

**ΑΛΕΞΑΝΔΡΕΙΟ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ
ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ**
ΤΜΗΜΑ ΑΥΤΟΜΑΤΙΣΜΟΥ



ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Του φοιτητή του τμήματος Αυτοματισμού

ΓΡΗΓΟΡΙΑΔΗΣ ΧΡΙΣΤΟΣ

Αριθμός μητρώου 041853

**Θέμα: Υλοποίηση συστήματος αντιστροφής για
φωτοβολταϊκά συστήματα**

Επιβλέπων καθηγητής : Δρ. Μιχαήλ Κιζήρογλου

Contents

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ	4
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	7
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2	9
ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ.....	9
2.1 Η ηλιακή ενέργεια.....	9
2.2 Τρόποι χρήσης της ηλιακής ενέργειας	11
2.3 Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία	12
2.4 Διασυνδεδεμένα και αυτόνομα φωτοβολταϊκά συστήματα.....	16
3.1 Μονοφασικοί Αντιστροφείς.....	20
3.1.1 Μονοφασικοί αντιστροφείς σε συνδεσμολογία γέφυρας.....	22
3.1.2 Έλεγχος μονοφασικού αντιστροφέα.....	24
3.1.2.1 Έλεγχος εύρους απλού παλμού (Pulse Width Modulation Control, PWM).....	25
3.1.2.2 Διαμόρφωση εύρους ημιτονοειδούς παλμού (Sinsusoidal Pulse Width Modulation, SPWM).....	25
3.1.2.3 Διαμόρφωση με μονοπωλική/ διπολική τάση εξόδου.....	27
3.1.2.4 Μέθοδος διαμόρφωσης ακριβούς αρμονικής ελαχιστοποίησης (Exact Harmonic elimination, HEPWM).....	28
3.1.2.5 Ελαχιστοποίηση ακριβούς αρμονικής (Exact harmonic minimization- HMPWM)	29
3.2 Μονοφασικός υψίσυχνος αναστροφέας	29

3.3 Προσομοίωση μονοφασικού αντιστροφέα.....	34
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4	39
ΤΡΙΦΑΣΙΚΟΣ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΕΑΣ.....	39
4.1 Έλεγχος Ημιτονοειδούς Διαμόρφωσης Έυρους παλμών τριφασικού μετατροπέα (Sinusoidal Pulse Width Modulation, SPWM).....	43
4.2 Σχεδίαση και εφαρμογές τριφασικού σε φωτοβολταϊκά.....	43
4.3 Αντιστροφείς πολλαπλών βαθμίδων	47
ΚΕΦΑΛΑΙΟ5.....	50
ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΕΑ ΣΕ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗ ΠΛΑΚΕΤΑ ΡΑΣΤΕΡ.....	50
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6	55
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	55
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	56

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 2.1 Τα είδη της ηλιακής ακτινοβολίας, άμεση, ανακλώμενη και διάχυτη[1].	9
Σχήμα 2.2: Η ετήσια ενεργειακή κατανάλωση από τον άνθρωπο[3].	11
Σχήμα 2.3:Λειτουργία ημιαγωγών p και n [6].	13
Σχήμα 2.4: Μονοκρυσταλλικό φωτοβολταϊκό στοιχείο.	14
Σχήμα 2.5: Φωτοβολταϊκό στοιχείο πολυκρυσταλλικού πυριτίου [10].	15
Σχήμα 2.6: Διασυνδεδεμένο Φωτοβολταϊκό σύστημα[8].	17
Σχήμα 3.1: Μονοφασικός μετατροπέας σε συνδεσμολογία ημιγέφυρας[11].	20
Σχήμα 3.2: Παλμοί έντασης των διακοπών T_+ και T_- σε κύκλωμα μονοφασικού αντιστροφέα[10].	21
Σχήμα 3.3: Κύκλωμα αντιστροφέα πλήρους γέφυρας[11].	22
Σχήμα 3.4: Τάση εξόδου στον αντιστροφέα πλήρους γέφυρας με διπολική τάση εξόδου[10, 11].	23
Σχήμα 3.5: Παλμοί έναυσης διακοπών και τάση εξόδου για τη λειτουργία αντιστροφέα πλήρους γέφυρας με μονοπολική τάση εξόδου[11].	24
Σχήμα 3.6: Απεικόνιση SPWM a) Ημιτονοειδής- Τριγωνική Σύγκριση, b) παλμοί μεταγωγής μετά τη σύγκριση[12].	26
Σχήμα 3.7: Κυματομορφή εξόδου κατά τη μονοπωλική διαμόρφωση εξόδου[12].	28
Σχήμα 3.8: Κυματομορφή εξόδου διπολικής μορφής ελέγχου[12].	28
Σχήμα 3.9: Συμμετρική κυματομορφή PWM[14].	29
Σχήμα 3.10: Αντιστροφέας τύπου Flyback[15].	30

Σχήμα 3.11: Ισοδύναμο κύκλωμα μετατροπέα για κάθε ημιπερίοδο[15].....	31
Σχήμα 3.12: Το ρεύμα που διαρρέει το μετασχηματιστή στην περιοχή της ασυνεχούς λειτουργίας[15].....	31
Σχήμα 3.13: Το ρεύμα που διαρρέει το μετασχηματιστή στην περιοχή συνεχούς/ ασυνεχούς ρεύματος[15].....	33
Σχήμα 3.14: Κύκλωμα ισχύος υψίσυχνου αντιστροφέα [16].....	33
Σχήμα 3.15: Μοντέλο στο SIMULINK μονοφασικού φωτοβολταϊκού συστήματος συνδεδεμένο στο δίκτυο[17].	35
Σχήμα 3.16: Κύκλωμα για τη μοντελοποίηση αντιστροφέα φωτοβολταϊκών για απευθείας σύνδεση στο δίκτυο[18].	36
Σχήμα 3.17: Στοιχεία του διακόπτη που χρησιμοποιήθηκαν στο PSIM για την προσομοίωση[18].	37
Σχήμα 4.1: Τριφασικός μετατροπέας με IGBT διακόπτες[10].....	39
Σχήμα 4.2: Κυματομορφές αντιστροφέα και φορτίου για παλμούς οδήγησης εύρους 180° και συμμετρικό ωμικό επαγωγικό φορτίο[10].....	40
Σχήμα 4.3: Κυματομορφές αντιστροφέα και φορτίου για παλμούς οδήγησης 120° και ωμικό συμμετρικό φορτίο[10].....	42
Σχήμα 4.4: Κυματομορφές αναφορών και φορέα στην τεχνική SPWM[10]....	43
Σχήμα 4.5: Δίκτυο που προσομοιώθηκε στην [19].....	44
Σχήμα 4.6: Διάγραμμα ελέγχου στην [20]	45
Σχήμα 4.7: Η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε στην [21].....	46
Σχήμα 4.8: Πειραματική διάταξη στη [22].	48
Σχήμα 4.9: Σχήμα ελέγχου σε κάθε βαθμίδα [22].....	48

Σχήμα 4.10: Τριφασικός αντιστροφείας τεσσάρων επιπέδων[23].....49

Σχήμα 4.11: Συγκριτικό διάγραμμα απόδοσης αντιστροφέων βάσει του βαθμού απόδοσης[23]50

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι τελευταίες δεκαετίες χαρακτηρίζονται από την ολοένα και αυξανόμενη ζήτηση της ενέργειας η οποία οδηγεί σε εξάντληση των ήδη υπάρχοντων αποθεμάτων των ορυκτών καυσίμων. Η προσπάθεια εξεύρεσης λύσεων του ενεργειακού προβλήματος οδήγησε την ερευνητική κοινότητα σε παγκόσμιο και εθνικό επίπεδο στη στροφή στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.

Μια από τις κυριότερες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας είναι η ηλιακή ενέργεια η οποία κατά κύριο λόγο μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια μέσω των φωτοβολταϊκών συστημάτων. Τα φωτοβολταϊκά είναι εναλλακτικά συστήματα μετατροπής ενέργειας που μετατρέπουν την ηλιακή ενέργεια σε ηλεκτρική. Τα φωτοβολταϊκά συστήματα είναι συστήματα παραγωγής συνεχούς τάσης και αποτελούνται από ένα σύνολο διατάξεων ηλεκτρονικών ισχύος (inverter) που μετατρέπουν τη συνεχή τάση και το ρεύμα σε εναλλασσόμενα.

Οι αντιστροφείς (inverters) χρησιμοποιούνται για τη σύνδεση των φωτοβολταϊκών στοιχείων στο δίκτυο ηλεκτρικού ρεύματος. Αποτελούνται από διακοπτικά στοιχεία τα οποία μετατρέπουν τη συνεχή τάση στα άκρα των φωτοβολταϊκών σε εναλλασσόμενη μέσω του ελέγχου του ηλεκτρικού ρεύματος.

Η παρούσα εργασία αποτελεί μια βιβλιογραφική ανασκόπηση της έρευνας που έχει πραγματοποιηθεί τα τελευταία χρόνια, στην Ελλάδα κυρίως, σχετικά με τους αντιστροφείς που χρησιμοποιούνται στα φωτοβολταϊκά συστήματα. Η βάση δεδομένων που χρησιμοποιείται στην παρούσα εργασία είναι η ακαδημαϊκή βάση δεδομένων των ελληνικών διπλωματικών θέσεων που έχουν πραγματοποιηθεί για τη μελέτη των αντιστροφών.

Συγκεκριμένα στο δεύτερο κεφάλαιο παρουσιάζονται γενικά στοιχεία για την κατάσταση των φωτοβολταϊκών συστημάτων καθώς και ο διαχωρισμός που υπάρχει στη βιβλιογραφία για φωτοβολταϊκά συστήματα συνδεδεμένα στο δίκτυο και στα μεμονωμένα φωτοβολταϊκά συστήματα καθώς και στις εφαρμογές τους.

Στο τρίτο κεφάλαιο γίνεται μια βιβλιογραφική ανασκόπηση σχετικά με τους μονοφασικούς μετατροπείς που χρησιμοποιούνται στα φωτοβολταϊκά συστήματα. Στη βιβλιογραφία υπάρχει ένα πλήθος εργασιών που αναφέρονται στους μετατροπείς αυτούς και σχεδιάζεται και μελετάται η λειτουργία τους στα φωτοβολταϊκά στοιχεία.

Στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζονται οι τριφασικοί μετατροπείς ως στοιχείο φωτοβολταϊκών εγκαταστάσεων ενώ στο πέμπτο κεφάλαιο συνοψίζονται τα βασικότερα συμπεράσματα των σχετικών εργασιών που αφορούν στη μελέτη αντιστροφών στα φωτοβολταϊκά συστήματα και γίνονται προτάσεις σχετικά με την περαιτέρω έρευνα που μπορεί να πραγματοποιηθεί στον τομέα αυτό.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

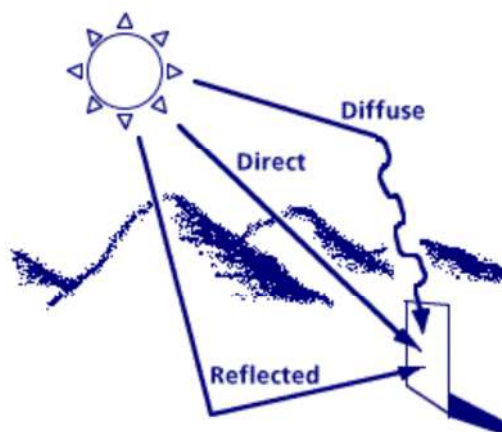
ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ

Στο κεφάλαιο αυτό θα γίνει μια σύντομη εισαγωγή στην τεχνολογία των φωτοβολταϊκών συστημάτων και στη σημασία τους ως εναλλακτικά συστήματα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.

2.1 Η ηλιακή ενέργεια

Με τον όρο ηλιακή ενέργεια εννοείται η ενέργεια που προσπίπτει στην επιφάνεια της γης με τη μορφή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας που παράγεται από τον ήλιο[1]. Η ηλεκτρομαγνητική ενέργεια φτάνει αμετάβλητη στην επιφάνεια της γης ενώ, οι αλλαγές που υφίσταται οφείλονται στη σύσταση της ατμόσφαιρας μέσα από την οποία περνάει.

Η ηλιακή ακτινοβολία έχει δύο βασικά χαρακτηριστικά: την ένταση και τη διεύθυνση πρόσπτωσης. Στην επιφάνεια της γης φτάνει μόνο η άμεση ακτινοβολία του ήλιου δηλαδή η ακτινοβολία που έρχεται άμεσα από τον ήλιο. Η υπόλοιπη ακτινοβολία απορροφάται από τα συστατικά της ατμόσφαιρας ή ανακλάται πάλι προς το διάστημα[1]. Το μέρος της ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει στην επιφάνεια της γης μετά από διαδοχικές αντανακλάσεις χωρίς όμως να έχει συγκεκριμένη διεύθυνση αποτελεί τη διάχυτη ακτινοβολία.



Σχήμα 2.1 Τα είδη της ηλιακής ακτινοβολίας, άμεση, ανακλώμενη και διάχυτη[1].

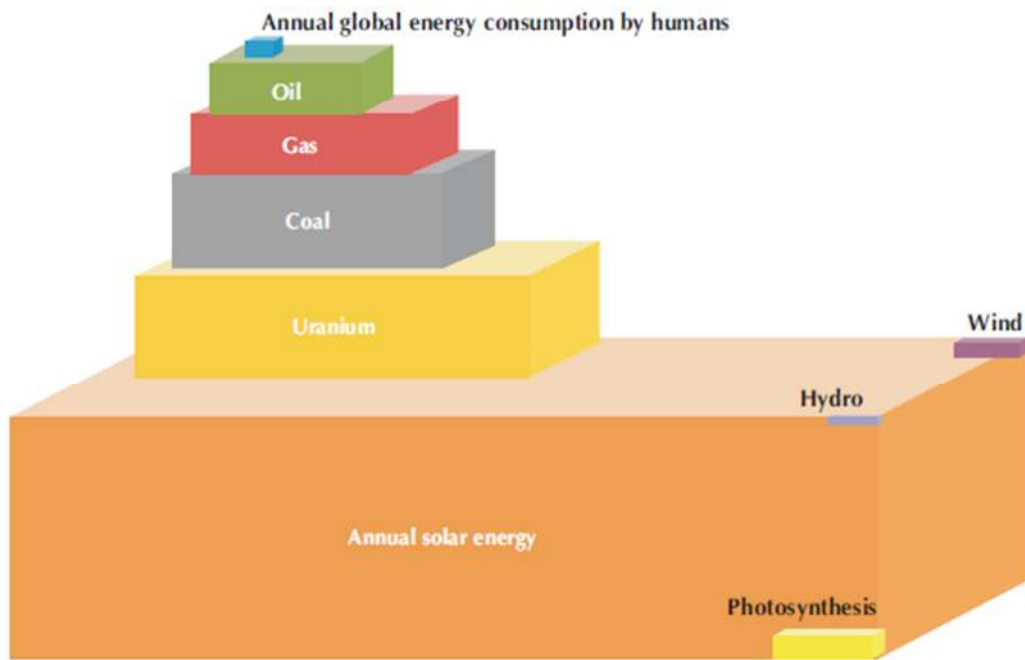
Κάθε δευτερόλεπτο η παραγόμενη ενέργεια από τον ήλιο είναι μεγαλύτερη από τέσσερα εκατομμύρια τόνους η οποία μέσω της ηλιακής ενέργειας

διαχέεται προς όλες τις κατευθύνσεις. Η ενέργεια που φτάνει στη γη διανύει μια απόσταση 150 εκατομμύρια χιλιόμετρα σε μερικά δευτερόλεπτα. Με δεδομένο ότι η γη μπορεί να προσομοιαστεί με μια περιστρεφόμενη μπάλα η ηλιακή ακτινοβολία που φτάνει στη γη κατά μέσο όρο το χρόνο είναι περίπου 342W/m^2 από τα οποία τα 77W/m^2 ανακλώνται πίσω στο διάστημα και τα 67W/m^2 απορροφούνται από την ατμόσφαιρα[2].

Η ηλιακή ακτινοβολία όπως ήδη αναφέρθηκε διακρίνεται σε άμεση και διαχεόμενη. Η άμεση ακτινοβολία αποτελεί συνδυασμό του ηλιακού φωτός και της θερμότητας της ακτινοβολίας ενώ η διαχεόμενη ακτινοβολία είναι έμμεση. Επιπλέον, η άμεση ακτινοβολία αντίθετα με την διαχεόμενη δημιουργεί σκιές. Σε κάθε ηλιακή συσκευή μπορεί να θεωρηθεί και μια Τρίτη μορφή ακτινοβολίας η ανακλώμενη αλλά γενικά η αναφορά πάντα γίνεται στην παγκόσμια ηλιακή ακτινοβολία που αποτελεί το άθροισμα της άμεσης και της διαχεόμενης ακτινοβολίας.

Τα αποθέματα της ηλιακής ενέργειας είναι πολύ μεγαλύτερα από τα διαθέσιμα αποθέματα των ορυκτών καυσίμων και του φυσικού αερίου. Είναι χαρακτηριστικό πως τα αποθέματα των ορυκτών καυσίμων διαρκούν για 46 χρόνια και τα αποθέματα του φυσικού αερίου για 58 χρόνια, η ηλιακή ενέργεια που συλλέγεται σε ένα έτος αρκεί για να καλύψει 6000 χρόνια ανθρώπινης ενεργειακής κατανάλωσης[3].

Το ετήσιο ποσοστό ενέργειας που λαμβάνεται από τον ήλιο είναι κατά πολύ μεγαλύτερο από το αντίστοιχο προβλεπόμενο ποσοστό των ορυκτών καυσίμων όπως επίσης και το ετήσιο δυναμικό των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας όπως την υδροδυναμική και την αιολική ενέργεια.



Σχήμα 2.2: Η ετήσια ενεργειακή κατανάλωση από τον άνθρωπο[3].

2.2 Τρόποι χρήσης της ηλιακής ενέργειας

Οι ηλιακές ακτίνες διαχωρίζονται, ανάλογα με το μήκος κύματός τους σε ορατή, υπέρυθρη και υπεριώδη ακτινοβολία. Η ορατή ακτινοβολία αποτελείται από 40% ενέργεια ακτινοβολίας, 50% υπέρυθρη ενέργεια και 10% από υπεριώδη ενέργεια. Επειδή οι περισσότερες υπεριώδεις ακτινοβολίες είναι «σχεδόν υπεριώδεις» ή υπεριώδεις «μικρού κύματος» με μήκη κύματος μικρότερα από 3000 νανόμετρα, δεν θεωρείται ότι αποτελούν θερμική ακτινοβολία.

Το βασικό πλεονεκτήμα της ηλιακής ακτινοβολίας για τον άνθρωπο είναι το φως το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για την μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης. Η αξιοποίηση του ηλιακού κυρίως σε κτήρια αποτελεί ένα μέσο μείωσης της ενεργειακής κατανάλωσης.

Η ηλιακή ενέργεια της ακτινοβολίας μετατρέπεται εύκολα σε θερμότητα μέσω της προσρόφησης της από υγρά, αέρια ή στερεά υλικά. Η θερμότητα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την θερμική άνεση των σπιτιών, για τη θέρμανση πισινών, την εξάτμιση του νερού και σε διεργασίες ζύρασης. Επιπλέον, η

θερμότητα μπορεί να μετατραπεί σε μηχανικό έργο ή ηλεκτρική ενέργεια και επιπλέον, μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε διεργασίες χημικού ή φυσικού μετασχηματισμού[2].

Από την άλλη, η ηλιακή ακτινοβολία μπορεί να θεωρηθεί και ως η ροή ηλεκτρομαγνητικών σωματιδίων των φωτονίων. Τα φωτόνια από τον ήλιο περιέχουν μεγάλη ποσότητα ενέργειας και μπορούν να προωθήσουν τις φωτοαντιδράσεις όπως αυτή της φωτοσύνθεσης και σε αυτά οφείλεται η αγωγιμότητα των ηλεκτρονίων στους ημιαγωγούς προκαλώντας τη φωτοβολταϊκή μετατροπή της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική[2].

2.3 Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία

Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία είναι οι συσκευές που σχετίζονται με την άμεση μετατροπή της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική. Η αρχή λειτουργίας του φωτοβολταϊκού κελιού στηρίζεται στο γεγονός πως το ηλιακό φως αποτελείται από πολύ μικρά σωματίδια που λέγονται φωτόνια τα οποία περιέχουν διαφορετικά ποσά ενέργειας ανάλογα με το μήκος κύματος του ηλιακού φάσματος. Τα φωτοβολταϊκά αποτελούν ένα είδος ημιαγωγού και όταν τα φωτόνια πέφτουν πάνω στην επιφάνειά τους ένα μέρος τους ανακλάται, ένα μέρος τους διαπερνά την επιφάνεια και κάποια από αυτά απορροφώνται από τον ημιαγωγό. Η παραγωγή του ηλεκτρικού ρεύματος προέρχεται από τα φωτόνια που απορροφώνται στην επιφάνεια του φωτοβολταϊκού. Το ηλεκτρικό ρεύμα αποτελεί το αποτέλεσμα της μετακίνησης των ηλεκτρονίων που προκαλείται από τα φωτόνια [4]. Το φαινόμενο αυτό αποτελεί το λεγόμενο φωτοβολταϊκό φαινόμενο.

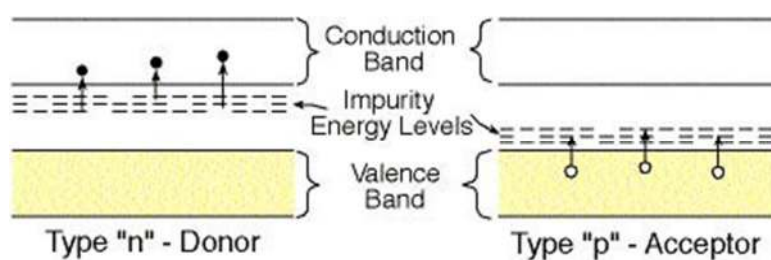
Η μετατροπή της ενέργειας των φωτονίων σε ηλεκτρική πραγματοποιείται από τους ημιαγωγούς. Τα διάφορα υλικά διακρίνονται με βάση τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά τους σε αγωγούς, ημιαγωγούς και μονωτές. Η βασική ιδιότητα ενός ημιαγωγού είναι ότι μπορεί να ελεγχθεί η ηλεκτρική του αγωγιμότητα.

Ένα από τα χαρακτηριστικά των ημιαγωγών είναι τα ηλεκτρόνια που βρίσκονται στην εξωτερική στοιβάδα σθένους του χημικού στοιχείου που τους αποτελεί. Το πιο γνωστό ημιαγωγίμο υλικό είναι το πυρίτιο το οποίο

χρησιμοποιείται ευρέως στα φωτοβολταϊκά στοιχεία[5]. Το πυρίτιο, με ατομικό αριθμό 14, έχει 4 ηλεκτρόνια στην εξωτερική του στοιβάδα και κατά συνέπεια έχει την τάση όταν υπάρχουν πολλά άτομα μαζί να διατάσσονται με τέτοιο τρόπο ώστε η εξωτερική του στοιβάδα να συμπληρώνεται με 8 ηλεκτρόνια. Η κρυσταλλική δομή του πυριτίου είναι το αποτέλεσμα της συμπλήρωσης της εξωτερικής στοιβάδας του πυριτίου με οκτώ ηλεκτρόνια. Όταν το πυρίτιο βρίσκεται σε κρυσταλλική μορφή αποκτά ηλεκτρικά χαρακτηριστικά παραπλήσια με αυτά ενός μονωτή, αφού δεν υπάρχουν ηλεκτρόνια για τη δημιουργία του ηλεκτρικού ρεύματος στο εσωτερικό του.

Οι ημιαγωγιμες ιδιότητες του πυριτίου μπορούν να αποκτηθούν με τεχνητό τρόπο και συγκεκριμένα με την πρόσμιξη του με άλλα στοιχεία που έχουν είτε πλεόνασμα ενός ηλεκτρονίου είτε έλλειμα ενός ηλεκτρονίου στην εξωτερική τους στοιβάδα. Με αυτόν τον τρόπο ο κρύσταλλος μπορεί να δεχτεί ηλεκτρικά φορτία. Όταν ο κρύσταλλος δέχεται θετικά φορτία μετατρέπεται σε ημιαγωγό τύπου p ενώ όταν δέχεται αρνητικά φορτία μετατρέπεται σε ημιαγωγό τύπου n.

Αν δυο κομμάτια πυριτίου διαφορετικού τύπου, τύπου n και p, έρθουν σε απόσταση μεταξύ τους δημιουργείται ανάμεσά τους μια δίοδος ή ένα ηλεκτρικό πεδίο στην επαφή των δύο υλικών που επιτρέπει την κίνηση των ηλεκτρονίων μόνο προς τη μια κατεύθυνση. Στον ημιαγωγό p δημιουργούνται με αυτόν τον τρόπο οπές οι οποίες έλκονται από τα επιπλέον ηλεκτρόνια της επαφής n. Αυτό το ζευγάρι των ημιαγωγών αποτελεί το δομικό στοιχείο του φωτοβολταϊκού στοιχείου.



Σχήμα 2.3:Λειτουργία ημιαγωγών p και n [6].

Όταν η ηλιακή ακτινοβολία πέφτει πάνω σε ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο περνάει από τον ημιαγωγό τύπου n και προσπίπτει πάνω στα άτομα του ημιαγωγού τύπου p . Τα ηλεκτρόνια της περιοχής τύπου p κινούνται μεταξύ των οπών και τελικά φτάνουν στη δίοδο, όπου έλκονται από το θετικό πεδίο. Ξεπερνώντας το ενεργειακό φάσμα σε αυτήν την περιοχή τα ηλεκτρόνια δεν μπορούν να επιστρέψουν. Με αυτόν τον τρόπο στον ημιαγωγό n δημιουργείται πλεόνασμα ηλεκτρονίων το οποίο δημιουργεί ηλεκτρικό ρεύμα αν τοποθετηθεί σε μια διάταξη όπως για παράδειγμα είναι η περίπτωση ενός αγωγού ανάμεσα στους ημιαγωγούς και ένα φορτίο που θα κλείσει τον αγωγό δρόμο.

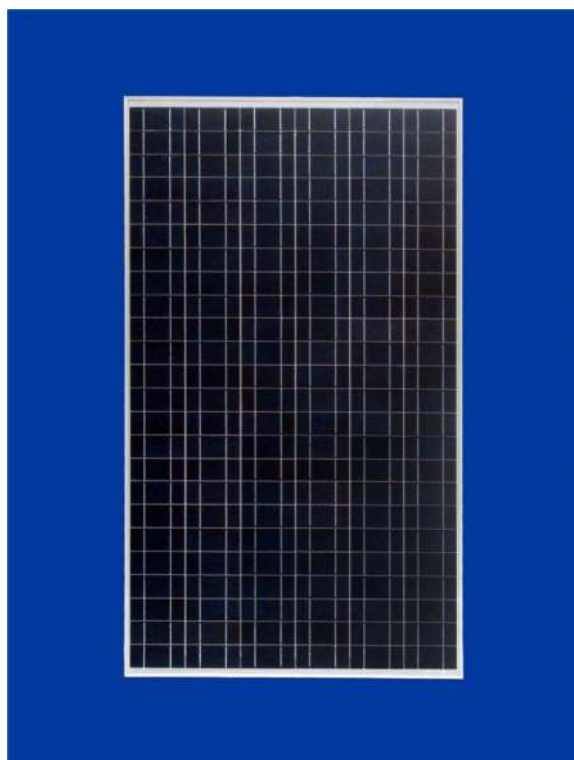
Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία μπορούν να διακριθούν σε δυο μεγάλες κατηγορίες: τα φωτοβολταϊκά κρυσταλλικού πυριτίου και στα φωτοβολταϊκά λεπτού υμένα [7].

Το μονοκρυσταλλικό πυρίτιο μπορεί να παραχθεί ως προϊόν τήξης του πολυκρυσταλλικού πυριτίου. Η μέθοδος παραγωγής του μονοκρυσταλλικού πυριτίου είναι η μέθοδος Czochralski κατά την οποία τα άτομα του πυριτίου σχηματίζουν τέσσερις χημικούς δεσμούς με τα γειτονικά τους άτομα δημιουργώντας με αυτόν τον τρόπο μια τέλεια κρυσταλλική δομή [8].



Σχήμα 2.4: Μονοκρυσταλλικό φωτοβολταϊκό στοιχείο. (ΠΗΓΗ???)

Στο πολυκρυσταλλικό πυρίτιο η κρυσταλλική δομή του πυριτίου διατηρείται αλλά εμφανίζονται διαφορετικοί κρύσταλλοι πυριτίου. Οι ατέλειες της κατασκευής αποτελούν σημεία επανασύνδεσης των φωτοδιεγερμένων φορέων. Η κατασκευή του πολυκρυσταλλικού κυτάρου, που χρησιμοποιείται στα φωτοβολταϊκά, αποτελεί μια θερμική διεργασία μέσω της οποίας το πυρίτιο τήκεται και στερεοποιείται με τέτοιο τρόπο που τα κρύσταλλα να είναι προσανατολισμένα σε μια ορισμένη κατεύθυνση. Η διεργασία αυτή παράγει ορθογώνιες ράβδους πολυκρυσταλλικού πυριτίου, οι οποίες στη συνέχεια κόβονται σε λεπτές λωρίδες προκειμένου να χρησιμοποιηθούν στα φωτοβολταϊκά στοιχεία. Τα πολυκρυσταλλικά φωτοβολταϊκά είναι φθηνότερα από τα μονοκρυσταλλικά αλλά παρουσιάζουν και μικρότερη απόδοση εξαιτίας του παραγόμενου φωτός που επιβαρύνει τους φορείς του πολυκρυσταλλικού πυριτίου οι οποίοι μπορεί να ανασυντίθενται στα όρια των κόκκων [9]. Η απόδοση των πολυκρυσταλλικών φωτοβολταϊκών μπορεί να αυξηθεί σημαντικά με την κατάλληλη επεξεργασία του υλικού ώστε οι κόκκοι να είναι αρκετά μεγάλοι και να προσανατολιστούν σε τέτοια κατεύθυνση ώστε να επιτρέπουν την διείσδυση του φωτός βαθιά μέσα στον κόκκο.



Σχήμα 2.5: Φωτοβολταϊκό στοιχείο πολυκρυσταλλικού πυριτίου [10]

Στα φωτοβολταϊκά στοιχεία λεπτού υμένα η επεξεργασία του υλικού γίνεται με μεθόδους χαμηλών θερμοκρασιών μικρού κόστους. Το στρώμα του ημιαγωγίμου υλικού στερεώνεται σε ένα υπόστρωμα χαμηλού κόστους όπως το γυαλί ή το πλαστικό με λεπτές στρώσεις (thin films). Με αυτόν τον τρόπο μειώνεται το κόστος παραγωγής δεδομένου ότι χρησιμοποιείται μικρότερη ποσότητα υλικού [11]. Το υλικό που συνήθως χρησιμοποιείται στα φωτοβολταϊκά λεπτού υμενίου είναι το υδρογονωμένο άμορφο πυρίτιο.

Τα φωτοβολταϊκά που παρουσιάζουν τη μεγαλύτερη απόδοση είναι αυτά που κατασκευάζονται με πολλαπλά στρώματα υλικού. Αυτός ο τύπος εντάσσεται στην κατηγορία φωτοβολταϊκών λεπτού υμένα. Τα πολυστρωματικά φωτοβολταϊκά στοιχεία έχουν στο πρώτο στρώμα ανεκμετάλλεута φωτόνια τα οποία κινούνται προς το δεύτερο στρώμα που αποτελείται από διαφορετικό υλικό και διαφορετικό διάκενο διαμορφώνοντας με αυτόν τον τρόπο τον φορέα του. Η μέθοδος κατασκευής λεπτού υμένα έχει συνδυαστεί με τα πολυστρωματικά φωτοβολταϊκά και τα υλικά που μπορούν να προσδώσουν μεγάλες αποδόσεις είναι το άμορφο πυρίτιο, ο δισελινιοειδής χαλκός και το αρσενικούχο γάλλιο [12].

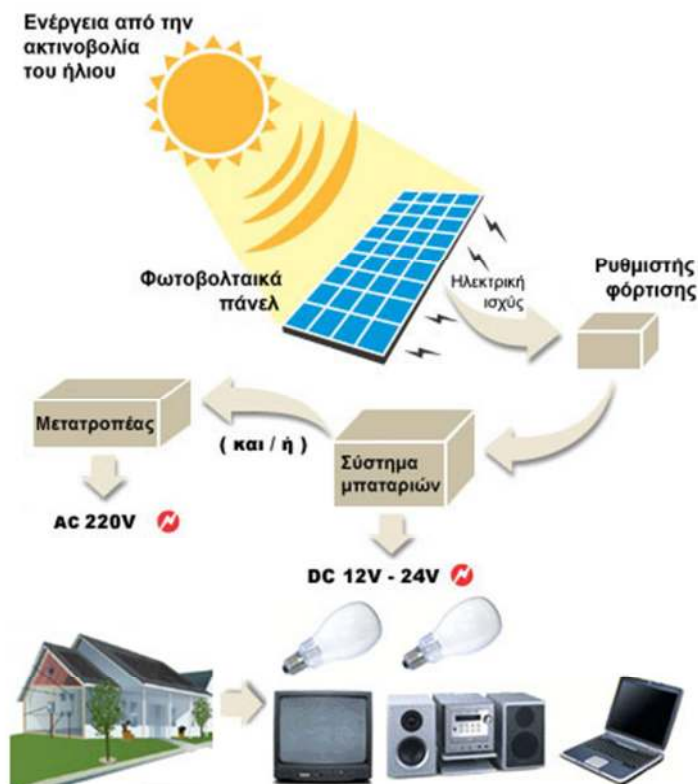
2.4 Διασυνδεδεμένα και αυτόνομα φωτοβολταϊκά συστήματα

Ανάλογα με τις εφαρμογές στις οποίες χρησιμοποιούνται τα φωτοβολταϊκά διακρίνονται σε αυτόνομα και διασυνδεδεμένα. Τα αυτόνομα τοπικά συστήματα μπορεί να παρέχουν ηλεκτρική ενέργεια για οικιακή χρήση σε περιοχές που δεν είναι συνδεδεμένες με το δίκτυο. Η παρεχόμενη ηλεκτρική ενέργεια μπορεί να χρησιμοποιηθεί για φωτισμό ψύξη και άλλα χαμηλά φορτία ενέργειας [7].

Εκτός από τα αυτόνομα τοπικά συστήματα υπάρχουν και τα αυτόνομα μη τοπικά συστήματα που αποτελούν την πρώτη εμπορική εφαρμογή φωτοβολταϊκών συστημάτων. Η ισχύς που μπορεί να παρέχουν

χρησιμοποιείται σε ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών από την άντληση νερού έως τις τηλεπικοινωνίες. Παρά το γεγονός ότι από αυτά τα συστήματα παράγεται μικρή ποσότητα ηλεκτρικής ενέργειας η ενέργεια αυτή είναι ανταγωνιστική προς άλλες μικρές πηγές παραγωγής [7].

Τα διασυνδεδεμένα φωτοβολταϊκά συστήματα αποτελούν συστήματα που λειτουργούν παράλληλα με το κεντρικό ηλεκτρικό δίκτυο. Σε αντίθεση με τα αυτόνομα συστήματα δεν διαθέτουν μπαταρίες και κατά συνέπεια έχουν μικρότερο κόστος γιατί δεν έχουν αναλώσιμα υλικά. Η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια καταναλώνεται από τον κάτοχο του συστήματος ενώ, η ενέργεια που περισσεύει πωλείται προς το δίκτυο. Τα βασικά μέρη ενός διασυνδεδεμένου φωτοβολταϊκού συστήματος είναι το φωτοβολταϊκό πλαίσιο, ο μετατροπέας, το δίκτυο και οι καταναλωτές (οικιακές συσκευές κλπ). Τα ίδια είναι και τα στοιχεία ενός αυτόνομου συστήματος με τη διαφορά ότι την θέση του δικτύου την έχουν οι μπαταρίες.



Σχήμα 2.6: Διασυνδεδεμένο Φωτοβολταϊκό σύστημα[8]

Το φωτοβολταϊκό πλαίσιο αποτελείται από ορισμένο αριθμό φωτοβολταϊκών στοιχείων που ενώνονται εξωτερικά με αντιανακλαστική μεμβράνη και έχουν γυάλινη επικάλυψη. Οι περισσότερες οικιακές συσκευές λειτουργούν με εναλλασσόμενο ρεύμα οπότε χρειάζεται ένας μετατροπέας που θα μετατρέπει το συνεχές ρεύμα που παράγεται από τα φωτοβολταϊκά σε εναλλασσόμενο.

Στα αυτόνομα φωτοβολταϊκά συστήματα απαιτείται ένας ρυθμιστής τάσης που θα ρυθμίζει και θα διατηρεί την κανονική φόρτιση των μπαταριών από τα φωτοβολταϊκά ούτως ώστε να μην υπάρχει ο κίνδυνος υπερφόρτισής της. Οι μπαταρίες στα αυτόνομα συστήματα χρησιμοποιούνται για να αποθηκεύεται το ηλεκτρικό ρεύμα που δεν καταναλώνεται και να το προσφέρουν όταν δεν υπάρχει ηλιακό φως δηλαδή κατά τις βραδινές κυρίως ώρες ή κατά τις μέρες που είναι εντελώς περιορισμένη η ηλιοφάνεια.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΕΑΣ (INVERTER)

Το βασικό πλεονέκτημα των φωτοβολταϊκών συστημάτων παραγωγής ισχύος είναι η απλότητα τους. Είναι εξολοκλήρου μια εγκατάσταση στερεάς κατάστασης από το φωτοβολταϊκό κελί μέχρι τη μεταφορά της ενέργειας στον καταναλωτή. Αν το φωτοβολταϊκό σύστημα είναι μικρής ισχύος από 1W έως 100 MW διασυνδεδεμένο στο δίκτυο απαιτείται για τη λειτουργία του ένα σύστημα ηλεκτρικών και ηλεκτρονικών στοιχείων. Συγκριτικά με άλλες πηγές ισχύος τα φωτοβολταϊκά είναι τα πιο εύκολα διαμορφώσιμα ενώ, τα μεγαλύτερα συστήματα απαιτούν περισσότερα στοιχεία ηλεκτρικής διασύνδεσης με το πιο πολύπλοκο σύστημα να είναι ο μετατροπέας[9].

Ο αντιστροφέας τάσης (inverter) αποτελεί μια διάταξη ισχύος μέσω της οποίας πραγματοποιείται η μετατροπή του συνεχούς ρεύματος σε εναλασσόμενο. Το εύρος εφαρμογής των αντιστροφέων εκτείνεται στις ακόλουθες εφαρμογές[10]:

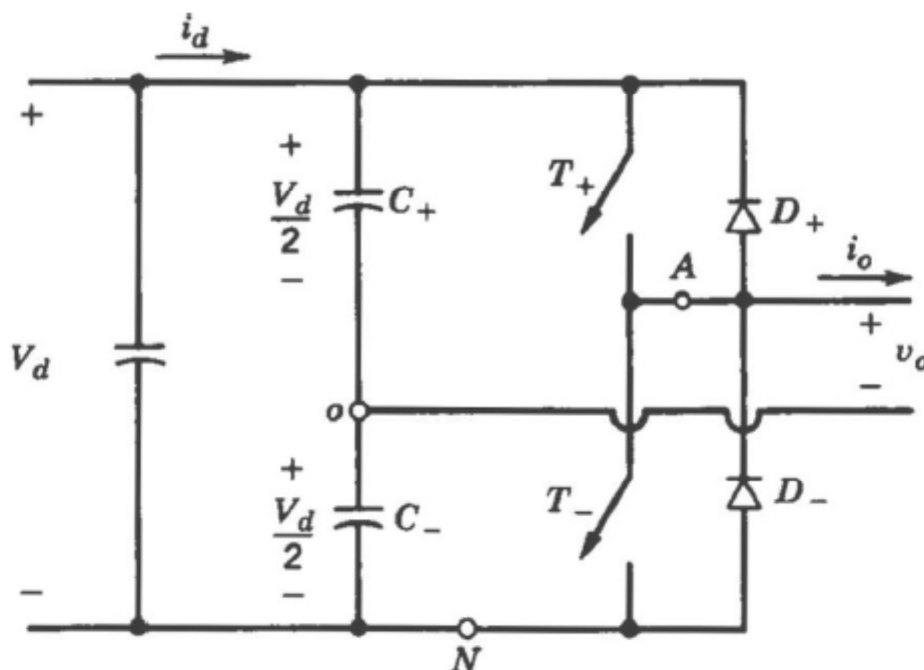
- Στα συστήματα ελέγχου μηχανών εναλασσόμενου ρεύματος
- Στα συστήματα Ανανεώσιμων πηγών ενέργειας όπως τα φωτοβολταϊκά
- Στα συστήματα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας
- Στα συστήματα παραγωγής και αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας
- Στα ενεργά φίλτρα για τη βελτίωση της ποιότητας ηλεκτρικής ισχύος
- Στα ενεργά συστήματα αντιστάθμισης και
- Στα συστήματα συνεχούς παραγωγής ισχύος

Οι αντιστροφείς μπορεί να τροφοδοτούνται συνεχώς από μια πηγή συνεχούς ισχύος ή να τροφοδοτούνται από μια παροχή συνεχούς ρεύματος. Οι αντιστροφείς ανεξάρτητα αν είναι συνεχούς ισχύος ή συνεχούς ρεύματος διακρίνονται και ταξινομούνται στους μονοφασικούς αντιστροφείς σε συνδεσμολογία ημιγέφυρας, στους μονοφασικούς αντιστροφείς σε συνδεσμολογία γέφυρας και στους τριφασικούς αντιστροφείς σε συνδεσμολογία γέφυρας[10].

Στην συνέχεια του κεφαλαίου παρουσιάζονται οι βασικές αρχές των συγκεκριμένων κατηγοριών αντιστροφών και γίνεται μια βιβλιογραφική ανασκόπηση των εργασιών που έχουν πραγματοποιηθεί για τους συγκεκριμένους αντιστροφείς στην ελληνική βιβλιογραφία.

3.1 Μονοφασικοί Αντιστροφείς

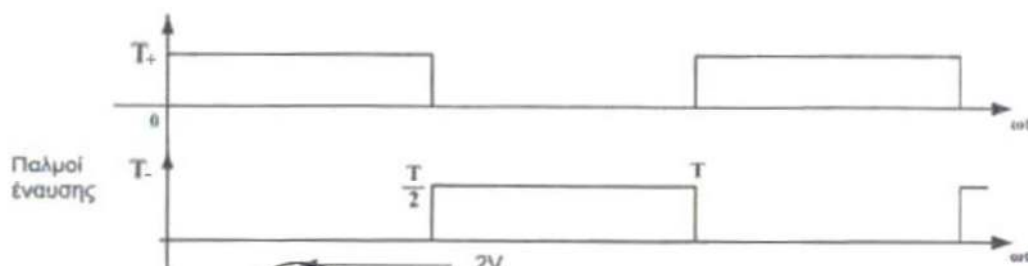
Στη συνδεσμολογία του μονοφασικού αντιστροφέα (Σχήμα 3.1) ο έλεγχος των δύο διακοπών (T_+ , T_-) καθορίζει την παραγωγή εναλλασσόμενης τάσης. Προκειμένου να είναι αποτελεσματική η λειτουργία του κυκλώματος ενός μονοφασικού αντιστροφέα στα άκρα της εισόδου συνεχούς ρεύματος συνδέονται δύο ίδιοι πυκνωτές με αρκετά μεγάλες χωρητικότητες. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα το δυναμικό στο σημείο σύνδεσης των πυκνωτών να είναι σταθερό σε σχέση με το δυναμικό στα άκρα της εισόδου και ίσο με το μισό του δυναμικού εισόδου. Στους συγκεκριμένους μετατροπείς στο σημείο που συνδέονται οι πυκνωτές συνδέεται το φορτίο ενώ οι πυκνωτές αποκόπτουν τη συνεχή συνιστώσα του ρεύματος εξόδου[11].



Σχήμα 3.1: Μονοφασικός μετατροπέας σε συνδεσμολογία ημιγέφυρας[11]

Η τάση αυτή είναι ένας τετραγωνικός παλμός δύο επιπέδων δηλαδή έχει μόνο θετικές και αρνητικές τιμές. Ο έλεγχος της τάσης εξόδου γίνεται με αύξηση των χρονικών διαστημάτων αγωγής των διακοπών μέσω των παλμών οδήγησής τους. Η αυξομοίωση των χρονικών διαστημάτων αγωγής των διακοπών οδηγεί σε σταθερή τάση στις διακυμάνσεις της πηγής εισόδου[10].

Σε κάθε χρονική στιγμή περνάει ρεύμα μόνο από τον ένα διακόπτη γιατί αλλιώς θα υπήρχε βραχυκύκλωμα και δεν μπορεί σε αυτήν την περίπτωση να καθοριστεί η τάση εξόδου.



Σχήμα 3.2: Παλμοί έντασης των διακοπών T_+ και T_- σε κύκλωμα μονοφασικού αντιστροφέα[10].

Όταν το φορτίο είναι ωμικό το ρεύμα εξόδου αντιστοιχεί στις τιμές που αντιστοιχούν στο ήμισυ της τάσης εισόδου ενώ στην κατάσταση αποκοπής το ρεύμα εξόδου μηδενίζεται. Στο κύκλωμα επαγωγικού φορτίου υπάρχουν δύο δίοδοι (D_- και D_+) που τοποθετούνται παράλληλα και αντίθετα με τους διακόπτες και επιτρέπουν στο ρεύμα εξόδου να κυκλοφορεί όταν κανένας διακόπτης δεν διαρρέεται από ρεύμα. Οι δίοδοι αυτοί είναι οι δίοδοι ελεύθερης διέλευσης.

Τα μειονεκτήματα του αντιστροφέα ημιγέφυρας είναι[10]:

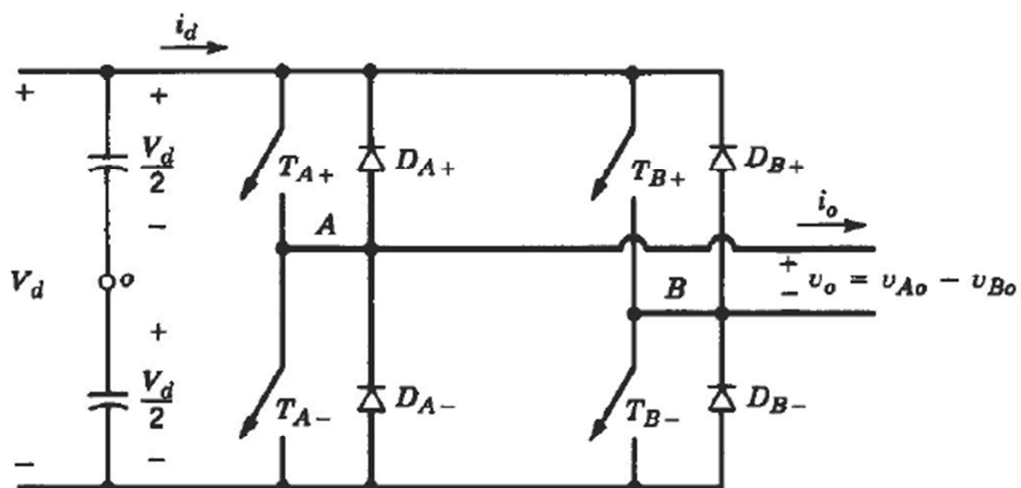
- Για την κατασκευή του συγκεκριμένου κυκλώματος είναι απαραίτητοι πυκνωτές μέσης λήψης
- Οι παλμοί στην τάση εξόδου έχουν πλάτος ίσο με το μισό της τάσης εισόδου

- Η τάση δεν μπορεί να καταμεριστεί ισότιμα στα άκρα των πυκνωτών.

Τα μειονεκτήματα αυτά αντιμετωπίζονται με τη συνδεσμολογία του αντιστροφέα πλήρους γέφυρας.

3.1.1 Μονοφασικοί αντιστροφείς σε συνδεσμολογία γέφυρας

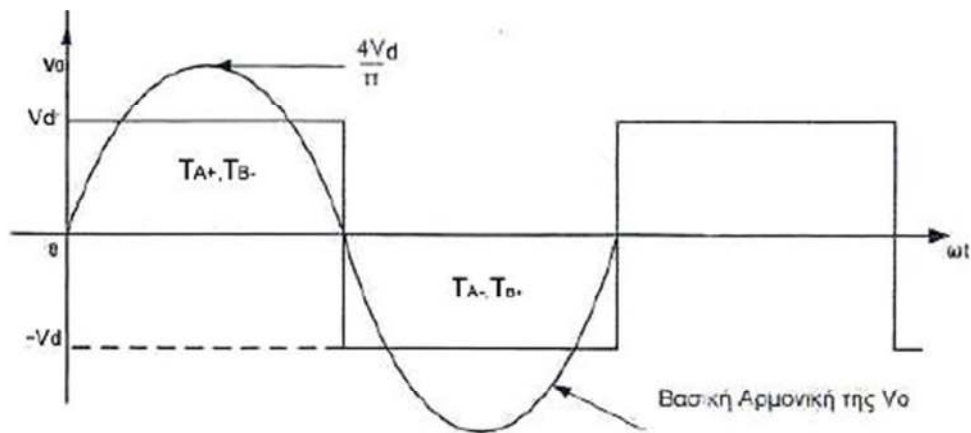
Στα κυκλώματα αντιστροφέων πλήρους γέφυρας υπάρχουν δύο επιπλέον διακόπτες οι οποίοι καθορίζουν τη μέγιστη τάση του αντιστροφέα στο διπλάσιο από τη μέγιστη τάση εξόδου του αντιστροφέα ημιγέφυρας. Η συνδεσμολογία είναι ανάλογη με αυτή του αντιστροφέα ημιγέφυρας και περιλαμβάνει ένα επιπλέον σκέλος διακοπών το οποίο συνδέεται στα άκρα του φορτίου που θα συνδεόνταν στα άκρα των πυκνωτών.



Σχήμα 3.3: Κύκλωμα αντιστροφέα πλήρους γέφυρας[11]

Στην πιο απλή περίπτωση ελέγχου διακοπών θεωρούνται τα ζεύγη T_{A+} , T_{B-} και T_{A-} , T_{B+} από τα οποία το ένα άγει και το άλλο είναι σε φάση αποκοπής. Όταν το ρεύμα διαρρέει τους διακόπτες T_{A+} και T_{B-} ενώ οι διακόπτες T_{A-} και T_{B+} είναι ανοικτοί, η τάση εξόδου είναι θετική και ίση με την τάση εισόδου ενώ στην αντίθετη περίπτωση είναι αρνητική και ίση με την τάση εισόδου. Με δεδομένο ότι η τάση εξόδου, V_o , παίρνει τιμές

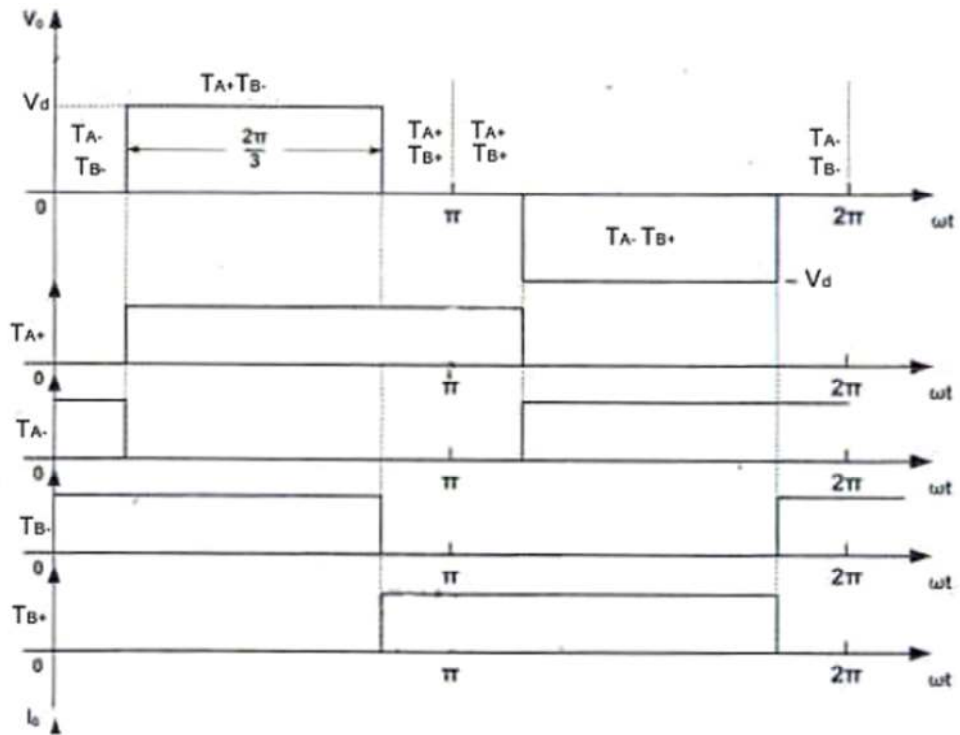
ανάμεσα στις ακραίες τιμές της τάσης εισόδου θεωρείται πως ο έλεγχος γίνεται με διπολική τάση εξόδου.



Σχήμα 3.4: Τάση εξόδου στον αντιστροφέα πλήρους γέφυρας με διπολική τάση εξόδου[10, 11]

Οι κυματομορφές ενός αντιστροφέα παρουσιάζουν τρία επίπεδα τάσης: αρνητική τάση εισόδου, θετική τάση εισόδου και μηδενική τάση εισόδου. Ο αντιστροφέας πλήρους γέφυρας μπορεί να μεταφέρει ηλεκτρική ενέργεια από την πηγή εισόδου προς το φορτίο και αντίστροφα και για αυτό μπορεί να χαρακτηριστεί ως αμφίπλευρος αντιστροφέας[10].

Στην περίπτωση παλμοδότησης των πυλών των διακοπών μπορεί να διεξαχθεί ξανά ο έλεγχος τους. Σε αυτήν την περίπτωση υπάρχουν δύο επιπλέον καταστάσεις λειτουργίας στις οποίες σε κατάσταση αγωγής βρίσκεται το ζεύγος T_{A+}, T_{B+} και το ζεύγος T_{A-}, T_{B-} . Στη μεταβατική κατάσταση η τάση εξόδου γίνεται μηδενική και το ρεύμα εξόδου συνεχίζει να κυκλοφορεί υποβοηθούμενο από τις διόδους ελεύθερης διέλευσης. Σε αυτήν την περίπτωση με δεδομένο πως κατά τη μετάβαση η τάση εξόδου μεταπηδά μεταξύ του μηδέν και των ακραίων τιμών της τάσης εισόδου θεωρείται ότι ο έλεγχος των διακοπών γίνεται με μονοπολική τάση *εξόδου.



Σχήμα 3.5: Παλμοί έναυσης διακοπών και τάση εξόδου για τη λειτουργία αντιστροφέα πλήρους γέφυρας με μονοπολική τάση εξόδου[11].

3.1.2 Έλεγχος μονοφασικού αντιστροφέα

Ο έλεγχος τάσης ενός μονοφασικού μετατροπέα μπορεί να πραγματοποιηθεί χρησιμοποιώντας τις ακόλουθες τεχνικές και μεθοδολογίες.

- Τη διαμόρφωση απλού εύρους παλμών
- Τη διαμόρφωση εύρους πολλαπλών παλμών
- Τη διαμόρφωση εύρους ημιτονοειδών παλμών
- Τη διαμόρφωση εύρους διαμορφωμένων ημιτονοειδών παλμών και
- τον έλεγχο αντικατάστασης φάσης

3.1.2.1 Έλεγχος εύρους απλού παλμού (Pulse Width Modulation Control, PWM)

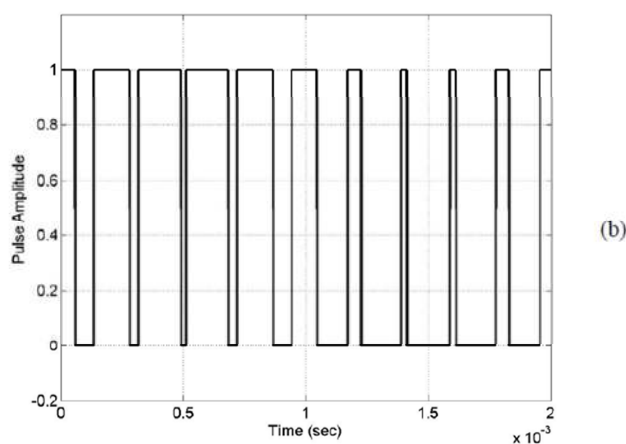
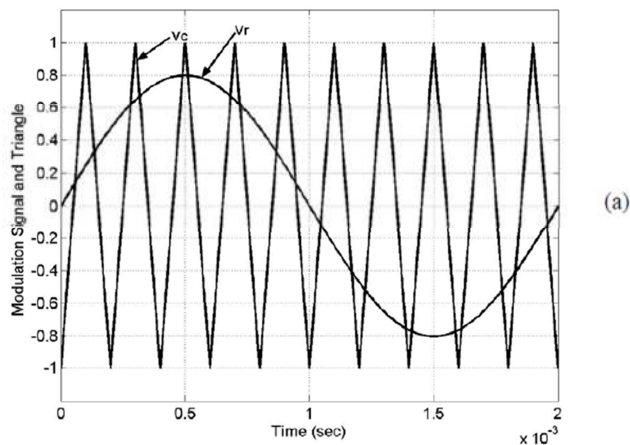
Η τάση εξόδου σε έναν μονοφασικό αντιστροφέα μπορεί να ελεγχθεί έτσι ώστε να είναι σταθερή ασκώντας έλεγχο στα εσωτερικά στοιχεία του. Η πιο αποτελεσματική μέθοδος για να πραγματοποιηθεί αυτό είναι με το έλεγχο του εύρους του απλού παλμού (Pulse Width Modulation, PWM) που χρησιμοποιείται στον αντιστροφέα. Ο αντιστροφέας τροφοδοτείται με μια σταθερή τάση εισόδου και επιτυγχάνεται μια εναλλασσόμενη τάση με την ρύθμιση του ανοιγοκλεισίματος των στοιχείων του μετατροπέα. Τα πλεονεκτήματα του ελέγχου PWM είναι πως η τάση εξόδου επιτυγχάνεται χωρίς την προσθήκη οποιουδήποτε εξωτερικού στοιχείου και ελαχιστοποιείται η μικρότερη αρμονική ενώ οι μεγαλύτερης τάξης αρμονικές ελαχιστοποιούνται με τη χρήση φίλτρων[12].

Στα μειονεκτήματα αυτής της μεθόδου είναι ότι οι διακόπτες είναι ακριβοί δεδομένου ότι έχουν χαμηλές στροφές και ανοιγοκλείνουν πολλές φορές. Παρόλα αυτά η συγκεκριμένη μέθοδος ελέγχου χρησιμοποιείται ευρέως. Η μέθοδος ελέγχου PWM χαρακτηρίζεται από παλμούς σταθερού πλάτους με διαφορετικούς κύκλους ανά περίοδο. Το πλάτος αυτών των παλμών διαμορφώνεται για να επιτευχθεί ο έλεγχος της τάσης εξόδου του αντιστροφέα και να μειωθούν οι αρμονικές. Υπάρχουν διάφορες μέθοδοι PWM που διαφέρουν ως προς τις αρμονικές τους οι οποίες με τη σειρά τους εξαρτώνται από τις αντίστοιχες τάσεις εξόδου.

3.1.2.2 Διαμόρφωση εύρους ημιτονοειδούς παλμού (Sinsusoidal Pulse Width Modulation, SPWM)

Η ημιτονοειδής μέθοδος PWM είναι επίσης γνωστή ως τριγωνική, υποαρμονική ή ημιταλαντωτική μέθοδος είναι επίσης γνωστή μέθοδος ελέγχου και αναφέρεται στο κύκλωμα ημι- γέφυρας ενός μονοφασικού αντιστροφέα[12].

Για την εφαρμογή της SPWM μια τριγωνική κυματομορφή συγκρίνεται με την ημιτονοειδή αναφορά της επιθυμητής συχνότητας. Η τομή της και τα κύματα καθορίζουν τα σημεία μεταγωγής και τη μετατροπή του διαμορφωμένου παλμού. Στο Σχήμα 3.6 παρουσιάζεται η PWM στην οποία με v_{is} σημειώνεται η μέγιστη τιμή του τριγωνικού φορέα και με v η τάση αναφορά ή το διαμορφωμένο σήμα. Στο σχήμα φαίνεται το τριγωνικό και το διαμορφωμένο σήμα με αυθαίρετη συχνότητα και μέγεθος. Στον αντιστροφέα ημιγέφυρας οι διακόπτες ελέγχονται με βάση τη σύγκριση του σήματος ελέγχου και του τριγωνικού κύματος που αναμιγνύονται σε έναν συγκριτή. Όταν το μέγεθος του κυματοειδούς σήματος είναι μεγαλύτερο από το τριγωνικό η έξοδος του συγκριτή είναι μεγάλη αλλιώς είναι χαμηλή.



Σχήμα 3.6: Απεικόνιση SPWM a) Ημιτονοειδής- Τριγωνική Σύγκριση, b) παλμοί μεταγωγής μετά τη σύγκριση[12]

Στην ημιτονική διαμόρφωση τα μεγέθη που έχουν ιδιαίτερη σημασία είναι:

Ο συντελεστής διαμόρφωσης πλάτους:

$m_a = V_{\text{control}} / V_{\text{tri}}$ όπου V_{control} το πλάτος του σήματος ελέγχου και V_{tri} το πλάτος του τριγωνικού σήματος το οποίο διατηρείται γενικά σταθερό.

Ο συντελεστής διαμόρφωσης συχνότητας

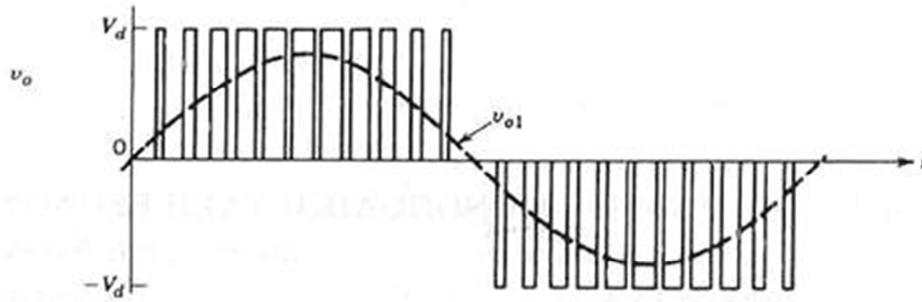
$m_f = f_s / f_1$ όπου f_1 η θεμελιώδης συχνότητα της τάσης του αντιστροφέα και f_s η συχνότητα της τριγωνικής κυματομορφής.

Όταν ο συντελεστής διαμόρφωσης συχνότητας ($m_f \leq 21$) η διαμόρφωση PWM είναι συγχρονισμένη. Για μικρές τιμές του m_f το σήμα της τριγωνικής κυματομορφής και το σήμα ελέγχου πρέπει να είναι συγχρονισμένα μεταξύ τους. Αν ο συντελεστής διαμόρφωσης είναι μεγάλος ($m_f > 21$) τα πλάτη των υποαρμονικών του οφείλονται στην ασύγχρονη διαμόρφωση PWM και είναι μικρά. Σε μεγάλες τιμές συντελεστή διαμόρφωσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί η ασύγχρονη διαμόρφωση στην οποία η συχνότητα της τριγωνικής κυματομορφής είναι σταθερή ενώ η συχνότητα της τάσης ελέγχου μεταβάλλεται.

Για τιμές του συντελεστή διαμόρφωσης πλάτους μικρότερες της μονάδας η διαμόρφωση PWM είναι ημιτονοειδής στη γραμμική περιοχή και το πλάτος της θεμελιώδους συνιστώσας της τάσης μεταβάλλεται γραμμικά. Η ημιτονοειδής διαμόρφωση ωθεί τις αρμονικές σε υψηλές συχνότητες γύρω από τη συχνότητα μετάβασης και τις πολλαπλάσιες της. Η θεμελιώδης όμως συνιστώσα δεν έχει το απαιτούμενο πλάτος. Αν ο συντελεστής διαμόρφωσης πλάτους είναι μεγαλύτερος από τη μονάδα οι περισσότερες πλευρικές ζώνες εντοπίζονται στις πλευρικές ζώνες και το φαινόμενο λέγεται υπερδιαμόρφωση[13].

3.1.2.3 Διαμόρφωση με μονοπωλική/ διπολική τάση εξόδου

Οι δυνατές καταστάσεις της τάσης εξόδου ενός αντιστροφέα είναι οι ακραίες τιμές τάσης ($\pm V_d$) και το μηδέν. Ο έλεγχος της τάσης κατά συνέπεια μπορεί να γίνει με διπολική διαμόρφωση και μονοπωλική διαμόρφωση. Στην περίπτωση της μονοπωλικής διαμόρφωσης η τάση εξόδου στον αντιστροφέα παίρνει μια από τις ακραίες τιμές ή τη μηδενική.



Σχήμα 3.7: Κυματομορφή εξόδου κατά τη μονοπωλική διαμόρφωση εξόδου[12]

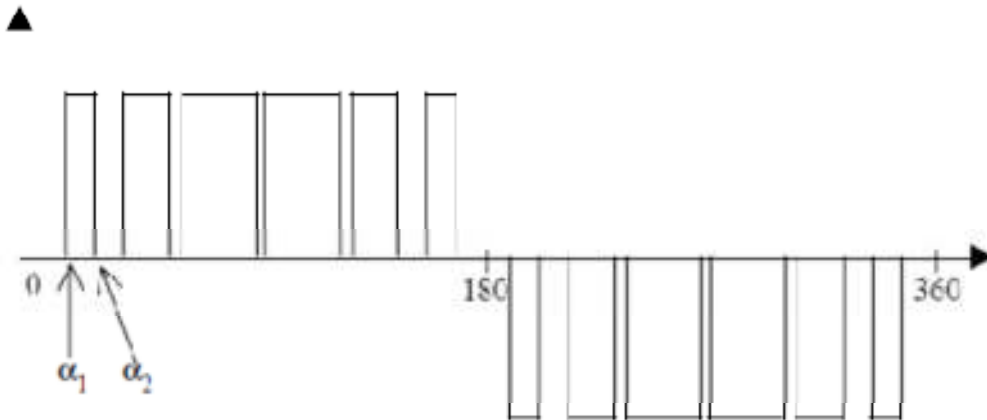
Στη διπολική μορφή ελέγχου αξιοποιούνται μόνο η αρνητική και η θετική τάση εξόδου. Κατά συνέπεια η τάση εξόδου εναλλάσσεται ανάμεσα σε δύο τιμές έτσι ώστε η πρώτη αρμονική εξόδου να είναι πάντα στο 50Hz. Η επιθυμητή ημιτονοειδής τάση προκύπτει από το φιλτράρισμα των ανώτερων αρμονικών.



Σχήμα 3.8: Κυματομορφή εξόδου διπολικής μορφής ελέγχου[12]

3.1.2.4 Μέθοδος διαμόρφωσης ακριβούς αρμονικής ελαχιστοποίησης (Exact Harmonic elimination, HEPWM)

Οι αντιστροφείς με υψηλή ισχύ λειτουργούν σε χαμηλές συχνότητες και αποσκοπούν στη μείωση των διακοπτικών απωλειών. Η τεχνική HEPWM αποσκοπεί στη μείωση των διακοπτικών απωλειών ταυτόχρονα με τη μείωση απωλειών εξαιτίας των αρμονικών. Στη συγκεκριμένη τεχνική επιλέγονται N αυθαίρετες γωνίες αλλαγής κατάστασης των διακοπών και βελτιώνεται η θέση των συγκεκριμένων γωνιών για να απαλειφθούν οι αρμονικές[12].



Σχήμα 3.9: Συμμετρική κυματομορφή PWM[14]

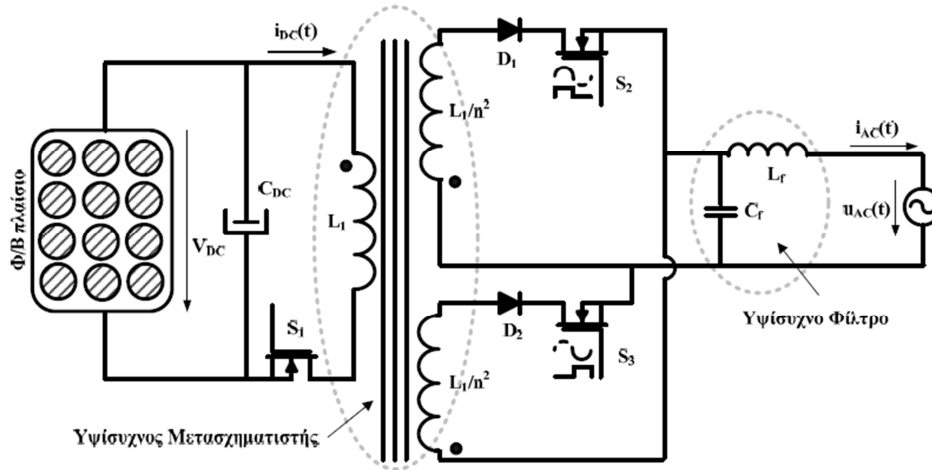
3.1.2.5 Ελαχιστοποίηση ακριβούς αρμονικής (Exact harmonic minimization-HMPWM)

Η συγκεκριμένη μέθοδος στοχεύει στην ελαχιστοποίηση των αρμονικών τάσης σε όλο το φάσμα των συχνοτήτων. Βασικό στοιχείο της συγκεκριμένης μεθόδου είναι η μείωση του συντελεστή παραμόρφωσης του ρεύματος (Total Harmonic Distortion, THD) που είναι ανεξάρτητος από την εμπέδηση του φορτίου. Στην HMPWM όπως και στην HEPWM περιλαμβάνουν την επίλυση πολύπλοκων μη γραμμικών εξισώσεων[14].

3.2 Μονοφασικός υψίσυχνος αναστροφέας

Σε μια πρόσφατη διατριβή [15] σχεδιάστηκε ένας υψίσυχνος μονοφασικός αντιστροφέας ο οποίος μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη διασύνδεση φωτοβολταϊκών γεννητριών μικρής ισχύος οι οποίες θα συνδέονται σε δίκτυο αστικών περιοχών. Στη συγκεκριμένη εργασία παρουσιάζεται αναλυτικά η λειτουργία ενός αντιστροφέα ρεύματος flyback που χρησιμοποιείται ευρέως στα φωτοβολταϊκά εναλλασσόμενου ρεύματος.

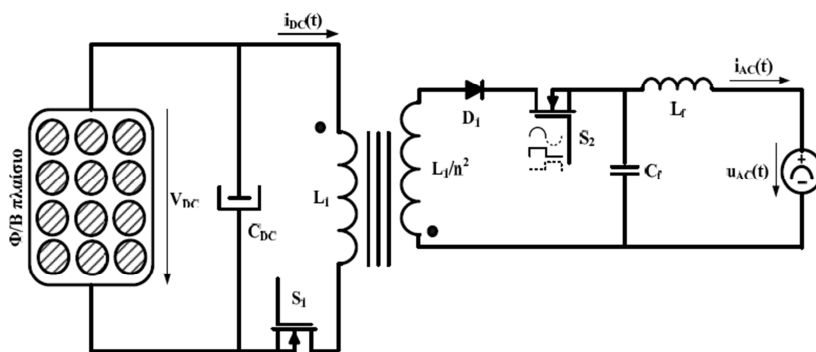
Ο αντιστροφέας αυτός λειτουργεί με βάση την κατάλληλη διαμόρφωση της πηγής ρεύματος έτσι ώστε κάθε στιγμή να παράγεται εναλλασσόμενο ημιτονοειδές ρεύμα που θα έχει την ίδια συχνότητα και την ίδια φάση με το δίκτυο.



Σχήμα 3.10: Αντιστροφείας τύπου Flyback[15]

Ο συγκεκριμένος μετατροπέας έχει συντελεστή ισχύος ίσο με τη μονάδα κατά συνέπεια, μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε διατάξεις για τη διόρθωση του συντελεστή ισχύος και μεταφέρει ηλεκτρική ενέργεια στο ηλεκτρικό δίκτυο από την πλευρά της συνεχούς τάσης.

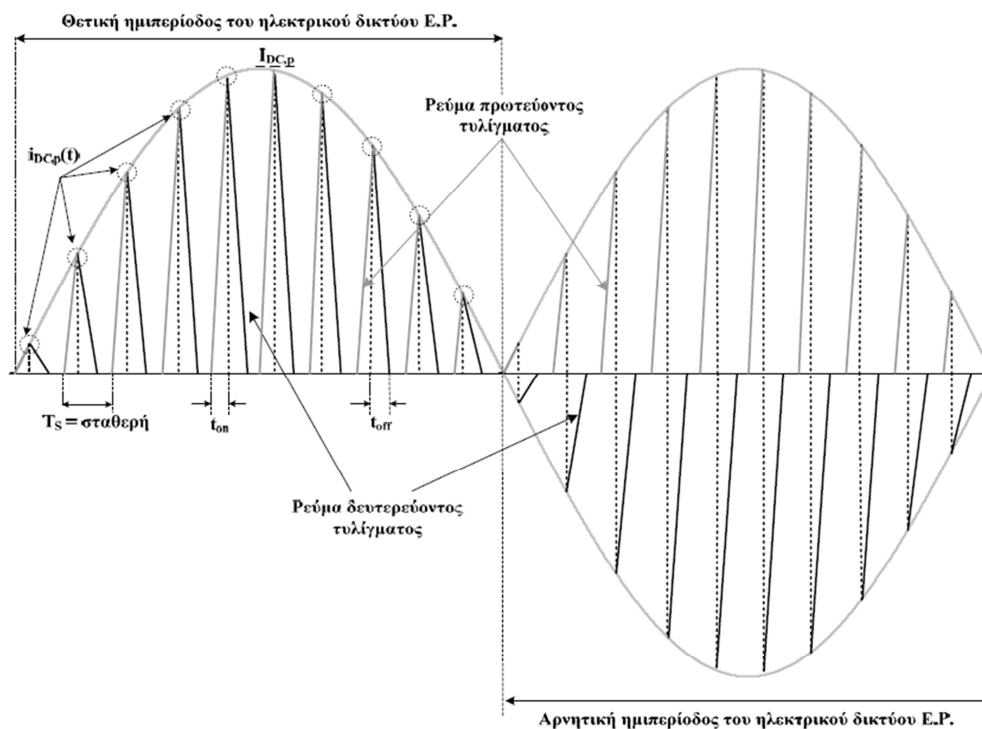
Στόχος της συγκεκριμένης διάταξης είναι η μεταφορά μόνο πραγματικής ισχύος από τη φωτοβολταϊκή γεννήτρια στο ηλεκτρικό δίκτυο και για αυτό θεωρείται απαραίτητο να εξασφαλιστεί στην έξοδο του αντιστροφέα ημιτονοειδές ρεύμα με συχνότητα 50Hz και στην ίδια φάση με την τάση του δικτύου. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί είτε χρησιμοποιώντας όμοια δευτερεύοντα τυλίγματα είτε εφαρμόζοντας κατάλληλες τεχνικές ελέγχου. Η διαμόρφωση που προτείνεται στη συγκεκριμένη διατριβή αποτελεί έναν κλασσικό μετατροπέα Flyback με μεταβλητή τάση εξόδου.



Σχήμα 3.11: Ισοδύναμο κύκλωμα μετατροπέα για κάθε ημιπερίοδο[15]

Η ελαχιστοποίηση των διαστάσεων του συγκεκριμένου μετατροπέα με απομόνωση βασίζεται στον όγκο του πυρήνα και κατά συνέπεια, στην αυτεπαγωγή του μετασχηματιστή και πραγματοποιείται με τη λειτουργία του στην περιοχή της συνεχούς αγωγής[15].

Στην περιοχή της συνεχούς αγωγής πραγματοποιείται η πλήρης εκφόρτιση του αντιστροφέα πριν τελειώσει μια διακοπτική περίοδος. Το ημιτονοειδές ρεύμα στην έξοδο του αντιστροφέα δημιουργείται με τη βοήθεια μιας τεχνικής ελέγχου που αναγκάζει τις μέγιστες τιμές του ρεύματος εισόδου σε κάθε κύκλο να είναι τέτοιες ώστε να συμβαδίζουν με την ημιτονοειδή τάση του δικτύου.

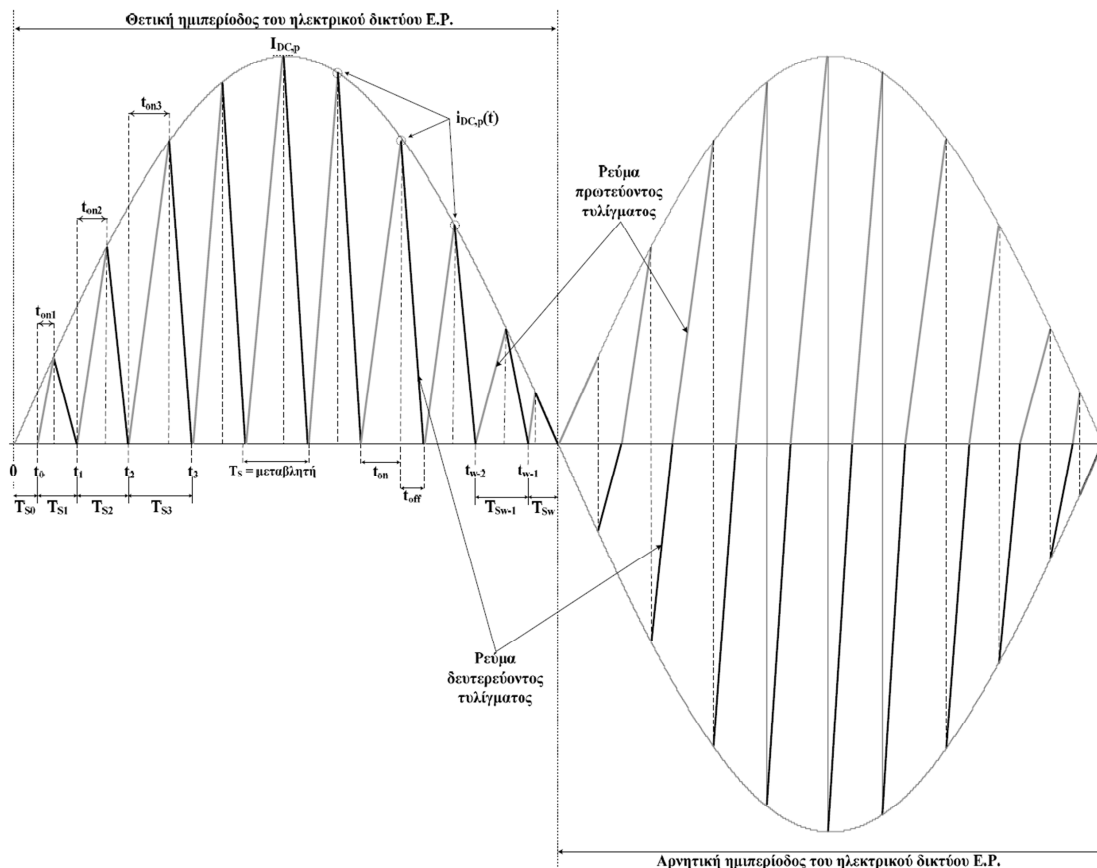


Σχήμα 3.12: Το ρεύμα που διαρρέει το μετασχηματιστή στην περιοχή της ασυνεχούς λειτουργίας[15]

Με δεδομένο ότι ο συγκεκριμένος αναστροφέας μελετήθηκε για προσαρμογή του σε φωτοβολταϊκές γεννήτρες που θα τοποθετηθούν στις όψεις ή στα παράθυρα κτηρίων θεωρείται πως η πυκνότητα ισχύος αποτελεί ένα σημαντικό παράγοντα για τη διαμόρφωση της διάταξης και εισάγεται ο Δείκτης

Μεγιστοποίησης της Πυκνότητας Ισχύος του αντιστροφέα ο οποίος συσχετίζει την πραγματική ισχύ που μεταφέρεται στο δίκτυο με τις σχεδιαστικές παραμέτρους του αντιστροφέα. Τα κριτήρια που διατυπώνονται για την τελική επιλογή της διακοπτικής ισχύος είναι η τιμή των απωλειών ισχύος σε συνδυασμό με την ελαχιστοποίηση των διαστάσεων του μετατροπέα[15].

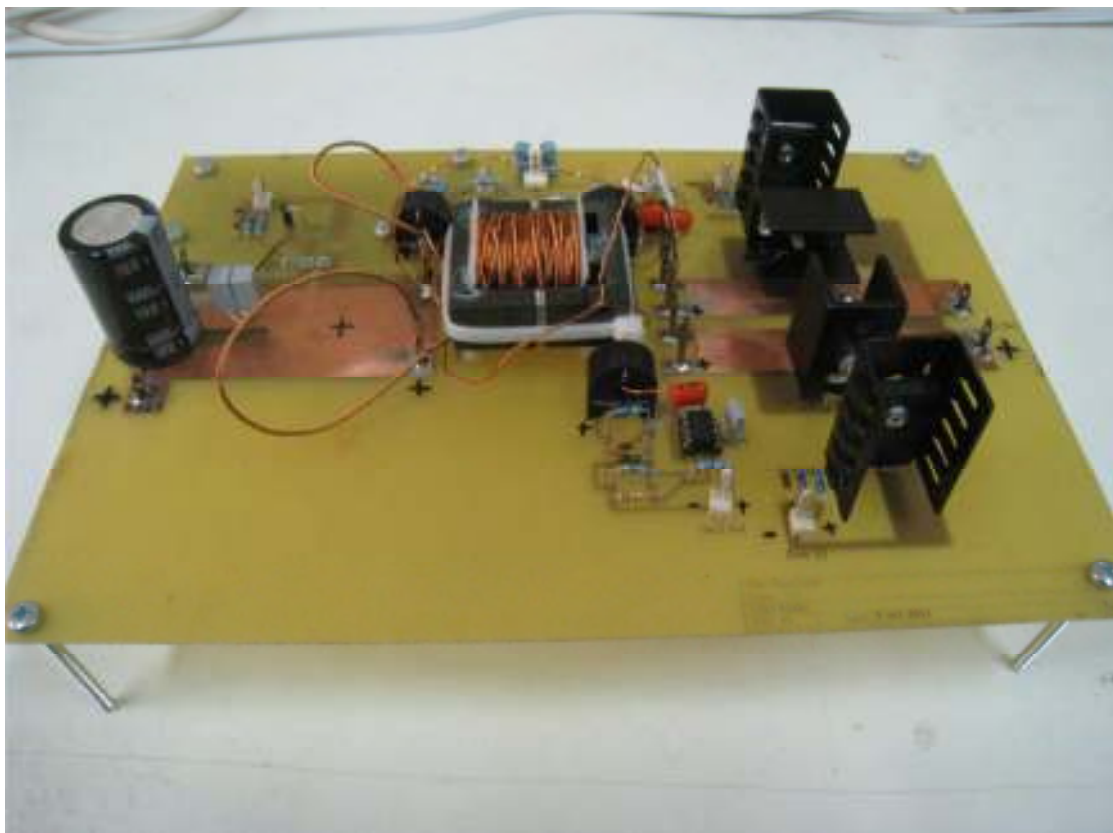
Επιπλέον, στην ίδια εργασία εισάγεται και μια νέα τεχνική ελέγχου του μονοφασικού μετατροπέα Flyback που τον ωθεί να λειτουργεί στο όριο συνεχούς και ασυνεχούς αγωγής. Η διαφορά της τεχνικής αυτής από τη λειτουργία στην περιοχή ασυνεχούς αγωγής είναι η έναρξη του νέου διακοπτικού κύκλου κάθε φορά που μηδενίζεται το ρεύμα του εκάστοτε δευτερεύοντος τυλίγματος που θεωρείται ενεργό. Η τεχνική αυτή εφαρμόζεται στη συγκεκριμένη διατριβή για πρώτη φορά στη συνεχή τάση των φωτοβολταϊκών γεννητριών. Στη συγκεκριμένη τεχνική ελέγχου δεν υπάρχουν χρονικά διαστήματα στα οποία ο μετασχηματιστής δεν διαρρέεται από ρεύμα.



Σχήμα 3.13: Το ρεύμα που διαρρέει το μετασχηματιστή στην περιοχή συνεχούς/ ασυνεχούς ρεύματος[15]

Παρά το γεγονός πως η μέθοδος αυτή είναι πιο πολύπλοκη από το έλεγχο με λειτουργία στην περιοχή ασυνεχούς ζώνης είναι εξασφαλισμένο ότι ο αντιστροφέας δεν εισέρχεται στην περιοχή ασυνεχούς ζώνης δεδομένου ότι ο μετασχηματιστής είναι πλήρως εκφορτισμένος στην έναρξη κάθε διακοπτικής περιόδου.

Σε άλλη εργασία [16] κατασκευάζεται μια τοπολογία φωτοβολταϊκών μονάδων διασπαρμένης παραγωγής με την κατασκευή μιας ηλεκτρονικής διάταξης που μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε δίκτυο τάσης. Ο αντιστροφέας στον οποίο βασίζεται η συγκεκριμένη διάταξη είναι ο ίδιος αντιστροφέας Flyback που αναπτύσσεται στη διατριβή του Κυρίτση[15] και η διαφορά της συγκεκριμένης εργασίας από την διατριβή είναι πως κατασκευάζεται η τοπολογία προκειμένου να επιβεβαιωθούν τα θεωρητικά αποτελέσματα με πειραματικές μετρήσεις.

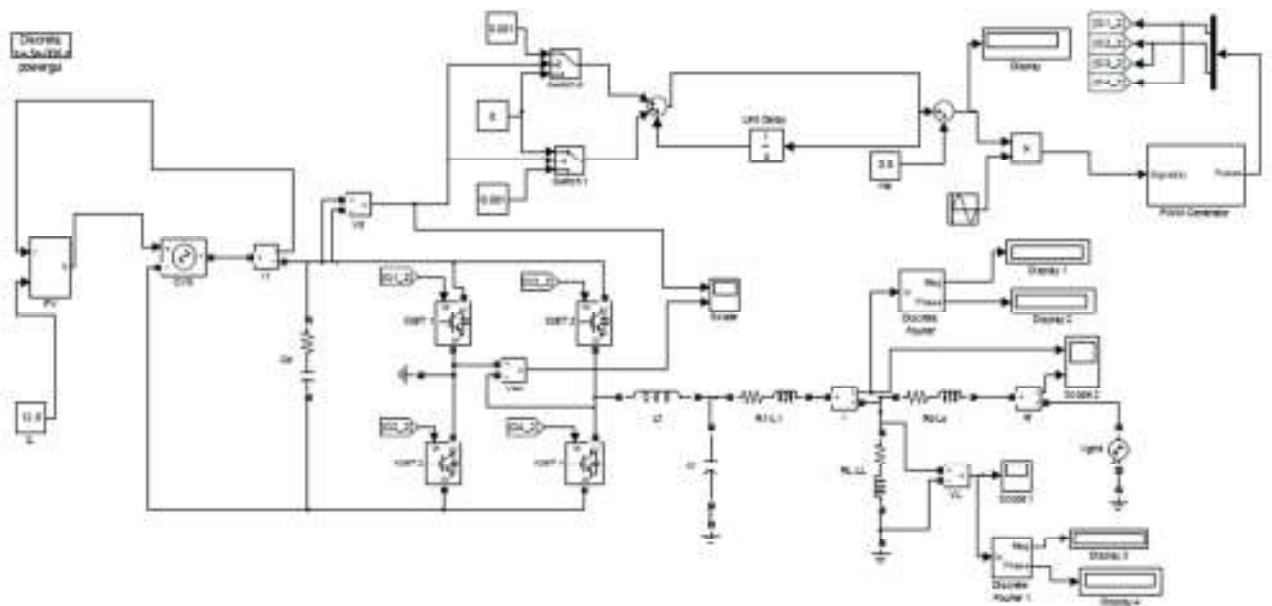


Σχήμα 3.14: Κύκλωμα ισχύος υψίσυχνου αντιστροφέα [16]

Όπως προκύπτει από τις δύο αναφερόμενες εργασίες ο συγκεκριμένος αντιστροφέας που αναλύθηκε και μελετήθηκε έχει μικρό βαθμό πολυπλοκότητας, γαλβανικής απομόνωσης και μικρό όγκο και βάρος. Επιπλέον παρουσιάζει υψηλό συντελεστή ισχύος και βαθμό απόδοσης σε ένα μεγάλο φάσμα παραγόμενης ισχύος ενώ συγκριτικά με άλλες διατάξεις εμπορικές έχει μικρό αριθμό στοιχείων[15, 16]. Ο υψηλός συντελεστής απόδοσης διατηρείται σε όλο το φάσμα ισχύος γεγονός που είναι ιδιαίτερα σημαντικό αφού η τάση μιας φωτοβολταϊκής γεννήτριας είναι μεταβαλλόμενη και εξαρτάται από την ηλιακή ακτινοβολία.

3.3 Προσομοίωση μονοφασικού αντιστροφέα

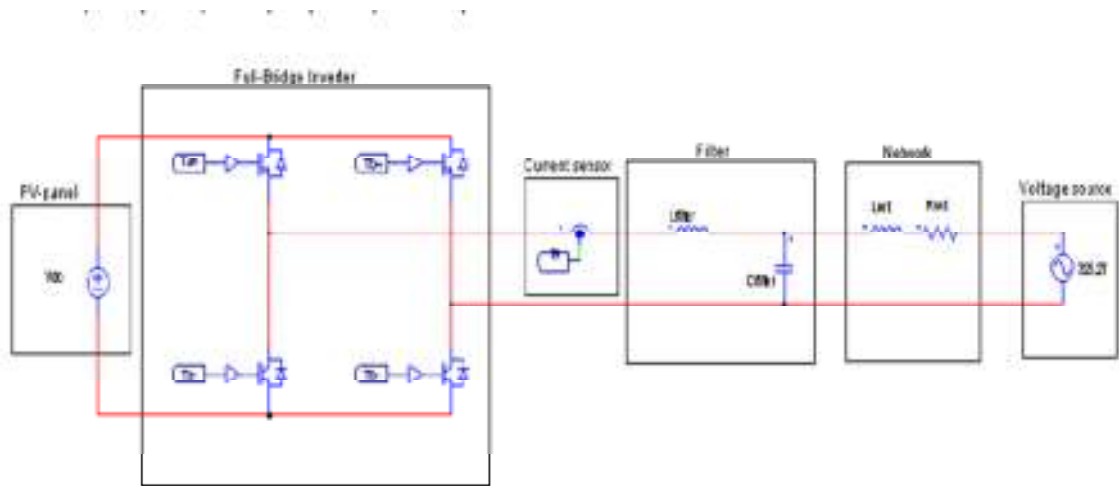
Η ανάλυση μονοφασικού φωτοβολταϊκού συστήματος έχει μελετηθεί με προσομοίωση με τη χρήση MATLAB/SIMULINK[17]. Το σύστημα που μελετήθηκε στη συγκεκριμένη εργασία αποτελούταν από μια φωτοβολταϊκή γεννήτρια, το μονοφασικό μετατροπέα, έναν πυκνωτή συνεχούς ρεύματος στην είσοδο και ένα φίλτρο στην έξοδο του αντιστροφέα. Η προσομοίωση στόχευε στην απεικόνιση των κυματομορφών ρεύματος και τάσης στα διάφορα σημεία του κυκλώματος και στην καταγραφή των αρμονικών. Στη συγκεκριμένη εργασία θεωρήθηκε πως η συνεχής τάση στην είσοδο του αντιστροφέα ήταν παραπλήσια με την τάση του σημείου μέγιστης ισχύος και ότι η διαφορά φάσης μεταξύ της τάσης στο φορτίο και ρεύματος στον κλάδο πριν το φορτίο ήταν μηδενική.



Σχήμα 3.15: Μοντέλο στο SIMULINK μονοφασικού φωτοβολταϊκού συστήματος συνδεδεμένο στο δίκτυο[17].

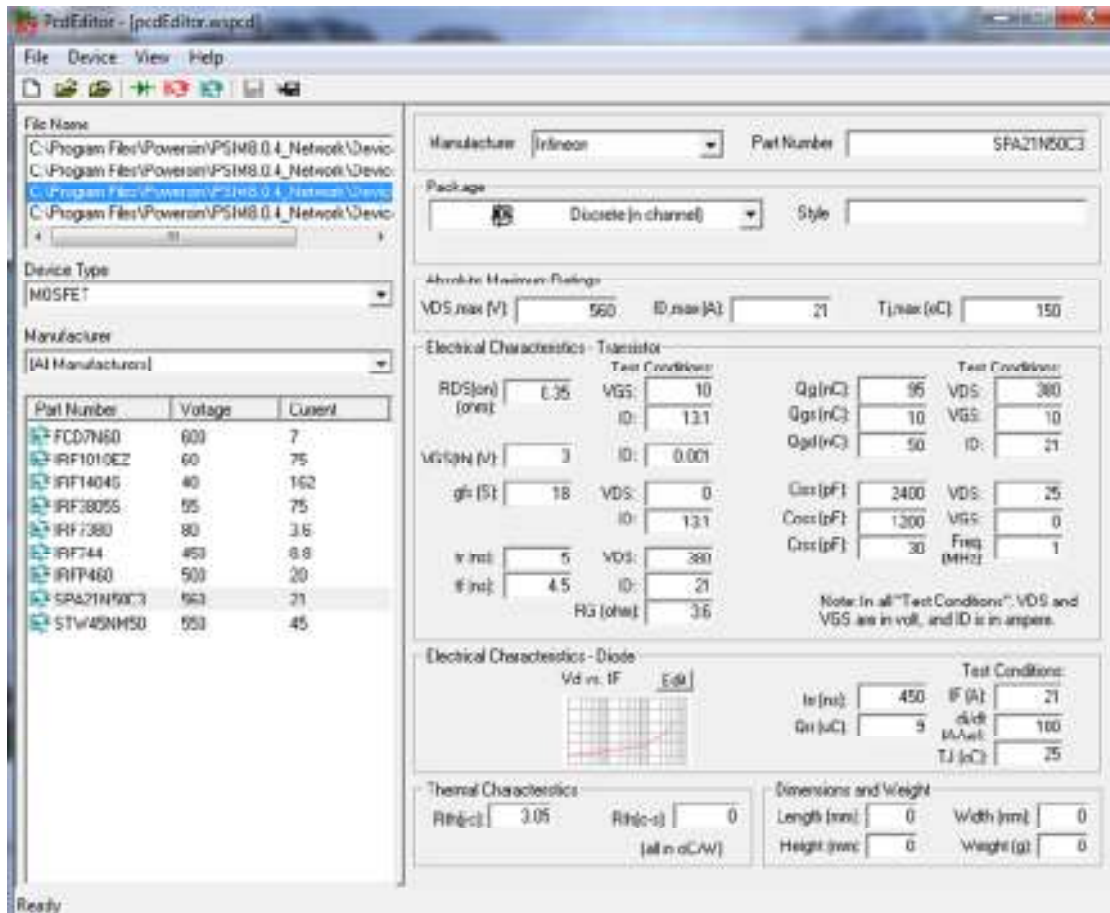
Με βάση την προσομοίωση ο συντελεστής διαμόρφωσης για τον οποίο η τάση στον πυκνωτή εισόδου κυμαίνεται κοντά στην τάση στο σημείο μέγιστης ισχύος προσδιορίστηκε ίσος με 0,744. Μετά τη ρύθμιση της εισόδου του αντιστροφέα και του συντελεστή ισχύος στην έξοδο προσδιορίστηκαν οι κυματομορφές του κυκλώματος. Η μέση τιμή της τάσης προσδιορίστηκε ίση με 443V και θα μπορούσε να είναι και μικρότερη αν χρησιμοποιούταν μικρότερος συντελεστής διαμόρφωσης. Η μείωση της κυμάτωσης της τάσης εισόδου και η μείωση του αρμονικού περιεχομένου των ρευμάτων εξόδου επιτεύχθηκε με διαφορετική τιμή χωρητικότητας πυκνωτή σε σχέση με τη θεωρητική τιμή.

Οι μέθοδοι λειτουργίας ενός αντιστροφέα για την παροχή ισχύος στο δίκτυο μελετώνται με τη βοήθεια του προγράμματος PSIM[18]. Στη συγκεκριμένη εργασία χρησιμοποιήθηκε κύκλωμα αντιστροφέα φωτοβολταϊκών και θεωρήθηκε η απευθείας σύνδεση του στο δίκτυο (Σχήμα 3.16).



Σχήμα 3.16: Κύκλωμα για τη μοντελοποίηση αντιστροφέα φωτοβολταϊκών για απευθείας σύνδεση στο δίκτυο[18].

Το κύκλωμα που χρησιμοποιήθηκε στη συγκεκριμένη προσομοίωση αποτελούταν από ένα πάνελ φωτοβολταϊκών και έναν αντιστροφέα πλήρους γέφυρας. Προκειμένου να θεωρηθεί για την προσομοίωση η έξοδος του αντιστροφέα ως σταθερή τάση πριν τη σύνδεσή του παρεμβάλλεται ένας DC-DC μετατροπέας. Την τάση που λαμβάνεται από τον μετατροπέα προσομοιώνει η πηγή τάσης που λαμβάνεται ως είσοδος στο κύκλωμα. Οι προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν αφορούσαν σε μεταβολή της τάσης από 340-600V. Ο υπολογισμός των απωλειών του αντιστροφέα χρησιμοποιήθηκε το thermal module του προγράμματος PSIM. Το στοιχείο αυτό είναι μια βάση δεδομένων στην οποία εισάγονται τα στοιχεία του διακόπτη (τύπος, κατασκευαστής, κώδικας κλπ) ενώ παράλληλα έχει καταχωρημένα μαζί με τα στοιχεία τους και κάποια διακοπτικά. Η προσομοίωση στη συγκεκριμένη εργασία έγινε για διακόπτη απωλειών MOFSET δεδομένου ότι η συχνότητα διαμόρφωσης ξεπερνάει τα 100kHz και ο IGBT δεν χρησιμοποιείται σε αυτές τις συχνότητες.



Σχήμα 3.17: Στοιχεία του διακόπτη που χρησιμοποιήθηκαν στο PSIM για την προσομοίωση[18].

Επιπλέον στο κύκλωμα που χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση υπήρχε ένας αισθητήρας ρεύματος και ένα φίλτρο LC που τοποθετείται στην έξοδο του αντιστροφέα και περιορίζει την αρμονική παραμόρφωση του ρεύματος και της τάσης. Με επαναληπτικές δοκιμές θεωρήθηκε πως η μικρότερη αρμονική παραμόρφωση είναι 2.2mH 5μF και αυτή χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση.

Οι προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν αποσκοπούσαν στη σύγκριση των μεθόδων ελέγχου και το διάστημα μέτρησης των αποτελεσμάτων ήταν 0,3-0,6sec. Από το σύνολο των προσομοιώσεων που πραγματοποιήθηκαν αποδείχθηκε ότι η αρμονική παραμόρφωση του ρεύματος ελαχιστοποιείται με μικτή διαμόρφωση. Συγκεκριμένα αποδείχθηκε πως η αύξηση της συνεχούς τάσης στον αντιστροφέα σε τιμές μεγαλύτερες των 380V έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της αρμονικής παραμόρφωσης. Επιπλέον, η μείωση του πλάτους

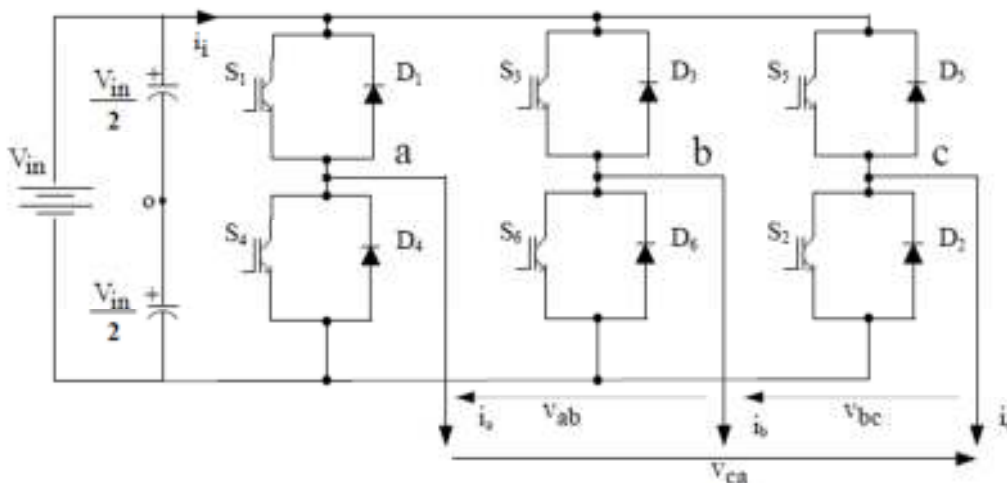
ζώνης ανοχής οδηγεί σε μείωση του συντελεστή αρμονικής παραμόρφωσης και σε αύξηση των απωλειών. Ο έλεγχος με τη μέθοδο ζώνης παραμόρφωσης οδηγεί σε αύξηση της τάσης και βελτίωση της παραμόρφωσης και της αύξησης των απωλειών. Για όλες τις προσομοιώσεις ο βαθμός απόδοσης προσδιορίστηκε ίσος με 95.5-96.5% με τις υψηλότερες τιμές να αντιστοιχούν σε μικρές απώλειες ενώ ο βαθμός απόδοσης ήταν ανεξάρτητος από την αρμονική παραμόρφωση. Οι απώλειες και η παραμόρφωση αποδείχθηκε ότι εξαρτώνται από την τάση εισόδου του αντιστροφέα.

Στη συγκεκριμένη εργασία [18] μελετήθηκε παράλληλα και προσομοιώθηκε η δυνατότητα δημιουργίας υπερτάσεων σε διασυνδεδεμένο με το δίκτυο σύστημα το οποίο ανάγεται σε πρόβλημα ροής φορτίου. Η συγκεκριμένη εργασία καταλήγει στο συμπέρασμα πως η σύνδεση των φωτοβολταϊκών σε αστικό δίκτυο δεν συνεπάγεται σε αύξηση της τάσης στους κόμβους του δικτύου ούτε στο μετασχηματιστή διανομής.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

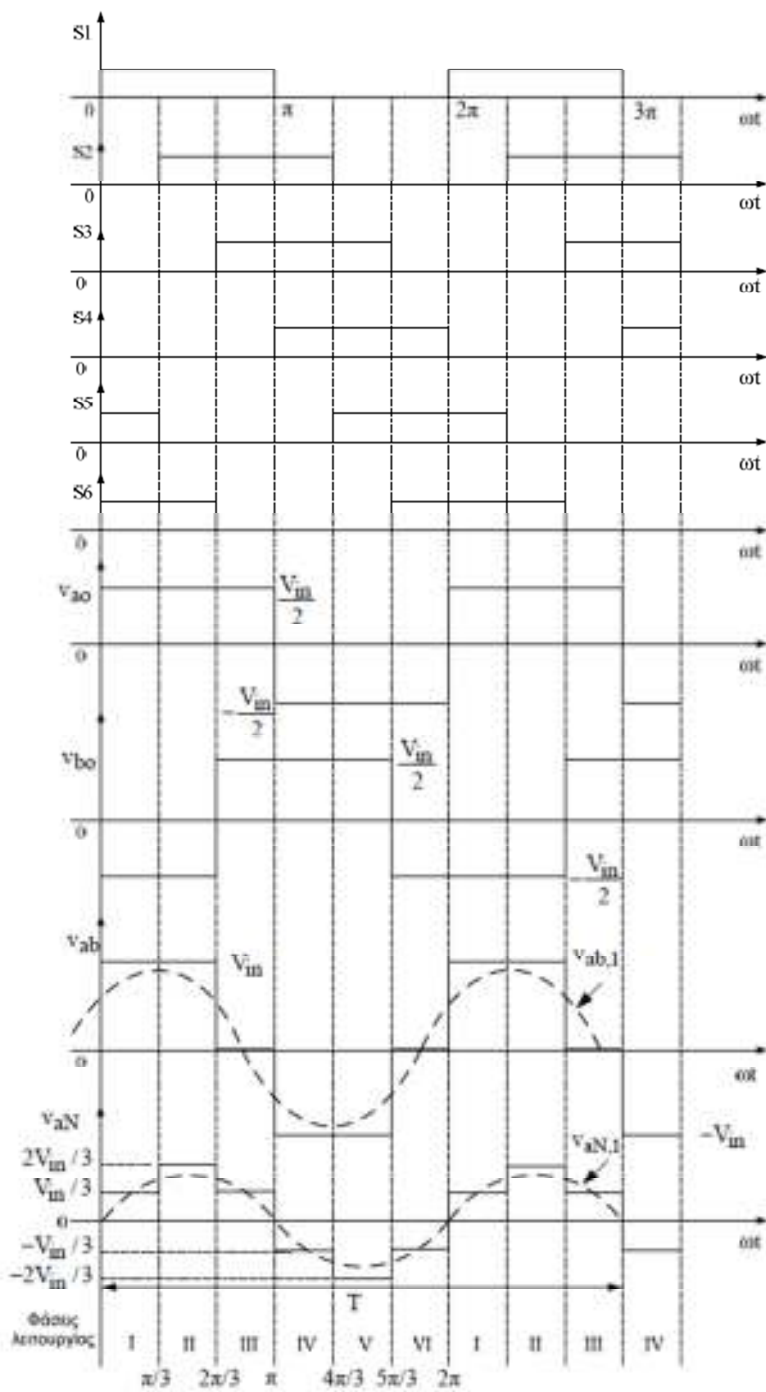
ΤΡΙΦΑΣΙΚΟΣ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΕΑΣ

Εκτός από τους μονοφασικούς αντιστροφέας συνήθως χρησιμοποιούνται στις φωτοβολταϊκές εφαρμογές και τριφασικοί αντιστροφέας με τροφοδοσία συνεχούς τάσης. Ο τριφασικός αντιστροφέας αποτελείται από τρεις αντιστροφέας ημιγέφυρας παράλληλα συνδεδεμένους με την ίδια κυματομορφή τάση εξόδου σε σχέση με ένα σημείο Ο και με μετατόπιση 120° μεταξύ τους[10].



Σχήμα 4.1: Τριφασικός μετατροπέας με IGBT διακόπτες[10].

Οι τριφασικοί μετατροπέες μπορεί να λειτουργούν με παλμούς οδήγησης ημιαγωγικών διακοπών εύρους 180° . Στην περίπτωση που οι κυματομορφές εξόδου των αντιστροφέων είναι γνωστές τότε μπορεί να προσδιοριστούν οι παλμοί οδήγησης των ημιαγωγικών διακοπών. Η λειτουργία του τριφασικού αντιστροφέα μπορεί να διαιρεθεί σε έξι διαστήματα. Για την ομαλή λειτουργία του τριφασικού αντιστροφέα πρέπει η αγωγή ανάμεσα στα ζεύγη (S_1, S_4) , (S_3, S_6) και (S_5, S_2) να μην είναι ταυτόχρονη γιατί διαφορετικά η συνεχής τάση στην έξοδο του αντιστροφέα βραχυκυκλώνεται[10].



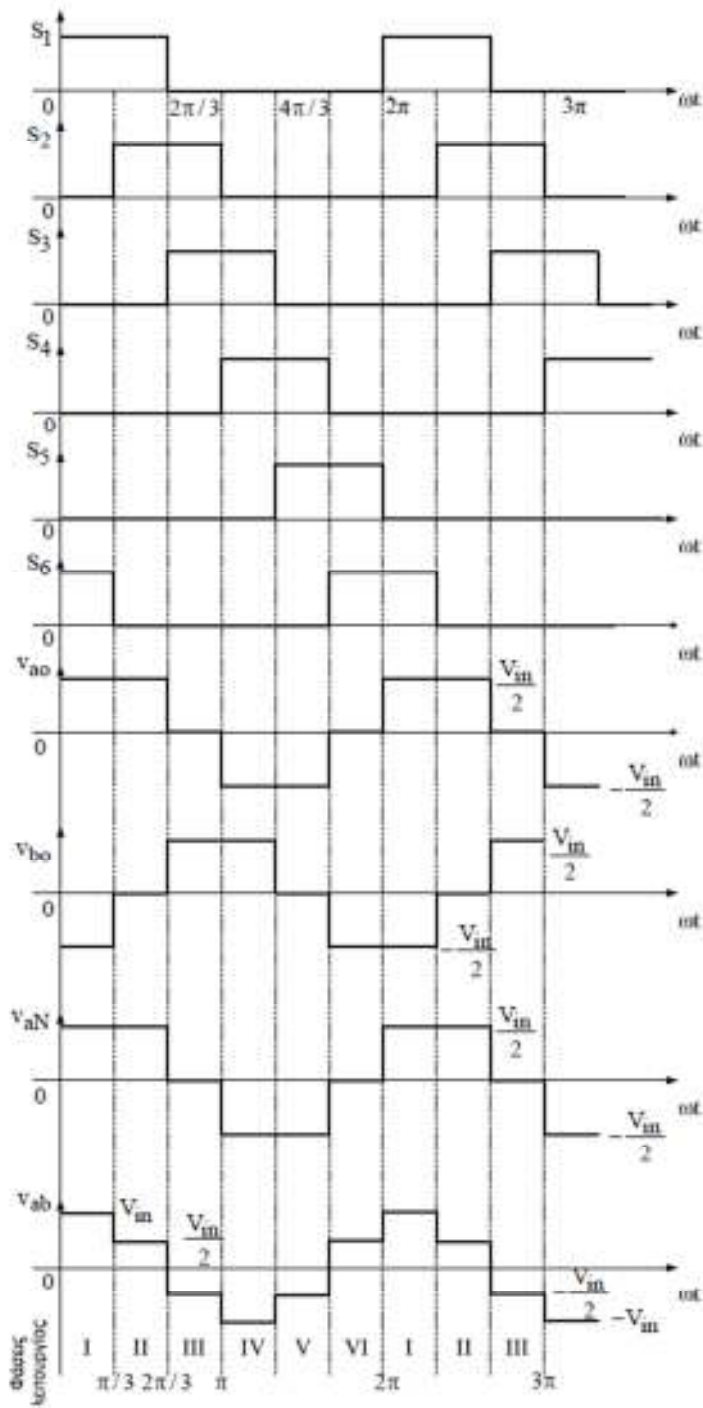
Σχήμα 4.2: Κυματομορφές αντιστροφέα και φορτίου για παλμούς οδήγησης εύρους 180° και συμμετρικό ωμικό επαγωγικό φορτίο[10].

Οι τριφασικοί αναστροφείς μπορεί να λειτουργήσουν και με παλμούς ημιαγωγικών διακοπών εύρους 120° . σε αυτήν την περίπτωση σε κάθε διάστημα λειτουργίας του αντιστροφέα η αγωγή πραγματοποιείται από έναν

διακόπτη από το πάνω μέρος και ένα διακόπτη από το κάτω μέρος. Και σε αυτήν την περίπτωση η λειτουργία του αντιστροφέα για μια περίοδο της τάσης εξόδου διαιρείται σε έξι διαστήματα στα οποία οι τάσεις εξόδου επιτυγχάνονται με διάφορους συνδυασμούς αγωγής[10].

Πίνακας 4.1: Διαστήματα λειτουργίας ημιαγωγικών διακοπών για παλμούς οδήγησης 120° [10]

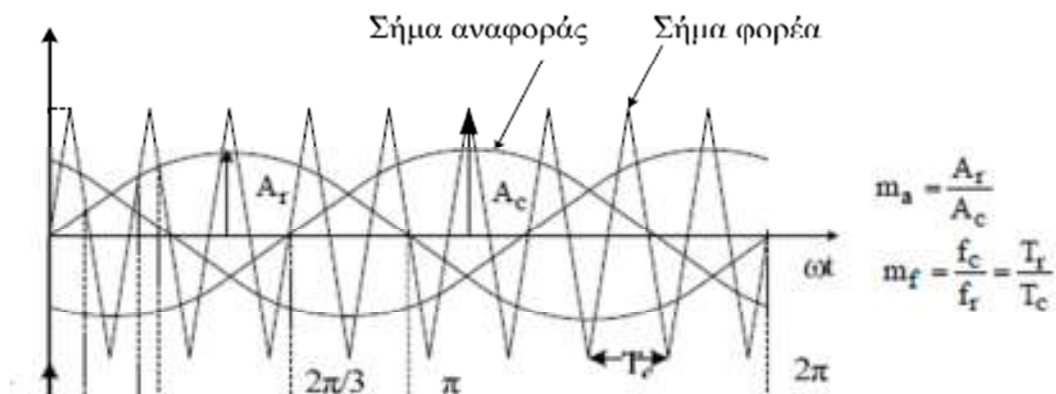
ΑΡΙΘΜΟΣ ΧΡΟΝΙΚΟΥ ΔΙΑΣΤΗΜΑΤΟΣ	ΧΡΟΝΙΚΟ ΔΙΑΣΤΗΜΑ	ΑΛΛΗΛΟΥΧΙΑ ΑΓΩΓΗΣ ΔΙΑΚΟΠΤΩΝ	ΕΠΙΠΕΔΟ ΦΑΣΙΚΗΣ ΤΑΣΗΣ ΕΞΟΔΟΥ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΕΑ V_m	ΕΠΙΠΕΔΟ ΦΑΣΙΚΗΣ ΤΑΣΗΣ ΦΟΡΤΙΟΥ v_{AN}
I	$[0, \pi/3]$	S_1, S_6	$+V_m/2$	$+V_m/2$
II	$[\pi/3, 2\pi/3]$	S_1, S_2	$+V_m/2$	$+V_m/2$
III	$[2\pi/3, \pi]$	S_1, S_2	0	0
IV	$[\pi, 4\pi/3]$	S_2, S_4	$-V_m/2$	$-V_m/2$
V	$[4\pi/3, 5\pi/3]$	S_2, S_4	$-V_m/2$	$-V_m/2$
VI	$[5\pi/3, 2\pi]$	S_2, S_6	0	0



Σχήμα 4.3: Κυματομορφές αντιστροφέα και φορτίου για παλμούς οδήγησης 120° και ωμικό συμμετρικό φορτίο[10]

4.1 Έλεγχος Ημιτονοειδούς Διαμόρφωσης Έυρους παλμών τριφασικού μετατροπέα (Sinusoidal Pulse Width Modulation, SPWM)

Οι τάσεις εξόδου σε έναν τριφασικό μετατροπέα είναι τετραγωνικές κυματομορφές με ανώτερες αρμονικές που έχουν συχνότητες κοντινές στη θεμελιώδη αρμονική συχνότητα. Η μείωση των ανώτερων αρμονικών πραγματοποιείται με την εφαρμογή ενός φίλτρου το οποίο εφαρμόζεται ανάμεσα στο φορτίο και στην έξοδο του αντιστροφέα. Στην περίπτωση της SPWM τεχνικής ελέγχου χρησιμοποιούνται τρεις ημιτονοειδείς κυματομορφές αναφοράς και μια τριγωνική κυματομορφή φορέα. Οι παλμοί οδήγησης των ημιαγωγικών διακοπών S_1-S_6 του αντιστροφέα όπως επίσης και οι τάσεις εξόδου των τριών ημιγεφυρών σε σχέση με το θεωρούμενο ουδέτερο σημείο ορίζονται από τα σημεία τομής των κυματομορφών αναφοράς και της κυματομορφής του φορέα[10].

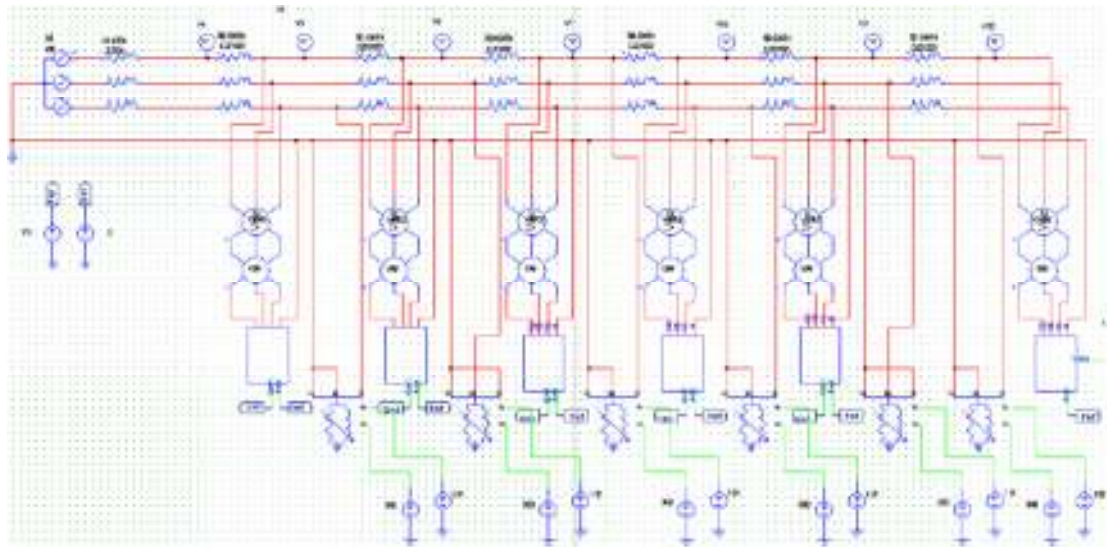


Σχήμα 4.4: Κυματομορφές αναφορών και φορέα στην τεχνική SPWM[10]

4.2 Σχεδίαση και εφαρμογές τριφασικού σε φωτοβολταϊκά

Στην εργασία του Βλαχόπουλου [19] παρουσιάζεται ο σχεδιασμός ενός τριφασικού αντιστροφέα διακοπτικού τύπου με ικανότητα ελέγχου της ενεργού και άεργου ισχύος στην έξοδό του. Με δεδομένο ότι ο συγκεκριμένος αντιστροφέας πρόκειται να χρησιμοποιηθεί στην έξοδο μιας φωτοβολταϊκής

εγκατάστασης ο σχεδιασμός επικεντρώνεται στο 1^ο και 4^ο τεταρτημόριο. Ο σχεδιασμός βασίστηκε στον έλεγχο του ρεύματος και δημιουργήθηκε η κατάλληλη κυματομορφή όπου διασφάλισε ότι ο αντιστροφέας θα δίνει συγκεκριμένη άεργο και ενεργή ισχύ στην έξοδό του. Παράλληλα, σχεδιάστηκε το απαραίτητο φίλτρο για τη μείωση των αρμονικών τάσεων και το οποίο εγκαταστάθηκε στην έξοδο της εγκατάστασης. Ο έλεγχος λειτουργίας του τριφασικού αντιστροφέα εξετάστηκε στη διασύνδεσή του με δίκτυο χαμηλής τάσης σε αγροτική περιοχή μέσω της προσομοίωσης στο PSIM.

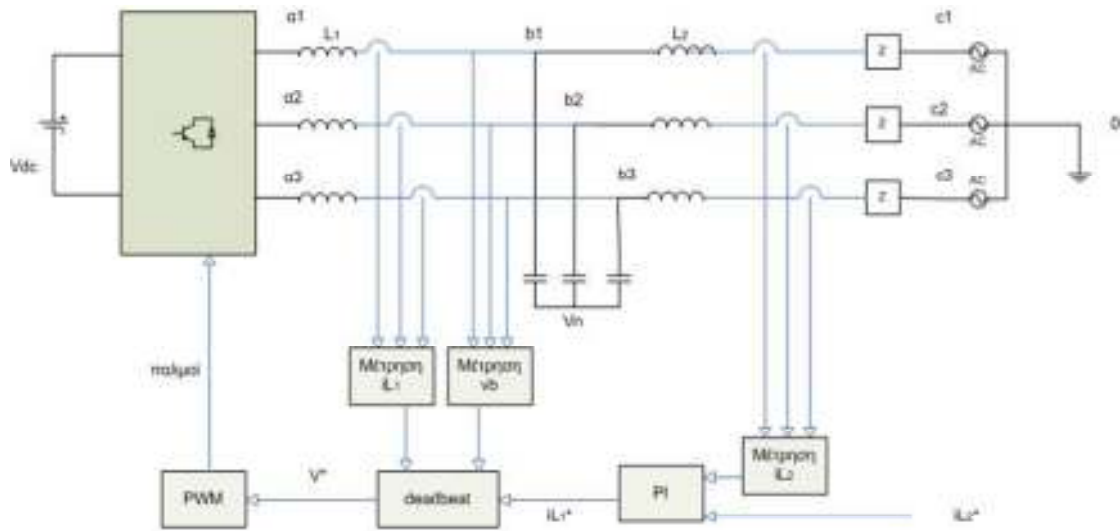


Σχήμα 4.5: Δίκτυο που προσομοιώθηκε στην [19]

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της συγκεκριμένης εργασίας η αύξηση της ισχύς εξόδου των φωτοβολταϊκών προκαλεί μεγαλύτερη ανύψωση τάσης. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα ο τελευταίος κόμβος στο δίκτυο να παρουσιάζει μεγαλύτερη τάση από τον πρώτο. Στον περιορισμό του φαινομένου αυτού συμμετέχει η ενεργός και άεργος ισχύς των καταναλωτών. Στη γραμμή τάσης του δικτύου μπορεί να εμφανιστεί πτώση τάσης όταν η ζήτηση είναι μεγαλύτερη ή ίση προς την παραγόμενη ισχύ. Αποδείχθηκε επίσης ότι όταν οι καταναλωτές σε ένα δίκτυο καταναλώνουν την μικρότερη ισχύ η τάση των κόμβων είναι η μικρότερη. Ως τελικό συμπέρασμα μετά από ένα πλήθος προσομοιώσεων προέκυψε πως η κεντρική διαχείριση δεν είναι απαραίτητη δεδομένου ότι σε μια περιοχή όπου υπάρχουν πολλοί αντιστροφείς η

εξισορρόπησή τους μπορεί να επιτευχθεί με την ενεργό ισχύ που παρέχεται στο δίκτυο[19].

Ο Παπαβασιλείου [20] στην εργασία του ελέγχει το ρεύμα εξόδου ως μέθοδο διαμόρφωσης του συστήματος διαμόρφωσης ενός αντιστροφέα με φίλτρο LCL. Για την εξαγωγή συμπερασμάτων χρησιμοποιήθηκε στη συγκεκριμένη εργασία ένας συνδυασμός ελέγχου dealbelt και ελέγχου PI.

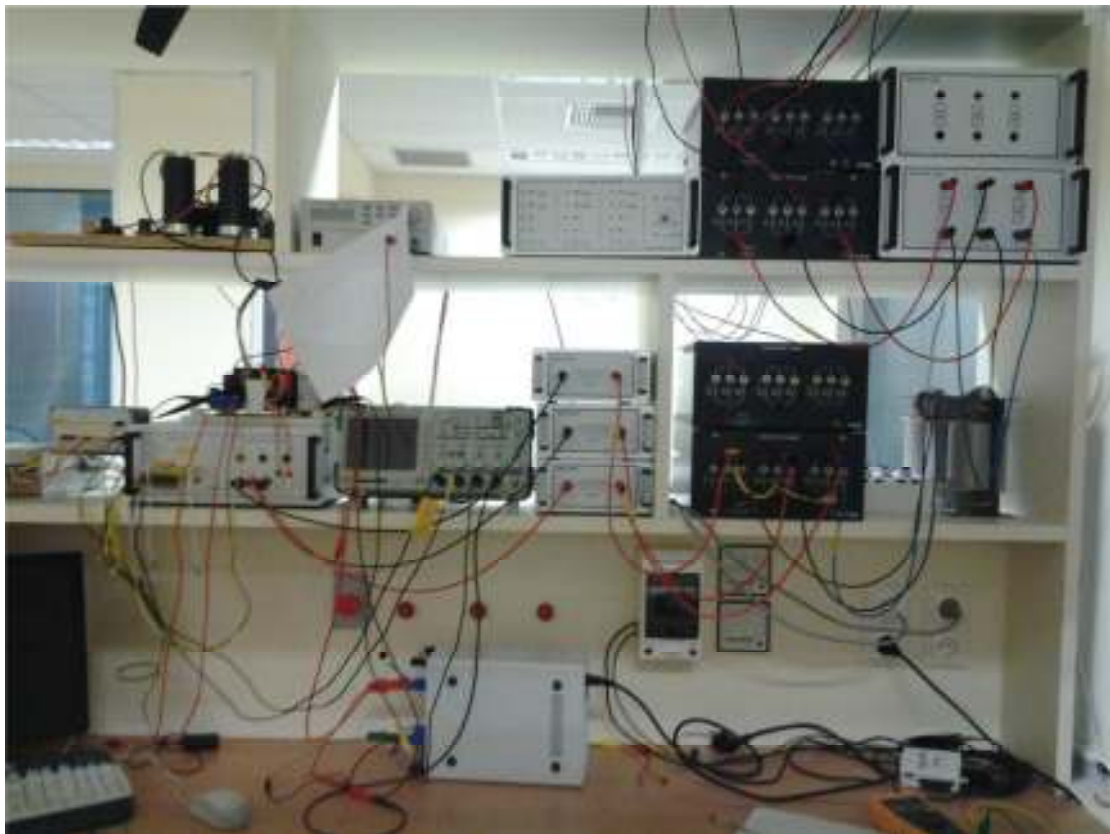


Σχήμα 4.6: Διάγραμμα ελέγχου στην [20]

Η χρήση του ελέγχου dealbelt στη συγκεκριμένη εργασία επιμερίζει τον έλεγχο και τον ανάγει σε μια άθροιση και σε μια ενίσχυση απλοποιώντας τον από σχετικά συστήματα που αναφέρονται στη βιβλιογραφία. Για την προσομοίωση του συστήματος ο Παπαβασιλείου χρησιμοποιεί το λογισμικό Simulink και επιμερίζει το κύκλωμα σε δύο επιμέρους κυκλώματα ελέγχου. Ο PI ελεγκτής ελέγχει τον εξωτερικό βρόγχο ελέγχου ενώ ο dealbelt τον εσωτερικό. Στη συγκεκριμένη εργασία αποδεικνύεται πως ο dealbelt έλεγχος είναι ανεξάρτητος από την μεταβολή της τάσης σε μια περίοδο ενώ το κύκλωμα πρόβλεψης του συγκεκριμένου ελεγκτή δεν είναι απαραίτητο να υπάρχει. Επιπλέον προσδιορίζονται οι συναρτήσεις μεταφοράς του PI ελεγκτή που είναι 10^{0u} βαθμού και προσδιορίζεται ο χρόνος αποκατάστασης ίσος με 20ms. Ο συντονισμός του ρεύματος εξόδου του φίλτρου προσδιορίζεται στα 5dB και

αποδुकνείετα πως η συχνότητα συντονισμού είναι ανάλογη με την τάση του δικτύου. Η επιλογή των παραμέτρων του κυκλώματος πραγματοποιήθηκε μέσω της αρμονικής αντίστασης του μετατροπέα και αποδείχθηκε πως ο συντονισμός γίνεται κοντά στις συχνότητες συντονισμού του φίλτρου LCL που θεωρήθηκε.

Ο Κωστούλας [21] χρησιμοποίησε έναν τριφασικό αντιστροφέα με πηγή τάσης ως στοιχείο πειραματικής διάταξης με την οποία εξέτασε την τροφοδοσία ενός μεταβαλλόμενου RL φορτίου από μια φωτοβολταϊκή γεννήτρια. Η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε περιλάμβανε επίσης μια φωτοβολταϊκή γεννήτρια, έναν τριφασικό μετασχηματιστή και ένα βαθυπερατό φίλτρο LC μια συσκευή βηματικής μεταβολής του φορτίου ενώ ο έλεγχος πραγματοποιήθηκε μέσω μικροεπεξεργαστή σε δύο επίπεδα.



Σχήμα 4.7: Η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε στην [21]

Στη συγκεκριμένη εργασία το πρώτο επίπεδο ελέγχου αφορούσε στον τριφασικό αντιστροφέα και μέσω του μικροεπεξεργαστή επιτεύχθηκε το

κύκλωμα παλμοδότησης με τη χρήση της μεθόδου SPWM ενώ το δεύτερο επίπεδο συσχετίστηκε με την υλοποίηση ενός PI ελεγκτή ο οποίος σε συνεργασία με το κύκλωμα παλμοδότησης σταθεροποιούσε την τάση του φορτίου[21].

Ο επιτυχής συνδυασμός του PI με την μέθοδο SPWM είχαν ως αποτέλεσμα να επιτευχθούν τα επιθυμητά χαρακτηριστικά της μόνιμης κατάστασης λειτουργίας. Η σταθεροποίηση της τάσης επιτεύχθηκε ακόμα και στην περίπτωση μεγάλων μεταβολών τάσεων εισόδου στον αντιστροφέα ενώ με την χρήση του σωστού φίλτρου μειώθηκε σημαντικά η αρμονική τάση του φορτίου.

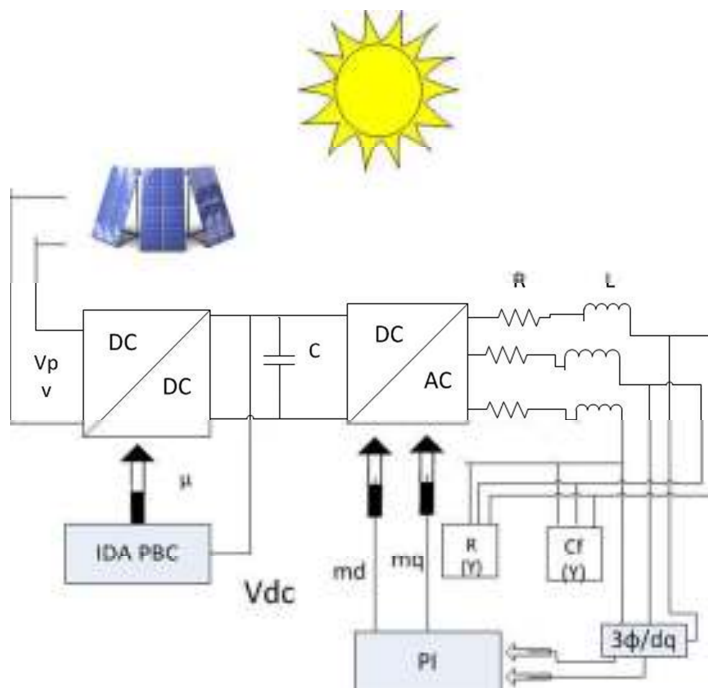
4.3 Αντιστροφείς πολλαπλών βαθμίδων

Εκτός από τους τυπικούς αντιστροφείς δύο βαθμίδων έχουν μελετηθεί και αντιστροφείς πολλαπλών βαθμίδων. Ο Πέγκος [22] προσομοίωσε έναν μετατροπέα DC-DC που συνδέεται σε σειρά με έναν τριφασικό DC-AC αντιστροφέα σε μεμονωμένο σύστημα. Η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε στη συγκεκριμένη εργασία περιλάμβανε μια συσκευή συνεχούς τάσης, έναν ανυψωτή τάσης, μια αντίσταση συνδεδεμένη σε σειρά και ένα σύστημα απόκτησης δεδομένων έτσι ώστε να μεταφέρονται τα δεδομένα τάσης εξόδου στον υπολογιστή και να λαμβάνεται ο κατάλληλος παλμός ο οποίος αποστέλλεται στο πρόγραμμα οδήγησης του μετατροπέα στο πρόγραμμα προσομοίωσης που στη συγκεκριμένη περίπτωση ήταν το Labview. Μέσω του Labview έγινε η εφαρμογή του μη γραμμικού ελεγκτή.



Σχήμα 4.8: Πειραματική διάταξη στη [22].

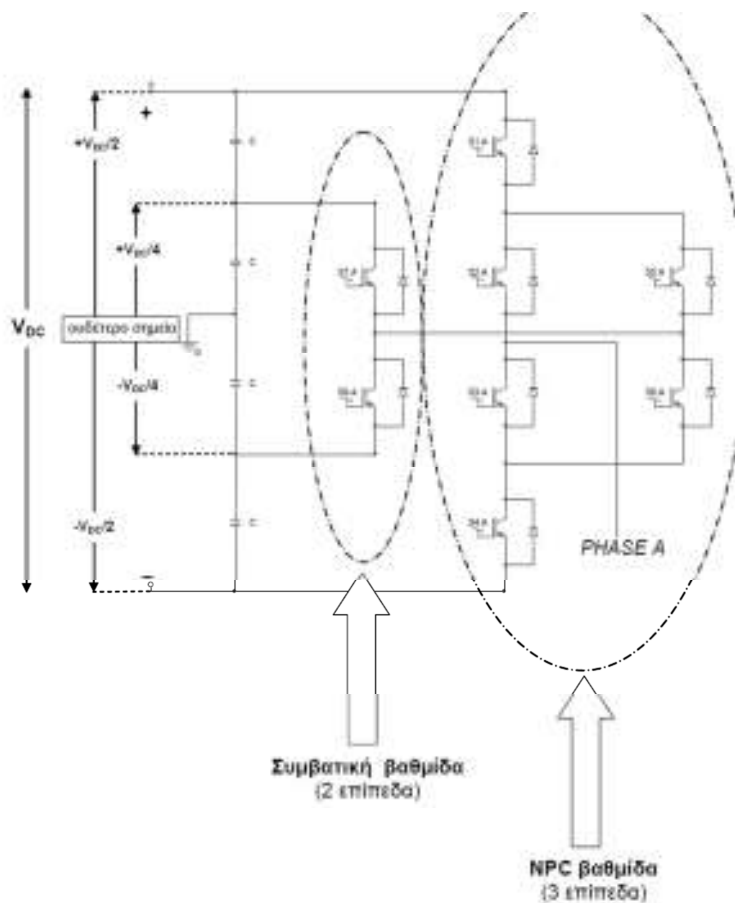
Στη συγκεκριμένη εργασία χρησιμοποιήθηκε ένας αντιστροφέας με έξι διακοπτικά στοιχεία που ήταν ομαδοποιημένα ως προς τη λειτουργία τους. Στη συγκεκριμένη εργασία μελετήθηκε πειραματικά ένα αυτόνομο σύστημα και για αυτό δεν υπάρχουν πηγές τάσης. Η προσομοίωση των εξισώσεων λειτουργίας του συστήματος έγινε με τη βοήθεια του Simulink και ο έλεγχος πραγματοποιήθηκε μέσω μικροεπεξεργαστή PI.



Σχήμα 4.9: Σχήμα ελέγχου σε κάθε βαθμίδα [22]

Το βασικό συμπέρασμα της συγκεκριμένης εργασίας ήταν η διαπίστωση πως οι παράμετροι του συστήματος επηρεάζουν την απόκριση του συστήματος.

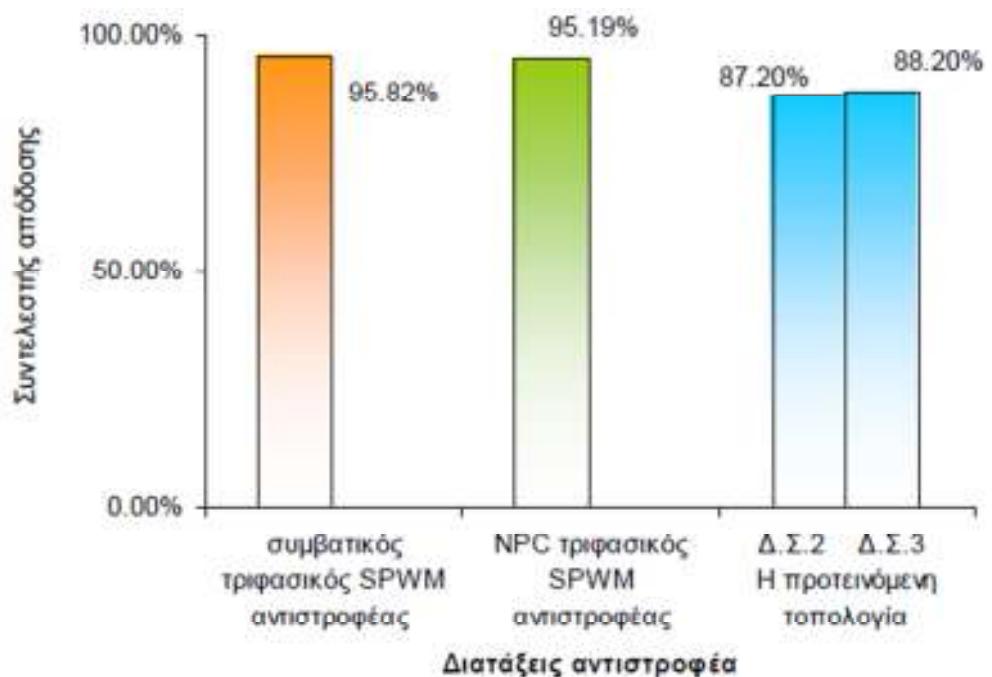
Σε άλλη εργασία [23] σχεδιάστηκε και προσομοιώστηκε ένας τριφασικός αντιστροφέας τάσης τεσσάρων επιπέδων. Στη δομή του συγκεκριμένου αντιστροφέα συνδυάζονται οι δομές των αντιστροφέων δύο και τριών επιπέδων και δημιουργούνται σενάρια για την έναρξη και το σταμάτημα των ημιαγωγικών διακοπών του αντιστροφέα. Η συγκεκριμένη διάταξη ελαχιστοποιεί την αρμονική παραμόρφωση αλλά παρουσιάζει μεγάλες απώλειες λόγω του μεγάλου αριθμού ημιαγωγικών στοιχείων που περιέχει.



Σχήμα 4.10: Τριφασικός αντιστροφέας τεσσάρων επιπέδων[23]

Στους αντιστροφείς πολλάπλών επιπέδων επιτυγχάνεται κλιμακωτή έξοδος η οποία μειώνει τις αρμονικές εξόδου οι οποίες τείνουν προς το μηδέν όσο

αυξάνονται τα επίπεδα τάσης εξόδου. Ο αντιστροφέας τεσσάρων επιπέδων που προτείνεται στη συγκεκριμένη εργασία [23] είναι συνδυασμός του συμβατικού και του NPC τριφασικού αντιστροφέα. Με τη συγκεκριμένη τοπολογία αντισταθμίζονται τα μειονεκτήματα των συγκεκριμένων κατηγοριών αντιστροφέων πολλαπλών επιπέδων και επιτρέπεται η λειτουργία με υψηλές τάσεις εισόδου και χαμηλό αρμονικό περιεχόμενο. Η προσομοίωση που πραγματοποιήθηκε επιβεβαίωσε τις κυματομορφές εξόδου και το γεγονός πως στον τριφασικό αντιστροφέα οι αρμονικές των εξόδων εκμηδενίζονται. Αποδुकνείται επίσης πως ο συμβατικός αντιστροφέας παρουσιάζει τις ελάχιστες απώλειες ισχύος στους διακόπτες και ανάμεσα στους διακόπτες υπάρχει ισοκατανομή απωλειών. Οι απώλειες του υβριδικού αντιστροφέα εντοπίστηκαν στους ακραίους διακόπτες ενώ προσδιορίστηκε και η κυρίαρχη αρμονική του φάσματος και τα χαρακτηριστικά της. Στη συγκεκριμένη εργασία είναι εφικτή η σύγκριση των αντιστροφέων με βάση το συντελεστή απόδοσης τους και αποδείχθηκε πως ο προτεινόμενος αντιστροφέας έχει υψηλότερες απώλειες σε σχέση με τους συμβατικούς μετατροπείς.



Σχήμα 4.11: Συγκριτικό διάγραμμα απόδοσης αντιστροφέων βάσει του βαθμού απόδοσης[23]

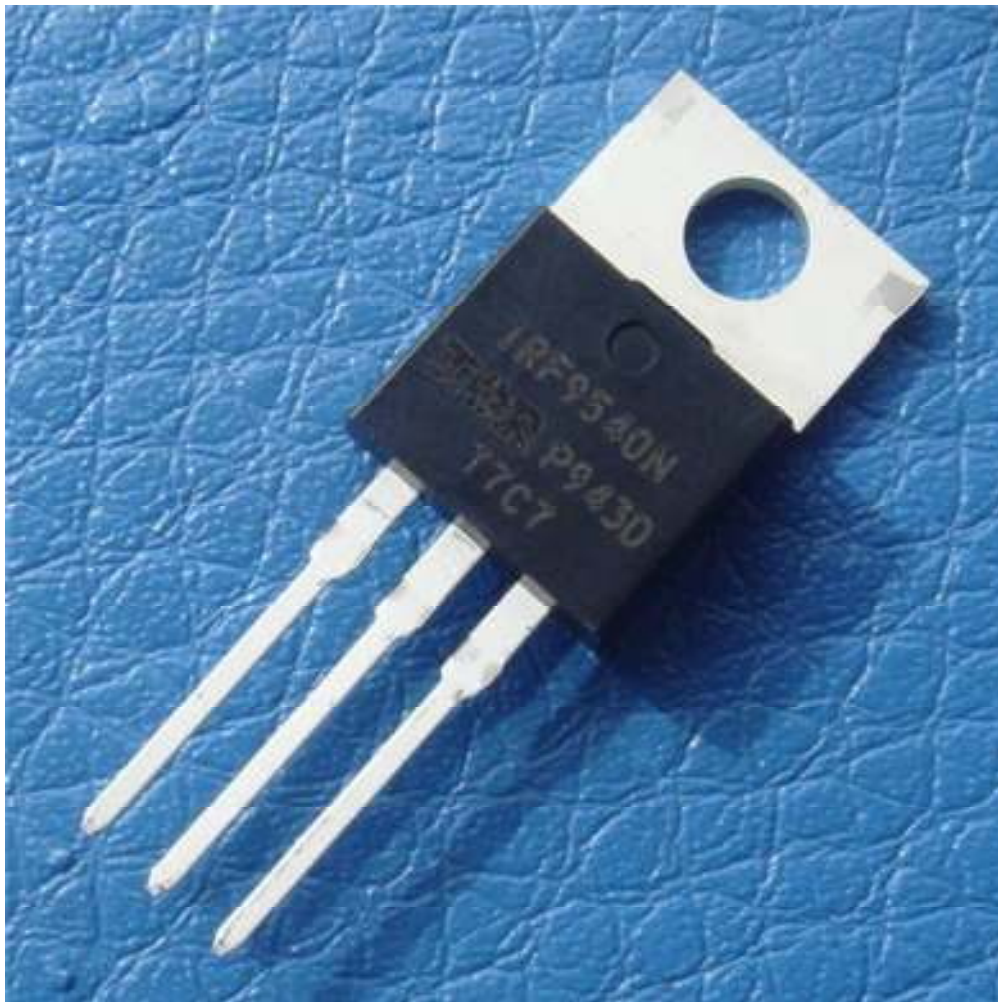
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΕΑ ΣΕ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗ ΠΛΑΚΕΤΑ ΡΑΣΤΕΡ

Για την υλοποίηση του αντιστροφέα στο ράστερ χρησιμοποιήθηκαν τα εξής υλικά:

1) 4 MOSFET εκ των οποίων

2 PMOS τύπου IRF954 ON με προδιαγραφές $V_{DSS} = 100V$, $R_{DS(ON)} < 0.117 \Omega$ και $I_D = 23A$

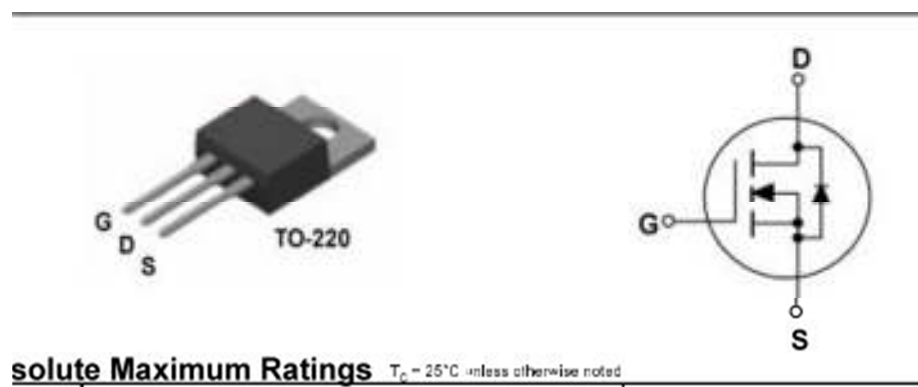


Σχήμα 5.1: MOSFET P_{CHANNEL} IRF954 ON

2 NMOS τύπου MTP3055V με προδιαγραφές $V_{DSS} = 60V$, $R_{DS(ON)} < 150m\Omega$
και $I_D = 12A$



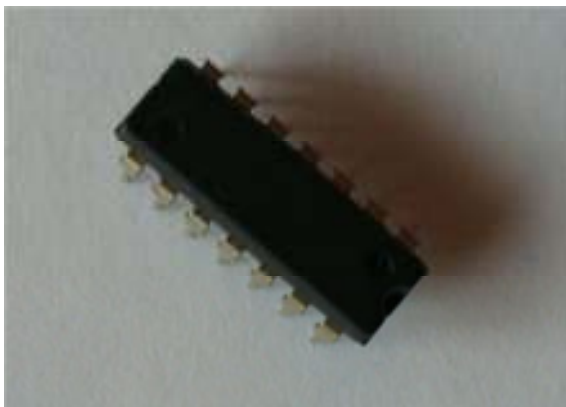
Σχήμα 5.2: MOSFET N_{CHANNEL} MTP3055V



absolute Maximum Ratings $T_C = 25^\circ C$ unless otherwise noted

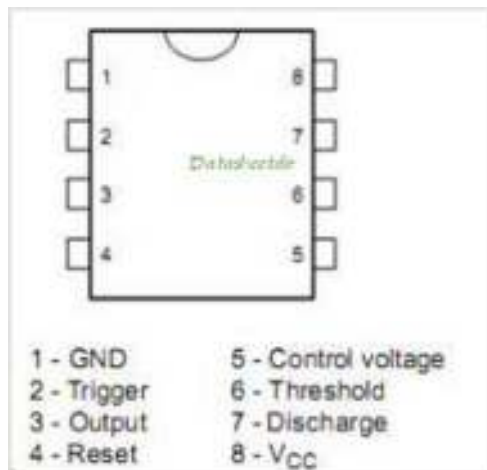
Σχήμα 5.3: datasheet των MOSFET

2)1 πύλη NOT 7404 για την εναλλαγή λειτουργίας των MOSFET.

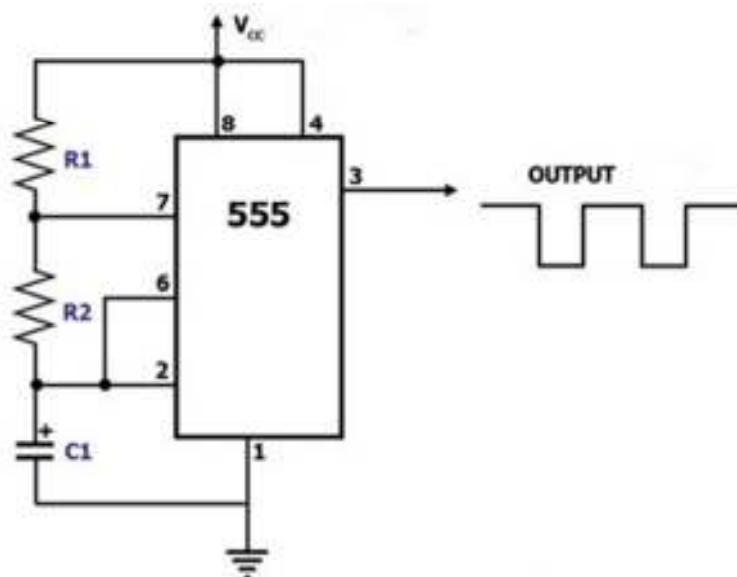


Σχήμα 5.4: Πύλη NOT 7404

3)1 γεννήτρια παλμών NE555N



Σχήμα 5.5: Datasheet NE555N



Σχήμα 5.6: Γεννήτρια τετραγωνικών παλμών με το ολοκληρωμένο 555

Από τους τύπους:

$$f = 1 / \ln 2 * C * (R1 + 2R2)$$

$$T_{ON} = \ln 2 * C * (R1 + 2R2)$$

$$T_{OFF} = \ln 2 * C * R2$$

Για τη ζητούμενη συχνότητα $f=50\text{Hz}$ υπολογίστηκε ότι πρέπει να χρησιμοποιηθούν οι παρακάτω αντιστάσεις και πυκνωτές:

$$C=100\text{nF}$$

$$R1=10\text{K}\Omega$$

$$R2=100\text{K}\Omega$$

4)Τέλος για το κύκλωμα LC από τον τύπο:

$$f=1/2\pi*\sqrt{L * C}$$

για τη ζητούμενη συχνότητα $f=50\text{Hz}$ έχουμε:

$$50=1/2*3.14*\sqrt{L * C}$$

$$314*\sqrt{L * C}=1$$

$$L * C=1*10^{-5}$$

Στην αγορά βρέθηκαν οι εξής πυκνωτές και πηνία που να ικανοποιούν την παραπάνω εξίσωση:

$$L=1\text{H και } C=10\mu\text{F.}$$

ΠΟΥ ΕΙΝΑΙ ΤΑ ΣΧΗΜΑΤΑ ΠΟΥ ΔΕΙΧΝΟΥΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ?? Αν έχεις έστω φωτογραφίες από τον παλμογράφο με το κύκλωμά σου και τις μετρήσεις, να τις προσθέσεις οπωσδήποτε! Στον κ. Νικολαΐδη πήγες (έχει παλμογράφο με ψηφιακή έξοδο για αποθήκευση δεδομένων);; Θα πρέπει οπωσδήποτε να τα κάνεις αυτά, έστω κι αν είναι έτοιμα μόνο για την παρουσίαση. Αλλιώς η πτυχιακή σου θα είναι εξαιρετικά αδύναμη.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στη συγκεκριμένη εργασία παρουσιάζεται μια βιβλιογραφική ανασκόπηση των αντιστροφών ισχύος ως αναπόσπαστο κομμάτι μιας φωτοβολταϊκής εγκατάστασης. Οι αντιστροφείς αποτελούν διατάξεις μετατροπής συνεχούς τάσεως ή ρεύματος σε εναλλασσόμενο και συνεισφέρουν στην απόδοση του φωτοβολταϊκού συστήματος.

Αποδुकνείεται από τα αποτελέσματα της βιβλιογραφίας πως η μελέτη των αντιστροφών μπορεί να γίνει σε πειραματικό αλλά και σε θεωρητικό επίπεδο με τη χρήση προσομοιώσεων. Στις περισσότερες εργασίες η πειραματική και θεωρητική προσέγγιση συνδυάζονται ενώ η μελέτη επικεντρώνεται στον προσδιορισμό των χαρακτηριστικών λειτουργίας των αντιστροφών κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες λειτουργίας.

Οι τριφασικοί αντιστροφείς επιτρέπουν τη λειτουργία σε υψηλές τάσεις ενώ οι μονοφασικοί σε μικρές τάσεις δικτύου. Εκτός από αυτούς τους δυο συμβατικούς τύπους αντιστροφών στη βιβλιογραφία συναντώνται και οι μετατροπείς πολλαπλών επιπέδων οι οποίοι επιτρέπουν ακόμα μεγαλύτερες τάσεις και περιορίζουν τα μειονεκτήματα που σχετίζονται με τις αρμονικές τάσεως στους άλλους δύο αντιστροφείς.

Όλες οι εργασίες που αναφέρονται στους αντιστροφείς τάσεως για φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις αναφέρονται στη μελέτη ήδη υπάρχοντων συστημάτων και στους συνδυασμούς τους και ο πειραματικός προσδιορισμός των παραμέτρων λειτουργίας τους γίνεται σε εργαστηριακό επίπεδο. Θα ήταν ιδιαίτερα χρήσιμη όμως η επιβεβαίωση των συγκεκριμένων αποτελεσμάτων μέσω πιλοτικών εφαρμογών φωτοβολταϊκών συστημάτων που θα επιτρέπουν

τον προσδιορισμό της συνολικής συνεισφοράς του αντιστροφέα στην παραγωγή ισχύος του μονομένου συστήματος και της μεταφοράς ισχύος του διασυνδεδεμένου συστήματος.

Μπορείς εδώ να παρουσιάσεις τον πίνακα σύγκρισης πτυχιακών εργασιών σε αντιστροφείς του Τσακνάκη (σου στέλνω την πτυχιακή σε 2^η επισύναψη, ο πίνακας είναι στο τέλος), εντάσσοντας και τη δική σου στη λίστα, καθώς και όσες έχεις βρει εσύ; Ο πίνακας ας είναι σε ξεχωριστό κεφάλαιο, και ανεξάρτητα από την βιβλιογραφία σου η οποία ήδη είναι πολύ καλή. Μπορείς να μορφοποιήσεις τον πίνακα ώστε να είναι πιο ευπαρουσίαστος και κατανοητός;

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Γκάγκας, Γ., *Ηλιακή Ενέργεια*. Παρουσίαση, Περιφερειακό Ενεργειακό Κέντρο Θεσσαλία, διαθέσιμο στο http://www.europeangreencities.com/pdf/TrainingTools/65.%20SOLAR%20ENERGY_GR.pdf.
2. International Energy Agency, *Solar Energy Perspectives*. Renewable Energy Technologies, available at: www.iea.org, 2011.
3. IEA, *World Energy Outlook*. <http://www.worldenergyoutlook.org/media/weo2010.pdf>, 2010.
4. Σύνδεσμος, Ε.Φ., *Φωτοβολταϊκά: Ένας πρακτικός τεχνικός οδηγός*. 2011.
5. http://www.prasina.gr/main/index.php?option=com_content&view=article&id=200&Itemid=201.
6. <http://panacea.med.uoa.gr/topic.aspx?id=908>.
7. PV-TRAC, *A Vision for Photovoltaic Technology*. <http://ec.europa.eu/research/energy/pdf/vision-report-final.pdf>.
8. http://solar-systems.gr/product_1.htm.
9. Worden, J., Zuecher Martinson, M, *How inverters work*.
10. ΑΠΘ, *ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΕΙΣ ΙΣΧΥΟΣ (INVERTERS DC-AC)*. Σημειώσεις μαθήματος διαθέσιμο στο <http://mycourses.ntua.gr/courses/ECE1094/document/%C1%ED%F4%E9%F3%F4%F1%EF%F6%E5%DF%F2-%C2%E9%EF%EC%E7%F7%E1%ED%E9%EA%DE%F2.pdf>.
11. Πασπαλιάρης, Α.Ι., *Μοντελοποίηση Συστήματος Κυψέλης Καυσίμου – Αντιστροφέα Τάσης και Ανάπτυξη Διεπαφής Χρήστη για τον Έλεγχο Πραγματικού Συστήματος σε ένα Ενεργειακά Αυτόνομο Κτήριο Υδρογόνου - ΑΠΕ*. Διπλωματική εργασία, ΕΜΠ, Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και μηχανικών υπολογιστών, 2012.
12. *CHAPTER 2 SINGLE PHASE PULSE WIDTH MODULATED INVERTERS*. <http://www.tntech.edu/files/cesr/StudThesis/asuri/Chapter2.pdf>.
13. Βεργοπούλου, Μ., *Ήπιες μορφές ενέργειας Σχεδίαση φωτοβολταϊκού συστήματος διασυνδεδεμένου στο δίκτυο*. Διπλωματική εργασία,

Πανεπιστήμιο Πατρών, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας ηλεκτρονικών υπολογιστών.

14. Δώδα, Σ., *Εξομοίωση Φωτοβολταϊκού Συστήματος Διασυνδεδεμένου στο Δίκτυο Χαμηλής Τάσης*. Διπλωματική Εργασία Πανεπιστήμιο Πατρών, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Υπολογιστών 2010.
15. Κυρίτσης, Α., *ΒΕΛΤΙΣΤΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΥΨΙΣΥΧΝΟΥ ΜΟΝΟΦΑΣΙΚΟΥ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΕΑ ΓΙΑ ΤΗ ΔΙΑΣΥΝΔΕΣΗ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΙΚΡΗΣ ΙΣΧΥΟΣ ΜΕ ΤΟ ΔΙΚΤΥΟ ΧΑΜΗΛΗΣ ΤΑΣΗΣ*. Διδακτορική Διατριβή, Πανεπιστήμιο Πατρών, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Υπολογιστών, 2009.
16. Αραβανής, Θ.Ι., *Μελέτη και κατασκευή διάταξης διασύνδεσης φωτοβολταϊκής γεννήτριας με το ηλεκτρικό δίκτυο χαμηλής τάσης*. Διπλωματική Εργασία, Πανεπιστήμιο Πατρών, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Υπολογιστών, 2012.
17. Γκαρτζώνη, Λ., *Ανάλυση, Σχεδιασμός και Διερεύνηση της λειτουργίας μονοφασικού φωτοβολταϊκού συστήματος συνδεδεμένου στο δίκτυο*. Διπλωματική Εργασία Πανεπιστήμιο Πατρών, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Υπολογιστών, 2010.
18. Μεσεμανώλης, Α., Ποντικίδης, Δ, *Μοντελοποίηση μονοφασικού inverter φωτοβολταϊκών και μελέτη της συμπεριφοράς του σε αστικά δίκτυα*. Διπλωματική Εργασία, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, 2009.
19. Βλαχόπουλος, Σ., *Σχεδίαση τριφασικού αντιστροφέα για διασύνδεση φωτοβολταϊκών στο δίκτυο με δυνατότητα ρύθμισης άεργης ισχύος*. Διπλωματική Εργασία, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, 2010.
20. Παπαβασιλείου, Α., *Έλεγχος ρεύματος αντιστροφέων πηγής τάσης για σύνδεση στο δίκτυο με LCL φίλτρο*. Διπλωματική Εργασία, ΕΜΠ, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών 2006.
21. Κωστούλας, Σ., *Μεταφορά εξομοιωμένου συστήματος ελέγχου σε μικροεπεξεργαστή για τροφοδότηση φορτίου από φωτοβολταϊκή γεννήτρια*. Διπλωματική Εργασία, Πανεπιστήμιο Πατρών, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Υπολογιστών, 2012.
22. Πέγκος, Ο., *Ανάλυση και πειραματική εφαρμογή ελέγχου σε αντιστροφέα δυο βαθμίδων (DC/DC και DC/AC) για σύνδεση φωτοβολταϊκού συστήματος*. Διπλωματική Εργασία, Πανεπιστήμιο Πατρών, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Υπολογιστών, 2012.

23. Παπαδόπουλος, Ν., *Ένας Νέος Τριφασικός Αντιστροφέας Τάσης Τεσσάρων Επιπέδων*. Διπλωματική εργασία, ΕΜΠ, Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και μηχανικών υπολογιστών, 2003.