

Τεχνολογικό εκπαιδευτικό ίδρυμα Δυτικής Ελλάδας
Σχολή : Σ.Τ.Ε.
Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών ΤΕ

Πτυχιακή εργασία
των φοιτητών του τμήματος ηλεκτρολόγων μηχανικών
του τεχνολογικού εκπαιδευτικού ιδρύματος Δυτικής Ελλάδας

Βασίλακας Βασίλειος του Γεωργίου

Μπρούμας Δημήτριος του Ιωάννη

ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΣΥΝΔΕΔΕΜΕΝΑ ΣΤΟ ΔΙΚΤΥΟ.

(Problems avised from on grid PV connection)

Επιβλέπων Καθηγητής : Ηλίας Σταθάτος

Αριθμός Πτυχιακής Εργασίας : 1303

ΠΑΤΡΑ 2015

Περίληψη

Η πτυχιακή έχει ως σκοπό την παρουσίαση των προβλημάτων που παρουσιάζουν τα φωτοβολταϊκα συνδεδεμένα με το δίκτυο .

Στην αρχή γίνεται μια εισαγωγή με αναφορά στην αστείρευτη πηγή ενέργειας, τον ήλιο. Το πώς ο άνθρωπος εκμεταλλεύεται την ηλιακή ενέργεια την οποία μετατρέπει σε ηλεκτρική μέσω των φωτοβολταϊκών .

Στην συνέχεια παρουσιάζονται οι σημαντικότεροι λόγοι για τους οποίους η φωτοβολταϊκή τεχνολογία έγινε περισσότερο ανταγωνιστική.

Παρουσιάζονται συνδεδεμένα στο δίκτυο φωτοβολταϊκα συστήματα.
Επίσης γίνεται παρουσίαση των προβλημάτων που προκύπτουν κατά τη σύνδεση φωτοβολταϊκών συστημάτων στο δίκτυο. Θα καλύψουμε τεχνικά και μη τεχνικά προβλήματα . Τέλος παρουσιάζονται τα προβλήματα που προκύπτουν λόγω της επίδρασης του δικτύου στα συνδεδεμένα φ/β συστήματα .

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1ο :ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	5
1.1 Ο ήλιος , η πυρηνική σύντηξη και το Φωτοβολταϊκό κύτταρο.....	5
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2ο : ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ.	7
2.1 Τι είναι η Φωτοβολταϊκή τεχνολογία.....	7
2.2 Χαρακτηριστικά φωτοβολταϊκών.....	7
2.3 Το Φωτοβολταϊκό φαινόμενο.....	10
2.4 τεχνολογία των φωτοβολταϊκών.....	14
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3ο : Φ/Β ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΣΥΝΔΕΔΕΜΕΝΑ ΣΤΟ ΔΙΚΤΥΟ ...	18
3.1 Εισαγωγή.....	18
3.2 Η Πορεία Εξέλιξης των Συνδεδεμένων στο Δίκτυο Φ/Β Συστημάτων.....	20
3.3 Περιγραφή Φ/Β Συστήματος Συνδεδεμένου στο Δίκτυο.....	23
3.4 Αντιστροφείς (inverter).....	26
3.4.1 Μονοφασικός αντιστροφέας.....	26
3.4.2 τριφασικός αντιστροφέας.....	27
3.5 Ανιχνευτές σημείου μέγιστης ισχύος.....	28
3.5.1 Έμμεσοι ανιχνευτές MPP.....	28
3.5.2 Άμεσοι ανιχνευτές MPP.....	29
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4ο: ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΠΟΥ ΠΡΟΚΥΠΤΟΥΝ ΚΑΤΑ ΤΗ ΣΥΝΔΕΣΗ Φ/Β ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΣΤΟ ΔΙΚΤΥΟ.....	31
4.1 Εισαγωγή.....	31
4.2 Μη Τεχνικά Προβλήματα Συνδεδεμένων στο Δίκτυο Φ/Β Συστημάτων.....	32
4.3 Τεχνικά Προβλήματα Συνδεδεμένων στο Δίκτυο Φ/Β Συστημάτων (Επίδραση Δικτύου στο Φωτοβολταϊκό Σύστημα).....	32
4.3.1 Βυθίσεις Τάσης.....	32
4.3.2 Ανυψώσεις (Swell) Τάσης.....	36

4.3.3 Βραχυκυκλώματα σε Ηλεκτρικές Εγκαταστάσεις.....	37
4.3.4 Ανώτερες Αρμονικές.....	39
4.4 Τεχνικά Προβλήματα Φ/Β Συστημάτων Συνδεδεμένων στο Δίκτυο (Επίδραση Φωτοβολταϊκού Συστήματος στο Δίκτυο).....	42
4.4.1 Ασφάλεια Προσωπικού και Πελατών.....	42
4.4.2 Προστασία Εξοπλισμού και Συστήματος.....	43
4.4.2.1 Σφάλματα προς Γη.....	43
4.4.2.2 Συνεισφορά στην Ικανότητα Βραχυκυκλώματος.....	45
4.4.2.3 Νησιδοποίηση (Islanding).....	48
4.4.2.4 Συμπεριφορά Φ/Β Συστήματος Κατά την Διάρκεια Ανωμαλιών του Δικτύου.....	55
4.4.3 Ποιότητα Ισχύος.....	57
4.4.3.1 Μεταβολές Τάσης.....	57
4.4.3.2 Ασύμμετρο Φορτίο του Συνδεδεμένου Συστήματος.....	62
4.4.3.3 Έγχυση Συνεχούς Ρεύματος στο Δίκτυο (Από τους Αντιστροφείς).....	63
4.4.3.4 Συντελεστής Ισχύος.....	70
4.4.3.5 Ρεύματα Προς Γη (Μονοφασικό Φ/Β Σύστημα Χωρίς Μετασχηματιστή).....	71
4.4.3.6 Πολλαπλοί Αντιστροφείς και Δίκτυο AC.....	80
4.3.3.7 Απώλειες.....	85
4.4.3.8 Αρμονικές.....	86
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	90
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	92

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1ο :ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Ο ήλιος , η Πυρηνική σύντηξη και το φωτοβολταϊκό κύτταρο

Ο ήλιος

Ο ήλιος μας αποτελείται ως επί το πλείστον από το υδρογόνο (70%), το ήλιο (28%) και το υπόλοιπο 2% από βαρέα στοιχεία. Είναι επίσης ένα κίτρινο νάνος αστέρας. Φυσικά είναι το μόνο αστέρι αρκετά κοντά μας, ώστε να εξετάσουμε τα εξωτερικά και τα εσωτερικά στρώματά του λεπτομερώς.

Ο ήλιος είναι το μόνο άστρο που επηρεάζει φανερά τη ζωή μας, όχι μόνο την ημέρα αλλά και τη νύκτα, με ηλιοφάνεια αλλά και τις νεφосκεπείς ημέρες. Ο ήλιος παράγει και ακτινοβολεί τεράστιες ποσότητες ενέργειας. Σε κάθε δευτερόλεπτο που περνά, ο ήλιος εκπέμπει ενέργεια ίση με μερικές εκατοντάδες δισεκατομμύρια τρισεκατομμυρίων κιλοβατώρες. Και μας παρέχει σχεδόν όλη την ενέργεια που χρησιμοποιούμε στη Γη. Ακόμη και ο άνεμος και τα νέφη είναι αποτέλεσμα της επίδρασης της ηλιακής ενέργειας στη Γη. Από την ηλιακή ακτινοβολία προέρχεται η αιολική ενέργεια, ο κύκλος του νερού, η βιολογική ενέργεια, το πετρέλαιο, το φυσικό αέριο, ο άνθρακας και σχεδόν όλη η ενέργεια στο ηλιακό σύστημα.

Ο ήλιος δημιουργεί την ηλιακή ενέργεια μέσω μιας διαδικασίας γνωστής ως πυρηνική σύντηξη, όπου δύο άτομα του υδρογόνου ενώνονται για να δημιουργηθεί ένα άτομο ηλίου.

Πυρηνική σύντηξη και το φωτοβολταϊκό κύτταρο

Κάθε δευτερόλεπτο, ο ήλιος μετατρέπει 500 εκατομμύρια μετρικούς τόνους υδρογόνου σε ήλιο. Λόγω της διαδικασίας της σύντηξης, 5 εκατομμύρια μετρικοί τόνοι μετατρέπονται σε ενέργεια κάθε δευτερόλεπτο. Αυτό σημαίνει ότι κάθε έτος, 157.680.000.000.000 μετρικοί τόνοι μετατρέπονται σε ενέργεια. Στη γη, λαμβάνουμε περίπου 2×10^{18} Watt . Αυτό αντιστοιχεί σε αρκετή ενέργεια ώστε να τροφοδοτηθούν 100 κοινοί λαμπτήρες φωτός για περίπου 5 εκατομμύρια έτη (περισσότερο από την ύπαρξη των ανθρώπων). Ισοδύναμα, η ενέργεια που στέλνει στη γη ο ήλιος, αντιστοιχεί στην ενέργεια που θα παρήγαγαν περισσότεροι από 150 εκατομμύρια μεγάλοι σταθμοί παραγωγής. Ο άνθρωπος εκμεταλλεύεται αυτή ακριβώς την ηλιακή ενέργεια χρησιμοποιώντας ηλιακά κύτταρα, πλαίσια ηλιακών κυττάρων και κάτοπτρα ώστε να δύναται να παράγει ηλεκτρική ενέργεια και να θερμαίνει νερό καλύπτοντας μέρος των ενεργειακών του αναγκών. Το φωτοβολταϊκό φαινόμενο ανακαλύφθηκε μόλις το 1839. Στις μέρες μας καθώς το κόστος των φωτοβολταϊκών στοιχείων μειώνεται συνεχώς και σε συνδυασμό με την όλο και αυξανόμενη ευαισθητοποίηση του κοινωνικού συνόλου απέναντι στο περιβάλλον καθώς και τις νομικές δεσμεύσεις των κρατών (συνθήκη του Kyoto) για χρήση εναλλακτικών πηγών ενέργειας, η χρήση των φωτοβολταϊκών συστημάτων εξαπλώνεται ραγδαία καθιστώντας τα ανταγωνιστικά έναντι των συμβατικών πηγών ενέργειας. Επίσης, δεδομένου ότι ο ήλιος θα «πεθάνει» σε περίπου πέντε δισεκατομμύρια χρόνια και ότι η ενέργεια που

προσφέρει είναι φιλική προς το περιβάλλον, συμπεραίνουμε ότι αυτός αποτελεί αένια πηγή ηλιακής ενέργειας καθιστώντας την εκμετάλλευση αυτής ιδιαίτερα επωφέλιμη συνοδευόμενη με πληθώρα πλεονεκτημάτων έναντι των υπολοίπων ενεργειακών πηγών και τα φωτοβολταϊκά συστήματα μια πολλά υποσχόμενη ενεργειακή τεχνολογία απαλλαγμένη από τις δυσμενείς περιβαλλοντολογικές επιπτώσεις των υπολοίπων συμβατικών πηγών ενέργειας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2ο : ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ

2.1 Τί Είναι η Φωτοβολταϊκή Τεχνολογία;

Είναι η τεχνολογία που παράγει, συνεχούς ρεύματος (DC) ηλεκτρική ενέργεια, από τους ημιαγωγούς όταν φωτίζονται από φωτόνια. Εφ' όσον προσπίπτει φως στο ηλιακό κύτταρο (το όνομα για το στοιχειώδες τμήμα του φωτοβολταϊκού πλαισίου), αυτό παράγει ηλεκτρική ενέργεια . Όταν σταματάει η πρόσπτωση ηλιακής ακτινοβολίας, σταματάει και η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Τα ηλιακά κύτταρα δεν επαναφορτίζονται και μερικά από αυτά είναι σε συνεχή υπαίθρια ή διαστημική λειτουργία για πάνω από 30 έτη.

2.2 Χαρακτηριστικά των φωτοβολταϊκών συστημάτων

Πλεονεκτήματα Φωτοβολταϊκών Συστημάτων

Η πηγή «καυσίμου» είναι μεγάλη και ουσιαστικά άπειρη.
Καθόλου εκπομπές, ούτε καύσεις ή διάθεση ραδιενεργών καυσίμων (δεν συμβάλλει ουσιαστικά στην παγκόσμια ρύπανση ή την αλλαγή του κλίματος).
Χαμηλό κόστος λειτουργίας .
Δεν υπάρχουν κινούμενα μέρη .
Χαμηλή θερμοκρασία λειτουργίας .
Υψηλή αξιοπιστία (πάνω από 20 έτη).
Γρήγορη εγκατάσταση.
Μπορεί να εγκατασταθεί σε υπάρχουσες κτιριακές εγκαταστάσεις.
Υψηλή αποδοχή του κοινού.
Υψηλά ποσοστά ασφαλείας.
Ημερήσια παραγωγή μπορεί να ευθυγραμμιστεί με ζήτηση.
Μπορούν να συνδυαστούν με άλλες πηγές ενέργειας, π.χ. με ένα αιολικό πάρκο, σε υβριδικά συστήματα .
Επεκτείνονται εύκολα και ανά πάσα στιγμή, για να καλύψουν κάποια αύξηση των αναγκών σε ενέργεια των χρηστών .
Έχουν πρακτικά μηδενικές απαιτήσεις συντήρησης .

Μειονεκτήματα Φωτοβολταϊκών Συστημάτων

Υψηλό κόστος εγκατάστασης.
Φτωχότερα σε αξιοπιστία τα συστήματα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας (ισοζύγιο ενέργειας), περιλαμβανομένων των στοιχείων αποθήκευσης.
Έλλειψη ευρέως εμπορικά διαθέσιμων ολοκληρωμένων συστημάτων για εγκατάσταση μέχρι στιγμής.
Έλλειψη οικονομικά αποδοτικής αποθήκευσης ενέργειας.
Η πηγή «καυσίμου», ήλιος, δεν παρέχει συνεχώς την ίδια ακτινοβολία (χαμηλής αξιοπιστίας πηγή).

Εφαρμογές των Φωτοβολταϊκών συστημάτων – Η κατάσταση στην Ελλάδα

Τα φωτοβολταϊκά συστήματα, βρίσκουν πάρα πολλές εφαρμογές και μπορούν να χρησιμοποιηθούν σχεδόν παντού, όπου απαιτείται η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Η τεχνολογία τους έχει ωριμάσει αρκετά και μπορούν να εξυπηρετούν και τα πλέον απαιτητικά ηλεκτρικά φορτία, χωρίς κανέναν πρόβλημα. Τα φωτοβολταϊκά συστήματα δίνουν αξιόπιστες και ικανοποιητικές λύσεις στο πρόβλημα του ηλεκτρισμού εκεί όπου δεν υπάρχει ηλεκτρική ενέργεια ή η μεταφορά της συνεπάγεται μεγάλο κόστος, καθώς επίσης εκεί όπου είναι αδύνατον να εγκατασταθεί άλλη πηγή ενέργειας. Τέλος τα συστήματα αυτά είναι σκόπιμο να εγκαθίστανται εκεί όπου απαιτείται υψηλή αξιοπιστία, καθώς και ελαχιστοποίηση των απαιτήσεων για συντήρηση και επίβλεψη.

Οι πιο ευρέως διαδεδομένες εφαρμογές τους είναι ορισμένες συσκευές χειρός, όπως π.χ. φανοί, ρολόγια, ηλεκτρονικά παιχνίδια, αριθμητικές μηχανές και άλλα, που συχνά τροφοδοτούνται από φωτοβολταϊκά στοιχεία και ενεργοποιούνται με τη βοήθεια του φωτός, αντί να καλύπτουν τις ανάγκες τους με μπαταρίες. Επίσης, τα φωτοβολταϊκά συστήματα χρησιμοποιούνται σε τροχόσπιτα και σκάφη αναψυχής, σε αγροτικές ή εξοχικές κατοικίες, καθώς και σε μικρά ή/και απομονωμένα ξενοδοχεία, προκειμένου να αποφευχθεί η εξάρτηση από το κεντρικό ηλεκτρικό δίκτυο.

Εξάλλου, τέτοια φωτοβολταϊκά συστήματα χρησιμοποιούνται και σε ορεινά καταφύγια, παρατηρητήρια δασοπυρόσβεσης, τηλεπικοινωνιακούς σταθμούς ή/και σε φάρους ναυτιλίας, εξαιτίας της αδυναμίας πρόσβασης τους στο κεντρικό δίκτυο.

Αυτόνομα φωτοβολταϊκά συστήματα, μπορούν να εξυπηρετήσουν άριστα μεμονωμένες κατοικίες ή μεγαλύτερες μονάδες, όπως ξενοδοχεία, νοσοκομεία, σχολεία, κλπ. Παράδειγμα τέτοιας εφαρμογής είναι μια κατοικία στις Μαργαρίτες Ρεθύμνου, όπου το φωτοβολταϊκό σύστημα, ισχύος 1000 W περίπου, που εγκαταστάθηκε το 1992, ηλεκτροδοτεί όλες σχεδόν τις εγκατεστημένες ηλεκτρικές συσκευές.

Πιο πρόσφατα, τον Ιούνιο του 1996, εγκαταστάθηκε ένα ανάλογο, αλλά αρκετά μεγαλύτερο, φωτοβολταϊκό σύστημα στο ξενοδοχείο Elounda Island Villas (στην Κρήτη). Το εν λόγω σύστημα, ισχύος 6500 W, εξυπηρετεί όλες τις ανάγκες ηλεκτροδότησης του δυναμικότητας 50 κλινών ξενοδοχείου.

Επιπλέον, συστήματα αυτού του είδους, μεγάλης εγκατεστημένης ισχύος, μπορούν να εξυπηρετήσουν ικανοποιητικά τις ανάγκες ολόκληρων μικρών οικισμών, όπως έχει γίνει στην περίπτωση του παραδοσιακού οικισμού στον Άσπρο Ποταμό Κρήτης. Ο εν λόγω οικισμός αποτελείται από 14 οικίες, ανακαινίσθηκε το 1989 και έκτοτε γίνεται συστηματική εκμετάλλευσή του για τουριστικούς λόγους. Τον Οκτώβριο του 1991 εγκαταστάθηκε φωτοβολταϊκό σύστημα ισχύος 1500 W το οποίο ηλεκτροδοτεί τα ψυγεία και τα φώτα του οικισμού, καθώς και μερικές τηλεοράσεις. Κατά το σχεδιασμό του, δόθηκε μεγάλη προσοχή, τόσο στην αξιοπιστία του συστήματος, όσο και στην αισθητική του, με αποτέλεσμα να τοποθετηθεί σε ειδικά διαμορφωμένο χώρο και να μη φαίνεται σχεδόν από πουθενά.

Η σημαντικότερη βέβαια χρήση των φωτοβολταϊκών συστημάτων, αφορά τη λειτουργία σταθμών ηλεκτροπαραγωγής μεσαίου ή μεγάλου μεγέθους, όπου το ηλεκτρικό ρεύμα αυτοκαταναλώνεται από τον παραγωγό ή διοχετεύεται στο κεντρικό ηλεκτρικό δίκτυο ή συμβαίνουν και τα 2 παράλληλα ανάλογα με τις ανάγκες. Στην Ελλάδα, η πρώτη και σημαντικότερη τέτοια εγκατάσταση έχει γίνει από τη Δ.Ε.Η. στην Κύθνο. Το φωτοβολταϊκό πάρκο που εγκαταστάθηκε εκεί, σχεδιάστηκε ώστε να

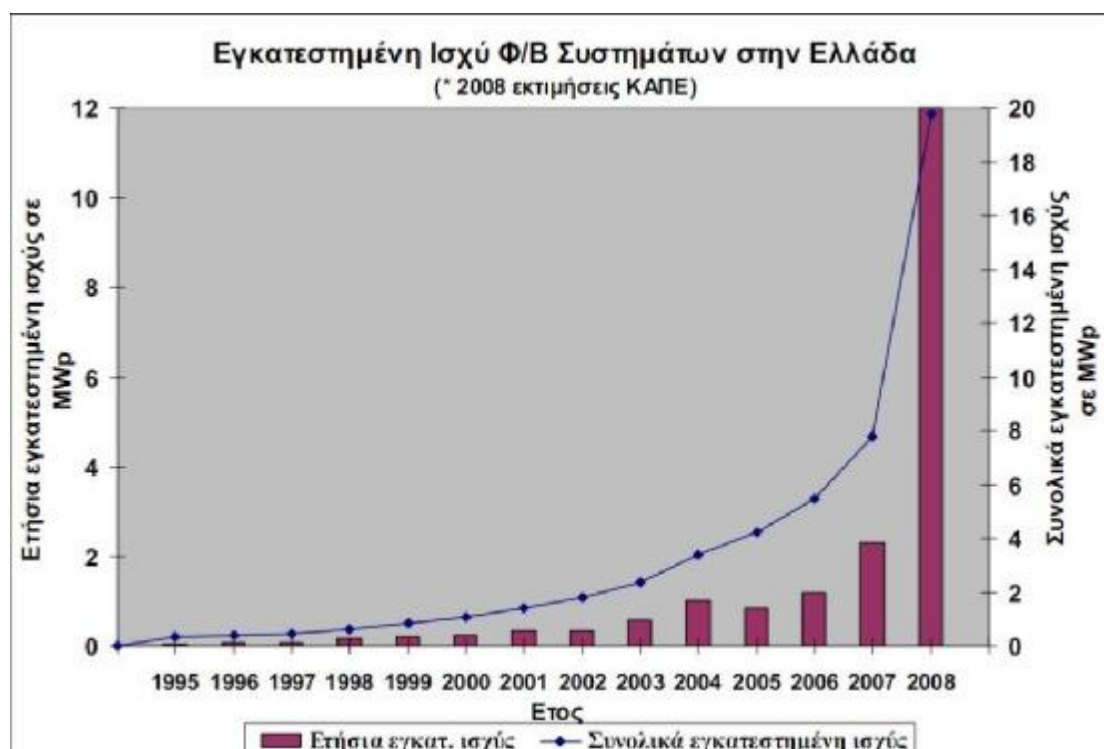
λειτουργεί σε συνδυασμό με τον υπάρχοντα συμβατικό σταθμό παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και ένα αιολικό πάρκο, που έχει επίσης εγκαταστήσει η Δ.Ε.Η. στο νησί, με σκοπό τη μείωση της ποσότητας ρεύματος που παράγεται από ορυκτά καύσιμα. Η ηλιακή γεννήτρια του φωτοβολταϊκού σταθμού της Κύθνου, που έχει μέγιστη δυνατότητα εξόδου 100 KWp (ο δείκτης p σημαίνει peak, αναφέρεται δε σε τιμή αιχμής).

Άλλη μια σημαντική εγκατάσταση είναι αυτή της Σίφνου. Σο 2000 εγκαταστάθηκε στη Σίφνο φωτοβολταϊκό πάρκο εγκατεστημένης ισχύος 60 KWp συνδεδεμένο στο τοπικό δίκτυο με μέση ετήσια παραγωγή ενέργειας 100 000 KWh.

Χρησιμοποιήθηκαν φωτοβολταϊκοί συλλέκτες πολυκρυσταλλικού πυριτίου.

Τέλος στις εγκαταστάσεις του Κέντρου Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (Πικέρμι Αττικής) τοποθετήθηκε φωτοβολταϊκό σύστημα ισχύος 40 KWp το Νοέμβριο του 2003.

Ετήσια και συνολική εγκατεστημένη ισχύς Φωτοβολταϊκών συστημάτων στην Ελλάδα .



2.3 Φωτοβολταϊκό Φαινόμενο

Το Φωτοβολταϊκό φαινόμενο είναι η άμεση μετατροπή της ηλιακής ακτινοβολίας σε ηλεκτρική ενέργεια. Το ηλιακό φως αποτελείται ουσιαστικά από μικρά «πακέτα ενέργειας» που λέγονται φωτόνια και περιέχουν διαφορετικά ποσά ενέργειας ανάλογα με το μήκος κύματος του ηλιακού φάσματος. Η πρόσκρουση των φωτονίων σε ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο (που είναι ημιαγωγός) έχει σαν αποτέλεσμα κάποια να ανακλώνται, άλλα να το διαπερνούν και άλλα να απορροφώνται από το αυτό. Αυτά τα τελευταία φωτόνια που απορροφώνται από το ημιαγωγό υλικό δημιουργούν περίσσεια από ζεύγη φορέων και συνεπώς διαφορά δυναμικού ανάμεσα στους ακροδέκτες του στοιχείου. Σ' αυτή την απλή αρχή της φυσικής λοιπόν βασίζεται μια από τις πιο εξελιγμένες τεχνολογίες παραγωγής ηλεκτρισμού.

Δεν μπορούν όλα τα υλικά να χρησιμοποιήσουν την ηλιακή ενέργεια για την παραγωγή ηλεκτρικής. Υπάρχουν υλικά, οι ημιαγωγοί που έχουν την ιδιότητα να μετατρέπουν την ενέργεια των προσπίπτοντων φωτονίων σε ηλεκτρική. Στους ημιαγωγούς οφείλεται ουσιαστικά η τεράστια τεχνολογική πρόοδος στον τομέα της ηλεκτρονικής και στον ευρύτερο χώρο της πληροφορικής και των τηλεπικοινωνιών συνεπώς αξίζει τον κόπο να δούμε τι τους κάνει τόσο ξεχωριστούς. Οι ημιαγωγοί μας δίνουν τη δυνατότητα να ελέγχουμε την ηλεκτρική τους αγωγιμότητα ενώ ένα χαρακτηριστικό που τους διαφοροποιεί από τα υπόλοιπα υλικά είναι ο αριθμός των ηλεκτρονίων σθένους.

Ο πιο γνωστός ημιαγωγός που χρησιμοποιείται στην κατασκευή των φωτοβολταϊκών είναι το πυρίτιο (Si) με ατομικό αριθμό 14. Στην εξωτερική του στοιβάδα το πυρίτιο έχει 4 ηλεκτρόνια αλλά έχει πολύ σταθερή κρυσταλλική μορφή, δηλαδή παρόλο που δεν έχει συμπληρωμένη την εξωτερική στοιβάδα δεν επιδιώκει ούτε να προσθέσει ούτε να διώξει ηλεκτρόνια. Αυτή είναι μια ιδιότητα που κάνει το πυρίτιο πολύ σημαντικό στοιχείο αφού του δίνει ηλεκτρικά χαρακτηριστικά πολύ κοντά σε αυτά ενός μονωτή (δεν υπάρχουν ελεύθερα ηλεκτρόνια). Όμως κατά την πρόσμειξη του πυριτίου (νόθευση) με στοιχεία τα οποία είτε έχουν ένα ηλεκτρόνιο περισσότερο, είτε ένα λιγότερο στη στοιβάδα σθένους (πχ. το Βόριο με 3ηλεκτρόνια στην εξωτερική στοιβάδα), δημιουργείται ένα κρύσταλλο δεκτικό είτε σε θετικά φορτία (τύπου p) είτε σε αρνητικά φορτία (τύπου n). Έτσι το νοθευμένο πυρίτιο διαθέτει είτε περίσσεια ηλεκτρονίων -τύπου n- είτε έλλειμμα -τύπου p.

Συγκεκριμένα για τους ημιαγωγούς τύπου n: προσθέτουμε στο πυρίτιο άτομα από την V ομάδα του περιοδικού πίνακα (Φώσφορος). Αυτά έχουν 5ηλεκτρόνια στην εξωτερική τους στοιβάδα από τα οποία τα τέσσερα συμμετέχουν στην δημιουργία δεσμών με τα γειτονικά άτομα του πυριτίου ενώ το πέμπτο συγκρατείται «χαλαρά» από τον πυρήνα. Από το σύνολο των χαλαρών αυτών ηλεκτρονίων δημιουργείται το νέφος των ελεύθερων ηλεκτρονίων. Αυτά όταν απορροφούν ενέργεια μπορούν να μεταφερθούν στη ζώνη αγωγιμότητας. Οι φορείς του ηλεκτρικού ρεύματος στους ημιαγωγούς τύπου n είναι τα ηλεκτρόνια. Οι επικρατέστεροι φορείς ονομάζονται φορείς πλειονότητας. Αντίστοιχα δεδομένα ισχύουν για τους ημιαγωγούς τύπου p. Στο έλλειμμα ενός ηλεκτρονίου δηλαδή η απουσία αρνητικού φορτίου

χαρακτηρίζεται και ως οπή, και πρακτικά σημαίνει θετικό φορτίο παρόλο που στην πραγματικότητα δεν υπάρχει.

Κανονικά μέσα στους νοθευμένους ημιαγωγούς οι φορείς μπορούν να μετακινούνται προς κάθε διεύθυνση ανάλογα με την εφαρμογή του πεδίου. Αν τώρα φέρουμε σε επαφή ένα κομμάτι πυριτίου τύπου n και ένα άλλο τύπου p τότε δημιουργείται μια δίοδος, ένα ηλεκτρικό πεδίο στην επαφή των δύο υλικών. Σα επιπλέον ηλεκτρόνια της επαφής n έλκονται από τις «οπές» τις επαφής p.

Η δίοδος αυτή ουσιαστικά επιτρέπει την κίνηση ηλεκτρονίων προς μια κατεύθυνση μόνο ενώ αποτελεί το δομικό στοιχείο του φωτοβολταϊκού κελιού και άρα τη βάση της φωτοβολταϊκής τεχνολογίας.

Η διαφορά στη συγκέντρωση ηλεκτρονίων και οπών ανάμεσα στους δυο ημιαγωγούς προκαλεί στην περιοχή της επαφής τους το φαινόμενο της διάχυσης. Αυτό σημαίνει ότι ηλεκτρόνια από την περιοχή n όπου βρίσκονται σε περίσσεια μεταφέρονται προς την περιοχή p και αντίστροφα για τις οπές. Έτσι ένα τμήμα του ημιαγωγού n κοντά στην επαφή p-n έχει θετικό φορτίο και όμοια ένα τμήμα του ημιαγωγού p κοντά στην επαφή p-n να έχει αρνητικό φορτίο.

Αυτές οι διεργασίες όμως δεν έχουν σαν αποτέλεσμα την παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος. Αυτό συμβαίνει επειδή αναπτύσσεται στην περιοχή της επαφής p-n ηλεκτρικό πεδίο με κατεύθυνση από την περιοχή n προς την περιοχή p. Το φαινόμενο της διάχυσης σταματά αφού τα ηλεκτρόνια κινούνται αντίθετα από τη φορά του πεδίου ενώ τα θετικά φορτία σύμφωνα με την κατεύθυνση του πεδίου. Και με αυτό τον τρόπο επέρχεται κατάσταση δυναμικής ισορροπίας.

Ας εξετάσουμε τώρα τι συμβαίνει όταν το φωτοβολταϊκό στοιχείο εκτίθεται στην ηλιακή ακτινοβολία. Τα φωτόνια που προσπίπτουν στο στοιχείο έχουν ένα ενεργειακό περιεχόμενο ίσο με

$$E=h \cdot l$$

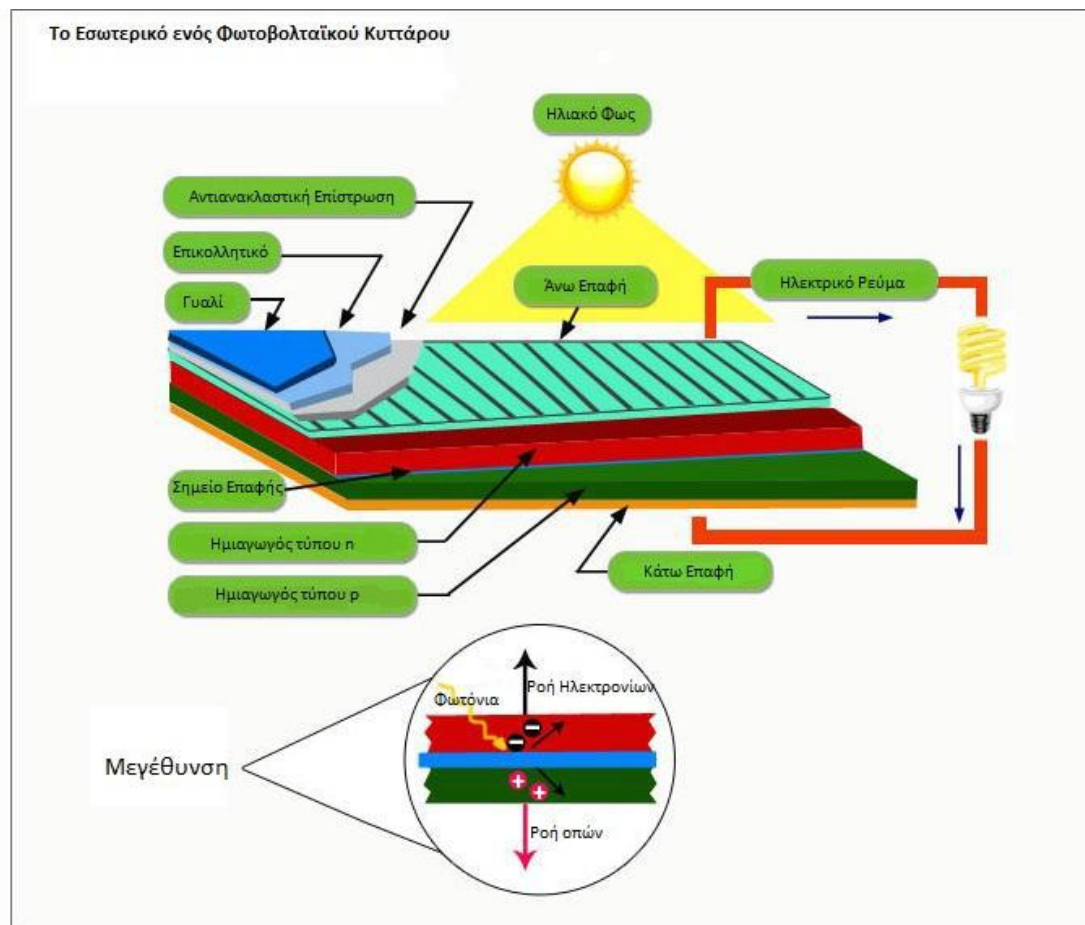
όπου h: η σταθερά του Planck

l: το μήκος κύματος του φωτονίου

Τα φωτόνια όταν προσπίπτουν σε μια διάταξη YB κελιού περνούν την επαφή τύπου-n χωρίς καμία επίδραση και χτυπούν τα άτομα της περιοχής τύπου-p όπου τα ηλεκτρόνια αρχίζουν να κινούνται μεταξύ των οπών, φτάνουν στην περιοχή της διόδου και έλκονται από το θετικό πεδίο της. Αν το ενεργειακό τους περιεχόμενο είναι μεγαλύτερο ή ίσο της διαφοράς ενέργειας μεταξύ της ζώνης σθένους και της ζώνης αγωγιμότητας, τότε τα φωτόνια αλληλεπιδρούν με ηλεκτρόνια της ζώνης σθένους και τους μεταφέρουν ενέργεια, με αποτέλεσμα αυτά να μετακινούνται στην ζώνη αγωγιμότητας αφήνοντας μία οπή στην ζώνη σθένους. Άρα όταν φωτόνια με κατάλληλα υψηλή ενέργεια προσπίπτουν στις περιοχές p , n ενός ημιαγωγού δημιουργούν ζεύγη ηλεκτρονίων-οπών και στις δύο περιοχές.

Τελικά, ηλεκτρόνια από την περιοχή p (φορείς μειονότητας) λαμβάνοντας την κατάλληλη ενέργεια από τα φωτόνια μεταπηδούν στη ζώνη αγωγιμότητας και διαχέονται προς την επαφή p-n. Εκεί υπάρχει αντίστροφης πόλωσης ηλεκτρικό πεδίο. Έτσι το πεδίο αυτό τα μετακινεί στην περιοχή n. Ακριβώς την ίδια λογική ακολουθούν και οι οπές της περιοχής n, αλλά με την αντίθετη πορεία. Άρα

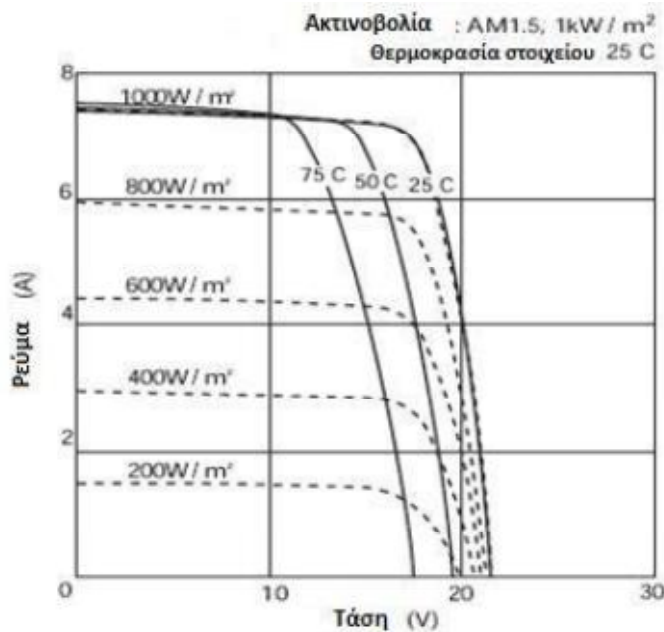
έχουμε ταυτόχρονα την αντίθετη κίνηση αντίθετων φορτίων, δηλαδή ουσιαστικά κίνηση φορτίου προς την μία κατεύθυνση. Τώρα δηλαδή δεν έχουμε απλά το φαινόμενο της διάχυσης που καταλήγει σε ισορροπία. Αφού υπάρχει συνεχόμενη κίνηση φορέων έχουμε τη δημιουργία ηλεκτρικού ρεύματος.



Για να γίνει βέβαια αυτό αρκεί να έχει τοποθετηθεί μια διάταξη (μεταλλικός αγωγός στο πάνω μέρος της επαφής n και στο κάτω της επαφής p) και ένα φορτίο ενδιάμεσα με τέτοιο τρόπο ώστε να κλείσει κύκλωμα, όπως φαίνεται και στο σχήμα.

I-V χαρακτηριστική

Το παραγόμενο ρεύμα συνδέεται με την τάση στα άκρα της διόδου με την ακόλουθη I-V χαρακτηριστική:



Απεικονίζεται στο σχήμα η σχέση I-V για τις διάφορες τιμές της θερμοκρασίας αλλά και της ακτινοβολίας ανά τετραγωνικό μέτρο. Στο «γόνατο» της καμπύλης παρατηρείται η μέγιστη ισχύς του φωτοβολταϊκού στοιχείου, αφού εκεί μεγιστοποιείται το γινόμενο της τάσης και του ρεύματος. Παρατηρούμε επίσης ότι η αύξηση της θερμοκρασίας του κυττάρου προκαλεί μείωση στην παραγόμενη ισχύ. Τέλος όπως είναι αναμενόμενο, όσο μεγαλύτερη ηλιακή ακτινοβολία δέχεται το κύτταρο τόσο περισσότερη ισχύς μπορεί να παράγει.

Απόδοση φωτοβολταϊκού

Πρέπει να σημειωθεί ότι δεν είναι δυνατό ένα υλικό να εκμεταλλευτεί όλη την προσπίπτουσα ηλιακή ενέργεια. Αυτό συμβαίνει επειδή το κάθε υλικό αντιδρά σε διαφορετικά μήκη κύματος της ακτινοβολίας. Έτσι ανάλογα με το υλικό που χρησιμοποιούμε μπορούμε να εκμεταλλευτούμε μόνο εκείνο το φάσμα της ακτινοβολίας που αντιδρά με το συγκεκριμένο υλικό. Συνεπώς υπάρχει περιορισμός στην απόδοση των φωτοβολταϊκών.

Η ικανότητα μετατροπής ή βαθμός απόδοσης ενός φωτοβολταϊκού κυττάρου είναι το ποσοστό της ηλιακής ενέργειας που μετατρέπεται σε ηλεκτρική. Επιδιώκουμε γενικά η ικανότητα μετατροπής να είναι η μεγαλύτερη δυνατή. Υπάρχουν ξεχωριστές τεχνολογίες φωτοβολταϊκών, καθεμιά απ τις οποίες διακρίνεται από διαφορετικό κόστος κατασκευής αλλά και άλλη ικανότητα μετατροπής, συνήθως μάλιστα τα δυο μεγέθη συνδέονται ανάλογα, όσο μεγαλύτερος βαθμός απόδοσης τόσο μεγαλύτερο και το κόστος.

Τα πρώτα φωτοβολταϊκά στοιχεία που κατασκευάστηκαν (19ος αιώνας) είχαν απόδοση περίπου 1-2%, ενώ το 1954 κατασκευάστηκαν τα πρώτα Υ/Β στοιχεία πυριτίου με απόδοση 6% .

Η ικανότητα μετατροπής αυξάνεται με την ανάπτυξη της τεχνολογίας των υλικών. Να σημειωθεί όμως ότι πρόκειται για ένα απαιτητικό εγχείρημα και η αύξηση της απόδοσης, έστω και κατά μια ποσοστιαία μονάδα, θεωρείται επίτευγμα στην

τεχνολογία των φωτοβολταϊκών. Σήμερα ο τυπικός βαθμός απόδοσης ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου είναι περίπου 12 – 19%, ανάλογα με τον τρόπο κατασκευής. Σε σχέση με τις αποδόσεις των άλλων πηγών ενέργειας, συμβατικών, αιολικών, υδροηλεκτρικών είναι αρκετά χαμηλός και συνεπώς το φωτοβολταϊκό σύστημα πρέπει να καταλαμβάνει μεγάλη επιφάνεια προκειμένου να αποδώσει την επιθυμητή ηλεκτρική ισχύ.

2.4 τεχνολογία των φωτοβολταϊκών

Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία κατασκευάζονται από ημιαγώγιμα υλικά και κυρίως από το πυρίτιο που αποτελεί τη βάση για το 90% περίπου της παγκόσμιας παραγωγής. Αυτό οφείλεται στην τεράστια παγκόσμια επιστημονική υποδομή για το Si, που χρησιμοποιείται για τις περισσότερες εφαρμογές της ηλεκτρονικής. Το πυρίτιο είναι ένα υλικό με πολλά χαρακτηριστικά πλεονεκτήματα που το έχουν καταστήσει τόσο ικανό και συμφέρον. Κατ' αρχήν είναι πολύ εύχρηστο στη μορφοποίηση του και στη μετατροπή του στην μονοκρυσταλλική μορφή. Η αφθονία του στη γη είναι μεγάλη καθώς μετά το οξυγόνο είναι το υλικό με τα μεγαλύτερα αποθέματα, ενώ η άμμος που είναι το διοξείδιο του πυριτίου αποτελεί μεγάλο κομμάτι του φλοιού της γης. Διατηρεί τις ηλεκτρικές του ιδιότητες μέχρι και στους 125C κάτι που το καθιστά ιδιαίτερα κατάλληλο για τη χρήση στα φωτοβολταϊκά. Είναι όμως ένα εύθραυστο υλικό και απαιτεί το σχηματισμό στοιχείων σχετικά μεγάλου πάχους με αποτέλεσμα την ανάγκη για υψηλή καθαρότητα και δομική τελειότητα.

Το πυρίτιο, ανάλογα με την επεξεργασία του, δίνει μονοκρυσταλλικά, πολυκρυσταλλικά ή τα άμορφα. Υπάρχουν επίσης και τα «υβριδικά» φωτοβολταϊκά τα οποία συνδυάζουν τις τεχνολογίες των άμορφων και των κρυσταλλικών. Συνολικά όπως αναφέραμε μετατρέπουν ένα 12-19% της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική και το ακριβές ποσοστό εξαρτάται από την τεχνολογία που χρησιμοποιούμε.

Τα μονοκρυσταλλικά πλαίσια είναι εκείνα που θεωρούνται τα πιο κορυφαία τεχνολογικά και χρησιμοποιούνται γενικά για μεγάλες ενεργειακές απαιτήσεις. Η τεχνολογία τους είναι ακριβή σε κόστος αλλά έχει το πλεονέκτημα της υψηλής αποδοτικότητας που κυμαίνεται από 14,5% έως 20%. Μάλιστα σε συνθήκες εργαστηρίου έχουν επιτευχθεί ακόμα μεγαλύτερες αποδόσεις έως και 24,7%.

Ο βασικός σχεδιασμός ενός κλασικού φωτοβολταϊκού στοιχείου από μονοκρυσταλλικό πυρίτιο περιλαμβάνει μια μεγάλη εμβαδού επαφή n+p τοποθετημένη σε μικρό βάθος από την επιφάνεια όπου προσπίπτει το φως. Η δίοδος βρίσκεται πάνω σε υπόστρωμα πυριτίου τύπου -p πάχους κάποιων εκατοντάδων μm ενώ στην εμπρόσθια επιφάνεια τοποθετείται αντανάκλαστικό επίστρωμα και μεταλλικές ωμικές επαφές οι οποίες τοποθετούνται και στην οπίσθια επιφάνεια.

Το μονοκρυσταλλικό φωτοβολταϊκό στοιχείο κατασκευάζεται από κυψέλες που έχουν κοπεί από ένα κυλινδρικό κρύσταλλο πυριτίου. Η κατασκευή του είναι πολύπλοκη και γίνεται με μια σειρά τυποποιημένων διεργασιών, σύμφωνα με τη μέθοδο Czochralski αλλά και τη μέθοδο τετηγμένης ζώνης η οποία είναι δαπανηρή μα παράγει υλικό υψηλότερης καθαρότητας και ανώτερης

κρυσταλλικότητας. Το αποτέλεσμα των μεθόδων είναι ένας μόνο ενιαίος κρύσταλλος, γι αυτό και η τεχνολογία αυτή ονομάζεται μονοκρυσταλλική. Εκτός από το πυρίτιο εισάγεται και το υλικό πρόσμιξης που συνήθως είναι το βόριο, για την παραγωγή κρυστάλλου τύπου -p. Τέλος τοποθετείται προστατευτικό περίβλημα γυαλιού για τη διατήρηση της καθαρότητας και την προστασία από τη διάβρωση.

Οι συνθήκες για τη βελτιστοποίηση της απόδοσης του μονοκρυσταλλικού στοιχείου είναι το βέλτιστο ενεργειακό διάκενο, η πλήρης απορρόφηση φωτονίων με ενέργειες μεγαλύτερες από το ενεργειακό διάκενο, ο τέλειος διαχωρισμός των παραγόμενων φορέων στην περιοχή επαφής και οι μηδενικές ηλεκτρικές απώλειες. Το πάχος των φωτοβολταϊκών στοιχείων μονοκρυσταλλικού πυριτίου είναι γύρω στα 0,3 χιλιοστά.

Επειδή η απόδοση τους είναι μεγάλη, για να παραχθεί ένα συγκεκριμένο ποσό ενέργειας απαιτείται μικρότερη έκταση της περιοχής εγκατάστασης δηλαδή χαρακτηρίζονται από την καλύτερη σχέση απόδοσης/επιφάνειας ή "ενεργειακής πυκνότητας".

Τα πολυκρυσταλλικά φωτοβολταϊκά στοιχεία είναι χαμηλότερης ποιότητας από τα μονοκρυσταλλικά έχοντας ονομαστικές αποδόσεις πλαισίων περίπου 11% έως 15%. Σε εργαστηριακές εφαρμογές έχουν επιτευχθεί αποδόσεις έως και 20%. Παράλληλα όμως εξισορροπώντας αυτό τους το μειονέκτημα έχουν χαμηλότερο κόστος κατασκευής αφού η μέθοδος παραγωγής τους είναι φθηνότερη από αυτήν των μονοκρυσταλλικών. Το πάχος τους είναι επίσης περίπου 0,3 χιλιοστά.

Τα πολυκρυσταλλικά φωτοβολταϊκά κατασκευάζονται από ράβδους λιωμένου και επανακρυσταλλομένου πυριτίου. Για την παραγωγή τους οι ράβδοι του πυριτίου κόβονται σε λεπτά τμήματα. Στα πολυκρυσταλλικά αποτελούνται από επιμέρους μονοκρυσταλλικές περιοχές, που όσο μεγαλύτερες είναι σε έκταση τόσο μεγαλύτερη είναι και η απόδοση των στοιχείων. Αυτή είναι και η αιτία του χαμηλότερου κόστους αυτής της τεχνολογίας καθώς τα πολυκρυσταλλικά μπορούν να παραχθούν από τα τμήματα πυριτίου που περισσεύουν από την κατασκευή μονοκρυσταλλικών. Τα μονοκρυσταλλικά χρειάζονται μεγάλο τμήμα κρυστάλλου αλλά από την κοπή του κάποια κομμάτια αχρηστεύονται καθώς είναι μικρά. Αυτά μπορούν να επαναχρησιμοποιηθούν για τα πολυκρυσταλλικά. Βασικότερες τεχνολογίες παραγωγής των πολυκρυσταλλικών είναι: η μέθοδος απ' ευθείας στερεοποίησης DS (directional solidification), η ανάπτυξη λιωμένου πυριτίου (χύτευση), και η ηλεκτρομαγνητική χύτευση EMC.

Τα φωτοβολταϊκά άμορφου πυριτίου αποτελούνται από ένα λεπτό στρώμα πυριτίου που έχει εναποτεθεί ομοιόμορφα σε κατάλληλο υπόβαθρο. Το άμορφο πυρίτιο παρουσιάζει μεγαλύτερη απορροφητικότητα του φωτός όμως η απόδοση των φωτοβολταϊκών από αυτό το υλικό είναι μικρότερη από εκείνη των κρυσταλλικών. Κατά μέσο όρο ο βαθμός απόδοσης των άμορφων στοιχείων αγγίζει το 6%. Παράλληλα όμως είναι και πολύ οικονομικά.

Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία ταινίας πυριτίου είναι μια σχετικά νέα τεχνολογία φωτοβολταϊκών στοιχείων. Η κατασκευή τους δε χρησιμοποιεί τόσο πυρίτιο όσο οι

προηγούμενες τεχνολογίες. Ο βαθμός απόδοσης των φωτοβολταϊκών στοιχείων αυτής της τεχνολογίας αγγίζει το 12-13% ενώ το πάχος του είναι περίπου 0,3mm. Στο εργαστήριο έχουν επιτευχθεί αποδόσεις της τάξης του 18%.

Στην τεχνολογία των Thin film δηλαδή τα φωτοβολταϊκά υλικά λεπτών επιστρώσεων περιλαμβάνονται υλικά όπως CdTe, CIGS, CIS και το άμορφο πυρίτιο. Πρόκειται ουσιαστικά για μια άλλη μορφή κατασκευής και κατηγοριοποίησης που αναφέρεται στο πάχος, και όχι στο υλικό.

Εδώ μειώνεται το πάχος των στοιχείων σε μm, σε σχέση με τις προηγούμενες μεθόδους. Έτσι το κόστος κατασκευής είναι χαμηλότερο όμως το ίδιο ισχύει και για την ικανότητα μετατροπής. Πάντως η τεχνολογία λεπτού στρώματος (thin film) είναι σε φάση ανάπτυξης, αφού με διάφορες μεθόδους επεξεργασίας και χρήση διαφορετικών υλικών αναμένεται αύξηση της απόδοσης, σταθεροποίηση των χαρακτηριστικών τους και αύξηση της διείσδυσης στην αγορά. Σήμερα πάντως αποτελούν την πιο φθηνή επιλογή Υ/Β πλαισίων.

Η επιλογή του είδους των φωτοβολταϊκών είναι συνάρτηση των αναγκών, του διαθέσιμου χώρου ή ακόμα και της οικονομικής ευχέρειας του χρήστη.

Τέλος τα κρυσταλλικά πλαίσια έχουν ονομαστική ισχύ εξόδου 10-250Wp ενώ τα thin film περίπου 100Wp.

Παρακάτω δίνεται συγκριτικός πίνακας για την κάθε τεχνολογία φωτοβολταϊκών. Όπως είδαμε, η τεχνολογία με τη μεγαλύτερη απόδοση είναι εκείνη των μονοκρυσταλλικών.

Τύπος	Άμορφα	Πολυκρυσταλλικά	Μονο-κρυσταλλικά	Υβριδικά
Απόδοση	5-7%	11-15%	14,5-20%	16-17%
επιφάνεια /kWp	10-20 m ²	8-10 m ²	7-8 m ²	6-7 m ²
Μέση ετήσια παραγωγή ενέργειας kWh/kWp	1.300	1.300	1.300	1.350
Μέση ετήσια παραγωγή ενέργειας kWh/m ²	65-140	130-160	160-185	190-225
Ετήσια μείωση εκπομπών CO ₂ kgCO ₂ /kWp	1.380-1.485	1.380	1.380	1.435

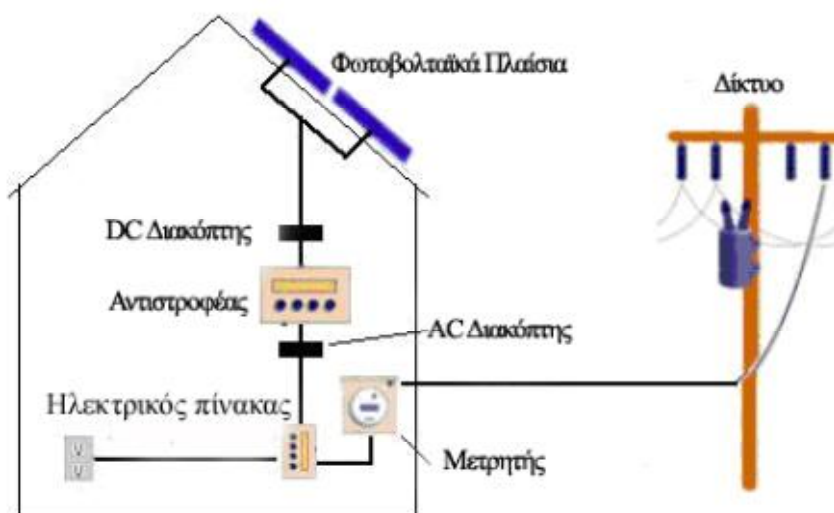
Η διείσδυση των φωτοβολταϊκών στη ζωή μας, συγκρινόμενη με τον εκρηκτικό τρόπο που εξελίχθηκε μια άλλη βιομηχανία ημιαγωγών υλικών, αυτή των ηλεκτρονικών υπολογιστών, γίνεται με πολύ αργό ρυθμό. Κύρια αιτία αποτελεί ο όγκος του απαιτούμενου υλικού (κρυσταλλικού πυριτίου) και η ιδιαίτερα ενεργοβόρος παραγωγή του καθώς επίσης το αυξημένο κόστος του εξοπλισμού και της ενέργειας που απαιτείται κατά την παραγωγική διαδικασία. Έτσι η τάση που φαίνεται ότι θα επικρατήσει στην αγορά των φωτοβολταϊκών στα επόμενα χρόνια είναι οι τεχνολογίες λεπτού υμενίου (thin film) στις οποίες επιτυγχάνεται σημαντική μείωση του απαιτούμενου όγκου πυριτίου και συνεπώς μείωση τιμής. Πάντως οι τεχνολογίες πυριτίου έχουν τα πρωτεία και αυτό επιβεβαιώνεται από τα εκατοντάδες εκατομμύρια ευρώ που έχουν επενδυθεί παγκοσμίως για την κατασκευή εργοστασίων παραγωγής πολυπυριτίου, ράβδων (μονοκρυσταλλικού και πολυκρυσταλλικού πυριτίου), φωτοβολταϊκών στοιχείων, κυψελών και πλαισίων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3ο : Φ/Β ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΣΥΝΔΕΔΕΜΕΝΑ ΣΤΟ ΔΙΚΤΥΟ

3.1 Εισαγωγή

Μέχρι πριν από μερικά χρόνια τα φωτοβολταϊκά συστήματα χρησιμοποιούνταν ευρέως για τη παροχή ηλεκτρισμού σε απομονωμένες περιοχές, όπου δεν ήταν εφικτή η παροχή ηλεκτρικής ενέργειας από τις Επιχειρήσεις Ηλεκτρισμού, ή ως εφεδρική πηγή ηλεκτρικής ενέργειας για οικιακές αλλά και για άλλες καταναλώσεις. Η πρόοδος που επιτεύχθηκε τα τελευταία χρόνια στο τομέα της φωτοβολταϊκής τεχνολογίας, σε συνδυασμό με το ολοένα και αυξανόμενο περιβαλλοντικό ενδιαφέρον συνέβαλλαν στη δραματική επιτάχυνση της εξάπλωσης των φωτοβολταϊκών πλαισίων (modules). Η εγκατεστημένη παραγωγή αυξάνεται κατά 40% κάθε έτος με πρώτη τη Γερμανία, αλλά και σε άλλες χώρες .

Τα ηλιακά κύτταρα, επίσης γνωστά ως φωτοβολταϊκά κύτταρα είναι αυτά που παράγουν ηλεκτρισμό. Αυτά, σε μικρό αριθμό, αποτελούν ένα πλαίσιο που μαζί με τον αντιστροφέα, τον μετασχηματιστή και φίλτρα συνιστούν ένα ολοκληρωμένο σύστημα παραγωγής (θα περιγραφεί αναλυτικά στην παράγραφο 3.3). Πολλά από τα συστήματα διαθέτουν μπαταρίες, φορτιστές μπαταριών, μια γεννήτρια εφεδρείας και έναν ελεγκτή ώστε οι καταναλωτές να μπορούν να θέσουν σε λειτουργία τα φορτία. Το διάγραμμα ενός φ/β συστήματος συνδεδεμένου στο δίκτυο παρουσιάζεται στην παρακάτω εικόνα



Σχήμα 3. 1 Τυπικό φωτοβολταϊκό σύστημα συνδεδεμένο στο δίκτυο

Μερικά αυτόνομα συστήματα όπως αυτά για την άντληση νερού, δεν απαιτούν εφεδρική πηγή .

Τα συνδεδεμένα στο δίκτυο φ/β συστήματα δεν απαιτούν την ύπαρξη μπαταριών ή γεννήτριας εφεδρείας καθώς χρησιμοποιούν το δίκτυο ως εφεδρεία. Τα φωτοβολταϊκά συστήματα της καταναμημένης παραγωγής μπορούν να συνδεθούν στο δίκτυο διαμέσου ενός κατάλληλου αντιστροφέα. Τις ηλιόλουστες ημέρες η φωτοβολταϊκή γεννήτρια παράγει ισχύ που τροφοδοτεί μέρος των φορτίων, π.χ οικιακές καταναλώσεις, ενώ η επιπλέον ενέργεια παρέχεται στο δίκτυο. Κατά τη διάρκεια της νύχτας και των ημερών με χαμηλή ή και καθόλου ηλιοφάνεια, τα φορτία τροφοδοτούνται αποκλειστικά από το δίκτυο. Τα ηλιακά συστήματα μπορούν να ενσωματώσουν αντιστροφείς για τη μετατροπή του παραγόμενου συνεχούς ρεύματος σε εναλλασσόμενο ώστε να χρησιμοποιηθεί στις τοπικές καταναλώσεις ή στο δίκτυο. Τα ολοκληρωμένα συστήματα συνήθως διαθέτουν αυτόματους διακόπτες, ασφάλειες και κύκλωμα γείωσης.

Τα πλεονεκτήματα των φωτοβολταϊκών συστημάτων που δεν είναι συνδεδεμένα με το δίκτυο είναι τα εξής:

- Τα αυτόνομα συστήματα μπορούν να περιορίσουν την ανάγκη δημιουργίας νέων γραμμών σε απομονωμένες περιοχές.
- Για αγροτικές και απομακρυσμένες περιοχές η ηλιακή ενέργεια κοστίζει λιγότερο από οποιοδήποτε άλλο τρόπο παραγωγής ηλεκτρισμού.
- Μπορούν να συνδεθούν στο υπάρχον δίκτυο για να διαθέσουν τη παραγωγή τους σε περιόδους υψηλής ζήτησης.
- Η εγκατάσταση των πλαισίων είναι πολύ απλή. Είναι δυνατό να τοποθετηθούν στο έδαφος, σε στέγες, σε τοίχους, σε παράθυρα.
- Χρειάζονται στοιχειώδη συντήρηση.
- Λειτουργούν αθόρυβα και αποτελεσματικά χωρίς να μολύνουν
- Μπορούν να συνδυαστούν εύκολα με άλλους τύπους παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.
- Μπορούν να φορτίζουν μπαταρίες ώστε να διατίθεται συνεχώς ενέργεια.

Καθώς το κόστος των φωτοβολταϊκών συστημάτων μειώνεται συνεχώς, τα συνδεδεμένα στο δίκτυο συστήματα γίνονται ολοένα και πιο ανταγωνιστικά. Επιπλέον, η ανάπτυξη της οικολογικής συνείδησης των καταναλωτών αντανακλάται σε μια προθυμία για επενδύσεις μεγάλων ποσών προκειμένου να διαθέτουν πράσινη ενέργεια. Το γεγονός αυτό σε συνδυασμό με την αύξηση ζήτησης ενέργειας οδήγησε στην αλματώδη ανάπτυξη των φ/β συστημάτων που συνδέονται στο δίκτυο. Επιπρόσθετα, η μείωση των τιμών οδήγησε σε αυξημένη ζήτηση για φωτοβολταϊκά συστήματα με αποτέλεσμα να ενταθούν οι προσπάθειες για βελτίωση της αξιοπιστίας και της εγκατάστασης των μερών που αποτελούν ένα φ/β σύστημα. Συνεπώς, το κόστος υλοποίησης των φ/β συστημάτων μειώνεται διαρκώς, ενώ ταυτόχρονα αυξάνεται η αξιοπιστία τους.

3.2 Η Πορεία Εξέλιξης των Συνδεδεμένων στο Δίκτυο Φ/Β Συστημάτων

Μέχρι τα μέσα της δεκαετίας του '70 υπήρξε πολύ λίγη συζήτηση σχετικά με την χρησιμοποίηση ηλεκτρικής ενέργειας από φωτοβολταϊκά συστήματα εκτός από το διαστημικό πρόγραμμα. Εντούτοις, λόγω του συνεχώς αυξανόμενου κόστους των ορυκτών καυσίμων, καθώς και λόγω των αυξανόμενων περιβαλλοντικών ανησυχιών για τη χρήση τους, αναπτύχθηκε το ενδιαφέρον για επίγειες χρήσεις της φωτοβολταϊκής παραγωγής. Η πρώτη αναφορά συνδεδεμένης σε δίκτυο φωτοβολταϊκής παραγωγής ήρθε το 1974. Αυτή η συζήτηση περί γενικής χρήσης μιας πιθανής φωτοβολταϊκής εφαρμογής ανέφερε τις συνεχώς αυξανόμενες δαπάνες για ορυκτά καύσιμα, την ανησυχία για την ποιότητα του περιβάλλοντος, με την κυβέρνηση των Ηνωμένων Πολιτειών να τους υποστηρίζει ως λόγους για χρήση των φωτοβολταϊκών συστημάτων. Προέβλεπε, εντούτοις, ότι δεν θα υπήρχε κεντρικός ηλιακός σταθμός παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας πριν από το έτος 2000. Ωστόσο τα γεγονότα που ακολούθησαν απέδειξαν το αντίθετο. Διάφορες τέτοιες γεννήτριες λειτουργούν στις ΗΠΑ και ανά τον κόσμο από το 1987.

Το σχέδιο για έναν κεντρικό σταθμό ηλιακής - θερμικής γεννήτριας δημοσιεύτηκε σε μια ερευνητική εργασία το 1975. Συγκεντρωμένο φως του ήλιου θερμαίνει δεξαμενές ώστε να παραχθεί ατμός, ο οποίος έπειτα περιστρέφει έναν αμοστρόβιλο περιστρεφόμενης μονάδας γεννητριών. Αν και δεν υπήρξε καμιά αναφορά για φωτοβολταϊκά σε αυτό το σχέδιο, σε μια άλλη ερευνητική εργασία του Πανεπιστημίου της Oklahoma, επιβεβαιώνονται οι προοπτικές για τη χρήση σε μεγάλη κλίμακα της ηλιακής ενέργειας. Το ενδιαφέρον του Εθνικού Ιδρύματος Επιστήμης (National Science Foundation) ήταν έντονο με αποτέλεσμα συζητήσεις το 1975, ενώ στο πανεπιστήμιο DeLaware μια πειραματική εφαρμογή φωτοβολταϊκών συστημάτων για οικιακή χρήση λάμβανε χώρα.

Το πανεπιστήμιο του Delaware, δημιουργός του πειράματος, είχε μια μικρή σειρά από φωτοβολταϊκά κύτταρα που τα χρησιμοποιούσε για να μελετήσει τον συσχετισμό της ηλιακής ενέργειας με τυπικά ημερήσια οικιακά ηλεκτρικά φορτία. Η ενέργεια από τη σειρά φωτοβολταϊκών χρησιμοποιούταν για να φορτίσει μπαταρίες που τροφοδοτούσαν ρεύμα σε συνεχούς ρεύματος φορτία μέσα στο σπίτι. Όταν τα επίπεδα φόρτισης της μπαταρίας έφεταν πολύ χαμηλά ή όταν η φωτοβολταϊκή γεννήτρια δεν ήταν επαρκής, ένας ειδικός διακόπτης επέτρεπε την τροφοδότηση ηλεκτρικής ενέργειας από το δίκτυο. Καθώς αυτό δεν ήταν μια αληθινή συνδεδεμένη με το δίκτυο φωτοβολταϊκή μονάδα παραγωγής, ωστόσο φαίνεται να είναι η πρώτη σημαντική πειραματική μελέτη της αλληλεπίδρασης μεταξύ της φωτοβολταϊκής παραγωγής και ενός ηλεκτρικού δικτύου.

Η φόρτιση των μπαταριών ήταν πάλι το θέμα σε μια ερευνητική εργασία του 1976 συζητώντας τη δαπάνη για τους ελεγκτές μπαταριών. Η φωτοβολταϊκή τεχνολογία καλύφθηκε λεπτομερώς για ένα ηλεκτρικό δίκτυο σε ένα εκπαιδευτικό έγγραφο της IEEE τον ίδιο χρόνο. Κανένας από τους ερευνητές, εντούτοις, δεν ανέφερε την πιθανότητα της συνδεδεμένης στο δίκτυο φωτοβολταϊκής εφαρμογής.

Η συνδεδεμένη λειτουργία περιγράφηκε πάλι σε εργασίες IEEE το 1978. Οι συντάκτες συζήτησαν για την φωτοβολταϊκή και την ηλιακή θερμική παραγωγή, σε συνδεδεμένες και αυτόνομες εφαρμογές, αλλά ακόμα και τα συνδεδεμένα συστήματα ακόμη περιελάμβαναν κάποια ενεργειακή αποθήκευση. Η ανάλυση ήταν κυρίως οικονομική, και δεν συζητούσαν τα πιθανά τεχνικά προβλήματα της σύνδεσης με το δίκτυο.

Μια άλλη οικονομική ανάλυση δημοσιεύτηκε επίσης το 1978. Συμπεριλήφθηκαν απλά σχέδια και οικονομικές αναλύσεις διάφορων συνδεδεμένων στο δίκτυο συστημάτων ηλιακής ενέργειας, συμπεριλαμβανομένου κατοικιών, ενδιάμεσων και κεντρικών σταθμών φωτοβολταϊκής παραγωγής. Τα προβλήματα σύνδεσης δεν συζητήθηκαν, αν και οι συντάκτες αναγνώρισαν ότι «στην περίπτωση της σύνδεσης με το δίκτυο, ζητήματα σχετικά με διεπαφή πελάτη/δικτύου όπως το ποσοστό συμμετοχής, η ιδιοκτησία, η ενεργειακή ανατροφοδότηση στο δίκτυο, η ασφάλεια και ο έλεγχος απαιτούσαν περαιτέρω καθορισμό». Αυτός ο περαιτέρω καθορισμός άρχισε με μια αξιολόγηση της αξιοπιστίας που εξέτασε το φορτίο που είναι ικανό να καλύψει το φωτοβολταϊκό σύστημα και πώς το δίκτυο μπορεί να δει την φωτοβολταϊκή παραγωγή από την πλευρά των συμβατικών γεννητριών του.

Η συζήτηση των ζητημάτων σύνδεσης στο δίκτυο συνεχίστηκε σε μια λεπτομερή αξιολόγηση του 1979 της χρησιμοποίησης της φωτοβολταϊκής παραγωγής ώστε να μειωθούν οι ανάγκες αιχμής του δικτύου. Το σύστημα που μελετήθηκε, εντούτοις, δεν ήταν ένα αληθινό συνδεδεμένο σύστημα. Οι συντάκτες πρόβλεψαν αποθήκευση ενέργειας σε μπαταρίες και έναν διακόπτη αλλαγής μεταφοράς στο δίκτυο, έτσι ώστε ενέργεια που παράγεται από το φωτοβολταϊκό σύστημα να μην ρέει στο δίκτυο. Ήταν, εντούτοις, μια χρήσιμη συζήτηση που συσχέτιζε τη χρησιμότητα των φωτοβολταϊκών με τις αιχμές φορτίου.

Οι λεπτομέρειες των ζητημάτων σύνδεσης στο δίκτυο άρχισαν να βγαίνουν σε επιστημονικά συνέδρια σχετικά με τα φωτοβολταϊκά συστήματα το 1980. Συζητήθηκαν οι γενικές ανησυχίες περί της ασφάλειας του προσωπικού, του εξοπλισμού, της προστασίας συστημάτων δικτύων κοινής ωφέλειας και της ποιότητας ισχύος. Ένα συγκεκριμένο πρόβλημα που αναφέρθηκε ήταν η δυνατότητα υπερφόρτισης μετασχηματιστών διανομής που προκαλείται από την παραγωγή ενέργειας από φωτοβολταϊκά συστήματα οικιακής χρήσης .

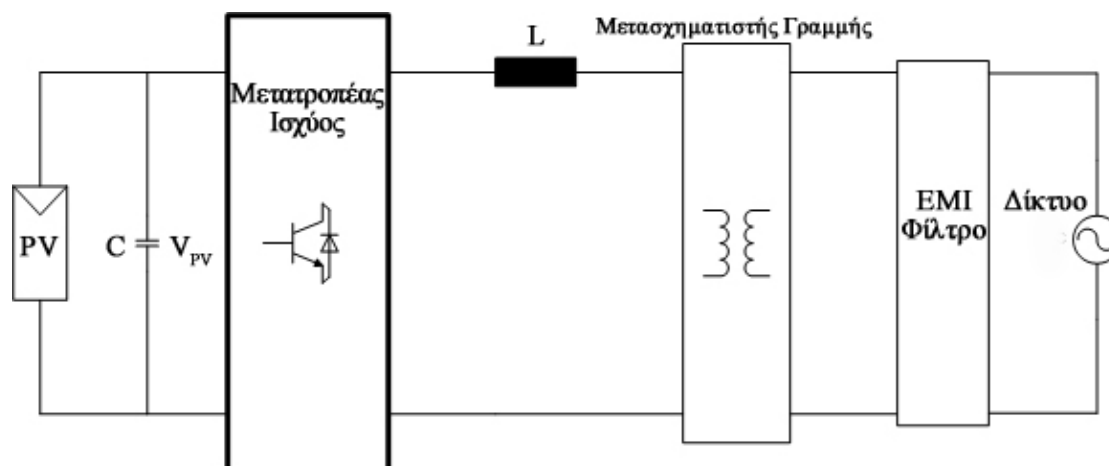
Στις αρχές του '80 η σύνδεση φωτοβολταϊκών συστημάτων στο ηλεκτρικό δίκτυο άρχισε να λαμβάνει μεγάλη προσοχή. Η συζήτηση σχετικά με την αγορά/πώληση, τα ποσοστά και το κόστος αυξήθηκε .

Μια άλλη μελέτη αντιμετώπισε τα ζητήματα απόρριψης φορτίου, της αρμονικής παραμόρφωσης και της επιλογικής προστασίας που παρουσιάζονται με τη κατανεμημένη φωτοβολταϊκή παραγωγή. Σε άλλες οι συντάκτες εκπονούν μελέτες ροής ισχύος σε εικονικά συστήματα κατανεμημένης παραγωγής και συμπεραίνουν:

- Η ισχύς που παράγεται από τη κατανεμημένη φωτοβολταϊκή παραγωγή μπορεί να υπερφορτώσει τον εξοπλισμό και τις γραμμές διανομής υπό συνθήκες μεταβαλλόμενου φορτίου.
- Η ενέργεια του φωτοβολταϊκού μπορεί να παρεμποδίσει τους ρυθμιστές τάσης υπό συνθήκες μεταβαλλόμενου φορτίου.
- Η άεργος ισχύς που καταναλώνεται από τους αντιστροφείς με μεταγωγή από το δίκτυο (line-commutated inverters) του φωτοβολταϊκού συστήματος αυξάνεται καθώς η τάση μειώνεται. Αυτή η άεργος ισχύς μειώνει την ικανότητα μεταφοράς των γραμμών διανομής.
- Φωτοβολταϊκά συστήματα οικιακού τύπου μπορεί να προκαλέσουν ασύμμετρες συνθήκες σε τριφασικά συστήματα.
- Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μέσω φωτοβολταϊκών συστημάτων μπορεί να παρεμποδίσει την εκκαθάριση σφαλμάτων .
- Προβλήματα που σχετίζονται με την ασφάλεια του προσωπικού μπορεί να προκύψουν από τη κατανεμημένη παραγωγή μέσω φωτοβολταϊκών.

Στα χρόνια που ακολούθησαν οι επιστημονικές μελέτες συνεχίστηκαν με συνεχώς αυξανόμενο ρυθμό πάνω σε θέματα ασφάλειας προσωπικού, προστασίας εξοπλισμού και ποιότητας ισχύος. Ως αποτέλεσμα η δημιουργία πολλών μονάδων παραγωγής από μερικά kW ως χιλιάδες kW.

3.3 Περιγραφή Φ/Β Συστήματος Συνδεδεμένου στο Δίκτυο



Σχήμα 3. 2 Τυπικό μοντέλο φωτοβολταϊκού συστήματος συνδεδεμένου στο δίκτυο

Το συνδεδεμένο στο δίκτυο φ/β σύστημα αποτελείται βασικά από μια φ/β γεννήτρια (σύνολο πλαισίων) και μια μονάδα μετατροπής ισχύος (αντιστροφέας). Το σχήμα 3.2 παρουσιάζει ένα τυπικό φ/β σύστημα που είναι συνδεδεμένο στο δίκτυο. Σε αυτό το μοντέλο παρατηρούμε έναν πυκνωτή C , ένα πηνίο L , έναν μετασχηματιστή, ένα φίλτρο EMI και το δίκτυο. Ο ρόλος όλων αυτών των στοιχείων θα περιγραφεί παρακάτω.

Ίσως το πιο σημαντικό τμήμα ενός φ/β συστήματος είναι η φωτοβολταϊκή γεννήτρια, που στο σχήμα συμβολίζεται ως "PV". Η φ/β γεννήτρια αποτελείται από ηλιακά κύτταρα που είναι συνδεδεμένα σε σειρά ή παράλληλα, ώστε να ικανοποιηθούν οι ενεργειακές ανάγκες. Ανάλογα με το μέγεθος της φ/β γεννήτριας, μπορεί να αποτελείται από πλαίσια (πλαίσιο είναι ένα σύνολο ορισμένων ηλιακών κυττάρων), panels (σύνολο πλαισίων) ή συστοιχίες (σύνολο panels). Η φ/β γεννήτρια παράγει μια συνεχή τάση V_{PV} , η οποία διατηρείται σταθερή με τη βοήθεια του πυκνωτή C .

Το επόμενο στάδιο είναι η μονάδα μετατροπής ισχύος και πιο συγκεκριμένα ο αντιστροφέας. Ο σχεδιασμός ενός συνδεδεμένου φωτοβολταϊκού συστήματος ξεκινάει με την επιλογή ενός κατάλληλου αντιστροφέα. Αυτός καθορίζει τη τάση του συστήματος από τη πλευρά του συνεχούς και τότε η φωτοβολταϊκή γεννήτρια μπορεί να διαμορφωθεί ανάλογα με τα χαρακτηριστικά εισόδου του αντιστροφέα. Ο αντιστροφέας είναι το πιο σημαντικό στοιχείο ενός φωτοβολταϊκού συστήματος ύστερα από τη φωτοβολταϊκή γεννήτρια. Η αρμοδιότητά του είναι να μετατρέπει το συνεχές ρεύμα που παράγεται από την συστοιχία σε ένα εναλλασσόμενο ρεύμα συχνότητας 50 ή 60 Hz (ανάλογα με το δίκτυο). Σε αντίθεση με τους αντιστροφείς που προορίζονται μόνο για αυτόνομα φωτοβολταϊκά συστήματα, αυτοί που προορίζονται για παράλληλη λειτουργία πρέπει να ανταποκρίνονται τόσο στα χαρακτηριστικά του δικτύου όσο και στην απόδοση της φ/β γεννήτριας εξίσου καλά.

Καθώς το ρεύμα από τις συστοιχίες ρέει μέσα από τον αντιστροφέα, τα χαρακτηριστικά του ουσιαστικά επηρεάζουν τη συμπεριφορά και την λειτουργία του φωτοβολταϊκού συστήματος.

Εκτός από την αποτελεσματική μετατροπή του συνεχούς σε εναλλασσόμενο ρεύμα, τα ηλεκτρονικά στοιχεία του αντιστροφέα περιλαμβάνουν επίσης στοιχεία που είναι υπεύθυνα για την ομαλή λειτουργία του συστήματος. Εξασφαλίζουν ότι η λειτουργία ξεκινάει τη κατάλληλη χρονική στιγμή της ημέρας μόλις οι φ/β συστοιχίες δώσουν αρκετή ισχύ. Αποτυχημένη προσπάθεια εκκίνησης απαιτεί ισχύ από το δίκτυο και θα πρέπει να αποφεύγεται. Κατά τη διάρκεια της ημέρας, το βέλτιστο σημείο λειτουργίας πάνω στη I-V χαρακτηριστική καμπύλη μετακινείται ανάλογα με τις διακυμάνσεις της ηλιακής ακτινοβολίας και της θερμοκρασίας της συστοιχίας. Μιας μορφής έξυπνου ελέγχου από τον αντιστροφέα περιλαμβάνει παρακολούθηση του σημείου μεγίστης ισχύος και συνεχή αναπροσαρμογή στο περισσότερο επιθυμητό σημείο λειτουργίας. Επίσης, στον αντιστροφέα είναι ενσωματωμένες συσκευές προστασίας, που τον αποσυνδέουν αυτομάτως από το σύστημα εάν προκύψουν ανωμαλίες στο δίκτυο ή στη φωτοβολταϊκή γεννήτρια.

Μετά τον αντιστροφέα παρατηρούμε το πηνίο γραμμής L , που απαιτείται για να ελέγξει το ρεύμα που εγχέεται στο δίκτυο. Ο αντιστροφέας περιλαμβάνει επίσης το μετασχηματιστή και το φίλτρο EMI. Τα πρώτα φ/β συστήματα που χρησιμοποιήθηκαν για οικιακή χρήση περιλάμβαναν έναν μονοφασικό αντιστροφέα με έναν μετασχηματιστή χαμηλής συχνότητας (Low Frequency - LF) που τοποθετείται μεταξύ του αντιστροφέα και του δικτύου. Αυτός ο μετασχηματιστής απαιτείται από πολλούς σχεδόν τους εθνικούς κανονισμούς και εγγυάται τη γαλβανική απομόνωση μεταξύ του δικτύου και των φ/β συστημάτων, παρέχοντας κατά συνέπεια προστασία. Επιπλέον, παρέχει απομόνωση μεταξύ του φ/β συστήματος και του εδάφους. Επίσης, εξασφαλίζει ότι κανένα συνεχές ρεύμα, που θα μπορούσε να προκαλέσει κορεσμό στον μετασχηματιστή διανομής, δεν εγχέεται στο δίκτυο. Τέλος, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να αυξήσει την τάση εξόδου των αντιστροφέων. Εντούτοις, οι μετασχηματιστές LF αυξάνουν το βάρος, το μέγεθος και το κόστος του φ/β συστήματος και μειώνουν την απόδοσή του.

Η εναλλακτική λύση είναι να αντικατασταθούν οι LF μετασχηματιστές με υψηλής συχνότητας (High Frequency - HF) μετασχηματιστές τοποθετημένους στο συνεχές τμήμα του αντιστροφέα. Με αυτό τον τρόπο, επιτυγχάνεται πάλι γαλβανική απομόνωση μεταξύ της φ/β γεννήτριας και του δικτύου. Οι μετασχηματιστές υψηλής συχνότητας έχουν μικρότερο βάρος, μέγεθος και κόστος. Εντούτοις, είναι πιο πολύπλοκοι και καμιά ουσιαστική βελτίωση δεν παρατηρείται στη γενική απόδοση του συστήματος.

Η εξέλιξη τεχνολογίας έχει καταστήσει πιθανό να παραληφθεί ο μετασχηματιστής χωρίς αντίκτυπο στα χαρακτηριστικά των συστημάτων όσον αφορά την ασφάλεια. Μερικές χώρες, όπως η Γερμανία, επιτρέπουν τώρα τη χρήση αντιστροφέων χωρίς μετασχηματιστή (transformerless) και άλλες σκέφτονται σοβαρά να αλλάξουν τους κανονισμούς σε αυτή την κατεύθυνση. Επομένως, είναι αρκετά πιθανό ότι πολλά από τα μελλοντικά φ/β συστήματα συνδεδεμένα στο δίκτυο να είναι χωρίς μετασχηματιστή.

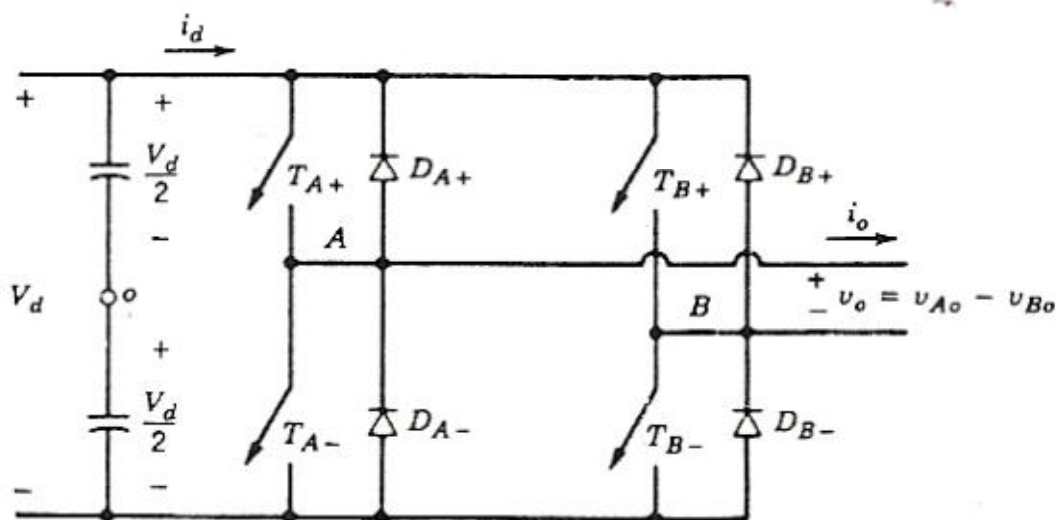
Τέλος, παρατηρούμε το EMI φίλτρο, το οποίο μειώνει την ανισορροπία μεταξύ των παρασιτικών χωρητικότητων του συστήματος, την ανισορροπία μεταξύ των τιμών των σύνθετων αντιστάσεων γραμμής, την έλλειψη συγχρονισμού στη διακοπτική λειτουργία των δύο σκελών της γέφυρας πλήρους κύματος, την ανισορροπία στη συμπεριφορά των διακοπών, καθυστερήσεις στους οδηγούς διακοπών. Αυτοί οι λόγοι κάνουν απαραίτητη τη χρήση φίλτρου EMI. Στην πραγματικότητα, οι τελευταίοι λόγοι θα μπορούσαν να οδηγήσουν σε ηλεκτρομαγνητική παρεμβολή στο φάσμα υψηλής συχνότητας.

3.4 Αντιστροφέας (inverter)

Όπως έχει ήδη αναφερθεί η τάση που παράγεται από τη φωτοβολταϊκή γεννήτρια είναι ακατάλληλη για την άμεση σύνδεση του φωτοβολταϊκού σταθμού στο δίκτυο διανομής ηλεκτρικής ενέργειας. Ο ρόλος του αντιστροφέα είναι η μετατροπή της συνεχούς τάσης που παράγεται από τα φωτοβολταϊκά στοιχεία σε εναλλασσόμενη, κατάλληλης τιμής και συχνότητας για σύνδεση στο δίκτυο. Οι αντιστροφέας DC/AC μπορεί να είναι είτε μονοφασικοί είτε τριφασικοί.

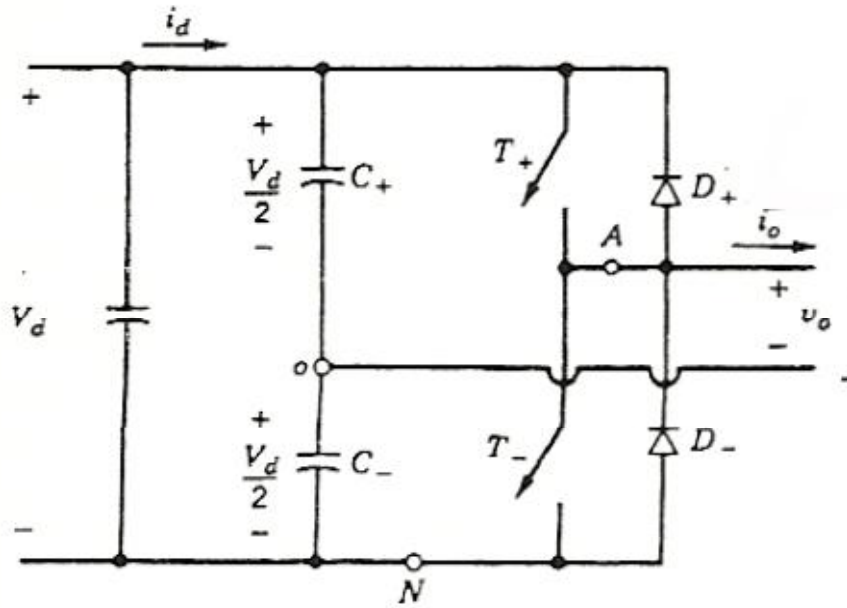
3.4.1 Μονοφασικός αντιστροφέας

Οι μονοφασικοί αντιστροφέας χωρίζονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες, ανάλογα με την τοπολογία τους σε αντιστροφέας ημιγέφυρας και πλήρους γέφυρας.



Σχήμα 3. 3 Μονοφασικός αντιστροφέας με πλήρη γέφυρα

Προτιμάται σε σχέση με άλλες διατάξεις όταν έχουμε υψηλότερες απαιτήσεις ισχύος. Αν τον συγκρίνουμε με τον αντιστροφέα με μισή γέφυρα (σχήμα 3.5), με την ίδια dc τάση εισόδου, η μέγιστη τάση εξόδου του αντιστροφέα με πλήρη γέφυρα είναι διπλάσια εκείνης του αντιστροφέα με μισή γέφυρα. Αυτό σημαίνει ότι για την ίδια ισχύ, το ρεύμα εξόδου και τα ρεύματα των διακοπών είναι το μισό εκείνων του αντιστροφέα με μισή γέφυρα. Σε υψηλά επίπεδα ισχύος, αυτό είναι ιδιαίτερο πλεονέκτημα, εφόσον απαιτεί λιγότερους παραλληλισμούς ημιαγωγικών στοιχείων.

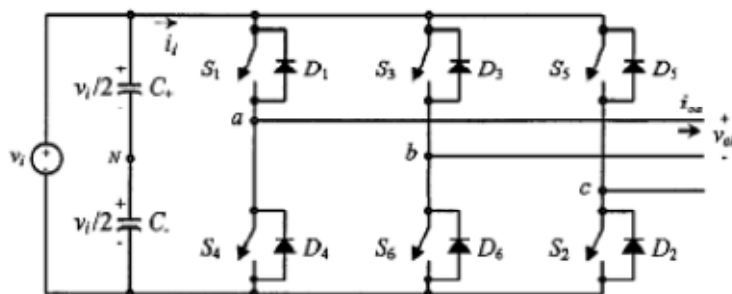


Σχήμα 3. 4 Μονοφασικός αντιστροφέας με μισή γέφυρα

Τα ζεύγη των διακοπών $(A+B-) T, T$ και $(A-B+) T, T$ από τα δύο σκέλη του σχήματος 3.4 αλλάζουν κατάσταση ως ζεύγη διακοπών 1 και 2 αντίστοιχα. Με το είδος αυτό της μετάβασης με Διαμόρφωση Εύρους Παλμών (Pulse Width Modulation –PWM), λαμβάνουμε την έξοδο του σκέλους A και την αντίθετη προς αυτή έξοδο του σκέλους B του αντιστροφέα. Για παράδειγμα, όταν ο $A+ T$ είναι κλειστός και η $A+ u$ ισούται με $2 V_d$, ο $B- T$ είναι επίσης κλειστός και $B+ u = -V_d$. Η V_d αντιστοιχεί στην V του μοντέλου μας.

3.4.2 τριφασικός αντιστροφέας

Οι τριφασικοί αντιστροφείς χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές μέσης και υψηλής ισχύος. σκοπός τους είναι να παρέχουν μια τριφασική πηγή τάσης ή έντασης, όπου το πλάτος, η φάση και η συχνότητα να είναι ανά πάσα στιγμή ελεγχόμενα.



σχήμα 3.5 Τριφασικός αντιστροφέας ελεγχόμενος από πηγή τάσης

Τα Φ/Β συστήματα με ισχύ κάτω από 5 KWp (ή κάτω από έκταση περίπου 50 τετραγωνικά μέτρα) γενικά αποτελούν μονοφασικά συστήματα και χρησιμοποιούν μονοφασικούς αντιστροφείς . Συστήματα με μεγαλύτερη ισχύ αποτελούν τριφασικό σύστημα .

3.5 Ανιχνευτές σημείου μέγιστης ισχύος

Για να αποδίδει το σύστημα μέγιστη ισχύ πρέπει να λειτουργεί στο σημείο μέγιστης ισχύος (ΣΜΙ) . Το ΣΜΙ αλλάζει σύμφωνα με τις κλιματικές συνθήκες . Ένας ανιχνευτής σημείου μέγιστης ισχύος εξασφαλίζει ότι ο αντιστροφέας προσαρμόζεται σε αυτό το σημείο . συνεπώς επειδή η τάση και το ρεύμα των ΦΒ στοιχείων ποικίλουν σημαντικά λόγω καιρικών συνθηκών θα πρέπει ο αντιστροφέας να αλλάζει το σημείο λειτουργίας του ώστε να επιτυγχάνει βέλτιστη λειτουργία . Ο ανιχνευτής σημείου μέγιστης ισχύος είναι ένα ηλεκτρονικό κύκλωμα το οποίο προσαρμόζει την τάση ώστε ο αντιστροφέας να λειτουργεί στο σημείο αυτό .

Η τεχνολογία της ανίχνευσης της μέγιστης ισχύος, άρχισε να χρησιμοποιείται σχετικά πρόσφατα στις εφαρμογές των φωτοβολταϊκών συστημάτων και αποτελεί πλέον χαρακτηριστικό κάθε καλού αντιστροφέα για σύνδεση με το δίκτυο ή φορτιστή συσσωρευτών. Σήμερα χρησιμοποιούνται πολυάριθμες τεχνικές και αλγόριθμοι για την εύρεση του σημείου μέγιστης ισχύος. Όλες αυτές οι τεχνικές μπορούν να ομαδοποιηθούν σε δυο μεγάλες κατηγορίες:

Έμμεσοι ανιχνευτές MPP .

Άμεσοι ανιχνευτές MPP .

3.5.1 Έμμεσοι ανιχνευτές MPP

Αυτοί οι ανιχνευτές προσεγγίζουν το σημείο μέγιστης λειτουργίας με βάση απλές υποθέσεις και έμμεσες μετρήσεις. Σύμφωνα με μία μέθοδο, η τάση λειτουργίας ρυθμίζεται ανάλογα με την εποχή του χρόνου. Μεγαλύτερες τιμές τάσης στο σημείο μέγιστης λειτουργίας αναμένονται τον χειμώνα, όπου οι θερμοκρασίες είναι χαμηλές, ενώ το καλοκαίρι οι τιμές της τάσης είναι σαφώς μικρότερες. Μια άλλη μέθοδος ρυθμίζει την τάση ανάλογα με την θερμοκρασία που αναπτύσσει το πλαίσιο. τέλος, μια τρίτη κάνει χρήση του γεγονότος ότι στα περισσότερα φωτοβολταϊκά στοιχεία ο λόγος τάσης στη μέγιστη ισχύ προς την τάση ανοιχτοκύκλωσης είναι σταθερός, δηλαδή:

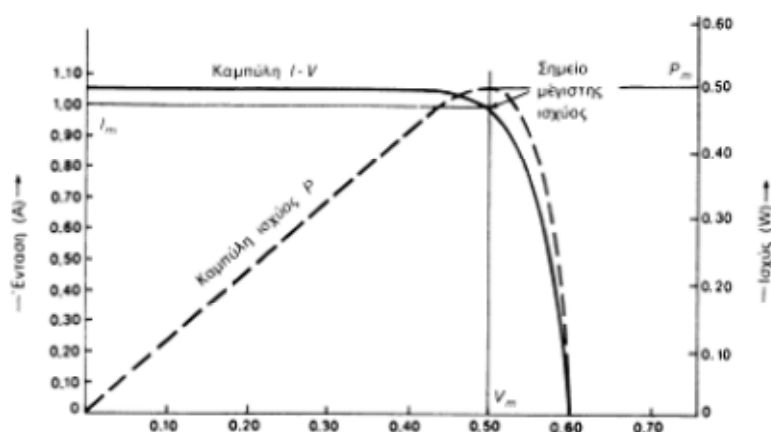
$$V_m/V_{oc}=K=\text{σταθερό}$$

Ένα φωτοβολταϊκό κύτταρο το οποίο παραμένει ανοιχτοκυκλωμένο τοποθετείται δίπλα από τις φωτοβολταϊκές συστοιχίες για να μετράται συνεχώς η τάση ανοιχτοκύκλωσης αυτού. Η τάση τότε των παραγωγικών φωτοβολταϊκών στοιχείων ρυθμίζεται κάθε στιγμή στο σημείο $K \cdot V_{oc}$, που εξασφαλίζει τη μέγιστη ισχύ.

3.5.2 Άμεσοι ανιχνευτές MPP

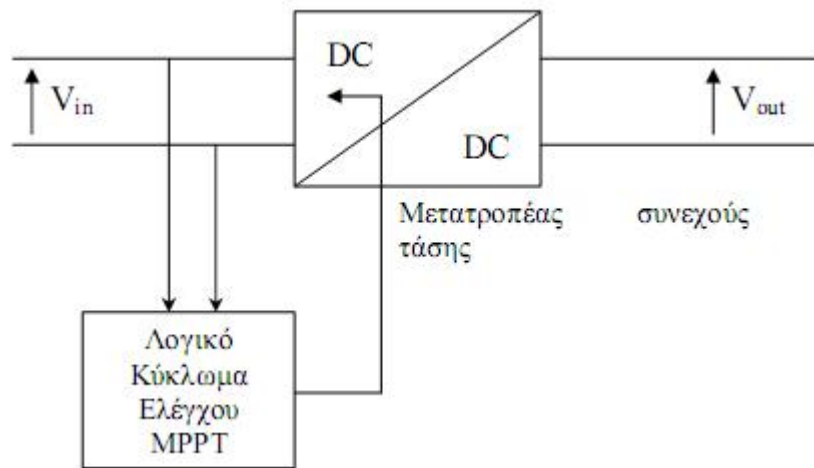
Η λειτουργία τους βασίζεται στη συνεχή παρακολούθηση των τιμών της τάσης και έντασης εξόδου των φωτοβολταϊκών γεννητριών, προκαλώντας ανά τακτά χρονικά διαστήματα μια διαταραχή της τάσης εξόδου αυτής. Αν διαπιστωθεί ότι με την αύξηση της τάσης αυξάνεται η ισχύς που παρέχει η γεννήτρια, τότε αυξάνουν την τάση προς τα πάνω ώσπου να έρθει μια ισορροπία. Αυτό είναι και το σημείο μέγιστης λειτουργίας.

Η ένταση που παράγεται από ένα φωτοβολταϊκό κύτταρο, δεν είναι σταθερή αλλά μεταβάλλεται αντίστροφα απ' ό,τι μεταβάλλεται η τάση. Για κάποιο συγκεκριμένο ζεύγος τάσης – έντασης, το κύτταρο δίνει τη μέγιστη ισχύ του. Ωστόσο, επειδή κάθε στιγμή η ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει στο κύτταρο δεν είναι σταθερή, ομοίως σταθερή δεν είναι και η τάση εξόδου του. Είναι λοιπόν επιθυμητό για κάθε στιγμή το φωτοβολταϊκό κύτταρο να μην παράγει την τάση και την ένταση όπως αυτά καθορίζονται από την αντίσταση του κυκλώματος που υπάρχει στα άκρα του, αλλά να δίνει στην έξοδο αυτό το ζεύγος τάσης – έντασης που μεγιστοποιεί την ισχύ του. Στο σχήμα 3.6 φαίνονται οι χαρακτηριστικές τάσης - έντασης και ισχύος ενός φωτοβολταϊκού κυττάρου.



σχήμα 3.6

Για να επιτευχθεί η λειτουργία στο σημείο μέγιστης ισχύος, χρησιμοποιείται ένα κύκλωμα DC/DC αντιστροφέα ανύψωσης - υποβιβασμού τάσης στα άκρα της ηλεκτρονικής συσκευής, στην οποία εισέρχεται η ισχύς της φωτοβολταϊκής συστοιχίας. Ένα απλό σχεδιάγραμμα DC/DC converter που χρησιμοποιείται για τον εντοπισμό της μέγιστης ισχύς εξόδου της φωτοβολταϊκής γεννήτριας φαίνεται παρακάτω.



Σχήμα 3.7 σχεδιάγραμμα DC/DC converter για εύρεση MPPT

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4ο: ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΠΟΥ ΠΡΟΚΥΠΤΟΥΝ ΚΑΤΑ ΤΗ 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 αντιμετώπισή 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

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.

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 περιελάμβανε 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.

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.

Οι μελλοντικές τεχνικές απαιτήσεις για τη σύνδεση κατανεμημένης (φωτοβολταϊκής) παραγωγής πρέπει να εξετάσουν ζητήματα ανοσοποίησης. Η εξέταση της γκριζας 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

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.

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).

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 απόζευξης ενάντια στις ανυψώσεις τάσης.

4.3.3 Βραχυκυκλώματα σε Ηλεκτρικές Εγκαταστάσεις

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.

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.

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 το 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 αντιστροφών, 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 απαγωγών υπέρτασης, απορροφούνται υψηλές ενέργειες και δημιουργούνται υψηλές υπερεντάσεις.

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

- Ο έλεγχος ρεύματος της γέφυρας εξόδου των αντιστροφών 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 αντοχής όλων των στοιχείων των αντιστροφών 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.

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

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.

Τα στοιχεία των αντιστροφέων 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 αντιστροφέων, 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).

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 (3η, 5η, 7η).

- 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:

- ο 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.

ο Σταθερή παραμόρφωση ρεύματος – μικρός αντίκτυπος: διάφοροι αντιστροφείς, για τους οποίους θεωρήθηκε μια μέση τιμή του THDI, παρουσίασαν σχετικά σταθερό THDI ανεξάρτητο από τη διαταραχή της κυματομορφής της τάσης. Δεν παρατηρήθηκε καμία σημαντική επίπτωση στη μορφή του ρεύματος λόγω της συνολικής αρμονικής παραμόρφωσης τάσης (THDU).

ο 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.

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 κατανεμημένα συστήματα φωτοβολταϊκής παραγωγής να διαδραματίζουν έναν σημαντικό ρόλο στα μελλοντικά δίκτυα διανομής (που θα στηρίζονταν πλήρως στη συμβολή της κατανεμημένης 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 κατανεμημένης 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 κατανεμημένα φορτία.

Ένα από τα προβλήματα ασφάλειας που μπορεί προκύψει σε κατανεμημένα 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 κατανεμημένου 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 κατανεμημένη φωτοβολταϊκή παραγωγή ή εάν υποθέσουν ότι η κατανεμημένη 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 κατανεμημένου 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 κατανεμημένων 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 κατανεμημένου 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 κατανεμημένο 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

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 αγωγούς 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 ποικίλουν 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 αγείωτο σύστημα 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 κατανεμημένα 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 αγείωτα 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 αντιληφθούν αυτά τα σφάλματα, τόσο σε γειωμένα όσο και αγείωτα φ/β συστήματα. Οι ανιχνευτές που χρησιμοποιούνται στα αγείωτα 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).

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.

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

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 επιλεχθεί 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 Χ.Τ 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 επηρεάζόταν σημαντικά η λειτουργία μιας χαρακτηριστικής προστασίας με ασφάλεια.

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 (Μ.Τ 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 Μ.Τ/Χ.Τ 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 αντιστροφικών, 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 καταναμημένης 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 καταναμημένη 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 καταναμημένης 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 καταναμημένη 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 καταναμημένης φωτοβολταϊκής παραγωγής πρέπει να επαναξιολογηθεί σε περίπτωση που μεταβληθούν οι μέθοδοι που γίνεται ο έλεγχος της καταναμημένης παραγωγής, για να ολοκληρώσουν άλλες λειτουργίες όπως η υποστήριξη τάσης.

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

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.

Προκειμένου να προετοιμαστεί η αγορά για μια υψηλότερη διείσδυση της καταναεμημένης 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 διαδικασιών συντήρησης, συνθήκες 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 λοιπόν μπορεί να εμφανιστεί λόγω των παρακάτω:

- 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:

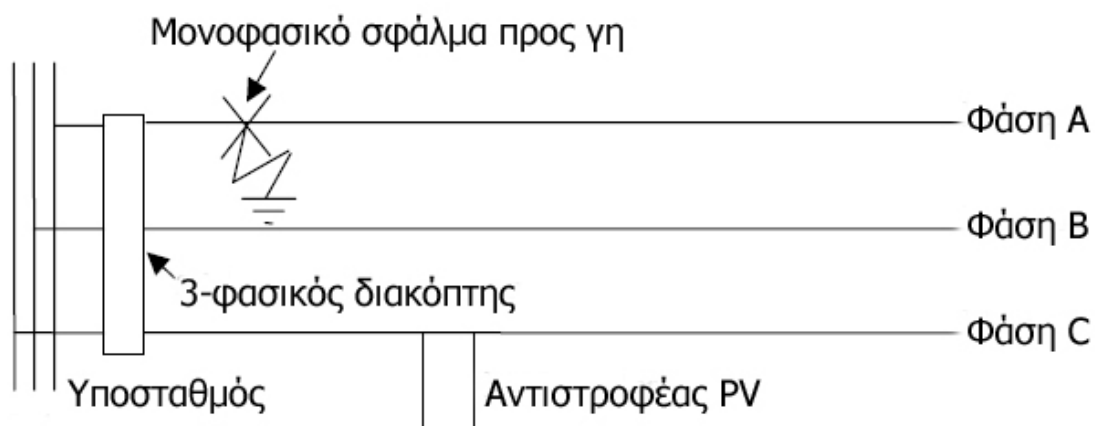
- Το δίκτυο δεν μπορεί να ελέγξει την τάση και τη συχνότητα στη νησίδα. Οι διακυμάνσεις τάσης ή συχνότητας μπορούν να προκαλέσουν ζημιά στον εξοπλισμό των πελατών. Οι ιδιοκτήτες των ηλεκτρικών δικτύων ανησυχούν γιατί θεωρούνται υπεύθυνοι για ζημιές στον ηλεκτρικό εξοπλισμό των πελατών τους, που συνδέονται 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.

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 A 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:
- 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:

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 αντιστροφή για μια ξαφνική αλλαγή

Ανίχνευση 3ης 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

Μέτρηση σύνθετης αντίστασης (Impedance Measurement)
Εγχείρει έναν παλμό στο δίκτυο για να διαπιστώσει αν υφίσταται πρόβλημα

Μέτρηση αρμονικής σύνθετης αντίστασης Στην οποία αρμονικές εγχέονται σκόπιμα για να
45
(Harmonic Impedance Measurement) 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 εγγραφούν 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 εγχέει 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.

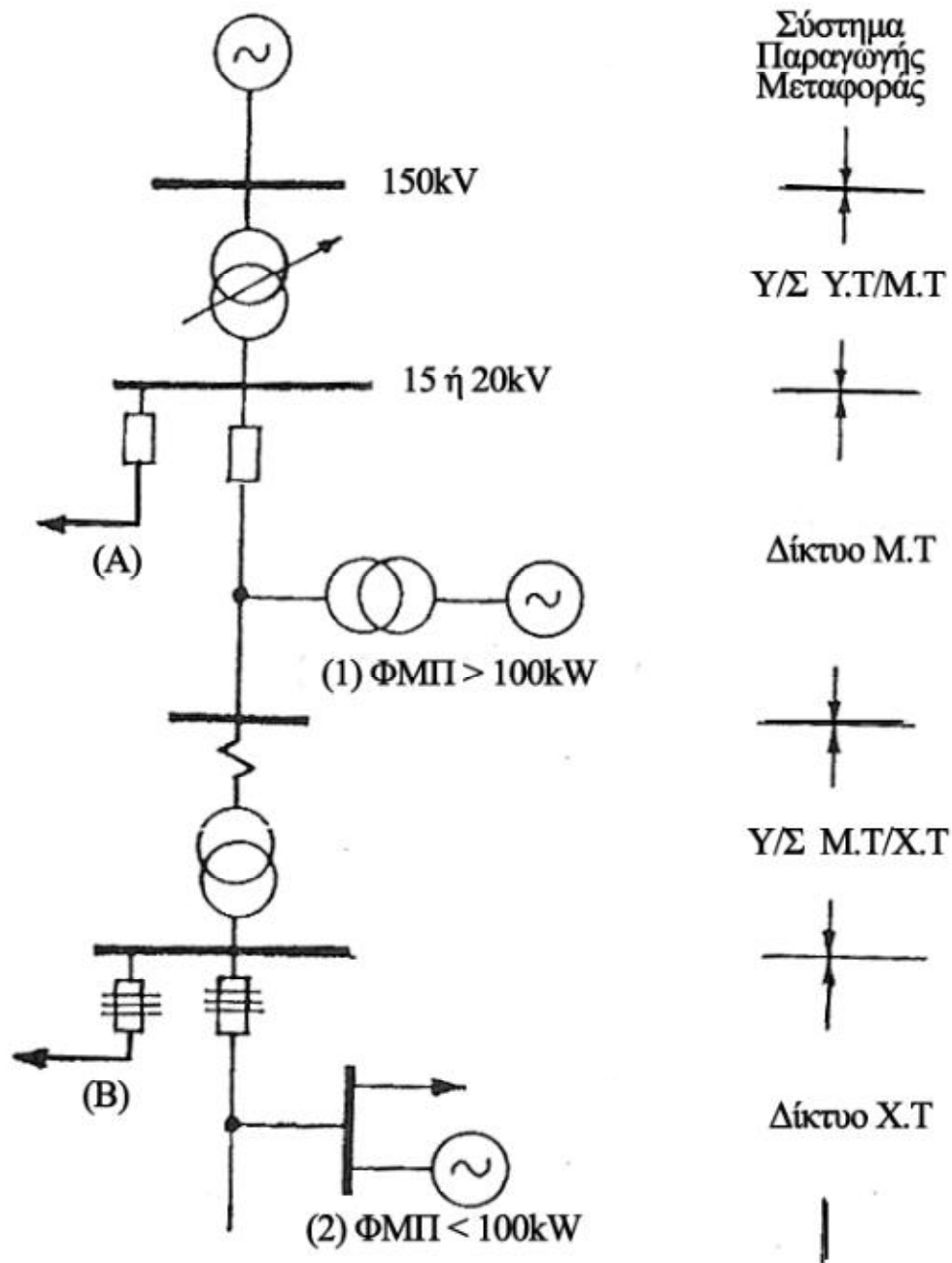
Οι μέθοδοι μετατόπισης τάσης και συχνότητας, συνήθως γνωστές ως μέθοδοι μετατόπισης τάσης και συχνότητας Sandia, προσπαθούν να θίξουν αυτές τις μεταβλητές με τη βοήθεια μιας θετικής ανάδρασης των μετρημένων τους μεταβλητών. Όταν εμφανίζεται μια κατάσταση νησιδοποίησης, οι γραμμές διανομής δεν διατηρούν 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 ευρύτετα 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.

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. Εξαίρεση 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 4.2).



Σχήμα 4. 2 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).

4.4.3 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 άεργου ισχύος.

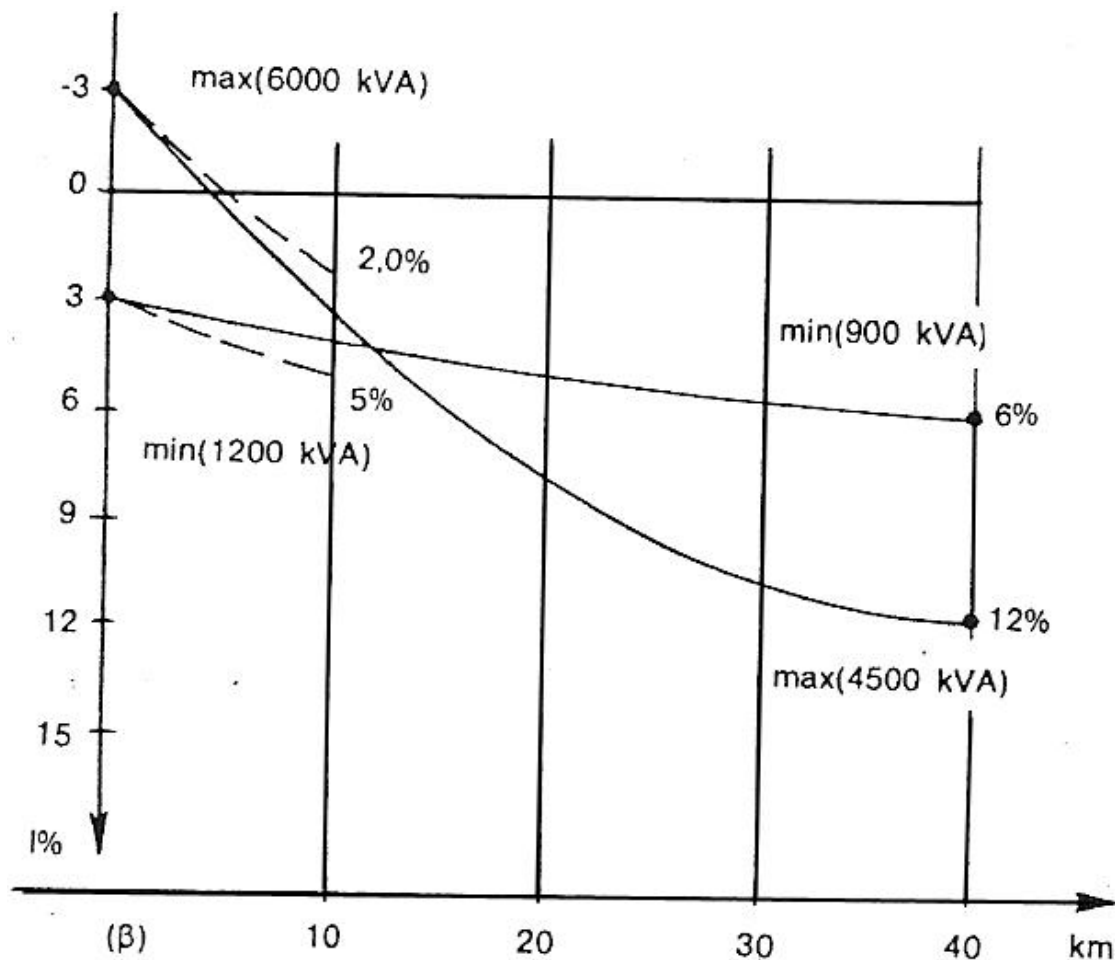
Η ισχύς χαμηλής ποιότητας μπορεί να έχει δυσμενείς συνέπειες στο δίκτυο και στα φορτία που τροφοδοτεί. Λίγα είναι γνωστά για τα αποτελέσματα των χαμηλών επιπέδων (π.χ 5~10%) στις αρμονικής παραμόρφωσης. Τα αρμονικά ρεύματα μπορούν να προκαλέσουν υψηλότερες θερμοκρασίες λειτουργίας στις μηχανές και στις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

4.4.3.1 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 Δ.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. 3 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 απόζευξή 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 καταναμημένου συστήματος. Εάν τα προβλήματα τάσης οφείλονται στην άεργο ισχύ της καταναμημένης 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 καταναμημένο σύστημα. Εντούτοις, οι στατικές συσκευές var αντιστάθμισης δεν είναι γενικά οικονομικές για μικρού μεγέθους καταναμημένα 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% διείσδυση 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 υποπευδύμαστε. 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).

Παρακάτω 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.

Επίπεδα τάσης και μέγιστος χρόνος διακοπής

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

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.

4.4.3.2 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.

4.4.3.3 Έγχυση Συνεχούς Ρεύματος στο Δίκτυο (Από τους Αντιστροφείς)

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 εγχέονται 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 κατανεμημένης 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 παραμένοντος 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.

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 2ης, 4ης, 6ης, 8ης και 10ης 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 μπορούσε να 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 προηγουμένως 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.

Συνιστώσα Συνεχούς Ρεύματος Αντιστροφών

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 2ης, 4ης, 6ης και 8ης 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 καταναμημένοι 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:
 - ο Μέγιστη DC έγχυση: 0.5% του ονομαστικού ρεύματος μετασχηματιστή, με εξαίρεση της μικρής κατανεμημένης παραγωγής
 - ο 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 αντιστροφών, 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 Χ.Τ 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 κατανεμημένη 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.

Όρια στην Έγχυση Συνεχούς Ρεύματος από τη Κατανεμημένη 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.

4.4.3.4 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 θερμοστρών, 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 var, το δίκτυο προσπαθεί να ικανοποιήσει τις ανάγκες για var 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 άεργου 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 άεργου 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 αντιστροφέας 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 αντιστροφέας 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 αντιστροφέα, καθώς η τάση και το ρεύμα ανιχνεύονται ήδη για άλλους σκοπούς

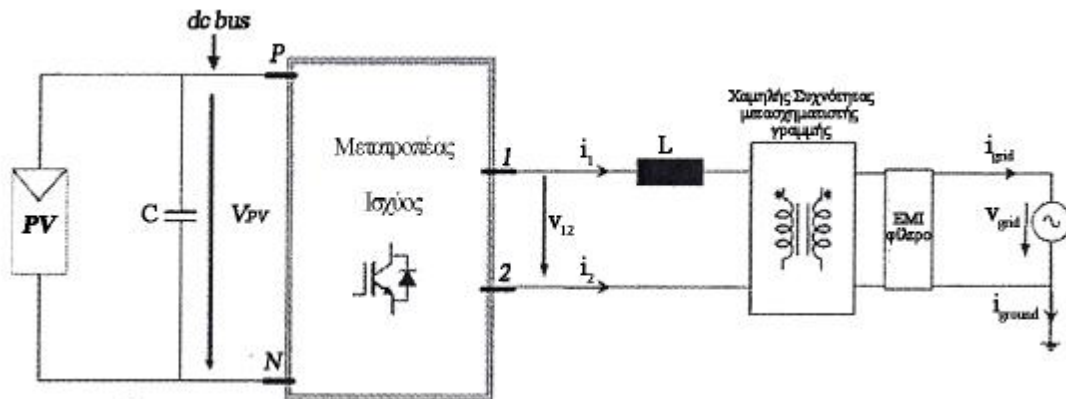
4.4.3.5 Ρεύματα Προς Γη (Μονοφασικό Φ/Β Σύστημα Χωρίς Μετασχηματιστή)

Τα πρώτα φ/β συστήματα που χρησιμοποιήθηκαν για οικιακή χρήση περιέλαβαν έναν μονοφασικό αντιστροφέα 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. 5 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, 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:

$$V_{cm}=(V_{1N}+V_{2N})/2$$

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

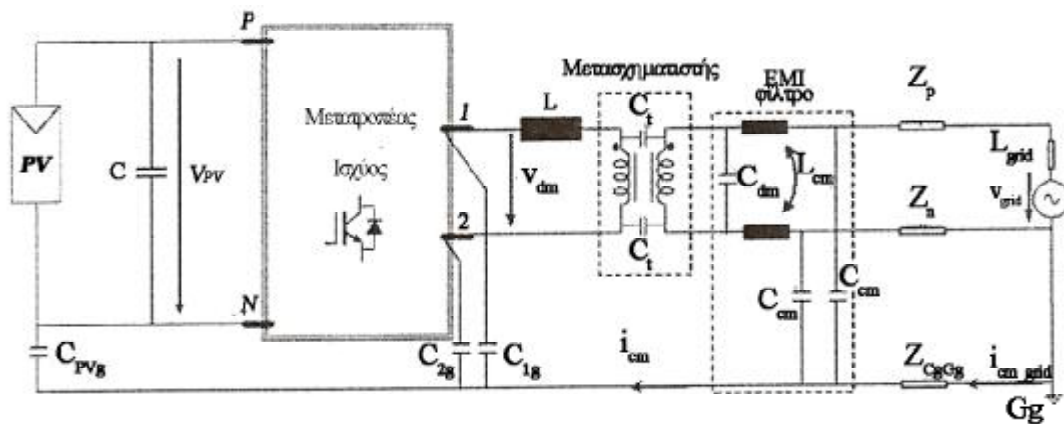
$$V_{dm}=V_{1N}-V_{2N}=V_{12}$$

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 (sT), επιλέγεται μια ιδιαίτερη ακολουθία των επιπέδων εξόδου μετατροπέων, και έπειτα μια συγκεκριμένη μέση τιμή της v_{dm} μεταξύ των τιμών $-p_v V$ και $p_v V$. Η διακοπτική συχνότητα ($ssf = 1/T$) 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, $p_v V$, 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 dmv 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 dmv . Υπάρχουν πολλαπλές τεχνικές διαμόρφωσης που παράγουν την ίδια θεμελιώδη συνιστώσα για τη dmv 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.



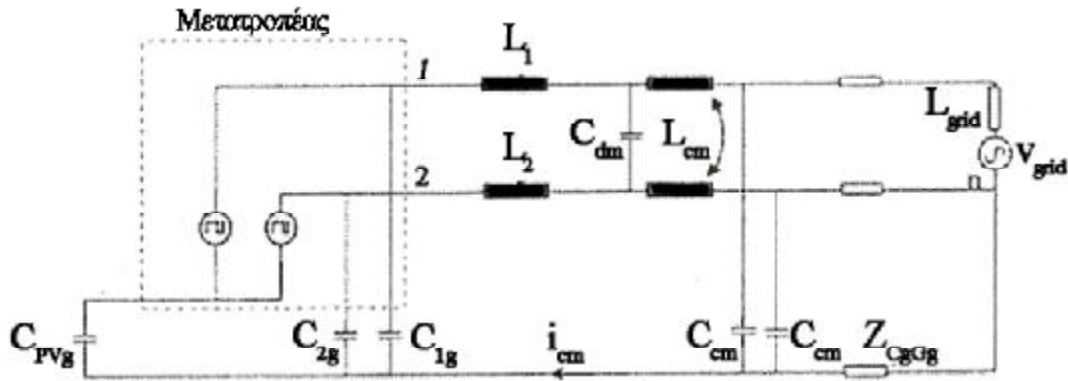
Σχήμα 4. 6 Απεικόνιση φωτοβολταϊκού συστήματος συμπεριλαμβανομένων των πιο σημαντικών παρασιτικών στοιχείων

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 $cm i$. Βεβαίως, η τιμή του common mode ρεύματος είναι μια συνάρτηση της common mode τάσης. Ωστόσο, η τιμή του $cm i$ δεν μπορεί να συναχθεί άμεσα από τη τιμή της $cm v$, δεδομένου ότι το $cm i$ επηρεάζεται από άλλες πηγές τάσης και στοιχεία όπως τα παρασιτικά στοιχεία του συστήματος. Το σχήμα 4.6 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 $pv_g C$ αντιπροσωπεύει

την παρασιτική χωρητικότητα μεταξύ του φωτοβολταϊκού πλαισίου και του εδάφους. Αυτή η χωρητικότητα είναι κατανομημένη σε όλη την επιφάνεια των φ/β γεννητριών. Μερικοί προτείνουν η $pV_g C$ 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 $pV_g C$ επηρεάζεται από τα χαρακτηριστικά της εγκατάστασης (τύπος εδάφους, υγρασία, σύνδεση στον μετατροπέα, κλπ). Η $g C_1$ και η $g C_2$ 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 $GcGg Z$ 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 $GcGg l$. Η $p Z$ και η $n Z$ είναι οι σύνθετες αντιστάσεις σειράς, επίσης επαγωγικές, της φάσης και των ουδέτερων αγωγών, αντίστοιχα. Τέλος, η $t C$ είναι η παρασιτική χωρητικότητα μεταξύ των τυλιγμάτων του μετασχηματιστή.

Όπως φαίνεται στο σχήμα 4.6, το ρεύμα $cm i$ 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 $cm i$ που σχετίζεται με τις χαμηλές και μέσες αρμονικές συχνότητας της $cm v$ μειώνεται αισθητά. Το φίλτρο EMI πρέπει να φιλτράρει μόνο τα τμήματα υψηλής συχνότητας της $cm v$, 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, $N v_1$ και $N v_2$, 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 4.6 αντικατασταθεί από αυτές τις πηγές τάσης, λαμβάνεται το μοντέλο του σχήματος 4.7.

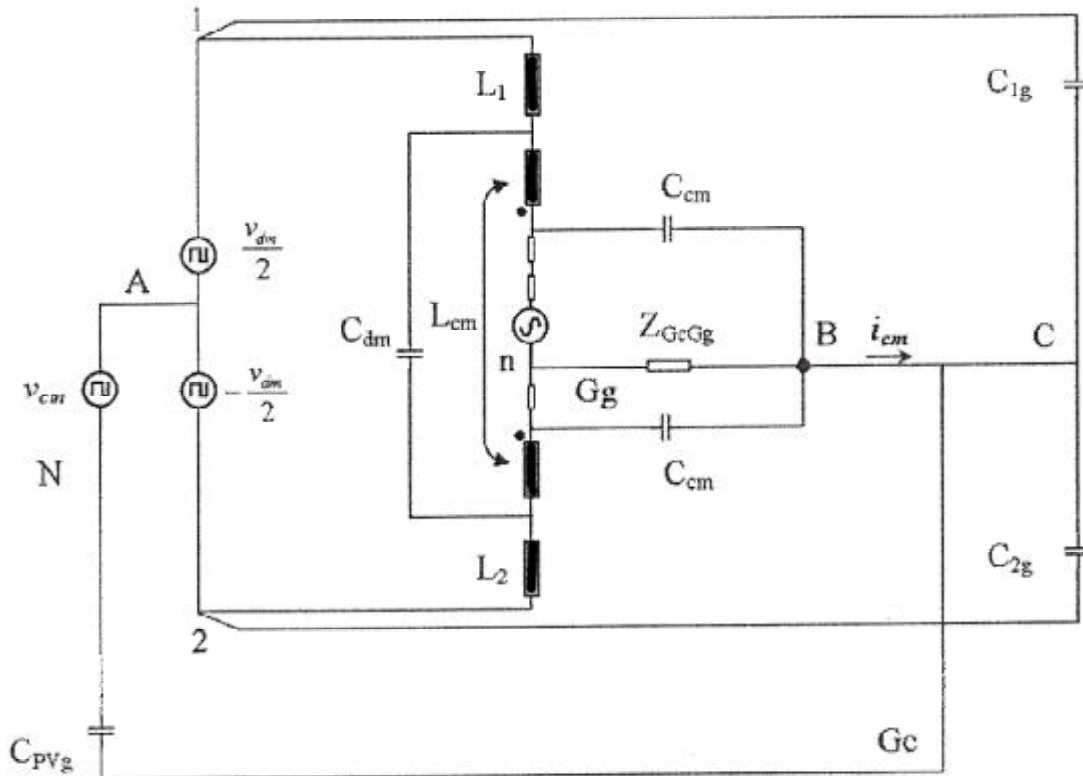


Σχήμα 4. 7 Μοντέλο φωτοβολταϊκού συστήματος με μετατροπέα πηγής τάσης

Το πηνίο γραμμής είναι χωρισμένο σε δύο μέρη, δηλαδή το ${}_1L$ (το μέρος που συνδέεται με τη φάση) και το ${}_2L$ (το μέρος που συνδέεται με τον ουδέτερο). Το ρεύμα i_{dm} , ρέει πάντα μέσω ολόκληρου του πηνίου γραμμής ${}_1L + L$. 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 ${}_1L$ και ${}_2L$ όπως φαίνεται στο σχήμα 4.7. Αυτό το κύκλωμα καθιστά δυνατή την ανάλυση τόσο του common όσο και του differential mode ζήτηματος.

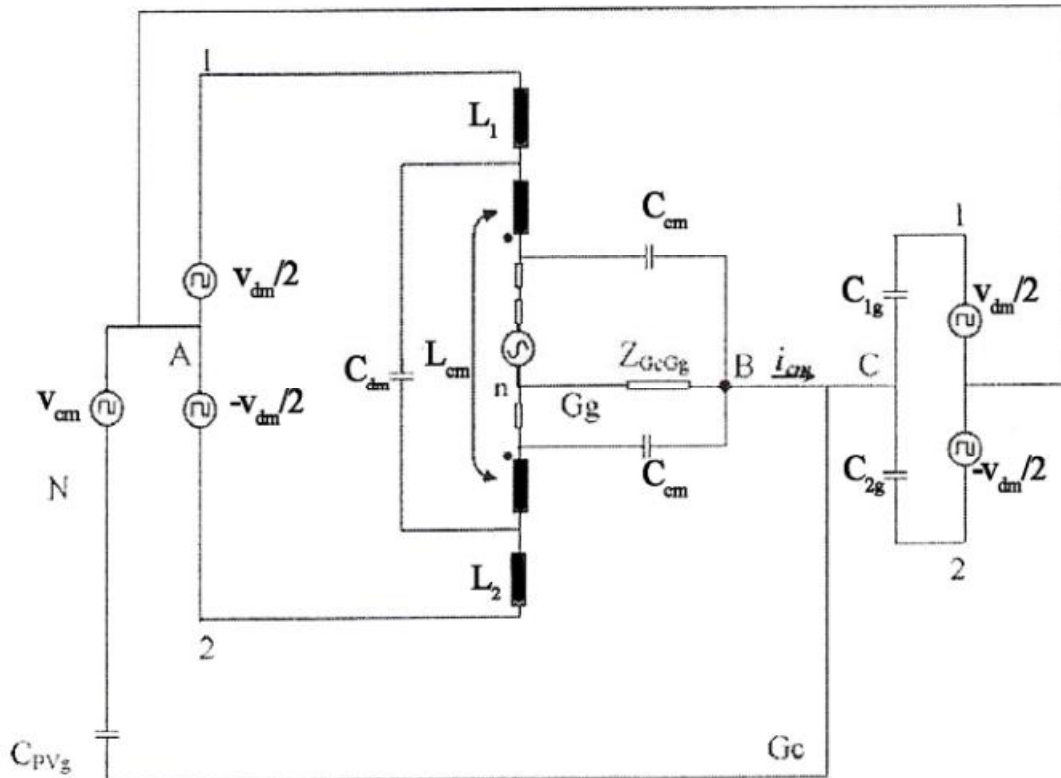
Για να αναπτυχθεί ένα καταλληλότερο μοντέλο για την ανάλυση του common mode, πρέπει να γίνει κάποια περαιτέρω εργασία στο κύκλωμα του σχήματος 4.7. Αρχικά, το μοντέλο που φαίνεται στο σχήμα 4.6, παρουσιάζεται στο σχήμα 4.7 με τους όρους $dm v$ και $cm v$. Δεδομένου ότι καμία απλοποίηση δεν εισήχθη στο μοντέλο, το κύκλωμα του σχήματος 4.7 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 4.8. 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 4.9 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 $cm L$. 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 4.9, λαμβάνεται το μοντέλο του σχήματος 4.10. Αυτό το μοντέλο χρησιμοποιείται για την ανάλυση common mode.



Σχήμα 4. 8 Μοντέλο φωτοβολταϊκού συστήματος σε σχέση με τις differential και common mode τάσεις του μετατροπέα

Το αναπτυγμένο μοντέλο περιλαμβάνει προφανώς τη πηγή τάσης $cm\ v$, αλλά και δύο πρόσθετες πηγές τάσης, την $s_1\ v$ και την $s_2\ v$. 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 $s_2\ v$ θα είναι κοντά στο μηδέν. Εν πάση περιπτώσει, ακόμα και όταν δεν υπάρχει συμμετρία, η συνεισφορά της $s_2\ v$ στο common mode ρεύμα για το χαμηλό και μέσο φάσμα συχνότητας αναμένεται να είναι πολύ λιγότερο σημαντική από αυτή των πηγών $s_1\ v$ και $cm\ v$. Αυτό οφείλεται στη χαμηλή τιμή των $g\ C_1$ και $g\ C_2$, σε σύγκριση με την $pv_g\ C$, 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 4.11. 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 $icm\ v$, 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 $pv_g\ C$ που παραμένει φορτισμένος στην τάση $icm\ v$.



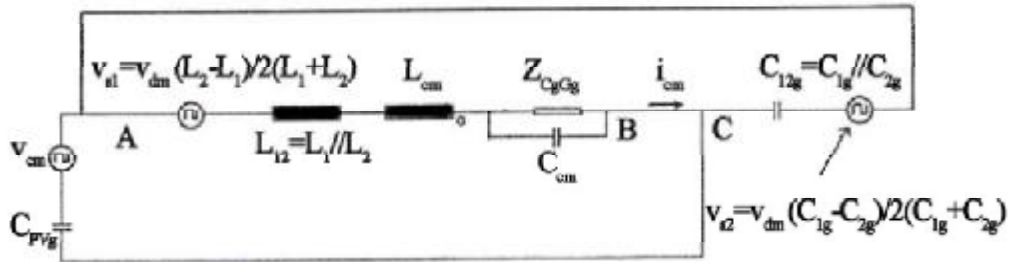
Σχήμα 4. 9 βήμα πριν λάβουμε το απλοποιημένο common mode μοντέλο

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

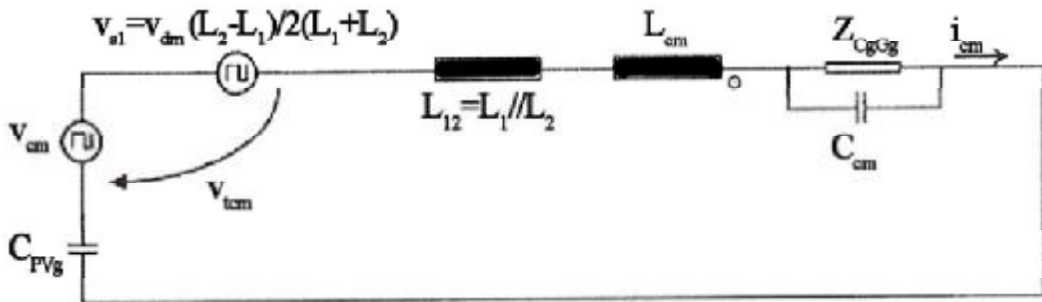
Ο μετατροπέας πλήρους κύματος είναι μια γνωστή τοπολογία τριών επιπέδων που παρέχει μια καλή εξισορρόπηση μεταξύ πολυπλοκότητας και απόδοσης. Ο FB μετατροπέας αποτελείται από δύο σκέλη, καθένα με δύο ελεγχόμενα transistors, συνήθως IGBTs και δύο διόδους. Το σχήμα 4.12 παρουσιάζει σε ένα φ/β σύστημα χωρίς 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 $2T$ και $4T$ είναι οι συμπληρωματικές καταστάσεις των $1T$ και $3T$, αντίστοιχα. Υπάρχουν μόνο τρία επίπεδα, δηλαδή τρεις διαφορετικές στιγμιαίες τιμές, για τη τάση differential mode ($0, pV, -pV$). Από τώρα και στο εξής, οι τέσσερις συνδυασμοί θα αναφέρονται με τη βοήθεια των διανυσμάτων τους ($N0, N, P, P0$).

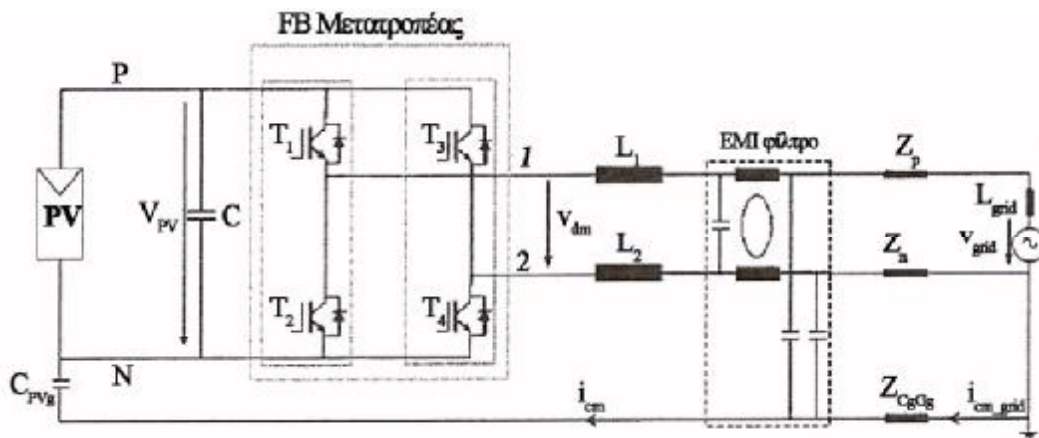
Οι καταστάσεις αγωγής των διακοπών καθορίζουν την τάση $dm v$ αλλά δεν παρέχουν αρκετές πληροφορίες για την ανάλυση της common mode συμπεριφοράς των φ/β συστημάτων. Με βάση το σχήμα 4.11 παρατηρούμε ότι $icm V$ είναι συνάρτηση των πηγών v_{cm} και $s1 V$.



Σχήμα 4. 10 Μοντέλο για το common mode



Σχήμα 4. 11 Τελικό μοντέλο για το common mode



Σχήμα 4. 12 Φωτοβολταϊκό σύστημα χωρίς μετασχηματιστή με μετατροπέα πλήρους κύματος

4.4.3.6 Πολλαπλοί Αντιστροφείς και Δίκτυο AC

Δεδομένου ότι τα μικρά φ/β συστήματα ηλεκτρικής παραγωγής γίνονται πιο κοινά, θα ήταν απαραίτητο να ερευνήσουμε τις διάφορες επιπτώσεις αυτής της συνεχόμενης διείσδυσης, 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 σφάλματος 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.

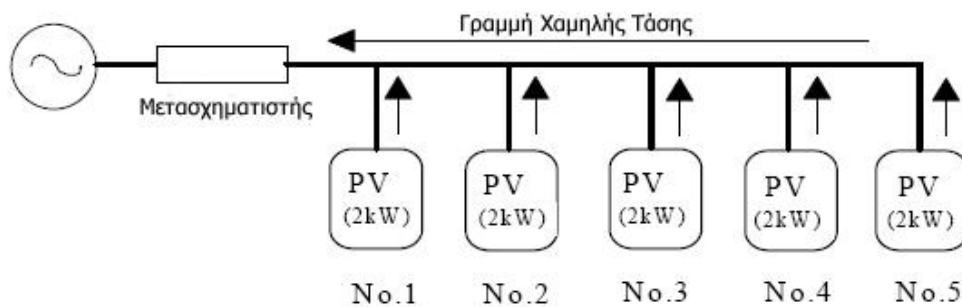
Γενικά κατά τη σύνδεση μεγάλου αριθμού φ/β συστημάτων:

- 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 σφάλματος για το φ/β σύστημα. Μια μέθοδος που ανιχνεύει την αλλαγή φάσης τάσης που εμφανίζεται σε κατάσταση σφάλματος μπορεί να είναι μια χρήσιμη επιλογή.

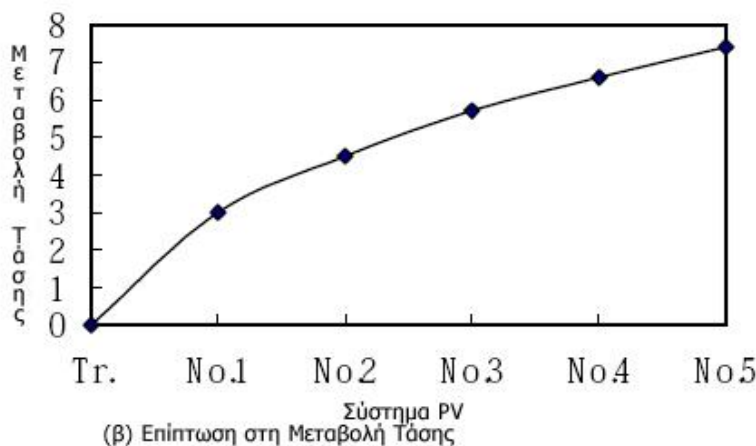
Επιπτώσεις και Αντιμετώπιση στην Περίπτωση Κανονικής Λειτουργίας.

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 4.13). 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

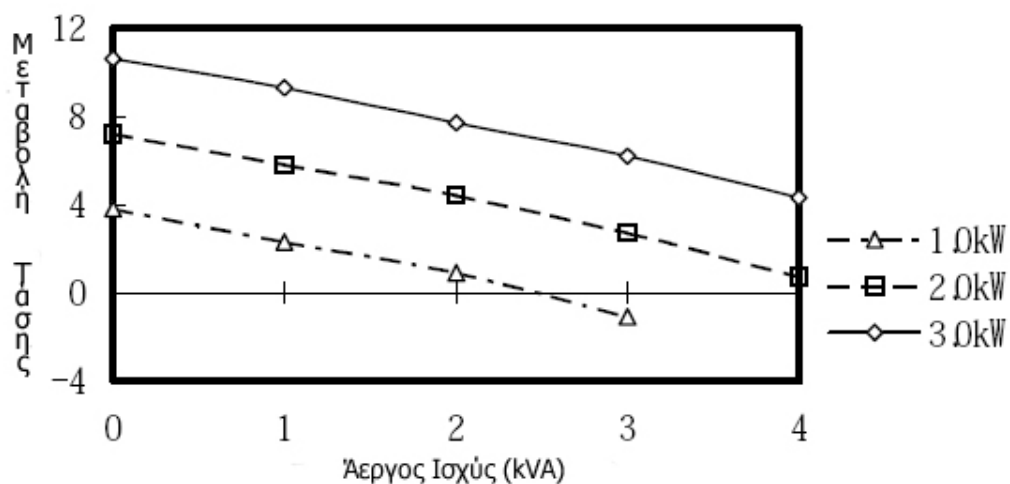
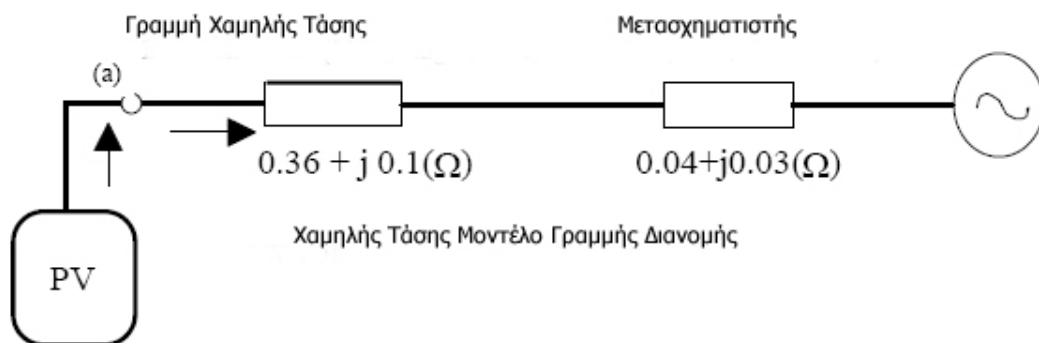


(β) Επίπτωση στη Μεταβολή Τάσης

Σχήμα 4. 13 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 αντιμετώπισουν 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 4.14. 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.

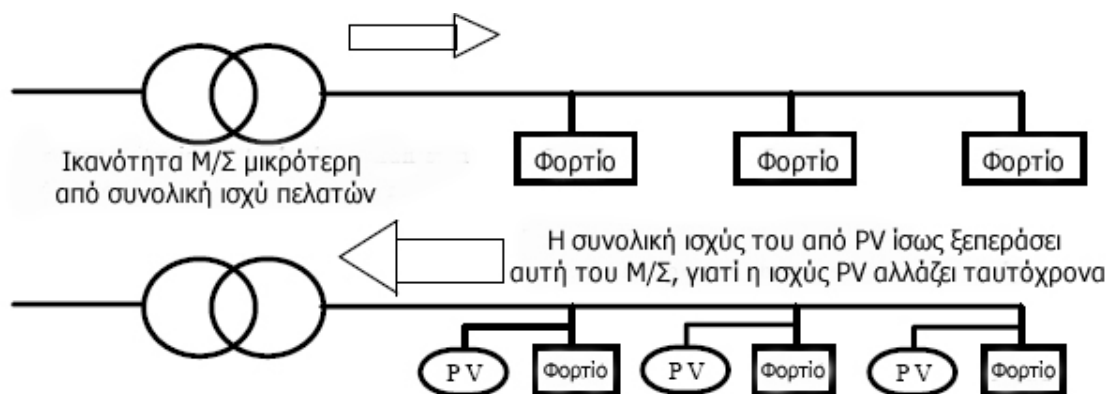


Σχήμα 4. 14 Μεταβολή τάσης μέσω ελέγχου άεργου ισχύος

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 4.15).



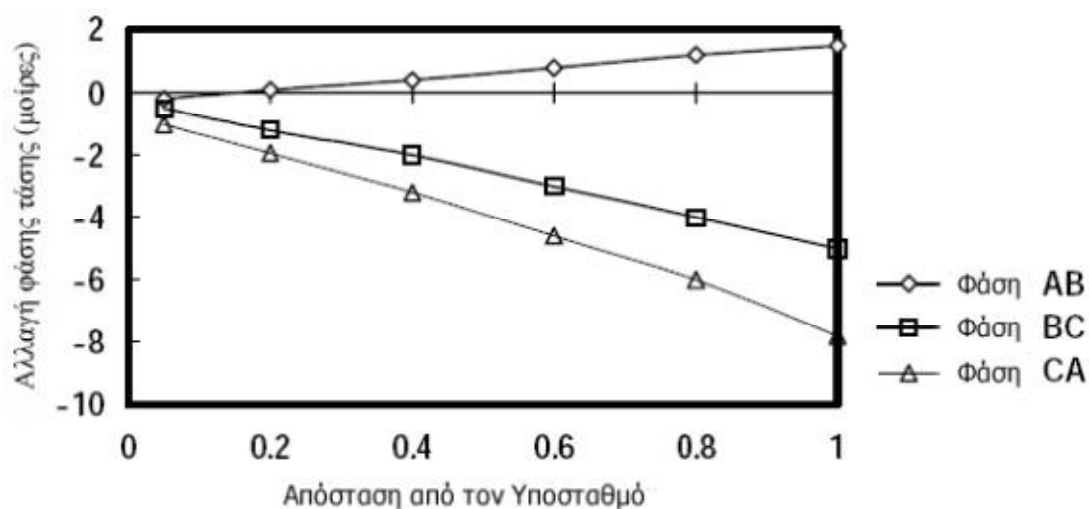
Σχήμα 4. 15 Επίδραση της αντίστροφης ροής ισχύος στην ισχύ του μετασχηματιστή

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

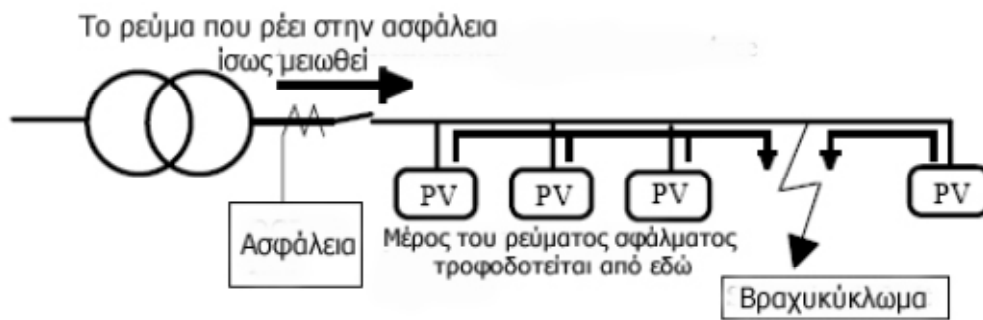
είναι εγκατεστημένοι στη πλευρά των πελατών, ίσως δεν θα είναι δυνατή η εκκαθάριση των σφαλμάτων στις ιδιοκτησίες των πελατών.

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 4.16.



Σχήμα 4. 16 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 4.17. Αυτό προκαλεί το φαινόμενο κατά το οποίο η ασφάλεια στον υποσταθμό να παραμείνει στην κατάσταση που είναι.



Σχήμα 4. 17 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

4.4.3.8 Αρμονικές

Το πρόβλημα με τις αρμονικές άρχισε να λαμβάνει ιδιαίτερη προσοχή από τη δεκαετία του '60 λόγω της αύξησης της χρήσης στατικών μετατροπέων, που επηρεάζουν άμεσα την ποιότητα της τροφοδότησης με ηλεκτρική ενέργεια.

Γενικά, το πρόβλημα των αρμονικών μπορεί να οριστεί ως εκείνη η ιδιαίτερη παραμόρφωση που, δημιουργούμενη από την παρουσία μη γραμμικών στοιχείων στα ηλεκτρικά δίκτυα, καθορίζει μια μόνιμη τροποποίηση των ημιτονοειδών κυματομορφών της τάσης και του ρεύματος, από την άποψη ότι οι ημιτονοειδείς συνιστώσες έχουν διαφορετική συχνότητα από τη θεμελιώδη.

Οι φ/β γεννήτριες συνδέονται με το δίκτυο διανομής μέσω των στατικών μετατροπέων και επομένως, είναι ενδεχομένως ικανές να προκαλέσουν αρμονικές, έτσι ώστε να υποβιβαστεί η ποιότητα της ηλεκτρικής ενέργειας και να επηρεαστεί η απόδοση άλλου εξοπλισμού ευαίσθητου στις αρμονικές τάσης. Από την άλλη, οι στατικοί μετατροπείς είναι ευαίσθητοι στις αρμονικές και μπορεί να λειτουργήσουν εσφαλμένα σαν αποτέλεσμα της αρμονικής παραμόρφωσης τάσης.

Από μελέτες προκύπτει ότι οι αρμονικές που εγχέονται είναι μικρό ποσοστό του ονομαστικού ρεύματος.

Οικιακά Φορτία. Τα κύρια φορτία που προκαλούν παραμορφώσεις είναι:

- Δέκτες τηλεοράσεων
- Συσκευές ελεγχόμενες από θυρίστορ (αυξομειωτές έντασης φωτισμού λαμπτήρων...)
- Λαμπτήρες φθορισμού
- Υπολογιστές

Αν και τα φορτία των κατοικιών που συνδέονται στο δίκτυο είναι περιορισμένης ισχύος, ο μεγάλος τους αριθμός συμβάλει σημαντικά στις αρμονικές του δικτύου. Η αρμονική συνιστώσα του ρεύματος από τον εξοπλισμό μπορεί να πλησιάσει το 100% και εάν είναι σε φάση με άλλες γεννήτριες μπορεί να προκαλέσει παραμόρφωση στην τάση του δικτύου περίπου της τάξης του 4%. Η παραμόρφωση είναι πιθανό να αυξηθεί περαιτέρω καθώς αυτές οι συσκευές πολλαπλασιάζονται.

Μετασηματιστές. Οι μετασηματιστές που λειτουργούν υπό κανονικές συνθήκες δεν συμβάλλουν σημαντικά στην τροφοδότηση των αρμονικών συνιστωσών στο δίκτυο. Εντούτοις, κατά τη διάρκεια της ενεργοποίησης (ακόμα και για περιττές αρμονικές) ή κατά τη διάρκεια μη κανονικής λειτουργίας, μπορούν να συμβάλουν σημαντικά στην αρμονική παραμόρφωση των όρων του δικτύου (3^η – 5^η – 7^η αρμονική).

Επιπτώσεις Αρμονικών

Οι αρμονικές μπορεί να προκαλέσουν απώλειες στο ηλεκτρικό δίκτυο και πιθανότατα ζημιά στον εξοπλισμό που είναι συνδεδεμένος σε αυτό. Αν και στα φ/β συστήματα είναι τυπικά μικρές, δεν θα πρέπει να αγνοούνται γιατί οι επιπτώσεις των αρμονικών είναι συσσωρευτικές. Ο σύγχρονος εξοπλισμός των αντιστροφών που λειτουργεί με τη μέθοδο PWM είναι τυπικά πολύ καλός, αφού παράγει πολύ λίγες αρμονικές. Ωστόσο, έχει φανεί πως σε συσκευές, όπως της τηλεόρασης, ότι πολύ μικρές πηγές αρμονικών μπορεί να έχουν μια σημαντική επίπτωση σε όλα τα επίπεδα του ηλεκτρικού δικτύου.

Οι κύριες επιπτώσεις των αρμονικών τάσης και ρεύματος στα διάφορα τμήματα του δικτύου είναι:

- Υπερβολικές τάσεις και ρεύματα συνεπεία του συντονισμού σειράς και του παράλληλου συντονισμού.
- Μείωση της απόδοσης των συστημάτων .
- Ζημιά στη μόνωση των συστημάτων με επακόλουθο τη μείωση του χρόνου ζωής τους.
- Ανακριβής λειτουργία μονάδων του ηλεκτρικού συστήματος.

Συντονισμός. Η παρουσία πυκνωτών σε ένα σύστημα μπορεί να προκαλέσει παράλληλο συντονισμό με πιθανή ζημιά στα συνιστώσα στοιχεία του συστήματος και ειδικότερα στους ίδιους τους πυκνωτές.

Στην πραγματικότητα, εάν η συχνότητα που αντιστοιχεί στον παράλληλο συντονισμό συμπίπτει με το ρεύμα που παράγεται από το μη γραμμικό φορτίο, εμφανίζεται μια ενίσχυση των τάσεων πέρα από το κλάδο συντονισμού του οποίου το πλάτος εξαρτάται από τις ωμικές παραμέτρους του συστήματος που λειτουργούν ως διατάξεις απόσβεσης. Εκτός από τον παράλληλο συντονισμό, που χαρακτηρίζεται από μια υψηλή σύνθετη αντίσταση στις πηγές αρμονικών στη συχνότητα συντονισμού, μπορεί επίσης να υπάρξει συντονισμός σειράς, που χαρακτηρίζεται από μια χαμηλή σύνθετη αντίσταση στις πηγές αρμονικών τάσης που εμφανίζονται στο δίκτυο.

Επιπτώσεις στις Περιστρεφόμενες Μηχανές. Οι αρμονικές προκαλούν δύο τύπους προβλημάτων για τις περιστρεφόμενες μηχανές:

- Ο πρώτος σχετίζεται με τις εναλλαγές της ηλεκτρομηχανικής ροπής και μπορεί να προκαλέσει καταπόνηση στα μηχανικά μέρη.
- Ο δεύτερος συνδέεται με την αύξηση τόσο των απωλειών σιδήρου (της τάξης μερικών ποσοστιαίων μονάδων), όσο και των απωλειών χαλκού. Μάλιστα, μπορεί να προκληθεί μια αξιοπρόσεχτη αύξηση στη θερμοκρασία των τυλιγμάτων.

Επιπτώσεις στους Μετασχηματιστές. Η κύρια επίδραση των αρμονικών στους μετασχηματιστές είναι μια αύξηση στις απώλειες σιδήρου και χαλκού. Φυσικά, τέτοια αποτελέσματα συναντώνται περισσότερο στην περίπτωση της τροφοδότησης μετασχηματιστών μη γραμμικών φορτίων όπως οι στατικοί μετατροπείς. Άλλη μια σημαντική επίπτωση που πρέπει να σημειωθεί είναι η πιθανή κυκλοφορία αρμονικών

ρευμάτων μηδενικής ακολουθίας σε τυλίγματα (τρίγωνο), που μπορεί να προκαλέσουν υπερθέρμανση του μετασχηματιστή.

Επιπτώσεις στους Πυκνωτές. Η κύρια επίπτωση των αρμονικών στους πυκνωτές είναι η αύξηση των απωλειών με μια επακόλουθη αύξηση στη θερμοκρασία που οδηγεί στη θερμική αστοχία. Επιπλέον, οι πυκνωτές έχουν επιπτώσεις στη παραμόρφωση τάσης στους κόμβους που συνδέονται, ιδιαίτερα κατά τη διάρκεια καταστάσεων συντονισμού. Σε αυτή τη περίπτωση, μπορεί να καθοριστεί η αύξηση των αρμονικών ρευμάτων με την επακόλουθη αύξηση των απωλειών και την πιθανή καταστροφή των ίδιων πυκνωτών.

Οι πυκνωτές υψηλής τάσης είναι ιδιαίτερα ευαίσθητοι σε μικρές υπερτάσεις. Είναι κοινή πρακτική να παρεμβάλουμε ένα πηνίο σε σειρά με τους πυκνωτές διόρθωσης συντελεστή ισχύος για να αποσυντονίσει το κόμβο που συνδέεται ο πυκνωτής. Αρμονικά ρεύματα που είναι κοντά στη συχνότητα συντονισμού μπορούν να προκαλέσουν αρκετά υψηλές τάσεις στο τέλος του πυκνωτών και να τους καταστρέψουν.

Επιπτώσεις στα Καλώδια. Όσον αφορά στα καλώδια, οι αρμονικές ρεύματος παράγουν μια αύξηση στις απώλειες λόγω του φαινομένου Joule που προκαλείται από τη σχετική με τη συχνότητα αύξηση στην εναλλασσόμενη αντίσταση του καλωδίου. Κατά συνέπεια, σημαντική μείωση της ζωής καλωδίων μπορεί να εμφανιστεί. Είναι λοιπόν χαρακτηριστική η αύξηση στις απώλειες .

Επιπτώσεις στους Ηλεκτρονόμους, τους Διακόπτες και τις Ασφάλειες. Οι αρμονικές μπορούν να επηρεάσουν τους ηλεκτρονόμους με διάφορους τρόπους με πιθανό επακόλουθο τη δυσλειτουργία τους. Ηλεκτρονόμοι που είναι ευαίσθητοι στην τάση και οι τιμές κορυφής ρεύματος ή/και η τάση και το ρεύμα που περνάει το μηδέν, επηρεάζονται σαφώς από την παρουσία της αρμονικής παραμόρφωσης (φαίνεται ότι αρμονικές 10-20% είναι ικανές να προκαλέσουν δυσλειτουργίες στη λειτουργία των ηλεκτρονόμων). Οι αρμονικές συνιστώσες μπορούν να έχουν μια μη αμελητέα επίδραση στη λειτουργία των διακοπών, δεδομένου ότι μπορούν να προκαλέσουν υψηλό παραμορφωμένο ρεύμα, καθιστώντας έτσι την διακοπή του ρεύματος δυσκολότερη. Τα αρμονικά ρεύματα μπορούν να προκαλέσουν υπερβολική θέρμανση των ασφαλειών, υποβιβάζοντας τα χαρακτηριστικά λειτουργίας τους.

Επιπτώσεις στους Στατικούς Μετατροπείς. Οι στατικοί μετατροπείς παράγουν τις αρμονικές αλλά μπορούν επίσης να επηρεαστούν από την παρουσία των αρμονικών τάσης στο δίκτυο. Στην πραγματικότητα, οι πυκνωτές και τα φίλτρα μπορεί να υποβάλλονται σε μια θερμική καταπόνηση ισχυρότερη από αυτή που προβλέπεται με βάση το σχεδιασμό λόγω των αρμονικών ρευμάτων που παρέχονται από το δίκτυο. Επιπλέον, οι αρμονικές στο δίκτυο μπορούν να επηρεάσουν τον έλεγχο των στατικών μετατροπέων όταν ο ίδιος ο έλεγχος βασίζεται στην ανίχνευση του μηδενισμού προκαλώντας, παραδείγματος χάριν, λάθος έναυση ή σφάλμα μεταγωγής.

Επιπτώσεις στους Μετρητές και τις Ηλεκτρονικές Συσκευές. Οι αρμονικές έχουν επιπτώσεις στη λειτουργία των μετρητών ενέργειας. Στην πραγματικότητα, οι αρμονικές παράγουν πρόσθετη ροπή και προκαλείται αύξηση στην ταχύτητα των εσωτερικών δίσκων. Ειδικότερα, έχει παρατηρηθεί ότι σε περίπτωση φορτίων ελεγχόμενα από θυρίστορ, η ένδειξη των μετρητών είναι υψηλότερη από την αναμενόμενη κατά μερικές ποσοστιαίες μονάδες επειδή το ρεύμα τροφοδότησης (50 - 60 Hz) είναι μεγαλύτερο εξαιτίας του αρμονικού περιεχομένου:

$$I_{\text{supply}} = I_{\text{load}} + I_{\text{hload}}$$

Έτσι ο μετρητής τείνει να κινηθεί πιο γρήγορα. Τέλος, συσκευές όπως οι τηλεοπτικές, PCs ή άλλος ηλεκτρονικός εξοπλισμός, συμβάλλει στην παραγωγή των αρμονικών διαταραχών, αλλά μπορούν επίσης να επηρεάζονται από την παρουσία αρμονικών στο δίκτυο διανομής. Παραδείγματος χάριν, για να αποφευχθεί πιθανή ασταθής λειτουργία, οι υπολογιστές απαιτούν γενικά ένα εναλλασσόμενο ρεύμα που περιέχει αρμονικές όχι περισσότερο από 5%.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Σκοπός της πτυχιακής εργασίας είναι η παρουσίαση των προβλημάτων που προκύπτουν κατά τη σύνδεση στο δίκτυο ενός φ/β συστήματος.

Η συσσωρευμένη εμπειρία σχετικά με την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από καταναμημένα φ/β συστήματα έχει ωριμάσει πολύ κατά την τελευταία δεκαετία. Αυτό, σε συνδυασμό με τη βελτίωση της απόδοσης και της αξιοπιστίας καθιστά τα συνδεδεμένα στο δίκτυο φ/β συστήματα περισσότερο ανταγωνιστικά από ποτέ.

Η σύνδεση όμως στο δίκτυο δημιουργεί προβλήματα, τόσο τεχνικής όσο και μη τεχνικής φύσεως. Ως κυριότερο μη τεχνικό πρόβλημα αναφέρεται το κόστος των φ/β συστημάτων, το οποίο παραμένει ακόμα υψηλό.

Όσον αφορά τα τεχνικά προβλήματα, αυτά διαχωρίζονται:

Στα προβλήματα που προκαλεί το δίκτυο στα συνδεδεμένα φ/β συστήματα.

Στα προβλήματα που προκαλούν τα συνδεδεμένα φ/β συστήματα στο δίκτυο.

Πιο συγκεκριμένα, για την πρώτη περίπτωση έχουμε:

- Διακυμάνσεις στη τάση (ανυψώσεις και βυθίσεις). Οι αιτίες που προκαλούν αυτές τις διακυμάνσεις σχετίζονται με σφραγματικές καταστάσεις ή με τη σύνδεση – αποσύνδεση μεγάλων φορτίων ή την ενεργοποίηση μιας συστοιχίας πυκνωτών.
- Βραχυκυκλώματα (σε διάφορα σημεία του δικτύου), που οδηγούν σε υπερτάσεις και υπερεντάσεις στην καταναμημένη φ/β παραγωγή.
- Ανώτερες και ενδιάμεσες αρμονικές, οι οποίες ασκούν ένα ευρύ φάσμα επιδράσεων τόσο στον εξοπλισμό όσο και στους πελάτες του ηλεκτρικού συστήματος και φυσικά στη φ/β παραγωγή. Επιδράσεις όπως διακυμάνσεις τάσης, θερμική καταπόνηση στους μετασχηματιστές, διαταραχή των στοιχείων προστασίας κ.α είναι χαρακτηριστικές.

Όσον αφορά τη δεύτερη περίπτωση, σαν σημαντικότερα προβλήματα έχουμε:

- Ανύψωση τάσης και διακυμάνσεις τάσης. Τα καταναμημένα φ/β συστήματα προκαλούν ανυψώσεις τάσης στο σημείο της σύνδεσης, γεγονός που περιορίζει τα επίπεδα ισχύος. Ωστόσο, έχουν αναπτυχθεί εμπορικές λύσεις που προλαμβάνουν τις ανεπιθύμητες υπερτάσεις. Για αντιστροφείς που λειτουργούν σε ασθενή δίκτυα, θα χρειαστεί στο μέλλον να ενσωματωθούν λειτουργίες ρύθμισης τάσης. Οι διακυμάνσεις τάσης που οφείλονται στις μεταβαλλόμενες συνθήκες λειτουργίας των φ/β συστημάτων (π.χ σύννεφα που περνούν), δεν ασκούν ουσιαστικά καμιά επίδραση στη τάση των δικτύων εξαιτίας του αργού ρυθμού μεταβολής.

- Νησιδοποίηση. Η πιθανή δημιουργία νησιδοποίησης στα δίκτυα διανομής με καταναμημένα φ/β συστήματα είναι ένα από τα πιο σημαντικά ζητήματα. Ωστόσο, έρευνες έχουν δείξει ότι με την υπάρχουσα τεχνολογία και τεχνογνωσία, η νησιδοποίηση δεν θα πρέπει να θεωρείται περιοριστικός παράγοντας για την περαιτέρω ανάπτυξη της καταναμημένης παραγωγής. Υπάρχει ακόμα απόκλιση στα συστήματα προστασίας που χρησιμοποιούνται στις διάφορες χώρες, πράγμα που επιβραδύνει την ανάπτυξη πολιτικών συνένωσης των διάφορων δικτύων. Γεγονός

είναι ότι το πρόβλημα της νησιδοποίησης στα φωτοβολταϊκά συστήματα που είναι συνδεδεμένα στο δίκτυο δεν έχει επιλυθεί πλήρως. Επίσης, δεν υπάρχει κάποια μέθοδος πρόληψης νησιδοποίησης που να είναι ταυτόχρονα πρακτική, αποδοτική και οικονομική.

- Συμβολή στην ικανότητα βραχυκυκλώματος. Σε αστικές περιοχές που χρησιμοποιούν υπόγεια καλωδιακά δίκτυα, τα ρεύματα από τα φ/β συστήματα είναι μικρά σε σχέση με τα ρεύματα βραχυκύκλωσης του δικτύου. Επομένως, δεν αναμένεται καμία δυσμενής συνέπεια στην εκκαθάριση σφαλμάτων. Μόνο κάτω από υψηλή διείσδυση της καταναεμημένης φ/β παραγωγής, στην περίπτωση σφαλμάτων που εμφανίζονται στο τέλος των γραμμών με υψηλή σύνθετη αντίσταση, ρεύματα από τα φ/β συστήματα μπορεί να δημιουργήσουν πρόβλημα στην ανίχνευση και την εκκαθάριση των σφαλμάτων.

- Αρμονικές ρεύματος, έγχυση συνεχούς ρεύματος και ρεύματα προς γη. Στην περίπτωση που οι αντιστροφείς συμμορφώνονται με τους κανονισμούς IEC 61000, οι αρμονικές ρεύματος από τους αντιστροφείς δεν φαίνεται να αποτελούν ουσιαστικό πρόβλημα. Για μεγαλύτερους αντιστροφείς, πρέπει να αναπτυχθούν νέοι κανονισμοί, αφού δεν είναι διαθέσιμοι ακόμα. Η έγχυση συνεχούς ρεύματος από τα φ/β συστήματα δεν φαίνεται να προκαλεί ουσιαστικά προβλήματα για τα δίκτυα, εκτός αν έχουμε αντιστροφείς χωρίς μετασχηματιστή. Σε αυτή την περίπτωση εμφανίζονται και ρεύματα προς γη που οφείλονται στα χαρακτηριστικά του συστήματος (π.χ παρασιτική χωρητικότητα).

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Φωτοβολταϊκά συστήματα Ι.Ε. Φραγκιαδάκης

Φωτοβολταϊκά συστήματα ΔΕΡΒΟΣ Θ. ΚΩΣΤΑΝΤΙΝΟΣ

Φωτοβολταϊκή Τεχνολογία Κ. Καγκαράκη

Ήπιες Μορφές Ενέργειας Ι Θωμάς Ζαχαρίας

Ήπιες Μορφές Ενέργειας ΙΙ Θωμάς Ζαχαρίας

Ηλεκτρονικά Ισχύος Εκδόσεις ΤΖΙΟΛΑ

Cres.gr Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών και Εξοικονόμησης Ενέργειας

wikipedia.org

europa.eu

helapco.gr