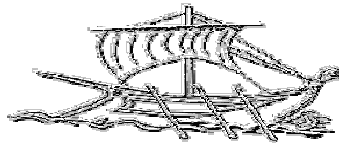
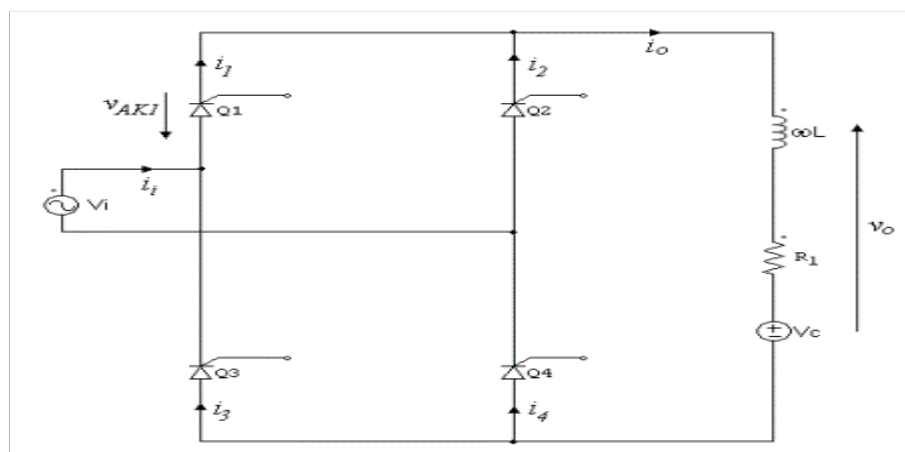


Α.Τ.Ε.Ι. ΠΕΙΡΑΙΑ
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΙΑΣ



**ΜΕΛΕΤΗ & ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ
ΜΟΝΟΦΑΣΙΚΗΣ ΠΛΗΡΩΣ ΕΛΕΓΧΟΜΕΝΗΣ ΓΕΦΥΡΑΣ**

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ



**ΑΔΑΜΟΠΟΥΛΟΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ , Α.Μ.: 27237
ΓΚΟΥΦΑΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ , Α.Μ.: 27123**

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ:. ΒΥΛΛΙΩΤΗΣ ΗΡΑΚΛΗΣ

**ΠΕΙΡΑΙΑΣ
ΑΚΑΔΗΜΑΪΚΟ ΕΤΟΣ: 2011-2012**

**ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ
ΜΟΝΟΦΑΣΙΚΗΣ
ΠΛΗΡΩΣ
ΕΛΕΓΧΟΜΕΝΗΣ ΓΕΦΥΡΑΣ**

Η εκπόνηση αυτής της πτυχιακής εργασίας έγινε υπό την επίβλεψη του καθηγητή εφαρμογών του τμήματος Ηλεκτρολογίας **κ.Ηρακλή Βυλλιώτη**, τον οποίο και ευχαριστούμε για την αμέριστη βοήθεια και τις πολύτιμες συμβουλές του, οι οποίες συνεισέφεραν καθοριστικά στο αποτέλεσμα. Επίσης ευχαριστούμε θερμά τον **κ.Νικόλαο Βενέτα**, συνεργάτη και διδάσκων στο εργαστήριο των ηλεκτρονικών ισχύος, για την επικουρική του συμβολή στην πραγματοποίηση του κατασκευαστικού τμήματος, καθώς και στην καθοδήγησή του στην επίλυση των προβλημάτων που ανέκυψαν.

Copyright © Αδαμόπουλος Γεώργιος, 2012

Copyright © Γκούφας Γεώργιος, 2012

Με επιφύλαξη κάθε δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, **για εμπορικό σκοπό**.

Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα. Η παρούσα εργασία αποτελείται από 2 μέρη, το συγγραφικό και το κατασκευαστικό(μετά το πέρας της εξέτασης, θα παραμείνει αυτούσια στη κατοχή του τμήματος ηλεκτρολογίας).

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τους συγγραφείς και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του τμήματος ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΙΑΣ (Σ.Τ.Εφ. – Α.Τ.Ε.Ι. ΠΕΙΡΑΙΑ)

Περιεχόμενα

Κεφάλαιο 1 : Ηλεκτρονικά Ισχύος – Thyristor

1.1 Εισαγωγή στα ηλεκτρονικά ισχύος	9
1.2 Η δομή ενός thyristor	17
1.3 Αρχή λειτουργίας thyristor	22
1.4 Στατική χαρακτηριστική & δυναμική συμπεριφορά του thyristor	25

Κεφάλαιο 2 : Ανορθωτικές διατάξεις - Γέφυρες

2.1 Γενική περιγραφή ανορθωτικών διατάξεων	34
2.2 Μη ελεγχόμενες ανορθώσεις	36
2.2.1 Μονοφασική τοπολογία με μία διόδο	36
2.2.2 Μονοφασική τοπολογία με τέσσερις διόδους	41
2.2.3 Τριφασική τοπολογία με έξι διόδους	46
2.3 Ελεγχόμενες ανορθώσεις	52
2.3.1 Μονοφασική πλήρως ελεγχόμενη γέφυρα (4 θυρίστορ)	53
2.3.2 Τριφασική πλήρως ελεγχόμενη γέφυρα (6 θυρίστορ)	55

Κεφάλαιο 3 : Μονοφασική πλήρως ελεγχόμενη γέφυρα

3.1 Μονοφασική πλήρως ελεγχόμενη γέφυρα	62
3.2 Ωμικό φορτίο, αντίσταση R (Ω)	63
3.3 Ωμικό-επαγωγικό φορτίο, {αντίσταση-πηνίο} R-L (Ω -H)	67

Κεφάλαιο 4 : Κατασκευαστικό & πειραματικό μέρος

4.1 Γενικά	79
4.2 Τροφοδοτικό	82
4.3 Κυκλώματα έναυσης	87

Βιβλιογραφία	101
---------------------	------------

Πρόλογος

Στην παρούσα πτυχιακή εργασία μελετάται η πλήρως ελεγχόμενη ανορθωτική διάταξη (τεσσάρων thyristor), μια επιλογή για τη μετατροπή του εναλλασσόμενου ρεύματος σε πολύ καλής ποιότητας συνεχές, για εφαρμογές μέσης ισχύος, ενώ βρίσκει πολλές εφαρμογές στη μεταφορά όσο και στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.

Στο πρώτο κεφάλαιο πραγματοποιείται μια εισαγωγή στην τεχνολογία των ηλεκτρονικών ισχύος. Θα επικεντρωθούμε κυρίως στην ηλεκτρονική υπόσταση του thyristor, ως κύριο στοιχείο της διάταξης. Μελετούμε την κατασκευή και τη λειτουργία του καθώς και τα χαρακτηριστικά του και την συμπεριφορά του..

Στο δεύτερο κεφάλαιο αναφέρονται οι κυριότερες ανορθωτικές διατάξεις (Rectifiers AC-DC), είτε ημιελεγχόμενες είτε πλήρως ελεγχόμενες, σε μονοφασική τροφοδοσία ή σε τριφασική.

Στη συνέχεια, στο τρίτο κεφάλαιο, περιγράφεται αναλυτικά η μελέτη της λειτουργίας της μονοφασικής πλήρως ελεγχόμενης γέφυρας με τη χρήση τεσσάρων thyristor.

Τέλος, στο τέταρτο κεφάλαιο περιγράφεται η μελέτη της γέφυρας την οποία κατασκευάσαμε, οι μετρήσεις που πήραμε, οι χαρακτηριστικές καμπύλες συν τα όποια συμπεράσματα στα οποία καταλήξαμε μετά το πέρας της εργασίας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΑ ΙΣΧΥΟΣ THYRISTOR

1.1 Η τεχνολογία των ηλεκτρονικών ισχύος

Τα Ηλεκτρονικά Ισχύος (Power Electronics) είναι η τεχνολογία που 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.

Η τεραστία εξέλιξη που γνωρίζουν τα Ηλεκτρονικά Ισχύος οφείλεται στην ευεργετική επίδραση συγκεκριμένων παραγόντων. Καταρχήν, υπήρξαν επαναστατικές πρόοδοι στην μικροηλεκτρονική τεχνολογία που οδήγησαν στην ανάπτυξη γραμμικών ολοκληρωμένων κυκλωμάτων και ψηφιακών επεξεργαστών σημάτων που χρησιμοποιούνται στα κυκλώματα ελέγχου των Ηλεκτρονικών Συστημάτων Ισχύος (Power Electronic Systems). Επιπλέον παρόμοιες πρόοδοι στην κατασκευαστική τεχνολογία κατέστησαν δυνατή τη σημαντική βελτίωση των χαρακτηριστικών τάσης και ρεύματος των ημιαγωγικών στοιχείων και τη σημαντική αύξηση των διακοπτικών τους ταχυτήτων. Υπήρξε φυσικά και η –πάντα απαραίτητη– διεύρυνση της αγοράς και η δημιουργία συγκεκριμένου χώρου για τα Ηλεκτρονικά Ισχύος.

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται ορισμένες από τις βασικότερες εφαρμογές των Ηλεκτρονικών Συστημάτων Ισχύος. Το εύρος του πεδίου των εφαρμογών αυτών υποδεικνύει ταυτόχρονα και τη σπουδαιότητα της τεχνολογίας των Ηλεκτρονικών Ισχύος. Παρατηρώντας τον πίνακα, γίνονται αμέσως κατανοητές οι πολλές διαστάσεις που έχει πλέον αποκτήσει και συνεχίζει να λαμβάνει, η αγορά των ηλεκτρονικών ισχύος.

Οικιακές Εφαρμογές	Ψύξη, Θέρμανση Φωτισμός Προετοιμασία Φαγητού Καταναλωτικά Ηλεκτρονικά Συστήματα
Εμπορικές Εφαρμογές	Ψύξη, Θέρμανση, Εξαερισμός Φωτισμός Αυτοματισμός Γραφείου Συστήματα Αδιάλειπτου παροχής

Βιομηχανικές Εφαρμογές	Αντλίες, Συμπιεστές, Ανεμιστήρες Συστήματα Ηλεκτρικής Κίνησης Εργαλειομηχανές Φωτισμός Βιομηχανικά Lasers Θέρμανση με Επαγωγή Ηλεκτροσυγκόλληση
Μεταφορές	Έλεγχος Κίνησης ηλεκτροκίνητων οχημάτων Ηλεκτροκίνητες Αμαξοστοιχίες Υπόγειος Σιδηρόδρομος Ηλεκτροκίνητες Λεωφορεία Φόρτιση Συσσωρευτών ηλεκτροκίνητων οχημάτων
Συστήματα Παροχής Ηλεκτρικής Ενέργειας	Μεταφορά Υψηλής Τάσης συνεχούς ρεύματος Στατική Αντιστάθμιση Άεργου ισχύος Συστήματα Αποθήκευσης ενέργειας Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας
Αεροδιαστημικές Εφαρμογές	Συστήματα Ηλ. Τροφοδοσίας αεροσκαφών Συστήματα Ηλ. Τροφοδοσίας δορυφόρων Συστήματα Ηλ. Τροφοδοσίας διαστημικών Λεωφορείων

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 καθώς τα ημιαγωγά στοιχεία ισχύος θα βελτιώνονται σε

επιδόσεις και ταυτόχρονα θα μειώνονται οι τιμές τους, όλο και περισσότερες εφαρμογές θα κάνουν χρήση της τεχνολογίας των Ηλεκτρονικών Ισχύος. 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 είσοδος μεγέθους V_i , συχνότητας f_i και αριθμού m_i φάσεων σε μια ηλεκτρική έξοδο μεγέθους V_o συχνότητας f_o και αριθμού φάσεων m_o .

Η απαίτηση 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 μετατροπείς 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.

Υπάρχουν διάφορα κριτήρια βάσει των οποίων μπορεί να γίνει ταξινόμηση των μετατροπέων που χρησιμοποιούνται στα ηλεκτρονικά ισχύος. Μεταξύ των κριτηρίων αυτών είναι:

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

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

Όσον αφορά την μετάβαση των ημιαγωγών διακοπών, ο όρος αυτός συνηθίζεται να χρησιμοποιείται όταν τίθεται υπό συζήτηση το σβήσιμο των διακοπών. Αυτό συμβαίνει 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. Η εξωτερική αυτή 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)..

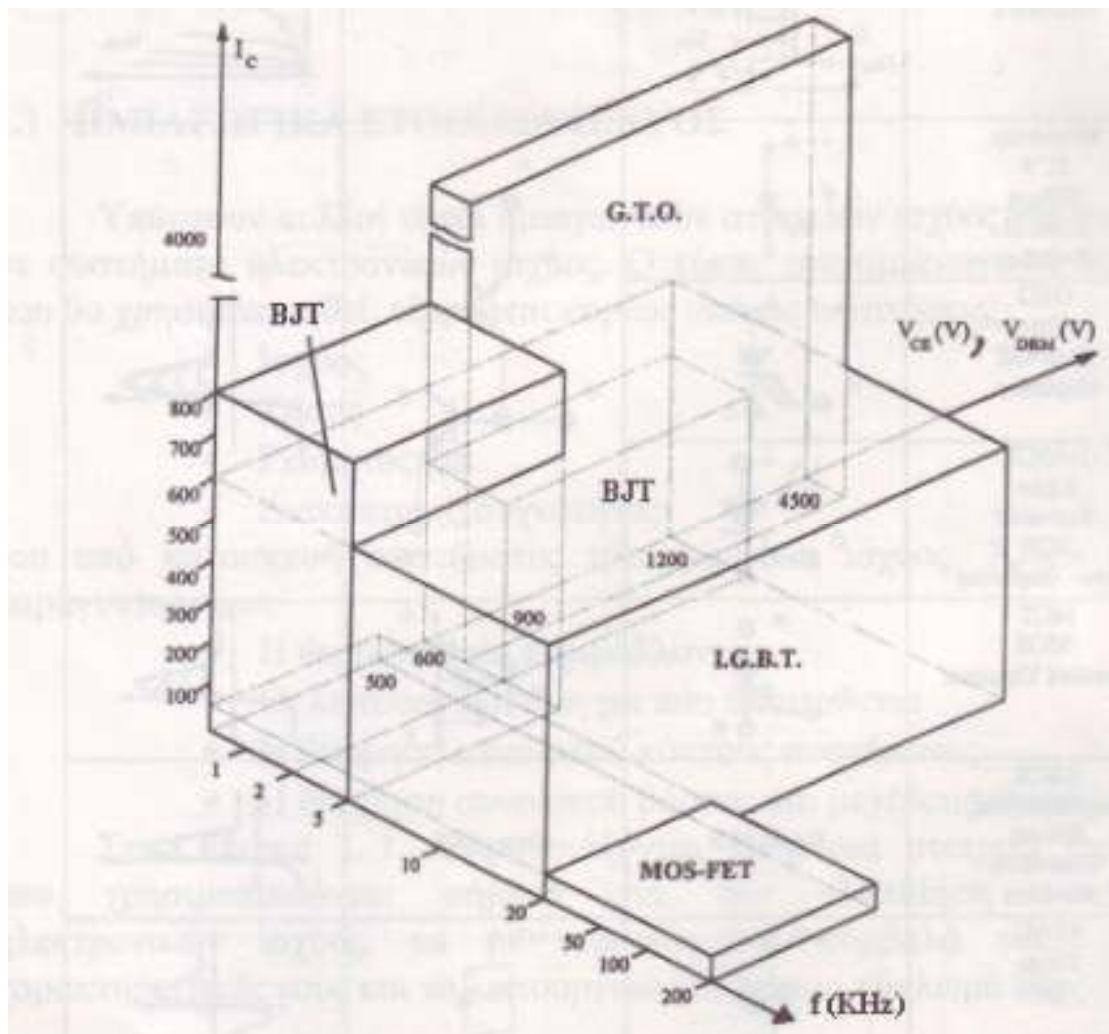
Στον πίνακα που ακολουθεί, παρουσιάζονται τα κύρια στοιχεία ημιαγωγών που χρησιμοποιούνται σήμερα για την υλοποίηση συστημάτων ηλεκτρονικών ισχύος, με τα τυποποιημένα σύμβολα τους, τις χαρακτηριστικές τάση-ένταση και το λειτουργικό τους ισοδύναμο κύκλωμα.

- A => Ανοδος (Anode)
- K => Κάθοδος (Kathode)
- G => Πύλη (Gate)
- C => Συλλέκτης (Collector)
- B => Βάση (Base)
- E => Εκπομπός (Emitter)
- D => Υποδοχή (Drain)
- S => Πηγή (Source)

Ημιαγωγικό Στοιχείο Ισχύος	Σύμβολο	Ισοδύναμο Κύκλωμα	Χαρακτηριστική
Δίοδος			
Τρανζίστορ Ισχύος NPN			
IGBT Insulated Gate Bipolar Transistor Τρανζίστορ επαφής με απομονωμένη βάση			
MOSFET			
Θυρίστορ SCR Silicon Control Rectifier			
GTO Gate Turn-Off Θυρίστορ			
LASCR Light Activated SCR Οπτο - Θυρίστορ			
MCT MOS Controlled Thyristor			
ASCR Asymmetrical Silicon Controlled Rectifier	Όμοιος SCR	Όμοιος SCR	
DIAC Diode AC			
TRIAC Triode AC			
UJT Unijunction Transistor			
CUJT Complementary Unijunction Transistor			

Στοιχεία Ημιαγωγών Ισχύος.

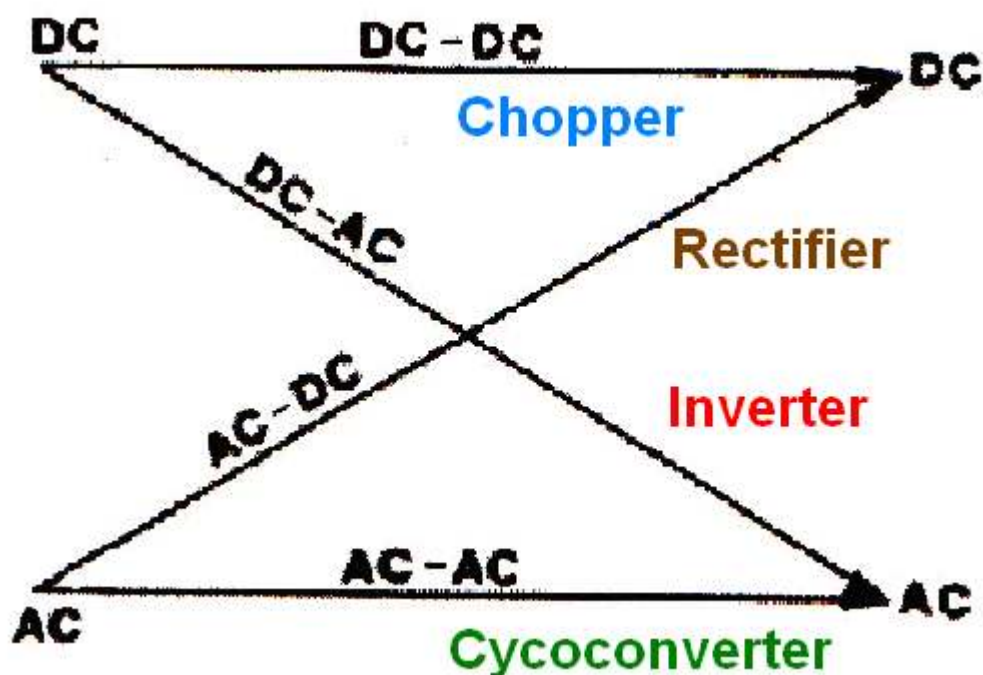
Στο επόμενο σχήμα, παρουσιάζονται οι δυνατότητες ισχύος καθώς και οι διακοπτικές ταχύτητες των παραπάνω ημιαγωγικών διακοπών.

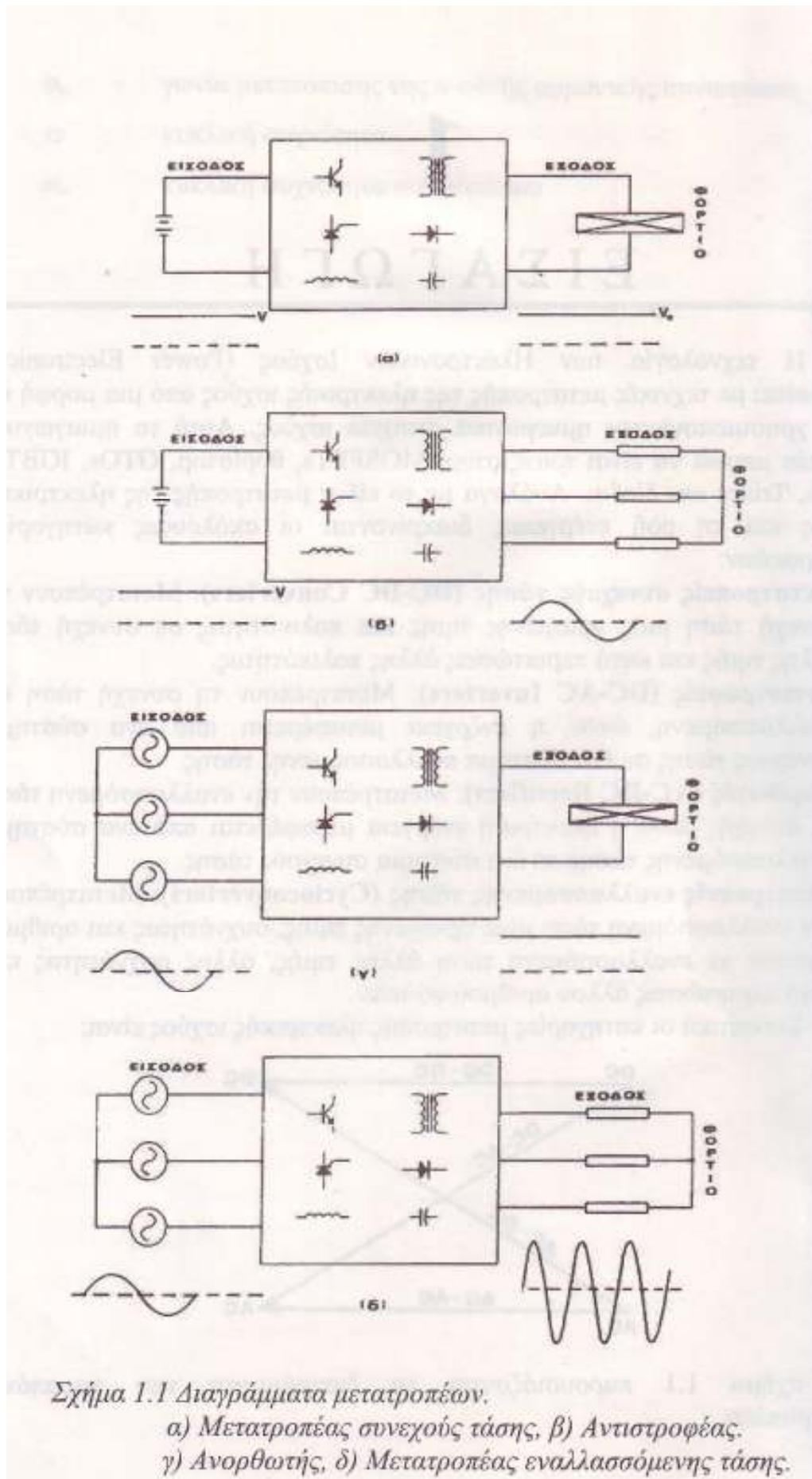


Όσον αφορά τους μετατροπείς, υπάρχουν μετατροπείς που μεταφέρουν ενέργεια μόνο από την πηγή στο φορτίο ενώ υπάρχουν κι άλλοι που μπορούν να μεταφέρουν ισχύ και προς την αντίθετη κατεύθυνση, να λειτουργήσουν δηλαδή, με αναγεννητικό (regenerative) τρόπο.

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 σταθεροί ηλεκτρονικοί μετατροπείς ισχύος. Παρακάτω διακρίνονται οι εξής κατηγορίες ηλεκτρονικών μετατροπών ανάλογα με το είδος της μετατροπής ηλεκτρικής ισχύος :

1. Μετατροπείς συνεχούς τάσης (DC-DC Converters) ή κατατμητές 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.





Σχήμα 1.1 Διαγράμματα μετατροπών.

α) Μετατροπέας συνεχούς τάσης, β) Αντιστροφέας.

γ) Ανορθωτής, δ) Μετατροπέας εναλλασσόμενης τάσης.

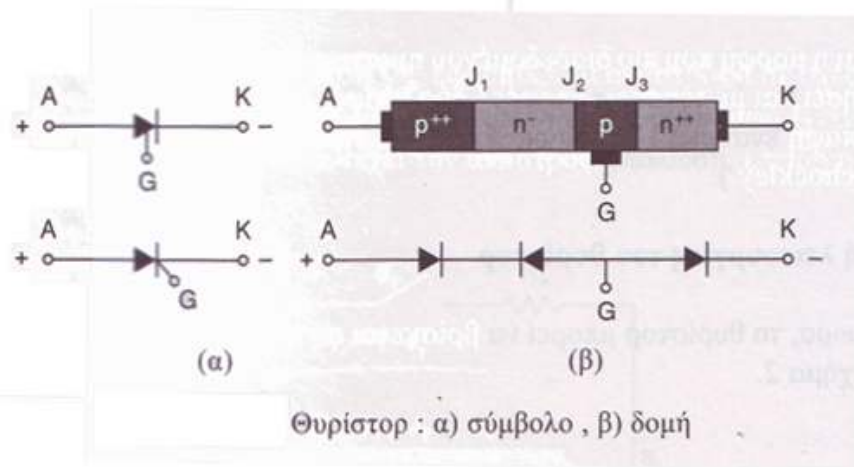
1.2 Η δομή ενός Thyristor (θυρίστορ)

Η ονομασία θυρίστορ, προέρχεται από την ηλεκτρονική λυχνία «θύρατρον», που εκτελούσε την ίδια λειτουργία. Η εμφάνιση του στα τέλη του 1950, έφερε επανάσταση στους στατικούς μετατροπείς ισχύος. Στην πραγματικότητα ένα θυρίστορ αποτελεί το συνδυασμό δυο τρανζίστορ. Ο συλλέκτης από ένα pnp τρανζίστορ αποτελεί τη βάση για ένα npn τρανζίστορ και αντιστρόφως. Η λειτουργία του θυρίστορ βασίζεται πάνω στην αναπαραγωγική λειτουργία δυο συζευγμένων τρανζίστορ και ουσιαστικά μοντελοποιείται σαν μια συσκευή με τρεις ακροδέκτες και τέσσερα επίπεδα.

ΕΙΚΟΝΕΣ ΑΠΟ ΔΙΑΦΟΡΟΥΣ ΤΥΠΟΥΣ ΘΥΡΙΣΤΟΡ



Το θυρίστορ ισχύος (Silicon Controlled Rectifier, SCR) είναι ένας ελεγχόμενος ανορθωτής πυριτίου τεσσάρων στρωμάτων (p-n-p-n), ο οποίος μπορεί να θεωρηθεί σαν συνδυασμός δύο transistor, όπως αποτυπώνεται στο παρακάτω σχήμα. Ο συγκεκριμένος ημιαγωγός είναι μίας κατεύθυνσης ως προς το ρεύμα και διπλής κατεύθυνσης ως προς την τάση.



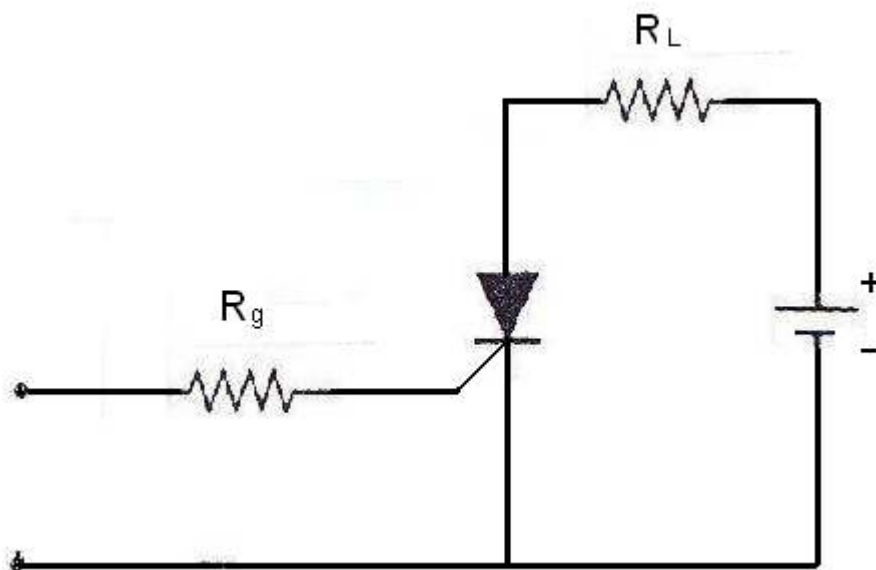
Στη δομή του θυρίστορ υπάρχουν τρεις επαφές (Junction J_1 , J_2 , J_3), μεταξύ τεσσάρων διαδοχικών στρωμάτων με προσμίξεις τύπου **p-n**. Τα δυο εξωτερικά στρώματα (υπόστρωμα **p**, αντίστοιχα **n**) έχουν ισχυρή πυκνότητα προσμίξεων (για αυτό και συμβολίζονται με **p++**, αντίστοιχα **n++**) και επιτρέπουν τη μετακίνηση ενός μεγάλου αριθμού φορέων ελευθέρων φορτίων. Λόγω αυτών, ένα θυρίστορ ισχύος μπορεί να αντέχει πυκνότητα μέσου ρεύματος $60 \sim 100 \text{ A/cm}^2$, τιμές συχνά απαραίτητες στα ηλεκτρονικά ισχύος. Τα μεσαία στρώματα, έχουν μικρή πυκνότητα προσμίξεων, ειδικά το **n** (γι αυτό συμβολίζεται και με **n⁻**), έτσι ώστε οι επαφές J_1 και J_2 να πραγματοποιούνται μεταξύ ενός δρόμου με αδύνατους και ενός με ισχυρούς δεσμούς. Μόνο έτσι αυτές οι επαφές μπορούν να αντέχουν μεγάλες ανάστροφες τάσεις των τάξεων $1 \sim 5 \text{ kV}$, χωρίς να διασπαστούν. Η μεγάλη διαφορά δυναμικού μεταξύ ανόδου και καθόδου βρίσκεται στο στρώμα **n**, κυρίως, στο οποίο επεκτείνεται κι η περιοχή αποκοπής (φτωχή σε φορείς ελευθέρων φορτίων) των επαφών J_1 και J_2 . Από αυτή την άποψη, το πλάτος της περιοχής στρώματος **n⁻** είναι μεγαλύτερο από το πλάτος των άλλων στρωμάτων

Το θυρίστορ έχει τρεις ακροδέκτες :

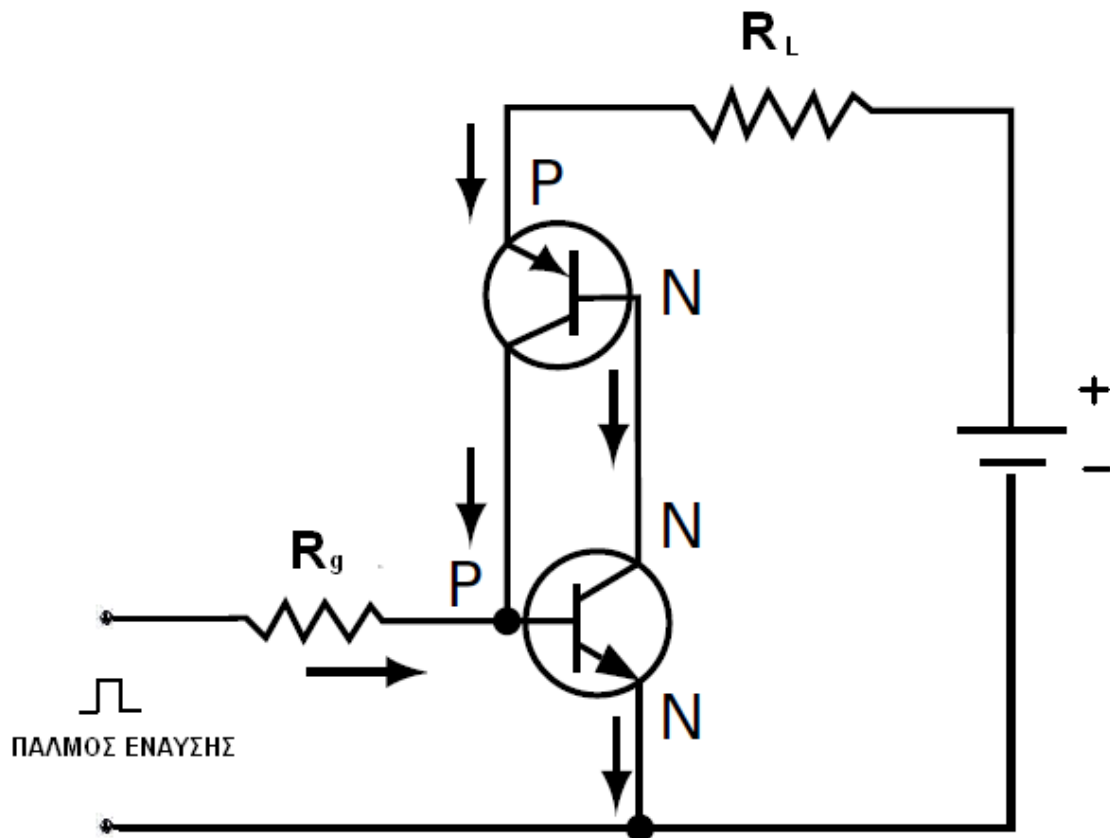
- ▶ Τον ακροδέκτη **A** που ονομάζεται άνοδος και συνδέεται με το στρώμα προσμίξεων **p++**
- ▶ Τον ακροδέκτη **B** που ονομάζεται κάθοδος και συνδέεται με το στρώμα προσμίξεων **n++**
- ▶ Τον ακροδέκτη **G** που ονομάζεται πύλη και συνδέεται με το στρώμα προσμίξεων **p+**

Αυτή είναι η μορφή του πιο διαδεδομένου ημιαγωγού με δομή **pnpn**. Μπορεί και να λειτουργήσει και με τέσσερις επαφές (δύο επαφές έναυσης) ή μόνο με δύο επαφές (χωρίς επαφή έναυσης) και το οποίο λέγεται δίοδος τεσσάρων στρωμάτων ή δίοδος Shockley.

- **ΚΥΚΛΩΜΑ ΙΣΧΥΟΣ ΜΕ ΘΥΡΙΣΤΟΡ**



- ΙΣΟΔΥΝΑΜΟ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΟ ΚΥΚΛΩΜΑ ΤΟΥ ΘΥΡΙΣΤΟΡ

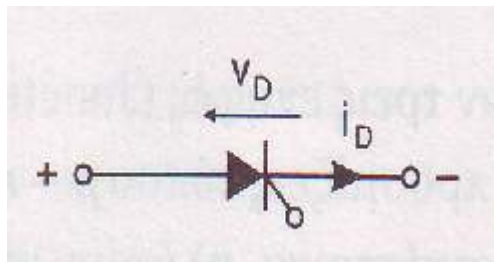


1.3 Αρχή λειτουργίας Thyristor (θυρίστορ)

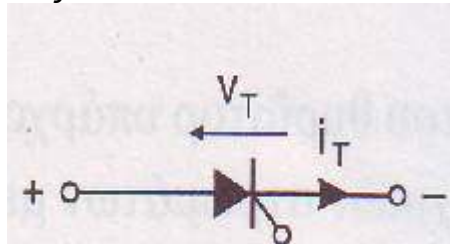
Στη προηγούμενη παράγραφο, αναφέρθηκε η δομή του θυρίστορ, ως ένας ελεγχόμενος ανορθωτής τεσσάρων στρωμάτων (ή αλλιώς ένας συνδυασμός δύο τρανζίστορ). Όταν στη πύλη (Gate) δεν υπάρχει παλμός έναυσης, ανεξάρτητα αν είναι θετικά πολωμένο, τότε δεν υπάρχει ροή ρεύματος μέσω του θυρίστορ.

Το θυρίστορ μπορεί να βρίσκεται σε τρεις καταστάσεις :

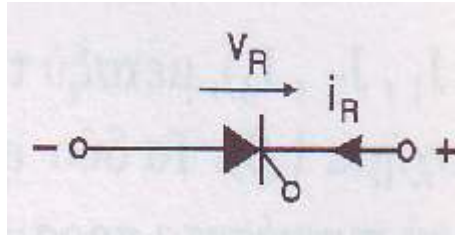
§ ορθά πολωμένο χωρίς τάση οδήγησης (κατάσταση ορθής αποκοπής), με εξωτερική τάση U_p , η οποία εφαρμόζεται με το θετικό ηλεκτρόδιο στην άνοδο και με το αρνητικό στη κάθοδο. Κατάσταση στην οποία τα χαρακτηριστικά μεγέθη συμβολίζονται με τον δείκτη D . Το θυρίστορ συνεχίζει να βρίσκεται σε αποκοπή και εξασφαλίζεται η διακοπή του κυκλώματος.



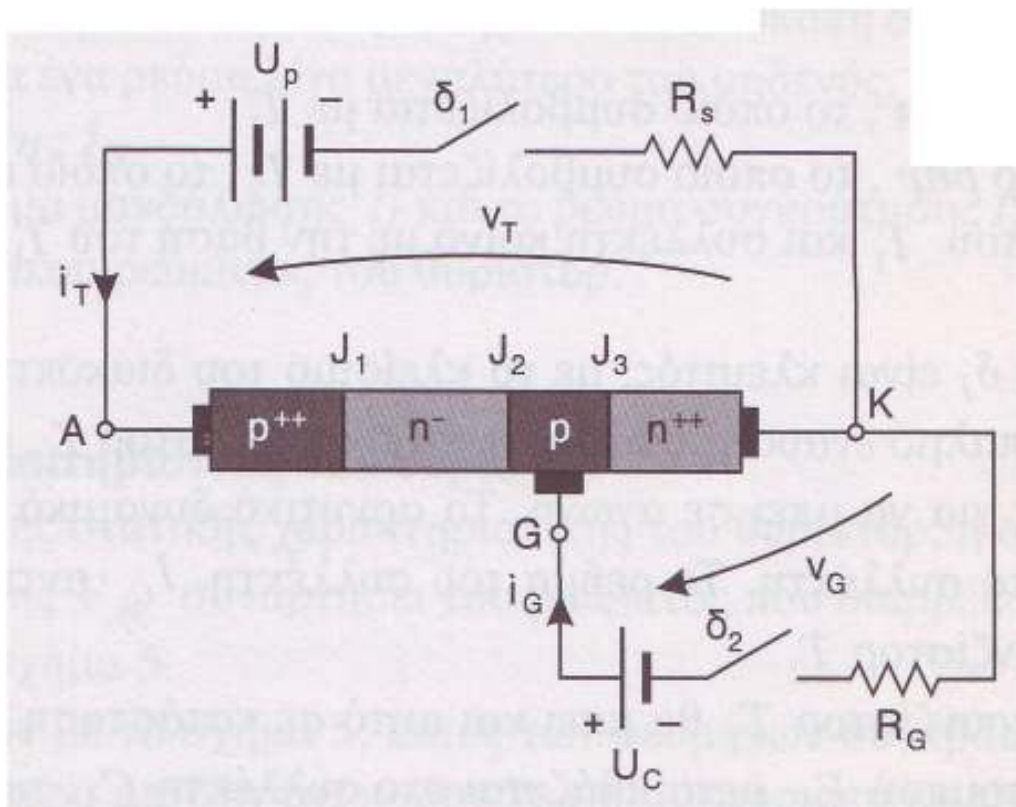
§ ορθά πολωμένο και με τάση οδήγησης (κατάσταση αγωγιμότητας), με δυο εξωτερικές τάσεις. Την U_p , η οποία εφαρμόζεται με το θετικό ηλεκτρόδιο στην άνοδο και με το αρνητικό στη κάθοδο και την τάση U_c να εφαρμόζεται με το θετικό ηλεκτρόδιο στην πύλη και το αρνητικό στη κάθοδο. Σε αυτή τη κατάσταση, στην οποία τα χαρακτηριστικά μεγέθη συμβολίζονται με τον δείκτη T , το θυρίστορ αρχίζει να άγει και εξασφαλίζει τη λειτουργία του κυκλώματος (όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα). Το θυρίστορ περνά στη κατάσταση της αγωγιμότητας όταν η τάση U_c εξασφαλίζει στο κύκλωμα πύλης – καθόδου ένα ρεύμα i_G , μεγαλύτερο της τιμής i_{GT} (το οποίο είναι ένα μέγεθος που δίδεται από τον κατάλογο των θυρίστορ).



§ ανάστροφα πολωμένο (κατάσταση ανάστροφης αποκοπής), με εξωτερική τάση U_p , η οποία εφαρμόζεται με το θετικό ηλεκτρόδιο στην κάθοδο και με το αρνητικό στην άνοδο. Κατάσταση στην οποία τα χαρακτηριστικά μεγέθη συμβολίζονται με τον δείκτη R . Το θυρίστορ δεν άγει και εξασφαλίζεται η διακοπή του κυκλώματος.



Κατά την **ανάστροφη πόλωση**, η τάση U_p εφαρμόζεται ανάστροφα σε σχέση με το σχήμα που ακολουθεί



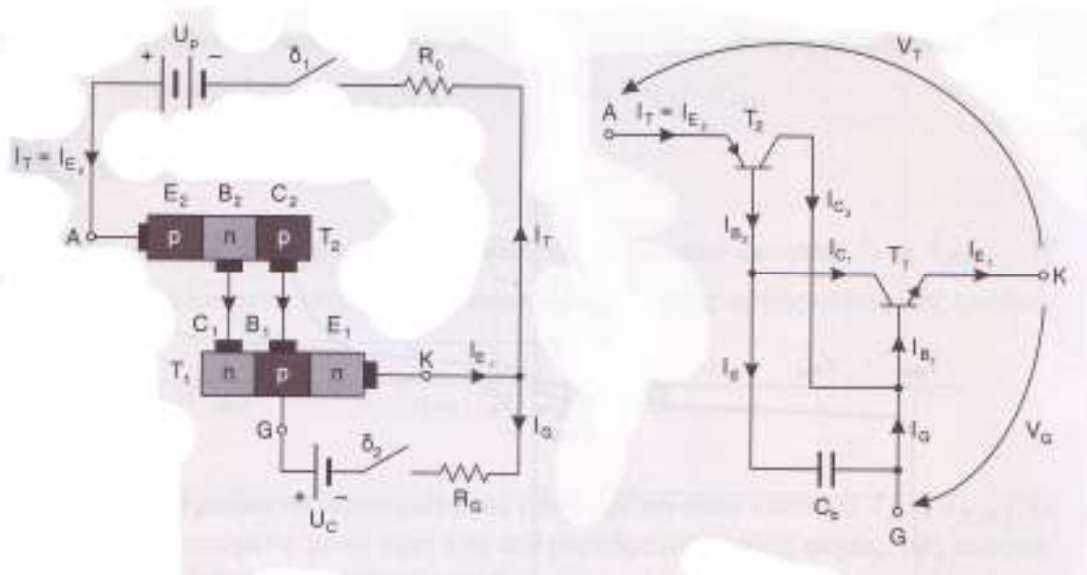
Οι επαφές J_1 και J_3 είναι ανάστροφα πολωμένες και η επαφή J_2 είναι ορθά πολωμένη. Η επαφή J_1 πρέπει να αντέχει στην ανάστροφη πόλωση, επειδή η J_3 έχει μικρή τάση διάσπασης (20 V έως 30 V), ως συνέπεια των μεγάλων συγκεντρώσεων προσμίξεων και στις 2 πλευρές της επαφής. Η ικανότητα ανάστροφης αποκοπής της επαφής J_1 συνήθως περιορίζεται από το μήκος της περιοχής n^- , η οποία καθορίζεται κατά προσέγγιση από το όριο της διάσπασης χιονοστιβάδας. Κατά την ανάστροφη πόλωση, το θυριστορ παραμένει σε αποκοπή, χωρίς να ενδιαφέρει αν υπάρχει ή όχι παλμός.

Στην ορθή πόλωση, η τάση U_p εφαρμόζεται με κλειστό τον διακόπτη δ_1 αλλά χωρίς παλμό έναυσης (με ανοιχτό τον διακόπτη δ_2). Οι επαφές J_1 και J_3 είναι ορθά πολωμένες και η επαφή J_2 είναι ανάστροφα πολωμένη. Οι πυκνότητες των προσμίξεων στο καθένα από τα στρώματα είναι τέτοιες, ώστε το στρώμα n^- να βρίσκεται εκεί όπου εμφανίζεται περιοχή εκκένωσης επαφής J_2 με ανάστροφη πόλωση. Με αυτόν τον τρόπο η περιοχή αυτή καθορίζει και πάλι την τάση αποκοπής, αυτή τη φορά για τη κατάσταση της ορθής πόλωσης. Επομένως και, χωρίς να μας ενδιαφέρει η πολικότητα της τάσης U_p , δηλαδή αδιάφορα αν το θυρίστορ είναι ορθά η ανάστροφα πολωμένο, αυτό είναι σε αποκοπή όταν δεν υπάρχει παλμός έναυσης. Κατά την ανάστροφη πόλωση αυτό θα διαρρέεται από ένα ρεύμα ανάστροφο I_R και κατά την ορθή πόλωση από ένα ρεύμα I_D (σε χαμηλή τιμή και οι δύο εντάσεις)

Κατά την ορθή πόλωση αλλά με παλμό έναυσης, δηλαδή με ανοιχτούς τους διακόπτες δ_1 και δ_1 , το θυρίστορ άγει μόνο αν ισχύει $I_e > I_{eT}$. Η είσοδος και η παραμονή στην κατάσταση αγωγιμότητας του θυρίστορ, ακόμα και μετά τη διακοπή του παλμού έναυσης, μπορεί να συνεχιστεί όπως στο κύκλωμα που ακολουθεί.

Στο συγκεκριμένο κύκλωμα έχει σχεδιαστεί το θυρίστορ ως συνδυασμός δυο ισοδύναμων θυρίστορ:

- Τρανζίστορ $n p n$, το οποίο συμβολίζεται ως T_1
- Τρανζίστορ $p n p$, το οποίο συμβολίζεται ως T_2 και έχει κοινή βάση με τον συλλέκτη του T_1 και κοινό συλλέκτη με τη βάση του T_1 .



Εάν ο διακόπτης δ_1 είναι κλειστός, με το κλείσιμο του διακόπτη δ_2 , το ρεύμα I_G αντικαθιστά τον παλμό εναυσης στη βάση για το τρανζίστορ T_1 στο οποίο πληρούνται οι συνθήκες ώστε να βρεθεί σε αγωγή. Το αρνητικό δυναμικό του εκπομπού E_1 μεταβιβάζεται στον συλλέκτη. Το ρεύμα του συλλέκτη I_{c1} αντικαθιστά το ρεύμα βάσης για το τρανζίστορ T_2 . οπότε το τρανζίστορ T_2 θα έρθει κι αυτό σε κατάσταση αγωγής. Το θετικό δυναμικό του εκπομπού E_2 μεταβιβάζεται στον συλλέκτη C_2 , το ρεύμα του συλλέκτη I_{c2} είναι το ρεύμα βάσης για το τρανζίστορ T_1 και επομένως μπορεί να παίξει το ρόλο του ρεύματος οδήγησης I_G . Συνεπώς ο διακόπτης δ_2 μπορεί να ανοίξει και το ρεύμα οδήγησης I_G στη πύλη του θυρίστορ να διακοπεί. Δημιουργείται δηλαδή με αυτόν το τρόπο μια διαδικασία μανδάλωσης, όπου τα δύο τρανζίστορ βρίσκονται σε κατάσταση αγωγής, αν και απομακρύνεται ο παλμός στη πύλη.

Το ρεύμα αυτό λέγεται ρεύμα μανδάλωσης I_L (LATCHING CURRENT)

Στην πραγματικότητα το θυρίστορ οδηγείται σε αποκοπή όχι ακριβώς για μηδενικό ρεύμα, αλλά για ένα ρεύμα λίγο μεγαλύτερο από το μηδέν!

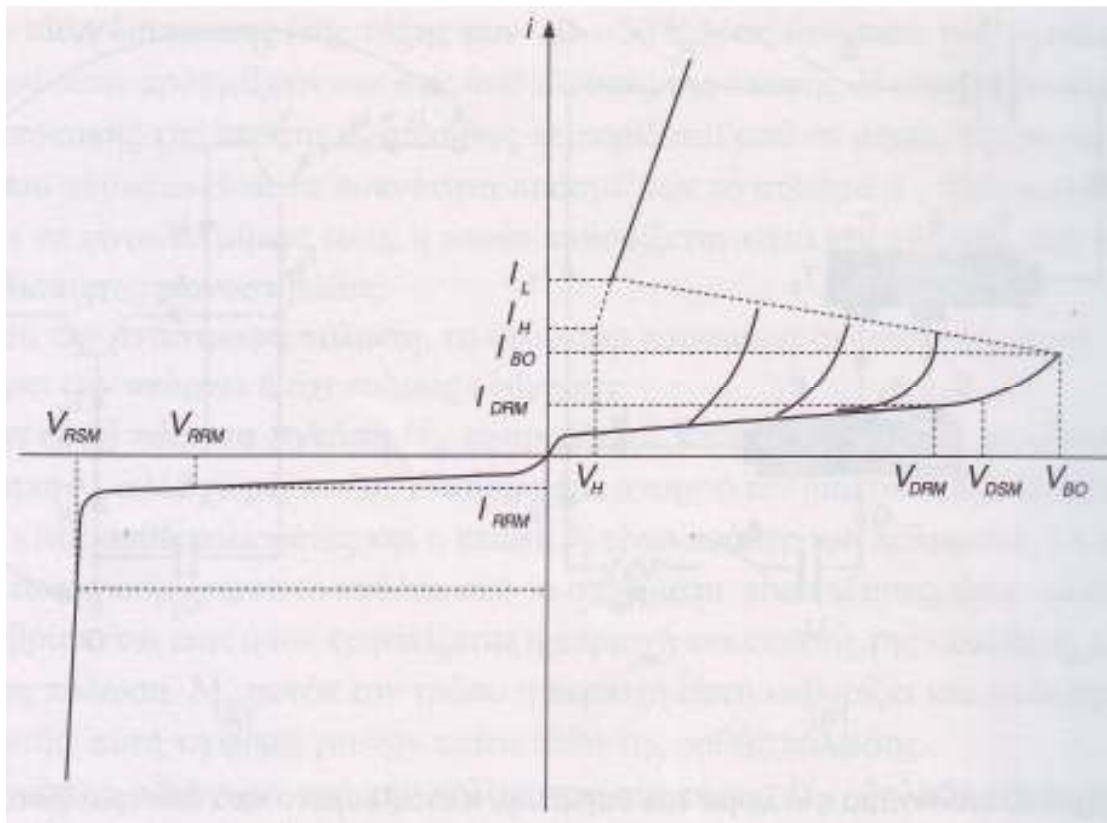
Το ρεύμα αυτό λέγεται ρεύμα συγκράτησης I_H (HOLDING CURRENT)

Συνήθως το ρεύμα μανδάλωσης I_L και το ρεύμα συγκράτησης I_H είναι περίπου το 1% του ονομαστικού ρεύματος του θυρίστορ.

1.4 Στατική χαρακτηριστική και δυναμική συμπεριφορά του θυρίστορ

- Στατική χαρακτηριστική του θυρίστορ

Η τυπική μορφή της στατικής χαρακτηριστικής του θυρίστορ, η οποία εκφράζει τη μεταβολή της τάσης V_{AK} συναρτήσει του ρεύματος που διαρρέει το θυρίστορ παρουσιάζεται στο ακόλουθο σχήμα



Συμφώνα με το σχήμα, εκτός των ρευμάτων συγκράτησης και μανδάλωσης, τα βασικότερα μεγέθη της χαρακτηριστικής είναι τα εξής :

A) ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΑΠΟΚΟΠΗΣ

§ τάση διάσπασης ορθής φοράς V_{BO} (Break over voltage)

Είναι η τάση διάσπασης ορθής φοράς για την οποία το θυρίστορ (χωρίς παλμό) οδηγείται σε κατάσταση αγωγής, για την συγκεκριμένη μέγιστη θερμοκρασία $T_j = 125\text{ }^\circ\text{C}$

§ επαναλαμβανομένη τάση κορυφής ορθής φοράς V_{DRM} ή V_{FB} (Repetitive peak forward voltage)

Είναι η μέγιστη επαναλαμβανόμενη τάση ορθής φοράς κάτω από την οποία για συγκεκριμένη μέγιστη θερμοκρασία, το θυρίστορ παραμένει σε κατάσταση αποκοπής (δίχως εξωτερικό παλμό). Αν η θερμοκρασία αυξηθεί $> 125\text{ }^\circ\text{C}$ υπάρχει κίνδυνος διάσπασης, για $V > V_{DRM}$

§ μη επαναλαμβανόμενη τάση κορυφής ορθής φοράς V_{DSM} ή V_{FBT} (non Repetitive peak off-state voltage)

Είναι τάση μη επαναλαμβανόμενη με κάποιο ρυθμό. Εάν η διάρκεια της είναι μικρότερη από 5ms, το θυρίστορ παραμένει σε κατάσταση αποκοπής.

§ επαναλαμβανόμενο ρεύμα κορυφής I_{DRM} (Repetitive peak off-state current)

Είναι το μέγιστο επαναλαμβανόμενο ρεύμα που κυκλοφορεί στο θυρίστορ, το οποίο ενώ εξακολουθεί να βρίσκεται σε αποκοπή, εφαρμόζεται σε αυτό επαναληπτικά ανοδική τάση ορθής φοράς. Η τάση αυτή αντιστοιχεί σε τάση ίση με την V_{DRM} .

§ επαναλαμβανόμενο ανάστροφο ρεύμα κορυφής I_{RRM} (Repetitive peak reverse current)

Αντιστοιχεί σε αντίστροφη τάση ανόδου ίση με V_{RRM}

B) ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑΣ

§ ενεργός τιμή ρεύματος αγωγιμότητας I_T ή $I_{R(rms)}$

Η μέγιστη επιτρεπόμενη ενεργός τιμή του ρεύματος παλμού ορθής φοράς της ανόδου

$$I_T(rms) = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i_R^2(t) dt}$$

§ μέση τιμή ρεύματος αγωγιμότητας I_μ ή $I_{T(av)}$ (Average on-state current)

Η μέγιστη επιτρεπόμενη μέση τιμή του ρεύματος παλμού, ορθής φοράς, της ανόδου. Εξαρτάται από τη μορφή του ρεύματος

$$I_\mu(rms) = I_{T(av)} = \frac{1}{T} \int_0^T i_R(t) dt$$

§ ρεύμα μανδάλωσης I_L (Latching current)

Το ελάχιστο απαιτούμενο ανοδικό ρεύμα ορθής φοράς που εξασφαλίζει την αγωγιμότητα του θυρίστορ.

§ ρεύμα συγκράτησης I_H (Holding current)

Το ελάχιστο απαιτούμενο ανοδικό ρεύμα ορθής φοράς, ώστε το θυρίστορ να «συγκρατείται» σε αγωγιμότητα μετά την εκκίνηση. Ισχύει

$$I_H \approx I_L / 2$$

§ μέγιστο επιτρεπόμενο κρουστικό ρεύμα I_{TSM} ή I_{SM} (Maximum permissible)

Είναι το μέγιστο κρουστικό ρεύμα που μπορεί να δεχθεί το θυρίστορ, χωρίς να υποστεί πιθανή βλάβη, για ορισμένο χρονικό διάστημα

§ μέγιστο επιτρεπόμενο κύμα ενέργειας (Maximum permissible surge energy)

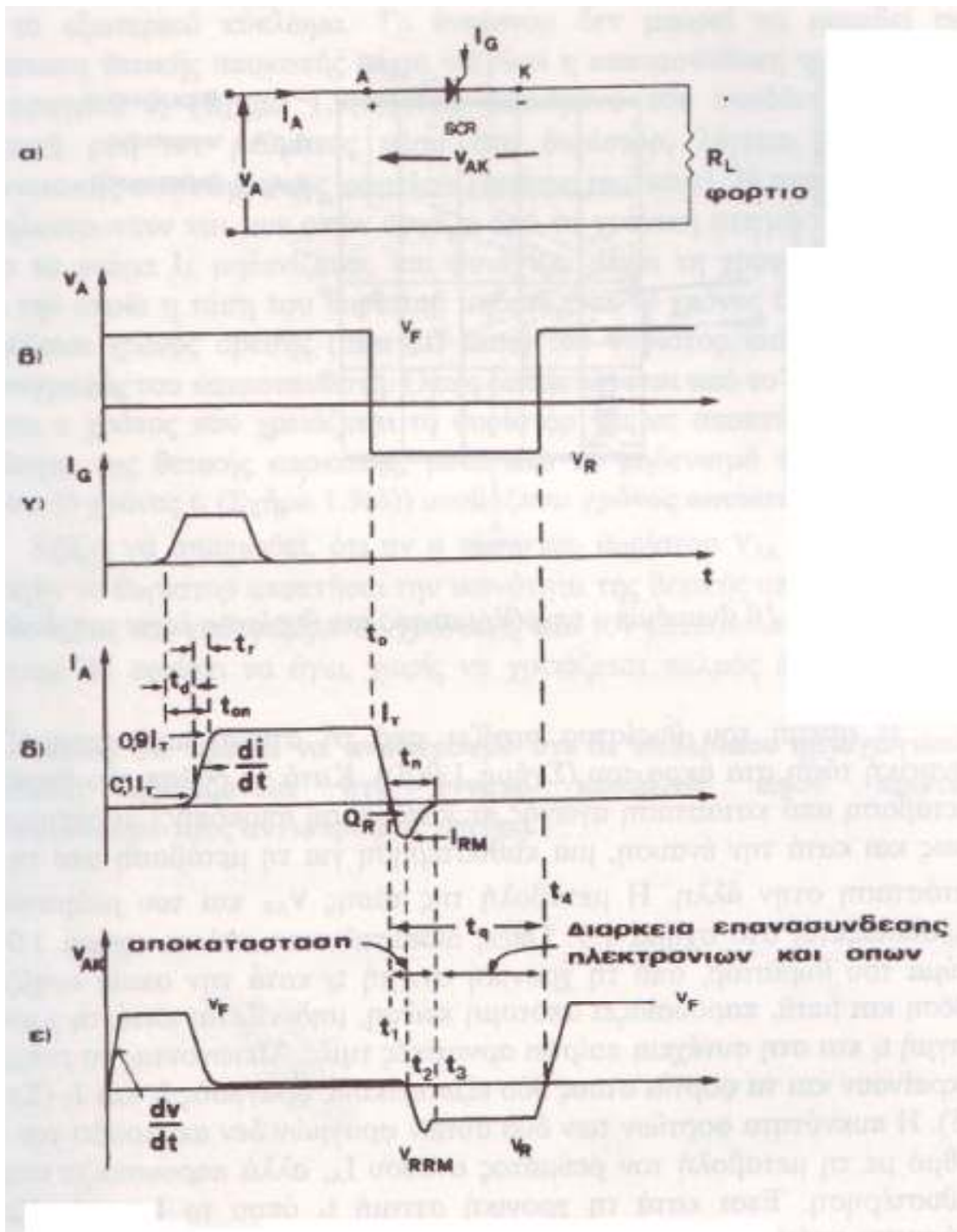
Δίδεται ως γινόμενο $I^2 \cdot t = I^2 \cdot R \cdot t$, για $R = 1 \Omega$. Έχει την έννοια της μέγιστης επιτρεπόμενης ενέργειας (ρεύμα I , θεωρητικά διερχόμενο από ωμική αντίσταση 1Ω), πέρα από την οποία, για λόγους προστασίας των θυρίστωρ, πρέπει να ενεργοποιηθεί το σύστημα προστασίας (ασφάλεια), σε συγκεκριμένη χρονική διάρκεια $\Delta t \approx 10 \text{ ms}$. Αποτελεί την βάση για τον υπολογισμό της ασφάλειας ταχείας τήξεως (προστασία από βραχυκύκλωμα). Οι συγκεκριμένες ασφάλειες παρέχουν προστασία από πιθανές υπερεντάσεις.

• Δυναμική συμπεριφορά του θυρίστωρ

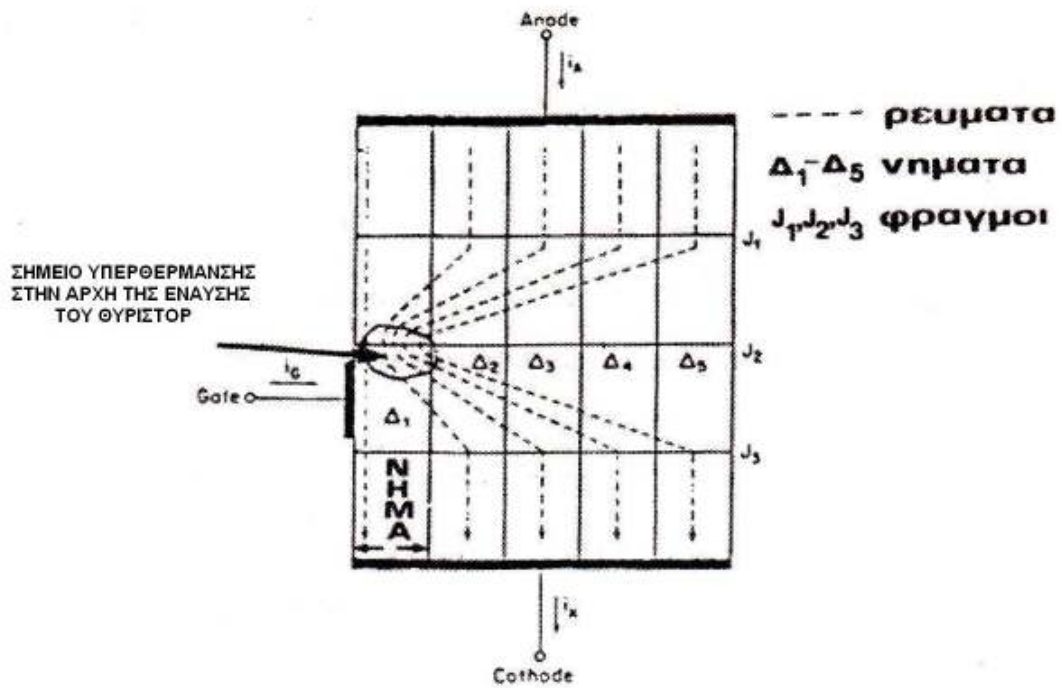
Στη παράγραφο που ακολουθεί, παρουσιάζονται οι κυματομορφές ενός θυρίστωρ τάσης – ρεύματος, σε κατάσταση αγωγής και σε κατάσταση αποκοπής, τις οποίες θα χρησιμοποιήσουμε, ώστε να εξηγήσουμε τη διακοπτική συμπεριφορά ενός θυρίστωρ.

Στο σχήμα (α), όταν η τάση V_A είναι θετική και το θυρίστωρ βρίσκεται σε κατάσταση θετικής αποκοπής, αν ένας παλμός έναυσης εφαρμοστεί στο θυρίστωρ, υπάρχει ένας χρόνος καθυστέρησης (Delay time, t_d) πριν το ρεύμα ανόδου I_A αρχίσει να αυξάνει. Ο χρόνος καθυστέρησης t_d (σχήμα δ) είναι περίπου μερικά μs και οφείλεται στην μετακίνηση φορτίων μέσα στη πλακέτα του θυρίστωρ, έτσι ώστε στο τέλος του χρόνου καθυστέρησης, να αρχίσει κυκλοφορία βρίσκεται στη κατάσταση διέλευσης ή αγωγής, το ρεύμα αρχίζει να αυξάνει μέχρι να φτάσει στη τελική τιμή I_A , με μια κλίση di / dt (όπως απεικονίζεται στο σχήμα δ). Η κλίση αυτή λέγεται ρυθμός μεταβολής του ρεύματος και χαρακτηρίζεται από μια μέγιστη τιμή $(di / dt)_{\text{max}}$, πέραν της οποίας υπάρχει καταστροφή του θυρίστωρ, λόγω τοπικής υπερθέρμανσης (Hot Spot). Η τιμή του $(di / dt)_{\text{max}}$ δίνεται στις προδιαγραφές του θυρίστωρ. Το φαινόμενο της τοπικής αυτής υπερθέρμανσης, οφείλεται στο ότι κατά την έναυση του διακοπτικού μας στοιχείου, το ρεύμα της ανόδου I_A , περνάει συγκεντρωτικά από ένα σημείο ενός νήματος του θυρίστωρ κι έτσι δημιουργείται πρόβλημα υπερθέρμανσης. Το φαινόμενο αυτό παρουσιάζεται στο σχήμα (στ).

Για να αποφευχθεί η καταστροφή ενός θυρίστωρ λόγω του di / dt , μια αυτεπαγωγή με τιμή $L = \mu\text{H}$, μπορεί να συνδεθεί σε σειρά με το θυρίστωρ. Όπως η ταχεία αύξηση του ρεύματος, έτσι και η ταχεία αύξηση της τάσης, διαταράσσει την ομαλή λειτουργία του θυρίστωρ. Αν η κλίση dV_{AK} / dt υπερβεί μια κρίσιμη τιμή $(dV_{AK} / dt)_{\text{max}}$, είναι δυνατό να προκληθεί έναυση κι όταν ακόμη αυτό βρίσκεται σε κατάσταση αποκοπής. Ο χρόνος που χρειάζεται το ρεύμα I_A για να αυξηθεί από το 10% μέχρι το 90% του ονομαστικού ρεύματος, ονομάζεται χρόνος ανύψωσης t_r (σχήμα δ). Το άθροισμα των χρόνων $t_d + t_r$, μας δίνει τον χρόνο έναυσης t_{on} (turn-on time) του θυρίστωρ (σχήμα δ).



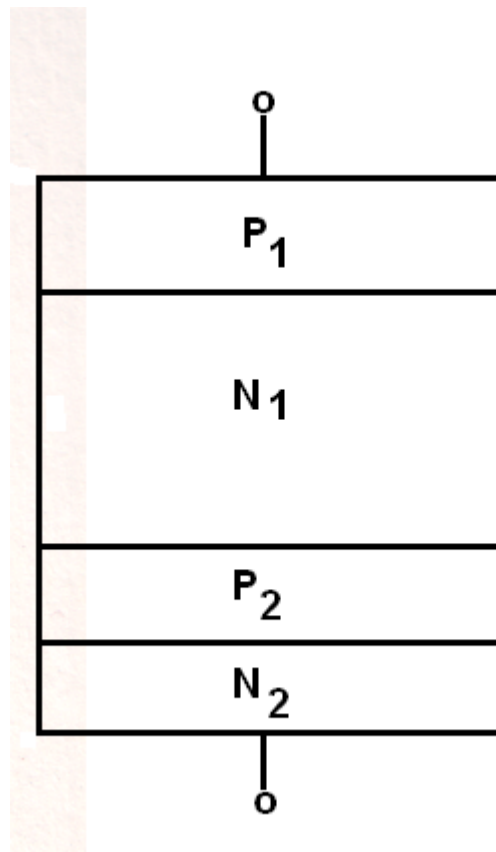
- α) Κύκλωμα με ένα θυρίστωρ.
- β) Τάση εισόδου του κυκλώματος.
- γ) Παλμός έναυσης του θυρίστωρ.
- δ) Ρεύμα του θυρίστωρ.
- ε) Τάση του θυρίστωρ.



Σχήμα (στ)

Η σβέση του θυρίστορ αρχίζει από τη στιγμή που εφαρμόζεται αρνητική άκρη στα άκρα του (σχήμα β). Κατά την σβέση – από κατάσταση αγωγής σε κατάσταση αποκοπής – παρατηρείται, όπως και κατά την έναυση, μια καθυστέρηση. Η μεταβολή της τάσης V_{AK} και του ρεύματος I_A , παρουσιάζεται στις παραπάνω γραφικές παραστάσεις. Όπως βλέπουμε, το ρεύμα του θυρίστορ, από τη χρονική στιγμή t_0 , κατά την οποία αρχίζει η σβέση και μετά, παρουσιάζει απότομη πτώση, μηδενίζεται τη χρονική στιγμή t_1 και στη συνέχεια παίρνει αρνητικές τιμές.

Για να δείξουμε τη δομική συμπεριφορά του θυρίστορ παραθέτουμε το παρακάτω σχήμα, ενώ επίσης βοηθά και το σχήμα (στ)



Μειώνοντας το ρεύμα I_A , μικραίνουν και τα φορτία στους 2 εξωτερικούς φραγμούς J_1 και J_3 . Η πυκνότητα φορτίων των δυο αυτών φραγμών, δεν ακολουθεί τον ίδιο ρυθμό με τη μεταβολή του ανοδικού ρεύματος I_A , αλλά παρουσιάζει κάποια καθυστέρηση. Έτσι κατά την χρονική στιγμή t_1 , όπου το I_A μηδενίζεται, υπάρχουν ακόμα τόσα φορτία, ώστε το θυρίστορ να βρίσκεται σε πλήρη κατάσταση αγωγής. Το αρνητικό ρεύμα θα εξακολουθήσει να κυκλοφορεί, μέχρι να μετακινηθούν οι περισσότεροι φορείς των φραγμών J_1 και J_3 . Όταν γίνει αυτό, οι φραγμοί J_1 και J_3 επανέρχονται στη κατάσταση αποκοπής και το ρεύμα πλησιάζει στο μηδέν, τη χρονική στιγμή t_3 . Το θυρίστορ πλέον, μπορεί να αποκόπτει αρνητική τάση, διότι οι φραγμοί J_1 και J_3 είναι αρνητικά πολωμένοι (Reversed biased). Όμως ο φραγμός J_2 παραμένει θετικά πολωμένος (Forward biased) και περιέχει αρκετά φορτία. Οι φορείς του συγκεκριμένου φραγμού, δεν μπορούν να κυκλοφορήσουν μέσω του εξωτερικού κυκλώματος κι έτσι επανασυνδέονται με ρυθμό, ο οποίος δεν εξαρτάται από το εξωτερικό κύκλωμα. Το θυρίστορ δεν μπορεί να μεταβεί σε κατάσταση θετικής αποκοπής, μέχρι να γίνει η επανασύνδεση των φορέων του φραγμού J_2 (σχήμα ε). Το φαινόμενο που συνδέεται με την αρνητική ροή του ρεύματος, μέσα στο θυρίστορ, λέγεται **φαινόμενο αδρανειακής συσσώρευσης φορτίων (Reverse recovery)**.

Η επανασύνδεση των ηλεκτρονίων και των οπών, ξεκινά από την χρονική στιγμή t_3 , κατά την οποία το ρεύμα I_A μηδενίζεται και συνεχίζει μέχρι τη χρονική στιγμή t_4 , κατά την οποία η τάση του θυρίστορ μηδενίζεται. Ο χρόνος t_a λέγεται χρόνος σβέσης (turn-on time) και δίνεται στις προδιαγραφές του κατασκευαστή. Όπως διαπιστώνεται από το σχήμα (ε), t_a είναι ο χρόνος που χρειάζεται το θυρίστορ για να αποκτήσει ξανά την ικανότητα της θετικής αποκοπής, μετά τον μηδενισμό του ρεύματος ανόδου. Ο χρόνος t_n (σχήμα δ) ονομάζεται χρόνος αποκατάστασης.

Σε περίπτωση που η τάση V_{AK} πάρει θετική τιμή, πριν το θυρίστορ αποκτήσει την ικανότητα της θετικής αποκοπής, δηλαδή πριν το τέλος του χρόνου t_a , τότε το θυρίστορ θα αρχίσει να άγει δίχως να χρειάζεται παλμός έναυσης στη πύλη.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΑΝΟΡΘΩΤΙΚΕΣ ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ ΓΕΦΥΡΕΣ

2.1 Γενική περιγραφή ανορθωτικών διατάξεων

Η διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας, πραγματοποιείται, ως γνωστόν, με εναλλασσόμενο ρεύμα ημιτονικής μορφής και συχνότητας 50 Hz. Πολλές όμως εφαρμογές, απαιτούν τροφοδοσία συνεχούς ρεύματος, οπότε είμαστε υποχρεωμένοι να μετατρέψουμε το εναλλασσόμενο ρεύμα (AC) σε συνεχές (DC). Η μετατροπή αυτή, επιτυγχάνεται με ανορθωτικές διατάξεις και διακρίνεται, σε **ελεγχόμενη** και **μη ελεγχόμενη**

Μια ανορθωτική διάταξη, γενικά, αποτελείται από:

- ▶ Την πηγή εναλλασσόμενου ρεύματος, η οποία τροφοδοτεί την διάταξη μέσω ενός μετασχηματιστή. Ο μετασχηματιστής τροφοδοσίας, όπως ονομάζεται, αφενός απομονώνει την διάταξη από το δίκτυο, αφετέρου προσαρμόζει την τάση στις ανάγκες του τροφοδοτούμενου φορτίου.
- ▶ Τα ανορθωτικά στοιχεία, που ανάλογα την διάταξη, μπορεί να είναι δίοδοι σταθερής(μη ελεγχόμενης) λειτουργίας ή θυρίστορ(ελεγχόμενης λειτουργίας). Οι δυο αυτοί τύποι ανορθωτικών στοιχείων, στηρίζουν τη λειτουργία τους στις ιδιότητες των ημιαγωγών. Παλαιότερα γινόταν χρήση κι άλλων διατάξεων και στοιχείων, όπως λυχνιών ατμών υδραργύρου και στοιχείων σεληνίου, οι οποίες όμως σήμερα έχουν εξαλειφθεί και αντικατασταθεί από τα ημιαγωγά στοιχεία.
- ▶ Το φίλτρο εξομάλυνσης. Αυτό αποτελείται κατά περίπτωση, από χωρητικότητες μεγάλης τιμής και αυτεπαγωγές με σιδηροπυρήνα και έχει ως σκοπό, την εξομάλυνση της κυματομορφής εξόδου της ανορθωτικής διάταξης.
- ▶ Το τροφοδοτούμενο φορτίο: ωμική αντίσταση, κινητήρας DC κ.λ.π.

Οι ανορθώσεις βρίσκουν εφαρμογές στις ακόλουθες περιοχές :

- Συστήματα ελέγχου κινητήρων συνεχούς ρεύματος
- Συστήματα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας
- Διασυνδέσεις σταθμών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας
- Φορτιστές συσσωρευτών
- Συστήματα αδιάλειπτου παροχής ισχύος (UPS)
- Τροφοδοτικά ηλεκτρικών και ηλεκτρονικών κυκλωμάτων.

Συνοπτικά οι διατάξεις των ανορθώσεων χωρίζονται σε 2 κατηγορίες, τις ελεγχόμενες και τις μη ελεγχόμενες.

1. ΜΗ ΕΛΕΓΧΟΜΕΝΕΣ ΑΝΟΡΘΩΣΕΙΣ

Μη ελεγχόμενες ανορθώσεις είναι οι ανορθώσεις εκείνες οι οποίες μετατρέπουν την εναλλασσόμενη τάση δικτύου σε συνεχή, χρησιμοποιώντας ηλεκτρονικές διατάξεις με διόδους. Λόγω του ότι οι διόδοι είναι ημιαγωγά στοιχεία, των οποίων η έναυση δεν μπορεί να ελεγχθεί, η τάση εξόδου της ανόρθωσης με διόδου θα παρουσιάσει κάποιες αυξομειώσεις. Δηλαδή όταν η εναλλασσόμενη τάση τροφοδοσίας παρουσιάσει κάποιες αυξομειώσεις, τότε και η τάση εξόδου (DC) της ανόρθωσης με διόδους, θα παρουσιάσει κάποιες αυξομειώσεις. Γι αυτό το λόγο ονομάζονται μη ελεγχόμενες ανορθώσεις.

2. ΕΛΕΓΧΟΜΕΝΕΣ ΑΝΟΡΘΩΣΕΙΣ.

Αντίθετα, ελεγχόμενες είναι οι ανορθώσεις στις οποίες δεν χρησιμοποιούνται διόδοι αλλά θυρίστορ. Ο λογος έχει να κάνει με τις ιδιότητες του συγκεκριμένου ηλεκτρονικού στοιχείου και ουσιαστικά, αναλύθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Εξαιτίας της απαραίτητης χρήσης παλμών, για την έναυση του, έχουμε τον έλεγχο της εκάστοτε διάταξης.

Τέλος, υπάρχουν περιπτώσεις διατάξεων οι οποίες περιλαμβάνουν ελεγχόμενα (θυρίστορ) και μη (διόδοι) διακοπτικά στοιχεία, είτε σε μονοφασική είτε σε τριφασική ανόρθωση.

2.2 Μη ελεγχόμενες ανορθώσεις

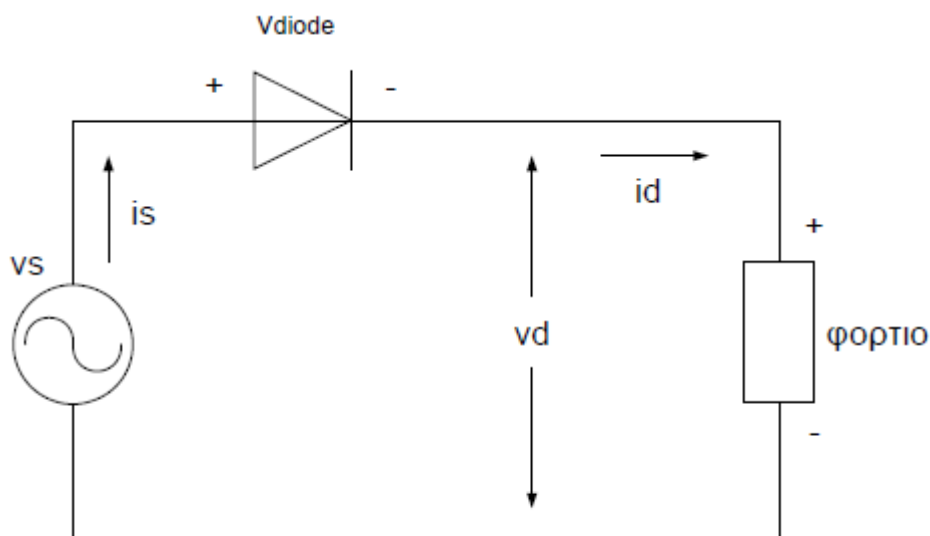
Οι μονοφασικές τοπολογίες είναι μια από τις πιο απλές αλλά και πιο συχνά χρησιμοποιούμενες σήμερα διατάξεις ηλεκτρονικών ισχύος. Αποτελούνται από μια εναλλασσόμενη είσοδο οι οποίες έχουν σε σειρά συνδεδεμένη μια ανορθωτική διάταξη μη ελεγχόμενη, που αποτελείται από διόδους.

Χρησιμοποιούνται σε όλα τα τροφοδοτικά οικιακών συσκευών και σε βιομηχανικές εφαρμογές μικρής ισχύος.

Στο κεφάλαιο αυτό θα αναλυθούν οι τοπολογίες ανορθωτικών διατάξεων με μία δίοδο, με τέσσερις διόδους και με έξι διόδους καθώς και η συμπεριφορά τους με διάφορα φορτία στην έξοδο όπως, ωμικό φορτίο και ωμικό-επαγωγικό φορτίο.

2.2.1 Μονοφασική τοπολογία με μία δίοδο

Στο ακόλουθο σχήμα φαίνεται η γενική τοπολογία με μια δίοδο και φορτίο στην έξοδο. Στο κύκλωμα υπάρχει η πηγή τροφοδοσίας V_s η οποία είναι συνήθως το δίκτυο ή κάποια άλλη εναλλασσόμενη πηγή και σε σειρά με αυτήν μια δίοδος. Κατά την λειτουργία του κυκλώματος πολώνεται θετικά η δίοδος και εφαρμόζεται δυναμικό στα άκρα της με αποτέλεσμα να ξεκινάει να άγει και αρχίζει να ρέει ένα ρεύμα στο κύκλωμα, έτσι στην έξοδο του μετατροπέα έχουμε την εμφάνιση μιας τάσης V_d . Στην συνέχεια θα μελετηθεί η συγκεκριμένη τοπολογία με μια δίοδο με διάφορα φορτία στην έξοδο.



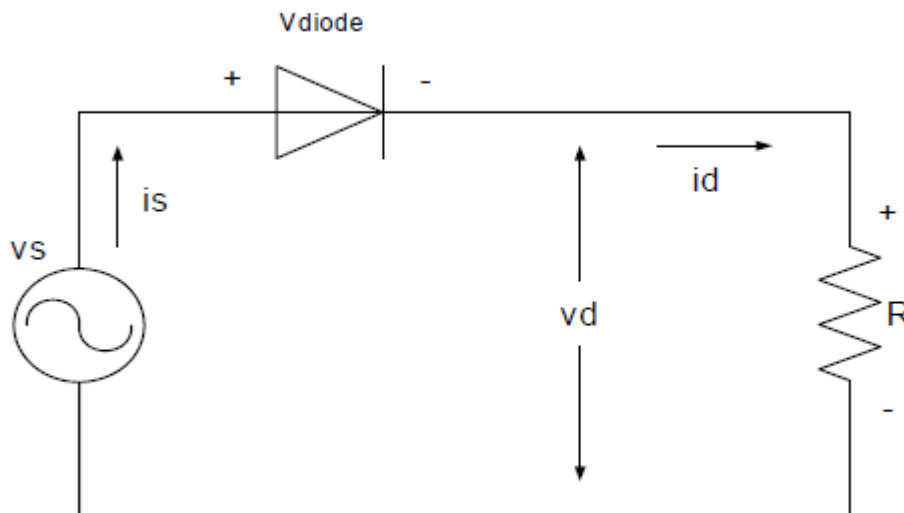
Τοπολογία με μια δίοδο.

A) Ωμικό φορτίο (R) στην έξοδο

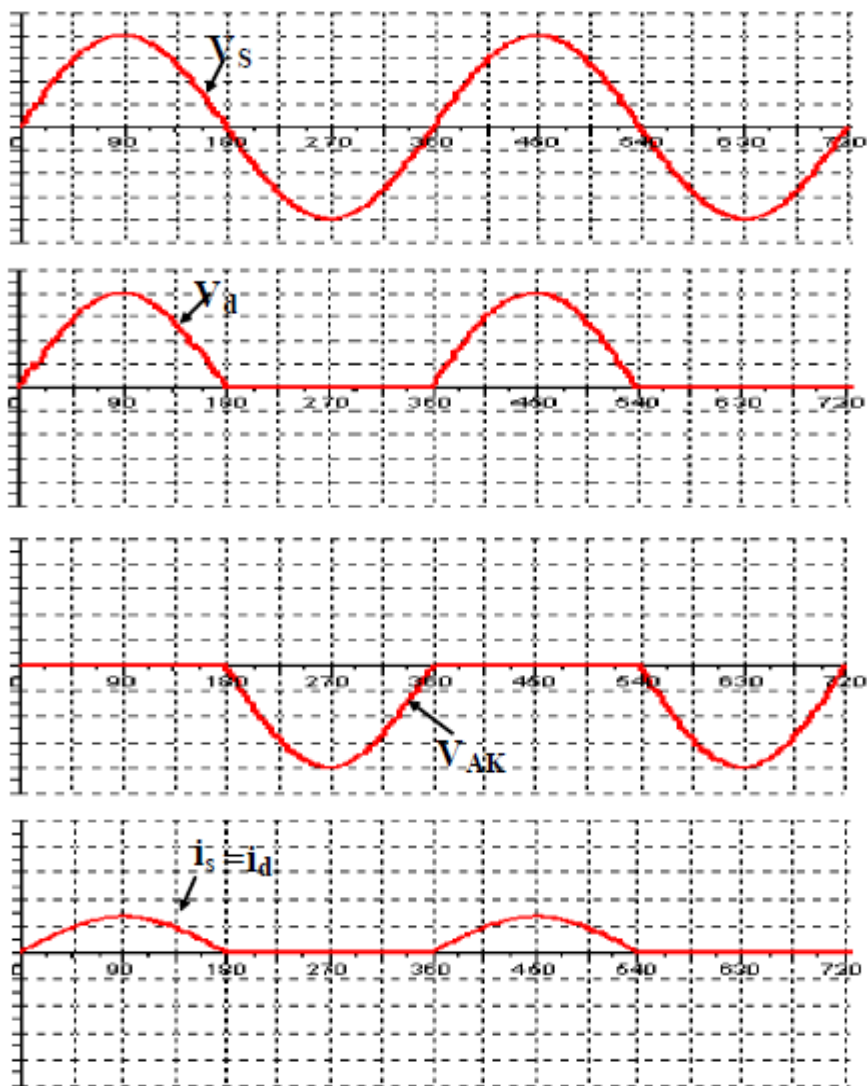
Στο σχήμα φαίνεται ένα κύκλωμα με μια δίοδο και ωμικό φορτίο στην έξοδο. Η λειτουργία του κυκλώματος είναι η ίδια με αυτήν που εξηγήθηκε παραπάνω. Παρακάτω δίδονται οι κυματομορφές των ηλεκτρικών μεγεθών του κυκλώματος.

Θεωρώντας την V_s σαν τάση εισόδου, I_s το ρεύμα που ρέει στο κύκλωμα και V_d την τάση εξόδου επάνω στο ωμικό φορτίο, προκύπτει η παρακάτω σχέση :

$$u_s(t) = i(t) \cdot R = u_d(t)$$



Τοπολογία με μια δίοδο.



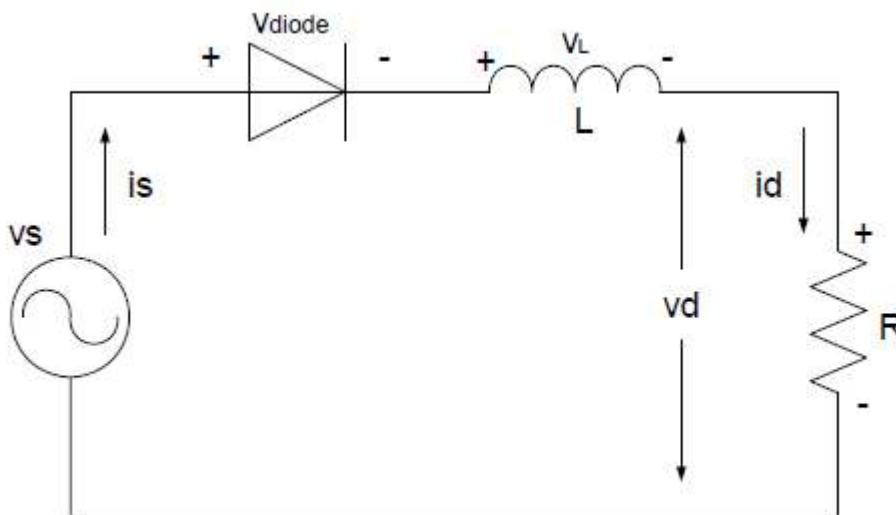
Κυματομορφές τάσεων και ρευμάτων για την ανορθωτική διάταξη με μια δίοδο και με ωμικό φορτίο.

B) Ωμικό-επαγωγικό φορτίο (R-L) στην έξοδο

Κατά την λειτουργία του κυκλώματος της ανορθωτικής μη ελεγχόμενης διάταξης ενός παλμού με ωμικό-επαγωγικό φορτίο την στιγμή που η δίοδος άγει, όπως δείχνει το σχήμα 3.5, μπορεί να θεωρηθεί σαν ένα βραχυκύκλωμα επάνω στο κύκλωμα και την στιγμή εκείνη η τάση της διόδου είναι ίση με 0. Την στιγμή εκείνη το ρεύμα που θα ρέει στο κύκλωμα δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$u_s = i \cdot R + L \frac{di}{dt}$$

Όπου η τάση αυτεπαγωγής $U_L = L \cdot di / dt$

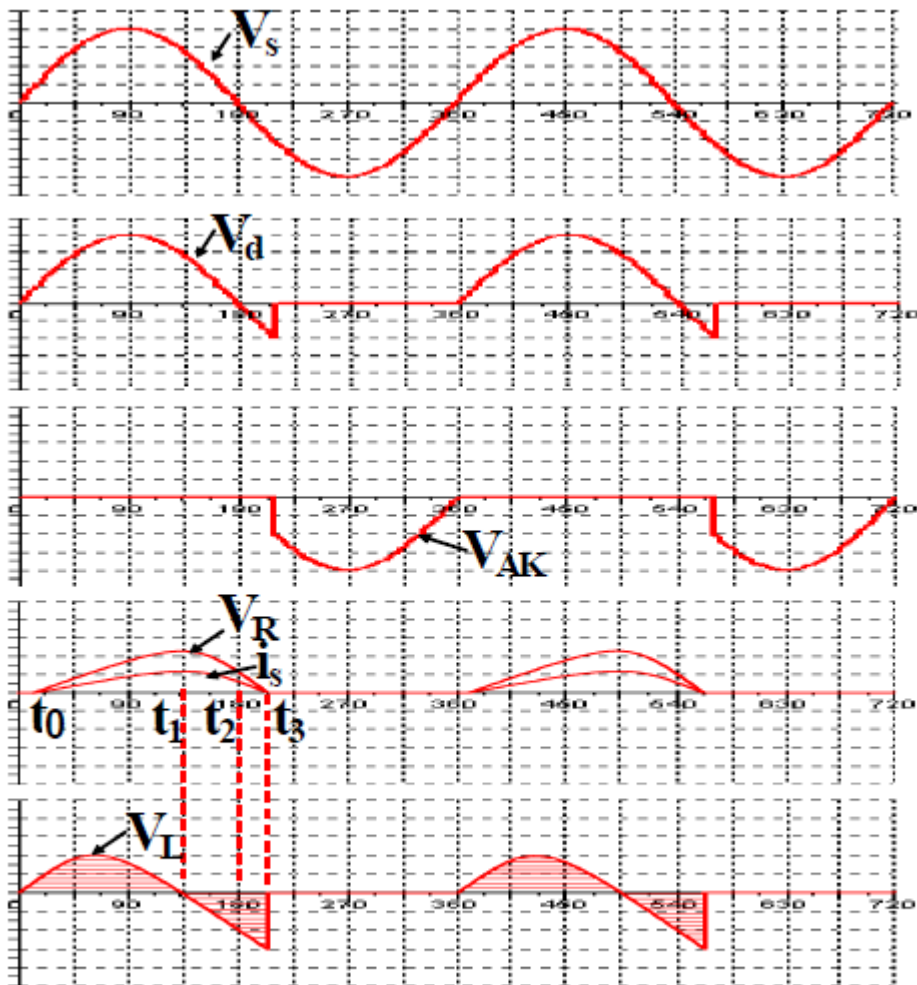


Τοπολογία με μια δίοδο και ωμικό-επαγωγικό φορτίο.

Στο παρακάτω σχήμα δίνονται οι κυματομορφές των τάσεων και των ρευμάτων κατά την λειτουργία του κυκλώματος σε διάφορες χρονικές στιγμές. Ξεκινώντας από την χρονική στιγμή t_0 έως της t_3 η V_d και η V_s σε όλη τη διάρκεια περιόδου είναι ίσες και συμφασικές. Μέχρι την στιγμή t_1 η $U_s > U_R$ οπότε και η $U_L = U_s - U_R$ έτσι το ρεύμα αυξάνει όπως επίσης αυξάνει και η ενέργεια που αποθηκεύεται στην αυτεπαγωγή.

Στο επόμενο χρονικό διάστημα $t_1 - t_2$ φαίνεται πως η U_L γίνεται αρνητική όπως και το ότι το ρεύμα αρχίζει να μειώνεται και μηδενίζεται την στιγμή που μηδενίζεται και η αυτεπαγωγή. Την στιγμή t_2 όπου η V_s γίνεται αρνητική το ρεύμα συνεχίζει να είναι θετικό λόγω του ότι η δίοδος άγει εξαιτίας της αποθηκευμένης ενέργειας της αυτεπαγωγής. Στην t_3 στιγμή όπου η δίοδος σταματάει να άγει και έχουμε μηδενισμό του ρεύματος ισχύει:

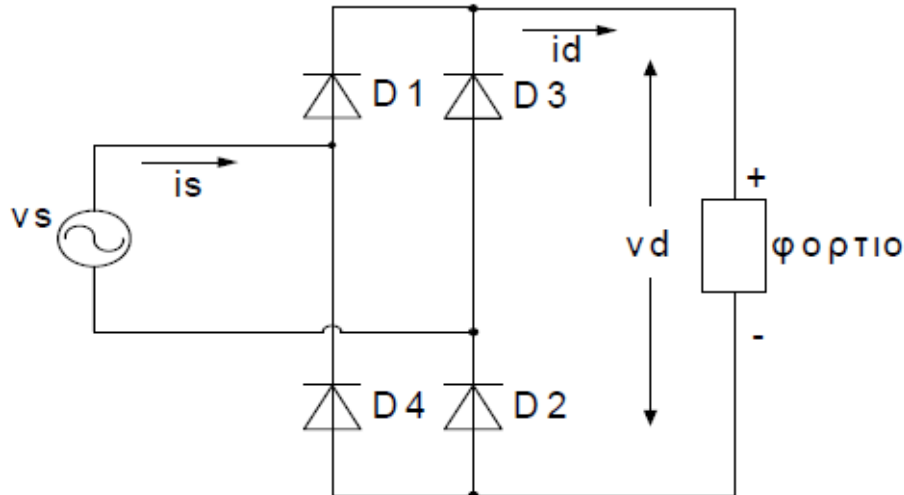
$$\frac{1}{L} V_L \cdot dt = di$$



Κυματομορφές τάσεων και ρευμάτων για την ανορθωτική διάταξη με μια δίοδο και με ωμικό-επαγωγικό φορτίο.

2.2.2 Μονοφασική τοπολογία με τέσσερις διόδους

Μια τοπολογία ανορθωτικής διάταξης είναι η διάταξη η οποία αποτελείται από τέσσερις διόδους και η ηλεκτρική σύνδεση της διάταξης αυτής φαίνεται στο εξής σχήμα



Τοπολογία με τέσσερις διόδους.

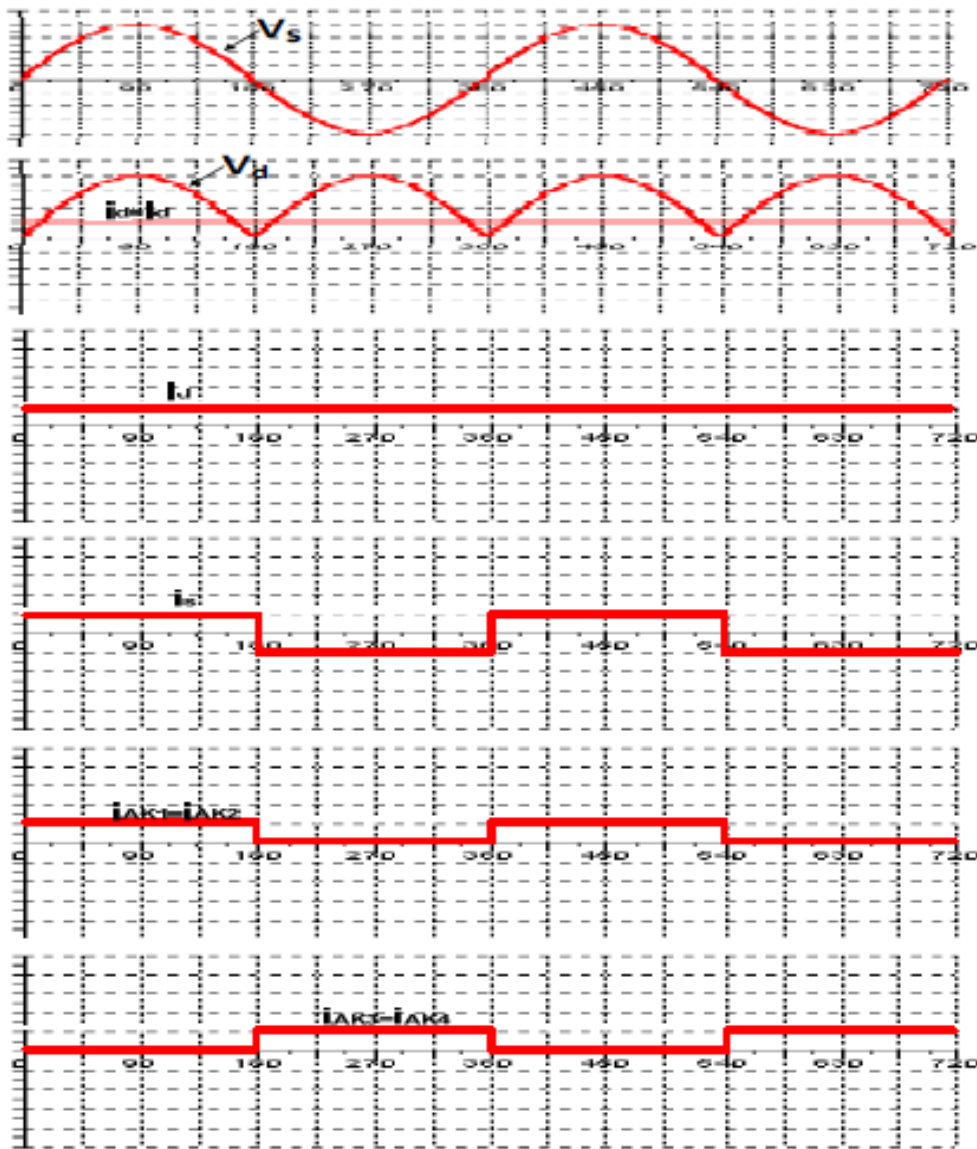
Στο κύκλωμα υπάρχουν δυο ζευγάρια διόδων οι οποίες λειτουργούν για το μισό της περιόδου. Στην πρώτη ημιπερίοδο είναι οι διόδοι D_1 και D_3 όπου λειτουργούν μαζί και στην δεύτερη ημιπερίοδο οι διόδοι D_2 και D_4 όπου αυτές οι δυο λειτουργούν μαζί.

Κατά την λειτουργία του κυκλώματος, όταν οι διόδοι D_1 και D_3 βρεθούν σε κοινό δυναμικό, το ρεύμα ρέει συνεχώς μέσα από μια δίοδο από την πρώτη ομάδα και μέσα από μια δίοδο της δεύτερης ομάδας. Όταν η V_s είναι θετική τότε η δίοδος D_1 θα άγει και το i_d και η V_s θα εμφανίζεται ως τάση ανάστροφης πόλωσης επάνω στα άκρα της D_3 . Όταν τώρα η V_s γίνει αρνητική τότε το ρεύμα ρέει μέσω της D_3 και η D_1 εμφανίζει στα άκρα της ανάστροφη πόλωση.

Το ίδιο τώρα συμβαίνει και στην περίπτωση που η δεύτερη ομάδα D_2 & D_4 βρεθούν σε κοινό δυναμικό. Όταν η V_s είναι θετική τότε η δίοδος D_2 θα άγει το i_d και η V_s θα εμφανίζεται ως τάση ανάστροφης πόλωσης επάνω στα άκρα της D_4 . Όταν τώρα η V_s γίνει αρνητική τότε το ρεύμα μεταβαίνει ακαριαία στη δίοδο D_4 και η D_2 εμφανίζει στα άκρα της ανάστροφη πόλωση.

Την συμπεριφορά των κυματομορφών τάσεων και ρευμάτων θα τα δούμε στο σχήμα που ακολουθεί, όπου σαν έξοδο θεωρείται μια πηγή ρεύματος.

Όταν η V_s είναι θετική τότε η δίοδος D1 και D2 στα δυο κυκλώματα θα άγουν, τότε ισχύει ότι $V_s = V_d$ και $i_s = i_d$. Όταν η V_s γίνει αρνητική τότε οι δίοδοι D3 και D4 στα δυο κυκλώματα θα άγουν, επομένως είναι $V_d = -V_s$ και $i_s = -i_d$, οπότε η τάση εξόδου μπορεί να εκφραστεί χρονικά από τη σχέση: $u_d(t) = |V_s|$.

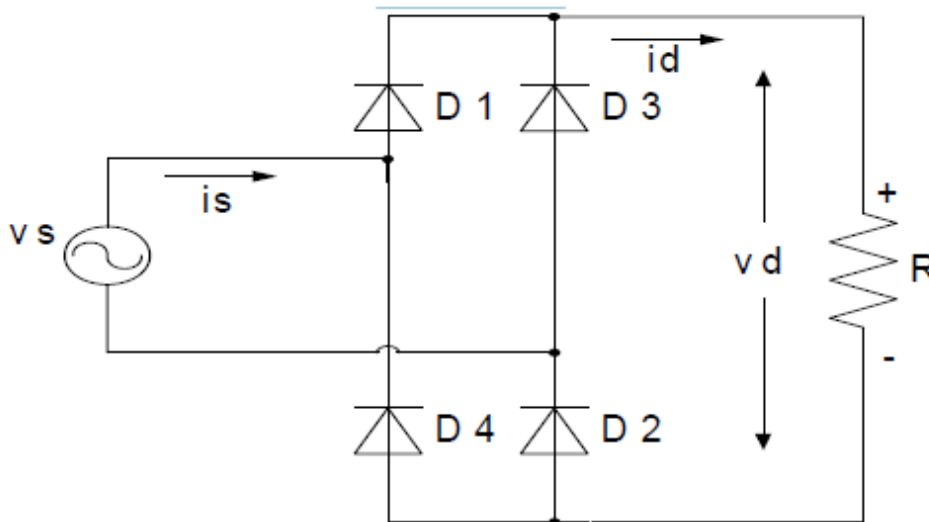


Κυματομορφές τάσεως και ρευμάτων για μια πλήρους γέφυρας ανορθωτική διάταξη με πηγή ρεύματος στην έξοδο.

Στην συνέχεια θα εξεταστεί η λειτουργία αυτών των ανορθωτικών διατάξεων με τέσσερις δίοδους, προσθέτοντας στην έξοδο διάφορα φορτία.

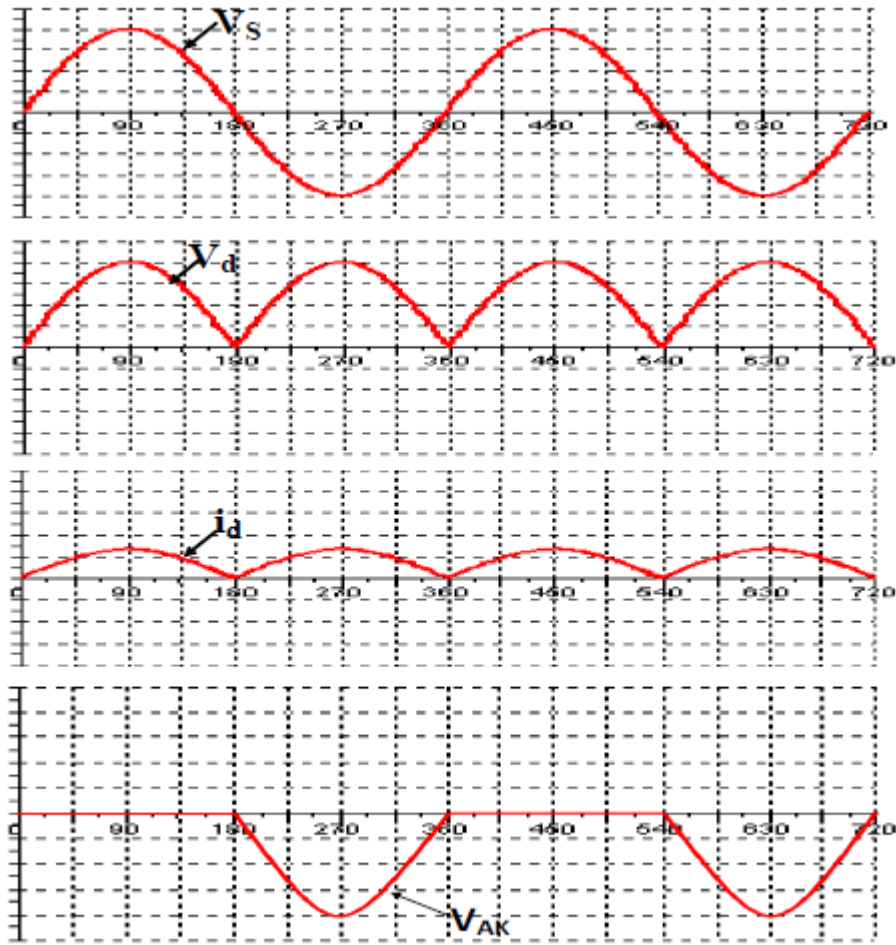
A) Ωμικό φορτίο (R) στην έξοδο

Η ανορθωτική διάταξη που φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα αποτελείται από μια εναλλασσόμενη τάση εισόδου, από τέσσερις διόδους και στην πλευρά Σ.Ρ. (έξοδο) του ανορθωτή είναι συνδεδεμένη μια ωμική αντίσταση.



Τοπολογία με ωμικό φορτίο στην έξοδο.

Παρατηρώντας τις κυματομορφές στη συνέχεια, φαίνεται ότι κατά την διάρκεια όπου η διόδοι D1 και D2 άγουν, έχουμε τάση στην έξοδο κατά την πρώτη ημιπερίοδο όπως επίσης, εμφανίζεται και ένα ρεύμα i_d το οποίο είναι συμφασικό με το ρεύμα i_s της πηγής εισόδου. Αντίστοιχα στις διόδους D3 και D4 εμφανίζεται η ανάστροφη τάση της πηγής εισόδου. Κατά την δεύτερη ημιπερίοδο εμφανίζεται πάλι μια τάση και ρεύμα στην έξοδο λόγω του ότι έχουν αρχίσει να άγουν η διόδοι D2 και D4 και η ανάστροφη τάση εμφανίζεται επάνω στις διόδους D1 και D2.



Κυματομορφές με ωμικό φορτίο.

- Η μέση τιμή V_{do} της DC εξόδου δίνεται από τον παρακάτω τύπο :

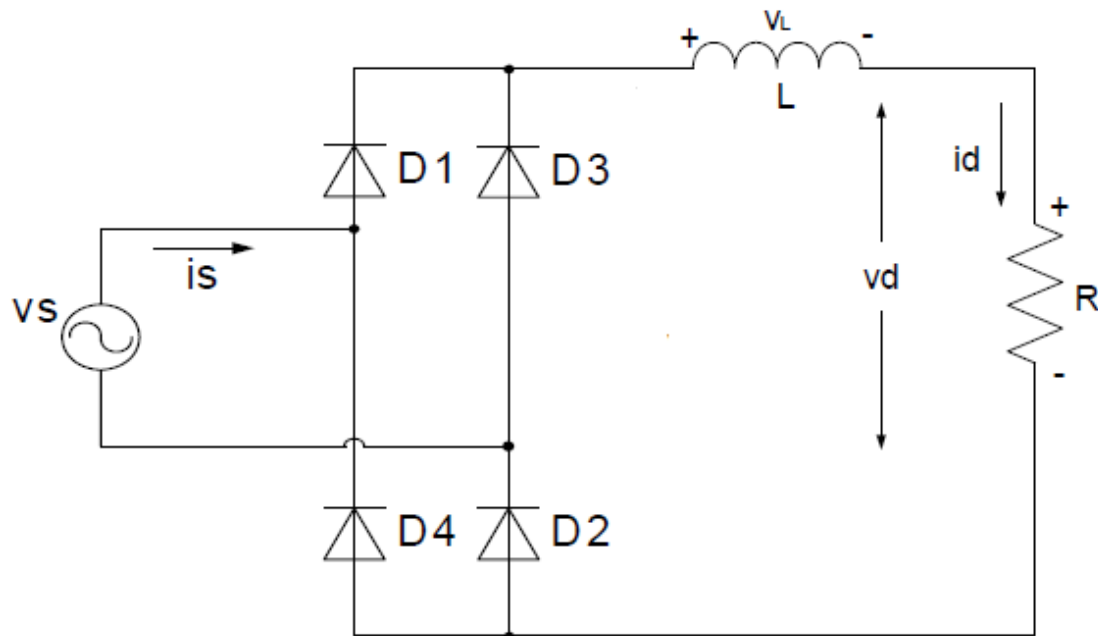
$$V_{do} = \frac{1}{T/2} \int_0^{T/2} \sqrt{2}V_s \sin \omega t \cdot dt = \frac{1}{\omega T/2} (\sqrt{2}V_s \cos \omega t) \Big|_0^{T/2} = \frac{2}{\pi} \sqrt{2} \cdot V_s$$

Επομένως

$$V_{do} = \frac{2}{\pi} \sqrt{2} \cdot V_s = 0.9 \cdot V_s$$

όπου V_s είναι η rms τιμή της τάσης εισόδου.

B) Ωμικό-επαγωγικό φορτίο (R-L) στην έξοδο



*Μη ελεγχόμενη ανορθωτική διάταξη πλήρους γέφυρας
ωμικό-επαγωγικό φορτίο.*

Το ηλεκτρικό κύκλωμα του μετατροπέα, με ωμικό — επαγωγικό φορτίο παρουσιάζεται στο σχήμα που βλέπουμε, όπου στη θέση του φορτίου είναι μια ωμική αντίσταση σε σειρά με μια καθαρή αυτεπαγωγή.

Όπως και στην περίπτωση της λειτουργίας με ωμικό φορτίο, για τα διαστήματα:

- $0 \leq \omega t \leq \pi$, μεταξύ των διόδων με κοινή κάθοδο ($D1, D3$), θα άγει αυτή που έχει άνοδο με θετικότερο δυναμικό, δηλαδή η $D1$, και μεταξύ των διόδων με κοινή άνοδο ($D2, D4$), θα άγει αυτή που έχει κάθοδο με αρνητικότερο δυναμικό, δηλαδή η $D4$.
- $\pi \leq \omega t \leq 2\pi$, μεταξύ των διόδων με κοινή κάθοδο ($D1, D3$), θα άγει αυτή που έχει άνοδο με θετικότερο δυναμικό, δηλαδή η $D3$, και μεταξύ των διόδων με κοινή άνοδο ($D2, D4$), θα άγει αυτή που έχει κάθοδο με αρνητικότερο δυναμικό, δηλαδή η $D2$.

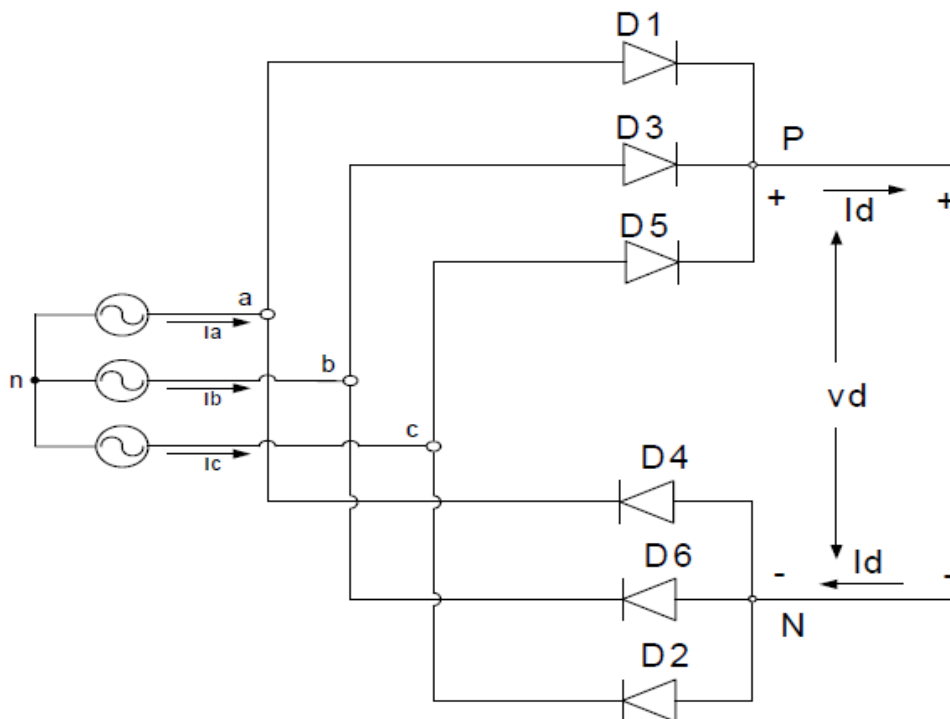
2.2.3 Τριφασική τοπολογία με έξι διόδους

Σε εφαρμογές όπου είναι απαραίτητη η δυνατότητα διαχείρισης μεγάλης ισχύος και η εμφάνιση όσο το δυνατόν μικρότερης κυμάτωσης στην έξοδο, χρησιμοποιούνται τριφασικές ανορθωτικές διατάξεις αντί των μονοφασικών ανορθωτικών διατάξεων.

Η λειτουργία μιας διάταξης με έξι διόδους είναι η εξής :

Σαν είσοδο υπάρχουν τρεις πηγές Ε.Ρ. οι οποίες τροφοδοτούνε το κύκλωμα και έχουμε τον σχηματισμό δυο ομάδων που αποτελούνται από τρεις διόδους η κάθε ομάδα. Κατά την λειτουργία το ρεύμα I_a ρέει μέσω μιας διόδου της πρώτης ομάδας και μέσω μιας διόδου της δεύτερης ομάδας. Στην «άνω» ομάδα θα άγει η diode που έχει την άνοδο της στο υψηλότερο δυναμικό ενώ οι άλλες δυο πολώνονται ανάστροφα. Στην «κάτω» ομάδα θα άγει η diode που έχει την κάθοδο της στο χαμηλότερο δυναμικό, ενώ οι άλλες δυο πολώνονται ανάστροφα.

Κατά την λειτουργία του κυκλώματος που ακολουθεί, εμφανίζεται τάση στην έξοδο στα δύο άκρα, P στον θετικό ακροδέκτη Σ.Ρ. και N στον αρνητικό ακροδέκτη Σ.Ρ., με σημείο αναφοράς τον ουδέτερο ακροδέκτη η στην πλευρά Ε.Ρ. του κυκλώματος. Έτσι μπορούν να βρεθούν τα δυναμικά V_{an} , V_{bn} , V_{cn} , στην πλευρά του Ε.Ρ. του κυκλώματος.

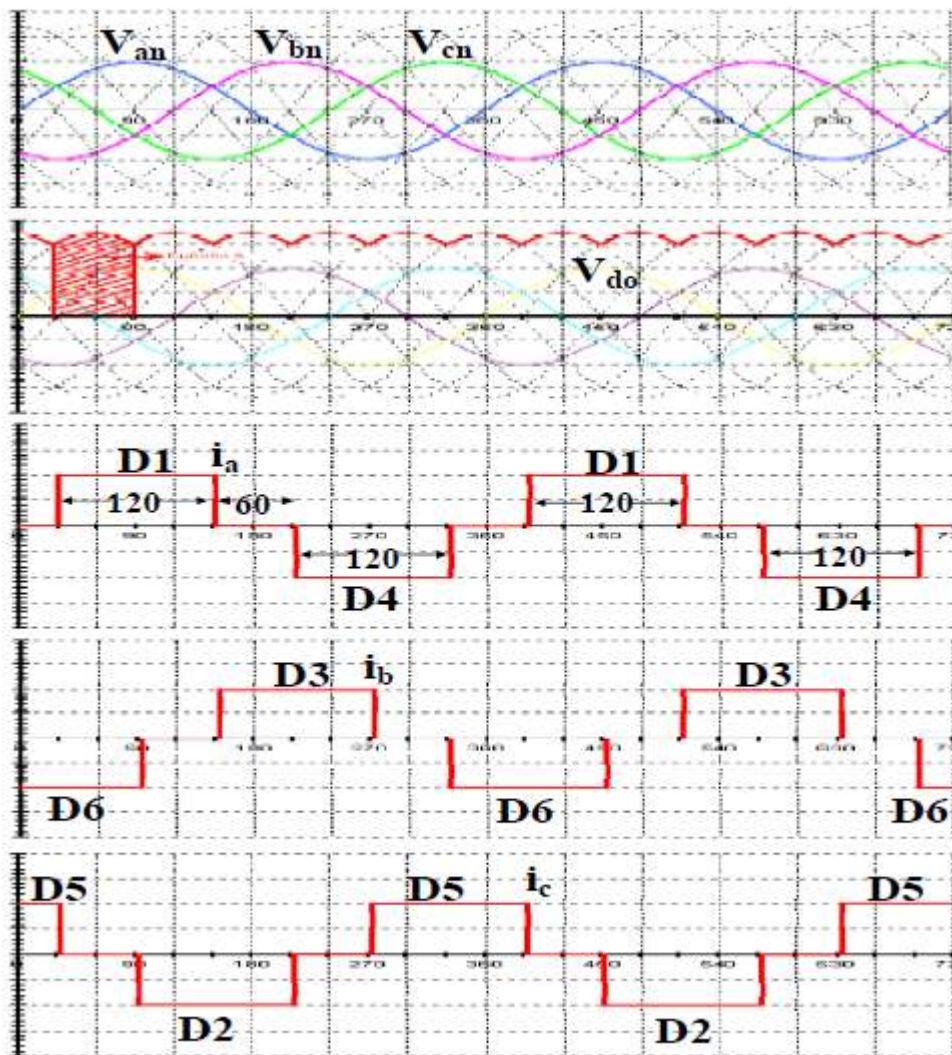


Τοπολογία με έξι διόδους.

Η στιγμιαία τιμή της τάσης στην έξοδο θα είναι **$V_d = V_{Pn} - V_{Nn}$**

Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι κυματομορφές των τάσεων εισόδου του κυκλώματος καθώς και η κυματομορφή της τάσης εξόδου V_d , η οποία αποτελείται από έξι τμήματα ανά περίοδο της τάσης του δικτύου. Στην περίπτωση αυτή η κάθε δίοδος άγει για 120° .

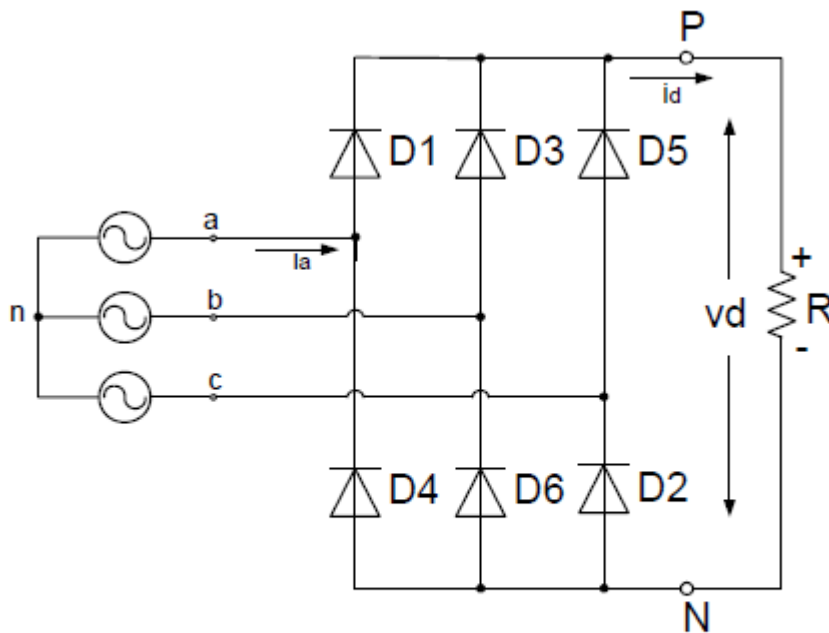
Οι κυματομορφές των ρευμάτων επίσης φαίνονται, όπου για το ρεύμα της φάσης α δηλαδή το i_a όταν άγει η δίοδος 1 το ρεύμα να είναι I_d , όταν άγει η δίοδος 4 τότε το ρεύμα στην έξοδο θα είναι $-I_d$ και το ρεύμα θα είναι 0 όταν καμία από τις παραπάνω διόδους δεν θα άγει. Η μετάβαση του ρεύματος από την μια δίοδο στην επόμενη θεωρείται ακαριαία, λόγω του ότι $LS=0$.



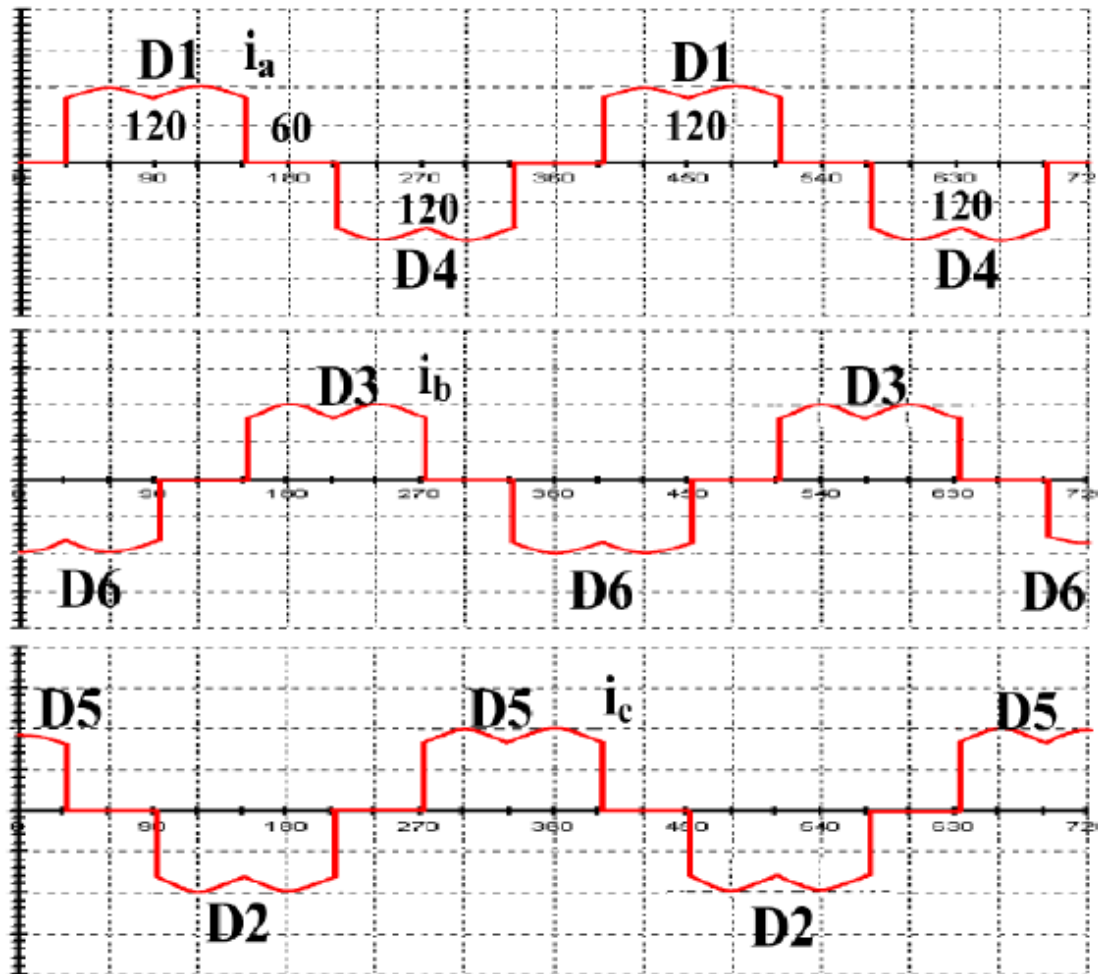
Κυματομορφές τάσεως και ρεύματος

A) Ωμικό φορτίο (R) στην έξοδο

Η λειτουργία της τριφασικής γέφυρας πλήρους ανόρθωσης και με ωμικό φορτίο θα είναι η ίδια με αυτήν που εξηγήθηκε προηγουμένως , ενώ το πλήρες κύκλωμα και οι κυματομορφές φαίνονται ακολούθως

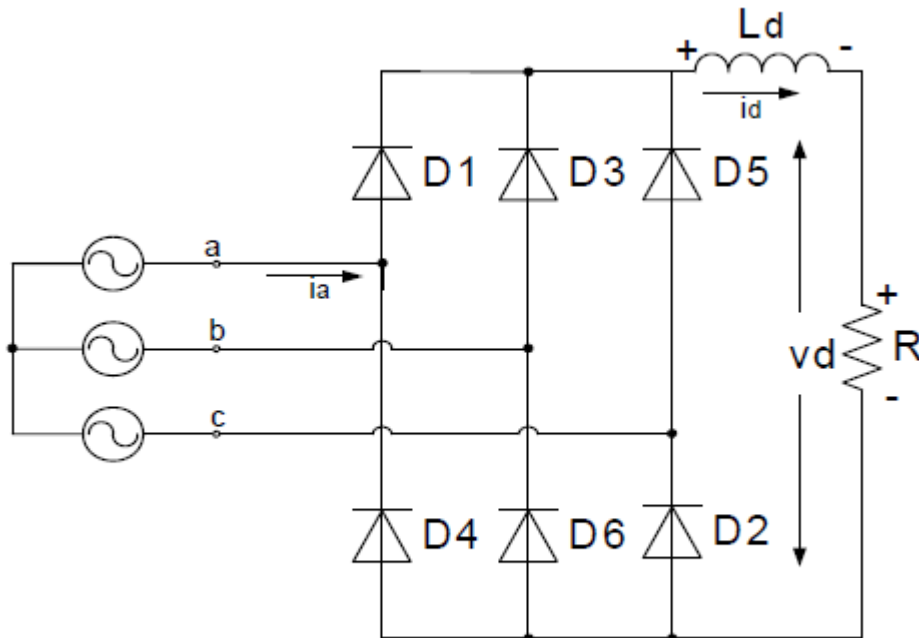


Τριφασική γέφυρα πλήρους ανόρθωσης με ωμικό φορτίο



Κυματομορφή των φασικών ρευμάτων στην περίπτωση ωμικού φορτίου.

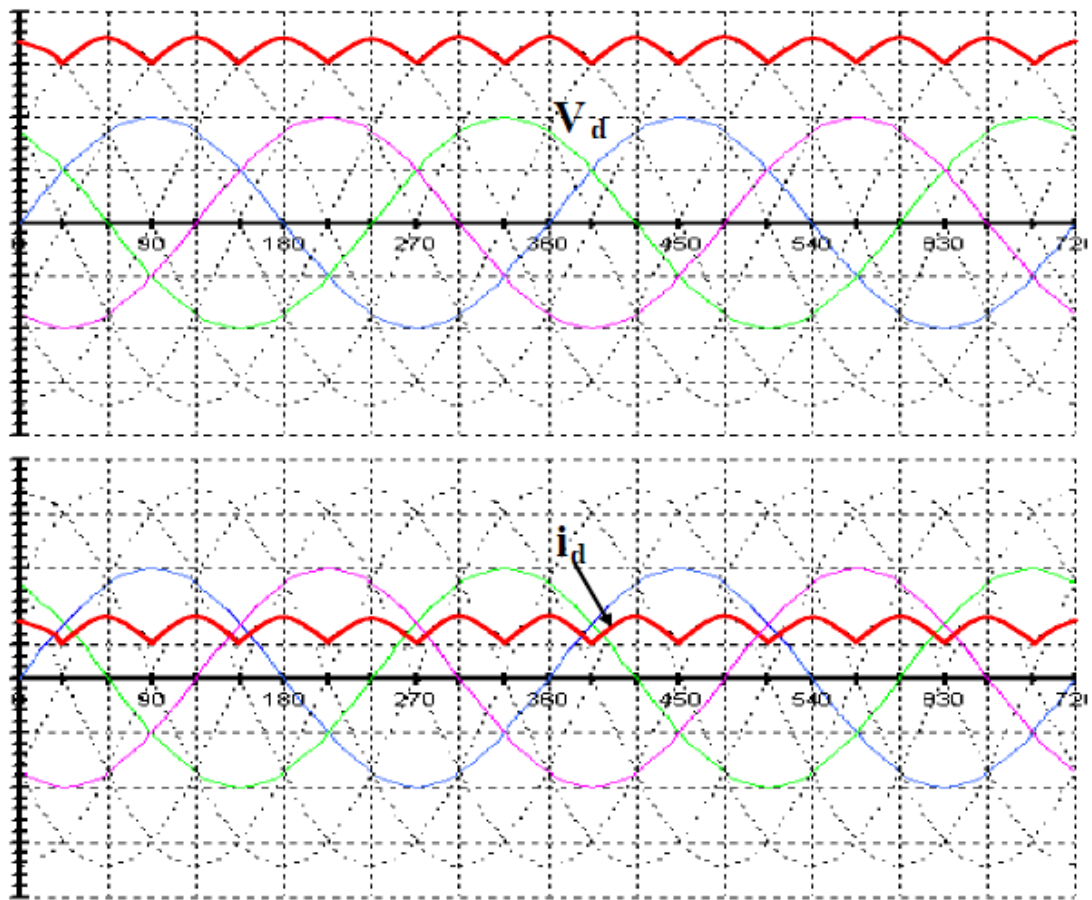
B) Ωμικό-επαγωγικό φορτίο (R-L) στην έξοδο



Τοπολογία με ωμικό-επαγωγικό φορτίο στην έξοδο.

Η διαφορά με το προηγούμενο φορτίο είναι ότι σε αυτό το κύκλωμα υπάρχει και μια αυτεπαγωγή L η οποία επηρεάζει την λειτουργία του κυκλώματος. Σε σειρά, λοιπόν με μια ωμική αντίσταση είναι συνδεδεμένη η αυτεπαγωγή όπως φαίνεται παραπάνω.

Στην περίπτωση ωμικού-επαγωγικού φορτίου η κυματομορφή της τάσης εξόδου θα είναι όμοια όπως και στις προηγούμενες περιπτώσεις απλώς η επαγωγή θα εξομαλύνει την κυμάτωση του ρεύματος όπως φαίνεται και στις κυματομορφές που ακολουθούν.

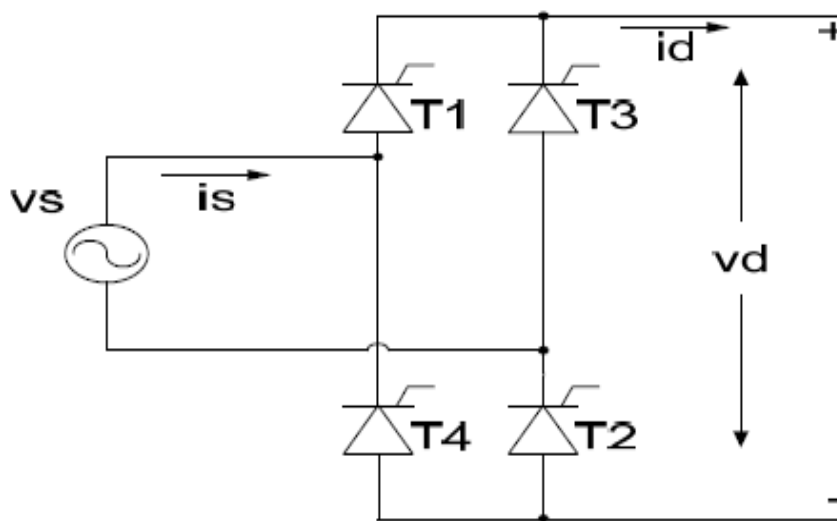


Κυματομορφές τάσεως και ρεύματος με ωμικό-επαγωγικό φορτίο.

2.3 Ελεγχόμενες ανορθώσεις

Σε πολλές εφαρμογές όπως είναι τα Σ.Ρ. κινητήρια συστήματα, είναι απαραίτητη η δυνατότητα ελέγχου της συνεχούς τάσης εξόδου. Στους ελεγχόμενους, από τη φάση, μετατροπείς της τάσης του δικτύου, η μετατροπή του Ε.Ρ. σε ελεγχόμενο Σ.Ρ. πραγματοποιείται με θυρίστορ. Παλαιότερα οι μετατροπείς αυτοί χρησιμοποιούνταν για τον έλεγχο της ροής της ηλεκτρικής ισχύος. Σήμερα χρησιμοποιούνται κυρίως σε τριφασικές εφαρμογές μεγάλης ισχύος, όπου είναι απαραίτητη ή επιθυμητή η δυνατότητα ελέγχου της ροής ισχύος μεταξύ της εναλλασσόμενης και της συνεχούς πλευράς.

Παραδείγματα τέτοιων εφαρμογών είναι οι μετατροπείς μεταφοράς ισχύος με υψηλή συνεχή τάση και ορισμένα κινητήρια συστήματα Ε.Ρ. ή Σ.Ρ. με δυνατότητα ανάκτησης ισχύος, δηλαδή με δυνατότητα επιστροφής ισχύος στο δίκτυο. Στους μετατροπείς αυτούς η χρονική στιγμή κατά την οποία ένα θυρίστορ άγει ή παύει να άγει εξαρτάται από την κυματομορφή της εναλλασσόμενης τάσης του δικτύου και τις εισόδους ελέγχου, δηλαδή τους παλμούς έναυσης.



Στο σχήμα φαίνεται ένας πλήρως ελεγχόμενος μετατροπέας. Για δεδομένες εναλλασσόμενες τάσεις δικτύου η μέση τάση στην έξοδο μπορεί να ελέγχεται με συνεχή τρόπο από μια μέγιστη θετική μέχρι μια μέγιστη αρνητική τιμή. Το συνεχές ρεύμα του μετατροπέα I_d δεν μπορεί να αλλάξει φορά.

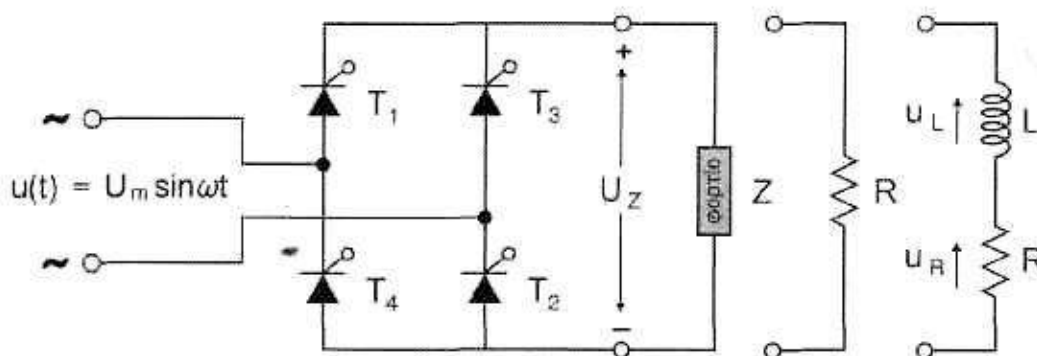
Επομένως, ένας μετατροπέας μπορεί να λειτουργήσει μόνο σε δυο τεταρτημόρια. Οι θετικές τιμές σημαίνουν λειτουργία ανόρθωσης, ενώ την στιγμή όπου η τάση γίνεται αρνητική αλλά το ρεύμα παραμένει θετικό έχουμε

λειτουργία αντιστροφής όπου η ισχύς της εξόδου επιστρέφει στην πλευρά της εισόδου.

Στην συνέχεια θα εξεταστούν κυκλώματα με θυρίστορ καθώς και ο έλεγχος τους για δεδομένες τάσεις εισόδου καθυστερώντας τις χρονικές στιγμές κατά τις οποίες επιτρέπεται στα θυρίστορ η έναρξη της αγωγής ρεύματος.

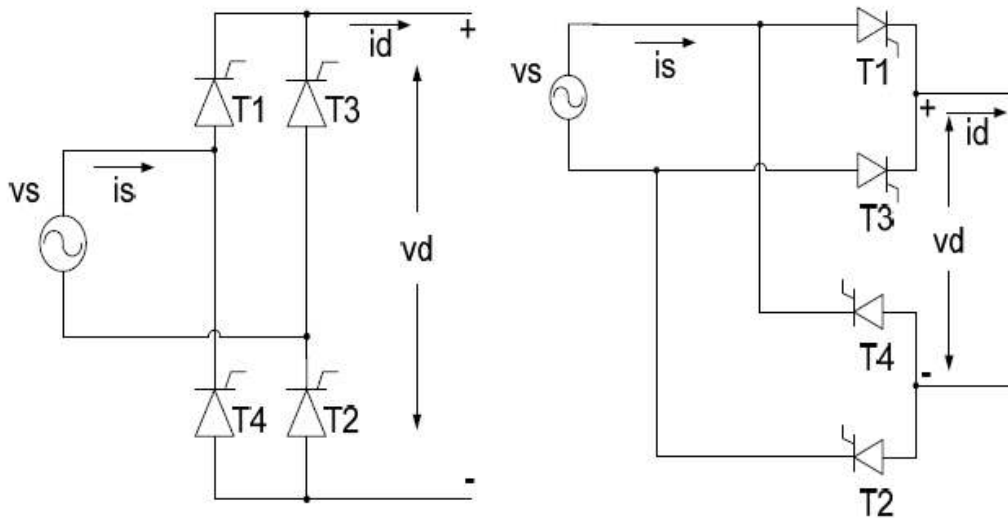
2.3.1 Μονοφασική πλήρως ελεγχόμενη γέφυρα(4 θυρίστορ)

Η πλήρως ελεγχόμενη μονοφασική γέφυρα αποτελεί την πληρέστερη διάταξη μονοφασικής ανόρθωσης. Η χρήση μετασχηματιστή στην είσοδο της διάταξης είναι προαιρετική, συνίσταται όμως για λόγους προστασίας (γαλβανική απομόνωση του φορτίου). Όπως θα δείξουμε στη συνέχεια, η διάταξη αυτή είναι 2 τεταρτημορίων. Δηλαδή, με κατάλληλες προϋποθέσεις, εκτός από **λειτουργία ανορθωτή** (ροή ισχύος από το δίκτυο στο φορτίο), μπορούμε να έχουμε και **λειτουργία αντιστροφή** (δίνοντας πλέον από την πλευρά του συνεχούς ρεύματος, ισχύ στο δίκτυο του εναλλασσομένου ρεύματος). Ο παραπάνω μετατροπέας αποτελείται από τέσσερα θυρίστορ, δύο ανά ημιγέφυρα. Για την ύπαρξη ρεύματος στο φορτίο, θα άγουν ταυτόχρονα τα θυρίστορ T1 και T2, και αντίστοιχα τα T3 και T4, τα οποία θα παλμοδοτούνται, επίσης ταυτόχρονα. Οι παλμοί έναυσης των δύο θυρίστορ που ανήκουν στην ίδια ημιγέφυρα, θα έχουν διαφορά φάσης 180° .



Η λειτουργία για όλα τα κυκλώματα με τέσσερα θυρίστορ είναι η ίδια για όλες τις περιπτώσεις φορτίων στην έξοδο.

Στο κύκλωμα υπάρχουν δυο ζευγάρια θυρίστορ τα οποία δουλεύουν αντιπαράλληλα. Όπως αναφέρθηκε, στην πρώτη περίπτωση είναι τα θυρίστορ 1 και 2 όπου άγουν ταυτόχρονα και στην δεύτερη περίπτωση τα θυρίστορ 3 και 4 όπου επίσης άγουν ταυτόχρονα.



Κατά την λειτουργία του κυκλώματος, το ρεύμα ρέει συνεχώς μέσα από ένα θυρίστορ από την πρώτη ομάδα και μέσα από ένα θυρίστορ της δεύτερης ομάδας. Όταν η V_s είναι θετική τότε το θυρίστορ 1 θα άγει το i_d και η V_s θα εμφανίζεται ως τάση ανάστροφης πόλωσης επάνω στα άκρα του θυρίστορ 3. Όταν τώρα η V_s γίνει αρνητική τότε το ρεύμα ρέει μέσω του 3 και το 1 εμφανίζει στα άκρα του ανάστροφη πόλωση. Το ίδιο τώρα συμβαίνει και στην περίπτωση που η δεύτερη ομάδα 2 & 4 βρεθούν σε κοινό δυναμικό. Όταν η V_s είναι θετική τότε το θυρίστορ 2 θα άγει το i_d και η V_s θα εμφανίζεται ως τάση ανάστροφης πόλωσης επάνω στα άκρα του θυρίστορ 4. Όταν τώρα η V_s γίνει αρνητική τότε το ρεύμα μεταβαίνει ακαριαία στο θυρίστορ 4 και το θυρίστορ 2 εμφανίζει στα άκρα της ανάστροφη πόλωση.

Όταν η V_s είναι θετική τότε τα θυρίστορ 1 και 2 στα δυο κυκλώματα θα άγουν, τότε ισχύει ότι $V_s = V_d$ και $i_s = i_d$. Όταν η V_s γίνει αρνητική τότε τα θυρίστορ 3 και 4 στα δυο κυκλώματα θα άγουν, επομένως είναι $V_d = -V_s$ και $i_s = -i_d$, οπότε η τάση εξόδου μπορεί να εκφραστεί χρονικά από τη σχέση :

$$V_d(t) = |V_s|.$$

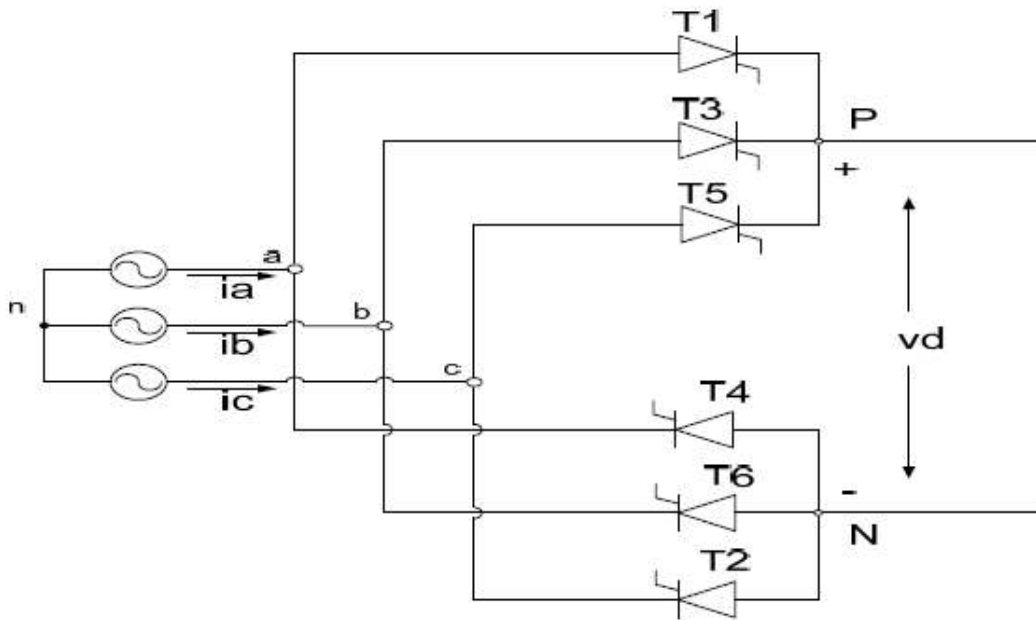
Λόγω του ότι η αυτεπαγωγή LS είναι ίση με 0, τότε η μετάβαση των ρευμάτων από την μια στιγμή στην άλλη θα γίνεται ακαριαία.

Ο συγκεκριμένος μετατροπέας περιγράφεται πλήρως στο επόμενο κεφάλαιο.

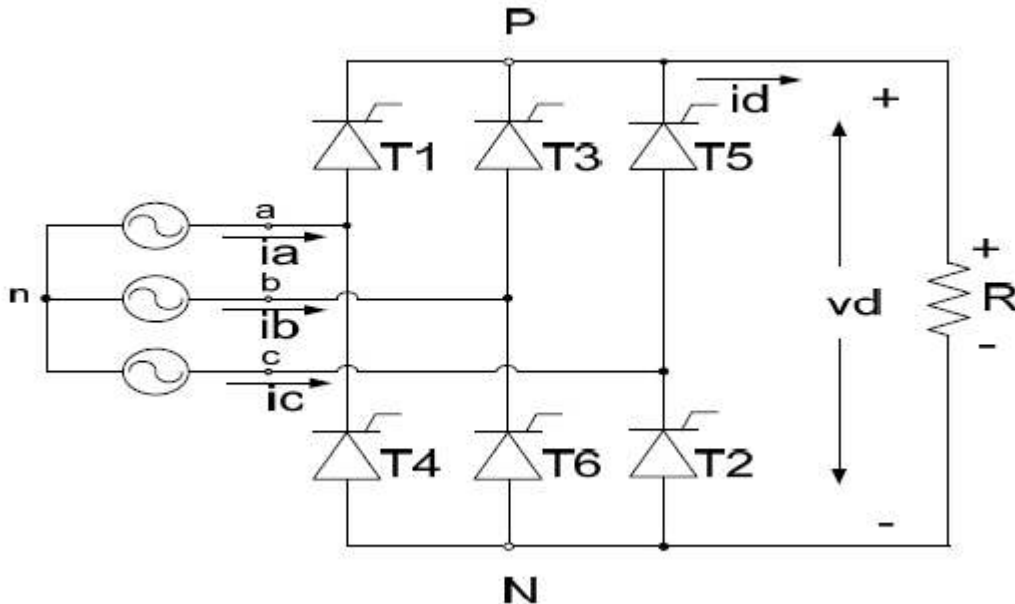
2.3.2 Τριφασική πλήρως ελεγχόμενη γέφυρα (6 θυρίστορ)

Η λειτουργία μιας τέτοιας τοπολογίας που φαίνεται καλύτερα στο σχήμα παρακάτω, έχει ως εξής : Το ρεύμα ρέει συνεχώς μέσα από ένα θυρίστορ από την πρώτη ομάδα (θυρίστορ 1 , 3 , 5) και μέσω ενός θυρίστορ της δεύτερης ομάδας (2 , 4 , 6). Αν τα ρεύματα πύλης εφαρμόζονται συνεχώς τα θυρίστορ συμπεριφέροντε όπως και οι δίοδοι.

Στην συνέχεια θα εξεταστεί η λειτουργία αυτών των ανορθωτικών διατάξεων με έξι θυρίστορ, προσθέτοντας στην έξοδο διάφορα φορτία.



A) Ωμικό φορτίο (R) στην έξοδο



Στο συγκεκριμένο σχήμα φαίνεται μια τριφασική διάταξη με ωμικό φορτίο στην έξοδο. Θα δούμε την συμπεριφορά της τάσης εξόδου για διάφορες γωνίες έναυσης.

Από τις κυματομορφές της διάταξης, παρακάτω βλέπουμε πως :

α) Για $0^\circ \leq \alpha \leq 60^\circ$

οι κυματομορφές της τάσης εξόδου είναι ίδιες για ωμικό φορτίο στην έξοδο χωρίς να υπάρχουν διαστήματα μηδενισμού.

Η τιμή της εξόδου δίνεται από τον τύπο

$$V_{do} = \frac{1}{\pi/3} \int_{-\pi/6}^{\pi/6} \sqrt{2}V_{LL} \cos \omega t \cdot d(\omega t) = \frac{3}{\pi} \sqrt{2}V_{LL} = 1.35 \cdot V_{LL}$$

όπου η $V_{da} = 1.35V_{LL} \cos \alpha$

β) Για $60^\circ \leq \alpha \leq 120^\circ$

η κυματομορφή της τάσης εξόδου εμφανίζει σημεία μηδενισμού αλλά σε καμία περίπτωση δεν γίνεται 0

Η τιμή της εξόδου για $60^\circ \leq \alpha \leq 120^\circ$ δίνεται από τον τύπο

$$V_{da} = \frac{1}{\pi} \int_{a+\pi/3}^{\pi} \sqrt{2} \cdot V_{LL} \sin(\omega t) \cdot d(\omega t) \Rightarrow V_{da} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} V_{LL} \cdot [1 + \cos(a + \pi/3)]$$

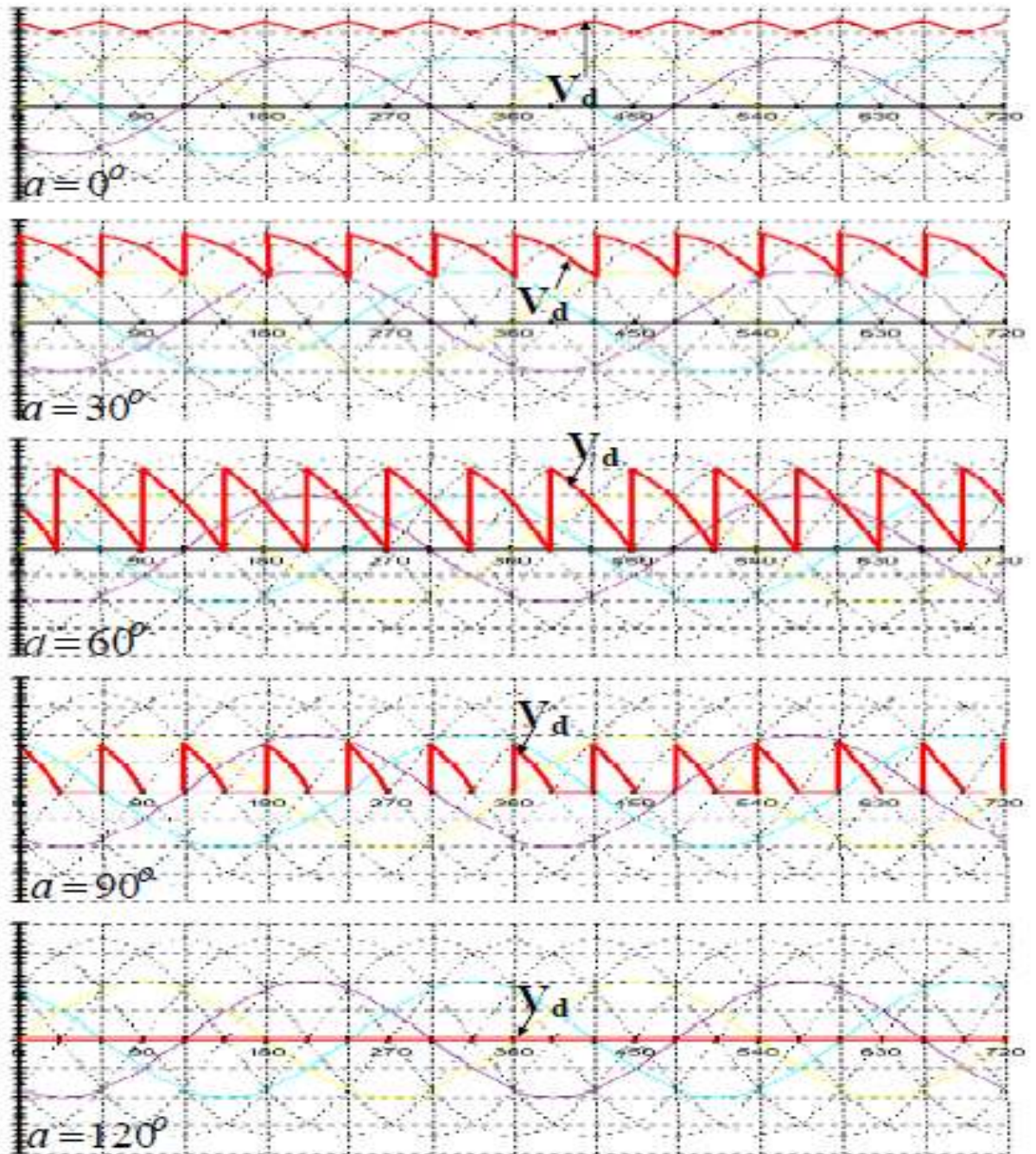
γ) Για $120^\circ \leq \alpha \leq 180^\circ$

η κυματομορφή της τάσης εξόδου όπως φαίνεται είναι ίση με μηδέν

$$\mathbf{V_{da}=0}$$

Γενικά για όλα τα παραπάνω ξέρουμε ότι

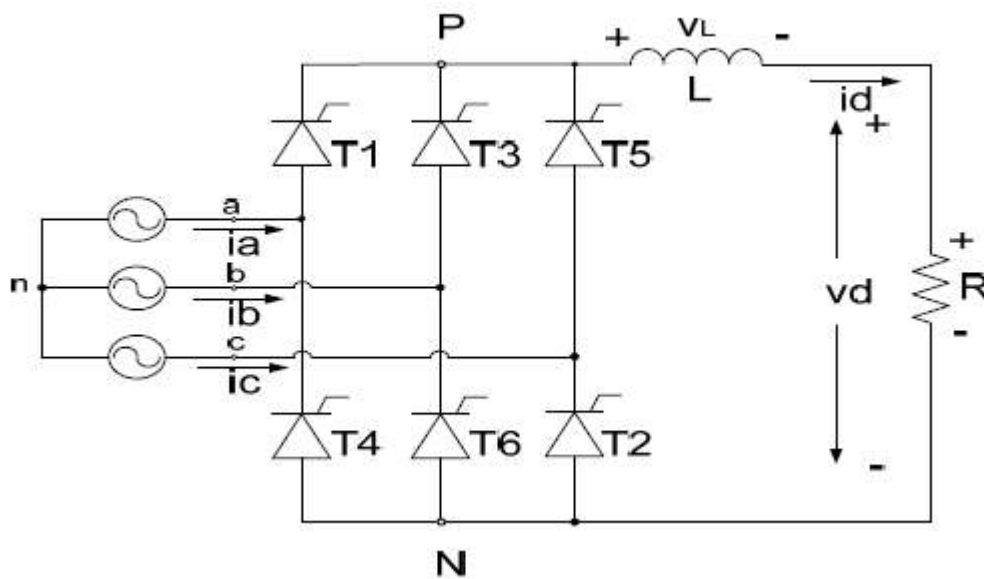
$$\frac{V_d}{V_{do}} = \begin{cases} \cos a, \dots \dots \dots 0 \leq a \leq 60^\circ \\ 1 + \cos(a + \pi/3), \dots \dots \dots 60^\circ \leq a \leq 120^\circ \\ 0, \dots \dots \dots 120^\circ \leq a \leq 180^\circ \end{cases}$$



ΚΥΜΑΤΟΜΟΡΦΕΣ ΜΕ ΩΜΙΚΟ ΦΟΡΤΙΟ

B) Ωμικό-επαγωγικό φορτίο (R-L) στην έξοδο

Στην συνέχεια θα δούμε το ακόλουθο κύκλωμα, όπου έχουμε μια διάταξη η οποία στην έξοδο της θα έχει ένα ωμικό-επαγωγικό φορτίο.



Από τις κυματομορφές της διάταξης, παρακάτω βλέπουμε πως :

α) Για $0^\circ \leq \alpha \leq 60^\circ$

οι κυματομορφές της τάσης εξόδου είναι όμοιες με αυτές που θα είχαμε αν είχαμε καθαρά ωμικό φορτίο στην έξοδο, άρα οι ίδιες εξισώσεις μας δίνουν την τάση στην έξοδο.

β) Για $60^\circ \leq \alpha \leq 120^\circ$

η κυματομορφή της τάσης εξόδου εμφανίζει σημεία μηδενισμού αλλά γίνεται και αρνητική. Το διάστημα το οποίο η τιμή της τάσης εξόδου γίνεται αρνητικό δεν πρέπει να είναι μεγαλύτερο από το θετικό διάστημα γιατί τότε θα έχουμε την λειτουργία αντιστροφεία. Εάν η τιμή του πηγίου είναι μικρή τότε θα

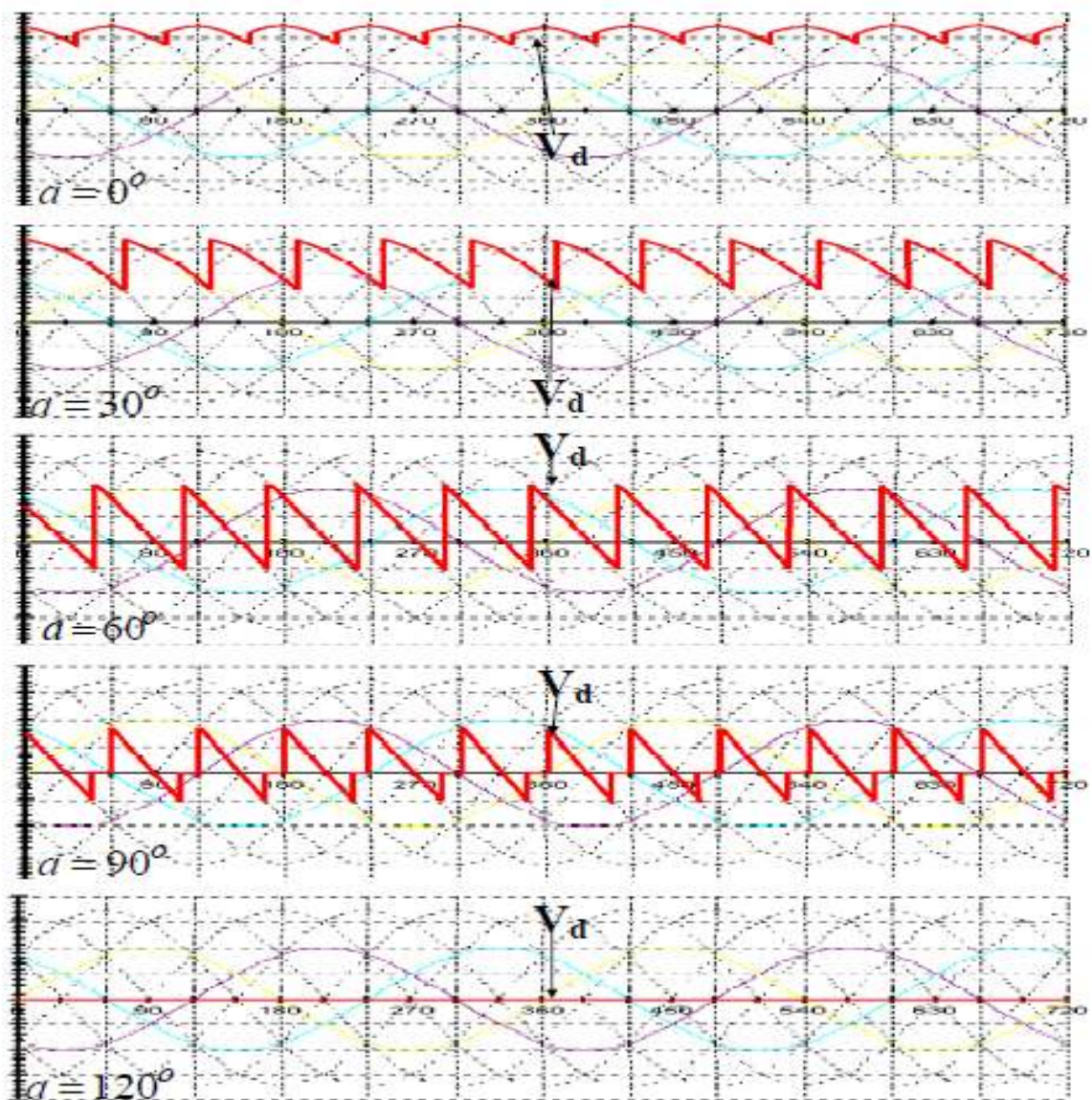
υπάρχει και ένα σημείο μηδενισμού β το οποίο παίζει σημαντικό ρόλο στην τιμή της εξόδου.

Η τιμή της εξόδου για $60^\circ \leq \alpha \leq 120^\circ$ δίνεται από τον τύπο

$$V_{da} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} V_{LL} \cdot [\cos(\alpha + \pi/3) + \cos \beta]$$

γ) Για $120^\circ \leq \alpha \leq 180^\circ$

η κυματομορφή της τάσης εξόδου όπως φαίνεται είναι ίση με μηδέν

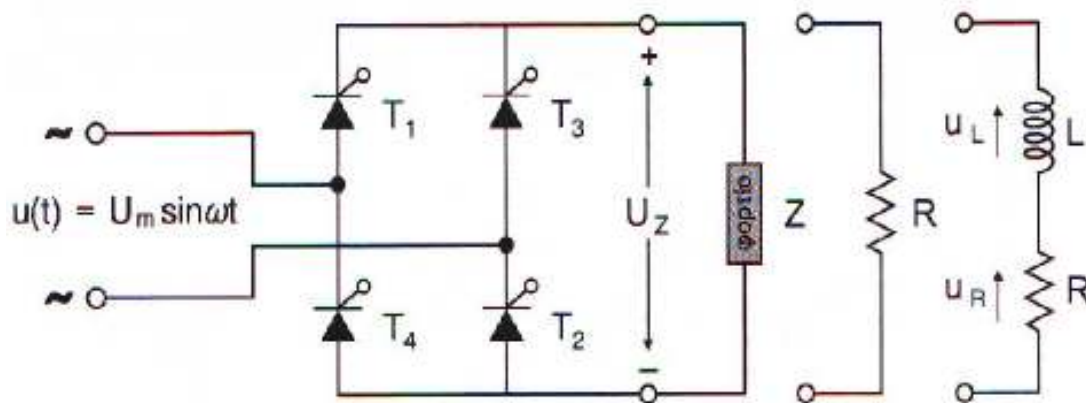


ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΜΟΝΟΦΑΣΙΚΗ ΠΛΗΡΩΣ ΕΛΕΓΧΟΜΕΝΗ ΓΕΦΥΡΑ

3.1 Μονοφασική πλήρως ελεγχόμενη γέφυρα

Η πλήρως ελεγχόμενη μονοφασική γέφυρα, που απεικονίζεται στο ακόλουθο σχήμα, αποτελεί την πληρέστερη διάταξη μονοφασικής ανόρθωσης.



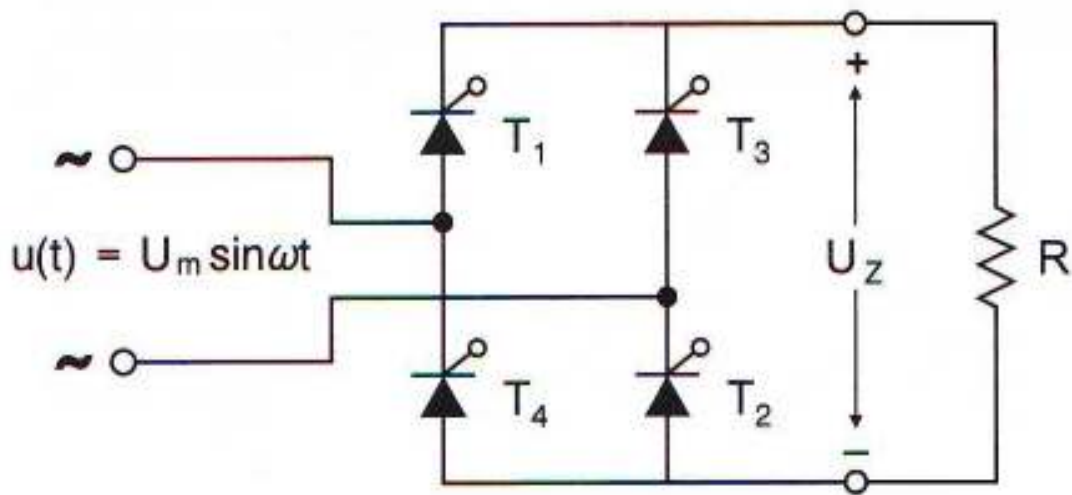
Η χρήση μετασχηματιστή στην είσοδο της διάταξης είναι προαιρετική, συνίσταται όμως για λόγους ασφάλειας (γαλβανική απομόνωση του φορτίου). Στις επόμενες σελίδες φαίνεται ότι η διάταξη αυτή είναι δυο τεταρτημορίων. Αυτό σημαίνει πως με κατάλληλες προϋποθέσεις, εκτός από λειτουργία ανορθωτή (ροή ισχύος από το δίκτυο στο φορτίο) μπορούμε να έχουμε και λειτουργία αντιστροφέα (δίνοντας από τη πλευρά του συνεχούς ρεύματος, ισχύ στο δίκτυο του εναλλασσόμενου). Ο μετασχηματιστής αυτός, αποτελείται από τέσσερα θυρίστορ, δυο ανά ημι-γέφυρα.

Για την ύπαρξη ρεύματος στο φορτίο, θα άγουν ταυτόχρονα τα θυρίστορ T1 και T2 και αντίστοιχα τα T3 και T4, τα οποία θα πυροδοτούνται επίσης ταυτόχρονα. Οι παλμοί έναυσης των δυο θυρίστορ που ανήκουν στην ίδια ημι-γέφυρα, θα έχουν διαφορά φάσης κατά 180 μοίρες.

Στις επόμενες παραγράφους αναλύονται οι λειτουργίες της γέφυρας με διαφορετικό φορτίο, μια ως καθαρά ωμικό φορτίο και μια ως ωμικό-επαγωγικό (κινητήρας)

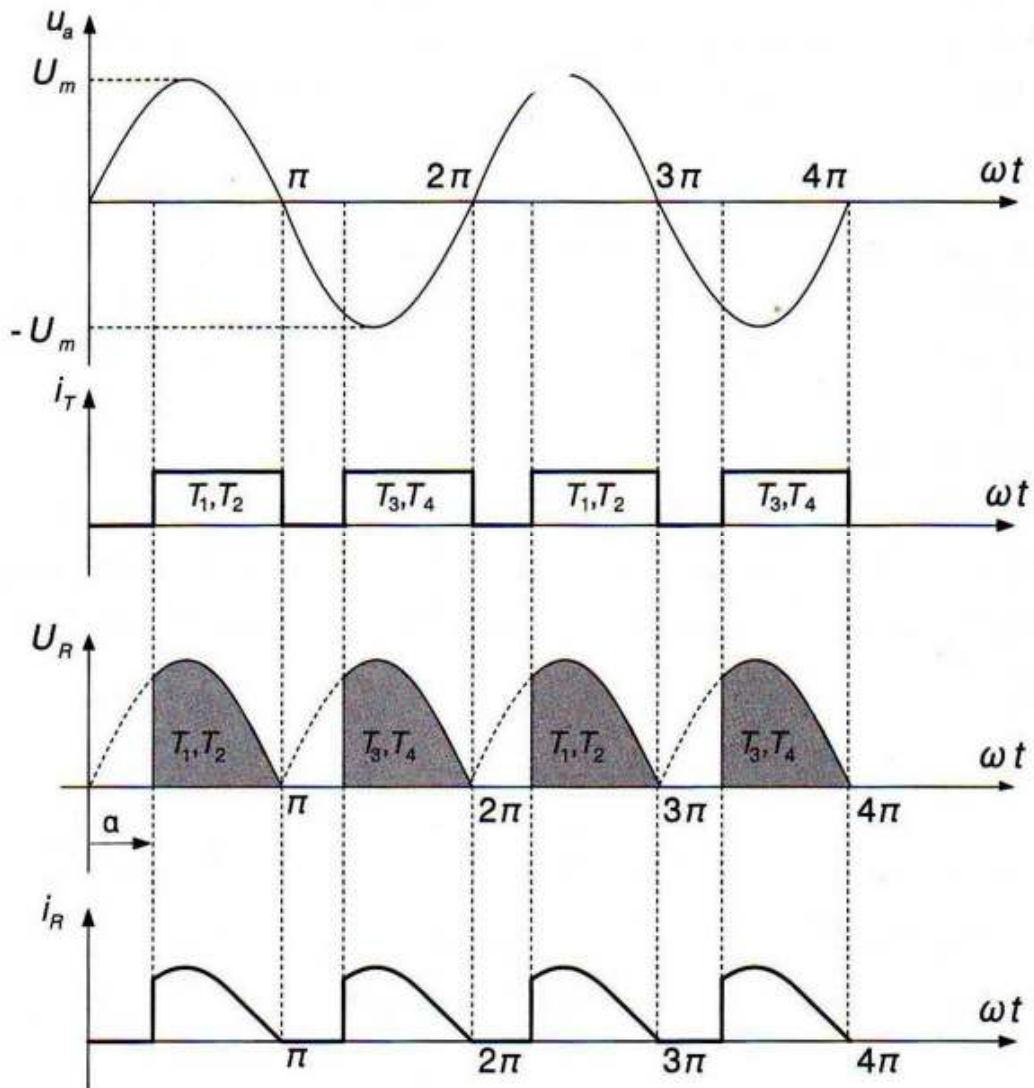
3.2 Ωμικό φορτίο, αντίσταση R (Ω)

Η σημαντικότερη ελεγχόμενη ανόρθωση μονοφασικού ρεύματος είναι η γέφυρα των τεσσάρων ημιαγωγικών στοιχείων. Η λειτουργία της ανόρθωσης αυτής έχει ως εξής : το ζευγάρι των θυρίστορ T_1 & T_4 , αρχίζει να άγει σε κάποια γωνία α της θετικής ημιπεριόδου της τάσης εισόδου και το ζευγάρι των θυρίστορ T_2 & T_3 , αρχίζει να άγει σε κάποια γωνία α της αρνητικής ημιπεριόδου.



Αν υποτεθεί ότι οι παλμοί έναυσης εφαρμόζονται στο ζεύγος των θυρίστορ T_1 και T_4 , σε κάποια γωνία α της θετικής ημιπεριόδου, τότε τα θυρίστορ θα αρχίζουν να άγουν κι έτσι το ρεύμα αρχίζει να κυκλοφορεί μέσω του φορτίου. Τότε για ωμικό φορτίο το ρεύμα εξόδου θα είναι V / R . Όταν η τάση εισόδου μηδενιστεί, τότε το ρεύμα εξόδου, επομένως και το ρεύμα των θυρίστορ, μηδενίζεται επίσης. Έτσι στο σημείο αυτό επιτυγχάνεται η σβέση (φυσική μετάβαση) των θυρίστορ T_1 και T_4 . Σε κάποια γωνία α της αρνητικής ημιπεριόδου, παλμοί έναυσης εφαρμόζονται στα θυρίστορ T_2 και T_3 κι έτσι τα θυρίστορ αρχίζουν να άγουν, δημιουργώντας ένα ρεύμα εξόδου V / R . Από τη στιγμή αγωγής των θυρίστορ T_2 και T_3 , η τάση εισόδου εμφανίζεται στα άκρα των θυρίστορ T_1 και T_4 , τα οποία έτσι είναι ανάστροφα πολωμένα. Τα θυρίστορ T_2 και T_3 θα σταματήσουν να άγουν στο τέλος της αρνητικής ημιπεριόδου, όπου και το ρεύμα εξόδου τείνει προς το μηδέν. Με την σβέση των θυρίστορ T_2 και T_3 τελειώνει και ο κύκλος λειτουργίας της ανόρθωσης. Ο επόμενος κύκλος θα αρχίσει πάλι με την έναυση των θυρίστορ T_1 και T_4 .

Στο σχήμα που ακολουθεί παρουσιάζονται οι κυματομορφές τάσεων κι εντάσεων του ρεύματος, όσο και οι περιοχές αγωγής του θυριστορ για τυχαία γωνία έναυσης α° .



Η τάση τροφοδοσίας είναι ημιτονοειδής :

$$u(t) = U_m \cdot \sin \omega t$$

- Για $\alpha < \omega t < \pi$, σε αγωγή εισέρχονται τα θυρίστορ T1 και T2
- Για $\pi + \alpha < \omega t < 2\pi$, σε αγωγή εισέρχονται τα θυρίστορ T3 και T4

§ Η μέση τιμή της τάσης εξόδου, δίνεται από την σχέση :

$$U_{L,av} = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) dt = \frac{2}{2\pi} \int_{\alpha}^{\pi} U_m \sin \omega t d\omega t = \frac{U_m}{\pi} [-\cos]_{\alpha}^{\pi} =$$

$$= \frac{U_m}{\pi} (\cos \alpha - \cos \pi) = U_{L,av} = \frac{U_m}{\pi} (1 + \cos \alpha)$$

§ Η ενεργός τιμή της τάσης στο φορτίο, δίνεται από την σχέση :

$$U_{L,rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u^2(t) dt} = \sqrt{\frac{2}{2\pi} \int_{\alpha}^{\pi} U_m^2 \sin^2 \omega t d\omega t} = \sqrt{\frac{U_m^2}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi} \sin^2 \omega t d\omega t} \quad (3)$$

όπου

$$\int_{\alpha}^{\pi} \sin^2 \omega t d\omega t = \int_{\alpha}^{\pi} \frac{1 - \cos 2\omega t}{2} d\omega t = \int_{\alpha}^{\pi} \frac{1}{2} d\omega t - \int_{\alpha}^{\pi} \frac{\cos 2\omega t}{2} d\omega t =$$

$$= \frac{1}{2} [\omega t]_{\alpha}^{\pi} - \frac{1}{4} [\sin 2\omega t]_{\alpha}^{\pi} = \frac{1}{2} (\pi - \alpha) - \frac{1}{4} (\sin 2\pi - \sin 2\alpha) =$$

$$= \frac{1}{2} (\pi - \alpha) + \frac{1}{4} \sin 2\alpha = \frac{1}{2} \left[(\pi - \alpha) + \frac{1}{2} \sin 2\alpha \right] \quad (4)$$

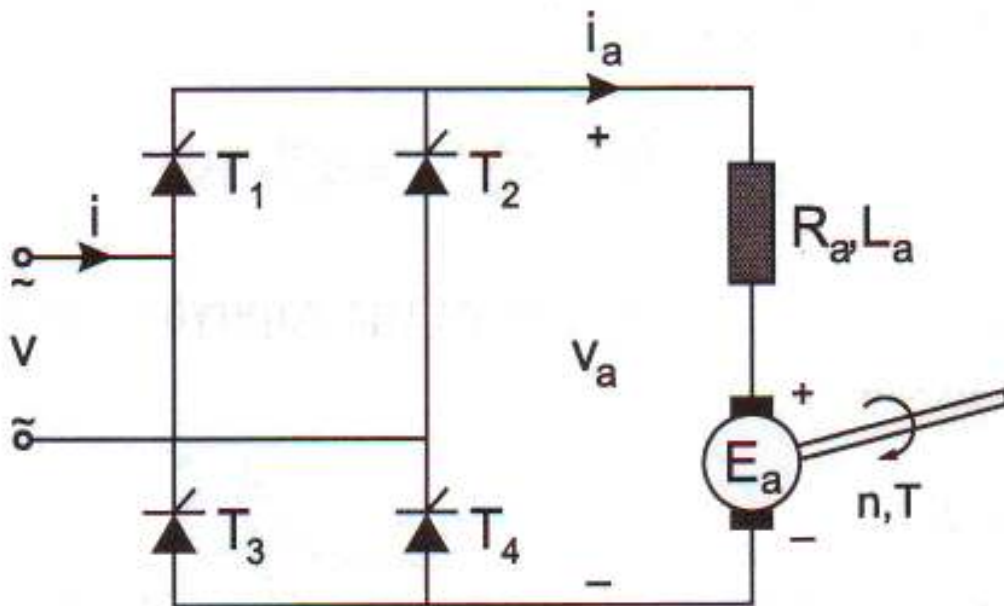
Από τις δύο σχέσεις (3) και (4), έχουμε

$$U_{L,rms} = \sqrt{\frac{U_m^2}{2\pi} \left[(\pi - \alpha) + \frac{1}{2} \sin 2\alpha \right]} = U_{L,rms} = \frac{U_m}{\sqrt{2}} \sqrt{\frac{1}{\pi} \left[(\pi - \alpha) + \frac{1}{2} \sin 2\alpha \right]} \quad (5)$$

Γίνεται φανερό ότι η τιμή μέσης τάσης εξόδου και η ενεργός τιμή τάσης στο φορτίο, δίνονται συναρτήσει της γωνίας έναυσης

3.3 Ωμικό-επαγωγικό φορτίο, $R-L$ ($\Omega-H$)

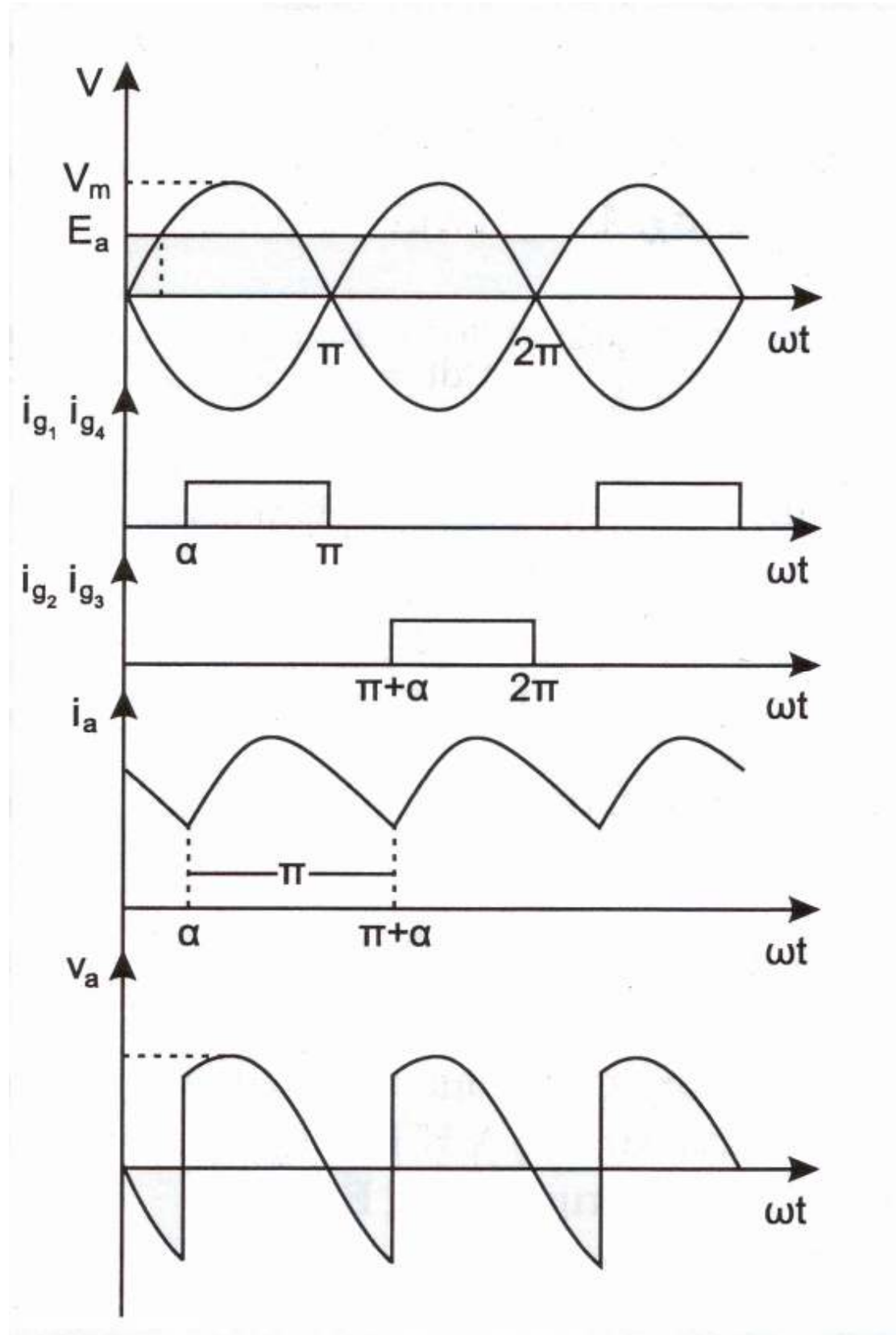
Στη συγκεκριμένη παράγραφο θα γίνει ανάλυση της λειτουργίας του ανορθωτή, έχοντας ως φορτίο έναν κινητήρα συνεχούς ρεύματος, δηλαδή ένα ωμικό-επαγωγικό φορτίο.



A) ΣΥΝΕΧΗΣ ΑΓΩΓΗ

Θεωρούμε ότι η αυτεπαγωγή τυλίγματος του τυμπάνου είναι αρκετά μεγάλη ώστε η αγωγή του αντίστοιχου ρεύματος τυμπάνου να είναι συνεχής. Όπως θα δείξουμε στη συνέχεια, για τιμές της γωνίας έναυσης στην περιοχή $0 \leq \alpha \leq 90^\circ$, έχουμε λειτουργία στο πρώτο τεταρτημόριο, δηλαδή η γέφυρα λειτουργεί ως ανορθωτής, παρέχοντας την απαραίτητη ισχύ του κινητήρα από το δίκτυο. Για γωνίες $90^\circ \leq \alpha \leq 180^\circ$ η μηχανή μπορεί να λειτουργεί στο δεύτερο τεταρτημόριο ως γεννήτρια ή πέδη, με την προϋπόθεση ότι ταυτόχρονα αντιστρέφεται η πολικότητα της αντί-ηλεκτρεγερτικής δύναμης (Α.Η.Ε.Δ.). Στη συγκεκριμένη περίπτωση, η γέφυρα λειτουργεί ως αντιστροφέας, παρέχοντας ισχύ από τη γεννήτρια προς το δίκτυο.

Στο ακόλουθο σχήμα παρουσιάζονται οι κυματομορφές τάσης και ρεύματος των διαφόρων συνιστωσών του συστήματος, για την, προαναφερθείσας περιοχής, λειτουργία.



Παρατηρούμε ότι η κυμάτωση της τάσης $v_a(t)$ και του ρεύματος $i_a(t)$ είναι διπλάσια της συχνότητας της τάσης εισόδου. Από την ανάλυση της κυματομορφής $V_a(t)$ σε σειρά Fourier, έχουμε τις εξής εκφράσεις για τους συντελεστές V_{An} και V_{Bn}

$$V_{An} = \frac{2V_m}{\pi} \left[\frac{\cos(n+1)\alpha}{n+1} - \frac{\cos(n-1)\alpha}{n-1} \right]$$

$$V_{Bn} = \frac{2V_m}{\pi} \left[\frac{\sin(n+1)\alpha}{n+1} - \frac{\sin(n-1)\alpha}{n-1} \right]$$

όπου ο n είναι άρτιος αριθμός και α η μέγιστη τιμή της εναλλασσόμενης φασικής τάσης του δικτύου.

- Η μέση τιμή της τάσης εξόδου της πλήρως ελεγχόμενης μονοφασική γέφυρας, για τυχαία γωνία έναυσης είναι :

$$V_a = \frac{1}{T} \int_0^T v_a(t) dt = \frac{2}{T} \int_0^{T/2} v_a(t) dt = \frac{1}{\pi} \int_\alpha^{\pi+\alpha} V_m \sin \theta d\theta = \frac{2V_m}{\pi} \cos \alpha$$

- Η μέση τιμή του ρεύματος τυμπάνου είναι :

$$I_a = \frac{V_a - E_a}{R_a} = \frac{2V_m}{\pi R_a} - \frac{E_a}{R_a}$$

Τέλος, η διαφορική εξίσωση του ρεύματος τυμπάνου στο διάστημα αγωγής, $\alpha < \omega t < \pi + \alpha$, είναι :

$$v_a(t) = V_m \sin \omega t = R_a i_a(t) + L_a \frac{di_a(t)}{dt} + e_a(t)$$

Με αρκετά καλή προσέγγιση, μπορούμε να θεωρήσουμε αμελητέα την κυμάτωση των στροφών και κατ' επέκταση της A.H.E.Δ $e_a(t)$ οπότε στην τελευταία σχέση αντί της $e_a(t)$ μπορούμε να θέσουμε τη μέση τιμή αυτής, δηλαδή την E_a .

Για να φτάσουμε στη τελική έκφραση του ρεύματος τυμπάνου, θετούμε ως μερική λύση της διαφορικής εξίσωσης την

$$i_{a,\mu}(t) = A + B \sin \omega t + C \cos \omega t$$

τότε

$$i_a(t) = D e^{-t/\tau} - \frac{E_a}{R_a} + \frac{V_m}{Z_a} \sin(\omega t - \varphi)$$

όπου

$$\varphi = \tan^{-1} \left[\frac{\omega L_a}{R_a} \right], \quad \tau = \frac{L_a}{R_a} \quad \text{και} \quad Z_a = \sqrt{R_a^2 + (\omega L_a)^2}$$

και D , η σταθερά ολοκλήρωσης της γενικής λύσης της ομογενούς διαφορικής εξίσωσης.

Αν ανατρέξουμε στις κυματομορφές και ρεύματος των διαφόρων συνιστωσών του συστήματος, που απεικονίζεται σε περασμένη σελίδα, έχουμε τις εξής οριακές συνθήκες

$$-I_{a,\min} = i_a(t = \alpha) = i_a(t = \alpha + \pi)$$

Αντικαθιστώντας τις παραπάνω συνθήκες στην σχέση του $i_a(t)$ υπολογίζουμε την τιμή της σταθεράς D , όπου

$$D = \frac{2V_m \sin(\alpha - \varphi)}{Z_a e^{-\alpha/\omega\tau} [e^{-\pi/\omega\tau} - 1]}$$

Έτσι καταλήγουμε στην τελική έκφραση του ρεύματος τυμπάνου :

$$i_a(\omega t) = \frac{V_m}{Z_a} \left[\sin(\omega t - \varphi) - \frac{2 \sin(\alpha - \varphi) e^{-(\omega t - \alpha)/\omega\tau}}{(1 - e^{-\pi/\omega\tau})} \right] - \frac{E_a}{R_a}$$

Καταλαβαίνουμε ότι η ολοκλήρωση της τελικής αυτής έκφρασης του ρεύματος τυμπάνου στο διάστημα $\alpha < \omega t < \pi + \alpha$, θα μας δώσει την ίδια μέση τιμή, όπως την είδαμε και παραπάνω.

Η ενεργός τιμή του ρεύματος τυμπάνου, η οποία συμπίπτει με την ενεργό τιμή του ρεύματος εισόδου, μπορεί να υπολογιστεί με τους δύο ακόλουθους τρόπους :

ΠΡΩΤΟΣ ΤΡΟΠΟΣ

$$I_{a,rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i_a^2(t) dt}$$

ΔΕΥΤΕΡΟΣ ΤΡΟΠΟΣ

$$I_{a,rms} = \sqrt{I_a^2 + \sum_{n=1}^{\infty} (I_{a,n}^2)}$$

όπου σε αυτή τη σχέση το άθροισμα βρίσκεται από :

$$I_{a,n} = \frac{V_{a,n}}{Z_{a,n}} \text{ και } Z_{a,n} = \sqrt{R_a^2 + (n\omega L_a)^2}$$

Συνήθως προτιμάται ο δεύτερος τρόπος, όπου χρησιμοποιώντας τους 3-4 πρώτους όρους των αρμονικών συνιστωσών, υπολογίζουμε την ενεργό τιμή του ρεύματος με αρκετά καλή προσέγγιση.

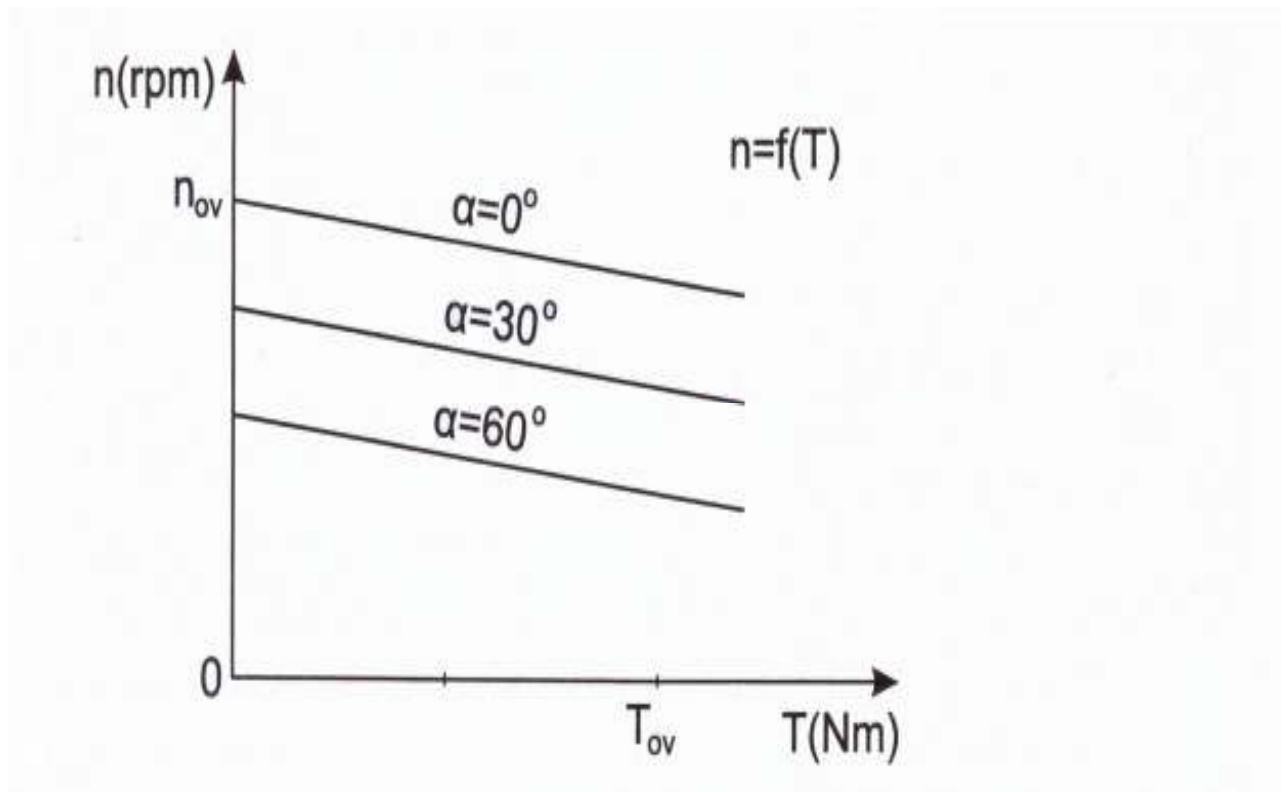
Η αναλυτική έκφραση των χαρακτηριστικών ροπής – στροφών του κινητήρα, στην περίπτωση της συνεχούς αγωγής, είναι :

$$n = \frac{2\sqrt{2}V_{rms} \cos \alpha}{\pi K_g \Phi_f} - \frac{R_a}{K_m K_g \Phi_f} T$$

με V_{rms} την ενεργό τιμή της εναλλασσόμενης τάσης εισόδου.

Ο πρώτος όρος παριστάνει την ταχύτητα όταν δεν υπάρχει φορτίο. Ο δεύτερος όρος παριστάνει την μείωση στροφών λόγω του φορτίου. Η θεωρητική ταχύτητα περιστροφής χωρίς φορτίο, μεταβάλλεται σε σχέση με την γωνία έναυσης, ενώ η κλίση για συγκεκριμένο φορτίο παραμένει σταθερή.

Οι χαρακτηριστικές ροπής – στροφορμής, $n = f(T)$, παρουσιάζονται στο παρακάτω σχήμα



§ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΕΑ ΕΝΤΟΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ 90°

Για γωνία έναυσης μεγαλύτερη των 90° , η τάση $v_a(t)$ του τυλίγματος τυμπάνου του κινητήρα γίνεται αρνητική. Αν ταυτόχρονα αντιστραφεί και η πολικότητα της Α.Η.Ε.Δ. $e_a(t)$, έχουμε λειτουργία αντιστροφέα, δηλαδή η μηχανή λειτουργεί πλέον στο δεύτερο τεταρτημόριο. Υπάρχουν δύο δυνατότητες λειτουργίας της μηχανής.

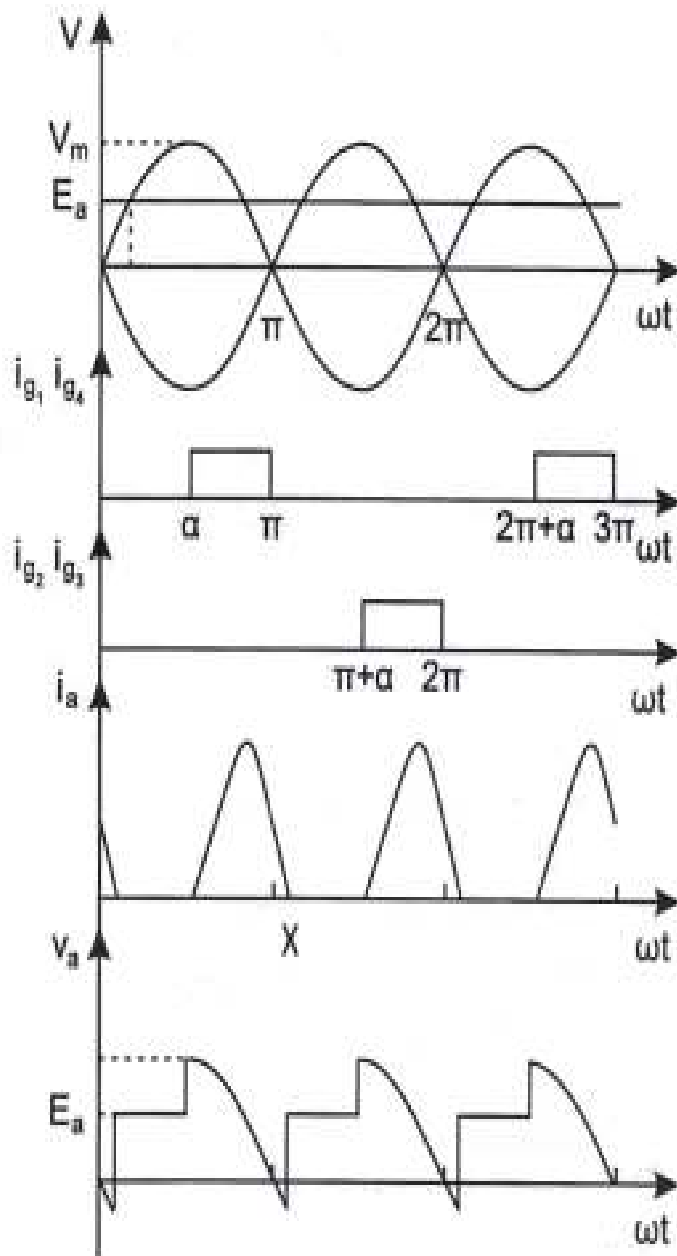
A) στην περίπτωση που το μηχανικό φορτίο στον άξονα του κινητήρα είναι παθητικό, έχουμε λειτουργία πέδησης(δυναμική πέδηση)

B) στην περίπτωση που υπάρχει η δυνατότητα συντήρησης της ροπής του άξονα(ενεργητικό μηχανικό φορτίο), τότε έχουμε λειτουργία γεννήτριας, παρέχοντας πλέον μόνιμα ισχύ στο δίκτυο.

Εάν η γωνία έναυσης γίνει μεγαλύτερη των 90° , αλλά δεν αναστραφεί η φορά της $e_a(t)$, τότε το ρεύμα $i_a(t)$ μηδενίζεται και ο κινητήρας είναι σαν να διακόπτεται από το δίκτυο (ελεύθερη πέδηση).

B) ΑΣΥΝΕΧΗΣ ΑΓΩΓΗ

Παραθέτουμε τις κυματομορφές τάσεων – ρευμάτων στην περίπτωση της ασυνέχειας.



Στο διάστημα $\alpha < \omega t < X$, ο κινητήρας συνδέεται με το δίκτυο Ε.Ρ. μέσω των θυρίστωρ T1 και T4. Την χρονική στιγμή, $\omega t = X$ το ρεύμα τυμπάνου μηδενίζεται, οπότε έχουμε τη σβέση των δυο αυτών θυρίστωρ. Μέχρι τον επόμενο παλμό έναυσης (T2 και T3), δηλαδή στο διάστημα $X < \omega t < \pi + \alpha$, το ρεύμα τυμπάνου εξακολουθεί να είναι μηδενικό.

Επομένως στο διάστημα αυτό η μηχανική ενέργεια του φορτίου καλύπτεται από την κινητική ενέργεια των στρεφόμενων μαζών. Επίσης για $X < \omega t < \pi + \alpha$ έχουμε $v_a(t) = e_a(t) = E_a$

Για μεγάλες ταχύτητες και μικρά φορτία, είναι δυνατόν να έχουμε διακοπή του ρεύματος πριν ακόμα η τάση του δικτύου περάσει στα αρνητικά, δηλαδή για $\omega t < \pi$. Η μέση τιμή της τάσης τυλίγματος τυμπάνου είναι :

$$V_a = \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi+\alpha} v_a(\omega t) \cdot d\omega t = \frac{1}{\pi} \left[\int_{\alpha}^X V_m \sin \omega t \cdot d\omega t + \int_X^{\pi+\alpha} E_a \cdot d\omega t \right] \rightarrow$$

$$V_a = \frac{V_m}{\pi} (\cos \alpha - \cos X) + \frac{E_a}{\pi} (\pi + \alpha - X)$$

Αντιστοίχως η μέση τιμή του ρεύματος τυμπάνου είναι :

$$I_a = \frac{V_a - E_a}{R_a} = \frac{V_m}{\pi R_a} (\cos \alpha - \cos X) + \frac{E_a}{\pi R_a} (\alpha - X)$$

Η διαφορική εξίσωση του ρεύματος τυμπάνου στο διάστημα αγωγής, $\alpha < \omega t < X$ είναι η ίδια με εκείνη της συνεχούς αγωγής, δηλαδή

$$v_a(t) = V_m \sin \omega t = R_a i_a(t) + L_a \frac{di_a(t)}{dt} + e_a(t)$$

με την αναλυτική έκφραση του ρεύματος να δίνεται από την εξίσωση

$$i_a(t) = De^{-t/\tau} - \frac{E_a}{R_a} + \frac{V_m}{Z_a} \sin(\omega t - \varphi)$$

Η μόνη διαφορά είναι στις οριακές τιμές, όπου στην συγκεκριμένη περίπτωση έχουμε

$$\underline{i_a = 0 = I_{\min}, \text{ για } \omega t = \alpha \text{ και } \omega t = X}$$

Αντίστοιχα μπορούμε να υπολογίσουμε την τιμή της σταθεράς D

$$D = \left[\frac{E_a}{R_a} - \frac{V_m}{Z_a} \sin(\alpha - \varphi) \right] e^{\alpha/\omega\tau}$$

Επομένως μετά την ολοκλήρωση της τιμής της σταθεράς ολοκλήρωσης, η γενική έκφραση του ρεύματος τυμπάνου είναι

$$i_a(\omega t) = \frac{V_m}{Z_a} \left[\sin(\omega t - \varphi) - \sin(\alpha - \varphi) e^{-(\omega t - \alpha)/\omega\tau} \right] - \frac{E_a}{R_a} (1 - e^{-(\omega t - \alpha)/\omega\tau})$$

Η γωνία X μηδενισμού του ρεύματος βρίσκεται από την τελευταία εξίσωση αν θέσουμε $i_a = 0$. Η εξίσωση που προκύπτει είναι υπερβατική και λύνεται με επαναληπτικές μεθόδους.

Αν θέσουμε $\omega t = X = \pi + \alpha$, η σχέση που προκύπτει αποτελεί το κριτήριο για την ελάχιστη απαιτούμενη «κρίσιμη» τιμή της αυτεπαγωγής του τυλίγματος τυμπάνου, για την οποία, υπό συγκεκριμένες συνθήκες φόρτισης V_m , E_a , α , έχουμε συνεχή αγωγή.

Θα πρέπει, λοιπόν

$$\cos \varphi \cdot \sin(\alpha - \varphi) \frac{(e^{-\pi/\omega\tau} + 1)}{(e^{-\pi/\omega\tau} - 1)} \geq \frac{E_a}{V_m}$$

όπου

$$\varphi = \tan^{-1} \left[\frac{\omega L_a}{R_a} \right] \quad \tau = \frac{L_a}{R_a}$$

Για την χαρακτηριστική ροπής στρωφών, στη περίπτωση της ασυνεχούς αγωγής, έχουμε τη σχέση

$$n = \frac{V_m}{\pi K_m \Phi_f} (\cos \alpha - \cos X) + \frac{E_a}{\pi K_g \Phi_f} (\pi + \alpha - X) - \frac{R_a T}{K_g K_m \Phi_f}$$

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΟ & ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

4.1 Γενικά

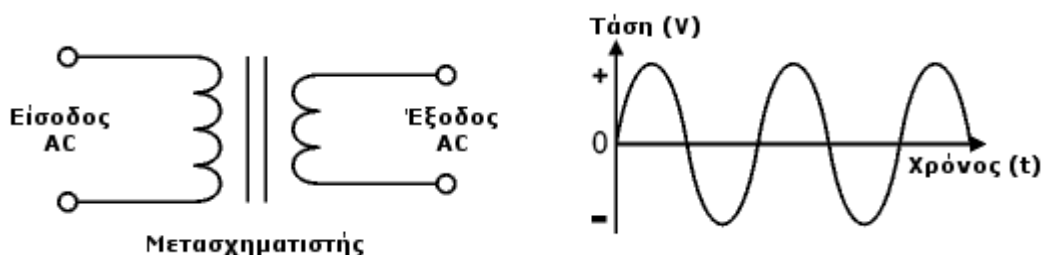
Η κατασκευή, στην οποία προχωρήσαμε, αποτελείται από **3 βασικά μέρη**:

- Τροφοδοτικό
- Κύκλωμα έναυσης 0° - 180°
- Κύκλωμα έναυσης 180° - 360°

Ένα τροφοδοτικό αποτελείται από τα παρακάτω εξαρτήματα-βαθμίδες:

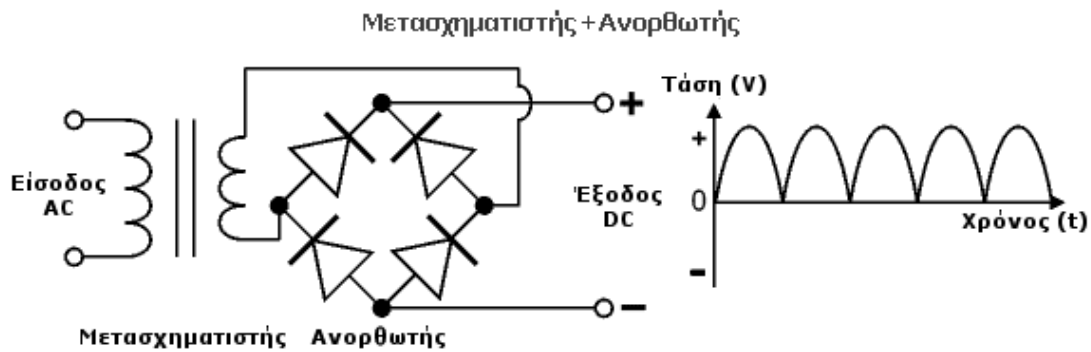
A) Μετασχηματιστής.

Ο μετασχηματιστής είναι μια συσκευή η οποία μεταφέρει ηλεκτρική ενέργεια μεταξύ δύο κυκλωμάτων, διαμέσου επαγωγικά συζευγμένων ηλεκτρικών αγωγών. Ο μετασχηματιστής βασίζεται σε δύο αρχές: πρώτον, ότι ένα ηλεκτρικό ρεύμα μπορεί να παράγει και, δεύτερον, ότι ένα μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο σε ένα τυλιγμένο σύρμα ("τύλιγμα"), επάγει διαφορά δυναμικού στα άκρα του τυλίγματος (ηλεκτρομαγνητική επαγωγή). Μεταβάλλοντας το ρεύμα στο πρωτεύον τύλιγμα, αλλάζει η ένταση του μαγνητικού του πεδίου. Εφόσον το μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο εκτείνεται και στο δευτερεύον τύλιγμα, επάγεται διαφορά δυναμικού στα άκρα του δευτερεύοντος. Με κατάλληλη επιλογή του αριθμού των περιελίξεων, ένας μετασχηματιστής επιτρέπει την ανύψωση μιας εναλλασσόμενης τάσης ή τον υποβιβασμό της.



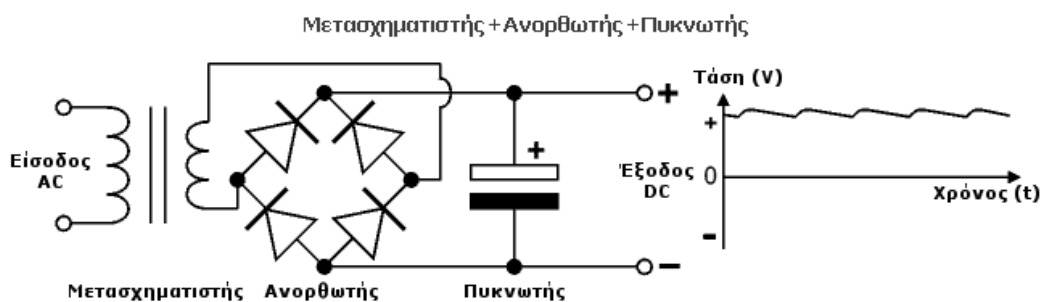
B) Ανορθωτής.

Όπως αναφέραμε και σε περασμένο κεφάλαιο, ο ανορθωτής είναι το πρώτο στάδιο της μετατροπής της εναλλασσόμενης τάσης (AC) σε συνεχή τάση (DC - ρεύμα που "κυλάει" προς μία μόνο φορά), η οποία περιέχει όμως και μία εναλλασσόμενη συνιστώσα (alternating component) 50Hz για την μισή ανόρθωση και 100Hz για την πλήρη ανόρθωση, την οποία θα φιλτράρουμε παρακάτω με έναν πυκνωτή. Υπάρχουν διάφοροι τρόποι συνδεσμολογίας διόδων για να πραγματοποιηθεί ένας ανορθωτής. Ο πιο σημαντικός και συνηθισμένος είναι η "διπλή ανόρθωση με γέφυρα" και προσφέρει ανόρθωση πλήρους κύματος. Ανόρθωση πλήρους κύματος επιτυγχάνεται επίσης και με δύο διόδους σε έναν μετασχηματιστή με μεσαία λήψη.



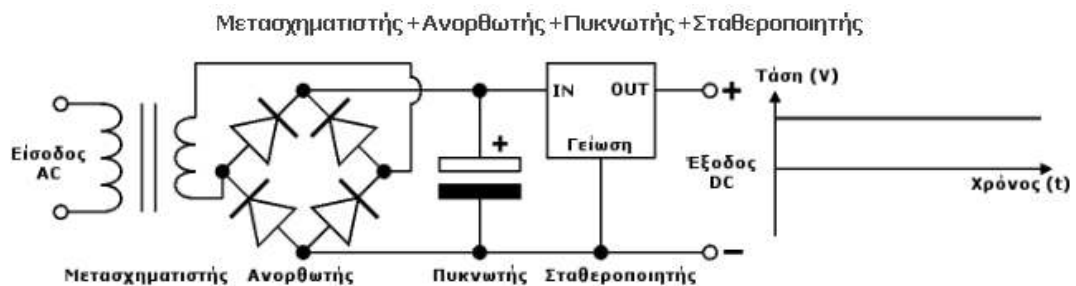
Γ) Εξομάλυνση.

Η εξομάλυνση (φιλτράρισμα) επιτυγχάνεται με ένα ηλεκτρολυτικό πυκνωτή μεγάλης χωρητικότητας συνδεδεμένο παράλληλα με το φορτίο. Ο πυκνωτής αποθηκεύει ενέργεια (γρήγορη φόρτιση) κατά τη διάρκεια της περιόδου αγωγής και την αποδίδει την ενέργεια στο φορτίο (εκφόρτιση) κατά τη διάρκεια της περιόδου μη αγωγής. Η εξομάλυνση αυξάνει την μέση τάση DC ($1.41 \times \text{RMS}$). Για παράδειγμα 12V RMS AC μετά από ανορθωτή πλήρους κύματος θα μειωθούν περίπου σε 10.6V RMS DC (τα 1.4V θα χαθούν λόγω πτώση τάσης στις διόδους - 0.66V ανά δίοδο πιο συγκεκριμένα). Με την τοποθέτηση του πυκνωτή εξομάλυνσης θα έχουμε $10.6 \times 1.41 = 14.9\text{V DC}$.



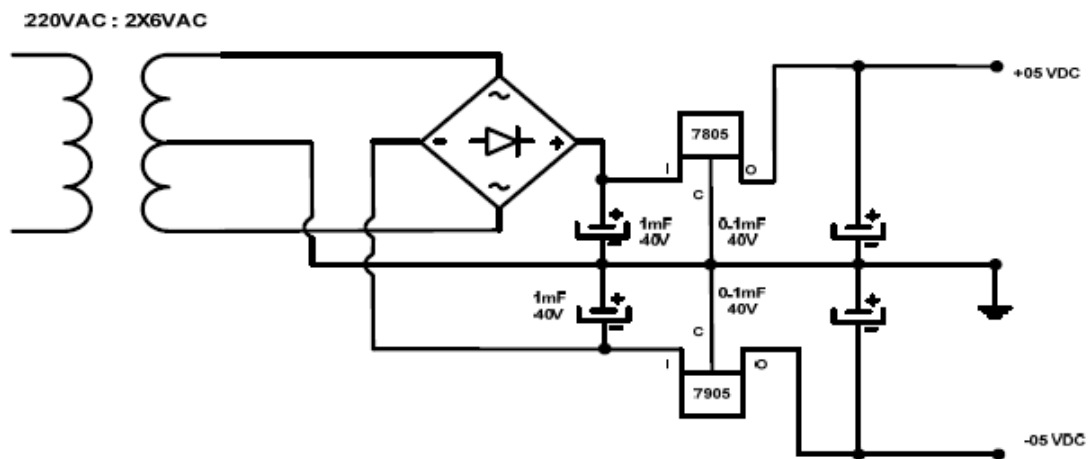
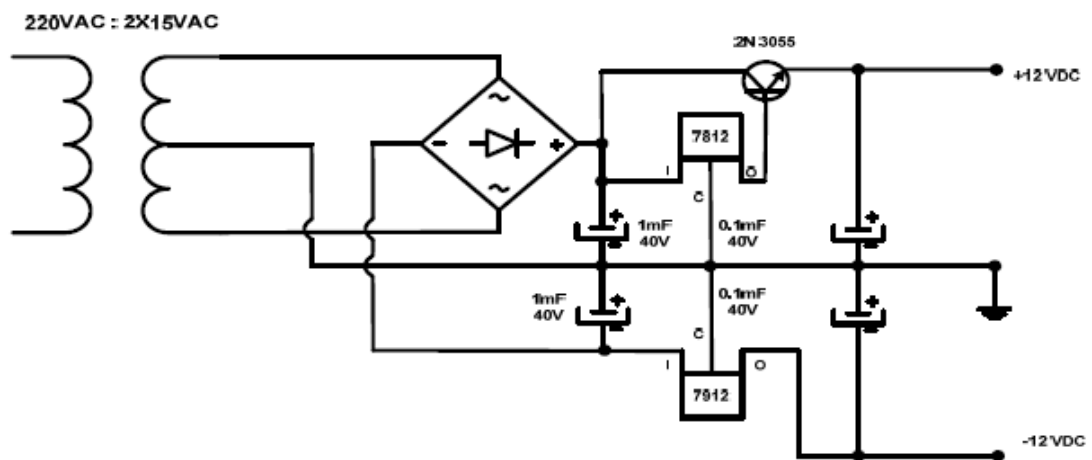
Δ) Σταθεροποιητής.

Οι σταθεροποιητές τάσης είναι ολοκληρωμένα κυκλώματα προρυθμισμένα σε κάποιες τάσεις εξόδου (συνήθως 5 έως 24V) και ως μία συγκεκριμένη ένταση ρεύματος. Οι περισσότεροι σταθεροποιητές περιέχουν κυκλώματα προστασίας υπερφόρτωσης και υπερθέρμανσης. Αρκετοί σταθεροποιητές έχουν τρεις επαφές ή περισσότερες, μοιάζοντας σαν τρανζίστορ ισχύος. Είναι σημαντικό η τάση εισόδου τους να είναι μερικά Volt παραπάνω από την σταθεροποιημένη τάση εξόδου. Ο ρόλος του σταθεροποιητή είναι να εξαλείφει κάθε κυμάτωση που απομένει από τον πυκνωτή εξομάλυνσης και να αποδίδει μία σταθερή τάση εξόδου. Πλέον η τάση εξόδου του σταθεροποιητή είναι κατάλληλη για να τροφοδοτήσουμε οποιαδήποτε συσκευή ή κύκλωμα.

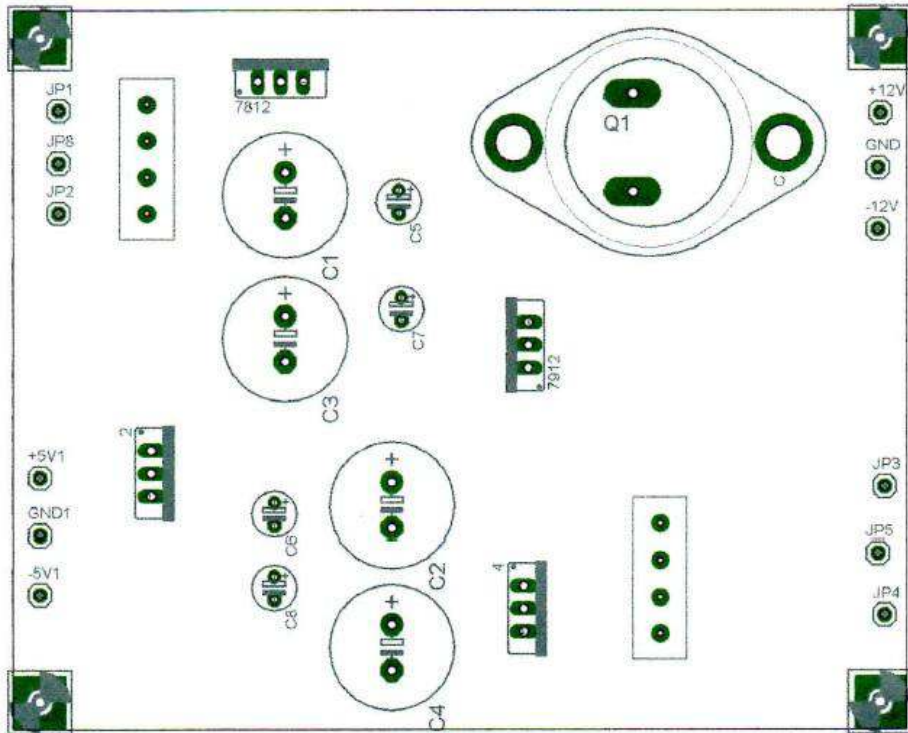


4.2 Τροφοδοτικό

Τα κυκλώματα έναυσης απαιτούν κάποιες τροφοδοτήσεις, ώστε να μπορέσουν να τεθούν σε λειτουργία. Οι συνεχείς αυτές τάσεις παρέχονται από το τροφοδοτικό, όπως αυτό απεικονίζεται στα ακόλουθα σχήματα. Οι τιμές των τάσεων έχουν εύρος -12V έως +12V ή -5V έως +5V.



Ακολουθούν 2 εικόνες του αμιγούς κατασκευαστικού τμήματος



Το κύκλωμα μας αποτελείται από τέσσερις βαθμίδες, οι οποίες περιγράφονται αναλυτικότερα παρακάτω :

Βαθμίδα 1η

Ο μετασχηματισμός της τάσης τροφοδοσίας από 220 V σε 2x15 V. Αυτό πετυχαίνεται με μετασχηματιστή ο οποίος στο δευτερεύων τύλιγμα θα έχει τρία άκρα, εκ των οποίων η μεσαία λήψη γειώνεται και τα άλλα δύο άκρα συνδέονται στην γέφυρα ανόρθωσης.

Βαθμίδα 2η

Η ανόρθωση της εναλλασσόμενης χαμηλής τάσης σε συνεχής τάση μέσω μιας γέφυρας διόδων.

Βαθμίδα 3η

Η ανορθωμένη πλέον τάση από την έξοδο της γέφυρας συνδέεται ηλεκτρολυτικούς πυκνωτές μεγάλης τιμής ώστε να γίνει η εξομάλυνση της.

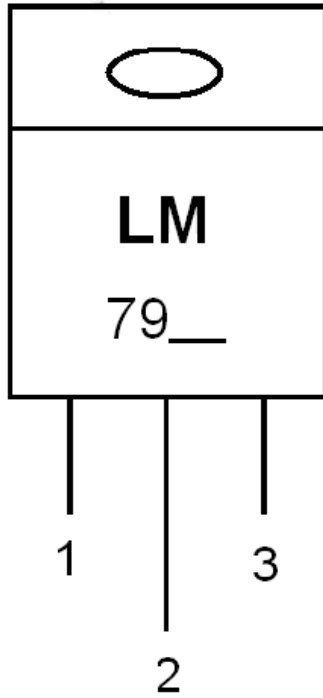
Βαθμίδα 4η

Η σχεδόν σταθερή συνεχής τάση οδηγείται στους σταθεροποιητές οι οποίοι μας δίνουν την επιθυμητή συνεχή τάση που θέλουμε για να τροφοδοτήσουμε το κύκλωμα έναυσης. Τα κυκλώματα αυτά χρησιμοποιούν τα ολοκληρωμένα της σειράς LM 78_ για σταθεροποίηση της θετικής τάσης και LM 79_ για σταθεροποίηση της αρνητικής τάσης.

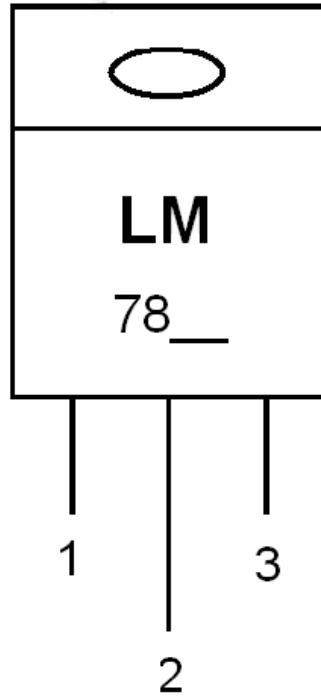
Ο αριθμός 78 σημαίνει σταθεροποίηση θετικής τάσης και οι αριθμοί που ακολουθούν φανερώνουν την ονομαστική τιμή της τάσης σταθεροποίησης. Επομένως, τα ολοκληρωμένα LM 7812 και LM 7805 που χρησιμοποιούμε στο τροφοδοτικό μας φανερώνουν σταθεροποίηση στα +12V D.C. και +5V D.C. αντίστοιχα

Ο αριθμός 79 σημαίνει σταθεροποίηση αρνητικής τάσης και οι αριθμοί που ακολουθούν φανερώνουν την ονομαστική τιμή της τάσης σταθεροποίησης. Επομένως, τα ολοκληρωμένα LM 7912 και LM 7905 που χρησιμοποιούμε στο τροφοδοτικό μας φανερώνουν σταθεροποίηση στα -12V D.C και -5V DC. αντίστοιχα.

ΣΥΜΒΟΛΙΣΜΟΣ ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΕΝΩΝ ΚΥΚΛΩΜΑΤΩΝ



1 : Input (Είσοδος)
2 : Ground (Γείωση)
3 : Output (Έξοδος)



1 : Ground (Γείωση)
2 : Input (Είσοδος)
3 : Output (Έξοδος)

- Υλικά που χρησιμοποιήσαμε για την κατασκευή τροφοδοτικού

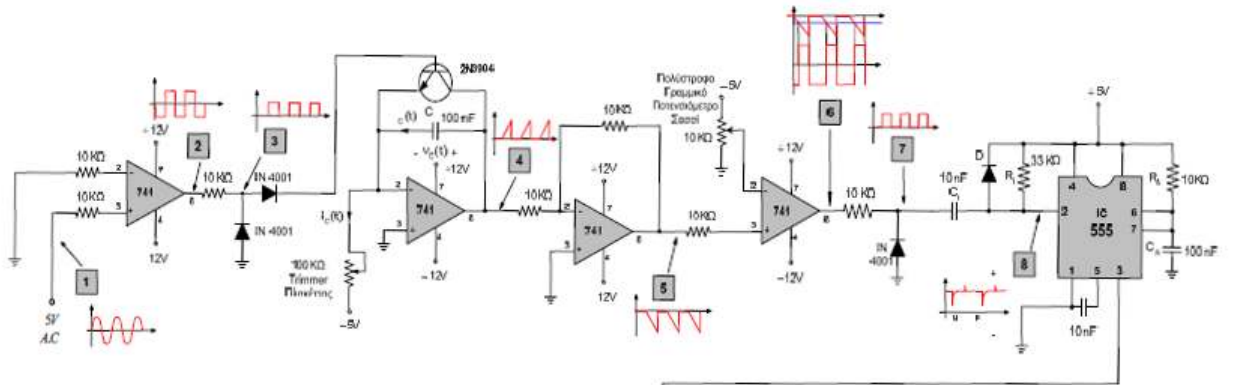
ΥΛΙΚΟ	ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΟ	ΠΟΣΟΤΗΤΑ
Ηλεκτρολυτικός Πυκνωτής	100mF	4
Ηλεκτρολυτικός Πυκνωτής	1000mF	4
Μονοφασική Γέφυρα	2 KBP 06	2
Μετασχηματιστής	230V / 2x15V / 2A	1
Μετασχηματιστής	230V / 2x6V / 2A	1
Σταθεροποιητής Τάσης +12V	LM 7812	1
Σταθεροποιητής Τάσης +5V	LM 7805	1
Σταθεροποιητής Τάσης -12V	LM 7912	1
Σταθεροποιητής Τάσης -5V	LM 7905	1
Κλέμες		7

4.3 Κυκλώματα έναυσης

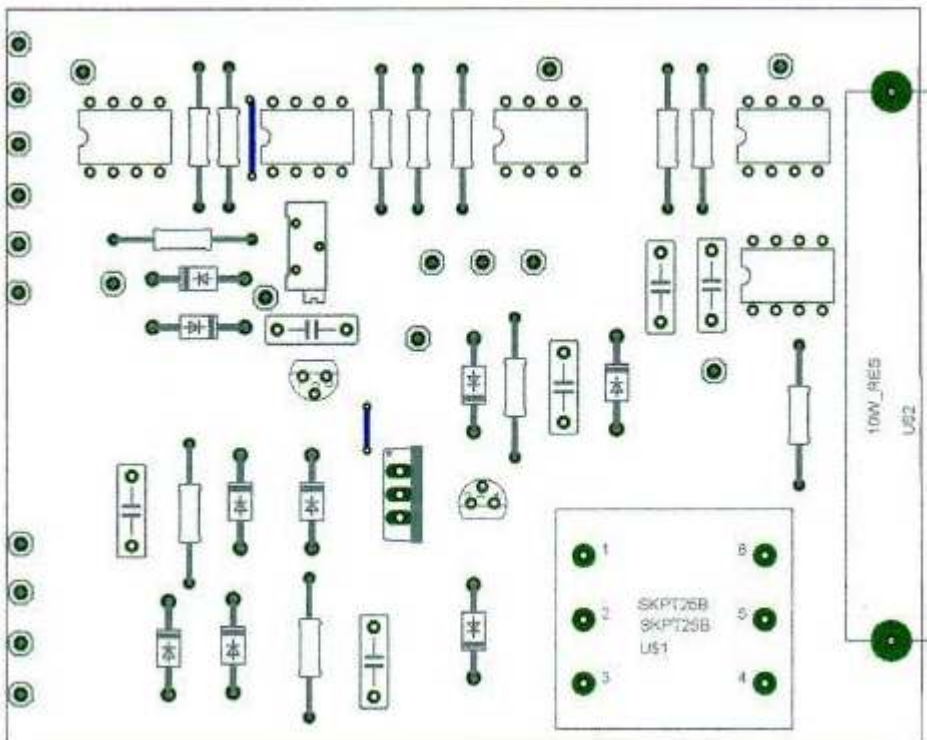
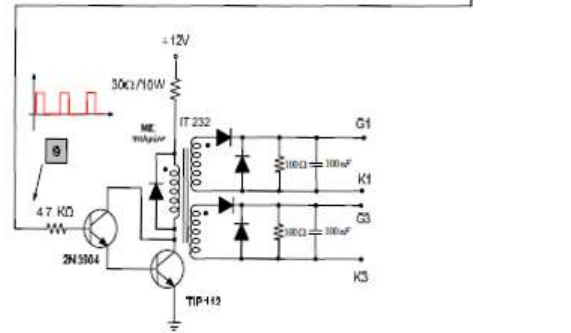
Το κύκλωμα το οποίο παράγει παλμούς για τον έλεγχο της μονοφασικής γέφυρας των θυρίστορ αποτελεί το κύκλωμα ελέγχου, το οποίο με τη σειρά του περιλαμβάνει το κύκλωμα έναυσης το οποίο παράγει παλμούς. Το κύκλωμα έναυσης αποτελεί την καρδιά του κυκλώματος ελέγχου. Σκοπός του κυκλώματος έναυσης είναι να παράγει και να ρυθμίζει χειροκίνητα, μ'ένα ποτενσιόμετρο, την χρονική στιγμή που θα δοθεί ο παλμός στα θυρίστορ.

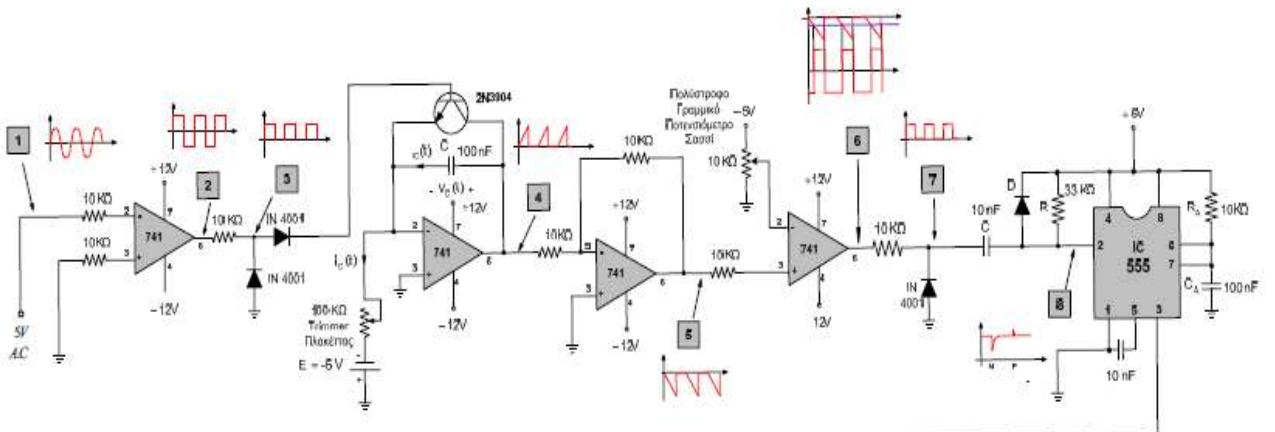
Δηλαδή την γωνία έναυσης α° . Επομένως ρυθμίζει έμμεσα την εναλλασσόμενη τάση στο φορτίο. Ο παλμός που παράγεται είναι συχνότητας 50Hz. Για την παραγωγή των παλμών χρησιμοποιούμε απλά κυκλώματα, τα οποία περιλαμβάνουν τελεστικούς ενισχυτές, τρανζίστορ και άλλα εξαρτήματα, με την βοήθεια των οποίων γίνεται κατανοητή η λειτουργία του κυκλώματος.

Το σχέδιο του κυκλώματος πυροδότησης παρουσιάζεται στα παρακάτω σχήματα. Χωρίζεται σε δύο κυκλώματα, ένα για τροφοδοσία έως και δύο θυρίστορ που άγουν από 0-180 και ένα για την τροφοδοσία έως και δύο θυρίστορ που άγουν από 180-360 μοίρες. Επίσης απεικονίζονται αντίστοιχα τα κατασκευαστικά κομμάτια – πλακέτες.

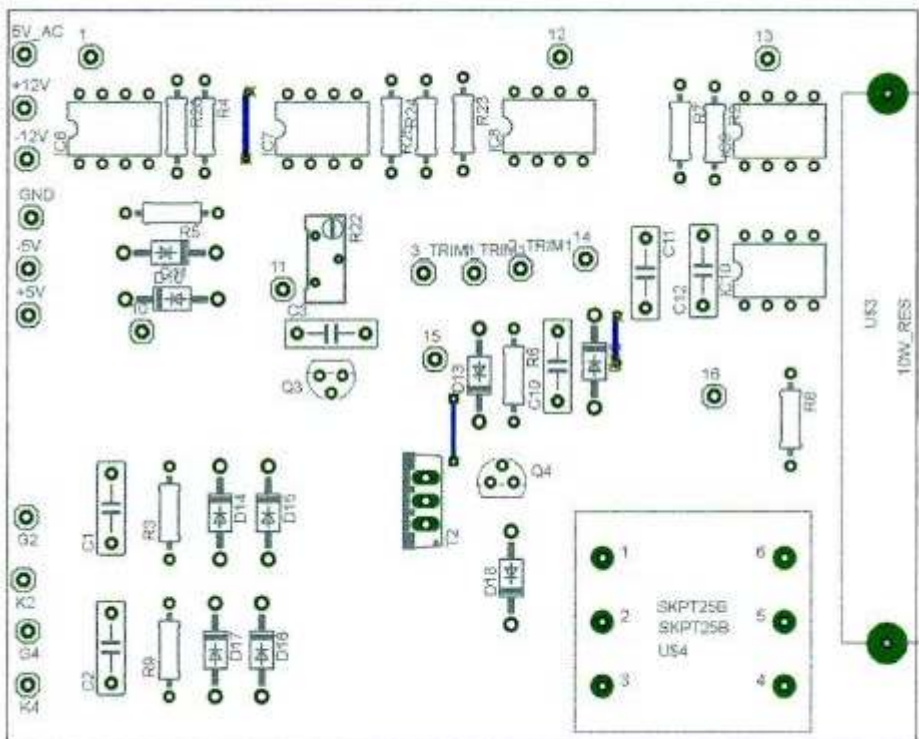
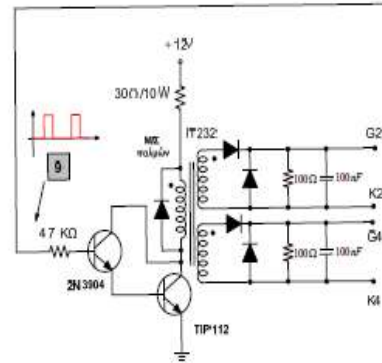


ΒΑΘΜΙΔΑ
ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ
ΠΑΛΜΩΝ 0-180





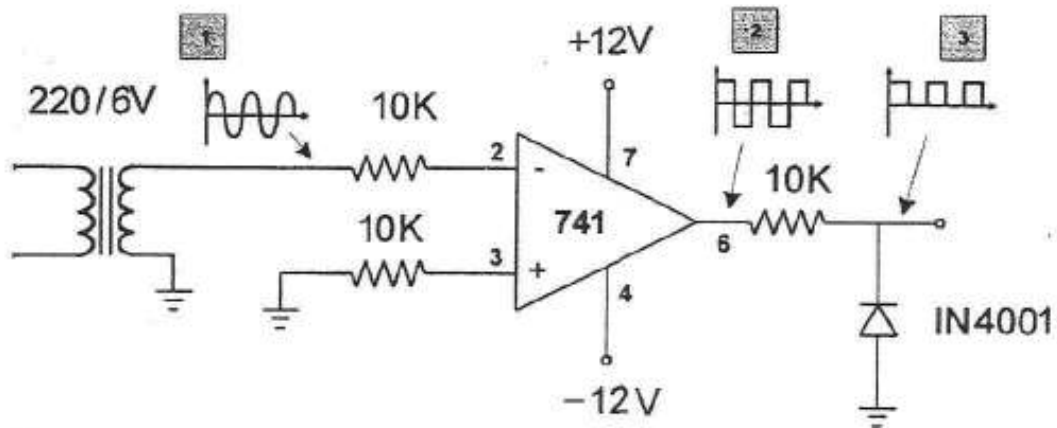
ΒΑΘΜΙΔΑ
ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ
ΠΑΛΜΩΝ 180-360



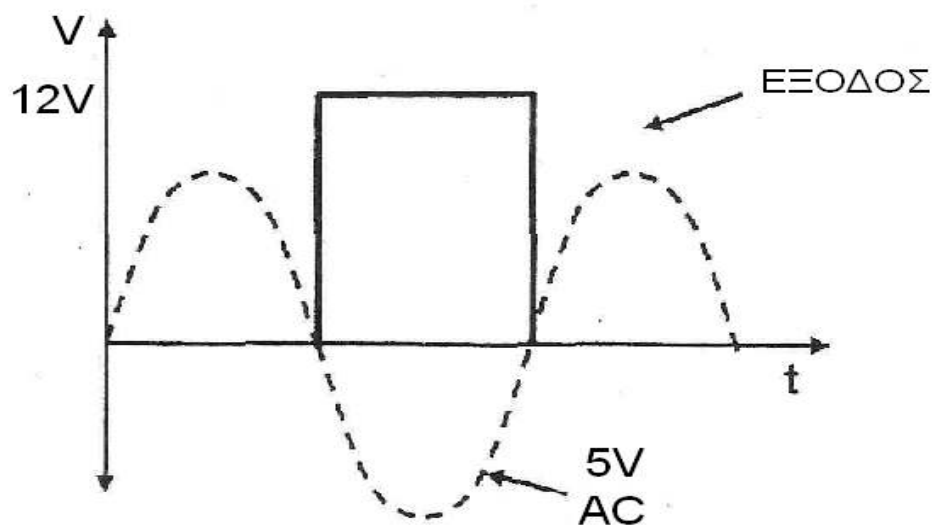
Στις παραγράφους που ακολουθούν, θα αναλύσουμε την κάθε βαθμίδα και θα παραθέσουμε τις κυματομορφές από τον παλμογράφο, για κάθε βαθμίδα.

Βαθμίδα 1η

Το κύκλωμα της πρώτης βαθμίδας περιλαμβάνει ένα τελεστικό ενισχυτή σε συνδεσμολογία συγκριτή και μια δίοδο και παρουσιάζεται στο σχήμα



Η τροφοδοσία του τελεστικού ενισχυτή είναι ίση με $\pm 12\text{ V}$. Η έξοδος του τελεστικού ενισχυτή μας δίνει -12 V στην θετική ημιπερίοδο της εναλλασσόμενης τάσης ενώ στην αρνητική ημιπερίοδο μας δίνει $+12\text{ V}$. Το σήμα εξόδου είναι ένας τετραγωνικός παλμός (μετατράπηκε από εναλλασσόμενο σήμα) και λόγω της δίοδου, στην έξοδο του τελεστικού ενισχυτή, λαμβάνουμε τελικά μόνο θετικούς τετραγωνικούς παλμούς.



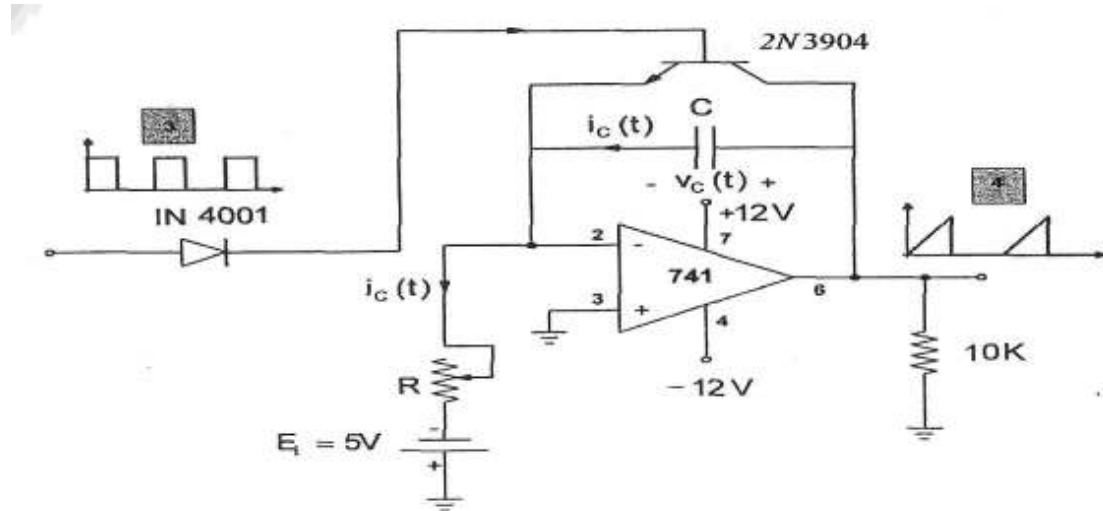
Η αντίσταση $10\text{ k}\Omega$ στην έξοδο του τελεστικού ενισχυτή χρησιμοποιείται για τον περιορισμό ρεύματος εξόδου στα 1.2 mA το πολύ ($12\text{V}/10\text{k}\Omega=1,2\text{ mA}$) και, συγχρόνως, αποτελεί την αντίσταση βάσης του τρανζίστορ της δεύτερης βαθμίδας που ακολουθεί. Οι αντιστάσεις στην είσοδο δεν είναι απαραίτητες γιατί η αντίσταση εισόδου του τελεστικού ενισχυτή είναι πρακτικά άπειρη.



ΕΝΔΕΙΞΗ ΠΑΛΜΟΓΡΑΦΟΥ

Βαθμίδα 2η

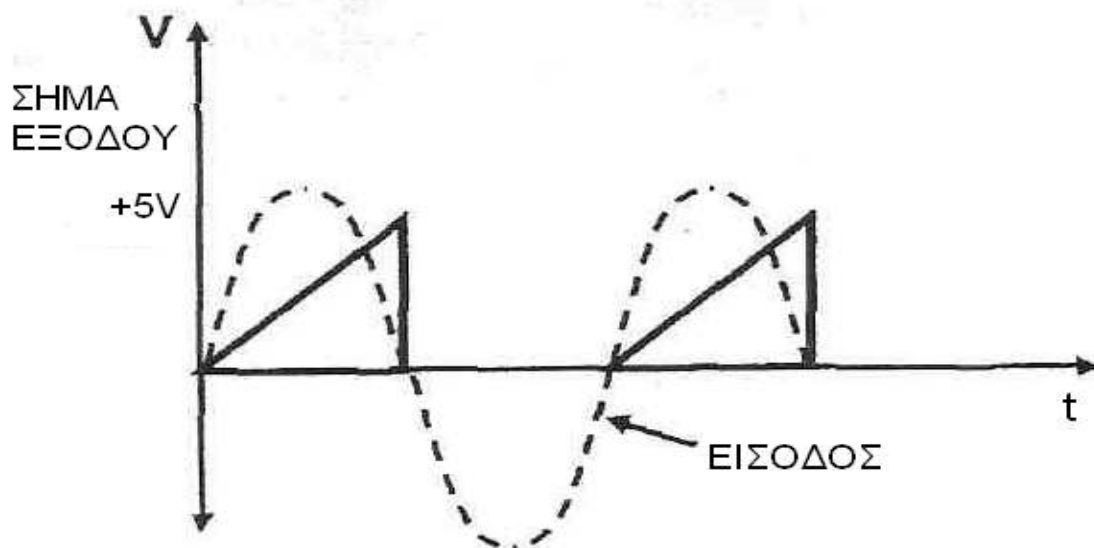
Το κύκλωμα της δεύτερης βαθμίδας περιλαμβάνει ένα τελεστικό ενισχυτή σε συνδεσμολογία ολοκληρωτή, μια διόδο και ένα τρανζίστορ



Γειώνουμε την μη αναστρέφουσα είσοδο του τελεστικού ενισχυτή. Όσο δεν υπάρχει τάση στην βάση του τρανζίστορ, από την πρώτη βαθμίδα, ο πυκνωτής φορτίζει γραμμικά και είναι ένα θετικό αναρριχητικό σήμα στην έξοδο. Το σταθερό ρεύμα φόρτισης του πυκνωτή εξαρτάται από την αντίσταση 100 K Ω και είναι ίσο με $5 \text{ V}/100 \text{ K}\Omega = 50 \mu\text{A}$.

Αν η βάση του τρανζίστορ δεχθεί θετική τάση, από την πρώτη βαθμίδα/τότε άγει και βραχυκυκλώνει τον πυκνωτή, οπότε παίρνουμε στην έξοδο σήμα μηδέν.

Τελικά στην έξοδο παίρνουμε ένα πριονωτό σήμα του οποίου η μέγιστη τιμή είναι $\Delta V_{\text{πυκνωτή}} = I \cdot \Delta t / C$

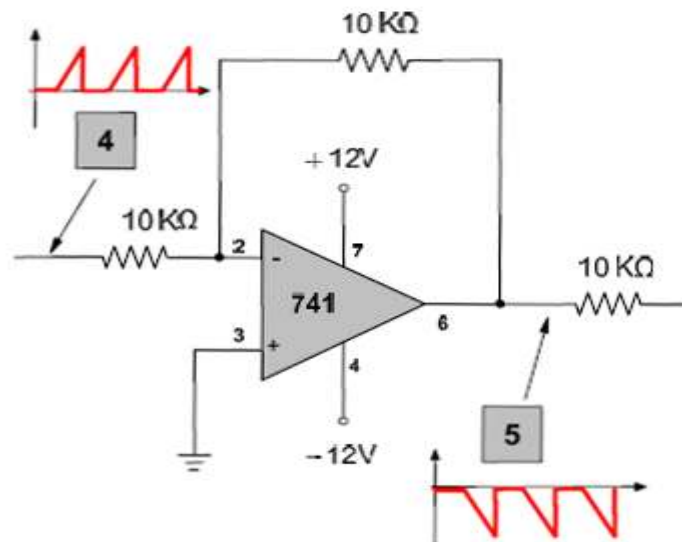




ΕΝΔΕΙΞΗ ΠΑΛΜΟΓΡΑΦΟΥ

Βαθμίδα 3η

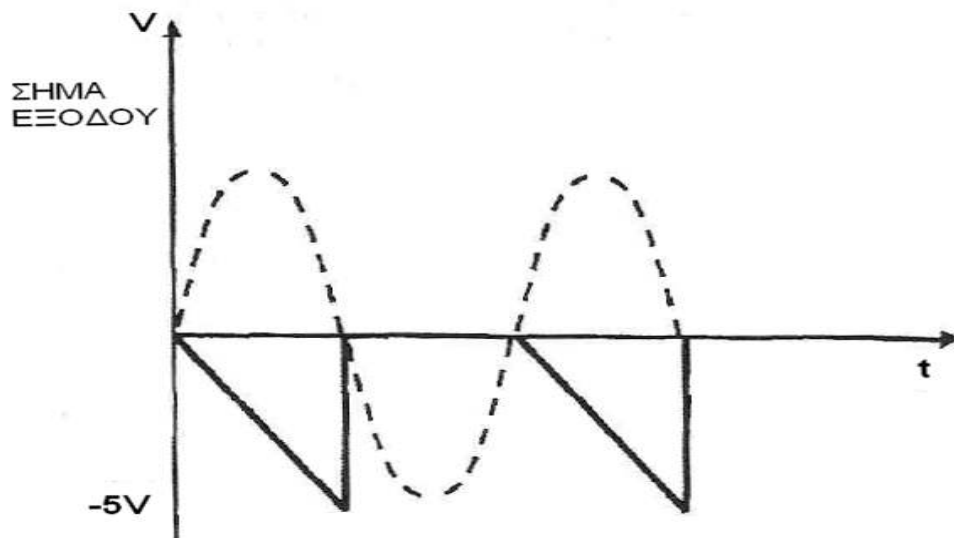
Το κύκλωμα της τρίτης βαθμίδας περιλαμβάνει έναν τελεστικό ενισχυτή σε συνδεσμολογία ενισχυτή και συγκεκριμένα αναστροφέα.



Το σήμα της δεύτερης βαθμίδας οδηγείται στον τελεστικό ενισχυτή του παραπάνω σχήματος οπότε στην έξοδο παίρνουμε :

$$V_{\text{εισόδου}} = -\frac{R_2}{R_1} V_{\text{εξόδου}}$$

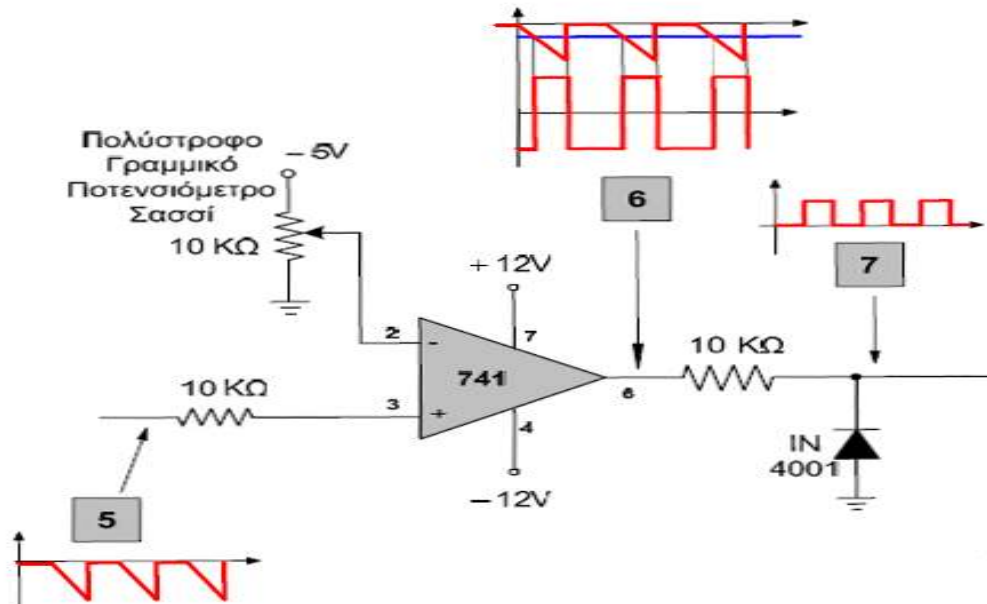
Επειδή οι αντιστάσεις R_1 και R_2 είναι ίσες παίρνουμε στην έξοδο του τελεστικού ενισχυτή το ίδιο σήμα ανεστραμμένο



ΕΝΔΕΙΞΗ ΠΑΛΜΟΓΡΑΦΟΥ

Βαθμίδα 4η

Το κύκλωμα της τέταρτης βαθμίδας περιλαμβάνει έναν τελεστικό ενισχυτή σε συνδεσμολογία συγκριτή, μια δίοδο και ένα ποτενσιόμετρο.



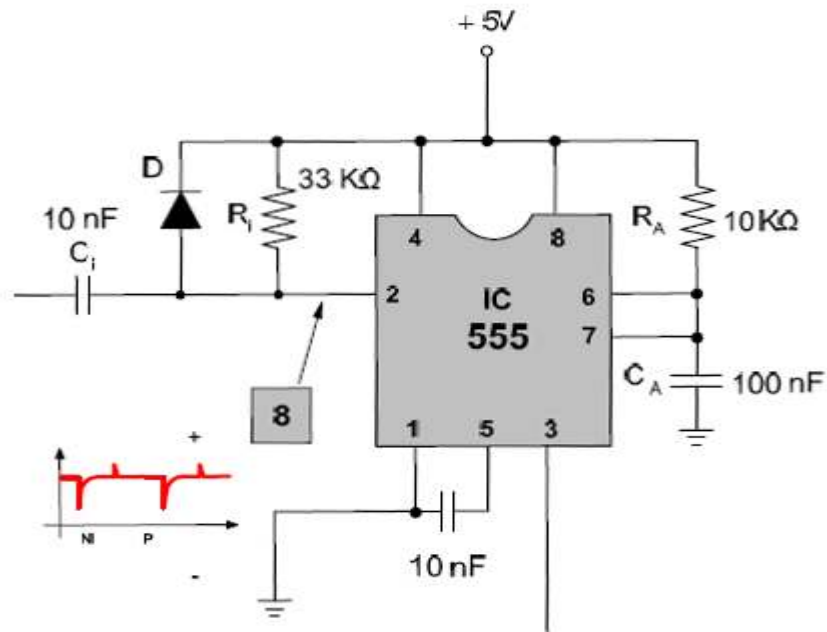
Το σήμα που δημιουργήσαμε στην τρίτη βαθμίδα το συγκρίνουμε με μια αρνητική τάση ενός ποτενσιόμετρου, μέσω του τελεστικού ενισχυτή. Η έξοδος δίνει θετικούς παλμούς +12 V λόγω και της δίοδου. Αν μεταβάλλουμε το ποτενσιόμετρο, μεταβάλλετε και το πλάτος από 0 έως π ακτίνια (0 -10 ms)

Ακολουθεί η ένδειξη του παλμογράφου, στη συγκεκριμένη βαθμίδα.



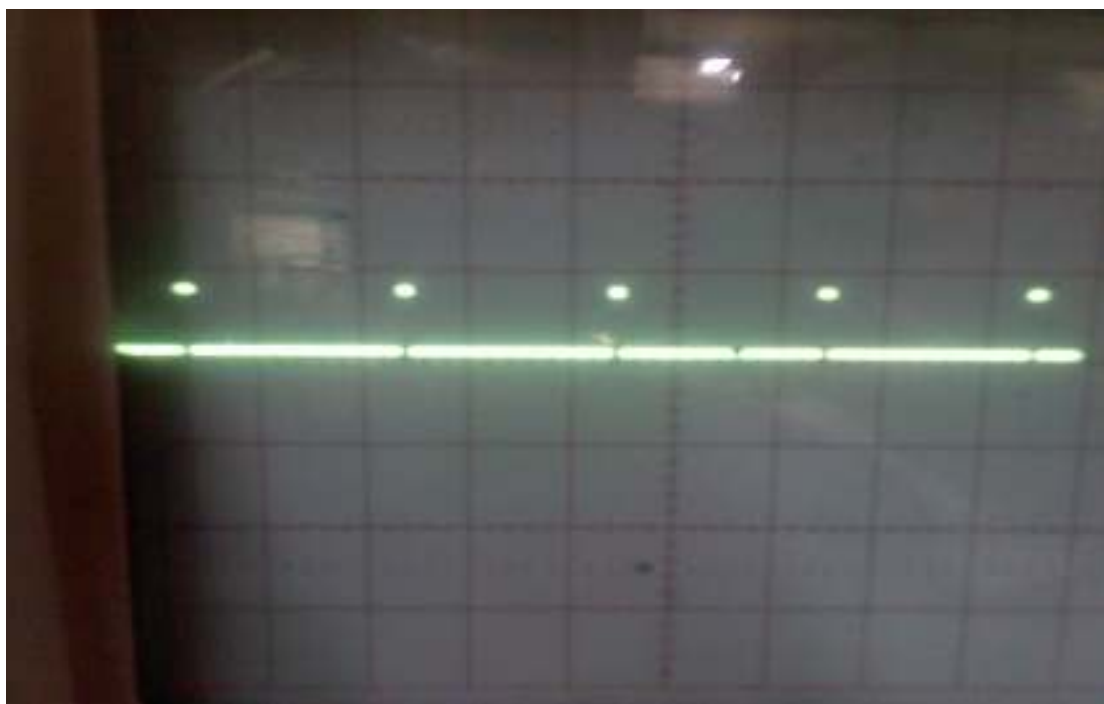
Βαθμίδα 5η

Το κύκλωμα της πέμπτης βαθμίδας περιλαμβάνει τον χρονιστή 555 σαν μονοσταθή πολυδονητή. Όπως αναφέραμε ο μονοσταθής πολυδονητής βγάζει παλμό στην έξοδο μόνο όταν δεχθεί "αντίστροφο παλμό". Επίσης, ο "αντίστροφος παλμός" πρέπει να έχει διάρκεια μικρότερη από αυτή του παλμού εξόδου του χρονιστή. Η διάρκεια του παλμού εξόδου είναι $T=1,1RC$ και στο συγκεκριμένο κύκλωμα είναι: $T= 1,1 \times 10K\Omega \times 100nF=1,1 \text{ msec}$. Ο "αντίστροφος παλμός" από την τέταρτη βαθμίδα έχει μεταβαλλόμενη διάρκεια που φθάνει τα 10msec. Επομένως, πρέπει να μειώσουμε την Διάρκεια του "αντίστροφου παλμού". Γι' αυτό τον σκοπό χρησιμοποιούμε ένα δικτύωμα RC πριν από τον χρονιστή 555, με αντίσταση $R=33 \text{ K}\Omega$ και πυκνωτή $C=10 \text{ nF}$



Το ένα άκρο του δικτυώματος το τροφοδοτούμε με σταθερή τάση +5V ενώ στο άλλο άκρο δίνουμε την έξοδο του κυκλώματος της τέταρτης βαθμίδας. Για όσο διάστημα η βαθμίδα 4 δίνει τάση +12V η τάση στην επαφή 2 του χρονιστή 555 είναι +5V. Αυτό γίνεται γιατί η διόδος είναι ορθά πολωμένη και μεταφέρει το δυναμικό των +5V, ενώ ο πυκνωτής είναι, επίσης, φορτισμένος. Την στιγμή που η τάση από την βαθμίδα 4 μηδενίζεται τότε στιγμιαία μεταφέρεται στην είσοδο του 555 το δυναμικό του πυκνωτή που ήταν φορτισμένος αρνητικά. Συγχρόνως έχουμε την φόρτιση του πυκνωτή στα +5V σε πολύ μικρό χρονικό διάστημα και αυτό λόγω της μικρής σταθεράς χρόνου του δικτυώματος. Όταν η βαθμίδα 4 ξαναδώσει τάση, αυτή η τάση θα προστεθεί στα +5V του πυκνωτή όμως η διόδος θα τα αποκόψει.

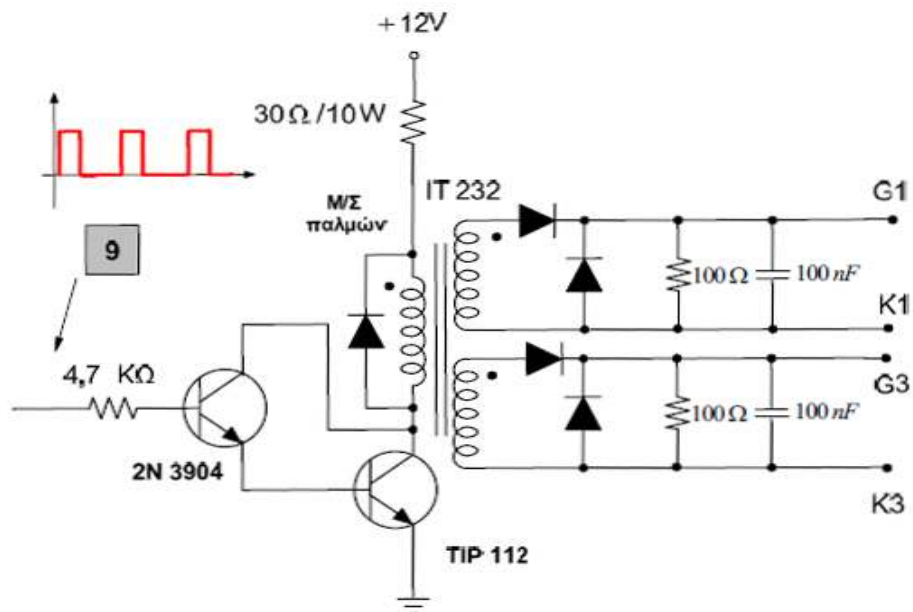
Με αυτόν τον τρόπο μειώνεται η διάρκεια του αντίστροφου παλμού σε $T=33K \times 10n=0,33msec$ περίπου. Στην πραγματικότητα αυτό που μας ενδιαφέρει για τον αντίστροφο παλμό είναι τα σημεία όπου η τάση πέφτει κάτω από το $1/3V_{cc}$ δηλαδή $5/3=1,66V$ και ανεβαίνει πάνω από τα $1,66V$. Επομένως ο αντίστροφος παλμός έχει ακόμα μικρότερη διάρκεια από τα $0,33msec$. Η έξοδος του χρονιστή 555 δίνει παλμό +5V σε κάθε αντίστροφο παλμό.



ΕΝΔΕΙΞΗ ΠΑΛΜΟΓΡΑΦΟΥ

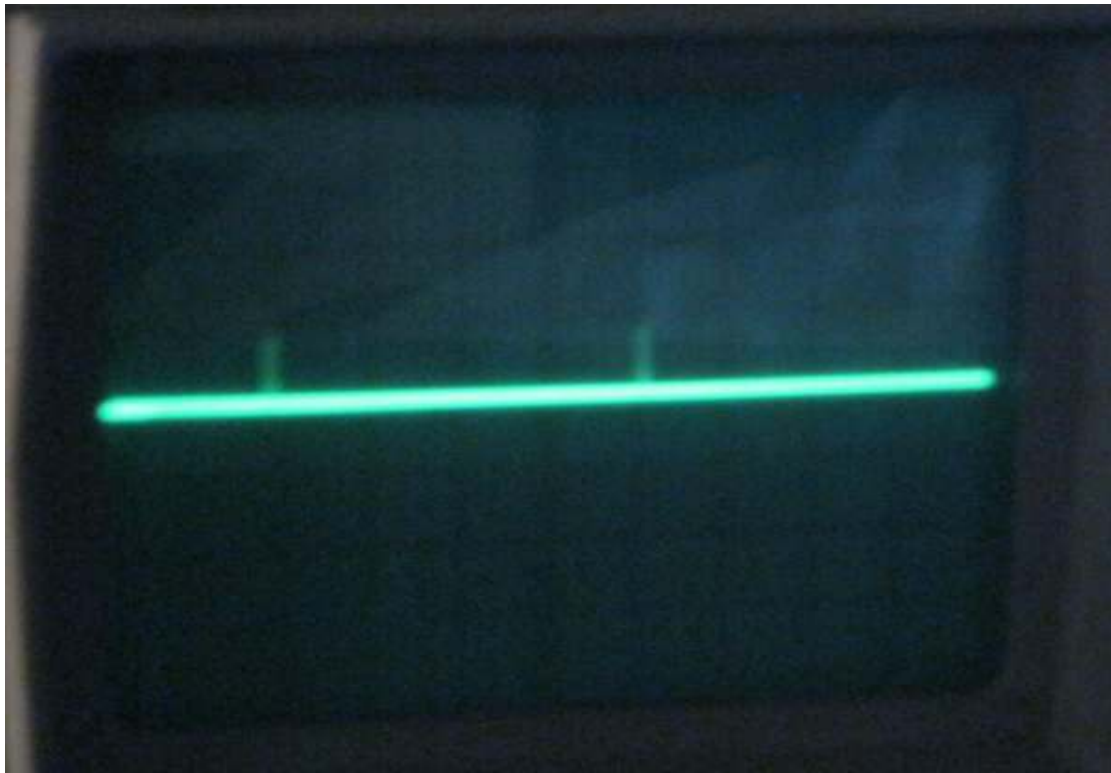
Βαθμίδα 5^η

Το κύκλωμα της έκτης βαθμίδας παρουσιάζεται στο ακόλουθο σχήμα.



Το κύκλωμα αποτελείται από τρία τμήματα:

1. Δύο τρανζίστορ σε συνδεσμολογία Darlington με τις κατάλληλες αντιστάσεις
2. Ένας μετασχηματιστής παλμών και δύο δίοδοι
3. Μία αντίσταση και ένας πυκνωτής στην έξοδο του μετασχηματιστή για προστασία της πύλης.



ΕΝΔΕΙΞΗ ΠΑΛΜΟΓΡΑΦΟΥ

- Υλικά που χρησιμοποιήσαμε για την κατασκευή των πλακετών κυκλωμάτων έναυσης.

ΥΛΙΚΟ	ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΟ	ΠΟΣΟΤΗΤΑ
Μετασχηματιστής Παλμών	SKPT 20	2
Τελεστικός ενισχυτής	LM 741	8
Τρανζίστορ	2N3904	4
Τρανζίστορ	TIP 112	2
Χρονιστής	IC 555	2
Δίοδος	IN 4001	18
Αντίσταση	100 Ω	4
Αντίσταση	4,7 kΩ	2
Αντίσταση	10 kΩ	16
Αντίσταση	33 kΩ	2
Αντίσταση	30Ω / 10W	2
Ρυθμιστική αντίσταση TRIMMER	100 kΩ	2
Γραμμικό ποτενσιόμετρο (πολυστροφικό)	10 kΩ	2
Πυκνωτής	10 nF	4
Πυκνωτής	100 nF	8
Κλέμες		10



Βιβλιογραφία

- [1] Κ.Α. Καρύμπακας, «Γενική Ηλεκτρονική», Τόμος Α, Θεσσαλονίκη 2001
- [2] Σ. Μανιάς, «Ηλεκτρονικά Ισχύος», Εκδ. ΣΥΜΕΩΝ, Αθήνα 2000
- [3] Π. Μαλατέστας – Ηρ. Βυλλιώτης, «Εργαστηριακές Ασκήσεις Ηλεκτρονικών Ισχύος », Εκδ. Τζιόλα, Θεσσαλονίκη 2004
- [4] Π. Μαλατέστας – Ηρ. Βυλλιώτης, «Εργαστηριακές Ασκήσεις Ηλεκτρικής Κίνησης », Εκδ. Τζιόλα, Θεσσαλονίκη 2005
- [5] Σ. Μανιάς, «Ανώτερα κεφάλαια ηλεκτρονικών ισχύος», Εκδ. Παπασωτηρίου, Αθήνα 1998
- [6] U.R. Mohan, «Εισαγωγή στα ηλεκτρονικά ισχύος», Εκδ. Τζιόλα, Θεσσαλονίκη 2010
- [7] Αν. Γούτης, «Το Ηλεκτρολογικό Σχέδιο» Τόμος Ι, Εκδ. ΙΩΝ Περιστέρι 1999
- [8] PowerThyristorApplication Notes, e-book
- [9] <http://users.ntua.gr>