



ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΠΕΙΡΑΙΑ  
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ  
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΙΑΣ

**ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΜΟΝΟΦΑΣΙΚΩΝ  
ΚΑΙ ΤΡΙΦΑΣΙΚΩΝ ΜΗ ΕΛΕΓΧΟΜΕΝΩΝ  
ΓΕΦΥΡΩΝ**

**ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**ΣΕΡΕΤΗΣ ΓΙΩΡΓΟΣ**

**Επιβλέπων Καθηγητής: ΗΡΑΚΛΗΣ ΒΥΛΛΙΩΤΗΣ**

ΑΙΓΑΛΕΩ, ΑΠΡΙΛΙΟΣ 2013

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Η πτυχιακή αυτή εργασία αναφέρεται στην μελέτη αλλά και στην κατασκευή μονοφασικών και τριφασικών μη ελεγχόμενων γεφυρών. Τα ηλεκτρονικά ισχύος είναι ένας τομέας της επιστήμης των ηλεκτρονικών με σημαντική πρόοδο τα τελευταία χρόνια. Στον τομέα αυτό στηρίζονται πάρα πολλές εφαρμογές. Η εξέλιξη των ηλεκτρονικών ισχύος προσφέρει σημαντικά αποτελέσματα στην ανάπτυξη πολλών ηλεκτρονικών συστημάτων στην εξοικονόμηση ενέργειας, την αυτοματοποίηση αλλά και στη βελτίωση της ποιότητας πολλών καθημερινών μας δραστηριοτήτων. Στο πρώτο κεφάλαιο πραγματοποιείται αρχικά μια ανάλυση στην επιστήμη των ηλεκτρονικών ισχύος ενώ στο δεύτερο κεφάλαιο της εργασίας μας παρουσιάζουμε τις κυριότερες ιδιότητες των βασικότερων ημιαγωγών διακοπών ισχύος αλλά και τα χαρακτηριστικά τους. Στο τρίτο κεφάλαιο της εργασίας μας παρουσιάζουμε τις ιδιότητες και τα τεχνικά χαρακτηριστικά των μετατροπέων ενώ στο τέταρτο κεφάλαιο πραγματοποιούμε μία αναλυτική αναφορά σε ορισμένες ανορθωτικές διατάξεις. Στο πέμπτο κεφάλαιο γίνεται μια αναφορά στους κινητήρες συνεχούς ρεύματος ενώ στο τελευταίο κεφάλαιο γίνεται αναφορά στην κατασκευή των μονοφασικών και τριφασικών γεφυρών.

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 - Εισαγωγή	
1.1 Η τεχνολογία των ηλεκτρονικών ισχύος .....	5
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 - Ημιαγωγικά στοιχεία ισχύος .....	10
2.1 Εισαγωγή .....	10
2.2 Δίοδος .....	11
2.2.1 Βασική δομή.....	11
2.2.2 Χαρακτηριστική τάσης ρεύματος.....	12
2.3 Δίοδος δύο κατευθύνσεων (DIAC).....	14
2.3.1 Βασική δομή.....	14
2.3.2 Χαρακτηριστική τάσης ρεύματος.....	15
2.4 Δίοδος ZENER.....	16
2.5 TRIAC.....	17
2.6 Θυρίστωρ .....	20
2.6.1 Βασική δομή.....	20
2.6.2 Χαρακτηριστική τάσης ρεύματος.....	25
2.7 GTO.....	27
2.8 Ελεγχόμενα διακοπτικά στοιχεία (BTJ , MOSFET).....	30
2.8.1 Εισαγωγή.....	30
2.8.2 Διπολικό τρανζίστωρ ( BTJ ).....	33
2.8.3 Τρανζίστωρ επίδρασης πεδίου – MOSFET.....	38
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 - Είδη μετατροπών.....	43
3.1 Εισαγωγή.....	43
3.2 Μετατροπείς AC/AC.....	44
3.3 Μετατροπείς DC/DC.....	47
3.4 Μετατροπείς DC/AC.....	48
3.5 Μετατροπείς AC/DC.....	51
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 - Ανορθωτικές διατάξεις.....	53
4.1 Εισαγωγή.....	53

4.2	Μη ελεγχόμενη πλήρης ανόρθωση με μετασχηματιστή μέσης λήψης.....	53
4.3	Μονοφασική ανορθωτική διάταξη με διόδους.....	54
4.4	Τριφασική μη ελεγχόμενη ανορθωτική διάταξη .....	55
4.5	Μονοφασική μη ελεγχόμενη γέφυρα .....	56
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 - Κινητήρες συνεχούς (DC) ρεύματος.....		59
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 - Μελέτη και κατασκευή μονοφασικών και τριφασικών μη ελεγχόμενων γεφυρών.....		62
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 – Συμπεράσματα.....		69
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....		70

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 - Εισαγωγή

### 1.1 Η τεχνολογία των ηλεκτρονικών ισχύος

Τα Ηλεκτρονικά Ισχύος είναι η τεχνολογία η οποία αναπτύχθηκε τα τελευταία τριάντα χρόνια, παρέχοντας τον έλεγχο της ροής ηλεκτρικής ισχύος (μέσω της επεξεργασίας της ημιτονοειδούς τάσης) που παρέχεται από τις ηλεκτρικές εταιρίες, και τη μετατροπή της ηλεκτρικής ενέργειας από τη μια μορφή σε άλλη .

Τα Ηλεκτρονικά Ισχύος έχουν μια τεραστία εξέλιξη η οποία οφείλεται στην ευεργετική συνεπίδραση διαφόρων παραγόντων. Κατ' αρχήν, υπήρξε αρκετά μεγάλη πρόοδος στην μικροηλεκτρονική τεχνολογία που οδήγησε στην ανάπτυξη ψηφιακών επεξεργαστών σημάτων που χρησιμοποιούνται στα κυκλώματα ελέγχου των Ηλεκτρονικών Συστημάτων Ισχύος και γραμμικών ολοκληρωμένων κυκλωμάτων .Επιπλέον η μεγάλη πρόοδος στην κατασκευαστική τεχνολογία έκανε δυνατή τη σημαντική βελτίωση των χαρακτηριστικών τάσης και ρεύματος των ημιαγωγικών στοιχείων και τη σημαντική αύξηση των διακοπτικών τους ταχυτήτων. Υπήρξε φυσικά και η απαραίτητη διεύρυνση της αγοράς και η δημιουργία συγκεκριμένου χώρου για τα Ηλεκτρονικά Ισχύος.

Παρακάτω παρουσιάζονται κάποιες από τις βασικότερες εφαρμογές των Ηλεκτρονικών Συστημάτων Ισχύος αλλά και οι διαστάσεις που έχει αποκτήσει, και συνεχίζει να λαμβάνει, η αγορά των ηλεκτρονικών ισχύος

- **Συστήματα Παροχής Ηλεκτρικής Ενέργειας** (Μεταφορά Υψηλής Τάσης Συνεχούς Ρεύματος) , (Στατική Αντιστάθμιση Άεργου ισχύος) , (Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας )

- **Βιομηχανικές Εφαρμογές** ( Φωτισμός ) , ( Συστήματα Ηλεκτρικής Κίνησης ) ( Εργαλειομηχανές ) , ( Βιομηχανικά Lasers ) , ( Θέρμανση με Επαγωγή ) , ( Αντλίες, Συμπιεστές, Ανεμιστήρες) , (Ηλεκτροσυγκόλληση)

- **Μεταφορές** ( Ηλεκτροκίνητες Αμαξοστοιχίες ) , ( Ο Έλεγχος της Κίνησης Ηλεκτροκίνητων Οχημάτων ) , ( Φόρτιση Συσσωρευτών Ηλεκτροκίνητων Οχημάτων ) , ( Ηλεκτροκίνητες Λεωφορεία ) , ( Υπόγειος Σιδηρόδρομος)

- **Οικιακές Εφαρμογές** (Ψύξη) , (Θέρμανση) , (Φωτισμός) , (Προετοιμασία Φαγητού) , (Καταναλωτικά Ηλεκτρονικά Συστήματα)

- **Εμπορικές Εφαρμογές** ( Συστήματα Αδιάλειπτου Παροχής ) , (Ψύξη) , (Θέρμανση) , (Εξαερισμός) , ( Φωτισμός ) , ( Εξοπλισμός, Αυτοματισμός Γραφείου)

- **Αεροδιαστημικές μεταφορές** ( Συστήματα Ηλεκτρικής Τροφοδοσίας Διαστημικών Λεωφορείων) , ( Συστήματα Ηλεκτρικής Τροφοδοσίας Αεροσκαφών) , ( Συστήματα Ηλεκτρικής Τροφοδοσίας Δορυφόρων)

Η πρόοδος στη μικροηλεκτρονική κατασκευαστική τεχνολογία οδήγησε στην ανάπτυξη των υπολογιστών των τηλεπικοινωνιακών συστημάτων και των καταναλωτικών ηλεκτρονικών συσκευών που –όλα τους– απαιτούν σταθεροποιημένα ρυθμιζόμενα τροφοδοτικά και, συχνά, συστήματα αδιάλειπτου παροχής ισχύος. Το αυξανόμενο κόστος της ηλεκτρικής ενέργειας καθιστά επιτακτική τη χρησιμοποίηση της κατά τον πλέον αποδοτικό τρόπο και τα ηλεκτρονικά συστήματα ισχύος προσφέρουν την πιο φθηνή επιλογή. Αναμφίβολα η τεχνολογία των Ηλεκτρονικών Ισχύος όσο τα ημιαγωγά στοιχεία ισχύος θα βελτιώνονται σε επιδόσεις και ταυτόχρονα θα μειώνονται οι τιμές τους, θα χρησιμοποιείται σε περισσότερες εφαρμογές. Για παράδειγμα ο τομέας των ηλεκτρονικών για αυτοκίνηση είναι μια ταχέως αναπτυσσόμενη περιοχή εφαρμογής των ηλεκτρονικών ισχύος.

Καθώς τα ηλεκτρικά φορτία συχνά απαιτούν ή προτιμούν τροφοδοσία με χαρακτηριστικά τάσης διαφορετικά από αυτά της διαθέσιμης από τις ηλεκτρικές εταιρίες, η λειτουργία του μετατροπέα είναι να πραγματοποιεί τον επιθυμητό μετασχηματισμό με τις ελάχιστες απώλειες και όσο το δυνατό αποδεκτό κόστος.

Γενικά ο μετατροπέας ελέγχει και μετατρέπει μια ηλεκτρική είσοδο μεγέθους  $V_i$  συχνότητας  $f_i$  και αριθμού φάσεων  $m_i$  σε μια ηλεκτρική έξοδο μεγέθους  $V_o$  συχνότητας  $f_o$  και αριθμού φάσεων  $m_o$ .

Η απαίτηση που έχουμε για ελάχιστες δυνατές απώλειες και το γεγονός ότι οι εφαρμογές ηλεκτρονικών ισχύος ποικίλουν από λίγα watts έως μερικές εκατοντάδες MWatt, επιβάλλουν το διακοπτικό τρόπο λειτουργίας των μετατροπέων ισχύος και πολλά ημιαγωγά στοιχεία ισχύος έχουν βελτιωθεί για αυτήν ακριβώς τη διακοπτική λειτουργία. Σε αντίθεση με τα γραμμικά ηλεκτρονικά (όπου τα ημιαγωγά στοιχεία είναι πολωμένα στην ενεργό περιοχή και λειτουργούν σαν ρυθμιζόμενες ωμικές αντιστάσεις με αποτέλεσμα να καταναλώνουν σημαντικό πόσο ενέργειας και η συνολική απόδοση του συστήματος να είναι χαμηλή), στους μετατροπέις ισχύος τα ημιαγωγά στοιχεία βρίσκονται είτε στην κατάσταση πλήρους αγωγής είτε στην κατάσταση πλήρους αποκοπής. Η απόδοση του μετατροπέα αυξάνεται και δεν υπάρχουν φαινόμενα υψηλής θέρμανσης των ημιαγωγών στοιχείων. Βεβαίως, η

διακοπτική λειτουργία έχει σαν αποτέλεσμα την ασυνεχή ροή ενέργειας μέσα από τα στοιχεία. Απαιτείται λοιπόν προσωρινή αποθήκευση ή φιλτράρισμα ενέργειας ώστε η συνολική ροή ισχύος να καταστεί ομαλή και αποδεκτή τόσο από την πηγή όσο και από το φορτίο και οι διακόπτες να μην υποβάλλονται σε άσκοπες καταπονήσεις. Συνεπώς η σύνδεση διακοπών με επαγωγικά και χωρητικά στοιχεία φίλτρου ανάμεσα στην πηγή και το φορτίο συνιστά ουσιαστικά την τοπολογία ενός μετατροπέα, η δε λειτουργία μπορεί να θεωρηθεί σαν μια διάδοχη διαφορετικών τοπολογιών που επαναλαμβάνονται κυκλικά.

Η ταξινόμηση των μετατροπέων που χρησιμοποιούνται στα ηλεκτρονικά ισχύος μπορεί να γίνει με διάφορα κριτήρια όπως

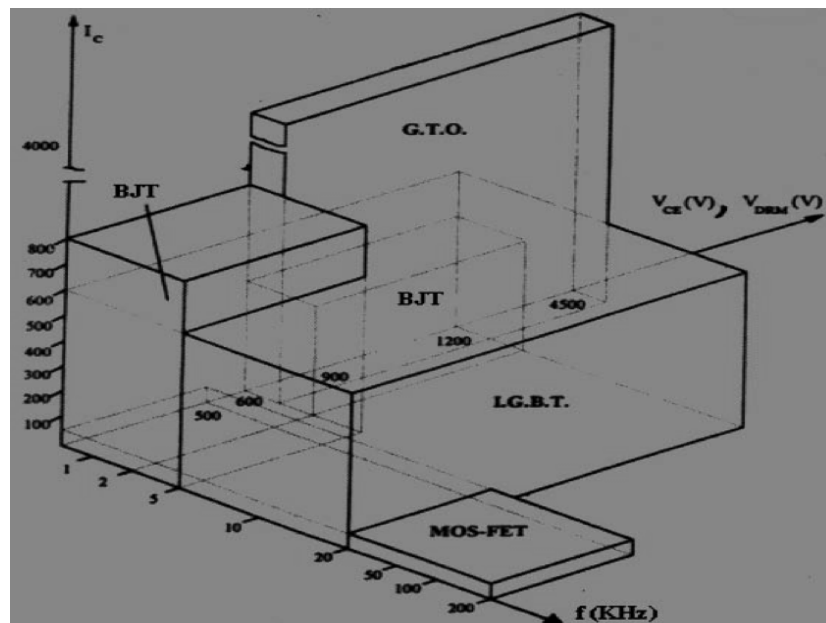
- Ο τύπος της μετατροπής που πραγματοποιείται
- Η δυνατότητα να μεταφέρουν ισχύ από την πηγή στο φορτίο και από το φορτίο στην πηγή
- Ο τρόπος με τον οποίο γίνεται η μεταγωγή των ημιαγωγών διακοπών

Ανάλογα με τον τύπο της μετατροπής που πραγματοποιείται ένας μετατροπέας μπορεί να είναι αντιστροφέας (inverter, dc/ac) ,ανορθωτής (rectifier, ac/dc) ρυθμιστής εναλλασσόμενης τάσης/ μετατροπέας συχνότητας (ac voltage controller/cycloconverter, ac/ac) η κατατμητής (chopper, dc/dc) .

Όσο αφορά την μετάβαση των ημιαγωγών διακοπών, ο όρος αυτός χρησιμοποιείται στο σβήσιμο των διακοπών διότι το άνοιγμα (ή σβήσιμο) του διακόπτη είναι συνήθως πιο δύσκολο για το ημιαγωγό στοιχείο.

Για τις διόδους και τους συνήθεις ελεγχόμενους ανορθωτές πυριτίου (Silicon Controlled Rectifiers SCRs - thyristors) είναι αδύνατο η σβέση να επιτευχθεί χωρίς εξωτερική βοήθεια. Αυτή η βοήθεια μπορεί να είναι η περιοδική αντιστροφή της τάσης μιας πηγής εναλλασσόμενης τάσης ή ενός εναλλασσόμενου φορτίου ή ακόμα και η αντί-ηλεκτρεγερτική δύναμη κάποιου κινητήρα. Στην περίπτωση αυτή γίνεται λόγος για φυσική μετάβαση (natural commutation) ή μετάβαση με τη βοήθεια της τάσης της γραμμής (line commutation) ή μετάβαση με τη βοήθεια του φορτίου (load commutation) ή εξωτερική μετάβαση (external commutation). Σε αυτές τις περιπτώσεις τα ημιαγωγικά στοιχεία ανοίγουν και κλείνουν σε φάση (phase locked) με τις κυματομορφές της τάσης του δικτύου, δηλαδή η διακοπτική λειτουργία έχει συχνότητα 50 (ή 60) Hz. Για αυτό και οι μετατροπείς αυτοί αναφέρονται σαν μετατροπείς δικτύου (line frequency converters) ή μετατροπείς ελεγχόμενοι από φάση (phase controlled converters).

Υπάρχει βέβαια και η εξαναγκασμένη μετάβαση (force commutation) ή αυτομετάβαση (self-commutation), όπου η σβέση των ημιαγωγικών διακοπών γίνεται με τη βοήθεια κυκλώματος που είναι ενσωματωμένο στην τοπολογία ισχύος ή αποτελεί μέρος του κυκλώματος ελέγχου. Αυτό συμβαίνει όταν η σβέση γίνεται με έλεγχο του ρεύματος στη βάση του ημιαγωγού διακόπτη (προκειμένου για διπολικά τρανζίστορ ισχύος, power BJTs), ή της τάσης στην πύλη του ημιαγωγού διακόπτη (προκειμένου για τρανζίστορ μεμονωμένης πύλης επίδρασης πεδίου ισχύος, power MOSFETs) και όταν η σβέση γίνεται με βοηθητικό κύκλωμα. Όταν υπάρχει εξαναγκασμένη μετάβαση, οι διακόπτες ανοίγουν και κλείνουν σε συχνότητες που είναι υψηλές σε σχέση με τη συχνότητα του δικτύου. Συχνά δε, έχει επικρατήσει οι μετατροπείς αυτοί να αναφέρονται σαν διακοπτικοί μετατροπείς (switching converters). Στο σχήμα 1.1 παρουσιάζονται οι δυνατότητες ισχύος και οι διακοπτικές συχνότητες διάφορων ημιαγωγικών διακοπών.



**Σχήμα 1.1** - Δυνατότητες ισχύος και οι διακοπτικές συχνότητες διάφορων ημιαγωγικών διακοπών



Υπάρχουν μετατροπείς που μεταφέρουν ενέργεια μόνο από την πηγή στο φορτίο ενώ υπάρχουν κι άλλοι που μπορούν να μεταφέρουν ισχύ και προς την αντίθετη κατεύθυνση, να λειτουργήσουν δηλαδή, με αναγεννητικό (regenerative) τρόπο.

Τα πρώτα είδη των μετατροπέων ισχύος ήταν στρεφόμενοι ηλεκτρομηχανικοί μετατροπείς ισχύος, οι οποίοι είναι ηλεκτρικές μηχανές συνεχούς ρεύματος και εναλλασσόμενου ρεύματος συζευγμένες μηχανικά μεταξύ τους. Σήμερα, δε χρησιμοποιούνται πια οι στρεφόμενοι ηλεκτρομηχανικοί μετατροπείς και τη θέση τους έχουν πάρει οι σύγχρονοι στατοί ηλεκτρονικοί μετατροπείς ισχύος. Ανάλογα με το είδος της μετατροπής ηλεκτρικής ισχύος διακρίνονται οι εξής κατηγορίες ηλεκτρονικών μετατροπών :

1. Μετατροπείς συνεχούς τάσης (DC-DC Converters) ή καταμητές συνεχούς τάσης (DC-Choppers). Μετατρέπουν τη συνεχή τάση μιας ορισμένης τιμής και πολικότητας σε συνεχή τάση άλλης τιμής και κατά περίπτωση άλλης πολικότητας.
2. Αντιστροφείς (DC-AC Inverters). Μετατρέπουν τη συνεχή τάση σε εναλλασσόμενη τάση με σταθερό ή μεταβαλλόμενο πλάτος και σταθερή ή μεταβαλλόμενη συχνότητα.
3. Ανορθωτές (AC-DC Rectifiers) Μετατρέπουν την εναλλασσόμενη τάση σε συνεχή τάση.
4. Κυκλομετατροπείς (Cycloconverters) ή ρυθμιστές εναλλασσόμενης τάσης. Μετατρέπουν την εναλλασσόμενη τάση μιας ορισμένης τιμής, συχνότητας και αριθμού φάσεων σε εναλλασσόμενη τάση άλλης τιμής, άλλης συχνότητας και κατά περίπτωση άλλου αριθμού φάσεων.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 - Ημιαγωγικά στοιχεία ισχύος

### 2.1 Εισαγωγή

Πολλοί ερευνητές και επιστήμονες δραστηριοποιήθηκαν για την εξεύρεση μέσων και μεθόδων που θα βοηθούσαν τον έλεγχο της ροής της ηλεκτρικής ενέργειας. Με την πάροδο του χρόνου η δημιουργία διαφόρων ημιαγωγικών στοιχείων ισχύος βοήθησε την ραγδαία εξέλιξη της τεχνολογίας των ηλεκτρονικών ισχύος. Τα ημιαγωγικά στοιχεία ισχύος χρησιμοποιούνται πλέον σε ευρεία κλίμακα σε πλήθος εφαρμογών, διότι και από τεχνικής άποψης εξελίσσονται συνεχώς καθώς έχουν τη δυνατότητα να διαχειρίζονται μεγάλα ποσά ισχύος με ευκολία και από οικονομικής άποψης έχουν γίνει ιδιαίτερα προσιτά. Ένα μεγάλο βήμα προς αυτή την κατεύθυνση πραγματοποιήθηκε και από τη μείωση του κόστους των σύγχρονων ημιαγωγών ισχύος, η οποία οδήγησε στην ανάπτυξη νέων τοπολογιών μετατροπών ισχύος. Η μελέτη των μετατροπών ισχύος πλέον είναι αρκετά εύκολη αφού σε πολλές περιπτώσεις οι ημιαγωγοί ισχύος μπορούν να λειτουργήσουν ως ιδανικοί διακόπτες. Ένα άλλο πλεονέκτημα των ημιαγωγών ισχύος είναι ότι τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά τους δεν επηρεάζουν τη συνολική λειτουργική συμπεριφορά του εκάστοτε κυκλώματος. Αυτό το χαρακτηριστικό τους βοηθάει και στην ευκολότερη ανάδειξη των χαρακτηριστικών των μετατροπών ισχύος. Με βάση τις χαρακτηριστικές καμπύλες των ημιαγωγών ισχύος μπορούμε να προσδιορίσουμε αν πρόκειται ή όχι για ιδανικά κυκλωματικά στοιχεία. Οι ήδη γνωστοί ημιαγωγοί ισχύος διαχωρίζονται σε τρεις κατηγορίες ανάλογα με το ποσοστό ελεγχιμότητας τους.

1. **Δίοδοι.** Παρουσιάζουν δύο καταστάσεις λειτουργίας. Η μία είναι η κατάσταση αγωγιμότητας και η άλλη είναι η κατάσταση αποκοπής και ελέγχονται με τη βοήθεια του κυκλώματος ισχύος.
2. **Thyristors.** Συνήθως κλείνουν από ένα σήμα ελέγχου και ανοίγουν υπό την επίδραση του κυκλώματος ισχύος.
3. **Ελεγχόμενοι διακόπτες.** Ανοίγουν και κλείνουν από τα σήματα ελέγχου. Σε αυτή την κατηγορία συμπεριλαμβάνονται και τα Διπολικά Τρανζίστορ Επαφής (Bipolar Junction Transistor - BJT), καθώς και τα

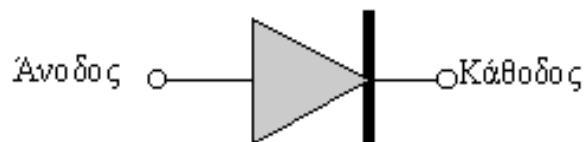
## Τρανζίστορ Επίδρασης Πεδίου Μεταλλικών Οξειδίων Ημιαγωγών (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor - MOSFET)

### 2.2 Δίοδος

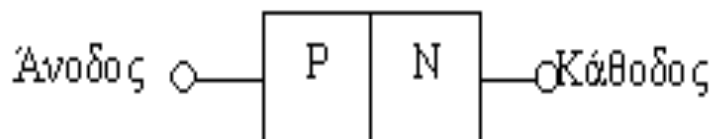
Η δίοδος είναι ένα εξάρτημα δύο ακροδεκτών και το βασικό χαρακτηριστικό της είναι ότι επιτρέπει τη διέλευση ροής ηλεκτρικού ρεύματος μόνο από την μια κατεύθυνση, η οποία είναι ανάλογη από τον τρόπο σύνδεσης της στο κύκλωμα.

#### 2.2.1 Βασική δομή

Η δίοδος κατασκευάζεται από δύο στρώματα ημιαγωγικού υλικού τύπου 'p' και τύπου 'n', σχηματίζοντας μία ένωση p-n και αποτελείται από δύο πόλους, την άνοδο και την κάθοδο. Τα υλικά που χρησιμοποιούμε συνήθως για την κατασκευή μιας δίοδου είναι το γερμάνιο και το πυρίτιο τα οποία υπό κανονικές συνθήκες περιβάλλοντος συμπεριφέρονται σαν ημιαγωγοί, ενώ σε πολύ μικρές θερμοκρασίες η αγωγιμότητά τους μειώνεται. Στο σχήμα 2.1 βλέπουμε το κυκλωματικό σύμβολο της δίοδου, ενώ στο σχήμα 2.2 την κρυσταλλική δομή μιας δίοδου, όπως παρατηρούμε



Σχήμα 2.1 - Κυκλωματικό σύμβολο δίοδου



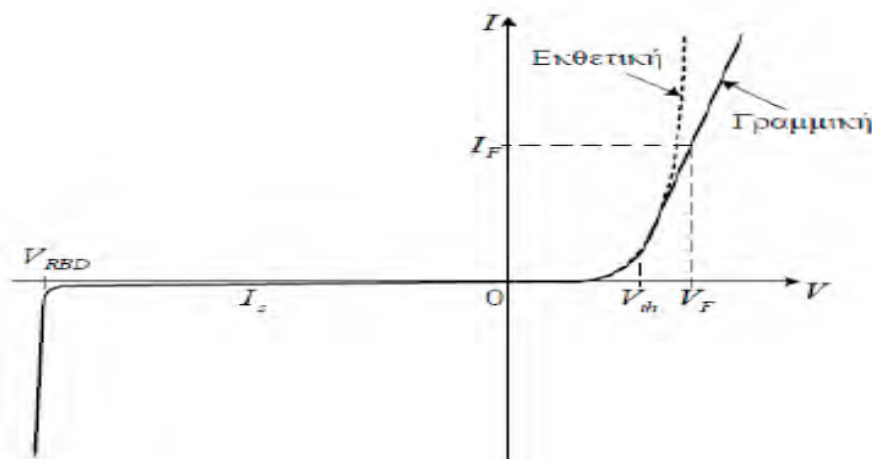
Σχήμα 2.2 - Κρυσταλλική δομή δίοδου

ο ένας ακροδέκτης της δίοδου είναι η άνοδος (anode) και ο άλλος ακροδέκτης είναι η κάθοδος (cathode), οι οποίοι συνδέονται με τα αντίστοιχα ημιαγωγικά στρώματα

μέσω κατάλληλων μεταλλικών επαφών. Η διόδος έχει δύο καταστάσεις λειτουργίας: την κατάσταση αγωγής και την κατάσταση αποκοπής. Η συμπεριφορά της εξαρτάται από τα ρεύματα και τις επιβαλλόμενες τάσεις και ρεύμα. Όταν είναι ορθά πολωμένη και η τάση στα άκρα της ξεπεράσει μια οριακή τιμή που ονομάζεται τάση κατωφλίου (*threshold voltage*)  $V_{th}$  τότε η διόδος αρχίζει να άγει. Μπορεί να θεωρηθεί ως ιδανικός διακόπτης, επειδή μεταβαίνει γρήγορα από την κατάσταση αποκοπής στην αγωγή. Όταν η διόδος είναι ανάστροφα πολωμένη και μέχρι η τάση στα άκρα της να γίνει ίση με την ανάστροφη τάση διάσπασης  $V_{RBD}$  (*Reverse BreakDown*), διαρρέεται μόνο από ένα πολύ μικρό ρεύμα διαρροής  $I_s$ . Όταν η τάση υπερβεί αυτήν την τιμή, το ρεύμα αυξάνεται υπερβολικά. Κατά την κανονική λειτουργία της διόδου, η ανάστροφη τάση πόλωσης δεν θα πρέπει να φτάνει την ονομαστική τιμή της τάσης διάσπασης.

### 2.2.2 Χαρακτηριστική καμπύλη I/V διόδου

Στο σχήμα 2.3 παρουσιάζεται η χαρακτηριστική καμπύλη λειτουργίας της διόδου ισχύος



**Σχήμα 2.3** - Χαρακτηριστική καμπύλη ρεύματος τάσης διόδου

Από την παραπάνω χαρακτηριστική τάσης - ρεύματος διαπιστώνουμε ότι για να άγει η διόδος κατά την ορθή της πόλωση δεν πρέπει απλά η τάση στα άκρα της να είναι θετική, αλλά πρέπει να είναι και μεγαλύτερη από μία ελάχιστη τιμή τάσης, η οποία ονομάζεται τάση κατωφλίου και η τιμή της καθορίζεται από το ημιαγωγικό υλικό από το οποίο είναι κατασκευασμένη η διόδος. Κατά την ανάστροφη πόλωση της διόδου, η

κατάρρευση της επαφής εμφανίζεται όταν έχουμε ακαριαία αύξηση του ανάστροφου ρεύματος και η αρνητική τάση στα άκρα της διόδου είναι πολύ κοντά στο να ξεπεράσει μία συγκεκριμένη για κάθε δίοδο τιμή τάσης, η οποία ονομάζεται δυναμικό ή τάση Zener. Στα κυκλώματα των ηλεκτρονικών ισχύος χρησιμοποιούνται κυρίως τρία είδη διόδων.

1. **Δίοδος Schottky.** Αυτό το είδος διόδου χρησιμοποιείται όταν χρειαζόμαστε μικρές τιμές πτώσης τάσης της τάξεως των 0.3 Volts. Αυτό είναι επιθυμητό συνήθως σε κυκλώματα τα οποία αποδίδουν πολύ μικρή τάση στην έξοδο τους. Αυτές οι διόδους παρουσιάζουν τάση διάσπασης σε ένα εύρος τιμών από 50 έως και 100 Volts.
2. **Δίοδος ταχείας αποκατάστασης.** Αυτό το είδος διόδου είναι με τέτοιο τρόπο σχεδιασμένο και κατασκευασμένο ώστε να χρησιμοποιείται σε υψίσυχνα κυκλώματα τα οποία διαθέτουν ελεγχόμενους διακόπτες. Έτσι αυτή η δίοδος χαρακτηρίζεται από μικρό χρόνο ανάστροφης αποκατάστασης. Ειδικότερα για τάσεις της τάξεως αρκετών μερικών εκατοντάδων Volts και για ρεύματα της τάξεως αρκετών εκατοντάδων Amperes αυτού του είδους οι διόδους εμφανίζουν χρόνους ανάστροφης αποκατάστασης μικρότερους από μερικά msec.
3. **Δίοδος συχνότητας δικτύου.** Αυτό το είδος διόδου είναι σχεδιασμένο με τέτοιο τρόπο, ώστε η πτώση τάσης που παρουσιάζει στα άκρα της κατά την ορθή της πόλωση να είναι όσο το δυνατόν μικρότερη. Η μικρή πτώση τάσης οδηγεί σε μεγαλύτερους χρόνους ανάστροφης αποκατάστασης, οι οποίοι χρησιμοποιούνται κυρίως σε εφαρμογές με συχνότητα ίση με τη συχνότητα του δικτύου. Αυτές οι διόδους έχουν ονομαστικές τάσεις διάσπασης της τάξεως αρκετών kVolts και ονομαστικά ρεύματα της τάξεως αρκετών kAmperes. Επίσης έχουν τη δυνατότητα να συνδεθούν και σε σειρά, αλλά και παράλληλα, ώστε να ικανοποιήσουν οποιαδήποτε απαίτηση τόσο σε τάση όσο και σε ρεύμα.

## 2.3 Δίοδος δύο κατευθύνσεων (Diac)

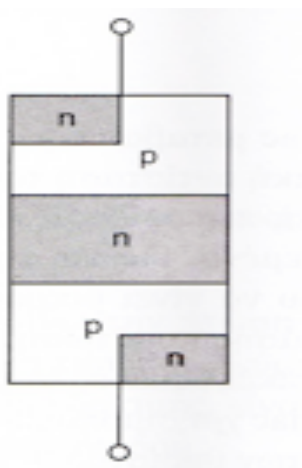
### 2.3.1 Βασική δομή

Η διάδος δύο κατευθύνσεων, αποτελεί μη ελεγχόμενο διακοπτικό στοιχείο δύο κατευθύνσεων (διακόπτης εναλασομένου). Στην ουσία το στοιχείο αυτό, προέρχεται από την αντιπαράλληλη σύνδεση δύο διόδων τεσσάρων στρωμάτων (δίοδοι Shockley ή δίοδοι ρηρη). Το κυκλωματικό σύμβολο του συγκεκριμένου στοιχείου το βλέπουμε στο σχήμα 2.4



Σχήμα 2.4 - Κυκλωματικό σύμβολο Διόδου δυο κατευθύνσεων (Diac)

Ενώ την κρυσταλλική δομή την παρατηρούμε στο σχήμα 2.5



Σχήμα 2.5 Κρυσταλλική δομή Διόδου δύο κατευθύνσεων (Diac)

### 2.3.2 Χαρακτηριστική τάσης ρεύματος

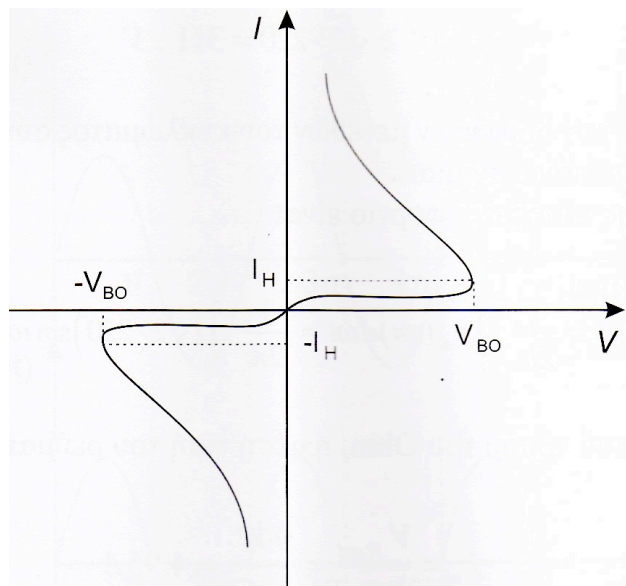
Στο σχήμα 2.6 βλέπουμε την χαρακτηριστική τάσης-ρεύματος του diac και παρατηρούμε ότι το Diac πρακτικά βρίσκεται σε κατάσταση αποκοπής, για κάθε τάση

$$-V_{BO} < V < V_{BO}$$

Όπου

$V_{BO}$ , τάση διάσπασης (V)

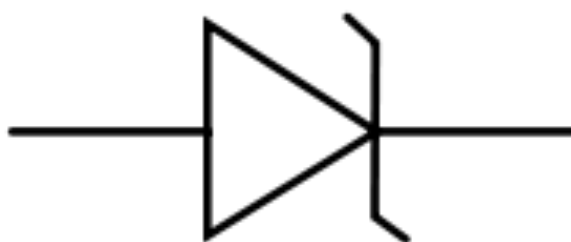
Για κάθε τάση,  $|V| > |\pm V_{BO}|$ , το diac μεταβαίνει από την κατάσταση αποκοπής στην κατάσταση αγωγής. Δηλαδή, η ωμική αντίσταση του στοιχείου ελατώνεται σημαντικά και το ρεύμα που το διαρρέει, περιορίζεται πλέον από τις συνθήκες του κυκλώματος στο οποίο είναι συνδεδεμένο. Για να επανέλθει το diac σε κατάσταση αποκοπής θα πρέπει το ρεύμα να γίνει μικρότερο από το αντίστοιχο ρεύμα συγκράτησης. Τυπικές τιμές της τάσης κυμάτωσης  $V_{BO}$ , κυμαίνονται στα όρια από μερικές δεκάδες έως και μερικές εκατοντάδες Volts. Το diac χρησιμοποιείται συχνά σε κυκλώματα έναυσης των θυρίστορ.



Σχήμα 2.6 - Χαρακτηριστική τάσης-ρεύματος Diac

## 2.4 Δίοδος ZENER

Η απότομη κλίση της χαρακτηριστικής τάσης-ρεύματος της διόδου στην περιοχή διάσπασης και η σχεδόν σταθερή πτώση τάσης που η κλίση της αντιπροσωπεύει, καθιστά τη δίοδο στη συγκεκριμένη περιοχή κατάλληλη σε χρήση για κυκλώματα σταθεροποίησης της τάσης. Η δίοδος Zener (ή δίοδος διάσπασης), είναι μια ειδικά κατασκευασμένη δίοδος, η οποία μπορεί να λειτουργεί στην περιοχή διάσπασης. Το κυκλωματικό σύμβολο το βλέπουμε στο σχήμα 2.7



Σχήμα 2.7 - Κυκλωματικό σύμβολο

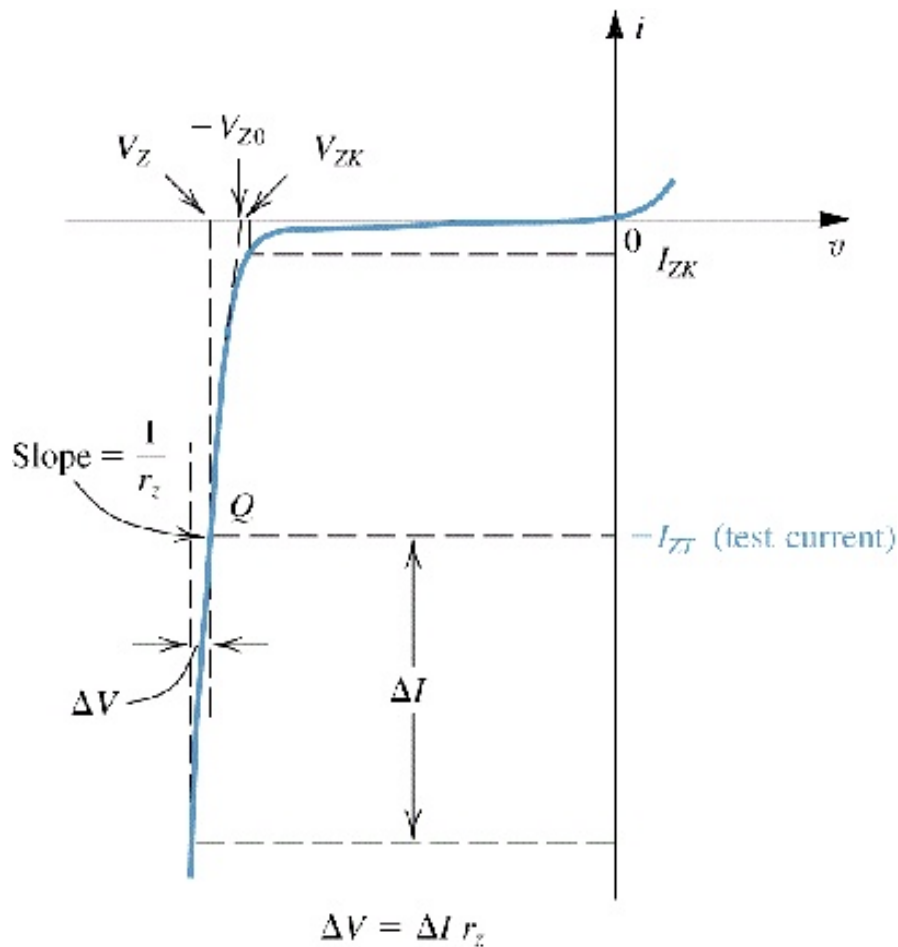
Η δίοδος κατά την ορθή πόλωση συμπεριφέρεται σαν μια απλή δίοδος. Κατά την ανάστροφη πόλωση στην αρχή το ρεύμα είναι μικρό και παραμένει σταθερό αλλά μετά την τάση Zener γίνεται απότομα μεγάλο. Η τάση στα άκρα της διόδου ανεξάρτητα από τις μεταβολές του ρεύματος παραμένει σταθερή

Η χαρακτηριστική τάσης-ρεύματος της διόδου Zener, δε διαφέρει από εκείνη της διόδου. Στο σχήμα 2.8, δείχνεται η χαρακτηριστική V-I, με έμφαση στην περιοχή διάσπασης.

Παρατηρούμε ότι, η καμπύλη της διόδου για ανάστροφα ρεύματα μεγαλύτερα από το ρεύμα γονάτου  $I_{ZK}$  είναι σχεδόν ευθεία γραμμή.

Συνήθως ο κατασκευαστής δίνει την πτώση τάσης κατά μήκος της Zener, για κάποια καθορισμένη πειραματική τιμή του ρεύματος  $I_{ZT}$  (ρεύμα δοκιμής). Η αντίσταση  $r_z$  που ορίζεται στο σημείο δοκιμής, είναι γνωστή ως δυναμική αντίσταση (ή αντίσταση μικρών μεταβολών) διόδου. Στο εμπόριο υπάρχουν δίοδοι Zener που η ονομαστική ισχύς είναι από 0,25W έως 50W.





Σχήμα 2.8 - Χαρακτηριστική τάσης-ρεύματος διόδου Zener

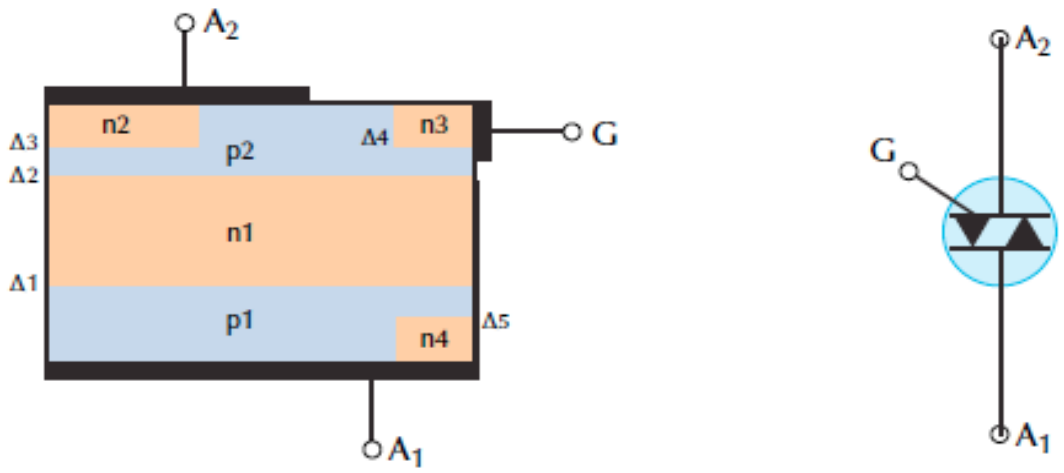
## 2.5 TRIAC

### 2.5.1 Βασική δομή

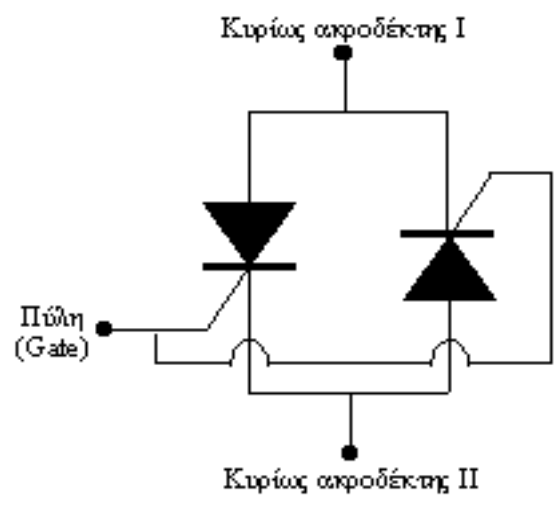
Το triac είναι ένας αμφίδρομος ελεγχόμενος ανορθωτής πυριτίου . Η κρυσταλλική δομή του και το κυκλωματικό του σύμβολο, δείχνονται στο σχ. 2.9,ενω στο σχήμα 2.10 το ισοδύναμο κύκλωμα του.

Στην ουσία αποτελείται από δύο θυρίστορ σε αντιπαράλληλη σύνδεση, με κοινή όμως

πύλη ελέγχου. Προφανώς, το triac ως διακόπτης δύο κατευθύνσεων, βρίσκει εφαρμογές σε μετατροπείς E.P./E.P. Μοναδικό χαρακτηριστικό αυτού του στοιχείου είναι ότι επιτρέπει τη διέλευση του ρεύματος και προς τις δύο κατευθύνσεις, κάτι που δεν συναντάται σε κανένα άλλο στοιχείο. Το triac ελέγχεται και με θετικούς και με αρνητικούς παλμούς. Η πολικότητα των παλμών αυτών, δεν επηρεάζει τη φορά αγωγιμότητας, η οποία εξαρτάται αποκλειστικά από τη σχετική πολικότητα των κύριων ακροδεκτών (main terminals) A1 και A2.



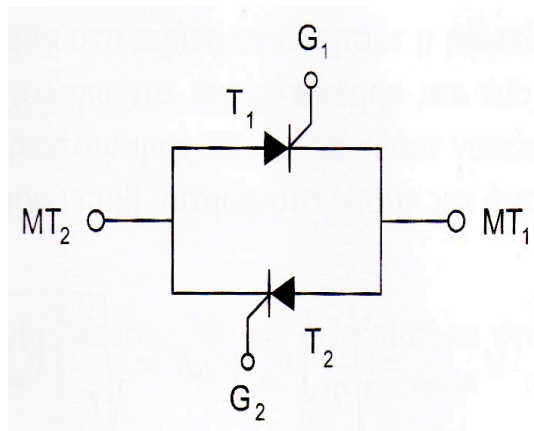
Σχήμα 2.9 - Κρυσταλλική δομή και κυκλωματικό σύμβολο triac



Σχήμα 2.10 - Ισοδύναμο κύκλωμα

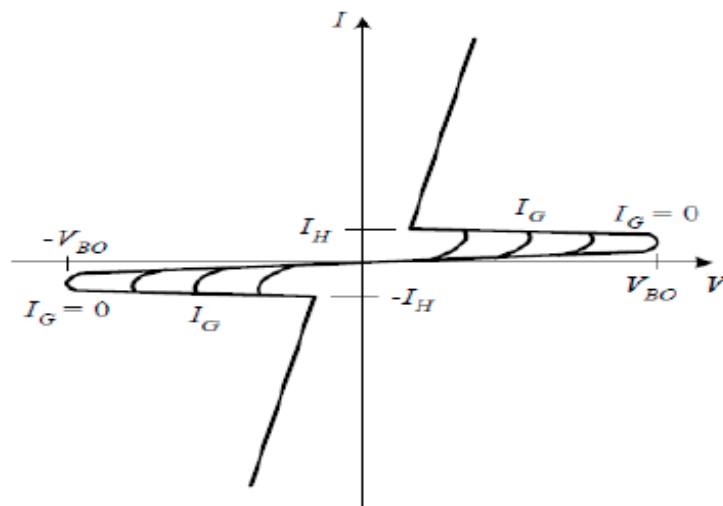
Για μικρές ισχεις (της τάξης μερικών KW) και κυρίως μικρές συχνότητες  $f < 400$

Hz) χρησιμοποιούνται triacs, ενώ για μεγαλύτερες ισχύς, αντιπαράλληλα θυρίστρον, σχήμα 2.11



**Σχήμα 2.11** – Αντιπαράλληλα θυρίστρον

Τα δύο αντιπαράλληλα θυρίστρον, ως διακόπτης εναλλασσόμενου, έχει πολύ καλύτερες επιδόσεις από το triac και ως προς την ισχύ και ως προς την μέγιστη συχνότητα λειτουργίας. Το μόνο μειονέκτημά του είναι ότι, σε αντίθεση με το triac, απαιτεί τροφοδοσία δύο ανεξάρτητων και γαλβανικά απομονωμένων παλμών για τις δύο πύλες.



**Σχήμα 2.12** - Χαρακτηριστική τάσης-ρεύματος triac

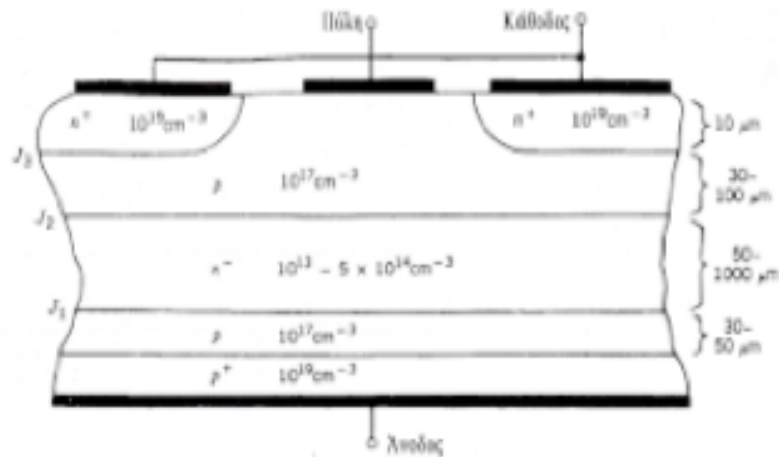
Οι ορισμοί των χαρακτηριστικών μεγεθών (ρεύματα συγκράτησης, μανδάλωσης,

τάσεις διάσπασης, κ.λ.π. ), είναι ακριβώς ανάλογα με τα αντίστοιχα των θυρίστορ. Η χαρακτηριστική τάση ρεύματος του triac δείχνεται στο σχήμα. 2.12

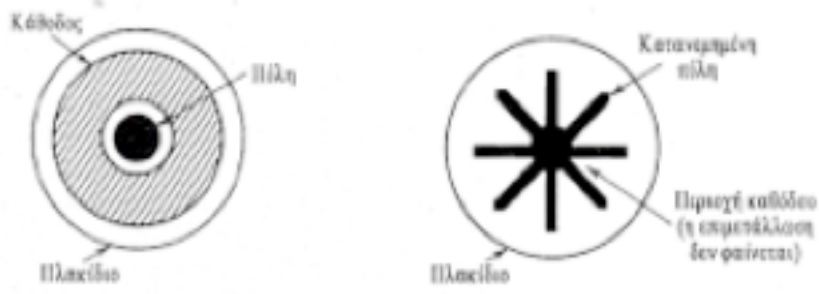
## 2.6 Θυρίστορ

### 2.6.1 Βασική δομή

Τα θυρίστορ (ονομάζονται SCR, που σημαίνει ελεγχόμενοι ανορθωτές πυριτίου) είναι μια από τις παλαιότερες κατηγορίες (από το 1957 στα Εργαστήρια Ερευνών της GENERAL ELECTRIC) ημιαγωγικών στοιχείων ισχύος και ακολουθούν να έχουν τη μεγαλύτερη ικανότητα διαχείρισης ισχύος. Έχουν μια δομή από τέσσερα στρώματα και αποτελούν έναν διακόπτη που μπορεί να ενεργοποιηθεί από τον ακροδέκτη ελέγχου (πύλη), αλλά δεν μπορεί να απενεργοποιηθεί από την πύλη. Οι ιδιότητες των θυρίστορ (ιδιαίτερα η ικανότητά τους να διαχειρίζονται μεγάλη ισχύ) εγγυώνται ότι πάντοτε θα έχουν σημαντικές εφαρμογές στα ηλεκτρονικά ισχύος. Για τον λόγο αυτό, ο σχεδιαστής και ο χρήστης ηλεκτρονικών ισχύος πρέπει να γνωρίζει τη λειτουργία των στοιχείων αυτών.

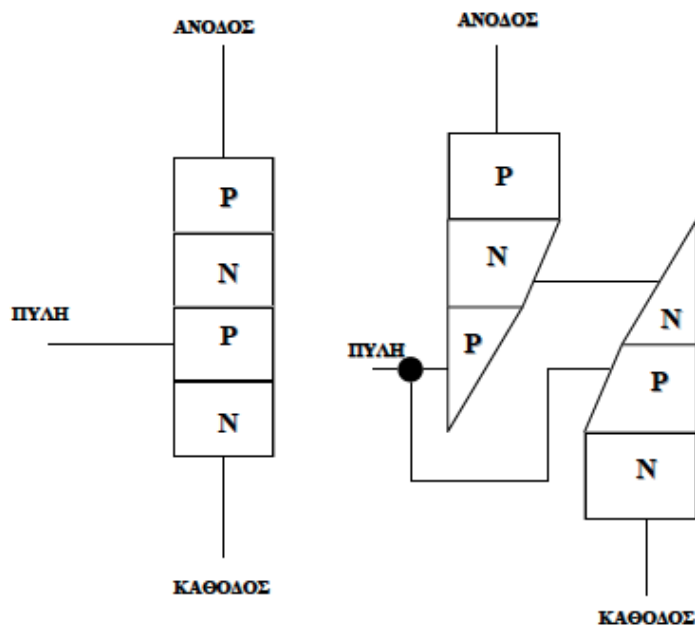


Σχήμα 2.13 - Κατακόρυφη διατομή ενός τυπικού θυρίστορ



**Σχήμα 2.14** - Διατάξεις πύλης και καθόδου

Στο σχήμα 2.13 , δίνεται η κατακόρυφη τομή ενός τυπικού θυρίστορ. Στο σχήμα φαίνεται το κατά προσέγγιση πάχος καθενός από τα τέσσερα διαδοχικά στρώματα με προσμίξεις τύπου p και τύπου n καθώς και οι κατά προσέγγιση πυκνότητες των προσμίξεων. Για την κατασκευή ενός θυρίστορ ισχύος χρησιμοποιείται ένα πλήρες πλακίδιο από πυρίτιο με διάμετρο μέχρι 10 cm .Στο σχήμα 2.14 φαίνονται δύο διαφορετικές διατάξεις πύλης και καθόδου. Η δομή με κατανομημένη πύλη είναι για τα θυρίστορ με μεγάλη διάμετρο (10 cm), ενώ η δομή με εντοπισμένο ηλεκτρόδιο πύλης είναι για θυρίστορ με μικρότερη διάμετρο. Γενικά η διάταξη των πυλών και των καθόδων των θυρίστορ έχει μεγάλη ποικιλία ανάλογα με τη διάμετρο του θυρίστορ , την επιθυμητή ικανότητα  $di/dt$  και την επιθυμητή περιοχή ταχυτήτων μετάβασης.

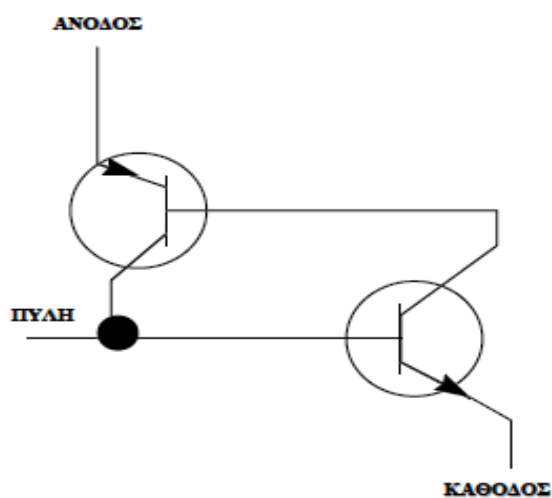


**Σχήμα 2.15** - Κρυσταλλική δομή θυρίστορ

Στο σχήμα 2.15 δίνεται η κρυσταλλική δομή ενός θυρίστορ ενώ στο σχήμα 2.16 το κυκλωματικό σύμβολο του θυρίστορ.

Ουσιαστικά, πρόκειται για το σύμβολο της διόδου (ή ανορθωτή) στο οποίο έχει προστεθεί ένας τρίτος ακροδέκτης ελέγχου, η πύλη. Στο σχήμα φαίνονται οι φορές αναφοράς της τάσης και του ρεύματος του θυρίστορ.

Η κατακόρυφη τομή του θυρίστορ είναι παρόμοια με την τομή του BJT, συμπεριλαμβανομένων και μερικών από τις πυκνότητες προσμίξεων και του πάχους ορισμένων στρωμάτων. Η κάθοδος βρίσκεται στην ίδια θέση με τον εκπομπό στο BJT και η θέση της πύλης στο θυρίστορ είναι ανάλογη με τη θέση της βάσης στο BJT. Η περιοχή  $\eta^{\ominus}$  στο θυρίστορ απορροφά το στρώμα εκκένωσης της επαφής που αποκόπτει την εφαρμοζόμενη τάση, όταν το θυρίστορ βρίσκεται σε κατάσταση αποκοπής, και με τον τρόπο αυτό εκτελεί την ίδια λειτουργία με την περιοχή  $\eta^{\ominus}$  μετατόπισης συλλέκτη στο BJT.



**Σχήμα 2.16** - Κυκλωματικό σύμβολο θυρίστορ

Το στρώμα  $\rho$  που σχηματίζει την άνοδο του θυρίστορ είναι ένα χαρακτηριστικό της δομής του θυρίστορ που δεν βρίσκεται στο BJT. Αυτό το στρώμα ανόδου αναγκάζει το θυρίστορ να έχει ιδιότητες διαφορετικές από τις ιδιότητες του BJT.

Για την εξέλιξη των διαφόρων ειδών Thyristors λαμβάνονται συνήθως υπόψη η τάση, το ρεύμα, ο χρόνος σβέσης, η ορθή πτώση τάσης, ο ρυθμός μεταβολής του ρεύματος, ο ρυθμός μεταβολής της τάσης. Τα διάφορα είδη των Thyristors παρουσιάζονται παρακάτω προκειμένου να καλυφθούν οι ανάγκες μίας μεγάλης γκάμας εφαρμογών στις οποίες υπεισέρχονται.

- **Phase-control Thyristor (Thyristor ελέγχου φάσης).** Σε ορισμένες περιπτώσεις χαρακτηρίζονται και ως Thyristors-μετατροπείς και χρησιμοποιούνται συνήθως σε εφαρμογές ανόρθωσης τάσεων και ρευμάτων με συχνότητα ίση με τη συχνότητα του δικτύου. Συνήθως τα Thyristors αυτά χρησιμοποιούνται σε ανορθωτές, οι οποίοι εξαρτώνται από τη συχνότητα και συνδέονται είτε με συνεχείς (DC) είτε με εναλλασσόμενους (AC) κινητήρες και σε δίκτυα που χρησιμοποιούνται για μεταφορά ισχύος με ιδιαίτερα υψηλή συνεχή (DC) τάση. Το θεωρητικά βέλτιστο Thyristor ελέγχου φάσης έχει τη δυνατότητα να διαχειρίζεται ιδιαίτερα υψηλές τιμές τάσης και ρεύματος και να εμφανίζει πολύ μικρή πτώση τάσης στα άκρα του όταν είναι σε κατάσταση αγωγιμότητας. Η διάμετρος του υποστρώματος ενός τέτοιου Thyristor είναι γύρω στα 10 cm, με μέση τιμή ρεύματος 4000 Amperes για τάσεις αποκοπής της τάξεως των 5 έως 7 kVolts. Η ορθή πτώση τάσης όταν το Thyristor άγει είναι γύρω στα 1,5 Volts για στοιχεία του 1 kVolt και γύρω στα 3 Volts για στοιχεία από 5 έως 7 kVolts.
- **Inverter-grade Thyristor (Thyristor αντιστροφών).** Αυτό το είδος Thyristor σχεδιάζεται έτσι ώστε όταν βρίσκεται σε κατάσταση αγωγιμότητας, να παρουσιάζει όσο το δυνατόν μικρότερο χρόνο σβέσης και όσο το δυνατόν χαμηλότερες τιμές ορθής πτώσης τάσης. Οι τιμές τάσης ενός τέτοιου στοιχείου φθάνουν τα 2500 Volts, ενώ οι τιμές ρεύματος τα 1500 Amperes. Ο χρόνος σβέσης παρουσιάζει διακύμανση της τάξης μερικών μsec και η τελικά του τιμή καθορίζεται από την τιμή της τάσης αποκοπής και την τιμή της ορθής πτώσης τάσης όταν το Thyristor βρίσκεται σε κατάσταση αγωγιμότητας.
- **Light-activated Thyristor (Thyristor φωτεινής διέγερσης).** Αυτό το είδος Thyristor μπορεί να βρεθεί σε κατάσταση αγωγιμότητας υπό την

επίδραση ενός φωτεινού παλμού, ο οποίος οδηγείται με τη βοήθεια οπτικών ινών σε μία ειδικά και ιδιαίτερα ευαίσθητη περιοχή του Thyristor. Αυτή η ιδιότητα που εμφανίζει ο συγκεκριμένος τύπος Thyristor στην ικανότητα που παρουσιάζει το φως, όταν διοχετεύεται σε κατάλληλα μήκη κύματος, να δημιουργεί πλεόνασμα ζευγών οπών (p) - ηλεκτρονίων (n) όταν προσπίπτει σε Πυρίτιο (Si). Αρχικά αυτός ο τύπος Thyristor έβρισκε χρήση όπου υπεισέρχονταν ιδιαίτερα υψηλά ποσά τάσης, όπως για παράδειγμα κατά τη μεταφορά ιδιαίτερα υψηλής συνεχούς (DC) τάσης όπου πολλά τέτοια Thyristor είναι συνδεδεμένα σε σειρά ώστε αν συνθέσουν ένα διακοπτικό σύστημα για ένα μετατροπέα. Όμως στο συγκεκριμένο τύπο Thyristor παρουσιάζονται και δυσλειτουργίες εξαιτίας της ανάπτυξης πολλών διαφορετικών και ιδιαίτερα υψηλών τιμών δυναμικού με αποτέλεσμα να συναντάμε δυσκολίες κατά την εφαρμογή των παλμών διέγερσης. Η τάση σε αυτό το είδος Thyristor είναι γύρω στα 4 kVolts και το ρεύμα γύρω στα 3 kAmperes. Η ορθή πτώση τάσης όταν αυτό άγει είναι περίπου 2 Volts και η απαίτηση ισχύος από τη φωτεινή διέγερση γύρω στα 5 mWatt.

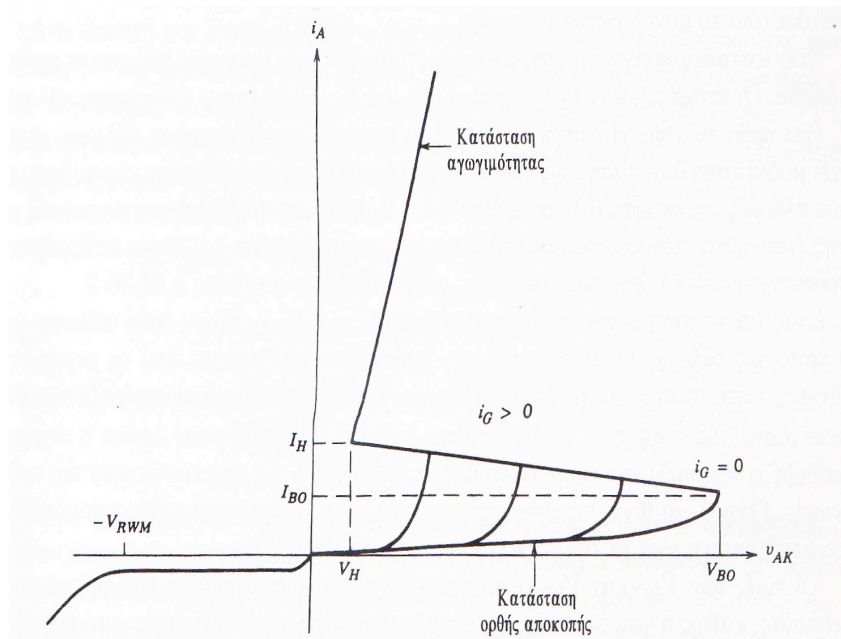
Ανάλογα με την εφαρμογή που θέλουμε να υποστηρίξουμε συναντάμε και διάφορες παραλλαγές των παραπάνω τύπων θυρίστορ:

- **Gate-Assisted Turn off Thyristor - GATT (Thyristor με Σβέση Υποβοηθούμενη από την Πύλη).**
- **Asymmetrical Silicon Controlled Rectifier - ASCR (Ασύμμετροι Ελεγχόμενοι Ανορθωτές Πυριτίου).**
- **Reverse-Conducting Thyristor - RCT (Thyristor Ανάστροφης Αγωγιμότητας).**
- **Mos Controlled Thyristor - MCT ( Thyristor Ελεγχόμενο από MOSFET).**



## 2.6.2. Χαρακτηριστική τάσης ρεύματος

Η μοναδικότητα του thyristor έγκειται κυρίως στη χαρακτηριστική του καμπύλη  $i-v$  (γραφική παράσταση του ρεύματος ανόδου  $i_A$  συναρτήσει της τάσης ανόδου-καθόδου  $V_{AK}$ ), η οποία φαίνεται στο σχήμα 2.17. Στην ανάστροφη φορά το thyristor εμφανίζεται ίδιο με την ανάστροφα πολωμένη δίοδο, η οποία άγει πολύ μικρό ρεύμα μέχρι να πραγματοποιηθεί η διάσπαση χιονοστιβάδας. Στο thyristor η μέγιστη ανάστροφη τάση ονομάζεται  $V_{RWM}$  (υπάρχουν στοιχεία με τιμές της  $V_{RM}$  μέχρι και 7000 V). Κατά την ορθή φορά το thyristor έχει δύο ευσταθείς καταστάσεις που συνδέονται μεταξύ τους με μια ασταθή κατάσταση. Στην ασταθή κατάσταση η χαρακτηριστική  $i-v$  εμφανίζει αρνητική αντίσταση. Η περιοχή μικρού ρεύματος-μεγάλης τάσης είναι η κατάσταση ορθής αποκοπής και η κατάσταση μικρής τάσης-μεγάλου ρεύματος είναι η κατάσταση αγωγιμότητας. Στη χαρακτηριστική  $i-v$  φαίνονται και οι δυο αυτές καταστάσεις. Στην κατάσταση αγωγιμότητας ένα thyristor μεγάλης ισχύος μπορεί να άγει ρεύματα μέχρι 2000-3000 A με πτώσεις τάσης μόνο μερικά volt.



Σχήμα 2.16 - Χαρακτηριστική ρεύματος τάσης του thyristor

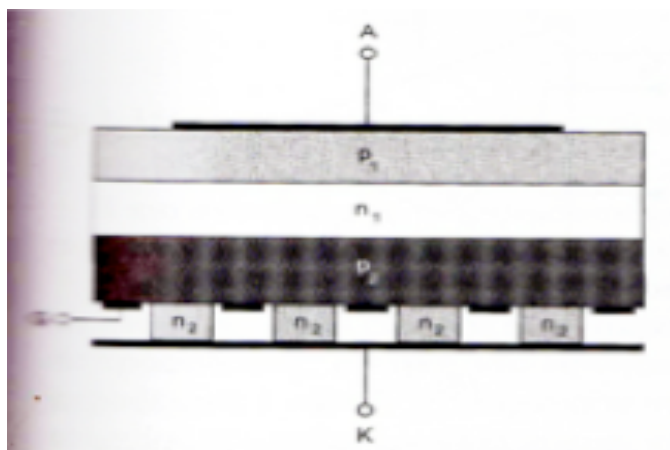
Στους χρήστες ενδιαφέρουν ειδικές τιμές τάσης και ρεύματος στο τεταρτημόριο ορθής πόλωσης της χαρακτηριστικής  $i-v$  και αυτές εμφανίζονται στα φυλλάδια των προδιαγραφών. Το ρεύμα συγκράτησης  $I_H$  παριστάνει το μέγιστο ρεύμα που μπορεί να περάσει μέσα από το θυρίστορ και που μπορεί να διατηρεί το στοιχείο σε κατάσταση αγωγιμότητας. Αυτή η τιμή του ρεύματος και η αντίστοιχη τάση στα άκρα του στοιχείου, που ονομάζεται τάση συγκράτησης  $V_H$ , παριστάνουν τη μικρότερη δυνατή επέκταση του τμήματος αγωγιμότητας της χαρακτηριστικής  $i-v$ . Στην κατάσταση ορθής αποκοπής οι ποσότητες που ενδιαφέρουν είναι η τάση ορθής αποκοπής  $V_{BO}$  (που μερικές φορές ονομάζεται τάση καμπής  $V_{BO}$ , επειδή η καμπύλη  $i-v$  κάμπτεται και μπαίνει στο τμήμα αγωγιμότητας ) και το αντίστοιχο ρεύμα καμπής  $I_{BO}$ .

Η τάση και το ρεύμα καμπής ορίζονται για μηδενικό ρεύμα πύλης, δηλαδή όταν η πύλη είναι ανοικτό κύκλωμα. Αν στο θυρίστορ εφαρμοστεί θετικό ρεύμα πύλης, τότε η μετάβασή του ή η καμπή του στην κατάσταση αγωγιμότητας θα συμβεί σε μικρότερες τιμές της τάσης ανόδου-καθόδου, όπως φαίνεται στο σχ. 2.16. Το θυρίστορ θα μεταβεί στην κατάσταση αγωγιμότητας με μικρές τιμές της  $V_{AK}$ , αν το ρεύμα πύλης είναι αρκετά μεγάλο. Αν και δεν φαίνεται στην χαρακτηριστική  $i-v$ , το ρεύμα πύλης μπορεί να μην είναι  $dc$  ρεύμα, αλλά και παλμός ρεύματος με κάποια ελάχιστη χρονική διάρκεια. Αυτή η ικανότητα του θυρίστορ να μεταβαίνει στην κατάσταση αγωγιμότητας με παλμό ρεύματος υπήρξε η βάση των διαδεδομένων εφαρμογών του.

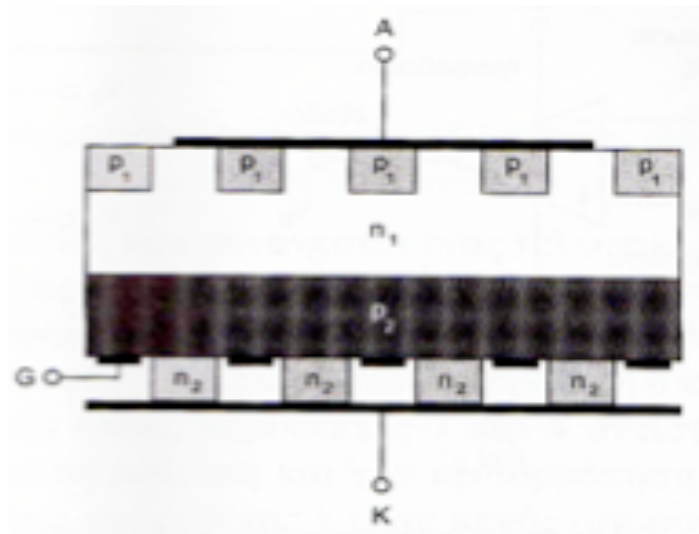
Ωστόσο, όταν το θυρίστορ βρίσκεται στην κατάσταση αγωγιμότητας, η πύλη δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να το οδηγήσει στην αποκοπή. Ο μόνος τρόπος αποκοπής του θυρίστορ είναι ο εξαναγκασμός από το εξωτερικό κύκλωμα του ρεύματος του στο στοιχείο να γίνει μικρότερο από το ρεύμα συγκράτησης για ένα ελάχιστο καθορισμένο χρονικό διάστημα. Έχουν αναπτυχθεί ειδικοί τύποι θυρίστορ που ονομάζονται GTO (gate turn-off, με αποκοπή από την πύλη), στα οποία το στοιχείο αποκόπτεται από την πύλη.

## 2.7 GTO

Στο κλασικό θυρίστορ μπορούμε να ελέγξουμε μόνο την έναυσή του. Η σβέση του εξαρτάται αποκλειστικά και μόνο από τις συνθήκες του κυκλώματος με το οποίο είναι συνδεδεμένο ( και επιτυγχάνεται όταν το ρεύμα του γίνει μικρότερο του ρεύματος συγκράτησης). Το GTO (gate turn-off thyristor), είναι ένας τύπος θυρίστορ με δύο ηλεκτρόδια ελέγχου, με το ένα από αυτά ελέγχεται η έναυση (όπως στα κλασικά θυρίστορ) και με το άλλο η σβέση του. Το κλασικό θυρίστορ, απουσία παλμού, έχει την ικανότητα να μπλοκάρει (αποκόπτει) τάσεις σχεδόν του ίδιου μεγέθους, τόσο κατά την ορθή όσο και κατά την ανάστροφη πόλωση. Στα GTOs, υπάρχουν δύο τύποι τους οποίους μπορούμε να δούμε στα σχήματα 2.17 και 2.18 αντίστοιχα, ο “reverse blocking type” που έχει την ικανότητα να μπλοκάρει (αποκόπτει) τάσεις σχεδόν ίδιου μεγέθους, τόσο κατά την ορθή όσο και κατά την ανάστροφη πόλωση και ο “anode short type”, του οποίου η ικανότητα στην αποκοπή τάσεων ανάστροφης πόλωσης είναι αρκετά μικρή ( της τάξης των 15 V )

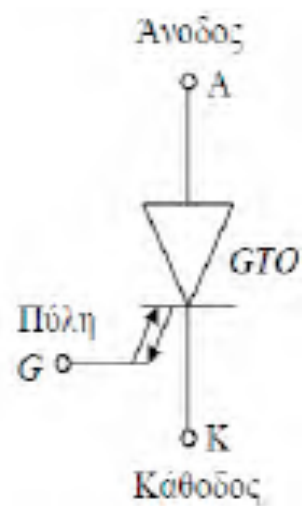


Σχήμα 2.17 - Θυρίστορ ελεγχόμενης σβέσης (GTO) “reverse blocking type”



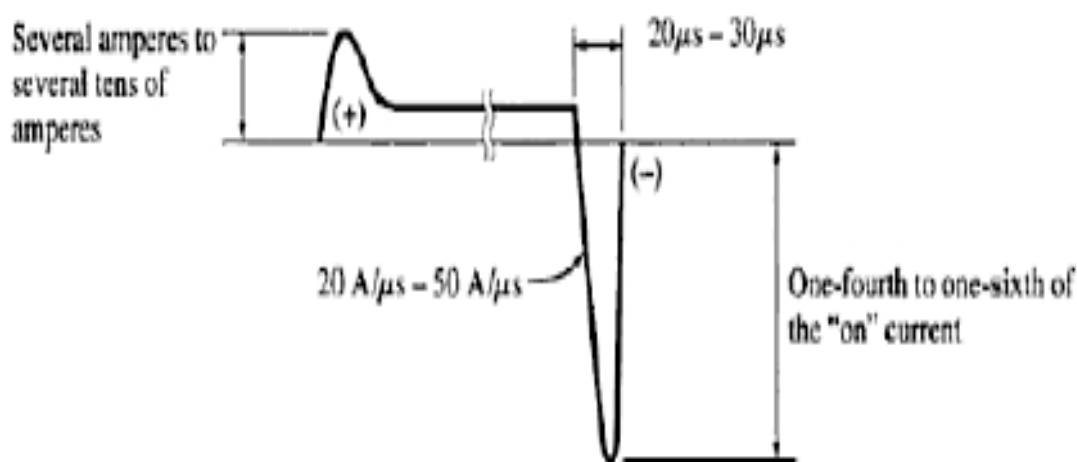
**Σχήμα 2.18** - Θυρίστορ ελεγχόμενης σβέσης (GTO) “anode short type”

Το κυκλωματικό σύμβολο του GTO το βλέπουμε στο σχήμα 2.19



**Σχήμα 2.19** - Κυκλωματικό σύμβολο GTO

Για την έναυση του, απαιτείται ένα μικρό ρεύμα όπως και στην περίπτωση του κλασικού τύπου θυρίστορ. Δηλαδή, το ρεύμα της πύλης κατά την έναυση είναι ανεξάρτητο του ρεύματος που θα διέλθει από το GTO μετά την έναυσή του. Τα πράγματα είναι τελείως διαφορετικά για τις συνθήκες σβέσης, καθότι το μέγεθος του απαιτούμενου ρεύματος πύλης για τη σβέση, εξαρτάται άμεσα από το μέγεθος του διερχόμενου ρεύματος από το GTO τη χρονική στιγμή της σβέσης. Για την σβεση απαιτείται αρνητικός παλμος 20-30μs με τιμή 1/4 με 1/6 του ρευματος, στο σχημα 2.20 παρατηρούμε την μεταβολή του ρευματος για ένα εξαρτητα GTO.



**Σχήμα 2.20** - Μεταβολή ρεύματος σε GTO

Για το απαιτούμενο ρεύμα στην πύλη για τη σβέση, ισχύει η σχέση

$$I_G = I / \beta_{\text{off}}$$

Όπου

$I$ , το διερχόμενο ρεύμα από το GTO

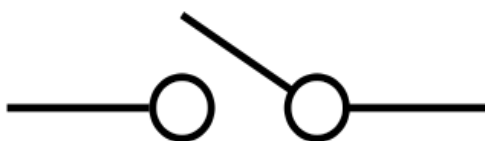
$\beta_{\text{off}}$ , το κέρδος ρεύματος κατά τη σβέση ( turn off current gain )

Τα θυρίστορ ελεγχόμενης σβέσης, βρίσκουν μεγάλες εφαρμογές στους μετατροπείς Σ.Ρ./Σ.Ρ.

## 2.8 Ελεγχόμενα Διακοπτικά Στοιχεία (BJT , MOSFET)

### 2.8.1 Εισαγωγή

Πολλοί από τους ημιαγωγούς ισχύος, όπως είναι το Διπολικό Τρανζίστορ Επαφής (Bipolar Junction Transistor - BJT) και το Τρανζίστορ Επίδρασης Πεδίου Μεταλλικών Οξειδίων Ημιαγωγών (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor - MOSFET), έχουν τη δυνατότητα να κλείνουν και να ανοίγουν υπό την επίδραση σημάτων ελέγχου, τα οποία εφαρμόζονται στον ακροδέκτη ελέγχου του εκάστοτε στοιχείου. Αυτά τα στοιχεία είναι οι λεγόμενοι ελεγχόμενοι διακόπτες. Το σύμβολο με το οποίο αναπαρίσταται ένας διακόπτης παρουσιάζεται στο σχήμα 2.21. Όταν ο διακόπτης είναι ανοιχτός δεν περνάει ρεύμα, σε αντίθεση με την περίπτωση που είναι κλειστός οπότε περνάει.



Σχήμα 2.21 - Σύμβολο αναπαράστασης διακόπτη

Ένας ιδανικός ελεγχόμενος διακόπτης παρουσιάζει τα παρακάτω χαρακτηριστικά:

- Προκειμένου να διεγερθεί αρκεί να δεχθεί ένα πολύ μικρό (ελάχιστο) ποσό ισχύος από την πηγή ελέγχου.
- Όταν είναι κλειστός υπάρχει διαρροή ρεύματος με ιδιαίτερα υψηλή ένταση και παρουσιάζει μηδενική πτώση τάσης στα άκρα του.
- Σε περίπτωση που δεχθεί κάποιο σήμα διέγερσης τότε μεταπίπτει σε αμελητέο χρόνο από την κατάσταση αγωγιμότητας στην κατάσταση αποκοπής και το αντίστροφο.

- Σε περίπτωση που είναι ανοιχτός τότε δε διαρρέεται από ρεύμα και μπορεί να αποκόψει ιδιαίτερα μεγάλες τιμές ορθών και ανάστροφων τάσεων.

Βέβαια ένας πραγματικός ημιαγωγός ισχύος δεν παρουσιάζει τα παραπάνω χαρακτηριστικά. Συνεπώς όταν χρησιμοποιείται σε διάφορα κυκλώματα θα καταναλώνει ισχύ. Είναι επίσης πιθανό να υπάρξει και υπερκατανάλωση ισχύος με αποτέλεσμα όχι μόνο την καταστροφή του ίδιου του ημιαγωγικού διακόπτη, αλλά και άλλων εξαρτημάτων του κυκλώματος. Επειδή λοιπόν δεν είναι εφικτό να συναντήσουμε τα ιδανικά χαρακτηριστικά που επιθυμούμε και να προσεγγίσουμε την ιδανική περίπτωση ελεγχόμενου διακόπτη, παρουσιάζουμε μερικά από τα επιθυμητά χαρακτηριστικά που είναι εφικτό να συναντήσουμε σε ένα πραγματικό ελεγχόμενο ημιαγωγικό διακόπτη.

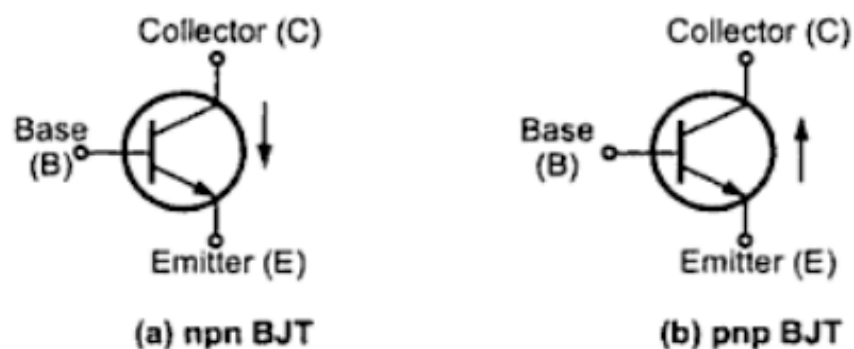
- Υψηλή ονομαστική τιμή τόσο του ρυθμού μεταβολής της τάσης στα άκρα του όσο και του ρυθμού μεταβολής της έντασης του ρεύματος που τον διαρρέει. Αυτό θα έχει ως αποτέλεσμα να μην είναι τόσο απαραίτητη η χρήση εξωτερικών κυκλωμάτων προστασίας, τα οποία σε άλλες περιπτώσεις είχαν ως αποστολή τον περιορισμό των παραπάνω ρυθμών μεταβολής στο ημιαγωγικό στοιχείο ώστε να μην καταστραφεί.
- Όταν ο διακόπτης βρίσκεται σε κατάσταση αποκοπής τότε το ρεύμα διαρροής πρέπει να είναι όσο το δυνατόν πιο μικρό.
- Πρέπει να είναι εφικτό να αντέχει ο διακόπτης τόσο την ονομαστική τάση στα άκρα του όσο και το ονομαστικό ρεύμα διαρροής, ταυτόχρονα κατά τη διαδικασία μετάβασης από την κατάσταση αγωγιμότητας στην κατάσταση αποκοπής και αντίστροφα. Αυτό θα έχει ως αποτέλεσμα να μην είναι απαραίτητη η χρήση εξωτερικών προστατευτικών κυκλωμάτων (snubber) στα άκρα της διάταξης.
- Όταν ο διακόπτης άγει, καλό θα είναι να παρουσιάζει κατά το δυνατόν πολύ μικρή τάση αγωγιμότητας, ώστε οι απώλειες ισχύος να είναι όσο το δυνατόν πιο μικρές.

- Η ισχύς ελέγχου για τη μετάβαση του διακόπτη από την κατάσταση αγωγιμότητας στην κατάσταση αποκοπής και αντίστροφα θα πρέπει να είναι όσο το δυνατόν μικρότερη ώστε γίνεται όσο το δυνατόν πιο απλός και ο τρόπος σχεδίασης του κυκλώματος ελέγχου.
- Όσο πιο μικρός είναι ο χρόνος έναυσης και ο χρόνος σβέσης τόσο σε πιο υψηλές συχνότητες μετάβασης θα είναι εφικτό να χρησιμοποιηθεί η διάταξη.
- Η αντίσταση αγωγιμότητας του διακόπτη πρέπει να παρουσιάζει θετικό θερμοκρασιακό συντελεστή. Εφόσον συμβαίνει αυτό το ρεύμα θα διαμοιράζεται εξίσου σε όλα τα παράλληλα συνδεδεμένα στοιχεία.
- Το ρεύμα αγωγιμότητας καλό θα είναι να έχει όσο το δυνατόν μεγαλύτερη ονομαστική τιμή έντασης. Αυτό βοηθάει σε περίπτωση που θέλουμε να τρέξουμε εφαρμογές με πολύ υψηλές τιμές έντασης ρεύματος διότι οι ανάγκες για παράλληλη σύνδεση ημιαγωγών στοιχείων θα είναι πολύ πιο μικρές με αποτέλεσμα να παύει να υφίσταται το πρόβλημα του τρόπου κατανομής του ρεύματος.
- Η τιμή τόσο της ορθής όσο και της ανάστροφης τάσης αποκοπής πρέπει να είναι όσο το δυνατόν πιο μεγάλη. Αυτό θα βοηθήσει διότι θα χρειάζεται να συνδέσουμε λιγότερα ημιαγωγικά στοιχεία σε σειρά οπότε θα απλουστεύεται ο σχεδιασμός και η υλοποίηση των κυκλωμάτων ελέγχου και των κυκλωμάτων προστασίας. Επειδή τα περισσότερα ημιαγωγικά στοιχεία παρουσιάζουν μία ελάχιστη τιμή τάσης αγωγιμότητας η οποία δεν εξαρτάται από την τιμή της τάσης αποκοπής, αν τα συνδέσουμε σε σειρά θα προκληθεί αύξηση της συνολικής τιμής της τάσης αγωγιμότητας με αποτέλεσμα να αυξηθούν και οι αντίστοιχες απώλειες αγωγιμότητας.



## 2.8.2 Διπολικό Τρανζίστορ Επαφής (BJT)

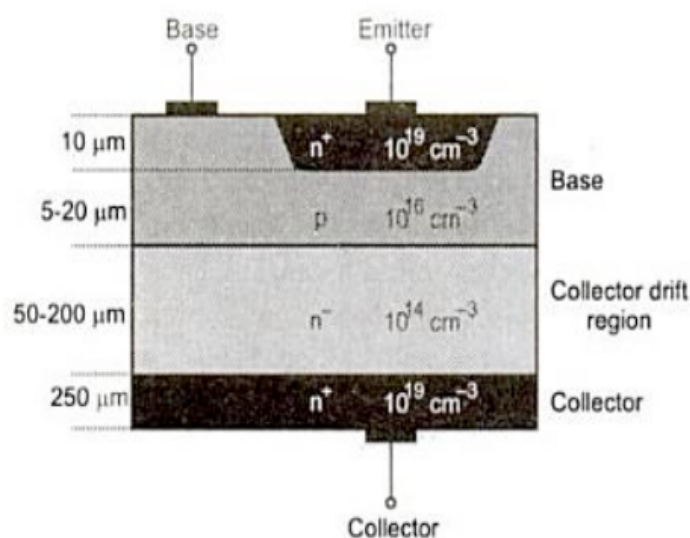
Ο τρόπος με τον οποίο συμβολίζουμε ένα Διπολικό Τρανζίστορ Επαφής (Bipolar Junction Transistor - BJT) παρουσιάζεται στο σχήμα 2.22. Στο αριστερό μέρος της εικόνας απεικονίζεται ένα BJT τύπου npn, ενώ στο δεξιό μέρος της εικόνας απεικονίζεται ένα BJT τύπου pnp.



Σχήμα 2.22 - Συμβολισμός ενός BJT

Το BJT ονομάζεται και τρανζίστορ ισχύος γενικότερα και είναι στοιχείο τριών ακροδεκτών. Ο πρώτος ακροδέκτης είναι ο συλλέκτης (Collector - C), ο δεύτερος ακροδέκτης είναι η βάση (Base - B) και ο τρίτος ακροδέκτης είναι ο εκπομπός (Emitter - E). Σε ένα BJT τύπου npn όταν η επαφή Βάσης - Εκπομπού είναι ορθά πολωμένη, το τρανζίστορ άγει με αποτέλεσμα να έχουμε ροή ρεύματος από το Συλλέκτη προς τον Εκπομπό. Σε αυτή την περίπτωση λέμε ότι το τρανζίστορ είναι στον κόρο και η πτώση τάσης μεταξύ Συλλέκτη και Εκπομπού γίνεται αμελητέα. Το BJT παύει να άγει μόλις η επαφή Βάσης - Εκπομπού πολωθεί ανάστροφα. Σε περίπτωση που έχουμε να κάνουμε με BJT τύπου pnp τότε όταν η επαφή Βάσης - Εκπομπού είναι ορθά πολωμένη το τρανζίστορ άγει με αποτέλεσμα να έχουμε ροή ρεύματος από τον Εκπομπό προς το Συλλέκτη. Και σε αυτή την περίπτωση το τρανζίστορ σταματάει να άγει όταν η επαφή Βάσης - Εκπομπού πολωθεί ανάστροφα. Έτσι γίνεται αντιληπτό ότι το ρεύμα βάσης έχει τον πλήρη έλεγχο για το πότε το BJT βρίσκεται σε κατάσταση αγωγιμότητας και πότε όχι. Η τάση αγωγιμότητας ενός τρανζίστορ ισχύος κυμαίνεται από 1 έως 2 Volts. Το συνεχές (DC) κέρδος ενός τρανζίστορ ισχύος κυμαίνεται από 5 έως 10. Ένα BJT ισχύος διατίθεται στο εμπόριο με προδιαγραφές τάσης γύρω στα 1400 Volts και προδιαγραφές ρεύματος της τάξεως

μερικών εκατοντάδων Amperes. Τα σύγχρονα BJT ισχύος είναι εφικτό να συμμετέχουν και σε παράλληλες συνδέσεις αρκεί κατά τη διαδικασία της σχεδίασης τους να έχει ληφθεί υπόψη αυτή η προοπτική σε συνδυασμό με την πρόληψη για διάθεση ενός μικρού επιπλέον περιθωρίου στην τιμή της έντασης του ρεύματος. Η δομή ενός BJT ισχύος είναι διαφορετική σε σύγκριση με τη δομή των τρανζίστορ μικρού σήματος. Στο σχήμα 2.23 που ακολουθεί απεικονίζεται η δομή της κατακόρυφης διατομής ενός BJT τύπου npn. Η κατακόρυφη δομή μπορεί να μεγιστοποιήσει το εύρος της διατομής μέσω της οποίας έχουμε ροή ρεύματος στη συσκευή. Όταν το τρανζίστορ βρίσκεται σε κατάσταση αγωγιμότητας, τότε έχουμε μείωση της αντίστασης και της ισχύος που τραβάει η συσκευή.

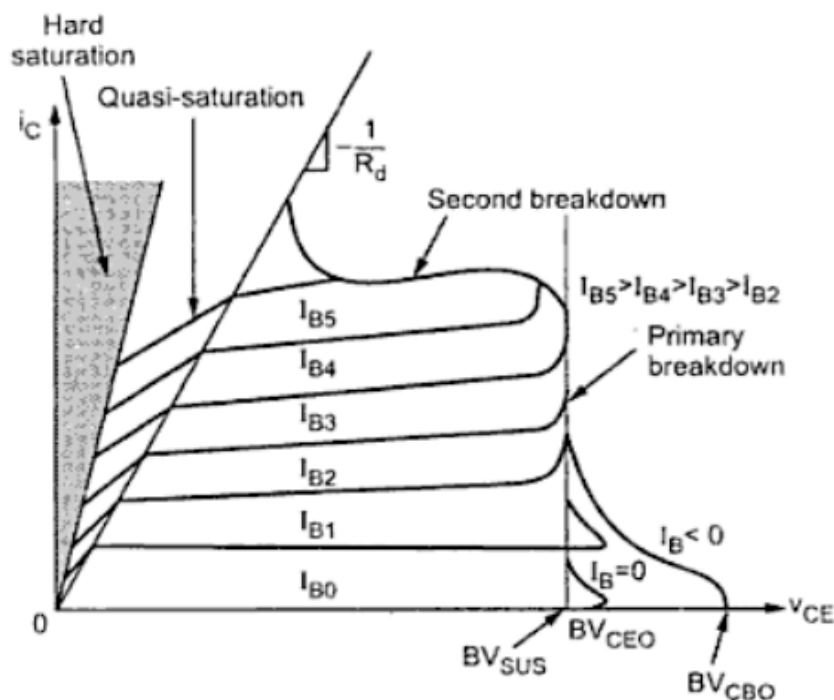


**Σχήμα 2.21** - Δομή κατακόρυφης διατομής ενός BJT τύπου npn

Στην παραπάνω δομή παρατηρούμε ότι υπάρχει μία ισχυρά ντοπαρισμένη περιοχή Εκπομπού, η οποία έχει πάχος γύρω στα 10 μm. Η Βάση είναι μέτρια ντοπαρισμένη και έχει πάχος το οποίο ποικίλλει από 5 έως 20 μm. Το μικρό πάχος της Βάσης παρέχει ποικιλία δυνατοτήτων και επιλογών κατά την πραγματοποίηση εφαρμογών. Όμως για μικρό πάχος Βάσης έχουμε και μείωση του δυναμικού κατάρρευσης του τρανζίστορ. Όπως βλέπουμε στην εικόνα, ο συλλέκτης χωρίζεται σε δύο περιοχές. Αυτές οι δύο περιοχές είναι η  $n^-$  και η  $n^+$ . Στη  $n^-$  το ποσοστό ντοπαρίσματος είναι χαμηλό και καλείται περιοχή drift του συλλέκτη. Το πάχος της περιοχής  $n^-$  καθορίζει και το δυναμικό κατάρρευσης του τρανζίστορ. Η περιοχή  $n^+$  είναι ιδιαίτερα ισχυρά

ντοπαρισμένη. Το ποσοστό ντοπαρίσματος της είναι ανάλογο με αυτό της περιοχής του Εκπομπού. Στο σχήμα 2.24 παρουσιάζεται η χαρακτηριστική τάσης - ρεύματος ενός BJT ισχύος. Σε αυτή την εικόνα βλέπουμε τη διακύμανση του ρεύματος Συλλέκτη  $i_c$  (για διάφορες τιμές τάσης Συλλέκτη - Εκπομπού) ως προς το ρεύμα της Βάσης  $i_B$ . Όπως διαπιστώνουμε στην εικόνα αυτή, υπάρχουν τέσσερις διαφορετικές καταστάσεις λειτουργίας του BJT.

1. **Κατάσταση αποκοπής.** Σε αυτή την κατάσταση λειτουργίας το ρεύμα που διαρρέει τη Βάση είναι σχεδόν μηδέν. Έτσι δεν υπάρχει ροή ρεύματος στην περιοχή του Συλλέκτη, οπότε το τρανζίστορ δε λειτουργεί.
2. **Κατάσταση ψευδοκόρου (Quasi Saturation).** Κατά την κατάσταση ψευδοκόρου αλλά και κατά την κατάσταση κόρου υπάρχει ροή ρεύματος στη Βάση και το τρανζίστορ βρίσκεται σε κατάσταση αγωγιμότητας. Οπότε η ροή του ρεύματος στο Συλλέκτη εξαρτάται από το φορτίο. Ένα BJT ισχύος δε λειτουργεί ποτέ στην ενεργό περιοχή, για παράδειγμα σαν ενισχυτής.



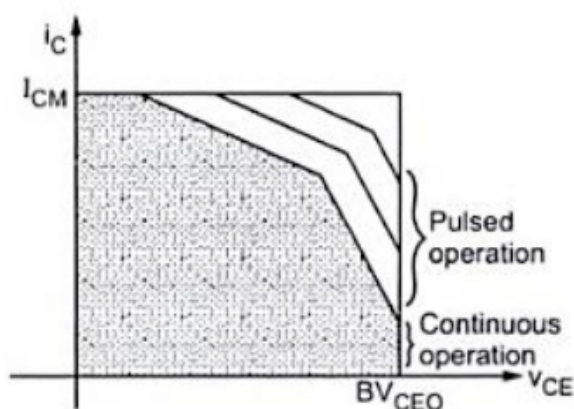
**Σχήμα 2.24** - Χαρακτηριστική Τάσης - Ρεύματος ενός BJT ισχύος τύπου npn και περιοχές λειτουργίας αυτού.

Λειτουργεί στην κατάσταση αποκοπής και στην κατάσταση κόρου. Για αυτό ακριβώς το λόγο λέμε ότι ένα BJT ισχύος δρα ως διακόπτης. Η τιμή τάσης  $BV_{SUS}$  που βλέπουμε στην παραπάνω εικόνα είναι η μέγιστη τιμή τάσης μεταξύ Συλλέκτη και Εκπομπού, που μπορεί να παρατηρηθεί όταν το BJT φέρει υπολογίσιμη τιμή ρεύματος Συλλέκτη. Η τιμή τάσης  $BV_{CEO}$  είναι η μέγιστη τιμή του δυναμικού κατάρρευσης, που μπορεί να παρατηρηθεί μεταξύ Συλλέκτη και Εκπομπού όταν η Βάση δε διαρρέεται από ρεύμα. Η τιμή τάσης  $BV_{CBO}$  είναι η τιμή του δυναμικού κατάρρευσης μεταξύ Συλλέκτη και Βάσης όταν ο Εκπομπός λειτουργεί σαν ανοιχτό κύκλωμα.

3. **Κατάσταση πρωτογενούς κατάρρευσης (Primary Breakdown).** Η περιοχή πρωτογενούς κατάρρευσης σε ένα BJT ισχύος παρατηρείται εξαιτίας της κατάρρευσης χιονοστιβάδας της επαφής μεταξύ Συλλέκτη και Βάσης. Τα μεγάλα ποσά ισχύος που χάνονται οδηγούν στην κατάσταση πρωτογενούς κατάρρευσης.
4. **Κατάσταση δευτερογενούς κατάρρευσης.** Από την Εικόνα 9 παρατηρούμε ότι για μεγάλες τιμές ρεύματος στο Συλλέκτη, η τιμή της τάσης στην επαφή μεταξύ Συλλέκτη και Εκπομπού ελαττώνεται. Εξαιτίας αυτής της πτώσης τάσης το ρεύμα του Συλλέκτη αρχίζει να αυξάνεται. Έτσι υπάρχει ουσιαστική αύξηση της ισχύος που τραβάει η συσκευή. Αυτή η διάχυση ισχύος δεν κατανέμεται ομοιόμορφα σε όλο το εύρος της συσκευής. Το μεγαλύτερο ποσοστό συγκεντρώνεται σε περιοχές όπου η θερμοκρασία παρουσιάζει ραγδαία αύξηση και το τρανζίστορ κινδυνεύει να καταστραφεί.

Προκειμένου να αποφευχθεί η καταστροφή ενός BJT ισχύος υπάρχει μία περιοχή στην οποία μπορεί να λειτουργεί και να μην κινδυνεύει να καταστραφεί. Αυτή η περιοχή ονομάζεται **Περιοχή Ασφαλούς Λειτουργίας (Safe Operating Area - SOA)** και ορίζεται από ένα συνδυασμό τιμών ρεύματος (στο Συλλέκτη) και τάσεων (στην επαφή Συλλέκτη - Εκπομπού), όπου το BJT μπορεί να λειτουργεί χωρίς να υπάρχει κίνδυνος να καταστραφεί. Σε περίπτωση που το BJT ισχύος είναι ορθά πολωμένο τότε η περιοχή στην οποία μπορεί να λειτουργήσει χωρίς φθορές ονομάζεται **Περιοχή Ασφαλούς Λειτουργίας Ορθής Πόλωσης (Forward Biased Safe Operating Area - FBSOA)**. Τα χαρακτηριστικά ρεύματος Συλλέκτη και τάσης

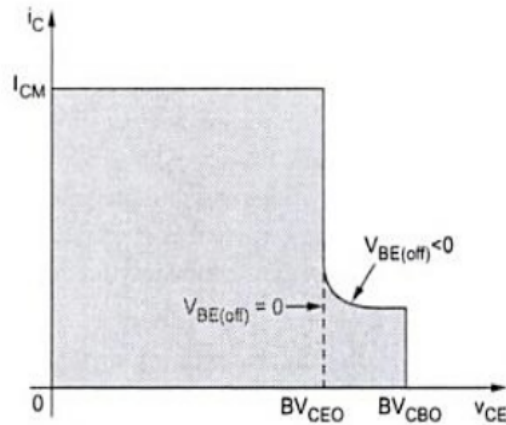
μεταξύ Συλλέκτη και Εκπομπού που συνθέτουν αυτή την περιοχή παρουσιάζονται παρακάτω στο σχήμα 2.25. Η γραμμοσκιασμένη περιοχή είναι η περιοχή SOA για συνεχόμενη ή για συνεχή (DC) λειτουργία. Η θερμοκρασία της επαφής μεγιστοποιείται κατά μήκος των ορίων της περιοχής SOA. Το εύρος της περιοχής SOA αυξάνεται αισθητά στην περίπτωση που έχουμε παλμική λειτουργία. Από τη στιγμή που τα BJT χρησιμοποιούνται κανονικά σε παλμική λειτουργία δηλαδή στις υψηλές συχνότητες, καταλαβαίνουμε ότι τότε η ενεργός περιοχή SOA θα είναι μεγαλύτερη.



**Σχήμα 2.25** - Περιοχή Ασφαλούς Λειτουργίας Ορθής Πόλωσης (Forward Biased Safe Operating Area - FBSOA) ενός BJT

Η τιμή του ρεύματος  $i_{CM}$  είναι η μέγιστη τιμή ρεύματος Συλλέκτη ακόμα και στην περίπτωση παλμικής λειτουργίας. Η τιμή τάσης  $BV_{CEO}$  είναι η μέγιστη τιμή τάσης στην επαφή μεταξύ Συλλέκτη και Εκπομπού όταν η Βάση δε διαρρέεται από ρεύμα. Η περιοχή SOA πρέπει να παρέχεται από τους κατασκευαστές του BJT στο φυλλάδιο με τα χαρακτηριστικά της συσκευής.

Σε περίπτωση που το BJT ισχύος είναι ανάστροφα πολωμένο τότε η περιοχή στην οποία μπορεί να λειτουργήσει χωρίς φθορές ονομάζεται **Περιοχή Ασφαλούς Λειτουργίας Ανάστροφης Πόλωσης (Reversed Biased Safe Operating Area - RBSOA)**. Η περιοχή ασφαλούς λειτουργίας RBSOA κατά την ανάστροφη πόλωση του τρανζίστορ παρουσιάζει μεγαλύτερο εύρος από την αντίστοιχη περιοχή FBSOA κατά την ορθή πόλωση του τρανζίστορ εξαιτίας της τιμής της τάσης  $BV_{CBO}$  μεταξύ των επαφών Συλλέκτη και Βάσης για μικρές τιμές ρεύματος στο Συλλέκτη. Στο σχήμα 2.26 που ακολουθεί παρουσιάζουμε την περιοχή ασφαλούς λειτουργίας RBSOA ενός BJT ισχύος.

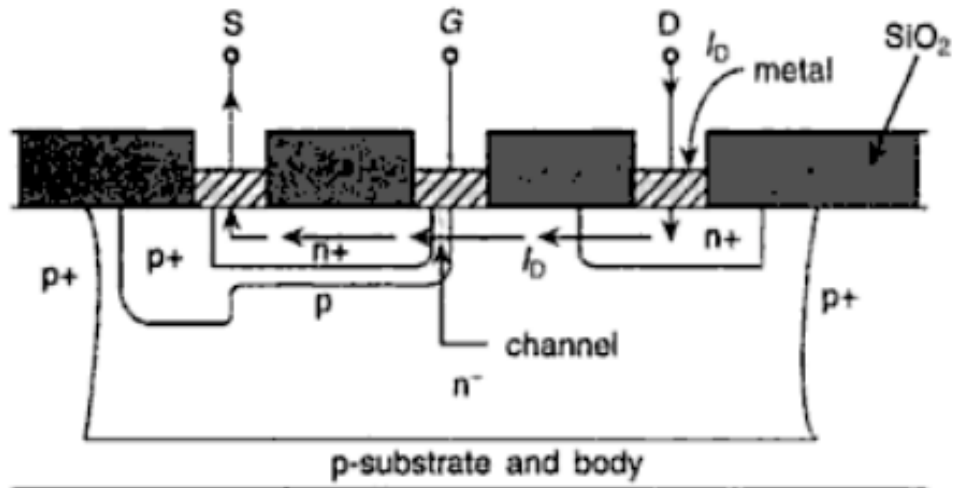


**Σχήμα 2.26** - Περιοχή Ασφαλούς Λειτουργίας Ανάστροφης Πόλωσης (Reversed Biased Safe Operating Area – RBSOA) ενός BJT

### 2.8.3 Τρανζίστορ επίδρασης πεδίου – MOSFET

Σε σύγκριση με τα BJT τα οποία είναι συσκευές ελεγχόμενες από ρεύμα, τα Τρανζίστορ Επίδρασης Πεδίου Μεταλλικών Οξειδίων Ημιαγωγών (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor - MOSFET) είναι συσκευές ελεγχόμενες από τάση. Τα MOSFET ισχύος διαφέρουν από τα BJT ισχύος στην αρχή λειτουργίας, στα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά και στην απόδοση. Στην πραγματικότητα τα χαρακτηριστικά απόδοσης των MOSFET είναι ανώτερα από τα αντίστοιχα χαρακτηριστικά των BJT. Αυτό ισχύει διότι τα MOSFET χαρακτηρίζονται από πολύ μικρότερους χρόνους μεταγωγής, απαιτούν απλούστερα κυκλωματικά μοντέλα τροφοδοσίας, έχουν δυνατότητα παράλληλης σύνδεσης, παρουσιάζουν σταθερή απολαβή και δίνουν ικανοποιητική απόκριση για μία μεγάλη ποικιλία θερμοκρασιών. Ένα MOSFET ισχύος έχει τρεις ακροδέκτες. Ο πρώτος είναι η πηγή (Source - S), ο δεύτερος είναι η πύλη (Gate - G) και ο τρίτος είναι ο απαγωγός ή καταβόθρα (Drain - D). Μάλιστα από το δυναμικό μεταξύ της πύλης και της πηγής ελέγχεται αν η συσκευή άγει ή όχι. Το MOSFET ισχύος αποτελεί εξέλιξη του MOSFET μικρού σήματος που χρησιμοποιείται σε κυκλώματα χαμηλής ισχύος. Το συμβατικό MOSFET μικρού σήματος χαρακτηριζόταν από μικρές τιμές ρεύματος, μικρή ανάστροφη αντίσταση και μεγαλύτερες απώλειες στην κατάσταση αγωγιμότητας. Αντίστοιχα το MOSFET ισχύος διαθέτει μία πλευρική δομή διπλής διάχυσης (Double

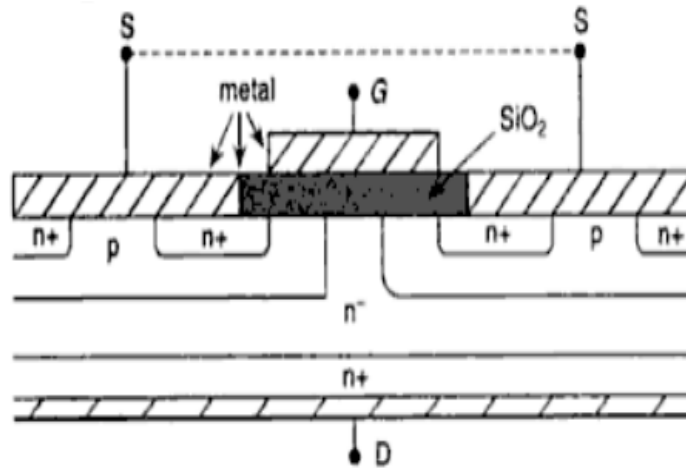
Diffused structure), για αυτό το λόγο ονομάζεται και DMOS , η οποία χρησιμεύει για υψηλές τάσεις και ρεύματα. Αυτή η δομή προσφέρει ένα κανάλι μικρό σε μήκος και υψηλής πυκνότητας , χαμηλή αντίσταση και χαμηλές απώλειες ισχύος στην κατάσταση αγωγιμότητας . Η δομή του DMOS απεικονίζεται στο σχήμα 2.27



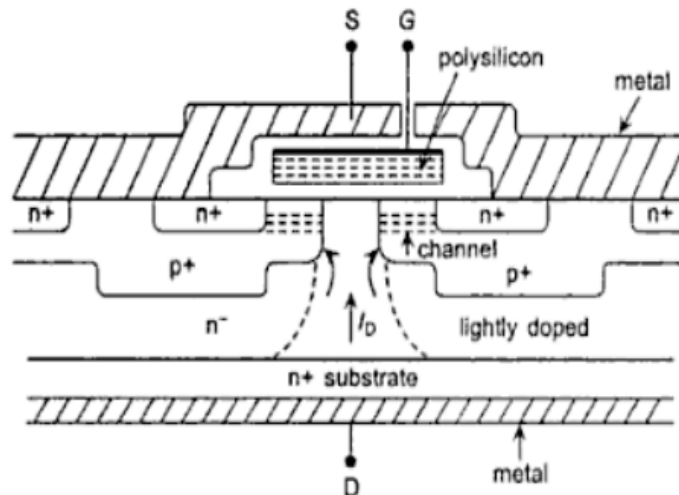
**Σχήμα 2.27** MOSFET ισχύος με πλευρική δομή διπλής διάχυσης

Κατά την περαιτέρω εξέλιξη της δομής του DMOS εγκρίθηκε η κατακόρυφη δομή . Σε αυτή τη δομή ο ακροδέκτης του απαγωγού βρίσκεται τοποθετημένος στο κάτω μέρος της πλάκας ώστε να αυξηθεί περισσότερο η πυκνότητα του καναλιού . Αρχικά η κατακόρυφη δομή χρησιμοποιήθηκε για τη βελτίωση της επαφής του τερματικού πύλης, όμως στη συνέχεια χρησιμοποιήθηκε ευρύτερα . Αυτή η δομή μεγιστοποιεί την περιοχή διέλευσης τόσο του ρεύματος της πηγής όσο και του ρεύματος του απαγωγού . Η κατακόρυφη δομή DMOS παρουσιάζεται στο σχήμα 2.28

Το υλικό της πύλης (πολυσιλικόνη) βρίσκεται ανάμεσα σε δύο στρώματα Διοξειδίου του Πυριτίου ( $\text{SiO}_2$ ), με το μέταλλο της πηγής να καλύπτει ολόκληρη την ενεργό περιοχή . Έτσι μειώνεται και η αντίσταση στην κατάσταση αγωγιμότητας άρα και οι απώλειες στην κατάσταση αγωγιμότητας . Πρακτικά όλα τα MOSFET ισχύος κατασκευάζονται με τη δομή που απεικονίζεται στην σχήμα 2.29



**Σχημα 2.29** - Κατακόρυφη δομή MOSFET ισχύος με πλευρική δομή διπλής διάχυσης



**Σχίμα 2.30** - Δομή ενός μέσου MOSFET ισχύος

Βέβαια πραγματοποιούνται και πολλές τροποποιήσεις ανάλογα με τον τρόπο χρήσης της συσκευής, ώστε να βελτιωθούν τόσο η απόδοση της όσο και τα λειτουργικά της χαρακτηριστικά .

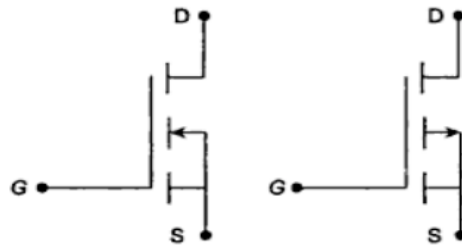
Το κυκλωματικό σύμβολο ενός MOSFET n-καναλιού και ενός MOSFET p-καναλιού παρουσιάζεται στο σχήμα 2.31 που ακολουθεί .

Η χαρακτηριστική τάσης-ρεύματος ενός MOSFET παρουσιάζεται στο σχήμα 2.32

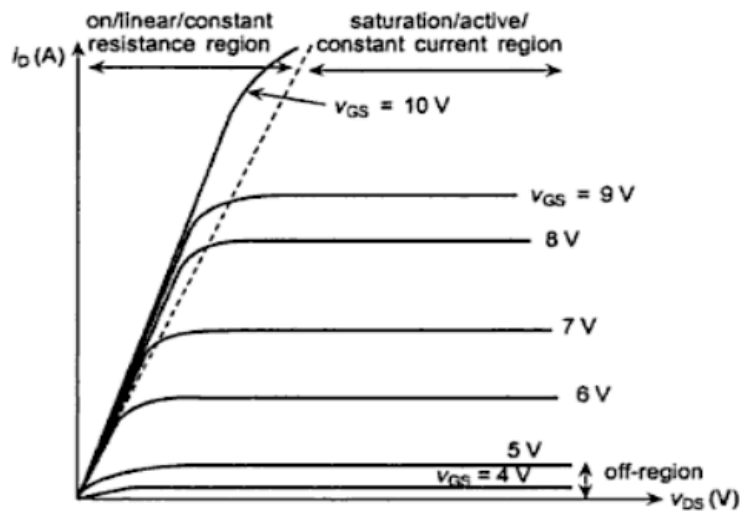
Το MOSFET βρίσκεται σε κατάσταση αγωγιμότητας λειτουργώντας προσεγγιστικά σαν ένας ιδανικός διακόπτης , όταν το δυναμικό μεταξύ πύλης και πηγής παίρνει αρκετά υψηλές τιμές. Αντίστοιχα, θα βρίσκεται σε κατάσταση αποκοπής όταν το



δυναμικό μεταξύ πύλης και πηγής είναι χαμηλότερο από μία ορισμένη τιμή η οποία ονομάζεται δυναμικό κατωφλίου . Ο χρόνος για τη μετάβαση από τη μία κατάσταση στην άλλη είναι ιδιαίτερα μικρός , της τάξεως του nsec. Τα MOSFET διατίθενται στο εμπόριο είτε με ονομαστική τάση μεγαλύτερη από 1000 Volts και πολύ μικρό ονομαστικό ρεύμα είτε με ονομαστικό ρεύμα γύρω στα 100 Amperes και μικρή ονομαστική τάση . Η μέγιστη διαφορά δυναμικού μεταξύ πύλης και πηγής είναι γύρω στα 20 Volts.



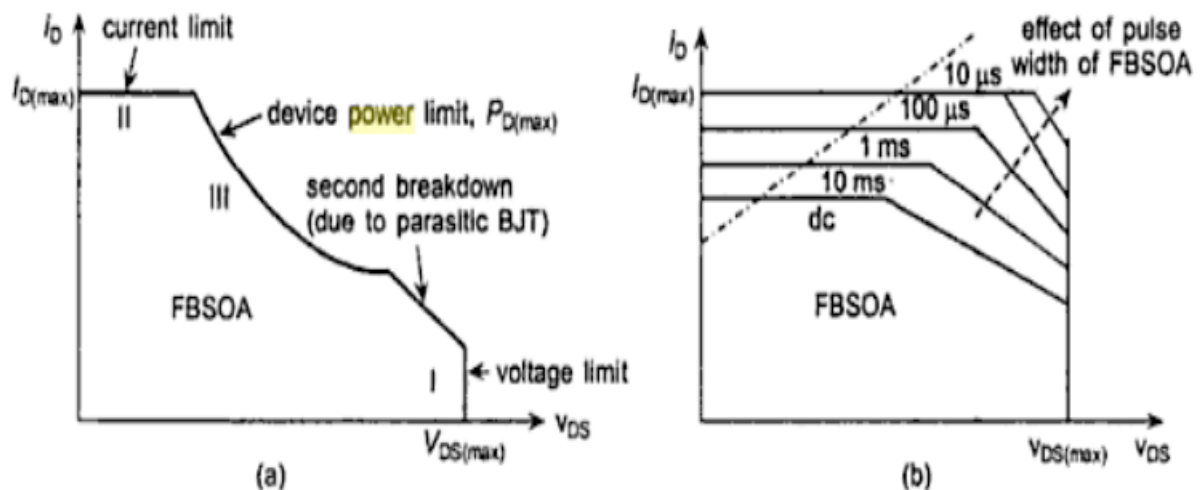
**Σχήμα 2.31** - Κυκλωματικό σύμβολο ενός MOSFET n-καναλιού (αριστερά) και ενός MOSFET p-καναλιού (δεξιά)



**Σχήμα 2.32** - Χαρακτηριστικά τάσης-ρεύματος ενός MOSFET

Προκειμένου να αποφύγουμε την πιθανή καταστροφή του MOSFET ισχύος υπάρχει μία περιοχή στην οποία μπορεί να λειτουργεί και να μην κινδυνεύει να καταστραφεί . Αυτή η περιοχή ονομάζεται **Περιοχή Ασφαλούς Λειτουργίας (Safe Operating Area - SOA)** και ορίζεται από ένα συνδυασμό τιμών ρεύματος και τάσης. Για ένα

MOSFET ισχύος υπάρχουν δύο διαφορετικές περιοχές ασφαλούς λειτουργίας . Η Περιοχή Ασφαλούς Λειτουργίας Ορθής Πόλωσης (Forward Biased Safe Operating Area - FBSOA) και η **Περιοχή Ασφαλούς Λειτουργίας κατά τη Μεταγωγή (Switching Safe Operating Area - SSOA)** . Οι καμπύλες της περιοχής SSOA θέτουν τους περιορισμούς της τάσης και του ρεύματος στην κατάσταση αποκοπής και μοιάζουν με τις αντίστοιχες καμπύλες της περιοχής RBSOA ενός BJT ισχύος . Η καμπύλη της περιοχής FBSOA ορίζει τους περιορισμούς στις τιμές της τάσης και του ρεύματος καθώς και το ποσό της ισχύος που μπορεί η συσκευή να διαχειριστεί (Σχήμα 2.33(a)) . Η πιο σημαντική οριακή τιμή για ένα MOSFET ισχύος είναι η μέγιστη τιμή του δυναμικού μεταξύ πηγής και απαγωγού . Αν σε μία συσκευή εφαρμοστεί υψηλότερη τιμή δυναμικού από αυτή τη μέγιστη τιμή, τότε θα καταστραφεί. Ακόμα και μια υψηλότερη τιμή δυναμικού με πολύ μικρή διάρκεια μπορεί να αποβεί καταστροφική για τη συσκευή . Για αυτό το λόγο κυκλώματα εξωτερικής προστασίας (snubber) είναι απαραίτητα για ένα MOSFET. Επίσης το ρεύμα  $I_D$  της συσκευής δεν πρέπει να υπερβαίνει την οριακή τιμή  $I_{Dmax}$  ούτε στιγμιαία, αλλιώς το εισερχόμενο ρεύμα στον κινητήρα ή στον μετατροπέα θα μπορεί να προκαλέσει καταστροφή της συσκευής . Η καμπύλη της περιοχής FBSOA μεταβάλλεται γρηγορότερα για ένα συνεχές (DC) ρεύμα και για ένα ρεύμα παλμών (Σχήμα 2.33(b)) . Αντίστοιχα στις χαμηλές τιμές του δυναμικού μεταξύ πηγής και απαγωγού το επιτρεπόμενο όριο του ρεύματος  $i_D$  ελαττώνεται .



Σχήμα 2.33 - Περιοχές ασφαλούς λειτουργίας ενός MOSFET ισχύος

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 - Είδη μετατροπέων

### 3.1 Εισαγωγή

Τα περισσότερα ηλεκτρικά φορτία διακρίνονται από το χαρακτηριστικό της απαίτησης για τροφοδοσία με διαφορετικές τάσεις σε σχέση με αυτές που δίνουν τα δίκτυα των ηλεκτρικών παρόχων. Για να καλυφθούν αυτές οι ανάγκες σε τροφοδοσία συνήθως χρησιμοποιούνται κατάλληλοι μετατροπείς ώστε να μετατρέπεται η παρεχόμενη τάση στην επιθυμητή μορφή με όσο το δυνατόν λιγότερες απώλειες και χαμηλότερο κόστος. Επειδή στις μέρες μας η απαίτηση για ελαχιστοποίηση των απωλειών γίνεται ολοένα και εντονότερη είναι επιβεβλημένο οι μετατροπείς ισχύος να λειτουργούν και ως διακόπτες. Για αυτό το λόγο τα ημιαγωγικά εξαρτήματα ενός μετατροπέα θα λειτουργούν είτε σε κατάσταση πλήρους αγωγιμότητας είτε σε κατάσταση πλήρους αποκοπής. Έτσι θα αυξάνεται συνεχώς η απόδοση του μετατροπέα χωρίς να αναπτύσσονται μεγάλα ποσά θερμότητας στα ημιαγωγικά του στοιχεία. Στόχος είναι η ισχύς που διακινείται στη διάταξη του μετατροπέα να είναι αποδεκτή τόσο από την πηγή όσο και από το φορτίο χωρίς να προκαλείται φθορά στα ημιαγωγικά στοιχεία.

Συνήθως η διάκριση των μετατροπέων ισχύος γίνεται ανάλογα με τον τύπο της μετατροπής που πραγματοποιούν, τον τρόπο με τον οποίο πραγματοποιείται η μεταγωγή των ημιαγωγικών διακοπών και τη δυνατότητα μεταφοράς ισχύος από την πηγή στο φορτίο και αντίστροφα. Οι πρώτοι μετατροπείς ισχύος που κυκλοφόρησαν στο εμπόριο ήταν στρεφόμενοι ηλεκτρομηχανικοί μετατροπείς, οι οποίοι ήταν και συνεχούς (DC) και εναλλασσόμενου (AC) ρεύματος οι οποίοι ήταν συζευγμένοι μηχανικά μεταξύ τους. Στις μέρες μας δε χρησιμοποιούνται τέτοιοι μετατροπείς, αλλά σύγχρονοι στατικοί μετατροπείς ισχύος. Οι μετατροπείς ισχύος διακρίνονται ανάλογα με το είδος της μετατροπής που πραγματοποιούν:

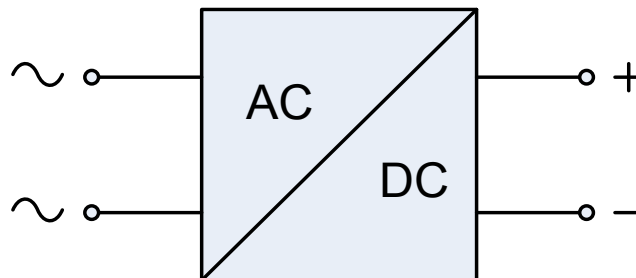
- **Μετατροπείς AC/DC.** Ονομάζονται και Ανορθωτές (Rectifiers) και μετατρέπουν την εναλλασσόμενη (AC) τάση και συνεχή (DC) τάση.
- **Μετατροπείς DC/AC.** Ονομάζονται και Αντιστροφεείς (Inverters) και μετατρέπουν τη συνεχή (DC) τάση σε εναλλασσόμενη (AC) τάση

σταθερού ή μεταβαλλόμενου πλάτους και σταθερής ή μεταβλητής συχνότητας.

- **Μετατροπείς DC/DC.** Ονομάζονται και κατατιμητές (Choppers) συνεχούς (DC) τάσης και μετατρέπουν μία συνεχή (DC) με ορισμένη τιμή και ορισμένη πολικότητα σε συνεχή (DC) τάση διαφορετικής τιμής και ανάλογα με τις ανάγκες τροφοδοσίας διαφορετικής ή όχι πολικότητας.
- **Μετατροπείς AC/AC.** Ονομάζονται και Κυκλομετατροπείς (Cycloconverters) και μετατρέπουν μια εναλλασσόμενη (AC) τάση ορισμένου πλάτους, ορισμένης συχνότητας και ορισμένου πλήθους φάσεων σε μία αλλά εναλλασσόμενη (AC) τάση διαφορετικής συχνότητας, διαφορετικού πλάτους και διαφορετικού πλήθους φάσεων

### 3.2 Μετατροπείς AC/DC

Ένας μετατροπέας AC/DC ονομάζεται και ανορθωτής (rectifier) και μετατρέπει μία εναλλασσόμενη (AC) τάση σταθερού πλάτους στην είσοδο του σε συνεχή (DC) τάση μεταβλητού πλάτους στην έξοδο του. Στο σχήμα 3.1 βλέπουμε το μπλόκ διάγραμμα ενός AC/DC μετατροπέα



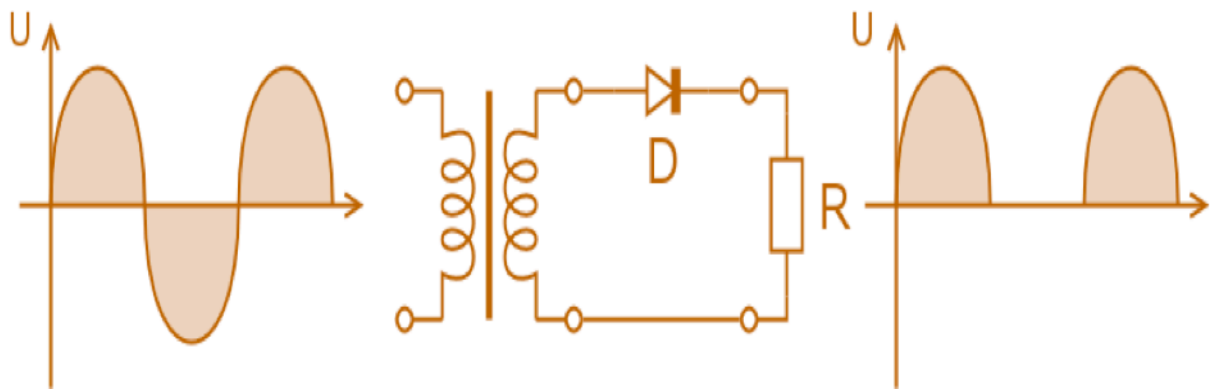
Σχήμα 3.1 - Μπλόκ διάγραμμα AC/DC μετατροπέα

Αυτοί οι μετατροπείς τροφοδοτούνται από μία ή περισσότερες πηγές εναλλασσόμενης (AC) τάσης ή εναλλασσόμενου (AC) ρεύματος μία ή πολλών φάσεων. Η μεταβαλλόμενη έξοδο είναι ένα συνεχές (DC) ρεύμα ή μία συνεχής (DC) τάση χαμηλής κυμάτωσης. Τα κυκλώματα αυτών των μετατροπέων χρησιμοποιούν την τάση γραμμής για να πραγματοποιήσουν τη μετατροπή για αυτό το λόγο ονομάζονται και κυκλώματα μετατροπής γραμμής. Τα κυκλώματα αυτών των μετατροπέων περιλαμβάνουν ανορθωτικές διόδους και μονοφασικά ή τριφασικά ελεγχόμενα κυκλώματα. Συνήθως χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές όπως συστήματα μεταφοράς υψηλής συνεχούς (DC) τάσης, κυκλώματα οδήγησης DC κινητήρων, ρυθμιζόμενα DC τροφοδοτικά, στατικοί αντισταθμιστές, κυκλώματα φόρτισης μπαταριών και μετατροπείς ανεμογεννητριών .

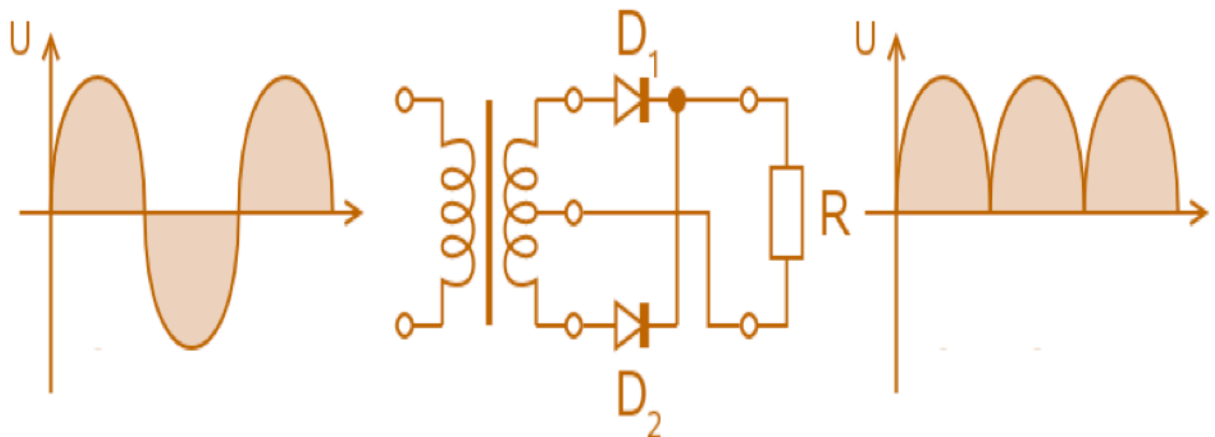
Οι μετατροπείς AC/DC ταξινομούνται με βάση τα ημιαγωγικά διακοπτικά στοιχεία που χρησιμοποιούνται στα κυκλώματα τους αλλά και τον τρόπο σύνδεσης αυτών των στοιχείων, σε επιμέρους κατηγορίες.

- **Μονοφασικοί μετατροπείς AC/DC.**
- **Τριφασικοί μετατροπείς AC/DC.**
- **Μη ελεγχόμενοι μετατροπείς AC/DC.** Αυτοί οι μετατροπείς χρησιμοποιούν ως ημιαγωγικά διακοπτικά στοιχεία διόδους και αποτελούν το οικονομικότερο είδος μετατροπέων AC/DC ειδικά σε περιπτώσεις που δε χρησιμοποιείται συνοδευτικό κύκλωμα ελέγχου. Έχουν απλό τρόπο κατασκευής αλλά δεν παρέχουν δυνατότητα ρύθμισης της τάσης εξόδου.
- **Ημιελεγχόμενοι μετατροπείς AC/DC.** Πρόκειται για διάταξη σχετικά μικρού κόστους και με κύκλωμα ελέγχου απλής μορφής. Παρουσιάζουν τάση εξόδου με μεγαλύτερη μέση τιμή, καταναλώνουν μικρότερο ποσό έργου ισχύος και δε χρειάζονται δίοδο ελεύθερης ροής για τα επαγωγικά τους φορτία.
- **Πλήρως ελεγχόμενοι μετατροπείς AC/DC.** Πρόκειται για διάταξη η οποία έχει τη δυνατότητα να λειτουργήσει και ως ανορθωτής αλλά και ως αντιστροφέας έχοντας διαφορετική φορά ισχύος σε κάθε μία από τις δύο αυτές περιπτώσεις

Ένα τυπικό παράδειγμα κυκλώματος μετατροπείας AC/DC μαζί με τις αντίστοιχες κυματομορφές εισόδου και εξόδου παρουσιάζεται στο σχήμα 3.2. Πρόκειται για ένα κύκλωμα ημιανόρθωσης. Κατά τη θετική ημιπερίοδο του σήματος εισόδου και για όσο χρόνο η τιμή του σήματος εισόδου έχει ξεπεράσει την τιμή της τάσης κατωφλίου της διόδου, η διάδος θα είναι ορθά πολωμένη συνεπώς θα άγει και θα παρουσιάζει σταθερή τάση στα άκρα της η οποία καθορίζεται από το υλικό κατασκευής της. Κατά την αρνητική ημιπερίοδο του σήματος εισόδου η διάδος θα είναι ανάστροφα πολωμένη συνεπώς δε θα άγει και θα συμπεριφέρεται σαν άπειρη αντίσταση.



**Σχήμα 3.2** - Μετατροπείας AC/DC σε λειτουργία ημιανόρθωσης.



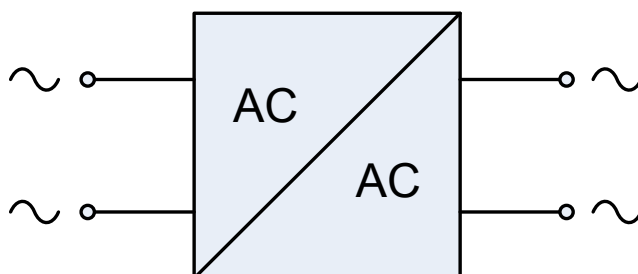
**Σχήμα 3.3** - Μετατροπείας AC/DC σε λειτουργία πλήρους ανόρθωσης.

Ένα ακόμα παράδειγμα κυκλώματος μετατροπέα AC/DC μαζί με τις αντίστοιχες κυματομορφές εισόδου και εξόδου παρουσιάζεται στο σχήμα 3.3

Πρόκειται για ένα κύκλωμα πλήρους ανόρθωσης. Κατά τη θετική ημιπερίοδο του σήματος εισόδου και για όσο χρόνο η τιμή του σήματος εισόδου έχει ξεπεράσει την τιμή της τάσης κατωφλίου της διόδου, η διάδος  $D_1$  θα είναι ορθά πολωμένη συνεπώς θα άγει και θα παρουσιάζει σταθερή τάση στα άκρα της η οποία καθορίζεται από το υλικό κατασκευής της. Σε αυτή την ημιπερίοδο η διάδος  $D_2$  θα είναι ανάστροφα πολωμένη. Το ακριβώς αντίστροφο θα συμβαίνει στην αρνητική ημιπερίοδο του σήματος εισόδου με τη διάδο  $D_2$  να άγει και τη διάδο  $D_1$  να είναι ανάστροφα πολωμένη. Η συνιστώσα της κυματομορφής εξόδου θα είναι κάθε φορά το αποτέλεσμα της αγωγιμότητας μίας εν των δύο διόδων.

### 3.3 Μετατροπείς AC/AC

Ένας μετατροπέας AC/AC ονομάζεται και κυκλομετατροπέας (Cycloconverter) και μετατρέπει απευθείας μία σταθερή εναλλασσόμενη (AC) τάση καθορισμένης συχνότητας και πλάτους σε μία νέα εναλλασσόμενη (AC) τάση διαφορετικής συχνότητας και διαφορετικού πλάτους. Το μπλόκ διάγραμμα ενός μετατροπέα AC/AC το βλέπουμε στο σχήμα 3.4. Ο σχεδιασμός αυτών των μετατροπέων περιλαμβάνει thyristors. Η έξοδος τους ελέγχεται με χαρακτηριστικά σήματα ενεργοποίησης τα οποία λαμβάνονται από μία κατάλληλη μονάδα ελέγχου. Η συχνότητα εξόδου είναι χαμηλότερη από της συχνότητα της πηγής τροφοδοσίας και συνήθως είναι ένα κλάσμα της τιμής της συχνότητας της πηγής τροφοδοσίας. Αυτοί οι μετατροπείς χρησιμοποιούνται συνήθως σε συστήματα βιομηχανικών μονάδων ιδιαίτερα υψηλής ισχύος.



Σχήμα 3.4 - Μπλόκ διάγραμμα μετατροπέα AC/AC

Ένας μετατροπέας AC/AC αποτελείται από μία συστοιχία ημιαγωγικών διακοπών οι οποίοι είναι συνδεδεμένοι είτε back to back είτε αντίστροφα-παράλληλα. Από το ελεγχόμενο άνοιγμα και κλείσιμο των διακοπών είναι πιθανό να παραχθούν στην έξοδο κυματομορφές τάσης με θεμελιώδη συχνотική συνιστώσα ίση με την επιθυμητή συχνότητα εξόδου. Οι μετατροπείς AC/AC ταξινομούνται σε δύο ευρύτερες κατηγορίες.

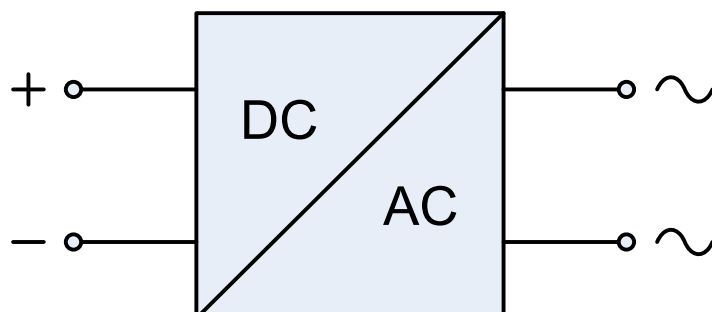
1. **Μετατροπείς AC/AC ελεγχόμενης φάσης.** Σε αυτούς τους μετατροπείς η διαφορά φάσης ελέγχεται από μία θύρα ρυθμιζόμενων παλμών.
2. **Μετατροπείς AC/AC φακέλου (envelope).** Σε αυτούς τους μετατροπείς οι διακόπτες παραμένουν κλειστοί και άγουν για διαδοχικές ημιπεριόδους.

### 3.4 Μετατροπείς DC/AC

Ένας μετατροπέας DC/AC ονομάζεται και αντιστροφέας (inverter) και μετατρέπει μία σταθερή συνεχή (DC) τάση σε μία εναλλασσόμενη (AC) τάση με μεταβαλλόμενο ή όχι πλάτος και μεταβαλλόμενη ή όχι συχνότητα. Οι μετατροπείς αυτοί μπορεί να είναι μονοφασικοί ή τριφασικοί. Στο σχήμα 3.5 βλέπουμε το μπλόκ διάγραμμα ενός μονοφασικού μετατροπέα, ενώ στο σχήμα 3.6 το κύκλωμα ενός τριφασικού μετατροπέα DC/AC. Ένας πρακτικός μετατροπέας DC/AC διαθέτει είτε μία μπαταρία, είτε μία ηλιακά τροφοδοτούμενη πηγή DC τάσης είτε μία συχνότητα γραμμής της τάξεως των 50 Hz. Οι μετατροπείς DC/AC σχεδιάζονται συνήθως χρησιμοποιώντας ημιαγωγικές συσκευές όπως είναι τα BJT ισχύος, τα MOSFET ισχύος και τα thyristors. Συνήθως χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές όπως συσκευές αδιάλειπτης παροχής ισχύος, συστήματα παροχής ισχύος για αεροπλάνα και διαστημόπλοια, κυκλώματα οδήγησης επαγωγικών και σύγχρονων κινητήρων, συστήματα μεταφοράς συνεχούς (DC) τάσης και συστήματα παροχής επαγωγικής θέρμανσης. Οι μετατροπείς DC/AC χρησιμοποιούνται γενικότερα σε φορητά



ηλεκτρονικά συστήματα πολύ χαμηλής ισχύος αλλά και σε βιομηχανικά συστήματα υπερυψηλής ισχύος.



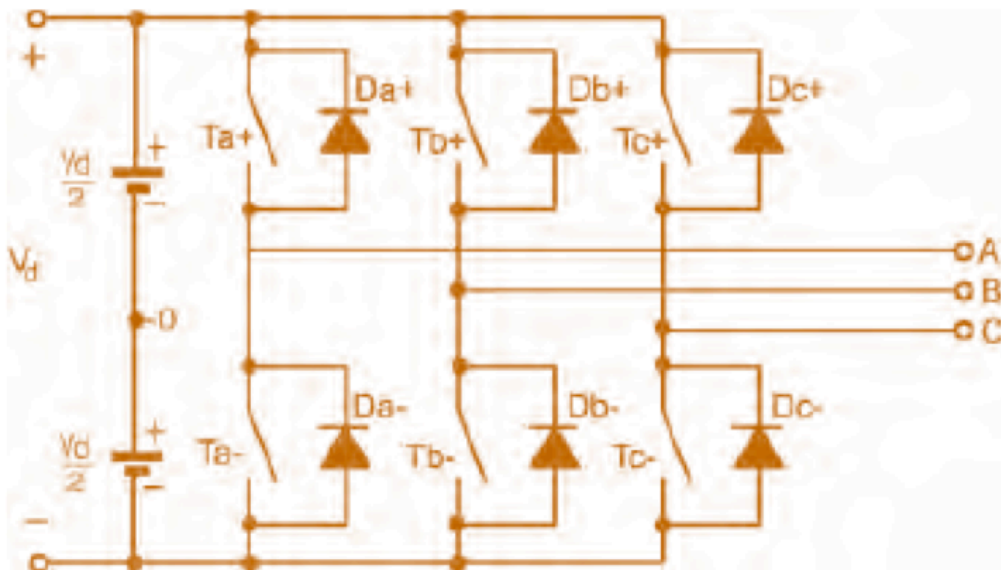
**Σχήμα 3.5** - Μπλόκ διάγραμμα μετατροπέα DC/AC

Οι μετατροπείς DC/AC ταξινομούνται με διάφορους τρόπους και κριτήρια. Ο γενικότερος τρόπος διάκρισης των μετατροπέων DC/AC τους κατατάσσει σε δύο μεγάλες κατηγορίες και πραγματοποιείται με βάση την πηγή τροφοδοσίας. Με βάση αυτό το κριτήριο οι μετατροπείς DC/AC (αντιστροφείς) διακρίνονται σε Αντιστροφείς Πηγής Τάσης (Voltage Source Inverters - VSI) και σε Αντιστροφείς Πηγής Ρεύματος (Current Source Inverters - CSI). Οι CSI τροφοδοτούνται από μία πηγή ρεύματος η οποία παρουσιάζει εσωτερική αντίσταση με ιδιαίτερα υψηλή τιμή. Η αποτελεσματική τροφοδοσία τους πραγματοποιείται χρησιμοποιώντας πηνία ή επαγωγικές συσκευές που υπόκεινται ρευματικούς περιορισμούς. Οι VSI τροφοδοτούνται από μία πηγή συνεχούς (DC) τάσης με μικρή εσωτερική αντίσταση. Η τελική τάση εξόδου τους παραμένει σχεδόν σταθερή ανεξάρτητα από το εξαγόμενο ρεύμα φόρτου.

Βέβαια οι κλασσικές διατάξεις μετατροπέων DC/AC εμφανίζουν δύο σημαντικά προβλήματα. Δεν είναι πάντα εφικτό να συνδεθούν σε δίκτυα με πολύ υψηλή τιμή τάσης (της τάξεως των 2.2 kVolts), αφού οι σύγχρονοι ημιαγωγικοί διακόπτες δεν παρέχουν την απαιτούμενη ασφάλεια. Επίσης οι μετατροπείς αυτοί εμφανίζουν χαμηλή ποιότητα ισχύος εξόδου, αφού οι κυματομορφές τους περιέχουν αρμονικές συνιστώσες. Για να παρακαμφθούν τα δύο παραπάνω μειονεκτήματα, χρησιμοποιούμε μετατροπείς DC/AC πολλαπλών επιπέδων, οι οποίοι αποτελούν

διατάξεις μετατροπών, των οποίων οι κυματομορφές φασικών τάσεων εμφανίζουν βηματική μεταβολή στο AC τους μέρος. Αυτή ακριβώς η βηματική μεταβολή προκαλεί ελάττωση του πλήθους των αρμονικών συνιστωσών, αφού πλησιάζει περισσότερο τη μορφή της ημιτονοειδούς κυματομορφής και ελαττώνει την καταπόνηση που δέχονται οι μονώσεις. Συνεπώς ο στόχος είναι η τάση να χαρακτηρίζεται από όσο γίνεται περισσότερα ενδιάμεσα επίπεδα. Οι διατάξεις των μετατροπών DC/AC ταξινομούνται σε τρεις κατηγορίες:

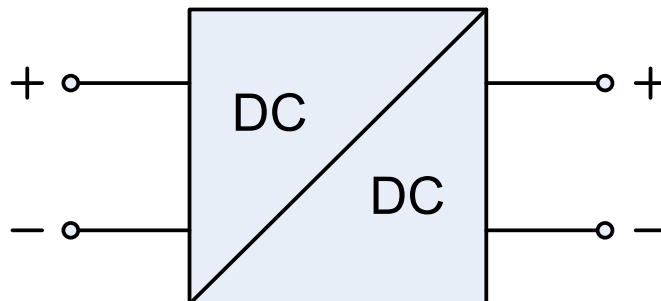
1. Μετατροπείς πολλαπλών επιπέδων με διόδους περιορισμού.
2. Μετατροπείς πολλαπλών επιπέδων με πυκνωτές περιορισμού.
3. Μετατροπείς πολλαπλών επιπέδων οι οποίοι αποτελούνται από επιμέρους μετατροπείς συνδεδεμένους σε σειρά.



**Σχήμα 3.6** Τριφασικός μετατροπέας DC/AC

### 4.3 Μετατροπείς DC/DC

Ένας μετατροπέας DC/DC ονομάζεται και κατατμητής (Chopper) και μετατρέπει τη σταθερή συνεχή (DC) τάση που λαμβάνει στην είσοδο του σε μία μεταβαλλόμενη συνεχή (DC) τάση εξόδου. Η DC τάση εξόδου μπορεί να έχει διαφορετικό πλάτος από αυτό της πηγής εισόδου. Οι μετατροπείς DC/DC σχεδιάζονται χρησιμοποιώντας ημιαγωγικές συσκευές όπως είναι τα BJT ισχύος, τα MOSFET ισχύος και τα thyristors. Η τάση εξόδου μπορεί να μεταβάλλεται ελέγχοντας το συντελεστή απόδοσης της συσκευής με σήματα χαμηλής ισχύος τα οποία προέρχονται από μία μονάδα ελέγχου. Ένας μετατροπέας DC/DC διαθέτει είτε μία συχνότητα γραμμής γύρω στα 50 Hz, είτε μία μπαταρία, είτε μία ηλιακά τροφοδοτούμενη πηγή DC τάσης. Συνήθως χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές όπως συνεχή (DC) κυκλώματα τροφοδοσίας, υπόγεια οχήματα, οχήματα τροφοδοτούμενα από μπαταρίες, κυκλώματα τροφοδοσίας ηλεκτρικών κινητήρων και τροφοδοτικά διακοπτικής λειτουργίας.



Σχήμα 3.7 - Μπλοκ διάγραμμα μετατροπέα DC/DC

Σε πολλά συστήματα ισχύος είναι απαραίτητη η μετατροπή μίας συνεχούς τάσης πολύ μεγάλης τιμής σε μία συνεχή τάση με διαφορετική τιμή. Σαν παράδειγμα αναφέρουμε τους κινητήρες συνεχούς ρεύματος, όπου χρησιμοποιούνται μετατροπείς DC/DC, ώστε να τροφοδοτηθεί ο οπλισμός της μηχανής με τάση υψηλής τιμής. Επίσης σε πολλά φωτοβολταϊκά συστήματα χρησιμοποιούνται μετατροπείς DC/DC για την αύξηση ή την ελάττωση της τάσης που προέρχεται από φωτοβολταϊκές συστοιχίες σε κατάλληλες τιμές για την αποτελεσματική τροφοδοσία του φορτίου. Επειδή όμως σε αυτά τα συστήματα απαιτείται η διακίνηση ιδιαίτερα υψηλών ποσών

τάσεως και ισχύος, δε χρησιμοποιούνται συμβατικοί μετατροπείς DC/DC, αφού αυτοί δεν είναι όσο αποτελεσματικοί χρειάζεται. Κυρίως χρησιμοποιούνται κατάλληλες τοπολογίες μετατροπέων DC/DC πολλαπλών επιπέδων ώστε να είναι εφικτή η αποτελεσματική διαχείριση των ιδιαίτερα υψηλών ποσών τάσεως και ισχύος που διακινούνται. Οι χρησιμοποιούμενες τοπολογίες είναι:

1. Μετατροπέας DC-DC πολλαπλών επιπέδων με διόδους περιορισμού.
2. Μετατροπέας DC-DC πολλαπλών επιπέδων με αιωρούμενους πυκνωτές.
3. Αμφίπλευρος μετατροπέας DC-DC πολλαπλών επιπέδων.
4. Μετατροπέας DC-DC πολλαπλών επιπέδων με μετατροπείς σε συνδεδεμένους σε σειρά

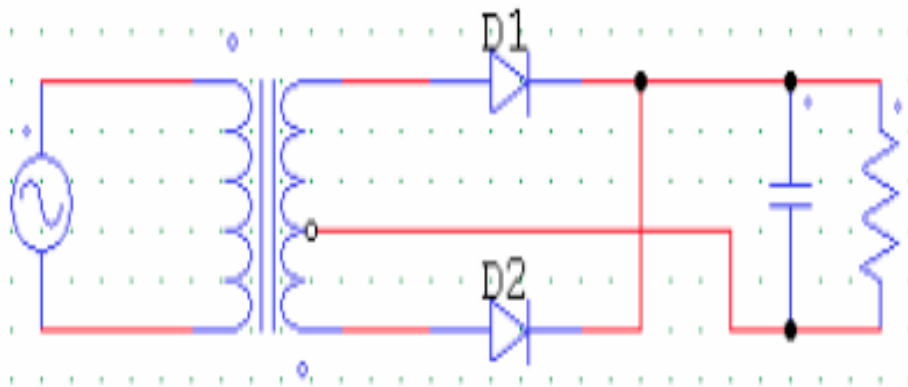
## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 – Ανορθωτικές διατάξεις

### 4.1 Εισαγωγή

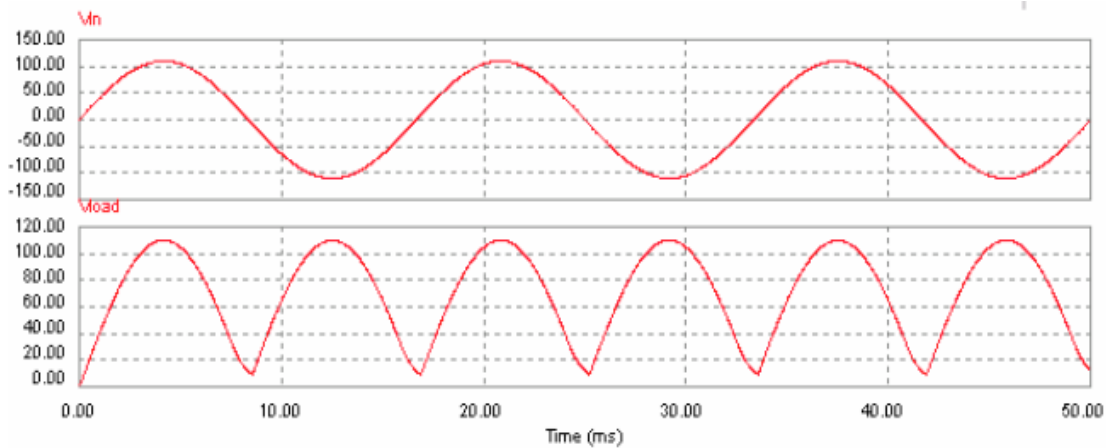
Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω ανάλογα με το είδος του ημιαγωγού στοιχείου που χρησιμοποιείται, οι ανορθωτές διακρίνονται σε δυο κατηγορίες. Τις ελεγχόμενες και τις μη ελεγχόμενες ανορθώσεις. Στις μη ελεγχόμενες ανορθώσεις οι γωνίες έναυσης και αγωγής εξαρτώνται μόνο από τη φύση του φορτίου. Οι μη ελεγχόμενες ανορθώσεις, που υλοποιούνται με διόδους, δεν έχουν την ικανότητα ελέγχου της τάσης εξόδου. Όμως εάν στα κυκλώματα αυτά η διάδος αντικατασταθεί από ένα θυρίστορ, τότε η γωνία έναυσης του θυρίστορ ελέγχεται από τον παλμό έναυσης του, και κατά συνέπεια μπορούμε να έχουμε έλεγχο της τάσης εξόδου της ανορθωτικής διάταξης. Στη συνέχεια εξετάζουμε διάφορες τοπολογίες ανορθωτικών διατάξεων.

### 4.2 Μη ελεγχόμενη πλήρης ανόρθωση με μετασχηματιστή μέσης λήψης

Στο σχήμα 4.1 παρουσιάζεται μια από τις απλούστερες, μη ελεγχόμενες, πλήρεις ανορθώσεις, ενώ στο σχήμα 4.2 παρουσιάζονται οι κυματομορφές της ανόρθωσης. Για την εξομάλυνση της τάσης στην έξοδο της διάταξης χρησιμοποιείται πυκνωτής εξόδου. Από τα φάσματα συχνοτήτων της τάσης και του ρεύματος εξόδου, οι κύριες αρμονικές συνιστώσες είναι η μηδενική και η δεύτερη, το πλάτος των οποίων είναι κατά πολύ μεγαλύτερο σε σύγκριση με τις υπόλοιπες αρμονικές συνιστώσες.



Σχήμα 4.1 - Μη ελεγχόμενη πλήρης ανόρθωση με μετασχηματιστή μέσης λήψης.



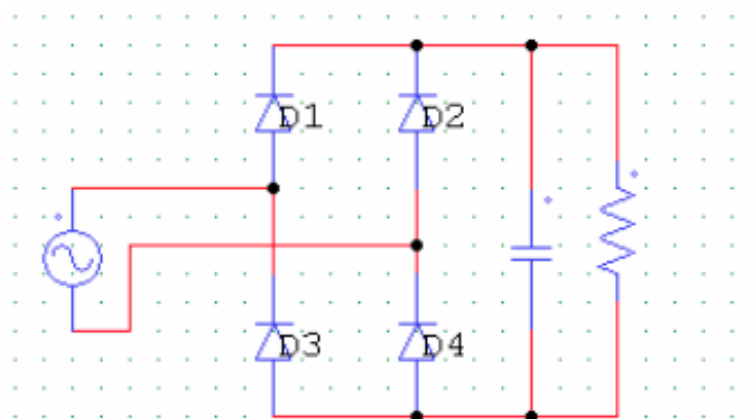
**Σχήμα 4.2** - Κυματομορφες ανόρθωσης με μετασχηματιστή μέσης λήψης.

### 4.3 Μονοφασική ανορθωτική διάταξη με διόδους

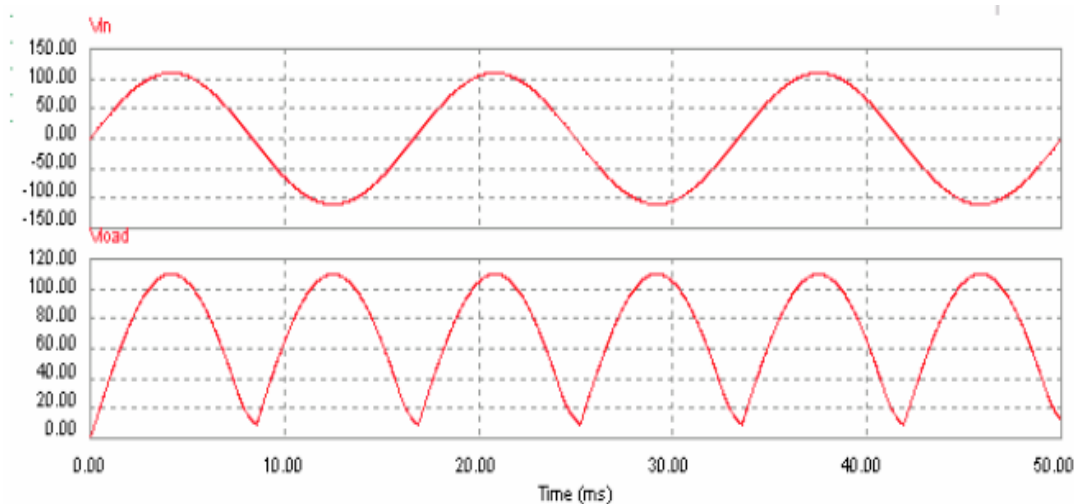
Στο σχήμα 4.3 παρουσιάζεται η μονοφασική ανορθωτική διάταξη με διόδους, μη ελεγχόμενη, ενώ στο σχήμα 4.4 οι βασικότερες κυματομορφές της. Οι κυματομορφές της ανόρθωσης αυτής είναι ίδιες με αυτές του σχήματος 4.2, ωστόσο τα πλεονεκτήματα της διάταξης αυτής σε σχέση με την ανόρθωση με μετασχηματιστή μέσης λήψης είναι:

- Απαιτεί απλούστερη κατασκευή μετασχηματιστή.
- Η καταπόνηση των διόδων είναι μισή από αυτή της μέσης λήψης και κατά συνέπεια μπορεί να αποδώσει διπλάσια ισχύ εξόδου.

Επομένως με το κόστος της χρησιμοποίησης δύο επιπλέον διόδων μπορεί να κατασκευαστεί μια πλήρης ανόρθωση με τα παραπάνω πλεονεκτήματα.



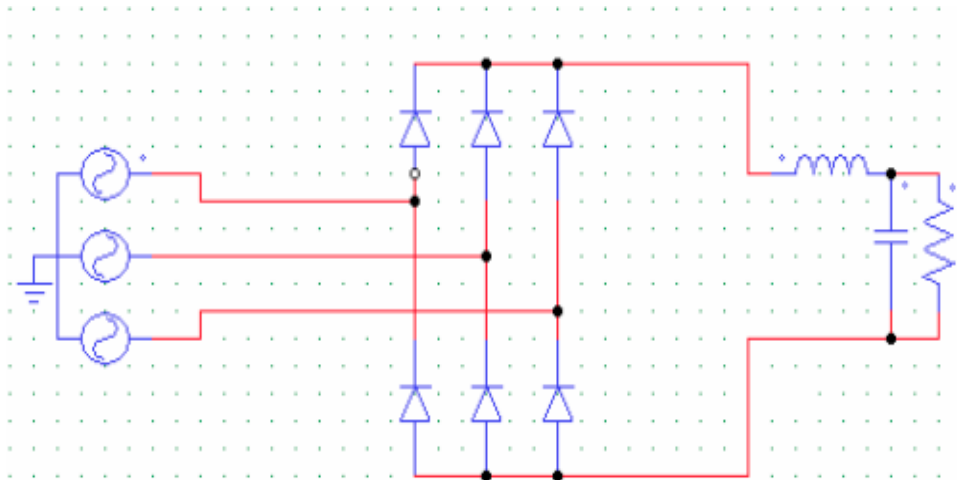
**Σχήμα 4.3** - Μονοφασική ανορθωτική διάταξη με διόδους



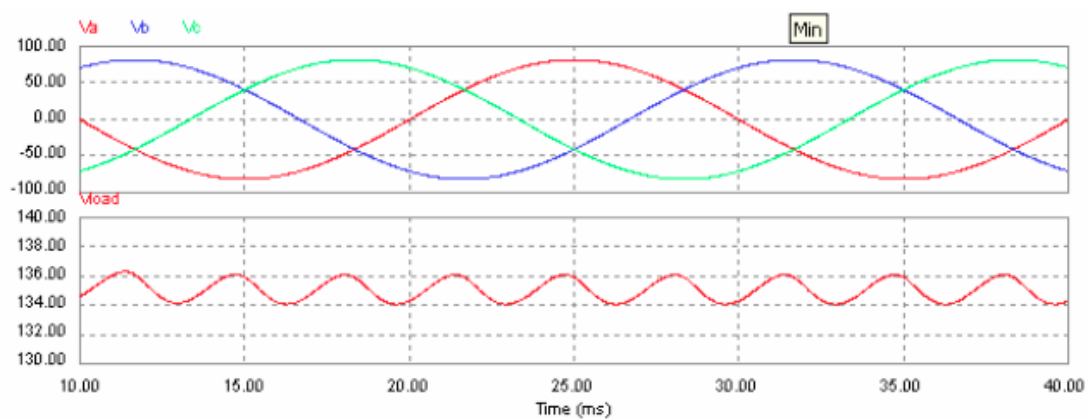
**Σχήμα 4.4** - Κυματομορφές ανόρθωσης με διόδους

#### 4.4 Τριφασική μη ελεγχόμενη ανορθωτική διάταξη

Στο σχήμα 4.5 παρουσιάζεται η τριφασική ανορθωτική διάταξη με διόδους, ενώ στο σχήμα 4.6 οι βασικότερες κυματομορφές της. Κατά τη λειτουργία αυτής της διάταξης πάντοτε άγει μια διάδος από την πάνω ομάδα διόδων και μια από την κάτω ομάδα διόδων. Όπως μπορούμε να διαπιστώσουμε από τις κυματομορφές των σχημάτων 4.4 και 4.2, η μεν μονοφασική ανορθωτική διάταξη, έχει μόνο δυο παλμούς τάσης στην έξοδο ενώ στην τριφασική έξι, πράγμα το οποίο υποδεικνύει ότι η τριφασική ανόρθωση παρέχει τάση μικρότερης κυμάτωσης και κατά συνέπεια απαιτεί μικρότερο φίλτρο εξόδου για την εξομάλυνση την κυμάτωσης αυτής. Τέλος με την τριφασική ανόρθωση έχουμε τη δυνατότητα να πάρουμε μεγαλύτερη DC τάση στην έξοδο σε σχέση με τη μονοφασική και κατά συνέπεια να τροφοδοτήσουμε το φορτίο με μεγαλύτερη ισχύς.



Σχήμα 4.5 - Τριφασική μη ελεγχόμενη ανορθωτική διάταξη.



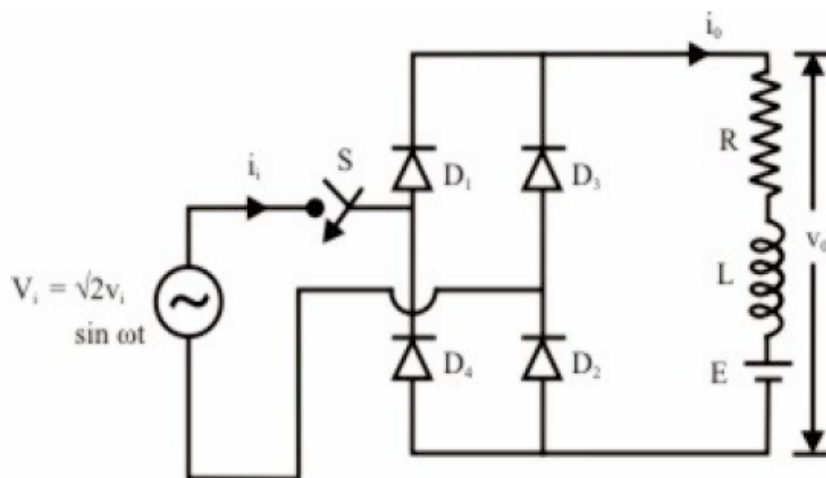
Σχήμα 4.6 - Κυματομορφές μη ελεγχόμενης ανορθωτικής διάταξης.

#### 4.5 Μονοφασική μη ελεγχόμενη γέφυρα

Η κυκλωματική συνδεσμολογία της μονοφασικής μη ελεγχόμενης γέφυρας παρουσιάζεται στο σχήμα 4.7 ενώ οι αντίστοιχες κυματομορφές στο σχήμα 4.8. Κατά τη θετική ημιπερίοδο του σήματος εισόδου οι δίοδοι  $D_1$  και  $D_2$  είναι ορθά πολωμένες και σχηματίζουν κλειστό κύκλωμα μαζί με το φορτίο, ενώ οι δίοδοι  $D_3$  και  $D_4$  είναι ανάστροφα πολωμένες και δεν άγουν. Αντίστοιχα κατά την αρνητική ημιπερίοδο του σήματος εισόδου οι δίοδοι  $D_3$  και  $D_4$  είναι ορθά πολωμένες και σχηματίζουν κλειστό



κύκλωμα μαζί με το φορτίο, ενώ οι δίοδοι  $D_1$  και  $D_2$  είναι ανάστροφα πολωμένες και δεν άγουν.



**Σχήμα 4.7** - Μη ελεγχόμενη μονοφασική γέφυρα.

Αυτή η συνδεσμολογία είναι από τις πιο δημοφιλείς και ευρύτερα χρησιμοποιούμενες σε εφαρμογές που απαιτούν συνεχή (DC) ισχύ εξόδου με τιμή από μερικές εκατοντάδες Watts έως αρκετά kWatts. Ο συγκεκριμένος μετατροπέας που παρουσιάζουμε είναι συνδεδεμένος με R-L-E φορτίο το οποίο μπορεί να αναπαραστήσει είτε ένα DC κινητήρα είτε μία μπαταρία αποθήκευσης. Ωστόσο η λειτουργία του παρουσιάζει πλήρη αναλογία και στην περίπτωση που συνδέεται με χωρητικό φορτίο. Όταν ο διακόπτης S είναι κλειστός κατά τη θετική ημιπερίοδο της τάσης εισόδου  $V_i$  δεν υπάρχει ροή ρεύματος στο κύκλωμα μέχρι η  $V_i$  να πάρει την τιμή E στο σημείο A. Από το σημείο αυτό και πέρα οι δίοδοι  $D_1$  και  $D_2$  είναι ορθά πολωμένες από την  $V_i$  και το ρεύμα  $i_o$  αρχίζει να αυξάνεται μέχρι το σημείο B. Μετά το σημείο B η τιμή της  $V_i$  πέφτει κάτω από την τιμή E και το ρεύμα  $i_o$  αρχίζει πάλι να μειώνεται. Ανάλογα με τις τιμές των R, L και E το ρεύμα  $i_o$  μπορεί εμφανίσει τις ακόλουθες διακυμάνσεις:

- Μπορεί να πάρει την τιμή μηδέν πριν η τάση εισόδου μηδενιστεί στο σημείο C.
- Μπορεί να έχει μη μηδενική τιμή και πέρα από το σημείο C και να μηδενιστεί πριν το σημείο D.
- Μπορεί να έχει μη μηδενική τιμή ακόμα και στο σημείο D.

Απλώς πρέπει να τονίσουμε ότι για όσο χρονικό διάστημα το ρεύμα  $i_0$  δεν είναι μηδέν άγουν εναλλάξ τα ζεύγη διόδων  $D_1, D_2$  και  $D_3, D_4$  όπως φαίνεται στο σχήμα 4.8. Με βάση αυτό το σχήμα παρατηρούμε ότι σε κάθε χρονική περίοδο για τις τάσεις και τα ρεύματα εισόδου και εξόδου ισχύει:

- Για  $0 < \omega t \leq \pi$ .  $v_0 = v_i = \sqrt{2} V_i \sin \omega t$  και  $i_i = i_0$
- Για  $\pi < \omega t \leq 2\pi$ .  $v_0 = -v_i = -\sqrt{2} V_i \sin \omega t$  και  $i_i = -i_0$

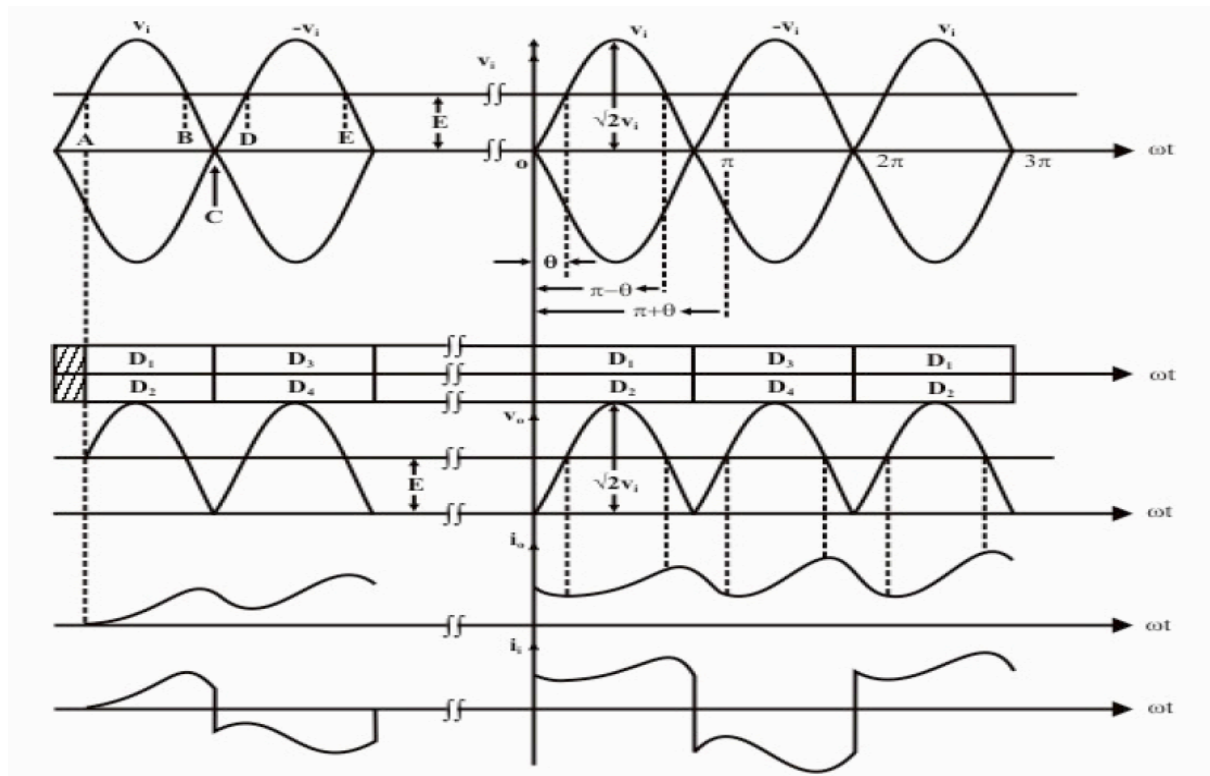
Η μέση τιμή της τάσης εξόδου δίνεται από τη σχέση:

$$V_{\text{OAV}} = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} V_i \sin \omega t \, dt = \frac{2}{\pi} V_i$$

Η ενεργός τιμή της τάσης εξόδου δίνεται από τη σχέση:

$$V_{\text{ORMS}} = \sqrt{\frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} V_i^2 (\sin \omega t)^2 \, dt} = \frac{V_i}{\sqrt{2}}$$

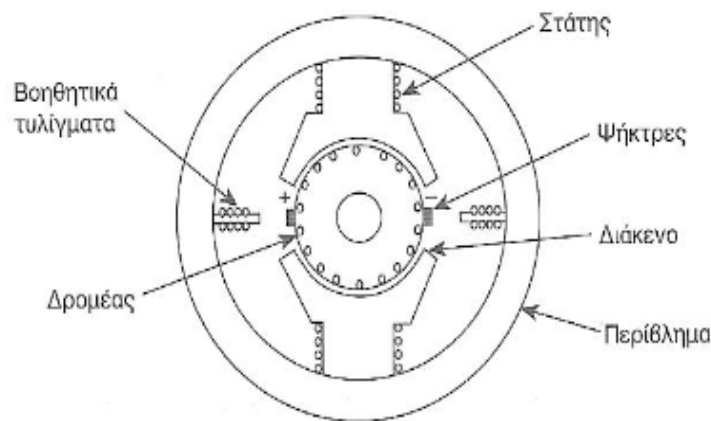
όπου  $V_i$  είναι το πλάτος της τάσης εισόδου.



**Σχήμα 4.8** - Κυματομορφές τάσεων ρευμάτων μη ελεγχόμενης μονοφασικής γέφυρας

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 - Κινητήρες συνεχούς ρεύματος

Ένας κινητήρας συνεχούς (DC) ρεύματος αποτελείται από ένα σταθερό (ακίνητο) μέρος το οποίο ονομάζεται στάτης και από ένα κινούμενο μέρος το οποίο ονομάζεται δρομέας. Η δομή ενός κινητήρα συνεχούς ρεύματος παρουσιάζεται στο σχημα 5.1



Σχημα 5.1 - Δομή κινητήρα συνεχούς ρεύματος.

Ο στάτης αποτελείται από τα εξής επιμέρους στοιχεία:

- **Μαγνητικοί πόλοι.** Πρόκειται για το μέσο διέγερσης της μηχανής αφού προσφέρουν μαγνητική ροή στο διάκενο. Κάθε πόλος διαθέτει τον πυρήνα και το τυλίγμα του, με μονωτικό υλικό να παρεμβάλλεται μεταξύ τους. Ο πυρήνας αποτελείται από μονωμένα σιδερένια ελάσματα και τα τυλίγματα από χάλκινες συρμάτινες μονωμένες σπείρες τυλιγμένες με βαμβάκι.
- **Βοηθητικοί πόλοι.** Βρίσκονται ανάμεσα στους κύριους πόλους και αποτρέπουν την έξπανση σπινθήρα στην περιοχή του συλλέκτη. Κατασκευάζονται όπως οι κύριοι πόλοι αλλά έχουν μικρότερο μέγεθος.
- **Ζύγωμα.** Είναι το κύριο μέρος του κινητήρα και συνδέει μηχανικά τους μαγνητικούς πόλους. Έχει σχήμα κυλίνδρου και είναι στην ουσία η βάση στήριξης του κινητήρα. Το υλικό κατασκευής του είναι ο χυτοχάλυβας ή ο ελατός σίδηρος.

- **Καλύμματα.** Στερεώνονται με βίδες στο ζύγωμα και χρησιμοποιούνται για τη στήριξη του άξονα του δρομέα και του ψηκτροφορέα αλλά και για να προφυλάξουν το εσωτερικό της μηχανής.
- **Ψηκτροφορέας και ψήκτρες.** Ο ψηκτροφορέας αποτελείται από ένα σιδερένιο δακτύλιο, τους βραχίονες και τις ψηκτροθήκες. Οι ψήκτρες κατασκευάζονται από σκληρό άνθρακα ή από γραφίτη ή με ανάμιξη άνθρακα και χαλκού. Τόσο ο ψηκτροφορέας όσο και οι ψήκτρες χρησιμεύουν για την προσαγωγή και απαγωγή του ρεύματος των τυλιγμάτων του δρομέα.

Ο δρομέας αποτελείται από τα εξής επιμέρους στοιχεία:

- **Άξονας.** Στον άξονα στερεώνονται το επαγωγικό τύμπανο (πυρήνας και τύλιγμα), ο συλλέκτης και ο ανεμιστήρας.
- **Συλλέκτης.** Κατασκευάζεται από πλήθος χάλκινων ελασμάτων τα οποία ονομάζονται τομείς συλλέκτη και στερεώνονται ανάμεσα σε δύο χαλύβδινα κοίλα κυλινδρικά τμήματα με παρεμβολή μονωτικού υλικού.
- **Ανεμιστήρας.** Τοποθετείται στον άξονα ώστε να δημιουργεί ρεύμα αέρα κατά την περιστροφή του. Αυτό το ρεύμα αέρα παρέχει την απαραίτητη ψύξη στον κινητήρα αφού εισέρχεται από το ένα κάλυμμα και εξέρχεται από το άλλο.
- **Επαγωγικό τύμπανο.** Αποτελείται από τον πυρήνα και το τύλιγμα. Ο πυρήνας προσφέρει ένα δίαυλο με μικρή μαγνητική αντίσταση για τη διέλευση των μαγνητικών γραμμών του πεδίου και φέρει το τύλιγμα του τυμπάνου. Είναι κατασκευασμένος από πλήθος μαγνητικών ελασμάτων. Το τύλιγμα κατασκευάζεται από μονωμένο χάλκινο αγωγό με διατομή κυκλικού ή ορθογώνιου σχήματος.

Ένας κινητήρας συνεχούς (DC) ρεύματος μπορεί να διεγερθεί με τέσσερις διαφορετικούς τρόπους:

1. Με ξένη διέγερση η οποία προέρχεται από ξεχωριστή πηγή.
2. Με διέγερση σειράς η οποία πραγματοποιείται με τη σε σειρά σύνδεση του τυλίγματος διέγερσης με το επαγωγικό τύμπανο.

3. Με σύνθετη διέγερση η οποία αποτελεί συνδυασμό παράλληλης και σε σειρά διέγερσης.
4. Με παράλληλη διέγερση η οποία προέρχεται από την πηγή τροφοδοσίας του επαγωγικού τυμπάνου.

Η ηλεκτρική ισχύς που απορροφάει ένας κινητήρας συνεχούς (DC) ρεύματος είναι ανάλογη με το μηχανικό φορτίο του κινητήρα. Ο αριθμός των στροφών ενός κινητήρα συνεχούς (DC) ρεύματος, σε συνάρτηση με ορισμένα βασικά μεγέθη που χαρακτηρίζουν τη λειτουργία του, δίνεται από τη σχέση:

$$\eta = \frac{V - I_a R_a}{k \Phi}$$

όπου  $V$  είναι η τάση τροφοδοσίας,  $I_a$  το ρεύμα του τυμπάνου του κινητήρα,  $R_a$  η αντίσταση του τυλίγματος του τυμπάνου,  $k$  μία σταθερά με τιμή εξαρτώμενη από τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του κινητήρα και  $\Phi$  η μαγνητική ροή ανά πόλο.

Με βάση την παραπάνω σχέση παρατηρούμε ότι:

1. Για ένταση διέγερσης και τάση τροφοδοσίας σταθερής τιμής, ο αριθμός των στροφών του κινητήρα θα είναι ανάλογος της έντασης του ρεύματος του τυμπάνου.
2. Για τάση τροφοδοσίας σταθερής τιμής, εφόσον μειώσουμε την ένταση της διέγερσης θα έχουμε μείωση της μαγνητικής ροής  $\Phi$  με ταυτόχρονη αύξηση της ταχύτητας του κινητήρα. Βέβαια η ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα δεν πρέπει να αυξηθεί ανεξέλεγκτα διότι ελλοχεύει ο κίνδυνος να καταστραφεί.
3. Για ένταση διέγερσης σταθερής τιμής, ο αριθμός των στροφών του κινητήρα θα είναι ανάλογος της τάσης τροφοδοσίας. Βέβαια η τάση τροφοδοσίας δεν πρέπει να αυξηθεί ανεξέλεγκτα διότι υπάρχει κίνδυνος καταστροφής της μόνωσης των αγωγών.

Από τα παραπάνω αντιλαμβανόμαστε ότι ο αριθμός των στροφών του κινητήρα ελαττώνεται πρακτικά όταν ελαττώνεται και η τάση τροφοδοσίας, ενώ αυξάνεται όταν μειώνεται το ρεύμα διέγερσης.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 - Κατασκευή μονοφασικών και τριφασικών γεφυρών

Καθοριστικός παράγοντας για την επιτυχία της εφαρμογής μας είναι η επιλογή των κατάλληλων υλικών και η ασφάλεια που θα παρέχει κατά την χρησιμοποίησή της.

Θα κατασκευαστούν 6 κουτιά τα οποία θα περιέχουν μια γέφυρα το καθένα (3 μονοφασικές και 3 τριφασικές)

Οι γέφυρες αυτές θα πρέπει να αντέχουν σε ρεύμα μέχρι 10Α και τάση μέχρι 400 volt ,επειδή η θερμότητα που αποβάλλουν οι γέφυρες εξαρτάται από την ένταση του ρεύματος θα πρέπει γι' αυτόν τον σκοπό να υπάρχει ψύκτρα που απάγει την θερμότητα προστατεύοντας τις γέφυρες.Οι μπόρνες που θα χρησιμοποιηθούν σε κάθε κουτί θα πρέπει να είναι μπόρνες ισχύος ,ενώ θα υπάρχει και ασφάλεια 10Α που θα βοηθάει την ομαλή λειτουργία της εφαρμογής μας.

Μετά την απαιτούμενη μελέτη χρησιμοποιήθηκαν κουτιά από αλουμίνιο με διαστάσεις (16 cm) μήκος (10 cm) πλάτος και (10 cm) ύψος .Στο μπροστινό μέρος κάθε κουτιού έγιναν 2 μικρές τρύπες στις οποίες τοποθετήθηκαν 2 μπόρνες κόκκινου (θετικό) και μαύρου (αρνητικό) χρώματος αντίστοιχα για το συνεχές ρεύμα.

Στο πίσω μέρος των 3 κουτιών που περιέχουν τις μονοφασικές γέφυρες 2 τρύπες και τοποθετήθηκαν οι αντίστοιχες μπόρνες και στα 3 κουτιά που περιέχουν τις τριφασικές γέφυρες 3 τρύπες στις οποίες τοποθετήθηκαν οι αντίστοιχες μπόρνες , για το εναλλασσόμενο ρεύμα.Στο σχήμα 6.1 βλέπουμε τον τύπο της μπόρνας που χρησιμοποιήθηκε



Σχήμα 6.1 - Μπόρνες

Οι 6 γέφυρες τοποθετήθηκαν πάνω σε ψύκτρες για την απαγωγή της θερμότητας, οι ψύκτρες πάνω σε μονωτικό υλικό πάχους 1cm. Η στήριξη τους έγινε στο κάτω μέρος των κουτιών. Στο σχήμα 6.2 βλέπουμε τις ψύκτρες που χρησιμοποιήθηκαν

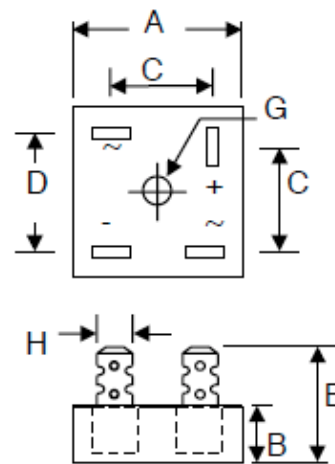


Σχήμα 6.2 - Ψύκτρες

Οι γέφυρες που χρησιμοποιήθηκαν για την εφαρμογή είναι η **KBPC2510** για τις 3 μονοφασικές στις οποίες το μέγιστο ρεύμα που αντέχουν είναι 35A ενώ η μέγιστη τάση που μπορούν να δεχθούν είναι 1000V και η **IXUS VUO 25-16** για τις 3 τριφασικές στις οποίες το μέγιστο ρεύμα που μπορούν να δεχθούν είναι 25A και η τάση που μπορούν να δεχθούν είναι 1600V. Στα σχήματα 6.3 και 6.4 βλέπουμε τις γέφυρες που χρησιμοποιήθηκαν



(α)

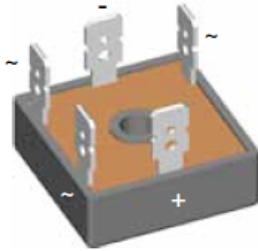
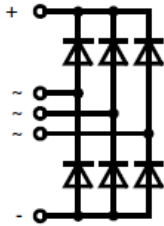


(β)

Σχήμα 6.3 - Χαρακτηριστικά (α) και δομή (β) της μονοφασικής γέφυρας

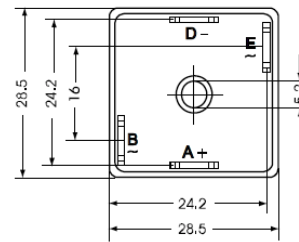
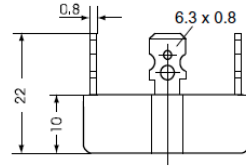
$$I_{dAV} = 25 \text{ A}$$

$$V_{RRM} = 800-1800 \text{ V}$$



(α)

Dimensions in mm (1 mm = 0.0394")



(β)

Σχήμα 6.4 - Χαρακτηριστικά (α) και δομή (β) τριφασικής γέφυρας

Στα σχήματα 6.5 , 6.6 , 6.7 , 6.8 βλέπουμε το **DATASHEET** της μονοφασικής γέφυρας **KBPC2510**

Characteristics	Symbol	-00/W	-01/W	-02/W	-04/W	-06/W	-08/W	-10/W	Unit
Peak Repetitive Reverse Voltage	$V_{RRM}$	50	100	200	400	600	800	1000	V
Working Peak Reverse Voltage	$V_{RWM}$								
DC Blocking Voltage	$V_R$								
RMS Reverse Voltage	$V_{R(RMS)}$	35	70	140	280	420	560	700	V
Average Rectifier Output Current @ $T_C = 60^\circ\text{C}$	KBPC15 $I_O$ KBPC25 KBPC35				15				A
Non-Repetitive Peak Forward Surge Current 8.3ms single half sine-wave Superimposed on rated load (JEDEC Method)	KBPC15 $I_{FSM}$ KBPC25 KBPC35				300				A
Forward Voltage Drop (per element)	KBPC15 @ $I_F = 7.5\text{A}$ KBPC25 @ $I_F = 12.5\text{A}$ KBPC35 @ $I_F = 17.5\text{A}$ $V_{FM}$				1.2				V
Peak Reverse Current At Rated DC Blocking Voltage	@ $T_C = 25^\circ\text{C}$ $I_{RM}$ @ $T_C = 125^\circ\text{C}$				10				$\mu\text{A}$ mA
$I^2t$ Rating for Fusing ( $t < 8.3\text{ms}$ ) (Note 1)	KBPC15 $I^2t$ KBPC25 KBPC35				373				$\text{A}^2\text{s}$



Typical Junction Capacitance (per element) (Note 2)	$C_j$	300	pF
Typical Thermal Resistance Junction to Case (per element) (Note 3)	$R_{\theta JC}$	6.3 3.8 2.7	K/W
RMS Isolation Voltage from Case to Lead	$V_{iso}$	2500	V
Operating and Storage Temperature Range	$T_i, T_{stg}$	-65 to +150	°C

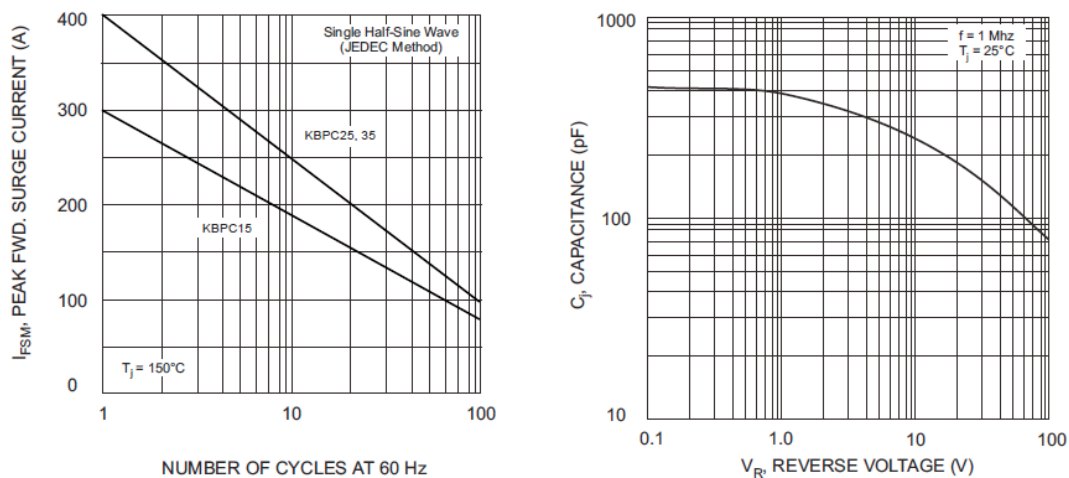
\* Glass passivated forms are available upon request.

Note: 1. Measured at non-repetitive, for  $t > 1ms$  and  $< 8.3ms$ .

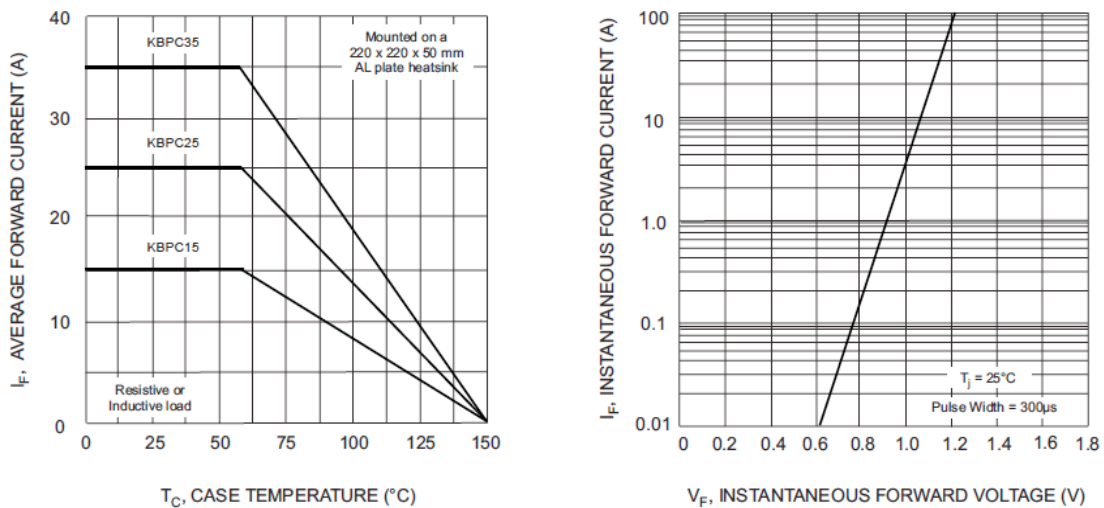
2. Measured at 1.0 MHz and applied reverse voltage of 4.0V D.C.

3. Thermal resistance junction to case mounted on heatsink.

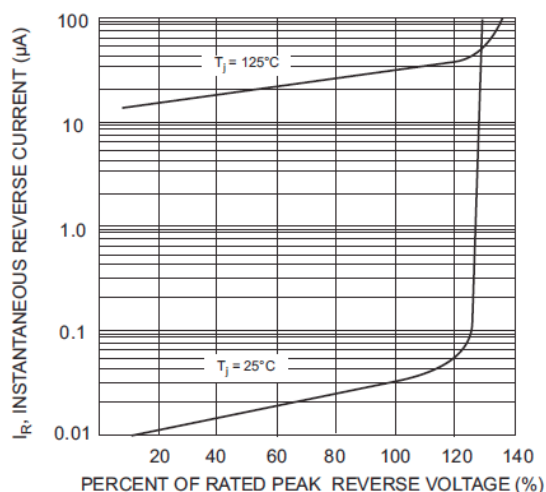
Σχήμα 6.5 - Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά



Σχήμα 6.6 - Χαρακτηριστικές ρεύματος συχνότητας και χωρητικότητας τάσης



Σχήμα 6.7 - Χαρακτηριστικές ρεύματος θερμοκρασίας και ρεύματος τάσης



**Σχήμα 6.8** - Χαρακτηριστική ρεύματος τάσης

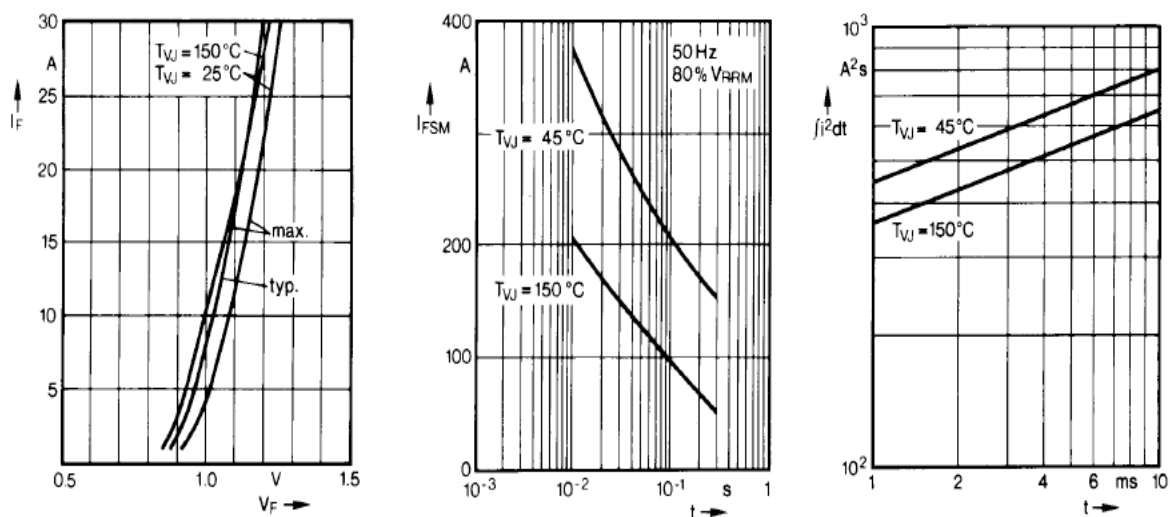
Στα σχήματα 6.9, 6.10, 6.11, 6.12 βλέπουμε το **DATASHEET** της τριφασικής γέφυρας **IXUS VUO 25-16**

Symbol	Conditions	Maximum Ratings	
$I_{dAV}$	$T_C = 85^\circ\text{C}$ , module	20	A
$I_{dAVM}$	$T_C = 63^\circ\text{C}$ , module	25	A
$I_{FSM}$	$T_{VJ} = 45^\circ\text{C}$ ; $t = 10$ ms (50 Hz)	380	A
	$V_R = 0$ ; $t = 8.3$ ms (60 Hz)	400	A
	$T_{VJ} = T_{VJM}$ ; $t = 10$ ms (50 Hz)	360	A
	$V_R = 0$ ; $t = 8.3$ ms (60 Hz)	400	A
$I^2t$	$T_{VJ} = 45^\circ\text{C}$ ; $t = 10$ ms (50 Hz)	725	$\text{A}^2\text{s}$
	$V_R = 0$ ; $t = 8.3$ ms (60 Hz)	750	$\text{A}^2\text{s}$
	$T_{VJ} = T_{VJM}$ ; $t = 10$ ms (50 Hz)	650	$\text{A}^2\text{s}$
	$V_R = 0$ ; $t = 8.3$ ms (60 Hz)	650	$\text{A}^2\text{s}$
$T_{VJ}$		-40...+150	$^\circ\text{C}$
$T_{VJM}$		150	$^\circ\text{C}$
$T_{stg}$		-40...+150	$^\circ\text{C}$
$V_{ISOL}$	50/60 Hz, RMS $t = 1$ min	2500	V~
	$I_{ISOL} \leq 1$ mA $t = 1$ s	3000	V~
$M_d$	Mounting torque (M5) (10-32 UNF)	2 $\pm$ 10%	Nm
		18 $\pm$ 10%	lb.in.
Weight	Typ.	22	g

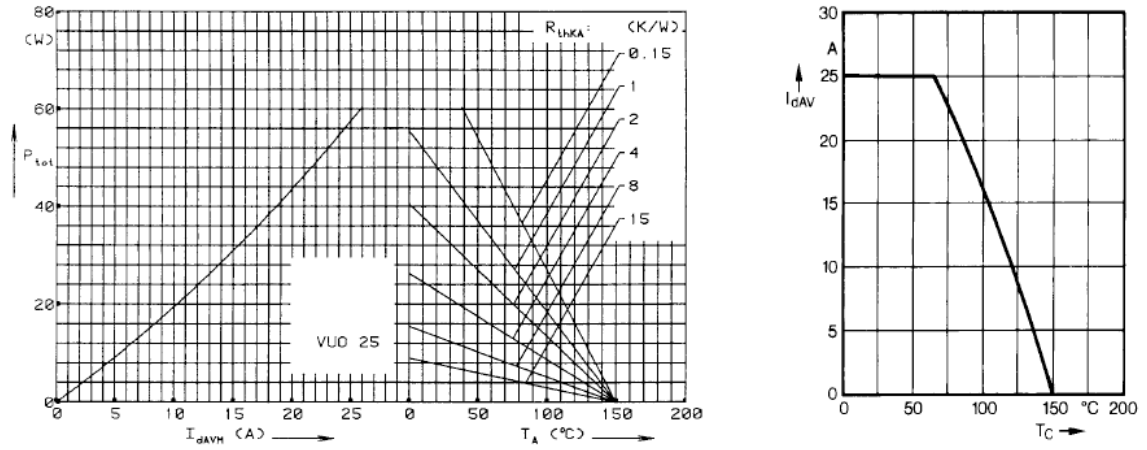
Symbol	Conditions	Characteristic Values
$I_R$	$V_R = V_{RRM}$ $T_{VJ} = 25^\circ\text{C}$ $T_{VJ} = T_{VJM}$	0.3    mA
		5.0    mA
$V_F$	$I_F = 150 \text{ A}$ $T_{VJ} = 25^\circ\text{C}$	2.2    V
$V_{T0}$	For power-loss calculations only	0.85    V
$r_t$		12    m $\Omega$
$R_{thJC}$	per diode; 120° el.	9.30    K/W
	per module	1.55    K/W
$R_{thJH}$	per diode; 120° el.	10.20    K/W
	per module	1.70    K/W
$d_s$	Creeping distance on surface	12.7    mm
$d_A$	Creepage distance in air	9.4    mm
$a$	Max. allowable acceleration	50    m/s <sup>2</sup>

Data according to IEC 60747 and refer to a single diode unless otherwise stated.

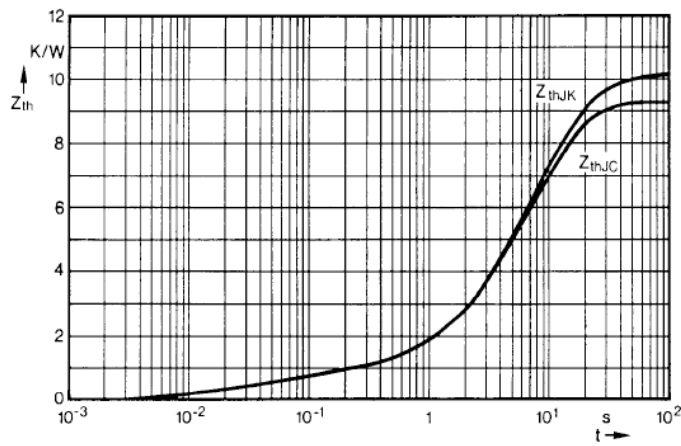
Σχήμα 6.9 - Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά τριφασικής γέφυρας



Σχήμα 6.10 - Χαρακτηριστικές ρεύματος τάσης και ρεύματος χρόνου



Σχήμα 6.11 - Χαρακτηριστικές ρεύματος θερμοκρασίας



Constants for  $Z_{thJC}$  calculation:

i	$R_{thi}$ (K/W)	$t_i$ (s)
1	0.194	0.024
2	0.556	0.07
3	2.25	5.8
4	6.3	8.5

Constants for  $Z_{thJK}$  calculation:

i	$R_{thi}$ (K/W)	$t_i$ (s)
1	0.194	0.024
2	0.556	0.07
3	2.25	5.8
4	6.3	8.5
5	0.9	28

Σχήμα 6.12 - Χαρακτηριστική θερμικής αντίστασης

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 - Συμπεράσματα

Τα ηλεκτρονικά συστήματα ισχύος είναι ένα αρκετά σημαντικό κομμάτι της επιστήμης των ηλεκτρονικών, αφού χρησιμοποιούνται κατά κόρον για τον έλεγχο και την επεξεργασία της παρεχόμενης ηλεκτρικής ενέργειας . Ανάλογα με τις ανάγκες που παρουσιάζονται για τη μετατροπή της ηλεκτρικής ενέργειας από μία μορφή σε μία άλλη χρησιμοποιούνται μετατροπείς οι οποίοι μπορεί να είναι DC/DC, AC/DC, DC/AC. Συνήθως τροφοδοτούνται από το δίκτυο και στην έξοδο τους παραδίδουν ενέργεια με κατάλληλα χαρακτηριστικά (τάση, ρεύμα, συχνότητα κλπ) ώστε να ταιριάζει με τις απαιτήσεις του εκάστοτε φορτίου.

Μία μη ελεγχόμενη τριφασική η μονοφασική γέφυρα αποτελείται από μη ελεγχόμενα διακοπτικά στοιχεία. Για την κατασκευή των κουτιών των μονοφασικών και τριφασικών μη ημιελεγχόμενων γεφυρών , οι δυσκολίες που παρουσιάστηκαν ήταν σημαντικές, δόθηκε αρχικά βάρος στο μέγεθος των κουτιων και την θέση όπου θα τοποθετούσαμε τις γέφυρες σε αυτά αλλά και στην μέγιστη ασφάλεια που θα παρείχαν κατά την χρησιμοποίησή τους στο εργαστήριο .Επίσης πολύ σημαντικό ρόλο για την επιτυχία των κατασκευών έπαιξε το γεγονός ότι δόθηκε ιδιαίτερη προσοχή στην ποιότητα των υλικών (καλώδια ,μπόρνες ,ασφαλειοθήκες) αλλά και στην αγορα αξιόπιστων μονοφασικών και τριφασικών γεφυρών.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Bruce Carsten, “**High Frequency Conductors in Switchmode Magnetics**” , HPFC Proceedings, May , 1986
- [2] Παντελής Β. Μαλατέστας, Ηρακλής Αθ. Βυλλιώτης, “ **ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΕΣ ΑΣΚΗΣΕΙΣ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΙΣΧΥΟΣ**”, Εκδόσεις Τζιόλα 2004.
- [3] Bose B. “ **Power Electronics & A.C. Drives**” , Prentice – Hall, 1<sup>st</sup> Edition, 1984.
- [4] Wikipedia. Thyristor. <http://en.wikipedia.org/wiki/Thyristor>
- [5] Γιώργος Σ. Τόμπρας. Εισαγωγή στην Ηλεκτρονική. Εκδόσεις Δίαυλος.
- [6] Dewan S.B., Straughen A., “**Power semiconductor circuits**”, John Wiley & Sons, 1<sup>st</sup> Edition, 1984.
- [7] Dr. Zainal Salam 2002. Power Electronics and Drives (Version 2).
- [8] Τζιαμπάζης Α, Τζιαμπάζη Β., “**Ηλεκτρονικά ισχύος (Εφαρμογές)**”, Σύγχρονη Εκδοτική, Αθήνα, 1990..
- [9] Sen P. “**Thyristors D.C. Drives**” , John Wiley & Sons , 1<sup>st</sup> Edition, 1981
- [10] Mohan N., Underland T., Robbins W. “**Ηλεκτρονικά Ισχύος**”, 2<sup>η</sup> Έκδοση , Εκδόσεις Τζιόλα, 2001.
- [11] Module 2 AC to DC Converters. Lesson 9 Single Phase Uncontrolled Rectifier. Version 2 EE IIT, Kharagpur.
- [12] Στέφανος Μανιάς. Ε. Καρφόπουλος. Π. Πάχος. Π. Παναγής. Κ. Παύλου. DC-DC Μετατροπείς Ηλεκτρονικών Ισχύος Πολλαπλών Επιπέδων. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
- [13] Kusko Alexander. “ **Solid-state DC motor drives**” MIT Press, London, England 1969.
- [14] Σ.Ν. Μανιάς, “**Ηλεκτρονικά Ισχύος**”, Εκ. Συμεών, 3<sup>η</sup> Έκδοση Αθήνα, 1991.
- [15] Wikipedia. Switch. <http://en.wikipedia.org/wiki/Switch>
- [16] Lander C., “**Power Electronics**” , Mc Graw-Hill, 2st Edition, 1987.
- [17] J. S. Chitode. Power Electronics. Technical Publications Pune.
- [18] Ε.Κ.Σερβετάς, “**Βιομηχανικά Ηλεκτρονικά**” Τόμος Α και Τόμος Β, Αθήνα 1990.

