



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

Υλοποίηση και Αξιολόγηση Μεθόδων
Ανίχνευσης Νησιδοποίησης

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

της

ΜΑΡΙΑΣ Γ. ΠΑΠΑΜΙΧΑΛΗ

Επιβλέπων Καθηγητής: Ν. Χατζηαργυρίου
Καθηγητής Ε.Μ.Π

ΑΘΗΝΑ, ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ 2014

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

Υλοποίηση και Αξιολόγηση Μεθόδων Ανίχνευσης Νησιδοποίησης

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

της

ΜΑΡΙΑΣ Γ. ΠΑΠΑΜΙΧΑΛΗ

Επιβλέπων Καθηγητής: Ν. Χατζηαργυρίου
Καθηγητής Ε.Μ.Π

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή στις 22/9/2014.

.....
Ν. Χατζηαργυρίου Στ. Παπαθανασίου Π. Γεωργιλιάκης
Καθηγητής Ε.Μ.Π Αν. Καθηγητής Ε.Μ.Π Επ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ, ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ 2014

.....

Μαρία Γ. Παπαμιχάλη

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

Copyright © Μαρία Γ. Παπαμιχάλη, 2014

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

.....

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσης 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 τη συγγραφέα.

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

Ευχαριστίες

Η εκπόνηση αυτής της διπλωματικής εργασίας έγινε υπό την επίβλεψη του καθηγητή του Ε.Μ.Π. Νικόλαου Χατζηαργυρίου, τον οποίο ευχαριστώ για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε, δίνοντάς μου την ευκαιρία να επεκτείνω τις γνώσεις μου στο χώρο των Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας και να ανακαλύψω την επιθυμία μου να εξειδικευτώ στον τομέα αυτό.

Ευχαριστώ, επίσης, τον ερευνητή Νάσσο Βασιλάκη για τις συμβουλές του και την καθοδήγησή του καθ' όλη τη διάρκεια της προσπάθειας αυτής.

Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους συμφοιτητές μου, φίλους και συνοδοιπόρους κατά τη διάρκεια της κοινής μας φοίτησης, για την υπέροχη συνεργασία μας, τις όμορφες στιγμές μας εντός και εκτός του χώρου του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, για τη στήριξή τους και την εμπιστοσύνη τους στις ικανότητές μου και στις προοπτικές μου. Νιώθω τυχερή που τους γνώρισα και το λιγότερο που μπορώ να κάνω είναι να ευχαριστήσω έναν-έναν ονομαστικά (και αλφαβητικά) τους: Αιμίλιο Τσουβελεκάκη, Αντώνη Αναστασόπουλο, Γιάννη Αθανάσογλου, Γιάννη Παρόλα, Γιώργο Φουστούκο, Ελένη Τσακαράκη, Ηλία Αλευρά, Νίκο Ανδρουλάκη, Νίκο Σταματόπουλο, Παναγιώτη Μαρινάκη, Σάκη Καραγιάννη, Χάρη Κοντούλη, Φαίη Καζάκου και Φώτη Ηλιόπουλο.

Τέλος, ευχαριστώ από τα βάθη της καρδιάς μου τον πατέρα μου Γιώργο, τη μητέρα μου Άννα και τον αδελφό μου, Στράτο, για την αγάπη τους και τη διαρκή εμπύχωσή τους, καθώς και για την ευγενική και διακριτική τους παρουσία, η οποία μου προσφέρει σιγουριά και ασφάλεια.

Περίληψη

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι το φαινόμενο της νησιδοποίησης, καθώς και η υλοποίηση και η αξιολόγηση μεθόδων που το ανιχνεύουν. Η εργασία χωρίζεται σε τέσσερα μέρη.

Στο πρώτο μέρος δίνεται το θεωρητικό υπόβαθρο του φαινομένου της νησιδοποίησης, των αιτιών και των συνεπειών του, καθώς και μία συνοπτική περιγραφή διαφόρων μεθόδων που το ανιχνεύουν. Οι μέθοδοι ανίχνευσης νησιδοποίησης παρουσιάζονται αναλόγως με την κατηγορία στην οποία ανήκουν. Αυτό καθορίζεται με βάση την αρχή που υλοποιείται ο κάθε αλγόριθμος, ώστε να ανιχνεύσει τη νησιδοποίηση. Συγκεκριμένα, κατηγοριοποιούνται σε δύο μεγάλες ομάδες: τις απομακρυσμένες μεθόδους, οι οποίες βασίζονται στην επικοινωνία μεταξύ μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής (ΔΠ) και δικτύου, και τις τοπικές, οι οποίες χρησιμοποιούν πληροφορίες στη μεριά του αντιστροφέα για τη λήψη απόφασης. Ειδικότερα, οι τοπικές μέθοδοι διακρίνονται στις παθητικές και τις ενεργητικές μεθόδους. Οι παθητικές μέθοδοι βασίζονται στη λήψη μετρήσεων των παραμέτρων στο Σημείο Κοινής Σύνδεσης (ΣΚΣ), ενώ οι ενεργητικές σε εκούσια παραμόρφωση των παραμέτρων αυτών. Στη συνέχεια, γίνεται αναφορά στα πρότυπα που περιγράφουν τις απαιτήσεις που πρέπει να πληροί ένας εξοπλισμός για να διασυνδεθεί στο δίκτυο, καθώς και τρόποι δοκιμής του. Τέλος, παρουσιάζεται το υπό μελέτη σύστημα (Φωτοβολταϊκός Αντιστροφέας-Φορτίο-Δίκτυο) και αναλύεται ο τρόπος ελέγχου του.

Στο δεύτερο μέρος παρουσιάζονται εκτενέστερα επιλεκτικά κάποιες μέθοδοι νησιδοποίησης, τόσο παθητικές, όσο και ενεργητικές. Μοντελοποιούνται στο προγραμματιστικό περιβάλλον MATLAB/SIMULINK και εξετάζεται η συμπεριφορά τους σε συνθήκες νησιδοποίησης (αποσύνδεση δικτύου). Επίσης, γίνεται συγκριτική αξιολόγηση των παθητικών μεθόδων με βάση το κριτήριο της Μη Ανιχνεύσιμης Ζώνης και των ενεργητικών μεθόδων με βάση το κριτήριο υποβάθμισης της ποιότητας ισχύος εξόδου του αντιστροφέα.

Στο τρίτο μέρος παρουσιάζεται η πειραματική διαδικασία που έλαβε χώρα στο Εργαστήριο Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας, στο Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, με σκοπό τη

δοκιμή τριών αντιστροφών με βάση το πρότυπο IEC 62116 για διασύνδεση στο δίκτυο. Παρουσιάζεται η διαδικασία του πειράματος, καθώς και τα αποτελέσματά του.

Τέλος, στο τέταρτο μέρος παρατίθενται τα αποτελέσματα της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Γίνεται αναφορά τόσο στην αξιολόγηση των μεθόδων που υλοποιήθηκαν, όσο και στα πειράματα που διεξήχθησαν, ολοκληρώνοντας με μελλοντικές προτάσεις έρευνας για το συγκεκριμένο αντικείμενο.

Λέξεις Κλειδιά: Μη σκόπιμη νησιδοποίηση, Παθητικές Μέθοδοι, Ενεργητικές Μέθοδοι, Μη Ανιχνεύσιμη Ζώνη

Abstract

The aim of this diploma thesis is to study the islanding phenomenon, as well as the implementation and the evaluation of a number of anti-islanding methods. This thesis is divided in four parts.

In the first part, theoretical background on the issue of the islanding phenomenon, its causes and its consequences is given. Moreover, a general description of several anti-islanding methods is provided. These methods are presented based on the category they belong to. This is indicated by the concept every anti-islanding method is based on. To be more specific, they are categorised into two main groups: the remote methods, which are based on the communication between the distributed generation unit (DG unit) and the utility and the local methods, which use the inverter-side information for the decision-making. Particularly, local methods are categorised into passive and active methods. Passive methods are based on the measurement of the parameters in the Point of Common Coupling (PCC), whereas active methods intentionally distort these parameters. The next step is the presentation of the standards describing the requirements of grid-connected equipment, as well as the testing procedures that the equipment must be undergone. Finally, the control algorithm employed to the examined system is analysed.

In the second part, several anti-islanding methods, both passive and active ones, are described in a more elaborate way. These methods are modelled in the computational environment MATLAB/SIMULINK and their performance during an islanding event (grid-disconnection) is studied. Moreover, with regards to the passive methods, a comparative evaluation based on the concept of Non Detection Zone is conducted. Active methods are evaluated based on their effect on the power quality of the inverter.

The third part is focused on the experiment, which took place in the Laboratory of Energy Power Systems, located in the campus of the National Technical University of Athens. Its purpose was to conduct the unintentional islanding test on three commercial solar inverters. The testing was based on the standard IEC 62116 and the issue was to

test whether the algorithms implemented in these three grid-connected inverters were able to detect an islanding event. Both the experimental process and its results are presented.

Finally, in the fourth part the results of this thesis are summarised. The evaluation of both passive and active methods implemented is presented, as well as the results of the conducted experiments . This thesis concludes proposing future work on the subject of anti-islanding methods.

Keywords: Unintentional islanding, Passive Methods, Active Methods, Non-Detection Zone

Περιεχόμενα

Περίληψη	v
1 Αρχές Νησιδοποίησης	3
1.1 Νησιδοποίηση	3
1.1.1 Οι δύο απόψεις για τη νησιδοποίηση	3
1.1.2 Αιτίες εμφάνισης της μη σκόπιμης νησιδοποίησης	5
1.1.3 Αρνητικές επιπτώσεις της μη σκόπιμης νησιδοποίησης	5
1.2 Μέθοδοι Ανίχνευσης Νησιδοποίησης	6
1.2.1 Απομακρυσμένες τεχνικές ανίχνευσης νησιδοποίησης	6
1.2.2 Τοπικές τεχνικές ανίχνευσης νησιδοποίησης	8
1.2.2.1 Παθητικές μέθοδοι	8
1.2.2.2 Ενεργητικές μέθοδοι	12
1.3 Τρόποι Αξιολόγησης των Μεθόδων Ανίχνευσης Νησιδοποίησης	15
1.3.1 Μη Ανιχνεύσιμη Ζώνη, NDZ	16
1.3.1.1 Ορισμός της Μη Ανιχνεύσιμης Ζώνης	16
1.3.1.2 Κυκλωματική διάταξη	16
1.3.1.3 Ο χώρος αναντιστοιχίας ισχύων ΔP ως προς ΔQ	18
1.3.1.4 Ο χώρος παραμέτρων φορτίου	20
1.3.2 Υποβάθμιση ποιότητας ισχύος	21
1.3.3 Ανίχνευση νησιδοποίησης στην περίπτωση πολλαπλών αντιστροφών	21
1.3.4 Ποσοστό εσφαλμένης ανίχνευσης	22
1.3.5 Κόστος υλοποίησης μεθόδων	22
1.3.6 Συγκριτικοί πίνακες μεθόδων	22
1.4 Απαιτήσεις δικτύου για φωτοβολταϊκά συστήματα	24
1.4.1 Το πρότυπο IEEE 1547.1	26
1.4.1.1 Σκοπός	26
1.4.1.2 Διαδικασία	26
1.4.1.3 Κριτήρια	29
1.4.2 Το πρότυπο IEC 62116	29
1.4.3 Το πρότυπο VDE 0126 – 1 – 1	30

1.4.4	Συγκεντρωτικός πίνακας για τα πρότυπα δοκιμής για ανίχνευση νησιδοποίησης	31
1.4.5	Απαιτήσεις προς πλήρωση για την Ελλάδα	31
2	Ανάλυση Ελέγχου Φωτοβολταϊκού Αντιστροφέα	33
2.1	Φωτοβολταϊκοί Αντιστροφείς	34
2.2	Βασικό Θεωρητικό Υπόβαθρο για Έλεγχο Αντιστροφέα	35
2.3	Έλεγχος ρεύματος αντιστροφέα πηγής τάσης στο πλαίσιο dq	38
2.3.1	Μοντελοποίηση διακοπών	39
2.3.2	Ορισμός του Χωρικού Φασιδέτη	40
2.3.2.1	Αναπαράσταση Χωρικού Φασιδέτη σε πλαίσιο $\alpha\beta$	41
2.3.2.2	Αναπαράσταση Χωρικού Φασιδέτη σε πλαίσιο dq	42
2.3.3	Εξαγωγή Μεταβλητών Κατάστασης	43
2.3.4	PQ έλεγχος	45
II	Προσομοιώσεις	51
3	Κυκλωματική Διάταξη Προσομοιώσεων	53
3.1	Απόκριση ΦΒ Αντιστροφέα	53
3.2	Ρυθμίσεις Παραμέτρων Μοντέλου Κυκλωματικής Διάταξης Προσομοιώσεων	56
4	Παθητικές Μέθοδοι	59
4.1	Ανίχνευση Νησιδοποίησης μέσω ηλεκτρονόμων OUV και OUF	60
4.1.1	Αποτελέσματα Προσομοιώσεων της μεθόδου OUV/OUF	61
4.1.2	Μη Ανιχνεύσιμη Ζώνη μεθόδου OUV/OUF	63
4.2	Ανίχνευση Νησιδοποίησης μέσω THD_V	65
4.2.1	Συμπεριφορά THD_V στην κατάσταση νησιδοποίησης	65
4.2.2	Προβληματισμοί και Αποτελέσματα μεθόδου THD_V	66
4.3	Ανίχνευση Νησιδοποίησης μέσω Voltage Phase Jump	68
4.3.1	Αποτελέσματα Προσομοιώσεων της μεθόδου Phase Jump	69
4.3.2	Μη Ανιχνεύσιμη Ζώνη μεθόδου Phase Jump	71
4.4	Ανίχνευση Νησιδοποίησης μέσω Vector Shift	71
4.4.1	Αποτελέσματα Προσομοιώσεων της μεθόδου VS	73
4.4.2	Μη Ανιχνεύσιμη Ζώνη μεθόδου VS	74
4.5	Ανίχνευση Νησιδοποίησης μέσω ηλεκτρονόμου RoCoF	75
4.5.1	Αποτελέσματα Προσομοιώσεων της μεθόδου RoCoF	76
4.5.2	Μη Ανιχνεύσιμη Ζώνη μεθόδου RoCoF	77
4.6	Συγκριτικά συμπεράσματα των παθητικών μεθόδων	78
5	Ενεργητικές μέθοδοι	81

5.1	Ανίχνευση Νησιδοποίησης AFD	82
5.1.1	Αποτελέσματα Προσομοιώσεων της μεθόδου AFD	83
5.1.2	Υποβάθμιση ποιότητας ισχύος εξόδου αντιστροφέα λόγω της μεθόδου AFD	85
5.2	Ανίχνευση Νησιδοποίησης SFS	85
5.2.1	Αποτελέσματα Προσομοιώσεων της μεθόδου SFS	87
5.2.2	Συγκριτικά αποτελέσματα μεταξύ AFD και SFS	88
5.2.3	Υποβάθμιση ποιότητας ισχύος εξόδου αντιστροφέα λόγω της μεθόδου SFS	89
5.3	Ανίχνευση Νησιδοποίησης SVS	90
5.3.1	Αποτελέσματα Προσομοιώσεων της μεθόδου SVS	90
5.3.2	Υποβάθμιση ποιότητας ισχύος εξόδου αντιστροφέα λόγω της μεθόδου SVS	91
5.4	Ανίχνευση Νησιδοποίησης βασισμένη στο PLL	92
5.4.1	Αποτελέσματα Προσομοιώσεων της μεθόδου PLL	94
5.4.2	Υποβάθμιση ποιότητας ισχύος εξόδου αντιστροφέα λόγω της μεθόδου SVS	95
5.5	Συγκριτικά συμπεράσματα των ενεργητικών μεθόδων	96
III	Πείραμα	97
6	Πειραματική Δοκιμή Αντιστροφέων	99
6.1	Δοκιμή Αντιστροφέα SMA TL 3000	101
6.2	Δοκιμή Αντιστροφέα Danfoss DLX 2.0	102
6.3	Δοκιμή Αντιστροφέα Sun Profi	104
IV	Συμπεράσματα	107
7	Συμπεράσματα και μελλοντικές προεκτάσεις	109
	Βιβλιογραφία	113

ΜΕΡΟΣ Ι

ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ

Κεφάλαιο 1

Αρχές Νησιδοποίησης

1.1 Νησιδοποίηση

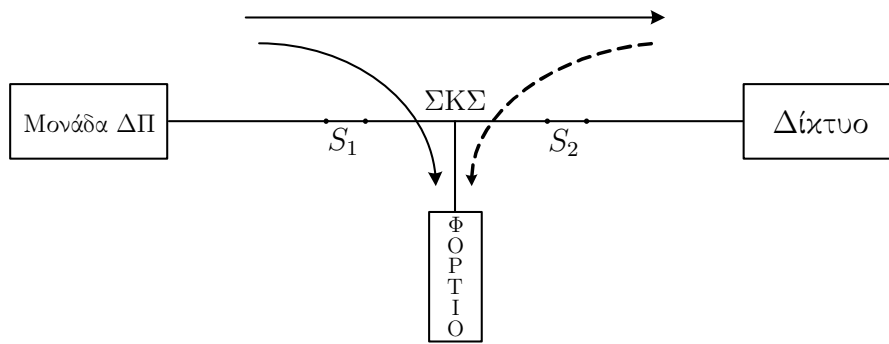
Νησιδοποίηση ορίζεται ως η κατάσταση στην οποία τουλάχιστον μία μονάδα διεσπαρμένης πηγής (ΔΠ) παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας τροφοδοτεί τοπικά φορτία χωρίς να είναι συνδεδεμένη—δηλαδή, όντας απομονωμένη από—οποιοδήποτε μεγαλύτερο ηλεκτρικό σύστημα, όπως είναι το Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΣΗΕ) [13]. Στο Σχήμα 1.1¹ απεικονίζεται πώς μπορεί μία μονάδα ΔΠ να έλθει σε κατάσταση νησιδοποίησης.

1.1.1 Οι δύο απόψεις για τη νησιδοποίηση

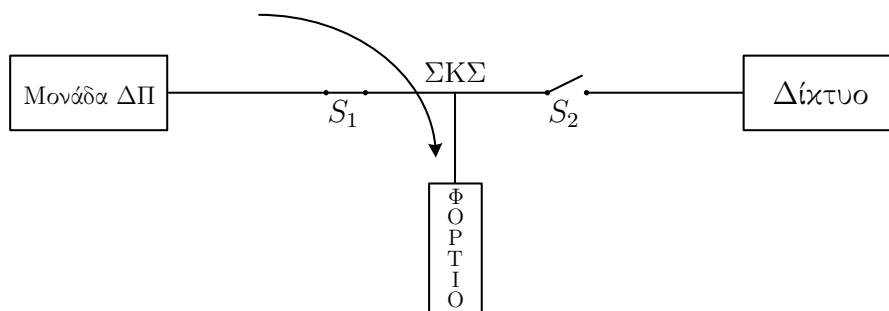
Η νησιδοποίηση μπορεί να είναι είτε σκόπιμη, είτε μη σκόπιμη. Με βάση αυτό, υπάρχουν δύο απόψεις σχετικά με την αξιολόγηση της επίδρασης της νησιδοποίησης ως κατάσταση στο ΣΗΕ.

Από τη μία πλευρά, η σκόπιμη νησιδοποίηση συνδέεται με την ιδέα του μικροδικτύου (microgrid) και έτσι, δίνεται η δυνατότητα συνέχισης της λειτουργίας ενός τμήματος της ηλεκτρικής νησίδας. Πρέπει να σημειωθεί ότι η δυνατότητα σκόπιμης νησιδοποίησης προϋποθέτει την ύπαρξη επαρκούς ελέγχου τάσης και συχνότητας μέσα στην ηλεκτρική νησίδα προκειμένου να διατηρείται ευσταθής η λειτουργία της. Αυτός ο έλεγχος μπορεί να περιλαμβάνει έλεγχο της παραγωγής (μέσω ρυθμιστών τάσης και συχνότητας), έλεγχο φορτίων (π.χ. απόρριψη μη κρίσιμων φορτίων), κατάλληλο έλεγχο πιθανών αποθηκευτικών μέσων κ.α. Τα πλεονεκτήματα αυτής της οπτικής γωνίας για τις μονάδες ΔΠ είναι ότι η σκόπιμη νησιδοποίηση μπορεί να βελτιώσει τη γενικότερη αξιοπιστία και την ασφάλεια της παροχής

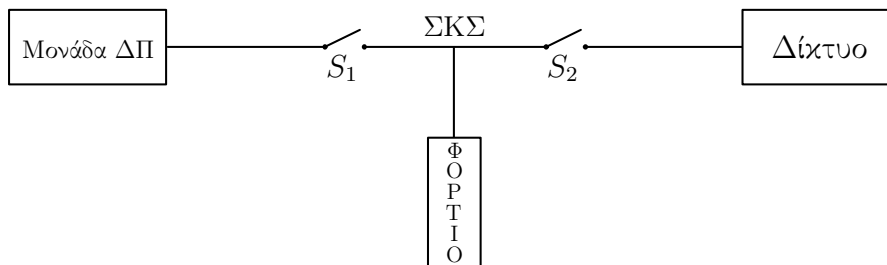
¹ΣΚΣ: Σημείο Κοινής Σύνδεσης ορίζεται για κάθε εγκατάσταση χρήστη το εγγύτερο προς το όριο δικτύου/χρήστη σημείο του δικτύου, το οποίο βρίσκεται ανάντη του ορίου χρήστη/δικτύου, και από το οποίο διέρχεται ηλεκτρική ενέργεια και προς εγκαταστάσεις άλλων χρηστών [21].



(α') Κανονική λειτουργία μονάδας ΔΠ διασυνδεδεμένης με δίκτυο.



(β') Δημιουργία ηλεκτρικής νησίδας.



(γ') Αποσύνδεση της μονάδας ΔΠ, λόγω ανίχνευσης της νησιδοποίησης.

Σχήμα 1.1: Νησιδοποίηση συστήματος

ισχύος, καθώς επίσης και ότι λόγω των βελτιωμένων δεικτών παροχής ισχύος, αυξάνονται τα έσοδα.

Παρά το γεγονός ότι η παραπάνω οπτική γωνία περιλαμβάνει αρκετά πλεονεκτήματα, προς το παρόν σχεδόν όλα τα ΣΗΕ απαιτούν οι μονάδες ΔΠ να αποσυνδέονται όταν έρθουν σε κατάσταση νησιδοποίησης.

Από την άλλη πλευρά, η μη σκόπιμη νησιδοποίηση έχει συνήθως μικρή διάρκεια ζωής, λόγω του γεγονότος ότι υπάρχει μεγάλη επίδραση στο ισοζύγιο ισχύος παραγωγής—κατανάλωσης. Η ανισορροπία αυτή προκαλεί μεγάλες αλλαγές στο μέτρο και τη συχνότητα της τάσης με αποτέλεσμα να ξεπερνώνται τα προκαθορισμένα επιτρεπόμενα όρια. Έτσι,

διακόπτεται η λειτουργία των συμμετεχόντων μονάδων ΔΠ. Όμως, υπάρχει η περίπτωση σχετικής ισορροπίας του ενεργειακού ισοζυγίου με αποτέλεσμα η αλλαγή του μέτρου των προαναφερθέντων μεταβλητών της τάσης να είναι τόσο μικρή, ώστε να μην ξεπεραστούν τα επιτρεπόμενα όρια και συνεπώς η ηλεκτρική νησίδα να παραμείνει διασυνδεδεμένη για μεγάλο χρονικό διάστημα.

Πολλοί παράγοντες μπορούν να προκαλέσουν την εμφάνιση της μη σκόπιμης νησιδοποίησης και είναι μη επιθυμητή γιατί συνοδεύεται από μια σειρά αρνητικών επιπτώσεων.

1.1.2 Αιτίες εμφάνισης της μη σκόπιμης νησιδοποίησης

Η κατάσταση της μη σκόπιμης νησιδοποίησης μπορεί να είναι αποτέλεσμα των παρακάτω συμβάντων [5]:

- (i) Ανίχνευση σφάλματος από τον προστατευτικό εξοπλισμό του δικτύου, με αποτέλεσμα την απομόνωση του τμήματος του δικτύου το οποίο περιέχει το σφάλμα, χωρίς όμως να ανιχνεύεται από τις μονάδες ΔΠ του τμήματος αυτού.
- (ii) Κατά λάθος απενεργοποίηση της παροχής του δικτύου λόγω προβληματικού εξοπλισμού.
- (iii) Πρόκληση σφάλματος από τον ανθρώπινο παράγοντα.
- (iv) Πρόκληση σφάλματος λόγω κάποιου φυσικού φαινομένου.

1.1.3 Αρνητικές επιπτώσεις της μη σκόπιμης νησιδοποίησης

Στην κατάσταση της μη σκόπιμης νησιδοποίησης εμφανίζονται μία σειρά από αρνητικές επιπτώσεις που σχετίζονται με την ασφάλεια, την αξιοπιστία του δικτύου και την ποιότητα της παρεχόμενης ισχύος. Οι επιπτώσεις αυτές παρουσιάζονται παρακάτω:

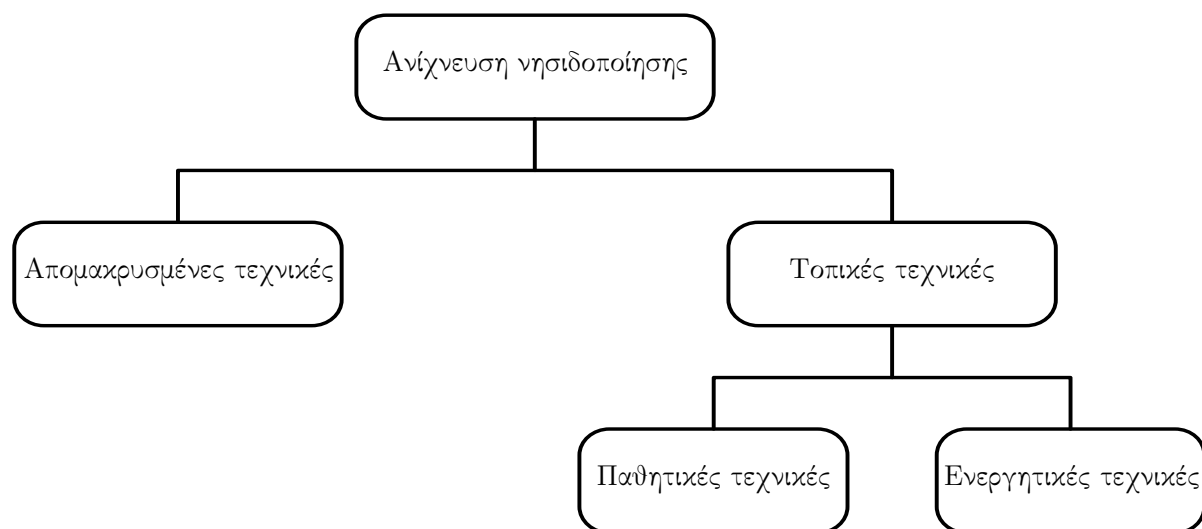
- (i) Έπαρξη θανάσιμου κινδύνου για το προσωπικό που εργάζεται σε κάποιο τμήμα του δικτύου το οποίο είναι σε κατάσταση νησιδοποίησης. Το προσωπικό διατρέχει το κίνδυνο ηλεκτροπληξίας, διότι εργάζεται με την προϋπόθεση ότι το συγκεκριμένο τμήμα έχει αποσυνδεθεί από το κεντρικό δίκτυο (άρα, θεωρείται ανενεργό), αλλά στην πραγματικότητα συνεχίζει να τροφοδοτείται από τις μονάδες ΔΠ της νησίδας.
- (ii) Έπαρξη κινδύνου διαταραχών της συχνότητας και της τάσης και διακύμανση αυτών εκτός των προκαθορισμένων ορίων, καθώς τα μεγέθη αυτά δεν επιβάλλονται από το δίκτυο. Αυτό μπορεί να έχει σαν αποτέλεσμα την καταστροφική βλάβη ορισμένων συσκευών που εξακολουθούν να λειτουργούν στο νησιδοποιημένο τμήμα του δικτύου.

- (iii) Πολλοί πάροχοι χρησιμοποιούν πρακτικές στιγμιαίας επανασύνδεσης. Αν η μονάδα ΔΠ επανασυνδεθεί με το σύστημα διανομής, μπορεί η επανασύνδεση αυτή να γίνει εκτός φάσης, με αποτέλεσμα να προκληθεί μεγάλη αύξηση στις τιμές μηχανικής ροπής και ρευμάτων, γεγονός το οποίο μπορεί να προκαλέσει βλάβες στις γεννήτριες και στις κινητήριες μηχανές.
- (iv) Σε περίπτωση σφάλματος εντός της ηλεκτρικής νησίδας, οι μονάδες ΔΠ δεν έχουν τη δυνατότητα να παρέχουν υψηλά ρεύματα βραχυκύκλωσης, διότι τα υφιστάμενα μέσα προστασίας είναι επιλεγμένα με βάση τα μεγάλα ρεύματα βραχυκύκλωσης που προέρχονται από το δίκτυο. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα τα μέσα προστασίας να μη διεγερθούν από τα χαμηλά ρεύματα των μονάδων ΔΠ και συνεπώς να διατηρηθούν τα σφάλματα εντός της ηλεκτρικής νησίδας.

Για λόγους όπως οι παραπάνω υπάρχει απαίτηση η κατάσταση της μη σκόπιμης νησιδοποίησης να ανιχνεύεται και να διακόπτεται έγκαιρα.

1.2 Μέθοδοι Ανίχνευσης Νησιδοποίησης

Η βασική φιλοσοφία της ανίχνευσης της κατάστασης νησιδοποίησης είναι αφενός η παρακολούθηση των παραμέτρων εξόδου της μονάδας ΔΠ και των παραμέτρων του συστήματος και αφετέρου η λήψη απόφασης για το αν η μονάδα ΔΠ βρίσκεται σε κατάσταση νησιδοποίησης ή όχι, με βάση την αλλαγή των παραμέτρων αυτών. Οι τεχνικές ανίχνευσης νησιδοποίησης κατηγοριοποιούνται σε απομακρυσμένες και τοπικές και οι τελευταίες χωρίζονται περαιτέρω σε παθητικές και ενεργητικές, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 1.2 [16].



Σχήμα 1.2: Κατηγοριοποίηση μεθόδων ανίχνευσης νησιδοποίησης

1.2.1 Απομακρυσμένες τεχνικές ανίχνευσης νησιδοποίησης

Οι απομακρυσμένες τεχνικές ανίχνευσης νησιδοποίησης βασίζονται στην επικοινωνία μεταξύ των παρόχων και των μονάδων ΔΠ. Μερικά παραδείγματα μεθόδων αυτής της κατηγορίας παρουσιάζονται παρακάτω:

(i) *Σύστημα σηματοδότησης γραμμών ισχύος (Power Line Carrier Communication—PLCC)*

Αυτή η μέθοδος χρησιμοποιεί τις γραμμές ισχύος σαν φορέα σημάτων για τη μετάδοση της πληροφορίας για το αν η μονάδα ΔΠ είναι ή όχι σε κατάσταση νησιδοποίησης.

Η συσκευή περιλαμβάνει μία γεννήτρια σημάτων, η οποία βρίσκεται στον υποσταθμό (25 kV και άνω). Αυτή η γεννήτρια σημάτων είναι συζευγμένη με το δίκτυο στο οποίο συνεχώς μεταδίδει ένα σήμα. Εξαιτίας του γεγονότος ότι το σύστημα ισχύος έχει φύση βαθυπερατού φίλτρου, τα σήματα πρέπει να μεταδίδονται κοντά ή χαμηλότερα από τη θεμελιώδη συνιστώσα, έτσι ώστε να μην παρεμβάλλονται σε άλλες τεχνολογίες όπως είναι το σύστημα ανάγνωσης αυτόματης μέτρησης (automatic meter reading). Επίσης, κάθε μονάδα ΔΠ είναι εξοπλισμένη με έναν ανιχνευτή σήματος για να λαμβάνει το εκπεμπόμενο σήμα.

Υπο κανονικές συνθήκες, το σήμα λαμβάνεται από τη μονάδα ΔΠ και το σύστημα παραμένει συνδεδεμένο. Όμως, αν συμβεί νησιδοποίηση, το εκπεμπόμενο σήμα αποκόπτεται λόγω του ανοίγματος διακόπτη του υποσταθμού και το σήμα δεν μπορεί να ληφθεί από τη μονάδα ΔΠ. Αυτό υποδεικνύει την παρουσία κατάστασης νησιδοποίησης.

(ii) *Σύστημα μεταφοράς του σήματος απόζευξης (Supervisory Control and Data Acquisition—SCADA)*

Η βασική ιδέα του συστήματος μεταφοράς του σήματος απόζευξης είναι η παρακολούθηση της κατάστασης των ασφαλειοαποζευκτών και των διακοπών αυτόματης επαναφοράς που θα μπορούσαν να θέσουν το σύστημα διανομής σε κατάσταση νησιδοποίησης. Για το σκοπό αυτό μπορούν να χρησιμοποιηθούν τα Συστήματα Ελέγχου-Εποπτείας και Μεταφοράς Δεδομένων Λειτουργίας από απόσταση (Supervisory Control and Data Acquisition—SCADA).

Όταν ανιχνεύεται μία αποσύνδεση στον υποσταθμό, το σύστημα μεταφοράς απόζευξης προσδιορίζει ποιά περιοχή έχει νησιδοποιηθεί και αποστέλλει κατάλληλο σήμα στις μονάδες ΔΠ, είτε για να παραμείνουν σε λειτουργία, ή για να τη διακόψουν.

1.2.2 Τοπικές τεχνικές ανίχνευσης νησιδοποίησης

Οι τοπικές τεχνικές ανίχνευσης νησιδοποίησης είναι εγκατεστημένες, παραδοσιακά, στη μεριά της μονάδας ΔΠ, ώστε να χρησιμοποιηθούν οι πληροφορίες που συγκεντρώνονται

αυτόνομα για να ληφθεί απόφαση αποσύνδεσης. Οι εν λόγω τεχνικές χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες:

- ◇ Οι **παθητικές μέθοδοι** λειτουργούν μετρώντας τις παραμέτρους του συστήματος, όπως οι διακυμάνσεις στην τάση, τη συχνότητα, την αρμονική παραμόρφωση, κ.α. Αυτές οι παράμετροι μεταβάλλονται πολύ σε κατάσταση νησιδοποίησης. Η διαφοροποίηση μεταξύ της κατάστασης νησιδοποίησης ή μη βασίζεται στην υπέρβαση τιμών κατωφλίου που τίθενται για αυτές τις παραμέτρους. Πρέπει να δίνεται ιδιαίτερη προσοχή στην επιλογή των τιμών κατωφλίου έτσι ώστε να γίνεται διάκριση μεταξύ της κατάστασης νησιδοποίησης και άλλων μεταβολών του συστήματος.
- ◇ Οι **ενεργητικές μέθοδοι** επιδρούν άμεσα στη λειτουργία του συστήματος ισχύος εισάγοντας κάποια διαταραχή. Η ιδέα στην οποία βασίζεται κάποια ενεργητική μέθοδος είναι ότι εισάγεται κάποια μικρή διαταραχή η οποία θα οδηγήσει σε σημαντική αλλαγή στις παραμέτρους του συστήματος όταν η μονάδα ΔΠ βρίσκεται σε κατάσταση νησιδοποίησης, ενώ αντίθετα η αλλαγή αυτή θα είναι αμελητέα όταν η μονάδα ΔΠ είναι συνδεδεμένη με το δίκτυο.
- ◇ Οι **υβριδικές μέθοδοι**, οι οποίες αναπτύσσονται ως συνδυασμός τόσο των ενεργητικών, όσο και των παθητικών μεθόδων. Οι υβριδικές μέθοδοι περιλαμβάνουν δύο στάδια ανίχνευσης νησιδοποίησης, έτσι ώστε να ξεπεραστούν τα προβλήματα που έχουν οι ενεργητικές και οι παθητικές μέθοδοι, με σκοπό την επίτευξη υψηλής απόδοσης. Κατά τη διαδικασία ανίχνευσης, η παθητική μέθοδος χρησιμοποιείται σαν ένα πρώτο στάδιο προστασίας, και στη συνέχεια, όταν υπάρχει υποψία νησιδοποίησης, αναλαμβάνει σε δεύτερο στάδιο η ενεργητική μέθοδος.

1.2.2.1 Παθητικές μέθοδοι

Οι παθητικές μέθοδοι χωρίζονται σε δύο υποκατηγορίες αναλόγως με το είδος της μονάδας ΔΠ. Συγκεκριμένα, υπάρχουν οι:

- ◇ *μονάδες ΔΠ συνδεδεμένες μέσω αντιστροφών πηγής τάσης (Voltage Source Inverter, VSI) με ελεγχόμενη παραγωγή ενεργού-αέργου ισχύος*
Οι μονάδες αυτές χρησιμοποιούν έλεγχο για την παραγωγή ενεργού-αέργου ισχύος με βάση αλγορίθμους που λαμβάνουν υπόψη παράγοντες όπως ο συντελεστής ισχύος, η μέγιστη πιθανή παραγωγή ισχύος κ.α. Οι παράγοντες αυτοί θεωρούνται σταθεροί κατά τη διάρκεια εντός της οποίας πρέπει να ανιχνευθεί η κατάσταση της νησιδοποίησης. Συνεπώς, για την ανάλυση των μεθόδων ανίχνευσης νησιδοποίησης αυτής της κατηγορίας θεωρείται ότι οι μονάδες ΔΠ λειτουργούν έχοντας σταθερές αναφορές ενεργού και αέργου ισχύος.

◇ *μονάδες ΔΠ με Σύγχρονες Γεννήτριες (ΣΓ)*

Οι μονάδες αυτές σε κανονική λειτουργία παράγουν σταθερή ενεργό ισχύ—δηλαδή, δεν υπάρχει έλεγχος της ενεργού ισχύος μέσω της συχνότητας. Σε αυτή την περίπτωση, για το χρονικό διάστημα που διαρκεί η κατάσταση της νησιδοποίησης, θεωρείται ότι τα συστήματα ελέγχου των ΣΓ δεν προλαβαίνουν να αντιδράσουν και άρα η μηχανική ισχύς στον άξονα θεωρείται σταθερή.

Παρακάτω παρουσιάζονται μερικές παθητικές μέθοδοι και των δύο παραπάνω κατηγοριών, καθώς και οι βασικές ιδέες πάνω στις οποίες έχουν υλοποιηθεί:

Παθητικές μέθοδοι για μονάδες ΔΠ με αντιστροφέα

(i) *Ανίχνευση μέσω ηλεκτρονόμων Υπέρ/Υπό-Τάσης και Υπερ/Υπο-Συχνότητας (OUV και OUF)*

Υπάρχει η απαίτηση όλοι οι αντιστροφείς που είναι διασυνδεδεμένοι στο δίκτυο να διαθέτουν ηλεκτρονόμους Υπέρ/Υπό-Τάση (Over/Under Voltage, OUV) και Υπερ/Υπο-Συχνότητας (Over/Under Frequency, OUF). Οι ηλεκτρονόμοι αυτοί οδηγούν στην αποσύνδεση του αντιστροφέα όταν οι τιμές της τάσης και της συχνότητας στο ΣΚΣ τίθενται εκτός των προβλεπόμενων επιτρεπόμενων ορίων όταν η μονάδα ΔΠ βρεθεί σε κατάσταση νησιδοποίησης. Τα όρια αυτά για την Ελλάδα αναφέρονται στην παράγραφο 1.4.5.

(ii) *Ανίχνευση Άλματος Φάσης της τάσης (Voltage Phase Jump)*

Η μέθοδος Άλματος Φάσης της τάσης παρακολουθεί τη διαφορά φάσης μεταξύ της τάσης εξόδου του αντιστροφέα και του ρεύματος εξόδου του. Υπό κανονικές συνθήκες αυτή η διαφορά φάσης είναι μηδέν. Όμως, σε κατάσταση νησιδοποίησης είναι διάφορη του μηδενός εξαιτίας της αναντιστοιχίας της αέργου ισχύος. Αυτή η μέθοδος μπορεί εύκολα να υλοποιηθεί μέσω μεθόδων συγχρονισμού με ανίχνευση μηδενισμών, όπου η φάση του ρεύματος ανανεώνεται κάθε φορά που μηδενίζεται η τάση και έτσι είναι δυνατή η ανίχνευση του άλματος φάσης.

(iii) *Ανίχνευση με βάση το αρμονικό περιεχόμενο (Harmonic Detection—HD)*

Ο αντιστροφέας της μονάδας ΔΠ, έστω και αν είναι σχεδιασμένος να λειτουργεί σαν ιδανική πηγή ρεύματος, παράγει αρμονικές λόγω του ανοιγοκλεισίματος των διακοπών—αρμονικές υψηλής τάξης—του νεκρού χρονικού διαστήματος (dead-time) και της πτώσης τάσης των ημιαγωγών—άρτιες αρμονικές—ή του κυματισμού της DC τάσης στην είσοδο του αντιστροφέα—περιττές αρμονικές. Αυτές οι αρμονικές ρεύματος πρέπει να παραμένουν χαμηλές για συμμόρφωση με τους κανονισμούς των προτύπων—π.χ. στα πρότυπα IEEE 1547 και IEC 61727 ισχύει ότι $THD_I < 5\%^2$. Όμως, αυτές οι αρμονικές παράγουν άρμονικές τάσης οι οποίες εξαρτώνται από την τιμή της σύνθετης

²Αναφορά στα πρότυπα στις απαιτήσεις για διασύνδεση στο δίκτυο γίνεται στην παράγραφο 1.4

αντίστασης του δικτύου. Συνήθως, η σύνθετη αντίσταση δικτύου είναι χαμηλή, επομένως οι αρμονικές τάσης είναι σχετικά χαμηλές και δύσκολο να ανιχνευτούν.

Σε κατάσταση νησιδοποίησης, η σύνθετη αντίσταση δικτύου αντικαθίσταται από τη σύνθετη αντίσταση του φορτίου, η οποία μπορεί να είναι πολύ μεγαλύτερη σε σχέση με αυτή του δικτύου, επομένως οι αρμονικές τάσης θα αυξηθούν σημαντικά και μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως δείκτες για ανίχνευση νησιδοποίησης.

Παρακάτω παρουσιάζονται οι διάφορες προσεγγίσεις ανίχνευσης νησιδοποίησης με βάση το αρμονικό περιεχόμενο:

(α') *Ανίχνευση με βάση την Ολική Αρμονική Παραμόρφωση (THD) τάσης ή των πιο σημαντικών αρμονικών*

Ελέγχεται αν αυτοί οι δείκτες υπερβαίνουν τις προκαθορισμένες τιμές κατωφλίου και αποφασίζεται αν το σύστημα είναι σε κατάσταση νησιδοποίησης ή όχι.

(β') *Αξιολόγηση ασυμμετρίας*

Η μέθοδος αξιολόγησης ασυμμετρίας είναι κατάλληλη για τριφασικά συστήματα. Ο δείκτης THD της τάσης μπορεί να αποτύχει να ανιχνεύσει την κατάσταση νησιδοποίησης αν το φορτίο έχει έντονα χαρακτηριστικά βαθυπερατού φίλτρου. Για λόγους αύξησης της αξιοπιστίας χρησιμοποιείται και ο δείκτης της ασυμμετρίας τάσης. Ελέγχεται αν αυτοί οι δείκτες υπερβαίνουν τις προκαθορισμένες τιμές κατωφλίου και αποφασίζεται αν το σύστημα είναι σε κατάσταση νησιδοποίησης ή όχι.

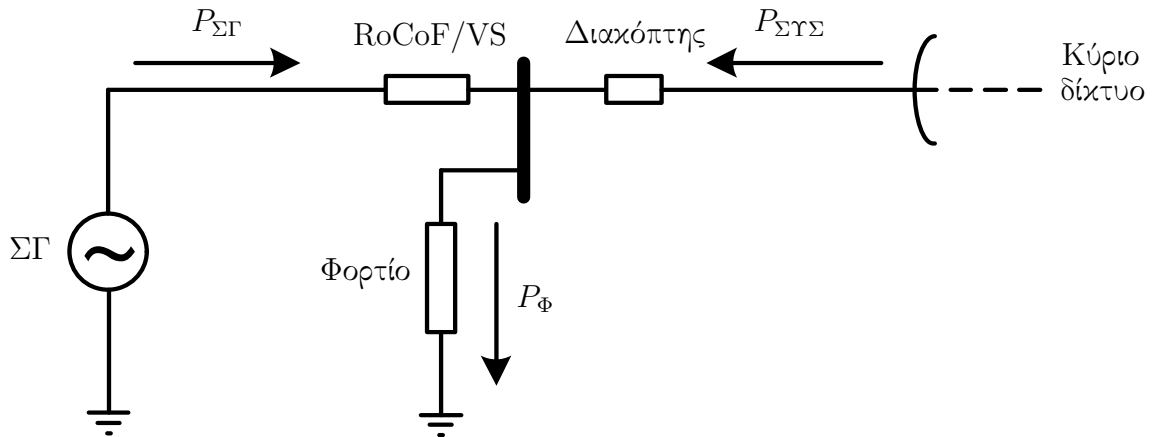
(γ') *Ανίχνευση με χρήση φίλτρου Kalman*

Η μέθοδος αυτή βασίζεται στην εκτίμηση μέσω φίλτρου Kalman των μεταβολών της 3^{ης}, 5^{ης} και 7^{ης} αρμονικής. Ο αλγόριθμος δεν υπολογίζει μόνο την απόλυτη τιμή των αρμονικών της τάσης δικτύου, αλλά επίσης και τη μεταβολή της πυκνότητας ισχύος (ενέργειας) του φάσματος.

(δ') *Ανίχνευση με ανάλυση Wavelet*

Η μέθοδος αυτή μπορεί να ανιχνεύσει την κατάσταση νησιδοποίησης με βάση τοπικές μετρήσεις της τάσης και ρεύματος στο ΣΚΣ, όπως γίνεται στις παθητικές μεθόδους. Επιπλέον, όμως, υπολογίζει τις συνιστώσες υψηλών συχνοτήτων που εισάγονται από τον αντιστροφέα, οι οποίες εξαρτώνται από τις χαρακτηριστικές του εφαρμοσμένου διαμορφωτή παλμού, του φίλτρου, και του ελεγκτή ρεύματος, όπως γίνεται στις ενεργητικές μεθόδους. Στη συνέχεια εφαρμόζεται ανάλυση Wavelet για την εντόπιση της χρονικής στιγμής που το σύστημα επήλθε σε κατάσταση νησιδοποίησης.

Στο Σχήμα 1.3 απεικονίζεται μία σύγχρονη γεννήτρια εξοπλισμένη με έναν από τους δύο διακόπτες που παρουσιάζονται στη συνέχεια, συνδεδεμένη με το δίκτυο και εγκάρσια με ένα φορτίο.

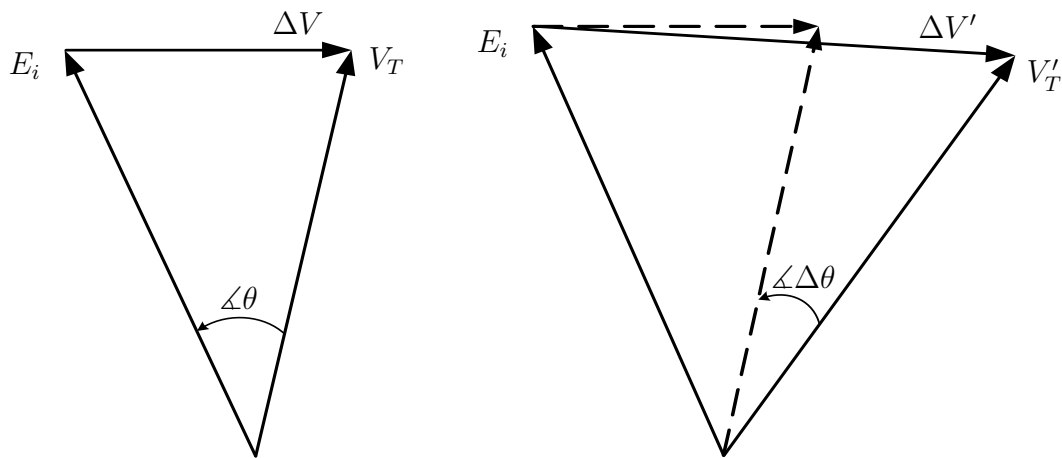


Σχήμα 1.3: Σύστημα μονάδας ΔΠ με ΣΓ η οποία έχει είτε διακόπτη RoCoF είτε διακόπτη VS

(i) Ρυθμός Μεταβολής της Συχνότητας (Rate of Change of Frequency—RoCoF)

Ο ρυθμός μεταβολής της συχνότητας, $\frac{df}{dt}$, οφείλεται στην ανισορροπία μεταξύ της μηχανικής ισχύος εισόδου και του φορτίου. Αυτή η ανισορροπία δημιουργεί μεταβατικά στο νησιδοποιημένο σύστημα και η συχνότητα του συστήματος αρχίζει και ποικίλλει δυναμικά.

(ii) Μετατόπιση Διανύσματος (Vector Shift—VS)



(α) Διανυσματικό διάγραμμα πριν τη νησιδοποίηση.

(β) Διανυσματικό διάγραμμα μετά τη νησιδοποίηση.

Σχήμα 1.4: Διανυσματικό διάγραμμα τάσεων για μέθοδο VS

Στη γεννήτρια του Σχήματος 1.3 υπάρχει μία πτώση τάσης ΔV μεταξύ της τάσης εξόδου της γεννήτριας V_T και της επαγόμενης τάσης E_I , εξαιτίας του ρεύματος της γεννήτριας $I_{\Sigma T}$, το οποίο διέρχεται από την αντίδραση της γεννήτριας X_d . Συνεπώς, υπάρχει μία διαφορά φάσης θ μεταξύ της τάσης εξόδου και της επαγόμενης τάσης. Το διανυσματικό διάγραμμα που περιγράφει τα παραπάνω απεικονίζεται στο Σχήμα 1.4(α'). Στο Σχήμα 1.3, στην περίπτωση που το σύστημα που αποτελείται από τη ΣΓ και το φορτίο νησιδοποιηθεί, η ΣΓ πλέον πρέπει να παρέχει ισχύ σε μεγαλύτερο φορτίο (ή μικρότερο) γιατί το ρεύμα του συστήματος $I_{\Sigma T\Sigma}$ έχει διακοπή. Έτσι, η ΣΓ αρχίζει και επιβραδύνει (ή επιταχύνει). Έτσι, η διαφορά φάσης μεταξύ της τάσης εξόδου της ΣΓ και της επαγόμενης τάσης της ξαφνικά αυξάνεται (ή μειώνεται), όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 1.4(β'). Η μέθοδος, λοιπόν, της Μετατόπισης Διανύσματος παρακολουθεί αυτή την αλλαγή στη διαφορά φάσης μεταξύ αυτών των διανυσμάτων και όταν αυτή υπερβεί την τιμή ενός κατωφλίου ανιχνεύεται η κατάσταση της νησιδοποίησης.

1.2.2.2 Ενεργητικές μέθοδοι

Οι ενεργητικές μέθοδοι εισάγουν μικρές διαταραχές οι οποίες έχουν σαν στόχο:

- ◇ να προκαλέσουν μεταβολές στη *συχνότητα* ικανές να ενεργοποιήσουν την προστασία OUF.

Αυτές οι μέθοδοι προκαλούν μεταβολή της συχνότητας της τάσης στο ΣΚΣ διαταράσσοντας τη συχνότητα του ρεύματος αναφοράς του αντιστροφέα, για παράδειγμα, με θετική ανάδραση. Όσο το δίκτυο είναι παρόν, είναι προφανές ότι η συχνότητα δεν μπορεί να μεταβληθεί, αλλά όταν αυτό αποσυνδέεται, η διαταραχή είναι ικανή να μεταβάλλει τη συχνότητα τόσο ώστε να ενεργοποιηθεί ο ηλεκτρονόμος Υπερ/Υπο-Συχνότητας.

- ◇ να προκαλέσουν μεταβολές στην *τάση* ικανές να ενεργοποιήσουν την προστασία OUV.

Αυτές οι μέθοδοι προκαλούν μεταβολή της τάσης στο ΣΚΣ είτε με θετική ανάδραση στο ρεύμα αναφοράς του αντιστροφέα, είτε με μεταβολή της αέργου ισχύος Q . Όσο το δίκτυο είναι παρόν, η τάση δεν μπορεί να μεταβληθεί, αλλά όταν αποσυνδεθεί, η διαταραχή είναι ικανή να μεταβάλλει την τάση τόσο ώστε να ενεργοποιηθεί ο ηλεκτρονόμος Υπέρ/Υπό-Τάσης.

- ◇ την εκτίμηση της *σύνθετης αντίστασης δικτύου*, και έτσι την έμμεση ανίχνευση της κατάστασης νησιδοποίησης.

Συγκεκριμένα, για συμμόρφωση με το πρότυπο VDE0126 – 1 – 1³, έχουν αναπτυχθεί

³Αναφορά στα πρότυπα γίνεται στην παράγραφο 1.4.

πιο πολύπλοκες μέθοδοι που στοχεύουν στην ακριβή εκτίμηση της σύνθετης αντίστασης δικτύου. Η ιδέα είναι ότι χρησιμοποιείται μία συγκεκριμένη διαταραχή για να γίνει εκτίμηση της σύνθετης αντίστασης με βάση την απόκριση του δικτύου.

- ◇ την ανίχνευση της κατάστασης νησιδοποίησης με χρήση Βρόχου Κλειδωμένης Φάσης (Phase Locked Loop—PLL).

Παρακάτω παρουσιάζονται μερικές ενεργητικές μέθοδοι, καθώς και οι βασικές αρχές λειτουργίας τους [19]:

Μέθοδοι Μεταβολής Συχνότητας

- (i) *Μέθοδος Μεταβολής της Φάσης (Sandia Frequency Shift—SFS)*

Η φασική γωνία του αντιστροφέα υπολογίζεται σαν συνάρτηση της συχνότητας. Η φασική απόκριση του αντιστροφέα σχεδιάζεται έτσι ώστε η φάση του αντιστροφέα να αυξάνεται πιο γρήγορα από την αντίστοιχη φάση του φορτίου RLC με συντελεστή ισχύος $\Sigma I=1$. Αν αποσυνδεθεί το δίκτυο και η συχνότητα στο ΣΚΣ αλλάξει, η απόκριση φάσης του αντιστροφέα αυξάνει το σφάλμα φάσης και έτσι προκαλείται αστάθεια στη συχνότητα. Αυτή η συχνότητα ενισχύει επιπρόσθετα τη διαταραχή στη συχνότητα στο ΣΚΣ και η συχνότητα τελικά οδηγείται εκτός των ορίων που ορίζονται από τον ηλεκτρονόμο Υπερ/Υπο-Συχνότητας

- (ii) *Μέθοδος απλή Μεταβολής της Συχνότητας (Active Frequency Drift—AFD)*

Η κυματομορφή του ρεύματος εξόδου του αντιστροφέα παραμορφώνεται ελάχιστα. Αυτό επιτυγχάνεται με το να προστεθεί ένα μηδενικό τμήμα στο ρεύμα αναφοράς, ούτως ώστε να μεταβληθεί προς τα άνω η συχνότητα του ρεύματος. Πιο συγκεκριμένα, η συχνότητα του ρεύματος αναφοράς του αντιστροφέα εξαναγκάζεται να είναι ελάχιστα υψηλότερη από τη συχνότητα της τάσης. Επιπλέον, το ρεύμα αναφοράς τίθεται ίσο με το μηδέν για όλο το χρονικό διάστημα μεταξύ των τομών των κυματομορφών του ρεύματος αναφοράς και της τάσης με τον άξονα του χρόνου (το ρεύμα αναφοράς τέμνει τον άξονα του χρόνου νωρίτερα από την τάση). Έτσι, υπάρχει μία συνεχής τάση της συχνότητας προς αλλαγή, γεγονός το οποίο αποτρέπεται όσο το δίκτυο είναι παρόν. Σε κατάσταση νησιδοποίησης, όμως, η συχνότητα μεταβάλλεται και τελικά ενεργοποιείται η προστασία Υπερ/Υπο-Συχνότητας.

- (iii) *Μέθοδος Μεταβολής της Αέργου Ισχύος (Reactive Power Variaton—RPV)*

Η βασική ιδέα είναι η έγχυση ενός αρμονικού σήματος παραμόρφωσης (τυπικά, χαμηλής συχνότητας) στο άεργο ρεύμα αναφοράς⁴. Αυτό το σήμα παραμόρφωσης θα επιχειρήσει να διαμορφωθεί με τη συχνότητα της τάσης, αλλά παρόντος του δικτύου δεν θα

⁴Ο ελεγχτής ρεύματος, καθώς και το ενεργό i_d και άεργο ρεύμα i_q αναφοράς, παρουσιάζονται στην Παράγραφο 2.3.4

γίνει καμία αλλαγή λόγω του στιβαρού του χαρακτήρα. Σε κατάσταση νησιδοποίησης, η τάση θα εξαρτάται γραμμικά από το ρεύμα και θα προκληθούν μεταβολές στη συχνότητα, οι οποίες τελικά θα ενεργοποιήσουν την προστασία Υπερ/Υπο-Συχνότητας.

Μέθοδος Μεταβολής της Τάσης

(i) Μέθοδος Μεταβολής της Τάσης (*Sandia Voltage Shift—SVS*)

Σε αυτή τη μέθοδο το πλάτος της τάσης χρησιμοποιείται σαν θετική ανάδραση στο ρεύμα αναφοράς του αντιστροφέα. Έτσι, αν υπάρχει μία μείωση στο πλάτος της τάσης στο ΣΚΣ (στην πράξη, συνήθως χρησιμοποιείται η RMS τιμή της τάσης), ο αντιστροφέας μειώνει το ρεύμα εξόδου και έτσι την ισχύ εξόδου. Αν το δίκτυο είναι παρόν, η επίδραση στην τάση είναι αμελητέα όταν η ισχύς μειώνεται. Όταν το δίκτυο αποσυνδέεται και υπάρχει μία μείωση στην τάση, υπάρχει μία μείωση στο πλάτος, όπως υποδεικνύεται από το νόμο του Ohm. Αυτή η συνεχής μείωση του πλάτους θα οδηγήσει στην ενεργοποίηση της προστασίας Υπερ/Υπό-Τάσης.

Εκτίμηση Σύνθετης Αντίστασης Δικτύου

(i) Μέθοδος Έγχυσης Αρμονικών (*Harmonic Injection—HI*)

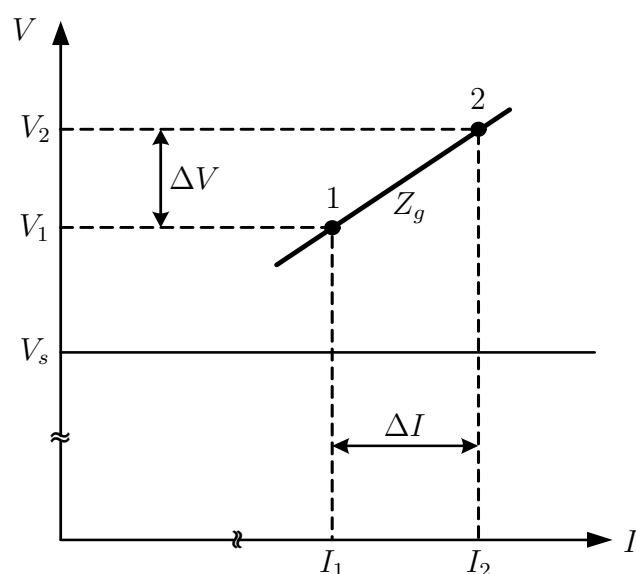
Η μέθοδος αρμονικών βασίζεται στην έγχυση μη χαρακτηριστικών αρμονικών ρεύματος και στη συνέχεια στην εξαγωγή της αντίστοιχης αρμονικής τάσης, η οποία εξαρτάται από την σύνθετη αντίσταση δικτύου σε αυτή τη συχνότητα. Αυτό προϋποθέτει ότι αυτές οι αρμονικές σε αυτές τις συχνότητες δεν είναι παρούσες στην τάση δικτύου υπό κανονικές συνθήκες, έτσι ώστε η τάση που θα ανιχνεύεται στη συχνότητα αυτή να είναι μόνο η πτώση τάσης επί της σύνθετης αντίστασης δικτύου.

(ii) Ανίχνευση μέσω Εκτίμησης της Σύνθετης Αντίστασης Δικτύου μέσω Ενεργητικής Μεταβολής της Αέργου Ισχύος (*Grid Impedance Estimation by Active Reactive Power Variation—GIE-ARPV*)

Αυτή η μέθοδος βασίζεται στο γεγονός ότι η σύνθετη αντίσταση δικτύου μπορεί να υπολογιστεί χρησιμοποιώντας δύο σταθερά σημεία λειτουργίας, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.5 και επιλύοντας με βάση το Νόμο Τάσεων Kirchoff. Αυτό συμβαίνει διότι κανονικά υπάρχουν δύο άγνωστοι στο κύκλωμα—η σύνθετη αντίσταση δικτύου και η τάση στην έξοδο του δικτύου. Ο τελευταίος άγνωστος μπορεί να διαγραφεί αν υπάρχουν διαθέσιμα δύο σύνολα μετρήσεων.

Ανίχνευση Νησιδοποίησης με μέθοδο βασισμένη στο PLL

Τέλος, αναφέρεται και αυτή η μέθοδος, η οποία δεν κατατάσσεται σε κάποια από τις παραπάνω κατηγορίες. Αυτή η μέθοδος εκμεταλλεύεται την ήδη υπάρχουσα δομή PLL—η οποία είναι υπεύθυνη για το συγχρονισμό του ρεύματος εξόδου του αντιστροφέα με την τάση του δικτύου—και βασίζεται στην επιτηδευμένη αλλοίωση της εξαγόμενης γωνίας του ρεύματος εξόδου του αντιστροφέα.



Σχήμα 1.5: Εκτίμηση σύνθετης αντίστασης δικτύου με ARPV

1.3 Τρόποι Αξιολόγησης των Μεθόδων Ανίχνευσης Νησιδοποίησης

Έχουν αναπτυχθεί πολλοί αλγόριθμοι ανίχνευσης της κατάστασης νησιδοποίησης, οι βασικότεροι εκ των οποίων παρουσιάζονται στην Παράγραφο 1.2. Είναι πολύ σημαντικό, όμως, να αναφερθεί ότι κανένας από αυτούς τους αλγόριθμους δεν είναι τέλειος. Υπάρχουν περιορισμοί, οι οποίοι αποτελούν και κριτήρια αξιολόγησης και σύγκρισης των διαφόρων μεθόδων. Αναφορικά, μερικοί από αυτούς τους περιορισμούς είναι [20]:

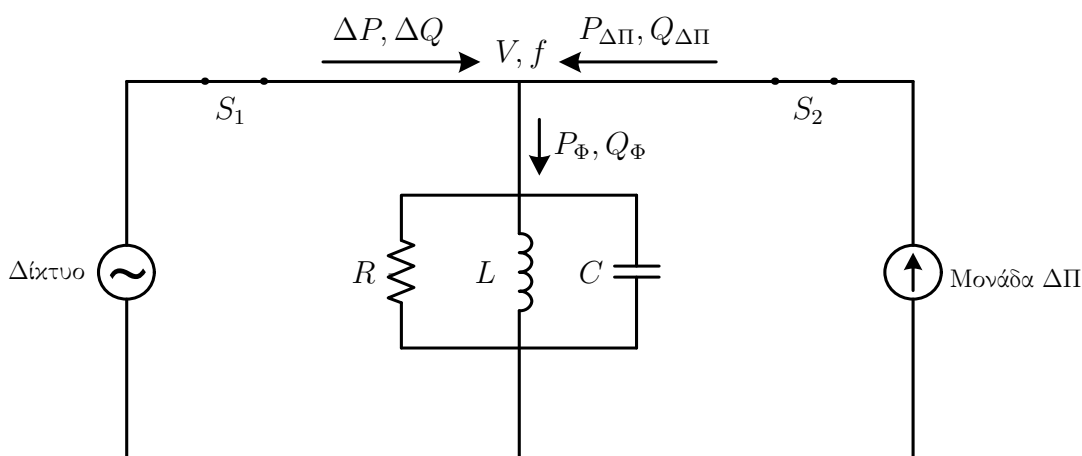
- ◇ η ύπαρξη Μη Ανιχνεύσιμης Ζώνης (Non Detection Zone—NDZ),
- ◇ η υποβάθμιση της ποιότητας ισχύος και του επιπέδου ευστάθειας του συστήματος,
- ◇ η λανθασμένη λειτουργία στην περίπτωση πολλαπλών αντιστροφών,
- ◇ η εσφαλμένη ανίχνευση κατάσταση νησιδοποίησης,
- ◇ το υψηλό κόστος υλοποίησης.

Στις επόμενες υποπαραγράφους θα αναλυθούν οι παραπάνω περιορισμοί και, επίσης, θα παρουσιαστούν συγκεντρωτικοί πίνακες σύγκρισης των μεθόδων που αναφέρθηκαν στην Παράγραφο 1.2 με βάση τη βιβλιογραφία.

1.3.1 Μη Ανιχνεύσιμη Ζώνη, NDZ

1.3.1.1 Ορισμός της Μη Ανιχνεύσιμης Ζώνης

Η Μη Ανιχνεύσιμη Ζώνη—για συντομία πλέον θα αναφέρεται ως NDZ—είναι ένας από τους πιο σημαντικούς δείκτες αξιολόγησης της απόδοσης μίας μεθόδου ανίχνευσης νησιδοποίησης. Ορίζεται ως το εύρος των τοπικών φορτίων—δηλαδή, φορτία εντός της πιθανής ηλεκτρικής νησίδας—για το οποίο οι υπό μελέτη μέθοδοι ανίχνευσης νησιδοποίησης υπό μελέτη μπορεί να αποτύχουν να ανιχνεύσουν την κατάσταση νησιδοποίησης.



Σχήμα 1.6: Σύστημα μονάδας ΔΠ διασυνδεδεμένη στο δίκτυο

1.3.1.2 Κυκλωματική διάταξη

Αρχικά, πρέπει να αναφερθεί ότι στην παρούσα διπλωματική εργασία θα χρησιμοποιηθούν μονάδες ΔΠ οι οποίες περιλαμβάνουν και αντιστροφείς. Η κυκλωματική διάταξη για τη δοκιμή των μεθόδων ανίχνευσης νησιδοποίησης φαίνεται στο Σχήμα 1.6.

Στο ΣΚΣ του δικτύου είναι συνδεδεμένος ένας αντιστροφέας ο οποίος θεωρείται ότι είναι σε λειτουργία σταθερής πηγής ρεύματος. Επίσης είναι συνδεδεμένο και ένα τοπικό δίκτυο, το οποίο αναπαρίσταται σαν ένα κύκλωμα RLC .

Η μοντελοποίηση του φορτίου γίνεται με αυτόν τον τρόπο διότι αυτό το απλό μοντέλο δουλεύει σωστά στο σενάριο της χειρότερης περίπτωσης. Γενικά, μη γραμμικά φορτία, όπως φορτία που παράγουν αρμονικές ή φορτία σταθερής ισχύος δεν παρουσιάζουν τόση δυσκολία στην ανίχνευση νησιδοποίησης [18].

Πολυ σημαντικό στοιχείο για το εκάστοτε πείραμα είναι ο συντελεστής ποιότητας Q_f , του οποίου ο ορισμός με βάση το IEEE Std. 929 – 2000 είναι:

$$Q_f = 2\pi \frac{\text{maximum energy stored}}{\text{total energy lost in a period}} \quad (1.1)$$

Συγκεκριμένα, στην περίπτωση της κυκλωματικής διάταξης του Σχήματος 1.6, ύστερα από

εκτέλεση πράξεων προκύπτει ότι

$$Q_f = R\sqrt{\frac{C}{L}} \quad (1.2)$$

Ένας άλλος τρόπος μαθηματικής αναπαράστασης του Q_f είναι ο εξής:

$$Q_f = \frac{\sqrt{Q_L Q_C}}{P} \quad (1.3)$$

όπου,

R είναι η ανά φάση αντίσταση του φορτίου [Ω],

C είναι η ανά φάση χωρητικότητα του φορτίου [F],

L είναι η ανά φάση επαγωγικότητα του φορτίου [H],

Q_L είναι η ανά φάση καταναλισκόμενη από την επαγωγική συνιστώσα του φορτίου άεργος ισχύς [VAR],

Q_C είναι η ανά φάση καταναλισκόμενη από την χωρητική συνιστώσα του φορτίου άεργος ισχύς [VAR],

P είναι η ενεργός ισχύς εξόδου ανά φάση της μονάδας [W].

Ο λόγος για τον οποίο ο παράγοντας Q_f είναι σημαντικός είναι ότι υψηλές τιμές του Q_f σημαίνουν ισχυρό συντονισμό (strong resonance), γεγονός το οποίο έχει σαν αποτέλεσμα το κύκλωμα να έχει πολύ ισχυρή τάση να κινείται προς, ή να παραμένει στη συχνότητα συντονισμού. Έτσι, όσο πιο υψηλός είναι ο Q_f , τόσο πιο δύσκολο είναι για μία μέθοδο ανίχνευσης νησιδοποίησης βασιζόμενη στη μεταβολή συχνότητας, να έχει τη σωστή απόκριση στην κατάσταση νησιδοποίησης. Όμως, τόσο χαμηλές τιμές, όσο και πολύ υψηλές του Q_f δεν είναι ρεαλιστικές. Είναι γενικά αποδεκτό από τους μηχανικούς ότι σε ένα σύστημα μεταφοράς είναι απίθανο το Q_f να ξεπεράσει την τιμή 2, 5.

Όσον αφορά τη σχέση που υπάρχει μεταξύ του Q_f και του Συντελεστή Ισχύος (ΣΙ—PF) της γραμμής μεταφοράς, ισχύει η παρακάτω εξίσωση:

$$Q_f = \tan(\arccos(PF)) \quad (1.4)$$

δηλαδή, με την αύξηση του ΣΙ προκύπτει μείωση του Q_f . Επομένως, η απαίτηση ότι ο Q_f πρέπει να είναι 2, 5 ή μικρότερος αντιστοιχίζεται στο ότι ο ΣΙ πρέπει να είναι 0, 37 ή μεγαλύτερος⁵.

Τέλος, το δίκτυο παρέχει ένα ζυγό εναλλασσόμενου ρεύματος, όπου η τάση και η συχνότητα θεωρούνται σταθερές. Επίσης, παρέχει όλη την άεργο ισχύ που ζητείται από το φορτίο και παρέχει ή απορροφά την έλλειψη ή το πλεόνασμα της ενεργού ισχύος του αντιστροφέα.

⁵Ο ΣΙ αναφέρεται στο Συντελεστή Ισχύος της γραμμής διανομής χωρίς την προσθήκη εγκάρσιου πυκνωτή για αντιστάθμιση ισχύος.

1.3.1.3 Ο χώρος αναντιστοιχίας ισχύων ΔP ως προς ΔQ

Οι εξισώσεις ισχύος ισορροπίας σε ένα τυπικό σύστημα διασυνδεδεμένο σε δίκτυο είναι οι εξής [12]:

$$P_{\Phi} = P_{\Delta\Pi} + \Delta P \quad (1.5)$$

$$Q_{\Phi} = Q_{\Delta\Pi} + \Delta Q \quad (1.6)$$

όπου,

P_{Φ} και Q_{Φ} είναι η ενεργός και άεργος ισχύς του φορτίου,

$P_{\Delta\Pi}$ και $Q_{\Delta\Pi}$ είναι η ενεργός και άεργος ισχύς της μονάδας $\Delta\Pi$ και

ΔP και ΔQ είναι η αναντιστοιχία ενεργού και άεργου ισχύος η οποία παρέχεται από το δίκτυο.

Δεν υπάρχει καθόλου αναντιστοιχία ισχύων (power mismatch), αν

$$P_{\Phi} = P_{\Delta\Pi}$$

$$Q_{\Phi} = Q_{\Delta\Pi}$$

Η συμπεριφορά του συστήματος τη στιγμή της αποσύνδεσης του δικτύου εξαρτάται από τις τιμές των ΔP και ΔQ τη στιγμή ακριβώς πριν ανοίξει ο διακόπτης του δικτύου και σχηματιστεί η ηλεκτρική νησίδα. Αν η συχνότητα συντονισμού του φορτίου RLC ισούται με τη συχνότητα του δικτύου, το φορτίο δεν απορροφά καθόλου άεργο ισχύ.

Από την άλλη πλευρά, η ενεργός ισχύς είναι ευθέως ανάλογη της τάσης. Η σχέση που εκφράζει την ενεργό ισχύ στα άκρα ενός φορτίου είναι η εξής:

$$P_{\Phi} = \frac{V^2}{R_{\Phi}} \quad (1.7)$$

Όταν αποσυνδέεται το δίκτυο, η ισχύς φορτίου παραμένει σταθερή και καταναλώνει την ισχύ που παράγεται από τη μονάδα $\Delta\Pi$. Έτσι η νέα τάση στο ΣΚΣ δίνεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$V' = \sqrt{\frac{P_{\Delta\Pi}}{P_{\Phi}}} V, \quad (1.8)$$

από όπου προκύπτει ότι αν:

$$\Delta P > 0 \Rightarrow \downarrow V,$$

ενώ αν:

$$\Delta P < 0 \Rightarrow \uparrow V.$$

Η περίπτωση $\Delta P > 0$ αντιστοιχεί σε σύστημα $\Delta\Pi$ το οποίο παράγει λιγότερη ενεργό ισχύ από ότι απαιτείται από το τοπικό φορτίο. Όταν αποσυνδεθεί το φορτίο και $\Delta P = 0$, η ενεργός ισχύς του φορτίου P_{Φ} μειώνεται, επομένως, όπως φαίνεται από την Εξίσωση (1.7), μειώνεται και η τάση V [17].

Η περίπτωση $\Delta P < 0$ αντιστοιχεί σε σύστημα $\Delta\Pi$ το οποίο παράγει περισσότερη ενεργό ισχύ από ότι απαιτείται από το τοπικό φορτίο. Όταν αποσυνδεθεί το φορτίο και $\Delta P = 0$, η ενεργός ισχύς του φορτίου P_{Φ} αυξάνεται, επομένως, όπως φαίνεται από την Εξίσωση (1.7), αυξάνεται και η τάση V .

Η σχέση που εκφράζει την άεργο ισχύ στα άκρα ενός φορτίου είναι η εξής:

$$Q_{\Phi} = Q_{\Delta\Pi} \left(\frac{1}{\omega L} - \omega C \right) V \quad (1.9)$$

από όπου προκύπτει ότι αν:

$$\Delta Q > 0 \Rightarrow \uparrow \omega,$$

ενώ αν:

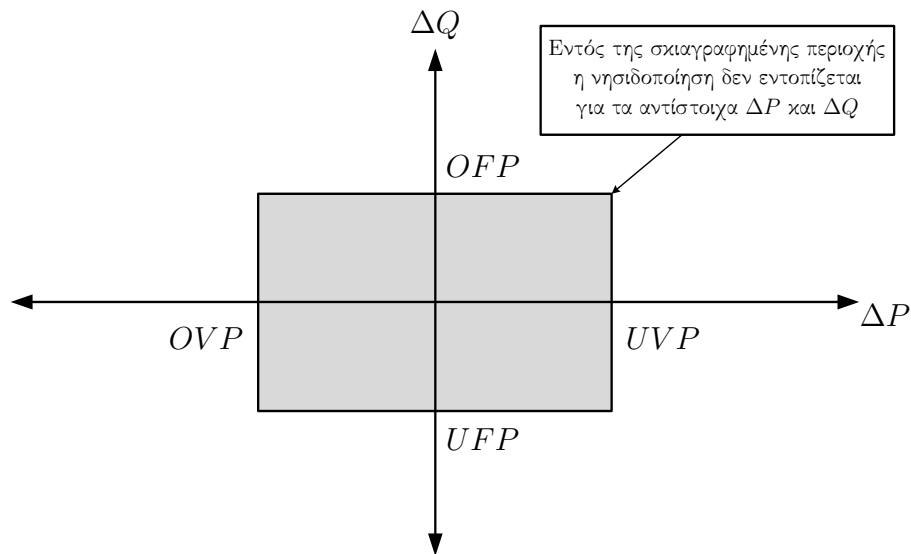
$$\Delta Q < 0 \Rightarrow \downarrow \omega.$$

Η περίπτωση $\Delta Q > 0$ αντιστοιχεί σε επαγωγικό ΣI φορτίου ή σε φορτίο του οποίου η άεργος συνιστώσα είναι αμιγώς επαγωγική. Κατά την αποσύνδεση του δικτύου, $\Delta Q = 0$. Όμως, όταν η μονάδα $\Delta\Pi$ είναι φωτοβολταϊκό σύστημα, συνήθως $Q_{\Delta\Pi} = 0$, επομένως και $Q_{\Phi} = 0$. Το γεγονός αυτό απαιτεί ότι όρος $\left(\frac{1}{\omega' L} - \omega' C\right)$ της Εξίσωσης εχ::ρεαστπωερλοαδ πρέπει να μηδενιστεί, το οποίο σημαίνει ότι το επαγωγικό μέρος πρέπει να μειωθεί και το χωρητικό να αυξηθεί. Για να συμβεί αυτό πρέπει η συχνότητα ω να αυξηθεί.

Αντίστοιχα, η περίπτωση $\Delta Q < 0$ αντιστοιχεί σε χωρητικό ΣI φορτίου ή σε φορτίο του οποίου η άεργος συνιστώσα είναι αμιγώς χωρητική. Κατά την αποσύνδεση του δικτύου, $\Delta Q = 0$. Όμως, όπως αναφέρθηκε παραπάνω για ΦB συστήματα, συνήθως $Q_{\Delta\Pi} = 0$, επομένως και $Q_{\Phi} = 0$. Το γεγονός αυτό απαιτεί ότι όρος $\left(\frac{1}{\omega' L} - \omega' C\right)$ της Εξίσωσης (1.9) πρέπει να μηδενιστεί, το οποίο σημαίνει ότι το επαγωγικό μέρος πρέπει να αυξηθεί και το χωρητικό να μειωθεί. Για να συμβεί αυτό πρέπει η συχνότητα ω να μειωθεί.

Για αρκετά μεγάλες τιμές αναντιστοιχίας ισχύων, είτε το μέγεθος της συχνότητας, είτε το μέγεθος της τάσης στο $\Sigma K \Sigma$ μεταβάλλονται τόσο πολύ που ενεργοποιείται είτε η προστασία OUF, είτε η προστασία OUV αντίστοιχα, αποτρέποντας τον αντιστροφέα να λειτουργήσει σε κατάσταση νησιδοποίησης. Όμως, για μικρή αναντιστοιχία ισχύων—δηλαδή, όταν η ισχύς του τοπικού φορτίου είναι πολύ κοντά στην ισχύ εξόδου του αντιστροφέα, η μέθοδος ανίχνευσης νησιδοποίησης αποτυγχάνει να ανιχνεύσει την κατάσταση νησιδοποίησης.

Η χαρτογράφηση, λοιπόν, του NDZ αποτελείται από τα χαρακτηριστικά ισχύος του φορτίου, την ενεργό ισχύ του αντιστροφέα και τα σημεία όπου ενεργοποιούνται οι προστασίες OUF και OUV. Παραδοσιακά, για τις παθητικές μεθόδους συνηθίζεται να χρησιμοποιείται ο χώρος ΔP ως προς ΔQ (χώρος αναντιστοιχίας ισχύων—power mismatch space) για αναπαράσταση του NDZ, όπως στο Σχήμα 1.7. Για να γίνει σύγκριση της απόδοσης των μεθόδων ανίχνευσης νησιδοποίησης πρέπει να χαρτογραφηθεί ο χώρος αναντιστοιχιών ισχύων για διάφορες τιμές του Q_f .



Σχήμα 1.7: Μη ανιχνεύσιμη ζώνη στο χώρο ΔP ως προς ΔQ

1.3.1.4 Ο χώρος παραμέτρων φορτίου

Η πλειοψηφία των ενεργητικών μεθόδων παρουσιάζουν καλύτερη απόδοση όσον αφορά το κριτήριο του NDZ. Όμως, αντίθετα με τις παθητικές μεθόδους, στις ενεργητικές χρησιμοποιείται ο χώρος παραμέτρων φορτίου [11].

Χώρος C_{norm} ως προς L

Μία πρώτη μορφή αναπαράστασης του NDZ ενεργητικών μεθόδων γίνεται στο χώρο C_{norm} ως προς L , δηλαδή στο χώρο κανονικοποιημένης χωρητικότητας ως προς την επαγωγικότητα (χώρος παραμέτρων φορτίου-load parameter space). Η κανονικοποιημένη χωρητικότητα, C_{norm} , ορίζεται ως η χωρητικότητα του φορτίου, C , διαιρεμένη με τη χωρητικότητα C_{res} η οποία συντονίζεται με την επαγωγικότητα του φορτίου στη συχνότητα του δικτύου $\omega_{\text{δικτυου}} = 2\pi f_{\text{δικτυου}}$

$$C_{norm} = \frac{C}{C_{res}} = CL\omega_{\text{δικτυου}} \quad (1.10)$$

Η αρχή με βάση την οποία αναπτύχθηκε η ιδέα αυτού του χώρου αναπαράστασης είναι τα κριτήρια φάσης, τα οποία ανακλούν το γεγονός ότι η καταναλισκόμενη από το φορτίο άεργος ισχύς πρέπει να είναι ίση με αυτή που παράγεται από τον αντιστροφέα σε μόνιμη κατάσταση. Το μειονέκτημα αυτού του χώρου αναπαράστασης είναι ότι πρέπει να σχεδιάζεται μία καμπύλη για κάθε τιμή της αντίστασης R .

Χώρος Q_f ως προς f_{res}

Η πλειοψηφία των μεθόδων ανίχνευσης νησιδοποίησης ακολουθούν στρατηγική που προκαλεί τη μεταβολή της συχνότητας του νησιδοποιημένου συστήματος και την ενεργοποίηση της προστασίας OUF, εφόσον απαιτείται σημαντική αναντιστοιχία ενεργού ισχύος για την ενεργοποίηση της προστασίας OUV.

Η συχνότητα ενός νησιδοποιημένου συστήματος με αντιστροφέα με μοναδιαίο ΣΙ, αρχικά επηρεάζεται από τη συχνότητα συντονισμού f_{res} του φορτίου RLC . Αν ο αντιστροφέας λειτουργεί με μοναδιαίο ΣΙ και δεν εισάγονται διαταραχές, η συχνότητα του νησιδοποιημένου συστήματος θα έχει τη συχνότητα συντονισμού, εφόσον αυτή είναι η μοναδική συχνότητα η οποία ικανοποιεί τη σχέση $Q_{\Phi} = Q_{\Delta\Pi} = 0$. Εναλλακτικά, η γωνία του φορτίου πρέπει να είναι ίση με τη γωνία μεταξύ του ρεύματος του αντιστροφέα και της τάσης του φορτίου. Επίσης, η γωνία του φορτίου επηρεάζεται και από το συντελεστή ποιότητας Q_f . Συνεπώς, ο χώρος Q_f ως προς f_{res} αποτελεί μία πολύ καλή επιλογή για την αναπαράσταση του NDZ και για τη σύγκριση μεταξύ των ενεργητικών μεθόδων ανίχνευσης νησιδοποίησης.

1.3.2 Υποβάθμιση ποιότητας ισχύος

Οι μέθοδοι ανίχνευσης νησιδοποίησης που στηρίζονται στην έγχυση διαταραχών, αναπόφευκτα, παραμορφώνουν την ισχύ εξόδου και επιδεινώνουν την ποιότητα ισχύος. Η ποιότητα ισχύος είναι πολύ σημαντικός δείκτης για την επιλογή της μεθόδου ανίχνευσης νησιδοποίησης.

1.3.3 Ανίχνευση νησιδοποίησης στην περίπτωση πολλαπλών αντιστροφών

Οι πολλαπλοί αντιστροφείς σε παράλληλη συνδεσμολογία μπορεί να ασχούν επιρροή στην απόδοση των μεθόδων ανίχνευσης νησιδοποίησης, η οποία μειώνεται, εκτός και αν οι μεταβολές που εισάγουν οι αντιστροφείς σε παράλληλη συνδεσμολογία είναι συγχρονισμένες. Ο λόγος για τον οποίο η απόδοση μειώνεται είναι ότι το συνολικό ρεύμα μειώνεται όταν προστίθενται περισσότεροι αντιστροφείς, διότι μπορεί το ρεύμα του ενός να ακυρώνεται από το ρεύμα του άλλου ή μπορεί ακόμη η μεταβολή της τάσης να είναι μη ανιχνεύσιμη.

1.3.4 Ποσοστό εσφαλμένης ανίχνευσης

Εσφαλμένη ανίχνευση ορίζεται ως η ανίχνευση κατάστασης νησιδοποίησης από τις μεθόδους ανίχνευσης νησιδοποίησης, όταν η μονάδα $\Delta\Pi$ είναι ακόμη συνδεδεμένη με το δίκτυο. Ο κύριος λόγος για εσφαλμένη ανίχνευση είναι η διακοπή των φορτίων ή άλλης μορφής διαταραχή, που οδηγούν τις μετρούμενες παραμέτρους σε υπέρβαση των φυσιολογικών ορίων. Το ποσοστό μπορεί να οριστεί ως [22]:

$$E = \frac{N_{error}}{N_{error} + N_{correct}} 100\%$$

όπου E είναι το ποσοστό εσφαλμένης ανίχνευσης, N_{error} είναι ο αριθμός των περιπτώσεων όπου έγινε εσφαλμένη ανίχνευση και $N_{correct}$ είναι ο αριθμός των περιπτώσεων όπου έγινε σωστή ανίχνευση.

1.3.5 Κόστος υλοποίησης μεθόδων

Τέλος, τα έξοδα εγκατάστασης και λειτουργίας είναι πάντα πολύ σημαντικός παράγοντας για την αξιολόγηση μίας μεθόδου ανίχνευσης νησιδοποίησης. Έτσι, πρέπει να γίνει προσεκτική επιλογή, με βάση το ιστορικό της πιθανότητας να έλθει σε κατάσταση νησιδοποίησης ένα σύστημα. Αυτό διασφαλίζει ότι το σύστημα ελέγχου είναι τόσο αξιόπιστο, όσο και ότι αποτελεί τον καλύτερο συνδυασμό κόστους, ποιότητας συστήματος και κινδύνων ασφαλείας.

1.3.6 Συγκριτικοί πίνακες μεθόδων

Παρακάτω παρουσιάζονται συνοπτικά οι συγκριτικοί πίνακες των μεθόδων που παρουσιάστηκαν στην Παράγραφο 1.2 με βάση τα κριτήρια αξιολόγησης μεθόδων που παρουσιάστηκαν στις προηγούμενες Παραγράφους, όπως αναφέρονται στη βιβλιογραφία [14].

Πίνακας 1.1: Σύγκριση Μεθόδων Ανίχνευσης Νησιδοποίησης (MAN) με βάση τη Μη Ανιχνεύσιμη Ζώνη (NDZ)

Κατηγορία Μεθόδων	MAN	NDZ
Παθητικές Μέθοδοι	OUV/OUF HD RoCoF	Μεγάλο Μεγάλο για μεγάλο Q_f Μικρό
Ενεργητικές Μέθοδοι	AFD SFS SVS SMS Μεταβολή Ισχύος	Αυξάνεται με αυξανόμενο Q_f Ελάχιστο Ελάχιστο Μικρότερο αυτού του AFD Μικρό
Απομακρυσμένες Μέθοδοι	PLCC SCADA	Μηδενικό Μηδενικό

⁶μεταβατική ευστάθεια

Πίνακας 1.2: Σύγκριση Μεθόδων Ανίχνευσης Νησιδοποίησης (MAN) με βάση την Επίδραση στην Ποιότητα Ισχύος

Κατηγορία Μεθόδων	MAN	Ποιότητα ισχύος
Παθητικές Μέθοδοι	OUV/OUF	Καμία Επίδραση
	HD	Καμία Επίδραση
	PJD	Καμία Επίδραση
	RoCoF	Καμία Επίδραση
	VU	Καμία Επίδραση
Ενεργητικές Μέθοδοι	AFD	Υποβάθμιση
	SFS	Μικρή Υποβάθμιση
	SVS	Μικρή Υποβάθμιση
	SMS	Μικρή Υποβάθμιση
	HI Μεταβολή Ισχύος	Παραγωγή Αρμονικών Επίδραση στην μετ. ευστ ⁶ .
Απομακρυσμένες Μέθοδοι	PLCC	Καμία Επίδραση
	SCADA	Καμία Επίδραση

Πίνακας 1.3: Σύγκριση Μεθόδων Ανίχνευσης Νησιδοποίησης (MAN) με βάση την απόδοση ανίχνευσης στην περίπτωση πολλαπλών αντιστροφών

Κατηγορία Μεθόδων	MAN	Απόδοση με πολ/πλούς αντιστρ.
Παθητικές Μέθοδοι	OUV/OUF	Υψηλή
	PJD	Δεν μειώνεται
Ενεργητικές	AFD	Μειώνεται
	SMS	Πολύ υψηλή
	Μεταβολή Ισχύος	Αύξ. του % εσφαλμ. ανίχν.
Απομακρυσμένες	PLCC	Πολύ υψηλή
	SCADA	Πολύ υψηλή

Πίνακας 1.4: Σύγκριση Μεθόδων Ανίχνευσης Νησιδοποίησης (MAN) με βάση το ποσοστό εσφαλμένης ανίχνευσης

Κατηγορία Μεθόδων	MAN	Ποσοστό εσφαλμένης ανίχνευσης
Παθητικές	HD	Υψηλό
	PJD	Υψηλό
	RoCoF	Υψηλό
	VU	Χαμηλό
Ενεργητικές	SFS	Χαμηλό
	SVS	Χαμηλό
	SMS	Χαμηλό
	Μεταβολή Ισχύος	Υψηλό
Απομακρυσμένες	PLCC	Μηδενικό
	SCADA	Μηδενικό

Πίνακας 1.5: Σύγκριση Μεθόδων Ανίχνευσης Νησιδοποίησης (MAN) με βάση το κόστος υλοποίησης

Κατηγορία Μεθόδων	Κόστος
Παθητικές	Χαμηλό
Ενεργητικές	Χαμηλό
Απομακρυσμένες	Πολύ υψηλό

1.4 Απαιτήσεις δικτύου για φωτοβολταϊκά συστήματα

Όπως αναφέρθηκε στην Παράγραφο 1.3.1, στην παρούσα διπλωματική εργασία θα χρησιμοποιηθούν μονάδες ΔΠ που περιλαμβάνουν και αντιστροφείς, αλλά πιο συγκεκριμένα, σαν μονάδες ΔΠ θα χρησιμοποιηθούν φωτοβολταϊκά συστήματα.

Τυπικά, στις περισσότερες χώρες εφαρμόζονται τοπικοί κανονισμοί οι οποίοι επιβάλλονται από τους τοπικούς διαχειριστές δικτύου, αλλά γίνονται μεγάλες προσπάθειες για τη δημιουργία κανονισμών οι οποίοι να μπορούν να επιβληθούν σε όλη την υφήλιο. Οι πιο σχετικοί διεθνείς οργανισμοί που αναπτύσσουν διεθνή πρότυπα για απαιτήσεις δικτύων είναι:

- ◇ η IEEE (Institute of Electrical and Electronic Engineers) στις ΗΠΑ,
- ◇ η IEC (International Electrotechnical Commission) στην Ελβετία,
- ◇ η DKE (German Commission for Electrical, Electronic and Information Technolo-

gies of DIN and VDE) στη Γερμανία, την κυριαρχούσα αγορά φωτοβολταϊκών.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, το ενδιαφέρον επικεντρώνεται στις απαιτήσεις που αφορούν την ανίχνευση νησιδοποίησης, η οποία ανίχνευση είναι απαραίτητη για την αποφυγή των προβλημάτων που δημιουργεί η κατάσταση της νησιδοποίησης και τα οποία συζητήθηκαν στην Παράγραφο 1.1.3. Για λόγους πληρότητας, όμως αναφέρεται ότι αυτά τα πρότυπα καθορίζουν, εκτός των απαιτήσεων περί ανίχνευσης νησιδοποίησης, απαιτήσεις που πρέπει να πληρούν οι εξοπλισμοί προς διασύνδεση με το δίκτυο σχετικά με την απόκριση τους σε μη κανονικές συνθήκες—διακυμάνσεις τάσης και συχνότητας και χρόνος επανασύνδεσης μετά από αποσύνδεση του εξοπλισμού—και με ποιότητα ισχύος—έγχυση DC ρεύματος, αρμονικές ρεύματος και μέσο ΣΙ. Τα πρότυπα τα οποία έχουν αναπτυχθεί από τους παραπάνω οργανισμούς, αφιερώνουν κάποιες παραγράφους στη δοκιμή ανίχνευσης της νησιδοποίησης. Τα πρότυπα αυτά είναι:

- ◇ το IEEE 1547.1,
- ◇ το IEC 62116,
- ◇ το VDE 0126 – 1 – 1.

Ακολούθως αναλύονται τα παραπάνω πρότυπα, με ιδιαίτερη προσοχή στο IEEE 1547.1, το οποίο είναι κομμάτι του IEEE 1547. Το τελευταίο αποτελεί το πρότυπο το οποίο έχει προκαλέσει τη μεγαλύτερη επιρροή όσον αφορά τη διασύνδεση μονάδων ΔΠ κάθε μορφής. Για αυτό το λόγο, η δοκιμή που προτείνεται από αυτό παρουσιάζεται αναλυτικά, ενώ οι δοκιμές που προτείνονται αντίστοιχα από τα άλλα δύο πρότυπα—το IEC 62116 και το VDE 0126 – 1 – 1—παρουσιάζονται συνοπτικά, διότι παρουσιάζουν μεγάλες ομοιότητες με το πρώτο.

1.4.1 Το πρότυπο IEEE 1547.1

Το πρότυπο IEEE Std 1547, ορίζει ένα σύνολο ενιαίων προϋποθέσεων που πρέπει να πληρούνται για τη διασύνδεση των μονάδων ΔΠ στο προς διασύνδεση τμήμα του ΣΗΕ. Έχει αναπτυχθεί από την Συντονιστική Επιτροπή Προτύπων 21 (Standards Coordinating Committee 21—SCC21). Σε γενικές γραμμές, ορίζει όρια και σημεία λειτουργίας διαφόρων παραμέτρων τόσο για τη διασύνδεση μίας μονάδας ΔΠ στο ΣΗΕ, όσο και για την απομάκρυνσή της από αυτό σε μη κανονικές συνθήκες. Εκδόθηκε το 2003 και αφορά σε δίκτυα 60 Hz και σε ΔΠ με φαινόμενη ισχύ μικρότερη των 10 MVA.

Πιο συγκεκριμένα, το πρότυπο IEEE Std 1547.1—μέρος αυτής της σειράς προτύπων για τη διασύνδεση μονάδων ΔΠ—παρέχει πληροφορίες για τη διαδικασία δοκιμών που πρέπει να ακολουθηθεί, ώστε να διαπιστωθεί και να επαληθευτεί η συμμόρφωση με τις απαιτήσεις του. Η εφαρμογή των δοκιμών του IEEE Std 1547.1 παρέχει στους κατασκευαστές, στους

παρόχους και στους ανεξάρτητους οργανισμούς που εκτελούν δοκιμές, μέσο επιβεβαίωσης της καταλληλότητας κάποιου συστήματος διασύνδεσης (ΣΔ) ή κάποιου εξαρτήματος που πρόκειται να χρησιμοποιηθεί κατά τη διασύνδεση μίας μονάδας ΔΠ με το ΣΗΕ. Αυτό το πρότυπο μπορεί να προσφέρει πιστοποίηση ότι ο εξοπλισμός είναι κατάλληλος για χρήση. Επίσης, αν και το πρότυπο αυτό ορίζει τη διαδικασία δοκιμών, δεν περιγράφει λεπτομερώς τις τεχνικές μετρήσεων που πρέπει να ακολουθηθούν, πληροφορίες οι οποίες υπάρχουν στο IEEE Std 120TM.

Οι τυποποιημένες δοκιμές διεξάγονται σε μία αντιπροσωπευτική μονάδα και μπορούν να λάβουν χώρα στο εργοστάσιο, σε ένα εργαστήριο δοκιμών, ή σε εξοπλισμό σε εξωτερικό χώρο. Ο εξοπλισμός υπό δοκιμή εγκαθίσταται με βάση τις προδιαγραφές του κατασκευαστή και λειτουργεί υπό ονομαστικές συνθήκες λειτουργίας, εκτός και αν υπάρχει διαφορετική υπόδειξη. Τέλος, το πρότυπο IEEE Std 1547.1 επιτρέπει τη διεξαγωγή τυποποιημένων δοκιμών σε πλήρη συστήματα, ηλεκτρονόμους πολλών χρήσεων, διακριτές συσκευές ή σε οποιοδήποτε συνδυασμό αυτών.

1.4.1.1 Σκοπός

Σκοπός αυτής της δοκιμής είναι η επαλήθευση ότι η μονάδα ή το εξάρτημα διασύνδεσης ΔΠ σταματά να παρέχει ενέργεια στον Εξοπλισμό Υπό Δοκιμή (ΕΥΔ) όπως προβλέπεται από το IEEE Std 1547 σε συνθήκες μη σκόπιμης νησιδοποίησης.

1.4.1.2 Διαδικασία

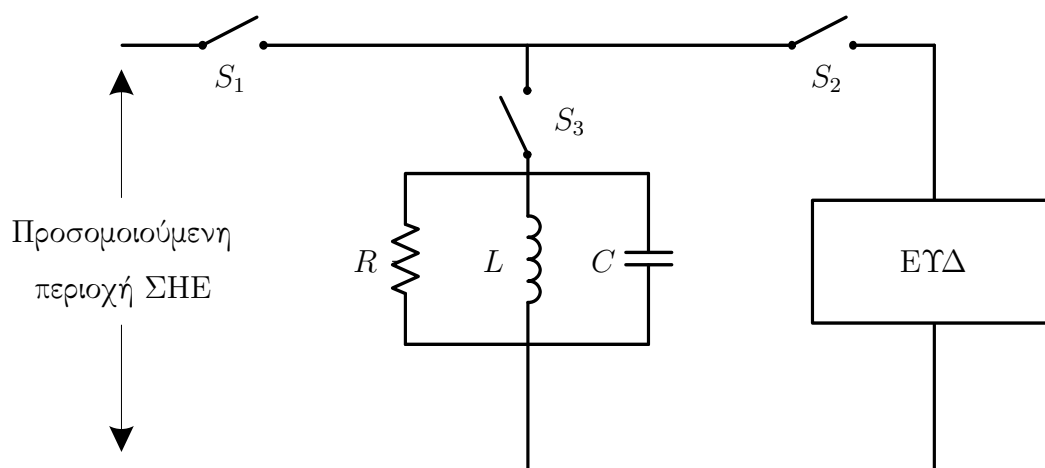
Αυτή η δοκιμή έχει σχεδιαστεί με σκοπό να εφαρμόζεται καθολικά σε όλες τις μονάδες ΔΠ, ανεξάρτητα από το ΣΙ εξόδου. Κάθε μορφής αντιστάθμιση αέργου ισχύος από τον ΕΥΔ πρέπει να γίνεται κατά τη διάρκεια της δοκιμής.

Παρακάτω (Σχήμα 6.1) φαίνεται η κυκλωματική διάταξη για τη δοκιμή μη σκόπιμης νησιδοποίησης.

Να σημειωθεί ότι, όταν ο κατασκευαστής του ΕΥΔ απαιτεί την ύπαρξη ενός εξωτερικού ή ξεχωριστού μετασχηματιστή, ο μετασχηματιστής θα συνδέεται μεταξύ του ΕΥΔ και του φορτίου *RLC* του Σχήματος 6.1 και θα θεωρείται μέρος του προϊόντος υπό δοκιμή.

Η διαδικασία που πρέπει να ακολουθηθεί για τη δοκιμή μη σκόπιμης νησιδοποίησης έχει ως εξής:

1. Για μονοφασικό ΕΥΔ, το κύκλωμα προς δοκιμή θα έχει τη διάταξη του Σχήματος 6.1. Για πολυφασικό ΕΥΔ, το συμμετρικό κύκλωμα φορτίου του Σχήματος 6.1 συνδέεται μεταξύ κάθε φάσης και του ουδέτερου για μία διάταξη τεσσάρων αγωγών ή μεταξύ των φάσεων για διάταξη τριών αγωγών. Η ουδέτερη σύνδεση (αγωγός γείωσης) του φορτίου *RLC*, η περιοχή προσομοίωσης ΣΗΕ και ο ΕΥΔ μένουν ανεπηρέαστοι από τη θέση του διακόπτη S_1 .



Σχήμα 1.8: Δοκιμή ανίχνευσης νησιδοποίησης (κατά IEEE)

2. Γίνεται η σύνδεση του ΕΥΔ σύμφωνα με τις οδηγίες και τις προδιαγραφές του κατασκευαστή.
3. Τίθενται όλες οι παράμετροι εισόδου του ΕΥΔ σε συνθήκες ονομαστική λειτουργίας του ΕΥΔ.
4. Τίθεται ο ΕΥΔ ώστε να παρέχει 100% της ονομαστικής ισχύος εξόδου.
5. Καταγράφονται όλες οι συσκευές.
6. Ρυθμίζεται η τάση της περιοχής προσομοίωσης ΣΗΕ στην ονομαστική τιμή με μία αποδεκτή απόκλιση $\pm 2\%$ και αντίστοιχα η συχνότητα στην ονομαστική τιμή με μία αποδεκτή απόκλιση $\pm 0,1$ Hz.
7. Προσαρμόζεται το φορτίο-νησίδα του Σχήματος 6.1 ώστε να παρέχει $Q_f 1,0 \pm 0,05$.
Η τιμή του Q_f βρίσκεται μέσω των Εξισώσεων (1.2) ή (1.3).

Η επαγωγικότητα και η χωρητικότητα μπορούν να υπολογισθούν με βάση τις παρακάτω εξισώσεις:

$$L = \frac{V^2}{2\pi f P Q_f} \quad (1.11)$$

$$C = \frac{P Q_f}{2\pi f V^2} \quad (1.12)$$

όπου,

f είναι η συχνότητα δικτύου [Hz],

V είναι η ονομαστική τάση στα άκρα κάθε φάσης του φορτίου RLC (για φορτία συνδεδεμένα ανά φάση, V είναι η ονομαστική φασική τάση) [V].

Η άεργος ισχύς του φορτίου ρυθμίζεται έτσι ώστε η συχνότητα συντονισμού f της νησίδας να είναι ανάμεσα στα προβλεπόμενα όρια υπέρτασης και υπότασης του ΕΥΔ και όσο το δυνατόν πλησιέστερα στην ονομαστική τάση.

8. Κλείνει ο διακόπτης S_3 , ο διακόπτης S_2 και ο διακόπτης S_1 και αναμένεται ο ΕΥΔ να παράξει το επιθυμητό επίπεδο ισχύος.
9. Προσαρμόζονται τα R , L και C μέχρις ότου το ρεύμα θεμελιώδους συχνότητας που διαπερνά το διακόπτη S_1 να είναι λιγότερο από 2% του ονομαστικού ρεύματος του ΕΥΔ σε μόνιμη κατάσταση.
10. Ανοίγει ο διακόπτης S_1 και καταγράφεται ο χρόνος μεταξύ του ανοίγματος του διακόπτη αυτού και της στιγμής που ο ΕΥΔ σταματά να παράσχει ισχύ στο φορτίο RLC .
11. Η δοκιμή επαναλαμβάνεται (βήματα 2 ως 10) προσαρμόζοντας την άεργο ισχύ του φορτίου με βήματα αύξησης του 1% από 95% μέχρι 105% της αρχικής τιμής ισχύος ισορροπίας.
12. Ύστερα από την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων του προηγούμενου βήματος (βήμα 11), σημειώνονται οι τρεις εκείνες μετρήσεις στις οποίες ο χρόνος ανοίγματος του διακόπτη ήταν μεγαλύτερος και επαναλαμβάνεται το πείραμα για αυτές τις περιπτώσεις δύο ακόμη φορές. Αν αυτές οι μετρήσεις δεν αντιστοιχούν σε διαδοχικές αυξήσεις της αέργου ισχύος (όπως αναφέρθηκε στο βήμα 11), τότε οι επιπρόσθετες δύο επαναλήψεις θα γίνουν για όλες τις ενδιάμεσες ρυθμίσεις φορτίου.
13. Επαναλαμβάνονται τα βήματα 4 ως 11 προσαρμόζοντας την πηγή εισόδου έτσι ώστε η έξοδος του ΕΥΔ να περιοριστεί στα 66% της ονομαστικής ισχύος εξόδου. Η σκοπιμότητα αυτής της ομάδας βημάτων είναι η αξιολόγηση του ΕΥΔ σε συνθήκες χαμηλότερης της πλήρους ισχύος και όπου η έξοδος καθορίζεται ή περιορίζεται από την πηγή εισόδου.
14. Επαναλαμβάνονται τα βήματα 4 ως 11 με την ισχύ εξόδου του ΕΥΔ να προσαρμόζεται είτε μέσω software είτε μέσω hardware στο 33% της ονομαστικής ισχύος εξόδου με την πηγή εισόδου να δύναται να παρέχει τουλάχιστον 150% της μέγιστης ισχύος εισόδου του ΕΥΔ. Η σκοπιμότητα αυτής της ομάδας βημάτων είναι η αξιολόγηση του ΕΥΔ σε συνθήκες χαμηλής ισχύος και όπου η έξοδος καθορίζεται ή περιορίζεται από τη ρύθμιση ελέγχου του ΕΥΔ.

1.4.1.3 Κριτήρια

Η δοκιμή είναι επιτυχής αν η ΔΠ σταματά να παρέχει ισχύ στο φορτίο-δοκίμιο εντός 2s από τη στιγμή εμφάνισης της νησιδοποίησης. Αν έστω και μία από τις δοκιμές έχει σαν

αποτέλεσμα ο ΕΥΔ να παραμένει σε κατάσταση νησιδοποίησης για χρόνο παραπάνω από τον προβλεπόμενο, η μονάδα αποτυγχάνει στη δοκιμή.

1.4.2 Το πρότυπο IEC 62116

Στην πρόχειρη έκδοση του IEC 62116 (Testing procedure of islanding prevention measures for grid connected photovoltaic power generating systems) προτείνονται παρόμοιες απαιτήσεις για την ανίχνευση νησιδοποίησης με αυτές του IEEE 1547.1. Τα συστήματα τα οποία μπορούν να δοκιμαστούν με βάση αυτό το πρότυπο έχουν ονομαστική ισχύ μικρότερη από ή ίση με 10 kVA και λειτουργούν υπό συχνότητα 50 Hz. Το κύκλωμα δοκιμής είναι ίδιο με αυτό του IEEE 1547.1 και πρέπει να υπάρχει ισορροπία ισχύος πριν γίνει η δοκιμή. Οι απαιτήσεις που πρέπει να πληρούνται για να επιτύχει στη δοκιμή ο ΕΥΔ περιλαμβάνει περισσότερες δοκιμές από ότι το πρότυπο IEEE 1547, αλλά δεν υπάρχουν ιδιαίτερες διαφορές σε σχέση με το τελευταίο.

Ο αντιστροφέας υπόκειται σε δοκιμή υπό τρία διαφορετικά επίπεδα ισχύος εξόδου, σε ποσοστά της ονομαστικής ισχύος εξόδου (A:100 – 105%, B:50 – 66%, C:25 – 33%). Η περίπτωση A εξετάζεται υπό μέγιστη επιτρεπόμενη ισχύ εισόδου του αντιστροφέα και η περίπτωση C υπό ελάχιστη επιτρεπόμενη ισχύ εξόδου. Όλες οι περιπτώσεις εξετάζονται με την ενεργό και άεργο ισχύ του φορτίου να μην παρουσιάζουν διακυμάνσεις. Στην περίπτωση A η δοκιμή γίνεται με βήμα του 5% τόσο της ενεργού όσο και της άεργου ισχύος εξόδου του αντιστροφέα, κυμαινόμενες από το –10% μέχρι το +10% από το σημείο λειτουργίας της ισχύος εξόδου του αντιστροφέα. Στις περιπτώσεις B και C υπάρχει μία διακύμανση του άεργου μέρους του φορτίου σε διαστήματα $\pm 5\%$ και σε βήματα ισχύος εξόδου του αντιστροφέα του 1%.

Ο μέγιστος επιτρεπόμενος χρόνος που μεσολαβεί από τη δημιουργία της κατάστασης της νησιδοποίησης μέχρι την ανίχνευσή της παραμένει 2s, όπως ακριβώς ισχύει και στο IEEE 1547.

1.4.3 Το πρότυπο VDE 0126 – 1 – 1

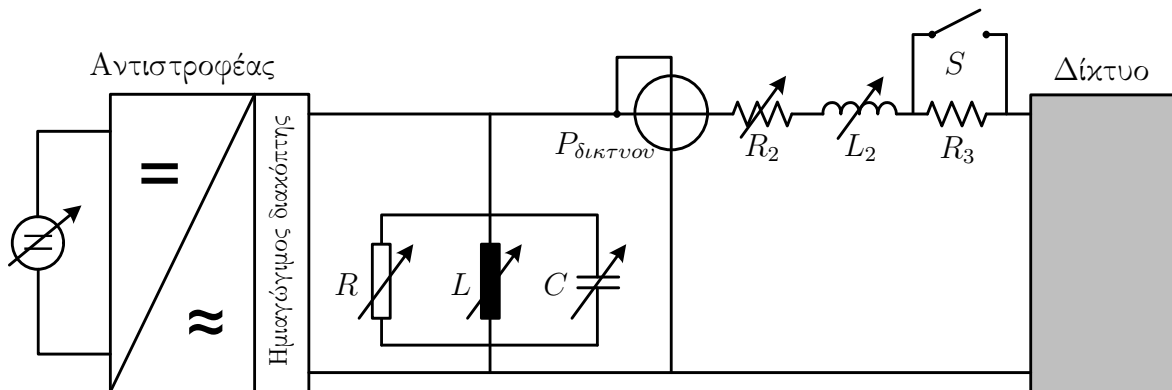
Ο τίτλος του προτύπου που αφορά τις δοκιμές για ανίχνευση νησιδοποίησης είναι Automatic disconnection device between a generator and the public low-voltage grid. Το πρότυπο αυτό επιτρέπει την εφαρμογή μίας εκ των τριών μεθόδων που παρουσιάζονται παρακάτω για αυτόματη αποσύνδεση της μονάδας ΔΠ σε περίπτωση σφάλματος του δικτύου:

(i) *Δοκιμή ανίχνευσης νησιδοποίησης μέσω μέτρησης σύνθετης αντίστασης*

Το κύκλωμα δοκιμής παρουσιάζεται στο Σχήμα 1.9. Η διαδικασία δοκιμής βασίζεται στην τοπική εξισορρόπηση της ενεργού και άεργου ισχύος με τη χρήση μεταβλητού κυκλώματος *RLC*. Ο διακόπτης *S* ανοίγει με σκοπό η σύνθετη αντίσταση δικτύου να αυξηθεί στο 1.0 Ω.

Η δοκιμή πρέπει να επαναληφθεί για διάφορες τιμές των R_2 και L_2 —οι οποίες προσομοιώνουν τη σύνθετη αντίσταση δικτύου—με μέγιστο εύρος 1.0Ω (μέγιστο εύρος για την επαγωγική αντίδραση L_2 είναι $0,5 \Omega$)

Ο ΕΥΔ θεωρείται ότι έχει επιτύχει στη δοκιμή αν ο χρόνος αποσύνδεσης για κάθε μεμονωμένη δοκιμή είναι μικρότερος από 5 s.



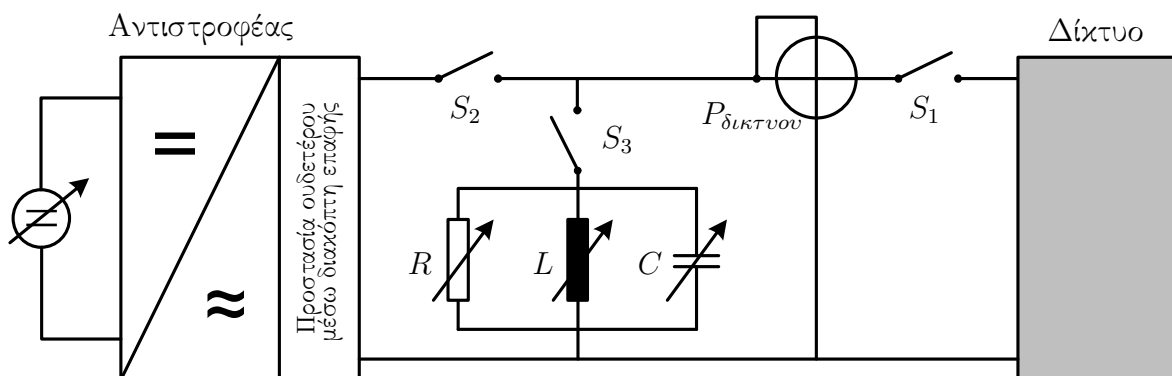
Σχήμα 1.9: Κύκλωμα δοκιμής ανίχνευσης νησιδοποίησης μέσω μέτρησης σύνθετης αντίστασης (VDE)

(ii) Δοκιμή ανίχνευσης νησιδοποίησης μέσω συντονιζόμενου κυκλώματος

Το κύκλωμα δοκιμής είναι ίδιο με αυτό του IEEE 1547.1, το οποίο παρουσιάζεται στο Σχήμα 1.10. Το ταλαντευόμενο κύκλωμα RLC πρέπει να έχει Q_f τουλάχιστον 2. Τα βήματα εκτέλεσης του πειράματος είναι παρόμοια με αυτά του IEEE 1547.1.

Όλη η σειρά βημάτων λαμβάνει χώρα για ισχύ εξόδου του αντιστροφέα $P = 25\%$, 50% και 100% της ονομαστικής ισχύος.

Ο ΕΥΔ θεωρείται ότι έχει επιτύχει στη δοκιμή αν ο χρόνος αποσύνδεσης για κάθε μεμονωμένη δοκιμή είναι μικρότερος από 5 s.



Σχήμα 1.10: Κύκλωμα δοκιμής ανίχνευσης νησιδοποίησης μέσω συντονιζόμενου κυκλώματος (VDE)

(iii) Ανίχνευση νησιδοποίησης μέσω παρακολούθησης της τριφασικής τάσης

Αν τουλάχιστον μία τάση αγωγού ξεπεράσει προς τα κάτω ή προς τα άνω τα όρια 80% και 115% της ονομαστικής τάσης αντίστοιχα, θα επακολουθήσει αυτόματη αποσύνδεση μέσα σε χρόνο 0,2 s.

Με σκοπό τον έλεγχο της παρακολούθησης τάσης, η μονάδα ΔΠ θα λειτουργήσει μέσω μίας πηγής εναλλασσόμενης τάσης μεταβλητού πλάτους, ρυθμισμένη στην ονομαστική τάση και σε τυχαία ισχύ εξόδου. Ο χρόνος αποσύνδεσης πρέπει να παραμείνει ίδιος για δοκιμές τάσης από 100% σε 77% και από 100% σε 118% της ονομαστικής τάσης. Αυτή η δοκιμή πρέπει να διεξαχθεί για όλους τους συνδυασμούς αγωγών.

1.4.4 Συγκεντρωτικός πίνακας για τα πρότυπα δοκιμής για ανίχνευση νησιδοποίησης

Ο παρακάτω πίνακας συγκεντρώνει τα βασικά χαρακτηριστικά των προτύπων δοκιμής για ανίχνευση νησιδοποίησης:

Πίνακας 1.6: Πρότυπα για δοκιμή ανίχνευσης νησιδοποίησης

	IEEE 1547.1	IEC 62116	VDE 0126 – 1 – 1
Εφαρμογή σε δίκτυα με f [Hz]	60	50	50
Συντελεστής ποιότητας Q_f	1	1	> 2
Χρόνος ανίχνευσης t [s]	< 2	< 2	< 5

1.4.5 Απαιτήσεις προς πλήρωση για την Ελλάδα

Πίνακας 1.7: Επιτρεπόμενα εύρη συχνότητας και τάσης για την Ελλάδα

Μεγέθη	Επιτρεπόμενα Εύρη
Επιτρεπόμενο εύρος συχνότητας, f	$49,5 \leq f \leq 50,5$ Hz
Επιτρεπόμενο εύρος τάσης, V	$184 \leq V \leq 264,5$ V

Για λόγους πληρότητας αναφέρονται τα επιτρεπόμενα εύρη συχνότητας και τάσης για αντιστροφείς, όπως καταγράφονται στην τεχνική αναφορά της εταιρείας ABB για τη διασύνδεση μονάδων ΔΠ στο Ελληνικό δημόσιο δίκτυο [1]. Το πρότυπο που ακολουθείται για την προστασία από την κατάσταση νησιδοποίησης είναι το VDE–0126 – 1 – 1 με τη διαφοροποίηση ότι ο χρόνος απόζευξης στην περίπτωση της κατάστασης αυτής είναι 500 ms.

Κεφάλαιο 2

Ανάλυση Ελέγχου Φωτοβολταϊκού Αντιστροφέα

Τα φωτοβολταϊκά (ΦΒ) συστήματα μετατρέπουν την ηλιακή ενέργεια σε ηλεκτρική βασισζόμενα στο φωτοβολταϊκό φαινόμενο¹. Τα βασικά τους πλεονεκτήματα είναι ότι δεν έχουν κόστος καυσίμου, δε ρυπαίνουν το περιβάλλον και δεν παρουσιάζουν λειτουργικά θέματα ασφαλείας. Εντούτοις, παρουσιάζουν σημαντικούς έμμεσους ρύπους ανά kW (λόγου χάριν, κατά την κατασκευή των πάνελ) [22].

Η $V - I$ χαρακτηριστική του ΦΒ κυττάρου είναι μη γραμμική και μεταβάλλεται με τη μεταβολή της ακτινοβολίας και της θερμοκρασίας. Γενικά, υπάρχει ένα μοναδικό σημείο στην καμπύλη $V - I$ ή $V - P$, το οποίο ονομάζεται Σημείο Μέγιστης Ισχύος (Max Power Point—MPP), στο οποίο το ΦΒ σύστημα λειτουργεί με μέγιστη απόδοση και παράγει τη μέγιστη ισχύ εξόδου. Οι συντεταγμένες του Σημείου Μέγιστης Ισχύος δεν είναι γνωστές, αλλά μπορούν να εντοπιστούν, είτε μέσω υπολογιστικών μοντέλων, είτε μέσω αλγορίθμων αναζήτησης. Έτσι, οι τεχνικές Ανίχνευσης του Σημείου Μέγιστης Ισχύος (Max Power Point Tracker—MPPT) είναι απαραίτητες για να διατηρείται το ΦΒ σύστημα στο σημείο παραγωγής μέγιστης ισχύος. Ονομαστικά, αναφέρονται μερικές τεχνικές MPPT [9]: μέθοδοι Διαταραχής και Παρατήρησης (the Perturb and Observe method), μέθοδοι Αυξητικής Αγωγιμότητας (the Incremental Conductance method), μέθοδος Τεχνητού Νευρωνικού Δικτύου (the Artificial Neural Network method) και η μέθοδος Ασαφούς Λογικής (the Fuzzy Logic method).

Τα ΦΒ συστήματα χρησιμοποιούν μετατροπείς DC/DC—για τη διατήρηση της τάσης εξόδου των ΦΒ συστημάτων στο επιθυμητό εύρος DC τάσης—σε συνδυασμό με αντιστροφείς DC/AC προκειμένου να συνδεθούν στο δίκτυο ή να συνδεθούν με τα φορτία που

¹Ορισμός: Εμφάνιση διαφοράς δυναμικού στα άκρα μίας διόδου στην οποία προσπίπτει ηλιακή ακτινοβολία.

τροφοδοτούν. Τέλος, αξίζει να σημειωθεί ότι τα ΦΒ συστήματα, λόγω αδυναμίας ρύθμισης της ποσότητας της ηλιακής ενέργειας που αξιοποιούν, παρουσιάζουν αργή απόκριση είτε σε μεταβολές των φορτίων που τροφοδοτούν, είτε σε διαταραχές του συστήματος στο οποίο συνδέονται. Για αυτόν ακριβώς το λόγο, για την απομονωμένη λειτουργία ΦΒ συστημάτων, απαιτείται ο συνδυασμός τους με αποθηκευτικά συστήματα γρήγορης απόκρισης.

Τα φωτοβολταϊκά συστήματα διακρίνονται σε:

- ◇ κεντρικά συστήματα με ισχύ έως και κάποιων MW και
- ◇ διεσπαρμένα με ισχύ μερικών kW, τα οποία εγκαθίστανται από ιδιώτες και συνδέονται στο τοπικό Δίκτυο Διανομής (ΔΔ). Για ισχύ εξόδου μέχρι 5 kW η σύνδεση του ΦΒ συστήματος γίνεται στο δίκτυο XT μέσω μονοφασικής παροχής, ενώ για ισχύ άνω των 5 kW και μέχρι 10 kW η σύνδεση γίνεται μέσω τριφασικής παροχής.

2.1 Φωτοβολταϊκοί Αντιστροφείς

Ο ΦΒ αντιστροφέας είναι το πιο σημαντικό στοιχείο των διεσπαρμένων ΦΒ συστημάτων και η κύρια λειτουργία του είναι η μετατροπή της DC ισχύος που παράγεται από το ΦΒ σύστημα σε συγχρονισμένη με το δίκτυο AC ισχύ.

Αναλόγως της τεχνολογίας διασύνδεσης των ΦΒ πάνελ υπάρχουν οι εξής τύποι ΦΒ αντιστροφέων [23]:

- ◇ κεντρικοί αντιστροφείς (central inverters),
- ◇ αντιστροφείς κλάδων (string inverters),
- ◇ αντιστροφείς πολλαπλών κλάδων (multi-string inverters),
- ◇ αντιστροφείς ενσωματωμένοι σε ΦΒ πάνελ (module integrated inverters).

Επίσης, αναλόγως με το αν χρησιμοποιούν μετασχηματιστή για γαλβανική απομόνωση (χαμηλής ή υψηλής συχνότητας) ανάμεσα στην DC είσοδο και την AC έξοδο χωρίζονται σε:

- ◇ αντιστροφείς με μετασχηματιστή (inverters with transformer),
- ◇ αντιστροφείς χωρίς μετασχηματιστή (transformerless (TL) inverters).

Σήμερα, η αγορά των κατασκευαστών ΦΒ αντιστροφέων είναι μεγάλη—π.χ. SMA, Sunways, Conergy, Ingeteam, Danfoss Solar, Refu—προσφέροντας μεγάλο εύρος ΦΒ αντιστροφέων με πολύ υψηλή αποδοτικότητα (>97%).

Όσον αφορά τους τριφασικούς ΦΒ αντιστροφείς, οι περισσότεροι είναι τριφασικοί με τέσσερα καλώδια, επιτρέποντάς τους, στην πραγματικότητα, να λειτουργούν σαν τρεις ανεξάρτητοι μονοφασικοί αντιστροφείς. Αυτή η λύση έχει δύο πλεονεκτήματα:

- ◇ επιτρέπει τη χρήση των ήδη υπάρχόντων αντιστροφέων,
- ◇ επιτρέπει τη χρήση της απαίτησης για ανίχνευση νησιδοποίησης, όπως προβλέπεται από το πρότυπο VDE 0126 – 1 – 1, με βάση το οποίο υποδεικνύεται ότι η παρακολούθηση της σύνθετης αντίστασης μπορεί να αντικατασταθεί με την παρακολούθηση της πολικής τάσης, αν ο έλεγχος της κάθε φάσης γίνεται ανεξάρτητα, όπως έχει αναφερθεί στην Παράγραφο 1.4.3.

Τέλος, λόγω της μεγάλης ποικιλίας τοπολογιών ΦΒ αντιστροφέων, οι δομές ελέγχου τους μπορούν να είναι πολύ διαφορετικές. Ο αλγόριθμος διαμόρφωσης πρέπει να είναι συγκεκριμένος για κάθε τοπολογία. Συγκεκριμένα, υπάρχουν τρεις διαφορετικές τάξεις λειτουργιών ελέγχου, οι οποίες πρέπει να καθοριστούν:

(i) Βασικές λειτουργίες—κοινές για όλους τους αντιστροφείς διασυνδεδεμένους στο δίκτυο:

- ◇ Έλεγχος ρεύματος δικτύου (π.χ. όρια THD, ευστάθεια στην περίπτωση μεγάλης μεταβολής σύνθετης αντίστασης δικτύου)
- ◇ Έλεγχος DC τάσης αντιστροφέα (π.χ. προσαρμογή στις μεταβολές της τάσης δικτύου)
- ◇ Συγχρονισμός με το δίκτυο (π.χ. λειτουργία με ΣΙ μονάδα)

(ii) Συγκεκριμένες λειτουργίες ΦΒ—κοινές για όλους τους ΦΒ αντιστροφείς

- ◇ Ανίχνευση Σημείου Μέγιστης Ισχύος (π.χ. μεγάλη αποδοτικότητα MPPT στη μόνιμη κατάσταση (τυπικά >99%), ευσταθής λειτουργία σε πολύ χαμηλά επίπεδα ακτινοβολίας)
- ◇ Μέθοδοι Ανίχνευσης Νησιδοποίησης
- ◇ Παρακολούθηση δικτύου (π.χ. συγχρονισμός, γρήγορη ανίχνευση τάσης/συχνότητας για παθητικές μεθόδους ανίχνευσης νησιδοποίησης)
- ◇ Παρακολούθηση ΦΒ πάνελ (π.χ. ανίχνευση μερικής σκίασης ΦΒ πάνελ)

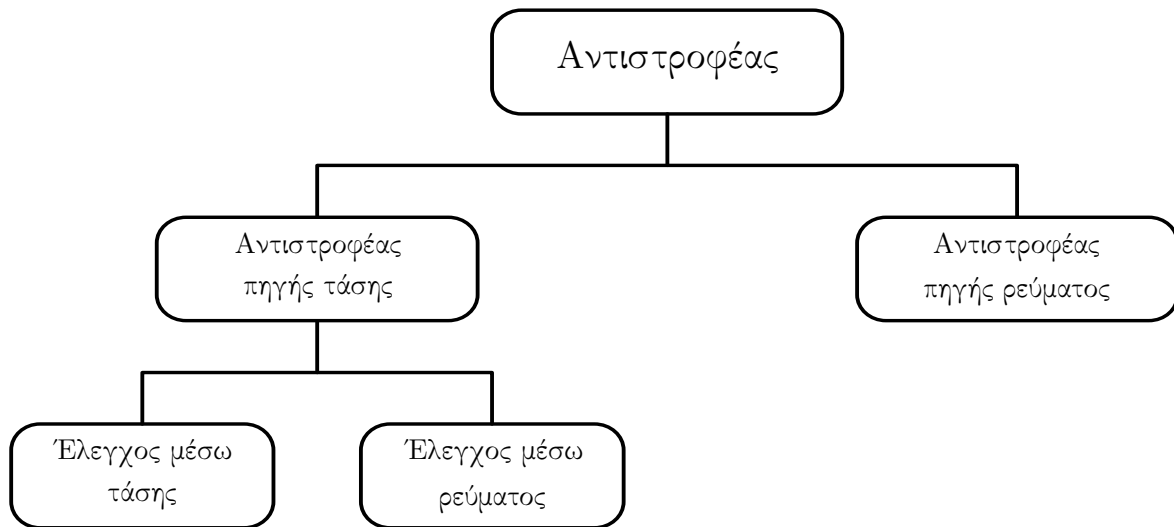
(iii) Βοηθητικές λειτουργίες

- ◇ Υποστήριξη δικτύου (π.χ. τοπικός έλεγχος τάσης, αντιστάθμιση ισχύος)

2.2 Βασικό Θεωρητικό Υπόβαθρο για Έλεγχο Αντιστροφέα

Στο Σχήμα 2.1 παρουσιάζεται η κατηγοριοποίηση των αντιστροφέων αναλόγως με τη φύση της DC πλευράς τους, καθώς και αναλόγως με την παράμετρο με βάση την οποία χτίζεται

το σύστημα ελέγχου.



Σχήμα 2.1: Εδώ γράφουμε τη λεζάντα

Στην περίπτωση εφαρμογών ΦΒ συστημάτων χρησιμοποιούνται Αντιστροφείς Πηγής Τάσης—ΑΠΤ (Voltage Source Inverters—VSIs). Οι εν λόγω αντιστροφείς μπορούν να κατηγοριοποιηθούν, ανάλογα με την παράμετρο στην οποία βασίζεται ο έλεγχός τους. Συγκεκριμένα, οι δύο βασικότερες κατηγορίες αντιστροφέων είναι:

- ◇ ΑΠΤ, όπου ελέγχεται άμεσα το ρεύμα
- ◇ ΑΠΤ, όπου ελέγχεται η ενεργός και άεργος ισχύς

Όσον αφορά την τελευταία περίπτωση, για τον έλεγχο της ενεργού και άεργου ισχύος υπάρχουν δύο προσεγγίσεις: αυτή, όπου ο έλεγχος επιτυγχάνεται έμμεσα μέσω του ελέγχου της τάσης (voltage-mode control) και αυτή, όπου ο έλεγχος επιτυγχάνεται έμμεσα μέσω του ελέγχου του ρεύματος (current-mode control). Η πρώτη προσέγγιση χρησιμοποιείται κυρίως σε εφαρμογές υψηλής τάσης/ισχύος. Η δεύτερη προσέγγιση προσφέρει τα πλεονεκτήματα ότι, λόγω της ρύθμισης του ρεύματος, ο ελεγκτής προστατεύεται από περιπτώσεις υπερρευμάτων. Άλλα πλεονεκτήματα είναι ότι αυτή η προσέγγιση παρέχει στιβαρότητα ενάντι στις μεταβολές των παραμέτρων του συστήματος του ελεγκτή, υψηλή δυναμική απόδοση και υψηλή ακρίβεια ελέγχου [24].

Αναλόγως με το ποιά είναι η παράμετρος η οποία ελέγχεται από το σύστημα ελέγχου του αντιστροφέα, οι διακόπτες παλμοδοτούνται με τέτοιο τρόπο ώστε, η ανά φάση ελεγχόμενη παράμετρος να γίνεται ίση με την αντίστοιχη επιθυμητή τιμή αναφοράς της. Για την περίπτωση που η ελεγχόμενη παράμετρος είναι το ρεύμα, στο Σχήμα 2.2 παρουσιάζεται μία κατηγοριοποίηση των πιθανών ελεγκτών. Στην πλειοψηφία των περιπτώσεων η παλμοδότηση των διακοπών επιτυγχάνεται μέσω της τεχνικής γνωστής ως διαμόρφωση εύρους παλμών (Pulse Width Modulation—PWM). Η εν λόγω τεχνική βασίζεται στη σύγκριση



Σχήμα 2.2: Εδώ γράφουμε τη λεζάντα

του πλάτους ενός σήματος-φέροντος, το οποίο έχει τριγωνική κυματομορφή με συχνότητα η οποία καθορίζει τη διακοπτική συχνότητα διακοπών, με το πλάτος ενός σήματος αναφοράς.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία επιλέχθηκε η χρήση γραμμικού ελέγχου. Για τον υπολογισμό των σημάτων διαμόρφωσης, στην περίπτωση τριφασικού συστήματος είναι επιθυμητό οι τριφασικές ποσότητες να μετασχηματιστούν από το τριφασικό πλαίσιο abc σε ένα διφασικό, γραμμικώς ανεξάρτητο πλαίσιο. Το κέρδος αυτού είναι ότι οι συνιστώσες του υπό έλεγχο ρεύματος είναι αποζευγμένες η μία από την άλλη, με αποτέλεσμα να μπορούν να ελεγχθούν ανεξάρτητα. Το τριφασικό σύστημα μπορεί να μετασχηματιστεί από πλαίσιο abc στο:

◇ πλαίσιο $\alpha\beta$

Ο μετασχηματισμός abc σε $\alpha\beta$ ονομάζεται μετασχηματισμός Clarke και οι τριφασικές ημιτονοειδείς ποσότητες μετασχηματίζονται σε διφασικές ημιτονοειδείς. Συνήθως, για λόγους απλοποίησης της σχεδίασης, χρησιμοποιούνται αντισταθμιστές αναλογικοί+συντονισμού (Proportional + Resonant—PR). Ο αντισταθμιστής τέτοιου τύπου είναι παρόμοιος με τον αντισταθμιστή PI, καθώς απαιτείται ρύθμιση μόνο δύο παραμέτρων. Ο ορισμός του μετασχηματισμού Clarke δίνεται στην Παράγραφο 2.3.2.

◇ πλαίσιο dq

Ο μετασχηματισμός abc σε dq ονομάζεται μετασχηματισμός Park και οι τριφασικές ημιτονοειδείς ποσότητες μετασχηματίζονται σε δύο DC ποσότητες. Στην περίπτωση ελέγχου στο πλαίσιο $\alpha\beta$, για να επιτευχθεί μηδενικό σφάλμα μόνιμης κατάστασης, το εύρος ζώνης του συστήματος ελέγχου πρέπει να είναι επαρκώς μεγαλύτερο από τη συχνότητα του συστήματος AC. Εναλλακτικά, για να αυξηθεί το κέρδος βρόχου, οι

αντισταθμιστές πρέπει να περιλαμβάνουν μιγαδικά συζυγή ζεύγη πόλων στη συχνότητα του συστήματος AC. Όμως, στον έλεγχο στο πλαίσιο dq , το μηδενικό σφάλμα μόνιμης κατάστασης μπορεί απλώς να επιτευχθεί συμπεριλαμβάνοντας ολοκληρωτικούς όρους στους αντισταθμιστές του ελεγκτή, μιας και οι ποσότητες είναι DC. Ως αρνητικό του ελέγχου αυτού λογίζεται μόνο ότι απαιτείται μηχανισμός συγχρονισμού, ο οποίος συνήθως επιτυγχάνεται μέσω του PLL. Ο ορισμός του μετασχηματισμού Park δίνεται στην Παράγραφο 2.3.2.

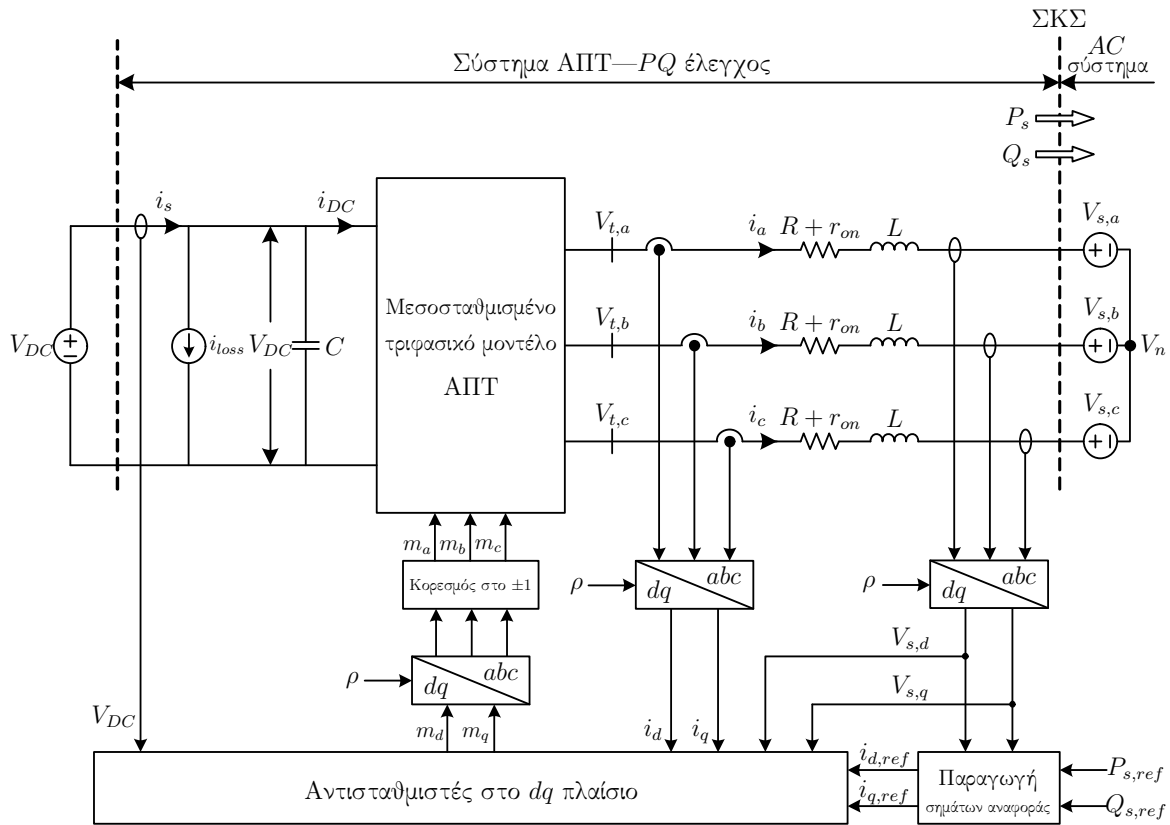
Στην παρούσα διπλωματική εργασία ο αντιστροφέας που χρησιμοποιήθηκε για τις προσομοιώσεις, οι οποίες παρουσιάζονται στο Κεφάλαιο Τάδε έχει τα παρακάτω χαρακτηριστικά:

- ◇ είναι ΑΠΤ (VSI),
- ◇ ελέγχεται η ενεργός και η άεργος ισχύς μέσω κατάλληλου ελεγκτή (PQ -controller),
- ◇ ο έλεγχος των ισχύων επιτυγχάνεται έμμεσα, μέσω ελέγχου του ρεύματος (current-control mode),
- ◇ οι τριφασικές ποσότητες, abc , μετασχηματίζονται στο dq πλαίσιο και
- ◇ χρησιμοποιείται η τεχνική Διαμόρφωσης Εύρους Παλμών (PWM) για τη διαμόρφωση των παλμών.

Ακολούθως παρουσιάζεται η μεθοδολογία σχεδίασης του ελέγχου για αντιστροφέα με τα προαναφερθέντα χαρακτηριστικά.

2.3 Έλεγχος ρεύματος αντιστροφέα πηγής τάσης στο πλαίσιο dq

Στο Σχήμα 2.3 απεικονίζεται το σχηματικό διάγραμμα του PQ ελεγκτή, όπου η ενεργός και άεργος ισχύες ελέγχονται έμμεσα μέσω ελέγχου του ρεύματος στο πλαίσιο dq [24]. Όπως φαίνεται, οι ανταλλασσόμενες με το AC σύστημα συνιστώσες ενεργού και αέργου ισχύος— $P_s(t)$ και $Q_s(t)$ —ελέγχονται από τις συνιστώσες ρεύματος i_d και i_q , αντίστοιχα. Τα σήματα ανάδρασης (feedback) και τα εμπροσθό-τροφοδοτούμενα (feed-forward) σήματα, πρώτα μετασχηματίζονται στο πλαίσιο dq και στη συνέχεια οι αντισταθμιστές τα επεξεργάζονται για να παράγουν τα σήματα ελέγχου, και πάλι, στο πλαίσιο dq . Τελικά, τα σήματα ελέγχου μετασχηματίζονται στο πλαίσιο abc και οδηγούνται στον ΑΠΤ. Για την προστασία του ΑΠΤ, οι εντολές αναφοράς $i_{d,ref}$ και $i_{q,ref}$ περιορίζονται από τα αντίστοιχα μπλοκ κορεσμού (saturation blocks).



Σχήμα 2.3: Σχηματικό Διάγραμμα ενός συστήματος ΑΠΤ, διασυνδεδεμένο στο δίκτυο

2.3.1 Μοντελοποίηση διακοπών

Όπως αναφέρθηκε στην Παράγραφο 2.2, στον αντιστροφέα που χρησιμοποιήθηκε στις προσομοιώσεις, ο αλγόριθμος παλμοδότησης των διακοπών είναι ο PWM. Σε κάθε μία από τις τρεις ημιγέφυρες του Σχήματος 2.4, οι διακόπτες άγουν συμπληρωματικά. Το σήμα-φέρων έχει μία περιοδική κυματομορφή με περίοδο T_s και κυμαίνεται από $-ST$ ως $+ST$, όπου ST είναι η απόλυτη τιμή του πλάτους της πριονωτής κυματομορφής του φέροντος. Τα σημεία τομής του σήματος-φέρωντος με το σήμα διαμόρφωσης της κάθε φάσης καθορίζουν τις διακοπτικές στιγμές καθενός από τους δύο διακόπτες της αντίστοιχης φάσης (ημιγέφυρας). Έτσι, η διακοπτική συνάρτηση ενός διακόπτη ορίζεται ως εξής:

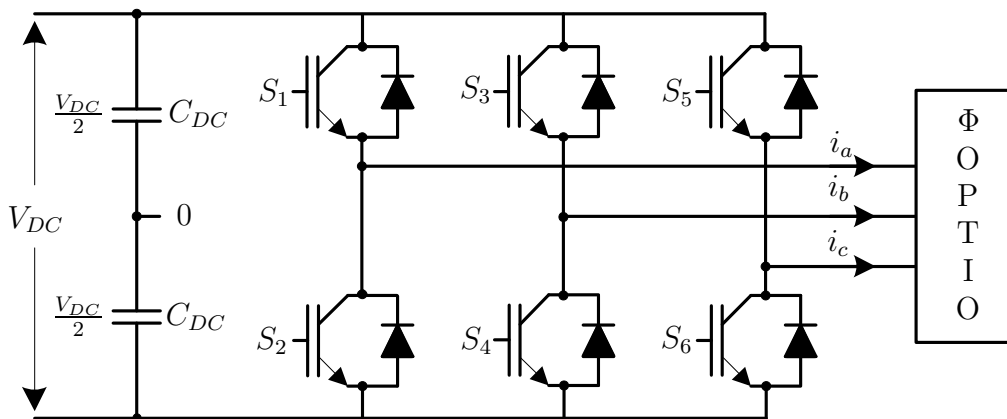
$$s(t) = \begin{cases} 1, & \text{αν ο διακόπτης έχει εντολή να άγει,} \\ 0, & \text{αν ο διακόπτης είναι σβηστός.} \end{cases} \quad (2.1)$$

Η ανάλυση του κυκλώματος μπορεί να γίνει χρησιμοποιώντας ένα από τα δύο παρακάτω μοντέλα διακοπών: το διακοπτικό και το μεσοσταθμισμένο μοντέλο.

Το διακοπτικό μοντέλο περιγράφει επακριβώς τη συμπεριφορά του αντιστροφέα σε μόνιμη και μεταβατική κατάσταση. Η ακρίβεια αυτή της περιγραφής μπορεί να επαυξηθεί, αν υιοθετηθούν ακριβή μοντέλα που περιγράφουν τη συμπεριφορά των στοιχείων του κυκλώ-

ματος του αντιστροφέα. Έτσι, δεδομένων των διακοπτικών συναρτήσεων των transistors, υπάρχει η δυνατότητα υπολογισμού του ρεύματος και της τάσης, μέσω του διακοπτικού μοντέλου. Επίσης, με τη χρήση του μοντέλου αυτού οι υπολογιζόμενες μεταβλητές περιλαμβάνουν και περιεχόμενο υψηλών συχνοτήτων, για παράδειγμα, λόγω της διακοπτικής διαδικασίας, καθώς επίσης και μεταβατικά.

Όμως, η σχέση μεταξύ του σήματος διαμόρφωσης—το οποίο είναι και η κύρια παράμετρος ελέγχου—και των μεταβλητών τάσης/ρεύματος δεν μπορεί να γίνει εύκολα αντιληπτή με τη χρήση του διακοπτικού μοντέλου. Επίσης, για τους σκοπούς σχεδίασης του ελέγχου, δεν είναι απαραίτητη η γνώση λεπτομερειών του περιεχομένου υψηλών συχνοτήτων της τάσης και της συχνότητας, επειδή οι αντισταθμιστές και τα φίλτρα σε σύστημα ελέγχου κλειστού βρόχου τυπικά παρουσιάζουν βαθυπερατή συμπεριφορά και δεν αλληλεπιδρούν με συνιστώσες υψηλών συχνοτήτων.



Σχήμα 2.4: Τριφασικός αντιστροφέας δύο επιπέδων

Για αυτούς τους λόγους, το ενδιαφέρον μετατίθεται από τις στιγμιαίες τιμές στις μεσοσταθμισμένες τιμές (average values) των μεταβλητών, με βάση τη θεωρία μεσοστάθμισης μη γραμμικών συστημάτων. Ο τελεστής μεσοστάθμισης, με βάση τον οποίο εξάγεται το μεσοσταθμισμένο μοντέλο είναι ο εξής:

$$\bar{x} = \frac{1}{T_s} \int_{t-T_s}^t x(\tau) d\tau \quad (2.2)$$

2.3.2 Ορισμός του Χωρικού Φασιθέτη

Θεωρώντας την παρακάτω συμμετρική, τριφασική, ημιτονοειδή κυματομορφή [24]:

$$\begin{aligned} f_a(t) &= \hat{f} \cos(\omega t + \theta_0), \\ f_b(t) &= \hat{f} \cos(\omega t + \theta_0 - \frac{2\pi}{3}), \\ f_c(t) &= \hat{f} \cos(\omega t + \theta_0 - \frac{4\pi}{3}), \end{aligned} \quad (2.3)$$

όπου \hat{f} , θ_0 και ω είναι το πλάτος, η αρχική γωνία φάσης και η γωνιακή συχνότητα της συνάρτησης, αντίστοιχα, ο χωρικός φασιδέτης ορίζεται ως εξής:

$$\vec{f}(t) = \frac{2}{3} \{ e^{j0} f_a(t) + e^{j\frac{2\pi}{3}} f_b(t) + e^{j\frac{4\pi}{3}} f_c(t) \} \quad (2.4)$$

Αντικαθιστώντας τα f_a , f_b και f_c της εξίσωσης (2.3) στην εξίσωση (2.4), και με τη χρήση των ταυτοτήτων $\cos \theta = \frac{1}{2}(e^{j\theta} + e^{-j\theta})$ και $e^{j0} + e^{j\frac{2\pi}{3}} + e^{j\frac{4\pi}{3}} \equiv 0$, προκύπτει

$$\vec{f}(t) = \hat{f} e^{j\theta_0} e^{j\omega t} = \hat{f} e^{j(\theta_0 + \omega t)} \quad (2.5)$$

2.3.2.1 Αναπαράσταση Χωρικού Φασιδέτη σε πλαίσιο $\alpha\beta$

Ο χωρικός φασιδέτης (2.4) μπορεί να αποσυντεθεί στην πραγματική και φανταστική του συνιστώσα:

$$\vec{f} = f_\alpha(t) + j f_\beta(t) \quad (2.6)$$

όπου f_α και f_β είναι οι συνιστώσες του $\vec{f}(t)$ στον α - και β -άξονα αντίστοιχα. Αντικαθιστώντας την εξίσωση (2.6) στην (2.4) προκύπτει

$$\begin{bmatrix} f_\alpha(t) \\ f_\beta(t) \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \mathbf{C} \begin{bmatrix} f_a(t) \\ f_b(t) \\ f_c(t) \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

όπου,

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

Η Εξίσωση (2.7) ονομάζεται Μετασχηματισμός Clarke.

2.3.2.2 Αναπαράσταση Χωρικού Φασιδέτη σε πλαίσιο dq

Για το χωρικό φασιδέτη $\vec{f} = f_\alpha(t) + j f_\beta(t)$, ο μετασχηματισμός από το πλαίσιο $\alpha\beta$ στο πλαίσιο dq πλαίσιο ορίζεται ως εξής:

$$f_d + jf_q = (f_\alpha(t) + jf_\beta(t))e^{-j\epsilon(t)} \quad (2.9)$$

το οποίο είναι ισοδύναμο σε μία μετατόπιση φάσης του $\hat{f}(t)$ κατά $-\epsilon(t)$. Αν το $\epsilon(t)$ επιλεχθεί ώστε:

$$\epsilon(t) = \epsilon_0 + \int \omega(\tau) d\tau \quad (2.10)$$

τότε σύμφωνα με την εξίσωση (2.9) η αναπαράσταση του \hat{f} στο πλαίσιο dq γίνεται:

$$f_d + jf_q = \hat{f}(t)e^{j(\theta_0 - \epsilon_0)}. \quad (2.11)$$

Έτσι, μετασχηματίζοντας το αρχικό τριφασικό σήμα στο πλαίσιο dq , οι συνιστώσες d και q που προκύπτουν είναι DC ποσότητες. Σύμφωνα με την ταυτότητα Euler $e^{j(\cdot)} = \cos(\cdot) + j \sin(\cdot)$, η Εξίσωση (2.9) μπορεί να γραφεί ως εξής:

$$\begin{bmatrix} f_d(t) \\ f_q(t) \end{bmatrix} = \mathbf{R}[\epsilon(t)] \begin{bmatrix} f_\alpha(t) \\ f_\beta(t) \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

όπου,

$$\mathbf{R}[\epsilon(t)] = \begin{bmatrix} \cos \epsilon(t) & \sin \epsilon(t) \\ -\sin \epsilon(t) & \cos \epsilon(t) \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

Τέλος, αναφέρεται η Εξίσωση (2.14), με βάση την οποία μετασχηματίζεται μία τριφασική, ημιτονοειδής ποσότητα, όπως αυτή της Εξίσωσης (2.3), στο πλαίσιο dq . Η εξίσωση ονομάζεται Μετασχηματισμός Park και είναι η εξής:

$$\begin{bmatrix} f_d(t) \\ f_q(t) \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \mathbf{T}[\epsilon(t)] \begin{bmatrix} f_a(t) \\ f_b(t) \\ f_c(t) \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

όπου,

$$\mathbf{T}[\epsilon(t)] = \begin{bmatrix} \cos \epsilon(t) & \cos \epsilon(t) - \frac{2\pi}{3} & \cos \epsilon(t) - \frac{4\pi}{3} \\ \sin \epsilon(t) & \sin \epsilon(t) - \frac{2\pi}{3} & \sin \epsilon(t) - \frac{4\pi}{3} \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

2.3.3 Εξαγωγή Μεταβλητών Κατάστασης

Σε συνέχεια του ορισμού βασικών εννοιών και εξισώσεων στα τριφασικά συστήματα, το επόμενο βήμα είναι η ανάλυση του κυκλώματος του Σχήματος 2.3 [24]. Έστω ότι η τάση

του AC συστήματος του ΑΠΤ εκράζεται ως:

$$\begin{aligned} V_{s,a}(t) &= \hat{V}_s \cos(\omega_0 t + \theta_0), \\ V_{s,b}(t) &= \hat{V}_s \cos(\omega_0 t + \theta_0 - \frac{2\pi}{3}), \\ V_{s,c}(t) &= \hat{V}_s \cos(\omega_0 t + \theta_0 - \frac{4\pi}{3}), \end{aligned} \quad (2.16)$$

όπου, \hat{V}_s είναι η τιμή πλάτους της φασικής τάσης, ω_0 είναι η γωνιακή συχνότητα του AC συστήματος-πηγής και θ_0 είναι η αρχική γωνία φάσης της πηγής. Με βάση την Εξίσωση (2.5), ο χωρικός φασιδέτης του $V_{s,abc}$ είναι:

$$\vec{V}_s(t) = \hat{V}_s e^{j(\theta_0 + \omega_0 t)} \quad (2.17)$$

Η διαφορική εξίσωση που περιγράφει την AC πλευρά του Σχήματος 2.3 είναι η παρακάτω:

$$L \frac{d\vec{i}}{dt} = -(R + r_{on}) \vec{i} + \vec{V}_t - \vec{V}_s \quad (2.18)$$

όπου, R και L είναι ο κλάδος που μεσολαβεί για τη διασύνδεση μεταξύ της εξόδου του αντιστροφέα και της AC πηγής, r_{on} είναι η αντίσταση αγωγής των διακοπτικών στοιχείων του αντιστροφέα και \vec{V}_t είναι το διάνυσμα που εκφράζει την τριφασική τάση στην έξοδο του αντιστροφέα. Αντικαθιστώντας την Εξίσωση (2.17) στην Εξίσωση (2.18), προκύπτει:

$$L \frac{d\vec{i}}{dt} = -(R + r_{on}) \vec{i} + \vec{V}_t - \hat{V}_s e^{j(\theta_0 + \omega_0 t)} \quad (2.19)$$

Στη συνέχεια, χρησιμοποιώντας την Εξίσωση (2.9) για να εκφράσουμε την Εξίσωση (2.19) σε πλαίσιο dq , αντικαθιστούμε $\vec{i} = i_{dq} e^{j\epsilon(t)}$ και $\vec{V}_t = V_{t,dq} e^{j\epsilon(t)}$ και ύστερα από τις απαραίτητες πράξεις, προκύπτει ότι:

$$L \frac{di_{dq}}{dt} = -j \left(L \frac{d\epsilon(t)}{dt} \right) i_{dq} - (R + r_{on}) i_{dq} + V_{t,dq} - \hat{V}_s e^{j(\theta_0 + \omega_0 t - \epsilon(t))} \quad (2.20)$$

όπου, $(\cdot)_{dq} = (\cdot)_d + j(\cdot)_q$.

Αποσυνθέτοντας την Εξίσωση (2.20) σε πραγματικό και φανταστικό μέρος, προκύπτει ότι:

$$L \frac{di_d}{dt} = \left(L \frac{d\epsilon(t)}{dt} \right) i_q - (R + r_{on}) i_d + V_{td} - \hat{V}_s e^{j(\theta_0 + \omega_0 t - \epsilon(t))} \quad (2.21)$$

$$L \frac{di_q}{dt} = - \left(L \frac{d\epsilon(t)}{dt} \right) i_d - (R + r_{on}) i_q + V_{tq} - \hat{V}_s e^{j(\theta_0 + \omega_0 t - \epsilon(t))} \quad (2.22)$$

Για να έλθουν οι Εξισώσεις (2.21) και (2.22) στην κανονική μορφή περιγραφής μεταβλητών στο χώρο κατάστασης, εισάγεται η μεταβλητή ω , όπου $\omega = \frac{d\epsilon(t)}{dt}$. Έτσι προκύπτουν οι παρακάτω μεταβλητές κατάστασης:

$$L \frac{di_d}{dt} = L\omega(t)i_q - (R + r_{on})i_d + V_{t,d} - \hat{V}_s e^{(j\theta_0 + \omega_0 t - \epsilon(t))} \quad (2.23)$$

$$L \frac{di_q}{dt} = -L\omega(t)i_d - (R + r_{on})i_q + V_{t,q} - \hat{V}_s e^{(j\theta_0 + \omega_0 t - \epsilon(t))} \quad (2.24)$$

$$\frac{d\epsilon(t)}{dt} = \omega(t) \quad (2.25)$$

Η χρησιμότητα του πλαισίου dq εξαρτάται από τη σωστή επιλογή των ϵ και ω . Αν $\omega = \omega_0$ και $\epsilon(t) = \omega_0 t + \theta_0$ τότε οι Εξισώσεις (2.23) και (2.24) γίνονται:

$$L \frac{di_d}{dt} = L\omega_0 i_q - (R + r_{on})i_d + V_{td} - \hat{V}_s \quad (2.26)$$

$$L \frac{di_q}{dt} = -L\omega_0 i_d - (R + r_{on})i_q + V_{t,q} \quad (2.27)$$

και περιγράφουν ένα γραμμικό σύστημα πρώτης τάξης, το οποίο διεγείρεται από την σταθερή είσοδο \hat{V}_s . Έτσι, οι μεταβλητές i_d , i_q , $V_{t,d}$ και $V_{t,q}$ είναι ποσότητες DC. Ο μηχανισμός για την εξασφάλιση ότι $\epsilon(t) = \omega_0 t + \theta_0$ είναι το PLL. Συγκεκριμένα, με βάση τις Εξισώσεις (2.9) και (2.17), προκύπτει για τις συνιστώσες της τάσης του AC συστήματος, αναλυμένες στο dq πλαίσιο ότι:

$$V_{s,d} = \hat{V}_s \cos(\theta_0 + \omega_0 t - \epsilon) \quad (2.28)$$

$$V_{s,q} = \hat{V}_s \sin(\theta_0 + \omega_0 t - \epsilon) \quad (2.29)$$

Η αντικατάσταση $\epsilon(t) = \omega_0(t)t + \theta_0$ στην (2.29) αντιστοιχεί στο ότι $V_{s,q} = 0$, στόχος που επιτυγχάνεται χάρη στο PLL.

2.3.4 PQ έλεγχος

Η ενεργός και άεργος ισχύς που λαμβάνει το AC σύστημα του Σχήματος 2.3 στο ΣΚΣ είναι [24]:

$$P_s(t) = \frac{3}{2}[V_{s,d}(t)i_d(t) + V_{s,q}(t)i_q(t)], \quad (2.30)$$

$$Q_s(t) = \frac{3}{2}[-V_{s,d}(t)i_q(t) + V_{s,q}(t)i_d(t)] \quad (2.31)$$

Αν το PLL βρίσκεται στη μόνιμη κατάσταση, $V_{s,q} = 0$, τότε οι Εξισώσεις (2.30) και (2.31) γίνονται:

$$P_s(t) = \frac{3}{2}V_{s,d}(t)i_d(t), \quad (2.32)$$

$$Q_s(t) = -\frac{3}{2}V_{s,d}(t)i_q(t) \quad (2.33)$$

Συνεπώς, από τις Εξισώσεις (2.32) και (2.33) προκύπτει ότι τα $P_s(t)$ και $Q_s(t)$ μπορούν να ελεγχθούν από τα i_d και i_q αντίστοιχα. Επίσης, προκύπτει ότι:

$$i_{d,ref}(t) = \frac{2}{3V_{s,d}}P_{s,ref}(t), \quad (2.34)$$

$$i_{q,ref}(t) = -\frac{2}{3V_{s,d}}Q_{s,ref}(t) \quad (2.35)$$

Επομένως, αν το σύστημα ελέγχου καταφέρει να εκμηδενίσει γρήγορα την απόκλιση των συνιστωσών του ρεύματος από τις αναφορές τους— $i_d \approx i_{d,ref}$ και $i_q \approx i_{q,ref}$ —τότε $P_s(t) \approx P_{s,ref}$ και $Q_s(t) \approx Q_{s,ref}$ —τα $P_s(t)$ και $Q_s(t)$ μπορούν να ελεγχθούν ανεξάρτητα από τις αντίστοιχες εντολές αναφοράς.

Ο έλεγχος του PQ ελεγκτή του Σχήματος 2.3 βασίζεται στις Εξισώσεις (2.23) και (2.24). Υποθέτοντας ότι $\omega(t) = \omega_0$ και λαμβάνοντας υπόψη τις Εξισώσεις (2.28) και (2.29), προκύπτει:

$$L\frac{di_d}{dt} = L\omega_0 i_q - (R + r_{on})i_d + V_{t,d} - V_{s,d} \quad (2.36)$$

$$L\frac{di_q}{dt} = -L\omega_0 i_d - (R + r_{on})i_q + V_{t,q} - V_{s,q} \quad (2.37)$$

Εξαιτίας της παρουσίας των όρων $L\omega_0$ στις Εξισώσεις (2.36) και (2.37), υπάρχει σύζευξη μεταξύ των μεταβλητών κατάστασης i_d και i_q . Υπάρχει, λοιπόν, η ανάγκη για απόζευξη.

Επίσης, επειδή πρόκειται για ΑΠΤ, η τριφασική τάση εξόδου του αντιστροφέα δίνεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$\begin{aligned} V_{t,a}(t) &= \frac{V_{DC}}{2}m_a(t), \\ V_{t,b}(t) &= \frac{V_{DC}}{2}m_b(t), \\ V_{t,c}(t) &= \frac{V_{DC}}{2}m_c(t), \end{aligned} \quad (2.38)$$

όπου m_{abc} είναι το τριφασικό σήμα διαμόρφωσης, το οποίο αποστέλλεται για σύγκριση με την τριγωνική κυματομορφή του αλγορίθμου PWM.

Στο dq πλαίσιο, η Εξίσωση (2.38) γίνεται:

$$V_{t,d}(t) = \frac{V_{DC}}{2}m_d(t), \quad (2.39)$$

$$V_{t,q}(t) = \frac{V_{DC}}{2}m_q(t), \quad (2.40)$$

Επιστρέφοντας στο ζήτημα της απόξευξης των δύο μεταβλητών κατάστασης του συστήματος ελέγχου— i_d και i_q —τα m_d και m_q ορίζονται όπως παρακάτω:

$$m_d = \frac{2}{V_{DC}}(u_d - L\omega_0 i_q + V_{s,d}), \quad (2.41)$$

$$m_q = \frac{2}{V_{DC}}(u_q - L\omega_0 i_d + V_{s,q}) \quad (2.42)$$

όπου u_d και u_q είναι δύο νέες είσοδοι ελέγχου. Αντικαθιστώντας τις Εξισώσεις (2.41) και (2.42) στις Εξισώσεις (2.39) και (2.40) και το αποτέλεσμα αυτής στις Εξισώσεις (2.36) και (2.37) προκύπτει:

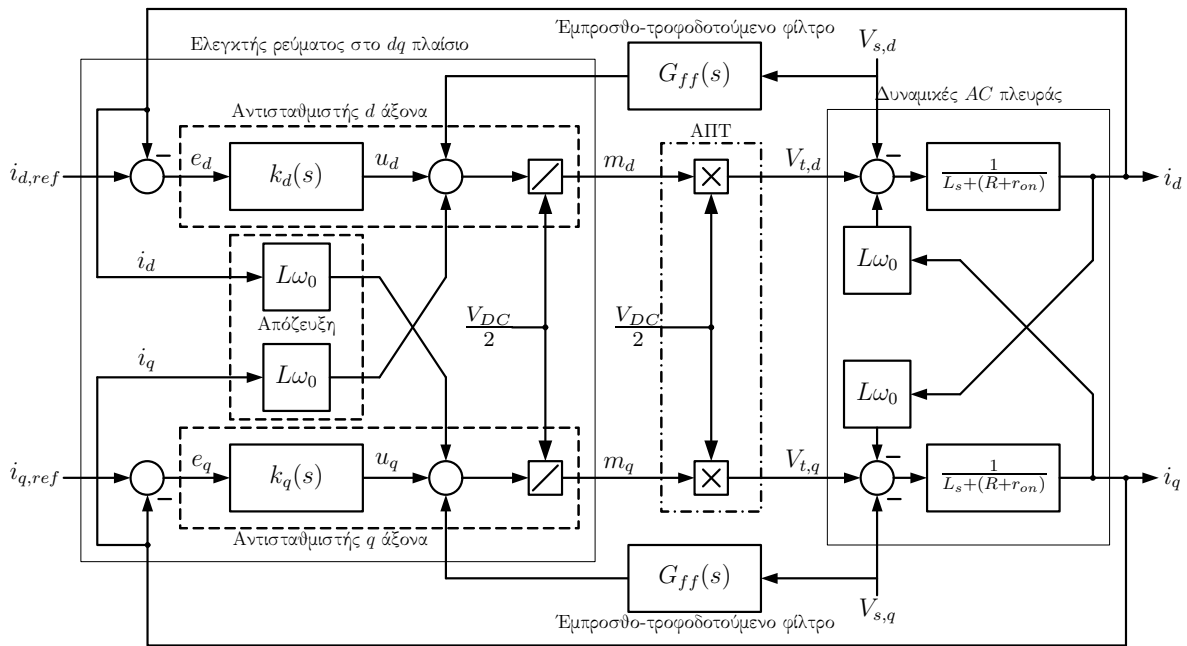
$$L\frac{di_d}{dt} = -(R + r_{on})i_d + u_d, \quad (2.43)$$

$$L\frac{di_q}{dt} = -(R + r_{on})i_q + u_q \quad (2.44)$$

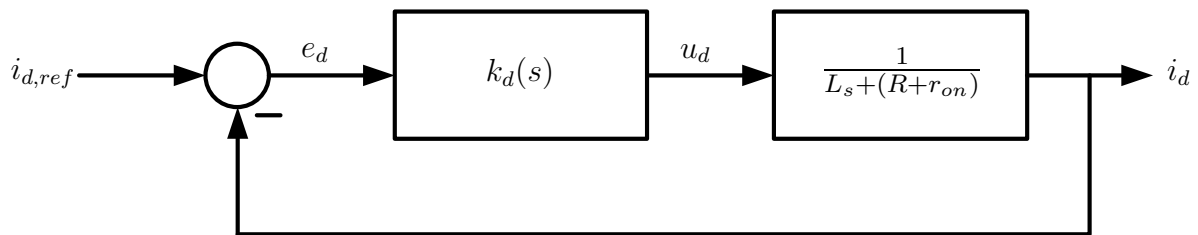
Οι Εξισώσεις (2.43) και (2.44) περιγράφουν δύο αποπλεγμένα, γραμμικά συστήματα, πρώτης τάξης. Στο Σχήμα 2.5 απεικονίζεται η αναπαράσταση των ελεγκτών ρεύματος σε dq άξονες του ΑΠΤ του Σχήματος 2.3 σε μπλοκ διάγραμμα, όπου τα u_d και u_q είναι οι έξοδοι των αντίστοιχων αντισταθμιστών. Η διαδικασία που ακολουθείται στο εσωτερικό του ελεγκτή είναι η εξής:

- (i) \diamond Ο αντισταθμιστής του d άξονα επεξεργάζεται το σφάλμα $e_d = i_{d,ref} - i_d$ και παρέχει το u_d . Στη συνέχεια συνεισφέρει στην Εξίσωση (2.41).
- \diamond Ο αντισταθμιστής του q άξονα επεξεργάζεται το σφάλμα $e_q = i_{q,ref} - i_q$ και παρέχει το u_q . Στη συνέχεια συνεισφέρει στην Εξίσωση (2.42).
- (ii) Τα σήματα m_d και m_q ενισχύονται κατά έναν παράγοντα $\frac{V_{DC}}{2}$ και προκύπτουν τα $V_{t,d}$ και $V_{t,q}$.
- (iii) Τα σήματα τάσης $V_{t,d}$ και $V_{t,q}$ ελέγχουν τα i_d και i_q με βάση τις Εξισώσεις (2.36) και (2.37).

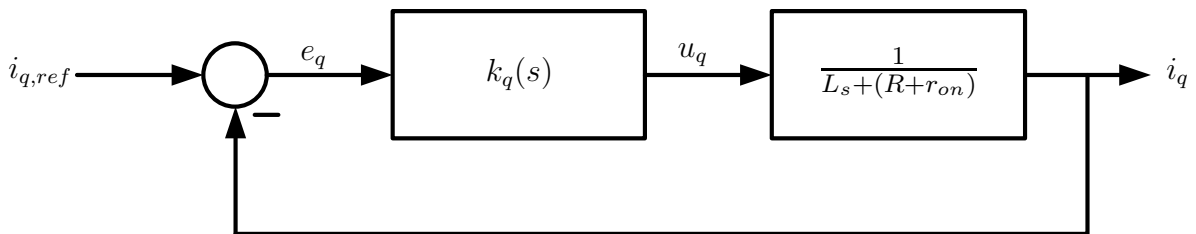
Στο Σχήμα 2.6 απεικονίζεται το μπλοκ διάγραμμα ελέγχου σε κλειστό βρόχο σε dq άξονες. Όπως φαίνεται, τα δύο μπλοκ είναι ταυτόσημα. Έτσι, και οι αντίστοιχοι αντισταθμιστές μπορούν να είναι ταυτόσημοι. Επομένως, η ανάλυση που ακολουθεί για τον ελεγκτή σε κλειστό βρόχο για τον d άξονα, ισχύει και για τον q άξονα.



Σχήμα 2.5: Μπλοκ διάγραμμα του συστήματος ελέγχου του ΑΠΤ του Σχήματος 2.3



(α') Ελεγκτής ρεύματος d άξονα σε κλειστό βρόχο



(β') Ελεγκτής ρεύματος q άξονα σε κλειστό βρόχο

Σχήμα 2.6: Απλοποιημένο μπλοκ διάγραμμα του συστήματος ελέγχου του ΑΠΤ του Σχήματος 2.3

Θεωρώντας τον ελεγκτή σε κλειστό βρόχο του Σχήματος 2.6(α'), ο αντισταθμιστής $k_d(s)$ μπορεί να είναι απλώς ένας αναλογικός-ολοκληρωτικός (PI) αντισταθμιστής, στόχος του οποίου είναι η εξάλειψη του σφάλματος του ρεύματος στο d άξονα. Έστω,

$$k_d(s) = \frac{k_p(s)s + k_i}{s}, \quad (2.45)$$

όπου k_p και k_i είναι το αναλογικό και το ολοκληρωτικό κέρδος, αντίστοιχα. Έτσι, το κέρδος

ανοιχτού βρόχου είναι:

$$ol(s) = \frac{k_p}{sL} \frac{s + k_i/k_p}{s + (R + r_{on})/L} \quad (2.46)$$

Πρέπει να σημειωθεί ότι ο πόλος στο $s = (R + r_{on})/L$ —ο οποίος είναι πολύ κοντά στην αρχή των αξόνων, και προκαλεί πτώση του πλάτους και της φάσης του κέρδους ανοιχτού βρόχου σε χαμηλές συχνότητες—ακυρώνεται από το μηδενικό στο k_i/k_p και έτσι το κέρδος ανοιχτού βρόχου παίρνει την τιμή $ol(s) = k_p/Ls$. Στη συνέχεια, η συνάρτηση μεταφοράς κλειστού βρόχου είναι η εξής:

$$\frac{I_d(s)}{I_{d,ref}(s)} = G_i(s) = \frac{1}{\tau_i s + 1} \quad (2.47)$$

αν

$$k_p = \frac{L}{\tau_i}, \quad (2.48)$$

$$k_i = \frac{R + r_{on}}{\tau_i}, \quad (2.49)$$

όπου τ_i είναι η σταθερά χρόνου του τελικού συστήματος κλειστού βρόχου και η οποία πρέπει να επιλέγεται κατάλληλα από το σχεδιαστή. Από τη μία, η σταθερά χρόνου τ_i πρέπει να είναι αρκετά μικρή, ώστε να επιτυγχάνεται γρήγορη απόκριση του συστήματος ελέγχου. Από την άλλη, πρέπει να είναι και αρκετά μεγάλη, ώστε το εύρος ζώνης του συστήματος κλειστού βρόχου να είναι αρκετά μικρότερο—για παράδειγμα 10 φορές—από τη διακοπτική συχνότητα του ΑΠΤ. Τέλος, αναλόγως με τις απαιτήσεις της εκάστοτε εφαρμογής και της διακοπτικής συχνότητας του ΑΠΤ, το τυπικό εύρος τιμών του τ_i είναι 0,5 – 5 ms.

ΜΕΡΟΣ ΙΙ

ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΙΣ

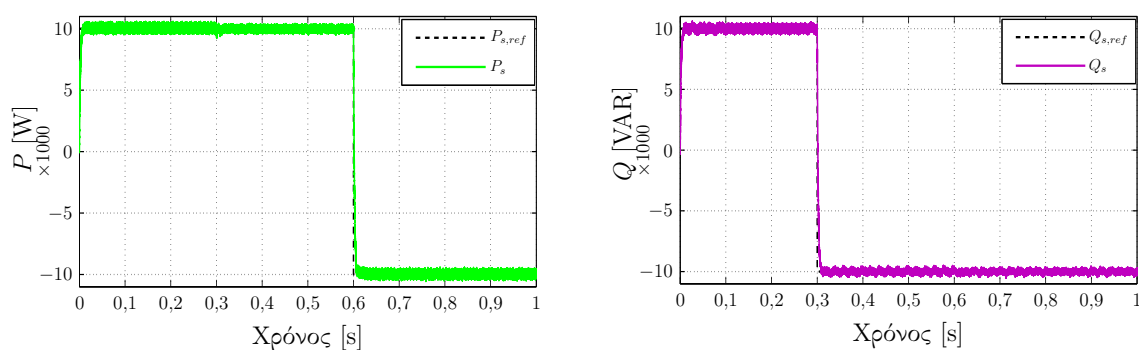
Κεφάλαιο 3

Κυκλωματική Διάταξη Προσομοιώσεων

3.1 Απόκριση ΦΒ Αντιστροφέα

Σε αυτό το μέρος μελετώνται κάποιες μέθοδοι ανίχνευσης νησιδοποίησης, τόσο ως προς την υλοποίησή τους, όσο και ως προς την αποδοτικότητά τους. Η αποδοτικότητα των παθητικών μεθόδων εξετάζεται με βάση το κριτήριο της Μη Ανιχνεύσιμης Ζώνης και οι ενεργητικές μέθοδοι με βάση το κριτήριο υποβάθμισης της ποιότητας ισχύος εξόδου του αντιστροφέα. Η ανάλυση των κριτηρίων αυτών γίνεται στην Παράγραφο 1.3.

Οι προσομοιώσεις των μεθόδων ανίχνευσης νησιδοποίησης υλοποιήθηκαν στο περιβάλλον προσομοιώσεων MATLAB/SIMULINK®.



(α) Ενεργός ισχύς εξόδου του αντιστροφέα και αναφορά του.

(β) Άεργος ισχύς εξόδου του αντιστροφέα και αναφορά του.

Σχήμα 3.1: Ενεργός και άεργος ισχύς εξόδου αντιστροφέα.

Για τον αντιστροφέα της κυκλωματικής διάταξης των προσομοιώσεων σχεδιάστηκε ελεγκτής ενεργού-άεργου ισχύος (PQ -controller), του οποίου ο έλεγχος επιτυγχάνεται έμμεσα, μέσω ρεύματος (current-mode control), όπως αυτός παρουσιάζεται στην Παράγραφο 2.3.4.

Αρχικά, παρουσιάζεται η συμπεριφορά του PQ -ελεγκτή (βλ. 2.3.4) σε μεταβολές των αναφορών της ενεργού και αέργου ισχύος. Συγκεκριμένα, στο Σχήμα 3.1 φαίνεται ότι το σφάλμα μεταξύ της ενεργού και αέργου ισχύος που μεταφέρεται στο δίκτυο— P_s και Q_s —και των αντίστοιχων αναφορών τους— $P_{s,ref}$ και $Q_{s,ref}$ —εκμηδενίζεται γρήγορα. Επίσης, φαίνεται ότι οι αποκρίσεις των P_s και Q_s είναι αποζευγμένες η μία από την άλλη—όταν η μία από τις δύο υφίσταται κάποια αλλαγή η άλλη δεν επηρεάζεται. Οι βηματικές συναρτήσεις που εφαρμόστηκαν για τις εντολές αναφοράς ενεργού και αέργου ισχύος είναι οι παρακάτω:

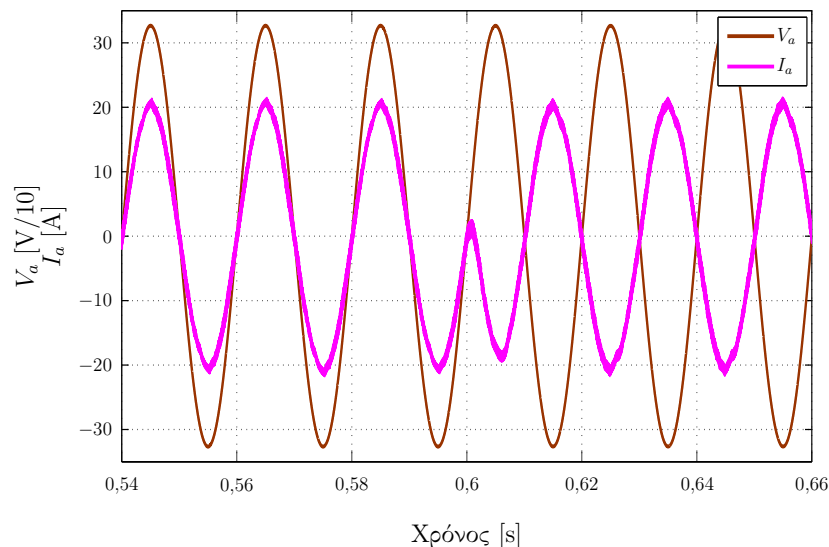
$$P_{s,ref}(t) = \begin{cases} 10000 \text{ W}, & \text{για } t < 0,6 \text{ s}, \\ -10000 \text{ W}, & \text{για } t \geq 0,6 \text{ s}. \end{cases}$$

$$Q_{s,ref}(t) = \begin{cases} 10000 \text{ VAR}, & \text{για } t < 0,3 \text{ s}, \\ -10000 \text{ VAR}, & \text{για } t \geq 0,3 \text{ s}. \end{cases}$$

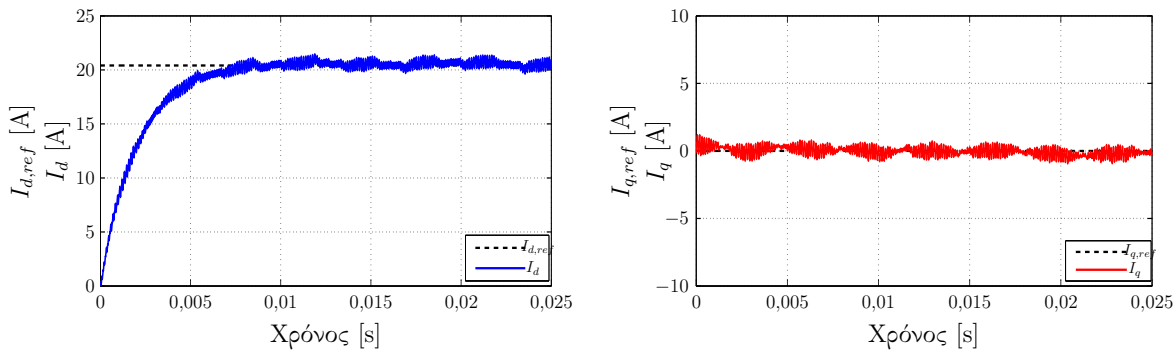
Μία άλλη περίπτωση που μελετάται είναι αυτή, όπου σαν εντολή αναφοράς για την αέργο ισχύ ισχύει $Q_{s,ref} = 0 \text{ VAR}$ και η εντολή αναφοράς για την ενεργό ισχύ δίνεται από την παρακάτω βηματική συνάρτηση:

$$P_{s,ref}(t) = \begin{cases} 10000 \text{ W}, & \text{για } t < 0,6 \text{ s}, \\ -10000 \text{ W}, & \text{για } t \geq 0,6 \text{ s}. \end{cases}$$

Το Σχήμα 3.2 απεικονίζει την κυματομορφή τάσης (σε κλίμακα 1 : 10) και ρεύματος της φάσης a στην έξοδο του αντιστροφέα— V_a και I_a —επικεντρωμένη στα 0,6 s. Παρατηρείται ότι για $t < 0,6$ s η τάση και το ρεύμα είναι συμφασικά και για $t \geq 0,6$ s η τάση και το ρεύμα έχουν 180° διαφορά φάσης.



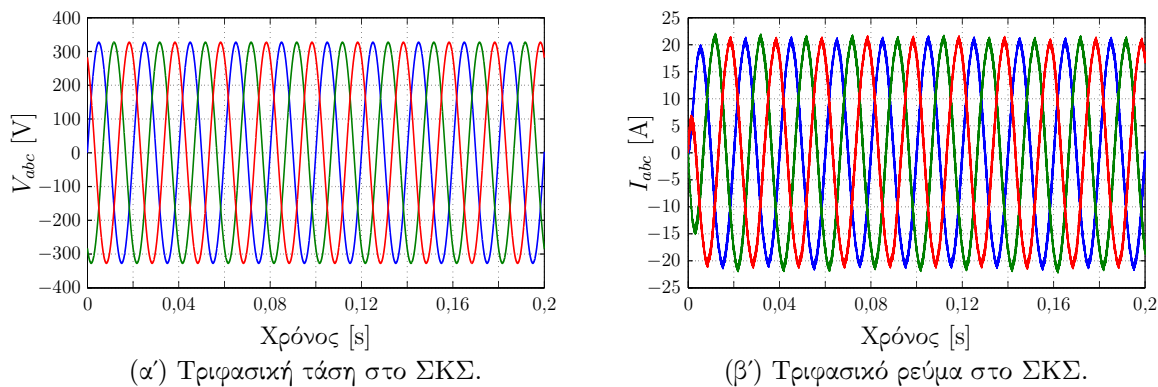
Σχήμα 3.2: Τάση και ρεύμα εξόδου αντιστροφέα (a φάση).



(α') Ρεύμα αντιστροφέα και αναφορά του στον d - (β') Ρεύμα αντιστροφέα και αναφορά του στον q - άξονα.

Σχήμα 3.3: Ρεύμα αντιστροφέα και αναφορά του στο πλαίσιο dq .

Το Σχήμα 3.3 απεικονίζει τις κυματομορφές της d συνιστώσας του ρεύματος του αντιστροφέα I_d , με την αναφορά της $I_{d,ref}$, καθώς και της q συνιστώσας I_q , με την αναφορά της $I_{q,ref}$. Φαίνεται ξεκάθαρα πως η βηματική απόκριση της κυματομορφής I_d είναι εκθετική συνάρτηση πρώτης τάξης, η οποία φτάνει την τελική της τιμή περίπου τη χρονική στιγμή 0,0075 s. Επίσης, στο ίδιο σχήμα φαίνεται καθαρά ότι οι μεταβλητές I_d και I_q είναι αποζευγμένες και ότι η κυματομορφή I_q παραμένει ίση με μηδέν, όσο η κυματομορφή I_d μεταβάλλεται από το μηδέν μέχρι 20, 5 A.



(α') Τριφασική τάση στο ΣΚΣ.

(β') Τριφασικό ρεύμα στο ΣΚΣ.

Σχήμα 3.4: Τριφασική τάση και ρεύμα στο ΣΚΣ για την περίπτωση που περιγράφεται από την (3.1).

Όσον αφορά την αποδοτικότητα του αντιστροφέα σε σχέση με την αρμονική παραμόρφωση του ρεύματος, πληρείται η προϋπόθεση $THD_I < 5\%$ και μετρήθηκε ότι είναι:

$$THD_I = 4,05\%^1$$

Τέλος, στο Σχήμα 3.4 παρουσιάζεται η κυματομορφή της τριφασικής τάσης και του ρεύματος στο εξής σημείο λειτουργίας αντιστροφέα:

$$P_{s,ref} = 10000 \text{ W},$$

¹Για $Q_f \approx 1$

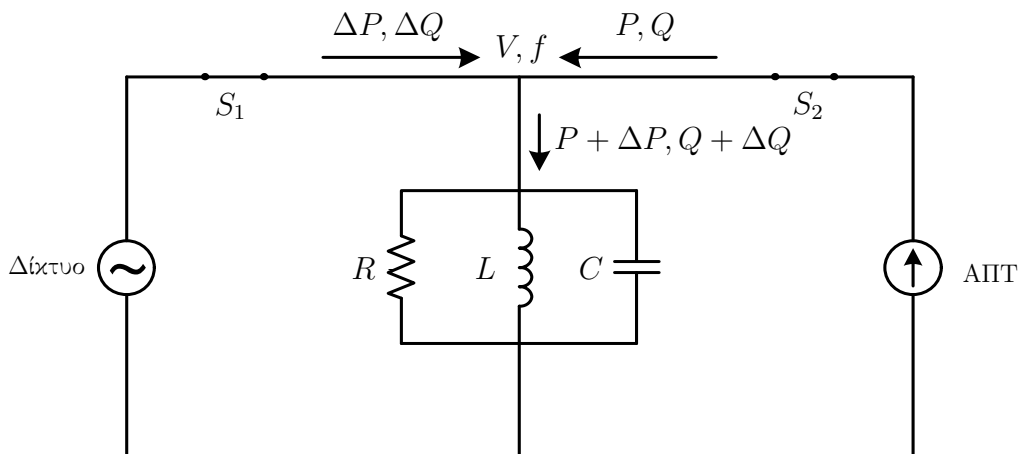
$$Q_{s,ref} = 0 \text{ VAR},$$

για και τις εξής τιμές φορτίου:

$$\begin{aligned} P_R &= 8000 \text{ W}, \\ Q_L &= 8000 \text{ VAR}, \\ Q_C &= 8000 \text{ VAR}. \end{aligned} \quad (3.1)$$

3.2 Ρυθμίσεις Παραμέτρων Μοντέλου Κυκλωματικής Διάταξης Προσομοιώσεων

Η κυκλωματική διάταξη που εξετάζεται είναι αυτή του Σχήματος 3.5, όπου ο φωτοβολταϊκός αντιστροφέας λειτουργεί σαν πηγή ρεύματος. Ο διακόπτης του δικτύου— S_1 ανοίγει τη χρονική στιγμή $t = 0, 1 \text{ s}$ για τις προσομοιώσεις των παθητικών μεθόδων και $t = 0, 25 \text{ s}$ για αυτές των ενεργητικών μεθόδων.



Σχήμα 3.5: Κυκλωματική διάταξη προσομοιώσεων

Το RLC φορτίο είναι ρυθμισμένο περί το 100% της ονομαστικής ενεργού ισχύος του φωτοβολταϊκού αντιστροφέα, δηλαδή $P_\Phi \approx 10000 \text{ W}$, με σκοπό την επίτευξη της ισορροπίας ισχύος (power match). Η συχνότητα συντονισμού του φορτίου είναι 50 Hz , δηλαδή ίση με την ονομαστική συχνότητα του δικτύου. Επίσης, οι προσομοιώσεις λαμβάνουν χώρα για συντελεστή ποιότητας του φορτίου $Q_f = 1$, δηλαδή όση ενεργός ισχύς καταναλώνεται από την αντίσταση R , τόση άεργος ισχύς ανταλλάσσεται μεταξύ της χωρητικότητας C και της επαγωγικότητας L .

Η διάρκεια προσομοίωσης είναι $T = 0, 6 \text{ s}$ και ο χρόνος δειγματοληψίας $T_s = 5 \mu\text{s}$.

Τέλος, αναφέρεται πως οι εντολές αναφοράς ενεργού και άεργου ισχύος των προσομοιώσεων που έλαβαν χώρα, ήταν ρυθμισμένες ως εξής:

$$P_{s,ref} = 10000 \text{ W},$$

$$Q_{s,ref} = 0 \text{ VAR.}$$

Κεφάλαιο 4

Παθητικές Μέθοδοι

Οι παθητικές μέθοδοι βασίζονται στην ανίχνευση ανωμαλιών στα ηλεκτρικά σήματα στο ΣΚΣ του Σχήματος 3.5.

Σε κατάσταση νησιδοποίησης οι μεταβολές στο πλάτος ή στο ρυθμό μεταβολής των ηλεκτρικών σημάτων στο ΣΚΣ μπορούν να προκαλέσουν την υπέρβαση των επιτρεπόμενων τιμών κατωφλίου. Το γεγονός αυτό μπορεί να χρησιμοποιηθεί για ανίχνευση νησιδοποίησης. Όμως, σε συνθήκες ισορροπίας ισχύος (power match), αυτές οι μεταβολές είναι αμελητέες και, επομένως, δεν υπερβαίνουν τα επιτρεπόμενα όρια κατωφλίου μέσα στο αποδεκτό χρονικό διάστημα. Αυτές οι συνθήκες βρίσκονται εντός της Μη Ανιχνεύσιμης Ζώνης. Η Μη Ανιχνεύσιμη Ζώνη μπορεί να μειωθεί με τη μείωση των τιμών κατωφλίου, όμως αυτό μπορεί να οδηγήσει σε ενεργοποίηση όχλησης (nuisance tripping). Συνεπώς, κάθε παθητική μέθοδος έχει πρόβλημα ύπαρξης Μη Ανιχνεύσιμης Ζώνης υπολογίσιμου μεγέθους [2].

Στις Παραγράφους 4.1 - 4.5 παρουσιάζονται οι εξής παθητικές μέθοδοι ανίχνευσης νησιδοποίησης:

- ◇ μέσω ηλεκτρονόμων OUV και OUF,
- ◇ μέσω THD_V ,
- ◇ μέσω Voltage Phase Jump,
- ◇ μέσω Vector Shift και
- ◇ μέσω ηλεκτρονόμου RoCoF.

Τέλος, στην Παράγραφο 4.6 παρέχεται μία συγκριτική παρουσίαση των Μη Ανιχνεύσιμων Ζωνών των παραπάνω παθητικών μεθόδων.

4.1 Ανίχνευση Νησιδοποίησης μέσω ηλεκτρονόμων OUV και OUF

Υπάρχει η απαίτηση όλοι οι αντιστροφείς που διασυνδέονται στο δίκτυο να διαθέτουν ηλεκτρονόμους OUV και OUF. Οι εξισώσεις ισχύος ισορροπίας δίνονται από τις Εξισώσεις (1.5) και (1.6).

Η ανίχνευση της νησιδοποίησης αυτής της μεθόδου—η οποία πλέον θα καλείται μέθοδος OUV/OUF για χάρη συντομίας—βασίζεται στην τιμή της ισχύος που παρέχεται στο φορτίο από το δίκτυο— ΔP και ΔQ —και από τις τιμές κατωφλίου OUV (V_{\max} , V_{\min}) και OUF (f_{\max} , f_{\min}). Όταν το δίκτυο αποσυνδεθεί (άνοιγμα διακόπτη S_1), η τάση και η συχνότητα του φορτίου λαμβάνουν νέες τιμές V' και f' . Όταν η νέα τάση ή της νέα συχνότητα βρεθεί εκτός των προβλεπόμενων ορίων των προαστασιών OUV και OUF ανοίγει διακόπτης του αντιστροφέα S_2 . Αν η νέα τάση ή η νέα συχνότητα δεν βγει εκτός των προβλεπόμενων ορίων, ο αντιστροφέας θα συνεχίσει να λειτουργεί σε κατάσταση νησιδοποίησης και η αναντιστοιχία ενεργού και αέργου ισχύος στην οποία συμβαίνει αυτό ανήκει στη Μη Ανιχνεύσιμη Ζώνη.

Πρέπει να σημειωθεί, ότι το 1998 οι Begović et al. [3] δημοσίευσαν αποτελέσματα έρευνας, όπου αποδεικνυόταν ότι σε ΦΒ συστήματα τα οποία διαθέτουν μόνο αυτού του τύπου την προστασία έναντι της κατάστασης της νησιδοποίησης, υπάρχει σημαντική πιθανότητα ο συνδυασμός των τιμών του φορτίου να βρεθεί μέσα στη Μη Ανιχνεύσιμη Ζώνη. Επομένως, η προστασία αυτή δεν είναι επαρκής αν λειτουργεί μόνη της και υπάρχει ανάγκη για επιπρόσθετη προστασία έναντι της κατάστασης της νησιδοποίησης.

Η Μη Ανιχνεύσιμη Ζώνη για την ενεργό και την άεργο ισχύ της μεθόδου αυτής μπορεί να υπολογιστεί θεωρητικά [15] και είναι η παρακάτω:

$$\left(\frac{V}{V_{\max}}\right)^2 - 1 \leq \frac{\Delta P}{P_{\Delta\Pi}} \leq \left(\frac{V}{V_{\min}}\right)^2 - 1, \quad (4.1)$$

$$Q_f \left(1 - \left(\frac{f}{f_{\max}}\right)^2\right) \leq \frac{\Delta Q}{P_{\Delta\Pi}} \leq Q_f \left(1 - \left(\frac{f}{f_{\min}}\right)^2\right). \quad (4.2)$$

Επομένως, στην προκειμένη περίπτωση, για $Q_f = 1$, $f_{\max} = 50,5 \text{ Hz}$, $f_{\min} = 49,5 \text{ Hz}$, $V_{\max} = 264 \text{ V}$ και $V_{\min} = 184 \text{ V}^1$, η Μη Ανιχνεύσιμη Ζώνη θεωρητικά είναι:

$$-24,09\% \leq \frac{\Delta P}{P_{\Delta\Pi}} \leq 56,25\%, \quad (4.3)$$

$$-2,0\% \leq \frac{\Delta Q}{P_{\Delta\Pi}} \leq 1,9\%. \quad (4.4)$$

¹Οι τάσεις είναι φασικές και RMS.

4.1.1 Αποτελέσματα Προσομοιώσεων της μεθόδου OUV/OUF

Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τις προσομοιώσεις των εξής περιπτώσεων:

Πίνακας 4.1: Περιπτώσεις προσομοίωσης για τη μέθοδο OUV/OUF

Παράμετροι	Π1	Π2	Π3	Π4
P_R [W]	15400	7780	14000	14000
Q_L [VAR]	15400	7780	13870	14140
Q_C [-VAR] ²	15400	7780	14130	13860
Q_f ³	1	1	≈ 1	≈ 1
$t_{islanding}$ [s]	0, 1			
Ενεργ/ηση ηλ/νόμου	UV	OV	UF	OF

Από τις Εξισώσεις (1.5) και (1.6) υπολογίζεται η αναντιστοιχία ισχύος (power mismatch) για κάθε μία από τις 4 περιπτώσεις του Πίνακα 4.1. Για τον υπολογισμό του ΔQ απαιτείται η γνώση του Q_Φ , η εύρεση του οποίου γίνεται μέσω της Εξίσωσης 1.9. Στις δύο πρώτες περιπτώσεις δεν υπάρχει ροή αέργου ισχύος από/προς το φορτίο, διότι η χωρητική και επαγωγική άεργος ισχύς είναι ίσες. Όμως στις δυο τελευταίες περιπτώσεις, προκειμένου να εξεταστεί το ενδεχόμενο ροής αέργου ισχύος από/προς το φορτίο, ρυθμίστηκε η χωρητική και η επαγωγική άεργος ισχύς έτσι ώστε να μην είναι ίσες μεν, αλλά η διαφορά τους να είναι τόσο μικρή ώστε $Q_f \approx 1$, δε. Τα αποτελέσματα συνοψίζονται στον Πίνακα 4.2.

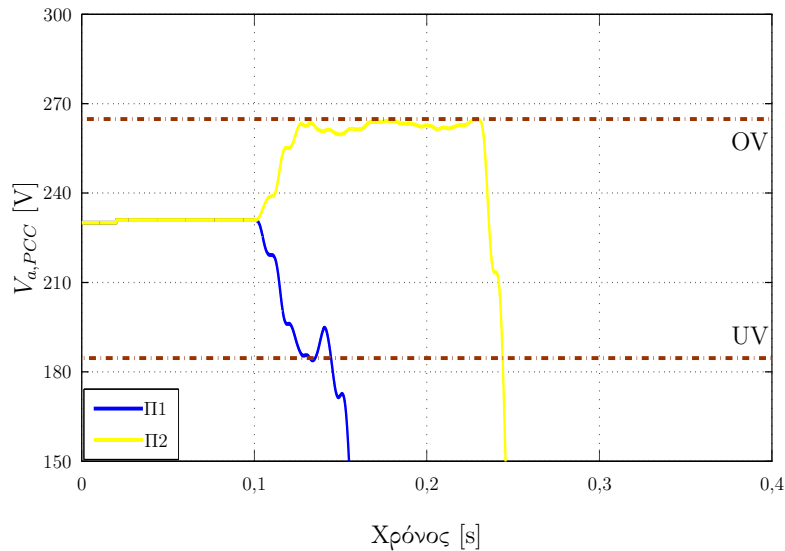
Πίνακας 4.2: Αναστοιχία ισχύος για τις Περιπτώσεις 1 – 4 του Πίνακα 4.1

Παράμετροι	Π1	Π2	Π3	Π4
P_Φ [W]	15400	7780	14000	14000
ΔP [W]	5400	-2220	4000	4000
Q_Φ [VAR]	0	0	-260	280
ΔQ [VAR]	0	0	-260	280

Σύμφωνα με την Παράγραφο 1.3.1, θεωρητικά, αναμένεται στην περίπτωση Π1 να αποσυνδεθεί ο αντιστροφέας λόγω ενεργοποίησης του ηλεκτρονόμου UV και στην περίπτωση Π2 λόγω του ηλεκτρονόμου OV. Η θεωρία επαληθεύεται πρακτικά μέσω προσομοίωσης και το γεγονός αυτό παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.1.

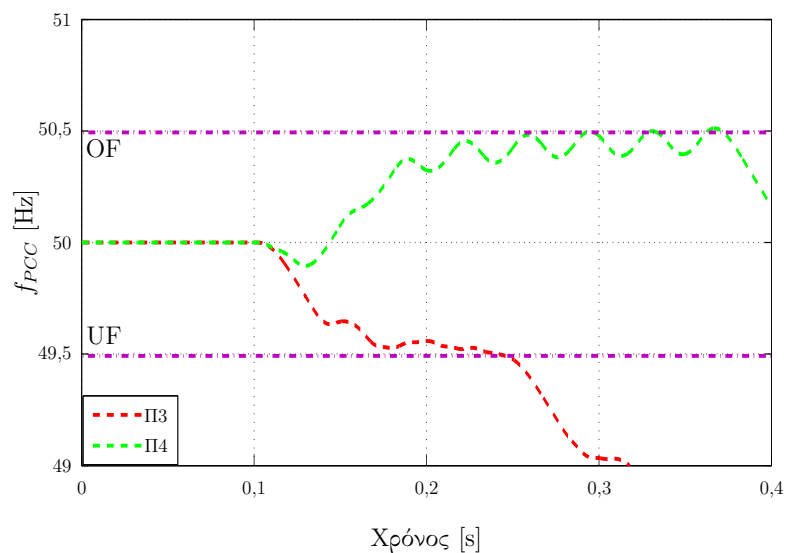
²Σύμβαση φορτίου.

³Με βάση την Εξίσωση (1.3)



Σχήμα 4.1: Τάση της φάσης a στο ΣΚΣ για τις Περιπτώσεις 1 και 2.

Σύμφωνα με την Παράγραφο 1.3.1, θεωρητικά, αναμένεται στην περίπτωση Π3 να αποσυνδεθεί ο αντιστροφέας λόγω ενεργοποίησης του ηλεκτρονόμου UF και στην περίπτωση Π4 λόγω του ηλεκτρονόμου OV. Η θεωρία επαληθεύεται πρακτικά μέσω προσομοίωσης και το γεγονός αυτό παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.2.

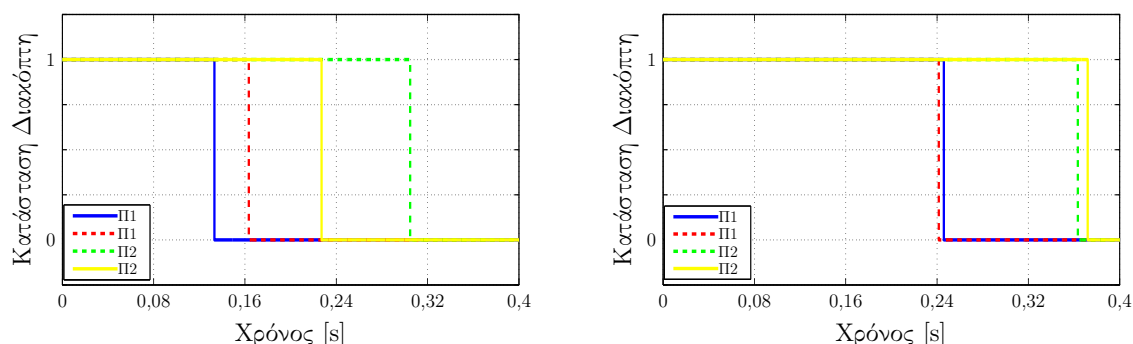


Σχήμα 4.2: Συχνότητα στο ΣΚΣ για τις Περιπτώσεις 3 και 4.

Τέλος, στο Σχήμα 4.3 απεικονίζονται οι στιγμές της ενεργοποίησης των τεσσάρων ηλεκτρονόμων για κάθε μία από τις τέσσερις περιπτώσεις. Συγκεκριμένα, στο Σχήμα 4.3(α') φαίνεται ότι και στις δύο περιπτώσεις—Π1 και Π2—ο ηλεκτρονόμος ο οποίος ενεργοποιείται πρώτος και εξαιτίας του οποίου ανιχνεύεται τελικά η κατάσταση της νησιδοποίησης, είναι ο ηλεκτρονόμος OUV. Αυτό είναι αναμενόμενο λόγω της αναντιστοιχίας της ενεργού ισχύος.

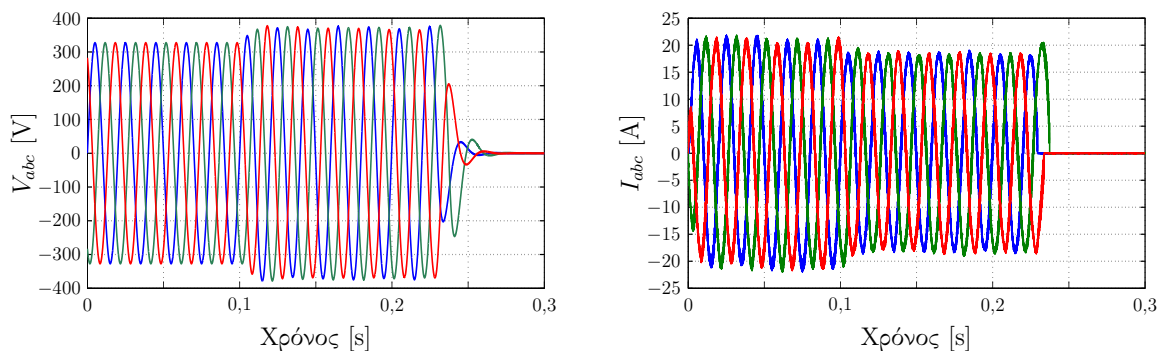
Στο Σχήμα 4.3(β') φαίνεται ότι και στις δύο περιπτώσεις—Π3 και Π4—ο ηλεκτρονόμος ο οποίος ενεργοποιείται πρώτος και εξαιτίας του οποίου ανιχνεύεται τελικά η κατάσταση της νησιδοποίησης, είναι ο ηλεκτρονόμος OUF. Αυτό είναι αναμενόμενο λόγω της αναντιστοιχίας της αέργου ισχύος.

Τέλος, στο Σχήμα 4.4 απεικονίζεται ο αναμενόμενος μηδενισμός της τριφασικής τάσης και του ρεύματος στο ΣΚΣ για την περίπτωση Π2.



(α') Κατάσταση ηλεκτρονόμων OUV και OUF της (β') Κατάσταση ηλεκτρονόμων OUV και OUF της Περίπτωσης 1 και 2. Περίπτωσης 3 και 4.

Σχήμα 4.3: Μετάβαση των ηλεκτρονόμων OUV και OUF όταν ανιχνεύεται η κατάσταση νησιδοποίησης. Με συμπαγείς γραμμές απεικονίζεται η κατάσταση των ηλεκτρονόμων OUV και με διακεκομμένες αυτή των ηλεκτρονόμων OUF.



(α') Τριφασική τάση στο ΣΚΣ για την περίπτωση Π2. (β') Τριφασικό ρεύμα στο ΣΚΣ για την περίπτωση Π2.

Σχήμα 4.4: Τριφασική τάση και ρεύμα στο ΣΚΣ για την περίπτωση Π2 (μέθοδος OUV/OUF)

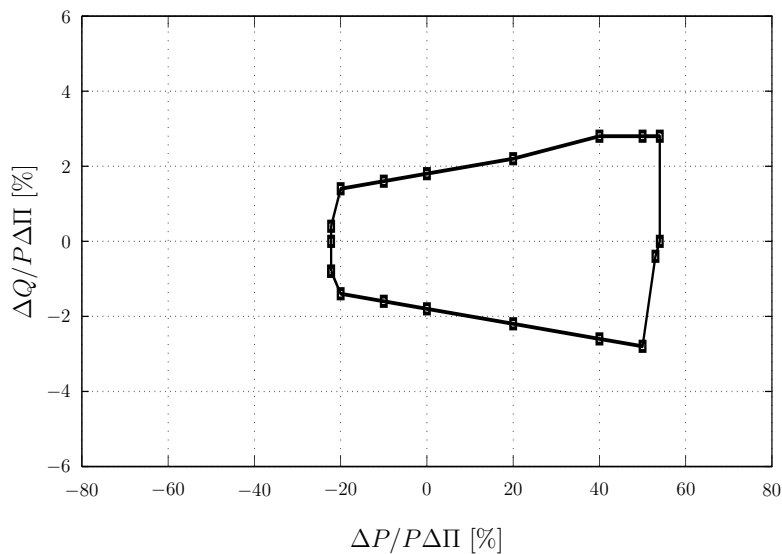
4.1.2 Μη Ανιχνεύσιμη Ζώνη μεθόδου OUV/OUF

Στο Σχήμα 4.5 παρουσιάζεται το διάγραμμα Μη Ανιχνεύσιμης Ζώνης της μεθόδου OUV/OUF. Από αυτό εξάγεται το συμπέρασμα ότι για τις δεδομένες τιμές παραμέτρων η μη

ανιχνεύσιμη ζώνη είναι:

$$\begin{cases} -22,2\% \leq \frac{\Delta P}{P_{\Phi}} \leq 54\% & \text{για } \Delta Q = 0, \\ -1,8\% \leq \frac{\Delta Q}{P_{\Phi}} \leq 1,8\% & \text{για } \Delta P = 0. \end{cases} \quad (4.5)$$

Η (4.5) επαληθεύει προσεγγιστικά τη θεωρητική εξαγωγή της Μη Ανιχνεύσιμης Ζώνης, τα αποτελέσματα της οποίας είναι οι Ανισώσεις (4.3) και (4.4).



Σχήμα 4.5: Διάγραμμα Μη Ανιχνεύσιμης Ζώνης της μεθόδου ανίχνευσης νησιδοποίησης μέσω των ηλεκτρονόμων OUV και OUF.

4.2 Ανίχνευση Νησιδοποίησης μέσω THD_V

Η μέθοδος ανίχνευσης νησιδοποίησης μέσω THD_V —η οποία πλέον θα καλείται μέθοδος THD_V για χάρη συντομίας—δε βασίζεται στην έννοια της αναντιστοιχίας ισχύος για την ανίχνευση νησιδοποίησης, δηλαδή δε διαθέτει Μη Ανιχνεύσιμη Ζώνη. Η μέθοδος βασίζεται στον υπολογισμό του THD της τάσης στο ΣΚΣ και ο διακόπτης S_2 του Σχήματος 3.5 ανοίγει όταν αυτό υπερβεί κάποια τιμή κατωφλίου.

4.2.1 Συμπεριφορά THD_V στην κατάσταση νησιδοποίησης

Στην κατάσταση της νησιδοποίησης δύο είναι οι μηχανισμοί που μπορούν να προκαλέσουν την αύξηση του THD της τάσης στο ΣΚΣ [17]:

- (i) ο πρώτος είναι ο ίδιος ο αντιστροφάας, διότι παράγει κάποιες αρμονικές ρεύματος στο AC ρεύμα εξόδου του, όπως ισχύει για όλους του μετατροπείς ισχύος. Όπως αναφέρθηκε και στην Παράγραφο 1.2.2 μία τυπική τιμή προς συμμόρφωση για το

THD_I είναι $\text{THD}_I < 5\%$ του ρεύματος πλήρους φόρτισης. Υπό κανονικές συνθήκες, το δίκτυο, όντας στιβαρή πηγή τάσης, οδηγεί ένα μη παραμορφωμένο ημιτονοειδές ρεύμα στα άκρα του φορτίου. Υπό αυτές τις συνθήκες, τα αρμονικά ρεύματα που παράγονται από τον αντιστροφέα ρέουν προς το δίκτυο. Όταν ανοίγει ο διακόπτης S_1 του Σχήματος 3.5, οι αρμονικές ρεύματος που παράγονται από τον αντιστροφέα ρέουν στο φορτίο και, με βάση το νόμο του Ohm και την αρχή επαλληλίας, αυτές παράγουν αρμονικές τάσης στο ΣΚΣ. Αυτές οι αρμονικές τάσης ανιχνεύονται από τον αντιστροφέα και έτσι γίνεται αντιληπτή η κατάσταση της νησιδοποίησης, δίνοντας εντολή για άνοιγμα του διακόπτη S_2 .

- (ii) ο δεύτερος είναι η απόκριση τάσης του μετασχηματιστή στην πλευρά του δικτύου. Αν ο διακόπτης S_1 του Σχήματος 3.5 είναι στην πλευρά του πρωτεύοντος του μετασχηματιστή, το δευτερεύον του θα διεγείρεται από το ρεύμα εξόδου του ΦΒ συστήματος. Όμως, εξαιτίας της μαγνητικής υστέρησης του μετασχηματιστή, η απόκριση τάσης του σε αυτή τη—σχεδόν—ημιτονοειδή διέγερση υφίσταται παραμόρφωση σε μεγάλο βαθμό. Συγκεκριμένα, περιέχει μία μεγάλη συνιστώσα τρίτης αρμονικής. Το φαινόμενο αυτό έχει διαπιστωθεί και πειραματικά από ερευνητές, οι οποίοι έχουν βρει ότι η τρίτη αρμονική της τάσης στο ΣΚΣ μπορεί να αυξηθεί κατά έναν παράγοντα, πέντε ή και μεγαλύτερο, τη στιγμή που το σύστημα έρχεται σε κατάσταση νησιδοποίησης, εξαιτίας της παραμόρφωσης που εισάγεται από τυπικούς, αστικούς, εναέριους μετασχηματιστές (pole-mounted transformers).

4.2.2 Προβληματισμοί και Αποτελέσματα μεθόδου THD_V

Θεωρητικά, η ανίχνευση νησιδοποίησης μέσω THD_V έχει υψηλά ποσοστά επιτυχίας υπό ένα μεγάλο εύρος συνθηκών. Όμως, το πρόβλημα αυτής της μεθόδου βρίσκεται στο ζήτημα της υλοποίησης—δεν είναι πάντα δυνατή η επιλογή σωστής τιμής κατωφλίου που να παρέχει αξιόπιστη προστασία έναντι της νησιδοποίησης, αλλά ταυτόχρονα και να μην οδηγεί το διακόπτη S_2 σε ενεργοποίηση όχλησης (nuisance tripping). Τα δύο κριτήρια που πρέπει να ληφθούν υπόψη για την επιλογή της τιμής κατωφλίου είναι τα εξής [17]:

- (i) πρέπει να είναι μεγαλύτερη από την προσδοκώμενη τιμή THD_V του δικτύου, αλλά
- (ii) πρέπει να είναι μικρότερη από την τιμή του THD_V η οποία θα προκύψει κατά τη διάρκεια μίας κατάσταση νησιδοποίησης.

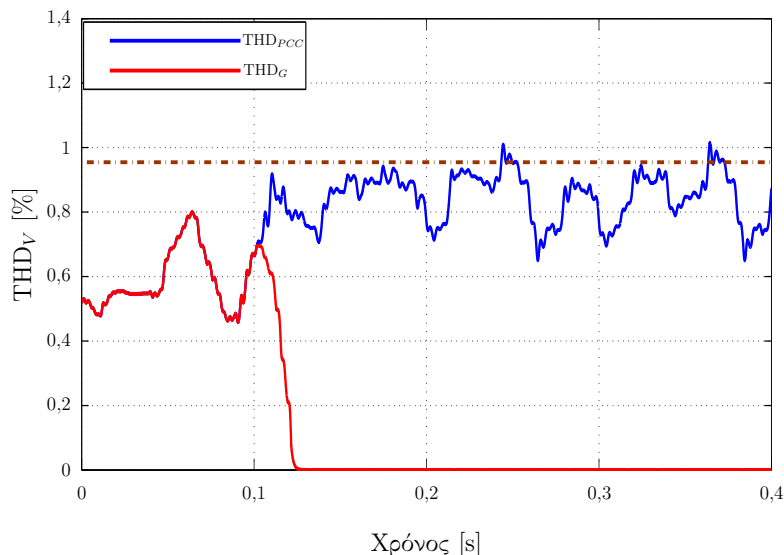
Για να γίνει κατανοητός ο προβληματισμός που προκύπτει από τα παραπάνω θα δοθεί ένα παράδειγμα με βάση τον προκειμένο αντιστροφέα. Όπως αναφέρεται στην Παράγραφο 3.2, παράγει $\text{THD}_I = 4,05\%$, με φορτίο RLC . Η σύνθετη αντίσταση⁴ του φορτίου μειώνεται

⁴ $Z_{load} = \frac{1}{\frac{1}{R} - j(\frac{1}{\omega L} - \omega C)}$.

με την αύξηση της συχνότητας. Συνεπώς, η παραμόρφωση στην απόκριση της τάσης είναι μικρότερη από ότι αυτή στο ρεύμα εξόδου του αντιστροφέα.

Στην πραγματικότητα, η παραμόρφωση της τάσης του δικτύου υπό κανονικές συνθήκες είναι 1 – 2%. Όμως, υπάρχουν συνθήκες, στις οποίες η παραμόρφωση τάσης μπορεί να αυξηθεί σημαντικά. Για παράδειγμα, η παρουσία μετατροπέων ισχύος προκαλεί αύξηση στο αρμονικό περιεχόμενο της τάσης, διότι παράγονται αρμονικές ρεύματος σε συχνότητες που ταυτίζονται με τις συχνότητες συντονισμού του δικτύου. Επίσης, μεταβατικές παραμορφώσεις τάσης—όπως αυτές που δημιουργούνται κατά το άνοιγμα συστοιχιών πυκνωτών—μπορεί να ερμηνευτούν από τον αντιστροφέα σαν στιγμιαία αύξηση του THD_V .

Από την παραπάνω ανάλυση φαίνεται ξεκάθαρα ότι είναι δύσκολο να ξεπεραστεί το πρόβλημα της επιλογής κριτηρίου τιμής κατωφλίου.



Σχήμα 4.6: THD_V δικτύου και THD_V στο PCC. Το Σχήμα απεικονίζει τις τιμές για πριν και μετά την έναρξη της κατάστασης της νησιδοποίησης τη στιγμή $t = 0,1$ s. Ο διακόπτης S_2 δεν συμπεριλαμβάνεται για αυτή την προσομοίωση.

Όσον αφορά τις προσομοιώσεις της παρούσας διπλωματικής, το Σχήμα 4.6 απεικονίζει THD_V της τάσης του δικτύου και αυτό της τάσης στο ΣΚΣ. Η νησιδοποίηση συμβαίνει τη χρονική στιγμή $t_{\text{islanding}} = 0,1$ s. Το φορτίο είναι RLC και είναι σε απόλυτη αντιστοιχία ισχύος με την ενεργό ισχύ του αντιστροφέα (power match):

$$\begin{aligned} R &= 10000 \text{ W}, \\ Q_L &= 10000 \text{ VAR}, \\ Q_C &= 10000 \text{ VAR}. \end{aligned} \quad (4.6)$$

Με βάση τα κριτήρια επιλογής της τιμής κατωφλίου και το Σχήμα 4.6, η τιμή κατωφλίου πρέπει να βρίσκεται στο εύρος:

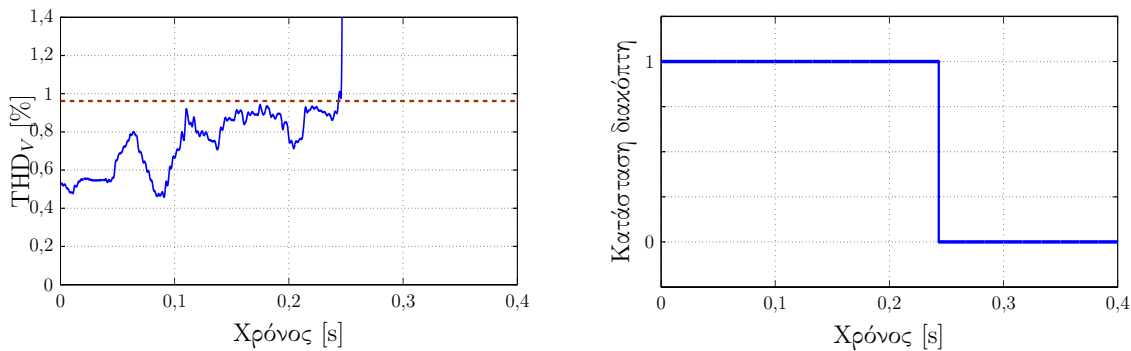
$$\text{THD}_{V,\text{grid}} \leq \text{THD}_{V,\text{thres}} \leq \text{THD}_V, \quad (4.7)$$

δηλαδή, πρέπει:

$$0,8 \% \leq \text{THD}_{V,thres} \leq 1 \%$$

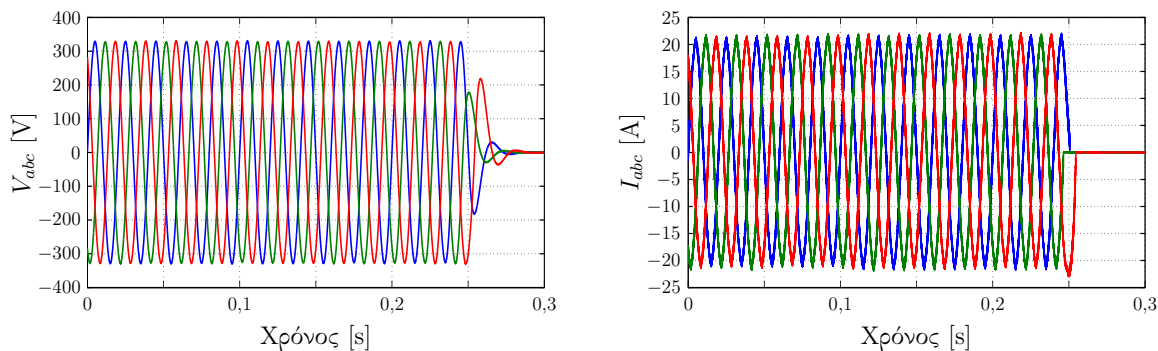
Εν προκειμένω, η τιμή κατωφλίου που επιλέχθηκε είναι $\text{THD}_{V,thres} = 0,95 \%$. Η κατάσταση του διακόπτη S_2 , ο οποίος ελέγχεται από τη μεθόδο THD_V , φαίνεται στο Σχήμα 4.7(β'). Συνεπώς, επαληθεύεται ότι η μέθοδος αυτή είναι ανεξάρτητη από την αναντιστοιχία ισχύος, εφόσον έχει μηδενική Μη Ανιχνεύσιμη Ζώνη στο χώρο ΔP ως προς ΔQ . Ο αναμενόμενος μηδενισμός της τριφασικής τάσης και του ρεύματος στο ΣΚΣ απεικονίζεται στο Σχήμα 4.8.

Τέλος, στο Σχήμα 4.7(α') απεικονίζεται η συμπεριφορά του THD_V στο ΣΚΣ πριν και μετά τη νησιδοποίηση⁵.



(α') Συμπεριφορά THD_V στο ΣΚΣ πριν και μετά την (β') Κατάσταση διακόπτη ο οποίος ελέγχεται μέσω έναρξη της κατάσταση της νησιδοποίησης. της μεθόδου THD_V .

Σχήμα 4.7: Κατάσταση διακόπτη και συμπεριφορά THD_V στο ΣΚΣ.



(α') Τριφασική τάση στο ΣΚΣ για την περίπτωση που (β') Τριφασικό ρεύμα στο ΣΚΣ για την περίπτωση περιγράφεται από την (4.6). που περιγράφεται από την (4.6).

Σχήμα 4.8: Τριφασική τάση και ρεύμα στο ΣΚΣ για την περίπτωση που περιγράφεται από την (4.6) (μέθοδος THD_V).

⁵ Αν και αναμένεται μηδενισμός του THD_V , αυτό δεν συμβαίνει στην προσομοίωση λόγω του γεγονότος ότι μετά τη νησιδοποίηση το μπλοκ υπολογισμού του THD_V δέχεται σαν είσοδο θόρυβο και δεν λειτουργεί σωστά.

4.3 Ανίχνευση Νησιδοποίησης μέσω Voltage Phase Jump

Η μέθοδος ανίχνευσης νησιδοποίησης Voltage Phase Jump—η οποία πλέον θα καλείται μέθοδος Phase Jump για χάρη συντομίας—βασίζεται στην παρακολούθηση της γωνίας μεταξύ της κυματομορφής της τάσης εξόδου του αντιστροφέα και της κυματομορφής του ρεύματος εξόδου του. Στην κυκλωματική διάταξη που περιγράφεται στο Σχήμα 3.5 ο ΣΙ ισχύος του φορτίου είναι διάφορος της μονάδας, λόγω της ύπαρξης των στοιχείων L και C . Υπό κανονικές συνθήκες, η κυματομορφή του ρεύματος εξόδου του αντιστροφέα είναι συγχρονισμένη με την τάση του δικτύου παρακολουθώντας τα σημεία μηδενισμού της κυματομορφής της τάσης στο ΣΚΣ. Αυτός είναι ο ρόλος του PLL, όπως αναφέρεται στην Παράγραφο 1.2.2 [17].

Όταν ανοίξει ο διακόπτης S_1 του Σχήματος 3.5, δεν μπορεί πλέον να εξάγεται η γωνία αναφοράς από την κυματομορφή της τάσης στο ΣΚΣ, διότι η στιβαρή τάση του δικτύου είναι απύσχα. Αντίθετα, η κυματομορφή του ρεύματος εξόδου του αντιστροφέα μπορεί να αποτελέσει τη νέα αναφορά γωνίας. Αυτό συμβαίνει διότι ο συγχρονισμός μεταξύ της κυματομορφής ρεύματος εξόδου του αντιστροφέα και της τάσης στο ΣΚΣ λαμβάνει χώρα στα σημεία μηδενισμού της κυματομορφής της τάσης στο ΣΚΣ. Μεταξύ αυτών των σημείων μηδενισμού το PLL, ουσιαστικά, λειτουργεί σε ανοιχτό βρόχο. Συνεπώς, ξαφνικά η κυματομορφή ρεύματος εξόδου του αντιστροφέα γίνεται η κυματομορφή αναφοράς για τη γωνία.

Αφού η συχνότητα δεν έχει αλλάξει ακόμη, η γωνία του φορτίου πρέπει να γίνει ίδια με αυτή πριν την αποσύνδεση του δικτύου, και εξαιτίας αυτού η τάση στο ΣΚΣ πρέπει να κάνει άλμα σε αυτή τη νέα τιμή φάσης, όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 4.9.

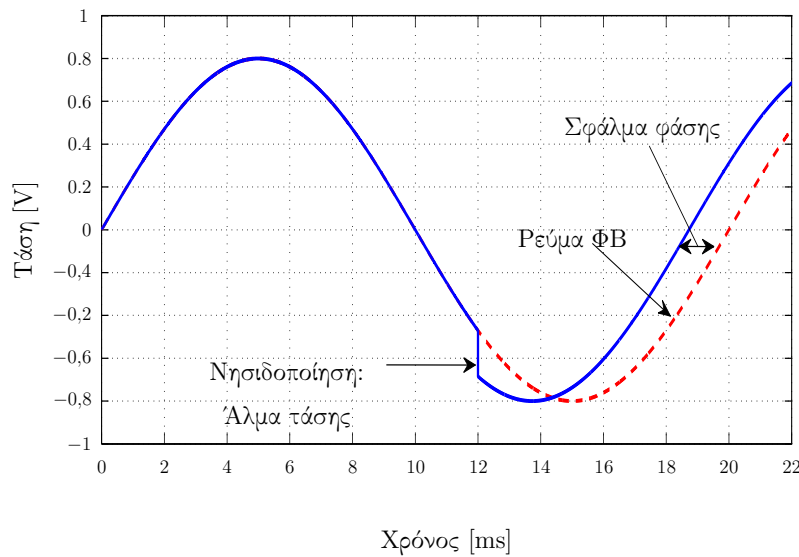
Ο υπολογισμός της γωνίας του φορτίου γίνεται μέσω της εξίσωσης:

$$\theta = \tan^{-1} \left[R \left(\omega C - \frac{1}{\omega L} \right) \right] \quad (4.8)$$

Αν το σύστημα έλθει σε κατάσταση νησιδοποίησης και το φορτίο έχει συχνότητα συντονισμού ίση με αυτή του δικτύου, η γωνία του φορτίου δε μεταβάλλεται. Όμως, αν το φορτίο έχει συχνότητα συντονισμού διαφορετική από αυτή του δικτύου η γωνία μεταβάλλεται.

Έστω η διαφορά γωνίας μεταξύ της κυματομορφής της τάσης στο ΣΚΣ και αυτής του ρεύματος εξόδου του αντιστροφέα $\Delta\theta$. Αν τεθεί μία τιμή κατωφλίου θ_{thres} , τότε μπορεί να ανιχνευτεί η κατάσταση νησιδοποίησης αν $\Delta\theta > \theta_{thres}$ [7].

Η αποδοτικότητα αυτής της μεθόδου εξαρτάται πολύ από την αναντιστοιχία αέργου ισχύος. Η Μη Ανιχνεύσιμη Ζώνη εξαρτάται από την επιλογή της τιμής κατωφλίου θ_{thres} .



Σχήμα 4.9: Άλμα τάσης μετά την αποσύνδεση του δικτύου.

4.3.1 Αποτελέσματα Προσομοιώσεων της μεθόδου Phase Jump

Για τη διεξαγωγή των προσομοιώσεων επιλέγεται μία τυπική τιμή κατωφλίου, $\theta_{thres} = 1^\circ$. Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τις προσομοιώσεις των εξής περιπτώσεων:

Πίνακας 4.3: Περιπτώσεις προσομοίωσης για τη μέθοδο Phase Jump

Παράμετροι	Π1	Π2
P_R [W]	12000	12000
Q_L [VAR]	12260	11680
Q_C [-VAR] ⁶	11740	12320
Q_f ⁷	≈ 1	
$t_{islanding}$ [s]	0, 1	

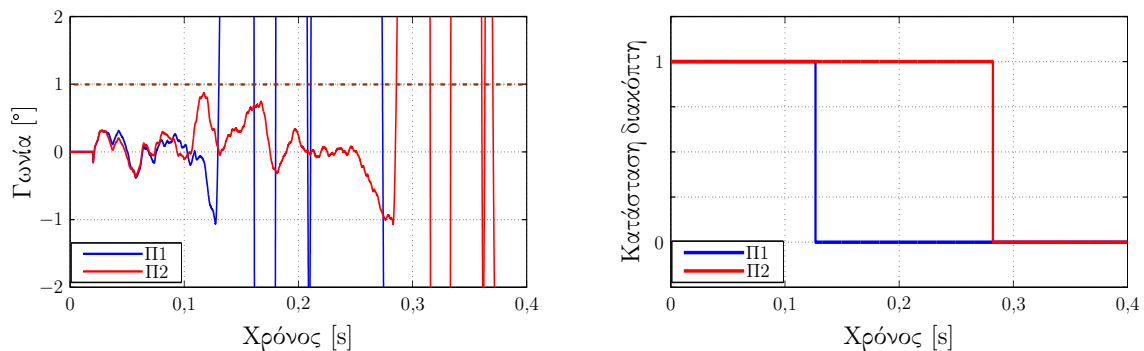
Σε περιπτώσεις αντίστοιχες των Π1 και Π2, επειδή $Q_L \neq Q_C$, ισχύει ότι $Q_\Phi \neq 0$. Επομένως, η συχνότητα συντονισμού του φορτίου είναι διαφορετική από τη συχνότητα δικτύου. Για αυτό το λόγο, όταν αποσυνδέεται ο διακόπτης S_1 του Σχήματος 3.5, διαφοροποιείται η γωνία του φορτίου. Στις περιπτώσεις Π1 και Π2 η διαφοροποίηση της γωνίας αυτής είναι τέτοια, ώστε να μπορεί να ανιχνευθεί η κατάσταση της νησιδοποίησης. Όπως αναφέρεται στην Παράγραφο 4.3, αυτή η διαφοροποίηση γωνίας ανιχνεύεται μέσω παρακολούθησης της

⁶Σύμβαση φορτίου.

⁷Με βάση την Εξίσωση (1.3).

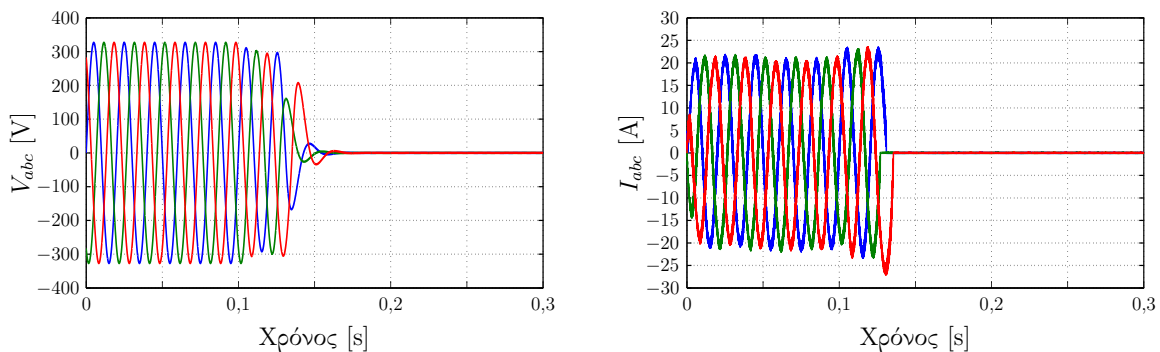
διαφοράς γωνίας μεταξύ της κυματομορφής της τάσης στο ΣΚΣ και αυτής του ρεύματος εξόδου του αντιστροφέα. Για τις περιπτώσεις Π1 και Π2, η συμπεριφορά αυτής της διαφοράς γωνίας απεικονίζεται στο Σχήμα 4.10(α'). Όταν οι κυματομορφές της διαφοράς φάσης για τις περιπτώσεις Π1 και Π2 υπερβαίνουν την τιμή κατωφλίου, ανοίγει ο διακόπτης S_2 , όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.10(β').

Τέλος, στο Σχήμα 4.11 απεικονίζεται ο αναμενόμενος μηδενισμός της τριφασικής τάσης και ρεύματος στο ΣΚΣ για την περίπτωση Π1.



(α') Συμπεριφορά της διαφοράς γωνίας μεταξύ της (β') Κατάσταση διακόπτη ο οποίος ελέγχεται μέσω κυματομορφής τάσης στο ΣΚΣ και της κυματομορφής ρεύματος εξόδου του αντιστροφέα ($\Delta\theta$).

Σχήμα 4.10: Κατάσταση διακόπτη και συμπεριφορά $\Delta\theta$ στο ΣΚΣ για τις περιπτώσεις Π1 και Π2.

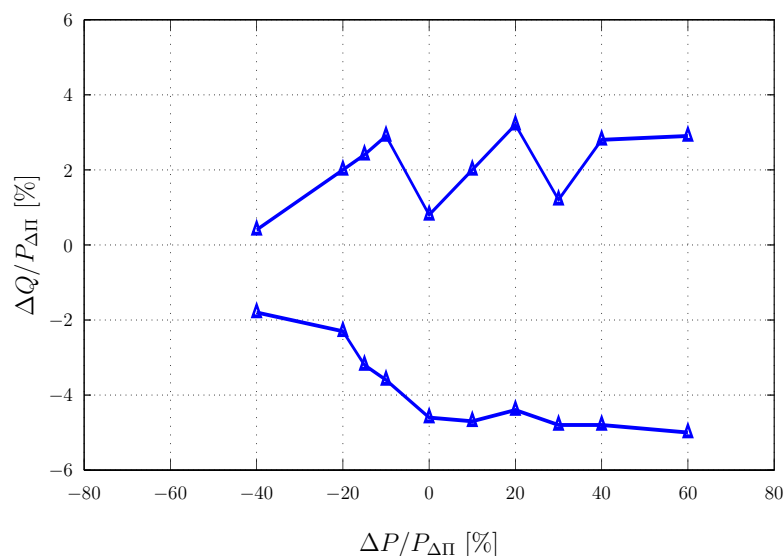


(α') Τριφασική τάση στο ΣΚΣ για την περίπτωση Π1. (β') Τριφασικό ρεύμα στο ΣΚΣ για την περίπτωση Π1.

Σχήμα 4.11: Τριφασική τάση και ρεύμα στο ΣΚΣ για την περίπτωση Π1 (μέθοδος Phase Jump).

4.3.2 Μη Ανιχνεύσιμη Ζώνη μεθόδου Phase Jump

Στο Σχήμα 4.12 παρουσιάζεται το διάγραμμα Μη Ανιχνεύσιμης Ζώνης της μεθόδου Phase Jump. Από αυτό συμπεραίνουμε ότι, όπως αναφέρεται στην Παράγραφο 4.3, όντως, η μέθοδος αυτή είναι ευαίσθητη στην αναντιστοιχία αέργου ισχύος, ενώ δεν είναι ευαίσθητη σε αυτή της ενεργού ισχύος.



Σχήμα 4.12: Διάγραμμα Μη Ανιχνεύσιμης Ζώνης της μεθόδου ανίχνευσης νησιδοποίησης της μεθόδου Phase Jump.

4.4 Ανίχνευση Νησιδοποίησης μέσω Vector Shift

Η μέθοδος ανίχνευσης νησιδοποίησης Μετατόπισης Διανύσματος (Vector Shift)—η οποία πλέον θα καλείται VS για χάρη συντομίας—βασίζεται στη μέτρηση της γωνίας της τριφασικής τάσης στο ΣΚΣ [8]. Η υλοποίηση της μεθόδου αυτής στηρίζεται στους μηδενισμούς της κυματομορφής της τάσης (zero-crossings). Σε κάθε ημιπερίοδο λαμβάνεται μία μέτρηση γωνίας για κάθε μία από τις τρεις τάσεις, ενώ, ο αλγόριθμος αποφαίνεται στο τέλος κάθε περιόδου. Γενικά, η VS λαμβάνει τις ίδιες μετρήσεις με τους ηλεκτρονόμους OUV και OUF, όμως η λειτουργία της μεθόδου αυτή βασίζεται σε διαφορετική αρχή λειτουργίας.

Η διαφορά γωνίας της τάσης κάθε φάσης υπολογίζεται με βάση το χρόνο μηδενισμού της. Πιο συγκεκριμένα, συγκρίνονται οι χρόνοι μηδενισμού (δύο χρόνοι—ένας για τη θετική και ένας για την αρνητική ημιπερίοδο) της τάσης κάθε φάσης κατά την παρούσα περίοδο με αυτούς της προηγούμενης περιόδου. Αυτή η σύγκριση γίνεται και για τις τρεις φάσεις. Αν πέντε από αυτές τις έξι μετρήσεις υπερβαίνουν την τιμή κατωφλίου θ_{thres} , που έχει προκαθοριστεί, ανοίγει ο διακόπτης που ελέγχεται από τον αλγόριθμο αυτό—στην προκειμένη περίπτωση ο διακόπτης S_2 του Σχήματος 3.5.

Εφόσον ο αλγόριθμος αυτός εκτελεί συγκρίσεις μεταξύ δύο διαδοχικών περιόδων, παρέχεται γρήγορη λήψη απόφασης και ενεργοποίηση διακόπτη σε προσεγγιστικά 30 ms. Επίσης η χρήση των τάσεων και των τριών φάσεων στη σύγκριση κάνει τον αλγόριθμο λιγότερο ευαίσθητο στην αρμονική παραμόρφωση της τάσης, στις παρεμβολές και στα σφάλματα ασυμμετρίας. Το γεγονός αυτό καθιστά την προστασία που παρέχεται από τον αλγόριθμο αυτόν ευσταθή και μειώνεται η πιθανότητα για ενεργοποίηση όχλησης (nuisance tripping).

Τέλος, αναφέρεται ότι η μέθοδος Vector Shift είναι από τις πιο διαδεδομένες στο σύ-

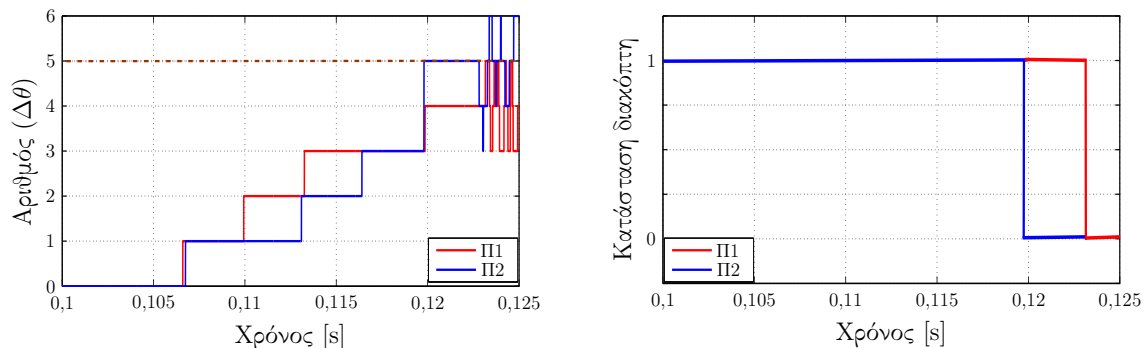
νολο των παθητικών μεθόδων—μαζί με τη μέθοδο RoCoF, η οποία παρουσιάζεται στην Παράγραφο 4.5 [4].

4.4.1 Αποτελέσματα Προσομοιώσεων της μεθόδου VS

Για τη διεξαγωγή των προσομοιώσεων επιλέχθηκε η τιμή κατωφλίου $\theta_{thres} = 2^\circ$. Ακολούθως, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τις προσομοιώσεις των περιπτώσεων, όπως παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.4:

Πίνακας 4.4: Περιπτώσεις προσομοίωσης για τη μέθοδο VS

Παράμετροι	Π1	Π2
P_R [W]	6950	10000
Q_L [VAR]	6950	9670
Q_C [-VAR] ⁸	6950	10330
Q_f ⁹	1	≈ 1
$t_{islanding}$ [s]	0, 1	

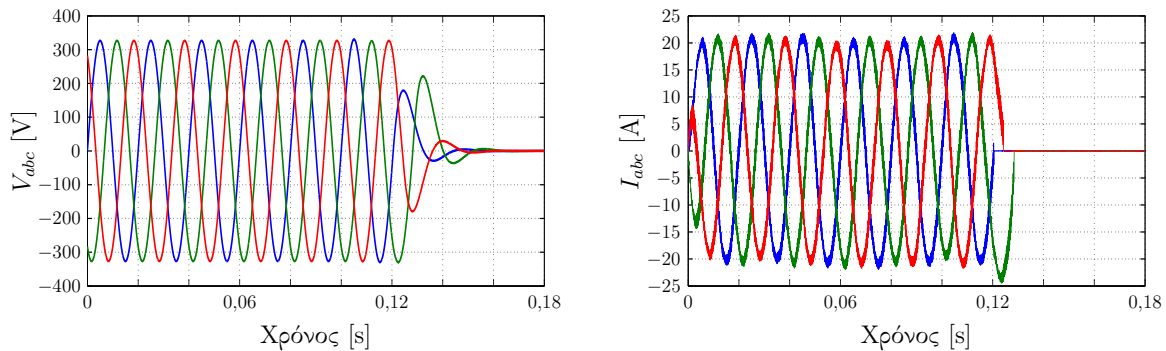


(α) Αριθμός που υποδηλώνει πόσες από τις υπολο- (β') Κατάσταση διακόπτη ο οποίος ελέγχεται από τον γιζόμενες $\Delta\theta$ της τριφασικής τάσης υπερβαίνει την αλγόριθμο VS. τιμή κατωφλίου $\theta_{thres} = 2^\circ$.

Σχήμα 4.13: Κατάσταση διακόπτη και συμπεριφορά $\Delta\theta$ στο ΣΚΣ για τις περιπτώσεις Π1 και Π2.

Στο Σχήμα 4.13(α') απεικονίζεται ο αριθμός των μετρούμενων διαφορών φάσεων $\Delta\theta$ οι οποίες ξεπερνούν την τιμή κατωφλίου θ_{thres} . Όταν ο αριθμός των μετρούμενων διαφορών φάσης υπερβαίνει το 5, ενεργοποιείται ο διακόπτης S_2 του Σχήματος 3.5 στον οποίο είναι ενσωματωμένος ο αλγόριθμος VS. Η κατάσταση του διακόπτη αυτού φαίνεται στο Σχήμα 4.13(β'). Από τη στιγμή που ανοίγει ο διακόπτης αυτός, ως αναμενόμενο, μηδενίζεται η τάση και το ρεύμα στο ΣΚΣ, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.14 για την Περίπτωση Π1.

⁸Σύμβαση φορτίου.

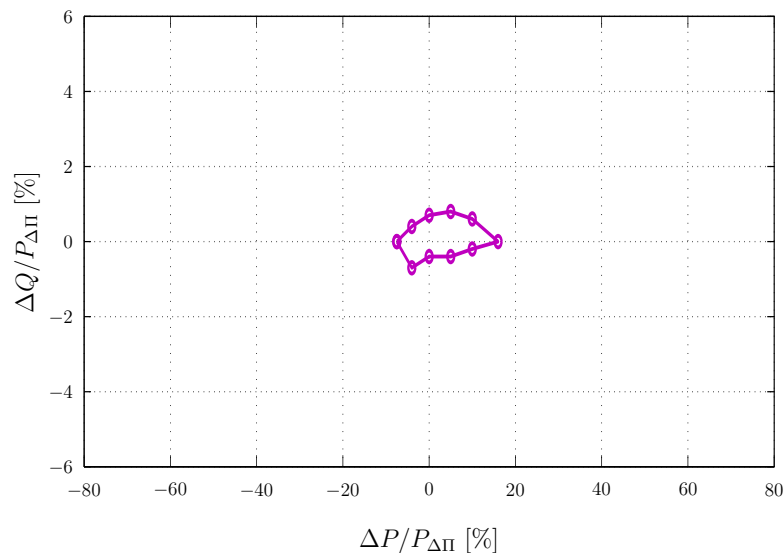


(α') Τριφασική τάση στο ΣΚΣ για την περίπτωση Π2. (β') Τριφασικό ρεύμα στο ΣΚΣ για την περίπτωση Π2.

Σχήμα 4.14: Τριφασική τάση και ρεύμα στο ΣΚΣ για την περίπτωση Π2 (μέθοδος VS).

4.4.2 Μη Ανιχνεύσιμη Ζώνη μεθόδου VS

Στο Σχήμα 4.15 παρουσιάζεται το διάγραμμα Μη Ανιχνεύσιμης Ζώνης της μεθόδου VS. Το συγκεκριμένο διάγραμμα αντιστοιχεί στην τιμή κατωφλίου που επιλέχθηκε για τη διεξαγωγή των προσομοιώσεων. Παρατηρείται ότι για την αναντιστοιχία ενεργού ισχύος, ισχύει ότι η Μη Ανιχνεύσιμη Ζώνη είναι σε απόλυτη τιμή 15 – 20 %, γεγονός το οποίο συμφωνεί με τη βιβλιογραφία [8].



Σχήμα 4.15: Διάγραμμα Μη Ανιχνεύσιμης Ζώνης της μεθόδου ανίχνευσης νησιδοποίησης της μεθόδου VS.

⁹Με βάση την Εξίσωση (1.3).

4.5 Ανίχνευση Νησιδοποίησης μέσω ηλεκτρονόμου RoCoF

Η μέθοδος ανίχνευσης νησιδοποίησης μέσω του Ρυθμού Μεταβολής της Συχνότητας (RoCoF)—η οποία πλέον θα καλείται μέθοδος RoCoF για χάρη συντομίας—είναι από τις πιο διαδεδομένες, μαζί με τη μέθοδο VS, η οποία παρουσιάζεται στην Παράγραφο 4.1. Παρά το γεγονός ότι είναι διαδεδομένη μέθοδος, υπάρχουν προβλήματα λόγω ύπαρξης Μη Ανιχνεύσιμης Ζώνης και λόγω ενεργοποίησης όχλησης (Nuisance Tripping) εξαιτίας μεταβατικών που οφείλονται σε ξαφνικές μεταβολές φορτίων.

Ο αλγόριθμος RoCoF βασίζεται στην αναντιστοιχία ισχύος που υπάρχει μετά την αποσύνδεση του δικτύου. Υπολογίζεται ο ρυθμός μεταβολής της συχνότητας της τάσης στο ΣΚΣ και συγκρίνεται με μία τιμή κατωφλίου. Όταν ο δείκτης RoCoF υπερβεί την τιμή κατωφλίου, αποστέλλεται σήμα για αποσύνδεση του αντιστροφέα. Για συστήματα 50 Hz τυπικές τιμές κατωφλίου κυμαίνονται στο εύρος:

$$0,1 \text{ Hz/s} \leq \text{RoCoF}_{\text{thres}} \leq 1 \text{ Hz/s}.$$

Ένας προβληματισμός που αφορά τη μέθοδο RoCoF είναι ότι προϊόντα διαφορετικών κατασκευαστών συχνά ανταποκρίνονται διαφορετικά στο ίδιο γεγονός, ακόμη και όταν χρησιμοποιούνται ίδιες ρυθμίσεις. Αυτό οφείλεται στις λεπτές διαφορές μεταξύ των αλγορίθμων που χρησιμοποιούνται στους ηλεκτρονόμους. Μερικοί ηλεκτρονόμοι RoCoF χρησιμοποιούν αλγορίθμους που στηρίζονται στην έννοια του μηδενισμού της κυματομορφής της τάσης (zero-crossing algorithms), ενώ άλλοι χρησιμοποιούν Διακριτό Μετασχηματισμό Fourier (Discrete Fourier Transform—DFT) για τον υπολογισμό της συχνότητας. Επίσης, διαφοροποιείται ο τρόπος έκφρασης του ρυθμού μεταβολής της συχνότητας. Η συνήθης περίπτωση είναι η χρήση χρονικού παραθύρου διάρκειας 3 ως 6 κύκλων, αν και υπάρχουν εξαιρέσεις που χρησιμοποιούν παράθυρα μεγαλύτερης διάρκειας.

Για τη διεξαγωγή των προσομοιώσεων επιλέχθηκε η χρήση αλγορίθμου zero-crossing για τη μέτρηση της συχνότητας της τάσης και το χρονικό παράθυρο υπολογισμού του RoCoF είναι 3 κύκλοι. Το τελευταίο ισχύει, διότι για τον υπολογισμό αυτό χρησιμοποιήθηκε ο παρακάτω τύπος [6]:

$$\frac{df}{dt} = \frac{f_n - f_{n-3,\text{cycle}}}{T_{3,\text{cycle}}}, \quad (4.9)$$

όπου,

f_n , είναι η μέτρηση συχνότητας της τάσης του παρόντος κύκλου [Hz],

$f_{n-3,\text{cycle}}$, είναι η μέτρηση συχνότητας της τάσης του κύκλου που τελείωσε πριν 3 περιόδους [Hz] και

$T_{3,\text{cycle}}$ είναι η διάρκεια των τριών πιο πρόσφατων περιόδων της τάσης [s].

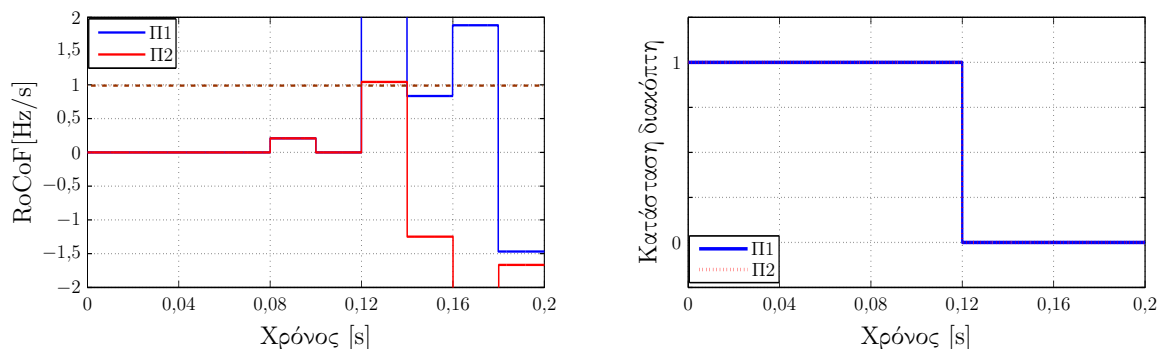
Η τιμή του RoCoF υπολογίζεται σε κινούμενα χρονικά παράθυρα των 60 ms και απαιτείται η λήψη δύο συνεχόμενων αποτελεσμάτων για να κριθεί αν το κύκλωμα είναι σε κατάσταση νησιδοποίησης ή όχι. Όταν η τιμή και των δύο αυτών αποτελεσμάτων υπερβεί την προκαθορισμένη τιμή κατωφλίου αποστέλλεται σήμα για το άνοιγμα του διακόπτη S_2 του Σχήματος 3.5. Για μεγαλύτερη ευστάθεια θα μπορούσε να προστεθεί και μία χρονοκαθυστέρηση, μετά το πέρας της οποίας θα αποστέλλεται το προαναφερθέν σήμα για άνοιγμα του διακόπτη.

4.5.1 Αποτελέσματα Προσομοιώσεων της μεθόδου RoCoF

Για τη διεξαγωγή των προσομοιώσεων επιλέχθηκε η τιμή κατωφλίου, $\text{RoCoF}_{thres} = 1 \text{ Hz/s}$. Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τις προσομοιώσεις των εξής περιπτώσεων:

Πίνακας 4.5: Περιπτώσεις προσομοίωσης για τη μέθοδο RoCoF

Παράμετροι	Π1	Π2
P_R [W]	11500	11400
Q_L [VAR]	11500	11420
Q_C [-VAR] ¹⁰	11500	10380
Q_f ¹¹	1	≈ 1
$t_{islanding}$ [s]	0, 1	



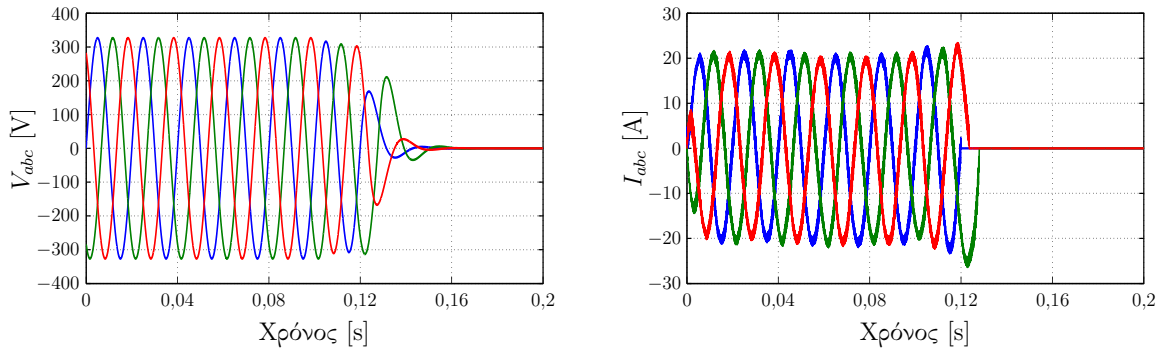
(α') Ρυθμός μεταβολής της συχνότητας της τάσης (β') Κατάσταση διακόπτη ο οποίος ελέγχεται από τον στο ΣΚΣ, όπως υπολογίζεται με βάση την Εξίσω- αλγόριθμο RoCoF. ση (4.9).

Σχήμα 4.16: Κατάσταση διακόπτη και συμπεριφορά RoCoF στο ΣΚΣ για τις περιπτώσεις Π1 και Π2.

¹⁰Σύμβαση φορτίου.

¹¹Με βάση την Εξίσωση (1.3).

Στο Σχήμα 4.16(α') απεικονίζεται ο ρυθμός μεταβολής της συχνότητας—σε διακριτή μορφή, λόγω της φύσης της Εξίσωσης 4.9 στην οποία βασίστηκε η υλοποίηση του αλγορίθμου. Όταν η μεταβλητή αυτή υπερβεί την τιμή κατωφλίου—1 Hz/s—τότε, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.16(β') δίνεται η εντολή να ανοίξει ο διακόπτης S_2 του Σχήματος 3.5. Από τη στιγμή που ανοίγει ο διακόπτης αυτός, ως αναμενόμενο μηδενίζεται η τάση και το ρεύμα στο ΣΚΣ, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.17 για την Περίπτωση Π2.



(α') Τριφασική τάση στο ΣΚΣ για την περίπτωση Π2. (β') Τριφασικό ρεύμα στο ΣΚΣ για την περίπτωση Π2.

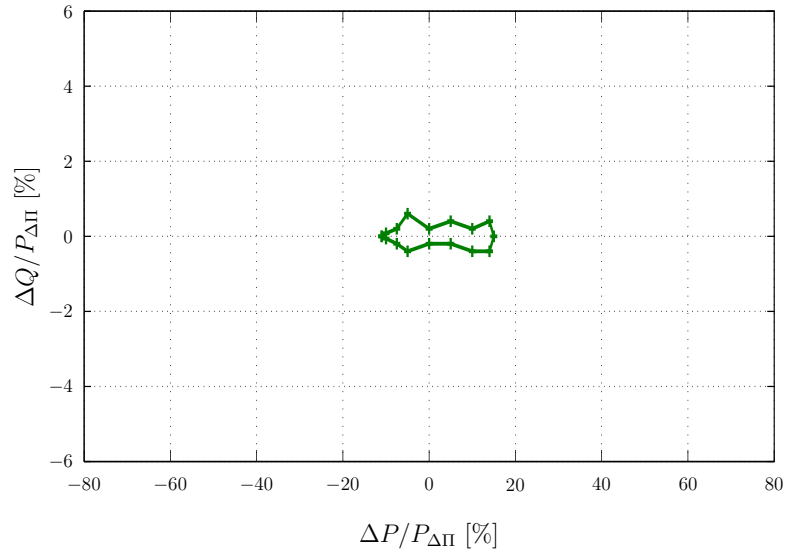
Σχήμα 4.17: Τριφασική τάση και ρεύμα στο ΣΚΣ για την περίπτωση Π2 (μέθοδος RoCoF)

4.5.2 Μη Ανιχνεύσιμη Ζώνη μεθόδου RoCoF

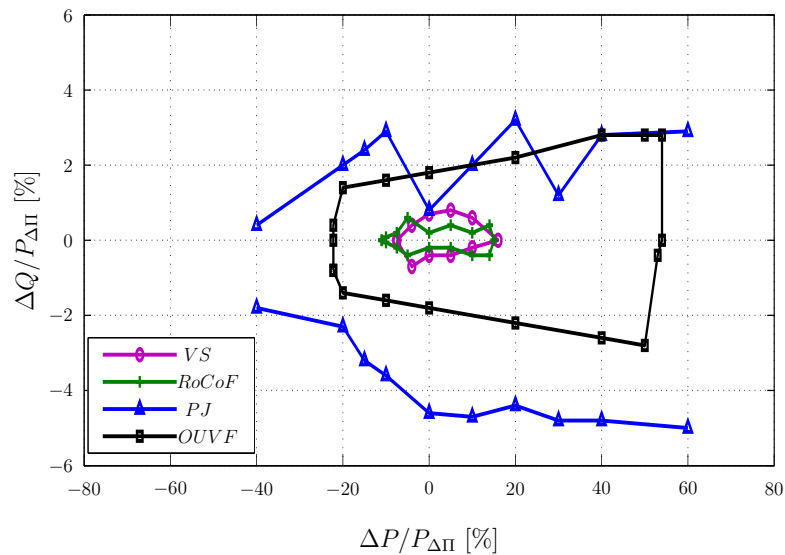
Στο Σχήμα 4.18 παρουσιάζεται το διάγραμμα Μη Ανιχνεύσιμης Ζώνης της μεθόδου RoCoF. Το συγκεκριμένο διάγραμμα αντιστοιχεί στην τιμή κατωφλίου που επιλέχθηκε για τη διεξαγωγή των προσομοιώσεων. Σημειώνεται ότι το διάγραμμα Μη Ανιχνεύσιμης Ζώνης μεταβάλλεται αναλόγως με την επιλεγείσα τιμή κατωφλίου [8]. Παρατηρείται ότι, όντως υπάρχει εξάρτηση της μεθόδου αυτής από την αναντιστοιχία ισχύος, γεγονός που επαληθεύει τη θεωρία της βιβλιογραφίας [6].

4.6 Συγκριτικά συμπεράσματα των παθητικών μεθόδων

Το Σχήμα 4.19 αποτελεί μία συγκριτική απεικόνιση των Μη Ανιχνεύσιμων Ζωνών των Παθητικών Μεθόδων που παρουσιάζονται στις Παραγράφους 4.1 - 4.5. Όπως αναφέρεται στην Παράγραφο 4.2, η μέθοδος THD_V δεν εξαρτάται από την αναντιστοιχία ισχύος, επομένως για αυτό το λόγο δεν υπάρχει στο συγκριτικό διάγραμμα.



Σχήμα 4.18: Διάγραμμα Μη Ανιχνεύσιμης Ζώνης της μεθόδου ανίχνευσης νησιδοποίησης της μεθόδου RoCoF.



Σχήμα 4.19: Συγκριτικά διαγράμματα Μη Ανιχνεύσιμης Ζώνης για τις Παθητικές Μεθόδους. Η μέθοδος THD_V διαθέτει μηδενική Μη Ανιχνεύσιμη Ζώνη.

Κεφάλαιο 5

Ενεργητικές μέθοδοι

Οι ενεργητικές μέθοδοι προκαλούν τεχνητά ανωμαλίες στα ηλεκτρικά σήματα στο ΣΚΣ, οι οποίες μπορούν να ανιχνευτούν σε περίπτωση που το σύστημα του Σχήματος 3.5 έλθει σε κατάσταση νησιδοποίησης.

Εξαιτίας της δημιουργίας τεχνητών ανωμαλιών στα ηλεκτρικά σήματα στο ΣΚΣ, οι ενεργητικές μέθοδοι συνήθως έχουν μικρότερες Μη Ανιχνεύσιμες Ζώνες σε σύγκριση με αυτές των παθητικών μεθόδων. Ο λόγος είναι ότι ακόμη και σε ισορροπία ισχύος μεταξύ του ΣΚΣ και του δικτύου, οι ανωμαλίες που δημιουργούνται οδηγούν σε συνθήκη αναντιστοιχίας ισχύος. Έτσι, τα ηλεκτρικά σήματα που παρακολουθούνται υπερβαίνουν τις αντίστοιχες τιμές κατωφλίου και ανιχνεύεται η κατάσταση της νησιδοποίησης.

Αν και οι ενεργητικές μέθοδοι παρέχουν μεγαλύτερη αξιοπιστία ανίχνευσης της κατάστασης της νησιδοποίησης σε σύγκριση με τις παθητικές μεθόδους, ασκούν επιρροή στην ποιότητα ισχύος του συστήματος, όταν ο αντιστροφέας είναι διασυνδεδεμένος στο δίκτυο. Επιπρόσθετα, υπό ορισμένες συνθήκες, το εγχεόμενο σήμα για την ανίχνευση νησιδοποίησης μπορεί να οδηγήσει σε αστάθεια του συστήματος [2].

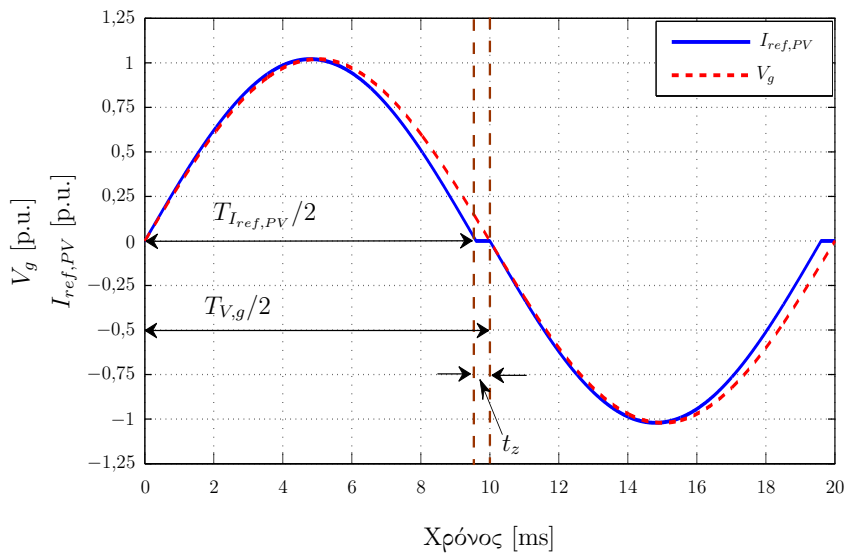
Στις Παραγράφους 5.1 - 5.4 παρουσιάζονται οι εξής ενεργητικές μέθοδοι ανίχνευσης νησιδοποίησης:

- ◇ AFD,
- ◇ SFS,
- ◇ SVS,
- ◇ βασισμένη στο PLL.

Στην Παράγραφο 5.5 παρέχεται μία συγκριτική παρουσίαση της υποβάθμισης ποιότητας ισχύος που προκαλούν οι παραπάνω ενεργητικές μέθοδοι. Ο δείκτης μέσω του οποίου θα εκφραστεί η υπόβαθμιση ποιότητας ισχύος είναι το THD_I του ρεύματος εξόδου του αντιστροφέα.

5.1 Ανίχνευση Νησιδοποίησης AFD

Στη μέθοδο Απλής Μεταβολής της Συχνότητας (Active Frequency Drift)—η οποία πλέον θα καλείται AFD για χάρη συντομίας—παράγεται από τον αντιστροφέα ένα παραμορφωμένο ρεύμα εξόδου, το οποίο εξαναγκάζει τη συχνότητα της τάσης στο ΣΚΣ του Σχήματος 3.5 να βρεθεί εκτός των ορίων Υπερ/Υπο-Συχνότητας, όταν αποσυνδεθεί το δίκτυο. Το ρεύμα εξόδου του αντιστροφέα παραμορφώνεται διότι προσπαθεί να ‘ακολουθήσει’ την αναφορά του, η κυματομορφή της οποίας έχει αλλοιωθεί. Ένα παράδειγμα της αλλοιωμένης κυματομορφής αναφοράς του ρεύματος απεικονίζεται στο Σχήμα 5.1. Στο ίδιο Σχήμα απεικονίζεται μία μη παραμορφωμένη ημιτονοειδής κυματομορφή, για λόγους σύγκρισης [3]. Η επεξήγηση



Σχήμα 5.1: Παράδειγμα κυματομορφής ρεύματος αναφοράς για υλοποίηση του AFD.

των μεταβλητών του Σχήματος 5.1 είναι η εξής:

$T_{V,g}$ είναι η περίοδος της τάσης του δικτύου [s],

$T_{I_{ref,PV}}$ είναι η περίοδος του ρεύματος αναφοράς του ελεγκτή του αντιστροφέα—στο πλαίσιο abc [s],

t_z είναι ο νεκρός χρόνος ή χρόνος μηδενισμού [s].

Ο λόγος:

$$cf = \frac{t_z}{T_{V,g}/2} \quad (5.1)$$

ονομάζεται κλάσμα φαλιδισμού (chopping fraction—cf).

Κατά τη διάρκεια της θετικής ημιπεριόδου, το ρεύμα αναφοράς του αντιστροφέα έχει ημιτονοειδή κυματομορφή με συχνότητα ελάχιστα μεγαλύτερη από αυτή της τάσης δικτύου. Όταν η κυματομορφή του ρεύματος αναφοράς μηδενιστεί, παραμένει μηδέν για διάστημα t_z μέχρι να μηδενιστεί και η κυματομορφή της τάσης. Κατά τη διάρκεια της αρνητικής ημιπεριόδου, το ρεύμα αναφοράς του αντιστροφέα έχει ημιτονοειδή κυματομορφή—το αρνητικό

αντίστοιχο της ημιτονοειδούς κυματομορφής της θετικής ημιπεριόδου. Όταν η κυματομορφή του ρεύματος αναφοράς μηδενιστεί, παραμένει μηδέν μέχρι τη στιγμή του ανοδικού μηδενισμού της τάσης δικτύου—δηλαδή του μηδενισμού, όπου η συνάρτηση περνάει από την αρνητική ημιπερίοδο στη θετική.

Αν το σύστημα του Σχήματος 3.5 έλθει σε κατάσταση νησιδοποίησης η απόκριση τάσης θα ακολουθήσει την παραμορφωμένη κυματομορφή ρεύματος. Η τάση επομένως θα μηδενιστεί σε μικρότερο χρόνο από ότι πριν τη διαμόρφωση της ηλεκτρικής νησίδας. Στη συνέχεια, ο αντιστροφέας αυξάνει τη συχνότητα του ρεύματος αναφοράς του, προκαλώντας εκ νέου την αύξηση της συχνότητας της τάσης στο ΣΚΣ. Αυτή η διαδικασία συνεχίζεται μέχρι τη στιγμή που η συχνότητα υπερβαίνει το όριο Υπερ-Συχνότητας, οπότε και αποστέλλεται σήμα για αποσύνδεση του αντιστροφέα.

Αυτή η μέθοδος προκαλεί μικρή υποβάθμιση στην ποιότητα ισχύος εξόδου του αντιστροφέα.

Το μέγεθος της Μη Ανιχνεύσιμης Ζώνης εξαρτάται από την τιμή του κλάσματος ψαλιδισμού. Όμως, είναι αρκετά μεγάλη σε σχέση με αυτή άλλων ενεργητικών μεθόδων.

5.1.1 Αποτελέσματα Προσομοιώσεων της μεθόδου AFD

Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την προσομοίωση της εξής περίπτωσης:

Πίνακας 5.1: Περίπτωση προσομοίωσης για τη μέθοδο AFD

Παράμετροι	Π1
P_R [W]	12000
Q_L [VAR]	12100
Q_C [-VAR] ¹	11900
Q_f ²	≈ 1
cf	0,04
$t_{islanding}$ [s]	0,25

Όπως παρουσιάζεται και στον Πίνακα 5.1, για τη διεξαγωγή της προσομοίωσης επιλέχθηκε κλάσμα ψαλιδισμού $cf = 0,04$, το οποίο, σύμφωνα με την Εξίσωση (5.1), εκφράζει ότι το παραμορφωμένο ημίτονο ρεύματος αναφοράς έχει συχνότητα:

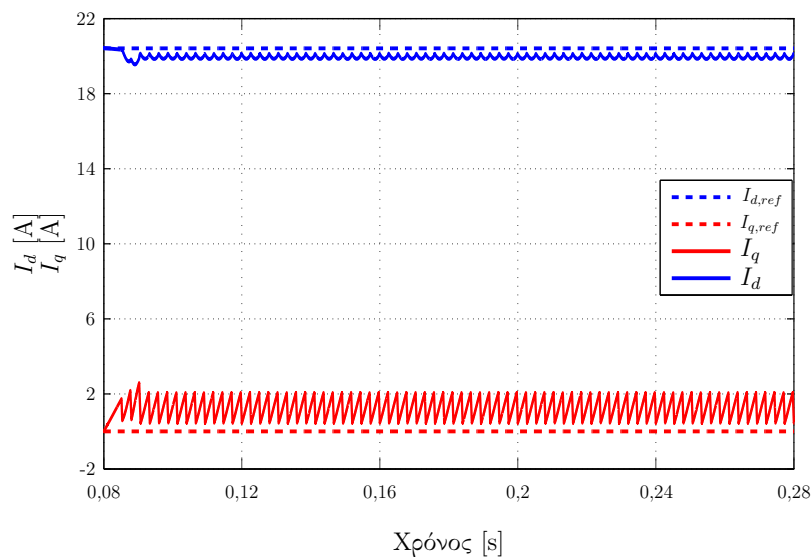
$$T_{I_{ref,PV}} \approx 52 \text{ Hz.}$$

¹Σύμβαση φορτίου.

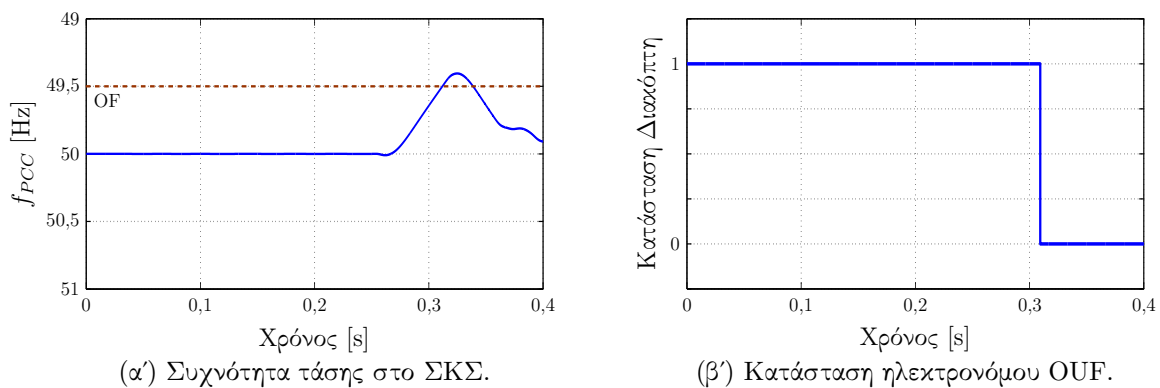
²Με βάση την Εξίσωση (1.3).

Στο Σχήμα 5.2 παρουσιάζεται η παραμόρφωση που προκαλείται από τον αλγόριθμο AFD στο ρεύμα αναφοράς στο πλαίσιο dq σε σύγκριση με τα αντίστοιχα μη παραμορφωμένα μεγέθη.

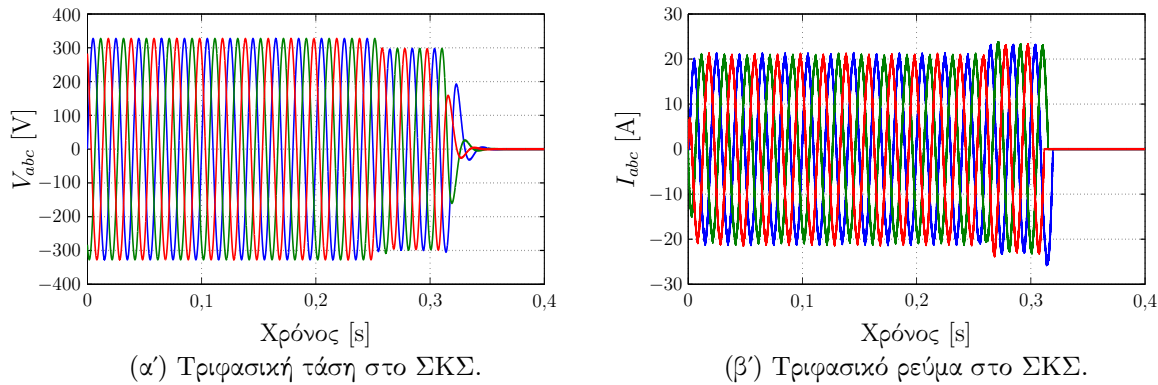
Στο Σχήμα 5.3(α') παρουσιάζεται η συμπεριφορά της συχνότητας της τάσης στο ΣΚΣ. Όταν αυτή υπερβεί το όριο OF, όπως αναμένεται—λόγω της συνάρτησης που έχει χρησιμοποιηθεί προκειμένου να παραμορφωθεί το ρεύμα αναφοράς του αντιστροφέα—ανοίγει ο διακόπτης που αντιστοιχεί στον S_2 του Σχήματος 3.5. Η κατάσταση του διακόπτη αυτού παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.3(β'). Μετά από το άνοιγμα αυτού, όπως είναι αναμενόμενο, μηδενίζονται οι τριφασικές τάσεις και ρεύματα, όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 5.4.



Σχήμα 5.2: Παραμορφωμένα ρεύματα αναφοράς αντιστροφέα σε σύγκριση με τα αντίστοιχα μη παραμορφωμένα για τη μέθοδο AFD.



Σχήμα 5.3: Συμπεριφορά της συχνότητας της τάσης στο ΣΚΣ και κατάσταση διακόπτη OUF για τη μέθοδο AFD.



Σχήμα 5.4: Τριφασική τάση και ρεύμα στο ΣΚΣ για τη μέθοδο AFD.

5.1.2 Υποβάθμιση ποιότητας ισχύος εξόδου αντιστροφέα λόγω της μεθόδου AFD

Για την εκτίμηση της υποβάθμισης ισχύος εξόδου του αντιστροφέα που προκαλεί η μέθοδος AFD υπό κανονικές συνθήκες—δηλαδή με τον αντιστροφέα διασυνδεδεμένο στο δίκτυο—χρησιμοποιήθηκε ως δείκτης η Ολική Αρμονική Παραμόρφωση του ρεύματος του αντιστροφέα, THD_I . Έγιναν προσομοιώσεις για διάφορα κλάσματα ψαλιδισμού και ο μέσος όρος της Ολικής Αρμονικής Παραμόρφωσης είναι $THD_I = 4,27\%$. Ο αντιστροφέας, απουσία της μεθόδου αυτής, έχει $THD_I = 4,05\%$. Άρα, το THD_I αυξάνεται κατά $5,15\%$.

5.2 Ανίχνευση Νησιδοποίησης SFS

Η μέθοδος Μεταβολής της Συχνότητας (Sandia Frequency Shift)—η οποία πλέον θα καλείται μέθοδος SFS για χάρη συντομίας—αποτελεί την επέκταση της μεθόδου AFD, η οποία παρουσιάζεται στην Παράγραφο 5.1. Η διαφορά τους είναι ότι η πρώτη χρησιμοποιεί θετική ανάδραση για την ανίχνευση νησιδοποίησης. Για το λόγο αυτό, μία δεύτερη ονομασία της είναι μέθοδος Απλής Μεταβολής Συχνότητας με Θετική Ανάδραση (Active Frequency Drift with Positive Feedback—AFDPF). Όπως και στη μέθοδο AFD, χρησιμοποιείται ένα κλάσμα ψαλιδισμού, οδηγώντας στο ίδιο αποτέλεσμα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.1 [3]. Όμως, αυτό το κλάσμα είναι συνάρτηση του σφάλματος στη συχνότητα γραμμής και υπολογίζεται ως εξής:

$$cf = cf_0 + K(f_{\Sigma\text{ΚΣ}} - f_{\gamma\rho}) \quad (5.2)$$

όπου,

cf_0 , είναι το κλάσμα ψαλιδισμού, όταν δεν υπάρχει σφάλμα συχνότητας,

K , είναι το κέρδος επιτάχυνσης,

$f_{\Sigma\text{ΚΣ}}$, είναι η συχνότητα γραμμής μετρημένη στο ΣΚΣ,

$f_{\gamma\rho}$, είναι η ονομαστική συχνότητα γραμμής.

Όταν το δίκτυο είναι παρόν, λόγω των μικρών μεταβολών που ανιχνεύονται στη συχνότητα της τάσης, αυτή τείνει να αυξηθεί, αλλά η ευστάθεια του δικτύου αποτρέπει το γεγονός αυτό. Όταν ανοίξει ο διακόπτης S_1 του Σχήματος 3.5, δεν υπάρχει πλέον η ευστάθεια του δικτύου και η μέθοδος, πλέον, είναι ικανή να μεταβάλλει τη συχνότητα στο ΣΚΣ.

Όσο η συχνότητα αποκλίνει από την ονομαστική συχνότητα γραμμής, το κλάσμα ψαλιδισμού επιταχύνεται. Αυτό θα συνεχίσει να συμβαίνει μέχρις ότου η συχνότητα υπερβεί το όριο Υπερ-Συχνότητας. Για λόγους πληρότητας, αναφέρεται ότι αυτή η μέθοδος λειτουργεί είτε για αυξανόμενη, είτε για μειούμενη συχνότητα, αναλόγως με το πρόσημο του κλάσματος κοπής. Προφανώς, στη δεύτερη περίπτωση, ενεργοποιείται ο ηλεκτρονόμος UF.

Αυτή η μέθοδος είναι ελκυστική λόγω της απλότητας της υλοποίησής της. Επίσης έχει μία από τις μικρότερες Μη Ανιχνεύσιμες Ζώνες. Αυτή η μέθοδος παρέχει έναν καλό συμβιβασμό μεταξύ ανίχνευσης νησιδοποίησης, ποιότητας ισχύος εξόδου και απόκρισης στη μεταβατική κατάσταση. Μπορεί να συνδυαστεί με τη μέθοδο SVS, η οποία παρουσιάζεται στην Παράγραφο 5.3 και το αποτέλεσμα είναι πολύ αποδοτικό.

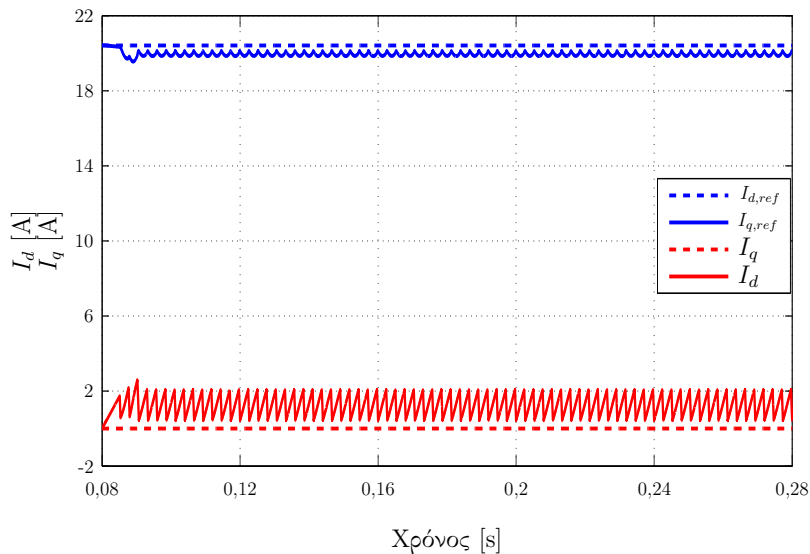
Τέλος, αυτή η μέθοδος προκαλεί υποβάθμιση στην ποιότητα ισχύος εξόδου του αντιστροφέα. Όσο αυξάνεται το κλάσμα ψαλιδισμού, η υποβάθμιση επιδεινώνεται. Όταν ο αντιστροφέας είναι συνδεδεμένος σε αδύναμα δίκτυα, αυτό μπορεί να οδηγήσει σε ανεπιθύμητη μεταβατική συμπεριφορά [5].

5.2.1 Αποτελέσματα Προσομοιώσεων της μεθόδου SFS

Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την προσομοίωση της εξής περίπτωσης:

Πίνακας 5.2: Περίπτωση προσομοίωσης για τη μέθοδο SFS

Παράμετροι	Π1
P_R [W]	12000
Q_L [VAR]	12100
Q_C [-VAR] ³	11900
Q_f ⁴	≈ 1
cf_0	0,04
K	0,05
$t_{islanding}$ [s]	0,25



Σχήμα 5.5: Παραμορφωμένα ρεύματα αναφοράς αντιστροφέα σε σύγκριση με τα αντίστοιχα μη παραμορφωμένα για τη μέθοδο SFS.

Όπως παρουσιάζεται και στον Πίνακα 5.2, για τη διεξαγωγή της προσομοίωσης επιλέχθηκε κλάσμα ψαλιδισμού $cf_0 = 0,04$, το οποίο, σύμφωνα με την Εξίσωση (5.1), εκφράζει ότι το παραμορφωμένο ημίτονο ρεύματος αναφοράς έχει συχνότητα:

$$T_{I_{ref,PV}} \approx 52 \text{ Hz.}$$

Στο Σχήμα 5.5 παρουσιάζεται η παραμόρφωση που προκαλείται από τον αλγόριθμο SFS στο ρεύμα αναφοράς στο πλαίσιο dq σε σύγκριση με τα αντίστοιχα μη παραμορφωμένα μεγέθη.

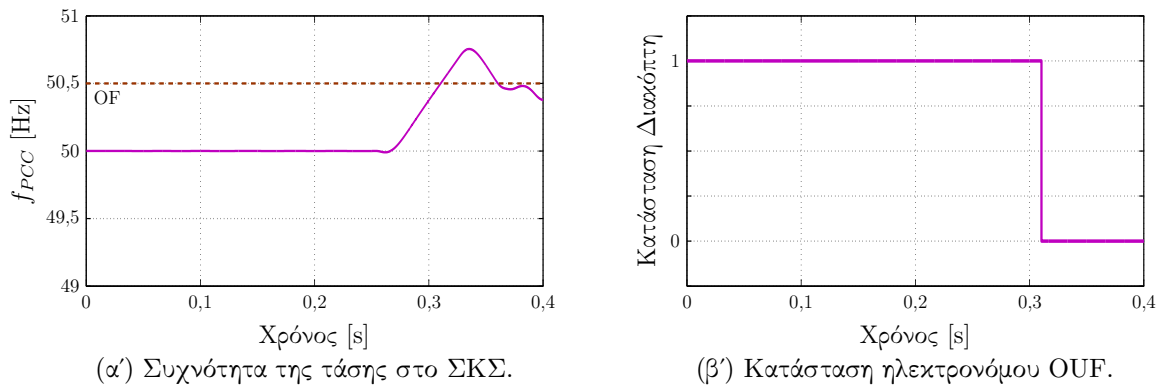
Στο Σχήμα 5.6(α') παρουσιάζεται η συχνότητα της τάσης στο ΣΚΣ. Όταν αυτή υπερβεί το όριο OF, όπως αναμένεται—λόγω της συνάρτησης που έχει χρησιμοποιηθεί προκειμένου να παραμορφωθεί το ρεύμα αναφοράς του αντιστροφέα—ανοίγει ο διακόπτης που αντιστοιχεί στον S_2 του Σχήματος 3.5. Η κατάσταση του διακόπτη αυτού παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.6(β'). Μετά από το άνοιγμα αυτού, όπως είναι αναμενόμενο, μηδενίζονται οι τριφασικές τάσεις και ρεύματα, όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 5.7.

5.2.2 Συγκριτικά αποτελέσματα μεταξύ AFD και SFS

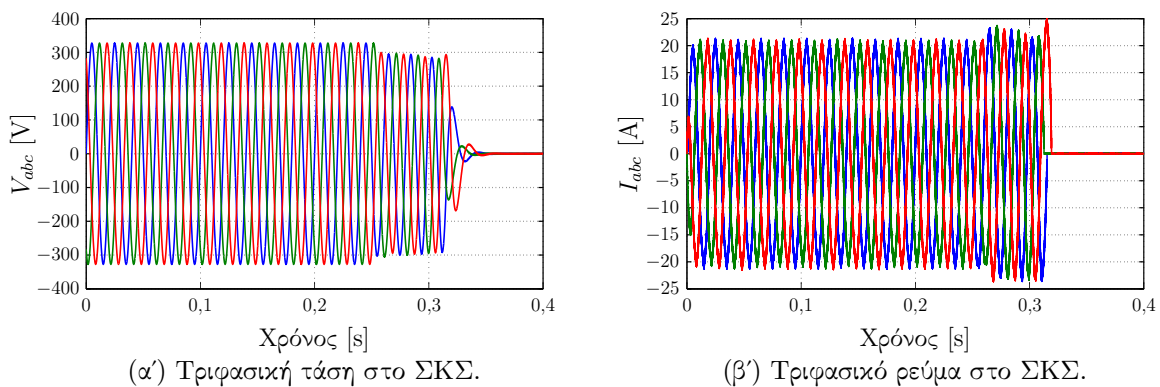
Οι μέθοδοι AFD και SFS είναι βασισμένες στην έννοια της μεταβολής συχνότητας. Όμως, η δεύτερη χρησιμοποιεί και θετική ανάδραση του σφάλματος μεταξύ της συχνότητας γραμμής και αυτής στο ΣΚΣ. Επομένως, αναμένεται πιο γρήγορη απόκριση στην κατάσταση της νησιδοποίησης, όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 5.8. Η νησιδοποίηση συμβαίνει τη χρονική στιγμή $t = 0,25$ s.

³Σύμβαση φορτίου.

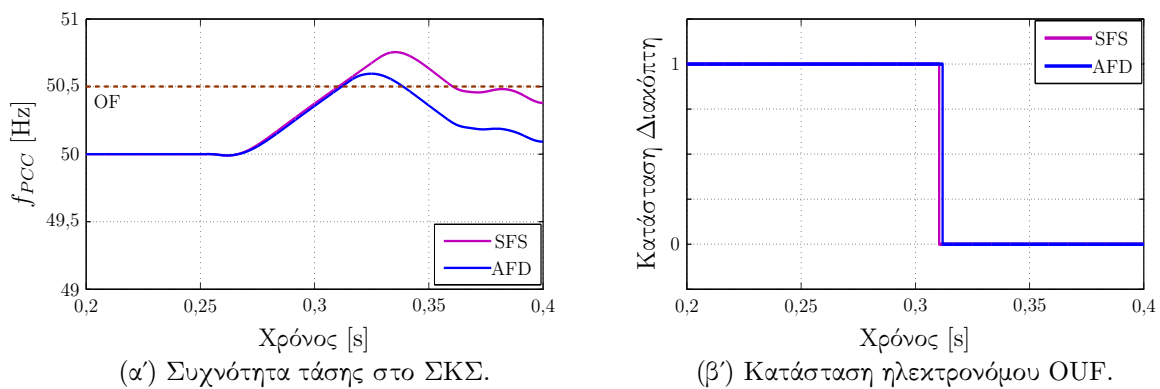
⁴Με βάση την Εξίσωση (1.3).



Σχήμα 5.6: Συμπεριφορά της συχνότητας της τάσης στο ΣΚΣ και κατάσταση διακοπή OUF για τη μέθοδο SFS.



Σχήμα 5.7: Τριφασική τάση και ρεύμα στο ΣΚΣ για τη μέθοδο SFS.



Σχήμα 5.8: Συμπεριφορά της συχνότητας της τάσης στο ΣΚΣ και κατάσταση διακοπή OUF. Συγκριτικά διαγράμματα μεταξύ μεθόδων AFD και SFS.

5.2.3 Υποβάθμιση ποιότητας ισχύος εξόδου αντιστροφέα λόγω της μεθόδου SFS

Για την εκτίμηση της υποβάθμισης ισχύος εξόδου του αντιστροφέα που προκαλεί η μέθοδος SFS υπό κανονικές συνθήκες—δηλαδή με τον αντιστροφέα διασυνδεδεμένο στο δίκτυο—

χρησιμοποιήθηκε ως δείκτης η Ολική Αρμονική Παραμόρφωση του ρεύματος του αντιστροφέα, THD_I . Έγιναν προσομοιώσεις για διάφορα κλάσματα ψαλιδισμού και ο μέσος όρος της Ολικής Αρμονικής Παραμόρφωσης είναι $THD_I = 4,27\%$. Ο αντιστροφέας, απουσία της μεθόδου αυτής, έχει $THD_I = 4,05\%$. Άρα, το THD_I αυξάνεται κατά $5,15\%$. Παρατηρείται ότι η υποβάθμιση είναι ίδια με αυτή που προκαλεί η μέθοδος AFD. Αυτό είναι λογικό, διότι η διαφορά των δύο μεθόδων έγκειται στη θετική ανάδραση, $f_{\Sigma K\Sigma} - f_{\gamma\rho}$, η οποία δεν παίζει κάποιο ρόλο στις προκειμένες προσομοιώσεις, καθώς δεν υπήρξε κάποια αλλαγή στο φορτίο.

5.3 Ανίχνευση Νησιδοποίησης SVS

Η μέθοδος SVS παρακολουθεί την RMS τιμή της τάσης στο ΣΚΣ του Σχήματος 3.5. Λειτουργεί επιχειρώντας να μετακινήσει την τάση στο ΣΚΣ εκτός των ορίων ΟUV. Αυτό πραγματοποιείται χρησιμοποιώντας το σφάλμα μεταξύ της τάσης στο ΣΚΣ και της ονομαστικής τάσης γραμής. Αυτό, ύστερα από την επαύξησή του μέσω του κέρδους επιτάχυνσης K , μεταβάλλει το ρεύμα αναφοράς του αντιστροφέα. Το παραμορφωμένο ρεύμα αναφοράς του αντιστροφέα της μεθόδου SVS είναι:

$$I_{ref,παρ} = I_{ref} + K (V_{\Sigma K\Sigma} - V_{\gamma\rho}). \quad (5.3)$$

Όταν το δίκτυο δεν είναι παρόν και υπάρξει κάποια μείωση στην τάση στο ΣΚΣ $V_{\Sigma K\Sigma}$, προκαλείται μείωση του ρεύματος εξόδου του αντιστροφέα. Σύμφωνα με το Νόμο του Ohm, λόγω της μείωσης του ρεύματος του φορτίου, θα προκληθεί περαιτέρω μείωση της τάσης στο ΣΚΣ. Η διαδικασία αυτή συνεχίζεται μέχρις ότου η μείωση της τάσης ανιχνευτεί από τον ηλεκτρονόμο UV.

Αυτή η μέθοδος είναι απλή ως προς την υλοποίηση. Επίσης, θεωρείται η πιο αποτελεσματική σε σύγκριση με τις υπόλοιπες μεθόδους θετικής ανάδρασης. Σε συνδυασμό με τη μέθοδο SFS—η οποία παρουσιάζεται στην Παράγραφο 5.2—η Μη Ανιχνεύσιμη Ζώνη που δημιουργείται είναι τόσο μικρή, που είναι δύσκολο να δημιουργηθεί για πειραματική επιβεβαίωση.

Αυτή η μέθοδος δεν συνιστάται αν το δίκτυο είναι αδύναμο ή έχει χαμηλή ποιότητα ισχύος. Η αποτελεσματικότητά του αντιστροφέα μειώνεται, εξαιτίας της μείωσης της ισχύος εξόδου του.

Τέλος, η μέθοδος έχει Μη Ανιχνεύσιμη Ζώνη ποιοτικά παρόμοια με αυτή της μεθόδου ΟUV, αλλά πολύ μικρότερη σε μέγεθος [10].

5.3.1 Αποτελέσματα Προσομοιώσεων της μεθόδου SVS

Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την προσομοίωση της εξής περίπτωσης:

Πίνακας 5.3: Περίπτωση προσομοίωσης για τη μέθοδο SVS

Παράμετροι	Π1
P_R [W]	11000
Q_L [VAR]	11000
Q_C [-VAR] ⁵	11000
Q_f ⁶	1
K	0,3
$t_{islanding}$ [s]	0,25

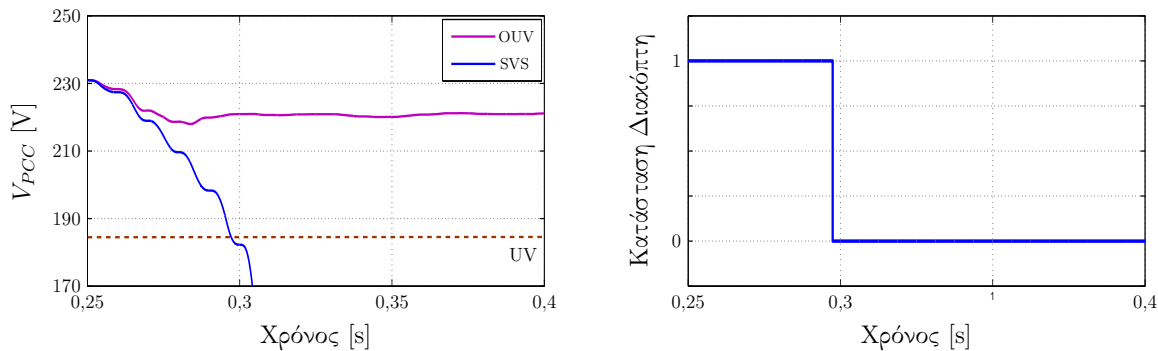
Στο Σχήμα 5.9(α') παρουσιάζεται η συμπεριφορά της τάσης στο ΣΚΣ της μεθόδου SVS σε σύγκριση με αυτής της μεθόδου OUV. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.5, το σημείο λειτουργίας που έχει επιλεγεί βρίσκεται εντός της Μη Ανιχνεύσιμης Ζώνης της μεθόδου OUV, για αυτό το λόγο η τάση στο ΣΚΣ που αντιστοιχεί σε αυτή τη μέθοδο δεν υπερβαίνει το όριο OUV. Όμως, η τάση που αντιστοιχεί στην περίπτωση που έχει εφαρμοστεί η μέθοδος SVS υπερβαίνει το όριο UV—λόγω της συνάρτησης (5.3). Συνεπώς, ανοίγει ο διακόπτης S_2 του Σχήματος 3.5. Η κατάσταση του διακόπτη αυτού παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.9(β'). Μετά από το άνοιγμα αυτού, όπως είναι αναμενόμενο, μηδενίζονται οι τριφασικές τάσεις και ρεύματα, όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 5.10.

5.3.2 Υποβάθμιση ποιότητας ισχύος εξόδου αντιστροφέα λόγω της μεθόδου SVS

Για την εκτίμηση της υποβάθμισης ισχύος εξόδου του αντιστροφέα που προκαλεί η μέθοδος SVS υπό κανονικές συνθήκες—δηλαδή με τον αντιστροφέα διασυνδεδεμένο στο δίκτυο—χρησιμοποιήθηκε ως δείκτης η Ολική Αρμονική Παραμόρφωση του ρεύματος του αντιστροφέα, THD_I . Έγιναν προσομοιώσεις για διάφορα κέρδη επιτάχυνσης και ο μέσος όρος της Ολικής Αρμονικής Παραμόρφωσης είναι $THD_I = 4,11\%$. Ο αντιστροφέας, απουσία της μεθόδου αυτής, έχει $THD_I = 4,05\%$. Άρα, το THD_I αυξάνεται κατά $1,48\%$.

⁵Σύμβαση φορτίου.

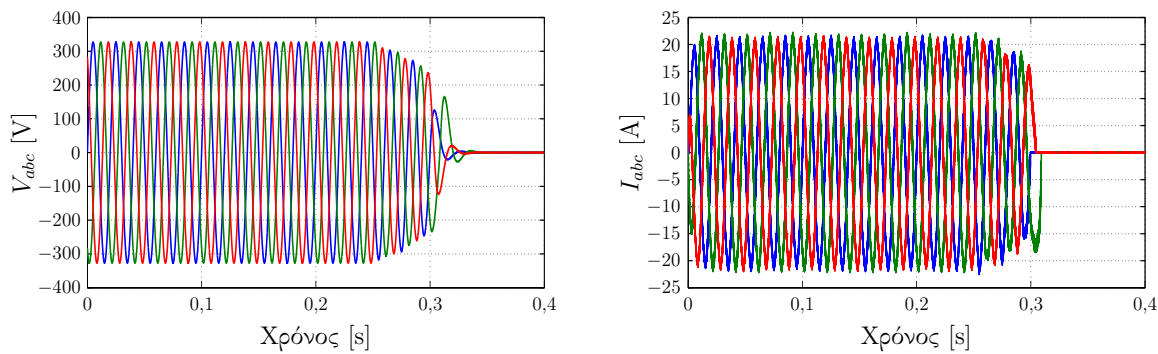
⁶Με βάση την Εξίσωση (1.3)



(α') Σύγκριση συμπεριφοράς της τάσης στο ΣΚΣ μεταξύ της μεθόδου SVS και της απλής προστασίας από τον ηλεκτρονόμο OUV.

(β') Κατάσταση ηλεκτρονόμου OUV.

Σχήμα 5.9: Σύγκριση συμπεριφοράς της τάσης στο ΣΚΣ μεταξύ μεθόδου SVS και της απλής προστασίας από τον ηλεκτρονόμο OUV και κατάσταση διακόπτη OUV που οδηγείται από τη μέθοδο SVS.



(α') Τριφασική τάση στο ΣΚΣ.

(β') Τριφασικό ρεύμα στο ΣΚΣ.

Σχήμα 5.10: Τριφασική τάση και ρεύμα στο ΣΚΣ για τη μέθοδο SVS.

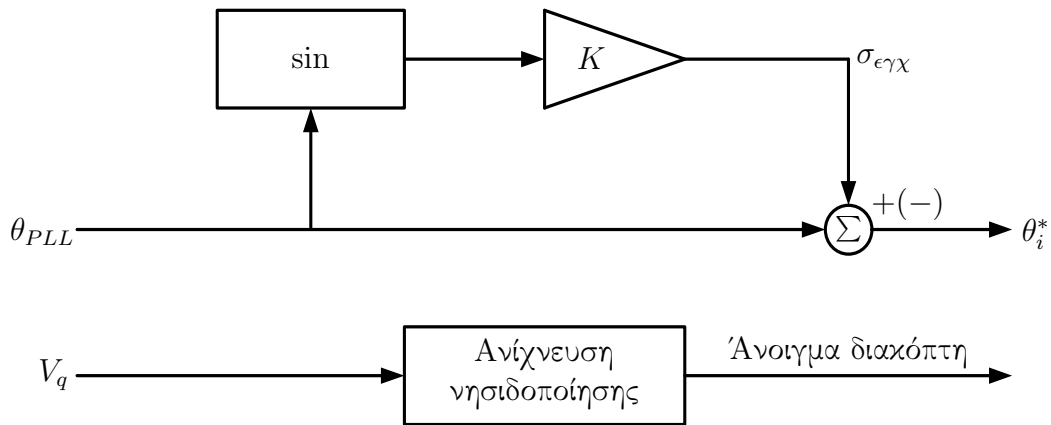
5.4 Ανίχνευση Νησιδοποίησης βασισμένη στο PLL

Η μέθοδος ανίχνευσης νησιδοποίησης βάσει PLL—η οποία πλέον θα καλείται μέθοδος PLL για χάρη συντομίας—βασίζεται στην ανίχνευση των αλλαγών στη σύνθετη αντίσταση δικτύου. Ένα ημιτονοειδές σήμα, $\sigma_{\epsilon\gamma\chi}$, προστίθεται στη γωνία του PLL (θ_{PLL}) όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 5.11, με σκοπό τη μικρή παραμόρφωση της φάσης του ρεύματος αντιστροφέα. Στη συνέχεια, εξάγεται ένα σήμα ανάδρασης από την τάση στο ΣΚΣ. Αυτό το σήμα μετασχηματίζεται στο πλαίσιο dq και, στη συνέχεια, λαμβάνεται η συνιστώσα του άξονα q για επεξεργασία.

Το εγχεόμενο σήμα ορίζεται ως εξής:

$$\sigma_{\epsilon\gamma\chi} = K \sin \theta_{PLL} \quad (5.4)$$

όπου το κέρδος K χρησιμοποιείται για να ρυθμιστεί η ποσότητα της παραμόρφωσης που απαιτείται για την ανίχνευση νησιδοποίησης. Η τελική αναφορά γωνίας για το ρεύμα είναι η



Σχήμα 5.11: Μέθοδος ανίχνευσης νησιδοποίησης βασισμένη στο PLL.

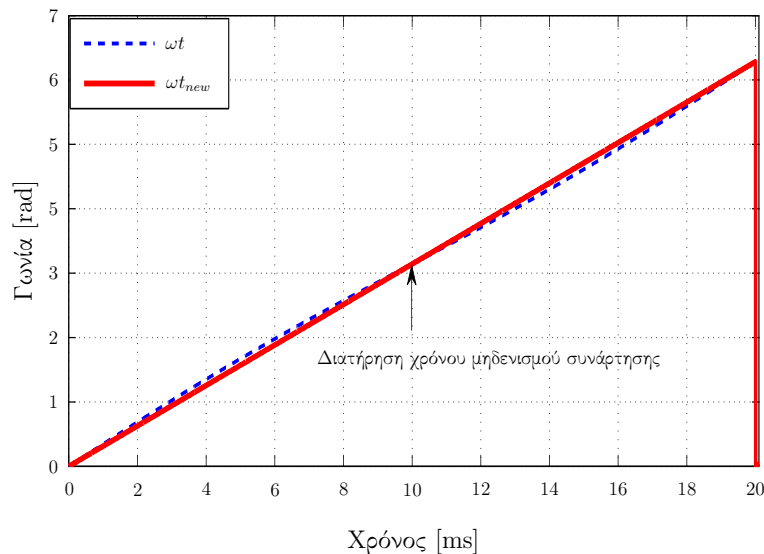
εξής:

$$\sin \theta_{inv}^* = \sin(\theta_{PLL} + \sigma_{\epsilon\gamma\chi}) = \sin(\theta_{PLL} + K \sin \theta_{PLL}) \quad (5.5)$$

η οποία, ύστερα από εκτέλεση πράξεων, μπορεί να προσεγγιστεί από τον παρακάτω τύπο:

$$\sin \theta_{PLL}^* + \frac{K}{2} \sin 2\theta_{PLL} \quad (5.6)$$

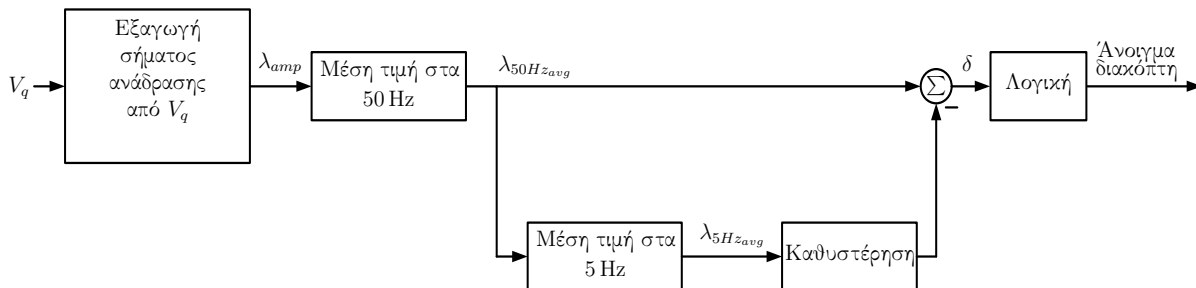
Για μικρές τιμές του κέρδους K —π.χ. $K < 0.05$ —η προσθήκη του $K \sin \theta_{PLL}$ στο $\sin(\theta_{PLL})$ είναι ισοδύναμη με την προσθήκη ενός σήματος δεύτερης αρμονικής, χωρίς όμως, να επηρεάζεται το πλάτος και τα σημεία μηδενισμού της συνάρτησης. Στο Σχήμα 5.12 απεικονίζεται η παραμορφωμένη κυματομορφή γωνίας στην έξοδο του PLL σε σύγκριση με μία μη παραμορφωμένη.



Σχήμα 5.12: Παραμορφωμένη γωνία στην έξοδο του PLL.

Αποτέλεσμα της έγχυσης σήματος δεύτερης αρμονικής είναι η εμφάνιση μίας δεύτερης αρμονικής στην τάση, της οποίας το πλάτος εξαρτάται από την τιμή της σύνθετης αντίστασης

δικτύου. Το πλάτος της δεύτερης αρμονικής μπορεί να εξαχθεί σαν σήμα ανάδρασης από την τάση V_q στο ΣΚΣ. Στη συνέχεια, γίνεται υπολογισμός της μέσης τιμής του πλάτους του σήματος ανάδρασης, τόσο στα 50 όσο και στα 5 Hz.



Σχήμα 5.13: Επεξεργασία σήματος για ανίχνευση νησιδοποίησης.

Όταν το σύστημα έλθει σε κατάσταση νησιδοποίησης, υπάρχει αλλαγή στη σύνθετη αντίσταση δικτύου. Η αλλαγή της τιμής αυτής ανιχνεύεται από το σήμα ανάδρασης V_q , μέσω τη διαφοράς, δ , μεταξύ της μέσης τιμής πλάτους στα 50 Hz μείον αυτής στα 5 Hz, όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 5.13.

Η τιμή δ συγκρίνεται με μία τιμή κατωφλίου. Αν είναι μεγαλύτερη από αυτή, τότε ξεκινάει ένας χρονομετρητής. Αν η τιμή του δ παραμείνει πάνω από την τιμή κατωφλίου για χρόνο περισσότερο από 0,2s, αποστέλλεται σήμα για άνοιγμα του διακόπτη S_2 του Σχήματος 3.5. Διαφορετικά, αν η τιμή του δ γίνει μικρότερη από την τιμή κατωφλίου, μηδενίζεται ο χρονομετρητής [19].

5.4.1 Αποτελέσματα Προσομοιώσεων της μεθόδου PLL

Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την προσομοίωση της εξής περίπτωσης:

Πίνακας 5.4: Περίπτωση προσομοίωσης για τη μέθοδο PLL

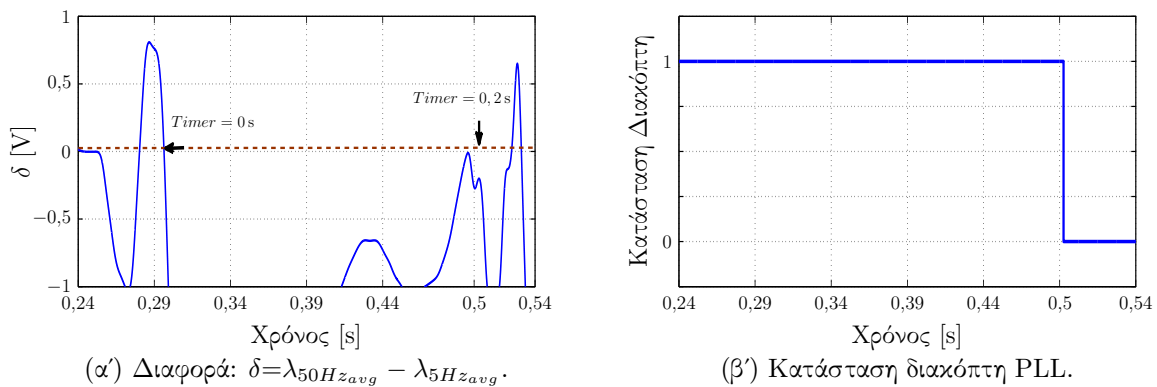
Παράμετροι	Π1
P_R [W]	12000
Q_L [VAR]	12000
Q_C [-VAR] ⁷	12000
Q_f ⁸	1
K	0,05
δ_{thres}	0,02
$t_{islanding}$ [s]	0,25

Με βάση τον αλγόριθμο του Σχήματος που παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.13 ο δείκτης ανίχνευσης της κατάστασης νησιδοποίησης παρακολουθεί την παρακάτω διαφορά:

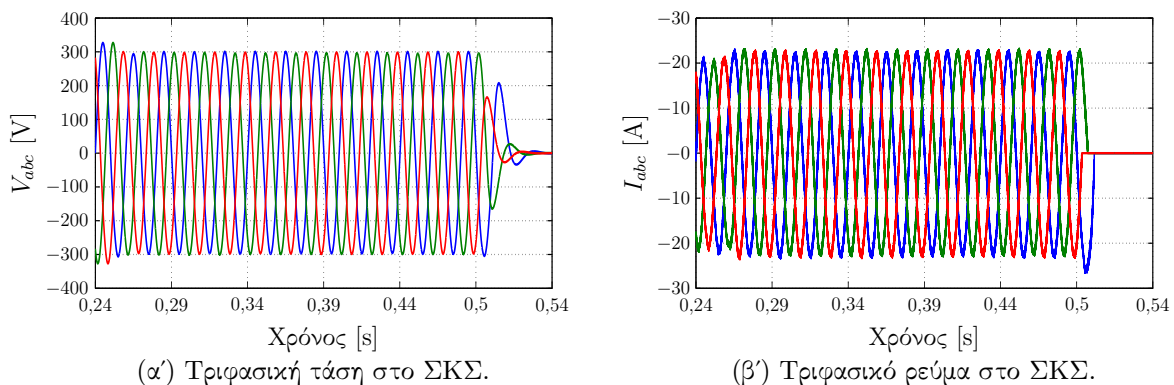
$$\delta = \lambda_{50Hz_{avg}} - \lambda_{5Hz_{avg}} \quad (5.7)$$

όπου, $\lambda_{50Hz_{avg}}$ είναι η μέση τιμή του πλάτους του σήματος ανάδρασης, V_q , στα 50 Hz, $\lambda_{5Hz_{avg}}$ είναι η μέση τιμή του πλάτους του σήματος ανάδρασης, V_q , στα 5 Hz.

Όταν η διαφορά είναι μεγαλύτερη από την προκαθορισμένη τιμή κατωφλίου, δ_{thres} , ξεκινάει ο χρονομετρητής. Αν η τιμή της διαφοράς των μέσων τιμών των πλατών παραμείνει εκτός ορίου για χρόνο περισσότερο από 0,2s, αποστέλλεται σήμα για την αποσύνδεση του αντιστροφέα. Αυτά συνοψίζονται στο Σχήμα 5.14. Μετά από το άνοιγμα του διακόπτη, όπως είναι αναμενόμενο, μηδενίζονται οι τριφασικές τάσεις και ρεύματα, όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 5.15.



Σχήμα 5.14: Δείκτης ανίχνευσης και κατάσταση διακοπής για τη μέθοδο PLL.



Σχήμα 5.15: Τριφασική τάση και ρεύμα στο ΣΚΣ για τη μέθοδο PLL.

⁷Σύμβαση φορτίου.

⁸Με βάση την Εξίσωση (1.3).

5.4.2 Υποβάθμιση ποιότητας ισχύος εξόδου αντιστροφέα λόγω της μεθόδου SVS

Για την εκτίμηση της υποβάθμισης ισχύος εξόδου του αντιστροφέα που προκαλεί η μέθοδος PLL υπό κανονικές συνθήκες—δηλαδή με τον αντιστροφέα διασυνδεδεμένο στο δίκτυο—χρησιμοποιήθηκε ως δείκτης η Ολική Αρμονική Παραμόρφωση του ρεύματος του αντιστροφέα, THD_I . Έγιναν προσομοιώσεις για διάφορα κέρδη επιτάχυνσης και ο μέσος όρος της Ολικής Αρμονικής Παραμόρφωσης είναι $THD_I = 4,16\%$. Ο αντιστροφέας, απουσία της μεθόδου αυτής, έχει $THD_I = 4,05\%$. Άρα, το THD_I αυξάνεται κατά $2,71\%$.

5.5 Συγκριτικά συμπεράσματα των ενεργητικών μεθόδων

Η αξιολόγηση των ενεργητικών μεθόδων έγινε με βάση την παραμόρφωση που προκαλούν στην ποιότητα ισχύος εξόδου του αντιστροφέα. Συνοπτικά, τα συγκριτικά αποτελέσματα είναι τα εξής:

- ◇ στη μέθοδο AFD, κατά μέσο όρο του κλάσματος ψαλιδισμού cf , ισχύει ότι $THD_I = 4,27\%$, δηλαδή σε σύγκριση με την περίπτωση απουσίας ενεργητικής μεθόδου, η αύξηση του THD_I είναι $5,15\%$,
- ◇ στη μέθοδο SFS, κατά μέσο όρο του κλάσματος ψαλιδισμού cf_0 , ισχύει ότι $THD_I = 4,27\%$, δηλαδή σε σύγκριση με την περίπτωση απουσίας ενεργητικής μεθόδου, η αύξηση του THD_I είναι $5,15\%$,
- ◇ στη μέθοδο SVS, κατά μέσο όρο του κέρδους επιτάχυνσης K , ισχύει ότι $THD_I = 4,11\%$, δηλαδή σε σύγκριση με την περίπτωση απουσίας ενεργητικής μεθόδου, η αύξηση του THD_I είναι $1,48\%$,
- ◇ στη μέθοδο PLL, κατά μέσο όρο του κέρδους επιτάχυνσης K , ισχύει ότι $THD_I = 4,16\%$, δηλαδή σε σύγκριση με την περίπτωση απουσίας ενεργητικής μεθόδου, η αύξηση του THD_I είναι $2,71\%$.

ΜΕΡΟΣ ΙΙΙ

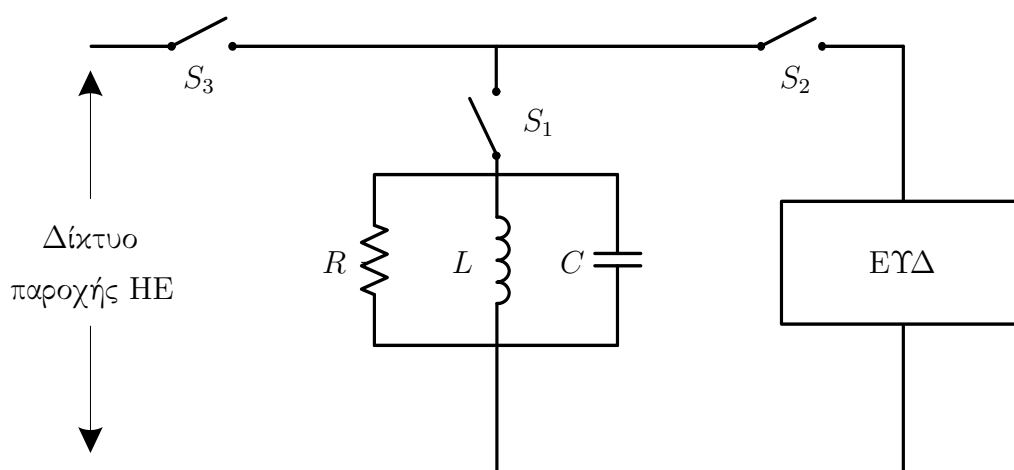
ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ

Κεφάλαιο 6

Πειραματική Δοκιμή Αντιστροφών

Σε αυτό το Μέρος παρουσιάζεται η πειραματική δοκιμή τριών φωτοβολταϊκών αντιστροφών στο Εργαστήριο Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας, του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Η διαδικασία που ακολουθήθηκε για την εκτέλεση του πειράματος υποδεικνύεται από το πρότυπο IEC 62116¹. Σύμφωνα με την αναφορά της ABB, σχετικά με τις απαιτήσεις διασύνδεσης στο ελληνικό δημόσιο δίκτυο, ο χρόνος αποσύνδεσης σε περίπτωση νησιδοποίησης είναι 0,5 s [1]. Η πειραματική κυκλωματική διάταξη είναι η παρακάτω:



Σχήμα 6.1: Δοκιμή ανίχνευσης νησιδοποίησης.

Οι τρεις φωτοβολταϊκοί αντιστροφείς που δοκιμάστηκαν (Εξοπλισμός Υπό Δοκιμή—ΕΥΔ) είναι οι εξής:

◇ SMA TL 3000,

¹ Αν και η Ελλάδα ακολουθεί το πρότυπο VDE 0126 – 1 – 1, δεν ήταν δυνατό να γίνουν πειράματα με βάση αυτό, λόγω περιορισμένης δυνατότητας ρύθμισης των φορτίων *RLC*.

◇ Danfoss DLX 2.0,

◇ Sun Profi.

Όσον αφορά το διαθέσιμο υλικό RLC , σύμφωνα με το πρότυπο IEC 62116 πρέπει να επιτευχθεί $Q_f = 1$. Ο συντελεστής ποιότητα δίνεται από την Εξίσωση:

$$Q_f = \frac{\sqrt{Q_L Q_C}}{P_R} \quad (6.1)$$

όπου,

P_R είναι η ενεργός ισχύς του φορτίου [W],

Q_C είναι η χωρητική άεργος ισχύς του φορτίου [VAR],

Q_L είναι η επαγωγική άεργος ισχύς του φορτίου [VAR].

Για τη ρύθμιση της αντίστασης R , χρησιμοποιήθηκε αντιστάτης με συνεχή βήματα. Επομένως, η επιθυμητή ενεργός ισχύς, η οποία δίνεται από την Εξίσωση (6.2) ήταν δυνατό να επιτευχθεί με ακρίβεια.

$$P_\Phi = \frac{V^2}{R} \quad (6.2)$$

Όμως, οι διαθέσιμες τιμές χωρητικότητας C —οι οποίες παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.1—και επαγωγικότητας L —οι οποίες παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.2—ήταν περιορισμένες σε αριθμό, λόγω χρήσης υλικού με διακριτά βήματα. Για αυτό το λόγο υπήρχε και περιορισμός στην επίτευξη της επιθυμητής χωρητικής αέργου ισχύος—η οποία δίνεται από την Εξίσωση (6.3)—και της επαγωγικής αέργου ισχύος—η οποία δίνεται από την Εξίσωση (6.4)—έτσι ώστε να ισχύει $Q_f=1$.

$$C_\Phi = \frac{PQ_f}{2\pi fV^2} \quad (6.3)$$

$$L_\Phi = \frac{V^2}{2\pi fPQ_f} \quad (6.4)$$

Η διαδικασία που ακολουθήθηκε για την εκτέλεση των πειραμάτων, βασίζεται στα βήματα 2-10 που περιγράφονται στην Παράγραφο 1.4.1, η οποία, αν και αναφέρεται στο πρότυπο IEEE 1547.1, ισχύει και για το IEC 62116. Η διαφορά έγκειται στα βήματα 3 και 4. Η ισχύς εξόδου του αντιστροφέα των πειραμάτων που παρουσιάζονται στις επόμενες Παραγράφους εξαρτόταν από τις συνθήκες ηλιοφάνειας της ημέρας και ώρας που αυτά διεξάγονταν.

6.1 Δοκιμή Αντιστροφέα SMA TL 3000

Ο πρώτος αντιστροφέας που υποβλήθηκε σε δοκιμή αντηνσιδοποίησης ήταν ο SMA TL 3000. Μερικά από τα χαρακτηριστικά του φαίνονται στον Πίνακα 6.3:

Οι συνθήκες υπό τις οποίες διεξήχθη το πείραμα, καθώς και η επιλογή των τιμών του φορτίου RLC φαίνονται στον Πίνακα 6.4:

Πίνακας 6.1: Δυνατές τιμές χωρητικότητας [μ F]

A/A	R	S	T
1	9,90	9,80	9,90
2	9,91	9,88	9,94
3	9,90	20,10	20,40
4	19,90	30,60	30,20
5	30,60	40,20	51,00
6	51,00	62,00	62,00

Πίνακας 6.2: Δυνατές τιμές επαγωγικότητας [H]

A/A	R	S	T
1	1,09	1,19	1,07
2	0,5562	—	0,5467
3	0,3678	—	0,36134
4	0,2796	—	0,2748
5	0,223	0,23923	—
6	0,1869	—	0,2
7	0,1611	0,1723	—
8	0,1406	—	—
9	0,1249	—	0,122
10	0,1137	—	0,1111
11	0,103	0,1093	—

Σε αυτό το πείραμα επετεύχθη αντιστοιχία ενεργού ισχύος, $\Delta P/P_{\Delta\Pi} = 0\%$, και αναντιστοιχία αέργου ισχύος της τάξης του $\Delta Q/P_{\Delta\Pi} = -1,09\%$.

Στο Σχήμα 6.2 απεικονίζεται το ρεύμα και η τάση του δικτύου και του αντιστροφέα SMA TL 3000, από όπου παρατηρείται ότι τη στιγμή $t = 0,31$ s το δίκτυο αποσυνδέεται. Τη στιγμή εκείνη, ο αντιστροφέας SMA TL 3000 και το φορτίο *RLC* σχηματίζουν μία ηλεκτρική νησίδα. Όπως, φαίνεται από την τάση και το ρεύμα του αντιστροφέα, η κατάσταση νησιδοποίησης ανιχνεύεται επιτυχώς και αποσυνδέεται τη στιγμή $t = 0,425$ s.

Πίνακας 6.3: Βασικά χαρακτηριστικά του αντιστροφέα SMA TL 3000

Είσοδος (DC)	
Μέγιστη Ισχύς DC [W]	3200
Μέγιστο Ρεύμα Εισόδου [A]	17
Έξοδος (AC)	
Ονομαστική Ισχύς AC [W]	3000
Μέγιστο ρεύμα Εξόδου [A]	16
$\cos \phi$	1
Βαθμός Απόδοσης (Euro) [%]	97

Πίνακας 6.4: Συνθήκες και επιλογή τιμών RLC για τη διεξαγωγή πειράματος στον αντιστροφέα SMA TL 3000

$V_{RMS,inv}$ [V]	230
$I_{RMS,inv}$ [A]	2,25
P_{inv} [W]	517,5
R [Ω]	102
L [H]	0,36134
C [μF]	30,2
Q_L [VAR]	466
Q_C [VAR]	501,9
Q_f	0,93

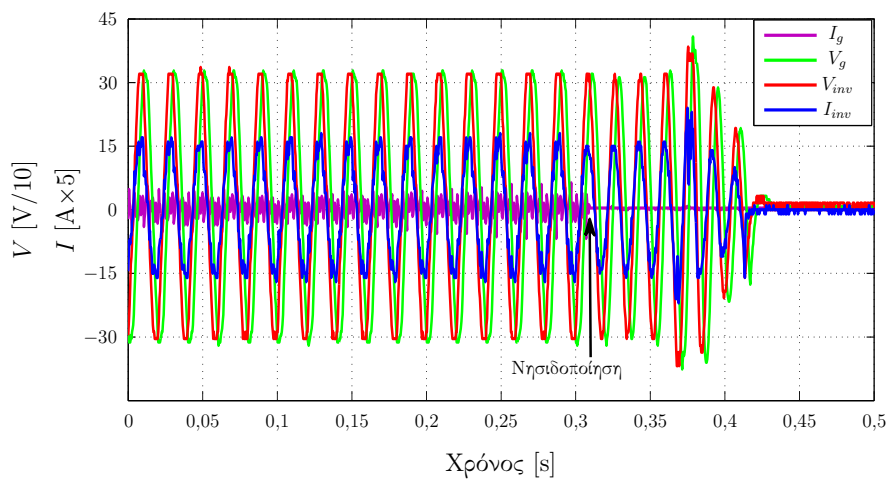
6.2 Δοκιμή Αντιστροφέα Danfoss DLX 2.0

Ο δεύτερος αντιστροφέας που υποβλήθηκε σε δοκιμή αντηνσιδοποίησης ήταν ο Danfoss DLX 2.0. Μερικά από τα χαρακτηριστικά του φαίνονται στον Πίνακα 6.5:

Οι συνθήκες υπό τις οποίες διεξήχθη το πείραμα, καθώς και η επιλογή των τιμών του φορτίου RLC φαίνονται στον Πίνακα 6.6:

Σε αυτό το πείραμα επετεύχθη αντιστοιχία ενεργού ισχύος, $\Delta P/P_{\Delta\Pi} = 0\%$, και αναντιστοιχία αέργου ισχύος της τάξης του $\Delta Q/P_{\Delta\Pi} = 5\%$.

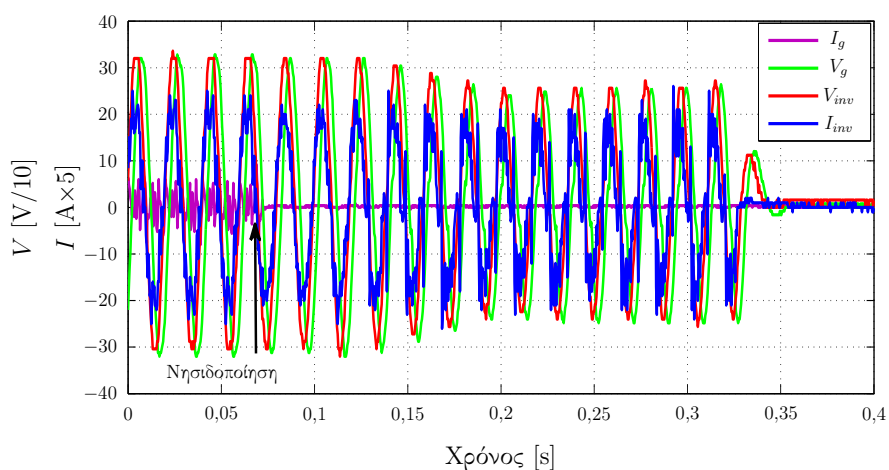
Στο Σχήμα 6.3 απεικονίζεται το ρεύμα και η τάση του δικτύου και του αντιστροφέα Danfoss DLX 2.0, από όπου παρατηρείται ότι τη στιγμή $t = 0,07\text{ s}$ το δίκτυο αποσυνδέεται. Τη στιγμή εκείνη, ο αντιστροφέας Danfoss DLX 2.0 και το φορτίο RLC σχηματίζουν μία



Σχήμα 6.2: Τάση και ρεύμα δικτύου και αντιστροφέα SMA TL 3000.

Πίνακας 6.5: Βασικά χαρακτηριστικά του αντιστροφέα Danfoss DLX 2.0

Είσοδος (DC)	
Μέγιστη Ισχύς DC [W]	2625
Μέγιστο Ρεύμα Εισόδου [A]	9,5
Έξοδος (AC)	
Ονομαστική Ισχύς AC [W]	2000
Μέγιστο ρεύμα Εξόδου [A]	10,5
$\cos \phi$	1
Βαθμός Απόδοσης (Euro) [%]	96,3



Σχήμα 6.3: Τάση και ρεύμα δικτύου και αντιστροφέα Danfoss DLX 2.0.

ηλεκτρική νησίδα. Όπως, φαίνεται από την τάση και το ρεύμα του αντιστροφέα, η κατάσταση νησιδοποίησης ανιχνεύεται επιτυχώς και αποσυνδέεται τη στιγμή $t = 0,328$ s.

Πίνακας 6.6: Συνθήκες και επιλογή τιμών RLC για τη διεξαγωγή πειράματος στον αντιστροφέα Danfoss DLX 2.0

$V_{RMS,inv}$ [V]	230
$I_{RMS,inv}$ [A]	2,7
P_{inv} [W]	628
R [Ω]	84,24
L [H]	0,23923
C [μF]	40,2
Q_L [VAR]	703,9
Q_C [VAR]	668
Q_f	1,09

6.3 Δοκιμή Αντιστροφέα Sun Profi

Ο τρίτος αντιστροφέας που υποβλήθηκε σε δοκιμή αντηνσιδοποίησης ήταν ο Sun Profi. Μερικά από τα χαρακτηριστικά του φαίνονται στον Πίνακα 6.7:

Πίνακας 6.7: Βασικά χαρακτηριστικά του αντιστροφέα Sun Profi

Είσοδος (DC)	
Μέγιστη Ισχύς DC [W]	2150
Έξοδος (AC)	
Ονομαστική Ισχύς AC [W]	2000
Μέγιστο ρεύμα Εξόδου [A]	10,5
$\cos \phi$	1
Βαθμός Απόδοσης (Euro) [%]	92

Οι συνθήκες υπό τις οποίες διεξήχθη το πείραμα, καθώς και η επιλογή των τιμών του φορτίου RLC φαίνονται στον Πίνακα 6.8:

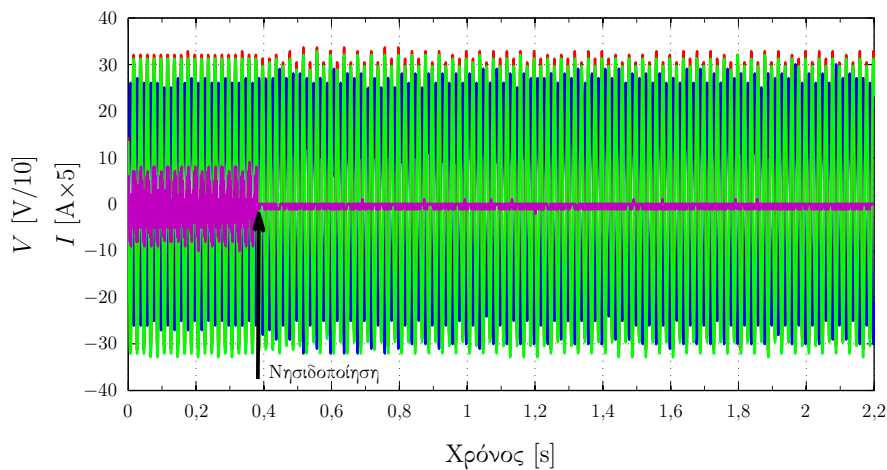
Σε αυτό το πείραμα επετεύχθη αντιστοιχία ενεργού ισχύος, $\Delta P/P_{\Delta\Pi} = 0\%$, και αναντιστοιχία αέργου ισχύος της τάξης του $\Delta Q/P_{\Delta\Pi} = -1,97\%$.

Στο Σχήμα 6.4 απεικονίζεται το ρεύμα και η τάση του δικτύου και του αντιστροφέα Sun Profi, από όπου παρατηρείται ότι τη στιγμή $t = 0,38\text{ s}$ το δίκτυο αποσυνδέεται. Τη στιγμή εκείνη, ο αντιστροφέας Sun Profi και το φορτίο RLC σχηματίζουν μία ηλεκτρική νησίδα.

Μέχρι το τέλος του παραθύρου παρατήρησης—1,82 s μετά το σχηματισμό της ηλεκτρικής

Πίνακας 6.8: Συνθήκες και επιλογή τιμών RLC για τη διεξαγωγή πειράματος στον αντιστροφέα Sun Profi

$V_{RMS,inv}$ [V]	230
$I_{RMS,inv}$ [A]	2,2
P_{inv} [W]	506
R [Ω]	104,6
L [H]	0,3678
C [μF]	30,6
Q_L [VAR]	457,8
Q_C [VAR]	508
Q_f	0,95

**Σχήμα 6.4:** Τάση και ρεύμα δικτύου και αντιστροφέα Sun Profi. Η κυματομορφή που διακόπτεται αντιστοιχεί στο ρεύμα δικτύου.

νησίδας—δεν έχει γίνει ανίχνευση της νησιδοποίησης. Όμως, σύμφωνα με τις ελληνικές απαιτήσεις για προστασία από τη νησιδοποίηση, πρέπει να γίνεται ανίχνευση της κατάστασης αυτής το πολύ σε διάρκεια 0,5 s από το σχηματισμό της ηλεκτρικής νησίδας. Επομένως, ο αντιστροφέας αυτός δεν πληροί τις προδιαγραφές για διασύνδεση στο ελληνικό δημόσιο δίκτυο.

ΜΕΡΟΣ IV

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Κεφάλαιο 7

Συμπεράσματα και μελλοντικές προεκτάσεις

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας ήταν το φαινόμενο της μη σκόπιμης νησιδοποίησης, καθώς και μέθοδοι με βάση τις οποίες αυτή ανιχνεύεται και διακόπτεται.

Αρχικά, διεξήχθη βιβλιογραφική έρευνα σχετικά με το φαινόμενο αυτό καθαυτό, τους λόγους για τους οποίους είναι πιθανό να συμβεί, καθώς και τις αρνητικές του συνέπειες. Λόγω των τελευταίων, προκύπτει η ανάγκη ύπαρξης μεθόδων ανίχνευσης του φαινομένου της μη σκόπιμης νησιδοποίησης. Έγινε αναφορά και σύντομη περιγραφή των ήδη υπάρχουσών τοπικών μεθόδων, οι οποίες χωρίζονται σε παθητικές και ενεργητικές.

Η βιβλιογραφική έρευνα ολοκληρώθηκε με την ανάλυση των προτύπων που σχετίζονται με τη δοκιμή ανίχνευσης μη σκόπιμης νησιδοποίησης και συγκεκριμένα των IEEE 1547.1, IEC 62116 και VDE 0126 – 1 – 1. Δόθηκε αναλυτική περιγραφή των βημάτων δοκιμής του πρώτου, καθώς αποτέλεσε και τη βάση όλων των προτύπων απαιτήσεων για διασύνδεση σε δίκτυα. Τέλος, αναφέρθηκαν οι απαιτήσεις που ισχύουν για αντιστροφείς προς διασύνδεση με το ελληνικό δημόσιο δίκτυο.

Σε συνέχεια της βιβλιογραφικής έρευνας, έγινε εκτενέστερη μελέτη εννέα μεθόδων ανίχνευσης νησιδοποίησης, οι οποίες αναλύθηκαν και προσομοιώθηκαν. Έχοντας ως βάση έναν αντιστροφέα με έλεγχο ενεργού-αέργου ισχύος μέσω ελέγχου ρεύματος, υλοποιήθηκαν οι μέθοδοι στο προγραμματιστικό περιβάλλον MATLAB/SIMULINK και τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων που διεξήχθησαν, αξιολογήθηκαν.

Όσον αφορά τις παθητικές μεθόδους, αναλύθηκαν και υλοποιήθηκαν οι μέθοδοι Υπέρ/Υπό-Τάσης (OUV και OUF), Ολικής Αρμονικής Παραμόρφωσης της Τάσης στο ΣΚΣ (THD_V), Άλματος Φάσης της Τάσης (Voltage Phase Jump), Ρυθμού Μεταβολής της Συχνότητας στο ΣΚΣ (RoCoF) και Μεταβολής του Διανύσματος της τάσης στο ΣΚΣ (VS). Τα αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν αφορούν τη συμπεριφορά των παραμέτρων ενδιαφέροντος, με βάση τις οποίες ανιχνευόταν η κατάσταση της νησιδοποίησης. Τέλος, πραγματο-

ποιήθηκε σύγκριση των μεθόδων αυτών με βάση το κριτήριο της Μη Ανιχνεύσιμης Ζώνης στο χώρο αναντιστοιχίας ενεργού και αέργου ισχύος (ΔP ως προς ΔQ). Προέκυψαν συμπεράσματα που επιβεβαιώνουν τη βιβλιογραφική έρευνα:

- ◇ Η μέθοδος Υπέρ/Υπό-Τάσης και Υπερ/Υπο-Συχνότητας διαθέτει Μη Ανιχνεύσιμη Ζώνη $-22,2\% \leq \frac{\Delta P}{P_{\Delta\Pi}} \leq 54\%$, για $\Delta Q = 0$, και $-1,8\% \leq \frac{\Delta Q}{P_{\Delta\Pi}} \leq 1,8\%$ για $\Delta P = 0$. Συμπεραίνεται ότι αυτή η μέθοδος δεν είναι ικανή μόνη της να προστατεύσει τον αντιστροφέα από το φαινόμενο της νησιδοποίησης.
- ◇ Η μέθοδος Ολικής Αρμονικής Παραμόρφωσης της Τάσης στο ΣΚΣ, δε διαθέτει Μη Ανιχνεύσιμη Ζώνη, όμως το κύριο πρόβλημα που αντιμετωπίζει είναι η δυσκολία επιλογής της τιμής κατωφλίου. Αυτή εξαρτάται από το φορτίο RLC , τις αρμονικές τάσης του αντιστροφέα, καθώς επίσης και από το αρμονικό περιεχόμενο της τάσης του δικτύου.
- ◇ Η μέθοδος Άλματος της Φάσης της Τάσης αποδεικνύεται ότι διαθέτει Μη Ανιχνεύσιμη Ζώνη, η οποία ποιοτικά είναι παρόμοια με αυτή της μεθόδου του ηλεκτρονόμου Υπερ/Υπο-Συχνότητας, αλλά είναι μικρότερου μεγέθους. Πρέπει να σημειωθεί, όμως, το μέγεθος αυτό εξαρτάται από την τιμή κατωφλίου που επιλέγεται.
- ◇ Η μέθοδος Ρυθμού Μεταβολής της Συχνότητας στο ΣΚΣ και η μέθοδος Μεταβολής του Διανύσματος της Τάσης διαθέτουν ποιοτικά παρόμοιες Μη Ανιχνεύσιμες Ζώνες με αυτή της μεθόδου Υπέρ/Υπό-Τάσης και Υπερ/Υπο-Συχνότητας, αλλά είναι πολύ μικρότερου μεγέθους. Φυσικά, η αποδοτικότητά τους, όσον αφορά αυτό το κριτήριο, εξαρτάται από την τιμή κατωφλίου που επιλέγεται.

Όσον αφορά τις ενεργητικές μεθόδους αναλύθηκαν και υλοποιήθηκαν οι μέθοδοι απλής Μεταβολής της Συχνότητας (Active Frequency Drift—AFD), Μεταβολής της Συχνότητας με Θετική Ανάδραση (Active Frequency Drift with Posiditive Feedback—AFDPF ή αλλιώς Sandia Frequency Shift—SFS), Μεταβολής της Τάσης (Sandia Voltage Shift) και PLL. Παρουσιάστηκαν αποτελέσματα της παραμόρφωσης των παραμέτρων στις οποίες βασίζεται η κάθε μέθοδος. Τέλος, πραγματοποιήθηκε σύγκριση των μεθόδων αυτών με βάση το κριτήριο της υποβάθμισης ισχύος εξόδου του αντιστροφέα. Η επίδραση των μεθόδων στο δείκτη παραμόρφωσης του ρεύματος (THD_I) σε σύγκριση με την τιμή του όταν απουσιάζει η εκάστοτε ενεργητική μέθοδος είναι η εξής:

- ◇ αύξηση κατά μέσο όρο 5,15% για τη μέθοδο απλής Μεταβολής της Συχνότητας,
- ◇ αύξηση κατά μέσο όρο 5,15% για τη μέθοδο Μεταβολής της Συχνότητας με Θετική Ανάδραση,
- ◇ αύξηση κατά μέσο όρο 1,48% για τη μέθοδο Μεταβολής της Τάσης,

- ◇ αύξηση κατά μέσο όρο 2,71 % για τη μέθοδο της οποίας η ιδέα βασίζεται στη λειτουργία του PLL.

Τέλος, εξετάστηκε πειραματικώς (μερικώς) η ικανότητα ανίχνευσης νησιδοποίησης τριών αντιστροφέων του Εργαστηρίου Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας, του Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου, οι οποίοι είχαν διασυνδεθεί με το δίκτυο. Το πρότυπο το οποίο ακολουθήθηκε για τη διεξαγωγή αυτών των πειραματικών δοκιμών ήταν το IEC 62116, αν και η Ελλάδα ακολουθεί το VDE 0126 – 1 – 1. Ο λόγος ήταν ότι το διαθέσιμο υλικό για ρύθμιση του φορτίου *RLC* δεν έδινε τη δυνατότητα για τη διεξαγωγή των πειραμάτων με βάση το δεύτερο πρότυπο.

Οι τρεις αντιστροφείς που τέθηκαν υπό δοκιμή ήταν ο SMA TL 3000, ο Danfoss DLX 2.0 και ο Sun Profi. Αρχικά, δημιουργήθηκαν συνθήκες όσο το δυνατόν καλύτερης ισορροπίας ισχύος. Στην περίπτωση των δύο πρώτων αντιστροφέων—SMA TL 3000 και Danfoss DLX 2.0—όταν αποσυνδέθηκε το δίκτυο, η κατάσταση της νησιδοποίησης έγινε αντιληπτή και αποσυνδέθηκαν στον προβλεπόμενο από τις απαιτήσεις χρόνο. Εν αντιθέσει, ο ενσωματωμένος αλγόριθμος στον αντιστροφέα Sun Profi, δεν κατέστη δυνατό να ανιχνεύσει την αποσύνδεση του δικτύου, οπότε κρίθηκε ότι το συγκεκριμένο σύστημα δεν πληροί τις προϋποθέσεις για να διασυνδεθεί στο ελληνικό δημόσιο δίκτυο.

Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

- ◇ Μελέτη της Μη Ανιχνεύσιμης Ζώνης των ενεργητικών μεθόδων στο χώρο παραμέτρων φορτίου.
- ◇ Μελέτη επίδρασης παραλληλισμού αντιστροφέων με διαφορετικές ενεργητικές μεθόδους.
- ◇ Δοκιμή εξοπλισμού μέσω της μοντελοποίησης του δικτύου και του φορτίου με Power Hardware In the Loop—PHIL.

Βιβλιογραφία

- [1] ABB. Απαιτήσεις διασύνδεσης στο Ελληνικό δημόσιο δίκτυο. Δήλωση συμμόρφωσης, 2012.
- [2] B. Bahrani. Islanding detection and control of islanded single and two-parallel distributed generation units. Master's thesis, Department of Electrical and Computer Engineering, Toronto, 2008.
- [3] M. Begović, M. Ropp, A. Rohatgi, and A. Pregelj. Determining the sufficiency of standard protective relaying for islanding prevention in grid-connected pv systems. In *2nd World Conference on Photovoltaic Solar Energy Conversion*, pages 2519–2524, Vienna, Austria, Jul. 1998.
- [4] G. M. Bhutto, E. Ali, J. Kumar, and M. A. Bhayo. Islanding protection and islanding detection in low voltage cigre distribution network with distributed generations. *Smart Grid and Renewable Energy*, 5:152–159, Jun. 2014.
- [5] W. Bower and M. Ropp. Evaluation of islanding detection methods for photovoltaic utility-interactive power systems. Technical Report T5-09: 2002, International Energy Agency Implementing Agreement on Photovoltaic Power Systems, 2002.
- [6] R. Bugdał, A. Dyśko, G. Burt, and J. McDonald. Performance analysis of the rocof and vector shift methods using a dynamic protection modelling approach. In *Effect of distributed generation on power system protection*, pages 139–144, Bled, Slovenia, Sep. 2006.

- [7] F. De Mango, M. Liserre, A. Dell'Aquila, and A. Pigazo. Overview of anti-islanding algorithms for pv systems. part i: Passive methods. In *Power Electronics and Motion Control Conference, 2006. EPE-PEMC 2006. 12th International*, pages 1878–1883, Portoroz, Aug./Sep. 2006.
- [8] X. Ding, P. Crossley, and D. Morrow. Islanding detection for distributed generation. *Journal of Electrical Engineering & Technology*, 2(1):19–22, Mar. 2007.
- [9] R. Faranda and S. Leva. Energy comparison of mppt techniques for pv systems. In *Power and Energy Society General Meeting—Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, 2008 IEEE*, pages 1–6, Pittsburgh, PA, Jul. 2008.
- [10] I. Hobbs. *Evaluation and Implementation of Anti-Islanding Methods for Converter-Fed Distributed Generation*. PhD thesis, Department of Electrical Engineering, Stellenbosch, 2009.
- [11] S. Huili. Performance assessment of islanding detection methods using the concept of non-detection zones. Master's thesis, Department of Electrical Engineering at Concordia University, Montréal, Québec, Canada, 2005.
- [12] F. Khan, A. Massoud, and A. Gastli. A simulink model of an active island detection technique for inverter-based distributed generation. In *GCC Conference and Exhibition (GCC)*, pages 315–319, Doha, Qatar, Nov. 2013.
- [13] J. M. Lee. Islanding detection methods for microgrids. Master's thesis, Electrical Engineering at the University of Wisconsin-Madison, Madison, Wisconsin, United States, 2011.
- [14] C. Li, C. Cao, Y. Cao, Y. Kuang, L. Zeng, and B. Fang. A review of islanding detection methods for microgrid. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 35:211–220, Apr. 2014.
- [15] Z. Mi and F. Wang. Power equations and non-detection zone of passive islanding detection and protection method of grid connected photovoltaic generation system. In *Circuits, Communications and Systems, 2009. PACCS'09. Pacific-Asia Conference on*, pages 360–363, Chengdu, May 2009.
- [16] T. Pujhari. *Islanding Detection in Distributed Generation*. PhD thesis, Department of Electrical Engineering, National Institute of Technology, Rourkela, India, 2009.
- [17] M. Ropp, M. Begović, and A. Rohatgi. Prevention of islanding in grid-connected photovoltaic systems. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 7(1):39–59, Jan./Feb. 1999.

-
- [18] J. Stevens, R. Bonn, J. Ginn, S. Gonzalez, and G. Kern. Development and testing of an approach to anti-islanding in utility-interconnected photovoltaic systems. Technical report, Sandia National Laboratories, Albuquerque, New Mexico and Livermore, California, 2000.
- [19] R. Teodorescu, M. Liserre, and P. Rodríguez. *Grid Converters for Photovoltaic and Wind Power Systems*. Intersci. Publ. John Wiley & Sons Inc., Chichester, West Sussex, UK, 1st edition, 2011.
- [20] W. Y. Teoh and C. W. Tan. An overview of islanding detection methods in photovoltaic systems. *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 58:674–682, Oct. 2011.
- [21] PAE. (Σχέδιο) Κώδικας Διαχείρισης του Δικτύου, 2008.
- [22] Ν. Στεφόπουλος and Π. Τριανταφύλλου. Διευρεύνηση Προβλημάτων Νησιδοποίησης σε Δίκτυα Διανομής με Ιδιοπαραγωγούς. Master's thesis, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, Τομέας Ηλεκτρικής Ενέργειας, Θεσσαλονίκη, 2011.
- [23] Μ. Δαμιανίδης, Γ. Κατσαρός, Μ. Τόλης, and Φ. Στεργιόπουλος. Οδηγός Μελέτης και Υλοποίησης Φωτοβολταϊκών Έργων, 2011.
- [24] A. Yazdani and R. Iravani. *Voltage-Sourced Converters in Power Systems*. Intersci. Publ. John Wiley & Sons Inc., 2010.