του σφάλματος.

5.3.1 Απόκριση σε τριφασικό σφάλμα

Στη συνέχεια παρουσιάζεται η συμπεριφορά κάθε στρατηγικής σε τριφασική βύθιση τάσης, όπου η παραμένουσα τάση ισούται με το 50% της ονομαστικής της τιμής. Όπως θα δούμε και στη συνέχεια, για το συγκεκριμένο σφάλμα απαιτούνται τέτοια επίπεδα αέργου ισχύος τα οποία είναι ικανά να προκαλέσουν περιορισμό της ισχύος εισόδου από τη Φ/Β εγκατάσταση, έτσι ώστε να ικανοποιούνται τα όρια του ρεύματος εξόδου που έχουμε θέσει για τον αντιστροφέα.

5.3.1.1 Έλεγχος ρευμάτων θετικής ακολουθίας αντιστροφέα (PSCC)

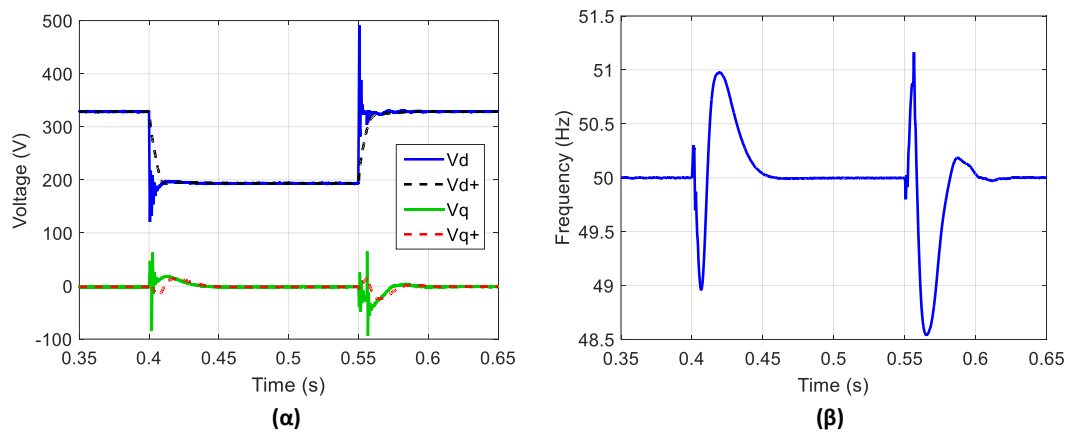
Στο σχήμα 5.3-1 παρουσιάζεται η μορφή της τάσης στο ΣΚΣ, καθώς και αυτή στην έξοδο του LC φίλτρου του αντιστροφέα, όπως μετατρέπεται λόγω του Μ/Σ αστέρα-τριγώνου. Η τελευταία είναι αυτή που μετράται για τις ανάγκες υλοποίησης του ελέγχου.



Σχήμα 5.3-1: Κυματομορφές τάσεων (α) στο σημείο του σφάλματος και (β) στην έξοδο του LC φίλτρου του αντιστροφέα.

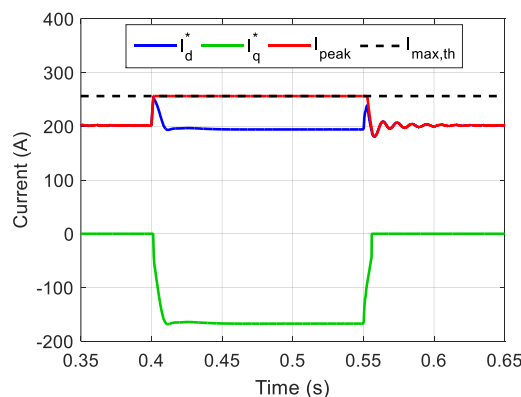
Η ορθή λειτουργία του DSOGI-PLL παρουσιάζεται στο σχήμα 5.3-2, όπου φαίνεται ο γρήγορος εντοπισμός της τάσης θετικής ακολουθίας στο σύγχρονα στρεφόμενο πλαίσιο αναφοράς, καθώς και της συχνότητας του δικτύου. Υπενθυμίζουμε ότι με την εφαρμογή του συγκεκριμένου PLL, το dq πλαίσιο αναφοράς συγχρονίζεται με την συγκεκριμένη τάση

με τέτοιο τρόπο ώστε η q συνιστώσα της να είναι μηδενική, ενώ η d συνιστώσα να ισούται με το πλάτος της. Η ανίχνευση των δύο παραπάνω μεγεθών γίνεται μέσα σε αποδεκτά χρονικά πλαίσια με βάση τους κώδικες του δικτύου, δηλαδή σε χρονικό διάστημα μικρότερο από 40ms, ώστε να καθοριστούν άμεσα τα άεργα ρεύματα αναφοράς. Παράλληλα με τις συνιστώσες της τάσης θετικής ακολουθίας, παρουσιάζονται και οι αντίστοιχες της πραγματικής τάσης εξόδου του αντιστροφέα, απ' όπου προκύπτει ότι τα δύο μεγέθη είναι ισοδύναμα σε συμμετρικές καταστάσεις.



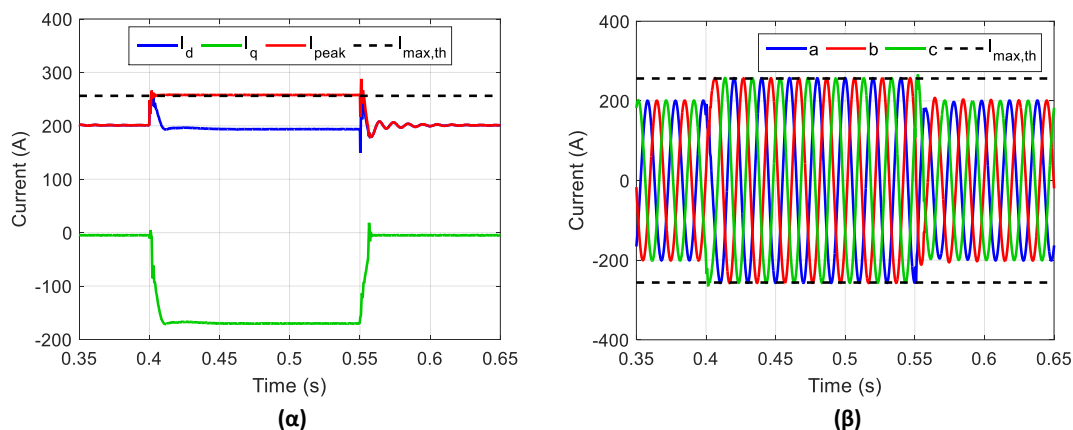
Σχήμα 5.3-2: Απόκριση DSOGI-PLL. (α) dq συνιστώσες τάσης εξόδου αντιστροφέα και τάσης θετικής ακολουθίας και (β) συχνότητα PLL.

Με βάση την πτώση της τάσης θετικής ακολουθίας που παρατηρείται καθορίζεται στη συνέχεια η άεργος συνιστώσα των ρευμάτων αναφοράς I_q^* , σύμφωνα με τους κώδικες, ενώ η ενεργός συνιστώσα I_d^* προκύπτει κατά τα γνωστά από τον κατάλληλο έλεγχο της τάσης στο DC link και υπόκειται σε περιορισμό αν η τιμή του συνολικού ρεύματος ξεπεράσει το θερμικό όριο του αντιστροφέα. Οι αναφορές που προέκυψαν για το συγκεκριμένο σφάλμα φαίνονται στο σχήμα 5.3-3. Παρατηρούμε ότι η άεργος συνιστώσα παίρνει αρνητική τιμή κατά τη διάρκεια του σφάλματος, όπως απαιτείται προκειμένου να έχουμε έγχυση αέργου ισχύος προς το δίκτυο, ενώ η ενεργός συνιστώσα περιορίζεται προκειμένου το συνολικό ρεύμα να μην ξεπεράσει τα όρια του αντιστροφέα. Το γεγονός αυτό θα οδηγήσει σε μείωση της ενεργού ισχύος που ρέει προς το δίκτυο, όπως θα δούμε και στη συνέχεια.



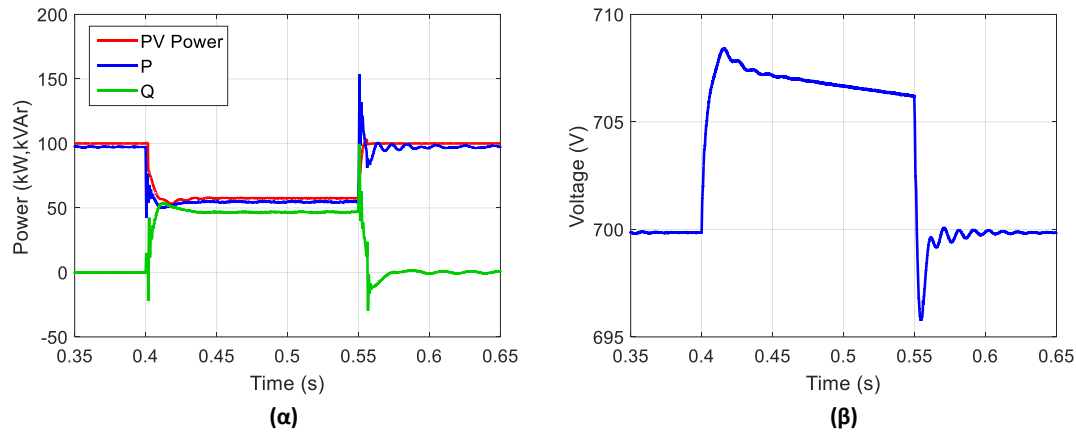
Σχήμα 5.3-3: Ρεύματα αναφοράς στο σύγχρονα στρεφόμενο πλαίσιο.

Από τον έλεγχο ρευμάτων που πραγματοποιείται με τη χρήση PI ελεγκτών προκύπτουν τελικά τα πραγματικά ρεύματα, τα οποία φαίνονται στο σχήμα 5.3-4, τόσο στο dq όσο και στο abc πλαίσιο αναφοράς. Παρατηρούμε ότι τα πραγματικά μεγέθη στο dq πλαίσιο ακολουθούν με ικανοποιητική ακρίβεια τις αναφορές τους, επιβεβαιώνοντας την ορθή λειτουργία του ελέγχου. Αντίστοιχα, τα ρεύματα εξόδου του αντιστροφέα είναι πλήρως συμμετρικά, όπως θα περιμέναμε εξαιτίας της DC φύσης των σημάτων στο dq πλαίσιο αναφοράς και η έγχυσή τους προς το δίκτυο γίνεται άμεσα, υπερκαλύπτοντας το όριο των 40ms.



Σχήμα 5.3-4: Ρεύματα εξόδου του αντιστροφέα (α) στο dq και (β) στο abc πλαίσιο αναφοράς.

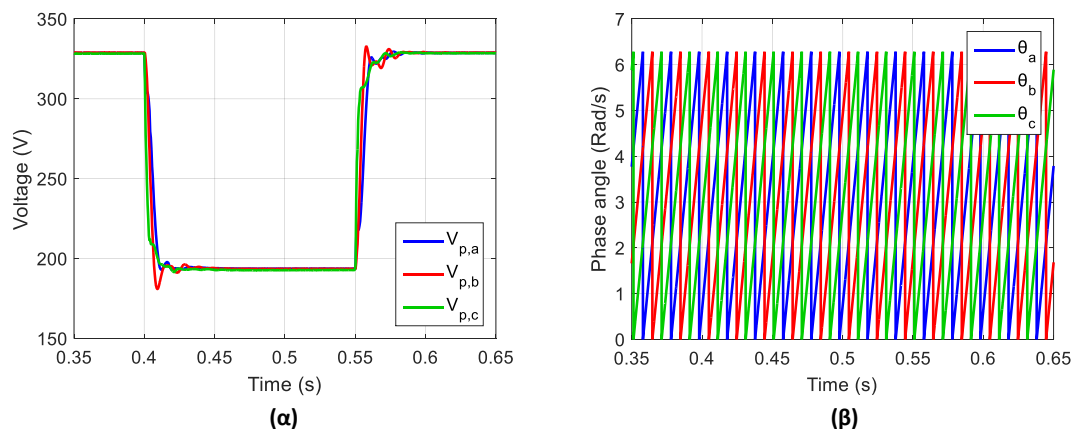
Στο σχήμα 5.3-5 δίνονται η ισχύς που παρέχεται από τα Φ/Β, η ενεργός και η άεργος ισχύς που εγχέονται προς το δίκτυο, καθώς και η τάση στο DC link της διάταξης. Αρχικά παρατηρούμε τη μείωση της ενεργού ισχύος που παρέχεται στο δίκτυο, λόγω του περιορισμού των ενεργών ρευμάτων που αναφέραμε προηγουμένως, καθώς επίσης και την παροχή άεργου ισχύος, όπως προβλέπεται από τους κώδικες. Με την εφαρμογή του περιορισμού των ενεργών ρευμάτων ενεργοποιείται αυτόματα και ο ελεγκτής περιορισμού της ισχύος εισόδου από τα Φ/Β, ο οποίος έχει προσομοιωθεί να υλοποιείται σε πιο αργό χρόνο από το υπόλοιπο σύστημα, εξαιτίας των βαθμίδων ελέγχου που μεσολαβούν σε μία πραγματική αντίστοιχη διάταξη. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα η συγκεκριμένη ισχύς να καθυστερεί να προσαρμοστεί στις μεταβολές της ενεργού ισχύος εξόδου, οδηγώντας σε μία μικρή υπέρταση στο DC link, η οποία φαίνεται στο δεύτερο σχήμα. Η συγκεκριμένη υπέρταση δεν ξεπερνά τα προβλεπόμενα όρια και επομένως η διάταξη μπορεί να συνεχίσει ομαλά τη λειτουργία της υποστηρίζοντας το δίκτυο. Τέλος, αξίζει να αναφερθεί η μικρή απόκλιση που παρατηρείται μεταξύ της ισχύος εισόδου των Φ/Β και της ενεργού ισχύος εξόδου ακόμα και σε κανονικές συνθήκες. Ο λόγος που συμβαίνει αυτό είναι ότι οι ισχείς εξόδου μετρούνται στο ΣΚΣ της Φ/Β εγκατάστασης οπότε είναι λογικό να μεσολαβούν κάποιες απώλειες, οι οποίες οφείλονται σε μεγάλο βαθμό και στην παρουσία του Μ/Σ ανύψωσης.

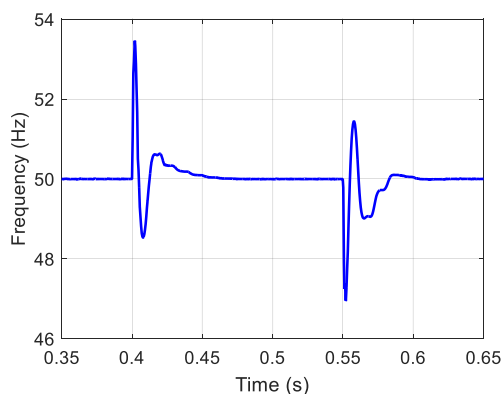


Σχήμα 5.3-5: (α) Ισχύς εισόδου από τα Φ/Β και ενεργός-άεργος ισχύς που παρέχεται στο δίκτυο και (β) τάση στο dc link της διάταξης.

5.3.1.2 Ανεξάρτητος έλεγχος ρευμάτων τριών φάσεων αντιστροφέα (IPCC)

Για τη συγκεκριμένη μέθοδο θα ελέγξουμε αρχικά τη σωστή απόκριση του τροποποιημένου συστήματος συγχρονισμού που χρησιμοποιεί, με τη χρήση τριών μονοφασικών SOGI-PLL, παρουσιάζοντας τα πλάτη, τις φασικές γωνίες και τη συχνότητα των τριών τάσεων εξόδου του αντιστροφέα. Τα συγκεκριμένα μεγέθη φαίνονται στο σχήμα 5.3-6. Αρχικά παρατηρούμε ότι τα πλάτη των τριών τάσεων εντοπίζονται άμεσα από το σύστημα συγχρονισμού συνεισφέροντας στη γρήγορη απόκριση του συνολικού συστήματος ελέγχου. Μάλιστα παίρνουν την ίδια τιμή κατά τη διάρκεια του σφάλματος, όπως περιμέναμε λόγω του συμμετρικού βραχυκυκλώματος. Επίσης οι φάσεις των τριών τάσεων εντοπίζονται σωστά χωρίς να επηρεάζονται από το σφάλμα και αντίστοιχα και η συχνότητα, η οποία επανέρχεται στα 50Hz σε χρονικό διάστημα 50ms από την εμφάνιση του σφάλματος.

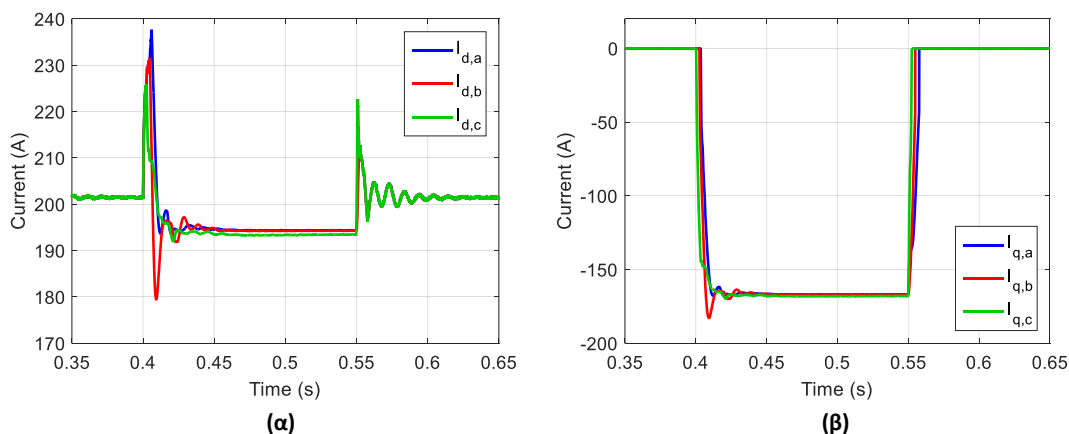




(γ)

Σχήμα 5.3-6: Απόκριση τριών μονοφασικών SOGI-PLL σε τριφασικό σφάλμα. α) Πλάτη, (β) φασικές γωνίες και (γ) συχνότητα τριών τάσεων εξόδου αντιστροφέα.

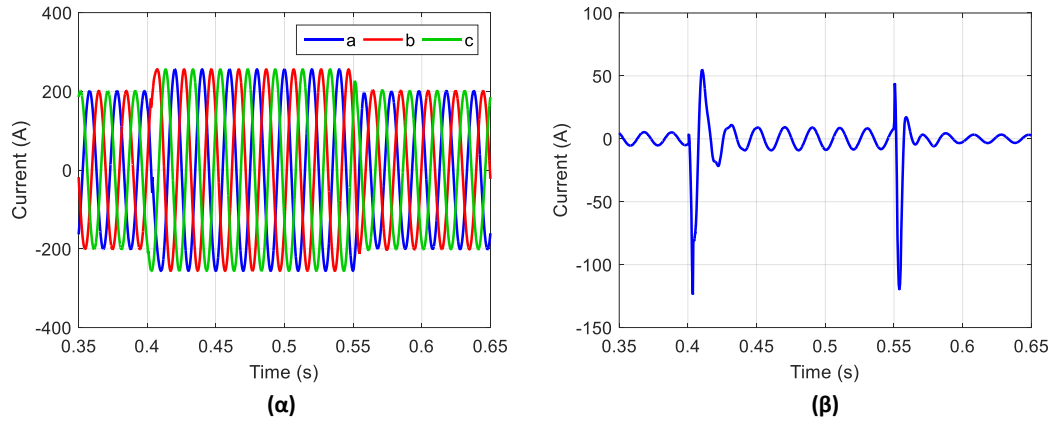
Έχοντας δεδομένα τα πλάτη των τάσεων στη συνέχεια καθορίζονται οι άεργες συνιστώσες των ρευμάτων αναφοράς ξεχωριστά για κάθε φάση, όπως φαίνεται στο σχήμα 5.3-7(β). Με αυτόν τον τρόπο η κάθε φάση υποστηρίζεται με ένα ποσοστό άεργου ρεύματος το οποίο είναι ανάλογο με την πτώση τάσης που παρατηρείται. Παρατηρούμε ότι και στις τρεις φάσεις η υποστήριξη με άεργα ρεύματα είναι κοινή λόγω του συμμετρικού βραχυκυκλώματος. Αντίστοιχα κοινές είναι και οι ενεργές συνιστώσες των ρευμάτων αναφοράς για κάθε φάση, οι οποίες κατά τα γνωστά καθορίζονται με έλεγχο τάσης στο DC link και στη συνέχεια υπόκεινται ή όχι σε περιορισμό ανάλογα με το άεργο ρεύμα που απαιτείται στην αντίστοιχη φάση. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, όπως βλέπουμε στο σχήμα 5.3-7(α), οι τρεις συνιστώσες έχουν υποστεί περιορισμό, καθώς μειώθηκαν κατά τη διάρκεια του σφάλματος.



Σχήμα 5.3-7: (α) Ενεργές συνιστώσες ρευμάτων αναφοράς ανά φάση και (β) άεργες συνιστώσες ρευμάτων αναφοράς ανά φάση.

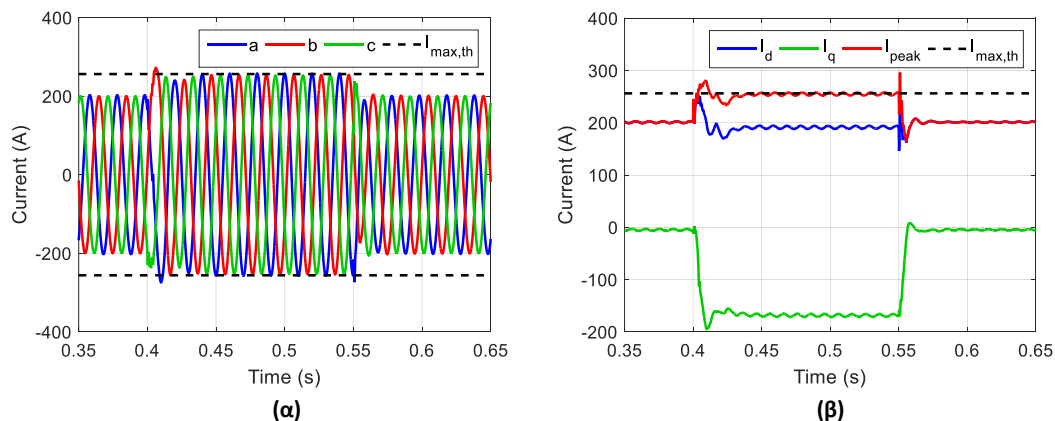
Με βάση τις παραπάνω αναφορές ρευμάτων, στη συνέχεια υλοποιείται ο “τροποποιημένος” μετασχηματισμός Park, απ’ όπου προκύπτουν οι αντίστοιχες αναφορές στο abc πλαίσιο, οι οποίες φαίνονται στο σχήμα 5.3-8(α). Ωστόσο εξαιτίας της φύσης του συγκεκριμένου μετασχηματισμού, οι συγκεκριμένες αναφορές περιλαμβάνουν μία μικρή συνιστώσα μηδενικής ακολουθίας, η οποία προκύπτει από το άθροισμα των ρευμάτων των τριών φάσεων και φαίνεται στο σχήμα 5.3-8(β). Η συγκεκριμένη συνιστώσα είναι

ανεπιθύμητη λόγω της διάταξης των τριών αγωγών που χρησιμοποιούμε και όπως αναλύσαμε στο προηγούμενο κεφάλαιο απαλείφεται, ενώ επίσης τα ρεύματα υπόκεινται και σε έναν δεύτερο περιορισμό, οπότε προκύπτουν οι τελικές αναφορές που δίνονται για έλεγχο.



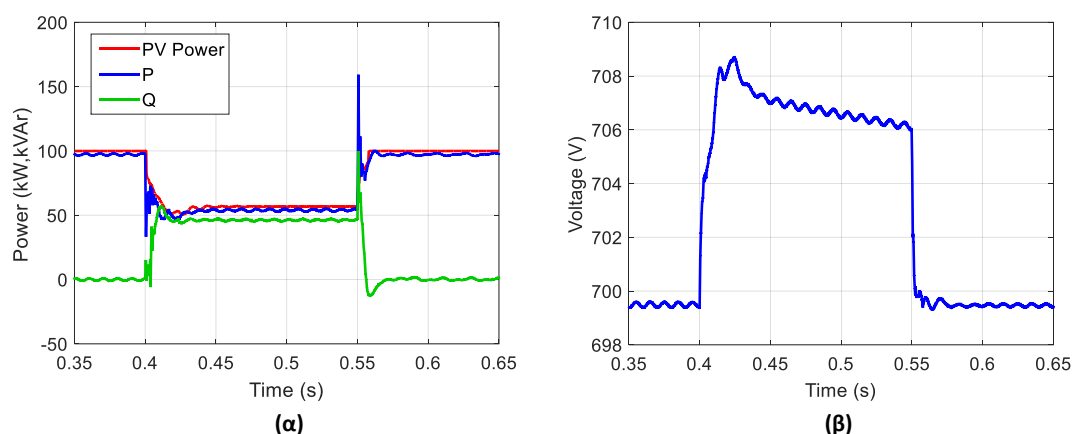
Σχήμα 5.3-8: (α) Ρεύματα αναφοράς στο abc πλαίσιο με συνιστώσα μηδενικής ακολουθίας και (β) κοινό ρεύμα τριών φάσεων.

Στο σχήμα 5.3-9 φαίνονται τα πραγματικά ρεύματα που ρέουν στην έξοδο του αντιστροφέα κατά τη διάρκεια του συμμετρικού σφάλματος, με χρήση της συγκεκριμένης μεθόδου, τόσο στο abc όσο και στο dq πλαίσιο αναφοράς. Παρατηρούμε ότι τα συγκεκριμένα ρεύματα αποκλίνουν ελαφρώς από την ιδανική συμμετρική συμπεριφορά την οποία θα αναμέναμε να είχαν στο συγκεκριμένο σφάλμα, γεγονός που οφείλεται στην απαλοιφή του μικρού ρεύματος μηδενικής ακολουθίας. Η μικρή αυτή ασυμμετρία παρατηρείται και από τις dq συνιστώσες, καθώς χαρακτηρίζονται από μικρές ταλαντώσεις συχνότητας διπλάσιας του δικτύου (100Hz), οι οποίες μαρτυρούν την ύπαρξη μικρών ρευμάτων αρνητικής ακολουθίας. Ωστόσο και με αυτή τη μέθοδο εξασφαλίζεται τελικά η έγχυση άεργου ρεύματος αντίστοιχου με αυτού της πρώτης μεθόδου, επομένως τηρούνται απόλυτα οι κώδικες του δικτύου. Αξίζει να σημειωθεί και πάλι ότι τα επιθυμητά ρεύματα εξόδου παρέχονται στο δίκτυο εντός των αποδεκτών χρονικών πλαισίων, από τη στιγμή που πραγματοποιείται το σφάλμα, ενώ τηρούνται και πάλι τα θερμικά όρια, πλην ενός μικρού χρονικού διαστήματος της τάξης των 20ms, το οποίο θεωρείται πολύ μικρό για να προκαλέσει την αποσύνδεση της διάταξης.



Σχήμα 5.3-9: Ρεύματα εξόδου αντιστροφέα (α) στο abc και (β) στο dq πλαίσιο αναφοράς.

Τέλος, στο σχήμα 5.3-10 παρουσιάζονται η ισχύς εισόδου από τα Φ/Β, η ενεργός και η άεργος ισχύς εξόδου και η τάση στο DC link της διάταξης. Από το πρώτο σχήμα επιβεβαιώνεται και πάλι η υποστήριξη του δικτύου μέσω παροχής αέργου ισχύος η οποία φτάνει στα ίδια επίπεδα όπως και με την πρώτη μέθοδο. Επίσης, η ισχύς εισόδου φαίνεται να προσαρμόζεται άμεσα στη μείωση της ενεργού ισχύος εξόδου, προκειμένου να επιτευχθεί η τήρηση των θερμικών ορίων του αντιστροφέα, οδηγώντας σε μία μικρή μόνο υπερύψωση της τάσης στο DC link, η οποία δεν ξεπερνά τα 10V. Οι μικρές κυματώσεις διπλάσιας συχνότητας που παρατηρούνται τόσο στις ισχύεις όσο και στην τάση εισόδου, οφείλονται στη μικρή ασυμμετρία των ρευμάτων η οποία αναφέρθηκε προηγουμένως.

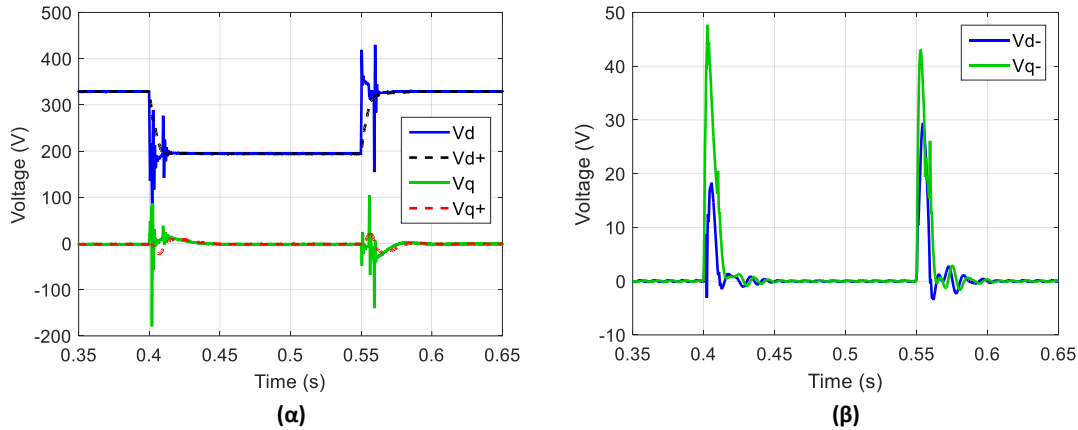


Σχήμα 5.3-10: (α) Ισχύς εισόδου από Φ/Β εγκατάσταση, ενεργός και άεργος ισχύς που παρέχεται στο δίκτυο και (β) τάση DC link.

5.3.1.3 Έλεγχος ρευμάτων αντιστροφέα σε δύο σύγχρονα στρεφόμενα πλαίσια αναφοράς (DDSRF-CC)

Σε συμμετρικά σφάλματα του δικτύου η συγκεκριμένη μεθοδολογία ελέγχου δεν παράγει αναφορές ρευμάτων αρνητικής ακολουθίας, καθώς δεν υπάρχει ανάγκη για μείωση της τάσης αρνητικής ακολουθίας του δικτύου, αλλά ούτε και για μείωση της κυμάτωσης της τάσης στο DC link. Συνεπώς και για τις δύο εκδοχές της συγκεκριμένης στρατηγικής που παρουσιάστηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο, ο έλεγχος των ρευμάτων θα έχει παρόμοια αποτελέσματα με αυτά που παρατηρήσαμε στον έλεγχο ρευμάτων θετικής ακολουθίας. Η ουσιαστική διαφορά σε σχέση με τη συγκεκριμένη στρατηγική είναι ότι ο έλεγχος πραγματοποιείται πλέον σε δύο αποζευγμένα σύγχρονα πλαίσια αναφοράς και όχι στο $\alpha\beta$ πλαίσιο.

Επίσης, όπως είδαμε στο προηγούμενο κεφάλαιο, το σύστημα συγχρονισμού που χρησιμοποιείται στη συγκεκριμένη στρατηγική είναι το DSOGI-PLL με επιπλέον βρόχο ελέγχου για τον εντοπισμό της τάσης αρνητικής ακολουθίας. Ο εντοπισμός των συμμετρικών συνιστωσών των τάσεων του δικτύου για την περίπτωση του συμμετρικού σφάλματος φαίνεται στο σχήμα 5.3-11. Από το συγκεκριμένο σχήμα επιβεβαιώνεται η μηδενική τάση αρνητικής ακολουθίας, η οποία ισούται κατά τα γνωστά με τη d συνιστώσα στο αρνητικά στρεφόμενο πλαίσιο αναφοράς. Ακόμη, όπως αναμέναμε η πραγματική τάση του δικτύου ισοδυναμεί με την αντίστοιχη τάση θετικής ακολουθίας.

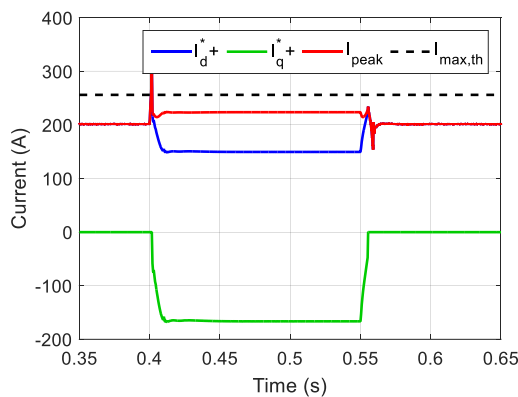


Σχήμα 5.3-11: Τάσεις (α) θετικής και (β) αρνητικής ακολουθίας στα αντίστοιχα στρεφόμενα πλαίσια αναφοράς.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα ρεύματα εξόδου, οι ισχείς και η τάση στο DC link για τις δύο εκδοχές της συγκεκριμένης στρατηγικής, όπου στην πρώτη επιλέξαμε τον περιορισμό της ενεργού ισχύος σε συνθήκες σφάλματος αναλογικά με την πτώση τάσης που παρατηρείται, σύμφωνα με τους ισπανικούς κώδικες, ενώ στη δεύτερη εφαρμόζεται ο κλασσικός περιορισμός, ώστε να τηρούνται τα θερμικά όρια του αντιστροφέα.

5.3.1.3.1 Μέθοδος 1^η: Περιορισμός ενεργού ισχύος σύμφωνα με τους ισπανικούς κώδικες

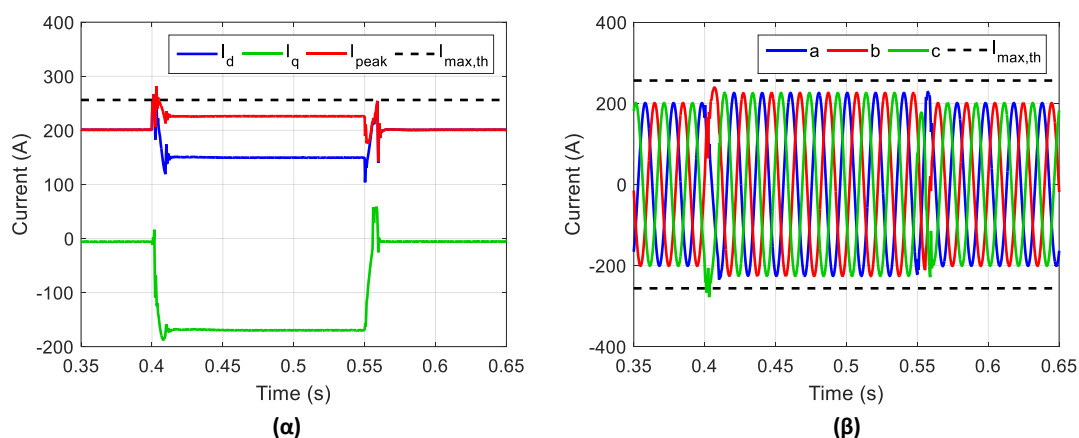
Τα ρεύματα αναφοράς θετικής ακολουθίας όπως προκύπτουν για το συγκεκριμένο σφάλμα φαίνονται στο σχήμα 5.3-12. Η άεργος συνιστώσα ρεύματος παίρνει την τιμή της ανάλογα με την πτώση της τάσης θετικής ακολουθίας, ενώ ο περιορισμός της ενεργού συνιστώσας, ο οποίος πλέον ορίζεται από τους ισπανικούς κώδικες, είναι τέτοιος ώστε το συνολικό ρεύμα να μην φτάνει τα θερμικά όρια του αντιστροφέα. Υπενθυμίζεται ότι για τη συγκεκριμένη περίπτωση οι αναφορές των ρευμάτων αρνητικής ακολουθίας ορίζονται μηδενικές.



Σχήμα 5.3-12: Αναφορές ρευμάτων θετικής ακολουθίας στο dq^+ πλαίσιο αναφοράς.

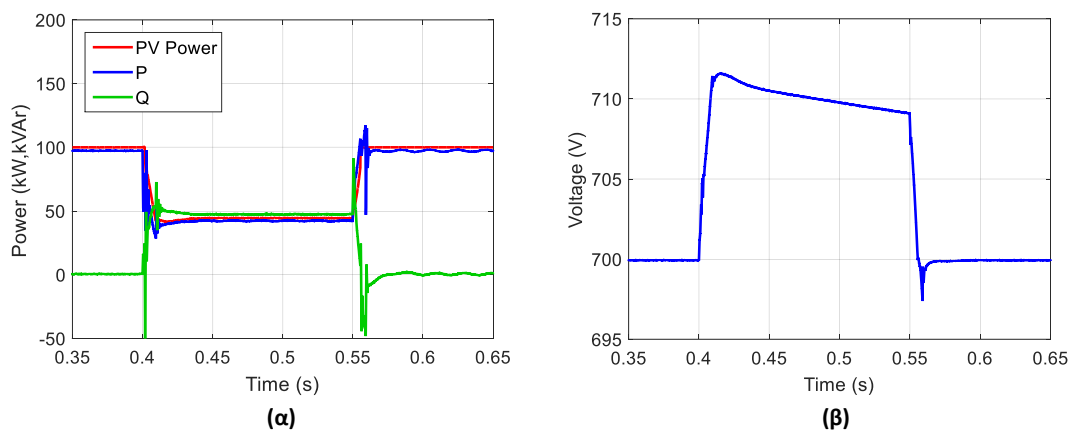
Τα ρεύματα εξόδου τα οποία προέκυψαν από τον έλεγχο στα δύο σύγχρονα στρεφόμενα πλαίσια φαίνονται στο σχήμα 5.3-13, τόσο στο dq^+ όσο και στο abc πλαίσιο αναφοράς. Τα συγκεκριμένα ρεύματα έχουν την αναμενόμενη συμμετρική μορφή, ενώ παίρνουν τις τιμές των αναφορών τους σε χρονικό διάστημα μικρότερο των 40ms. Επιπλέον

επιβεβαιώνεται ότι το πλάτος τους είναι πιο κάτω από τα θερμικά όρια του αντιστροφέα, λόγω του περιορισμού ενεργού ισχύος που εφαρμόστηκε.



Σχήμα 5.3-13: Ρεύματα εξόδου αντιστροφέα (α) στο dq^+ και (β) στο abc πλαίσιο αναφοράς.

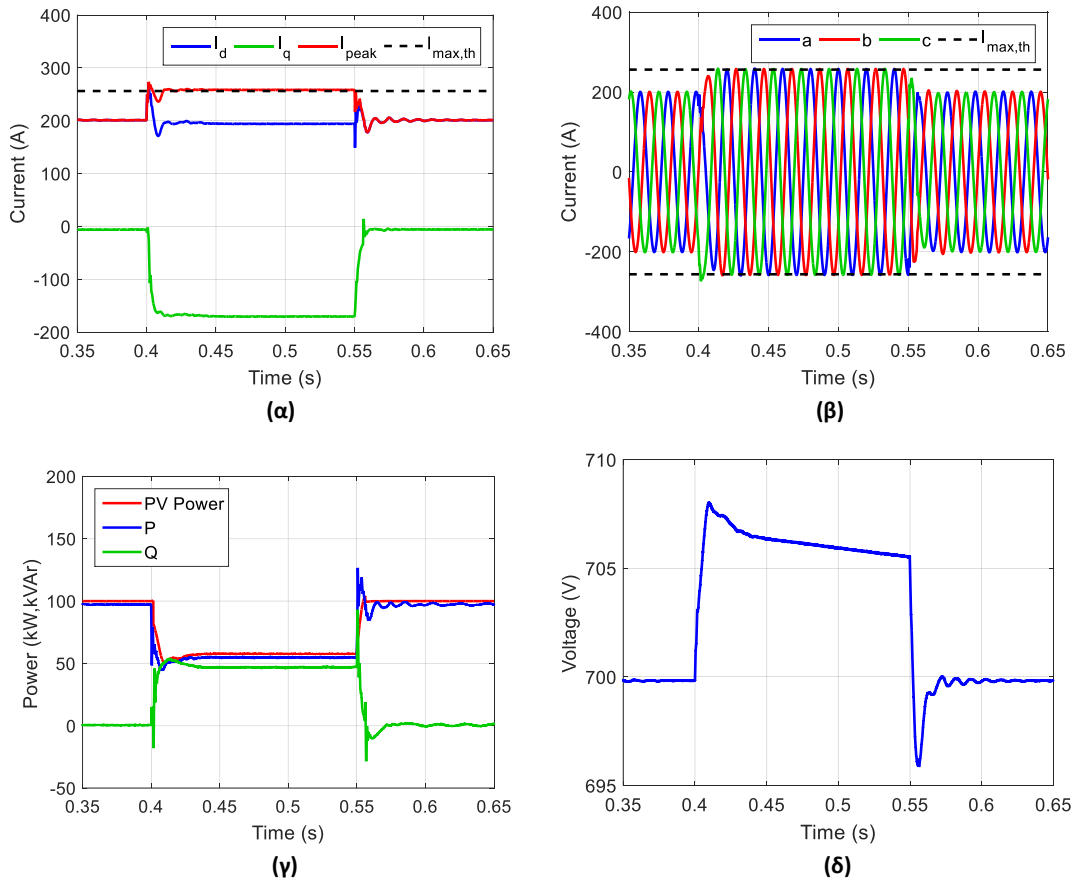
Αντίστοιχα, οι ισχείς εισόδου και εξόδου, καθώς και η τάση στο DC link φαίνονται στο σχήμα 5.3-14. Από τα συγκεκριμένα σχήματα προκύπτει η επιπλέον μείωση της ενεργού ισχύος σε σχέση με τις προηγούμενες στρατηγικές, η οποία έχει ως αποτέλεσμα μία ελαφρώς μεγαλύτερη υπερύψωση της τάσης στο DC link, εξαιτίας του μεγαλύτερου περιορισμού, καθώς και της καθυστέρησης του ελέγχου ισχύος από τα Φ/Β. Η άεργος ισχύς όπως αναμενόταν είναι στα ίδια επίπεδα με τις προηγούμενες περιπτώσεις.



Σχήμα 5.3-14: (α) Ισχύς Φ/Β, ενεργός και άεργος ισχύς που παρέχεται στο δίκτυο και (β) τάση στο DC link.

5.1.3.1.2 Μέθοδος 2^η: Περιορισμός ενεργού ισχύος για τήρηση των θερμικών ορίων

Στη δεύτερη εκδοχή της συγκεκριμένης στρατηγικής, η μόνη διαφοροποίηση που εισάγεται σε σχέση με την πρώτη στρατηγική είναι ότι ο έλεγχος των ρευμάτων πραγματοποιείται στα δύο στρεφόμενα πλαίσια. Για το λόγο αυτό τα αποτελέσματα που προέκυψαν δεν παρουσιάζουν ουσιαστικές διαφοροποιήσεις, όπως φαίνεται και από το σχήμα 5.3-15. Τα αποτελέσματα αυτά, όπως και της προηγούμενης εκδοχής, αποδεικνύουν πως ο έλεγχος των ρευμάτων στα δύο στρεφόμενα πλαίσια είναι το ίδιο αποδοτικός με τον έλεγχο ρευμάτων θετικής ακολουθίας σε συμμετρικές καταστάσεις.



Σχήμα 5.3-15: Απόκριση μεθόδου DDSRF-CC σε συμμετρικό σφάλμα ώστε να τηρούνται τα θερμικά όρια. Ρεύματα εξόδου (α) στο dq^+ και (β) στο abc πλαίσιο αναφοράς, (γ) ισχύς εισόδου Φ/B , ενεργός και άεργος ισχύς εξόδου και (δ) τάση DC link.

5.3.2 Απόκριση σε μονοφασικό σφάλμα

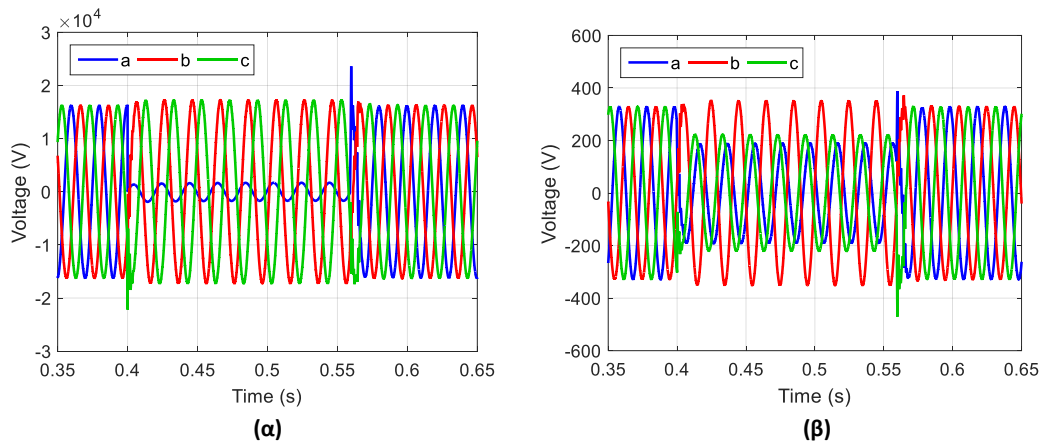
Στη συνέχεια θα παρουσιαστεί η συμπεριφορά των εξεταζόμενων στρατηγικών κατά τη διάρκεια ενός μονοφασικού σφάλματος, όπου η παραμένουσα τιμή της τάσης στη φάση που έχει υποστεί το σφάλμα φτάνει στο 10% της ονομαστικής της τιμής. Το συγκεκριμένο σφάλμα θα πραγματοποιηθεί και πάλι στο ζυγό της ΜΤ του δικτύου, όπως και στην προηγούμενη περίπτωση και για το λόγο αυτό θα υποστεί μία μεταβολή ως προς τον τύπο του στην πλευρά της ΧΤ, εξαιτίας της ύπαρξης του Μ/Σ, διατηρώντας ωστόσο χαρακτηριστικά ασυμμετρίας, όπως θα δούμε και στη συνέχεια.

Η μεγαλύτερη συχνότητα εμφάνισης τέτοιων σφαλμάτων σε σχέση με τα υπόλοιπα (τριφασικά, διφασικά) στο πραγματικό δίκτυο, καθώς και η έντονη σχέση ασυμμετρίας την οποία εισάγουν ειδικά στο δίκτυο της ΧΤ, τα καθιστούν κατάλληλα για τη διερεύνηση των υπό εξέταση στρατηγικών σε ασύμμετρα σφάλματα του δικτύου, όπου αποκτά ουσιαστικό νόημα ο διαχωρισμός τους. Επίσης, η φύση του συγκεκριμένου σφάλματος, σε συνδυασμό με τα θερμικά όρια που έχουν τεθεί, είναι ικανά να προκαλέσουν περιορισμό των ενεργών ρευμάτων σε όλες τις μεθόδους, οπότε θα εξεταστεί ουσιαστικά και πάλι ο έλεγχος περιορισμού της ισχύος εισόδου από τα Φ/B .

5.3.2.1 Έλεγχος ρευμάτων θετικής ακολουθίας αντιστροφή (PSCC)

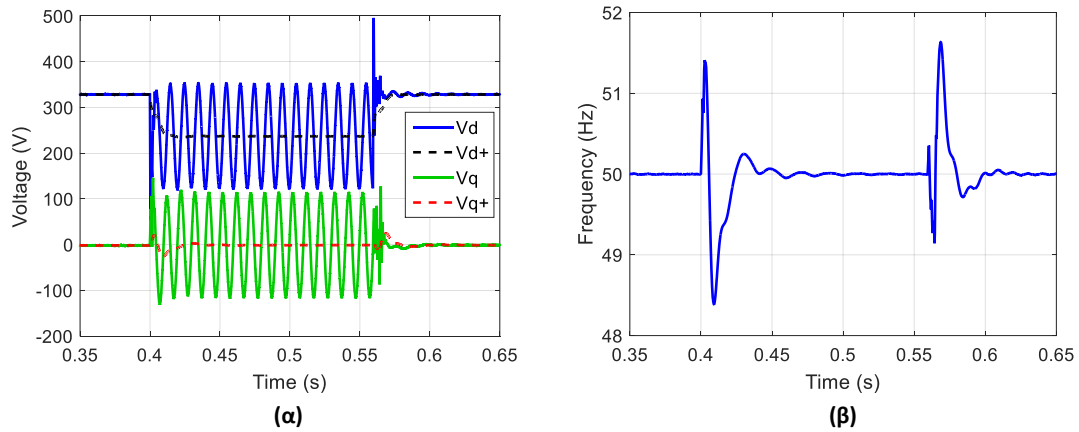
Αρχικά, στο σχήμα 5.3-16 παρουσιάζεται η μονοφασική βύθιση τάσης στην πλευρά της ΜΤ του δικτύου, καθώς και ο τύπος στον οποίο μετατρέπεται το συγκεκριμένο σφάλμα

στην έξοδο του LC φίλτρου του αντιστροφέα, στην πλευρά της ΧΤ. Παρατηρούμε ότι η ασυμμετρία παίρνει άλλη μορφή στη πλευρά χαμηλής τάσης του μετασχηματιστή τόσο ως προς τα πλάτη των τάσεων όσο και ως προς τις φάσεις, όπου επί της ουσίας το σφάλμα μετατρέπεται σε διφασικό. Επίσης, γίνεται εμφανής η ανύψωση της τάσης στις φάσεις που δεν έχουν υποστεί κάποιο σφάλμα, τόσο στη ΧΤ όσο και στη ΜΤ, γεγονός που οφείλεται στην εξαιρετικά ασθενή συμπεριφορά του δικτύου που έχουμε προσομοιώσει και εξαιτίας της έγχυσης ρευμάτων θετικής ακολουθίας μόνο που προκαλεί αυτή η τεχνική, τα οποία όπως είδαμε προκαλούν ομοιόμορφη ανύψωση των τριών φάσεων. Ωστόσο η συγκεκριμένη ανύψωση φτάνει στα επίπεδα του 6.13% της ονομαστικής τιμής της τάσης, οπότε δεν ξεπερνά το άνω όριο, το οποίο ορίζεται στο 10% σύμφωνα με τους κώδικες δικτύου.



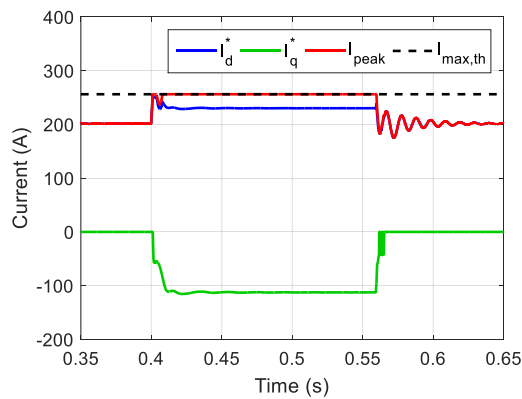
Σχήμα 5.3-16: (α) Μονοφασική βύθιση τάσης στην πλευρά της ΜΤ του δικτύου και (β) σύστημα τάσεων στην έξοδο του LC φίλτρου του αντιστροφέα.

Ο εντοπισμός της τάσης θετικής ακολουθίας και της συχνότητας του δικτύου από το DSOGI-PLL φαίνεται στο σχήμα 5.3-17. Αρχικά παρατηρούμε τις ταλαντώσεις διπλάσιας συχνότητας στις συνιστώσες της τάσης εξόδου του αντιστροφέα στο dq πλαίσιο αναφοράς, οι οποίες οφείλονται στην ύπαρξη της συνιστώσας αρνητικής ακολουθίας, λόγω του ασύμμετρου σφάλματος. Αντίθετα η αναπαράσταση της θετικής ακολουθίας των συγκεκριμένων τάσεων στο ίδιο πλαίσιο, όπως αναμενόταν, δεν παρουσιάζει αντίστοιχες ταλαντώσεις, ενώ κατά τα γνωστά ισούται με τη μέση τιμή των συνιστωσών των πραγματικών τάσεων. Ο εντοπισμός της θετικής ακολουθίας, καθώς και της συχνότητας γίνεται εντός των αποδεκτών χρονικών ορίων.



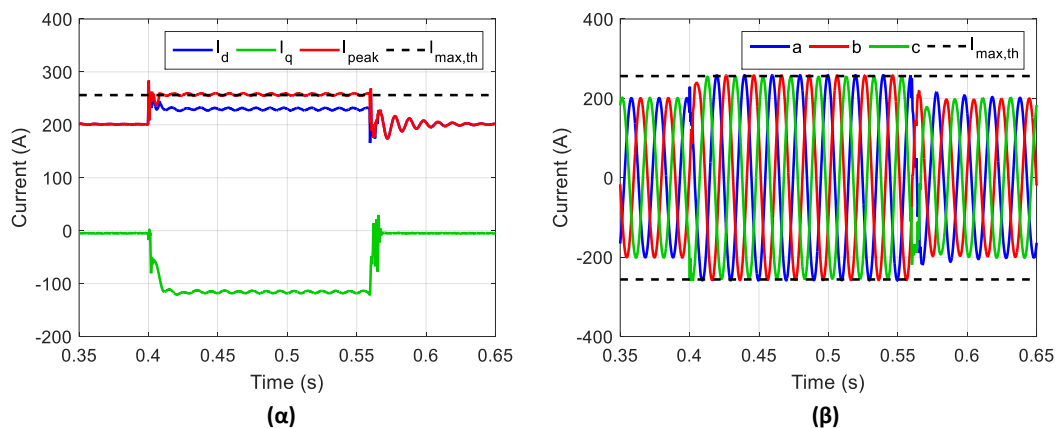
Σχήμα 5.3-17: Απόκριση DSOGI-PLL σε μονοφασικό σφάλμα. (α) Συνιστώσες πραγματικής τάσης εξόδου αντιστροφέα και τάσης θετικής ακολουθίας στο σύγχρονα στρεφόμενο πλαίσιο αναφοράς και (β) συχνότητα τάσης του δικτύου.

Με βάση την πτώση της τάσης θετικής ακολουθίας επιλέγεται κατά τα γνωστά η αναφορά της αέργου συνιστώσας των ρευμάτων εξόδου I_q^* , ενώ η ενεργός I_d^* προκύπτει με έλεγχο της τάσης στο DC link, όπως φαίνονται στο σχήμα 5.3-18. Η αναφορά του ενεργού ρεύματος παίρνει σταθερή τιμή παρά την ταλάντωση της τάσης στο DC link λόγω ασυμμετρίας, την οποία θα παρουσιάσουμε στη συνέχεια, εξαιτίας της ύπαρξης του notch filter το οποίο απορρίπτει τις συγκεκριμένες ταλαντώσεις, ενώ υφίσταται και περιορισμό ώστε να μην ξεπεραστούν τα θερμικά όρια, λόγω των άεργων ρευμάτων.



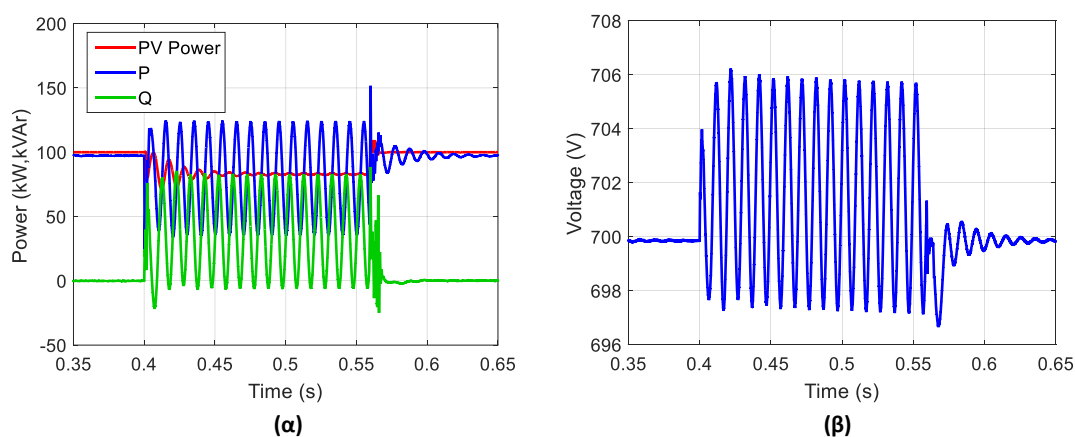
Σχήμα 5.3-18: Ρεύματα αναφοράς στο σύγχρονα στρεφόμενο πλαίσιο.

Στο σχήμα 5.3-19 φαίνονται οι πραγματικές τιμές που προκύπτουν από τον έλεγχο των ρευμάτων, τόσο στο dq όσο και στο abc πλαίσιο αναφοράς. Παρατηρούμε ότι τα ρεύματα εξόδου του αντιστροφέα είναι πλήρως συμμετρικά, εξαιτίας της DC μορφής των dq συνιστωσών, ενώ τηρούν και πάλι τα θερμικά όρια.



Σχήμα 5.3-19: Απόκριση ελεγκτή ρευμάτων σε ασύμμετρο σφάλμα. (α) Ρεύματα εξόδου στο dq πλαίσιο αναφοράς και (β) πραγματικά ρεύματα εξόδου.

Τέλος, στο σχήμα 5.3-20 παρουσιάζονται η ισχύς εισόδου από τα Φ/Β, η ενεργός και άεργος ισχύς που εγχέεται στο δίκτυο, καθώς και η τάση στο DC link που προκύπτει από το ισοζύγιο μεταξύ αυτών. Οι ταλαντώσεις διπλάσιας συχνότητας στις ισχύεις εξόδου του αντιστροφέα είναι αποτέλεσμα της ασυμμετρίας των τάσεων που προκύπτει κατά τη διάρκεια του σφάλματος. Από το σχήμα παρατηρείται η μείωση της μέσης τιμής της ενεργού ισχύος για τήρηση των θερμικών ορίων, ενώ γίνεται εμφανής και η παροχή αέργου ισχύος, η οποία κατά μέσο όρο είναι μεγαλύτερη από το μηδέν. Ακόμα, η ισχύς εισόδου από τα Φ/Β ακολουθεί τη μείωση της ενεργού ισχύος εξόδου, επιβεβαιώνοντας και πάλι την ορθή λειτουργία του ελέγχου για τον περιορισμό της, ενώ δεν εμφανίζει αντίστοιχες ταλαντώσεις, εξαιτίας της ύπαρξης του notch filter. Τέλος, οι συγκεκριμένες ταλαντώσεις εμφανίζονται και στην τάση του DC link, όπως αναφέραμε και προηγουμένως, στην οποία κατά τα γνωστά παρατηρείται μία μικρή υπερύψωση, χωρίς ωστόσο να ξεπερνιούνται τα όρια υπέρτασης, καθώς η μέγιστη τιμή φτάνει τα 706V.

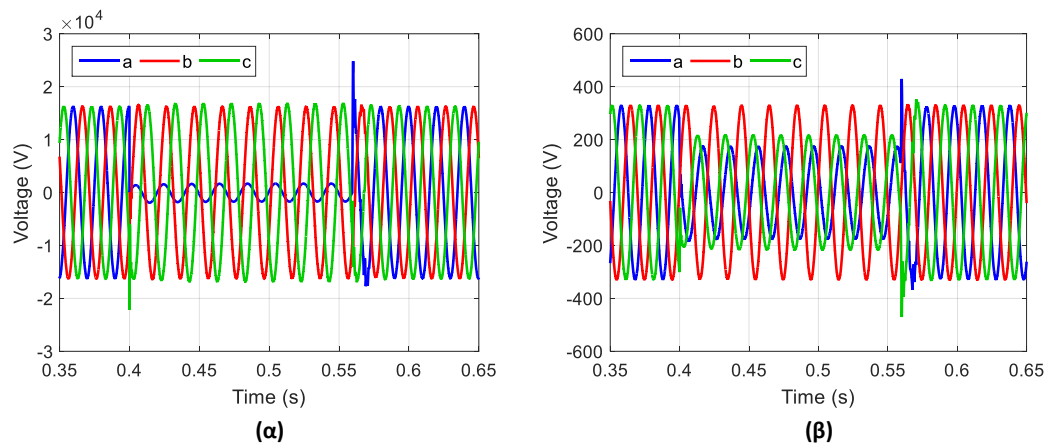


Σχήμα 5.3-20: (α) Ισχύς εισόδου από τα Φ/Β, ισχύεις εξόδου προς το δίκτυο και (β) τάση DC link αντιστροφέα κατά τη διάρκεια μονοφασικού σφάλματος.

5.3.2.2 Ανεξάρτητος έλεγχος ρευμάτων τριών φάσεων αντιστροφέα (IPCC)

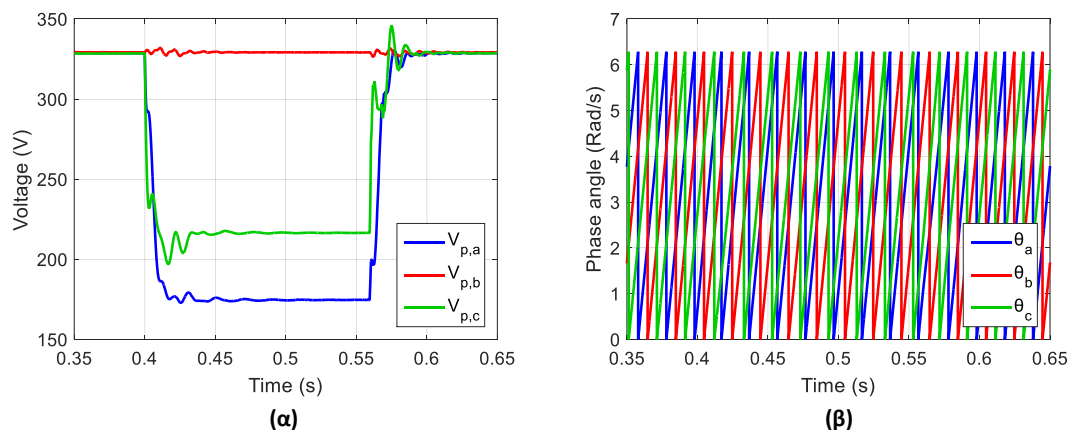
Στο σχήμα 5.3-21 παρουσιάζονται οι τάσεις στην πλευρά της MT και της XT κατά τη διάρκεια του σφάλματος. Με τη χρήση της συγκεκριμένης στρατηγικής παρατηρούμε ότι δεν παρατηρείται η παραμικρή υπερύψωση στην φάση που δεν έχει υποστεί κάποιο

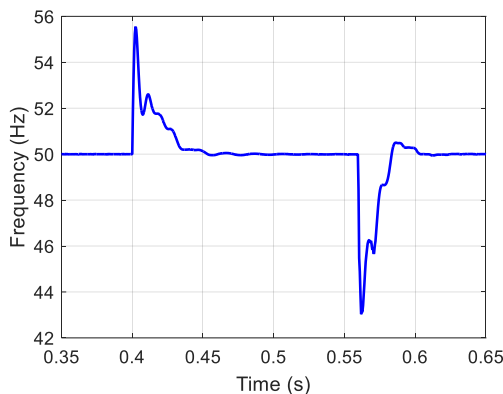
σφάλμα στην πλευρά της ΧΤ, σε αντίθεση με την προηγούμενη στρατηγική. Αντίστοιχα στη ΜΤ παρατηρείται μία μικρή υπερύψωση της τάξης του 3.68% της ονομαστικής τιμής, η οποία είναι σαφώς μειωμένη σε σχέση με πριν.



Σχήμα 5.3-21: (α) Μονοφασική βύθιση τάσης στην πλευρά της ΜΤ του δικτύου και (β) σύστημα τάσεων στην έξοδο του LC φίλτρου του αντιστροφέα.

Η απόκριση του συστήματος συγχρονισμού με τη χρήση των τριών μονοφασικών SOGI-PLL φαίνεται στο σχήμα 5.3-22, όπου παρουσιάζονται τα πλάτη και οι φασικές γωνίες των τριών φάσεων, καθώς και η συχνότητα που εντοπίζεται από το σύστημα κατά τη διάρκεια του σφάλματος. Από το πρώτο σχήμα γίνεται εμφανές αυτό που αναφέραμε και προηγουμένως, ότι η φάση b , που δεν παρουσιάζει σφάλμα, παραμένει ανεπηρέαστη και δεν παρουσιάζει υπερύψωση λόγω της έγχυσης αέργου ισχύος, που θα δούμε στη συνέχεια ότι γίνεται, καθώς και της ασθenoύς συμπεριφοράς του δικτύου. Αντίστοιχα το πλάτος των άλλων δύο φάσεων εντοπίζεται εντός των επιθυμητών χρονικών ορίων. Ο σωστός εντοπισμός των τριών φασικών γωνιών φαίνεται στο δεύτερο σχήμα, όπου γίνεται φανερή και η ολίσθηση που πραγματοποιείται μεταξύ των τριών φάσεων κατά τη διάρκεια του σφάλματος. Τέλος, η σαφώς μεγαλύτερη υπερύψωση της συχνότητας κατά τη διάρκεια του σφάλματος (6Hz περίπου) που παρατηρείται στο τρίτο σχήμα, σε σχέση με την προηγούμενη στρατηγική, οφείλεται στο ότι ο εντοπισμός της γίνεται πλέον από τις φασικές τάσεις οι οποίες παρουσιάζουν μεγαλύτερη βύθιση σε σχέση με την τάση θετικής ακολουθίας, που χρησιμοποιεί το κλασικό DSOGI-PLL. Παρ' όλα αυτά η πραγματική συχνότητα εντοπίζεται με ακρίβεια σε χρονικό διάστημα 50ms, το οποίο είναι αποδεκτό.

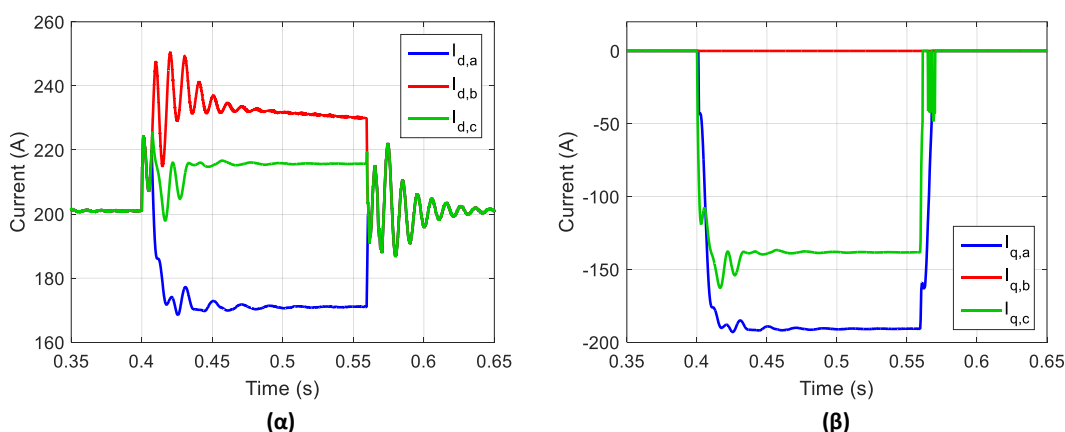




(γ)

Σχήμα 5.3-22: Απόκριση τριών μονοφασικών SOGI-PLL σε μονοφασικό σφάλμα. α) Πλάτη, (β) φασικές γωνίες και (γ) συχνότητα τριών τάσεων εξόδου αντιστροφέα.

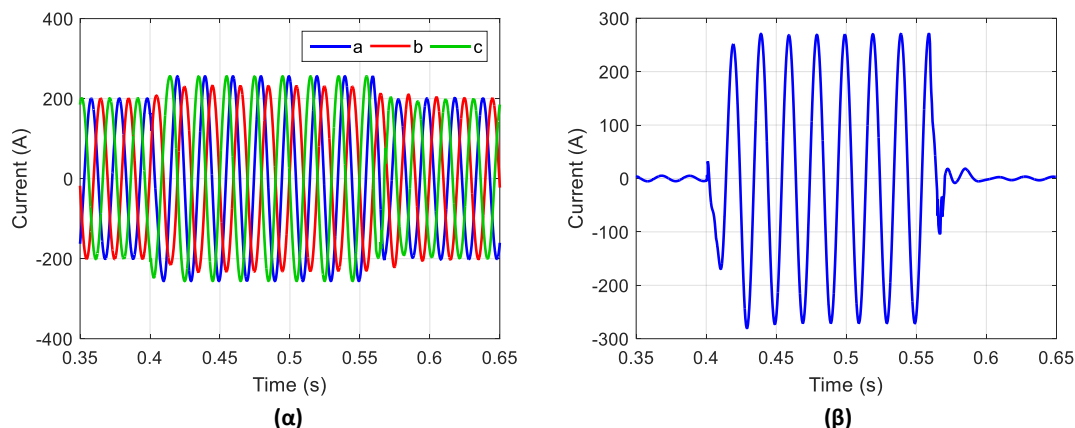
Με βάση την πτώση τάσης που παρατηρείται σε κάθε φάση προκύπτουν με ανεξάρτητο τρόπο τα τρία άεργα ρεύματα αναφοράς, ενώ τα ενεργά ρεύματα για κάθε φάση είναι αποτέλεσμα ελέγχου της τάσης στο DC link και της πρώτης βαθμίδας περιορισμού, ώστε να μην ξεπεραστούν τα θερμικά όρια του αντιστροφέα. Η μορφή των παραπάνω ρευμάτων για το συγκεκριμένο σφάλμα φαίνεται στο σχήμα 5.3-23. Παρατηρούμε ότι στις φάσεις που έχουν υποστεί το σφάλμα στη ΧΤ (*b* και *c*) ορίζονται τα επιθυμητά άεργα ρεύματα αναφοράς, ενώ τα αντίστοιχα ενεργά περιορίζονται για να μην ξεπεραστούν τα θερμικά όρια. Αντίθετα για τη φάση *a* η άεργος συνιστώσα του ρεύματος αναφοράς ορίζεται μηδενική, καθώς δεν απαιτείται υποστήριξη, ενώ η ενεργός συνιστώσα δεν υφίσταται κάποιο περιορισμό και προκύπτει απευθείας από τον έλεγχο της DC τάσης. Η συγκεκριμένη αναφορά καθυστερεί να πάρει μία μόνιμη τιμή, εξαιτίας της ταυτόχρονης λειτουργίας δύο ελεγκτών στο DC link, έναν για τον καθορισμό των ενεργών ρευμάτων και έναν για τον περιορισμό της ισχύος εισόδου από τα Φ/Β. Ωστόσο δεδομένης και της χρονικής διάρκειας του σφάλματος, η συγκεκριμένη απόκλιση θεωρείται αμελητέα.



Σχήμα 5.3-23: (α) Ενεργές και (β) άεργες συνιστώσες ρευμάτων αναφοράς τριών φάσεων κατά τη διάρκεια μονοφασικού σφάλματος.

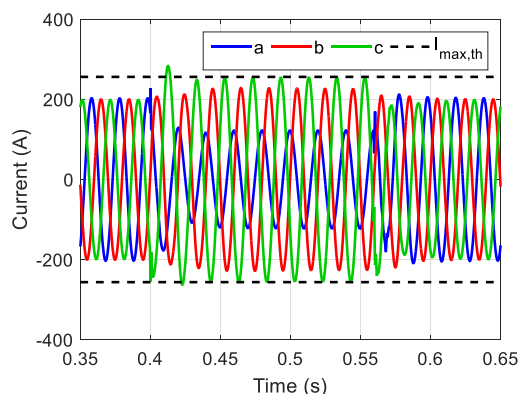
Με βάση τις παραπάνω αναφορές και με εφαρμογή του τροποποιημένου μετασχηματισμού Park, ο οποίος κάνει χρήση των τριών φασικών γωνιών προκύπτουν τα τριφασικά ρεύματα αναφοράς του σχήματος 5.3-24. Τα συγκεκριμένα ρεύματα, παρόλο

που φαίνεται να τηρούν τα θερμικά όρια και έχουν την επιθυμητή ημιτονοειδή μορφή, περιλαμβάνουν μία σημαντική συνιστώσα μηδενικής ακολουθίας, η οποία φαίνεται στο δεύτερο σχήμα και πρέπει να απορριφθεί, μιας και το σύστημα που χρησιμοποιούμε είναι τριών αγωγών.



Σχήμα 5.3-24: (α) Ρεύματα αναφοράς στο *abc* πλαίσιο πριν την απόρριψη μηδενικής ακολουθίας και (β) κοινό ρεύμα.

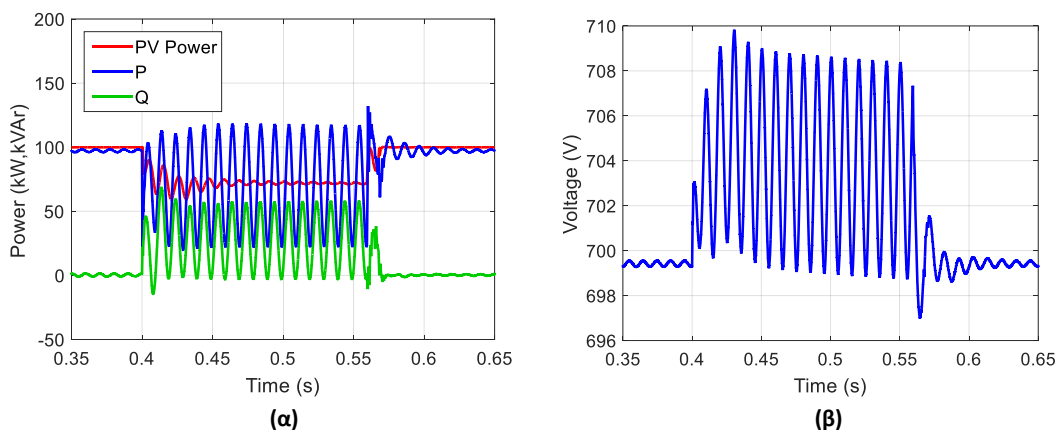
Απορρίπτοντας το κοινό ρεύμα μόνο από τις φάσεις που παρουσιάζουν σφάλμα και εφαρμόζοντας και τη δεύτερη βαθμίδα περιορισμού, σύμφωνα με την περιγραφή της μεθόδου που έγινε σε προηγούμενο κεφάλαιο, προκύπτουν οι επιθυμητές αναφορές ρευμάτων στο *abc* πλαίσιο, οι οποίες μετασχηματίζονται στο *αβ* πλαίσιο και εισάγονται στους PR ελεγκτές για να προκύψουν τα πραγματικά ρεύματα που φαίνονται στο σχήμα 5.3-25. Τα τελικά ρεύματα όπως αναμενόταν είναι ασύμμετρα, τηρούν πλήρως τα θερμικά όρια του αντιστροφέα, τα οποία φαίνονται με διακεκομμένη γραμμή, ενώ είναι απαλλαγμένα και από τη συνιστώσα μηδενικής ακολουθίας.



Σχήμα 5.3-25: Ρεύματα εξόδου αντιστροφέα με χρήση της μεθόδου IPCC, κατά τη διάρκεια μονοφασικού σφάλματος.

Τέλος, στο σχήμα 5.3-26 παρουσιάζονται οι ισχείς εισόδου και εξόδου του αντιστροφέα καθώς και η τάση στο DC link για τη συγκεκριμένη περίπτωση. Οι ταλαντώσεις διπλάσιας συχνότητας που παρατηρούνται, αυτήν τη φορά δεν οφείλονται μόνο στην ασυμμετρία της τάσης εξόδου, αλλά και σε αυτήν των ρευμάτων εξόδου. Η ισχύς εισόδου των Φ/Β ακολουθεί και πάλι τη μείωση της ενεργού ισχύος εξόδου, γεγονός που φανερώνει

την ορθή λειτουργία του ελέγχου περιορισμού ισχύος, ενώ η υπερύψωση στο DC link λόγω της καθυστέρησης που εισάγει το συγκεκριμένο σύστημα δεν ξεπερνά τα επιτρεπτά όρια. Ακόμη, οφείλουμε να τονίσουμε πως σε σχέση με την προηγούμενη μέθοδο παρατηρείται μεγαλύτερη μείωση την ενεργού ισχύος κατά τη διάρκεια του σφάλματος, γεγονός που δεν είναι επιθυμητό, καθώς και μείωση της άεργου ισχύος, η οποία αυτή τη φορά εγχέεται κατά κύριο λόγο στις φάσεις που παρουσιάζουν σφάλμα. Τα παραπάνω δεδομένα μαζί με άλλα θα παρουσιαστούν συγκεντρωτικά στην τελευταία ενότητα του κεφαλαίου, όπου θα γίνει η σύγκριση των μεθόδων.



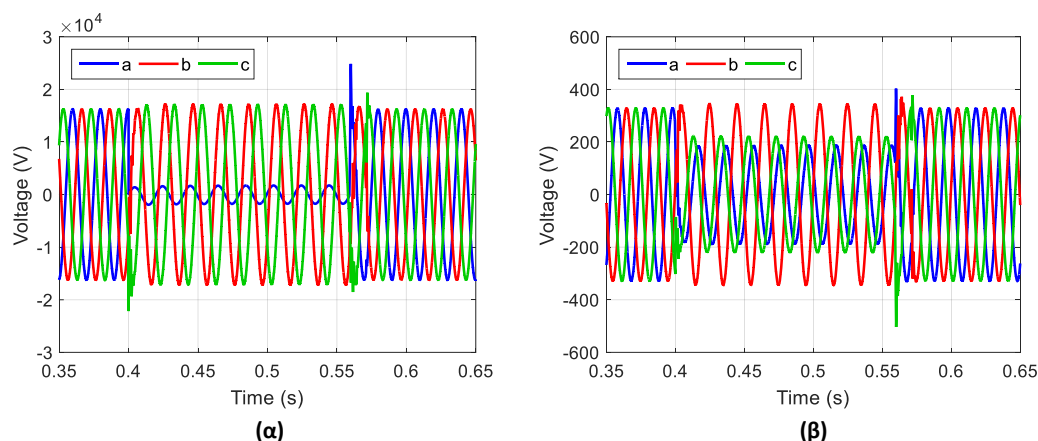
Σχήμα 5.3-26: (α) Ισχύς εισόδου από τα Φ/Β, ενεργός και άεργος ισχύς προς το δίκτυο και (β) τάση στο DC link κατά τη διάρκεια μονοφασικού σφάλματος.

5.3.2.3 Έλεγχος ρευμάτων αντιστροφέα σε δύο σύγχρονα στρεφόμενα πλαίσια αναφοράς (DDSRF-CC)

Στη συγκεκριμένη στρατηγική, όπως είδαμε και στο προηγούμενο κεφάλαιο, παράγονται ρεύματα αναφοράς αρνητικής ακολουθίας κατά τη διάρκεια ασύμμετρων σφαλμάτων που οδηγούν σε ασύμμετρα ρεύματα στην έξοδο του αντιστροφέα. Για την παραγωγή των παραπάνω αναφορών έχουμε διακρίνει δύο περιπτώσεις, όπου στην πρώτη εξασφαλίζουμε την έγχυση άεργων ρευμάτων αρνητικής ακολουθίας με στόχο τον περιορισμό της τάσης αρνητικής ακολουθίας, ενώ στη δεύτερη βασικό κριτήριο αποτελεί η μείωση της κυμάτωσης στο DC link που προκύπτει κατά τη διάρκεια των συγκεκριμένων σφαλμάτων. Στη συνέχεια παρουσιάζεται η λειτουργία των παραπάνω μεθοδολογιών για το μονοφασικό σφάλμα στο ζυγό της MT που εξετάστηκε και προηγουμένως.

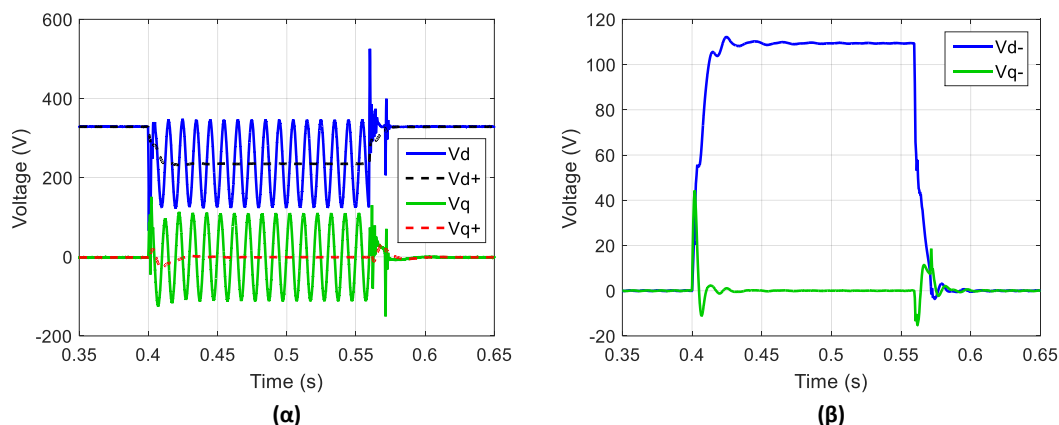
5.3.2.3.1 Μέθοδος 1^η: Επιλογή αναφορών ρεύματος για μείωση της τάσης αρνητικής ακολουθίας του δικτύου

Αρχικά, στο σχήμα 5.3-27 φαίνεται η μορφή της τάσης στην πλευρά υψηλής τάσης του Μ/Σ, καθώς και στην έξοδο του αντιστροφέα, αν εφαρμόσουμε τη συγκεκριμένη μεθοδολογία. Οι παραπάνω τάσεις παρουσιάζουν ίδια συμπεριφορά, όπως με την εφαρμογή του ελέγχου ρευμάτων θετικής ακολουθίας, καθώς παρατηρείται η ίδια ανύψωση στις φάσεις που δεν παρουσιάζουν σφάλμα, της τάξης του 6.13% της ονομαστικής τιμής.



Σχήμα 5.3-27: Σύστημα τάσεων (α) στην υψηλή πλευρά του Μ/Σ και (β) στην έξοδο του αντιστροφέα κατά τη διάρκεια μονοφασικού σφάλματος.

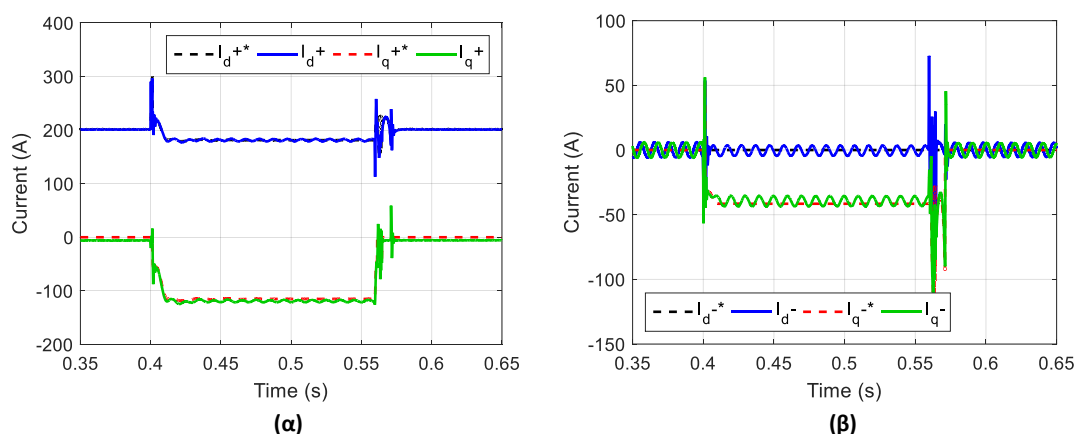
Ο εντοπισμός της τάσης θετικής και αρνητικής ακολουθίας από το DSOGI-PLL φαίνεται στο σχήμα 5.3-28. Οι παραπάνω τάσεις παριστάνονται στα δύο σύγχρονα στρεφόμενα πλαίσια με αντίθετες φορές, όπου οι δύο συνιστώσες παίρνουν σταθερές τιμές. Για μία ακόμα φορά παρατηρούμε ότι η τάση θετικής ακολουθίας ισούται με τη μέση τιμή της πραγματικής τάσης στο dq^+ πλαίσιο αναφοράς, στην οποία συνυπάρχει και η τάση αρνητικής ακολουθίας και είναι αυτή που προκαλεί τις ταλαντώσεις διπλάσιας συχνότητας. Αντίστοιχα, η d συνιστώσα της τάσης αρνητικής ακολουθίας στο dq^- πλαίσιο αναφοράς ισούται με το πλάτος των συγκεκριμένων ταλαντώσεων όπως περιμέναμε και με βάση τη θεωρία που παρουσιάσαμε στο προηγούμενο κεφάλαιο.



Σχήμα 5.3-28: Τάσεις (α) θετικής και (β) αρνητικής ακολουθίας στα δύο σύγχρονα στρεφόμενα πλαίσια.

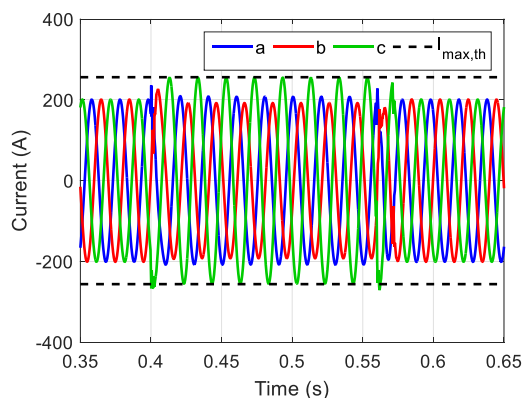
Η αναφορά για τα άεργα ρεύματα θετικής ακολουθίας I_d^{+*} καθορίζεται από την πτώση της τάσης θετικής ακολουθίας, σύμφωνα με τους ευρωπαϊκούς κώδικες δικτύου, ενώ η αναφορά για τα ενεργά I_d^{+*} αποδίδεται με βάση τους ισπανικούς κώδικες, όπου όσο μεγαλύτερη πτώση τάσης παρατηρείται τόσο αυτά μειώνονται. Η επιπλέον δυνατότητα έγχυσης ρευμάτων που υπάρχει με βάση τα θερμικά όρια του αντιστροφέα, δίνεται ως αναφορά για τα άεργα ρεύματα αρνητικής ακολουθίας I_d^{-*} , τα οποία συνεισφέρουν στη μείωση της αντίστοιχης τάσης, ενώ η αναφορά για τα ενεργά ρεύματα αρνητικής ακολουθίας I_d^{-*} επιλέγεται να είναι μηδενική. Οι αναφορές που προέκυψαν για το

συγκεκριμένο σφάλμα, καθώς και τα πραγματικά ρεύματα στα δύο σύγχρονα στρεφόμενα πλαίσια όπως προκύπτουν από το δίκτυο απόζευξης φαίνονται στο σχήμα 5.3-29. Παρατηρούμε ότι όντως τα άεργα ρεύματα θετικής και αρνητικής ακολουθίας παίρνουν αρνητικές τιμές κατά τη διάρκεια του σφάλματος, οι οποίες είναι τέτοιες ώστε να παρέχεται επαγωγική άεργος ισχύς θετικής ακολουθίας και χωρητική άεργος ισχύς αρνητικής ακολουθίας, όπως είναι το επιθυμητό, ενώ τα ενεργά ρεύματα αρνητικής ακολουθίας παραμένουν μηδενικά. Ακόμη, μπορούμε να διακρίνουμε την ορθή λειτουργία του ελέγχου ρευμάτων, καθώς οι πραγματικές τιμές ακολουθούν τις αναφορές με ικανοποιητικό τρόπο, παρά τις μικρές ταλαντώσεις διπλάσιας συχνότητας, οι οποίες δεν απορρίπτονται πλήρως από το δίκτυο απόζευξης.



Σχήμα 5.3-29: Ρεύματα (α) θετικής και (β) αρνητικής ακολουθίας στα δύο σύγχρονα στρεφόμενα πλαίσια (πραγματικά και αναφορές).

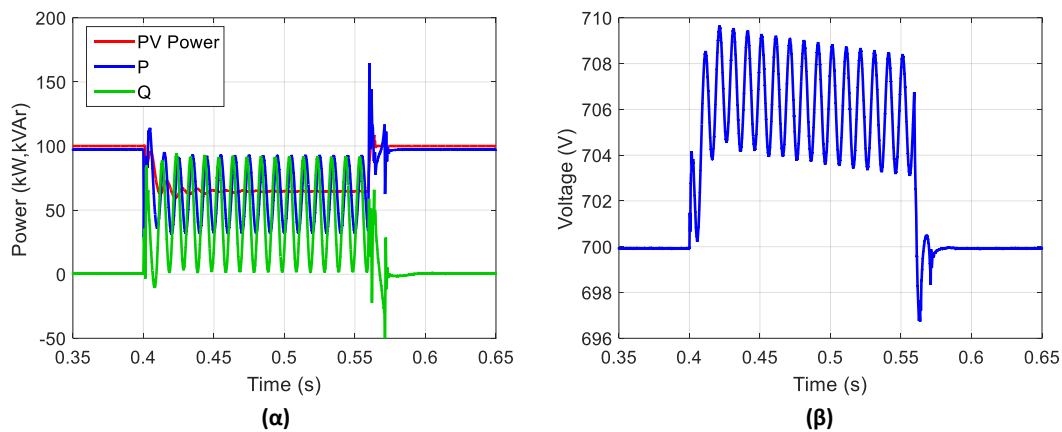
Τα ρεύματα εξόδου του αντιστροφέα όπως προκύπτουν από τον παραπάνω έλεγχο φαίνονται στο σχήμα 5.3-30. Από το συγκεκριμένο σχήμα διακρίνεται η ασυμμετρία που προκύπτει, χωρίς ωστόσο το μέγιστο ρεύμα να ξεπερνά τα θερμικά όρια, ενώ η μορφή τους είναι απολύτως ημιτονοειδής χωρίς αρμονικές.



Σχήμα 5.3-30: Ρεύματα εξόδου αντιστροφέα κατά τη διάρκεια μονοφασικού σφάλματος για μείωση της τάσης αρνητικής ακολουθίας.

Τέλος, στο σχήμα 5.3-31 παρουσιάζονται οι ισχείς εισόδου και εξόδου, καθώς και η τάση στο DC link, όπως προκύπτουν από την εφαρμογή της συγκεκριμένης μεθόδου. Όπως

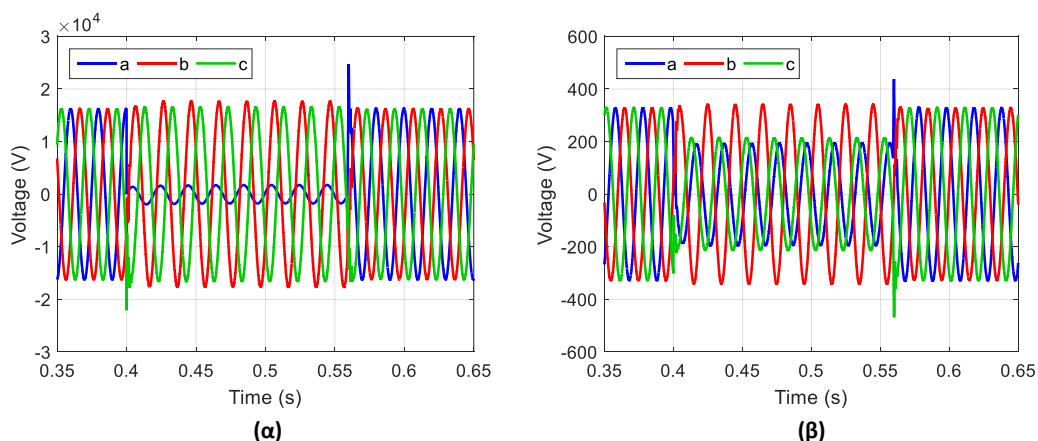
θα δούμε και στο τέλος του κεφαλαίου, από τη συγκεκριμένη στρατηγική προκύπτει μέχρι στιγμής η μεγαλύτερη μείωση της ενεργού ισχύος κατά τη διάρκεια του σφάλματος, καθώς αυτό ορίζουν οι ισπανικοί κώδικες, ενώ παρέχεται και μεγάλη ποσότητα αέργου ισχύος, αφού εκμεταλλευόμαστε πλήρως τα όρια του αντιστροφέα για αυτό το λόγο. Επίσης για μία ακόμα φορά επιβεβαιώνεται η σωστή λειτουργία του ελέγχου περιορισμού ισχύος από τα Φ/Β, καθώς παρατηρούμε άμεση μείωση της ισχύος εισόδου, αντίστοιχη με αυτή της ενεργού ισχύος, ενώ η υπέρταση στο DC link παραμένει εντός αποδεκτών ορίων (710V).



Σχήμα 5.3-31: (α) Ισχείς εισόδου και εξόδου και (β) τάση στο DC link της διάταξης.

5.3.2.3.2 Μέθοδος 2^η: Επιλογή αναφορών ρεύματος για μείωση της κυμάτωσης της τάσης στο DC link

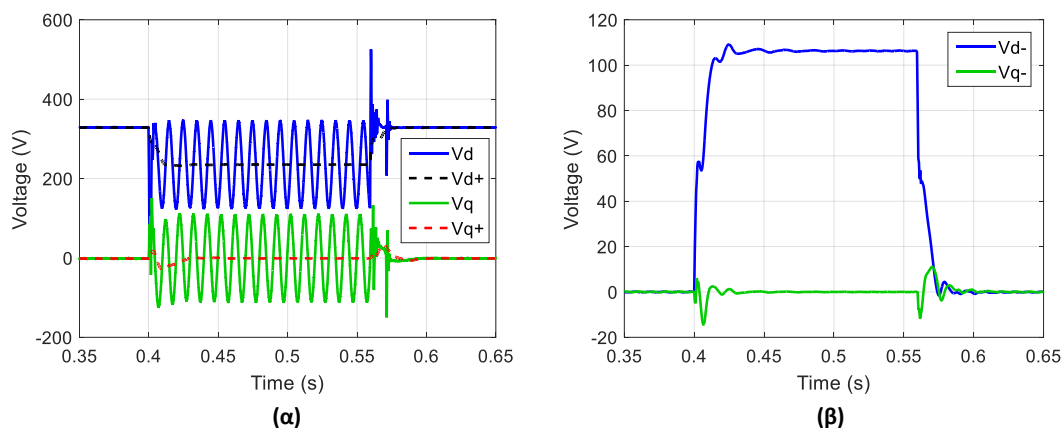
Οι τάσεις που προκύπτουν κατά την εφαρμογή της συγκεκριμένης στρατηγικής φαίνονται στο σχήμα 5.3-32. Για το εξαιρετικά ασθενές δίκτυο που έχουμε προσομοιώσει, σε αυτήν την περίπτωση παρατηρείται η μεγαλύτερη υπερύψωση στην πλευρά της ΜΤ, η οποία φτάνει τα επίπεδα του 9.2% της ονομαστικής τιμής. Ωστόσο και πάλι βρισκόμαστε εντός αποδεκτών ορίων, οπότε δεν προκύπτει κάποιο πρόβλημα λόγω υπέρτασης στο δίκτυο.



Σχήμα 5.3-32: Σύστημα τάσεων (α) στην υψηλή πλευρά του Μ/Σ και (β) στην έξοδο του αντιστροφέα.

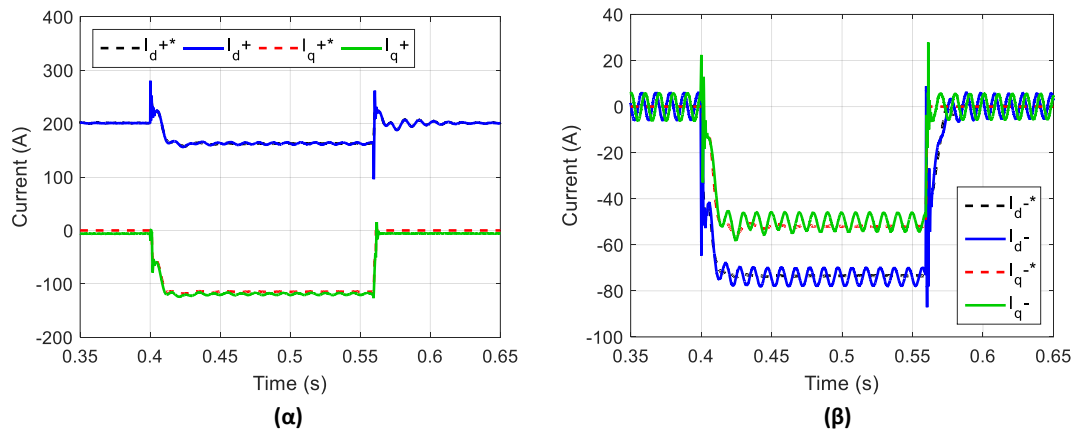
Αντίστοιχα με τη προηγούμενη μέθοδο, στο σχήμα 5.3-33 παρουσιάζουμε την απόκριση του DSOGI-PLL ως προς τις τάσεις θετικής και αρνητικής ακολουθίας στα δύο σύγχρονα στρεφόμενα πλαίσια. Η εικόνα δεν διαφέρει σημαντικά σε σχέση με πριν, παρά

μόνο ως προς την επιρροή που ασκεί η συγκεκριμένη μέθοδος στις τάσεις θετικής και αρνητικής ακολουθίας, η οποία θα παρουσιαστεί αναλυτικά στο τέλος του κεφαλαίου, όπως και για τις υπόλοιπες μεθόδους.



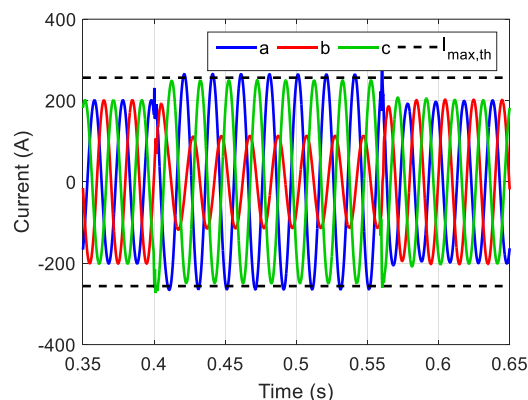
Σχήμα 5.3-33: Απόκριση DSOGI-PLL. Τάσεις (α) θετικής και (β) αρνητικής ακολουθίας στα δύο σύγχρονα στρεφόμενα πλαίσια.

Η ουσιαστική διαφοροποίηση σε σχέση με την προηγούμενη μέθοδο εισάγεται στον τρόπο υπολογισμού των αναφορών των ρευμάτων θετικής και αρνητικής ακολουθίας. Η μόνη αναφορά που υπολογίζεται με ίδιο τρόπο είναι αυτή των άεργων ρευμάτων θετικής ακολουθίας I_q^{+*} , σύμφωνα με τους ευρωπαϊκούς κώδικες. Κατά τα άλλα οι υπόλοιπες αναφορές προκύπτουν έχοντας ως βασικό κριτήριο τον περιορισμό της κυμάτωσης στο DC link, καθώς και την τήρηση των θερμικών ορίων, όπως αναλύθηκε στην προηγούμενη παράγραφο. Τα παραπάνω πετυχαίνονται με ένα συγκεκριμένο συνδυασμό ρευμάτων θετικής και αρνητικής ακολουθίας για κάθε περίπτωση (ένα σημείο λειτουργίας), ο οποίος για το μονοφασικό σφάλμα που προσομοιώσαμε φαίνεται στο σχήμα 5.3-34. Παρατηρούμε ότι και με τη συγκεκριμένη μέθοδο οι αναφορές των άεργων ρευμάτων θετικής και αρνητικής ακολουθίας I_q^{+*} και I_q^{-*} παίρνουν αρνητικές τιμές, γεγονός που συντελεί στη μείωση της ασυμμετρίας, καθώς προκαλούν αύξηση της τάσης θετικής ακολουθίας και μείωση της αρνητικής αντίστοιχα. Επίσης, η ενεργός συνιστώσα αρνητικής ακολουθίας I_d^{-*} παίρνει μη μηδενική τιμή, για να συντελέσει και αυτή στη μείωση της κυμάτωσης, οδηγώντας παράλληλα σε μείωση της ενεργού ισχύος λόγω της αρνητικής της τιμής. Τέλος, τα πραγματικά ρεύματα, όπως προκύπτουν από το δίκτυο απόζευξης, ακολουθούν ικανοποιητικά τις αναφορές, με μοναδικό μειονέκτημα τη μη τέλεια απόρριψη των ταλαντώσεων διπλάσιας συχνότητας που είδαμε και προηγουμένως.



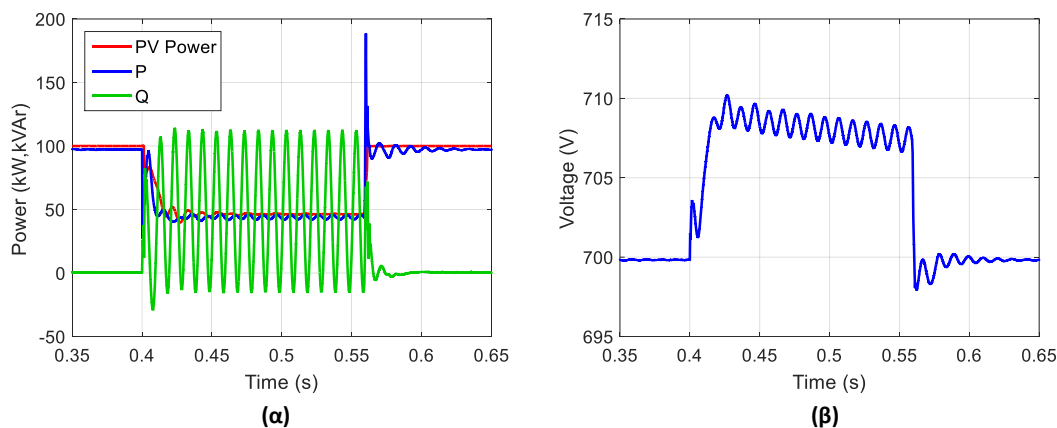
Σχήμα 5.3-34: Ρεύματα (α) θετικής και (β) αρνητικής ακολουθίας στα δύο σύγχρονα στρεφόμενα πλαίσια (πραγματικά και αναφορές).

Τα ρεύματα εξόδου του αντιστροφέα, όπως προκύπτουν από το συγκεκριμένο έλεγχο φαίνονται στο σχήμα 5.3-35, όπου γίνεται εμφανής και πάλι η ασυμμετρία και η τήρηση των θερμικών ορίων με μία μικρή απόκλιση, που πιθανώς να βελτιώνεται με καλύτερη ρύθμιση του ελέγχου. Ακόμη αξίζει να σημειωθεί πως η αρμονική παραμόρφωση των ρευμάτων είναι εξαιρετικά χαμηλή, όπως και σε όλες τις μεθόδους που είδαμε έως τώρα.



Σχήμα 5.3-35: Ρεύματα εξόδου αντιστροφέα με εφαρμογή της μεθόδου περιορισμού της κυμάτωσης της τάσης στο DC link.

Τέλος, στο σχήμα 5.3-36 παρουσιάζεται η μορφή των ισχύων εισόδου και εξόδου, καθώς και της τάσης στο DC link, κατά τη διάρκεια του σφάλματος. Από τα συγκεκριμένα σχήματα η εφαρμογή της συγκεκριμένης μεθόδου κρίνεται επιτυχής, καθώς οι συγκεκριμένες αναφορές ρευμάτων πετυχαίνουν όντως μείωση της κυμάτωσης της ενεργού ισχύος στο ελάχιστο, η οποία οδηγεί σε αντίστοιχη μείωση της κυμάτωσης στην τάση του DC link, που ήταν και το ζητούμενο. Ωστόσο το επίπεδο της υπέρτασης παραμένει ίδιο (710V), εντός αποδεκτών ορίων, ενώ επίσης απαιτείται η μεγαλύτερη μείωση ενεργού ισχύος και σημαντική παροχή αέργου ισχύος σε σχέση με τις υπόλοιπες στρατηγικές, όπως θα φανεί και στην αναλυτική σύγκριση που θα γίνει στην επόμενη παράγραφο.



Σχήμα 5.3-36: (α) Ισχύς εισόδου από τα Φ/Β, ενεργός και άεργος ισχύς προς το δίκτυο και (β) τάση στο DC link της διάταξης.

5.4 Συγκριτική μελέτη στρατηγικών ελέγχου

Με βάση τα αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν παραπάνω, προκύπτουν ορισμένα βασικά συμπεράσματα για την καταλληλότητα εφαρμογής των εξεταζόμενων στρατηγικών ελέγχου, τόσο σε κανονικές συνθήκες όσο και σε καταστάσεις σφάλματος. Αρχικά, θεωρείται σημαντικό να αναφέρουμε ότι όλες οι στρατηγικές είναι ικανές να παρέχουν ρεύματα χαμηλής αρμονικής παραμόρφωσης, πολύ πιο κάτω από το όριο ($THD = 5\%$), τόσο στην μόνιμη κατάσταση λειτουργίας όσο και κατά τη διάρκεια βυθίσεων τάσης.

Το πρώτο μειονέκτημα πιστώνεται στον ανεξάρτητο έλεγχο των τριών φάσεων (IPCC), ο οποίος εισάγει μια μικρή ασυμμετρία στα ρεύματα, ακόμα και σε κανονικές συνθήκες, λόγω της συνιστώσας μηδενικής ακολουθίας που προκύπτει από τον “τροποποιημένο” μετασχηματισμό Park. Κατά τα άλλα οι τέσσερις στρατηγικές συμπεριφέρονται με πανομοιότυπο τρόπο τόσο στη μόνιμη κατάσταση όσο και σε συμμετρικά σφάλματα του δικτύου, όπου παρέχουν τα επιθυμητά ρεύματα εντός του αποδεκτού χρονικού πλαισίου των 40ms. Η παροχή της αέργου ισχύος γίνεται επί της ουσίας, σε όλες τις περιπτώσεις, αναλογικά με την πτώση τάσης θετικής ακολουθίας του δικτύου, όπως ορίζουν οι κώδικες. Επίσης, θεωρώντας ότι κατά τη διάρκεια του σφάλματος θέλουμε να παρέχουμε κατά το δυνατόν περισσότερη ενεργό ισχύ στο δίκτυο και από τη στιγμή που μπορούμε να εκμεταλλευτούμε τον αντιστροφέα μέχρι τα όριά του, ο περιορισμός της ενεργού ισχύος που υπαγορεύεται από τους ισπανικούς κώδικες και εφαρμόζεται από την πρώτη μέθοδο της στρατηγικής DDSRF-CC δε φαίνεται να έχει ιδιαίτερο νόημα για το συγκεκριμένο τύπο σφαλμάτων.

Οι ουσιαστικές διαφορές των εξεταζόμενων στρατηγικών εισάγονται κατά τη διάρκεια των ασύμμετρων βυθίσεων τάσης. Η διερεύνηση για το συγκεκριμένο τύπο σφαλμάτων θα γίνει λαμβάνοντας υπόψη ότι οι κώδικες δικτύου δεν είναι το ίδιο κατατοπιστικοί ως προς τις απαιτήσεις τους, όπως στην περίπτωση των συμμετρικών βυθίσεων τάσης. Υπό το παραπάνω πρίσμα, καμία στρατηγική δεν μπορεί σε πρώτη φάση να απορριφθεί ως προς την υποστήριξη που παρέχει στο δίκτυο. Ωστόσο, τόσο ο έλεγχος ρευμάτων θετικής ακολουθίας (PSCC) όσο και ο έλεγχος στα δύο σύγχρονα στρεφόμενα πλαίσια (DDSRF-CC), ο οποίος διακρίνεται σε δύο υποπεριπτώσεις, παρέχουν άεργα ρεύματα θετικής ακολουθίας αναλογικά με την πτώση τάσης θετικής ακολουθίας του

δικτύου, γεγονός που ικανοποιεί την απαίτηση που υπάρχει για τα συμμετρικά σφάλματα. Η συγκεκριμένη λειτουργία του ελέγχου θα μπορούσε να κριθεί αποδεκτή και για τα ασύμμετρα σφάλματα. Από την άλλη ο έλεγχος IPCC ορίζει τις άεργες συνιστώσες των ρευμάτων ξεχωριστά για κάθε φάση, ανάλογα με την πτώση τάσης που παρατηρείται σε κάθε μία από αυτές.

Στον πίνακα 5-1 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά ορισμένα βασικά χαρακτηριστικά που προέκυψαν από τις προσομοιώσεις που έγιναν παραπάνω και θα μας βοηθήσουν να εξετάσουμε την καταλληλότητα των εξεταζόμενων στρατηγικών σε ασύμμετρα σφάλματα, ενώ αναφέρονται και τα πλαίσια πραγματοποίησης των ελέγχων, χάριν ολοκλήρωσης. Η πρώτη ουσιαστική διαφοροποίηση έχει να κάνει με το γεγονός ότι με την εφαρμογή της μεθόδου PSCC εγχέονται προς το δίκτυο συμμετρικά ρεύματα, σε αντίθεση με όλες τις υπόλοιπες μεθόδους όπου τα ρεύματα χαρακτηρίζονται από ένα βαθμό ασυμμετρίας. Η συγκεκριμένη ασυμμετρία δεν πρέπει να θεωρείται απαγορευτική, δεδομένης της μικρής χρονικής διάρκειας των σφαλμάτων και από τη στιγμή που το επιτρέπουν ρητά και οι κώδικες του δικτύου. Αντιθέτως, η ύπαρξή της μπορεί να κριθεί και επιθυμητή, εφόσον τα θετικά χαρακτηριστικά τα οποία αποδίδονται σε αυτή συμβάλλουν ουσιαστικά στην υποστήριξη του δικτύου.

Πίνακας 5-1: Συγκριτικά αποτελέσματα εξεταζόμενων στρατηγικών ελέγχου σε μονοφασικό σφάλμα στην πλευρά MT του δικτύου.

	<i>PSCC</i>	<i>IPCC</i>	<i>DDSRF-CC</i> Μέθοδος 1 ^η	<i>DDSRF-CC</i> Μέθοδος 2 ^η
Πλαίσιο πραγματοποίησης ελέγχου	$\alpha\beta$	$\alpha\beta$	dq^+, dq^-	dq^+, dq^-
Τύπος ρευμάτων	Συμμετρικά	Ασύμμετρα	Ασύμμετρα	Ασύμμετρα
P (kW)	79.5	70	62	44
Q (kVAr)	38	27	46.5	48.5
Δείκτης ασυμμετρίας τάσης δικτύου, n (%)	49.48	47.51	47.91	47.22
Υπέρταση μη εσφαλμένης φάσης (%)	6.13	3.68	6.13	9.2
Περιορισμός κυμάτωσης στο DC link	OXI	OXI	OXI	NAI

Επίσης, για το μονοφασικό σφάλμα στην πλευρά υψηλής τάσης του Μ/Σ ανύψωσης που εξετάσαμε, παρουσιάζονται η ενεργός και η άεργος ισχύς που παρέχονται στο δίκτυο κατά τη διάρκεια του σφάλματος. Να υπενθυμίσουμε ότι η ονομαστική ισχύς της Φ/Β εγκατάστασης είναι 100kW. Παρατηρούμε ότι με την τεχνική PSCC πετυχαίνουμε τη μεγαλύτερη δυνατή έγχυση ενεργού ισχύος κατά τη διάρκεια του σφάλματος, μιας και πέρα από τα άεργα ρεύματα που ορίζονται από τους κώδικες, το υπολειπόμενο ρεύμα μέχρι τα όρια του αντιστροφέα αποδίδεται στις ενεργές συνιστώσες. Τα ασύμμετρα ρεύματα των υπόλοιπων στρατηγικών μειώνουν σημαντικά την ικανότητα παροχής ενεργού ισχύος, με σπουδαιότερο παράδειγμα τη μέθοδο περιορισμού της κυμάτωσης (DDSRF-CC, Μέθοδος

2^η), όπου τα ενεργά ρεύματα αρνητικής ακολουθίας μειώνουν επιπλέον την ενεργό ισχύ. Επίσης, η μειωμένη ενεργός ισχύς στη μέθοδο περιορισμού της τάσης αρνητικής ακολουθίας (DDSRF-CC, Μέθοδος 1^η) οφείλεται στην απαίτηση των ισπανικών κωδίκων δικτύου, προκειμένου να υπάρχει παράθυρο και για άεργα ρεύματα αρνητικής ακολουθίας.

Όσον αφορά την άεργο ισχύ προς το δίκτυο, η στρατηγική IPCC παρουσιάζει όπως αναμενόταν την πιο μικρή παροχή, καθώς προσφέρεται υποστήριξη της τάσης κυρίως στις φάσεις που έχουν υποστεί σφάλμα. Αντίθετα, οι στρατηγικές ελέγχου DDSRF-CC παρουσιάζουν τις μεγαλύτερες παροχές, λόγω του ότι συμμετέχουν και άεργα ρεύματα αρνητικής ακολουθίας για την υποστήριξη του δικτύου, επιπλέον με αυτά της θετικής.

Ακόμη, η εξαιρετικά ασθενής συμπεριφορά του δικτύου που προσομοιώσαμε παραπάνω μας επιτρέπει να ελέγξουμε πως διαμορφώνεται ο δείκτης ασυμμετρίας n της τάσης στο ΣΚΣ, ο οποίος ορίζεται ως ο λόγος της τάσης αρνητικής ακολουθίας προς αυτήν της θετικής, με την εφαρμογή καθεμίας από τις παραπάνω στρατηγικές, καθώς επίσης και το ποσοστό υπέρτασης, σε σχέση με την ονομαστική, στις φάσεις που δεν έχουν υποστεί σφάλμα. Παρατηρούμε ότι οι στρατηγικές που εγχέουν ασύμμετρα ρεύματα πετυχαίνουν μεγαλύτερο περιορισμό του δείκτη ασυμμετρίας, καθώς πέρα από αύξηση της τάσης θετικής ακολουθίας προκαλούν και μείωση της τάσης αρνητικής ακολουθίας. Το παραπάνω σενάριο φαίνεται επιθυμητό για ασύμμετρες καταστάσεις. Όσον αφορά την υπέρταση των μη εσφαλμένων φάσεων, η στρατηγική IPCC πράγματι πετυχαίνει το μεγαλύτερο περιορισμό, χωρίς ωστόσο και οι υπόλοιπες στρατηγικές να βγαίνουν εκτός των μέγιστων επιτρεπτών ορίων. Το χαρακτηριστικό αυτό, σε συνδυασμό με το γεγονός ότι το δίκτυο στις περισσότερες περιπτώσεις παρουσιάζει πιο ισχυρή συμπεριφορά, καθιστούν το συγκεκριμένο κριτήριο μικρής σημασίας.

Τέλος, παρατηρούμε ότι η μοναδική στρατηγική η οποία πετυχαίνει περιορισμό της κυμάτωσης της τάσης στο DC link είναι η δεύτερη υποπερίπτωση της μεθόδου DDSRF-CC, για την οποία ουσιαστικά αποτελεί βασικό κριτήριο εξαγωγής των ρευμάτων αναφοράς. Από εκεί και πέρα η κυμάτωση που παρατηρείται με εφαρμογή των υπόλοιπων μεθόδων, σε καμία περίπτωση δεν μπορεί να θεωρηθεί απαγορευτική, λόγω της μικρής τιμής της ($\pm 4.5V$ περίπου), της μικρής χρονικής διάρκειας του σφάλματος και δεδομένου ότι η υπέρταση κυμαίνεται στα ίδια επίπεδα για όλες τις περιπτώσεις και δεν ξεπερνά τα ανώτερα όρια.

Λαμβάνοντας υπόψη όλα τα παραπάνω, μπορούμε να καταλήξουμε πλέον στην καταλληλότερη μέθοδο ελέγχου του αντιστροφέα για διασύνδεση της Φ/Β εγκατάστασης με το δίκτυο. Η μέθοδος IPCC απορρίπτεται αρχικά σε σχέση με τις υπόλοιπες, λόγω της ανικανότητά της να παρέχει πλήρως συμμετρικά ρεύματα ακόμα και στη μόνιμη κατάσταση. Επίσης, η εφαρμογή της μεθόδου DDSRF-CC για περιορισμό της κυμάτωσης της τάσης στο DC link (Μέθοδος 2^η) υστερεί εξαιτίας της μεγάλης μείωσης της ενεργού ισχύος κατά τη διάρκεια του ασύμμετρου σφάλματος, ενώ όπως είδαμε και παραπάνω το αντιστάθμισμά της δεν είναι και τόσο σημαντικό, ειδικότερα αν αναλογιστούμε τη συχνότητα τέτοιων φαινομένων.

Η τελική επιλογή πρέπει να γίνει μεταξύ της μεθόδου PSCC και της εφαρμογής της μεθόδου DDSRF-CC για περιορισμό της τάσης αρνητικής ακολουθίας (Μέθοδος 1^η). Ο περιορισμός της ενεργού ισχύος και η αυξημένη άεργος ισχύς της δεύτερης σε σχέση με την πρώτη εξηγείται ουσιαστικά λόγω της συμμετοχής των άεργων ρευμάτων αρνητικής ακολουθίας στην υποστήριξη της τάσης. Η συγκεκριμένη λειτουργία φαντάζει επιθυμητή

για την αντιμετώπιση των ασύμμετρων σφαλμάτων, καθώς υποβοηθούνται και οι δύο συμμετρικές συνιστώσες της τάσης του δικτύου προς τη σωστή κατεύθυνση. Ωστόσο, η πολυπλοκότητα που εισάγει η συγκεκριμένη μέθοδος, εξαιτίας της διαφορετικής φιλοσοφίας του ελέγχου, μπορεί να κριθεί πολύ σημαντική στην πράξη, όπου πρέπει να εφαρμοστεί με τη χρήση ψηφιακών ελεγκτών με συγκεκριμένη υπολογιστική ικανότητα.

Το παραπάνω χαρακτηριστικό σε συνδυασμό με την ασάφεια των κωδικών δικτύου ως προς την αντιμετώπιση της τάσης αρνητικής ακολουθίας σε ασύμμετρα σφάλματα, καθιστούν τον έλεγχο PSCC τη μοναδική σίγουρη λύση για εφαρμογή σε όλους τους τύπους σφαλμάτων. Η συγκεκριμένη μέθοδος τηρεί πλήρως τους υπάρχοντες κώδικες και εξασφαλίζει την αδιάλειπτη λειτουργία του συστήματος, προσφέροντας παράλληλα τη μεγαλύτερη δυνατότητα παροχής ενεργού ισχύος κατά τη διάρκεια των ασύμμετρων σφαλμάτων. Η ορθή λειτουργία της θα επιβεβαιωθεί και πειραματικά στο επόμενο κεφάλαιο, με τη χρήση εργαστηριακών διατάξεων μικρής ισχύος.

6 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Στο παρόν κεφάλαιο θα εξεταστεί πειραματικά η ορθή λειτουργία των συστημάτων συγχρονισμού που παρουσιάστηκαν στο τρίτο κεφάλαιο, καθώς και της μεθόδου ελέγχου ρευμάτων θετικής ακολουθίας (PSCC), η οποία κρίθηκε ως η καταλληλότερη για τη διασύνδεση της Φ/Β μονάδας με το δίκτυο. Κριτήριο για την πειραματική επιβεβαίωση των παραπάνω συστημάτων αποτελούν η θεωρητική ανάλυση και οι προσομοιώσεις που προηγήθηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια.

Οι μετρήσεις που θα ακολουθήσουν έγιναν με εργαστηριακές διατάξεις μικρής ισχύος, οπότε προέκυψαν ορισμένες διαφοροποιήσεις σε σχέση με την εξεταζόμενη τοπολογία του δικτύου, οι οποίες θα παρουσιαστούν στη συνέχεια. Ωστόσο η γενικότερη φιλοσοφία των ελέγχων παραμένει ίδια και επομένως δε χάνεται η αξιοπιστία των μετρήσεων, οι οποίες μπορούν εύκολα να αναχθούν και σε συστήματα μεγαλύτερης ισχύος.

6.1 Περιγραφή πειραματικής διάταξης

Η πειραματική διάταξη από την οποία λάβαμε τις μετρήσεις που θα παρουσιαστούν στη συνέχεια αποτελείται κατά κύριο λόγο από μία Φ/Β συστοιχία ισχύος 2kW, ένα μετατροπέα ισχύος, ο οποίος περιλαμβάνει τον DC/DC μετατροπέα και τον αντιστροφέα δύο επιπέδων και μία ελεγχόμενη τριφασική γεννήτρια, η οποία εξομοιώνει το δίκτυο. Η συγκεκριμένη γεννήτρια παράγει απευθείας την τάση των 400V, οπότε δεν απαιτείται η χρήση μετασχηματιστή ανύψωσης. Επίσης, λόγω της χαμηλής ισχύος της συγκεκριμένης τοπολογίας, κρίθηκε προτιμότερο να χρησιμοποιηθούν L αντί για LC φίλτρα στην έξοδο του αντιστροφέα, καθώς ήταν εφικτό να καταστείλουμε τις αρμονικές των διακοπτικών συχνοτήτων με χαμηλές τιμές αυτεπαγωγών. Να σημειωθεί ότι ο αντιστροφέας συνδέθηκε απευθείας μέσω των φίλτρων στην τριφασική γεννήτρια και δεν χρησιμοποιήθηκαν επιπλέον ωμικο-επαγωγικές αντιστάσεις για την εξομοίωση των γραμμών μεταφοράς.

6.1.1 Φωτοβολταϊκή συστοιχία

Τα φωτοβολταϊκά πλαίσια που χρησιμοποιήθηκαν για την παραγωγή της ισχύος εισόδου της διάταξης είναι της εταιρίας Yingli Solar και συγκεκριμένα τα *YL165P-23b*, τα οποία αποδίδουν μέγιστη ισχύ 165W, σε STC συνθήκες (ηλιακή ακτινοβολία 1000W/m² και θερμοκρασία περιβάλλοντος 25°C). Η πειραματική συστοιχία, η οποία φαίνεται στην εικόνα 6-1, προέκυψε συνδέοντας δώδεκα από τα παραπάνω πλαίσια σε σειρά, οπότε υπήρχε η δυνατότητα συνολικής παραγωγής 1980W.



Εικόνα 6-1: Φωτοβολταϊκή συστοιχία πειραματικής διάταξης.

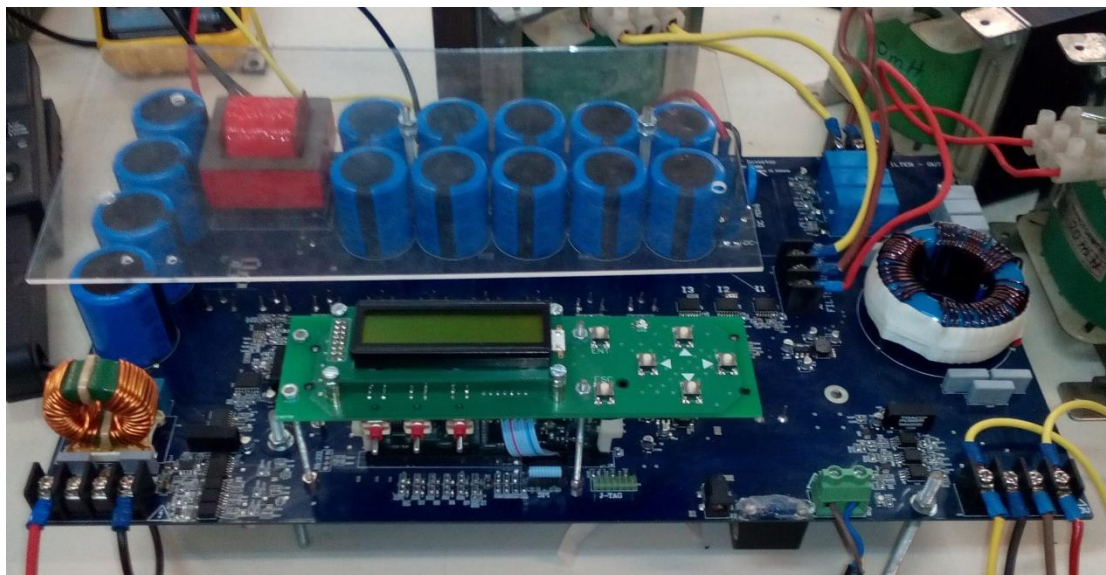
Τα τεχνικά χαρακτηριστικά για κάθε ένα από τα χρησιμοποιούμενα πλαίσια, σε STC συνθήκες, δίνονται στον πίνακα 6-1. Η σημαντική παρατήρηση που προκύπτει από τα συγκεκριμένα χαρακτηριστικά είναι ότι η τάση μέγιστης απολαβής ισχύος για τα δώδεκα πλαίσια είναι $V_{mp} = 12 * 23 = 276V$, οπότε σε κάθε περίπτωση θα χρειαστεί ανύψωση της τάσης από τον DC/DC μετατροπέα προκειμένου να πετύχουμε τα 700V της τάσης στο DC link. Επίσης δίνεται ότι το ρεύμα μέγιστης απολαβής ισχύος είναι $I_{mp} = 7.17A$.

Πίνακας 6-1: Τεχνικά χαρακτηριστικά φωτοβολταϊκών πλαισίων σε STC συνθήκες.

Τύπος υλικού πλαισίου	Πολύ-κρυσταλλικό πυρίτιο
Αριθμός κελιών πλαισίου	48
Μέγιστη απόδοση	12.7%
Μέγιστη αποδιδόμενη ισχύς	165W
Ρεύμα μέγιστης ισχύος (I_{mp})	7.17A
Τάση μέγιστης ισχύος (V_{mp})	23V
Ρεύμα βραχυκύκλωσης (I_{sc})	7.9A
Τάση ανοιχτοκύκλωσης (V_{oc})	29V
Θερμοκρασιακός συντελεστής ισχύος	-0.45%/°C
Θερμοκρασιακός συντελεστής τάσης	-0.107V/°C

6.1.2 Μετατροπέας ισχύος

Για τις ανάγκες διασύνδεσης των Φ/Β πλαισίων με την ελεγχόμενη γεννήτρια, καθώς και για την υλοποίηση των ελέγχων χρησιμοποιήθηκε ο μετατροπέας ισχύος του εργαστηρίου Ηλεκτρικών Μηχανών και Ηλεκτρονικών Ισχύος ο οποίος φαίνεται στην εικόνα 6-2. Ο συγκεκριμένος μετατροπέας σχεδιάστηκε και υλοποιήθηκε από το διδάκτορα κ. Γεώργιο Καμπίτση και όπως αναφέραμε και προηγουμένως, ενσωματώνει πάνω του τόσο τον DC/DC μετατροπέα όσο και τον αντιστροφέα που είναι απαραίτητοι για τη λειτουργία του συστήματος.



Εικόνα 6-2: Μετατροπέας ισχύος πειραματικής διάταξης.

Η DC τάση που παράγεται από τα Φ/Β οδηγείται στην είσοδο του DC/DC μετατροπέα, όπου δημιουργείται το PV link με τη χρήση τεσσάρων ηλεκτρολυτικών πυκνωτών χωρητικότητας 470 μ F, παράλληλα συνδεδεμένων, οπότε προκύπτει η συνολική χωρητικότητα $C_{pv-link} = 1.88mF$. Στο συγκεκριμένο μετατροπέα υλοποιείται ο αλγόριθμος του ελέγχου μέγιστης απολαβής ισχύος (MPPT), με τον οποίο δεν ασχοληθήκαμε στην παρούσα εργασία, καθώς και ο περιορισμός της ισχύος εισόδου των Φ/Β σε περίπτωση που ξεπεραστούν τα θερμικά όρια του αντιστροφέα κατά τη διάρκεια σφάλματος, μέσω κατάλληλης παλμοδότησης του διακοπτικού του στοιχείου. Η τελευταία διαδικασία υλοποιήθηκε απλοϊκά στο εξεταζόμενο θεωρητικό μοντέλο μεταβάλλοντας κατάλληλα την τιμή της πηγής ρεύματος στην είσοδο του αντιστροφέα.

Το DC link της συγκεκριμένης διάταξης υλοποιείται με τη χρήση δέκα παράλληλων ηλεκτρολυτικών πυκνωτών, όπως αυτοί που χρησιμοποιήθηκαν στο PV link, οπότε προκύπτει $C_{dc-link} = 4.7mF$. Τα διακοπτικά στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν για τη δημιουργία της γέφυρας του αντιστροφέα είναι τεχνολογίας καρβιδίου του πυριτίου και πιο συγκεκριμένα τα *Silicon Carbide MOSFETs C2M0080120D*. Τα συγκεκριμένα διακοπτικά παρουσιάζουν την καλύτερη δυνατή απόδοση για υψηλές συχνότητες λειτουργίας, όπως αυτή που θα εξετάσουμε στο συγκεκριμένο σύστημα, που φτάνει τα 20kHz. Η συχνότητα αυτή απέχει σε μεγάλο βαθμό από εκείνη του μοντελοποιημένου συστήματος, η οποία επιλέχθηκε σκοπίμως αρκετά μικρότερη (2.5kHz), λόγω των αυξημένων απωλειών που προκύπτουν για μεγάλα επίπεδα ισχύος.

Η εφαρμογή του ελέγχου τόσο στο DC/DC μετατροπέα όσο και στον αντιστροφέα υλοποιήθηκε με τη χρήση ενός ψηφιακού επεξεργαστή σήματος και συγκεκριμένα του *TMS320F28335* της Texas Instruments, ο οποίος επίσης περιλαμβάνεται στην πλακέτα. Αξίζει να σημειωθεί ότι ο έλεγχος του αντιστροφέα πραγματοποιήθηκε με συχνότητα 20kHz, ενώ ο αντίστοιχος του DC/DC μετατροπέα ήταν δέκα φορές πιο αργός, δηλαδή 2kHz.

Τέλος, τα πηνία που χρησιμοποιήθηκαν ως φίλτρα στην έξοδο του αντιστροφέα, καθώς και για τη διασύνδεσή του με την ελεγχόμενη γεννήτρια, επιλέχθηκε να έχουν την τιμή $L = 20mH$. Τα συγκεκριμένα πηνία, όπως είδαμε και σε προηγούμενο κεφάλαιο

λειτουργούν ως βαθυπερατά φίλτρα και καταστέλλουν αποδοτικά τις αρμονικές των ρευμάτων που οφείλονται στα διακοπτικά στοιχεία του αντιστροφέα.

6.1.3 Τριφασική ελεγχόμενη γεννήτρια

Η τριφασική ελεγχόμενη γεννήτρια που χρησιμοποιήθηκε για την εξομείωση του δικτύου φαίνεται στην εικόνα 6-3, ενώ η πλήρης ονομασία του μοντέλου είναι *Power Source MX30-3Pi-411-413-HV* και είναι ισχύος 30kVA. Η συγκεκριμένη γεννήτρια μπορεί να προκαλέσει με κατάλληλη ρύθμιση συμμετρικές και ασύμμετρες βυθίσεις τάσης, καθώς επίσης και μεταβολή της συχνότητας και αρμονική παραμόρφωση. Επίσης, η σύνδεσή της με το δίκτυο της ΔΕΗ επιτρέπει οποιαδήποτε ροή ενεργού και αέργου ισχύος από και προς αυτό.



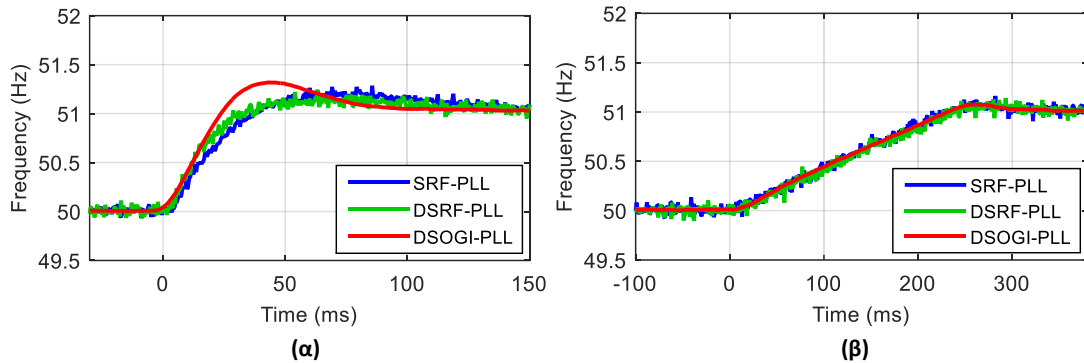
Εικόνα 6-3: Τριφασική ελεγχόμενη γεννήτρια.

6.2 Πειραματική εφαρμογή εξεταζόμενων συστημάτων συγχρονισμού PLL

Σε συνέχεια των προσομοιώσεων που παρουσιάστηκαν σε προηγούμενο κεφάλαιο για το SRF-PLL, το DSOGI-PLL και το DSRF-PLL, στην παρούσα ενότητα θα επιβεβαιωθεί και πειραματικά η απόκριση τους, για μεταβολές της συχνότητας και της τάσης παρόμοιες με αυτές που προκλήθηκαν στο μοντελοποιημένο σύστημα. Η εφαρμογή των παραπάνω διαταραχών έγινε μέσω της τριφασικής ελεγχόμενης γεννήτριας. Ενδεικτικά αναφέρουμε ότι η υλοποίηση των εξεταζόμενων συστημάτων με τη χρήση του ψηφιακού ελεγκτή πραγματοποιήθηκε με την ίδια συχνότητα που θα εφαρμοστεί και ο έλεγχος του αντιστροφέα, δηλαδή στα 20kHz, όπως ακριβώς είχε υλοποιηθεί και στις προσομοιώσεις.

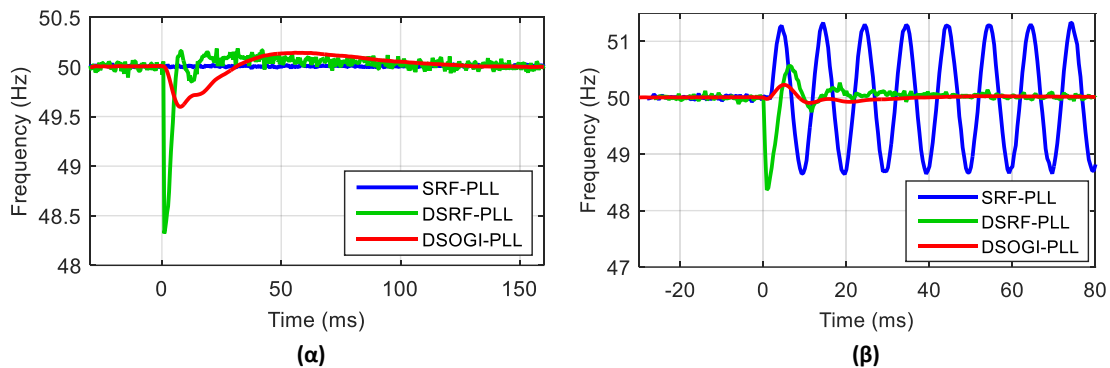
Στο σχήμα 6.2-1 παρατηρούμε την απόκριση των εξεταζόμενων τύπων PLL τόσο σε βηματική μεταβολή της συχνότητας όσο και σε μεταβολή τύπου ράμπας κατά 1Hz. Η εικόνα είναι αναμενόμενη βάσει των προσομοιώσεων που είχαν γίνει, με τις τρεις μεθόδους να εμφανίζουν σχεδόν ταυτόσημη συμπεριφορά, αν εξαιρέσουμε την ελαφρώς μεγαλύτερη υπερπήδηση της συχνότητας που παρουσιάζει το DSOGI-PLL, κατά τη βηματική μεταβολή.

Επίσης, για τη συγκεκριμένη μεταβολή το πραγματικό σύστημα απαιτεί κάπως μεγαλύτερο χρόνο (>50ms) μέχρι να εντοπίσει πλήρως τη συχνότητα του δικτύου σε σχέση με το μοντελοποιημένο.



Σχήμα 6.2-1: Απόκριση διατάξεων PLL σε περίπτωση μεταβολής της συχνότητας. (α) Βηματική μεταβολή και (β) μεταβολή σε μορφή ράμπας.

Η απόκριση των συστημάτων για συμμετρικό και ασύμμετρο σφάλμα παρουσιάζεται στο σχήμα 6.2-2, όπου εφαρμόσαμε μία τριφασική και μία μονοφασική βύθιση της τάσης κατά 50% της ονομαστικής τιμής. Από τα πειραματικά δεδομένα επιβεβαιώνεται η αδυναμία του απλού SRF-PLL να εντοπίσει τη συχνότητα κατά τη διάρκεια ασύμμετρων σφαλμάτων, όπου εμφανίζονται ταλαντώσεις διπλάσιας συχνότητας λόγω της ύπαρξης της τάσης αρνητικής ακολουθίας. Τα άλλα δύο PLL συμπεριφέρονται με αποδοτικό τρόπο και στους δύο τύπους σφαλμάτων, καθώς εντοπίζουν τη συχνότητα σε σύντομο χρονικό διάστημα, ενώ επιβεβαιώνεται και η ελαφρώς καλύτερη συμπεριφορά του DSOGI-PLL, λόγω μικρότερης υπερπήδησης.



Σχήμα 6.2-2: Απόκριση διατάξεων PLL (α) σε συμμετρικό σφάλμα και (β) ασύμμετρο σφάλμα.

6.3 Πειραματική επιβεβαίωση ορθής λειτουργίας ελέγχου ρευμάτων θετικής ακολουθίας (PSCC)

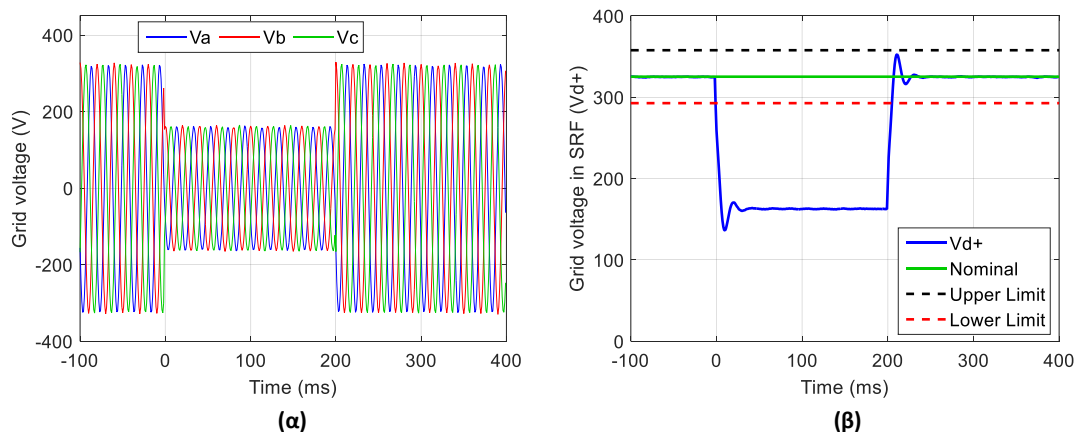
Για τις ανάγκες της πειραματικής επιβεβαίωσης της επιλεγείσας στρατηγικής ελέγχου σε σφάλματα του δικτύου, πραγματοποιήθηκε μέσω της τριφασικής ελεγχόμενης γεννήτριας μία τριφασική βύθιση τάσης στο 50% της ονομαστικής τιμής και μία μονοφασική στο 10%. Παρόμοιες βυθίσεις είχαν πραγματοποιηθεί και στο πλαίσιο των

προσομοιώσεων, με τη διαφορά ότι στην περίπτωση του ασύμμετρου σφάλματος, η μονοφασική βύθιση είχε μετατραπεί σε διφασική με ολίσθηση των τριών φάσεων, λόγω της ύπαρξης του Μ/Σ ανύψωσης. Στο πραγματικό σύστημα, οι βυθίσεις που προκαλούνται από τη γεννήτρια εφαρμόζονται αυτούσιες στην έξοδο του αντιστροφέα, και επομένως είναι αυτές που αποτελούν κριτήριο της λειτουργίας του ελέγχου για υποστήριξη του δικτύου. Στην περίπτωση του μονοφασικού σφάλματος, επιλέχθηκε να μην εφαρμοστεί ολίσθηση των τριών φάσεων από τη γεννήτρια, καθώς η έννοια της ασυμμετρίας εισάγεται λόγω της ανομοιομορφίας των πλατών και θεωρήθηκε επαρκές για την εκτίμηση της ορθής λειτουργίας του ελέγχου σε ασύμμετρες καταστάσεις.

Κατά τη διάρκεια εκτέλεσης των πειραμάτων, οι συνθήκες στην τοποθεσία που ήταν εγκατεστημένα τα Φ/Β ήταν τέτοιες, ώστε η μέγιστη αποδιδόμενη ισχύς τους να μην ξεπερνά το 1.5kW, από την ονομαστική ισχύ των 2kW που είναι ικανά να παρέχουν σε STC συνθήκες. Επίσης, το μέγιστο επιτρεπόμενο όριο των ρευμάτων στην έξοδο του αντιστροφέα (θερμικό όριο) επιλέχθηκε να είναι 1.5 φορές το ονομαστικό, δηλαδή περίπου 6.15A-peak, το οποίο είναι σαφώς πιο ελαστικό από το αντίστοιχο του μοντελοποιημένου συστήματος (1.25), λόγω της μικρότερης κλίμακας ισχύος. Ωστόσο, όπως θα δούμε και στη συνέχεια, το συγκεκριμένο όριο είναι ικανό να προκαλέσει περιορισμό της ενεργού ισχύος στην περίπτωση του συμμετρικού σφάλματος που θα εφαρμοστεί, αλλά όχι και για το ασύμμετρο σφάλμα, λόγω της μικρότερης απαίτησης αέργου ισχύος. Τέλος, θα πρέπει να τονίσουμε ότι λόγω απουσίας πυκνωτών στο φίλτρο εξόδου του αντιστροφέα, δεν πραγματοποιήθηκε ο εσωτερικός βρόχος ελέγχου των αντίστοιχων ρευμάτων, παρά μόνο των ρευμάτων που εγχέονται απευθείας στο δίκτυο.

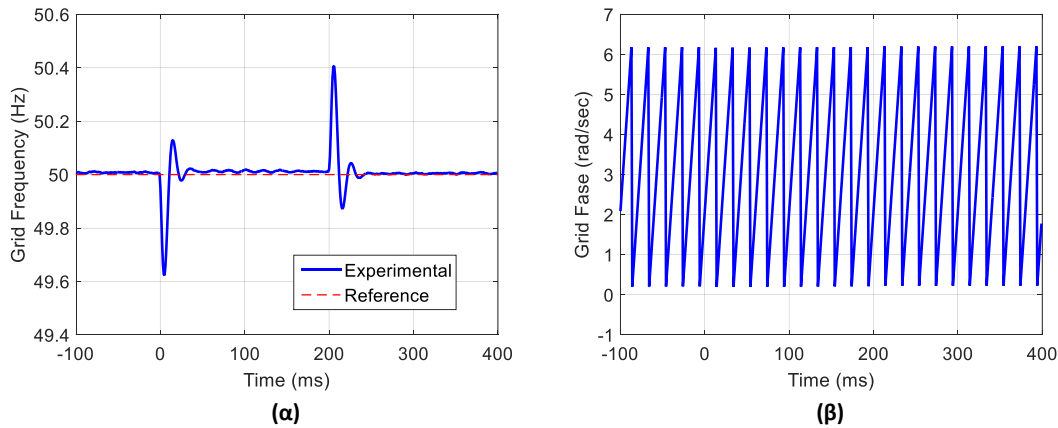
6.3.1 Απόκριση σε συμμετρικό σφάλμα

Η συμμετρική βύθιση τάσης κατά 50% η οποία προκλήθηκε από τη γεννήτρια φαίνεται στο σχήμα 6.3-1(α), ενώ το πλάτος της τάσης θετικής ακολουθίας που προκύπτει για το συγκεκριμένο σφάλμα παρουσιάζεται στο σχήμα 6.3-1(β), όπου έχουν σχεδιαστεί και τα μέγιστα επιτρεπόμενα όρια διακύμανσης, όπως ορίζονται από τους κώδικες ($\pm 10\%$). Παρατηρούμε ότι στη συγκεκριμένη περίπτωση, όπως αναμενόταν, η τάση θετικής ακολουθίας πέφτει στο μισό της ονομαστικής της τιμής, επομένως πρέπει να πραγματοποιηθεί έγχυση αέργου ισχύος προς το δίκτυο.



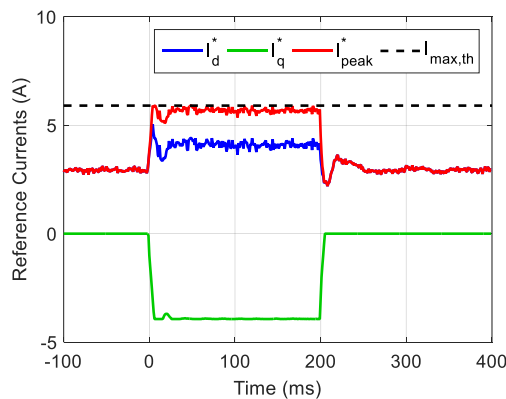
Σχήμα 6.3-1: (α) Συμμετρική βύθιση τάσης και (β) πλάτος της τάσης θετικής ακολουθίας.

Η ορθή λειτουργία του συστήματος συγχρονισμού DSOGI-PLL παρουσιάζεται στο σχήμα 6.3-2, όπου φαίνονται η συχνότητα και η γωνία μιας φάσης του δικτύου. Ο εντοπισμός της συχνότητας γίνεται σε χρονικό διάστημα μικρότερο των 40ms, όπως απαιτείται για να λειτουργήσει ο έλεγχος, ενώ η συμπεριφορά του συστήματος είναι ελαφρώς καλύτερη από αυτή που παρουσιάστηκε στις προσομοιώσεις, λόγω καλύτερης ρύθμισης των κερδών.



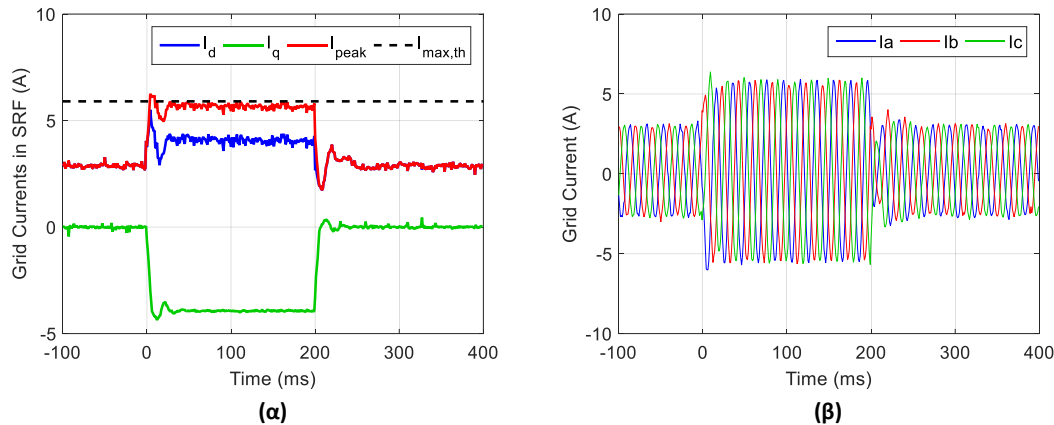
Σχήμα 6.3-2: Απόκριση DSOGI-PLL σε συμμετρική βύθιση τάσης. (α) Συχνότητα και (β) φάση του δικτύου.

Οι αναφορές της ενεργού και της άεργου συνιστώσας ρεύματος, όπως προκύπτουν από τον έλεγχο της τάσης του DC link της διάταξης και την πτώση της τάσης θετικής ακολουθίας αντίστοιχα, φαίνονται στο σχήμα 6.3-3. Όπως αναφέραμε και παραπάνω, το ποσό της άεργου συνιστώσας που απαιτείται για την υποστήριξη του δικτύου στο συγκεκριμένο σφάλμα, προκαλεί περιορισμό της ενεργού συνιστώσας, ο οποίος έχει ως αποτέλεσμα το πλάτος των ρευμάτων στην έξοδο του αντιστροφέα να μην ξεπερνά τα θερμοκά του όρια.



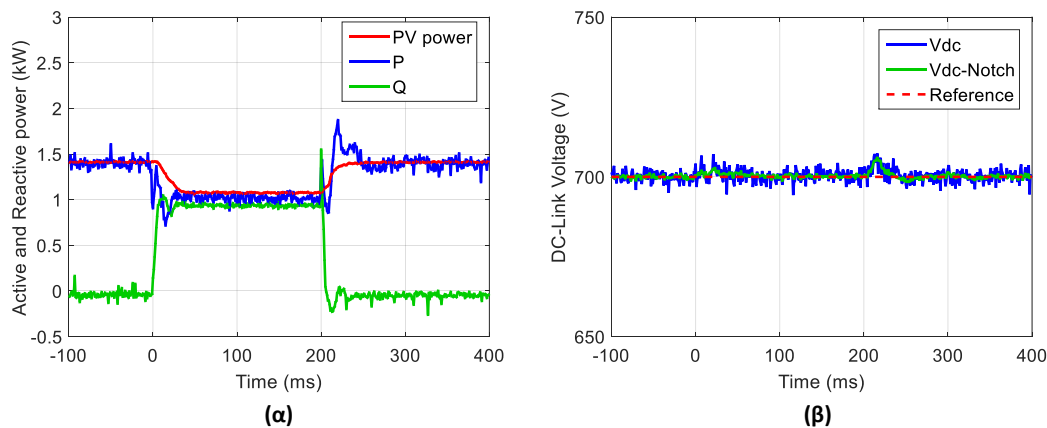
Σχήμα 6.3-3: Ρεύματα αναφοράς στο dq πλαίσιο για συμμετρική βύθιση τάσης 50%.

Η ορθή λειτουργία του ελέγχου ρευμάτων επιβεβαιώνεται από το σχήμα 6.3-4, όπου παρατηρούμε ότι τα πραγματικά ρεύματα στο dq πλαίσιο παίρνουν τις επιθυμητές τιμές των αναφορών με μεγάλη ακρίβεια. Επίσης, στο ίδιο σχήμα φαίνονται και τα ρεύματα που προκύπτουν στην έξοδο του αντιστροφέα, τα οποία όπως αναμενόταν έχουν την επιθυμητή συμμετρική μορφή και επαληθεύουν τον περιορισμό που έγινε ως προς τα θερμοκά όρια.



Σχήμα 6.3-4: Ρεύματα εξόδου αντιστροφέα (α) στο dq και (β) στο abc πλαίσιο αναφοράς.

Στο σχήμα 6.3-5 παρατηρούμε την ισχύ εισόδου από τα Φ/Β, την ενεργό και την άεργο ισχύ που παρέχεται στο δίκτυο, καθώς και την τάση στο DC link, όπως προκύπτει από την εφαρμογή του ελέγχου για τήρηση του ισοζυγίου ισχύος. Από το πρώτο σχήμα γίνεται εμφανής ο περιορισμός της ενεργού ισχύος προς το δίκτυο, εξαιτίας της ρύθμισης των ρευμάτων που είδαμε προηγούμενως, καθώς επίσης και η έγχυση άεργου ισχύος για υποστήριξη του δικτύου, εντός του προβλεπόμενου ορίου των 40ms.

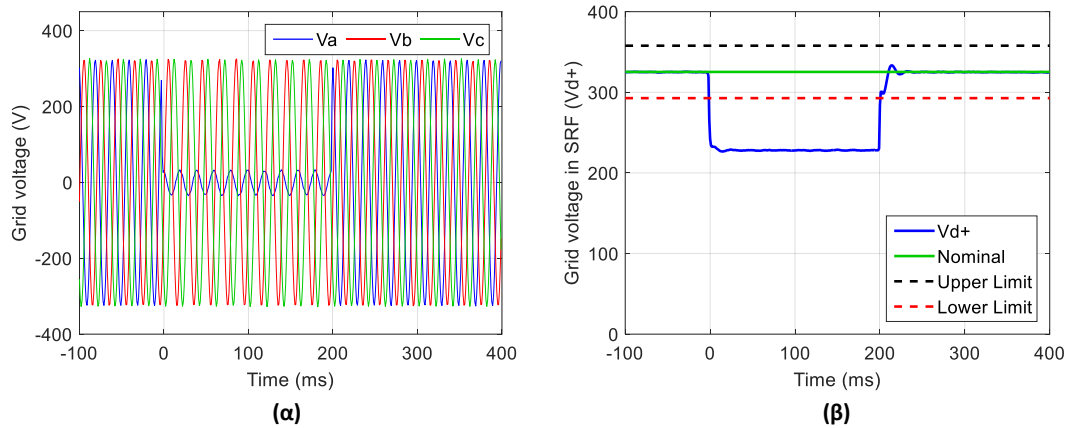


Σχήμα 6.3-5: (α) Ισχείς εισόδου και εξόδου του αντιστροφέα και (β) τάση στο DC link της διάταξης για συμμετρικό σφάλμα 50%.

Επίσης, επιβεβαιώνεται η ορθή λειτουργία του ελέγχου για τον περιορισμό της ισχύος εισόδου από τα Φ/Β, η οποία ακολουθεί τη μείωση της ενεργού ισχύος του αντιστροφέα. Μάλιστα ο έλεγχος αυτός, ο οποίος εφαρμόζεται στον DC/DC μετατροπέα, σε συνδυασμό με τις τιμές των πυκνωτών που χρησιμοποιήθηκαν στο DC link προκαλεί επι της ουσίας μηδενική ανύψωση της DC τάσης, η οποία φαίνεται στο δεύτερο σχήμα. Βέβαια ένας ακόμη λόγος για τον οποίο δεν παρατηρείται ανύψωση είναι και η μικρή ποσότητα ισχύος που παρέχεται από τα Φ/Β. Τέλος, από το ίδιο σχήμα κρίνουμε ότι ο έλεγχος στο DC link λειτουργεί αποδοτικά, πετυχαίνοντας την επιθυμητή τιμή αναφοράς σε όλη τη διάρκεια του σφάλματος, ενώ η χρήση του notch filter στη συγκεκριμένη περίπτωση δεν επηρεάζει ουσιαστικά το σύστημα, καθώς η τάση δεν παρουσιάζει ταλαντώσεις διπλάσιας συχνότητας.

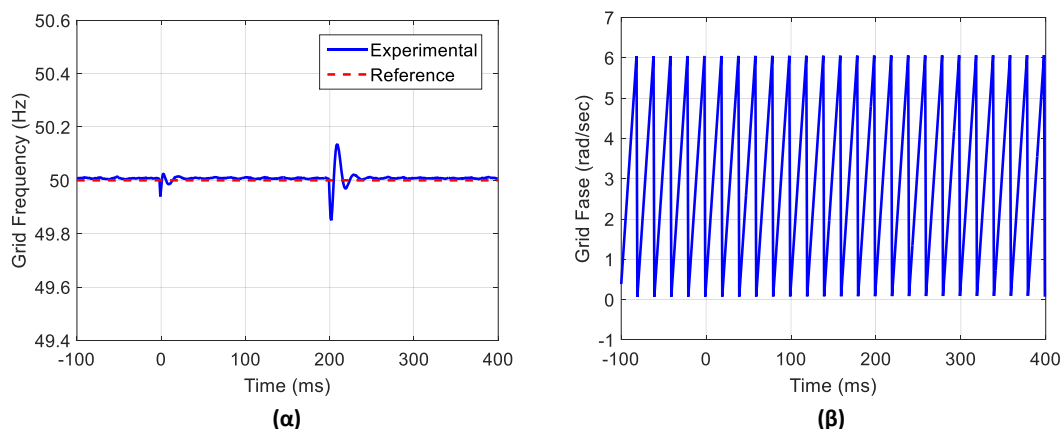
6.3.2 Απόκριση σε ασύμμετρο σφάλμα

Στο σχήμα 6.3-6 παρουσιάζεται η ασύμμετρη βύθιση τάσης, όπως προκλήθηκε από την ελεγχόμενη γεννήτρια, καθώς και η αντίστοιχη πτώση της τάσης θετικής ακολουθίας. Παρά το μεγάλο ποσοστό της βύθισης στη μία φάση, η τάση θετικής ακολουθίας παρουσιάζει μικρότερη μείωση σε σχέση με το συμμετρικό σφάλμα που εξετάσαμε προηγουμένως και επομένως θα απαιτηθεί μικρότερη ποσότητα αέργου ισχύος για υποστήριξη του δικτύου, όπως θα δούμε και στη συνέχεια.



Σχήμα 6.3-6: (α) Μονοφασική βύθιση τάσης και (β) πλάτος της τάσης θετικής ακολουθίας.

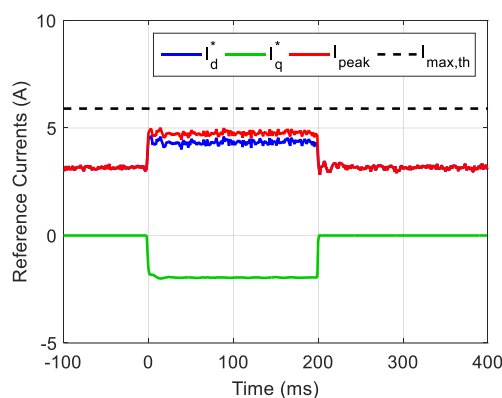
Η ορθή λειτουργία του DSOGI-PLL επιβεβαιώνεται στο σχήμα 6.3-7 και για το συγκεκριμένο τύπο σφάλματος, όπου παρουσιάζεται η συχνότητα και η γωνία μίας φάσης του δικτύου. Μάλιστα παρατηρούμε ότι η απόκριση του συστήματος είναι καλύτερη σε σχέση με το προηγούμενο σφάλμα, λόγω μικρότερης απόκλισης από τη συχνότητα αναφοράς, γεγονός που πιστοποιεί τη σοβαρότητα του συμμετρικού σφάλματος εν συγκρίσει με το ασύμμετρο, για το συγκεκριμένο σύστημα.



6.3-7: Απόκριση DSOGI-PLL σε μονοφασική βύθιση τάσης. (α) Συχνότητα και (β) φάση του δικτύου.

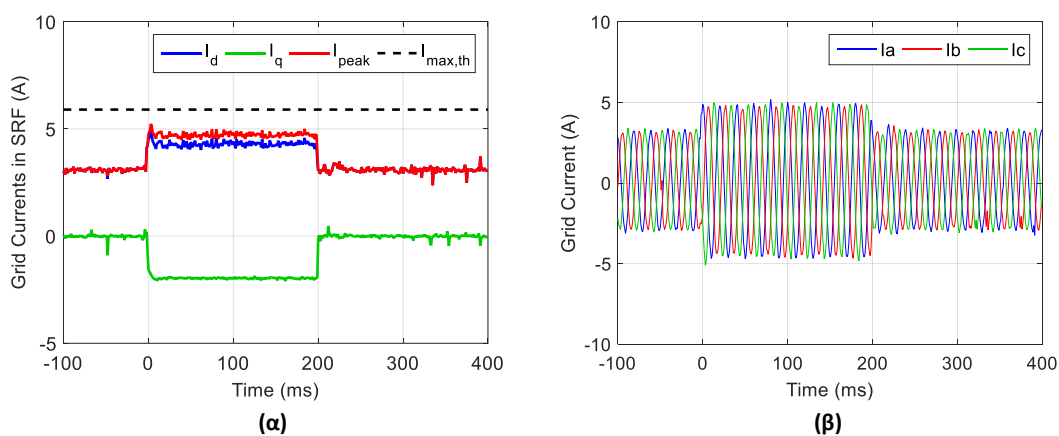
Οι αναφορές των ρευμάτων στο σύγχρονα στρεφόμενο πλαίσιο, όπως προέκυψαν για το εξεταζόμενο σφάλμα, φαίνονται στο σχήμα 6.3-8. Από το σχήμα αυτό συμπεραίνουμε ότι για τη συγκεκριμένη πτώση της τάσης θετικής ακολουθίας, τα άεργα

ρεύματα που ορίζονται ως αναφορά δεν είναι ικανά να προκαλέσουν περιορισμό των ενεργών ρευμάτων, γεγονός που επιβεβαιώνεται αν παρατηρήσουμε ότι το συνολικό πλάτος των επιθυμητών ρευμάτων είναι μικρότερο από τα θερμικά όρια του αντιστροφέα. Ο μη περιορισμός των ενεργών ρευμάτων οφείλεται επίσης στο γεγονός ότι και στις κανονικές συνθήκες του δικτύου τα εγχεόμενα ρεύματα είναι ήδη μικρότερα από τα ονομαστικά, όπως εξηγήθηκε και παραπάνω. Ακόμη, οι αναφορές των ρευμάτων εξακολουθούν να είναι DC μεγέθη, καθώς το notch filter είναι ικανό να απορρίψει τις όποιες ταλαντώσεις εισάγονται στην τάση του DC link, κατά τον προσδιορισμό των ενεργών ρευμάτων, ενώ η τάση θετικής ακολουθίας, που καθορίζει τα άεργα ρεύματα, παραμένει ανεπηρέαστη από οποιαδήποτε μορφή ασυμμετρίας.



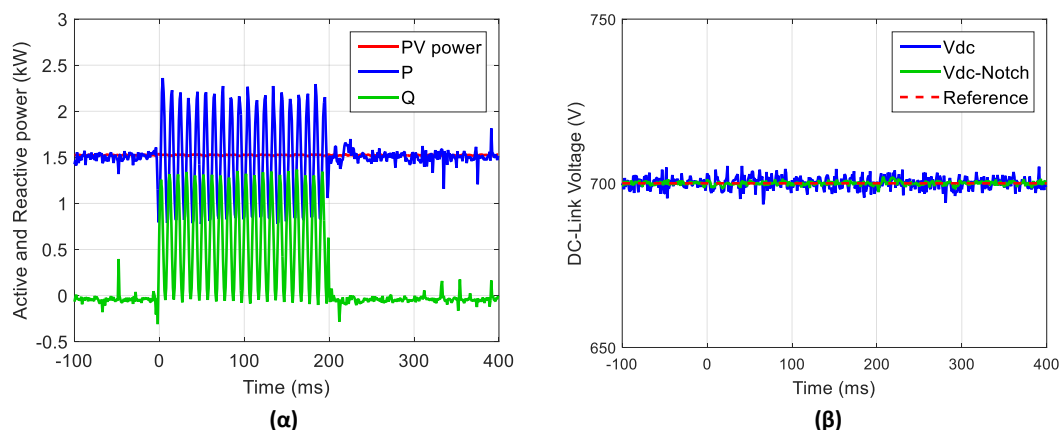
Σχήμα 6.3-8: Ρεύματα αναφοράς στο dq πλαίσιο για μονοφασική βύθιση τάσης 90%.

Στο σχήμα 6.3-9 επιβεβαιώνεται η αναμενόμενη λειτουργία του ελέγχου ρευμάτων, όπου τα πραγματικά ρεύματα στο dq πλαίσιο αναφοράς ακολουθούν με ικανοποιητική ακρίβεια τις αναφορές τους, ενώ τα εγχεόμενα ρεύματα που προκύπτουν στην έξοδο του αντιστροφέα παίρνουν και πάλι την επιθυμητή συμμετρική μορφή, παρά την ασυμμετρία του συστήματος τάσεων, λόγω της DC μορφής των dq συνιστωσών. Επίσης, από τα συγκεκριμένα σχήματα παρατηρούμε ότι η έγχυση των ρευμάτων γίνεται εντός των προβλεπόμενων χρονικών ορίων (<40ms).



Σχήμα 6.3-9: Ρεύματα εξόδου αντιστροφέα (α) στο dq και (β) στο abc πλαίσιο αναφοράς.

Η ισχύς εισόδου από τα Φ/Β, η ενεργός και άεργος ισχύς προς το δίκτυο και η τάση στο DC link της διάταξης παρουσιάζονται στο σχήμα 6.3-10. Η μεγάλη διαφοροποίηση που εισάγεται, σε σχέση με το συμμετρικό σφάλμα, έχει να κάνει με την ύπαρξη ταλαντώσεων διπλάσιας συχνότητας στη ενεργό και την άεργο ισχύ που παρέχει ο αντιστροφέας προς το δίκτυο, όπως περιμέναμε με βάση τη θεωρία και τις προσομοιώσεις που παρουσιάστηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια. Ακόμη, παρατηρούμε ότι η μέση τιμή της ενεργού ισχύος παραμένει ίδια με πριν το σφάλμα, λόγω του ότι δεν εφαρμόστηκε περιορισμός στα ενεργά ρεύματα του αντιστροφέα, όπως είδαμε και παραπάνω.



Σχήμα 6.3-10: (α) Ισχύεις εισόδου και εξόδου του αντιστροφέα και (β) τάση στο DC link της διάταξης για μονοφασικό σφάλμα 90%.

Η ισχύς των Φ/Β ακολουθεί την παραπάνω μέση τιμή, χωρίς ταλαντώσεις διπλάσιας συχνότητας, οι οποίες απορρίπτονται με την εφαρμογή του κατάλληλου ελέγχου στον DC/DC μετατροπέα. Στο μοντελοποιημένο σύστημα, όπου οι διατάξεις πριν το DC link του αντιστροφέα έχουν προσομοιωθεί με μία ιδανική πηγή ρεύματος, οι παραπάνω ταλαντώσεις απορρίφθηκαν μέσω της πηγής, με την χρήση του notch filter κατά τον έλεγχο της DC τάσης.

Τέλος, η τάση στο DC link ακολουθεί και πάλι την αναφορά των 700V σε όλη τη διάρκεια του σφάλματος, επιβεβαιώνοντας ουσιαστικά την τήρηση του ισοζυγίου ισχύος. Οι ταλαντώσεις διπλάσιας συχνότητας της τάσης παίρνουν πολύ μικρή τιμή για το συγκεκριμένο τύπο σφάλματος και δε γίνονται εύκολα εμφανείς, λόγω της μεγάλης χωρητικότητας των πυκνωτών στο DC link. Ωστόσο, η ύπαρξη του notch filter ομαλοποιεί ακόμα περισσότερο την παραπάνω τάση, επιβεβαιώνοντας την ορθή λειτουργία του.

7 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

7.1 Ανασκόπηση της εργασίας

Στην παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιήθηκε μία λεπτομερής διερεύνηση στρατηγικών ελέγχου αντιστροφέα Φ/Β συστημάτων, με στόχο την υποστήριξη του δικτύου σε συμμετρικά και ασύμμετρα σφάλματα. Έπειτα από μία διεξοδική μελέτη της σύγχρονης βιβλιογραφίας, παρουσιάστηκαν συγκεντρωτικά τέσσερις ξεχωριστές στρατηγικές ελέγχου, οι οποίες συμμορφώνονται με τους πιο πρόσφατους κώδικες δικτύου, ενώ παράλληλα παρουσιάζουν διαφορετικά κριτήρια υλοποίησης κατά τη διάρκεια σφαλμάτων. Η ορθή λειτουργία των παραπάνω στρατηγικών εξασφαλίζεται με την εφαρμογή ενός κατάλληλου συστήματος συγχρονισμού. Προς αυτήν την κατεύθυνση, αρχικά, εξετάστηκαν τρεις διαφορετικές τοπολογίες διατάξεων PLL και πραγματοποιήθηκε σύγκριση μεταξύ τους, μέσω προσομοιώσεων.

Η πρώτη διάταξη, το απλό SRF-PLL, ενώ συμπεριφέρεται ιδανικά σε μεταβολές της συχνότητας και συμμετρικές καταστάσεις του δικτύου, δεν επιδεικνύει ανάλογη συμπεριφορά σε ασύμμετρα σφάλματα και αρμονική παραμόρφωση της τάσης, όπου δεν είναι δυνατός ο εντοπισμός της συχνότητας. Το γεγονός αυτό οφείλεται, αφενός στην εμφάνιση της τάσης αρνητικής ακολουθίας, η οποία προκαλεί ταλαντώσεις διπλάσιας συχνότητας και αφετέρου στην ανικανότητα του εύρους ζώνης του ελεγκτή να απορρίψει τις αρμονικές συνιστώσες.

Το πρόβλημα των ασύμμετρων καταστάσεων φαίνεται πως λύνει ικανοποιητικά η δεύτερη διάταξη η οποία τέθηκε υπό εξέταση, το DSRF-PLL, η οποία λειτουργεί με τον εντοπισμό της τάσης θετικής ακολουθίας του δικτύου. Η συγκεκριμένη λειτουργία επιτυγχάνεται με το μετασχηματισμό της τάσης του δικτύου σε δύο σύγχρονα στρεφόμενα πλαίσια με αντίθετες φορές και την εφαρμογή ενός δικτύου απόζευξης για την απαλοιφή των ταλαντώσεων διπλάσιας συχνότητας. Ωστόσο, το πρόβλημα εντοπισμού της συχνότητας λόγω αυξημένου αρμονικού περιεχομένου της τάσης παραμένει.

Την καλύτερη απόκριση σε όλες τις καταστάσεις του δικτύου παρουσιάζει το DSOGI-PLL, το οποίο είναι και αυτό που επιλέγεται ουσιαστικά κατά την εφαρμογή των εξεταζόμενων ελέγχων. Η συγκεκριμένη διάταξη εντοπίζει την τάση θετικής ακολουθίας με χρήση προσαρμοστικών φίλτρων δευτέρας τάξεως, τα οποία παράλληλα παρέχουν το κατάλληλο εύρος ζώνης για την απόρριψη της αρμονικής παραμόρφωσης του δικτύου σε ικανοποιητικό βαθμό.

Στη συνέχεια, αναλύθηκαν τα κριτήρια εφαρμογής των στρατηγικών ελέγχου του αντιστροφέα, με βάση το πιο σύγχρονο θεσμικό πλαίσιο των ευρωπαϊκών κωδίκων δικτύου. Οι συγκεκριμένοι κώδικες ενώ διευκρινίζουν ικανοποιητικά τις τεχνικές απαιτήσεις του συστήματος στην περίπτωση των συμμετρικών βυθίσεων τάσης, υστερούν σημαντικά ως προς τη σαφήνειά τους σε ασύμμετρα σφάλματα.

Η πρώτη στρατηγική (PSCC) εξασφαλίζει την έγχυση συμμετρικών ρευμάτων σε οποιοδήποτε τύπο σφάλματος και παρέχει άεργο ισχύ προς το δίκτυο αναλογικά με την πτώση της τάσης θετικής ακολουθίας. Η συγκεκριμένη ισχύς παρέχεται εξ ολοκλήρου μέσω άεργων ρευμάτων θετικής ακολουθίας, τα οποία προκαλούν αύξηση της τάσης θετικής

ακολουθίας μόνο, ενώ σε ένα ασύμμετρο σφάλμα αφήνουν την τάση αρνητικής ακολουθίας ανεπηρέαστη.

Η δεύτερη στρατηγική (IPCC) ελέγχει τα ρεύματα κάθε φάσης του αντιστροφέα με ανεξάρτητο τρόπο, παρέχοντας άεργο ισχύ κυρίως στις φάσεις που έχουν υποστεί το σφάλμα. Έτσι σε ένα ασύμμετρο σφάλμα και για ασθηνή συμπεριφορά του δικτύου, οι ανεπηρέαστες φάσεις δεν κινδυνεύουν με ανύψωση της τάσης παραπάνω από τα μέγιστα επιτρεπτά όρια. Στα συμμετρικά σφάλματα η συγκεκριμένη στρατηγική εξασφαλίζει το απαιτούμενο μέγεθος αέργου ισχύος, σύμφωνα με τους κώδικες, πλην όμως εισάγει και ένα μικρό ποσοστό ασυμμετρίας στα ρεύματα, ακόμα και σε περιπτώσεις που δεν παρατηρείται σφάλμα. Επιπλέον, η πολυπλοκότητά της είναι σαφώς αυξημένη σε σχέση με την πρώτη στρατηγική.

Η τρίτη στρατηγική (DDSRF-CC, Negative Sequence Limitation) παρέχει και αυτή άεργα ρεύματα θετικής ακολουθίας αναλογικά με την πτώση της αντίστοιχης τάσης, ενώ, επίσης, συμμορφώνεται με τους ισπανικούς κώδικες δικτύου περιορίζοντας την ενεργό ισχύ σύμφωνα και πάλι με την πτώση της ίδιας τάσης. Η συγκεκριμένη συμπεριφορά εξασφαλίζει ένα περιθώριο ρευμάτων μέχρι τα θερμικά όρια του αντιστροφέα, έτσι ώστε σε περίπτωση ασύμμετρου σφάλματος να χρησιμοποιείται για την έγχυση άεργων ρευμάτων αρνητικής ακολουθίας, ικανών να περιορίσουν το δείκτη ασυμμετρίας της τάσης του δικτύου. Ωστόσο, το υπολογιστικό κόστος της συγκεκριμένης μεθόδου κρίνεται, επίσης, σημαντικό.

Τέλος, η τέταρτη στρατηγική (DDSRF-CC, DC Ripple Limitation), η οποία έχει και πάλι την επιθυμητή συμπεριφορά στα συμμετρικά σφάλματα, κατά τη διάρκεια ενός ασύμμετρου σφάλματος ορίζει με τέτοιο τρόπο τις συνιστώσες ρευμάτων θετικής και αρνητικής ακολουθίας, έτσι ώστε να επιτευχθεί μείωση της κυμάτωσης, λόγω ταλαντώσεων διπλάσιας συχνότητας (100Hz), στην ενεργό ισχύ και κατ' επέκταση στην τάση του DC link. Η παραπάνω λειτουργία στοχεύει στην αύξηση της αξιοπιστίας του αντιστροφέα, προστατεύοντας τους ηλεκτρολυτικούς πυκνωτές στο DC link από διακυμάνσεις στη θερμοκρασία τους, οι οποίες είναι δυνατόν να εμφανιστούν για μικρές χωρητικότητες πυκνωτών. Στα αρνητικά της συγκεκριμένης μεθόδου λογίζεται η μεγάλη μείωση της ενεργού ισχύος κατά τη διάρκεια του ασύμμετρου σφάλματος.

Η επιβεβαίωση της ορθής λειτουργίας των παραπάνω στρατηγικών έγινε μέσω κατάλληλων προσομοιώσεων σε μονάδα ισχύος 100kW, συνδεδεμένη στο δίκτυο της Μέσης Τάσης, με χρήση μετασχηματιστή ανύψωσης. Από τις συγκεκριμένες προσομοιώσεις λάβαμε τα αναμενόμενα αποτελέσματα και προκρίναμε τη μέθοδο PSCC ως την καταλληλότερη για καθολική εφαρμογή σε σφάλματα του δικτύου, λόγω μικρότερης πολυπλοκότητας και πλήρους συμμόρφωσης με τους ευρωπαϊκούς κώδικες δικτύου. Επιπλέον, με τη συγκεκριμένη στρατηγική επιτυγχάνονται τα υψηλότερα επίπεδα παροχής ενεργού ισχύος κατά τη διάρκεια των ασύμμετρων σφαλμάτων.

Τα εξεταζόμενα συστήματα PLL και η επιλεγείσα στρατηγική εφαρμόστηκαν και σε πειραματική διάταξη του εργαστηρίου, μικρότερης ισχύος, στην οποία δεν χρησιμοποιήθηκε μετασχηματιστής ανύψωσης και επιλέχθηκε να γίνει απευθείας διασύνδεση της Φ/Β μονάδας με το δίκτυο της Χαμηλής Τάσης. Επιπλέον, προτιμήθηκε η χρήση απλού φίλτρου L , αντί για LC , στην έξοδο του αντιστροφέα για τη σύνδεση με το δίκτυο, το οποίο κρίνεται αποδοτικό για το συγκεκριμένο επίπεδο ισχύος. Οι παραπάνω διαφοροποιήσεις δεν επηρέασαν ουσιαστικά τη φιλοσοφία εφαρμογής των ελέγχων και

την εκτίμησή τους σε πειραματικό επίπεδο. Οι μετρήσεις που λάβαμε επαλήθευσαν τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων και επιβεβαίωσαν την επιθυμητή λειτουργία της μεθόδου PSSC, η οποία εξασφάλιζε την αδιάλειπτη λειτουργία του συστήματος και την παροχή αέργου ισχύος σε συνθήκες σφάλματος.

7.2 Στοιχεία συμβολής της εργασίας

Σαν στοιχείο πρωτοτυπίας της παρούσας εργασίας λογίζεται η συγκεντρωτική παρουσίαση των πιο σύγχρονων τεχνικών ελέγχου αντιστροφέα Φ/Β συστημάτων και η ανάλυση της συμπεριφοράς τους σε συμμετρικά και ασύμμετρα σφάλματα του δικτύου. Επίσης, σημαντικό στοιχείο είναι η συγκριτική μελέτη των παραπάνω στρατηγικών και η ανάδειξη της πιο αποδοτικής, με βάση τους πιο πρόσφατους κώδικες δικτύου.

Η ουσιαστική συνεισφορά της εργασίας, ωστόσο, εντοπίζεται στον τρόπο αντιμετώπισης των ασύμμετρων σφαλμάτων, καθώς παρουσιάστηκαν εναλλακτικές μορφές υποστήριξης του δικτύου για τις συγκεκριμένες συνθήκες. Το συγκεκριμένο θέμα βρίσκεται ακόμα υπό διερεύνηση, γεγονός που αναδεικνύει τη σπουδαιότητα της παραπάνω μελέτης.

Τέλος, στα πλαίσια ορθής λειτουργίας των ελέγχων, μελετήθηκαν διαφορετικά συστήματα συγχρονισμού και εντοπίστηκε διάταξη (DSOGI-PLL) ικανή να εντοπίζει τη συχνότητα του δικτύου τόσο σε συμμετρικές όσο και σε ασύμμετρες καταστάσεις, αλλά και σε συνθήκες αρμονικής παραμόρφωσης.

7.3 Θέματα για περαιτέρω διερεύνηση

Ένα σημαντικό θέμα που προκύπτει από τη διερεύνηση που πραγματοποιήθηκε στην παρούσα διπλωματική εργασία έχει να κάνει με τους υφιστάμενους κώδικες δικτύου και την έλλειψη συγκεκριμένων τεχνικών απαιτήσεων για υποστήριξη σε ασύμμετρα σφάλματα του δικτύου. Δεδομένου ότι τα συγκεκριμένα σφάλματα επισυμβαίνουν πιο συχνά από τα συμμετρικά, θα πρέπει να οριστούν νέοι κανονισμοί οι οποίοι θα καθορίζουν με ακρίβεια τον προσδιορισμό των ρευμάτων αναφοράς. Πιο συγκεκριμένα θα πρέπει να αποσαφηνιστεί αν κρίνεται δόκιμη η έγχυση άεργων ρευμάτων αρνητικής ακολουθίας επιπλέον των αντίστοιχων θετικής ακολουθίας, προκειμένου πέρα από την ανύψωση της τάσης θετικής ακολουθίας να υπάρχει συνεισφορά και στη μείωση του δείκτη ασυμμετρίας. Αν ναι, θα πρέπει να καθοριστεί το ποσοστό συμμετοχής κάθε συμμετρικής συνιστώσας ρεύματος, ανάλογα με τον τύπο του σφάλματος.

Σε περίπτωση που μία τέτοια λειτουργία θεωρηθεί απαραίτητη, η στρατηγική DDSRF-CC για μείωση της τάσης αρνητικής ακολουθίας χρήζει περισσότερης μελέτης, ώστε να τελειοποιηθεί σύμφωνα με τους νέους κώδικες και να μειωθεί η πολυπλοκότητά της, μιας και λειτουργεί ήδη προς την κατεύθυνση που αναλύθηκε προηγουμένως. Επίσης, αναλόγως με τις απαιτήσεις των νέων κωδίκων για τα ασύμμετρα σφάλματα, ενδεχομένως να μπορούσε να εφαρμοστεί και η μέθοδος IPCC, αν το πρόβλημα της μικρής ασυμμετρίας που εισάγεται λυθεί ή στην πράξη κριθεί αμελητέο, αφού κατά τα άλλα η απόκρισή της κρίνεται ικανοποιητική.

Τέλος, το σύστημα που μοντελοποιήθηκε στην παρούσα εργασία μπορεί να επεκταθεί, ώστε να περιλαμβάνει και το υπόλοιπο σύστημα πριν από το DC link μαζί με ένα ρεαλιστικό και αποδοτικό σύστημα ελέγχου της ισχύος εισόδου από τα Φ/Β, ενώ κρίνεται απαραίτητο να ενσωματωθούν και οι κατάλληλοι έλεγχοι για την αντιμετώπιση των αργών μεταβολών της τάσης και για ρύθμιση της συχνότητας του δικτύου, οι οποίοι συμπληρωματικά απαιτούνται από τους κώδικες.

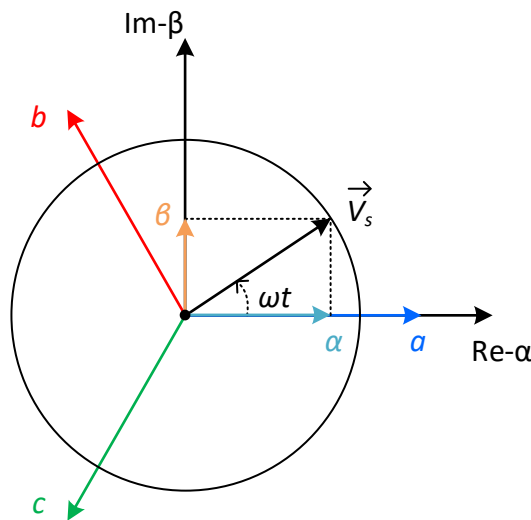
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Π.1 Μετασχηματισμοί Clarke και Park

Για την πραγματοποίηση των ελέγχων απαιτείται η εφαρμογή ορισμένων μετασχηματισμών οι οποίοι μετατρέπουν τα τριφασικά συστήματα των τάσεων και των ρευμάτων σε μορφή κατάλληλη για τις ανάγκες του συστήματος. Προς αυτήν την κατεύθυνση στη συγκεκριμένη ενότητα παρουσιάζονται οι μετασχηματισμοί στο στατό (Clarke) και το σύγχρονα στρεφόμενο (Park) πλαίσιο αναφοράς [55], [56], οι οποίοι θα αναλυθούν στη συνέχεια.

Π.1.1 Μετασχηματισμός στο στατό πλαίσιο αναφοράς $\alpha\beta$ (Clarke)

Με την εφαρμογή του συγκεκριμένου μετασχηματισμού επιτυγχάνεται η αναπαράσταση ενός οποιουδήποτε τριφασικού συστήματος με ένα στρεφόμενο διάνυσμα στο χώρο των δύο διαστάσεων (χωρικό διάνυσμα). Για να συμβεί αυτό θεωρούμε ότι το πλαίσιο αναφοράς μας είναι δύο κάθετοι άξονες α και β στο μιγαδικό πλαίσιο, όπου ο α ταυτίζεται με τη φάση a του συστήματος όπως φαίνεται στο σχήμα Π.1-1. Τα διανύσματα των υπολοίπων δύο συνιστωσών τοποθετούνται στο χώρο με διαφορά γωνίας $\pm 120^\circ$, θεωρώντας συμμετρικό σύστημα. Για τις ανάγκες του μετασχηματισμού οι τρεις συνιστώσες του τριφασικού συστήματος θεωρούνται ακίνητες στο χώρο, ενώ μεταβάλλεται μόνο το πλάτος τους.



Σχήμα Π.1-1: Τοποθέτηση στατού πλαισίου αναφοράς $\alpha\beta$ στο μιγαδικό επίπεδο.

Οι συνιστώσες $\alpha\beta$ του επιθυμητού στρεφόμενου διανύσματος προκύπτουν ουσιαστικά στιγμιαία από την προβολή της κάθε συνιστώσας a , b και c πάνω στους άξονες α και β , σύμφωνα με τον επόμενο τύπο:

$$\vec{V}_s = V_\alpha + jV_\beta = \frac{2}{3} * (V_a + V_b e^{j2\pi/3} + V_c e^{-j2\pi/3}) \quad (\text{Π.1})$$

Οπότε προκύπτει:

$$V_\alpha = V_a \quad (\text{Π.2})$$

$$V_\beta = 1/\sqrt{3}(V_b - V_c) \quad \text{ή} \quad V_\beta = 1/\sqrt{3}(V_b + V_a)$$

Και αντίστοιχα σε πολική μορφή:

$$\vec{V}_s = |V_s| \angle \varphi \quad (\text{Π.3})$$

Όπου:

$$|V_s| = \sqrt{V_\alpha^2 + V_\beta^2} \quad \text{και} \quad \varphi = \arctan\left(\frac{V_\beta}{V_\alpha}\right)$$

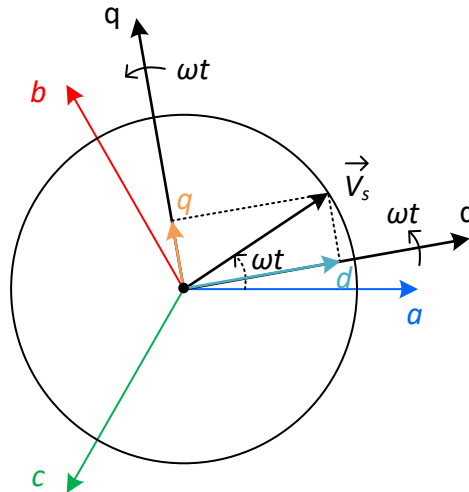
Το διάνυσμα που προκύπτει στρέφεται με τη συχνότητα των συνιστωσών του τριφασικού συστήματος. Με τις παραπάνω σχέσεις επιτυγχάνεται ουσιαστικά ο μετασχηματισμός ενός συμμετρικού τριφασικού συστήματος σε ένα χρονομεταβλητό διφασικό σύστημα, όπου οι δύο συνιστώσες θα έχουν ίδιο πλάτος με τις τριφασικές συνιστώσες και διαφορά φάσης μεταξύ τους 90° . Ο συγκεκριμένος μετασχηματισμός, καθώς και ο αντίστροφός του ($\alpha\beta$ σε abc πλαίσιο) παρουσιάζονται στη συνέχεια σε μορφή πινάκων, όταν $f_a + f_b + f_c = 0$:

$$\begin{bmatrix} f_\alpha \\ f_\beta \end{bmatrix} = \frac{2}{3} * \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} f_a \\ f_b \\ f_c \end{bmatrix} \quad (\text{Π.4})$$

$$\begin{bmatrix} f_a \\ f_b \\ f_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} f_\alpha \\ f_\beta \end{bmatrix}$$

Π.1.2 Μετασχηματισμός στο σύγχρονα στρεφόμενο πλαίσιο αναφοράς dq (Park)

Με το μετασχηματισμό Park επιτυγχάνεται η μετατροπή ενός τριφασικού ή διφασικού χρονομεταβλητού συστήματος (abc και $\alpha\beta$ πλαίσια αναφοράς αντίστοιχα) σε ένα διφασικό σύστημα σταθερών συνιστωσών. Οι συγκεκριμένες συνιστώσες προκύπτουν από τις προβολές του στρεφόμενου διανύσματος που αναφέρθηκε στην προηγούμενη ενότητα πάνω σε ένα πλαίσιο αναφοράς το οποίο στρέφεται με την ίδια συχνότητα και αποτελείται από δύο κάθετους άξονες d και q , όπως φαίνεται στο σχήμα Π.1-2.



Σχήμα Π.1-2: Τοποθέτηση στρεφόμενου πλαισίου αναφοράς dq στο μιγαδικό επίπεδο.

Στην ουσία με την εφαρμογή του συγκεκριμένου μετασχηματισμού πετυχαίνουμε την αναπαράσταση ημιτονοειδών σημάτων με σταθερές ποσότητες, όποτε καθίσταται πιο εύκολος ο έλεγχός τους με τη χρήση PI ελεγκτών. Αν θεωρήσουμε τριφασικό συμμετρικό σύστημα ($f_a + f_b + f_c = 0$), στη συνέχεια δίνονται οι σχέσεις μετασχηματισμού από το abc πλαίσιο αναφοράς στο dq και αντίστροφα.

$$\begin{bmatrix} f_d \\ f_q \end{bmatrix} = \frac{2}{3} * \begin{bmatrix} \cos\omega t & \cos(\omega t - 120^\circ) & \cos(\omega t - 240^\circ) \\ -\sin\omega t & -\sin(\omega t - 120^\circ) & -\sin(\omega t - 240^\circ) \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} f_a \\ f_b \\ f_c \end{bmatrix} \quad (\text{Π.5})$$

$$\begin{bmatrix} f_a \\ f_b \\ f_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\omega t & -\sin\omega t \\ \cos(\omega t - 120^\circ) & -\sin(\omega t - 120^\circ) \\ \cos(\omega t - 240^\circ) & -\sin(\omega t - 240^\circ) \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} f_d \\ f_q \end{bmatrix}$$

Όπου το ω αντιστοιχεί στην κυκλική συχνότητα του τριφασικού συστήματος. Αντίστοιχα για το μετασχηματισμό από το $\alpha\beta$ πλαίσιο αναφοράς στο dq και αντίστροφα, δίνονται οι επόμενοι τύποι:

$$\begin{bmatrix} f_d \\ f_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\omega t & \sin\omega t \\ -\sin\omega t & \cos\omega t \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} f_\alpha \\ f_\beta \end{bmatrix} \quad (\text{Π.6})$$

$$\begin{bmatrix} f_\alpha \\ f_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\omega t & -\sin\omega t \\ \sin\omega t & \cos\omega t \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} f_d \\ f_q \end{bmatrix}$$

Π.2 Παράμετροι μοντελοποιημένου συστήματος

Στο συγκεκριμένο παράρτημα παρουσιάζονται συγκεντρωτικά όλες οι τιμές των παραμέτρων που χρησιμοποιήθηκαν κατά τη μοντελοποίηση της εξεταζόμενης τοπολογίας δικτύου και των στρατηγικών ελέγχου στα πλαίσια της προσομοίωσης.

Πίνακας Π-1: Χαρακτηριστικά αντιστροφέα και φίλτρου εξόδου.

Ονομαστική ισχύς αντιστροφέα, P_n	100 kW
Πυκνωτής εισόδου, C_{dc}	20 mF
Διακοπτική συχνότητα, f_{sw}	2.5 kHz
Θερμικά όρια, $I_{max,th}$	256.2 A
Αυτεπαγωγή φίλτρου, L_f	0.5 mH
Χωρητικότητα φίλτρου, C_f	0.18 mF
Αντίσταση απόσβεσης φίλτρου, R_d	0.4 Ω

Πίνακας Π-2: Χαρακτηριστικά τοπολογίας δικτύου.

Ονομαστική τάση δικτύου, V_n	20 kV
Ισχύς βραχυκύκλωσης δικτύου, S_k	1 MVA
Συνδεσμολογία Μ/Σ	Γειωμένος αστέρας - τρίγωνο
Ονομαστική ισχύς Μ/Σ, S_{trans}	400 kVA
Ονομαστικές πολικές τάσεις Μ/Σ	0.4/20 kV
Ωμική αντίσταση Μ/Σ, R_{trans}	3.83% pu
Επαγωγική αντίδραση Μ/Σ, X_{trans}	1.15% pu
Αντίσταση γραμμής μεταφοράς, R_l	0.264 Ω /km
Αυτεπαγωγή γραμμής μεταφοράς, X_l	0.071 Ω /km

Πίνακας Π-3: Παράμετροι συστήματος συγχρονισμού DSOGI-PLL.

Σταθερά φίλτρων δευτέρας τάξεως SOGI-QSG, k	1.4
Αναλογικό κέρδος PI ελεγκτή θετικά στρεφόμενου πλαισίου, $K_{p,pll}^+$	0.4
Ολοκληρωτικό κέρδος PI ελεγκτή θετικά στρεφόμενου πλαισίου, $K_{i,pll}^+$	0.7
Αναλογικό κέρδος PI ελεγκτή αρνητικά στρεφόμενου πλαισίου (DDSRF-CC), $K_{p,pll}^-$	10
Ολοκληρωτικό κέρδος PI ελεγκτή αρνητικά στρεφόμενου πλαισίου (DDSRF-CC), $K_{i,pll}^-$	0.1

Πίνακας Π-4: Παράμετροι στρατηγικών ελέγχου PSCC και IPCC.

	PSCC	IPCC
Συχνότητα δειγματοληψίας ρευμάτων, $f_{control}$	200 kHz	
Αναλογικό κέρδος PI ελεγκτή DC τάσης, $K_{p,dc}$	5000	7
Ολοκληρωτικό κέρδος PI ελεγκτή DC τάσης, $K_{i,dc}$	10	0.1
Αναλογικό κέρδος PR ελεγκτή ρευμάτων εξόδου, K_p	3	
Ολοκληρωτικό κέρδος PR ελεγκτή ρευμάτων εξόδου, K_r	1	
Αναλογικό κέρδος ελεγκτή ρευμάτων πυκνωτών, K_c	100	

Πίνακας Π-5: Παράμετροι στρατηγικής ελέγχου DDSRF-CC.

Συχνότητα δειγματοληψίας ρευμάτων, $f_{control}$	200kHz
Αναλογικό κέρδος PI ελεγκτή DC τάσης, $K_{p,dc}$	5000
Ολοκληρωτικό κέρδος PI ελεγκτή DC τάσης, $K_{i,dc}$	10
Αναλογικό κέρδος PI ελεγκτή ρευμάτων εξόδου θετικής ακολουθίας, K_p^+	3
Ολοκληρωτικό κέρδος PI ελεγκτή ρευμάτων εξόδου θετικής ακολουθίας, K_i^+	1
Αναλογικό κέρδος ελεγκτή ρευμάτων πυκνωτών θετικής ακολουθίας, K_c^+	100
Αναλογικό κέρδος PI ελεγκτή ρευμάτων εξόδου αρνητικής ακολουθίας, K_p^-	0.1
Ολοκληρωτικό κέρδος PI ελεγκτή ρευμάτων εξόδου αρνητικής ακολουθίας, K_i^-	1
Αναλογικό κέρδος ελεγκτή ρευμάτων πυκνωτών αρνητικής ακολουθίας, K_c^-	1

Πίνακας Π-6: Παράμετροι ελεγκτή ισχύος εισόδου από τα Φ/B.

Συχνότητα πραγματοποίησης ελέγχου, f_{dc}	20 kHz
Αναλογικό κέρδος PI ελεγκτή, $K_{p,pv}$	7
Ολοκληρωτικό κέρδος PI ελεγκτή, $K_{i,pv}$	10

Βιβλιογραφία

- [1] M. Tsili and S. Papathanassiou, "A review of grid code technical requirements for wind farms," *IET Renew. Power Gener.*, vol. 3, no. 3, p. 308, 2009.
- [2] Entso-E, "ENTSO-E Network Code for Requirements for Grid Connection Applicable to all Generators," no. June, p. 81, 2012.
- [3] Bdew, "Generating Plants Connected to the Medium-Voltage Network," no. June, 2008.
- [4] V. D. N. V. E.ON Netz GmbH, "TransmissionCode 2007. Network and System Rules of the German Transmission System Operators," *August*, no. August, 2007.
- [5] Annex of O.P. 12.2, "Restricted to the technical requirements of wind power and photovoltage facilities (draft)," *Red Electrica*, October 2008. Online available: <http://www.ree.es>.
- [6] M. Altin, Ö. Göksu, R. Teodorescu, P. Rodriguez, B. B. Jensen, and L. Helle, "Overview of recent grid codes for wind power integration," *Proc. Int. Conf. Optim. Electr. Electron. Equipment, OPTIM*, pp. 1152–1160, 2010.
- [7] Αναστάσης Π. Τσουμάνης, "Ανάλυση και υλοποίηση συστήματος ελέγχου αντιστροφέα φωτοβολταϊκών συστημάτων," *Διπλωματική Εργασία σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών Ε.Μ.Π.*
- [8] H. R. Karshenas and H. Saghafi, "Investigation of LCL Filters Connected Converters," *Technology*, vol. 00, pp. 1–6, 2006.
- [9] M. Liserre, F. Blaabjerg, and S. Hansen, "Design and Control of an LCL -Filter-Based Three-Phase Active Rectifier," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 41, no. 5, pp. 1281–1291, 2005.
- [10] Σωτήριος Ι. Νάνου, "Ανάπτυξη μεταβατικών μοντέλων φωτοβολταϊκών σταθμών," *Μεταπτυχιακή Εργασία Διατμηματικού Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών Ε.Μ.Π. "Παραγωγή και Διαχείριση Ενέργειας"*.
- [11] B. Axelrod, Y. Berkovich, and a. Ioinovici, "Performance Improvement of LCL -Filter-Based," *Proc. 2003 Int. Symp. Circuits Syst. 2003. ISCAS '03.*, vol. 3, no. 5, pp. 1320–1330, 2003.
- [12] R. Automation and A. Bradley, "A Novel Control to Actively Damp Resonance in Input LG Filter of a Three Phase Voltage Source Converter," *Control*, pp. 545–551, 1996.
- [13] Στέφανος Ν. Μανιάς, *Ηλεκτρονικά Ισχύος*, Εκδόσεις Συμείων, Αθήνα 2014.
- [14] N. Mohan, T. M. Undeland, and W. P. Robbins, *Power Electronics: Converters, Applications and Design*. 2003.
- [15] "Symmetrical Components" can be found in the following website: https://en.wikipedia.org/wiki/Symmetrical_components

- [16] A. Camacho, M. Castilla, J. Miret, J. C. Vasquez, and E. Alarcon-Gallo, "Flexible voltage support control for three-phase distributed generation inverters under grid fault," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 60, no. 4, pp. 1429–1441, 2013.
- [17] A. Camacho, M. Castilla, J. Miret, R. Guzman, and A. Borrell, "Reactive power control for distributed generation power plants to comply with voltage limits during grid faults," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 29, no. 11, pp. 6224–6234, 2014.
- [18] A. Luna, J. Rocabert, I. Candela, P. Rodriguez, R. Teodorescu, and F. Blaabjerg, "Advanced structures for grid synchronization of power converters in distributed generation applications," *2012 IEEE Energy Convers. Congr. Expo. ECCE 2012*, pp. 2769–2776, 2012.
- [19] R. J. Ferreira, R. E. Araujo, and J. a. P. Lopes, "A comparative analysis and implementation of various PLL techniques applied to single-phase grids," *Proc. 2011 3rd Int. Youth Conf. Energ.*, pp. 1–8, 2011.
- [20] M. Karimi-Ghartemani and M. R. Iravani, "A method for synchronization of power electronic converters in polluted and variable-frequency environments," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 19, no. 3, pp. 1263–1270, 2004.
- [21] M. Mirhosseini, J. Pou, V. G. Agelidis, E. Robles, and S. Ceballos, "A three-phase frequency-adaptive phase-locked loop for independent single-phase operation," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 29, no. 12, pp. 6255–6259, 2014.
- [22] P. Loop, E. Robles, S. Ceballos, J. Pou, and L. Mart, "Variable-Frequency Grid-Sequence Detector Based on a Quasi-Ideal Low-Pass Filter Stage and a," vol. 25, no. 10, pp. 2552–2563, 2010.
- [23] L. Hadjidemetriou, E. Kyriakides, and F. Blaabjerg, "Synchronization of grid-connected renewable energy sources under highly distorted voltages and unbalanced grid faults," *IECON Proc. (Industrial Electron. Conf.)*, pp. 1887–1892, 2013.
- [24] P. Rodriguez, P. Arizmendiarieta, and J. R. Hermoso, "Multiple Second Order Generalized Integrators for Harmonic Synchronization of Power Converters," no. 1, pp. 2239–2246, 2009.
- [25] G. E. Kampitsis, A. P. Tsoumanis, K. C. Gallos, and S. A. Papathanassiou, "Experimental Investigation of the Response of Different PLL Algorithms," vol. 856, pp. 291–296, 2016.
- [26] P. Rodríguez, R. Teodorescu, I. Candela, a. V. Timbus, M. Liserre, and F. Blaabjerg, "New positive-sequence voltage detector for grid synchronization of power converters under faulty grid conditions," *PESC Rec. - IEEE Annu. Power Electron. Spec. Conf.*, 2006.
- [27] P. Rodriguez, J. Pou, J. Bergas, I. Candela, R. Burgos, and D. Boroyevic, "Double Synchronous Reference Frame PLL for Power Converters Control," *IEEE 36th Conf. Power Electron. Spec. 2005.*, vol. 22, no. 2, pp. 1415–1421, 2007.
- [28] M. Castilla, J. Miret, A. Camacho, J. Matas, and L. G. De Vicuña, "Voltage support control strategies for static synchronous compensators under unbalanced voltage sags," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 61, no. 2, pp. 808–820, 2014.

- [29] J. Miret, A. Camacho, M. Castilla, L. G. De Vicuna, and J. Matas, "Control scheme with voltage support capability for distributed generation inverters under voltage sags," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 28, no. 11, pp. 5252–5262, 2013.
- [30] X. Guo, X. Zhang, B. Wang, W. Wu, and J. M. Guerrero, "Asymmetrical grid fault ride-through strategy of three-phase grid-connected inverter considering network impedance impact in low-voltage grid," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 29, no. 3, pp. 1064–1068, 2014.
- [31] A. Camacho Santiago, M. Castilla Fernandez, J. Miret Tomas, J. Matas Alcala, R. Guzman Sola, Ó. de Sousa Pérez, P. Marti Colom, and J. L. Garcia de Vicuña Muñoz de la Nava, "Control strategies based on effective power factor for distributed generation power plants during unbalanced grid voltage," *Annu. Conf. IEEE Ind. Electron. Soc.*, pp. 7134–7139, 2013.
- [32] F. Wang, J. L. Duarte, and M. a M. Hendrix, "Pliant active and reactive power control for grid-interactive converters under unbalanced voltage dips," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 26, no. 5, pp. 1511–1521, 2011.
- [33] H. Lin, Y. Qiu, Z. Dai, and H. Yin, "A novel method for voltage support control under unbalanced grid faults and grid harmonic voltage disturbances," *IET Power Electron.*, vol. 8, no. 8, pp. 1377–1385, 2015.
- [34] A. Uphues, K. Nötzold, R. Wegener, S. Soter, and R. Griessel, "Support of grid voltages with asymmetrical reactive currents in case of grid errors," *Proc. IEEE Int. Conf. Ind. Technol.*, pp. 1781–1786, 2013.
- [35] S. Alepuz, S. Busquets-Monge, J. Bordonau, J. a. Martinez-Velasco, C. a. Silva, J. Pontt, and J. Rodriguez, "Control strategies based on symmetrical components for grid-connected converters under voltage dips," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 56, no. 6, pp. 2162–2173, 2009.
- [36] A. Camacho, M. Castilla, J. Miret, A. Borrell, and L. G. De Vicu??a, "Active and reactive power strategies with peak current limitation for distributed generation inverters during unbalanced grid faults," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 62, no. 3, pp. 1515–1525, 2015.
- [37] M. Mirhosseini, J. Pou, B. Karanayil, and V. G. Agelidis, "Positive- and Negative-Sequence Control of Grid- Connected Photovoltaic Systems under Unbalanced Voltage Conditions," no. October, pp. 1–6, 2013.
- [38] E. Twining and D. G. Holmes, "Grid current regulation of a three-phase voltage source inverter with an LCL input filter," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 18, no. 3, pp. 888–895, 2003.
- [39] A. Xu, Z. Xu, S. Xie, and M. Zou, "Study on dual-loop grid current control scheme for grid-connected inverter with an LCL-filter," *2009 4th IEEE Conf. Ind. Electron. Appl. ICIEA 2009*, pp. 3200–3203, 2009.
- [40] G. Zeng, T. W. Rasmussen, and a S. Model, "Design of Current-Controller with PR-regulator for LCL-Filter Based Grid-Connected Converter," pp. 490–494, 2010.

- [41] B. M. Song, Y. Kim, H. Cha, and H. Lee, "Current harmonic minimization of a grid-connected photovoltaic 500kW three-phase inverter using PR control," *IEEE Energy Convers. Congr. Expo. Energy Convers. Innov. a Clean Energy Futur. ECCE 2011, Proc.*, vol. 1, pp. 1063–1068, 2011.
- [42] D. N. Zmood and D. G. Holmes, "Stationary frame current regulation of PWM inverters with zero steady-state error," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 18, no. 3, pp. 814–822, 2003.
- [43] X. H. Chai, C. J. Zhang, B. Ben, and X. H. Wang, "Notch filter constraints analysis and SPLL design under unbalanced voltage conditions," *Proc. - 2014 Int. Power Electron. Appl. Conf. Expo. IEEE PEAC 2014*, pp. 664–669, 2014.
- [44] G. Liu, X. Cao, W. Wang, T. Ma, W. Yang, and Y. Chen, "Adaptive control strategy to enhance penetration of PV power generations in weak grid," *Proc. - 2014 Int. Power Electron. Appl. Conf. Expo. IEEE PEAC 2014*, pp. 1217–1221, 2015.
- [45] S. Grunau and F. W. Fuchs, "Effect of Wind-Energy Power Injection into Weak Grids," *EWEA 2012 Conf. Proc.*, p. 2012, 2012.
- [46] M. Mirhosseini, J. Pou, and V. G. Agelidis, "Individual Phase Current Control With the Capability to Avoid Overvoltage in Grid-Connected Photovoltaic Power Plants Under Unbalanced Voltage Sags," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 8993, no. c, pp. 5346–5351, 2015.
- [47] M. Ciobotaru, R. Teodorescu, and F. Blaabjerg, "A New Single-Phase PLL Structure Based on Second Order Generalized Integrator," *Power Electron. Spec. Conf. 2006. PESC '06. 37th IEEE*, pp. 1–6, 2006.
- [48] M. Reyes, P. Rodriguez, S. Vasquez, a. Luna, R. Teodorescu, and J. M. Carrasco, "Enhanced Decoupled Double Synchronous Reference Frame Current Controller for Unbalanced Grid-Voltage Conditions," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 27, no. 9, September 2012.
- [49] I. J. Gabe and H. Pinheiro, "Wind Turbines Reactive Current Control During Unbalanced Voltage Dips," no. type C, 2013.
- [50] C. T. Lee, C. W. Hsu, and P. T. Cheng, "A low-voltage ride-through technique for grid-connected converters of distributed energy resources," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 47, no. 4, pp. 1821–1832, 2011.
- [51] Hong-Seok Song and Kwanghee Nam, "Dual Current Control Scheme for PWM Converter," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 46, no. 5, pp. 953–959, 1999.
- [52] F. a. Magueed, a. Sannino, and J. Svensson, "Transient performance of voltage source converter under unbalanced voltage dips," *2004 IEEE 35th Annu. Power Electron. Spec. Conf. (IEEE Cat. No.04CH37551)*, vol. 2, pp. 0–5, 2004.
- [53] Z. Ivanovic, M. Vekic, S. Grabic, E. Adzic, and V. Katic, "Wide bandwidth power flow control algorithm of the grid connected VSI under unbalanced grid voltages," *2008 13th Int. Power Electron. Motion Control Conf. EPE-PEMC 2008*, no. 2, pp. 1957–1962, 2008.

- [54] H.-C. Chen, C.-T. Lee, P.-T. Cheng, R. Teodorescu, and F. Blaabjerg, "A Low-Voltage Ride-Through Technique for Grid-connected Converters with Reduced Power Transistors Stress," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. PP, no. 99, pp. 1–1, 2016.
- [55] "Alpha-beta transformation" can be found in the following website:
https://en.wikipedia.org/wiki/Alpha%E2%80%93beta_transformation
- [56] "Direct-quadrature-zero transformation" can be found in the following website:
https://en.wikipedia.org/wiki/Direct%E2%80%93quadrature%E2%80%93zero_transformation