



Ανώτατο
Εκπαιδευτικό
Ίδρυμα
Πειραιά

ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟΥ ΤΟΜΕΑ

ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΗΣ
ΕΚΠΑΙΔΕΥΣΗΣ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

“ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΤΗΣ ΔΙΕΙΣΔΥΣΗΣ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΣΤΟ
ΔΙΚΤΥΟ ΧΑΜΗΛΗΣ ΤΑΣΗΣ.
ΕΠΠΤΩΣΕΙΣ ΚΑΙ ΕΠΙΔΡΑΣΕΙΣ ”



Επιβλέπων Καθηγητής:
Σπουδαστής:

Ψωμόπουλος Κωνσταντίνος
Μπακόλας Βασίλειος

ΑΜ: 39253

Αθήνα

Μάιος– 2017

Copyright © Ανώτατο Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Πειραιά

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Ανωτάτου Τεχνολογικού Εκπαιδευτικού Ιδρύματος Πειραιά.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η δημιουργία της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας θα ήταν αδύνατη χωρίς την βοήθεια και υποστήριξη κάποιων ανθρώπων, η προσφορά των οποίων ήταν καταλυτική στην εκτέλεση των αριθμητικών μοντέλων αλλά και στη συγγραφή της εργασίας. Για το λόγο αυτό νιώθω την ανάγκη να ευχαριστήσω:

- Τον κ. Νίκο Μανουσάκη για την αμέριστη βοήθεια του και συνεχή συμπαράσταση καθ' όλη τη διάρκεια της εκπόνησης
- Την οικογένεια μου, που με στήριξε με κάθε τρόπο, σε όλα τα χρόνια των σπουδών μου
- Και τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή μου κ. Κωνσταντίνο Ψωμόπουλο, για την πολύτιμη βοήθεια και την καθοδήγηση που μου προσέφερε σε ζητήματα που αφορούσαν την κατασκευή των αριθμητικών μοντέλων

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Ευχαριστίες.....	iii
Λίστα σχημάτων.....	6
Λίστα πινάκων.....	8
Summary.....	9
1^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ “Ενέργεια”.....	13
1.1 Έννοια και μορφές ενέργειας.....	13
1.2 Ιστορική αναδρομή των ενεργειακών πηγών.....	15
1.3 Οι πηγές ενέργειας σήμερα.....	15
1.4 Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας	16
1.5 Προδιαγραφές και νομοθεσία της Ευρωπαϊκής Ένωσης.....	17
2^ο Κεφάλαιο “Απώλειες δικτύου και τρόποι μείωσης”	19
2.1 Απώλειες δικτύου	19
2.2 Τρόποι μείωσης απωλειών δικτύου	19
2.3 Διεσπαρμένη Παραγωγή.....	20
3^ο Κεφάλαιο “Φωτοβολταϊκό σύστημα”.....	24
3.1 Τι είναι το φωτοβολταϊκό σύστημα	24
3.2 Τύποι φωτοβολταϊκών συστημάτων	27
3.3 Τρόπος λειτουργίας του φωτοβολταϊκού συστήματος	28
3.4 Εγκατάσταση Φωτοβολταϊκού συστήματος.....	29
3.4.1 Φωτοβολταϊκό πάνελ.....	30
3.4.2 Αντιστροφείας τάσης.....	30
3.4.3 Ρυθμιστής φόρτισης και μπαταρία	30
3.4.4 Προϋποθέσεις για την εγκατάσταση ενός φωτοβολταϊκού συστήματος.....	30
3.4.5 Διαδικασία τοποθέτησης φωτοβολταϊκού συστήματος.....	31
3.5 Τοποθέτηση φωτοβολταϊκού συστήματος.....	33
3.5.1 Διαδικασία τοποθέτησης φωτοβολταϊκού συστήματος.....	36
3.5.2 Τοποθέτηση σε κτίριο.....	37
3.5.3 Τοποθέτηση σε οικόπεδο.....	38
3.6 Αυτόνομα Φωτοβολταϊκά Συστήματα.....	39
4^ο Κεφάλαιο “ Προβλήματα που προκύπτουν κατά την σύνδεση φ/β συστημάτων στο δίκτυο”	43
4.1 Εισαγωγή	43
4.2 Μη Τεχνικά Προβλήματα Συνδεδεμένων στο Δίκτυο Φ/Β Συστημάτων.....	44
4.3 Τεχνικά Προβλήματα Συνδεδεμένων στο Δίκτυο Φ/Β Συστημάτων (Επίδραση Δικτύου στο Φωτοβολταϊκό Σύστημα)	44
4.3.1 Βυθίσεις Τάσης.....	44
4.3.2 Ανυψώσεις (Swell) Τάσης.....	48
4.3.3 Βραχυκυκλώματα σε Ηλεκτρικές Εγκαταστάσεις.....	49
4.3.4 Ανώτερες Αρμονικές	51
4.4 Τεχνικά Προβλήματα Φ/Β Συστημάτων Συνδεδεμένων στο Δίκτυο (Επίδραση Φωτοβολταϊκού Συστήματος στο Δίκτυο).....	54
4.4.1 Ασφάλεια Προσωπικού και Πελατών.....	54
4.4.2 Προστασία Εξοπλισμού και Συστήματος	55
4.4.2.1 Σφάλματα προς Γη.....	55
4.4.2.2 Συνεισφορά στην Ικανότητα Βραχυκυκλώματος	57

4.4.2.3	<i>Νησιδοποίηση (Islanding)</i>	60
4.4.2.4	<i>Συμπεριφορά Φ/Β Συστήματος Κατά την Διάρκεια Ανωμαλιών του Δικτύου ..</i>	87
4.4.2.5	<i>Συντελεστής Ισχύος</i>	101
4.4.2.6	<i>Ρεύματα Προς Γη (Μονοφασικό Φ/Β Σύστημα Χωρίς Μετασχηματιστή)</i>	102
4.4.2.7	<i>Πολλαπλοί Αντιστροφείς και Δίκτυο AC</i>	127
5^ο Κεφάλαιο “Προσομοίωση φ/β συστήματος σε περιβάλλον Matlab/Simulink”		134
5.1	Εισαγωγή	134
5.2	Τα χαρακτηριστικά του φωτοβολταϊκού συστήματος	134
5.3	Προσομοίωση του συστήματος-Αποτελέσματα	137
5.4	Απεικόνιση και περιγραφή του μοντέλου που θα χρησιμοποιήσω.....	140
6^ο Κεφάλαιο “Προσομοίωση μονοφασικού φ/β συστήματος συνδεδεμένου στο δίκτυο”		144
6.1	Προσομοίωση με αλλαγές στα στοιχεία των πυκνωτών φιλτραρίσματος.....	145
6.2	Προσομοίωση με απαλοιφή του μετασχηματιστή σύζευξης από το κύκλωμα.....	147
6.3	Προσομοίωση αφαιρώντας τα στοιχεία RLC από το κύκλωμα.....	149
6.4	Προσομοίωση με απαλοιφή της Α-φάσης πριν τον Μ/Χ σύζευξης	151
6.5	Προσομοίωση με βραχυκύκλωμα μεταξύ των Α-Β φάσεων πριν των Μ/Χ σύζευξης	153
6.6	Συμπεράσματα	156
Βιβλιογραφία		157

ΛΙΣΤΑ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 2.1: Σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας	21
Σχήμα 2.2: Αιολικός σταθμός παραγωγής.....	22
Σχήμα 2.3: Μεγάλο υδροηλεκτρικό έργο	22
Σχήμα 2.4: Φωτοβολταϊκός Σταθμός Παραγωγής σε στέγη οικίας.....	23
Σχήμα 3.1: Φ/Β πάνελ	25
Σχήμα 3.2: Φ/Β εγκαταστάσεις σε οροφές κτιρίων.....	26
Σχήμα 3.3: Φωτοβολταϊκό στοιχείο μονοκρυσταλλικού πυριτίου	28
Σχήμα 3.4: Φωτοβολταϊκό στοιχείο πολυκρυσταλλικού πυριτίου	28
Σχήμα 3.5: Αυτόνομο φωτοβολταϊκό σύστημα	29
Σχήμα 3.6: Κτίριο με φωτοβολταϊκή πρόσοψη	33
Σχήμα 3.7: Ο πύργος CIS στο Manchester της Μ. Βρετανίας με φωτοβολταϊκή πρόσοψη	33
Σχήμα 3.8: Εικόνα Ενσωμάτωση φωτοβολταϊκών σε κεραμίδια	34
Σχήμα 3.9: Φωτοβολταϊκό σε μορφή κεραμιδιού	34
Σχήμα 3.10: Εικόνα Στάση λεωφορείου με ενσωματωμένα φωτοβολταϊκά στην οροφή.	35
Σχήμα 3.11: Ενσωμάτωση φωτοβολταϊκών σε στέγαστρα.....	35
Σχήμα 3.12: Ενσωμάτωση φωτοβολταϊκή σε περσίδες	36
Σχήμα 3.13: Φωτοβολταϊκό πάρκο στην Καρδίτσα με ισχύ 2MW	39
Σχήμα 3.14: Εφαρμογή φωτοβολταϊκών σε σκάφος.	41
Σχήμα 3.15: Φωτοβολταϊκά σε πεζοδρόμιο	41
Σχήμα 3.16: Εφαρμογή φωτοβολταϊκών σε Αεροπλάνο	42
Σχήμα 4.1: Μονοφασικό σφάλμα σε τριφασικό σύστημα	62
Σχήμα 4.2: Σύνδεση φωτοβολταϊκού συστήματος με το δίκτυο	68
Σχήμα 4.3: Απεικόνιση ζώνης μη ανίχνευσης στην οποία οι τέσσερις κοινοί ηλεκτρονόμοι δεν μπορούν να αποτρέψουν τη νησιδοποίηση φ/β συστήματος	72
Σχήμα 4.4: Απεικόνιση του βρόχου κλειδώματος φάσης (PLL)	74
Σχήμα 4.5: Σχήμα που εξηγεί τη λειτουργία της μεθόδου ανίχνευσης άλματος φάσης (PJD).....	75
Σχήμα 4.6: Λεπτομερές γράφημα με τιμές συχνοτήτων που δείχνει τα χαρακτηριστικά μεταξύ της φάσης – συχνότητας για μια PCU που εφαρμόζει τη μέθοδο αποτροπής νησιδοποίησης SMS.	76
Σχήμα 4.7: Σχεδιασμός μιας χαρακτηριστικής της μεθόδου SMS και της απόκρισης φάσης για διάφορα RLC φορτία. Η έντονη καμπύλη σχήματος S είναι η χαρακτηριστική της μεθόδου SMS. Οι άλλες καμπύλες είναι οι αποκρίσεις φάσης των RLC (αντεστραμμένες λόγω του αρνητικού πρόσημου της εξίσωσης (4.7)). Το R κρατιέται σταθερό. Το L και το C μεταβάλλονται, διατηρώντας μοναδιαίο συντελεστή ισχύος στα 60Hz. Για τα τρία κάτω φορτία της λεζάντας, η μέθοδος SMS δεν μπορεί να ανιχνεύσει νησιδοποίηση	78
Σχήμα 4.8: Σχεδιασμός μιας χαρακτηριστικής της μεθόδου SMS και της απόκρισης φάσης για διάφορα RLC φορτία. Η έντονη καμπύλη σχήματος S είναι η χαρακτηριστική της μεθόδου SMS. Οι άλλες καμπύλες είναι οι αποκρίσεις φάσης των RLC (αντεστραμμένες λόγω του αρνητικού πρόσημου της εξίσωσης (4.7)). Το L και το C κρατούνται σταθερά και συντονισμένα στα 60Hz. Για τα τρία πάνω φορτία της λεζάντας, η μέθοδος SMS δεν μπορεί να ανιχνεύσει νησιδοποίηση.....	79
Σχήμα 4.9: Παράδειγμα που χρησιμοποιείται για να υλοποιήσουμε τη μέθοδο πρόληψης νησιδοποίησης AFD. Επίσης παρουσιάζεται ένα καθαρό ημιτονοειδές σήμα για σύγκριση.	81
Σχήμα 4.10: Η μέθοδος εισαγωγής άεργης αντίστασης. Στο σημείο b συνδέεται συστοιχία πυκνωτών.	84
Σχήμα 4.11: Ενδεικτική παράσταση δικτύου διανομής	87
Σχήμα 4.12: Μεταβολή τάσεων κατά μήκος γραμμής Μ.Τ.	90
Σχήμα 4.13: Απεικόνιση μονοφασικού φωτοβολταϊκού συστήματος	104
Σχήμα 4.14: Απεικόνιση φωτοβολταϊκού συστήματος συμπεριλαμβανομένων των πιο σημαντικών παρασιτικών στοιχείων	108
Σχήμα 4.15: Μοντέλο φωτοβολταϊκού συστήματος με μετατροπέα πηγής τάσης	109
Σχήμα 4.16: Μοντέλο φωτοβολταϊκού συστήματος σε σχέση με τις differential και common mode τάσεις του μετατροπέα	110
Σχήμα 4.17: βήμα πριν λάβουμε το απλοποιημένο common mode μοντέλο	112

Σχήμα 4.18: Μοντέλο για το <i>common mode</i>	113
Σχήμα 4.19: Τελικό μοντέλο για το <i>common mode</i>	113
Σχήμα 4.20: Φωτοβολταϊκό σύστημα χωρίς μετασχηματιστή με μετατροπέα πλήρους κύματος	114
Σχήμα 4.21: Κυματομορφές με την τεχνική <i>UPWM</i> όταν το πηνίο γραμμής είναι συμμετρικά διαχωρισμένο	116
Σχήμα 4.22: Κύριες κυματομορφές τάσης με την Διπολική (<i>Bipolar</i>) μοντελοποίηση (πηνίο γραμμής συμμετρικά κατανεμημένο)	118
Σχήμα 4.23: Φ/B σύστημα χωρίς μετασχηματιστή με μετατροπέα μισής γέφυρας τριών επιπέδων ...	120
Σχήμα 4.24: Κυματομορφές διαμόρφωσης για μετατροπέα μισού κύματος τριών επιπέδων	122
Σχήμα 4.25: Φ/B σύστημα χωρίς μετασχηματιστή με μετατροπέα πλήρους κύματος με <i>ac</i> -παράκαμψη	123
Σχήμα 4.26: Κυματομορφές διαμόρφωσης για το μετατροπέα πλήρους κύματος με <i>ac</i> -παράκαμψη ...	126
Σχήμα 4.27: Αύξηση τάσης λόγω αντίστροφης ροής ισχύος.....	129
Σχήμα 4.28: Μεταβολή τάσης μέσω ελέγχου άεργου ισχύος.....	130
Σχήμα 4.29: Επίδραση της αντίστροφης ροής ισχύος στην ισχύ του μετασχηματιστή.....	131
Σχήμα 4.30: Αλλαγή φάσης τάσης σε περίπτωση σφάλματος βραχυκυκλώματος.....	132
Σχήμα 4.31: Ροή ρεύματος σφάλματος κάτω από σφάλμα βραχυκυκλώματος γραμμής διανομής.....	133
Σχήμα 5.1: Μοντέλο απλής διόδου.....	135
Σχήμα 5.2: Το κύκλωμα λειτουργίας με τα σημεία εισόδου και εξόδου	137
Σχήμα 5.3: Το κύκλωμα λειτουργίας που περιλαμβάνει το φωτοβολταϊκό	138
Σχήμα 5.4: Το εσωτερικό κύκλωμα του φωτοβολταϊκού μας μοντέλου	138
Σχήμα 5.5: Στοιχεία λειτουργίας του φωτοβολταϊκού.....	139
Σχήμα 5.6: Απεικόνιση των γραφικών παραστάσεων <i>I-V</i> και <i>P-V</i>	139
Σχήμα 5.7: Παράλληλη απεικόνιση 5 διαφορετικών τιμών ακτινοβολίας.....	140
Σχήμα 5.8: Συστοιχία από 5 πάνελ φωτοβολταϊκών.....	141
Σχήμα 5.9: Μοντέλο συστοιχίας φωτοβολταϊκών.....	141
Σχήμα 5.10: Συστοιχία φωτοβολταϊκών συνδεδεμένη στο δίκτυο χαμηλής τάσης	142
Σχήμα 6.1: Γραφική απεικόνιση της ισχύος στην έξοδο του κυκλώματος προς το δίκτυο.	144
Σχήμα 6.2: Γραφική απεικόνιση της τάσης και της έντασης του ρεύματος στην έξοδο προς το δίκτυο διανομής	145
Σχήμα 6.3: Παράλληλη απεικόνιση της τάσης και της έντασης του ρεύματος στην έξοδο προς το δίκτυο διανομής του πειράματος και των φυσιολογικών συνθηκών λειτουργίας.	146
Σχήμα 6.4: Παράλληλη απεικόνιση της ισχύος στην έξοδο του κυκλώματος προς το δίκτυο διανομής του πειράματος και των φυσιολογικών συνθηκών λειτουργίας.	146
Σχήμα 6.5: Το κύκλωμα μας αφού αφαιρέσαμε τον <i>M/X</i>	147
Σχήμα 6.6: Παράλληλη απεικόνιση της ισχύος στην έξοδο του κυκλώματος προς το δίκτυο διανομής του πειράματος και των φυσιολογικών συνθηκών λειτουργίας.	148
Σχήμα 6.7: Παράλληλη απεικόνιση της τάσης και της έντασης του ρεύματος στην έξοδο προς το δίκτυο διανομής του πειράματος και των φυσιολογικών συνθηκών λειτουργίας.	148
Σχήμα 6.8: Το κύκλωμα χωρίς τα στοιχεία <i>RLC</i>	149
Σχήμα 6.9: Παράλληλη απεικόνιση της τάσης και της έντασης του ρεύματος στην έξοδο προς το δίκτυο διανομής του πειράματος και των φυσιολογικών συνθηκών λειτουργίας.	150
Σχήμα 6.10: Παράλληλη απεικόνιση της ισχύος στην έξοδο του κυκλώματος προς το δίκτυο διανομής του πειράματος και των φυσιολογικών συνθηκών λειτουργίας.	150
Σχήμα 6.11: Το κύκλωμα με την απώλεια της <i>A</i> φάσης πριν τον <i>M/X</i>	151
Σχήμα 6.12: Παράλληλη απεικόνιση της ισχύος στην έξοδο του κυκλώματος προς το δίκτυο διανομής του πειράματος και των φυσιολογικών συνθηκών λειτουργίας.	152
Σχήμα 6.13: Παράλληλη απεικόνιση της τάσης και της έντασης του ρεύματος στην έξοδο προς το δίκτυο διανομής του πειράματος και των φυσιολογικών συνθηκών λειτουργίας.	152
Σχήμα 6.14: Το κύκλωμα μετά το βραχυκύκλωμα	153
Σχήμα 6.15: Παράλληλη απεικόνιση της ισχύος στην έξοδο του κυκλώματος προς το δίκτυο διανομής του πειράματος και των φυσιολογικών συνθηκών λειτουργίας.	154
Σχήμα 6.16: Παράλληλη απεικόνιση της τάσης και της έντασης του ρεύματος στην έξοδο προς το δίκτυο διανομής του πειράματος και των φυσιολογικών συνθηκών λειτουργίας.....	154

ΛΙΣΤΑ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 4.1: Κυριότερες Μέθοδοι Ανίχνευσης Νησιδοποίησης	686
Πίνακας 4.2: Σύγκριση των μεθόδων που μελετήθηκαν	86
Πίνακας 4.3: Εντάσεις βραχυκυκλώσεως σε σχέση με ισχύ Φ.Μ.Π	88
Πίνακας 4.4: Επίπεδα τάσης και μέγιστος χρόνος διακοπής	93
Πίνακας 4.5: Τάσεις εξόδου και διανύσματα του μετατροπέα πλήρους κύματος	114
Πίνακας 4.6: Κύριες τάσεις αντιστροφέα, του μετατροπέα πλήρους κύματος L_1	114
Πίνακας 4.7: Κύριες τάσεις αντιστροφέα, του μετατροπέα πλήρους κύματος L_1	114
Πίνακας 4.8: Τάσεις εξόδου και διανύσματα του μετατροπέα μισού κύματος τριών επιπέδων	121
Πίνακας 4.9: Κύριες τάσεις αντιστροφέα, μετατροπέα μισού κύματος τριών επιπέδων με $L_1 = L(L_2 = 0)$	121
Πίνακας 4.10: Κύριες τάσεις αντιστροφέα, μετατροπέα μισού κύματος τριών επιπέδων με $L_1 = L_2 = L/2$	121
Πίνακας 4.11: Τάσεις εξόδου και διανύσματα του μετατροπέα HERIC	124
Πίνακας 4.12: Κύριες τάσεις αντιστροφέα, μετατροπέα HERIC με $L_1 = L(L_2 = 0)$	124
Πίνακας 4.13: Κύριες τάσεις αντιστροφέα, μετατροπέα HERIC με $L_1 = L_2 = L/2$	124
Πίνακας 4.14: Σύνοψη των τοπολογιών που αναλύθηκαν	127

SUMMARY

This thesis investigates the evaluation of the effect in a low voltage network due to high penetration of small scale photovoltaics as well as in the operation of the protection systems. The photovoltaic panel consists of a photovoltaic array, a DC-DC power converter which elevates the voltage and a DC-AC inverter. In order to evaluate the effects, a model of the photovoltaic panel was simulated using Matlab/Simulink. The values of the radiation and the temperature were kept constant. Finally, after analyzing the results, the photovoltaic panel's effectiveness in case of a malfunction is examined.

Keywords: voltage, network , photovoltaics, panel, inverter, model, temperature , converter ,
multifunction ,Matlab/Simulink

Πρόλογος

Στην παρούσα διπλωματική εργασία γίνεται ανάλυση, μοντελοποίηση και έλεγχος ενός φωτοβολταϊκού συστήματος συνδεδεμένο στο δίκτυο χαμηλής τάσης. Το σύστημα μας αποτελείται από μια φωτοβολταϊκή συστοιχία, ένα μετατροπέα ισχύος AC-AC που ανυψώνει την τάση και ενός αντιστροφέα που μετατρέπει την συνεχή τάση σε εναλλασσόμενη. Σκοπός της εργασίας αυτής είναι η μελέτη της επίδρασης αυτής της συστοιχίας των φωτοβολταϊκών στο δίκτυο χαμηλής τάσης του μοντελοποιημένου κυκλώματος που τα έχω συνδέσει καθώς και οι επιπτώσεις που θα έχουν πάνω στα συστήματα ασφάλειας του. Για να γίνει η παραπάνω μελέτη πραγματοποιήθηκε προσομοίωση του συνολικού συστήματος σε περιβάλλον Matlab /Simulink για σταθερές τιμές ακτινοβολίας και θερμοκρασίας. Μέσω των αποκρίσεων του συστήματος εξετάζεται η αποτελεσματικότητα του σε περιπτώσεις δυσλειτουργίας του συστήματος και εξάγονται τα αντίστοιχα συμπεράσματα.

Λέξεις κλειδιά: τάση, μοντελοποίηση, φωτοβολταϊκό σύστημα, μετατροπέας, αντιστροφείς, επιπτώσεις, θερμοκρασία, δυσλειτουργία, προσομοίωση Matlab/Simulink

1^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ

“ΕΝΕΡΓΕΙΑ”

1.1 Έννοια και μορφές ενέργειας

Κάθε φυσικό σύστημα περιέχει (ή εναλλακτικά αποθηκεύει) μία ποσότητα που ονομάζεται ενέργεια. Ενέργεια, συνεπώς, είναι η ικανότητα ενός σώματος ή συστήματος να παραγάγει έργο. Οποιαδήποτε μορφή δράσης, από τα παιδικά παιχνίδια μέχρι τη λειτουργία των μηχανών και από το μαγείρεμα τροφών μέχρι τη γραμμή παραγωγής στο εργοστάσιο, προϋποθέτει κατανάλωση ενέργειας.

Ανάλογα με τον τρόπο που έχει αποκτηθεί, ανταλλαχθεί ή αποθηκευτεί, μπορούμε να μιλήσουμε για πολλές μορφές ενέργειας όπως η μηχανική ενέργεια, η ηλεκτρική ενέργεια, η πυρηνική ενέργεια, η θερμική ενέργεια και η χημική ενέργεια. Η κύρια μονάδα μέτρησης της ενέργειας, της θερμότητας και του έργου στο σύστημα μονάδων SI είναι το Joule (J) ($J=N \cdot m$, δηλαδή $1 \text{ Joule} = 1 \text{ Newton} \cdot 1 \text{ Meter}$).

Η κινητική και η δυναμική ενέργεια θεωρούνται ως οι δύο μορφές της μηχανικής ενέργειας. Κατά την κίνηση ενός σώματος ή φορτίου σε συντηρητικό πεδίο δυνάμεων, και εφόσον δεν υπάρχουν τριβές, η δυναμική ενέργεια μετατρέπεται σε κινητική ενέργεια και το αντίστροφο, το άθροισμά τους όμως είναι πάντα σταθερό και ίσο με τη μηχανική ενέργεια που αρχικά είχε το σώμα.

- Κινητική ενέργεια είναι η ενέργεια που έχει ένα σώμα όταν κινείται και αναφέρεται στην ικανότητά του να παράγει έργο. Εξαρτάται από τη μάζα και την ταχύτητα ενός κινούμενου σώματος.
- Ως Δυναμική ενέργεια ορίζεται η ενέργεια που κατέχει ένα σώμα λόγω της θέσεως ή της κατάστασής του, είναι δηλαδή η δυνατότητα του σώματος να παράγει έργο επειδή βρίσκεται μέσα σε κάποιο πεδίο δυνάμεων. Συγκεκριμένα, η δυναμική ενέργεια διακρίνεται σε ενέργεια θέσεως (π.χ. ένα σώμα σε πεδίο βαρύτητας που έχει τη δυνατότητα να κινηθεί σε χαμηλότερη θέση παράγοντας έργο) και ενέργεια μορφής ή αλλιώς παραμόρφωσης, που εμφανίζεται όταν συστρέφουμε, συμπιέζουμε, τεντώνουμε ή λυγίζουμε ένα υλικό αλλάζοντας τη φυσική του μορφή (π.χ. το παραμορφωμένο ελατήριο ή λάστιχο). Στην περίπτωση αυτή, το σώμα μπορεί να παράγει έργο επανερχόμενο στη "φυσική" του μορφή.
- Πυρηνική ή Ατομική ενέργεια ονομάζεται η ενέργεια που απελευθερώνεται όταν μετασχηματίζονται ατομικοί πυρήνες. Είναι, δηλαδή, η δυναμική ενέργεια που είναι εγκλεισμένη στους πυρήνες των ατόμων λόγω της αλληλεπίδρασης των σωματιδίων που τα συνιστούν. Η πυρηνική ενέργεια προέρχεται από τη σχάση του πυρήνα ενός ατόμου σε δύο ή περισσότερα σωματίδια από την πρόσκρουση με νετρόνια, με επακόλουθο την απελευθέρωση της δύναμης. Εφόσον οι πυρηνικές αντιδράσεις είναι ελεγχόμενες (όπως συμβαίνει στην καρδιά ενός πυρηνικού αντιδραστήρα), μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να καλύψει ενεργειακές ανάγκες.

- Η Θερμική ενέργεια αποτελείται από το σύνολο της κινητικής ενέργειας των σωματιδίων που συγκροτούν τα υλικά σώματα, καθώς αυτά κινούνται στο εσωτερικό τους. Με τον όρο θερμότητα εννοούμε ειδικά την ενέργεια που μεταφέρεται από ένα σώμα υψηλής θερμοκρασίας σε άλλο με χαμηλότερη θερμοκρασία, με αποτέλεσμα να αυξάνεται η κινητική ενέργεια των σωματιδίων του. Η θερμική ενέργεια μπορεί να είναι και αποτέλεσμα της ηλιακής ενέργειας.
- Η Ηλεκτρική ενέργεια αναφέρεται στην κινητική ενέργεια των κινούμενων ηλεκτρονίων (ηλεκτρικό ρεύμα), λόγω της ύπαρξης διαφοράς δυναμικού στα άκρα ενός αγωγού.
- Η Χημική ενέργεια ορίζεται ως το σύνολο της δυναμικής ενέργειας που απαιτήθηκε για τη συγκρότηση μορίων χημικών ουσιών από διάφορα άτομα, κάτω από την αλληλεπίδραση ηλεκτρομαγνητικών δυνάμεων. Η χημική ενέργεια αποδίδεται συνήθως ως θερμική ή ηλεκτρική, όταν τα μόρια διασπώνται και πάλι σε άτομα ή μετασχηματίζεται στους οργανισμούς σε θερμική και κινητική, με βιολογικούς μηχανισμούς, και ονομάζεται ζωική ενέργεια.

Μεγάλη ποικιλία μορφών ενέργειας βρίσκεται πίσω από τα διαφορετικά φυσικά φαινόμενα. Η ενέργεια, με την οποία τροφοδοτείται ο πλανήτης μας, προέρχεται σχεδόν εξ ολοκλήρου από τον Ήλιο. Ο ήλιος παρέχει στη γη θερμότητα με την εκπεμπόμενη ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία σε ημερήσια βάση και η οποία με τη σειρά της είναι υπεύθυνη για μια σειρά δράσεων που οδηγούν στην ενέργεια από τη βιομάζα, το νερό, τον άνεμο, τα κύματα και τα θαλάσσια ρεύματα (δευτερογενής ηλιακή ενέργεια). Επίσης, η ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει στη γη εδώ και εκατομμύρια χρόνια έχει δημιουργήσει «αποθηκευμένη» ενέργεια, με την μετατροπή των φυτικών και ζωικών υλών σε πετρέλαιο, γαιάνθρακα και φυσικό αέριο, δηλαδή σε ορυκτά ή φυσικά καύσιμα. Αυτή η διεργασία, βεβαίως, γίνεται και σήμερα, αλλά σε πολύ μικρό ρυθμό που δεν μπορεί να συγκριθεί με τον τεράστιο ρυθμό που η σημερινή κοινωνία καταναλώνει αυτούς τους εξαντλήσιμους ενεργειακούς πόρους.

Οι ενεργειακοί πόροι που υπάρχουν «αποθηκευμένοι» στη γη αποτελούν την κύρια ενέργεια (capital energy), η οποία μπορεί να υποδιαιρευθεί στις παρακάτω έξι κατηγορίες:

1. πρωτογενής ενέργεια (primary energy) είναι η ενέργεια που προέρχεται κατευθείαν από τον ήλιο ή τη γη (ορυκτά και πυρηνικά καύσιμα),
2. δευτερογενής ενέργεια (secondary energy) είναι το σύνολο των μορφών ενέργειας που προκύπτουν από τη μετατροπή πρωτογενούς ενέργειας μέσω χημικών, φυσικών, μηχανικών, θερμικών ή πυρηνικών δράσεων (π.χ. βενζίνη, ηλεκτρική ισχύς) για να χρησιμοποιηθούν ως χρήσιμη ενέργεια,
3. ανανεώσιμη ενέργεια (renewable energy) είναι οι μορφές δυναμικής ενέργειας, οι οποίες ανανεώνονται σε σταθερό ρυθμό και σχετικά γρήγορα, όπως η ηλιακή ενέργεια, η αιολική ενέργεια, η ενέργεια από βιομάζα, η γεωθερμική ενέργεια, η υδροηλεκτρική ενέργεια καθώς και η ενέργεια από θάλασσες και ωκεανούς,
4. μη ανανεώσιμη ενέργεια (nonrenewable energy) είναι οποιαδήποτε μορφή δυναμικής ενέργειας που δεν εμπίπτει στον ορισμό της ανανεώσιμης ενέργειας, με παράδειγμα τα ορυκτά καύσιμα,
5. ενέργεια από τη διεργασία της καύσης (combustion process), όπου πολλές από τις δυναμικές μορφές ενέργειας θα πρέπει να αξιοποιηθούν μέσω της διεργασίας της καύσης για να μετατρέψουν την αποθηκευμένη ενέργεια σε έργο, και
6. ενέργεια που δεν περιλαμβάνει διεργασία καύσης (noncombustion process), όπως η υδροίσχύς και η αιολική ενέργεια, οι οποίες αποτελούν μορφές δυναμικής ενέργειας

1.2 Ιστορική αναδρομή των ενεργειακών πηγών

Από την αρχαιότητα ο άνθρωπος χρησιμοποίησε διάφορες πηγές ενέργειας, μεταξύ των οποίων το ξύλο, ο άνθρακας, το πετρέλαιο, το φυσικό αέριο και ο ηλεκτρισμός. Παρακάτω περιγράφονται συνοπτικά κάποια στοιχεία για την ιστορική τους χρήση και ανακάλυψη.

- Το Ξύλο αποτελεί το κυρίαρχο καύσιμο όλων των εποχών, χρησιμοποιείται ακόμη και σήμερα, ιδιαίτερα στις αναπτυσσόμενες χώρες.
- Ο Άνθρακας, τον οποίο χρησιμοποιούσαν οι κάτοικοι της Ουαλίας κατά την εποχή του χαλκού, αργότερα οι Ρωμαίοι, οι Ινδιάνοι στη Β. Αμερική, οι Κινέζοι, και οι Άγγλοι από τον 12ο μ.Χ. αιώνα. Ο άνθρακας αποτελούσε την κύρια πηγή ενέργειας και ήταν βασική αιτία της ώθησης που δόθηκε στην βιομηχανική επανάσταση.
- Το Πετρέλαιο αντλήθηκε πρώτη φορά το 1857 στο Αμβούργο και το 1859 στην Πενσυλβανία, αν και ήταν γνωστό σε πολλούς πολιτισμούς, όπως η Εγγύς Ανατολή και η Κίνα.
- Η πρώτη γεώτρηση του Φυσικό αερίου έγινε το 1865 στη Νέα Υόρκη και αρχικά χρησιμοποιούνταν για φωτισμό (παλαιότερα είχαν χρησιμοποιηθεί στην Κίνα και την Ιαπωνία).
- Για την Ηλεκτρική ενέργεια είναι γνωστό ότι ο Edison ανακάλυψε το 1882 τον ηλεκτρικό λαμπτήρα, ενώ η εταιρία του είχε ιδρυθεί από το 1878.

1.3 Οι πηγές ενέργειας σήμερα

Το σύνολο των πηγών ενέργειας, που ο άνθρωπος έχει στη διάθεσή του διακρίνεται σε δύο κύριες κατηγορίες, στις πηγές εκείνες που βασίζονται σε υπάρχοντα αποθέματα μέσα στο στερεό φλοιό της Γης, με συγκεκριμένη διάρκεια ζωής, και σε αυτές που καθημερινά και αέναα μας παρέχονται σε βαθμό ήπιας εκμετάλλευσης.

Στην πρώτη κατηγορία ανήκουν τα ορυκτά καύσιμα (πετρέλαιο, φυσικό αέριο, κάρβουνο), αναφερόμενα και ως συμβατικά καύσιμα και η μη ήπια μορφή ενέργειας, η πυρηνική ενέργεια.

Οι πηγές ενέργειας της δεύτερης κατηγορίας έχουν βασική τους προέλευση τον ήλιο. Η ενέργεια του ήλιου που φτάνει στη γη με τη μορφή ακτινών, εκτός από τη γενικότερη συμβολή της στη δημιουργία, ανάπτυξη και διατήρηση της ζωής στον πλανήτη, μας παρέχει ακατάπαυστα ενέργεια, με διάφορες μορφές αξιοποίησης. Άμεσα θερμαίνει, εξατμίζει μεγάλες ποσότητες θαλασσινού νερού και συντηρεί τον γνωστό φυσικό κύκλο, δημιουργώντας λίμνες και ποτάμια, που αποτελούν πρόσθετη πηγή ενέργειας (υδατοπτώσεις). Θέτει σε κίνηση τις αέριες μάζες της ατμόσφαιρας (αιολική ενέργεια), δημιουργεί τα κύματα (ενέργεια κυμάτων) και συμβάλλει στη δημιουργία των θαλάσσιων ρευμάτων. Απορροφάται από συνδυασμένα υλικά και παράγει ηλεκτρισμό (φωτοβολταϊκό φαινόμενο). Τέλος, συμβάλλει στην ανάπτυξη της χλωρίδας. Η καύση δε των φυτικών προϊόντων παράγει ενέργεια (βιομάζα).

1.4 Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας

Ως ανανεώσιμες πηγές ενέργειας ορίζονται ενεργειακές πηγές όπως ο ήλιος, ο άνεμος, η βιομάζα, οι οποίες υπάρχουν σε αφθονία στο φυσικό μας περιβάλλον. Είναι οι πρώτες μορφές ενέργειας που χρησιμοποίησε ο άνθρωπος σχεδόν αποκλειστικά μέχρι τις αρχές του 19ου αιώνα, οπότε και στράφηκε στην έντονη χρήση του άνθρακα και των υδρογονανθράκων.

Το ενδιαφέρον για την αξιοποίηση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και την ανάπτυξη αξιόπιστων και οικονομικά αποδεκτών τεχνολογιών που δεσμεύουν το δυναμικό τους, παρουσιάστηκε αρχικά μετά την πρώτη πετρελαϊκή κρίση του 1973, ενισχύθηκε μετά τη δεύτερη κρίση του 1979 και παγιώθηκε κατά την τελευταία δεκαετία, μετά τη συνειδητοποίηση των παγκόσμιων περιβαλλοντικών προβλημάτων. Τα πλεονεκτήματα των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και, κυρίως, η ουσιαστική τους συμβολή στην ενεργειακή απεξάρτηση της ανθρωπότητας από τους εξαντλήσιμους ενεργειακούς πόρους δικαιολογούν αυτή τη μεγάλη στροφή.

Οι Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας, έχουν κύρια γενεσιουργό αιτία την ηλιακή ακτινοβολία, με εξαίρεση εκείνη που αφορά στην ενέργεια των παλιροϊκών κινήσεων που οφείλονται στη δράση της βαρύτητας, κυρίως της Σελήνης, πάνω στους υδάτινους όγκους που καλύπτουν την επιφάνεια της Γης, καθώς και τη γεωθερμική, όπου η ηλιακή ακτινοβολία παίζει δευτερεύοντα ρόλο.

Οι «ήπιες μορφές ενέργειας», όπως έχει επικρατήσει να ονομάζονται οι μορφές ενέργειας που προέρχονται από την εκμετάλλευση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, ταξινομούνται στις ακόλουθες πέντε κατηγορίες:

1. Ηλιακή Ενέργεια: Η ηλιακή ακτινοβολία με τη βοήθεια της τεχνολογίας γίνεται εκμεταλλεύσιμη. Η ενέργεια που παίρνουμε αποτελεί την ηλιακή ενέργεια. Τα συστήματα που χρησιμοποιούνται για τη μετατροπή της ηλιακής ακτινοβολίας σε εκμεταλλεύσιμη ενέργεια διακρίνονται σε: α) ενεργητικά ηλιακά συστήματα: μετατρέπουν την ηλιακή ακτινοβολία απευθείας σε θερμότητα, β) παθητικά ηλιακά και υβριδικά συστήματα: αφορούν κατάλληλες αρχιτεκτονικές λύσεις με παράλληλη χρήση κατάλληλων δομικών υλικών, ώστε να επιτρέπεται η απευθείας εκμετάλλευση της ηλιακής ενέργειας για θέρμανση, δροσισμό ή φωτισμό, και γ) φωτοβολταϊκά ηλιακά συστήματα: μετατρέπουν την ηλιακή ενέργεια απευθείας σε ηλεκτρική ενέργεια.
2. Αιολική Ενέργεια: είναι η κινητική ενέργεια του ανέμου, η οποία μετατρέπεται αρχικά σε μηχανική ενέργεια και στη συνέχεια σε άλλες εκμεταλλεύσιμες μορφές ενέργειας.
3. Υδραυλική Ενέργεια: είναι η ενέργεια που προέρχεται από τις υδατοπτώσεις. Η ενέργεια αυτή μετασχηματίζεται αρχικά σε μηχανική ενέργεια και στη συνέχεια σε άλλες μορφές, κυρίως σε ηλεκτρική ενέργεια.
4. Γεωθερμική Ενέργεια: είναι θερμική ενέργεια που προέρχεται από το εσωτερικό της Γης και εμπεριέχεται σε φυσικούς ατμούς, σε επιφανειακά ή υπόγεια θερμά νερά και σε θερμά ξηρά πετρώματα.
5. Βιομάζα: είναι αποτέλεσμα της φωτοσυνθετικής δραστηριότητας, η οποία μετασχηματίζει την ηλιακή ενέργεια, με μια σειρά διεργασιών, σε φυτικούς οργανισμούς χερσαίας ή υδρόβιας προέλευσης. Οι φυτικοί αυτοί οργανισμοί αποτελούν τη βιομάζα και μετατρέπονται, κυρίως με καύση, σε άλλες μορφές ενέργειας .
6. Ηλεκτρομαγνητική ενέργεια: αποτελείται από κύματα ηλεκτρικής και μαγνητικής ενέργειας, τα οποία διαδίδονται (ακτινοβολούνται) στον ελεύθερο χώρο. Η περιοχή στην οποία αναπτύσσονται τα κύματα αυτά ονομάζεται ηλεκτρομαγνητικό πεδίο. Τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα εμφανίζονται με πολλές διαφορετικές μορφές. Για παράδειγμα, τα ραδιοκύματα, τα μικροκύματα, το ορατό φως αλλά και οι ακτίνες X

αποτελούν μορφές ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων. Όλα τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα διαδίδονται με την ταχύτητα του φωτός.

Η ανάπτυξη των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και κυρίως της αιολικής και της φωτοβολταϊκής ηλεκτρικής ενέργειας, προωθείται και ενισχύεται, με ισχυρά κίνητρα και υψηλούς ρυθμούς, σ' όλο τον αναπτυσσόμενο κόσμο. Οι ανεξάντλητες (ανανεώσιμες) πηγές ενέργειας έχουν κύρια χαρακτηριστικά το ότι είναι άφθονες και περιβαλλοντολογικά καθαρότερες. Η αλόγιστη χρήση, αφενός των συμβατικών καυσίμων (ρύπανση περιβάλλοντος), αφετέρου της πυρηνικής ενέργειας (πυρηνικά ατυχήματα) αποτελούν σοβαρή αιτία για τα οικολογικά προβλήματα.

Παρότι η ανανεώσιμη ενέργεια διαδραματίζει σημαντικό ρόλο, είναι σημαντικό να μην παραβλεφθούν ορισμένες δυσκολίες. Η κύρια δυσκολία που αντιμετωπίζουν σήμερα οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, προκειμένου να ενσωματωθούν στην καθημερινή ζωή, είναι το σχετικά υψηλό κόστος της παραγόμενης kWh τους, σε σχέση με το κόστος της kWh πετρελαίου. Δεδομένου ότι πρόκειται για αραιές μορφές ενέργειας (μικρής ροής ενέργειας), μέχρι στιγμής, τουλάχιστον, έχουν υψηλό κόστος ανά μονάδα παραγόμενης ενέργειας τελικής χρήσης. Μεταξύ των δύο κύριων τρόπων παραγωγής ανανεώσιμης ενέργειας, αιολικής και φωτοβολταϊκής, η αιολική εμφανίζεται σήμερα οικονομικότερη και άρα περισσότερο προσιτή, κυρίως με τη μορφή αιολικών πάρκων, συνδεδεμένων στο δίκτυο της ΔΕΗ.

Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας χρειάζονται εφεδρικές συμβατικές πηγές ενέργειας. Η ηλεκτροπαραγωγή από αιολική και ηλιακή ενέργεια είναι διακοπτόμενη και απρόβλεπτη. Κλιματικοί παράγοντες είναι δυνατό να προξενήσουν μεγάλες αυξομειώσεις στη διαθεσιμότητα βιομάζας και υδροηλεκτρικής ενέργειας από το ένα έτος στο επόμενο. Τέλος, η ανάπτυξη διαφοροποιημένου και ασφαλούς ενεργειακού συστήματος, όπου να περιλαμβάνεται υψηλότερο μερίδιο ανανεώσιμης ενέργειας, επί του παρόντος, εξακολουθεί να αποτελεί, εν γένει, πολιτική υψηλότερου κόστους.

Εμφανίζονται ήδη βελτιωμένα εργαλεία ανάλυσης και διαχείρισης που θα καταστήσουν δυνατή την ανάπτυξη της κατάλληλης αντιμετώπισης αυτών των προκλήσεων και των σημαντικών εμποδίων. Στα εργαλεία αυτά περιλαμβάνονται: πλέον εξελιγμένα μοντέλα κοστολόγησης που λαμβάνουν υπόψη τον αντίκτυπο των υψηλότερων μεριδίων ανανεώσιμης ενέργειας στο συνολικό κόστος του ηλιακού συστήματος καθώς εξελιγμένα εργαλεία μετεωρολογικών προβλέψεων που είναι δυνατό να ενσωματωθούν σε σύγχρονα συστήματα ενεργειακής διαχείρισης ώστε ο εφοδιασμός να ανταποκρίνεται καλύτερα στη ζήτηση.

1.5 Προδιαγραφές και νομοθεσία της Ευρωπαϊκής Ένωσης

Τα φωτοβολταϊκά πλαίσια πρέπει να πληρούν τις προδιαγραφές της Ευρωπαϊκής Ένωσης, έχοντας υποβληθεί στις παρακάτω δοκιμασίες :

1. Θερμικών κύκλων
2. Θερμικού σοκ
3. Ψύξης – υγρασίας
4. Ηλεκτρικής μόνωσης
5. Κρούσεως χαλαζόπτωσης
6. Μηχανικής αντοχής και στρέψης
7. Περιβάλλοντος άλμης

8. Ακτινοβολιών και έκθεσης στο νερό
9. Ηλεκτρικού πεδίου

Η Ευρωπαϊκή Ένωση (ΕΕ) έχει μεγάλα σχέδια για το μέλλον των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, και πολύ προσοχή έχει κατευθυνθεί προς την παραγόμενη αιολική ενέργεια, με τα έθνη όπως Αγγλία και η Γερμανία να ανοίγουν το δρόμο παράγοντας το μέγιστο δυνατό από την αιολική ενέργεια στην Ευρώπη. Για αυτόν τον λόγο, το πιο πρόσφατο πλάνο της ευρωπαϊκής επιτροπής είναι να μειώσει την εκπομπή άνθρακα με την επένδυση ενός μεγάλου μέρους των 50 δισεκατομμυρίων ευρώ στην έρευνα και την ανάπτυξη της ηλιακής ενέργειας.

Το μεγαλύτερο πρόβλημα πάνω στο οποίο δουλεύει η NREL (εθνικό εργαστήριο ανανεώσιμης πηγής ενέργειας) είναι το πώς θα αποθηκεύσουν μέρος της θερμότητας που παράγεται όσο υπάρχει το φως της μέρας, προκειμένου αυτή να απελευθερωθεί αργότερα.

Οι καλές προθέσεις είναι πάντα ευπρόσδεκτες, δεν αρκούν όμως για να ανατρέψουν μία πραγματικότητα που όλοι συμφωνούν πως πρέπει να αλλάξει. Γι' αυτό και η στοχοθέτηση και οι κανονιστικές διατάξεις με αυστηρά χρονοδιαγράμματα αποτελούν μια ουσιαστική εγγύηση για να μπορέσουμε να έχουμε πρακτικά αποτελέσματα. Στην κατεύθυνση αυτή κινείται και η κοινοτική οδηγία 2001/77 «Για την προώθηση της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας στην εσωτερική αγορά ηλεκτρικής ενέργειας».

Στην εσωτερική αγορά ηλεκτρισμού της Ευρωπαϊκής Ένωσης στρατηγικός στόχος είναι η δημιουργία ενός πλαισίου για τη σημαντική αύξηση μεσοπρόθεσμα του προερχόμενου από ανανεώσιμες πηγές ηλεκτρισμού στην Ευρωπαϊκή Ένωση και η διευκόλυνση της πρόσβασης του σε αυτόν (εσωτερική αγορά ηλεκτρικής ενέργειας).

Η προώθηση του ηλεκτρισμού από Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας αποτελεί πρώτη προτεραιότητα. Η Λευκή Βίβλος για τις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας του 1997 ανέδειξε τον καίριο ρόλο τους σε σχέση με την ασφάλεια της τροφοδοσίας, για την απασχόληση και το περιβάλλον, και πρότεινε έναν ενδεικτικό στόχο διπλασιασμού του μεριδίου των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας στο ενεργειακό ισοζύγιο της Ευρωπαϊκής Ένωσης από 6 σε 12% μέχρι το 2010. Ο στόχος αυτός επικυρώθηκε από το Συμβούλιο το 1998. Ειδικότερα, όσον αναφορά τα περιβαλλοντικά ζητήματα, η αυξημένη χρήση ηλεκτρισμού από Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας θα αποτελέσει ένα σημαντικό τμήμα των δράσεων που θα απαιτηθούν ώστε να εκπληρωθούν οι δεσμεύσεις που υιοθετήθηκαν από την Ευρωπαϊκή Ένωση στο Κιότο σχετικά με την μείωση των εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου.

Τα κυριότερα μέτρα για την αντιμετώπιση του φαινομένου είναι η εξοικονόμηση ενέργειας, η αύξηση της ενεργειακής απόδοσης, η αξιοποίηση των καθαρών πηγών ενέργειας, η προστασία των δασών και ο περιορισμός των αερίων ρύπων. Αξίζει να σημειωθεί ότι τα τελευταία δέκα χιλιάδες χρόνια δεν παρατηρήθηκαν θερμοκρασιακές αλλαγές άνω του ενός βαθμού κελσίου μέσα σε ένα αιώνα. Τον 20ο αιώνα παρατηρήθηκε αύξηση της θερμοκρασίας κατά 0,4 - 0,8 βαθμούς κελσίου. Η δεκαετία 1990 - 2000 θεωρείται η θερμότερη για το βόρειο ημισφαίριο και ο Αύγουστος του 2003 ήταν ο θερμότερος στην Ευρώπη προκαλώντας μεγάλο αριθμό θανάτων.

2^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ

“ΑΠΩΛΕΙΕΣ ΔΙΚΤΥΟΥ ΚΑΙ ΤΡΟΠΟΙ ΜΕΙΩΣΗΣ”

2.1 Απώλειες δικτύου

Σκοπός των Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας είναι να τροφοδοτούνται οι καταναλωτές με ηλεκτρική ισχύ καλής ποιότητας, με λογική αξιοπιστία και με φθηνό τρόπο. Δηλαδή, πρέπει να δίνεται όση ισχύς χρειάζεται στη κατανάλωση και μάλιστα στη χρονική περίοδο και στο σημείο που απαιτείτε. Ωστόσο, από το στάδιο της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας μέχρι το σημείο κατανάλωσης ένα ποσοστό της ηλεκτρικής ενέργειας χάνεται.

Υπάρχουν τρεις τρόποι με τους οποίους μπορεί να υπάρξει απώλεια ενέργειας πριν αυτή φτάσει στο φορτίο, όταν εφαρμοστεί σε μια γραμμή μεταφοράς, αυτοί είναι :

1. ακτινοβολία
 2. θέρμανση αγωγού η απώλειες Joule
 3. και θέρμανση διηλεκτρικού
- Οι απώλειες λόγω ακτινοβολίας αυξάνονται με την συχνότητα για οποιαδήποτε γραμμή μεταφοράς και τελικά τερματίζουν την χρησιμότητα της γραμμής για κάποια υψηλή συχνότητα.
 - Οι απώλειες Joule οφείλονται στην ωμική αντίσταση των αγωγών. Όταν από έναν αγωγό που έχει ωμική αντίσταση $R(\text{Ohm})$ διέρχεται ρεύμα έντασης $I(\text{A})$ αναπτύσσεται θερμότητα στον αγωγό που ισοδυναμεί με απώλειες ενέργειας. Η θερμική ενεργεία χάνεται στο περιβάλλον. Οι απώλειες αυτές ονομάζονται απώλειες Joule ή ηλεκτρικές. Στα υπόγεια καλώδια είναι χαμηλότερες από ότι στις αντίστοιχες ισοδύναμες εναέριες γραμμές, κυρίως λόγω των μεγαλύτερων διατομών τους και λόγω της φύσης των χρησιμοποιούμενων αγωγών.
 - Η θέρμανση διηλεκτρικού είναι ανάλογη της τάσης που υπάρχει στο διηλεκτρικό και επομένως αντιστρόφως ανάλογη της χαρακτηριστικής αντίστασης για κάθε μεταδιδόμενη ισχύ. Αυξάνεται με την συχνότητα, αφού βαθμιαία χειροτερεύουν οι ιδιότητες με την αύξηση της συχνότητας για οποιοδήποτε διηλεκτρικό μέσο. Οι απώλειες αυτές είναι γενικά μικρότερες από τις απώλειες Joule. Τις περισσότερες φορές θεωρούνται αμελητέες και δεν λαμβάνονται υπόψη.

2.2 Τρόποι μείωσης απωλειών δικτύου

Οι απώλειες ενέργειας στις γραμμές μεταφοράς έχουν ως αποτέλεσμα ένα διαρκές κόστος ενέργειας, που επιβαρύνει την επιχείρηση ηλεκτρισμού, γεγονός που οδηγεί σε αναζήτηση μεθόδων για την μείωση τους. Μέτρα για την μείωση των απωλειών μπορούν να ληφθούν σε καθένα από τα στάδια της παραγωγής, της μεταφοράς και της διανομής της

ηλεκτρικής ενέργειας. Έχουν γίνει αρκετές προσπάθειες για την μείωση των απωλειών σε συστήματα διανομής. Μια από αυτές, σημαντική για τον τομέα των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας είναι η αλλαγή του επίπεδου τάσης από 15kV στα 20kV. Η συγκεκριμένη αλλαγή εφαρμόστηκε στο ελληνικό ηλεκτρικό σύστημα και επέφερε σημαντική μείωση στις απώλειες και παρατηρούνται στις γραμμές, στους μετασχηματιστές διανομής καθώς και στους μετασχηματιστές στα κέντρα της τάσης ΥΤ/ΜΤ.

Γενικά, τρόποι με τους οποίους ελαχιστοποιούνται οι απώλειες είναι:

1. Μειώνοντας το ρεύμα με διόρθωση του συντελεστή ισχύος $\cos\phi$, δηλαδή με αντιστάθμιση.
2. Αυξάνοντας την διατομή των αγωγών (γεγονός που είναι ασύμφορο οικονομικά και στην περίπτωση του υπόγειου δικτύου τις περισσότερες φορές αδύνατο).
3. Ελαττώνοντας τις απώλειες κορώνων με διάφορα μέσα, π.χ. με πολλαπλούς αγωγούς, ή δακτυλίους που εξομαλύνουν το πεδίο. Οι απώλειες κορώνων είναι ασήμαντες για τάσης μεταφοράς κάτω των 200kV.
4. Με αναδιάταξη-ανασχηματισμό του δικτύου μέσω διακοπτικών κινήσεων. Η συγκεκριμένη μέθοδος βασίζεται στην διασύνδεση γειτονικών γραμμών μέσω διακοπών έτσι ώστε όλα τα φορτία να ικανοποιούνται, αλλά στη νέα δομή κάποια από αυτά να τροφοδοτούνται από διαφορετική οδό τροφοδοσίας.
5. Μειώνοντας τη φόρτιση της γραμμής με τη χρήση της «Διανεμημένης Παραγωγής» της ηλεκτρικής ενέργειας, δηλαδή της παραγωγής ενέργειας κοντά στην κατανάλωση της, με αποτέλεσμα να μειώνεται η φόρτιση και οι απώλειες των δικτύων Μεταφοράς και Διανομής.

2.3 Διεσπαρμένη Παραγωγή

Ένα από τα σημαντικότερα ζητήματα της εποχής μας αφορά την αγορά ενέργειας στην χώρα μας και παγκοσμίως, είναι η διεύθυνση διεσπαρμένης παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στο υπάρχον δίκτυο με πηγές ενέργειας που ποικίλουν σε μέγεθος (από μερικά kW έως περίπου 10MW).

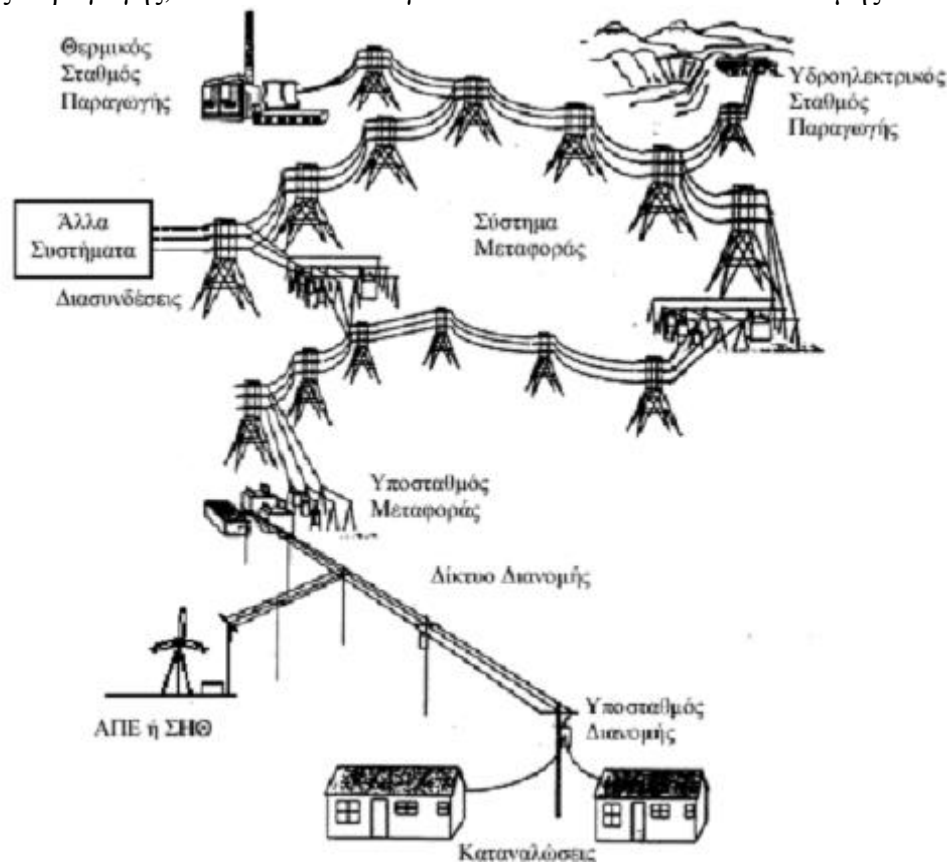
Ο όρος Δεσπαρμένη Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας η ΔΠ(Distributed Generation, DG), αναφέρεται στη χρήση γεννητριών μικρού ή μεσαίου μεγέθους, οι οποίες είτε συνδέονται απευθείας στο κεντρικό δίκτυο διανομής μέσω ιδιωτικών προμηθευτών είτε κατευθείαν στον τελικό αποδέκτη. Στην τελευταία αυτή περίπτωση μιλάμε για Διάσπαρτη Παραγωγή (Dispersed Generation), η οποία περιλαμβάνει γεννήτριες πολύ μικρού μεγέθους ικανές να καλύψουν αποκλειστικά οικιακές ανάγκες ή μικρές επιχειρήσεις, της τάξης των 10 έως 250 kW.

Οι περισσότερες γεννήτριες της ΔΠ χρησιμοποιούν παραδοσιακούς τρόπους παραγωγής : πετρέλαιο, μηχανές εσωτερικής καύσης ή συνδυασμένου κύκλου κ.ά. Επιπρόσθετα, σε μεγάλο ποσοστό χρησιμοποιούνται Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ), όπως αέρας, ήλιος και νερό. Βασικό πλεονέκτημα τους απέναντι των συμβατικών πηγών είναι το ότι ανανεώνονται από τη φύση, δεν προκαλούν μόλυνση της ατμόσφαιρας και συμβάλλουν στη μείωση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα και άλλων αέριων ρύπων. Οι γεννήτριες των ΑΠΕ προτιμώνται επίσης διότι το μικρό μέγεθος επιτρέπει την απευθείας σύνδεση τους στο επίπεδο XT του κεντρικού δικτύου. Επίσης, τα τελευταία χρόνια βρίσκεται σε εξέλιξη η χρήση μικροστροβίλων

(microturbines) και κυψελών καυσίμων (fuel cells). Οι μικροστροβίλοι είναι στρόβιλοι μικρού μεγέθους σε σχέση με τους παραδοσιακούς, οι οποίοι όμως παράγουν μεγάλα ποσά ηλεκτρικής ισχύος όταν συνδεθούν με γεννήτριες της ΔΠ. Τέλος, οι κυψέλες καυσίμων παράγουν ηλεκτρική ενέργεια από την αντίδραση του υδρογόνου με το οξυγόνο.

Από την πλευρά του καταναλωτή, παραγωγή σε τοπικό επίπεδο μπορεί να σημαίνει αύξηση της αξιοπιστίας και ποιότητας ισχύος της παρεχομένης ενέργειας και σε περιβάλλον πλήρως απελευθερωμένης αγοράς, την μείωση του κόστους κάλυψης των ενεργειακών του αναγκών με ευέλικτους τρόπους διαχείρισης της τοπικής παραγωγής, όταν οι τιμές στην ελεύθερη αγορά ενέργειας την καθιστούν οικονομικά συμφέρουσα. Από την πλευρά του χειριστή του Δικτύου Μέσης Τάσης ή της Επιχείρησης Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας δυνατότητα τοπικής κάλυψης του φορτίου ή μέρους του προσφέρει πληθώρα πλεονεκτημάτων, όπως αναβολή επενδύσεων κεφαλαίου για την ενίσχυση των δικτύων μεταφοράς και διανομής, αλλά και των κεντρικών σταθμών παραγωγής, καθώς επίσης και μείωση των απωλειών.

Όσο αφορά τις ΑΠΕ, ο ρυθμός τμε τον οποίο παρέχεται η ενέργεια δεν είναι ελεγχόμενος, ώστε η ηλεκτρική ενέργεια να παρέχεται όταν το απαιτούν οι ανθρώπινες ανάγκες. Το γεγονός αυτό σε συνδυασμό με το ότι η ηλεκτρική ενέργεια δύσκολα αποθηκεύεται σε μεγάλες ποσότητες, οδηγεί στην ανάγκη της σύνδεσης των ΑΠΕ στο ηλεκτρικό δίκτυο και την παράλληλη λειτουργία τους με το Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας. Δεδομένου δε ότι για τεχνικούς λόγους οι μονάδες των ΑΠΕ είναι μικρής ισχύος, συγκριτικά με τις μονάδες της συμβατικής παραγωγής, συνδέονται κατά γενικό κανόνα στο επίπεδο Διανομής και Μεταφοράς.



Σχήμα 2.1: Σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας

Οι μορφές των ΑΠΕ που είναι σήμερα τεχνικοοικονομικά εκμεταλλεύσιμες είναι οι ακόλουθες:

- Αιολική ενέργεια: Η κινητική ενέργεια του ανέμου μετατρέπεται αρχικά σε μηχανική και ακολούθως σε ηλεκτρική, μέσω των ανεμογεννητριών (Σχήμα 2.2). Η τεχνολογία των ανεμογεννητριών παρουσίασε μεγάλη εξέλιξη κατά τα τελευταία χρόνια, με αντίστοιχη μείωση του κόστους παραγωγής της παραγόμενης ενέργειας.



Σχήμα 2.2: Αιολικός σταθμός παραγωγής

- Υδροηλεκτρική ενέργεια: Αποτελεί μια ανανεώσιμη μορφή ενέργειας, η οποία χρησιμοποιήθηκε από τα πρώτα βήματα ανάπτυξης των ηλεκτρικών εφαρμογών, κυρίως με την κατασκευή φραγμάτων και την δημιουργία υδάτινων ταμιευτηρίων μεγάλων ποταμών.



Σχήμα 2.3: Μεγάλο υδροηλεκτρικό έργο

- Βιομάζα: Ο όρος υποδηλώνει τα πάσης φύσεως υποπροϊόντα και κατάλοιπα της φυσικής, ζωικής, δασικής και αλιευτικής παραγωγής, πριν ή μετά την βιομηχανική τους επεξεργασία, καθώς και τα αστικά λύματα και τα απορρίμματα.
- Γεωθερμική ενέργεια: Ανάλογα με την θερμοκρασία των γεωθερμικών ρευστών που λαμβάνονται με γεωτρήσεις, διακρίνεται σε “χαμηλής” (25° - 1000° C), “μέσης” (100° - 1500° C) και “υψηλής” (άνω των 1500° C) ενθαλπίας. Η γεωθερμική ενέργεια χαμηλής και μέσης ενθαλπίας βρίσκει πολλές εφαρμογές στη γεωργική βιομηχανία και τη θέρμανση χώρων, ενώ για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας προσφέρεται η υψηλής ενθαλπίας.

- Ηλιακή ενέργεια: Η αξιοποίηση της με την απευθείας μετατροπή της σε ηλεκτρική μέσω των φωτοβολταϊκών στοιχείων, παρουσιάζει τα περισσότερα πλεονεκτήματα.



Σχήμα 2.4: Φωτοβολταϊκός Σταθμός Παραγωγής σε στέγη οικίας

Η ενσωμάτωση διανεμημένης παράγωγης στο δίκτυο οδηγεί σε μια αύξηση της τάσης του δικτύου. Αυτή η μεταβολή μπορεί να είναι ευπρόσδεκτη υπό συγκεκριμένες συνθήκες, αλλά μπορεί επίσης να επιφέρει δυσλειτουργία του δικτύου υπό άλλες συνθήκες. Ο έλεγχος της τάσης ενός δικτύου όταν σε αυτό έχει διεισδύσει διανεμημένη παράγωγή αποτελεί ένα από τα βασικά προβλήματα που πρέπει να λυθούν ώστε να διευκολυνθεί η εγκατάσταση μεγάλων ποσοτήτων διανεμημένης παραγωγής. Ειδικότερα στην περίπτωση διαταραχών της κανονικής λειτουργίας της εγκαταστάσεως η και του δικτύου, λόγω σφαλμάτων ή άλλων αιτιών, θα πρέπει να εξασφαλίζεται ότι οι επιπτώσεις τους περιορίζονται στο ελάχιστο δυνατόν και ότι οπωσδήποτε δεν δημιουργούν επικίνδυνες καταστάσεις για τον εξοπλισμό η και την ασφάλεια προσώπων. Για τον λόγο αυτό έχουν καθοριστεί από την ΔΕΗ τεχνικοί κανόνες οι οποίοι εξασφαλίζουν τα παραπάνω καθώς και ειδικότερες απαιτήσεις για τον εξοπλισμό ζεύξεως και προστασίας της εγκατάστασης παραγωγής.

3^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ

“ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ”

3.1 Τι είναι το φωτοβολταϊκό σύστημα

Ένα φωτοβολταϊκό (Φ/Β) σύστημα γενικά αποτελείται από ένα ή περισσότερα πάνελ (Σχήμα 1.5) η πλαίσια, ή όπως λέγονται συχνά στο εμπόριο, κρύσταλλα φωτοβολταϊκών στοιχείων (ή κυψελών) μαζί με τις απαραίτητες συσκευές και διατάξεις για τη μετατροπή της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται στην επιθυμητή μορφή. Η τεχνολογία των φωτοβολταϊκών χρησιμοποιεί ημιαγωγή υλικά σε μορφή κυψέλης (cell) διαφόρων μεγεθών. Από την όψη της φυσικής στερεάς κατάστασης, μια κυψέλη είναι ουσιαστικά μια εκτεταμένη μέγεθος δίοδος p-n, με την ένωση (junction) των δυο στρωμάτων να βρίσκεται κοντά στην πάνω επιφάνεια. Η κυψέλη μετατρέπει άμεσα το ηλιακό φως σε ηλεκτρικό συνεχές ρεύμα. Πολυάριθμες κυψέλες συνδέονται μαζί σε ένα πλαίσιο (module) ώστε να παράγουν την αιτουμένη ισχύ.



Σχήμα 3.1: Φ/B πάνελ

Μια φωτοβολταϊκή εγκατάσταση μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να τροφοδοτήσει με ρεύμα μια περιοχή που είναι αποκομμένη από το δίκτυο παροχής ρεύματος (Stand-Alone System) ή για να παρέχει ισχύ στο δίκτυο εφόσον έχουν ικανοποιηθεί οι ηλεκτρικές ανάγκες (Grid-Connected System). Εφαρμόζεται επίσης η χρήση των φωτοβολταϊκών σε συνδυασμό με γεννήτρια δημιουργώντας έτσι ένα υβριδικό σύστημα (Hybrid System) σε περιπτώσεις όπου απαιτείται αδιάλειπτη παροχή ηλεκτρικής ενέργειας. Τέλος, η απλούστερη περίπτωση χρήσης είναι αυτή κατά την οποία τροφοδοτείται άμεσα κάποιο φορτίο συνεχούς ρεύματος.

Οι κύριοι παράγοντες που επηρεάζουν την ηλεκτρική σχεδίαση μιας φωτοβολταϊκής εγκατάστασης είναι οι εξής:

1. Η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας. Το πλάτος του παραγόμενου ρεύματος γίνεται μέγιστο κάτω από πλήρη φωτεινό ήλιο. Σε μια μερικώς ηλιόλουστη ημέρα το ρεύμα μειώνεται σε αναλογία με την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας
2. Η γωνία της διεύθυνσης του ήλιου με το έδαφος. Η παράγωγη είναι μέγιστη όταν ο ήλιος είναι κάθετος στο πλαίσιο. Μάλιστα προκειμένου να επιτυγχάνεται όσον το δυνατό περισσότερη ισχύς εξόδου έχουν κατασκευαστεί στηρίγματα φωτοβολταϊκών πλαισίων με μηχανισμό κίνησης, τα οποία μπορούν να ακλουθούν τον ήλιο.
3. Η θερμοκρασία λειτουργίας των πλαισίων. Γενικά είναι καλύτερο για μια φωτοβολταϊκή κυψέλη να λειτουργεί σε χαμηλή θερμοκρασία αφού έτσι παράγει περισσότερη ισχύ.

Μια φωτοβολταϊκή διάταξη, όπως έχει αναφερθεί, παράγει συνεχές ρεύμα. Έτσι μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να τροφοδοτήσει ένα συνεχές (DC) φορτίο άμεσα ή με την χρήση κάποιου συσσωρευτή (μπαταριάς). Στην περίπτωση όμως που απαιτείται η τροφοδότηση φορτίου εναλλασσομένου ρεύματος (AC) ή η διασύνδεση της εγκατάστασης στο δίκτυο διανομής ρεύματος τότε είναι απαραίτητη η χρήση ενός μετατροπέα ο οποίος θα μετατρέπει το συνεχές ρεύμα σε εναλλασσόμενο. Η μετατροπή αυτή πρέπει να γίνεται πάντα με τις μικρότερες δυνατές απώλειες και είναι σημαντικό χαρακτηριστικό ενός τέτοιου μετατροπέα.

Όσον αφορά την Ελλάδα για την προώθηση της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται από φωτοβολταϊκούς σταθμούς, καταρτίζεται από την ΡΑΕ και εγκρίνεται από τον Υπουργό Ανάπτυξης, Πρόγραμμα Ανάπτυξης Φωτοβολταϊκών Σταθμών, σύμφωνα με τον νόμο 3468/06. Το πρόγραμμα αυτό αφορά την ανάπτυξη φωτοβολταϊκών σταθμών που εγκαθίστανται στην ελληνική επικράτεια, συνολικής ισχύος τουλάχιστον 500 MW peak, για σταθμούς που συνδέονται με το Σύστημα, απευθείας ή μέσω Δικτύου και συνολική ισχύος τουλάχιστον 200 MW peak, για σταθμούς που συνδέονται στο δίκτυο Μη Διασυνδεδεμένων Νησιών. Ένα διασυνδεδεμένο φωτοβολταϊκό σύστημα γνωστό και ως φωτοβολταϊκό «πάρκο» είναι σε μόνιμη σύνδεση με το δίκτυο της ΔΕΗ με σκοπό να διοχετεύει την ενεργεία που παράγει στο σύστημα. Δεν υπάρχουν αποθηκευτικοί μηχανισμοί και μια τέτοια εγκατάσταση πρέπει να σχεδιάζεται με τρόπο που να αποδίδει την μέγιστη ετήσια ηλεκτρική ενέργεια, κάτι που επιτυγχάνεται με συνδυασμό πολλών παρόντων.

Σύστημα εγκατεστημένο σε επικλινή στέγη



Σύστημα εγκατεστημένο σε επίπεδη στέγη



Σχήμα 3.2: Φ/Β εγκαταστάσεις σε οροφές κτιρίων

Γενικά σημαντικοί λόγοι για την προώθηση της φωτοβολταϊκής τεχνολογίας, της έρευνας και των εφαρμογών στην χώρα μας είναι η αξιοποίηση μια εγχώριας και ανανεώσιμης πηγής ενέργειας (ηλιακή) που βρίσκεται σε αφθονία, παράλληλα με την σταδιακή απεξάρτηση από το πετρέλαιο και κάθε μορφής εισαγόμενη ενέργεια καθώς και η ενίσχυση του ηλεκτρικού δικτύου τις ώρες των μεσημβρινών αιχμών, όπου τα Φ/Β παράγουν το μεγάλο μέρος ηλεκτρικής ενέργειας, ιδιαίτερα κατά τη θερινή περίοδο που παρατηρείται έλλειψη η πολύ υψηλό κόστος ενέργειας. Τέλος, σημαντική είναι και η συμβολή των Φ/Β για τη μείωση των απωλειών του δικτύου, με την παραγωγή ενέργειας στον τόπο της κατανάλωσης, και την ελάφρυνση των γραμμών μεταφοράς.

Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία μετατρέπουν άμεσα την ηλιακή ενέργεια σε ηλεκτρική. Η ηλεκτρική ενέργεια που παράγουν έχει μορφή συνεχούς ηλεκτρικού ρεύματος και μπορεί να χρησιμοποιηθεί απευθείας ως συνεχές ρεύμα ή να μετατραπεί σε εναλλασσόμενο ρεύμα ή ακόμα και να αποθηκευτεί και να χρησιμοποιηθεί κάποια άλλη στιγμή.

Το βασικό στοιχείο ενός φωτοβολταϊκού συστήματος είναι το ηλιακό στοιχείο το οποίο αποτελείται από ημιαγωγό, συνήθως, πυρίτιο. Δεν υπάρχουν κινητές μονάδες σε ένα ηλιακό

στοιχείο, η λειτουργία του είναι φιλική προς το περιβάλλον και, αν η συσκευή προστατεύεται σωστά από τις καιρικές συνθήκες, δεν πρόκειται να υποστεί φθορά σε βάθος χρόνου.

Καθώς το ηλιακό φως διαχέεται σε ολόκληρο τον πλανήτη, τα φωτοβολταϊκά συστήματα μπορούν να παράγουν ενέργεια οπουδήποτε. Επειδή η πηγή ενέργειας θα διαρκέσει για εκατοντάδες χιλιάδες χρόνια και είναι πολύ δύσκολο να παρέμβουμε στη μεταφορά της, τα φωτοβολταϊκά αναμένεται να αποτελέσουν μακροπρόθεσμα μια πολύ σημαντική πηγή ενέργειας παγκοσμίως.

Τα φωτοβολταϊκά συστήματα είναι ευέλικτα και εύχρηστα, επομένως η παράγωγή ηλεκτρικής ενέργειας τους μπορεί να χρησιμοποιηθεί σχεδόν για οποιαδήποτε εφαρμογή, από ρολόγια χειρός, αριθμομηχανές, συστήματα τηλεπικοινωνιών και μικρούς φορτιστές μπαταρίας έως τεράστιες κεντρικές μονάδες παραγωγής ενέργειας που λειτουργούν μόνο με ηλεκτρική ενέργεια. Τα φωτοβολταϊκά συστήματα μπορούν να κατασκευαστούν με τη σταδιακή πρόσθεση πάνελ, που προσαρμόζονται εύκολα, σε αντίθεση με τις πιο συμβατικές μεθόδους παραγωγής ενέργειας, όπως είναι οι πυρηνικοί σταθμοί ή οι σταθμοί παραγωγής ενέργειας, που λειτουργούν με ορυκτά καύσιμα, οι οποίοι, για να είναι οικονομικά βιώσιμοι, θα πρέπει να έχουν τη μορφή και το μέγεθος μονάδων παραγωγής πολλών MW.

Η όλη κατασκευή του φωτοβολταϊκού πλαισίου (φωτοβολταϊκό φύλλο) είναι ειδικά σχεδιασμένη για υψηλή αντοχή σε μηχανικές καταπονήσεις και εγκατάσταση σε περιβάλλον δυσμενών κλιματολογικών συνθηκών, αποτελούμενο από «στρώματα» διαφορετικών στρώσεων υλικών (επικαλύψεις), καθένα από τα οποία λειτουργεί προστατευτικά. Τα στοιχεία που συγκροτούν το φωτοβολταϊκό πλαίσιο ενθυλακώνονται σε λεπτό διαφανές στρώμα ΕΩΑ. Η εμπρόσθια επιφάνεια καλύπτεται από ενισχυμένο λευκό γυαλί διαύγειας νερού και η οπίσθια, με ειδικό film PVF. Το μεταλλικό πλαίσιο είναι κατασκευασμένο από αναδύόμενο αλουμίνιο και περιβάλλει το «φωτοβολταϊκό φύλλο». Μεταξύ των δυο, παρεμβάλλεται ελαστικό παρέμβυσμα βουτυλίου, προσδίδοντας ελευθερία μικρών κινήσεων και προστασία από θερμικές συστοδιαστολές.

Η κατασκευή πρέπει να είναι ιδιαίτερος ανθεκτική στην υγρασία, την ατμόσφαιρα υψηλής περιεκτικότητας σε άλμη, τις δυνατές κρούσεις χαλαζόπτωσης και τις θερμικές καταπονήσεις.

Τα φωτοβολταϊκά πλαίσια τοποθετούνται σε μεταλλικά στηρίγματα κατασκευασμένα από profil αλουμινίου ή από σιδερογωνίες γαλβανισμένες εν θερμό, ώστε να εξασφαλίζουν αντοχή στην διάβρωση. Όλα τα στηρίγματα συνδέονται με χρήση ανοξείδωτων και περικοχλίων ασφαλείας

3.2 Τύποι φωτοβολταϊκών συστημάτων

Σε σχέση με το βαθμό ενσωμάτωσής τους τα φωτοβολταϊκά πλαίσια διακρίνονται σε δυο κατηγορίες:

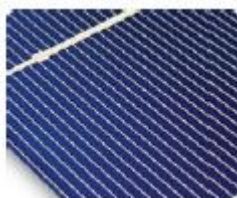
- τυπικά πλαίσια τα οποία αποτελούν την πιο διαδεδομένη λύση σε εφαρμογές φωτοβολταϊκών συστημάτων πάνω σε στεγές κτιρίων ή σε πολύ μεγάλες

φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις στην υπαίθρο και η κατασκευή τους βασίζεται σε μεθοδο πολυστρωματώσης,

- ημιπερατά φωτοβολταϊκά πλαίσια που επιλέγονται στις περιπτώσεις αρχιτεκτονικής ενσωμάτωσης, όχι μόνο λόγω του ιδιαίτερου σχεδιασμού τους, αλλά και γιατί μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως μονωτικοί υαλοπίνακες.

Με βάση το υλικό κατασκευής τους τα φωτοβολταϊκά πλαίσια χωρίζονται σε :

1. φωτοβολταϊκά στοιχεία μονοκρυσταλλικού πυριτίου (Εικόνα 1). Το πάχος τους είναι γύρω στα 0,3 χιλιοστά. Η απόδοσή τους στη βιομηχανική κατασκευή τους κυμαίνεται στο 15 – 18 % για το πλαίσιο. Στο εργαστήριο έχουν επιτευχθεί ακόμα μεγαλύτερες αποδόσεις έως και 24,7 %. Τα μονοκρυσταλλικά φωτοβολταϊκά στοιχεία χαρακτηρίζονται από το πλεονεκτήμα της καλύτερης σχέσης απόδοσης επιφάνεια ή ενεργειακής πυκνότητας. Ένα άλλο χαρακτηριστικό είναι το υψηλό κόστος κατασκευής σε σχέση με τα πολυκρυσταλλικά. Και τα δύο βασίζονται στην ανάπτυξη ραβδού πυριτίου.



Σχήμα 3.3: Φωτοβολταϊκό στοιχείο μονοκρυσταλλικού πυριτίου

2. φωτοβολταϊκά στοιχεία πολυκρυσταλλικού πυριτίου (Multi Crystalline Silicon) (Εικόνα 2). Το πάχος τους είναι επίσης περίπου 0,3 χιλιοστά. Όσο μεγαλύτερες είναι σε έκταση οι μονοκρυσταλλικές περιοχές τόσο μεγαλύτερη είναι και η απόδοση για τα πολυκρυσταλλικά φωτοβολταϊκά κελιά. Σε εργαστηριακές εφαρμογές έχουν επιτύχει αποδόσεις έως και 20% ενώ στο εμπόριο τα πολυκρυσταλλικά στοιχεία διατίθενται με αποδόσεις από 13% έως και 15% για τα φωτοβολταϊκά πλαίσια (πάνελ).



Σχήμα 3.4: Φωτοβολταϊκό στοιχείο πολυκρυσταλλικού πυριτίου

3.3 Τρόπος λειτουργίας του φωτοβολταϊκού συστήματος

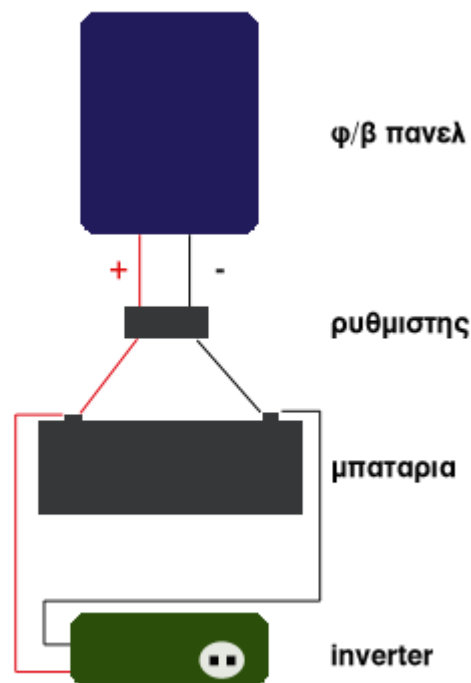
Η παραγωγή του ηλεκτρικού ρεύματος σε ένα φωτοβολταϊκό σύστημα οφείλεται στην ιδιαίτερη συμπεριφορά ορισμένων υλικών, όταν πάνω τους πέφτει ηλιακή ακτινοβολία. Συγκεκριμένα, στοιχεία όπως το γερμάνιο, το σελήνιο και το πυρίτιο αποτελούν τη βάση για τα φωτοβολταϊκά κύτταρα, τα οποία παράγουν ρεύμα για την επίδραση της ηλιακής ακτινοβολίας.

Οι αποδόσεις των φωτοβολταϊκών κυττάρων είναι της τάξης του δέκα τοις εκατό (10%), που σημαίνει ότι ένα τεράστιο ποσό ενέργειας διαφεύγει. Το ηλιακό φως είναι μικρά πακέτα ενέργειας που λέγονται φωτόνια. Ανάλογα με το μήκος κύματος του ηλιακού φάσματος, τα φωτόνια περιέχουν διαφορετικά ποσά ενέργειας. Όταν λοιπόν προσκρούσουν σε ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο, άλλα ανακλώνται, άλλα το διαπερνούν και άλλα απορροφώνται από το φωτοβολταϊκό. Αυτά τα τελευταία είναι που παράγουν ηλεκτρικό ρεύμα. Τα φωτόνια αυτά αναγκάζουν τα ηλεκτρόνια του φωτοβολταϊκού να μετακινηθούν σε άλλη θέση. Σ' αυτή την απλή αρχή της φυσικής βασίζεται η τεχνολογία παραγωγής ηλεκτρισμού.

Ένα φωτοβολταϊκό σύστημα αποδίδει περισσότερο κατά τους θερινούς μήνες λόγω της αυξημένης ηλιοφάνειας ενώ τους χειμερινούς μήνες με συννεφιά, λιγότερο. Συνεπώς, δεν έχει σημασία τι καιρό έχει κάθε ημέρα λειτουργίας ξεχωριστά, αλλά πόση ηλιακή ακτινοβολία σωρευτικά συγκεντρώνεται ανά σημείο κατά μία συγκεκριμένη διάρκεια. Γενικά, η απόδοση ενός φωτοβολταϊκού συστήματος σε σχέση με τη γεωγραφική του θέση, εκτιμάται σύμφωνα με μέσες τιμές ετήσιας ενεργειακής απόδοσης, που προκύπτουν από επίσημες πηγές καταμέτρησης. Η συνολική απόδοση, όμως, του φωτοβολταϊκού συστήματος θα εξαρτηθεί και από την επιλογή εξοπλισμού και μηχανισμών εγκατάστασης.

3.4 Εγκατάσταση Φωτοβολταϊκού συστήματος

Ένα φωτοβολταϊκό σύστημα αποτελείται από ένα ή περισσότερα φωτοβολταϊκά πάνελ και έναν αντιστροφέα τάσης. Στην περίπτωση που έχουμε αυτόνομο φωτοβολταϊκό σύστημα χρειαζόμαστε επιπλέον έναν ρυθμιστή φορτίσεως και μία συστοιχία μπαταριών.



Σχήμα 3.5: Αυτόνομο φωτοβολταϊκό σύστημα

3.4.1 Φωτοβολταϊκό πάνελ

Το φωτοβολταϊκό πάνελ (PV array) αποτελείται από ένα ή περισσότερα φωτοβολταϊκά πλαίσια, που έχουν προκατασκευαστεί και συναρμολογηθεί σε ενιαία κατασκευή, έτοιμη για να τοποθετηθεί σε φωτοβολταϊκή εγκατάσταση. Μπορούν να συνδεθούν σε σειρά ή παράλληλα σχηματίζοντας μια φωτοβολταϊκή συστοιχία. Φωτοβολταϊκή συστοιχία (PV array) είναι μια ομάδα από φωτοβολταϊκά πλαίσια ή πάνελ με ηλεκτρική αλληλοσύνδεση, τοποθετημένα συνήθως σε κοινή κατασκευή στήριξης.

Μπορούμε να συνδέσουμε όσα φωτοβολταϊκά πάνελ θέλουμε σε σειρά ή και παράλληλα, για να πετύχουμε το συνδυασμό Τάσης ρεύματος (Volt), Έντασης ρεύματος (Ampere) και φυσικά την συνολική Ισχύ (Watt) που θέλουμε να έχει το σύστημά μας.

Φωτοβολταϊκά συνδεδεμένα σε σειρά εννοούμε όταν τα έχουμε συνδέσει μεταξύ τους, ενώνοντας το θετικό καλώδιο εξόδου του ενός πάνελ με το αρνητικό του άλλου, δηλαδή εναλλάξ το + με το - κ.ο.κ. Συνδεδεμένα παράλληλα είναι όταν συνδέουμε το θετικό καλώδιο εξόδου του ενός πάνελ με το θετικό του επόμενου και το αρνητικό καλώδιο εξόδου με το αρνητικό του επόμενου.

Σε σειρά αθροίζεται μόνο η τάση (τα Volt), ενώ παράλληλα αθροίζεται μόνο η ένταση (τα Ampere). Αν προορίζονται για αυτόνομο σύστημα με συσσωρευτές (μπαταρίες), τότε η απαιτούμενη τάση εξαρτάται από αυτή των συσσωρευτών ή της συστοιχίας συσσωρευτών. Παρακάτω περιγράφονται δύο παραδείγματα για την κατανόηση του υπολογισμού της συνολικής ισχύος ενός φωτοβολταϊκού συστήματος.

3.4.2 Αντιστροφέας τάσης

Ο αντιστροφέας ή μετατροπέας (inverter) είναι μια ηλεκτρονική συσκευή που μετατρέπει το συνεχές ρεύμα σε εναλλασσόμενο. Η επιλογή του αντιστροφέα εξαρτάται πάντα από το πόσο μεγάλη μπαταρία έχουμε και από το μέγεθος της εγκατάστασης.

3.4.3 Ρυθμιστής φόρτισης και μπαταρία

Ο ρυθμιστής φόρτισης (charge controller) είναι μια συσκευή που χρησιμοποιείται κυρίως σε αυτόνομα συστήματα για να ρυθμίζει τη φόρτιση των συσσωρευτών. Ο ρυθμιστής φόρτισης φροντίζει για τη σωστή φόρτιση της μπαταρίας. Ακόμη, για μελλοντική επέκταση των φωτοβολταϊκών, μπορούμε να πάρουμε ένα μεγαλύτερο ρυθμιστή. Η μπαταρία πρέπει να είναι πάντα λίγο μεγαλύτερη από την ημερήσια παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας των φωτοβολταϊκών.

3.4.4 Προϋποθέσεις για την εγκατάσταση ενός φωτοβολταϊκού συστήματος

Για να εγκατασταθεί ένα φωτοβολταϊκό σύστημα σε ένα κτίριο ή σε ένα οικόπεδο πρέπει να πληρούνται οι ακόλουθες προϋποθέσεις:

1) Ύπαρξη κατάλληλου χώρου για:

- Τις μπαταρίες.
- Τα ηλεκτρικά συστήματα.

- Τη διατήρηση της ελάχιστης απαιτούμενης απόστασης μεταξύ των φωτοβολταϊκών πάνελ.

Όσον αφορά την απόσταση των φωτοβολταϊκών πάνελ, η απόσταση μεταξύ της προβολής της μιας σειράς των πάνελ στο έδαφος με την αρχή της επόμενης σειράς πρέπει να είναι το διπλάσιο από το μέγιστο ύψος των πάνελ.

2) Προσανατολισμός: Αν τα φωτοβολταϊκά τοποθετηθούν σε κάθετη επιφάνεια τότε έχουν καλύτερη απόδοση σε Νότιο προσανατολισμό. Αν είναι κεκλιμένη η επιφάνεια τοποθέτησης τότε απαιτείται μια μεγαλύτερη ποικιλία προσανατολισμών για να έχουμε ανεκτά ενεργειακά αποτελέσματα. Σε κάθε περίπτωση ο Βόρειος προσανατολισμός δεν προτιμάται.

3) Η σωστή κλίση των φωτοβολταϊκών πάνελ: Είναι πολύ βασικό να τοποθετούμε τα φωτοβολταϊκά πάνελ με σωστή κλίση ως προς τον ήλιο και το έδαφος. Οι διαφορές στην παραγωγή ρεύματος είναι πολύ σημαντικές. Για παράδειγμα, ένα κεκλιμένο πάνελ δέχεται περισσότερο φως από ένα κατακόρυφο. Οι γωνίες που μπορούν να χρησιμοποιηθούν είναι από ορθή μέχρι και 150 μοίρες. Η μέγιστη κλίση των 150 μοιρών, προτείνεται για να επιτρέπεται στη βροχή να ξεπλένει τη σκόνη. Για ένα φωτοβολταϊκό στραμμένο προς το Νότο, η πιο αποτελεσματική γωνία είναι 30-40 μοίρες. Μικρότερη κλίση συνεπάγεται μικρότερες απαιτούμενες αποστάσεις μεταξύ των φωτοβολταϊκών πάνελ, ενώ μεγαλύτερη κλίση συνεπάγεται μεγαλύτερες απαιτούμενες αποστάσεις μεταξύ των φωτοβολταϊκών πάνελ, για την αποφυγή σκιάσεων. Αν δεν υπάρχει περιορισμός χώρου, προτιμούμε τις μεγαλύτερες αποστάσεις παρά την μικρότερη από τη βέλτιστη επιλογή γωνίας κλίσης. Την ημέρα των χειμωνιάτικων μηνών οι σκιές είναι μεγαλύτερες λόγω της χαμηλότερης πορείας του ήλιου

4) Αερισμός: Η απόδοση του φωτοβολταϊκού μειώνεται κατά την αύξηση της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος που είναι τοποθετημένο, γι' αυτό και πρέπει το πίσω μέρος του φωτοβολταϊκού να αερίζεται επαρκώς.

5) Σκίαση: Πρέπει να υπάρχει αρκετός ελεύθερος και ασκίαστος χώρος στη θέση τοποθέτησης του φωτοβολταϊκού. Ανάλογα με την κατηγορία που εντάσσεται το φωτοβολταϊκό, απαιτούνται 8 m²/KW για μονοκρυσταλλικά και 10 m²/KW για πολυκρυσταλλικά. Για τα άμορφα φωτοβολταϊκά συστήματα απαιτούνται περίπου το διπλάσιο. Μικρές σκιάσεις σε περιόδους χαμηλής έντασης του ήλιου είναι αποδεκτές και δεν προκαλούν ιδιαίτερες απώλειες στη συνολική παραγωγή.

6) Βάρος: Ένα πλήρες φωτοβολταϊκό ζυγίζει 15-20 kg/m². Αν κι αυτό δεν αποτελεί πρόβλημα, καλό είναι να το γνωρίζουμε και να ληφθεί υπ' όψη.

3.4.5 Διαδικασία τοποθέτησης φωτοβολταϊκού συστήματος

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, όποιος επιθυμεί να τοποθετήσει ένα φωτοβολταϊκό σύστημα θα πρέπει αρχικά να απευθυνθεί σε μία εταιρεία εγκατάστασης φωτοβολταϊκών, η οποία θα του προμηθεύσει τον εξοπλισμό, αλλά και θα τον βοηθήσει σε όλα τα επόμενα βήματα (Δ.Ε.Η., τράπεζες, κ.λπ.). Προτιμάται η συνεργασία με οργανωμένες εταιρείες που εξειδικεύονται στην εγκατάσταση φωτοβολταϊκών συστημάτων. Η φωτοβολταϊκή εγκατάσταση θα λειτουργεί για πολλά χρόνια κι έτσι γίνεται φανερό ότι ο ενδιαφερόμενος θα πρέπει να επιλέξει μια εταιρεία με την οποία να μπορεί να επενδύσει στην αρμονική συνεργασία.

Τα σημεία που πρέπει να προσέξει ο ενδιαφερόμενος όταν έρθει σε επαφή με μια εταιρεία είναι:

- Η αξιοπιστία: τήρηση προδιαγραφών, δεσμεύσεων και υποσχέσεων.
- Ο επαγγελματισμός: σωστή εξυπηρέτηση, τήρηση χρονοδιαγραμμάτων.
- Η επιστημονική κατάρτιση και εμπειρία: επάρκεια σε τεχνικές γνώσεις και εμπειρία στις κατασκευές.
- Τα κατάλληλα μέσα και υποδομές: χρήση κατάλληλων μέσων και εργαλείων κατά τη μελέτη και την εγκατάσταση.

Η εταιρεία εγκατάστασης θα κάνει μια μελέτη και θα δώσει στον ενδιαφερόμενο μια οικονομική προσφορά, ανάλογα με το διαθέσιμο χώρο και τις δικές του απαιτήσεις.

Αυτή η μελέτη πρέπει να συμπεριλαμβάνει τις εξής πληροφορίες:

- Πόσα κιλοβάτ μπορούν να εγκατασταθούν στη στέγη, το δώμα ή το οικόπεδο.
- Πόσα πάνελ και πόσοι μετατροπείς θα χρησιμοποιηθούν, τί ονομαστικής ισχύος, τον κατασκευαστή και τη χώρα προέλευσής τους.
- Τον τύπο του συστήματος στήριξης και τον κατασκευαστή.
- Τον τύπο της καλωδίωσης.
- Τις εγγυήσεις όλων των παραπάνω.
- Την ετήσια απόδοση του συστήματος σε κιλοβατώρες.
- Το τελικό κόστος και όφελος του συστήματος.
- Το χρόνο παράδοσης.

Ο ενδιαφερόμενος θα πρέπει να δώσει προσοχή στις ακόλουθες λεπτομέρειες ώστε να επιλέξει σωστά τα υλικά που θα χρησιμοποιηθούν:

- επιλογή επώνυμων υλικών, από αξιόπιστες εταιρείες κατασκευής και δοκιμασμένα σε ό,τι αφορά τη λειτουργία και την απόδοσή τους
- υλικά με τις απαραίτητες πιστοποιήσεις, δηλαδή υλικά που οι πιστοποιήσεις τους να είναι σύμφωνες με τα διεθνή πρότυπα
- εγγυήσεις λειτουργίας και απόδοσης
- υλικά για τα οποία θα μπορεί να βρεθεί εύκολα τεχνική υποστήριξη, τώρα και στο μέλλον.

Ο ενδιαφερόμενος θα πρέπει επίσης να δώσει προσοχή στα επόμενα βασικά χαρακτηριστικά του προτεινόμενου φωτοβολταϊκού συστήματος:

- η μέγιστη ισχύς
- η υψηλή απόδοση
- η αντίσταση στις διακυμάνσεις θερμοκρασίας
- η καλύτερη εγγύηση λειτουργίας
- η αντίσταση στη φθορά
- η αξιοπιστία της εταιρείας κατασκευής
- οι δόκιμες διαστάσεις.

Είναι δύσκολο να επιτευχθεί ο βέλτιστος συνδυασμός όλων των παραπάνω, αλλά είναι δυνατό να επιλεγεί εκείνο που ταιριάζει καλύτερα στις ανάγκες του κάθε καταναλωτή. Μετά την επιλογή της κατάλληλης προσφοράς, ο ενδιαφερόμενος απευθύνεται στον ΔΕΔΔΗΕ ώστε να εγκριθεί η πρότασή του για να ξεκινήσει η διαδικασία εγκατάστασης.

3.5 Τοποθέτηση φωτοβολταϊκού συστήματος

Τα φωτοβολταϊκά συστήματα μπορούν να τοποθετηθούν σε οικόπεδα, στέγες (επίπεδες ή κεκλιμένες) ή προσόψεις κτιρίων. Παρέχονται σε διάφορα μεγέθη και μπορούν, για παράδειγμα να υποκαταστήσουν τμήμα μιας κεραμοσκεπής ή τα υαλοστάσια σε μια πρόσοψη ή να χρησιμοποιηθούν σαν φωταγωγοί



Σχήμα 3.6: Κτίριο με φωτοβολταϊκή πρόσοψη



Σχήμα 3.7: Ο πύργος CIS στο Manchester της Μ. Βρετανίας με φωτοβολταϊκή πρόσοψη

Παρέχονται σε διάφορα χρώματα και σε διάφορα πάχη διαφάνειας για ειδικές αρχιτεκτονικές εφαρμογές. Διατίθενται, επίσης, διαφανή φωτοβολταϊκά, για προσόψεις εμπορικών κτιρίων, με θερμομονωτικές ιδιότητες αντίστοιχες με αυτές των υαλοστασίων χαμηλής εκπεμπιμότητας που επιτυγχάνουν πέραν της ηλεκτροπαραγωγής και εξοικονόμηση ενέργειας 15-30% σε σχέση με κτίριο με συμβατικά υαλοστάσια. Ήδη παράγονται και φωτοβολταϊκά κεραμίδια που μπορούν να χρησιμοποιηθούν στη θέση των κανονικών κεραμιδιών (βλ. εικόνες 6 και 7)



Σχήμα 3.8: Εικόνα Ενσωμάτωση φωτοβολταϊκών σε κεραμίδια



Σχήμα 3.9: Φωτοβολταϊκό σε μορφή κεραμιδιού

Τα φωτοβολταϊκά μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν ως σκίαστρα πάνω από παράθυρα, σε πέργκολες και στέγαστρα χώρων στάθμευσης (βλ. εικόνες 8,9 και 10)



Σχήμα 3.10: Εικόνα Στάση λεωφορείου με ενσωματωμένα φωτοβολταϊκά στην οροφή.



Σχήμα 3.11: Ενσωμάτωση φωτοβολταϊκών σε στέγαστρα



Σχήμα 3.12: Ενσωμάτωση φωτοβολταϊκή σε περσίδες

Ωστόσο, πριν την τοποθέτηση των φωτοβολταϊκών ο ενδιαφερόμενος θα πρέπει να πραγματοποιήσει μια σειρά από ενέργειες. Το αρχικό στάδιο είναι να απευθυνθεί σε μια εταιρεία εγκατάστασης φωτοβολταϊκών, η οποία θα τον ενημερώσει για τα επόμενα βήματα που πρέπει να ακολουθήσει

3.5.1 Διαδικασία τοποθέτησης φωτοβολταϊκού συστήματος

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, όποιος επιθυμεί να τοποθετήσει ένα φωτοβολταϊκό σύστημα θα πρέπει αρχικά να απευθυνθεί σε μία εταιρεία εγκατάστασης φωτοβολταϊκών, η οποία θα του προμηθεύσει τον εξοπλισμό, αλλά και θα τον βοηθήσει σε όλα τα επόμενα βήματα (Δ.Ε.Η., τράπεζες, κ.λπ.). Προτιμάται η συνεργασία με οργανωμένες εταιρείες που εξειδικεύονται στην εγκατάσταση φωτοβολταϊκών συστημάτων. Η φωτοβολταϊκή εγκατάσταση θα λειτουργεί για πολλά χρόνια κι έτσι γίνεται φανερό ότι ο ενδιαφερόμενος θα πρέπει να επιλέξει μια εταιρεία με την οποία να μπορεί να επενδύσει στην αρμονική συνεργασία.

Τα σημεία που πρέπει να προσέξει ο ενδιαφερόμενος όταν έρθει σε επαφή με μια εταιρεία είναι:

- Η αξιοπιστία: τήρηση προδιαγραφών, δεσμεύσεων και υποσχέσεων.
- Ο επαγγελματισμός: σωστή εξυπηρέτηση, τήρηση χρονοδιαγραμμάτων.
- Η επιστημονική κατάρτιση και εμπειρία: επάρκεια σε τεχνικές γνώσεις και εμπειρία στις κατασκευές.
- Τα κατάλληλα μέσα και υποδομές: χρήση κατάλληλων μέσων και εργαλείων κατά τη μελέτη και την εγκατάσταση.

Η εταιρεία εγκατάστασης θα κάνει μια μελέτη και θα δώσει στον ενδιαφερόμενο μια οικονομική προσφορά, ανάλογα με το διαθέσιμο χώρο και τις δικές του απαιτήσεις.

Αυτή η μελέτη πρέπει να συμπεριλαμβάνει τις εξής πληροφορίες:

- Πόσα κιλοβάτ μπορούν να εγκατασταθούν στη στέγη, το δώμα ή το οικόπεδο.
- Πόσα πάνελ και πόσοι μετατροπείς θα χρησιμοποιηθούν, τί ονομαστικής ισχύος, τον κατασκευαστή και τη χώρα προέλευσής τους.
- Τον τύπο του συστήματος στήριξης και τον κατασκευαστή.
- Το χρόνο παράδοσης.
- Τον τύπο της καλωδίωσης.
- Τις εγγυήσεις όλων των παραπάνω.
- Την ετήσια απόδοση του συστήματος σε κιλοβατώρες.
- Το τελικό κόστος και όφελος του συστήματος.

Ο ενδιαφερόμενος θα πρέπει να δώσει προσοχή στις ακόλουθες λεπτομέρειες ώστε να επιλέξει σωστά τα υλικά που θα χρησιμοποιηθούν:

- επιλογή επώνυμων υλικών, από αξιόπιστες εταιρείες κατασκευής και δοκιμασμένα σε ό,τι αφορά τη λειτουργία και την απόδοσή τους
- υλικά με τις απαραίτητες πιστοποιήσεις, δηλαδή υλικά που οι πιστοποιήσεις τους να είναι σύμφωνες με τα διεθνή πρότυπα
- εγγυήσεις λειτουργίας και απόδοσης
- υλικά για τα οποία θα μπορεί να βρεθεί εύκολα τεχνική υποστήριξη, τώρα και στο μέλλον.

Ο ενδιαφερόμενος θα πρέπει επίσης να δώσει προσοχή στα επόμενα βασικά χαρακτηριστικά του προτεινόμενου φωτοβολταϊκού συστήματος:

- η μέγιστη ισχύς
- η υψηλή απόδοση
- η αντίσταση στις διακυμάνσεις θερμοκρασίας
- η καλύτερη εγγύηση λειτουργίας
- η αντίσταση στη φθορά
- η αξιοπιστία της εταιρείας κατασκευής
- οι δόκιμες διαστάσεις.

Είναι δύσκολο να επιτευχθεί ο βέλτιστος συνδυασμός όλων των παραπάνω, αλλά είναι δυνατό να επιλεγεί εκείνο που ταιριάζει καλύτερα στις ανάγκες του κάθε καταναλωτή. Μετά την επιλογή της κατάλληλης προσφοράς, ο ενδιαφερόμενος απευθύνεται στον ΔΕΔΔΗΕ ώστε να εγκριθεί η πρότασή του για να ξεκινήσει η διαδικασία εγκατάστασης

3.5.2 Τοποθέτηση σε κτίριο

Για την τοποθέτηση των φωτοβολταϊκών πλαισίων σε ένα κτίριο, υπάρχουν τέσσερις βασικοί τρόποι:

- α) τοποθέτηση σε κεκλιμένα στηρίγματα,
- β) τοποθέτηση σε ειδική βάση προσαρμοζόμενη στο εξωτερικό του κελύφους,
- γ) απ' ευθείας τοποθέτηση
- δ) ενσωμάτωση των φωτοβολταϊκών στο κέλυφος του κτιρίου.

Τα φωτοβολταϊκά πάνελ μπορούν να έχουν ή να μην έχουν πλαίσιο. Τα φωτοβολταϊκά πάνελ με πλαίσιο χρησιμοποιούνται σε κεκλιμένες στέγες ή σε επίπεδες οροφές. Αντίθετα, τα φωτοβολταϊκά πάνελ χωρίς πλαίσιο χρησιμοποιούνται σε προσόψεις ή τοιχώματα.

Με τα φωτοβολταϊκά σε στέγες η Ευρωπαϊκή Ένωση θέλησε να ωθήσει τους πολίτες της να αξιοποιήσουν την ηλιακή ενέργεια. Έτσι, ξεκίνησε το πρόγραμμα «Φωτοβολταϊκά σε Στέγες»

με πολύ ευνοϊκές ρυθμίσεις και αρκετά κίνητρα. Το πρόγραμμα αφορά στέγες και δώματα στα οποία μπορούν να τοποθετηθούν φωτοβολταϊκά συνολικής ισχύος 10 kW. Σε αυτό μπορούν να μετέχουν όλοι οι πολίτες και, προκειμένου για την Ελλάδα, να πωλούν το ρεύμα που παράγουν στη ΔΕΗ. Το κέρδος για τον κάτοχο φωτοβολταϊκών είναι διπλό. Εισπράττει χρήματα από τη ΔΕΗ για το ρεύμα που παράγει, ενώ δεν χρειάζεται να πληρώνει για το ρεύμα που καταναλώνει.

Δικαίωμα συμμετοχής στο πρόγραμμα «Φωτοβολταϊκά σε Στέγες» έχουν όλοι οι κάτοικοι της Ελλάδας, ιδιώτες ή μικρές επιχειρήσεις, με μοναδική προϋπόθεση να είναι ιδιοκτήτες του ακινήτου που θα τοποθετηθούν τα φωτοβολταϊκά και το ακίνητο τους να είναι σε σύνδεση με την ΔΕΗ. Ο ιδιώτης ή η επιχείρηση που ενδιαφέρεται να τοποθετήσει τα φωτοβολταϊκά πρέπει να απευθυνθεί στα γραφεία της ΔΕΗ της περιοχής του. Αργότερα, θα κληθεί να υπογράψει δύο συμβάσεις, η πρώτη αφορά την εγκατάσταση του μετρητή ρεύματος και η δεύτερη αφορά την πώληση του ρεύματος στη ΔΕΗ. Εξίσου σημαντικό για όσους αποφασίσουν να τοποθετήσουν φωτοβολταϊκά στις στέγες τους είναι ότι προς το παρόν δεν φορολογούνται για τα έσοδα που προκύπτουν από την πώληση του ρεύματος, λόγω του μικρού μεγέθους του συστήματος που δικαιούται το κάθε κτίριο. Εκτός από τα φωτοβολταϊκά σε στέγες μονοκατοικιών, τοποθετούνται και σε στέγες και δώματα πολυκατοικιών. Απαιτείται η σύμφωνη γνώμη όλων των ιδιοκτητών και η διαδικασία πραγματοποιείται από το διαχειριστή.

Η τοποθέτηση των φωτοβολταϊκών είναι μια επένδυση για το μέλλον αφού εξασφαλίζει κέρδη για τον κάτοχο του φωτοβολταϊκού συστήματος για 25 χρόνια τουλάχιστον. Ειδικά σε κάποιες περιοχές της Ελλάδας που επικρατεί ηλιοφάνεια τους περισσότερους μήνες του χρόνου, η απόδοση είναι εγγυημένη. Τα κέρδη εξαρτώνται από το μέγεθος της εγκατάστασης και όσο μεγαλύτερη είναι αυτή, τόσο πιο πολλά τα κέρδη.

Η τιμή πώλησης της κιλοβατώρας παρ' όλες τις προσαρμογές είναι κατά πολύ μεγαλύτερη από την τιμή που πληρώνουμε για ρεύμα. Η χρηματοδότηση από τις τράπεζες που αφορά το συγκεκριμένο πρόγραμμα, φτάνει έως και το 100%. Εφόσον φυσικά πληροί τις προϋποθέσεις για τραπεζικό δανεισμό. Σε αυτή την περίπτωση το κόστος για την τοποθέτηση των φωτοβολταϊκών συστημάτων είναι μηδαμινό για τον κάτοχο του ακινήτου, αφού άμεσα μπορεί από τα κέρδη του να αποπληρώσει το δάνειο.

3.5.3 Τοποθέτηση σε οικόπεδο

Η κατασκευή ενός φωτοβολταϊκού πάρκου μπορεί να πραγματοποιηθεί σε έκταση γης που δεν σκιάζεται, δεν είναι δασική, δεν φιλοξενεί αρχαιολογικά ευρήματα και δεν βρίσκεται σε ζώνη υψηλής παραγωγικότητας (βλ. εικόνα 11)



Σχήμα 3.13: Φωτοβολταϊκό πάρκο στην Καρδίτσα με ισχύ 2MW

Συγκεκριμένα, για την εγκατάσταση φωτοβολταϊκών και ηλιακών συστημάτων σε εκτός σχεδίου περιοχές:

- Εξασφαλίζεται ότι οι κατευθύνσεις του Ειδικού Πλαισίου Χωροταξικού Σχεδιασμού και Αειφόρου Ανάπτυξης για τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας εφαρμόζονται για το σύνολο των φωτοβολταϊκών σταθμών.
- Αποσαφηνίζονται οι περιπτώσεις στις οποίες απαιτείται έκδοση οικοδομικής άδειας στην περίπτωση εγκατάστασης φωτοβολταϊκών συστημάτων.
- Οι ελάχιστες αποστάσεις των εγκαταστάσεων και του συνοδού οικίσκου από τα όρια γηπέδου γίνονται ρεαλιστικότερες, επιτρέποντας την αξιοποίηση μεγαλύτερου ποσοστού κάλυψης γηπέδου.
- Καθορίζονται εκ νέου οι απολύτως αναγκαίες κατασκευές, με άρση του περιορισμού ύψους και εισάγεται κατάλληλη ρύθμιση ώστε να καθίσταται δυνατή η εγκατάσταση όσων οικίσκων εγκατάστασης ηλεκτρονικού εξοπλισμού είναι απαραίτητοι στις εγκαταστάσεις αυτές, ανεξαρτήτως της συνολικής εγκατεστημένης ισχύος τους.
- Ιδιαίτερη μέριμνα λαμβάνεται για θέματα ασφαλείας, δεδομένης της σημαντικής αύξησης του ορίου εγκατεστημένης ισχύος φωτοβολταϊκών σταθμών από 150kW σε 1MW που εισήγαγε ο πρόσφατος ν.3851/2010 σε συνδυασμό με την κατάργηση για τις μονάδες ηλεκτροπαραγωγής από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας της διαδικασίας έγκρισης εργασιών και αντικατάστασή της από έγκριση εργασιών μικρής κλίμακας

3.6 Αυτόνομα Φωτοβολταϊκά Συστήματα

Τα φωτοβολταϊκά πλαίσια μιας φωτοβολταϊκής συστοιχίας συνδέονται έτσι ώστε να σχηματίζουν παράλληλους κλάδους, που καταλήγουν, μέσω του φορτιστή, στον συσσωρευτή.

Προκειμένου να αποκλειστεί, αφενός η εκ φόρτιση του συσσωρευτή μέσω των φωτοβολταϊκών πλαισίων του κλάδου κατά τη διάρκεια της νύκτας, αφετέρου η κυκλοφορία ρευμάτων που επιβάλλουν ένας ή περισσότεροι κλάδοι στους υπόλοιπους, κάθε κλάδος εφοδιάζεται με μια δίοδο αντεπιστροφής ή απομόνωσης, τοποθετημένη στο αντίστοιχο κιβώτιο συνδέσεων του κλάδου. Αν οι γραμμές μεταφοράς από κάθε κλάδο καταλήγουν σε κεντρικό κιβώτιο, τότε σ' αυτό τοποθετούνται και οι δίοδοι αντεπιστροφής

Κατά τη διάρκεια μιας ημέρας, μέρος της ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει στη φωτοβολταϊκή συστοιχία, μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια.

Η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια:

- Είτε χρησιμοποιείται για την απευθείας τροφοδοσία των ηλεκτρικών συσκευών της εφαρμογής, οι οποίες αναφέρονται στη συνέχεια, ως καταναλώσεις ή φορτία (άμεση χρήση),
- Είτε αποθηκεύεται σε ηλεκτρικούς συσσωρευτές προκειμένου να χρησιμοποιηθεί κατά τη διάρκεια της νύκτας ή των περιόδων συννεφιάς (έμμεση χρήση).

Επίσης, η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια, είτε αξιοποιείται ως έχει, δηλαδή, ως ενέργεια συνεχούς ρεύματος, είτε μετατρέπεται σε ενέργεια εναλλασσόμενου ρεύματος, μέσω διάταξης που ονομάζεται inverter. Πάντως, στις περισσότερες περιπτώσεις ενδείκνυται η μετατροπή του συνεχούς ρεύματος της φωτοβολταϊκής συστοιχίας σε εναλλασσόμενο, δεδομένης της ευρείας χρήσης των συσκευών με τροφοδοσία 220 Volt.

Σε κάθε περίπτωση, η μετατροπή της ηλιακής ακτινοβολίας, σε ηλεκτρική και η μεταφορά της στο χώρο τελικής αξιοποίησής της, συνοδεύεται από απώλειες. Μέρος της μεταφερόμενης ηλεκτρικής ενέργειας μετατρέπεται σε εσωτερική ενέργεια των συσκευών, αυξάνοντας τη θερμοκρασία των καλωδίων και των ηλεκτρονικών διατάξεων του φωτοβολταϊκού συστήματος, αποβαλλόμενη, τελικά, προς το περιβάλλον.

Τα αυτόνομα φωτοβολταϊκά συστήματα έχουν εφαρμογή σε ποικίλες εγκαταστάσεις, όπως:

- α) φάροι και σηματοδούρες θαλασσιών οδών,
- β) τηλεπικοινωνίες (τηλεφωνικό δίκτυο δυσπρόσιτων / απομονωμένων περιοχών, αναμεταδότες τηλεόρασης, αναμεταδότες FM, αναμεταδότες μικροκυμάτων τηλεπικοινωνιών, τηλέφωνο εθνικών οδών, τηλεπικοινωνίες Ε. .),
- γ) μονάδες αναγνώρισης – προειδοποίησης (ανισόπεδες διαβάσεις σιδηροδρόμου, σημάνσεις οδών, φωτεινά σήματα),
- δ) μετρητικές διατάξεις, κ.λ.π. (σειсмоγράφοι, μετρητές κυκλοφορίας),
- ε) ηλεκτροδότηση κατοικιών, οικισμών, camping, κτηνοτροφικών μονάδων, κ.λ.π.,
- στ) άντληση – άρδευση, κ.ά.(βλ.εικόνες 12,13 και 14).Τα περισσότερα αυτόνομα συστήματα, στην Ελλάδα, προς το παρόν, βρίσκονται στο Άγιο Όρος .



Σχήμα 3.14: Εφαρμογή φωτοβολταϊκών σε σκάφος.



Σχήμα 3.15: Φωτοβολταϊκά σε πεζοδρόμιο



Σχήμα 3.16: Εφαρμογή φωτοβολταϊκών σε Αεροπλάνο

4^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ

“ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΠΟΥ ΠΡΟΚΥΠΤΟΥΝ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΣΥΝΔΕΣΗ Φ/Β ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΣΤΟ ΔΙΚΤΥΟ ”

4.1 Εισαγωγή

Κατά τα τελευταία χρόνια υπάρχει ένα συνεχώς αυξανόμενο ενδιαφέρον για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές, με μικρές μονάδες παραγωγής, ισχύος από μερικά kW μέχρι μερικές εκατοντάδες ή και χιλιάδες kW. Σημαντικό μέρος συμμετοχής σε αυτές τις μονάδες παίζουν οι φωτοβολταϊκές.

Για λόγους οικονομικούς και τεχνικούς οι παραπάνω μονάδες παραγωγής είναι συχνά αναγκαίο να λειτουργούν παράλληλα με τα δίκτυα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας συνδεδεμένες στο δίκτυο Χαμηλής Τάσης (Χ.Τ., 220/380 V) ή το δίκτυο Μέσης Τάσης (Μ.Τ., 15 ή 20 kV), ανάλογα με το μέγεθος τους.

Η σύνδεση των μονάδων αυτών στα δίκτυα ανεξάρτητα από το εάν ανήκουν στους καταναλωτές (πελάτες) των Επιχειρήσεων Διανομής ηλεκτρικής ενέργειας, όπως συχνά συμβαίνει, ή την ίδια την Ηλεκτρική Επιχείρηση, επηρεάζει σοβαρά την λειτουργία του δικτύου, τόσο σε ότι αφορά τις συνθήκες παροχής της ηλεκτρικής ενέργειας προς τους καταναλωτές (σταθερότητα και συνέχεια της τάσεως τροφοδοτήσεως) όσο και την ασφάλεια των καταναλωτών και του προσωπικού εκμεταλλεύσεως που εργάζεται στα δίκτυα.

Για το λόγο αυτό τόσο στις ΗΠΑ όσο και την Ευρώπη, το θέμα αποτελεί αντικείμενο εκτεταμένων μελετών, με στόχο την έκδοση κανονισμών που θα καθορίζουν τις συνθήκες υπό τις οποίες είναι επιτρεπτή η σύνδεση των μονάδων αυτών από τις Επιχειρήσεις Διανομής. Παράλληλα επιδιώκεται να καθοριστούν και τα στοιχεία εκείνα που πρέπει να λαμβάνουν υπόψη τους οι κατασκευαστές των μονάδων ώστε να επιτυγχάνεται η ομαλή λειτουργία τους σε παράλληλη σύνδεση με το δίκτυο. Ο καθορισμός μάλιστα των παραπάνω, διαπιστώθηκε ότι ήταν επείγον να γίνει επειδή, λόγω της άγνοιας των προβλημάτων που δημιουργούν οι μονάδες αυτές στα δίκτυα από την πλευρά των κατασκευαστών, υπήρξε μία αντίδραση, από την πλευρά των Επιχειρήσεων Διανομής ηλεκτρικής ενέργειας, όσον αφορά τη σύνδεση των μονάδων αυτών. Έτσι σήμερα η συνεργασία κατασκευαστών και διανομέων ηλεκτρικής ενέργειας αποτελεί την απαραίτητη προϋπόθεση για την διάδοση αυτών των μικρών μονάδων παραγωγής, η χρήση των οποίων προβλέπεται ότι θα αυξάνεται συνεχώς στο μέλλον. Τα δημιουργούμενα για το δίκτυο προβλήματα σχετίζονται άμεσα με τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του (τοπολογία , προστασία κλπ.) και τον τρόπο εκμεταλλεύσεώς του, που διαφέρουν από τη μια χώρα στην άλλη.

Στη συνέχεια ακολουθεί μία ανάλυση των προβλημάτων που δημιουργεί η σύνδεση των μονάδων αυτών στα δίκτυα διανομής και των μέτρων που λαμβάνονται για την αντιμετώπιση των, λαμβανομένων υπόψη και των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών των δικτύων διανομής.

4.2 Μη Τεχνικά Προβλήματα Συνδεδεμένων στο Δίκτυο Φ/Β Συστημάτων

Παρά το γεγονός ότι πολλά από τα τεχνικά προβλήματα έχουν ήδη επιλυθεί, υπάρχουν ακόμα εμπόδια που περιορίζουν τη ευρεία διάδοση χρήσης των φωτοβολταϊκών συστημάτων. Πρόκειται για τα εξής :

- Το υψηλό κόστος των φωτοβολταϊκών πλαισίων
- Το κόστος των συνιστάμενων επιμέρους μερών τους
- Η έλλειψη της συγκεκριμενοποίησης των απαιτήσεων για τα συνδεδεμένα συστήματα
- Η έλλειψη εκπαιδευμένου προσωπικού και επιθεωρητών για την εγκατάσταση

4.3 Τεχνικά Προβλήματα Συνδεδεμένων στο Δίκτυο Φ/Β Συστημάτων (Επίδραση Δικτύου στο Φωτοβολταϊκό Σύστημα)

4.3.1 Βυθίσεις Τάσης

Περιγραφή

Είναι μια ξαφνική μείωση της τάσης σε ένα σημείο στο ηλεκτρικό σύστημα που ακολουθείται από μια αποκατάσταση τάσης μετά από μια μικρή χρονική περίοδο, που διαρκεί από μερικούς κύκλους ως μερικά δευτερόλεπτα (Ορισμός κατά IEC).

Αλλιώς, είναι μια ξαφνική μείωση της τάσης τροφοδότησης σε μια τιμή της τάξης μεταξύ 90% και 1% της ονομαστικής τάσης U_c , που ακολουθείται από μια αποκατάσταση τάσης μετά από μια μικρή χρονική περίοδο. Συμβατικά η διάρκεια μιας βύθισης τάσης είναι μεταξύ 10ms και 1min. περίπου. Το βάθος μιας βύθισης τάσης ορίζεται ως η διαφορά μεταξύ της ελάχιστης RMS τάσης κατά τη διάρκεια της βύθισης τάσης και της ονομαστικής τάσης. Αλλαγές τάσης που δεν μειώνουν την τάση τροφοδότησης σε ποσοστό λιγότερο από 90% της ονομαστικής τάσης U_c δεν θεωρούνται βυθίσεις (Ορισμός κατά EN).

Οι βασικές αιτίες των βυθίσεων τάσης είναι ξαφνικές και μεγάλες αυξήσεις της ροής ρεύματος μέσω των σύνθετων αντιστάσεων των συστημάτων, που οδηγούν σε μεγάλες πτώσεις τάσης. Αυτή η ξαφνική αλλαγή μπορεί να έχει δύο πηγές προέλευσης: βραχυκυκλώματα και διακοπτική λειτουργία μεγάλων φορτίων (π.χ. επαγωγική μηχανή που ξεκινά), με τη πρώτη να προκαλεί τις σημαντικότερες επιπτώσεις.

Οι βυθίσεις τάσης και οι σύντομες διακοπές θεωρούνται ευρέως ως οι πιο σοβαρές

διαταραχές ποιότητας ισχύος λόγω της επίδρασής τους σε ευαίσθητες διαδικασίες (εσφαλμένη λειτουργία εξοπλισμού).

Γενικά, οι βυθίσεις τάσης χαρακτηρίζονται από το πλάτος τους (που εκφράζεται, για παράδειγμα, σε ποσοστό επί τοις εκατό της τάσης) και της διάρκειας (σε κύκλους ή milliseconds). Η πλειοψηφία των βυθίσεων τάσης έχει ένα πλάτος περίπου 80% και διάρκεια 4 έως 10 κύκλους. Εντούτοις, οι βυθίσεις τάσης είναι μάλλον σύνθετα φαινόμενα: το σημείο επάνω στο κύμα της βύθισης/αποκατάστασης τάσης και το άλμα γωνίας φάσης είναι επίσης παράμετροι που επηρεάζουν.

Η ευαισθησία του γενικού ηλεκτρικού εξοπλισμού στις βυθίσεις τάσης καθορίζεται από τα επιτρεπτά όρια τάσεως του δικτύου, τα οποία καθορίζουν την περιοχή (πλάτος - διάρκεια) στην οποία ο εξοπλισμός μπορεί να λειτουργήσει.

Για τις κατανεμημένες γεννήτριες, όπως οι φ/β γεννήτριες, εκτός από τις πιθανές εσωτερικές επιπτώσεις που μπορεί να έχουν οι βυθίσεις τάσης (π.χ. υπερένταση, αστάθεια), μπορούν επίσης να προκαλέσουν διαταραχές στο δίκτυο μέσω της επίδρασής τους στη κατανεμημένη γεννήτρια (εξωτερικές επιπτώσεις). Ένα πιθανό πρόβλημα είναι η απώλεια παραγωγής ως αποτέλεσμα αποσύνδεσης ενός σημαντικού ποσού της κατανεμημένης παραγωγής μετά από μια βύθιση τάσης, ιδιαίτερα όταν έχουμε μεγάλο ποσοστό διείσδυσης κατανεμημένης παραγωγής, δηλαδή μεγάλο ποσοστό συνδεδεμένων στο δίκτυο φωτοβολταϊκών συστημάτων. Παραδείγματος χάριν, σε επίπεδα μεταφοράς, μεγάλα φωτοβολταϊκά πάρκα μπορεί να έχουν επιπτώσεις στην ευστάθεια του δικτύου σε περίπτωση ξαφνικής αποσύνδεσης λόγω μιας διαταραχής του δικτύου. Στο επίπεδο διανομής οι εγκαταστάσεις κατανεμημένης παραγωγής είναι πολύ μικρότερες αλλά περισσότερο διαδεδομένες, επομένως μια διαταραχή στο επίπεδο μεταφοράς μπορεί να διαδοθεί πέρα από ένα ευρύ τμήμα της περιοχής και να οδηγήσει σε απώλεια ενός ουσιαστικού μέρους της κατανεμημένης φωτοβολταϊκής παραγωγής.

Αυτό οδηγεί στην ιδέα που λέει πως όταν η διείσδυση της κατανεμημένης παραγωγής αυξάνεται, η φιλοσοφία της αποσύνδεσης «στη πρώτη ένδειξη προβλήματος» δεν είναι πλέον αποδεκτή.

Θεωρητικά Στοιχεία

Έχουν γίνει προσομοιώσεις στα πλαίσια του προγράμματος DISPOWER. Το πρόγραμμα αποτελεί μια κοινοπραξία από 38 διαφορετικούς συνεργάτες (επιχειρήσεις ηλεκτρισμού, ερευνητικά κέντρα, εταιρείες και πανεπιστήμια από 11 ευρωπαϊκές χώρες). Κύριος στόχος του προγράμματος ήταν η απάντηση στο ερώτημα: «Πώς γίνεται να αυξηθεί η κατανεμημένη παραγωγή και να ενταχθεί στα ήδη υπάρχοντα ηλεκτρικά δίκτυα χωρίς να χαθεί η αξιοπιστία, η ασφάλεια και η ποιότητά τους». Έτσι λοιπόν, σε ένα ερευνητικό έργο ενός ασθενούς δικτύου (στο νησί της Κύθνου), όπου μελετήθηκε η συμπεριφορά του δικτύου όταν αρκετές ανανεώσιμες πηγές , όπως φ/β συστήματα και ανεμογεννήτριες, ενσωματώθηκαν στα διάφορα σημεία του. Ο ετήσιος μέσος όρος του φορτίου που εξυπηρετήθηκε από το δίκτυο ήταν περίπου 600 kW, με ισχυρές εποχιακές διακυμάνσεις. Η τοπολογία του δικτύου ήταν ακτινική και περιλαμβάνει, εκτός από τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, πέντε γεννήτριες diesel (4 MW συνολικά) και εγκαταστάσεις μπαταριών. Εκτελέστηκε επίσης έλεγχος συχνότητας και τάσης με τη χρησιμοποίηση ψευδοφορτίου και εξοπλισμού μετατόπισης φάσης, αντίστοιχα.

Ένα από τα εξεταζόμενα σενάρια περιλάμβανε την εγκατάσταση 10 φ/β συστημάτων, κατανεμημένα πέρα από το δίκτυο του νησιού. Η μέγιστη ισχύς που μπορεί να εγχυθεί από κάθε

φωτοβολταϊκό σύστημα είναι 130 kWp (1.3 MWp συνολικά). Μια ανάλυση ροής φορτίου διεξαγόταν για τα διαφορετικά επίπεδα ισχύος που εγγέονταν από τα φ/β συστήματα. Οι προσομοιώσεις στα ζητήματα μόνιμης κατάστασης έδωσαν τα ακόλουθα αποτελέσματα:

- Για δίκτυο με χαμηλό φορτίο, η παρατηρηθείσα τάση ήταν σύμφωνα με όρια που ορίζονται από τα πρότυπα EN- 50160 ($\pm 10\%$).
- Εξετάζοντας την κατάσταση με υψηλό φορτίο, παρατηρήθηκε ότι η τάση ήταν κάτω από την ονομαστική τιμή (τα υψηλά ρεύματα φορτίου οδήγησαν σε μεγάλες πτώσεις τάσης). Συνεχείς αυξήσεις στην ισχύ που εγγέεται από τα φ/β συστήματα οδήγησαν σε μια βελτίωση της μορφής τάσης και το μέγεθος των πτώσεων τάσης μειώθηκε.

Αναλύθηκε η ευστάθεια του δικτύου, με την έρευνα των επιπτώσεων μιας ουσιαστικής διείσδυσης φ/β συστημάτων πάνω στη συμπεριφορά τάσης του δικτύου. Η αποσύνδεση των καταναμημένων φ/β μονάδων λόγω της προστασίας που ενεργοποιείται όταν έχουμε τάση κάτω από κάποιο όριο, προσομοιώθηκε για διάφορα σενάρια διείσδυσης (μέχρι 33%), κατά τη διάρκεια τριφασικών σφαλμάτων. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι το δίκτυο έδειξε ευσταθή συμπεριφορά παρέχοντας την στρεφόμενη εφεδρεία που υπήρχε. Εντούτοις, λόγω του υψηλού κόστους της ενέργειας που παρήχθη από τις γεννήτριες diesel, βρέθηκε ότι θα ήταν ιδιαίτερα επιθυμητό να επιτευχθεί μείωση αυτής της εφεδρείας χωρίς επίπτωση βέβαια στη λειτουργία των συστημάτων ισχύος.

Προτάθηκε μια λύση στο προηγούμενο πρόβλημα, με τη βοήθεια χρησιμοποίησης των ηλεκτρονικών αντιστροφών φωτοβολταϊκής ισχύος, οι οποίοι συνεχίζουν να λειτουργούν παρά τη διαταραχή ή επανασυνδέονται γρήγορα μετά τη διαταραχή. Αυτή η επιλογή προσομοιώθηκε επίσης και τα αποτελέσματα έδειξαν ότι, με αυτούς τους αντιστροφείς, είναι δυνατό να ενεργοποιηθεί το σύστημα ισχύος με μια χαμηλότερη στρεφόμενη εφεδρεία και χωρίς οποιοδήποτε κίνδυνο ασφάλειας.

Πειραματικά Στοιχεία (Ευαισθησία των Αντιστροφών του Φ/Β Συστήματος)

Πραγματοποιήθηκαν πειραματικές δοκιμές στα πλαίσια του προγράμματος DISPOWER για αντιστροφείς (αντιπροσωπευτικοί της ευρωπαϊκής αγοράς: 12 μονοφασικές μονάδες με διαφορετικό σχεδιασμό, χαμηλής συχνότητας μετασχηματιστή, υψηλής συχνότητας μετασχηματιστή και χωρίς μετασχηματιστή) και αποκάλυψαν τα ακόλουθα αποτελέσματα:

- Οι περισσότεροι αντιστροφείς εμφανίστηκαν να είναι πολύ ευαίσθητοι στις βυθίσεις τάσης (δεν αντιστάθηκαν σε γεγονότα με μεγαλύτερο πλάτος από 50% με διάρκεια 40ms, 70% με 100ms).
- Γενικά, οι αντιστροφείς εμφανίστηκαν να είναι πολύ ευαίσθητοι στα άλματα γωνίας φάσης: στις περισσότερες περιπτώσεις, απενεργοποιήθηκαν για ένα άλμα της τάξης των 5° (άλμα γωνίας που ερμηνεύεται από τον αντιστροφέα ως μια απόκλιση συχνότητας).
- Σε μερικές περιπτώσεις, παρατηρήθηκαν βυθίσεις τάσης με σημαντικότερες επιπτώσεις στη λειτουργία των αντιστροφών (όχι μόνο αποσύνδεση). Ένα μάλλον μεγάλο μέρος των αντιστροφών παρουσίασε αιχμές ρεύματος μετά την αποκατάσταση της τάσης.
- Η ευστάθεια του βρόχου ελέγχου ρεύματος επηρεάστηκε επίσης σε μερικές περιπτώσεις (προβλήματα ελέγχου ρεύματος: διακυμάνσεις ρεύματος υψηλής συχνότητας ή χαμηλής συχνότητας).
- Η ικανότητα λειτουργίας παρά τη διαταραχή ή γρήγορης επανασύνδεσης μετά τη διαταραχή, που όπως είδαμε λειτουργεί ενάντια στη βύθιση τάσης παρουσιάστηκε μόνο στο 25% των αντιστροφών, που είχαν γρήγορο βρόχο ελέγχου ρεύματος. Σε μια περίπτωση ένας αντιστροφέας αύξησε το ρεύμα εξόδου του για να κρατήσει τη ισχύ εξόδου σταθερή, παρουσιάζοντας την ικανότητα να μετριάσει τις βυθίσεις τάσης.
- Η υψηλή ευαισθησία των αντιστροφών στις βυθίσεις τάσης μπορεί να έχει αρνητική επίπτωση στην απόδοση των αντιστροφών (άρα και των φ/β εγκαταστάσεων), στη διάρκεια ζωής και τελικά στο ίδιο το δίκτυο. Ο έλεγχος της γραμμής διανομής είναι καθοριστικός και επηρεάζει την ευαισθησία των αντιστροφών στις βυθίσεις τάσης.

Πειραματικές δοκιμές πραγματοποιήθηκαν επίσης στην Ιαπωνία σε ένα φωτοβολταϊκό σύστημα 200 kWp. Μια μέγιστη πτώση 40% με μια 0.2 δευτερόλεπτα διάρκεια δημιουργήθηκε σε μια γραμμή διανομής και παρατηρήθηκε η λειτουργία κάθε φ/β συστήματος παραγωγής κατά τη σύνδεσή του στο δίκτυο:

- Φ/β συστήματα που είχαν στιγμιαίο έλεγχο ρεύματος αντιστροφέα συνέχισαν τη σταθερή λειτουργία τους χωρίς παραγωγή υπερεντάσεων.
- Φ/β συστήματα που δεν είχαν αυτήν την λειτουργία (ήταν τύπου ελέγχου τάσης) παρήγαγαν υπερεντάσεις και η λειτουργία διακόπηκε από τους ηλεκτρονόμους υπερεντάσεως.

Πειραματικές μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν σε ένα φ/β σύστημα 100 kW στην Αυστρία αποκάλυψαν τη σημασία ενός κατάλληλου σχεδιασμού προστασίας μέσω αποσύζευξης των φ/β συστημάτων. Τα αυστηρά καθορισμένα όρια λειτουργίας ή ένας ακατάλληλος σχεδιασμός μπορούν όχι μόνο να οδηγήσουν σε προβλήματα σχετικά με την αξιόπιστη λειτουργία των εγκαταστάσεων αλλά επιπλέον είναι πηγή ποιοτικών διαταραχών ισχύος προς το δίκτυο.

Ανάγκες για Τυποποίηση

Οι μελλοντικές τεχνικές απαιτήσεις για τη σύνδεση κατανεμημένης (φωτοβολταϊκής) παραγωγής πρέπει να εξετάσουν ζητήματα ανοσοποίησης. Η εξέταση της γκρίζας ζώνης μεταξύ των απαιτήσεων ανοσοποίησης και της αποσύνδεσης, θα συνέβαλλε θετικά στην ασφάλεια και τους ποιοτικούς στόχους χωρίς επιβολή σημαντικών πρόσθετων περιορισμών στον εξοπλισμό της κατανεμημένης φωτοβολταϊκής παραγωγής.

Από αυτή την άποψη, πρέπει να αντιμετωπιστεί η έλλειψη τυποποιήσεων ρεύματος αντιστροφών στη περίπτωση προστασίας μέσω αποσύζευξης ενάντια στις βυθίσεις τάσης. Αυτό μπορεί να γίνει με:

- στιγμιαία μέτρηση της RMS τάσης που οδηγεί σε άμεσο σήμα ενεργοποίησης μετά τη βύθιση τάσης και επομένως, αποσύνδεση του αντιστροφέα ,
- μέτρηση της RMS τάσης που οδηγεί σε ένα σήμα ενεργοποίησης, το οποίο αποστέλλεται μόνο όταν η RMS τάση παραμένει κάτω από ένα κατώφλι. Αυτό σημαίνει ότι ο αντιστροφέας μπορεί να ανεχτεί βυθίσεις τάσης μέχρι αυτό το όριο.

Αυτό αποδεικνύει πώς διαφορετικές εφαρμογές ελέγχου των γραμμών διανομής από τους αντιστροφείς μπορεί να έχει μεγάλη επίπτωση στην ευαισθησία τους όταν συμβαίνουν διαταραχές στο δίκτυο.

4.3.2 Ανυψώσεις (Swell) Τάσης

Περιγραφή

Η ανύψωση τάσης είναι μια προσωρινή αύξηση της τάσης σε ένα σημείο στο ηλεκτρικό σύστημα επάνω από ένα κατώτατο όριο, χαρακτηριστικά γύρω στο 1.1 p.u. Όπως οι βυθίσεις τάσης, χαρακτηρίζονται και αυτές συνήθως από το πλάτος και τη διάρκειά τους.

Οι ανυψώσεις τάσης συσχετίζονται συνήθως με τις καταστάσεις σφάλματος των ηλεκτρικών συστημάτων (π.χ. προσωρινά η τάση αυξάνεται στις φάσεις που δεν έγινε το σφάλμα κατά τη διάρκεια μονοφασικών σφαλμάτων προς γη). Επίσης μπορεί να προκληθούν λόγω της διακοπτικής λειτουργίας (σύνδεση - αποσύνδεση) μεγάλων φορτίων ή την ενεργοποίηση μεγάλης συστοιχίας πυκνωτών.

Η δριμύτητα μιας ανύψωσης τάσης κατά τη διάρκεια μιας σφαλματικής κατάστασης είναι μια συνάρτηση της θέσης του σφάλματος, της σύνθετης αντίστασης των συστημάτων και της γείωσης. Οι ανυψώσεις τάσης είναι λιγότερο κοινές από τις βυθίσεις τάσης, ειδικά για τα γειωμένα συστήματα.

Πειραματικά Στοιχεία (Ευαισθησία των Αντιστροφών του Φ/Β Συστήματος)

Πειραματικές δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν στα πλαίσια του προγράμματος

DISPOWER για αντιστροφείς (αντιπροσωπευτικοί της ευρωπαϊκής αγοράς: 12 μονοφασικές μονάδες με διαφορετικό σχεδιασμό, χαμηλής συχνότητας μετασχηματιστή, υψηλής συχνότητας μετασχηματιστή και χωρίς μετασχηματιστή) αποκάλυψαν τα ακόλουθα αποτελέσματα όταν η τάση ανυψώνεται μέχρι το 120% της τάσης του δικτύου:

- Οι αντιστροφείς που δοκιμάστηκαν αποδείχθηκαν πολύ ευαίσθητοι στις ανυψώσεις τάσης. Η μέθοδος προστασίας μέσω αποσύζευξης (π.χ. προστασία υπέρτασης) έπαιξε αποφασιστικό ρόλο στη συμπεριφορά των συσκευών.
- Σε μερικές περιπτώσεις, ο έλεγχος ρεύματος των αντιστροφέων ήταν έντονα επηρεασμένος από μικρή τάση ανύψωσης (ενώ δεν επηρεαζόταν σε περίπτωση βύθισης τάσης).

Ανάγκες για Τυποποίηση

Οι μελλοντικές τεχνικές απαιτήσεις για τη σύνδεση της κατανεμημένης φωτοβολταϊκής παραγωγής πρέπει να εξετάσουν ζητήματα ανοσοποίησης. Η εξέταση της γκρίζας ζώνης μεταξύ των απαιτήσεων ανοσοποίησης και της αποσύνδεσης, θα συνέβαλλε θετικά στην ασφάλεια και τους ποιοτικούς στόχους χωρίς επιβολή σημαντικών πρόσθετων περιορισμών στον εξοπλισμό της κατανεμημένης φωτοβολταϊκής παραγωγής. Απαιτούνται νέες τυποποιήσεις ρεύματος για τους αντιστροφείς ώστε να επιτευχθεί προστασία απόξευξης ενάντια στις ανυψώσεις τάσης.

4.3.3 Βραχυκυκλώματα σε Ηλεκτρικές Εγκαταστάσεις

Περιγραφή

Τα βραχυκυκλώματα στις ηλεκτρικές εγκαταστάσεις αντιπροσωπεύουν μια έντονη κατάσταση καταπόνησης για τον εξοπλισμό που είναι συνδεδεμένος με τον ίδιο κλάδο όπου έχει συμβεί το βραχυκύκλωμα . Πρόβλημα δημιουργείται εάν το βραχυκύκλωμα διακόπτεται από μια ασφάλεια ή από έναν αυτόματο διακόπτη . Σε αυτήν την περίπτωση, ο εξοπλισμός που συνδέεται στον ίδιο κλάδο δέχεται αρχικά μια έντονη βύθιση τάσης (λόγω του βραχυκυκλώματος), που ακολουθείται αμέσως από μια παροδική υπέρταση (ως αποτέλεσμα της διακοπής του βραχυκυκλώματος από τον εξοπλισμό προστασίας).

Τα χαρακτηριστικά των παροδικών υπερτάσεων εξαρτώνται από τη σύνθετη αντίσταση του δικτύου, το μέγιστο ρεύμα βραχυκυκλώματος , τα χαρακτηριστικά διακοπής των διατάξεων προστασίας και τις χωρητικότητες που είναι παρούσες στο δίκτυο. Ο πιο σημαντικός παράγοντας που σχετίζεται με αυτά είναι το ενεργειακό περιεχόμενό τους, το οποίο καθορίζεται από την ενέργεια που αποθηκεύεται στα επαγωγικά στοιχεία του δικτύου. Όσον αφορά τα όργανα προστασίας, οι θερμικοί μαγνητικοί διακόπτες παρουσιάζουν υπερτάσεις χωρίς κανένα ιδιαίτερο ενδιαφέρον (αν και το μέγιστο ρεύμα μέσω αυτών μπορεί να φθάσει πολύ υψηλές τιμές), ενώ χαρακτηριστικές υπερτάσεις που προκαλούνται από ασφάλειες είναι της τάξης του 1 – 1.5kV.

Θεωρητικά Στοιχεία

Οι συνέπειες των βραχυκυκλωμάτων για τους αντιστροφείς είναι:

- Η βύθιση τάσης μετά από το βραχυκύκλωμα οδηγεί σε υψηλό du/dt και σχετικά μεγάλες υπερεντάσεις, σε περίπτωση που δεν υπάρχει κανένας περιορισμός ρεύματος στον αντιστροφέα. Ο πραγματικός αντίκτυπος αυτών των υπερεντάσεων εξαρτάται κυρίως από τον σχεδιασμό του υλικού και την στρατηγική ελέγχου που χρησιμοποιείται.
- Διακοπή του ρεύματος βραχυκυκλώματος με τη βοήθεια οργάνων προστασίας (υψηλό di/dt) θα οδηγήσει σε εκφόρτιση και αποθήκευση της ενέργειας στις χωρητικότητες. Αυτό οδηγεί σε μια αιφνίδια μεταβολή τάσης που θα φανεί επίσης από τον αντιστροφέα και επομένως θα προκαλέσει καταπόνηση στα ηλεκτρονικά στοιχεία του κυκλώματος εξόδου.

Πειραματικά Στοιχεία (Εναισθησία των Αντιστροφέων του Φ/Β Συστήματος)

Πραγματοποιήθηκαν πειραματικές δοκιμές στα πλαίσια του προγράμματος DISPOWER για αντιστροφείς (αντιπροσωπευτικοί της ευρωπαϊκής αγοράς: 8 μονοφασικές μονάδες με διαφορετικό σχεδιασμό, χαμηλής συχνότητας μετασχηματιστή, υψηλής συχνότητας μετασχηματιστή και χωρίς μετασχηματιστή). Οι μονάδες που χρησιμοποιήθηκαν δοκιμάστηκαν κάτω από διαφορετικές επαγωγικές αντιδράσεις δικτύου και δημιούργησαν αιφνίδιες μεταβολές στην τάση εξόδου ισοδύναμες με εκείνες που εμφανίζονται στις ασφάλειες ταχείας τήξεως. Τα πιο σχετικά αποτελέσματα ήταν τα ακόλουθα :

- Σχετικά με τις υπερεντάσεις, μετρήθηκαν τιμές μέχρι και 20 φορές την ονομαστική έξοδο, που σε μερικές περιπτώσεις δημιούργησε έντονη καταπόνηση στις διατάξεις που φέρουν αυτά τα ρεύματα.
- Σχετικά με την εσωτερική προστασία υπέρτασης των αντιστροφέων, η πιο συνηθισμένη μέθοδος ήταν απλά η χρήση varistors, αντίσταση ανάλογη της τάσης, (σε μερικές συσκευές επίσης χρησιμοποιούνται πρόσθετα στοιχεία προστασίας). Με τη συνηθισμένη προστασία, η αιχμή υπέρτασης περιορίστηκε περίπου 2 έως 2.5 φορές της αιχμής ονομαστικής τάσης δικτύου. Εντούτοις, στις χαμηλές τάσεις των απαγωγέων υπέρτασης, απορροφούνται υψηλές ενέργειες και δημιουργούνται υψηλές υπερεντάσεις.

Η ανάλυση των ατελειών των αντιστροφέων δίνει έμφαση σε μερικούς βασικούς παράγοντες για μια κατάλληλη εφαρμογή της προστασίας ενάντια στα βραχυκυκλώματα:

- Ο έλεγχος ρεύματος της γέφυρας εξόδου των αντιστροφέων έχει μια βασική επίπτωση επάνω στη συμπεριφορά της κατά τη διάρκεια των καταστάσεων βραχυκυκλώματος. Μια κατάλληλη στρατηγική ελέγχου δεν πρέπει να δημιουργεί πρόσθετες υπερεντάσεις κατά τη διάρκεια των γρήγορων πτώσεων της τάσης δικτύου ή κατά την αποκατάσταση της τάσης μετά από ένα βραχυκύκλωμα.
- Η τάση ανοχής όλων των στοιχείων των αντιστροφέων που είναι άμεσα συνδεδεμένα με το δίκτυο πρέπει να συνεργαστεί κατάλληλα με την τάση περιορισμού των οργάνων προστασίας που χρησιμοποιούνται (π.χ. varistors). Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό για τον έλεγχο, τα όργανα μέτρησης της συσκευής και την μονάδα μετατροπής ισχύος.
- Ειδική προσοχή πρέπει να ληφθεί για να εξασφαλιστεί ότι η προστασία υπέρτασης

δουλεύει κατά τη διάρκεια όλων των καταστάσεων λειτουργίας. Εάν τα όργανα προστασίας ελέγχουν π.χ. τη μονάδα μετατροπής ισχύος, μπορεί να συμβούν άσχημα αποτελέσματα εάν η μονάδα μετατροπής ισχύος δεν είναι συνδεδεμένη με το δίκτυο (παραδείγματος χάριν κατά τη διάρκεια της νύχτας).

- Δεν φαίνεται να είναι απαραίτητοι ιδιαίτερα πολύπλοκοι μέθοδοι προστασίας για διατάξεις που χρησιμοποιούνται σε οικιακές εφαρμογές. Εντούτοις, σε ειδικές περιπτώσεις και στα πλαίσια λειτουργίας σε έντονες καιρικές συνθήκες, μπορεί να είναι απαραίτητη πρόσθετη εξωτερική προστασία.

Ανάγκες για Τυποποίηση

Συγκεκριμένες τυποποιήσεις για τους φ/β αντιστροφείς πρέπει να περιλάβουν τη δοκιμή κάτω από ρεαλιστικές συνθήκες βραχυκυκλώματος στην AC πλευρά.

4.3.4 Ανώτερες Αρμονικές

Περιγραφή

Η τάση δικτύου στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας δεν είναι ποτέ ένα καθαρό ημίτονο. Διαταραχές με μορφή ανώτερων αρμονικών και ενδιάμεσων αρμονικών (interharmonics) τάσεων που υπερτίθενται όσον αφορά την τάση δικτύου είναι μερικά από τα κύρια προβλήματα ποιότητας ισχύος στη μόνιμη κατάσταση.

- Οι ανώτερες αρμονικές (κατά IEEE) είναι ημιτονοειδείς τάσεις ή ρεύματα που έχουν συχνότητες που είναι ακέραια πολλαπλάσια της συχνότητας στην οποία το σύστημα τροφοδοσίας είναι σχεδιασμένο να λειτουργεί (που αποκαλείται θεμελιώδης συνιστώσα, συνήθως 50 Hz ή 60 Hz)
- Οι ενδιάμεσες αρμονικές (κατά IEC) είναι τάσεις ή ρεύματα των οποίων οι συχνότητες δεν είναι ακέραια πολλαπλάσια της θεμελιώδους. Μπορούν να εμφανιστούν ως διακριτές συχνότητες ή ως φάσμα ευρείας ζώνης.

Οι κύριες πηγές αρμονικών που υπάρχουν στα δίκτυα είναι μη γραμμικά φορτία, που κυρίως παρουσιάζονται στα επίπεδα Μ.Τ και Χ.Τ του συστήματος. Οι αρμονικές τάσεις που υπερτίθενται στη θεμελιώδη τάση δικτύου έχουν την προέλευσή τους στα αρμονικά ρεύματα που προκαλούνται από αυτά τα φορτία. Παραδείγματα πηγών αρμονικών ρευμάτων στα δίκτυα είναι: παροχές ηλεκτρικού ρεύματος με διακοπτική λειτουργία, λαμπτήρες φθορισμού, συσκευές αδιάλειπτης παροχής ηλεκτρικού ρεύματος, κυκλο-μετατροπείς, φορτία ελεγχόμενης φασικής γωνίας, στατικοί αντισταθμιστές VAR και μετασχηματιστές. Επίσης, γραμμικά φορτία (που αποτελούνται από αντιστάτες, πυκνωτές ή/και πηνία) μπορούν να γίνουν πηγή αρμονικών ρευμάτων όταν λειτουργούν κάτω από καταστάσεις παραμορφωμένης τάσης. Η παραμόρφωση στο ρεύμα μπορεί να είναι πολύ υψηλότερη από τη παραμόρφωση στη τάση: τα επίπεδα παραμόρφωσης αρμονικού ρεύματος επάνω από 100% εμφανίζονται συχνά για μονοφασικά φορτία, αλλά αρμονική παραμόρφωση τάσης επάνω από 8% είναι πολύ απίθανο να εμφανιστεί.

Σχετικά με τις ενδιάμεσες αρμονικές στα δίκτυα, μπορούν να δημιουργηθούν όποτε

υπάρχει διαμόρφωση πλάτους του ρεύματος φορτίου (π.χ. παροδικές αλλαγές στη κατάσταση λειτουργίας των φορτίων), όταν η διακοπτική λειτουργία των στατικών μετατροπέων που χρησιμοποιούν ημιαγωγικά στοιχεία δεν είναι συγχρονισμένη με τη συχνότητα δικτύου ή όταν οι μετασχηματιστές είναι σε κατάσταση κορεσμού. Χαρακτηριστικές πηγές ενδιάμεσων αρμονικών είναι: κυκλομετατροπείς, στατικοί μετατροπείς συχνότητας, επαγωγικοί κινητήρες, ανεμογεννήτριες και φορτία με έλεγχο αριθμού των περιόδων.

Οι αρμονικές και οι ενδιάμεσες αρμονικές ασκούν ένα ευρύ φάσμα επιδράσεων στον εξοπλισμό και τους «πελάτες» του δικτύου (συμπεριλαμβανομένων των φορτίων και των γεννητριών). Τα χαρακτηριστικά προβλήματα είναι μεταβολές στην τάση RMS και διακύμανση τάσης, θερμικές επιπτώσεις στους μετασχηματιστές, τις γεννήτριες και τις μηχανές (αυξημένες απώλειες), διαταραχές ηλεκτρονικού εξοπλισμού, ακουστικές διαταραχές, υπερφόρτωση παθητικών φίλτρων, διαταραχή των συστημάτων προστασίας και των προστατευτικών ηλεκτρονόμων, αλληλεπίδραση με τα συστήματα επικοινωνιών (τηλέφωνο, σήματα μετάδοσης ελέγχου), καταπόνηση στα μονωτικά υλικά, κορεσμός μετασχηματιστών και συντονισμοί στο σύστημα.

Θεωρητικά Στοιχεία

Τα στοιχεία των αντιστροφών κατανεμημένης φωτοβολταϊκής παραγωγής που είναι ενδεχομένως ευαίσθητα στις διαταραχές τάσης (αρμονικές και ενδιάμεσες αρμονικές) είναι τα ακόλουθα:

- Μονάδα ελέγχου ρεύματος και στάδιο μετατροπής ισχύος. Ανάλογα με τη στρατηγική ελέγχου αντιστροφών, η μορφή της τάσης δικτύου μπορεί να έχει ουσιαστική επίπτωση στον έλεγχο ρεύματος και έτσι στη μορφή (παραμόρφωση) του ρεύματος εξόδου. Επομένως, υψηλά επίπεδα παραμόρφωσης τάσης μπορεί να προκαλέσουν προβλήματα στον έλεγχο του καθαρού, ημιτονοειδούς ρεύματος εξόδου.
- Διεπαφή και προστασία δικτύου. Οι ενδιάμεσες αρμονικές που είναι παρούσες στην τάση δικτύου προκαλούν διακυμάνσεις στη τάση και τη συχνότητα δικτύου: εάν οποιαδήποτε από αυτές τις παραμέτρους είναι εκτός πεδίου τιμών, η ενσωματωμένη προστασία αποσυνδέει τους αντιστροφείς από το δίκτυο. Ιδιαίτερα θα επηρεαστούν μέθοδοι που στηρίζονται σε υψηλή ακρίβεια της διέλευσης του σήματος τάσης από το μηδέν (έλεγχος συχνότητας και σύνθετης αντίστασης).

Πειραματικά Στοιχεία (Ευαισθησία των Αντιστροφών του Φ/Β Συστήματος)

Πειραματικές δοκιμές έγιναν στα πλαίσια του προγράμματος DISPOWER για αντιστροφείς (αντιπροσωπευτικοί της ευρωπαϊκής αγοράς: 8 μονοφασικές μονάδες με διαφορετικό σχεδιασμό, χαμηλής συχνότητας μετασχηματιστή, υψηλής συχνότητας μετασχηματιστή και χωρίς μετασχηματιστή).

Οι δοκιμές βασίστηκαν στα ευρωπαϊκά πρότυπα που εξετάζουν τις αρμονικές και τις ενδιάμεσες αρμονικές (EN 61000-4-13), για σημεία κοινής σύνδεσης (Point of Common Coupling) και έγιναν σε ηλεκτρομαγνητικό περιβάλλον. Εφαρμόστηκαν συνδυασμένες κυματομορφές αρμονικής τάσης που περιέχουν μεγάλο ποσοστό των κρισιμότερων αρμονικών (3^η, 5^η, 7^η).

Τα πιο σχετικά αποτελέσματα είναι τα ακόλουθα:

- Γενικά οι αντιστροφείς δεν επηρεάζονται από την παρουσία αρμονικών στην τάση δικτύου. Ωστόσο κάποιες αρμονικές μπορεί να προκαλέσουν αύξηση στο πλάτος της τάσης η οποία με τη σειρά της να οδηγήσει σε υπερεντάσεις. Αυτές είναι πολύ πιθανό να οδηγήσουν σε μη αναμενόμενη λειτουργία της προστασίας από υπερένταση.
- Μερικοί αντιστροφείς ήταν σε θέση να ελέγξουν το ρεύμα εξόδου ανεξάρτητα από τη μορφή της τάσης. Σε άλλες περιπτώσεις η παραμόρφωση τάσης οδήγησε σε μια σημαντική αύξηση της συνολικής αρμονικής παραμόρφωσης ρεύματος (THDI) μέχρι 40-50%, με το ρεύμα εξόδου είτε να τείνει να αντισταθμίσει την υπάρχουσα παραμόρφωση τάσης (ενεργός συμπεριφορά φίλτρου), είτε να μην την αντισταθμίζει καθόλου.

Μια συγκριτική ανάλυση της συμπεριφοράς των αντιστροφέων και του ελέγχου εξόδου τους, κάτω από κανονικές συνθήκες, αποκαλύπτει τα ακόλουθα:

- Χαμηλή παραμόρφωση ρεύματος – μικρός αντίκτυπος: οι αντιστροφείς με ένα πολύ χαμηλό THDI κάτω από κανονικές συνθήκες επηρεάστηκαν ελαφρώς μόνο από τα υψηλά επίπεδα παραμόρφωσης τάσης.
- Σταθερή παραμόρφωση ρεύματος – μικρός αντίκτυπος: διάφοροι αντιστροφείς, για τους οποίους θεωρήθηκε μια μέση τιμή του THDI, παρουσίασαν σχετικά σταθερό THDI ανεξάρτητα από τη διαταραχή της κυματομορφής της τάσης. Δεν παρατηρήθηκε καμία σημαντική επίπτωση στη μορφή του ρεύματος λόγω της συνολικής αρμονικής παραμόρφωσης τάσης (THDU).
- Μεγάλος αντίκτυπος: δύο συσκευές με μέσο THDI επηρεάστηκαν σημαντικά από αρμονικές, ιδιαίτερα στο εύρος των 100Hz ως 1000Hz. Σε αυτές τις συχνότητες, τα THDI έφτασαν επίπεδα μέχρι και 48%.
- Για να επιτευχθεί ένα υψηλό επίπεδο ανοσοποίησης έναντι των ενδιάμεσων αρμονικών απαιτείται έλεγχος της συχνότητας. Έλεγχος με πολύ στενά όρια συχνότητας οδηγεί στην αποσύνδεση του αντιστροφέα και έτσι δεν επιτυγχάνεται ανοσοποίηση. Πιο διευρυμένα όρια συχνότητας είναι ευαίσθητα σε βραχυπρόθεσμες διακυμάνσεις.

Ανάγκες για Τυποποίηση

Τα υπάρχοντα πρότυπα ανοσοποίησης σχετικά με τις αρμονικές και τις ενδιάμεσες αρμονικές στη τάση δικτύου, όπως το EN 61000-4-13, φαίνεται να είναι επαρκή για τους συνδεδεμένους στο δίκτυο αντιστροφείς. Εντούτοις με τα καταναμημένα συστήματα φωτοβολταϊκής παραγωγής να διαδραματίζουν έναν σημαντικό ρόλο στα μελλοντικά δίκτυα διανομής (που θα στηρίζονταν πλήρως στη συμβολή της καταναμημένης παραγωγής), πρέπει να τυποποιηθούν πρόσθετες απαιτήσεις σχετικά με την επιθυμητή συμπεριφορά των αντιστροφέων κατά τη διάρκεια των διαταραχών που συμβαίνουν στα δίκτυα.

Από την άλλη πλευρά, συστήνεται η λειτουργία των αντιστροφέων της καταναμημένης παραγωγής και ως ενεργά φίλτρα, για να αντισταθμίσουν τοπικά τις υπάρχουσες αρμονικές που παράγονται από τα φορτία, ιδιαίτερα για τα μελλοντικά δίκτυα. Πρέπει να αναπτυχθούν συγκεκριμένες τυποποιήσεις για τους αντιστροφείς, με τέτοιου είδους δυνατότητες, ώστε να εξασφαλίζουν την ποιοτική λειτουργία, αποφεύγοντας παράλληλα αρνητικές επιπτώσεις εξαιτίας της απρόβλεπτης αλληλεπίδρασης μεταξύ αυτών των συσκευών και του δικτύου.

4.4 Τεχνικά Προβλήματα Φ/Β Συστημάτων Συνδεδεμένων στο Δίκτυο (Επίδραση Φωτοβολταϊκού Συστήματος στο Δίκτυο)

4.4.1 Ασφάλεια Προσωπικού και Πελατών

Η ασφάλεια του προσωπικού και των καταναλωτών είναι ο πρώτος παράγοντας που εξετάζεται από την άποψη του υλικού και των χρησιμοποιούμενων διαδικασιών κατά την λειτουργία των δικτύων διανομής. Οι υπάρχουσες τοπολογίες, το υλικό και οι πρακτικές προστασίας, οι διαδικασίες ασφάλειας προσωπικού που έχουν υιοθετηθεί, βασίζονται στην παραγωγή ισχύος από κεντρικούς σταθμούς παραγωγής και μεταφορά της στα καταναμημένα φορτία.

Ένα από τα προβλήματα ασφάλειας που μπορεί προκύψει σε καταναμημένα φωτοβολταϊκά συστήματα παραγωγής είναι ότι μπορεί να συνεχίσει να τροφοδοτεί με ενέργεια ένα τμήμα του δικτύου διανομής το οποίο αποσυνδέθηκε για λόγους συντήρησης. Αυτό είναι πιθανό εάν το φορτίο σε αυτό το τμήμα είναι σχεδόν ίδιο με την ισχύ εξόδου του καταναμημένου συστήματος. Εάν αυτός είναι ο λόγος, τυπικά ρελέ υπερτάσεων/υποτάσεων και μεγαλύτερης/μικρότερης συχνότητας (πάνω ή κάτω από ένα κατώτατο όριο συχνότητας) ίσως δεν μπορούν να ανιχνεύσουν αυτή την ανώμαλη κατάσταση νησιδοποίησης (islanding, θα παρουσιαστεί αναλυτικότερα παρακάτω). Αυτό είναι μια επικίνδυνη κατάσταση για το προσωπικό συντήρησης του δικτύου, επειδή μπορεί να υποθέσουν ότι το τμήμα στο οποίο δουλεύουν έχει αποσυνδεθεί, εάν δεν γνωρίζουν τη καταναμημένη φωτοβολταϊκή παραγωγή ή εάν υποθέσουν ότι η καταναμημένη φωτοβολταϊκή παραγωγή δεν τροφοδοτείται με ενέργεια όταν ουσιαστικά τροφοδοτείται.

Υπάρχουν διάφορα μέτρα που μπορούν να παρθούν σε ένα ηλεκτρικό δίκτυο ώστε να εξασφαλιστεί η ασφάλεια του δικτύου διανομής του καταναμημένου φωτοβολταϊκού συστήματος. Πρώτα, πρέπει να προσδιοριστεί η θέση αυτών των συσκευών σε χάρτες δικτύου. Έπειτα, πρέπει να επιθεωρούνται τα ρελέ, οι διακόπτες ισχύος, οι απαγωγείς υπέρτασης και άλλες συσκευές προστασίας ώστε να εξασφαλιστεί ότι ο εξοπλισμός θα παρέχει την επαρκή προστασία και ασφάλεια. Στο ηλεκτρικό δίκτυο μπορούν να προστεθούν επιπλέον διακόπτες που ελέγχουν την τροφοδότηση και διακόπτες στο δίκτυο διανομής ώστε να μειωθεί το μέγεθος των τμημάτων διανομής με τα φωτοβολταϊκά συστήματα που συνδέονται. Αυτό θα μπορούσε να μειώσει τον αριθμό των καταναμημένων συσκευών διανομής που θα έπρεπε να απομονωθούν από το σύστημα κατά τη διάρκεια της επισκευής, συντήρησης ή έκτακτης ανάγκης καθώς και τον αριθμό των διακοπών του καταναμημένου δικτύου που θα έπρεπε να ανοίξουν και να κλείσουν.

Συνιστάται τα ηλεκτρικά δίκτυα να προσθέτουν ένα πρόσθετο βήμα στα βήματα ασφάλειας που απαιτούνται, κατά την συντήρηση των αποσυνδεδεμένων (νεκρή γραμμή) δικτύων διανομής. Μετά από τα βήματα ασφάλειας που απαιτούνται για να αποσυνδέσουν τον ηλεκτρικό εξοπλισμό και τα κυκλώματα στο μέρος του δικτύου διανομής όπου εκτελείται η εργασία, κάθε καταναμημένο φωτοβολταϊκό σύστημα παραγωγής, που μπορεί να τροφοδοτήσει την περιοχή

εργασίας, πρέπει να αποσυνδεθεί από το ηλεκτρικό δίκτυο. Κατόπιν η περιοχή εργασίας πρέπει να εξεταστεί όσον αφορά την τάση για να καθοριστεί ότι όλες οι συσκευές του κατανεμημένου συστήματος είναι

εκτός λειτουργίας. Το κλείσιμο των διακοπών στη γραμμή διανομής και των διακοπών στις εγκαταστάσεις κατανεμημένης φωτοβολταϊκής παραγωγής πρέπει να αποτρέψει την επανατροφοδότηση της περιοχής εργασίας από μια κατανεμημένη ηλεκτρική πηγή.

Μια εναλλακτική λύση για το δίκτυο είναι να χρησιμοποιηθούν οι διαδικασίες ελέγχου ενώ η γραμμή είναι συνδεδεμένη (live-line) παρά να αποσυνδεθεί κάθε συσκευή κατανεμημένου συστήματος που μπορεί να τροφοδοτήσει την περιοχή εργασίας. Εντούτοις, αυτή η διαδικασία μπορεί να αυξήσει σημαντικά το κόστος και το χρόνο συντήρησης των δικτύων διανομής. Ένα άλλο μειονέκτημα αυτής της διαδικασίας είναι ότι υπάρχει μεγαλύτερος κίνδυνος σοβαρού τραυματισμού.

4.4.2 Προστασία Εξοπλισμού και Συστήματος

Στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας υπάρχουν τρεις τομείς έντονου ενδιαφέροντος, οι οποίοι είναι: (1) σφάλματα προς γη, (2) συνεισφορά στην ικανότητα βραχυκυκλώματος, και (3) συνεχής λειτουργία του συστήματος σε ένα τμήμα που παρατηρείται νησιδοποίηση. Οι διατάξεις του συστήματος μπορεί να συμβάλουν με ένα σημαντικό ρεύμα βραχυκυκλώματος κατά την διάρκεια σφαλμάτων που είναι ιδιαίτερα ενοχλητικό για την ασφάλεια, κατά τη διάρκεια προσωρινού σφάλματος. Καταστάσεις συντονισμού μπορεί να αναπτυχθούν σε ένα τμήμα μιας γραμμής διανομής που είναι απομονωμένη με πυκνωτές και του συστήματος κατά τη διάρκεια σφαλμάτων γραμμής - γης. Αυτό μπορεί να προκαλέσει υπερτάσεις στις φάσεις της γραμμής διανομής που δεν προκλήθηκε σφάλμα. Οι διαδικασίες ανοιγοκλεισίματος στο δίκτυο διανομής μπορεί να προκαλέσουν νησιδοποίηση και βλάβες αν το σύστημα και οι συσκευές του κατανεμημένου συστήματος φωτοβολταϊκής παραγωγής λειτουργούν εκτός φάσης.

4.4.2.1 Σφάλματα προς Γη

Περιγραφή

Η γείωση λειτουργίας και προστασίας είναι δύο συμπληρωματικά μέτρα που χρησιμοποιούνται ευρέως στα φ/β συστήματα για να παρέχουν ασφάλεια. Οι γειώσεις λειτουργίας, όταν χρησιμοποιούνται, γενικά παρέχουν αγώγιμους δρόμους προς γη που χρησιμοποιούν αγώγους ρεύματος που προορίζονται γι'αυτή τη λειτουργία, ενώ οι γειώσεις προστασίας παρέχουν αγώγιμους δρόμους προς γη για τις μεταλλικές επιφάνειες που μπορεί να τροφοδοτηθούν ακούσια και εξασφαλίζουν ότι αυτές οι επιφάνειες θα παραμένουν σε ίδιο ή κοντινό δυναμικό με αυτό της γης. Οι πρακτικές γείωσης λειτουργίας και προστασίας και οι απαιτήσεις ποικίλλουν ευρέως τόσο όσον αφορά τις εφαρμογές όσο και μεταξύ των χωρών, ως αποτέλεσμα της ιστορικής εξέλιξης στους κανονισμούς που δημιουργήθηκαν για να εξετάσουν την ασφάλεια και τις τεχνικές γείωσης στα ηλεκτρικά συστήματα παραγωγής και διανομής.

Παραδείγματος χάριν, οι κανονισμοί στις ΗΠΑ απαιτούν γείωση προστασίας σε όλα τα φ/β συστήματα και γείωση λειτουργίας για συστήματα με τάσεις άνω των 50 βολτ (μοντέλο ανοιχτού κυκλώματος). Ευρωπαϊκοί και ιαπωνικοί κανονισμοί απαιτούν γείωση προστασίας, αλλά δεν απαιτούν γείωση λειτουργίας και τα περισσότερα από τα φ/β συστήματα δεν έχουν αγωγούς οδήγησης του ρεύματος προς γη στην DC πλευρά. Και οι δύο προσεγγίσεις συνεπάγονται πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα, δηλαδή:

- Το σύστημα χωρίς γείωση παρέχει την καλύτερη μείωση κινδύνου πυρκαγιάς (απαιτούνται πολλαπλά σφάλματα προς γη για να δημιουργηθεί κίνδυνος πυρκαγιάς) και επιτρέπει την εύκολη ανίχνευση σφαλμάτων προς γη.
- Γενικά το γειωμένο φ/β σύστημα παρέχει την καλύτερη προστασία για το προσωπικό σε σχέση με ηλεκτροπληξία (τα καταναμημένα φ/β συστήματα και η καλωδίωση προς γη δεν σχηματίζει στατικές φορτίσεις).

Παρά τα προηγούμενα σχόλια, με κατάλληλο σχεδιασμό, τόσο τα γειωμένα όσο και τα αγειώτα φ/β συστήματα μπορούν να επιτύχουν ικανοποιητική προστασία για το προσωπικό, τον εξοπλισμό και έναντι πυρκαγιάς. Μια σημαντική εκτίμηση για τα γειωμένα φ/β συστήματα είναι να καθοριστεί η συμβατότητα της γείωσης του φ/β συστήματος με το δίκτυο που συνδέεται.

Λόγω της ηλεκτρικής φύσης των φ/β συστημάτων και των ιδιαίτερων συνθηκών λειτουργίας (που εκτίθενται σε υπαίθριες μετεωρολογικές συνθήκες καθώς επίσης και σε ενδεχόμενα σφάλματα που προέρχονται από το δίκτυο διανομής ή την ίδια την ηλεκτρική εγκατάσταση), είναι πιθανό να δημιουργηθούν τα ακόλουθα σφάλματα μόνωσης:

- Αστοχίες μόνωσης μεταξύ των αγωγών μεταφοράς ρεύματος αντίθετης πολικότητας, που προκαλούν σφάλματα γραμμής – γραμμής. Το ρεύμα που ρέει στα σφάλματα γραμμής – γραμμής μπορεί να είναι από φωτοβολταϊκά πλαίσια στο κύκλωμα σφάλματος, από πλαίσια που είναι παράλληλα συνδεδεμένα με το κύκλωμα σφάλματος ή από εξωτερικές πηγές όπως είναι μπαταρίες ή αντιστροφείς. Οι δίοδοι αντεπιστροφής έχουν αποτύχει σε πολλές περιπτώσεις στις φ/β εγκαταστάσεις και έχουν επιτρέψει σε πολλαπλές φ/β συστοιχίες να συμβάλουν στα ρεύματα σφαλμάτων προς γη.
- Αστοχίες μόνωσης μεταξύ των αγωγών μεταφοράς ρεύματος και του εδάφους, γνωστές ως σφάλματα προς γη. Αυτά τα σφάλματα μπορούν να αναπτυχθούν μέσα στη συστοιχία του φωτοβολταϊκού συστήματος, σε κυκλώματα που έχουν ενωθεί ηλεκτρικά με τη συστοιχία ή σε διακόπτες και αντιστροφείς. Πρέπει να χρησιμοποιηθούν ανιχνευτές σφαλμάτων προς γη για να ανιληφθούν αυτά τα σφάλματα, τόσο σε γειωμένα όσο και αγειώτα φ/β συστήματα. Οι ανιχνευτές που χρησιμοποιούνται στα αγειώτα συστήματα πρέπει να είναι πιο ευαίσθητοι για να προστατεύσουν το προσωπικό, από ό,τι αυτοί που χρησιμοποιούνται στα γειωμένα. Το πρακτικό όριο για την ευαισθησία σφαλμάτων προς γη περιορίζεται από ρεύματα ροής που προκαλούνται λόγω καιρικών συνθηκών (π.χ υγρασία).

Θεωρητικά και Πειραματικά Στοιχεία

Συσσωρευτικά ρεύματα διαρροής που συνδέονται στη φ/β συστοιχία , μακριές

καλωδιώσεις, διατάξεις προστασίας υπερτάσεων, δίοδοι, πίνακες συνδέσεων, η γραμμή διανομής, στα οποία εναποτίθεται υγρασία καθιστούν συχνά την ανίχνευση σφαλμάτων προς γη δύσκολη.

Τα ρεύματα διαρροής στα πρώτα φ/β συστήματα ήταν συχνά επαρκή για να προκαλέσουν ψεύτικες ενδείξεις σφαλμάτων προς γη και συνέβαλλαν έτσι στην απενεργοποίηση του συστήματος για πολλές ώρες. Τα ρεύματα διαρροής που συνδέονται με όλα τα εξαρτήματα της κατανεμημένης φ/β πηγής και με τη καλωδίωση θέτουν επίσης μη ορατούς και άγνωστους κινδύνους προς το προσωπικό ή μπορεί να συμβάλουν στα σφάλματα προς γη που αυξάνουν τον κίνδυνο για πυρκαγιά.

Η αυξανόμενη διείσδυση φωτοβολταϊκών συστημάτων που είναι εγκατεστημένα σε κτήρια, που χρησιμοποιούν κυκλώματα DC καλωδίωσης και αντιστροφείς, απαιτεί ανίχνευση σφαλμάτων προς γη και διατάξεις που θα θέτουν εκτός λειτουργίας τη φωτοβολταϊκή συστοιχία, ώστε να εξασφαλιστεί η προστασία από πυρκαγιά καθώς και η ασφάλεια του προσωπικού. Δεν υπάρχει εντούτοις καμία τυποποίηση ακόμα σχετικά με τα σφάλματα προς γη που προέρχονται από τη DC πλευρά των φ/β συστημάτων. Η DC πλευρά απαιτεί ειδικά μέτρα που είναι υπό εξέταση. Η ιδιαίτερη αλληλεπίδραση μεταξύ του φ/β συστήματος, των κτηρίων (συμπεριλαμβανομένου των χρηστών) και των δικτύων ηλεκτρικής ενέργειας κάνει αυτό το θέμα ιδιαίτερα σημαντικό.

Ανάγκες για Τυποποίηση

Παρούσες διεθνείς τυποποιήσεις (καθώς επίσης και πολλοί εθνικοί κανονισμοί) που καλύπτουν τα φ/ β συστήματα που εγκαθίστανται στα κτήρια (IEC 60364-7-712) είναι ελλιπείς σχετικά με την προστασία από σφάλματα λόγω αυτόματης αποσύνδεσης της τροφοδοσίας από τη DC πλευρά των φ/β συστημάτων.

4.4.2.2 Συνεισφορά στην Ικανότητα Βραχυκυκλώματος

Περιγραφή

Γενικά θεωρείται ότι οι φ/β γεννήτριες που είναι συνδεδεμένες στα δίκτυα διανομής δεν παρέχουν σφαλματικό ρεύμα βραχυκύκλωσης στο σύστημα στην περίπτωση που το σφάλμα βραχυκύκλωσης γίνεται στη πλευρά του δικτύου διανομής. Αυτό συμβαίνει επειδή το ρεύμα βραχυκυκλώματος μιας φωτοβολταϊκής συστοιχίας είναι το πολύ 10 με 20% μεγαλύτερο από το ονομαστικό μέγιστο ρεύμα εξόδου. Οι αντιστροφείς είναι κανονικά εξοπλισμένοι με έναν ηλεκτρονόμο που ελέγχει κάποιο κατώτατο όριο τάσης και αντιστροφείς τύπου ελεγχόμενοι από ρεύμα, που χρησιμοποιούνται κυρίως για κατανεμημένη φ/β παραγωγή, έχουν έναν περιορισμό υπερέντασης σε περίπτωση διαταραχής στη πλευρά του δικτύου διανομής. Επομένως θεωρείται ότι εάν ο αριθμός των συνδεδεμένων φ/β συστημάτων παραμένει μικρός, η επίδρασή τους στη γραμμή διανομής θα είναι αμελητέα. Εντούτοις, εάν ο αριθμός των φ/β συστημάτων αυξηθεί, η ικανότητα βραχυκυκλώματος ολόκληρου του δικτύου διανομής (συμπεριλαμβανομένων των φ/β συστημάτων) μπορεί επίσης να αυξηθεί και το ρεύμα σφάλματος κατά τη διάρκεια του

βραχυκυκλώματος μπορεί να φθάσει σε πιο μεγάλες τιμές. Εάν η τιμή του ρεύματος βραχυκυκλώματος υπερβαίνει την ικανότητα των αυτόματων διακοπών υπερέντασης που έχουν εγκατασταθεί στο τέλος, στη πλευρά των πελατών, μπορεί να τους καταστήσει ανίκανους να εκκαθαρίσουν το σφάλμα στις εγκαταστάσεις των πελατών.

Στα δίκτυα διανομής, η προστασία έναντι σφαλμάτων βραχυκυκλώματος στις γραμμές παρέχεται με τη βοήθεια ηλεκτρονόμων υπερεντάσεως ή/και με ασφάλειες που συνεργάζονται με τις συσκευές προστασίας των γραμμών διανομής. Ένα πρόβλημα που υπάρχει είναι ότι κάτω από υψηλή διείσδυση της κατανεμημένης φ/β παραγωγής και ορισμένες συνθήκες (για παράδειγμα, όταν εμφανίζεται στο τέλος μιας μεγάλου μήκους γραμμής διανομής με υψηλή αντίσταση), τα φ/β συστήματα μπορεί να είναι ανίκανα να ανιχνεύσουν ένα σφάλμα και παρέχουν ένα σημαντικό μέρος του ρεύματος σφάλματος, ώστε να μην υπάρχει επιλογική προστασία από μέσα προστασίας, να δημιουργούνται υπερβολικά ρεύματα σφάλματος, λανθασμένη λειτουργία των ασφαλειών και δυσκολία στην ανίχνευση σφάλματος. Παραδείγματος χάριν, κανονικά θα έπαιρνε πέντε έως έξι κύκλους για αυτόματο διακόπτη επαναφοράς, χρησιμοποιώντας μια στιγμιαία λειτουργία ενεργοποίησης για να εκκαθαρίσει ένα σφάλμα, ως εκ τούτου μια ασφάλεια χρειάζεται να επιλεχτεί έτσι ώστε ο ελάχιστος χρόνος τήξης της να είναι μεγαλύτερος από το συνολικό χρόνο εκκαθάρισης του διακόπτη σφάλματος (πρέπει να είναι τουλάχιστον έξι κύκλοι συν κάποιο χρόνο περιθωρίου). Εάν το ρεύμα σφάλματος αυξάνεται λόγω της συμβολής της κατανεμημένης παραγωγής στο ρεύμα σφάλματος, ο ελάχιστος χρόνος τήξης μπορεί να είναι σημαντικά πιο σύντομος από έξι κύκλους, χρόνος μεγαλύτερος από αυτόν στον οποίο ενεργοποιείται η επιλογική προστασία. Επομένως, η επιλογική προστασία, μεταξύ της ασφάλειας και του χρόνου υπερέντασης του ηλεκτρονόμου, σε διαφορετικά επίπεδα ρεύματος σφάλματος, είναι κρίσιμα για τη προστασία του δικτύου διανομής.

Παρά τα προηγούμενα σχόλια, πρέπει επίσης να σημειωθεί ότι σε μερικές χώρες, στην περίπτωση δικτύου X.T το μέγεθος των σφαλμάτων είναι τέτοιο που ακόμη και σε υψηλά επίπεδα διείσδυσης, η πιθανή συμβολή ρεύματος της κατανεμημένης φωτοβολταϊκής παραγωγής μπορεί να είναι πολύ μικρότερη από αυτή που προέρχεται από το δίκτυο διανομής. Παραδείγματος χάριν, με ένα ρεύμα σφάλματος από έναν υποσταθμό 500 kVA της τάξης των 5000-15000 A και μια συμβολή από μια κατανεμημένη φ/β παραγωγή 500 kW, περίπου με 1000 A, δεν θα επηρεαζόταν σημαντικά η λειτουργία μιας χαρακτηριστικής προστασίας με ασφάλεια.

Θεωρητικά Στοιχεία

Μια θεωρητική ανάλυση έχει πραγματοποιηθεί στις ΗΠΑ για να καθορίσει τον αντίκτυπο τόσο της λειτουργίας της κατανεμημένης παραγωγής όσο και των συστημάτων ισχύος. Η ανάλυση έγινε κυρίως πάνω σε τοπολογίες που περιέχουν αντιστροφείς.

Όσον αφορά την επίπτωση της κατανεμημένης παραγωγής στα ρεύματα σφαλμάτων, μελετήθηκαν οι συνεισφορές των ρευμάτων σφάλματος αντιστροφικών ελεγχόμενων από ρεύμα, κάτω από διάφορες καταστάσεις, με τη βοήθεια προσομοιώσεων. Εξετάστηκε μια γραμμή διανομής που χρησιμοποιείται ευρέως στα δίκτυα διανομής των ΗΠΑ (M.T 13.2 kV, σύνθετη αντίσταση πηγής: $X1=0.5$, $X1/R1=30$, $X0/X1=1$, $R0/R1=1$), με μια συνολική ισχύ κατανεμημένης παραγωγής 5 MVA που συνδέεται με τη βοήθεια M.T/X.T μετασχηματιστή

(13.2/0.48 kV). Η εστίαση της μελέτης ήταν στην μείωση του αριθμού των χρησιμοποιούμενων ασφαλειών. Τα κύρια αποτελέσματα ήταν τα ακόλουθα:

- Κάτω από τριφασικό σφάλμα που εμφανίζεται στο απομακρυσμένο άκρο γραμμής διανομής και με διάρκεια 0.2 δευτερόλεπτα, αν και η πτώση τάσης δεν ήταν αρκετά μεγάλη, τόσο σε διάρκεια όσο και σε πλάτος, ώστε να προκαλέσει την ενεργοποίηση της προστασίας υποτάσεως (τάση κάτω από ένα κατώτατο όριο) των αντιστροφών, η συμβολή του ρεύματος σφάλματος της κατανεμημένης παραγωγής ήταν μόνο ένα πολύ μικρό μέρος του συνολικού ρεύματος σφάλματος (με αντιστροφείς που παρέχουν σταθερό ρεύμα με μικρές αιφνίδιες μεταβολές όταν το σφάλμα εμφανίζεται και εκκαθαρίζεται). Επομένως, αυτή η κατάσταση θεωρήθηκε απίθανο να έχει επιπτώσεις στην επιλογική προστασία ασφάλειας - διακοπών. Εντούτοις, περαιτέρω προσομοιώσεις αποκάλυψαν μεγαλύτερη συνεισφορά στο ρεύμα σφάλματος με υψηλότερη διείσδυση της κατανεμημένης παραγωγής και σε συνθήκες με ασθενέστερες γραμμές από αυτές που εξετάστηκαν.
- Κάτω από μονοφασικό σφάλμα που εμφανίζεται στο απομακρυσμένο άκρο γραμμής διανομής και διαρκεί 0.2 δευτερόλεπτα, λήφθηκαν παρόμοιες τιμές για τη συμβολή του ρεύματος σφάλματος όπως και στην περίπτωση τριφασικών σφαλμάτων (ελαφρώς υψηλότερες, λόγω των μετασχηματιστών τρίγωνο - αστέρα, των αντιστροφών που παρέχουν αγωγή δρόμο για ρεύματα μηδενικής ακολουθίας). Αυτό επιβεβαιώνει περαιτέρω ότι η ελεγχόμενη από ρεύμα κατανεμημένη παραγωγή είχε μικρό αντίκτυπο στη συμβολή σφάλματος και στη μείωση του αριθμού των χρησιμοποιούμενων ασφαλειών.
- Ένα τριφασικό προς γη σφάλμα σε μια γραμμή, προκάλεσε την ενεργοποίηση της προστασίας υποτάσεως των αντιστροφών, η οποία προκαλεί μια γρήγορη αποσύνδεση. Πάλι, η συμβολή του ρεύματος σφάλματος βρέθηκε να είναι κυρίως από το δίκτυο. Η συμβολή του ρεύματος της κατανεμημένης παραγωγής, που ήδη ήταν μικρή, μειώθηκε περαιτέρω όταν οι διατάξεις ενεργοποίησης της προστασίας αποσυνδέθηκαν. Επισημάνθηκε επίσης, ότι η γρήγορη αποσύνδεση των φ/β συστημάτων μπορεί να μειώσει, κατά τη διάρκεια των σφαλμάτων, τα οφέλη προς το σύστημα ισχύος που παρέχονται από τη κατανεμημένη παραγωγή.
- Ως σύγκριση, προσομοιώθηκαν επίσης ρεύματα σφάλματος από τα επαγωγικά φορτία μηχανών (συνολικής ισχύος, 5 MW). Οι τιμές που λήφθηκαν ήταν πολύ υψηλότερες. Οι επιπτώσεις των σφαλμάτων της κατανεμημένης φωτοβολταϊκής παραγωγής πρέπει να επαναξιολογηθεί σε περίπτωση που μεταβληθούν οι μέθοδοι που γίνεται ο έλεγχος της κατανεμημένης παραγωγής, για να ολοκληρώσουν άλλες λειτουργίες όπως η υποστήριξη τάσης.

Σε μια άλλη Βρετανική μελέτη συνήχθη επίσης το συμπέρασμα ότι η συνδεδεμένη με αντιστροφέα κατανεμημένη φωτοβολταϊκή παραγωγή δεν έχει καμία σημαντική συμβολή στα επίπεδα σφάλματος του δικτύου.

Πειραματικά Στοιχεία

Στα πλαίσια της Διεθνούς Αντιπροσωπείας Ενέργειας – Πρόγραμμα Συστημάτων Φωτοβολταϊκής Ισχύος (International Energy Agency – Photovoltaic Power Systems Programme, IEA – PVPS), έγιναν διαφορετικές έρευνες στην Ιαπωνία πάνω στις επιπτώσεις των βραχυκυκλωμάτων στο επίπεδο διανομής στους φ/β αντιστροφείς. Με αυτό τον στόχο, αφ' ενός εξετάστηκαν τέσσερις αντιστροφείς του εμπορίου στο εργαστήριο κάτω από συνθήκες βραχυκυκλώματος που προέρχεται από το δίκτυο, τόσο χωριστά όσο και ανά ζευγάρια. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι οι αντιστροφείς παρείχαν ένα ρεύμα σφάλματος περίπου δύο φορές μεγαλύτερο από αυτό πριν από το βραχυκύκλωμα και ότι ο χρόνος για να εκκαθαριστεί το σφάλμα ήταν περίπου 1 έως 2 κύκλοι . Βγήκε το συμπέρασμα, ότι όταν εξετάστηκε αντιστροφέας ελεγχόμενος από ρεύμα, το ρεύμα βραχυκύκλωσης από τους αντιστροφείς του φωτοβολταϊκού συστήματος ήταν αμελητέο.

Πειραματικές δοκιμές πραγματοποιήθηκαν στα πλαίσια μιας δοκιμής, για φωτοβολταϊκό σύστημα 200 kWp στην Ιαπωνία. Κάτω από ορισμένες συνθήκες σφάλματος όπου δημιουργήθηκαν βραχυκυκλώματα μέσω υψηλών αντιστάσεων, η πτώση τάσης στη γραμμή διανομής ήταν ελάχιστη και κάθε σύστημα συνέχισε τη λειτουργία του χωρίς να ανιχνεύσει το σφάλμα. Αυτό έδειξε ότι υπήρξαν περιπτώσεις όπου η διέλευση ρευμάτων σφάλματος μέσω των υποσταθμών μειώθηκε και δεν λειτούργησε ο ηλεκτρονόμος υπερέντασης του υποσταθμού.

Ανάγκες για Τυποποίηση

Προκειμένου να προετοιμαστεί η αγορά για μια υψηλότερη διείσδυση της κατανεμημένης παραγωγής, πρέπει να αναπτυχθούν συγκεκριμένα πρότυπα για τους αντιστροφείς που να καλύπτουν όρια για την συμβολή του ρεύματος βραχυκύκλωσης.

4.4.2.3 Νησιδοποίηση (Islanding)

Η κατάσταση νησιδοποίησης είναι αυτή κατά την οποία ένας συνδεδεμένος στο δίκτυο φωτοβολταϊκός αντιστροφέας συνεχίζει να τροφοδοτεί τα φορτία που συνδέονται στο ίδιο δίκτυο, μετά από μια διακοπή της γραμμής διανομής. Αυτό μπορεί να συμβεί ως συνέπεια λόγω κάποιων διαδικασιών συντήρησης ή συνθηκών σφάλματος όπως βραχυκυκλώματα κλπ.

Αν ένα τμήμα του δικτύου, θεωρηθεί ως τμήμα νησιδοποίησης, τότε δεν μπορεί να εφαρμοστεί κανένας έλεγχος από το σύστημα, τόσο στη τάση όσο και στη συχνότητα της «νησίδας». Το φαινόμενο αυτό λοιπόν μπορεί να εμφανιστεί λόγω των παρακάτω περιπτώσεων:

- Ως αποτέλεσμα ενός σφάλματος που ανιχνεύεται από τα όργανα προστασίας του δικτύου και προκαλεί το άνοιγμα μιας συσκευής προστασίας κατά του σφάλματος, αλλά που δεν ανιχνεύεται από τον αντιστροφέα του φωτοβολταϊκού συστήματος (μη ανιχνεύσιμα σφάλματα γραμμής).
- Ως αποτέλεσμα τυχαίου ανοίγματος της γραμμής διανομής του δικτύου λόγω εσφαλμένης λειτουργίας του εξοπλισμού.
- Ως αποτέλεσμα απενεργοποίησης της γραμμής διανομής και των φορτίων για λόγους συντήρησης.
- Ως αποτέλεσμα ανθρώπινου λάθους, κακής εκτίμησης.

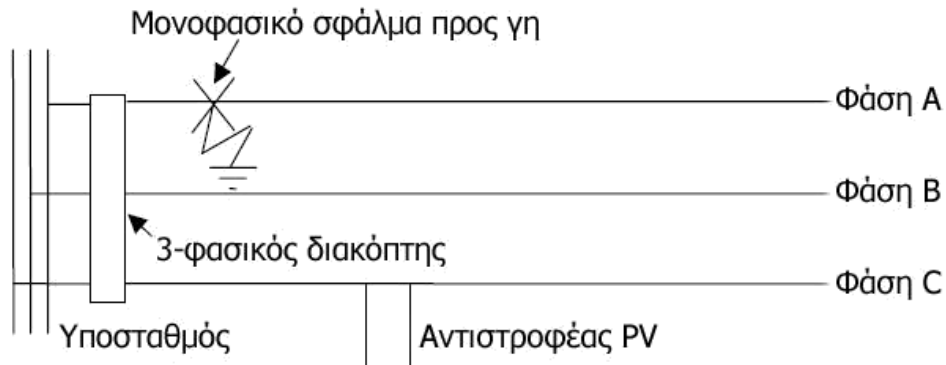
Οι λόγοι που θα πρέπει να αποφεύγεται η νησιδοποίηση είναι:

- Το δίκτυο δεν μπορεί να ελέγξει την τάση και τη συχνότητα στη νησίδα. Οι διακυμάνσεις τάσης ή συχνότητας μπορούν να προκαλέσουν ζημιά στον εξοπλισμό των πελατών. Οι ιδιοκτήτες των ηλεκτρικών δικτύων ανησυχούν γιατί θεωρούνται υπεύθυνοι για ζημιές στον ηλεκτρικό εξοπλισμό των πελατών τους, που συνδέονται στο δίκτυό τους, οι οποίες ζημιές είναι αποτέλεσμα των διακυμάνσεων τάσης και συχνότητας έξω από τα καθορισμένα όρια.
- Η νησιδοποίηση εμποδίζει την ομαλή αποκατάσταση του δικτύου.
- Το ανοιγοκλείσιμο σε μια νησίδα μπορεί να οδηγήσει στην συνεχόμενη εσφαλμένη λειτουργία της γραμμής ή την καταστροφή εξοπλισμού του φ/β συστήματος. Αυτό θα συμβεί όταν ο εξοπλισμός δεν είναι σε φάση με το δίκτυο.
- Η νησιδοποίηση μπορεί να δημιουργήσει κίνδυνο για τους εργαζομένους στη γραμμή του δικτύου, επειδή προκαλεί την ενεργοποίηση μιας γραμμής που υποτίθεται ότι αποσυνδέθηκε.

Μη Ανιχνεύσιμα Σφάλματα Γραμμής

Γενικά θεωρείται ότι ένας φ/β αντιστροφέας δεν θα έχει κανένα πρόβλημα σχετικά με νησιδοποίηση όταν ο λόγος που προκλήθηκε ανοιχτοκύκλωμα του δικτύου είναι ένα σφάλμα γραμμής. Ενώ για τριφασικά φ/β συστήματα υπάρχει πάντα μια διαταραχή τάσης που συνδέεται με το σφάλμα, στα μονοφασικά φ/β συστήματα δεν συμβαίνει πάντα αυτό.

Η πλειοψηφία των φ/β συστημάτων που τοποθετούνται σε στέγες, θα συνδεθεί σε μια φάση της τριφασικής γραμμής του δικτύου. Η πλειοψηφία των συσκευών που τα δίκτυα χρησιμοποιούν για να εκκαθαρίσουν τα σφάλματα είναι τριφασικές συσκευές. Πολλές μονοφασικές ασφάλειες τοποθετούνται στα συστήματα του δικτύου, καθώς επίσης και μονοφασικοί διακόπτες επαναφοράς, αλλά όλες αυτές οι συσκευές έχουν μια τριφασική διάταξη εκκαθάρισης σφάλματος πάνω τους. Οι μονοφασικές ασφάλειες συνήθως συνεργάζονται με έναν αυτόματο διακόπτη ισχύος έτσι ώστε ο διακόπτης να λειτουργεί πρώτα, με σκοπό να εκκαθαρίσει τα προσωρινά σφάλματα, κατόπιν η γραμμή μπορεί να ανοιγοκλείσει και κατά συνέπεια να περιοριστεί ο χρόνος διακοπής λειτουργίας. Η ασφάλεια λειτουργεί μόνο αν η προσπάθεια ανοιγοκλεισίματος αποτύχει να εκκαθαρίσει το σφάλμα. Αυτός ο συνδυασμός μονοφασικών αντιστροφέων και τριφασικών διακοπών σφάλματος οδηγεί στην πιθανή κατάσταση όπου ένα σφάλμα μπορεί να υπάρχει σε μια γραμμή που προέρχεται από το άνοιγμα ενός αυτόματου διακόπτη, αλλά χωρίς να έχουμε διαταραχή τάσης ώστε να έχουμε επίπτωση στον μονοφασικό αντιστροφέα.



Σχήμα 4.1: Μονοφασικό σφάλμα σε τριφασικό σύστημα

Ένα παράδειγμα μιας τέτοιας κατάστασης φαίνεται στο σχήμα 4.1, όπου υπάρχει ένα μονοφασικό σφάλμα προς γη (ένας εξαιρετικά κοινός τύπος σφάλματος) στη φάση Α ενώ το φ/β σύστημα είναι στη φάση C. Σε αυτήν την περίπτωση, είναι δυνατό η συσκευή εκκαθάρισης σφάλματος (δηλαδή ο αυτόματος διακόπτης) να ανοίξει και ο μονοφασικός φ/β αντιστροφέας να μην έχει δει την αισθητή διαταραχή τάσης. Ένας τριφασικός αντιστροφέας, σε αυτήν την ίδια κατάσταση, πιθανώς (ανάλογα με τη θέση που γίνονται τα σφάλματα και τη σοβαρότητά τους) να είχε δει τη διαταραχή τάσης

Ανοιγοκλείσιμο (Reclosing)

Η μεγάλη πλειοψηφία (πάνω από 90%, από τις εκτιμήσεις της βιομηχανίας των ηλεκτρικών δικτύων) των διακοπών λειτουργίας του δικτύου σε περιοχές με εναέριες γραμμές προκαλούνται από φαινόμενα παροδικής φύσης, όπως ένα κλαδί που πέφτει στις γραμμές ή μια πυρκαγιά που προκαλείται από έναν κεραυνό. Μια τεχνική που τα περισσότερα δίκτυα χρησιμοποιούν για να περιορίσουν το χρόνο διακοπής λειτουργίας, που συνδέεται με αυτά τα παροδικά σφάλματα είναι γνωστή ως "reclosing." Αυτό περιλαμβάνει το άνοιγμα της συσκευής (αυτόματος διακόπτης επαναφοράς ή recloser) και έπειτα γρήγορα το ξανακλείσιμό της. Ο χρόνος που η συσκευή είναι ανοιχτή συχνά επιτρέπει την εκκαθάριση του σφάλματος και έπειτα η reclosing λειτουργία αποκαθιστά την κανονική λειτουργία. Εάν η πρώτη reclosing λειτουργία δεν εκκαθαρίσει το σφάλμα, η reclosing διαδικασία επαναλαμβάνεται κανονικά 2 ή 3 φορές με όλο και μεγαλύτερες περιόδους που ο διακόπτης είναι ανοικτός. Εάν το σφάλμα δεν μπορεί να εκκαθαριστεί από αυτές τις διαδοχικές διαδικασίες, τότε η συσκευή διακοπής ανοίγει και μένει ανοικτή μέχρι το προσωπικό να επισκεφτεί την περιοχή, να καθορίσει την αιτία και να θεραπεύσει το πρόβλημα και έπειτα χειροκίνητα να ξανακλείσει το διακόπτη.

Τί σχέση έχει αυτό με τη νησιδοποίηση; Εάν η γραμμή είναι ανοικτή και έπειτα κλείνει, και ένας φ/β αντιστροφέας παραμένει ενεργός κατά τη διάρκεια της ανοικτής περιόδου, δύο πράγματα μπορούν να εμφανιστούν, από τα οποία κανένα δεν έχει θετικές επιπτώσεις.

Κατ' αρχάς, η παραγωγή ενέργειας από τον αντιστροφέα θα μπορούσε πιθανώς να διατηρήσει το σφάλμα, έτσι ώστε η reclosing λειτουργία θα αποτύγχανε και θα οδηγούσε σε μια μακροχρόνια διακοπή λειτουργίας, που απαιτεί δράση από το προσωπικό του δικτύου. Αυτό το φαινόμενο έχει δύο αιτίες. Το φ/β σύστημα μπορεί τροφοδοτεί μια φάση

στην οποία δεν είναι συνδεδεμένο ανατροφοδοτώντας διάφορες τριφασικές διατάξεις όπως μετασχηματιστές διανομής και μεγάλους κινητήρες. Επίσης η απαραίτητη ενέργεια για να διατηρηθεί το σφάλμα είναι πολύ λιγότερη από την ενέργεια που απαιτείται για να καθιερώσει το σφάλμα αρχικά.

Δεύτερον, μια διαφορά φάσης μπορεί να αναπτυχθεί μεταξύ του αντιστροφέα και του δικτύου κατά τη διάρκεια της διακοπής λειτουργίας έτσι ώστε , όταν η γραμμή ξανακλείσει, η διαφορά φάσης είναι επαρκής για να προκαλέσει ζημιά στον αντιστροφέα. Αυτό δεν αναμένεται να είναι πρόβλημα για διακοπές επανακλεισίματος της τάξης κάτω από δευτερόλεπτο, αλλά για μεγαλύτερες διακοπές επανακλεισίματος είναι κοινό πρόβλημα.

Άρα, η νησιδοποίηση μπορεί να προκαλέσει προβλήματα στη λειτουργία του δικτύου και σε άλλες μονάδες. Σε μικρότερο βαθμό μπορεί να είναι επικίνδυνη για το προσωπικό συντήρησης. Για αυτό το λόγο, οι φωτοβολταϊκοί αντιστροφείς πρέπει να προστατεύονται από το φαινόμενο νησιδοποίησης, ακόμη και αν η πιθανότητα εμφάνισής του είναι πολύ μικρή.

Η χρήση των συνδεδεμένων στο δίκτυο φωτοβολταϊκών συστημάτων αυξάνεται τώρα πολύ γρήγορα. Εντούτοις, εθνικοί και διεθνείς κανονισμοί που αφορούν τη νησιδοποίηση είναι ακόμα υπό συζήτηση. Μάλιστα , η προστασία από το φαινόμενο νησιδοποίησης είναι μια από τις πιο σημαντικές πηγές διαφωνίας.

Πρακτικά, είναι δυνατό να αντικατασταθούν τα διάφορα φορτία που συνδέονται με το δίκτυο από μια ισοδύναμη ωμική αντίσταση παράλληλα με ένα πηνίο και έναν πυκνωτή. Επιπλέον υποθέτουμε ότι ο αντιστροφέας θα προσπαθεί πάντα να εγχύσει μόνο την ενεργό ισχύ στο δίκτυο και τα φορτία. Η τελευταία υπόθεση ισχύει για όλους τους σύγχρονους αντιστροφείς που χρησιμοποιούν τη τεχνική διαμόρφωσης PWM. Όλοι αυτοί οι αντιστροφείς έχουν δύο βρόχους ελέγχου που μπορούν να περιορίσουν το φαινόμενο της νησιδοποίησης:

- Ο βρόχος ελέγχου τάσης θα κρατήσει την τάση εισόδου σε ένα τέτοιο επίπεδο που να λαμβάνεται η μέγιστη δυνατή ενέργεια από τα φωτοβολταϊκά πλαίσια. Εάν η ακτινοβολία είναι σταθερή η τάση στην έξοδο θα είναι επίσης σταθερή, οδηγώντας κατά συνέπεια σε ένα σταθερό σημείο λειτουργίας. Εάν έχουμε προσαρμογή φορτίου τότε αυτή η τάση εξόδου θα είναι μέσα στα επιτρεπτά όρια της τάσης δικτύου.

Σε περίπτωση νησιδοποίησης η ενεργός ισχύς που καταναλώνεται από το φορτίο είναι συνάρτηση μόνο της τάσης:

$$P = \frac{U^2}{R_L}$$

- Το ρεύμα και η τάση κρατούνται σε φάση μέσω μιας διαδικασίας συνεργασίας τους. Εάν κυρίως χωρητικά φορτία (το ρεύμα προπορεύεται σε σχέση με την τάση) είναι παρόντα, ο αντιστροφέας θα αυξήσει τη συχνότητά του μέχρι η άεργος ισχύς που καταναλώνεται από το φορτίο να γίνει μηδέν. Το αντίθετο θα συμβεί για τα επαγωγικά φορτία. Σε περίπτωση νησιδοποίησης η άεργος ισχύς που

καταναλώνεται από το φορτίο είναι συνάρτηση της τάσης και της συχνότητας:

$$Q = \frac{U^2}{\omega L} \left(1 - (\omega / \omega_R)^2 \right), \text{ όπου } \omega_R = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

Αυτή η συμπεριφορά οδηγεί στο συμπέρασμα ότι είναι εύκολα δυνατό να εξαλειφθούν σχεδόν όλες οι περιπτώσεις νησιδοποίησης μόνο με μείωση της επιτρεπόμενης ζώνης τάσης και συχνότητας (δηλαδή συγκεκριμένα ανώτερα και κατώτερα όρια και απαίτηση για άμεση αντίδραση εάν μια από αυτές τις παραμέτρους είναι έξω από αυτά τα όρια). Ωστόσο, η κατάσταση γίνεται πολυπλοκότερη σε πιο σύνθετες διατάξεις οπότε χρειάζονται να ληφθούν όρια και για άλλα μεγέθη.

Διάφορες τεχνικές ανίχνευσης του φαινομένου νησιδοποίησης μπορούν να βρεθούν στη βιβλιογραφία. Αυτές μπορούν να ταξινομηθούν σε δύο κύριες ομάδες: τις παθητικές και τις ενεργητικές μεθόδους. Οι παθητικές μέθοδοι προσπαθούν να ανιχνεύσουν το φαινόμενο με τη βοήθεια της παρατήρησης της εξέλιξης των εξόδων των ηλεκτρικών μεταβλητών των αντιστροφών. Από την άλλη, οι ενεργητικές μέθοδοι διαταράσσουν αυτές τις μεταβλητές με σκοπό να ανιχνεύσουν το φαινόμενο σε σχέση με την αντίδραση του συστήματος.

Πίνακας 4. 1: Κυριότερες Μέθοδοι Ανίχνευσης Νησιδοποίησης

Μέθοδοι	Χαρακτηριστικά
Παθητικές Μέθοδοι	
Πάνω από καθορισμένη τάση (Over Voltage)	Σβήσιμο όταν η τάση ξεπερνά, προς τα πάνω, ένα καθορισμένο όριο τάσης – Πολύ κοινός τρόπος
Κάτω από καθορισμένη τάση (Under Voltage)	Όπως παραπάνω, αλλά όταν η τάση γίνεται μικρότερη από ένα μικρότερο όριο – Πολύ κοινός τρόπος
Πάνω από καθορισμένη συχνότητα (Over Frequency)	Όταν η συχνότητα ξεπερνά, προς τα πάνω, ένα καθορισμένο όριο – Πολύ κοινός τρόπος
Κάτω από καθορισμένη συχνότητα (Under Frequency)	Όταν η συχνότητα γίνεται μικρότερη από ένα μικρότερο όριο – Πολύ κοινός τρόπος
Ρυθμός μεταβολής συχνότητας (Frequency Variation Rate)	Πιο περίπλοκη μέθοδος που προκαλείται από ασυνήθιστες μεταβολές στη συχνότητα – Κοινός τρόπος
Άλμα φάσης τάσης (Voltage Phase Jump)	Γνωστή επίσης ως ανίχνευση συντελεστή ισχύος. Ελέγχει τη διαφορά φάσης μεταξύ της τάσης και του ρεύματος εξόδου αντιστροφέα για μια ξαφνική αλλαγή
Ανίχνευση 3 ^{ης} αρμονικής τάσης (Third Harmonic Voltage Detection)	Οι αρμονικές θα αυξηθούν αν η χαμηλή σύνθετη αντίσταση του δικτύου γίνει μηδέν
Ενεργητικές Μέθοδοι	
Μετατόπιση συχνότητας (Frequency Shift)	Όταν μια αλλαγή στη συχνότητα ανιχνεύεται, η μέθοδος τροποποιεί τη συχνότητα των ρευμάτων Εξόδου στην ίδια κατεύθυνση Εγγχεί έναν παλμό στο δίκτυο για να
Μέτρηση σύνθετης αντίστασης (Impedance Measurement)	διαπιστώσει αν υφίσταται πρόβλημα
Μέτρηση αρμονικής σύνθετης αντίστασης (Harmonic Impedance Measurement)	Στην οποία αρμονικές εγχέονται σκόπιμα για να ανιχνευθεί η αντίδραση

Μέθοδοι Δικτύου

Επικοινωνίες δικτύου (Utility Communications) Απαιτείται συνεχές σήμα από το δίκτυο για να ελέγχει τη παραγωγή

Οι πιο συχνά χρησιμοποιούμενες παθητικές μέθοδοι είναι οι μέθοδοι παρατήρησης τάσης και συχνότητας. Αυτές οι μέθοδοι παρατηρούν την RMS τιμή της τάσης εξόδου και τη συχνότητα και ενεργοποιούν τους ηλεκτρονόμους τάσεως (ή αλλιώς επιτήρησης τάσεως) και συχνότητας όταν αυτά τα μεγέθη βγαίνουν έξω από τα αναμενόμενα όρια. Δεδομένου ότι τα περισσότερα κριτήρια και κανονισμοί απαιτούν ηλεκτρονόμους προστασίας, οι μέθοδοι επιτήρησης τάσης και συχνότητας βρίσκουν πολύ συχνά εφαρμογή στους φωτοβολταϊκούς αντιστροφείς. Προφανώς, αυτές οι μέθοδοι δεν παρέχουν ανίχνευση εάν η τάση και η συχνότητα βρίσκονται μέσα στα όρια των ηλεκτρονόμων μετά την εμφάνιση του φαινομένου. Δύο άλλες παθητικές μέθοδοι προτείνονται μερικές φορές: έλεγχος αρμονικής τάσης και ανίχνευση άλματος φάσης. Ο πρώτος ελέγχει το αρμονικό περιεχόμενο και αποσυνδέει τη μονάδα όταν ξεπερνιέται ένα όριο. Η μέθοδος ανίχνευσης άλματος φάσης ελέγχει τη μετατόπιση φάσης μεταξύ της τάσης και του ρεύματος του αντιστροφέα και ενεργοποιεί τους ηλεκτρονόμους προστασίας όταν δημιουργείται μια ξαφνική αλλαγή στη μετατόπιση φάσης. Και οι δύο μέθοδοι δεν χρησιμοποιούνται ευρέως εξαιτίας της δυσκολίας επιλογής των ορίων μετάβασης και της ευαισθησίας στις πηγές θορύβου και τις μεταβολές τάσης.

Εξαιτίας του γεγονότος ότι οι παθητικές μέθοδοι δεν μπορούν πάντα να εγγυηθούν ανίχνευση, προτείνονται οι ενεργητικές μέθοδοι σαν ένας εναλλακτικός τρόπος ελέγχου της τάσης και της συχνότητας ή ακόμα πιο συχνά σαν συμπληρωματικό μέσο ανίχνευσης. Υπάρχουν δύο κύριες ενεργητικές μέθοδοι: αυτές που συνεχώς διαταράσσουν τις μεταβλητές εξόδου του αντιστροφέα για να μετρήσουν κάποιες παραμέτρους και αυτές που αρχίζουν να διαταράσσουν αυτές τις μεταβλητές μόνο όταν αντιληφθούν ότι αυτές οι μεταβλητές έχουν αλλάξει. Οι μέθοδοι ολίσθησης συχνότητας (frequency drift) και η μέτρηση σύνθετης αντίστασης (impedance measurement) ανήκουν στην πρώτη ομάδα ενώ οι μέθοδοι μετατόπισης συχνότητας (frequency shift), μετατόπισης τάσης (voltage shift) και ολισθαίνουσας (slide-mode) μετατόπισης συχνότητας ανήκουν στη δεύτερη.

Η μέθοδος ολίσθησης συχνότητας δημιουργεί μια παραμορφωμένη κυματομορφή ρεύματος με τέτοιο τρόπο ώστε σε κατάσταση νησιδοποίησης, η συχνότητα τείνει να μετακινηθεί εκτός ορίων λειτουργίας. Όταν αυτή η μέθοδος εφαρμόζεται με θετική ανάδραση, η ικανότητα ανίχνευσης του φαινομένου νησιδοποίησης αυξάνεται σημαντικά. Ωστόσο, η μέθοδος αυτή έχει δύο σημαντικές αδυναμίες. Πρώτον, η μέθοδος πάντα εγγχεί ένα παραμορφωμένο ρεύμα που είναι μια σημαντική αδυναμία αυτών των ενεργητικών μεθόδων αφού προκαλούν προβλήματα «τρεμουλιάσματος» (flicker). Δεύτερον, μερικά φορτία μπορεί να αντισταθμίσουν τη μετατόπιση συχνότητας και έτσι να μειωθεί η ικανότητα ανίχνευσης του φαινομένου νησιδοποίησης.

Η μέθοδος ανίχνευσης μέσω μέτρησης της σύνθετης αντίστασης εισάγει μια περιοδική διαταραχή στο ρεύμα εξόδου και υπολογίζει έπειτα την τιμή της σύνθετης αντίστασης με τη μέτρηση και τον υπολογισμό του μέσου όρου της τάσης και του ρεύματος κατά τη

διάρκεια της διαταραχής. Μια αλλαγή ή μια υψηλή τιμή στην εκτιμώμενη σύνθετη αντίσταση μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην ανίχνευση μιας κατάστασης νησιδοποίησης. Ένας από τους λόγους που κάνουν αυτή τη μέθοδο σημαντική είναι γιατί απαιτείται από τους κανονισμούς στη Γερμανία και σε άλλες χώρες. Ωστόσο, όπως έχει αποδειχθεί από μελέτες, δεν είναι πολύ αποτελεσματικός τρόπος όσον αφορά την ανίχνευση της νησιδοποίησης. Αρχικά, η διαταραχή στο ρεύμα πρέπει να εισαχθεί στο δίκτυο μέσα σε μια πολύ μικρή περίοδο χρόνου και να το διαταράξει όσο το δυνατόν λιγότερο. Η σύνθετη αντίσταση είναι έπειτα πολύ δύσκολο να εκτιμηθεί από την τάση και το ρεύμα ακριβώς, αφού μετρούνται κατά ένα πολύ σύντομο χρονικό διάστημα. Επιπροσθέτως, η επιλογή του επιπέδου μεταβολής της τιμής της σύνθετης αντίστασης δεν είναι μικρό πρόβλημα. Πολύ υψηλές τιμές μειώνουν την ικανότητα ανίχνευσης ενώ πολύ μικρές τιμές μπορεί να οδηγήσουν σε εσφαλμένη ανίχνευση. Τέλος, αυτή η μέθοδος είναι τελείως αναποτελεσματική σε περίπτωση πολλαπλών αντιστροφών συνδεδεμένων στο ίδιο τμήμα ισχύος. Η απαίτηση της εφαρμογής της μεθόδου μέτρησης της σύνθετης αντίστασης σε συνδεδεμένους στο δίκτυο φωτοβολταϊκούς αντιστροφείς είναι αυτή τη στιγμή υπό συζήτηση στις περισσότερες από τις χώρες που την απαιτούν οι κανονισμοί. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε αλλαγές στους υπάρχοντες κανονισμούς.

Η μέθοδος ολισθαίνουσας μετατόπισης συχνότητας (slide-mode frequency shift) ελέγχει τη μεταβολή φάσης μεταξύ του ρεύματος εξόδου και της τάσης του αντιστροφέα σαν συνάρτηση της μετρούμενης συχνότητας. Όταν πραγματοποιηθεί μια κατάσταση νησιδοποίησης η συχνότητα αλλάζει και η μέθοδος αυξάνει ή μειώνει τη μεταβολή φάσης ώστε να κάνει τη συχνότητα να ολισθήσει προς τιμές εκτός ορίων λειτουργίας. Εντούτοις, αυτή η μέθοδος μπορεί να είναι μη αποτελεσματική όταν τα χαρακτηριστικά του φορτίου από τον αντιστροφέα αλληλεπιδρούν με τη μέθοδο και σταθεροποιούνται σε μια τιμή εντός ορίων λειτουργίας. Συμπερασματικά, αυτή η μέθοδος δεν είναι ευρέως χρησιμοποιούμενη στους φωτοβολταϊκούς αντιστροφείς.

Οι μέθοδοι μετατόπισης τάσης και συχνότητας, συνήθως γνωστές ως μέθοδοι μετατόπισης τάσης και συχνότητας Sandia, προσπαθούν να θίξουν αυτές τις μεταβλητές με τη βοήθεια μιας θετικής ανάδρασης των μετρημένων τους μεταβλητών. Όταν εμφανίζεται μια κατάσταση νησιδοποίησης, οι γραμμές διανομής δεν διατηρούν την τάση και τη συχνότητα, οι οποίες μεταβάλλονται με βάση το φορτίο. Η μέθοδος μετατόπισης τάσης μετακινεί το πλάτος του ρεύματος εξόδου στην κατεύθυνση των μεταβολών τάσης, έτσι ώστε να βγάλουν το σύστημα έξω από τα όρια τάσης του ηλεκτρονόμου. Αν και με αυτή τη μέθοδο επιτυγχάνεται μια υψηλή ικανότητα ανίχνευσης νησιδοποίησης, έχει δύο σημαντικά μειονεκτήματα, τα οποία είναι η μεταβλητότητα της rms τιμής της τάσης δικτύου και οι μεταβολές στην πραγματική ισχύ που παρέχεται από τον αντιστροφέα.

Η μέθοδος μετατόπισης συχνότητας βασίζεται στην ίδια φιλοσοφία με τη μέθοδο μετατόπισης τάσης. Όταν ανιχνεύεται μια αλλαγή στη συχνότητα, η μέθοδος τροποποιεί τη συχνότητα των ρευμάτων εξόδου στην ίδια κατεύθυνση. Σε περίπτωση νησιδοποίησης, η μέθοδος προκαλεί μια συνεχή μετατόπιση στη συχνότητα έως ότου βγαίνει έξω από τα όρια ηλεκτρονόμων συχνότητας. Αντίθετα από τη μέθοδο μετατόπισης τάσης, η μέθοδος μετατόπισης συχνότητας δεν απαιτεί μεταβολή της πραγματικής ισχύος και έτσι η αποτελεσματικότητά της είναι αρκετά υψηλότερη. Πράγματι, αυτή η μέθοδος θεωρείται μια από τις αποτελεσματικότερες μεθόδους

ανίχνευσης του φαινομένου νησιδοποίησης . Αυτή η υψηλή ικανότητα πρόληψης, μαζί με το γεγονός ότι δεν εισάγει μια περιοδική παραμόρφωση στις γραμμές διανομής, έχει οδηγήσει αυτήν την μέθοδο να είναι μεταξύ των ευρύτερα χρησιμοποιημένων μεθόδων ανίχνευσης στα συνδεδεμένα σε δίκτυο φωτοβολταϊκά συστήματα. Επιπλέον, αυτή η μέθοδος απαιτείται συνήθως ή τουλάχιστον συστήνεται από πολλούς κανονισμούς, όπως εκείνοι των Η.Π.Α.

Παρακάτω ακολουθεί αναλυτική παρουσίαση των μεθόδων ανίχνευσης νησιδοποίησης.

Ανίχνευση Νησιδοποίησης από Κοινά Συστήματα Προστασίας

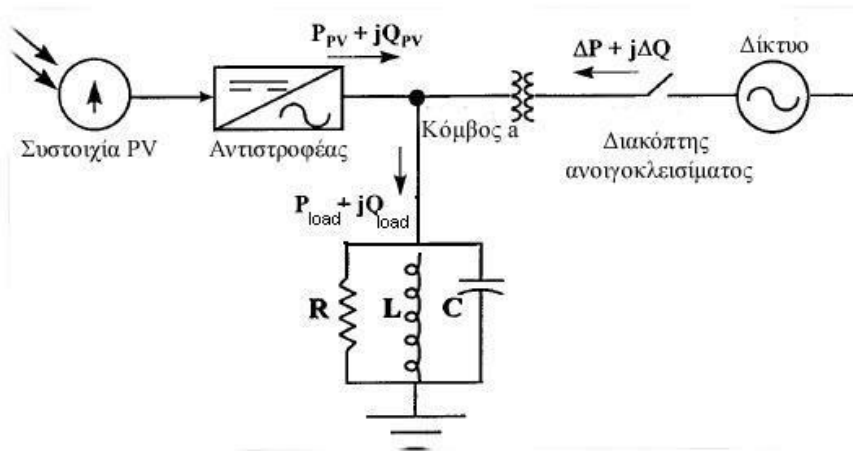
Τα συνδεδεμένα στο δίκτυο φ/β συστήματα απαιτείται να έχουν έναν ηλεκτρονόμο υπέρτασης (OVR – overvoltage relay), έναν ηλεκτρονόμο «υπότασης» (ή ελλείψεως τάσης) (UVR – undervoltage relay), έναν ηλεκτρονόμο για συχνότητα πάνω από μια καθορισμένη ανώτατη τιμή (OFR – overfrequency relay) και έναν ηλεκτρονόμο για συχνότητα κάτω από μια καθορισμένη κατώτατη τιμή (UFR – underfrequency relay) που αποσυνδέουν το φ/β σύστημα από το δίκτυο σε περίπτωση που το πλάτος ή η συχνότητα της τερματικής τάσης της PCU (Power Conditioning Unit – Μονάδα Προσαρμογής Ισχύος) πηγαίνουν εκτός κάποιων καθορισμένων ορίων. Κάτω από τις περισσότερες περιστάσεις, αυτοί οι ηλεκτρονόμοι θα αποτρέψουν τη νησιδοποίηση. Για να κατανοηθεί αυτό θεωρήστε το σχήμα 4.2. Όταν ο αυτόματος διακόπτης είναι κλειστός, η πραγματική και η άεργος ισχύς $P_{PV} + jQ_{PV}$ ρέει από το φ/β σύστημα στον κόμβο a και ισχύς

$P_{load} + jQ_{load}$ ρέει από το a στο φορτίο. Άρα στον κόμβο a έχουμε:

$$\Delta P = P_{load} - P_{PV}$$

$$\Delta Q = Q_{load} - Q_{PV} \quad (4.1)$$

όπου P , Q είναι η πραγματική και άεργος ισχύς που ρέει στη γραμμή τροφοδότησης από το δίκτυο.



Σχήμα 4.2: Σύνδεση φωτοβολταϊκού συστήματος με το δίκτυο

Πρέπει να επισημανθεί ότι οι PCUs των φ/β συστημάτων τυπικά λειτουργούν με

μοναδιαίο συντελεστή ισχύος, έτσι κάτω από τις περισσότερες συνθήκες $Q_{PV} = 0$ και $\Delta Q = Q_{load}$. Η πραγματική και άεργος ισχύς που καταναλώνονται από το φορτίο δίνονται από:

$$P_{load} = \text{Re} \left[\vec{V}_a * \vec{I}_{load}^* \right] = 2V_a I_{load} \cos \varphi$$

$$Q_{load} = \text{Re} \left[\vec{V}_a * / \vec{I}_{load}^* \right] = 2V_a I_{load} \sin \varphi \quad (4.2)$$

Όπου το $\cos \varphi$ είναι συντελεστής μετατόπισης (displacement power factor – dprf), που είναι ίδιος με τον συντελεστή ισχύος σε γραμμικά κυκλώματα με ημιτονοειδής τάσεις και ρεύματα και V_a και I_{load} είναι οι RMS τιμές της V_a , της στιγμιαίας αντίστασης στο a και i_{load} το ρεύμα φορτίου. Ο αστερίσκος διώχνει συζυγή μιγαδική ποσότητα. Υποθέτοντας ότι το φορτίο μπορεί να αντιπροσωπεύει ως ένα παράλληλο RLC κύκλωμα, αυτές οι εκφράσεις μπορούν να γραφτούν ως εξής:

$$P_{load} = V_a \frac{V_a}{R_{load}} \quad (4.3)$$

$$Q_{load} = V_a \left[\frac{V_a}{\omega L} - \frac{V_a}{\omega C} \right] \quad (4.4)$$

Όταν ο αυτόματος διακόπτης ανοίγει, τόσο η P όσο και η Q θα πάνε στο μηδέν. Η συμπεριφορά του συστήματος θα στηριχθεί στις P και Q στη στιγμή πριν από το ότι το φορτίο μπορεί να αντιπροσωπευθεί ως ένα παράλληλο RLC κύκλωμα, αυτές οι εκφράσεις μπορεί να γραφούν ως εξής:

άνοιγμα του αυτόματου διακόπτη που διαμορφώνει τη κατάσταση νησιδοποίησης, οι οποίες σημειώνονται ως ΔP^- και ΔQ^- . Υπάρχουν τέσσερις περιπτώσεις στις οποίες οι μέθοδοι OVR/UVR ή οι OFR/UFR θα αποτρέψουν τη νησιδοποίηση.

1) $\Delta P^- > 0$. Σε αυτήν την περίπτωση, το φ/β σύστημα παράγει λιγότερη πραγματική ισχύ από αυτή που απαιτείται από το τοπικό φορτίο ($P_{load} > P_{PV}$). Από την εξίσωση (4.3) βλέπουμε ότι όταν ανοίγει ο διακόπτης και το P γίνεται μηδέν, η P_{load} θα μειωθεί, που σημαίνει ότι η V_a πρέπει επίσης να μειωθεί αφού το R_{load} μπορεί να υποθεθεί ότι

είναι σταθερό κατά τη διάρκεια αυτού του χρονικού διαστήματος. Αυτή η μείωση μπορεί να ανιχνευθεί από την μέθοδο UVR και έτσι η νησιδοποίηση αποτρέπεται.

2) $\Delta P^- < 0$. Σε αυτήν την περίπτωση, $P_{load} < P_{PV}$ και η ισχύς ρέει προς το δίκτυο. Τώρα, όταν το P γίνεται μηδέν, το P_{load} πρέπει να αυξηθεί και η V_a θα αυξηθεί επίσης. Αυτή η κατάσταση μπορεί να ανιχνευθεί από την μέθοδο OVR και πάλι η νησιδοποίηση αποτρέπεται.

3) $\Delta Q^- > 0$. Αυτή η περίπτωση αντιστοιχεί σε ένα φορτίο με επαγωγικό συντελεστή ισχύος ή φορτίο του οποίου η άεργη συνιστώσα είναι επαγωγική. Μετά το άνοιγμα του αυτόματου διακόπτη, $Q = 0$. Εντούτοις, όπως προηγουμένως αναφέρθηκε, το Q_{PV} είναι συνήθως μηδέν, και επομένως $Q_{load} = 0$. Αυτό απαιτεί ο όρος στις αγκύλες στην εξίσωση (4.4) να γίνει μηδέν, που σημαίνει ότι το επαγωγικό μέρος πρέπει να μειωθεί και το χωρητικό μέρος να αυξηθεί. Η εξίσωση (4.4) μας δείχνει ότι για να γίνει αυτό η συχνότητα ω της v_a πρέπει να αυξηθεί. Αυτή η αύξηση στο ω μπορεί να ανιχνευθεί από τη μέθοδο OFR.

4) $\Delta Q^- < 0$. Αυτή η περίπτωση αντιστοιχεί σε φορτίο με χωρητικό συντελεστή ισχύος. Όπως και στη περίπτωση (3), όταν Q γίνεται μηδέν, τα επαγωγικά και χωρητικά μέρη της εξίσωσης (4.4) πρέπει να ισοροπήσουν έτσι ώστε το $Q_{load} = 0$ και αυτό απαιτεί το ω να μειωθεί. Αυτό μπορεί να ανιχνευθεί από τη μέθοδο UFR.

Να σημειωθεί ότι οι περιπτώσεις (3) και (4) μπορούν να εκφραστούν από την άποψη ενός όρου φάσης. Το φ/β σύστημα θα προκαλέσει την αλλαγή της συχνότητα έως ότου επιτευχθεί η ακόλουθη κατάσταση:

$$\arg \left\{ R^{-1} + j\omega C - j(\omega L)^{-1} \right\} = 0 \quad (4.5)$$

Αυτό εμφανίζεται στη συχνότητα συντονισμού του φορτίου, $\omega_{res} = (LC)^{-0.5}$. Στην ω_{res} επιτυγχάνεται η μόνιμη κατάσταση και δεν εμφανίζεται επιπλέον μεταβολή στην ω . Εάν η ω_{res} βρεθεί έξω από τα όρια των μεθόδων OFR/UFR, δεν θα εμφανιστεί νησιδοποίηση.

Αξίζει να επαναλάβουμε σε αυτό το σημείο ότι όλες οι διατάξεις PCU των φ/β συστημάτων για εφαρμογές διεπαφής με το δίκτυο πρέπει να έχουν προστασία OVR/UVR και OFR/UFR. Επομένως, εάν είτε η πραγματική είτε η άεργος ισχύς του φορτίου και του φ/β συστήματος δεν αντιστοιχίζονται και επιλέγονται κατάλληλα όρια για τις μεθόδους OVR/UVR και OFR/UFR, η νησιδοποίηση δεν θα εμφανιστεί.

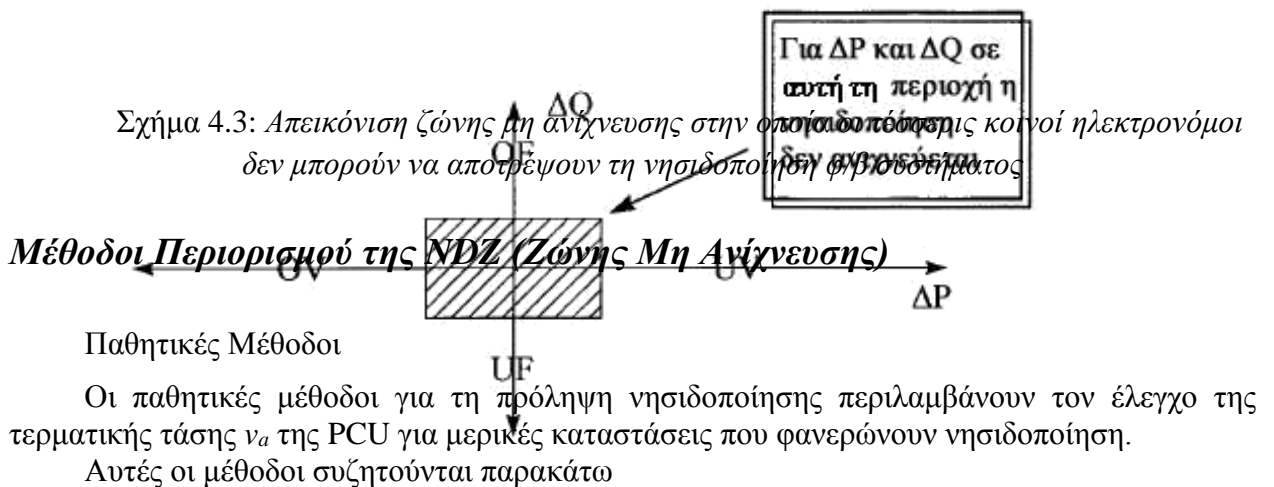
Με αυτήν την κατανόηση της λειτουργίας των τεσσάρων πιο κοινών ηλεκτρονόμων, μπορούμε τώρα να επανεξετάσουμε το ζήτημα της παρέμβασης των φ/β συστημάτων με τη λειτουργία αυτόματων διακοπών ισχύος με κύκλους πτώσεως τάσεως και αυτομάτων επαναφοράς. Αυτοί είναι διακόπτες που ανοίγουν όταν ανιχνεύεται μια κατάσταση υπερεντάσεως που προκαλείται από ένα σφάλμα και έπειτα αυτόματα ανοιγοκλείνουν μετά από ένα σύντομο χρονικό διάστημα. Κατά τη διάρκεια του διαστήματος που είναι ανοικτός, ο ιονισμένος αέρας που διαμορφώνει το κανάλι αγωγιμότητας πρέπει να διαλυθεί, επιτρέποντας με αυτόν τον τρόπο στο σφάλμα να εκκαθαριστεί μόνο του χωρίς εκτεταμένη διακοπή της λειτουργίας του ηλεκτρικού δικτύου. Εάν το σφάλμα δεν εκκαθαριστεί κατά τη διάρκεια του πρώτου ανοικτού διαστήματος, ο αυτόματος διακόπτης επαναφοράς θα ανοίξει πάλι για μια

μακρύτερη χρονική περίοδο. Μερικοί διακόπτες επαναφοράς επαναλαμβάνουν αυτήν την διαδικασία και μια τρίτη φορά. Εάν η κατάσταση υπερεντάσεως εμμένει μετά από όλα αυτά τα ανοικτά διαστήματα, ο διακόπτης ανοίγει και παραμένει σε αυτή τη κατάσταση, που σημαίνει ότι δεν θα προσπαθήσει να ξανακλείσει έως ότου επαναρυθμιστεί χειροκίνητα από το προσωπικό συντήρησης. Για μια διάταξη όπως αυτή του σχήματος 4.2, έχει υποθεθεί ότι αν η σύνθετη αντίσταση του σφάλματος είναι αρκετά υψηλή, το φ/β σύστημα θα μπορούσε να συνεχίσει να διατηρεί το κανάλι ιονισμένου αέρα, αποτρέποντας την εκκαθάριση του σφάλματος κατά την διάρκεια του πρώτου ανοικτού χρονικού διαστήματος του αυτόματου διακόπτη επαναφοράς. Αυτό θα μπορούσε να οδηγήσει σε μη αναγκαίες και μεγάλου χρόνου διακοπές ισχύος και μείωση στην αξιοπιστία της παροχής ηλεκτρικής ισχύος στο φορτίο. Ωστόσο, αν αναλογιστούμε τί αναμένεται να συμβεί αν, για παράδειγμα, ένα σφάλμα προς γη συνδεθεί στο σχήμα 4.2 μεταξύ της γραμμής διανομής του δικτύου και της γης, οπουδήποτε μέσα στο σύστημα. Σε αυτό το απλό μοντέλο το σφάλμα εμφανίζεται σαν μια αντίσταση συνδεδεμένη παράλληλα με το φορτίο. Τα σφάλματα που προκαλούν τη διέλευση σε αρκετό ρεύμα ώστε να λειτουργήσουν λανθασμένα οι αυτόματοι διακόπτες επαναφοράς έχουν πολύ χαμηλή σύνθετη αντίσταση. Εάν ένα τέτοιο σφάλμα ήταν παρόν στον αυτόματο διακόπτη του σχήματος, θα έβγαζε απότομα έξω το φορτίο και θα οδηγούσε σε μια μείωση στην τάση στον κόμβο a που θα ανιχνευόταν από το φ/β σύστημα, δεδομένου ότι η μέθοδος UVR απαιτείται για να απενεργοποιηθεί η PCU πολύ γρήγορα (μέσα σε μερικούς κύκλους) εάν η τάση στο a πέσει σε πολύ χαμηλό επίπεδο. Ένα σφάλμα με σημαντικά υψηλή σύνθετη αντίσταση που η πτώση της V_a δεν θα ήταν αρκετά μεγάλη ώστε να λειτουργήσει η μέθοδος UVR δεν θα απορροφούσε αρκετό ρεύμα για να προκαλέσει το άνοιγμα ενός τυπικού αυτόματου διακόπτη επαναφοράς. Επομένως, με τον εξοπλισμό που υπάρχει, φαίνεται ότι τα φ/β συστήματα δεν θα πρέπει να παρεμποδίζουν τη λειτουργία των αυτόματων διακοπών ισχύος με κύκλους πτώσεως και αυτόματου επαναφοράς. Εντούτοις, οι συσκευές ανίχνευσης σφαλμάτων υψηλής σύνθετης αντίστασης είναι σε ανάπτυξη και η διαδεδομένη χρήση τέτοιων ανιχνευτών θα μπορούσε να αλλάξει τις απαιτήσεις προστασίας νησιδοποίησης για τα φ/β συστήματα. Πάνω σε αυτό το ζήτημα απαιτείται ακόμα αρκετή έρευνα.

Ανεπάρκειες των Κοινών Συστημάτων Προστασίας: Η Ζώνη Μη Ανίχνευσης (Non Detection Zone - NDZ)

Έχουμε εξετάσει ως εδώ τέσσερις περιπτώσεις στις οποίες οι μέθοδοι OVR/UVR και οι OFR/UFR ενός φ/β συστήματος θα αποτρέψουν τη νησιδοποίηση. Δυστυχώς, υπάρχει μια ακόμη πιθανή περίπτωση: $P^- = Q^- = 0$. Αυτό αντιστοιχεί σε μια περίπτωση στην οποία η παραγωγή ισχύος του φ/β συστήματος ταιριάζει απόλυτα με την απαίτηση ισχύος των φορτίων και ο dpf του φορτίου είναι μονάδα. Σε αυτή η περίπτωση, όταν ο διακόπτης είναι ανοικτός δεν εμφανίζεται καμία αλλαγή στο απομονωμένο σύστημα και οι μέθοδοι OVR/UVR και OFR/UFR δεν λειτουργούν. Στην πραγματικότητα, τα P^- και Q^- δεν είναι απαραίτητο να είναι ακριβώς μηδέν για να γίνει αυτό επειδή το πλάτος και η συχνότητα της τάσης δικτύου αναμένεται να παρεκκλίνουν ελαφρώς από τις ονομαστικές τιμές και επομένως τα κατώφλια για τους τέσσερις ηλεκτρονόμους δεν μπορούν να τεθούν αυθαίρετα μικρά ή αλλιώς το φ/β σύστημα θα υπόκειται σε εσφαλμένη λειτουργία. Αυτός ο περιορισμός οδηγεί στο σχηματισμό μιας ζώνης μη ανίχνευσης (NDZ), όπως φαίνεται στο σχήμα 4.3. Μελέτες έχουν δείξει ότι η πιθανότητα

του P^- και Q^- να πέσουν σε NDZ των μεθόδων OVR/UVR και OFR/UFR μπορεί να είναι πολύ σημαντική. Επομένως είναι σημαντικό τα φ/β συστήματα να ενσωματώσουν μεθόδους για να αποτρέψουν τη Νησιδοποίηση στην περίπτωση όπου $P^- = Q^- \approx 0$



Μέθοδος Ελέγχου Αρμονικής Τάσης

Η μέθοδος ελέγχου αρμονικής τάσης δεν στηρίζεται σε έναν κακό συνδυασμό πραγματικής ή άεργου ισχύος για την αντίχνευση. Αντ' αυτού, η PCU του φ/β συστήματος ελέγχει τη συνολική αρμονική παραμόρφωση (THD) του v_a και διακόπτει εάν το THD υπερβαίνει κάποιο κατώτατο όριο. Υπάρχουν δύο μηχανισμοί που μπορούν να αναγκάσουν τις αρμονικές στο v_a να αυξηθούν όταν αρχίζει η νησιδοποίηση. Ένας από αυτούς είναι η ίδια η PCU του φ/β συστήματος. Μια PCU του φ/β συστήματος θα παράγει κάποιες αρμονικές ρεύματος στην εναλλασσόμενη έξοδο ρεύματος, όπως κάνουν όλοι οι μετατροπείς ισχύος. Μια χαρακτηριστική απαίτηση, ενός συνδεδεμένου στο δίκτυο φ/β συστήματος, για την PCU είναι ότι παράγουν λιγότερο από 5% THD του συνολικού ονομαστικού ρεύματος. Κάτω από κανονική λειτουργία, το δίκτυο, που είναι μια σχετικά αυστηρής ακρίβειας πηγή τάσης, οδηγεί σε μια μη παραμορφωμένη ημιτονοειδή τάση ($THD \approx 0$) στα τερματικά των φορτίων, που αναγκάζει το (γραμμικό) φορτίο να απορροφήσει ένα μη παραμορφωμένο ημιτονοειδές ρεύμα. Λαμβάνοντας υπόψη τον κόμβο a, βλέπουμε ότι κάτω από αυτή τη συνθήκη τα αρμονικά ρεύματα που παράγονται από τη PCU θα οδηγηθούν προς το δίκτυο. Όταν ο αυτόματος

διακόπτης ανοίγει, τα αρμονικά ρεύματα που παράγονται από τη PCU θα εγχυθούν στο φορτίο και από το νόμο του Ohm και την υπέρθεση (superposition), θα προκαλέσουν αρμονικές στην v_a . Αυτές οι αρμονικές τάσης μπορούν να ανιχνευθούν από τη PCU, η οποία μπορεί έπειτα να υποθέσει ότι το φ/β σύστημα βρίσκεται σε κατάσταση νησιδοποίησης και να διακόψει τη λειτουργία.

Ο δεύτερος μηχανισμός είναι η απόκριση τάσης του μετασχηματιστή που παρουσιάζεται στο σχήμα 4.2. Εάν ο διακόπτης που αποσυνδέει την πηγή τάσης δικτύου από τη νησίδα είναι στο πρωτεύον του μετασχηματιστή, το δευτερεύον του μετασχηματιστή θα διεγερθεί από το ρεύμα εξόδου του φ/β συστήματος. Εντούτοις, λόγω της μαγνητικής υστέρησης του μετασχηματιστή, η απόκριση τάσης του μετασχηματιστή σε αυτή τη (περίπου) ημιτονοειδή διέγερση είναι ιδιαίτερα παραμορφωμένη. Ειδικότερα, περιέχει μια μεγάλη τρίτη αρμονική συνιστώσα. Αυτό το φαινόμενο έχει επαληθευθεί πειραματικά. Οι ερευνητές έχουν διαπιστώσει ότι η τρίτη αρμονική τάση στον κόμβο a μπορεί να αυξηθεί κατά έναν παράγοντα της τάξης του πέντε ή περισσότερο όταν αρχίζει η νησιδοποίηση λόγω της παραμόρφωσης που εισάγεται από κοινούς μετασχηματιστές.

Θεωρητικά, η μέθοδος ελέγχου αρμονικής τάσης υπόσχεται να είναι ιδιαίτερα επιτυχής στην ανίχνευση νησιδοποίησης κάτω από ένα ευρύ φάσμα καταστάσεων και η αποτελεσματικότητά της δεν αλλάζει σημαντικά στην περίπτωση πολλαπλών αντιστροφών. Εντούτοις, υποφέρει από σοβαρή δυσκολία εφαρμογής: δεν είναι πάντα δυνατό να επιλεγεί ένα κατώφλι για ενεργοποίηση, το οποίο παρέχει αξιόπιστη προστασία από νησιδοποίηση αλλά δεν οδηγεί σε εσφαλμένη λειτουργία του φ/β συστήματος. Είναι σαφές ότι πρέπει να επιλεγεί ένα κατώφλι που να είναι: (α) υψηλότερο από το THD που μπορεί να αναμένεται στην τάση δικτύου αλλά, (β) χαμηλότερο από το THD που θα παραχθεί κατά τη διάρκεια νησιδοποίησης από τους δύο μηχανισμούς που περιγράφονται παραπάνω. Ας υποθέσουμε ότι η PCU του φ/β συστήματος παράγει 5% THD στο ρεύμα εξόδου του, που είναι το μέγιστο επιτρεπόμενο όριο. Για ένα ωμικό φορτίο που τροφοδοτείται από αυτό το ρεύμα, το THD της v_a θα είναι επίσης 5%, αλλά για ένα παράλληλο RLC που η σύνθετη αντίσταση του φορτίου μειώνεται με την αύξηση της συχνότητας πάνω από την ω_{res} και έτσι μπορεί να υπάρξει λιγότερη παραμόρφωση στην απόκριση τάσης απ' ό,τι στο ρεύμα που παρουσιάζεται. Είναι επομένως ξεκάθαρο ότι το κατώτατο όριο THD θα πρέπει να τεθεί χαμηλότερα από 5%. Στην πραγματικότητα, η τάση παραμόρφωσης του δικτύου που υποθέσαμε να είναι ≈ 0 προηγουμένως μπορεί πραγματικά να αναμένεται να είναι 1- 2% υπό κανονικές συνθήκες, αλλά υπάρχουν πολλές καταστάσεις, όπως η παρουσία των μετατροπέων ηλεκτρικής ισχύος που παράγουν αρμονικές ρεύματος στις συχνότητες στις οποίες το δίκτυο παρουσιάζει συντονισμό, η οποία μπορεί προκαλέσει τη σημαντική αύξηση αυτής της τιμής. Επίσης, παροδικές διαταραχές τάσης, ιδιαίτερα μεγάλες όπως εκείνες που συνοδεύουν τη σύνδεση και αποσύνδεση πυκνωτών, θα μπορούσαν να ερμηνευθούν από τη PCU του φ/β συστήματος ως στιγμιαία αύξηση στο THD, ανάλογα με την τεχνική μέτρησης που χρησιμοποιείται. Είναι σαφές ότι σε μερικές περιπτώσεις δεν είναι δυνατό να επιλεγεί ένα κατώτατο όριο που να ικανοποιεί τα κριτήρια (α) και (β). Είναι δυνατό να υπερνικήσουμε αυτό το πρόβλημα χρησιμοποιώντας ψηφιακή επεξεργασία σήματος και αναγνώριση αρμονικής υπογραφής (harmonic signature recognition), αλλά αυτές οι τεχνικές δεν μπορούν να εφαρμοστούν τόσο λόγω κόστους όσο και αποδοτικότητας σε μικρές PCUs φ/β συστημάτων. Για αυτούς τους λόγους, η τεχνική ελέγχου αρμονικών δεν έχει χρησιμοποιηθεί εμπορικά.

Μέθοδος Ανίχνευσης Παροδικής Αλλαγής Φάσης ή Άλματος Φάσης

Μια άλλη μέθοδος πρόληψης νησιδοποίησης, η ανίχνευση άλματος φάσης (PJD – Phase Jump Detection), περιλαμβάνει τον έλεγχο της φάσης μεταξύ της τελικής τάσης του αντιστροφέα και του ρεύματος εξόδου του για ένα ξαφνικό άλμα. Ας αναλογιστούμε την περίπτωση στην οποία το φορτίο στο σχήμα 4.2 έχει ένα μη μοναδιαίο dpf (μη μηδενική φασική γωνία τάσης - ρεύματος). Κάτω από κανονική λειτουργία, η κυματομορφή των ρευμάτων εξόδου της PCU θα συγχρονίζονταν με την τάση του δικτύου με την ανίχνευση αύξουσας (ή φθίνουσας) διέλευσης από το μηδέν του v_a . Αυτό γίνεται μέσω της χρήσης ενός βρόχου κλειδώματος φάσης (PLL – Phase Locked Loop). Μια σχηματική αναπαράσταση του κυκλώματος PLL παρουσιάζεται στο σχήμα 4.4. Το φίλτρο της γραμμής εισόδου αφαιρεί το θόρυβο και αρμονικές υψηλότερης τάξης από το σήμα εισόδου, που εδώ είναι η v_a . Η συσκευή σύγκρισης φάσης δημιουργεί ένα σήμα

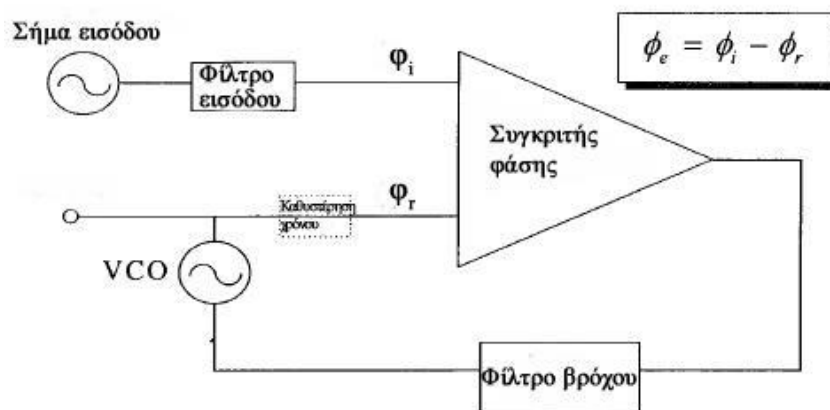
του οποίου το μέγεθος είναι ανάλογο προς το λάθος φάσης μεταξύ των σημάτων εισαγωγής του, τα οποία είναι η v_a και η έξοδος του ελεγχόμενου από τάση ταλαντωτή

VOC (Voltage Controlled Oscillator). Στα περισσότερα σύγχρονα PLLs, οι συγκριτές φάσης χρησιμοποιούν κάποιο τρόπο μέτρησης του χρόνου μεταξύ των αύξουσων περασμάτων από το μηδέν των δύο τους κυματομορφών εισόδου ώστε να καθορίσουν το λάθος φάσης. Το φίλτρο βρόχου αφαιρεί τις εναλλασσόμενες συνιστώσες ρεύματος από την έξοδο του συγκριτή φάσης. Το συνεχές (DC) σήμα εξόδου του συγκριτή και του φίλτρου βρόχου χρησιμοποιούνται για να ρυθμίσουν την έξοδο του VCO με τέτοιο τρόπο ώστε να μειωθεί το λάθος φάσης μεταξύ της εξόδου του και της v_a . Σε έναν αντιστροφέα

φ/β συστήματος, η έξοδος του VCO παρέχει το πρότυπο κυματομορφής για το ρεύμα εξόδου της PCU, i_{PV} , και έχει έτσι την ίδια φάση και συχνότητα i_{PV} . Επομένως, η

λειτουργία του PLL είναι να συγχρονίσει τη v_a και το i_{PV} . Για να εφαρμοστεί η PJD,

πρέπει απλά να προσθέσουμε μια συσκευή που μετρά το συνεχές (DC) σήμα εξόδου του συγκριτή φάσης και φίλτρου βρόχου και παράγει ένα σήμα για να απενεργοποιήσει τη PCU όταν αυτό το σήμα φθάνει ή υπερβαίνει κάποιο κατώτατο όριο.



Σχήμα 4.4: Απεικόνιση του βρόχου κλειδώματος φάσης (PLL)

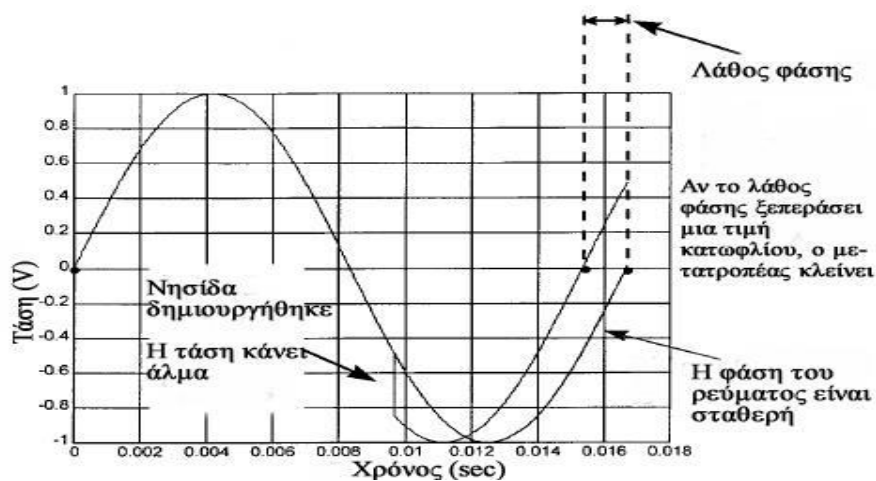
Η μέθοδος PJD δουλεύει όπως φαίνεται στο σχήμα 4.5. Όταν το δίκτυο απενεργοποιείται, ξαφνικά είναι το ρεύμα i_{PV} του φ/β συστήματος που γίνεται η πάγια

φάση αναφοράς, δεδομένου ότι το i_{PV} ακολουθεί ακόμα το πρότυπο κυματομορφής που παρέχεται από το PLL. Εντούτοις, δεδομένου ότι η συχνότητα δεν έχει αλλάξει, η φασική γωνία ρεύματος - τάσης του φορτίου πρέπει να είναι η ίδια όπως πριν το άνοιγμα του διακόπτη του δικτύου και επομένως η v_a πρέπει να κάνει «άλμα» σε αυτήν την νέα φάση όπως φαίνεται στο σχήμα 4.5.

Στο επόμενο σημείο αύξουσας διέλευσης από το μηδέν της v_a , το λάθος φάσης που προκύπτει μεταξύ της νέας τάσης και του ρεύματος εξόδου της PCU, εάν είναι μεγαλύτερο από το κατώφλι, θα προκαλέσει τη συσκευή ελέγχου στο PLL να παράγει σήμα τερματισμού και έτσι η νησιδοποίηση αποτρέπεται. Εάν κάνουμε την απλοποιημένη υπόθεση ότι η απόκριση των συστημάτων είναι στιγμιαία, μπορούμε να γράψουμε ένα κατά προσέγγιση κριτήριο φάσης για τη μέθοδο PJD παρόμοιο με αυτό για τις μεθόδους OFR/UFR:

$$\left| \arg \left\{ R^{-1} + j\omega C - j(\omega L)^{-1} \right\} \right| \geq \varphi_{th} \quad (4.6)$$

δημιουργείται ένα σήμα τερματισμού. Αν η εξίσωση (4.6) ικανοποιείται στη συχνότητα ω_0 , τότε η νησιδοποίηση δεν θα εμφανιστεί.

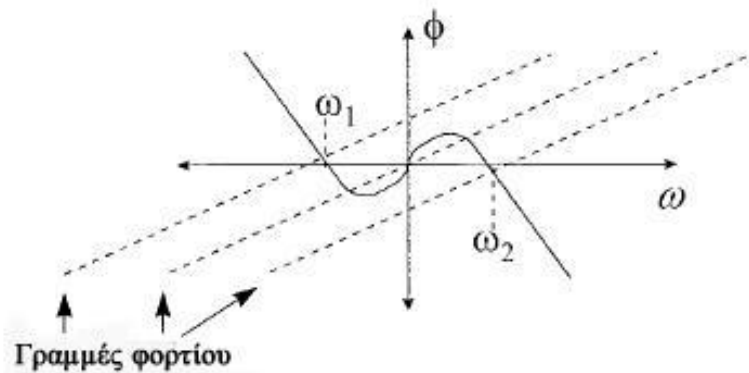


Σχήμα 4.5: Σχήμα που εξηγεί τη λειτουργία της μεθόδου ανίχνευσης άλματος φάσης (PJD)

Τα πλεονεκτήματα της μεθόδου PJD είναι η ευαισθησία και η ευκολία εφαρμογής της. Δυστυχώς, το μειονέκτημά της είναι ότι έχει μια ζώνη μη ανίχνευσης (NDZ) για τα φορτία με μοναδιαίο dprf, μέσα στην υπάρχουσα NDZ των τεσσάρων κοινών ηλεκτρονόμων. Αυτή η NDZ μπορεί να απομακρυνθεί από την περιοχή φορτίων με μοναδιαίο dfr με τη λειτουργία της PCU με έναν μη μοναδιαίο συντελεστή ισχύος, αλλά όπως αναφέρθηκε προηγουμένως δεν μπορεί να κινηθεί πολύ μακριά χωρίς να καταστήσει τη PCU ακριβότερη. Η ανίχνευση άλματος φάσης επομένως μπορεί να συρρικνωθεί αλλά δεν εξαλείφει τη NDZ των τεσσάρων κοινών ηλεκτρονόμων.

Μέθοδος Ολισθαίνουσας Μετατόπισης Συχνότητας

Στη μέθοδο ολισθαίνουσας μετατόπισης συχνότητας (SMS – Slide Mode Frequency Shift), η φασική γωνία ρεύματος - τάσης της PCU, αντί να ελέγχεται πάντα ώστε να είναι μηδέν, γίνεται να είναι μια συνάρτηση της συχνότητας της v_a όπως φαίνεται στο σχήμα 4.6. Η σχήματος S καμπύλη απόκρισης φάσης της PCU σχεδιάζεται έτσι ώστε η φάση του αντιστροφέα να αυξάνεται γρηγορότερα από τη φάση των περισσότερων φορτίων μοναδιαίου dfr στη περιοχή κοντά στη συχνότητα δικτύου ω_0 . Αυτό κάνει την ω_0 ένα ασταθές σημείο λειτουργίας για τη PCU. Ενώ το δίκτυο είναι συνδεδεμένο, σταθεροποιεί το σημείο λειτουργίας ω_0 παρέχοντας φάση και συχνότητα αναφοράς. Εντούτοις, μετά από το άνοιγμα του διακόπτη, το σημείο λειτουργίας φάσης –συχνότητας του φορτίου και του φ/β συστήματος μπορεί να είναι σε μια διασταύρωση του φορτίου γραμμής και



Σχήμα 4.6: Λεπτομερές γράφημα με τιμές συχνοτήτων που δείχνει τα χαρακτηριστικά μεταξύ της φάσης – συχνότητας για μια PCU που εφαρμόζει τη μέθοδο αποτροπής νησιδοποίησης SMS.

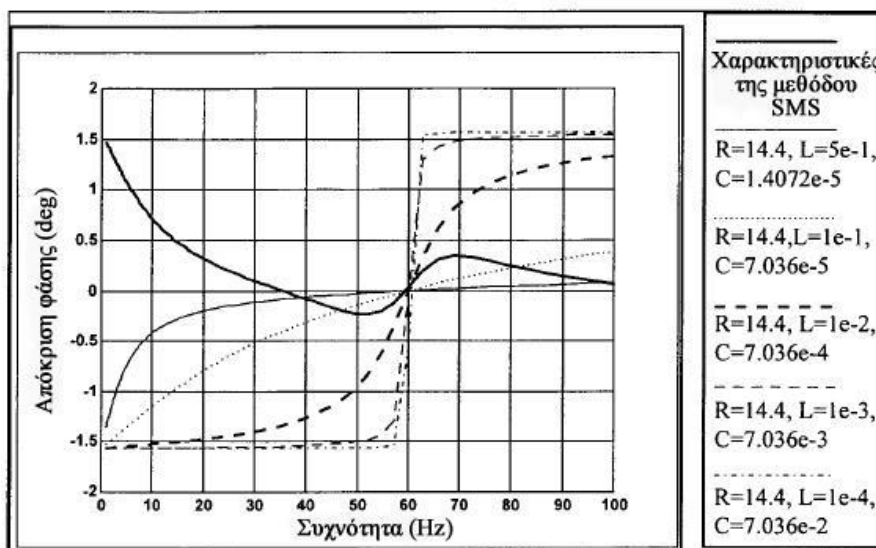
Η καμπύλη σχήματος S είναι η χαρακτηριστική φάσης – συχνότητας. Οι διακεκομμένες γραμμές είναι οι γραμμές φορτίου (αντεστραμμένες λόγω του αρνητικού πρόσημου στην

εξίσωση (4.7)). Η δεύτερη γραμμή φορτίου περνά από το σημείο $(\omega_0, 0)$, υποδεικνύοντας φορτίο μοναδιαίου dfr της καμπύλης απόκρισης φάσης της PCU. Θεωρούμε το φορτίο γραμμής ενός φορτίου με μοναδιαίο dfr, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.6. Η γραμμή φορτίου και η καμπύλη απόκρισης φάσης της PCU τέμνονται στο σημείο $(\omega_0, 0)$, αλλά εάν υπάρχει οποιαδήποτε μικρή διαταραχή της συχνότητας της ν_a μακριά από την ω_0 , η αστάθεια της PCU στο ω_0 αναγκάζει τη PCU να ενισχύσει τη διαταραχή και να οδηγήσει το σύστημα σε έναν νέο σημείο λειτουργίας, είτε ω_1 ή ω_2 ανάλογα με την κατεύθυνση της διαταραχής. Η καμπύλη φάσης της PCU μπορεί να σχεδιαστεί κατά τέτοιο τρόπο ώστε οι ω_1 και ω_2 να βρίσκονται εκτός της NDZ της μεθόδου OFR/UFR.

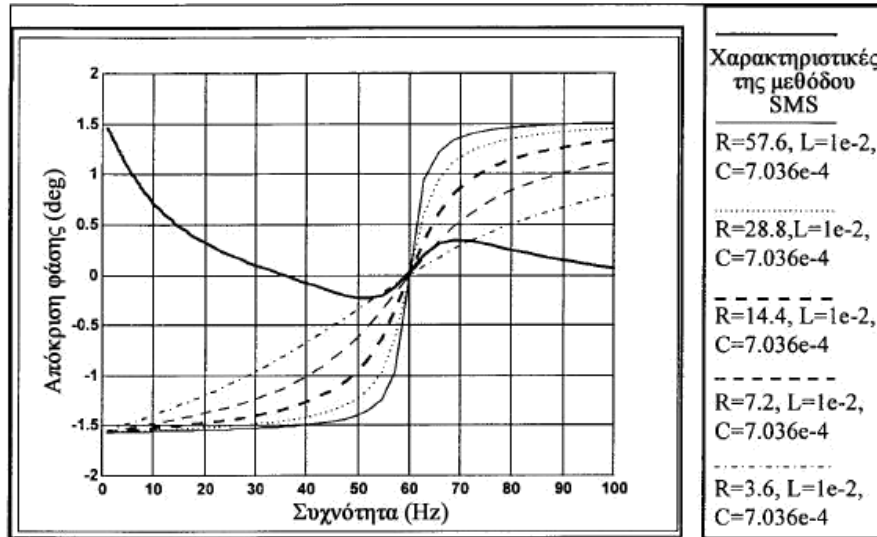
Η μέθοδος SMS εφαρμόζεται μέσω του σχεδιασμού του φίλτρου της γραμμής εισόδου στο PLL. Αυτό το φίλτρο ελέγχει τη χαρακτηριστική φάσης της PCU επειδή ελέγχει το σήμα αναφοράς για το PLL. Επομένως, αυτό που απαιτείται είναι να σχεδιαστεί το φίλτρο εισόδου ώστε να έχει την επιθυμητή χαρακτηριστική φάσης. Μπορούμε να γράψουμε μια έκφραση για αυτή τη συχνότητα μόνιμης κατάστασης που επιτυγχάνεται με αυτό τον τρόπο από την άποψη ενός άλλου κριτηρίου φάσης:

$$\left| \arg \left\{ R^{-1} + j\omega C - j(\omega L)^{-1} \right\} \right| = -\arg \{ G(j\omega) \} \quad (4.7)$$

όπου $G(j\omega)$ είναι η συνάρτηση μεταφοράς του φίλτρου της γραμμής εισόδου. Ας θεωρήσουμε την περίπτωση όπου η μετατόπιση φάσης του φίλτρου γραμμής εισόδου είναι μηδέν στη συχνότητα δικτύου και το φορτίο έχει έναν dfr κοντά στη μονάδα. Αν η εξίσωση (4.7) έχει περισσότερες από μια λύσεις (δείτε σχήμα 4.6), η λύση στη συχνότητα δικτύου είναι ασταθής και δεν θα εμφανιστεί νησιδοποίηση. Αυτό το σχέδιο έχει αποδειχθεί να είναι ιδιαίτερα αποτελεσματικό, τόσο θεωρητικά όσο και πειραματικά. Λειτουργεί για καθαρά ωμικά φορτία των οποίων οι καμπύλες απόκρισης φάσης κινούνται στον άξονα συχνοτήτων όπως φαίνεται στο σχήμα 4.6. Επίσης λειτουργεί για μεγάλο εύρος φορτίων RLC. Ωστόσο μερικά φορτία RLC έχουν καμπύλες απόκρισης φάσης τέτοιες ώστε η φάση του φορτίου αυξάνεται πιο γρήγορα από τη φάση της PCU του φ/β συστήματος, που σημαίνει ότι η εξίσωση 4.7 έχει μόνο μια λύση στην ω_0 . Αυτό κάνει την ονομαστική συχνότητα γραμμής ένα σταθερό σημείο λειτουργίας και καθιστά τη μέθοδο SMS μη αποτελεσματική. Για να καταδειχθεί αυτό το γεγονός έγινε ανάλυση αυτής της κατάστασης σε υπολογιστή και τα αποτελέσματα φαίνονται στα σχήματα 4.7 και 4.8.



Σχήμα 4.7: Σχεδιασμός μιας χαρακτηριστικής της μεθόδου SMS και της απόκρισης φάσης για διάφορα RLC φορτία. Η έντονη καμπύλη σχήματος S είναι η χαρακτηριστική της μεθόδου SMS. Οι άλλες καμπύλες είναι οι αποκρίσεις φάσης των RLC (αντεστραμμένες λόγω του αρνητικού πρόσημου της εξίσωσης (4.7)). Το R κρατιέται σταθερό. Το L και το C μεταβάλλονται, διατηρώντας μοναδιαίο συντελεστή ισχύος στα 60Hz. Για τα τρία κάτω φορτία της λεζάντας, η μέθοδος SMS δεν μπορεί να ανιχνεύσει νησιδοποίηση



Σχήμα 4.8: Σχεδιασμός μιας χαρακτηριστικής της μεθόδου SMS και της απόκρισης φάσης για διάφορα RLC φορτία. Η έντονη καμπύλη σχήματος S είναι η χαρακτηριστική της μεθόδου SMS. Οι άλλες καμπύλες είναι οι αποκρίσεις φάσης των RLC (αντεστραμμένες λόγω του αρνητικού πρόσημου της εξίσωσης (4.7)). Το L και το C κρατούνται σταθερά και συντονισμένα στα 60Hz. Για τα τρία πάνω φορτία της λεζάντας, η μέθοδος SMS δεν μπορεί να ανιχνεύσει νησιδοποίηση

Σε αυτές τις προσομοιώσεις, σχεδιάζεται μια καμπύλη απόκρισης φάσης με τη μέθοδο SMS από ένα αντιστροφέα του εμπορίου σε σχέση με τις αποκρίσεις φάσης διάφορων παράλληλων φορτίων RLC. Αυτά τα παραδείγματα δείχνουν ότι η μέθοδος SMS έχει μια NDZ για τα φορτία RLC με σχετικά μικρές τιμές του L αλλά μεγάλες τιμές του C (σχήμα 4.7), ή χαμηλής ισχύος φορτία στα οποία το R είναι μεγάλο (σχήμα 4.8). Ένα πρόσθετο πρόβλημα με τη μέθοδο SMS είναι ότι στηρίζεται σε μια ανεξέλεγκτη, εξωτερικά παρεχόμενη διαταραχή, η οποία κάνει δύσκολες τις προβλέψεις χωρίς διακοπές χρόνου ενός εξοπλισμένου με τη μέθοδο SMS φ/β συστήματος.

Ενεργητικές Μέθοδοι

Προκειμένου να εξαλειφθούν οι ανεπάρκειες των παθητικών μεθόδων αποκλεισμού NDZ, έχουν αναπτυχθεί διάφορες ενεργητικές μέθοδοι. Οι ενεργητικές μέθοδοι περιλαμβάνουν την αλλαγή της διαμόρφωσης του συστήματος ή του ελέγχου του ρεύματος i_{PV} με τέτοιο τρόπο ώστε να προκαλέσουν αλλαγή στη v_a κατά τη νησιδοποίηση. Οι ενεργητικές μέθοδοι περιλαμβάνουν:

Μέθοδος Μεταβολής Εξόδου ή Μέτρησης Σύνθετης Αντίστασης

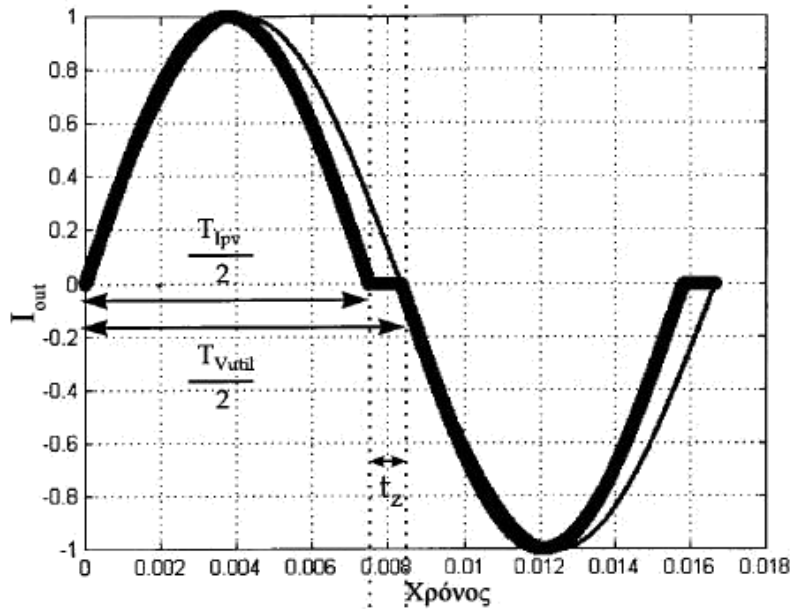
Από τη στιγμή που το φ/β σύστημα φαίνεται από το δίκτυο ως πηγή ρεύματος, η οποία παρέχει ρεύμα που δίνεται από τη σχέση:

$$i_{PV} = I_{PV} \sin(\omega_{PV}t + \varphi_{PV}) \quad (4.8)$$

υπάρχουν τρεις παράμετροι της εξόδου του φ/β συστήματος που μπορούν να μεταβληθούν: το πλάτος I_{PV} , η συχνότητα ω_{PV} και η φάση φ_{PV} . Στη μέθοδο Μεταβολής εξόδου εφαρμόζεται περιοδικά μια διαταραχή σε μια από αυτές τις παραμέτρους. Αν το δίκτυο είναι αποσυνδεδεμένο, η μεταβολή θα προκαλέσει μια ανιχνεύσιμη αλλαγή στη v_a , που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ανίχνευση της νησιδοποίησης. Με αυτές τις ενέργειες, η PCU κατορθώνει να μετρά το dv_a/di_{PV} και επομένως για αυτό η μέθοδος λέγεται και Μέτρηση Σύνθετης Αντίστασης. Το πρωταρχικό πλεονέκτημά της είναι ότι θεωρητικά δεν έχει καμία NDZ. Για ένα απλό φ/β σύστημα με οποιοδήποτε τοπικό φορτίο, εάν το φορτίο και οι ισχύεις φωτοβολταϊκού ισορροπούν επάνω στην αποσύνδεση του δικτύου, η μεταβολή εξόδου της PCU θα ανατρέψει αυτήν την ισορροπία και θα αναγκάσει τη μέθοδο UVR να λειτουργήσει. Εντούτοις, η μέθοδος μεταβολής εξόδου έχει σημαντικά μειονεκτήματα. Ένα από τα σοβαρότερα από αυτά είναι ότι η αποδοτικότητά της μειώνεται στην περίπτωση πολλαπλών αντιστροφών. Αυτό συμβαίνει ακόμα κι αν όλες οι PCUs στη νησίδα χρησιμοποιούν την μέθοδο μεταβολής εξόδου, εκτός αν η μεταβολή είναι κάπως συγχρονισμένη. Ο λόγος είναι ότι καθώς όλο και περισσότερες PCUs προστίθενται στη νησίδα, το ποσό της μεταβολής που εισάγεται από κάθε PCU στο συνολικό i_{PV} που παράγεται από όλα τα φ/β συστήματα μειώνεται και τελικά η μεταβολή γίνεται τόσο μικρή που η αλλαγή στη v_a γίνεται μη ανιχνεύσιμη. Επίσης, για υψηλής ισχύος φ/β συστήματα, η μέθοδος μεταβολής εξόδου μπορεί να οδηγήσει σε αστάθεια του δικτύου, τρεμούλιασμα τάσης και διάφορα άλλα προβλήματα. Επομένως, η μέθοδος μεταβολής εξόδου δεν είναι κατάλληλη για πολλαπλά μικρά συστήματα ή για απλά μεγάλα συστήματα. Αυτά τα μειονεκτήματα έχουν οδηγήσει πολλούς να συμπεράνουν ότι αυτή η μέθοδος έχει μικρή πρακτική αξία.

Μέθοδος Ενεργητικής Ολίσθησης Συχνότητας

Στην μέθοδο Ενεργητικής Ολίσθησης Συχνότητας (AFD – Active Frequency Drift), η PCU του φ/β συστήματος χρησιμοποιεί ένα ελαφρώς παραμορφωμένο ρεύμα εξόδου για να προκαλέσει ολίσθηση προς τα πάνω ή προς τα κάτω της συχνότητας της v_a . Ένα παράδειγμα μιας κυματομορφής που υλοποιεί αύξουσα ολίσθηση συχνότητας παρουσιάζεται στο σχήμα 4.9, μαζί με ένα μη παραμορφωμένο ημιτονοειδές κύμα για σύγκριση.



Σχήμα 4.9: Παράδειγμα που χρησιμοποιείται για να υλοποιήσουμε τη μέθοδο πρόληψης νησιδοποίησης AFD. Επίσης παρουσιάζεται ένα καθαρό ημιτονοειδές σήμα για σύγκριση.

Η T_{Vutil} είναι η περίοδος της τάσης του δικτύου. Η $T_{I_{pv}}$ είναι η περίοδος του ημιτονοειδούς μέρους του ρεύματος εξόδου του φ/β συστήματος. Το t_z είναι ο χρόνος μηδενισμού. Ο λόγος του t_z στη μισή περίοδο της τάσης δικτύου, $T_{Vutil}/2$, αναφέρεται ως κλάσμα τεμαχισμού (*cf*). Κατά τη διάρκεια του πρώτου τμήματος του ημικυκλίου, το ρεύμα εξόδου του φ/β συστήματος είναι ένα ημίτονο με συχνότητα ελαφρώς υψηλότερη από αυτή της τάσης δικτύου. Όταν το ρεύμα εξόδου του φ/β συστήματος φθάνει στο μηδέν, παραμένει στο μηδέν για χρόνο t_z πριν αρχίσει το δεύτερο ημικύκλιο. Για το πρώτο μέρος του δεύτερου ημικυκλίου, το ρεύμα εξόδου του φ/β συστήματος είναι το αρνητικό μισό από το ημιτονοειδές κύμα από το πρώτο ημικύκλιο. Όταν το ρεύμα του φ/β συστήματος φθάνει πάλι στο μηδέν, παραμένει στο μηδέν μέχρι η τάση του δικτύου περάσει αυξανόμενη από το μηδέν. Όταν εφαρμόζουμε μια τέτοια κυματομορφή ρεύματος σε ένα ωμικό φορτίο, με απουσία της τάσης δικτύου, η απόκριση τάσης του θα ακολουθήσει το παραμορφωμένο ρεύμα i_{pv} και επομένως η v_a θα φθάσει σε σημείο αύξοντος μηδενισμού t_z δευτερόλεπτα πριν από αυτό που θα είχε ακόμα συνδεδεμένο το δίκτυο. Αυτό ερμηνεύεται από το φ/β σύστημα ως μια αύξηση στη συχνότητα της v_a . Το φ/β σύστημα αυξάνει έπειτα τη συχνότητά του προσπαθώντας να διατηρήσει τις σχέσεις που παρουσιάζονται στο σχήμα 4.9. Το ωμικό φορτίο αποκρίνεται πάλι με την προώθηση του αρνητικού προς το θετικό σημείο περάσματος από το μηδέν της v_a κατά t_z , που ερμηνεύεται πάλι από το φ/β σύστημα ως αύξηση στη συχνότητα και αυτή η διαδικασία συνεχίζεται έως ότου η συχνότητα έχει ολισθήσει αρκετά από την ονομαστική, ώστε να ανιχνευθεί από τη μέθοδο OFR.

Η μέθοδος AFD είναι επίσης ιδιαίτερα αποτελεσματική στην ανίχνευση ενός ευρέως φάσματος καταστάσεων νησιδοποίησης. Εντούτοις, έχει επίσης μια NDZ. Ας θυμηθούμε από τη

παράγραφο που αναφερθήκαμε στη μέθοδο OFR/UFR, ότι εάν το τοπικό φορτίο είναι χωρητικό, η συχνότητα της τάσης στη νησίδα θα παρουσιάσει μια τάση για να μειωθεί, αντιδρώντας μερικώς στην ανοδική ολίσθηση συχνότητας της PCU. Εάν το ποσοστό του χρόνου μηδενισμού του ρεύματος εξόδου αντιστροφεί είναι δεδομένο, έχει φανεί πειραματικά ότι θα υπάρχει πάντα μια ιδιαίτερη τιμή χωρητικότητας που μπορεί να προστεθεί στο ωμικό φορτίο που θα οδηγήσει σε μια προς τα κάτω ολίσθηση συχνότητας που ακυρώνει ακριβώς την ανοδική ολίσθηση συχνότητας της PCU. Κάτω από αυτή τη κατάσταση η νησιδοποίηση μπορεί να συνεχίσει αόριστα. Επομένως, η μέθοδος AFD είναι γνωστό ότι έχει μια NDZ για τέτοια φορτία RC. Εντούτοις, πρόσφατα έχει αποδειχθεί ότι η μέθοδος AFD έχει επίσης μια NDZ για μια σειρά παράλληλων RLC φορτίων. Για τέτοια φορτία, ένα κριτήριο για σταθερή, μόνιμη κατάσταση συχνότητα για PCU εξοπλισμένη με διάταξη μεθόδου AFD μπορεί να γραφεί ως εξής:

$$\arg \left\{ R^{-1} + (j\omega L)^{-1} + j\omega C \right\}^{-1} = -0.5\omega \cdot t_z = -0.5\pi \cdot cf \quad (4.9)$$

όπου cf είναι το κλάσμα τεμαχισμού που ορίστηκε προηγουμένως. Μόλις το σύστημα φθάσει σε αυτή τη συχνότητα μόνιμης κατάστασης, που θα είναι ελαφρώς υψηλότερη από την συχνότητα συντονισμού του φορτίου, δεν πραγματοποιείται καμία περαιτέρω αύξηση συχνότητας. Εάν η συχνότητα μόνιμης κατάστασης βρίσκεται μέσα στα κατώτατα όρια λειτουργίας της μεθόδου OFR/UFR και η απόκριση πλάτους του φορτίου RLC είναι τέτοια που η τάση δεν υπερβαίνει τα κατώτατα όρια της μεθόδου OFR/UFR, η νησιδοποίηση μπορεί να συνεχίσει αόριστα. Χρησιμοποιώντας αυτήν την εξίσωση έχει αποδειχθεί ότι η μέθοδος AFD κινεί απλά τη NDZ της μεθόδου OFR/UFR σε φορτίο με χωρητικό df_r για φορτία RLC με μικρό C και μεγάλο L και επίσης στενεύει τη NDZ για μεγάλο C και μικρό L . Εντούτοις, είναι πιθανό να απαιτείται ένα μεγάλο cf ώστε να ληφθεί ένα σημαντικό όφελος, που οδηγεί σε σημαντική παραμόρφωση του ρεύματος εξόδου της PCU.

Μια νέα προσέγγιση: Μέθοδος Ενεργητικής Ολίσθησης Συχνότητας με Θετική Ανάδραση

Είμαστε σε θέση να υπερνικήσουμε μερικώς τα μειονεκτήματα της μεθόδου AFD με την προσθήκη θετικής ανάδρασης, δημιουργώντας μια νέα μέθοδο που αποκαλείται μέθοδος Ενεργητικής Ολίσθησης Συχνότητας με Θετική Ανάδραση (AFDPF). Στη μέθοδο AFDPF ο cf μεταβάλλεται κατά τη διάρκεια κάθε κύκλου ρεύματος της PCU του ϕ/β συστήματος σύμφωνα με την έκφραση:

$$cf_k = cf_{k-1} + F(\Delta \omega k) \quad (4.10)$$

όπου cf_k είναι το κλάσμα τεμαχισμού στο k στο κύκλο $F (F : \mathfrak{R} \rightarrow \mathfrak{R})$ Είναι ο χωρος του δειγματοληπτικά ελεγμένου λάθους συχνότητας στο k στο κυκλο και $\Delta\omega_k = \omega_k - \omega_0$ επάνω στη διώρθωση του cf . Χρησιμοποιώντας γραμμικό F , έχει καταδειχθεί ότι η μέθοδος AFDPF έχει μια σημαντικά μικρότερη NDZ από τη μέθοδο AFD. Σε μερικές περιπτώσεις επιτεύχθηκε μια μείωση του μεγέθους της NDZ για διάφορα πλάτη. Υπάρχουν δύο κύριοι λόγοι για αυτήν την μείωση στο μέγεθος της NDZ. Ο ένας είναι ότι μια PCU φ/β συστήματος εξοπλισμένη με τη μέθοδο AFDPF ευνοεί μια

απόκλιση αρνητικής συχνότητας, εάν το F έχει περιττή συμμετρία. Εάν το ω_k είναι αρνητικό, ο cf θα μειωθεί και μπορεί ακόμα να γίνει αρνητικός έτσι ώστε ο μετατροπέας να έχει μια τάση ολίσθησης προς τα κάτω. Καταυτό τον τρόπο μετατροπέας συνεργάζεται με τα φορτία που τείνουν να οδηγήσουν τη συχνότητα της ν_a προς τα κάτω, αντί να προσπαθήσει να αντιδράσει προς αυτά όπως κάνει η μέθοδος AFD. Ο δεύτερος λόγος για τη μείωση του μεγέθους της NDZ είναι ότι η αυτοδιέγερση της συχνότητας δεν εμφανίζεται μέχρι που οι αποκλίσεις συχνότητας είναι πολύ μεγαλύτερες από αυτές στη περίπτωση της μεθόδου AFD. Αυτό φαίνεται ευκολότερα με την εξέταση μιας απλοποιημένης κατάστασης στην οποία η απόκριση του συστήματος υποτίθεται ότι είναι στιγμιαία και το F υποτίθεται ότι είναι γραμμικό ($F = K \omega_k$). Κατόπιν, αντικαθιστώντας την εξίσωση (4.9) στην (4.10) έχουμε:

$$\arg\{R^{-1} + (j\omega_k L)^{-1} + j\omega_k C\}^{-1} = -0.5\omega \cdot \pi \cdot cf \quad (4.11)$$

Αυτή η προσεγγιστική κατάσταση φάσης δείχνει ότι καθώς το λάθος της συχνότητα αυξάνεται, η απαιτούμενη φάση του φορτίου αυξάνεται και κάνει έτσι την συχνότητα να αποκλίνει μακριά από την συχνότητα συντονισμού του φορτίου που απαιτείται για να επιτευχθεί η μόνιμη κατάσταση. Αυτό το αποτέλεσμα εμποδίζει την επίτευξη μιας συχνότητας μόνιμης κατάστασης μέχρι που επιτυγχάνονται πολύ μεγαλύτερες συχνότητες από ό,τι θα συνέβαινε με τη μέθοδο AFD, δίνοντας μεγαλύτερη δυνατότητα ανίχνευσης από τη μέθοδο OFR/UFR.

Ένα άλλο σημαντικό πλεονέκτημα της μεθόδου AFDPF είναι ότι δεν χάνει την αποτελεσματικότητά της στην περίπτωση πολλαπλών αντιστροφών. Τόσο η μέθοδος AFD όσο και η AFDPF πρέπει να διατηρήσουν την αποτελεσματικότητά τους στην περίπτωση στην οποία όλοι οι αντιστροφείς σε μια νησίδα χρησιμοποιούν συγκεκριμένο πλαίσιο λειτουργίας, αλλά η μέθοδος AFDPF μπορεί επίσης να λειτουργήσει από κοινού με διάφορα άλλα πλαίσια. Παραδείγματος χάριν, ας θεωρήσουμε μια περίπτωση στην οποία υπάρχουν δύο φ/β συστήματα, ένα που είναι εξοπλισμένο με μέθοδο AFDPF και ένα με την αρμονική ανίχνευση. Όταν το δίκτυο αποσυνδέεται και η μέθοδος AFDPF αρχίζει να αυξάνει το cf , το THD του ρεύματος εξόδου της PCU στη μέθοδο AFDPF θα

αυξηθεί. Αυτή η αύξηση στη παραμόρφωση μπορεί να βοηθήσει στη λειτουργία της PCU χρησιμοποιώντας την αρμονική ανίχνευση, αυξάνοντας την πιθανότητα ένας από τους μετατροπείς να λειτουργήσει και να σταματήσει η νησιδοποίηση. Η μέθοδος AFDPF μπορεί επίσης να παρέχει τη διαταραχή που απαιτείται για να κάνει την μέθοδο SMS να λειτουργήσει. Η μέθοδος AFDPF είναι επομένως πολύ καλά ταιριασμένη για εφαρμογή σε μικρά φ/β συστήματα με πολλαπλούς αντιστροφείς ή σε AC συστοιχίες.

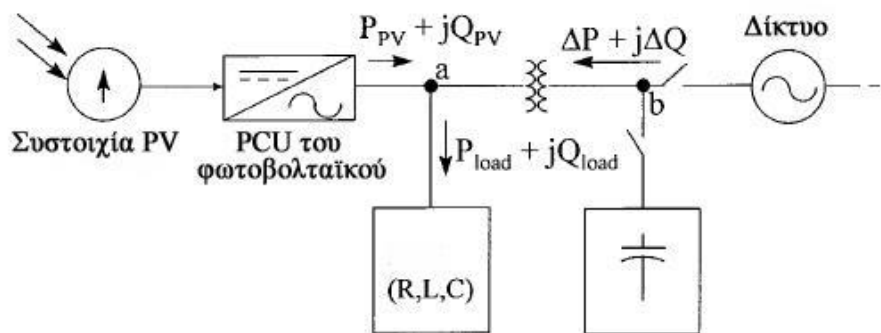
Η μέθοδος AFDPF είναι σαφώς ένα πολύ ελπιδοφόρο σχέδιο πρόληψης νησιδοποίησης. Εντούτοις, έχει μερικά μειονεκτήματα. Ένα από τα σοβαρότερα είναι ότι, εάν η μέτρηση της συχνότητας της ν_a είναι ανακριβής, η AFDPF θα αναγκάσει μια PCU ενός φ/β συστήματος να

έχει μια υψηλότερη μόνιμη κατάσταση THD στο ρεύμα εξόδου της από ό,τι στην μέθοδο AFD. Αυτό το πρόβλημα μπορεί να ελαχιστοποιηθεί με κατάλληλη επιλογή των c_{fo} και F , καλό σχεδιασμό φίλτρου και ανιχνευτή διέλευσης από το μηδέν.

Επίσης, δυνατό να συμβεί αλλά λιγότερο πιθανό είναι το ενδεχόμενο αστάθειας σε περιοχές του δικτύου στις οποίες παρατηρείται υψηλού επιπέδου διείσδυση από φ/β συστήματα, αν η πηγή τάσης του δικτύου δεν είναι αρκετά άκαμπτη. Η καταλληλότητα αυτής της μεθόδου για μεγάλα φ/β συστήματα είναι επομένως ασαφής. Τέλος, αν και η μέθοδος AFDPF μειώνει σημαντικά το μέγεθος της NDZ, δεν την αποβάλλει. Η AFDPF έχει μια NDZ για φορτία RLC με μεγάλο C και μικρό L , παρόμοιο με (αλλά μικρότερο από) αυτό που βρέθηκε για τη μέθοδο SMS. Η έρευνα για τη μέθοδο AFDPF βρίσκεται αυτήν την περίοδο σε εξέλιξη.

Εισαγωγή Άεργης Αντίστασης

Η μέθοδος Εισαγωγής Άεργης Αντίστασης είναι μοναδική μεταξύ των μεθόδων πρόληψης δεδομένου ότι δεν στηρίζεται στη PCU για να ανιχνεύσει τη κατάσταση νησιδοποίησης. Άντ' αυτού, μια μεγάλη άεργη αντίσταση, συνήθως πυκνωτές, εγκαθίσταται στο δίκτυο σε ένα πιθανό σημείο νησίδας, στο b όπως φαίνεται στο σχήμα 4.10.



Σχήμα 4.10: Η μέθοδος εισαγωγής άεργης αντίστασης. Στο σημείο b συνδέεται συστοιχία πυκνωτών.

Ο διακόπτης είναι κανονικά ανοικτός. Όταν ο αυτόματος διακόπτης ανοίξει, ο διακόπτης των πυκνωτών κλείνει μετά από μια σύντομη καθυστέρηση. Στην περίπτωση όπου το P^- και το Q^- ήταν σχεδόν μηδέν, η ξαφνική προσθήκη μιας μεγάλης άεργης σύνθετης αντίστασης θα προκαλέσει ανισορροπία στην απαίτηση άεργου ισχύος, προκαλώντας μείωση συχνότητας που η μέθοδος UFR μπορεί να ανιχνεύσει. Αυτή η μέθοδος προσφέρει διάφορα πλεονεκτήματα. Είναι ιδιαίτερα αποτελεσματική στην παρεμπόδιση της νησιδοποίησης εφ' όσον επιτρέπεται η μικρή καθυστέρηση μεταξύ του χρόνου ανοίγματος του αυτόματου διακόπτη και του χρόνου της εισαγωγής των πυκνωτών. Αυτή η καθυστέρηση είναι απαραίτητη για να εξασφαλιστεί ότι η εισαγωγή του πυκνωτή δεν θα δημιουργήσει μια ισορροπημένη κατάσταση μεταξύ του φ/β συστήματος και του επαγωγικού φορτίου. Οι πυκνωτές αυτού του τύπου είναι εύκολα διαθέσιμοι και έχει αποκτηθεί πολλή εμπειρία με τη χρήση τους στα δίκτυα. Οι ίδιοι πυκνωτές θα μπορούσαν επίσης να χρησιμοποιηθούν για την υποστήριξη άεργης ισχύος, με ελάχιστες μόνο αλλαγές στη λογική διακοπτικής λειτουργίας, ώστε να τους επιτρέπεται να διατηρήσουν την λειτουργία τους κατά τη Νησιδοποίηση. Εντούτοις, δύο προφανή μειονεκτήματα στη μέθοδο εισαγωγής άεργης αντίστασης είναι: (1) μπορεί να υπάρξουν πολλαπλοί διακόπτες σε σειρά που

οδηγεί σε πιθανή νησίδα, που σημαίνει ότι ο διακόπτης σειράς θα πρέπει να εξοπλιστεί με πυκνωτές (ανάλογα με τα φορτία), (2) αυτή η μέθοδος δεν μπορεί να αποτρέψει σύντομες καταστάσεις νησιδοποίησης, μερικώς λόγω της ταχύτητας της δράσης των διακοπών του πυκνωτή και μερικώς λόγω της απαραίτητης καθυστέρησης της διακοπτικής λειτουργίας.

Περίληψη των Υπαρχουσών Μεθόδων Πρόληψης Νησιδοποίησης

Ο πίνακας 4.2 συνοψίζει τις μεθόδους πρόληψης νησιδοποίησης που συζητούνται σε αυτή τη παράγραφο. Κάθε πλαίσιο πρόληψης νησιδοποίησης είναι ταξινομημένο σύμφωνα με τους τύπους των καταστάσεων των φορτίων κάτω από τις οποίες μπορεί να αποτραπεί η νησιδοποίηση. Είναι προφανές πως δεν υπάρχει ακόμα κάποιο τέλειο πλαίσιο πρόληψης νησιδοποίησης. Όλες οι υπάρχουσες μέθοδοι περιλαμβάνουν μια εξισορρόπηση μεταξύ της αποτελεσματικότητας στην πρόληψη νησιδοποίησης, της ποιότητας ισχύος, της απλότητας και του κόστους υλοποίησης. Καμία από τις μεθόδους δεν επιτυγχάνει όλους αυτούς τους στόχους.

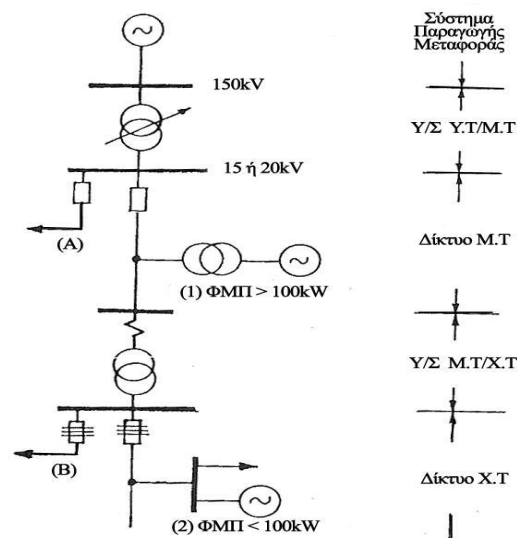
Πίνακας 4.2: Σύγκριση των μεθόδων που μελετήθηκαν

Μέθοδος προστασίας από νησιδοποίηση	Δουλεύει για πολλαπλούς αντιστροφείς;	Προστασία νησιδοποίησης Κάτω από ποιές από αυτές τις συνθήκες η δοθείσα μέθοδος προστατεύει από νησιδοποίηση;				Σημείωση
		$\Delta P^- \neq 0$	$\Delta Q^- \neq 0$	$\Delta P^- = \Delta Q^- \approx 0$, ωμικό φορτίο	$\Delta P^- = \Delta Q^- \approx 0$, συντονισμένο RLC	
OVR/UVR	Ναι	Ναι	Ναι	Όχι	Όχι	Μικρή NDZ γύρω από το $\Delta P^- = 0$ γιατί τα κατώτατα όρια δεν τίθενται αυθαίρετα μικρά
OFR/UFR	Ναι	Όχι	Ναι	Όχι	Όχι	Μικρή NDZ γύρω από το $\Delta Q^- = 0$ γιατί τα κατώτατα όρια δεν τίθενται αυθαίρετα μικρά
PJD	Ναι	Όχι	Ναι	Όχι	Όχι	Μπορεί να είναι πολύ αποτελεσματική, αλλά η NDZ βρίσκεται μέσα στη OFR/UFR, OVR/UVR
Αρμονική ανίχνευση	Ναι;	Σημείωση	Σημείωση	Σημείωση	Σημείωση	Η ανίχνευση δεν εξαρτάται στο ταίριασμα ισχύος αλλά στο THD της v_c . Η τοποθέτηση του κατωφλίου είναι πρόβλημα σε αυτή τη μέθοδο
Μεταβολή εξόδου	Όχι	Ναι	Ναι	Ναι	Ναι	Αποτυχία σε περίπτωση πολλαπλών αντιστροφών προκαλεί προβλήματα ευστάθειας, για μεγάλα συστήματα PV, μειώνοντας την αποτελεσματικότητα
SMS	Ναι;	Όχι	Ναι	Ναι	Ναι	Παραματικά φαίνεται πολύ αποτελεσματική, αλλά έχει NDZ για χαμηλής ισχύος φορτία και φορτία χαμηλού L και υψηλού C
AFD	Ναι;	Όχι	Ναι	Ναι	Όχι	Μη αποτελεσματική για χαμηλό L και υψηλό C που είναι κοντά σε μοναδιαίο τελεστή μετατόπισης της συχνότητας δικτύου. Απαιτεί παραμόρφωση ρεύματος εξόδου
AFDPF	Ναι;	Όχι	Ναι	Ναι	Ναι	Πολύ αποτελεσματικό εκτός από την περίπτωση πολύ χαμηλού L, υψηλού C που είναι κοντά σε μοναδιαίο τελεστή μετατόπισης. Ίσως παράγει μεγαλύτερη παραμόρφωση εξόδου από την AFD
Είσοδος άεργης αντίστασης	Ναι	Ναι	Ναι	Ναι	Ναι	Απαιτεί την εγκατάσταση εξοπλισμού στο σημείο κοινής ζεύξης από την πλευρά του δικτύου. Δεν προλαμβάνει σύντομη νησιδοποίηση

4.4.2.4 Συμπεριφορά Φ/Β Συστήματος Κατά την Διάρκεια Ανωμαλιών του Δικτύου

Τα δίκτυα διανομής Μ.Τ και Χ.Τ. λειτουργούν κατά κανόνα «ακτινικά» και για το λόγο αυτό χρησιμοποιούνται γενικά απλά μέσα προστασίας υπερεντάσεως. Εξαιρέση υπάρχει μόνο στα δίκτυα ορισμένων πολύ μεγάλων πόλεων όπου τα δίκτυα λειτουργούν «κλειστά». Στη χώρα μας όλα τα δίκτυα Μ.Τ και Χ.Τ. λειτουργούν ακτινικά. Με τη σύνδεση όμως Φωτοβολταϊκών Μονάδων Παραγωγής (Φ.Μ.Π) στο δίκτυο διανομής, οπότε παύει πλέον να λειτουργεί ως ακτινικό, δημιουργούνται ορισμένα προβλήματα που πρέπει να ελέγχονται ώστε η σύνδεση των Φ.Μ.Π να μη προκαλεί ανωμαλίες. Τα προβλήματα αυτά εξετάζονται στη συνέχεια.

Αναφερόμενοι στο σχήμα 4.11 παρατηρούμε ότι όταν δεν είναι συνδεδεμένες οι Φ.Μ.Π ένα βραχυκύκλωμα στην γραμμή Μ.Τ. (Α) θα τροφοδοτηθεί μόνο από το σύστημα Παραγωγής - Μεταφοράς και για την απομόνωσή του θα προκληθεί το άνοιγμα του διακόπτη προστασίας στην αρχή της γραμμής. Αν στο δίκτυο είναι συνδεδεμένες Φ.Μ.Π, το βραχυκύκλωμα στη γραμμή (Α) θα τροφοδοτηθεί, εκτός από το σύστημα Παραγωγής - Μεταφοράς και από τις Φ.Μ.Π, οπότε είναι πιθανό να προκληθούν άκαιρες και ανεπιθύμητες λειτουργίες των μέσων προστασίας του δικτύου στο οποίο συνδέονται οι Φ.Μ.Π. Συγκεκριμένα μπορεί να προκληθεί πτώση του διακόπτη Μ.Τ. στην αρχή της γραμμής στην οποία συνδέονται οι Φ.Μ.Π ή τήξη των ασφαλειών διακλαδώσεως ή του Υ/Σ Μ.Τ./Χ.Τ. (Σχήμα 4.11).



Σχήμα 4.11: Ενδεικτική παράσταση δικτύου διανομής

Επί πλέον, όπως είναι φανερό, το ρεύμα βραχυκυκλώσεως των Φ.Μ.Π προστίθεται στο παρεχόμενο από το σύστημα, με βάση το οποίο έγινε η επιλογή του υλικού του δικτύου, και οπωσδήποτε, έστω και αν δεν έχει σαν αποτέλεσμα την υπέρβαση του ορίου αντοχής του υλικού σε βραχυκύκλωμα, αυξάνει την καταπόνηση του δικτύου

Όπως όμως αποδεικνύεται στη συνέχεια τέτοιοι κίνδυνοι είναι πρακτικώς μηδενικοί για τις συνήθεις περιπτώσεις μικρών Φ.Μ.Π και συνεπώς η σύνδεση αυτών στα δίκτυα διανομής μπορεί να γίνεται χωρίς να απαιτούνται ουσιαστικές αλλαγές ως προς το σημείο αυτό.

Μικρή είναι επίσης και η επίπτωση από την αύξηση των εντάσεων βραχυκυκλώσεως που καταπονούν τα στοιχεία του δικτύου Μ.Τ. όπως φαίνεται από τα ακόλουθα παραδείγματα:

Θεωρούμε τη γραμμή 15 kV μήκους 40 km του σχήματος 4.11 στην αρχή της οποίας η ισχύς βραχυκυκλώσεως λαμβάνεται 250 MVA και εξετάζουμε ποια θα είναι η αύξηση της εντάσεως τριφασικού βραχυκυκλώματος, στην αρχή και το τέλος της γραμμής, αν οι Φ.Μ.Π αποτελούν ποσοστό 10%,20% ή 50% του μέγιστου φορτίου της γραμμής (4500 kVA). Τα αποτελέσματα φαίνονται στον παρακάτω Πίνακα 4.3.

Ισχύς ΦΜΠ		Εντάσεις βραχυκυκλώσεως		
(kVA)	% του μέγιστου φορτίου	Από δίκτυο		Από ΦΜΠ
		Αρχή γραμμής (A)	Τέλος γραμμής (A)	(A)
450	10	9.600	500	70
900	20	9.600	500	140
2250	50	9.600	500	350

Πίνακας 4.3: Εντάσεις βραχυκυκλώσεως σε σχέση με ισχύ Φ.Μ.Π

Παρατηρούμε ότι και στην ακραία περίπτωση (πρακτικά αδύνατη περίπτωση) που οι Φ.Μ.Π αποτελούν το 50% του φορτίου της γραμμής, στην μεν περίπτωση βραχυκυκλώματος στην αρχή της γραμμής η συμβολή των Φ.Μ.Π είναι τελείως ασήμαντη, στην δε περίπτωση βραχυκυκλώματος στο άκρο της γραμμής, μπορεί ποσοστιαία να είναι σημαντική, σαν απόλυτο όμως μέγεθος είναι μικρή και δεν επηρεάζει την αντοχή του υλικού, το οποίο άλλωστε εκλέγεται ανεξάρτητα της θέσεως του στο δίκτυο.

Στις προηγούμενες εκτιμήσεις της συμβολής των Φ.Μ.Π στις προστασίες ή τις εντάσεις βραχυκυκλώσεως θεωρήθηκε η δυσμενέστερη περίπτωση κατά την οποία το σύνολο της εγκατεστημένης ισχύος των Φ.Μ.Π είναι συγκεντρωμένη, δηλαδή αγνοούνται οι αντιστάσεις των γραμμών, πράγμα όμως που δεν είναι ουσιαστικό σφάλμα αν ληφθεί υπόψη ότι οι αντιστάσεις των γραμμών είναι πολύ μικρότερες των αντιστοίχων των Φ.Μ.Π.

Ποιότητα ισχύος

Η σύνδεση ενός κατανεμημένου φωτοβολταϊκού συστήματος στο δίκτυο διανομής μπορεί να επηρεάσει την ποιότητα ισχύος που μεταφέρεται στα φορτία και τη λειτουργία του εξοπλισμού των δικτύων διανομής. Η ποιότητα ισχύος σχετίζεται με την αρμονική παραμόρφωση του ρεύματος και της τάσης. Η ποιότητα ισχύος μπορεί να επηρεάσει την λειτουργία των ρυθμιστών τάσης, τις διακοπτικές λειτουργίες των πυκνωτών, τον εξοπλισμό προστασίας και τα φορτία. Τα σημαντικότερα ζητήματα είναι η αρμονική παραμόρφωση και η κατανάλωση έργου ισχύος.

Η ισχύς χαμηλής ποιότητας μπορεί να έχει δυσμενείς συνέπειες στο δίκτυο και στα φορτία που τροφοδοτεί. Λίγα είναι γνωστά για τα αποτελέσματα των χαμηλών επιπέδων (π.χ 5~10%) στις αρμονικής παραμόρφωσης. Τα αρμονικά ρεύματα μπορούν να προκαλέσουν υψηλότερες θερμοκρασίες λειτουργίας στις μηχανές και στις μετασχηματιστές, πράγμα που ίσως μειώσει τον ωφέλιμο χρόνο ζωής στις. Το αρμονικό ρεύμα μπορεί στις να προκαλέσει παραμόρφωση σε κοντινά κυκλώματα επικοινωνιών. Η κατανάλωση έργου ισχύος από στις διατάξεις του συστήματος προκαλεί αυξημένες απώλειες στις γραμμές διανομής.

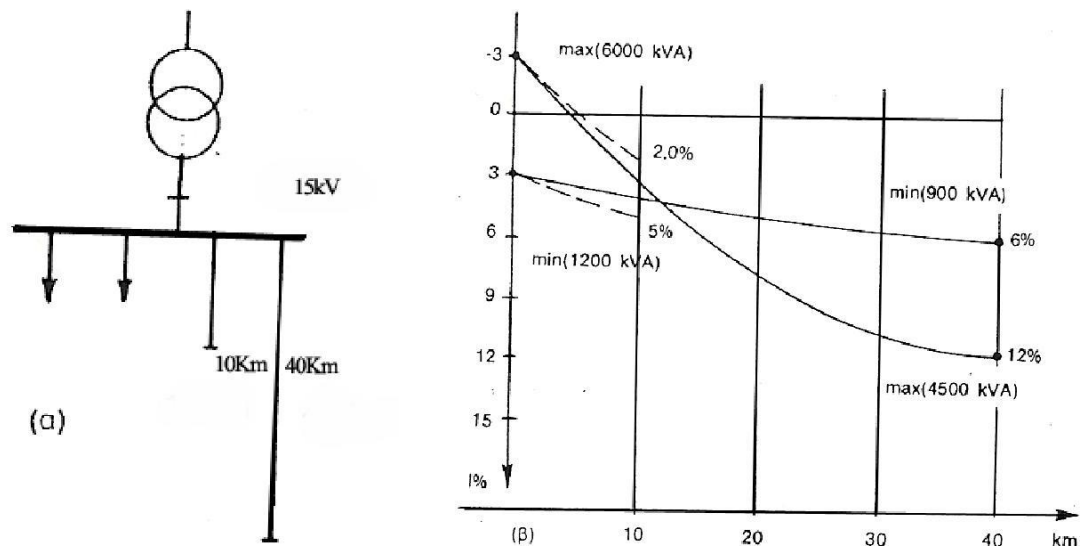
Μεταβολές Τάσης

Η έξοδος των φωτοβολταϊκών πλαισίων εξαρτάται άμεσα από τις καιρικές συνθήκες (π.χ συννεφιά), πράγμα που οδηγεί στην μεταβολή της ισχύος εξόδου με βάση την κάλυψη από τα σύννεφα. Μάλιστα σε μερικές περιπτώσεις η μεταβολή αυτή μπορεί να είναι ραγδαία μέσα σε λίγα δευτερόλεπτα. Αυτό μπορεί να προκαλέσει προβλήματα ρύθμισης τάσης στη γραμμή διανομής. Η σοβαρότητα του προβλήματος εξαρτάται από την ισχύ της διάταξης του κατανεμημένου συστήματος συγκρινόμενη με την ισχύ της γραμμής διανομής στην οποία συνδέεται. Τα κυριότερα προβλήματα σχετικά με τις μεταβολές τάσης ακολουθούν παρακάτω.

Μεταβολές των Τάσεων Λόγω Μεταβολής της Ροής Ισχύος

Για να φανεί πιο συγκεκριμένα η επίπτωση που μπορεί να έχει η σύνδεση των Φ. Μ.Π στην μεταβολή του επιπέδου της τάσεως του δικτύου Διανομής της .Ε.Η για παράδειγμα, θεωρούμε μια τυπική περίπτωση ενός Υ/Σ 150/15 kV, από τον οποίο εκκινούν, εκτός των άλλων, μία εναέρια υπεραστική γραμμή 15 kV, με μήκος κορμού 40 km και μία εναέρια αστική γραμμή μήκους κορμού 10 km (Σχήμα 4.12). Όπως είναι γνωστό η ρύθμιση της τάσεως στα δίκτυα Διανομής, έτσι ώστε η τάση τροφοδοτήσεως των καταναλωτών Μ.Τ. ή Χ.Τ., να κυμαίνεται σε ορισμένα όρια (π.χ $\pm 3\%$ της ονομαστικής στην Μ.Τ. και $\pm 6\%$ στην Χ.Τ) επιτυγχάνεται με την «υπό φορτίο» μεταβολή των λήψεων του Μ/Σ Υ.Τ./Μ.Τ. και την κατάλληλη επιλογή των λήψεων των Μ/Σ Μ.Τ./Χ.Τ.. Η «υπό φορτίο» μεταβολή στον Μ/Σ Υ.Τ./Μ.Τ. γίνεται συνήθως αυτόματα και συγκεκριμένα η τάση των ζυγών Μ.Τ. αυξάνεται ή μειώνεται περί μία μέση τιμή, ανάλογα με την αύξηση ή μείωση του φορτίου του Μ/Σ αντίστοιχα, ώστε να «αντισταθμίζεται» η πτώση τάσεως στις γραμμές Διανομής. Στο σχήμα 4.12 δείχνονται οι κατανομές των τάσεων κατά μήκος της γραμμής 15kV της τυπικής περιπτώσεως που προαναφέρθηκε (με την παραδοχή ότι η κατανομή του φορτίου σ' αυτές είναι

ομοιόμορφη, η δε σχέση μέγιστου - ελάχιστου φορτίου είναι 1:5), για μία «αντιστάθμιση» $\pm 3\%$ στον Μ/Σ Υ.Τ./Μ.Τ. Με την κατάλληλη επιλογή των λήψεων των Μ/Σ Μ.Τ./Χ.Τ. ($0, \pm 2,5\%, \pm 5\%$) επιτυγχάνεται η τήρηση της τάσεως των καταναλωτών στα καθορισμένα όρια.



Σχήμα 4.12: Μεταβολή τάσεων κατά μήκος γραμμής Μ.Τ

Οι επιπτώσεις στις τάσεις του δικτύου από την σύνδεση Φ.Μ.Π οι οποίες φυσικά θα μπαίνουν σε λειτουργία ανεξάρτητα από τις μεταβολές του φορτίου του Υ/ Σ, είναι φανερό ότι εξαρτώνται από τη συνολική ισχύ τους αλλά και από τη γραμμή (και το σημείο αυτής) στην οποία θα συνδεθούν. Αν για παράδειγμα τεθεί θέμα συνδέσεως στην υπεραστική γραμμή 40 km που να μπορούν να αποδώσουν φορτίο ίσο περίπου με το ελάχιστο της γραμμής και τεθούν σε λειτουργία την ώρα ελαχίστου, τότε στους καταναλωτές θα εμφανιστούν σημαντικές υπερτάσεις, δεδομένου ότι αντί πτώσεως τάσεως 3% στη γραμμή θα υπάρξει μηδενισμός της πτώσεως τάσεως ή και υπέρταση. Την υπέρταση αυτή δεν θα μπορέσει να αντισταθμίσει η αυτόματη «υπό φορτίο» αλλαγή τάσεως του Μ/Σ Υ.Τ./Μ.Τ., που καθορίζεται από το συνολικό φορτίο του Υ/ Σ Υ.Τ./Μ.Τ., αν ληφθεί υπόψη ότι η παραγόμενη από τις φωτοβολταϊκές γεννήτριες ισχύς κατά κανόνα θα είναι μικρή σχετικά μέρος του συνολικού φορτίου του Υ/Σ Υ.Τ./Μ.Τ. Αντίθετα η σύνδεση των ίδιων φωτοβολταϊκών γεννητριών στην γραμμή μήκους 10 km δεν θα δημιουργούσε ανάλογα προβλήματα, συνήθως όμως στην πράξη οι φωτοβολταϊκές γεννήτριες συνδέονται στις σχετικά ασθενείς υπεραστικές γραμμές.

Μία λύση για να αποφευχθεί η ενίσχυση των υπεραστικών γραμμών, που εφαρμόζεται σε ορισμένες χώρες, είναι η εγκατάσταση ρυθμιστού τάσεως στην αρχή ή επί της γραμμής.

Ανάλογα, αλλά απλούστερα τόσο στην ανάλυση όσο και την αντιμετώπισή τους, είναι τα προβλήματα τάσεως που δημιουργούν στο δίκτυο Χ.Τ. οι μικρές Φ.Μ.Π που συνδέονται σ' αυτό. Ο κίνδυνος συνίσταται βασικά στο ενδεχόμενο ανυψώσεως της τάσεως από την σύνδεση της Φ.Μ.Π κατά την ώρα χαμηλού φορτίου, πράγμα που δεν μπορεί πάντοτε να αντιμετωπιστεί με την μεταβολή της λήψεως του Μ/Σ Μ.Τ./Χ.Τ. Επομένως το κύριο κριτήριο για την δυνατότητα συνδέσεως μιας Φ.Μ.Π σε υφιστάμενο δίκτυο Χ.Τ. αποτελεί η ανύψωση της τάσεως κατά την ώρα ελαχίστου φορτίου. Σημειώνεται τέλος ότι συχνά οι Φ.Μ.Π (ιδίως οι σχετικά μεγάλης

ισχύος) περιλαμβάνουν διατάξεις προστασίας που επιτρέπουν την σύνδεση μόνο όταν η τάση του δικτύου βρίσκεται μέσα σε ορισμένα όρια ή και προκαλούν την απόζευξη τους όταν η τάση υπερβεί ορισμένο όριο. Οι διατάξεις αυτές μπορούν να αποτελούν και μέσα αποφυγής ανωμαλιών στο δίκτυο, εφόσον η αξιοπιστία τους είναι εξασφαλισμένη.

Εκτός όμως της γενικότερης μεταβολής του επιπέδου των τάσεων προβλήματα στα δίκτυα Διανομής μπορεί να προκαλεί η συχνή μεταβολή της παρεχομένης από την Φ.Μ.Π ισχύος προς το δίκτυο. Το φαινόμενο θα αναλυθεί και παρακάτω. Για το λόγο αυτό σε ορισμένες χώρες επιβάλλονται πρόσθετοι περιορισμοί. Για παράδειγμα στην Δανία, επιβάλλεται οι διακυμάνσεις αυτές του δικτύου να μην υπερβαίνουν το 3% ή το 6% κατά μέγιστο, λαμβάνοντας μάλιστα υπόψη αντί της ονομαστικής ισχύος της γεννήτριας, το 150% αυτής.

Μεταβολές των Τάσεων κατά την Ζεύξη - Απόζευξη

Οι απότομες μεταβολές της τάσεως (βυθίσεις ή και ανυψώσεις) που προκαλούνται κατά την ζεύξη και απόζευξη των Φ.Μ.Π δημιουργούν ανωμαλίες παρόμοιες με τις προ-καλούμενες κατά την ζεύξη - εκκίνηση των κινητήρων.

Λόγω όμως του μεταβλητού χαρακτήρα της ηλιακής ακτινοβολίας μπορεί να δημιουργούνται καταστάσεις που οδηγούν σε διαδοχικές ζεύξεις και αποζεύξεις. Ο ρυθμιστής τάσης δεν θα μπορούσε να αποκριθεί αρκετά γρήγορα στις αλλαγές στην ισχύ εξόδου και θα ήταν ανίκανος να διατηρήσει μια σταθερή τάση στις γραμμές διανομής. Αν ο ρυθμιστής μπορούσε να αποκριθεί τόσο γρήγορα τότε θα προέκυπτε θέμα σχετικά με την διάρκεια ζωής και την συντήρησή του. Φαίνεται ότι η καλύτερη λύση για να αποφευχθούν τα προβλήματα ρύθμισης τάσης σε αυτή την κατάσταση είναι να παρασχεθεί επαρκής ισχύς για τη διάταξη του κατανεμημένου συστήματος. Εάν τα προβλήματα τάσης οφείλονται στην άεργο ισχύ της κατανεμημένης παραγωγής, η καλύτερη λύση είναι να εγκατασταθεί μια στατική αντιστάθμιση var. Αυτό αποκλείει τα προβλήματα που συνδέονται με την ενίσχυση των αρμονικών από τους αντιστροφείς και την αύξηση της πιθανότητας νησιδοποίησης στο κατανεμημένο σύστημα. Εντούτοις, οι στατικές συσκευές var αντιστάθμισης δεν είναι γενικά οικονομικές για μικρού μεγέθους κατανεμημένα συστήματα.

Flicker (Τρεμούλιασμα) Τάσης

Το flicker αναφέρεται στην εξασθένιση και ενίσχυση της ακτινοβολίας των λαμπτήρων που προκαλούνται από τις διακυμάνσεις τάσης. Ως φαινόμενο, μπορεί να είναι αρκετά ενοχλητικό, επειδή δημιουργεί παράπονα από τους πελάτες. Οι ελλοχεύουσες διακυμάνσεις τάσης μπορούν να προκαλέσουν πρόωρη γήρανση του εξοπλισμού ρύθμισης τάσης δικτύου. Το flicker είναι η μισή ιστορία σχετικά με την κατανάλωση var. Το ρεύμα που απαιτείται για να μεταφερθούν vars επιβάλλει μια πτώση τάσης στις γραμμές του δικτύου όπως ακριβώς το ρεύμα που παραδίδει τα Watt. Επομένως η μέθοδος χειρισμού της κατανάλωσης var θα προσκρούσει στην πτώση τάσης στη γραμμή διανομής. Όπως έχει αναφερθεί σε επιστημονικές μελέτες:

«Τα δίκτυα πρέπει να ελέγχουν την τάση των κυκλωμάτων διανομής τους ώστε να κρατηθεί η τάση μέσα σε καθορισμένα όρια. Γενικά , το πρόβλημα είναι να ελαχιστοποιηθεί η μέγιστη τάση σε περιοχές κοντά στην πηγή υποσταθμού και να ελαχιστοποιηθεί η ελάχιστη τάση σε περιοχές κοντά στο τέλος της γραμμής διανομής.

Όταν η τοπική παραγωγή εγκαθίσταται για να παρέχει πραγματική ισχύ, η μείωση

στο φορτίο πραγματικής ισχύος στη γραμμή διανομής τείνει να προκαλέσει την αύξηση της τάσης κοντά στο σημείο που εφαρμόζεται η παραγωγή. Αντιθέτως, ζήτηση άεργου ισχύος από την τοπική παραγωγή αναγκάζει την τάση να πέφτει. Μπορεί να φανεί, από μαθηματική άποψη, ότι τα δύο αυτά αποτελέσματα αντισταθμίζονται μεταξύ τους (δηλαδή καμία αλλαγή τάσης) όταν η γωνία του συντελεστή ισχύος της παραγωγής είναι το συμπλήρωμα της γωνίας του συντελεστή ισχύος του βραχυκυκλώματος του δικτύου διανομής. Η τιμή για τα δίκτυα διανομής είναι της τάξης των 45° - 60° , η βέλτιστη τιμή των γωνιών συντελεστή ισχύος για την τοπική παραγωγή είναι της τάξης των 30° - 45° . Αυτό αντιστοιχεί σε επαγωγικό συντελεστή ισχύος της τάξης του 0.7-0.85. Οι επαγωγικοί συντελεστές ισχύος κάτω από 0.85 μπορούν να προκαλέσουν μείωση της τάσης όταν η παραγωγή λειτουργεί και όταν ο συντελεστής ισχύος είναι κάτω του 0.7 θα προκαλέσουν σίγουρα πτώση τάσης. Αυτή η πτώση τάσης είναι ακόμα πιο ανεπιθύμητη όταν η παραγωγή βρίσκεται κοντά στο τέλος της γραμμής διανομής δεδομένου ότι μπορεί να μειώσει την τάση κάτω από τα ελάχιστα όρια.

Συντελεστές ισχύος μεγαλύτεροι από 0.85 μπορούν να προκαλέσουν αύξηση, παρά μείωση της τάσης. Αυτό δεν είναι σπουδαίας σημασίας αφού η επίδραση είναι μικρή σε θέσεις κοντά στο σταθμό παραγωγής όπου η τάση είναι ήδη υψηλή. Σε θέσεις κοντά στο τέλος της γραμμής διανομής, όπου η επίδραση της ανόδου τάσης είναι μέγιστη, η επίδραση είναι συνήθως ευεργετική αφού η τάση σε τέτοιες θέσεις τείνει να είναι μικρή».

Αφού από οικονομικής πλευράς ο συντελεστής ισχύος μιας διάταξης πρέπει να τείνει στη μονάδα, ενώ όσον αφορά το flicker τάσης ο συντελεστής ισχύος πρέπει να είναι 0.85 ή μεγαλύτερος, θα έχουμε ευνοϊκότερες συνθήκες σε διατάξεις με μοναδιαίο συντελεστή ισχύος, δηλαδή καμιά κατανάλωση var.

Άλλες Επιδράσεις Τάσης.

Υπάρχει η δυνατότητα η φωτοβολταϊκή παραγωγή να επηρεάσει τον εξοπλισμό του δικτύου ακόμα και αν δεν υπάρχει κανένας προφανής αντίκτυπος στο flicker τάσης. Ο ρυθμιστικός εξοπλισμός που βρίσκεται σε πολλά δίκτυα λειτουργεί σε βήματα τάσης 5/8%. Δηλαδή οποιαδήποτε αλλαγή τάσης της τάξης του 5/8% ή μεγαλύτερη, θα ενεργοποιήσει τους ρυθμιστές. Από αποτελέσματα μελέτης που έγινε από την Επιχείρηση Ισχύος της Georgia των Η.Π.Α φαίνεται ότι για 20% διεύδυση φ/β συστημάτων στο δίκτυο, όταν η παραγωγή μειώθηκε κατά 25% από ένα «περαστικό» σύννεφο, προκλήθηκε αλλαγή τάσης της τάξης του 0.9%, ικανή να προκαλέσει αλλαγή στο βήμα του ρυθμιστή. Εάν ένα τέτοιο σύννεφο επρόκειτο να περάσει πάνω από μια γραμμή διανομής σε κατοικημένη περιοχή μία φορά κατά τη διάρκεια μιας ώρας, το αποτέλεσμα θα ήταν ένα 20% αύξηση στη λειτουργία των ρυθμιστών, με επακόλουθο την αύξηση της απαίτησης συντήρησης και μείωσης του χρόνου ζωής (ίδια αποτελέσματα με αυτά που είδαμε και παραπάνω).

Ωστόσο, σε άλλη μελέτη επισημαίνεται ότι η επίπτωση της κίνησης των σύννεφων μπορεί να μην είναι τόσο κοινή όσο υποπτευόμαστε. Μελετήθηκαν δύο πραγματικές γραμμές διανομής, με την πρώτη να καλύπτει μια περιοχή περίπου 1.2 με 2.5 μίλια, και τη δεύτερη μια περιοχή 8 με 14 μίλια. Προκειμένου να ληφθεί η μεταβολή τάσης της τάξης του 0.9%, ολόκληρη περιοχή της γραμμής διανομής που περιέχει τα φ/β συστήματα πρέπει να αλλάξει κατάσταση, από πλήρη ηλιοφάνεια σε πλήρη κάλυψη από σύννεφα. Αν και αυτό είναι δυνατό, δεν είναι τόσο πιθανό σενάριο. Δύο άλλα σενάρια φαίνονται πιθανότερα. Το πρώτο είναι διασκορπισμένη συννεφιά, κατά την διάρκεια καλοκαιρίας που θα οδηγούσε τα μεμονωμένα φ/β συστήματα να αυξάνουν και να μειώνουν την παραγωγή τους, αλλά η γενική παραγωγή σε μια

μεμονωμένη γραμμή διανομής θα παρέμενε σχετικά σταθερή. Το άλλο πλέον πιθανό σενάριο είναι μετακίνηση ενός ολόκληρου μετώπου σύννεφων, το οποίο πράγματι θα άλλαζε την παραγωγή στην έξοδο των φωτοβολταϊκών από πλήρη σε μειωμένη τιμή, αλλά αυτό πιθανότητα θα συνέβαινε λιγότερο από μια φορά τη μέρα. Γι'αυτό πρέπει να γίνονται μελέτες για συγκεκριμένα συστήματα και στην συγκεκριμένη περιοχή που τοποθετούνται, ώστε να διαπιστώνονται τα χαρακτηριστικά «συννεφιάς» στη περιοχή. Πρέπει να αναλογιστούμε, πως αν η διακύμανση τάσης είναι ένα σοβαρό πρόβλημα για το δίκτυο, το πρόβλημα μπορεί να αντιμετωπιστεί με ρύθμιση των φωτοβολταϊκών διατάξεων ώστε να λειτουργούν με ένα σταθερό συντελεστή ισχύος (πράγμα που είναι δυνατό μόνο στις αυτομεταγόμενες διατάξεις).

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται τα επίπεδα τάσης και μέγιστου χρόνου διακοπής όπως είναι ταξινομημένα στο πρότυπο IEEE 929-2000. Τα επίπεδα της τάσης βασίζονται στα θεσπισμένα όρια από τον ANSI C84.1 για ονομαστική τάση βάσης 120V. Τα ποσοστά που βρίσκονται εντός παρενθέσεων στο πίνακα 4.4 είναι ανηγμένα σε άλλες βάσεις. Στις περισσότερες περιπτώσεις για τα μικρά φωτοβολταϊκά συστήματα η τάση βάσης είναι τα 120V. Ο αντιστροφέας πρέπει να έχει σχεδιαστεί έτσι ώστε να ακολουθεί ενεργειακά τον αριθμό των κύκλων που παραθέτονται στον πίνακα 4.4 καθώς εμφανίζονται μεταξύ του πρώτου ορίου διαταραχής.

Ο ψηφιακά ελεγχόμενος αντιστροφέας μπορεί να αισθανθεί το όριο σε πολύ μεγάλο βαθμό δειγματοληψίας. Ο αντιστροφέας θα συνεχίσει να καταγράφει τα όρια όταν η ηλεκτρική ενέργεια αποσυνδεθεί για να επανασυνδεθεί αφού το όριο έχει σταθεροποιηθεί ξανά. Όταν ο αντιστροφέας έχει αποσυνδεθεί πρέπει να παραμείνει εκτός σύνδεσης έως ότου επιβεβαιωθεί ότι το δίκτυο έχει σταθεροποιηθεί για ένα ελάχιστο χρόνο των 5 λεπτών.

Τάση	Μέγιστος χρόνος Διακοπής
$V < 60$ ($V < 50\%$)	6 κύκλοι
$60 < V < 106$ ($50\% < V < 110\%$)	120 κύκλοι
$106 < V < 132$ ($88\% < V < 110\%$)	Φυσιολογική Λειτουργία
$132 < V < 165$ ($110\% < V < 137\%$)	120 κύκλοι
$165 < V$ ($137\% < V$)	2 κύκλοι

Πίνακας 4.4: Επίπεδα τάσης και μέγιστος χρόνος διακοπής

Τα παραπάνω στοιχεία αναφέρονται συγκεκριμένα για μικρούς αντιστροφείς αλλά πρέπει να προσαρμοστούν για αντιστροφείς για μεγάλα δίκτυα. Πρέπει να σημειωθεί ότι οι τιμές της τάσης αναφέρονται στο σημείο σύνδεσης με το δίκτυο, γνωστό και ως σημείο κοινής σύνδεσης (ΣΚΣ) για έναν αντιστροφέα. Εάν ο αντιστροφέας είναι τοποθετημένος σε μερική απόσταση από το ΣΚΣ μπορεί να υπάρξει πτώση τάσης στη γραμμή μεταξύ του αντιστροφέα και του ΣΚΣ. Σε μια τέτοια περίπτωση πρέπει να ληφθεί υπόψη η έξοδος του αντιστροφέα, καθώς τότε η τάση εξόδου του αντιστροφέα θα είναι υψηλότερη από την τάση του ΣΚΣ.

Ασύμμετρο Φορτίο του Συνδεδεμένου Συστήματος

Μια άλλη ανησυχία για την ποιότητα ισχύος είναι η σύνδεση μονοφασικών καταναμημένων συστημάτων στις τριφασικές γραμμές διανομής. Η σημαντική επίδραση αυτών των συσκευών μπορεί να οδηγήσει σε συνθήκες ασύμμετρου φορτίου καθώς επίσης και προβληματική λειτουργία του εξοπλισμού προστασίας εάν η γραμμή γίνεται υπερβολικά ασύμμετρη. Η ασύμμετρη τάση μπορεί να οδηγήσει σε υπερβολική αρνητικής ακολουθίας

θέρμανση.

Έγχυση Συνεχούς Ρεύματος στο Δίκτυο (Από τους Αντιστροφείς)

Περιγραφή

Η απαίτηση χρησιμοποίησης μετασχηματιστών απομόνωσης για συνδεδεμένα στο δίκτυο φ/β συστήματα για λόγους ασφαλείας ποικίλλει μεταξύ των χωρών. Αν και σε μερικές είναι αναγκαία απαίτηση, σε άλλες η απαίτηση εξαρτάται από τα τεχνικά χαρακτηριστικά γνωρίσματα των διατάξεων (π.χ. ελέγχου συνεχούς ρεύματος) ή από συγκεκριμένες τεχνικές απαιτήσεις του δικτύου.

Πολλοί αντιστροφείς του εμπορίου χρησιμοποιούν μετασχηματιστές. Αυτοί καταστέλλουν οποιαδήποτε DC συνιστώσα λόγω σχεδιασμού. Εντούτοις, οι αντιστροφείς χωρίς μετασχηματιστή έχουν κερδίσει τη τελευταία δεκαετία αυξανόμενη σημασία λόγω τεχνικών και οικονομικών πλεονεκτημάτων (μεγαλύτερη απόδοση, μικρότερο βάρος, όγκος και κόστος).

Οι μετατροπείς ελεγχόμενοι με διαμόρφωση PWM μπορούν να παράγουν DC συνιστώσες όταν άρτιου βαθμού αρμονικές περιέχονται στη κυματομορφή της τάσης και γενικά όταν υπάρχει αστάθεια στη κυματομορφή τάσης του δικτύου. Όταν η τάση δικτύου περιέχει αρμονικές, ένα ποσοστό από αυτές θα περιληφθεί στη κυματομορφή αναφοράς που χρησιμοποιείται από τον αντιστροφέα. Αυτή η παραμόρφωση της κυματομορφής αναφοράς θα είναι υψηλότερη ειδικά στην περίπτωση όπου ο συγχρονισμός του αντιστροφέα με την τάση δικτύου γίνεται παίρνοντας ως αναφορά τις διελεύσεις της τάσης από το μηδέν.

Οι άρτιες αρμονικές ρεύματος εγγέονται από φορτία που παρουσιάζουν μη συμμετρικές χαρακτηριστικές ρεύματος – τάσης ($i-u$), για παράδειγμα $i(u) \neq -i(-u)$. Πιθανές πηγές άρτιων αρμονικών στα δίκτυα είναι: τριφασικές ελεγχόμενες γέφυρες μισού κύματος, μετατροπείς (π.χ. τριφασικοί ανορθωτές που τροφοδοτούν DC/DC μετατροπείς, 6-παλμικοί κυκλομετατροπείς) και ανορθωτές μισού κύματος. Η παραμόρφωση ρεύματος διαδίδεται μέσω του δικτύου διανομής και προκαλεί παραμορφώσεις τάσης εξαιτίας της σύνθετης αντίστασης του δικτύου.

Όσον αφορά τα DC ρεύματα στα δίκτυα, πρέπει να γίνει η ακόλουθη διάκριση:

- Το «συμμετρικό» DC ρεύμα είναι μια συνιστώσα που ρέει σε ηλεκτροφόρους και ουδέτερους αγωγούς. Μπορεί να παραχθεί, παραδείγματος χάριν, από φορτία που χρησιμοποιούν ανορθωτές μισού κύματος (όπως οι αυξομειωτές έντασης φωτισμού, υψηλής συχνότητας αντιστάσεις ρύθμισης ρεύματος (ballasts) μέσα σε λαμπτήρες φθορισμού και διατάξεις ισχύος με διακοπτική λειτουργία που χρησιμοποιούνται σε οικιακές εφαρμογές) ή αντιστροφείς PWM.
- Το «ασύμμετρο» DC ρεύμα είναι μια παραμένουσα συνιστώσα που μπορεί να δημιουργηθεί από σφάλματα προς γη σε εγκαταστάσεις καταναλωμένης φωτοβολταϊκής παραγωγής που χρησιμοποιούν DC πηγές και αντιστροφείς χωρίς γαλβανική απομόνωση, ή από ρεύματα διαρροής προς γη στο DC κύκλωμα του αντιστροφέα.

Σήμερα, δεν υπάρχουν όρια για τις DC αρμονικές που να καθορίζονται από τα ευρωπαϊκά πρότυπα EN και επιπροσθέτως για εξοπλισμό που καταναλώνει λιγότερο από 75W δεν έχει καθοριστεί κανένα όριο αρμονικών. Ως εκ τούτου για κάποιο οικιακό εξοπλισμό, όπως για τους φορτιστές κινητών τηλεφώνων, δεν είναι γνωστό εάν παράγεται οποιαδήποτε συνιστώσα DC ρεύματος. Σε γενικές γραμμές, η πιθανότητα υψηλού επιπέδου έγχυσης DC (π.χ. επάνω από 20mA), είναι δυνατή μετά από άθροισμα μικρότερου επιπέδου εγχύσεων DC από

διάφορες συσκευές.

Ο αντίκτυπος των DC ρευμάτων στον εξοπλισμό του δικτύου, επηρεάζει κυρίως τους μετασχηματιστές διανομής, συσκευές παραμένουτος ρεύματος (RCD), μετασχηματιστές ρεύματος, μετρητές ενέργειας, καλωδιώσεις και μεταλλικές δομές. Από αυτά, κρίσιμες επιπτώσεις έχουμε στα:

- Ασφαλής λειτουργία των RCD: το AC σήμα ενεργοποίησης υπερβαίνει την ονομαστική τιμή λόγω παρουσίας DC ρευμάτων
- Μετασχηματιστές διανομής: αύξηση αρμονικής παραμόρφωσης, αύξηση απωλειών, αύξηση θέρμανσης και θορύβου, που συνδέονται με τον κορεσμό (προκαλούνται από μια συνεχούς ρεύματος αντιστάθμιση στη μαγνήτιση του πυρήνα του μετασχηματιστή). Ο κορεσμός μπορεί να προκαλέσει υψηλά ρεύματα αιχμής, τα οποία μπορεί να ενεργοποιήσουν την ασφάλεια εισόδου και έτσι να προκληθεί διακοπή ισχύος.

Θεωρητικά Στοιχεία (Συνιστώσα Συνεχούς Τάσης της Πηγής Τάσης Αντιστροφών)

Προσομοιώσεις έχουν γίνει στα πλαίσια του προγράμματος DISPOWER προκειμένου να διαπιστωθεί το ποσό συνεχούς τάσης που η πηγή τάσης αντιστροφών με διαμόρφωση PWM μπορεί να παράγει κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες. Αναλύθηκαν διαφορετικές τοπολογίες μετατροπών (2-επιπέδων, 3-επιπέδων και 5-επιπέδων), με διαμόρφωση PWM και αρμονικές που περιλαμβάνονται στη κυματομορφή της τάσης δικτύου (Αρμονικές 2^{ης}, 4^{ης}, 6^{ης}, 8^{ης} και 10^{ης} σειράς, αρμονικό ποσοστό της κυματομορφής της τάσης μεταξύ 1 και 10%, αρμονικές γωνίες που κυμαίνονται από 0 ως 162 °), προκειμένου να καλυφθεί ένα ευρύ φάσμα πιθανών καταστάσεων.

Τα πιο σχετικά αποτελέσματα ήταν τα ακόλουθα:

- Το επίπεδο της συνιστώσας συνεχούς τάσης συσχετίζεται άμεσα με το δείκτη Συχνότητας Διαμόρφωσης (MF – Modulation Frequency). Γενικά, για δείκτες MF μέχρι 33, καθώς ο δείκτης MF αυξάνεται η συνεχής συνιστώσα μειώνεται. για κάθε τιμή αρμονικού ποσοστού που εξετάστηκε, δείκτης MF 21 δίνει το πιο υψηλό επίπεδο συνεχούς συνιστώσας.
- Δεν υπάρχει καμία σαφής σύνδεση μεταξύ της συνεχούς συνιστώσας και του Πλάτους Διαμόρφωσης (MA – Modulation Amplitude). Το ίδιο πράγμα ισχύει για την αρμονική γωνία (HA – Harmonic Angle).
- Οι υψηλότερες συνεχείς συνιστώσες λήφθηκαν για τους 2-επιπέδων μετατροπείς, με τιμές μεταξύ 0.6 και 9.5% της θεμελιώδους συνιστώσας της τάσης γραμμής. Μετατροπείς 3-επιπέδων παρήγαγαν τις χαμηλότερες συνεχείς συνιστώσες (μεταξύ 1 και 2.5%), παρόμοια με αυτές που παράγονται από μετατροπείς 5-επιπέδων (μεταξύ 1.8 και 2.2%).
- Για υψηλούς δείκτες MF ($MF \geq 45$), το επίπεδο της συνεχούς συνιστώσας ήταν χαμηλό σε όλες τις περιπτώσεις (<1%).

Επιπλέον, πραγματοποιήθηκε ανάλυση των χαρακτηριστικών μέτρων που χρησιμοποιούνται για να αποβληθεί η συνεχής συνιστώσα σε αντιστροφείς PWM. Τα ακόλουθα δεν συστήνονται λόγω των μειονεκτημάτων τους:

- Εφοδιασμός με φίλτρα ώστε να αφαιρεθούν οι αρμονικές από τη μετρούμενη τάση δικτύου. Αν και αυτό θα απέτρεπε τις άρτιες αρμονικές να εισέρθουν στην κυματομορφή τάσης αναφοράς, ένα τέτοιο φίλτρο θα καθυστερήσει τη χρονική απόκριση από το σύστημα ελέγχου σε περίπτωση σφάλματος του συστήματος (και επομένως δεν θα ήταν ικανό να αποτρέψει μια υπερένταση).
- Αύξηση της Συχνότητας Διαμόρφωσης ώστε να εξαλειφθεί η συνεχής συνιστώσα στην τάση εξόδου του αντιστροφέα. Αυτό οδηγεί σε υψηλότερες απώλειες λόγω διακοπτικής λειτουργίας και χαμηλότερη απόδοση του αντιστροφέα. Πρέπει να χρησιμοποιηθεί μια ελάχιστη τιμή, για την οποία η συνεχής συνιστώσα είναι χαμηλή και η απόδοση του αντιστροφέα είναι υψηλή.

Επιπτώσεις των Συνεχών Ρευμάτων στους Μετασχηματιστές Διανομής

Μια μελέτη έγινε στο Ηνωμένο Βασίλειο πάνω στον αντίκτυπο του συνεχούς ρεύματος που εγχέεται και προκαλεί την αρμονική παραμόρφωση των μετασχηματιστών διανομής. Οι προσομοιώσεις βασίστηκαν σε έναν μετασχηματιστή 500 kVA 11/0.433 kV (φόρτωση 50% και μοναδιαίο συντελεστή ισχύος). Σαν κριτήριο για την αποδεκτή DC έγχυση, προτάθηκε ένα όριο της τάξης του 5% συνολικής αρμονικής παραμόρφωσης (THD) για το ρεύμα. Ειδικότερα, για έναν χαρακτηριστικό μετασχηματιστή διανομής 500kVA, προτάθηκε μια έγχυση συνεχούς ρεύματος 40mA, ώστε να θεωρηθεί αφετηρία για μελλοντική εργασία.

Ένα άλλο όριο έγχυσης συνεχούς ρεύματος της τάξης του 0.5% του ονομαστικού φασικού ρεύματος προτάθηκε την από Εθνική Αμερικανική Ηλεκτρική Συνεταιριστική Ένωση.

Επιπτώσεις των Συνεχών Ρευμάτων σε Διατάξεις Παραμένουστος Ρεύματος

Θεωρητικές μελέτες που έγιναν στο Ηνωμένο Βασίλειο κατάληξαν στο συμπέρασμα ότι οι RCD είναι απίθανο να επηρεαστούν αρνητικά (δηλ. αποτρέπεται η ενεργοποίησή τους σε κατάσταση σφάλματος) από τη παρουσία του συνεχούς ρεύματος που προκύπτει από τους αντιστροφείς που χρησιμοποιούνται από κοινού με ενσωματωμένες εγκαταστάσεις παραγωγής.

Επιπτώσεις των Συνεχών Ρευμάτων στη Διάβρωση Καλωδίων και Δικτύων

Στην προηγούμενως αναφερθείσα μελέτη παρατηρήθηκε ότι υπάρχει ένας μεγάλος όγκος στοιχείων σχετικά με τους κινδύνους διάβρωσης που συνδέονται με τα συνεχή ρεύματα που ρέουν στα ηλεκτρικά δίκτυα και καλώδια (και ειδικότερα όσον αφορά την διάβρωση παρασιτικού ρεύματος). Ενώ τέτοια αστοχία μπορεί να οδηγήσει στη διακοπή παροχής ισχύος, μια μεγαλύτερη αστοχία μπορεί επίσης να εμφανιστεί με σημαντικότερες συνέπειες. Επομένως, πρέπει να τεθούν κάποια ανώτερα όρια. Σε αυτό το θέμα απαιτείται επιπλέον συζήτηση.

Πειραματικά Στοιχεία Συνιστώσα Συνεχούς Ρεύματος Αντιστροφέων

Πραγματοποιήθηκαν πειραματικές δοκιμές στα πλαίσια του προγράμματος DISPOWER για αντιστροφείς (αντιπροσωπευτικοί της ευρωπαϊκής αγοράς: 12 μονοφασικές μονάδες με διαφορετικό σχεδιασμό, χαμηλής συχνότητας μετασχηματιστή, υψηλής συχνότητας μετασχηματιστή και χωρίς μετασχηματιστή). Χρησιμοποιήθηκαν τάσεις δοκιμής με διάφορα αρμονικά επίπεδα, που βασίζονται στα ευρωπαϊκά πρότυπα (EN 61000-4-13, για τα σημεία της κοινής σύνδεσης), που αντιστοιχούν σε επίπεδα που μπορούν εμφανιστούν στα κοινά δίκτυα. Αρμονικές τάσης 2^{ης}, 4^{ης}, 6^{ης} και 8^{ης} τάξης εφαρμόστηκαν στις δοκιμές.

Τα κύρια αποτελέσματα ήταν τα ακόλουθα:

- Στο 67% των περιπτώσεων τα συνεχή ρεύματα που μετρήθηκαν ήταν κάτω από 100 mA. Στις υπόλοιπες περιπτώσεις τα συνεχή ρεύματα ήταν μικρότερα από 600 mA.
- Το ποσό της συνεχούς συνιστώσας δεν αυξάνεται με την παρουσία άρτιων αρμονικών τάσης.
- Συγκρίνοντας τα επίπεδα δοκιμής τάσης που χρησιμοποιήθηκαν και τα επίπεδα που αναμένονται στα δίκτυα, καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι συνδεδεμένοι στο δίκτυο κατανεμημένοι αντιστροφείς δεν παράγουν συνιστώσες συνεχούς ρεύματος .

Επιπτώσεις Συνεχών Ρευμάτων στους Μετασχηματιστές Διανομής

Πειραματικές μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν σε μια πυκνή αστική γερμανική περιοχή με φ/β συστήματα 50kWp (25 φωτοβολταϊκά συστήματα 2kWp κάθε ένα, με αντιστροφείς χωρίς μετασχηματιστή, με μεταγωγή από το δίκτυο) έδειξαν συνεχή ρεύματα μεταξύ 0 και 5% του θεμελιώδους ρεύματος για έναν απλό αντιστροφέα, με ένα μέγιστο συνολικό συνεχές ρεύμα περίπου 4A για όλους τους αντιστροφείς. Κατά τη διάρκεια ενός έτους δοκιμής, αυτές οι συνεχείς συνιστώσες δεν προκάλεσαν οποιαδήποτε διαταραχή στο δίκτυο.

Εργαστηριακές δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν στη Γερμανία με έναν τοροειδή μετασχηματιστή (λόγου μετασχηματισμού 1:1, 3 kVA) υπό διαφορετικές συνθήκες φορτίου (AC και DC) παρουσίασαν τα εξής:

- Χωρίς κανένα AC φορτίο στο δευτερεύον, φορτίο συνεχούς ρεύματος παλλόμενο στο 50% του ονομαστικού ρεύματος του μετασχηματιστή (και τα δύο σε τιμές RMS) δεν προκάλεσε κανένα κίνδυνο τοπικής συσκότισης (blackout) λόγω της λειτουργίας της ασφάλειας του μετασχηματιστή στο πρωτεύον.
- Λειτουργία κάτω από υψηλό σταθερό φορτίο εναλλασσόμενου ρεύματος (85% του ονομαστικού) και μεταβλητά συνεχή φορτία (παρόμοιες συνθήκες με μετασχηματιστή δικτύου) έδειξε ότι η συνεχής συνιστώσα προκάλεσε μια παραμόρφωση στο ρεύμα στο πρωτεύον του μετασχηματιστή. Για συνεχή ρεύματα μέχρι 13% του ονομαστικού ρεύματος του μετασχηματιστή δεν εμφανίστηκε καμία κατάσταση κινδύνου.

Τα πειράματα επαναλήφθηκαν για διαφορετικό λόγο μετασχηματισμού (2:1). Τα αποτελέσματα ήταν παρόμοια, με μόνη διαφορά να είναι το ρεύμα στο πρωτεύον, που μειώνεται από το νέο λόγο μετασχηματισμού.

Πειραματικές δοκιμές πάνω σε φωτοβολταϊκά συστήματα πραγματοποιήθηκαν στα πλαίσια προγράμματος στην Ιαπωνία, με προσομοίωση 2 εναέριων γραμμών διανομής υψηλής τάσης (μετασχηματιστής 500 kVA και 2000 kVA αντίστοιχα), κάθε γραμμή αποτελούταν από 10 ισοδύναμα τμήματα με συνολικό μήκος 10 χλμ, με 2 μετασχηματιστές (10 και 30 kVA) τοποθετημένους σε κάθε τμήμα των γραμμών διανομής. Μονοφασικά φ/β συστήματα συνδέθηκαν με την πλευρά χαμηλής τάσης των μετασχηματιστών: στη γραμμή 1, 100 μονάδες με ισχύ 2 kWp η κάθε μια, συνολικά δηλαδή 200 kWp, στη γραμμή 2, 100 μονάδες με ισχύεις 2, 3 και 5 kWp, δηλαδή συνολικά 300 kWp. Οι μισοί αντιστροφείς που συνδέθηκαν στη γραμμή 1 ήταν ελεγχόμενοι από τάση και οι άλλοι μισοί ελεγχόμενοι από ρεύμα, ενώ αυτοί που συνδέθηκαν στη γραμμή 2 ήταν όλοι ελεγχόμενοι από ρεύμα.

Προκλήθηκε πειραματικά ένα σφάλμα συνδέοντας την έξοδο της φωτοβολταϊκής συστοιχίας (4 παράλληλες σειρές με 7 συνδεδεμένα σε σειρά πλαίσια σε κάθε μια) απευθείας με το κύκλωμα εναλλασσόμενου ρεύματος ενός μετασχηματιστή 10 kVA. Οι μετρήσεις έδειξαν ότι τόσο το ρεύμα που εμφανίστηκε στο μετασχηματιστή όσο και οι άρτιες αρμονικές αυξήθηκαν στην πλευρά υψηλής τάσης του μετασχηματιστή (η κυματομορφή του ρεύματος που εμφανίστηκε προκάλεσε παραμόρφωση εξαιτίας μαγνητικής επίδρασης από τα συνεχή ρεύματα). Εντούτοις, ακόμα και όταν προκλήθηκε συνεχές ρεύμα ισοδύναμο με 10% του ονομαστικού ρεύματος του μετασχηματιστή, δεν παρατηρήθηκε κανένα πρόβλημα, όπως υπερθέρμανση.

Η επίδραση του προηγούμενου πειραματικού συνεχούς – εναλλασσόμενου σφάλματος ερευνήθηκε και σε άλλα μέρη της γραμμής διανομής. Οι μετρήσεις έδειξαν ότι:

- Φάνηκε παραμόρφωση της κυματομορφής ρεύματος σε άλλα φ/β συστήματα που συνδέθηκαν με την ίδια γραμμή διανομής χαμηλής τάσης όπου πραγματοποιήθηκε το σφάλμα AC-DC. Αυτό το φαινόμενο δεν είχε επιπτώσεις στα φ/β συστήματα, όπως παύση για παράδειγμα της ηλεκτρικής παραγωγής.
- Φάνηκε παραμόρφωση της κυματομορφής του ρεύματος, που προκλήθηκε από το σφάλμα AC-DC, σε άλλους μετασχηματιστές που συνδέθηκαν στην ίδια υψηλής τάσης γραμμή διανομής. Αυτό ήταν ιδιαίτερα αξιοπρόσεχτο στους μετασχηματιστές που τοποθετήθηκαν στην πλευρά παροχής ηλεκτρικού ρεύματος, αλλά όχι στους μετασχηματιστές που βρίσκονται στη πλευρά του φορτίου.
- Καμία επίδραση δεν παρατηρήθηκε στα φ/β συστήματα που συνδέθηκαν με την πλευρά χαμηλής τάσης των μετασχηματιστών. Κατά συνέπεια, υπήρξε ελάχιστη καταστρεπτική επίδραση, όπως υπερθέρμανση του μετασχηματιστή που προκαλείται από τα σφάλματα των φ/β συστημάτων που συνεχίστηκαν για αρκετά λεπτά.

Πειραματικές δοκιμές έχουν πραγματοποιηθεί στα πλαίσια του προγράμματος DISPOWER για δύο μετασχηματιστές διανομής 400 kVA, προκειμένου να προσδιοριστούν τα αποτελέσματα της DC έγχυσης και για να καθοριστούν τα επίπεδα ανοσοποίησης : ένας μετασχηματιστής, αντιπροσωπευτικός της τεχνολογίας της δεκαετίας του '70, μάλλον μη αποδοτικός , και ένας αντιπροσωπευτικός της τεχνολογίας του 2005, μάλλον αποδοτικός (κατηγορία μετασχηματιστή με τις χαμηλότερες απώλειες και πολύ χαμηλά επίπεδα δημιουργίας ρεύματος). Έγινε η υπόθεση ότι η εγκατεστημένη κατανεμημένη παραγωγή αντιπροσωπεύει το μισό της ονομαστικής ισχύος των μετασχηματιστών.

Ερευνήθηκαν οι ηλεκτρικές επιπτώσεις της DC έγχυσης πάνω στην αρμονική παραμόρφωση ρεύματος, απώλειες χωρίς φορτίο και επίπεδα θορύβου. Τα κύρια αποτελέσματα ήταν τα εξής:

- Από τις 3 επιπτώσεις που ερευνήθηκαν, η αύξηση του επιπέδου θορύβου λόγω των συνεχών ρευμάτων είναι η πιο περιοριστική, ιδιαίτερα για τους μετασχηματιστές της τελευταίας δεκαετίας. Προτείνονται οι ακόλουθοι όροι ανοσοποίησης των μετασχηματιστών:
- Μέγιστη DC έγχυση: 0.5% του ονομαστικού ρεύματος μετασχηματιστή, με εξαίρεση της μικρής κατανεμημένης παραγωγής
- Μέγιστη DC έγχυση για μικρή κατανεμημένη παραγωγή: 100 mA ανά μονάδα.
- Οι προηγούμενες τιμές θεωρούνται μάλλον συντηρητικές (τα όρια τέθηκαν βάσει μιας μικρής αύξησης του επιπέδου θορύβου σε έναν σύγχρονο μετασχηματιστή με πολύ μικρό ρεύμα διέγερσης), που σημαίνει ότι αν τηρηθούν αυτές οι τιμές δεν θα οδηγηθούμε σε οποιοδήποτε πρόβλημα για κάθε μετασχηματιστή διανομής.

Σαν συμπέρασμα δηλώθηκε ότι η έγχυση συνεχούς ρεύματος από γεννήτριες που αποτελούνται από αντιστροφείς φαίνεται να μην είναι ένα σοβαρό ζήτημα. Με κατάλληλο σχεδιασμό του ελέγχου των αντιστροφέων, δεδομένου ότι προκαλούν τα περισσότερα ρεύματα, τα επίπεδα συνεχούς ρεύματος είναι χαμηλά σε σύγκριση με τα σημαντικά όρια που προτάθηκαν παραπάνω.

Επιπτώσεις Συνεχών Ρευμάτων στις Συσκευές Παραμένοντος Ρεύματος

Έρευνες που έγιναν στο Ηνωμένο Βασίλειο και την Αυστρία για την επίδραση των «συμμετρικών» συνεχών ρευμάτων στις συσκευές παραμένοντος ρεύματος (RCD) που μπορούν να επηρεαστούν από τα συνεχή ρεύματα συμπέραναν τα εξής:

- Τα «συμμετρικά» συνεχή ρεύματα δεν έχουν κανένα αξιόλογο αντίκτυπο στη λειτουργία των RCDs. Ακόμη και σε διάφορα επίπεδα amperes των συνεχών ρευμάτων, η λειτουργία ενεργοποίησης των συσκευών έδρασε ικανοποιητικά.
- Τα «ασύμμετρα» συνεχή ρεύματα έχουν μια αξιοπρόσεχτη επίδραση στα RCDs. Για αυτόν τον λόγο και προκειμένου να αποτραπούν τα προβλήματα ασφάλειας, RCDs ευαίσθητα στο ρεύμα πρέπει να χρησιμοποιηθούν σε σύνδεση με τις γεννήτριες, που θα μπορούσαν να παρουσιάσουν συνεχή παραμένοντα ρεύματα.

Επιπτώσεις Συνεχών Ρευμάτων στις Συσκευές Μέτρησης

Έρευνα που έχει γίνει στο Ηνωμένο Βασίλειο τις επιπτώσεις των DC συνιστωσών πάνω στις συσκευές μέτρησης συμπεραίνει:

- Σχετικά με τον αντίκτυπο στη μέτρηση του ρεύματος στους μετασχηματιστές, σύμφωνα με την οδηγία του κατασκευαστή, συνεχή ρεύματα μέχρι 10% του ονομαστικού ρεύματος δεν πρέπει να προκαλούν ανακρίβειες. Εξετάζοντας X.T μετασχηματιστές ρεύματος (50/5 A), θα απαιτούσαν ένα επίπεδο συνεχούς ρεύματος της τάξης των 5 A για να επηρεαστεί η ακρίβεια, μια τιμή πάρα πολύ υψηλή για να θεωρηθεί ως περιοριστική για τη καταναεμημένη παραγωγή
- Σχετικά με τους μετρητές ηλεκτρικής ενέργειας (βατώρες), για τους νέους μετρητές που συμμορφώνονται με τα υπάρχοντα πρότυπα (IEC 62053) εξασφαλίζεται αξιόπιστη και ακριβής λειτουργία κάτω από συνθήκες συνεχούς ρεύματος. Αντίθετα, ηλεκτρομηχανικοί μετρητές θεωρούνται ευαίσθητοι και οδηγούν σε αποκλίσεις μέτρησης με την παρουσία συνιστωσών συνεχούς ρεύματος.

Ανάγκες για Τυποποίηση Όρια στην Έγχυση Συνεχούς Ρεύματος από τη Καταναεμημένη Φωτοβολταϊκή Παραγωγή

- Οι αντιστροφείς με διαμόρφωση PWM μπορούν σε γενικές γραμμές να παράγουν συμμετρικά συνεχή ρεύματα κατά τη διάρκεια της κανονικής λειτουργίας

παρουσία άρτιων αρμονικών στην τάση δικτύου. Αυτήν την περίοδο, στους κανονισμούς που εφαρμόζονται, η διάκριση μεταξύ του συμμετρικού και ασύμμετρου συνεχούς ρεύματος δεν γίνεται. Αυτό το σημείο πρέπει να εξεταστεί στις μελλοντικές συζητήσεις περί τυποποίησης.

- Τα όρια έγχυσης συνεχούς ρεύματος που διευκρινίζονται αυτήν την περίοδο στις απαιτήσεις σύνδεσης είναι πολύ διαφορετικά, κυμαινόμενα από 20mA (UK) χωρίς να υπερβαίνουν το 1A (IEEE). Απαιτείται η υιοθέτηση ομοιόμορφων ορίων.

Συμπερασματικά, ο αντιστροφέας δε πρέπει να εγχέει συνεχές ρεύμα μέσα στο εναλλασσόμενο σύστημα περισσότερο από το 0.5% του εναλλασσόμενου ρεύματος εξόδου του υπό οποιαδήποτε συνθήκη λειτουργίας του αντιστροφέα. Το συνεχές ρεύμα έχει σημαντική επίπτωση στα επαγωγικά φορτία και για αυτό το λόγο θα πρέπει να διατηρείται σε μικρά επίπεδα. Με ένα συνδυασμό εφαρμογής εναλλασσόμενου με συνεχούς στα πηνία, αυτά μπορούν να φθάσουν στον κορεσμό καταλήγοντας σε απώλειες υστέρησης πέρα από τα όρια της συσκευής. Ένας τρόπος προφύλαξης του δικτύου είναι η τροποποίηση της σύνδεσης ώστε να μην έχουμε έγχυση συνεχούς ρεύματος. Αυτός ο τρόπος όμως είναι ακριβός και όχι απαραίτητος. Υπάρχουν και άλλες σχεδιαστικές επιλογές εξίσου αξιόπιστες και λιγότερο δαπανηρές. Επειδή ο αντιστροφέας παρακολουθεί το ρεύμα του, μπορεί να προγραμματιστεί να διακόπτει τη λειτουργία του σε περίπτωση που απαιτείται η ανάπτυξη υπερβολικά μεγάλου συνεχούς ρεύματος στην έξοδό του.

4.4.2.5 Συντελεστής Ισχύος

Ο όρος «συντελεστής ισχύος» χρησιμοποιείται κανονικά όταν συζητάμε για μια συσκευή που καταναλώνει και Watt και vars (vars περιγράφει την ισχύ που είναι 90° εκτός φάσης από Watt, επίσης γνωστά ως άεργα βολτ-αμπέρς). Ο συντελεστής ισχύος είναι ένα μέτρο των σχετικών μεγεθών των Watt και vars που αποτελούν ένα φορτίο. Τα περισσότερα σπίτια έχουν επαγωγικό συντελεστή ισχύος 0.9. Ο λόγος για τον οποίο ο συντελεστής ισχύος είναι ένα ζήτημα στα φωτοβολταϊκά συστήματα είναι γιατί οι διατάξεις με μεταγωγή από το δίκτυο καταναλώνουν vars ενώ μεταφέρουν watts, που μπορεί να θεωρηθεί μια μη οικονομική επιβάρυνση στο δίκτυο (και, τελικά, στους υπόλοιπους πελάτες του δικτύου), αφού αναγκάζει το δίκτυο να «αγοράζει» watts ενώ μεταφέρει vars δωρεάν. Αυτομεταγόμενες διατάξεις δεν καταναλώνουν απαραίτητα vars και στην πραγματικότητα μπορούν να σχεδιαστούν με οποιοδήποτε συντελεστή ισχύος, συμπεριλαμβανόμενου χωρητικού συντελεστή ισχύος, ο οποίος παράγει vars. Εξαιτίας της πολύπλοκης κατάστασης όπου παράγονται watts και καταναλώνονται vars, θα πάψουμε να αναφερόμαστε στο συντελεστή ισχύος και θα αρχίσουμε να αναφερόμαστε στην κατανάλωση var.

Εν συντομία, ωμικά φορτία (λαμπτήρες πυρακτώσεως, αντιστάσεις θερμαστρών, κλπ) καταναλώνουν Watts. Επαγωγικά φορτία (μηχανές, μετασχηματιστές, κλπ) καταναλώνουν vars εκτός από Watt. Χωρητικά φορτία (οι πυκνωτές δεν είναι ένας κοινός τύπος φορτίου) παράγουν vars. Η δυνατότητα να παρασχεθούν και τα δύο απαραίτητα, Watt και vars και να οδηγηθούν στο φορτίο ενός δικτύου, απαιτεί πρώτα να παραχθούν

και διανεμηθούν ώστε το δίκτυο να καλύψει τις υποχρεώσεις του. Εξαιτίας ενός σημαντικού αριθμού συσκευών που βρίσκεται στα δίκτυα και καταναλώνουν vars, το δίκτυο προσπαθεί να ικανοποιήσει τις ανάγκες για vars εγκαθιστώντας πυκνωτές στις γραμμές διανομής, ανακουφίζοντας με αυτόν τον τρόπο μια κεντρική εγκατάσταση ισχύος από την ανάγκη παραγωγής vars και διαβίβασής τους κατά μήκος ολόκληρου του δικτύου (η διαβίβαση vars περιλαμβάνει τις απώλειες ενέργειας, ακριβώς όπως διαβιβάζοντας τα Watt και δημιουργεί πτώση τάσης). Το κόστος, η μεταφορά και οι επιδράσεις στη μεταβολή της τάσης είναι τα σημαντικά θέματα κατά την συζήτηση κατανάλωσης των vars. Μια πτυχή της κατανάλωσης var είναι καθαρώς οικονομική. Οι οικιακοί πελάτες του δικτύου τιμολογούνται με βάση την κατανάλωση βατώρας τους. Εάν ένα φ/β σύστημα προστεθεί σε μια κατοικία και αυτό το φ/β σύστημα παρέχει μόνο πραγματική ισχύ (δηλαδή λειτουργεί με μοναδιαίο συντελεστή ισχύος), το δίκτυο χάνει το εισόδημα από τα Watt που έχουν αντικατασταθεί από τα Watt του φ/β συστήματος, αλλά πρέπει να συνεχίσει να ικανοποιεί την απαίτηση της κατοικίας για vars. Εάν, επιπλέον, το φ/β σύστημα απαιτεί vars, το δίκτυο πρέπει να ικανοποιήσει την απαίτηση του φ/β συστήματος για vars εκτός από την απαίτηση της κατοικίας για vars. Σε κάθε περίπτωση το δίκτυο δεν αντισταθμίζει τις δαπάνες του και το πραγματικό εισόδημά του μειώνεται επειδή λιγότερες βατώρες πωλούνται στους πελάτες. Μια άποψη είναι η εξής: «Προκειμένου να είμαστε απολύτως δίκαιοι, θα ήταν επιθυμητό η τοπική παραγωγή να τροφοδοτεί την ζήτηση του τοπικού έργου φορτίου. Δεδομένου ότι αυτή η τιμή θα ήταν δύσκολο να καθοριστεί, ένας λογικός συμβιβασμός είναι η τοπική παραγωγή να λειτουργεί σε 1.0 pF έτσι ώστε, τουλάχιστον, να μην επιβάλλει οποιαδήποτε πρόσθετη ζήτηση έργου ισχύος στο δίκτυο». Αυτή η άποψη προτείνει τη χρήση μιας διάταξης υψηλής συχνότητας που έχει σχεδιαστεί έτσι ώστε ούτε να καταναλώνει, ούτε να παράγει vars.

Συμπερασματικά, ο αντιστροφείας πρέπει να λειτουργεί με συντελεστή ισχύος μεγαλύτερο του 0.85, επαγωγικό ή χωρητικό. Με την έγκριση του φορέα διαχείρισης του δικτύου, μπορεί να είναι αποδεκτό ο αντιστροφείας να λειτουργεί με συντελεστή ισχύος επαγωγικό, μικρότερο από 0.85 για να αντισταθμίζει το χωρητικό συντελεστή ισχύος του δικτύου. Η κατάσταση αυτή μπορεί εύκολα να παρακολουθηθεί από τον αντιστροφεία, καθώς η τάση και το ρεύμα ανιχνεύονται ήδη για άλλους σκοπούς.

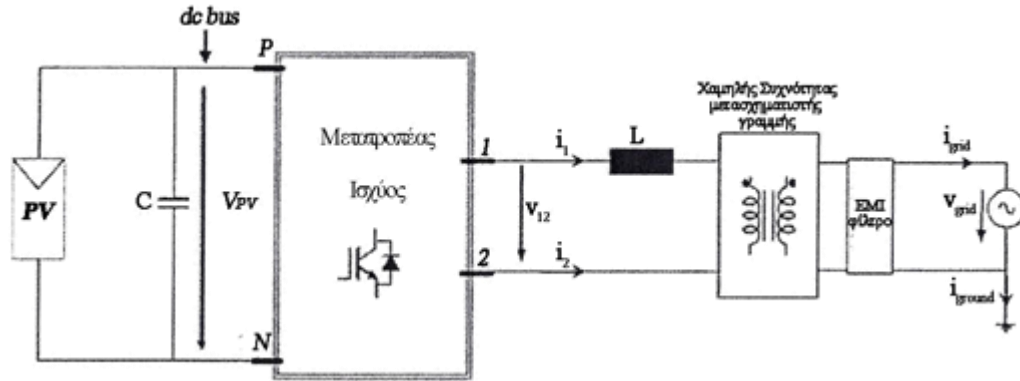
4.4.2.6 Ρεύματα Προς Γη (Μονοφασικό Φ/Β Σύστημα Χωρίς Μετασχηματιστή)

Τα πρώτα φ/β συστήματα που χρησιμοποιήθηκαν για οικιακή χρήση περιέλαβαν έναν μονοφασικό αντιστροφεία με έναν μετασχηματιστή χαμηλής συχνότητας (LF) που τοποθετήθηκε μεταξύ του σταδίου μετατροπής ισχύος και του δικτύου. Αυτός ο μετασχηματιστής απαιτείται από όλους σχεδόν τους εθνικούς κανονισμούς και εγγυάται τη γαλβανική απομόνωση μεταξύ του δικτύου και των φ/β συστημάτων, παρέχοντας κατά συνέπεια προστασία. Επιπλέον, παρέχει την απομόνωση μεταξύ του φ/β συστήματος και του εδάφους του δικτύου, έτσι ώστε να περιορίζεται το ρεύμα «κοινού τρόπου» (common mode current). Όμως τόσο ο μετασχηματιστής LF, όσο και ο μετασχηματιστής HF, τα χαρακτηριστικά των οποίων είδαμε στην παράγραφο 3.3, έχουν

πολλά μειονεκτήματα ως προς το κόστος και την τοπολογία του συστήματος.

Η εξέλιξη της τεχνολογίας έχει καταστήσει δυνατό την παράλειψη του μετασχηματιστή χωρίς αντίκτυπο στα χαρακτηριστικά των συστημάτων όσον αφορά την ασφάλεια και την διασύνδεση με άλλα συστήματα. Επίσης, η χρήση μιας σειράς φωτοβολταϊκών πλαισίων επιτρέπει να έχουμε τάσεις MPP που είναι αρκετές ώστε να αποφευχθεί η αύξηση (boosting) τάσεων στο τμήμα μετατροπής. Άρα, αυτό το τμήμα μπορεί να αποτελείται από ένα απλό αντιστροφέα, χωρίς την ανάγκη μετασχηματιστή, ούτε dc-dc μετατροπέα, με αποτέλεσμα ένα πιο απλό, οικονομικό και αποδοτικό τμήμα μετατροπής. Όπως αναφέρθηκε και στην παράγραφο 3.3, πολλά από τα μελλοντικά συνδεδεμένα στο δίκτυο φ/β συστήματα θα είναι χωρίς μετασχηματιστή.

Εντούτοις, για να αξιολογήσουμε τη γενική απόδοση ενός φ/β συστήματος, την ποιότητα ρεύματος του δικτύου και την αποτελεσματικότητα των συστημάτων, πρέπει να ληφθεί υπόψη η common mode συμπεριφορά. Όταν δεν χρησιμοποιείται μετασχηματιστής, μια γαλβανική σύνδεση εμφανίζεται μεταξύ των φ/β πλαισίων και του δικτύου, δηλαδή μεταξύ των πλαισίων και του εδάφους. Επομένως, το ρεύμα που εγχέεται στο έδαφος περιορίζεται μόνο από τις σύνθετες αντιστάσεις μετατροπέων (κυρίως από το φίλτρο EMI) και την παρασιτική χωρητικότητα μεταξύ της φ/β γεννήτριας και του εδάφους. Συνεπώς, όταν παράγει ο αντιστροφέας μια μεταβλητή common mode τάση, τα ισχυρά common mode ρεύματα διαρροής μπορούν να διατρέξουν μέσω της μεγάλης παρασιτικής χωρητικότητας μεταξύ του φ/β πλαισίου και του εδάφους. Για να αποφευχθεί το φαινόμενο, δηλαδή τα ρεύματα αυτά να ρέουν στο έδαφος, είναι απαραίτητο να χρησιμοποιηθούν τα στάδια μετατροπής ισχύος μαζί με τις κατάλληλες τεχνικές διαμόρφωσης που δεν παράγουν μεταβλητές common mode τάσεις. Η κύρια δυσκολία στην ανάλυση αυτών των χωρίς μετασχηματιστή φ/β συστημάτων προέρχεται από την έλλειψη ενός απλού προτύπου και μιας διαδικασίας ώστε να μελετηθεί θεωρητικά η common mode συμπεριφορά του συστήματος. Στη συνέχεια παρουσιάζεται ένα κατανοητό πρότυπο για να αναλυθούν και να κατανοηθούν τέτοιου είδους ζητήματα σε μονοφασικά χωρίς μετασχηματιστή φ/β συστήματα. Επιπροσθέτως, αυτό το πρότυπο είναι χρήσιμο στην έρευνα για νέες τοπολογίες μετατροπής και τις τεχνικές μοντελοποίησης για τα συστήματα αυτού του τύπου. Κατ' αρχάς, εισάγεται το πρόβλημα common mode για φ/β συστήματα χωρίς μετασχηματιστή. Έπειτα, αναλύεται λεπτομερώς η συμπεριφορά του συστήματος. Σαν αποτέλεσμα αυτής της ανάλυσης, λαμβάνεται ένα κατάλληλο πρότυπο για να προσδιορίσει τόσο τη συμμετοχή των στοιχείων μετατροπής στα ρεύματα προς γη όσο και για να αξιολογήσει την συνεισφορά οποιασδήποτε τεχνικής μοντελοποίησης.



Σχήμα 4.13: Απεικόνιση μονοφασικού φωτοβολταϊκού συστήματος

Περιγραφή του συστήματος

Το συνδεδεμένο σε δίκτυο φ/β σύστημα αποτελείται βασικά από μια φ/β γεννήτρια (σύνολο πλαισίων) και ένα στάδιο μετατροπής ισχύος (αντιστροφέας). Το σχήμα 4.13 παρουσιάζει ένα γενικό φ/β σύστημα, το οποίο πρόκειται να μελετηθεί ακριβώς για να αναλυθεί το ζήτημα common mode σε φ/β συστήματα.

Τα σημεία "1" και "2" αντιστοιχούν στις εξόδους των μετατροπέων ισχύος. Χαρακτηριστικά, ο μετατροπέας είναι μια ελεγχόμενη πηγή τάσης, και επομένως, μια κατάσταση βραχυκυκλώματος εμφανίζεται όποτε συνδέεται απευθείας με άλλη πηγή τάσης όπως το δίκτυο. Συνεπώς, το πηνίο γραμμής (L) απαιτείται για να ελέγξει το ρεύμα που εγχέεται στο δίκτυο. Ο αντιστροφέας περιλαμβάνει επίσης το μετασχηματιστή LF και το φίλτρο EMI. Σε ένα φ/β σύστημα ο αντιστροφέας έχει έναν διπλό ρόλο. Από τη μία, πρέπει να ελέγξει την τάση της φ/β γεννήτριας, V_{PV} , έτσι ώστε το σημείο λειτουργίας της φ/β γεννήτριας να είναι πάντα όσο το δυνατόν πιο κοντά στο MPP. Από την άλλη, πρέπει να εγχύσει την ενέργεια που εξάγεται από τη φ/β γεννήτρια στο δίκτυο με τη βοήθεια της έγχυσης ενός ημιτονοειδούς ρεύματος, i_{grid} , με μοναδιαίο συντελεστή ισχύος.

Μια άλλη πτυχή που λαμβάνεται υπόψη στα συνδεδεμένα στο δίκτυο φ/β συστήματα είναι η ροή ρεύματος διαμέσου της σύνδεσης μεταξύ του δικτύου και του εδάφους, συνεπεία της common mode λειτουργίας του φ/β συστήματος. Αυτό το ρεύμα έχει αρνητικά αποτελέσματα τόσο όσον αφορά την ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα (EMC), όσο και την ασφάλεια του συστήματος. Η μελέτη τόσο της ποιότητας του ρεύματος που εγχέεται στο δίκτυο όσο και του ρεύματος διαρροής προς τη γη, είναι πολύ χρήσιμη για να περιγράψει τη συμπεριφορά του συστήματος με τη βοήθεια των common mode και «διαφορικού τρόπου» (differential mode) ζητημάτων.

Η common mode οποιασδήποτε τάσης εξόδου κυκλωμάτων είναι η μέση τιμή των τάσεων μεταξύ των εξόδων και μιας κοινής αναφοράς. Για αυτό το σύστημα, είναι πολύ κατάλληλο να χρησιμοποιηθεί ο αρνητικός ακροδέκτης, το σημείο N, ως κοινή αναφορά. Επομένως, η common mode τάση του μετατροπέα, v_{cm} , είναι:

$$v_{cm} = \frac{v_{1N} + v_{2N}}{2} \quad (4.12)$$

Η differential mode τάση, ορίζεται ως η τάση μεταξύ των δύο εξόδων των μετατροπέων:

$$v_{dm} = v_{1N} - v_{2N} = v_{12} \quad (4.13)$$

Από τις εξισώσεις (4.12) και (4.13) η τάση μεταξύ των εξόδων των μετατροπέων και του σημείου N μπορεί να εκφραστεί ως:

$$v_{1N} = \frac{v_{dm}}{2} + v_{cm} \quad (4.14)$$

$$v_{2N} = -\frac{v_{dm}}{2} + v_{cm} \quad (4.15)$$

Το common mode ρεύμα στην έξοδο της πλήρους κύματος γέφυρας (Full Bridge - FB) ορίζεται ως:

$$i_{cm} = i_1 + i_2 \quad (4.16)$$

Το differential mode ρεύμα είναι:

$$i_{dm} = i_1 - i_2 \quad (4.17)$$

$$i_1 = i_{dm} + \frac{i_{cm}}{2} \quad (4.18)$$

$$i_2 = -i_{dm} + \frac{i_{cm}}{2} \quad (4.19)$$

εία μπορεί να

$$i_1 = i_{dm} + \frac{i_{cm}}{2} \quad (4.18)$$

$$i_1 = -i_{dm} + \frac{i_{cm}}{2} \quad (4.19)$$

Από το σχήμα 4.13 και την εξίσωση (4.16), είναι σαφές ότι το ρεύμα προς γη αντιστοιχεί στο ρεύμα, i_{cm} . Επομένως, το i_{cm} χρειάζεται ένα συνεχόμενο αγωγίμο δρόμο από το έδαφος στον μετατροπέα. Σχετικά με το differential mode ρεύμα, αφήνει ένα από τα σκέλη της FB και επιστρέφει μέσω του άλλου σκέλους. Το ρεύμα που ρέει στο δίκτυο, αν θεωρήσουμε ότι έχουμε μετασχηματιστή με λόγο μετασχηματισμού 1:1, μπορεί να εκφρασθεί:

$$i_{grid} = i_1 = i_{dm} + \frac{i_{cm}}{2} \quad (4.20)$$

Το μοντέλο του φ/β συστήματος που παρουσιάζεται στο σχήμα 4.13 δεν περιλαμβάνει κανένα αγωγίμο δρόμο για το ρεύμα προς γη ώστε να επιστρέφει στο FB μετατροπέα. Έτσι, το ρεύμα i_{cm} είναι μηδέν. Υπό αυτούς τους όρους, το μόνο ρεύμα που ρέει στο δίκτυο αντιστοιχεί στον όρο i_{dm} . Η δυναμική αυτού του όρου είναι μια λειτουργία της τάσης που εφαρμόζεται πέρα από το πηνίο γραμμής L, το οποίο μπορεί να ελεγχθεί από την τάση v_{dm} που παράγεται από το μετατροπέα:

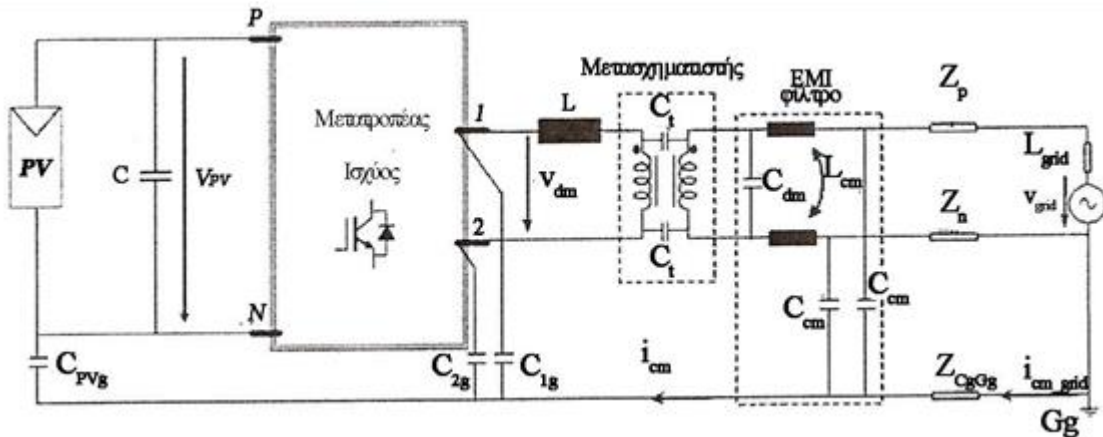
$$\frac{di_{grid}}{dt} = \frac{di_{dm}}{dt} = \frac{v_{dm} - v_{grid}}{L} \quad (4.21)$$

Επομένως, η differential mode τάση ελέγχει το ρεύμα που ρέει στο δίκτυο. Η στιγμιαία τιμή της v_{dm} εξαρτάται από τις τάσεις στα σημεία 1 και 2. Αρκετά συχνά ο μετατροπέας αποτελείται από ένα σύνολο διακοπών και συμπεριφέρεται ως πηγή τάσης που μπορεί να παράγει διακριτές τιμές τάσεων εξόδου. Αυτές οι τιμές καλούνται επίπεδα εξόδου. Τα επίπεδα τάσης που μπορούν να παραχθούν από το μετατροπέα εξαρτώνται από την τοπολογία του. Οι μονάδες μετατροπής έπειτα ταξινομούνται σε μετατροπείς με περισσότερα επίπεδα, δύο, τρία ή περισσότερα επίπεδα μετατροπέα. Αυτή τη στιγμή, οι πιο συχνά χρησιμοποιούμενοι μετατροπείς είναι αυτοί των τριών επιπέδων.

Το επίπεδο της τάσης εξόδου μετατροπέων τίθεται από την κατάσταση

διακοπτικής λειτουργίας των διακοπών των μετατροπέων. Με χρήση τεχνικών διαμόρφωσης PWM, κατά τη διάρκεια ενός πολύ σύντομου χρόνου αποκαλούμενου διακοπτική περίοδος (T_s), επιλέγεται μια ιδιαίτερη ακολουθία των επιπέδων εξόδου μετατροπέων, και έπειτα μια συγκεκριμένη μέση τιμή της v_{dm} μεταξύ των τιμών $-V_{PV}$ και V_{PV} . Η διακοπτική συχνότητα ($f_s = 1/T_s$) επιλέγεται χαρακτηριστικά περίπου σε τάξη των δεκάδων kHz για τα μονοφασικά φ/β συστήματα. Κατά συνέπεια, ο μετατροπέας μπορεί να μεταβάλλει τη μέση τιμή v_{dm} αρκετά γρήγορα ώστε να ελέγχει το ρεύμα που ρέει μέσα στο δίκτυο, με μια μικρή κυμάτωση υψηλής συχνότητας. Για να κρατηθεί το ρεύμα υπό έλεγχο κατά τη διάρκεια ολόκληρης της περιόδου του δικτύου, η τάση στον αγωγίμο δρόμο συνεχούς ρεύματος, V_{PV} , πρέπει να είναι υψηλότερη από το μέγιστο της τάσης δικτύου. Είναι απαραίτητη μια ελάχιστη τιμή για αυτήν την τάση, περίπου 350V, σε συστήματα δικτύου 230V.

Όσον αφορά το φάσμα αρμονικών, η v_{dm} εισάγει μια θεμελιώδη συνιστώσα στη συχνότητα δικτύου και αρμονικές υψηλής συχνότητας. Τα πλάτη αυτών των αρμονικών είναι αποτέλεσμα της τεχνικής διαμόρφωσης που χρησιμοποιείται, από την οποία προκύπτει μια διανυσματική ακολουθία. Η θεμελιώδης συνιστώσα του ρεύματος που ρέει στο δίκτυο, και μέσω αυτού της ισχύος που ρέει στο δίκτυο, ελέγχεται με τη βοήθεια της θεμελιώδους συνιστώσας v_{dm} . Υπάρχουν πολλαπλές τεχνικές διαμόρφωσης που παράγουν την ίδια θεμελιώδη συνιστώσα για τη v_{dm} αλλά με διαφορετικές αρμονικές υψηλής συχνότητας. Μόλις είναι γνωστή η διανυσματική ακολουθία και η τάση δικτύου, το ρεύμα δικτύου μπορεί να υπολογιστεί άμεσα με τη βοήθεια της εξίσωσης (4.21). Επομένως, είναι εύκολο να αξιολογηθεί η ποιότητα της τεχνικής διαμόρφωσης από την THD του ρεύματος. Όσο υψηλότερη είναι η διακοπτική συχνότητα, τόσο υψηλότερη είναι η ποιότητα του ρεύματος εξόδου μετατροπέων. Εντούτοις, οι απώλειες αυξάνουν με τη διακοπτική συχνότητα και έπειτα η απόδοση του μετατροπέα μειώνεται. Οι απώλειες ενέργειας του μετατροπέα οφείλονται στις απώλειες διακοπτικής ενέργειας που προκαλείται από τη ροή του ρεύματος μέσω των διακοπών και τις απώλειες διακοπτικής ενέργειας που προκαλούνται από το άνοιγμα και κλείσιμο των διακοπών. Επομένως, όταν αξιολογείται η απόδοση ενός μετατροπέα που λειτουργεί με μια ιδιαίτερη τεχνική διαμόρφωσης, πρέπει να εξεταστούν η ποιότητα ρεύματος και η απόδοση, τα οποία αποτελούν χαρακτηριστικά γνωρίσματα.

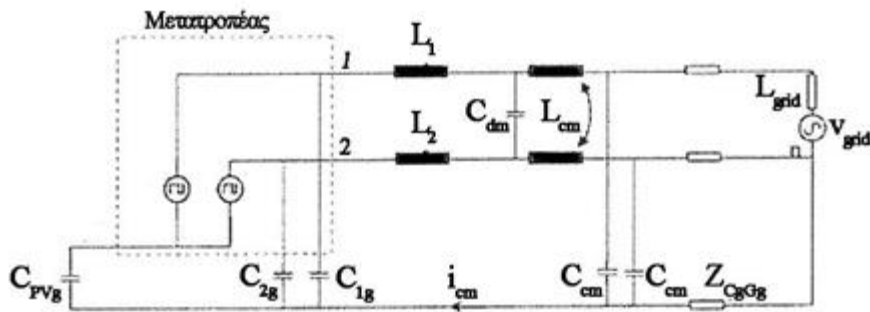


Σχήμα 4.14: Απεικόνιση φωτοβολταϊκού συστήματος συμπεριλαμβανομένων των πιο σημαντικών παρασιτικών στοιχείων

Μέχρι τώρα το common mode ρεύμα δεν έχει ληφθεί υπόψη δεδομένου ότι, προφανώς, δεν υπάρχει αγωγίμος δρόμος για να ακολουθήσει. Στα πραγματικά φ/β συστήματα, η παρασιτική χωρητικότητα εμφανίζεται και παρέχει ηλεκτρικούς αγωγίμους δρόμους για το ρεύμα προς γη που δεν είναι άλλο από το i_{cm} . Βεβαίως, η τιμή του common mode ρεύματος είναι μια συνάρτηση της common mode τάσης. Ωστόσο, η τιμή του i_{cm} δεν μπορεί να συναχθεί άμεσα από τη τιμή της v_{cm} , δεδομένου ότι το i_{cm} επηρεάζεται από άλλες πηγές τάσης και στοιχεία όπως τα παρασιτικά στοιχεία του συστήματος. Το σχήμα 4.14 παρουσιάζει με μεγαλύτερη λεπτομέρεια το σχέδιο του φ/β συστήματος συμπεριλαμβανομένων των σημαντικότερων παρασιτικών στοιχείων, που απεικονίζονται ως πυκνωτές και πηνία, τα οποία επηρεάζουν τα ρεύματα προς γη. Σε αυτό το σχήμα, η C_{PVg} αντιπροσωπεύει την παρασιτική χωρητικότητα μεταξύ του φωτοβολταϊκού πλαισίου και του εδάφους. Αυτή η χωρητικότητα είναι κατανεμημένη σε όλη την επιφάνεια των φ/β γεννητριών. Μερικοί προτείνουν η C_{PVg} να μοντελοποιείται ως δύο συνδεδεμένοι πυκνωτές με τον πρώτο συνδεδεμένο μεταξύ του θετικού άκρου της φ/β γεννήτριας και της γης και τον δεύτερο μεταξύ του αρνητικού και της γης. Ωστόσο μοντελοποίηση με μόνο έναν πυκνωτή είναι αρκετή για να απεικονίσει την συνεισφορά των φ/β γεννητριών στην common mode λειτουργία. Η τιμή του πυκνωτή C_{PVg} επηρεάζεται από τα χαρακτηριστικά της εγκατάστασης (τύπος εδάφους, υγρασία, σύνδεση στον μετατροπέα, κλπ). Η C_{1g} και η C_{2g} αντιπροσωπεύουν τις παρασιτικές χωρητικότητες μεταξύ της γης και των σημείων εξόδου του μετατροπέα. Οι τιμές τους είναι μια συνάρτηση των διακοπών και της σύνδεσης μεταξύ αυτών και της διάταξης απαγωγής θερμότητας. Η Z_{GcGg} είναι η εν σειρά σύνθετη αντίσταση μεταξύ των σημείων γείωσης του μετατροπέα και του δικτύου. Αυτή η σύνθετη αντίσταση σειράς οφείλεται κυρίως στην παρασιτική επαγωγή γείωσης I_{GcGg} . Η Z_p και η Z_n είναι οι σύνθετες αντιστάσεις σειράς, επίσης επαγωγικές, της φάσης και των ουδέτερων αγωγών, αντίστοιχα. Τέλος, η C_t είναι η παρασιτική χωρητικότητα μεταξύ των τυλιγμάτων του μετασχηματιστή.

Όπως φαίνεται στο σχήμα 4.14, το ρεύμα i_{cm} μπορεί να διατρέξει το σύστημα εξαιτίας της παρασιτικής χωρητικότητας στον μετασχηματιστή LF. Αυτές οι χωρητικότητες είναι της τάξης των εκατοντάδων picofarads και έπειτα εκθέτουν μια υψηλή σύνθετη αντίσταση στο χαμηλό και μέσο φάσμα συχνότητας (<50kHz). Κατά συνέπεια, το ρεύμα i_{cm} που σχετίζεται με τις χαμηλές και μέσες αρμονικές συχνότητες της v_{cm} μειώνεται αισθητά. Το φίλτρο EMI πρέπει να φιλτράρει μόνο τα τμήματα υψηλής συχνότητας της v_{cm} , έτσι το μέγεθος φίλτρων γίνεται αρκετά μικρό. Επομένως, εάν χρησιμοποιείται ένας μετασχηματιστής, το common mode δεν παίζει σημαντικό ρόλο στην επιλογή της ισχύος του μετατροπέα και της τεχνικής διαμόρφωσης που χρησιμοποιεί. Common mode μοντέλο του συστήματος

Η τάση μεταξύ των εξόδων του μετατροπέα και του σημείου N, v_{1N} και v_{2N} , επιβάλλεται από την διακοπτική λειτουργία των διακοπών, οι οποίοι λειτουργούν σύμφωνα με την εκάστοτε τεχνική διαμόρφωσης. Επομένως, και οι δύο έξοδοι μπορούν να μελετηθούν ως ελεγχόμενες πηγές τάσης συνδεδεμένες με το σημείο N. Οι χρόνοι ανόδου και καθόδου κυμαίνονται μεταξύ δέκα και εκατό nanoseconds και καθορίζονται, κυρίως, από τα χαρακτηριστικά του διακόπτη. Εάν ο μετατροπέας του σχήματος 4.14 αντικατασταθεί από αυτές τις πηγές τάσης, λαμβάνεται το μοντέλο του σχήματος 4.15.



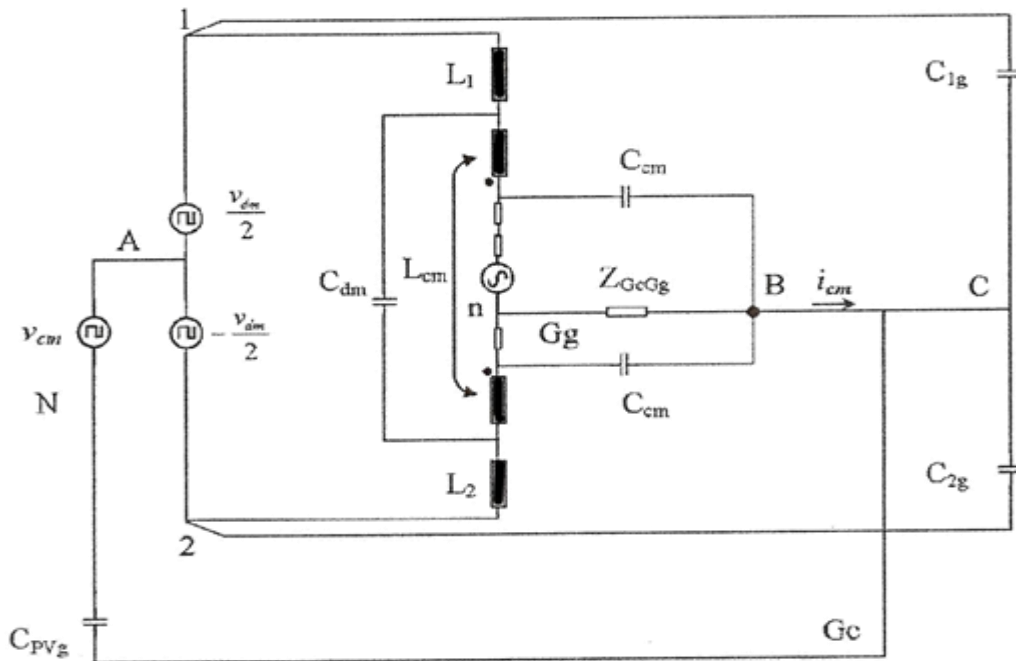
Σχήμα 4.15: Μοντέλο φωτοβολταϊκού συστήματος με μετατροπέα πηγής τάσης

Το πηνίο γραμμής είναι χωρισμένο σε δύο μέρη, δηλαδή το L_1 (το μέρος που συνδέεται με τη φάση) και το L_2 (το μέρος που συνδέεται με τον ουδέτερο). Το ρεύμα i_{dm} , ρέει πάντα μέσω ολόκληρου του πηνίου γραμμής $L_1 + L_2$. Επομένως δεν έχει σημασία εάν αυτό το πηνίο συνδέεται είτε με τη φάση ή με τον ουδέτερο αγωγό. Εντούτοις, το μισό common mode ρεύμα ρέει μέσω του αγωγού φάσης και το άλλο μισό μέσω του ουδέτερου αγωγού. Επομένως η θέση του πηνίου γραμμής επηρεάζει το common mode ρεύμα. Με στόχο να μελετηθεί η επιρροή της θέσης των πηνίων γραμμής, το πηνίο είναι χωρισμένο σε L_1 και L_2 όπως φαίνεται στο σχήμα 4.15. Αυτό το κύκλωμα καθιστά δυνατή την ανάλυση τόσο του common όσο και του differential mode ζητήματος.

Για να αναπτυχθεί ένα καταλληλότερο μοντέλο για την ανάλυση του common

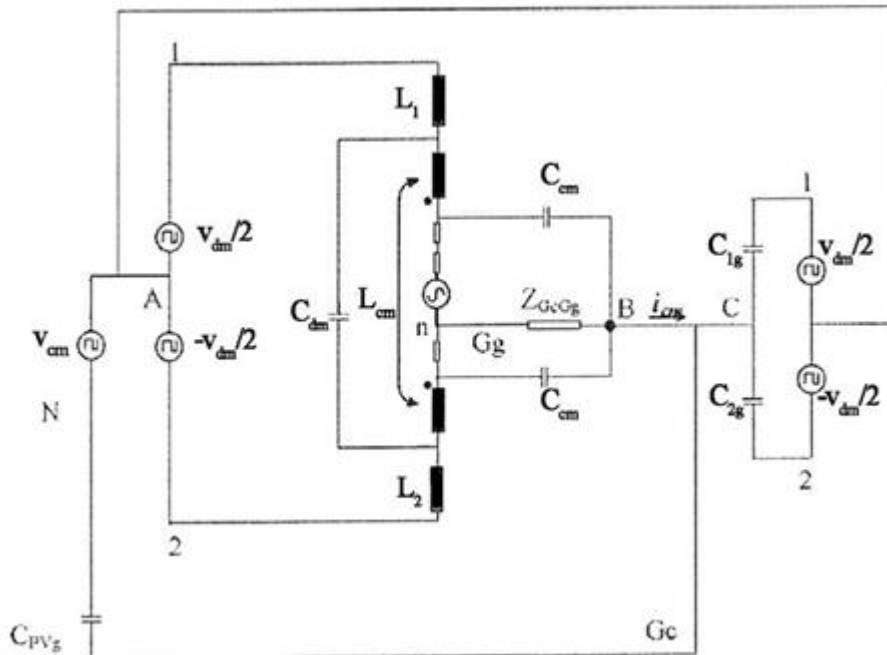
mode, πρέπει να γίνει κάποια περαιτέρω εργασία στο κύκλωμα του σχήματος 4.15. Αρχικά, το μοντέλο που φαίνεται στο σχήμα 4.14, παρουσιάζεται στο σχήμα 4.15 με τους όρους v_{dm} και v_{cm} . Δεδομένου ότι καμία απλοποίηση δεν εισήχθη στο μοντέλο, το κύκλωμα του σχήματος 4.15 είναι αρκετό για να αναλύσει το common και differential mode του συστήματος. Εντούτοις, είναι πολύ περίπλοκο να αξιολογηθεί η επίδραση των τεχνικών διαμόρφωσης πέρα από την common mode συμπεριφορά, η οποία καθορίζει το μέγεθος του πηνίου του φίλτρου EMI. Με αυτό τον στόχο, ένα απλουστευμένο μοντέλο, που περιορίζεται στον common mode, απεικονίζεται στο σχήμα 4.16. Προηγουμένως, και για να γίνει η παραγωγή των ισοδύναμων κυκλωμάτων μεταξύ των σημείων A – B και C – A ευκολότερη, οι differential mode πηγές εμφανίζονται στο μοντέλο του σχήματος 4.17 καθώς επίσης και τα σημεία 1 και 2.

Η κατά μήκος της παρασιτικής χωρητικότητας μεταξύ της φ/β γεννήτριας και της γης παρουσιάζει ένα τμήμα χαμηλής συχνότητας λόγω του δικτύου. Εντούτοις, το δίκτυο είναι μια χαμηλής συχνότητας πηγή τάσης (50-60 Hz) και η σύνθετη αντίσταση εξόδου της είναι πολύ μικρότερη συγκρινόμενη τόσο με το πηνίο γραμμής L και το EMI φίλτρο του πηνίου L_{cm} . Συμπερασματικά, η συνεισφορά του δικτύου στο common mode ρεύμα θα αμελείται από εδώ και στο εξής. Εισάγοντας τα ισοδύναμα κυκλώματα μεταξύ των σημείων A – B και C – A όπως φαίνεται στο σχήμα 4.17, λαμβάνεται το μοντέλο του σχήματος 4.18. Αυτό το μοντέλο χρησιμοποιείται για την ανάλυση common mode.



Σχήμα 4.16: Μοντέλο φωτοβολταϊκού συστήματος σε σχέση με τις differential και common mode τάσεις του μετατροπέα

Το αναπτυγμένο μοντέλο περιλαμβάνει προφανώς τη πηγή τάσης v_{cm} , αλλά και δύο πρόσθετες πηγές τάσης, την v_{s1} και την v_{s2} . Αυτές οι πηγές τάσης οφείλονται στις ασυμμετρίες που προκαλούνται στις differential mode σύνθετες αντιστάσεις, δηλαδή στις σύνθετες αντιστάσεις γραμμής και στις παρασιτικές χωρητικότητες μεταξύ των διακοπών και της γης. Επομένως, ακόμη και αν ο μετατροπέας δεν παράγει οποιοδήποτε common mode τάση, είναι δυνατό να υπάρξουν common mode ρεύματα όταν υπάρχει κάποια ασυμμετρία στις τιμές των αναφερθεισών σύνθετων αντιστάσεων. Τις περισσότερες φορές, οι δύο έξοδοι του μετατροπέα είναι συμμετρικές και μπορεί να υποθεθεί ότι οι παρασιτικές χωρητικότητες των διακοπών είναι ίδιες. Επομένως η v_{s2} θα είναι κοντά στο μηδέν. Εν πάση περιπτώσει, ακόμα και όταν δεν υπάρχει συμμετρία, η συνεισφορά της v_{s2} στο common mode ρεύμα για το χαμηλό και μέσο φάσμα συχνότητας αναμένεται να είναι πολύ λιγότερο σημαντική από αυτή των πηγών v_{s1} και v_{cm} . Αυτό οφείλεται στη χαμηλή τιμή των C_{1g} και C_{2g} , σε σύγκριση με την C_{PVg} , που είναι της τάξης των δεκάδων ως εκατοντάδων picofarads. Εάν η συμβολή αυτού του κλάδου του κυκλώματος θεωρηθεί αμελητέα, λαμβάνεται τελικά το κύκλωμα του σχήματος 4.19. Το κύριο πλεονέκτημα αυτού του απλού κυκλώματος είναι η δυνατότητα να αξιολογηθεί εύκολα και να γίνει κατανοητή η συνεισφορά, στο ρεύμα common mode, οποιασδήποτε τεχνικής διαμόρφωσης και τοποθέτησης πηνίου γραμμής. Ένα άμεσο συμπέρασμα είναι ότι όταν η τάση v_{icm} , που από εδώ και πέρα θα αναφέρεται ως ολική common mode τάση, δεν αλλάζει, κανένα ρεύμα common mode δεν θα ρέει μέσω του κυκλώματος. Αυτό οφείλεται στην παρουσία του πυκνωτή C_{PVg} που παραμένει φορτισμένος στην τάση v_{icm} .



Σχήμα 4.17: βήμα πριν λάβουμε το απλοποιημένο common mode μοντέλο

Ανάλυση Φ/Β Συστήματος Χωρίς Μετασχηματιστή με Μετατροπέα Πλήρους Κύματος(FB)

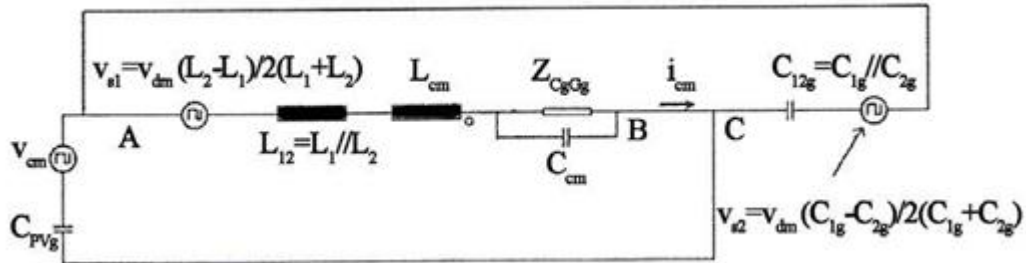
Ο μετατροπέας πλήρους κύματος είναι μια γνωστή τοπολογία τριών επιπέδων που παρέχει μια καλή εξισορρόπηση μεταξύ πολυπλοκότητας και απόδοσης . Ο FB μετατροπέας αποτελείται από δύο σκέλη, καθένα με δύο ελεγχόμενα transistors, συνήθως IGBTs και δύο διόδους. Το σχήμα 4.20 παρουσιάζει σε ένα φ/β σύστημα χωρίς μετασχηματιστή που περιλαμβάνει αυτόν τον μετατροπέα.

Όταν το άνω IGBT ενός σκέλους είναι ON, το κάτω πρέπει να είναι OFF ώστε να αποφευχθεί το βραχυκύκλωμα του αγωγού διέλευσης συνεχούς ρεύματος και αντίστροφα. Ο πίνακας 4.5 απαριθμεί τους τέσσερις πιθανούς συνδυασμούς που αντιστοιχούν στις επιτρεπόμενες καταστάσεις αγωγής των διακοπών του FB. Οι καταστάσεις αγωγής για τους T_2 και T_4 είναι οι συμπληρωματικές καταστάσεις των T_1 και T_3 , αντίστοιχα. Υπάρχουν μόνο τρία επίπεδα, δηλαδή τρεις διαφορετικές στιγμιαίες τιμές, για τη τάση differential mode (0, V_{PV} , $-V_{PV}$). Από τώρα και στο εξής, οι τέσσερις συνδυασμοί θα αναφέρονται με τη βοήθεια των διανυσμάτων τους (0_N , N , P , 0_P).

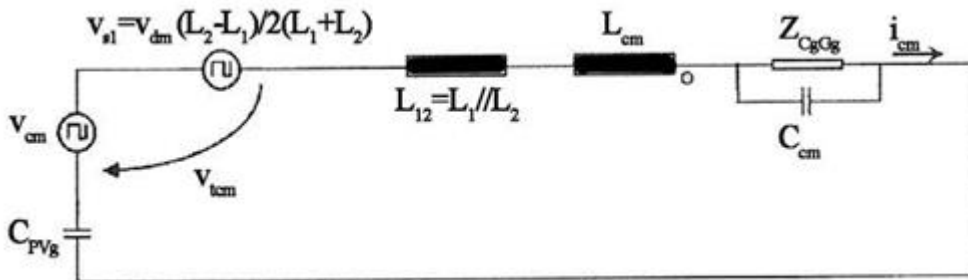
Οι καταστάσεις αγωγής των διακοπών καθορίζουν την τάση v_{dm} αλλά δεν παρέχουν αρκετές πληροφορίες για την ανάλυση της common mode συμπεριφοράς των φ/β συστημάτων. Με βάση το σχήμα 4.19 παρατηρούμε ότι V_{icm} είναι συνάρτηση των πηγών v_{cm} και v_{s1} . Η τάση v_{cm} μπορεί να παραχθεί από τα διανύσματα του πίνακα 4.5, ενώ η τάση v_{s1} εξαρτάται επίσης από την ασυμμετρία των τιμών των πηνίων L_1 και L_2 .

Επομένως, για να εξεταστεί ο common mode είναι απαραίτητο να αξιολογηθεί το

σύνολο της common mode τάσης για κάθε συνδυασμό των L_1 και L_2 . Ωστόσο, υπάρχουν άπειροι συνδυασμοί και μόνο οι δύο πιο ενδιαφέρουσες περιπτώσεις θα εξεταστούν εδώ. Τα αποτελέσματα και για τις δύο περιπτώσεις παρουσιάζονται στους πίνακες 4.6 και 4.7. Αυτοί οι πίνακες παρουσιάζουν τις τιμές των v_{dm} και v_{icm} για κάθε περίπτωση και επιτρέπουν την ανάλυση και την ανάπτυξη τεχνικών διαμόρφωσης για ένα φ/β σύστημα χωρίς μετασηματιστή, με μετατροπέα πλήρους κύματος (FB).



Σχήμα 4.18: Μοντέλο για το common mode



Σχήμα 4.19: Τελικό μοντέλο για το common mode

Περίπτωση 1: ολόκληρο το πηνίο γραμμής τοποθετείται στον αγωγό φάσης
($L_2 \rightarrow 0$ και $L_1 \rightarrow L$)

Αυτή είναι η απλούστερη και συνήθως πιο χρησιμοποιούμενη επιλογή για την τοποθέτηση πηνίων γραμμής. Στην πράξη, δεν είναι δυνατό να παραληφθεί όλη η αυτεπαγωγή από τον ουδέτερο αγωγό λόγω της παρασιτικής αυτεπαγωγής των αγωγών (σχήμα 4.20). Επομένως, στο μοντέλο του σχήματος 4.19, η παράλληλη σύνθετη αντίσταση λόγω του L_1 και η παρασιτική αυτεπαγωγή θα είναι περίπου ίσες με την παρασιτική αυτεπαγωγή του ουδέτερου (της τάξεως των εκατοντάδων nH ως λίγα μH). Ο πίνακας 4.6 παρουσιάζει τις τιμές που αντιστοιχούν σε v_{dm} και v_{icm} , που είναι το κλειδί

για να παραχθεί ή να αναλυθεί κάθε τεχνική διαμόρφωσης.

Πίνακας 4.5: Τάσεις εξόδου και διανύσματα του μετατροπέα πλήρους κύματος

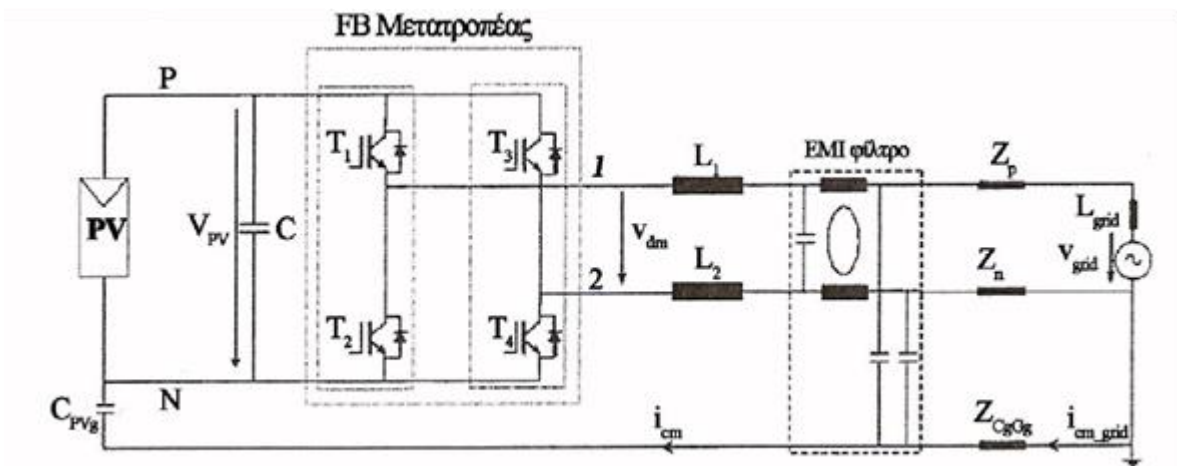
Διάνυσμα	T1	T3	v_{1N}	v_{2N}	$v_{dm} = v_{1N} - v_{2N}$
0_N	OFF	OFF	0	0	0
N	OFF	ON	0	V_{PV}	$-V_{PV}$
P	ON	OFF	V_{PV}	0	V_{PV}
0_P	ON	ON	V_{PV}	V_{PV}	0

Πίνακας 4.6: Κύριες τάσεις αντιστροφέα, του μετατροπέα πλήρους κύματος $L_1 = L(L_2 = 0)$

Διάνυσμα	v_{dm}	$v_{cm} = \frac{v_{1N} + v_{2N}}{2}$	$v_{s1} = v_{dm} \cdot \frac{1}{2}$	$v_{tcm} = v_{s1} + v_{cm}$
0_N	0	0	≈ 0	≈ 0
N	$-V_{PV}$	$V_{PV} \cdot 2$	$\approx V_{PV} \cdot 2$	$\approx V_{PV}$
P	V_{PV}	$V_{PV} \cdot 2$	$\approx -V_{PV} \cdot 2$	≈ 0
0_P	0	V_{PV}	≈ 0	$\approx V_{PV}$

Πίνακας 4.7: Κύριες τάσεις αντιστροφέα, του μετατροπέα πλήρους κύματος $L_1 = L_2 = L$

Διάνυσμα	v_{dm}	$v_{cm} = \frac{v_{1N} + v_{2N}}{2}$	$v_{s1} = v_{dm} \cdot 0$	$v_{tcm} = v_{s1} + v_{cm}$
0_N	0	0	≈ 0	≈ 0
N	$-V_{PV}$	$V_{PV} \cdot 2$	≈ 0	$\approx V_{PV} \cdot 2$
P	V_{PV}	$V_{PV} \cdot 2$	≈ 0	$\approx V_{PV} \cdot 2$
0_P	0	V_{PV}	≈ 0	$\approx V_{PV}$



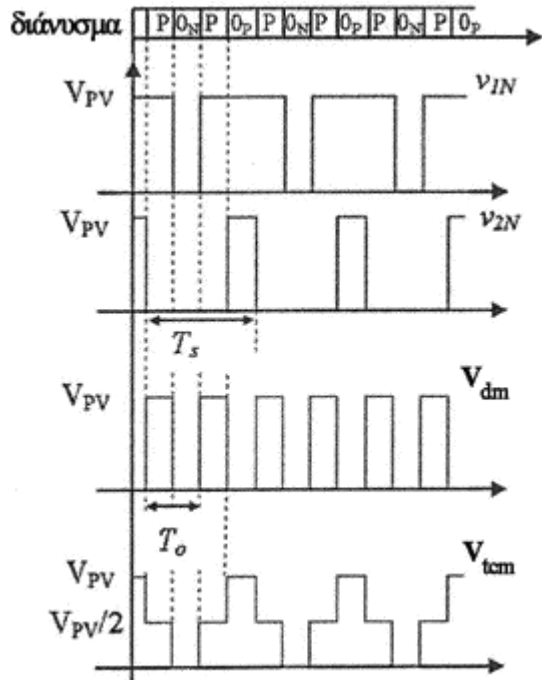
Σχήμα 4.20: Φωτοβολταϊκό σύστημα χωρίς μετασχηματιστή με μετατροπέα πλήρους

Περίπτωση 2: το πηνίο γραμμής χωρίζεται σε δύο ακριβώς ίδια μέρη ($L_1 = L_2 = L/2$)

Ένα εναλλακτικό σενάριο της περίπτωσης 1, που φαίνεται πολύ ενδιαφέρον είναι να κατανεμηθεί συμμετρικά το πηνίο γραμμής L μεταξύ της φάσης και των ουδέτερων αγωγών έτσι ώστε η τάση v_{s1} να γίνει μηδέν. Ο πίνακας 4.7 παρουσιάζει τις τιμές των v_{dm} και v_{tcm} για αυτή την περίπτωση.

Με τους πίνακες 4.6 και 4.7 είναι δυνατό να αναλυθεί μια ιδιαίτερη τεχνική διαμόρφωσης ή να παραχθούν νέες, που να σχετίζονται με τα common και differential mode ζητήματα. Ανεξάρτητα από την τεχνική διαμόρφωσης που εξετάζεται, η ελεγχιμότητα του ρεύματος δικτύου επιβάλλει ότι η θεμελιώδης συνιστώσα της v_{dm} εισάγει μια ημιτονοειδή μορφή στη συχνότητα δικτύου. Για να απλοποιηθεί αυτό, από τώρα και στο εξής το θετικό ημικύκλιο της θεμελιώδους συνιστώσας v_{dm} θα αναφέρεται ως θετικό ημικύκλιο της v_{dm} . Το αντίστοιχο θα γίνει και για τον αρνητικό κύκλο. Σχετικά με το ρεύμα common mode, είναι σαφές από το μοντέλο του σχήματος 4.19 το βασικό είναι ότι η τάση v_{tcm} παραμένει πάντα σταθερή, όποια και αν είναι η τιμή του. Κατόπιν, πρέπει να ελέγξουμε αυτές τις συνθήκες στους πίνακες 4.6 και 4.7 ώστε να αναλύσουμε ή να παράγουμε οποιαδήποτε τεχνική διαμόρφωσης.

Αρχικά, εξετάζεται η Μονοπολική Τεχνική Διαμόρφωσης (Unipolar Pulse Width Modulation - UPWM) για να αξιολογηθεί η καταλληλότητά της για τα φωτοβολταϊκά συστήματα χωρίς μετασχηματιστή. Αυτή η τεχνική είναι η πιο εκτενώς εφαρμοζόμενη στους μετατροπείς FB. Η UPWM χρησιμοποιεί τα τρία επίπεδα που αναφέρονται στις εξόδους του μετατροπέα (V_{PV} , 0 , $-V_{PV}$). Υπάρχουν διάφοροι τρόποι να εφαρμοστεί η UPWM. Ο παραδοσιακός αποτελείται από τη διαίρεση του χρόνου για το 0 επίπεδο σε δύο ίδιους χρόνους, καθένα για κάθε μηδενικό διάνυσμα 0_N και 0_P . Σε αυτή η περίπτωση, το θετικό ημικύκλιο της v_{dm} λαμβάνεται με τα διανύσματα 0_P , P , 0_N . Το αρνητικό ημικύκλιο λαμβάνεται με τη βοήθεια των διανυσμάτων N , 0_N και 0_P . Σύμφωνα με τον πίνακα 4.5, για να εφαρμοστεί η ακολουθία 0_P , P , 0_N , P και τα δύο σκέλη πρέπει να διαμορφωθούν με τη βοήθεια του λόγου κατάτμησης (χρόνος αγωγής του άνω διακόπτη σε σχέση την συνολική περίοδο μεταγωγής). Ακόμη, οι εντολές στους διακόπτες πρέπει να συγχρονιστούν ώστε να ληφθεί μια συχνότητα εξόδου f_o , στην v_{dm} , που διπλασιάζει τη συχνότητα διακοπτικής λειτουργίας (σχήμα 4.21). Αυτό το τελευταίο χαρακτηριστικό γνώρισμα είναι πολύ σημαντικό δεδομένου ότι βελτιώνει την εξισορρόπηση μεταξύ των ενεργειακών απωλειών μετατροπής και της ποιότητας ρεύματος (THD), έτσι ώστε, να μπορεί να επιτευχθεί η υψηλότερη απόδοση για το ϕ/β σύστημα. Με τη UPWM, το ρεύμα εξόδου ρέει πάντα μέσω δύο IGBTs ή ενός IGBT και μιας διόδου, δηλαδή οι ενεργειακές απώλειες λόγω αγωγής του μετατροπέα οφείλονται στις απώλειες αγωγής των δύο ημιαγωγών ισχύος. Οι απώλειες ενέργειας λόγω διακοπτικής λειτουργίας οφείλονται σε δύο IGBTs και δύο διόδους που μοντελοποιούνται στη μισή συχνότητα εξόδου και με μια τάση της V_{PV} .



Σχήμα 4.21: Κυματομορφές με την τεχνική UPWM όταν το πηνίο γραμμής είναι συμμετρικά διαχωρισμένο

Για να αναλύσουμε την συμπεριφορά common mode πρέπει να εξεταστούν οι πίνακες 4.6 και 4.7. Στον πίνακα 4.6, το πηνίο γραμμής συνδέεται με τον αγωγό φάσης. Σε αυτή την περίπτωση, η v_{tcm} παρουσιάζει τέσσερα βήματα τάσης με εύρος ίσο με V_{PV} κατά τη διάρκεια κάθε περιόδου μεταγωγής. Στην άλλη περίπτωση (πίνακας 4.7), το πηνίο γραμμής είναι χωρισμένο συμμετρικά μεταξύ της φάσης και των ουδέτερων αγωγών. Πάλι, υπάρχουν τέσσερα βήματα τάσης της v_{tcm} , αν και τώρα το εύρος περιορίζεται σε $V_{PV}/2$. Όταν το πηνίο γραμμής χωρίζεται μεταξύ της φάσης και των ουδέτερων αγωγών, η κυματομορφή της τάσης v_{tcm} που αντιστοιχεί στο θετικό ημικύκλιο της v_{dm} απεικονίζεται στο σχήμα 4.21.

Για να κατανοηθεί καλύτερα το μέγεθος του EMI φίλτρου, είναι ενδιαφέρον να ριχτεί μια ματιά στη συμπεριφορά του συστήματος όταν δεν περιλαμβάνεται το φίλτρο EMI (L_{cm} και C_{cm}). Χωρίς το φίλτρο EMI, κάθε βήμα τάσης στην v_{tcm} δημιουργεί μια αιφνίδια μεταβολή τάσης που εξαρτάται από τον αγωγό και τις παρασιτικές αντεπαγωγές της γης (l_s) και τον C_{PVg} . Ο πυκνωτής C_{PVg} θα φθάσει γρήγορα στο μόνιμη κατάσταση με την ίδια τάση της v_{tcm} . Επομένως, όταν εφαρμόζεται η UPWM η τάση πέρα από τον C_{PVg} θα οδηγήσει σε βήματα τάσης με ένα από τα πλάτη V_{PV} ή $V_{PV}/2$. Η αιχμή του ρεύματος i_{cm} μπορεί να υπολογιστεί για ολόκληρο το πηνίο γραμμής στον αγωγό φάσης ως:

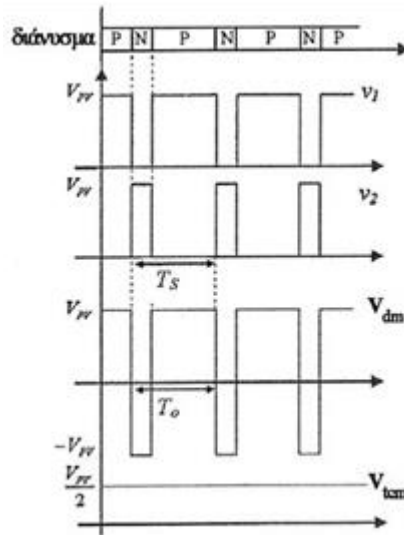
$$I_{p_cm} \approx \frac{V_{PV}}{\sqrt{\frac{l_s}{C_{PVg}}}} \quad (4.22)$$

Για να αντιληφθούμε τη σημασία της εξίσωσης (4.22) θεωρούμε ένα φ/β σύστημα 5 kW, παίρνοντας $C_{PVg} = 50nF$, $V_{PV} = 350V$ και μια συνολική παρασιτική αυτεπαγωγή $l_s = 4\mu H$, το ρεύμα αιχμής I_{p_cm} είναι περίπου 40A. Σε ένα πραγματικό φ/β σύστημα, το φίλτρο EMI θα μειώσει αυτό το μέγεθος εάν ο πυρήνας του πηνίου δεν φτάνει στον κορεσμό. Το μέγεθος του πηνίου του EMI που απαιτείται για να αντέξει στη τάση v_{icm} που παρήχθη από το φωτοβολταϊκό σύστημα χωρίς μετασχηματιστή με μετατροπέα FB UPWM, χωρίς μετάβαση στον κορεσμό, είναι πολύ μεγάλο. Αυτός είναι ο λόγος για τον οποίο αυτή η τεχνική διαμόρφωσης δεν είναι επαρκής για τα φ/β συστήματα χωρίς μετασχηματιστή. Τώρα, οι πίνακες 4.6 και 4.7 θα εξεταστούν με στόχο μια καταλληλότερη τεχνική διαμόρφωσης για τα φ/β συστήματα χωρίς μετασχηματιστή. Από τον πίνακα 4.6, μπορεί να εκτιμηθεί ότι για το θετικό ημικύκλιο v_{dm} , μπορούν να χρησιμοποιηθούν τα διανύσματα 0_N και P , έπειτα η τάση v_{icm} παραμένει σταθερή και ίση με 0V. Για το αρνητικό ημικύκλιο v_{dm} , μπορούν να επιλεγούν τα διανύσματα 0_P και N . Επομένως, η τάση v_{icm} παραμένει επίσης σταθερή αλλά τώρα ίση με V_{PV} . Με αυτήν την τεχνική διαμόρφωσης, κατά τη διάρκεια κάθε μισού κύκλου η τάση v_{icm} δεν αλλάζει καθόλου. Κατόπιν, ο πυκνωτής C_{PVg} (σχήμα 4.19) παραμένει σε σταθερή τάση και δεν εμφανίζεται common mode ρεύμα. Από τον πίνακα 4.5, μπορεί να φανεί ότι η πρακτική εφαρμογή αυτής της τεχνικής διαμόρφωσης αποτελείται από τη διαμόρφωση του ενός από τα σκέλη της FB στη συχνότητα δικτύου και του άλλου στη διακοπτική συχνότητα. Αυτή η τεχνική, αποκαλούμενη Υβριδική Διαμόρφωση Πλάτους Παλμού (Hybrid Pulse Width Modulation - HPWM), προτάθηκε με στόχο την απόδοση της FB, δεδομένου ότι επιτρέπει τη χρήση διακοπών με χαμηλότερες απώλειες αγωγής στο σκέλος που διαμορφώνεται στη συχνότητα δικτύου. Αλλά στην περίοδο μεταγωγής που η v_{dm} εναλλάσσεται από το ένα ημικύκλιο στο άλλο, ένα βήμα τάσης, με εύρος ίσο με V_{PV} , πραγματοποιείται στην v_{icm} . Όπως φαίνεται και από την εξίσωση (4.22), το ρεύμα προς γη θα παρουσιάσει μια ισχυρή αιχμή (peak) εκτός αν το φίλτρο EMI δεν περιλαμβάνει ένα common mode πηνίο αρκετά μεγάλο ώστε να αντέξει τα βήματα τάσης της v_{icm} .

Επομένως, αυτή η τεχνική διαμόρφωσης παρουσιάζει επίσης το ίδιο σημαντικό μειονέκτημα με τη UPWM στα φωτοβολταϊκά συστήματα χωρίς μετασχηματιστή που βασίζονται σε μετατροπέα FB.

Από τον πίνακα 4.7, δηλαδή όταν είναι χωρισμένο συμμετρικά το πηνίο γραμμής, φαίνεται ότι χρησιμοποιώντας μόνο τα διανύσματα P και N είναι δυνατό να ληφθούν τα θετικά και αρνητικά ημικύκλια της v_{dm} . Συγχρόνως, δεν υπάρχει καμιά αλλαγή στη τιμή της v_{icm} , που παραμένει σταθερή και ίση με $V_{PV}/2$. Επομένως, αυτή η τεχνική διαμόρφωσης φαίνεται να έχει ενδιαφέρουσες ιδιότητες για τα φωτοβολταϊκά συστήματα χωρίς μετασχηματιστή. Από τον πίνακα 4.5, φαίνεται η πρακτική εφαρμογή αυτής της

τεχνικής. Αυτή η τεχνική διαμόρφωσης διαμορφώνει και τα δύο σκέλη του FB μετατροπέα διαμέσου της διακοπτικής λειτουργίας του άνω (κάτω) IGBT ενός σκέλους ταυτόχρονα με το κάτω (άνω) IGBT του άλλου σκέλους στη συχνότητα εξόδου. Επομένως, προκύπτει ότι η συχνότητα εξόδου είναι ίδια με τη διακοπτική συχνότητα. Στην πραγματικότητα, αυτή η τεχνική είναι η γνωστή ως Διπολική Τεχνική Διαμόρφωσης (Bipolar Modulation Technique). Οι κύριες κυματομορφές για το θετικό ημικύκλιο της v_{dm} απεικονίζονται στο σχήμα 4.22.



Σχήμα 4.22: Κύριες κυματομορφές τάσης με την Διπολική (Bipolar) μοντελοποίηση (πηνίο γραμμής συμμετρικά κατανεμημένο)

Η Διπολική διαμόρφωση με το πηνίο γραμμής χωρισμένο μεταξύ της φάσης και των ουδέτερων αγωγών παρουσιάζει εξαιρετικά χαρακτηριστικά σε συνδυασμό με το φίλτρο EMI. Εντούτοις, αξίζει να σημειωθεί ότι ένα μικρό common mode ρεύμα πάντα ρέει μέσω της γης λόγω:

- Ανισορροπίας μεταξύ των παρασιτικών χωρητικότητων C_{1g} και C_{2g}
- Ανισορροπίας μεταξύ των τιμών των σύνθετων αντιστάσεων γραμμής L_1 και L_2 . Η σύνθετη αντίσταση του δικτύου συμμετέχει σε αυτή την ανισορροπία.
- Έλλειψης συγχρονισμού στη διακοπτική λειτουργία των δύο σκελών της πλήρους κύματος (FB), ανισορροπίας στη συμπεριφορά των διακοπών, καθυστερήσεις στους οδηγούς διακοπών (switching drivers κλπ).

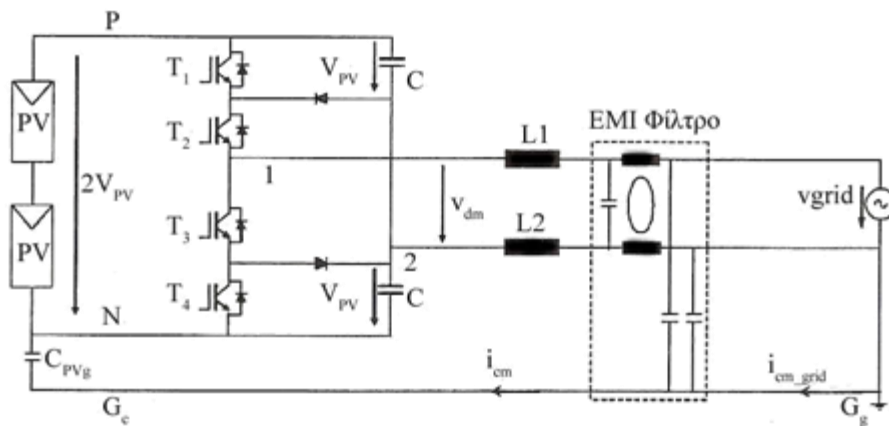
Αυτοί οι τρεις λόγοι κάνουν απαραίτητη τη χρήση φίλτρου EMI. Στην πραγματικότητα, ο τρίτος θα μπορούσε να οδηγήσει σε ηλεκτρομαγνητική παρεμβολή στο φάσμα υψηλής συχνότητας, που απαιτεί μια τιμή L_{cm} όμοια με αυτή που απαιτείται

για τη διαμόρφωση UPWM.

Όπως επισημάνθηκε, η συνολική απόδοση του αντιστροφέα πρέπει να περιλάβει το ζήτημα common mode αλλά και την απόδοση και την ποιότητα του ρεύματος που ρέει στο δίκτυο. Τα δύο τελευταία χαρακτηριστικά είναι σχετικά με την τάση differential mode. Να σημειωθεί, ότι στο σχήμα 4.22 η συχνότητα εξόδου είναι ίση με τη διακοπτική συχνότητα. Επομένως, για να φτάσουμε την ίδια συχνότητα εξόδου με αυτή που λαμβάνεται με τη UPWM, η διακοπτική συχνότητα πρέπει να διπλασιασθεί. Ακόμα και τότε, η κυμάτωση του ρεύματος που ρέει στο δίκτυο θα είναι υψηλότερη από αυτή που λαμβάνεται με τη UPWM, δεδομένου ότι τα βήματα τάσης v_{dm} είναι $2V_{PV}$. Με γνώμονα την απόδοση, κατά τη διάρκεια κάθε περιόδου μεταγωγής υπάρχουν δύο IGBTs και δύο δίοδοι που λειτουργούν στη συχνότητα εξόδου. Επομένως, οι απώλειες ενέργειας μεταγωγής είναι διπλές από αυτές με τη UPWM για την ίδια συχνότητα εξόδου. Όσον αφορά τις απώλειες αγωγής, αυτές παραμένουν ίδιες. Στη Διπολική (Bipolar) τεχνική, υπάρχουν δύο IGBTs ή δύο δίοδοι που οδηγούν το ρεύμα εξόδου, δηλαδή δύο ημιαγωγοί, όπως στη περίπτωση της UPWM. Συνεπώς, η εξισορρόπηση μεταξύ της απόδοσης και της ποιότητας ρεύματος που επιτυγχάνεται από τη Διπολική τεχνική διαμόρφωσης είναι χειρότερη από αυτή που λαμβάνεται με τη UPWM. Φ/Β Σύστημα Χωρίς Μετασηματιστή με Μετατροπέα Μισού Κύματος Τριών Επιπέδων

Η Διπολική Τεχνική Διαμόρφωσης με έναν μετατροπέα FB παρουσιάζει άριστη common mode συμπεριφορά αλλά σε σύγκριση με τη UPWM παρουσιάζει μικρή εξισορρόπηση μεταξύ της ποιότητας ρεύματος και της απόδοσης. Αυτό έχει παρακινήσει ερευνητική προσπάθεια πάνω σε άλλους μετατροπείς. Η τοπολογία μετατροπέων ισχύος που παράγει εγγενώς μια μη - μεταβλητή common mode τάση είναι η οικογένεια αντιστροφέων μισού κύματος με δύο, τρία ή περισσότερα επίπεδα. Στο σχήμα 4.23, απεικονίζεται ένα φ/β σύστημα χωρίς μετασηματιστή που περιλαμβάνει έναν τριών επιπέδων μετατροπέα μισού κύματος. Αυτός ο μετατροπέας αποτελείται από τέσσερα IGBT και έξι δίοδους, δηλαδή δύο περισσότερες δίοδοι από το μετατροπέα FB. Εκτός από την άριστη συμπεριφορά common mode, παρουσιάζει επίσης πολύ σημαντικά χαρακτηριστικά γνωρίσματα τόσο όσον αφορά τον differential mode (προσφέρει τρία επίπεδα για την τάση εξόδου) όσο και την απόδοση (οι διακόπτες πρέπει να αντέξουν στη μισή dc τάση, $2V_{PV}$). Για να αναλυθεί αυτό το σύστημα, πρέπει να παραχθούν νέοι πίνακες, ισοδύναμοι με τους πίνακες 4.5 ως 4.7. Όπως μπορεί να εκτιμηθεί από το σχήμα 4.23, η έξοδος 2 συνδέεται μόνιμα με το μεσαίο σημείο της φ/β γεννήτριας τάσης, ενώ έξοδος 1 σχετίζεται με ένα σκέλος μετατροπής που προσαρμόζεται ώστε να έχουμε έλεγχο στην τάση v_{dm} . Αυτός ο μετατροπέας προσφέρει τρία επίπεδα για την τάση εξόδου. Η τάση V_{PV} μπορεί να επιτευχθεί όταν T_1 και T_2 είναι σε ON. Σε αυτή την περίπτωση T_3 και T_4 πρέπει να είναι OFF ώστε να αποφευχθούν τα βραχυκυκλώματα. Η τάση $0V$ επιτυγχάνεται εάν T_2 και T_3 είναι ON και έπειτα T_1 και T_4 είναι OFF. Τέλος, η τάση $-V_{PV}$ εμφανίζεται αν τα T_3 και T_4 είναι ON και έπειτα T_1 και T_2 είναι OFF. Από αυτές τις εκτιμήσεις οι πιθανές καταστάσεις μοντελοποίησης φαίνονται στον πίνακα 4.8. Οι πίνακες 4.9 και 4.10 παρουσιάζουν τις τιμές των v_{dm} και v_{cm} ανάλογα με τις δύο περιπτώσεις τοποθέτησης του πηνίου γραμμής. Ο πίνακας 4.9 αντιστοιχεί στην υπόθεση

ότι ολόκληρο το πηνίο γραμμής είναι στον αγωγό φάσης και ο πίνακας 4.10 στην υπόθεση που το πηνίο γραμμής είναι χωρισμένο συμμετρικά και στους δύο αγωγούς.



Σχήμα 4.23: Φ/Β σύστημα χωρίς μετασχηματιστή με μετατροπέα μισής γέφυρας τριών επιπέδων

Όταν το πηνίο γραμμής χωρίζεται μεταξύ του ουδέτερου και του αγωγού φάσης (πίνακας 4.10), μπορεί να φανεί ότι δεν υπάρχει τρόπος να διαμορφωθεί το θετικό και το αρνητικό ημικύκλιο της v_{dm} χωρίς να έχουμε επίσης μια μεταβολή στην κυματομορφή της v_{cm} . Εντούτοις, εάν ολόκληρο το πηνίο γραμμής συνδεθεί με τον αγωγό φάσης (πίνακας 4.9), είναι σαφές ότι οποιοδήποτε διάνυσμα και αν επιλεγεί, η τάση v_{cm} παραμένει σταθερή

και ίση με τη V_{PV} . Αυτό είναι μια βελτίωση σε σχέση με τον μετατροπέα FB με τη Διπολική Τεχνική, όπου μόνο δύο επίπεδα ήταν δυνατά. Επομένως, η τεχνική μοντελοποίησης πρέπει να έχει ως σκοπό να επιτύχει τα καλύτερα differential mode χαρακτηριστικά. Με αυτό τον στόχο, τα βασικά σημεία ανέρχονται σε δύο. Το ένα είναι να παραχθεί μια τάση εξόδου, v_{dm} , με τη χαμηλότερη κυμάτωση και την υψηλότερη συχνότητα εξόδου ώστε να πάρουμε το χαμηλότερο THD στο ρεύμα που εγχέεται στο δίκτυο. Το άλλο είναι να επιτευχθεί υψηλή συχνότητα εξόδου με τη χαμηλότερη διακοπτική συχνότητα, ώστε να έχουμε όσο το δυνατόν χαμηλότερες διακοπτικές απώλειες. Για να μειωθεί η κυμάτωση της v_{dm} , τα διανύσματα 0 και P χρησιμοποιούνται για το θετικό ημικύκλιο της v_{dm} και τα διανύσματα 0 και N για το αρνητικό. Από τον πίνακα 4.8, μπορεί άμεσα να συναχθεί το συμπέρασμα ότι κατά τη διάρκεια του θετικού ημικύκλιου της v_{dm} το T_2 παραμένει πάντα ON και μόνο τα T_1 και T_3 μοντελοποιούνται στη διακοπτική συχνότητα. Παρόμοια κατάσταση παρουσιάζεται

για το αρνητικό ημικύκλιο. Οι κυματομορφές που αντιστοιχούν σε αυτήν την διαμόρφωση φαίνονται στο σχήμα 4.24.

Πίνακας 4.8: Τάσεις εξόδου και διανύσματα του μετατροπέα μισού κύματος τριών επιπέδων

Διάνυσμα	T1	T2	T3	T4	v_{1N}	v_{2N}	$v_{dm} = v_{1N} - v_{2N}$
<i>N</i>	OFF	OFF	ON	ON	0	V_{PV}	$-V_{PV}$
<i>P</i>	ON	ON	OFF	OFF	$2V_{PV}$	V_{PV}	V_{PV}
0	OFF	ON	ON	OFF	V_{PV}	V_{PV}	0

Πίνακας 4.9: Κύριες τάσεις αντιστροφέα, μετατροπέα μισού κύματος τριών επιπέδων με $L_1 = L(L_2 = 0)$

Διάνυσμα	v_{dm}	v_{cm}	v_{s1}	$v_{tcm} = v_{s1} + v_{cm}$
<i>N</i>	$-V_{PV}$	$V_{PV} / 2$	$\approx V_{PV} / 2$	$\approx V_{PV}$
<i>P</i>	V_{PV}	$3V_{PV} / 2$	$\approx -V_{PV} / 2$	$\approx V_{PV}$
0	0	V_{PV}	0	V_{PV}

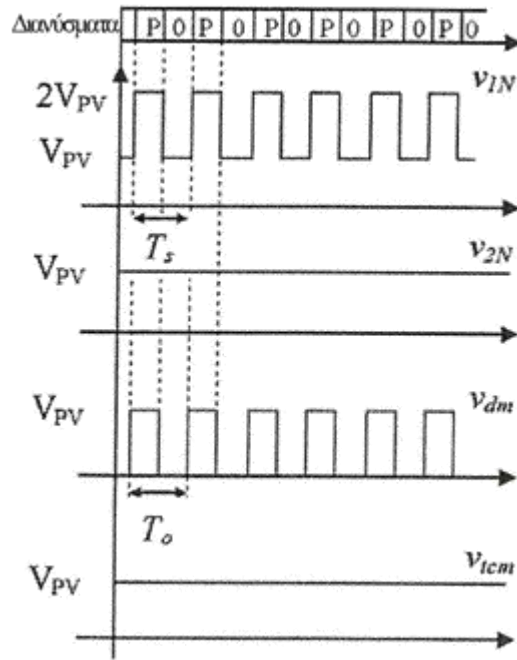
Πίνακας 4.10: Κύριες τάσεις αντιστροφέα, μετατροπέα μισού κύματος τριών επιπέδων με $L_1 = L_2 = L/2$

Διάνυσμα	v_{dm}	v_{cm}	v_{s1}	$v_{tcm} = v_{s1} + v_{cm}$
<i>N</i>	$-V_{PV}$	$V_{PV} / 2$	$\approx V_{PV} / 2$	$\approx V_{PV}$
<i>P</i>	V_{PV}	$3V_{PV} / 2$	$\approx -V_{PV} / 2$	$\approx V_{PV}$
0	0	V_{PV}	0	V_{PV}

Οι συνολικές απώλειες ενέργειας λόγω διακοπτικής λειτουργίας για αυτήν την τοπολογία οφείλονται στη διακοπτική λειτουργία ενός IGBT και μιας διόδου στη συχνότητα εξόδου και με μια τάση ίση με V_{PV} . Για να επιτύχουμε την ίδια συχνότητα εξόδου με τον μετατροπέα FB που διαμορφώθηκε με την τεχνική UPWM, είναι απαραίτητο να διπλασιαστεί η διακοπτική συχνότητα σε σχέση με αυτή που είχαμε στον μετατροπέα FB με την τεχνική UPWM. Κάνοντας αυτό, θα έχουμε τις ίδιες απώλειες διακοπτικής λειτουργίας και στους δύο μετατροπείς. Όσον αφορά τις απώλειες αγωγής, μπορεί να διαπιστωθεί ότι σε αυτή την τοπολογία το ρεύμα εξόδου ρέει μέσω δύο IGBTs ή ένα IGBT και μια διόδο, έτσι οι απώλειες αγωγής είναι παρόμοιες με αυτές της τοπολογίας FB. Συμπερασματικά, σε ένα φωτοβολταϊκό σύστημα χωρίς μετασχηματιστή, η τεχνική διαμόρφωσης που περιγράψαμε για τον μετατροπέα μισού κύματος (HB) τριών επιπέδων με ολόκληρο το πηνίο γραμμής στο διακοπτικό τμήμα, έχει ως αποτέλεσμα την καλύτερη λειτουργία απ' ό,τι στον μετατροπέα FB με την τεχνική UPWM. Η THD του ρεύματος εξόδου και η απόδοση είναι παρόμοιες αλλά τώρα δεν δημιουργείται καμιά

μεταβολή στην common mode τάση.

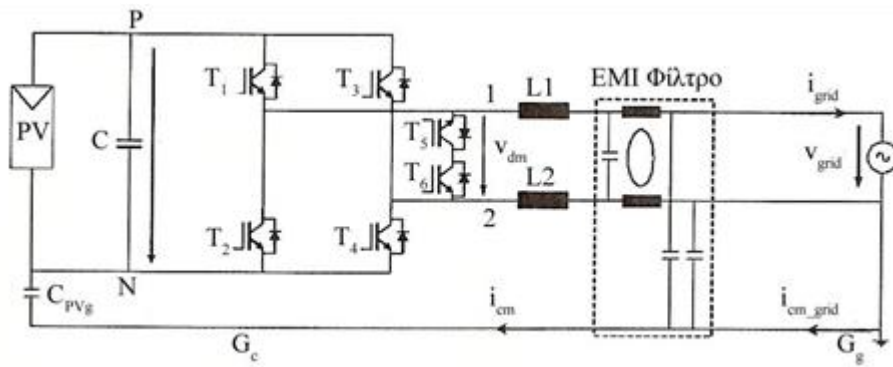
Εντούτοις, η συνεχής τάση πρέπει να είναι δύο φορές αυτή που απαιτείται στην τοπολογία του FB, αφού το πλάτος της θεμελιώδους συνιστώσας της v_{dm} , που επιβάλλεται κυρίως από το πλάτος της τάσης δικτύου, πρέπει να είναι το ίδιο. Αυτό επιτυγχάνεται με σύνδεση σε σειρά περισσότερων φ/β συστοιχιών ή χρησιμοποιώντας dc/dc στάδια ισχύος που αυξάνουν την συνεχή τάση. Εάν συμπεριλαμβάνεται ένας dc/dc μετατροπέας, η διαμόρφωση της φ/β γεννήτριας μπορεί να είναι η ίδια με εκείνη που χρησιμοποιείται για έναν FB μετατροπέα. Εντούτοις, οι απώλειες ενέργειας στο στάδιο dc/dc μειώνουν την συνολική απόδοση του φ/β συστήματος.



Σχήμα 4.24: Κυματομορφές διαμόρφωσης για μετατροπέα μισού κύματος τριών επιπέδων

Φ/Β Σύστημα Χωρίς Μετασχηματιστή με Μετατροπέα Πλήρους Κύματος (FB) με AC-Παράκαμψη

Στο σχήμα 4.25, απεικονίζεται ένα φ/β σύστημα χωρίς μετασχηματιστή που συμπεριλαμβάνει αυτή τη τοπολογία μετατροπής και ονομάζεται Αντιστροφέας με Αρχές Υψηλής Απόδοσης και Αξιοπιστίας (Highly Efficient Reliable Inverter Concept – HERIC). Ο μετατροπέας ισχύος αποτελείται τώρα από μια τοπολογία FB με δυνατότητα βραχυκύκλωσης των εξόδων της (ac-παρακάμψη) χωρίς τη χρησιμοποίηση των διακοπών FB. Η ac-παρακάμψη επιτυγχάνεται με τη βοήθεια των τρανζίστορς T_5 και T_6 και των διόδων τους αντιπαράλληλα. Αυτός ο μετατροπέας περιλαμβάνει έξι IGBTs και έξι διόδους, δηλαδή δύο διόδους και δύο IGBTs περισσότερο από τον μετατροπέα FB και δύο IGBTs περισσότερα από τον μετατροπέα μισού κύματος τριών επιπέδων.



Σχήμα 4.25: Φ/Β σύστημα χωρίς μετασχηματιστή με μετατροπέα πλήρους κύματος με ac-παράκαμψη

Για να αναλυθεί η απόδοση αυτού του μετατροπέα, πρέπει πάλι να αναπτυχθεί το ισοδύναμο του πίνακα 4.5 (επιτρεπόμενες καταστάσεις αγωγής), του πίνακα 4.6 (κυματομορφές της τάσης εξόδου όταν το πηνίο γραμμής είναι στον αγωγό φάσης) και του πίνακα 4.7 (κυματομορφές τάσεων εξόδου όταν το πηνίο γραμμής χωρίζεται μεταξύ των αγωγών φάσης και ουδετέρου). Για να λάβουμε το ισοδύναμο του πίνακα 4.5 είναι απαραίτητο να προσδιορίσουμε τις καταστάσεις αγωγής των διακοπών του μετατροπέα. Για να αποφευχθούν τα βραχυκυκλώματα, οι απαγορευμένοι συνδυασμοί για τους διακόπτες σε ON κατάσταση είναι $T_1 - T_2$, $T_3 - T_4$, $T_1 - T_6 - T_4$, $T_3 - T_5 - T_2$. Ο πίνακας 4.11 παρουσιάζει τις δυνατές καταστάσεις για τους διακόπτες του μετατροπέα.

Πίνακας 4.11: Τάσεις εξόδου και διανύσματα του μετατροπέα HERIC

Διάνυσμα	T1	T2	T3	T4	T5	T6	v_{1N}	v_{2N}	$v_{dm} = v_{1N} - v_{2N}$
N	OFF	ON	ON	OFF	OFF	OFF	0	V_{PV}	$-V_{PV}$
P	ON	OFF	OFF	ON	OFF	OFF	V_{PV}	0	V_{PV}
0_N	OFF	ON	OFF	ON	OFF	OFF	0	0	0
0_P	ON	OFF	ON	OFF	OFF	OFF	V_{PV}	V_{PV}	0
$0_1, i_{grid} > 0$	OFF	OFF	OFF	OFF	ON	OFF	-	-	0
$0_2, i_{grid} < 0$	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	ON	-	-	0

Ο πίνακας 4.11 είναι ακριβώς ίδιος με τον 4.5 εκτός από τα διανύσματα 0_1 και 0_2 . Για να αντιληφθούμε τη συμπεριφορά common mode είναι απαραίτητο να ξέρουμε την common mode τάση που παράγεται από τον μετατροπέα. Αυτό απαιτεί την γνώση των v_{1N} και v_{2N} . Τα διανύσματα 0_1 και 0_2 είναι μια ιδιαίτερη περίπτωση του μετατροπέα γιατί όλοι οι διακόπτες της διάταξης FB είναι σε αυτή τη περίπτωση OFF. Εξαιτίας αυτού, οι τιμές των v_{1N} και v_{2N} δεν μπορούν να υπολογιστούν αφού το αρνητικό σημείο του dc αγωγίμου δρόμου είναι θεωρητικά αποκομμένο από τις εξόδους του μετατροπέα. Στην πράξη, οι διακόπτες του μετατροπέα παρουσιάζουν μια παρασιτική χωρητικότητα. Αυτή η χωρητικότητα επιτρέπει να συμπεράνουμε την τάση εξόδου της FB όταν όλοι οι FB διακόπτες είναι OFF. Κατά τη διάρκεια της διαδικασίας κλεισίματος το ρεύμα εξόδου πρέπει να αφήσει τη FB και να πάει στην ac-πανάκαμψη. Δεδομένου ότι οι έξοδοι βραχυκυκλώνονται από την ac-πανάκαμψη, η τελική τάση v_{1N} και v_{2N} πρέπει να είναι η ίδια. Υποθέτοντας ότι οι παρασιτικές χωρητικότητες των διακοπών FB είναι παρόμοιες, όλη η διαδικασία κλεισίματος του FB θα είναι συμμετρική. Επομένως η μεταβολή της τάσης και στα δύο σκέλη θα είναι ίδια. Σε εκείνη την περίπτωση, η τάση v_{cm} είναι ίση με το μισό του dc δρόμου, δηλαδή $V_{PV}/2$. Τώρα, μπορούν να παραχθούν εύκολα οι αντίστοιχοι πίνακες για την v_{dm} και την v_{icm} σαν συνάρτηση της τοποθέτησης της επαγωγής γραμμής. Ο πίνακας 4.12 αντιστοιχεί στην περίπτωση που ολόκληρη η επαγωγή γραμμής τοποθετείται στον αγωγό φάσης και ο πίνακας 4.13 στην περίπτωση που η επαγωγή γραμμής είναι χωρισμένη συμμετρικά και στους δύο αγωγούς.

Πίνακας 4. 12 Κύριες τάσεις αντιστροφέα, μετατροπέα HERIC με $L_1 = L(L_2 = 0)$

Διάνυσμα	v_{dm}	v_{cm}	v_{s1}	$v_{tcm} = v_{s1} + v_{cm}$
N	$-V_{PV}$	$V_{PV}/2$	$\approx V_{PV}/2$	$\approx V_{PV}$
P	V_{PV}	$V_{PV}/2$	$\approx -V_{PV}/2$	≈ 0
0_N	0	0	0	0
0_P	0	V_{PV}	0	V_{PV}
$0_1, i_{grid} > 0$	0	$\approx V_{PV}/2$	0	$\approx V_{PV}/2$
$0_2, i_{grid} < 0$	0	$\approx V_{PV}/2$	0	$\approx V_{PV}/2$

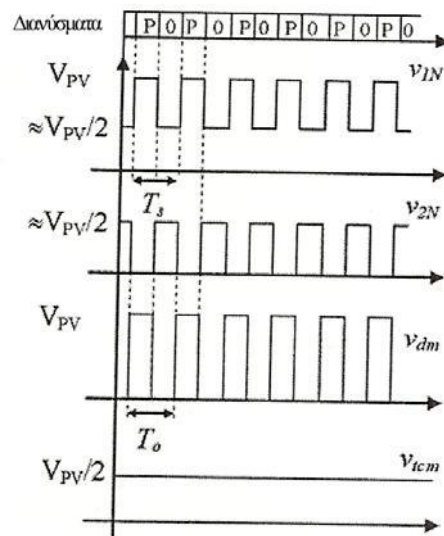
Εάν τα διανύσματα 0_1 και 0_2 δεν χρησιμοποιούνται, η ανάλυση είναι ακριβώς η ίδια με αυτή του μετατροπέα FB. Επομένως, εξετάζονται μόνο οι βελτιώσεις που μπορούν να επιτευχθούν όταν μοντελοποιούμε με τα διανύσματα 0_1 και 0_2 . Τα διανύσματα P και 0_1 είναι επιλεγμένα κατά τη διάρκεια του θετικού ημικυκλίου της v_{dm} . Σε αυτό το ημικύκλιο, το ρεύμα εξόδου i_{grid} είναι θετικό δεδομένου ότι ο συντελεστής ισχύος είναι κοντά στο 1. Τα διανύσματα N και 0_2 επιλέγονται για την παραγωγή του αρνητικού ημικυκλίου της v_{dm} . Εξετάζοντας τους πίνακες 4.12 και 4.13, μπορεί άμεσα να φανεί ότι μόνο όταν η επαγωγή γραμμής είναι συμμετρικά χωρισμένη μεταξύ των αγωγών φάσης και ουδέτερου αποφεύγεται η μεταβολή στη τάση v_{tcm} . Επομένως, θα επιτευχθεί μια εξαιρετική λειτουργία.

Πίνακας 4. 13 Κύριες τάσεις αντιστροφέα, μετατροπέα HERIC με $L_1 = L_2 = L/2$

Διάνυσμα	v_{dm}	v_{cm}	v_{s1}	$v_{tcm} = v_{s1} + v_{cm}$
N	$-V_{PV}$	$V_{PV}/2$	≈ 0	$\approx V_{PV}/2$
P	V_{PV}	$V_{PV}/2$	≈ 0	$\approx V_{PV}/2$
0_N	0	0	0	0
0_P	0	V_{PV}	0	V_{PV}
$0_1, i_{grid} > 0$	0	$\approx V_{PV}/2$	0	$\approx V_{PV}/2$
$0_2, i_{grid} < 0$	0	$\approx V_{PV}/2$	0	$\approx V_{PV}/2$

Από τον πίνακα 4.11 μπορεί να παραχθεί η στρατηγική διαμόρφωσης για τους διακόπτες των μετατροπέων. Κατά τη διάρκεια του θετικού ημικυκλίου, τα τρανζίστορ T_1 και T_4 οδηγούν τη ροή του ρεύματος εξόδου όταν εφαρμόζεται το διάνυσμα P . Όταν εφαρμόζεται το διάνυσμα 0_1 το ρεύμα εξόδου ρέει μέσω του T_5 και της διόδου που είναι παράλληλα του T_6 . Επομένως η v_{dm} παρουσιάζει ένα παλμό V_{PV} . Το τρανζίστορ T_5

μπορεί να είναι ON κατά τη διάρκεια ολόκληρου του θετικού ημικυκλίου της v_{dm} δεδομένου ότι η διόδος που είναι παράλληλα με το T_6 αποτρέπει την γέφυρα από το να παρουσιάσει βραχυκύκλωμα όταν τα T_1 και T_4 είναι ON. Για το αρνητικό ημικύκλιο της v_{dm} , χρησιμοποιούνται τα διανύσματα N και O_2 . Επομένως η διάταξη λειτουργεί ως μετατροπέας τριών επιπέδων με συχνότητα εξόδου ίση με τη διακοπτική συχνότητα και τη συνολική common mode τάση σταθερή και ίση με $V_{PV}/2$. Οι κύριες κυματομορφές τάσης για το θετικό ημικύκλιο φαίνονται στο σχήμα 4.26.



Σχήμα 4.26: Κυματομορφές διαμόρφωσης για το μετατροπέα πλήρους κύματος με ac-παράκαμψη

Σε σύγκριση με το μετατροπέα FB με τεχνική UPWM, ο FB μετατροπέας με ac-παράκαμψη πρέπει να έχει διακοπτική λειτουργία σε διπλάσια συχνότητα για να επιτύχει την ίδια συχνότητα εξόδου και την κυματομορφή v_{dm} . Σε αυτό το μετατροπέα δύο IGBTs διαμορφώνουν στη συχνότητα εξόδου αλλά με μισή dc τάση ($V_{PV}/2$) και μια διόδος διαμορφώνει στη συχνότητα εξόδου με V_{PV} . Επομένως, οι απώλειες που προέρχονται από την διακοπτική λειτουργία είναι ίδιες με αυτές του FB μετατροπέα με τεχνική UPWM για την ίδια συχνότητα εξόδου. Όσον αφορά τις απώλειες αγωγής, το ρεύμα εξόδου ρέει μέσω δύο IGBTs ή μέσω ενός IGBT και μιας διόδου, δηλαδή δύο ημιαγωγοί. Επομένως οι απώλειες αγωγής θα είναι ίδιες και για τους δύο μετατροπέες. Σαν συμπέρασμα, στα φ/β συστήματα χωρίς μετασχηματιστή, ο FB μετατροπέας με ac-παράκαμψη βελτιώνει την λειτουργία του μετατροπέα FB. Επιπλέον, παρουσιάζει τόσο καλή λειτουργία όσο ο μετατροπέας μισού κύματος τριών επιπέδων, αλλά απαιτεί μόνο το μισό της dc τάσης. Σαν μειονέκτημα, μπορεί να επισημανθεί ότι αυτή η τοπολογία απαιτεί περισσότερους διακόπτες.

Τέλος, ο πίνακας 4.14 συνοψίζει τα κύρια τεχνικά αποτελέσματα της ανάλυσης που προηγήθηκε. Η συχνότητα εξόδου και η τιμή της επαγωγής γραμμής είναι ίδιες σε όλες τις περιπτώσεις.

Πίνακας 4.14: Σύνοψη των τοπολογιών που αναλύθηκαν

Τοπολογία μετατροπής	Τοποθέτηση επαγωγής γραμμής	Αριθμός διακοπών	Dc τάση	Απώλειες ενέργειας		Κυμάτωση ρεύματος	Μέγεθος πηγίου EMI
				Αγωγής	Διακοπτική λειτουργία		
FB+UPWM	$L_1 = L$	8	Αναφορά	Αναφορά	Αναφορά	Αναφορά	Πολύ μεγάλο
FB+HUPWM	$L_1 = L$	8	Ίδια	Ελαφρώς καλύτερη	Ίδια	Ίδια	Πολύ μεγάλο
FB+BPWM	$L_1 = L_2 = L / 2$	8	Ίδια	Ίδια	Διπλάσια	Διπλάσια	Μικρό
Μισού κύματος, τριών επιπέδων	$L_1 = L$	10	Διπλάσια	Ίδια	Ίδια	Ίδια	Μικρό
HERIC	$L_1 = L_2 = L / 2$	12	Ίδια	Ίδια	Ίδια	Ίδια	Μικρό

4.4.2.7 Πολλαπλοί Αντιστροφείς και Δίκτυο AC

Δεδομένου ότι τα μικρά φ/β συστήματα ηλεκτρικής παραγωγής γίνονται πιο κοινά, θα ήταν απαραίτητο να ερευνησουμε τις διάφορες επιπτώσεις αυτής της συνεχόμενης διεύθυνσης, που δεν είναι τόσο σημαντική για τα απλά συστήματα αντιστροφών. Παραδείγματος χάριν, εάν ένας μεγάλος αριθμός καταναμημένων φ/β γεννητριών συνδέεται με έναν κλάδο χαμηλής τάσης του δικτύου διανομής, τότε η αντίστροφη ροή ισχύος στο σύστημα ισχύος υψηλότερης τάσης θα αυξηθεί αισθητά κατά τη διάρκεια των περιόδων χαμηλού φορτίου και της μέγιστης ημερήσιας ηλιακής ακτινοβολίας. Αυτό μπορεί να προκαλέσει μια σημαντική άνοδο τάσης στις γραμμές διανομής, ιδιαίτερα στα άκρα. Επίσης, τα φ/β συστήματα θα τροφοδοτήσουν ένα μέρος του ρεύματος σφαλμάτων σε περίπτωση σφάλματος στις γραμμές διανομής. Αυτό το πρόσθετο ρεύμα σφάλματος θα μειώσει το ρεύμα σφάλματος που ρέει στους

υποσταθμούς και ίσως να προκαλέσει την εσφαλμένη λειτουργία των ηλεκτρονόμων. Είναι έτσι απαραίτητο να προσδιοριστούν οι επιπτώσεις που μπορούν να εμφανιστούν κατά τη σύνδεση μεγάλου αριθμού φ/β συστημάτων και να καθορισθούν τρόποι αντιμετώπισης.

Γενικά κατά τη σύνδεση μεγάλου αριθμού φ/β συστημάτων:

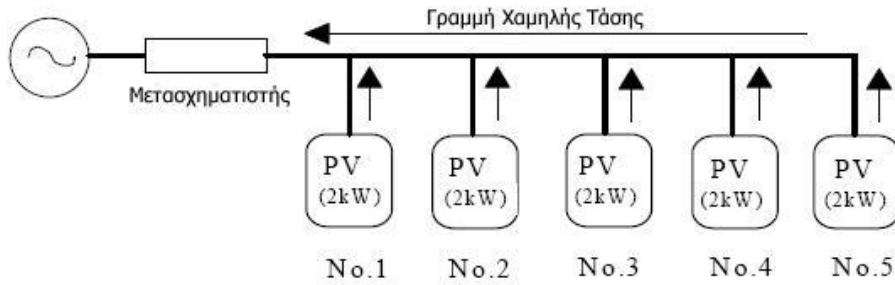
- Η τάση στη πλευρά του πελάτη μπορεί να υπερβεί το ανώτερο όριο λόγω αντίστροφης ροής ισχύος από τα φ/β συστήματα κατά τη διάρκεια των ωρών χαμηλού φορτίου κατά την διάρκεια της μέρας. Ο χωρητικός συντελεστής ισχύος του φ/β συστήματος είναι ένα αποτελεσματικό αντίμετρο για να αποτραπεί η άνοδος της τάσης χωρίς τη μείωση της πραγματικής ισχύος.
- Εάν κάθε πελάτης που τροφοδοτείται από έναν μετασχηματιστή διανομής εγκαθιστά φ/β συστήματα με μια ισχύ ίση ή μεγαλύτερη από την συμπεφωνημένη ισχύ, η αντίστροφη ροή ρεύματος θα μπορούσε να ξεπεράσει την ισχύ των μετασχηματιστών λόγω της ταυτόχρονης αλλαγής στην ισχύ εξόδου των φ/β συστημάτων και της τοπολογίας των μετασχηματιστών. Θα ήταν απαραίτητο να εξεταστεί το σενάριο αντικατάστασης του μετασχηματιστή ή να εγκατασταθεί μια αποθήκη ενέργειας.
- Θα ήταν απαραίτητο να αναπτυχθεί ένα νέο σύστημα ανίχνευσης σφαλμάτων για το φ/β σύστημα. Μια μέθοδος που ανιχνεύει την αλλαγή φάσης τάσης που εμφανίζεται σε κατάσταση σφάλματος μπορεί να είναι μια χρήσιμη επιλογή.

Επιπτώσεις και Αντιμετώπιση στην Περίπτωση Κανονικής Λειτουργίας

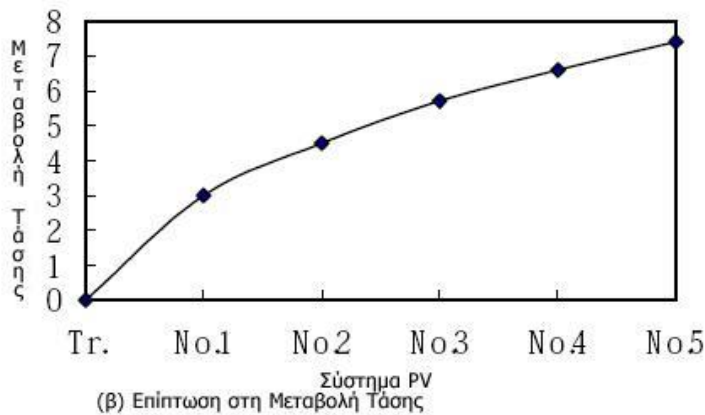
Μεταβολή Τάσης. Αυτή τη στιγμή, η τοπολογία και η λειτουργία των δικτύων διανομής στηρίζονται στην υπόθεση ότι η ισχύς ρέει από τους υποσταθμούς διανομής στον πελάτη και ότι τα δίκτυα ελέγχονται για να διατηρούν τα κατάλληλα επίπεδα τάσης στον πελάτη. Όταν η πτώση τάσης στη γραμμή διανομής είναι μεγάλη, η τάση πελατών ελέγχεται μέσω ρύθμισης των μετασχηματιστών ή με την εγκατάσταση ρυθμιστών τάσης.

Εάν ένας μεγάλος αριθμός φ/β συστημάτων συνδέεται με τις γραμμές διανομής που ελέγχεται με τον τρόπο που περιγράφεται παραπάνω, η τάση στη πλευρά του πελάτη μπορεί να αυξηθεί λόγω της αντίστροφης ροής ισχύος (Σχήμα 4.27). Αυτή η αύξηση θα εξαρτηθεί από τα σχετικά μεγέθη του φορτίου και της ηλεκτρικής παραγωγής. Από την στιγμή που η τάση στο δευτερεύον του μετασχηματιστή διανομής είναι τυπικά σε

υψηλότερη τιμή από την ονομαστική τάση, η τάση στο τέλος της γραμμής διανομής θα μπορούσε να υπερβεί το ανώτατο όριο ακόμα και με μικρή αντίστροφη ροή ισχύος, που πιθανώς δημιουργήθηκε από το φ/β σύστημα κατά την διάρκεια χαμηλού φορτίου που παρουσιάστηκε κατά τη διάρκεια της μέρας.



(α) Κατάσταση Αντίστροφης Ροής Ισχύος

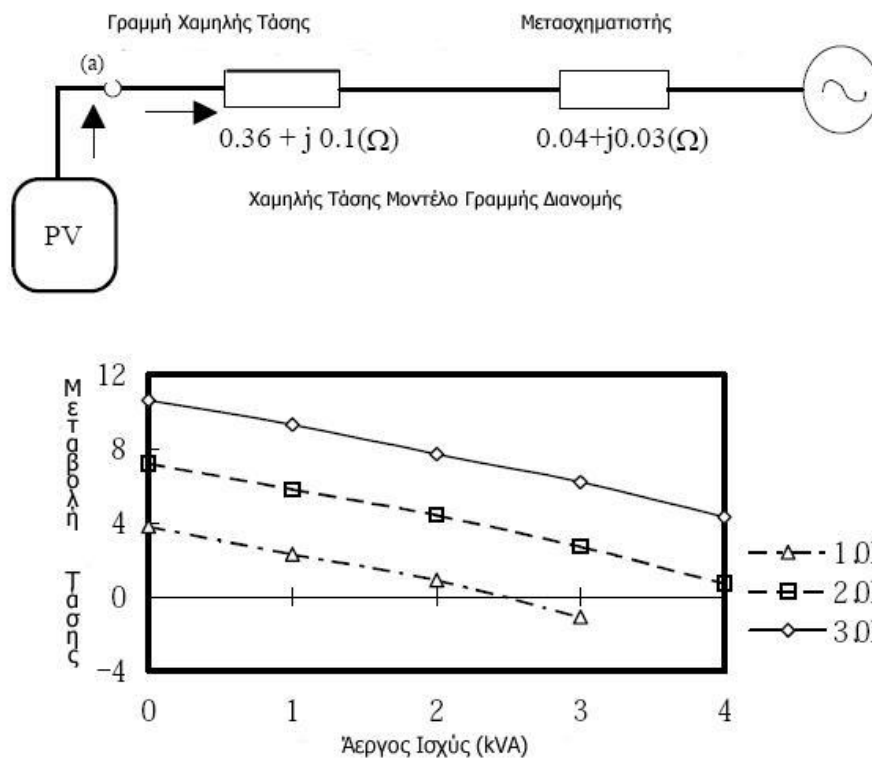


Σχήμα 4.27: Αύξηση τάσης λόγω αντίστροφης ροής ισχύος

Στις γραμμές διανομής, η τάση λειτουργίας στα άκρα των γραμμών τείνει να μειωθεί. Επομένως, ρυθμιστές τάσης μπορεί να εγκατασταθούν στη γραμμή σε ένα σημείο στη μέση, με τη τάση στο δευτερεύον του ρυθμιστή καθορισμένη υψηλότερα από την τάση στο πρωτεύον. Αυτή η αναλογία τάσης θα αλλάζει αυτόματα καθώς η τάση της γραμμής θα κυμαίνεται. Εάν ένας μεγάλος αριθμός φ/β συστημάτων συνδέεται στις γραμμές διανομής που έχουν ρυθμιστές τάσης, μπορεί να λειτουργήσουν συχνά λόγω των αλλαγών τάσης που αντιστοιχούν στις μεταβολές της ηλιακής ακτινοβολίας. Σαν αποτέλεσμα, μπορεί να μικρύνει η διάρκεια ζωής των ρυθμιστών αυτών.

Δύο τρόποι αντιμετώπισης μπορούν αντιμετωπίσουν την άνοδο τάσης που οφείλεται στην αντιστροφή ροής ισχύος. Η πρώτη είναι να λειτουργούμε το φ/β σύστημα με χωρητικό συντελεστή ισχύος. Η άλλη είναι να μειώσουμε την ενεργό παραγωγή του φ/β συστήματος. Η λειτουργία με χωρητικό συντελεστή ισχύος έχει το πλεονέκτημα ότι μπορούμε να ελέγχουμε την τάση χωρίς περιορισμό της παραγωγής ενεργούς ισχύος του φ/β συστήματος, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.28. Εντούτοις, η αποτελεσματικότητα αυτής της μεθόδου εξαρτάται από την αναλογία της ωμικής αντίστασης με την άεργη συνιστώσα της σύνθετης αντίστασης των γραμμών διανομής. Εάν το τμήμα ωμικής αντίστασης της σύνθετης αντίστασης είναι πολύ μεγάλο σε σύγκριση με την άεργη

συνιστώσα, απαιτείται μια μεγάλη άεργος ισχύς για να διατηρηθεί η κατάλληλη τιμή τάσης. Προσοχή πρέπει να δοθεί σε αυτόν τον παράγοντα επειδή είναι απαραίτητος ένας μεγάλος αντιστροφέας όταν η αντίσταση των γραμμών είναι μεγάλη. Ο συντελεστής ισχύος ολόκληρης της γραμμής διανομής μπορεί επίσης να υποβιβαστεί εάν κάθε φ/β σύστημα στη γραμμή παρέχει μεγάλη άεργο ισχύ. Η χαρακτηριστική διαδικασία που υιοθετείται αυτή τη στιγμή όσον αφορά αυτήν την επίπτωση είναι να γυρίσει ο αντιστροφέας σε χωρητικό συντελεστή ισχύος μόλις επιτυγχάνεται το ανώτερο όριο τάσης και έπειτα να περιοριστεί η παραγωγή ισχύος του αντιστροφέα που προκαλεί προβλήματα. Αυτό συμβαίνει όταν δεν μπορεί να κατασταλεί η άνοδος τάσης, με την τροφοδότηση άεργου, μια δυνατότητα που έχει ο αντιστροφέας.



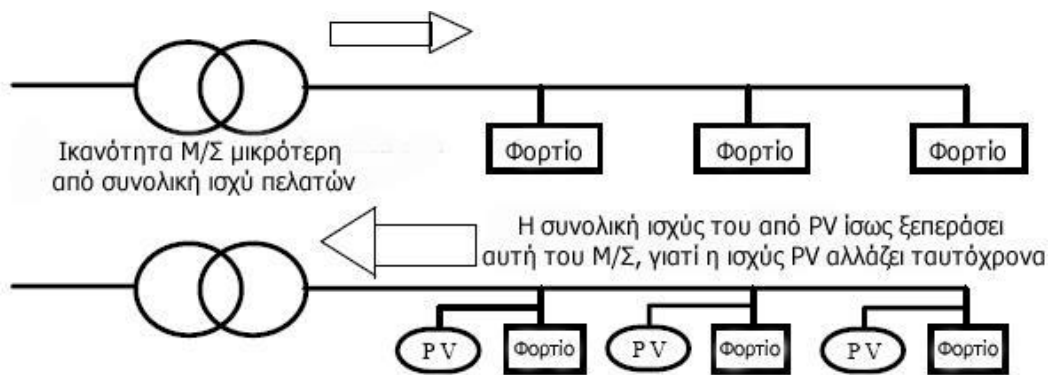
Σχήμα 4.18: Μεταβολή τάσης μέσω ελέγχου άεργου ισχύος

Μπορούμε να αντιμετωπίσουμε το πρόβλημα με την ανάπτυξη ενός ρυθμιστή τάσης ικανό να ελέγχει την τάση τόσο κάτω από συνθήκες αντίστροφης ροής ισχύος, όσο και σε κανονική ροή ισχύος.

Αντίστροφη Ροή Ισχύος. Συνήθως, ένας μετασχηματιστής διανομής τροφοδοτεί περισσότερους από έναν πελάτες. Σε αυτήν την περίπτωση, η μέγιστη ισχύς σε έναν τέτοιο μετασχηματιστή είναι κανονικά λιγότερη από το συνολικό ποσό ισχύος όλων αυτών που είναι συνδεδεμένοι στο μετασχηματιστή, επειδή η μέγιστη τιμή ισχύος που

καταναλώνεται από κάθε πελάτη δεν εμφανίζεται ταυτόχρονα. Για αυτόν τον λόγο και λαμβάνοντας υπόψη την οικονομία, η ισχύς των μετασχηματιστών επιλέγεται σε μια τιμή μικρότερη από τη συνολική ισχύ των πελατών.

Εάν κάθε πελάτης που τροφοδοτείται από έναν τέτοιο μετασχηματιστή διανομής εγκαθιστά φ/β συστήματα με μια ισχύ ίση ή μεγαλύτερη από την ισχύ των μετασχηματιστών, η αντίστροφη ροή ρεύματος μέσω του μετασχηματιστή θα μπορούσε να υπερβεί την ισχύ των μετασχηματιστών επειδή η παραγωγή ισχύος από τα φ/β συστήματα αυξάνεται ταυτόχρονα με βάση την ηλιακή ακτινοβολία (Σχήμα 4.29).



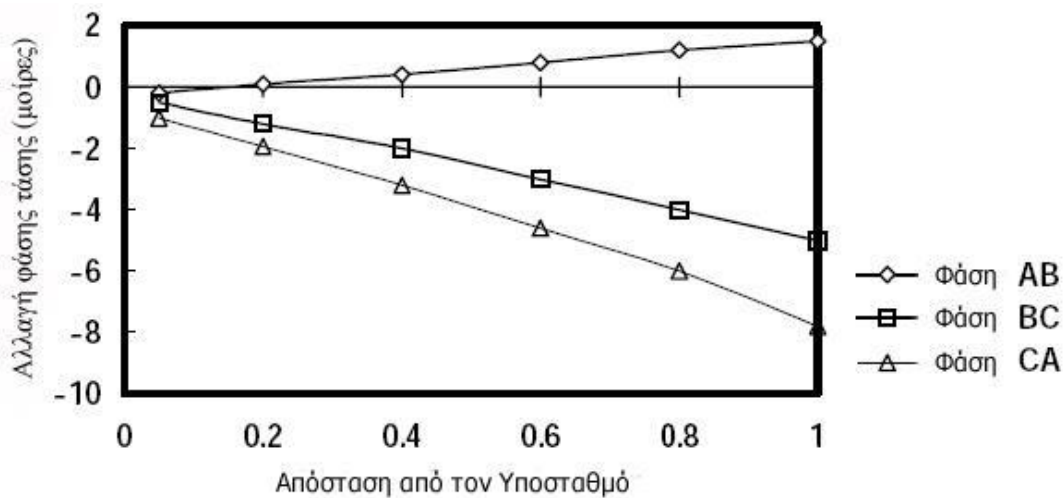
Σχήμα 4.29: Επίδραση της αντίστροφης ροής ισχύος στην ισχύ του μετασχηματιστή

Εάν η αντίστροφη ισχύς μέσω του μετασχηματιστή υπερβαίνει την ονομαστική τιμή, πρέπει να αντικατασταθεί με μετασχηματιστή μεγαλύτερης ισχύος ή να εγκατασταθούν πρόσθετοι μετασχηματιστές. Εναλλακτικά, θα μπορούσε να εγκατασταθεί μια διάταξη ενεργειακής αποθήκευσης με μια σχετικά μικρή χωρητικότητα για να μετριάσει την μεταβολή παραγωγής ή για να μεταβάλει την φ/β παραγωγή σε ώρες αιχμής φορτίου. Εντούτοις, αυτά τα μέτρα μπορεί να θεωρηθούν μη πρακτικά από οικονομικής άποψης και το απλό μέτρο του περιορισμού του ποσού παραγωγής που επιτρέπεται από κάθε πελάτη θα επετύγχανε τον ίδιο στόχο.

Επιπτώσεις και Αντιμετώπιση σε Ακραίες Περιπτώσεις των Γραμμών Διανομής

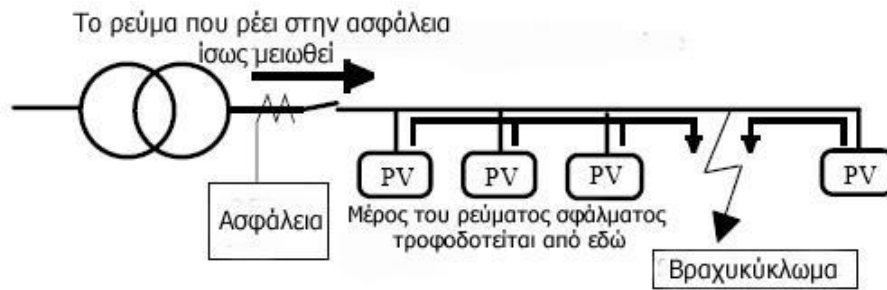
Αυξανόμενη Ικανότητα Βραχυκυκλωμάτων. Όταν ένα σφάλμα βραχυκυκλώματος εμφανίζεται σε μια γραμμή διανομής, το ρεύμα βραχυκυκλώματος περιορίζεται σε 1.1 έως 1.5 φορές το ονομαστικό ρεύμα. Αυτό συμβαίνει επειδή το ρεύμα βραχυκυκλώματος που παρέχεται από κάθε φ/β σειρά είναι περίπου 1.2 φορές το ονομαστικό ρεύμα και κάθε σύστημα αντιστροφών έχει μια λειτουργία περιορισμού υπερεντάσεως (overcurrent). Εκτιμάται λοιπόν, ότι αν ο αριθμός των συνδεδεμένων φ/β συστημάτων παραμένει μικρός, η συνεισφορά του ρεύματος βραχυκύκλωσης στη γραμμή διανομής θα ήταν αμελητέα. Ωστόσο, αν ο αριθμός αυξηθεί, η ικανότητα βραχυκυκλώματος του

δικτύου διανομής ίσως μεγαλώσει και το ρεύμα κατά τη διάρκεια βραχυκυκλώματος γίνει πιο μεγάλο. Αν η τιμή του ρεύματος βραχυκύκλωσης ξεπεράσει την ισχύ διακοπής των διακοπών βραχυκυκλώματος, που είναι εγκατεστημένοι στη πλευρά των πελατών, ίσως δεν θα είναι δυνατή η εκκαθάριση των σφαλμάτων στις ιδιοκτησίες των πελατών. Τα φ/β συστήματα ίσως είναι ικανά να ανιχνεύσουν ένα βραχυκύκλωμα στις περισσότερες περιπτώσεις σφάλματος βραχυκυκλώματος που συμβαίνει σε γραμμές διανομής ή στον εξοπλισμό των πελατών. Ωστόσο, η πτώση τάσης στις γραμμές διανομής ίσως μειωθεί όταν συμβαίνει ένα σφάλμα βραχυκυκλώματος με υψηλή αντίσταση. Για παράδειγμα, η τάση και η φάση της γραμμής διανομής αλλάζει αιφνίδια και κατά βήματα όπως φαίνεται στο σχήμα 4.30.



Σχήμα 4.30: Αλλαγή φάσης τάσης σε περίπτωση σφάλματος βραχυκυκλώματος

Όλες οι γραμμές διανομής προστατεύονται σε περίπτωση βραχυκυκλώματος στις γραμμές από ασφάλειες. Το φ/β σύστημα μπορεί να είναι ανίκανο να ανιχνεύσει ένα σφάλμα όταν συμβαίνει ένα σφάλμα βραχυκυκλώματος στο τέλος μιας μεγάλου μήκους γραμμής διανομής με υψηλή ωμική αντίσταση ή όταν συμβαίνει μια υπερφόρτιση της γραμμής διανομής. Εάν ένας μεγάλος αριθμός φ/β συστημάτων συνδέεται με τις γραμμές διανομής και είναι ανίκανο να ανιχνεύσουν ένα σφάλμα, τα φ/β συστήματα τροφοδοτούν ένα μέρος του ρεύματος σφάλματος ή του ρεύματος υπερφόρτισης για να μειώσουν ουσιαστικά τη ροή ρεύματος μέσω του υποσταθμού, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.31. Αυτό προκαλεί το φαινόμενο κατά το οποίο η ασφάλεια στον υποσταθμό να παραμείνει στην κατάσταση που είναι.



Σχήμα 4.31: Ροή ρεύματος σφάλματος κάτω από σφάλμα βραχυκυκλώματος γραμμής διανομής

4.3.3.7 Απώλειες

Οι απώλειες στα φωτοβολταϊκά συστήματα οφείλονται κυρίως στις ακόλουθες αιτίες:

- Δυσμενής προσανατολισμός της φωτοβολταϊκής γεννήτριας
- Σκίαση και ακαθαρσίες στα φ/β στοιχεία
- Κακός συνδυασμός των πλαισίων, εξαιτίας των ηλεκτρικών ανομοιογενειών που υπάρχουν στις χαρακτηριστικές καμπύλες τους
- Υπερθέρμανση των πλαισίων που είναι τοποθετημένα επάνω σε τοίχους λόγω του κακού αερισμού από τη πίσω όψη
- Πτώσεις τάσης κατά μήκος των καλωδίων, ασφαλειών και διόδων στη πλευρά του συνεχούς ρεύματος
- Ηλεκτρική κατανάλωση των μετρητών και των ρελέ.
- Ανεπαρκής συντήρηση
- Απώλειες στους αντιστροφείς
- Κακός συνδυασμός φωτοβολταϊκής γεννήτριας και αντιστροφέα

5^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ

“ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ Φ/Β ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΣΕ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΜΑΤLAB/SIMULINK”

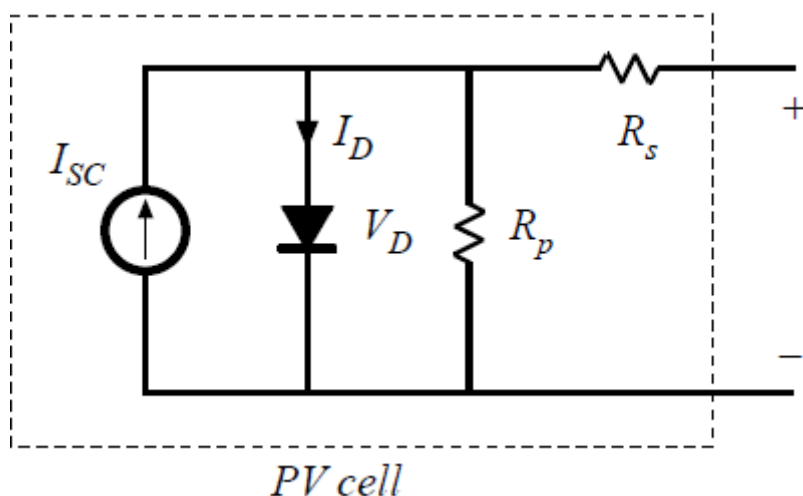
5.1 Εισαγωγή

Κατά την διάρκεια της βιβλιογραφικής αναζήτησης για να βρούμε το μοντέλο που θα χρησιμοποιήσουμε στο πείραμα μας συναντήσαμε και κάποια αλλά μοντέλα φωτοβολταϊκών που λειτουργούν σε γραμμές χαμηλής τάσης δικτύου. Υπάρχουν περιπτώσεις όπως αναφέρετε το συγκεκριμένο άρθρο [8] όπου οι φωτοβολταϊκές συστοιχίες συνδέονται με το δίκτυο μόνο με την χρήση ενός μετατροπέα dc-ac ,ή πάρα πολλούς μικρούς μετατροπείς που συνδέουν ένα η δυο πάνελ απευθείας στο δίκτυο. Επίσης αναφέρεται πρόταση για τοποθέτηση των μη μεμονωμένων ανά πάνελ dc-dc μετατροπέων που είναι συνδεδεμένη σε σειρά για να δημιουργηθεί μία σειρά υψηλής τάσης η οποία θα συνδέεται στη συνέχεια με τον απλοποιημένο dc-ac μετατροπέα. Αυτό προσφέρει το πλεονέκτημα να προσεγγίζουμε τον μετατροπέα στα πάνελ χωρίς να έχουμε το πρόβλημα του κόστους και τις κυρώσεις για επιμέρους dc-ac μετατροπείς. Μια άλλη περίπτωση που συναντήσαμε ήταν η χρήση πολυεπίπεδων μετατροπών πηγής που χρησιμοποιούν στο δίκτυο χαμηλής τάσης στο παρακάτω άρθρο[9] και έχουν τα εξής πλεονεκτήματα σε σχέση με τους αντίστοιχους συμβατικούς. Με την σύνθεση της τάσης στον ακροδέκτη εξόδου AC από πολλά επίπεδα DC τάσης μπορούν να παραχθούν πολλές κυματομορφές σε μορφή σκάλας οι οποίες προσεγγίζουν την ημιτονοειδή κυματομορφή με χαμηλές αρμόνικες παραμόρφωσης καθώς και μειώνοντας έτσι τις απαιτήσεις του φίλτρου. Η ανάγκη των πολλών πηγών από την πλευρά της συνεχής τάσης του μετατροπέα κάνει την πολυεπίπεδη τεχνολογία ελκυστική για τις φωτοβολταϊκές ενέργειες.

5.2 Τα χαρακτηριστικά του φωτοβολταϊκού συστήματος

Για την μελέτη και τη προσομοίωση χρησιμοποιείται φωτοβολταϊκό σύστημα το οποίο συνδέεται στο δίκτυο. Το μοντέλο που χρησιμοποιείται είναι αρκετά απλοποιημένο. Τα μοντέλα ισοδύναμου κυκλώματος ορίζουν ολόκληρη την I-V καμπύλη ενός κατάρρου, υποομάδας, η συστοιχίας ως μια συνεχής λειτουργία αγία ένα δεδομένο σύνολο συνθηκών λειτουργίας. Ένα βασικό κύκλωμα το οποίο χρησιμοποιείτε είναι το μοντέλο της απλής διόδου, το οποίο προέρχεται από φθισικές

αρχές και αντιπροσωπεύεται από το ακόλουθο κύκλωμα για ένα ενιαίο ηλιακό κύτταρο:



Σχήμα 5.1: Μοντέλο απλής διόδου

Η κυρία εξίσωση για αυτό το ισοδύναμο κύκλωμα διαμορφώνεται χρησιμοποιώντας τον νόμο έντασης του Kirchhoff για I έσο με :

$$I = I_{sc} - I_D - I_p \quad (5.1)$$

Εδώ το I_{sc} αντιπροσωπεύει το ρεύμα που δημιουργείται από το φως στο κύτταρο. Το I_D παριστάνει το ρεύμα που εξαρτάται από την τάση αλλά έχει χαθεί από τον ανασυνδέαμε, και το I_p αντιπροσωπεύει το ρεύμα που χάνεται λόγω του παραλληλισμού των αντιστάσεων. Σε αυτό το ενιαίο μοντέλο διόδου, το I_D μοντελοποιείται χρησιμοποιώντας την εξίσωση Shockley για μια ιδανική diode:

$$I_D = I_0 \left[\exp\left(\frac{V + IR_s}{nV_T}\right) - 1 \right] \quad (5.2)$$

Όπου n είναι ο ιδανικός παράγοντας της διόδου (αδιαστατη, συνήθως μεταξύ 1 και 2 για μια μεμονωμένη διασταύρωση κύτταρου) I_0 είναι το ρεύμα κορεσμού, και V_T είναι η θερμοκή τάση η οποία δίνεται από :

$$V_T = \frac{kT_c}{q} \quad (5.3)$$

Όπου k είναι η σταθερά του Boltzmann ($1.381 * 10^{-23} J / K$) και q είναι το στοιχειώδες φορτίο ($1.602 * 10^{-19} C$)

Γράφοντας το ρεύμα παράκαμψης ως $I_p = (V + IR_s) / R_p$ και συνδυάζοντας το με τις παραπάνω εξισώσεις στην κυρία εξίσωση για το μοντέλο της απλής διόδου έχουμε:

$$I = I_{sc} - I_0 \left[\exp\left(\frac{V + IR_s}{nV_T}\right) - 1 \right] - \frac{V + IR_s}{R_p} \quad (5.4)$$

Οι πέντε παράμετροι σε αυτή την εξίσωση είναι κατά κύριο λόγο βασικοί σε όλα τα ισοδύναμα μοντέλα απλής διόδου:

- I_{sc} ένταση φωτός
- I_0 ρεύμα διόδου αντιστροφής κορεσμού
- R_s αντίσταση σειράς
- R_p παράλληλη αντίσταση
- n παράγοντας ιδανικότητας της διόδου

Για ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο η συστοιχία που περιλαμβάνει N_s κύτταρα σε σειρά ,και υποθέτοντας ότι όλα τα κύτταρα είναι ταυτόσημα και υπό ομοιόμορφη και ώση ακτινοβολία και θερμοκρασία (δηλαδή δημιουργούν ίδιο ρεύμα και τάση). $I_{module} = I_{cell}$ και $V_{module} = N_s * V_{cell}$

Η απλή εξίσωση διόδου για μια ενότητα η συστοιχία γίνεται:

$$I_M = I_{sc} - I_0 \left[\exp\left(\frac{V_M + I_M N_s R_s}{nN_s V_T}\right) - 1 \right] - \frac{V_M + I_M N_s R_s}{N_s R_p} \quad (5.5)$$

Όπου I_M και V_M είναι η ένταση και η τάση, της μονάδας η της συστοιχίας. Πρέπει να λαμβάνεται μεριμνά κατά την εφαρμογή των παραμέτρων ενός μοντέλου ανάλογα με το αν εφαρμόζονται σε ένα κελί, μια ενότητα η μια συστοιχία .Οι παράμετροι για μονάδες η συστοιχίες χρησιμοποιούνται αυστηρά με την εξίσωση απλής διόδου για το I ,η οποία είναι η πιο συχνά εφαρμοζόμενη μορφή.

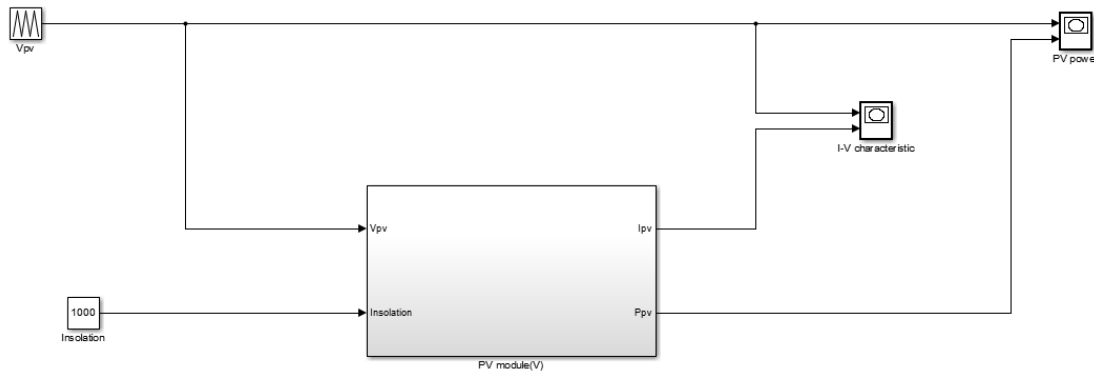
Σε μερικές υλοποιήσεις η θερμική τάση V_T , ο παράγοντας ιδανικότητας της διόδου n , και ο αριθμός των κελίων σε σειρά N_s συνδυάζονται σε μια μοναδική μεταβλητή a η οποία ονομάζεται τροποποιημένος συντελεστής ιδανικότητας:

$$a = \frac{N_s n k T_c}{q} \quad (5.6)$$

5.3 Προσομοίωση του συστήματος-Αποτελέσματα

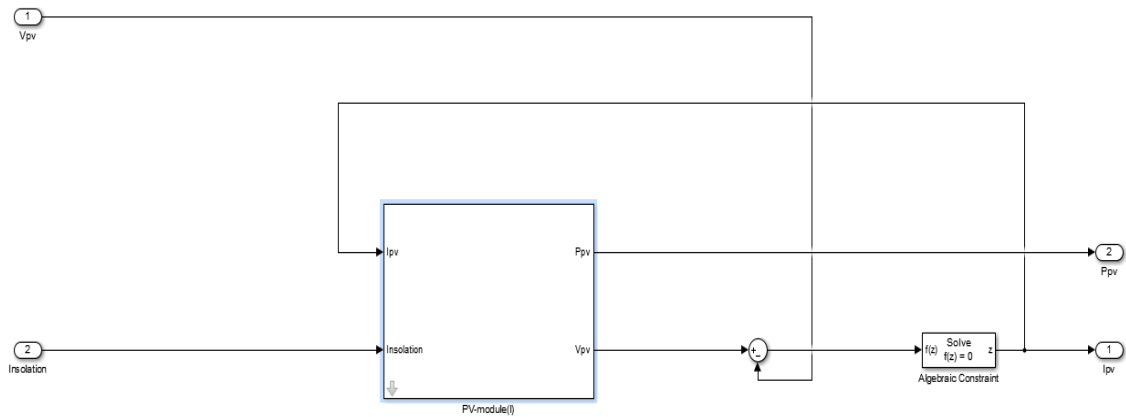
Στη συγκεκριμένη προσομοίωση εξετάστηκαν οι αποκρίσεις διαφόρων μεγεθών για το φωτοβολταϊκό σύστημα όταν αυτό υποβάλλεται σε μεταβολές της ηλιακής ακτινοβολίας. Για την ακρίβεια συμβαίνει μια σταδιακή αύξηση και απεικόνιση με διάφορα 200 W/m² σε κάθε μέτρηση. Δηλαδή αρχικά θα δούμε τις χαρακτηριστικές τα αποτελέσματα μας στα ιδανικά 1000 W/m² και στην συνέχεια μια παράλληλη απεικόνιση για ακτινοβολία 200,400,600,800 και 1000 W/m² αντίστοιχα.

Με την βοήθεια του προγράμματος MATLAB/SIMULINK καταφέραμε να απεικονίσουμε μια φωτοβολταϊκή μονάδα αναλυτικά όπως φαίνεται στις παρακάτω φωτογραφίες :



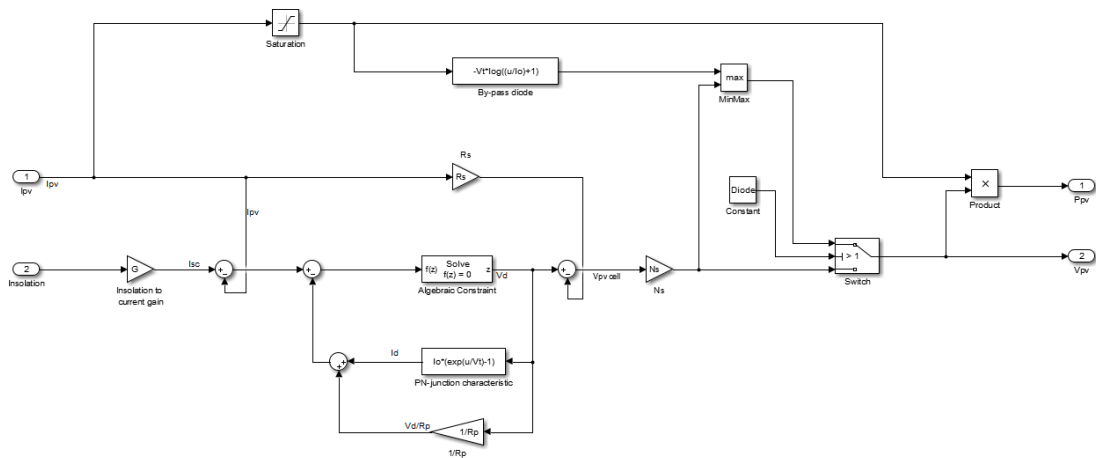
Σχήμα 5.2: Το κύκλωμα λειτουργίας με τα σημεία εισόδου και εξόδου

Το φωτοβολταϊκό μοντέλο που παρατηρούμε παραπάνω δέχεται τάση από μια πηγή εναλλασσόμενου ρεύματος και μια σταθερή ακτινοβολία της τάξης των 1000 W/m². Στη συνέχεια επεξεργάζεται τα δεδομένα μας με το κύκλωμα που βρίσκεται στο εσωτερικό του το οποίο θα δείξουμε παρακάτω και μας δίνει πίσω ως έξοδο δυο τιμές. Η μια είναι η ένταση ρεύματος του φωτοβολταϊκού (Ipv) και η άλλη είναι η ισχύς του φωτοβολταϊκού μας συστήματος (Ppv). Συνδυάζοντας την τάση με την ένταση και την ισχύ με την τάση έχουμε την απεικόνιση των χαρακτηριστικών καμπύλων ενός φωτοβολταϊκού μοντέλου τάσης. Η επεξεργασία των δεδομένων που δίνουμε στο φωτοβολταϊκό μας γίνεται με την παρακάτω διάταξη :



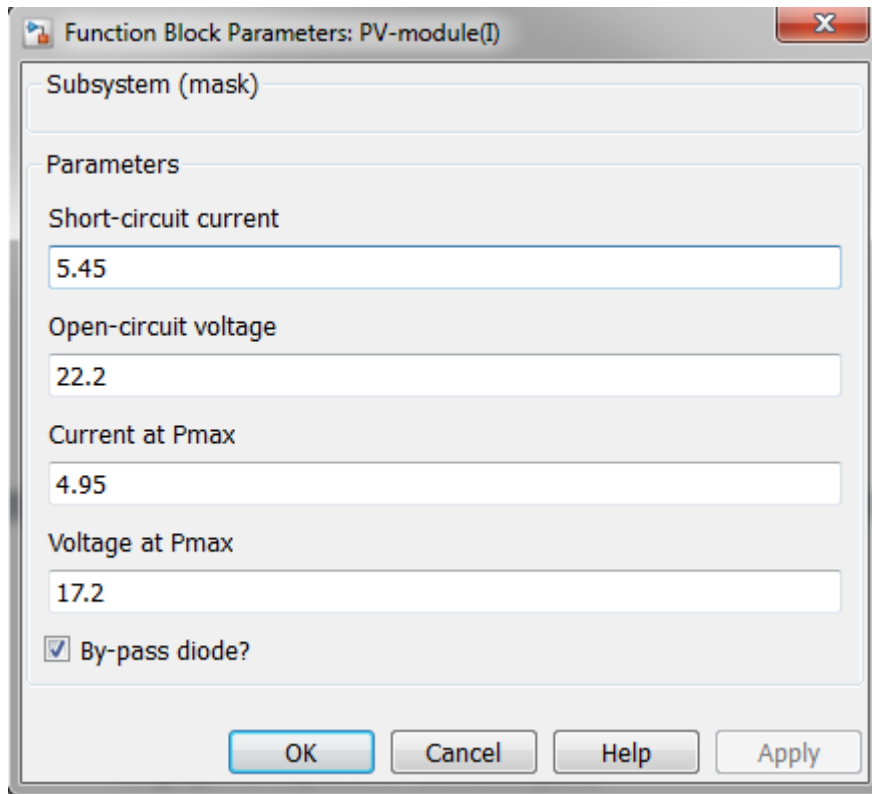
Σχήμα 5.3: Το κύκλωμα λειτουργίας που περιλαμβάνει το φωτοβολταϊκό έντασης

Στην παραπάνω διάταξη βλέπουμε ότι χρησιμοποιείτε ένα υπομονεύω φωτοβολταϊκού έντασης στο οποίο εμείς θα δώσουμε της συνθήκες λειτουργίας του κατασκευαστή και θα εξετάσουμε τα αποτελέσματα του κέτο αποτελείτε από το παρακάτω κύκλωμα:



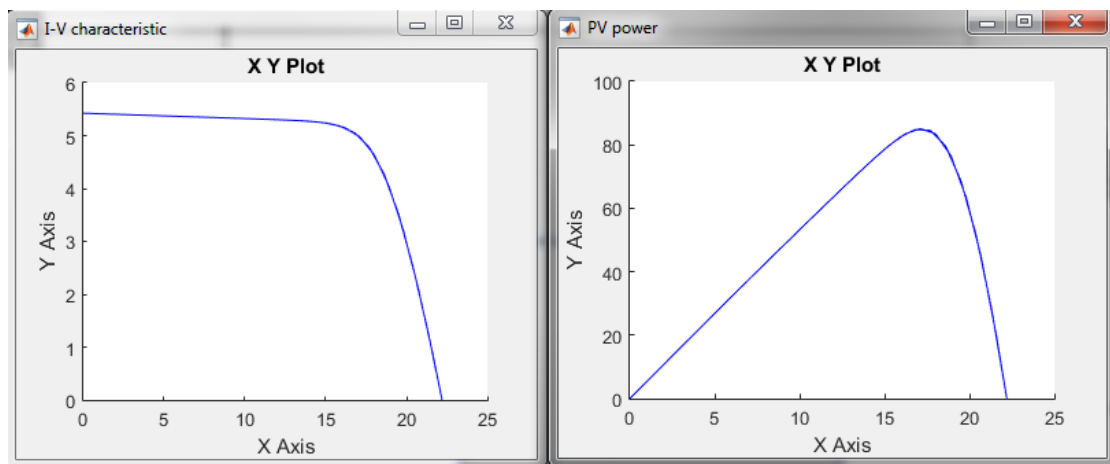
Σχήμα 5.4: Το εσωτερικό κύκλωμα του φωτοβολταϊκού μας μοντέλου

Στη συνέχεια χρησιμοποιήσαμε τα δεδομένα ενός συγκεκριμένου φωτοβολταϊκού με τα εξής στοιχεία λειτουργίας:



Σχήμα 5.5: Στοιχεία λειτουργίας του φωτοβολταϊκού

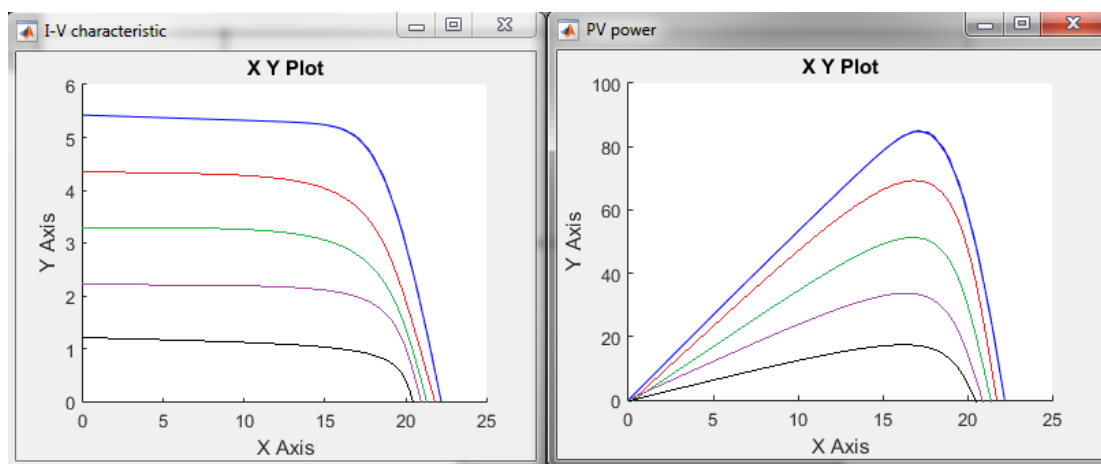
Από το όποιο πήραμε τα παρακάτω αποτελέσματα αρχικά για ακτινοβολία ώση με 1000 W/m^2



Σχήμα 5.6: Απεικόνιση των γραφικών παραστάσεων $I-V$ και $P-V$

Στη συνέχεια θα δείξουμε μια παράλληλη απεικόνιση δίνοντας στο σύστημα μου αυτή τη φορά όχι μια τιμή ακτινοβολίας αλλά 5 διαφορετικές ταυτόχρονα.

Οι τιμές της ακτινοβολίας που θα δώσω στο σύστημα μου θα είναι 200 W/m², 400 W/m², 600 W/m², 800 W/m² και 1000 W/m² αντιστοιχα. Έτσι παίρνω το εξής αποτέλεσμα:



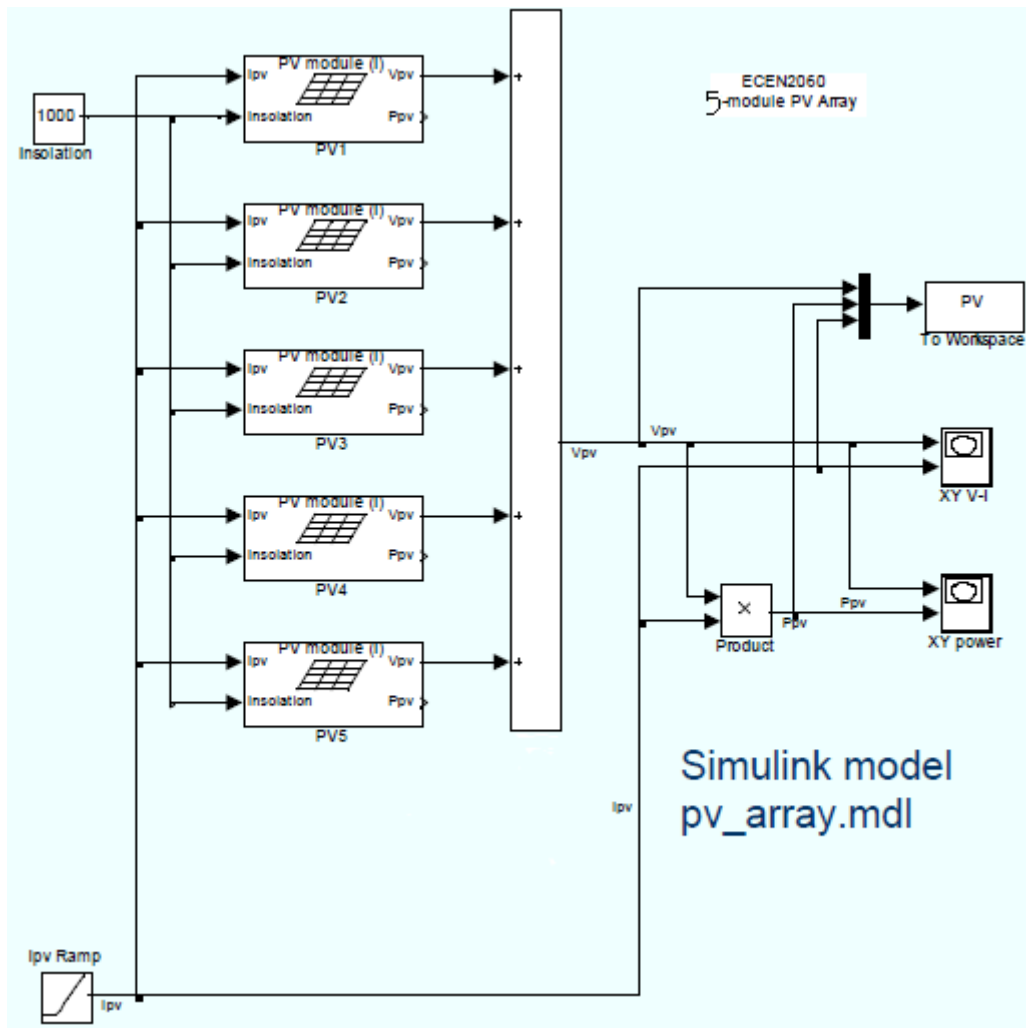
Σχήμα 5.7: Παράλληλη απεικόνιση 5 διαφορετικών τιμών ακτινοβολίας

Οι χαρακτηριστικές που σχηματιστήκαν αντιπροσωπεύουν και τις αντίστοιχες τιμές ηλιακής ακτινοβολίας που έδωσα στο μοντέλο μου. Δηλαδή μπλε για 1000 W/m², κόκκινο για 800W/m², πράσινο για 600 W/m², μωβ για 400 W/m² και μαύρο για 200 W/m² αντιστοιχα.

5.4 Απεικόνιση και περιγραφή του μοντέλου που θα χρησιμοποιήσω

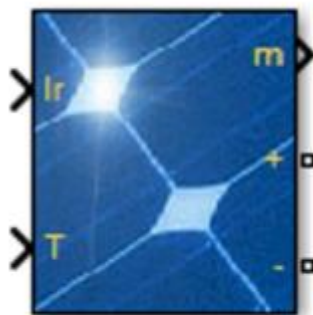
Το θέμα της εργασίας μας όμως είναι η μελέτη της επίδρασης πολλών μικρών φωτοβολταϊκών στις γραμμές χαμηλής τάσης και όχι ενός οπότε, στη συνέχεια θα ασχοληθούμε με μια συστοιχία φωτοβολταϊκών και τι επιπτώσεις μπορεί να προκαλέσει στις γραμμές χαμηλής τάσης. Για να το καταφέρουμε αυτό προσομοιώσαμε και πάλι το σύστημα μας με την βοήθεια του προγράμματος MATLAB/SIMULINK.

Αρχικά αυτή την φορά δεν θα χρησιμοποιήσουμε ένα φωτοβολταϊκό πάνελ αλλά μια συστοιχία από πάνελ τα οποία έχουν την παρακάτω μορφή:



Σχήμα 5.8: Συστοιχία από 5 πάνελ φωτοβολταϊκών

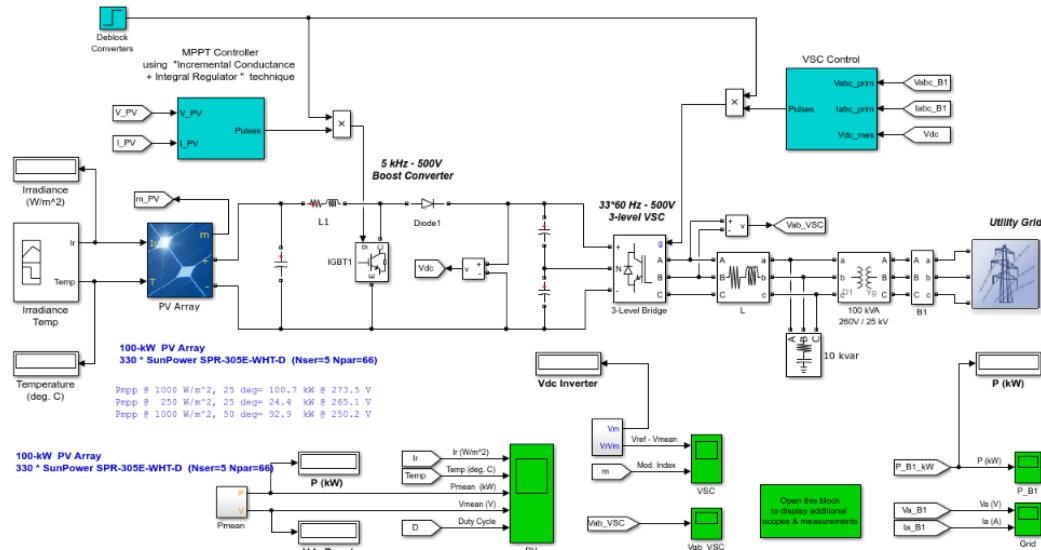
Στην παραπάνω εικόνα χρησιμοποιούμε 5 παράλληλα συνδεδεμένα φωτοβολταϊκά έτσι όπως τα παρουσιάσαμε αναλυτικά προηγούμενος και δημιουργούμε μια συστοιχία φωτοβολταϊκών στην οποία δίνουμε ως δεδομένο την ένταση του δικτύου αλλά και κάποια ακτινοβολία και παράγεται τάση προς το δίκτυο. Η παραπάνω συστοιχία απεικονίζεται στο περιβάλλον του MATLAB από το παρακάτω μοντέλο.



Σχήμα 5.9: Μοντέλο συστοιχίας φωτοβολταϊκών

Έπειτα τοποθετώ την συστοιχία μου στο δίκτυο χαμηλής τάσης το οποίο επίσης έχω απεικονίσει σε περιβάλλον MATLAB και έχω την εξής διάταξη η οποία θα είναι και

η διάταξη η οποία θα με απασχολήσει όσον αφορά τα αποτελέσματα του πειράματος μου.



Σχήμα 5.10: Συστοιχία φωτοβολταϊκών συνδεδεμένη στο δίκτυο χαμηλής τάσης

Περιγραφή

Μια συστοιχία ΦΒ 100 kW είναι συνδεδεμένη με ένα δίκτυο 25-kV μέσω ενός DC-DC μετατροπέα ώθησης και ένα τριών φάσεων τριών επιπέδων μετατροπέα τάσης πηγής. (VSC). Μέγιστη Power Point Tracking (MPPT) υλοποιείται στο μετατροπέα ώθηση με τη βοήθεια ενός μοντέλου Simulink® χρησιμοποιώντας την τεχνική «Στοιχειώδη αγωγιμότητα + Integral Ρυθμιστής».

Ένα άλλο παράδειγμα (βλέπε μοντέλο power_PVarray_grid_avg) χρησιμοποιεί κατά μέσο όρο μοντέλα για τους μετατροπείς DC_DC και VSC. Σε αυτό το μέσο μοντέλο ο ελεγκτής MPPT βασίζεται στην τεχνική της «διατάραξε και παρατήρησε».

Το λεπτομερές μοντέλο περιέχει τα ακόλουθα συστατικά:

- Συστοιχία φωτοβολταϊκών που δίνουν κατ 'ανώτατο όριο των 100 kW στις $1000 \text{ W} / \text{m}^2$ ξαπλώστρες ακτινοβολίας.
- 5-kHz DC-DC μετατροπέα που ανυψώνει την τάση των φωτοβολταϊκών από την φυσική τάση (273 V DC στη μέγιστη ισχύ) έως 500 V DC. Η κυκλική εναλλαγή έχει βελτιστοποιηθεί από έναν ελεγκτή MPPT που χρησιμοποιεί την τεχνική του «Integral Ρυθμιστής Στοιχειώδες αγωγιμότητα +». Αυτό το σύστημα MPPT αυτόματα αλλάζει τον κύκλο λειτουργίας, προκειμένου να δημιουργήσει την απαιτούμενη τάση για να εξάγει μέγιστη ισχύ.
- 1980 Hz, 3-επίπεδα 3-φάσεις VSC. Το VSC μετατρέπει τα 500 V DC τάσης σε 260 V AC και διατηρεί τον συντελεστή ισχύος ενότητας. Το σύστημα ελέγχου VSC χρησιμοποιεί δύο βρόχους ελέγχου: έναν εξωτερικό βρόχο ελέγχου που ρυθμίζει την τάση του DC Link σε +/- 250 V και ένα εσωτερικό βρόχο ελέγχου που ρυθμίζει το I_d και το I_q ρεύματα δικτύου (ενεργό και άεργο ρεύμα συστατικά). Το I_d ρεύμα αναφοράς είναι η έξοδος της τάσης DC στον εξωτερικό ελεγκτή. Το I_q έχει οριστεί σε μηδέν, προκειμένου να διατηρηθεί ο συντελεστής ισχύος της ενότητας. Οι V_d και V_q έξοδοι τάσης

του ρεύματος ελεγκτή μετατρέπονται σε τρία μοντέλα σήματος U_{abc_ref} και χρησιμοποιείται από τη γεννήτρια PWM. Το σύστημα ελέγχου χρησιμοποιεί ένα δείγμα χρόνου 100 μικροδευτερόλεπτα για την τάση και το ρεύμα καθώς επίσης και για τη μονάδα συγχρονισμού PLL. Οι γεννήτριες παλμών της Boost και οι μετατροπείς VSC χρησιμοποιούν ένα γρήγορο χρόνο δείγμα 1 μικροδευτερόλεπτο, προκειμένου να πάρετε μια κατάλληλη ανάλυση των κυματογράφων PWM.

- 10 kVAR συστοιχίας πυκνωτών που φιλτράρουν τις αρμόνικες που παράγονται από τις VSC.
- 100 kVA 260V / 25kV μετασχηματιστή σύζευξης τριών φάσεων.
- πλέγμα χρησιμότητας (+ σύστημα ισοδύναμο μεταφοράς 120 kV 25 kV τροφοδότη διανομής).

Η συστοιχία των 100 kW φωτοβολταϊκών χρησιμοποιεί 330 SunPower ενότητες (SPR-305E-WHT-D). Η σειρά αποτελείται από 66 χορδές της σειράς 5-συνδεδεμένες μονάδες συνδέονται παράλληλα ($66 * 5 * 305,2 \text{ W} = 100,7 \text{ kW}$).

Η παράμετρος «Ενότητα» του φωτοβολταϊκή συστοιχίας σας επιτρέπει να επιλέξετε μεταξύ διαφόρων τύπων σειρών του NREL Συστήματος

Οι κατασκευαστικές προδιαγραφές για μία μονάδα είναι:

Αριθμός των κυττάρων που συνδέονται σε σειρά: 96

Τάση ανοιχτού κυκλώματος: $A = 64,2 \text{ V}$

Ρεύμα βραχυκύκλωσης: $A = 5.96 \text{ A}$

Τάσης και ρεύμα σε μέγιστη ισχύ: $V_{amp} = 54,7 \text{ V}$, $A = 5.58 \text{ A}$

Το μενού μπλοκ φωτοβολταϊκής συστοιχίας σας επιτρέπει να σχεδιάσετε το i-V και P-V χαρακτηριστικά για μία μονάδα και για ολόκληρη την σειρά.

Το μπλοκ της φωτοβολταϊκής συστοιχίας έχει δύο εισόδους που σας επιτρέπουν ποικίλες τιμές ακτινοβολίας του ήλιου (είσοδος 1 σε W / m^2) και της θερμοκρασίας (είσοδος 2 βαθμούς C). Τα προφίλ ακτινοβολίας και της θερμοκρασίας ορίζεται από ένα μπλοκ σήματος Builder το οποίο είναι συνδεδεμένο με τις εισόδους φωτοβολταϊκής γεννήτριας.

6^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ

“ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΡΙΦΑΣΙΚΟΥ Φ/Β ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΣΥΝΔΕΔΕΜΕΝΟΥ ΣΤΟ ΔΙΚΤΥΟ”

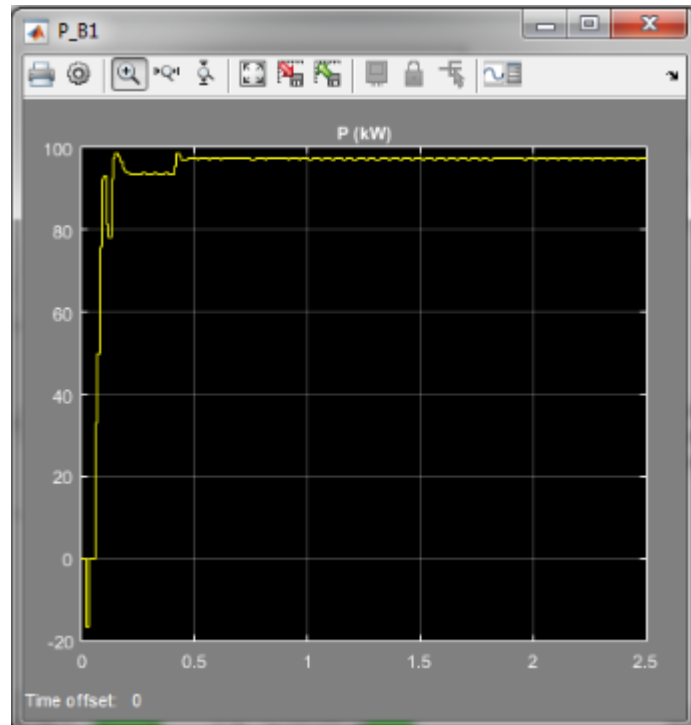
Για την μελέτη και την προσομοίωση χρησιμοποιούμε ένα αναλυτικό μοντέλο συστοιχίας φωτοβολταϊκών 100-kW η οποία είναι συνδεδεμένη σε ένα δίκτυο 25 kV μέσω ενός DC-DC μετατροπέα ώθησης και ενός τριφασικού VSC τριών επιπέδων .

Η προσομοίωση του μοντέλου γίνεται με σταθερές τις τιμές της ηλιακής ακτινοβολίας αλλά και της θερμοκρασιακού τιμές που χρησιμοποιούμε για τα παραπάνω είναι οι εξής:

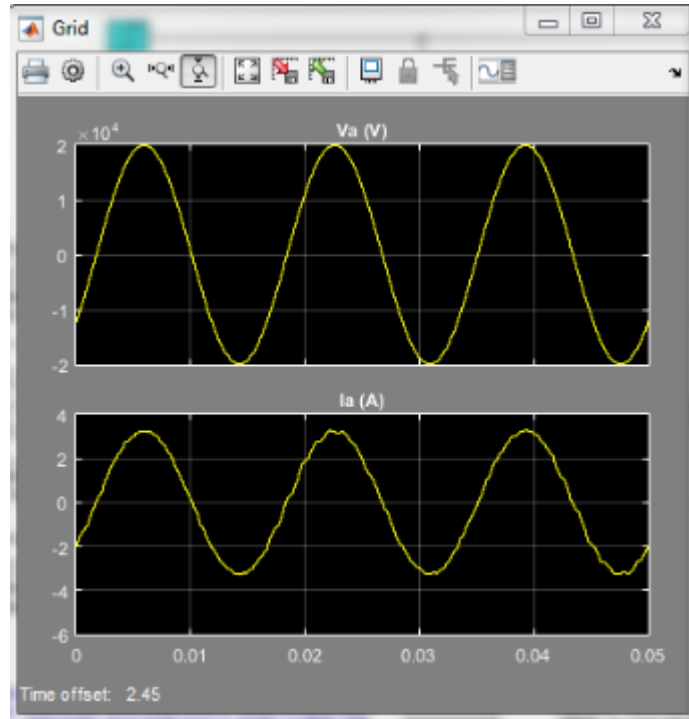
$$I = 1000 \text{ W/m}^2$$

$$T = 30 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Μετά από χρόνο $t = 2.5 \text{ sec}$ και χρησιμοποιώντας τα παραπάνω δεδομένα στο κύκλωμα μας έχουμε το εξής αποτέλεσμα:



Σχήμα 6.1: Γραφική απεικόνιση της ισχύος στην έξοδο του κυκλώματος προς το δίκτυο.



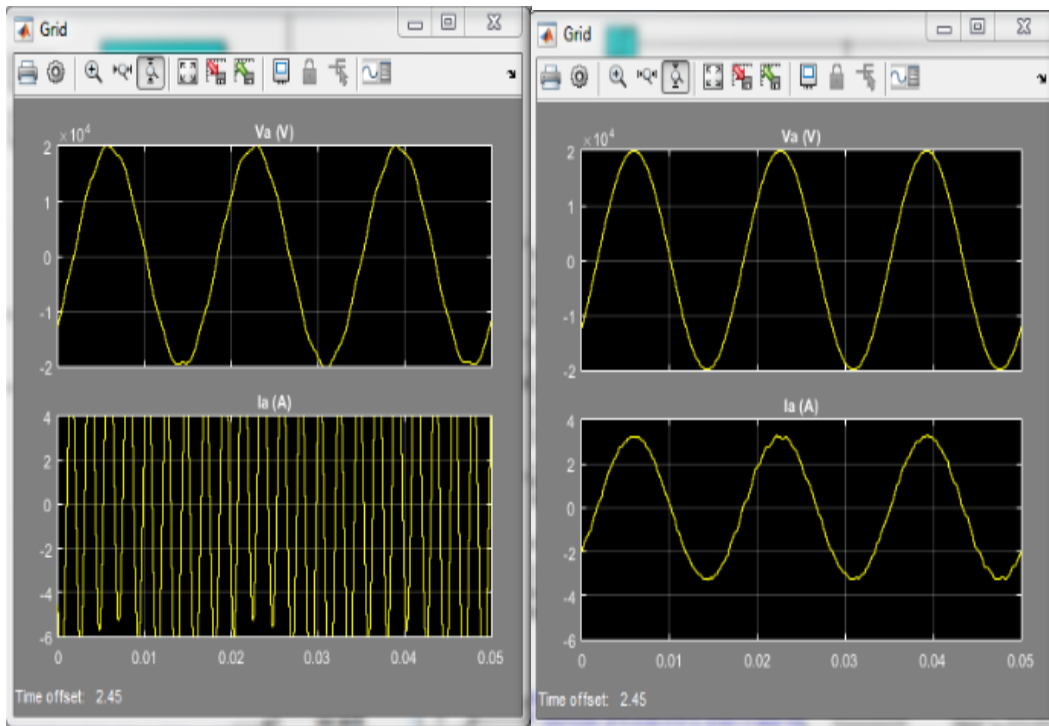
Σχήμα 6.2: Γραφική απεικόνιση της τάσης και της έντασης του ρεύματος στην έξοδο προς το δίκτυο διανομής

Στις φυσιολογικές συνθήκες λειτουργίας παρατηρούμε στην ότι το μοντέλο που χρησιμοποιούμε δίνει στο δίκτυο μια σταθερή εναλλασσόμενη τάση V_A . Όσον αφορά την ισχύ του δικτύου. Από την χρονική στιγμή $t = 0$ έως $t = 0.05$ οι παλμοί στον boost μετατροπέα και στο VSC είναι μπλοκαρισμένοι. Συνεπώς η τάση στο φωτοβολείται είναι αντίστοιχη με την τάση ανοιχτού κυκλώματος γέφυρα τριών επιπέδων λειτούργει ως μια απλή δίοδος ανόρθωσης και οι DC πυκνωτές αρχίζουν να φορτώνουν όταν η τάση ξεπεράσει τα 500V. Από $t=0.05$ και μετά ο μετατροπέας και το VSC σύστημα ξεμπλοκάρουν η τάση ρυθμίζεται σε $DC=500\text{ V}$. Έτσι ο κύκλος του μετατροπέα ανύψωσης σταθεροποιείται και έχουμε τα παραπάνω αποτελέσματα όσον αφορά την ισχύ στο σύστημα και την σταθεροποίηση της.

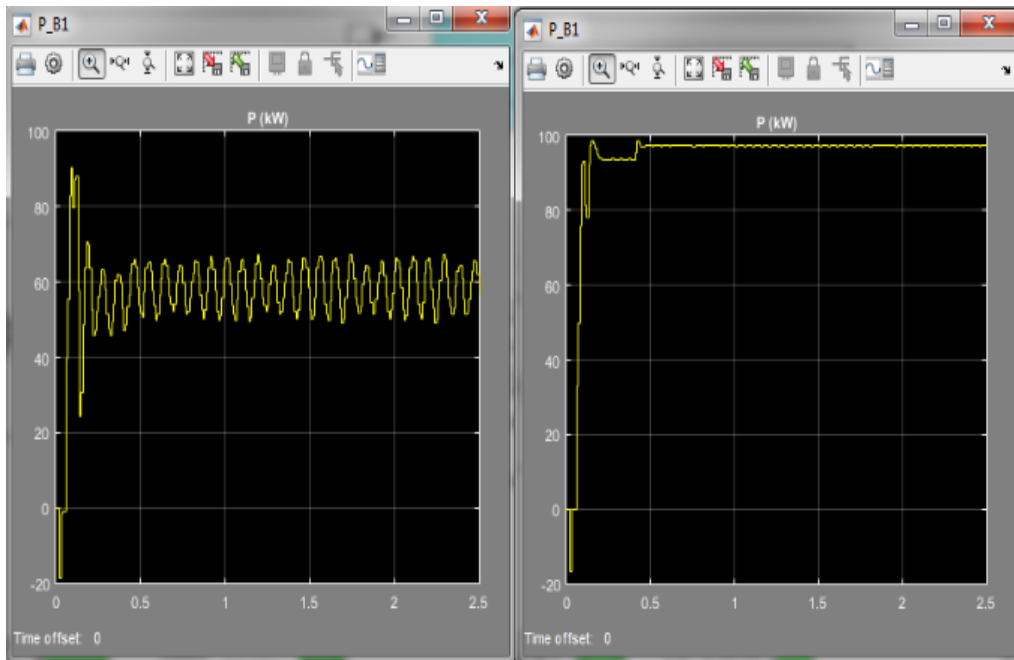
Αφού παρατηρήσαμε την συμπεριφορά του μοντέλου μας σε φυσιολογικές συνθήκες λειτουργίας, στη συνέχεια θα δούμε τι συμβαίνει στο μοντέλο μας σε περιπτώσεις που κάτι δεν λειτουργήσει σωστά και πως αυτό επηρεάζει κάθε φορά το αποτέλεσμα το οποίο θέλουμε να έχουμε.

6.1 Προσομοίωση με αλλαγές στα στοιχεία των πυκνωτών φιλτραρίσματος

Στην συγκεκριμένη περίπτωση αλλαζω την συχνότητα στην συστοιχία των πυκνωτών οι οποίοι φιλτράρουν τις αρμόνικες που παράγονται από το VSC. Από 60 Hz την κάνω 40 Hz και την ενεργό τιμή της τάσης V_{rms} από 240 V σε 160 V. Έτσι παρατηρούμε ότι με αυτή την δυσλειτουργία των πυκνωτών έχουμε το εξής αποτέλεσμα:



Σχήμα 6.3: Παράλληλη απεικόνιση της τάσης και της έντασης του ρεύματος στην έξοδο προς το δίκτυο διανομής του πειράματος και των φυσιολογικών συνθηκών λειτουργίας.

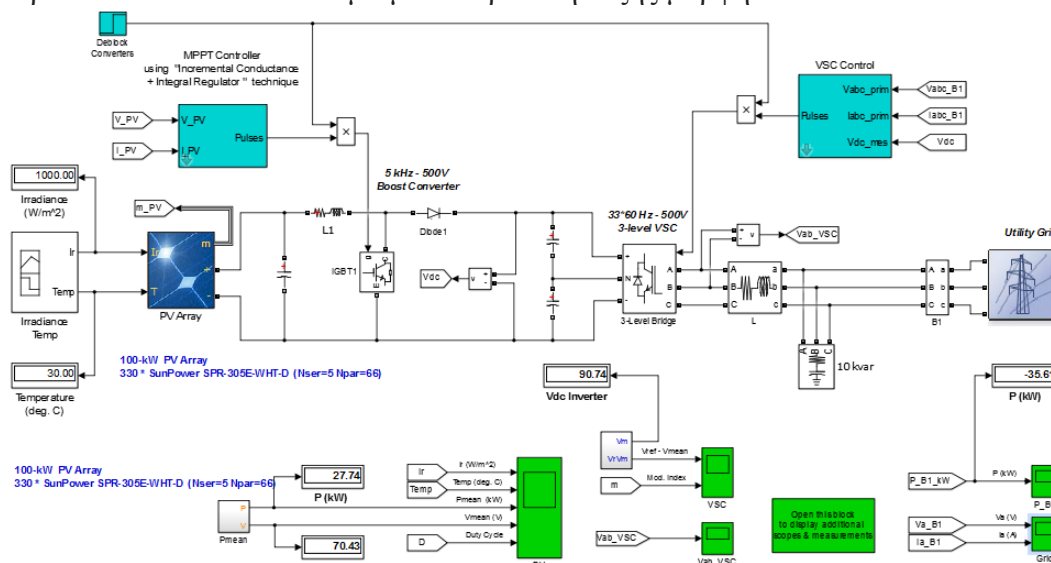


Σχήμα 6.4: Παράλληλη απεικόνιση της ισχύος στην έξοδο του κυκλώματος προς το δίκτυο διανομής του πειράματος και των φυσιολογικών συνθηκών λειτουργίας.

Αλλάζοντας την συχνότητα παρατηρούμε ότι συνεχίζει η ημιτονοειδής καμπύλη τόσο στο VA όσο και στο IA. Το IA ωστόσο έχει επηρεαστεί περισσότερο παρατηρώντας ότι στο ίδιο χρονικό διάστημα ενώ μειώνουμε την συχνότητα έχουμε περισσότερες καμπύλες και με οριακές τιμές μεγαλύτερες από ότου στις φυσιολογικές του συνθήκες. Όσον αφορά την ισχύ παρατηρούμε μεγάλη αλλαγή καθώς όχι μόνο δεν φτάνει τις φυσιολογικές τις τιμές αλλά παράλληλα δεν μπορεί να σταθεροποιηθεί σε μια τιμή διότι δεν μπορεί να φιλτραριστεί από τους πυκνωτές. Έτσι το αποτέλεσμα μας είναι να έχουμε μια λανθασμένη τιμή μεταξύ των 42 και 70 kW όπως το 63.09 kW που έχουμε ως τελική τιμή στα 2.5 sec λόγω της δυσλειτουργίας του συστήματος μας.

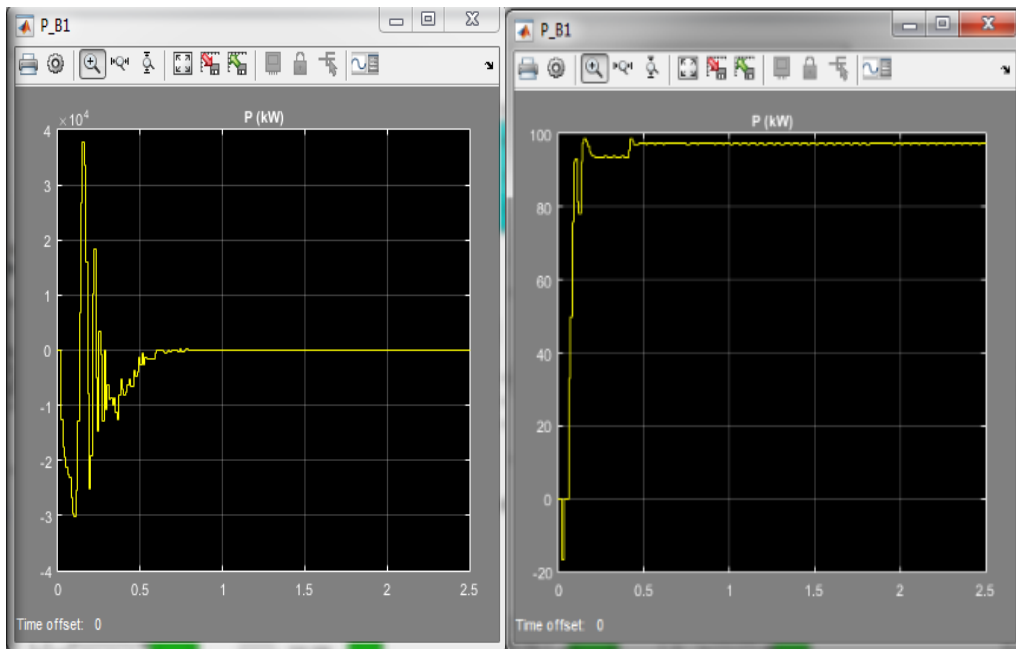
6.2 Προσομοίωση με απαλοιφή του μετασχηματιστή σύζευξης από το κύκλωμα

Στη συγκεκριμένη περίπτωση θα αφαιρέσω τον μετασχηματιστή σύζευξης τριών φάσεων από το κύκλωμα μου ο οποίος είναι τοποθετημένος με σκοπό να μεταφέρει την ηλεκτρική ενέργεια που περνούμε από το κοίλωμα μας στο δίκτυο. Αφού αφαιρέσω τον M/X το κύκλωμα μου παίρνει την εξής μορφή:

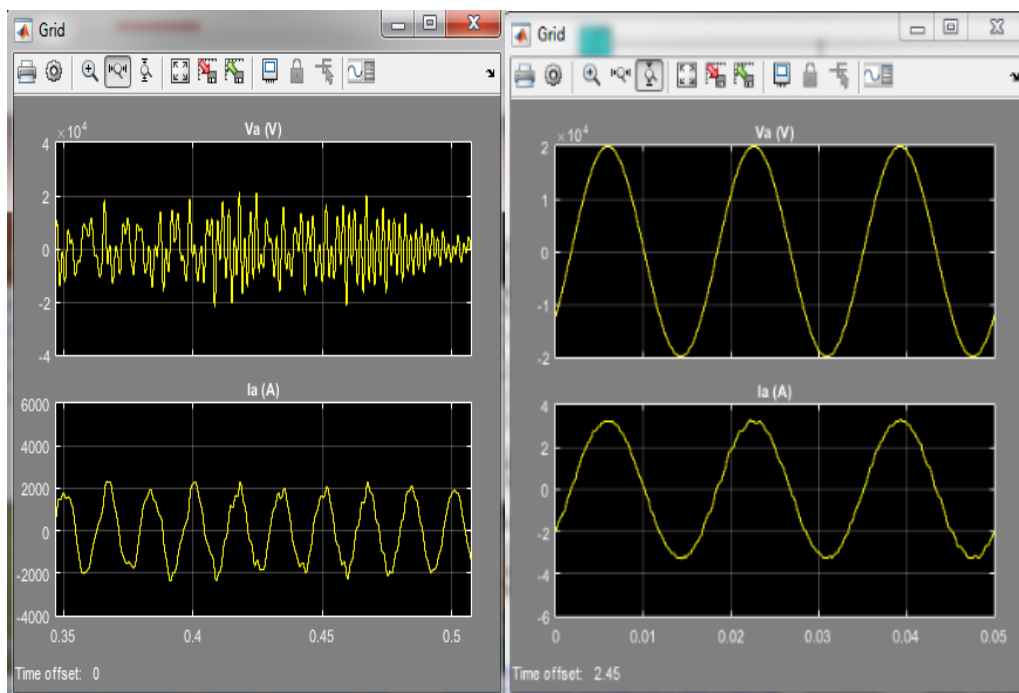


Σχήμα 6.5: Το κύκλωμα μας αφού αφαιρέσαμε τον M/X

Από το παραπάνω κύκλωμα αφού το τρέξουμε έχουμε τα εξής αποτελέσματα:



Σχήμα 6.6: Παράλληλη απεικόνιση της ισχύος στην έξοδο του κυκλώματος προς το δίκτυο διανομής του πειράματος και των φυσιολογικών συνθηκών λειτουργίας.

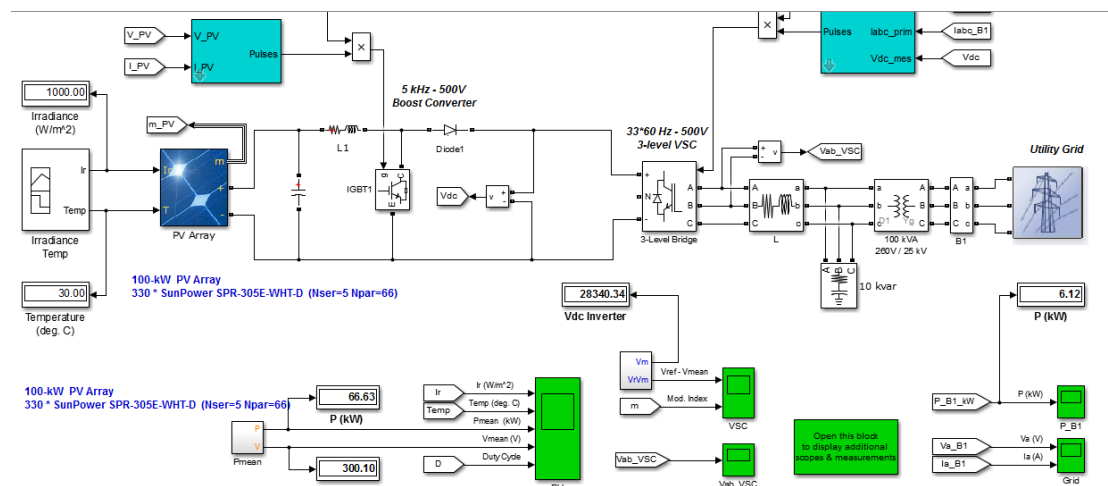


Σχήμα 6.7: Παράλληλη απεικόνιση της τάσης και της έντασης του ρεύματος στην έξοδο προς το δίκτυο διανομής του πειράματος και των φυσιολογικών συνθηκών λειτουργίας.

Από τα αποτελέσματα όσον αφορά την τάση και την ένταση του ρεύματος που στέλνουμε στο δίκτυο παρατηρούμε μεγάλη αλλαγή. Αρχικά η τάση μας παρατηρούμε ότι έχει μια ακανόνιστη μορφή και στην συνέχεια σιγά σιγά μηδενίζεται. Από την άλλη πλευρά παρατηρούμε ότι η ένταση του ρεύματος εκτοξεύεται στα 2000 A το οποίο την κάνει παρά πολύ επικίνδυνη. Τόσο μεγάλες τιμές ρεύματος είναι ικανές να καταστρέψουν το κύκλωμα μας γιατί και η παρουσία του M/X είναι απαραίτητη έτσι ώστε να μπορέσουμε να τις διαχειριστούμε. Όσον αφορά την ισχύ του κυλήματος παρατηρούμε ότι αρχικά μπορεί να παίρνει μια ανοδική τάση αλλά πολύ σύντομα γίνεται αρνητική και παραμένει αρνητική μέχρι που σιγά σιγά μηδενίζεται.

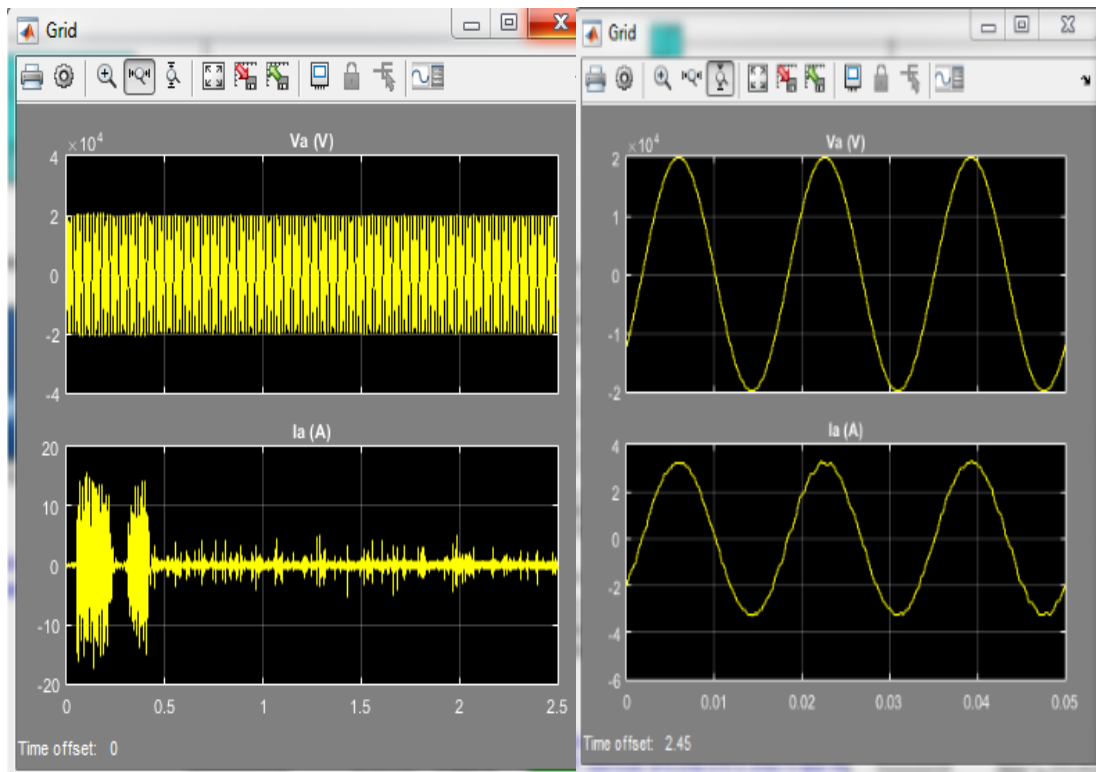
6.3 Προσομοίωση αφαιρώντας τα στοιχεία RLC από το κύκλωμα

Στην 3 περίπτωση θα αφήσουμε το υπόλοιπο κύκλωμα όπως έχει και θα αφαιρέσουμε τα στοιχεία RLC που έχουν τοποθετηθεί στο κύκλωμα μας θεωρώντας ότι έχουν καταστραφεί για κάποιο λόγο και δεν αποδίδουν έτσι όπως θα έπρεπε στην θέση για την οποία τα έχουμε τοποθετήσει. Έτσι αφού τρέξουμε το κύκλωμα μας παίρνει την εξής μορφή :

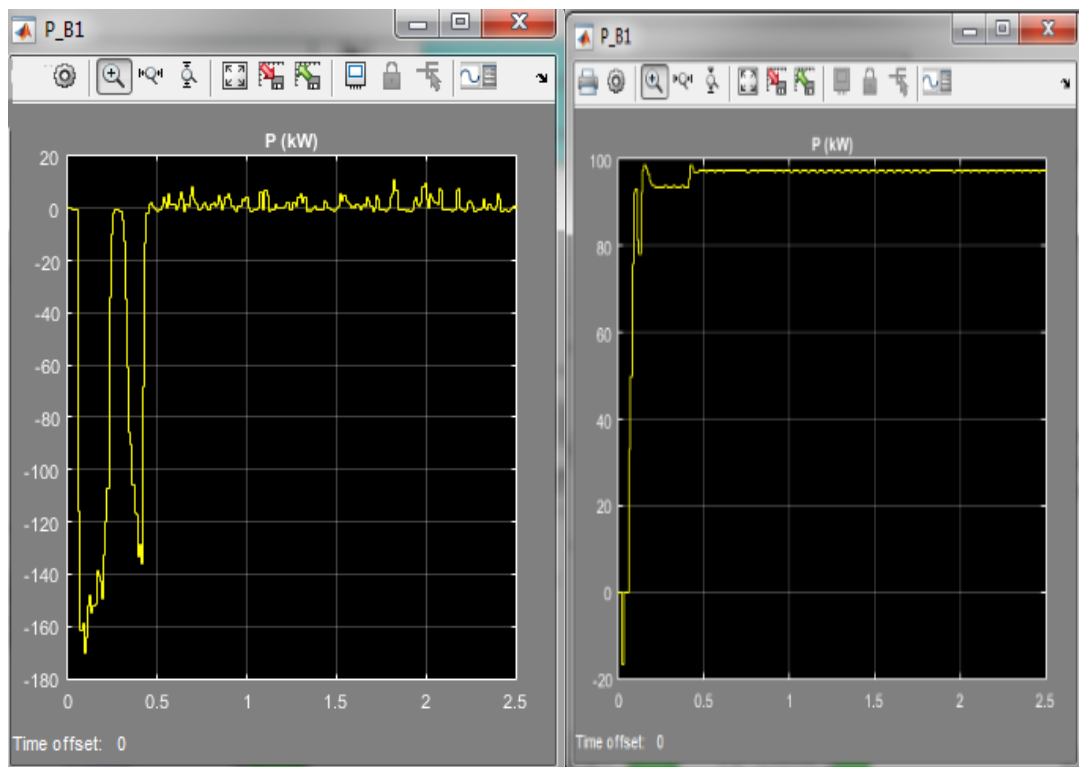


Σχήμα 6.8: Το κύκλωμα χωρίς τα στοιχεία RLC

Από το οποίο στη συνέχεια παίρνουμε τα εξής αποτελέσματα:



Σχήμα 6.9: Παράλληλη απεικόνιση της τάσης και της έντασης του ρεύματος στην έξοδο προς το δίκτυο διανομής του πειράματος και των φυσιολογικών συνθηκών λειτουργίας.

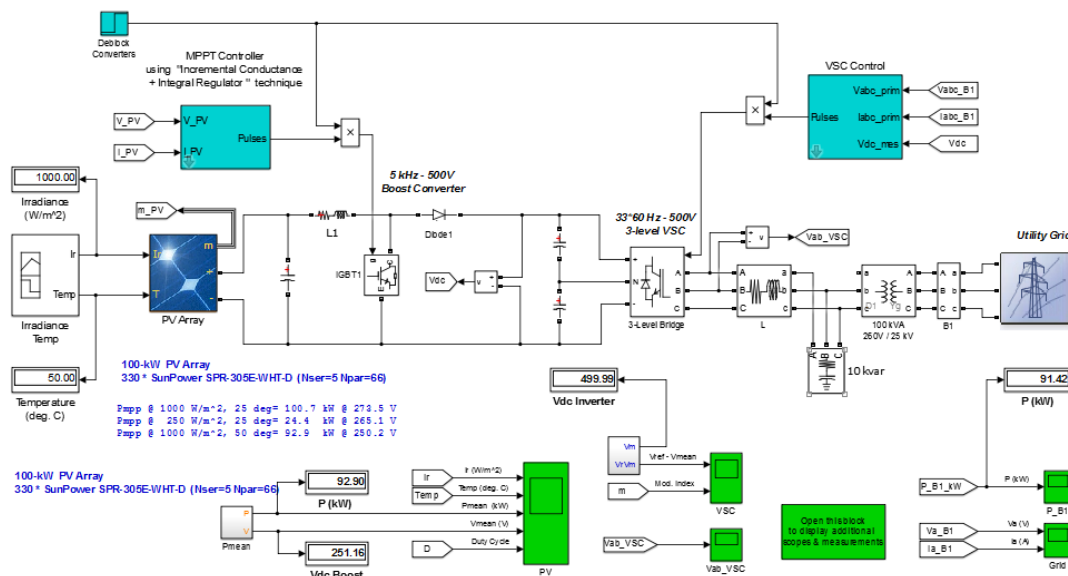


Σχήμα 6.10: Παράλληλη απεικόνιση της ισχύος στην έξοδο του κυκλώματος προς το δίκτυο διανομής του πειράματος και των φυσιολογικών συνθηκών λειτουργίας.

Από τα αποτελέσματα όσον αφορά την τάση και την ένταση του ρεύματος παρατηρούμε αρχικά ότι η τάση έχει μια ημιτονοειδές μορφή κατά την διάρκεια του πειράματος η οποία κυμαίνεται σε πολύ μεγάλα νούμερα. Από την άλλη μεριά η ένταση του ρεύματος που στέλνουμε στο δίκτυο παρουσιάζει μια παράξενη συμπεριφορά έχοντας δυο πολύ υψηλές διακυμάνσεις στην αρχή οι οποίες φτάνουν και ξεπερνούν ακόμη και τα 10 A. Στην συνέχεια λιγοστεύει και ταλαντεύεται σε μικρότερες τιμές από 3A έως και -3A. Όσον αφορά την ισχύ του κυκλώματος μου , παρατηρώ ότι αρχικά έχει δυο πολύ χαμηλές αρνητικές διακυμάνσεις που αγγίζουν μέχρι και τα -170 kW. Μετά τα 0.5 sec η ισχύς γίνεται θετική αλλά πολύ μικρη σε σχέση με τις αρνητικές τιμές που παρατηρήσαμε αρχικά . Μέχρι και το τέλος του πειράματος μου παραμένει όμως θετική. Κάτι άλλο που πρέπει να επισημάνουμε είναι ότι η τάση του ρεύματος στο inverter φτάνει μέχρι και τα 28kV σύμφωνα με τις ενδείξεις των οργάνων στο αφού έχει τελειώσει η προσομοίωση μου. Αυτό το αποτέλεσμα είναι πολύ κακό λόγω του ότι τόσο μεγάλη ένταση του ρεύματος είναι ικανή να καταστρέψει το inverter με αποτέλεσμα να καταστραφεί όλο το κύκλωμα μου . Για αυτό τον λόγο τα στοιχεία RLC του κυκλώματος μας είναι αναγκαία έτσι ώστε να μπορέσουν να περιορίσουν την δημιουργεί τόσο μεγάλης έντασης του ρεύματος και να προστατεύσουν το δίκτυο αλλά και το κύκλωμα μου από τυχόν υπερτάσεις.

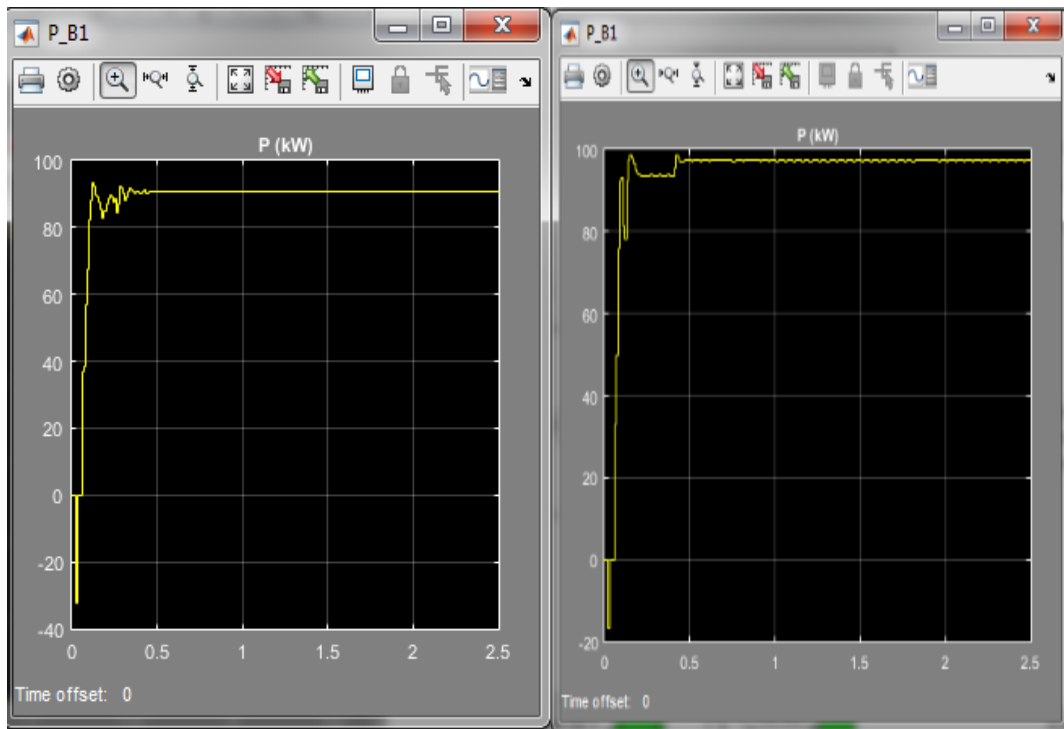
6.4 Προσομοίωση με απαλοιφή της A-φάσης πριν τον M/X σύζευξης

Στην τέταρτη περίπτωση θα κρατήσω την διάταξη μου όπως έχει στο πρώτο κομμάτι και στη συνέχεια θα αφαιρέσω την πρώτη φάση στην έξοδο ακριβώς πριν τον M/X. Στην συνέχεια τρέχω το πρόγραμμα μου το οποίο έχει την παρακάτω διάταξη και παίρνω τα εξής αποτελέσματα:

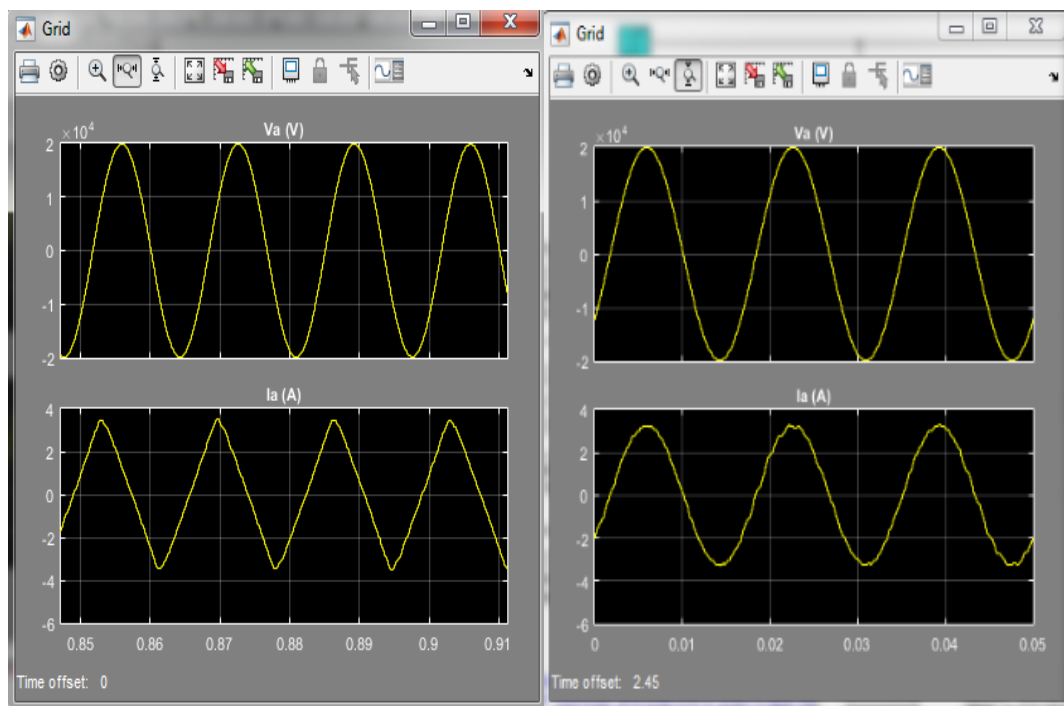


Σχήμα 6.11: Το κύκλωμα με την απόληξη της A φάσης πριν τον M/X

Όπως παρατηρούμε από στην παραπάνω εικόνα έχει αφαιρεθεί η φάση A στην έξοδο στο σημείο μετά από τους πυκνωτές προς τον M/X. Μετά από αυτήν την τροποποίηση τα αποτελέσματα μας έχουν ως εξής:



Σχήμα 6.12: Παράλληλη απεικόνιση της ισχύος στην έξοδο του κυκλώματος προς το δίκτυο διανομής του πειράματος και των φυσιολογικών συνθηκών λειτουργίας.

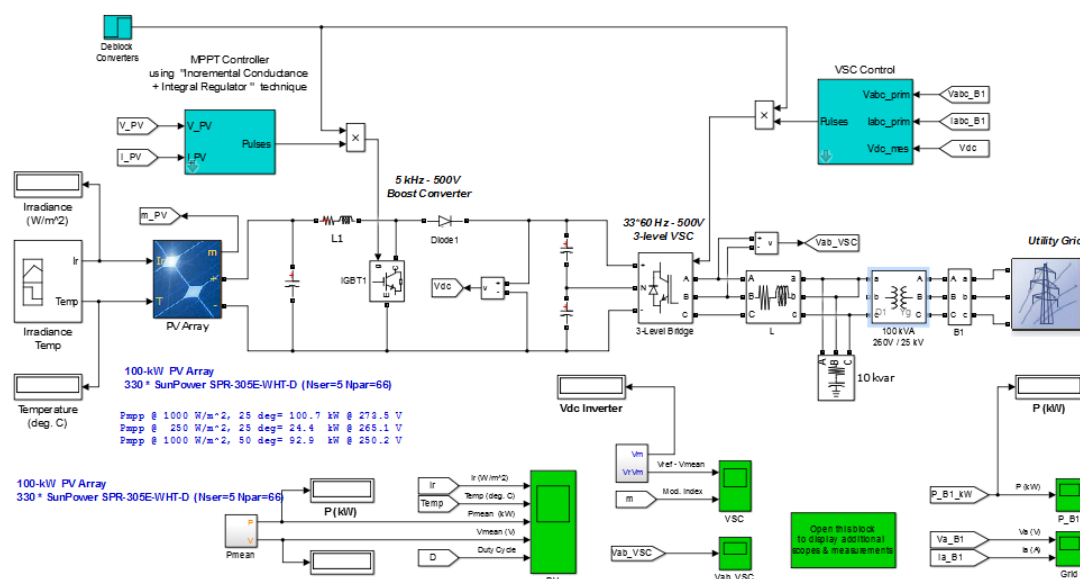


Σχήμα 6.13: Παράλληλη απεικόνιση της τάσης και της έντασης του ρεύματος στην έξοδο προς το δίκτυο διανομής του πειράματος και των φυσιολογικών συνθηκών λειτουργίας.

Από τα αποτελέσματα μου όσον αφορά την τάση που πηγαίνει στο δίκτυο διανομής ,σε σχέση με τις ιδανικές συνθήκες λειτουργίας δεν παρατηρούμε αλλαγή. Η μορφή της παραμένει ημιτονοειδές και κυμαίνεται στα ίδια νούμερα. Δηλαδή η τάση δεν επηρεάζεται όσο η ένταση του ρεύματος η όποια έχει αλλάξει ριζικά. Η μορφή της έντασης του ρεύματος παρόλο που συνεχίζει να μένει στις ίδιες τιμές με της φυσιολογικές τιμές παρατηρούμε αλλαγή στην απεικόνιση της. Παρατηρούμε ότι η απεικόνιση της από ημιτονοειδές μορφή έχει γίνει τριγωνική μορφή σήματος. Όσον αφορά τώρα την απεικόνιση της ισχύος στην έξοδο του κυκλώματος δεν παρατηρούμε μεγάλη αλλαγή. Τα αποτελέσματα μας είναι σχεδόν ίδια με τις πρότυπες συνθήκες λόγω του ότι οι τιμές της τάσης και της έντασης δεν έχουν αλλάξει οπότε δεν επηρεάστηκε και η ισχύς.

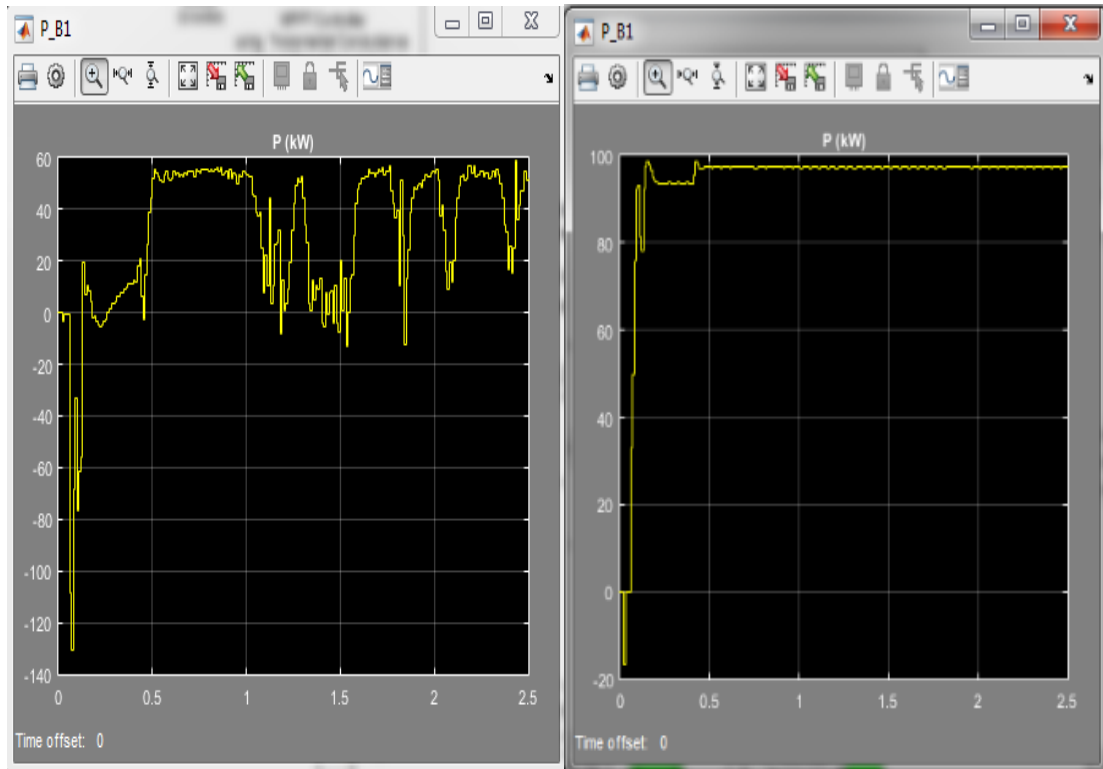
6.5 Προσομοίωση με βραχυκύκλωμα μεταξύ των A-B φάσεων πριν των M/X σύζευξης

Στην πέμπτη και τελευταία περίπτωση εξετάζουμε την περίπτωση ενός βραχυκυκλώματος μεταξύ της A και της B φάσης του κυκλώματος στο σημείο ακριβώς πριν τον M/X . Έτσι το κύκλωμα μας με το βραχυκύκλωμα θα πάρει την εξής μορφή:

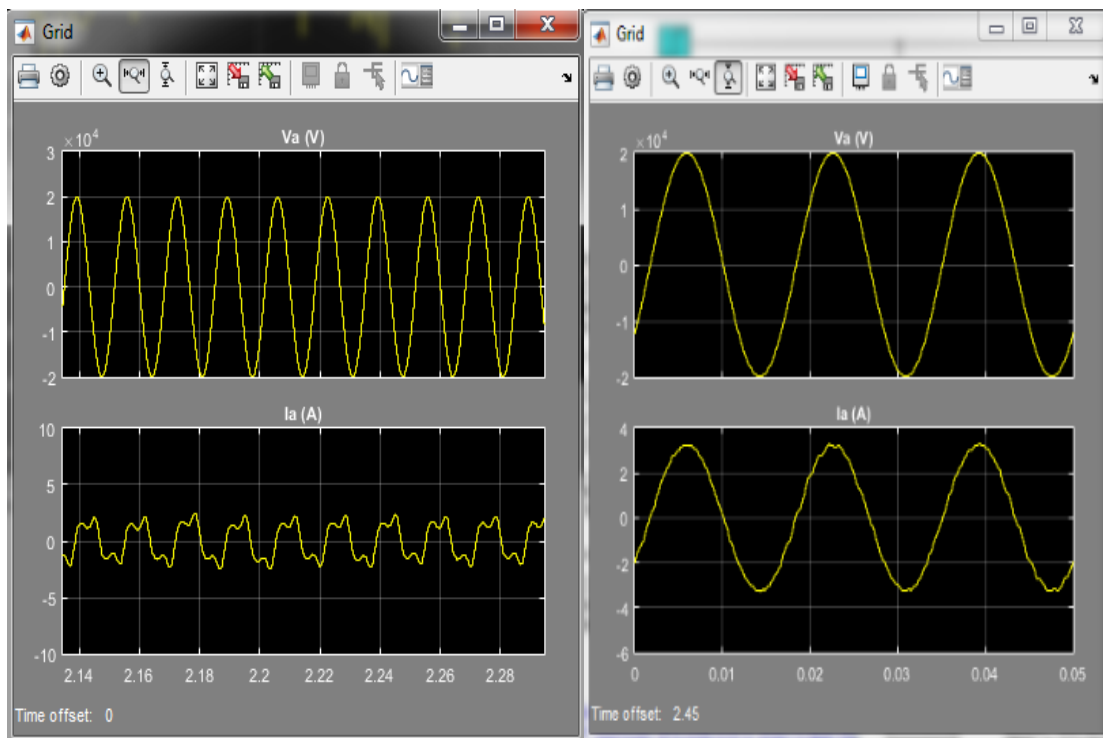


Σχήμα 6.14: Το κύκλωμα μετά το βραχυκύκλωμα

Στην συνέχεια τρέχουμε το πρόγραμμα μας και παίρνουμε τα παρακάτω αποτελέσματα:



Σχήμα 6.15: Παράλληλη απεικόνιση της ισχύος στην έξοδο του κυκλώματος προς το δίκτυο διανομής του πειράματος και των φυσιολογικών συνθηκών λειτουργίας.



Σχήμα 6.16: Παράλληλη απεικόνιση της τάσης και της έντασης του ρεύματος στην έξοδο προς το δίκτυο διανομής του πειράματος και των φυσιολογικών συνθηκών λειτουργίας.

Από τα αποτελέσματα όσον αφορά την ισχύ στην έξοδο προς το δίκτυο διανομής παρατηρώ μεγάλη αλλαγή σε σχέση με τις φυσιολογικές συνθήκες. Παρατηρώ ότι το βραχυκύκλωμα μεταξύ των Α και Β φάσεων πριν τον Μ/Χ επηρεάζει άμεσα την ισχύ του κυκλώματος. Αρχικά φτάνει στιγμιαία σε που μεγάλες αρνητικές τιμές και στην συνέχεια παρατηρώ ότι αυξομειώνεται συνεχώς σε θετικές τιμές από 0 μέχρι 60 W χωρίς να καταφέρνει να σταθεροποιηθεί όπως παρατηρούμε στις φυσιολογικές συνθήκες λειτουργίας του κυκλώματος μας. Από την άλλη μεριά στην τάση του ρεύματος δεν υπάρχει κάποια σημαντική διάφορα στην απεικόνιση της καθώς συνεχίζει να κρατεί την ημιτονοειδές μορφή της και επίσης κυμαίνεται σταθερά στις ίδιες τιμές. Το ίδιο δεν μπορούμε να πούμε για την ένταση του ρεύματος καθώς παρατηρούμε αρκετά μεγάλη αλλαγή στην απεικόνιση της καθώς ενώ κρατεί μια άμορφη κυματογράφο η οποία όμως παρόλα αυτά είναι επαναλαμβανομένη σταθερά μέχρι το τέλος του πειράματος μας.

6.6 Συμπεράσματα

Σκοπός της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας είναι η παρουσίαση των προβλημάτων που προκύπτουν κατά την σύνδεση πολλών μικρών φωτοβολταϊκό στο δίκτυο χαμηλής τάσης στα συστήματα ασφάλειας, Ένα τέτοιο δίκτυο φτιάξαμε στο περιβάλλον του Matlab/Simulink και κάναμε τα πειράματα μας σε συγκεκριμένη θερμοκρασία και ηλιακή ακτινοβολία.

Η σύνδεση των κατανεμημένων φ/β στο δίκτυο δημιουργεί αρκετά προβλήματα. Αυτά μπορεί να είναι τεχνικά προβλήματα αλλά και μη τεχνικά. Ένα από τα μη τεχνικά προβλήματα των φ/β είναι το ότι το κόστος τους είναι αρκετά υψηλό και σε συνδυασμό πάντα με την ποιότητα του.

Όσον αφορά τα τεχνικά προβλήματα χωρίζονται σε δυο κατηγορίες.

Η πρώτη κατηγορία είναι τα προβλήματα που προκαλούν τα συνδεδεμένα φωτοβολταϊκό στο δίκτυο. Τα πιο σημαντικά από αυτά είναι τα παρακάτω:

- Διακυμάνσεις της τάσης. Τα επίπεδα της ισχύς περιορίζονται λόγω του ότι τα κατανεμημένα στο δίκτυο φ/β προκαλούν ανυψώσεις της τάσης στο σημείο όπου τα συνδέουμε. Οι διακυμάνσεις της τάσης που οφείλονται στις καιρικές συνθήκες όπως είναι η συννεφιά η βροχή και η χιονόπτωση, δεν ασκούν ουσιαστικά καμία επίδραση στην τάση του δικτύου.
- Πιθανά βραχυκυκλώματα. Σε περιπτώσεις που έχουμε υψηλή διείσδυση κατανεμημένης φ/β παράγωγης αν έχουμε σφάλματα στο τέλος της γραμμής τότε τα ρεύματα μπορεί να δημιουργήσουν πρόβλημα στο να καθαρίσουμε αυτά τα σφάλματα.
- Νησιδοποίηση. Η πιθανή δημιουργία νησιδοποίησης στα δίκτυα διανομής με κατανεμημένα φ/β συστήματα είναι ένα από τα πιο σημαντικά ζητήματα. Ωστόσο σύμφωνα με έρευνες υπάρχει και η τεχνολογία και η τεχνογνωσία για αποφυγή της νησιδοποίησης. Το πρόβλημα που υπάρχει όμως είναι το ότι καμία μέθοδος πρόληψης δεν μπορεί να είναι ταυτόχρονα πρακτική ,αποδοτική και οικονομική.

Η δεύτερη κατηγορία είναι τα προβλήματα που προκαλεί το δίκτυο στα συνδεδεμένα φωτοβολταϊκό συστήματα στο δίκτυο. Τα πιο σημαντικά από αυτά είναι τα παρακάτω:

- Ανυψώσεις και βυθίσεις της τάσης που προκαλούνται αν συνδέουμε και αποσυνδέουμε μεγάλα φόρτια ή αν δεν λειτουργούν σωστά οι πυκνωτές που χρησιμοποιούμε.
- Υπερτάσεις και Υπερεντάσεις στην κατανεμημένη φ/β παράγωγη που δημιουργούνται από βραχυκυκλώματα .
- Μη ελεγχόμενες αρμόνικες. Οι αρμόνικες είτε οι ανώτερες είτε οι ενδιάμεσες μπορούν να προκαλέσουν σοβαρό πρόβλημα στο σύστημα μας όπως το να καταπονήσουν θερμικά τους M/X και τα υπόλοιπα στοιχεία που αποτελούν το κύκλωμα μας.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Κουτσούμπας, Χ. (2006). *Ήπιες μορφές ενέργειας*. Εκδόσεις Ελληνικά Γράμματα, Αθήνα.
2. Καπλάνης, Σ. Ν. (2004). *Ήπιες μορφές ενέργειας ΙΙΙ - Μηχανική των φωτοβολταϊκών συστημάτων*. Εκδόσεις Ίων, Αθήνα.
3. Φραγκιαδάκης, Ι. (2009). *Φωτοβολταϊκά συστήματα*. Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη.
4. Ned Mohan, Tore M. Undeland, William P. Robbins, «Power Electronics: Converters, Applications and Design», Wiley, 3 edition, October 2002.
5. Mohamed A. Eltawil , Zhengming Zhao «Grid-connected photovoltaic power systems: Technical and potential Problems»
6. Μ. Παπαδόπουλος, «Οι Επιπτώσεις Της Συνδέσεως Μικρών Μονάδων Παραγωγής Στα Δίκτυα Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας», ΔΕΗ, Ε.Δ. 35.
7. Μ. Ε. Ropp, Μ. Begovic, Α. Rohatgi, «Prevention Of Islanding In Grid-Connected
8. P.C Sernia.Cascaded DC-DC converter connection of photovoltaic modules
9. Martina Calais ,Vassilios Agelidis Multilevel converters for single-phase grid connected photovoltaic systems
10. Photovoltaic Systems», Progress In Photovoltaics: Research And Applications, John Wiley & Sons, Ltd, 2005.
11. Ε.Β.ΧΑΤΖΙΚΟΣ,Matlab για επιστήμονες και μηχανικούς, ΕΚΔΟΣΕΙΣ ΤΖΙΟΛΑ