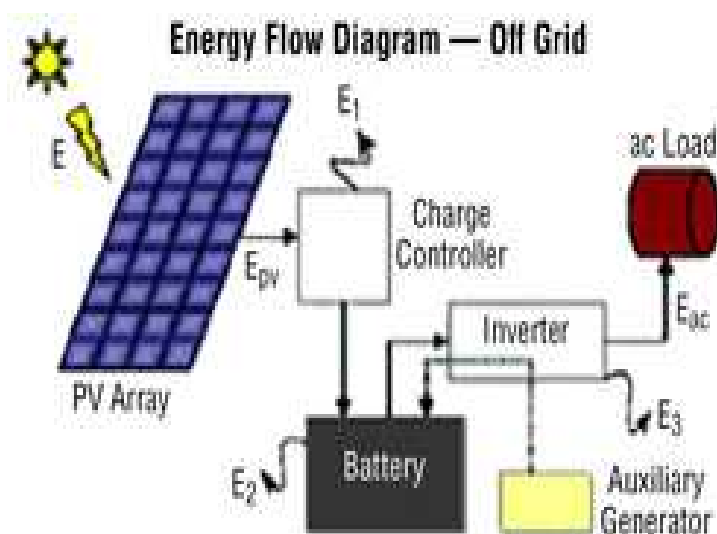




**ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΕΝΑΛΛΑΣΣΟΜΕΝΗΣ ΤΑΣΗΣ (220V/50HZ) ΑΠΟ
ΑΥΤΟΝΟΜΟ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΜΕΣΩ INVERTER 2 kW**



ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΜΑΝΙΤΗΣ ΑΝΤΩΝΗΣ M.Sc

ΣΠΟΥΔΑΣΤΕΣ: ΑΣΚΟΡΔΑΛΑΚΗΣ ΠΑΝΤΕΛΗΣ
ΛΥΡΩΝΗΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ

ΧΑΝΙΑ, ΑΠΡΙΛΙΟΣ 2005

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	6
ΚΕΦ.1 ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ ΗΛΙΑΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ	7
1.1 Εισαγωγή	7
1.2 Τεχνολογική Καταγωγή	7
1.2.1 Δομή & Βασική Θεωρία Ημιαγωγών.....	7
1.2.2 Ένωση p-n - Δίοδος Ημιαγωγών.....	11
1.3 Φωτοβολταϊκή Μετατροπή.....	14
1.3.1 Φωτοβολταϊκό Φαινόμενο.....	14
1.4 Παράγοντες Επίδρασης στην Απόδοση της Φ/Β Μετατροπής	15
1.5 Εφαρμογές	16
1.5.1 Κατηγορίες φωτοβολταϊκών συστημάτων	17
ΚΕΦ.2 ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΙΣ ΑΠΟ ΣΥΝΕΧΕΣ ΣΕ ΕΝΑΛΛΑΣΣΟΜΕΝΟ (DC/AC) ΑΝΑΣΤΡΟΦΕΙΣ (INVERTERS).....	20
2.1 Γενικά.....	20
2.2 Λειτουργία αντιστροφών	22
2.2.1 Αντιστροφέας φυσικής μεταγωγής	22
2.2.2 Αντιστροφέας δυναμικής (εξαναγκασμένης) μεταγωγής.....	24
2.3 Αναστροφείς σταθερής πηγής τάσης	28
2.3.1 Μονοφασικός inverter τύπου ημιγέφυρας.....	28
2.3.2 Μονοφασικός inverter τύπου γέφυρας τετραγωνικού κύματος (square wave inverter).....	29
2.3.3 Μονοφασικός inverter τύπου γέφυρας ημιτετραγωνικού κύματος	32
2.4 Τριφασικοί Inverters.....	35
2.4.1 Αγωγή του κάθε θυρίστορ για 180°	36
2.4.2 Αγωγή του κάθε θυρίστορ για 120°	39
2.5 Αντιστροφείς σταθερής πηγής ρεύματος.....	42

2.6	Άλλοι τύποι αντιστροφών.....	44
2.7	Έλεγχος τάσης σε μονοφασικούς inverters	45
2.7.1	Απλή διαμόρφωση εύρους παλμών.	46
2.7.2	Πολλαπλή διαμόρφωση εύρους παλμών.....	47
2.7.3	Ημιτονοειδής διαμόρφωσης εύρους παλμών.....	48
2.7.4	Προχωρημένες τεχνικές διαμόρφωσης.....	50
ΚΕΦ.3	ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΤΟΥ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΕΑ.....	54
3.1	Γενικά.....	54
3.2	Αλγόριθμος λειτουργίας του αντιστροφέα.....	65
3.3	Σύντομη περιγραφή των μονάδων του συστήματος.....	69
3.4	Συμπεράσματα	70
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ		72
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ.....		74

Π Ρ Ο Λ Ο Γ Ο Σ

Η διαφαινόμενη εξάντληση των ενεργειακών αποθεμάτων των συμβατικών καυσίμων (άνθρακας, φυσικό αέριο, πετρέλαιο, σχάσιμα υλικά) σε συνδυασμό με τη διαρκώς αυξανόμενη ζήτηση ενέργειας, αλλά και τη βαθμιαία επιδείνωση των περιβαλλοντικών προβλημάτων, οδήγησε τις σύγχρονες κοινωνίες να στραφούν αφενός σε τεχνικές εξοικονόμησης και ορθολογικής χρήσης της ενέργειας, αφετέρου στην αξιοποίηση των ήπιων ή ανανεώσιμων μορφών ενέργειας. Γνωστές ενεργειακές πηγές αποτελούν ανεξάντλητα (ανανεώσιμα) ενεργειακά αποθέματα, ενώ η χρήση τους είναι φιλική προς το περιβάλλον.

Η παρούσα πτυχιακή εργασία έχει σαν στόχο να συμβάλει στη δημιουργία ενός αυτόνομου φωτοβολταϊκού συστήματος στο χώρο του Τεχνολογικού Εκπαιδευτικού Ιδρύματος Κρήτης, Παράρτημα Χανίων, μελετώντας κατασκευάζοντας έναν inverter 2kW ο οποίος θα μετατρέπει τη συνεχή τάση που έχουν συσσωρεύσει οι συσσωρευτές του αυτόνομου φωτοβολταϊκού συστήματος σε εναλλασσόμενη τάση δικτύου (230V/50Hz).

Εύκολα λοιπόν γίνεται αντιληπτό ότι η συμβολή των Ηλεκτρονικών, και συγκεκριμένα των Ηλεκτρονικών Ισχύος σε θέματα ενέργειας είναι καθοριστική.

Φθάνοντας στο τέλος αυτής της προσπάθειας αισθανόμαστε την ανάγκη να ευχαριστήσουμε ιδιαίτερα τον επιβλέποντα καθηγητή της πτυχιακής εργασίας :

- Α. Μανίτη, M.Sc. Καθηγητή Εφαρμογών, για την έγκριση ανάθεσης της πτυχιακής εργασίας, για τις επιστημονικές του επισημάνσεις για την ολοκλήρωση της εργασίας αυτής, καθώς και για τη διάθεση όλης της υλικοτεχνικής υποδομής του εργαστηρίου ηλεκτρονικών ισχύος. Θα θέλαμε ακόμη να τον ευχαριστήσουμε για την αμέριστη επιστημονική συμβολή του στα πλαίσια συγγραφής της εργασίας, καθώς και για το βιβλιογραφικό υλικό που μας παρείχε.

Επιπλέον θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε θερμά και τους :

- Phd. Ι.Χατζάκη, Καθηγητή εφαρμογών, για όλες τις χρήσιμες παρατηρήσεις, αξιόλογες υποδείξεις και τη συνεχή καθοδήγησή του σε καθημερινή βάση στην εκπόνηση της πτυχιακής εργασίας. Ειδικότερα τον ευχαριστούμε ολόψυχα για την πολύτιμη γνώση που μας παρείχε στο γνωστικό αντικείμενο του inverter, την πλήρη καθοδήγηση στα πλαίσια διεξαγωγής όλων των πειραματικών μετρήσεων, καθώς επίσης για τη συμβολή του στον αρχικό πειραματικό σχεδιασμό.

- Γ. Πλοκαμάκη, για τις πολύτιμες γνώσεις, συμβουλές και επιστημονικές υποδείξεις σχετικά με το γνωστικό αντικείμενο των φωτοβολταϊκών συστημάτων καθώς επίσης και για την παραχώρηση των φωτοβολταϊκών συλλεκτών που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα πτυχιακή εργασία.
- Κ. Αμπατζίδα για την πολύτιμη βοήθειά του στον προγραμματισμό του μικροεπεξεργαστή.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Αντικείμενο της παρούσας πτυχιακής εργασίας είναι η μελέτη και κατασκευή ενός αυτόνομου φωτοβολταϊκού συστήματος, το οποίο θα χρησιμοποιηθεί στο εργαστήριο ηλεκτρονικών ισχύος για εξοικονόμηση ενέργειας καθώς επίσης για εκπαιδευτικούς και πειραματικούς σκοπούς.

Στα πλαίσια της πτυχιακής εργασίας ακολουθήθηκε η εξής μεθοδολογία :

Συγκέντρωση και μελέτη βιβλιογραφικών δεδομένων, μελέτη και σχεδιασμός του αυτόνομου φωτοβολταϊκού συστήματος βασισμένα σε συγκεκριμένες παραμέτρους και τέλος κατασκευή και έλεγχος ομαλής λειτουργίας του παραπάνω συστήματος.

Αρχικά, για να κατανοηθεί πλήρως η εργασία αυτή, είναι απαραίτητο να αναφερθούμε στη φωτοβολταϊκή τεχνολογία και στις εφαρμογές της. Ο inverter που κατασκευάστηκε θα χρησιμοποιηθεί σε ένα αυτόνομο φωτοβολταϊκό σύστημα, συνεπώς στο **κεφάλαιο 1** περιγράφεται με λίγα λόγια η αρχή λειτουργίας των φωτοβολταϊκών συστημάτων.

Στο **κεφάλαιο 2** εμπεριέχονται θεωρητικές γνώσεις για τους inverters καθώς επίσης και οι κυματομορφές που τους πλαισιώνουν.

Στα πλαίσια της εργασίας αυτής, κατασκευάστηκε ένας inverter 2KW, χαρακτηριστικά του οποίου παρουσιάζονται αναλυτικά στο **κεφάλαιο 3**. Ουσιαστικά, το κεφάλαιο αυτό είναι ένα εγχειρίδιο, για τη συγκεκριμένη κατασκευή.

ΚΕΦ.1 ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ ΗΛΙΑΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ

1.1 Εισαγωγή

Η σύγχρονη τεχνολογία μας έδωσε τη δυνατότητα εκμετάλλευσης της ενέργειας της ηλιακής ακτινοβολίας με τη χρήση των ηλιακών φωτοβολταϊκών συστημάτων (Φ/Β), που η λειτουργία τους στηρίζεται στο φωτοβολταϊκό φαινόμενο, δηλαδή την άμεση μετατροπή της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας σε ηλεκτρικό ρεύμα.

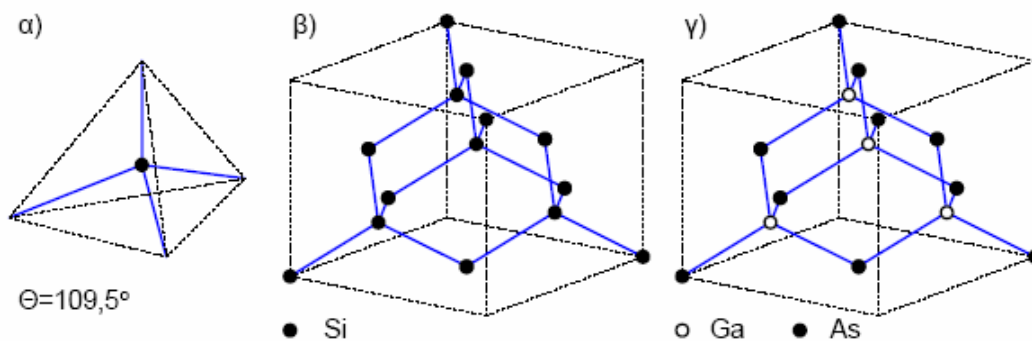
Μερικά υλικά, όπως το πυρίτιο με πρόσμιξη άλλων στοιχείων γίνονται ημιαγωγοί (άγουν το ηλεκτρικό ρεύμα προς μια μόνο διεύθυνση), έχουν δηλαδή τη δυνατότητα να δημιουργούν διαφορά δυναμικού όταν φωτίζονται και κατά συνέπεια να παράγουν ηλεκτρικό ρεύμα. Συνδέοντας μεταξύ τους πολλά μικρά κομμάτια τέτοιων υλικών (φωτοβολταϊκές κυψέλες ή στοιχεία), τοποθετώντας τα σε μία επίπεδη επιφάνεια (φωτοβολταϊκό σύστημα) και στρέφοντάς τα προς τον ήλιο είναι δυνατό να πάρουμε ηλεκτρικό ρεύμα αρκετό για να καλύψουμε τις ανάγκες για τη λειτουργία:

- επιστημονικών συσκευών (όπως δορυφόρων)
- για την κίνηση ελαφρών αυτοκινήτων (ηλιακά αυτοκίνητα),
- για τη λειτουργία φάρων,
- για την κάλυψη έστω και μέρους των ενεργειακών αναγκών μικρών απομονωμένων κατοικιών, όπως φωτισμός, τηλεπικοινωνίες, ψύξη, ηχητική κάλυψη.

1.2 Τεχνολογική Καταγωγή

1.2.1 Δομή & Βασική Θεωρία Ημιαγωγών

Οι φωτοβολταϊκές κυψέλες κατασκευάζονται από ημιαγωγούς που αποτελούν σώματα με ενδιάμεση ηλεκτρική αγωγιμότητα, μεταξύ αγωγών (μέταλλα) και μονωτών (πολυμερή, κεραμικά υλικά). Οι κυριότεροι ημιαγωγοί είναι τετρασθενή στοιχεία, όπως το πυρίτιο (Si) και το γερμάνιο (Ge) ή ακόμα και χημικές ενώσεις με τετραεδρική δομή (εικόνα 1.1), όπως το αρσενιούχο γάλλιο και το θειούχο κάδμιο.

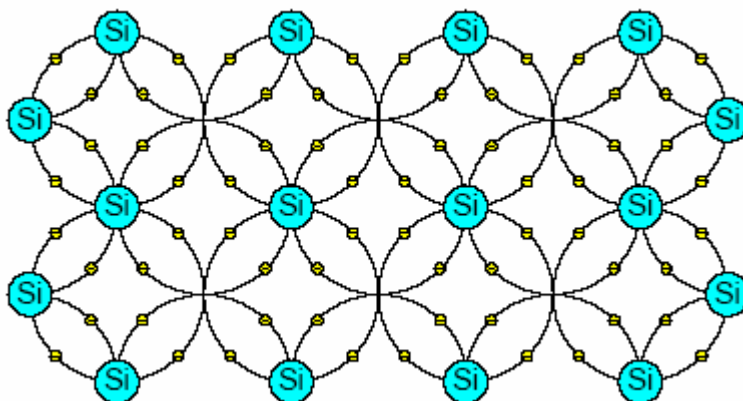


Εικόνα 1.1 : α) Η κρυσταλλική δομή των κυριότερων ημιαγωγών είναι τετραεδρική, δηλαδή τα γειτονικά άτομα βρίσκονται σε θέσεις του κρυσταλλικού πλέγματος που αντιστοιχούν στο κέντρο και στις κορυφές ενός κανονικού τετραέδρου.

β) Στους στοιχειακούς αγωγούς (π.χ. Si) όλα τα άτομα του πλέγματος είναι ίδια.

γ) Στις ημιαγωγίμες χημικές ενώσεις (π.χ. Si) τα άτομα που βρίσκονται σε γειτονικές θέσεις είναι διαφορετικά.

Συγκεκριμένα το πυρίτιο αποτελεί τον πιο διαδεδομένο τύπο ημιαγωγού στοιχείου, καθώς η χρήση του έχει επικρατήσει σχεδόν στο σύνολο των ηλεκτρονικών εφαρμογών, συμπεριλαμβανομένων και των φωτοβολταϊκών. Όπως φαίνεται από την επίπεδη απεικόνιση του πλέγματος του πυριτίου (εικόνα 1.2), κάθε άτομο πυριτίου είναι ενωμένο με τέσσερα γειτονικά άτομα με ομοιοπολικούς δεσμούς. (Στο πλέγμα τα ηλεκτρόνια σθένους αλλάζουν συνεχώς θέσεις μεταξύ τους κινούμενα από και προς τους γειτονικούς δεσμούς του Si.)



Εικόνα 1.2 : Επίπεδη απεικόνιση του πλέγματος του πυριτίου

Επομένως όλα τα ηλεκτρόνια σθένους των ατόμων πυριτίου είναι δεσμευμένα στους ομοιοπολικούς δεσμούς, με αποτέλεσμα να μην υπάρχουν ελεύθεροι φορείς του ηλεκτρικού ρεύματος και το σώμα να μη διαθέτει ηλεκτρική αγωγιμότητα. Αυτό συμβαίνει όμως μόνο στην περίπτωση που ο ημιαγωγός βρίσκεται στη θεμελιώδη ενεργειακή κατάσταση, δηλαδή στην κατάσταση εκείνη όπου το ενεργειακό του περιεχόμενο είναι πολύ χαμηλό (θερμοκρασιακή περιοχή απολύτου μηδενός). Στην κατάσταση αυτή οι ημιαγωγοί συμπεριφέρονται σαν μονωτές.

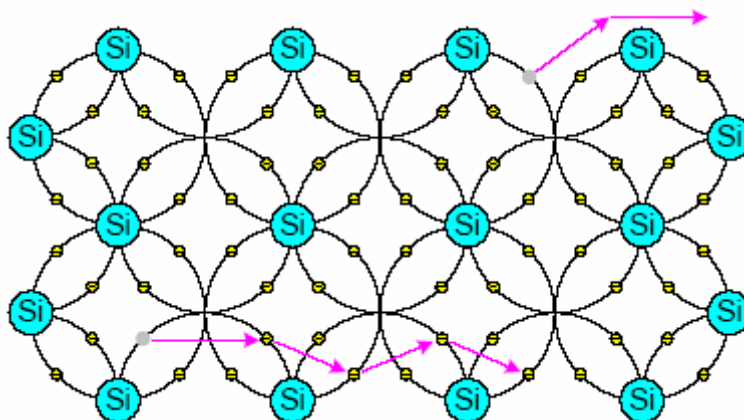
Όταν όμως οι ημιαγωγοί απορροφήσουν κάποιο ποσό ενέργειας, μέσω θερμότητας ή ακτινοβολίας, τότε διαταράσσονται οι ομοιοπολικοί δεσμοί μεταξύ ατόμων πυριτίου. Έτσι σε συνηθισμένες θερμοκρασίες περιβάλλοντος, η θερμική ενέργεια που παρέχεται στο σώμα και κατανέμεται στα άτομά του προκαλεί την απελευθέρωση πολλών ηλεκτρονίων από τους ομοιοπολικούς δεσμούς. Αναλυτικότερα, η συνεχής ανακατανομή της θερμικής ενέργειας από το ένα άτομο στο άλλο, είναι δυνατό να προκαλέσει, στιγμιαία και σε τυχαίες θέσεις, τη διέγερση δεσμευμένων ηλεκτρονίων (στην κρυσταλλική δομή του πυριτίου), με αποτέλεσμα αυτά να απελευθερωθούν και να αρχίσουν να κινούνται ελεύθερα. Τα ελεύθερα αυτά ηλεκτρόνια απομακρύνονται από την περιοχή του δεσμού τους, χάρη στην κινητική ενέργεια που απέκτησαν από τη θερμότητα. Κατά συνέπεια ο ημιαγωγός διαθέτει πλέον ευκίνητους φορείς ηλεκτρισμού, οι οποίοι και του προσδίδουν αξιόλογη ηλεκτρική αγωγιμότητα.

Αξίζει να σημειωθεί ότι η το ποσό της ελάχιστης απαιτούμενης ενέργειας για την απελευθέρωση ενός ηλεκτρονίου σθένους από το δεσμό στον οποίο ανήκει είναι συγκεκριμένο και ισούται με το ενεργειακό διάκενο E_g του ημιαγωγού. Ως ενεργειακό διάκενο ορίζεται η ενεργειακή διαφορά μεταξύ των εξής δυο ζωνών :

- της ζώνης αγωγιμότητας η οποία περικλείει τις ενέργειες των ελεύθερων ηλεκτρονίων που είναι υπεύθυνες για την ύπαρξη ηλεκτρικού ρεύματος στον ημιαγωγό, και
- της ζώνης σθένους, η οποία και περικλείει τις διάφορες ενεργειακές στάθμες των ατόμων των ημιαγωγικών στοιχείων.

Η απομάκρυνση ενός ηλεκτρονίου από κάποιο δεσμό δεν συνεπάγεται την καταστροφή του κρυσταλλικού πλέγματος (εικόνα 1.3), καθώς τα άτομα των οποίων έσπασε ο δεσμός εξακολουθούν να συνδέονται με τα γειτονικά τους άτομα με τρεις άθικτους δεσμούς καθώς και μεταξύ τους με έναν ατελή δεσμό ενός ηλεκτρονίου. Οι τρεις και ο ήμισυ δεσμός είναι ικανοί να συγκρατήσουν σε συνοχή τον κρύσταλλο και μετά την ελευθέρωση του ηλεκτρονίου. Άλλωστε έχει αποδειχθεί ότι το πλήθος των ελεύθερων ηλεκτρονίων, δηλαδή το

πλήθος των διασπασμένων δεσμών των σωμάτων που μας ενδιαφέρουν, είναι ένα πολύ μικρό ποσοστό του συνόλου των δεσμών των ατόμων του κρυσταλλικού πλέγματος.



Εικόνα 1.3 : Η απομάκρυνση ενός ηλεκτρονίου από κάποιο δεσμό δεν συνεπάγεται την καταστροφή του κρυσταλλικού πλέγματος.

Τα ελεύθερα ηλεκτρόνια (e) περιφέρονται άτακτα στο κρυσταλλικό σώμα, ανάμεσα στα άτομα και τους δεσμούς τους. Αυτό συμβαίνει για όσο χρονικό διάστημα διατηρούν την αυξημένη τους ενέργεια. Όταν η ενέργεια τους μειωθεί σημαντικά, δεσμεύονται στην κενή θέση κάποιου ατελούς δεσμού, που μπορεί να συναντήσουν στον δρόμο τους και παύουν να είναι ελεύθερα. Ο ατελής δεσμός στον οποίο θα επιστρέψουν τα ηλεκτρόνια δεν είναι απαραίτητο να αντιστοιχεί σε εκείνον από τον οποίο έφυγαν. Όσο χρονικό διάστημα τα ηλεκτρόνια αυτά είναι ελεύθερα, συμβάλλουν στην αύξηση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας του σώματος, για αυτό και ονομάζονται ηλεκτρόνια αγωγιμότητας.

Οι κενές ηλεκτρονικές θέσεις των χημικών δεσμών, που ονομάζονται οπές (h), λειτουργούν σαν παγίδες δέσμευσης για όσα ηλεκτρόνια έχουν χαμηλό ενεργειακό περιεχόμενο. Αλλά ακόμη και αν δεν υπάρχουν ελεύθερα ηλεκτρόνια στην περιοχή γύρω από την οπή, δεν σημαίνει ότι η κενή θέση μένει αμετακίνητη, καθώς μπορεί να προσελκύσει κάποιο ηλεκτρόνιο σθένους γειτονικού δεσμού. Τότε το ηλεκτρόνιο αυτό αποδεσμεύεται από τον δεσμό που άνηκε, δημιουργώντας ταυτόχρονα μια κενή θέση, και συμπληρώνει την κενή θέση της γειτονικής οπής (εικόνα 1.3). Η μετατόπιση της οπής μπορεί να εξακολουθεί να πραγματοποιείται, εκτός εάν κάποια στιγμή δεσμευθεί από αυτή ένα ελεύθερο ηλεκτρόνιο.

Τότε η οπή εξαφανίζεται, και ο ομοιοπολικός δεσμός γίνεται πλήρης. Οι οπές διαγράφουν και αυτές μια άτακτη κίνηση στο σώμα, από ένα δεσμό στον άλλο, αφού είναι τυχαία η

κατεύθυνση από την οποία θα έρθει το γειτονικό ηλεκτρόνιο που θα συμπληρώνει τον ατελή δεσμό. Όταν όμως επιβάλλεται εξωτερικό πεδίο, το ηλεκτρόνιο θα προσέλθει από την κατεύθυνση που ευνοείται ενεργειακά. Τότε η κίνηση των οπών είναι προσανατολισμένη και αντίθετη αυτής των ηλεκτρονίων που κατευθύνονται προς υψηλότερα δυναμικά.

Παρατηρούμε δηλαδή ότι στους ημιαγωγούς εκδηλώνονται δύο μηχανισμοί : η απελευθέρωση των ηλεκτρονίων από τους δεσμούς, με ταυτόχρονη δέσμευση ελεύθερων ηλεκτρονίων στις οπές. Η συγκέντρωση (πλήθος φορέων ανά μονάδα όγκου) των ελεύθερων ηλεκτρονίων ή των οπών ενός ημιαγωγού παραμένει αμετάβλητη και εξαρτάται μόνο από το υλικό και την θερμοκρασία του. Όσο ασθενέστεροι είναι οι δεσμοί μέσα στο υλικό και όσο υψηλότερη είναι η θερμοκρασία του, τόσο μεγαλύτερη θα είναι και η συγκέντρωση των φορέων του, δηλαδή των ηλεκτρονίων και των οπών του.

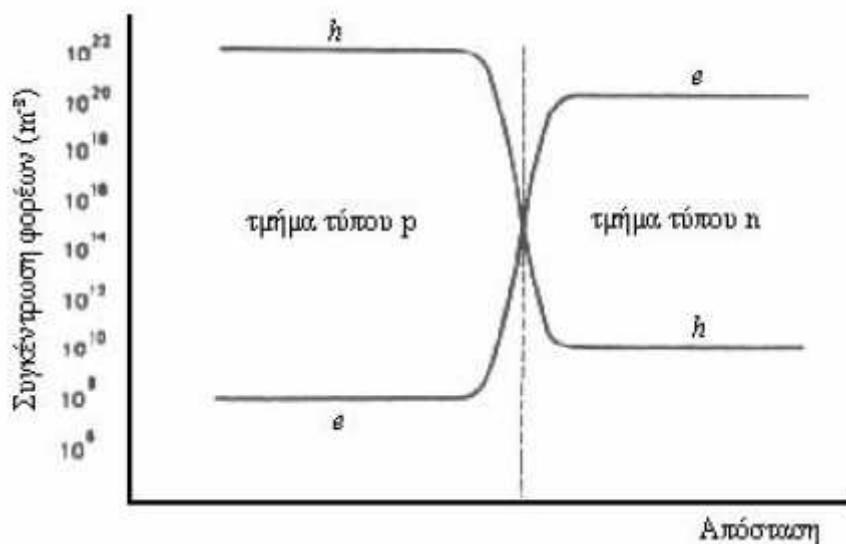
1.2.2 Ένωση p-n - Δίοδος Ημιαγωγών

Όπως προαναφέρθηκε, χαρακτηριστική ιδιότητα των ημιαγωγών ενός στοιχείου είναι η εξίσωση της συγκέντρωσης των ελεύθερων ηλεκτρονίων (e) και της συγκέντρωσης των οπών (h). Όμως σε ημιαγωγούς προσμίξεων η συγκέντρωση του ενός είδους φορέων (φορείς πλειονότητας) είναι συνήθως πολύ μεγαλύτερη από αυτήν του άλλου είδους (φορείς μειονότητας), με αποτέλεσμα η συμβολή των φορέων μειονότητας στην αγωγιμότητα, συνήθως, να θεωρείται αμελητέα. Όταν οι φορείς πλειονότητας είναι ηλεκτρόνια τότε ο ημιαγωγός χαρακτηρίζεται ως τύπου “n”. Αντίθετα, όταν οι φορείς πλειονότητας είναι οπές τότε ο ημιαγωγός χαρακτηρίζεται ως τύπου “p”.

Ο θεμέλιος λίθος όλων των ημιαγωγών διατάξεων είναι η ένωση p-n. Αυτή η ένωση σχηματίζεται όταν έρθουν σε επαφή ένα τεμάχιο ημιαγωγικού τύπου p με ένα τεμάχιο ημιαγωγικού τύπου n. Εκείνη τη χρονική στιγμή, ένα μέρος από τις οπές του τεμαχίου τύπου p διαχέεται προς το τεμάχιο τύπου n, όπου οι οπές είναι λιγότερες και συγχρόνως ένα μέρος από τα ελεύθερα ηλεκτρόνια του τεμαχίου n διαχέεται προς το τεμάχιο τύπου p, όπου τα ελεύθερα ηλεκτρόνια είναι λιγότερα. Η ανάμιξη αυτή των φορέων και η αύξηση της συγκέντρωσης των φορέων μειονότητας στις περιοχές κοντά στη διαχωριστική επιφάνεια των τεμαχίων τύπου p και n, ανατρέπουν την αρχική κατάσταση.

Η περιοχή μεταξύ του ημιαγωγού τύπου p και του ημιαγωγού τύπου n, καλείται ζώνη εξάντλησης. Η ζώνη αυτή αποτελεί την δίοδο διέλευσης των οπών και των ηλεκτρονίων από τον ένα ημιαγωγό στον άλλο. Μετά από ένα χρονικό διάστημα και αφού έχουν ολοκληρωθεί

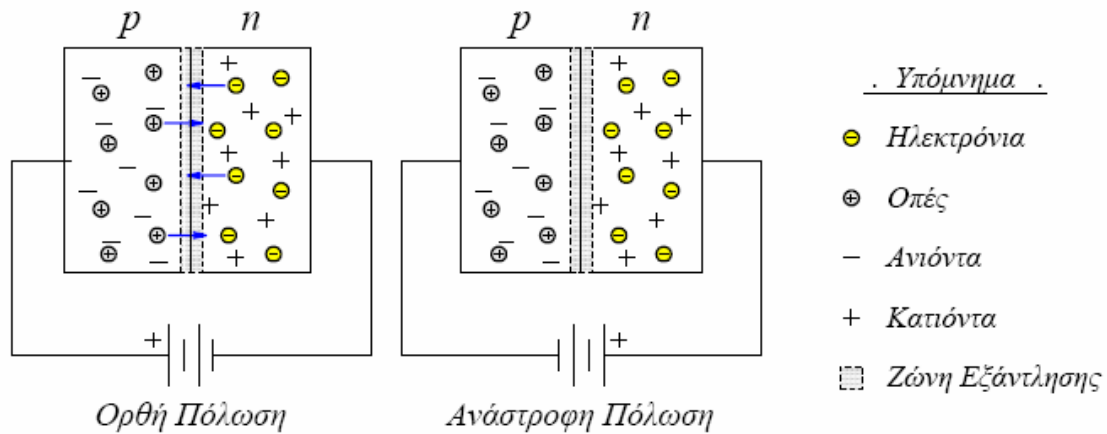
οι αντίστοιχες μετατοπίσεις (ροές) φορέων, επέρχεται μια κατάσταση ισορροπίας όπου οι συγκεντρώσεις των οπών και των ηλεκτρονίων έχουν σταθεροποιηθεί όπως φαίνεται στην *εικόνα 1.4*.



Εικόνα 1.4 : Ημιαγωγός τύπου p και τύπου n.

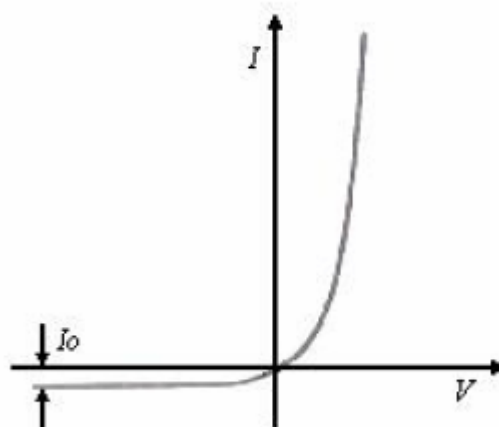
Σε αντίθεση με τους ευκίνητους φορές των ημιαγωγών (ελεύθερα ηλεκτρόνια και οπές) που τείνουν να διαχέονται προς τις περιοχές με τη μικρότερη συγκεντρωσή τους, η συγκεντρωσή των αρνητικών ιόντων στα οποία μετατράπηκαν οι αποδέκτες του τμήματος τύπου p και η συγκεντρωσή των θετικών ιόντων στα οποία μετατράπηκαν οι δότες στο τμήμα τύπου n, παραμένουν αμετάβλητες, αφού τα ιόντα μένουν ακίνητα στο σώμα. Έτσι το υλικό χάνει τοπικά την ηλεκτρική του ουδετερότητα και οι πλευρές της ένωσης φορτίζονται με αντίθετα ηλεκτρικά φορτία, με αποτέλεσμα να εμφανίζεται μια διαφορά δυναμικού (συνήθως 0.6-0.8 Volts), της οποίας το ηλεκτροστατικό πεδίο εμποδίζει την παραπέρα διάχυση των φορέων προς το απέναντι τμήμα της ένωσης.

Αποτέλεσμα όλων των παραπάνω είναι ότι η ένωση p-n, παρουσιάζει εντελώς διαφορετική συμπεριφορά στην ροή του ηλεκτρικού ρεύματος, ανάλογα με την φορά αυτού και άρα ανάλογα με την τάση που της επιβάλλεται εξωτερικά. Εξαιτίας αυτής της χαρακτηριστικής συμπεριφοράς της η ένωση p-n ονομάζεται και *δίοδος*.



Εικόνα 1.5 : Ορθή και ανάστροφη πόλωση.

Υπάρχουν δύο τρόποι επιβολής τάσεως σε μια ένωση p-n (δίοδο). Όταν εφαρμόσουμε τον θετικό πόλο της πηγής στον ημιαγωγό τύπου p και τον αρνητικό στον ημιαγωγό τύπου n, τότε η δίοδος είναι ορθά πολωμένη, οπότε και συμπεριφέρεται σαν κλειστός διακόπτης, ενώ όταν ο θετικός πόλος της πηγής εφαρμοστεί στον ημιαγωγό τύπου n και ο αρνητικός στον p ημιαγωγό, τότε η δίοδος όντας ανάστροφα πολωμένη λειτουργεί σαν ανοιχτός διακόπτης (εικόνα 1.5). Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία, αποτελούν διόδους που λειτουργούν σε συνθήκες ορθής πόλωσης. Στην εικόνα 1.6 φαίνεται η χαρακτηριστική καμπύλη μιας διόδου p-n.



Εικόνα 1.6 : Χαρακτηριστική καμπύλη διόδου p-n.

1.3 Φωτοβολταϊκή Μετατροπή

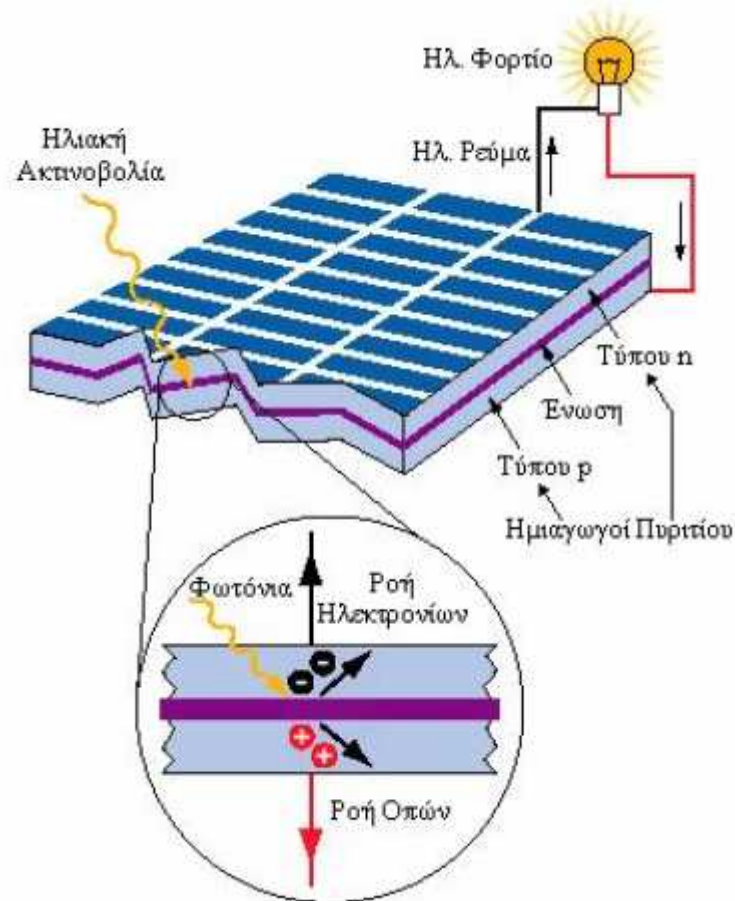
1.3.1 Φωτοβολταϊκό Φαινόμενο

Όπως προαναφέρθηκε, τα φωτοβολταϊκά κύτταρα αποτελούν διόδους ημιαγωγικών ενώσεων τύπου p-n με τη μορφή επίπεδης πλάκας.

Κάθε φωτόνιο της προσπίπτουσας ακτινοβολίας με ενέργεια ίση ή μεγαλύτερη από το ενεργειακό διάκενο του ημιαγωγού, έχει την δυνατότητα να απορροφηθεί σε ένα χημικό δεσμό και να ελευθερώσει ένα ηλεκτρόνιο. Όσο διαρκεί η ακτινοβολία, δημιουργείται περίσσια φορέων (ελεύθερων ηλεκτρονίων και οπών).

Οι φορείς αυτοί, καθώς κυκλοφορούν στο στερεό (και εφόσον δεν επανασυνδεθούν με φορείς αντίθετου προσήμου) δέχονται την επίδραση του ενσωματωμένου ηλεκτροστατικού πεδίου της ένωσης p-n. Εξαιτίας αυτού τα ελεύθερα ηλεκτρόνια εκτρέπονται προς το τμήμα τύπου n και οι οπές εκτρέπονται προς το τμήμα τύπου p, με αποτέλεσμα να δημιουργείται μια διαφορά δυναμικού ανάμεσα στους ακροδέκτες των δύο τμημάτων της διόδου. Αν στους ακροδέκτες αυτούς συνδεθεί κατάλληλο ηλεκτρικό φορτίο παρατηρείται ροή ηλεκτρικού ρεύματος και ισχύος από τη φωτοβολταϊκή διάταξη προς το φορτίο.

Συμπερασματικά η όλη διάταξη αποτελεί μια πηγή ηλεκτρικού ρεύματος που διατηρείται για όσο χρονικό διάστημα διαρκεί η πρόσπτωση της ηλιακής ακτινοβολίας στην επιφάνεια του φωτοβολταϊκού κύτταρου.



Εικόνα 1.7 : Μηχανισμός εκδήλωσης του φωτοβολταϊκού φαινομένου

Η εκδήλωση της διαφοράς δυναμικού ανάμεσα στους δύο ακροδέκτες της παραπάνω διάταξης, η οποία αντιστοιχεί σε ορθή πόλωση της διόδου, ονομάζεται φωτοβολταϊκό φαινόμενο, ο μηχανισμός εκδήλωσης του οποίου παρουσιάζεται σχηματικά στην εικόνα 1.7. Στην πρακτική εκμετάλλευση του φαινομένου αυτού, στηρίζεται η λειτουργία του συνόλου των φωτοβολταϊκών διατάξεων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.

1.4 Παράγοντες Επίδρασης στην Απόδοση της Φ/Β Μετατροπής

Στα φωτοβολταϊκά στοιχεία δεν είναι η δυνατή η μετατροπή ολόκληρης της προσπίπτουσας ακτινοβολίας σε ηλεκτρική ενέργεια. Ένα μέρος αυτής ανακλάται πάνω στην επιφάνεια του στοιχείου και διαχέεται πάλι προς το περιβάλλον.

Από την ακτινοβολία που διεισδύει στον ημιαγωγό, εκείνη η ποσότητα η οποία αποτελείται από φωτόνια, των οποίων η ενέργεια είναι μικρότερη από το ενεργειακό διάκενο του

ημιαγωγού, δεν μπορεί να απορροφηθεί. Για τα φωτόνια αυτά ο ημιαγωγός συμπεριφέρεται σαν διαφανές σώμα. Έτσι η ακτινοβολία αυτή περνά το ημιαγωγίμο υλικό του στοιχείου και απορροφάται στο μεταλλικό ηλεκτρόδιο, που βρίσκεται στο πίσω μέρος της κυψέλης, με αποτέλεσμα να το θερμαίνει.

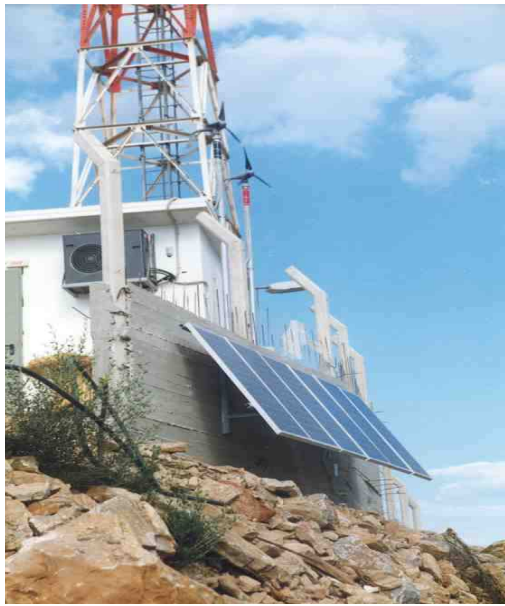
Αλλά και από την ακτινοβολία που τελικά απορροφά ο ημιαγωγός, μόνο εκείνο το μέρος των φωτονίων των οποίων το ενεργειακό περιεχόμενο είναι ταυτόσημο με αυτό του διακένου, μας βοηθά. Το υπόλοιπο δεν χάνεται, αλλά μεταφέρεται με την μορφή της κινητικής ενέργειας στο ηλεκτρόνιο το οποίο ελευθερώθηκε από τον δεσμό και τελικά και αυτό μετατρέπεται σε θερμότητα. Όμως η ανάπτυξη μεγάλης θερμοκρασίας στο εσωτερικό των φωτοβολταϊκών στοιχείων, οδηγεί σε μείωση της απόδοσης του συστήματος.

Έχει αποδειχτεί ότι η ροή της ακτινοβολίας στο εσωτερικό των κυψελών ακολουθεί εκθετική μορφή σε σχέση με την απόσταση που διανύει αυτή μέσα στην κυψέλη, γεγονός που συνδέεται με την επίδραση του πάχους των ημιαγωγικών τμημάτων.

Όταν ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο δέχεται ακτινοβολία, διεγείρεται παράγοντας ηλεκτρικό ρεύμα, το οποίο καλείτε φωτόρευμα I_{ph} και του οποίου η τιμή θα είναι ανάλογη προς τα ενεργά φωτόνια που απορροφά το στοιχείο. Το φωτόρευμα είναι ανάλογο της φασματικής απόκρισης ως συνάρτηση του μήκους κύματος της προσπίπτουσας ακτινοβολίας, γεγονός που αποδεικνύει την εξάρτηση της απόδοσης του φωτοβολταϊκού στοιχείου, από την ποιότητα της ηλιακής ακτινοβολίας.

1.5 Εφαρμογές

Τα φωτοβολταϊκά κύτταρα, τα φωτοβολταϊκά πλαίσια και οι μεγάλης κλίμακας φωτοβολταϊκοί σταθμοί παραγωγής (εικόνα 1.8) έχουν γίνει τμήμα της καθημερινής μας ενεργειακής πραγματικότητας. Η άμεση παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από την ηλιακή ακτινοβολία είναι εξαιρετικά διαδεδομένη σε πολλούς τομείς. Οι φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις χαρακτηρίζονται από την σταθερότητα τους, την έλλειψη κινουμένων μερών, την αυτονομία τους και τον μεγάλο χρόνο ζωής τους, καθώς και από τον αποκεντρωτικό χαρακτήρα που διαθέτουν. Δεν παράγουν κανενός είδους θόρυβο και είναι φιλικά προς το περιβάλλον. Ο μόνος περιορισμός που τίθεται είναι το υψηλό τους κόστος αγοράς, καθώς η συντήρησή τους είναι σχεδόν ανύπαρκτη.



Εικόνα 1.8 : Φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις

1.5.1 Κατηγορίες φωτοβολταϊκών συστημάτων

Ανάλογα με την αποθήκευση της παραγόμενης ενέργειας τα φ/β συστήματα διακρίνονται σε τρεις μεγάλες κατηγορίες :

- **Διασυνδεδεμένα φωτοβολταϊκά συστήματα**

Στα διασυνδεδεμένα με το δίκτυο φωτοβολταϊκά συστήματα, η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια από τα φωτοβολταϊκά, τροφοδοτεί τα ηλεκτρικά φορτία και η περίσσεια ηλεκτρικής ενέργειας εφ' όσον υπάρχει διαβιβάζεται και πωλείται στο δίκτυο. Στις περιπτώσεις όμως που η ενέργεια από τα φωτοβολταϊκά δεν επαρκεί για να καλύψει τα φορτία τότε το δίκτυο παρέχει τη συμπληρωματική ενέργεια. Έτσι στα διασυνδεδεμένα συστήματα υπάρχουν δύο μετρητές ηλεκτρικής ενέργειας. Ο ένας μετράει την ενέργεια που δίνεται στο δίκτυο και ο άλλος την ενέργεια που παρέχει το δίκτυο. Επίσης στη περίπτωση των διασυνδεδεμένων συστημάτων δεν απαιτείται χρήση συσσωρευτών, γεγονός που ελαττώνει το αρχικό κόστος της εγκατάστασης καθώς και το κόστος συντήρησης.

• **Αυτόνομα φωτοβολταϊκά συστήματα**

Είναι αυτά που δεν είναι συνδεδεμένα με άλλες πηγές (παραδοσιακές ή μη) παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος (εικόνα 1.9).

Σήμερα υπάρχει πληθώρα μικρών φωτοβολταϊκών συστημάτων σε κεραίες τηλεπικοινωνιακών σταθμών, εξοχικά σπίτια, αντλίες άντλησης νερού, χιονοδρομικά κέντρα, τροχόσπιτα, φάρους, μετεωρολογικούς σταθμούς, υπαίθρια φωτιστικά σώματα, σκάφη και άλλα τα οποία καθίστανται ενεργειακά αυτόνομα. Βέβαια υπάρχουν συστοιχίες συσσωρευτών οι οποίες αποθηκεύουν την παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια. ενώ σε περίπτωση που έχουμε φορτία εναλλασσομένου ρεύματος θα πρέπει να υπάρχει ένας αντιστροφέας στο σύστημα ο οποίος θα μετατρέπει την συνεχή σε εναλλασσόμενη τάση. Όταν τα αυτόνομα φωτοβολταϊκά συστήματα συνδυασθούν και με άλλη ανανεώσιμη ή συμβατική πηγή ηλεκτρικής ενέργειας (ανεμογεννήτρια, ηλεκτροπαραγωγό ζεύγος, κ.λ.π.) τότε χαρακτηρίζονται σαν υβριδικά.

Τα *βασικά μέρη* ενός αυτόνομου φωτοβολταϊκού συστήματος είναι :

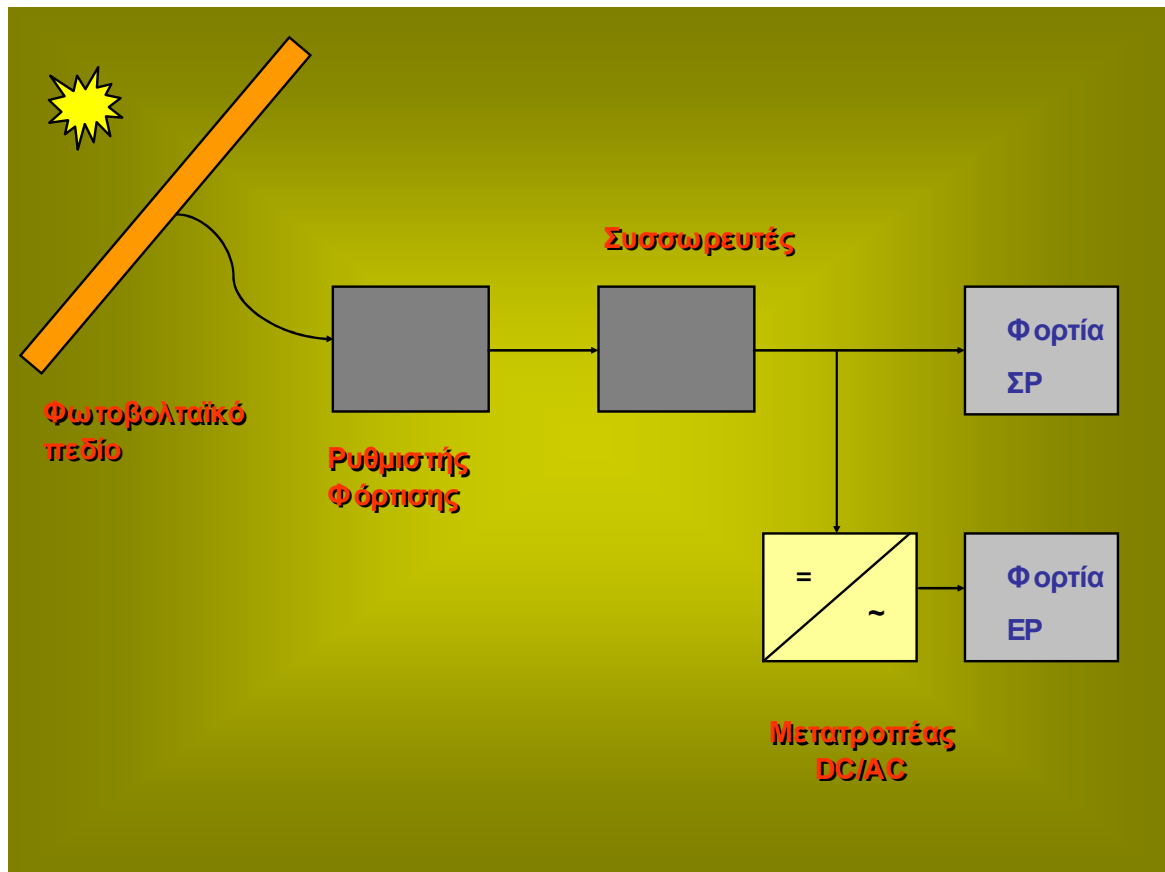
A. Φ/B πεδίο Φ/B πλαίσια
 Σύστημα στήριξης
 Καλωδιώσεις

B. Μονάδα μετατροπής ισχύος

Ηλεκτρονικά ελέγχου
(μονάδα ρύθμισης συνεχούς τάσης, προστασία, έλεγχος)
Μετατροπέας DC/AC

Γ. Συσσωρευτής

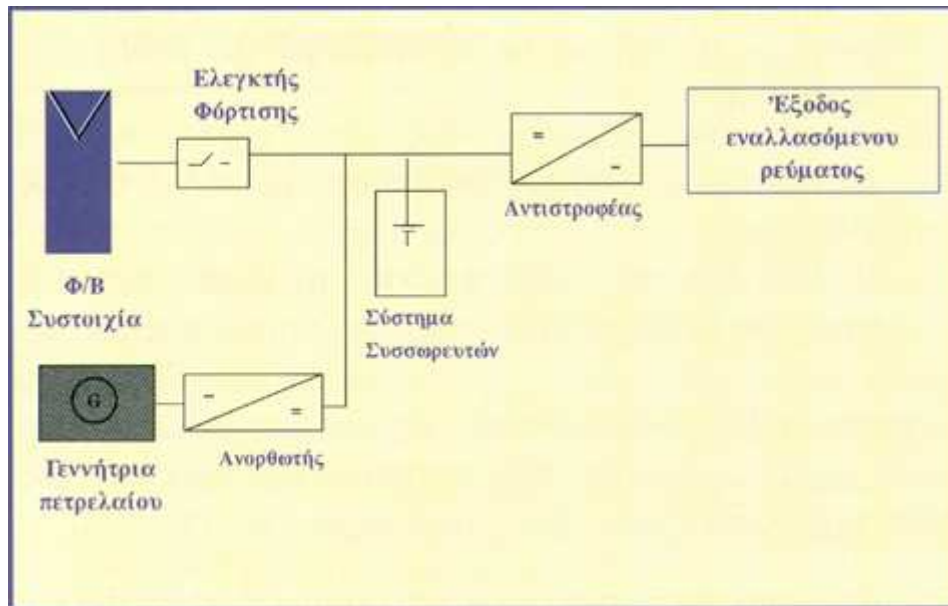
Δ. Φορτίο (Ζήτηση)



Εικόνα 1.9 : Φωτοβολταϊκό σύστημα

- **Υβριδικά φωτοβολταϊκά συστήματα**

Αυτόνομο σύστημα που αποτελείται από τη Φ/Β συστοιχία σε συνδυασμό με άλλες πηγές ενέργειας όπως μια γεννήτρια πετρελαίου, που η λειτουργία της φαίνεται στην εικόνα 1.10 ή άλλη μορφή ΑΠΕ όπως για παράδειγμα οι ανεμογεννήτριες.



Εικόνα 1.10 : Αυτόνομο σύστημα που αποτελείται από τη Φ/Β συστοιχία σε συνδυασμό με μια γεννήτρια πετρελαίου

ΚΕΦ.2 ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΙΣ ΑΠΟ ΣΥΝΕΧΕΣ ΣΕ ΕΝΑΛΛΑΣΣΟΜΕΝΟ (DC/AC) ΑΝΑΣΤΡΟΦΕΙΣ (INVERTERS)

2.1 Γενικά

Οι μετατροπείς από DC σε AC είναι γνωστοί με το όνομα αναστροφείς (inverters). Ο σκοπός αυτών των διατάξεων είναι να μετατρέπουν την dc ισχύ εισόδου σε ac ισχύ εξόδου επιθυμητής τιμής τάσης, ρεύματος και συχνότητας.

Η τάση εξόδου μπορεί να είναι σταθερή ή μεταβλητή με σταθερή ή μεταβλητή συχνότητα. Μεταβλητή τάση στην έξοδο μπορούμε να έχουμε μεταβάλλοντας την τάση εισόδου και διατηρώντας το κέρδος του inverter (λόγος της ac τάσης εξόδου προς την dc τάση εισόδου) σταθερό. Απ' την άλλη μεριά αν η dc τάση εισόδου είναι σταθερή και δεν ρυθμίζεται, τότε μεταβλητή τάση εξόδου μπορούμε να έχουμε μεταβάλλοντας το κέρδος του inverter, το οποίο συνήθως το πετυχαίνουμε με έλεγχο PWM.

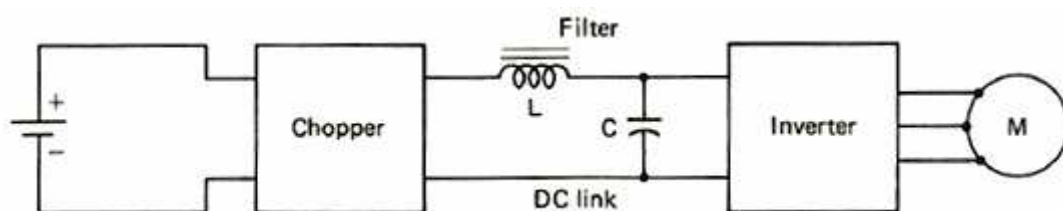
Η μορφή της τάσης εξόδου σε έναν ιδανικό inverter πρέπει να είναι ημιτονοειδής. Στην πράξη όμως αυτό συμβαίνει δύσκολα με αποτέλεσμα την ύπαρξη αρμονικών οι οποίες προφανώς μειώνουν την απόδοση και τις χαρακτηριστικές επιδόσεις του μετατροπέα. Σε εφαρμογές χαμηλής και μέσης ισχύος, τετραγωνικές ή περίπου τετραγωνικές κυματομορφές τάσης

μπορεί να γίνουν δεκτές. Σε μεγάλης ισχύος εφαρμογές απαιτούνται ημιτονοειδείς κυματομορφές χαμηλής παραμόρφωσης.

Οι inverters χρησιμοποιούνται ευρύτατα σε βιομηχανικές εφαρμογές σε συστήματα οδήγησης (ac drives) μηχανών εναλλασσομένου ρεύματος, τροφοδοτικά ισχύος κλπ. Συνήθως η είσοδος μπορεί να είναι ένας ανορθωτής, μια μπαταρία υγρών στοιχείων, φωτοβολταϊκά στοιχεία, ή άλλη πηγή dc. Οι inverters μπορούν κυρίως να ταξινομηθούν σε τρεις κατηγορίες:

Inverters σταθερής πηγής τάσης (VSI): Στην περίπτωση αυτή η dc τάση εισόδου είναι σταθερή ανεξάρτητη από το ρεύμα φορτίου. Η τάση στην έξοδο καθορίζεται από τον inverter, ενώ η μορφή του ρεύματος εξαρτάται από το είδος του φορτίου (σχήμα 2.1).

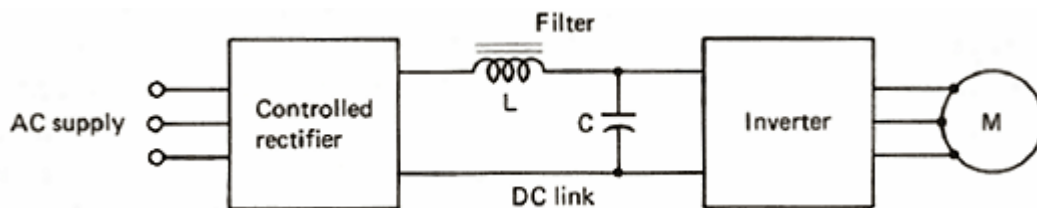
1. Μονοφασικός inverter τύπου ημι-γέφυρας
2. Μονοφασικός inverter τύπου γέφυρας
 - α) Τετραγωνικού κύματος (square wave output)
 - β) Ημι-τετραγωνικού κύματος (quasi-square wave output)
3. Τριφασικός inverter τύπου γέφυρας
 - α) αγωγή κάθε διακόπτη για 180°
 - β) αγωγή κάθε διακόπτη για 120°



Σχήμα 2.1 : Μετατροπέας σταθερής πηγής τάσης

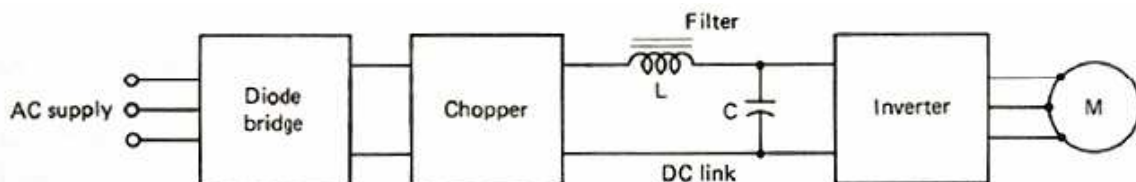
Inverters σταθερής πηγής ρεύματος (CSI): Η αυτεπαγωγή σε σειρά με την τροφοδοσία είναι τόσο μεγάλη που διατηρεί το ρεύμα εισόδου σταθερό. Το ρεύμα στην έξοδο καθορίζεται από τον inverter, ενώ η τάση εξαρτάται από το είδος του φορτίου.

Inverters dc ζεύξης (dc link) : Είναι διατάξεις μετατροπής δύο βαθμίδων. Η εναλλασσόμενη τάση του δικτύου μετατρέπεται σε συνεχή μέσω ανορθωτή. Η ανορθωμένη τάση μετατρέπεται πάλι σε εναλλασσόμενη μέσω inverter με δυνατότητα ρύθμισης της συχνότητας. Για την ανόρθωση χρησιμοποιείται ελεγχόμενος ανορθωτής ο οποίος τροφοδοτεί τον inverter με μεταβλητή συνεχή τάση (σχήμα 2.2).



Σχήμα 2.2 : Μετατροπέας dc ζεύξης με ελεγχόμενο ανορθωτή στην είσοδο

Εάν ο ανορθωτής είναι μη ελεγχόμενος (μόνο δίοδοι) η ρύθμιση της τάσης γίνεται τότε από τον ίδιο τον inverter ή υπάρχει μια ενδιάμεση βαθμίδα chopper μεταξύ ανορθωτή και inverter (σχήμα 2.3). Ο inverter μπορεί να είναι είτε σταθερής πηγής τάσης (VFI) ή σταθερής πηγής ρεύματος (CFI).



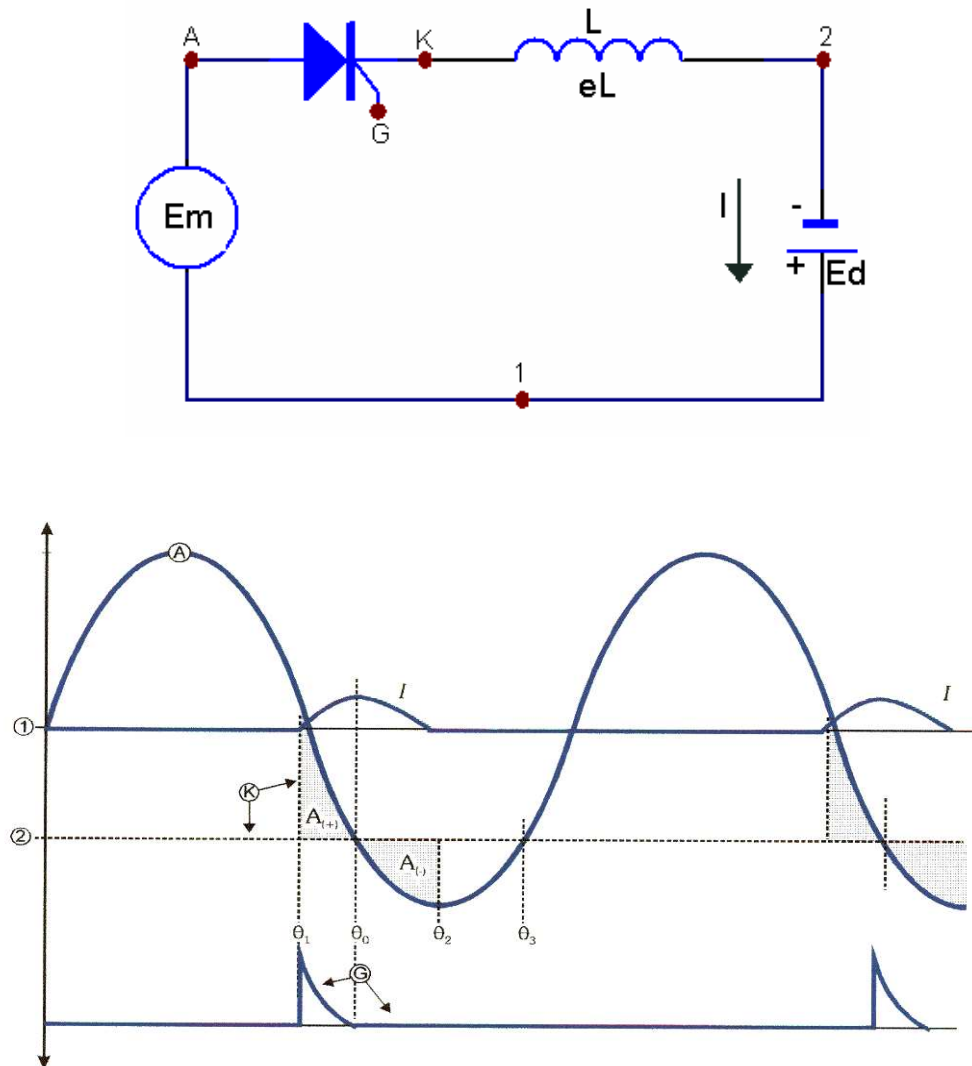
Σχήμα 2.3 : Μετατροπέας dc ζεύξης με μη ελεγχόμενο ανορθωτή και chopper στην είσοδο

2.2 Λειτουργία αντιστροφών

2.2.1 Αντιστροφές φυσικής μεταγωγής

Ένας αντιστροφέας εξορισμού μετατρέπει μια dc ισχύ σε μια ac ισχύ. Δηλαδή κάνει την αντίστροφη λειτουργία ενός ανορθωτή. Υπάρχουν δύο τύποι ανιστροφών . Ο αντιστροφέας φυσικής μεταγωγής και ο αντιστροφέας εξαναγκασμένης μεταγωγής.

Εδώ θα εξεταστεί η λειτουργία ενός αντιστροφέα φυσικής μεταγωγής που το κύκλωμα του είναι ακριβώς ίδιο μ' αυτό του ελεγχόμενου ανορθωτή με τη διαφορά ότι τα άκρα της μπαταρίας τώρα έχουν αντιστραφεί. Έτσι το δυναμικό του σημείου 2 βρίσκεται κάτω από το σημείο 1 και αυτό γιατί το ρεύμα μπορεί να ρέει μόνο από την άνοδο προς την κάθοδο και η πηγή E_d δίδει ισχύ όταν το θυρίστορ άγει.



Σχήμα 2.4 : Κύκλωμα αναστροφέα φυσικής μεταγωγής και οι χαρακτηριστικές τάσης & ρεύματα

Από την άλλη μεριά η ισχύς αυτή πρέπει να απορροφηθεί από τα άκρα της ac πλευράς επειδή δεν έχουμε απώλειες στο πηνίο και το θυρίστορ. Επομένως το κύκλωμα αυτό είναι δυναμικά ικανό να μετατρέψει dc ισχύ σε ac ισχύ.

Για να επιτευχθεί αυτή η μετατροπή το θυρίστορ πρέπει να σκανδαλιστεί μέσα σε μια ακριβώς ορισμένη περιοχή .

Πρώτα , για την έναρξη της αγωγής το A πρέπει να είναι θετικό σε σχέση με το K. Απ' όταν το K είναι στο ίδιο δυναμικό με το σημείο 2, οι παλμοί σκανδαλισμού πρέπει επομένως να εφαρμοστούν ή πριν από τη θ_0 ή μετά την θ_3 . Θα δούμε παρακάτω ότι τελικά η πύλη πρέπει να σκανδαλιστεί πριν τη θ_0 .

Ας υποθέσουμε ότι το θυρίστορ σκανδαλίζεται στη γωνία θ_1 . Τότε το K αμέσως "πηδά" από το επίπεδο 2 στο επίπεδο A και το πηνίο συσσωρεύει θετικά $V \cdot S$ μέχρι τη γωνία θ_0 . Έτσι το συνολικό ρεύμα φθάνει ένα μέγιστο στη γωνία θ_0 και η περιοχή $A_{(+)}$ είναι μέγιστη. Βαθμίδων μετά πέφτει στο μηδέν και η αγωγή σταματά στη γωνία θ_2 όταν $A_{(-)} = A_{(+)}$. Για την αύξηση του ρεύματος και επομένως ροή της ενεργούς ισχύος πρέπει να αυξήσουμε την γωνία έναυσης θ_1 . Για μείωση της αγωγής η $A_{(-)}$ πρέπει να είναι ίση με $A_{(+)}$. Επομένως η μέγιστη περιοχή που μπορεί να έχει η $A_{(-)}$ είναι αυτή που βρίσκεται μεταξύ του ημιτονικού κύματος και τον επιπέδου του σημείου 2. Καθώς αυξάνουμε τη γωνία έναυσης η $A_{(+)}$ γίνεται όλο και μεγαλύτερη , αλλά αν αυτή ξεπεράσει τη μέγιστη διαθέσιμη τιμή $A_{(-)}$ η αγωγή δεν θα σταματήσει ποτέ. Το dc ρεύμα τότε δεν θα δημιουργείται με κάθε περίοδο μέχρι που η ασφάλεια του κυκλώματος "καεί".

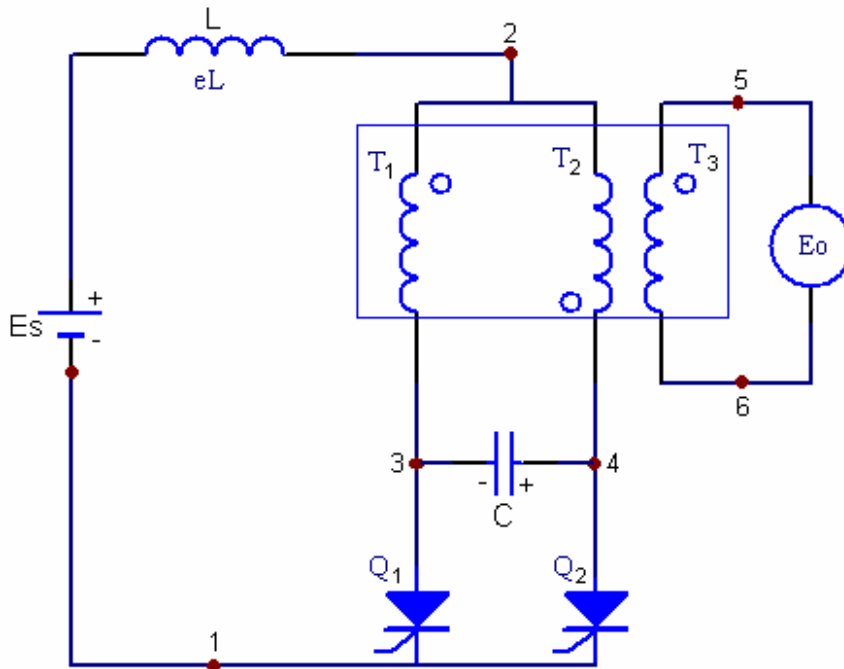
Για τον ίδιο λόγο η αγωγή δεν μπορεί ν' αρχίσει αμέσως μετά τη γωνία θ_3 . Τα μέγιστα (peaks) του ρεύματος καθυστερούν των θετικών μέγιστων της τάσης και έτσι η ac πηγή πρέπει ακόμη να τροφοδοτήσει με άεργη ισχύ Q τον αναστροφέα. Επομένως P και Q ρέουν σε ανάθετες διευθύνσεις σε ένα αντιστροφέα.

Μονοφασικοί αντιστροφέας φυσικής μεταγωγής όπως αυτόν τον εξετάσαμε εδώ δεν χρησιμοποιούνται στην πράξη. Είναι πάντα τριφασικοί και ακόμα για να είναι η μορφή του ρεύματος όσο γίνεται ημιτονοειδής χρησιμοποιούμε κατάλληλα φίλτρα.

2.2.2 Αντιστροφέας δυναμικής (εξαναγκασμένης) μεταγωγής

Ο αντιστροφέας αυτός μετατρέπει dc ισχύ σε ac ισχύ. Υπάρχουν πολλοί τύποι αναστροφέων εξαναγκασμένης μεταγωγής και όλοι στηρίζουν τη λειτουργία τους στην δυναμική μεταγωγή . Η συχνότητα εξόδου μπορεί να φθάσει μέχρι και τα 20KHz εξαρτώμενη από την ικανότητα switching (ανοιγοκλεισίματος) των θυρίστορς.

Το φορτίο μπορεί να είναι παθητικό , όπως μια αντίσταση ή ένα πηνίο , ή ενεργό όπως ένας ας κινητήρας. Ένα τυπικό παράδειγμα αντιστροφέα εξαναγκασμένης μεταγωγής φαίνεται παρακάτω.



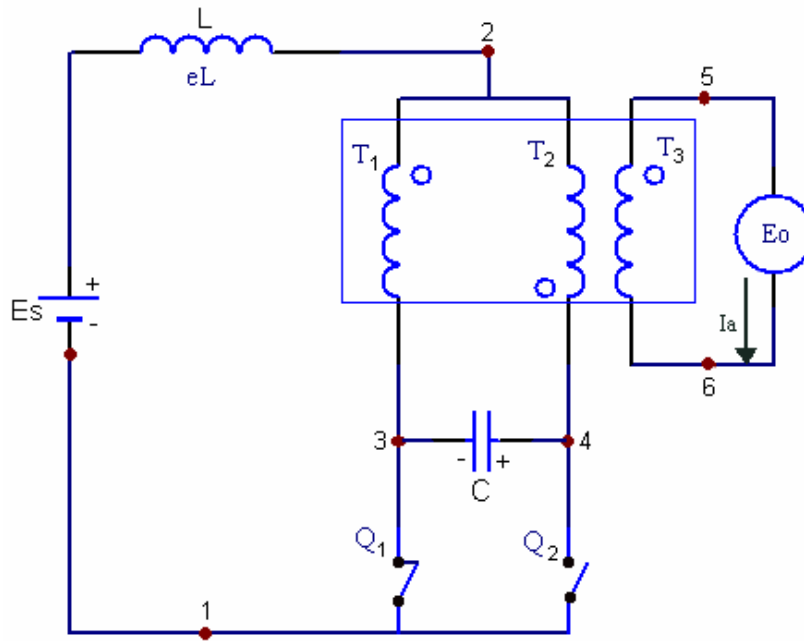
Σχήμα 2.5 : Τυπικός αναστροφέας εξαναγκασμένης μεταγωγής

Ο αντιστροφέας αυτός αποτελείται από:

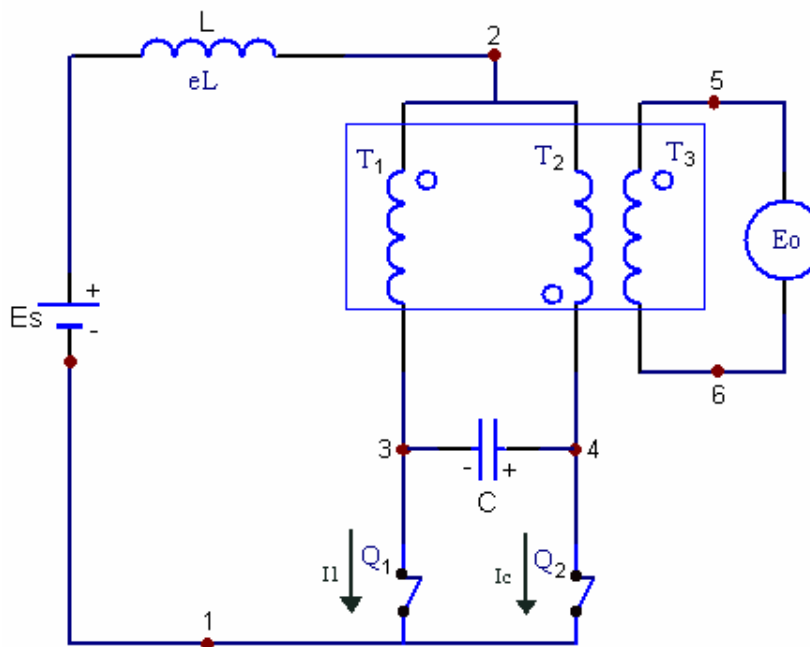
1. την πηγή dc E
2. τα θυρίστωρες Q1 ,Q2
3. το πηνίο εξομάλυνσης για τη διατήρηση σταθερού ρεύματος πηγής.
4. Τον πυκνωτή μεταγωγής C
5. Ένα Μ/Τ με 2 πρωτεύοντα T_1 , T_2 και ένα δευτερεύον T_3 και ο οποίος θεωρούμε ότι είναι ιδανικός.
6. Το φορτίο R
7. Ένα σύστημα ελέγχου εξωτερικό (το οποίο δεν φαίνεται στο σχήμα) για τον σκανδαλισμό των θυρίστωρες Q1, Q2.

Για να καταλάβουμε τη λειτουργία του αντιστροφέα, υποθέτουμε ότι αρχικά το Q1 βρίσκεται σε αγωγή και το Q2 είναι μανδαλωμένο. Το σταθερό ρεύμα I_1 ρέει στο

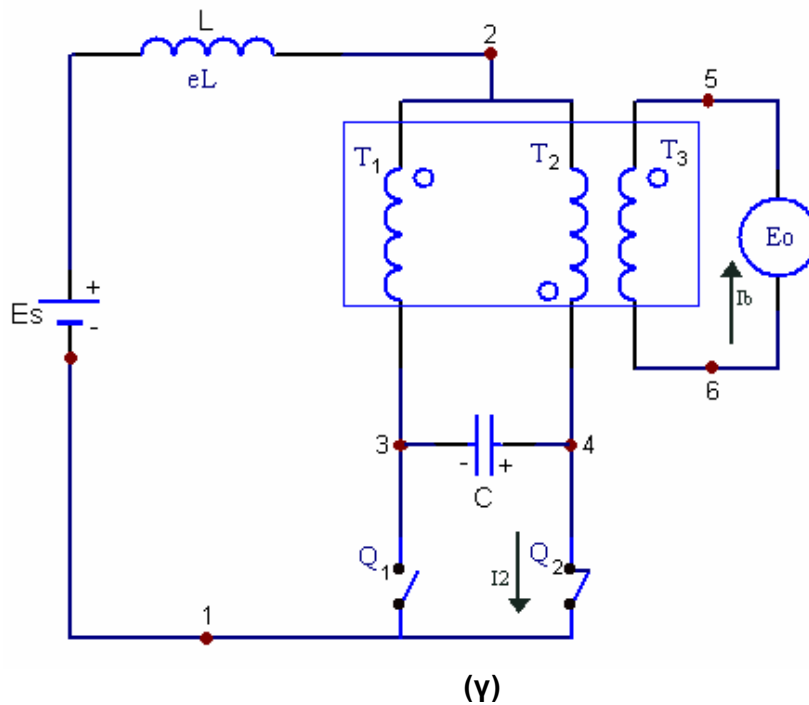
πρωτεύον T_1 και ο πυκνωτής c είναι πλήρως φορτισμένος με τις πολικότητες που φαίνονται στο σχήμα 2.6(α)



(α)



(β)



Σχήμα 2.6 : Λειτουργία αντιστροφέα εξαναγκασμένης μεταγωγής

Το σταθερό ρεύμα I_1 επάγει ένα σταθερό ρεύμα I_a στο δευτερεύον τύλιγμα. Η κατάσταση αυτή διατηρείται έως όταν εφαρμόσουμε ένα παλμό στην πύλη του Q_2 αρχίζοντας την αγωγή του.

Καθώς το Q_2 θ' αρχίσει να άγει το δυναμικό του σημείου 4 πέφτει στο δυναμικό του σημείου 1. Αμέσως ο πυκνωτής εκφορτίζεται παράγοντας ένα ρεύμα μεταγωγής I_c το οποίο ρέει αντίθετα από το I_1 [σχήμα 2.6 (β)]. Το ρεύμα I_c αυξάνεται πολύ γρήγορα και όταν $I_c = I_1$, το ρεύμα στο Q_1 γίνεται μηδέν και τότε ενεργεί σαν ένας ανοικτός διακόπτης [σχήμα 2.6 (γ)]. Με το Q_1 τώρα μανδαλωμένο, ο πυκνωτής φορτίζεται γρήγορα μέσω του πρωτεύοντος T_1 και επομένως το σημείο 3 γρήγορα γίνεται θετικό σε σχέση με το σημείο 4. Καθώς το ρεύμα φορτίσεως I_1 ελαττώνεται στο τύλιγμα T_2 . Όταν οι συνθήκες αυτές σταθεροποιηθούν, το T_2 μεταφέρει το ίδιο ρεύμα όπως το T_1 μετέφερε πριν. Αυτό είναι συνοδευόμενο από ένα ρεύμα δευτερεύοντος I_b .

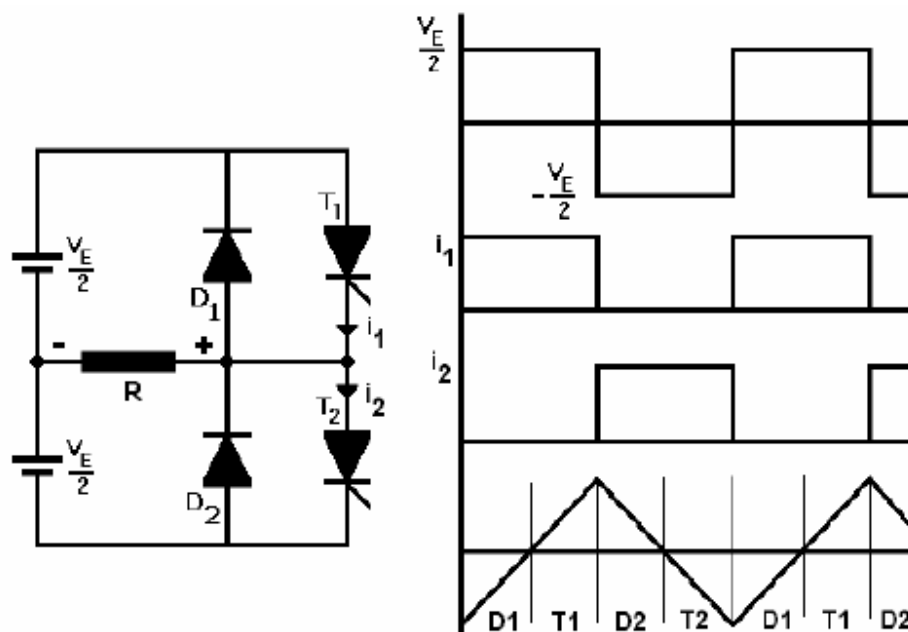
Ο επόμενος παλμός αρχίζει την αγωγή στο Q_1 προξενώντας την πτώση των δυναμικών των σημείων 3 στο δυναμικό του σημείου 1. Ο πυκνωτής ξανά πάλι εκφορτίζεται και έτσι μανδαλώνεται το Q_2 ξαναγυρνώντας πάλι στο ίδιο σημείο που ξεκινήσαμε. Ουσιαστικά δηλαδή οι εναλλασσόμενοι παλμοί πύλης που μεταφέρουν την αγωγή από το ένα θυρίστορ στο άλλο οφείλονται στην παρουσία του πυκνωτή μεταγωγής C . Σε σχέση με

το ΜΤ , όταν το Q_1 άγει το ρεύμα I_1 επάγει ένα ρεύμα δευτερεύοντος I° . Βασιζόμενοι στις πολικότητες [σχήμα 2.6 (α)] το I_a πρέπει να ρέει στη διεύθυνση που φαίνεται. Όμοια όταν το Q_2 άγει το I_2 επάγει ένα ρεύμα δευτερεύοντος I_b . Το αποτέλεσμα είναι ότι τα δυο δευτερεύοντα ρεύματα I_a και I_b είναι ίσα αλλά ρέουν σε αντίθετες διευθύνσεις . Επομένως το φορτίο διαρρέετε από ένα εναλλασσόμενο ρεύμα. Για την αλλαγή της συχνότητας πρέπει απλά να μεταβάλλουμε τη συχνότητα των παλμών στις πύλες των Q_1, Q_2 . Με τον τρόπο αυτό μπορούμε να δημιουργήσουμε συχνότητες από 4Hz έως 5000Hz ανάλογα με το σχεδιασμό τον Μ/Τ και των SCR_s . Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι οι αντιστροφείς αυτοί μπορούν να τροφοδοτούν με ac ισχύ ωμικά ή και επαγωγικά φορτία . Έτσι βρίσκονται σε πλήρη αντίθεση με τους αντιστροφείς φυσικής μεταγωγής οι οποίοι απορροφούν άεργη ισχύ από την ac πλευρά.

2.3 Αναστροφείς σταθερής πηγής τάσης

2.3.1 Μονοφασικός inverter τύπου ημιγέφυρας

Η αρχή λειτουργίας του μονοφασικού αναστροφέα εξηγείται με την βοήθεια του σχήματος 2.7 το οποίο αποτελείται από δύο chopper. Όταν είναι αναμμένο το θυρίστορ T_1 για μισή περίοδο ($T/2$) η στιγμιαία τιμή της τάσης στο φορτίο θα είναι $V_E/2$.



Σχήμα 2.7 : Μονοφασικός inverter με τοπολογία ημι-γέφυρας

Όταν είναι αναμμένο μόνο το θυρίστορ T2 για άλλη μισή περίοδο τότε η στιγμιαία τιμή της τάσης στο φορτίο θα είναι $-V_E/2$. Τα κύκλωμα είναι σχεδιασμένο έτσι ώστε τα T1, T2 να μην είναι ποτέ αναμμένα ταυτόχρονα διότι η πηγή θα βραχυκυκλώνεται. Στο *σχήμα 2.7* φαίνονται επίσης οι κυματομορφές της τάσης εξόδου και των ρευμάτων στα δύο θυρίστορ με φορτίο καθαρά ωμικό. Ο αναστροφέας αυτός απαιτεί dc πηγή τριών καλωδίων. Σε κάθε θυρίστορ όταν αυτό είναι ανοικτό η τάση που εφαρμόζεται στα άκρα του είναι V_E . Η ενεργός τιμή της τάσης εξόδου δίνεται από την σχέση :

$$V_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \left[\int_0^{\pi} \left(\frac{V_E}{2}\right)^2 d\omega t + \int_{\pi}^{2\pi} \left(-\frac{V_E}{2}\right)^2 d\omega t \right]} = \frac{V_E}{2} \quad (2.1)$$

Εάν το φορτίο είναι επαγωγικό το ρεύμα φορτίου δεν μπορεί να αλλάξει ακαριαία φορά μαζί με την τάση εξόδου. Εάν λοιπόν το T1 σβήσει την χρονική στιγμή $t=T/2$ τότε το ρεύμα φορτίου εξακολουθεί να ρέει μέχρις ότου να μηδενιστεί μέσω της διόδου D2 και του κάτω μισού τμήματος της dc πηγής. Παρόμοια εάν το T2 σβήσει την χρονική στιγμή $t=T$ τότε το ρεύμα φορτίου εξακολουθεί να ρέει μέχρις ότου να μηδενιστεί μέσω της διόδου D1 και του πάνω μισού τμήματος της dc πηγής. Όταν οι διόδοι D1 και D2 άγουν τότε ένα μέρος της αποθηκευμένης στην αυτεπαγωγή του φορτίου ενέργειας επιστρέφει στην πηγή. Στο *σχήμα 2.7* φαίνεται το ρεύμα στο φορτίο και τα διαστήματα στα οποία άγουν οι διόδοι και τα θυρίστορς για καθαρά επαγωγικό φορτίο. Ας σημειωθεί ότι για καθαρά επαγωγικό φορτίο, κάθε θυρίστορ άγει μόνο για $T/2$ (ή 90°).

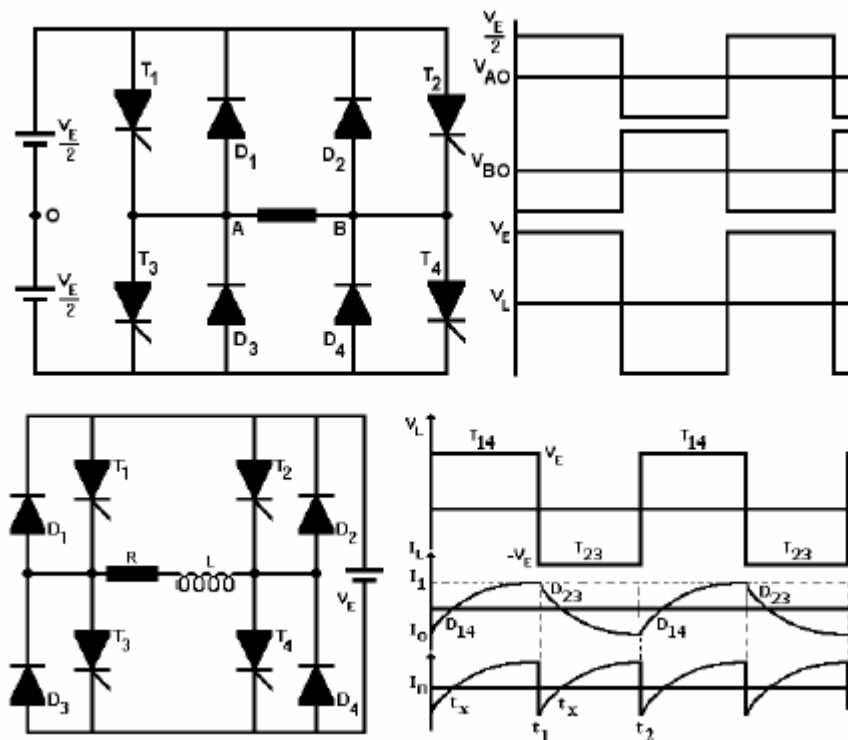
Ανάλογα με τον συντελεστή ισχύος του φορτίου, η περίοδος αγωγής ενός θυρίστορ κυμαίνεται από 90° σε 180° . Στην πράξη αν t_q είναι ο χρόνος σβέσης ενός θυρίστορ, θα πρέπει οπωσδήποτε να υπάρχει μια ελάχιστη χρονική καθυστέρηση t_q , ανάμεσα στο θυρίστορ που τείνει να σβήσει και στο επόμενο που τείνει να ανάψει, διαφορετικά το αποτέλεσμα θα είναι βραχυκύκλωμα μέσω των δυο θυρίστορ. Συνεπώς η μέγιστη αγωγή ενός θυρίστορ σε χρόνο θα είναι $T/2 - t_q$.

2.3.2 Μονοφασικός inverter τύπου γέφυρας τετραγωνικού κύματος (square wave inverter)

Ένας μονοφασικός inverter τύπου γέφυρας φαίνεται στο *σχήμα 2.8* και αποτελείται από τέσσερα θυρίστορ σε συνδεσμολογία μονοφασικής γέφυρας. Όταν τα θυρίστορς T1 και T4 ανάψουν ταυτόχρονα η τάση εισόδου V_E , εμφανίζεται στα άκρα του φορτίου. Όταν τα

θυρίστορς T2 και T3 ανάψουν με την προϋπόθεση ότι θα σβήσουν τα T1, T4 η τάση στα άκρα του φορτίου αντιστρέφεται και είναι $-V_E$. Η κυματομορφή της τάσης εξόδου φαίνεται στο *σχήμα 2.8*. Η ενεργός (rms) τάση εξόδου μπορεί να βρεθεί από:

$$V_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \left[\int_0^{\pi} V_E^2 dt + \int_{\pi}^{2\pi} (-V_E)^2 dt \right]} = V_E \quad (2.2)$$



Σχήμα 2.8 : Μονοφασικός inverter πλήρους γέφυρας με φορτίο ωμικό-επαγωγικό

Από τις κυματομορφές του *σχήματος 2.8* φαίνεται ότι το κάθε ζευγάρι από τα θυρίστορς της γέφυρας είναι αναμμένο για 180° από την συνολική περίοδο της τάσης στο φορτίο. Το ρεύμα στο φορτίο αυξάνει εκθετικά μέσα από τα T1 και T4 σύμφωνα με την εξίσωση :

$$V_E = L \frac{di_L}{dt} + i_L R \quad (2.3)$$

Όταν τα T1, T4 σβήνουν τα T2, T3 ανάβουν αναστρέφοντας την τάση στο φορτίο. Λόγω της επαγωγικής συμπεριφοράς του φορτίου το ρεύμα σε αυτό δεν αναστρέφεται ακαριαία και έτσι

η ενέργεια που είναι αποθηκευμένη στο πηνίο ρέει προς την τροφοδοσία μέσα από τις D2,D3 σύμφωνα με τη εξίσωση :

$$-V_E = L \frac{di_L}{dt} + i_L R \quad (2.4)$$

Το ρεύμα ελαττώνεται εκθετικά και όταν μηδενισθεί τότε τα θυρίστρος T3,T4 πολώνονται ορθά και οδηγούν το ρεύμα του φορτίου προσφέροντας ενέργεια στη αυτεπαγωγή. Η τάση εξόδου έχει τετραγωνική μορφή όπως φαίνεται και στο *σχήμα 2.8* και η ενεργός τιμή όπως δείξαμε πιο πάνω είναι ίση με την τάση εισόδου V_E . Για ένα από ωμικό επαγωγικό φορτίο κατά την διάρκεια του πρώτου κύκλου χωρίς αρχικό ρεύμα φορτίου αν λύσουμε την διαφορική εξίσωση 2.3 τότε προκύπτει το ρεύμα φορτίο που δίνεται από την :

$$i_L = \frac{V_E}{R} (1 - e^{-\frac{R}{L}t}) \quad (2.5)$$

Όπως φαίνεται από το *σχήμα 2.8* για $t = 0$ $i_L = -I_0$ οπότε η παραπάνω εξίσωση δίνει :

$$i_L = \frac{V_E}{R} - \left(\frac{V_E}{R} - I_0\right) e^{-\frac{R}{L}t} \quad \text{με } 0 \leq t \leq t_1 \quad (2.6)$$

για $V_L = V_E$ τότε $I_0 \leq 0$

κατά την διάρκεια του δεύτερου κύκλου ($t_1 \leq t \leq t_2$) όταν η τάση στο φορτίο αναστρέφεται η διαφορική εξίσωση 2.5 δίνει :

$$i_L = -\frac{V_E}{R} + \left(\frac{V_E}{R} - I_1\right) e^{-\frac{R}{L}t} \quad \text{με } 0 \leq t \leq t_2 - t_1 \quad (2.7)$$

για $V_L = -V_E$ τότε $I_1 \geq 0$

Επειδή $I_1 = -I_0$ το ρεύμα μπορεί να βρεθεί την σχέση 2.6 αν θέσουμε για $t = t_1$ $i_L = I_1$ οπότε :

$$I_L = \frac{V_E}{R} \left(\frac{1 - e^{-\frac{R}{L}t_1}}{1 + e^{-\frac{R}{L}t_1}} \right) \quad (2.8)$$

Ο χρόνος υπολογίζεται από την σχέση 2.6 αν θέσουμε $i_L=0$ οπότε έχουμε :

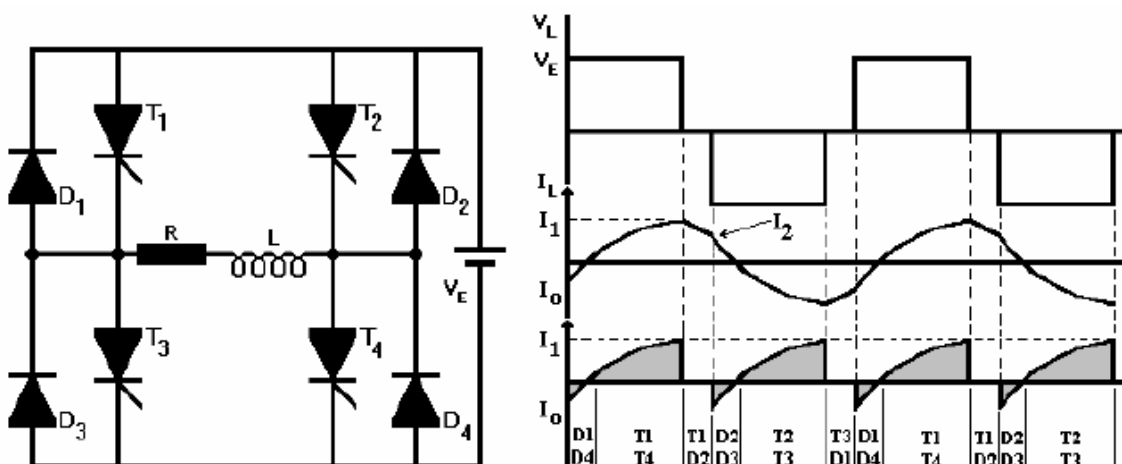
$$t_x = \frac{L}{R} \ln \left(1 - \frac{I_o R}{V_E} \right) \quad (2.9)$$

Η ενεργός ισχύς στο φορτίο θα είναι :

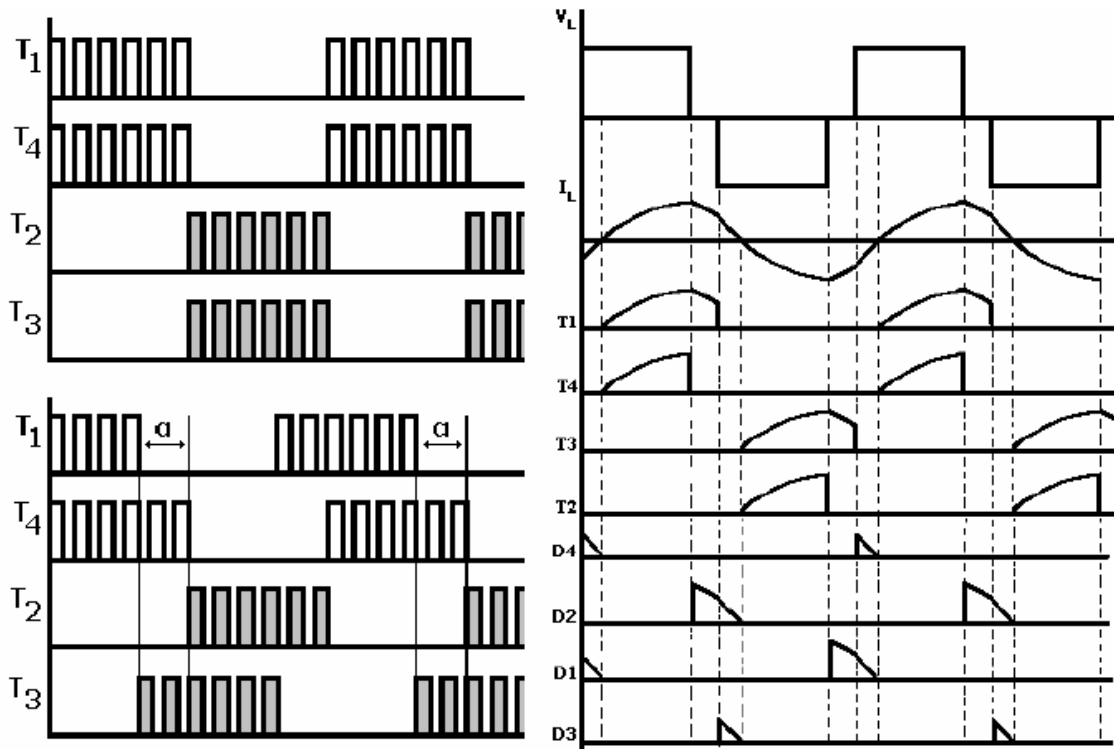
$$P_L = \frac{1}{t_1} \int_0^{t_1} V_E i_L(t) dt$$

2.3.3 Μονοφασικός inverter τύπου γέφυρας ημιτετραγωνικού κύματος

Ο έλεγχος της τάσης εξόδου μπορεί να γίνει εάν μέσα στην περίοδο της τετραγωνικής τάσης του φορτίου δημιουργήσουμε περιοχές όπου αυτή θα είναι μηδέν δίνοντας έτσι την μορφή ενός ημι-τετραγωνικού κύματος. Αυτό μπορούμε να το πετύχουμε με έναν inverter με τοπολογία γέφυρας όπως φαίνεται στο *σχήμα 2.9* όπου όμως έχουμε αλλάξει τον τρόπο πυροδότησης των θυρίστωρς όπως φαίνεται στο *σχήμα 2.10*. Όπως παρατηρούμε οι παλμοί στα θυρίστωρς T1,T4 είναι μετατοπισμένοι (προηγούνται) κατά γωνία α σε σχέση με τους παλμούς στα θυρίστωρς T2,T3.



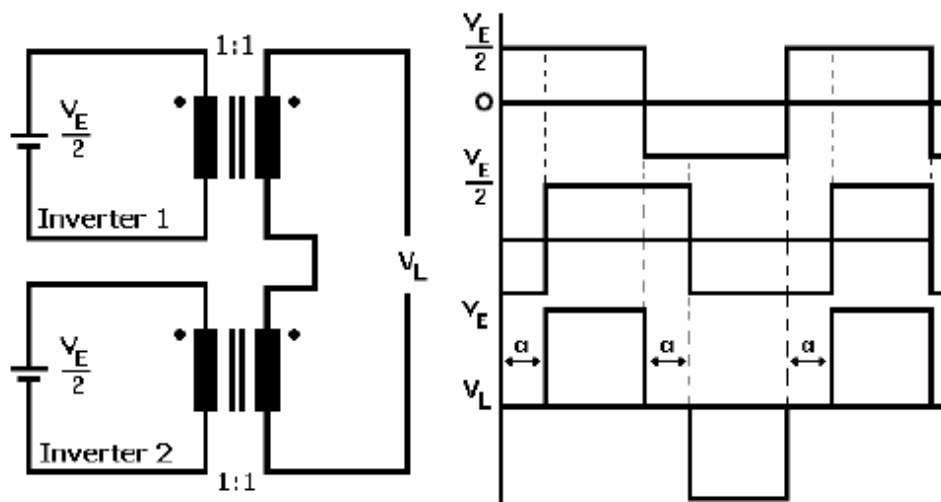
Σχήμα 2.9 : Μονοφασικός inverter πλήρους γέφυρας με φορτίο ωμικό–επαγωγικό



Σχήμα 2.10 : Πυροδότησης των θυρίστορς και χαρακτηριστικές κυματομορφές.

Ας πάρουμε για παράδειγμα την χρονική στιγμή όπου το T3 πυροδοτείται προκειμένου να σβήσει το T1, το ρεύμα του φορτίου μεταφέρεται στη δίοδο D3, αλλά καθώς το θυρίστορ T4 είναι ακόμη αναμμένο το ρεύμα του φορτίου ακολουθεί το δρόμο μέσω των T4, D3 βραχυκυκλώνοντας το φορτίο, κάνοντας μηδενική την τιμή της τάσης στο φορτίο. Τώρα όταν πυροδοτείται το T2 προκειμένου να σβήσει το T4, ο μόνος δρόμος για το ρεύμα του φορτίου είναι μέσω των διόδων D3 και D4 συνδέοντας την dc πηγή τροφοδοσίας με το φορτίο κατά την αρνητική φορά. Τα θυρίστορς T2, T3 αρχίζουν να άγουν αμέσως μετά τον μηδενισμό του ρεύματος. Τα ρεύμα στα θυρίστορς όπως και στις διόδους δεν είναι πλέον τα ίδια. Ενας εναλλακτικός τρόπος παραγωγής ημιτετραγωνικού κύματος είναι να συνδυάσουμε τις εξόδους από δύο push-pull inverters από τις οποίες η μία είναι μετατοπισμένη ως προς την άλλη κατά γωνία α όπως φαίνεται και στο σχήμα 2.11. Ετσι αν προσθέσουμε τις δύο εξόδους προκύπτει το επιθυμητό αποτέλεσμα. Η ενεργός τιμή της τάσης εξόδου δίνεται από την σχέση :

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \left[\int_0^{\pi-\alpha} V_E^2 dt + \int_{\pi}^{2\pi-\alpha} (-V_E)^2 dt \right]} = V_E \sqrt{1 - \frac{\alpha}{\pi}} \tag{2.10}$$



Σχήμα 2.11 : Ολίσθηση της τάσης εξόδου του ενός inverter έναντι του άλλου.

Το ρεύμα στο φορτίο δίνεται από την :

με $V_L > 0$ και $I_0 \leq 0$

$$i_L = \frac{V_E}{R} - \left(\frac{V_E}{R} - I_0 \right) e^{-\frac{R}{L}t} \quad \text{με } 0 \leq t \leq t_0 \quad (2.11)$$

με $V_L = 0$ και $I_1 \geq 0$

$$i_L = I_1 e^{-\frac{R}{L}t} \quad \text{με } 0 \leq t \leq t_1 - t_0 \quad (2.12)$$

με $V_L < 0$ και $I_2 \geq 0$

$$i_L = -\frac{V_E}{R} + \left(\frac{V_E}{R} + I_2 \right) e^{-\frac{R}{L}t} \quad \text{με } 0 \leq t \leq t_2 - t_1 \quad (2.13)$$

Τα ρεύματα I_0 I_1 I_2 δίνονται από τις σχέσεις :

$$I_0 = \frac{-V_E}{R} \left(\frac{e^{-\frac{L}{R}t_0} - e^{-\frac{L}{R}t_1}}{1 - e^{-\frac{L}{R}t_1}} \right), \quad I_1 = \frac{V_E}{R} \left(\frac{1 - e^{-\frac{L}{R}t_0}}{1 - e^{-\frac{L}{R}t_1}} \right), \quad I_2 = -I_0 \quad (2.14)$$

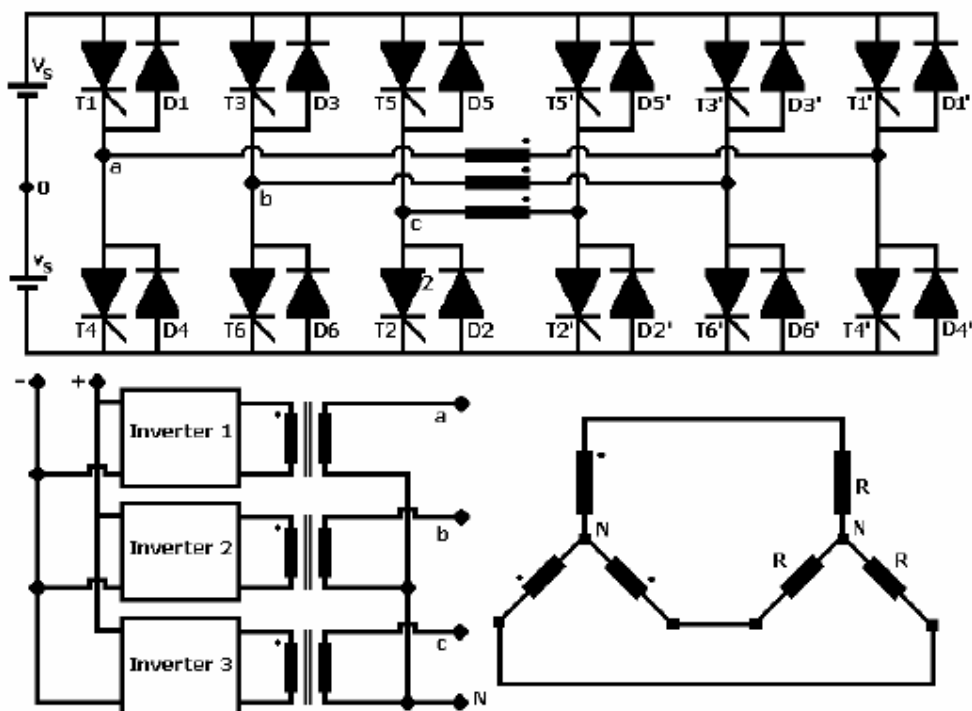
Η ενεργός ισχύς στο φορτίο θα είναι :

$$P_L = \frac{1}{t_1} \int_0^{t_1} V_E i_L(t) dt \quad (2.15)$$

όπου το ρεύμα i_L δίνεται από τις σχέσεις 2.11, 2.12 και 2.13.

2.4 Τριφασικοί Inverters

Οι τριφασικοί inverters χρησιμοποιούνται συνήθως σε εφαρμογές υψηλής ισχύος. Όπως φαίνεται στο *σχήμα 2.12* τρεις μονοφασικοί inverters πλήρους γέφυρας μπορούν να συνδεθούν παράλληλα για να σχηματίσουν έναν τριφασικό inverter. Τα διάφορα κυκλώματα μεταγωγής των θυρίστωρ έχουν σκόπιμα παραληφθεί προκειμένου να απλουστευθούν αυτές.



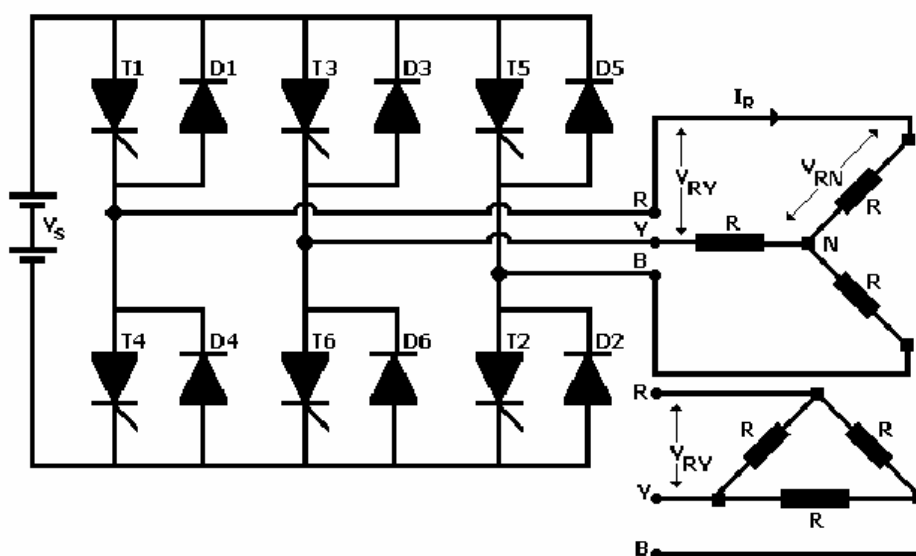
Σχήμα 2.12 : Τριφασικός inverter αποτελούμενος από τρεις μονοφασικούς inverters πλήρους γέφυρας με διόδους ελεύθερης ροής και φορτίο σε συνδεσμολογία αστέρα.

Στο *σχήμα 2.13* έχουν συνδυαστεί επίσης τρεις μονοφασικοί inverters μισής γέφυρας για να δημιουργήσουν έναν τριφασικό inverter με έξι θυρίστωρες και έξι διόδους ελεύθερης ροής αντιπαράλληλα με αυτά. Στη συνέχεια θα μελετήσουμε δύο τύπους ελέγχου που μπορούν να εφαρμοστούν στα θυρίστωρες με αγωγή 180° και 120° .

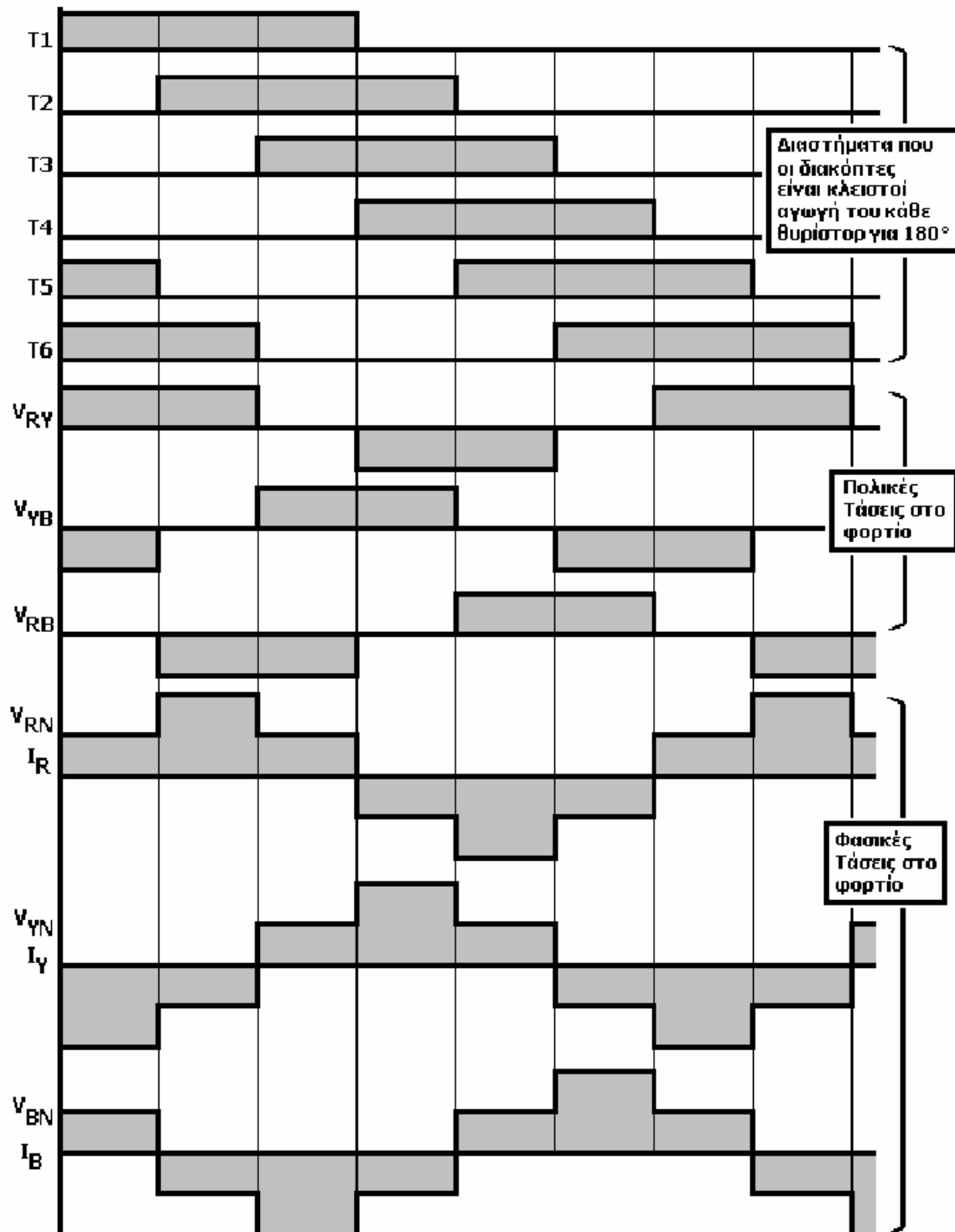
2.4.1 Αγωγή του κάθε θυρίστωρα για 180°

Στην περίπτωση αυτή τρία θυρίστωρες είναι αναμμένα σε κάθε χρονική στιγμή. Όταν το θυρίστωρα T1 πυροδοτείται, το άκρο R είναι συνδεδεμένο στο θετικό άκρο της dc πηγής εισόδου. Όταν το θυρίστωρα T4 πυροδοτείται, τότε το άκρο R οδηγείται στο αρνητικό άκρο της dc πηγής. Υπάρχουν έξι φάσεις λειτουργίας για κύκλο στην έξοδο της διάταξης και κάθε μία από αυτές διαρκεί 60° . Τα θυρίστωρες αριθμούνται σύμφωνα με την σειρά πυροδότησης (123, 234, 345, 456, 561, 612). Στο *σχήμα 2.14* φαίνονται τα διαστήματα που άγουν τα θυρίστωρες μετατοπισμένα το ένα ως προς το άλλο κατά 60° καθώς οι κυματομορφές τάσεων και ρευμάτων στο φορτίο το οποίο είναι ωμικό σε συνδεσμολογία αστέρα. Για συνδεσμολογία φορτίου σε τρίγωνο τα φασικά ρεύματα μπορούν να υπολογισθούν κατευθείαν από τις αντίστοιχες πολικές τάσεις και στη συνέχεια να υπολογιστούν τα ρεύματα των γραμμών.

Για συνδεσμολογία φορτίου σε αστέρα πρέπει πρώτα να υπολογιστούν οι τάσεις γραμμής – ουδετέρου (φασικές) και στη συνέχεια να υπολογίσουμε τα ρεύματα. Υπάρχουν έξι φάσεις λειτουργίας για κάθε κύκλο και τα ισοδύναμα κυκλώματα φαίνονται στο *σχήμα 2.15* για συνδεσμολογία φορτίου σε αστέρα .

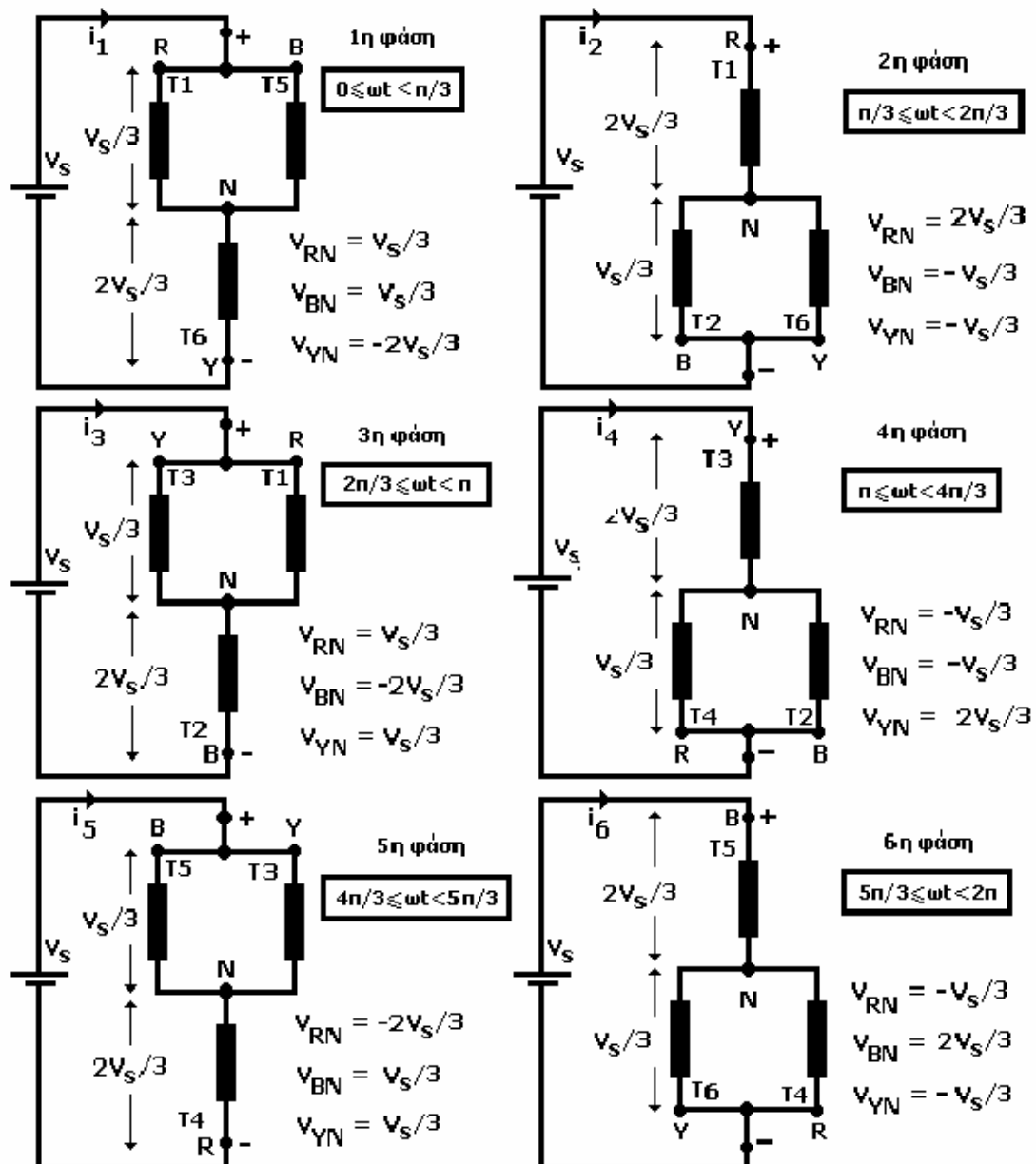


Σχήμα 2.13 : Τριφασικός inverter με φορτίο σε συνδεσμολογία αστέρα



Σχήμα 2.14 : Κυματομορφές φασικών και πολικών τάσεων στο φορτίο τριφασικού inverter αποτελούμενου από τρεις μονοφασικούς inverters μισής γέφυρας με διόδους ελεύθερης ροής και φορτίο σε συνδεσμολογία αστέρα. Η διάρκεια αγωγής του κάθε διακόπτη είναι 180°.

$0 \leq \omega t < \pi/3,$	$\pi/3 \leq \omega t < 2\pi/3,$	$2\pi/3 \leq \omega t < \pi,$
$R_{eq} = R + \frac{R}{2} = \frac{3R}{2}$ $i_1 = \frac{V_s}{R_{eq}} = \frac{2V_s}{3R}$ $V_{YN} = -i_1 R = \frac{-2V_s}{3}$ $V_{RN} = V_{BN} = \frac{i_1 R}{2} = \frac{V_s}{3}$	$R_{eq} = R + \frac{R}{2} = \frac{3R}{2}$ $i_2 = \frac{V_s}{R_{eq}} = \frac{2V_s}{3R}$ $V_{RN} = i_2 R = \frac{2V_s}{3}$ $V_{BN} = V_{YN} = \frac{-i_2 R}{2} = \frac{-V_s}{3}$	$R_{eq} = R + \frac{R}{2} = \frac{3R}{2}$ $i_3 = \frac{V_s}{R_{eq}} = \frac{2V_s}{3R}$ $V_{BN} = -i_3 R = \frac{-2V_s}{3}$ $V_{YN} = V_{RN} = \frac{i_3 R}{2} = \frac{V_s}{3}$
$\pi \leq \omega t < 4\pi/3,$	$4\pi/3 \leq \omega t < 5\pi/3,$	$5\pi/3 \leq \omega t < 2\pi,$
$R_{eq} = R + \frac{R}{2} = \frac{3R}{2}$ $i_4 = \frac{V_s}{R_{eq}} = \frac{2V_s}{3R}$ $V_{YN} = i_4 R = \frac{2V_s}{3}$ $V_{RN} = V_{BN} = \frac{-i_4 R}{2} = \frac{-V_s}{3}$	$R_{eq} = R + \frac{R}{2} = \frac{3R}{2}$ $i_5 = \frac{V_s}{R_{eq}} = \frac{2V_s}{3R}$ $V_{RN} = -i_5 R = \frac{-2V_s}{3}$ $V_{YN} = V_{BN} = \frac{i_5 R}{2} = \frac{V_s}{3}$	$R_{eq} = R + \frac{R}{2} = \frac{3R}{2}$ $i_6 = \frac{V_s}{R_{eq}} = \frac{2V_s}{3R}$ $V_{BN} = i_6 R = \frac{2V_s}{3}$ $V_{RN} = V_{YN} = \frac{-i_6 R}{2} = \frac{-V_s}{3}$



Σχήμα 2.15 : Στιγμαϊκές τιμές φασικών και πολικών τάσεων στο φορτίο του τριφασικού inverter

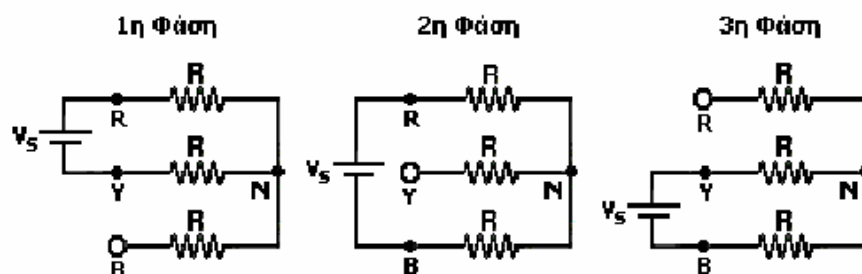
2.4.2 Αγωγή του κάθε θυρίστορ για 120°

Στην περίπτωση αυτή δύο θυρίστορς είναι αναμμένα σε κάθε χρονική στιγμή. Όταν το θυρίστορ T1 πυροδοτείται, το άκρο R είναι συνδεδεμένο στο θετικό άκρο της dc πηγής εισόδου, ενώ όταν πυροδοτείται το θυρίστορ T4, τότε το άκρο R οδηγείται στο αρνητικό άκρο της dc

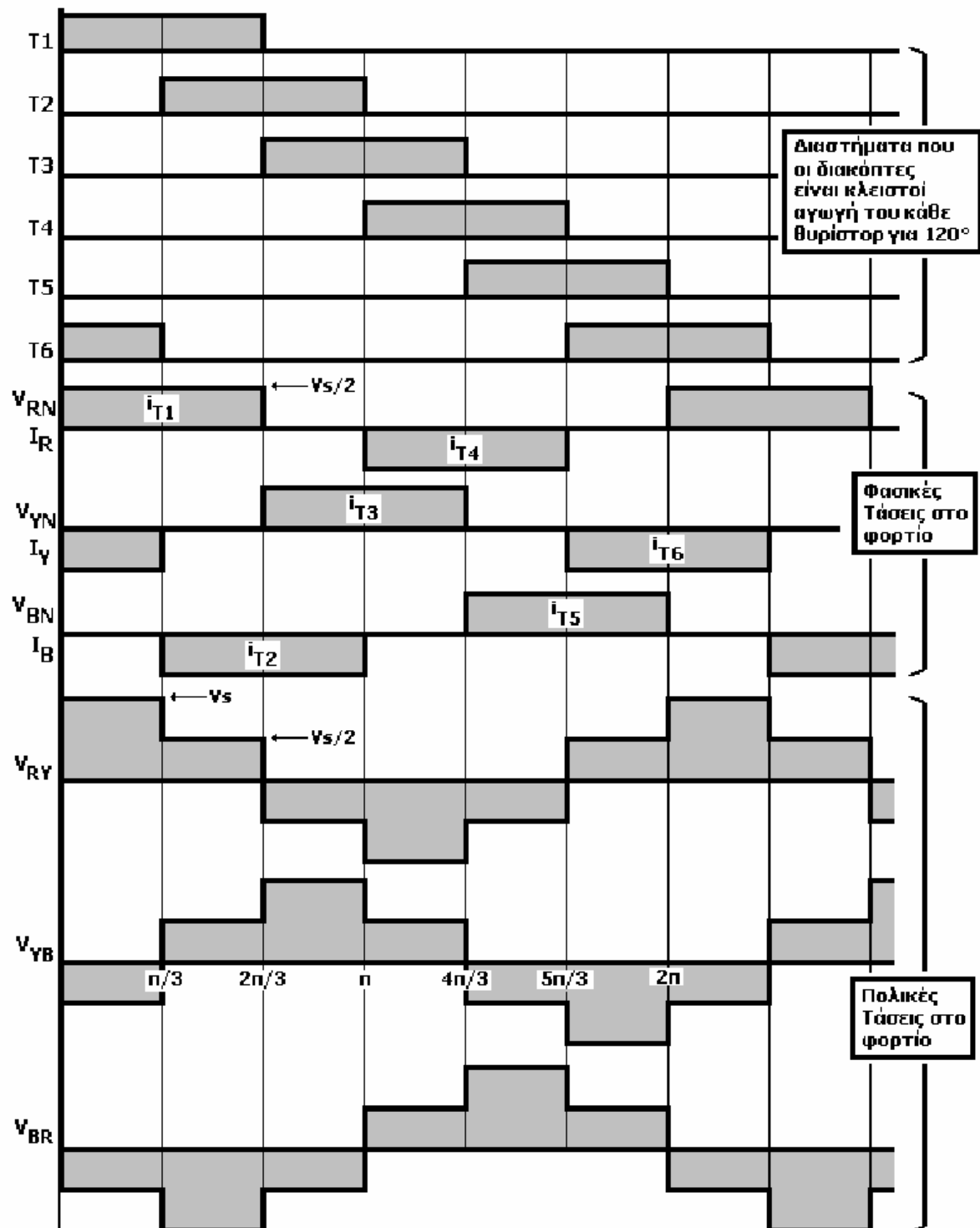
πηγής. Υπάρχουν έξι φάσεις λειτουργίας για ένα κύκλο στην έξοδο της διάταξης και κάθε μία από αυτές διαρκεί 60° .

Τα θυρίστρος αριθμούνται σύμφωνα με την σειρά πυροδότησης 16, 21, 32, 43, 54, 65. Στο *σχήμα 2.17* φαίνονται τα διαστήματα που άγουν τα θυρίστρος μετατοπισμένα το ένα ως προς το άλλο κατά 60° καθώς και οι κυματομορφές τάσεων και ρευμάτων στο φορτίο το οποίο είναι ωμικό συνδεδεμένο σε αστέρα.

$0 \leq \omega t < \pi/3,$	$\pi/3 \leq \omega t < 2\pi/3,$	$2\pi/3 \leq \omega t < \pi,$
$R_{eq} = R + R = 2R$ $i_1 = \frac{V_s}{R_{eq}} = \frac{V_s}{2R}$ $V_{BN} = 0$ $V_{RN} = -V_{YN} = i_1 R = \frac{V_s}{2}$	$R_{eq} = R + R = 2R$ $i_2 = \frac{V_s}{R_{eq}} = \frac{V_s}{2R}$ $V_{YN} = 0$ $V_{RN} = -V_{BN} = i_2 R = \frac{V_s}{2}$	$R_{eq} = R + R = 2R$ $i_3 = \frac{V_s}{R_{eq}} = \frac{V_s}{2R}$ $V_{RN} = 0$ $V_{YN} = -V_{BN} = i_3 R = \frac{V_s}{2}$
$\pi \leq \omega t < 4\pi/3,$	$4\pi/3 \leq \omega t < 5\pi/3,$	$5\pi/3 \leq \omega t < 2\pi,$
$R_{eq} = R + R = 2R$ $i_4 = \frac{V_s}{R_{eq}} = \frac{V_s}{2R}$ $V_{BN} = 0$ $V_{YN} = -V_{RN} = i_4 R = \frac{V_s}{2}$	$R_{eq} = R + R = 2R$ $i_5 = \frac{V_s}{R_{eq}} = \frac{V_s}{2R}$ $V_{YN} = 0$ $V_{BN} = -V_{RN} = i_5 R = \frac{V_s}{2}$	$R_{eq} = R + R = 2R$ $i_6 = \frac{V_s}{R_{eq}} = \frac{V_s}{2R}$ $V_{RN} = 0$ $V_{BN} = -V_{YN} = i_6 R = \frac{V_s}{2}$



Σχήμα 2.16 : Ισοδύναμα κυκλώματα για ωμικό φορτίο συνδεδεμένο σε αστέρα.

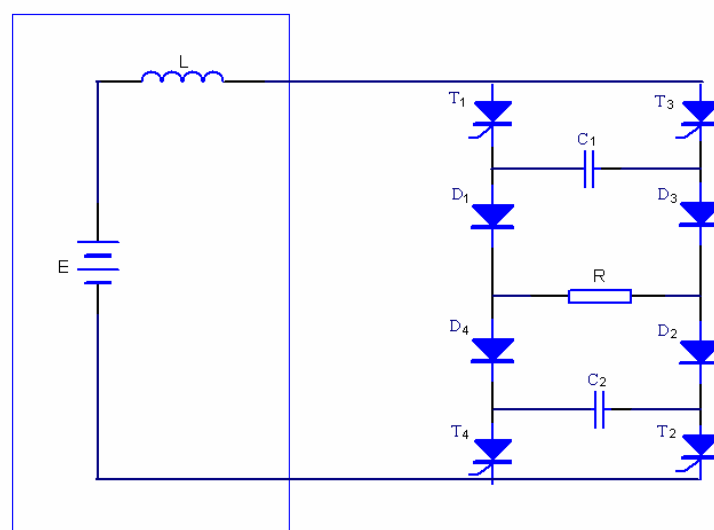


Σχήμα 2.17 : Κυματομορφές φασικών και πολικών τάσεων στο φορτίο τριφασικού inverter αποτελούμενου από τρεις μονοφασικούς inverters μισής γέφυρας με διόδους ελεύθερης ροής και φορτίο σε συνδεσμολογία αστέρα. Η διάρκεια αγωγής του κάθε διακόπτη είναι 180° .

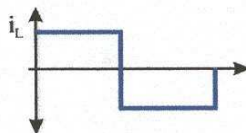
2.5 Αντιστροφείς σταθερής πηγής ρεύματος

Στις προηγούμενες παραγράφους εξετάστηκαν αντιστροφείς οι οποίοι τροφοδοτούνται από μια πηγή σταθερής τάσης και με τάση στα άκρα του φορτίου βηματικής μορφής. Οι αντιστροφείς πηγής σταθερού ρεύματος έχουν το πλεονέκτημα ότι το ρεύμα από την πηγή dc είναι σταθερό και ανεξάρτητο από διάφορες συνθήκες στον αντιστροφέα για μια περίοδο μερικών κύκλων. Στην πράξη αυτό επιτυγχάνεται αν σε σειρά με την πηγή συνδεθεί μια μεγάλη αυτεπαγωγή έτσι ώστε οι αλλαγές στην τάση του αντιστροφέα που μπορεί να συμβούν να εξισορροπηθούν από την $U_L = L \frac{di}{dt}$.

Αυτό βέβαια θα ισχύει για μικρά di/dt και επομένως το ρεύμα θα διατηρείται σταθερό για μικρές χρονικές στιγμές. Με ένα αντιστροφέα σταθερού ρεύματος είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθεί ένα απλό κύκλωμα μεταγωγής μόνο με πυκνωτή, σαν αυτό του σχήματος 2.18.



(α)

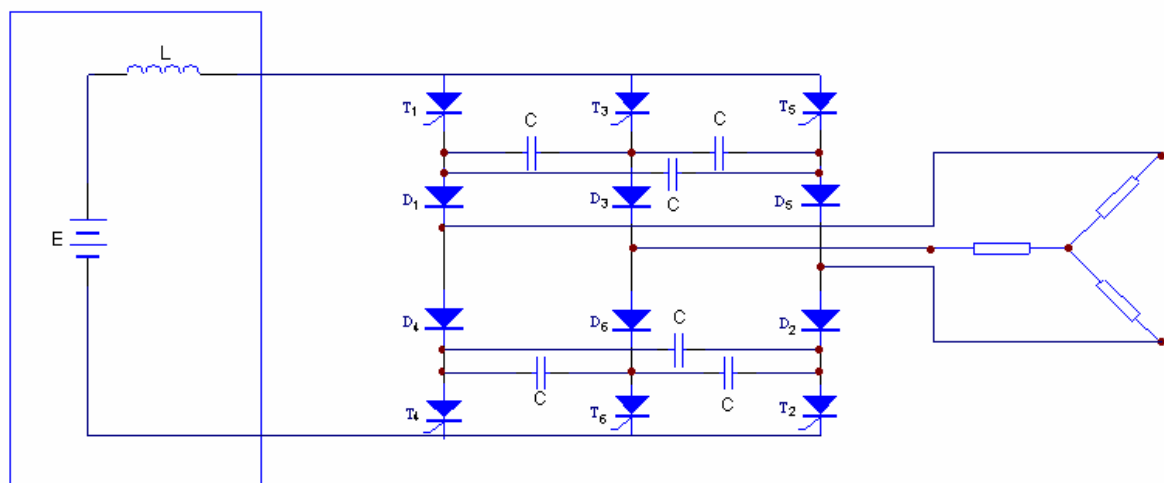


(β)

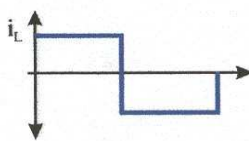
Σχήμα 2.18 : Μονοφασικός αντιστροφέας πηγής σταθερού ρεύματος α) Κύκλωμα β) κυματομορφή ρεύματος-φορτίου

Στο κύκλωμα λοιπόν αυτό, με τα thyristors T_1 και T_2 σε αγωγή, και οι δυο πυκνωτές φορτίζονται με τον αριστερό τους σπλισμό θετικό (όπως φαίνεται στο σχήμα). Όταν τα thyristors T_3 και T_4 "πυροδοτούνται" οι πυκνωτές συνδέονται στα άκρα των thyristors T_1 και T_2 αντίστοιχα, εκφορτίζονται και επομένως τα "σβήνουν" ενώ ρεύμα ρέει τώρα μέσω των T_3 C_1 D_1 φορτίο, D_2 C_2 T_4 και οι πυκνωτές φορτίζονται τώρα με αντίθετη πολικότητα. Όταν οι πυκνωτές φορτιστούν πλήρως οι δίοδοι D_3 και D_4 θα αρχίσουν να άγουν, αντιστρέφοντας έτσι το ρεύμα στο φορτίο το οποίο τελικά μεταφέρεται από τα T_3 και T_4 και ο κύκλος αυτός επαναλαμβάνεται.

Η ίδια διαδικασία μεταγωγής εφαρμόζεται και στους τριφασικούς αντιστροφείς με πηγή σταθερού ρεύματος. Τα thyristors τώρα "πυροδοτούνται" με τη σειρά $(T_1 - T_2) - (T_3 - T_4) - (T_5 - T_6) - T_1$ κ.ο.κ. με κάθε thyristor να βρίσκεται σε αγωγή για 120° , ενώ για κάθε στιγμή άγουν μόνο δύο thyristors.



(α)

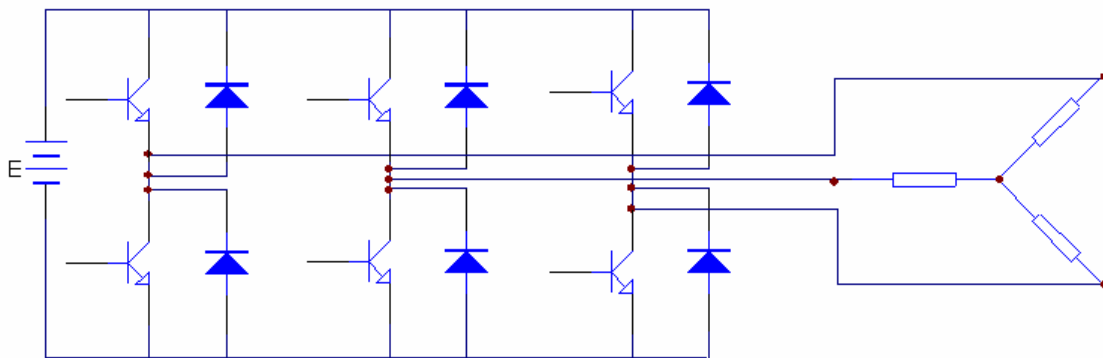


(β)

Σχήμα 2.19 : Τριφασικός μετατροπέας πηγής σταθερού ρεύματος α) Κύκλωμα β) Κυματομορφή ρεύματος-φορτίου

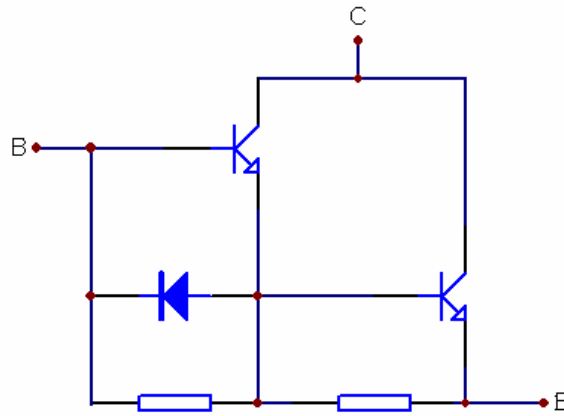
2.6 Άλλοι τύποι αντιστροφών

Οι αντιστροφείς των κυκλωμάτων που ήδη εξετάσαμε χρησιμοποιούν συνηθισμένα thyristors σαν στοιχεία διακοπής, τα οποία απαιτούν εξωτερικά κυκλώματα μεταγωγής (σαν αυτά του 3ου μέρους) που καθιστούν την αντιστροφή μια πολύπλοκη διαδικασία. Η εξέλιξη όμως της τεχνολογίας των ηλεκτρονικών ισχύος εισήγαγε πρόσφατα ένα αριθμό νέων συσκευών κατάλληλων για εφαρμογές αντιστροφής. Έτσι χρησιμοποιώντας thyristors GTO (Gate Turn-Off) τα κυκλώματα μεταγωγής εξαλείφονται, αλλά τα κυκλώματα πύλης είναι τώρα περισσότερο σύνθετα απ' ό,τι των άλλων (κοινών) thyristors. Περισσότερο χρησιμοποιούμενα κυκλώματα σε διατάξεις αντιστροφής είναι αυτά που χρησιμοποιούν transistors όπως δείχνει και το *σχήμα 2.20*.



Σχήμα 2.20 : Βασικός αντιστροφέας τριών φάσεων με τρανζίστρορ ισχύος

Τα transistors όπως είναι γνωστό μπορούν να αλλάζουν κατάσταση (on-off) γρηγορότερα απ' ό,τι τα thyristors αλλά απαιτούν ρεύμα βάσης μεγάλο κατά την διάρκεια της on περιόδου. Έτσι το ρεύμα βάσης θα πρέπει να ελέγχεται σε μέγεθος έτσι ώστε να κρατά το transistor ακριβώς μέσα στα όρια τον κορεσμού. Οι απαιτήσεις της βάσης (σε ρεύμα) τον transistor ελαττώνονται με την διάταξη Darlington του transistor ισχύος που φαίνεται στο *σχήμα 2.21*.



Σχήμα 2.21 : Διάταξη Darlington του transistor ισχύος

Τέλος χρησιμοποιώντας σαν συσκευή αλλαγής κατάστασης (on-off) το MOSFET ισχύος στους αντιστροφείς πετυχαίνουμε τους γρηγορότερους αντιστροφείς για απαιτήσεις χαμηλής ισχύος ανάλογα προς το περιορισμένο ρεύμα και τάση του.

Ολοκληρώνοντας τη περιγραφή των αντιστροφέων πρέπει ακόμα να αναφερθεί ότι :

- Χρησιμοποιώντας συνηθισμένα thyristors με εξωτερικά κυκλώματα μεταγωγής ο αντιστροφέας λειτουργεί με συχνότητα έως 100Hz περίπου.
- Χρησιμοποιώντας thyristors GTO (Gate Turn-Off) η συχνότητα μπορεί να επεκταθεί έως τα 2000Hz περίπου.
- Χρησιμοποιώντας transistors έως τα 10KHz και
- Χρησιμοποιώντας MOSFET έως τα 25KHz

Οι τιμές αυτές είναι ενδεικτικές επειδή είναι απαραίτητο να εξισορροπηθούν προσεκτικά οι απώλειες αγωγής και οι απώλειες κατά την αλλαγή κατάστασης με τις απώλειες του φορτίου.

2.7 Έλεγχος τάσης σε μονοφασικούς inverters

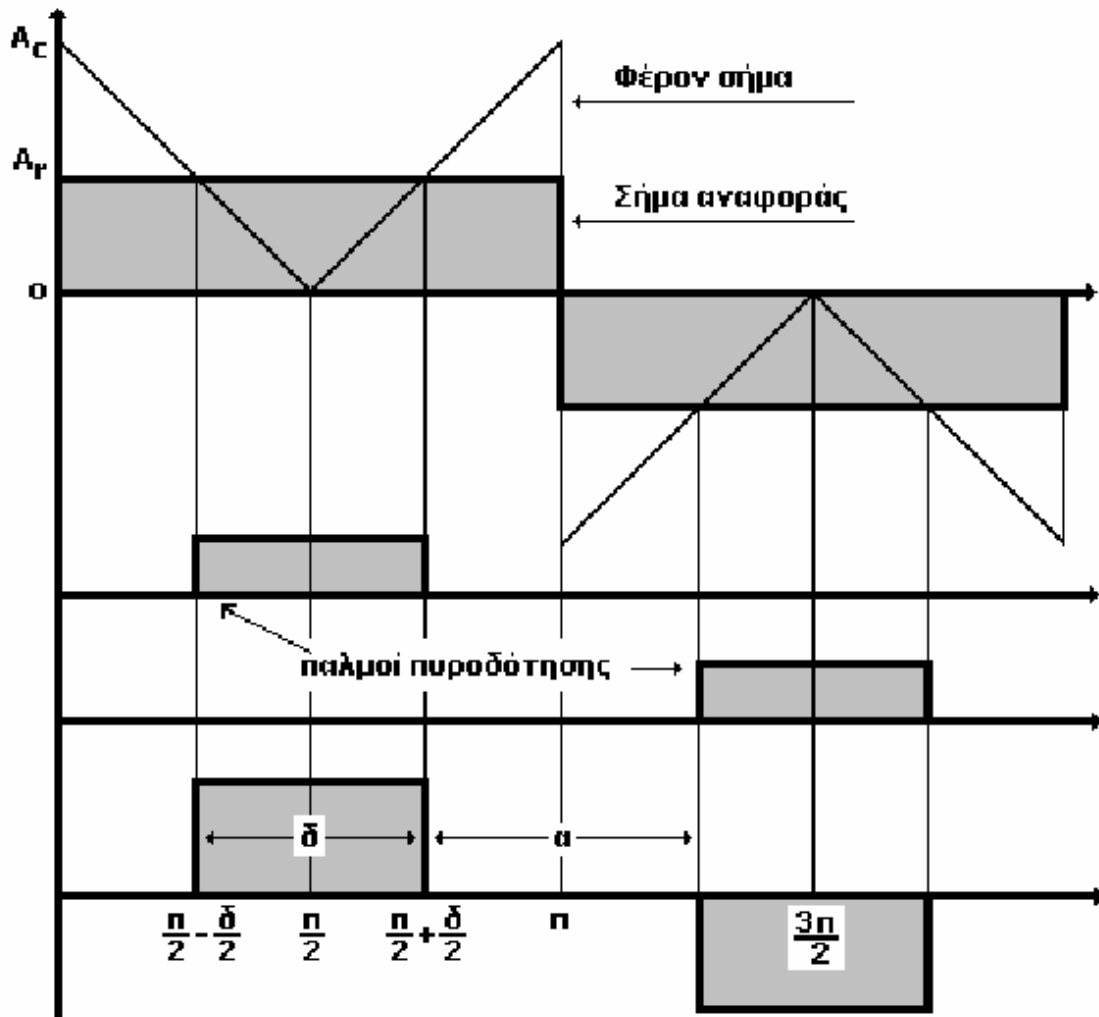
Σε πολλές βιομηχανικές εφαρμογές, απαιτείται συχνά ο έλεγχος της τάσης εξόδου των inverters με σκοπό να αντιμετωπίσουμε την μεγάλη ποικιλία των dc τάσεων εισόδου αλλά και για να ελέγξουμε την ισχύ στο φορτίο. Επίσης στους επαγωγικούς κινητήρες απαιτείται ο λόγος της τάσης προς την συχνότητα να είναι σταθερός με σκοπό τον έλεγχο των στροφών αλλά και της ροπής του κινητήρα.

Υπάρχουν διάφορες τεχνικές ελέγχου της τάσης εξόδου ενός inverter. Η πιο αποτελεσματική είναι αυτή στην οποία χρησιμοποιείται η διαμόρφωση εύρους παλμών (**PWM Pulse Width Modulation**). Έτσι λοιπόν οι πιο συχνά χρησιμοποιούμενες τεχνικές είναι :

- | | |
|--|-----------------------------------|
| 1. Απλή διαμόρφωση εύρους παλμών | Single Pulse Width Modulation |
| 2. Πολλαπλή διαμόρφωση εύρους παλμών | Multi Pulse Width Modulation |
| 3. Ημιτονοειδής διαμόρφωση εύρους παλμών | Sinusoidal Pulse Width Modulation |

2.7.1 Απλή διαμόρφωση εύρους παλμών.

Στην τεχνική της απλής διαμόρφωσης εύρους παλμών υπάρχει μόνο ένας παλμός για κάθε ημιπερίοδο, ενώ το εύρος του παλμού αυτού είναι μεταβλητό, ώστε να μπορέσουμε να πετύχουμε τον έλεγχο της τάσης εξόδου του inverter. Στο *σχήμα 2.22* φαίνονται η τάση εξόδου ενός μονοφασικού inverter πλήρους γέφυρας και οι παλμοί πυροδότησης των θυρίστρος, οι οποία δημιουργούνται συγκρίνοντας ένα ορθογώνιο σήμα αναφοράς πλάτους A_r με ένα τριγωνικό φέρον κύμα πλάτους A_c .



Σχήμα 2.22 : Απλή διαμόρφωση εύρους παλμών.

Η συχνότητα του σήματος αναφοράς καθορίζει την συχνότητα της θεμελιώδους αρμονικής συνιστώσας της τάσης εξόδου. Ρυθμίζοντας το A_r από 0 μέχρι A_c , ο παλμός δ , μπορεί να μεταβάλλεται από 0° ως 180° . Ο λόγος $M = A_r/A_c$ είναι μεταβλητός και ονομάζεται **συντελεστής διαμόρφωσης**.

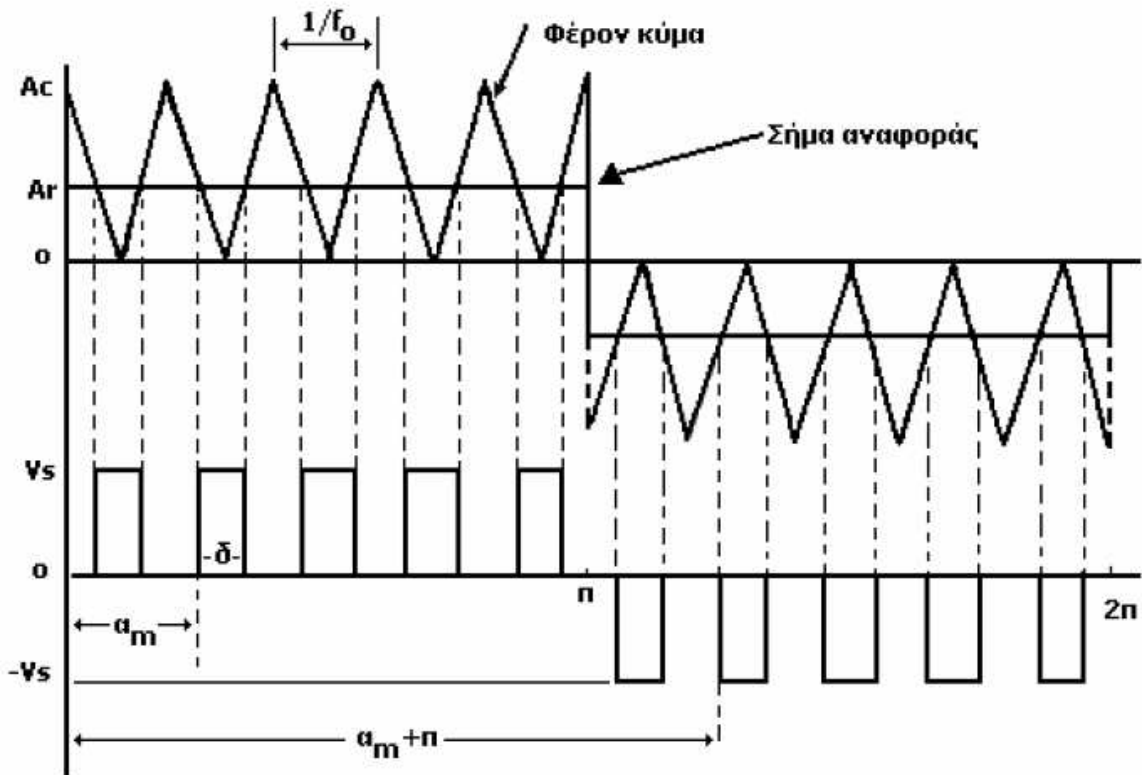
2.7.2 Πολλαπλή διαμόρφωση εύρους παλμών

Το αρμονικό περιεχόμενο μπορεί να ελαττωθεί χρησιμοποιώντας περισσότερους παλμούς σε κάθε ημιπερίοδο της τάσης εξόδου. Η δημιουργία των παλμών για το άναμμα και σβήσιμο των θυρίστωρ φαίνεται στο **σχήμα 2.23** όπου ένα σήμα αναφοράς συγκρίνεται με ένα τριγωνικό φέρον κύμα. Η συχνότητα του σήματος αναφοράς καθορίζει την συχνότητα εξόδου f_o , ενώ η συχνότητα του φέροντος, f_c καθορίζει τον αριθμό των παλμών p για μια

ημιπερίοδο. Ο συντελεστής διαμόρφωσης ρυθμίζει την τάση εξόδου, ενώ ο αριθμός των παλμών για κάθε ημιπερίοδο βρίσκεται από σχέση :

$$p = \frac{f_c}{2f_0} = \frac{m_f}{2} \quad (2.16)$$

όπου λόγος $m_f = f_c/f_0$ ονομάζεται **συντελεστής διαμόρφωσης συχνότητας**. Η ρύθμιση του συντελεστή διαμόρφωσης M από 0 μέχρι 1 μεταβάλλει το εύρος του παλμού από 0 έως π/p και την τάση εξόδου από 0 έως V_s

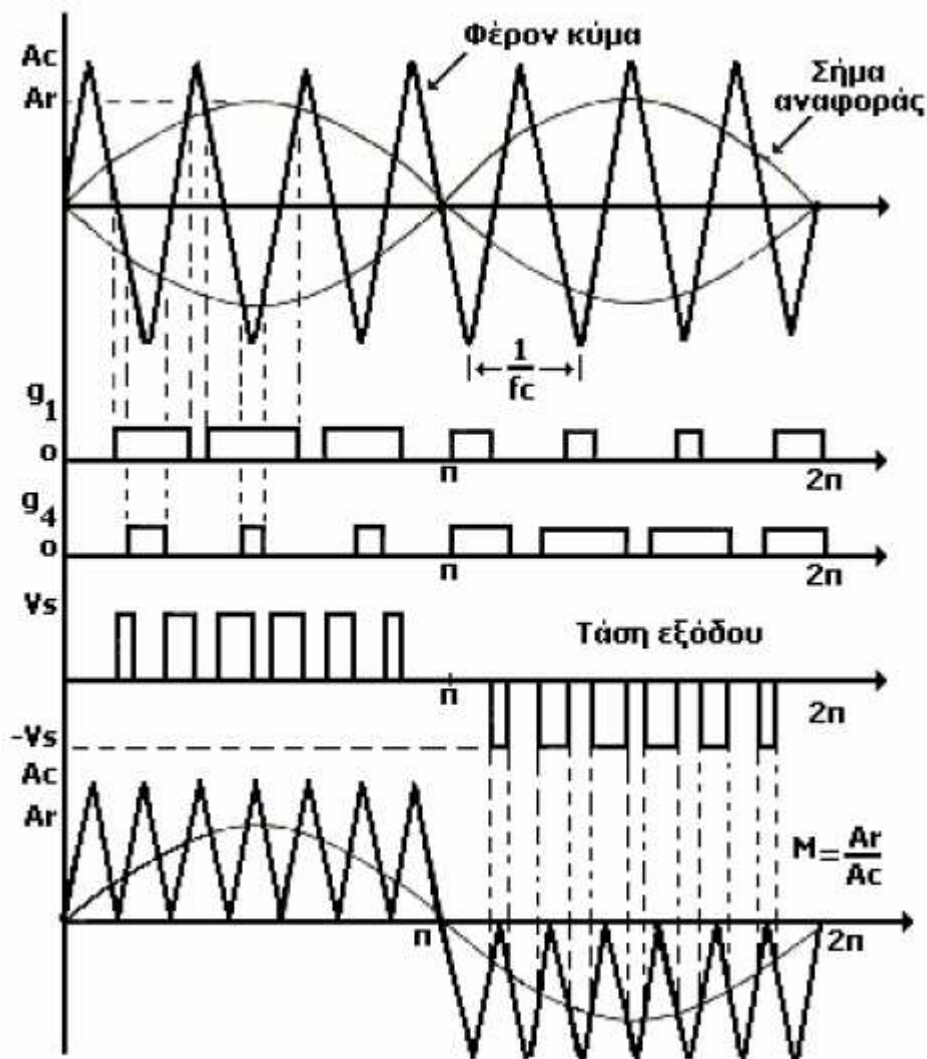


Σχήμα 2.23 : Πολλαπλός παλμός διαμόρφωσης πλάτους.

2.7.3 Ημιτονοειδής διαμόρφωσης εύρους παλμών

Αντί να διατηρήσουμε σταθερό το εύρος όλων των παλμών, όπως συμβαίνει στην περίπτωση του πολλαπλού παλμού διαμόρφωσης, το εύρος μεταβάλλεται ανάλογα με το πλάτος ενός ημιτονοειδούς κύματος αναφοράς. Ο συντελεστής παραμόρφωσης και

οι χαμηλής τάξης αρμονικές μειώνονται σημαντικά. Τα σήματα πύλης φαίνονται στο *σχήμα 2.24*, και δημιουργούνται συγκρίνοντας ένα ημιτονοειδές σήμα αναφοράς με ένα τριγωνικό φέρον κύμα συχνότητας f_c . Αυτός ο τύπος διαμόρφωσης χρησιμοποιείται συχνά σε βιομηχανικές εφαρμογές και αναφέρεται εν συντομία ως SPWM. Η συχνότητα του σήματος αναφοράς f_c καθορίζει την συχνότητα εξόδου του inverter, f_o , ενώ το πλάτος A_r ελέγχει τον συντελεστή διαμόρφωσης M , και ως εκ τούτου την ενεργό τάση εξόδου V_o . Ο αριθμός των παλμών για κάθε ημιπερίοδο εξαρτάται από την συχνότητα του φέροντος.



Σχήμα 2.24 : Ημιτονοειδής διαμόρφωσης εύρους παλμών

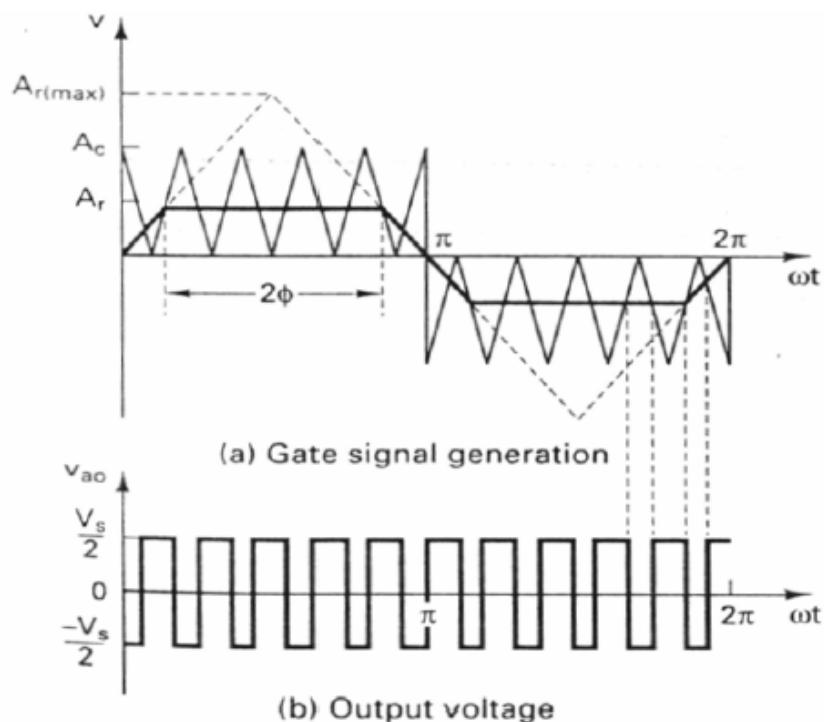
2.7.4 Προχωρημένες τεχνικές διαμόρφωσης

Ο SPWM που είναι πολύ κοινά χρησιμοποιημένος, υποφέρει από “επιστροφές” (π.χ. χαμηλή τάση εξόδου). Άλλες τεχνικές που προσφέρουν βελτιωμένη λειτουργία είναι :

1. Τραπεζοειδής διαμόρφωση
2. Κλιμακωτή διαμόρφωση
3. Βαθμιδωτή διαμόρφωση
4. Διαμόρφωση αρμονικής έγχυσης
5. Διαμόρφωση Δέλτα

Τραπεζοειδής διαμόρφωση. Τα σήματα πύλης παράγονται συγκρίνοντας ένα τριγωνικό φέρον κύμα με ένα διαμορφωμένο τραπεζοειδές κύμα όπως φαίνεται στο σχήμα 2.25. Το τραπεζοειδές κύμα μπορεί να αποκτηθεί από ένα τριγωνικό κύμα περιορίζοντας του το μέγεθος σε $\pm A_r$, μικρότερο του μέγιστου πλάτους $A_r(\max)$. Έτσι $A_r = \sigma A_r(\max)$ όπου η μεταβλητή σ ονομάζεται συντελεστής τριγωνισμού, γιατί η κυματομορφή γίνεται τριγωνική για $\sigma = 1$. Ο συντελεστής διαμόρφωσης M θα είναι :

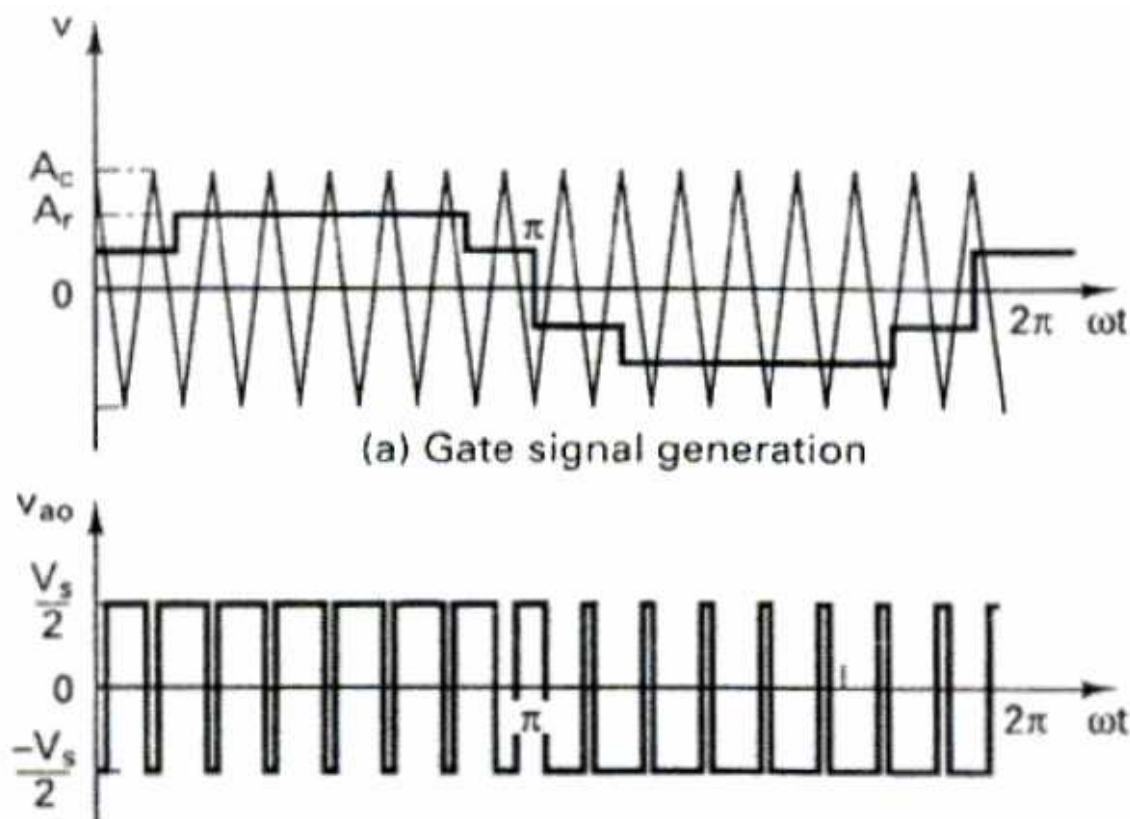
$$M = \frac{A_r}{A_c} = \frac{\sigma A_r(\max)}{A_c} \quad \text{για } 0 \leq M \leq 1 \quad (2.17)$$



Σχήμα 2.25 : Τραπεζοειδής διαμόρφωση.

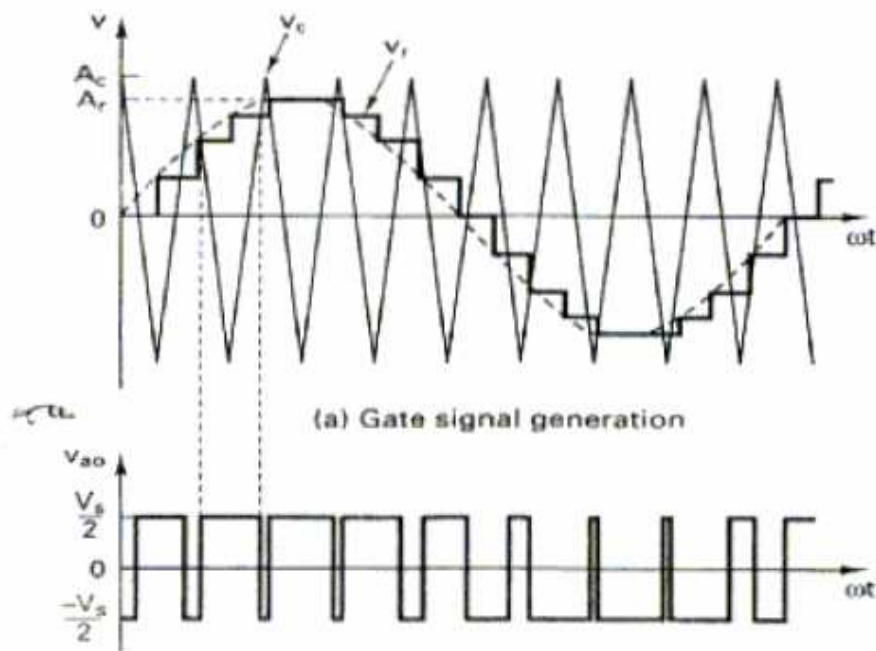
Η γωνία του επίπεδου τμήματος του τραπεζοειδούς κύματος δίνεται από την $2\varphi = (1-\sigma)\pi$. Για καθορισμένες τιμές των $A_r(\max)$ και A_c , ο συντελεστής διαμόρφωσης M που καθορίζει την τάση εξόδου μπορεί να αλλάζει μεταβάλλοντας τον συντελεστή τριγωνισμού σ . Αυτός ο τύπος διαμόρφωσης αυξάνει την τιμή κορυφής της θεμελιώδους τάσης εξόδου έως $1,05V_s$ αλλά η έξοδος περιέχει χαμηλής τάξης αρμονικές.

Κλιμακωτή διαμόρφωση. Το σήμα διαμόρφωσης είναι ένα κλιμακωτό κύμα, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.26. Η κλιμακωτή διαμόρφωση δεν είναι δείγμα προσέγγισης στο ημιτονοειδές σήμα. Τα επίπεδα κλιμάκωσης υπολογίζονται για να ελαχιστοποιηθούν ειδικές αρμονικές. Ο λόγος διαμόρφωσης συχνότητας m_f και ο αριθμός των κλιμακώσεων επιλέγονται για την απόκτηση επιθυμητής ποιότητας της τάσης εξόδου. Αυτός είναι ένας άριστος PWM και δεν συνιστάται για λιγότερους από 15 παλμούς στον κύκλο. Έχει αποδειχθεί ότι για υψηλή τάση εξόδου και χαμηλό συντελεστή διαμόρφωσης ο άριστος αριθμός παλμών είναι 15 για 2 επίπεδα, 21 για 3 επίπεδα και 27 για 4 επίπεδα. Αυτός ο τύπος ελέγχου παράγει υψηλής ποιότητας τάση εξόδου με τιμή κορυφής της θεμελιώδους αρμονικής τάσης εξόδου έως $0,94V_s$.



Σχήμα 2.26 : Κλιμακωτή διαμόρφωση.

Βηματική διαμόρφωση. Το διαμορφωτικό σήμα είναι ένα βαθμιδωτό κύμα [8] όπως φαίνεται στο σχήμα 2.27. Το βαθμιδωτό κύμα δεν είναι δείγμα προσέγγισης ημιτονοειδούς κυματομορφής. Διαχωρίζεται σε ειδικά διαστήματα π.χ. 200, κάθε διάστημα ελέγχεται ατομικά για τον έλεγχο του μεγέθους της βασικής συνιστώσας και για τον περιορισμό ειδικών αρμονικών. Αυτός ο τύπος ελέγχου δίνει χαμηλή παραμόρφωση, αλλά υψηλότερο βασικό μέγεθος σε σύγκριση με τον απλό PWM έλεγχο.



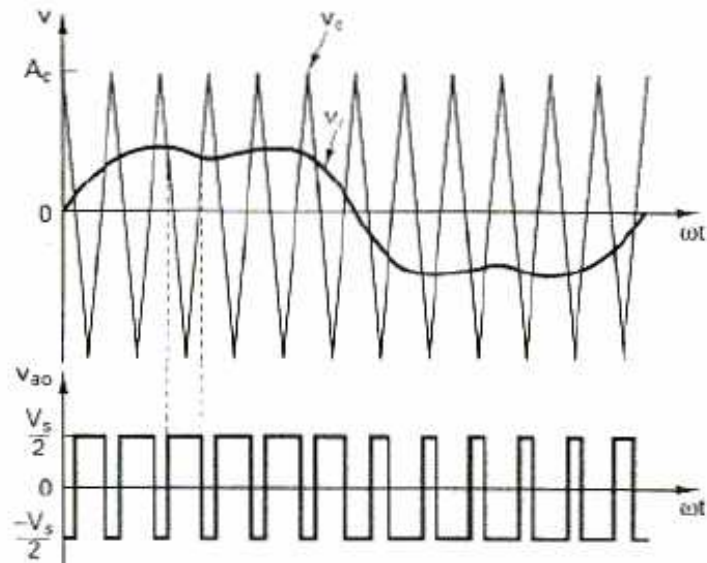
Σχήμα 2.27 : Βαθμιδωτή διαμόρφωση.

Διαμόρφωση αρμονικής έγχυσης. Το διαμορφωτικό σήμα δημιουργείται εγχέοντας επιλεγμένες αρμονικές στο ημιτονοειδές κύμα. Αυτό επιδρά στην επίπεδη κορυφή της κυματομορφής και μειώνει το ποσό της υπερδιαμόρφωσης. Παράγει όμως υψηλότερο πλάτος στην θεμελιώδη αρμονική και χαμηλή παραμόρφωση στην τάση εξόδου. Το σήμα διαμόρφωσης είναι γενικά της μορφής :

$$u_r = 1,15\eta\mu\omega t + 0,27\eta\mu 3\omega t - 0,029\eta\mu 9\omega t \quad (2.18)$$

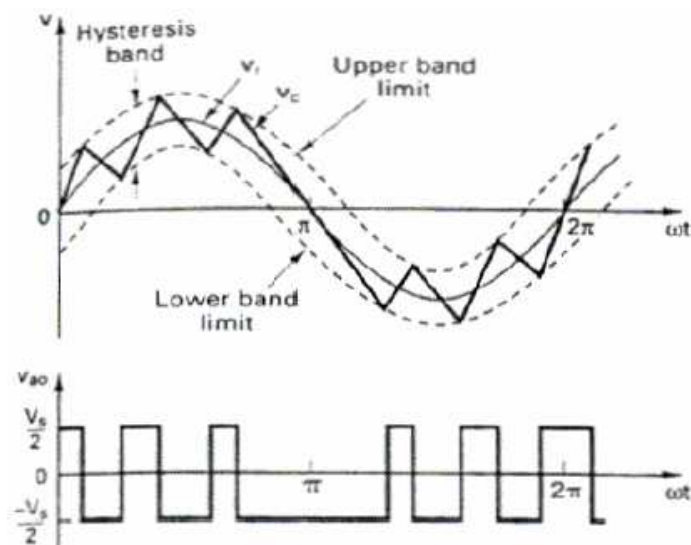
με έγχυση τρίτης και ένατης αρμονικής όπως φαίνεται στο σχήμα 2.28. Πρέπει να σημειωθεί ότι η έγχυση 3η τάξης αρμονικών δεν έχει καμία επίδραση στην ποιότητα της τάσης εξόδου, γιατί η έξοδος ενός τριφασικού inverter για παράδειγμα δεν περιέχει καθόλου αρμονικές τρίτης τάξης. Εάν εγχέεται μόνο η τρίτη αρμονική, η u_r δίνεται από την :

$$u_r = 1,15\eta\mu\omega t + 0,19\eta\mu 3\omega t \quad (2.19)$$



Σχήμα 2.28 : Διαμόρφωση επιλεγμένης αρμονικής έγχυσης.

Διαμόρφωση Δέλτα. Στην διαμόρφωση Δέλτα, ένα τριγωνικό κύμα αφήνεται να ταλαντούται μέσα σε ένα καθορισμένο παράθυρο ΔV πάνω και κάτω από το σήμα αναφοράς v_r . Η λειτουργία διακοπής του inverter, που είναι ίδια με την τάση εξόδου v_o , γεννιέται από τις τομές της τριγωνικής κυματομορφής v_c όπως φαίνεται στο σχήμα 2.29. Είναι επίσης γνωστή ως διαμόρφωση υστέρησης. Εάν η συχνότητα του διαμορφωτικού κύματος αλλάξει διατηρώντας την κλίση του τριγωνικού κύματος σταθερή, ο αριθμός των παλμών και τα πλάτη τους από το διαμορφωτικό κύμα θα αλλάξουν. Η βασική τάση εξόδου φτάνει το $1 V_s$ και εξαρτάται από το μέγιστο μέγεθος A_r και συχνότητα f_r της τάσης αναφοράς. Η διαμόρφωση Δέλτα μπορεί να ελέγξει το λόγο τάσης/συχνότητας, το οποίο είναι επιθυμητό σε έλεγχο ac κινητήρων.



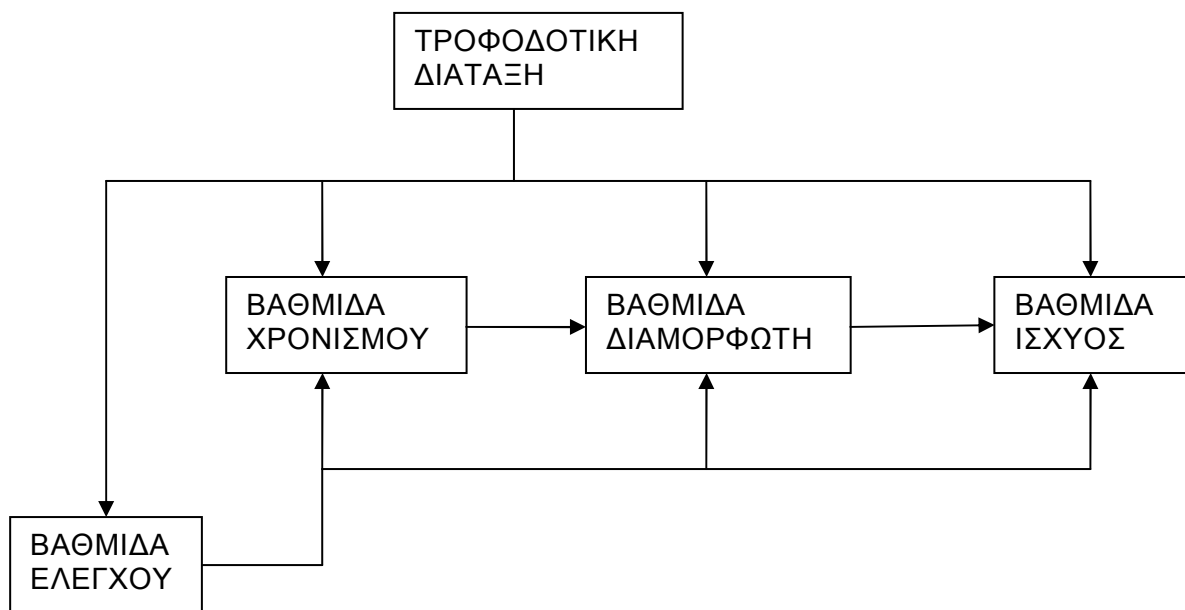
Σχήμα 2.29 : Διαμόρφωση Δέλτα.

ΚΕΦ.3 ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΤΟΥ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΕΑ

3.1 Γενικά

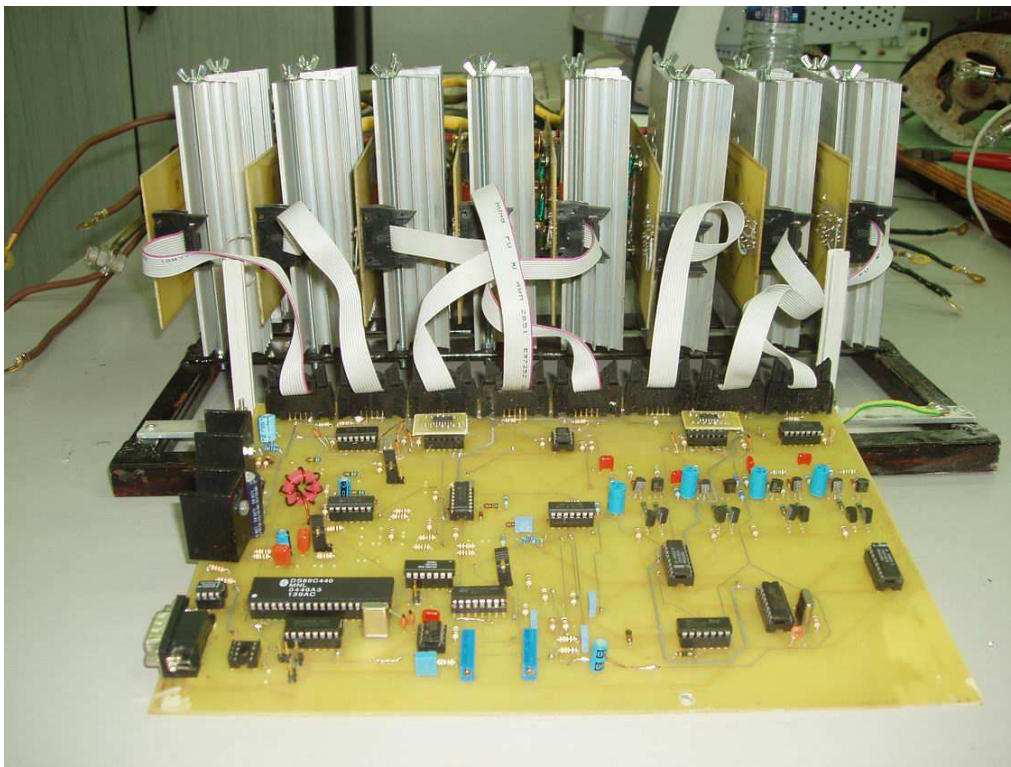
Το κεφάλαιο αυτό αναφέρεται στον αντιστροφέα που κατασκευάστηκε, στην αρχή και στον τρόπο λειτουργίας του για τους σκοπούς της συγκεκριμένης πτυχιακής εργασίας.

Παρακάτω φαίνεται το μπλοκ διάγραμμα των βαθμίδων που απαρτίζουν τον αντιστροφέα.

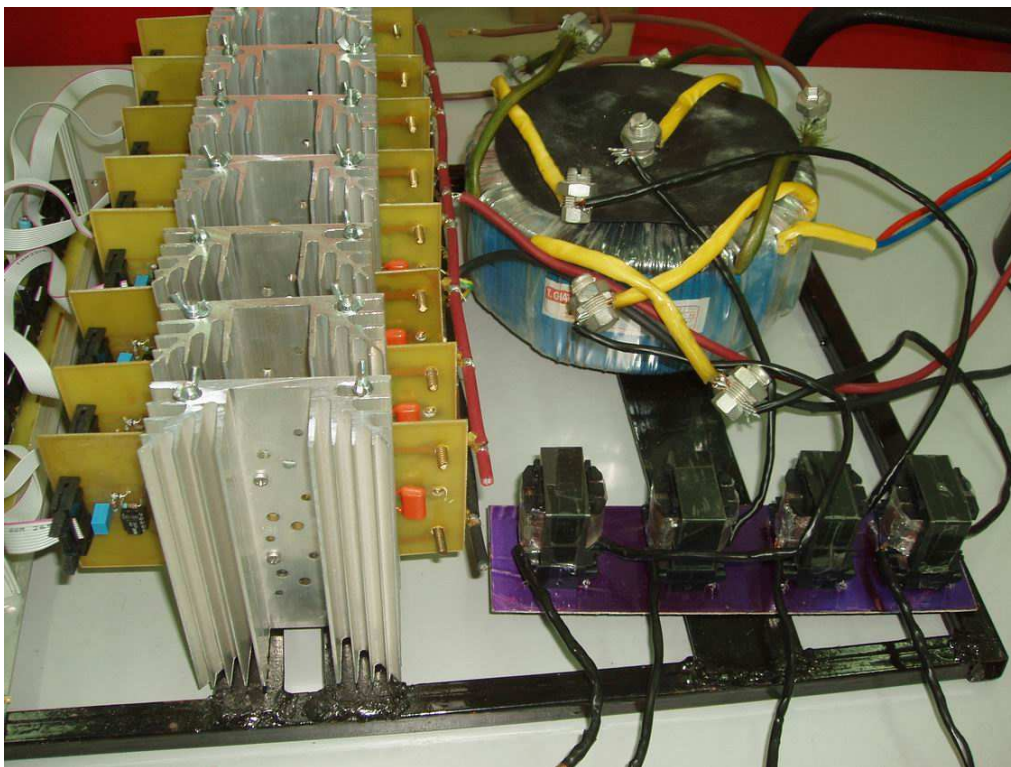


Σχήμα 3.1 : Μπλόκ διάγραμμα βαθμίδων λειτουργίας του inverter

Στην *εικόνα 3.1* παρουσιάζεται η κεντρική πλακέτα ελέγχου του αντιστροφέα, η οποία φέρει τη βαθμίδα χρονισμού, τη βαθμίδα ελέγχου, τη βαθμίδα διαμορφωτή και την τροφοδοτική διάταξη, ενώ η βαθμίδα ισχύος παρουσιάζεται στην *εικόνα 3.2*.



Εικόνα 3.1 : Κεντρική πλακέτα ελέγχου του αντιστροφέα



Εικόνα 3.2 : Βαθμίδα ισχύος του αντιστροφέα

Η τροφοδοτική διάταξη του αντιστροφέα (σχήμα 3.5) είναι εκείνη που παράγει τις τάσεις που απαιτούνται για να λειτουργήσουν οι υπόλοιπες βαθμίδες, το απαιτούμενο είναι να έχει υψηλό βαθμό απόδοσης γιατί επηρεάζει τον βαθμό απόδοσης όλου του αντιστροφέα. Για να έχει υψηλό βαθμό απόδοσης είναι διακοπτικό. Το κυρίως τμήμα του της τροφοδοτικής διάταξης στηρίζεται στο διακοπτικό σταθεροποιητή **LM2576** ο οποίος είναι σχεδιασμένος ώστε να παίρνει την τάση τροφοδοσίας του αντιστροφέα και να παράγει σταθερή τάση 15volt. Η τάση αυτή τροφοδοτεί τους οδηγούς των mosfets (mosfets drivers) και εφαρμόζεται στις πύλες τους όταν αυτά είναι σε αγωγή. Επειδή όμως ο αντιστροφέας χρησιμοποιεί και αναλογικά κυκλώματα η σταθεροποίηση της τάσης για το αναλογικό κομμάτι είναι γραμμική. Ένας γραμμικός σταθεροποιητής **7805** τροφοδοτείται από τα 15volt που παράγει το κύριο τμήμα της τροφοδοτικής διάταξης και παράγει την τροφοδοσία των 5volt που θα χρησιμοποιηθεί από τα αναλογικά και τα ψηφιακά κυκλώματα ελέγχου του αντιστροφέα.

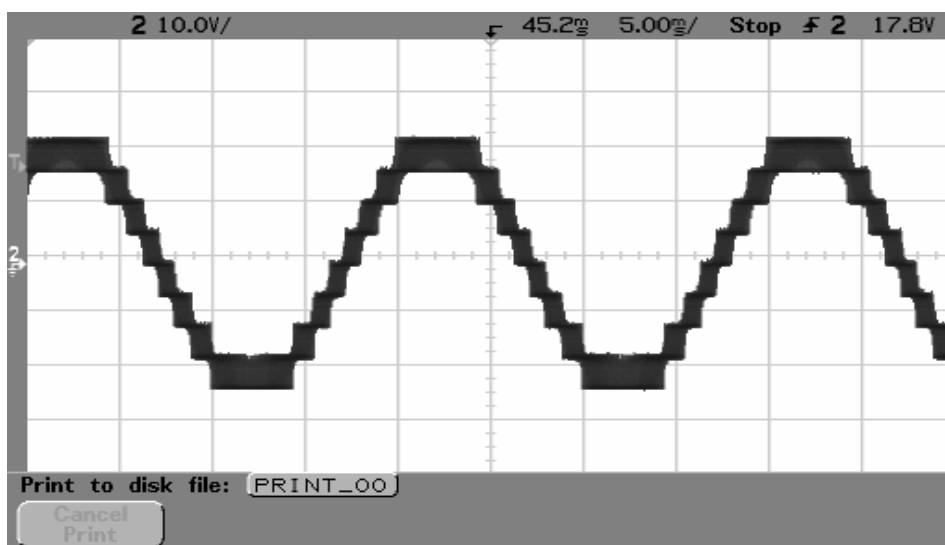
Στη συνέχεια υπάρχει η βαθμίδα χρονισμού του αντιστροφέα. Από τη βαθμίδα αυτή παράγεται η συχνότητα της PWM (σχήμα 3.9) καθώς και το ημίτονο αναφοράς που θα δημιουργήσει την τάση εξόδου των 50hz (σχήμα 3.8). Η κάρδιά της βαθμίδας χρονισμού είναι ένα ολοκληρωμένο **4060**. Από το ολοκληρωμένο αυτό χρονίζεται ένα ψηφιακό κύκλωμα που παράγει μια ημιτετραγωνική διαμόρφωση PWM. Η διαμόρφωση αυτή αποδιαμορφώνεται από ένα βαθυπερατό φίλτρο (Butterworth) 4^{ης} τάξης που είναι στηριγμένο στους τελεστικούς **MCP619** το οποίο στην έξοδο του παράγει το ημίτονο αναφοράς.

Έτσι το ημίτονο αναφοράς οδηγείται στη συνέχεια στη βαθμίδα του διαμορφωτή PWM (σχήμα 3.7). Ο διαμορφωτής PWM διαμορφώνει την τάση τροφοδοσίας στο πλάτος των τριγωνικών παλμών που παράγει την PWM και με αυτόν τον τρόπο δημιουργεί έλεγχο ενός κύκλου (one cycle control) στην τάση εξόδου διατηρώντας σταθερό το κέρδος του αντιστροφέα και ανεξάρτητο από την τάση τροφοδοσίας. Το ημίτονο αναφοράς συγκρίνεται με τους τριγωνικούς παλμούς με τους συγκριτές **LMX339** που με τη σειρά τους οδηγούν πύλες **74HC08**. οι πύλες αυτές χρησιμοποιούνται από το διαμορφωτή για να υπάρχει μία είσοδος ελέγχου μέσω της οποίας άγουν μόνο οι κάτω πλευρές από τις ημιγέφυρες. Στη συνέχεια κάθε έξοδος του διαμορφωτή οδηγεί και μία ημιγέφυρα ισχύος στηριγμένη στο ολοκληρωμένο κύκλωμα **IR2104** το οποίο είναι ένας οδηγός ημιγέφυρας και έχει τη δυνατότητα να οδηγήσει δύο τύπου n-channel mosfet **IRFP054N**. Στην έξοδο της ημιγέφυρας που δημιουργείται από αυτά τα εξαρτήματα εμφανίζονται οι

PWM διαμορφώσεις. Οι PWM διαμορφώσεις οδηγούνται μέσω πηνίων αποδιαμόρφωσης στο πρωτεύον ενός τοροειδή μετασχηματιστή και τελικά αποδιαμορφώνονται από ένα πυκνωτή που βρίσκεται στο δευτερεύον του. Τα πηνία αποδιαμόρφωσης με τις παρασιτικές αυτεπαγωγές του μετασχηματιστή δημιουργούν ένα βαθυπερατό φίλτρο 2^{ης} τάξης με τον πυκνωτή της εξόδου.

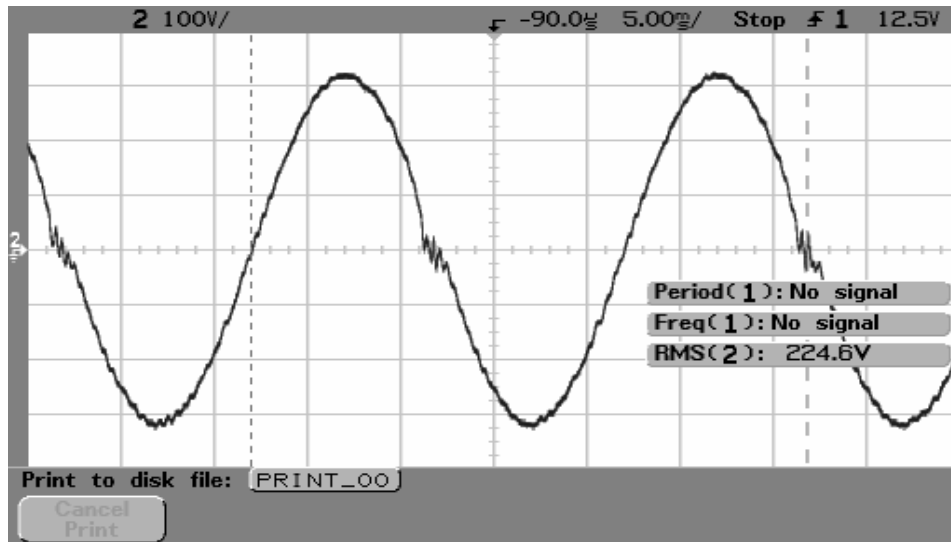
Στο τέλος υπάρχει και η βαθμίδα ελέγχου του αντιστροφέα (σχήμα 3.6) της οποίας καρδιά είναι ένας μικροελεγκτής **DS89C440**. Ο μικροελεγκτής έχει τη δυνατότητα να μεταβάλει το πλάτος της εξόδου. Για τη μεταβολή του πλάτους εξόδου χρησιμοποιείται ένα ψηφιακό ποτενσιόμετρο **DS1267** που επικοινωνεί μέσω ενός 3-wire interface. Δύο συγκριτές **MAX973** περιλαμβάνονται σε αυτή τη βαθμίδα και ελέγχουν την τάση εισόδου να είναι μέσα στα πλαίσια της κανονικής λειτουργίας του αντιστροφέα και σε άλλη περίπτωση δημιουργούν αίτημα διακοπής στο μικροελεγκτή (interrupt) ώστε να ξεκινήσει η διαδικασία σβέσης του αντιστροφέα. Ο μικροελεγκτής έχει τη δυνατότητα επικοινωνίας με υπολογιστή μέσω σειριακής θύρας για την περίπτωση που μελλοντικά ο αντιστροφέας θέλουμε να συνεργάζεται με υπολογιστή. Επίσης έχουν τοποθετηθεί κάποια όργανα μέτρησης (βολτόμετρο, αμπερόμετρο) για ένδειξη των τιμών της τάσης και του ρεύματος τροφοδοσίας. Επιπλέον τοποθετήθηκαν κάποια ενδεικτικά led για να εμφανίζουν τις τάσεις λειτουργίας του αντιστροφέα (5volt, 15volt και 24volt)

Στην έξοδο της βαθμίδας ισχύος (σχήμα 3.4) όταν δεν υπάρχουν πηνία αποδιαμόρφωσης πειραματικά πήραμε το παρακάτω παλμογράφημα (η τάση είναι 24V γιατί δεν υπάρχει μετασχηματιστής), όπου φαίνεται καθαρά η διαμόρφωση SPWM.



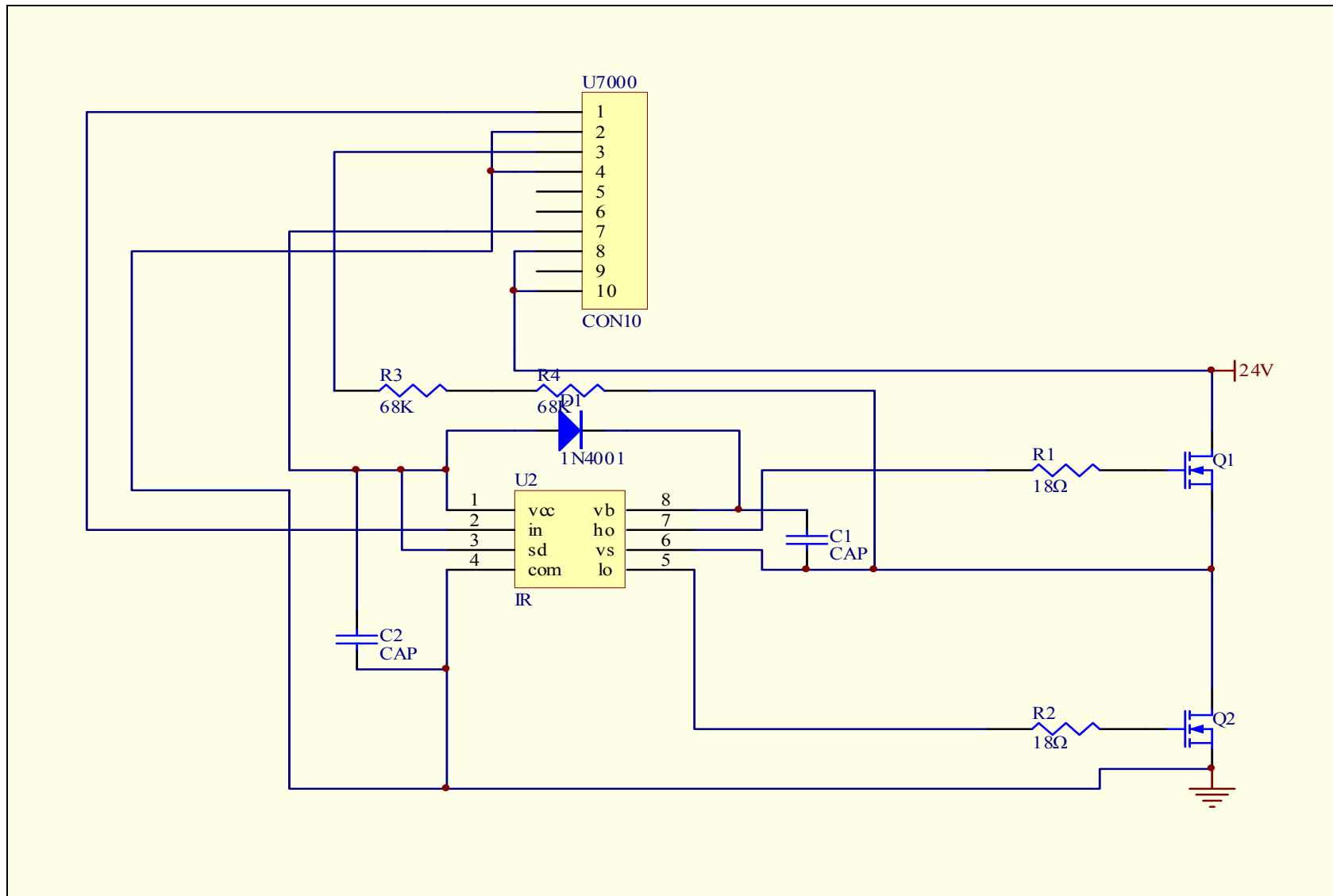
Σχήμα 3.2 : Παλμογράφημα τάσης εξόδου (χωρίς μετασχηματιστή)

Με την προσθήκη των πηνίων αποδιαμόρφωσης και του μετασχηματιστή πήραμε τελικά ημιτονοειδή κυματομορφή με τάση εξόδου 220V όπως φαίνεται στο *σχήμα 3.2*.

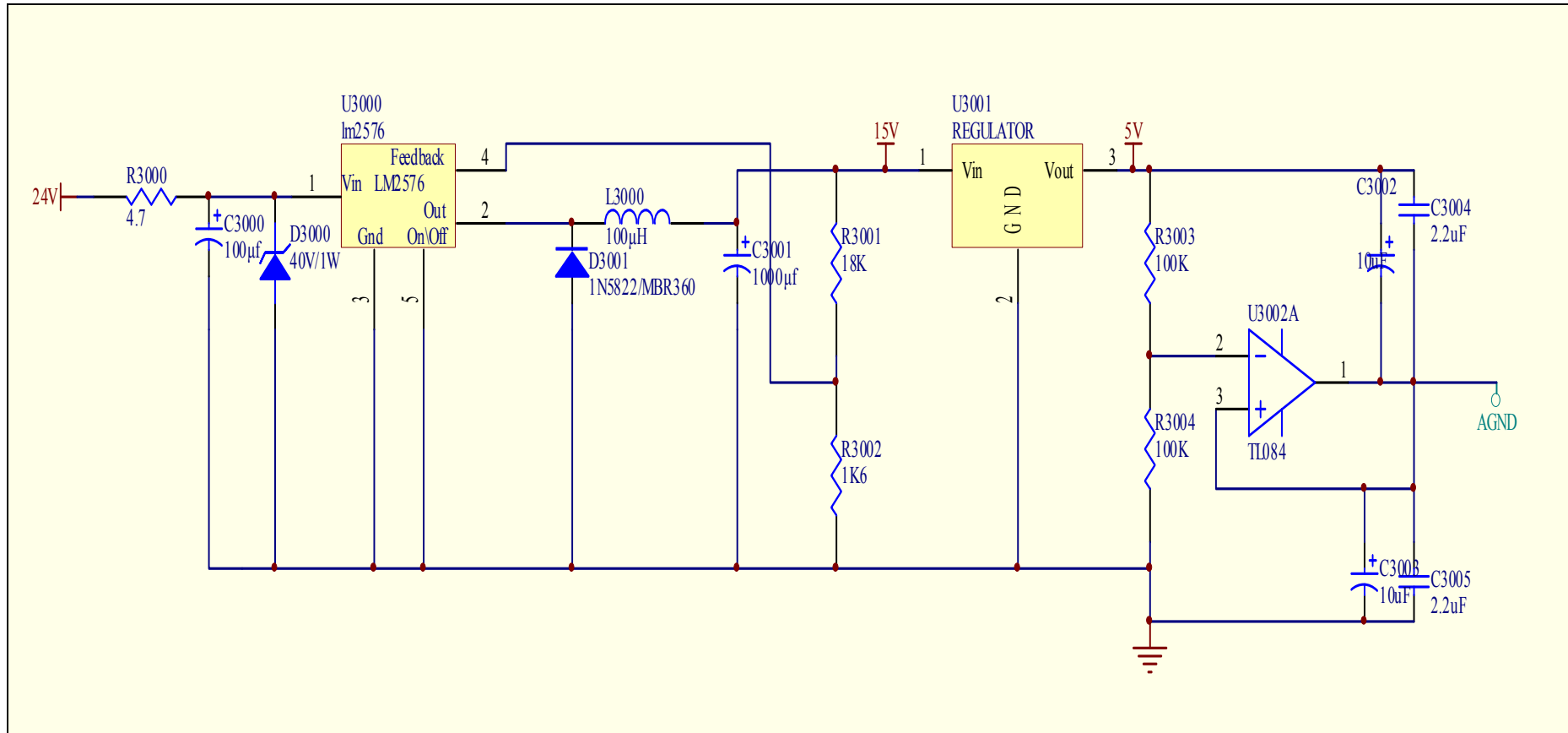


Σχήμα 3.3 : Παλμογράφημα τάσης εξόδου

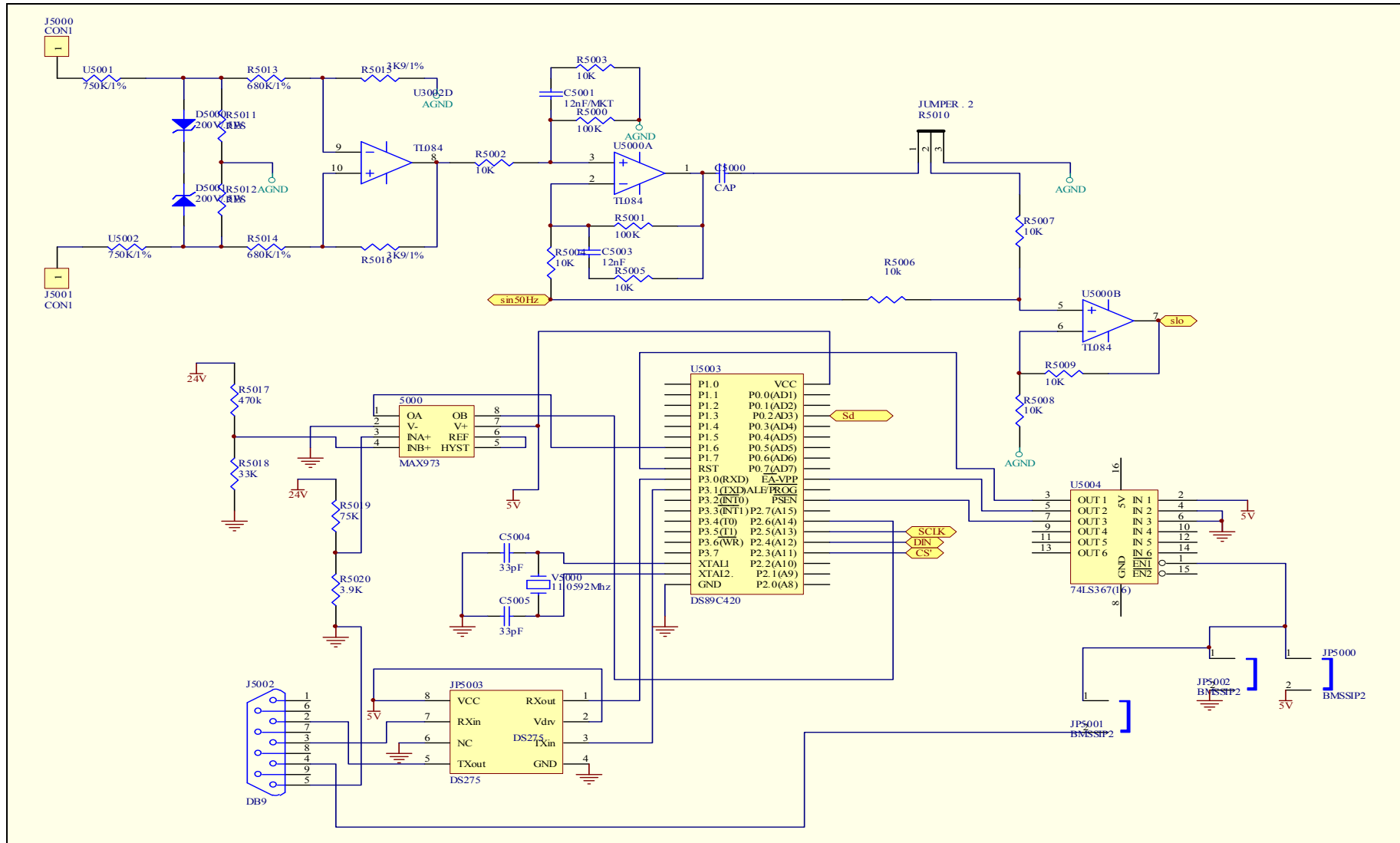
Παρακάτω φαίνονται τα σχηματικά διαγράμματα των κεντρικών βαθμίδων του αντιστροφέα όπως αυτές σχεδιάστηκαν μέσω του σχεδιαστικού προγράμματος **PROTEL99SE**. Έτσι όπως στο μπλοκ διάγραμμα φαίνονται τα σχηματικά διαγράμματα της βαθμίδας ισχύος, της τροφοδοτικής διάταξης, της βαθμίδας ελέγχου, της βαθμίδας διαμορφωτή και της βαθμίδας χρονισμού αντίστοιχα.



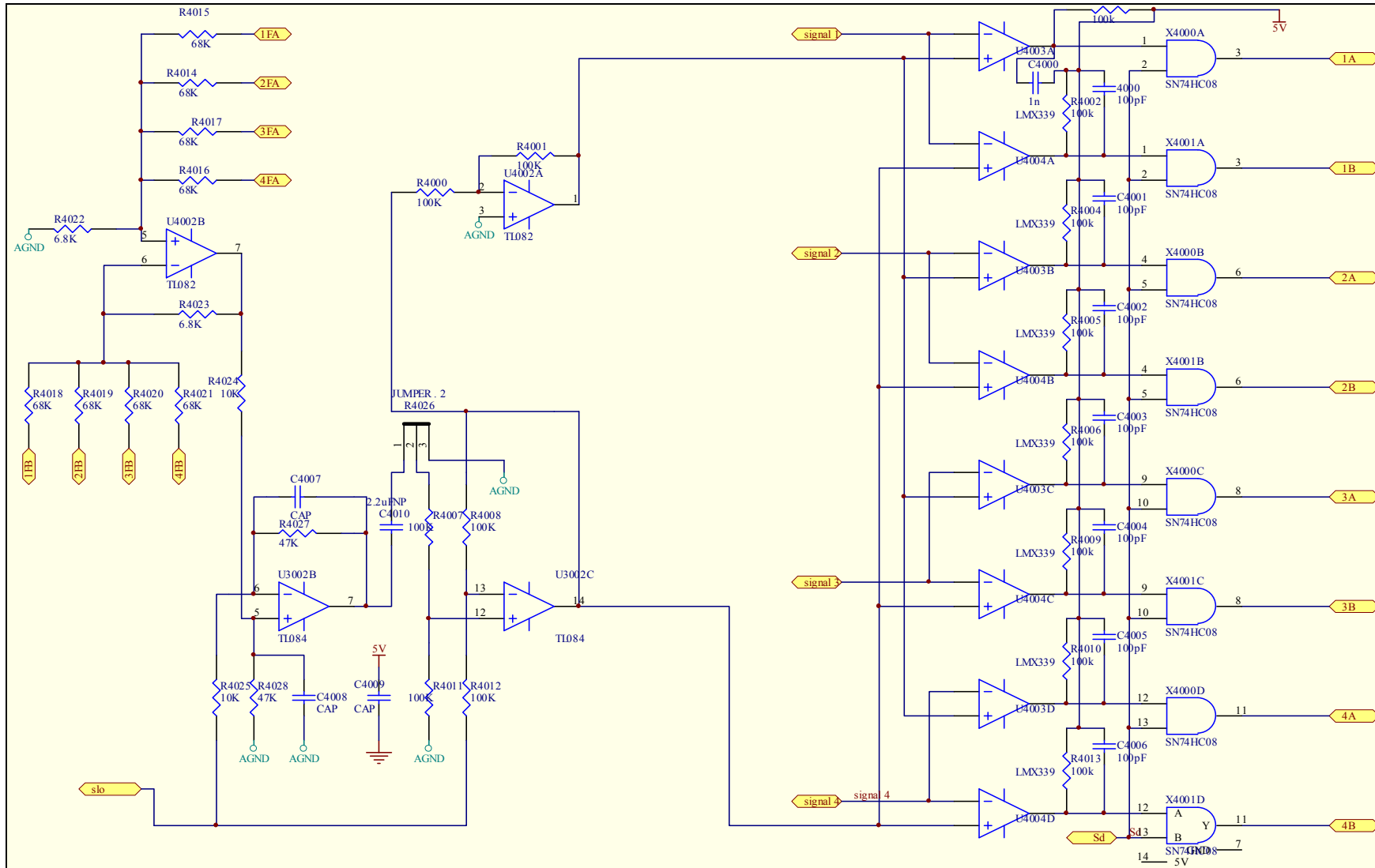
Σχήμα 3.4 : Σχηματικό διάγραμμα βαθμίδας ισχύος



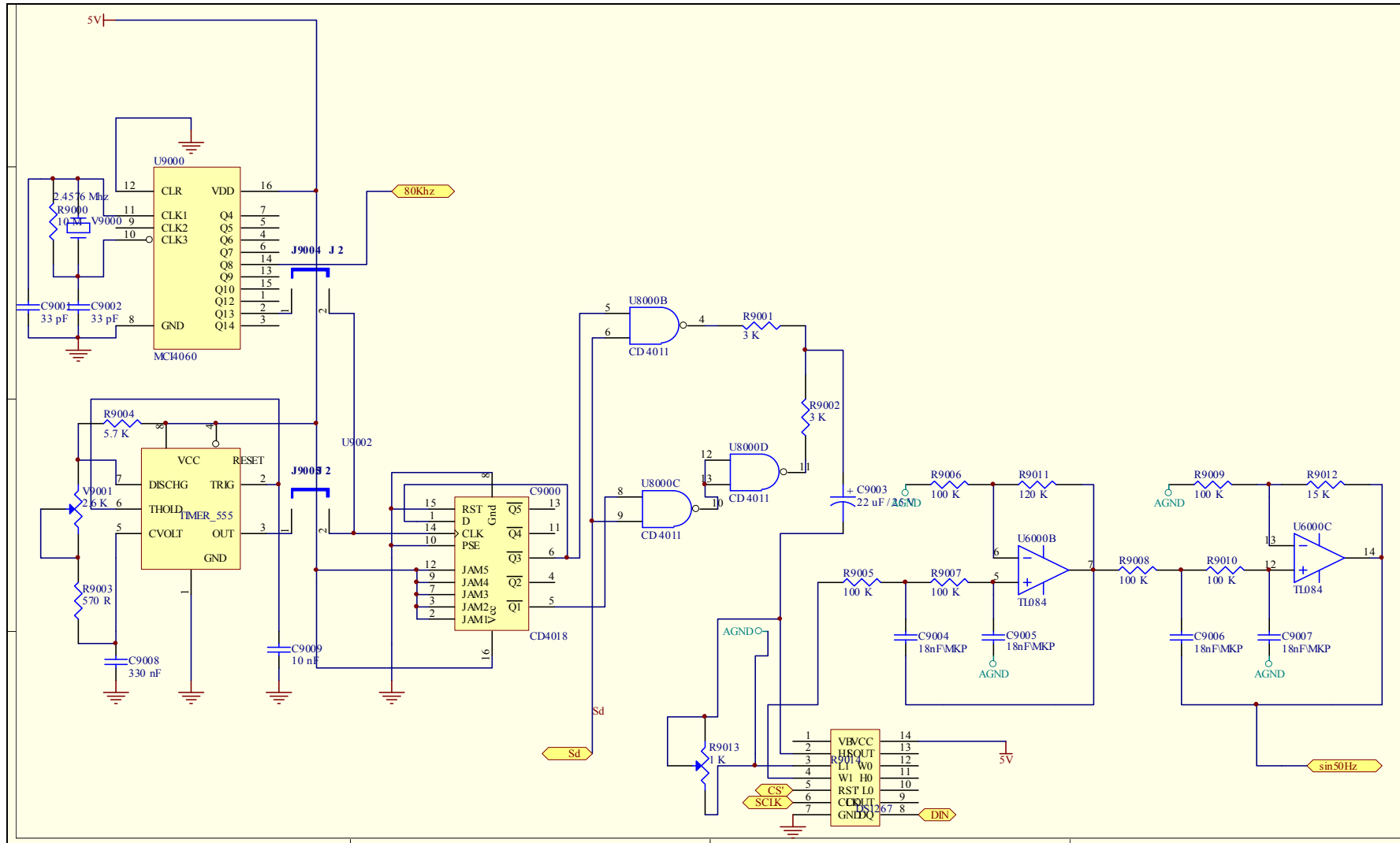
Σχήμα 3.5 : Σχηματικό διάγραμμα τροφοδοτικής διάταξης



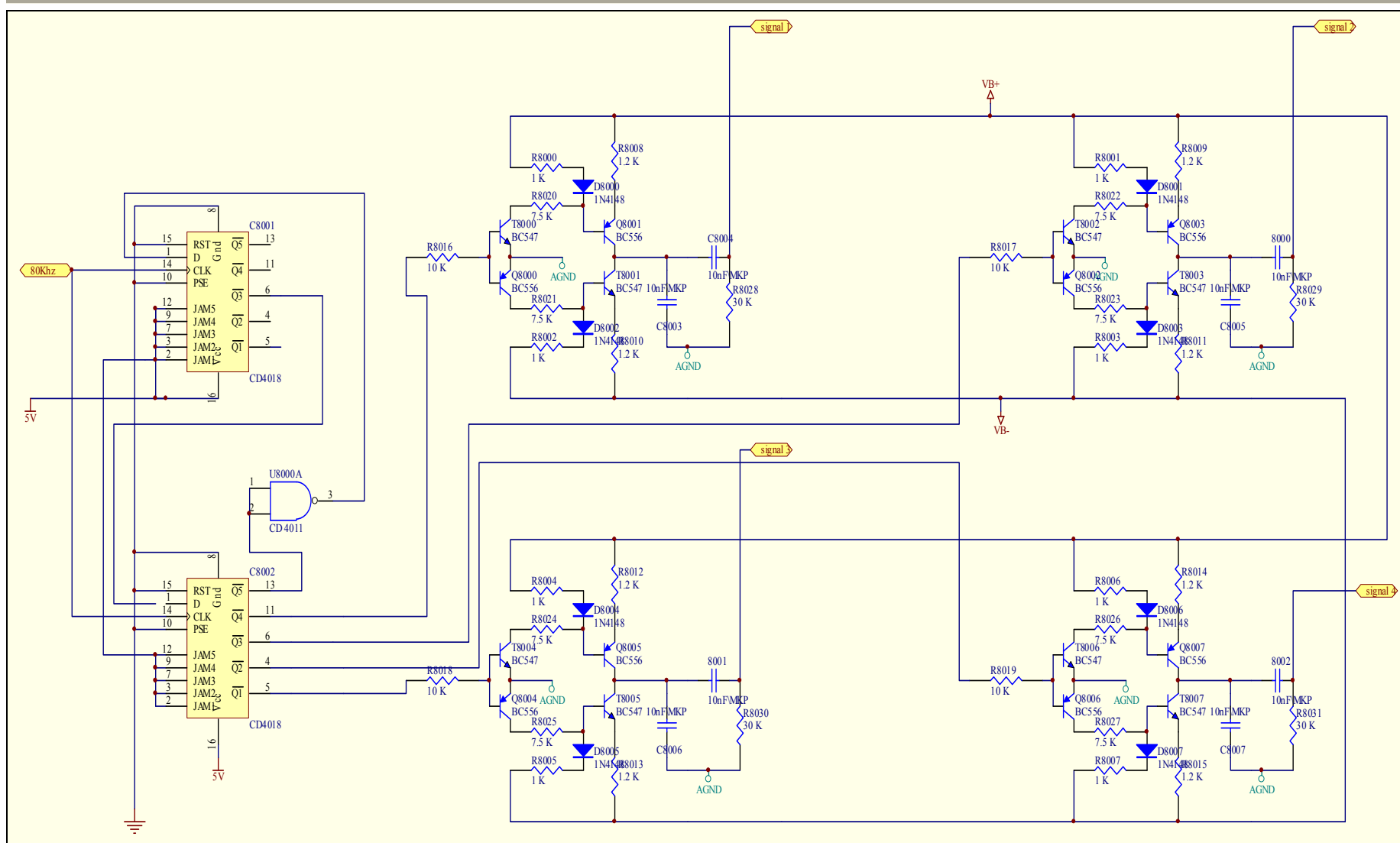
Σχήμα 3.6 : Σχηματικό διάγραμμα βαθμίδα ελέγχου



Σχήμα 3.7 : Σχηματικό διάγραμμα βαθμίδας διαμορφωτή



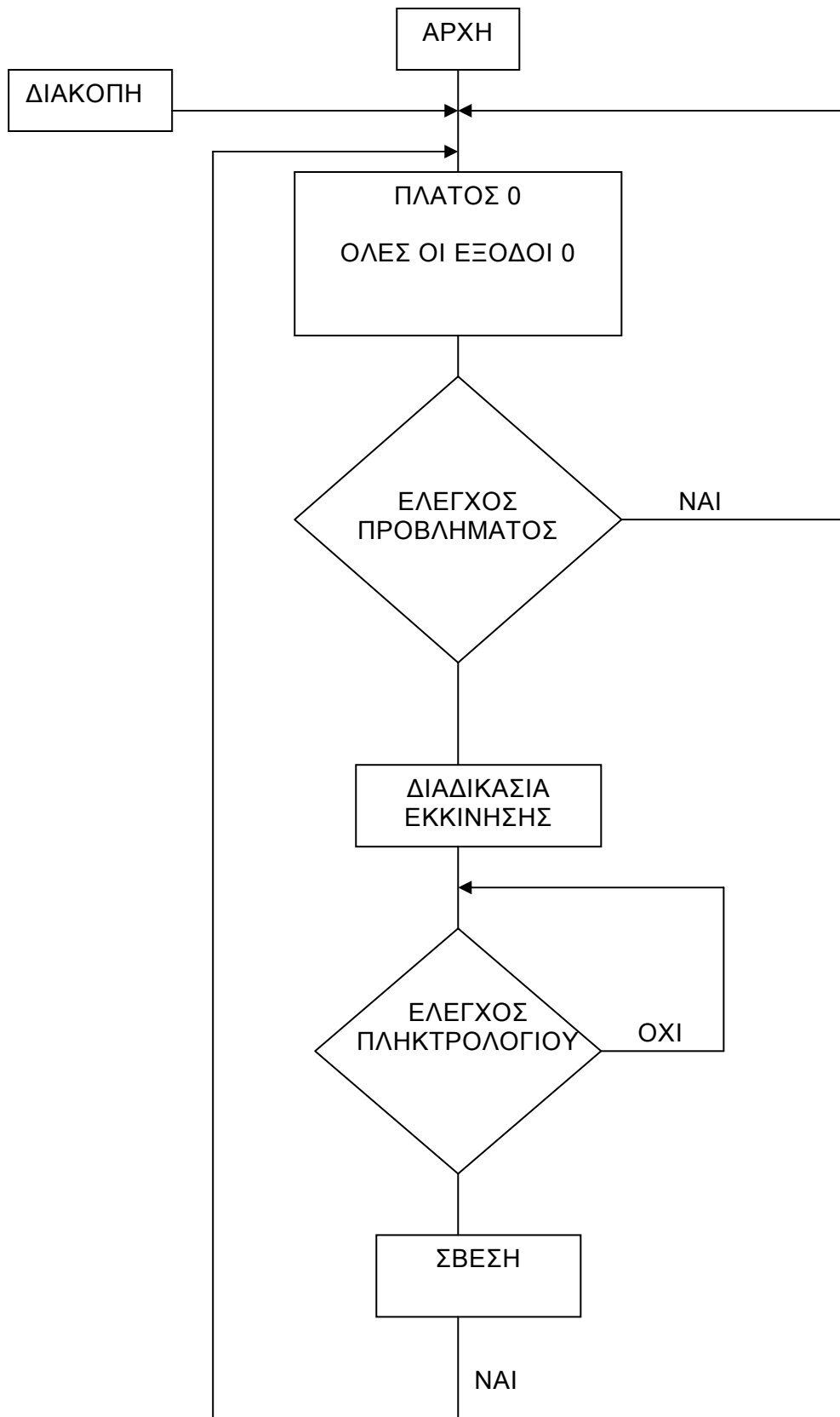
Σχήμα 3.8 : Σχηματικό διάγραμμα βαθμίδας χρονισμού



Σχήμα 3.9 : Σχηματικό διάγραμμα βαθμίδας χρονισμού

3.2 Αλγόριθμος λειτουργίας του αντιστροφέα

Όπως φαίνεται στο *σχήμα 3.9* με την τροφοδότηση του αντιστροφέα έχουμε στην έξοδο πλάτος 0 και όλες οι έξοδοι των MOSFET είναι 0. Μόλις πατηθεί το πλήκτρο εκκίνησης το πλάτος της τάσης στην έξοδο αυξάνεται σταδιακά μέχρι που φτάνει τα 220 Volt. Εάν παρουσιαστεί πρόβλημα κατά τη διαδικασία εκκίνησης (υπερτάσεις κλ.π) αυτός επιστρέφει στην αρχική του κατάσταση. Στη συνέχεια για να ξεκινήσει η διαδικασία σβέσης πιέζουμε το πλήκτρο και το πλάτος της τάσης εξόδου μειώνεται μέχρι να μηδενιστεί και ο αντιστροφέας επιστρέφει στην αρχική του κατάσταση. Σε όλη τη διάρκεια της λειτουργίας του μόλις παρουσιαστεί κάποιο πρόβλημα ο αντιστροφέας μέσω του συστήματος προστασίας του θα καταφέρει να επιστρέψει στην κατάσταση που βρίσκεται στην αρχή. Επίσης παρακάτω φαίνεται ο κώδικας που κατασκευάστηκε για τον προγραμματισμό του μικροεπεξεργαστή.



Σχήμα 3.9 : Αλγόριθμος λειτουργίας αντιστροφεία

```
ORG 0000H
CLR P2.7
SJMP MAIN
ORG 03H
SJMP POWER_ON
ORG 043H
SJMP COMP_OUTB
ORG 053H
SJMP COMP_OUTA

SCLK EQU P2.5
DIN EQU P2.4
CS EQU P2.3
SD EQU P2.7
PUSH_BUTTON EQU P3.2
DOWN EQU 060H
UP EQU 061H
ON_OFF EQU 050H

MAIN:   ACALL INT_ENABLE
        MOV R0,#ON_OFF
        MOV @R0,#0
WAIT:   SJMP WAIT

INT_ENABLE: SETB EX2
          SETB EX0
          SETB EX4
          CLR P1.4
          CLR P1.6
          SETB EA
          RET

POWER_ON: CLR EA
          CLR IE0
          CLR EX0
          MOV R0,#ON_OFF
          CJNE @R0,#0,NEXT
          MOV @R0,#1
          MOV R0,#UP
          MOV @R0,#0
          ACALL UP_POT
          CLR SD
          SJMP ENDINT
NEXT:   MOV @R0,#0
          MOV R0,#DOWN
          MOV @R0,#255
          ACALL DOWN_POT
          SETB SD
```

```
ENDINT:    SETB EX0
           SETB EA
           RETI
```

```
COMP_OUTA: CLR EA
            MOV EXIF,#0
            CLR EX4
            CLR SD
            ACALL START_POT
            MOV A,#0
            ACALL SEND_POT
            SETB EX4
            SETB EA
            RET
```

```
COMP_OUTB: CLR EA
            MOV EXIF,#0
            CLR EX2
            CLR SD
            ACALL START_POT
            MOV A,#0
            ACALL SEND_POT
            SETB EX2
            SETB EA
            RET
```

```
DOWN_POT:  MOV R0,#DOWN
DOWN_LOOP: MOV A,@R0
            ACALL START_POT
            ACALL SEND_POT
            DEC @R0
            ACALL DELAY_POT
            CJNE @R0,#0,DOWN_LOOP
            RET
```

```
UP_POT:    MOV R0,#UP
UP_LOOP:   MOV A,@R0
            ACALL START_POT
            ACALL SEND_POT
            INC @R0
            ACALL DELAY_POT
            CJNE @R0,#255,UP_LOOP
            RET
```

```

START_POT:   SETB CS
             SETB DIN
             SETB SCLK
             CLR SCLK
             RET

SEND_POT:    MOV R0,#8
LOOP1:       RRC A
             MOV DIN,C
             SETB SCLK
             CLR SCLK
             DJNZ R0,LOOP1
             MOV R0,#8
LOOP0:       RRC A
             MOV DIN,C
             SETB SCLK
             CLR SCLK
             DJNZ R0,LOOP0
             CLR CS
             RET

DELAY_POT:   MOV R2,#05H
L_DEL_POT1:  MOV R4,#0FFH
L_DEL_POT:   DJNZ R4,L_DEL_POT
             DJNZ R2,L_DEL_POT1
             RET

```

3.3 Σύντομη περιγραφή των μονάδων του συστήματος

Οι εγκατεστημένες φωτοβολταϊκές γεννήτριες είναι της εταιρείας Siemens Solar . Το μοντέλο αυτό έχει τα εξής τεχνικά χαρακτηριστικά:

Τεχνικά χαρακτηριστικά Φ/Β γεννήτριας Siemens	
Ονομαστική μέγιστη ισχύς (Pmax)	128 W
Τάση Φ/Β συστήματος	8 V
Τάση ανοιχτού κυκλώματος (VOC)	9,6 V
Ονομαστικό ρεύμα φόρτισης	16 A
Ρεύμα βραχυκύκλωσης (ISC)	16,9 A
Διαστάσεις	(1020x1400x10)mm

Οι συσσωρευτές έχουν τα εξής τεχνικά χαρακτηριστικά :

Τεχνικά χαρακτηριστικά συσσωρευτών	
Ονομαστική τάση	12 V
Ονομαστική χωρητικότητα	122Ah
Διαστάσεις	400x200x300 mm
Βάρος	30kg

Ο αντιστροφέας έχει τα εξής τεχνικά χαρακτηριστικά :

Τεχνικά χαρακτηριστικά Αντιστροφέα	
Ονομαστική τάση εισόδου	24 V DC
Ονομαστική τάση εξόδου	230 V AC
Κυματομορφή εξόδου	Διαμορφωμένο ημίτονο
Συχνότητα	50 Hz
Ονομαστική ισχύς	2 kw
Αυτοκατανάλωση (χωρίς φορτίο)	0.9A

3.4 Συμπεράσματα

Στην παρούσα πτυχιακή εργασία κατασκευάστηκε ένα αυτόνομο φωτοβολταϊκό σύστημα καθώς και ένας αντιστροφέας ισχύος 2kW. Το σύστημα παρουσίασε μια αναμενόμενη απόδοση και χαρακτηριστικά. Η κατανάλωση του συστήματος χωρίς φορτίο ήταν σημαντικά χαμηλή πράγμα επίσης σημαντικό για την βελτίωση της απόδοσης του. Μελλοντικά όμως μπορούν να γίνουν και περαιτέρω επεμβάσεις έτσι ώστε να έχουμε ακόμα μεγαλύτερη απόδοση και αξιοπιστία. Για παράδειγμα θα μπορούσαν να γίνουν επεμβάσεις στο σύστημα της προστασίας του αντιστροφέα για την αποφυγή περισσότερων προβλημάτων από υπερτάσεις και υπερεντάσεις επίσης θα μπορούσε να κατασκευασθεί ένα κύκλωμα το οποίο να συνεχίζει την λειτουργία του αντιστροφέα ακόμα και όταν μερικές βαθμίδες του έχουν βγει εκτός λειτουργίας. Ο μικροεπεξεργαστής που υπάρχει στο σύστημα θα μπορούσε επίσης να έχει περισσότερες λειτουργίες όσον αφορά τον έλεγχο και την προστασία όπως το να καθορίζει το πλάτος της τάσης εξόδου καθώς και την συχνότητα λειτουργίας του το

οποία θα μπορούν να απεικονίζονται σε μια οθόνη υγρών κρυστάλλων . Επίσης θα μπορούσαν να τοποθετηθούν ηλιακοί συλλέκτες με μεγαλύτερη απόδοση και μεγαλύτερης ισχύος έτσι ώστε να μεγαλώσει και η συνολική απόδοση του συστήματος.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- *Ανδρίτσος Ι., Μετατροπείς από συνεχές σε εναλλασσόμενο (DC/AC) αναστροφείς, Σημειώσεις Ηλεκτρονικών Ισχύος*
- A. R. Turner, Design and Implementation of a Single Phase Transconductance Inverter, University of Sydney, School of Electrical and Information Engineering, 2003
- *Καλδέλης Ι., Καββαδίας Κ., Εργαστηριακές εφαρμογές Ήπιων μορφών ενέργειας, Αθήνα 2001*
- *Μανίτης Α., Σημειώσεις Θεωρίας, Ηλεκτρονικά ισχύος*
- P.Wolfs, S.Senini, A Low Cost High Efficiency Inverter for Photovoltaic Applications, Central Queensland University
- *Τσιλιγκιρίδης Γ., Φωτοβολταϊκά. Εφαρμογές στα κτίρια, Διημερίδα – Σεμινάριο κατάρτισης*

Web sites

- <http://helios.teiath.gr/>
- http://helios.teiath.gr/interconnectedpv/GRID_PV/Down_links/Grid_Inverter-DataCom/fronius_ig_e.pdf
- <http://www.helapco.gr/>
- <http://www.cres.gr/kape/index.htm>
- <http://www.pvsunenergy.gr/index.html>
- <http://www.sealab.gr/greek/frames.html>
- http://195.251.117.227/main/pdf/Greek/HYDRA%20%20INV_CHR%20Manual4_5_4.pdf

- <http://www.seners.gr/pages/gr/faq.htm#faq1>
- http://solar_cells.tripod.com/notes_sel_1.html
- http://www.interq.or.jp/japan/se-inoue/e_ckt8.htm
- http://www.interq.or.jp/japan/se-inoue/e_ckt30.htm
- <http://www.users.bigpond.com/brookman/photovoltaic%20system.html>
- <http://inf-server.inf.uth.gr/courses/CE234/Lectures.ppt>

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

