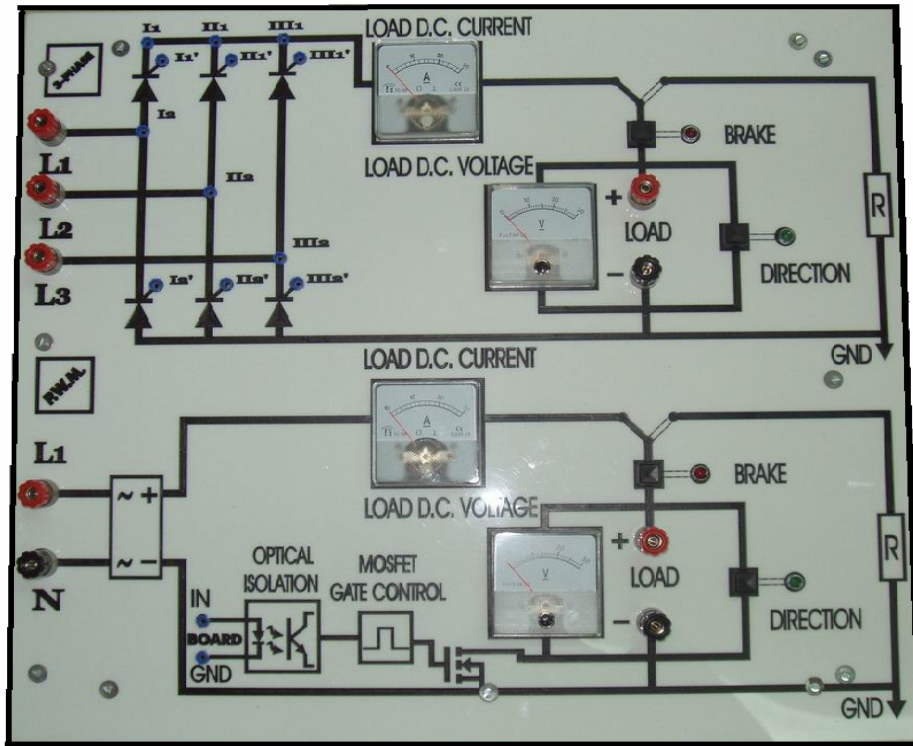




Τ.Ε.Ι. ΚΡΗΤΗΣ ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΧΑΝΙΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ



ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΘΕΜΑ : ΕΠΕΚΤΑΣΗ ΤΟΥ POWER BOARD ΓΙΑ ΡΥΘΜΙΣΗ
ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΚΑΙ ΑΛΛΑΓΗΣ ΦΟΡΑΣ ΠΕΡΙΣΤΡΟΦΗΣ ΚΙΝΗΤΗΡΩΝ
D.C. ΜΕΓΑΛΗΣ ΙΣΧΥΟΣ - ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΠΕΔΗΣΗ

ΕΙΣΗΓΗΤΗΣ:

ΤΣΑΚΙΡΗΣ ΑΝΤΩΝΙΟΣ

ΣΠΟΥΔΑΣΤΕΣ:

ΜΑΝΙΤΗΣ ΜΑΡΙΟΣ

ΜΠΑΡΟΥΕΗΣ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ

Πρόλογος

Στόχος αυτής της πτυχιακής εργασίας είναι να δώσει μία ενοποιημένη περίληψη της θεωρίας των εξαρτημάτων και των κυκλωμάτων που συναντάμε σήμερα στο ευρύ πεδίο των ηλεκτρονικών ισχύος. Το τελικό αποτέλεσμα αυτής της προσπάθειας είναι η σχεδίαση και κατασκευή μιας διάταξης που θα δώσει τη δυνατότητα στους σπουδαστές πρακτικά να προσεγγίσουν τον συγκεκριμένο τομέα της ηλεκτρονικής.

Η οργάνωση αυτής της εργασίας αντανακλά μια προσπάθεια να διασπαστεί το ογκώδες αυτό αντικείμενο σε κατανοητά μέρη για τον σπουδαστή και να δημιουργηθεί, κομμάτι κομμάτι, μία ανάλυση της θεωρίας αυτού του πολύ διαδεδομένου τομέα σήμερα, που έχει σαν στόχο τον ηλεκτρονικό έλεγχο της ισχύος.

Το τελικό αποτέλεσμα θα είναι ο σπουδαστής, έχοντας αυτή την εργασία σαν οδηγό, να μπορέσει να συνδυάσει την θεωρία με την εφαρμογή κατά κύριο λόγο, αλλά με απώτερο στόχο την ρεαλιστική ένταξή του στο ευρύ φάσμα των εφαρμογών των ηλεκτρονικών ισχύος, υπό αυστηρά ελεγχόμενων συνθηκών ασφαλείας.

Τέλος, η πραγματοποίηση αυτής της πτυχιακής εργασίας δεν θα ήταν δυνατή δίχως την βοήθεια των καθηγητών μας Τσακίρη Αντωνίου, Μανίτη Αντωνίου και του συμφοιτητή μας Στίγκα Κωνσταντίνου, αλλά και χωρίς την αμέριστη συμπαράσταση των γονιών μας.

Περιεχόμενα

Πρόλογος.....	σελίδα 2
Περιεχόμενα.....	σελίδα 3

Κεφάλαιο 1^ο

1.1 Εισαγωγή.....	σελίδα 5
1.2 Εφαρμογές Ηλεκτρονικών Ισχύος.....	σελίδα 8
1.3 Ημιαγωγά Στοιχεία Ισχύος.....	σελίδα 8
1.3.1 Δίοδος (Diode)	σελίδα 9
1.3.2 Θυρίστωρ (Thyristor)	σελίδα 14
1.3.3 Triac	σελίδα 30
1.3.4 Mosfet.....	σελίδα 31
1.3.5 Transistor.....	σελίδα 42
1.3.6 Optocoupler.....	σελίδα 45

Κεφάλαιο 2^ο

2.1 Μεταγωγή και κυκλώματα μεταγωγής.....	σελίδα 47
2.2 Κυκλώματα ηλεκτρονικών ισχύος	σελίδα 57
2.2.1 Εισαγωγή στους μη ελεγχόμενους ανορθωτές.....	σελίδα 57
2.2.2 Εισαγωγή στους ελεγχόμενους ανορθωτές.....	σελίδα 74
2.2.3 Εισαγωγή στους αντιστροφείς (Inverters D.C.-A.C.).....	σελίδα 96
2.2.4 Εισαγωγή στους μετατροπείς D.C. ισχύος choppers.....	σελίδα 109
2.2.5 Εισαγωγή στους κυκλομετατροπείς (Cycloconverters).....	σελίδα 116

Κεφάλαιο 3^ο

3.1 Στοιχεία ηλεκτρικών μηχανών.....	σελίδα 123
3.2 Κατασκευαστική δομή ηλεκτρικών μηχανών.....	σελίδα 125
3.3 Βασικές εξισώσεις των ηλεκτρικών μηχανών.....	σελίδα 127
3.4 Χαρακτηρισμός ακροδεκτών των ηλεκτρικών μηχανών.....	σελίδα 129
3.5 Βηματικοί κινητήρες.....	σελίδα 135
3.6 Ηλεκτρονικός κινητήρας.....	σελίδα 142
3.7 Δομή μηχανών συνεχούς ρεύματος.....	σελίδα 144
3.8 Τρόπος λειτουργίας των κινητήρων συνεχούς ρεύματος.....	σελίδα 162
3.9 Συνδεσμολογίες κινητήρων συνεχούς ρεύματος.....	σελίδα 165
3.10 Έλεγχος στροφών κινητήρων συνεχούς ρεύματος	σελίδα 176
3.11 Σερβοκινητήρες.....	σελίδα 194
3.12 Ηλεκτρική πέδηση (Braking)	σελίδα 199

Κεφάλαιο 4^ο

4.1 Κυκλώματα ηλεκτρονικών ισχύος για τον έλεγχο ταχύτητας.....	σελίδα 205
4.2 Έλεγχος ταχύτητας με αντιστροφή σταθερής τάσης.....	σελίδα 205
4.3 Έλεγχος ταχύτητας με αντιστροφή σταθερού ρεύματος.....	σελίδα 206
4.4 Έλεγχος ταχύτητας με κυκλομετατροπέα.....	σελίδα 207
4.5 Έλεγχος ταχύτητας με αναστροφή transistors ισχύος.....	σελίδα 207
4.6 Έλεγχος στροφών δακτυλιοφόρων κινητήρων.....	σελίδα 208
4.7 Άλλες εφαρμογές των ημιαγωγών ισχύος.....	σελίδα 209

Κεφάλαιο 5^ο

5.1	Εισαγωγή στο Powerboard.....	σελίδα 218
5.2	Το τροφοδοτικό.....	σελίδα 219
5.3	Βαθμίδα παραγωγής τριφασικού ρεύματος.....	σελίδα 222
5.4	Βαθμίδα ελέγχου συγχρονισμού και πυροδοτικών παλμών πύλης.....	σελίδα 225
5.5	Βαθμίδα μπλοκαρίσματος πυροδοτικών παλμών (Block up Logic)	σελίδα 230
5.6	Βαθμίδα διαμόρφωσης εύρους παλμού P.W.M.....	σελίδα 233
5.7	Κυκλώματα ανορθωτικών διατάξεων.....	σελίδα 246
5.8	Η γέφυρα H.....	σελίδα 248
5.9	Κυκλωματικά στοιχεία D.C.-D.C. μετατροπέων.....	σελίδα 249
5.10	Φορτία.....	σελίδα 251

Κεφάλαιο 6^ο

6.1	Επέκταση δυνατοτήτων του Powerboard.....	σελίδα 253
6.1.1	Σκοπός της εργασίας	σελίδα 253
6.2	Η Εργασία μας.....	σελίδα 253
6.2.1	Μετρήσεις.....	σελίδα 281
6.2.2	Αποτελέσματα.....	σελίδα 281
6.2.3	Συμπεράσματα.....	σελίδα 282

Παράρτημα

•	Παράρτημα.....	σελίδα 285
•	Τεχνικά κείμενα εξαρτημάτων – Datasheets.....	σελίδα 286
•	Βιβλιογραφία.....	σελίδα 287

Κεφάλαιο 1^ο

1.1 Εισαγωγή.

Η πτυχιακή εργασία είναι χωρισμένη συνολικά σε 7 θεματικές ενότητες που καλύπτουν με σαφήνεια το αντικείμενο που μελετάται. Η κάθε θεματική ενότητα εξετάζει ένα ξεχωριστό αντικείμενο από τις υπόλοιπες και είναι χωρισμένη σε μικρότερες έτσι ώστε να γίνεται ευκολότερα κατανοητή.

- **Κεφάλαιο 1^ο** : Γίνεται μία γενικότερη εισαγωγή στο αντικείμενο που πρόκειται να παρουσιάσει. Αναλυτικότερα γίνεται μία ανάλυση των ηλεκτρονικών στοιχείων εκείνων που συναντούμε σήμερα στα ηλεκτρονικά ισχύος συνοδευόμενα από τις απαραίτητες αναλύσεις για τον τρόπο λειτουργία τους με κυκλώματα και γραφικές παραστάσεις.

Τα στοιχεία αυτά είναι :

1. Δίοδος
2. Thyristor (SCR)
3. Triac
4. Mosfet
5. Transistor
6. Optocoupler

- **Κεφάλαιο 2^ο** : Μία ειδικότερη ανάλυση στην τεχνική της μεταγωγής των thyristors που συνοδεύεται από κυκλώματα μεταγωγής και την κατάλληλη θεωρία για την κατανόηση τους. Επίσης γίνεται εκτενή αναφορά στα ήδη γνωστά κυκλώματα ηλεκτρονικών ισχύος με αναλύσεις κυκλωμάτων και με μεγάλη έμφαση στις κυματομορφές εξόδων ανάλογα με το είδος του φορτίου.

Τα κυκλώματα αυτά είναι :

1. Κυκλώματα ανόρθωσης (μη ελεγχόμενα- ελεγχόμενα)
2. Αντιστροφείς (Inverters)
3. Μετατροπείς DC (Choppers)
4. Κυκλομετατροπείς (Cycloconverters)

- **Κεφάλαιο 3^ο** : Μία αναφορά στα στοιχεία των ηλεκτρικών μηχανών όλων των ειδών, με παράλληλο διαχωρισμό τους σε είδη σε σχέση με την διέγερση τους. Επίσης γίνεται αναφορά στην ηλεκτρική πέδηση και τον έλεγχο των ηλεκτρικών μηχανών.

Οι μηχανές αυτές είναι:

1. Ηλεκτρικές μηχανές συνεχούς ρεύματος
2. Ηλεκτρικές μηχανές μονοφασικού εναλλασσομένου ρεύματος
3. Ηλεκτρικές μηχανές τριφασικού εναλλασσομένου ρεύματος

- **Κεφάλαιο 4^ο** : Εδώ παρουσιάζονται κάποιες άλλες τεχνικές που με την βοήθειά τους μπορεί να ρυθμιστεί η ταχύτητα κινητήρων μεγάλης ισχύος. Παρουσίαση ηλεκτρονικών κυκλωμάτων και αρχές λειτουργία τους.

Τα κυκλώματα αυτά είναι :

1. Έλεγχος ταχύτητας με αντιστροφέα σταθερής τάσης
2. Έλεγχος ταχύτητας με αντιστροφέα σταθερού ρεύματος
3. Έλεγχος ταχύτητας με κυκλομετατροπέα
4. Έλεγχος ταχύτητας με αναστροφέα transistors ισχύος
5. Έλεγχος στροφών δακτυλιοφόρων κινητήρων

- **Κεφάλαιο 5^ο** : Αναφορά στο Powerboard του εργαστηρίου των ηλεκτρονικών ισχύος με αναλύσεις ξεχωριστά όλων των βαθμίδων του σε επίπεδο ηλεκτρονικών κυκλωμάτων και σημάτων εξόδου.

Οι βαθμίδες αυτές είναι :

1. Τροφοδοτικό Powerboard
2. Βαθμίδα παραγωγής τριφασικού ρεύματος
3. Βαθμίδα μπλοκαρίσματος πυροδοτικών παλμών (BLOCK UP LOGIC)
4. Βαθμίδα ελέγχου συγχρονισμού και πυροδοτικών παλμών πύλης
5. Βαθμίδα διαμόρφωσης εύρους παλμού P.W.M. (Pulse width modulation)
6. Κυκλώματα ανορθωτικών διατάξεων
7. Bridge H
8. Κυκλωματικά στοιχεία DC-DC μετατροπών
9. Φορτία

- **Κεφάλαιο 6^ο** : Ανάλυση της κατασκευής που έχει σαν στόχο την επέκταση των δυνατοτήτων του Powerboard για την ρύθμιση στροφών και φοράς κινητήρων μεγάλης ισχύος με ηλεκτρική πέδηση. Παρουσίαση των ηλεκτρονικών σχεδίων και επεξήγησή τους με μπλοκ διαγράμματα και κυματομορφές εισόδων και εξόδων. Παρουσίαση μετρήσεων, αποτελεσμάτων και συμπερασμάτων.

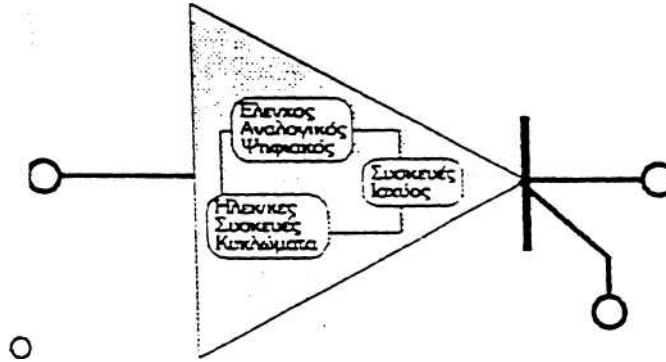
Τα κυκλώματα αυτά είναι :

1. Οδήγηση κινητήρα συνεχούς ρεύματος με τριφασική πλήρως ελεγχόμενη γέφυρα
2. Οδήγηση κινητήρα συνεχούς ρεύματος με την μέθοδο διαμόρφωσης εύρους παλμού P.W.M.
3. Κύκλωμα γαλβανικής απομόνωσης και οδήγησης Mosfet
4. Κύκλωμα αλλαγής φοράς κινητήρα συνεχούς ρεύματος
5. Κύκλωμα ηλεκτρικής πέδησης για κινητήρα συνεχούς ρεύματος

- **Παράρτημα :** Σε αυτή την ενότητα συμπεριλαμβάνονται όλα τα τεχνικά χαρακτηριστικά των εξαρτημάτων που χρησιμοποιήθηκαν στην τελική κατασκευή. Τέλος έχει καταγραφεί η βιβλιογραφία από την οποία αντλήθηκε χρήσιμο υλικό και θεωρήθηκε απαραίτητο για την ολοκλήρωση της πτυχιακής εργασίας.

1.2 Εφαρμογές ηλεκτρονικών ισχύος.

Οι συνεχώς αυξανόμενες απαιτήσεις ισχύος, ο εύκολος έλεγχος της και η ανάγκη χαμηλού κόστους εφαρμογών ανάγκασαν την ηλεκτροεπιστήμη στην ανάπτυξη του ηλεκτρονικού έλεγχου ισχύος. Τα ηλεκτρονικά ισχύος πρέπει έτσι να συνδυάζουν ισχύ, έλεγχο και ηλεκτρονική.



Σχήμα 1.1

Η ισχύς αφορά τον στατικό και κινούμενο εξοπλισμό για την παραγωγή, μεταφορά και διανομή της ηλεκτρικής ισχύος. Ο έλεγχος αφορά τη μόνιμη κατάσταση και τα δυναμικά χαρακτηριστικά των κλειστών συστημάτων και η ηλεκτρονική αφορά τις συσκευές στερεάς κατάστασης και τα κυκλώματα για την επεξεργασία των σημάτων για τον επιθυμητό έλεγχο. Γενικά, μπορούμε να πούμε ότι η ηλεκτρονική ισχύος ορίζεται σαν ο τομέας των εφαρμογών των ηλεκτρονικών συσκευών στερεάς κατάστασης για τον έλεγχο και τη μετατροπή της ηλεκτρικής ισχύος.

1.3 Ημιαγωγά στοιχεία ισχύος.

Από το 1957 μέχρι το 1970 είχαμε αποκλειστική εφαρμογή στον έλεγχο της ισχύος του thyristor ή SCR (Silicon Controlled Rectifier). Από το 1970 και μετά αναπτύχθηκαν διάφοροι τύποι ημιαγωγών ισχύος οι οποίοι είναι διαθέσιμοι στην αγορά. Οι τύποι αυτοί των ημιαγωγών ισχύος μπορεί να διαιρεθούν στις εξής κατηγορίες:

- Power diodes
- Thyristors
- Triacs
- Power Mosfets
- Power Transistors
- Optocouplers

Οι κατηγορίες αυτές των ημιαγωγών ισχύος μας δίδουν τη δυνατότητα δημιουργίας ηλεκτρονικών κυκλωμάτων ισχύος για :

- μετατροπή AC - D.C. (rectifiers)
- μετατροπή D.C. - AC (inverters)
- μετατροπή D.C. - D.C. (choppers)
- μετατροπή AC - AC (cycloconverters)

1.3.1 Δίοδος (Diode).

Η δίοδος ισχύος είναι ένας ημιαγωγός με πάρα πολλές εφαρμογές σε ηλεκτρικά και ηλεκτρονικά κυκλώματα όπως επίσης στα ηλεκτρονικά ισχύος για τη μετατροπή ισχύος.

Τρία είναι τα είδη των διόδων που Βρίσκονται σήμερα στο εμπόριο:

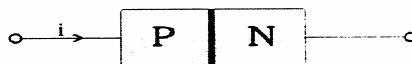
1. Δίοδοι γενικής χρήσης (μέχρι 3000V, 3500A)
2. Δίοδοι υψηλής ταχύτητας (fast recovery) (μέχρι 3000V, 1000A) με αντίστροφο χρόνο επανάκτησης μεταξύ 0,1 και 5μs.
3. Schottkey δίοδος (χαμηλή τάση αγωγής και πολύ μικρό χρόνο επανάκτησης της τάξης nanoseconds).

Μια δίοδος άγει όταν η τάση ανόδου της είναι υψηλότερη από αυτή της καθόδου ενώ η πτώση τάσης ορθής φοράς μιας δίοδου ισχύος είναι περίπου 0,5V με 1,2V.

Αν η τάση καθόδου είναι υψηλότερη της ανόδου λέμε ση η δίοδος βρίσκεται σε κατάσταση αποκοπής. Το σχηματικό της σύμβολο και η κατασκευαστική δομή μιας δίοδου φαίνονται στο σχήμα 1.2.



(α)



(β)

P= Θετικό υλικό
N= Αρνητικό υλικό

Σχήμα 1.2

- (α) Σχηματικό σύμβολο δίοδου
(β) Κατασκευαστική δομή δίοδου

Αν και δεν έχει κινούμενα μέρη η δίοδος ενεργεί σαν ένας διακόπτης υψηλής ταχύτητας που οι επαφές της ανοίγουν και κλείνουν σύμφωνα με τους παρακάτω κανόνες:

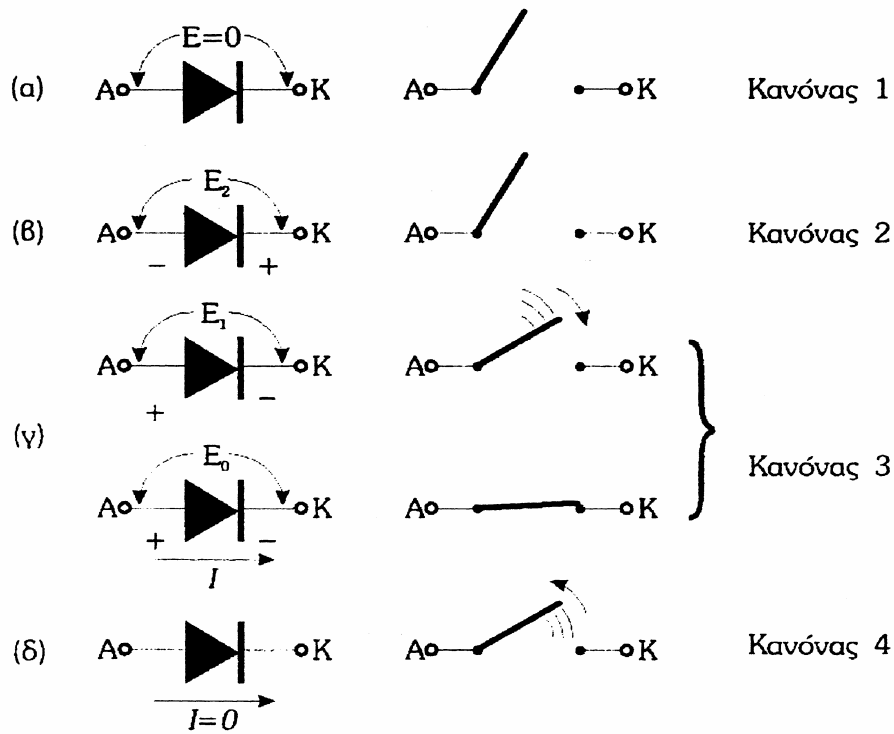
Κανόνας 1. Όταν δεν εφαρμόζεται τάση στα άκρα μιας δίοδου αυτή ενεργεί σαν ένας ανοικτός διακόπτης. Το κύκλωμα επομένως είναι ανοικτό, μεταξύ των A και K.

Κανόνας 2. Όταν εφαρμόζουμε μια ανάστροφη τάση E_2 στα άκρα της διόδου έτσι ώστε η άνοδος να'ναι αρνητική σε σχέση με την κάθοδο, η διόδος εξακολουθεί να ενεργεί σαν ένας ανοικτός διακόπτης .

Κανόνας 3. Αν μια στιγμιαία τάση (forward) E_1 εφαρμόζεται στα άκρα της διόδου έτσι ώστε η άνοδος A να'ναι 'ελαφρώς' θετική σε σχέση με την κάθοδο K τότε τα άκρα βραχυκυκλώνονται.

Η διόδος τότε ενεργεί σαν ένα κλειστό διακόπτη και ένα ρεύμα αμέσως αρχίζει να ρέει από την άνοδο στην κάθοδο. Όσο η διόδος άγει μια μικρή πτώση τάσης εμφανίζεται στα άκρα της. Η τάση αυτή είναι μικρότερη από 1,5V και έτσι μπορούμε να τη θεωρήσουμε αμελητέα στα περισσότερα ηλεκτρονικά κυκλώματα.

Κανόνας 4. Όσο η διόδος διαρρέετε από ρεύμα ενεργεί σαν ένας κλειστός διακόπτης. Ωστόσο αν το ρεύμα σταματήσει για έστω 10μs η διόδος επανέρχεται αμέσως στην φυσική της κατάσταση (ανοικτός διακόπτης).



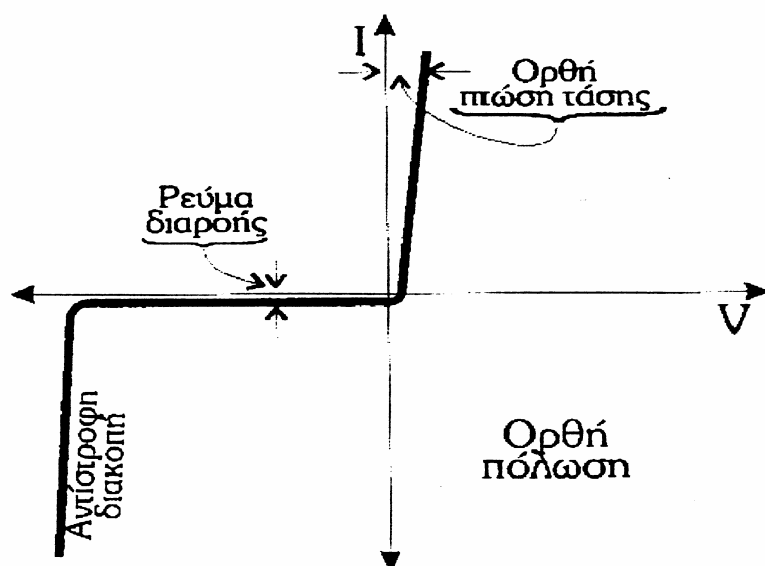
Σχήμα 1.3
Κανόνες διόδων

Χαρακτηριστικές Διόδων.

1. Στατική χαρακτηριστική.

Όταν το δυναμικό της ανόδου είναι θετικό σε σχέση με αυτό της καθόδου η διόδος είναι θετικά (ορθά) πολωμένη και τότε λέμε ότι η διόδος άγει. Μια διόδος που βρίσκεται σε αγωγή έχει μια πτώση τάσης στα άκρα της σχετικά μικρή και εξαρτάται κύρια από τη θερμοκρασία και την κατασκευή της. Όταν το δυναμικό της καθόδου είναι θετικό σε σχέση με αυτό της ανόδου η διόδος είναι ανάστροφα πολωμένη και ένα μικρό αντίστροφο ρεύμα (διαρροής) της τάξης των μA ή mA ρέει μέσα στη διόδο.

Με αύξηση της αντίστροφης αυτής τάσης έχουμε τη διακοπή της ένωσης (reverse breakdown) παίρνοντας έτσι τη χαρακτηριστική αντίστροφης διακοπής (Σχήμα 1.4).

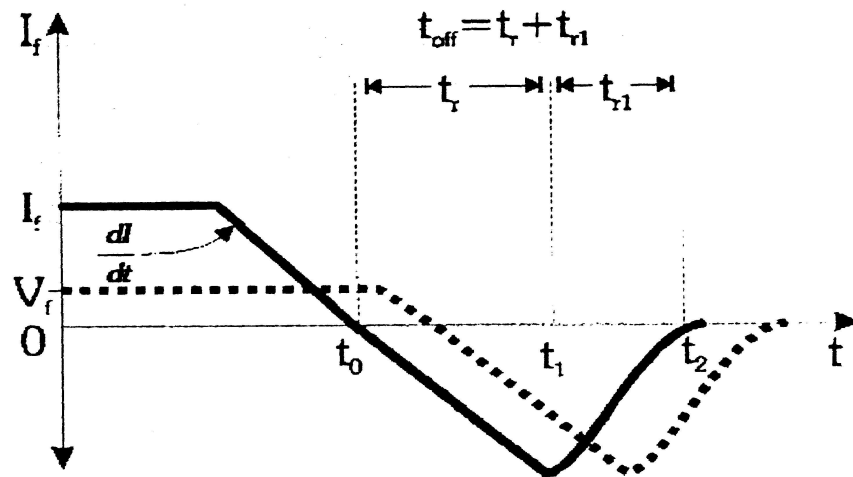


Σχήμα 1.4

Στατική χαρακτηριστική διόδου

2. Δυναμική χαρακτηριστική.

Η δυναμική χαρακτηριστική της διόδου αφορά κύρια μόνο το φαινόμενο της σβέσης (ή turn off) ή μανδάλωσης που είναι ακόμα γνωστό και σαν αντίστροφος χρόνος επανάκτησης των φορέων (ή reverse recovery time) της διόδου. Παρατηρώντας λοιπόν την χαρακτηριστική του σχήματος 1.5, βλέπουμε ότι η μανδάλωση της διόδου χαρακτηρίζεται από το μηδενισμό του ρεύματος ορθής φοράς (forward current) που τη διατρέχει και στη συνέχεια από την εμφάνιση μιας αντίστροφης τάσης στα άκρα της.

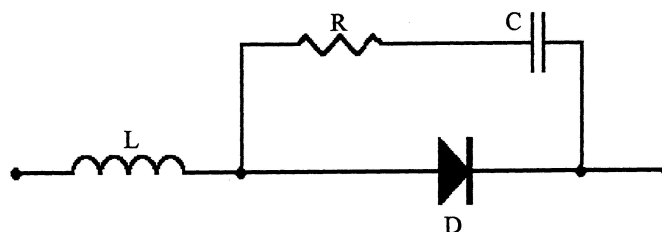


Σχήμα 1.5
Δυναμική χαρακτηριστική διόδου

Η μείωση του I_f (dI_f/dt) εξαρτάται από το εξωτερικό κύκλωμα. Την χρονική στιγμή t_0 , το ρεύμα περνά από το '0' και στη συνέχεια εμφανίζεται ένα αντίστροφο ρεύμα της ίδιας κλίσης μέχρι τη χρονική στιγμή t_1 . Η διάδος τότε αρχίζει να ξαναβρίσκει την ικανότητα της μανδάλωσης, η κλίση του ρεύματος αλλάζει και με δεδομένο ότι το εξωτερικό κύκλωμα είναι γενικά επαγωγικό, εμφανίζεται μια υπέρταση στους ακροδέκτες της διόδου.

Την χρονική στιγμή t_2 το ρεύμα μηδενίζεται και η διάδος τότε είναι μανδαλωμένη. Ο σημαντικός χρόνος t_{off} είναι της τάξης των μερικών μs ενώ το εύρος της αντίστροφης υπέρτασης εξαρτάται κύρια από την αυτεπαγωγή του εξωτερικού κυκλώματος.

Στην περίπτωση που το εύρος της υπέρτασης αυτής είναι πολύ σημαντικό ένα κύκλωμα προστασίας πρέπει να συνδεθεί στα άκρα της διόδου, όπως δείχνει το σχήμα 4.6.



Σχήμα 1.6
Κύκλωμα προστασίας διόδου

Το φαινόμενο της έναυσης δεν παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον εκτός από τον χρόνο εγκατάστασης του που είναι της τάξης των μερικών μς για όλες τις διόδους.

Ένα ακόμα σημαντικό μέγεθος που χαρακτηρίζεται από τα φύλλα δεδομένων των διαφόρων εταιριών είναι το αντίστροφο φορτίο επανάκτησης Qp. Αυτό καθορίζεται από την περιοχή που περικλείει το αντίστροφο ρεύμα επανάκτησης και είναι το ποσόν του φορτίου των φορέων που ρέει διαμέσου της διόδου κατά την αντίθετη κατεύθυνση λόγω της αλλαγής από αγωγή ορθής φοράς στην κατάσταση μανδάλωσης.

Χαρακτηριστικά Στοιχεία Διόδων.

1. Μέγιστη αντίστροφη τάση (P.L.V ή PRV).

Μια διόδος μπορεί να αντιστέκεται μέχρι μια ορισμένη τιμή αντίστροφης τάσης πριν καταστραφεί .Η PRV αυτή τάση κυμαίνεται από 50 V έως 2000 V ανάλογα την κατασκευή της. Αν ξεπεραστεί η τάση αυτή η διόδος αρχίζει να άγει ανάστροφα και της περισσότερες περιπτώσεις καταστρέφεται αμέσως.

2. Μέγιστο ρεύμα (Μέση τιμή).

Υπάρχει επίσης ένα όριο στην τιμή του ρεύματος που μπορεί η διόδος να μεταφέρει. Το μέγιστο ρεύμα μπορεί να κυμαίνεται από μερικές εκατοντάδες mA μέχρι πάνω από 2000 A ανάλογα από την κατασκευή της διόδου.

3. Μέγιστη θερμοκρασία.

Μία διόδος δεν πρέπει ποτέ να λειτουργεί με θερμοκρασία πάνω από την οποία δίνει ο κατασκευαστής της. Οι περισσότερες διόδου πυριτίου μπορούν να λειτουργούν ικανοποιητικά σε θερμοκρασία μεταξύ -50°C και $+200^{\circ}\text{C}$.

Η θερμοκρασία της μπορεί ν' αλλάξει πολύ γρήγορα και αυτό οφείλεται στο μικρό της μέγεθος και την μικρή της μάζα. Για την βελτίωση της μεταφοράς θερμότητας οι διόδου συνήθως τοποθετούνται σ' ένα μεταλλικό στοιχείο που ονομάζεται ψήκτρα. Σε μεγάλες εγκαταστάσεις οι διόδου μπορεί να ψύχονται με ανεμιστήρες, με λάδι ή από συνεχή ροή αποιονισμένου νερού.

1.3.2 Θυρίστορ (THYRISTOR). (Silicon Controlled Rectifier - SCR).

Το thyristor ή SCR (ελεγχόμενος ανορθωτής πυριτίου) είναι ένα από τα παλαιότερα, ευρύτερα χρησιμοποιούμενα και υψηλότερης ισχύος μέλη της 'οικογένειας thyristor'. Όπως είναι γνωστό οι δίοδοι ανόρθωσης επιτρέπουν τη ροή του ρεύματος προς μια διεύθυνση, ενώ δεν την επιτρέπουν προς την άλλη.

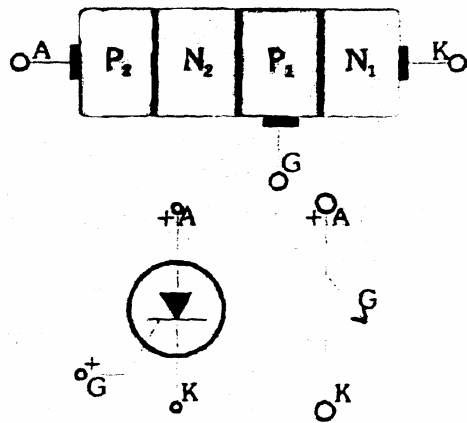
Τα thyristors εκτελούν την ίδια λειτουργία με την επιπλέον δυνατότητα που έχουν να ελέγχουν τη έναρξη της αγωγιμότητας τους με ένα τρίτο ηλεκτρόδιο που διαθέτουν και ονομάζεται πύλη (gate).

Τα βασικά πλεονεκτήματα τους είναι:

1. Μικρές διαστάσεις.
2. Υψηλή ταχύτητα μεταγωγής (της τάξης των μs).
3. Υψηλή απόδοση.
4. Μικρή πτώση τάσης ορθής φοράς λόγω μικρής εσωτερικής αντίστασης κατά τη διάρκεια της αγωγιμότητας.
5. Μεγάλη μηχανική αντοχή.
6. Ικανότητα λειτουργίας με τάση μέχρι 2000V και εντάσεις μέχρι 1000A.
7. Μικρό ρεύμα πύλης ανάλογα τον τύπο του θυρίστορ (από 0.2 mA).
8. Μεγάλη διάρκεια ζωής.
9. Μεγάλη αξιοπιστία.
10. Ελάχιστες απαιτήσεις συντήρησης
11. Υψηλή θερμοκρασία λειτουργίας.

Τα πλεονεκτήματα αυτά κατέστησαν το θυρίστορ ένα εξαιρετικό στοιχείο στερεάς κατάστασης, το οποίο συναντάται σε πολλούς τύπους διατάξεων σε ημιαγωγούς με εφαρμογές που εκτείνονται από ισχύς μερικών mW μέχρι τις βιομηχανικές εφαρμογές που απαιτούν ισχύς έως εκατοντάδες KW.

Από πλευράς δομής το θυρίστορ είναι μια ημιαγωγός μονάδα πυριτίου τεσσάρων στρωμάτων (P1,N1,P2,N2), τριών ενώσεων (J1,J2,J3) με τρία ηλεκτρόδια: άνοδο A, κάθοδο K, και πύλη G. Η δομή, το κυκλωματικό σύμβολο και μηχανικό ισοδύναμο (διακόπτης) του θυρίστορ φαίνονται στο σχήμα 1.7.



Σχήμα 1.7
Δομή, σύμβολο Thyristor

Λειτουργία Thyristor.

Γενικά η λειτουργία του θυρίστορ μπορεί να εξηγηθεί ως εξής :

Όταν η άνοδος είναι θετική ως προς την κάθοδο το θυρίστορ είναι πολωμένο κατά την ορθή φορά, ενώ όταν η άνοδος είναι αρνητική ως προς την κάθοδο είναι πολωμένο κατά την αντίστροφη φορά. Με ορθή πόλωση του θυρίστορ μπορεί να έχουμε δύο καταστάσεις. Την κατάσταση μη αγωγιμότητας ή φραγμού ορθής φοράς (off state) κατά την οποία παρουσιάζει υψηλή αντίσταση στη ροή του ρεύματος (κυκλοφορεί ένα πολύ μικρό ρεύμα διαρροής), ή την κατάσταση αγωγιμότητας (on state) κατά την οποία παρουσιάζει μικρή αντίσταση στη ροή του ρεύματος.

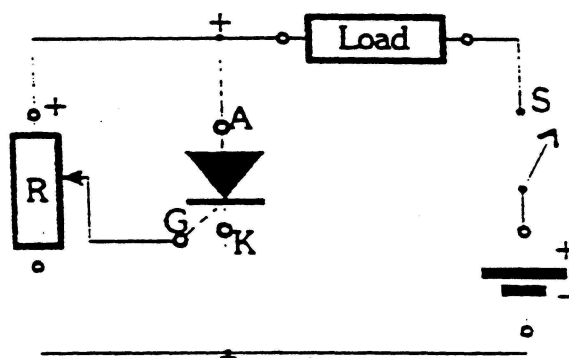
Στην περιοχή φραγμού ορθής φοράς η αύξηση της τάσης μεταξύ ανόδου καθόδου έχει πολύ μικρή ή καμία επίδραση στο ρεύμα διαρροής, μέχρι που η τάση αυτή απόκτησα μια τιμή ορισμένη που την ονομάζουμε τάση διάσπασης ορθής φοράς (break over voltage). Με μικρή αύξηση της τάσης πέρα από την τιμή αυτή προκαλείται απότομη αύξηση του ρεύματος μέσα από το θυρίστορ. Το ρεύμα ορθής φοράς τότε περιορίζεται μόνο από την αντίσταση του εξωτερικού κυκλώματος. Το θυρίστορ θα εξακολουθήσει να βρίσκεται στην κατάσταση αγωγιμότητας αρκεί το ρεύμα ανόδου να διατηρείται υψηλότερο από μια ελάχιστη οριακή τιμή, που ονομάζεται ρεύμα συγκρατήσεως (holding-current) I_H . Αν το ρεύμα πέσει κάτω από τη τιμή I_H το θυρίστορ μεταπίπτει σε κατάσταση αποκοπής (blocking state). Το ίδιο θα συμβεί αν διακοπεί η ανοδική τάση, αν είναι συνεχής ή μηδενισθεί αν είναι εναλλασσόμενη.

Αν η τάση στα άκρα του θυρίστορ αυξηθεί κατά την αντίστροφη φορά κυκλοφορεί μέσα από αυτό μόνο ένα μικρό ρεύμα, μέχρι που η τάση φθάσει μια ορισμένη τιμή που την ονομάζουμε αντίστροφη τάση διακοπής (breakdown reverse voltage). Στην κατάσταση αυτή το θυρίστορ κινδυνεύει να καταστραφεί. Η οριακή αυτή τιμή ποικίλει ανάλογα με τον τύπο του θυρίστορ.

Η τάση διακοπής (BO) ορθής φοράς , που απαιτείται για τη μετάβαση του θυρίστορ από την κατάσταση αποκοπής στην κατάσταση αγωγιμότητας, μειώνεται αισθητά αν στην πύλη διοχετευθεί ρεύμα (φορείς-οπές) με την εφαρμογή σ' αυτήν εξωτερικής θετικής τάσης. Το ρεύμα αυτό ονομάζεται ρεύμα πύλης (gate current) I_G . Όσο το ρεύμα πύλης αυξάνεται τόσο η απαιτούμενη τάση διάσπασης ορθής φοράς μειώνεται, μέχρι που η χαρακτηριστική καμπύλη V/I πάρει περίπου τη μορφή της καμπύλης μιας κλασσικής διόδου.

Σης περισσότερες πρακτικές εφαρμογές το θυρίστορ λειτουργεί με τάση ανόδου πολύ μικρότερη της V_{BO} (για $I_G=0$) και "σκανδαλίζεται" με θετικούς (ως προς την κάθοδο) παλμούς ικανού πλάτους που να εξασφαλισθεί ότι θα μεταβεί στην κατάσταση αγωγιμότητας την επιθυμητή στιγμή, και θα παραμείνει σ' αυτήν.

Για να παραμείνει στην κατάσταση αγωγιμότητας μετά την αφαίρεση του παλμού πύλης, απαιτείται μια ελάχιστη τιμή ανοδικού ρεύματος που ονομάζεται ρεύμα μανδάλωσης I_L (Latching Current) . Μια συνήθης αναλογία μεταξύ των I_L και I_H είναι 2:1



Σχήμα 1.8

Thyristor σε κύκλωμα τροφοδοτούμενο με DC τάση

Το θυρίστορ μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε κυκλώματα τροφοδοτούμενα από συνεχείς ή από εναλλασσόμενες τάσεις. Η λειτουργία του με συνεχείς τάσεις είναι σχετικά απλή. Μεταξύ ανόδου και καθόδου εφαρμόζεται μια τάση (άνοδος θετική ως προς την κάθοδο) μικρότερη από την V_{BO} (για $I_G = 0$), και μεταξύ πύλης και καθόδου εφαρμόζεται μια συνεχής τάση (πύλη θετική ως προς την κάθοδο), την οποία μπορούμε να πάρουμε από τη πηγή τροφοδότησης μέσω ενός ποτενσιόμετρου R. (Βλέπε σχήμα παραπάνω). Μόλις η πύλη αποκτήσει την κατάλληλη τιμή τάσης, το θυρίστορ οδηγείται στην κατάσταση αγωγιμότητας και βραχυκυκλώνει το ποτενσιόμετρο, μηδενίζοντας έτσι το ρεύμα πύλης.

Για τη διακοπή της λειτουργίας του θυρίστορ θα πρέπει να διακοπεί η τάση ανόδου.

Η λειτουργία του θυρίστορ με εναλλασσόμενη τάση είναι διαφορετική και περισσότερο ενδιαφέρουσα , διότι δίνει την δυνατότητα ελέγχου της ισχύος που παρέχεται στο φορτίο, ανάλογα με τις απαιτήσεις.

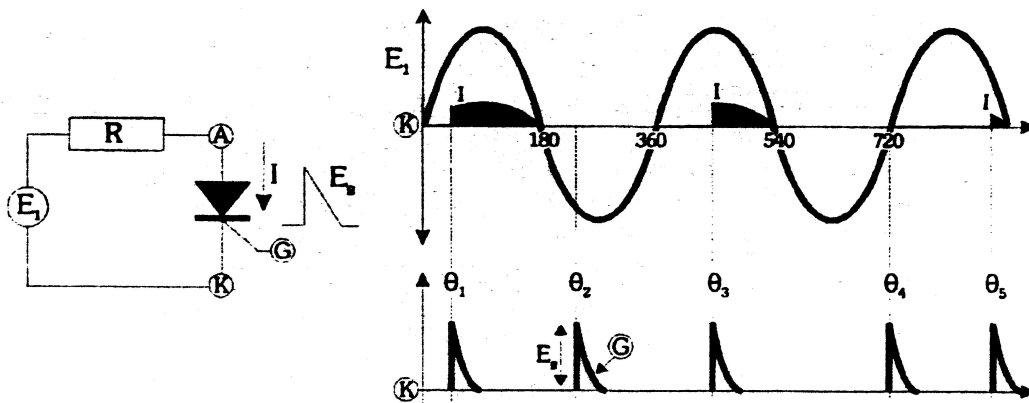
Ο έλεγχος της παρεχόμενης ισχύος γίνεται με μεταβολή της γωνίας αγωγιμότητας. Ελέγχοντας δηλαδή τον χρόνο αγωγιμότητας , ελέγχουμε την τιμή του ρεύματος σύμφωνα με τα γνωστά από την ηλεκτροτεχνία.

1. για ωμικό φορτίο π.χ. $P = I^2 \cdot R = U^2/R$ και αν $u(t) = U_0 \sin \omega t$ ή
2. $i(t) = I_0 \sin \omega t$

$$U_{rms}^2 = \frac{1}{T} \int_0^T [u(t)]^2 dt \qquad I_{rms}^2 = \frac{1}{T} \int_0^T [i(t)]^2 dt$$

Όσο μεγαλύτερο είναι το τμήμα της ημιπεριόδου του ρεύματος τόσο μεγαλύτερη είναι η μέση ισχύς που το τροφοδοτεί.

Ας δούμε τώρα, όπως φαίνεται και στο σχήμα 1.9 ένα κύκλωμα, με ένα θυρίστορ και μία αντίσταση συνδεδεμένα σε σειρά με μία πηγή A.C. Ένας αριθμός από θετικούς παλμούς E_g εφαρμόζονται στην πύλη και οι οποίοι έχουν αρκετό πλάτος για να αρχίσουν την αγωγή του θυρίστορ. Οι παλμοί αυτοί μπορούν να εφαρμοστούν με την βοήθεια ενός χειροκίνητου διακόπτη ή από ένα ηλεκτρονικό κύκλωμα. Οι παλμοί αυτοί (σύμφωνα με το σχήμα) εφαρμόζονται στις γωνίες $\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4$ και θ_5 . Ας δούμε λοιπόν τι συμβαίνει τις στιγμές εφαρμογής των παλμών στις γωνίες αυτές.



Σχήμα 1.9

- (α) SCR και ανάσταση συνδεδεμένα με πηγή AC.
- (β) Συμπεριφορά των S.C.R. ανάλογα με την γωνία σκανδαλισμού

Από 0- θ_1 : Αν και η άνοδος είναι θετική, η αγωγή είναι αδύνατη επειδή $E_g=0$. Το θυρίστορ τότε είναι ανοικτός διακόπτης.

θ_1 : Η αγωγή αρχίζει επειδή άνοδος και πύλη είναι θετική.

Από θ_1 -180°: Η αγωγή συνεχίζεται παρ' όλο που η τάση της πύλης έχει πέσει στο μηδέν. Οι παλμοί της πύλης δεν έχουν πλέον επίδραση στην αγωγή του θυρίστορ. Η πτώση τάσης άνοδος-καθόδου είναι μικρότερη από 1.5V επομένως θεωρούμε ότι άνοδος και κάθοδος είναι βραχυκυκλωμένες, (κλειστός διακόπτης)

180°: Το ρεύμα του θυρίστορ είναι μηδέν και η πύλη ξαναβρίσκει την ικανότητα του ελέγχου. Από 180°-360°: Η αγωγή είναι αδύνατη επειδή η άνοδος είναι αρνητική.

Από 360°-540°: Η αγωγή αρχίζει στη γωνία θ_3 και σταματά όταν το ρεύμα μηδενίζεται στις 540°. Οι παλμοί στη πύλη βρίσκονται τώρα σε καθυστέρηση μεγαλύτερη απ' ό,τι στην πρώτη θετική ημιπερίοδο και άρα το ρεύμα ανόδου ρέει για συντομότερο χρόνο.

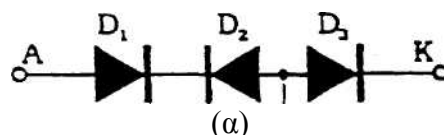
Από 720°-900°: Η αγωγή αρχίζει για γωνία θ_5 αλλά το ρεύμα ανόδου είναι τώρα ακόμη μικρότερο λόγω της μεγάλης καθυστέρησης στην "πυροδότηση" της πύλης.

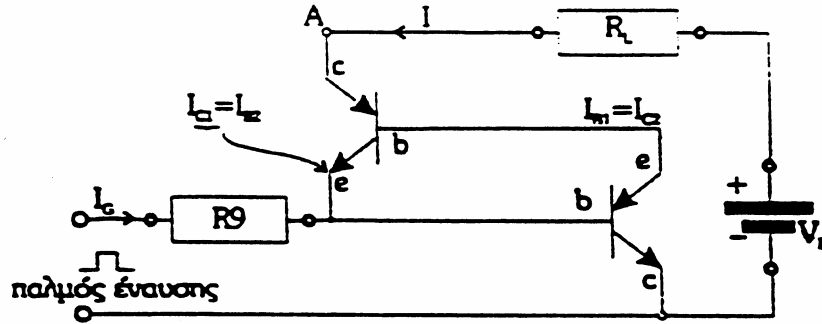
Όταν ένας παλμός εφαρμόζεται στην πύλη έχουμε και την ροή ενός ρεύματος. Επειδή όμως ο παλμός έχει διάρκεια λίγων μs η μέση τιμή της ισχύος που εφαρμόζεται είναι πολύ μικρή σε σχέση με τη μέση ισχύ που εφαρμόζεται στο φορτίο. Ο λόγος των δύο ισχύων καλείται κέρδος ισχύος και φθάνει την τιμή περίπου του 1/1000. Έτσι μία ισχύ πύλης π.χ. 1W μπορεί να ελέγξει ένα φορτίο 1000KW.

Όπως είδαμε παραπάνω στο κύκλωμα που εξετάσαμε η αγωγή του θυρίστορ σταματά στο τέλος κάθε κύκλου και η πύλη ξαναβρίσκει την ικανότητα ελέγχου. Η μεταγωγή από την μία κατάσταση στην άλλη στην περίπτωση αυτή καλείται φυσική μεταγωγή. Υπάρχουν όμως κυκλώματα όπου το ρεύμα ανόδου πρέπει να διακοπεί σε μία συγκεκριμένη χρονική στιγμή. Αυτό γίνεται με τεχνητούς τρόπους και η μεταγωγή τότε ονομάζεται δυναμική μεταγωγή, (τις τεχνικές μεταγωγής των SCR θα δούμε παρακάτω).

Λειτουργία Thyristor με Ισοδύναμο σε Διόδους και Ανάλογο με Transistor Κύκλωμα.

α) Εξετάζοντας το ισοδύναμο (σε διόδους) Σχήμα 1.10 κύκλωμα βλέπουμε ότι αν εφαρμόσουμε μια αρνητική τάση από την άνοδο στη κάθοδο τότε οι D1 και D3 είναι ανάστροφα πολωμένες ενώ η D2 ορθά. Η χαρακτηριστική του θυρίστορ τότε είναι τελείως όμοια με αυτή της διόδου με ανάστροφη πόλωση. :



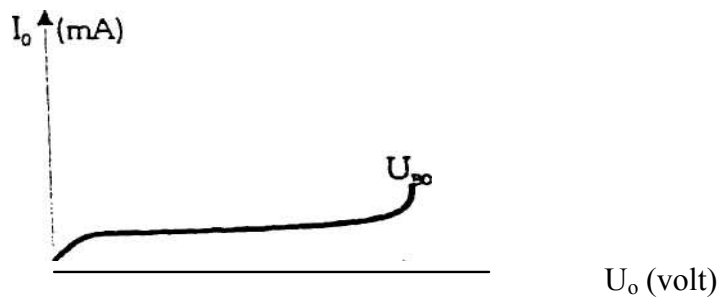


(β)
Σχήμα 1.10

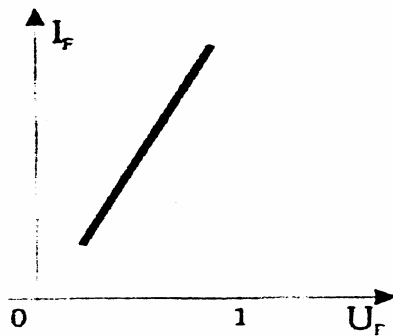
- (α) Ισοδύναμο σε διόδους κύκλωμα Thyristors
(β) Ανάλογο με Transistors

Για αύξηση της τάσης πέρα από ένα σημείο έχουμε καταστροφή του θυρίστορ.

Αν εφαρμόσουμε θετική τάση στην άνοδο και αρνητική στην κάθοδο οι D1, D2 είναι ορθά πολωμένες επομένως άγουν ενώ η D2 είναι ανάστροφα πολωμένη επομένως από το σύστημα αυτό δεν έχουμε διέλευση ρεύματος (εκτός από ένα πολύ μικρό ρεύμα διαρροής leakage current). Το θυρίστορ θα βρεθεί σε αγωγή αν αυξήσουμε την τάση μέχρι το σημείο U_{BO} (Break over voltage) αλλά ένας τέτοιος τρόπος 'σκανδαλισμού' πρέπει να αποφεύγεται γιατί καταστρέφει το στοιχείο.



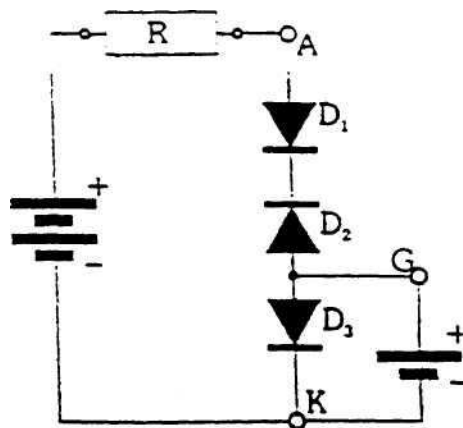
Σχήμα 1.11
Σημείο Break over voltage thyristor



Σχήμα 1.12
Ευθεία αγωγής thyristor

Το θυρίστορ τότε άγει και συμπεριφέρεται σαν μια δίοδος ορθά πολωμένη στην οποία δεν έχουμε τη δυνατότητα επέμβασης ώστε να ρυθμίσουμε το ρεύμα της.

Η πτώση τάσης στο θυρίστορ όταν άγει είναι περίπου 1V. Αν τώρα στη πύλη του θυρίστορ εφαρμόσουμε μια τάση (θετική) ενώ οι D1 και D3 είναι ορθά πολωμένες, η D3 θα άγει όπως εύκολα φαίνεται, από το σχήμα 1.13.



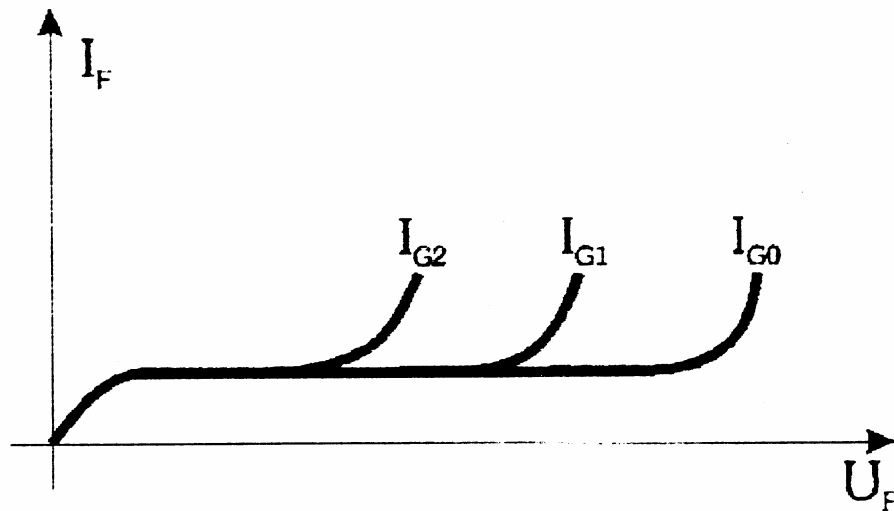
Σχήμα 1.13
Ισοδύναμο κύκλωμα thyristor με διόδους & πύλη

Τότε το θυρίστορ θα συμπεριφέρεται πλέον σαν μια ορθά πολωμένη δίοδος. Το μικρό ρεύμα που στην πραγματικότητα δημιούργησε την κατάσταση αυτή δεν είναι σε θέση τώρα να επηρεάσει το πολύ μεγάλο ρεύμα ανόδου-καθόδου.

Αν το ρεύμα ανόδου-καθόδου είναι πολύ μικρό και το ρεύμα της πύλης έχει μηδενιστεί τότε το θυρίστορ δεν άγει. Το μικρότερο ρεύμα με το οποίο το θυρίστορ μπορεί να βρίσκεται σε κατάσταση αγωγής, ενώ το ρεύμα πύλης είναι μηδέν ονομάζεται ρεύμα συγκρατήσεως (I_H - holding current).

β) Αν θεωρήσουμε τώρα το thyristor σαν συνδυασμό δύο τρανζίστορ: Σχήμα 1.10. Όπως είδαμε παραπάνω όταν το thyristor βρίσκεται σε κατάσταση αγωγής (μετά την εφαρμογή του παλμού έναυσης) θα εξακολουθήσει να παραμένει στην κατάσταση αυτή ακόμα και αν ο παλμός έναυσης σταματήσει να εφαρμόζεται.

Θα διακοπεί η κατάσταση αυτή μόνο όταν το ρεύμα μέσα από το thyristor γίνει πολύ μικρό ή ακόμα αλλάξει η πολικότητα της ανόδου σε σχέση με την κάθοδο.



Σχήμα 1.14
Ρεύματα πύλης thyristor

Εξετάζοντας το ισοδύναμο κύκλωμα όπως αυτό δόθηκε (Σχήμα 1.13) παραπάνω έχουμε ότι:

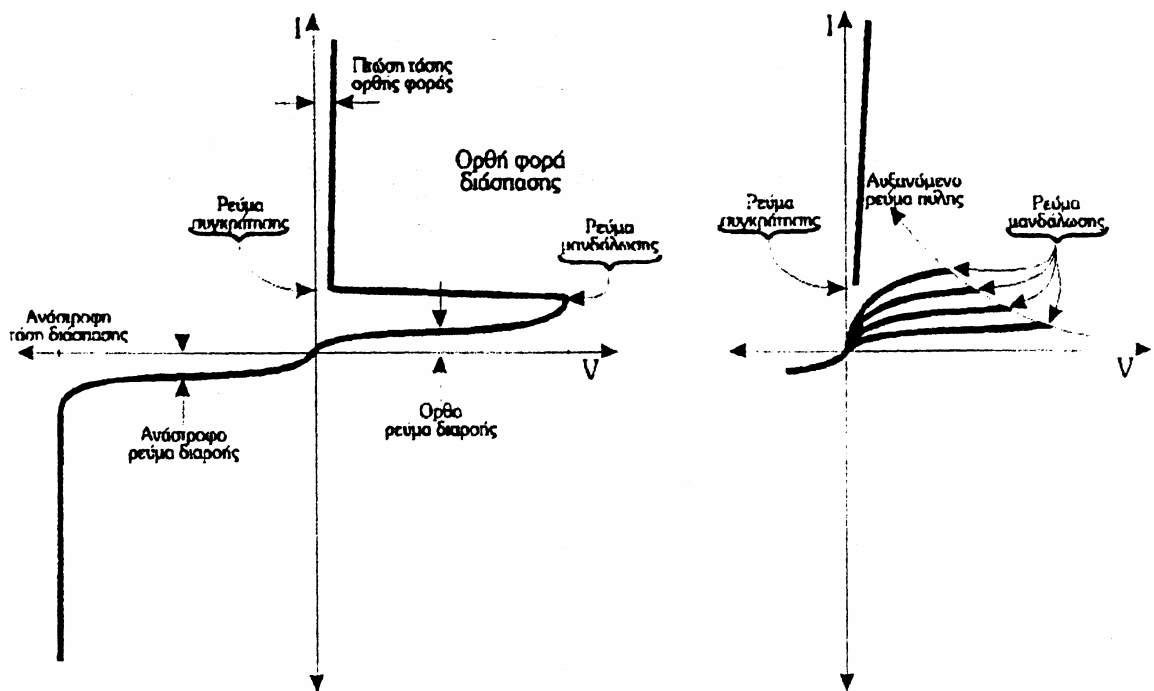
Για $I_g = 0$ δηλαδή δεν υπάρχει παλμός στη πύλη του thyristor (βάση του Q2) δεν έχουμε διέλευση ρεύματος μεταξύ ανόδου & καθόδου.

Για $I_g > 0$ (δηλαδή εφαρμόζεται παλμός στην πύλη που είναι θετικός σχετικά με την κάθοδο), το Q2 αρχίζει να άγει οπότε έχουμε διέλευση ρεύματος μέσω της βάσης του Q1 με αποτέλεσμα ένα ρεύμα I_{SCR} ρέει από το εξωτερικό κύκλωμα προς το στοιχείο.

Το ρεύμα του συλλέκτη του Q1 διοχετεύεται στη βάση του Q2, δηλαδή $I_{B1} = I_{C2}$. Τότε λέμε ότι έχουμε μανδάλωση (latching) του στοιχείου που διατηρείται στην κατάσταση αγωγής και όταν ακόμα αφαιρεθεί ο παλμός έναυσης από την πύλη. Για την μετάβαση του thyristor στην κατάσταση αποκοπής πρέπει το κύριο ρεύμα να ελαττωθεί σε μια τιμή, που είναι λίγο μεγαλύτερη από το μηδέν και που ονομάζεται ρεύμα συγκράτησης (Holding current - I_H).

Θα πρέπει ακόμα να σημειωθεί ότι για τη μετάβαση του thyristor στην κατάσταση αγωγής απαιτείται ένα ελάχιστο ρεύμα ανόδου, το οποίο δημιουργείται μέσω του εξωτερικού κυκλώματος και ονομάζεται 'ρεύμα μανδάλωσης' (latching current).

Τότε το ρεύμα συγκρατήσεως όσο και το ρεύμα μανδάλωσης είναι το 1% του ονομαστικού ρεύματος του θυρίστορ. Η χαρακτηριστική καμπύλη U, I ενός τυπικού θυρίστορ φαίνεται στο σχήμα 1.15.



Σχήμα 1.15
Χαρακτηριστικές Thyristor

Οι απαιτούμενες στάθμες ρεύματος και τάσης για την έναυση ενός θυρίστορ εξαρτώνται από τη θερμοκρασία επαφής του στοιχείου που ενεργοποιείται. Όταν η θερμοκρασία επαφής αυξάνει η πύλη γίνεται περισσότερο ευαίσθητη και αντίθετα.

Οι απαιτήσεις ρεύματος για την έναυση της πύλης για κάθε τύπο στοιχείου, δίνονται στις προδιαγραφές των κατασκευαστών. Στις προδιαγραφές καθορίζεται μόνο το DC που χρειάζεται για την έναυση του θυρίστορ (gate current to trigger i.e $I_{GT} = 150 \text{ mA}$).

Από τη χαρακτηριστική του θυρίστορ διακρίνουμε τις εξής καταστάσεις.

1. Κατάσταση διέλευσης (conduction stale).
2. Κατάσταση θετικής αποκοπής (Forward blocking stale).
3. Κατάσταση αρνητικής αποκοπής (Reverse blocking stale).

Στην 1 κατάσταση: Το θυρίστορ άγει.

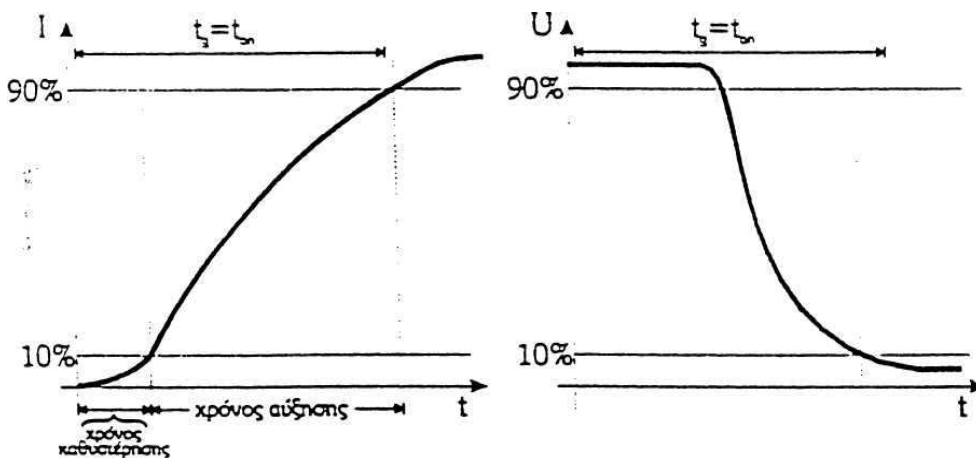
Στην 2 κατάσταση: Το θυρίστορ είναι θετικά πολωμένο και άγει όταν δοθεί παλμός έναυσης.

Στην 3 κατάσταση: θα βρεθεί το thyristor αν αρνητική τάση εφαρμοστεί μεταξύ ανόδου και καθόδου, οπότε και επιτυγχάνεται η σβέση του.

Αν η τάση ανόδου-καθόδου με θετική πόλωση φτάσει την κρίσιμη τάση αποκοπής τότε στην περιοχή της αρνητικής αποκοπής υπερβεί ένα ορισμένο όριο, τότε το ρεύμα I αποκτά μεγάλες τιμές με αποτέλεσμα την καταστροφή του thyristor.

Δυναμικές Χαρακτηριστικές του Thyristor.

Έναυση του thyristor (turn - on).



Σχήμα 1.16
Ρεύμα & τάση thyristor κατά την έναυση

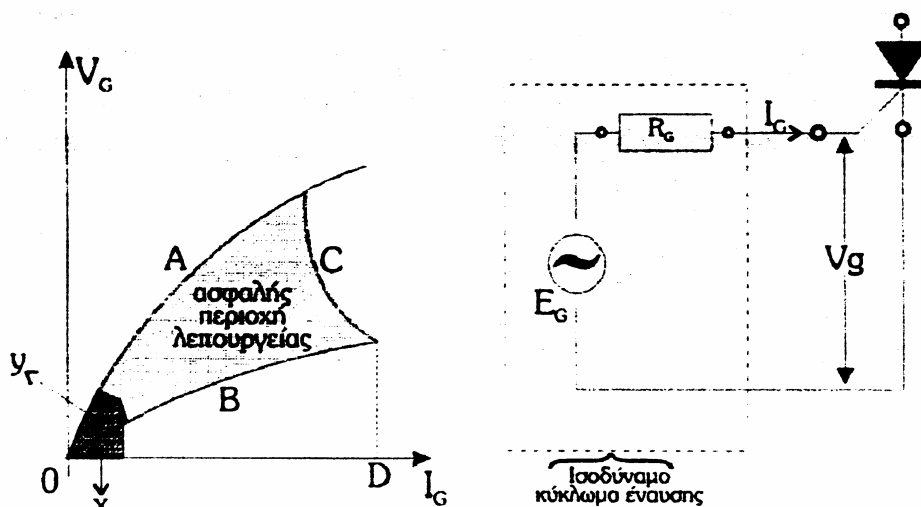
Εξετάζοντας τις χαρακτηριστικές τάσης και ρεύματος της πύλης παρατηρούμε τα εξής :

Ο παλμός έναυσης δίδεται τη χρονική στιγμή t_0 και από το πέρασμα στην κατάσταση διέλευσης από την κατάσταση μανδάλωσης, απαιτείται χρόνος $t_g = t_{on}$. Ο χρόνος αυτός εξαρτάται από δυο χρόνους : Τον χρόνο καθυστέρησης (delay time) και τον χρόνο αύξησης (rise time). Ο χρόνος καθυστέρησης είναι ο χρόνος που απαιτείται για να φτάσει το ρεύμα το 10% της τελικής τιμής του, και ο χρόνος αύξησης είναι ο χρόνος που απαιτείται για να φθάσει το ρεύμα από το 10% στο 90% της τελικής τιμής.

Ο σχεδιασμός του κυκλώματος έναυσης βασίζεται στις χαρακτηριστικές καμπύλες που δίδονται για κάθε ιδιαίτερο τύπο thyristor από τον κατασκευαστή στα φύλλα δεδομένων και χαρακτηριστικών.

Στα χαρακτηριστικά αυτά αναφέρονται τα μέγιστα και ελάχιστα όρια της ορθής φοράς της πύλης όπως επίσης και του ρεύματος για κάθε ιδιαίτερο thyristor.

Ακόμα δίδεται και η χαρακτηριστική καμπύλη κατανάλωσης η οποία έχει την μορφή της χαρακτηριστικής που φαίνεται στο σχήμα 1.17. Η χαρακτηριστική αυτή ανταποκρίνεται σε μια κλάση SCRs με τα ίδια χαρακτηριστικά.

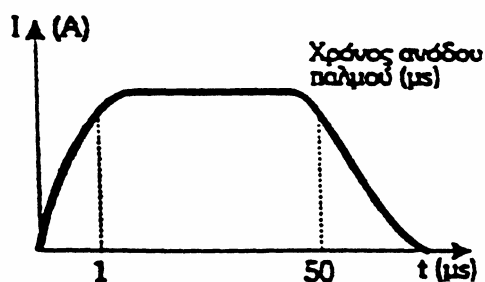


Σχήμα 1.17
Χαρακτηριστική καμπύλη πύλης & ισοδύναμο κύκλωμα έναυσης

Η καμπύλη A αντιπροσωπεύει την χαμηλότερη τιμή της τάσης V_G που πρέπει να εφαρμοστεί στην πύλη για την έναυση του thyristor. Η καμπύλη B αντιπροσωπεύει την χαμηλότερη τιμή της V_G που πρέπει να εφαρμοστεί στην πύλη για την έναυση του thyristor. Η υπερβολή c αντιπροσωπεύει τη μέγιστη επιτρεπόμενη απώλεια της πύλης για ένα ιδιαίτερο πλάτος παλμού στην πύλη. Το σημείο D δείχνει το μέγιστο επιτρεπόμενο ρεύμα πύλης. Τα x και y δείχνουν τις περιοχές της μη έναυσης του thyristor και της σίγουρης έναυσης του thyristor για DC τάση και ρεύμα πύλης αντίστοιχα. Οι χαρακτηριστικές που αναφέρθηκαν παραπάνω περιλαμβάνουν μια περιοχή που ονομάζεται ασφαλής περιοχή λειτουργίας του thyristor (SOAR).

Για να 'σκανδαλιστεί' λοιπόν ένα thyristor θα πρέπει να εξασφαλιστούν οι ελάχιστες τιμές και ρεύματα πύλης, που σημαίνει ότι το κύκλωμα έναυσης θα πρέπει να 'ναι ικανό να τροφοδοτήσει την πύλη με τιμή τάσης και ρεύματος πάνω από τις ελάχιστες απαιτούμενες τιμές.

Μια σπουδαία παράμετρος που πρέπει να ληφθεί σοβαρά υπόψη κατά την έναυση του thyristor είναι ο λόγος di/dt γιατί μια μεγάλη τιμή του λόγου αυτού μπορεί να προκαλέσει την καταστροφή του thyristor ($di/dt = \text{χρόνος ανόδου ρεύματος}$).



Σχήμα 1.18
Σχήμα παλμού τυπικού κυκλώματος έναυσης

Ο χρόνος αυτός επιτυγχάνεται κύρια με την τεχνική παλμών που οι απώλειες τους είναι πολύ μικρότερες σε σχέση με το συνεχές ρεύμα και που ακόμα ο χρόνος σκανδαλισμού μπορεί να ελεγχθεί με ακρίβεια. Ένα πρακτικό κύκλωμα σκανδαλισμού μπορεί τυπικά να έχει τα χαρακτηριστικά του παλμού του σχήματος 1.18.

Παραδείγματα Κυκλωμάτων έναυσης.

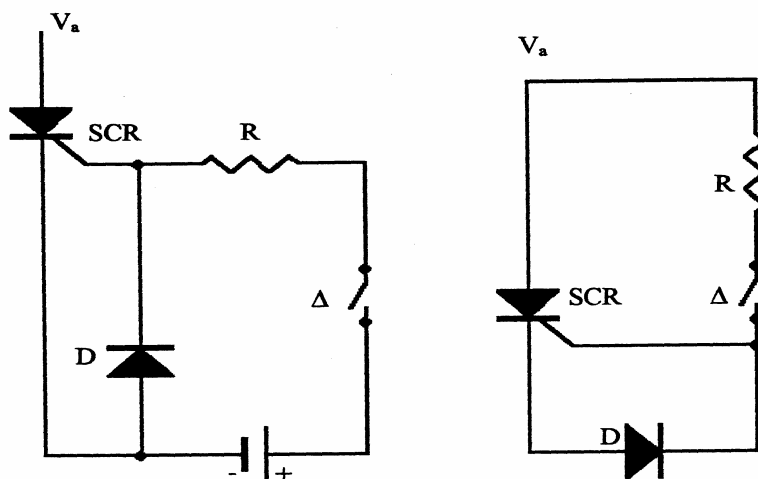
Υπάρχουν πολλά κυκλώματα σκανδαλισμού των thyristor τα οποία μπορεί να χρησιμοποιούν, την τάση του δικτύου και συνδυασμό RC κυκλωμάτων ή τους παλμούς εξόδου μετασχηματιστών παλμών, ή κυκλώματα παλμών με UJT και PJT κ.τ.λ.

Η αγορά όμως σήμερα εμπλουτίζεται και με ολοκληρωμένες μονάδες κυκλωμάτων εκκίνησης (chips) με μεγαλύτερες δυνατότητες ρύθμισης και ελέγχου. Στην κατηγορία αυτή ανήκουν τα : MY-5001, MY-5011 της MULLARD, το L-120 της SGS / ATEC UAA-145 & 146 της TELEFUNKEN, το TCA-780 της SIEMENS, το MOC-3011 της MOTOROLA κ.τ.λ.

Μερικά απλά παραδείγματα κυκλωμάτων έναυσης είναι:

1. Σήματα έναυσης με D.C.

Δύο απλά κυκλώματα έναυσης με D.C. που χρησιμοποιούν ένα διακόπτη, μια αντίσταση και μια διάοδο είναι αυτά που φαίνονται στο σχήμα 1.19.



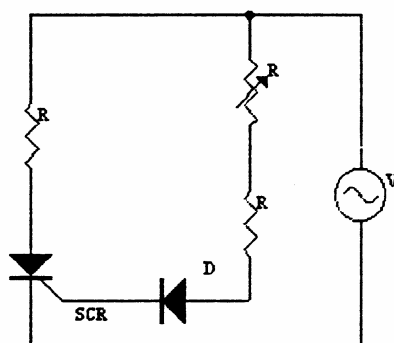
Σχήμα 1.19
Κυκλώματα έναυσης με D.C τάση

Στο κύκλωμα (1) ο διακόπτης μπορεί να είναι μηχανικός ή ηλεκτρονόμος ή ένας διακόπτης τρανζίστορ ή ακόμα ένα άλλο θυρίστορ. Η αντίσταση R περιορίζει το ρεύμα πύλης ενώ η δίοδος χρησιμοποιείται για την εμπόδιση μιας υψηλής αντίστροφης τάσης σκανδάλης στους ακροδέκτες πύλης καθόδου όταν διακόπτεται το ρεύμα.

Στο κύκλωμα (2) έχουμε μια παραλλαγή του κυκλώματος (1) στην οποία δεν απαιτείται ξεχωριστή πηγή για τον σκανδαλισμό της πύλης.

2. Σήματα έναυσης με A.C.

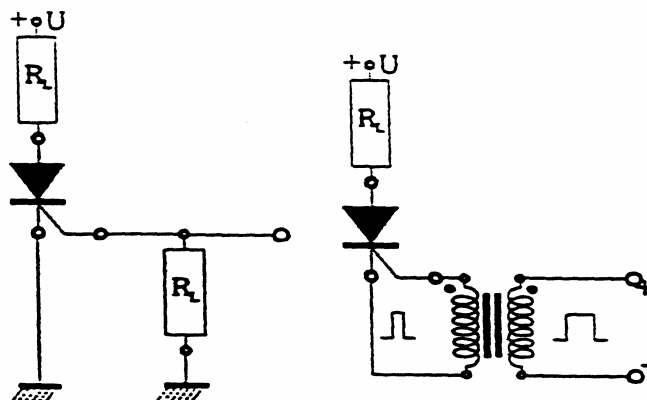
Ένα απλό κύκλωμα έναυσης με A.C. είναι αυτό που φαίνεται στο σχήμα 1.20. Στις θετικές ημιπεριόδους το thyristor διεγείρεται σε κάποια γωνία θ μικρότερη των 90° , όταν η τάση φθάσει μια τιμή τέτοια που το ρεύμα μέσω της πύλης να είναι ικανό να διεγείρει το thyristor.



Σχήμα 1.20
Διέγερση thyristor με A.C. τάση

3. Σήματα έναυσης από παλμοσειρές.

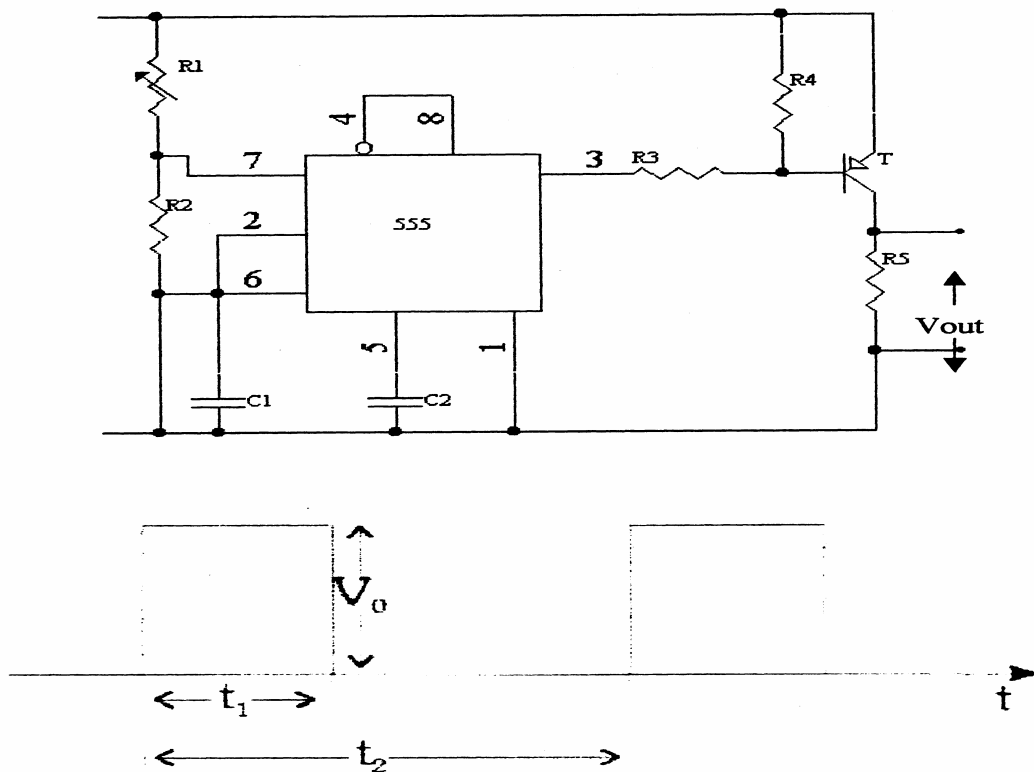
Χρησιμοποιώντας παλμικά σήματα για την έναυση των thyristors έχουμε το πλεονεκτήματα της μικρότερης κατανάλωσης ισχύος στην πύλη, τη γαλβανική απομόνωση, χρησιμοποιώντας μετασχηματιστή παλμών ή φωτοδίοδο ή φωτοτρανζίστορ, μεταξύ πύλης και καθόδου, και ακόμα την ταχύτερη και περισσότερο αξιόπιστη έναυση. Το σχήμα 1.21 δείχνει ένα τέτοιο παράδειγμα σκανδαλισμού.



Σχήμα 1.21
Διέγερση thyristor με παλμοσειρές

4. Με ολοκληρωμένα κυκλώματα (chips).

Ένα παράδειγμα ολοκληρωμένου κυκλώματος για τον σκανδαλισμό thyristors είναι το γνωστό IC 555 με την συνδεσμολογία που δείχνει το σχήμα 1.22.



Σχήμα 1.22

Κύκλωμα σκανδαλισμού με το IC555 και οι κυματομορφές εξόδου του

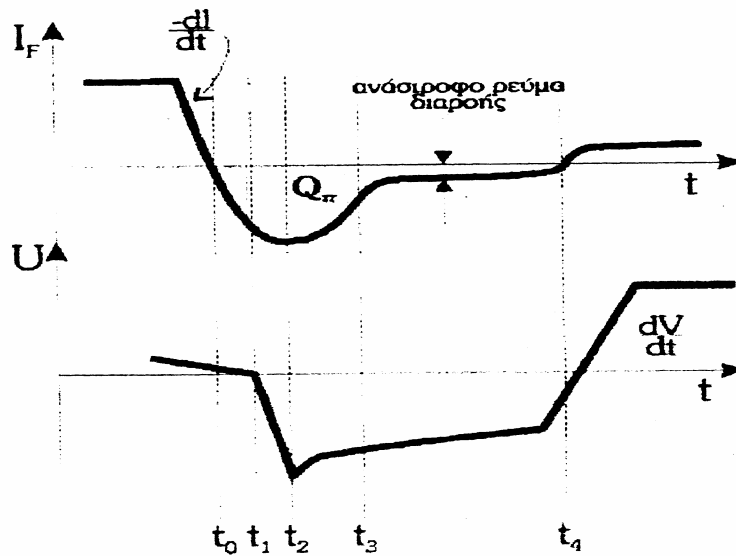
Το κύκλωμα αυτό είναι χρήσιμο για τον σκανδαλισμό SCRs λόγω των πολλών πλεονεκτημάτων του. Ο παλμός εξόδου έχει ένα γρήγορο χρόνο ανύψωσης και διάρκεια η οποία μπορεί να ελεγχθεί από ένα RC κύκλωμα.

Σβέση του Thyristor (turn-off).

Η αλλαγή της κατάστασης ενός Thyristor, από την αγωγή στην αποκοπή, (σβέση) αρχίζει όταν το ρεύμα ορθής φοράς πέφτει σε μία τιμή κατώτερη της τιμής του ρεύματος συγκράτησης (Holding Current), με μηδενικό ρεύμα πύλης. Όλο το φαινόμενο της σβέσης του thyristor εξαρτάται από το ρεύμα ορθής φοράς πριν τη σβέση, τη μέγιστη τιμή αντίστροφου ρεύματος, το λόγο αύξησης της τάσης ορθής φοράς και της επίδραση της θερμοκρασίας.

Όταν το ρεύμα έχει πέσει στο μηδέν, το thyristor πρέπει να τοποθετηθεί στην κατάσταση ανάστροφης αποκοπής, με μια ανάστροφη τάση που θα εφαρμοστεί στα άκρα του, για αρκετό χρόνο ικανό να επιτρέψει στους φορείς (οπές - ηλεκτρόνια) να επανέλθουν στην αρχική κατάσταση ολοκληρώνοντας έτσι τη σβέση του thyristor.

1.23. Η δυναμική συμπεριφορά του thyristor (κατά τη σβέση) φαίνεται στο σχήμα



Σχήμα 1.23

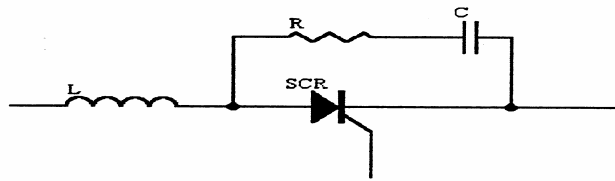
Το ρεύμα και η τάση των thyristor κατά την διάρκεια turn off με $I_g=0$

Αρχικά το ρεύμα πέφτει στο μηδέν στο χρόνο t_0 και μετά αντιστρέφεται. Από t_0 έως t_1 το αντίστροφο αυτό ρεύμα συγκρατείται (συντηρείται) από το μεγάλο αριθμό των φορέων του thyristor, και η πτώση τάσης είναι μικρή. Από τη χρονική στιγμή t_2 και μετά το αντίστροφο αυτό ρεύμα δεν μπορεί πλέον να συντηρηθεί και αρχίζει να ελαττώνεται. Την ίδια χρονική στιγμή εμφανίζεται η μέγιστη αντίστροφη τάση και καθώς το κύκλωμα είναι συνήθως επαγωγικό, η τάση αυτή θα παραμείνει ακόμη περισσότερο, οδηγώντας έτσι το αντίστροφο ρεύμα στο επίπεδο του ρεύματος διαρροής. Αν και η ανάκτηση της αντίστροφης αυτής περιόδου (αλλαγή όλων των p-n ενώσεων από ορθή σε ανάστροφη πόλωση) συμπληρώνεται τη χρονική στιγμή t_3 , η ανάστροφη τάση πρέπει να διατηρηθεί μέχρι το χρόνο t_4 για να εξασφαλιστεί ότι η πυκνότητα των φορέων στην περιοχή της κεντρικής ενώσεως είναι αρκετά αραιή έτσι, ώστε να εμποδίσει την πιθανότητα έναυσης όταν μία τάση ορθής φοράς εφαρμοστεί.

Ο συνολικός χρόνος σβέσης ποικίλει ανάλογα με το thyristor αλλά τυπικά βρίσκεται μεταξύ 10 έως 100μs.

Οι συνθήκες που αναπτύχθηκαν παραπάνω για τη σβέση του thyristor εξελίσσονται ταυτόχρονα (αυτόματα) από κυκλώματα που χρησιμοποιούμε (Κυκλώματα αποκοπής) και που θα εξετάσουμε αργότερα.

Για την προστασία του thyristor λόγω των υπερεντάσεων που δημιουργούν προβλήματα, χρησιμοποιούμε συχνά ένα κύκλωμα RC συνδεδεμένο στους ακροδέκτες του thyristor όπως φαίνεται στο σχήμα 1.24.



Σχήμα 1.24
Προστατευτικό κύκλωμα thyristor

Χαρακτηριστικά Μεγέθη των Thyristors.

Η λειτουργία των thyristors είναι οριοθετημένη από πολλούς περιορισμούς και παραμέτρους, οι οποίοι καθορίζουν τα όρια λειτουργίας τους. Τα στοιχεία αυτά για κάθε ξεχωριστό τύπο thyristor δίδονται από τους κατασκευαστές στα φύλλα δεδομένων. Ενδεικτικά αναφέρουμε την μέγιστη, τη μέση και την ενεργό (RMS) τιμή του ρεύματος, τη μέγιστη τάση ορθής και ανάστροφης τάσης όπως επίσης και τα χαρακτηριστικά μεγέθη του κυκλώματος πύλης.

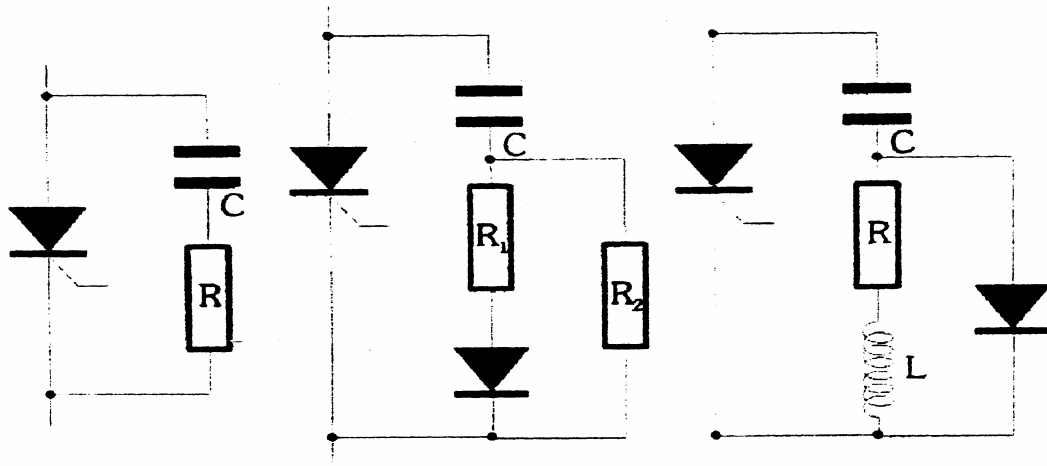
Επιπρόσθετα υπάρχουν και αρκετά παροδικά (μεταβατικά) μεγέθη τα οποία πρέπει να εκτιμηθούν κατάλληλα σε κάθε περίπτωση.

Υπερφορτίσεις μικρής διάρκειας έχουν σαν αποτέλεσμα την αύξηση της εσωτερικής θερμοκρασίας του thyristor με εξωτερική μεταφορά θερμότητας. Λαμβάνοντας υπ' όψη μας ότι οι απώλειες των thyristors είναι ανάλογες των μεταβολών του ρεύματος, η αύξηση της εσωτερικής θερμοκρασίας μπορεί να εκφρασθεί με μια τιμή:

$$\int i^2 dt$$

η οποία σχετίζεται με τη μέγιστη επιτρεπόμενη αύξηση της θερμοκρασίας.

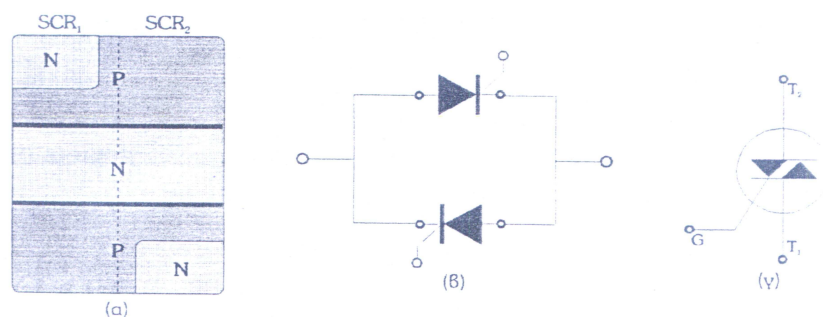
Μεγάλη επίδραση στη λειτουργία του thyristor είναι ακόμα ο μέγιστος ρυθμός ανόδου της τάσης ορθής φοράς (dV/dt). Αν ο λόγος αυτός είναι μεγάλος, το thyristor μπορεί να καταστεί αγώγιμο χωρίς την εφαρμογή ρεύματος στην πύλη του, με αποτέλεσμα την ενδεχόμενη καταστροφή του. Η παράμετρος αυτή (dV/dt) του thyristor θα πρέπει να εκλέγεται έτσι, ώστε να εμποδίζει την έναυση με αυτόν τον τρόπο. Το μέγεθος του επιβαλλόμενου dV/dt μπορεί να ελεγχθεί με τη χρήση κυκλωμάτων σαν αυτά του σχήματος 1.25



Σχήμα 1.25
Κυκλώματα ελέγχου dV/dt

1.3.3 Triac (Triode alternate current switch).

Το triac είναι ένας ημιαγωγός πέντε στρωμάτων (N, P, N, P, N), τριών ακροδεκτών ο οποίος μπορεί να μεταβεί από την κατάσταση OFF στην κατάσταση ON και με τις δύο πολικότητες μιας εναλλασσόμενης τάσης τροφοδότησης. Ισοδυναμεί με δύο thyristors συνδεσμοποιημένα αντιπαράλληλα με τρεις ακροδέκτες. Οι δυο ακροδέκτες (T1, T2 ή K.A2, KA1) διαρρέονται από το ελεγχόμενο ρεύμα και ο τρίτος (πύλη) χρησιμοποιείται για το «σκανδαλισμό» του, δηλαδή τον έλεγχο της αγωγιμότητας. Η δομή του, η ισοδυναμία του με δυο thyristors και το κυκλωματικό σύμβολό του φαίνονται στο σχήμα 1.26.



Σχήμα 1.26

- α) Δομή του triac
- β) Ισοδύναμο κύκλωμα triac με δυο thyristors
- γ) Κυκλωματικό σύμβολο

Τα κυριότερα χαρακτηριστικά λειτουργίας ενός triac είναι τα εξής :

1. Αμφίπλευρη αγωγιμότητα .
2. Σκανδαλισμός με παλμούς πύλης θετικής ή αρνητικής πολικότητας ανεξάρτητα από την πολικότητα της τάσης που εφαρμόζεται μεταξύ T1, T2.
3. Σε κατάσταση αγωγής του triac η πύλη του δεν ασκεί έλεγχο.
4. Η αγωγιμότητα σταματά όταν το ρεύμα που διαρρέει τους T1, T2 γίνει μικρότερο από το ρεύμα συγκράτησης (holding current).
5. Χρόνος αποκοπής της τάξης των μsec .

1.3.4 MOSFET Ισχύος. (Metal oxide semiconductor fields effect transistor).

Οι αυξανόμενες απαιτήσεις από τις ηλεκτρονικές συσκευές ισχύος για υψηλότερη συχνότητα λειτουργίας σε εφαρμογές όπως η αλλαγή κατάστασης σε ισχύ τροφοδότησης, έχει οδηγήσει στην ανάπτυξη των Mosfet ισχύος. Τα Mosfet ισχύος λειτουργούν με μικρές απώλειες και απαιτούν πολύ μικρότερες τιμές ρεύματος πύλης από ότι απαιτεί η βάση ενός ισοδύναμου transistor για να διατηρηθεί στην κατάσταση αγωγής.

Σε χαμηλότερες τάσεις η αντίσταση στην κατάσταση αγωγής (on state) ενός MOSFET ισχύος είναι μικρότερη από αυτή ενός ισοδύναμου transistor κυμαινόμενη από 0,05 έως 0,25 Ω για μια συσκευή 100V και 2-8 Ω για μια συσκευή 1000V.

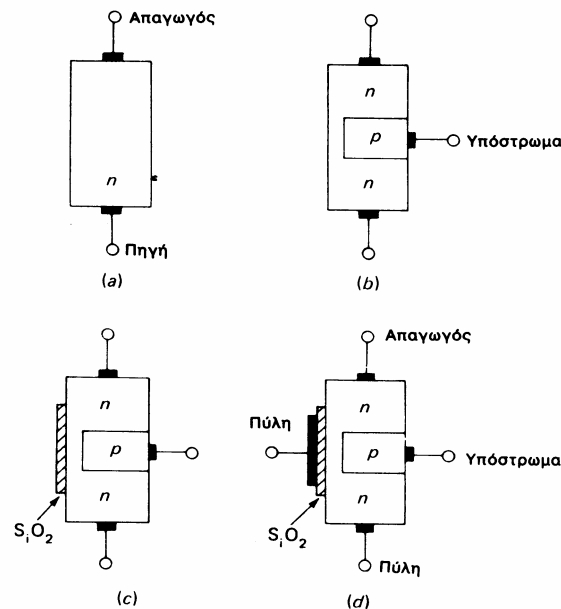
Οι εφαρμογές των Mosfet ισχύος δεν είναι πολύ εξαπλωμένη από το γεγονός ότι η τεχνολογία που χρησιμοποιείται για την κατασκευή τους είναι σήμερα περισσότερο ακριβή απ' ότι αυτή των άλλων συσκευών ηλεκτρονικών ισχύος. Χρησιμοποιούνται όμως ιδιαίτερα στην κατασκευή inverters, choppers και παλμοτροφοδοτικών.

MOSFET τύπου αραίωσης.

Όπως το JFET, έτσι και το MOSFET έχει μία πηγή, μία πύλη και έναν επαγωγό. Η μεγάλη διαφορά έγκειται στο ότι η πύλη είναι απομονωμένη από το κανάλι. Γι' αυτόν το λόγο, μπορούμε να εφαρμόσουμε θετικές αλλά και αρνητικές τάσεις στην πύλη. Και στις δύο περιπτώσεις, το ρεύμα της πύλης είναι αμελητέο.

Περιοχές του MOSFET.

Το MOSFET αποτελείται κατ' αρχήν από ένα τμήμα ημιαγωγού n τύπου. Όπως φαίνεται και στο σχήμα 1.27(α), στα άκρα αυτού του τμήματος συνδέονται οι ακροδέκτες επαγωγού και πηγής. Όπως και στα JFET, η επιβολή μίας θετικής τάσης στους ακροδέκτες επαγωγού - πηγής εξαναγκάζει τα ελεύθερα ηλεκτρόνια να ρέουν από την πηγή στον επαγωγό. Όμως, αντίθετα με το JFET, το MOSFET έχει μόνο μία p περιοχή. Αυτό φαίνεται στο σχήμα 1.27(β). Αυτή η περιοχή ονομάζεται υπόστρωμα (substrate). Η p περιοχή περιορίζει το εύρος του καναλιού ανάμεσα στην πηγή και τον επαγωγό. Έτσι υπολείπεται μόνο ένα στενό πέρασμα στην αριστερή πλευρά του στοιχείου του σχήμα 1.27(β). Τα ελεύθερα ηλεκτρόνια που ρέουν από την πηγή στον επαγωγό, περνούν μέσα από αυτό το στενό πέρασμα. Μία λεπτή φέτα διοξειδίου του πυριτίου (SiO_2) αποτίθεται στην αριστερή πλευρά του καναλιού. Αυτό το υλικό είναι ένας μονωτής. Τέλος, μία μεταλλική πύλη τοποθετείται πάνω από τον μονωτή (Σχήμα 1.27(δ)). Επειδή η πύλη είναι απομονωμένη από το κανάλι, το MOSFET είναι γνωστό και σαν FET μονωμένης - πύλης (IGFET).



Σχήμα 1.27

Δομή του MOSFET.

(α) n -κανάλι. (β) Προσθήκη του υποστρώματος. (γ) Προσθήκη του διοξειδίου του πυριτίου.

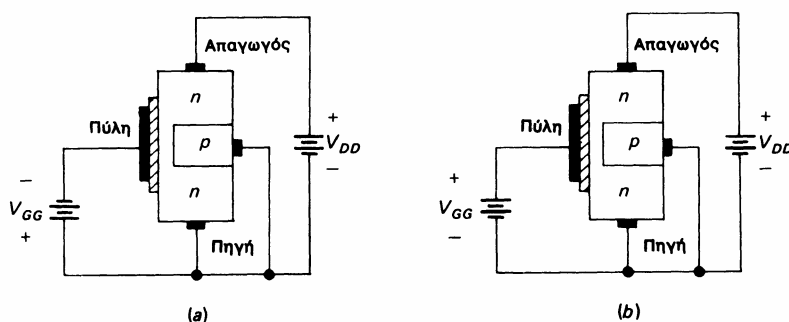
(δ) Προσθήκη της πύλης.

Λειτουργία αραίωσης.

Πώς λειτουργεί το MOSFET του σχήματος 1.28(α). Κατά τα γνωστά, η τροφοδοσία V_{DD} εξαναγκάζει τα ελεύθερα ηλεκτρόνια να ρέουν από την πηγή στον επαγωγό. Αυτά τα ελεύθερα ηλεκτρόνια ρέουν μέσα από το στενό κανάλι που σχηματίζεται στα αριστερά του p υποστρώματος. Όπως στα JFET, η τάση της πύλης ελέγχει την αντίσταση του n καναλιού. Όμως, επειδή η πύλη είναι απομονωμένη από το κανάλι, μπορούμε να εφαρμόσουμε σ' αυτήν είτε θετική είτε αρνητική τάση. Στο σχήμα 1.28(α) εφαρμόζεται στην πύλη αρνητική τάση.

Αυτή η τάση αναχαιτίζει τα ελεύθερα ηλεκτρόνια και τα ωθεί πίσω προς την πηγή. Αυτό σημαίνει ότι η αρνητική τάση στην πύλη ελαττώνει τη ροή ανάμεσα στην πηγή και τον επαγωγό.

Όσο πιο αρνητική είναι η τάση της πύλης, τόσο πιο μικρό είναι το ρεύμα μέσα στο κανάλι. Αν η αρνητική τάση της πύλης αυξηθεί αρκετά, το ρεύμα ανάμεσα στην πηγή και τον επαγωγό αποκόπτεται. Επομένως, με την επιβολή αρνητικής τάσης στην πύλη, το MOSFET λειτουργεί κατά τρόπον ανάλογο με αυτόν του JFET. Επειδή η επιβολή αρνητικής τάσης στην πύλη προκαλεί αραίωση των φορτίων που ρέουν μέσα στο κανάλι, αυτός ο τρόπος λειτουργίας ονομάζεται λειτουργία αραίωσης (depletion mode).



Σχήμα 1.28
(α) Αρνητική πύλη. (β) Θετική πύλη.

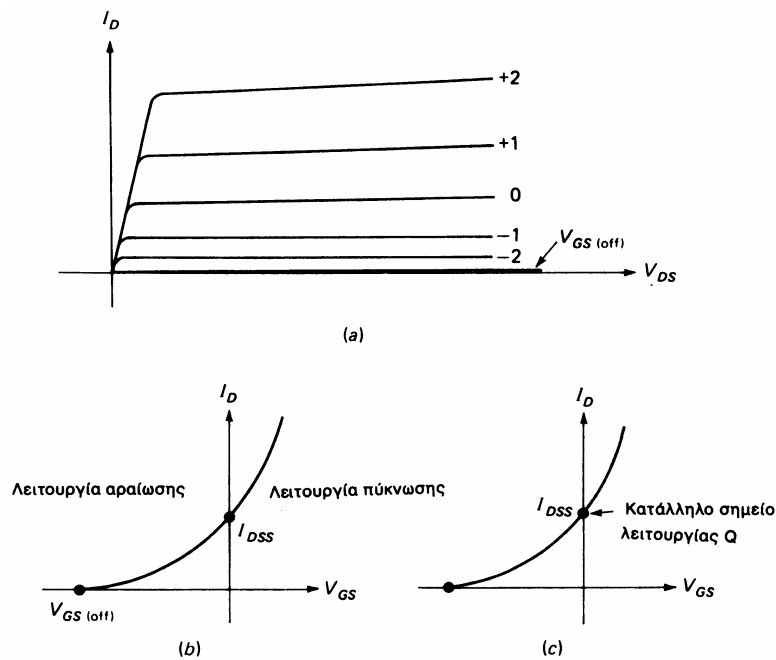
Λειτουργία πύκνωσης.

Μία θετική τάση εφαρμόζεται στην πύλη του κυκλώματος του σχήματος 1.28(β). Η τάση αυτή έλκει τα ελεύθερα ηλεκτρόνια και αυξάνει τη ροή ρεύματος ανάμεσα στην πηγή και τον επαγωγό. Μ' άλλα λόγια, η θετική τάση ενισχύει την αγωγιμότητα του καναλιού. Όσο πιο θετική είναι η τάση της πύλης, τόσο μεγαλύτερη είναι η ροή από την πηγή στον επαγωγό. Η λειτουργία του MOSFET με θετική τάση ονομάζεται λειτουργία πύκνωση (enhancement mode).

Το ρεύμα της πύλης είναι αμελητέο και στους δύο τρόπους λειτουργίας. Αυτό οφείλεται στην παρεμβολή του μονωτικού στρώματος. Η αντίσταση εισόδου της πύλης είναι πολύ μεγάλη, από 10^{10} μέχρι 10^{14} Ω. Το στοιχείο του σχήματος 1.28(α) και (β) είναι ένα MOSFET n-καναλιού. Το συμπληρωματικό του στοιχείο είναι το MOSFET p-καναλιού.

Χαρακτηριστικές καμπύλες του MOSFET.

Οι χαρακτηριστικές επαγωγού ενός MOSFET n-καναλιού δίνονται στο σχήμα 1.29(α). Η $V_{GS(off)}$ παριστάνει την αρνητική τάση πύλης που αποκόπτει το ρεύμα επαγωγού. Αν η v_{DS} είναι μικρότερη του μηδενός, έχουμε λειτουργία αραίωσης. Από την άλλη μεριά, αν η V_{GS} είναι μεγαλύτερη του μηδενός, έχουμε λειτουργία πύκνωσης.



Σχήμα 1.29
 (α) Χαρακτηριστικές καμπύλες επαγωγού τον MOSFET. (β) Καμπύλες διαγωγιμότητας. (γ) Μηδενική πόλωση

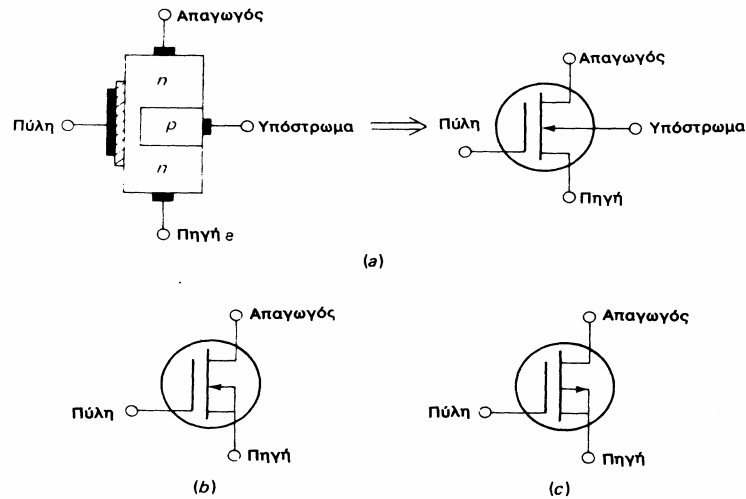
Η καμπύλη διαγωγιμότητας δίνεται στο σχήμα 1.29(β). Το I_D είναι το ρεύμα απαγωγού με βραχυκυκλωμένη πύλη. Σημειώστε ότι το I_{DSS} δεν είναι πλέον το μέγιστο δυνατό ρεύμα. Όπως βλέπετε, η καμπύλη διαγωγιμότητας εκτείνεται προς τα δεξιά, για θετικές τιμές της V_{GS} . Έτσι, το I_D είναι μεγαλύτερο από το I_{DSS} στη λειτουργία πύκνωσης. Τα MOSFET με τη χαρακτηριστική διαγωγιμότητας του σχήματος 1.29(β) χρησιμοποιούνται εύκολα γιατί δεν απαιτούν τάση πόλωσης. Όπως φαίνεται και στο σχήμα 1.29(γ), μπορούμε να τοποθετήσουμε το σημείο Q στο σημείο τομής του άξονα των τεταγμένων με τη χαρακτηριστική, όπου $I_D = I_{DSS}$ και $V_{GS} = 0$. Αυτό σημαίνει ότι δε χρειαζόμαστε τάση στην πύλη, γεγονός που απλοποιεί το κύκλωμα πόλωσης.

Κάθε MOSFET το οποίο μπορεί να λειτουργήσει είτε με αραιώση είτε με πύκνωση, ονομάζεται MOSFET τύπου αραιώσης. Αφού αυτός ο τύπος του MOSFET εμφανίζει μη μηδενικό ρεύμα απαγωγού για μηδενική τάση πύλης, ονομάζεται και MOSFET κανονικά στην κατάσταση on (normally on MOSFET).

Κυκλωματικά σύμβολα.

Στο σχήμα 1.30(α) δίνεται το κυκλωματικό σύμβολο ενός MOSFET τύπου αραιώσης. Η πύλη έχει τη μορφή σπλισμού ενός πυκνωτή. Δεξιά από την πύλη υπάρχει μία λεπτή γραμμή που παριστάνει το κανάλι. Ο ακροδέκτης του απαγωγού βρίσκεται στην κορυφή του καναλιού και ο ακροδέκτης της πηγής στη βάση του καναλιού. Το βέλος του υποστρώματος δείχνει προς το n υλικό. Επομένως, το στοιχείο αυτό είναι ένα MOSFET n-καναλιού.

Συνήθως, ο κατασκευαστής συνδέει εσωτερικά το υπόστρωμα με την πηγή. Σαν συνέπεια έχουμε ένα στοιχείο τριών ακροδεκτών, της οποίας το κυκλωματικό σύμβολο δίνεται στο σχήμα 1.30(β). Ο κατασκευαστής μπορεί ακόμα, χρησιμοποιώντας αντίθετο τύπο πρόσμειξης, να κατασκευάσει ένα MOSFET p-καναλιού, του οποίου το κυκλωματικό σύμβολο δίνεται στο σχήμα 1.30(γ).



Σχήμα 1.30

Σύμβολα των MOSFET τύπου αραίωσης

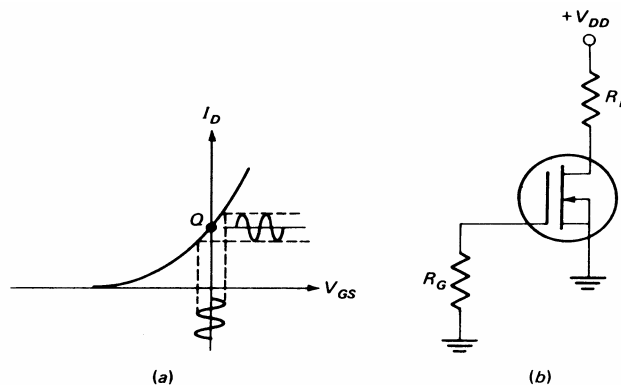
(α) n-καναλιού με ακροδέκτη υποστρώματος, (β) n-καναλιού. (γ) p-καναλιού.

Πόλωση.

Επειδή τα MOSFET τύπου αραίωσης μπορούν να λειτουργήσουν σε λειτουργία αραίωσης, μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε τις μεθόδους πόλωσης που περιγράψαμε στα JFET. Αυτές είναι οι μέθοδοι της άμεσης πόλωσης πύλης, της αυτοπόλωσης, της πόλωσης με διαιρέτη τάσης, της πόλωσης πηγής, και της πόλωσης με πηγή ρεύματος. Εκτός από τις παραπάνω μεθόδους, και ειδικά για το MOSFET τύπου αραίωσης, μπορούμε να εφαρμόσουμε μια επιπλέον μέθοδο πόλωσης. Αφού το MOSFET τύπου αραίωσης μπορεί να λειτουργήσει είτε με αραίωση είτε με πύκνωση, μπορούμε να θέσουμε το σημείο λειτουργίας Q στο $V_{GS} = 0$. Αυτό φαίνεται στο σχήμα. 1.31(α). Στην περίπτωση αυτή, η προσθήκη ενός ac σήματος εισόδου στην πύλη μπορεί να προκαλέσει διακυμάνσεις πάνω και κάτω από το σημείο Q.

Η χρήση της τιμής $V_{GS} = 0$ απλοποιεί σημαντικά το κύκλωμα πόλωσης. Το κύκλωμα που χρησιμοποιούμε δίνεται στο σχήμα 1.31(β). Σ' αυτό το απλό κύκλωμα δεν εφαρμόζεται τάση στην πύλη ή στην πηγή. Επομένως $V_{GS} = 0$ και $I_D = I_{DSS}$. Η dc τάση απαγωγού είναι ίση με

$$V_{DS} = V_{DD} - I_{DSS} * R_D$$



Σχήμα 1.31
Μηδενική πόλωση.

Η μηδενική πόλωση του σχήματος 1.31(α) εφαρμόζεται μόνο στα MOSFET τύπου αραιώσης. Δεν μπορεί να εφαρμοστεί στα διπολικά transistor ή στα JFET.

Εφαρμογές.

Αφού το MOSFET τύπου αραιώσης πολωθεί σ' ένα σημείο Q, μπορεί πλέον να ενισχύσει μικρά σήματα. Οι ενισχυτές με MOSFET είναι παρόμοιοι με τους ενισχυτές με JFET. Επομένως μπορούμε να εφαρμόσουμε την ac ανάλυση του προηγούμενου κεφαλαίου. Για παράδειγμα, ένας ενισχυτής κοινής πηγής με MOSFET έχει κέρδος τάσης g_{mD} , ένας ακόλουθος πηγής έχει $g_{mS} / (1 + g_{mS})$, κ.τ.λ.

Αν θέλουμε πολύ μεγάλη αντίσταση εισόδου, μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε MOSFET, αντί για JFET. Η αντίσταση εισόδου του MOSFET τείνει στο άπειρο, εξ' αιτίας της μονωμένης πύλης. Επιπλέον, τα MOSFET τύπου αραιώσης εμφανίζουν εξαιρετικά χαρακτηριστικά χαμηλού θορύβου. Αυτό είναι μεγάλο πλεονέκτημα για οποιαδήποτε βαθμίδα που βρίσκεται κοντά στη βαθμίδα εισόδου ενός συστήματος. Ο λόγος είναι ότι ο θόρυβος ενισχύεται με τον ίδιο τρόπο που ενισχύεται το επιθυμητό σήμα. Όπως και στο JFET, η g_m ενός MOSFET ελαττώνεται όταν η V_{GS} γίνει πιο αρνητική. Γι αυτόν το λόγο, τα MOSFET μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε κυκλώματα αυτομάτου ελέγχου του κέρδους (automatic-gain control circuits (AGC)).

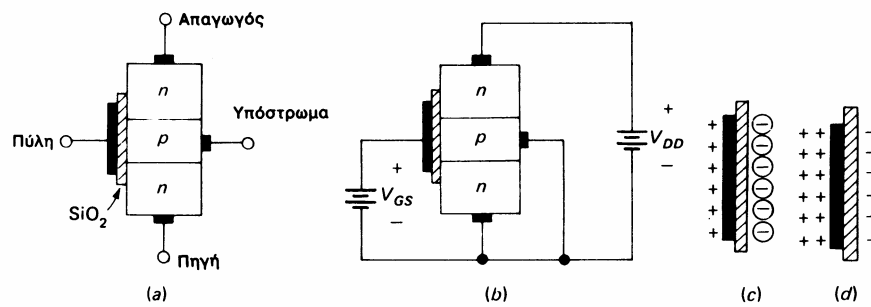
MOSFET τύπου πύκνωσης.

Ένα άλλο είδος MOSFET που εφαρμόζεται πολύ στα ψηφιακά κυκλώματα, είναι το MOSFET τύπου πύκνωσης (enhancement - type MOSFET). Αυτό το MOSFET λειτουργεί αποκλειστικά με πύκνωση.

Δημιουργία του στρώματος αντιστροφής στο σχήμα 1.32(α) δίνονται τα διάφορα τμήματα ενός MOSFET τύπου πύκνωσης. Προσέξτε ότι το υπόστρωμα εκτείνεται μέχρι την επίστρωση του διοξειδίου του πυριτίου. Γι αυτόν το λόγο, δεν έχουμε πια κανάλι n-τύπου ανάμεσα στην πηγή και τον απ αγωγό.

Πώς άγει το MOSFET τύπου πύκνωσης; Το σχήμα 1.32(β) δείχνει τις κανονικές πολικότητες πόλωσης. Όταν $V_{GS} = 0$, η τροφοδοσία V_{DD} προσπαθεί να εξαναγκάσει τα ελεύθερα ηλεκτρόνια να ρέουν από την πηγή στον απαγωγό. Όμως, το p υπόστρωμα έχει ελάχιστα θερμικά παραγόμενα ελεύθερα ηλεκτρόνια. Έτσι, το ρεύμα ανάμεσα στην πηγή και τον απαγωγό είναι αμελητέο. Γι αυτόν το λόγο, το MOSFET τύπου πύκνωσης είναι ένα MOSFET που βρίσκεται κανονικά στην κατάσταση off (normally off MOSFET).

Για να έχουμε ρεύμα απαγωγού, πρέπει να επιβάλλουμε μία αρκετά μεγάλη θετική τάση στην πύλη. Η πύλη συμπεριφέρεται όπως ο ένας οπλισμός του πυκνωτή, το διοξείδιο του πυριτίου όπως το διηλεκτρικό και το υπόστρωμα p όπως ο δεύτερος οπλισμός του πυκνωτή. Στο σχήμα 1.32(γ), για μικρές τάσεις πύλης, τα θετικά φορτία στην πύλη επάγουν αρνητικά φορτία στο p υπόστρωμα. Αυτά τα επαγόμενα φορτία είναι αρνητικά ιόντα, που παράγονται από την κατάληψη οπών από ηλεκτρόνια σθένους μέσα στο p υπόστρωμα. Αν αυξήσουμε περισσότερο την τάση πύλης, τα επιπλέον θετικά φορτία στην πύλη μπορούν να θέσουν ελεύθερα ηλεκτρόνια σε τροχιά γύρω από τα αρνητικά ιόντα (δες σχήμα 1.32(δ)). Με άλλα λόγια, όταν η πύλη είναι αρκετά θετική, δημιουργεί ένα λεπτό στρώμα ελεύθερων ηλεκτρονίων, που καλύπτει όλη τη διαδρομή από την πηγή προς τον απαγωγό.



Σχήμα 1.32
MOSFET τύπου πύκνωσης

(α) Δομή, (β) Κανονική πόλωση, (γ) Δημιουργία αρνητικών ιόντων, (δ) Δημιουργία του στρώματος αντιστροφής n-τύπου

Το στρώμα των ελεύθερων ηλεκτρονίων βρίσκεται δίπλα στο διοξείδιο του πυριτίου. Το στρώμα αυτό δε συμπεριφέρεται πια σαν ημιαγωγός ρ-τύπου. Αντίθετα, λόγω των επαγόμενων ελεύθερων ηλεκτρονίων, συμπεριφέρεται σαν ημιαγωγός η-τύπου. Γι' αυτόν το λόγο, το στρώμα του ρ υλικού που εφάπτεται με το διοξείδιο του πυριτίου ονομάζεται στρώμα αντιστροφής n-τύπου.

Τάση κατωφλίου.

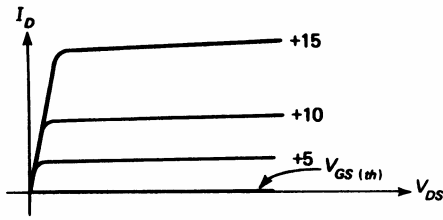
Η ελάχιστη τάση πύλης - πηγής που προκαλεί την εμφάνιση του στρώματος αντιστροφής n-τύπου ονομάζεται τάση κατωφλίου και σημειώνεται με V_{th} . Όταν η τάση της πύλης είναι μικρότερη από την τάση κατωφλίου, το ρεύμα απαγωγού είναι μηδέν. Όμως, όταν η τάση πύλης είναι μεγαλύτερη από την τάση κατωφλίου, το στρώμα αντιστροφής n-τύπου συνδέει την πηγή με τον απαγωγό και έχουμε ρεύμα.

Η τιμή της τάσης κατωφλίου εξαρτάται από τον τύπο του MOSFET. Η $V_{GS(th)}$ μπορεί να μεταβάλλεται από τιμές μικρότερες του 1 V σε τιμές μεγαλύτερες των 5 V. Για παράδειγμα, το 3N169 έχει τάση κατωφλίου 1,5 V. Όταν η τάση στην πύλη είναι μικρότερη από αυτήν την τιμή, το MOSFET είναι ανοικτό. Όταν η τάση είναι μεγαλύτερη από 1,5 V, το MOSFET άγει.

Τα MOSFET πύκνωσης χρησιμοποιούνται συνήθως στα ψηφιακά κυκλώματα, γιατί βρίσκονται κανονικά στην κατάσταση off. Όταν η τάση πύλης υπερβεί την τάση κατωφλίου, το MOSFET λειτουργεί σαν κλειστός διακόπτης. Στις επόμενες παραγράφους θα περιγράψουμε μερικά ψηφιακά κυκλώματα με MOSFET πύκνωσης.

Χαρακτηριστικές καμπύλες του MOSFET πύκνωσης.

Στο σχήμα 1.33 δίνεται ένα σύνολο χαρακτηριστικών καμπύλων απαγωγού για το MOSFET πύκνωσης. Η πιο χαμηλή καμπύλη είναι η καμπύλη $V_{GS(th)}$. Όταν η V_{GS} είναι μικρότερη από την $V_{GS(th)}$, το ρεύμα απαγωγού είναι, στην ιδανική περίπτωση, μηδέν και το MOSFET είναι στην κατάσταση off. Όταν η V_{GS} είναι μεγαλύτερη από την $V_{GS(th)}$, έχουμε ρεύμα στον απαγωγό. Όσο μεγαλύτερη είναι η V_{GS} , τόσο μεγαλύτερο είναι το ρεύμα απαγωγού.

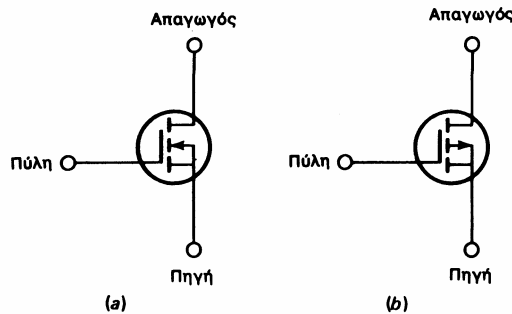


Σχήμα 1.33
Χαρακτηριστικές καμπύλες απαγωγού τον MOSFET τύπου πύκνωσης.

Κυκλωματικά σύμβολα.

Όταν $V_{GS} = 0$, το MOSFET πύκνωσης βρίσκεται στην κατάσταση off, επειδή δεν υπάρχει αγώγιμο κανάλι ανάμεσα στην πηγή και τον απαγωγό. Το κυκλωματικό σύμβολο του σχήματος 1.34(α) δηλώνει την κατάσταση off με την διακεκομμένη γραμμή του καναλιού. Όπως γνωρίζετε, αν η τάση πύλης υπερβεί την τάση κατωφλίου, δημιουργεί το στρώμα αντιστροφής n-τύπου, που συμπεριφέρεται σαν ένα κανάλι η-τύπου. Γι' αυτόν το λόγο, το στοιχείο αυτό είναι ένα MOSFET πύκνωσης η-καναλιού.

Στο σχήμα 1.34(β) δίνεται το κυκλωματικό σύμβολο ενός MOSFET πύκνωσης ρ-καναλιού. Σ' αυτήν την περίπτωση, η τάση κατωφλίου είναι αρνητική και το ρεύμα απαγωγού ρέει προς την αντίθετη κατεύθυνση από αυτήν του MOSFET n-καναλιού.

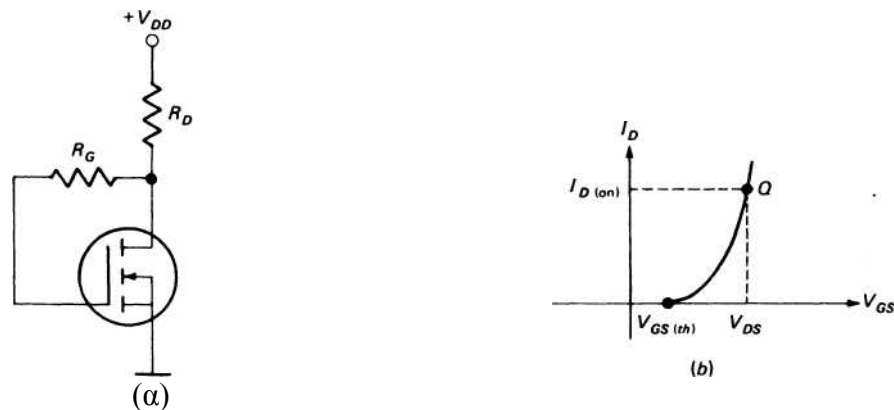


Σχήμα 1.34
Σύμβολα τον MOSFET τύπου πύκνωσης, (α) n-καναλιού. (β) ρ-καναλιού.

Μέγιστη τάση πύλης – πηγής.

Και στους δύο τύπους MOSFET, πύκνωσης και αραιώσης, παρεμβάλλεται ένα λεπτό στρώμα διοξειδίου του πυριτίου ανάμεσα στην πύλη και το κανάλι. Αν η τάση πύλης - πηγής αυξηθεί υπερβολικά, αυτό το στρώμα μπορεί να καταστραφεί. Για παράδειγμα, στο 2N3796 η $V_{G_}$ περιορίζεται στα ± 30 V. Αν η τάση πύλης - πηγής γίνει θετικότερη από 30 V ή αρνητικότερη από -30 V, το μονωτικό στρώμα του MOSFET θα καταστραφεί.

Εκτός από την απευθείας επιβολή μεγάλης V_{GS} , το μονωτικό στρώμα μπορεί να καταστραφεί και από άλλους, λιγότερο προφανείς, λόγους. Αν τοποθετήσετε ή απομακρύνετε το MOSFET από ένα κύκλωμα, ενώ το κύκλωμα τροφοδοτείται, μπορεί να αναπτυχθούν μεταβατικές τάσεις που να υπερβαίνουν την τιμή $V_{GS(max)}$. Ακόμη, αν πιάσετε το MOSFET, μπορεί να εναποθέσετε σ αυτό στατικά φορτία, που να υπερβαίνουν την $V_{GS(max)}$. Γι αυτόν το λόγο, συνήθως τα MOSFET προστατεύονται με ένα αγώγιμο δαχτυλίδι που συνδέει τους ακροδέκτες. Το δαχτυλίδι αυτό απομακρύνεται μετά τη σύνδεση του MOSFET στο κύκλωμα.



Σχήμα 1.35
Πόλωση με ανάδραση απαγωγού.

Τα νεότερα MOSFET προστατεύονται με την ενσωμάτωση στο ολοκληρωμένο κύκλωμα διόδων Zener που συνδέονται παράλληλα με την πύλη και την πηγή.

Η τάση της Zener είναι μικρότερη από την οριακή τιμή $V_{GS(max)}$. Μ' αυτόν τον τρόπο, η διόδος Zener διασπάται πριν από την καταστροφή του λεπτού μονωτικού στρώματος. Το μειονέκτημα των ενσωματωμένων διόδων είναι ότι μειώνουν την αντίσταση εισόδου του MOSFET.

Πόλωση των MOSFET πύκνωσης.

Στα MOSFET πύκνωσης έχουμε ρεύμα, όταν η V_{GS} γίνει μεγαλύτερη από την V_h . Γι αυτόν το λόγο, οι μέθοδοι αυτοπόλωσης, πόλωσης με πηγή ρεύματος, και μηδενικής πόλωσης δε μπορούν να εφαρμοστούν. Αυτές οι μέθοδοι απαιτούν λειτουργία αραίωσης. Υπολείπονται η άμεση πόλωση πύλης, η πόλωση με διαιρέτη τάσης και η πόλωση της πηγής. Αυτές οι μέθοδοι μπορούν να εφαρμοστούν στα MOSFET τύπου πύκνωσης, γιατί μπορούν να προκαλέσουν λειτουργία πύκνωσης.

Μία άλλη μέθοδος πόλωσης του MOSFET πύκνωσης είναι η πόλωση με ανάδραση επαγωγού που δίνεται στο σχήμα 1.35(a). Όταν το MOSFET άγει, δίνει ένα ρεύμα απαγωγού $I_{D(on)}$ και μία τάση απαγωγού $V_{DS(on)}$. Αφού το ρεύμα πύλης είναι περίπου μηδέν, η τάση στα άκρα της R_D είναι μηδέν. Γι αυτόν το λόγο, $V_{GS} = V_{DS(on)}$. Όπως και στην πόλωση με ανάδραση συλλέκτη, η πόλωση με ανάδραση επαγωγού τείνει να αντισταθμίσει τις οποιεσδήποτε μεταβολές των παραμέτρων των FET.

Αν το I τείνει για κάποιο λόγο να αυξηθεί, η $V^{''}$ ελαττώνεται. Σαν συνέπεια, ελαττώνεται η V^{\wedge} και αντισταθμίζει μερικά την αρχική αύξηση του $I_{D(on)}$.

Στο σχήμα 1.35(β) φαίνεται το σημείο Q πάνω στην καμπύλη διαγωγιμότητας. Οι συντεταγμένες του είναι I_D και $V_{DS(on)}$. Τα φυλλάδια των κατασκευαστών των MOSFET τύπου πύκνωσης δίνουν συνήθως τιμές για τα $I_{D(on)}$ και $V_{DS(on)}$. Αυτό βοηθά στον καθορισμό του σημείου Q. Αυτό που πρέπει να κάνετε είναι να επιλέξετε την τιμή της R_D που δίνει την επιθυμητή V_{DS} . Η αντίσταση αυτή είναι η εξής:

$$R_D = V_{DD} - V_{DS(on)} / I_{D(on)}$$

Για παράδειγμα, το φυλλάδιο ενός MOSFET πύκνωσης δίνει $V_{DS(on)} = 10\text{ V}$ και $I_{D(on)} = 3\text{ mA}$. Αν η τάση τροφοδοσίας είναι 25 V , η απαιτούμενη αντίσταση απαγωγού είναι:

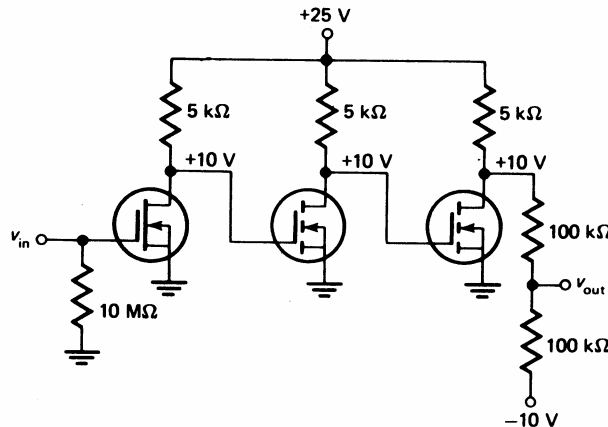
$$R_D = 25\text{ V} - 10\text{ V} / 3\text{ mA} = 5\text{ k}\Omega$$

DC ενισχυτής.

Ο dc ενισχυτής είναι ένας ενισχυτής ο οποίος μπορεί να ενισχύσει όλες τις χαμηλές συχνότητες μέχρι τη μηδενική, με σταθερό κέρδος τάσης. Ένας τρόπος για να κατασκευάσουμε ένα dc ενισχυτή είναι να παραλείψουμε όλους τους πυκνωτές σύζευξης και παράκαμψης.

Στο σχήμα 1.36 δίνεται ένας ενισχυτής με MOSFET. Η βαθμίδα εισόδου είναι ένα MOSFET αραίωσης με μηδενική πόλωση. Η δεύτερη και η τρίτη βαθμίδα χρησιμοποιούν MOSFET πύκνωσης. Κάθε μια βαθμίδα δέχεται την V_{GS} από τον απαγωγό της προηγούμενης. Στη σχεδίαση του κυκλώματος του σχήματος 1.36 χρησιμοποιούνται MOSFET με ρεύματα απαγωγού στα 3 mA . Γι αυτόν το λόγο, κάθε απαγωγός βρίσκεται στα $+10\text{ V}$ ως προς τη γη. Τοποθετούμε την έξοδο ανάμεσα σε δύο αντιστάσεις των $100\text{ k}\Omega$. Αφού ο ακροδέκτης της κάτω αντίστασης συνδέεται στα -10 V , η τάση ηρεμίας της εξόδου είναι 0 V . Όταν οδηγούμε τον ενισχυτή με μία ac τάση, ανεξάρτητα από το πόσο χαμηλή είναι η συχνότητα, θα παίρνουμε ένα ενισχυμένο σήμα στην έξοδο.

Υπάρχουν και άλλοι τρόποι σχεδίασης ac ενισχυτών. Η ομορφιά του ενισχυτή του σχήματος 1.36 έγκειται στην απλότητα του.



Σχήμα 1.36
Ενισχυτής DC με MOSFET

Εφαρμογές με MOSFET τύπου πύκνωσης.

Οι υπολογιστές χρησιμοποιούν ολοκληρωμένα κυκλώματα (ICs) με χιλιάδες transistors. Τα ολοκληρωμένα κυκλώματα λειτουργούν εξαιρετικά καλά παρά τις ανοχές των transistor και τις μεταβολές της θερμοκρασίας. Πώς συμβαίνει αυτό; Η απάντηση βρίσκεται στη σχεδίαση δύο καταστάσεων, δηλαδή με τη χρήση δύο μόνο σημείων της γραμμής φορτίου του κάθε transistor. Σ' αυτήν την περίπτωση, το transistor συμπεριφέρεται σαν διακόπτης και όχι σαν πηγή ρεύματος. Τα κυκλώματα που χρησιμοποιούν διακόπτες με transistor ονομάζονται διακοπτικά, ψηφιακά ή λογικά κυκλώματα. Από την άλλη μεριά, τα κυκλώματα που χρησιμοποιούν πηγές ρεύματος με transistor ονομάζονται γραμμικά ή αναλογικά κυκλώματα.

Προτίμηση των MOSFET πύκνωσης.

Το MOSFET πύκνωσης βρίσκει τη μεγαλύτερη του εφαρμογή στα ψηφιακά κυκλώματα. Ένας λόγος είναι η μικρή κατανάλωση ισχύος. Ένας άλλος λόγος είναι ο μικρός χώρος που καταλαμβάνει στο chip (στο ολοκληρωμένο κύκλωμα). Ο κατασκευαστής μπορεί να τοποθετήσει πολύ περισσότερα MOSFET τύπου πύκνωσης απ' ό,τι διπολικά transistor στο chip. Γι αυτόν το λόγο, τα MOSFET πύκνωσης χρησιμοποιούνται για ολοκλήρωση μεγάλης κλίμακας σε μικροεπεξεργαστές, μνήμες, και άλλες διατάξεις που απαιτούν χιλιάδες στοιχείων σ' ένα chip.

1. Παθητικό φορτίο.

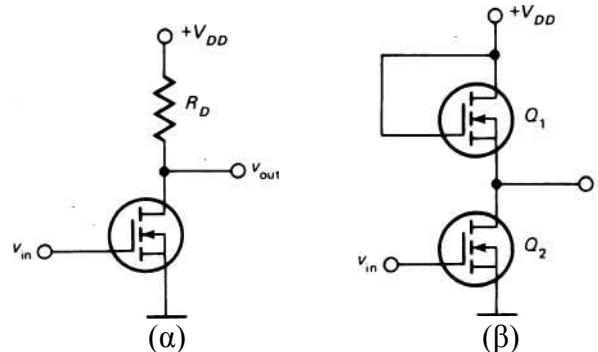
Στο σχήμα 1.37(α) δίνεται μία οδηγός βαθμίδα με MOSFET και ένα παθητικό φορτίο (αντίσταση R_D). Σ' αυτό το κύκλωμα, η v_{in} είναι είτε low είτε high, και το MOSFET δρα σαν διακόπτης που λειτουργεί είτε στην κατάσταση off είτε στην κατάσταση on. Όταν η v_{in} είναι low, το MOSFET βρίσκεται στην αποκοπή και η v_{out} είναι ίση με την τάση εισόδου. Από την άλλη μεριά, όταν η v_{in} είναι high, το MOSFET βρίσκεται στον κόρο και η v_{out} λαμβάνει χαμηλές τιμές.

2. Ενεργό φορτίο.

Οι αντιστάσεις καταλαμβάνουν μεγαλύτερο χώρο στο chip απ' ό,τι τα MOSFET. Γι αυτόν το λόγο, χρησιμοποιούνται σπάνια σε ολοκληρωμένα κυκλώματα με MOS. Στο σχήμα 1.37(β) δίνεται ένα άλλο διακοπτικό κύκλωμα με μία οδηγό βαθμίδα με MOSFET Q_2 , και ένα ενεργό φορτίο Q_1 . Επειδή το Q_1 είναι πολωμένο με ανάδραση απαγωγού, άγει πάντα. Με προσεκτικό σχεδιασμό πετυχαίνουμε ώστε το πάνω MOSFET να έχει $r_{DS(on)}$ τουλάχιστον 10 φορές μεγαλύτερη από αυτήν του κάτω MOSFET. Γι αυτόν το λόγο, το Q_1 συμπεριφέρεται σαν αντίσταση και το Q_2 σαν διακόπτης.

Αν χρησιμοποιήσουμε οδηγό βαθμίδα MOS και φορτίο MOS καταλήγουμε σε πολύ μικρότερα ολοκληρωμένα κυκλώματα, γιατί τα MOSFET καταλαμβάνουν πολύ μικρότερο χώρο απ' ό,τι οι αντιστάσεις. Αυτός λοιπόν είναι ο λόγος που η τεχνολογία MOS κυριαρχεί στις εφαρμογές των υπολογιστών. Επιτρέπει να συμπεριλάβουμε περισσότερα κυκλώματα σ' ένα chip.

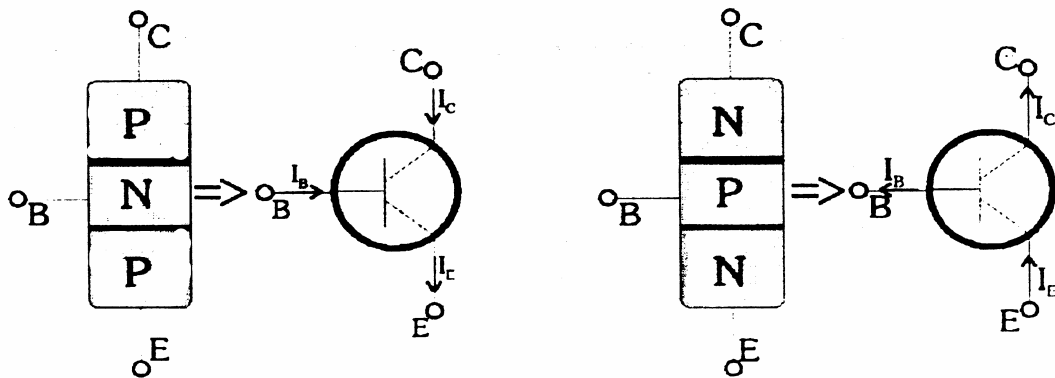
Το βασικό που θα πρέπει να θυμόμαστε είναι η λογική του ενεργού φορτίου, όπου το ένα ενεργό στοιχείο δρα σαν φορτίο στο άλλο. Τα ενεργά φορτία χρησιμοποιούνται στα διπολικά transistor, και ειδικά στους τελεστικούς ενισχυτές



Σχήμα 1.37
Οδηγός βαθμίδα με MOSFET
(α) παθητικό φορτίο, (β) ενεργό φορτίο.

1.3.5 Τρανζίστορ Ισχύος (Power Transistor).

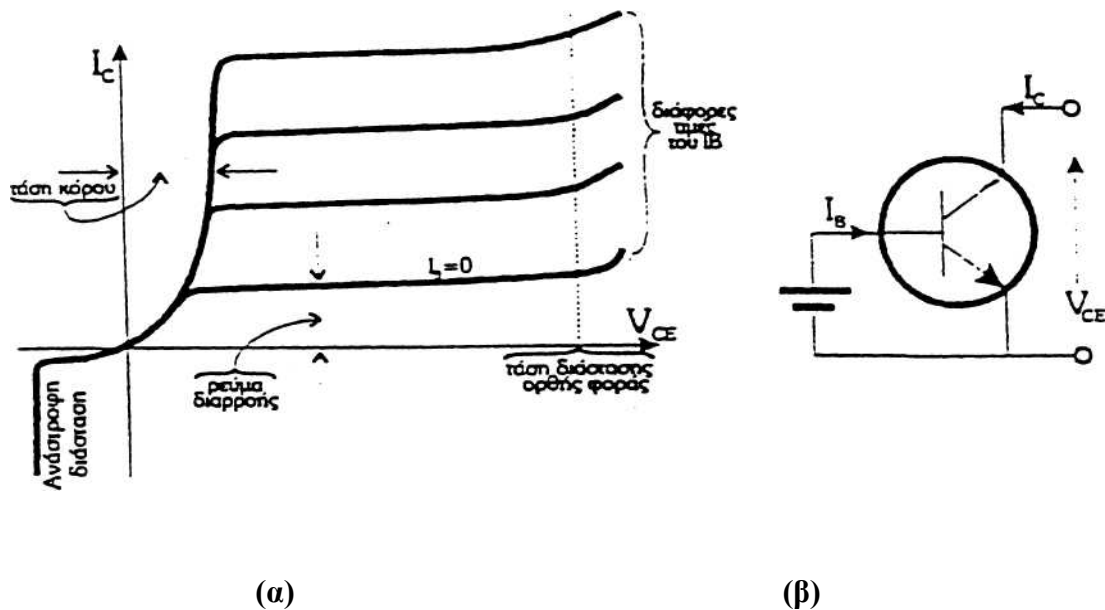
Το τρανζίστορ είναι ένας ημιαγωγός τριών στρωμάτων που σχηματίζεται ή από δύο περιοχές 'P' και μια περιοχή 'N' ή από μία περιοχή 'P' και δύο περιοχές 'N'. Στην πρώτη περίπτωση το transistor είναι γνωστό σαν pnp transistor και στην δεύτερη σαν npn transistor. Τα τρία άκρα του έχουν τις ονομασίες βάση, εκπομπός και συλλέκτης (base, emitter και collector).



Σχήμα 138
Σχηματισμός transistor

Η ταχύτητα διακοπής των σύγχρονων transistors είναι πολύ μεγαλύτερη από αυτή των thyristors και για τον λόγο αυτό είναι ευρέως χρησιμοποιούμενα σε D.C.-D.C. και D.C.-A.C. μετατροπείς, με διόδους αντιπαράλληλα συνδεδεμένες για να εξασφαλίζουν ροή ρεύματος δυο κατευθύνσεων. Πρέπει όμως να σημειωθεί ότι οι τάσεις και τα ρεύματα λειτουργίας των είναι χαμηλότερης τιμής από αυτήν των thyristors γι' αυτό συνήθως χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές χαμηλής και μέσης ισχύος.

Αν και υπάρχουν τρεις δυνατές συνδέσεις των transistors (κοινού συλλέκτη, κοινής βάσης και κοινού εκπομπού) σε εφαρμογές διακοπής, η σύνδεση κοινού εκπομπού είναι περισσότερο χρησιμοποιούμενη.



Σχήμα 1.39
Χαρακτηριστική transistor

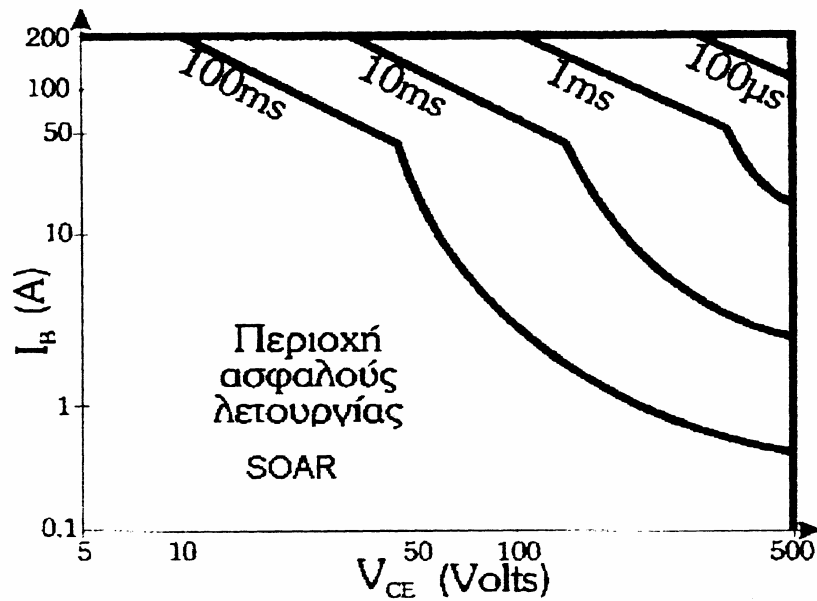
Το σχήμα 1.39(α) δείχνει την χαρακτηριστική του transistor σύμφωνα με το κύκλωμα του σχήματος 1.39(β)

Το transistor PnP παρουσιάζει όμοια χαρακτηριστικά με το transistor NpN με τις πολικότητες τάσεων και ρευμάτων κατά την αντίθετη φορά.

Στις εφαρμογές των ηλεκτρονικών ισχύος το transistor χρησιμοποιείται αποκλειστικά σαν ένας ελεγχόμενος διακόπτης με ρεύμα βάσης μηδέν (transistor off) ή με ρεύμα βάσης σε κορεσμό (transistor on) καθώς σε οποιαδήποτε άλλη κατάσταση η απώλεια ισχύος ίσως είναι απαγορευτική.

Για την ελάττωση του χρόνου turn-on και επομένως την κατανάλωση ισχύος της συσκευής χρησιμοποιείται ένα μεγάλο αρχικό ρεύμα βάσης το οποίο στη συνέχεια ελαττώνεται σε μια τιμή ικανή να κρατά το transistor σε κορεσμό και να ελαττώνει την απώλεια του κυκλώματος βάσης.

Στην αντίθετη περίπτωση (turn-off) το ρεύμα βάσης θα πρέπει να ελαττωθεί κατά το δυνατόν γρηγορότερα.

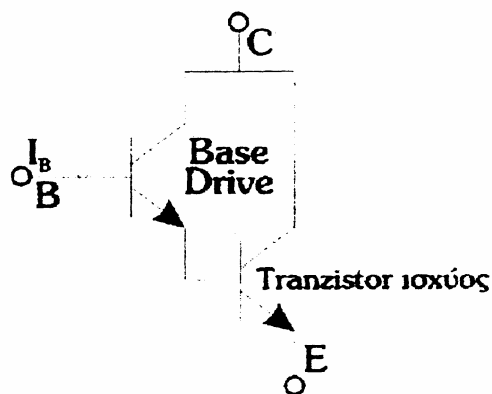


Σχήμα 1.40

Όρια ασφαλούς λειτουργίας transistor

Για την πλήρη αξιοποίηση του transistor χωρίς αυτό να υπερθερμαίνεται μπορεί να χρησιμοποιηθεί η περιοχή ασφαλούς λειτουργίας (safe operating area, SOAR) όπως αυτή φαίνεται στο σχήμα 1.40. Η περιοχή αυτή καθορίζει τα ασφαλή όρια λειτουργίας των στιγμιαίων τιμών των I_c σε όλη τη διάρκεια της μεταβολής.

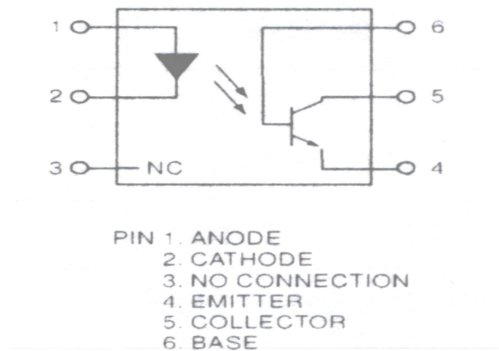
Σε ορισμένα transistor ισχύος το ρεύμα οδήγησης της βάσης προέρχεται από ένα άλλο transistor (base-drive circuit) με μια συνδεσμολογία που είναι γνωστή σαν Darlington κύκλωμα και που φαίνεται στο σχήμα 1.41 που έχει όμως το μειονέκτημα του μεγαλύτερου χρόνου διακοπής.



Σχήμα 1.41 Κύκλωμα Darlington

1.3.6 Οπτοζεύκτης (Optocoupler).

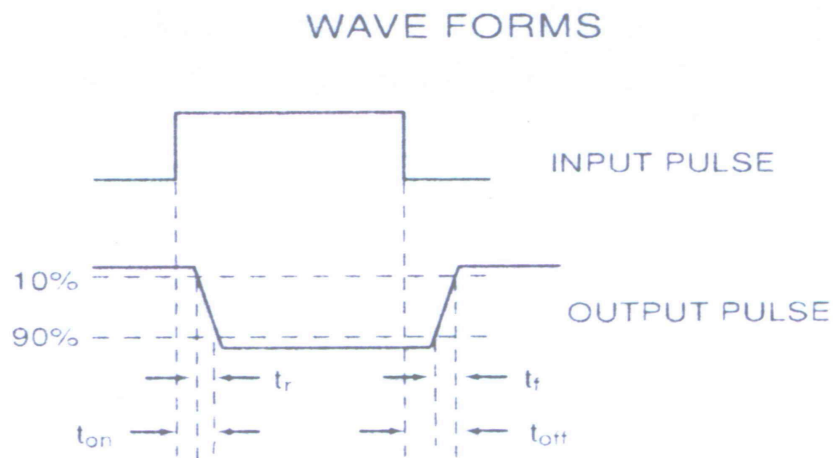
Ο οπτοζεύκτης είναι ένα ευρέως διαδεδομένο εξάρτημα, απαραίτητο στις περισσότερες κατασκευές ηλεκτρονικών ισχύος. Στο εσωτερικό του βρίσκεται μια υπέρυθρη δίοδος εκπομπής και ένα φωτοτρανζίστορ σε μια θήκη 6 ακροδεκτών όπως βλέπουμε και στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 1.42

Αρχή λειτουργίας οπτοζεύκτη.

Η λειτουργία του στηρίζεται στην «ευαισθησία» της βάσης του φωτοτρανζίστορ στις εναλλαγές της κατάστασης της υπέρυθρης δίοδου. Όταν η δίοδος εκπέμπει στην έξοδο έχουμε λογικό '0', ενώ όταν η δίοδος δεν εκπέμπει στην έξοδο έχουμε λογικό '1'. Αξίζει να σημειώσουμε πως σε σχέση με το σήμα εισόδου του οπτοζεύκτη στην έξοδο του το σήμα είναι αντιστραμμένο κατά 180°.

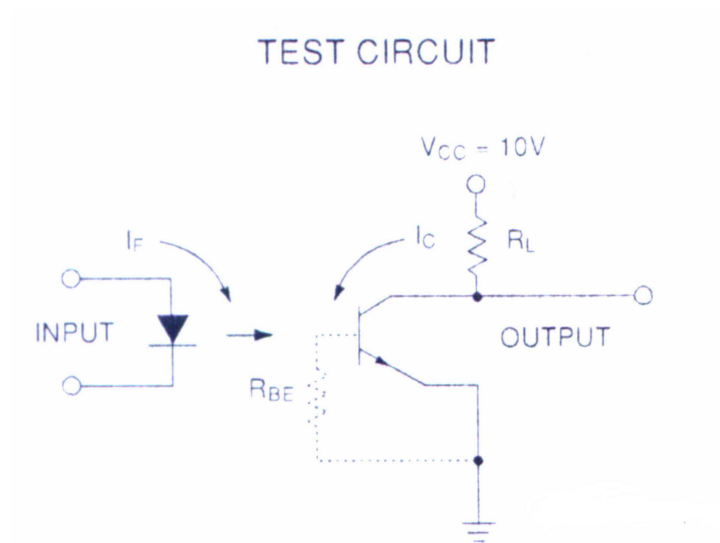


Σχήμα 1.43

Εφαρμογές.

Η χρήση των οπτοζευκτών στα κυκλώματα ηλεκτρονικών ισχύος είναι απαραίτητη γιατί μας εξασφαλίζουν την γαλβανική απομόνωση μεταξύ των κυκλωμάτων πυροδότησης και των κυκλωμάτων ισχύος που κατά συνέπεια σημαίνει και μεγαλύτερη ασφάλεια από τυχόν διαρροές ρευμάτων υψηλής τιμής.

Παρακάτω βλέπουμε ένα τυπικό κύκλωμα οπτοζεύκτη.



Σχήμα 1.44

Κεφάλαιο 2^ο

2.1 Μεταγωγή και κυκλώματα μεταγωγής.

Μεταγωγή ενός thyristor θα ονομάσουμε τη διαδικασία που πρέπει να ακολουθηθεί έτσι ώστε το thyristor από την κατάσταση αγωγής να μεταβεί στην κατάσταση αποκοπής. Στις περιπτώσεις που η χρησιμοποιούμενη τάση για τον έλεγχο ισχύος (ή άλλες εφαρμογές) είναι AC, η μεταγωγή του thyristor επιτυγχάνεται εύκολα και αυτόματα κατά το μηδενισμό του ρεύματος (τάση μεταξύ ανόδου - καθόδου ίση με το μηδέν) σύμφωνα με την ημιτονοειδή χαρακτηριστική του AC. Υπάρχουν όμως πάρα πολλές εφαρμογές όπως οι μετατροπείς DC - AC (αντιστροφείς) και οι DC - DC (choppers) που η τροφοδοσία των διατάξεων γίνεται από πηγή συνεχούς τάσης (DC).

Στις περιπτώσεις αυτές η μεταγωγή επιτυγχάνεται με κατάλληλα κυκλώματα τα οποία θα πρέπει να εξασφαλίζουν το μηδενισμό του ρεύματος και ταυτόχρονα την εφαρμογή μιας ανάστροφης τάσης για τόσο χρόνο όσο απαιτεί το thyristor για την επαναφορά του στην κατάσταση αποκοπής (blocking state). Αν τα κυκλώματα που αναφέρθηκαν δεν χρησιμοποιούν thyristors σ' άλλα transistors ή GTO thyristors αρκεί να ελαττώσουμε (ουσιαστικά στο μηδέν) το ρεύμα βάσης για τα transistors ή να εφαρμόσουμε αρνητικό παλμό στην πύλη του GTO για να μεταβούν αυτά στην κατάσταση αποκοπής.

Έχουν προταθεί πολλά κυκλώματα μεταγωγής των thyristors που το καθένα έχει και το δικό του τρόπο εφαρμογής. Στις σημειώσεις αυτές είναι δύσκολο να εξεταστούν όλα αυτά τα κυκλώματα γι' αυτό θα δοθούν ορισμένα απλά παραδείγματα για να κατανοηθεί ο τρόπος λειτουργίας τους.

Οι τεχνικές μεταγωγής, όπως έχει ήδη αναφερθεί, μπορούν να κατανεμηθούν σε δύο κατηγορίες :

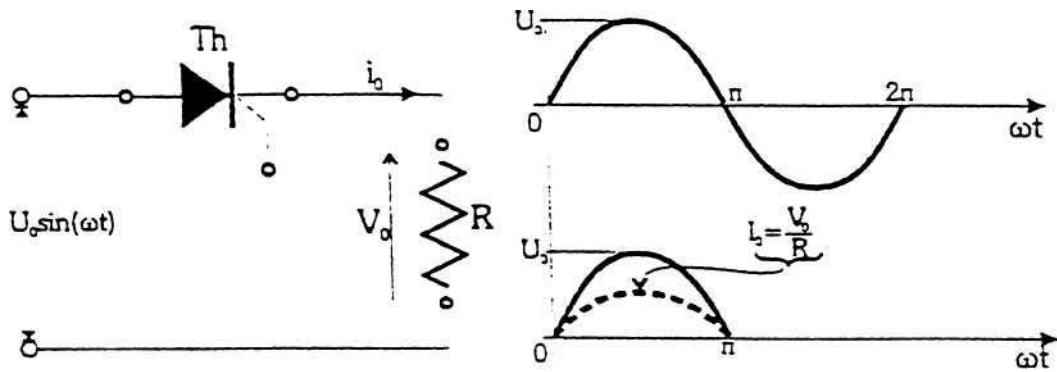
1. την φυσική μεταγωγή και
2. την δυναμική μεταγωγή (ή εξαναγκασμένη μεταγωγή).

Η Φυσική Μεταγωγή.

Όπως αναφέρθηκε στην προηγούμενη παράγραφο, αν η πηγή ή η τάση εισόδου είναι AC, το ρεύμα στο thyristor μηδενίζεται . Φυσικά στα σημεία μηδενισμού του ρεύματος μια αναστροφή τάση εμφανίζεται στα άκρα του. Έτσι, έχουμε ένα αυτόματο σβήσιμο του thyristor που οφείλεται στην συμπεριφορά της πηγής.

Αυτό είναι γνωστό σαν φυσική μεταγωγή (natural commutation) ή μεταγωγή λόγω της πηγής εισόδου (line commutation).

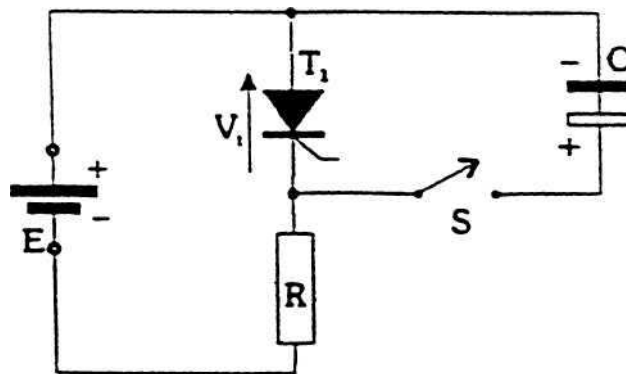
Στην πράξη το thyristor σκανδαλίζεται ταυτόχρονα σε κάθε θετική ημιπερίοδο του A.C. κύκλου έτσι ώστε να εξασφαλίζεται ένας συνεχής έλεγχος της ισχύος. Ο τύπος της μεταγωγής αυτής εφαρμόζεται στους ελεγκτές τάσης A.C., στους ελεγχόμενους ανορθωτές και στους κυκλομετατροπείς. Η διάταξη του κυκλώματος για φυσική μεταγωγή και οι κυματομορφές τάσης και ρεύματος φαίνονται στο σχήμα 2.1.

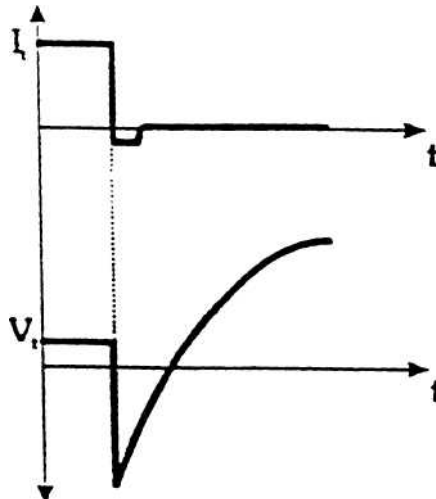


Σχήμα 2.1
Φυσική μεταγωγή thyristor

Δυναμική ή Εξαναγκασμένη Μεταγωγή.

Μεταγωγή με παράλληλη χωρητικότητα.





Σχήμα 2.2
Μεταγωγή με παράλληλη χωρητικότητα

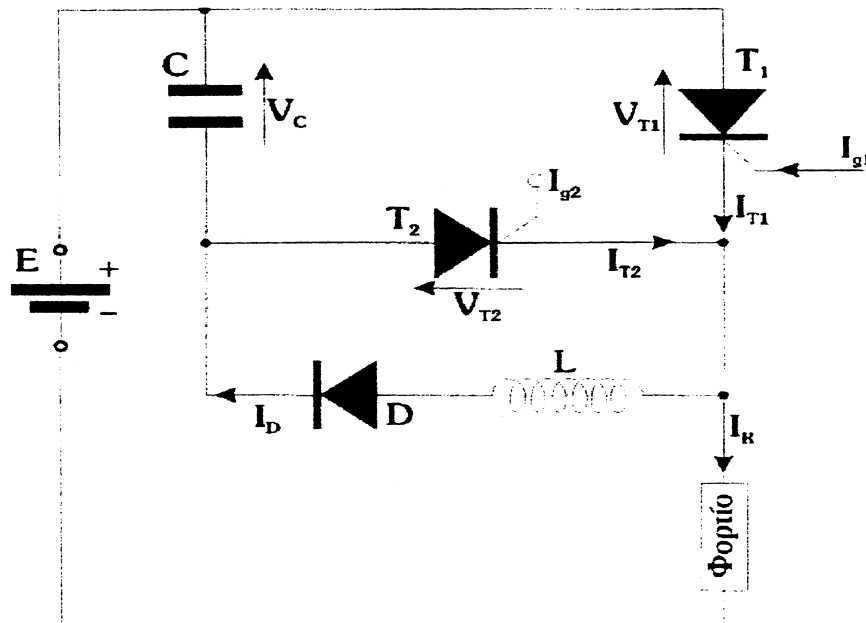
Το κύκλωμα αυτό (Σχήμα 2.2) είναι πολύ απλό και η μεταγωγή επιτυγχάνεται με την σύνδεση ενός πυκνωτή και ενός μηχανικού διακόπτη παράλληλα στο thyristor.

Όταν το thyristor βρίσκεται σε κατάσταση αγωγής το ρεύμα θα' ναι ίσο με E/R . Με το κλείσιμο του διακόπτη (s) εμφανίζεται στα άκρα του thyristor μια ανάστροφη τάση επομένως το ρεύμα στιγμιαία αναστρέφεται για να ανακτηθεί το αποθηκευμένο φορτίο.

Παρατηρώντας τις κυματομορφές τάσης και ρεύματος συμπεραίνουμε ότι η τάση V_T θα γίνει θετική με το πέρασμα του χρόνου με την προϋπόθεση ότι ο πυκνωτής θα πρέπει να' ναι αρκετά μεγάλος ώστε να διατηρεί την ανάστροφη τάση για όσο χρόνο απαιτεί η σβέση του thyristor. Μετά την ολοκλήρωση της σβέσης του thyristor ο πυκνωτής φορτίζεται στην τάση της πηγής E με ανάστροφη πολικότητα από την αρχική. Όπως εύκολα φαίνεται από τα παραπάνω το κύκλωμα αυτό δεν είναι πρακτικό (λόγω μηχανικού διακόπτη και μη επαναφοράς της αρχικής πολικότητας του πυκνωτή) γι' αυτό και δεν χρησιμοποιείται.

Μεταγωγή με κύκλωμα LC και βοηθητικού thyristor.

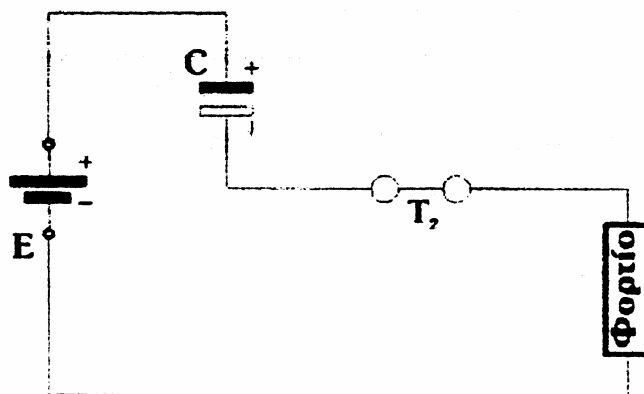
Στο κύκλωμα του Σχήμα 2.3 θεωρούμε ότι τα thyristors είναι ιδανικά και όλα τα στοιχεία χωρίς απώλειες. Το thyristor T1 είναι το κύριο ενώ το T2 είναι το βοηθητικό.



Σχήμα 2.3
Κύκλωμα μεταγωγής με LC και Βοηθητικό thyristor

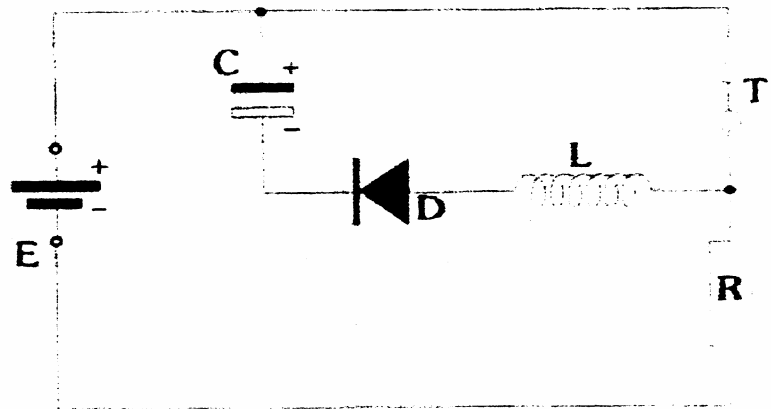
Η λειτουργία του κυκλώματος είναι η εξής:

Θεωρώντας ότι ο πυκνωτής C είναι αρχικά χωρίς φορτίο όταν η πηγή συνδεθεί δεν έχουμε ροή ρεύματος και τα δύο thyristors είναι σε αποκοπή. Με σκανδαλισμό του T_2 ο πυκνωτής φορτίζεται στην τάση της πηγής E και ένα ρεύμα αρχικής τιμής E/R που θα μειώνεται εκθετικά, θα ρέει μέσω του T_2 και του φορτίου R μέχρι που ο πυκνωτής φορτιστεί μετά από χρόνο t το ισοδύναμο κύκλωμα τότε θα 'ναι:



(Η φόρτιση του πυκνωτή σταματά μόλις το ρεύμα πέσει κάτω από την τιμή του ρεύματος αυτοσυγκράτησης του thyristor T2).

Με σκανδαλισμό τώρα του T1 συνδέεται το φορτίο στην πηγή ενώ ταυτόχρονα αρχίζει η εκφόρτιση του πυκνωτή μέσω της διόδου, της αυτεπαγωγής L και του T1, αμέσως μετά έχουμε νέα φόρτιση του πυκνωτή με αντίθετη πολικότητα λόγω της παρουσίας της αυτεπαγωγής. Το ισοδύναμο κύκλωμα τότε θα 'ναι :



Αφού ο πυκνωτής φορτιστεί με την πολικότητα αυτή διακόπτεται το κύκλωμα φόρτισης λόγω της διόδου που θα 'ναι ανάστροφα πολωμένη. Στις αρχικές συνθήκες του επανέρχεται το κύκλωμα με σκανδαλισμό του thyristor T1. Τότε το φορτίο του πυκνωτή τοποθετείται στα άκρα του T1 αποκόποντάς το.

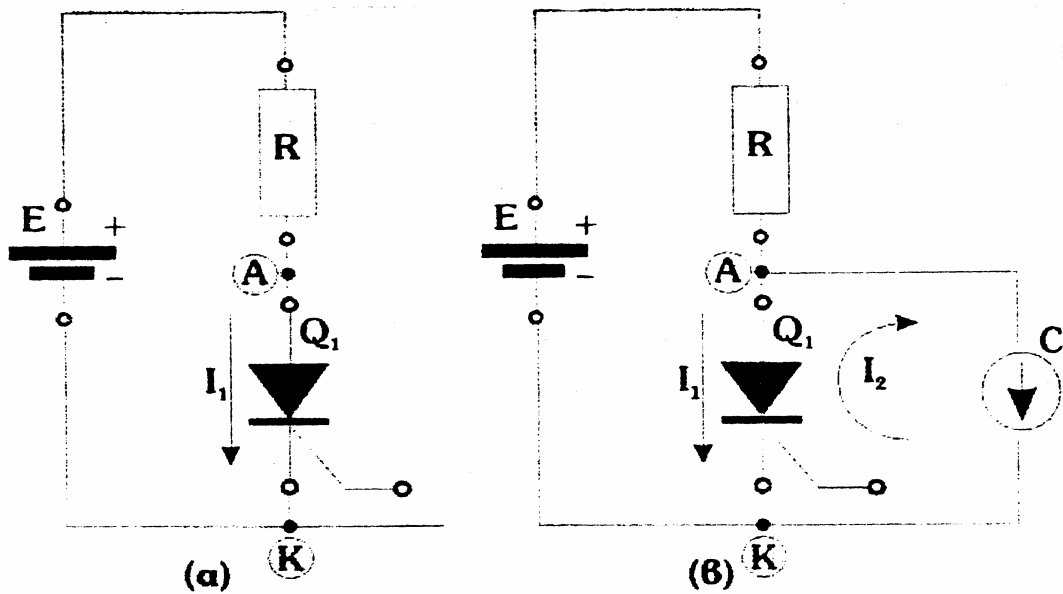
Συνοψίζοντας τις συνθήκες του αρχικού κυκλώματος (Σχ. 2.3)

1. Σκανδαλισμός του T1 συνδέει το φορτίο με την πηγή
2. Σκανδαλισμός του T2 αποσυνδέει το φορτίο από την πηγή.

Ο τρόπος μεταγωγής αυτός παρόλο το μειονέκτημα που έχει να ρέει το ρεύμα φόρτισης του πυκνωτή μέσα από το φορτίο, χρησιμοποιείται σε πάρα πολλές εφαρμογές κυκλωμάτων αντιστροφών και choppers λόγω της απλότητας του.

3. Αποκοπή με πυκνωτή C και βοηθητικό SCR.

Έστω το κύκλωμα του σχήματος (α) :



Σχήμα 2.4
 (α) SCR συνδεδεμένο με πηγή DC
 (β) Δυναμική μεταγωγή

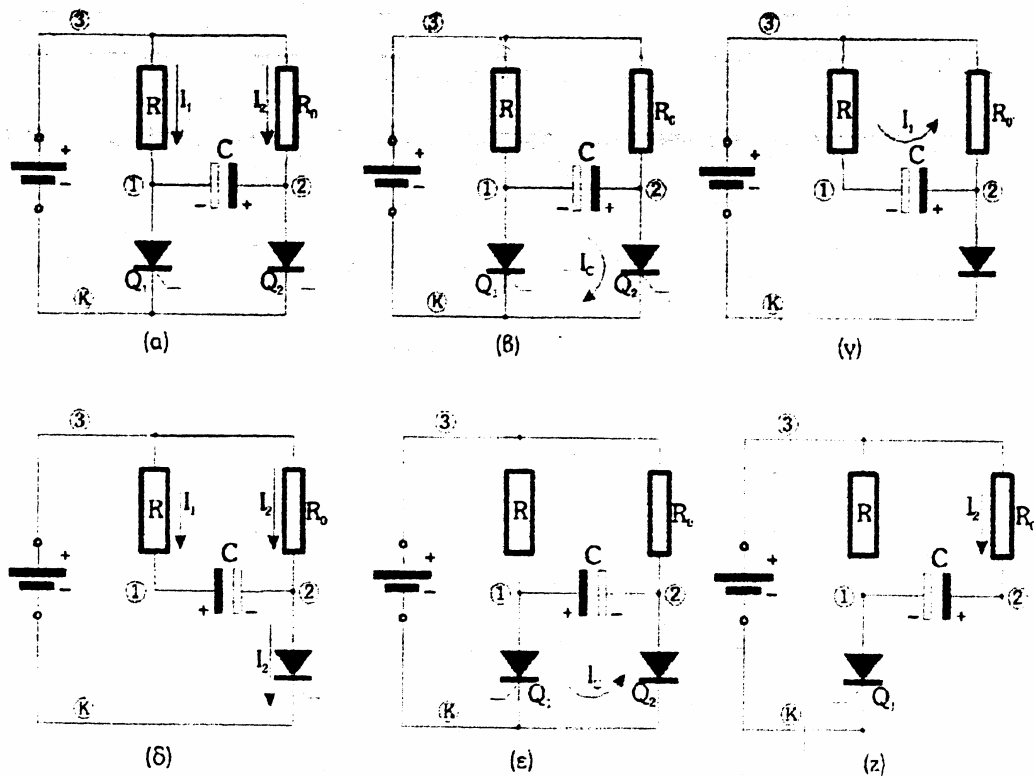
Αν εφαρμόσουμε ένα απλό θετικό παλμό στην πύλη ένα D.C. ρεύμα θα ρέει στο φορτίο συνεχώς. Η αγωγή στο SCR μπορεί να σταματήσει με ένα από τους τρεις παρακάτω τρόπους :

Με στιγμιαία ελάττωση στο μηδέν της τάσης τροφοδοσίας E.

1. Ανοίγοντας το κύκλωμα σε κάποιο σημείο του.
2. Εξαναγκάζοντας το ρεύμα ανόδου να πέσει στο μηδέν για ένα σύντομο χρονικό διάστημα.

Οι δυο πρώτοι τρόποι δεν είναι εφαρμόσιμοι, επομένως ας δούμε τον τρίτο τρόπο.

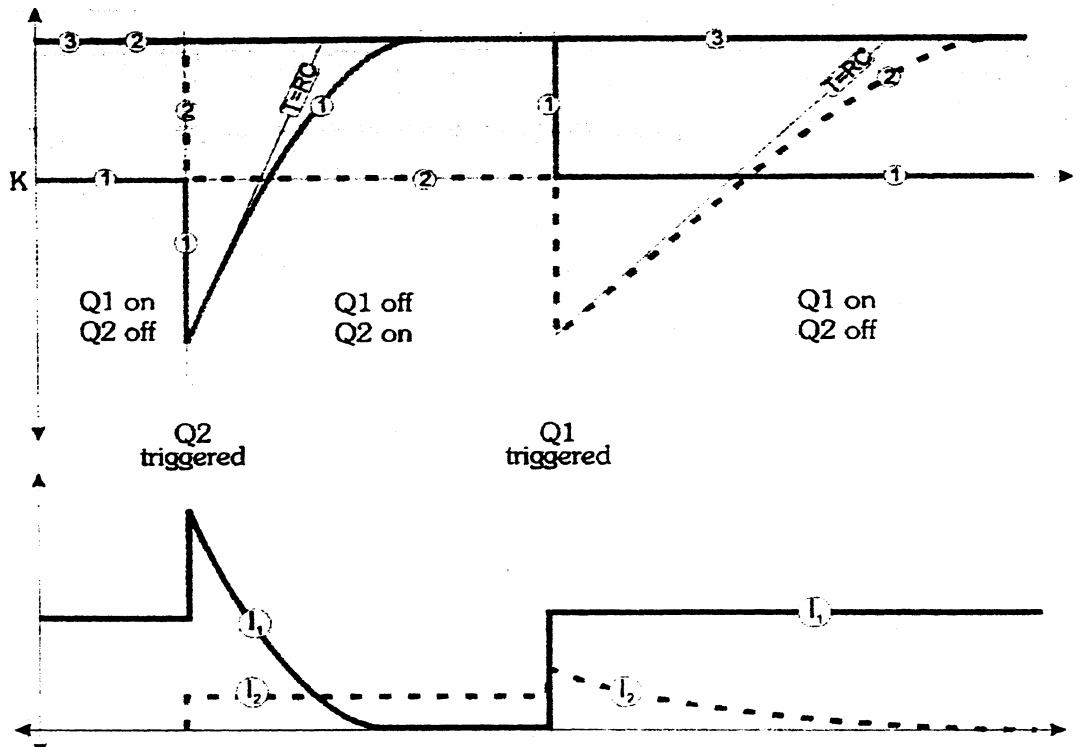
Όπως φαίνεται στο κύκλωμα (β) μία πηγή μεταβλητού ρεύματος c συνδέεται παράλληλα με το θυρίστορ Q1. Καθώς αυξάνουμε τώρα το ρεύμα της πηγής αυτής I2 βαθμιαία το ολικό ρεύμα ($I_1 - I_2$) που ρέει στο θυρίστορ ελαττώνεται. Ωστόσο για όσο χρόνο το ρεύμα αυτό δεν είναι μηδέν το θυρίστορ συνεχίζει να άγει με αποτέλεσμα το ρεύμα του φορτίου να' ναι το ίδιο. Αν τώρα αυξήσουμε το I2 να γίνει ίσο με το I1 το θυρίστορ θα σταματήσει να άγει. Στην πράξη το ρεύμα I2 είναι ένας βραχύς παλμός ρεύματος που συνήθως εφαρμόζεται σκανδαλίζοντας ένα δεύτερο θυρίστορ. Ένα τέτοιο κύκλωμα είναι το παρακάτω και η λειτουργία του είναι η εξής :



Σχήμα 2.5
Λειτουργία κυκλώματος δυναμικής (εξαναγκασμένης) μεταγωγής

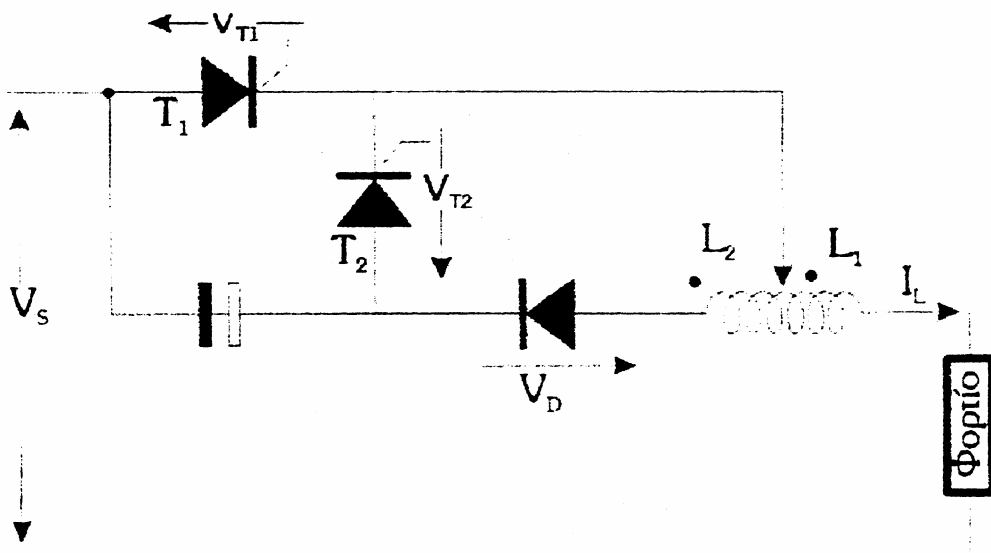
Ας υποθέσουμε ότι το Q1 βρίσκεται σε αγωγή & το Q2 είναι αποκομμένο. Ακόμα ότι το κύκλωμα βρίσκεται αρκετή ώρα σε λειτουργία έτσι ώστε ρεύματα και τάσεις έχουν φθάσει τις τιμές σταθερής κατάστασης της. Ο πυκνωτής είναι φορτισμένος στην τάση E με πολικότητα που φαίνεται στο (α). Αμελώντας την πτώση τάσης στο Q1 θα ισχύει : $I_1 = E/R$ και $I_2 = 0$. Για να σταματήσει η αγωγή στην R σκανδαλίζουμε το Q2(β). Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την εκφόρτιση του πυκνωτή. Το ρεύμα εκφόρτισης I_c εξαναγκάζει το Q1 σε αποκοπή και το κύκλωμα παίρνει τη μορφή του σχήματος (γ). Το επίπεδο του σημείου 1 πέφτει στα E Volt κάτω από το επίπεδο του σημείου K με αποτέλεσμα το ρεύμα I_1 να φθάσει μία στιγμιαία τιμή $I_1 = 2E/R$. Το ρεύμα I_1 θα φορτίσει τώρα γρήγορα τον πυκνωτή με αντίθετη πολικότητα και έτσι το σημείο 1 θα φθάσει τελικά το επίπεδο του σημείου 3.

Το κύκλωμα τώρα έχει την μορφή του σχήματος (δ) αλλά με $I_1 = 0$. Το ρεύμα I_2 μπορεί να περιοριστεί σε τιμή μικρότερη από αυτή του I_1 χρησιμοποιώντας μία σχετικά μεγάλη αντίσταση R_0 . Για την τροφοδότηση πάλι του φορτίου πυροδοτούμε πάλι το Q1, και έχουμε τη μορφή του σχήματος (ε). Το ρεύμα εκφόρτισης I_c τώρα προκαλεί το 'σβήσιμο' του Q2 και ο πυκνωτής φορτίζεται με αντίθετη πολικότητα (2), οπότε μπορεί να επαναληφθεί πάλι ο παραπάνω κύκλος.



Σχήμα 2.6
Συμπεριφορά τάσεων & ρευμάτων

Κύκλωμα αποκοπής Jones.

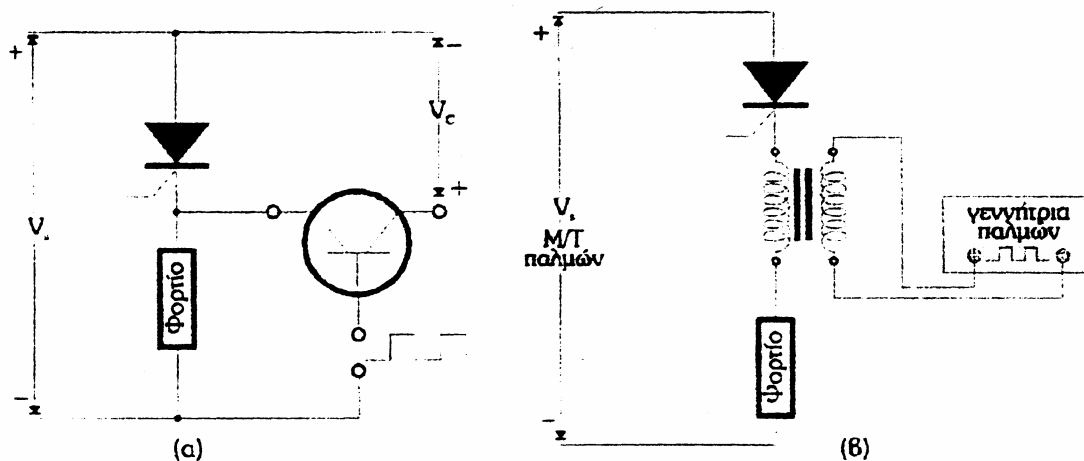


Σχήμα 2.7
Κύκλωμα Jones

Το κύκλωμα Jones χρησιμοποιεί επίσης ένα Βοηθητικό thyristor αλλά έχει το πλεονέκτημα, έναντι του προηγούμενου κυκλώματος, της σίγουρης λειτουργίας αρχίζοντας την σειρά μετατροπής από την αρχική έναυση (turn-on). Ο κύκλος λειτουργίας του κυκλώματος είναι ο εξής:

Με εκφορτισμένο αρχικά τον πυκνωτή C 'πυροδοτείται' το thyristor T1 το οποίο γίνεται αγωγίμο και μια τάση προκαλείται στην αυτεπαγωγή L₂ η οποία φορτίζει τον πυκνωτή μέσω διόδου με την πολικότητα που φαίνεται στο σχήμα. Έχουμε δηλαδή φόρτιση του πυκνωτή και ροή του ρεύματος μέσω του φορτίου. Για την αποκοπή του ρεύματος στο φορτίο αρκεί να 'πυροδοτηθεί' το T2 οπότε η τάση του πυκνωτή θα εφαρμοσθεί στα άκρα του T1 και θα το αποκόψει (σβέση).

Κυκλώματα αποκοπής με εξωτερική πηγή τάσης.



Σχήμα 2.8

Αποκοπή με εξωτερική πηγή τάσης

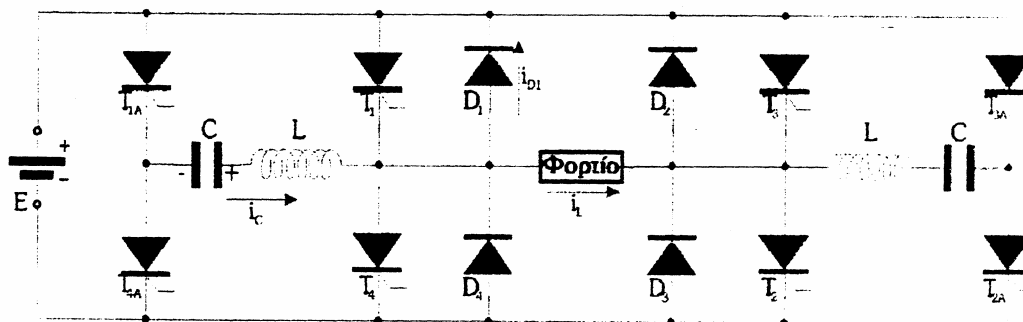
(α) Αποκοπή με transistor

(β) Αποκοπή με WT παλμών

Στο σχήμα 2.8(α) ένας διακόπτης transistor χρησιμοποιείται για την σύνδεση της τάσης της εσωτερικής πηγής στα άκρα του αγωγίμου thyristor όταν θέλουμε την αποκοπή του, ενώ στο σχήμα 2.8(β) χρησιμοποιείται ένας μετασχηματιστής παλμών για να εισάγει στο κύκλωμα μια ανάστροφη τάση με πλάτος μεγαλύτερο του 1V που είναι συνήθως η πτώση τάσης σε κάθε thyristor που βρίσκεται σε αγωγή.

Κυκλώματα γεφυρών.

Περισσότερο σύνθετα κυκλώματα με μεγαλύτερες δυνατότητες είναι τα κυκλώματα μεταγωγής με thyristors συνδεδεμένα υπό μορφή γέφυρας. Μια τέτοια γέφυρα που είναι περισσότερο γνωστή σαν γέφυρα Mc Murray φαίνεται στο παρακάτω σχήμα 2.9.



Σχήμα 2.9
Γέφυρα μεταγωγής Mc Murray

Στο κύκλωμα αυτό το φορτίο μπορεί να συνδεθεί στην πηγή D.C. με οποιαδήποτε πολικότητα ανάλογα αν άγουν τα thyristors T1, T2 ή T3, T4. Ακόμα το κύκλωμα χρησιμοποιεί ένα συνδυασμό χωρητικότητας και αυτεπαγωγής σε σειρά μαζί με τα βοηθητικά thyristors T_{1A} και T_{4A} για τη μεταγωγή του ρεύματος. Ας θεωρήσουμε τις συνθήκες του σχήματος 2.9 όπου το T1 βρίσκεται σε αγωγή και ο πυκνωτής C είναι φορτισμένος με την πολικότητα που φαίνεται στο σχήμα.

Σκανδαλίζοντας το T_{2A} στο χρόνο το ο πυκνωτής θ' αρχίσει να εκφορτίζεται μέσω της αυτεπαγωγής L παράγοντας ένα ρεύμα ταλάντωσης του οποίου το μέγεθος είναι μεγαλύτερο από το ρεύμα φορτίου (με κατάλληλο υπολογισμό). Το ρεύμα αυτό ρέει μέσω του T1 στο μηδέν με αποτέλεσμα την αποκοπή του T1. Ταυτόχρονα η διόδος D1 αντιστρέφει το πλεονάζον ρεύμα ($i_D = i_C - I_L$) οπότε η τάση ορθής φοράς της διόδου εμφανίζεται στα άκρα του T1 σαν τάση ανάστροφης φοράς κατά την περίοδο από το χρόνο t1 στο χρόνο t2 ολοκληρώνοντας έτσι τη σβέση του T1.

Καθώς τώρα ο πυκνωτής εκφορτίζεται και το ρεύμα του πέφτει κάτω από το ρεύμα του φορτίου η διόδος D1 σταματά να άγει στο χρόνο t2. Το ρεύμα φορτίου συνεχίζει να ρέει μέσω του βοηθητικού thyristor T_{1A} φορτίζοντας τώρα τον πυκνωτή με αντίθετη πολικότητα (από αυτήν που φαίνεται στο σχήμα 2.9) στην τάση της πηγής και η διόδος D4 αρχίζει τώρα να άγει. Η D4 συνεχίζει να παίρνει ένα μεγαλύτερο μέρος του ρεύματος φορτίου καθώς η ενέργεια στο μαγνητικό πεδίο της αυτεπαγωγής L μεταφέρεται στον πυκνωτή ελαττώνοντας έτσι το ρεύμα στο T_{1A} στο μηδέν με αποτέλεσμα την αποκοπή του και επομένως την ολοκλήρωση της μεταγωγής.

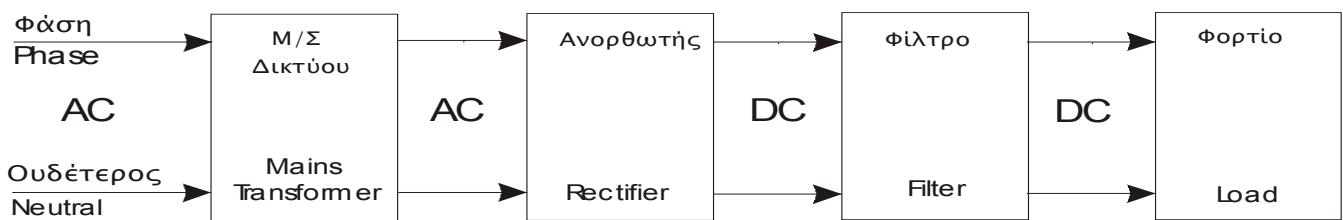
Ο πυκνωτής C είναι τώρα φορτισμένος και έτοιμος για τον επόμενο κύκλο μεταγωγής με κύριο thyristor το T_4 και βοηθητικό το T_{4A} .

2.2 Κυκλώματα ηλεκτρονικών ισχύος.

2.2.1 Εισαγωγή στους μη ελεγχόμενους ανορθωτές.

Σαν μη ελεγχόμενους ανορθωτές ονομάζουμε τις κυκλωματικές εκείνες διατάξεις τις οποίες μετατρέπουν μία AC ισχύ σε DC, χωρίς την δυνατότητα ελέγχου της ισχύος εξόδου αλλά η ισχύς στην έξοδο των διατάξεων αυτών καθορίζεται καθαρά και μόνο από τα χαρακτηριστικά των στοιχείων που τις αποτελούν.

Στις διατάξεις αυτές συναντάμε σαν κύριο στοιχείο την γνωστή σε όλους δίοδο ή συνδυασμό διόδων (Ανορθωτής) ανάλογα με την περίπτωση και κάποια βοηθητικά στοιχεία όπως πυκνωτές, πηνία και ωμικούς αντιστάτες τα οποία χρησιμοποιούνται κυρίως στο φιλτράρισμα της DC τάσεως εξόδου και φυσικά την βελτίωση των χαρακτηριστικών της τάσεως αυτής όπως είναι η μείωση της AC κυμάτωσης (Vripple) και αύξηση της DC (Vaverage) αυξάνοντας έτσι τον βαθμό απόδοσης ισχύος των ανορθωτικών αυτών διατάξεων όπως θα δούμε και παρακάτω.



Σχήμα 2.10

Στο σχήμα 2.10 βλέπουμε σε μπλοκ διάγραμμα τις βαθμίδες ενός τροφοδοτικού για την μετατροπή της AC τάσης του δικτύου σε DC τάση στο φορτίο. Ο ρόλος κάθε βαθμίδας αναλύεται παρακάτω.

1. **Μ/Σ Δικτύου** Χρησιμοποιείται για να απομονώσει την τάση του δικτύου από τις επόμενες βαθμίδες και για να μετατρέψει την τάση του δικτύου στην επιθυμητή τιμή. Εδώ θα πρέπει να τονίσουμε ότι σε κυκλώματα ισχύος με την χρήση τεχνολογίας Switching όπως τα τροφοδοτικά σε ηλεκτρονικούς υπολογιστές δεν συναντάμε μετασχηματιστή απομόνωσης αλλά η τάση του δικτύου ανορθώνεται φιλτράρεται και μετά τεμαχίζεται με την χρήση κάποιου Chopper (τεμαχιστής) ώστε να μπορεί να μετασχηματιστεί στην επιθυμητή τιμή.
2. **Ανορθωτής** Χρησιμοποιείται για να μετατρέψει την AC ισχύ του δευτερεύοντος του μετασχηματιστή σε DC. Εδώ συναντάμε τρεις διαφορετικές διατάξεις ανορθώσεως, απλή ανόρθωση, διπλή ανόρθωση και ανόρθωση με την χρήση γέφυρας διόδων.

3. **Φίλτρο** Ρόλος του φίλτρου εξομάλυνσης είναι να μετατρέψει την ανορθωμένη κυματομορφή σε όσο το δυνατόν μεγαλύτερη DC μειώνοντας στο ελάχιστο την οποιαδήποτε μεταβαλλόμενη συνιστώσα της τάσεως εξόδου του ανορθωτή.
4. **Φορτίο** Σαν φορτίο στα διάφορα ανορθωτικά κυκλώματα συναντάμε από απλούς ωμικούς αντιστάτες έως και ενεργά φορτία όπως συστοιχίες μπαταριών και γενικά οποιαδήποτε συσκευή ή διάταξη η οποία απαιτεί DC ισχύ.

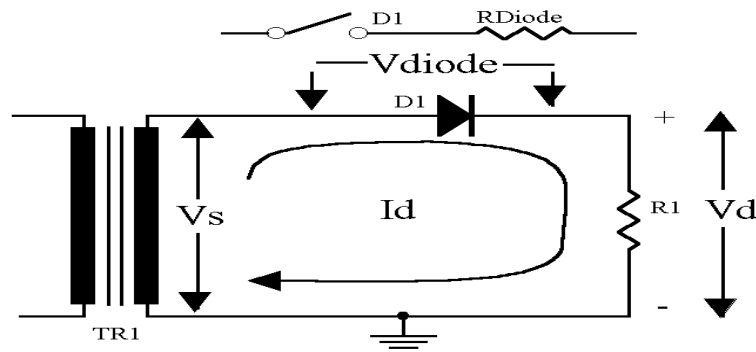
Απλή ανόρθωση μονοφασικός ανορθωτής μισού κύματος.

Παρακάτω θα δούμε τον τρόπο λειτουργίας ενός απλού κυκλώματος ημιανόρθωσης με την χρήση των παρακάτω φορτίων :

- 1) Ωμικό
- 2) Επαγωγικό-Ωμικό
- 3) Χωρητικό-Ωμικό
- 4) Ενεργό

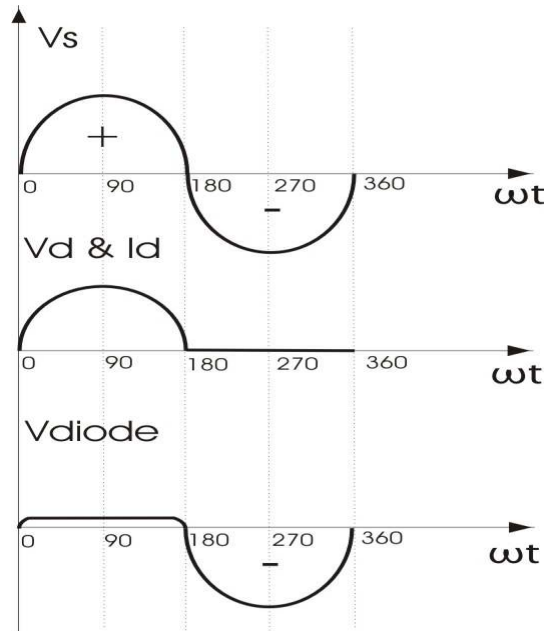
1. Ωμικό φορτίο.

Στο σχήμα 2.11 βλέπουμε την συνδεσμολογία ενός ανορθωτή με φορτίο μια απλή αντίσταση.



Σχήμα 2.11

Κατά την θετική ημιπερίοδο της V_s (0° - 180°) η D1 πολώνεται ορθά και συμπεριφέρεται σαν ένας κλειστός διακόπτης με μια μικρή πτώση τάσης στα άκρα του που εξαρτάται αποκλειστικά και μόνο από τον τύπο της διόδου D1, με αποτέλεσμα να διαρρέεται από το ρεύμα I_d το οποίο δημιουργεί ένα ανάπτυγμα τάσης στα άκρα της R1 την V_d όπως βλέπουμε και στο σχήμα 2.12.

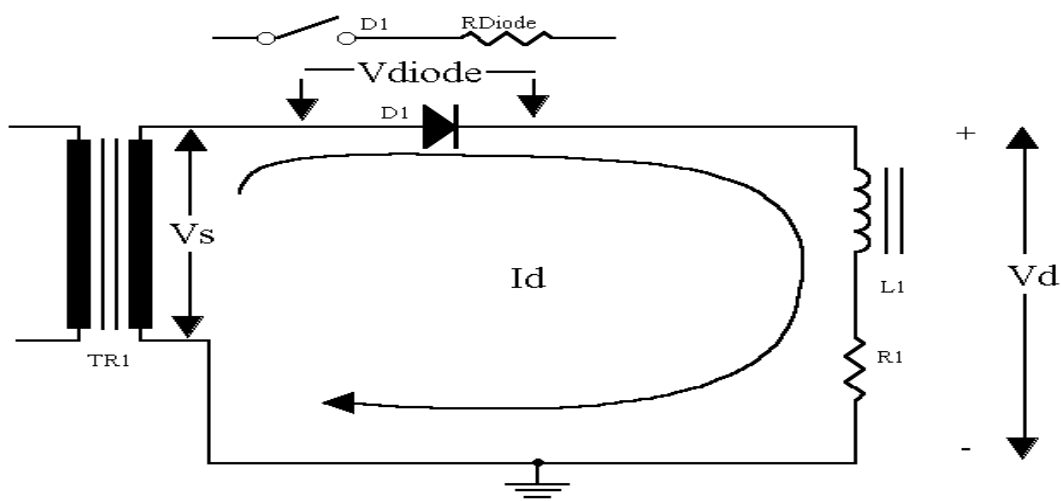


Σχήμα 2.12

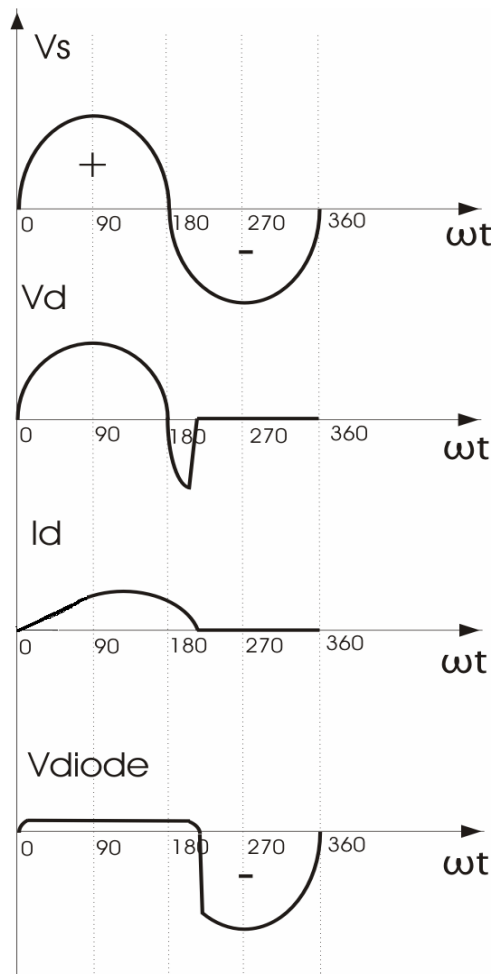
Κατά την αρνητική ημιπερίοδο της V_s (180° - 360°) η $D1$ είναι ανάστροφα πολωμένη και συμπεριφέρεται σαν ένας ανοιχτός διακόπτης. Έτσι το φορτίο δεν διαρρέεται από ρεύμα και η τάση $V_d = 0$. Αντίστοιχα στα άκρα της διόδου $D1$ έχουμε την ανάστροφη τάση η οποία είναι $V_{rv} = -V_{max}$.

2. Επαγωγικό – ωμικό.

Στο σχήμα 2.13 βλέπουμε την συνδεσμολογία ενός ανορθωτή με φορτίο ένα πηνίο και έναν ωμικό αντιστάτη.



Σχήμα 2.13



Σχήμα 2.14

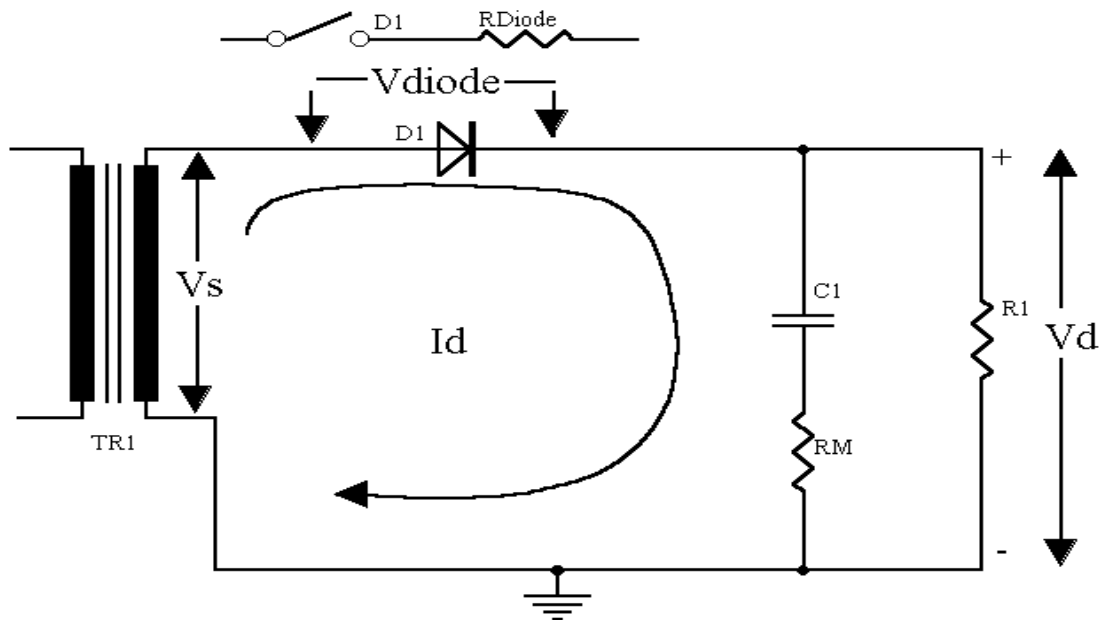
Κατά την θετική ημιπερίοδο της V_s (0° - 180°) η διάδος είναι πολωμένη ορθά και συμπεριφέρεται σαν ένας κλειστός δια-κόπτης με μια μικρή πτώση τάσεως στα άκρα της, το ρεύμα στο φορτίο I_d καθυστερεί για κάποιες μοίρες λόγω του πηνίου L_1 και της αντιστάσεως R_1 .

Κατά την αρνητική ημιπερίοδο της V_s (180° - 360°) η διάδος D_1 είναι πολωμένη ανάστροφα, στην ουσία λόγω της αποθηκευμένης ενέργειας στο πηνίο το πηνίο προσπαθεί να διατηρήσει την ροή του ρεύματος I_d αλλάζοντας την πολικότητα της τάσεως στα άκρα του, συμπεριφέρεται σαν γεννήτρια και αναγκάζει την διάοδο D_1 να παραμείνει αγώγιμη για μερικές μοίρες ακόμα, δημιουργώντας έτσι την αρνητική αιχμή τάσης στο φορτίο.

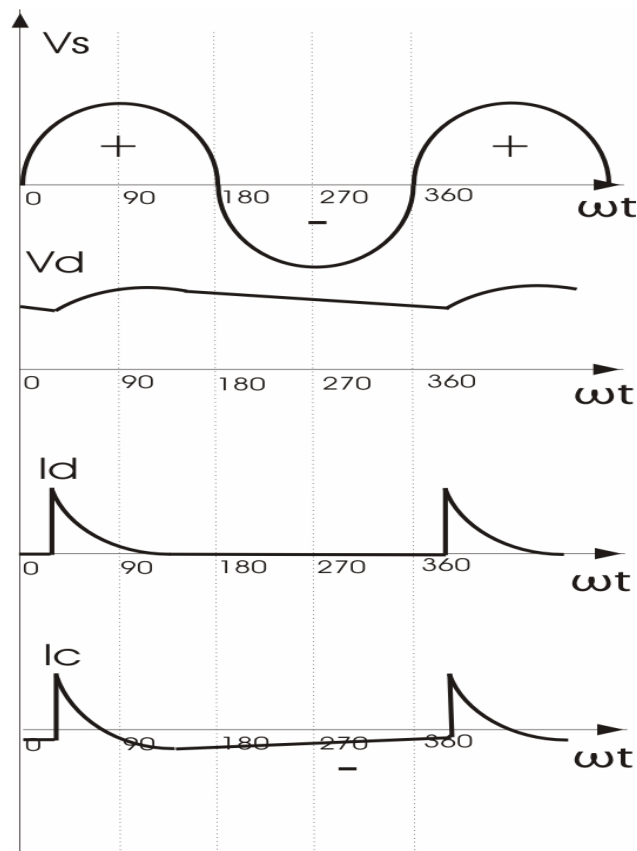
Το φαινόμενο αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την μείωση της μέσης τιμής της τάσεως εξόδου V_{an} και για την αντιμετώπιση του χρησιμοποιούμε κάποια δικτύωματα αποκατάστασης (fast recovery networks) παράλληλα με το πηνίο όπως ένα δίκτυωμα RC σειράς ή μία γρήγορη διάοδο με μικρή τάση γονάτου $V_f \leq 0,1V$ όπως διάοδια Shcottky-Barrier ή ακόμα και συνδυασμό των τριών RCD για μεγάλες ανάστροφες τάσεις.

3. Χωρητικό – ωμικό.

Στο σχήμα 2.15 βλέπουμε την συνδεσμολογία ενός ανορθωτή με φορτίο ένα πυκνωτή και έναν ωμικό αντιστάτη, η αντίσταση R_M είναι βοηθητική για την μετατροπή του ρεύματος του πυκνωτή σε τάση με πολύ μικρή τιμή .



Σχήμα 2.15



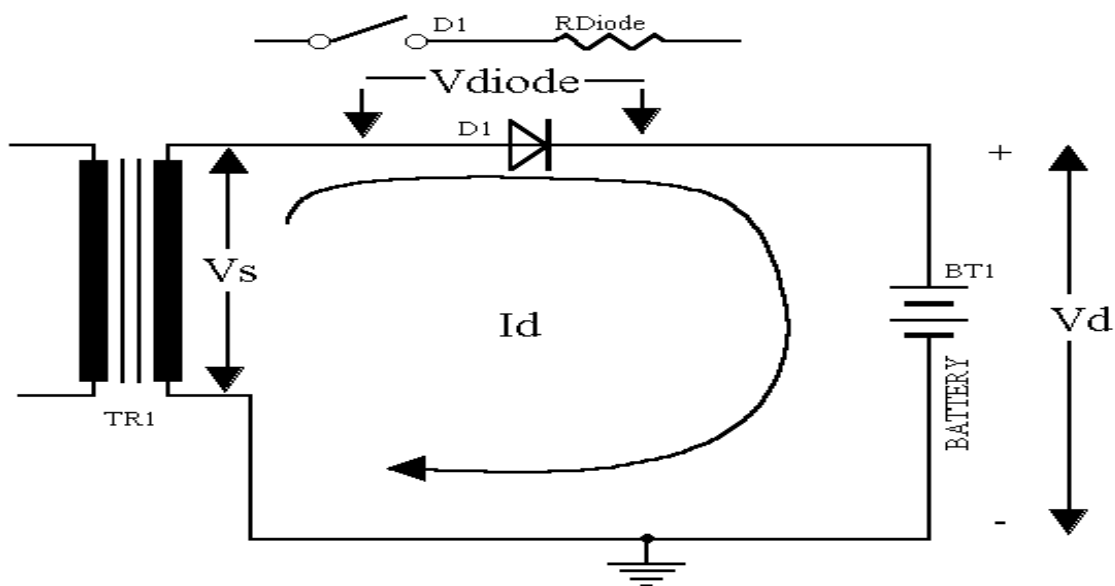
Σχήμα 2.16

Κατά την θετική ημιπερίοδο της V_s (0° - 180°) η δίοδος D1 άγει για ένα μικρό χρονικό διάστημα και φορτίζει τον πυκνωτή C1 όπως φαίνεται και από την κυματομορφή του I_d του σχήματος 2.16. Όταν η τάση του πυκνωτή φτάσει την μέγιστη τιμή της τότε η δίοδος παύει να είναι αγωγίμη αφού η τάση στο φορτίο V_d είναι μεγαλύτερη από την V_s (περίπου στις 90°) και η δίοδος D1 ανάστροφα πολωμένη.

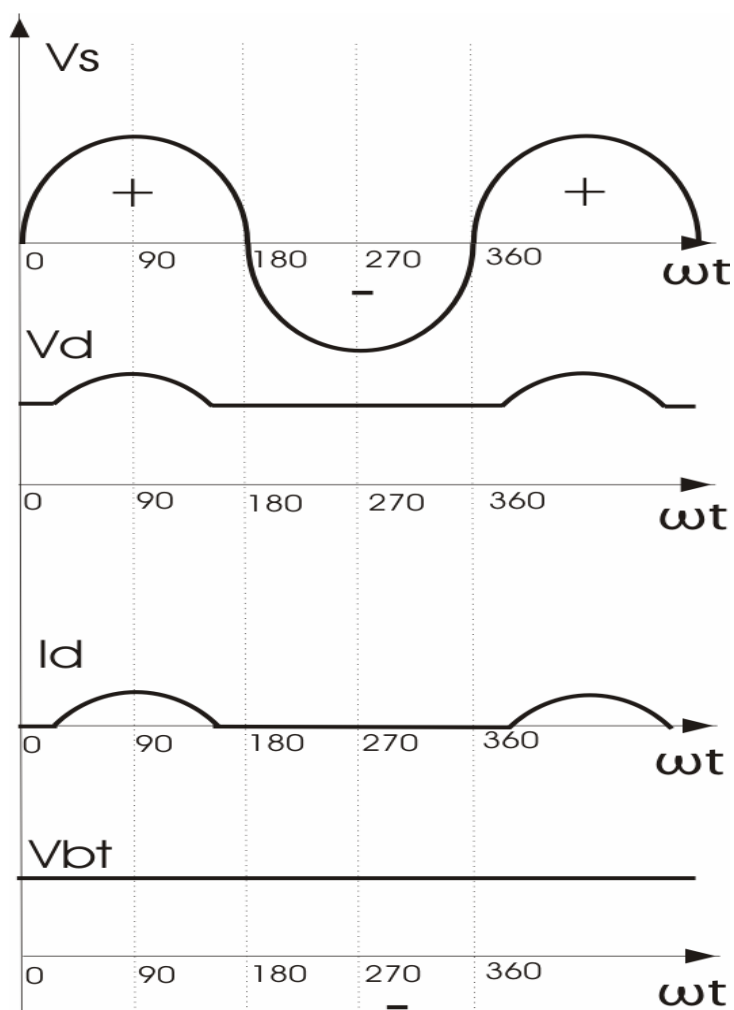
Από τις 90° έως και τις 360° η δίοδος βρίσκεται στην αποκοπή και το ρεύμα I_d είναι μηδέν σε αντίθεση με το ρεύμα εκφόρτισης του πυκνωτή I_c το οποίο διαρρέει την R1 και εκφορτίζει τον πυκνωτή C1 με σταθερά χρόνου $T=R_1C_1$ με $R_M \ll R_1$. Έτσι η τιμή της V_d μειώνεται σταδιακά μέχρι και την επόμενη θετική ημιπερίοδο που θα φορτιστεί και πάλι ο πυκνωτής C1.

4. Ενεργό φορτίο.

Στο σχήμα 2.17 βλέπουμε την συνδεσμολογία ενός ανορθωτή με φορτίο έναν συσσωρευτή (Μπαταρία).



Σχήμα 2.17



Σχήμα 2.18

Η λειτουργία της διάταξης στηρίζεται στην συνθήκη $0.45V_{S_{rms}} - V_{diode} > V_{bt}$, αυτή η συνθήκη εξασφαλίζει την ροή ρεύματος στην παραπάνω διάταξη.

Κατά την θετική ημιπερίοδο της V_s και ενώ η V_s είναι μεγαλύτερη της V_{bt} η D1 γίνεται αγώγιμη και ένα ρεύμα I_d αναπτύσσει μια τάση V_d στα άκρα του συσσωρευτή. Το peak της τάσης που παρατηρούμε στην κυματομορφή της V_d του σχήματος 2.9 οφείλεται στην εν σειρά εσωτερική αντίσταση της μπαταρίας .

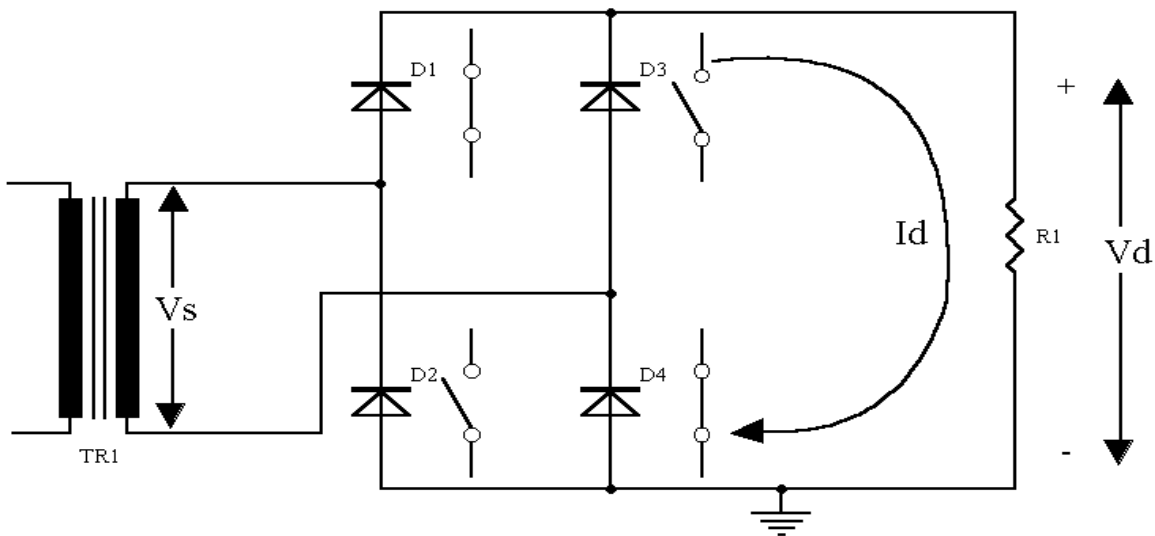
Κατά την αρνητική ημιπερίοδο της V_s η D1 είναι ανάστροφα πολωμένη και δεν διαρρέετε από ρεύμα, η τάση στα άκρα του φορτίου είναι στην ουσία η τάση της ηλεκτρεγερτικής δύναμης του συσσωρευτή και ισχύει $V_{bt} = V_d$.

Είναι φανερό πως το ρεύμα φόρτισης της μπαταρίας I_d είναι ανάλογο της DC $V_{d_{average}}$ τάσης τροφοδοσίας του συσσωρευτή.

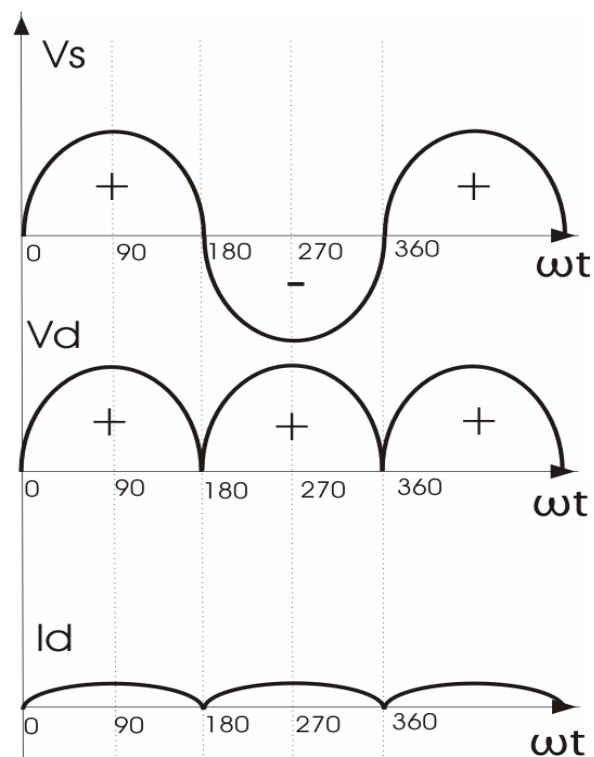
Μονοφασική ανόρθωση γέφυρας διόδων.

Πρόκειται για μονοφασική διάταξη ανόρθωσης η οποία έχει πολύ μεγαλύτερο συντελεστή αποδόσεως σε σχέση με την απλή ανόρθωση αφού η μέση τιμή της τάσεως στο φορτίο (ωμικός αντιστάτης) με την χρήση γέφυρας είναι διπλάσια .

Παρακάτω θα δούμε την λειτουργία μιας τέτοιας διάταξης με φορτίο έναν απλό ωμικό αντιστάτη. Στην περίπτωση χρήσης επαγωγικών χωρητικών ή και ενεργών φορτίων δουλεύουμε με τον ίδιο τρόπο όπως και στην περίπτωση της απλής ανόρθωσης.



Σχήμα 2.19



Σχήμα 2.20

Κατά την θετική ημιπερίοδο της V_s (0° - 180°) θεωρούμε θετικό το άνω άκρο του μετασχηματιστή και αρνητικό το κάτω, αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την ορθή πόλωση των διόδων D1 και D4 και την ροή ρεύματος στο φορτίο δημιουργώντας έτσι ένα ανάπτυγμα τάσης (V_d) όπως βλέπουμε και στο σχήμα 2.20 .

Οι δίοδοι D1 και D4 συμπεριφέρονται σαν κλειστοί διακόπτες με μια μικρή πτώση τάσης στα άκρα τους όπως βλέπουμε και στο σχήμα 2.19, σε αντίθεση με της διόδους D2, D3 που είναι ανάστροφα πολωμένες .

Κατά την αρνητική ημιπερίοδο της V_s (180° - 360°) έχουμε αναστροφή της πολικότητας στο δευτερεύον του μετασχηματιστή την αποκοπή των διόδων D1,D4 και την ορθή πόλωση των διόδων D2, D3. Έτσι ένα ρεύμα I_d διαρρέει το φορτίο και αναπτύσσει μία DC τάση με την ίδια πολικότητα όπως και κατά την θετική ημιπερίοδο της V_s . Τέλος με τον τρόπο αυτό πετυχαίνουμε διπλασιασμό της DC τάσης στο φορτίο αφού εκμεταλλευόμαστε και τις δύο ημιπεριόδους τις V_s .

$$V_{d_{aver}} = 0.9V_{s_{rms}}$$

Διφασική ανόρθωση και πολυφασικοί μη ελεγχόμενοι ανορθωτές.

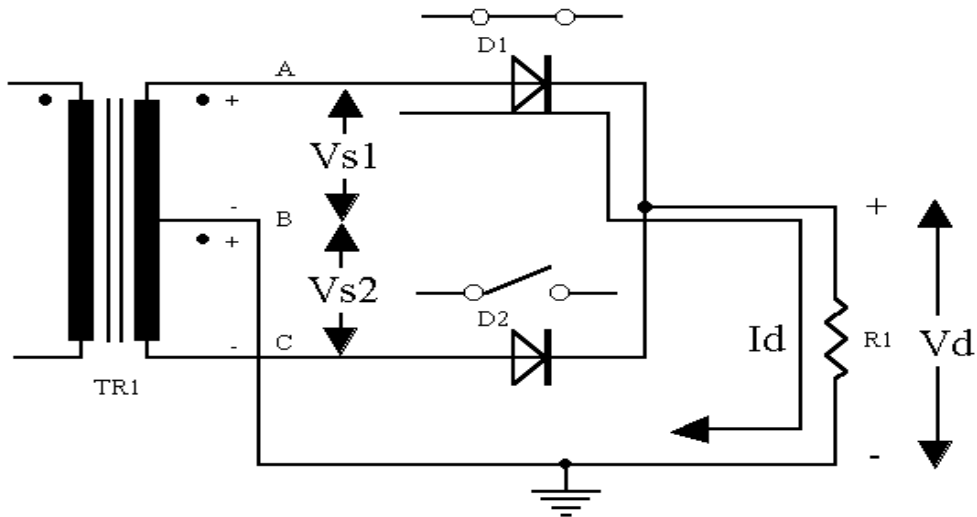
Στην κατηγορία αυτή των ανορθωτών ανήκουν οι εξής διατάξεις :

1. Διφασική ανόρθωση.
2. Τριφασικός ανορθωτής μεσαίου σημείου.
3. Τριφασικός ανορθωτής γέφυρας διόδων.

Για την καλύτερη κατανόηση των διατάξεων αυτών μεγάλο βάρος πρέπει να δίνουμε στην διευκρίνιση του σημείου αναφοράς (“0V”) επάνω στην κυκλωματική διάταξη και να μας παρέχεται κάποιο γράφημα με την πραγματική αναπαράσταση των διαφόρων φασικών τάσεων $L_1, L_2 \dots L_n$.

Διφασική ανόρθωση.

Στο σχήμα 2.21 βλέπουμε την κυκλωματική διάταξη της διφασικής ανόρθωσης.

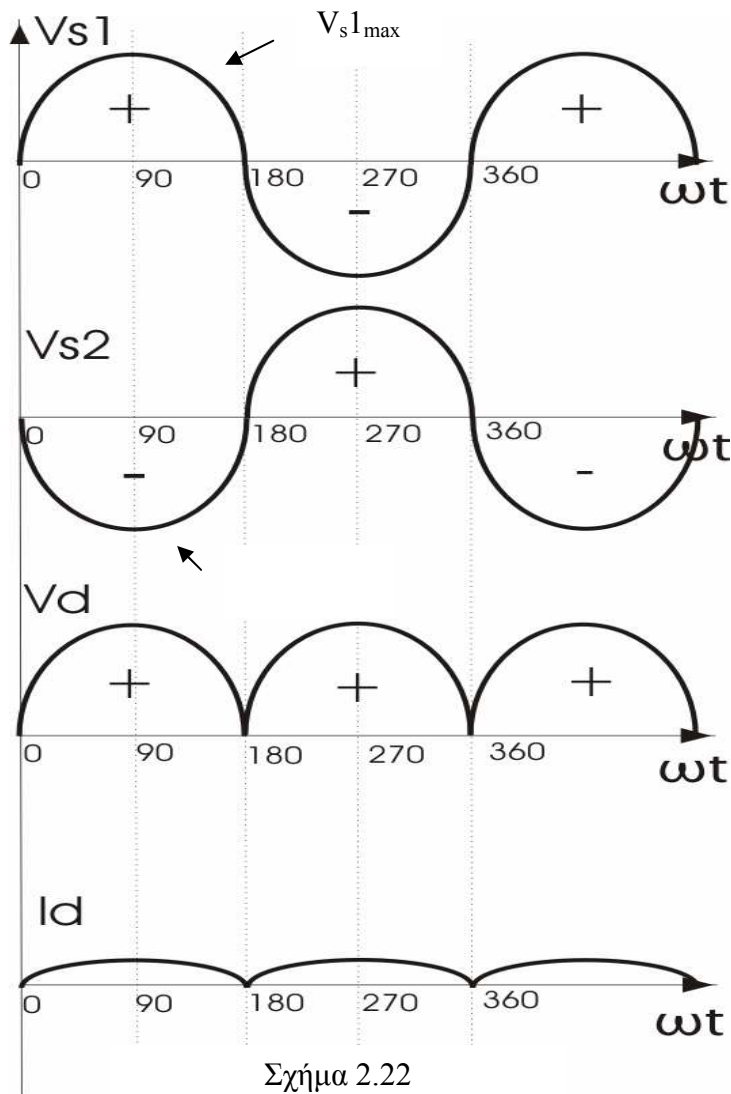


Σχήμα 2.21

Το παραπάνω κύκλωμα δεν είναι τίποτα άλλο από τον συνδυασμό δύο κυκλωμάτων απλής ανόρθωσης με την μόνη διαφορά ότι έχουμε έναν μετασχηματιστή με δύο δευτερεύοντα με μεσαία λήψη (“B”), έτσι έχουμε δύο τάσεις στο δευτερεύον με διαφορά φάσης 180° ως προς την γείωση ή τον ουδέτερο αγωγό (“B”).

Βλέποντας λίγο καλύτερα το σχήμα παρατηρούμε πως όταν το σημείο A έχει θετικό δυναμικό (θετική ημιπερίοδος), το σημείο C παρουσιάζει αρνητικό δυναμικό ως προς το σημείο αναφοράς B και αντίστροφα.

Καταλαβαίνουμε λοιπόν πως είναι απαραίτητο να έχουμε σε κάποιο χαρτί τις κυματομορφές των τάσεων V_{s1} και V_{s2} ως προς τον χρόνο για να μπορούμε να πούμε με ακρίβεια πια από τις παραπάνω διόδους είναι αγώγιμη σε κάθε χρονική περίοδο.



Σχήμα 2.22

Κατά την θετική ημιπερίοδο της V_{s1} (0° - 180°) το σημείο A με κουκίδα (αρχή της περιέλιξης του δευτερεύοντος του Μ/Σ) παρουσιάζει θετικό δυναμικό ως προς το σημείο αναφοράς B και η διάοδος D1 συμπεριφέρεται σαν ένας κλειστός διακόπτης με μια μικρή πτώση τάσης στα άκρα της έτσι ένα ρεύμα I_d διαρρέει το φορτίο αναπτύσσοντας μία τάση V_d όπως βλέπουμε και στα σχήματα 2.21 και 2.22. Για όλο αυτό τον χρόνο η διάοδος D2 είναι ανάστροφα πολωμένη λόγω της διαφοράς φάσης μεταξύ των V_{s1} και V_{s2} και δεν διαρρέεται από ρεύμα, στα άκρα της διάοδου η ανάστροφη αυτή τάση φτάνει την τιμή του $2V_{max}$ δηλαδή είναι σαν να εφαρμόζουμε μεταξύ ανόδου καθόδου της D2 ολόκληρη την τάση του δευτερεύοντος του μετασχηματιστή. Μαθηματικά η διαφορά δυναμικού μεταξύ καθόδου ανόδου θα δίνεται από την παρακάτω σχέση θεωρώντας την D1 ιδανική:

$$PRV = V_{reverse} = V_{s1_{max}} \cdot \sin\theta - V_{s2_{max}} \cdot \sin(\theta + \Delta\Phi)$$

- για $\theta = \omega t = 90^\circ$ που έχουμε την μέγιστη τιμή τάσεως.
- για $V_{s1_{max}} = V_{s2_{max}} = V_{s_{max}}$
- για $\Delta\Phi = 180^\circ$ μεταξύ της V_{s1} και V_{s2}

η παραπάνω εξίσωση γίνεται :

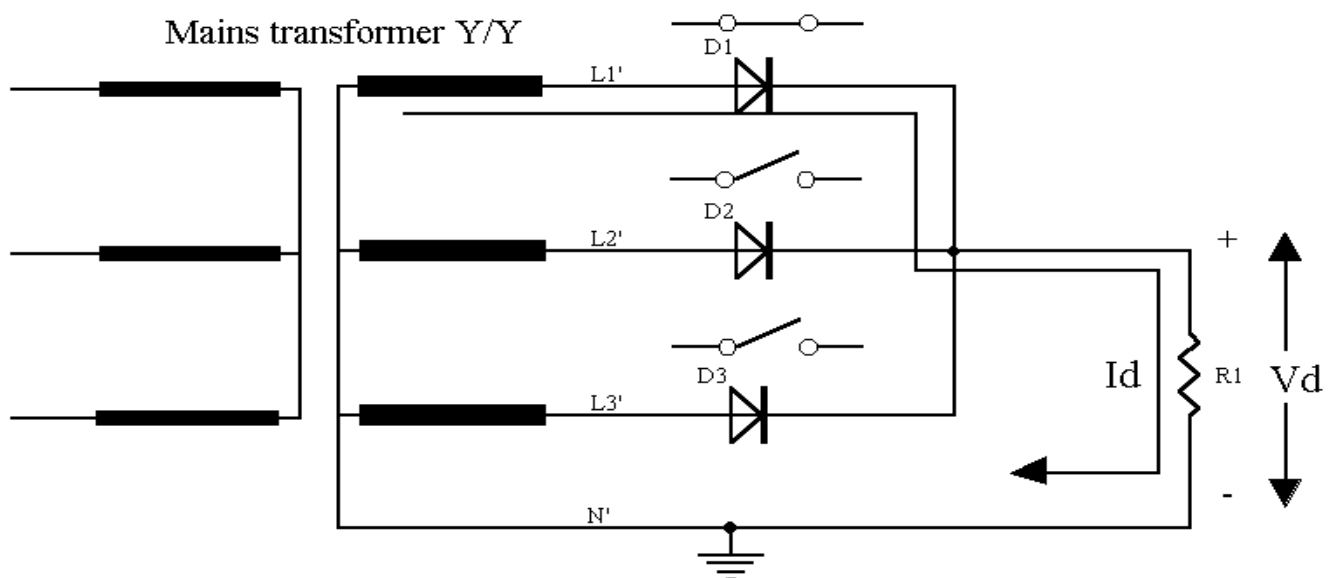
$$\begin{aligned}
 V_{reverse} &= V_{S_{max}} \cdot \sin 90^\circ - V_{S_{max}} \cdot \sin(90^\circ + 180^\circ) \\
 &= V_{S_{max}} \cdot 1 - V_{S_{max}} \cdot (-1) \\
 &= V_{S_{max}} + V_{S_{max}} \\
 &= 2V_{S_{max}}
 \end{aligned}$$

Κατά την θετική ημιπερίοδο της $V_{s2}(180^\circ-360^\circ)$ η διάδος D2 είναι ορθά πολωμένη αφού το δυναμικό στο σημείο C του σχήματος 2.12 είναι θετικό ως προς το σημείο αναφοράς B και ένα ρεύμα διαρρέει το φορτίο με την ίδια φορά όπως και κατά την θετική ημιπερίοδο της V_{s1} , αναπτύσσοντας μία DC τάση V_d στα άκρα του φορτίου. Η D1 είναι για όλο αυτό το χρόνο στην αποκοπή και δεν διαρρέετε από ρεύμα.

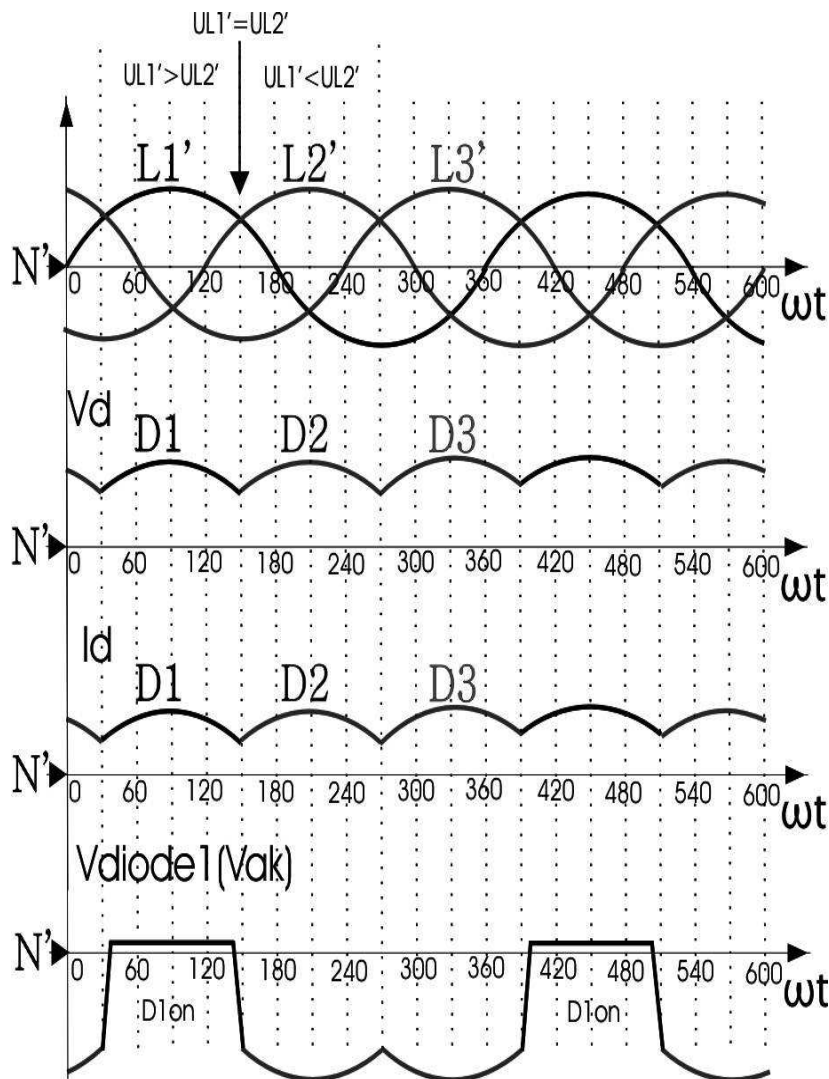
Τα πλεονεκτήματα της διάταξης αυτής είναι ότι έχουμε μικρότερη πτώση τάσης στα άκρα των διόδων σε κάθε ημιπερίοδο, άγει μία διάδος κάθε φορά αυξάνοντας τον βαθμό απόδοσης σε σχέση με την χρήση γέφυρας.

Μειονεκτήματα της διάταξης αυτής είναι ο μετασχηματιστής με μεσαία λήψη και η χρήση διόδων με μεγάλες ανάστροφες τάσεις αυξάνοντας το κόστος της διάταξης.

Τριφασικός ανορθωτής μεσαίου σημείου.



Σχήμα 2.23



Σχήμα 2.24

Στο σχήμα 2.23 βλέπουμε την κυκλωματική διάταξη ενός τριφασικού ανορθωτή μεσαίου σημείου (τριφασικός ανορθωτής τριών παλμών). Η ονομασία αυτή οφείλεται στην χρήση του ουδετέρου αγωγού στο δευτερεύον του μετασχηματιστή (N') σαν σημείο αναφοράς για την μέτρηση τάσεων στα διάφορα σημεία της διάταξης.

Το παραπάνω κύκλωμα λειτουργεί με τον ίδιο τρόπο όπως και το κύκλωμα της απλής ανόρθωσης με την μόνη διαφορά ότι στην περίπτωση αυτή έχουμε τριφασική πηγή με διαφορά φάσης 120° μοίρες μεταξύ των τριών φάσεων και αναγκαστικά την χρήση τριών διόδων ανορθώσεως D1, D2 και D3 για κάθε φάση. Καταλαβαίνουμε λοιπόν πως ανάλογα με τον αριθμό των φάσεων απαιτείται και ο ανάλογος αριθμός διόδων ανορθώσεως.

Στο σχήμα 2.24 βλέπουμε τις κυματομορφές των τριών φάσεων L1', L2' και L3' αν θεωρήσουμε πως οι φάσεις L2' και L3' είναι εκτός λειτουργίας τότε θα είχαμε DC ρεύμα στο φορτίο μόνο εξαιτίας της φάσης L1' και του ανορθωτή D1 ο οποίος συμπεριφέρεται σαν κλειστός διακόπτης. Η διάδος θα ήταν ορθά πολωμένη από 0° έως και τις 180° όπως φαίνεται από την κυματομορφή της φάσης L1' στο σχήμα 2.24.

Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η άνοδος της διόδου είναι σε όλο αυτό το διάστημα θετικότερη από την κάθοδο της διόδου και ένα ρεύμα διαρρέει για όλο αυτό τον χρόνο το φορτίο R1.

Ενεργοποιώντας τώρα και την φάση L2' παρατηρούμε πως από 0° έως και τις 150° η L1' είναι θετικότερη ως προς την L2' παίρνοντας σαν σημείο αναφοράς τον ουδέτερο N'. Στις 150° που διασταυρώνονται οι δύο φάσεις L1' και L2' είναι το μεταβατικό σημείο μεταξύ των δύο φάσεων κατά το οποίο η φάση L2' αρχίζει να γίνεται θετικότερη της L1' (σχήμα 2.24). Παρατηρούμε επίσης πως η κάθοδος τόσο της D1 όσο και της D2 βρίσκονται πάντα στο ίδιο δυναμικό ως προς τον N' αφού είναι συνδεδεμένες μεταξύ τους και συνδεδεμένες με το φορτίο (σχήμα 2.24). Αφού λοιπόν έχουμε το ίδιο δυναμικό στις καθόδους των D1 και D2 για να πούμε με ακρίβεια πια διόδος θα γίνει αγωγίμη μας αρκεί να ελέγχουμε πια από τις δύο φάσεις άρα και τις ανόδους των διόδων έχει το μεγαλύτερο θετικό δυναμικό. Έτσι λόγω ότι η L2' είναι θετικότερη της L1' ακριβώς μετά τις 150° η D2 γίνεται αγωγίμη και ένα νέο ρεύμα Id διαρρέει το φορτίο δημιουργώντας μια απότομη αύξηση στην τάση επάνω στην R1 (Vd) η οποία αναγκάζει την διόδο D1 να περάσει στην κατάσταση αποκοπής .

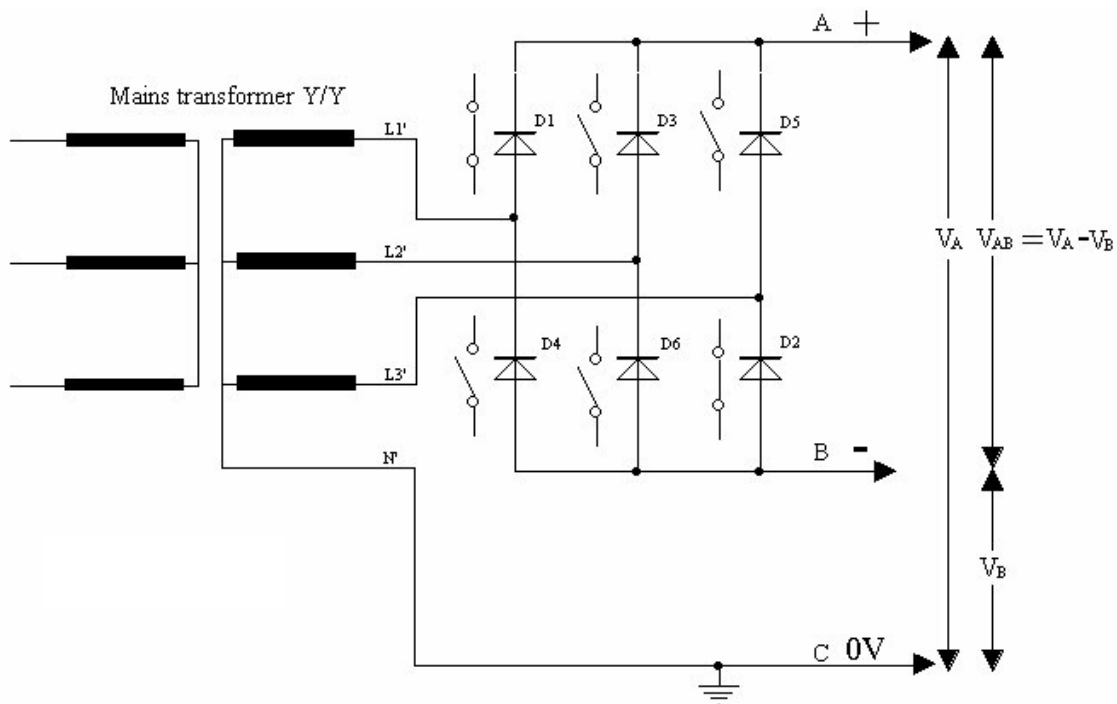
Ενεργοποιώντας τέλος και την φάση L3', στις 30° όσο και στις 270° που διασταυρώνονται οι φάσεις L3'-L1' και L2'-L3' αντίστοιχα έχουμε το ίδιο φαινόμενο αναγκάζοντας τελικά την κάθε διόδο της διάταξης να διαρρέετε από ρεύμα μόνο για 120° της συνολική περιόδου ανά φάση. Για παράδειγμα η D1 διαρρέετε από ρεύμα από τις 30° έως και τις 150° όπως φαίνεται από την κυματομορφή της τάσεως μεταξύ ανόδου καθόδου (Vdiode1) στο σχήμα 2.24. Το αρνητικό τμήμα της κυματομορφής είναι στην ουσία η ανάστροφη τάση στα άκρα της διόδου η οποία είναι ίση με :

$$PRV = V_{\text{diode reverse}} = \sqrt{3} V_{L \text{ max}}$$

Η τιμή της DC τάσης στο φορτίο Vd θα δίνεται από την σχέση:

$$Vd_{\text{average}} = \frac{3\sqrt{3}}{2\pi} \cdot V_{L \text{ max}} \approx 0.83 \cdot V_{L \text{ max}}$$

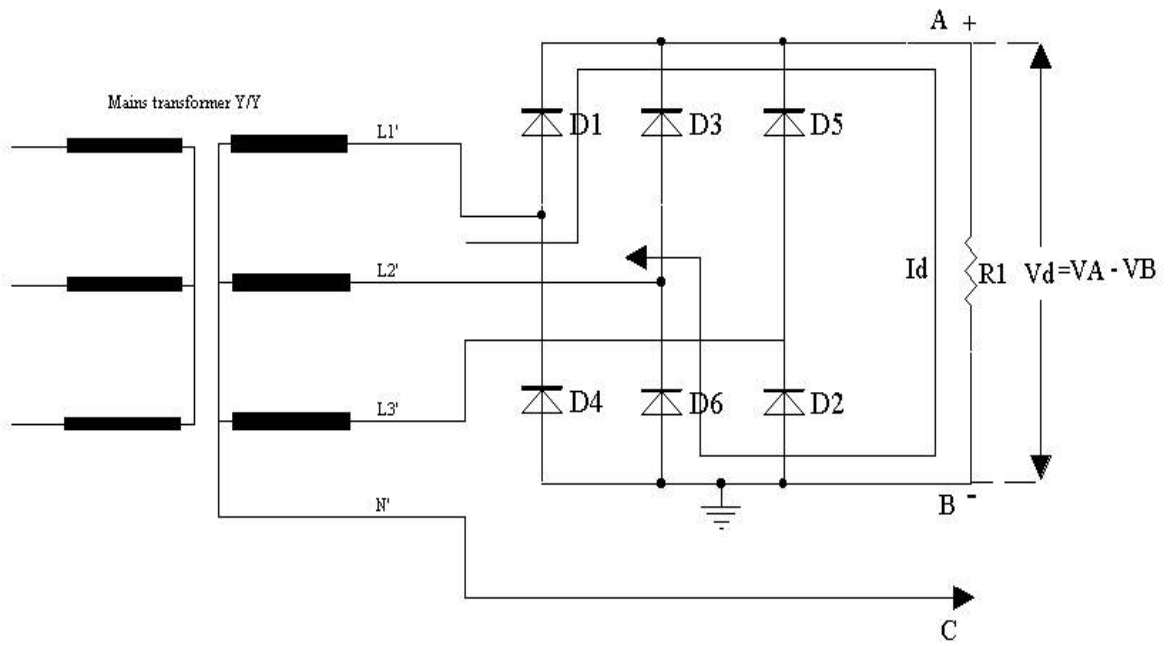
Τριφασικός ανορθωτής γέφυρας διόδων.



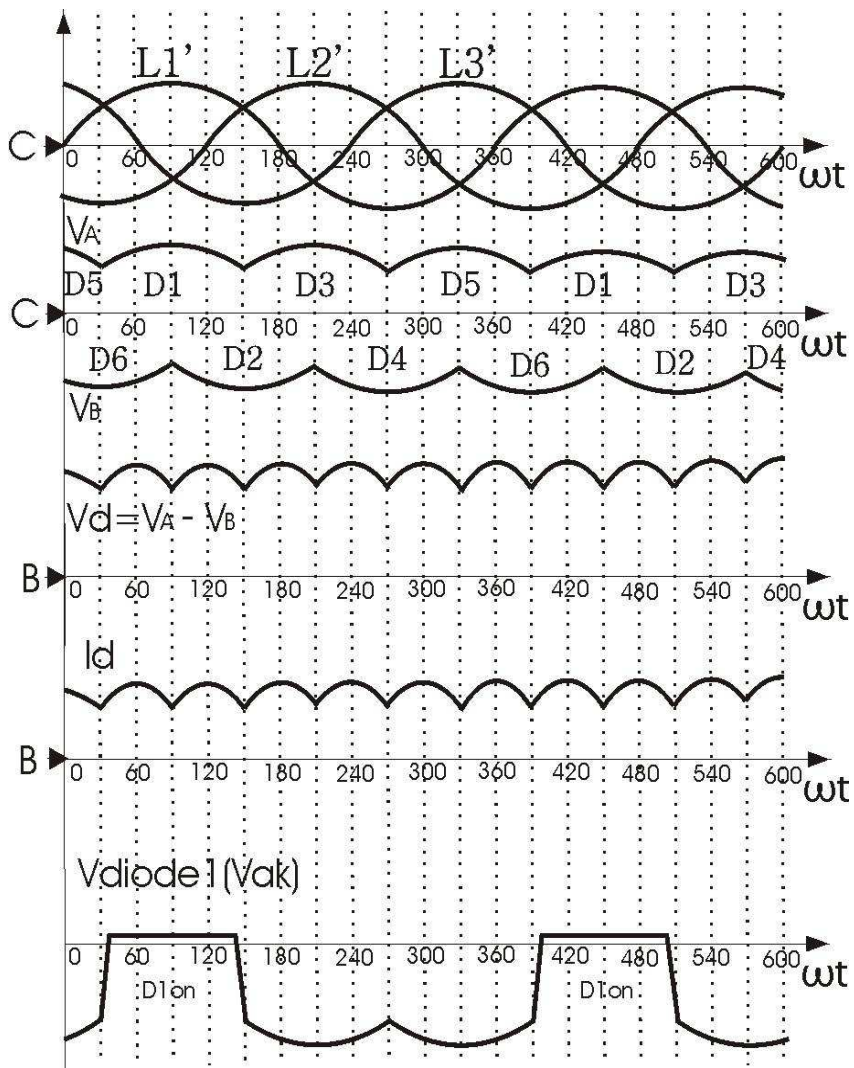
Σχήμα 2.25

Στο σχήμα 2.25 βλέπουμε την κυκλωματική διάταξη ενός τριφασικού ανορθωτή γέφυρας διόδων (τριφασικός ανορθωτής έξι παλμών). Ουσιαστικά η διάταξη αυτή δεν είναι τίποτα άλλο από τον συνδυασμό δύο τριφασικών ανορθωτικών κυκλωμάτων μεσαίου σημείου. Έτσι έχουμε το θετικό τμήμα της γέφυρας αποτελούμενο από τα διόδια D1,D3,D5 και το αρνητικό αποτελούμενο από τα διόδια D2,D4,D6. Ανάλογα με τα άκρα σύνδεσης του φορτίου μπορούμε να πάρουμε μια θετική DC τάση (βλέπε παράγραφο 2.4.2) V_A μεταξύ των σημείων A και C (σημείο αναφοράς) αφού δουλεύουμε μόνο το θετικό τμήμα της γέφυρας, μία αρνητική DC τάση V_B μεταξύ των σημείων B και C δουλεύοντας μόνο το αρνητικό τμήμα της γέφυρας και τέλος μια μεγαλύτερη θετική DC τάση V_{AB} μεταξύ των σημείων A και B δουλεύοντας αυτή την φορά και τα δύο τμήματα της γέφυρας θετικό και αρνητικό.

Εμείς θα μελετήσουμε τον τρόπο λειτουργίας της διάταξης αναφερόμενοι στο παρακάτω σχήμα 2.26. Το φορτίο είναι συνδεδεμένο μεταξύ των ακροδεκτών A και B οπότε η τάση του σημείου A ως προς τον ουδέτερο αγωγό N'(C) και όχι ως προς το σημείο αναφοράς (B) έχει την μορφή της V_A του σχήματος 2.27 ενώ η κυματομορφή της τάσης μεταξύ του σημείου αναφοράς B και του ουδέτερου αγωγού N' (C) έχει την μορφή της V_B δηλαδή η V_B είναι μία αρνητική DC τάση ως προς τον ουδέτερο C, από τα παραπάνω συμπεραίνουμε ότι η $V_{AB}=V_D$ και ίση με την διαφορά δυναμικού των V_A-V_B , αλλά επειδή η V_B είναι αρνητική και ίση με την V_A κατά απόλυτη τιμή σε απολύτως συμμετρική διάταξη τελικά η $V_{D \text{ average}}=V_A - (-V_B) = V_A+V_B=2V_A$. Η κυματομορφή της V_d φαίνεται στο σχήμα 2.27. Έτσι η DC τάση στο φορτίο είναι διπλάσια σε σχέση με τον ανορθωτή μεσαίου σημείου με μεγαλύτερο βαθμό αποδόσεως ισχύος.



Σχήμα 2.26



Σχήμα 2.27

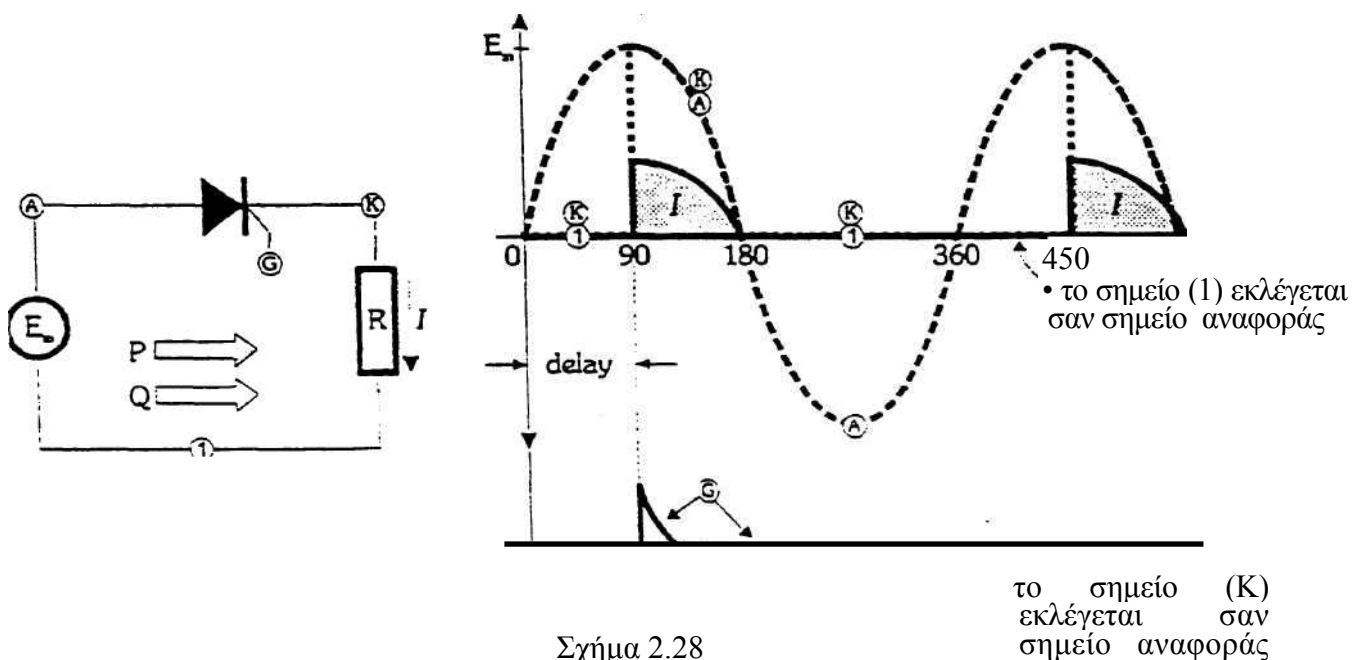
Για να βρούμε τώρα ποιες διόδοι είναι αγωγίμες κάθε φορά θα πρέπει να δούμε ποιες φασικές τάσεις $L1'$, $L2'$ και $L3'$ είναι θετικές και ποιες αρνητικές την κάθε χρονική στιγμή. Βλέποντας λίγο καλύτερα το σχήμα 2.27 παρατηρούμε ότι από τις 0° - 30° η φάση $L3'$ είναι θετική και η φάση $L2'$ αρνητική ως προς το σημείο C έτσι οι διόδοι D5 και D6 γίνονται αγωγίμες και ένα ρεύμα I_D που ξεκινά από την $L3'$ διαρρέει το φορτίο και κλείνει κύκλωμα μέσω της φάσης $L2'$. Την στιγμή που διασταυρώνονται οι φάσεις $L3'$ και $L1'$ (30°) η $L1'$ γίνεται θετικότερη της $L3'$ ενώ ταυτόχρονα η $L2'$ παραμένει αρνητική μέχρι και τις 90° έτσι από τις 30° έως και τις 90° έχουμε την αγωγή των διόδων D1 και D6 και ένα νέο ρεύμα I_D που ξεκινά από την φάση $L1'$ διαρρέει το φορτίο R1 και κλείνει κύκλωμα μέσω της φάσης $L2'$ αναπτύσσοντας μία DC τάση στο φορτίο όπως φαίνεται και στο σχήμα 2.27. Το φαινόμενο αυτό επαναλαμβάνεται κάθε 60° έχοντας αγωγίμες δύο διόδους κάθε φορά.

2.2.2 Εισαγωγή στους ελεγχόμενους ανορθωτές.

Μονοφασικός ελεγχόμενος ανορθωτής μισού κύματος. (Single-phase, half-wave rectifier)

1. Με παθητικό φορτίο.

Όπως είναι γνωστό παθητικό φορτίο είναι αυτό που δεν περιέχει πηγή ενέργειας και το απλούστερο παθητικό φορτίο είναι η ωμική αντίσταση. Στο σχήμα 2.28 φαίνεται ένα ωμικό φορτίο και ένα thyristor σε σειρά συνδεδεμένα στα άκρα μιας μονοφασικής πηγής. Η A.C. πηγή παράγει μια ημιτονοειδή τάση μέγιστης τιμής E_m ενώ οι παλμοί της πύλης του thyristor συγχρονίζονται με τη συχνότητα της γραμμής. Στο παράδειγμα μας οι παλμοί καθυστερούν 90° .



Σχήμα 2.28

- α. SCR τροφοδοτώντας παθητικό φορτίο
- β. Χαρακτηριστικές τάσης και ρεύματος

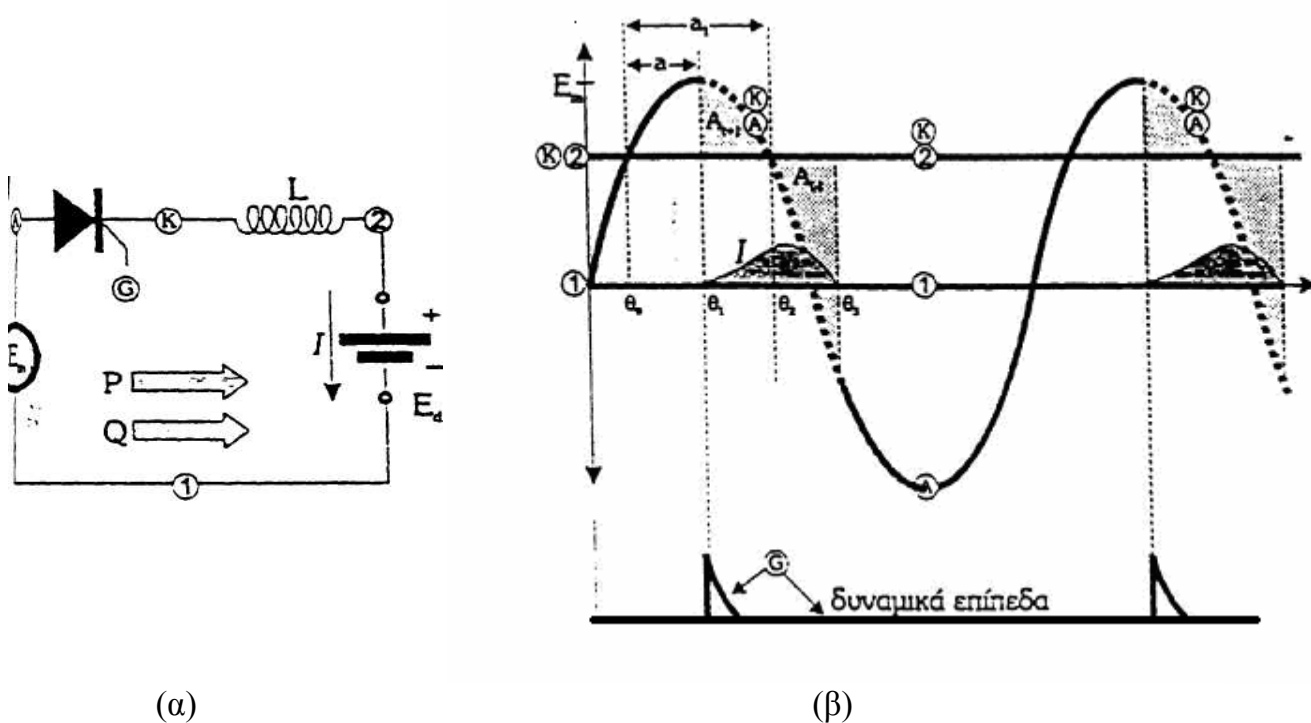
Η αγωγή επομένως αρχίζει κάθε στιγμή που η A.C. τάση φτάνει τη μέγιστη θετική τιμή της και έτσι το ρεύμα θα ρέει για 90° .

Όπως φαίνεται στις κυματομορφές τάσης ρεύματος το ρεύμα καθυστερεί της τάσης γιατί αυτό ρέει μόνο για τις τελευταίες 90° της θετικής ημιπεριόδου. Αυτή η καθυστέρηση (που καλείται και μετατόπιση) παράγει τα ίδια αποτελέσματα όπως ένα επαγωγικό φορτίο.

Επομένως η ac πηγή πρέπει να δώσει και άεργη και πραγματική ισχύ στο φορτίο. Ο συντελεστής ισχύος μειώνεται καθώς εμείς καθυστερούμε τους παλμούς σκανδαλισμού, ενώ αν το thyristor σκανδαλιστεί σε γωνία 0° δεν θα έχουμε άεργη ισχύ να απορροφείται από τον ανορθωτή ($Q=U I \sin\phi$ & $\phi=0 \rightarrow \sin\phi=0$).

2. Ελεγχόμενος ανορθωτής με ενεργό φορτίο.

Το σχήμα 2.29 δείχνει μια ac πηγή E_m και ένα dc φορτίο E_d συνδεδεμένα με ένα thyristor σε σειρά με ένα πηνίο.



(α)

(β)

Σχήμα 2.29

α. SCR τροφοδοτώντας ενεργό φορτίο.

β. Χαρακτηριστικές τάσης και ρεύματος.

Το φορτίο που αντιπροσωπεύεται από την μπαταρία παίρνει ενέργεια επειδή όταν το thyristor άγει το ρεύμα I εισέρχεται στο θετικό άκρο. Το πηνίο εξομάλυνσης L περιορίζει τα μέγιστο ρεύμα σε μια τιμή που να βρίσκεται μέσα στα όρια του thyristor, και οι παλμοί σκανδαλισμού αρχίζουν την αγωγή σε μια γωνία θ_1 .

Αν πάρουμε το σημείο 1 σαν μηδενικό σημείο αναφοράς του δυναμικού, τότε το σημείο 2 θα βρίσκεται E_d Volt πάνω από αυτό.

Επιπλέον το δυναμικό του σημείου A θα ταλαντώνεται ημιτονοειδές γύρω από το επίπεδο του σημείου 1.

Αν το SCR αντικατασταθεί από μια δίοδο, η αγωγή θα αρχίσει σε μια γωνία θ_0 επειδή αυτή τη στιγμή η άνοδος γίνεται θετική. Επομένως στο παράδειγμα μας η αγωγή αρχίζει μόνο όταν η πύλη σκανδαλίζεται σε γωνία θ_1 .

Όταν η αγωγή αρχίζει το σημείο K "πηδά" από το επίπεδο 2 στο επίπεδο του σημείου A και η τάση E_{A2} εμφανίζεται στα άκρα του πηνίου. Το γινόμενο $V \cdot S$ (volts*seconds) φθάνει μια μέγιστη τιμή όπου η περιοχή $A(+)$ είναι μέγιστη. Το αντίστοιχο μέγιστο ρεύμα τότε δίνεται από τη σχέση:

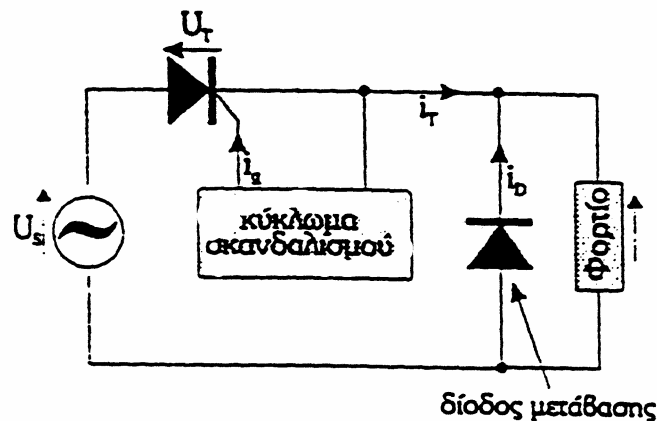
$$I_{\max} = A_{(+)} / L$$

Το ρεύμα μετά μειώνεται βαθμιαία και γίνεται μηδέν για γωνία Θ_3 όπου $A_{(-)}$ είναι ίση με $A_{(+)}$. Καθώς η αγωγή σταματά το σημείο K "πηδά" από το επίπεδο A στο επίπεδο του σημείου 2 και παραμένει εκεί μέχρι τον επόμενο παλμό πύλης. (Το επίπεδο του K φαίνεται από την διακεκομμένη γραμμή).

Όπως και στο προηγούμενο κύκλωμα το ρεύμα φορτίου καθυστερεί της τάσης E_m και επομένως η πηγή έχει να τροφοδοτήσει το φορτίο με άεργη και ενεργό ισχύ. Αν ελαττώσουμε τη γωνία έναυσης α , η περιοχή $A_{(+)}$ αυξάνει όπως επίσης και το ρεύμα I . Επομένως μπορούμε να μεταβάλλουμε την ενεργό ισχύ που τροφοδοτεί το φορτίο από μηδέν ($\alpha=0$) σε μια μέγιστη τιμή ($\alpha=90$).

Από πρακτικής πλευράς το κύκλωμα αυτό μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν ένα μεταβλητό φορτιστή μπαταριών, ή να ρυθμίζει τη ταχύτητα και τη ροπή ενός dc κινητήρα. Στην περίπτωση του κινητήρα η E_d αντιπροσωπεύει την ηλεκτρομαγνητική δύναμη του επαγωγίμου και η L την αυτεπαγωγή του.

3. Αν το φορτίο είναι σύνθετο και το κύκλωμα έχει και δίοδο μεταγωγής.



Σχήμα 2.30

Η δίοδος μετάβασης (ή μεταγωγής) εμποδίζει την αντιστροφή της τάσης στο φορτίο (πέρα από τη μικρή τιμή της πτώσης τάσης της). Κατά τη διάρκεια της αγωγής του thyristor η χαρακτηριστική κυματομορφή του ρεύματος υπαγορεύεται από την εξίσωση: $U_L = R i_L + L \frac{di}{dt}$, αλλά καθώς η τάση αντιστρέφεται, η U_L είναι πραγματικά μηδέν και το ρεύμα φορτίου τότε ακολουθεί μια εκθετική μείωση.

Αναλύοντας την κυματομορφή της τάσης φορτίου προκύπτει ότι:

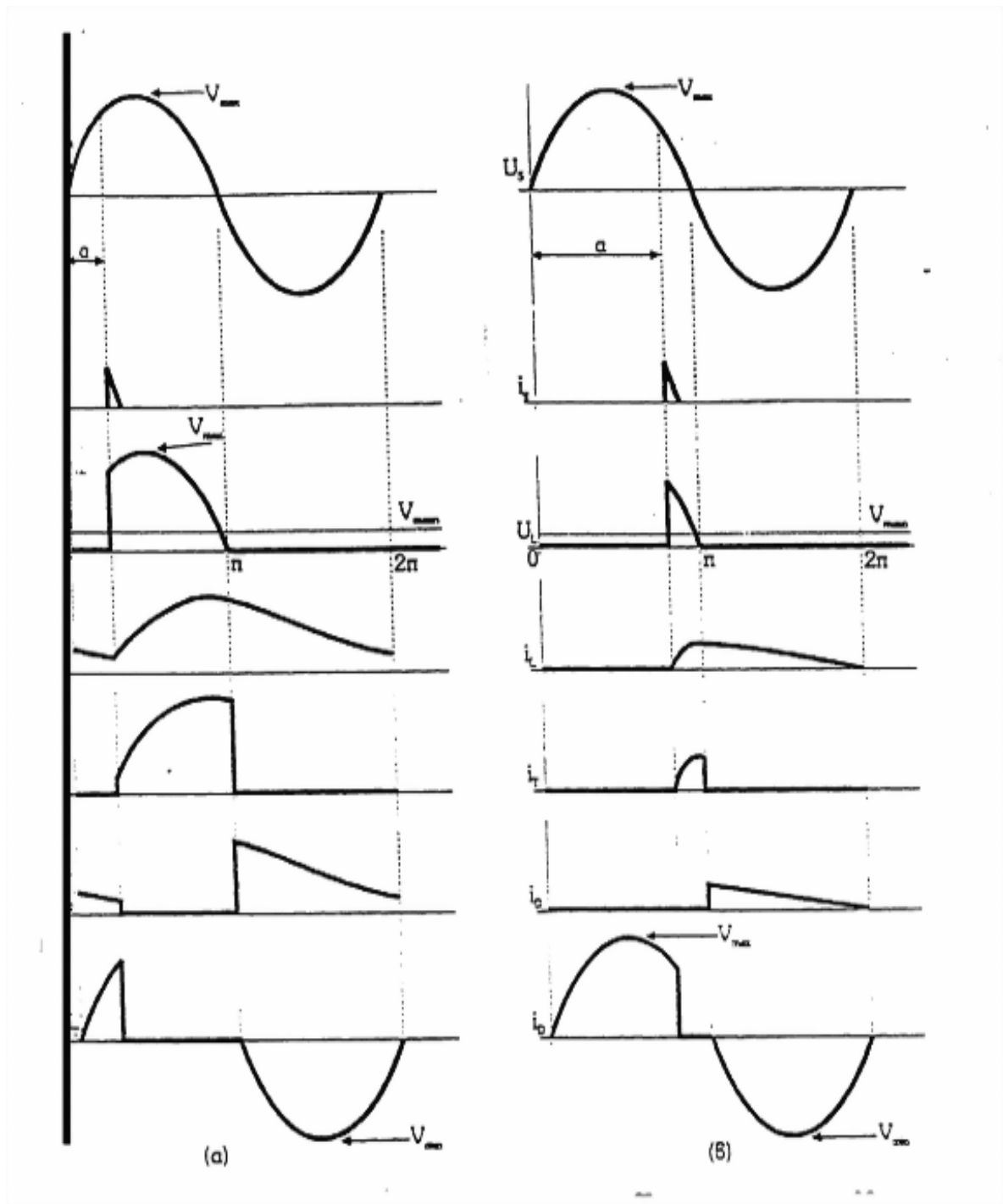
$$V_{MEAN} = \frac{1}{2\pi} \int_{\alpha}^{\pi} V \sin \theta d\theta = \frac{V_{MAX}}{2\pi} (1 + \cos \alpha) ,$$

($\theta = \omega t$)

Ακόμα από τις κυματομορφές προκύπτει ότι όσο μεγαλύτερη είναι η γωνία έναυσης α τόσο χαμηλότερη είναι η μέση τιμή της τάσης του φορτίου. Αυτό φαίνεται και από την παραπάνω εξίσωση :

$$V_{MEAN} = \frac{V_{MAX}}{2\pi} (1 + \cos \alpha) ,$$

από την οποία προκύπτει $V_{MEAN}=0$ όταν $\alpha=180^\circ$.

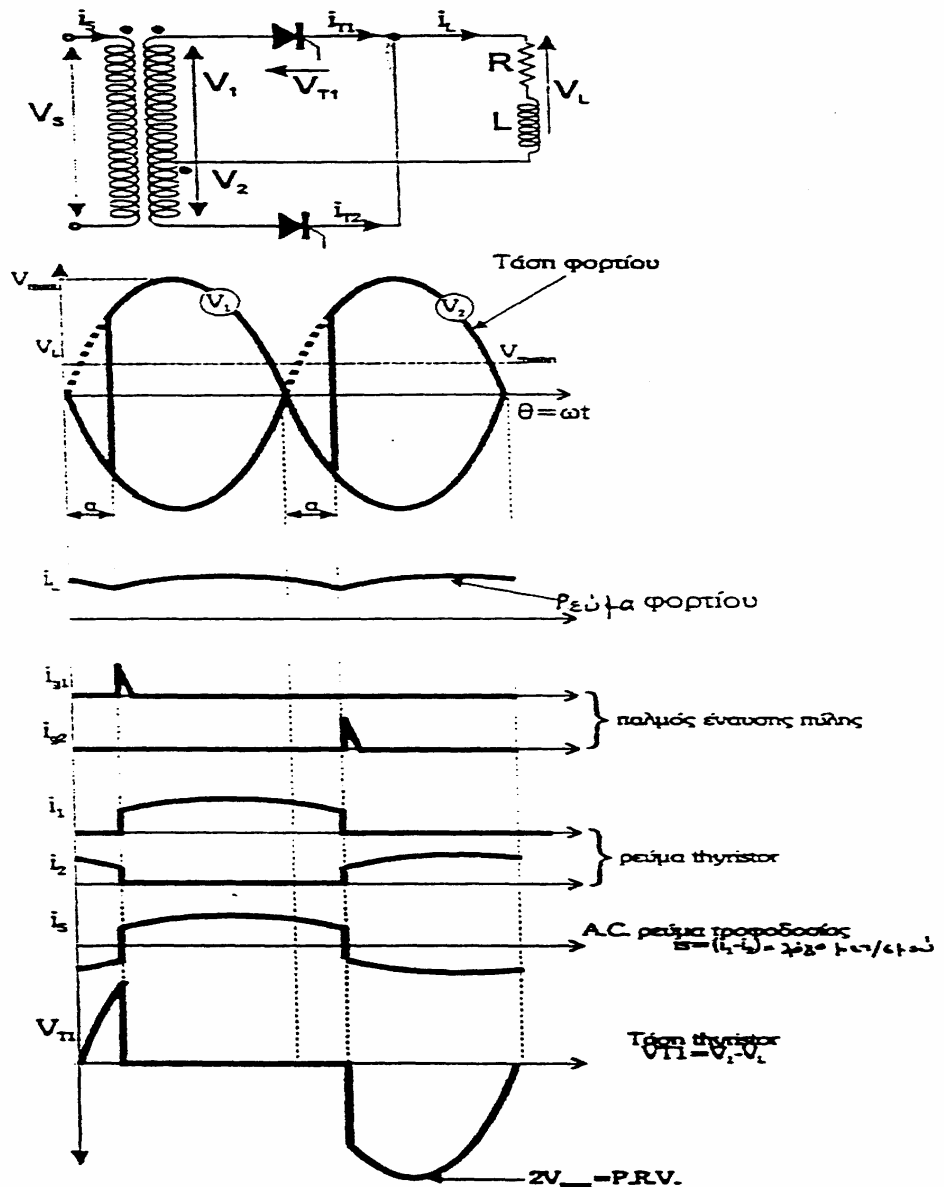


Σχήμα 2.31

- α. Μονοφασικό ελεγχόμενο κύκλωμα μισού κύματος με δίοδο μετάβασης.
- β. Μικρή γωνία καθυστέρησης έναυσης και συνεχές ρεύμα.
- γ. Μεγάλη γωνία καθυστέρησης κα μη συνεχές ρεύμα.

Ελεγχόμενος ανορθωτής πλήρους κύματος. (Full-Wave Rectifier)

Τα ίδια ισχύουν και στη σύνδεση με thyristors όπως εύκολα μπορούμε να δούμε από τις κυματομορφές. όταν το T2 άγει (δηλαδή είναι σχεδόν ένα βραχυκύκλωμα) όλη η τάση του δευτερεύοντος εμφανίζεται στα άκρα του thyristor T1 που εκείνη τη χρονική στιγμή βρίσκεται σε κατάσταση αποκοπής.



Σχήμα 2.32 Διφασικό κύκλωμα μισού κύματος.
α. Συνδέσεις.
β. Κυματομορφές.

Το thyristor T_1 μπορεί να “σκανδαλιστεί” στην κατάσταση αγωγής οποιαδήποτε στιγμή, μετά που η τάση V_1 είναι θετική. Το σημείο της κυματομορφής για το οποίο το thyristor (ή τα thyristors) “σκανδαλίζεται” καθορίζεται από τη γωνία έναυσης α και μετρείται από το σημείο εκείνο στο οποίο μια διάδος θα άγει αν αντικαθιστούσε ένα thyristor. Ο ορισμός αυτός για τη γωνία έναυσης εφαρμόζεται σε όλους τους μετατροπείς με thyristors.

Τα κυκλώματα έναυσης των thyristors δεν φαίνονται στην παραπάνω συνδεσμολογία για να αποφευχθεί ενδεχόμενη σύγχυση με τη βασική συνδεσμολογία, αλλά μπορούμε να υποθέσουμε ότι δίνουν τον απαιτούμενο παλμό έναυσης στην πύλη των thyristors την κατάλληλη, στιγμή που εμείς έχουμε επιλέξει.

Την χρονική στιγμή κατά την οποία το thyristor T_2 “σκανδαλίζεται” με το thyristor T_1 να άγει, η θετική τάση V_2 εμφανίζεται στα άκρα του φορτίου. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα τη μεταφορά του ρεύματος από thyristor T_1 στο thyristor T_2 , δηλαδή τη συνεχή ροή του ρεύματος στο φορτίο. Η μέση τιμή της τάσης του φορτίου θα δίδεται από τη σχέση :

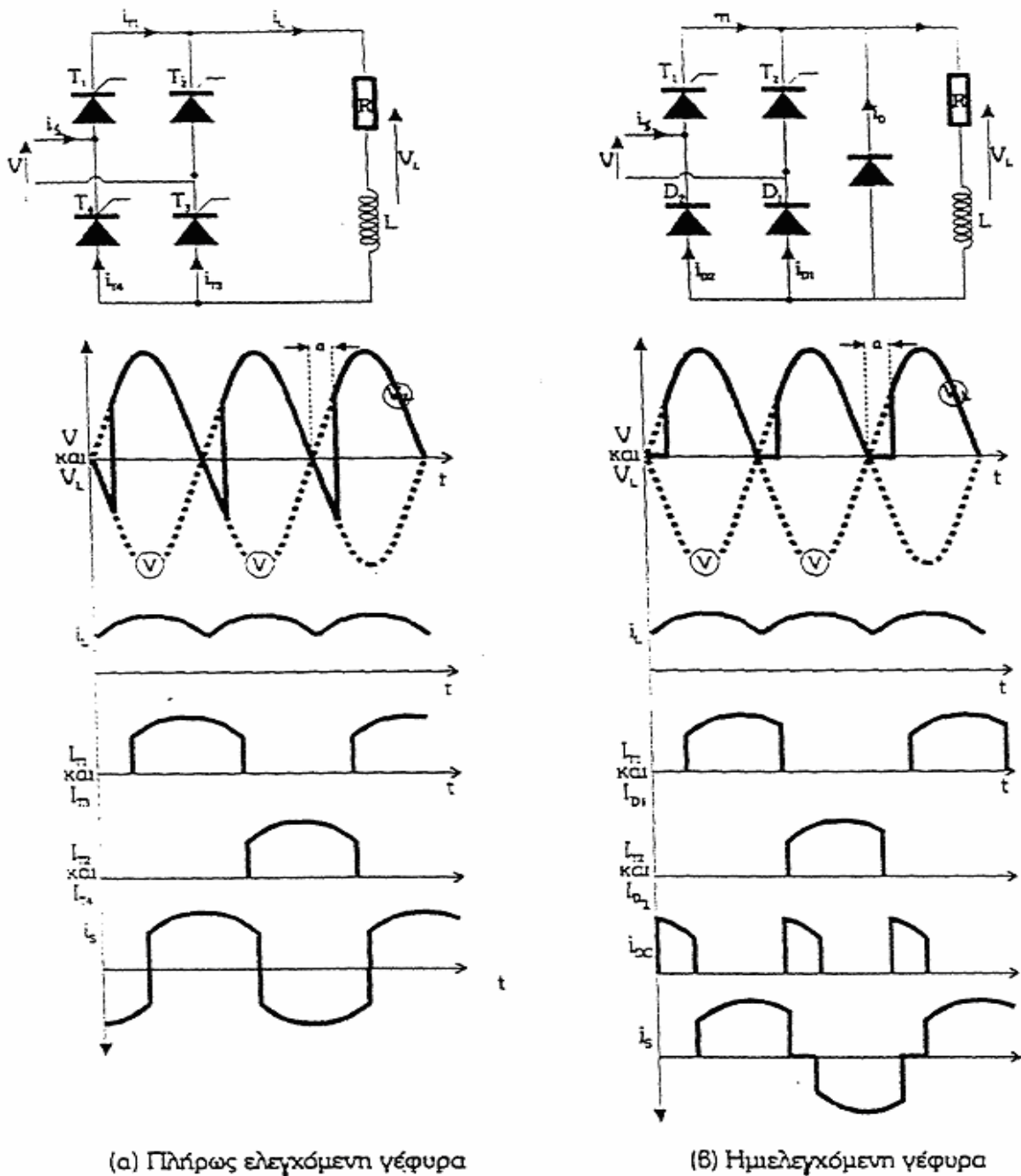
$$V_{MEAN} = \frac{1}{\pi} \int V_{MAX} \sin \omega t d_x = \frac{2V_{MAX}}{\pi} \cos \alpha$$

Θα πρέπει εδώ να σημειωθεί ότι, στην πράξη, λόγω της πτώσης τάσης στα άκρα καθενός thyristor, η τάση στα άκρα του φορτίου είναι μικρότερη και ακόμα ότι η αυτεπαγωγή του φορτίου είναι αρκετά μεγάλη έτσι, ώστε να εξασφαλίζει τη συνεχή ροή ρεύματος στο φορτίο (κοίτα κυματομορφή τάσης φορτίου - αντιστροφή τάσης.).

Όπως προκύπτει από τη σχέση της μέσης τιμής της τάσης, θα πάρει αυτή τη μεγαλύτερη τιμή της, για γωνία έναυσης ίση με το μηδέν (περίπτωση διόδου) και θα γίνει μηδέν για γωνία έναυσης 90° . Όπως φαίνεται ακόμα από ης κυματομορφές. Καθώς η κυματομορφή της τάσης του φορτίου επαναλαμβάνεται δύο φορές στη διάρκεια μιας περιόδου της τάσης τροφοδότησης, ο μετατροπέας αυτός λέμε ότι είναι δύο παλμών.

Μονοφασικές γέφυρες ανόρθωσης με thyristors (πλήρως ελεγχόμενες) και thyristors και διόδους (ημιελεγχόμενες).

Στο σχήμα παρακάτω φαίνονται τα κυκλώματα και οι αντίστοιχες κυματομορφές και για τις δύο γέφυρες ανόρθωσης (πλήρως ελεγχόμενη - ημιελεγχόμενη).



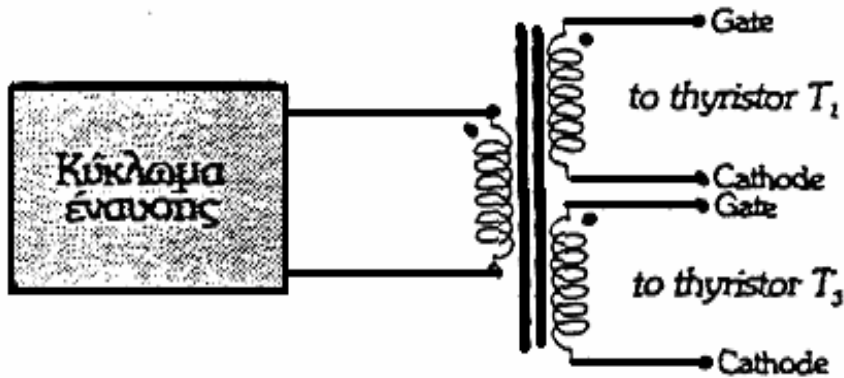
Σχήμα 2.33 Κυκλώματα γεφυρών πλήρους κύματος.

Διακρίνοντας τις κυματομορφές εξόδου (φορτίου) τάσης είναι εύκολο να διαπιστώσουμε την επίδραση της διόδου μετάβασης στην εμπόδιση της αντίστροφης τάσης στο φορτίο.

Η περίοδος αγωγής για την πλήρως ελεγχόμενη γέφυρα είναι π , ενώ για την ημieleγχόμενη γέφυρα είναι $(\pi - \alpha)$ σαν ένα αποτέλεσμα της ενέργειας της διόδου μετάβασης. Για την γέφυρα πλήρως η αγωγή θα αρχίσει όταν τα thyristors θα σκανδαλιστούν και για να κυκλοφορήσει ρεύμα πρέπει τα thyristors T_1 και T_3 να

"σκανδαλιστούν" μαζί όπως και τα thyristors T_2 και T_4 στο επόμενο μισό της περιόδου. Για την εξασφάλιση της ταυτόχρονης έναυσης των thyristors T_1 , T_3 και T_2 , T_4 πρέπει να χρησιμοποιηθεί το ίδιο κύκλωμα έναυσης (για κάθε ζευγάρι).

Ένα τέτοιο κύκλωμα φαίνεται στο σχήμα :



Σχήμα 2.34

Η τάση στο φορτίο, θεωρώντας αμελητέες τις πτώσεις τάσης thyristors και diode είναι:

Γέφυρα πλήρως ελεγχόμενη :

$$V_{MEAN} = \frac{1}{\pi} \int V_{MAX} \sin \omega t d_x = \frac{2V_{MAX}}{\pi} \cos a$$

Γέφυρα ημιελεγχόμενη :

$$V_{MEAN} = \frac{1}{\pi} \int V_{MAX} \sin \omega t d_x = \frac{V_{MAX}}{\pi} (1 + \cos a)$$

Τριφασικό ελεγχόμενο κύκλωμα ανόρθωσης μισού κύματος.

Αν στο αντίστοιχο κύκλωμα με διόδους, οι διόδοι αντικατασταθούν με thyristors το κύκλωμα γίνεται πλήρως ελεγχόμενο με τη μέση τιμή της τάσης του φορτίου να μπορεί να ελεγχθεί από τη γωνία έναυσης a . (είναι φανερό ότι οι παλμοί έναυσης θα πρέπει, συμφωνά με τις τάσεις, να είναι μετατοπισμένοι κατά 120° δίνοντας την ίδια γωνία έναυσης για κάθε thyristor).

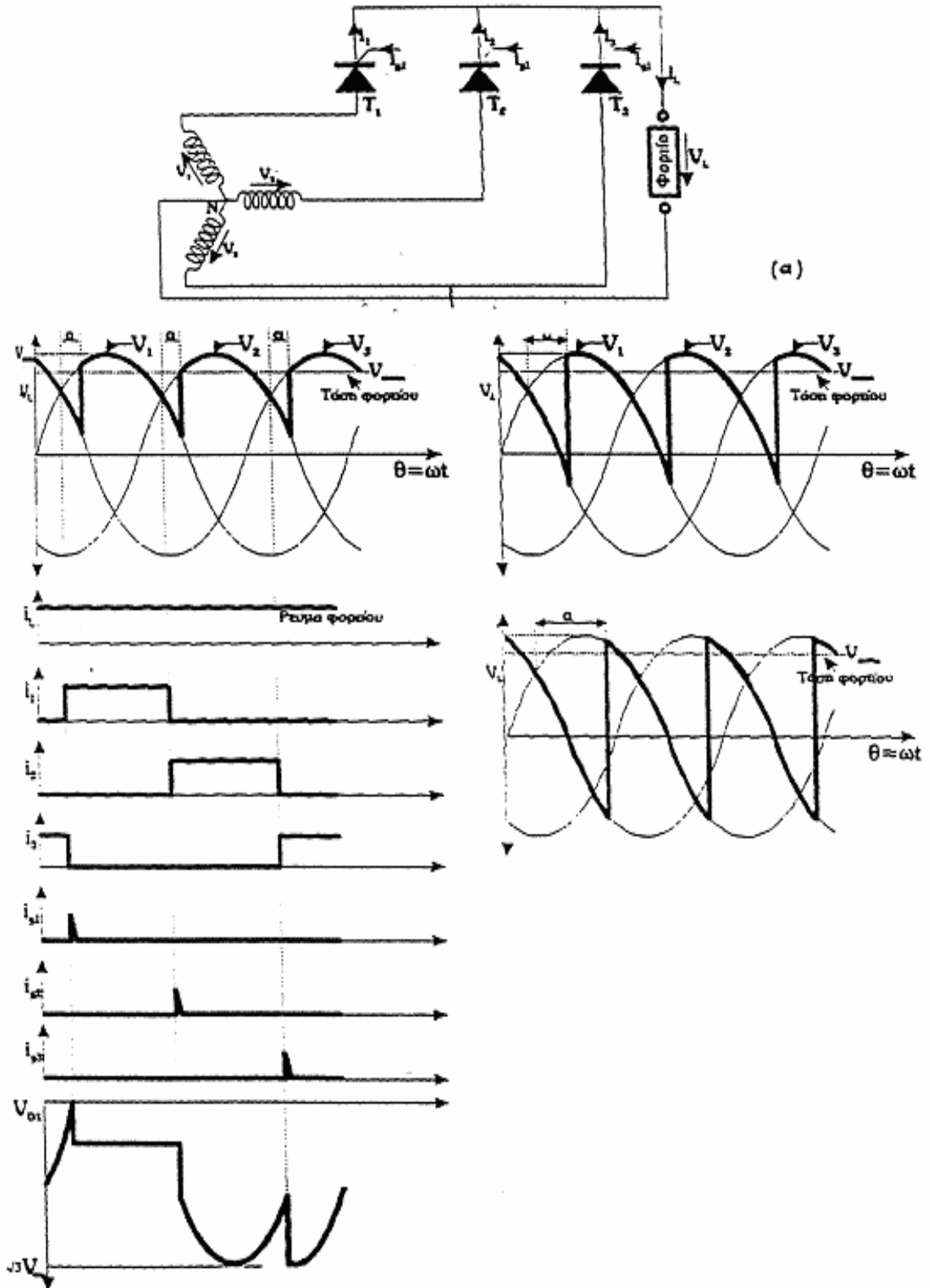
Η συνδεσμολογία και οι κυματομορφές φαίνονται στο σχήμα 2.35

Οι κυματομορφές c και d της τάσης του φορτίου δείχνουν την επίδραση της γωνίας έναυσης στον υπολογισμό της μέσης τιμής της που και εδώ (σύμφωνα με την αντίστοιχη των διόδων) θα είναι:

$$V_{MEAN} = \frac{1}{2\pi/3} \int_{\pi/6+a}^{5\pi/6+a} \sin(\omega t) d\omega t = \frac{3\sqrt{3}}{2\pi} V_{MAX} \cos a$$

Για ένα σταθερό ρεύμα I_L η ενεργός τιμή (rms) του ρεύματος σε κάθε thyristor στη διάρκεια μιας περιόδου (της τροφοδοσίας) θα είναι :

$$I_{rms}^2 = \frac{1}{2\pi} \int_{\alpha}^{\alpha+2\pi/3} I_L^2 d\omega t = \frac{I_L^2}{2\pi} \left(a + \frac{2\pi}{3} - \alpha \right) \Rightarrow I_{rms} = \frac{I_L}{\sqrt{3}}$$

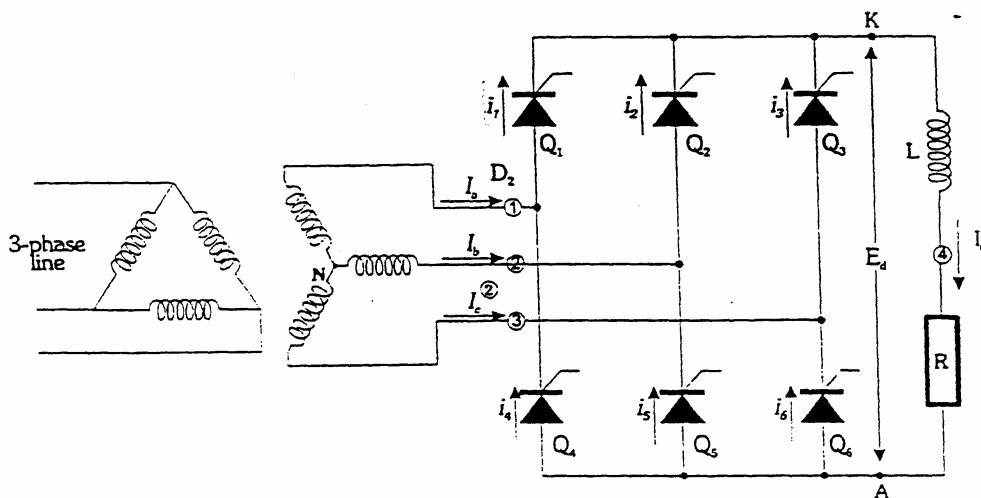


Σχήμα 2.35
 α. Τριφασικό ελεγχόμενο κύκλωμα μισού κύματος με thyristors.
 β. Κυματομορφές με διάφορες γωνίες σκανδαλισμού.

Τριφασικός μετατροπέας 6-παλμών.

Ο τριφασικός μετατροπέας 6-παλμών με thyristors (τριφασική γέφυρα ανόρθωσης) είναι ο περισσότερο χρησιμοποιούμενος μετατροπέας, σε κυκλώματα ανόρθωσης ή και αντιστροφής, στα ηλεκτρονικά ισχύος.

Εξαιτίας των σημαντικών αυτών εφαρμογών στην πράξη θα εξετάσουμε στο κεφάλαιο αυτό τη λειτουργία του με περισσότερες λεπτομέρειες .

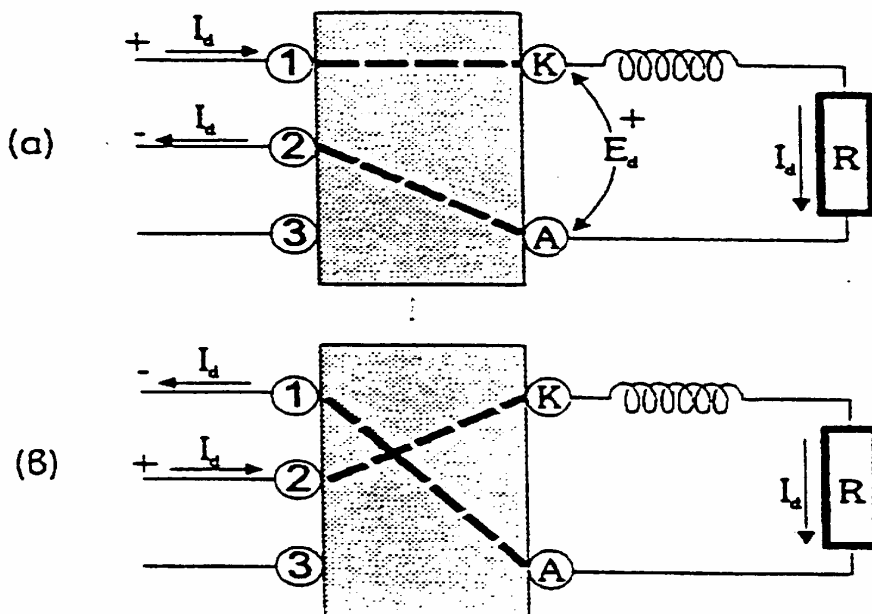


Σχήμα 2.36 Τριφασικός μετατροπέας 6-παλμών.

Ο μετατροπέας αυτός αποτελείται από 6 thyristors συνδεδεμένα στο δευτερεύον ενός τριφασικού μετασχηματιστή. Η διάταξη των thyristors είναι ακριβώς ίδια με αυτήν του τριφασικού ανορθωτή (με διόδους). Επειδή το κύκλωμα αυτό μπορούμε να αρχίσουμε την αγωγή των thyristors όταν εμείς επιθυμούμε, τα thyristors μας δίνουν την δυναμικότητα να μεταβάλλουμε την dc τάση εξόδου όταν ο μετατροπέας λειτουργεί σαν ανορθωτής. Ο ίδιος μετατροπέας μπορεί να λειτουργήσει και σαν αντιστροφέας αν στη θέση του φορτίου R συνδέσουμε μια πηγή d.c.

Βασική αρχή λειτουργίας.

Αναφερόμενοι στα παρακάτω σχήματα υποθέτουμε ότι τα thyristors είναι κλεισμένα σε ένα κουτί και το πηνίο έχει μια πολύ μεγάλη αυτεπαγωγή έτσι ώστε το ρεύμα φορτίου I_d να παραμένει σταθερό.



Σχήμα 2.37

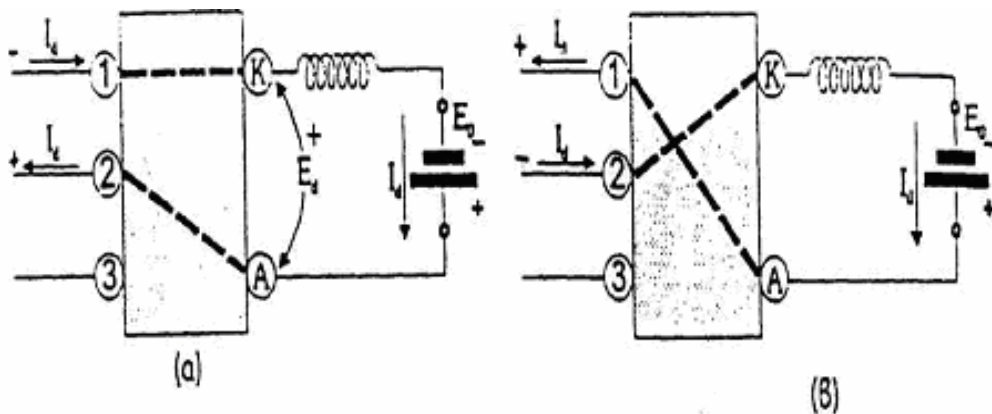
Στο σχήμα 2.37(a) τα thyristors Q_1, Q_5 είναι τοποθετημένα μεταξύ των άκρων K-1 και A-2 και είναι σε αγωγή. Σε μια χρονική στιγμή αργότερα τα thyristors Q_2, Q_4 που είναι τοποθετημένα μεταξύ των K-2 και A-1 θα άγουν. Τα άλλα thyristors είναι με τον ίδιο τρόπο τοποθετημένα και ανοιγοκλείνουν με τη σειρά τους. Όταν τα στάδια αυτά πραγματοποιηθούν όλος ο κύκλος λειτουργίας επαναλαμβάνεται.

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι το d.c. ρεύμα ρέει στις γραμμές a.c. όπως δείχνει και το σχήμα 2.37 και αντιστρέφεται περιοδικά. Έτσι στην πραγματικότητα είναι ένα a.c ρεύμα πλάτους I_d . Είναι ακόμα φανερό ότι το ρεύμα σε μια ιδιαίτερη γραμμή (σε κάθε γραμμή χωριστά) είναι μηδέν για ένα σύντομο χρονικό διάστημα (η γραμμή 3 στο σχήμα 2.37).

Η σειρά λειτουργίας που περιγράφηκε είναι όμοια με αυτήν της γέφυρας με διόδους με μια σημαντική διαφορά. Τα thyristors μπορούν να άγουν για μια χρονική στιγμή που εμείς επιθυμούμε στη διάρκεια της a.c περιόδου. Έτσι η αγωγή μπορεί ν' αρχίσει όταν η στιγμιαία τάση μεταξύ των a.c. γραμμών είναι υψηλή ή χαμηλή. Αν η τάση είναι χαμηλή τότε η dc τάση στην έξοδο θα είναι επίσης χαμηλή. Αντίθετα τα thyristors άγουν όταν η τάση των a.c. γραμμών στιγμιαία πλησιάζει την μέγιστη της τιμή, τότε η dc τάση εξόδου θα είναι υψηλή. Η μέση τιμή της E_{KA} είναι η dc τάση εξόδου E_d . Τα παραπάνω μας δείχνουν πως ο μετατροπέας λειτουργεί σαν ανορθωτής. Ο ίδιος μετατροπέας μπορεί να λειτουργήσει και σαν αντιστροφέας αν εκπληρωθούν τρεις βασικές συνθήκες.

- Πρέπει να υπάρχει μια πηγή dc τάσης E_0 που να μπορεί να εξασφαλίσει ένα ρεύμα I_d . Η πηγή αυτή να συνδέεται σε σειρά με μια αυτεπαγωγή μεγάλης τιμής (για την διατήρηση του ρεύματος I_d).
- Ο μετατροπέας πρέπει να συνδεθεί με μια τριφασική γραμμή ημιτονοειδούς τάσης που η μορφή της αυτή να μπορεί να διατηρηθεί ακόμα και αν το ρεύμα γραμμής δεν είναι ημιτονοειδές. Η τάση αυτή μπορεί να προέρχεται π.χ. από μια τοπική γεννήτρια.

- Τα thyristors πρέπει να σκανδαλίζονται έτσι ώστε το ρεύμα I_d να ρέει σε μια γραμμή της a.c. πλευράς η οποία είναι στιγμιαία θετική. Επομένως η πυροδότηση της πύλης πρέπει να είναι συγχρονισμένη με τη συχνότητα της γραμμής. Η κατανόηση της λειτουργίας του αντιστροφέα μπορεί να γίνει ευκολότερα με αναφορά στο σχήμα 2.38.



Σχήμα 2.38 Λειτουργία αντιστροφέα.

α. Q_1, Q_3 σε αγωγή.

β. Q_2, Q_4 σε αγωγή.

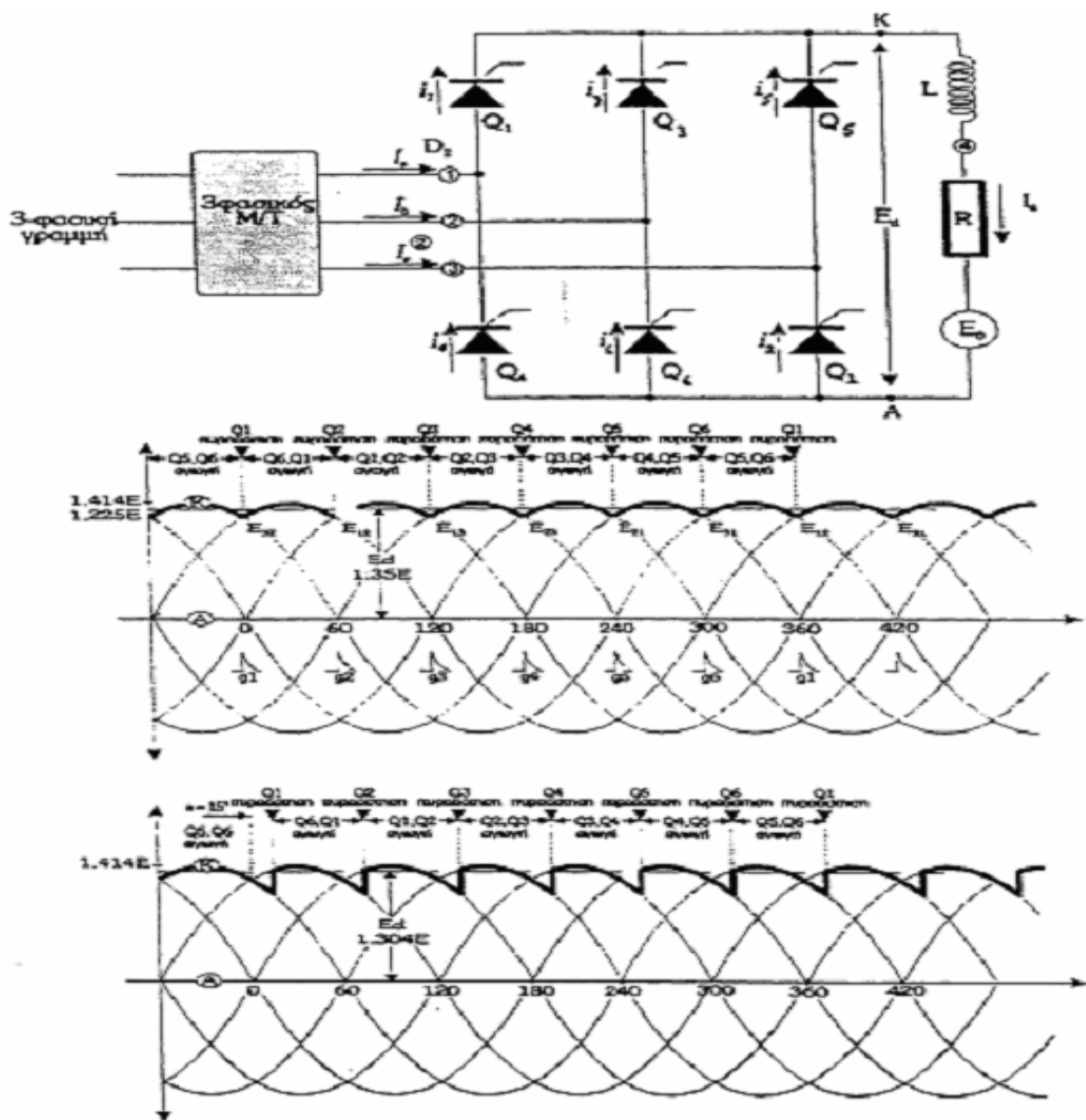
Η σύνδεση του σχήματος 2.38 είναι ακριβώς ίδια με αυτήν του σχήματος 2.37 εκτός από την αντικατάσταση της αντίστασης R με την πηγή E_o . Κοιτάζοντας πρώτα από την πλευρά του dc, το ρεύμα I_d πρέπει να ρέει κατά την ίδια διεύθυνση όπως προηγούμενα γιατί τα thyristors δεν μπορούν να άγουν διαφορετικά. Από την άλλη πλευρά, επειδή χρειαζόμαστε η πηγή E_o να δίδει ισχύ, πρέπει το I_d να ρέει όπως δείχνει το σχήμα 2.38. Με άλλα λόγια το συν (+) της πηγής E_o πρέπει να συνδεθεί με το άκρο A. Από την άλλη πλευρά η τριφασική γραμμή συνδέεται στα άκρα 1,2,3. Για τον σκανδαλισμό τώρα των thyristors πρέπει να προσέξουμε έτσι ώστε αυτός να γίνει κατά τέτοιον τρόπο που η a.c. γραμμή να τροφοδοτείται με ισχύ. Αυτό γίνεται στο σχήμα 2.38 γιατί το ρεύμα I_d ρέει πάντα σε μια a.c. γραμμή που είναι στιγμιαία θετική.

Να σημειωθεί ότι οι πολικότητες των τάσεων γραμμής στη σύνδεση του μετατροπέα σαν αντιστροφέα είναι ακριβώς αντίθετες από αυτές του ανορθωτή. Το ρεύμα γραμμής εναλλάσσεται όπως πριν και έχει μια μέγιστη τιμή ίση με I_d . Αν η dc τάση E_o είναι χαμηλή, τα thyristors πρέπει να πυροδοτηθούν όταν η στιγμιαία a.c. τάση είναι χαμηλή. Αντίθετα όταν η dc τάση είναι υψηλή, τα thyristors πρέπει να πυροδοτηθούν όταν η a.c. τάση γραμμής είναι κοντά στη μέγιστη τιμή της. Τέλος για τη διατήρηση του ρεύματος I_d σε σταθερή τιμή, το πηνίο λειτουργεί σαν μια απομονωτική βαθμίδα μεταξύ της κυμαινόμενης τάσης E_{KA} και της σταθερής τάσης E_o .

Τριφασικός ανορθωτής 6-παλμών με ενεργό φορτίο.

Ας θεωρήσουμε το κύκλωμα του σχήμα 2.39 στο οποίο ένας τριφασικός μετατροπέας τροφοδοτεί ένα φορτίο που αποτελείται από μια πηγή dc τάσης E_0 και μια αντίσταση με ένα πηνίο εξομάλυνσης σε σειρά. Ο μετατροπέας τροφοδοτείται από ένα τριφασικό μετασχηματιστή. Οι πύλες των thyristor Q_1 έως Q_6 σκανδαλίζονται διαδοχικά κατά διαστήματα 60° . Υποθέτουμε ότι ο μετατροπέας βρίσκεται σε λειτουργία για κάποιο χρόνο έτσι ώστε οι συνθήκες να είναι σταθερές.

Αρχικά έστω τα thyristors Q_5 και Q_6 άγουν μεταφέροντας ρεύμα φορτίου I_d (σχήμα 3.12α). Μετά, στις 0° σημείο (θ_0), το thyristor Q_1 σκανδαλίζεται με ένα παλμό πύλης.



Σχήμα 2.39 Τριφασικός ανορθωτής 6-παλμων.

α. Γωνία έναυσης 0° .

β. Γωνία έναυσης 15° .

Τότε το Q_1 αρχίζει να άγει αναλαμβάνοντας από το Q_5 . Στις 60° το thyristor Q_2 πυροδοτείται με αποτέλεσμα της μεταγωγής αυτής τη μεταφορά του ρεύματος φορτίου από το Q_6 στο Q_2 . Αυτή η διαδικασία συνεχίζεται όπως το σχήμα 3.12 δείχνει, το σημείο K ακολουθεί τα μέγιστα των διαδοχικών κυμάτων. Τα thyristor ονομάζονται ($Q_1 Q_2 \dots Q_6$) συμφωνά με τη σειρά κατά την οποία σκανδαλίζονται.

Δύο thyristors άγουν κάθε χρονική στιγμή, και τα ζευγάρια που βρίσκονται κάθε φορά σε αγωγή είναι : Q_1-Q_2 , Q_2-Q_3 , Q_3-Q_4 κ.ο.κ. Επομένως αναφερόμενος στο σχήμα 2.40 μπορούμε να πούμε με μια ματιά ποια thyristors βρίσκονται σε αγωγή για κάθε χρονική στιγμή. Ο μετατροπέας ενεργεί σαν ένας ανορθωτής και η μέση τιμή της dc τάσης μεταξύ K και A είναι $E_d = 1.35E$. Επειδή δεν υπάρχει ουσιαστική πτώση τάσης στο πηνίο, η dc τάση μεταξύ των σημείων 4 και A είναι επίσης $1.35E$.

Επομένως το ρεύμα I_d θα δίδεται από τη σχέση :

$$I_d = (E_d - E_0) / R$$

Ο χρόνος σκανδαλισμού πρέπει να είναι πολύ ακριβής έτσι ώστε να πάρουμε την ανορθωμένη τάση που φαίνεται στο σχήμα 2.40(α).

Επομένως αν ο παλμός g_1 δοθεί λίγο πιο μπροστά από τη γωνία θ_0 η αγωγή δεν θα αρχίσει επειδή η άνοδος 1 είναι τότε αρνητική. Από την άλλη πλευρά αν ο παλμός g_1 δοθεί αργότερα από το θ_0 το Q_5 (μαζί με το Q_6) θα συνεχίζει να άγει.

Στην πράξη οι παλμοί σκανδαλισμού έχουν αρκετό πλάτος για να εξασφαλίσουν την μεταγωγή την κατάλληλη στιγμή.

Αν τώρα καθυστερήσουμε όλους τους παλμούς έναυσης κατά μια γωνία 15° το ρεύμα I_d θα συνεχίζει να ρέει στο Q_5 έως όταν δοθεί ο παλμός g_1 στο Q_1 . Τότε θα έχουμε μεταγωγή και το δυναμικό του σημείου K "πηδά" από τη γραμμή 3 στη γραμμή 1. Η ίδια διαδικασία συμβαίνει (αλλά σε αργότερους χρόνους) για τα άλλα thyristors. Το τελικό αποτέλεσμα για τη μορφή του κύματος μεταξύ των άκρων K και A φαίνεται στο σχήμα 2.40(b).

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η καθυστέρηση αυτή στη γωνία έναυσης δεν ελαττώνει τη διάρκεια αγωγής γιατί κάθε thyristor θα εξακολουθεί να άγει για 120° και κάθε τμήμα της τάσης έχει μια διάρκεια 60° . Ακόμα το ρεύμα παραμένει σταθερό χωρίς κυματισμό λόγω της παρουσίας του πηνίου (που έχει μεγάλη αυτεπαγωγή). Το επίπεδο του σημείου K ακολουθεί τις κορυφές των ημιτονοειδών κυμάτων αλλά η μέση τιμή της τάσης E_d μεταξύ των K και A θα είναι προφανώς μικρότερη από πριν. Έτσι αυτή θα δίδεται από τη σχέση :

$$E_d = 1,35E \cos \alpha$$

και αν έχει δίοδο μεταγωγής :

$$E_d = \frac{3\sqrt{2}}{2\pi} E (1 + \cos \alpha)$$

όπου :

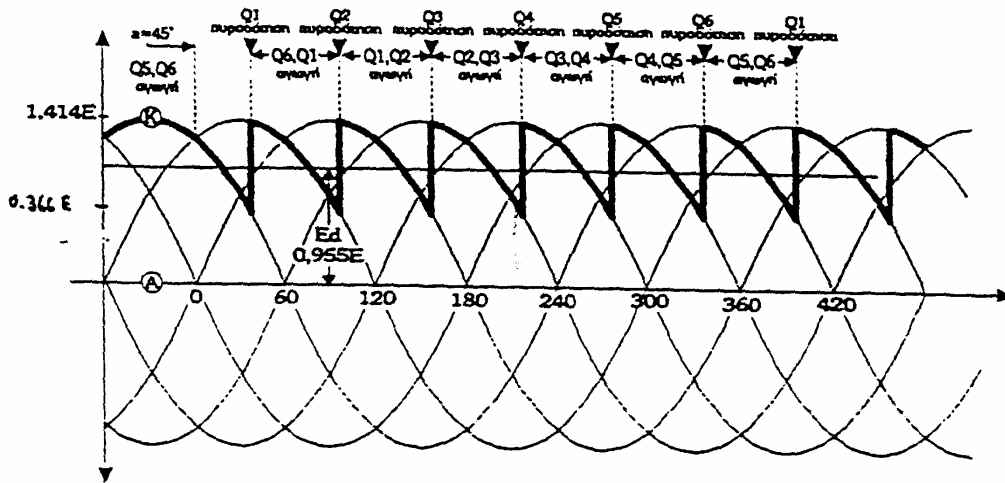
E_d = η παραγόμενη από τον μετατροπέα dc τάση.

E = η ενεργός a.c. πολική τάση.

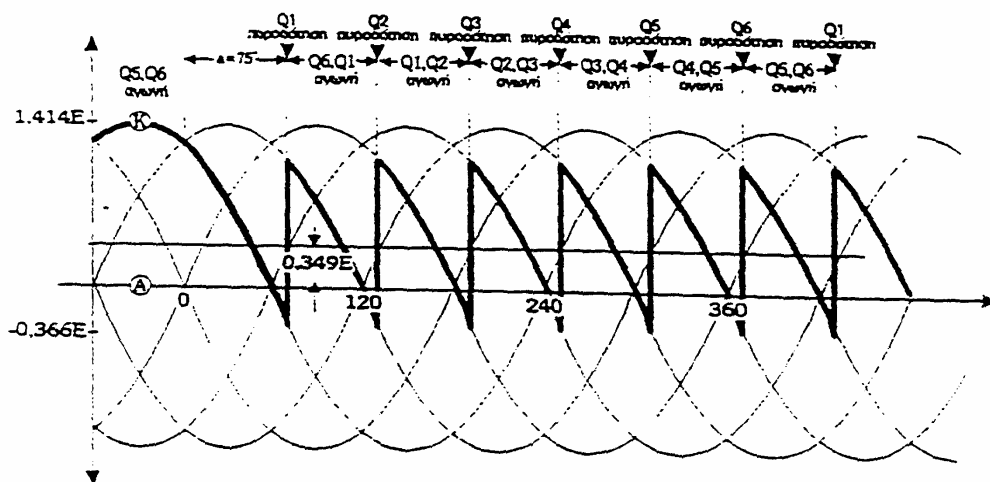
α = η γωνία έναυσης.

Αν η γωνία α γίνεται όλο και μεγαλύτερη τότε η τάση E_d γίνεται όλο και μικρότερη. Αν επομένως η E_d γίνει ίση με την E_o ή και μικρότερη το ρεύμα θα σταματήσει να ρέει στο φορτίο.

Αν η E_d γίνει μικρότερη από την E_o θα έπρεπε κανονικά το ρεύμα να αντιστρεφόταν, πράγμα όμως που δεν γίνεται γιατί τα thyristors άγουν μόνο κατά την ορθή διεύθυνση (ορθά πολωμένα). Τα σχήματα 2.40(γ) και 2.40(δ) δείχνουν την κυματομορφή μεταξύ των σημείων Κ και Α για γωνίες έναυσης $\alpha=45^\circ$ και $\alpha=75^\circ$ αντίστοιχα.



(γ)

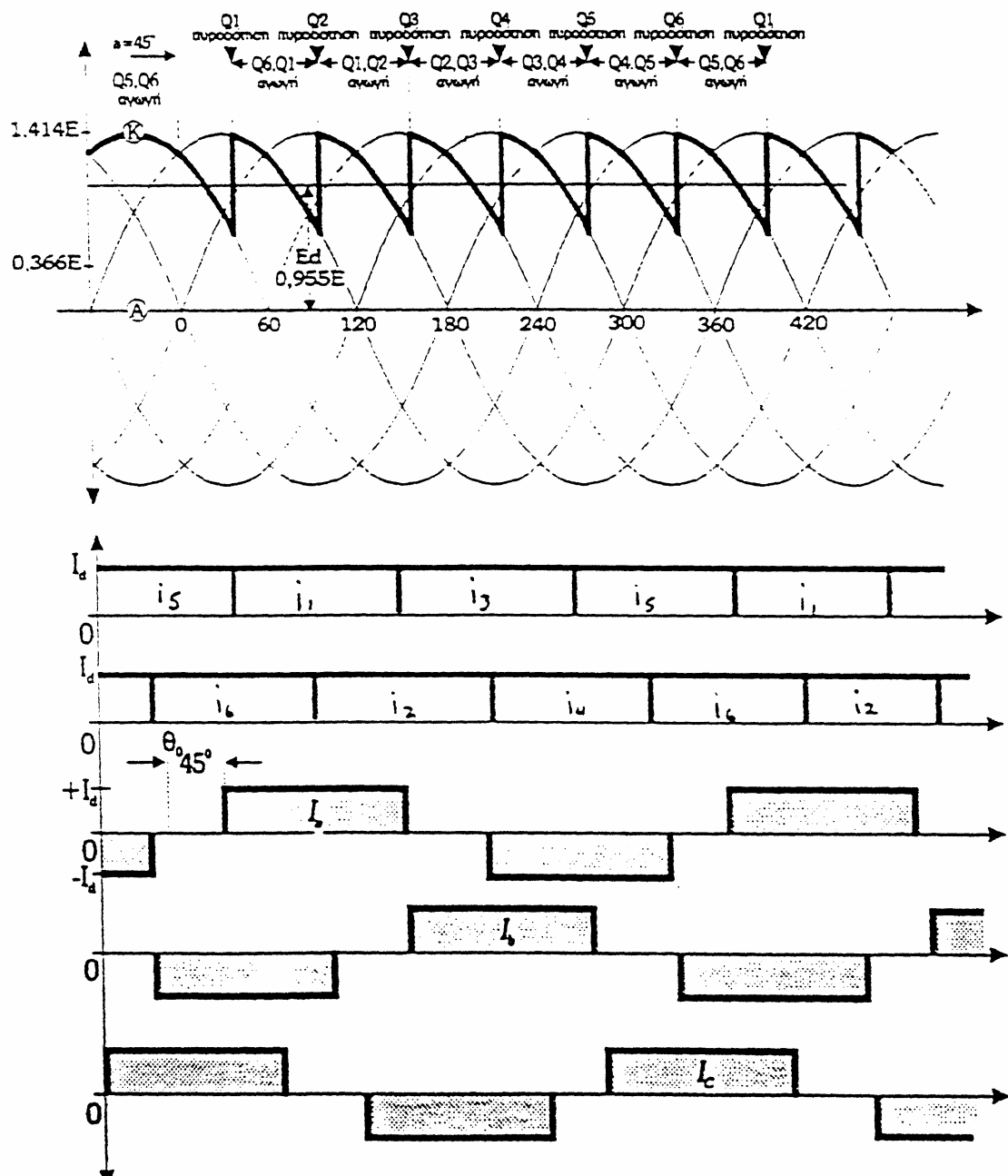


(δ)

Σχήμα 2.40
 γ. Γωνία έναυσης 45° .
 δ. Γωνία έναυσης 75°

Ρεύματα στον τριφασικό μετατροπέα 6-παλμων.

Το σχήμα 2.41 δείχνει τις κυματομορφές τάσης και ρεύματος όταν ο μετατροπέας λειτουργεί σαν ανορθωτής με γωνία έναυσης 45° . Τα ρεύματα $I_1, I_2, I_3, I_4, I_5, I_6$ σε κάθε thyristor ρέει για 120° και η μέγιστη τιμή καθ' ενός είναι ίση με την τιμή του συνεχούς ρεύματος I_d για κάθε γωνία μεταξύ 0° και 180° . Επομένως τα ρεύματα για κάθε μετατροπέα με thyristors είναι ταυτόσημα με αυτό του τριφασικού ανορθωτή με διόδους. Η μόνη διαφορά είναι ότι τα ρεύματα ρέουν με καθυστέρηση σε κάθε κύκλο.



Σχήμα 2.41 Κυματομορφές τάσης και ρεύματος του τριφασικού μετατροπέα, με γωνία έναυσης 45° .

Οι κυματομορφές των αντίστοιχων ac ρευμάτων γραμμής βρίσκονται εύκολα γιατί αυτά είναι ίσα ε τη διαφορά των σχετικών ρευμάτων των thyristors. Έτσι με αναφορά στο σχήμα 2.40 το ρεύμα γραμμής θα είναι $I_a = I_1 - I_4$. Τα ρεύματα των γραμμών έχουν όπως μια μέγιστη τιμή I_d αλλά ρέουν σε θετικούς και σε αρνητικούς παλμούς των 120° . Το θερμικό αποτέλεσμα των ρευμάτων των γραμμών a.c. είναι πολύ σημαντικό επειδή συνήθως ρέουν στα τυλίγματα του μετασχηματιστή του μετατροπέα. Η απώλεια I_R^2 εξαρτάται από την ενεργό τιμή του ρεύματος I και όπως είδαμε $I = 0.816 I_d$.

Η ενεργός τιμή του ρεύματος γραμμής είναι επομένως κατευθείαν ανάλογη του dc ρεύματος εξόδου και δεν εξαρτάται από την γωνία έναυσης. Τα ίδια συμβαίνουν και όταν ο μετατροπέας λειτουργεί σαν αντιστροφείας.

Ακόμα τα ρεύματα των γραμμών καθυστερούν των αντιστοίχων τάσεων κατά 45° ($\alpha = 45^\circ$) που σημαίνει ότι ο μετατροπέας απορροφά άεργη ισχύ από το σύστημα a.c. με το οποίο είναι συνδεδεμένος. Αυτό συμβαίνει όταν ο μετατροπέας λειτουργεί ή σαν ανορθωτής ή σαν αναστροφείας και η άεργος αυτή ισχύς δίδεται από τη σχέση :

$$Q = P \tan \alpha$$

όπου :

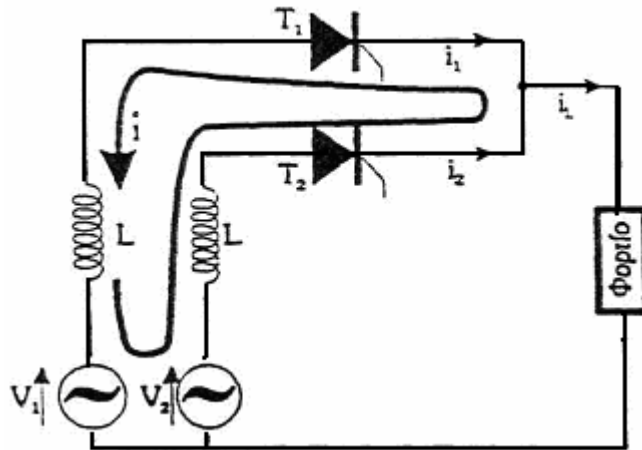
Q = άεργος ισχύς που απορροφάται από τον μετατροπέα (VAR)

P = dc ισχύς του μετατροπέα (θετική για ανορθωτή και αρνητική για αντιστροφεία) (Watt).

α = γωνία έναυσης.

Επικάλυψη (Overlap).

Στα αναφερθέντα μέχρι τώρα θεωρήσαμε τις πηγές σαν ιδανικές με αποτέλεσμα στην εξέταση των διαφόρων κυκλωμάτων να δεχθούμε ότι η μεταφορά ρεύματος από μια δίοδο ή ένα thyristor σε ένα άλλο να γίνεται στιγμιαία. Στην πράξη όμως οι πηγές (δευτερεύοντα μετασχηματιστών) έχουν αντίσταση και αυτεπαγωγή και έτσι να απαιτείται κάποιος χρόνος για την αλλαγή του ρεύματος, θεωρώντας ότι η αυτεπαγωγική αντίδραση μιας a.c. πηγής είναι πολύ μεγαλύτερη από την ωμική της αντίσταση (επομένως αυτή θεωρείται αμελητέα) ας εξετάσουμε το φαινόμενο αυτό σε ένα τριφασικό ανορθωτή μισού κύματος.



Σχήμα 2.42
Μεταγωγή μεταξύ δύο thyristors T₁ και T₂.

Με ένα σταθερό ρεύμα φορτίου, η επίδραση της "πυροδότησης" του T₂ είναι να προκαλέσει ένα ρεύμα κυκλοφορίας (circulating current) μεταξύ των thyristors T₁ και T₂ όπως δείχνει το σχήμα 2.42. Το ρεύμα αυτό θα αυξάνει από μηδέν, την στιγμή της "πυροδότησης" του T₂, μέχρι I_L που είναι το ρεύμα φορτίου, ενώ το ρεύμα στο T₁ θα γίνεται μηδέν και το thyristor αυτό θα γίνεται μη αγωγίμο. Η χρονική περίοδος τώρα στην οποία και τα δύο thyristors άγουν αναφέρεται σαν περίοδος επικάλυψης και καθορίζεται από τη γωνία επικάλυψης γ. Θεωρώντας αμελητέα την πτώση τάσης των thyristors η γωνία αυτή υπολογίζεται ως εξής :

$$u_2 - u_1 = L \frac{d_i}{d_t} + L \frac{d_i}{d_t} = 2L \frac{d_i}{d_t} \quad (1) \quad u_2 - u_1 = \text{τάση γραμμής ή πολική τάση}$$

Για t=0 την στιγμή της "πυροδότησης" του T₂ θα έχουμε :

$$u_2 - u_1 = u_{LINE} = \sqrt{3}V_m \sin(\omega t + a) \quad (2)$$

Από την (1) και (2) προκύπτει ότι :

$$2L \frac{d_i}{d_t} = \sqrt{3}V_m \sin(\omega t + a) \quad \text{ή} \quad d_i = \frac{\sqrt{3}V_m}{2L} \sin(\omega t + a) dt$$

και ολοκληρώνοντας από t=0 έως t έχουμε :

$$i = \frac{\sqrt{3}V_m}{2\omega L} [\cos a - \cos(\omega t + a)]$$

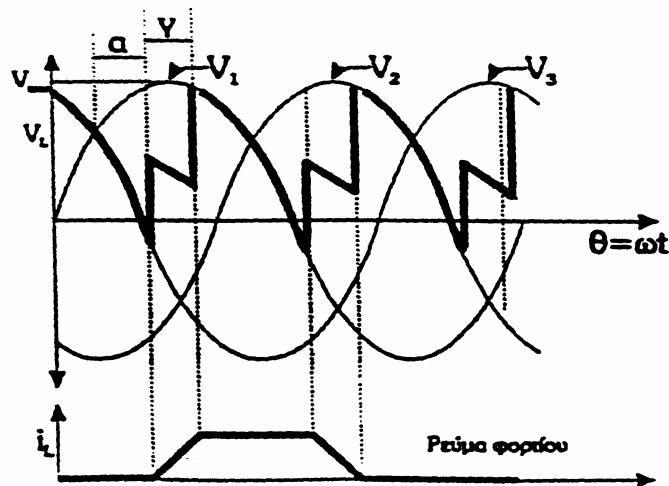
Η επικάλυψη αυτή ολοκληρώνεται για $I=I_L$ δηλαδή $\omega t=\gamma$. Άρα

$$i = \frac{\sqrt{3}V_m}{2\omega L} [\cos a - \cos (\gamma + a)]$$

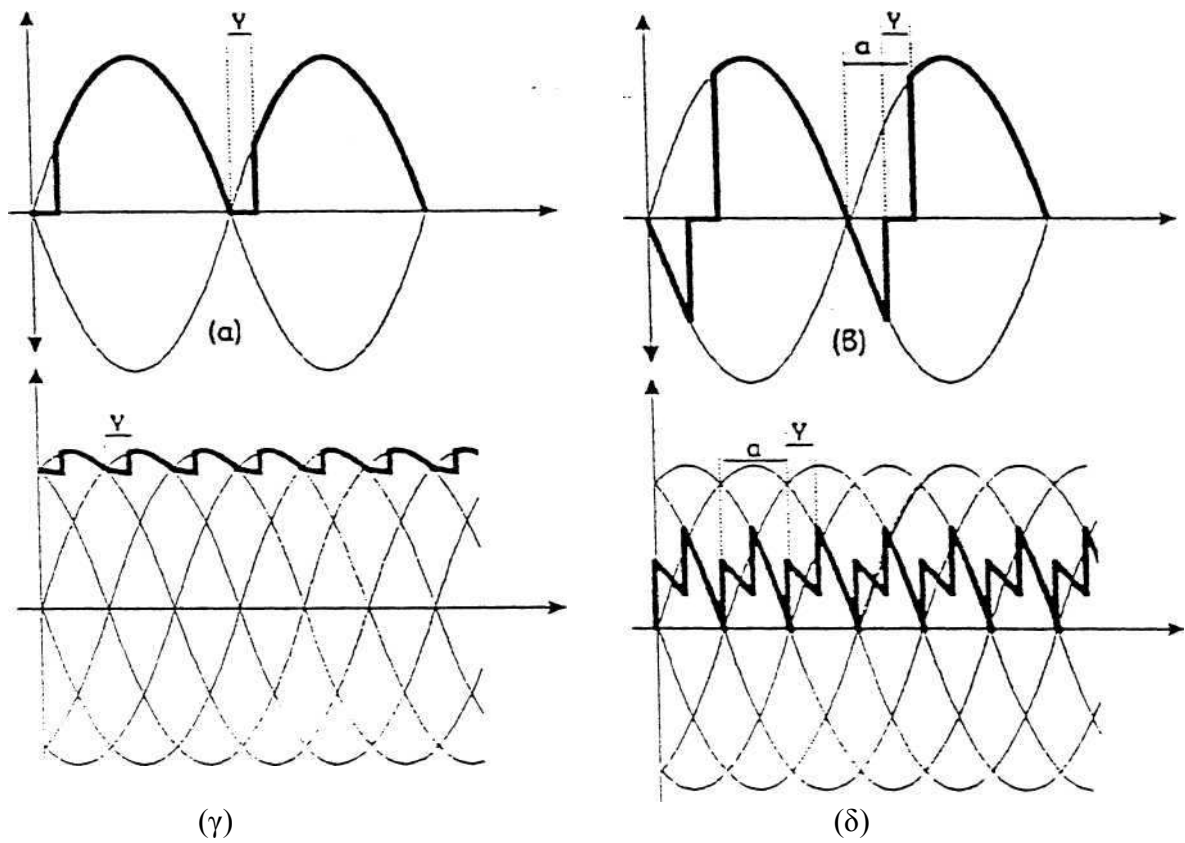
$$\int_0^t di = \int_0^t \frac{\sqrt{3}V_m}{2L} \sin(\omega t + a) dt \Rightarrow i = \frac{\sqrt{3}V_m}{2\omega L} \cos a (-\cos \omega t)_0^t + \frac{\sqrt{3}V_m}{2\omega L} \sin a (\sin \omega t)_0^t \Rightarrow$$

$$i = -\frac{\sqrt{3}V_m}{2\omega L} \cos a \cos \omega t + \frac{\sqrt{3}V_m}{2\omega L} \cos a + \frac{\sqrt{3}V_m}{2\omega L} \sin a \sin \omega t \Rightarrow$$

$$i = \frac{\sqrt{3}V_m}{2\omega L} [\cos a - \cos a \cos \omega t + \sin a \sin \omega t] \Rightarrow i = \frac{\sqrt{3}V_m}{2\omega L} [\cos a - \cos (\omega t + a)]$$



Σχήμα 2.43



Σχήμα 2.44 Τυπικές κυματομορφές δείχνοντας την επικάλυψη.

- (α) 2-παλμών μη-ελεγχόμενος.
- (β) 2-παλμών ελεγχόμενος.
- (γ) 6-παλμών μη-ελεγχόμενος.
- (δ) 6-παλμών ελεγχόμενος.

Η μέση τιμή της τάσης του φορτίου θα δίνεται από τη σχέση :

$$V_{MEAN} = \frac{3\sqrt{3}V_{MAX}}{4\pi} [\cos a + \cos(a + \gamma)]$$

2.2.3 Εισαγωγή στους αντιστροφείς (Inverters DC-AC).

Οι αντιστροφείς είναι μετατροπείς της DC τάσης ή ρεύματος σε AC με μεταβλητή συχνότητα και πλάτος. Χρησιμοποιούνται κυρίως σε συστήματα :

- Ελέγχου ταχύτητας μηχανών AC
- Ελέγχου θερμοκρασίας
- Ελέγχου ηλεκτρικής ενέργειας
- Ελέγχου τάσης εξόδου αιολικών διατάξεων
- Ελέγχου τάσης εξόδου φωτοβολταϊκών διατάξεων κ.α.

Διακρίνονται σε δύο κατηγορίες :

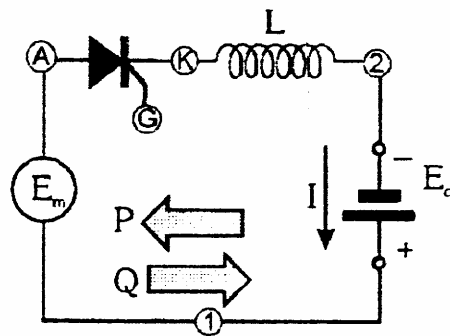
1. Στους αντιστροφείς με τροφοδότηση από πηγή DC τάσης (voltage-sourced inverter).
2. Στους αντιστροφείς με τροφοδότηση από πηγή DC ρεύματος (current-sourced inverter).

Λειτουργία αντιστροφέων.

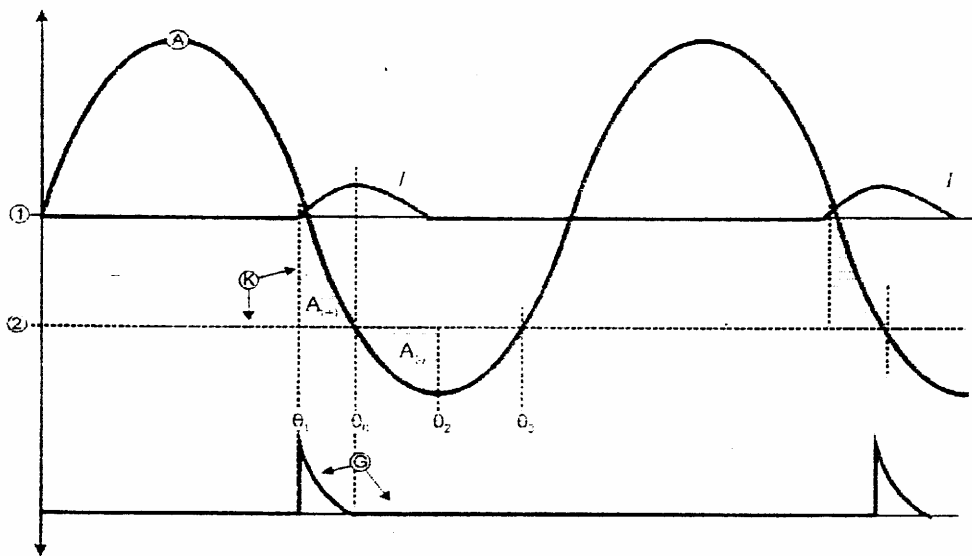
Αντιστροφέας φυσικής μεταγωγής.

Ένας αντιστροφέας εξ' ορισμού μετατρέπει μια DC ισχύ σε μια AC ισχύ. Δηλαδή κάνει την αντίστροφη λειτουργία ενός ανορθωτή. Υπάρχουν δύο είδη αντιστροφέων. Ο αντιστροφέας φυσικής μεταγωγής και ο αντιστροφέας εξαναγκασμένης μεταγωγής.

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



(Κύκλωμα αναστροφέα)



(Χαρακτηριστικές τάσεις & ρεύματα)

Σχήμα 2.45

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

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

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

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

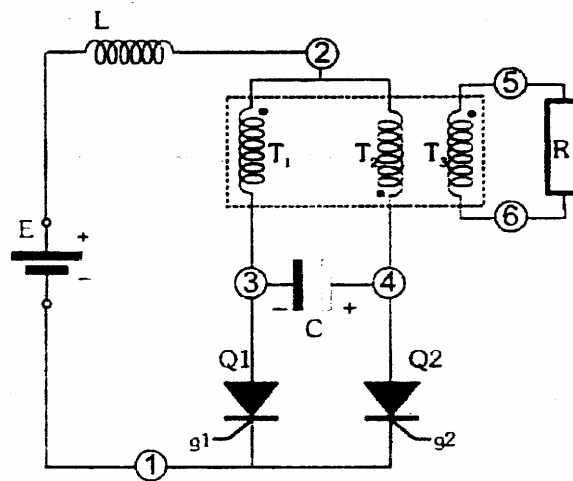
Για τον ίδιο λόγο η αγωγή δεν μπορεί να αρχίσει αμέσως μετά τη γωνία θ_3 . Τα (peaks) μέγιστα του ρεύματος καθυστερούν των θετικών μέγιστων της τάσης και έτσι η AC πηγή πρέπει ακόμη να τροφοδοτήσει με αεργή ισχύ Q τον αντιστροφέα. Επομένως P και Q ρέουν σε αντίθετες διευθύνσεις σε έναν αντιστροφέα.

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

Αντιστροφέας δυναμικής (εξαναγκασμένης) μεταγωγής.

Ο αντιστροφέας αυτός μετατρέπει DC ισχύ σε AC ισχύ. Υπάρχουν πολλοί τύποι αντιστροφέων εξαναγκασμένης μεταγωγής και όλοι στηρίζουν τη λειτουργία τους στη δυναμική μεταγωγή. Η συχνότητα εξόδου μπορεί να φθάσει μέχρι και 20 KHz εξαρτώμενη από την ικανότητα switching των θυρίστωρς.

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

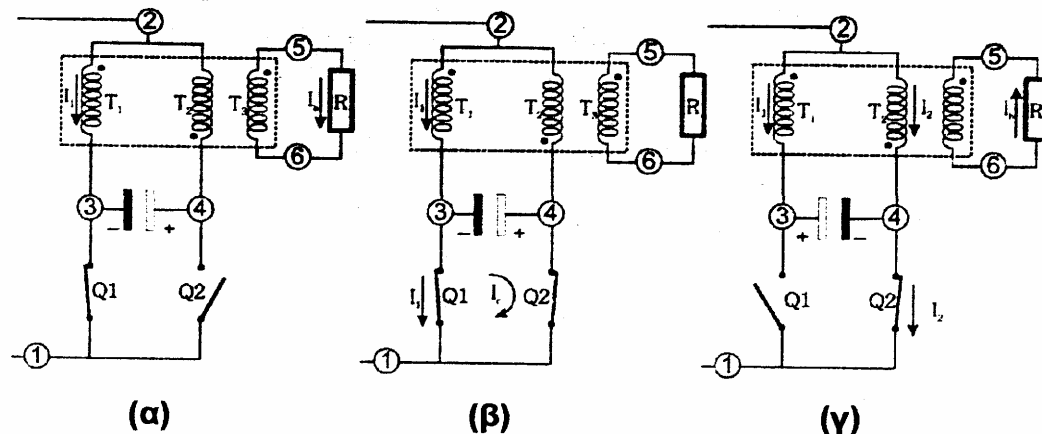


Σχήμα 2.46

Ο αντιστροφέας αυτός αποτελείται από :

1. Την πηγή DC E .
2. Τα θυρίστωρς $Q1$, $Q2$.
3. Το πηνίο εξομάλυνσης για τη διατήρηση σταθερού ρεύματος πηγής.
4. Τον πυκνωτή μεταγωγής C .
5. Ένα Μ\Τ με δύο πρωτεύοντα $T1$, $T2$ και ένα δευτερεύων $T3$ και ο οποίος θεωρούμε ότι είναι ιδανικός.
6. Το φορτίο.
7. Ένα σύστημα ελέγχου εξωτερικό (το οποίο δεν φαίνεται στο σχήμα) για τον σκανδαλισμό των θυρίστωρς $Q1$, $Q2$.

Για να καταλάβουμε τη λειτουργία του αντιστροφέα, υποθέτουμε ότι αρχικά το Q1 βρίσκεται σε αγωγή και το Q2 είναι μανδαλωμένο. Το σταθερό ρεύμα I_1 ρέει στο πρωτεύον T1 και ο πυκνωτής C είναι πλήρως φορτισμένος με τις πολικότητες που φαίνονται στο σχήμα 2.47(α).



Σχήμα 2.47

Το σταθερό ρεύμα I_1 επάγει ένα σταθερό ρεύμα I_a στο δευτερεύον τύλιγμα. Η κατάσταση αυτή διατηρείται έως ότου εφαρμόσουμε ένα παλμό στην πύλη του Q2 αρχίζοντας την αγωγή του.

Καθώς το Q2 θα αρχίσει να άγει το δυναμικό του σημείου 4 πέφτει στο δυναμικό του σημείου 1. Αμέσως ο πυκνωτής εκφορτίζεται παράγοντας ένα ρεύμα μεταγωγής I_c το οποίο ρέει αντίθετα από το I_1 2.47(β). Το ρεύμα I_c αυξάνεται πολύ γρήγορα και όταν $I_c = I_1$, το ρεύμα στο Q1 γίνεται μηδέν και τότε ενεργεί σαν ένας ανοικτός διακόπτης 2.47(γ). Με το Q1 τώρα μανδαλωμένο, ο πυκνωτής φορτίζεται γρήγορα μέσω του πρωτεύοντος T1 και επομένως το σημείο 3 γρήγορα γίνεται θετικό σε σχέση με το σημείο 4. Όταν οι συνθήκες αυτές σταθεροποιηθούν, το T2 μεταφέρει το ίδιο ρεύμα όπως το T1 μετέφερε πριν. Αυτό είναι συνοδευόμενο από ένα ρεύμα δευτερεύοντος I_b .

Ο επόμενος παλμός αρχίζει την αγωγή στο Q1 προξενώντας την πτώση του δυναμικού του σημείου 3 στο δυναμικό του σημείου 1. Ο πυκνωτής ξανά πάλι εκφορτίζεται και έτσι μανδαλώνεται το Q2 ξαναγυρνώντας πάλι στο ίδιο σημείο που ξεκινήσαμε.

Ουσιαστικά δηλαδή οι εναλλασσόμενοι παλμοί πύλης που μεταφέρουν την αγωγή από το ένα θυρίστορ στο άλλο οφείλονται στην παρουσία του πυκνωτή μεταγωγής C.

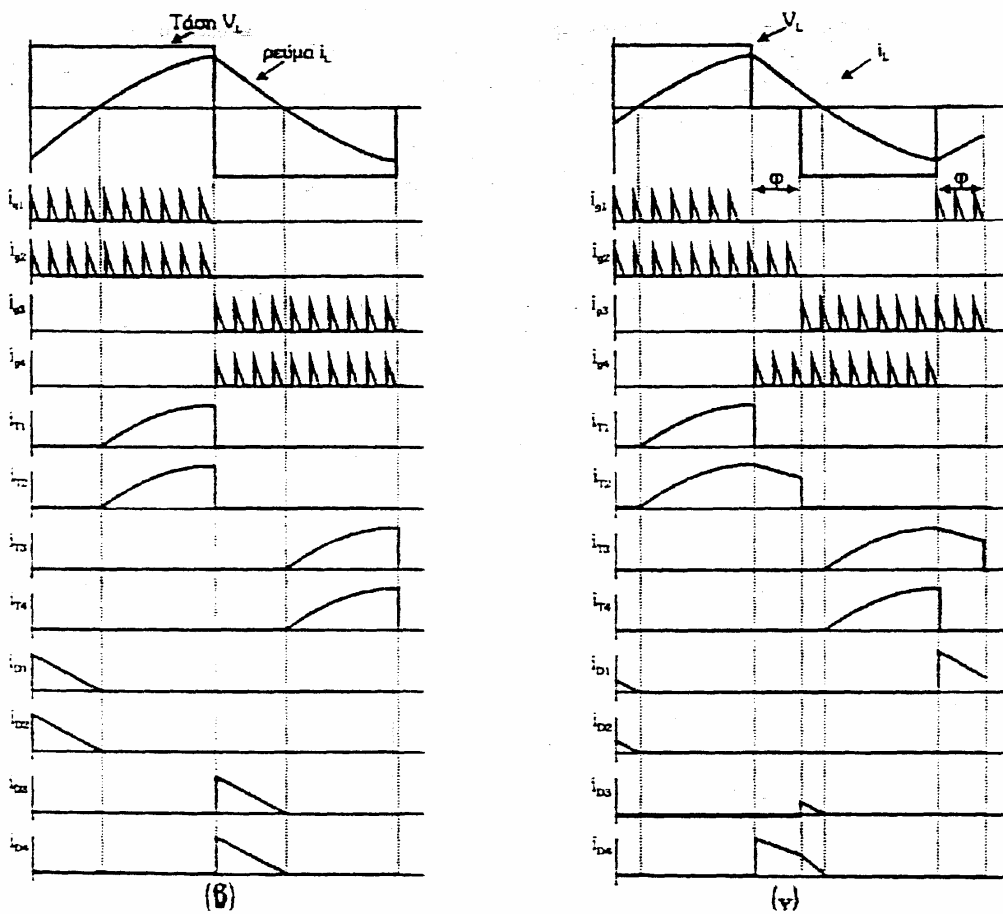
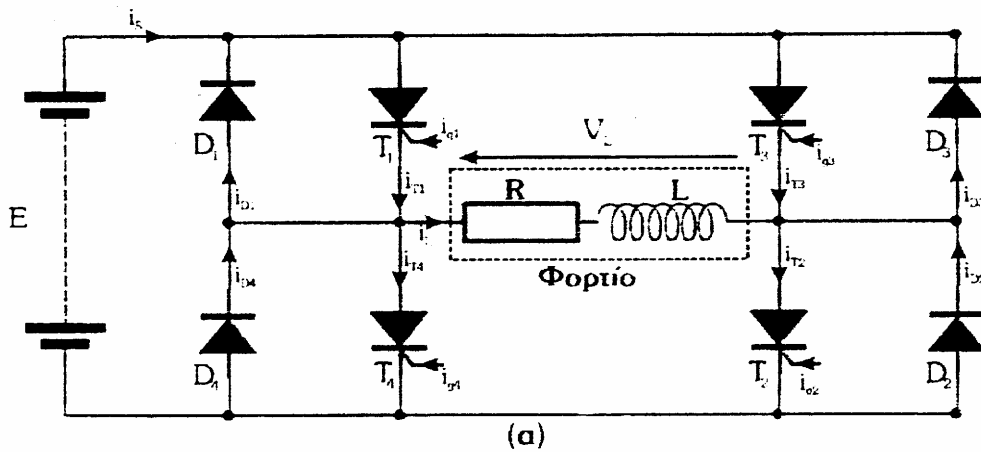
Σε σχέση με το Μ\Τ, όταν το Q1 άγει το ρεύμα I_1 επάγει ένα ρεύμα δευτερεύοντος I_a . Βασιζόμενοι στις πολικότητες 2.47(α) το I_a πρέπει να ρέει στη διεύθυνση που φαίνεται. Όμοια όταν Q2 άγει το I_2 επάγει ένα ρεύμα δευτερεύοντος I_b . Το αποτέλεσμα είναι ότι τα δύο δευτερεύοντα ρεύματα I_a και I_b είναι ίσα αλλά ρέουν σε αντίθετες διευθύνσεις. Επομένως το φορτίο διαρρέετε από ένα εναλλασσόμενο ρεύμα. Για την αλλαγή της συχνότητας πρέπει απλά να μεταβάλλουμε τη συχνότητα των παλμών στις πύλες των Q1,Q2. Με τον τρόπο αυτό μπορούμε να δημιουργήσουμε συχνότητες από 4 Hz έως 5000Hz ανάλογα με το σχεδιασμό του Μ\Τ και των SCR's. Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι οι αντιστροφείς αυτοί μπορούν να τροφοδοτούν με AC ισχύ ωμικά ή και επαγωγικά φορτία. Έτσι βρίσκονται σε πλήρη αντίθεση με τους αντιστροφείς φυσικής μεταγωγής οι οποίοι απορροφούν άεργη ισχύ από την AC πλευρά

Αντιστροφείς μονοφασικής γέφυρας.

Το βασικό κύκλωμα ενός αντιστροφέα με πηγή DC τάσης προκύπτει από τον συνδυασμό κυκλωμάτων choppers δύο τεταρτημόριων (που είναι και ένα κύκλωμα chopper 4 τεταρτημόριων). Ο συνδυασμός αυτός δίνει ένα ρεύμα διπλής (εναλλασσόμενης) κατεύθυνσης στο φορτίο και φαίνεται στο σχήμα 2.48. Η διάταξη αυτή αποτελεί έναν αντιστροφέα μονοφασικής γέφυρας.

Αν το φορτίο ήταν ωμικό τότε με την εναλλαγή της πυροδότησης των ζευγών των θυρίστωρς T1,T2 και T3,T4 θα τοποθετείται η πηγή DC κατά μήκος του φορτίου με εναλλασσόμενη πολικότητα δίνοντας έτσι ένα τετραγωνικό κυματισμό. Ωστόσο με ένα επαγωγικό φορτίο η κυματομορφή του ρεύματος είναι καθυστερημένη αν και η κυματομορφή της τάσης είναι σταθερή. Η λειτουργία μιας τάσης μιας τάσης φορτίου τετραγωνικού κύματος φαίνεται στο σχήμα 2.48(β). Τα θυρίστωρς πυροδοτούνται από συνεχείς παλμούς για 180° . Παρατηρώντας την μορφή του ρεύματος του φορτίου προς το τέλος της θετικής ημιπεριόδου συμπεραίνουμε ότι αυτό είναι θετικό αυξάνει εκθετικά. Ωστόσο όταν τα θυρίστωρς T3 και T4 πυροδοτούνται ενώ τα T1, T2 σβήνουν (από εξωτερικό κύκλωμα), η τάση στο φορτίο αντιστρέφεται και όχι το ρεύμα.

Το ρεύμα θα ελαττωθεί στο μηδέν όταν η ενέργεια που αποταμιευθεί στο πηνίο επιστρέψει στην πηγή DC μέσω των διόδων D3, D4. Τα θυρίστωρς T3 και T4 τώρα θα άγουν και το φορτίο θα τροφοδοτείται με ισχύ και το ρεύμα θα αυξάνεται εκθετικά.



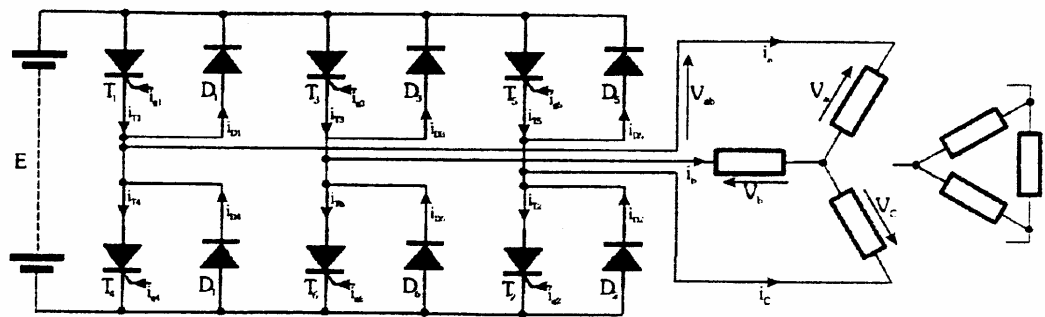
Σχήμα 2.48

Επειδή το ρεύμα του φορτίου κάποια στιγμή θα μηδενιστεί είναι απαραίτητο τα θυρίστορ να πυροδοτούνται από συνεχείς παλμούς έναυσης, όπως αυτό φαίνεται και το σχήμα παραπάνω. Σε πολλές εφαρμογές απαιτείται έλεγχος της τάσης του φορτίου. Για να επιτευχθεί αυτό θα πρέπει :

1. η πηγή DC να είναι σταθερής τιμής και
2. να δημιουργήσουμε μηδενικές περιόδους στο τετραγωνικό κύμα όπως φαίνεται στο σχήμα 2.48(γ). Η μορφή του κύματος τότε λέγεται ημιτετραγωνική.

Αντιστροφέας τριφασικής γέφυρας.

Το βασικό κύκλωμα ενός αντιστροφέα τριφασικής γέφυρας φαίνεται στο παρακάτω σχήμα :



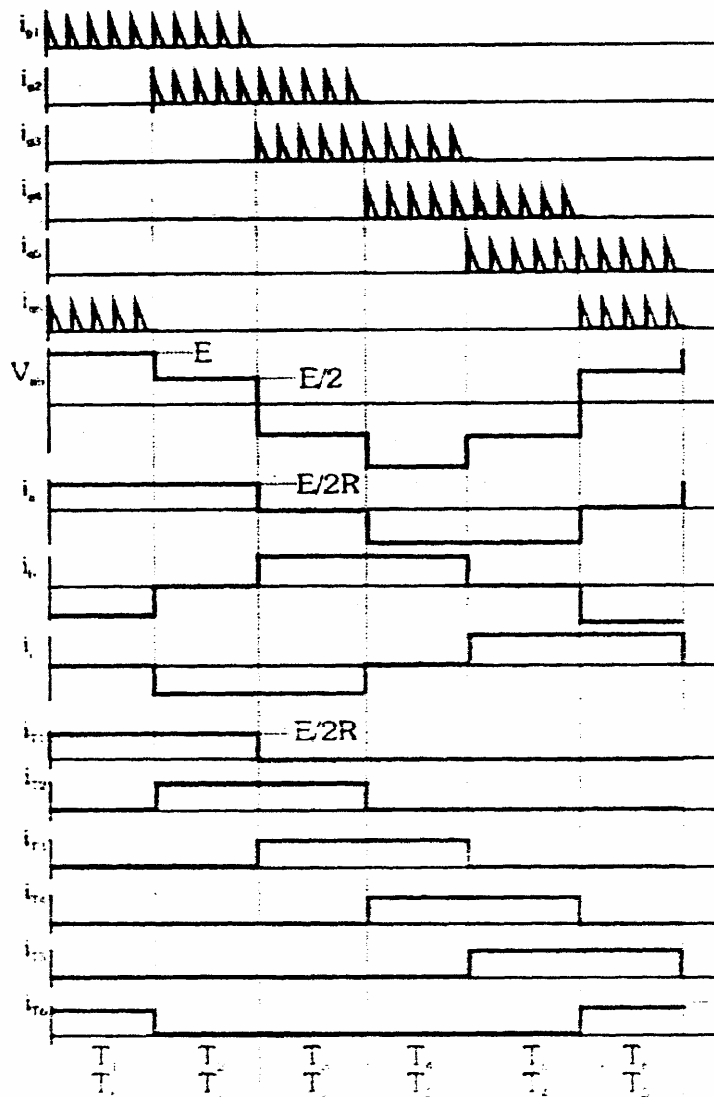
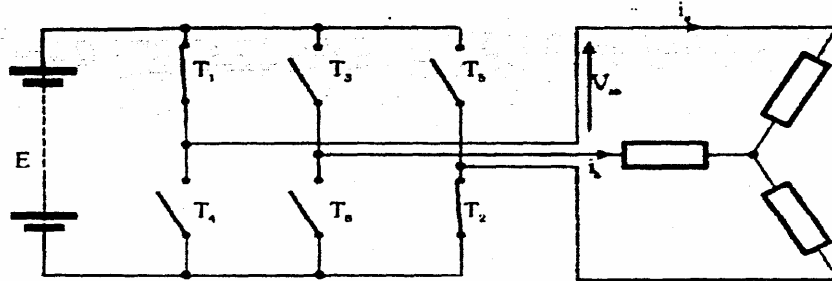
Σχήμα 2.49

Τα κυκλώματα αποκοπής των θυρίστωρ δεν φαίνονται στην διάταξη αυτή, όπως και στον αντιστροφέα μονοφασικής γέφυρας. Στον αντιστροφέα αυτό, όπως και στον ανορθωτή τριφασικής γέφυρας, κάθε θυρίστωρ μπορεί να άγει για 120° της περιόδου εξόδου. Ας εξετάσουμε το κύκλωμα αυτό για ένα φορτίο ωμικό που είναι συνδεδεμένο κατά αστέρα ή κατά τρίγωνο υποθέτοντας ότι στο τέλος των 120° της περιόδου ένα κύκλωμα αποκοπής σβήνει το κατάλληλο θυρίστωρ.

Με αναφορά λοιπόν στο σχήμα 2.50(α) κάθε θυρίστωρ άγει για 120° δηλαδή για το $1/3$ της περιόδου, (η πηγή συνδέεται με το φορτίο μέσω ενός θυρίστωρ από τη μια πλευρά και ενός άλλου από την άλλη), και θεωρώντας τα θυρίστωρ σαν διακόπτες η πηγή DC είναι ανοιγοκλεινόμενη (on-off) σε έξι βήματα έτσι που συνδεθεί η τριφασική έξοδος. Ο ρυθμός με τον οποίο τα θυρίστωρ αλλάζουν κατάσταση (on-off) καθορίζουν τη συχνότητα του φορτίου.

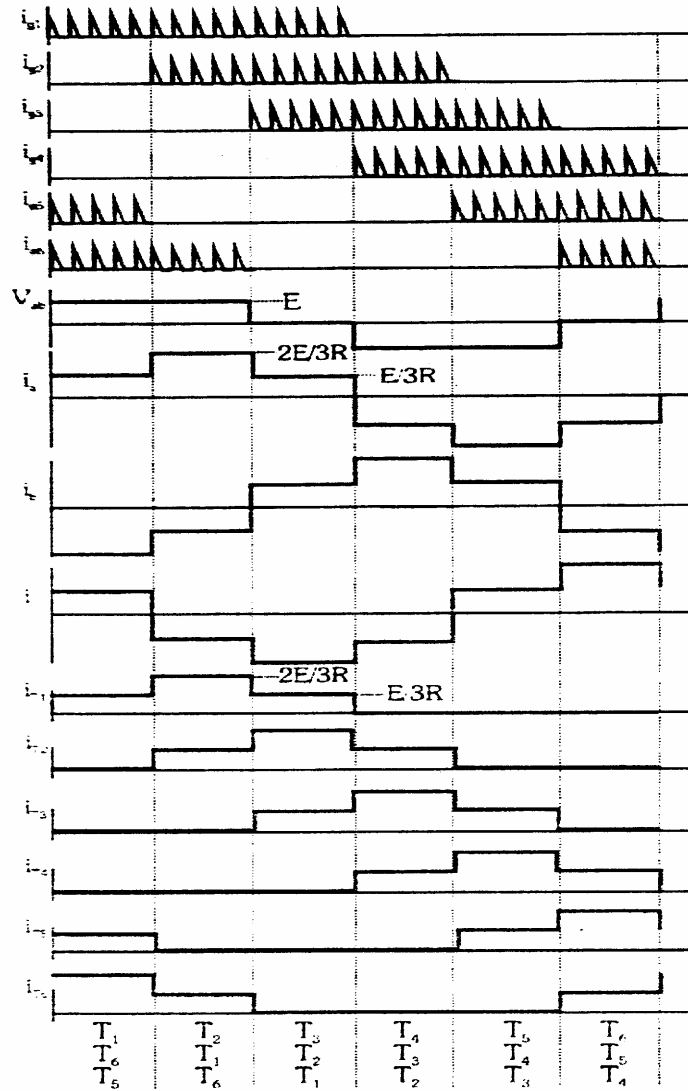
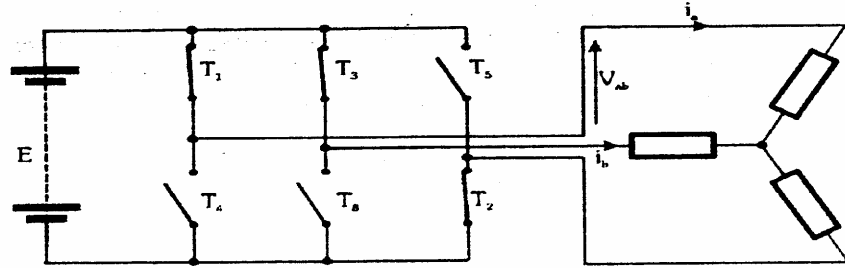
Έτσι το ρεύμα στο φορτίο θα έχει τη μορφή που δείχνουν οι κυματομορφές του σχήματος 2.50(β) δηλαδή θα είναι ημιτετραγωνικού κύματος. Η βηματική μορφή της τάσης (πολικής) μπορεί να πάρει άλλη μορφή αν το φορτίο δεν είναι καθαρά ωμικό αλλά υπάρχει και αυτεπαγωγή, καθώς τότε η μεταφορά του ρεύματος φορτίου στις διόδους θα διατηρήσει τους διακόπτες του σχήματος 2.50(α) (δηλαδή τα θυρίστωρ) κλειστά για μεγαλύτερο χρόνο από αυτόν των 120° .

Είναι περισσότερο συνηθισμένο ένας αντιστροφείας να λειτουργεί με κάθε thyristor σε αγωγή για 180° . Με αυτόν το τρόπο τώρα η πηγή DC συνδέεται με το φορτίο με ένα thyristor από τη μια μεριά και δύο thyristors από την άλλη.



Σχήμα 2.50

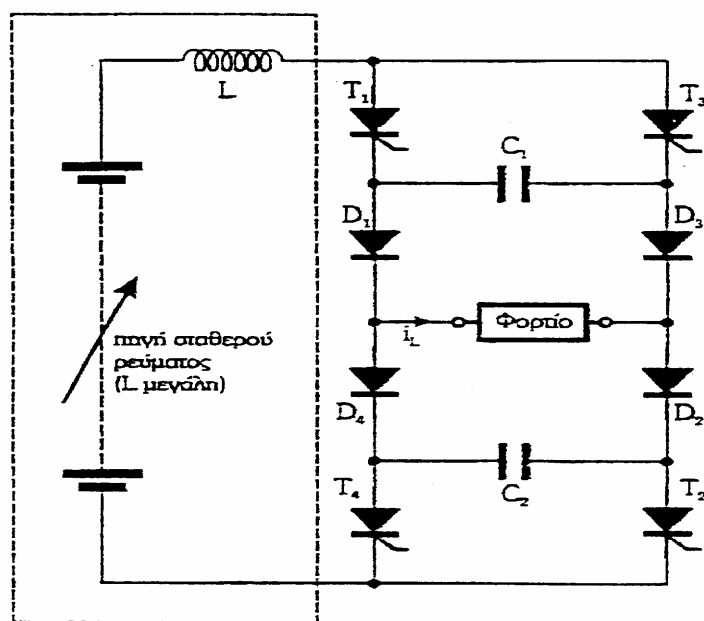
Οι κυματομορφές φαίνονται στο σχήμα 2.51 για ένα φορτίο καθαρά ωμικό. Η μορφή της τάσης αντίστοιχα με την προηγούμενη περίπτωση θα πάρει άλλη μορφή για το φορτίο που έχει αυτεπαγωγή.



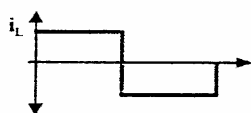
Σχήμα 2.51

Αντιστροφείς πηγής σταθερού ρεύματος.

Εξετάσαμε ήδη αντιστροφείς οι οποίοι τροφοδοτούνται από μια πηγή σταθερής τάσης και με τάση στα άκρα του φορτίου βηματικής μορφής. Οι αντιστροφείς πηγής σταθερού ρεύματος που θα δούμε τώρα έχουν το πλεονέκτημα ότι το ρεύμα από την πηγή DC είναι σταθερό και ανεξάρτητο από διάφορες συνθήκες στον αντιστροφέα για μια περίοδο μερικών κύκλων. Στην πράξη αυτό επιτυγχάνεται αν σε σειρά με την πηγή συνδεθεί μια μεγάλη αυτεπαγωγή έτσι ώστε οι αλλαγές στην τάση του αντιστροφέα που μπορεί να συμβούν να εξισορροπηθούν από την $U_L = L \frac{di}{dt}$. Αυτό βέβαια θα ισχύει για μικρά $\frac{di}{dt}$ και επομένως το ρεύμα θα διατηρείται σταθερό για μικρές χρονικές στιγμές. Με έναν αντιστροφέα σταθερού ρεύματος είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθεί ένα απλό κύκλωμα μεταγωγής μόνο με πυκνωτή, σαν αυτό του παρακάτω σχήματος.



(α)

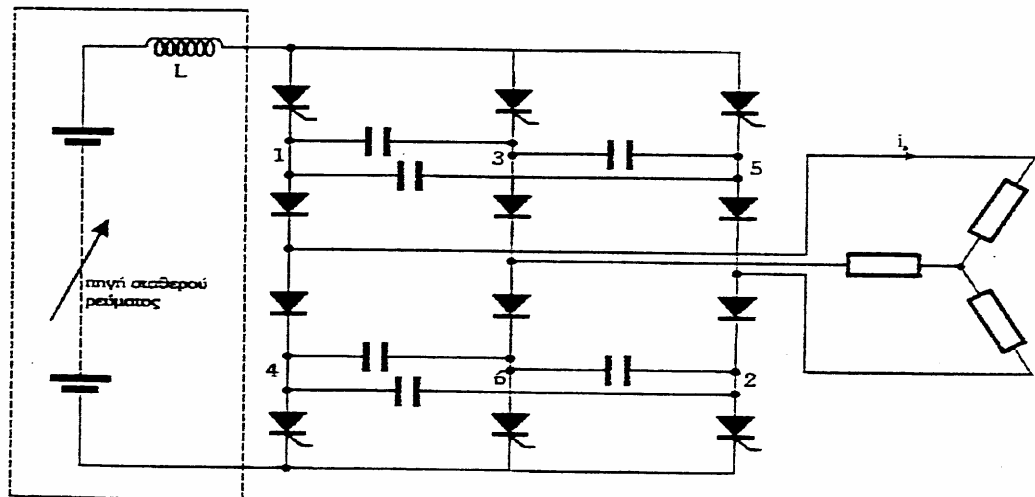


(β)

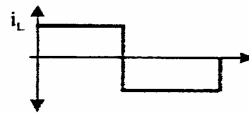
Στο κύκλωμα αυτό, με τα θυρίστρος T1 και T2 σε αγωγή και οι δύο πυκνωτές φορτίζονται με τον αριστερό τους οπλισμό θετικό (όπως φαίνεται στο σχήμα). Όταν τα θυρίστρος T3 και T4 πυροδοτούνται οι πυκνωτές συνδέονται στα άκρα των θυρίστρος T1 και T2 αντίστοιχα, εκφορτίζονται και επομένως τα σβήνουν ενώ ρεύμα ρέει τώρα μέσω των T3 C1 D1 φορτίο, D2, C2, T4 και οι πυκνωτές φορτίζονται τώρα με αντίθετη πολικότητα.

Όταν οι πυκνωτές φορτιστούν πλήρως οι δίοδοι D3 και D4 θα αρχίσουν να άγουν, αντιστρέφοντας έτσι το ρεύμα στο φορτίο το οποίο τελικά μεταφέρεται από τα T3 και T4 και ο κύκλος αυτός επαναλαμβάνεται.

Η ίδια διαδικασία μεταγωγής εφαρμόζεται και στους τριφασικούς αντιστροφείς με πηγή σταθερού ρεύματος. Τα θυρίστορς τώρα πυροδοτούνται με τη σειρά (T1-T2)- (T3-T4)- (T5-T6)-T1 κ.ο.κ. με κάθε θυρίστορ να βρίσκεται σε αγωγή για 120° , ενώ για κάθε στιγμή άγουν μόνο δύο θυρίστορς.



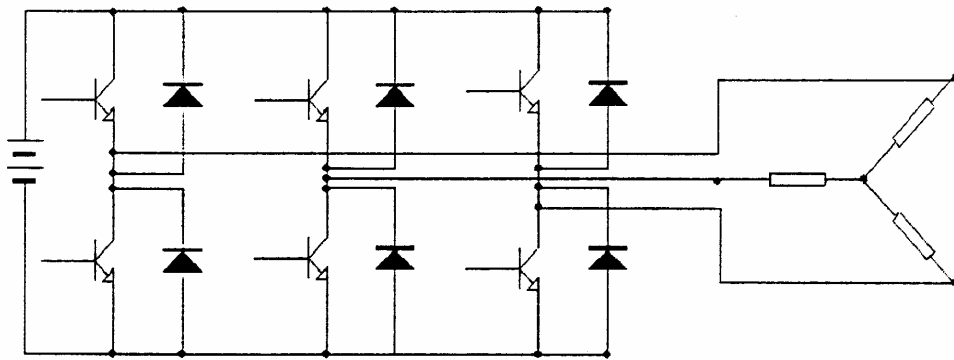
(α)



Σχήμα 4.18

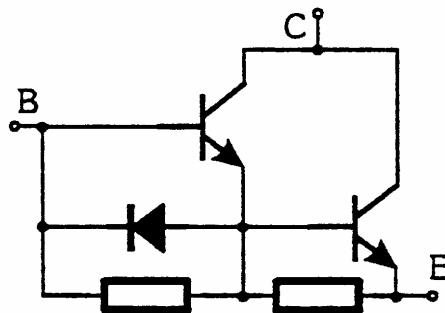
Άλλοι τύποι αντιστροφών.

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



Σχήμα 2.52

Τα τρανζίστορ όπως είναι γνωστό μπορούν να αλλάζουν κατάσταση (on-off) γρηγορότερα απ' ό τι τα θυρίστορς αλλά απαιτούν ρεύμα βάσης μεγάλο κατά την διάρκεια της περιόδου. Έτσι το ρεύμα βάσης θα πρέπει να ελέγχεται σε μέγεθος έτσι ώστε να κρατά το τρανζίστορ ακριβώς μέσα στα όρια του κορεσμού. Οι απαιτήσεις της βάσης (σε ρεύμα) του τρανζίστορ ισχύος που φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 2.53

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

Ολοκληρώνοντας τη περιγραφή των αντιστροφέων πρέπει ακόμα να αναφερθεί ότι :

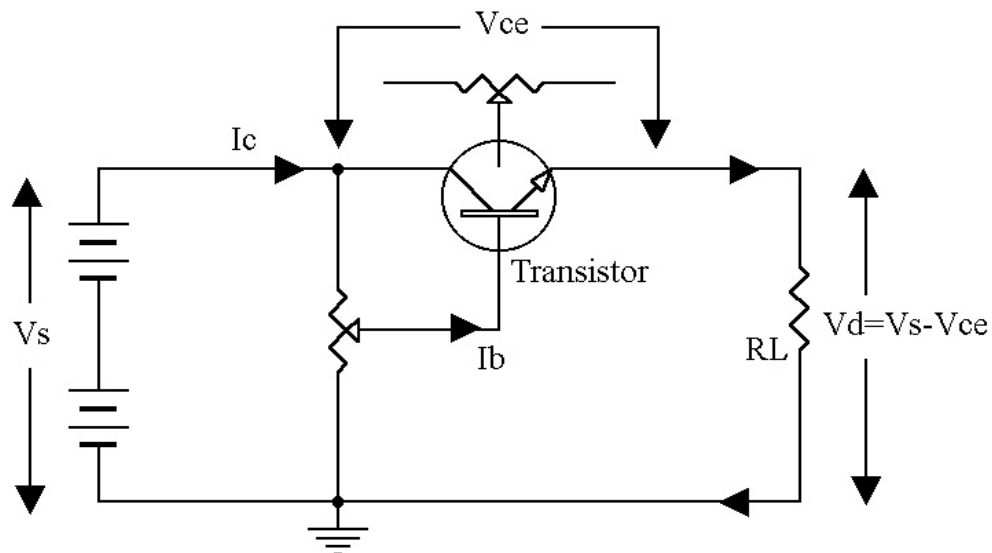
- Χρησιμοποιώντας συνηθισμένα θυρίστορς με εξωτερικά κυκλώματα μεταγωγής ο αντιστροφέας λειτουργεί με συχνότητα έως 100Hz περίπου.
- Χρησιμοποιώντας θυρίστορς GTO (Gate Turn-Off) η συχνότητα μπορεί να επεκταθεί έως τα 2000Hz περίπου.
- Χρησιμοποιώντας τρανζίστορ έως τα 10KHz και

- Χρησιμοποιώντας MOSFET έως τα 25KHz

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

2.2.4 Εισαγωγή στους μετατροπείς DC ισχύος choppers.

Παλαιότερα ο μόνος τρόπος για να ρυθμισθεί η DC ισχύ σε ένα φορτίο από μια DC πηγή ήταν να τοποθετηθεί σε σειρά με το φορτίο μία 'ρυθμιζόμενη αντίσταση' ισχύος όπως για παράδειγμα ένα διπολικό transistor(Transferred Resistor). Ρυθμίζοντας λοιπόν το ρεύμα βάσης, ρυθμίζεται και η αντίσταση μεταξύ συλλέκτη-εκπομπού άρα και την ισχύς εξόδου σχήμα



Σχήμα 2.54

Δύο από τα κυριότερα μειονεκτήματα της παραπάνω διάταξης που οδήγησαν τους μηχανικούς στην σχεδίαση των choppers είναι :

1. Η τάση εξόδου μπορεί να είναι μικρότερη ή ίση με την τάση εισόδου.
2. Μικρή απόδοση ισχύος (μεγάλες απώλειες ισχύος στο by pass τρανζίστορ).

Έστω στην παραπάνω διάταξη να είχαμε τις εξής απαιτήσεις :

$$P_{RL}=120W, \quad V_d = \frac{V_S}{2}=12V, \quad I_c = I_{RL}=10A$$

Τότε

$$V_{ce} = V_S - V_d = 24V - 12V = 12V$$

ΠΙΝΑΚΑΣ 1		
Περιγραφή	Linear regulator	Chopper
Απόδοση ισχύος n	Μικρή: Εξαρτάται από $\Delta U = U_{in} - U_{out}$	Μεγάλη 75%-95%
$U_{out} \geq U_{in}$ (1)	Όχι	Ναι
$U_{out} \leq U_{in}$ (2)	Ναι	Ναι
Αντιστροφή πολικότητας (3)	Όχι	Ναι
Συνδυασμό των: 1,2,3	Όχι	Ναι
Αριθμός ακροδεκτών	3: $U_{in}, U_{out}, common$ line	3: $U_{in}, U_{out}, common$ line
Βάρος /Όγκος	Μεγάλο	Μικρό

$$P_{ce} = V_{ce} \cdot I_c = 12V \cdot 10A = 120W$$

$$P_{in} = P_{ce} + P_{RL} = 120W + 120W = 240W$$

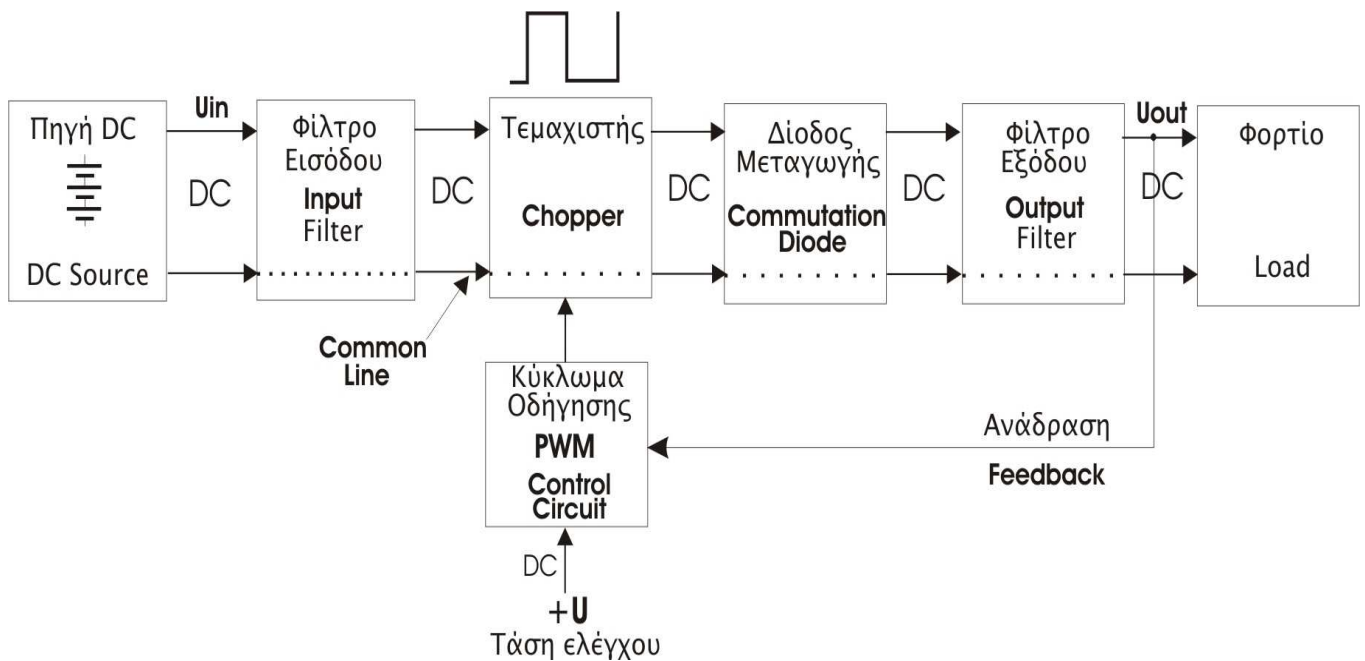
$$n = \frac{P_{RL}}{P_{in}} = \frac{120W}{240W} = 0,5 \Rightarrow 50\%$$

Από τα παραπάνω νούμερα φαίνεται πως για να τροφοδοτηθεί ένα φορτίο 12V/120W από μια πηγή 24V θα πρέπει να σπαταληθούν σε θερμότητα άλλα 120W, με αποτέλεσμα την χρήση μεγάλου ψυγείου απαγωγής θερμότητας στο τρανζίστορ ισχύος, μεγάλο όγκο, μεγάλο βάρος και τέλος μεγάλο κόστος κατασκευής.

Η λύση δόθηκε με τους DC-DC choppers. Τα choppers έχουν τα εξής πλεονεκτήματα στην μετατροπή DC ισχύος έναντι των γραμμικών διατάξεων (linear regulators) του σχήματος 2.54, τα οποία συνοψίζονται στον παρακάτω πίνακα 1.

Η αρχή λειτουργίας των choppers στηρίζεται στην διακοπόμενη λειτουργία του ημιαγωγού ισχύος και στην αποθήκευση ενέργειας σε κάποιο πηνίο Choke, ώστε να μπορούμε να την εκμεταλλευτούμε κατά την διάρκεια που το διακοπτικό στοιχείο είναι στην κατάσταση OFF. Η οδήγηση των διακοπτικών στοιχείων στους DC-DC choppers πραγματοποιείται με PWM διαμόρφωση.

Στο σχήμα 2.55 βλέπουμε την βασική δομή σε μπλοκ διάγραμμα των DC-DC choppers



Σχήμα 2.55

1. Πηγή DC Είναι η πηγή τροφοδοσίας της διάταξης μπορεί να προέρχεται από την έξοδο μιας ανορθωτικής διάταξης ή από μια συστοιχία μπαταριών.

2. Φίλτρο εισόδου Ρόλος του φίλτρου εισόδου είναι να περιορίσει κάθε μεταβαλλόμενη ή εναλλασσόμενη συνιστώσα λόγω της διακοπτόμενης λειτουργίας του chopper διατηρώντας την τάση της DC πηγής σταθερή. Ανάλογα με την τοπολογία του μετατροπέα μπορεί να αποτελεί μέρος του φίλτρου αυτού και το πηνίο choke αποθήκευσης ενέργειας.

3. Chopper Είναι το διακοπτικό στοιχείο το οποίο μετατρέπει την DC τάση σε μεταβαλλόμενη DC τάση. Συνήθως συναντάμε διάφορα διακοπτικά ηλεκτρονικά στοιχεία όπως SCR, GTO, MCT, MOSFET, IGBT, BIPOLAR TRANSISTORS σε τοπολογίες σύμφωνα με την συχνότητα λειτουργίας f_{sw} και την απαιτούμενη ισχύ του μετατροπέα.

4. Δίοδος μεταγωγής Με την χρήση της διόδου αυτής εκμεταλλευόμαστε την αποθηκευμένη ενέργεια του πηνίου κατά τον OFF χρόνο του διακοπτικού στοιχείου.

5. Φίλτρο εξόδου Ρόλος του φίλτρου εξόδου είναι να περιορίσει τον peak-peak κυματισμό της τάσεως εξόδου λόγω της διακοπτόμενης λειτουργίας του τεμαχιστή διατηρώντας την σταθερή. Ανάλογα με την τοπολογία του μετατροπέα μπορεί να συναντήσουμε στο φίλτρο αυτό και το πηνίο (choke) αποθήκευσης ενέργειας.

6. Φορτίο Σαν φορτία συναντάμε οποιαδήποτε συσκευή ή διάταξη η οποία απαιτεί DC ισχύ.

7. Κύκλωμα οδήγησης PWM Η μέθοδος οδήγησης βαθμίδων με Choppers είναι η διαμόρφωση με εύρος παλμού (Pulse Width Modulation ή Pulse Duration Modulation). Η βαθμίδα αυτή έχει σαν είσοδο μια DC τάση που ρυθμίζει τον κύκλο εργασίας (Duty Cycle) του PWM διαμορφωτή. Επίσης η βαθμίδα αυτή έχει και μια είσοδο αναδράσεως από το φορτίο (U_{out}) ώστε η τάση εξόδου να διατηρείται σταθερή ανεξάρτητα από τις μεταβολές της πηγής συνεχούς ρεύματος και η είσοδος αυτή επιδρά στον κύκλο εργασίας.

Διακρίνουμε τρεις βασικές τοπολογίες των DC-DC μετατροπέων ανάλογα με τον τρόπο που μεταβάλλεται η τάση εξόδου και αυτές είναι:

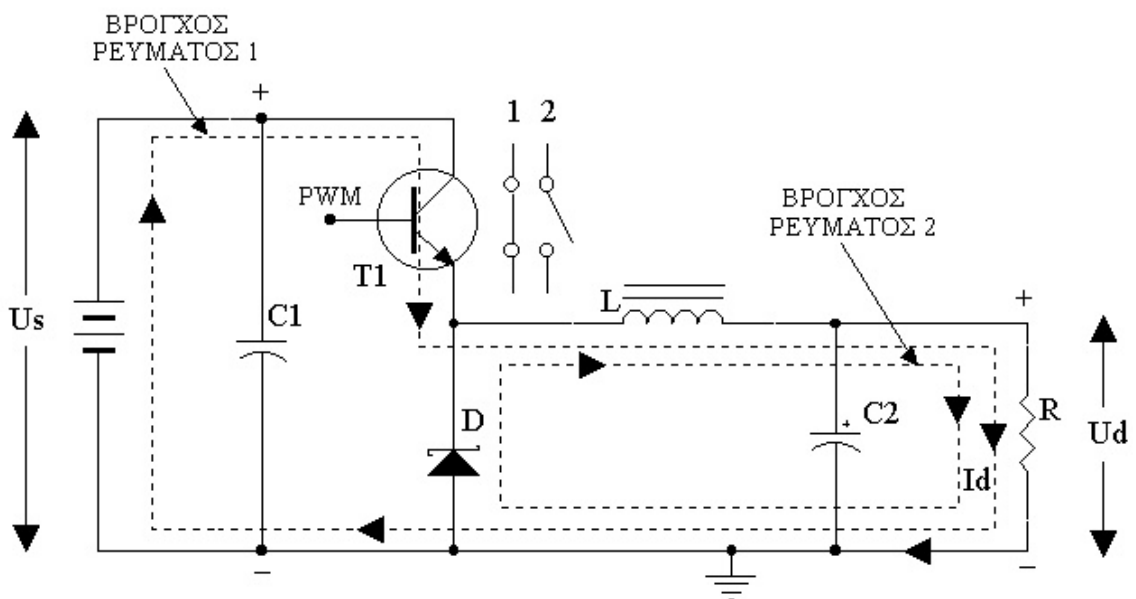
1. Buck converter ή Step down converter
2. Boost converter ή Step up converter
3. Buck-boost ή Flyback converter

Το 1977 σχεδιάστηκε από τον Slobodan Cuk ένας διπλός στην ουσία μετατροπέας Buck-boost (3) που πείρε και το όνομα του (Cuk converter), και συνδυάζει τα χαρακτηριστικά και των τριών βασικών διατάξεων. Είναι ίσως ο πιο σύγχρονος DC-DC μετατροπέας και υπάρχει άφθονη βιβλιογραφία για τον τρόπο λειτουργίας της διάταξης αυτής.

Παρακάτω φαίνεται ο τρόπος λειτουργίας των βασικών μετατροπέων με φορτίο έναν απλό ωμικό αντιστάτη.

1. Buck ή Step down DC-DC μετατροπέας

Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται η διάταξη του step down chopper.



Σχήμα 2.56

Η λειτουργία του μετατροπέα μπορεί να χωριστεί σε δύο φάσεις 1 και 2. Στην φάση 1 το διακοπτικό τρανζίστορ είναι στην κατάσταση ON αφού οδηγείται στον κόρο με έναν θετικό παλμό στην βάση, η διόδος D είναι ανάστροφα πολωμένη και ένα γραμμικά αυξανόμενο ρεύμα λόγω της αυτεπαγωγής L, διαρρέει το φορτίο αναγκάζοντας τον πυκνωτή C2 να φορτιστεί σε μια τάση ανάλογη του χρόνου t_{on} . Στον βρόγχο 1 βλέπουμε την φορά του ρεύματος στην διάταξη του step down chopper κατά την φάση 1. Ο C1 αποτελεί το φίλτρο εισόδου ενώ η αυτεπαγωγή L με τον C2 αποτελεί το φίλτρο εξόδου.

Κατά την φάση 2 το T1 περνά στην κατάσταση OFF η U_s αποσυνδέεται, και το πηνίο L προσπαθώντας να διατηρήσει την ροή ρεύματος στο φορτίο, αντιστρέφει την πολικότητα της τάσης στα άκρα του. Η Δίοδος D περνά στην κατάσταση ON, και ένα νέο ρεύμα λόγω της αποθηκευμένης ενέργειας του πηνίου διαρρέει το φορτίο, αναγκάζοντας τον C2 να εκφορτιστεί μέσα στον χρόνο t_{off} . Στον βρόγχο ρεύματος 2 του σχήματος 5.3 φαίνεται η φορά του ρεύματος στην διάταξη κατά τον χρόνο OFF.

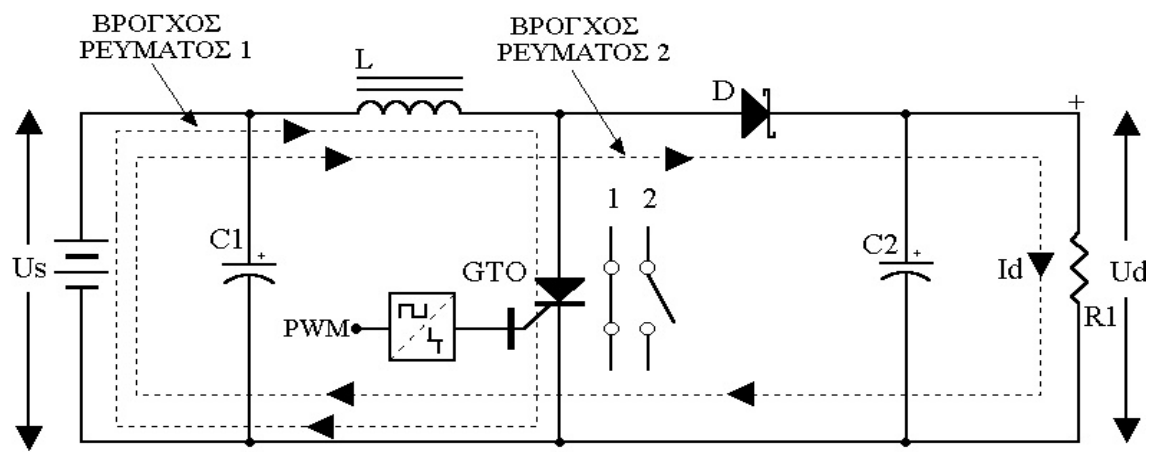
Και στις δύο φάσεις λειτουργίας του step down chopper η φορά του ρεύματος στο φορτίο διατηρείται σταθερή αναπτύσσοντας μια θετική τάση U_d στα άκρα του φορτίου ως προς το σημείο αναφοράς. Η τάση εξόδου μπορεί να είναι $U_d \leq U_s$ αν θεωρηθούν αμελητέες οι απώλειες μεταξύ C-E του T1, την διόδο D ιδανική και αμελητέες απώλειες στο choke. Στην πράξη δεν υπάρχουν ιδανικά στοιχεία και έτσι η επιλογή των στοιχείων της παραπάνω διάταξης πρέπει να γίνεται με μεγάλη προσοχή ώστε να υπάρχουν μικρές απώλειες ισχύος στα διάφορα κυκλωματικά στοιχεία.

$$U_d = U_s \cdot \frac{t_{on}}{t_{on} + t_{off}} = U_s \cdot D.C.$$

Στην περίπτωση της D θα πρέπει να επιλεγεί μια ταχύτατη διόδο με μικρή τάση ορθής φοράς όπως μια διόδο schottky λόγω της μεγάλης συχνότητας $f_{switching}$ του διακοπτικού τρανζίστορ.

2. Boost ή Step up DC-DC μετατροπέας

Στο σχήμα 2.57 φαίνεται η διάταξη του step up chopper.



Σχήμα 2.57

Η λειτουργία του κυκλώματος μπορεί να χωριστεί σε δύο φάσεις. Στην φάση 1 το GTO είναι στην κατάσταση ON με ένα θετικό παλμό πύλης και συμπεριφέρεται σαν κλειστός διακόπτης. Ο βρόγχος 1 αντιπροσωπεύει το ρεύμα που αναπτύσσεται στην διάταξη κατά τον χρόνο αυτό. Το πηνίο L διαρρέεται από ρεύμα και αποθηκεύει ενέργεια υπό μορφή μαγνητικού πεδίου. Η διάδος D είναι στην αποκοπή και το φορτίο διαρρέεται μόνο από το ρεύμα εκφόρτισης του πυκνωτή C2 ο οποίος είχε παραμείνει φορτισμένος από τον προηγούμενο κύκλο εργασίας (duty cycle) .

Στην φάση 2 το GTO περνά στην κατάσταση OFF με έναν αρνητικό παλμό πύλης, το πηνίο αντιστρέφει την πολικότητα της τάσης στα άκρα του και προσπαθεί να διατηρήσει την φορά και την ροή του ρεύματος σταθερή. Με την αλλαγή της πολικότητας της τάσης στο πηνίο, η πηγή U_s και η τάση του πηνίου U_L είναι σε σειρά, έτσι το άθροισμα των δύο τάσεων θα δώσει μία συνολική τάση μεγαλύτερη από την τάση της πηγής. Η τάση αυτή πολώνει την διάοδο D ορθά και ένα ρεύμα διαρρέει την παραπάνω διάταξη δημιουργώντας τον βρόγχο ροής ρεύματος 2.

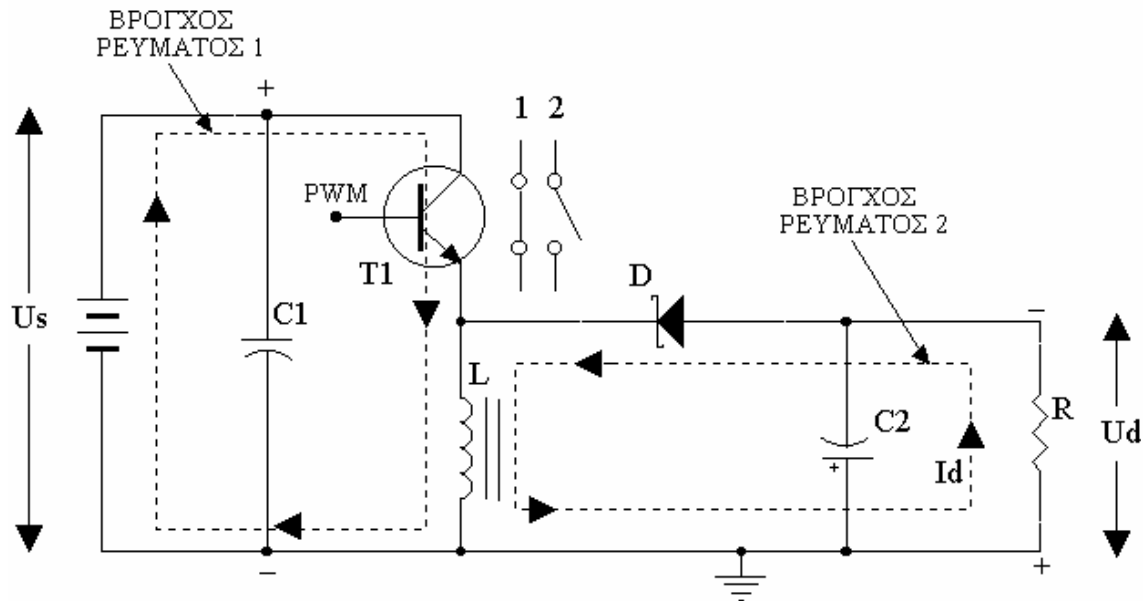
Κατά τον χρόνο αυτό ο πυκνωτής C2 φορτίζεται σε μια τάση ανάλογη του αθροίσματος των δύο τάσεων U_L+U_s η οποία φυσικά εξαρτάται από τους χρόνους ON και OFF του διακοπτικού στοιχείου GTO.

Μεγάλη προσοχή πρέπει να δίνεται στον υπολογισμό του πηνίου Choke, διότι εάν επιλέξουμε κύκλο εργασίας μεταξύ 0,5-0,9 υπάρχει μεγάλη πιθανότητα να οδηγηθεί ο πυρήνας του πηνίου στον κόρο(πρέπει για D.C.=0,9 η μαγνητική επαγωγή του πυρήνα του choke $B < B_{max}$) και το ρεύμα που διαρρέει το πηνίο αντί να αυξάνεται γραμμικά να αυξηθεί κάθετα, με αποτέλεσμα την καταστροφή του διακοπτικού στοιχείου.

$$U_d = \frac{U_s}{1 - \frac{t_{on}}{t_{on} + t_{off}}} = \frac{U_s}{1 - D.C.}$$

3. Buck boost ή Flyback DC-DC μετατροπείας

Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται η διάταξη του flyback chopper.



Σχήμα 2.58

Η διάταξη αυτή είναι ο συνδυασμός των step up και step down μετατροπέων, συνδυάζει τα χαρακτηριστικά των προηγούμενων μετατροπέων αλλά η τάση εξόδου έχει ανάστροφη πολικότητα από την τάση εισόδου.

Όπως στις προηγούμενες διατάξεις, κατά την φάση 1 το τρανζίστορ T1 περνά στην κατάσταση ON με ένα θετικό παλμό στην βάση. Ένα γραμμικά αυξανόμενο ρεύμα λόγω του πηνίου L διαρρέει τον βρόγχο 1, ενώ η διόδος D είναι στην αποκοπή. Το πηνίο δεν πρέπει να οδηγηθεί στον κόρο για τους λόγους που αναφέρθηκαν στην προηγούμενη παράγραφο, έτσι αποθηκεύει ενέργεια και το μόνο ρεύμα που ρέει στο φορτίο R είναι το ρεύμα εκφόρτισης του πυκνωτή από τον προηγούμενο κύκλο εργασίας.

Κατά την φάση 2 το τρανζίστορ T1 περνά στην κατάσταση OFF, το πηνίο προσπαθεί να διατηρήσει την φορά του ρεύματος αντιστρέφοντας την πολικότητα της τάσης στα άκρα του, έτσι η διόδος D πολώνεται ορθά και ένα ρεύμα κυκλοφορεί στον βρόγχο 2 λόγω της αυτεπαγωγής L φορτίζοντας τον πυκνωτή C2 αρνητικά. Η τάση στο φορτίο είναι αντίθετης πολικότητας σε σχέση με την τάση εισόδου U_s ως προς το σημείο αναφοράς.

Με κατάλληλη ρύθμιση των χρόνων t_{on} και t_{off} η μέση τιμή της τάσεως εξόδου μπορεί να είναι μεγαλύτερη, μικρότερη ή ίση με την U_s αλλά με αντίθετη πολικότητα. Ίσως να φαίνεται λίγο περίεργο ότι η τάση εξόδου μπορεί να είναι μεγαλύτερη από την τάση εισόδου αλλά δικαιολογείτε από την μαγνητική ροή στο πηνίο L και την συνάρτηση μεταφοράς του μετατροπέα στις παρακάτω σχέσεις.

$$1. U_L \cdot t_{on} = -U_L \cdot t_{off} \text{ (Weber)}$$

$$2. U_d = -U_s \cdot \frac{t_{on}}{t_{off}} = -U_s \cdot \frac{D \cdot C.}{1 - D.C.}$$

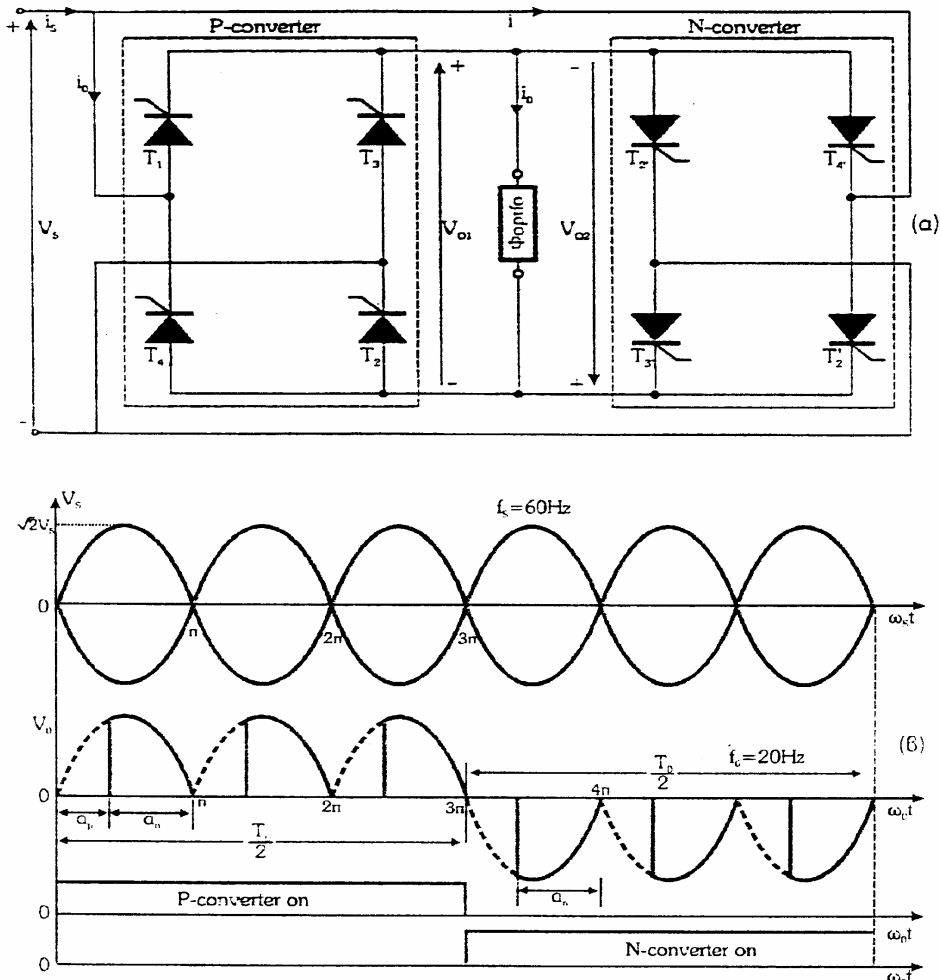
2.2.5 Εισαγωγή στους κυκλομετατροπείς (Cycloconverters).

Κυκλομετατροπείας είναι ένας μετατροπείας ισχύος AC ορισμένης συχνότητας σε μια ισχύ AC διαφορετικής συχνότητας. Η πλειοψηφία των κυκλομετατροπέων είναι φυσικής μεταγωγής και η μέγιστη συχνότητα εξόδου είναι περιορισμένη σε μια τιμή η οποία είναι μόνο ένα κλάσμα της συχνότητας της πηγής τροφοδότησης.

Οι κυριότερες εφαρμογές τους βρίσκονται στους κινητήρες AC και για ισχύς έως 15MW με συχνότητες από 0 έως 20Hz.

1. Μονοφασικοί κυκλομετατροπείς.

Η αρχή λειτουργίας των μονοφασικών κυκλομετατροπέων μπορεί να εξηγηθεί με την βοήθεια του παρακάτω σχήματος :



Σχήμα 2.59
Μονοφασικός/ Μονοφασικός μετατροπείας

Όπως φαίνεται από το κύκλωμα (α) οι δύο μονοφασικοί ελεγχόμενοι μετατροπείς λειτουργούν σαν μια μονοφασική γέφυρα ανόρθωσης. Ωστόσο οι γωνίες έναυσης των είναι τέτοιες έτσι ώστε η τάση εξόδου του ενός μετατροπέων να είναι ίση και αντίθετη με την τάση εξόδου του άλλου μετατροπέα.

Αν ο μετατροπέας P λειτουργεί μόνος τότε η μέση τιμή της τάσης εξόδου είναι θετική και αν ο μετατροπέας N λειτουργεί μόνος η μέση τιμή της τάσης εξόδου είναι αρνητική. Στις κυματομορφές του σχήματος φαίνεται η τάση εξόδου και οι γωνίες έναυσης για τους P & N μετατροπείς με τον P μετατροπέα να βρίσκεται σε αγωγή για $T_0/2$ και τον N μετατροπέα να βρίσκεται σε αγωγή επίσης για $T_0/2$. Η συχνότητα της τάσης εξόδου είναι:

$$F_0 = \frac{1}{T_0}$$

Αν α_p είναι η γωνία έναυσης για τον P μετατροπέα, η γωνία έναυσης για τον N μετατροπέα είναι $\alpha_n = \pi - \alpha_p$.

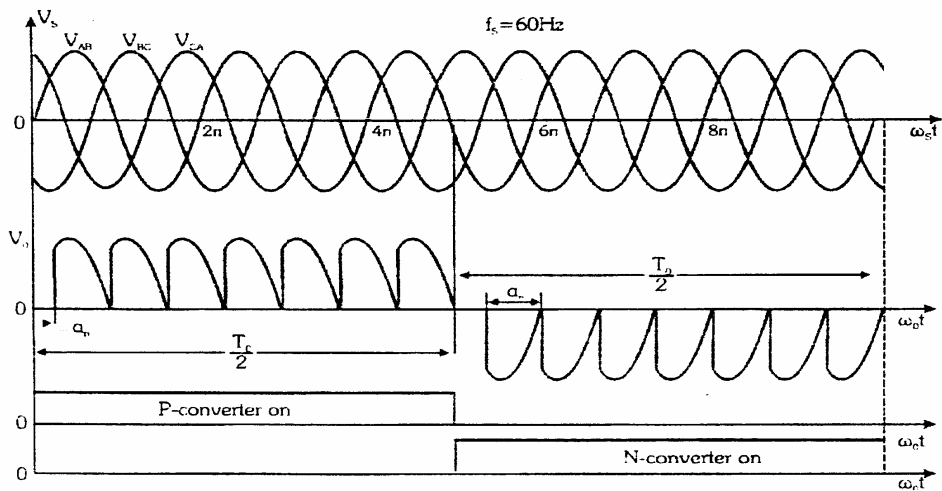
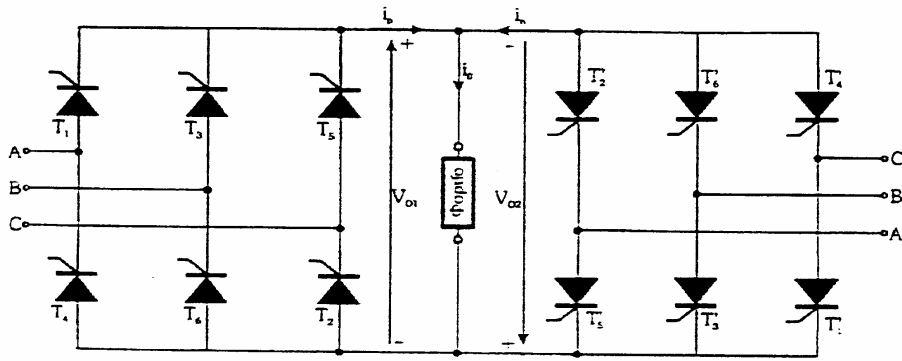
Η μέση τιμή της τάσης εξόδου του P μετατροπέα είναι ίση και αντίθετη της μέσης τιμής της τάσης εξόδου τον N μετατροπέα. Δηλαδή :

$$V_{02} = - V_{01}$$

2. Τριφασικοί κυκλομετατροπείς.

Το κύκλωμα και οι κυματομορφές ενός τριφασικού/μονοφασικού κυκλομετατροπέα φαίνονται στο παρακάτω σχήμα.

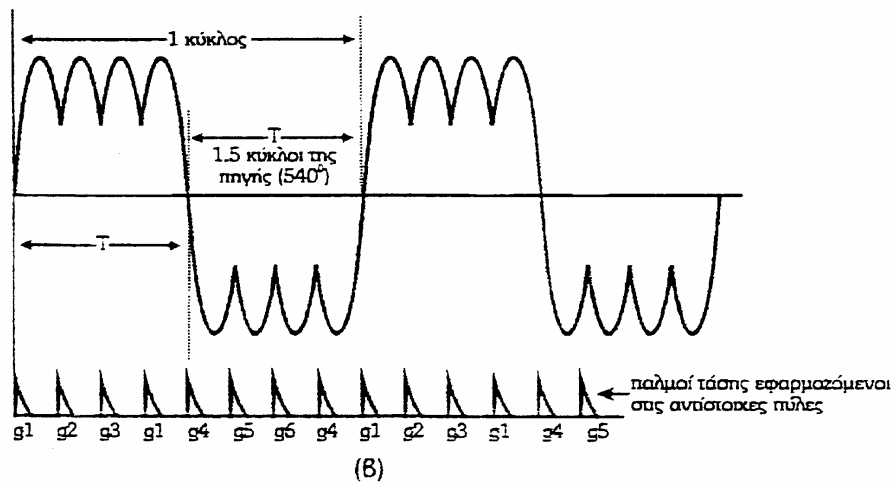
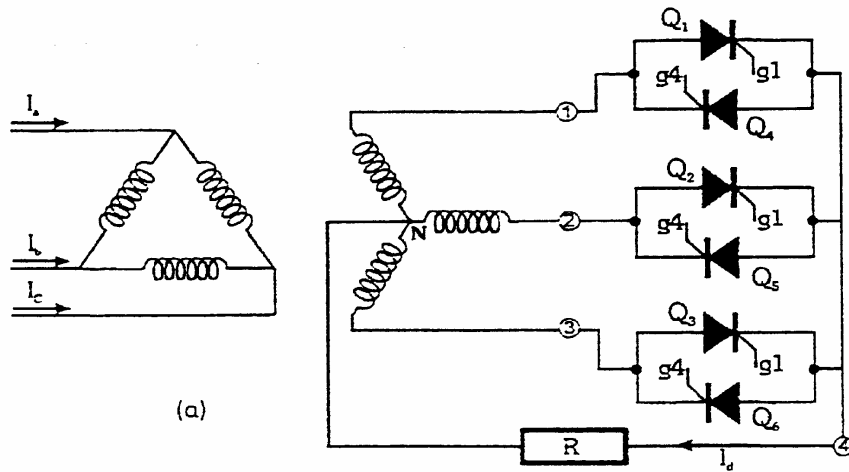
Οι δύο AC-DC μετατροπείς είναι τριφασικοί ελεγχόμενοι ανορθωτές. Όμοια με τη λειτουργία του μονοφασικού κυκλομετατροπέα ο P μετατροπέας λειτουργεί για την μισή περίοδο όπως και ο N μετατροπέας λειτουργεί για την άλλη μισή.



Σχή

μα 2.60
Τριφασικός/ Μονοφασικός μετατροπέας

Ένα άλλο απλό κύκλωμα τριφασικού/μονοφασικού κυκλομετατροπέα φαίνεται στο σχήμα 2.60. Αποτελείται από τρεις ομάδες θυρίστωρ που είναι συνδεδεμένες σε μια τριφασική πηγή. Οι τρεις αυτές ομάδες θυρίστωρ τροφοδοτούν ένα ωμικό φορτίο R.



Σχήμα 2.61
 (α) Τριφασικός/ Μονοφασικός βασικός κυκλομετατροπέας
 (β) Τυπική μορφή της τάσης εξόδου

Για να γίνει κατανοητή η λειτουργία του κυκλώματος υποθέτουμε ότι όλα τα θυρίστορς στην αρχή είναι μανδαλωμένα. Μετά, για ένα διάστημα T_a οι πύλες των θυρίστορς Q_1, Q_2, Q_3 πυροδοτούνται από τους παλμούς g_1, g_2, g_3, g_1 με τέτοιο τρόπο σαν να ήταν συνηθισμένες δίοδοι. Το αποτέλεσμα είναι το κύκλωμα να συμπεριφέρεται σαν έναν ανορθωτή 3 παλμών (μεσαίου σημείου) και το άκρο 4 θα είναι θετικό σε σχέση με το N.

Κατά τη διάρκεια του επόμενου διαστήματος T , πυροδοτούνται τα θυρίστορς Q_4, Q_5, Q_6 , με τους παλμούς g_4, g_5, g_6, g_4 . Το άκρο 4 γίνεται τώρα αρνητικό σε σχέση με το N. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται για τα θυρίστορς Q_1, Q_2, Q_3 κ.ο.κ. με αποτέλεσμα μια τάση χαμηλής συχνότητας να εμφανίζεται στα άκρα του φορτίου. Η διάρκεια του ενός κύκλου είναι $2T$ seconds και συγκρινόμενη με ένα ημιτονοειδές κύμα είναι μάλλον μικρή.

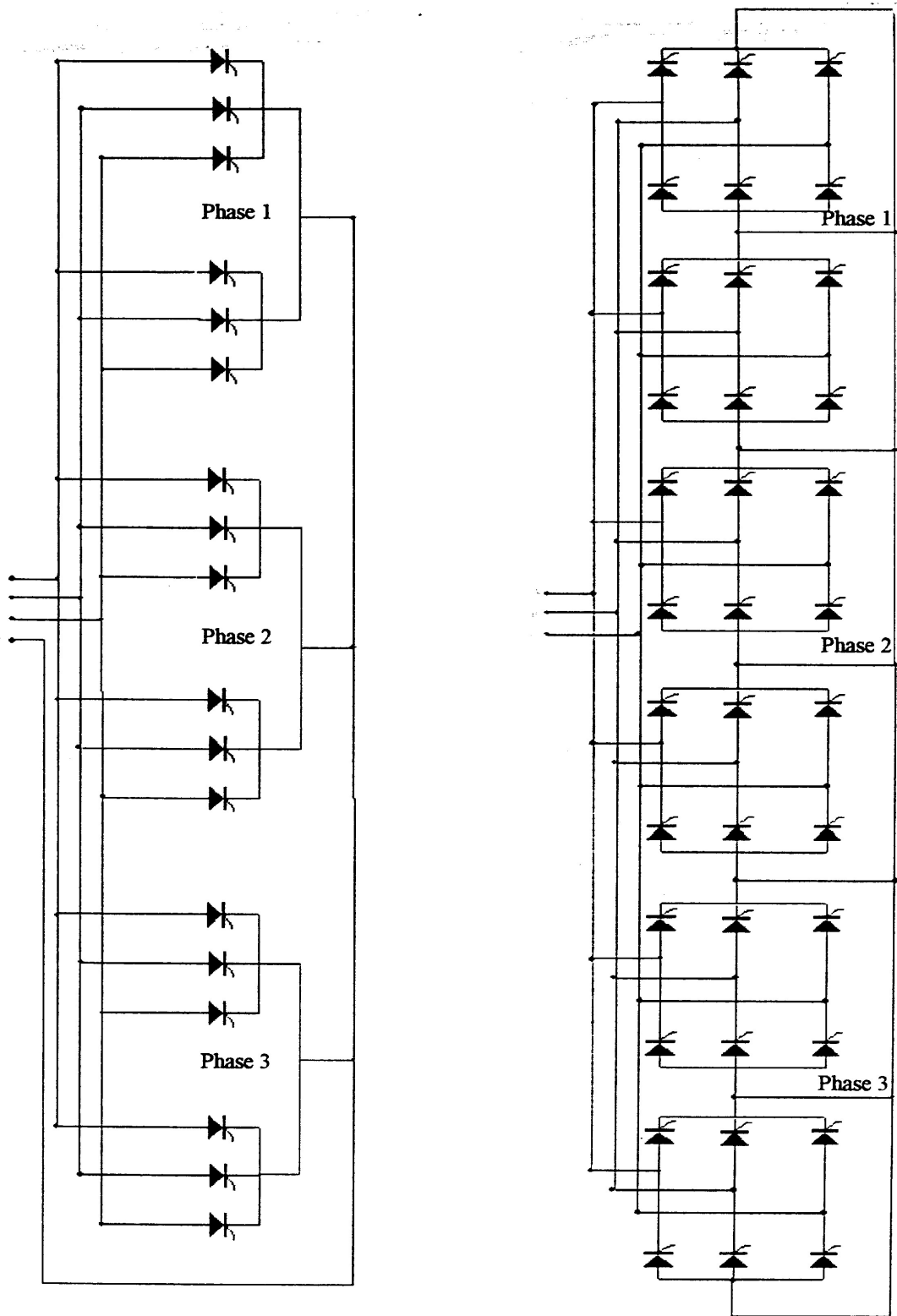
Δηλαδή κάθε ημιπερίοδος αντιστοιχεί σε 540° για μια συχνότητα τροφοδότησης 60 Hz. Έτσι η διάρκεια T είναι $\frac{540}{360} \cdot \frac{1}{60} = 0.0025$ seconds, όπου αντιστοιχεί σε μια συχνότητα $\frac{1}{2 \cdot 0.0025} = 20\text{Hz}$.

Είναι προφανές ότι επαναλαμβάνοντας τη διαδικασία πυροδότησης των θυρίστρος με τους παλμούς g1, g2, g3, g1..... μπορούμε να διατηρήσουμε το άκρο 4 θετικό για όσο μεγάλο διάστημα εμείς επιθυμούμε, ακολουθούμενο από ένα ίσο μεγάλο αρνητικό, όταν g4, g5, g6, g4 πυροδοτούνται. Έτσι μπορούμε να δημιουργήσουμε συχνότητες χαμηλές όσο εμείς θέλουμε.

Θα πρέπει ακόμα να αναφερθεί ότι ο κυκλομετατροπέας που εξετάσαμε είναι τριφασικός/μονοφασικός χωρίς να διαταράσσεται η ισορροπία της τριφασικής γραμμής, ενώ υπάρχουν και κυκλομετατροπείς που παράγουν μια ημιτονοειδή τριφασική έξοδο χαμηλής συχνότητας από μια ημιτονοειδή τριφασική είσοδο 60Hz (τριφασικός/ τριφασικός κυκλομετατροπέας).

Υπάρχουν όμως περιπτώσεις και ιδιαίτερα στον έλεγχο των τριφασικών κινητήρων που απαιτείται τριφασική τάση στην έξοδο του κυκλομετατροπέα με μεταβλητή συχνότητα.

Στις περιπτώσεις αυτές που το φορτίο είναι τριφασικό πραγματοποιούμε μια από τις παρακάτω συνδεσμολογίες.



Σχήμα 2.62 Συνδέσεις κυκλομετατροπέων με τριφασική έξοδο
 (α) 3-παλμών (β) 6-παλμών

Η διαφορά των δύο αυτών συνδυασμών είναι ότι όσο μεγαλύτερος είναι ο αριθμός των παλμών τόσο περισσότερο η κυματομορφή εξόδου πλησιάζει την επιθυμητή ημιτονοειδή μορφή.

Η μέγιστη τιμή της τάσης εξόδου του κυκλομετατροπέα (η οποία είναι ίση με την μέση τιμή της DC τάσης που κάθε ομάδα μπορεί να τροφοδοτήσει) αμελώντας την επικάλυψη θα δίνεται από την σχέση :

$$V = \frac{P}{\pi} \cdot \sin\left(\frac{\pi}{p}\right) \cdot V_{s(MAX)}$$

ή

$$V_0 = \frac{P}{\pi} \cdot \sin\left(\frac{\pi}{p}\right) \cdot V_s \cdot \cos a$$

αν η τάση μειώνεται με καθυστέρηση έναυσης a .

Κεφάλαιο 3^ο

3.1 Στοιχεία ηλεκτρικών μηχανών και έλεγχος αυτών.

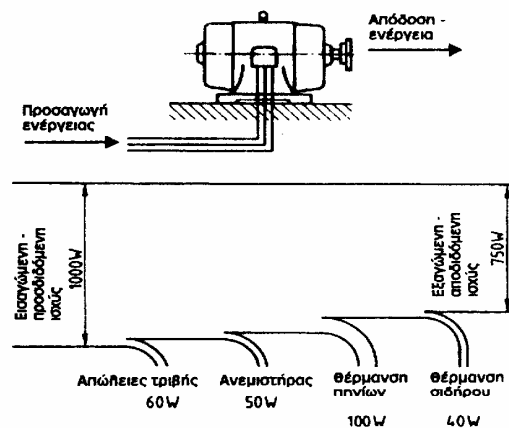
Γενικά για περιστρεφόμενες ηλεκτρικές μηχανές.

Ταξινόμηση.

Οι περιστρεφόμενες ηλεκτρικές μηχανές είναι ηλεκτρικές συσκευές, που κατά τη λειτουργία τους έχουν περιστρεφόμενα μέρη και στην περίπτωση που δεν δημιουργείται κάποια σύγκυση αναφέρονται απλά ως ηλεκτρικές μηχανές. Οι ηλεκτρικές μηχανές δεν ανήκουν στα πολυάριθμα ηλεκτρονικά κυκλώματα, π.χ. κυκλώματα ανορθωτών. Στις ηλεκτρικές μηχανές αποδίδονται διάφορα κριτήρια.

Ταξινόμηση σύμφωνα με την αποστολή.

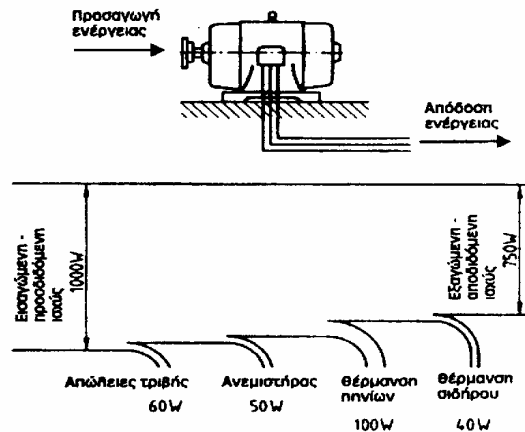
Οι ηλεκτρικές μηχανές σύμφωνα με την αποστολή τους διακρίνονται σε κινητήρες, γεννήτριες και μετατροπείς. Οι κινητήρες μετατρέπουν την ηλεκτρική ενέργεια σε μηχανική (σχήμα 3.1) και οι κινητήρες αποτελούν μια συνηθισμένη ηλεκτρική συσκευή. Κινεί πολυάριθμες μηχανές π.χ. εργαλειομηχανές.



Σχήμα 3.1

Οι γεννήτριες μετατρέπουν την μηχανική ενέργεια σε ηλεκτρική (σχήμα 3.2). Η συνολική ισχύς όλων των ηλεκτρικών γεννητριών είναι φυσικά μικρότερη από την ισχύ όλων των ηλεκτρικών κινητήρων. Βέβαια η ισχύς της κάθε γεννήτριας είναι συνήθως πολύ μεγάλη γι' αυτό και οι ηλεκτρικές γεννήτριες είναι σπανιότερες από ηλεκτρικούς κινητήρες.

Οι ηλεκτρικοί μετατροπείς μετατρέπουν μια ηλεκτρική ενέργεια μιας συγκεκριμένης τάσης ή συχνότητας σε μια ηλεκτρική ενέργεια της τάσης και της συχνότητας. Η σημασία των μετατροπέων μειώθηκε με την εφαρμογή της ηλεκτρονικής.



Σχήμα 3.2

Ταξινόμηση σύμφωνα με το είδος του ρεύματος.

Οι κινητήρες, οι γεννήτριες και οι μετατροπείς εμφανίζονται σ' όλα τα είδη ρευμάτων. Ο γενικός χαρακτηρισμός των κινητήρων γεννητριών και μετατροπέων είναι ηλεκτρικές μηχανές. Στην ταξινόμηση σύμφωνα με το είδος του ρεύματος, διακρίνουμε συνήθως της τριφασικές μηχανές, της μονοφασικές μηχανές εναλλασσομένου ρεύματος, και της μηχανές συνεχούς ρεύματος.

Ταξινόμηση σύμφωνα με ορισμένες απόψεις.

Οι ηλεκτρικές μηχανές ταξινομούνται της σύμφωνα και με ορισμένες απόψεις, π.χ. στην περίπτωση που αν η λειτουργία της στηρίζεται σ' ένα περιστρεφόμενο μαγνητικό πεδίο ονομάζονται μηχανές περιστρεφόμενου πεδίου. Στην περίπτωση που της κινητήρες το ρεύμα του δρομέα παράγεται εξ' επαγωγής τότε της ονομάζονται επαγωγικοί κινητήρες.

Μία συνηθισμένη ταξινόμηση μεταξύ των μηχανών στροφομένου πεδίου παρουσιάζεται ως της τη συχνότητα του ρεύματος τροφοδοσίας της στροφές σε σχέση με της στροφές του στροφόμένου πεδίου, οπότε διακρίνουμε της σύγχρονες και της ασύγχρονες ηλεκτρικές μηχανές.

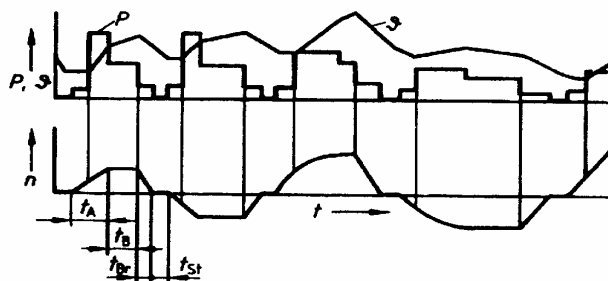
Σύγχρονες μηχανές θεωρούνται εκείνες της οποίες η ταχύτητα περιστροφής του δρομέα είναι ίση με την ταχύτητα περιστροφής του στροφόμένου μαγνητικού πεδίου. Οι της μηχανές ανήκουν της ασύγχρονες.

Ανάλογα με το είδος του διαχωρισμού της, είναι δυνατόν οι της μηχανές να χαρακτηρισθούν με διάφορους τρόπους.

3.2 Κατασκευαστική δομή ηλεκτρικών μηχανών.

Οι ηλεκτρικές μηχανές χαρακτηρίζονται από το σταθερό τμήμα της, που ονομάζεται στάτης (ή στάτορας) και το περιστρεφόμενο τμήμα που ονομάζεται δρομέας (ή ρότορας). Στη δομική σύνθεση της μηχανής διακρίνονται τα ενεργά και τα παθητικά της μέρη. Στα ενεργά μέρη ανήκουν τα τμήματα από τα οποία διέρχεται το ηλεκτρικό ρεύμα και η μαγνητική ροή της π.χ. τα πηνία, το πακέτο ελασμάτων του στάτη και το πακέτο ελασμάτων του δρομέα. Τα παθητικά μέρη είναι κατασκευαστικά τμήματα από τα οποία δεν διέρχεται ούτε το ρεύμα ούτε τη μαγνητική ροή της π.χ. ο άξονας.

Η διάταξη του δρομέα ως προς το στάτη είναι δυνατόν να διαφέρει, γι' αυτό και εμφανίζονται διάφορες κατασκευαστικές φόρμες μηχανών. Για της φόρμες αυτές θεσπίστηκαν συμβολισμοί σύμφωνα με το DIN και IEC. Ιδιαίτερα συχνά συναντώνται στην πράξη οι μηχανές οριζόντιας τοποθέτησης, οι οποίες διαθέτουν ένα ή δύο έδρανα (κουζινέτα-τριβεία) (πίνακας 1). Υπάρχουν της και μηχανές κάθετης τοποθέτησης που χρησιμοποιούνται ευρέως στην πράξη. Οι πλέον διαδεδομένες φόρμες είναι IMB3 και IMB5.



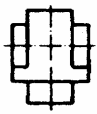




Σχήμα 3.3 Ισχύς θερμοκρασίας και στροφές στο είδος λειτουργίας S9.

Πίνακας 1: Μηχανές με τριβείς (Κουζινέτα)		
IEC-Κωδ. I IEC-Κωδ. II	Εικόνα	Εξήγηση
IMB5 IM 3001		Με δύο κουζινέτα, τανία σταθεροποίησης
IMB6 IM1051		όπως IMB5 σταθεροποιημένη στον τοίχο ελεύθερου άξονα αριστερά
IMB7 IM1061		όπως IMB6 αλλά με ελεύθερο τον άξονα δεξιά
IMB8 IM1071		όπως IMB3, αλλά για σταθεροποίηση στην οροφή
IBM10 IM4001		με δύο ασπίδες στρωμάτων, φλάντζα σταθεροποίησης
IMB14 IM3601		Με δύο ασπίδες στρωμάτων επιφάνεια σταθεροποίησης στην μετωπική πλευρά

Πίνακας 1: Μηχανές κάθετης τοποθέτησης		
IEC-Κωδ. I IEC-Κωδ. II	Εικόνα	Εξήγηση
IMV1 IM3011		με δύο ασπίδες, φλάντζα και ελεύθερο άξονα κάτω
IMV2 IM3231		όπως IMV1, αλλά με ελεύθερο άξονα πάνω
IMV3 IM3031		όπως IMV1, αλλά με φλάντζα και ελεύθερο άξονα πάνω
IMV4 IM3211		όπως IMV3, αλλά με ελεύθερο άξονα κάτω
IMV5 IM1011		με δύο τριβείς, ελεύθερο άξονα κάτω τάση για σταθεροποίηση στον τοίχο
IMV10 IM4011		με δύο ασπίδες φλάντζα σταθεροποίησης κάτω
IMV18 IM3611		όπως IMV10, αλλά φλάντζα και επιφάνεια σταθεροποίησης μετωπικά πλευρικά

Πίνακας 1

Της μεγάλης ηλεκτρικής μηχανές εκτός από το είδος κατασκευής δίνεται και το είδος κατασκευής A.C.D και W. Στο είδος κατασκευής A δεν υπάρχει αυτοτελής βάση. Ο δρομέας με την μηχανή κίνησης έχει κοινή βάση. Οι μηχανές του είδους κατασκευής C έχουν μια όρθια βάση και δύο (έδρανα) κουζινέτα. Οι μηχανές του είδους κατασκευής D έχουν μόνον βάση όρθιας τοποθέτησης. Οι μηχανές του είδους W τοποθετούνται σε δακτύλιο, δακτύλιο φρεατίου και κολόνες στήριξης (πίνακας 2).

Πίνακας 1: Μηχανές κάθετης τοποθέτησης		
IEC-Κωδ. I IEC-Κωδ. II	Εικόνα	Εξήγηση
A2 IM5510		χωρίς άξονα, περίβλημα με υπερυψωμένη βάση
C2 IM6010		με δύο ασπίδες στρωμάτων και μία όρθια βάση
D1 IM7001		μία όρθια βάση, φθάντζα του άξονα
D9 IM7201		με δύο βάσεις σταθεροποίησης ελεύθερο άξονα
W1 IM8015		εγκάρσια βάση πάνω φθάντζα ζεύξης κάτω Στη βάση πλάκα σώμα φρεάτιο-κοιλώνες στήριξης

Πίνακας 2

3.3 Βασικές εξισώσεις των ηλεκτρικών μηχανών.

Εξίσωση της ροπής.

Κατά τη λειτουργία των ηλεκτρικών μηχανών δημιουργείται η ροπή $M = F \cdot r$ από τη δύναμη F ($F=BIl$) που αναπτύσσεται στον αγωγό μήκους l που διαρρέεται από ρεύμα έντασης I και βρίσκεται μέσα στο μαγνητικό πεδίο επαγωγής B του αριθμού αγωγών ζ και την ενεργό ακτίνα του δρομέα r (σχήμα 3.4). Παρ' όλα αυτά ένα μόνο μέρος του αγωγού βρίσκεται πλήρως μέσα στο μαγνητικό πεδίο γι' αυτό το γινόμενο πολλαπλασιάζεται με την σχέση κάλυψης πόλων a ($a < 1$). Επομένως λαμβάνουμε τη σχέση:

$$M = B \cdot I \cdot l \cdot z \cdot r \cdot a$$

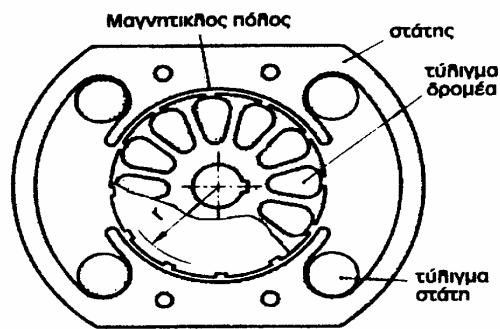
Από την εξίσωση αυτή διαπιστώνουμε ότι η ροπή μιας μηχανής εξαρτάται την ένταση του ρεύματος στον δρομέα, την μαγνητική επαγωγή και της διαστάσεις της μηχανής.

M : ροπή

C_m : Σταθερά της μηχανής I : ένταση του ρεύματος στο δρομέα

Φ : Μαγνητική ροή όλων των πόλων.

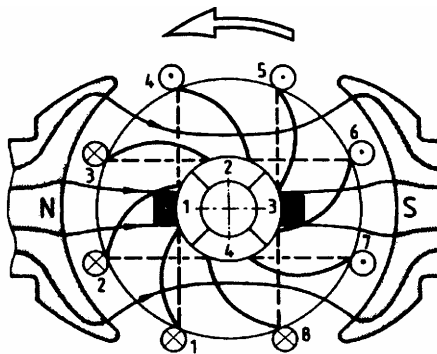
$$M = C_m \cdot I \cdot \Phi$$



Σχήμα 3.4

Εξίσωση τάσης.

Κατά τη λειτουργία των ηλεκτρικών μηχανών δημιουργείται τάση από επαγωγή επειδή οι αγωγοί κόβουν το μαγνητικό πεδίο. Η παραγωγή αυτή της τάσης εμφανίζεται στις γεννήτριες, αλλά και στους κινητήρες.



Η παραγόμενη τάση U_i εξαρτάται από την τάση που παράγεται σε έναν αγωγό $U_i = B \cdot L \cdot v$, τον αριθμό των αγωγών και την σχέση κάλυψης των πόλων $a \cdot B$ η μαγνητική επαγωγή, I το ενεργό μήκος του δρομέα και v η ταχύτητα των ράβδων του δρομέα.

$$U_i = Blvza = BI \cdot 2\pi nrza$$

όπου η οι στροφές του δρομέα και r η ενεργός ακτίνα. Από την εξίσωση διαπιστώνεται ότι η παραγόμενη τάση εξαρτάται από την μαγνητική επαγωγή της μηχανής, τις στροφές και τις διαστάσεις της. Οι διαστάσεις της συνοψίζονται στη σταθερά της μηχανής.

U_i : παραγόμενη τάση

C_u : Σταθερά της μηχανής

Φ : Μαγνητική ροή όλων των πόλων

n : στροφές

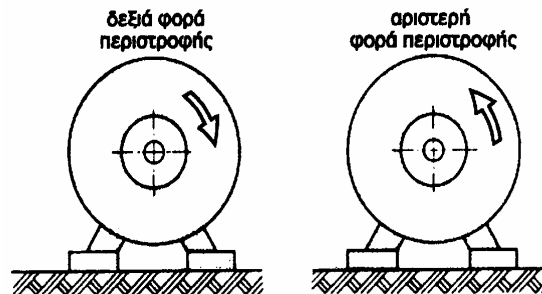
Η σταθερά της μηχανής για τον υπολογισμό της ροπής C_m είναι διαφορετικής τιμής από την σταθερά της μηχανής για τον υπολογισμό της παραγόμενης τάσης C_u .

Η τάση που παράγεται από μια ηλεκτρική μηχανή αυξάνεται γραμμικά συναρτήσει των στροφών και της μαγνητικής ροής. Εξαρτάται από το είδος και τις διαστάσεις της μηχανής.

3.4 Χαρακτηρισμός ακροδεκτών των ηλεκτρικών μηχανών.

Φορά περιστροφής.

Η φορά περιστροφής της μηχανής έχει σημαντικό ρόλο στο χαρακτηρισμό των ακροδεκτών σύνδεσης μιας ηλεκτρικής μηχανής. Διακρίνουμε την αριστερή και τη δεξιά φορά περιστροφής. Στη δεξιά φορά περιστροφής η μηχανή περιστρέφεται προς την φορά των δεικτών του ρολογιού, ενώ στην αριστερή φορά αντίθετα προς την φορά δεικτών του ρολογιού (σχήμα 3.5).



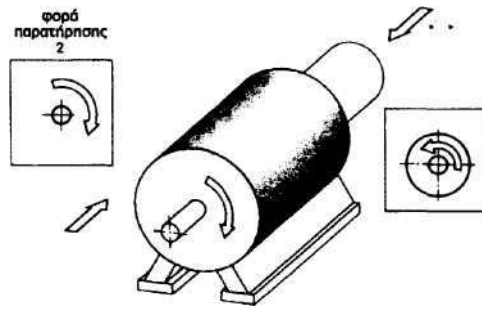
Σχήμα 3.5

Η διεύθυνση από την οποία παρατηρείται μια ηλεκτρική μηχανή κατέχει σημαντικό ρόλο στον προσδιορισμό της φοράς περιστροφής της (σχήμα 3.6). Η παρατήρηση προς την διεύθυνση 2 του σχήματος 3.6 η μηχανή περιφέρεται στην φορά δεικτών του ρολογιού, επομένως έχει δεξιά περιφορά. Ενώ αν παρατηρείται προς την διεύθυνση 1 του σχήματος τότε έχουμε αριστερή περιφορά. Επομένως, πρέπει να καθοριστεί το μέρος από το οποίο βλέπουμε την μηχανή για να καθοριστεί η φορά περιστροφής της.

Η φορά περιστροφής ισχύει για την παρατήρηση προς το πίσω ή το εμπρός μέρος του άξονα.

Για μηχανές με δύο ίδιες πλευρές εξόδου του άξονα, θεωρείται σαν μέτρο για την φορά περιστροφής η πλευρά του δρομέα χωρίς δακτυλίους και χωρίς συλλέκτη.

Στο τριφασικό ρεύμα έχει καθοριστεί, ότι οι συνδέσεις είναι σωστές εάν έχουμε δεξιά φορά περιστροφής στη σύνδεση U στην L1, V στην L2 και W στην I-3. Αριστερή περιφορά εμφανίζεται αν αλλαχθούν δύο (φάσεις) αγωγοί του δικτύου, π.χ. L2 στο U και M στο V.



Σχήμα 3.6

Εξάρτηση της φοράς περιστροφής από την διεύθυνση παρατήρησης

Στους κινητήρες τριφασικού ρεύματος η δεξιά φορά περιστροφής πραγματοποιείται κατά τις συνδέσεις L1 με U, L2 με V, και L3 με W.

Στις άλλες μηχανές η δεξιά φορά περιστροφής καθορίζεται πιο δύσκολα.

Χαρακτηρισμός ακροδεκτών στις μηχανές χωρίς συλλέκτη.

Οι μηχανές χωρίς συλλέκτη εργάζονται με στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο. Στις μηχανές αυτές ανήκει π.χ. ο κινητήρας τριφασικού βραχυκυκλωμένου δρομέα. Το ίδιο ισχύει και για όλες οι γεννήτριες εναλλασσομένου ρεύματος.

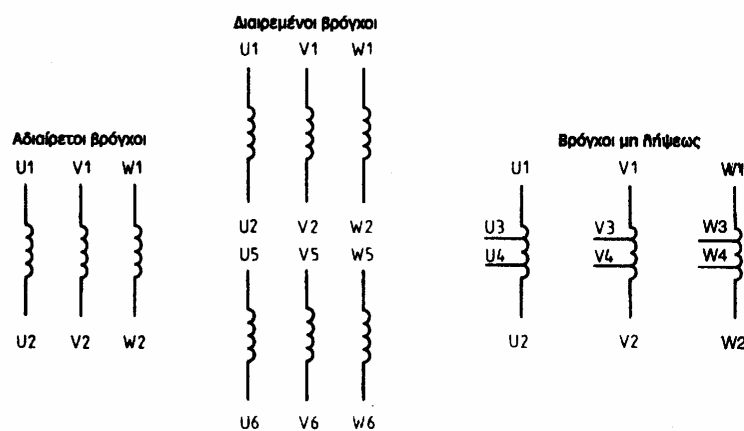
Τα χαρακτηριστικά γράμματα των αλφανουμερικών χαρακτηρισμών για τους ακροδέκτες των μηχανών χωρίς συλλέκτη είναι μεγάλα γράμματα του αλφαβήτου αρχίζοντας με το K (πίνακας 3).

Οι αρχές των βρόχων των τυλιγμάτων χαρακτηρίζονται με τον αριθμό 1, το τέλος με το 2. Όταν σ' ένα βρόχο μεταξύ των κυρίων συνδέσεων 1 και 2 υπάρχουν και άλλες συνδέσεις τότε χαρακτηρίζονται με παρακάτω αρίθμηση π.χ. με 3 ή 4. Εάν υπάρχουν περισσότερα τμήματα βρόχων τότε χρησιμοποιούνται τα νούμερα 5 και 6, για τρίτα τμήματα βρόχων οι αριθμοί 9 και 10 για τέταρτα οι αριθμοί 13 και 14. Εάν στην μηχανή η σύνδεση είναι εσωτερική δηλαδή αστέρα ή τρίγωνο, τότε οι εξωτερικοί ακροδέκτες χαρακτηρίζονται με τα γράμματα U, V, W.

Πίνακας 1: Χαρακτηριστικά γράμματα για μηχανές χωρίς συλλέκτη	
Πρωτεύον τύλιγμα	U, V, W σε 3 U~ σε 1~
Σημείο αστέρα πρωτεύοντος	N
Δευτερεύον τύλιγμα	K L M
Σημείο αστέρα δευτερεύοντος	Q
Συνεχές ρεύμα-τύλιγμα διέγερσης	F
Άλλο είδος τυλίγματος	R, S, T, X, Y, Z

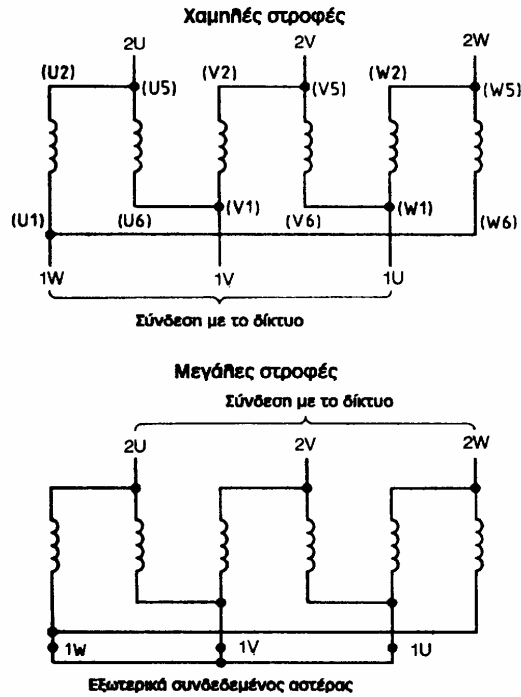
Πίνακας 3

Στις μηχανές αλλαγής αριθμού ζευγών πόλων, δηλαδή στις μηχανές με διαφορετικές στροφές, ο αριθμός 1 τοποθετείται στις μικρές στροφές, και το 2 στις μεγάλες στροφές. Στην συνδεσμολογία κατά Dahlander οι ακροδέκτες μεγάλου αριθμού πόλων (μικρές στροφές) 1U, 1V, 1W και των μικρού αριθμών πόλων (μεγάλες στροφές) 2U, 2V, 2W.



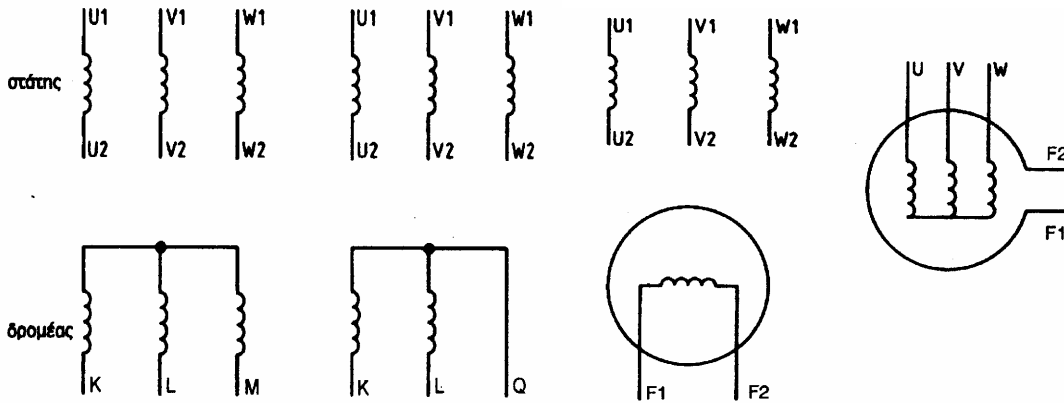
Σχήμα 3.7 Χαρακτηρισμός ακροδεκτών του τυλίγματος του στάτη μιας τριφασικής μηχανής

Όταν υπάρχουν 3 είδη στροφών, τότε τοποθετούνται οι αριθμοί 1, 2 και 3. Τα τμήματα των βρόχων του τυλίγματος Dahlander εκλαμβάνονται ως τμήματα βρόχων ενός τυλίγματος, δηλαδή αριθμούνται με U1, U2 και U5, U6 κ.ο.κ. Ο χαρακτηρισμός αυτός των ακροδεκτών εμφανίζεται στο κιβώτιο ακροδεκτών. Οι ακροδέκτες των τερμάτων 1U και 1W στις μικρές στροφές μεταλλάσσονται, για να διατηρηθεί η φορά περιστροφής στις δύο βαθμίδες στροφών.



Σχήμα 3.8

Στους δακτυλιοφόρους κινητήρες, οι συνδέσεις του στάτη χαρακτηρίζονται κατά τον γνωστό κανόνα, οι συνδέσεις του δρομέα με K, L, M όταν έχουν σύνδεση αστέρα και με K.L.Q αν έχουμε συνδεσμολογία V (σχήμα 3.8).



Σχήμα 3.8

Σχήμα 3.9

Χαρακτηρισμός ακροδεκτών σε κινητήρα με δακτυλιοφόρο δρομέα
Χαρακτηρισμός ακροδεκτών του τυλίγματος διέγερσης Σ.Ρ.

Στις σύγχρονες μηχανές οι ακροδέκτες του στάτη χαρακτηρίζονται όπως και οι ακροδέκτες των δακτυλιοφόρων κινητήρων, το τυλίγμα διέγερσης Σ.Ρ με F1 και F2. Με F1 και F2 χαρακτηρίζονται και άλλα είδη τυλιγμάτων διέγερσης.

Οι χαρακτηρισμοί των ακροδεκτών των μονοφασικών ηλεκτρικών μηχανών χωρίς συλλέκτη γίνονται με τον ίδιο τρόπο. Το κύριο τυλίγμα χαρακτηρίζεται με το γράμμα U, και το βοηθητικό τυλίγμα με το Z. Η αρίθμηση με τα νούμερα που τοποθετούνται δίπλα στα γράμματα 1 και 2 γίνεται έτσι, ώστε η δεξιά φορά περιστροφής να εμφανίζεται όταν το ρεύμα διέρχεται στους δύο βρόχους από το 1 προς το 2. Η αριστερή φορά περιστροφής όταν το ρεύμα διέρχεται στον ένα βρόχο από το 1 προς το 2 και στον άλλο από το 2 προς το 1.

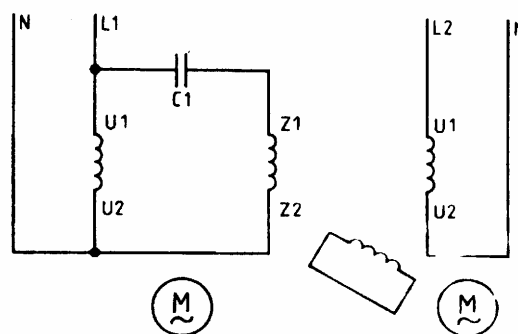
Χαρακτηρισμός ακροδεκτών στις μηχανές με συλλέκτες.

Οι μηχανές στις οποίες πρέπει να υπάρχει συνεχής εναλλαγή των πόλων του ρεύματος του δρομέα διαθέτουν σ' αυτόν συλλέκτη. Στις μηχανές με συλλέκτη ανήκουν οι περισσότερες μηχανές συνεχούς ρεύματος. Οι ακροδέκτες τόσο της ίδιας της μηχανής όσο και των άλλων διατάξεων σύνδεσης των μηχανών με συλλέκτη χαρακτηρίζονται με νουμερικά σύμβολα. Στις μηχανές συνεχούς ρεύματος χρησιμοποιούνται τα μεγάλα γράμματα από το πρώτο μισό του αλφαβήτου μέχρι το J (πίνακας 4).

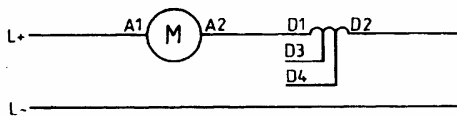
Τύλιγμα τυμπάνου	A
Τύλιγμα πόλων αναστροφής	B
Τύλιγμα πόλων αντιστάθμισης	C
Τύλιγμα διέγερσης σειράς	D
Τύλιγμα διπλής παράλληλης διέγερσης	E
Τύλιγμα ξένης διέγερσης	F
Βοηθητικά τυλίγματα κατά μήκος του αξόνα	H
Βοηθητικά τυλίγματα εγκάρσια στον άξονα	J

Πίνακας 4

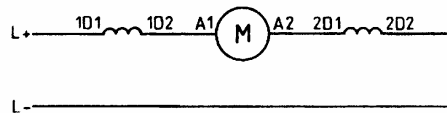
Εάν στο ίδιο το τμήμα του τυλίγματος υπάρχουν λήψεις τότε αυτές χαρακτηρίζονται με τους αριθμούς π.χ. 3 και 4 σχήμα 3.11.



Σχήμα 3.10



Σχήμα 3.11



Σχήμα 3.12

Η αρίθμηση στην αρχή της σύνδεσης γίνεται με τους μικρούς αριθμούς, γενικά με το 1 στην αρχή του τυλίγματος. Αν έχουμε ίδια είδη τυλιγμάτων δύο ομάδων π.χ. σε ένα συμμετρικά μοιρασμένο τύλιγμα πεδίου, τότε τοποθετούνται πριν το χαρακτηριστικό γράμμα αριθμοί. Φυσικά η κάθε ομάδα χαρακτηρίζεται με τον ίδιο αριθμό π.χ 1D1 και 1D2 είναι οι συνδέσεις για το μισό του τυλίγματος συνδεσμολογίας σειράς, και 2D1 και 2D2 του δεύτερου ήμισυ (σχήμα 3.12). Όταν υπάρχει τύλιγμα ίδιου είδους τότε δεν χρειάζεται η προηγούμενη αρίθμηση.

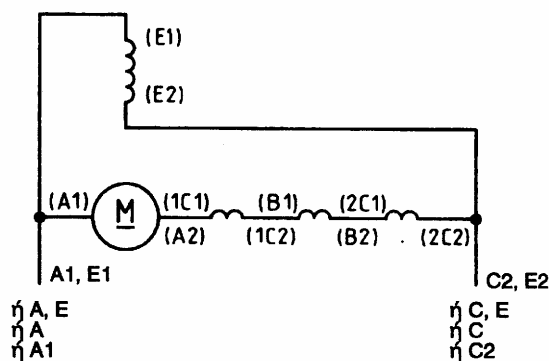
Η αρίθμηση σε ομάδες χρησιμοποιείται μόνο, αν υπάρχουν πολλές ίδιες ομάδες τυλιγμάτων.

Αν ένα μόνο μέρος ακροδεκτών οδηγείται προς τα έξω, τότε ο χαρακτηρισμός τους απλοποιείται.

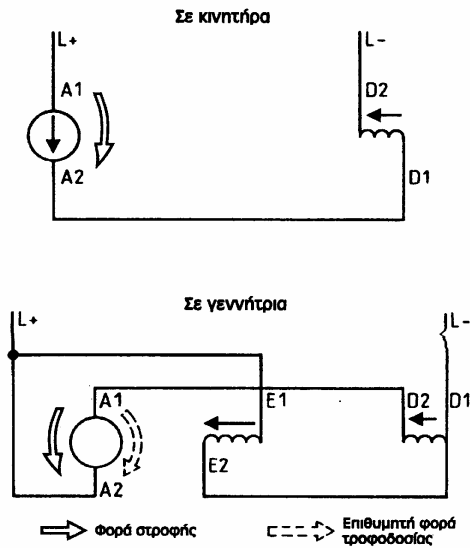
Για το σκοπό αυτό υπάρχουν διάφορες δυνατότητες. Σε κάθε περίπτωση η αρίθμηση των ομάδων είναι χωρίς σημασία γι' αυτό παραλείπεται. Έτσι π.χ στις συνδέσεις με C θα είναι 2C2 με E2 (σχήμα 3.10).

Για τον προσδιορισμό της φοράς περιστροφής των μηχανών συνεχούς ρεύματος έχει καθοριστεί, ότι αν το ρεύμα διέρχεται από την αρχή προς το τέλος του τμήματος του τυλίγματος τότε έχουμε δεξιά φορά περιστροφής. Στις γεννήτριες συνεχούς ρεύματος το ρεύμα τύμπανου προσπαθεί να στρέψει το τύμπανο στην αντίθετη φορά απ' αυτή που στρέφεται αυτό. Για αυτή την επιθυμία περιστροφής του τύμπανου ισχύουν οι ίδιοι κανόνες που εφαρμόζονται για την φορά περιστροφής του κινητήρα. Η φορά κίνησης της γεννήτριας είναι βέβαια προς την αντίθετη κατεύθυνση (σχήμα 3.13).

Η δεξιά φορά περιστροφής στους κινητήρες συνεχούς ρεύματος πραγματοποιείται αν το ρεύμα στα τμήματα του τυλίγματος διέρχεται από την αρχή προς το τέλος. Στις γεννήτριες η φορά περιστροφής είναι αντίθετη προς επιθυμητή φορά περιστροφής.



Σχήμα 3.13



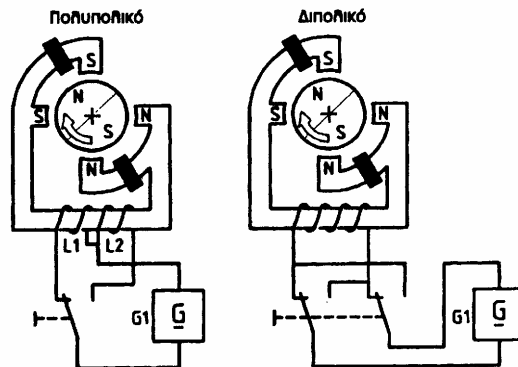
Σχήμα 3.14 Καθορισμός της κατεύθυνσης του ρεύματος για την φορά περιστροφής των μηχανών με συλλέκτη

Κινητήρες συνεχούς ρεύματος με μαγνητικό δρομέα.

Η χρησιμοποίηση μαγνητικών δρομέων είναι δυνατή και στους κινητήρες συνεχούς ρεύματος με την προϋπόθεση πως ένα συνεχές ρεύμα διέρχεται από ένα τύλιγμα κατάλληλα τοποθετημένο για να δημιουργείται στρεφόμενο πεδίο.

3.5 Βηματικοί κινητήρες.

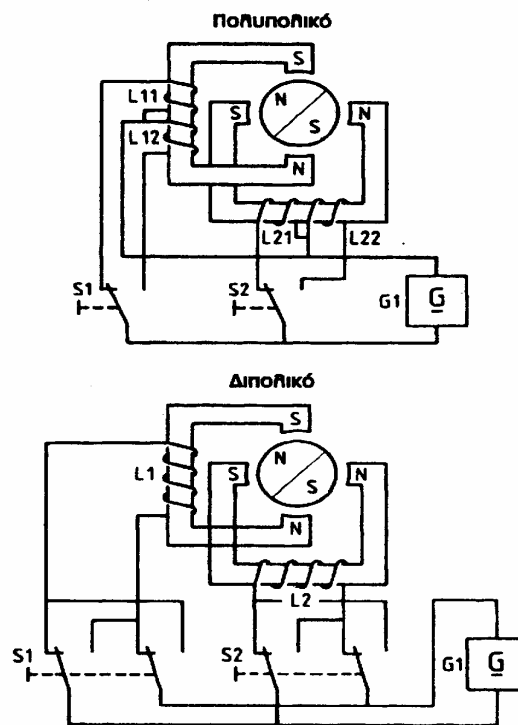
Ο δρομέας ενός βηματικού κινητήρα σε κάθε παλμό συνεχούς ρεύματος (ορθογωνικός παλμός) περιστρέφεται κατά μια σταθερή γωνία, η οποία ονομάζεται γωνία βήματος. Σε μια γρήγορη ακολουθία παλμών η βηματική κίνηση εξελίσσεται σε ομαλή περιστροφική κίνηση. Η περιστροφική κίνηση του βηματικού κινητήρα είναι αυστηρά ανάλογη του αριθμού παλμών γι' αυτό στην πράξη αναφέρεται πως ο βηματικός κινητήρας δεν χάνει το βήμα του.



Σχήμα 3.15

Οι βηματικοί κινητήρες με μαγνητικό δρομέα, διακρίνονται στον κινητήρα του ενός βρόχου (σχήμα 3.15), στον κινητήρα των δύο βρόχων (σχήμα 3.15) και στον κινητήρα των 5 βρόχων. Οι παραπάνω κινητήρες είναι δυνατόν να διαθέτουν διπολικό ή πολιπολικό τύλιγμα. Ο έλεγχος των ρηματικών κινητήρων με πολιπολικό τύλιγμα γίνεται με τη σύνδεση πολικού διακόπτη εναλλασσόμενων θέσεων, ενώ σ' αυτούς με διπολικό τύλιγμα γίνεται απαραίτητα με τη χρησιμοποίηση διπολικού διακόπτη (σχήμα 3.16). Για τον έλεγχο των βηματικών κινητήρων χρησιμοποιούνται ηλεκτρονικοί διακόπτες, μηχανικοί διακόπτες ή ηλεκτρομηχανικοί διακόπτες.

Για την λειτουργία βηματικών κινητήρων απαιτούνται ειδικοί διακόπτες ελέγχου. Στους βηματικούς κινητήρες του ενός βρόχου το στρεφόμενο πεδίο δημιουργείται όπως το πεδίο του κινητήρα διχαστικών πόλων, δηλαδή με τη χρησιμοποίηση ενός δακτυλίου βραχυκύκλωσης κάτω από τύλιγμα (σχήμα 3.16). Η φορά περιστροφής των κινητήρων αυτών δεν μεταβάλλεται. Σε διάκριση από τους κινητήρες διχαστικών πόλων, η εναλλασσόμενη μαγνητική ροή που τους διαρρέει έχει ορθογωνική, και όχι ημιτονοειδή μορφή. Στους βηματικούς κινητήρες των δύο βρόχων και των πέντε βρόχων η δημιουργία του στρεφόμενου πεδίου δημιουργείται χωρίς διχαστικούς πόλους με τον κατάλληλο έλεγχο των βρόχων του τυλίγματος (πίνακας 5). Η αλλαγή φοράς περιστροφής των βηματικών κινητήρων δύο βρόχων είναι δυνατή με την αλλαγή της σειράς ελέγχου.



Σχήμα 3.16

- α: Γωνία βήματος
- 2ρ: Αριθμός πόλων
- m: Αριθμός βρόχων

$$a = \frac{360^{\circ}}{2pm}$$

Στους βηματικούς κινητήρες υπάρχει λειτουργία πλήρους βήματος και μισού βήματος. Στους κινητήρες πλήρους βήματος ο δρομέας κινείται με την αλλαγή του ελέγχου κατά την πλήρη γωνία βήματος, ενώ στην λειτουργία μισού βήματος μόνον κατά μισή γωνία βήματος.

Στους κινητήρες βήματος με δυο βρόχους η φορά περιστροφής εξαρτάται από την σειρά των παλμών ελέγχου.

Η γωνία βήματος των βηματικών κινητήρων εξαρτάται από τον αριθμό πόλων και τον αριθμό βρόχων.

Νρ. βήματος		Λειτουργία όλων των βημάτων μαύρο Λειτουργία μισού αριθμού βημάτων κόκκινο	
Αρισ. περισ.	Δεξιό περισ.	Διακόπτης S1	Διακόπτης S2
0=4	0=4	←	←
3 1/2	1/2	←	Μέσο
3	1	←	→
2 1/2	1 1/2	Μέσο	→
2	2	→	→
1 1/2	2 1/2	→	Μέσο
1	3	→	←
1/2	3 1/2	Μέσο	←

Πίνακας 5

Στους βηματικούς κινητήρες παρουσιάζονται πολλές διαφορετικές γωνίες βήματος. Οι στροφές ενός βηματικού κινητήρα εξαρτώνται από το είδος λειτουργίας, την γωνία βήματος και την συχνότητα βήματος f_b και τους παλμούς ελέγχου. Κύρια όμως εξαρτώνται από την συχνότητα με την οποία μεταβάλλεται ο έλεγχος και όχι η συχνότητα του κάθε παλμού στον βρόχο του τυλίγματος.

η : στροφές

f_b : συχνότητα βήματος

m : αριθμός βρόχων $2p$: αριθμός πόλων

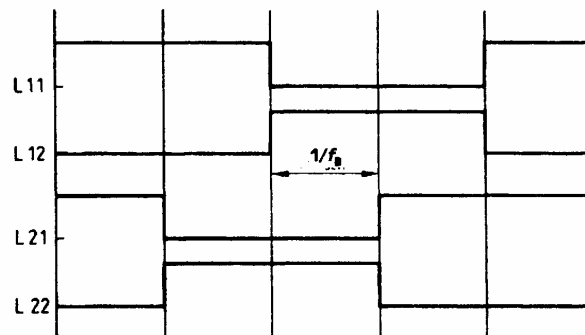
Για λειτουργία πλήρους βήματος

$$n = \frac{f_B}{m \cdot 2p}$$

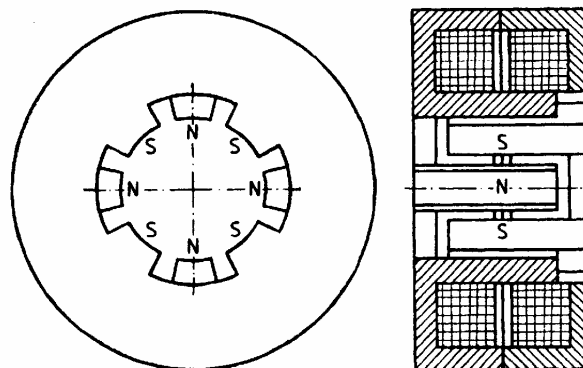
Για λειτουργία μισού βήματος

$$n = \frac{f_B}{2m \cdot 2p}$$

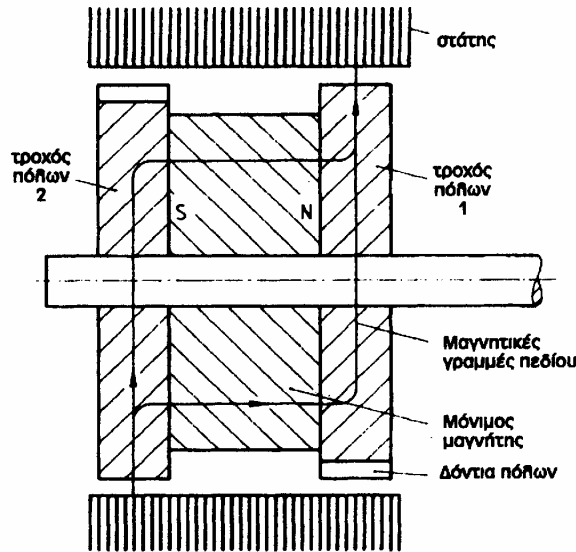
Πίνακας : Τυπική γωνία βήματος και βήμα/στροφή								
1,8°	2°	3,6°	7,5°	9°	11,25°	15°	30°	45°
200	180	100	48	40	32	24	12	8



Έλεγχος των πολυπολικών βηματικών κινητήρων δύο βρόγχων



Σχήμα 3.17 Βηματικός κινητήρας για μεγαλύτερη γωνία βήματος (Αρχή ονυχωτών πόλων)



Σχήμα 3.18 Βηματικός κινητήρας για μικρή γωνία βήματος
(Αρχή ίσων πόλων)

Στους βηματικούς κινητήρες του είδους αυτού ο στάτης έχει δύο βρόχους (σχήμα 3.19). Ο καταμερισμός οδόντων του στάτη είναι τόσο μεγάλος όσο και ο καταμερισμός των οδόντων του τροχού πόλων του δρομέα επόμενης διπλάσιο από τον καταμερισμό των πόλων του δρομέα.

Στην εμφανή παράσταση του σχήματος 3.19 παρατηρείται ένας κινητήρας μόνο με 18 οδοντώσεις στον δρομέα και δύο οδοντώσεις για κάθε πόλο του στάτη. Αρχικά υπάρχει μια συγκεκριμένη κατάσταση παρεμβολής στους δύο βρόχους του τυλίγματος. Ο δρομέας παίρνει μια θέση ανάλογη με την πολικότητα του στάτη, εκεί όπου η μαγνητική αντίσταση έχει μικρή τιμή. Με την αλλαγή φοράς του ρεύματος στο βρόχο Li αντιστρέφεται η πολικότητα, οπότε προκύπτει μια νέα θέση ηρεμίας του δρομέα ο οποίος αλλάζει την θέση του κατά 10° . Η επόμενη κατά 10° δεξιά περιστροφή πραγματοποιείται με την αντιστροφή της φοράς του ρεύματος στο βρόχο B και κατόπιν πάλι στο βρόχο A.

Στους βηματικούς κινητήρες, με την αρχή της ισότητας πόλων ένας τετραπολικός δρομέας χρησιμοποιείται με έναν διπολικό μόνιμο μαγνήτη.

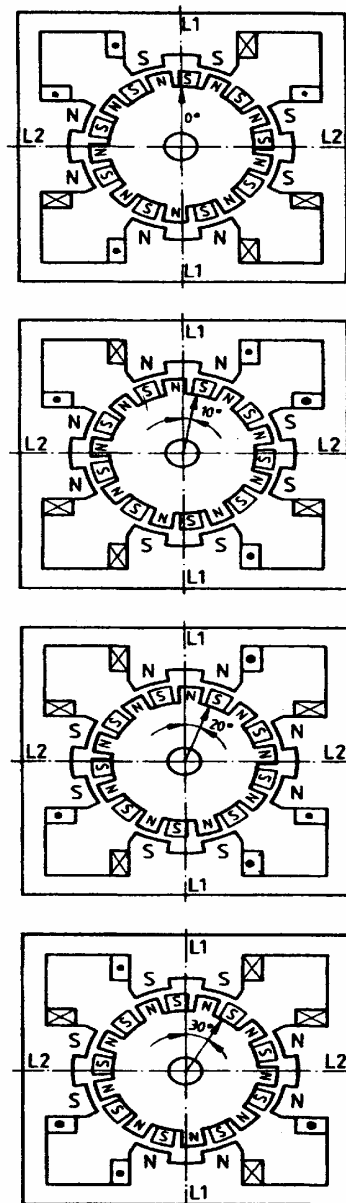
Συνήθως στους βηματικούς κινητήρες των 5 βρόχων μόνο οι τέσσερις ελέγχονται συγχρόνως. Στην περίπτωση αυτή αναφερόμεθα για έλεγχο τεσσάρων βρόχων. Έτσι ο ένας βρόχος είναι βραχυκυκλωμένος. Στο βηματικό κινητήρα δύο βρόχων η γωνία βήματος είναι μικρότερη ενώ διαφορετικά ίση ώστε ο βηματικός κινητήρας να κινείται ομαλά.

Κατά τον έλεγχο των τεσσάρων βρόχων του βηματικού κινητήρα των πέντε βρόχων ο ένας βρόχος του είναι βραχυκυκλωμένος.

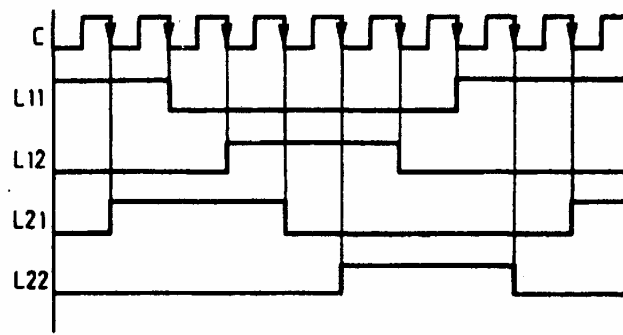
Ο έλεγχος των βηματικών κινητήρων ανάλογα με το είδος τους και το είδος λειτουργίας τους απαιτεί για την πραγματοποίηση του μία ειδική σειρά παλμών τάσης στα τμήματα του τυλίγματος. Στον βηματικό κινητήρα των δύο βρόχων κατά τη λειτουργία του πλήρους βήματος ελέγχονται συγχρόνως δύο βρόχοι, ενώ στη λειτουργία

μισού βήματος για το μισό του χρόνου ελέγχεται ένας βρόχος ή και οι δύο βρόχοι. Αυτό ισχύει και κατά τις δύο φορές περιστροφής, όμως η σειρά των απαραίτητων παλμών τάσης για κάθε φορά περιστροφής είναι διαφορετική. Στους βηματικούς κινητήρες των πέντε βρόχων ελέγχονται συγχρόνως πάντα το ολιγότερο δύο βρόχοι και το πολύ τρεις βρόχοι.

Ανάλογα με το είδος του ρηματικού κινητήρα, την φορά περιστροφής και το είδος λειτουργίας η σειρά των παλμών τάσης είναι διαφορετική στους βρόχους των τυλιγμάτων.

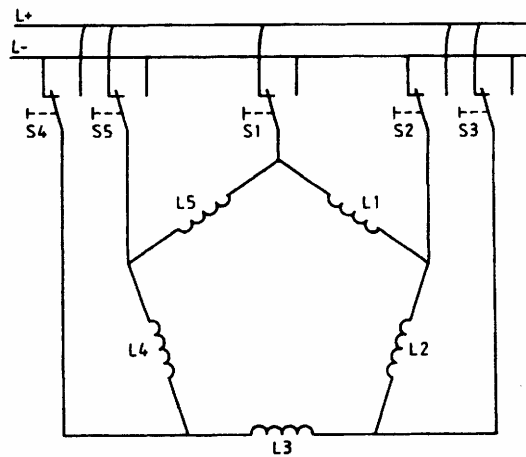


Σχήμα 3.19 Τρόπος λειτουργίας στους βηματικούς κινητήρες κατά την αρχή της ισότητας των πόλων

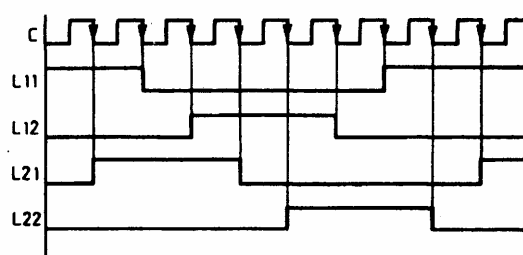


Σχήμα 3.20 Χρονοδιάγραμμα ανάπτυξης για έλεγχο μέσω βήματος

Η διαφορετικότητα του ελέγχου απαιτεί ένα "έξυπνο" κύκλωμα ελέγχου το οποίο πετυχαίνεται π.χ. με ένα δυαδικό μετρητή συνδεδεμένο με κωδικοποιητή. Στους βηματικούς κινητήρες δύο βρόχων η λειτουργία πλήρους βήματος γίνεται με τις καταστάσεις παρεμβολής από 0 έως 3 απαραίτητα. Κατόπιν αρκεί ένας μετρητής τεσσάρων βημάτων από 0 μέχρι 3. Κατά τη λειτουργία μισού βήματος του κινητήρα αυτού είναι απαραίτητες οι καταστάσεις παρεμβολής από 0 μέχρι 10 οπότε απαιτείται μετρητής τεσσάρων βημάτων με δυνατότητα μέτρησης το πολύ από 0 μέχρι 15. Επίσης για τον έλεγχο του βηματικού κινητήρα των πέντε βρόχων είναι απαραίτητος ένας μετρητής τεσσάρων βημάτων. Στη θέση του αριθμητή ο οποίος συνδέεται με τον κωδικοποιητή έχει δυνατότητα να χρησιμοποιηθεί ένας μικροεπεξεργαστής, στον οποίο συνδέεται ένα τμήμα ισχύος που ονομάζεται ανιχνευτής.



Σχήμα 3.21 Βηματικός κινητήρας 5 βρόχων



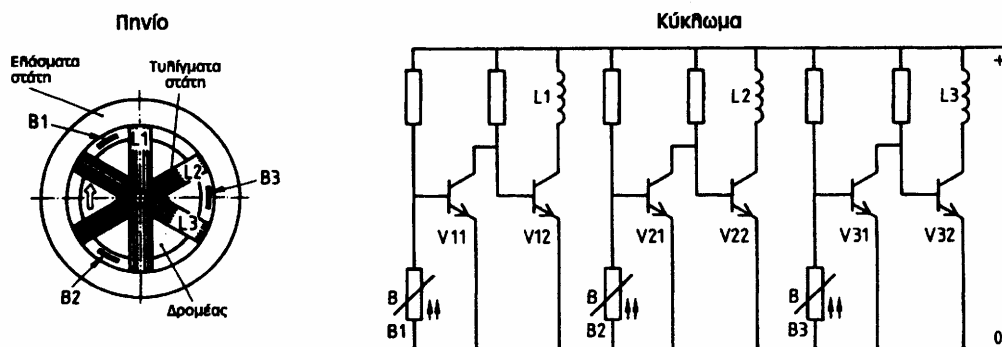
Σχήμα 3.22 Χρονοδιάγραμμα ανάπτυξης για Βηματικός κινητήρας 5 βρόχων

Ο έλεγχος των ρηματικών κινητήρων πραγματοποιείται με δυαδικό μετρητή και ένα κωδικοποιητή ή ένα μικροεπεξεργαστή συνδεδεμένο μ' ένα ανιχνευτή.

Η ροπή στρέψης που αποδίδεται από ένα βηματικό κινητήρα και η μέγιστη συχνότητα βήματος εξαρτώνται πολύ από τη συσκευή ελέγχου. Ακόμα και χωρίς ρεύμα στάτη εμφανίζεται εξαιτίας των μαγνητικών δυνάμεων ροπή ηρεμίας. Με την αύξηση της συχνότητας ελέγχου αυξάνεται η φαινόμενη αντίσταση του τυλίγματος του στάτη, έτσι ώστε να μειώνεται η κατανάλωση του ρεύματος. Η μεγαλύτερη συχνότητα βήματος, στην οποία εκκινεί ο κινητήρας χωρίς σφάλμα στο βήμα με τη ροπή φορτίου, χαρακτηρίζεται ως οριακή συχνότητα εκκίνησης. Η οριακή ροπή εκκίνησης είναι η μέγιστη ροπή φορτίου με την οποία ο κινητήρας σε συνάρτηση με την συχνότητα βήματος είναι δυνατόν να εκκινήσει χωρίς σφάλμα βήματος. Η οριακή ροπή λειτουργίας είναι η μεγαλύτερη ροπή φορτίου με την οποία είναι δυνατόν να λειτουργεί ο κινητήρας σε συνάρτηση με τη συχνότητα βήματος. Στην κανονική λειτουργία και σε όχι πολύ μεγάλη ροπή φορτίου ο βηματικός κινητήρας περιστρέφεται σε κάθε παλμό ελέγχου ακριβώς κατά τη γωνία βήματος. Επομένως εμφανίζεται γωνία φορτίου που Αυτή μπορεί να είναι τόσο μεγάλη όσο και η γωνία βήματος. Δεν εμφανίζεται βέβαια καμία άθροιση της γωνίας φορτίου. Το σφάλμα εμφανίζεται λοιπόν το πολύ στο τέλος του ελέγχου με μια γωνία ανεξάρτητα από τον αριθμό παλμών. Οι ρηματικοί κινητήρες χρησιμοποιούνται για πιεστήρια, έλεγχος από μακριά, ενδείξεις από απόσταση, εγκαταστάσεις αριθμήσεων, χαρακτήρες καμπύλων, ανάγνωση καρτών στην τεχνική ελέγχου και ρύθμισης. Εκτός από τους τύπους των βηματικών κινητήρων που έχουν περιγραφεί, υπάρχουν και άλλοι τύποι π.χ. με μαλακό μαγνητικό δρομέα.

3.6 Ηλεκτρονικός κινητήρας.

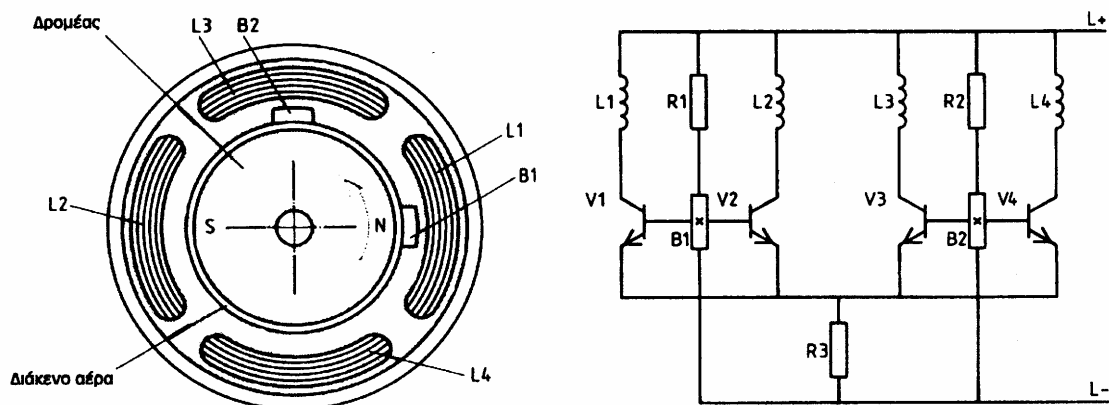
Οι ηλεκτρονικοί κινητήρες υπάρχουν σε πολλά είδη. Στους ηλεκτρονικούς κινητήρες με δρομέα μόνιμου μαγνήτη, ο στάτης φέρει τρεις βρόχους τυλιγμάτων, που το ένα μετά το άλλο παρεμβάλλεται στο συνεχές ρεύμα (σχήμα 3.4). Με τον τρόπο αυτό δημιουργείται στρεφόμενο πεδίο που συμπαρασύρει το δρομέα.



Σχήμα 3.24

Ηλεκτρονικός κινητήρας με πλάκες πεδίου ως αισθητήρια της θέσης του δρομέα.

Η συνέχιση της παρεμβολής επιτυγχάνεται με την θέση του δρομέα. Ως αισθητήρια για την θέση του δρομέα χρησιμοποιούνται π.χ. πλάκες πεδίου (αντιστάσεις εξαρτημένες από μαγνητικό πεδίο). Αν ο δρομέας βρίσκεται σε τέτοια θέση, ώστε η μαγνητική επαγωγή στις πλάκες πεδίου να έχει το μέγεθος $B1$, η συγκεκριμένη αντίσταση είναι μεγάλης τιμής. Με αυτόν τον τρόπο η βάση του τρανζίστορ $V11$ είναι θετική, ώστε να άγει και η βάση του τρανζίστορ $V12$ τοποθετείται στο 0. Έτσι λοιπόν η βάση του $V12$ φράζει τη διέλευση του ρεύματος, με αποτέλεσμα να μην υπάρχει ρεύμα στο βρόχο $L1$. Οι βρόχοι $L2$ και $L3$, απεναντίας, διαρρέονται από ρεύμα και συνεπώς ο δρομέας περιστρέφεται. Αντίστοιχα ελέγχει τότε το τρανζίστορ $V21$ και μετά το $V31$. Σε μία άλλη κατασκευαστική έκδοση ηλεκτρονικού κινητήρα με δρομέα μόνιμου μαγνήτη στον στάτη διατάσσονται τέσσερα πηνία (σχήμα 3.25) που ελέγχονται από τη θέση την οποία λαμβάνει ο δρομέας. Για το σκοπό αυτό στον στάτη τοποθετούνται δύο γεννήτριες Hall, που είναι μετατεθειμένες μεταξύ τους κατά 90° . Η γεννήτρια Hall αποτελείται από ένα λεπτό ημιαγωγό πλακίδιο, που βρίσκεται κάθετα τοποθετημένο στο μαγνητικό πεδίο του δρομέα (σχήμα 3.25). Από την κατά μήκος κατεύθυνση του ημιαγωγού πλακιδίου διέρχεται ένα σταθερό συνεχές ρεύμα (σχήμα 3.25). Με την επιρροή του μαγνητικού πεδίου του δρομέα, τα φορτία ιόντων ωθούνται από τη δύναμη Lorentz προς τα πλευρά, ώστε στις δύο κάθετες πλευρές να είναι δυνατή η λήψη μιας τάσης. Αν στην κατά μήκος πλευρά υπάρχει συνεχές ρεύμα, η παραγόμενη αυτή τάση είναι τόσο μεγάλη, όση και η μαγνητική επαγωγή.



Σχήμα 3.25

Ανάλογα με την πολικότητα του μαγνητικού πεδίου της γεννήτριας Hall η πολικότητα της τάσης εξόδου είναι διαφορετική. Έτσι στο κύκλωμα του σχήματος 3.25, από την κάθε γεννήτρια Hall ελέγχεται ένα τρανζίστορ, που με την σειρά του ελέγχει ένα πηνίο.

Το κύκλωμα του σχήματος 3.25 της προηγούμενης σελίδας έχει υπολογιστεί έτσι, ώστε χωρίς μαγνητικό πεδίο όλα τα τρανζίστορ να φράζουν τη ροή ρεύματος, οπότε όλα τα πηνία δεν διαρρέονται από ρεύμα. Το μαγνητικό πεδίο του δρομέα διαπερνά την γεννήτρια Hall $B1$, έτσι η βάση του τρανζίστορ $V1$ είναι ισχυρά θετική, ενώ η βάση του $V2$ ισχυρά αρνητική. Το $V1$ άγει, ενώ το $V2$ φράζει την ροή ρεύματος. Ο βρόχος $L1$ διαπερνάται από ρεύμα και δημιουργεί το μαγνητικό πεδίο του στάτη οπότε ο δρομέας στρέφεται παρακάτω και έρχεται κάτω από την επιρροή του μαγνητικού πεδίου η γεννήτρια Hall $B2$.

Κατ' ακολουθία με το τρανζίστορ V3 ελέγχεται το πηνίο L3, και ο δρομέας στρέφεται παραπέρα. Μετά από μισή περιστροφή ο απέναντι ευρισκόμενος μαγνητικός πόλος του δρομέα βρίσκεται κάτω από την B1 οπότε μεταβάλλεται η πολικότητα της χάσης της γεννήτριας Hall B1. Στην περίπτωση αυτή ο βρόχος L1 είναι χωρίς ρεύμα και ο L2 ελέγχεται διαμέσου του τρανζίστορ V2. Αντίστοιχα, κατόπιν ελέγχεται η γεννήτρια Hall B2 και το ρεύμα στους βρόχους L4 και L3. Στη συνέχεια το φαινόμενο επαναλαμβάνεται.

Τα πηνία του στάτη ενός ηλεκτρονικού κινητήρα ελέγχονται σε σχέση με τη θέση του μόνιμου μαγνήτη του δρομέα.

Γραμμικοί κινητήρες συνεχούς ρεύματος.

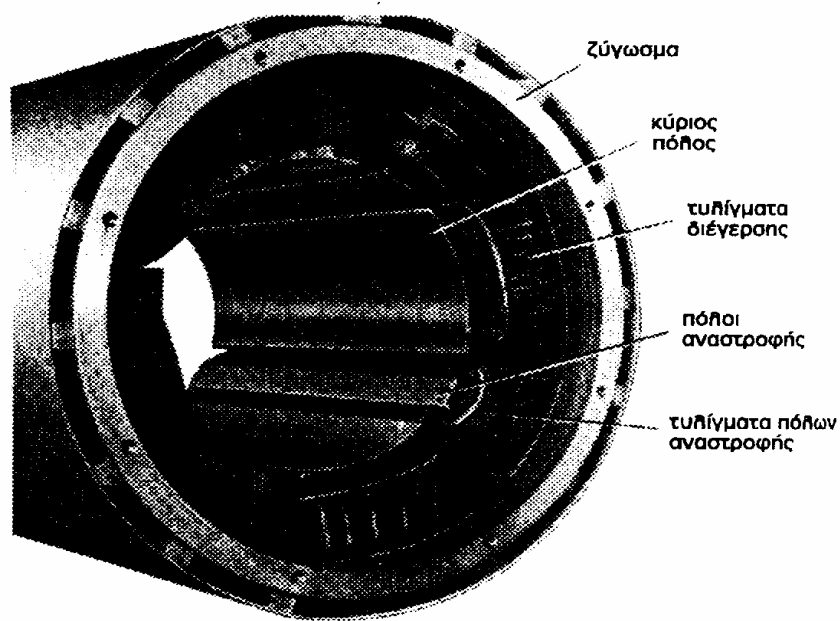
Ο γραμμικός κινητήρας συνεχούς ρεύματος με την πιο απλή μορφή είναι ο κινητήρας ίσων πόλων. Αυτόν πρέπει να τον θεωρήσουμε ως εξέλιξη των οργάνων μέτρησης περιστρεφόμενου πηνίου. Στο όργανο μέτρησης με περιστρεφόμενο πηνίο ένα περιστρεφόμενο πηνίο βρίσκεται σ' ένα ομοιογενές μαγνητικό πεδίο. Από το πηνίο διέρχεται ρεύμα π.χ. στο πάνω μισό του πηνίου ξεκινώντας από τον παρατηρητή και προς τα κάτω προς τον παρατηρητή. Γι' αυτό στο πηνίο ενεργεί μια ροπή στρέψης. Αν αυτό το όργανο μέτρησης με στρεφόμενο πηνίο, μοιρασθεί στα δύο και οι μαγνητικές γραμμές του πεδίου του οδηγηθούν διαμέσου μιας ροής που επιστρέφει προς τα πίσω, τότε πραγματοποιείται ακόμα μια περιστροφική κίνηση.

Στους κινητήρες ίσων πόλων (γραμμικοί κινητήρες μόνιμου μαγνήτη) το πηνίο δεν εδράζεται, ώστε να περιστρέφεται, αλλά οδηγείται κατά μήκος ενός στρογγυλού τερματικού ανατρεπόμενου σιδήρου. Στο διάκενο επικρατεί επίσης ένα ομογενές μαγνητικό πεδίο. Στο διαρρεόμενο από ρεύμα πηνίο ενεργεί και εδώ μια δύναμη. Σε αντίθετη φοράς διέλευση ρεύματος το φτωχό σε τριβές πηνίο κινείται προς την αντίθετη κατεύθυνση.

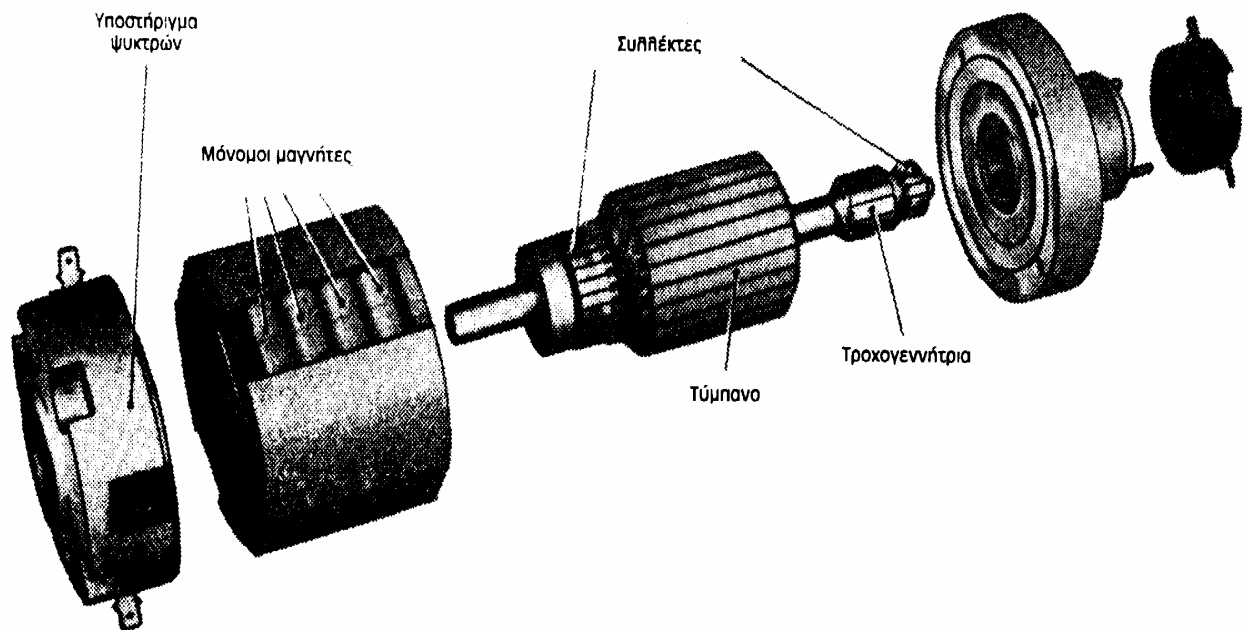
Οι κινητήρες αυτοί ίσων πόλων χρησιμοποιούνται π.χ. στην κίνηση συσκευών καταγραφής. Υπάρχουν και γραμμικοί κινητήρες συνεχούς ρεύματος με μετασχηματιστές μετρήσεων.

3.7 Δομή της μηχανής συνεχούς ρεύματος.

Ο στάτης της μηχανής συνεχούς ρεύματος που χαρακτηρίζεται και ως υποστήριγμα μαγνητών έχει σαν σκοπό την παραγωγή σταθερού μαγνητικού πεδίου. Το σταθερό μαγνητικό πεδίο στις μηχανές συνεχούς ρεύματος ισχύος μέχρι 30 KW δημιουργείται από μόνιμους μαγνήτες (μαγνητικοί πόλοι) ή από τύλιγμα διέγερσης (τύλιγμα πεδίου). Στις μηχανές με μόνιμο μαγνήτη, οι μαγνητικοί πόλοι στερεώνονται σταθερά στο κέλυφος (ζύγωμα) (σχήμα 3.27). Στις μηχανές με τύλιγμα πεδίου (διέγερσης) οι κύριοι πόλοι φέρουν το τύλιγμα διέγερσης (σχήμα 3.26). Οι κύριοι πόλοι αποτελούνται από τον πυρήνα πόλων και τα πέδιλα πόλων που αποτελούνται συνήθως από ηλεκτροελάσματα. Στις μεσαίες και μεγάλες μηχανές μεταξύ των κυρίων πόλων τοποθετούνται τα τυλίγματα των πόλων αναστροφής (βοηθητικών πόλων). Υπάρχουν και μηχανές συνεχούς ρεύματος στις οποίες όλο το μαγνητικό υλικό εκτός από τους μόνιμους μαγνήτες αποτελείται από ηλεκτροελάσματα.

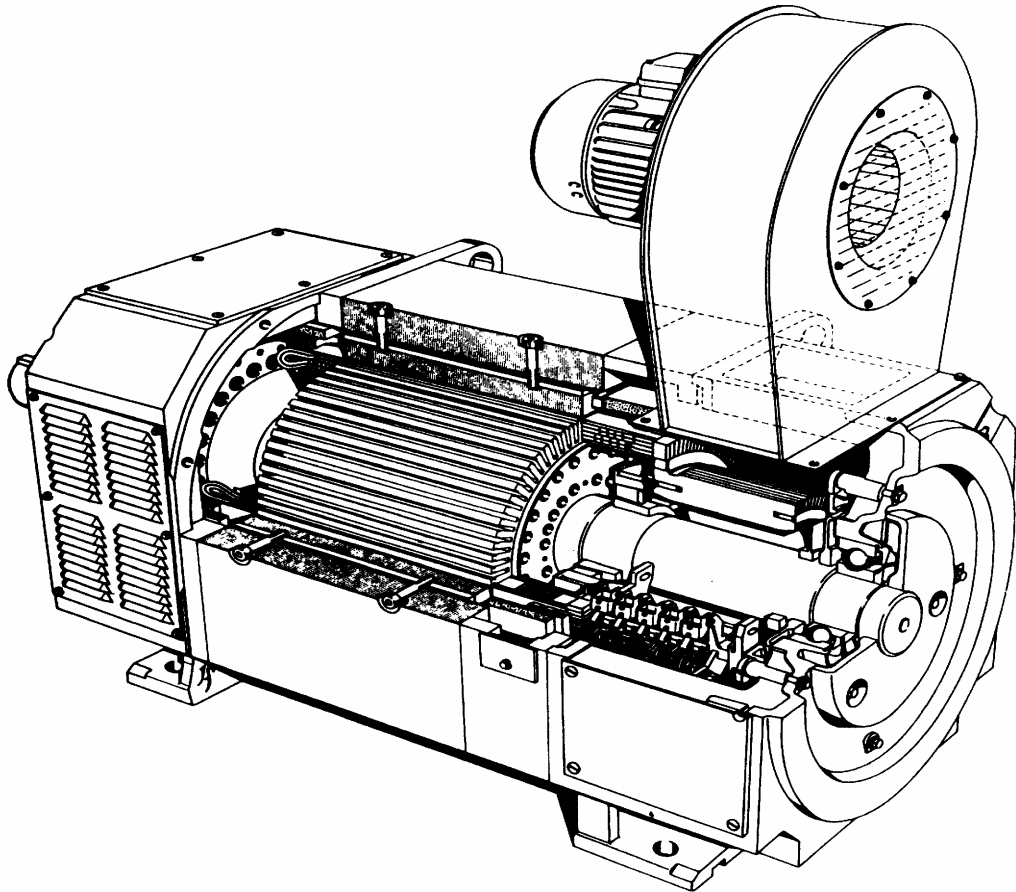


Σχήμα 3.26 Στάτης ενός κινητήρα συνεχούς ρεύματος



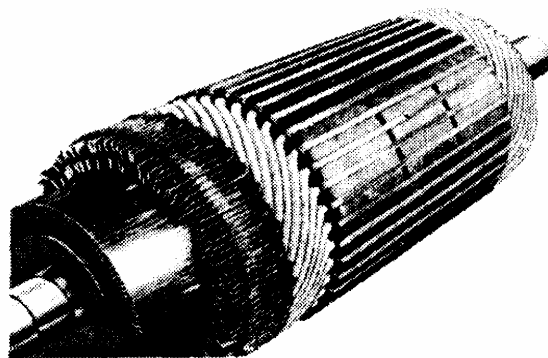
Σχήμα 3.27 Κινητήρας Σ.Ρ. με διέγερση από μόνιμους μαγνήτες και ταχογεννήτρια

Οι πολύ μεγάλοι κινητήρες για την καλύτερη ψύξη τους φέρουν και ανεμιστήρα (σχήμα 3.28).



Σχήμα 3.28 Κινητήρας συνεχούς ρεύματος με ξένη διέγερση και ανεμιστήρα.

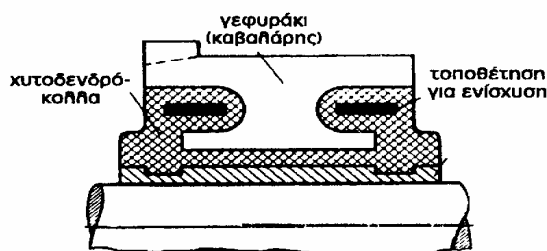
Στους κινητήρες με συλλέκτη ο δρομέας λέγεται συνήθως τύμπανο ή επαγωγικό τύμπανο και αποτελείται από τον άξονα, τον πυρήνα (πακέτο ελασμάτων), τύλιγμα τύμπανου και το συλλέκτη (σχήμα 3.29).



Σχήμα 3.29 Τύμπανο ενός κινητήρα Σ.Ρ.

Το τύλιγμα του τύμπανου συνδέεται στον συλλέκτη. Στις μεσαίες και μεγάλες μηχανές υπάρχει και ανεμιστήρας. Συχνά με τον άξονα του δρομέα συνδέονται βοηθητικές συσκευές π.χ. ταχογεννήτρια για την μέτρηση στροφών.

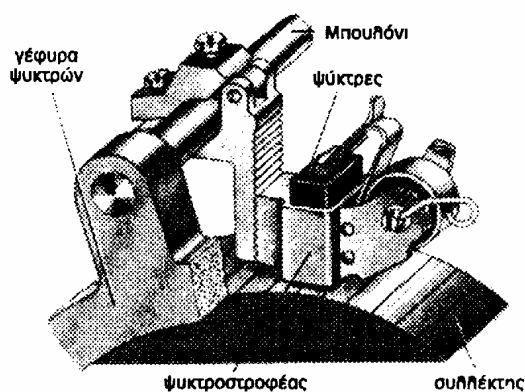
Ο συλλέκτης αποτελείται από ξεχωριστές λάμες (τομείς) από σκληρό χαλκό, που είναι μονωμένες μεταξύ τους με μίκα και συγκρατούνται με χυτή δένδρόκολλα ή με μηχανικό πρεσάρισμα (σχήμα 3.28).



Σχήμα 3.30 Δομή συλλέκτη

Η σύνδεση του τυλίγματος του τύμπανου στους τομείς του συλλέκτη πραγματοποιείται με συγκόλληση. Στον στάτη της μηχανής συνεχούς ρεύματος υπάρχει ένας μηχανισμός ψηκτρών (ψηκτροφορέας) (σχήμα 3.31).

Αυτός χρησιμοποιείται για την υποδοχή των ψηκτρών οι οποίες κατασκευάζονται από άνθρακα ή γραφίτη. Η ονομασία ψήκτρες έχει ιστορική σημασία επειδή χρησιμοποιήθηκαν ψήκτρες από πλατίνα. Ο μηχανισμός ψηκτρών αποτελείται από το στήριγμα αυτών, το μπουλόνι και ένα περιστρεφόμενο τμήμα (σχήμα 3.31).



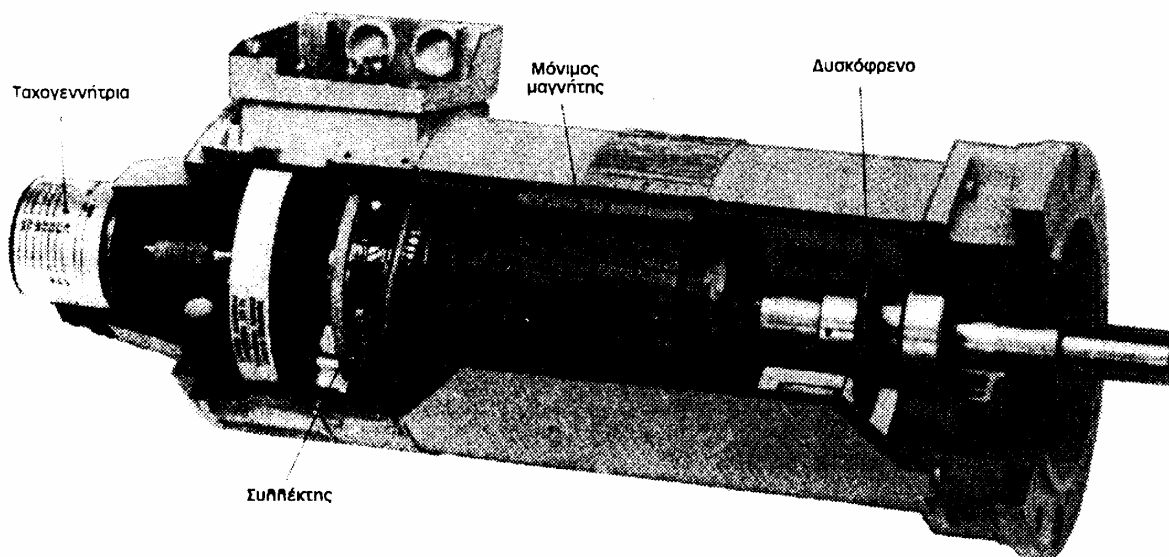
Σχήμα 3.31

Σε κινητήρες που απαιτείται γρήγορη απόκριση στροφών σε εντολές ελέγχου π.χ. σε κινήσεις χειρισμού η ροπή αδρανείας πρέπει να έχει μικρή τιμή.

Η ροπή αδρανείας αποτελεί ένα μέτρο για την ροπή στρέψης, η οποία είναι απαραίτητη για την επιτάχυνση της μηχανής. Αν λοιπόν θεωρήσουμε τη μάζα του δρομέα της μηχανής συγκεντρωμένη σε ένα σημείο, και μάλιστα με μια τόσο μεγάλη απόσταση από τον άξονα περιστροφής, ώστε για την επιτάχυνση της περιστροφικής κίνησης να απαιτείται ίδια ροπή όπως στην πραγματική μηχανή, τότε ο υπολογισμός της ροπής αδρανείας γίνεται από τη μάζα και την απόσταση.

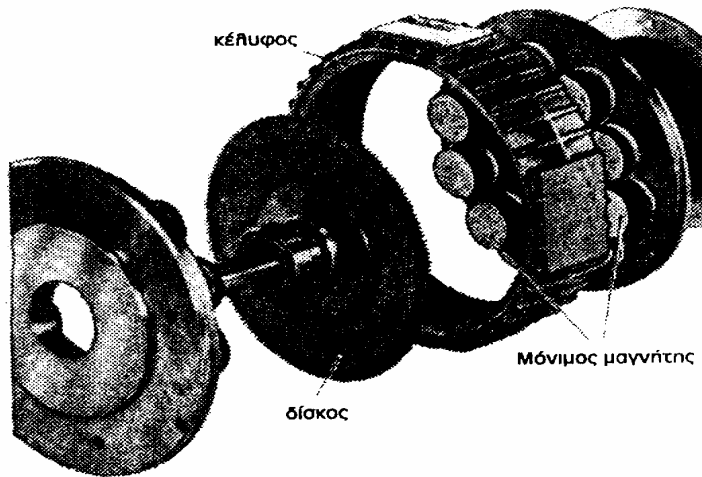
J: Ροπή αδράνειας
m: Μάζα
n: ακτίνα αδράνειας
[J] = Kgr·m² J=m· n

Η κατασκευή λεπτού δρομέα ή δρομέα χωρίς σίδηρο έχει ως συνέπεια την εμφάνιση μικρής ροπής αδράνειας στις ηλεκτρικές μηχανές (σχήμα 3.32). Οι κινητήρες του είδους αυτού χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές εργαλειομηχανών όπου πρέπει να υπάρχει δυνατότητα ελέγχου.



Σχήμα 3.32 Κινητήρας με διέγερση μόνιμων μαγνητών με λεπτό δρομέα

Στους κινητήρες με δρομέα δίσκου (σχήμα 3.33) υπάρχει επίσης μικρή ροπή αδράνειας. Στον κινητήρα του είδους αυτού ως δρομέας χρησιμοποιείται ένας λεπτός δίσκος χωρίς σίδηρο. Στις δύο πλευρές - όπως και στα ολοκληρωμένα κυκλώματα - στη θέση του τυλίγματος υπάρχουν αγωγάμοι δρόμοι. Στον δίσκο του δρομέα ολισθαίνουν οι ψηκτροθήκες έτσι ώστε να μην είναι απαραίτητος ο αναστροφέας του ρεύματος, δηλαδή ο συλλέκτης. Και στις δύο πλευρές του δρομέα δίσκου επιδρούν οι μόνιμοι μαγνήτες, ώστε να διέρχεται απ' αυτές ένα ισχυρό μαγνητικό πεδίο ίδιας κατεύθυνσης. Εξ' αιτίας της ίδιας πολικότητας του μαγνητικού πεδίου, ο κινητήρας αυτός ονομάζεται πολυπολικός.



Σχήμα 3.33 Κινητήρας δίσκινου δρομέα

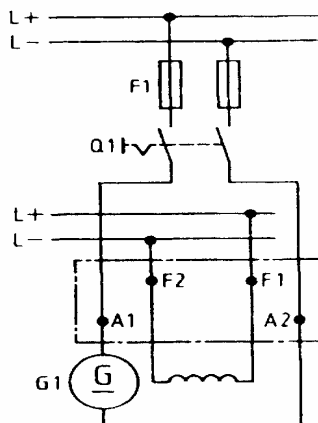
Ο κινητήρας με δρομέα δίσκου έχει διέγερση μόνιμου μαγνήτη, μικρή αδράνεια και βασικά ανήκει στην κατηγορία κινητήρων συνεχούς ρεύματος για κίνηση ταχείας αντίδρασης.

Βασικές συνδεσμολογίες των γεννητριών συνεχούς ρεύματος.

Τα διάφορα είδη γεννητριών συνεχούς ρεύματος διαφέρουν μεταξύ τους από τον τρόπο σύνδεσης του τυλίγματος διέγερσης με το τύλιγμα του τύμπανου. Οι ίδιες συνδέσεις εμφανίζονται και στους κινητήρες συνεχούς ρεύματος.

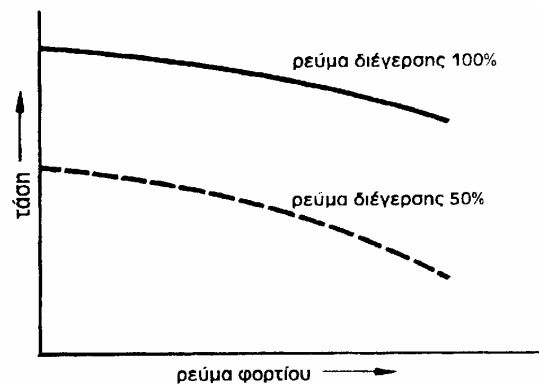
Γεννήτρια ξένης διέγερσης.

Στις γεννήτριες ξένης διέγερσης το ρεύμα διέγερσης παρέχεται από μια ξεχωριστή πηγή π.χ. ανορθωμένο δίκτυο (σχήμα 3.34).



Σχήμα 3.34

Αν η γεννήτρια φορτιστεί με τη σύνδεση καταναλωτών στο τύμπανο, τότε η παρεχόμενη τάση μειώνεται, απέναντι στην τάση κενής λειτουργίας επειδή ενεργοποιείται η εσωτερική αντίσταση του τύμπανου (σχήμα 3.35). Μια ειδική μορφή της γεννήτριας ξένης διέγερσης είναι εκείνη με διέγερση μόνιμων μαγνητών. Η γεννήτρια ξένης διέγερσης είναι η πιο σημαντική γεννήτρια συνεχούς ρεύματος. Χρησιμοποιείται ως γεννήτρια ελέγχου στον μετατροπέα του Leonard. Επίσης κινητήρες συνεχούς ρεύματος με ξένη διέγερση εργάζονται για μικρό χρόνο π.χ. για την πέδηση μηχανών κίνησης.

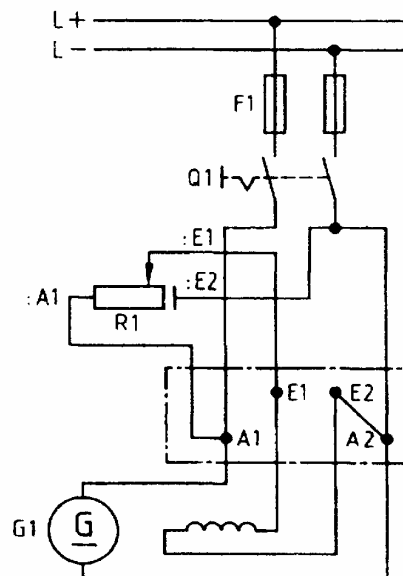


Σχήμα 3.35

Η πιο συνηθισμένη γεννήτρια συνεχούς ρεύματος είναι η γεννήτρια με ξένη διέγερση.

Γεννήτρια παράλληλης διέγερσης.

Στις γεννήτριες παράλληλης διέγερσης το τύλιγμα διέγερσης συνδέεται παράλληλα με το τύλιγμα του τύμπανου (σχήμα 3.36) Αν το τύμπανο πρέπει να εκκινηθεί από τη θέση ηρεμίας τότε παράγεται σ' αυτό μια χαμηλή τάση, όσο ακόμα υπάρχει ο παραμένον μαγνητισμός. Αν το τύλιγμα διέγερσης είναι σωστά συνδεδεμένο, αρχικά διαρρέεται από ένα μικρό ρεύμα διέγερσης, που ενισχύει τον παραμένοντα μαγνητισμό που έχει ως συνέπεια τη δημιουργία μιας μεγάλης τάσης.



Σχήμα 3.36

Έτσι η μηχανή διεγείρεται μόνη της (αυτοδιεγείρεται). Αν όμως το τύλιγμα διέγερσης συνδεθεί λαθεμένα προς το δίκτυο, το ρεύμα διέγερσης μειώνει (εξασθενεί) τον παραμένοντα μαγνητισμό και η μηχανή δεν διεγείρεται. Η αυτοδιέγερση δεν είναι δυνατή, ακόμη, όταν οι ακροδέκτες του τύμπανου είναι βραχυκυκλωμένοι.

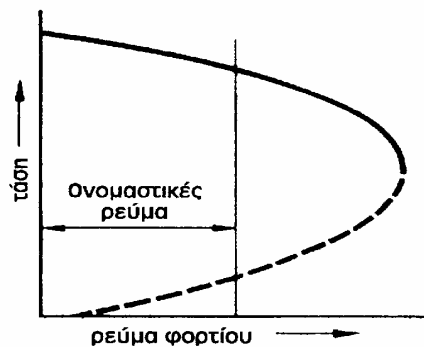
Αν σε μια γεννήτρια παράλληλης διέγερσης δεν υπάρχει παραμένων μαγνητισμός ή το τύλιγμα της διέγερσης είναι λαθεμένα συνδεδεμένο, ή η φορά περιστροφής είναι λαθεμένη ή οι ακροδέκτες του τύμπανου είναι βραχυκυκλωμένοι δεν πραγματοποιείται καμία αυτοδιέγερση.

Έτσι η μηχανή διεγείρεται μόνη της (αυτοδιεγείρεται). Αν όμως το τύλιγμα διέγερσης συνδεθεί λαθεμένα προς το δίκτυο, το ρεύμα διέγερσης μειώνει (εξασθενεί) τον παραμένοντα μαγνητισμό και η μηχανή δεν διεγείρεται. Η αυτοδιέγερση δεν είναι δυνατή, ακόμη, όταν οι ακροδέκτες του τύμπανου είναι βραχυκυκλωμένοι.

Αν σε μια γεννήτρια παράλληλης διέγερσης δεν υπάρχει παραμένων μαγνητισμός ή το τύλιγμα της διέγερσης είναι λαθεμένα συνδεδεμένο, ή η φορά περιστροφής είναι λαθεμένη ή οι ακροδέκτες του τύμπανου είναι βραχυκυκλωμένοι δεν πραγματοποιείται καμία αυτοδιέγερση.

Στην περίπτωση που απαιτείται η λήψη ρυθμιζόμενης τάσης πρέπει να συνδεθεί ένας ροοστάτης στο κύκλωμα της διέγερσης. Με το άνοιγμα του κυκλώματος στο τύλιγμα της διέγερσης θα δημιουργείται μια μεγάλη τάση, επειδή το ρεύμα διέγερσης θα αυξανόταν ραγδαία με αποτέλεσμα την καταστροφή της μόνωσης. Έτσι ο ροοστάτης (μεταβλητή αντίσταση) βραχυκυκλώνει το τύλιγμα διέγερσης όταν το κύκλωμα διέγερσης τίθεται εντός λειτουργίας (σχήμα 3.36).

Στις γεννήτριες παράλληλης διέγερσης η τάση στους ακροδέκτες του τύμπανου μειώνεται με το φορτίο σε σχέση με την τάση της κενής λειτουργίας, πιο πολύ απ' ότι στη γεννήτρια ξένης διέγερσης (σχήμα 3.37). Η μικρή πτώση τάσης στη λειτουργία με φορτίο - εξαιτίας της αντίστασης των τύμπανων - προκαλεί μια μείωση της τάσης στο τύλιγμα διέγερσης, έτσι ώστε να εμφανίζεται ένα μικρό ρεύμα διέγερσης λόγω του οποίου η τάση μειώνεται ακόμα (σχήμα 3.37). Αν στη γεννήτρια παράλληλης διέγερσης πραγματοποιηθεί μια αλλαγή φοράς περιστροφής, τότε το ρεύμα στο τύλιγμα διέγερσης πρέπει να διέρχεται προς την ίδια κατεύθυνση για να μην εξασθενεί τον παραμένοντα μαγνητισμό γεγονός που εξασφαλίζεται στην περίπτωση της πολικότητας των τυλιγμάτων του στάτη ή του τύμπανου. Αυτό όμως δεν ισχύει στις γεννήτριες ξένης διέγερσης, επειδή δεν είναι απαραίτητη η αυτοδιέγερση.

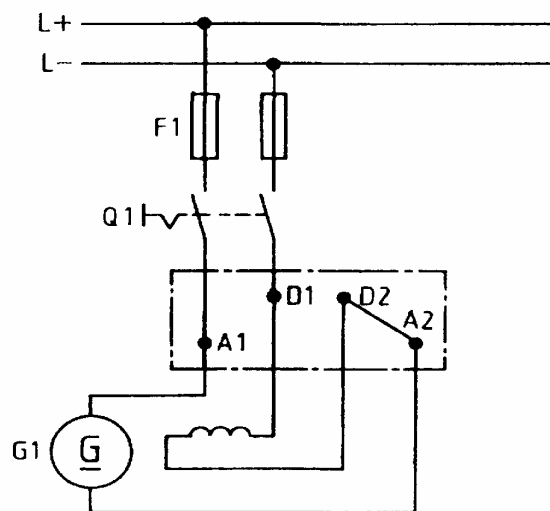


Σχήμα 3.37

Αν αλλάξει η φορά περιστροφής των γεννητριών συνεχούς ρεύματος, στην περίπτωση που δεν έχουμε γεννήτρια ξένης διέγερσης, πρέπει να αλλάξει η πολικότητα στο τύλιγμα της διέγερσης ή του τύμπανου.

Γεννήτρια με διέγερση σειράς.

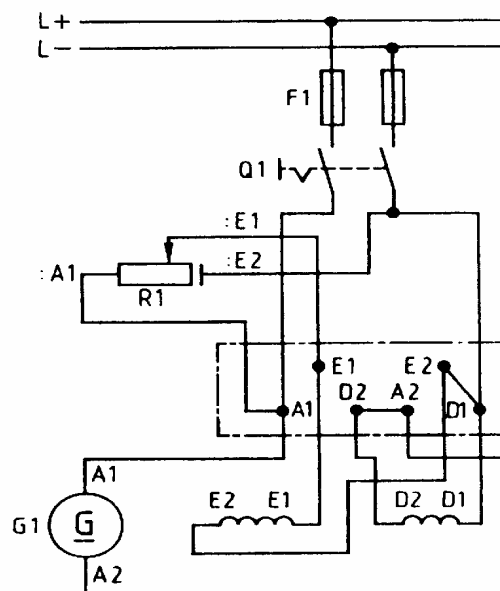
Σε μια γεννήτρια με διέγερση σειράς το τύλιγμα διέγερσης συνδέεται με το τύλιγμα του τύμπανου σε σειρά (σχήμα 3.38). Η μηχανή έχει τη δυνατότητα να αυτοδιεγείρεται όπως η γεννήτρια παράλληλης διέγερσης. Όσο δεν φορτίζεται η γεννήτρια, η τάση παράγεται από τον παραμένοντα μαγνητισμό, επειδή δεν υπάρχει ρεύμα διέγερσης. Κατά τη φόρτιση ανέρχεται η τάση. Οι γεννήτριες με διέγερση σειράς στην πραγματικότητα είναι χωρίς σημασία, επειδή η τάση τους αυξάνεται με το φορτίο. Υπάρχουν όμως γεννήτριες οι οποίες είναι ένας συνδυασμός γεννήτριας παράλληλης διέγερσης και γεννήτριας με διέγερση σειράς (γεννήτριες σύνθετης διέγερσης). Εκτός αυτού συμβαίνει πολλές φορές κινητήρες με διέγερση σειράς να λειτουργούν ως γεννήτρια π.χ. για την πέδηση.



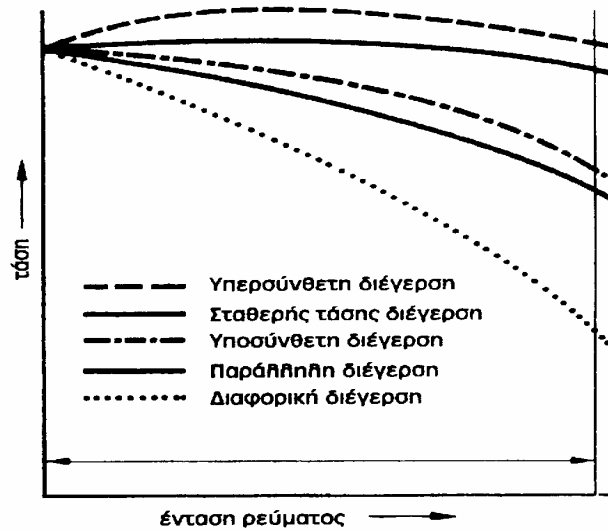
Σχήμα 3.38

Γεννήτρια με σύνθετη διέγερση (σύνθετη γεννήτρια).

Η γεννήτρια με σύνθετη διέγερση είναι ένας συνδυασμός γεννήτριας με παράλληλη διέγερση και γεννήτριας με διέγερση σειράς. Έχει δύο τύλιγματα διέγερσης, που είναι τοποθετημένα στους ίδιους κυρίως πόλους. Το ένα τύλιγμα διέγερσης είναι παράλληλο και το άλλο σειράς (σχήμα 3.39). Σε σειρά με ίο παράλληλο τύλιγμα συνδέεται ένας ροοστάτης. Συνήθως το τύλιγμα σειράς συνδέεται έτσι, ώστε το μαγνητικό του πεδίο να έχει την ίδια κατεύθυνση με το μαγνητικό πεδίο του παράλληλου τυλίγματος με συνέπεια να αυξάνεται το μαγνητικό πεδίο του στάτη κατά τη φόρτιση της μηχανής. Κατά τη φόρτιση της γεννήτριας σύνθετης διέγερσης η τάση της είναι μεγαλύτερη από την τάση της γεννήτριας παράλληλης διέγερσης. Η γεννήτρια αυτή λέγεται αθροιστικής σύνθετης διέγερσης. Μία γεννήτρια χαρακτηρίζεται απλά ως *σύνθετη*, αν η τάση της είναι ανεξάρτητη από το φορτίο (σχήμα 3.40). Κατά τη φόρτιση των μη σύνθετων γεννητριών εμφανίζεται αύξηση της τάσης. Αν πάλι το τύλιγμα σειράς συνδέεται έτσι ώστε κατά τη φόρτιση να μειώνεται ο μαγνητισμός του στάτη τότε και η τάση μειώνεται ιδιαίτερα. Στην περίπτωση αυτή η γεννήτρια χαρακτηρίζεται ως διαφορικής σύνθετης διέγερσης. Οι γεννήτριες σύνθετης διέγερσης χρησιμοποιούνται π.χ. ως γεννήτριες διέγερσης για την παροχή του συνεχούς ρεύματος στις σύγχρονες γεννήτριες.



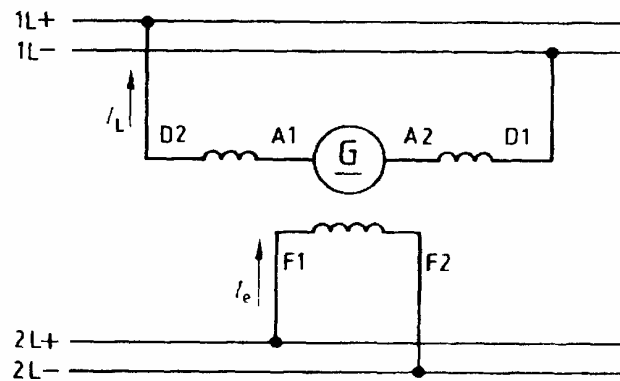
Σχήμα 3.39



Σχήμα 3.40

Γεννήτρια ξένης διέγερσης με βοηθητικό τύλιγμα σειράς.

Την αρχή της σύνθετης διέγερσης χρησιμοποιούμε στις γεννήτριες ξένης διέγερσης (σχήμα 3.41). Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται, η ανεξαρτητοποίηση της τάσης της γεννήτριας από το φορτίο. Πρέπει να προσεχτεί, ότι κατά την αλλαγή φοράς περιστροφής εμφανίζεται μια διαφορική σύνθετη διέγερση, επειδή αλλάζει η φορά του ρεύματος στο τύμπανο και κατά συνέπεια στο βοηθητικό τύλιγμα σειράς.



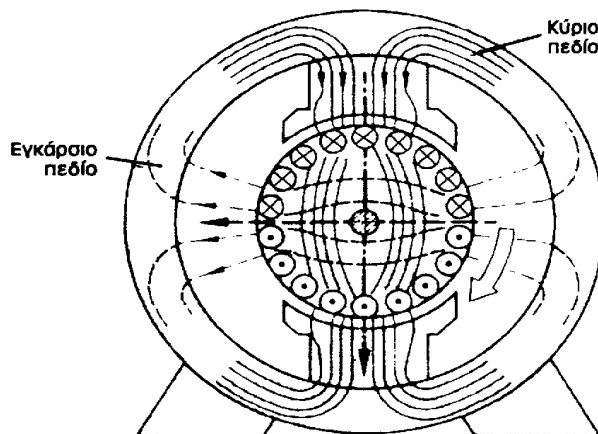
Σχήμα 3.41

Εγκάρσιο πεδίο τύμπανου.

Το εγκάρσιο πεδίο τύμπανου δημιουργείται κατά τη φόρτιση των γεννητριών συνεχούς ρεύματος και στους κινητήρες συνεχούς ρεύματος. Η δημιουργία του πεδίου αυτού παρακολουθείται και αναλύεται πιο εύκολα στη γεννήτρια. Γι' αυτό αναλύουμε το εγκάρσιο πεδίο του τύμπανου στην αρχή γεννήτριας, παρόλο που δεν εμφανίζεται τόσο συχνά όσο στους κινητήρες συνεχούς ρεύματος.

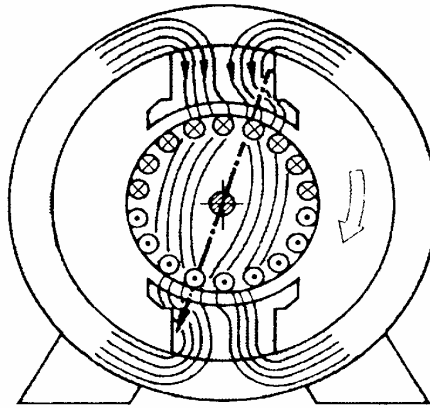
Δημιουργία του εγκάρσιου πεδίου του τύμπανου.

Αν μια γεννήτρια φορτιστεί, τότε το τυλίγμα του τύμπανου της διαρρέεται από ρεύμα. Σε μια γεννήτρια συνεχούς ρεύματος με δύο ψήκτρες οι πλευρές του τυλίγματος στο επάνω μισό του τύμπανου διαρρέονται από ρεύμα του οποίου η φορά είναι αντίθετη από τη φορά του ρεύματος που διαρρέει τις κάτω πλευρές αυτού. Έτσι δημιουργείται ένα επιπρόσθετο μαγνητικό πεδίο (σχήμα 3.42), που βρίσκεται εγκάρσια (κάθετα) προς το κύριο πεδίο του τυλίγματος διέγερσης και ονομάζεται εγκάρσιο πεδίο τύμπανου.



Σχήμα 3.42 Εγκάρσιο πεδίο τυμπάνου στη γεννήτρια

Αν οι μηχανές συνεχούς ρεύματος φορτιστούν, τότε δημιουργείται ένα εγκάρσιο πεδίο τύμπανου. Το εγκάρσιο πεδίο είναι τόσο ισχυρό, όσο μεγάλο είναι το φορτίο της μηχανής. Μαζί με το κύριο πεδίο δημιουργεί ένα κοινό (συνιστάμενο) μαγνητικό πεδίο (σχήμα 3.43). Αυτό το κοινό μαγνητικό πεδίο στις γεννήτριες έχει μετατοπισθεί προς τη φορά περιστροφής από το κύριο πεδίο. Η μετατόπιση του κύριο πεδίου από το εγκάρσιο πεδίο χαρακτηρίζεται ως αντίδραση επαγωγικού τύμπανου. Σύμφωνα με τον κανόνα του Lenz, με την αντίδραση του επαγωγικού τύμπανου το κύριο πεδίο γίνεται ασθενέστερο. Αποτέλεσμα της αντίδρασης του επαγωγικού τύμπανου κατά τη φόρτιση, είναι η παραγωγή τάσεων σε άλλες πλευρές του τυλίγματος από εκείνες που έχουν τάση κατά την κενή λειτουργία της γεννήτριας. Οι ψήκτρες πρέπει να τοποθετηθούν έτσι, ώστε να συνδεθούν με το μέρος των πηνίων στις οποίες δεν παράγεται τάση. Η θέση αυτή (στο χώρο) των πλευρών των πηνίων ονομάζεται ουδέτερη ζώνη, επειδή σ' αυτή δεν παράγεται τάση. Η αντίστοιχη θέση των ψηκτρών ονομάζεται επίσης ουδέτερη ζώνη.



Σχήμα 3.43 Αντίδραση τυμπάνου στη γεννήτρια

Κατά τη φόρτιση γεννητριών συνεχούς ρεύματος, η ουδέτερη ζώνη μετατοπίζεται στη φορά περιστροφής.

Αν οι ψήκτρες δεν βρίσκονται στην ουδέτερη ζώνη, βραχυκυκλώνουν έτσι τέτοια πηνία στα οποία παράγεται τάση. Η βραχυκύκλωση πραγματοποιείται τη στιγμή στην οποία η ψήκτρα εφάπτεται συγχρόνως με δύο τομείς του συλλέκτη.

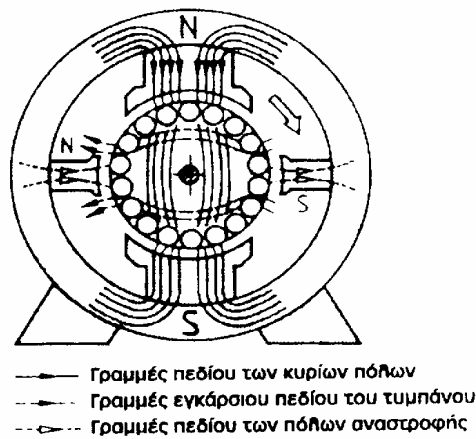
Έτσι από μια θέση των ψηκτρών εκτός της ουδέτερης ζώνης διέρχονται ισχυρά ρεύματα. Εξαιτίας του γεγονότος αυτού δημιουργούνται ισχυροί σπινθήρες ψηκτρών, επειδή κατά την παραπέρα περιστροφή του τύμπανου το κύκλωμα των βραχυκυκλωμένων πηνίων ανοίγει πάλι. Η εξισορρόπηση της μετατόπισης της ουδέτερης ζώνης στις γεννήτριες χωρίς βοηθητικούς πόλους (αναστροφής), γίνεται με τη μετατόπιση των ψηκτρών - με τη διάταξη του ψηκτροφορέα - μέχρι να βρεθούν πάλι στην ουδέτερη ζώνη. Οι ψήκτρες στις γεννήτριες χωρίς βοηθητικούς πόλους (αναστροφής) μετατοπίζονται λίγο προς τη φορά περιστροφής απέναντι στην θέση αυτών κατά τη λειτουργία χωρίς φορτίο.

Οι ψήκτρες μιας γεννήτριας χωρίς βοηθητικούς πόλους αναστροφής μετατοπίζονται λίγο προς την φορά περιστροφής, σε σύγκριση με τη θέση αυτών κατά την λειτουργία χωρίς φορτίο.

Η ακριβής εξισορρόπηση του εγκάρσιου πεδίου με τη μετατόπιση των ψηκτρών δεν είναι δυνατή, επειδή το φορτίο πάλλεται και μαζί μ' αυτό η θέση της ουδέτερης ζώνης. Στα μικρότερα ή μεγαλύτερα φορτία η θέση των ψηκτρών δεν ισχύει και εμφανίζονται σπινθήρες σ' αυτές. Στις γεννήτριες με εναλλασσόμενη φορά περιστροφής η μετατόπιση των ψηκτρών δεν χρησιμοποιείται καθόλου.

Βοηθητικοί πόλοι ή πόλοι αναστροφής.

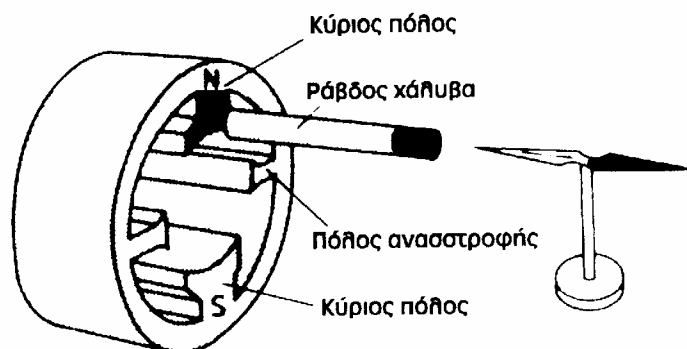
Με τους βοηθητικούς πόλους (αναστροφής) δημιουργείται ένα ανάστροφο πεδίο το οποίο αναιρεί το εγκάρσιο πεδίο του τύμπανου (σχήμα 3.44). Με τον τρόπο αυτό στις μηχανές που έχουν βοηθητικούς πόλους η ουδέτερη ζώνη και κατά την εναλλασσόμενη φόρτιση παραμένει σχεδόν στην ίδια θέση. Οι βοηθητικοί πόλοι δημιουργούν συλλέκτη χωρίς σπινθηρισμούς.



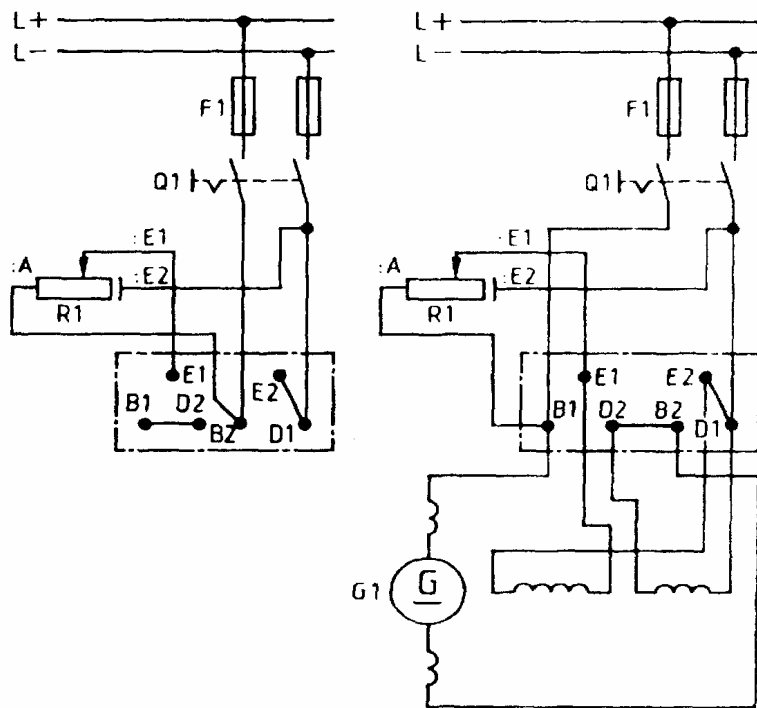
Σχήμα 3.44 Πόλοι αναστροφής στη γεννήτρια

Στις μηχανές συνεχούς ρεύματος με τους βοηθητικούς πόλους (αναστροφής) το εγκάρσιο πεδίο του τύμπανου μετατοπίζεται στην ουδέτερη ζώνη.

Στη γεννήτρια, οι βοηθητικοί πόλοι τοποθετούνται έτσι, ώστε να ακολουθούν ένα κύριο πόλο κατά την φορά περιστροφής της π.χ. σ' ένα Νότιο Κύριο πόλο ένας βόρειος πόλος αναστροφής (σχήμα 3.44). Για να τεθεί σε λειτουργία μια μηχανή με αναστρεφόμενους πόλους πρέπει να ελεγχθεί η σωστή πολικότητα με πυξίδα. Επειδή οι πόλοι συνήθως είναι απλησίαστοι τους επιμηκύνει κανείς με μία ράβδο από ατσάλι (χάλυβα) (σχήμα 3.45). Το πεδίο των βοηθητικών πόλων πρέπει να μεταβάλλεται με το φορτίο επειδή το εγκάρσιο πεδίο του τύμπανου μεταβάλλεται με το φορτίο. Πρέπει, λοιπόν, σε μικρά φορτία να είναι ασθενές και σε μεγάλα ισχυρό. Έτσι το τύλιγμα των βοηθητικών πόλων συνδέεται σε σειρά με το τύλιγμα του τύμπανου και οδηγείται ξεχωριστά στο κιβώτιο των ακροδεκτών αλλά είναι συνδεδεμένο στο εσωτερικό της μηχανής με το τύλιγμα του τύμπανου. Στην περίπτωση αυτή στο κιβώτιο ακροδεκτών υπάρχει ο χαρακτηρισμός B1 και B2 (σχήμα 3.46) ή ακόμα A1 και A2. Αν αλλαχθούν οι ακροδέκτες μόνον του τυλίγματος του τύμπανου για την αλλαγή φοράς περιστροφής μιας μηχανής με βοηθητικούς πόλους, τότε οι πόλοι αναστροφής δεν ισχύουν πια. Γι' αυτό πάντα για την αλλαγή φοράς περιστροφής πάντα αλλάζεται μαζί με την πολικότητα του τυλίγματος τύμπανου αλλάζεται και η πολικότητα των βοηθητικών πόλων.



Σχήμα 3.45 Έλεγχος των πόλων μηχανής συνεχούς ρεύματος



Σχήμα 3.46 Γεννήτρια με σύνθετη διέγερσης με πόλους αναστροφής
 Αριστερά : Συνδεσμολογία με αριστερή περιστροφή
 Δεξιά : Συνδεσμολογία με δεξιά περιστροφή

Στις μηχανές με βοηθητικούς πόλους μεταλλάσσεται η συνδεσμολογία σειράς των τυλιγμάτων του τύμπανου και των βοηθητικών πόλων στην περίπτωση που πρέπει να αλλάξει η φορά περιστροφής τους.

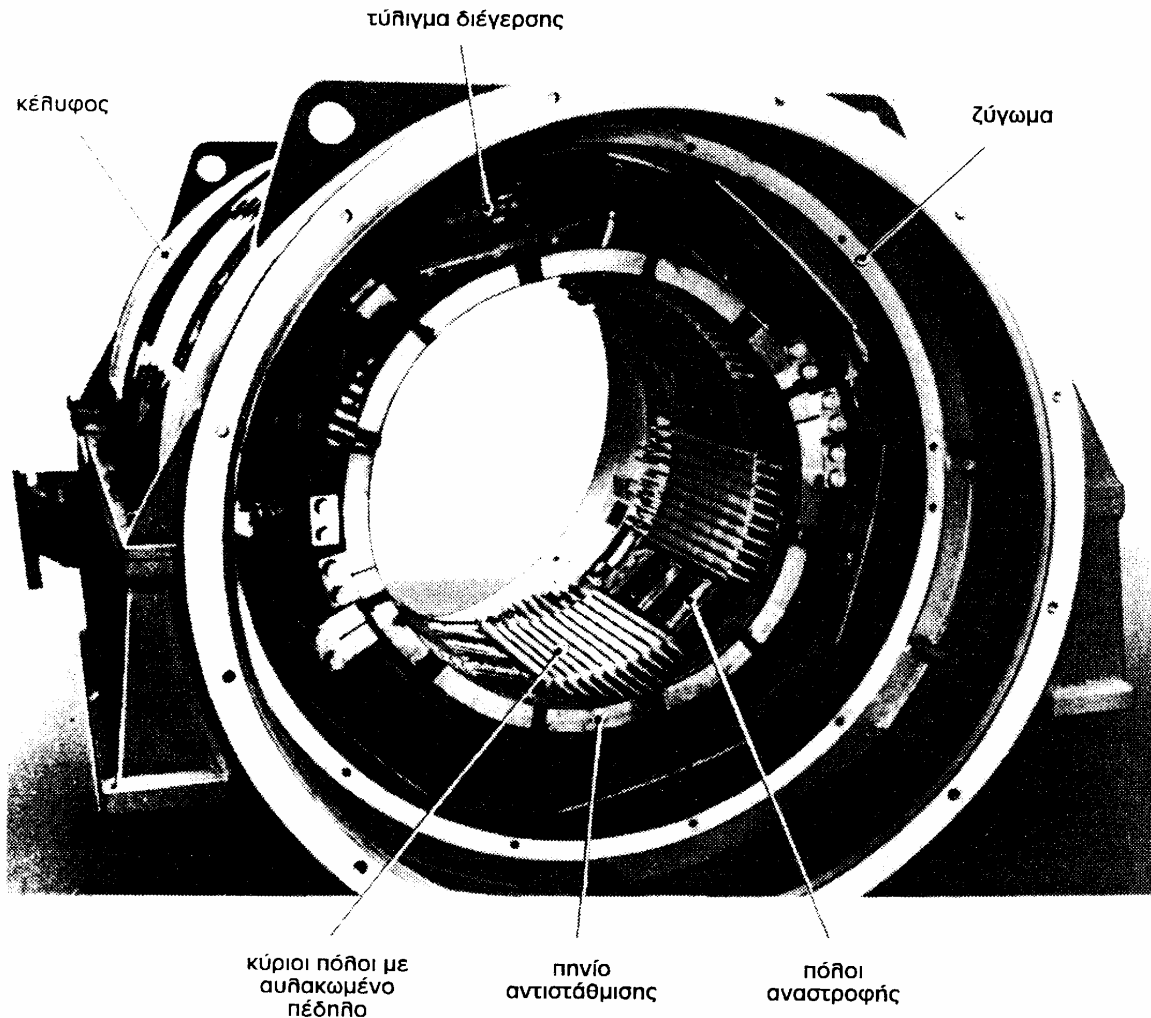
Εκτός από τις μικρές μηχανές όλες οι άλλες μηχανές συνεχούς ρεύματος διαθέτουν βοηθητικούς πόλους.

Τύλιγμα αντιστάθμισης.

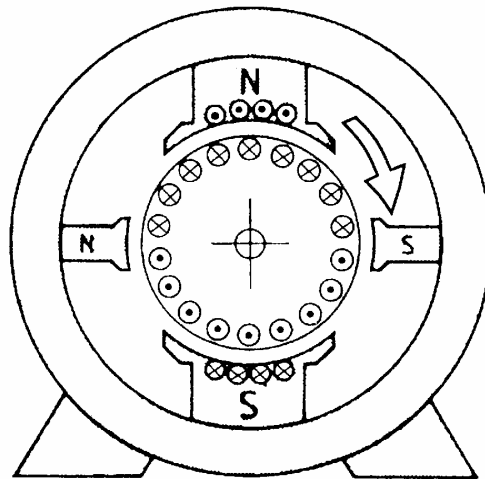
Στους κύριους πόλους το εγκάρσιο πεδίο του τύμπανου πιέζει τις μαγνητικές γραμμές του πεδίου στην κορυφή μετά την ακμή του κυρίου πόλου (σχήμα 3.44).

Εξαιτίας αυτού στις μεγάλες και ταχύστροφες μηχανές η τάση σ' ένα τμήμα των τυλιγμάτων του τύμπανου η απέναντι στο επόμενο πηνίο γίνεται τόσο μεγάλη, ώστε να πραγματοποιείται εκκένωση στη θέση της αδύνατης μόνωσης. Η αδύνατη μόνωση είναι το κενό μεταξύ των τομέων του συλλέκτη. Η τάση μεταξύ δύο γειτονικών τομέων ονομάζεται τάση καβαλάρη (γέφυρας) και για μηχανές μεγάλης διατομής αγωγών πρέπει να είναι μικρότερη από 35V.

Η παραμόρφωση - λοιπόν - του πεδίου που δημιουργείται από το εγκάρσιο πεδίο του τύμπανου κάτω από τους κύριους πόλους ανατρέπεται από το τύλιγμα αντιστάθμισης (σχήμα 3.47). Το τύλιγμα αυτό συνδέεται σε σειρά σε αυλάκια των κυρίως πόλων έτσι, ώστε οι πλευρές πηνίων που βρίσκονται στα αυλάκια να έχουν ρεύμα αντίθετης κατεύθυνσης από αυτό των πλευρών του τυλίγματος του τύμπανου (σχήμα 3.48).



Σχήμα 3.47 Μηχανή συνεχούς ρεύματος με πόλους αναστροφής και τυλίγματα αντιστάθμισης.



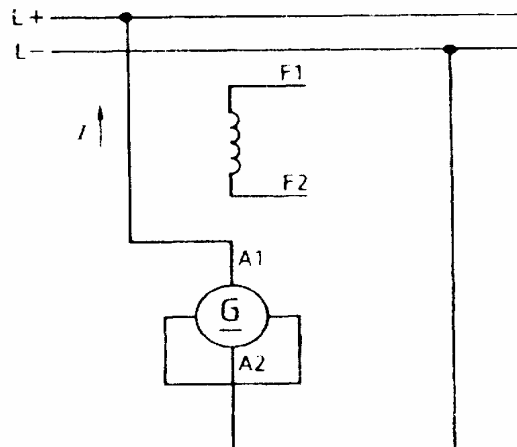
Σχήμα 3.48 Φορά ρεύματος στο τύλιγμα αντιστάθμισης

Στις μεγάλες μηχανές συνεχούς ρεύματος το τύλιγμα αντιστάθμισης αναιρεί την παραμόρφωση που δημιουργεί το εγκάρσιο πεδίο του τύμπανου κάτω από τους κυρίως πόλους, ώστε να μην εμφανίζεται μεγάλη τάση γέφυρας.

Το τύλιγμα αντιστάθμισης χρησιμοποιείται κυρίως στις μηχανές συνεχούς ρεύματος με κρουστική φόρτιση.

Γεννήτριες εγκάρσιου επιπέδου.

Στις γεννήτριες εγκάρσιου πεδίου γίνεται εκμετάλλευση του εγκάρσιου πεδίου του τύμπανου. Ο στάτης των γεννητριών αυτών κατασκευάζεται όπως ο στάτης μηχανών συνεχούς ρεύματος, έχει όμως ιδιαίτερα πλατύς πόλους, για την ανάπτυξη ισχυρού εγκάρσιου πεδίου του τύμπανου. Ο δρομέας τους κατασκευάζεται όπως ο δρομέας των μηχανών συνεχούς ρεύματος. Στο συλλέκτη του ολισθαίνουν δύο ζεύγη ψηκτρών από τα οποία εκείνο μεταξύ των κυρίων πόλων είναι βραχυκυκλωμένο. Η παραγόμενη τάση λαμβάνεται στο άλλο ζεύγος ψηκτρών που βρίσκεται κάτω από τους κύριους πόλους (σχήμα 3.49).



Σχήμα 3.49 Γεννήτρια

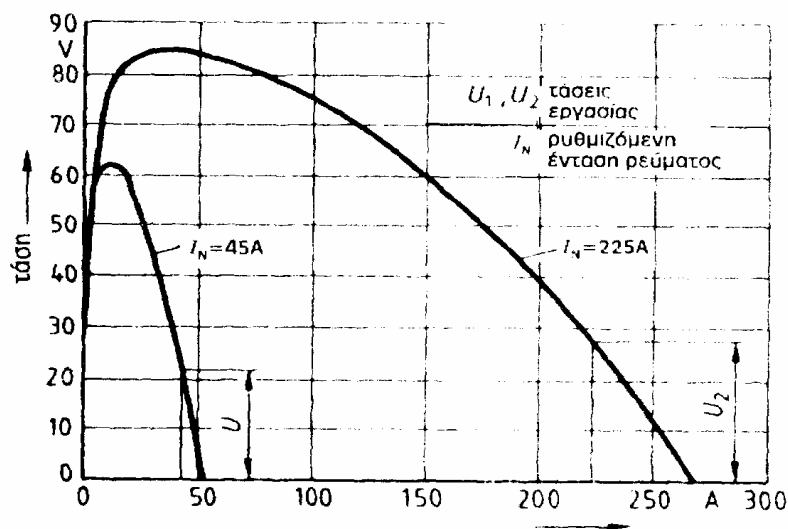
Το μαγνητικό πεδίο των κύριων πόλων κατά την περιστροφή του δρομέα παράγει τάσεις στα πηνία του δρομέα ενώ από τις βραχυκυκλωμένες ψήκτρες - που βρίσκονται μεταξύ των κυρίων πόλων - διέρχεται ρεύμα. Το ρεύμα αυτό δημιουργεί το ισχυρό εγκάρσιο πεδίο το οποίο με τη σειρά του παράγει μια δεύτερη τάση στα τυλίγματα του δρομέα, που λαμβάνεται από τις ψήκτρες που βρίσκονται κάτω από τους κύριους πόλους. Το ρεύμα φορτίου που διέρχεται από τις ψήκτρες αυτές δημιουργεί άλλο εγκάρσιο πεδίο που αποδυναμώνει το κύριο πεδίο.

Στις μεγαλύτερες στροφές, το ρεύμα στις βραχυκυκλωμένες ψήκτρες καθώς επίσης και το εγκάρσιο πεδίο του τύμπανου αρχικά αυξάνονται. Το ισχυρότερο τώρα ρεύμα φορτίου με τη φορά διέλευσης του αποδυναμώνει το κύριο πεδίο, ώστε το ρεύμα στις βραχυκυκλωμένες ψήκτρες και μαζί το εγκάρσιο πεδίο του τύμπανου καθώς και το ρεύμα φορτίου να παραμένουν ίδια. Κατά τη μείωση της αντίστασης φορτίου, αρχικά το ρεύμα φορτίου αυξάνεται, κατόπιν όμως εξασθενεί πάλι το κύριο φορτίο παραμένει ίδιο.

Η γεννήτρια εγκάρσιου πεδίου παρέχει ένα ρεύμα, που εξαρτάται λίγο από τις στροφές και την αντίσταση του φορτίου.

Οι γεννήτριες εγκάρσιου πεδίου με ξένη διέγερση χρησιμοποιούνται ως γεννήτριες σταθερού ρεύματος. Στο κύκλωμα καταναλωτών υπάρχει ένα συμπληρωματικό τυλίγμα αντιστάθμισης, που προκαλεί μικρή μεταβολή της ξένης διέγερσης και μεγάλη μεταβολή του ρεύματος των καταναλωτών (μηχανές ενισχυτές).

Οι γεννήτριες συγκολλήσεων είναι συνήθως γεννήτριες εγκάρσιου πεδίου. Το τυλίγμα διέγερσης συνδέεται σε σειρά με τις ψήκτρες των κυκλώματος συγκόλλησης που βρίσκονται κάτω από τους κύριους πόλους. Στους κύριους πόλους βρίσκεται ένας ρυθμιζόμενος εμβαπτισμένος πόλος με τον οποίο υπάρχει δυνατότητα μεταβολής της μαγνητικής αντίστασης του κύριου πεδίου και μαζί τη ρύθμιση του μεγέθους του ρεύματος συγκόλλησης (σχήμα 3.50).



Σχήμα 3.50

3.8 Τρόπος λειτουργίας των κινητήρων συνεχούς ρεύματος

Γενικά

Στον στάτη των κινητήρων συνεχούς ρεύματος το μαγνητικό πεδίο παράγεται με το ρεύμα διέγερσης ή με τους μόνιμους μαγνήτες.

Η θέση των μαγνητικών πόλων δεν μεταβάλλεται. Το τύμπανο ενός διπολικού κινητήρα με συλλέκτη -κατά την περιστροφή του - επιδρά όπως ένας ηλεκτρομαγνήτης με σταθερούς πόλους. Βέβαια με την περιστροφή μεταβάλλεται η θέση των τυλιγμάτων του τύμπανου, όμως με τη χρησιμοποίηση του συλλέκτη το ρεύμα μεταλλάσσει την πολικότητα του, ώστε οι πόλοι του τύμπανου να παραμένουν ίδιοι. Με την αλληλεπίδραση των πεδίων του τύμπανου του δρομέα και του μαγνητικού πεδίου του στάτη εμφανίζεται μια ροπή που περιστρέφει το τύμπανο. Κατά την περιστροφή του τύμπανου το μαγνητικό πεδίο αυτού τείνει να στραφεί προς την ίδια φορά με το μαγνητικό πεδίο του στάτη όμως παίρνει πάλι την αρχική του κατεύθυνση, επειδή κάθε φορά το ρεύμα οδηγείται σ' άλλο πηνίο του τύμπανου.

Στους κινητήρες με συλλέκτη εμφανίζεται ροπή στρέψης, όταν υπάρχει μαγνητικό πεδίο στο στάτη και διέρχεται ρεύμα από το τύλιγμα του τύμπανου του δρομέα.

Η φορά της ροπής στρέψης των κινητήρων με συλλέκτη και μ' αυτό τον τρόπο η φορά περιστροφής αλλάζουν, αν αλλάξει η φορά του πεδίου του τυμπάνου. Αυτό γίνεται με την αλλαγή της πολικότητας του ρεύματος του τύμπανου ή της πολικότητας του πεδίου διέγερσης (μαγνητικό πεδίο του στάτη) με την αλλαγή της φοράς του ρεύματος διέγερσης. Η αλλαγή της φοράς περιστροφής κινητήρα συνεχούς ρεύματος κατά τη λειτουργία του, πραγματοποιείται με την αλλαγή της πολικότητας του κυκλώματος σειράς των τυλιγμάτων του τύμπανου και των πόλων αναστροφής, ενώ όμως το τύλιγμα διέγερσης παραμένει αμετάβλητο διαρρεόμενο από το ρεύμα διέγερσης.

Η αλλαγή φοράς περιστροφής των κινητήρων με συλλέκτη πραγματοποιείται με την αλλαγή της πολικότητας του ρεύματος του τύμπανου.

Ροπή στρέψης και ρεύμα εκκίνησης (έλξης)

Σύμφωνα με την εξίσωση των ροπών στρέψης των ηλεκτρικών μηχανών η ροπή στρέψης των κινητήρων συνεχούς ρεύματος εξαρτάται από την ένταση του κυρίου πεδίου και την ένταση του πεδίου του τύμπανου.

Η ροπή στρέψης των κινητήρων συνεχούς ρεύματος είναι τόσο μεγάλη, όσο μεγάλο είναι το ρεύμα διέγερσης και το ρεύμα τύμπανου.

Ήδη, από μια πολύ μικρή τάση (π.χ. 10% της ονομαστικής τάσης) διέρχεται το πλήρες ονομαστικό ρεύμα.

Κατά την ηρεμία του κινητήρα εμφανίζεται μεγάλη ένταση ρεύματος στο τύμπανο επειδή υπάρχει σημαντική τάση και η μικρή αντίσταση του τυλίγματος αυτού. Κατά τη σύνδεση με την πλήρη τάση εμφανίζεται μια ανεπίτρεπτα μεγάλη ένταση ρεύματος. Επομένως, η απευθείας σύνδεση είναι δυνατή μόνο στους μικρούς κινητήρες συνεχούς ρεύματος. Η εκκίνηση των μεσαίων και των μεγάλων κινητήρων συνεχούς ρεύματος πραγματοποιείται μόνο με μειωμένη τάση τύμπανου. Οι κινητήρες συνεχούς ρεύματος οι οποίοι τροφοδοτούνται συνήθως από ανορθωτική διάταξη που περιλαμβάνει ένα σταθεροποιητή τάσης με μειωτή έντασης, έχουν τη δυνατότητα απευθείας σύνδεσης. Αυτό συμβαίνει επειδή η μείωση του ρεύματος κατά την υπέρβαση του μέγιστου ρεύματος αυτόματα μειώνει την τάση. Η μέγιστη ένταση του ρεύματος ρυθμίζεται έτσι, ώστε να προσαρμόζεται στην ονομαστική τιμή του συνδεδεμένου κινητήρα συνεχούς ρεύματος.

Αν μειωθεί η τάση με αντίσταση εκκίνησης (εκκινητή), τότε πρέπει αυτή να συνδεθεί σε σειρά με το κύκλωμα του τύμπανου. Το μέγεθος της αντίστασης εκκίνησης εξαρτάται από την αντίσταση του τύμπανου, το ονομαστικό ρεύμα του κινητήρα, την τάση δικτύου και την επιτρεπόμενη μέγιστη ένταση του ρεύματος εκκίνησης.

Συνήθως η αντίσταση του εκκινητή μεταβάλλεται κλιμακωτά (αντίσταση με βαθμίδες). Η κατανομή πρέπει να γίνεται έτσι ώστε να υπάρχει κατά το δυνατόν μια ομαλή εκκίνηση. Αντί για αντίσταση εκκίνησης (εκκινητή), στην πράξη χρησιμοποιούνται συνήθως ανορθωτές με δυνατότητα ρύθμισης της τάσης τους.

Ρύθμιση στροφών

Ο δρομέας περιστρέφεται, και το ρεύμα που απορροφά ο κινητήρας ελαττώνεται πολύ. Αν περιστρέφεται το τύμπανο μιας μηχανής συνεχούς ρεύματος τότε παράγεται σ' αυτό μια τάση, επειδή οι αγωγοί του τύμπανου τέμνουν τις μαγνητικές γραμμές του πεδίου. Η τάση έχει τέτοια κατεύθυνση ώστε να αντιτίθεται την αιτία που την δημιουργεί. Η αιτία για την παραγωγή τάσης είναι το ρεύμα του τύμπανου επειδή αυτό προκαλεί την περιστροφή του τύμπανου. Στο περιστρεφόμενο τύμπανο κινητήρων συνεχούς ρεύματος παράγεται τάση, που ελαττώνει την τιμή του απορροφούμενου ρεύματος. Η τάση που παράγεται στο τύμπανο ενός κινητήρα ονομάζεται και αντί-ΗΕΔ (ΗΕΔ - Ηλεκτρεγερτική δύναμη). Το διάνυσμα αναφοράς της αντί-ΗΕΔ είναι αντίθετο προς το διάνυσμα αναφοράς της τάσης τροφοδοσίας.

Το τύμπανο περιστρέφεται στην αρχή αργά και έπειτα γρήγορα.

Αν σε κινητήρα συνεχούς ρεύματος αυξηθεί η τάση τύμπανου, τότε το τύμπανο δέχεται ένα μεγαλύτερο ρεύμα οπότε σχηματίζει μια μεγάλη ροπή στρέψης και επιταχύνεται τόσο χρόνο - μέχρι η αυξανόμενη στο τύμπανο παραγόμενη τάση - να μειώσει το ρεύμα του τύμπανου.

Οι στροφές ενός κινητήρα συνεχούς ρεύματος αυξάνονται με την αύξηση της τάσης του τυμπάνου και ελαττώνονται με τη μείωση της.

Το τύμπανο δέχεται ένα μεγάλο ρεύμα σε μικρή τάση διέγερσης και στρέφεται γρηγορότερα. Με τη μείωση της τάσης διέγερσης ελαττώνεται το ρεύμα διέγερσης και κατ' επέκταση η τάση που παράγεται στο τύμπανο οπότε αυτό δέχεται ένα ισχυρότερο ρεύμα. Έτσι αναπτύσσεται μια μεγαλύτερη ροπή στρέψης και επιταχύνεται κατά το χρονικό διάστημα που απαιτείται για να γίνει η παραγόμενη τάση όση ήταν πριν. Οι στροφές των κινητήρων συνεχούς ρεύματος αυξάνονται όταν μειώνεται το ρεύμα διέγερσης. Πρέπει να προσεχτεί, ότι το ρεύμα διέγερσης δεν πρέπει να μειώνεται ανεξέλεγκτα. Στην λειτουργία χωρίς φορτίο ή στη λειτουργία με μικρό φορτίο μπορούν να αυξηθούν τόσο πολύ οι στροφές, ώστε να καταστραφούν τα τυλίγματα του τύμπανου από τις φυγοκεντρικές δυνάμεις. Η μείωση της τάσης διέγερσης δεν χρησιμοποιείται πάντα σε πολύ μεγάλα φορτία. Σε μεγαλύτερα φορτία ο κινητήρας πρέπει να παρέχει μια μεγαλύτερη ροπή στρέψης. Επειδή η μείωση του ρεύματος της διέγερσης σύμφωνα με την εξίσωση των ροπών στρέψης της ηλεκτρικής μηχανής έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της ροπής της μηχανής, ο κινητήρας απορροφά ένα αντίστοιχο μεγάλο ρεύμα στο τύμπανο του προκειμένου να αναπτύξει την απαιτούμενη ροπή στρέψης. Στην περίπτωση αυτή μπορεί να καεί το τύλιγμα του τύμπανου.

Αν ο κινητήρας λειτουργεί στις ονομαστικές του στροφές, τότε πρέπει να μειώνεται η τάση του τυμπάνου. Αν ο κινητήρας λειτουργεί πάνω από τις ονομαστικές του στροφές τότε πρέπει να μειώνεται η τάση της διέγερσης.

Ρεύμα τύμπανου και εγκάρσιο πεδίο τύμπανου

Το ρεύμα στο τύμπανο αυξάνεται κατά τη φόρτιση. Αν αυξηθεί το φορτίο πρέπει ο κινητήρας να απορροφήσει μεγαλύτερη ισχύ κατά συνέπεια μεγαλύτερο ρεύμα από το δίκτυο. Αυτό γίνεται με την ελάττωση των στροφών του, οπότε στο τύλιγμα του τύμπανου του παράγεται μια μικρότερη τάση.

Οι κινητήρες συνεχούς ρεύματος κατά τη λειτουργία τους με φορτίο απορροφούν από το δίκτυο ένα ισχυρότερο ρεύμα από εκείνο που απορροφούν κατά τη λειτουργία τους χωρίς φορτίο.

Κατά τη φόρτιση κινητήρων με συλλέκτη εξαιτίας του ρεύματος του τύμπανου δημιουργείται - όπως και στις γεννήτριες συνεχούς ρεύματος - ένα εγκάρσιο πεδίο τύμπανου και κατά συνέπεια μια αντίδραση τύμπανου. Η φορά του ρεύματος στο τύμπανο στον κινητήρα είναι αντίθετη απ' αυτή στη γεννήτρια με την προϋπόθεση πως υπάρχει η ίδια φορά περιστροφής. Έτσι είναι προφανές πως το εγκάρσιο πεδίο του τύμπανου έχει αντίθετη κατεύθυνση (φορά) απ' ότι στη γεννήτρια με αποτέλεσμα και η ουδέτερη ζώνη να μετατοπίζεται σε αντίθετη κατεύθυνση απ' ότι στην γεννήτρια. Ακόμα, εξ' αιτίας της αντίδρασης του τύμπανου εμφανίζεται μια εξασθένηση του πεδίου.

Κατά τη λειτουργία του κινητήρα με συλλέκτη με φορτίο η ουδέτερη ζώνη του μετατοπίζεται αντίθετα προς τη φορά περιστροφής. Κατά τη λειτουργία των μικρών κινητήρων με συλλέκτη χωρίς φορτίο οι ψήκτρες μετατοπίζονται αντίθετα προς τη φορά περιστροφής της ουδέτερης ζώνης, για να υπάρχουν μικροί σπινθήρες κατά τη φόρτιση. Με τη μετατόπιση των ψηκτρών αδυνατίζει το κύριο πεδίο, επειδή κατά ένα μέρος το εγκάρσιο πεδίο του τύμπανου είναι αντίθετο προς αυτό.

Υπάρχει πιθανότητα να εμφανιστεί η απρόσμενη περίπτωση, κατά τη φόρτιση του κινητήρα, όπου αποκτήσει ένα μεγάλο αριθμό στροφών οπότε με τη μετατόπιση των ψηκτρών η λειτουργία γίνεται ασταθής. Γι' αυτό η μετατόπιση των ψηκτρών δεν ενδείκνυται να χρησιμοποιείται σε μεσαίους και μεγάλους κινητήρες. Στους κινητήρες συνεχούς ρεύματος με ονομαστική ισχύ πάνω από 1KW υπάρχουν συνήθως βοηθητικοί πόλοι (αναστροφής). Αυτοί βρίσκονται μεταξύ των κυρίων πόλων και ενεργούν αντίθετα προς το εγκάρσιο πεδίο του τύμπανου. Η πολικότητά τους πρέπει να είναι τέτοια ώστε κατά τη φορά περιστροφής τον κάθε κύριο πόλο να διαδέχεται ένας βοηθητικός ίδιος πόλος. Το τύλιγμα των βοηθητικών πόλων συνδέεται σε σειρά με το τύλιγμα του τύμπανου.

Σε μεγάλα φορτία το πεδίο των βοηθητικών πόλων είναι επίσης μεγάλο. Οι βοηθητικοί πόλοι δημιουργούν συλλέκτες χωρίς σπινθηρισμούς. Στους κινητήρες, συμφωνά με τη φορά περιστροφής ο κάθε κύριος πόλος διαδέχεται έναν όμοιο βοηθητικό πόλο.

Πριν τη λειτουργία κινητήρων συνεχούς ρεύματος πρέπει να ελέγχεται η ορθότητα των πόλων αναστροφής. Αυτό πραγματοποιείται - όπως και στις γεννήτριες συνεχούς ρεύματος - με πυξίδα και χαλύβδινη ράβδος. Στους μεγάλους κινητήρες με ονομαστική ισχύ πάνω από 100KW, καθώς και σε κινητήρες, που εργάζονται με κρουστικό φορτίο, τοποθετείται συμπληρωματικά κάτω από τους κύριους πόλους το τύλιγμα αντιστάθμισης.

3.9 Συνδεσμολογία κινητήρων συνεχούς ρεύματος.

Τα διάφορα είδη κινητήρων συνεχούς ρεύματος διαφέρουν μεταξύ τους από τον τρόπο σύνδεσης του τυλίγματος διέγερσης στον στάτη σε σχέση με το τύλιγμα του τύμπανου. Βασικά υπάρχουν τέσσερις δυνατότητες (πίνακας 6). Από τα τέσσερα αυτά είδη κινητήρων μόνο ο κινητήρας σειράς και κυρίως ο κινητήρας ξένης διέγερσης κατασκευάζονται ακόμη. Από τις χαρακτηριστικές καμπύλες του πίνακα 6 παρατηρούμε, ότι ο κινητήρας ξένης διέγερσης έχει την ίδια συμπεριφορά με τον κινητήρα παράλληλης διέγερσης.

Από ιστορικούς λόγους χαρακτηρίζει κανείς τη συμπεριφορά αυτή συμπεριφορά παράλληλης σύνδεσης. Ανάλογα στους καταλόγους των κατασκευαστών οι κινητήρες ξένης διέγερσης αναφέρονται ως κινητήρες παράλληλης διέγερσης.

Στην πράξη από τους κινητήρες συνεχούς ρεύματος εμφανίζονται κυρίως μόνον αυτοί της ξένης διέγερσης και της διέγερσης σειράς.

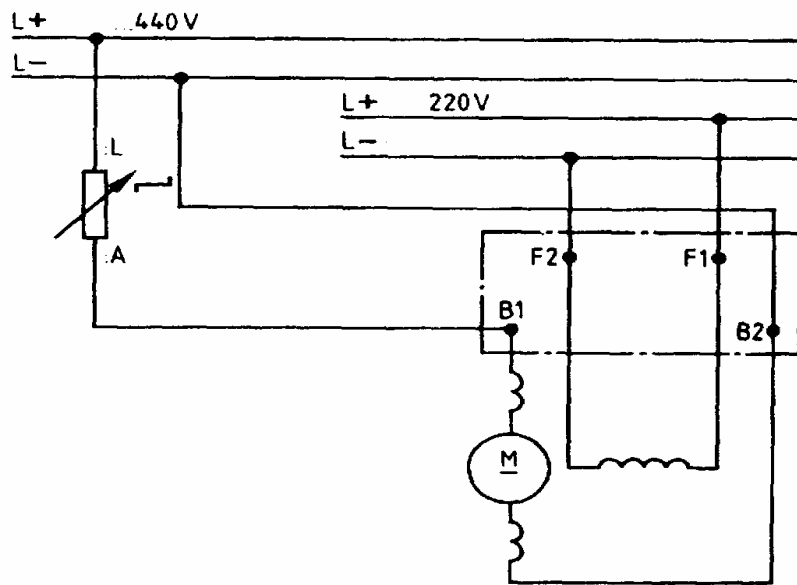
Πίνακας : Συνήθεις κινητήρες με συλλέκτη για συνεχές ρεύμα

Κινητήρας με διέγερση σειράς*	Κινητήρας με ξένη διέγερση**	Κινητήρας με παράλληλη διέγερση	Κινητήρας σύνθετης διέγερσης

Πίνακας 6
Συνήθεις κινητήρες με συλλέκτη για συνεχές ρεύμα.

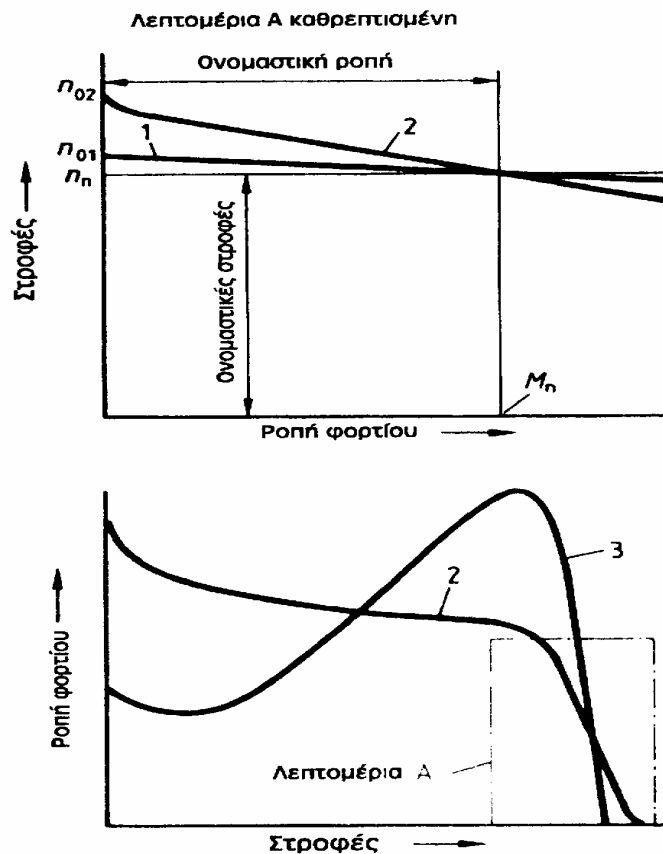
Κινητήρας με ξένη διέγερση (ξένης διέγερσης).

Στους κινητήρες με ξένη διέγερση, το ρεύμα διέγερσης παρέχεται από μια ανεξάρτητη πηγή τάσης (σχήμα 3.51). Το τύλιγμα διέγερσης δεν συνδέεται με το τύμπανο. Για την εκκίνηση και τη μείωση των στροφών κάτω από τον ονομαστικό αριθμό στροφών πρέπει να ελέγχεται η τάση του τύμπανου π.χ. μέσω μιας ελεγχόμενης ανορθωτικής διάταξης. Η χρησιμοποίηση (μιας αντίστασης εκκίνησης) ενός εκκινητή σε σειρά με το τύμπανο είναι δυνατή, όμως στην πράξη αποφεύγεται λόγω των απωλειών θερμότητας του. Αν πάλι οι στροφές πρέπει να είναι μεγαλύτερες από τις ονομαστικές στροφές, τότε πρέπει να μειώνεται η τάση διέγερσης π.χ. με μια ελεγχόμενη ανορθωτική διάταξη ή έναν εκκινητή. Οι κινητήρες με μόνιμους μαγνήτες στη θέση του τυλίγματος διέγερσης είναι επίσης κινητήρες ξένης διέγερσης. Οι εκδόσεις των μόνιμων μαγνητών φτάνουν σε ονομαστική ισχύ μέχρι 30KW και χρησιμοποιούνται π.χ. ως κινητήρες υαλοκαθαριστήρων στα αυτοκίνητα, ως ελεγχόμενοι κινητήρες για τις εργαλειομηχανές και ως κινητήριες μηχανές στις εργαλειομηχανές.



Σχήμα 3.51

Οι κινητήρες ξένης διέγερσης χωρίς μεταβολή των δύο τάσεων συμπεριφέρονται όπως οι τριφασικοί κινητήρες. Δεν ελέγχονται κατά την εν κενό λειτουργία, και οι στροφές αυξάνονται κατά την παρεμβολή τους στο δίκτυο μέχρι η παραγόμενη τάση στο τύμπανο γίνει ίση με την τάση του δικτύου. Κατά τη φόρτιση οι στροφές μειώνονται μόνο λίγο (σχήμα 3.52).



Σχήμα 3.52 Χαρακτηριστικές καμπύλες

1. Κινητήρας ξένης διέγερσης
2. Κινητήρας ξένης διέγερσης με τύλιγμα σειράς
3. Κινητήρας τριφασικός με βραχυκυκλωμένου δρομέα

Η μείωση των στροφών είναι απαραίτητη, για τη μείωση της τάσης του τύμπανου. Με τον τρόπο αυτό ο κινητήρας είναι σε θέση να δέχεται ένα μεγάλο ρεύμα που είναι απαραίτητο για τη δημιουργία μεγάλης ροπής στρέψης στην περίπτωση που το μαγνητικό πεδίο παραμένει σταθερό.

Παρόλο που οι κινητήρες ξένης διέγερσης είναι εξοπλισμένοι με βοηθητικούς πόλους - εκτός τους μικρούς κινητήρες - είναι δυνατόν να εμφανισθεί μια αύξηση των στροφών στα μεγάλα φορτία, λόγω της παραμόρφωσης (εξασθένησης) του μαγνητικού πεδίου του στάτη και της μείωσης του ρεύματος διέγερσης εξαιτίας της αύξησης της θερμότητας. Αυτή δεν είναι επιθυμητή, γιατί έτσι και αυξάνονταν περισσότερο το φορτίο οι στροφές θα μπορούσαν να αυξάνονται συνέχεια. Για την σταθεροποίηση των στροφών τους, οι κινητήρες ξένης διέγερσης εξοπλίζονται με ένα βοηθητικό τύλιγμα σειράς το οποίο συνδέεται έτσι ώστε να ενισχύει το μαγνητικό πεδίο της διέγερσης. Οι κινητήρες του είδους αυτού συμπεριφέρονται όπως οι κινητήρες σύνθετης διέγερσης. Με το βοηθητικό τύλιγμα σειράς προσομοιώνονται οι χαρακτηριστικές καμπύλες του κινητήρα ξένης διέγερσης προς τις χαρακτηριστικές καμπύλες του κινητήρα με διέγερση σειράς (σχήμα 3.52).

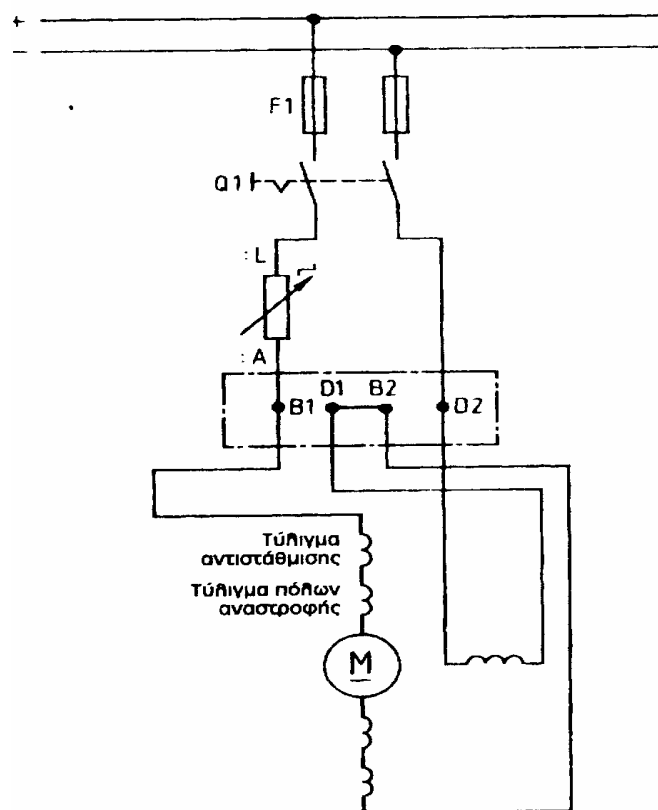
Με τον τρόπο αυτό με την αύξηση του φορτίου μειώνονται οι στροφές πολύ περισσότερο απ' ότι χωρίς το βοηθητικό τύλιγμα σειράς γεγονός που αποτελεί μειονέκτημα. Το πλεονέκτημα όμως, των κινητήρων ξένης διέγερσης με βοηθητικό τύλιγμα σειράς, είναι η εμφάνιση μεγαλύτερης ροπής στρέψης από εκείνη των κινητήρων ξένης διέγερσης χωρίς το βοηθητικό τύλιγμα σειράς (σχήμα 3.52).

Οι κινητήρες ξένης διέγερσης προσφέρονται με και χωρίς το βοηθητικό τύλιγμα σειράς.

Οι κινητήρες ξένης διέγερσης χρησιμοποιούνται στις περιπτώσεις που πρέπει οι στροφές να μεταβάλλονται σε μεγάλο εύρος π.χ. ως κινητήρια μηχανή στις εργαλειομηχανές υψηλής αξίας καθώς και σε ανυψωτικές μηχανές.

Κινητήρες σειράς.

Στους κινητήρες σειράς το τύλιγμα διέγερσης συνδέεται σε σειρά με το τύλιγμα του τύμπανου (σχήμα 3.53). Με τον τρόπο αυτό το τύλιγμα διέγερσης διαρρέεται από το συνολικό ρεύμα του τυλίγματος του τύμπανου. Κατά συνέπεια σε ισχυρό ρεύμα τύμπανου και το ρεύμα της διέγερσης είναι ισχυρό. Η περίπτωση αυτή συμβαίνει κυρίως κατά την εκκίνηση, γι' αυτό οι κινητήρες σειράς παρέχουν πολύ μεγάλη ροπή στρέψης. Οι κινητήρες σειράς έχουν τη μεγαλύτερη ροπή εκκίνησης απ' όλους τους άλλους κινητήρες συνεχούς ρεύματος.

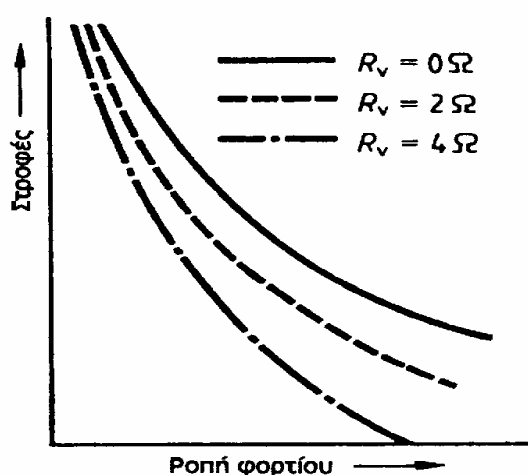


Σχήμα 3.53

Αν ο κινητήρας σειράς περιστρέφεται χωρίς φορτίο τότε μειώνεται συνεχώς το ρεύμα τύμπανου και κατά συνέπεια το ρεύμα διέγερσης με αποτέλεσμα να εξασθενεί το πεδίο διέγερσης και να αυξάνονται οι στροφές του.

Οι κινητήρες σειράς δεν ελέγχονται κατά τη λειτουργία τους χωρίς φορτίο.

Το μειονέκτημα αυτό αντιμετωπίζεται με κατασκευαστικά μέσα. Έτσι στους μικρούς κινητήρες τοποθετούνται ανεμιστήρες με μεγάλη φτερωτή, που με την αύξηση των στροφών παρουσιάζουν ένα αυξημένο φορτίο. Κινητήρες σειράς δεν πρέπει να φορτίζονται δια μέσου πλατιών μιάντων, επειδή αυτοί υπάρχει περίπτωση να αποσυνδεθούν. Κατά τη φόρτιση των κινητήρων σειράς το ρεύμα του τύμπανου και της διέγερσης αυξάνονται να αυξάνεται και η ροπή στρέψης. Η ισχυροποίηση του μαγνητικού πεδίου του στάτη προκαλεί μία σημαντική μείωση των στροφών (σχήμα 3.54).



Σχήμα 3.54

Ιδιαίτερα μεγάλη είναι η μείωση των στροφών υπό φορτίο, στην περίπτωση που ο κινητήρας κινηθεί με μια προαντίσταση (εκκινητή). Στην περίπτωση αυτή προκαλείται η αύξηση του ρεύματος του τύμπανου στην προαντίσταση με αποτέλεσμα την αύξηση της πτώσης τάσης στα τυλίγματα, και την μείωση της τάσης του τύμπανου.

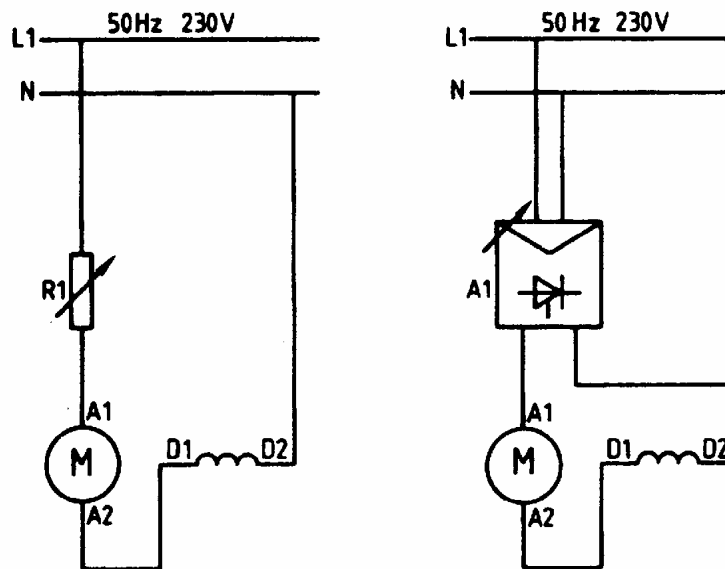
Οι στροφές τώρα μειώνονται, επειδή με το ρεύμα του τύμπανου το ρεύμα διέγερσης γίνεται μεγαλύτερο και επειδή η τάση του τύμπανου μειώνεται (σχήμα 3.54).

Οι κινητήρες σειράς χρησιμοποιούνται κυρίως στα ηλεκτρικά οχήματα π.χ. ηλεκτρικά τραίνα, τραμ, κλαρκ. Αν το μαγνητικό υλικό (ο πυρήνας) αυτών των κινητήρων κατασκευάζεται από ηλεκτροελάσματα, τότε εργάζονται οι κινητήρες σειράς και σε εναλλασσόμενη τάση. Οι μικροί κινητήρες σειράς χρησιμοποιούνται στα αυτοκίνητα ως εκκινητές (μίζα) και αν πρόκειται να χρησιμοποιηθούν - σε ειδική έκδοση - για το εναλλασσόμενο ρεύμα χαρακτηρίζονται ως κινητήρες Universal.

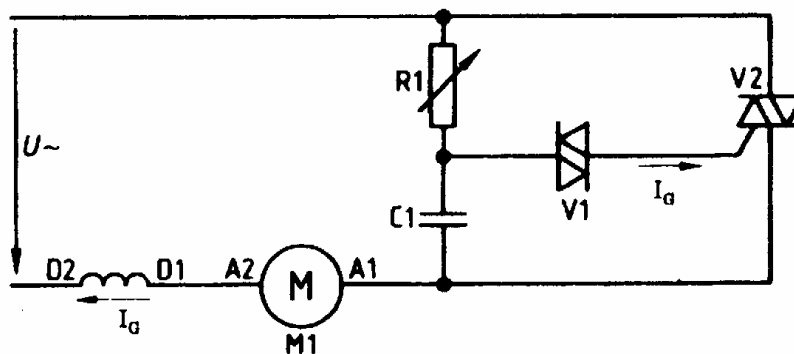
Έλεγχος κινητήρων με συλλέκτη.

Εκκίνηση μονοφασικών κινητήρων με διέγερση σειράς.

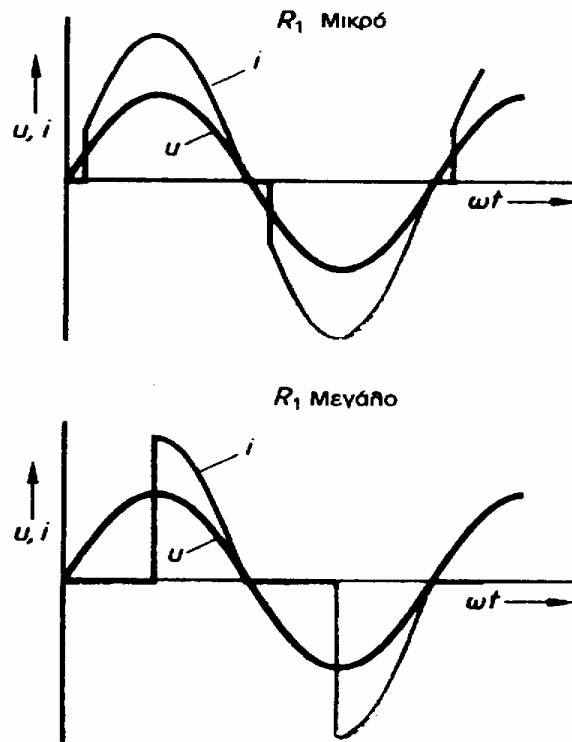
Στους μικρούς μονοφασικούς κινητήρες με διέγερση σειράς (κινητήρες Universal) η εκκίνηση γίνεται χωρίς προβλήματα συνήθως με την απευθείας σύνδεση τους στο δίκτυο. Στην περίπτωση που πρέπει να πραγματοποιηθεί δυναμική εκκίνηση, τότε αυτή γίνεται με μειωμένη τάση (σχήμα 3.55). Η μείωση της τάσης πραγματοποιείται με μια πρόσθετη αντίσταση, με ένα στραγγαλιστικό πηνίο ή με ένα μετασχηματιστή. Με τη νέα τεχνολογία χρησιμοποιείται ο έλεγχος αποκοπής (σχήμα 3.56) π.χ. με ένα Triac. Ο πυκνωτής C1 φορτίζεται διαμέσου της ρυθμιζόμενης αντίστασης R1. Ανάλογα με το μέγεθος της R1 η τάση στον C1 στη διάρκεια κάθε ημιπεριόδου φτάνει νωρίτερα ή αργότερα την τάση παρεμβολής του Diac V1. Το Diac είναι μια δίοδος, η οποία με μια συγκεκριμένη τάση (περίπου 30 V) γίνεται αγωγίμη. Έτσι το ρεύμα ελέγχου I_c σε κάθε ημιπερίοδο και ανάλογα με τη ρύθμιση του R1 έχει διαφορετική τιμή. Αντίστοιχα δεν αναπτύσσεται το πλήρες ρεύμα φορτίου, αλλά μόνο ένα μέρος του ημιτονοειδούς ρεύματος (σχήμα 3.57). Η μέση τιμή της τάσης του κινητήρα είναι αντίστοιχα μικρή.



Σχήμα 3.55



Σχήμα 3.56



Σχήμα 3.57

Στον έλεγχο αποκοπής η μέση τιμή της τάσης είναι τόσο μικρή, όσο αργότερα πραγματοποιηθεί η πυροδότηση έναυση.

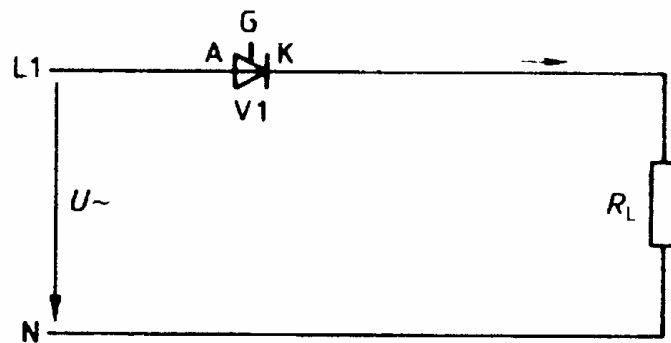
Εκκίνηση κινητήρων συνεχούς ρεύματος με διέγερση σειράς.

Η εκκίνηση των μικρών κινητήρων συνεχούς ρεύματος με διέγερση σειράς πραγματοποιείται με την απευθείας σύνδεση τους στο δίκτυο π.χ. στις μίζες (εκκινητήρες) αυτοκινήτων. Οι μεγαλύτεροι κινητήρες συνεχούς ρεύματος με διέγερση σειράς εκκινούνται με τη μείωση της τάσης τους όπως και οι μονοφασικοί κινητήρες συνεχούς ρεύματος με σύνδεση σειράς, με τη μείωση της τάσης. Η μείωση της χάρσης πραγματοποιείται με πρόσθετη αντίσταση, όχι όμως με στραγγαλιστικό πηνίο ή με μετασχηματιστή.

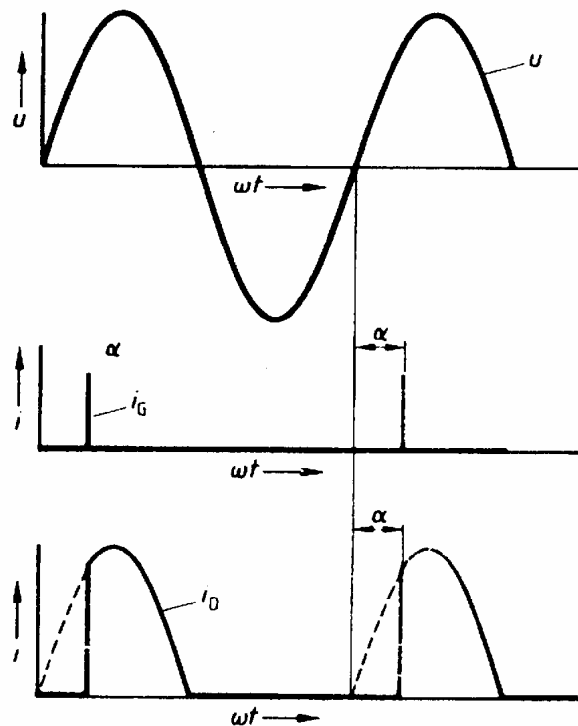
Στην εκκίνηση των μεγάλων κινητήρων συνεχούς ρεύματος με διέγερση σειράς χρησιμοποιείται ως πρόσθετη αντίσταση, μια ενεργό (ωμική) αντίσταση.

Στα σύγχρονα κυκλώματα για τη μείωση της τάσης χρησιμοποιείται ο έλεγχος αποκοπής με θυρίστορ. Κατ' αυτόν στο κύκλωμα ανόρθωσης πρέπει να αντικατασταθεί η δίοδος με θυρίστορ (σχήμα 3.58). Αυτό συμβαίνει γιατί το θυρίστορ μετά την πυροδότηση του (έναυση) συμπεριφέρεται όπως μια δίοδος. Πριν την έναυση όμως το θυρίστορ που συνδέεται στην προωθητική κατεύθυνση δεν επιτρέπει τη διέλευση του ρεύματος, "μπλοκάρει" το κύκλωμα. Ως ρεύμα πυροδότησης I_c χρησιμοποιούνται συνήθως παλμοί ρεύματος (σχήμα 3.59).

Ανάλογα με τη θέση των παλμών έναυσης ως προς τις μηδενικές θέσεις της συνδεδεμένης εναλλασσόμενης τάσης η έναυση σε σχέση με τις μηδενικές τιμές πραγματοποιείται με λίγη ή πολύ καθυστέρηση. Κ απόσταση από τη μηδενική θέση χαρακτηρίζεται ως γωνία έναυσης (πυροδότησης). Σε μια μικρή γωνία έναυσης το ρεύμα διέρχεται όπως περίπου σε μια δίοδο. Για μια μεγαλύτερη γωνία έναυσης το ρεύμα αποκαθίσταται λίγο αργότερα, ακολουθεί μια "αποκοπή φάσης". Η γωνία έναυσης μπορεί να είναι από 5° μέχρι 180° . Τα θυρίστορ είναι δυνατόν να εμφανίζονται σ' όλα τα κυκλώματα ανόρθωσης για ρύθμιση της τάσης. Στα κυκλώματα γέφυρας όλες οι διόδοι είναι δυνατόν να αντικατασταθούν με θυρίστορ. Στην περίπτωση αυτή αναφερόμαστε στα πλήρως ελεγχόμενα κυκλώματα γέφυρας. Κυκλώματα του είδους αυτού είναι δυνατόν να εργαστούν ως ανορθωτές ή ως μετατροπείς για τη μετατροπή συνεχούς τάσης σε εναλλασσόμενη τάση. Στον έλεγχο των κινητήρων τα πλήρως ελεγχόμενα κυκλώματα γέφυρας είναι απαραίτητα μόνον τότε, όταν χρησιμοποιείται η ωφέλιμη πέδηση των κινητήρων συνεχούς ρεύματος. Αυτό είναι βέβαια σπάνιο. Συνήθως για τον έλεγχο κινητήρα απαιτείται κύκλωμα ανορθωτή.

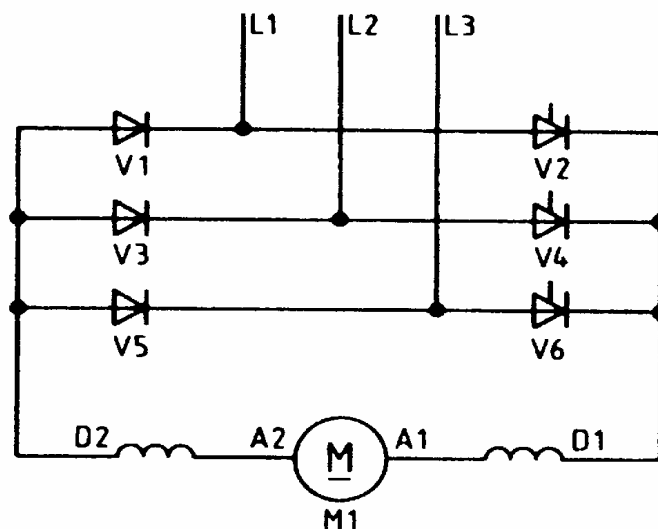


Σχήμα 3.58



Σχήμα 3.59

Τότε αρκεί σε κάθε κλάδο γέφυρας να τοποθετηθεί ένας θυρίστορ (σχήμα 3.60). Στο κύκλωμα γέφυρας έξι παλμών είναι απαραίτητοι τρεις δίοδοι και τρεις θυρίστορς, ενώ στα κυκλώματα δύο παλμών δύο. Στην περίπτωση των κυκλωμάτων αυτών αναφερόμαστε στα ημιελεγχόμενα κυκλώματα γέφυρας.



Σχήμα 3.60

Στον έλεγχο κινητήρων συνεχούς ρεύματος χρησιμοποιούνται συνήθως ημιελεγχόμενα κυκλώματα γέφυρας.

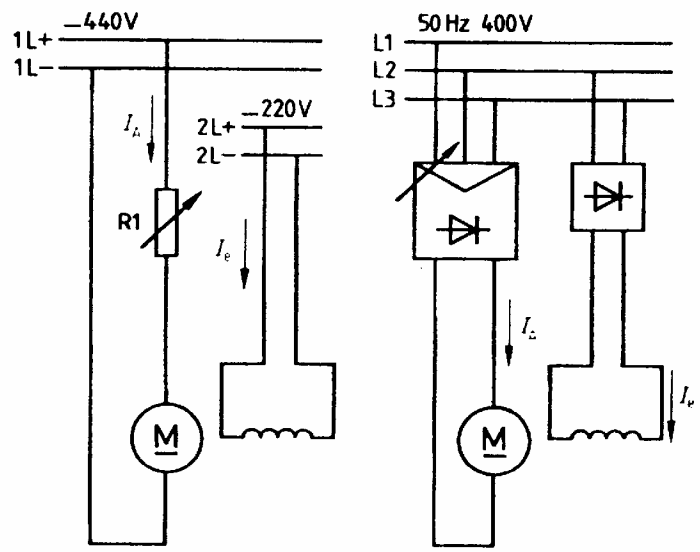
Οι μεγαλύτεροι κινητήρες συνεχούς ρεύματος με διέγερση σειράς τροφοδοτούνται συνήθως από μια ανορθωτική συσκευή. Αν αυτή έχει μια μεταβαλλόμενη τάση, π.χ. με έλεγχο αποκοπής, τότε στην εκκίνηση εφαρμόζεται μικρότερη τάση.

Η εκκίνηση των μεγάλων κινητήρων συνεχούς ρεύματος με διέγερση σειράς πραγματοποιείται με τη μείωση της τάσης στην ανορθωτική συσκευή.

Κατά την τροφοδοσία των μεγάλων κινητήρων συνεχούς ρεύματος με διέγερση σειράς από δίκτυο συνεχούς ρεύματος, π.χ. από συσσωρευτές (μπαταρίες), η μείωση της τάσης πετυχαίνεται με αντιστάσεις ή έναν ηλεκτρονικό καταμεριστή.

Εκκίνηση κινητήρων συνεχούς ρεύματος με ξένη διέγερση.

Οι κινητήρες συνεχούς ρεύματος με ξένη διέγερση εξαιτίας της ιδιαιτερότητας τους απαιτούν πάντα μία συσκευή εκκίνησης. Είναι δε σημαντικό, ότι κατά την εκκίνηση τους χρησιμοποιείται η πλήρης τάση διέγερσης, όμως μία μειωμένη τάση τύμπανου. Στην απλή περίπτωση η μείωση της τάσης του τύμπανου πραγματοποιείται πάλι με πρόσθετη αντίσταση (σχήμα 3.61). Επειδή οι κινητήρες συνεχούς ρεύματος με ξένη διέγερση τροφοδοτούνται συνήθως από το δίκτυο δια μέσου μιας ανορθωτικής συσκευής, με την οποία η τάση του τύμπανου ρυθμίζεται ιδιαίτερα με τον έλεγχο αποκοπής.



Σχήμα 3.61

Η εκκίνηση κινητήρων συνεχούς ρεύματος με ξένη διέγερση πραγματοποιείται με ρυθμιζόμενη ανορθωτική συσκευή. Η τάση διέγερσης είναι σταθερή, ενώ η τάση του τύμπανου ρυθμίζεται.

Υπολογισμός εκκινητή στους κινητήρες συνεχούς ρεύματος.

Στους κινητήρες συνεχούς ρεύματος οι πρόσθετες αντιστάσεις χρησιμοποιούνται μόνο σε εξαιρετικές περιπτώσεις. Ο υπολογισμός των αντιστάσεων αυτών καθώς και ο καταμερισμός του εκκινητή σε βαθμίδες πραγματοποιείται όπως με τους εκκινητές των κινητήρων με δακτυλιοφόρο δρομέα. Οι εξισώσεις (τύποι) υπολογισμού είναι σχεδόν ίδιες. Ο τρόπος υπολογισμού είναι ίδιος με τον κινητήρα δακτυλιοφόρου δρομέα οπότε πρέπει να υπολογιστούν η αντίσταση του δρομέα (αντίσταση τύμπανου), το ρεύμα δρομέα (ρεύμα τύμπανου) και απ' αυτά η αντίσταση του εκκινητή.

RA: Αντίσταση τύμπανου	$R_A = \frac{U_a}{I_N}$
U _a : Πτώση τάσης στην RA	$U_a \approx \frac{2}{3} U \cdot (1 - n)$
I _N : Ονομαστικό ρεύμα τύμπανου	$I_N \approx \frac{P}{0,9 \cdot U}$
U: Ονομαστική τάση	$I_1 \approx 1,1 \cdot I_N$
n : Βαθμός απόδοσης	$I_2 \approx 1,5 \cdot I_N$
P: Ονομαστική ισχύς (αποδιδόμενη)	$I_e \approx 0,8 \cdot I_N$
I ₁ : Ρεύμα εκκίνησης	$R_V = \frac{U}{I_2} - R_A$
I ₂ : Μέγιστο ρεύμα εκκίνησης	$R_e = \frac{U}{I_e} - R_A - R_V$
I _e : Ρεύμα παρεμβολής	
R _V : Αντίσταση του εκκινητή	
R _e : Πρόσθετη αντίσταση	

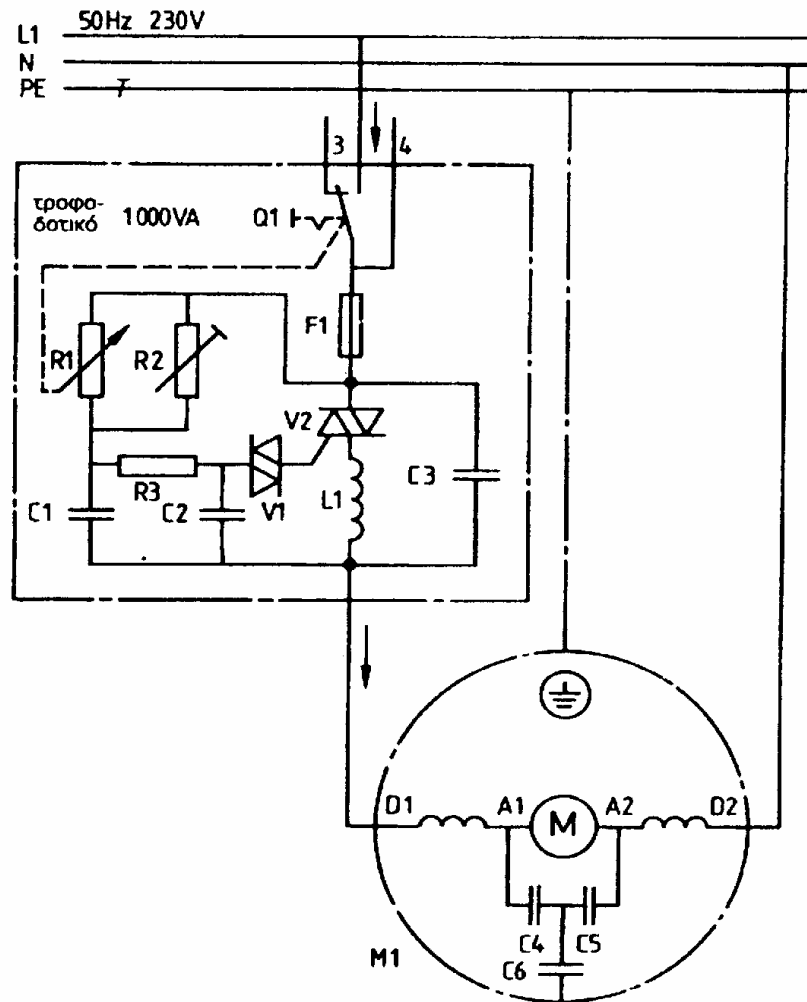
Ο καταμερισμός του εκκινητή πραγματοποιείται όπως στον κινητήρα με δακτυλιοφόρο δρομέα.

3.10 Έλεγχος στροφών των κινητήρες συνεχούς ρεύματος.

Έλεγχος στροφών στους κινητήρες με συλλέκτη.

Ο έλεγχος στροφών στους κινητήρες με διέγερση σειράς και στους κινητήρες συνεχούς ρεύματος με ξένη διέγερση πραγματοποιείται με τον ίδιο τρόπο όπως η εκκίνηση του. Για τη μείωση των στροφών μειώνεται η τάση τύμπανου, ενώ για την αύξηση των στροφών αυξάνεται. Η αύξηση των στροφών πάνω από την ονομαστική τιμή τους είναι δυνατόν να πραγματοποιηθεί στους κινητήρες ξένης διέγερσης με τη μείωση της τάσης διέγερσης, αν βέβαια ο κινητήρας έχει κατασκευαστεί για μεγάλες στροφές.

Ως κυκλώματα έλεγχου χρησιμοποιούνται κυρίως τα κυκλώματα ανορθωτών με έλεγχο αποκοπής. Στους μονοφασικούς κινητήρες με σύνδεση σειράς (κινητήρα Universal) χρησιμοποιούνται συνήθως ρυθμιστές εναλλασσόμενου ρεύματος με Triac (σχήμα 3.62). Το μειονέκτημα στον έλεγχο αποκοπής είναι ότι η καμπύλη της τάσης του δικτύου επηρεάζεται από αυτό γι' αυτό επιτρέπεται ο έλεγχος μέχρι ορισμένα όρια.



Σχήμα 3.62

Στους κινητήρες με ενεργό (ωμικό) και επαγωγικό φορτίο για δίκτυο 220 V η παροχή ισχύος είναι μέχρι 1,4 KW. Αν η ανορθωτική συσκευή συνδεθεί, στον έλεγχο αποκοπής, με 380 V τότε η μέγιστη επιτρεπόμενη ισχύς παροχής είναι 10 KW.

Η ισχύς εισόδου των ανορθωτικών συσκευών με έλεγχο αποκοπής στο μονοφασικό δίκτυο των 220 V δεν πρέπει να είναι μεγαλύτερη από 1,4 KW, ενώ σε τριφασική παροχή δικτύου 380 V όχι μεγαλύτερη από 10 KW.

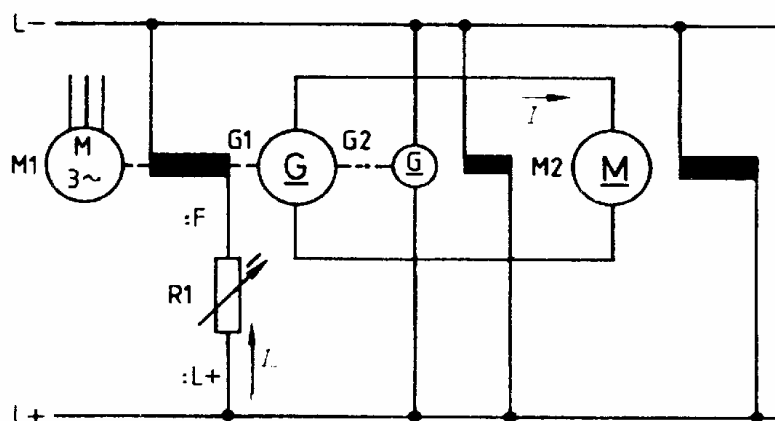
Ο περιορισμός αυτός δεν ισχύει για το βιομηχανικό δίκτυο, στο οποίο υπάρχει εγκατεστημένος δικός του μετασχηματιστής για την τροφοδοσία της βιομηχανικής εγκατάστασης.

Συνδεσμολογία – Leonard.

Ο έλεγχος στροφών των κινητήρων ξένης διέγερσης πραγματοποιείται σε σχέση με μία γεννήτρια ξένης διέγερσης στη συνδεσμολογία κατά Leonard (σχήμα 3.63). Δεν πρόκειται βέβαια για έναν κατ' αποκοπή έλεγχο, ώστε να επηρεάζεται η καμπύλη τάσης του δικτύου. Γι' αυτό για το δίκτυο ισχύουν τα όρια ισχύος του ελέγχου κατ' αποκοπή.

Στη συνδεσμολογία - Leonard δεν πραγματοποιείται καμιά αλλαγή της καμπύλης της τάσης του δικτύου.

Στη συνδεσμολογία - Leonard (σχήμα 3.63) ένας κινητήρας βραχυκυκλωμένου δρομέα M1 κινεί το τύμπανο μιας γεννήτριας με ξένη διέγερση C1 και το τύμπανο μιας γεννήτριας παράλληλης διέγερσης G2 με σταθερές στροφές. Η γεννήτρια παράλληλης διέγερσης παράγει μόνο την τάση διέγερσης για το αντίστοιχο δίκτυο διέγερσης στο οποίο συνδέονται τα τυλίγματα διέγερσης των C1, C2 και του κινητήρα ξένης διέγερσης M2. Σε σειρά με το τυλίγμα διέγερσης της C1 βρίσκεται η αντίσταση πεδίου R1 με την οποία ρυθμίζεται η ένταση του ρεύματος διέγερσης για τη C1 (σχήμα 3.63). Το τύμπανο της C1 συνδέεται παράλληλα με το τύμπανο του M2.



Σχήμα 3.63

Μετά την επιτάχυνση του M1 υπάρχει η πλήρης τάση στο δίκτυο διέγερσης. Με τη ρύθμιση της R1 υπάρχει δυνατότητα να ρυθμίζεται ποικιλότροπα το ρεύμα διέγερσης της C1. Έτσι, αν το ρεύμα διέγερσης είναι μικρό τότε η τάση που παράγεται στη γεννήτρια C1 είναι επίσης μικρής τιμής. Αυτή η μειωμένη τάση εφαρμόζεται στο επαγωγικό τύμπανο του M2, οπότε ο κινητήρας στρέφεται αργά. Αν αντίθετα με τη ρύθμιση της R1 αυξηθεί η τιμή του ρεύματος διέγερσης της C1, τότε η τάση που παράγεται από την G2 αυξάνεται και το τύμπανο του M2 στρέφεται γρήγορα.

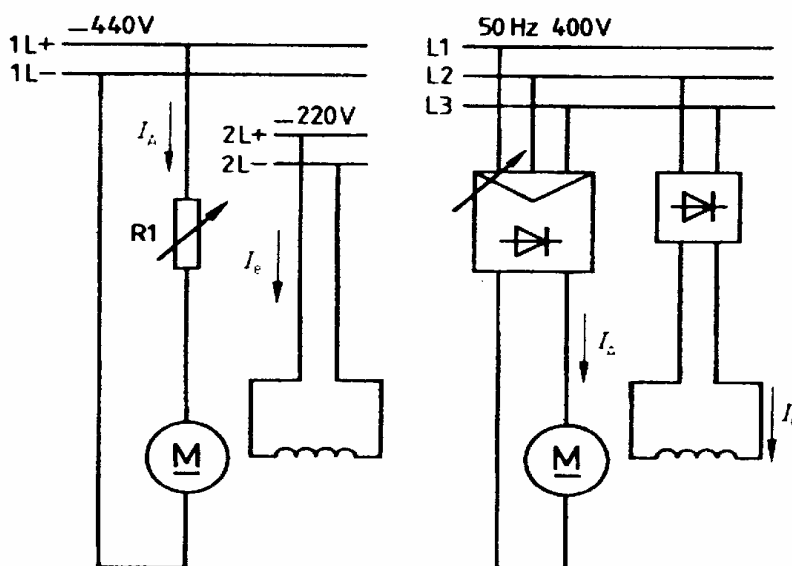
Στη συνδεσμολογία Leonard οι στροφές ενός κινητήρα ξένης διέγερσης ρυθμίζονται χωρίς περιορισμό, επίσης χωρίς να εφαρμόζεται ένας έλεγχος αποκοπής.

Ένα πλεονέκτημα της συνδεσμολογίας Leonard προκύπτει από το γεγονός, ότι εξαιτίας των κινούμενων μαζών των τριών περίπου ίδιου μεγέθους μηχανών, τα μεγέθη φορτίων κρατούνται μακριά από το δίκτυο. Εκτός αυτού η συνδεσμολογία είναι λιγότερο ευαίσθητη στην υπέρταση από τα ηλεκτρονικά κυκλώματα ελέγχου.

Μειονέκτημα στη συνδεσμολογία Leonard σε σχέση με τον έλεγχο με αποκοπή είναι ότι παρουσιάζει μικρότερο βαθμό απόδοσης και απαιτεί σύντομη συντήρηση.

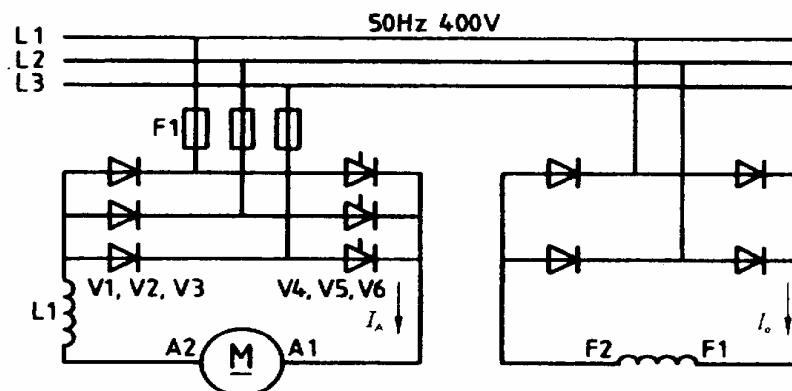
Έλεγχος στροφών στους κινητήρες συνεχούς ρεύματος με ξένη διέγερση.

Οι στρόφες των κινητήρων ξένης διέγερσης ελέγχονται - βασικά - με μια μεταβλητή αντίσταση στο κύκλωμα του επαγωγικού τύμπανου (σχήμα 3.64). Σήμερα ως μεταβλητή αντίσταση στο κύκλωμα χρησιμοποιείται ένα ηλεκτρονικό κύκλωμα.



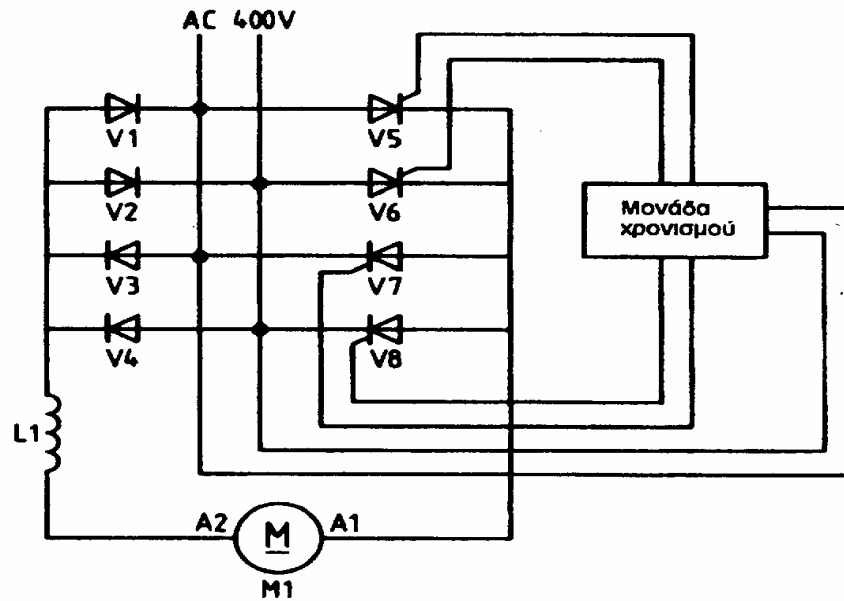
Σχήμα 3.64

Στην πιο απλή μορφή, το τμήμα ισχύος του κυκλώματος αυτού είναι ένα ημιελεγχόμενο κύκλωμα γέφυρας για το κύκλωμα του τύμπανου και ένα ανεξέλεγκτο κύκλωμα γέφυρας για το κύκλωμα διέγερσης. Για ισχύς μέχρι 4KW λαμβάνεται κύκλωμα γέφυρας δύο παλμών B2 και ένα κύκλωμα γέφυρας 6 παλμών B6 (σχήμα 3.65).



Σχήμα 3.65

Το κύκλωμα σχήμα 1 είναι κατάλληλο για μια φορά περιστροφής του κινητήρα και για λειτουργία ως κινητήρα. Η αλλαγή φοράς περιστροφής είναι δυνατή με ένα διακόπτη αναστροφής στο κύκλωμα του τύμπανου ή το κύκλωμα διέγερσης. Συνήθως χρησιμοποιείται μια ανάστροφη δίοδος (σχήμα 3.66) στην οποία συνδέονται συνήθως δύο αντιπαράλληλα κυκλώματα γεφυρών στο τύμπανο του κινητήρα. Η μονάδα χρονισμού για τον έλεγχο αποκοπής, πρέπει να συνδέεται έτσι, ώστε να λειτουργεί είτε η μια είτε η άλλη γέφυρα.

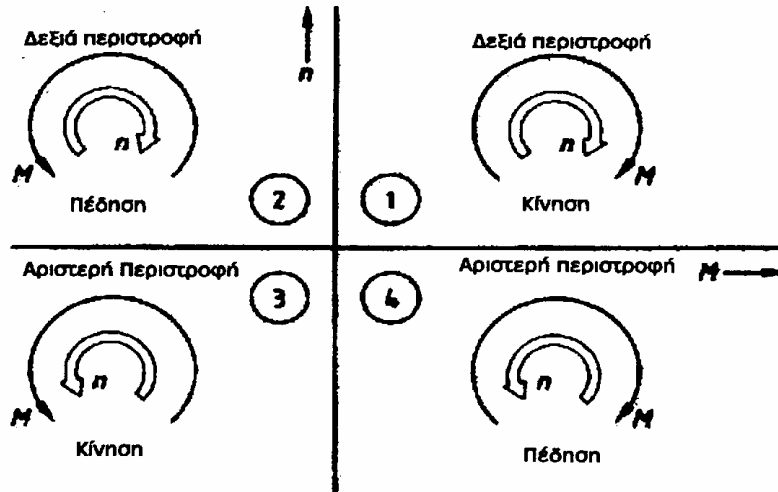


Σχήμα 3.66

Στην ανάστροφη δίοδο επιτρέπεται να ελέγχεται κάθε φορά είτε το ένα είτε το άλλο κύκλωμα γέφυρας.

Στο κύκλωμα (σχήμα 3.66) ελέγχονται για τη δεξιά φορά περιστροφής του κινητήρα τα θυρίστορ V5 και V6, για την αριστερή φορά περιστροφής τα θυρίστορ V7 και V8.

Κατά τη λειτουργία μιας ηλεκτρικής μηχανής διακρίνουμε τέσσερα τεταρτημόρια (σχήμα 3.67). Λαμβάνουμε λοιπόν τα τέσσερα αυτά τεταρτημόρια αν ο οριζόντιος άξονας οριστεί ως άξονας ροπών και ο κάθετος άξονας ως άξονας των στροφών. Αν οριστεί ακόμα στη δεξιά φορά περιστροφής το θετικό πρόσημο, τότε προκύπτει στο 1 τεταρτημόριο λειτουργία κινητήρα (κίνηση) με δεξιά περιστροφή ενώ αντίστοιχα το 3 τεταρτημόριο λειτουργία κινητήρα με αριστερή περιστροφή.

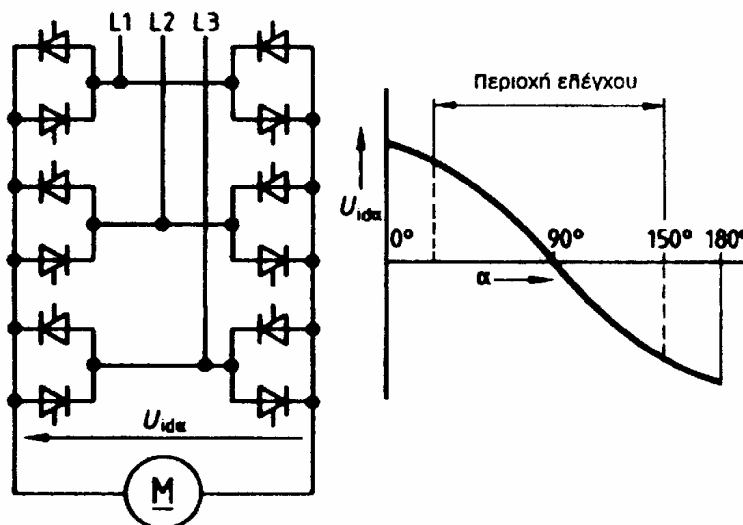


Σχήμα 3.67

Τα ημιελεγχόμενα κυκλώματα γέφυρας είναι κατάλληλα μόνον για το 1 και 3 τεταρτημόριο.

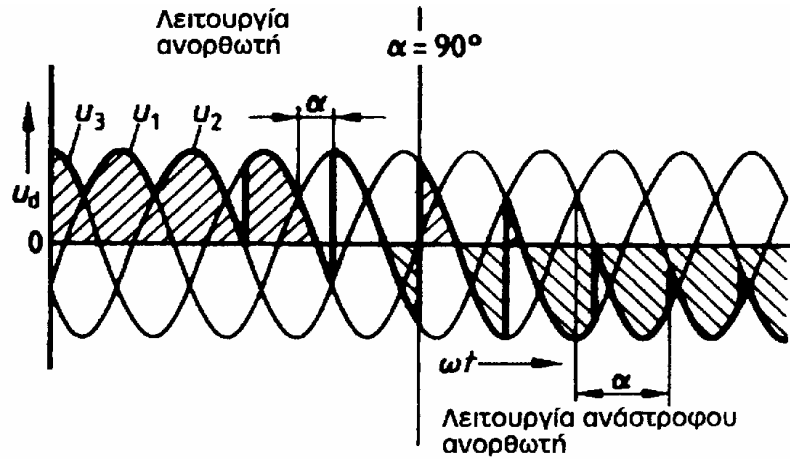
Η λειτουργία στο 2 και 4 τεταρτημόριο υπάρχει, όταν η φορά περιστροφής είναι αντίθετη με τη φορά του στρεφόμενου πεδίου στην περίπτωση που διαθέτουμε πέδηση. Αν ένας ελεγχόμενος με θυρίστορ κινητήρας, οδηγείται σε πέδηση με την επιστροφή της ενέργειας στο δίκτυο (ωφέλιμη πέδηση), τότε ο ελεγχόμενος ανορθωτής να εργαστεί ως δίοδος διπλής ανόρθωσης.

Η λειτουργία διπλής ανόρθωσης πραγματοποιείται με κύκλωμα γέφυρας πλήρους ελέγχου π.χ. με κύκλωμα γέφυρας μόνον από θυρίστορ (σχήμα 3.68). Ένα πλήρως ελεγχόμενο κύκλωμα γέφυρας παριστάνει μια ανόρθωση δύο κατευθύνσεων, που επιτρέπει π.χ. τη λειτουργία στο 1 και 4 τεταρτημόριο. Αν χρησιμοποιηθούν δύο πλήρως ελεγχόμενα κυκλώματα γέφυρας (σχήμα 1) τότε έχουμε ανάστροφο ελεγχόμενο ανορθωτή, που επιτρέπει τη λειτουργία και στα τέσσερα τεταρτημόρια. Ένας ανάστροφα ελεγχόμενος ανορθωτής είναι ένας ανορθωτής δύο κατευθύνσεων για τις δύο φορές περιστροφής.



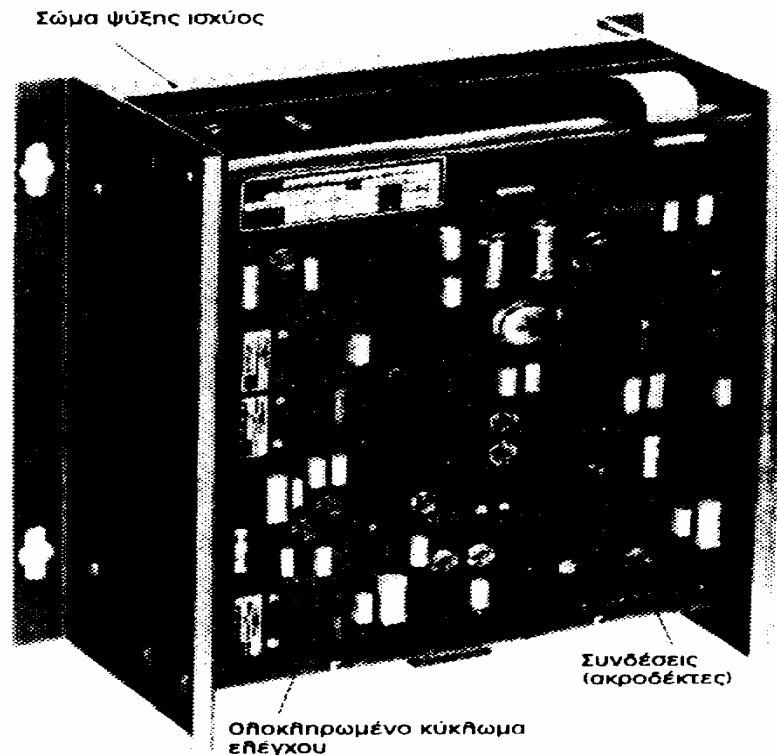
Σχήμα 3.68

Η μετάβαση από τη λειτουργία διόδου στη λειτουργία διόδου διπλής ανόρθωσης πραγματοποιείται με την αλλαγή της γωνίας έναυσης. Για γωνία από 0° μέχρι 90° έχουμε λειτουργία διόδου, από 90° μέχρι 180° διόδου διπλής ανόρθωσης (σχήμα 3.69). Στη λειτουργία διόδου διπλής ανόρθωσης τα θυρίστωρ ελέγχονται έτσι, ώστε να είναι δυνατή η παροχή ενέργειας στο δίκτυο από τον κινητήρα που εργάζεται ως γεννήτρια.



Σχήμα 3.69

Ανάλογα με τη γωνία έναυσης μιας ανάστροφης ελεγχόμενης διόδου έχουμε λειτουργία διόδου ή διόδου διπλής ανόρθωσης. Για τη λειτουργία κινητήρων συνεχούς ρεύματος με τη ρύθμιση των στροφών τους, προσφέρονται συσκευές ρύθμισης στροφών που καταναλώνουν τμήμα ισχύος με τα θυρίστωρ και της μονάδας χρονισμού (σχήμα 3.70). Η μονάδα χρονισμού και ο ρυθμιστής περιλαμβάνουν πολλά ολοκληρωμένα κυκλώματα.

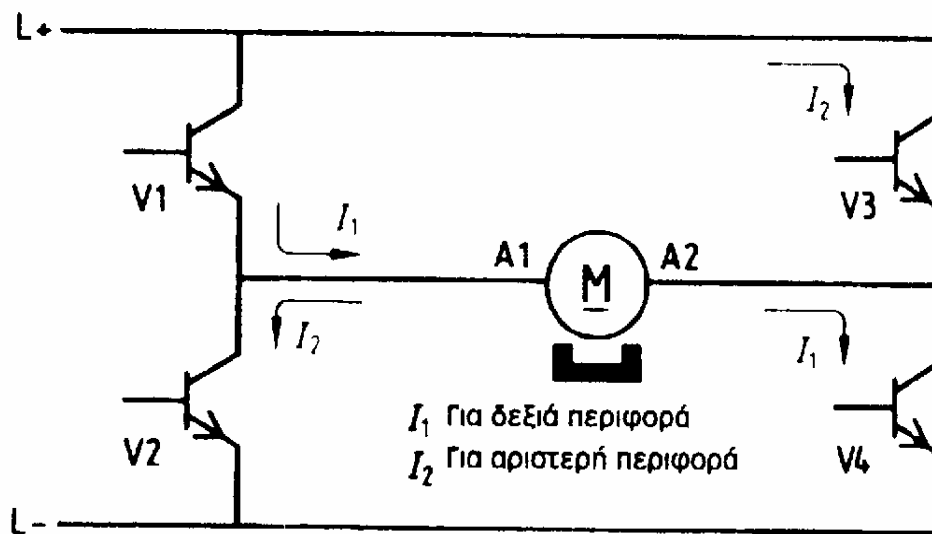


Σχήμα 3.70

Στο κύκλωμα γέφυρας δύο παλμών κάθε 10 ms πυροδοτείται ένα θυρίστορ, στο κύκλωμα γέφυρας 6 παλμών κάθε 3,33 ms. Ο χρόνος αυτός είναι δυνατόν να διαρκεί μέχρι ένα σήμα ελέγχου να έχει μια επίδραση στο κύκλωμα φορτίου.

Τα θυρίστορ ως ρυθμιστικά σκέλη έχουν ένα νεκρό χρόνο της τάξης των μερικών ms.

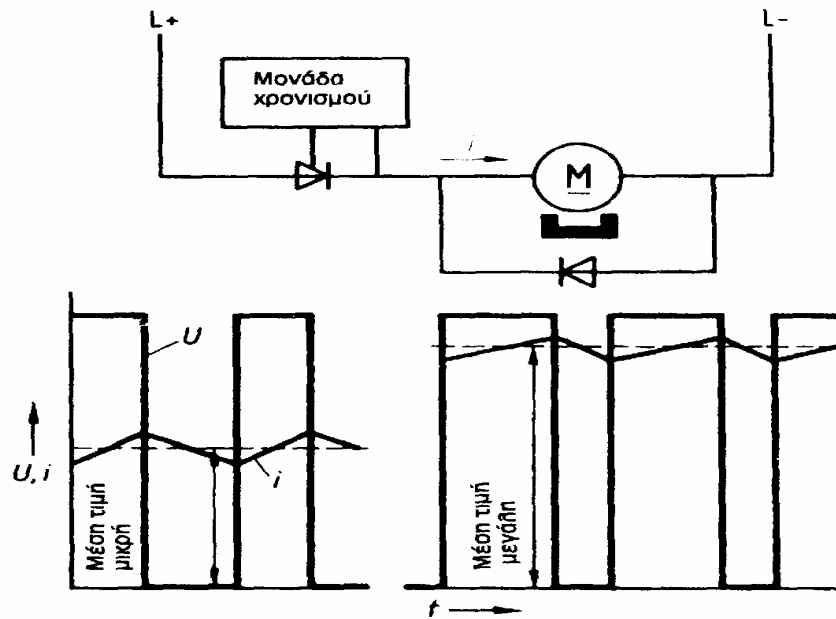
Εάν πρέπει το σήμα ελέγχου να μην παρουσιάζει επιβράδυνση, τότε ο έλεγχος των κινητήρων συνεχούς ρεύματος πραγματοποιείται δια μέσου τρανζίστορ (σχήμα 3.71). Τα τρανζίστορ δεν παρουσιάζουν επιβράδυνση στο σήμα ελέγχου. Οι συσκευές ελέγχου με τρανζίστορ είναι κατάλληλες για όλα τα τεταρτημόρια λειτουργίας.



Σχήμα 3.71

Έλεγχος στροφών με ρυθμιστή συνεχούς ρεύματος.

Ο έλεγχος στροφών κινητήρων συνεχούς ρεύματος που τροφοδοτούνται με συνεχή τάση είναι δυνατόν να πραγματοποιηθεί και με τη χρησιμοποίηση ενός ρυθμιστή συνεχούς ρεύματος π.χ. από ένα ανορθωτικό κύκλωμα μόνον με ανορθωτές (διόδους) ή από συσσωρευτή (μπαταρία). Με το ρυθμιστή συνεχούς ρεύματος δια μέσου ενός ρυθμιστικού σκέλους π.χ. ένα κύκλωμα θυρίστορ, δίνονται ραγδαία παλμοί τάσης στο τύμπανο του κινητήρα, ένας κατόπιν του άλλου (σχήμα 3.72). Κατά τις διακοπές της τάσης - λόγω Lenz - το τύμπανο διαρρέεται από ρεύμα αυτεπαγωγής, η διάδος που συνδέεται παράλληλα με το τύμπανο έτσι, ώστε η εφαρμοσμένη τάση να είναι η ανάστροφη τάση της διόδου ονομάζεται διάδος ελευθέρως διέλευσης.



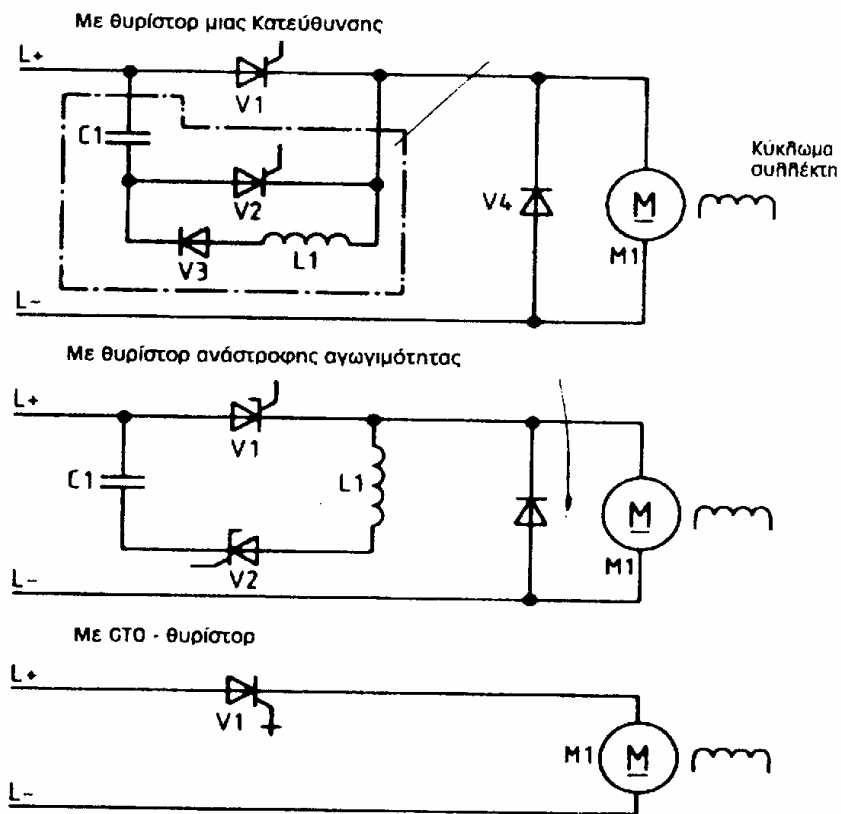
Σχήμα 3.72

Ο ρυθμιστής συνεχούς ρεύματος ενός κινητήρα συνεχούς ρεύματος αποτελείται από ένα ηλεκτρονικό κύκλωμα και μία δίοδο ελεύθερας διέλευσης.

Στο ρυθμιστή συνεχούς ρεύματος εμφανίζονται μικρές απώλειες - αντίθετα προς την ρυθμιστική αντίσταση - επειδή στο τύμπανο του κινητήρα εμφανίζεται είτε η πλήρης τάση είτε καμιά τάση. Ανάλογα με τη συχνότητα των διακοπών ή ανάλογα με τη διάρκεια αυτών διαφέρει η μέση τιμή του ρεύματος του τύμπανου. Συνήθως ο ρυθμιστής συνεχούς ρεύματος εργάζεται με τη σταθερή συχνότητα της μονάδας χρονισμού, ώστε ο αριθμός παρεμβολών να είναι σταθερός. Αντίθετα, το εύρος των παλμών αλλάζει ανάλογα με το επιθυμητό ρεύμα και χαρακτηρίζεται ως διαμόρφωση εύρους παλμών (ΔΕΗ).

Ο ρυθμιστής συνεχούς ρεύματος εργάζεται συνήθως με διαμόρφωση εύρους παλμών.

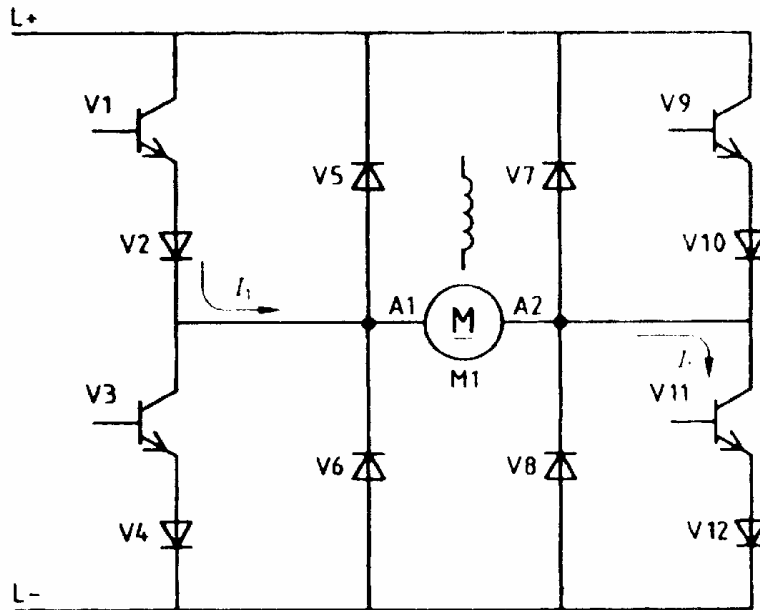
Στο ρυθμιστικό σκέλος με θυρίστορ η διακοπή του συνεχούς ρεύματος δεν είναι απλή. Αν χρησιμοποιούνται θυρίστορ μιας κατεύθυνσης (αποκοπή αντίστροφης φοράς), τότε πρέπει να υπάρχει κύκλωμα αναστροφής (συλλέκτης) με πυκνωτή διακοπής, πηνίο διακοπής, βοηθητικό θυρίστορ και δίοδο (σχήμα 3.71). Αν χρησιμοποιούνται θυρίστορ ανάστροφης αγωγιμότητας, τότε το κύκλωμα αναστροφής γίνεται απλό. Ακόμα απλούστερο γίνεται το ρυθμιστικό σκέλος αν χρησιμοποιηθεί ένα CTO-θυρίστορ (σχήμα 3.73).



Σχήμα 3.73

Στους ρυθμιστές συνεχούς ρεύματος κατάλληλα για χρησιμοποίηση είναι τα CTO-θυρίστορ.

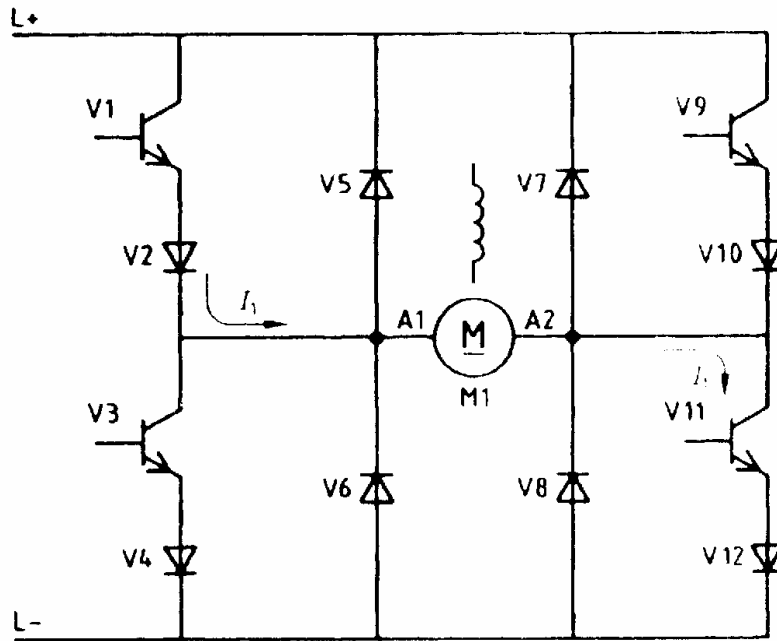
Η μονάδα χρονισμού του ρυθμιστή συνεχούς ρεύματος με CTO-θυρίστορ είναι δαπανηρότερη από τη μονάδα χρονισμού άλλων θυρίστορ. Το μειονέκτημα των κυκλωμάτων θυρίστορς είναι ο νεκρός χρόνος, ο οποίος εξαρτάται από τη συχνότητα των ρυθμών της μονάδας χρονισμού. Τα τρανζίστορ-ρυθμιστικά σκέλη (κυκλώματα) εργάζονται χωρίς νεκρό χρόνο (σχήμα 3.74). Στην περίπτωση που τα τρανζίστορ V1 και V11 ελέγχονται με το κύκλωμα του σχήματος 1, τότε η μηχανή M1 εργάζεται σε δεξιά περιστροφή ως κινητήρας. Αν η τάση τύμπανου στη λειτουργία γεννήτριας σε δεξιά περιφορά γίνει πολύ μεγάλη τότε ακολουθεί τροφοδοσία στο δίκτυο διαμέσου V5 και V8 στο V2 και V12 φράζουν (αποκόπτουν) τις συνδέσεις του εκπομπού. Αντίστοιχα, το κύκλωμα εργάζεται στην αριστερή περιστροφή με τα άλλα τρανζίστορ και διόδους.



Σχήμα 3.74

Αναστροφέας ρεύματος ενδιάμεσου κυκλώματος.

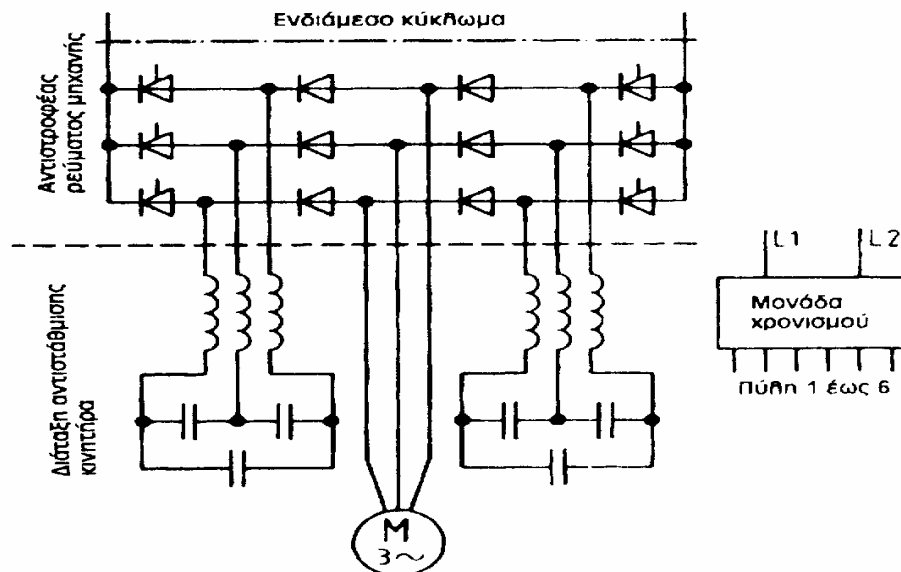
Κατά τον έλεγχο των στροφών τριφασικών ασύγχρονων κινητήρων είναι απαραίτητη η ύπαρξη ρεύματος στο στάτη, του οποίου η συχνότητα και η ένταση να αποτελούντα ρυθμιζόμενα μεγέθη. Η ρύθμιση αυτή πραγματοποιείται με αμφίδρομες διόδους οι οποίες συνδέονται σε ένα ενδιάμεσο κύκλωμα σ' έναν ανορθωτή ρεύματος δικτύου (σχήμα 3.75). Αν το κύκλωμα του αμφίδρομου ανορθωτή συνδέεται απ' ευθείας με το κύκλωμα ανόρθωσης του δικτύου διαμέσου ενός στραγγαλιστικού πηνίου, τότε αναφερόμαστε στην περίπτωση αντιστροφέα ρεύματος με ενδιάμεσο κύκλωμα (I-αντιστροφέα). Ο ανορθωτής ρεύματος δικτύου έχει τη δυνατότητα να εργάζεται στη λειτουργία ανόρθωσης και αμφίδρομης ανόρθωσης. Ελέγχεται με τη συχνότητα του δικτύου από τη μονάδα χρονισμού του με τη μέθοδο της αποκοπής. Ανάλογα με τον έλεγχο ο ανορθωτής ρεύματος δικτύου παρέχει μια μεταβλητή ένταση του ρεύματος. Στο ενδιάμεσο κύκλωμα συνδέεται ο μετατροπέας συχνότητας ή ο ανορθωτής ρεύματος της μηχανής, όπως ονομάζεται, (σχήμα 3.76) ο οποίος παράγει την επιθυμητή συχνότητα.



Σχήμα 3.75

Στον αντιστροφέα ρεύματος ενδιάμεσου κυκλώματος ο ανορθωτής ρεύματος δικτύου παρέχει την απαιτούμενη ένταση του ρεύματος και ο αντιστροφέας ρεύματος της μηχανής την απαιτούμενη συχνότητα.

Ο αντιστροφέας ρεύματος μηχανής χρειάζεται όπως και ο ρυθμιστής συνεχούς ρεύματος μια διάταξη αναστροφής (σχήμα 3.76). Η επαγωγική αντίσταση σκέδασης του συνδεδεμένου κινητήρα βραχυκυκλωμένου δρομέα αποτελεί ένα δομικό μέρος της διάταξης αυτής. Οι πυκνωτές πρέπει να εναρμονίζονται με τον συνδεδεμένο κινητήρα. Ο αντιστροφέας ρεύματος μηχανής είναι ένας αμφίδρομος ανορθωτής με ξένη οδήγηση. Η μονάδα χρονισμού του παρέχει μια εναλλασσόμενη συχνότητα.

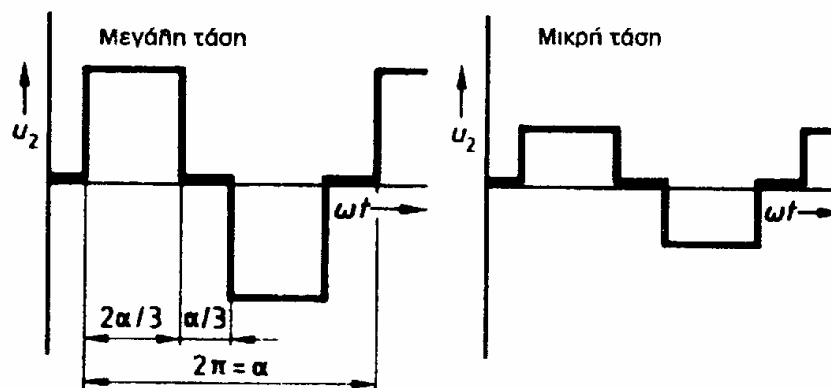


Σχήμα 3.76

Στον αντιστροφέα-ρεύματος ενδιάμεσου κυκλώματος ο κινητήρας συνδέεται στο δίκτυο για κάθε στιγμή διαμέσου του ενδιάμεσου κυκλώματος-στραγγαλιστικού πηνίου. Με τον τρόπο αυτό απορροφάται απ' ευθείας από το δίκτυο η άεργος ισχύς. Οι δίοδοι άεργου ισχύος δεν πρέπει να προβλέπονται στους ανορθωτές ρεύματος.

Αντιστροφέας με διαμόρφωση πλάτους παλμού (ΑΔΠ).

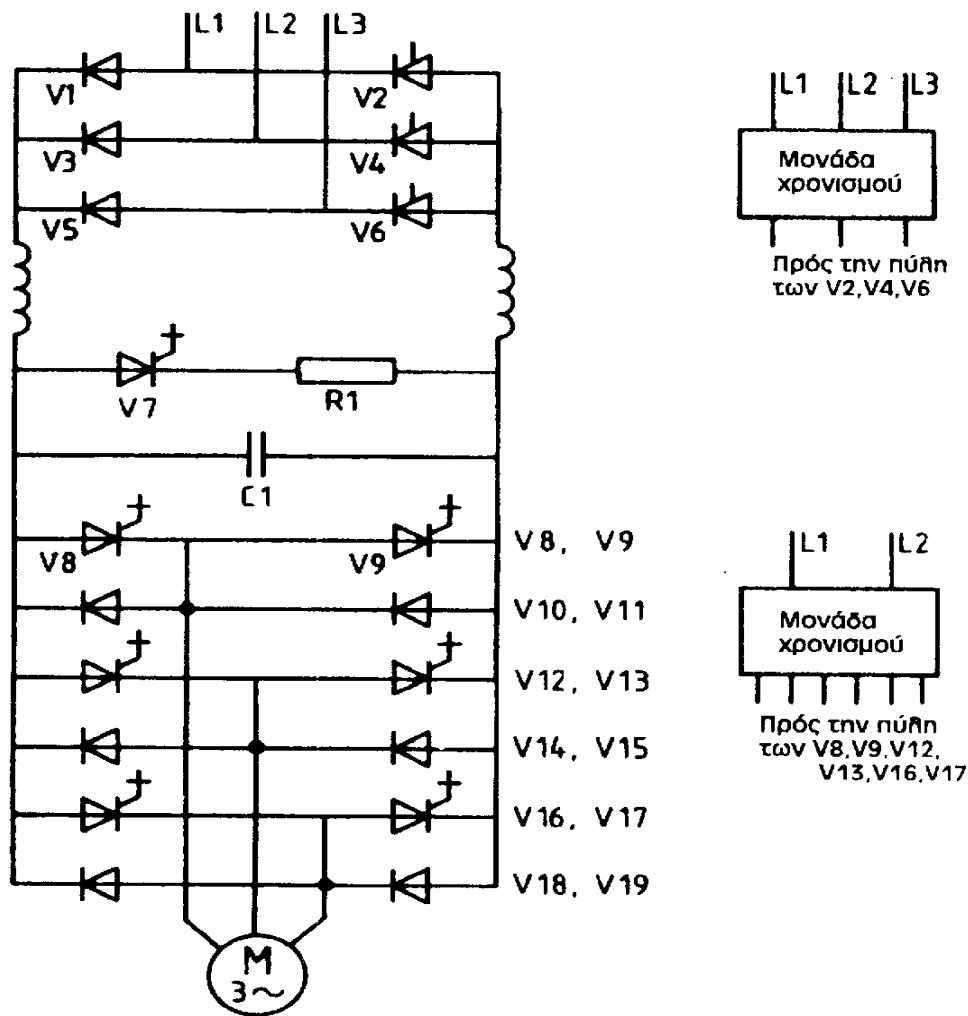
Υπάρχουν αντιστροφείς, στους οποίους είναι δυνατή η μεταβολή του ύψους της εξερχόμενης τάσης (U-αντιστροφέας). Αν σ' έναν U-αντιστροφέα προσαρμόζεται - για λόγους χρήσης - επιθυμητή συχνότητα στη διάρκεια μιας ημιπεριόδου προς το ύψος του εκάστοτε ορθογωνικού παλμού, ενώ ο χρόνος διακοπής είναι πάντα $1/3$ της χρονικής περιόδου, τότε αναφερόμαστε στη διαμόρφωση πλάτους παλμού (σχήμα 3.77).



Σχήμα 3.77

Στη διαμόρφωση πλάτους παλμού μεταβάλλεται η μέγιστη τιμή μιας ορθογωνικής εναλλασσόμενης τάσης.

Κατά τον έλεγχο στροφών ενός τριφασικού ασύγχρονου κινητήρα ή ενός τριφασικού σύγχρονου κινητήρα, στους ακροδέκτες αυτού τοποθετούνται τρεις τάσεις με το ΑΔΠ (σχήμα 3.78). Έτσι ο κινητήρας δεν τίθεται σε λειτουργία με ημιτονοειδές ρεύμα (σχήμα 3.79) με συνέπεια όμως να εμφανίζονται αρμονικές ώστε να προκαλούν ενοχλητικά βουητά.



Σχήμα 3.78



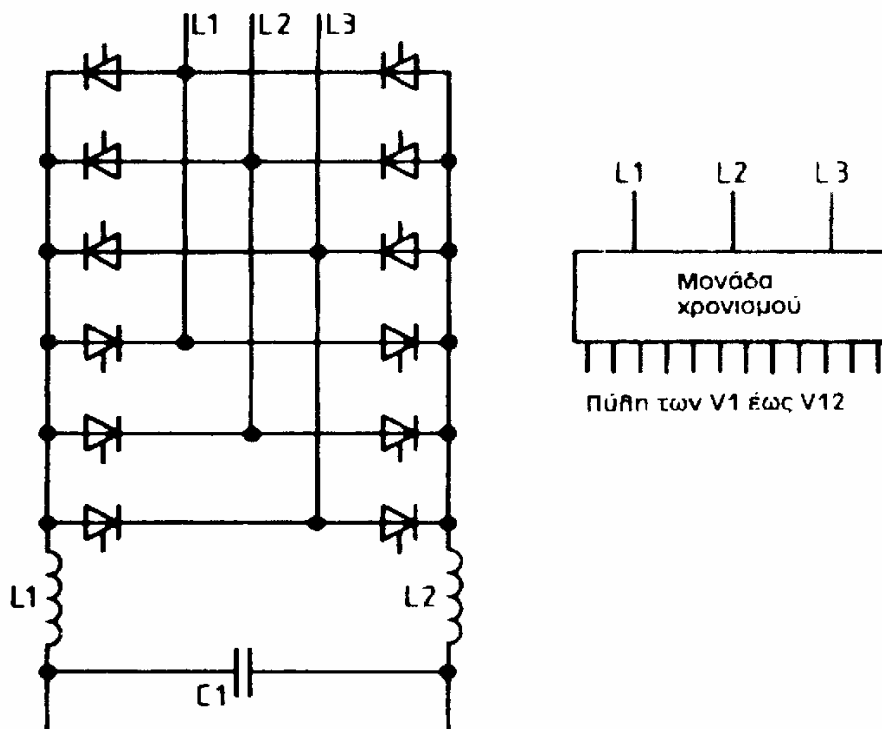
Σχήμα 3.79

Στον έλεγχο στροφών με ΑΔΠ η συμπεριφορά των κινητήρων είναι δυσμενής.

Στους V-αντιστροφείς (σχήμα 3.78) δεν είναι συνεχής η σύνδεση μεταξύ κινητήρα εξαιτίας του C1. Γι' αυτό το δίκτυο δεν έχει τη δυνατότητα να παρέχει πάντα την άεργο ισχύ. Πρέπει να πετυχαίνεται η διέλευση ρεύματος σε αντίθετη κατεύθυνση, μετά τη διακοπή των θυρίστορ του αμφίδρομου ανορθωτή. Έτσι συνδέονται διόδοι αντιπαράλληλα προς τα θυρίστορ. Αν χρησιμοποιηθούν θυρίστορ αναστροφής αγωγιμότητας, τότε δεν είναι απαραίτητοι (αναγκαίοι) οι διόδοι άεργου ισχύος.

Στο κύκλωμα του σχήματος 3.78 η λειτουργία κινητήρα είναι δυνατή στα τέσσερα τεταρτημόρια, παρόλο που δεν πραγματοποιείται επιστροφή ενέργειας. Αυτό το δημιουργεί το CTO-θυρίστορ V7 μαζί με την αντίσταση πέδησης R1. Αν πρέπει να πραγματοποιηθεί πέδηση του κινητήρα τότε τα θυρίστορ V1 μέχρι V6 δεν ελέγχονται ενώ τα θυρίστορ V8, V9, V12, V13, V16 και V17 ελέγχονται στη λειτουργία ανόρθωσης. Αν ελέγχεται το V7, τότε η R1 απορροφά την ενέργεια συνεχούς ρεύματος του ενδιάμεσου κυκλώματος, ώστε να συντελεί στην πέδηση του κινητήρα (πέδηση με αντίσταση).

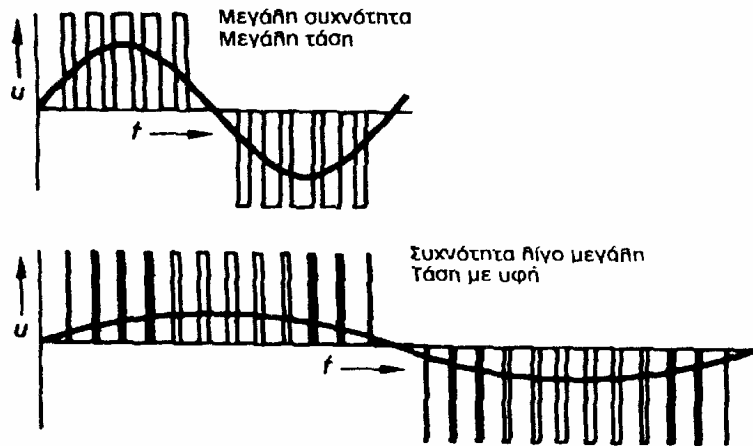
Κατά τη λειτουργία τεσσάρων τεταρτημορίων με επιστροφή ενέργειας πρέπει να προβλέπονται δύο κυκλώματα γέφυρας για τους ανορθωτές ρεύματος του δικτύου (σχήμα 3.80). Η αντίσταση πέδησης και το θυρίστορ της παραλείπονται. Το κύκλωμα αμφίδρομου ανορθωτή αντιστοιχεί στο κύκλωμα του σχήματος 3.78. Η μονάδα χρονισμού είναι απαραίτητη.



Σχήμα 3.80

Αντιστροφείας με διαμόρφωση εύρους παλμού (ΔΕΠ αντιστροφείας).

Στην περίπτωση που διατηρείται σταθερή η μέγιστη τιμή της ορθογωνικής τάσης - κατά τη διάρκεια της κάθε ημιπεριόδου σε έναν V-αντιστροφέα, ενώ το εύρος των παλμών προσαρμόζεται στις διάφορες απαιτήσεις - τότε αναφερόμαστε στη διαμόρφωση εύρους παλμού (ΔΕΠ) (σχήμα 3.81). Αν οι διακοπές μεταξύ των παλμών είναι μεγάλες τότε η μέση τιμή της τάσης είναι μικρή. Αντίθετα στις μικρές διακοπές μεταξύ των παλμών λαμβάνουμε μεγαλύτερη τάση.



Σχήμα 3.81

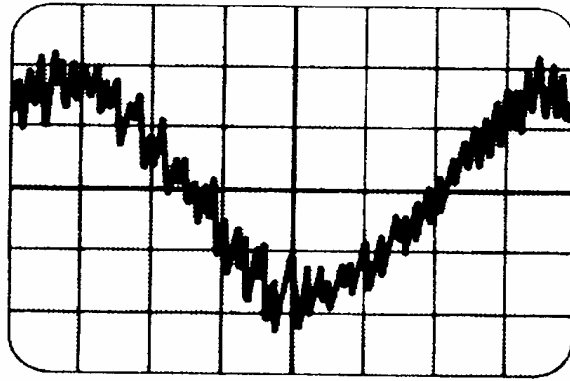
Στους αντιστροφείς με διαμόρφωση εύρους παλμού ο έλεγχος της τάσης πραγματοποιείται με ρύθμιση της διάρκειας διακοπής.

Η συχνότητα παλμού στο ΔΕΠ παραμένει συνήθως ίδια. Π.χ. 5 KHz. Παρόλα αυτά όμως, με τη διαμόρφωση εύρους παλμού είναι δυνατή και η ρύθμιση της συχνότητας, αν αλλάζεται ο αριθμός των τετραγωνικών παλμών στη διάρκεια της κάθε ημιπεριόδου. Αν σε μια περίοδο π.χ. υπάρχουν 8 τετραγωνικοί παλμοί, τότε η συχνότητα της βασικής κυματομορφής είναι $5000 \text{ Hz}/8=625 \text{ Hz}$. Στους 12 τετραγωνικούς παλμούς σε μία περίοδο είναι $5000\text{Hz}/12=417 \text{ Hz}$.

Στους αντιστροφείς με διαμόρφωση εύρους παλμού ο έλεγχος συχνότητας πραγματοποιείται με τον έλεγχο του αριθμού παλμών με την ίδια πολικότητα.

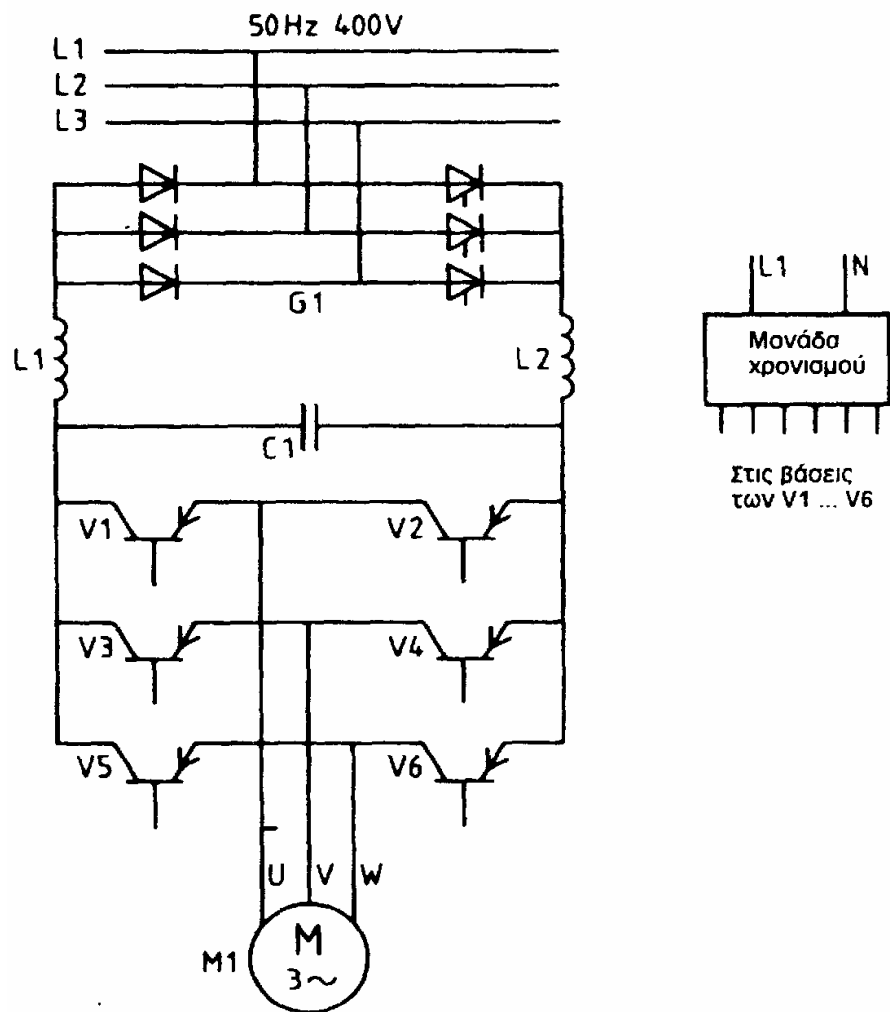
Υπάρχει ένα ΔΕΠ, στο οποίο κατά τη διάρκεια της μιας ημιπεριόδου με την ίδια συχνότητα παλμού το εύρος του παλμού μεταβάλλεται περιοδικά και μάλιστα στη μηδενική θέση είναι στενότερο απ' ό τι στο μέσο των πακέτων των παλμών. Συνέπεια αυτού είναι η προσομοίωση της μέσης τιμής της τάσης καλύτερα με την ημιτονοειδή.

Η μορφή του ρεύματος του κινητήρα στον ΔΕΠ εξαρτάται από τον έλεγχο του αντιστροφέα. Στους μικρούς ελέγχους (στενός παλμός) το ρεύμα του κινητήρα είναι σχεδόν ημιτονοειδές. Στον ημιέλεγχο (διάρκεια παλμού = διάρκεια διακοπής) εμφανίζονται ασθενείς αρμονικές (σχήμα 3.82). Στον πλήρη έλεγχο οι αρμονικές είναι τόσο ισχυρές όσο και στις ΑΔΠ (διαμόρφωση πλάτους παλμών).



Σχήμα 3.82

Η διαμόρφωση εύρους παλμού πραγματοποιείται με κυκλώματα thyristor και χρησιμοποιείται σε ισχύς μέχρι 5000 KVA. Το τμήμα ισχύος των κυκλωμάτων είναι όπως και στους μετατροπείς παλμών με ΑΔΠ, π.χ. σχήμα 3.83.



Σχήμα 3.83

Οι μονάδες χρονισμού για τη ΔΕΠ έχουν μεγαλύτερο κόστος από τη ΑΔΠ. Επίσης και η διακοπή των τρανζίστορ στοιχίζει περισσότερο στη ΔΕΠ, επειδή πρέπει να παρεμβάλλονται συχνότερα.

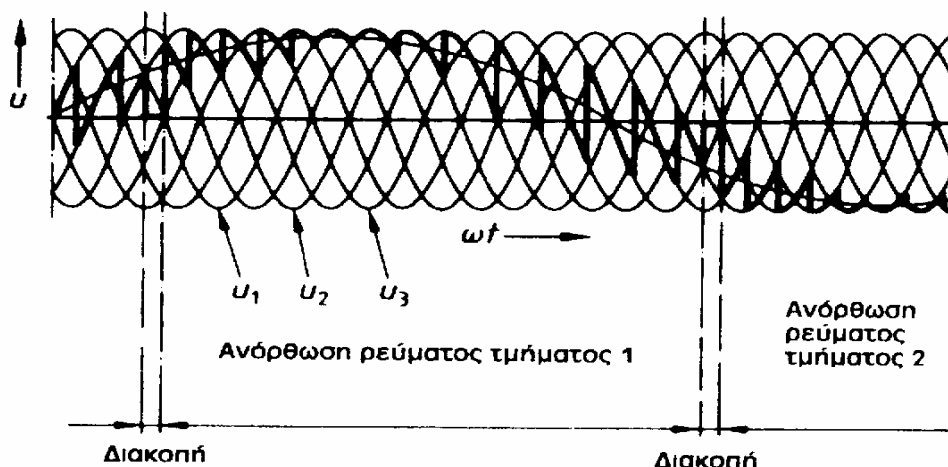
Η διακοπή του συνεχούς ρεύματος με τρανζίστορ είναι, αντίθετα, απλή. Γι' αυτό σε μικρές και μέσες ισχύς (μέχρι περίπου 70 KVA) χρησιμοποιούνται αντιστροφείς παλμών-τρανζίστορ με ΔΕΠ.

Από τη συνεχή τάση ενός ανορθωτή ρεύματος δικτύου κερδίζεται μια ακολουθία ορθογωνικών παλμών με ένα κύκλωμα γέφυρας από τρανζίστορ. Αν π.χ. πρέπει να έρχεται στους ακροδέκτες σύνδεσης U και V του κινητήρα του σχήματος 2 μία διαδοχή παλμών όπως του σχήματος 2 πάνω, της προηγούμενης σελίδας, τότε τα τρανζίστορ V2 και V3 πρέπει να ελέγχονται πρώτα τέσσερις φορές για αγωγιμότητα και έπειτα για την αποκοπή. Κατόπιν μένουν σε φραγμό (αποκοπή) οι V2 και V3, V4 και V1 ελέγχονται μαζί στην αρχή τέσσερις φορές για αγωγή και κατόπιν για αποκοπή (φραγμό). Με αντίστοιχο τρόπο, αλλά σε μετάθεση 120° ελέγχονται τα τρανζίστορ για την τροφοδοσία οι ακροδέκτες VW και WU.

Οι αντιστροφείς παλμού με ΔΕΠ κατασκευάζονται όπως ο αντιστροφέας - θυρίστορ και όπως ο αντιστροφέας - τρανζίστορ.

Άμεσος αντιστροφέας.

Στον άμεσο αντιστροφέα παράγονται τρεις κατά προσέγγιση ημιτονοειδείς τάσεις χωρίς παράκαμψη με μικρότερη συχνότητα από αυτή του δικτύου μέσα από ένα ενδιάμεσο κύκλωμα συνεχούς ρεύματος (σχήμα 3.84). Για την κάθε μία τάση εξόδου αποκόπτονται τμήματα των τριών τάσεων εισόδου (σχήμα 3.84), γι' αυτό στην κάθε μια από τις τρεις τάσεις εξόδου πρέπει να βρίσκεται το συνολικό τριφασικό δίκτυο. Ο μετασχηματιστής του άμεσου αντιστροφέα πρέπει να έχει τρία τυλίγματα εξόδου με τρεις φάσεις το καθένα. Υπάρχει περίπτωση χρησιμοποίησης τριών κανονικών τριφασικών μετασχηματιστών παράλληλα συνδεδεμένων στην πλευρά εισόδου. Στα τυλίγματα εξόδου του μετασχηματιστή ανόρθωσης υπάρχουν συνολικά 6 κυκλώματα γεφυρών Β6 που συνδέονται με τρανζίστορ. Συνολικά υπό έλεγχο βρίσκονται 36 τρανζίστορ.



Σχήμα 3.84

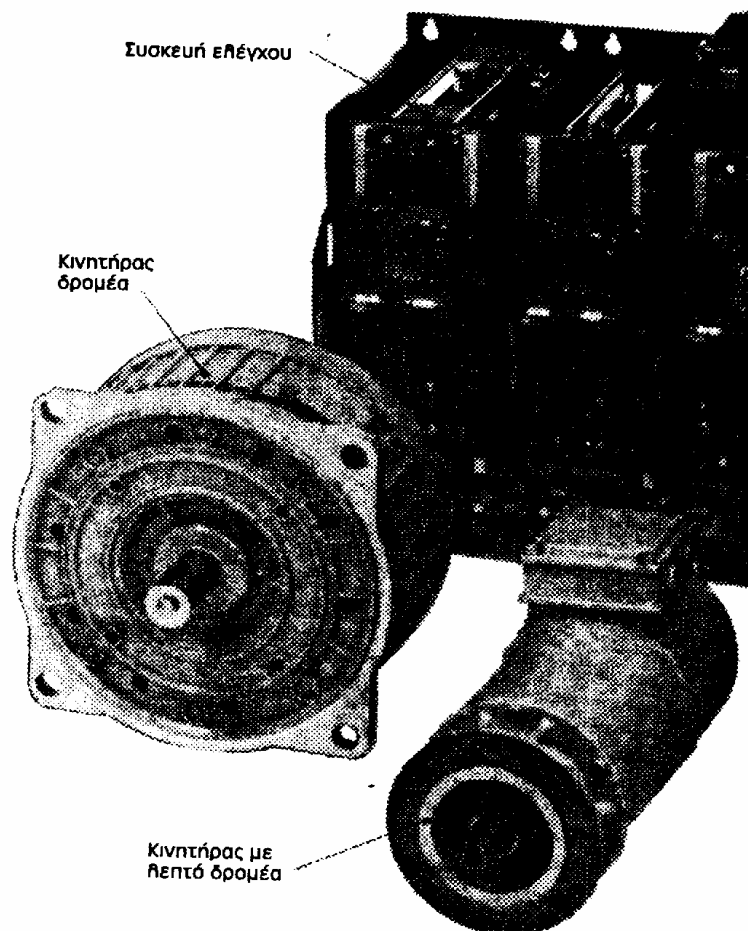
Οι άμεσοι αντιστροφείς καταναλώνουν ένα ογκώδες (εκτεταμένο) τμήμα ισχύος και απαιτούν ένα σύνθετο έλεγχο.

Γι' αυτό οι αντιστροφείς - παρά τη μεγάλη απόδοση τους - χρησιμοποιούνται μόνο για τον έλεγχο στροφών πολύ μεγάλων ασύγχρονων κινητήρων ή πολύ μεγάλων σύγχρονων κινητήρων.

3.11 Σερβοκινητήρες.

Γενικά

Οι σερβοκινητήρες είναι κινητήρες που χρησιμοποιούνται για βοηθητικούς σκοπούς. Οι σερβοκινητήρες δεν κινούν φυσικά την καθ' αυτή μηχανή εργασίας, αλλά μόνον τέτοια τμήματα (μέρη), των οποίων οι ενεργειακές ανάγκες είναι μικρότερες από τις ενεργειακές ανάγκες του κινητήρα κίνησης. Οι σερβοκινητήρες έχουν ονομαστική ισχύ συνήθως μέχρι 5 KW και είναι κινητήρες συνεχούς καθώς επίσης και κινητήρες τριφασικού ρεύματος. Η τροφοδοσία ρεύματος τους πραγματοποιείται συνήθως με την απεριόριστη ηλεκτρονικά κυκλώματα (σχήμα 3.85).



Σχήμα 3.85

Οι σερβοκινητήρες χρησιμοποιούνται για βοηθητική κίνηση των μηχανών εργασίας. Η τροφοδοσία τους πραγματοποιείται μ' ένα ηλεκτρονικό κύκλωμα.

Οι σερβοκινητήρες χρησιμοποιούνται συνήθως για μηχανισμό προώθησης και την κίνηση για τον προσδιορισμό θέσης των ψηφιακά ελεγχόμενων εργαλειομηχανών. Το ξεχωριστό είδος των μηχανών αυτών καθορίζει την απαίτηση που προσφέρουν οι σερβοκινητήρες.

- Μεγάλη ροπή στρέψης μέχρι περίπου 40 Nm στον άξονα του κινητήρα.
- Μικρής διάρκειας καταπόνηση μέχρι το διπλάσιο της ροπής στρέψης.
- Ανοδικότητα στροφών, για να παραμένει η ταχύτητα σε διαφορετικά φορτία η ίδια. Ρύθμιση στροφών από 1:10.000.

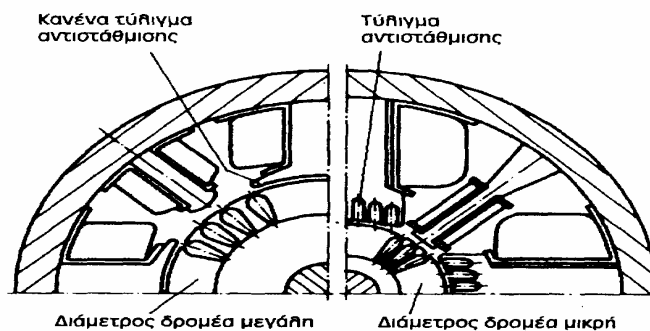
Δυνατότητες να κινείται σε ελάχιστα στοιχεία διανυσμάτων.

- Μικρή ροπή αδρανείας, για να μπορεί η κίνηση να ακολουθεί χωρίς καθυστέρηση το σήμα.
- Δυνατότητα ανακατασκευής σε μια ταχογεννήτρια ως μετρητή στροφών.

Οι απαιτούμενες ιδιότητες ενός σερβοκινητήρα είναι δυνατόν να πραγματοποιηθούν με κινητήρες συνεχούς ή τριφασικού ρεύματος, ανάλογα φυσικά με την κατασκευή.

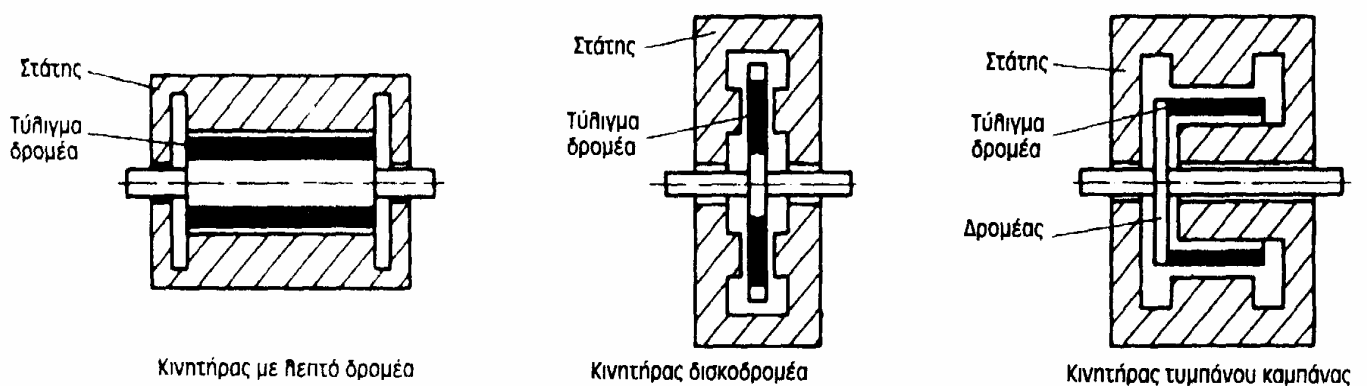
Σερβοκινητήρες ως κινητήρες συνεχούς ρεύματος.

Για την επίτευξη μιας μεγάλης ροπής στρέψης-υπερφόρτισης στους σερβοκινητήρες-συνεχούς ρεύματος πρέπει το μαγνητικό πεδίο να είναι ιδιαίτερα ισχυρό (σχήμα 3.86). Στη δυνατή υπερφόρτιση ο αναστροφέας στο συλλέκτη γίνεται κρίσιμος. Γι' αυτό στους σερβοκινητήρες-συνεχούς ρεύματος τοποθετείται πάντα ένα τύλιγμα αντιστάθμισης. Εκτός αυτού η διάμετρος του τύμπανου κατασκευάζεται πολύ πιο μικρή από τη διάμετρο των κανονικών κινητήρων συνεχούς ρεύματος. Έτσι η ροπή αδρανείας ενός σερβοκινητήρα-συνεχούς ρεύματος είναι σχετικά πολύ μικρή. Με τη μείωση της διαμέτρου του τύμπανου εξοικονομείται η απαραίτητη θέση για το ιδιαίτερα σημαντικό τύλιγμα διέγερσης. Οι σερβοκινητήρες-συνεχούς ρεύματος εξαιτίας της μικρής διαμέτρου του τύμπανου είναι λεπτότεροι από τους άλλους κινητήρες συνεχούς ρεύματος ίσης ισχύος. Αυτό απαιτείται, επειδή για ίδιο μήκος τύμπανου η ροπή στρέψης μειώνεται με τη διάμετρο του τύμπανου.



Σχήμα 3.86

Οι σερβοκινητήρες-συνεχούς ρεύματος έχουν λεπτή κατασκευή ως κινητήρες συνεχούς ρεύματος, με μικρή διάμετρο τύμπανου και ισχυρό μαγνητικό πεδίο, και διαθέτουν τύλιγμα αντιστάθμισης. Για σερβοκινητήρες ιδιαίτερα γρήγορης αντίδρασης προσφεύγουμε στους κινητήρες συνεχούς ρεύματος, των οποίων το τύμπανο δεν περιέχει σίδηρο εκτός από τον άξονα (σχήμα 3.87). Κινητήριες μηχανές του είδους αυτού υπάρχουν για ισχύ της τάξης του 1 KW.



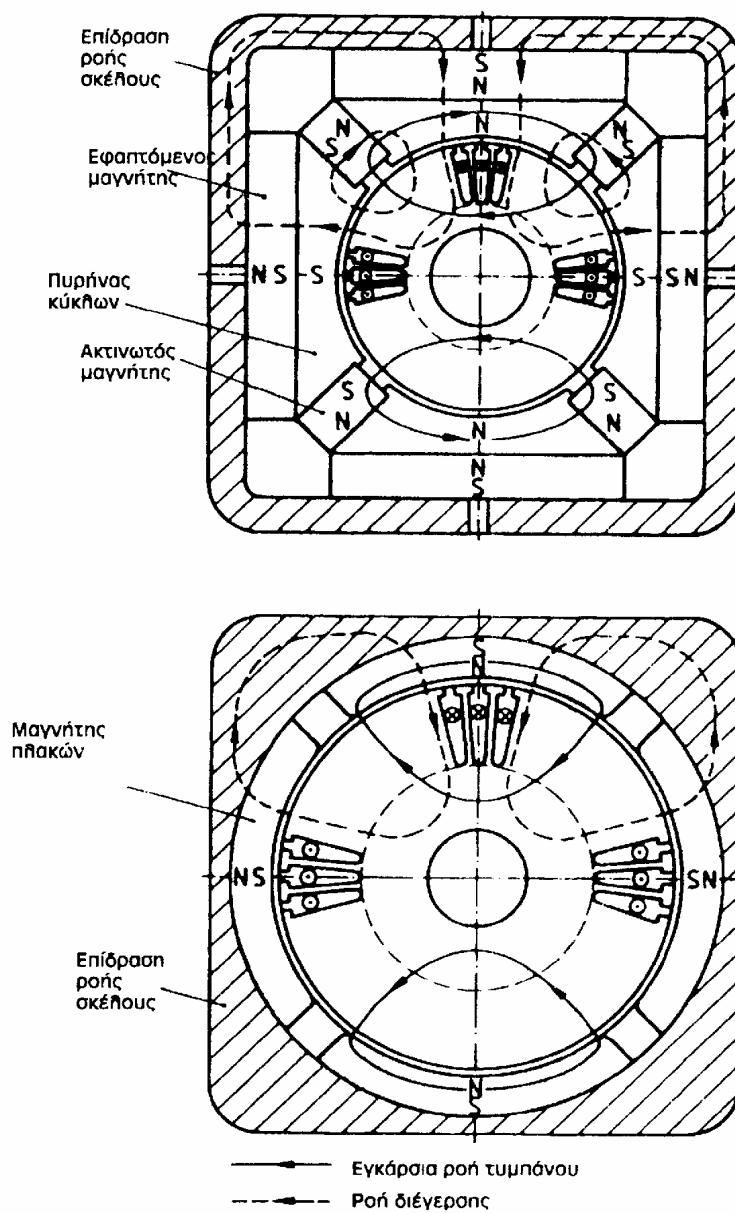
Σχήμα 3.87

Ένας κινητήρας λεπτού δρομέα έχει μικρή μάζα αδράνειας σε σχέση με έναν κινητήρα κανονικού δρομέα. Το τύλιγμα δεν οδηγείται πλέον σε αυλάκια αλλά περιτυλίγεται στον άξονα του δρομέα. Έτσι το πηνίο τυλίγεται ομοιόμορφα κατά μήκος του δρομέα. Αυτό οδηγεί σε μια πολύ ήρεμη κίνηση στις μικρές στροφές. Στον κινητήρα αυτό, στη θέση ενός κυλινδρικού δρομέα χρησιμοποιείται ένας λεπτός δίσκος χωρίς πυρήνα και μικρή μάζα αδράνειας. Στον κινητήρα με δρομέα καμπάνας ως δρομέας χρησιμοποιείται ένα χυτό τύλιγμα μορφής καμπάνας καλυμμένο με πλαστικό ενώ ο πυρήνας είναι ακίνητος. Οι κινητήρες των κατασκευών αυτών επιτυγχάνουν κατά την επιτάχυνση από τη θέση ηρεμίας τους, τις ονομαστικές στροφές των 3000 1/min σε χρόνο 10 ms περίπου.

Ιδιαίτερα γρήγορης αντίδρασης είναι οι σερβοκινητήρες-συνεχούς ρεύματος μικρής ισχύος των οποίων το τύμπανο εκτός από τον άξονα δεν περιέχει άλλο σίδηρο.

Στους σερβοκινητήρες συνεχούς ρεύματος, στη θέση της διέγερσης συνεχούς ρεύματος με το τύλιγμα πεδίου, χρησιμοποιείται διέγερση μόνιμου μαγνήτη (σχήμα 1). Στη διέγερση με μόνιμους μαγνήτες οι μαγνητικές γραμμές πεδίου του στάτη προέρχονται από τους μόνιμους μαγνήτες και όχι από ένα τύλιγμα διέγερσης. Από κατασκευαστικής πλευράς διακρίνουμε τη δομή διέγερσης με μόνιμο μαγνήτη με συγκέντρωση ροής και τη δομή μαγνήτη σε κυκλικές ζώνες (σχήμα 1). Στη δομή με συγκέντρωση ροής ο στάτης διαθέτει πυρήνα από μαγνητομαλακά υλικά τα οποία επιδρούν στη δημιουργία ομοιόμορφης μαγνητικής ροής. Με τη μορφή των πέλδων των πόλων επιτυγχάνεται η εκκίνηση του δρομέα χωρίς κρούση. Τα πέλδια των πόλων σχηματίζουν και ανάστροφη ροή για την εγκάρσια μετατόπιση του πεδίου του τύμπανου. Αυτό έχει σαν συνέπεια, ακόμα και σε μεγάλα φορτία να μην είναι δυνατή η απομαγνητοποίηση των κυρίως πόλων.

Εξαιτίας της κατασκευής με την τετραγωνική μορφή είναι δυνατή η τοποθέτηση των μόνιμων μαγνητών σε μορφή πλακών, που έχουν εύκολη την επεξεργασία τους. Οι ακτινωτοί μαγνήτες (σχήμα 3.88) επιδρούν, ώστε η ροή διέγερσης να εισχωρεί μέχρι το εσωτερικό του τύμπανου. Κατά τη χρήση μαγνητών κυκλικών τόξων (ζωνών) οι πόλοι διέγερσης σχηματίζονται με τομείς μαγνητικών πλακών. Με την κατάλληλη ένταση μαγνήτη είναι δυνατό, να υπάρχει εκκίνηση του δρομέα χωρίς κρούση. Γι' αυτό προς το τέλος οι μαγνητικές πλάκες μαγνητίζονται ασθενώς. Κατά τη χρήση πλακών μαγνήτη πρέπει να φροντίζεται η ύπαρξη ενός μεγάλου διάκενου αέρος, ώστε να είναι μικρές οι αντεπιδράσεις από το εγκάρσιο πεδίο του τύμπανου προς το πεδίο διέγερσης. Στην περίπτωση πολύ μεγάλων φορτίων υπάρχει ο κίνδυνος της απομαγνήτισης των πλακών μαγνήτη.

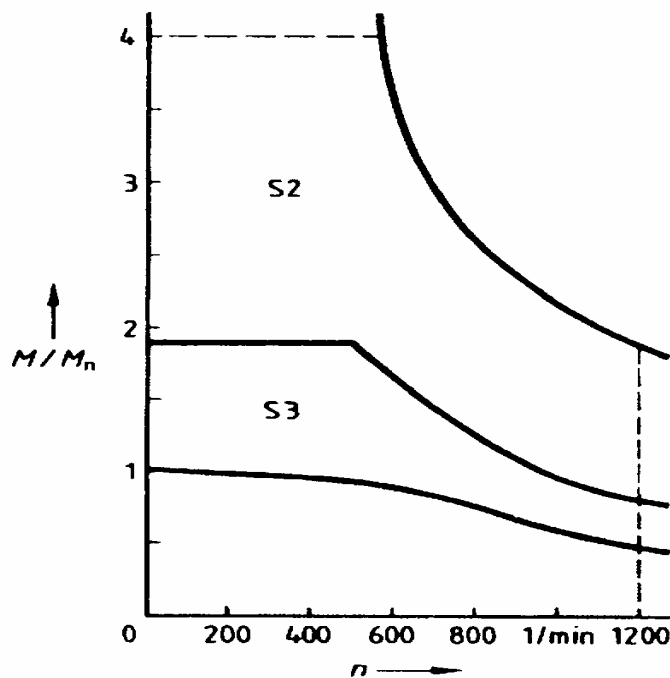


Σχήμα 3.88

Στους σερβοκινητήρες συνεχούς ρεύματος με διέγερση μόνιμων μαγνητών, η συγκέντρωση ροής πραγματοποιείται με ακτινωτούς ή κυκλικών τόξων μαγνήτες.

Οι σερβοκινητήρες-συνεχούς ρεύματος με διέγερση μόνιμων μαγνητών κατασκευάζονται συνήθως χωρίς πόλους αναστροφής. Γι' αυτό, στις μεγάλες στροφές πρέπει να χρησιμοποιείται ένα κύκλωμα προστασίας, στις συσκευές ανόρθωσης προκειμένου να μην υπάρχει διέλευση μεγάλων ρευμάτων. Οι σερβοκινητήρες-συνεχούς ρεύματος που ελέγχονται με στοιχεία τρανζίστορ, ακολουθούν την εντολή ελέγχου σχεδόν χωρίς επιβράδυνση. Αντίθετα αν ο έλεγχος γίνεται με θυρίστορ υπάρχει ένας νεκρός χρόνος (χρόνος μέχρι την εκτέλεση της εντολής) της τάξης των 10 ms. Ο έλεγχος στροφών των σερβοκινητήρων-συνεχούς ρεύματος πραγματοποιείται με τη ρύθμιση της τάσης του τύμπανου. Η ροπή στρέψης του σερβοκινητήρα εξαρτάται από τις ρυθμιζόμενες στροφές και το είδος λειτουργίας του κινητήρα.

Στη διαρκή λειτουργία S1 στις χαμηλές στροφές, η ροπή στρέψης είναι τόσο μεγάλη όσο και η ονομαστική ροπή στρέψης του κινητήρα (σχήμα 3.89). Στις υψηλές στροφές στη διαρκή λειτουργία η ροπή στρέψης μειώνεται λίγο. Αν ο σερβοκινητήρας εργάζεται σε διακοπτόμενη λειτουργία S3, η ροπή στρέψης είναι σημαντικά μεγάλη (σχήμα 3.89). Αν ο σερβοκινητήρας εργάζεται σε βραχεία λειτουργία S2, ανάλογα με τις στροφές, είναι δυνατόν η ροπή στρέψης να φτάσει μέχρι το τετραπλάσιο της ονομαστικής ροπής στρέψης.



Σχήμα 3.89

Η μεγαλύτερη ροπή στρέψης των σερβοκινητήρων συνεχούς ρεύματος εμφανίζεται στη λειτουργία μικρής διάρκειας (βραχεία λειτουργία), ενώ στις χαμηλές στροφές η ροπή στρέψης είναι δυνατόν να φθάσει μέχρι το τετραπλάσιο της ονομαστικής ροπής στρέψης.

3.12 Ηλεκτρική πέδηση.

Στους ηλεκτρικούς κινητήρες, ανάλογα με το είδος του φορτίου που κινούν, συμβαίνει πολλές φορές να μεσολαβεί ένα σημαντικό χρονικό διάστημα από τη στιγμή που θα διακόψουμε το ρεύμα που τους τροφοδοτεί, μέχρι να σταματήσει ο κινητήρας. Όταν αυτό είναι ενοχλητικό για την εγκατάσταση που κινεί ο κινητήρας τότε για το γρήγορο σταμάτημά του ή εφαρμόζουμε την μηχανική πέδηση με μια μηχανική πέδη ή την ηλεκτρική πέδηση από τον ίδιο κινητήρα.

Στην ηλεκτρική πέδηση, για να καταναλώσουμε την κινητική ενέργεια που έχει ο κινητήρας και το κινούμενο μηχανήμα τη στιγμή που διακόπτουμε την τροφοδότηση, μετατρέπουμε προσωρινά τον κινητήρα σε γεννήτρια με φορτίο. Έτσι η κινητική ενέργεια μετατρέπεται σε ηλεκτρική, που καταναλώνεται στο φορτίο.

Ένας άλλος τρόπος να γίνει η παραπάνω μετατροπή είναι, μετά τη διακοπή της τροφοδοτήσεως του κινητήρα, να συνδεθεί στα άκρα του επαγωγικού του τυμπάνου μια ωμική αντίσταση. Ο κινητήρας που εξακολουθεί να περιστρέφεται, λειτουργεί στο διάστημα αυτό σαν γεννήτρια και παράγει ηλεκτρική ενέργεια, που καταναλώνεται σαν θερμότητα πάνω στην ωμική αντίσταση. Οι δυνάμεις πεδήσεως, που δημιουργούνται στον κινητήρα όταν εργάζεται σαν γεννήτρια συντελούν στο γρήγορο σταμάτημα τόσο του κινητήρα όσο και το μηχανήματος που κινεί.

Ένας άλλος τρόπος να πραγματοποιηθεί η ηλεκτρική πέδηση είναι να μην αποσυνδεθεί από το δίκτυο τροφοδοτήσεως ο κινητήρας κατά τη διάρκεια που θέλουμε να γίνει η πέδηση. Τότε, με ένα τρόπο που έχει προβλεφθεί από τον κατασκευαστή, αυξάνουμε τη διέγερση του κινητήρα, με συνέπεια να αυξηθεί η ηλεκτρεγερτική του δύναμη επάνω από την τάση του δικτύου τροφοδοτήσεως. Έτσι, ο κινητήρας λειτουργεί πάλι σαν γεννήτρια που τροφοδοτεί με ηλεκτρική ενέργεια το δίκτυο, με αποτέλεσμα να έχουμε πέδηση της μηχανής. Ο τρόπος αυτός εφαρμόζεται π.χ. στα ηλεκτρικά τρένα, όταν κινούνται σε κατηφόρα.

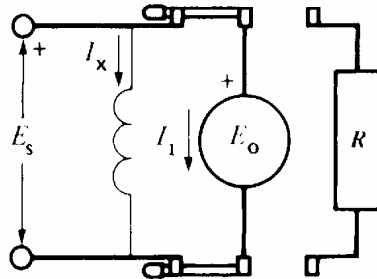
Οι δύο παραπάνω τρόποι πέδησης των κινητήρων περιγράφονται παρακάτω με τις επικρατούσες ονομασίες τους που είναι :

A. Dynamic brake

B. Plugging

A. Dynamic brake.

Θεωρούμε έναν κινητήρα παράλληλης διέγερσης που το πεδίο του συνδέεται κατευθείαν στην πηγή E_s όπως επίσης και το επαγωγίμο στην ίδια πηγή. Ένας μεταγωγικός διακόπτης μας δίνει τη δυνατότητα σύνδεσης του επαγωγίμου με την πηγή ή με μια εξωτερική αντίσταση R .

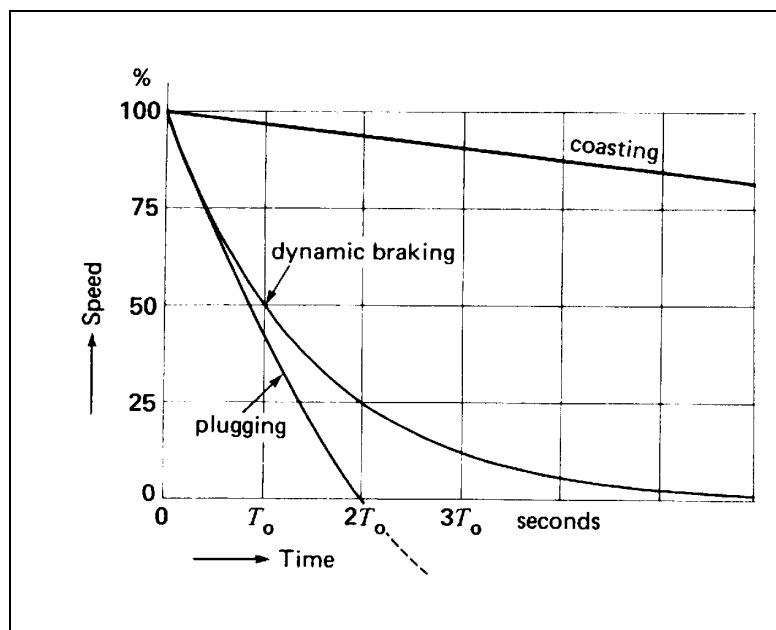


Σχήμα 3.90

Με αυτό το plugging κύκλωμα μια αντίθετη ροπή αναπτύσσεται ακόμα και όταν ο κινητήρας σταματήσει να περιστρέφεται (για $n=0$, $E_o=0$, αλλά $I_2=Es/R$ που είναι περίπου το μισό της αρχικής του τιμής).

Όσο γρήγορα σταματήσει ο κινητήρας να περιστρέφεται τόσο γρήγορα πρέπει να ανοίξουμε το κύκλωμα του επαγωγίμου του κινητήρα γιατί αλλιώς θα αρχίσει να περιστρέφεται στην αντίθετη διεύθυνση.

Το παρακάτω διάγραμμα δείχνει τις χαρακτηριστικές για διάφορους τρόπους σταματήματος του κινητήρα.



Δυναμική πέδηση και μηχανική σταθερά. (Dynamic braking and mechanical time constant)

Όπως αναφέρθηκε η ταχύτητα ελαττώνεται εκθετικά με το χρόνο όταν ένας κινητήρας σταματά με δυναμική πέδηση. Μπορούμε επομένως να πούμε πως μια μηχανική χρονική σταθερά T είναι αντίστοιχα της ηλεκτρικής χρονικής σταθεράς ενός πυκνωτή που εκφορτίζεται πάνω σε μια αντίσταση. Στην πραγματικότητα T είναι ο χρόνος που χρειάζεται για να πέσει η ταχύτητα ενός κινητήρα στο 36.8% της αρχικής τιμής.

Ωστόσο είναι πολύ ευκολότερο να σχεδιάσουμε τις χαρακτηριστικές στροφών-χρόνου ορίζοντας μια νέα χρονική σταθερά T_0 τέτοια ώστε να δηλώνει το χρόνο που χρειάζεται για να πέσει η ταχύτητα στο 50% της κανονικής τιμής της.

Μια σχέση που συνδέει τη χρονική σταθερά T και τη «μισή» χρονική σταθερά T_0 είναι η :

$$T_0 = 0.693T$$

Ακόμα αποδεικνύεται ότι :

$$T_0 = \frac{Jn_1^2}{131.5P_1}, \text{ όπου}$$

T_0 : ο χρόνος που χρειάζεται για να μειωθεί η ταχύτητα στο μισό της αρχικής τιμής.

J : στιγμή αδράνειας των περιστρεφόμενων μερών του κινητήρα (Kg m^2).

n_1 : αρχική ταχύτητα του κινητήρα όταν αρχίζει η πέδηση (r/min).

P_1 : αρχική ισχύς που παρέχεται από τον κινητήρα στην αντίσταση πέδησης (W).

131.5: σταθερά $[(30/\pi)^2 / \log_2 2]$.

0.693: σταθερά ($\log_2 2$).

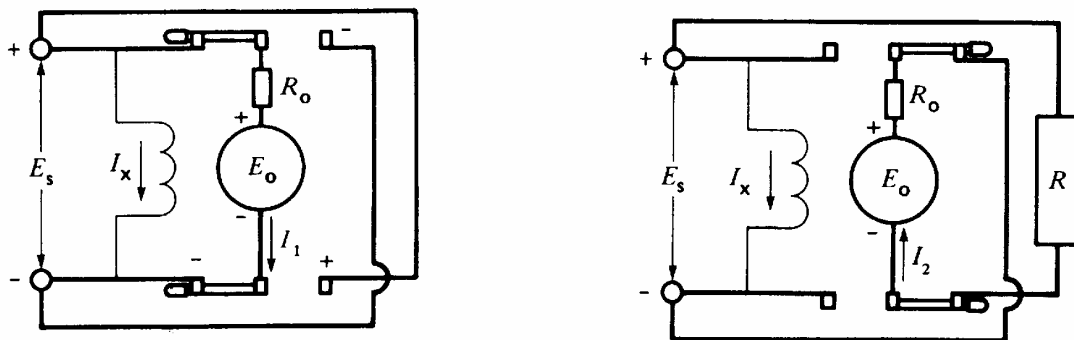
Η σχέση αυτή στηρίζεται στην υπόθεση ότι η πέδηση οφείλεται εξ ολοκλήρου στην ενέργεια που καταναλίσκεται στην αντίσταση πέδησης. Στην πραγματικότητα όμως έχουμε και μια άλλη ροπή πέδησης που οφείλεται στις τριβές με αποτέλεσμα ο χρόνος πέδησης να είναι ακόμα μικρότερος από αυτόν που δίνει η παραπάνω σχέση.

Όταν ο κινητήρας περιστρέφεται κανονικά η διεύθυνση του ρεύματος I_1 και η πολικότητα της E_0 (ΑΗΕΔ) είναι αυτές που φαίνονται στο σχήμα παραπάνω. Αν αμελήσουμε την πτώση τάσης IR του επαγωγίμου τότε $E_0 = E_s$. Αν ξαφνικά ανοίξουμε το διακόπτη ο κινητήρας θα εξακολουθεί να περιστρέφεται και η ταχύτητά του σταδιακά θα μειώνεται λόγω των τριβών. Από την άλλη μεριά αφού το παράλληλο πεδίο του κινητήρα εξακολουθεί να υπάρχει η επαγωγίμη τάση E_0 θα συνεχίσει να υπάρχει μειωμένη με τον ίδιο ρυθμό όπως η ταχύτητα. Δηλαδή ο κινητήρας είναι τώρα μια γεννήτρια που το επαγωγίμο της είναι ένα ανοικτό κύκλωμα.

Αν τώρα κλείσουμε το διακόπτη προς τη μεριά της εξωτερικής αντίστασης το επαγωγίμο συνδέεται ξαφνικά με την αντίσταση με αποτέλεσμα η τάση E_0 να παράγει ένα ρεύμα επαγωγίμου I_2 . Το ρεύμα αυτό ρέει στην αντίθετη διεύθυνση από αυτή του I_1 επομένως μια αντίθετη ροπή αναπτύσσεται η οποία εξαρτάται από το ρεύμα I_2 . Η αντίθετη αυτή ροπή είναι η αιτία για ένα γρήγορο αλλά ομαλό σταμάτημα του κινητήρα. Στην πράξη η αντίσταση R έχει τέτοια τιμή που το I_2 να είναι διπλάσιο του I_1 επομένως και η αντίθετη ροπή να είναι διπλάσια της κανονικής

B. Plugging.

Με τη μέθοδο αυτή το σταμάτημα του κινητήρα είναι ακόμα πιο γρήγορο και στηρίζεται στην ξαφνική αλλαγή του ρεύματος του επαγωγίμου αντιστρέφοντας τα άκρα της πηγής.

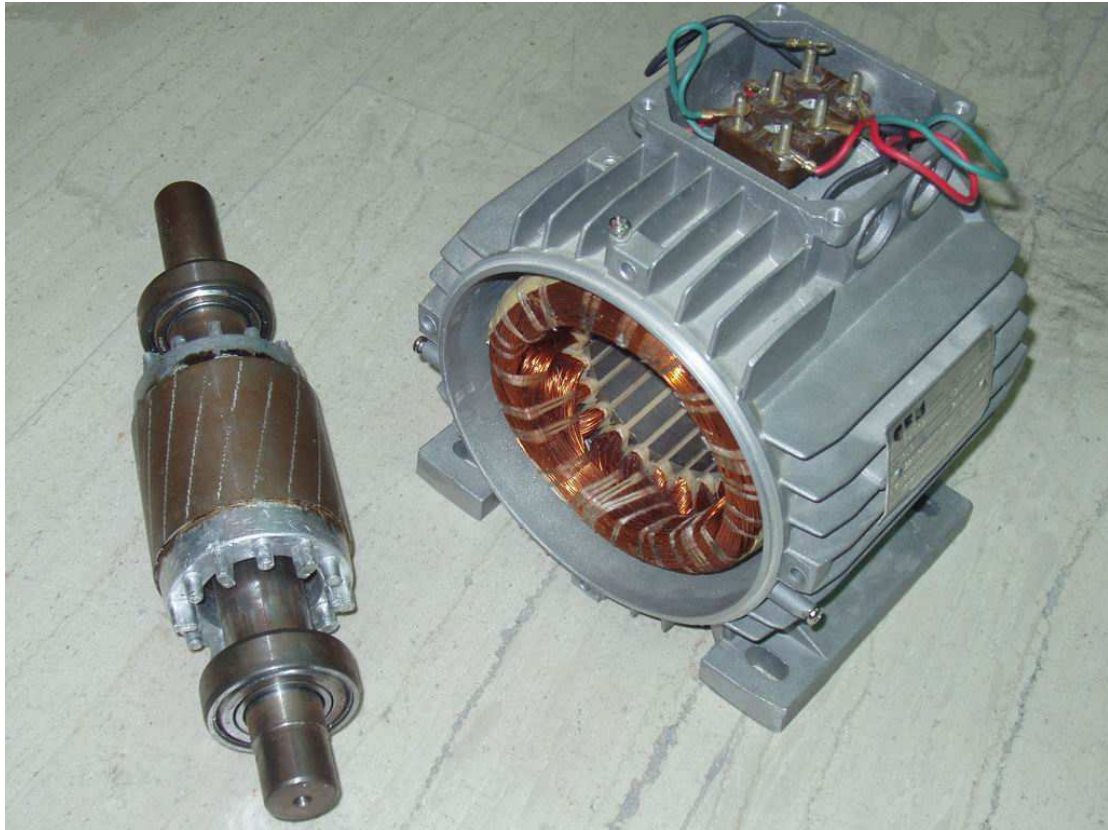


Σχήμα 3.91

$$\text{Υπό κανονικές συνθήκες : } I_1 = \frac{E_s - E_0}{R_0}$$

Αν ξαφνικά αντιστρέψουμε τα άκρα της πηγής, η τάση που ενεργεί στο κύκλωμα του επαγωγίμου γίνεται $(E_0 + E_s)$ δηλαδή η E_0 δεν είναι πλέον ΑΗΕΔ αλλά δρα αθροιστικά στο κύκλωμα. Η ολική αυτή τάση παράγει τώρα ένα ρεύμα που είναι ίσως 100 φορές μεγαλύτερο από ρεύμα πλήρους φορτίου του επαγωγίμου. Το ρεύμα αυτό ίσως στην αρχή να δημιουργήσει ένα τόξο (arc) στο επαγωγίμο με αποτέλεσμα την καταστροφή του. Για το λόγο αυτό τοποθετούμε την αντίσταση R σε σειρά με το αντίστροφο αυτό κύκλωμα. Όπως στη δυναμική πέδηση (Dynamic braking) η εκλογή μιας αντίστασης έχει σαν στόχο τον περιορισμό του ρεύματος I_2 στο διπλάσιο I_1 έτσι κι εδώ η αντίσταση εκλέγεται για να είναι το I_2 διπλάσιο του ρεύματος πλήρους φορτίου.

Παρακάτω βλέπουμε διάφορους τύπους κινητήρων.





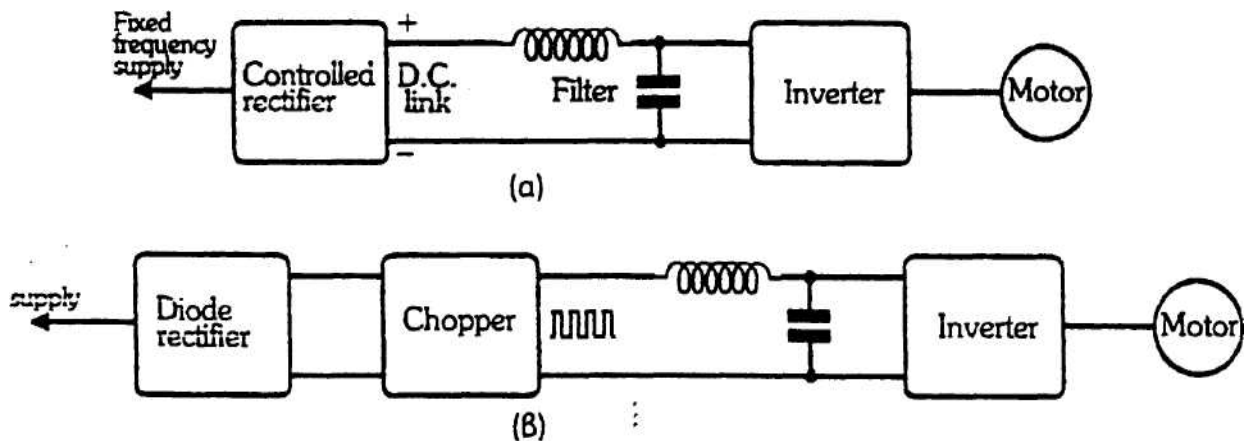
Κεφάλαιο 4^ο

4.1 Άλλα κυκλώματα ηλεκτρονικών ισχύος για τον έλεγχο της ταχύτητας.

Στο κεφάλαιο αυτό θα δοθούν και κάποια άλλα κυκλώματα για τον έλεγχο της ταχύτητας των επαγωγικών κινητήρων χρησιμοποιώντας ημιαγωγά στοιχεία ισχύος.

4.2 Έλεγχος ταχύτητας με αντιστροφή σταθερής τάσης.

Το κύκλωμα αυτό κάνει έλεγχο της ταχύτητας ενός επαγωγικού κινητήρα βραχυκυκλωμένου δρομέα. Ο αναστροφέας έχει γωνία έναυσης του κάθε thyristor 180° .

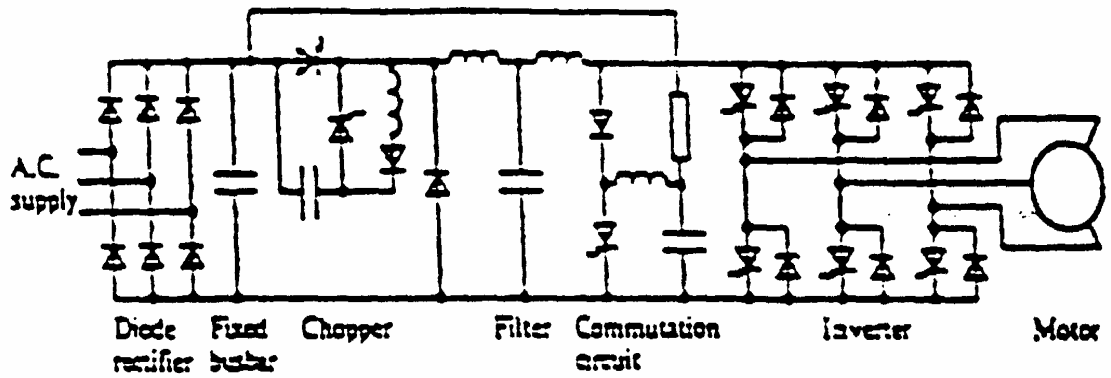


Σχήμα 4.1

Ρύθμιση τάσης με αναστροφή ημπετραγωνικού κύματος
α) Από ελεγχόμενο ανορθωτή β) Από Chopper

Για την τροφοδότηση του αναστροφέα μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε ένα ελεγχόμενο ανορθωτή, για σταθερή συχνότητα τροφοδότησης, ή ένα chopper που τροφοδοτείται από ένα ανορθωτή διόδων, για σταθερή τάση. Οι δύο αυτές διατάξεις φαίνονται στο παραπάνω σχήμα

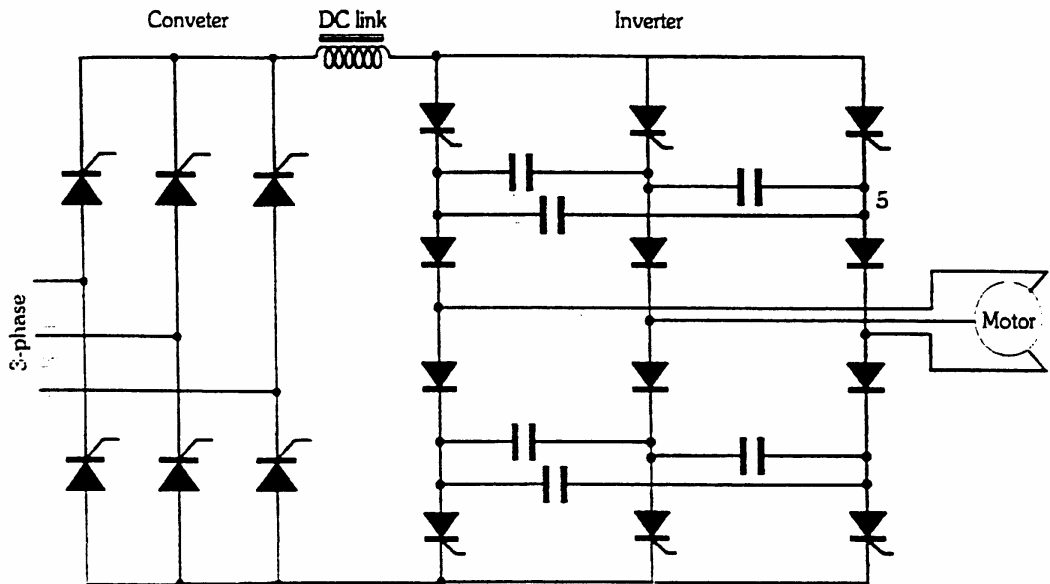
Ένα ολοκληρωμένο κύκλωμα στο οποίο συμπεριλαμβάνεται και το κύκλωμα αποκοπής φαίνεται στο παρακάτω σχήμα



Σχήμα 4.2
Παράδειγμα Chopper-Αντιστροφέα

4.3 Έλεγχος ταχύτητας με αντιστροφέα σταθερού ρεύματος.

Το κύκλωμα αυτό κάνει έλεγχο της ταχύτητας ενός επαγωγικού κινητήρα βραχυκυκλωμένου δρομέα .

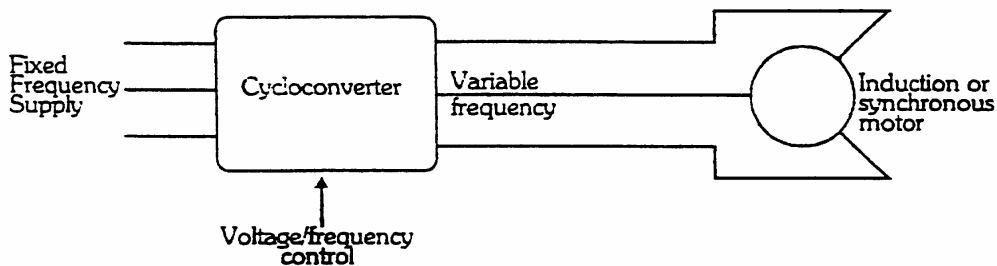


Σχήμα 4.3
Έλεγχος ταχύτητας με αναστροφέα σταθερού ρεύματος

Η αυτεπαγωγή χρησιμοποιείται για εξομάλυνση του ρεύματος.

Συγκρινόμενο με το προηγούμενο κύκλωμα το κύκλωμα αυτό έχει το πλεονέκτημα της χρήσης συμβατικών thyristors με απλή μεταγωγή χρησιμοποιώντας μόνο πυκνωτές.

4.4 Έλεγχος ταχύτητας με κυκλομετατροπέα.

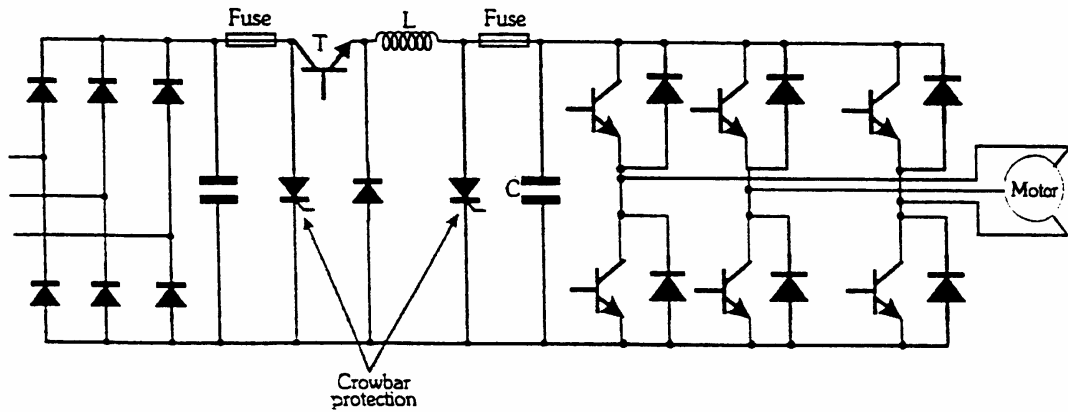


Σχήμα 4.4
Έλεγχος κυκλομετατροπέα

Το κυριότερο πρόβλημα της διάταξης αυτής είναι ο περιορισμός στη συχνότητα εξόδου στο 1/3 περίπου της συχνότητας εισόδου. Αν η συχνότητα εισόδου είναι 50 ή 60Hz η μέγιστη συχνότητα εξόδου είναι γύρω στα 20Hz και σε συνδυασμό με το μεγάλο κόστος της διάταξης αυτής, σε σχέση με τις διατάξεις των αναστροφών, καθιστούν την εφαρμογή τους πολύ περιορισμένη.

4.5 Έλεγχος ταχύτητας με αναστροφή transistors ισχύος.

Ένα τυπικό κύκλωμα που χρησιμοποιεί αναστροφή με transistors ισχύος φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Το πλεονέκτημα του κυκλώματος αυτού είναι ότι καταργούνται εδώ τα κυκλώματα μεταγωγής. Χρησιμοποιείται κύρια σε διατάξεις ασθενούς ισχύος και ιδιαίτερα για να τροφοδοτούν κινητήρα υψηλών στροφών.

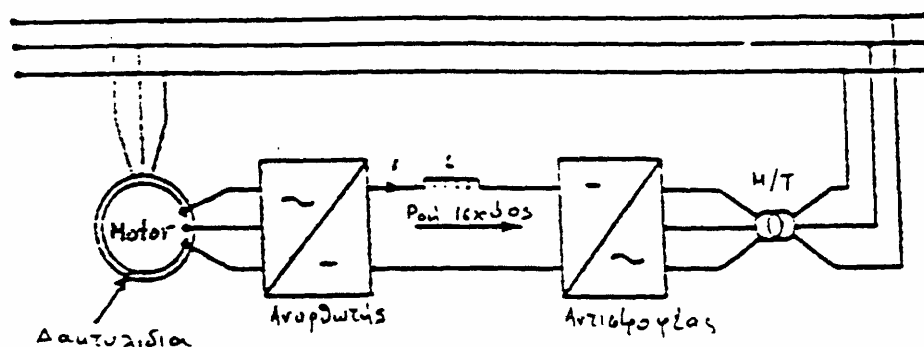


Σχήμα 4.5
Τοπικό κύκλωμα οδήγησης με αντιστροφή transistors

4.6 Έλεγχος στροφών δακτυλιοφόρων κινητήρων.

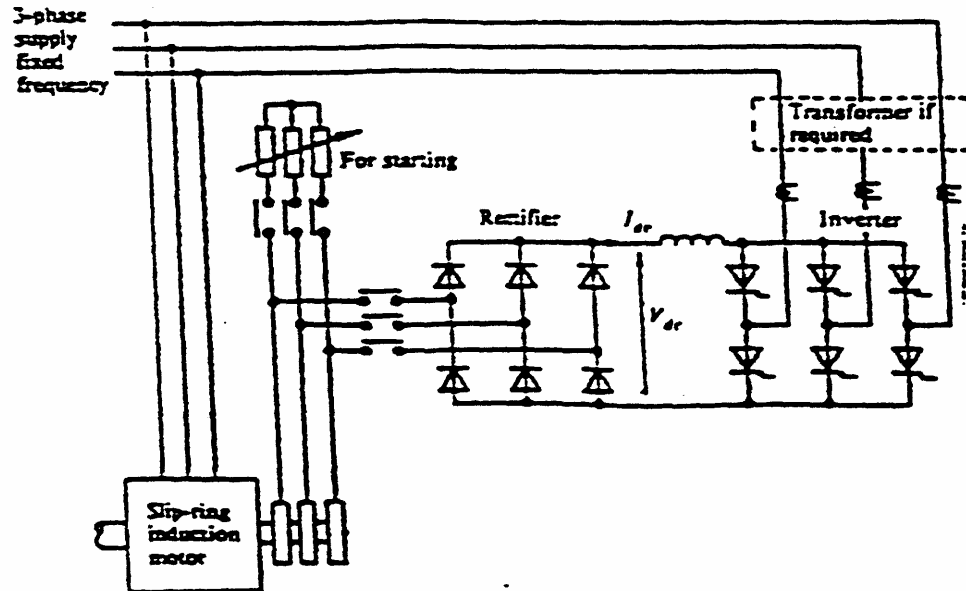
Όπως είναι γνωστό στους δακτυλιοφόρους κινητήρες ή κινητήρες τυλιγμάτων δρομέα όπως αλλιώς λέγονται, τα άκρα των τυλιγμάτων του δρομέα καταλήγουν στα τρία δακτυλίδια μέσω των οποίων μπορούμε να έχουμε πρόσβαση στο κύκλωμα του δρομέα. Με αυτό το δεδομένο έχουν αναπτυχθεί οι ελεγκτές ανάκτησης της ενέργειας ολίσθησης στους οποίους ενέργεια αποσπάται από το δρομέα στη συχνότητα του δρομέα και επιστρέφει μέσω ενός μετατροπέα συχνότητας στην πηγή τροφοδότησης. Με έλεγχο τώρα του ποσού της ανακτώμενης ενέργεια μπορούμε να ρυθμίσουμε την ταχύτητα της μηχανής.

Μια έκδοση ρύθμισης του τύπου αυτού είναι το στατικό σύστημα Kramer του παρακάτω σχήματος στον οποίο η μετατροπή της συχνότητας γίνεται από το συνδυασμό ενός ανορθωτή και ενός αντιστροφέα.



Σχήμα 4.6
Στατικό κύκλωμα Kramer

Το ολοκληρωμένο κύκλωμα έχει τη μορφή.



Σχήμα 4.7

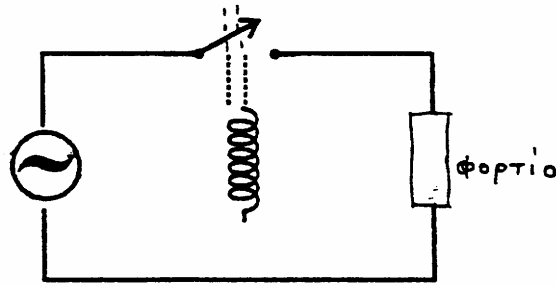
Ολοκληρωμένο κύκλωμα ελέγχου του ποσού της ανακτώμενης ενέργειας για τη ρύθμιση της ταχύτητας δακτυλιοφόρου κινητήρα

4.7 Άλλες εφαρμογές των ημιαγωγών ισχύος.

Αυτόματος διακόπτης ισχύος ημιαγωγών στοιχείων.

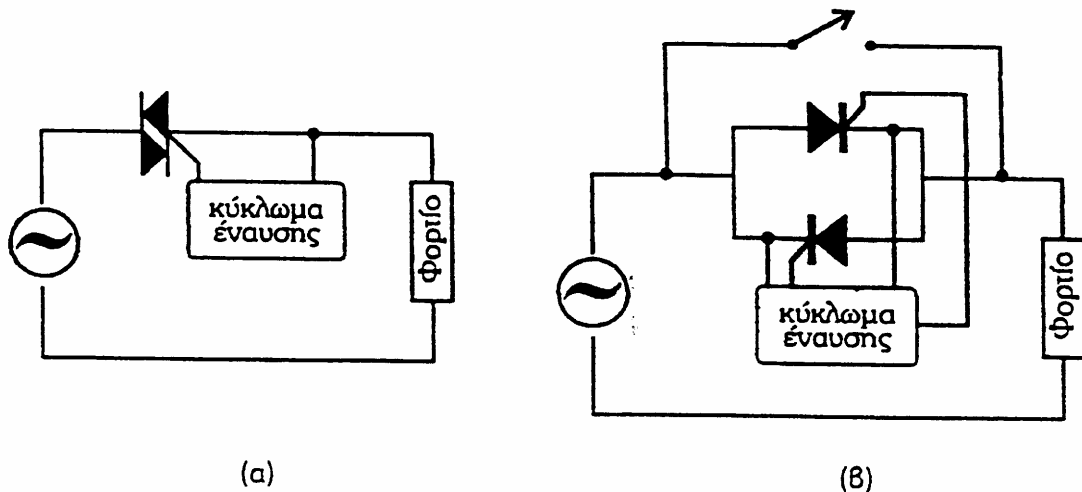
Ο αυτόματος διακόπτης ισχύος ημιαγωγών (ημιαγωγός διακόπτης) είναι μια συσκευή αλλαγής κατάστασης που συνδέει (on) ή αποσυνδέει (off) ένα φορτίο ισχύος από την πηγή τροφοδότησης.

Οι μηχανικοί διακόπτες ενεργοποιούνται με ηλεκτρομαγνητικούς μεταγωγείς που μεταφέρουν τις επαφές τους, όπως δείχνει το απλό κύκλωμα του σχήματος.



Σχήμα 4.8

Χρησιμοποιώντας ημιαγωγά στοιχεία ισχύος έχουμε τις εναλλακτικές λύσεις που φαίνονται στα σχήματα



Σχήμα 4.9

Το κύκλωμα (α) χρησιμοποιείται για χαμηλές καταναλώσεις ενώ το κύκλωμα (β) χρησιμοποιείται για υψηλές τιμές ισχύος. Ο μηχανικός διακόπτης χρειάζεται κάποιο χρονικό διάστημα για να λειτουργήσει που μπορεί να είναι και μερικοί κύκλοι (περίοδοι). Οι ημιαγωγοί διακόπτες θα ανοίξουν αμέσως μόλις στην πύλη τους δοθεί ένας παλμός έναυσης.

Με κατάλληλη ρύθμιση του κυκλώματος έναυσης η λειτουργία του ημιαγωγού διακόπτη (on-off) μπορεί να ρυθμιστεί σε οποιαδήποτε γωνία επιθυμούμε στη διάρκεια ενός κύκλου. Όταν ο διακόπτης αυτός χρησιμοποιείται σε κυκλώματα a.c. όπως είναι γνωστό για να διατηρείται στην κατάσταση on, απαιτεί συνεχείς παλμούς έναυσης στην πύλη, ενώ διακόπτει τη λειτουργία του κυκλώματος (turn-off) στον πρώτο μηδενισμό του ρεύματος μετά την αφαίρεση του παλμού έναυσης.

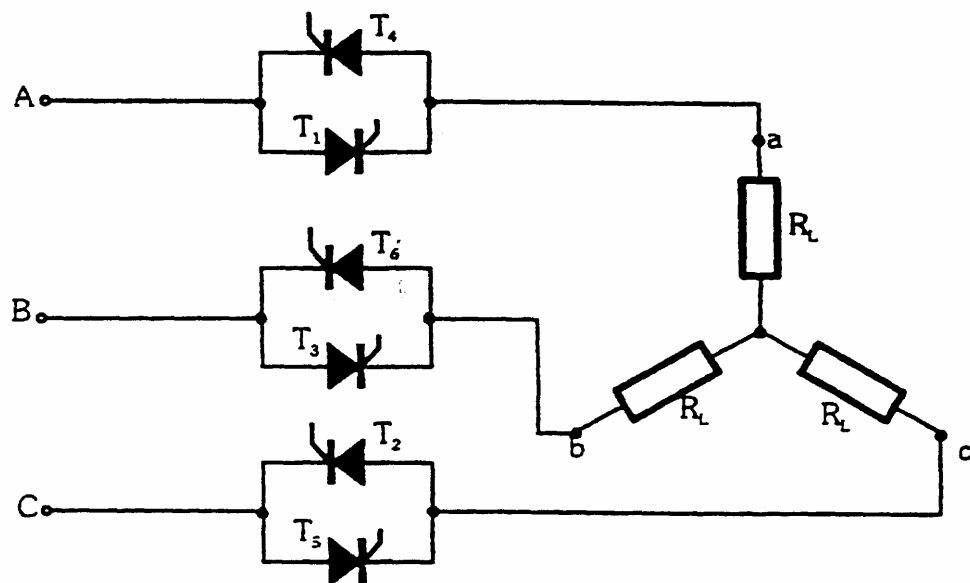
Άλλο μειονέκτημα των μηχανικών διακοπών είναι η δημιουργία τόξου κατά τη διάρκεια της διακοπής υψηλών φορτίων με δυσάρεστα αποτελέσματα πολλές φορές. Το φαινόμενο αυτό δεν υπάρχει με τη χρήση των ημιαγωγών διακοπών. Πρέπει όμως να σημειωθεί ότι στην κατάσταση (on) αγωγής των thyristors ή triacs

αναπτύσσεται μια πτώση τάσης με αποτέλεσμα την δημιουργία θερμότητας στα ημιαγωγά στοιχεία. Για την αποφυγή της κατάστασης αυτής είναι δυνατόν να δημιουργήσουμε ένα βραχυκύκλωμα των thyristors (triacs) (διακεκομμένη γραμμή με τον διακόπτη στο σχήμα (β)).

Από τα παραπάνω συμπεραίνουμε ότι ο ημιαγωγός διακόπτης έχει τα πλεονεκτήματα της ταχύτητας, της ακριβείας του χρόνου λειτουργίας (on or off), της μη συντήρησης και της αθόρυβης λειτουργίας του.

Ιδιαίτερη προσοχή θα πρέπει να δοθεί στην εκλογή τους αν πρόκειται να χρησιμοποιηθούν για έλεγχο κινητήρων ή άλλες εφαρμογές με ιδιαίτερες απαιτήσεις (μεγάλο ρεύμα εκκίνησης κινητήρων, μεταβατικά φαινόμενα σε επαγωγικά φορτία κ.τ.λ)

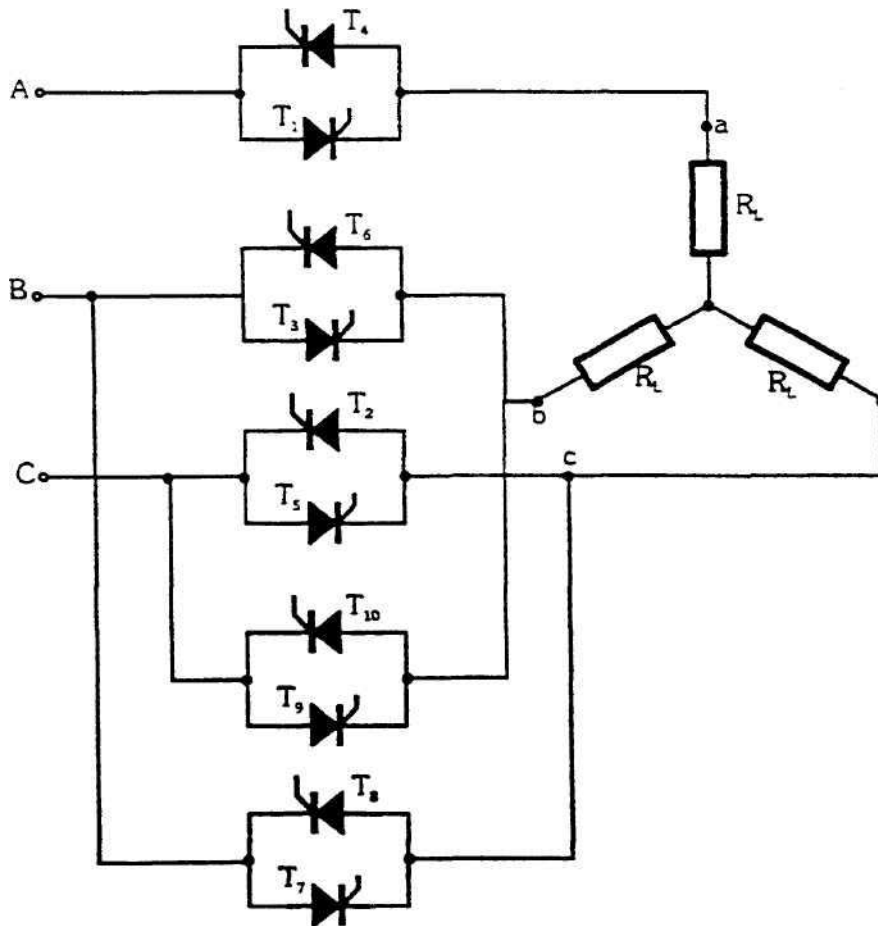
Τέλος θα πρέπει να σημειωθεί ακόμα ότι οι διατάξεις που φαίνονται στα σχήματα (α) και (β) μπορούν να επεκταθούν και σε τριφασικές εφαρμογές όπως δείχνει το παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 4.10

Τριφασικός διακόπτης με ημιαγωγούς για τον έλεγχο τριφασικού φορτίου.

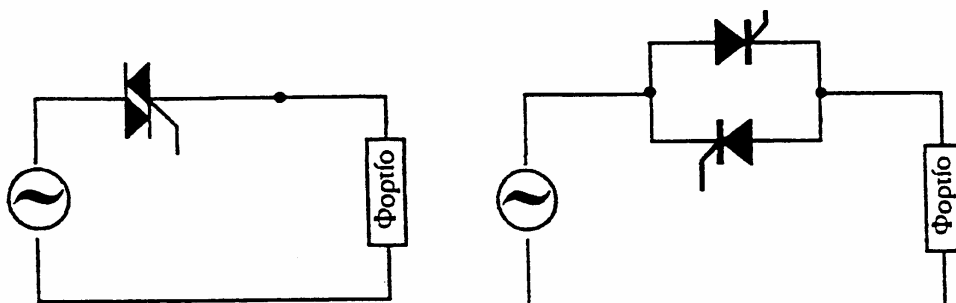
Σε πολλές εφαρμογές είναι πιθανό να απαιτηθεί αλλαγή της διαδοχής των φάσεων στο φορτίο (π.χ. για την αλλαγή της φοράς περιστροφής ενός τριφασικού κινητήρα). Για να επιτευχθεί η απαίτηση αυτή χρησιμοποιούμε την συνδεσμολογία του σχήματος .



Σχήμα 4.11
Τριφασικός διακόπτης με thyristors για αντιστροφή δυο φάσεων.

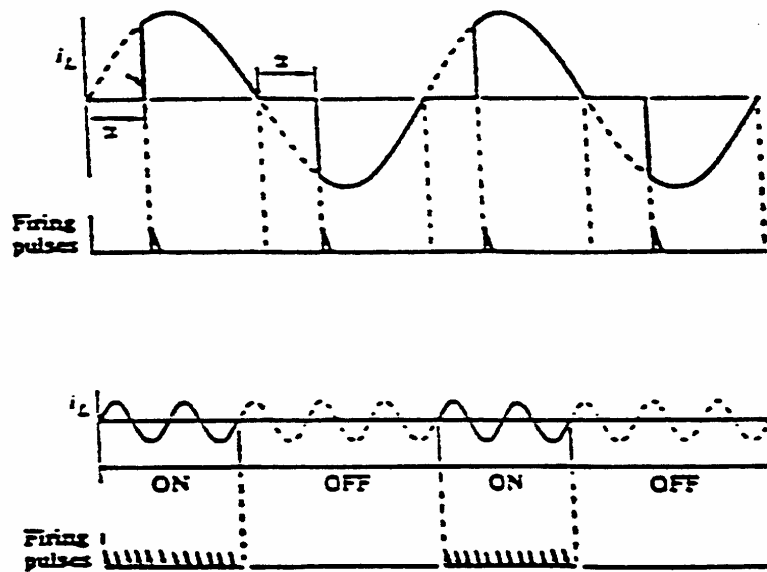
Θέρμανση.

Ένα θερμαντικό φορτίο με ωμική αντίσταση μπορεί να ρυθμιστεί για διαφορετικές ισχύς με τη φύση ενός triac ή με δύο thyristors συνδεδεμένα αντιπαράλληλα όταν η ισχύς που θέλουμε να ελέγχουμε είναι μεγάλη. Οι απλές αυτές διατάξεις ελέγχου φαίνονται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 4.12
Απλές Διατάξεις Ελέγχου.

Η ρύθμιση της γωνίας φάσης επιτυγχάνεται με παλμούς έναυσης καθυστέρησης πλάτους α που δίδονται στο ξεκίνημα κάθε ημιπεριόδου.



Σχήμα 4.13

Έλεγχος ισχύος σε μονοφασικό φορτίο θέρμανσης
 α) Έλεγχος γωνίας φάσεως
 β) Έλεγχος ολόκληρου κύκλου

Η ισχύς που θα δίδεται στο φορτίο όπως είναι γνωστό θα' ναι:

$$P_L = \frac{V_{rms}^2}{R} = \frac{1}{\pi R} \int_{\alpha}^{\pi} (V_{max} \sin \theta)^2 d\theta$$

Και η λύση αυτής της σχέσης είναι:

$$\begin{aligned} P_L &= \frac{V_{max}^2}{\pi R} \int_{\alpha}^{\pi} \sin^2 \theta d\theta = \frac{V_{max}^2}{\pi R} \int_{\alpha}^{\pi} \frac{1 - \cos 2\theta}{2} d\theta = \frac{V_{max}^2}{2\pi R} \int_{\alpha}^{\pi} d\theta - \frac{V_{max}^2}{2\pi R} \int_{\alpha}^{\pi} \cos 2\theta d\theta = \\ &= \frac{V_{max}^2}{2\pi R} (\pi - \alpha) - \frac{V_{max}^2}{2\pi R} \left(\frac{\sin 2\pi}{2} - \frac{\sin 2\alpha}{2} \right) \dot{\eta} P_L = \frac{V_{max}^2}{\pi R} \left(\pi - \alpha + \frac{1}{2} \sin 2\alpha \right) \end{aligned}$$

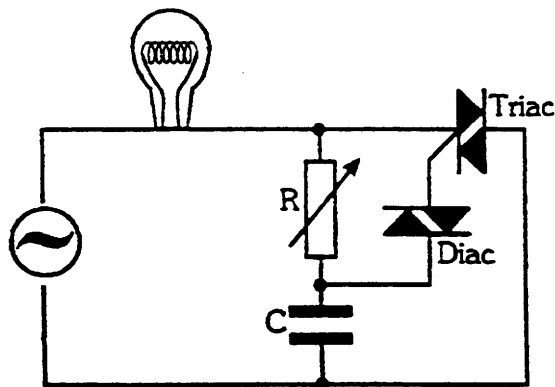
Η πλειοψηφία των θερμικών φορτίων έχουν σταθερές χρόνου μερικών δευτερολέπτων ή και περισσότερων. Στην περίπτωση αυτή μια μικρή ρύθμιση της θερμοκρασίας ενός τέτοιου φορτίου (ηλεκτρική θερμάστρα, ηλεκτρικός θερμοσίφωνας κ.τ.λ.) μπορεί να επιτευχθεί επιτρέποντας έναν αριθμό περιόδων για την on κατάσταση με ένα αριθμό περιόδων για την off κατάσταση όπως δείχνει το παραπάνω σχήμα (β).

Ο τύπος του ελέγχου αυτού ονομάζεται έλεγχος ολόκληρου κύκλου και η ισχύς θα δίδεται από τη σχέση :

$$P_L = \frac{V_{rms}^2}{R} * \frac{ontime}{(on + off)time} = \frac{V_{rms}^2}{2R} * \frac{ontime}{(on + off)time}$$

Η ρύθμιση του φωτισμού των λαμπτήρων πυρακτώσεως (ο λαμπτήρας πυρακτώσεως είναι ένα θερμικό φορτίο ωμικής αντίστασης), μπορεί να ρυθμιστεί σύμφωνα με τον πρώτο τρόπο (ρύθμιση γωνίας φάσης) καθώς η θερμική χρονική σταθερά του λαμπτήρα είναι πολύ μικρή για να επιτρέψει τη ρύθμιση με έλεγχο της περιόδου.

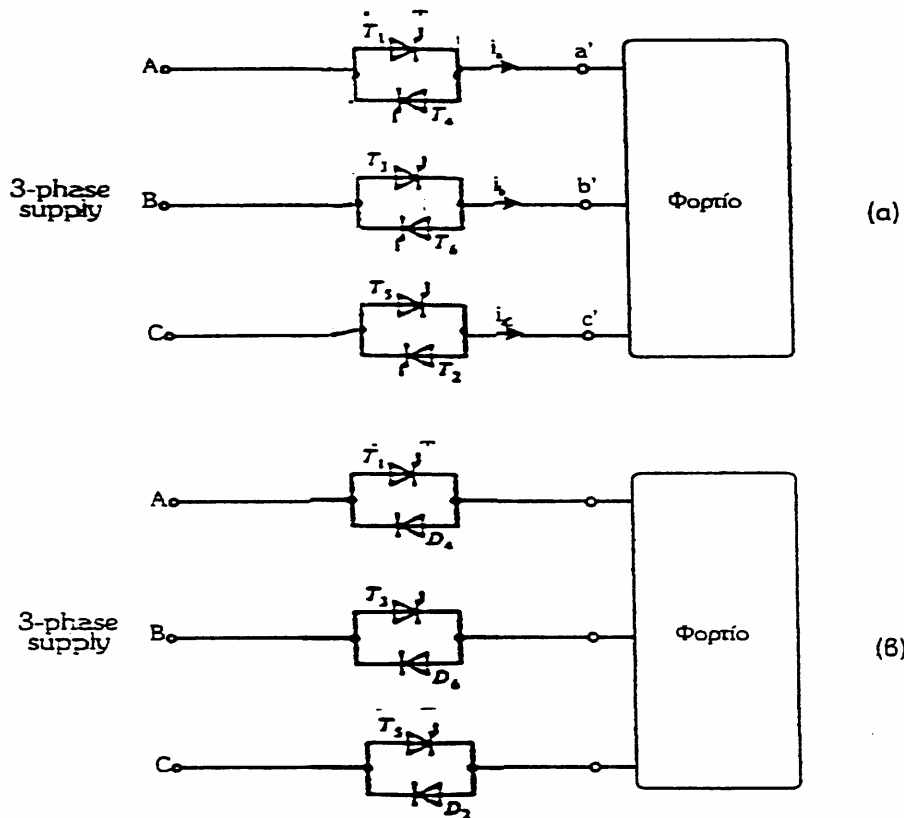
Ένα απλό κύκλωμα που είναι περισσότερο γνωστό σαν dimmer λαμπτήρων είναι αυτό του παρακάτω σχήματος.



Σχήμα 4.14
Dimmer κύκλωμα

Όταν το φορτίο του πυκνωτή C φτάσει το σημείο breakdown της diac τότε αυτός θα εκφορτιστεί στην πύλη του triac. Η ρύθμιση της αντίστασης R καθορίζει το ρυθμό φόρτισης του πυκνωτή C και επομένως την καθυστέρηση της γωνίας φάσης.

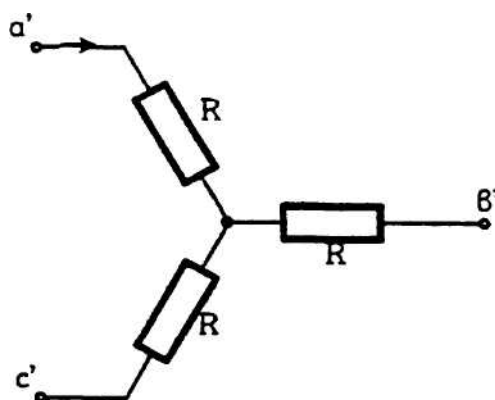
Σε περιπτώσεις τριφασικών φορτίων συνδεδεμένων κατά αστέρα ή κατά τρίγωνο ο έλεγχος μπορεί να επιτευχθεί με μια από τις διατάξεις του παρακάτω σχήματος.



Σχήμα 4.15
 Τριφασικά φορτία
 α) Πλήρως ελεγχόμενα β) Ημieleγχόμενα

Ο πλήρης έλεγχος του φορτίου απαιτεί έξι thyristors (ή τρία triacs) ενώ αντίθετα ο μερικώς έλεγχος (half controlled circuit} του κυκλώματος απαιτεί διόδους αντιπαράλληλα με τα thyristors.

Αν το φορτίο είναι σε σύνδεση αστέρα με αντίσταση $R(\Omega)$ / φάση,



Σχήμα 4.16

και αν τρία thyristors βρίσκονται σε αγωγή τότε:

$$i_a = \frac{V_{(\max)}}{2R} \sin(\omega t + \phi) = \frac{V_{LINE(\max)}}{\sqrt{3}R} \sin(\omega t + \phi)$$

Όταν μόνο δυο thyristors βρίσκονται σε αγωγή τότε:

$$i_a = \frac{V_{(\max)}}{2R} \sin(\omega t + \phi)$$

Για διατάξεις πλήρους ελέγχου η ισχύς στο φορτίο θα 'ναι :

- Για γωνίες έναυσης μεταξύ 0° και 60°

$$P_L = 3I_{rms}^2 R = \frac{3V_{LINE(\max)}^2}{R\pi} \left(\frac{\pi}{6} - \frac{\alpha}{4} + \frac{\sin 2\alpha}{8} \right)$$

- Για γωνίες έναυσης μεταξύ 60° και 90°

$$P_L = 3I_{rms}^2 R = \frac{3V_{LINE(\max)}^2}{R\pi} \left(\frac{\pi}{12} + \frac{3}{16} \sin 2\alpha + \frac{\sqrt{3}}{16} \cos 2\alpha \right)$$

- Για γωνίες έναυσης μεταξύ 90° και 150°

$$P_L = 3I_{rms}^2 R = \frac{3V_{LINE(\max)}^2}{R\pi} \left(\frac{5\pi}{24} - \frac{\alpha}{4} + \frac{\sqrt{3}}{16} \cos 2\alpha + \frac{1}{16} \sin 2\alpha \right)$$

Στις παρακάτω εξισώσεις δεν λαμβάνονται υπόψη οι πτώσεις τάσεως μεταξύ των thyristors και οποιεσδήποτε άλλες απώλειες. Για τις διατάξεις μερικού ελέγχου (half-controlled) η ισχύς στο φορτίο θα 'ναι :

- Για γωνίες έναυσης μεταξύ 0° και 90°

$$P_L = 3I_{rms}^2 R = \frac{3V_{LINE(\max)}^2}{R\pi} \left(\frac{\pi}{3} - \frac{\alpha}{4} + \frac{\sin 2\alpha}{8} \right)$$

- Για γωνίες έναυσης μεταξύ 90° και 120°

$$P_L = \frac{3V_{LINE(max)}^2}{2R\pi} \left(\frac{11\pi}{24} - \frac{\alpha}{4} \right)$$

- Για γωνίες έναυσης μεταξύ 120° και 210°

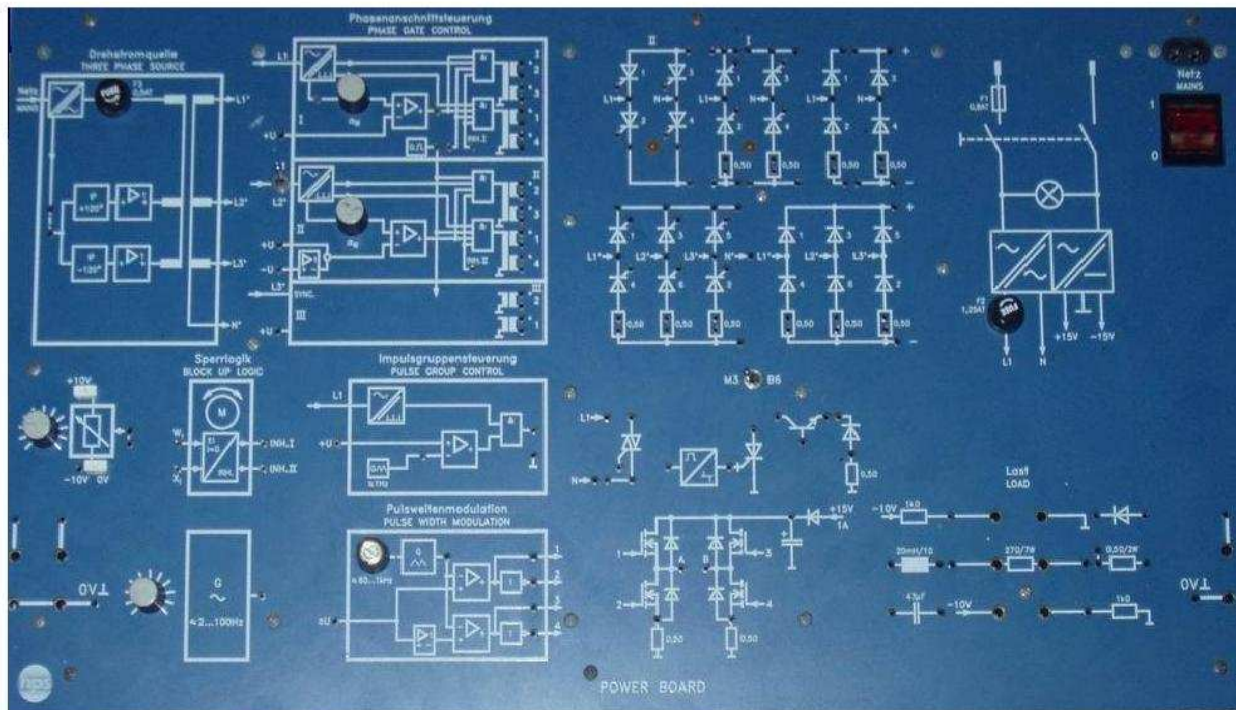
$$P_L = \frac{3V_{LINE(max)}^2}{2R\pi} \left(\frac{7\pi}{24} - \frac{a}{4} + \frac{\sin 2a}{16} - \frac{\sqrt{3}}{16} \cos 2a \right)$$

Κεφάλαιο 5^ο

5.1 Εισαγωγή στο Powerboard.

Το Power board είναι μία αναπτυξιακή συσκευή η οποία προσφέρεται για την πρακτική εφαρμογή και μελέτη βασικών κυκλωματικών διατάξεων των ηλεκτρονικών ισχύος .

Αποτελείται από έξι βασικές βαθμίδες καθώς επίσης και από κάποιες βοηθητικές διατάξεις οι οποίες παρουσιάζονται παρακάτω αναλυτικά, με φωτογραφίες της κάθε βαθμίδας και κάποιες επεξηγήσεις για τον τρόπο λειτουργίας ώστε να κατανοήσουμε τον σκοπό και το ρόλο της κάθε βαθμίδας ξεχωριστά .

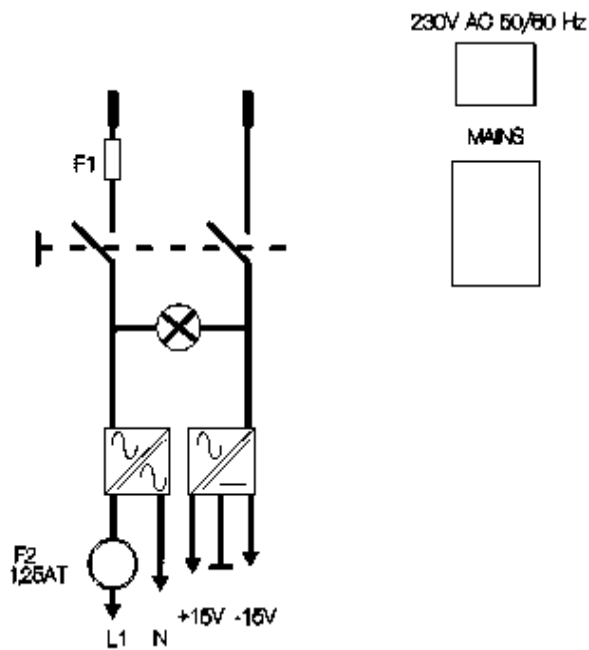


Powerboard εργαστηρίου ηλεκτρονικών ισχύος

5.2 Το τροφοδοτικό.

Στην πρόσοψη της συσκευής διακρίνουμε τον γενικό διακόπτη τροφοδοσίας 'MAINS' καθώς και το Block διάγραμμα του τροφοδοτικού .

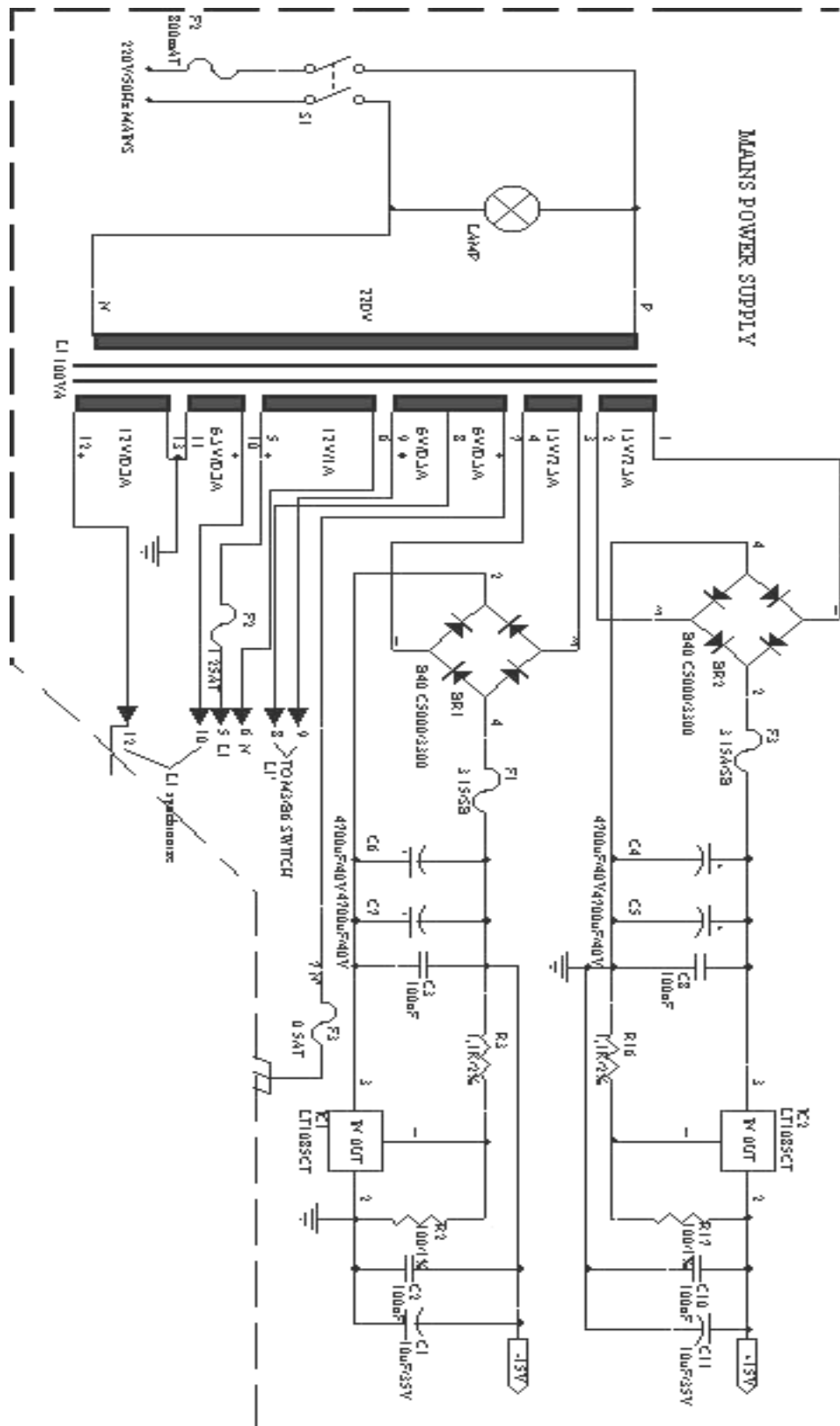
Κλείνοντας τον διακόπτη ενεργοποιούμε το τροφοδοτικό της διάταξης τροφοδοτώντας με ηλεκτρική ισχύ τις διάφορες βαθμίδες του Board. Το τροφοδοτικό παράγει δύο DC τάσεις '+15V' και '-15V' ως προς την γη '0V' καθώς επίσης και μιας εναλλασσόμενης τάσης $12V_{RMS}$ 'L1' ως προς τον ουδέτερο 'N' (σχήμα 5.1).



Σχήμα 5.1

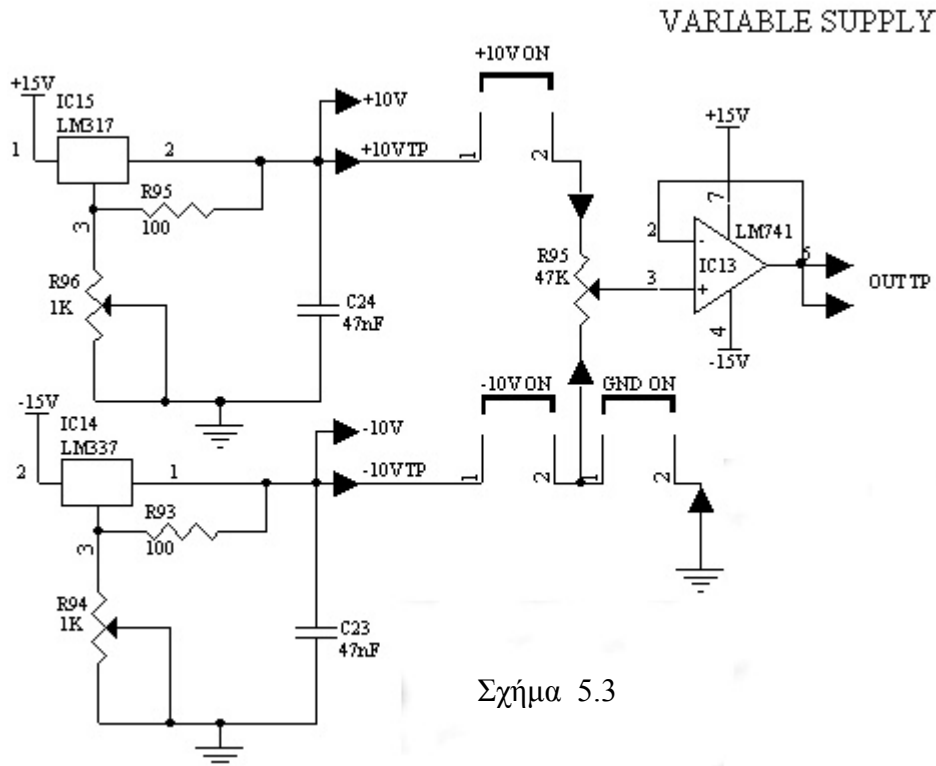
Σχηματικό κύκλωμα τροφοδοσίας του Powerboard.

Στο σχήμα 5.2 φαίνεται η κυκλωματική διάταξη του κυρίως τροφοδοτικού του board. Κεντρικό στοιχείο της βαθμίδας αυτής αποτελεί ο μετασχηματιστής τροφοδοσίας L1 φαινόμενης ισχύος 100VA. Για τις ανάγκες της κατασκευής έχει κατασκευαστεί με 7 δευτερεύοντα τυλίγματα κάποια από τα οποία αποτελούν την κυρίως παροχή DC ισχύος ενώ κάποια άλλα χρησιμοποιούνται για τον εσωτερικό συγχρονισμό εσωτερικών βαθμιδών, καθώς και παροχές χαμηλής AC ισχύος με τάσεις που δεν ξεπερνούν τα 12 V. Οι τάσεις συγχρονισμού αναγράφονται σαν L1 synchronize και L1-N για την παροχή AC ισχύος. Οι ακροδέκτες 1-2,3-4, οδηγούνται σε δυο γέφυρες ανόρθωσης BR1 και BR2. Στις DC εξόδους των δυο ανορθωτών είναι συνδεδεμένοι ηλεκτρολυτικοί πυκνωτές εξομάλυνσης C4,C5,C6,C7. Τέλος οι δυο DC τάσεις μετά τα φίλτρα εξομάλυνσης οδηγούνται σε δυο γραμμικούς σταθεροποιητές τάσεως των 3 A low drop της εταιρίας Linear Technology IC1,IC2. Οι αντιστάσεις R2-R3 και R16-R17 αποτελούν διαιρέτες τάσης οι οποίοι έχουν επιλεγεί για την σταθεροποίηση τη τάσης εξόδου στα 15 V. Με την συνδεσμολογία του σχήματος 5.2 πετυχαίνουμε παραγωγή συμμετρικής τάσης $\pm 15 \text{ V} / 3,15 \text{ A}$ για την κάλυψη των αναγκών DC τροφοδοσίας του board.



Σχήμα 5.2

Σχηματικό κύκλωμα μεταβλητού τροφοδοτικού του power board.



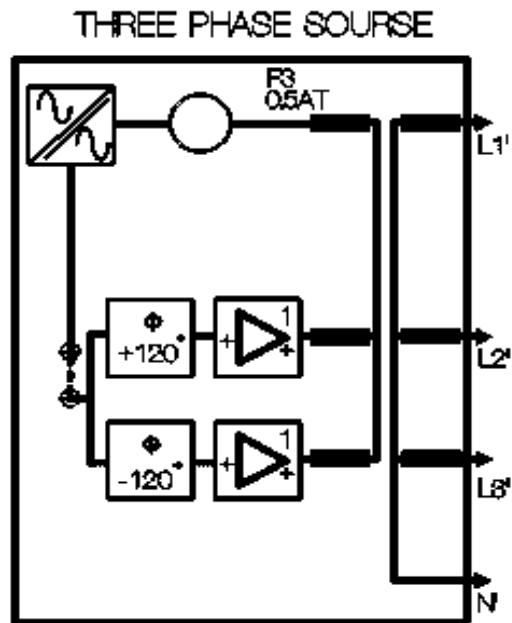
Σχήμα 5.3

Η βαθμίδα αυτή αποτελείται από τα regulators IC14–IC15. Τροφοδοτούνται με συμμετρική τάση $\pm 15\text{V}$ με κοινό ground ενώ με τις αντιστάσεις R93-R94,R95-R96 επιτυγχάνεται ρύθμιση για τάσεις εξόδου $\pm 10\text{V}$ οι οποίες οδηγούνται στα ομώνυμα test points με βελάκια στο σχήμα 5.3. Ο τελεστικός ενισχυτής IC13 με την μεταβλητή αντίσταση R95 αποτελούν ένα ποτενσιόμετρο με απομόνωση αφού ο τελεστικός LM741 είναι συνδεσμοποιημένος σαν buffer.

5.3 Βαθμίδα παραγωγής τριφασικού Ρεύματος (Three phase source).

Σκοπός της βαθμίδας αυτής είναι η παραγωγή τριών φάσεων $L1'$, $L2'$ και $L3'$ για την διεξαγωγή πειραμάτων στα τριφασικά κυκλώματα ισχύος. Μία εναλλασσόμενη τάση μέσω μετασχηματιστή περνά από δύο βαθμίδες μετατόπισης φάσης και μετατοπίζεται κατά $+120^\circ$ μοίρες και κατά -120° μοίρες στην συνέχεια με την χρήση ενισχυτικών βαθμίδων και ενός μετασχηματιστή παράγονται οι τρεις φάσεις με σειρά διαδοχής $L3'$ (-120°), $L1'$ (0°), $L2'$ ($+120^\circ$).

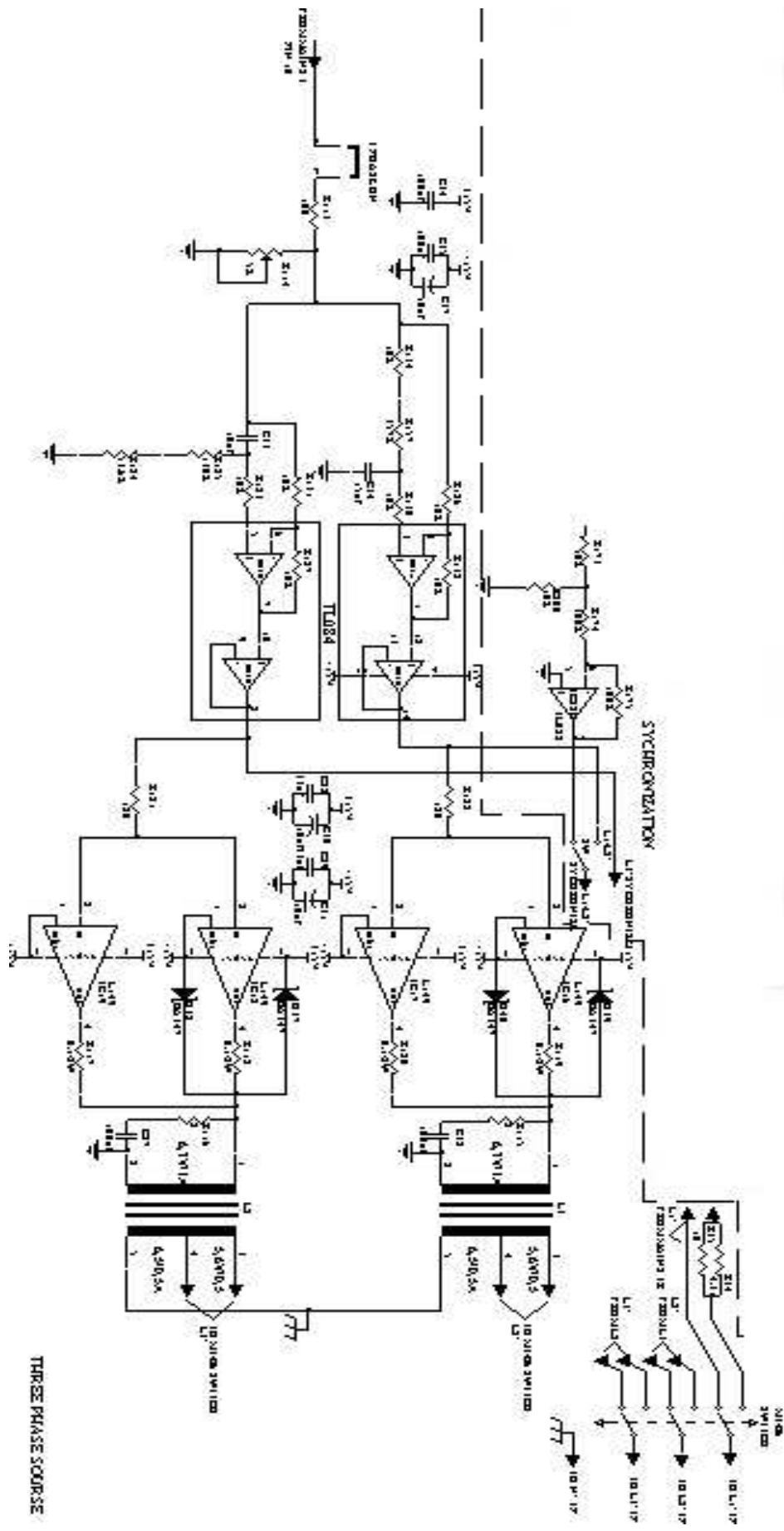
Τέλος με τον διακόπτη 'M3/B6' επιλέγουμε την AC τάση εξόδου των τριών φάσεων μεταξύ 12V ή 6V RMS .



Σχήμα 5.4

Σχηματικό κύκλωμα βαθμίδας παραγωγής τριφασικού ρεύματος.

Σκοπός της βαθμίδας αυτής είναι η παραγωγή δυο φάσεων με διαφορά φάσης 120° , με αναφορά την φάση $L1'$ του σχήματος 5.5 (ακροδέκτες 8-9 M/Σ). Ο ακροδέκτης 10 του μετασχηματιστή τροφοδοσίας αποτελεί την φάση εισόδου της βαθμίδας αυτής με rms τιμή 6,5 V ως προς το ground. Η τάση αυτή οδηγείται σε δυο ολισθητές φάσης γύρω από τους τελεστικούς ενισχυτές IC20A- IC20B. Το δικτύωμα R134-R128-R130 και C34 αποτελούν το δίκτυωμα ολίσθησης RC επιπορίας τάσης κατά 120° ενώ το δίκτυωμα R123-R124-R125 και C33 αποτελούν το δίκτυωμα ολίσθησης RC προπορίας τάσης κατά 120° . Η ενίσχυση των IC20A και IC20B έχει επιλεγεί μονάδα με την χρήση ίσης τιμής αντιστάσεων ανάδρασης R126-R127-R131-R132. Τα δυο σήματα στις εξόδους 1-7 των παραπάνω τελεστικών οδηγούνται σε δυο βαθμίδες απομόνωσης IC20C και IC20D. Το ποδαράκι 14 του IC20D αποτελεί την $L2'$ φάση συγχρονισμού η οποία οδηγείται στον διακόπτη $L1/L2'$ μαζί με την τάση συγχρονισμού από τον ακροδέκτη 12 του μετασχηματιστή τροφοδοσίας ώστε να υπάρχει δυνατότητα επιλογής εισόδου συγχρονισμού της βαθμίδας II πυροδοτικών παλμών. Το ποδαράκι 14 του IC20D και το ποδαράκι 8 του IC20C οδηγούνται μέσω δυο αντιστάσεων R121-R122 σε δυο παράλληλα συνδεδεμένα ζευγάρια ακουστικών ενισχυτών ισχύος IC16-17 και IC18-19. Οι έξοδοι των IC16-17 με την χρήση αντιστάσεων αντιστάθμισης για την παράλληλη σύνδεση τους οδηγούνται σε έναν μετασχηματιστή 6,3 V με δυο δευτερεύοντα τυλίγματα 5,6 και 6,5 V. Λόγω συμμετρίας της διάταξης αυτής τα ίδια κυκλωματικά στοιχεία χρησιμοποιούνται γύρω από τα IC18-19.



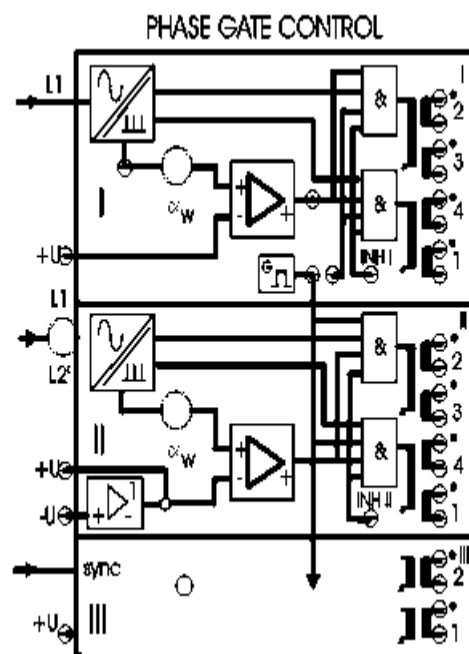
Σχήμα 5.5

Οι δυο μετασχηματιστές εξόδου L3, L2 έχουν κοινό ουδέτερο αγωγό ποδαράκια 5 και παρέχουν δυο φάσεις με διαφορετικές τάσεις ποδαράκια 3 και 4 τα οποία οδηγούνται στον διακόπτη επιλογής M3/B6. Στον ίδιο διακόπτη έκτος των φάσεων L2', L3' οδηγείται και η φάση L1' με δυο διαφορετικές τάσεις ποδαράκια 8-9 με κοινό ουδέτερο αγωγό ποδαράκι 7 του μετασχηματιστή τροφοδοσίας. Έτσι με μεταγωγή του διακόπτη M3/B6 παρέχεται ολόκληρη ή η μισή τάση από τα δευτερεύοντα τυλίγματα των μετασχηματιστών L1-L2-L3.

5.4 Βαθμίδα ελέγχου συγχρονισμού και πυροδοτικών παλμών πύλης.

Σκοπός της βαθμίδας αυτής είναι ο συγχρονισμός του εσωτερικού πολυδονητή με την φάση εισόδου στο αριστερό τμήμα της βαθμίδας (βλέπε σχήμα 5.6 L1, L2', L3'sync) και η παραγωγή πυροδοτικών παλμών για τον σκανδαλισμό τόσο των Thyristors όσο και του Triac του αναπτυξιακού. Ο διακόπτης L1-L2' μας επιτρέπει να επιλέξουμε με ποια από της δύο φάσεις θέλουμε να συγχρονίσουμε την βαθμίδα «II».

Για παράδειγμα για να σκανδαλίσουμε τα Thyristors της «I» πλήρως ελεγχόμενης γέφυρας ανόρθωσης θα πρέπει να συνδέσουμε το « I » τμήμα του phase gate control. Τα Thyristors της γέφυρας φέρουν έναν αριθμό από 1 έως 4 αντίστοιχα συνδέουμε και το ανάλογο δευτερεύον τυλίγμα των μετασχηματιστών εξόδου του phase gate control.

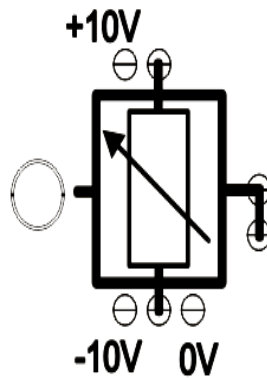


Σχήμα 5.6

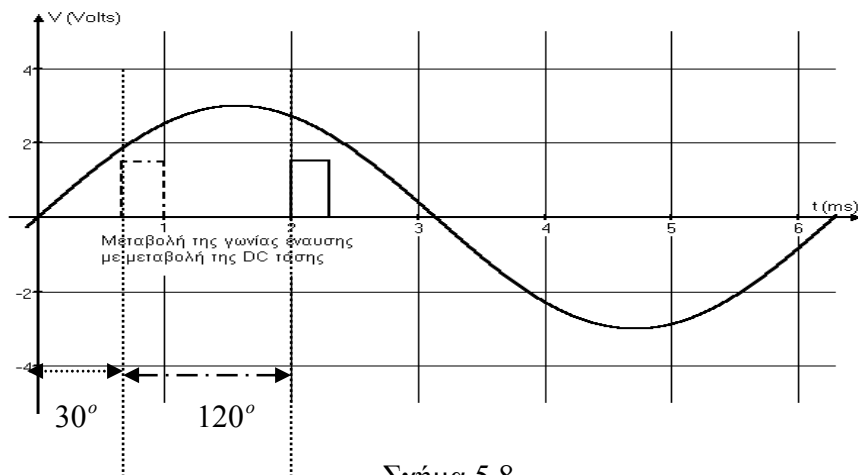
Προσοχή! Ο ακροδέκτης με κουκίδα συνδέεται πάντα με το Gate του Thyristor και το άλλο άκρο του δευτερεύοντος με την κάθοδο.

Για τον έλεγχο τώρα της γωνίας έναυσης χρησιμοποιούμε μία DC τάση “+U ” στο αριστερό τμήμα της βαθμίδας η τάση αυτή μετατοπίζει τους παλμούς σκανδαλισμού των μετασχηματιστών εξόδου ως προς τον χρόνο (Σχήμα 5.8). Βέβαια υπάρχουν και δύο ποτενσιόμετρα στο phase gate control με την ένδειξη « a_w » για μικρομετρική ρύθμιση της γωνίας έναυσης .

Την DC τάση την παίρνουμε από το μεταβλητό τροφοδοτικό του power board συνδέοντας κατάλληλα τους ακροδέκτες του ποτενσιόμετρου ρύθμισης τάσης (Σχήμα 5.7).

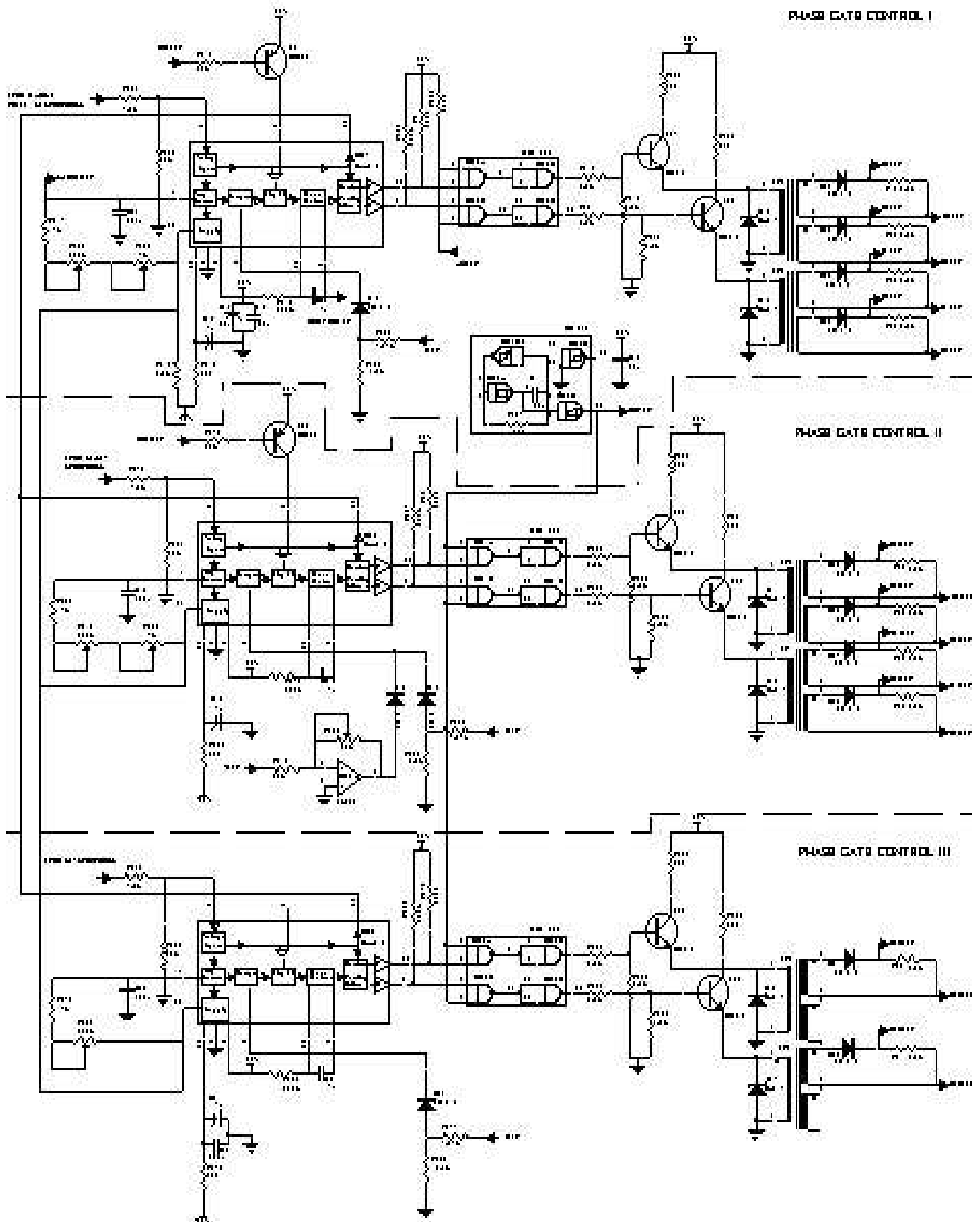


Σχήμα 5.7



Σχήμα 5.8

Σχηματικό σχέδιο βαθμίδας ελέγχου συγχρονισμού και παραγωγής πυροδοτικών παλμών.



Σχήμα 5.9

Στο σχήμα 5.9 φαίνονται οι τρεις βαθμίδες παραγωγής πυροδοτικών παλμών για την οδήγηση των ελεγχόμενων ανορθωτικών διατάξεων καθώς και μιας διάταξης ελέγχου AC ισχύος με την χρήση του Triac του board. Οι τρεις αυτές βαθμίδες I, II, III, είναι όμοιες οπότε θα περιορισθεί η ανάλυση μόνο για την βαθμίδα πυροδοτικών παλμών I.

Για την σχεδίαση των βαθμίδων αυτών έχει χρησιμοποιηθεί το ολοκληρωμένο UAA146 της εταιρίας TEMIC-TELEFUNKEN. Το ολοκληρωμένο αυτό έχει όλες τις απαραίτητες βαθμίδες για την δημιουργία ενός κυκλώματος οδήγησης SCR και κατά συνέπεια Triac. Ο συγχρονισμός του ολοκληρωμένου IC27 επιτυγχάνεται με την εφαρμογή της φάσης L1 μέσω του διαιρέτη τάσης R129-133 στο ποδαράκι 9. Το ολοκληρωμένου τροφοδοτείται με συμμετρική τάση $\pm 15V$ ποδαράκια 1,3,13. Από την έξοδο του εσωτερικού τροφοδοτικού ποδαράκι 15 μια DC τάση οδηγείτε σε ένα δικτύωμα RC αποτελούμενο από τα στοιχεία R201, R150, R147, C39 τα οποία είναι υπεύθυνα για τον χρονισμό της εσωτερικής γεννήτριας πριονωτής κυματομορφής ποδαράκι 7. Η κυματομορφή της γεννήτριας μπορεί να παρατηρηθεί από το S.tooth test point. Ο χρονισμός του εσωτερικού μονοσταθής πολυδονητή (ποδαράκια 2,11) πραγματοποιείται με το δικτύωμα R143, C38. Ο έλεγχος της γωνίας έναυσης πραγματοποιείται με την βοήθεια του test point +U το οποίο είναι συνδεδεμένο με τον διαιρέτη τάσης R135, R136 και την δίοδο D41 η οποία εξασφαλίζει την παρουσία θετικής τάσης στο ποδαράκι σύγκρισης τάσης 8 του εσωτερικού συγκριτή. Το ποδαράκι 6 χρησιμοποιείται για την αποκοπή παραγωγής παλμών από το IC27. Η είσοδος αυτή ελέγχεται μέσω του INH I test point και των T24, R148.

Οι έξοδοι του IC27 10,14 με την χρήση αντιστάσεων pull up οδηγούνται στις εισόδους δύο πυλών NAND IC21A-C. Οι δύο ελεύθεροι ακροδέκτες των παραπάνω πυλών είναι συνδεδεμένες με το AND test point, σκοπός του είναι η επιλογή του χρήστη για σκανδαλισμό των thyristors με ομάδες παλμών. Έτσι εάν συνδεθεί η γεννήτρια τετραγωνικών παλμών, κατασκευασμένη γύρω από το IC23, με το AND test point τότε έχουμε παραγωγή ομάδων παλμών στην έξοδο της βαθμίδας αυτής. Η γεννήτρια αυτή είναι εσωτερικά συνδεδεμένη με τις βαθμίδες II και III. Με την χρήση δύο ακόμα πυλών NAND IC21B-D, το ολοκληρωμένο IC21 είναι συνδεδεσολογημένο σαν δύο πύλες AND με εξόδους τα ποδαράκια 4,11.

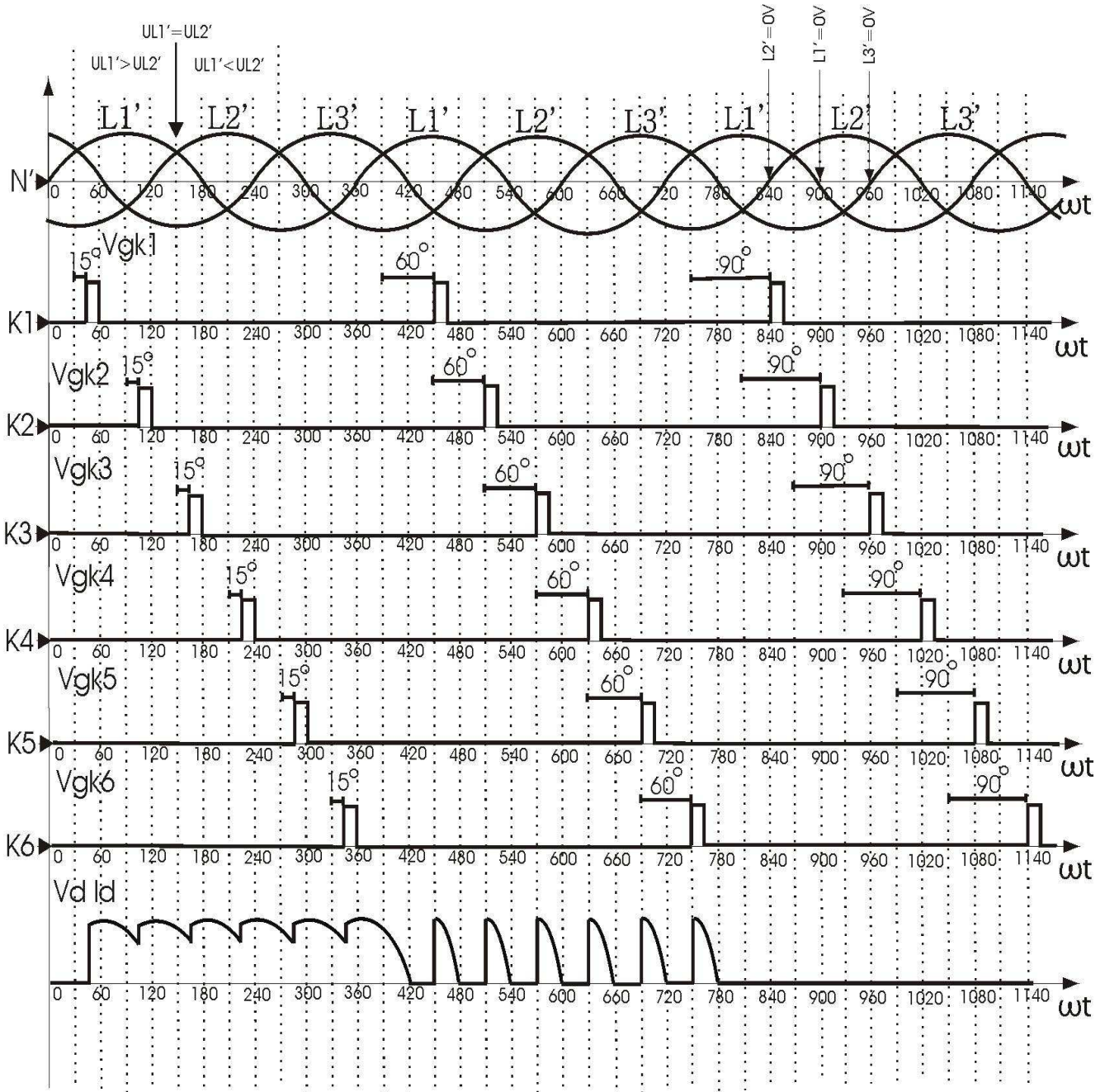
Ακολουθούν δύο βαθμίδες οδήγησης των μετασχηματιστών παλμών αποτελούμενες από τα T17-18 και τις αντιστάσεις πολώσεως των τρανζίστορ αυτών. Ρόλος των τρανζίστορ είναι να οδηγήσουν με ικανοποιητικό ρεύμα τους μετασχηματιστές παλμών TP1 και TP2.

Οι μετασχηματιστές παλμών είναι χειροποίητοι με τοροειδή πυρήνα και λόγο σπειρών 1:1:1 με $L_p=L_{s1}=L_{s2}=1,7mH$ και $R_{dc}=1\Omega$. Ο TP1 έχει την δυνατότητα πυροδότησης 2 SCR για τις θετικές ημπεριόδους της φάσης L1, ενώ ο TP2 πυροδοτεί άλλα δύο SCR για τις αρνητικές.

Τα δικτυώματα RD στα δευτερεύοντα τυλίγματα των μετασχηματιστών παλμών εξασφαλίζουν σκανδαλισμό των ημιαγωγών ισχύος με θετικούς παλμούς.

Κυματομορφές εξόδου βαθμίδας παραγωγής πυροδοτικών παλμών.

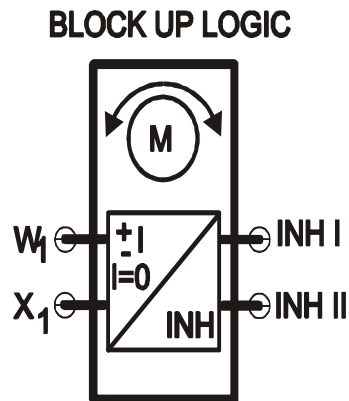
Οι παλμοί έναυσης μεταξύ των SCR 1-4,3-6,5-2, έχουν διαφορά φάσης 180° αφού σκανδαλίζουμε δύο SCR για κάθε θετική και αρνητική ημιπερίοδο ανά φάση (σχήμα 5.10).



Σχήμα 5.10

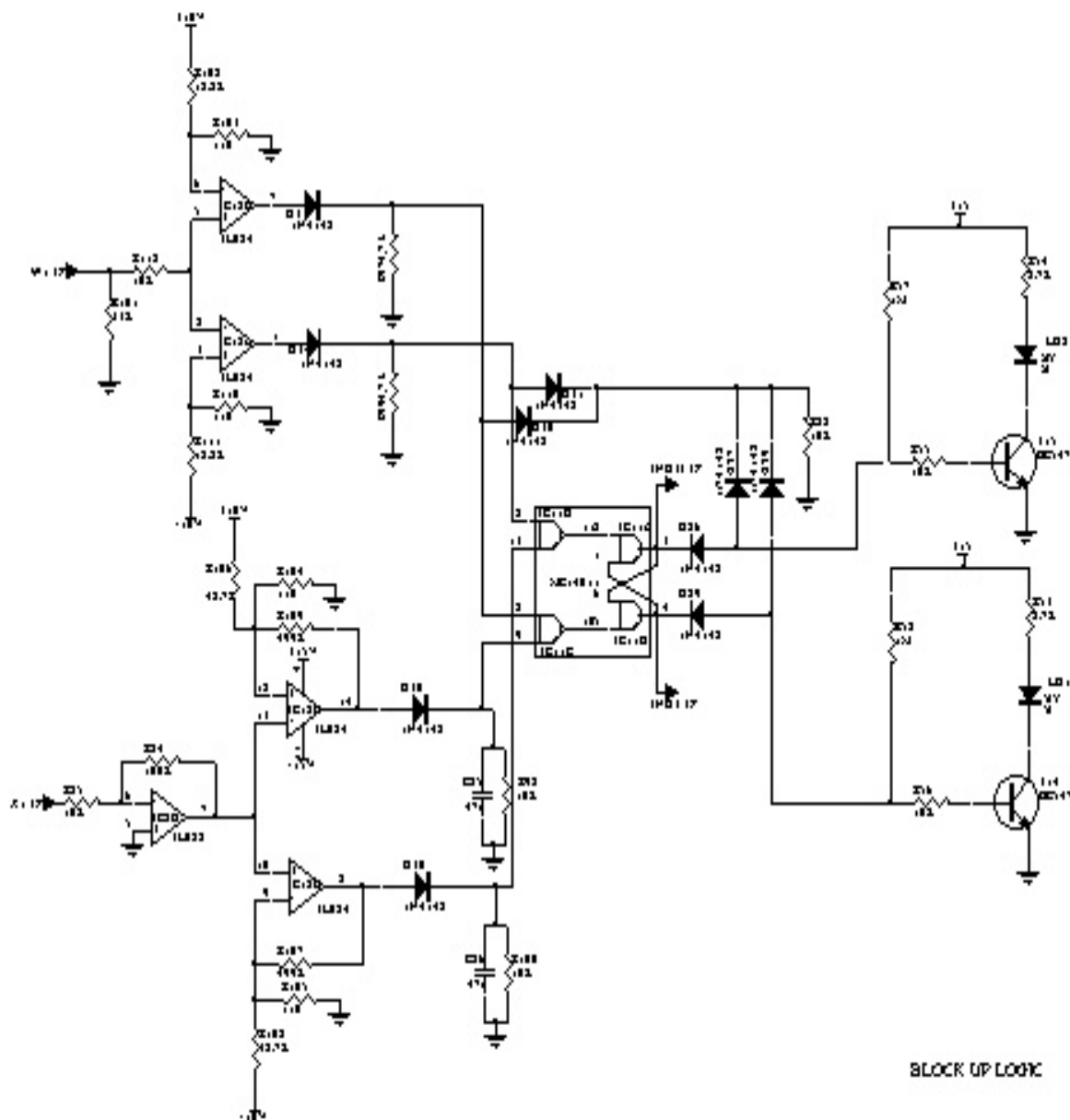
5.5 Βαθμίδα μπλοκαρίσματος πυροδοτικών παλμών (BLOCK UP LOGIC).

Σκοπός της βαθμίδας αυτής είναι να μπλοκάρει τους πυροδοτικούς παλμούς της βαθμίδας ελέγχου πυροδοτικών παλμών του σχήματος 5.6. Η βαθμίδα αυτή ελέγχεται από δύο σήματα εισόδου 'W1' και 'X1', μέσω του Computer logic. Οι δυο έξοδοι 'INH I' και 'INH II' ουσιαστικά αποκόπτουν τους πυροδοτικούς παλμούς της 'I' και 'II' βαθμίδας σκανδαλισμού του σχήματος 5.6. Με την συνεργασία τέλος των βαθμιδών Computer logic, Block up logic, Phase gate control και δύο αντιπαράλληλων ελεγχόμενων ανορθωτικών βαθμιδών μπορούμε να ελέγξουμε ένα μοτέρ DC αλλάζοντας την ταχύτητα και την φορά περιστροφής .



Σχήμα 5.11

Σχηματικό κύκλωμα βαθμίδας μπλοκαρίσματος πυροδοτικών παλμών πύλης.



Σχήμα 5.12

Στο σχήμα 5.12 φαίνεται το κύκλωμα της βαθμίδας μπλοκαρίσματος πυροδοτικών παλμών. Ανάλογα με την στάθμη της τάσης στις εισόδους W1,X1 έχουμε μπλοκάρισμα των παλμών εξόδου των βαθμίδων παραγωγής πυροδοτικών παλμών I και II της επόμενης παραγράφου.

Τα δύο σήματα X1 και W1 από την βαθμίδα του μικροϋπολογιστή οδηγούνται μέσω των R101,R112,R85,R84 και του αναστρέφων ενισχυτή IC8B στις εισόδους τεσσάρων συγκριτών. Οι συγκριτές IC12A-IC12B ελέγχουν πότε η είσοδος W1έχει θετικό μέτωπο ή αρνητικό μέτωπο τάσης και ανάλογα παράγουν δύο θετικές τάσεις +10V οι οποίες οδηγούνται στις εισόδους δύο πυλών NAND IC11D,IC11C. Στις ίδιες πύλες οδηγούνται και οι έξοδοι των άλλων δύο συγκριτών IC12C,IC12D.

Και αυτοί οι συγκριτές κάνουν την ίδια δουλειά όπως οι προηγούμενοι με την μόνη διαφορά ότι στην περίπτωση που η είσοδος X1 πάρει μηδενική τάση οι εξόδοι των συγκριτών θα περάσουν συγχρόνως στα +10V. Στην περίπτωση αυτή το RS flip-flop γύρω από το IC11 περνά από την κατάσταση SET στην κατάσταση RESET, διαδοχικά λόγω της παλμοσειράς W1 και τροφοδοτεί διαδοχικά με 0 και +15V τις εξόδους Q(ποδαράκι 4) και Q'(ποδαράκι 3) ενεργοποιώντας ή βγάζοντας εκτός λειτουργίας τις εισόδους INH I και INH II των βαθμιδών πυροδοτικών παλμών. Με αυτόν τον τρόπο μπορούμε με την χρήση δύο αντιπαράλληλων ελεγχόμενων ανορθωτικών διατάξεων να κατασκευάσουμε έναν cycloconverter μεταβλητής συχνότητας εξόδου, εξαρτώμενη από την επιλεγμένη συχνότητα της εισόδου W1.

Εάν τώρα έχουμε θετικό μέτωπο τάσης στην είσοδο X1, ανεξάρτητα από την είσοδο W1 έχουμε κατάσταση SET του flip-flop και +15V στην έξοδο INH I. Έτσι σταματούν οι παλμοί σκανδαλισμού της βαθμίδας I της επόμενης παραγράφου. Αντίστοιχα με αρνητικό μέτωπο τάσης στην X1 είσοδο έχουμε αποκοπή των παλμών της βαθμίδας II.

Τα τρανζίστορ T14 και T15 σε συνεργασία με τα LD1,LD2,R53 έως R58 και D26 έως D31 παρέχουν φωτεινές ενδείξεις για την κατάσταση της βαθμίδας μπλοκαρίσματος παλμών και κατά συνέπεια την ένδειξη λειτουργίας των ανορθωτών I και II.

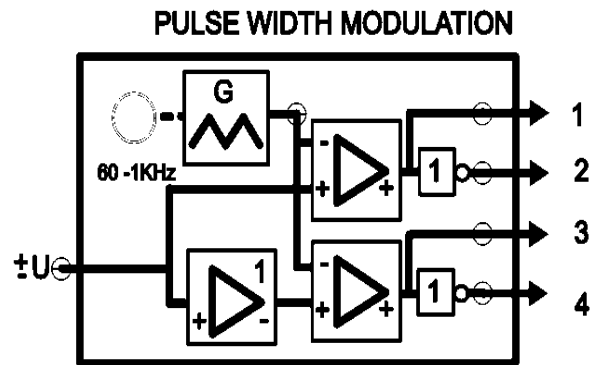
Η γεννήτρια ημιτόνου είναι βασισμένη στο ολοκληρωμένο ICL8038CCPD της εταιρίας Intersil. Οι αντιστάσεις R89 R90 και ο πυκνωτής C22 ρυθμίζουν τον χρονισμό του ολοκληρωμένου. Οι αντιστάσεις ρύθμισης R86-R87 ρυθμίζουν την συμμετρία της τάσης εξόδου του ολοκληρωμένου. Στο ποδαράκι 8 μέσω του ποτενσιόμετρου R91 και της αντίστασης R92 οδηγείται μια DC τάση με την οποία παρέχεται η δυνατότητα ρύθμισης της συχνότητας εξόδου μεταξύ 2-100 Hz.

Η έξοδος ποδαράκι 2 του IC 10 οδηγείται σε έναν αναστρέφων ενισχυτή ο οποίος ενισχύει το σήμα περίπου 5 φορές. Ο ενισχυτής αποτελείται από τα IC8A, R83-R88. Η έξοδος του ενισχυτή οδηγείται στο test point Gout.

5.6 Βαθμίδα διαμόρφωσης εύρους παλμού P.W.M. (pulse width modulation).

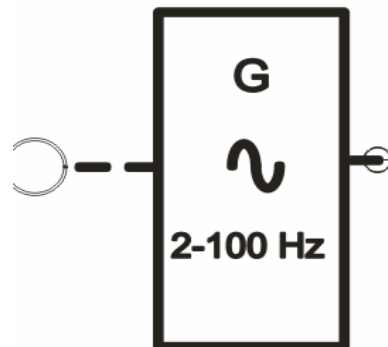
Στο σχήμα 5.13 βλέπουμε την βαθμίδα διαμόρφωσης εύρους παλμού. Σκοπός της βαθμίδας αυτής είναι η παραγωγή παλμών μεταβλητού εύρους για την οδήγηση της γέφυρας «H».

Το εύρος των παλμών εξόδου ρυθμίζεται τόσο από DC όσο και από εναλλασσόμενη τάση με την χρήση του μεταβλητού τροφοδοτικού (σχήμα 5.3) ή της γεννήτριας ημιτόνου (σχήμα 5.14).



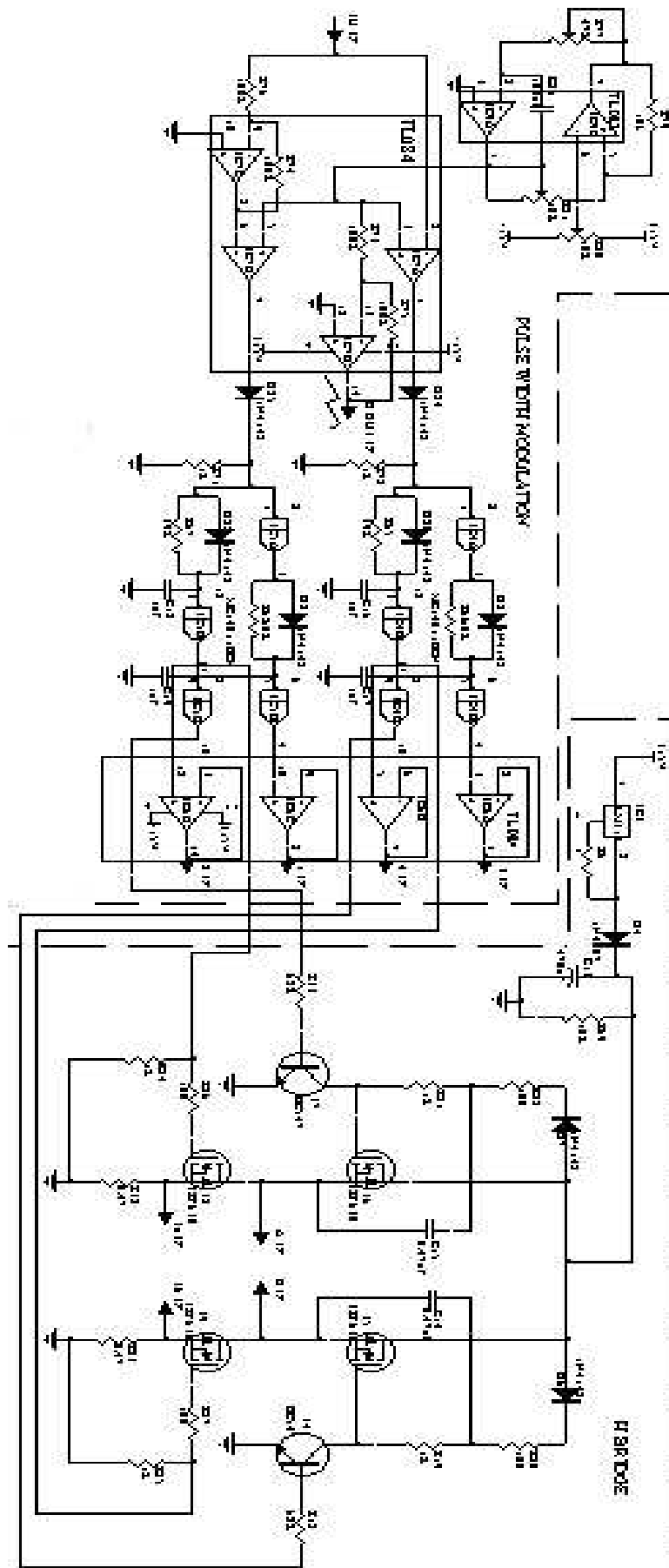
Σχήμα 5.13

Οι τέσσερις εξοδοί της βαθμίδας είναι συνδεδεμένοι με τις αντίστοιχες πύλες (Gates) των Mosfet της «H» γέφυρας. Τέλος με την χρήση της βαθμίδας αυτής και ενός κλάδου της γέφυρας «H» δημιουργούμε το κύκλωμα οδήγησης των DC to DC converters.



Σχήμα 5.14 Γεννήτρια ημιτόνου.

Σχηματικό σχέδιο βαθμίδας διαμόρφωσης εύρους παλμού P.W.M. (pulse width modulation).



Σχήμα 5.15

Οι τελεστικοί ενισχυτές IC9A-IC9B αποτελούν έναν ολοκληρωτή με ρυθμιζόμενη ενίσχυση. Με το ποτενσιόμετρο R80 ρυθμίζουμε την συχνότητα εξόδου του ολοκληρωτή αυτού. Η έξοδος πριονωτής μορφής οδηγείται στο κοινό άκρο σύνδεσης των IC7A-IC7B. Οι δυο αυτοί τελεστικοί αποτελούν δυο συγκριτές με τάσης αναφοράς την τάση εισόδου από το test point $\pm U$. Η τάση αυτή είναι η τάση offset η οποία οδηγείται στην αναστρέφουσα είσοδο IC7A ενώ στο IC7B οδηγείται μέσω ενός μοναδιαίου αναστρέφων ενισχυτή IC7C. Έτσι η τάση αναφοράς για τους δυο τελεστικούς θα έχει πάντα αντίθετο πρόσημο. Όταν το IC7A έχει έξοδο θετικό κόρο το IC7B θα έχει αρνητικό, δηλαδή τις δυο τάσεις τροφοδοσίας $\pm 15V$.

Η έξοδος του IC7D οδηγείται στο Gout test point απ' όπου παρατηρείται η πριονωτή κυματομορφή του ολοκληρωτή.

Τα δυο σήματα από τις εξόδους των δυο συγκριτών οδηγούνται σε δυο όμοιες συμμετρικές διατάξεις οι οποίες πραγματοποιούν μια χρονοκαθυστέρηση στους παλμούς εξόδου, με δικτύωματα R,C,D και πύλες NAND. Αυτό γίνεται για να αποφεύγονται φαινόμενα αγωγής δυο Mosfet την ίδια χρονική στιγμή στον ίδιο κλάδο της γέφυρας 'H'. Το κύκλωμα αυτό δημιουργίας νεκρών χρόνων μεταξύ των παλμών είναι κατασκευασμένο γύρω από τα ολοκληρωμένα IC4 και IC5.

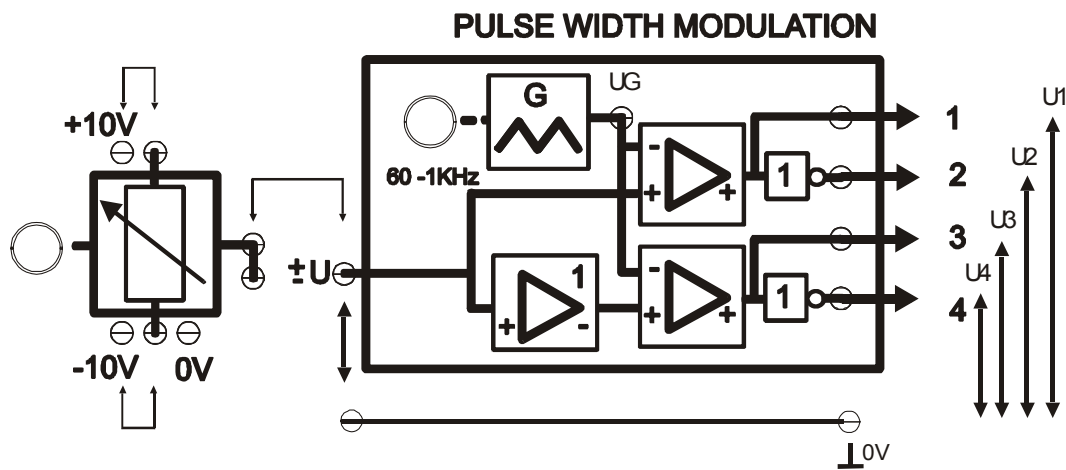
Οι τέσσερις τελεστικοί που αποτελούν το IC6 είναι συνδεδεσμένοι σαν buffers και οδηγούν τα test points 1-4 ώστε να υπάρχει η δυνατότητα παρακολούθησης των τεσσάρων καναλιών εξόδου του PWM διαμορφωτή.

Η γέφυρα 'H' αποτελείται από τέσσερα Mosfet IRF 630 με εσωτερικές διόδους damper. Τα Mosfet T8-T9 αποτελούν το low side της γέφυρας ενώ τα T5-T6 το high side. Η γέφυρα τροφοδοτείται από ένα regulator LM317 σε συνδεσμολογία πηγής σταθερού ρεύματος 1A. Οι διόδοι D6-D7 εξασφαλίζουν την ροή ρεύματος μόνο προς μια κατεύθυνση κατά τον χρόνο που τα τρανζίστορ T4-T7 είναι στην κατάσταση off. Τα τέσσερα κανάλια PWM οδηγούνται, στο low side της γέφυρας μέσω αντιστάσεων ενώ στο high side χρησιμοποιούνται δύο τρανζίστορ οδήγησης T4-T7. Οι πυκνωτές C14-C15 χρησιμοποιούνται για την δημιουργία κατάλληλου δυναμικού μεταξύ gate-source των high side Mosfet κατά τον χρόνο που τα T4-T7 περνούν στην κατάσταση on.

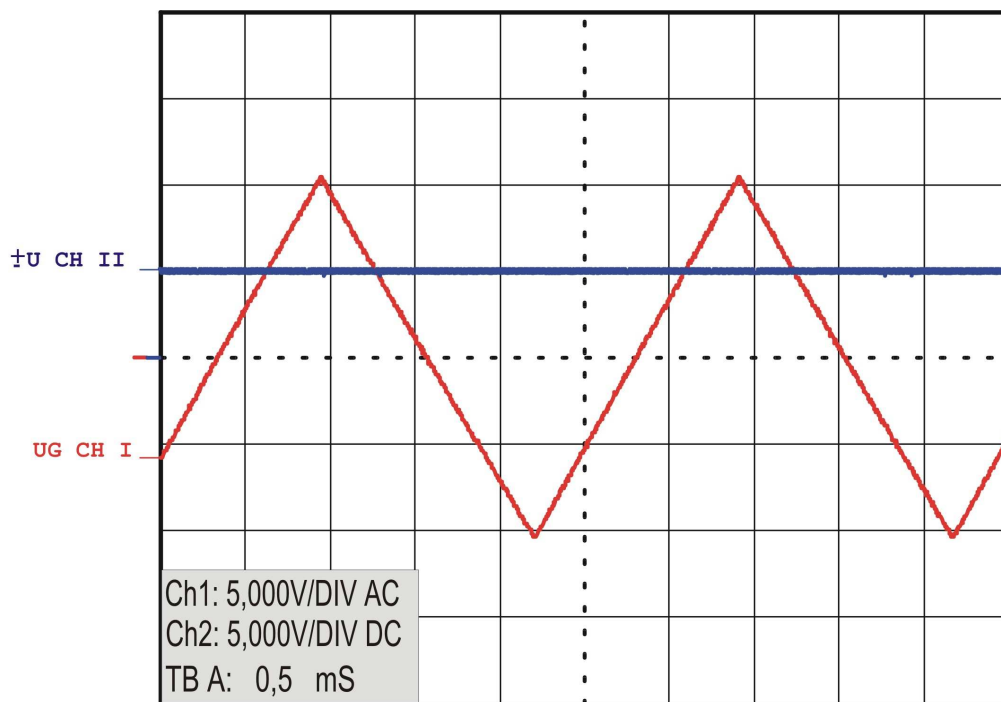
Τα test points A-B αποτελούν τα άκρα σύνδεσης του φορτίου.

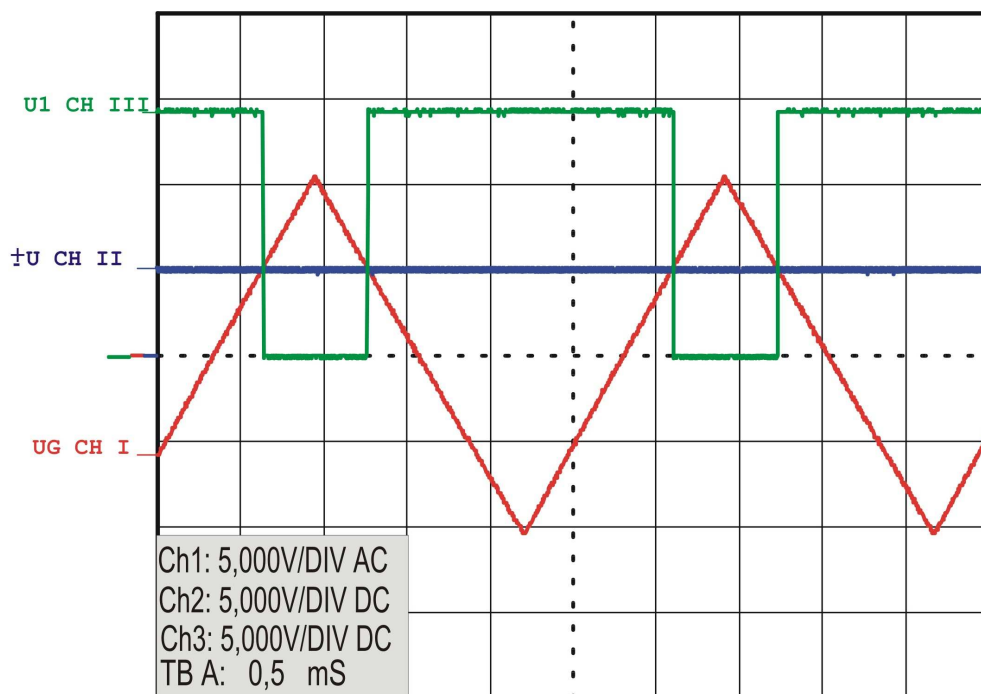
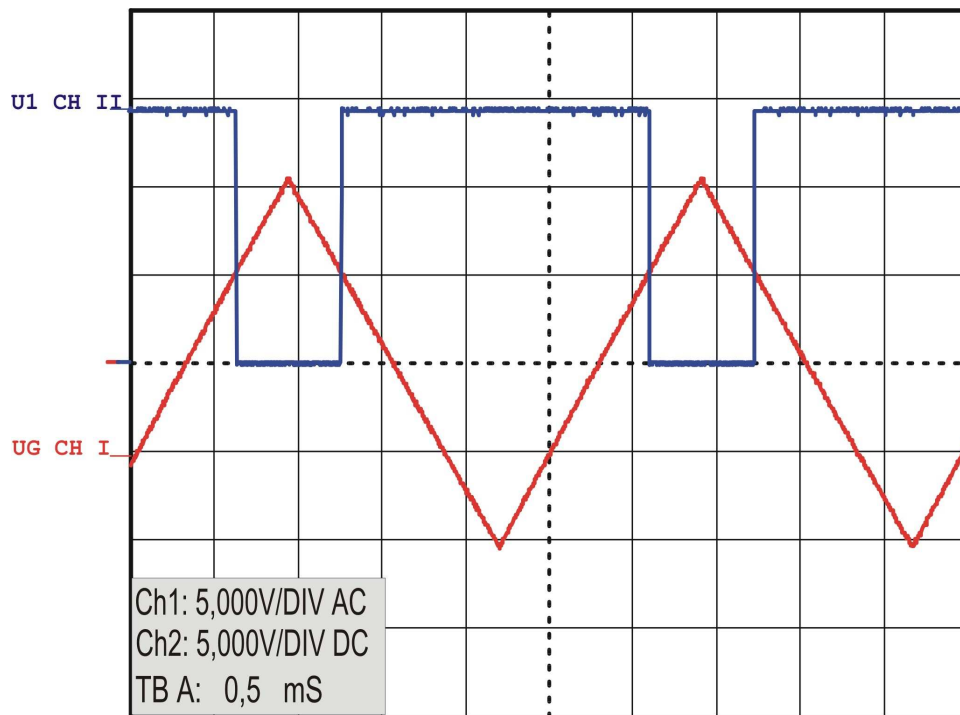
Κυματομορφές εξόδου βαθμίδας διαμόρφωσης εύρους παλμού P.W.M. (pulse width modulation).

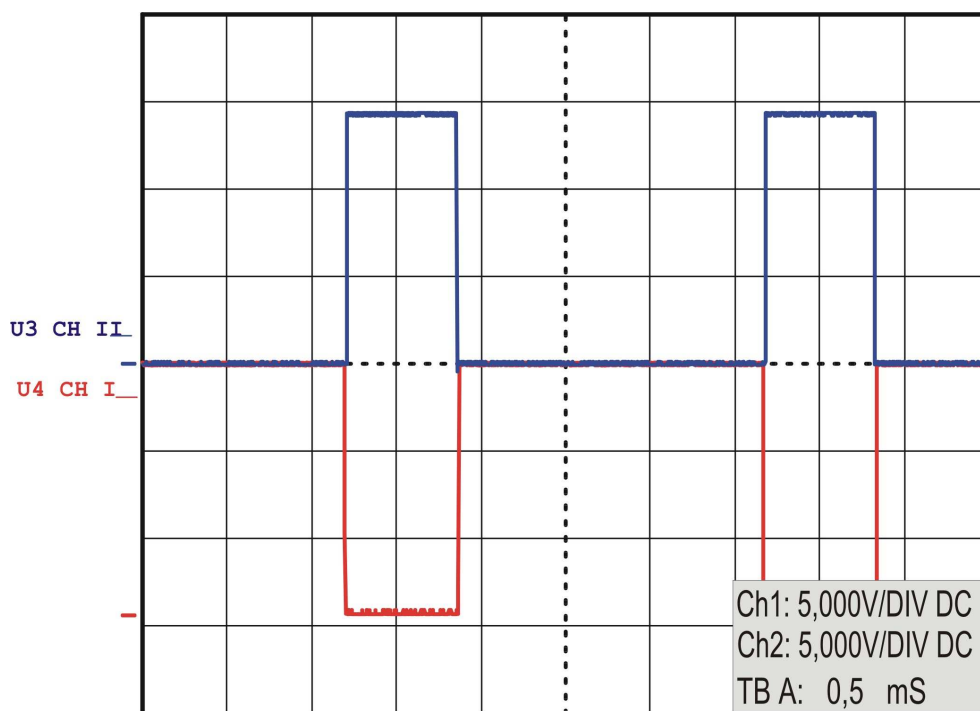
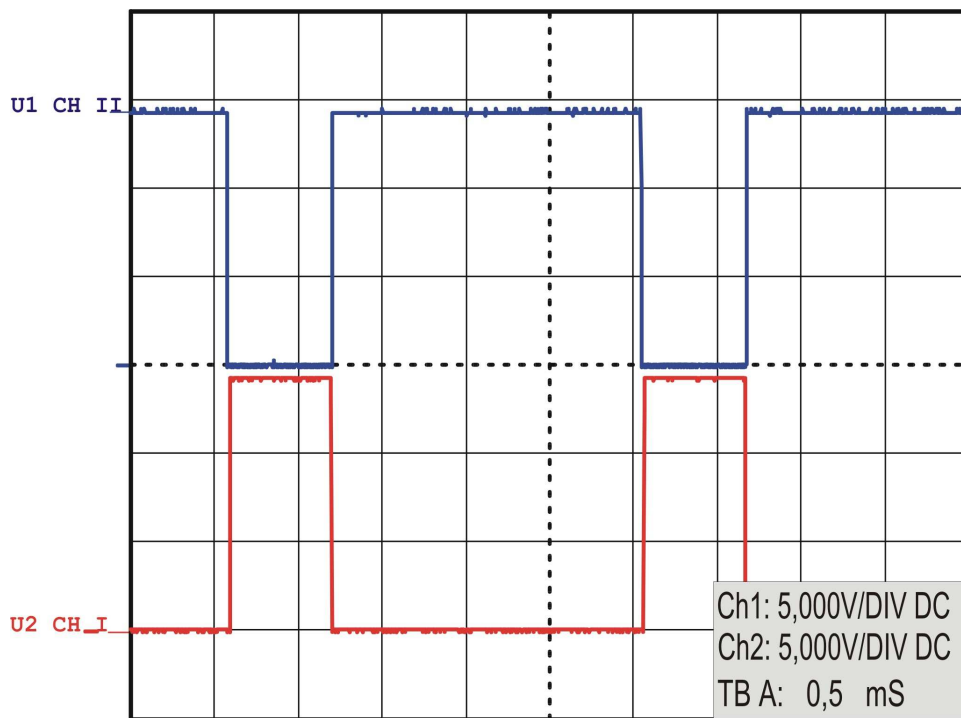
Στα παρακάτω διαγράμματα βλέπουμε τις κυματομορφές εξόδου της βαθμίδας διαμόρφωσης εύρους παλμού P.W.M. (pulse width modulation) σχήμα 4.9, σε σχέση με το σήμα εισόδου. Πολύ χρήσιμα για την κατανόηση της λειτουργίας της γέφυρας Η είναι και τα διαγράμματα που απεικονίζουν τις χρονικές διαφορές μεταξύ των παλμών εξόδου.

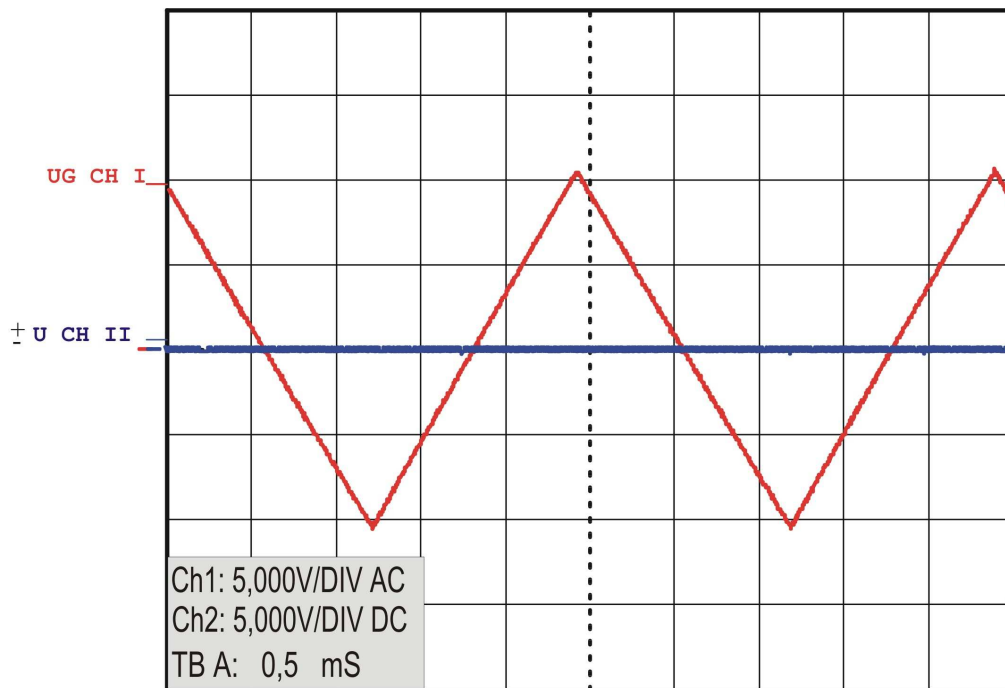
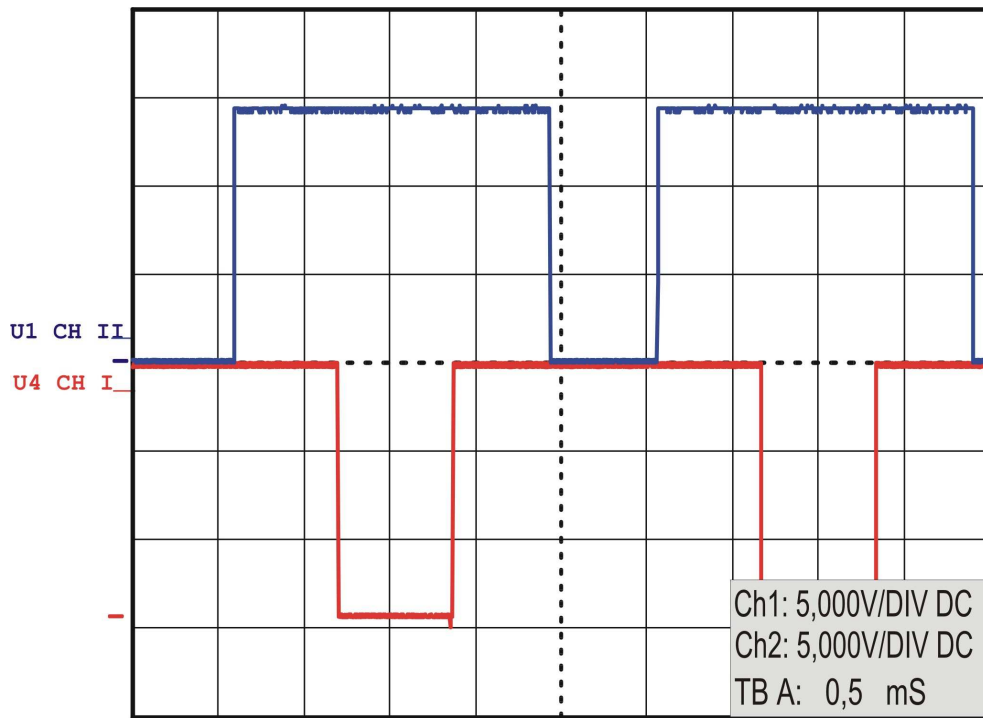


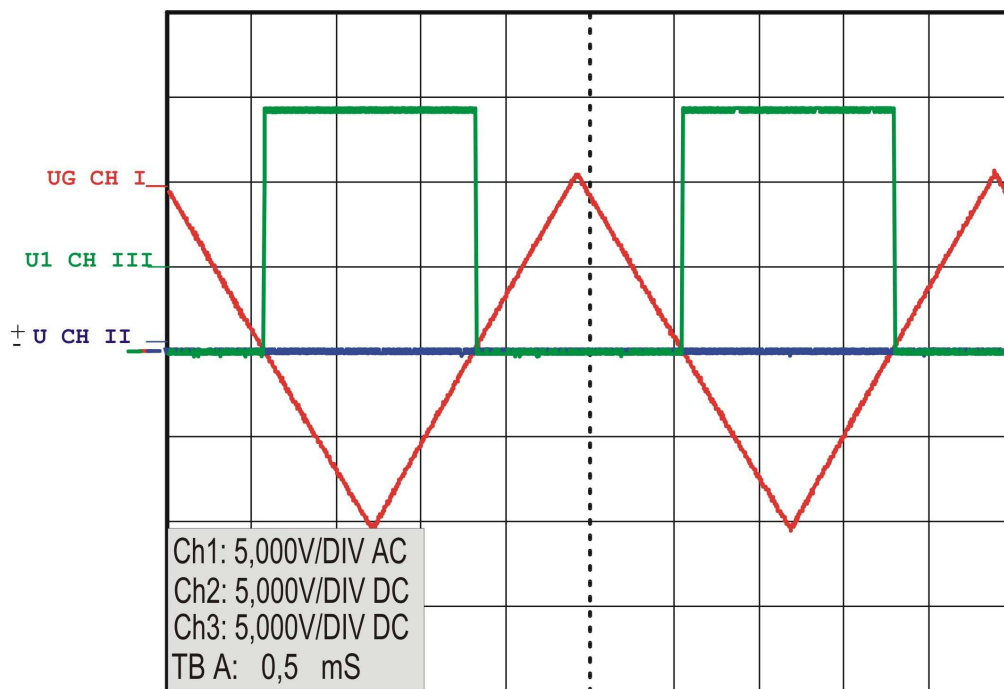
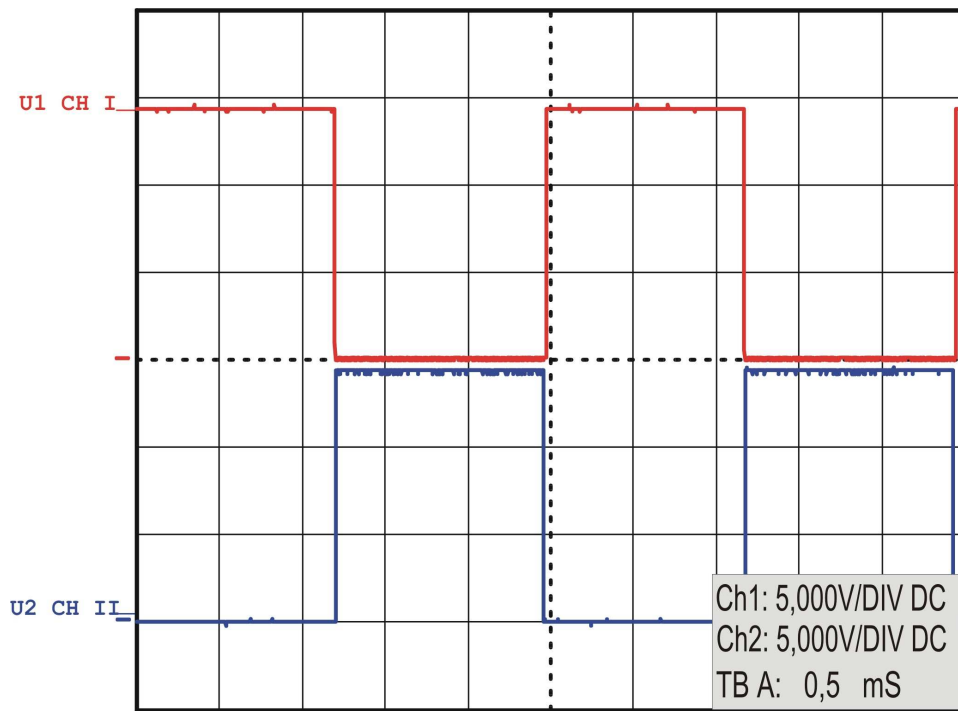
Σχήμα 5.16

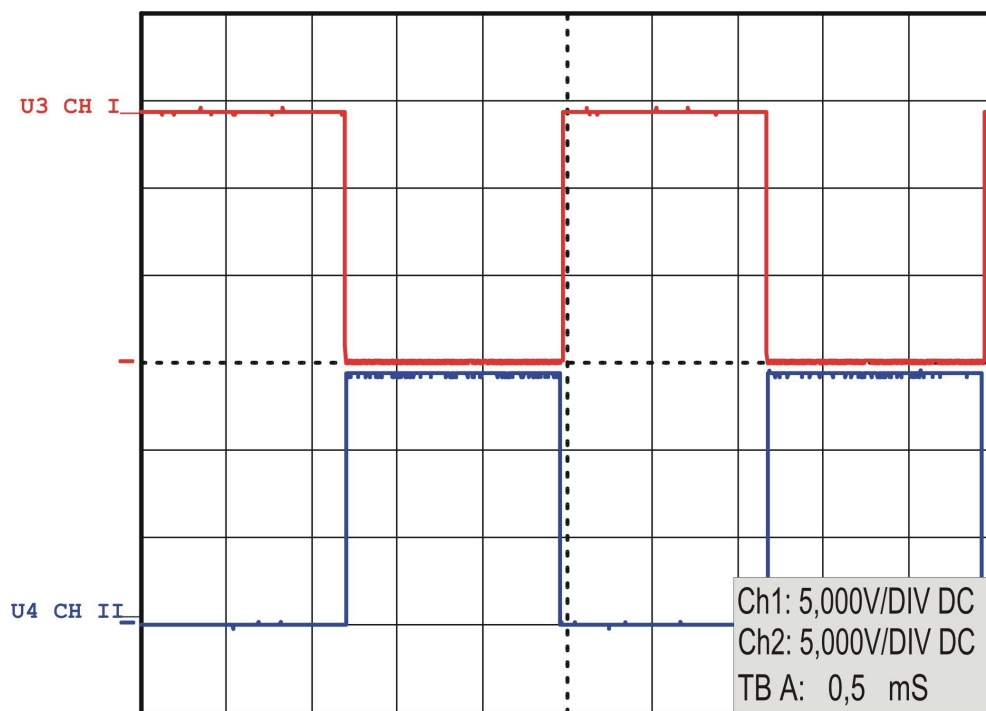
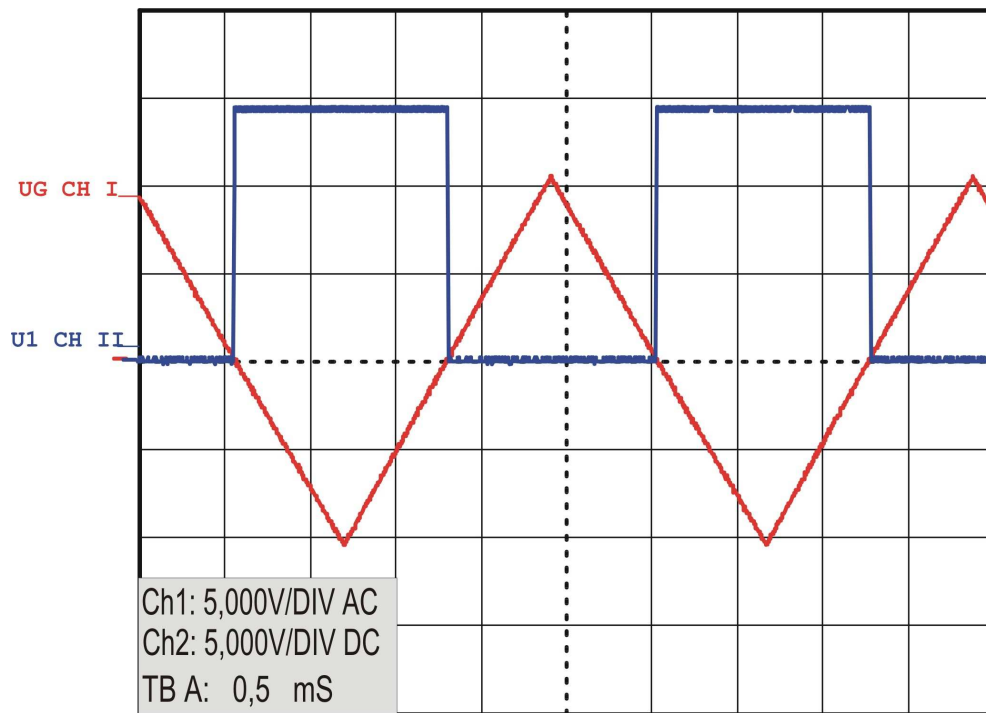


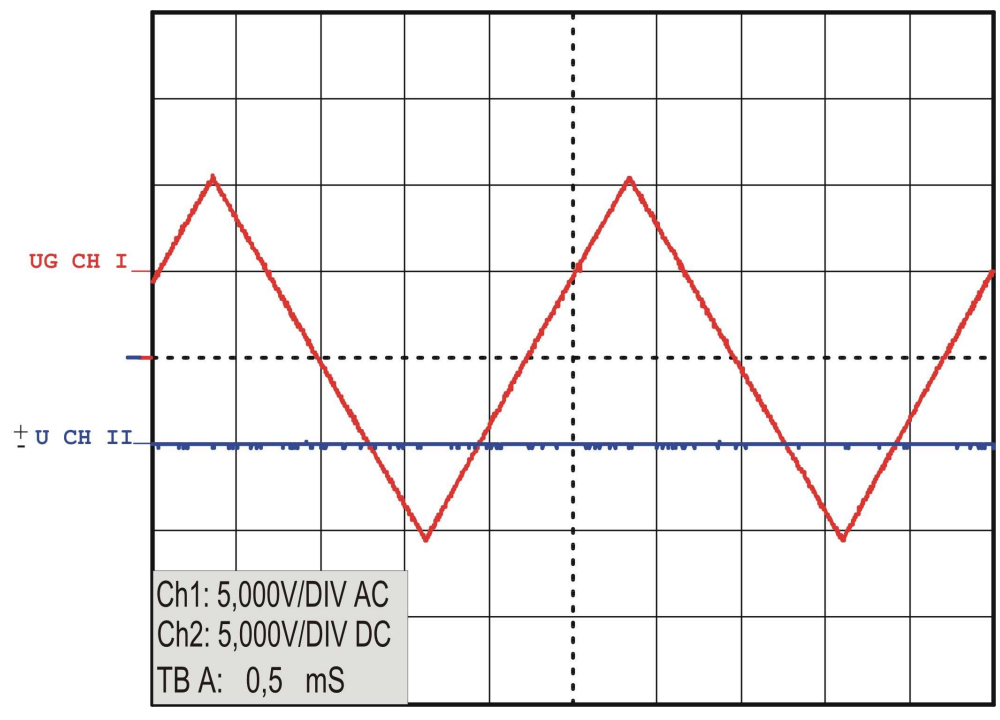
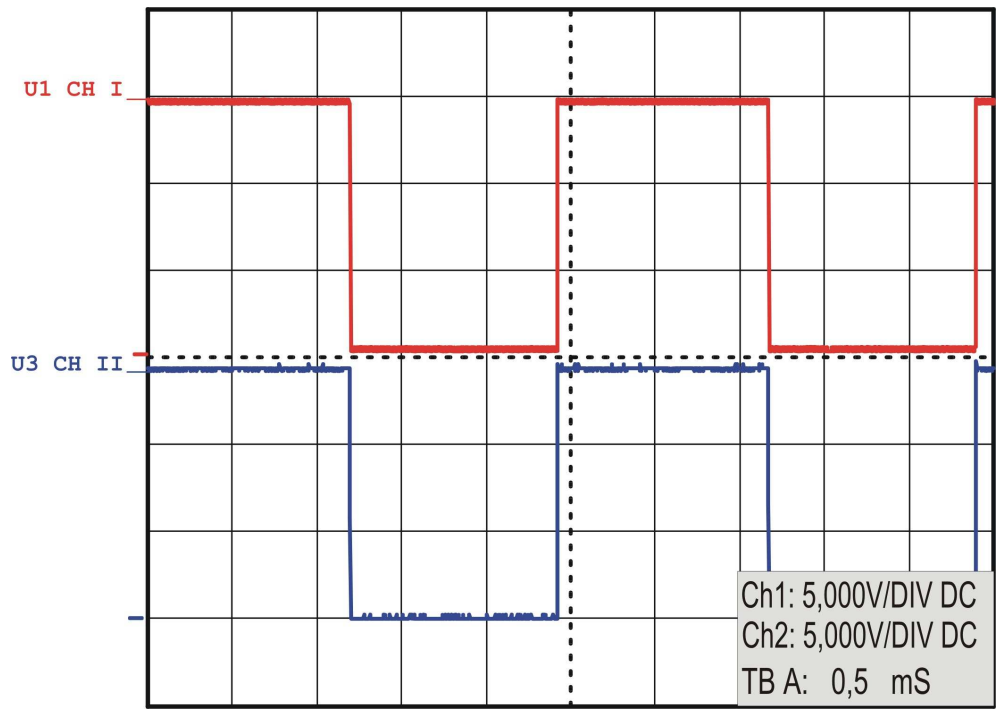


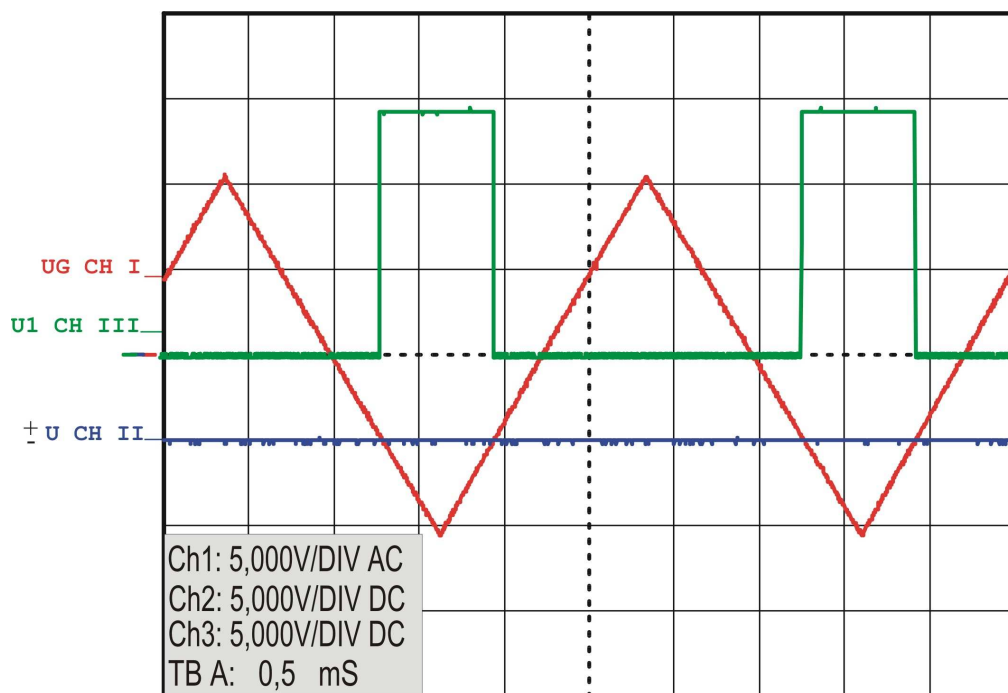
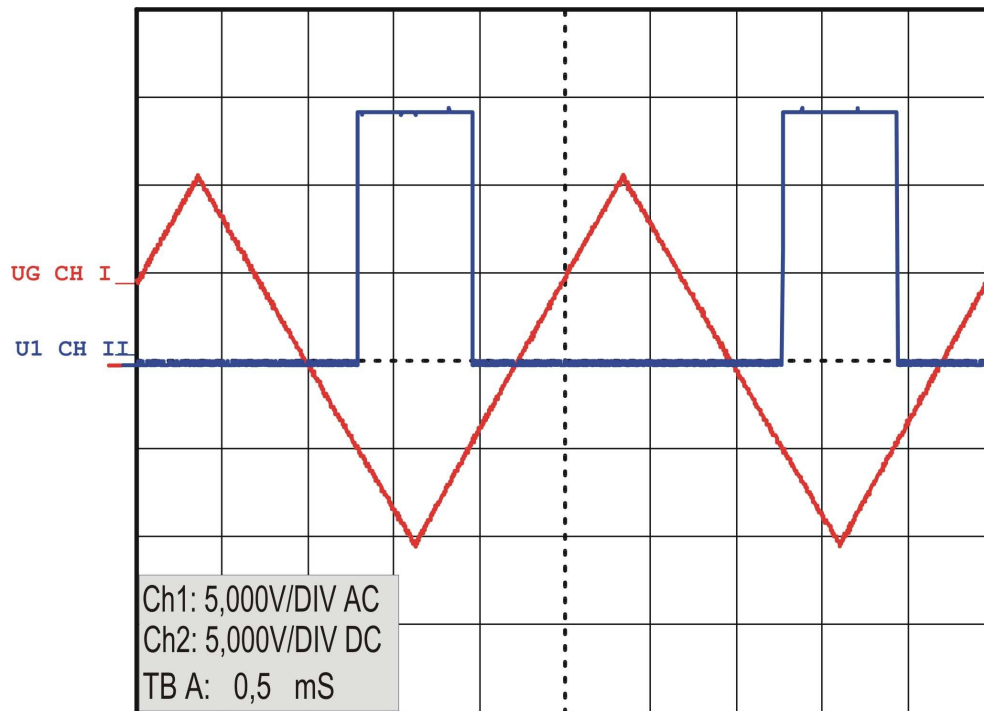


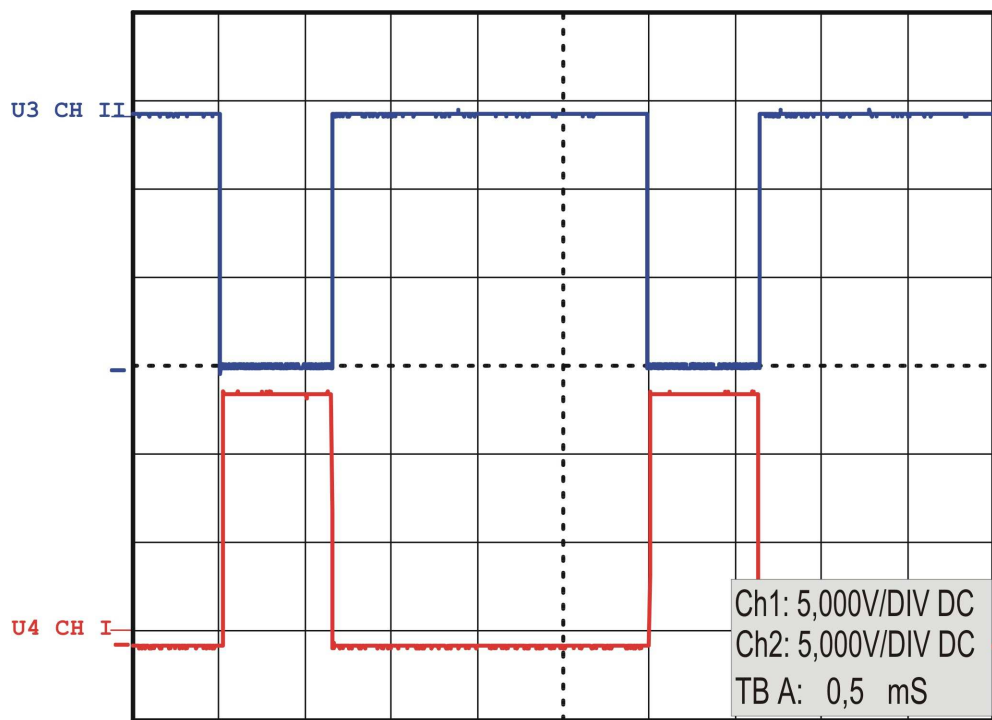
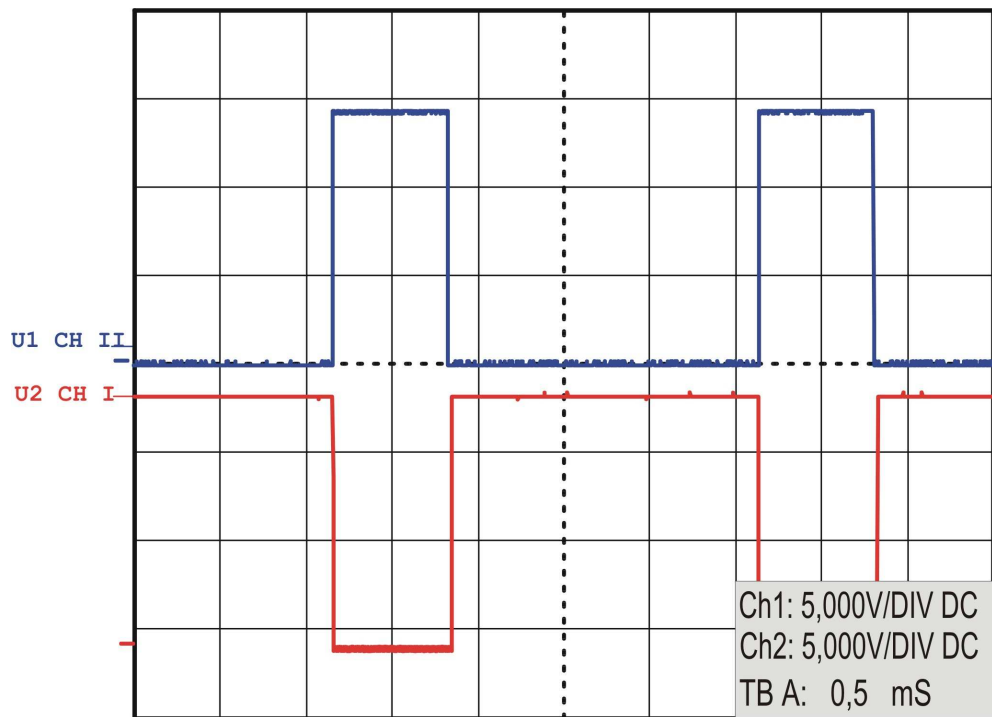


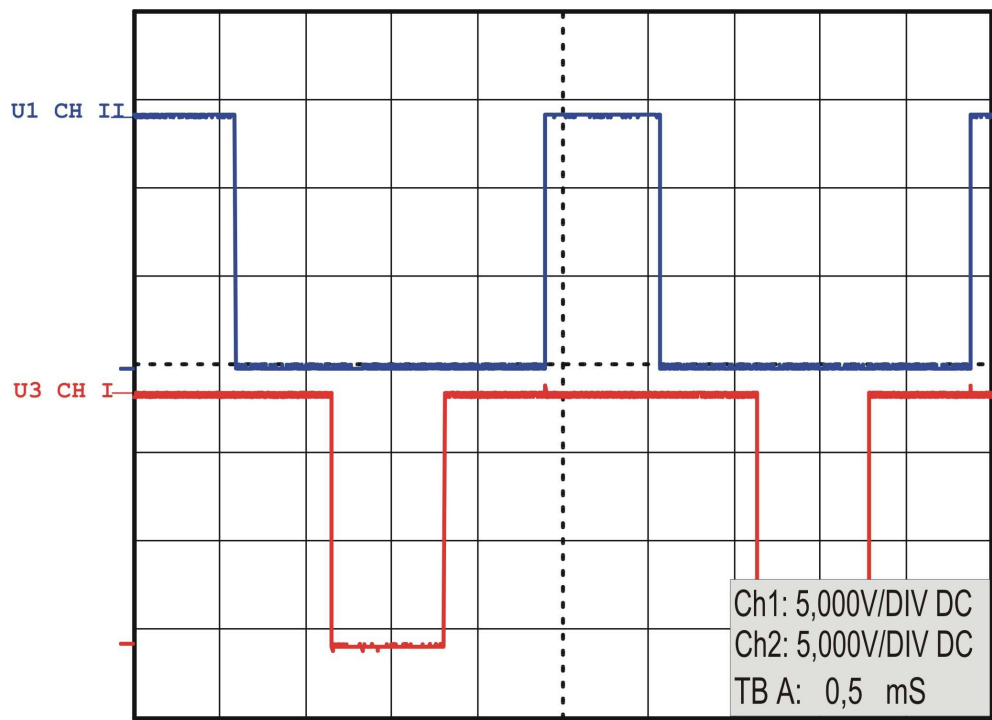










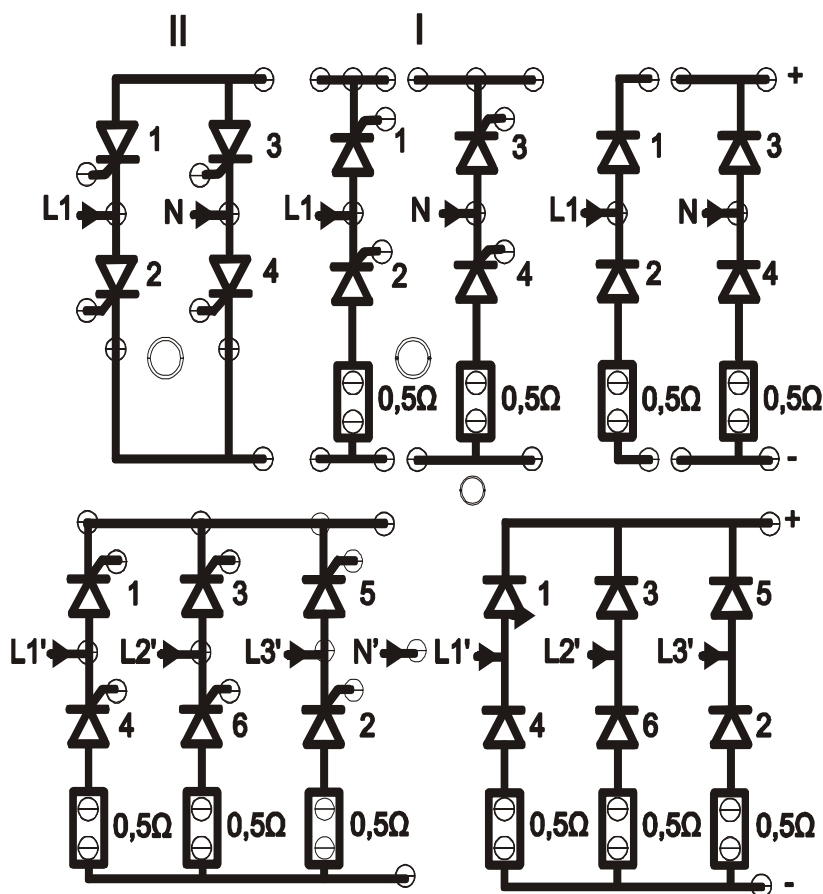


5.7 Κυκλώματα ανορθωτικών διατάξεων.

Ελεγχόμενες - Μη ελεγχόμενες ανορθωτικές διατάξεις.

Στην διάθεση μας για να πειραματιστούμε με τους μη ελεγχόμενους όσο και με τους ελεγχόμενους ανορθωτές, έχουμε τις ανορθωτικές διατάξεις του σχήματος 5.17.

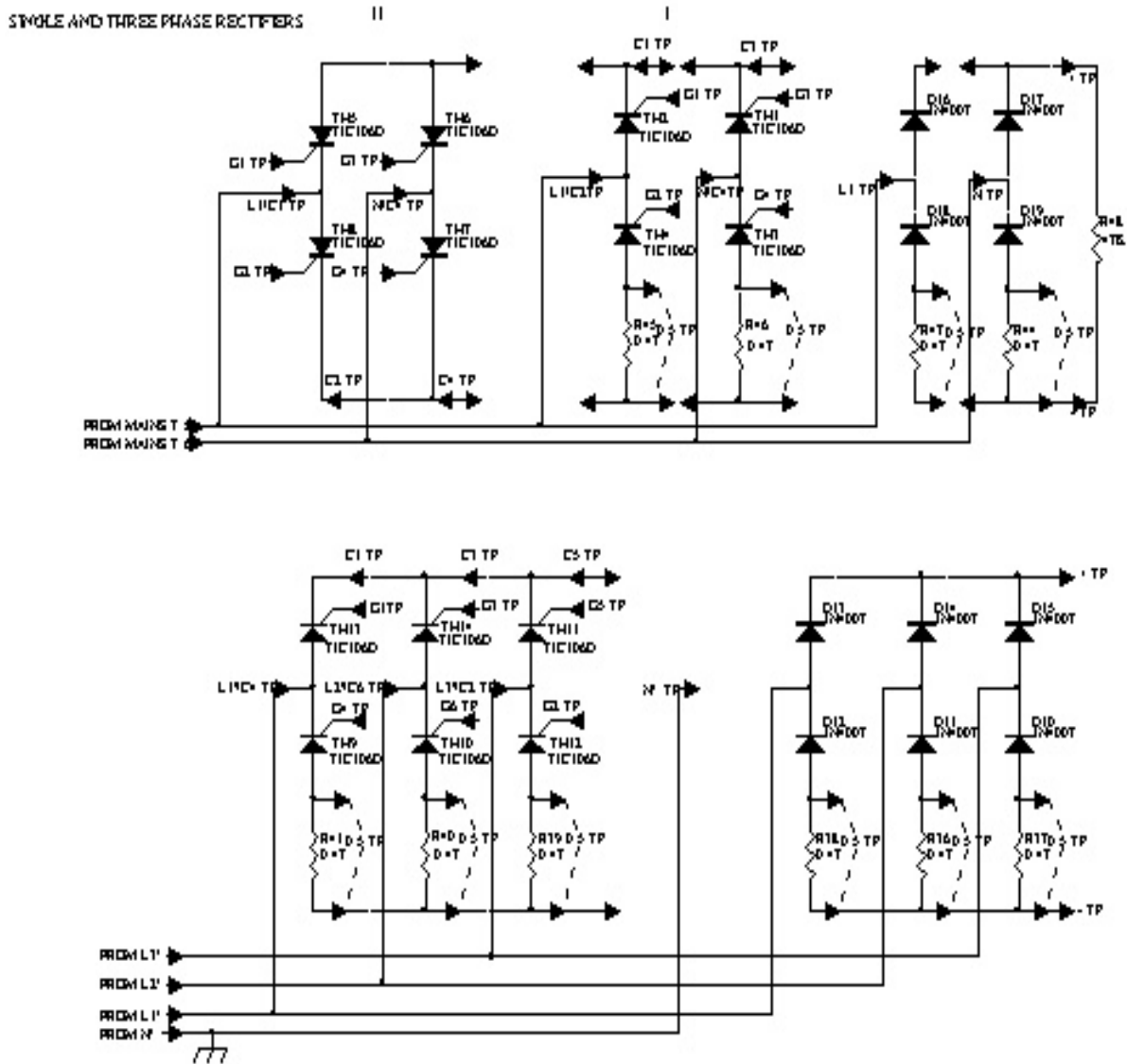
Όσο αφορά τις μονοφασικές ανορθωτικές διατάξεις, η συσκευή έχει μία γέφυρα μη ελεγχόμενη και δύο αντιπαράλληλες πλήρως ελεγχόμενες 'I' και 'II'. Οι γέφυρες αυτές είναι μαρκαρισμένες με I και II ώστε ο ασκούμενος να γνωρίζει με ποια τμήματα της βαθμίδας συγχρονισμού και πυροδοτικών παλμών θα πρέπει να σκανδαλίσει τις δύο αυτές διατάξεις.



Σχήμα 5.17

Στους τριφασικούς μετατροπείς έχουμε στην διάθεση μας δύο τριφασικές γέφυρες, μία μη ελεγχόμενη και μία πλήρως ελεγχόμενη όπως βλέπουμε στο σχήμα 5.17. Σε διάφορους κλάδους των διατάξεων αυτών βλέπουμε συνδεδεμένες αντιστάσεις των 0.5Ω για την μετατροπή του ρεύματος σε τάση ώστε να μπορούμε να δούμε στον παλμογράφο την μορφή του ρεύματος του κάθε κλάδου.

Κυκλώματα ανορθωτικών διατάξεων .



Σχήμα 5.18

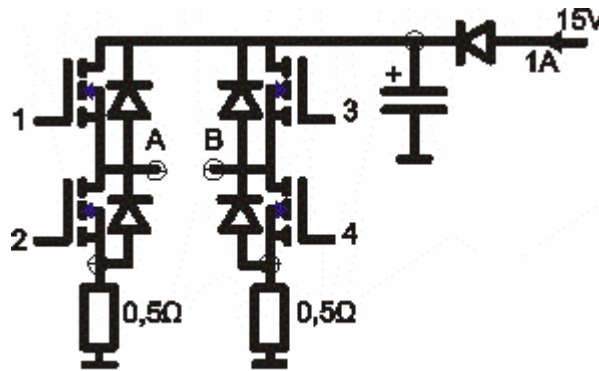
Στο σχήμα 5.18 φαίνονται μονοφασικές και τριφασικές ανορθωτικές διατάξεις ελεγχόμενες και μη ελεγχόμενες.

Οι μη ελεγχόμενες διατάξεις αποτελούνται από κατάλληλα συνδεσμολογημένες διόδους ανόρθωσης 1N4007 και αντιστάσεις μετατροπής σε διάφορους κλάδους, του ρεύματος σε τάση για την απεικόνιση σε παλμογράφο.

Οι ελεγχόμενοι ανορθωτές είναι συνδεσμολογημένοι με SCRs sensitive gate της εταιρίας Texas semiconductors TIC106D. Και στα ανορθωτικά αυτά κυκλώματα έχουν προστεθεί αντιστάσεις μέτρησης.

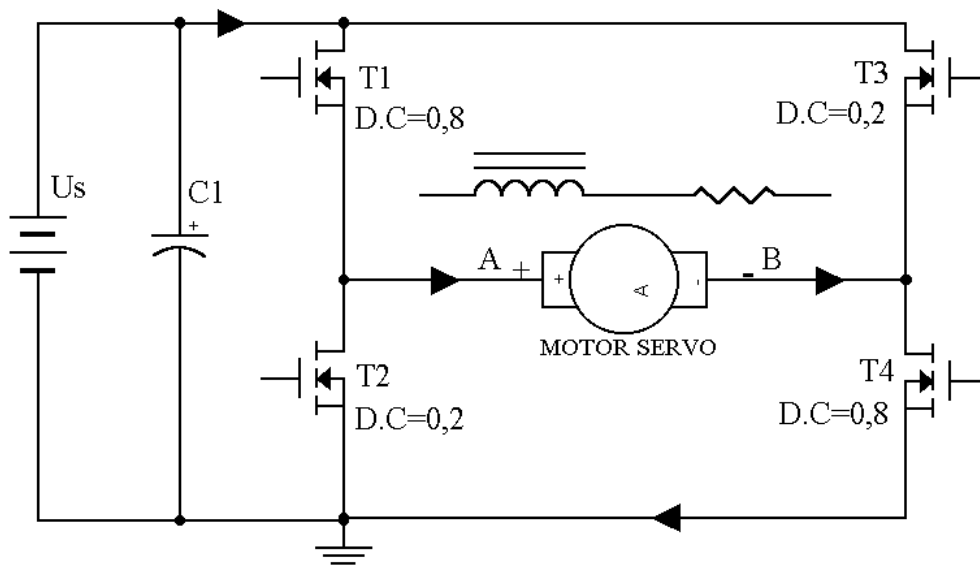
5.8 Η γέφυρα Η.

Η γέφυρα 'Η' του σχήματος 5.19 ανήκει στην κατηγορία των Inverters. Αποτελείται από 4 Mosfet N channel τα οποία τροφοδοτούνται από μία πηγή σταθερού ρεύματος 15V/1A.



Σχήμα 5.19

Η πηγή αυτή χρησιμοποιείται για να προστατέψει τα Mosfet στην περίπτωση σύνδεσης μεταξύ των ακροδεκτών 'A-B' φορτίου χαμηλής αντιστάσεως επίσης και τα τέσσερα Mosfet φέρουν διόδους απόσβεσης (Dampner diodes) μεταξύ drain-source για μεγαλύτερη προστασία κατά την οδήγηση επαγωγικών φορτίων όπως ηλεκτροκινητήρων. Οι πύλες των Mosfet οδηγούνται από την βαθμίδα διαμόρφωσης εύρους παλμού.

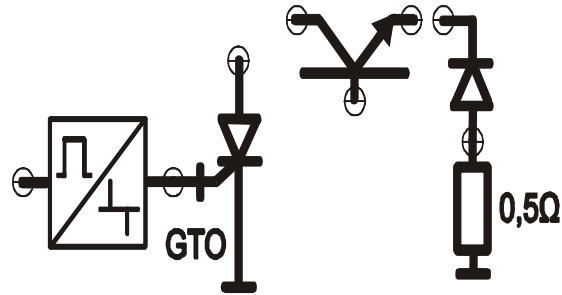


Σχήμα 5.20 Τυπικό κύκλωμα οδήγησης κινητήρα με γέφυρα Η.

5.9 Κυκλωματικά στοιχεία DC-DC μετατροπών.

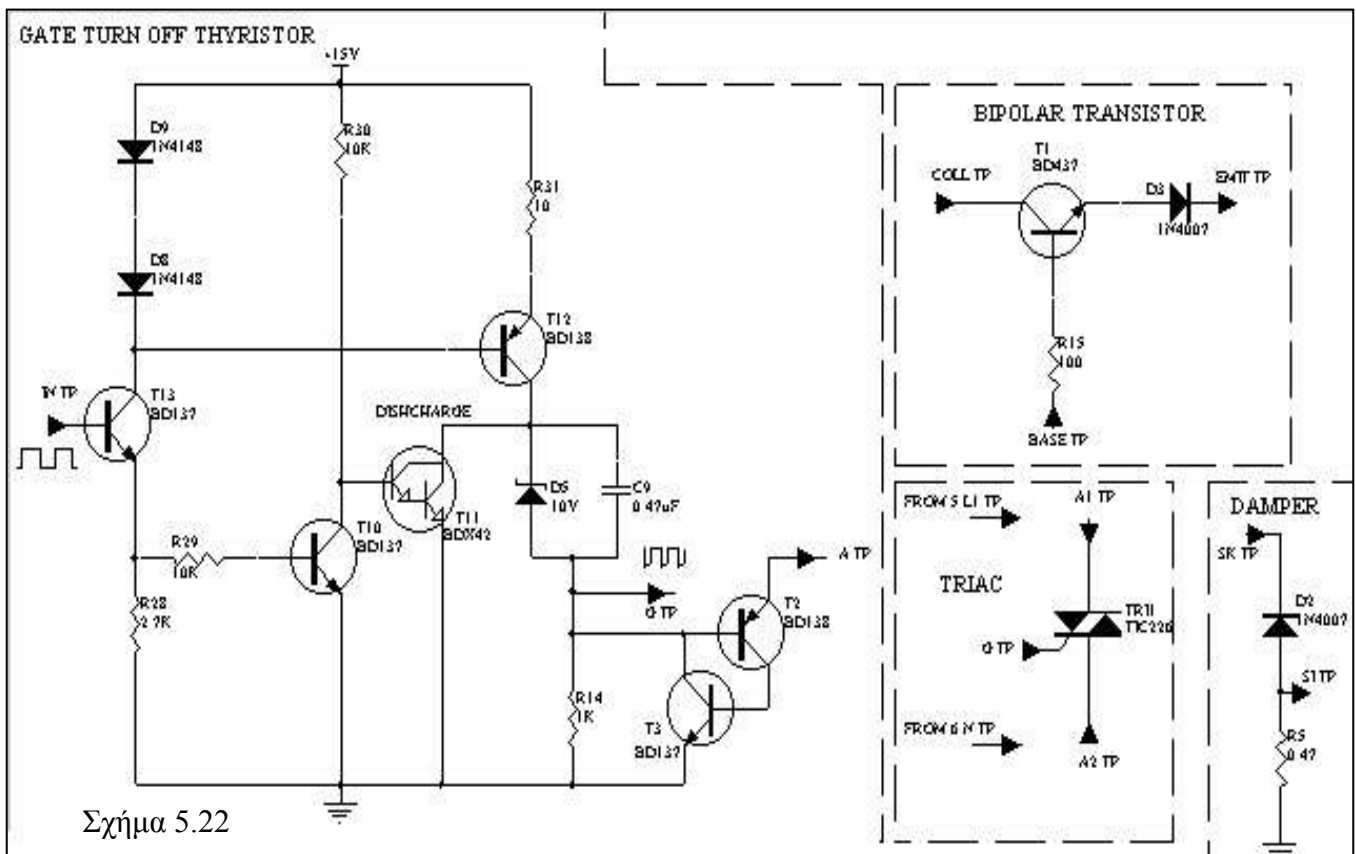
Για την διεξαγωγή πειραμάτων με τους τρεις τύπους chopper (up, down, flyback) χρησιμοποιούμε το διπολικό NPN τρανζίστορ του σχήματος καθώς και το GTO (Gate Turn Off) θυρίστορ του σχήματος 5.21.

Η οδήγηση των δύο αυτών στοιχείων γίνεται μέσω της βαθμίδας διαμόρφωσης εύρους παλμού και του ενός κλάδου της γέφυρας 'H'.



Σχήμα 5.21

Κυκλωματικά στοιχεία των DC-DC, AC-AC, μετατροπών.



Σχήμα 5.22

Στο σχήμα 5.22 φαίνονται το διπολικό τρανζίστορ, το Triac, η δίοδος μεταγωγής και το Gate turn off Thyristor με το κύκλωμα μετατροπής PWM σε παλμούς ON-OFF.

Το διπολικό τρανζίστορ αποτελείται από τα T1,R15 και D3 με τρεις ακροδέκτες σύνδεσης στην πρόσοψη της συσκευής.

Στο Triac TR11 δεν χρησιμοποιείται κάποιο επιπλέον στοιχείο και βγάζει και αυτό τρεις ακροδέκτες σύνδεσης.

Η δίοδος μεταγωγής D2 είναι συνδεδεμένη με μια αντίσταση μέτρησης R5 με εξόδους δυο test points.

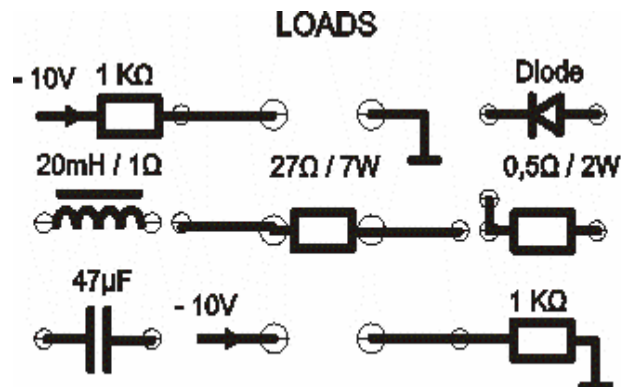
Τα τρανζίστορ T2-T3 αποτελούν το GTO θυρίστορ με έναν ακροδέκτη σύνδεσης. Η είσοδος PWM συμβολίζεται με το in test point και οδηγείται στην βάση του T13. Όταν στην βάση του T13 φθάσει ένας θετικός παλμός πολώνεται το T12 ορθά και ξεκινάει η διαδικασία φόρτισης του πυκνωτή C9. Ρόλος της διόδου ζένερ D5 είναι, η τάση φόρτισης του πυκνωτή C9 να μην ξεπεράσει την τιμή των 10V. Κατά τον χρόνο που φορτίζεται ο C9 με σταθερό ρεύμα λόγω του T12 τα τρανζίστορ T2 και T3 οδηγούνται στον κόρο με αποτέλεσμα την μανδάλωση του GTO.

Κατά τον χρόνο που η βάση του T13 οδηγείται στο ground μέσω του σήματος PWM (δηλαδή έχουμε λογικό '0') το T12 αποκόπτεται και σταματά η φόρτιση του C9. Ανάλογα έχουμε αποκοπή του T10 και οδήγηση του T11 μέσω της R30 στον κόρο και την απότομη εκφόρτιση του πυκνωτή C9. Λόγω του ότι ο πυκνωτής C9 εκφορτίζεται απότομα το δυναμικό που αναπτύσσεται στην R14 είναι έντονα αρνητικό με αποτέλεσμα την αποκοπή των T2-T3 και κατά συνέπεια του GTO.

5.10 Φορτία.

Στο παρακάτω σχήμα βλέπουμε τα διάφορα φορτία της συσκευής τα οποία είναι διαθέσιμα κατά την πραγματοποίηση κυκλωματικών διατάξεων.

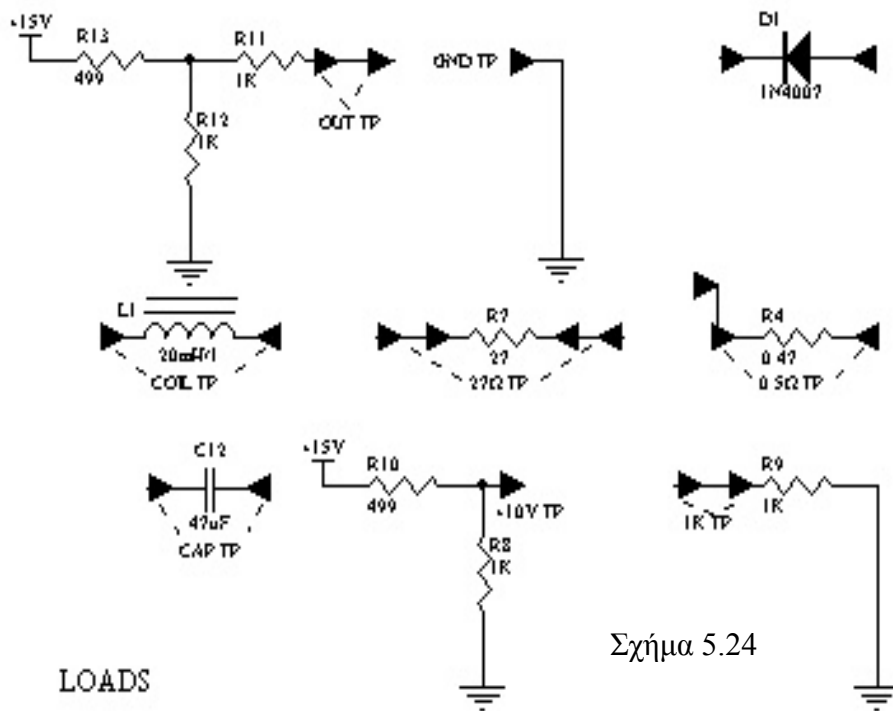
Η συσκευή διαθέτει τρεις αντιστάσεις $1\text{K}\Omega$, 27Ω και $0,5\Omega$, ένα πηνίο τύπου Choke (χαμηλών συχνοτήτων) 20mH και έναν πυκνωτή $47\mu\text{F}$. Στους 6 ακροδέκτες 4mm μπορούμε να συνδέσουμε ένα PTC, μια λυχνία 12V και ένα LDR τα οποία βρίσκονται σε ειδικό κουτί το οποίο συνδέουμε σε δύο ασκήσεις που αφορούν τους μετατροπείς AC-AC και DC-AC.



Σχήμα 5.23

Η διάδοδος που φαίνεται στο σχήμα 5.23 είναι ένα επιπλέον στοιχείο το οποίο μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε σε όποια κυκλωματική διάταξη επιθυμούμε.

Σχηματικό κύκλωμα φορτίων.



Σχήμα 5.24

Η συσκευή διαθέτει τρεις αντιστάσεις 1KΩ, 27Ω και 0,47Ω, ένα πηνίο τύπου Choke (χαμηλών συχνοτήτων) 20mH και έναν πυκνωτή 47μF. Στα 6 test points 4mm μπορούμε να συνδέσουμε ένα PTC, μια λυχνία 12V και ένα LDR τα οποία βρίσκονται σε ειδικό κουτί.

Κεφάλαιο 6^ο

6.1 Επέκταση δυνατοτήτων του Powerboard.

6.1.1 Σκοπός της εργασίας.

Όπως αναφέρθηκε και στην αρχή της εργασίας, σκοπός της είναι η κατανόηση της θεωρίας των εξαρτημάτων αλλά και των κυκλωμάτων που συναντάμε στο κλάδο των ηλεκτρονικών ισχύος. Στο κεφάλαιο αυτό θα αναλυθεί ο τρόπος με τον οποίο η παρούσα εργασία μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως επέκταση του ήδη υπάρχον Powerboard για τον πλήρη έλεγχο D.C. κινητήρων (κινητήρων συνεχούς ρεύματος).

Με τον όρο ‘πλήρη έλεγχο’ ενός κινητήρα εννοούμε τη ρύθμιση στροφών του (αργή ή γρήγορη κίνηση), την ακινητοποίησή του σε περίπτωση ανάγκης (φρένο) και τέλος την αλλαγή της φοράς λειτουργίας του (δεξιόστροφη ή αριστερόστροφη κίνηση).

Τα παραπάνω θα υλοποιηθούν με δύο διαφορετικές μεθόδους. Η μία μέθοδος στηρίζεται στη λειτουργία μιας τριφασικής πλήρως ελεγχόμενης γέφυρας με thyristors, ενώ η άλλη στη διαμόρφωση εύρους των παλμών ενός Mosfet (P.W.M.).

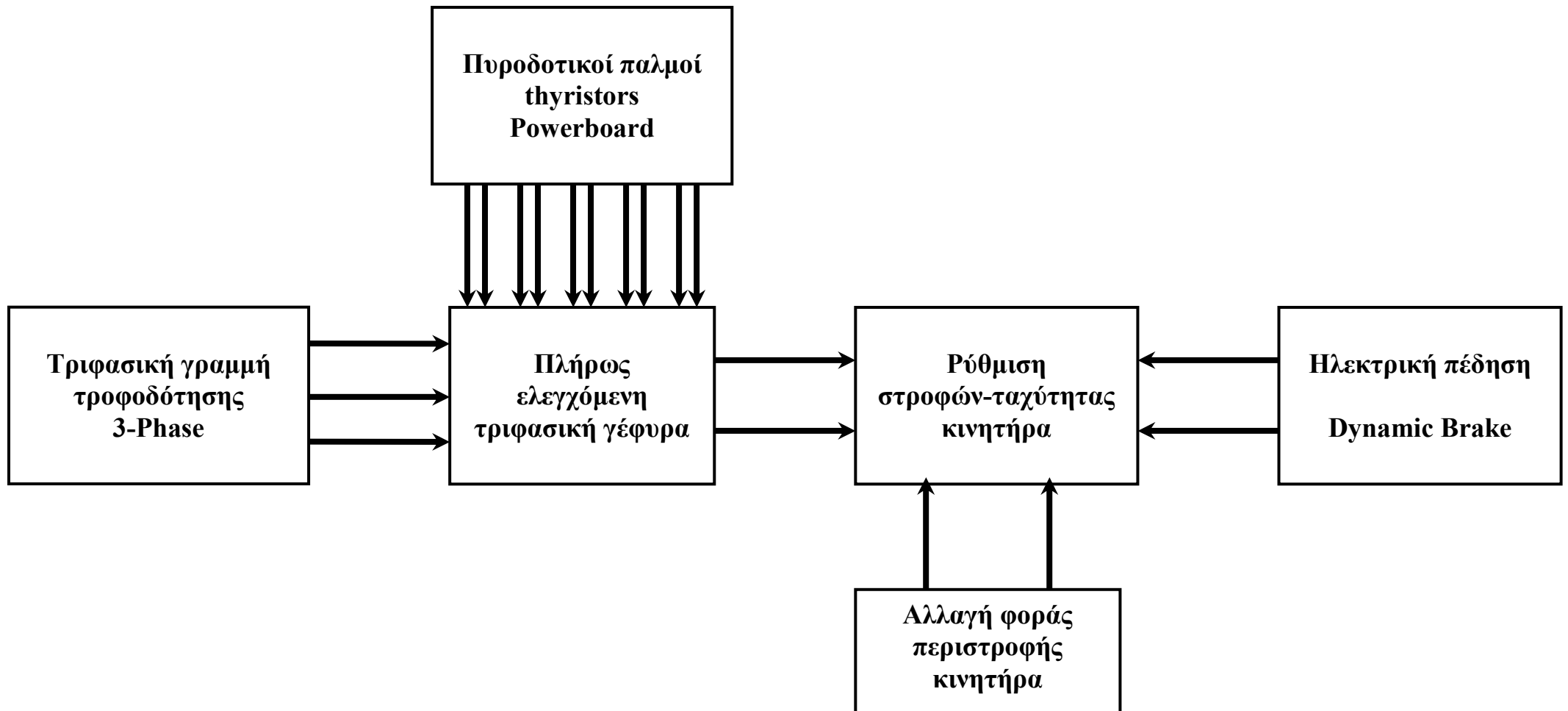
Η τροφοδότηση της τριφασικής γέφυρας γίνεται μέσω του τριφασικού δικτύου της Δ.Ε.Η., με τη βοήθεια ενός τριφασικού μετασχηματιστή 1KVA σε συνδεσμολογία τριγώνου-τριγώνου και με τάση δευτερεύοντος 12V. Τους πυροδοτικούς παλμούς για τον σκανδαλισμό των thyristors της γέφυρας τους παίρνουμε από το Powerboard και τις βαθμίδες Phase Gate Control I, II, III, με την κατάλληλη ρύθμιση έτσι ώστε οι πυροδοτικοί παλμοί να σκανδαλίζουν τα thyristors τις σωστές χρονικές στιγμές για τις φάσεις του δικτύου και όχι για τις παραγόμενες φάσεις του Powerboard L1’, L2’, L3’.

Η τροφοδότηση της βαθμίδας για την διαμόρφωση εύρους παλμών P.W.M. γίνεται ανορθώνοντας τη μία φάση και τον ουδέτερο του μετασχηματιστή. Τα διαμορφωμένα κατά εύρος σήματα τα παίρνουμε από το Powerboard και την βαθμίδα Pulse Width Modulation 1, 2, 3, 4.

6.2 Η εργασία μας.

Παρακάτω θα αναλυθούν τα μπλοκ διαγράμματα της εργασίας, τα σχηματικά και τα PCB’s των πλακετών που χρησιμοποιήθηκαν

Μπλοκ Διάγραμμα Τριφασικής Πλήρως Ελεγχόμενης Γέφυρας



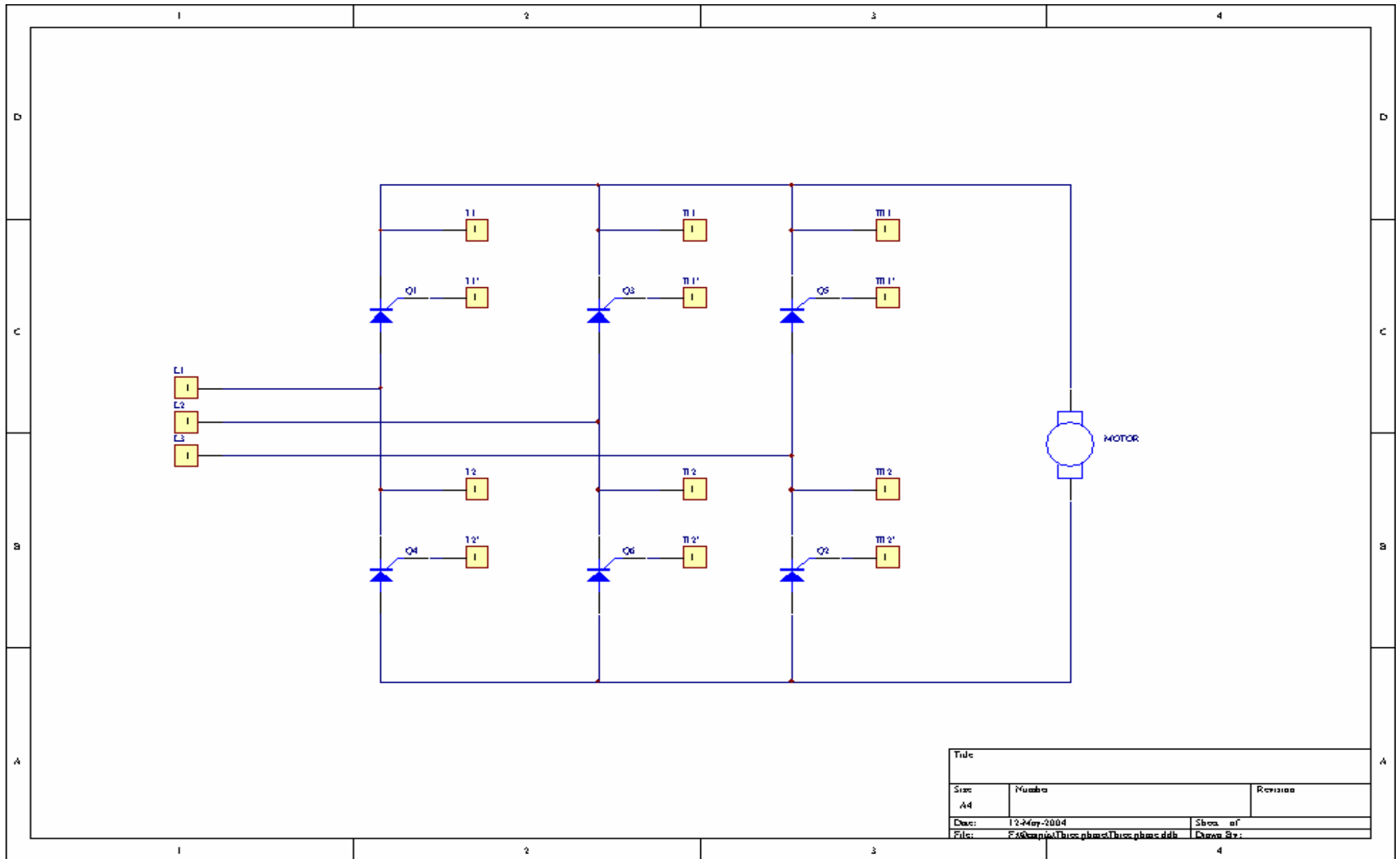
Σχήμα 6.1

Στο σχήμα 6.1 βλέπουμε το μπλοκ διάγραμμα της τριφασικής πλήρως ελεγχόμενης γέφυρας.

Αρχικά βλέπουμε τη γραμμή τροφοδότησης από το τριφασικό δίκτυο της Δ.Ε.Η. Ακολουθεί η τριφασική πλήρως ελεγχόμενη γέφυρα. Εκτός των τριών φάσεων η γέφυρα χρειάζεται και τους πυροδοτικούς παλμούς για τον σκανδαλισμό των thyristors από το Powerboard. Ρυθμίζοντας τώρα τη γωνία έναυσης των thyristors, από το Powerboard, πετυχαίνουμε τη ρύθμιση της ταχύτητας περιστροφής του κινητήρα.

Τέλος υπάρχει και μία βαθμίδα για την αλλαγή της φοράς περιστροφής και μία άλλη για την ηλεκτρική πέδηση, του κινητήρα.

Παρακάτω ακολουθεί η λειτουργία της πλήρως ελεγχόμενης τριφασικής γέφυρας και το σχηματικό διάγραμμά της (σχήμα 6.2).



Σχήμα 6.2

Στο σχήμα 6.2 βλέπουμε το σχηματικό διάγραμμα της τριφασικής πλήρως ελεγχόμενης γέφυρας.

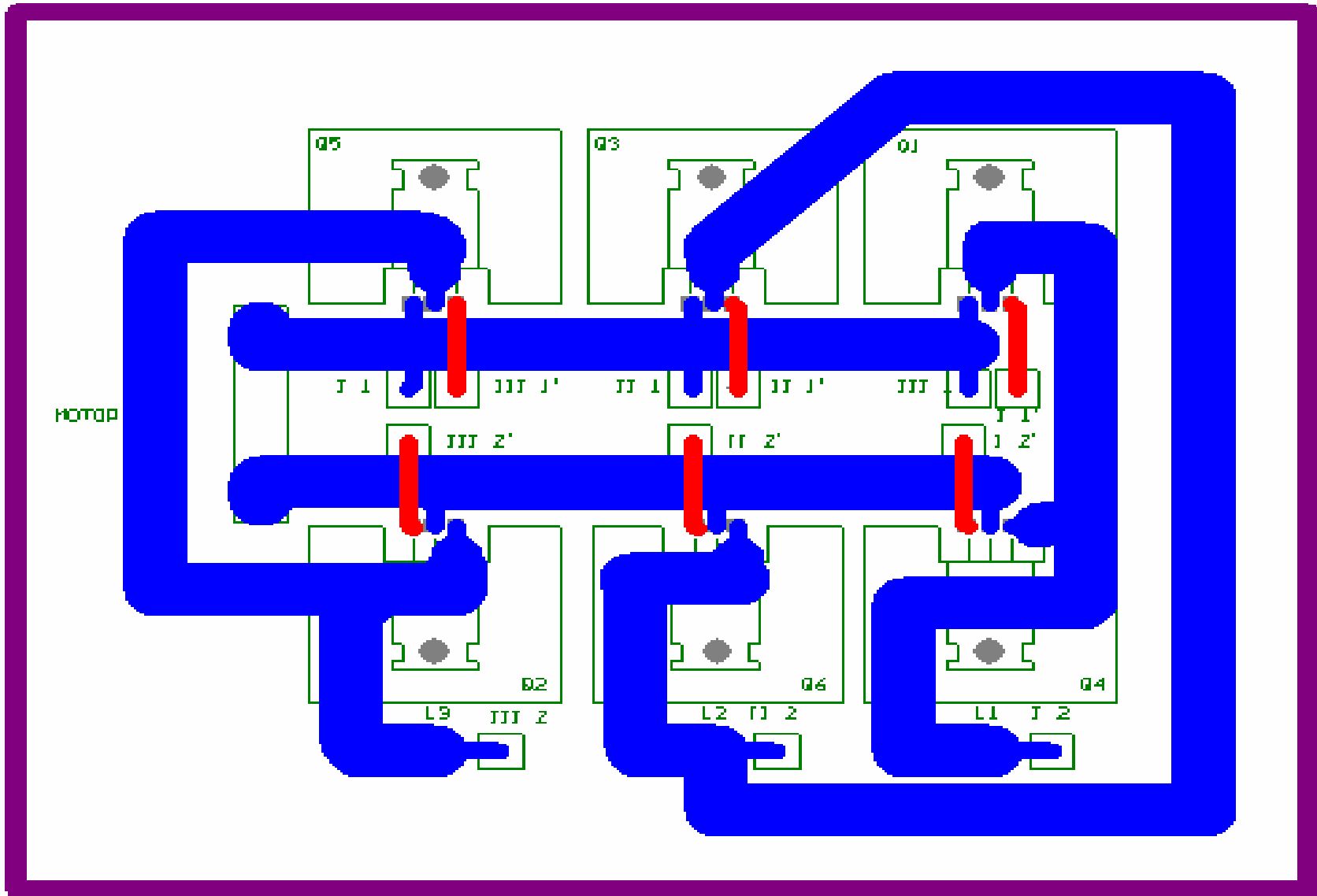
Όπως βλέπουμε η γέφυρα τροφοδοτείται σε τρία σημεία, με τη βοήθεια ενός τριφασικού μετασχηματιστή. Οι τρεις φάσεις έχουν διαφορά φάσεις μεταξύ τους 120° . Αυτό συμβαίνει για να τροφοδοτούνται οι τρεις κλάδοι της γέφυρας σε διαφορετικό χρόνο και όχι όλοι συγχρόνως.

Συγκεκριμένα η πρώτη φάση, L1, τροφοδοτεί τον πρώτο κλάδο των thyristors δηλαδή τα Q1, Q4. Επίσης για να λειτουργήσουν τα thyristors θα πρέπει να σκανδαλιστούν με παλμούς έναυσης. Οι παλμοί αυτοί δίνονται από το Powerboard, από τη βαθμίδα παραγωγής πυροδοτικών παλμών. Τα thyristors του πρώτου κλάδου πυροδοτούνται με παλμούς που παράγονται από τη πρώτη βαθμίδα του Powerboard (I).

Στη συνέχεια η δεύτερη φάση, L2, τροφοδοτεί το δεύτερο κλάδο των thyristors δηλαδή τα Q3, Q6. Οι πυροδοτικοί παλμοί που σκανδαλίζουν τα thyristors του δεύτερου κλάδου παράγονται από τη δεύτερη βαθμίδα του Powerboard (II).

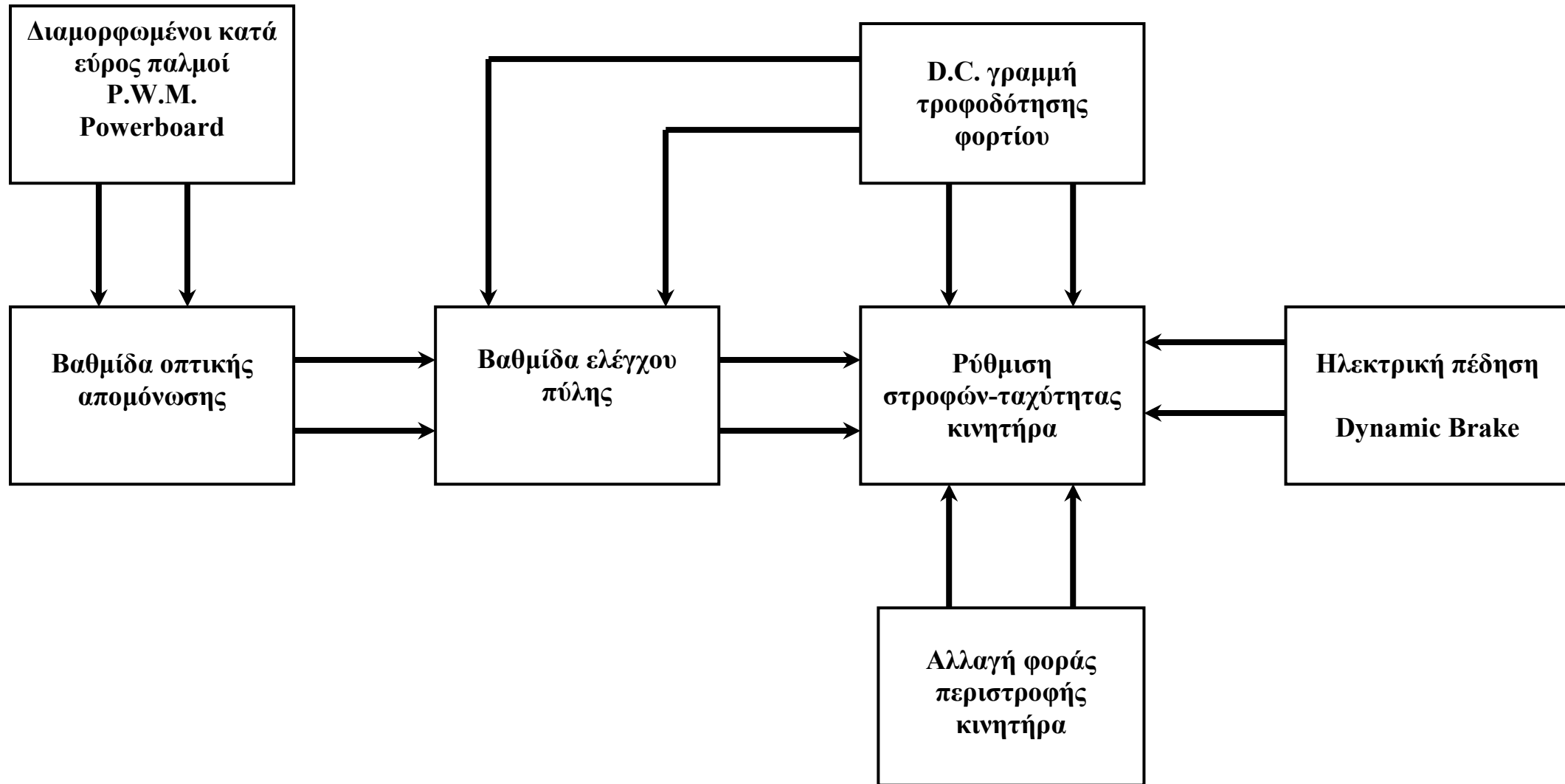
Τέλος η τρίτη φάση τροφοδοτεί το τρίτο κλάδο των thyristors Q5, Q2. Οι πυροδοτικοί παλμοί σκανδαλισμού, αυτών των thyristors προέρχεται από τη τρίτη βαθμίδα του Powerboard (III).

Στο παρακάτω σχήμα (σχήμα 6.3) ακολουθεί το τελικό σχηματικό εκτύπωσης της πλακέτας (PCB) για τη τριφασική πλήρως ελεγχόμενη γέφυρα.



Σχήμα 6.3

Μπλοκ Διάγραμμα Διάταξης Διαμόρφωσης Εύρους Παλμού P.W.M.



Σχήμα 6.4

Στο σχήμα 6.4 βλέπουμε το μπλοκ διάγραμμα της διάταξης διαμόρφωσης εύρους παλμών (P.W.M.).

Πρώτα βλέπουμε τη βαθμίδα οπτικής απομόνωσης των διαμορφωμένων παλμών που προστατεύει το Powerboard από το υπόλοιπο κύκλωμα ισχύος με γαλβανική απομόνωση.

Ακολουθεί η βαθμίδα ελέγχου της πύλης του Mosfet η οποία δέχεται τους διαμορφωμένους κατά εύρος παλμούς από το Powerboard και τους τροποποιεί κατάλληλα για να εφαρμοστούν στην πύλη του Mosfet. Επίσης υπάρχουν και διατάξεις για την προστασία του Mosfet από διάφορους παράγοντες όπως είναι η μεγάλη αύξηση της θερμοκρασίας, η απότομη αλλαγή στην ταχύτητα του κινητήρα, ρεύματα αιχμής κ.α.

Τέλος ακολουθεί και η βαθμίδα αλλαγής φοράς του κινητήρα και της ηλεκτρικής του πέδησης.

Στη συνέχεια μπορούμε να δούμε στο σχήμα 6.5 το σχηματικό διάγραμμα διάταξης διαμόρφωσης εύρους παλμών (P.W.M.)

Το κύκλωμα που βλέπουμε στο σχήμα 6.5 χωρίζεται σε τρεις βαθμίδες. Συγκεκριμένα ξεχωρίζουμε το κύκλωμα οπτικής απομόνωσης, το κύκλωμα ελέγχου της πύλης του Mosfet και τέλος τη βαθμίδα ισχύος.

Η πρώτη βαθμίδα χρησιμοποιείται για να εξασφαλίσουμε την απαραίτητη γαλβανική απομόνωση μεταξύ σημμάτων Power board και υπόλοιπου κυκλώματος και αποτελείται από την R1 το U1 και την R3. Η R1 είναι συνδεδεμένη σε σειρά με το Led που βρίσκεται εσωτερικά στο U1, κάνοντας τον απαραίτητο περιορισμό ρεύματος για τη σωστή λειτουργία του οπτοζεύκτη. Η R3 είναι συνδεδεμένη στον εκπομπό του τρανζίστορ του οπτοζεύκτη και στην τροφοδοσία και έχει σκοπό την αποφυγή βραχυκυκλώματος μεταξύ τροφοδοσίας και γείωσης κατά την αγωγή του τρανζίστορ. Εδώ πρέπει να παρατηρήσουμε πως σε σχέση με το σήμα εισόδου το σήμα που παίρνουμε στην έξοδο του οπτοζεύκτη είναι ανεστραμμένο κατά 180° , πράγμα που οφείλεται ουσιαστικά στην διακοπτική λειτουργία του τρανζίστορ του οπτοζεύκτη.

Η δεύτερη βαθμίδα αποτελείται από την R2, C5, R4, R5, D2, D3 και Q1 και χρησιμοποιείται για δύο ξεχωριστούς λόγους. Καταρχήν χρησιμοποιείται για να ενισχύσουμε το σήμα από την έξοδο του Power board και να μπορέσουμε να πολώσουμε σωστά την πύλη του Mosfet, πράγμα πολύ σημαντικό αφού σε αντίθετη περίπτωση θα είχαμε μεγάλη αύξηση της θερμοκρασίας του Mosfet λόγω της R_{DS} με τελικό αποτέλεσμα την καταστροφή του. Ο άλλος λόγος ύπαρξης αυτής της βαθμίδας είναι πως εκτός από την ενίσχυση του σήματος εισόδου έχουμε παράλληλα την αντιστροφή για άλλη μια φορά του σήματός μας κατά 180° που στην ουσία σημαίνει πως το σήμα τώρα στην πύλη του Mosfet και το σήμα που έχουμε από το Power board είναι ακριβώς τα ίδια με την διαφορά ότι το σήμα στο Mosfet είναι ενισχυμένο. Αυτό έχει μεγάλη σημασία γιατί σε αντίθετη περίπτωση που δεν θα είχαμε το ίδιο σήμα στο Mosfet και στην έξοδο του Power board η απουσία σήματος εισόδου, λογικό '0' (π.χ. στην περίπτωση που το Power board είναι κλειστό), θα σήμαινε λογικό '1' στην πύλη του Mosfet με αποτέλεσμα την περιστροφή του κινητήρα χωρίς την δυνατότητα ρύθμισης της ταχύτητάς του. Συγκεκριμένα η R2 και ο C5 χρησιμοποιούνται για την πόλωση της βάσης του τρανζίστορ Q1 ενώ η R4 είναι η αντίσταση εκπομπού του τρανζίστορ και έχει σκοπό την αποφυγή βραχυκυκλώματος μεταξύ τροφοδοσίας και γείωσης κατά την αγωγή του. Το Q1 είναι συνδεδεμένο σαν διακόπτης και η R5 είναι η αντίσταση πόλωσης της πύλης (Gate) του Mosfet. Η διάοδος D3 είναι μία γρήγορη διάοδος που προσθέτει στο κύκλωμά μας έναν νεκρό χρόνο μεταξύ 'turn on-turn off', δηλαδή στην ουσία αποφεύγονται οι απότομες μεταβολές στην ταχύτητα του κινητήρα που τώρα γίνονται με μία ανεπαίσθητη καθυστέρηση. Επίσης προστατεύει το Mosfet από ρεύματα αιχμής που τυχόν υπάρξουν. Η D2 είναι μία Zener στα 15 Volt όπου σε περίπτωση που για κάποιο λόγο το πλάτος των παλμών ξεπεράσουν την τιμή της Zener δεν αφήνει (γειώνει) το σήμα πριν αυτό να φτάσει στην πύλη του Mosfet.

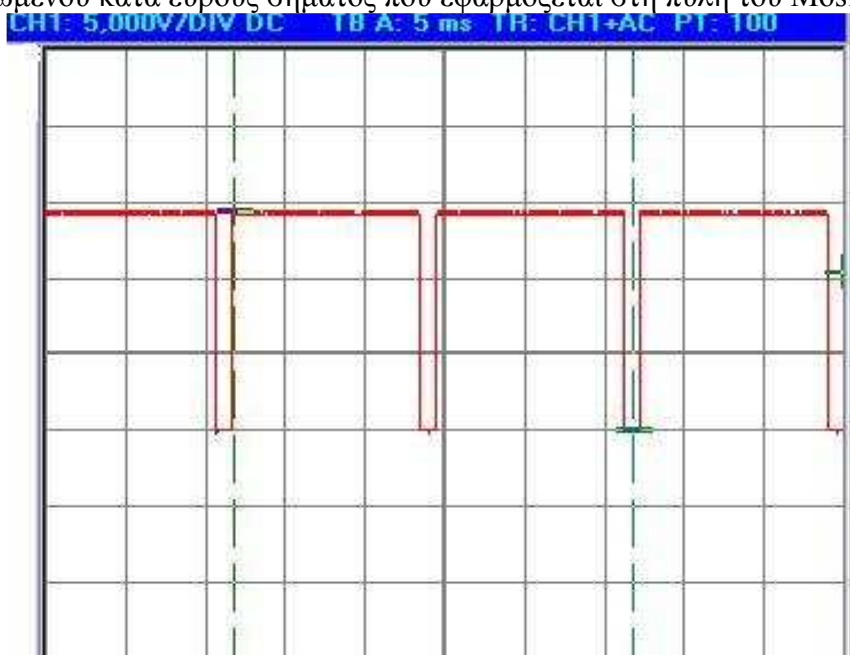
Η τρίτη βαθμίδα αποτελείται από το Mosfet Q2, τον S1 και από την διάοδο D1. Ο S1 είναι ένας θερμοστάτης στους 90°C βαθμούς και έχει σκοπό την προστασία του Mosfet και κατ' επέκταση του υπόλοιπου κυκλώματος από υπερθέρμανση που τυχόν μπορεί να παρατηρηθεί στην περίπτωση που ο κινητήρας λειτουργεί υπό πλήρες φορτίο για μεγάλο χρονικό διάστημα ή ίσως και στην περίπτωση που κάποια βλάβη συμβεί με αποτέλεσμα την μεγάλη αύξηση της θερμοκρασίας πάνω στο Mosfet. Συγκεκριμένα η δύο επαφές του θερμοστάτη είναι κλειστές και επιτρέπουν το σήμα να πολώνει την πύλη μέχρι την στιγμή που η θερμοκρασία του Mosfet φτάσει την

ονομαστική θερμοκρασία του θερμοστάτη οπότε και οι επαφές του ανοίγουν με αποτέλεσμα το σήμα τώρα να μην φτάνει στο Q2 και ουσιαστικά να απενεργοποιείται το κύκλωμά μας και η περιστροφή του κινητήρα προσωρινά, ως την στιγμή που θα πέσει η θερμοκρασία σε ασφαλή όρια για το κύκλωμα οπότε και θα ξεκινήσει πάλι η περιστροφή του κινητήρα.

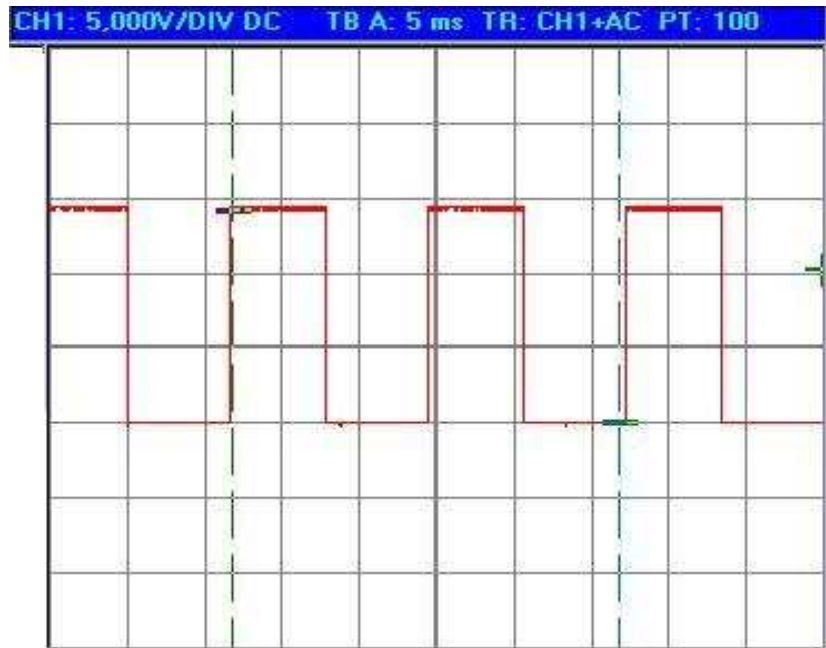
Ο θερμοστάτης είναι τοποθετημένος πάνω στην ψύκτρα όπου έχουμε τοποθετήσει το Mosfet και έχει μία μέγιστη ανοχή +/- 10°C. Η διάδος D1 είναι μία διάδος μεταγωγής γρήγορης απόκρισης με μέγιστο ονομαστικό ρεύμα 1A και είναι συνδεδεμένη στα άκρα του Q2 μεταξύ Source και Drain και έχει σκοπό την προστασία του Mosfet από ρεύματα αντίθετης φοράς, που έχει αποθηκεύσει ο κινητήρας όση ώρα βρίσκεται σε λειτουργία και που ρέουν προς το κύκλωμα κατά την αλλαγή της φοράς περιστροφής του. Αξίζει να σημειώσουμε πως το συγκεκριμένο Mosfet που χρησιμοποιούμε έχει μία τέτοια διάδο μεταγωγής εσωτερικά αλλά θεωρήσαμε προτιμότερο να προσθέσουμε ακόμα μια εξωτερικά για μέγιστη προστασία του κυκλώματος. Το Mosfet Q2, είναι αυτό που αναλόγως το σήμα που έχει στην πύλη του «κλείνει» την επαφή μεταξύ Source και Drain και επιτρέπει την διέλευση του ρεύματος μεταξύ τροφοδοσίας και γείωσης και επομένως ρυθμίζει και την τάση εξόδου αναλόγως το Duty Cycle του σήματος που εφαρμόζεται στην πύλη του. Το Mosfet που χρησιμοποιούμε εμείς είναι το IRFZ44N ένα N-channel Mosfet με $V_{DS}=55V$, $I_D=49A$, $I_{D(PULSED)}=160A$, $T_j=175^\circ C$ και $R_{DS(on)}=0.022\Omega$.

Τέλος υπάρχει και μία βαθμίδα σταθεροποίησης της τάσης στα 12V που αποτελείται από το U2, CR1, CR2, DR1, RR1 και ένα ενδεικτικό LED που χρησιμοποιείται για να τροφοδοτήσει μόνο την παραπάνω διάταξη και όχι τον κινητήρα. Η διάδος DR1 προστατεύει το κύκλωμα σταθεροποίησης αλλά και της τροφοδότησης από τάσεις άνω των 12 V.

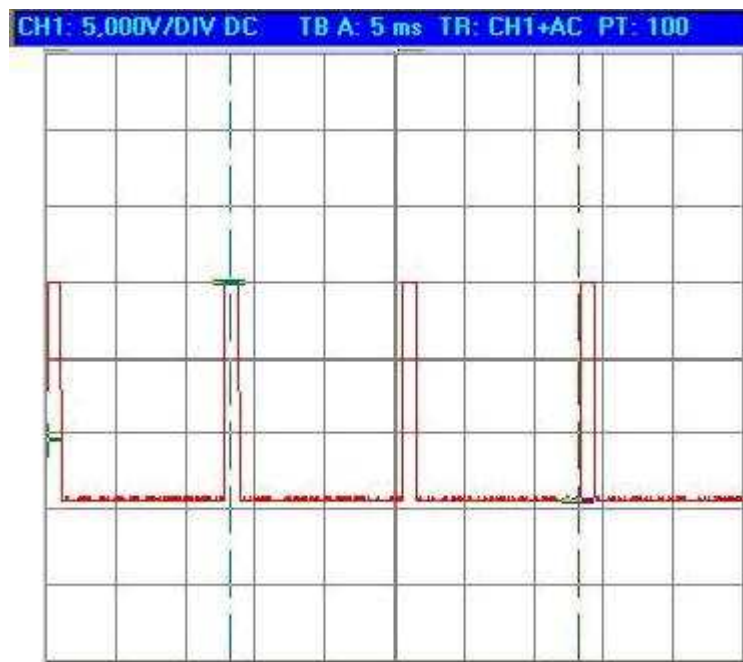
Παρακάτω βλέπουμε τρεις καταστάσεις ρύθμισης του Duty Cycle του διαμορφωμένου κατά εύρος σήματος (P.W.M.) στην πύλη του Mosfet.



Διαμορφωμένο κατά εύρος σήμα (P.W.M.) στην πύλη του Mosfet.
Duty Cycle 10% - $V_{LOAD} = 1,2V$

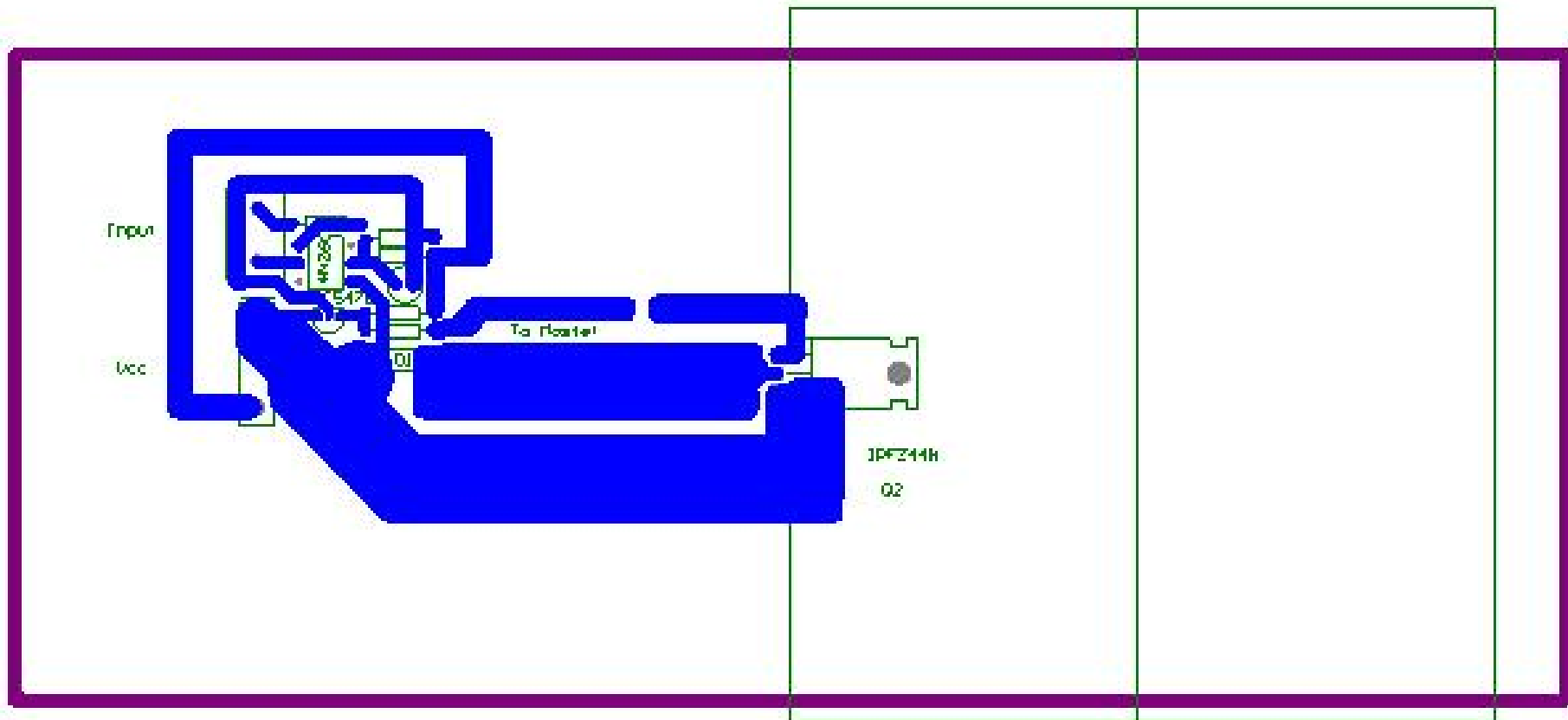


Διαμορφωμένο κατά εύρος σήμα (P.W.M.) στην πύλη του Mosfet.
Duty Cycle 50% - $V_{LOAD} = 6\text{Volt}$



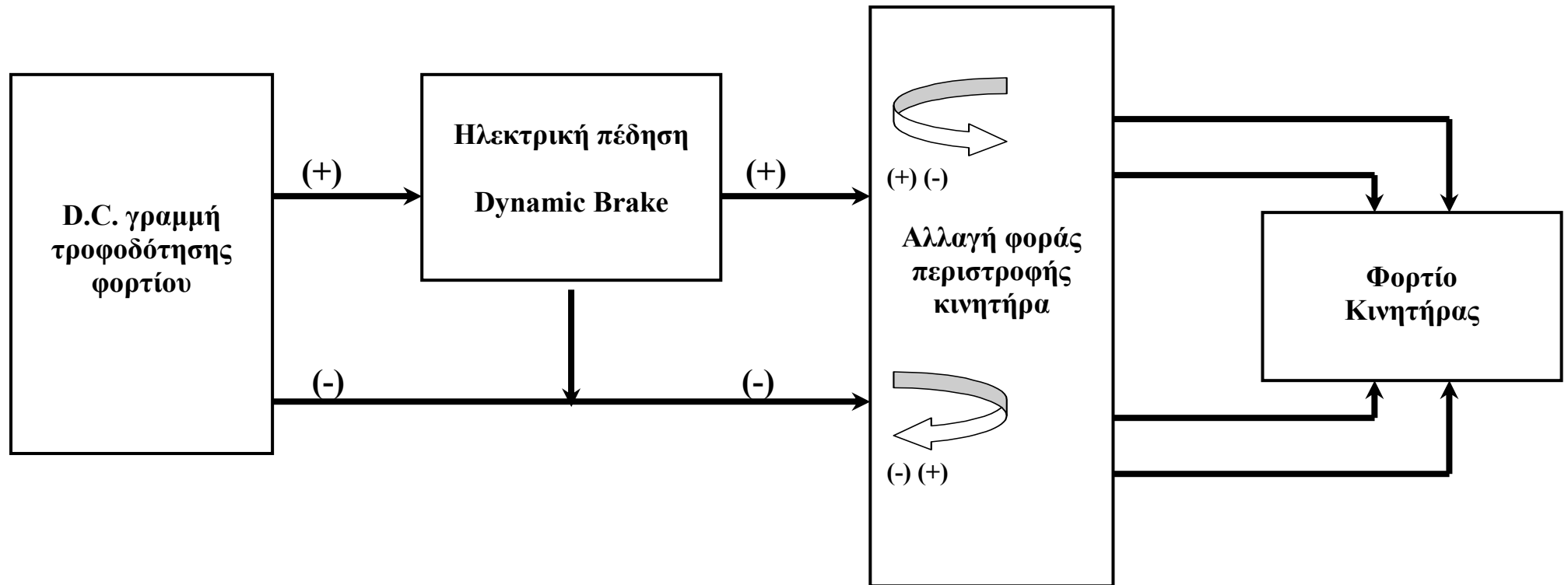
Διαμορφωμένο κατά εύρος σήμα (P.W.M.) στην πύλη του Mosfet.
Duty Cycle 90% - $V_{LOAD} = 10.8\text{Volt}$

Παρακάτω ακολουθεί το τελικό σχηματικό διάγραμμα εκτύπωσης της πλακέτας (PCB) διαμόρφωσης εύρους παλμών (P.W.M.)



Σχήμα 6.6

Μπλοκ διάγραμμα διάταξης αλλαγής φοράς και ηλεκτρικής πέδησης.



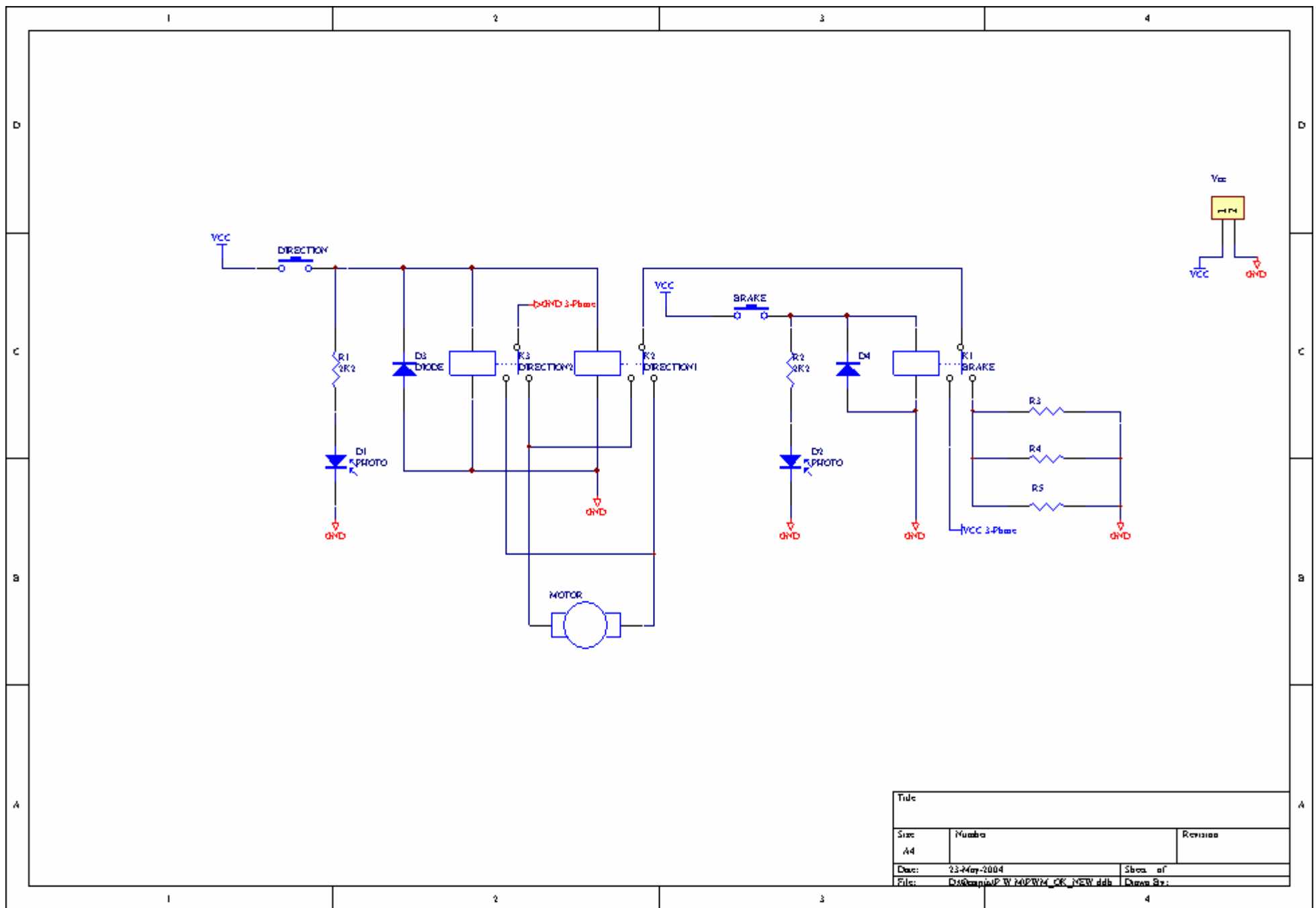
Σχήμα 6.7

Στο σχήμα 6.7 βλέπουμε το μπλοκ διάγραμμα της βαθμίδας που ρυθμίζει τη φορά περιστροφής του κινητήρα καθώς και αναγκαστικό σταμάτημά του (BRAKE).

Αρχικά έχουμε τη γραμμή τροφοδότησης της βαθμίδας που γίνεται με συνεχή τάση (12 Volts).

Στη συνέχεια ελέγχοντας τη συμπεριφορά ηλεκτρονικών στοιχείων, μπορούμε να φρενάρουμε το κινητήρα και να αλλάξουμε τη φορά περιστροφής του, αλλάζοντας στην ουσία τη φορά του ρεύματος στο επαγωγικό τύμπανο του κινητήρα.

Στο σχήμα 6.8 βλέπουμε το σχηματικό διάγραμμα διάταξης αλλαγής φοράς και ηλεκτρικής πέδησης του κινητήρα καθώς και την εξήγηση λειτουργίας του.



Σχήμα 6.8

Title		
Size:	Number:	Revision:
A4		
Date:	23-May-2004	Sheet of
File:	D:\Example\W MOTOR\OK_NEW.dds	Drawn By:

Το κύκλωμα του σχήματος 6.8 αποτελεί το κύκλωμα της αλλαγής φοράς περιστροφής και ηλεκτρικής πέδησης του κινητήρα. Το κύκλωμα αυτό χωρίζεται σε τρεις ξεχωριστές βαθμίδες. Η πρώτη βαθμίδα έχει να κάνει αποκλειστικά με την ηλεκτρική πέδηση του κινητήρα με την μέθοδο dynamic brake (δυναμικής πέδησης) που την λειτουργία της την εξετάσαμε στο κεφάλαιο 3.7.11. Η δεύτερη βαθμίδα είναι η βαθμίδα αλλαγής της φοράς περιστροφής του κινητήρα με την μέθοδο της αλλαγής της φοράς της ροής του ρεύματος στο τύλιγμα του επαγωγικού τυμπάνου του κινητήρα και η τρίτη μπορούμε να πούμε πως αποτελεί από μόνη της η έξοδος του συγκεκριμένου κυκλώματος αφού ακριβώς εκεί συνδέονται οι ακροδέκτες του κινητήρα με μεγάλη σημασία στο πώς ακριβώς αυτοί είναι συνδεδεμένοι στο κύκλωμά μας μετά από την ενεργοποίηση των επιμέρους βαθμιδών που εξετάσαμε πιο πάνω.

Πριν αρχίσουμε να εξηγήσουμε την λειτουργία των επιμέρους βαθμιδών, θα πρέπει να εξηγήσουμε τι ακριβώς είναι τα σημεία Vcc, GND, Vcc_3Phase και GND_3Phase. Στο σημείο Vcc_3Phase (ακροδέκτης 3 του ρελλέ K1) συνδέεται η έξοδος της τριφασικής γέφυρας (+) και στο σημείο GND_3Phase (ακροδέκτης 1 του ρελλέ K3) το (-) της τριφασικής γέφυρας. Αυτά τα σημεία αποτελούν την γραμμή τροφοδότησης του κινητήρα. Επομένως ότι έξοδο έχουμε από τα άκρα της τριφασικής γέφυρας (ρυθμίζοντας την γωνία έναυσης των thyristors, 0V-18V,19V) θα έχουμε και στα άκρα της γραμμής τροφοδότησης. Τα άλλα σημεία Vcc, GND όπου υπάρχουν στο κύκλωμα, συνδέονται με μία D.C. τάση, γύρω στα 12V για τα Vcc και την αντίστοιχη 0V για τα GND, όπου την έχουμε πάρει ανορθώνοντας μία φάση του τριφασικού δικτύου (L1, N, γι' αυτό τον λόγο χρησιμοποιούμε και τον ουδέτερο N εκτός από τις τρεις φάσεις L1-L2-L3 στην συνδεσμολογία της τριφασικής γέφυρας της εργασίας μας) και περνώντας την από έναν πυκνωτή εξομάλυνσης 15000μF/63V την χρησιμοποιούμε για να μπορούμε να ενεργοποιούμε τα ρελλέ με τα 2 μπουτόν που υπάρχουν. Σε περίπτωση που δεν χρησιμοποιούσαμε εξωτερική τροφοδοσία για τα Vcc, GND και τα παίρναμε από τα αντίστοιχα σημεία της εξόδου της τριφασικής γέφυρας (+), (-), (αυτό συμβαίνει στην άλλη διάταξη όπου συνδέουμε το κύκλωμα αλλαγής φοράς περιστροφής και ηλεκτρικής πέδησης με το κύκλωμα P.W.M, όλα τα Vcc, GND, είναι κοινά) , όταν θα ρυθμίζαμε την τάση εξόδου της από το Powerboard κάτω από τα 12V (τάση όπου ενεργοποιούνται τα ρελλέ) δεν θα μπορούσαμε να αλλάξουμε φορά περιστροφής του κινητήρα και να τον φρενάρουμε.

Η πρώτη βαθμίδα της ηλεκτρικής πέδησης αποτελείται από το ρελλέ K1 και τα στοιχεία που βρίσκονται γύρω του όπως το μπουτόν S1_Brake, R2, D2, D4, R3, R4 και R5. Πατώντας το μπουτόν S1_BRAKE περνάει ρεύμα από το πηνίο του ρελλέ K1 αλλάζει θέση ο διακόπτης και ανάβει το Led D2 που μας πληροφορεί ότι έχουμε ενεργοποιήσει το ηλεκτρικό φρένο. Όσο είναι πατημένο το μπουτόν και έχει αλλάξει θέση ο διακόπτης του ρελλέ, αντί να είναι ενωμένοι οι ακροδέκτες 3, 1 του ρελλέ όπως πριν, τώρα είναι ενωμένοι οι ακροδέκτες 1, 2 και βλέπουμε πως η γραμμή τροφοδότησης του κινητήρα τώρα έχει αλλάξει από (+), (-) της τριφασικής γέφυρας σε (-) της γέφυρας και μέσω των αντιστάσεων R3, R4, R5 στο GND. Άρα ότι ενέργεια είχε αποθηκεύσει ο κινητήρας όση ώρα περιστρεφόταν το δίνει τώρα με την μορφή ρεύματος ίδιας φοράς με πριν, μέσω των αντιστάσεων στο GND. Εδώ πρέπει να σημειώσουμε πως αναλόγως το μέγεθος των αντιστάσεων εξαρτάται ο χρόνος που κάνει ο κινητήρας να σταματήσει. Σε πραγματικές συνθήκες η ισχύς της αντίστασης αυτής φθάνει την τάξη των Kwatt αφού εκεί μιλάμε για εκατοντάδες Ampere. Η ηλεκτρική πέδηση σταματά μόνο όταν ξαναπατηθεί το ίδιο μπουτόν και επανέλθει ο

διακόπτης του K1 στην αρχική του θέση. Η αντίσταση R2 κάνει περιορισμό ρεύματος στο LED D2 για να μην καταστραφεί από την τάση των 12V. Η διάδος D4 προστατεύει τον ρελλέ K1 από ρεύματα αιχμής κατά το άνοιγμα και το κλείσιμο του μπουτόν.

Η βαθμίδα αλλαγής φοράς περιστροφής του κινητήρα αποτελείται από το δικτύωμα των δύο ρελλέ K2 και K3, το μπουτόν S2_DIRECTION, R1, D1 και D3. Μπορούμε να διακρίνουμε πως χωρίς να είναι πατημένο το μπουτόν S2_DIRECTION, είναι συνδεδεμένοι οι ακροδέκτες 1,2 του K2 και οι 1, 2 του K3 μέσω του κινητήρα. Άρα κλείνει κύκλωμα μεταξύ Vcc_3Phase (+) και GND_3Phase (-) και του κινητήρα αφού και οι ακροδέκτες 1, 3 του K1 είναι συνδεδεμένοι μεταξύ τους. Έτσι ο κινητήρας περιστρέφεται προς μία κατεύθυνση με ταχύτητα τόση όσο εμείς του ορίζουμε από το Powerboard με την ρύθμιση της γωνίας έναυσης των thyristors. Παρατηρούμε πως τα K2, K3 είναι συνδεδεμένα τα πηνία τους παράλληλα, όπως και το δικτύωμα των R1, D1 και D3. Αυτό πρακτικά σημαίνει πως τα δύο ρελλέ και το LED D1 ενεργοποιούνται ταυτόχρονα με το πάτημα του μπουτόν S2_DIRECTION. Όταν λοιπόν πατήσουμε το μπουτόν S2_DIRECTION τα ρελλέ K2 και K3 ενεργοποιούνται και αλλάζουν θέση οι διακόπτες τους και ταυτόχρονα ανάβει και το LED D1 όπου μας πληροφορεί ότι έχουμε αλλάξει την φορά περιστροφής του κινητήρα. Τώρα μπορούμε να δούμε πως κλείνει κύκλωμα μεταξύ των ακροδεκτών 1, 3 του K2 με τους ακροδέκτες 1,3 του K3 μέσω του κινητήρα. Άρα κλείνει πάλι κύκλωμα μεταξύ Vcc_3Phase (+) και GND_3Phase (-) και του κινητήρα αλλά αυτή την φορά το ρεύμα που ρέει στο επαγωγικό τύμπανο του κινητήρα ρέει με φορά αντίθετη από αυτή που έρεε πριν πατήσουμε το μπουτόν S2_DIRECTION πράγμα που συνεπάγεται αλλαγή της φοράς περιστροφής του κινητήρα μας. Η R1 κάνει περιορισμό ρεύματος του D2 και η D3 προστατεύει τα K2, K3 από ρεύματα αιχμής. Στην περίπτωση που είναι και τα δύο μπουτόν S1_BRAKE και S2_DIRECTION πατημένα θα φρενάρι ο κινητήρας και όταν αφήσουμε το φρένο ο κινητήρας θα δουλεύει πια με την αλλαγμένη φορά περιστροφής.

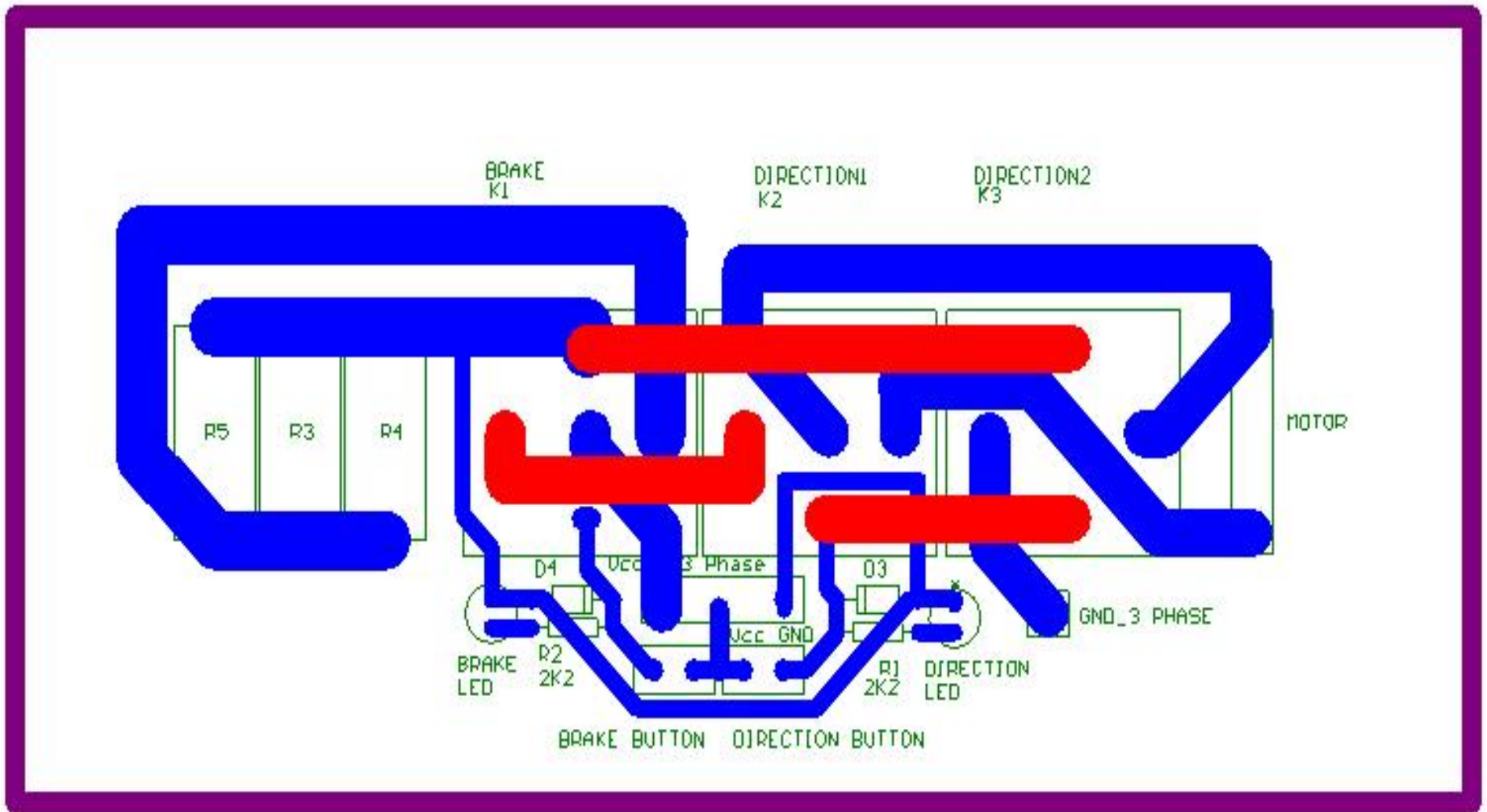
Την τρίτη βαθμίδα αποτελεί η έξοδος του κυκλώματος και κατά συνέπεια ο ίδιος ο κινητήρας όπου είναι απόλυτα εξαρτημένος από των συνδυασμό των καταστάσεων όπου βρίσκονται οι δύο άλλες βαθμίδες που αναφέραμε πιο πάνω. Οι διαφορετικές καταστάσεις που μπορεί να βρεθεί ο κινητήρας περιγράφεται στον πιο κάτω πίνακα :

Κατάσταση μπουτόν		Φορά περιστροφής κινητήρα
S1	S2	
0	0	Δεξιά
0	1	Αριστερά
1	0	----
1	1	----

Πίνακας 1

Συμπεριφορά κινητήρα σε σχέση με τις πιθανές καταστάσεις των μπουτόν.

Στο σχήμα 6.9 βλέπουμε το τελικό σχέδιο εκτύπωσης της διάταξης αλλαγής φοράς και ηλεκτρικής πέδησης του κινητήρα για την διάταξη της 3-φασικής γέφυρας.

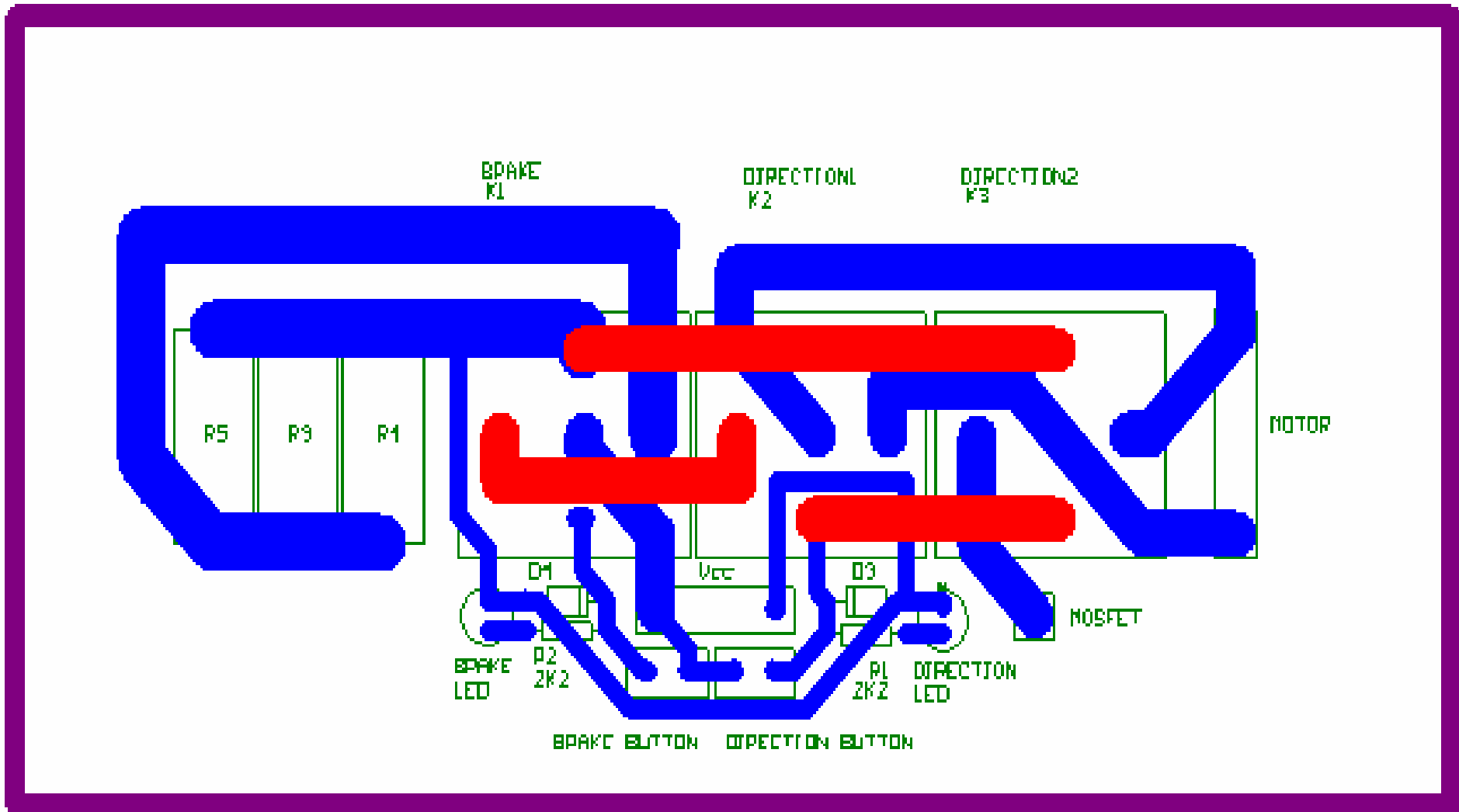


Σχήμα 6.9

Στο σχήμα 6.10 φαίνεται το σχηματικό διάγραμμα της διάταξης αλλαγής φοράς και ηλεκτρικής πέδησης του κινητήρα για τη διάταξη διαμόρφωσης εύρους παλμών (P.W.M.)

Η μόνη διαφοροποίηση αυτού του κυκλώματος με το παραπάνω είναι πως όλα τα σημεία Vcc και GND είναι κοινά με τα αντίστοιχα του κυκλώματος P.W.M. Επίσης το σημείο “ MOSFET ” είναι ενωμένο με το Drain του Mosfet και αναλόγως με την συχνότητα Switching του Mosfet και το Duty Cycle του σήματος από το Powerboard κλείνει κύκλωμα μεταξύ του Vcc του κινητήρα και του GND.

Τέλος ακολουθεί το τελικό σχηματικό εκτύπωσης της πλακέτας αλλαγής φοράς και ηλεκτρικής πέδησης του κινητήρα.

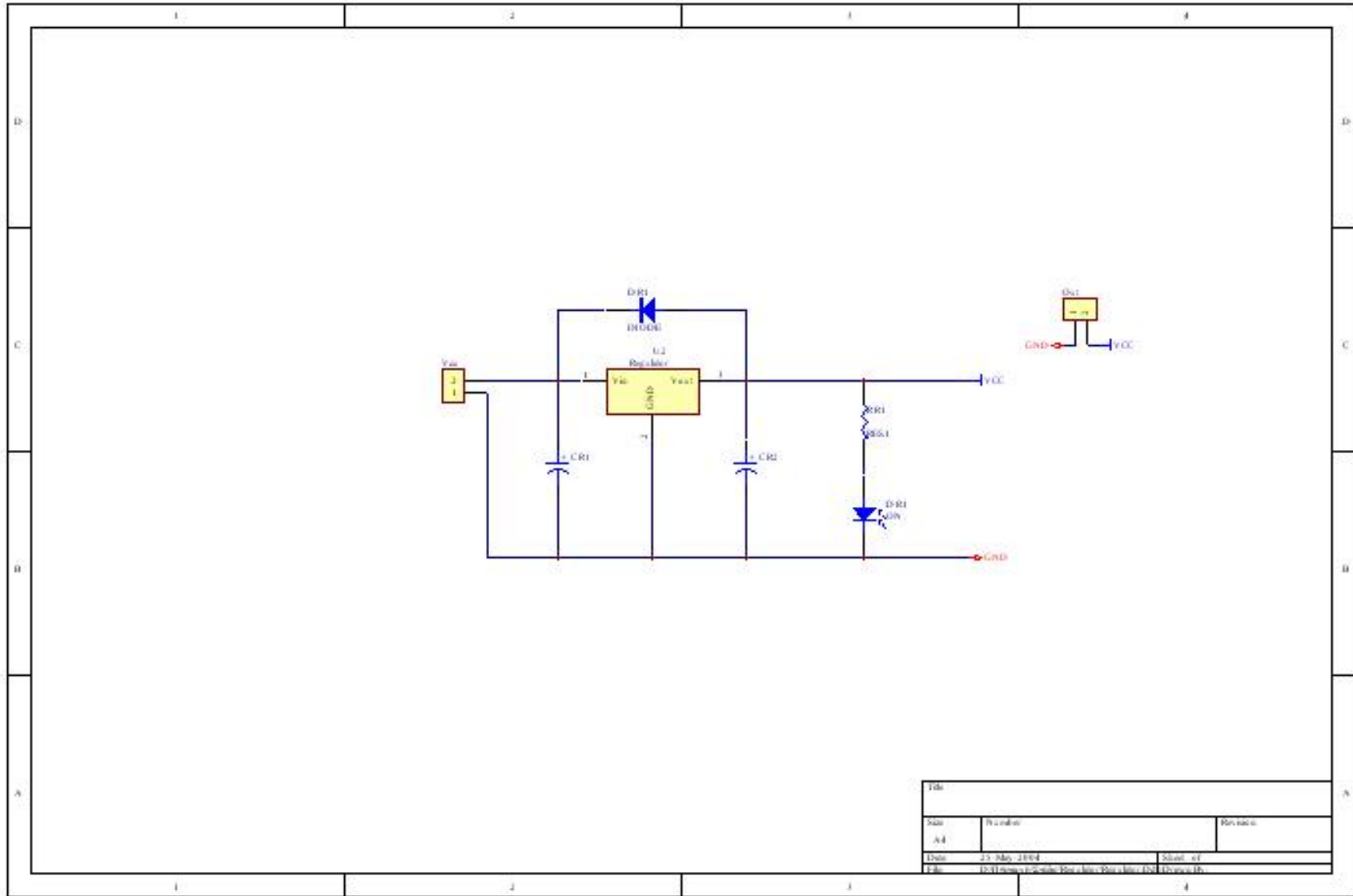


Σχήμα 6.11

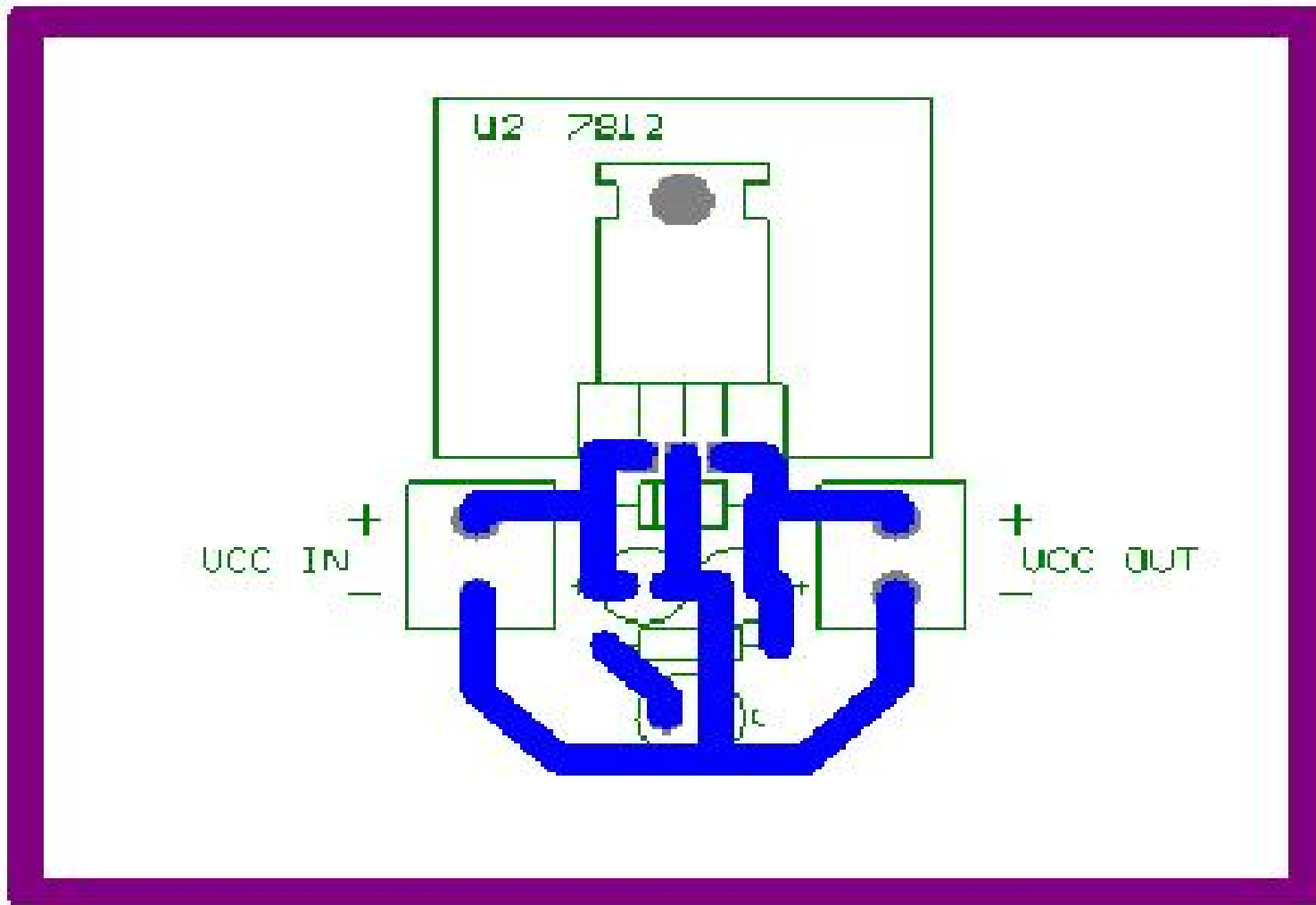
Στο παρακάτω σχήμα (σχήμα 6.12) βλέπουμε το σχηματικό κύκλωμα ενός σταθεροποιητή τάσης το οποίο προστατεύει το MOSFET που χρησιμοποιείται από τυχόν υπέρβαση της τάσεις λειτουργίας στην οποία δουλεύει το MOSFET σωστά και ασφαλές.

Η βαθμίδα αυτή αναφέρεται στη διάταξη διαμόρφωσης εύρους παλμών (P.W.M.) όπως φαίνεται και στο σχήμα 6.5

Τέλος ακολουθεί και το τελικό σχέδιο εκτύπωσης της πλακέτας του σταθεροποιητή (σχήμα 6.13).

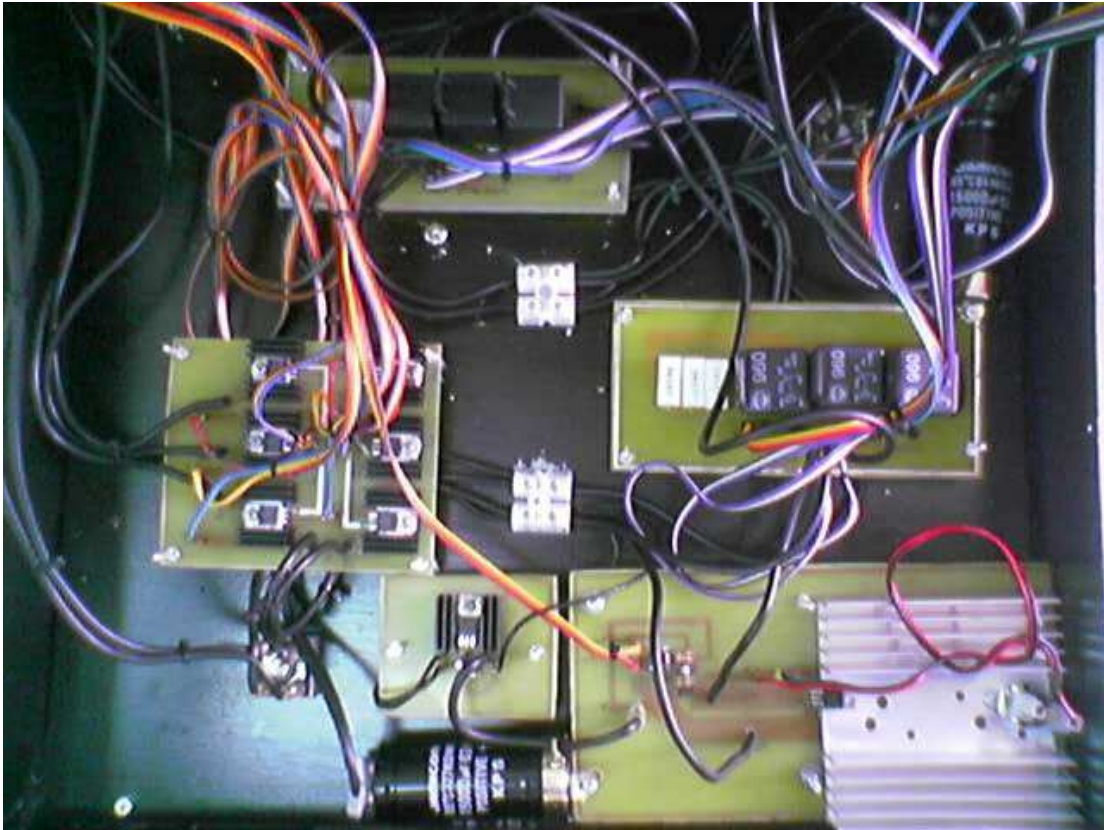


Σχήμα 6.12

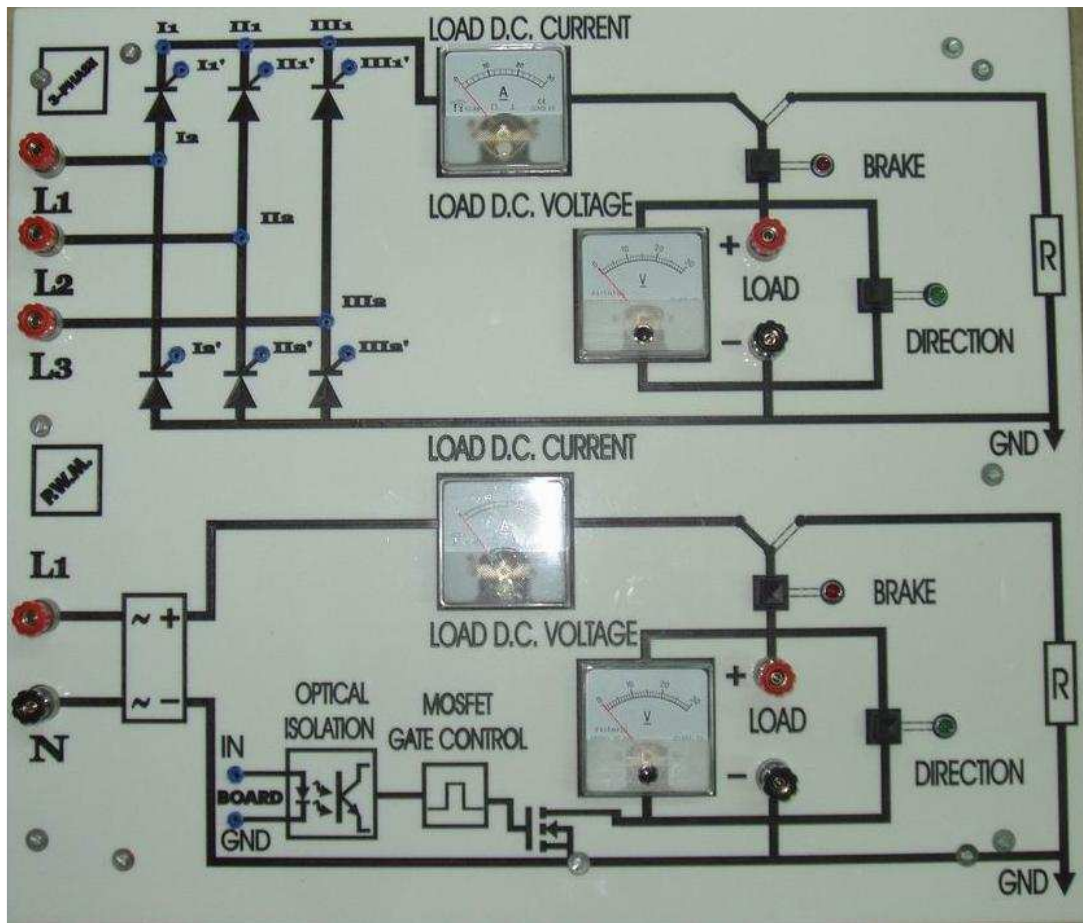


Σχήμα 6.13

Τέλος θα δούμε κάποιες φωτογραφίες που τραβήχτηκαν κατά τη διάρκεια κατασκευής της πτυχιακής εργασίας.



Εσωτερικό Main Board



Main Board

Παρακάτω φαίνονται οι δύο κινητήρες που χρησιμοποιήθηκαν για τη πραγματοποίηση των μετρήσεων που θα δούμε παρακάτω.



Σχήμα 6.14
Κινητήρας συνεχούς ρεύματος μεγάλης ισχύος (διέγερσης σειράς).



Σχήμα 6.15
Κινητήρας συνεχούς ρεύματος μικρής ισχύος (παράλληλης διέγερσης).

6.2.1 Μετρήσεις.

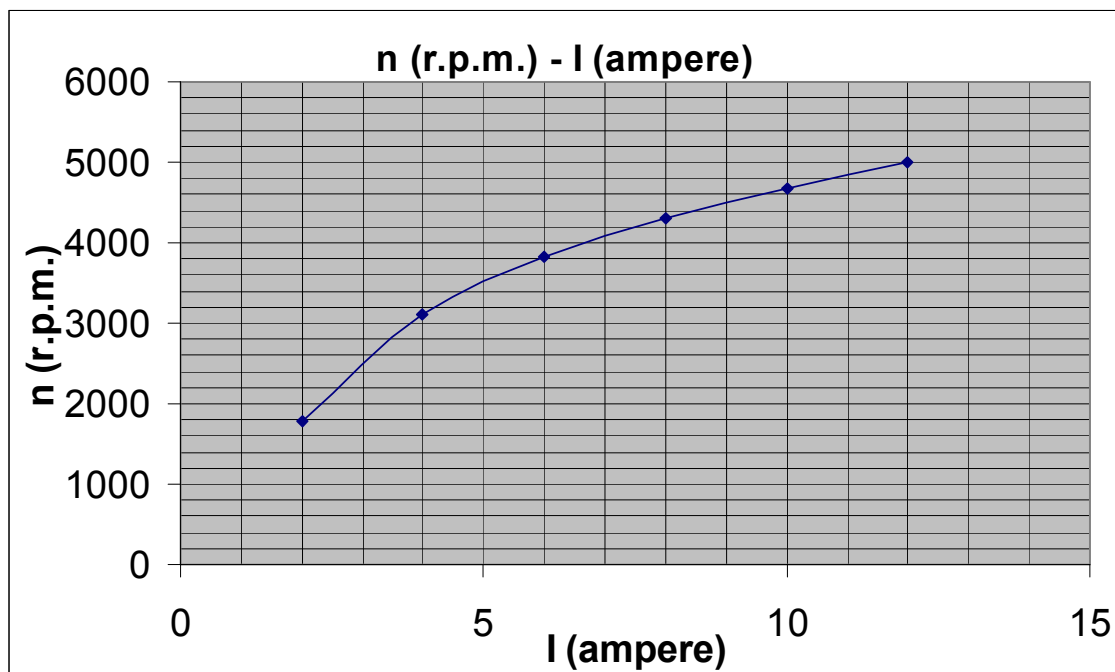
Παρακάτω ακολουθούν οι μετρήσεις που πάρθηκαν, έχοντας συνδεδεμένο έναν κινητήρα συνεχούς ρεύματος, διέγερσης σειράς, μεγάλης ισχύος.

V (volts)	n (r.p.m.)	I (ampere)
2	1786	2,92
4	3102	4,1
6	3834	5,15
8	4295	5,84
10	4670	6,7
12	4992	7,32

Πίνακας 2

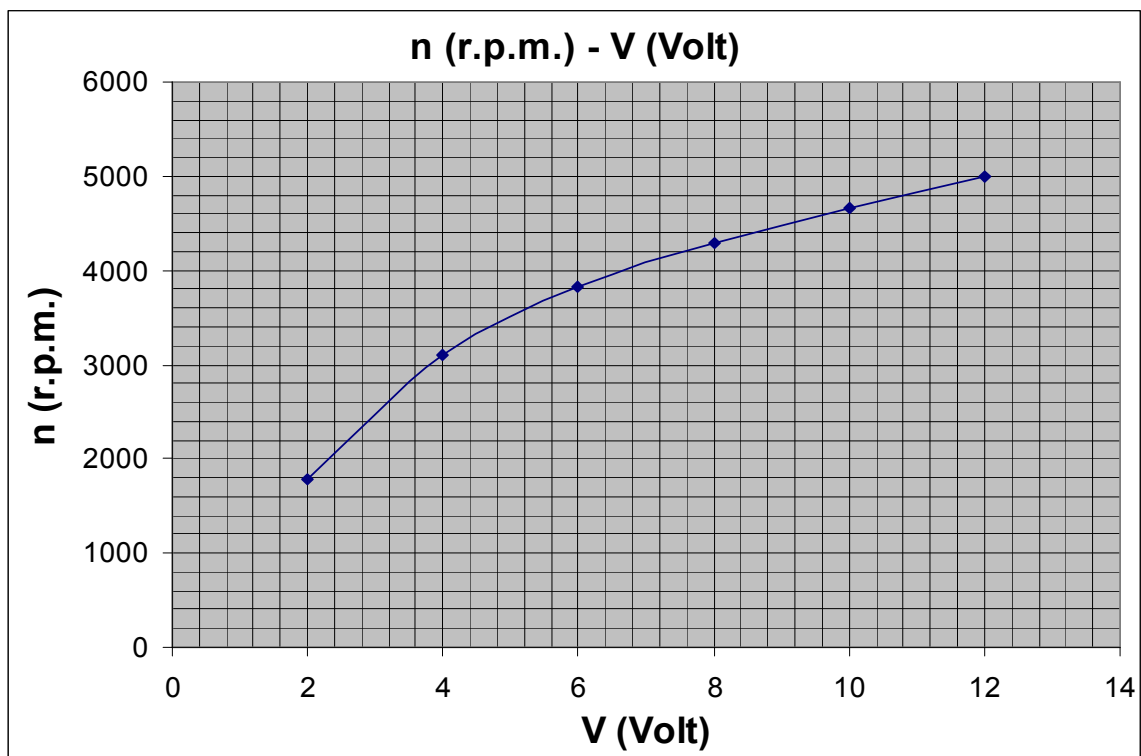
6.2.3 Αποτελέσματα.

Στα παρακάτω σχήματα, 6.16 και 6.17, βλέπουμε τις χαρακτηριστικές καμπύλες του κινητήρα.



Σχήμα 6.16

Χαρακτηριστική καμπύλη στροφών-ρεύματος ($n - I$) κινητήρα



Σχήμα 6.17
Χαρακτηριστική καμπύλη στροφών-τάσης ($n - V$) κινητήρα

6.2.4 Συμπεράσματα.

Όπως φαίνεται από τις γραφικές παραστάσεις οι στροφές του κινητήρα αυξάνονται ανάλογα με τη τάση και το ρεύμα που δίνουμε σε αυτόν. Οι μετρήσεις αυτές έγιναν χωρίς ο κινητήρας να έχει κάποιο μηχανικό φορτίο πάνω του, λόγω δυσκολίας εύρεσης κάτι τέτοιου.

Επίσης, για τον ίδιο λόγο, (έλλειψη μηχανικού φορτίου στο κινητήρα) πατώντας το φρένο θα δούμε ότι ο κινητήρας καθυστερεί να ακινητοποιηθεί. Διαφορετικά θα βλέπαμε το κινητήρα να σταματάει, ακαριαία, πατώντας το μπουτόν του φρένου.

θα πρέπει, επίσης να σημειωθεί ότι η αλλαγή φοράς του κινητήρα, που χρησιμοποιήθηκε για τα πειράματα, δεν πραγματοποιήθηκε για το λόγο ότι ο κινητήρας αυτός είναι διέγερσης σειράς, με συνέπεια να στρέφεται μόνο προς μια κατεύθυνση. Η αλλαγή φοράς πραγματοποιήθηκε με ένα κινητήρα παράλληλης διέγερσης μικρής ισχύος που είδαμε παραπάνω (σχήμα 6.15).

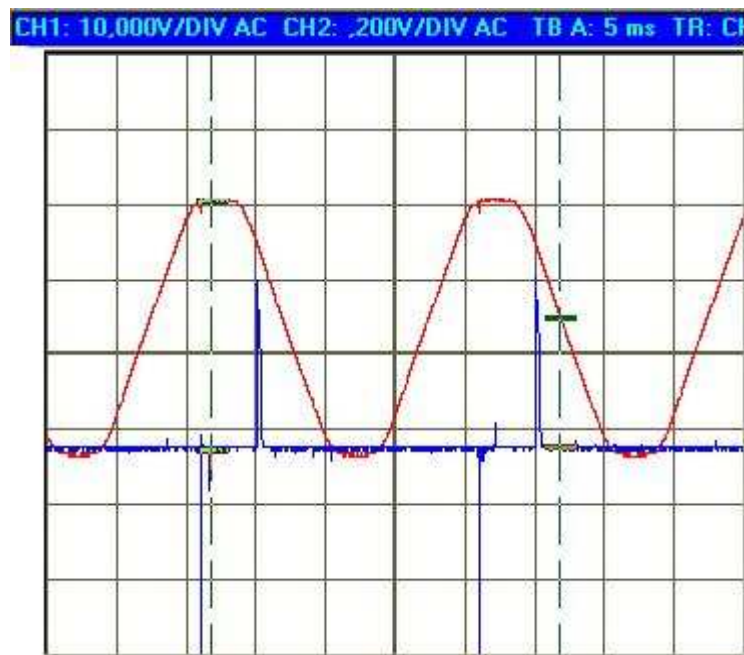
θα πρέπει να αναφερθεί ότι για τη σωστή λειτουργία της τριφασικής πλήρως ελεγχόμενης γέφυρας θα πρέπει οι τρεις να είναι διαδοχικές και να έχουν μεταξύ τους διαφορά φάσης 120° . Επίσης θα πρέπει να τροφοδοτηθούν σωστά και οι βαθμίδες του Powerboard έτσι ώστε να λειτουργούν και οι τρεις βαθμίδες έναυσης των thyristors, διαφορετικά θα παρατηρήσουμε ότι ο κινητήρας δε θα περιστρέφεται με τη μέγιστη δυνατή ταχύτητα.

Τέλος θα πρέπει να ρυθμιστεί κατάλληλα το Powerboard έτσι ώστε να έχουμε τον επιθυμητό συγχρονισμό ανάμεσα στους παλμούς έναυσης των thyristors και στις φάσεις του δικτύου.

Τα ποτενσιόμετρα ρύθμισης της γωνίας έναυσης των thyristors της πρώτης και της δεύτερης βαθμίδας (του Powerboard) να είναι ρυθμισμένα έτσι ώστε οι παλμοί έναυσης να είναι μέσα στα όρια της κυματομορφής των L1 και L2 αντίστοιχα (σχήμα 6.18), διαφορετικά ο κινητήρας δε θα ξεκινάει.

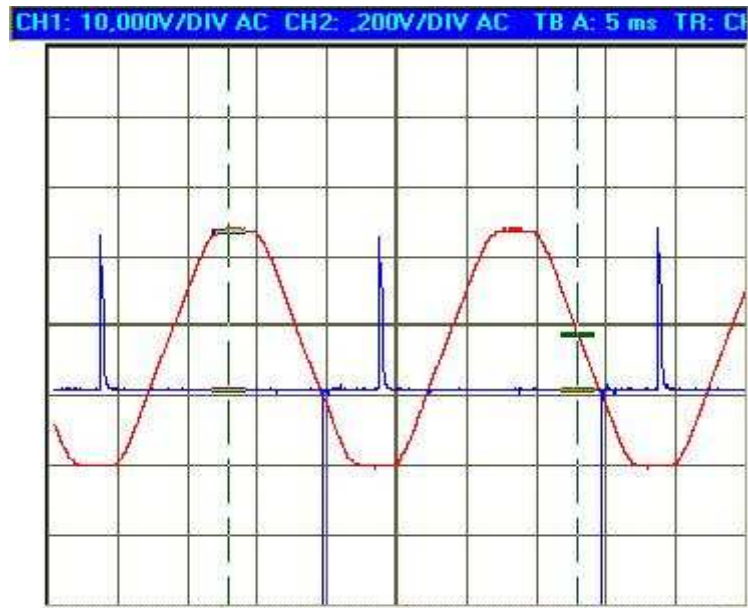
Ρυθμίζουμε τον διακόπτη L1/L2' στο L1 και τον διακόπτη M3/B6 στο B6. Έχοντας ρυθμίσει το ποτενσιόμετρο του τροφοδοτικού (του Powerboard) στο μηδέν (0 Volts) και το ποτενσιόμετρο της βαθμίδας Phase Gate Control II σχεδόν τέρμα δεξιά, θα πρέπει να ρυθμίσουμε το ποτενσιόμετρο της βαθμίδας Phase Gate Control I στο σημείο όπου θα έχουμε ως προς 'γη' στην έξοδο του συγκριτή 13,32Volt.

Παρακάτω φαίνονται κάποια παραδείγματα των όσων προαναφέρθηκαν.



Σχήμα 6.18

Οι παλμοί έναυσης των thyristors είναι μέσα στα όρια των κυματομορφών των φάσεων



Σχήμα 6.19

Οι παλμοί έναυσης των thyristors είναι έξω από τα όρια των κυματομορφών των φάσεων

Παράρτημα

*Τεχνικά κείμενα
εξαρτημάτων*

-

Datasheet's

Βιβλιογραφία

Ελληνική βιβλιογραφία :

- Ηλεκτρονικά ισχύος.....Σ. Μανιά.
- Βιομηχανικά ηλεκτρονικά.....Ε. Σερβετά.
- Ηλεκτρικές μηχανές Ι.....Φωτιάδη.
- Ηλεκτρικές μηχανές ΙΙ.....Φωτιάδη.
- Ηλεκτρικές μηχανές.....Σ. Βασιλακόπουλου.
- Ηλεκτρικές μηχανές Σ.Ρ.....Ν. Νικολαΐδη.
- Μετασχηματιστές και ηλεκτρικές μηχανές.....G.H.Haberle-H.D. Haberle.
- Σημειώσεις θεωρίας ηλεκτρονικών ισχύος.....Αν. Μανίτη.
- Σημειώσεις εργαστηρίου ηλεκτρονικών ισχύος.....Αν. Μανίτη.
- Σημειώσεις ηλεκτρικών μηχανών.....Αν. Μανίτη.

Ξένη βιβλιογραφία :

- Power electronics.....B.Bradley.
- Power electronics.....M.H.Rashid.
- Power electronics.....P.C.Sen.
- Power electronics.....Mohan-Underland-Robbins.
- Power electronics.....B.W.Williams.