

ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΑ ΙΣΧΥΟΣ

Γ'ΕΠΑΛ

Τομέας: Ηλεκτρολογίας, Ηλεκτρονικής και Αυτοματισμού

Ειδικότητα: Τεχνικός Αυτοματισμού

ΙΝΣΤΙΤΟΥΤΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΗΣ ΠΟΛΙΤΙΚΗΣ

Πρόεδρος: Γκλαβάς Σωτήριος

ΓΡΑΦΕΙΟ ΕΡΕΥΝΑΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ Β΄

Προϊστάμενος: Μάραντος Παύλος, Σύμβουλος ΥΠΟΠΑΙΘ

ΥΠΕΥΘΥΝΟΣ ΤΟΜΕΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΙΑΣ, ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ ΚΑΙ ΑΥΤΟΜΑΤΙΣΜΟΥ

Τσιλίκας Βάιος, Δρ.Μηχανικός Ε.Μ.Π.

Εισηγητής Ι.Ε.Π.

ΣΥΓΓΡΑΦΕΑΣ

Πολίτης Γεώργιος, Dipl.-Ing., Dipl.-Ing., MSc Ηλεκτρολόγος-Ηλ/κός Μηχανικός

τ. Επίκουρος Καθηγητής Τμ. Αυτοματισμού ΤΕΙ Πειραιά

ΚΡΙΤΕΣ-ΑΞΙΟΛΟΓΗΤΕΣ

1. Λιγνός Ιωάννης, Σχ.Σύμβουλος

Προϊστάμενος Δ/νσης Ε.Ε./Υ.ΠΟ.ΠΑΙ.Θ .

Ηλεκτρολόγος Μηχανικός MSEE, MBA, ΠΕ 12.05, ΠΕ 19

2. Γεωργάκης Θεόδωρος, MSc Ηλεκτρολόγος Μηχανικός

Εκπαιδευτικός Δευτεροβάθμιας Εκπαίδευσης ΠΕ 12.05, ΠΕ 19

3. Νικητοπούλου Σοφία, Ηλεκτρολόγος Μηχανικός

Εκπαιδευτικός Δευτεροβάθμιας Εκπαίδευσης ΠΕ17.03, ΠΕ 12.06

ΦΙΛΟΛΟΓΙΚΗ ΕΠΙΜΕΛΕΙΑ

Δρ. Λαζανάς Παναγιώτης, Φιλολόγος, Σύμβουλος Β΄ ΙΕΠ

ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΟΛΙΤΙΣΜΟΥ, ΠΑΙΔΕΙΑΣ ΚΑΙ ΘΡΗΣΚΕΥΜΑΤΩΝ
ΙΝΣΤΙΤΟΥΤΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΗΣ ΠΟΛΙΤΙΚΗΣ

Γεώργιος Πολίτης

ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΑ ΙΣΧΥΟΣ

Γ' ΕΠΑΛ

Τομέας: Ηλεκτρολογίας, Ηλεκτρονικής και Αυτοματισμού
Ειδικότητα: Τεχνικός Αυτοματισμού

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ	6
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	7
1.1 Γενικά	7
1.1.1 Τι είναι τα ηλεκτρονικά ισχύος	7
1.1.2 Σκοπός των ηλεκτρονικών ισχύος	8
1.1.3 Ποιες λειτουργίες εκτελούν τα ηλεκτρονικά ισχύος	8
1.2 Βασικά στοιχεία των ηλεκτρονικών ισχύος	11
1.2.1 Ημιαγωγό στοιχείο πυρίτιο (Si)	11
1.2.2 Δημιουργία ημιαγωγού τύπου-p και τύπου -n	12
1.2.3 Δίοδος (επαφή-pn)	14
1.2.4 Το διπολικό τρανζίστορ (BJT – Bipolar Junction Transistor)	18
1.2.5 Τρανζίστορ μονωμένης πύλης (Τρανζίστορ MOS-FET)	22
1.2.6 Το θυρίστορ (thyristor)	26
1.2.7 Παλμογεννήτρια	34
1.2.8 Μεταβατικά φαινόμενα	38
1.2.9 Ταξινόμηση των κυκλωμάτων ηλεκτρονικών ισχύος	45
1.2.10 Κατηγοριοποίηση των κυκλωμάτων των ηλεκτρονικών ισχύος	53
2. ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΙΣΧΥΟΣ ΧΩΡΙΣ ΜΕΤΑΒΑΣΗ	55
2.1. Κυκλώματα χωρίς μετάβαση	55
2.1.1 Κύκλωμα μη ελεγχόμενου ημιανορθωτή (M1U) με ωμικό φορτίο	55
2.1.2 Ελεγχόμενος ανορθωτής μισού κύματος (M1C) (R)	58
2.1.3 Ελεγχόμενος ανορθωτής μισού κύματος με ωμικό-επαγωγικό φορτίο	66
2.1.4 Μονοφασικός μετατροπέας EP/EP (κοινώς, “TRIAC”) ή Μονοφασικός ρυθμιστής εναλλασσόμενου ρεύματος (W1C)	72
3. ΕΤΕΡΟΟΔΗΓΟΥΜΕΝΑ ΚΥΚΛΩΜΑΤΑ	80
3.1 Μη ελεγχόμενη μονοφασική γέφυρα (Γέφυρα B2U)	80
3.1.1 Μερικές χρήσιμες εξισώσεις	84
3.2 Πλήρως ελεγχόμενη μονοφασική γέφυρα με ωμικό φορτίο (R)- (Γέφυρα B2C με ωμικό φορτίο)	86
3.2.1 Μερικοί χρήσιμοι μαθηματικοί τύποι και υπολογισμοί	95
3.3 Πλήρως ελεγχόμενη μονοφασική γέφυρα με RL-φορτίο ($\omega L \gg R$) (Γέφυρα B2C με ωμικό-επαγωγικό φορτίο $R, L \rightarrow \infty$)	97
3.3.1 Χρήσιμοι μαθηματικοί τύποι και υπολογισμοί	103
3.3.2 Μετάβαση της ελεγχόμενης μονοφασικής γέφυρας B2 από τη λειτουργία της ανόρθωσης στη λειτουργία της αντιστροφής	109
3.4 Τριφασικός ανορθωτής τριών παλμών. Τριφασικός ανορθωτής M3	114
3.4.1 Μη ελεγχόμενος τριφασικός ανορθωτής τριών παλμών (M3U)	114
3.4.1.1 Χρήσιμοι μαθηματικοί τύποι και υπολογισμοί	121
3.4.2. Ελεγχόμενος τριφασικός ανορθωτής τριών παλμών με ωμικό φορτίο (R) (M3C)	122
3.4.2.1 Χρήσιμοι μαθηματικοί τύποι και υπολογισμοί	126

4. ΑΥΤΟΟΔΗΓΟΥΜΕΝΑ ΚΥΚΛΩΜΑΤΑ	128
4.1 Μετατροπέας υποβιβασμού συνεχούς τάσης σε συνεχή τάση ή Ψαλιδιστές υποβιβασμού τάσης ή Step-down dc/dc converter ή Buck dc/dc converter ή DC choppers	128
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	135

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Το βιβλίο αυτό γράφτηκε για να καλύψει τις ανάγκες του μαθήματος «Ηλεκτρονικά Ισχύος. (Θεωρία)», της ειδικότητας «Τεχνικός Αυτοματισμού», του Τομέα Ηλεκτρολογίας, Ηλεκτρονικής και Αυτοματισμού, της Γ΄ Τάξης του ΕΠΑ.Λ.

Τα ηλεκτρονικά ισχύος είναι μια πολύ σημαντική τεχνολογία, που βρίσκει εφαρμογή σε ευρύ φάσμα των τεχνικών επιστημών. Επειδή το βιβλίο απευθύνεται σε μαθητές της δευτεροβάθμιας επαγγελματικής εκπαίδευσης, προσαρμόσαμε την ύλη στο επίπεδο αυτό. Τη χωρίσαμε σε κατηγορίες κυκλωμάτων, με αντιπροσωπευτικά κυκλώματα σε κάθε μία, ώστε να γίνει ευκολότερη η κατανόηση της λειτουργίας τους. Ιδιαίτερη βαρύτητα δώσαμε στα σχήματα και στις γραφικές παραστάσεις, για να παρουσιαστεί στους μαθητές μια ολοκληρωμένη εικόνα της λειτουργίας σημαντικών κυκλωμάτων.

Το βιβλίο αποτελείται από:

- α) Ένα εισαγωγικό κεφάλαιο, το οποίο διαπραγματεύεται τα βασικά στοιχεία των ηλεκτρονικών ισχύος.
- β) Το κεφάλαιο των ηλεκτρονικών διακοπών. Οι ηλεκτρονικοί διακόπτες δεν απαιτούν τάση μετάβασης.
- γ) Το κεφάλαιο των ετεροοδηγούμενων κυκλωμάτων τα οποία βρίσκουν μεγάλη εφαρμογή στον έλεγχο της κίνησης και στη μετατροπή της ηλεκτρικής ενέργειας. Τα κυκλώματα αυτά χρησιμοποιούν ως τάση μετάβασης την πολική τάση του δικτύου.
- δ) Το κεφάλαιο των αυτοοδηγούμενων κυκλωμάτων. Τα κυκλώματα αυτά χρησιμοποιούνται σε DC και AC κυκλώματα. Τα τελευταία χρόνια, λόγω της ανάπτυξης νέων στοιχείων, βρίσκουν όλο και μεγαλύτερη εφαρμογή σε κυκλώματα που λειτουργούσαν με θυρίστορ. Η τάση μετάβασης προέρχεται από ένα συσσωρευτή ενέργειας ή από το φορτίο.

Τέλος, θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου προς τον Δρ. Π. Μάραντο, Προϊστάμενο του Γραφείου Έρευνας Σχεδιασμού και Εφαρμογών Β΄ του Ι.Ε.Π., για τη γόνιμη συνεργασία μας καθώς και προς τον Δρ. Β.Τσιλικά, Εισηγητή Ι.Ε.Π., για τις εύστοχες παρατηρήσεις του και την καθοριστική συμβολή του στην έγκαιρη ολοκλήρωση του βιβλίου.

ο συγγραφέας

ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΑ ΙΣΧΥΟΣ

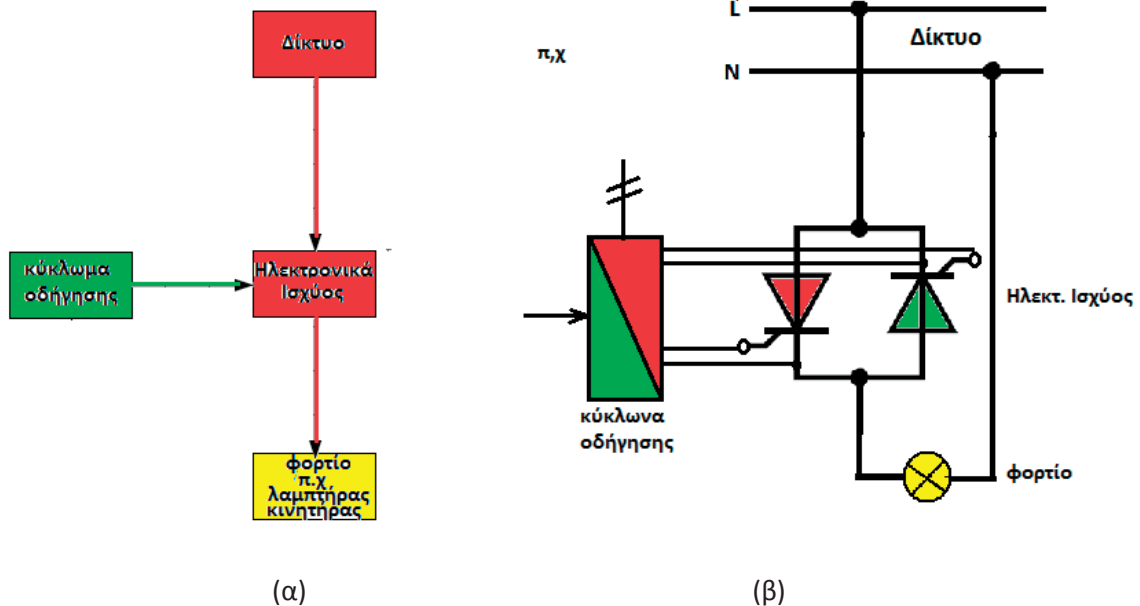
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Γενικά

Τα ηλεκτρονικά ισχύος είναι ένας καινούργιος, σχετικά, επιστημονικός κλάδος της Ηλεκτρικής Ενεργειακής Τεχνολογίας.

1.1.1 Τι είναι τα ηλεκτρονικά ισχύος

Τα ηλεκτρονικά ισχύος είναι η βαθμίδα, η οποία ενώνει το δίκτυο της ηλεκτρικής ενέργειας (ΔΕΗ) με το φορτίο (σχ. 1.1).



Σχ. 1.1: α) Σχηματική διάταξη του ρόλου και της σχέσης των ηλεκτρονικών ισχύος με τα υπόλοιπα ενεργειακά κυκλώματα.

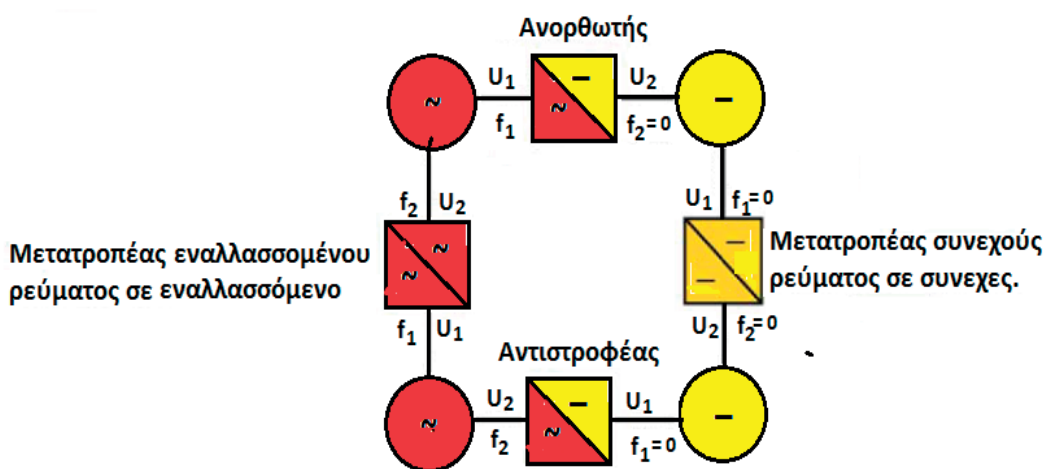
β) Απλή εφαρμογή των ηλεκτρονικών ισχύος, Dimmer.

1.1.2. Σκοπός των ηλεκτρονικών ισχύος

Σκοπός των ηλεκτρονικών ισχύος είναι ο έλεγχος και η μετατροπή της ηλεκτρικής ενέργειας.

1.1.3. Ποιες λειτουργίες εκτελούν τα ηλεκτρονικά ισχύος

Στο σχήμα που ακολουθεί, απεικονίζεται ένα block-διάγραμμα των εργασιών, οι οποίες εκτελούνται με τη βοήθεια των ηλεκτρονικών ισχύος καθώς και των βασικών συσκευών των ηλεκτρονικών ισχύος.



Σχ. 1.2: Κατηγοριοποίηση ηλεκτρονικών μετατροπέων ισχύος.

Η ονομασία των βασικών κυκλωμάτων των ηλεκτρονικών ισχύος, τα οποία αναπαριστώνται στο παραπάνω διάγραμμα, προέκυψε από τη λειτουργία που καθένα από αυτά επιτελεί.

1) Ανορθωτής

Ο ανορθωτής μετατρέπει μια εναλλασσόμενη τάση σε συνεχή.

Σύμβολο:



Αντιπροσωπευτικά κυκλώματα ανορθωτή είναι:

- η γέφυρα-B2
- ο ανορθωτής-M3
- η γέφυρα-B6.

2) Μετατροπέας DC/DC

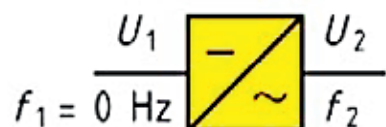
Σύμβολο μετατροπέα DC/DC:



Ο μετατροπέας DC/DC μετατρέπει μια συνεχή τάση σε μια άλλη, επίσης συνεχή τάση διαφορετικής, ωστόσο, τιμής και, ίσως, διαφορετικής πολικότητας.

3) Αντιστροφέας DC/AC

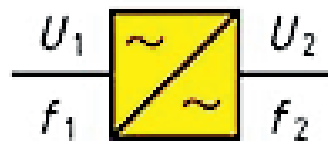
Σύμβολο αντιστροφέα:



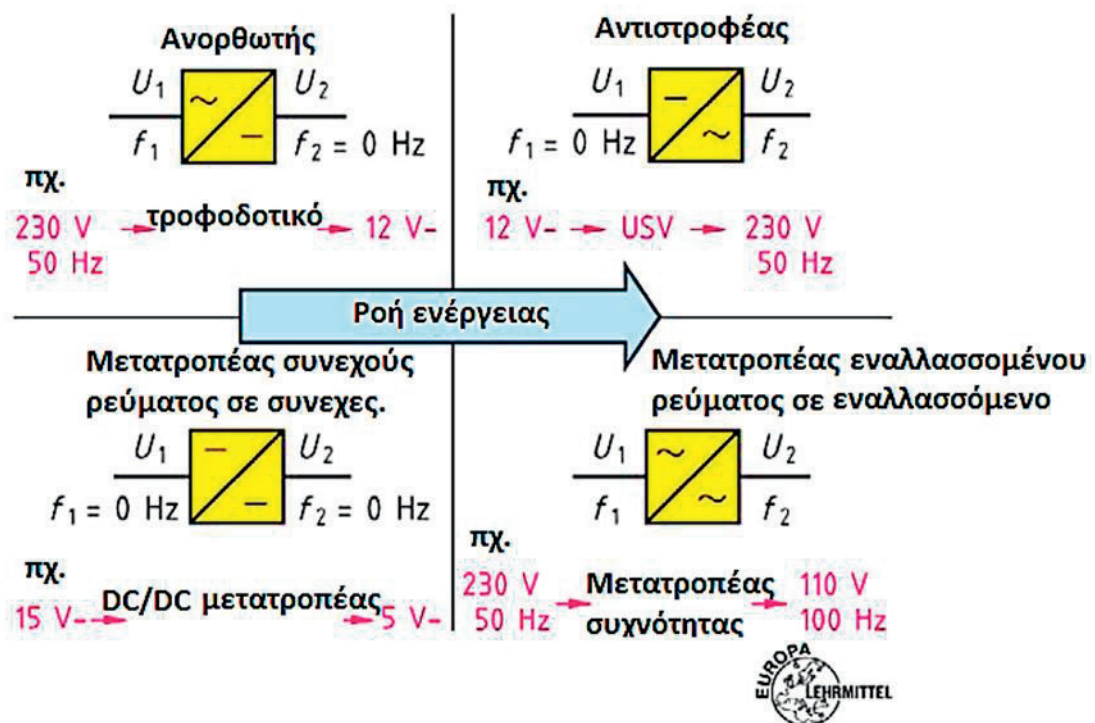
Ο αντιστροφέας μετατρέπει μια συνεχή τάση σε εναλλασσόμενη - μεταβλητής, όμως, συχνότητας και ενεργού τιμής.

4) Μετατροπέας AC/AC

Σύμβολο μετατροπέα AC/AC:



Ο μετατροπέας AC/AC μετατρέπει μια εναλλασσόμενη τάση σε, επίσης, εναλλασσόμενη, άλλης, όμως, ενεργού τιμής και άλλης συχνότητας.



Σχ. 1.3: Συγκεντρωτικός πίνακας συσκευών και λειτουργιών των ηλεκτρονικών ισχύος.

1.2 Βασικά στοιχεία των ηλεκτρονικών ισχύος

1.2.1 Ημιαγωγό στοιχείο πυρίτιο (Si)

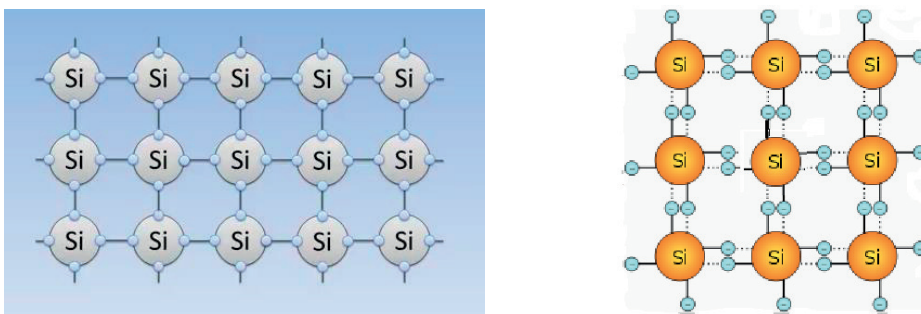
Τα χρησιμοποιούμενα στοιχεία των ηλεκτρονικών ισχύος κατασκευάζονται από ημιαγωγά στοιχεία κυρίως από πυρίτιο (Si).

Η *δίοδος* είναι το πιο απλό στοιχείο που έχει κατασκευαστεί από ημιαγωγό στοιχείο (πυρίτιο, Si). Παρακάτω, θα δώσουμε με απλό τρόπο τη λειτουργία της διόδου.

Μηχανισμός λειτουργίας επαφής p-n

Το ημιαγωγό στοιχείο που χρησιμοποιείται σήμερα στα ηλεκτρονικά ισχύος είναι το πυρίτιο (Si), διότι αντέχει σε υψηλότερη θερμοκρασία ($\theta_{Jmax} = 160\text{ }^{\circ}\text{C}$) και διαθέτει μεγαλύτερη ενεργειακή ζώνη από το αντίστοιχο ημιαγωγό στοιχείο το γερμάνιο (Ge).

Το πυρίτιο έχει τέσσερα (4) ηλεκτρόνια σθένους στην εξωτερική στιβάδα. Συνεπώς, κάθε άτομο πυριτίου συνδέεται με τέσσερα (4) γειτονικά άτομα σχηματίζοντας, έτσι, ομοιοπολικούς δεσμούς (σχ. 1.4).

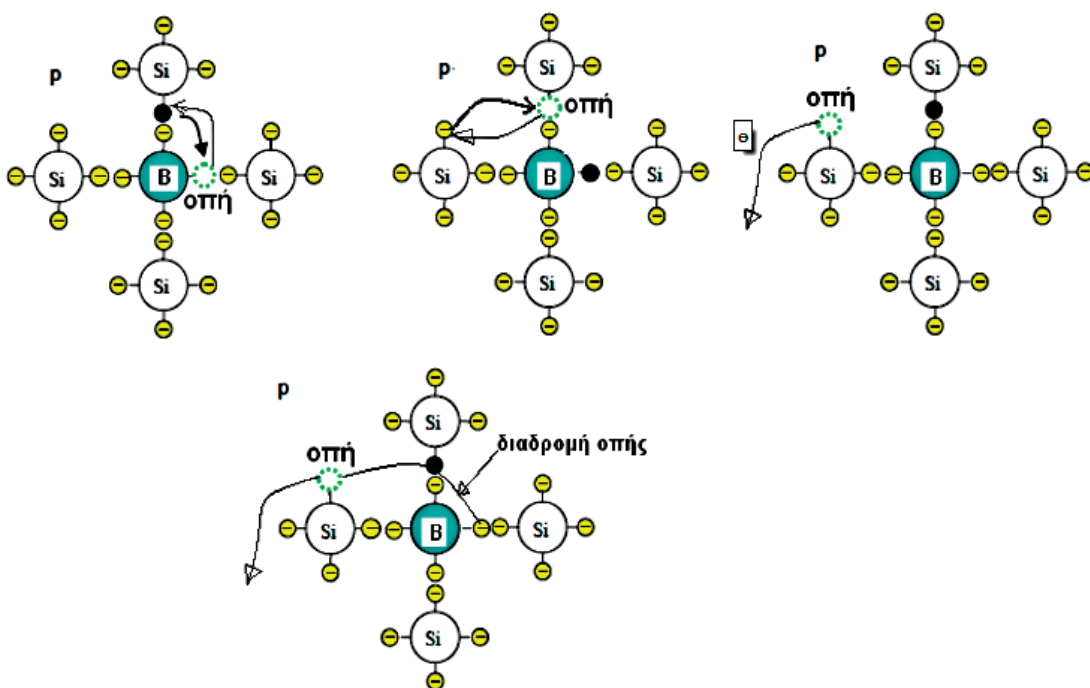


Σχ. 1.4: Κρυσταλλική δομή πυριτίου: δημιουργία ελεύθερων ηλεκτρονίων με θερμικό ιονισμό.

Όταν η θερμοκρασία του πυριτίου είναι μεγαλύτερη των 273K, τότε μερικά ηλεκτρόνια, λόγω της θερμικής τους ενέργειας, ξεφεύγουν από τον

ομοιοπολικό δεσμό και κινούνται ελεύθερα μέσα στο κρυσταλλικό πλέγμα. Την ίδια στιγμή, το άτομο, από το οποίο έφυγε ένα ηλεκτρόνιο, εμφανίζεται φορτισμένο θετικά. Η παραπάνω διαδικασία ονομάζεται *ιονισμός*. Το θετικό φορτίο που δημιουργήθηκε ονομάζεται *οπή*. Εύλογο είναι ότι ο αριθμός των οπών ισούται με τον αριθμό των ηλεκτρονίων.

Όταν ένα ηλεκτρόνιο φύγει από το άτομο και, κατά την κίνησή του, πέσει σε μια οπή, τότε λέμε ότι έχουμε *κίνηση οπών* (σχ. 1.5).

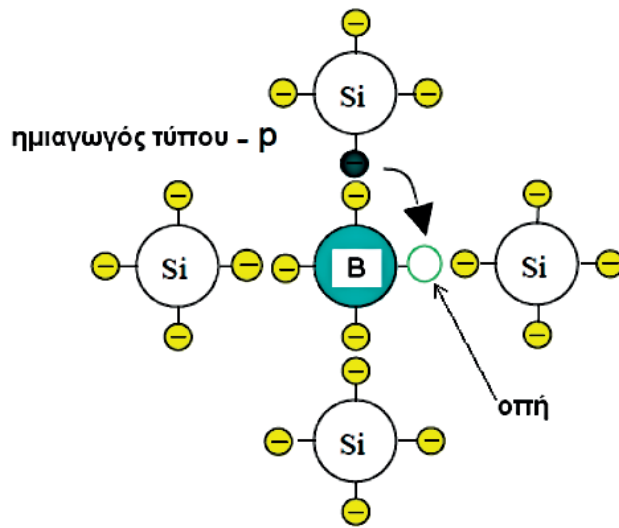


Σχ. 1.5: Κίνηση οπών σε ημιαγωγό

1.2.2 Δημιουργία ημιαγωγού τύπου-p και τύπου -n

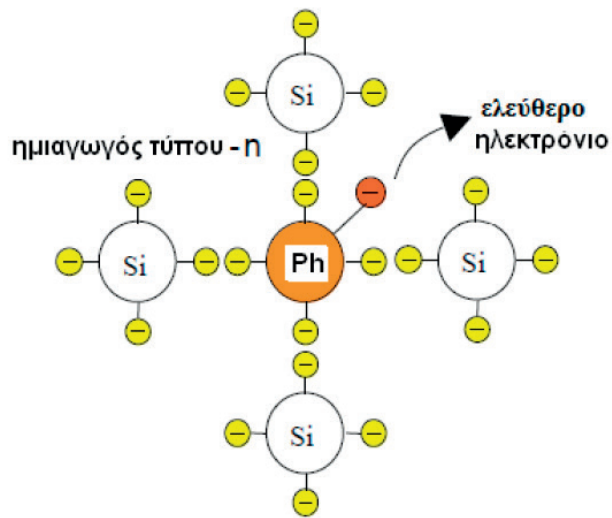
Εάν σ' έναν ημιαγωγό προσθέσουμε ένα τρισθενές στοιχείο, π.χ. βόριο, τότε τα τρία ηλεκτρόνια σθένους ενώνονται με τα γειτονικά άτομα του πυριτίου και δημιουργείται μία *οπή* (σχ. 1.6). Εισάγοντας περισσότερα άτομα βορίου δημιουργούμε περισσότερες *οπές* και το ημιαγωγό υλικό εμφανίζει θετική συμπεριφορά. Ο ημιαγωγός λέμε, ότι είναι *τύπου-p*. Επειδή, όμως, οι *οπές*

είναι περισσότερες από τα ηλεκτρόνια, λέμε ότι οι *οπές* είναι *φορείς πλειονότητας*.



Σχ. 1.6: Πρόσμιξη πυριτίου με δέκτες βορίου για δημιουργία ημιαγωγού τύπου-p .

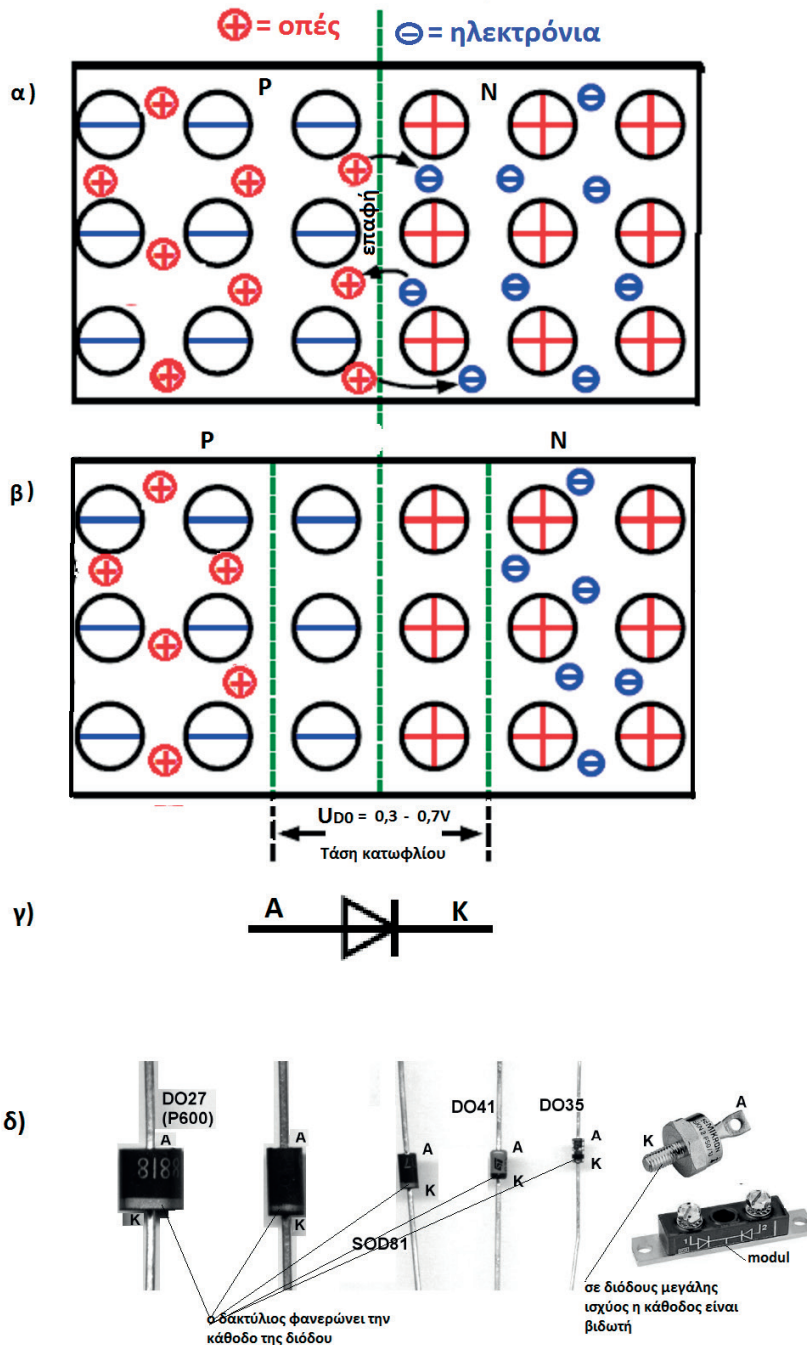
Αντίθετα, αν στο κρυσταλλικό πλέγμα του πυριτίου εισάγουμε άτομα ενός πεντασθενούς στοιχείου, όπως λ.χ. ο φώσφορος (P), τότε τα τέσσερα ηλεκτρόνια ενώνονται με τα αντίστοιχα γειτονικά άτομα του πυριτίου και περισσεύει ένα ηλεκτρόνιο *ελεύθερο*. Με τη μέθοδο αυτή δημιουργούμε ημιαγωγά υλικά με περισσότερα *ελεύθερα ηλεκτρόνια (φορείς πλειονότητας)* από ότι *οπές (φορείς μειονότητας)*. Το ημιαγωγό υλικό λέμε ότι είναι *τύπου-n*



Σχ. 1.7: Πρόσμιξη πυριτίου με φώσφορο για δημιουργία ημιαγωγού *τύπου-n*.

1.2.3 Δίοδος (επαφή-pn)

Εάν φέρουμε σ' επαφή ένα ημιαγωγό υλικό *τύπου-p* μ' ένα ημιαγωγό υλικό *τύπου-n* (σχ. 1.8), τότε δημιουργείται ένα σημαντικό στοιχείο των ηλεκτρονικών ισχύος και των ηλεκτρονικών γενικότερα. Το στοιχείο αυτό ονομάζεται *δίοδος*. (σχ.1.8)



Σχ. 1.8: Δομή και σύμβολο διόδου

α) επαφή-ρη

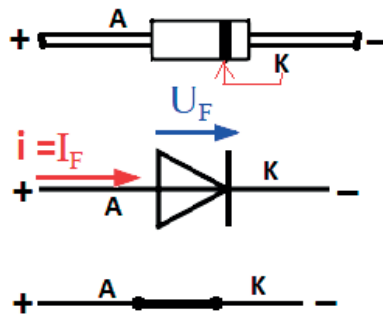
β) σύμβολο διόδου

γ) εμπορική μορφή της διόδου

Σημαντικές πληροφορίες που πρέπει να γνωρίζουμε για τη δίοδο:

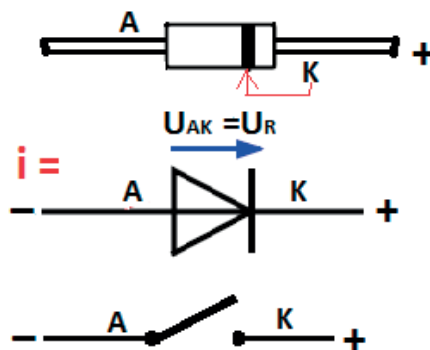
- ✓ Αποτελείται από δύο ζώνες ημιαγωγού υλικού, *τύπου-p* και *τύπου-n*.
- ✓ Διαθέτει δύο ακροδέκτες: την *άνοδο (A)*, που βρίσκεται στη ζώνη-p, και την *κάθοδο (K)*, που βρίσκεται στη ζώνη-n.
- ✓ Λειτουργεί σαν ένας μη ελεγχόμενος διακόπτης.

- ✓ Όταν η δίοδος είναι *ορθά πολωμένη*, δηλαδή θετική άνοδος και αρνητική κάθοδος και η τάση είναι $u_F \geq 0,7V$, τότε συμπεριφέρεται σαν κλειστός διακόπτης και άγει. Δηλαδή: (σχ.1.9)



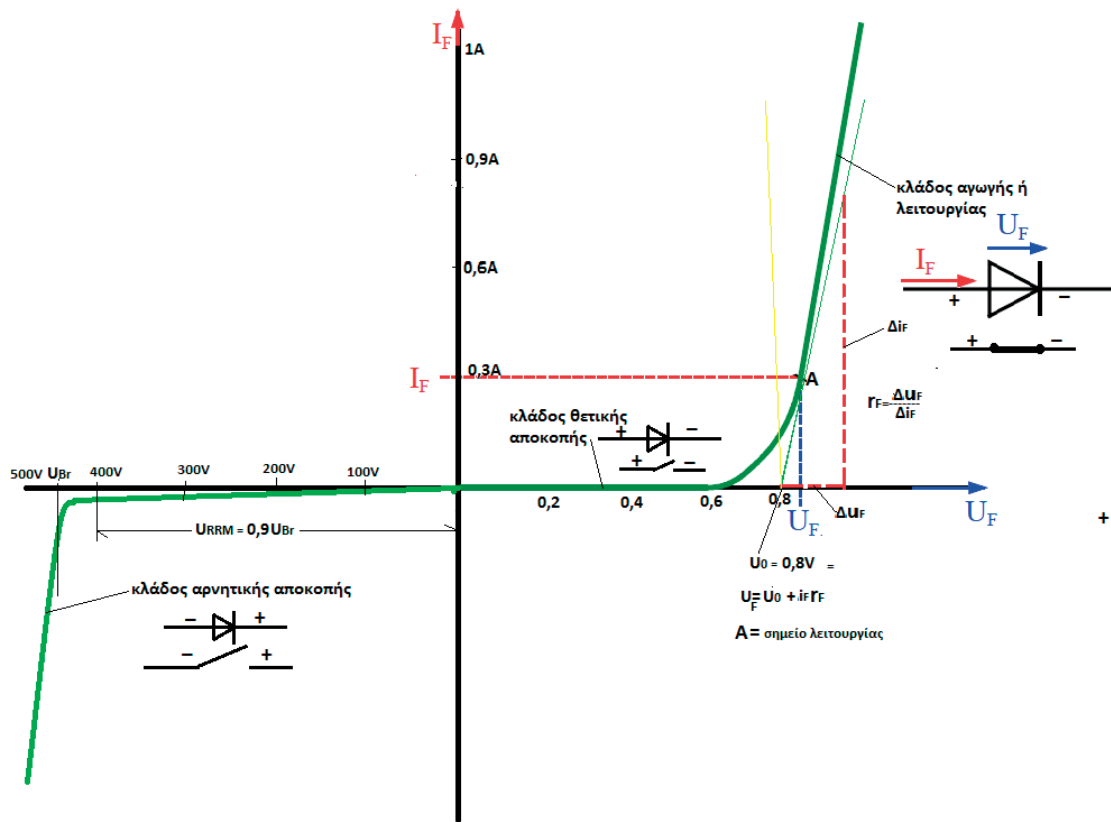
Σχ. 1.9: Ορθή πόλωση διόδου

- ✓ Όταν, αντίθετα, η δίοδος είναι *ανάστροφα πολωμένη*, συμπεριφέρεται σαν ανοικτός διακόπτης και δεν άγει. *Ανάστροφη πόλωση* σημαίνει: αρνητική άνοδος και θετική κάθοδος. (σχ.1.10)



Σχ. 1.10: Ανάστροφη πόλωση διόδου

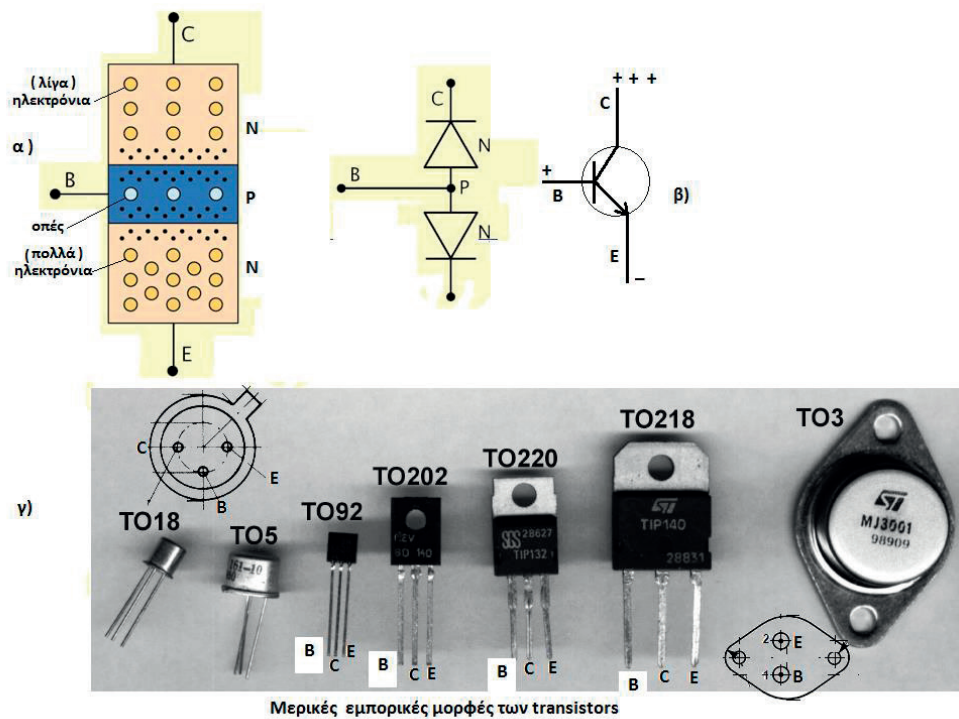
Η στατική χαρακτηριστική της διόδου φαίνεται στο παρακάτω σχήμα (1.11):



Σχ. 1.11: Στατική χαρακτηριστική της διόδου πυριτίου

1.2.4 Το διπολικό τρανζίστορ (BJT – Bipolar Junction Transistor)

Το τρανζίστορ είναι ένα ημιαγωγό στοιχείο των ηλεκτρονικών ισχύος, το οποίο αποτελείται από τρεις ζώνες ημιαγωγού στοιχείου διαδοχικά τοποθετημένες. Επομένως, έχουμε δύο τύπους τρανζίστορ: το τρανζίστορ npn και το τρανζίστορ pnp. Στα ηλεκτρονικά ισχύος χρησιμοποιούμε αποκλειστικά το τρανζίστορ npn.



Σχ. 1.12: Τρανζίστορ-npn

- α) Δομή ενός τρανζίστορ npn
- β) Σύμβολο τρανζίστορ τύπου-npn με ορθή πόλωση
- γ) Τρανζίστορ του εμπορίου

Λειτουργία npn-τρανζίστορ

Το τρανζίστορ λειτουργεί σαν ελεγχόμενος διακόπτης. Για να λειτουργήσει, όμως, απαιτείται ορθή πόλωση. Δηλαδή:

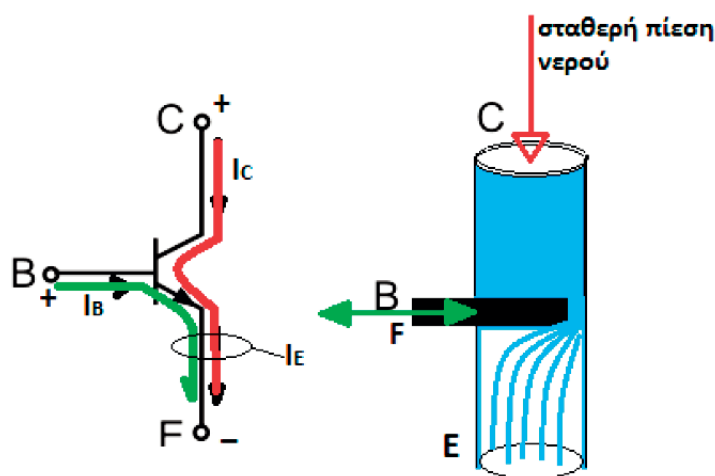
- θετική τάση (+) στον συλλέκτη (C)
- αρνητική τάση (-) στον εκπομπό (E ή γειωμένο εκπομπό)
- θετική τάση (+) στη βάση (B)

Σημείωση: Όταν το βέλος του εκπομπού δείχνει προς την περιφέρεια του κύκλου, τότε είναι τρανζίστορ-ηρη. Εάν το βέλος του εκπομπού δείχνει προς τη βάση τότε είναι τρανζίστορ-ρηρ.

- Όταν το τρανζίστορ είναι ορθά πολωμένο, τότε ρέει ένα μικρό ρεύμα I_B από τη βάση στον εκπομπό, το οποίο ρυθμίζει τη ροή ενός μεγάλου ρεύματος ($I_C \approx I_E$) από τον συλλέκτη στον εκπομπό. Όσο μεγαλώνουμε το ρεύμα βάσης (I_B), τόσο περισσότερο μεγαλώνει το ρεύμα συλλέκτη I_C . Ο λόγος $\frac{I_C}{I_B}$ ονομάζεται ενίσχυση (B). Συνήθεις τιμές του $B = 50-200$.

Π.χ.:

Εάν $B=200$ και $I_B = 5\text{mA}$, τότε $I_C = B \cdot I_B = 200 \cdot 5 = 1000 \text{ mA} = 1\text{A}$



Σχ. 1.13: α) Πόλωση ηρη-τρανζίστορ και β) μηχανικό ανάλογο του τρανζίστορ

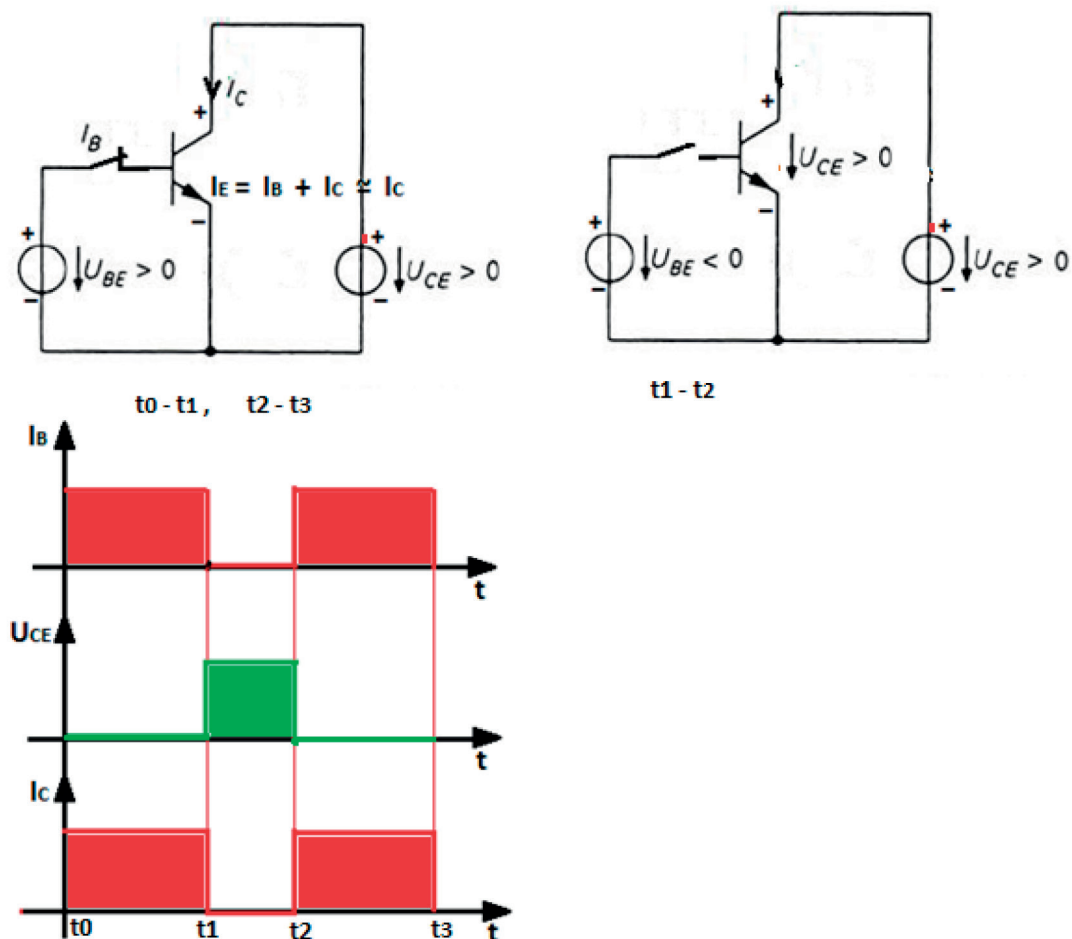
Το ρεύμα I_B ρέει από τη βάση του τρανζίστορ προς τον εκπομπό, μόνο όταν η τάση u_{BE} φθάσει στα $0,7\text{V}$. Η τάση αυτή ονομάζεται τάση κατωφλίου ($u_{BE} = 0,7\text{V}$).

– Για την κατανόηση της λειτουργίας του τρανζίστορ χρησιμοποιούμε ένα σωλήνα (σχ. 1.13β), μέσα από τον οποίο στέλνουμε νερό με σταθερή πίεση (\rightarrow ρεύμα συλλέκτη I_C). Τραβώντας προς τα έξω τον υδατοφράκτη (δύναμη έλξης F του υδατοφράκτη \rightarrow ρεύμα βάσης I_B) αυξάνουμε την ποσότητα του νερού (\rightarrow ρεύμα συλλέκτη I_C), που περνάει από το άνοιγμα του υδατοφράκτη. Άρα, εφαρμόζοντας σχετικά μικρή δύναμη στον υδατοφράκτη, ελέγχουμε μια μεγάλη ροή νερού μέσα από το σωλήνα. Ανάλογα, αυξομειώνοντας το μικρό ρεύμα βάσης (I_B), αυξομειώνουμε, αντίστοιχα, το μεγάλο ρεύμα συλλέκτη (I_C).

Χαρακτηριστικά γνωρίσματα του npn-τρανζίστορ είναι:

- η σχετικά μικρή αντίσταση εξόδου
- η μεγάλη αντίσταση εισόδου (επομένως απαιτείται σχετικά μεγάλη κατανάλωση ισχύος για τον έλεγχο του τρανζίστορ)
- η μικρή συχνότητα λειτουργίας

Ένα τρανζίστορ για να λειτουργήσει, πρέπει αφενός να είναι *ορθά πολωμένο* και αφετέρου να εφαρμοστεί μια θετική τάση στη *βάση*. Δηλαδή:

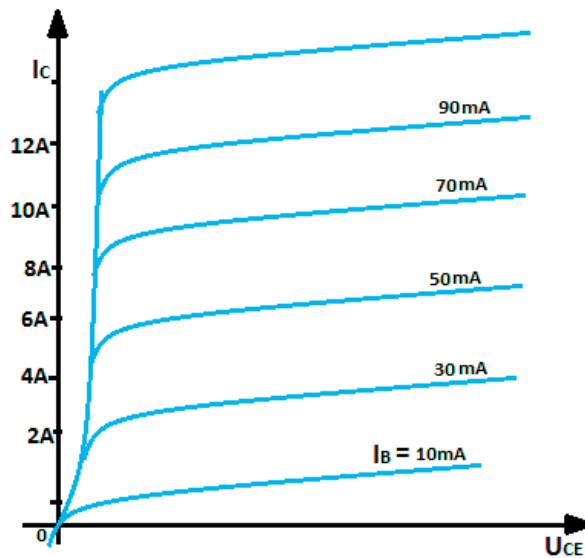


Σχ. 1.14: Τάσεις και ρεύματα κατά τη λειτουργία του τρανζίστορ

Από τις γραφικές παραστάσεις του σχήματος 1.14 διαπιστώνουμε:

- Χρονικό διάστημα 0 έως t_1 και t_2 έως t_3 :
 όταν μεταξύ βάσης και εκπομπού εφαρμόσουμε μια θετική συνεχή τάση (DC-Voltage), τότε οι ηρη-ζώνες είναι αγώγιμες, δηλαδή το τρανζίστορ λειτουργεί σαν κλειστός διακόπτης.
- Χρονικό διάστημα t_1 έως t_2 :
 όταν δεν υπάρχει τάση (u_{BE}) (ή ρεύμα I_B) στον ακροδέκτη της βάσης, τότε το τρανζίστορ λειτουργεί σαν ανοικτός διακόπτης. Το ρεύμα $I_C = 0$.

- Ανάλογα με το ρεύμα βάσης I_B (ή την τάση u_{BE}), λαμβάνουμε και διαφορετικό ρεύμα I_C . Παρακάτω φαίνονται οι χαρακτηριστικές εξόδου $I_C = f(u_{CE})$, με παράμετρο το ρεύμα βάσης I_B .



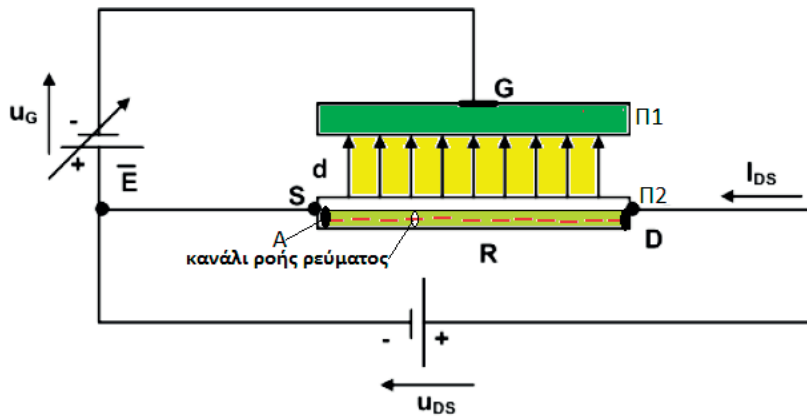
Σχ. 1.15: Χαρακτηριστικές $I_C = f(u_{CE})$

1.2.5 Τρανζίστορ μονωμένης πύλης (Τρανζίστορ MOS-FET)

Στο διπολικό τρανζίστορ έπρεπε να καταναλώσουμε ισχύ στο κύκλωμα της βάσης, για να μπορέσουμε να ελέγξουμε το ρεύμα του συλλέκτη.

Το MOS-FET τρανζίστορ κατασκευάστηκε για να μειώσει την κατανάλωση της ισχύος εισόδου.

Παρακάτω φαίνεται μια απλοποιημένη διάταξη για την κατανόηση της λειτουργίας του MOS-FET (σχ. 1.16).



Σχ. 1.16: Διάταξη για την κατανόηση της λειτουργίας του MOS-FET

Μεταξύ των δύο «πλακών» Π_1 και Π_2 , δημιουργείται, εξαιτίας της τάσης u_G , ένα ηλεκτρικό πεδίο (\mathbf{E}). Λόγω του μονωτικού υλικού που έχει τοποθετηθεί μεταξύ των δύο πλακών, δεν υπάρχει ροή ρεύματος. Η πλάκα Π_2 , όμως, χρησιμοποιείται ταυτόχρονα σαν αντίσταση στο κύκλωμα της πηγής u_{DS} . Έτσι, η πηγή u_{DS} ωθεί το ρεύμα I_{DS} διαμέσου της πλάκας Π_2 .

Αυξάνοντας την τάση u_G , το ηλεκτρικό πεδίο (\mathbf{E}) εισέρχεται βαθύτερα μέσα στην πλάκα Π_2 και ωθεί τα ελεύθερα ηλεκτρόνια όλο και περισσότερο σε μικρότερη επιφάνεια (A). Από τη σχέση

$$R = \frac{l}{\rho \cdot A}$$

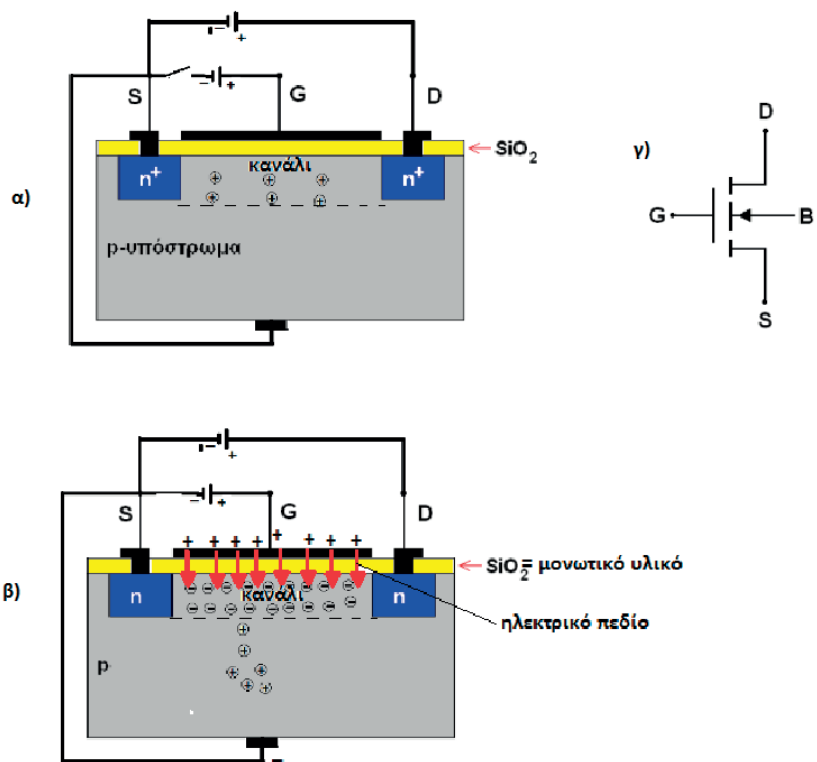
όπου (l): το μήκος του αγωγού, (A): η διατομή του και ρ : η ειδική αντίσταση του υλικού. Γνωρίζουμε, ότι όσο μικρότερη είναι η επιφάνεια (A), μέσα από την οποία περνάει το ρεύμα I_D , τόσο μεγαλύτερη είναι η αντίσταση R της πλάκας Π_2 . Από το νόμο του Ohm γνωρίζουμε, εξάλλου, ότι:

$$I_D = \frac{u_{DS}}{R}$$

Επομένως, μεταβάλλοντας την τάση u_G , μεταβάλλεται και το ηλεκτρικό πεδίο του πυκνωτή. Η αυξομείωση του πεδίου, έχει ως αποτέλεσμα την αυξομείωση της αντίστασης (R) της πλάκας Π_2 . Η αύξηση της αντίστασης (R), όμως, συνεπάγεται τη μείωση του ρεύματος (I). Σ' αυτή τη διαδικασία, η πηγή u_G δεν τροφοδοτεί με ρεύμα τον πυκνωτή. Συνεπώς, έχουμε αυξομείωση του ρεύματος I_0 , χωρίς, όμως, κατανάλωση ισχύος από το κύκλωμα της πύλης.

Στα ηλεκτρονικά ισχύος χρησιμοποιείται το MOS-FET τύπου *n*-καναλιού. Το υλικό των δύο πλακών είναι το πυρίτιο (Si). Το μονωτικό υλικό μεταξύ των πλακών είναι το διοξείδιο του πυριτίου (SiO_2). Η αντίσταση της πλάκας Π_2 ονομάζεται *καναλική αντίσταση* R_{DS} .

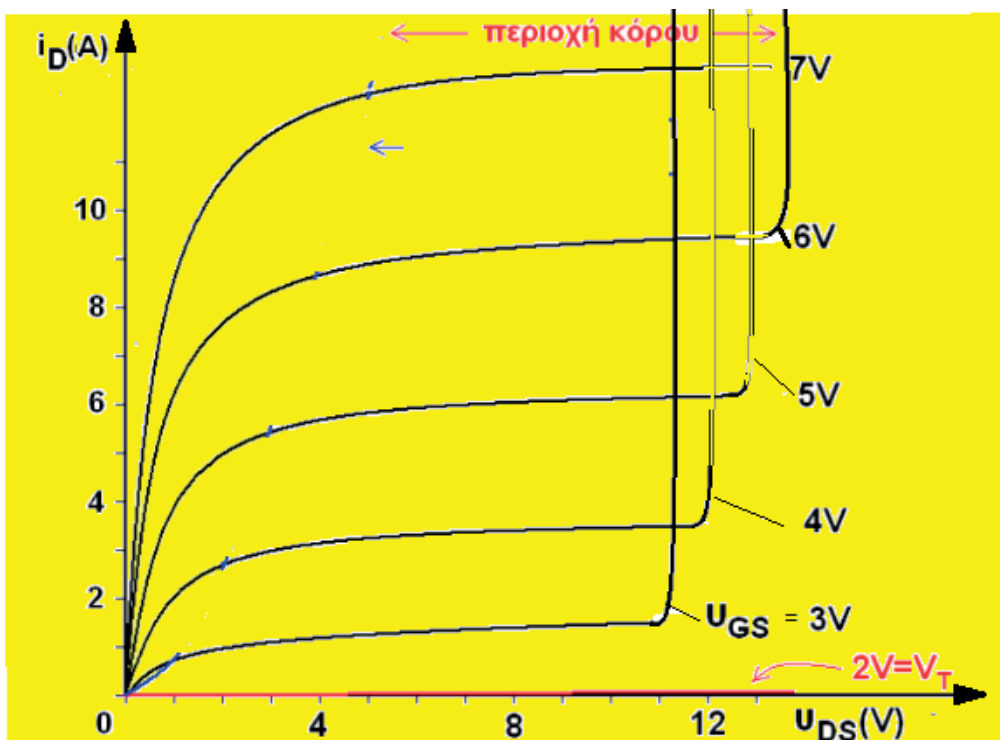
Στο σχ. 1.16 απεικονίζεται η συγκεκριμένη διάταξη, για την κατανόηση της λειτουργίας του MOS-FET. Παρακάτω φαίνεται μια πραγματική τομή του MOS-FET (σχ. 1.17).



Σχ. 1.17: Τομή ενός MOS-FET

Σύμφωνα με την παραπάνω διάταξη (σχ. 1.17α), εάν $u_{GS} = 0$, τότε μεταξύ D και S δεν υπάρχει ροή ρεύματος ($I_0 = 0$), διότι η pn-επαφή μεταξύ G και D είναι *ανάστροφα πολωμένη*. Μόλις εφαρμόσουμε μια τάση u_{GS} στην πύλη, τότε το ηλεκτρικό πεδίο απωθεί τις οπές του καναλιού και έλκει τα ηλεκτρόνια (φορείς μειονότητας) (σχ. 1.17β). Έτσι, το κανάλι εμπλουτίζεται με ηλεκτρόνια και γίνεται αγώγιμο. Η ροή του ρεύματος I_{DS} είναι πλέον δυνατή.

Μια βασική χαρακτηριστική του MOS-FET είναι η χαρακτηριστική $I_{DS} = f(u_{DS})$, που δίνεται στο σχ. 1.18.



Σχ. 1.18: Χαρακτηριστικές εξόδου του MOS-FET

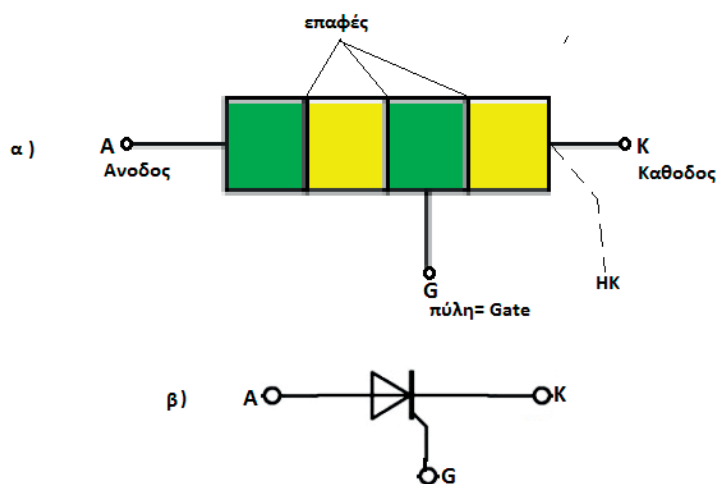
1.2.6 Το θυρίστορ (thyristor)

Κατασκευή

Το θυρίστορ είναι ένα ελεγχόμενο ημιαγωγό στοιχείο των ηλεκτρονικών ισχύος, το οποίο αποτελείται από:

- το ημιαγωγό στοιχείο
- το περίβλημα
- τους ακροδέκτες και, τέλος,
- το σώμα απαγωγής θερμότητας (κοινώς ψήκτρα).

Το ημιαγωγό στοιχείο αποτελείται από τέσσερις ζώνες τύπου-p και τύπου-n διαδοχικά τοποθετημένες (σχ. 1.19α).



Σχ. 1.19: α) Δομή θυρίστορ

β) Σύμβολο θυρίστορ

Το θυρίστορ διαθέτει τρεις (3) ακροδέκτες και τα μεγάλης ισχύος θυρίστορ διαθέτουν έναν επιπλέον (τέταρτο) ακροδέκτη.

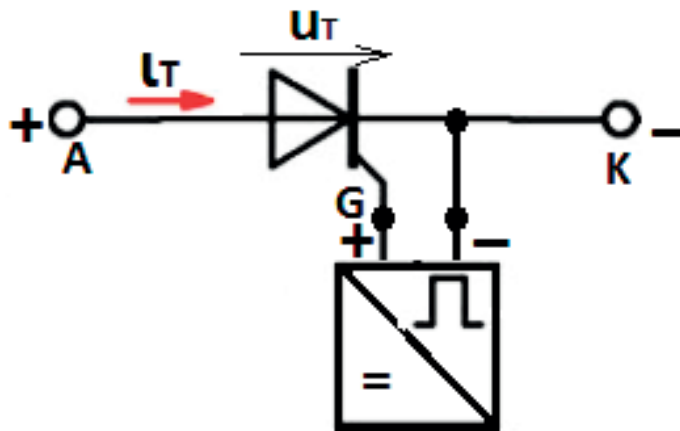
Οι ακροδέκτες χαρακτηρίζονται με τα γράμματα A = άνοδος, K = κάθοδος, G = πύλη και HK = βοηθητική κάθοδος.

Το ημιαγωγό στοιχείο, προκειμένου να προφυλάσσεται από τις καιρικές συνθήκες, περιβάλλεται από ένα πλαστικό περίβλημα.

Επειδή το θυρίστορ διαρρέεται από μεγάλα ρεύματα και το ημιαγωγό στοιχείο είναι μικρό σε όγκο (π.χ. ίσο με το μέγεθος μιας κοινής ταμπλέτας), αναπτύσσονται θερμοκρασίες, οι οποίες καταστρέφουν το θυρίστορ ή μεταβάλλουν τη συμπεριφορά του. Για να απάγουμε τη θερμότητα στο περιβάλλον, τοποθετούμε το θυρίστορ πάνω σ' ένα σώμα απαγωγής θερμότητας (ψήκτρα).

Λειτουργία

Προκειμένου το θυρίστορ να γίνει αγώγιμο (και να λειτουργήσει όπως ένας αγώγιμος διακόπτης), θα πρέπει να πολωθεί σωστά. Η πόλωση του θυρίστορ φαίνεται στο παρακάτω σχήμα (σχ.1.20):



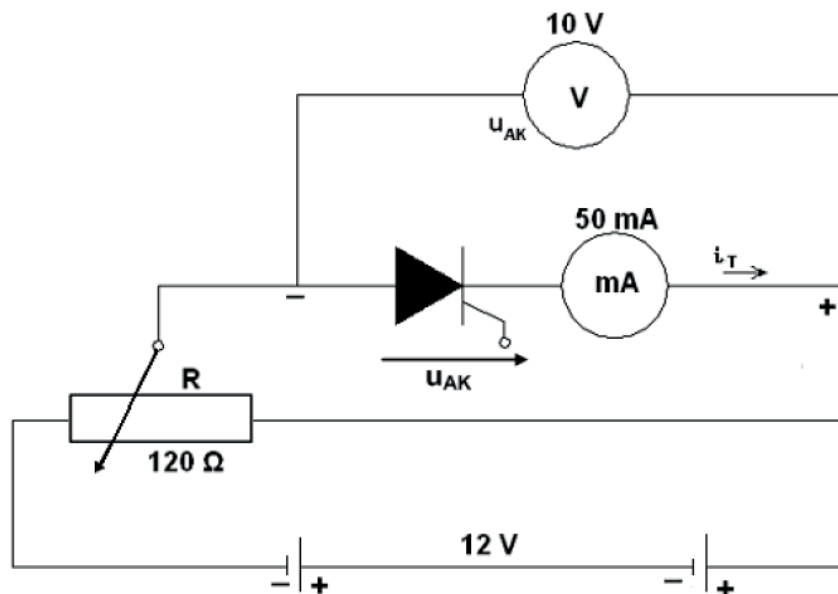
Σχ. 1.20: Ορθή πόλωση του θυρίστορ

Όταν ένα θυρίστορ είναι ορθά πολωμένο (θετική άνοδος, αρνητική κάθοδος), τότε για να γίνει αγώγιμο, δηλαδή για να αφήσει το ρεύμα I_T να περάσει από

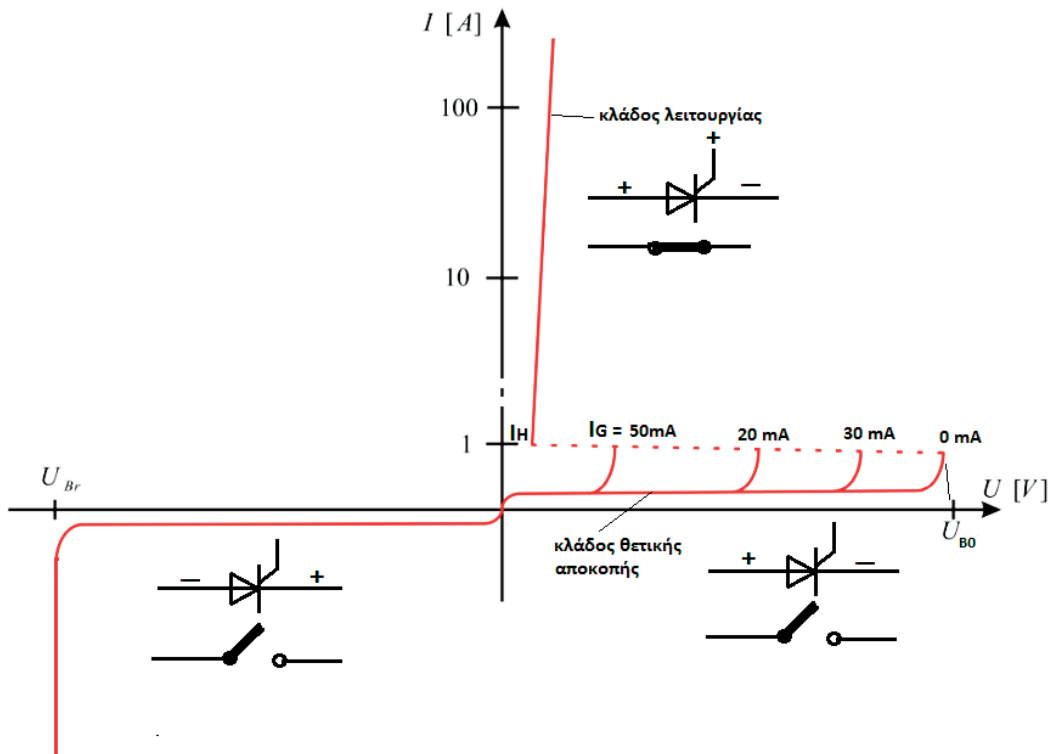
την άνοδο (A) προς την κάθοδο (K), θα πρέπει να δώσουμε στην πύλη έναν κατάλληλο παλμό έναυσης (παλμός έναυσης, παλμός πυροδότησης).

Ο παλμός έναυσης είναι μικρής διάρκειας. Όταν το θυρίστορ γίνει αγώγιμο, τότε ο παλμός μηδενίζεται και το θυρίστορ συνεχίζει να λειτουργεί, για όσο χρονικό διάστημα είναι ορθά πολωμένο.

Για να κατανοήσουμε τη συνολική λειτουργία του θυρίστορ, παρατηρούμε το παρακάτω απλοποιημένο κύκλωμα (σχ. 1.21) και σχεδιάζουμε τη στατική χαρακτηριστική (σχ. 1.22).



Σχ. 1.21: Απλοποιημένη πειραματική διάταξη για την κατανόηση της λειτουργίας του θυρίστορ στην ανάστροφη πόλωση.



Σχ. 1.22: Στατική χαρακτηριστική του θυρίστορ.

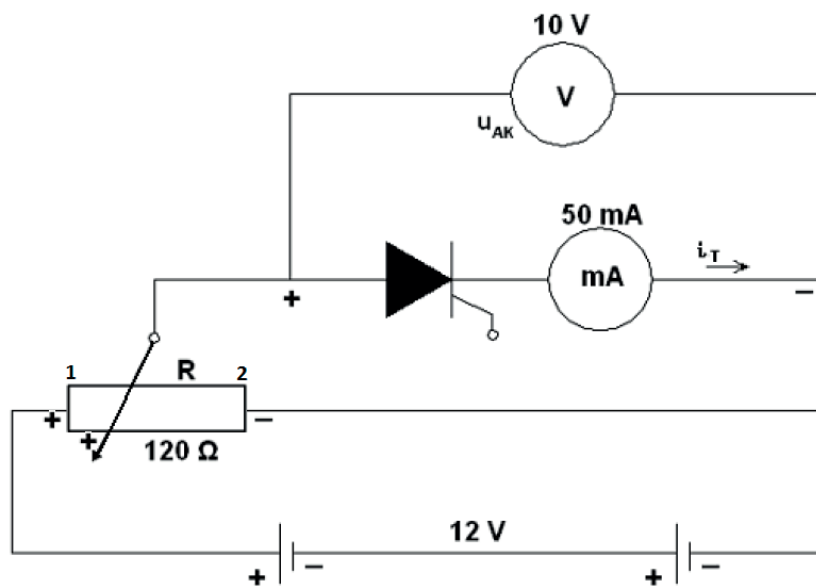
Παρατηρώντας το παραπάνω κύκλωμα (σχ. 1.21) διαπιστώνουμε ότι ο θετικός πόλος της πηγής u_0 είναι συνδεδεμένος με την κάθοδο (K) του θυρίστορ. Επομένως, το θυρίστορ είναι *ανάστροφα πολωμένο* και, σύμφωνα με όσα αναφέραμε παραπάνω, λειτουργεί σαν ανοικτός διακόπτης, αλλά σαν ηλεκτρονικός διακόπτης δεν είναι τέλειος. Έτσι, μετακινώντας τον δρομέα από τη θέση (1) προς τη θέση (2) του ποτενσιόμετρου (P), διαπιστώνουμε τα εξής:

- Η τάση (u_{AK} - ένδειξη βολτομέτρου) στα άκρα του θυρίστορ είναι αρνητική και μειώνεται σταδιακά από το μηδέν μέχρι την τάση $-u_0$.
- Ταυτόχρονα, το αμπερόμετρο, το οποίο μετρά το ρεύμα (I_T) που περνά μέσα απ' το θυρίστορ, δείχνει μια μικρή σταθερή αρνητική τιμή.
- Αυξάνοντας, ωστόσο, σε μεγαλύτερες τιμές την ανάστροφη τάση στα άκρα του θυρίστορ, διαπιστώνουμε ότι το ρεύμα I_T αυξάνει απότομα, χωρίς

παλμό έναυσης στην πύλη. Η ανάστροφη τάση, στην οποία το θυρίστορ έγινε αγώγιμο, ονομάζεται *κρίσιμη τάση θλάσης* u_{Br} .

- Αναπαριστώντας γραφικά τις τιμές του ρεύματος (I_T) και της τάσης (u_{AK}), λαμβάνουμε τον κλάδο αρνητικής αποκοπής (σχ. 1.22).
- Όταν μεταξύ ανόδου-καθόδου εφαρμόσουμε την *κρίσιμη τάση θλάσης* (u_{Br}), τότε το θυρίστορ καταστρέφεται.
- Η συμπεριφορά του θυρίστορ στο τρίτο τεταρτημόριο είναι όμοια με αυτήν της διόδου.

Στη συνέχεια, αντιστρέφουμε τους πόλους της πηγής (u_0) και έχουμε, έτσι, το κύκλωμα (σχ. 1.23)

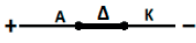


Σχ. 1.23: Απλοποιημένη πειραματική διάταξη για την κατανόηση της λειτουργίας του θυρίστορ στην ορθή πόλωση.

Στην παραπάνω διάταξη αντιστρέψαμε την πηγή (u_0), με αποτέλεσμα το πην ($-$) της πηγής (u_0) να είναι συνδεδεμένο με την κάθοδο (K) του θυρίστορ. Επομένως, το θυρίστορ είναι *ορθά πολωμένο*. Μετακινώντας τη μεσαία λήψη

του ποτενσιόμετρου από το άκρο (2) προς το άκρο (1), παρατηρούμε ότι η τάση u_{AK} αυξάνει προς θετικές τάσεις (0 έως + u_0), ενώ το ρεύμα I_T (ένδειξη αμπερομέτρου) αποκτά μια μικρή και σταθερή τιμή. Μεταφέροντας τις τιμές του I_T και της u_{AK} σ' ένα ορθογώνιο σύστημα, λαμβάνουμε τον κλάδο θετικής αποκοπής (σχ. 1.22).

Αν αυξήσουμε την τάση u_{AK} πέραν μιας ορισμένης τιμής, το θυρίστορ γίνεται ξαφνικά αγώγιμο, δηλαδή το ρεύμα I_T αυξάνει απότομα σε μεγάλες τιμές και η τάση u_{AK} πέφτει σε πολύ χαμηλή τιμή (π.χ. $u_{AK} \approx 3,2V$). Η τάση u_{AK} , στην οποία το θυρίστορ γίνεται αγώγιμο χωρίς παλμό έναυσης στην πύλη, ονομάζεται *κρίσιμη τάση θετικής αποκοπής* και συμβολίζεται με το γράμμα (u_{B0}). Αυτός ο τρόπος λειτουργίας δεν είναι επιτρεπτός, διότι το θυρίστορ καταστρέφεται.

Όταν το θυρίστορ είναι *ορθά πολωμένο* (δηλαδή βρίσκεται στον κλάδο θετικής αποκοπής, όπου η τάση $0 < u_{AK} < u_{B0}$) και δώσουμε *παλμό έναυσης* στην πύλη, τότε το θυρίστορ γίνεται αγώγιμο, δηλαδή συμπεριφέρεται σαν κλειστός διακόπτης. 


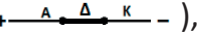
Το ρεύμα I_T παίρνει μεγάλες τιμές και η τάση του θυρίστορ μειώνεται απότομα σε μια μικρή τιμή $u_{T0} \approx 3,2V$, η οποία ονομάζεται *τάση κατωφλίου* (u_{T0}).

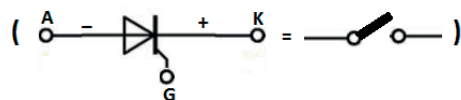
Μ' αυτόν τον τρόπο, το θυρίστορ μεταπίπτει από τον κλάδο θετικής αποκοπής σ' έναν νέο κλάδο, τον κλάδο λειτουργίας.

Αυτός ο τρόπος λειτουργίας του θυρίστορ είναι ο μόνος σωστός, διότι το θυρίστορ ελέγχεται με τη βοήθεια του *παλμού έναυσης* στην πύλη.

Το ελάχιστο ρεύμα του κλάδου λειτουργίας ονομάζεται *ρεύμα συγκράτησης* (I_H).

Σβέση του θυρίστορ

Μπορούμε να παύσουμε τη λειτουργία ενός τρανζίστορ (ανοικτός διακόπτης, ) , το οποίο ήδη λειτουργεί (κλειστός διακόπτης, ) , αφαιρώντας, απλώς, την τάση από τη βάση του. Ένα θυρίστορ, όμως, δεν σβήνει, όταν μηδενίζεται ο παλμός του ακροδέκτη της πύλης. Συνεχίζει να λειτουργεί, για όσο χρονικό διάστημα είναι ορθά πολωμένο. Για να σβήσει, δηλαδή για να σταματήσει τη λειτουργία του, θα πρέπει να πολωθεί ανάστροφα.



Η ανάστροφη τάση στα άκρα του θυρίστορ θα πρέπει να διαρκέσει για τόσο χρόνο, όσο απαιτείται για να εξαφανιστούν (επανασυνδεθούν) τα ηλεκτρόνια και οι οπές μέσα στην «ταμπλέτα» του πυριτίου. Ο χρόνος αυτός ονομάζεται *χρόνος εκκένωσης* t_q .

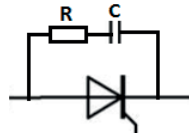
Στην πράξη, ο χρόνος παραμονής της ανάστροφης τάσης στα άκρα του θυρίστορ, είναι, για λόγους ασφαλείας, μεγαλύτερος και ονομάζεται *χρόνος ασφαλούς σβέσης* $t_c = 2,5 t_q$.

Προστασία του θυρίστορ

Το θυρίστορ κινδυνεύει να καταστραφεί από:

- **Υπερένταση** λόγω μεταβολών του φορτίου. Ως μέτρα προστασίας για την περίπτωση αυτή χρησιμοποιούνται *super flink* ασφάλειες, δηλαδή ασφάλειες ταχείας τήξης και μικροδιακόπτες με θερμική και ηλεκτρομαγνητική προστασία.
- **Υπερθέρμανση**. Στην περίπτωση αυτή, το θυρίστορ μπορεί να καταστραφεί ή και να τεθεί σε λειτουργία χωρίς παλμό έναυσης, αν είναι ορθά πολωμένο.

- Την κρίσιμη ταχύτητα μεταβολής της τάσης $\left. \frac{du}{dt} \right|_{cr}$. Αν η ταχύτητα μεταβολής της τάσης $\frac{du_T}{dt}$ στα άκρα του θυρίστορ ξεπεράσει την κρίσιμη τιμή, δηλαδή $\frac{du_T}{dt} > \left. \frac{du}{dt} \right|_{cr}$, τότε το θυρίστορ μπορεί να γίνει αγώγιμο ή να καταστραφεί. Για την προστασία του θυρίστορ, χρησιμοποιούνται κυκλώματα-RC συνδεδεμένα παράλληλα προς το θυρίστορ, π.χ.



- Την κρίσιμη ταχύτητα μεταβολής του ρεύματος $\left. \frac{di}{dt} \right|_{cr}$. Μια υπέρβαση της ταχύτητας μεταβολής του ρεύματος έχει ως αποτέλεσμα την καταστροφή του θυρίστορ. Στην περίπτωση αυτή, παρατηρούμε μαύρους κύκλους γύρω από το ηλεκτρόδιο της καθόδου. Για προστασία, συνδέουμε ένα πηνίο (L) σε σειρά με το θυρίστορ.
- Τη μέγιστη περιοδικά εμφανιζόμενη τάση αιχμής (u_{RRM}). Η τάση αυτή εμφανίζεται στο δίκτυο, όταν τίθενται σε λειτουργία επαγωγικά φορτία, π.χ. κινητήρες. Για προστασία, χρησιμοποιούνται RC-κυκλώματα παράλληλα προς το θυρίστορ.

Σημαντικά τεχνικά χαρακτηριστικά του θυρίστορ:

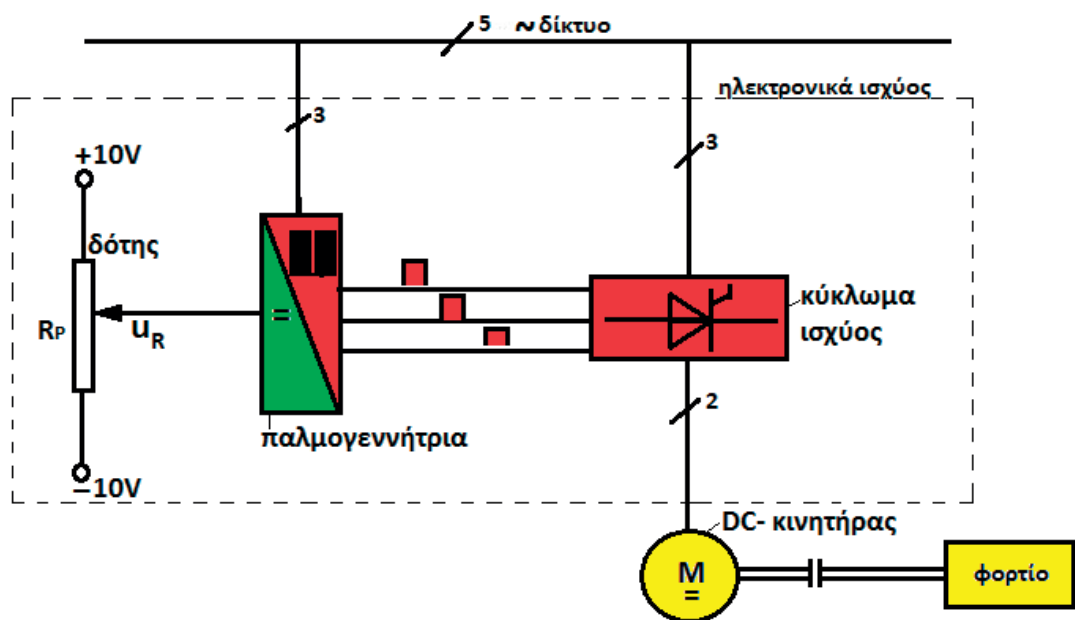
- 1) Το μέγιστο επιτρεπτό ρεύμα (I_{TAV})
- 2) Η μέγιστη περιοδική τάση αιχμής (u_{RRM})
- 3) Η μέγιστη κρουστική τάση αιχμής (u_{RSM})
- 4) Ο χρόνος εκκένωσης (t_q)
- 5) Η κρίσιμη ταχύτητα μεταβολής της τάσης $\left. \frac{du}{dt} \right|_{cr}$ και του ρεύματος $\left. \frac{di}{dt} \right|_{cr}$.

1.2.7 Παλμογεννήτρια

Σκοπός της παλμογεννήτριας είναι η παραγωγή παλμών για την *έναυση* των θυρίστωρ. Οι παλμοί πρέπει να πληρούν τις παρακάτω προϋποθέσεις:

- Να μεταβάλλονται χρονικά ανάλογα με την τιμή της συνεχούς τάσης ή της τάσης ελέγχου (u_R), που εφαρμόζεται στην είσοδο της παλμογεννήτριας.
- Οι παραγόμενοι παλμοί πρέπει να παράγονται, όταν τα αντίστοιχα θυρίστωρ είναι ορθά πολωμένα.

Μια γενική εικόνα της θέσης της παλμογεννήτριας σε ένα οδηγούμενο κινητήριο σύστημα είναι η παρακάτω (σχ. 1.24):

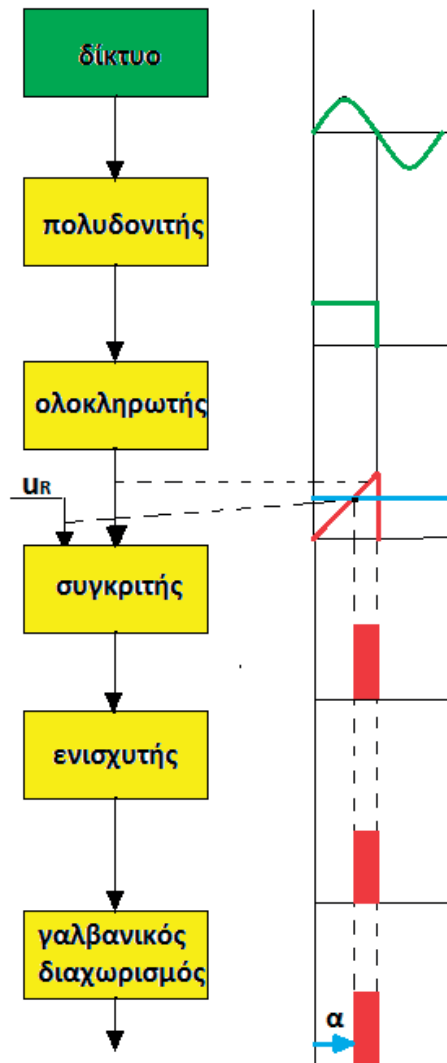


Σχήμα 1.24: Γενικό block-διάγραμμα ενός οδηγούμενου κινητήριου συστήματος.

Όπως αναφέρθηκε και πρωτίτερα, τα ηλεκτρονικά ισχύος είναι ο σύνδεσμος του ηλεκτρικού δικτύου και του φορτίου (κινητήρας). Τα ηλεκτρονικά ισχύος

αποτελούνται από το κύκλωμα ισχύος (δίοδος, τρανζίστορ ισχύος, θυρίστορ κτλ.) και το κύκλωμα ελέγχου (παλμογεννήτρια).

Στην ενότητα αυτή θα εξηγήσουμε τη γενική δομή της παλμογεννήτριας (σχ. 1.25)

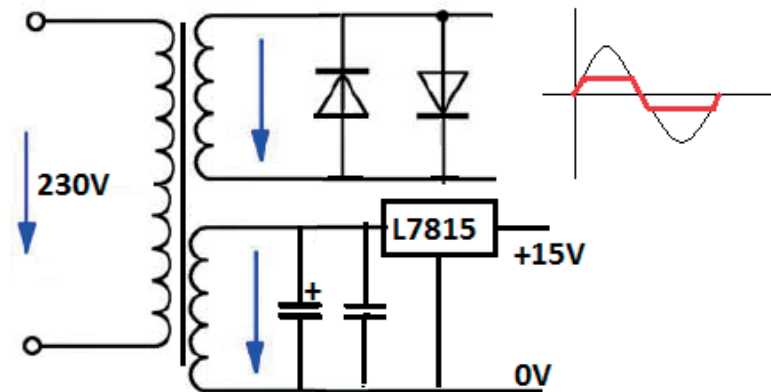


Σχ. 1.25: Βασική δομή μιας παλμογεννήτριας, α : η γωνία έναυσης.

Στη δομή της παλμογεννήτριας παρατηρούμε τις εξής βαθμίδες:

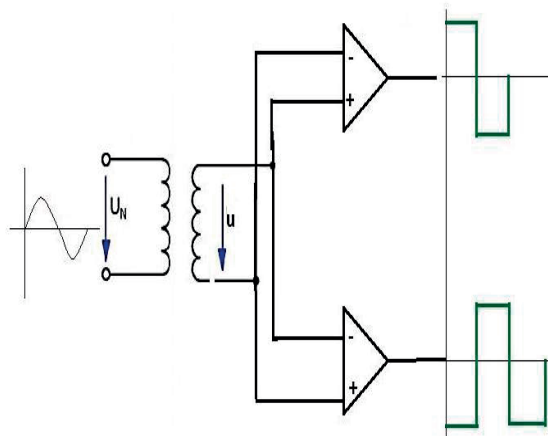
- **Το δίκτυο:** Η βαθμίδα αυτή διαθέτει έναν μετασχηματιστή μικρής ισχύος, συνήθως με δύο δευτερεύοντα 230V / 2x18V, 1A. Το ένα

τύλιγμα του δευτερεύοντος χρησιμοποιείται για τη δημιουργία της τάσης τροφοδοσίας ($\pm 15V$) των ολοκληρωμένων και το άλλο τύλιγμα για την ανίχνευση του μηδενός και τον συγχρονισμό των παλμών.



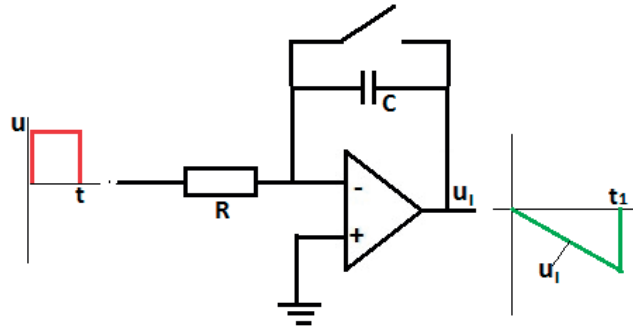
Σχ. 1.26: Τροφοδοτικό $\pm 15V$ και κύκλωμα συγχρονισμού

- **Τον πολυδονητή:** Ο πολυδονητής χρησιμεύει για τη δημιουργία ορθογωνικών παλμών.



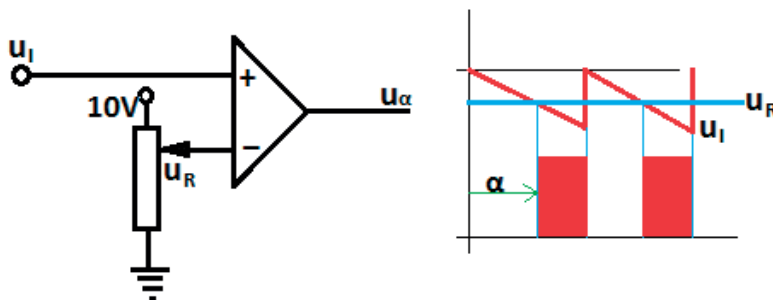
Σχ. 1.27: Πολυδονητής

- **Τον ολοκληρωτή:** Ο ολοκληρωτής παίρνει στην είσοδό του μια DC-τάση και τη μετατρέπει σε μια ανωφερική τάση με σταθερή κλίση. Ο διακόπτης Δ μηδενίζει την τάση u_i τη χρονική στιγμή t_1 .



Σχ. 1.28: Ολοκληρωτής

- **Τον συγκριτή:** Ο συγκριτής δέχεται στην είσοδό του την τάση (u_i) του ολοκληρωτή και τη συγκρίνει με μια συνεχή μεταβλητή τάση (u_R). Ο συγκριτής συγκρίνει τις δύο τάσεις (u_i και u_R) και, αν $u_i > u_R$, τότε δίνει στην έξοδό του μια συνεχή τάση.



Σχ. 1.29: Συγκριτής

- **Τον ενισχυτή:** Οι παλμοί u_α είναι μικρής ισχύος και δεν είναι ικανοί να κάνουν έναυση σ' ένα ορθά πολωμένο θυρίστορ. Για τον λόγο αυτό, απαιτείται μια βαθμίδα ενίσχυσης. Εάν το θυρίστορ είναι μικρής τάσης

(π.χ. 12V, 24V κτλ.), τότε μπορούμε να συνδέσουμε την τάση u_a κατευθείαν στον ακροδέκτη της πύλης.

1.2.8 Μεταβατικά φαινόμενα

Σχεδόν όλα τα κυκλώματα των ηλεκτρονικών ισχύος αποτελούνται από πηγές τάσης, μαγνητικούς και χωρητικούς συσσωρευτές, μετατροπείς ενέργειας, καθώς και από μη ελεγχόμενα και ελεγχόμενα ημιαγωγά στοιχεία.

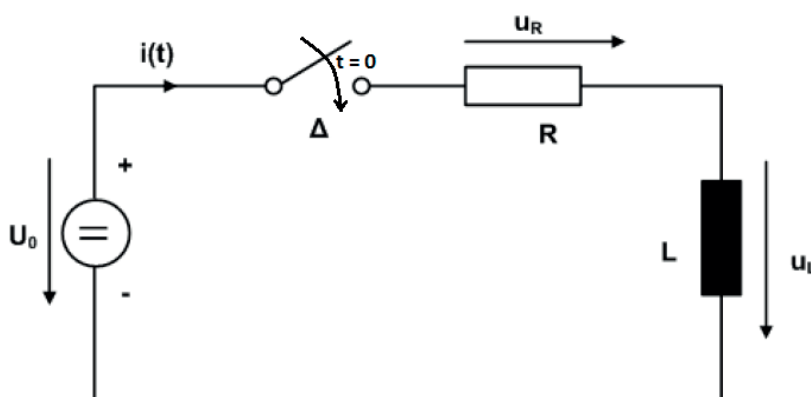
Λόγω της παραπάνω σύνθεσης των κυκλωμάτων ισχύος:

- Το ρεύμα του πηνίου δεν μπορεί να μεταβληθεί απότομα ή ν' αλλάξει φορά ροής.
- Η τάση των πυκνωτών δεν είναι, επίσης, δυνατόν να μεταβληθεί αλματωδώς.

Για να έχουμε μια εικόνα των μεταβατικών φαινομένων, θα μελετήσουμε δύο βασικά κυκλώματα:

α) Το κύκλωμα συνεχούς ρεύματος με RL-φορτίο

Παρακάτω φαίνεται μια πηγή συνεχούς τάσης, η οποία τροφοδοτεί ένα RL-φορτίο.



Σχ. 1.30: Πηγή συνεχούς τάσης με RL-φορτίο

Όταν ο διακόπτης Δ κλείσει, τη χρονική στιγμή $t = 0$ ισχύει:

$$u_R + u_L = u_0$$

$$i \cdot R + L \frac{di}{dt} = u_0$$

Η επίλυση της παραπάνω εξίσωσης απαιτεί τη γνώση ανώτερων μαθηματικών και γι' αυτό δίνεται η λύση της εξίσωσης. Το ρεύμα (i) του κυκλώματος υπολογίζεται από τη σχέση:

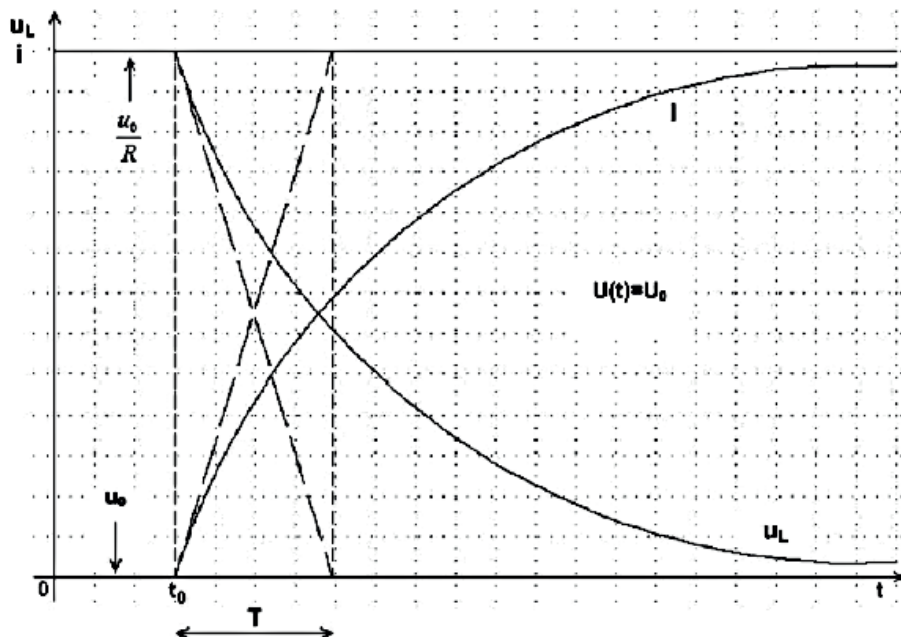
$$i = \frac{u_0}{R} (1 - e^{-\frac{t}{T}}) \quad (1)$$

$$\text{όπου } T = \frac{L}{R} \text{ η σταθερά χρόνου}$$

Ενώ η τάση (u_L) στα άκρα του πηνίου δίνεται από τη σχέση:

$$u_L = L \frac{di}{dt} \Rightarrow u_L = u_0 \cdot e^{-\frac{t}{T}} \quad (2)$$

Η γραφική αναπαράσταση των εξισώσεων (1) και (2) φαίνεται παρακάτω:



Σχ. 1.31: Μεταβατική χρονική απόκριση RL-κυκλώματος

Παρατηρήσεις:

α) Συμπεριφορά του πηνίου στο κύκλωμα συνεχούς ρεύματος.

Σύμφωνα με τον Lenz, το πηνίο συμπεριφέρεται ως εξής:

Όταν ο διακόπτης Δ είναι ανοιχτός, το ρεύμα (i) είναι μηδέν [$i = (0^-) = 0$]. Μόλις κλείσουμε τον διακόπτη, τη χρονική στιγμή $t = 0^+$ το ρεύμα (i) πρέπει να είναι, επίσης, μηδέν [$i = (0^+) = 0$]. Με το κλείσιμο του διακόπτη, η πηγή, όπως είναι φυσικό, ωθεί ένα ρεύμα $i = \frac{u_0}{R}$ μέσα στο κύκλωμα. Τόσο από τη σχέση (1) όσο, όμως, και από τη γραφική παράσταση παρατηρούμε ότι για $t = 0 \Rightarrow i = 0$.

Πώς συμβαίνει αυτό;

Κατά τον Lenz, το πηνίο αντιδρά στο αίτιο που αλλάζει την κατάσταση, στην οποία βρίσκεται. Για να είναι το ρεύμα $i(0^+) = 0$, το πηνίο δημιουργεί ένα αντίρρευμα (i_α) ίσο και αντίθετο με το ρεύμα $i(0^+) = \frac{u_0}{R}$ της πηγής. Δηλαδή

$$i(0^+) = -\frac{u_0}{R}.$$

Στη συνέχεια, το ρεύμα i_α μηδενίζεται εκθετικά και το ρεύμα (i) του κυκλώματος περιορίζεται, τελικά, μόνο από την αντίσταση (R) $\Rightarrow i(\infty) = \frac{u_0}{R}$.

Γι' αυτό λέμε, ότι το πηνίο στο συνεχές ρεύμα συμπεριφέρεται σαν βραχυκύκλωμα.

Αντίθετα, η τάση u_L του πηνίου με το κλείσιμο του διακόπτη είναι ίση με την τάση της πηγής $u_L(0^+) = u_0$. Ακολούθως, μειώνεται εκθετικά και, τελικά, μηδενίζεται.

Ταχύτητα μεταβολής του ρεύματος

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, ένα θυρίστορ μπορεί να καταστραφεί, αν η ταχύτητα, με την οποία μεταβάλλεται το ρεύμα (που περνά μέσα από το θυρίστορ), ξεπεράσει την κρίσιμη ταχύτητα $\left. \frac{di}{dt} \right|_{cr}$.

Παρατηρώντας τη μεταβολή του ρεύματος (i) του πηνίου, διαπιστώνουμε ότι η μεγαλύτερη μεταβολή του ρεύματος λαμβάνει χώρα, τη στιγμή που το ρεύμα περνά από το σημείο μηδέν του άξονα.

Από το τρίγωνο υπολογισμού της σταθεράς του χρόνου, μπορούμε να υπολογίσουμε την ταχύτητα μεταβολής του ρεύματος. Δηλαδή:

$$\epsilon\phi\phi = \frac{di}{dt} = \frac{\Delta I}{\Delta t} = \frac{\frac{u_0}{R}}{T} = \frac{\frac{u_0}{R}}{\frac{L}{R}} = \frac{u_0}{L}$$

Από την παραπάνω σχέση διαπιστώνουμε ότι η ταχύτητα μεταβολής του ρεύματος περιορίζεται μόνο από το πηνίο (και όχι από την ωμική αντίσταση).

Γραφικός υπολογισμός της σταθεράς χρόνου

Σταθερά χρόνου (T) είναι ο χρόνος που απαιτείται, για να φθάσει το ρεύμα

στο 63% της τελικής του τιμής $I_{max} = \frac{u_0}{R}$.

Η σταθερά χρόνου υπολογίζεται γραφικά με δύο τρόπους:

i) Φέρνουμε εφαπτομένη στην καμπύλη του ρεύματος στο σημείο μηδέν. Όταν η ευθεία αυτή φθάσει την τελική τιμή του ρεύματος (I_{max}), τότε φέρνουμε μία κάθετο στον άξονα του χρόνου. Το σημείο, όπου η κάθετος συναντά τον άξονα του χρόνου, μας δείχνει τη σταθερά χρόνου (T).
Σημ.: η μέθοδος αυτή δεν είναι ακριβής.

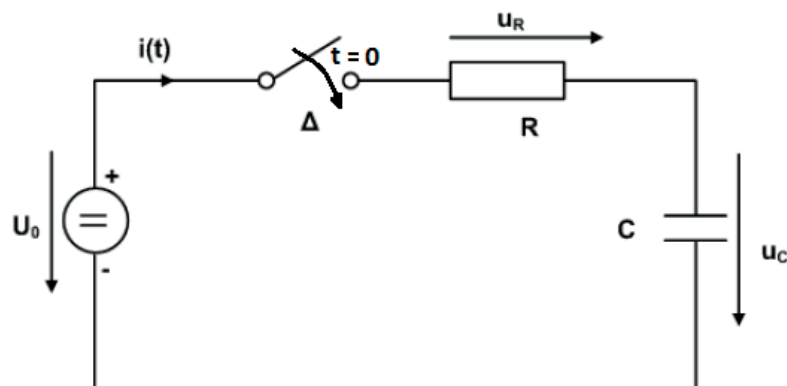
ii) Σημειώνουμε πάνω στον άξονα του ρεύματος την τιμή $0,63 \frac{u_0}{R}$.

Στο σημείο αυτό φέρνουμε μία κάθετο πάνω στον άξονα του ρεύματος. Ακριβώς εκεί, όπου η κάθετος συναντά την καμπύλη του ρεύματος, φέρνουμε κάθετο στον άξονα του χρόνου. Το σημείο τομής της καθέτου με τον άξονα του χρόνου μάς δείχνει τη σταθερά χρόνου (T). Γενικά, ισχύει ότι, μετά από 5T, το ρεύμα φθάνει στην τελική του τιμή.

Σημ.: η μέθοδος αυτή είναι ακριβής.

β) Το κύκλωμα συνεχούς ρεύματος με RC-φορτίο

Παρακάτω φαίνεται το κύκλωμα συνεχούς ρεύματος με RC-φορτίο (σχ. 1.32).



Σχ. 1.32: Κύκλωμα συνεχούς ρεύματος με RC-φορτίο

Όταν ο διακόπτης (Δ) κλείσει, τη χρονική στιγμή $t = 0$, ισχύει:

$$u_R + u_L = u_0 \quad \text{και} \quad i_C = C \cdot \frac{du_C}{dt}$$
$$i \cdot R + u_C = u_0$$

Η επίλυση της παραπάνω εξίσωσης απαιτεί γνώση ανώτερων μαθηματικών και για τον λόγο αυτό δίνεται η λύση της εξίσωσης. Εδώ η μεταβλητή δεν είναι το ρεύμα, αλλά η τάση u_c στα άκρα του πυκνωτή.

$$u_c = u_0 \cdot (1 - e^{-\frac{t}{T}})$$

T = σταθερά του χρόνου

$T = RC$

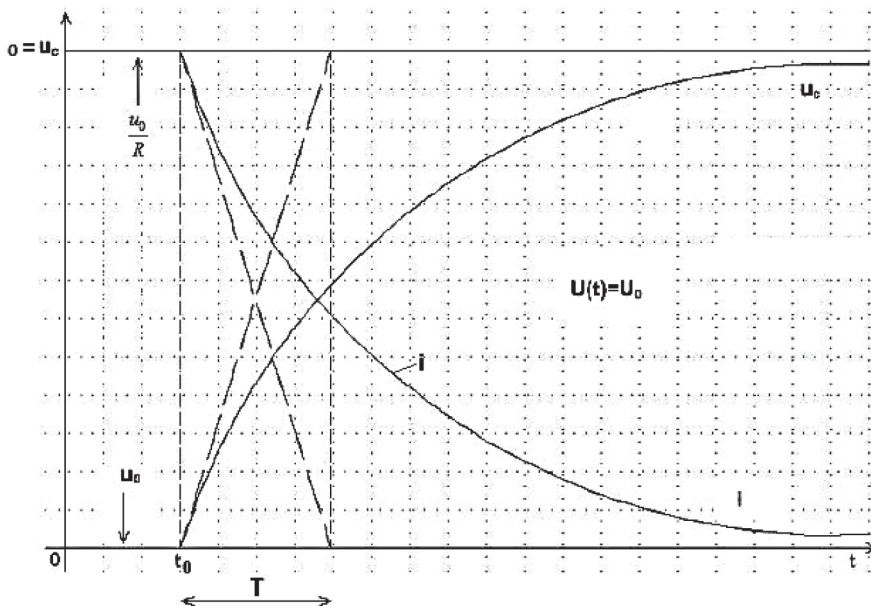
$$[T] = \frac{V}{A} \cdot \frac{A \cdot s}{V} = s$$

Από την εξίσωση του ρεύματος ($i_c = C \cdot \frac{du_c}{dt}$)

και της τάσης (u_c) του πυκνωτή, λαμβάνουμε την εξίσωση του ρεύματος

$$i_c = \frac{u_0}{R} \cdot e^{-\frac{t}{T}}$$

Από τις τελευταίες σχέσεις (u_c , i_c) διαπιστώνουμε, ότι η τάση (u_c) αυξάνει εκθετικά, το δε ρεύμα (i_c) μειώνεται εκθετικά (σχ. 1.33).



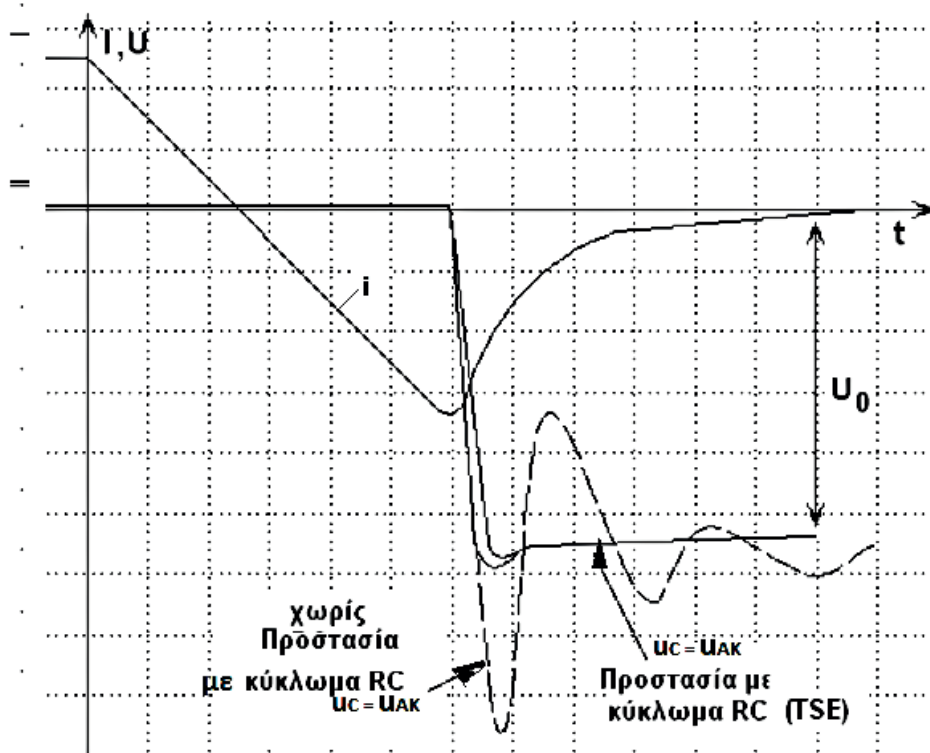
Σχ. 1.33. Μεταβατική χρονική απόκριση ενός κυκλώματος-RC.

Από το τρίγωνο ($t_0 T u_c$) υπολογίζουμε την ταχύτητα μεταβολής της τάσης, δηλ.

$$\frac{du_c}{dt} = \frac{\Delta u_c}{\Delta t} = \frac{u_0}{RC}$$

Η τελευταία σχέση μας φανερώνει, αν θέλουμε να μειώσουμε την ταχύτητα μεταβολής της τάσης, αρκεί να μεταβάλλουμε κατάλληλα το γινόμενο (RC).

Είχαμε αναφέρει, ότι το θυρίστορ μπορεί να τεθεί ανεπιθύμητα σε λειτουργία, αν η ταχύτητα μεταβολής της τάσης ξεπεράσει την κρίσιμη τιμή. Για να προστατέψουμε το θυρίστορ από τις απότομες μεταβολές της τάσης, συνδέουμε παράλληλα προς το θυρίστορ ένα δικτύωμα-RC. Παρακάτω φαίνεται η επίδραση του δικτυώματος-RC στη μείωση της ταχύτητας μεταβολής της τάσης (σχ. 1.34).



Σχ. 1.34: Κυματομορφές τάσης και ρεύματος, με και χωρίς δικτύωμα-RC κατά τη σβέση του θυρίστορ.

1.2.9 Ταξινόμηση των κυκλωμάτων των ηλεκτρονικών ισχύος

Οι τεχνίτες ταξινομούν, συνήθως, τα κυκλώματα των ηλεκτρονικών ισχύος ανάλογα με τον σκοπό, για τον οποίο χρησιμοποιούνται, ή με την εξωτερική τους λειτουργία. Π.χ.:

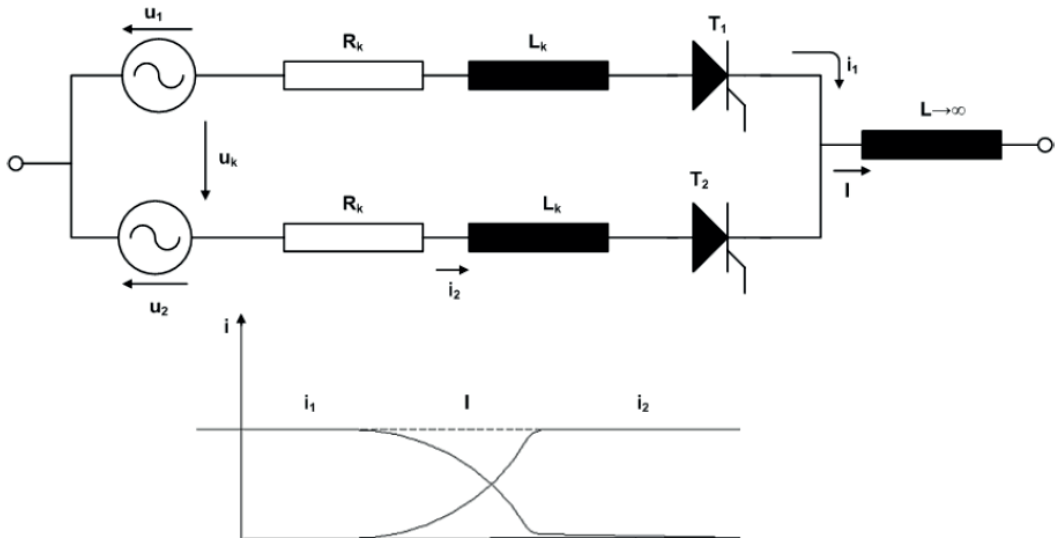
- ανορθωτές
- αντιστροφείς
- μετατροπείς DC/DC
- μετατροπείς AC/AC
- μετατροπείς συχνότητας κλπ.

Όμως η ταξινόμηση και η μελέτη των κυκλωμάτων γίνεται ανάλογα με την προέλευση της τάσης σβέσης των θυρίστορ ή, όπως συνηθέστερα λέγεται, την προέλευση της τάσης μετάβασης (u_K). Σύμφωνα με το κριτήριο αυτό, έχουμε τα εξής είδη μεταβάσεων:

α) Φυσική μετάβαση

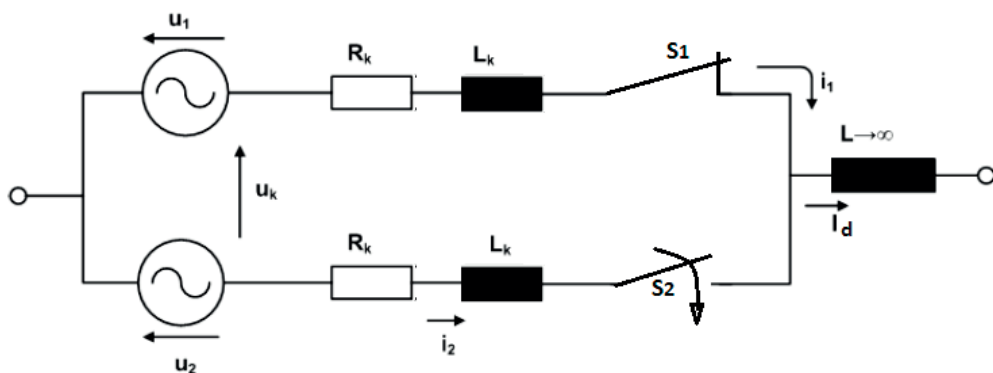
Με τον όρο *μετάβαση* εννοούμε τη διακοπή της ροής του ρεύματος ενός κλάδου και τη συνέχιση της ροής του ρεύματος σ' έναν άλλο κλάδο. Η διακοπή της ροής του ρεύματος από τον ένα κλάδο και η συνέχιση της ροής του στον επόμενο κλάδο, γίνεται με τη βοήθεια της τάσης μετάβασης (u_K). Κατά τη διάρκεια της μετάβασης, δημιουργείται βραχυκύκλωμα μεταξύ των δύο κλάδων. Το ρεύμα βραχυκύκλωσης (i_K) που αναπτύσσεται στον βρόχο των δύο κλάδων περιορίζεται αφενός μεν από τις αυτεπαγωγές (L_K) του κυκλώματος, αφετέρου δε από το άνοιγμα του διακόπτη (θυρίστορ) του πρώτου κλάδου.

Για την εξήγηση της λειτουργίας του φαινομένου της μετάβασης, λαμβάνουμε ένα τμήμα από το κύκλωμα του τριφασικού μετατροπέα τριών παλμών (M3) (σχ. 1.35).

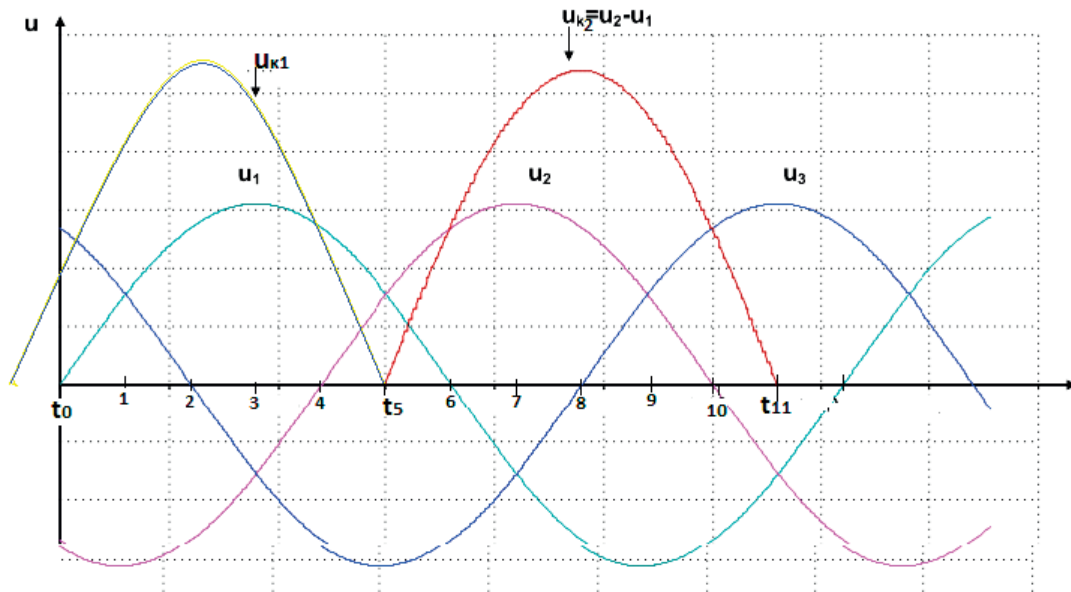


Σχ. 1.35: Κύκλωμα τριφασικού μετατροπέα τριών παλμών (M3)

Απλοποιούμε το παραπάνω κύκλωμα, αντικαθιστώντας αφενός μεν τις τάσεις u_1 και u_2 των τυλιγμάτων του μετασχηματιστή με πηγές τάσης u_1 και u_2 , αφετέρου δε τα θυρίστορ T_1 και T_2 με διακόπτες S_1 και S_2 αντίστοιχα. Έτσι, το απλοποιημένο κύκλωμα είναι της μορφής (σχ. 1.36).



Σχ. 1.36: Κύκλωμα φυσικής μετάβασης



Σχ. 1.37: Κυματομορφές τάσεων u_1 και u_2


α) Χρονικό διάστημα $t_0 - t_5$ (σχ.1.34)

Στο χρονικό διάστημα από $t_0 - t_5$, η τάση u_1 είναι θετικότερη της u_2 . Επομένως, η τάση u_{k1} ισούται με:

$$u_{k1} + u_2 - u_1 = 0 \quad u_{k1} = u_1 - u_2 = u_{12} > 0$$

Επειδή

$$u_{k1} > 0$$

έπεται ότι η άνοδος του θυρίστορ T_1 είναι θετική και η κάθοδος αρνητική - άρα, το θυρίστορ είναι ορθά πολωμένο και, στο διάστημα αυτό, δίνοντας παλμό έναυσης στο θυρίστορ T_1 (S_1), αυτό γίνεται αγώγιμο. Με το κλείσιμο του διακόπτη T_1 (S_1), η τάση u_{k1} εφαρμόζεται ανάστροφα στο θυρίστορ T_2 (S_2) και το κρατάει στην αποκοπή (ανοιχτός διακόπτης T_2 , ).

β) Χρονικό διάστημα $t_5 - t_{11}$ (σχ. 1.34)

Σ' αυτό το χρονικό διάστημα, η φασική τάση u_2 είναι θετικότερη της u_1 . Επομένως, η τάση u_{k2} ισούται με:

$$u_{k2} + u_1 - u_2 = 0 \Rightarrow u_{k2} = u_2 - u_1 = u_{21} > 0$$

Επειδή

$$u_{k2} > 0$$

έπεται ότι η άνοδος του θυρίστορ T_2 είναι θετική και η κάθοδος αρνητική.

Στο εν λόγω διάστημα, η άνοδος του θυρίστορ T_2 είναι θετικότερη της ανόδου του θυρίστορ T_1 .

Συνεπώς, δίνοντας παλμό έναυσης στο θυρίστορ T_2 γίνεται αγώγιμο (S_2

κλειστός ) και η τάση u_{k2} εφαρμόζεται ανάστροφα στο θυρίστορ T_1 ,

το οποίο οδηγείται στη σβέση (S_1 ανοικτός ) .

Είναι προφανές ότι για τη μετάβαση του ρεύματος (i_1) από τον κλάδο (1) στον κλάδο (2) απαιτείται η ύπαρξη της τάσης $u_k = |u_{k1}| = |u_{k2}|$ με την κατάλληλη πολικότητα. Η τάση u_k είναι η πολική τάση του δικτύου, η οποία στα ηλεκτρονικά ισχύος ονομάζεται *τάση μετάβασης*.

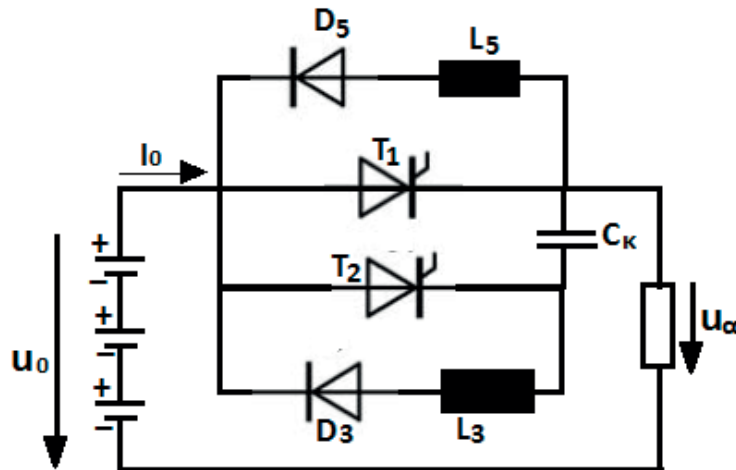
Η τάση μετάβασης στον τριφασικό μετατροπέα έρχεται από το δίκτυο και, επομένως, είναι σταθερή, δηλαδή έχει σταθερό πλάτος και συχνότητα. Η μετάβαση αυτή ονομάζεται *φυσική μετάβαση*.

Τα κυκλώματα των ηλεκτρονικών ισχύος, των οποίων η τάση μετάβασης προέρχεται από το δίκτυο (*φυσική μετάβαση*), ονομάζονται *ετεροοδηγούμενα κυκλώματα*.

Τέτοια κυκλώματα είναι η μονοφασική γέφυρα (B2), ο τριφασικός ανορθωτής τριών παλμών (M3), η τριφασική γέφυρα έξι παλμών (B6), κ.ά..

γ) Αυτοοδηγούμενη μετάβαση ή εξαναγκασμένη μετάβαση¹

Για την εξήγηση της λειτουργίας της αυτοοδηγούμενης μετάβασης χρησιμοποιούμε το παρακάτω κύκλωμα ενός ψαλιδιστή (chopper) (σχ. 1.38).



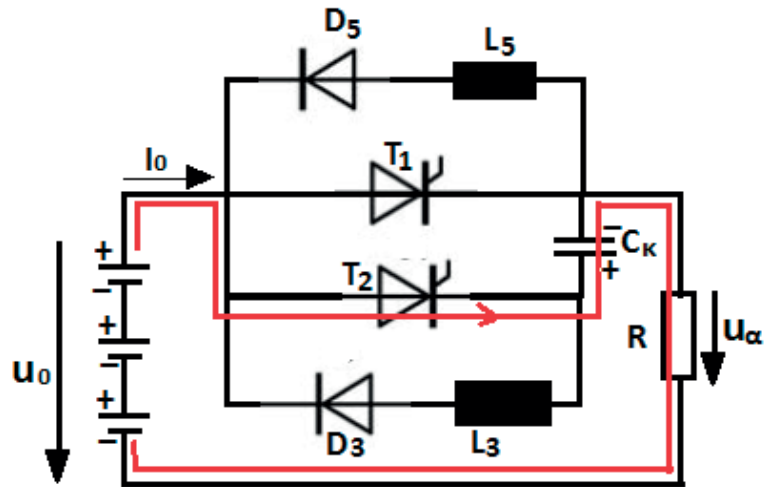
Σχ. 1.38: Κύκλωμα chopper

Το παραπάνω κύκλωμα chopper δεν χρησιμοποιείται πλέον. Αποτελούσε, όμως, για αρκετό χρονικό διάστημα το αντιπροσωπευτικό κύκλωμα της κατηγορίας των ψαλιδιστών (choppers).

Σκοπός του κυκλώματος είναι να τροφοδοτήσει το φορτίο (R) με μια μεταβλητή συνεχή τάση u_α μικρότερη της τάσης τροφοδοσίας u_0 .

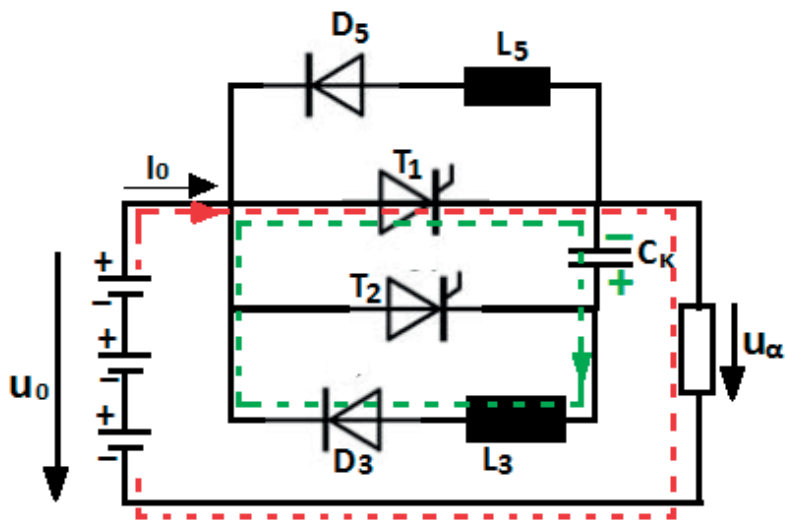
Με δεδομένο ότι το κύκλωμα τίθεται για πρώτη φορά σε λειτουργία, δίνουμε παλμό έναυσης στο θυρίστορ σβέσης T_2 . Το θυρίστορ T_2 είναι ορθά πολωμένο και με τον παλμό έναυσης στην πύλη γίνεται αγώγιμο. Το ρεύμα I_0 της πηγής ρέει από το συν (+) στο πλην (-) της πηγής μέσω του θυρίστορ T_2 , του πυκνωτή C_k και της αντίστασης (R) (σχ. 1.39).

¹ Δεν απαιτείται λεπτομερής ανάλυση του κυκλώματος, αλλά μια απλή εξήγηση του φαινομένου της εξαναγκασμένης μετάβασης.



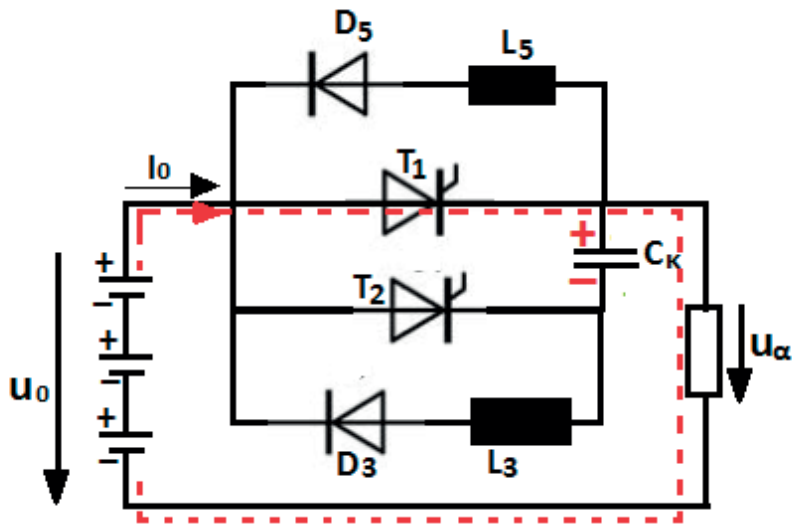
Σχ. 1.39: Λειτουργική κατάσταση κυκλώματος chopper

Καθώς το ρεύμα (I_0) περνάει από τον πυκνωτή C_k , φορτίζει τον πυκνωτή στην τάση της πηγής u_0 και, ταυτόχρονα, *πολώνει* το θυρίστορ T_2 *ανάστροφα* και αυτό σβήνει. Μετά το σβήσιμο του θυρίστορ (T_2) το κύκλωμα δεν διαρρέεται από ρεύμα. Δίνουμε *παλμό έναυσης* στο κυρίως θυρίστορ (T_1), το οποίο είναι, επίσης, ορθά πολωμένο και γίνεται αγωγίμο. Το ρεύμα (I_0) ρέει από το συν (+) της πηγής δια μέσου του θυρίστορ (T_1) στο φορτίο (R) και καταλήγει στο πλην (-) της πηγής (u_0). Ταυτόχρονα, όμως, το φορτίο του πυκνωτή C_k κλείνει κύκλωμα, μέσω του κλάδου D_3L_3 , το κύκλωμα του θυρίστορ (T_1) και φθάνει στο πλην(-) του πυκνωτή C_k . Έτσι, ο πυκνωτής (C_k) εκφορτίζεται και αλλάζει πολικότητα (σχ. 1.40).



Σχ. 1.40: Λειτουργική κατάσταση κυκλώματος chopper

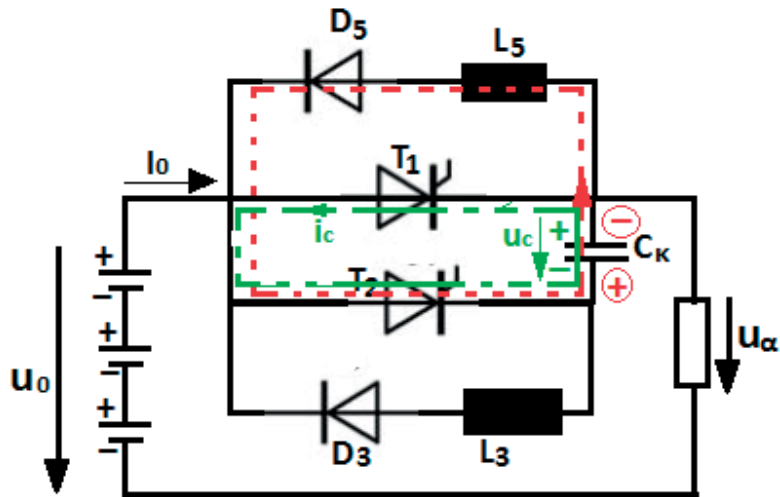
Μετά την αλλαγή της πολικότητας του πυκνωτή C_k , το ρεύμα I_0 ρέει, διαμέσου του θυρίστορ (T_1), από το συν (+) της πηγής (u_0) στο φορτίο R και φθάνει στο πλην (-) της πηγής u_0 (σχ. 1.41).



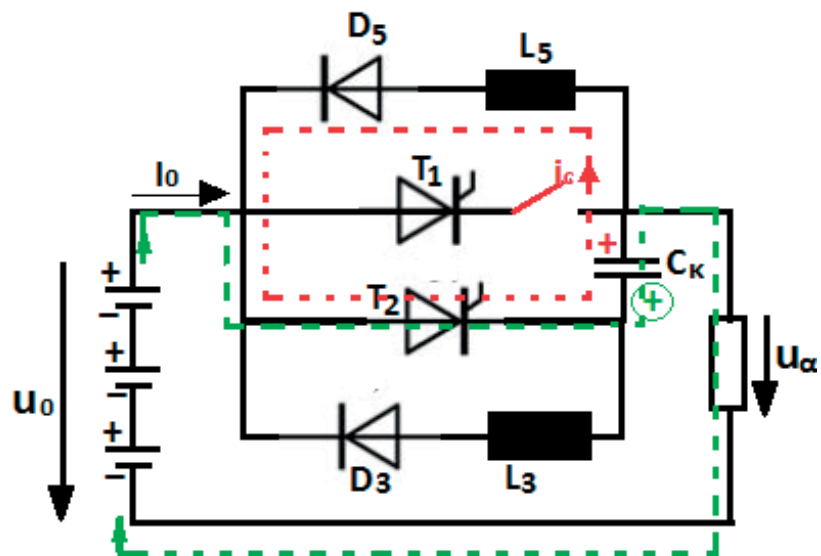
Σχ. 1.41: Λειτουργική κατάσταση κυκλώματος chopper

Στη συνέχεια, για να σβήσουμε το θυρίστορ T_1 , δίνουμε *παλμό έναυσης* στο θυρίστορ (T_2). Η τάση του πυκνωτή εφαρμόζεται ανάστροφα στο θυρίστορ (T_1) και το οδηγεί ακαριαία στη σβέση. Ο πυκνωτής δεν προφταίνει να εκφορτιστεί μέσα από το κύκλωμα $C_k T_1 T_2$, οπότε το ρεύμα του πυκνωτή ρέει,

διαμέσου του πηνίου L_5 της διόδου D_5 και του θυρίστορ T_2 , από το συν (+) στο πην (-) του πυκνωτή C_K . Το ρεύμα της πηγής I_0 αλλάζει ροή, από το συν (+) της πηγής u_0 δια μέσου του θυρίστορ (T_2) του πυκνωτή C_K , του φορτίου R καταλήγει στο πην της πηγής (u_0) (σχ. 1.43).



Σχ. 1.42: Λειτουργική κατάσταση κυκλώματος chopper



Σχ. 1.43: Λειτουργική κατάσταση κυκλώματος chopper

Από την παραπάνω περιγραφή λειτουργίας του κυκλώματος διαπιστώνουμε ότι:

- α) Δεν υπάρχει εναλλασσόμενο ή τριφασικό δίκτυο.
- β) Η αλλαγή ροής του ρεύματος από τον έναν κλάδο στον άλλο γίνεται με τη βοήθεια της τάσης (u_c) του πυκνωτή C_c . Η τάση u_c του πυκνωτή είναι η τάση μετάβασης.
- γ) Η εντολή αλλαγής ροής του ρεύματος γίνεται με την έναυση του θυρίστορ σβέσης (T_2) ή του κυρίως θυρίστορ (T_1).
- δ) Η έναυση των θυρίστορς προγραμματίζεται από τον χρήστη ανάλογα με την επιθυμητή λειτουργία του κυκλώματος. Ο τρόπος αυτός της μετάβασης, όπου η τάση μετάβασης προέρχεται από έναν συσσωρευτή ενέργειας (συνήθως πυκνωτή), ονομάζεται *αυτοοδηγούμενη* ή *εξαναγκασμένη μετάβαση*.

1.2.10 Κατηγοριοποίηση των κυκλωμάτων των ηλεκτρονικών ισχύος

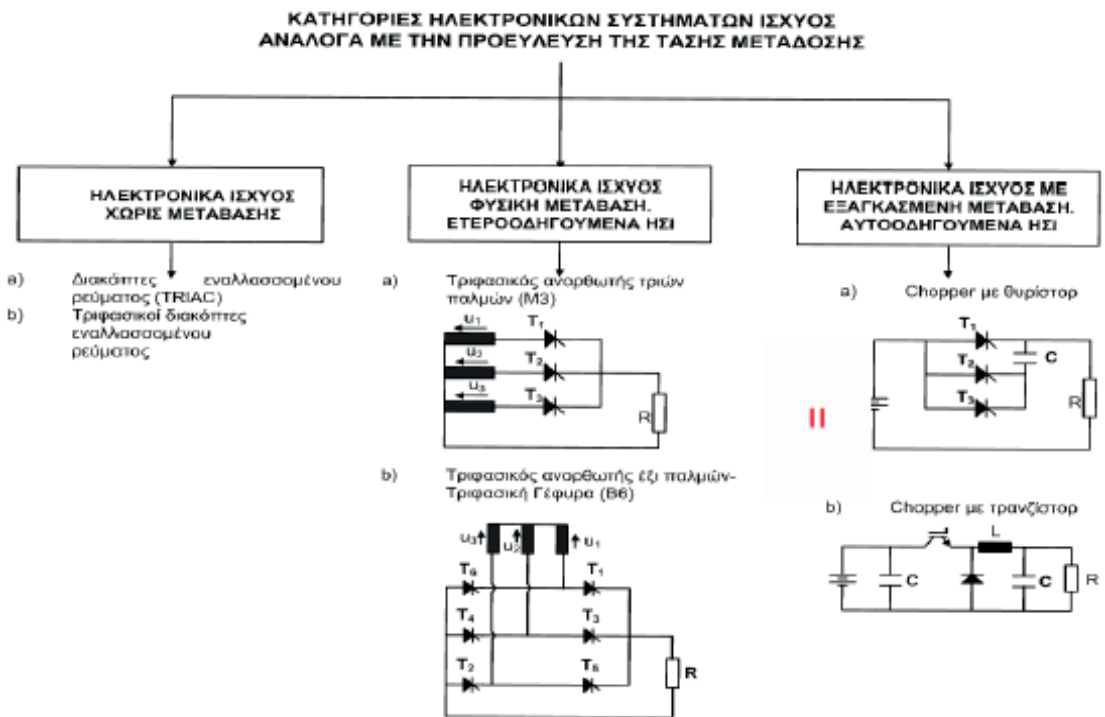
Τα κυκλώματα ηλεκτρονικών ισχύος διακρίνονται, ανάλογα με την προέλευση της τάσης μετάβασης, στις εξής κατηγορίες:

- α) Ηλεκτρονικά Συστήματα Ισχύος που δεν έχουν *φαινόμενο μετάβασης*. Τέτοια συστήματα είναι:
- οι ρυθμιζόμενοι διακόπτες μονοφασικού ρεύματος
 - οι ρυθμιζόμενοι διακόπτες τριφασικού ρεύματος.
- β) Ηλεκτρονικά Συστήματα Ισχύος **με φυσική μετάβαση**, τα οποία παίρνουν την τάση μετάβασης από το δίκτυο ή από το φορτίο. Αυτά τα συστήματα ονομάζονται **ετεροοδηγούμενα ηλεκτρονικά συστήματα ισχύος**, διότι για τη μετάβαση χρησιμοποιούν ξένη προς αυτά τάση, δηλαδή τάση μετάβασης που δεν ανήκει στο κύκλωμα των ηλεκτρονικών ισχύος. Οι βασικές λειτουργίες που εκτελούν είναι:

- ανόρθωση AC/DC
- αντιστροφή DC/AC
- μετατροπή AC/AC

γ) Ηλεκτρονικά Συστήματα Ισχύος με **εξαναγκασμένη μετάβαση**. Τα συστήματα αυτά ονομάζονται *αυτοοδηγούμενα*, διότι η τάση μετάβασης προέρχεται από το ίδιο κύκλωμα των ηλεκτρονικών ισχύος. Οι βασικές λειτουργίες που επιτελούν είναι:

- αντιστροφή DC/AC
- μετατροπή DC/DC



Σχ. 1.44: Κατηγορίες κυκλωμάτων των Ηλεκτρονικών Ισχύος.

2. ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΙΣΧΥΟΣ ΧΩΡΙΣ ΜΕΤΑΒΑΣΗ

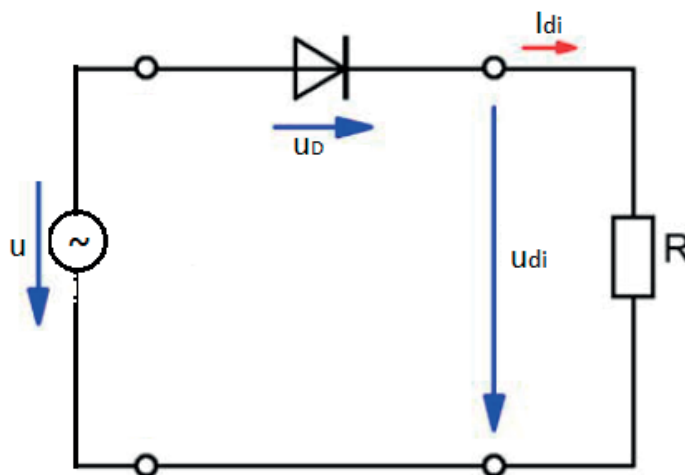
2.1 Κυκλώματα χωρίς μετάβαση

Στην κατηγορία αυτή ανήκουν, κυρίως, οι ηλεκτρονικοί διακόπτες, όπως το κύκλωμα μη ελεγχόμενης και ελεγχόμενης ημιανόρθωσης καθώς και το TRIAC μιας φάσης και τριών φάσεων.

2.1.1 Κύκλωμα μη ελεγχόμενου ημιανορθωτή (M1U) με ωμικό φορτίο (σχ. 2.1)

Το απλούστερο κύκλωμα των ηλεκτρονικών ισχύος είναι η τροφοδοσία ενός ωμικού φορτίου με εναλλασσόμενο ρεύμα διαμέσου μιας διόδου (σχ. 2.1).

Το κύκλωμα αυτό, αν και δεν έχει μεγάλη πρακτική εφαρμογή, αναλύεται παρακάτω διεξοδικά, όπου γίνεται περισσότερο κατανοητή η λειτουργία των ανορθωτών σε συνδυασμό με το φορτίο.

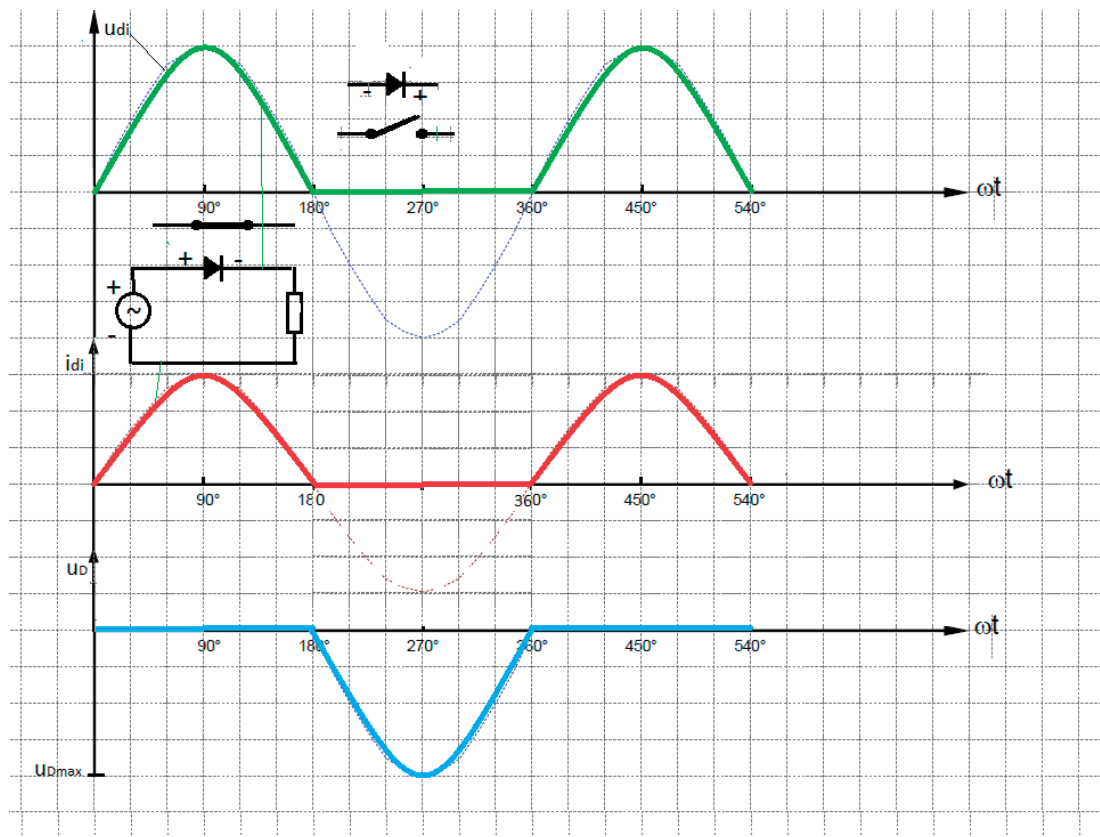


Σχ. 2.1: Κύκλωμα μη ελεγχόμενου μονοφασικού ημιανορθωτή M1U μιας φάσης.

Ανάλυση – λειτουργία του κυκλώματος

α) Περιοχή: $0 \leq \omega t < \pi$

Στην περιοχή αυτή, η τάση τροφοδοσίας $u(\omega t)$ της πηγής είναι θετική, ενώ η διάδος είναι ορθά πολωμένη και συμπεριφέρεται σαν κλειστός διακόπτης (σχ. 2.2).



Σχ. 2.2.: Λειτουργική κατάσταση του κυκλώματος. Κυματομορφές.

Αφού η διάδος άγει, η τάση $u(\omega t)$ της πηγής εφαρμόζεται στα άκρα της αντίστασης (R), οπότε

$$u(\omega t) = u_{di}$$

$$u_{di} = \text{μη σταθερή συνεχής τάση}$$

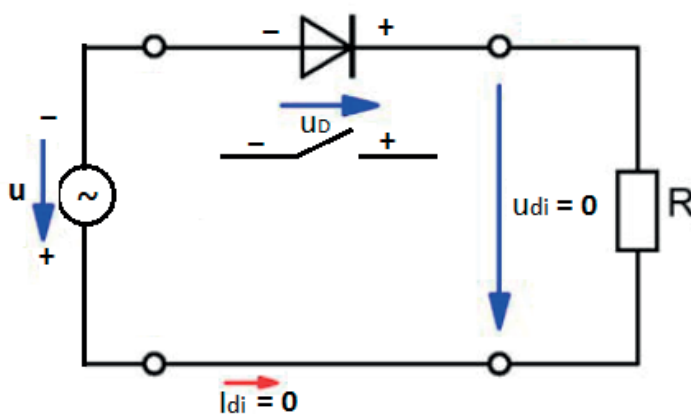
Επειδή το φορτίο (R) είναι ωμικό, το ρεύμα i_d του κυκλώματος είναι συμφασικό με την τάση του φορτίου και υπολογίζεται από τη σχέση:

$$i_{di} = \frac{u_{di}}{R}$$

Η τάση στα άκρα της διόδου, όταν αυτή άγει, είναι μηδέν. Στην περίπτωση αυτή, η διάδος θεωρείται ιδανική.

β) Περιοχή: $\pi \leq \omega t < 2\pi$

Στην περιοχή αυτή, η τάση (u) της πηγής έχει αλλάξει πολικότητα. Αυτό είναι εμφανές στο σχήμα που ακολουθεί.



Σχ. 2.2: Λειτουργική κατάσταση κυκλώματος μη ελεγχόμενου μονοφασικού ημιανορθωτή M1U μιας φάσης.

Η πηγή προσπαθεί να στείλει ένα ρεύμα (i_{di}) αντίθετης φοράς. Επειδή, όμως, η διάδος είναι ανάστροφα πολωμένη, λειτουργεί σαν ανοικτός διακόπτης, με αποτέλεσμα να εμποδίζεται η ροή του ρεύματος. Κατά τη διάρκεια της αρνητικής ημιπεριόδου ισχύουν οι σχέσεις:

$$i_{di} = 0 \Rightarrow u_{di} = i_{di} \cdot R = 0$$

$$u - u_{di} - u_D = 0 \Rightarrow u = u_D = u_m \cdot \eta \mu \omega t \text{ (αρνητική)}$$

Εδώ, παρατηρούμε ότι:

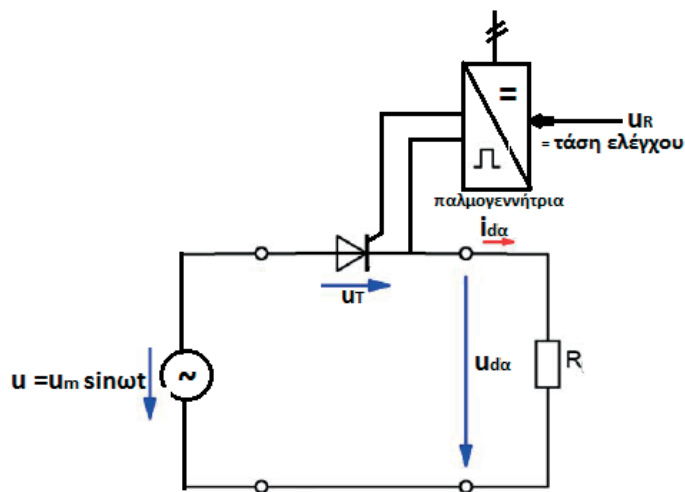
α) η μέγιστη τάση καταπόνησης της διόδου είναι το πλάτος της αρνητικής ημιπεριόδου της τάσης της πηγής, δηλαδή:

$$u = |u_{\max}| = \sqrt{2} u_{\text{εν}}$$

β) το ρεύμα (i_{di}) ρέει μέσα από το φορτίο (R), πάντα προς την ίδια φορά. Επομένως, εκτελεί τη λειτουργία της ανόρθωσης.

2.1.2 Ελεγχόμενος ανορθωτής μισού κύματος (M1C) (R)

Σκοπός του ανορθωτή είναι η μετατροπή της εναλλασσόμενης τάσης σε ελεγχόμενη συνεχή τάση. Στο σχήμα 2.3 φαίνεται το απλούστερο κύκλωμα ενός ελεγχόμενου ανορθωτή μισού κύματος με ωμικό φορτίο.



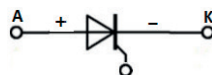
Σχ. 2.3: Κύκλωμα ελεγχόμενου ανορθωτή μισού κύματος με ωμικό φορτίο


Λειτουργία

Για τη μελέτη της λειτουργίας του κυκλώματος χωρίζουμε το διάστημα μιας περιόδου σε τρεις περιοχές:

α) Περιοχή 1: 0 έως α (σχ. 2.4)

Στο χρονικό διάστημα από 0 έως π , το θυρίστορ είναι ορθά πολωμένο.



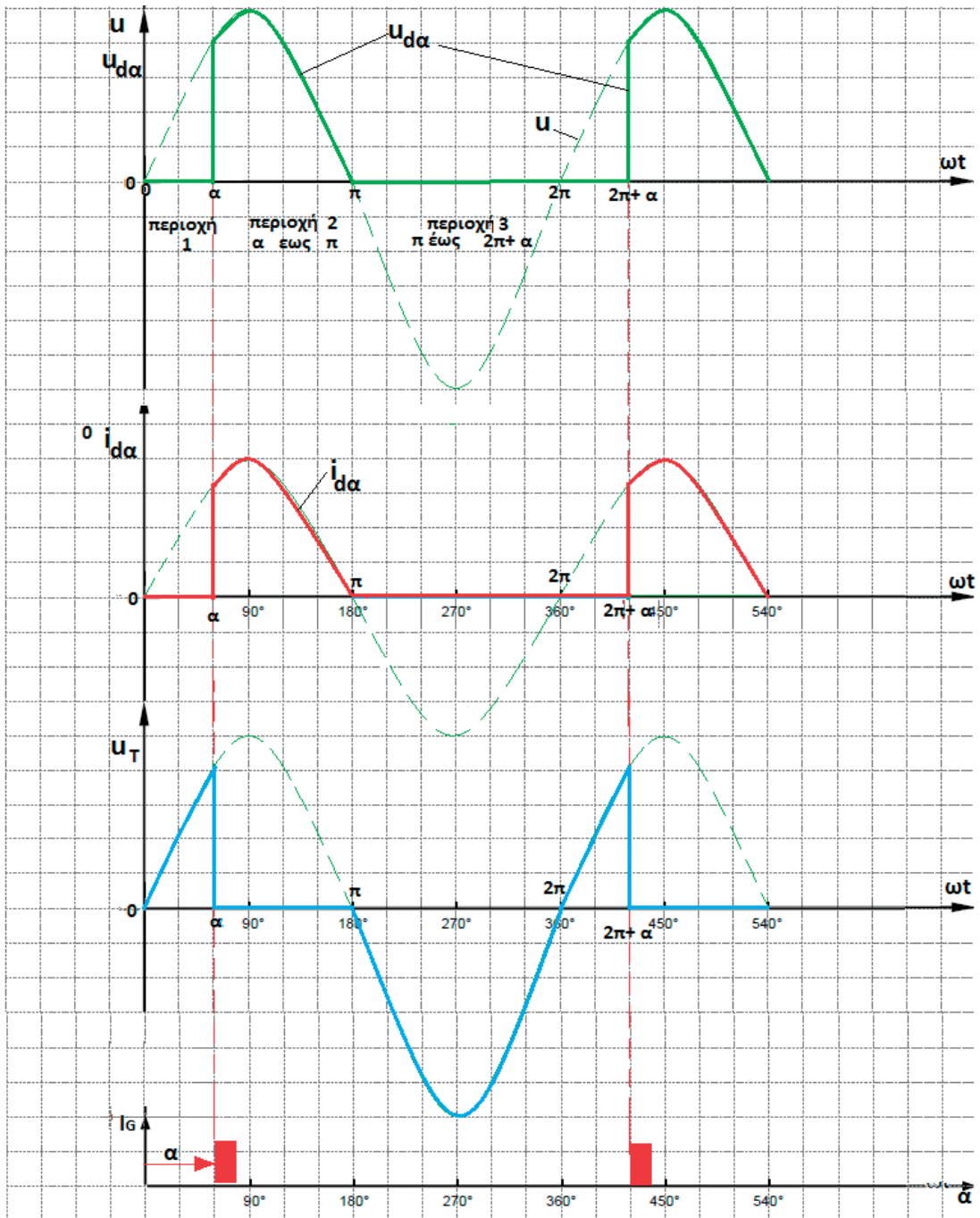
Το θυρίστορ, όμως, είναι ένας ανοικτός διακόπτης(), διότι δεν έχει παλμό έναυσης (u_G) στην πύλη.

Επομένως, ισχύει:

$$i_{d\alpha} = 0$$

$$u_{d\alpha} = i_{d\alpha} \cdot R = 0$$

$$u_T = u_m \cdot \eta \mu \omega t \quad \text{για } \omega t = 0 \text{ έως } \alpha$$



Σχ. 2.4: Κυματομορφές ανορθωτή μισού κύματος με ωμικό φορτίο, με γωνία έναυσης $=60^\circ$.

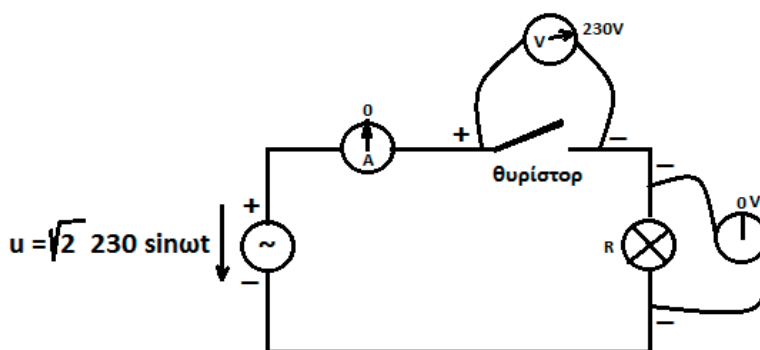
Παρατηρήσεις για την περιοχή 0 έως α :

- Εφόσον το θυρίστορ είναι ένας ιδανικός ανοικτός διακόπτης, το ρεύμα (i_{da}) του κυκλώματος είναι μηδέν ($i_{da} = 0$).
- Σύμφωνα με τον νόμο του Ohm, η τάση u_{da} στα άκρα του φορτίου (ωμική αντίσταση R) είναι συμφασική με το ρεύμα (i_{da})

που περνά μέσα από την αντίσταση (R) και υπολογίζεται από τη σχέση:

$$u_{d\alpha} = i_{d\alpha} \cdot R = 0 \cdot R = 0$$

- Αν βγάλουμε το πλαστικό περίβλημα του διακόπτη, με τον οποίο ανάβουμε το πολύφωτο του σαλονιού μας, και με ένα βολτόμετρο μετρήσουμε την τάση στους ακροδέκτες του διακόπτη (θυρίστορ) και του φορτίου (R) καθώς επίσης το ρεύμα του κυκλώματος (σχ. 2.5).

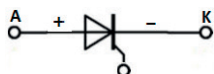


Σχ. 2.5: Μέτρηση δυναμικών όταν ο διακόπτης είναι ανοικτός (off).

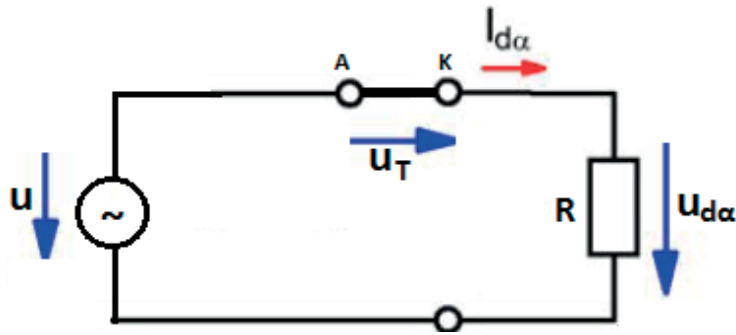
Παρατηρούμε ότι η συνολική τάση της πηγής (του δικτύου) εφαρμόζεται στα άκρα του διακόπτη (βλ. κυματομορφή, σχ. 2.4δ).

β) Περιοχή α έως π (σχ. 2.4α)

Στην περιοχή α έως π, το θυρίστορ συνεχίζει να είναι ορθά πολωμένο.



Τη χρονική στιγμή $\alpha = 60^\circ$, όμως, το θυρίστορ δέχεται παλμό έναυσης, οπότε ο διακόπτης (θυρίστορ) κλείνει. Το ισοδύναμο κύκλωμα είναι της μορφής:



Ο παλμός έναυσης στην πύλη του θυρίστορ μηδενίζεται, μόλις το θυρίστορ γίνει αγώγιμο. Μάλιστα, το θυρίστορ παραμένει αγώγιμο, για όσο χρονικό διάστημα είναι ορθά πολωμένο, δηλαδή από α έως π . Το τρανζίστορ, αντίθετα, χρειάζεται τον παλμό στη βάση του καθ' όλη τη διάρκεια της λειτουργίας του.

Επομένως, στην περιοχή α έως π ισχύει:

Το θυρίστορ λειτουργεί \rightarrow κλειστός διακόπτης

$$i_{d\alpha} = \frac{u_m \cdot \eta \mu \omega t}{R} = I_m \cdot \eta \mu \omega t$$

$$I_m = \frac{u_m}{R}$$

$$u_{d\alpha} = u_m \cdot \eta \mu \omega t$$

$$u_T = 0$$

Παρατηρήσεις για την περιοχή α έως π :

- Εφόσον το θυρίστορ είναι ένας ιδανικός κλειστός διακόπτης, η τάση της πηγής (του δικτύου) εφαρμόζεται στα άκρα του φορτίου (R) σε όλη τη διάρκεια της περιοχής α έως π (σχ. 2.4α). Επομένως, ισχύει:

$$u_{d\alpha} = u_m \cdot \eta \mu \omega t \quad \text{για } \alpha \leq \omega t < \pi \text{ (σχ. 2.4α)}$$

- Σύμφωνα με τον νόμο του Ohm, η τάση $u_{d\alpha}$ και το ρεύμα $i_{d\alpha}$ είναι συμφασικά.
- Εάν θεωρήσουμε ότι τα στοιχεία του κυκλώματος είναι ιδανικά, δηλαδή ότι το θυρίστορ έχει μηδενική εσωτερική αντίσταση, τότε λαμβάνουμε:

$$i_{d\alpha} = \frac{u_m}{R} \cdot \eta \mu \omega t \quad [\alpha \leq \omega t \leq \pi]$$

- Όταν το θυρίστορ άγει, η τάση στα άκρα του είναι μηδέν (0):

$$u_{AK} = u_T = 0$$

- Η τάση καταπόνησης του θυρίστορ είναι το πλάτος της εναλλασσόμενης τάσης

$$u_{Tmax} = \sqrt{2} u_{ev}$$

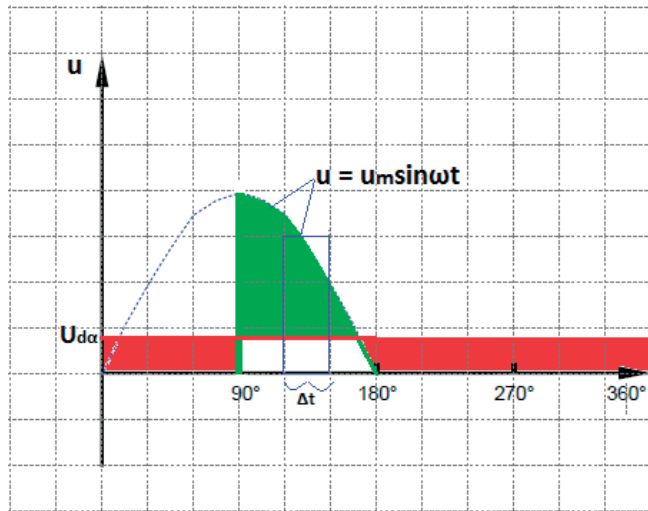
$$u_{Tmax} = \sqrt{2} \cdot 230V = 325V$$

- Μέση αριθμητική τιμή της τάσης και του ρεύματος.

Στα ηλεκτρονικά ισχύος οι κυματομορφές των διαφόρων μεγεθών είναι, συνήθως, σύνθετες και περιλαμβάνουν DC-συνιστώσες και AC-συνιστώσες.

Για να έχουμε μια σταθερή τιμή των μεγεθών αυτών, χρήσιμη στις πρακτικές εφαρμογές, υπολογίζουμε τη μέση αριθμητική τιμή τους. Η μέση αριθμητική τιμή της τάσης και του ρεύματος συμβολίζεται με τα κεφαλαία γράμματα U_{di} και I_{di} . Σε μερικές περιπτώσεις, όπως στην περιγραφή των ηλεκτρονικών υλικών, χρησιμοποιούνται τα σύμβολα U_{av} , I_{av} .

Η μέση αριθμητική τιμή υπολογίζεται εξισώνοντας την επιφάνεια της κυματομορφής με την επιφάνεια ενός ορθογώνιου παραλληλόγραμμου με μήκος βάσης ίσο με την περίοδο (2π) και ύψος ίσο με τη μέση αριθμητική τιμή της τάσης ($U_{d\alpha}$) ή του ρεύματος ($I_{d\alpha}$).



Σχ. 2.6: Σχηματικός υπολογισμός της μέσης τιμής της τάσης και του ρεύματος.

Χωρίζουμε την κυματομορφή σε μικρά ορθογώνια παραλληλόγραμμα βάσης Δt και ύψους $u = u_m \cdot \eta \mu \omega t$. Στη συνέχεια, αθροίζουμε τα εμβαδά των παραλληλογράμμων και τα εξισώνουμε με το εμβαδό του ορθογώνιου παραλληλόγραμμου. Έτσι, έχουμε:

$$A_1 = \Delta t \cdot u_m \cdot \eta \mu \omega t_i$$

$$A_2 = u_{da} \cdot 2\pi$$

$$A_1 = A_2$$

Συνεπώς $u_{da} \cdot 2\pi = \Delta t \cdot u_m \cdot \eta \mu \omega t_i$ και

$$u_{da} = \frac{\Delta t \cdot u_m \cdot \eta \mu \omega t}{2\pi} \Rightarrow u_{da} = \frac{u_m}{2\pi} (1 + \sigma \nu \alpha) \text{ και } I_{da} = \frac{u_m}{2\pi R} (1 + \sigma \nu \alpha)$$

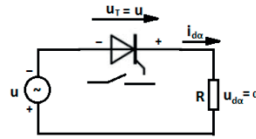
Η μέση τιμή της ισχύος υπολογίζεται από τη σχέση:

$$P = \frac{u_{\epsilon \nu} \cdot I_{\epsilon \nu}}{2\pi^2} (1 + \sigma \nu \alpha)^2$$

γ) Περιοχή π έως 2π (σχ. 2.4)

Στο σημείο $\omega t = \pi$, η τάση του δικτύου βυθίζεται στα αρνητικά και αλλάζει πολικότητα. Κατά συνέπεια, το θυρίστορ πολώνεται ανάστροφα και

οδηγείται στον κλάδο αρνητικής αποκοπής, οπότε και σβήνει. Η αρνητική ημιπερίοδος της τάσης εφαρμόζεται στα άκρα του θυρίστορ (σχ. 2.4 γ).

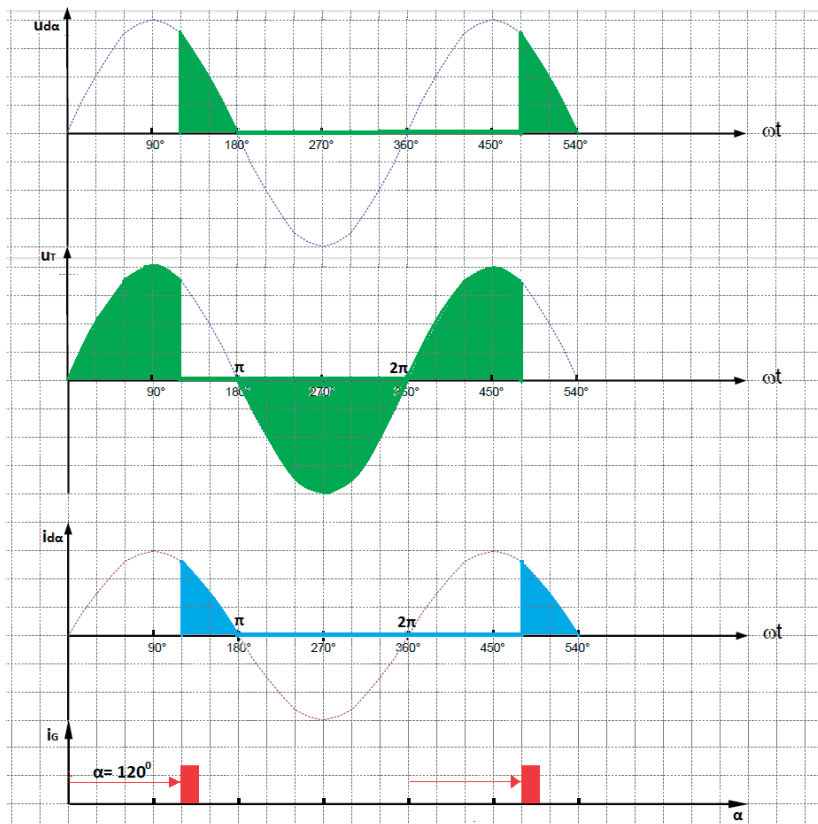


Επομένως, ισχύει:

$$i_{d\alpha} = 0$$

$$u_{d\alpha} = i_{d\alpha} \cdot R = 0$$

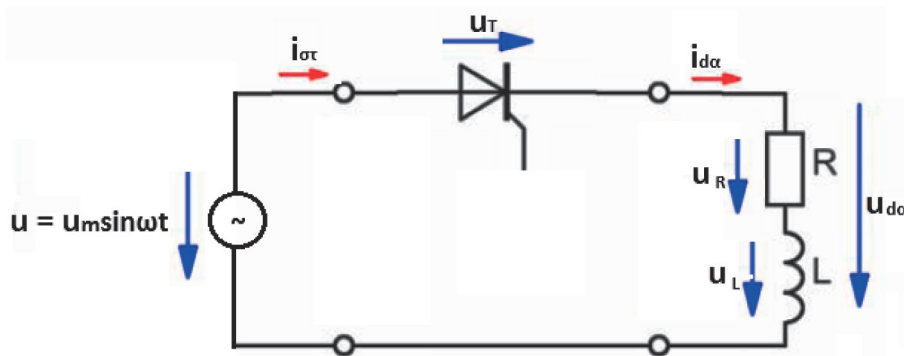
$$u_T = -u_m \cdot \eta \mu \omega t$$



Σχ. 2.7: Κυματομορφές ανорθωτή με ωμικό φορτίο (R) για γωνία έναυσης $\alpha = 120^\circ$

2.1.3 Ελεγχόμενος ανορθωτής μισού κύματος με ωμικό-επαγωγικό φορτίο (RL-φορτίο)

Παρακάτω απεικονίζεται το κύκλωμα ενός ανορθωτή μισού κύματος με RL-φορτίο (σχ. 2.8). Το φορτίο είναι το συχνότερα εμφανιζόμενο φορτίο στις βιομηχανικές εφαρμογές.



Σχ. 2.8: Ελεγχόμενος ανορθωτής μισού κύματος με RL-φορτίο

Από την ηλεκτροτεχνία γνωρίζουμε ότι, όταν το φορτίο είναι ωμικό-επαγωγικό, τότε το ρεύμα υστερεί της τάσης κατά γωνία $0 < \phi < 90^\circ$. Για τις τάσεις και το ρεύμα του κυκλώματος ισχύουν οι γνωστές σχέσεις της ηλεκτροτεχνίας, δηλαδή:

$$u = u_m \cdot \eta \mu \omega t$$

$$i = I_m \cdot \eta \mu (\omega t - \phi),$$

ϕ : φασική διαφορά μεταξύ της τάσης (u) και του ρεύματος (i)

$$I_m = \frac{u_m}{Z}$$

$$Z = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2}$$

δηλαδή, η ϕ είναι γωνία με εφαπτομένη ίση με

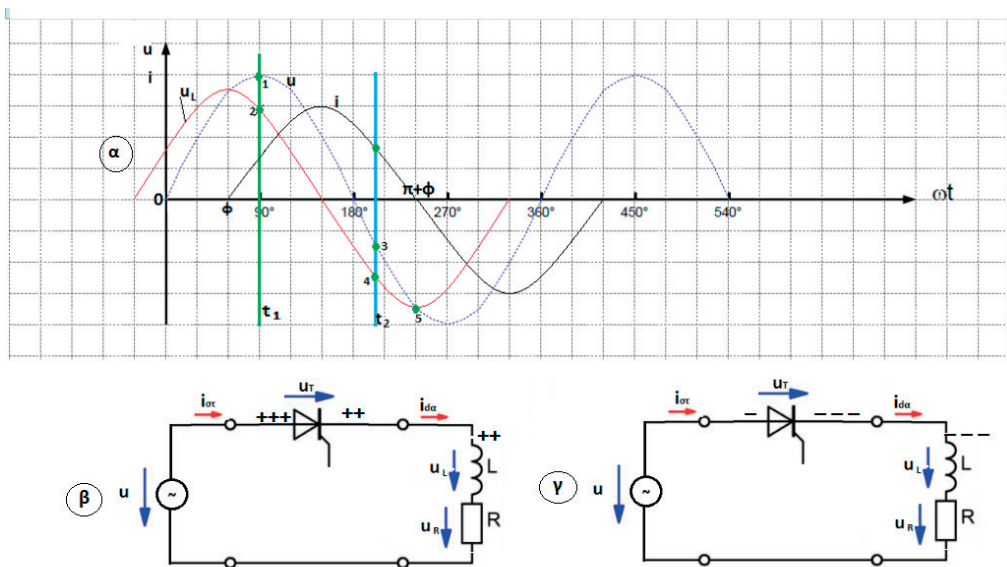
$$\epsilon \phi \phi = \frac{\omega L}{R} \quad \text{και} \quad \phi = \text{τοξ} \epsilon \phi \frac{\omega L}{R}$$

$$u_R = I \cdot R$$

$$u_L = X_L \cdot I$$

$$\vec{u} = \vec{u}_R + \vec{u}_L$$

Στο σχήμα που ακολουθεί (σχ. 2.9α), απεικονίζονται οι κυματομορφές των τάσεων και του ρεύματος του παραπάνω κυκλώματος στη στατική κατάσταση (χωρίς θυρίστορ).



Σχ. 2.9: Κυματομορφές τάσεων, ρεύματος και δυναμικών των χρονικών σημείων t_1 και t_2 .

Στο σχήμα (σχ. 2.9β) αποτυπώνεται μια πρακτική προσέγγιση των δυναμικών του χρονικού σημείου t_1 . Διαπιστώνεται ότι η άνοδος του θυρίστορ έχει υψηλότερο δυναμικό (1+++) απ' ό,τι η κάθοδος (2++). Επομένως, το θυρίστορ μπορεί να γίνει αγώγιμο, όπως ήταν, άλλωστε, αναμενόμενο.

Στο σχήμα (σχ. 2.9γ) αποτυπώνονται τα δυναμικά του χρονικού σημείου t_2 . Εδώ παρατηρούμε ότι η τάση της πηγής έχει βυθιστεί προς τα αρνητικά και θα περίμενε κανείς ότι το θυρίστορ, λόγω της αρνητικής τάσης στην άνοδο (3-), θα είχε σβήσει. Όμως, εάν προσέξουμε το δυναμικό (4) στο επάνω σημείο του πηνίου (L), δηλαδή στην κάθοδο του θυρίστορ, θα διαπιστώσουμε ότι έχει τιμή (4- - -). Το δυναμικό της καθόδου, συνεπώς, είναι περισσότερο αρνητικό απ' ό,τι της ανόδου. Μολονότι, λοιπόν, η τάση (u) του δικτύου έχει βυθιστεί στα αρνητικά, το θυρίστορ είναι ορθά πολωμένο και παραμένει ορθά πολωμένο μέχρι το σημείο τομής (5) της τάσης του δικτύου (u) με την τάση (u_L) στα άκρα του πηνίου. Στο σημείο αυτό ($\pi + \phi$) το ρεύμα (i) μηδενίζεται και τείνει να γίνει αρνητικό.

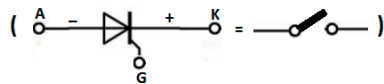
Συμπεράσματα

- Όταν το φορτίο του κυκλώματος είναι ωμικό-επαγωγικό (RL), τότε το θυρίστορ άγει -ακόμη και στην περίπτωση που η τάση βυθίζεται στα αρνητικά. Διότι το πηνίο βυθίζει την κάθοδο του θυρίστορ περισσότερο αρνητικά απ' ό,τι το δίκτυο την άνοδο του θυρίστορ.
- Το αρνητικό τμήμα της τάσης u_{da} φθάνει, θεωρητικά, μέχρι το σημείο ($\pi + \phi$).
- Μια άλλη διαπίστωση είναι ότι, όσο χρονικό διάστημα το ρεύμα είναι θετικό, το θυρίστορ άγει. Μόλις το ρεύμα τείνει να γίνει αρνητικό, το θυρίστορ ανοίγει σαν διακόπτης, γιατί δεν επιτρέπει ροή αρνητικού ρεύματος, δηλαδή ροή ρεύματος από την κάθοδο προς την άνοδο.

Λειτουργία

Γνωρίζουμε ότι το πηνίο αντιδρά στην αλλαγή της κατάστασης, στην οποία βρίσκεται. Στην περίπτωση του κυκλώματός μας, εάν δώσουμε έναν παλμό έναυσης (I_G) σε ένα χρονικό σημείο $\phi < \alpha < \pi + \alpha$ (π.χ. για $\alpha = 120^\circ$), τότε παρατηρούμε τα εξής:

Περιοχή (1): Στο διάστημα $0 \leq \omega t < \alpha$ το θυρίστορ είναι *ορθά πολωμένο*, συμπεριφέρεται όμως σαν ανοικτός διακόπτης,



γιατί δεν έχει δεχτεί παλμό στην πύλη.

Οπότε, ισχύουν τα ακόλουθα:

$$u_T = u_S = u_m \cdot \eta \mu \omega t$$

$$i_{d\alpha} = 0$$

$$u_{d\alpha} = 0$$

Περιοχή (2): Στο διάστημα $\omega t = \alpha$ έως $\pi + \phi$ το θυρίστορ, με την εφαρμογή του παλμού στην πύλη, γίνεται αγωγίμο. Η τάση του δικτύου εφαρμόζεται αμέσως στο φορτίο και έτσι έχουμε:

$$u_T = 0 \quad \text{θυρίστορ κλειστός διακόπτης}$$

$$u_{d\alpha} = u_S = u_m \cdot \eta \mu \omega t \quad \text{για } \alpha \leq \omega t \leq \pi + \phi$$

$$i_{d\alpha}(0^+) = i_{d\alpha}(0^-) = 0$$

$$i_{d\alpha} > 0 \quad \text{για } \omega t > \alpha$$

Το ρεύμα του κυκλώματος $i_{d\alpha}$ δεν λαμβάνει τη στιγμιαία τιμή του ρεύματος, όπως η τάση $u_{d\alpha}$, αλλά είναι για $\omega t = \alpha \Rightarrow i_{d\alpha}(0^+) = i_{d\alpha}(0^-) = 0$.

Τη χρονική στιγμή $\omega t = \alpha$, το ρεύμα του κυκλώματος $i_{d\alpha} = 0$, γιατί το ρεύμα, πριν κλείσει ο διακόπτης, ήταν επίσης μηδέν (0). Το δίκτυο, όμως, ωθεί στο κύκλωμα το στιγμιαίο ρεύμα

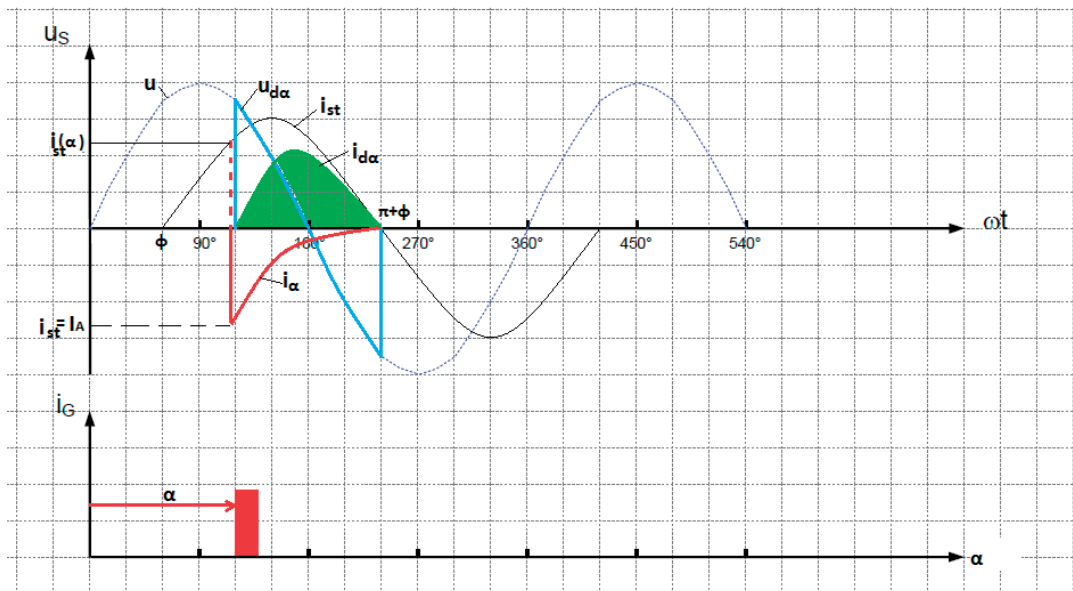
$$i_{st} = i_s(\omega t) = i(\alpha) = I_m \cdot \eta\mu(\alpha - \phi)$$

Για να μηδενιστεί το παραπάνω ρεύμα, σύμφωνα με τον Lenz, το πηνίο αναπτύσσει ένα αντίρρευμα, το οποίο είναι ίσο και αντίθετο με το στιγμιαίο ρεύμα $i(\alpha) = i_{st} = -I_m \cdot \eta\mu(\alpha - \phi)$. Το αντίρρευμα μειώνεται εκθετικά και, τελικά, μηδενίζεται. Το ρεύμα $i_{d\alpha}$ του κυκλώματος προκύπτει, αν αφαιρέσουμε το αντίρρευμα i_α από το ρεύμα i_{st} του δικτύου. Δηλαδή:

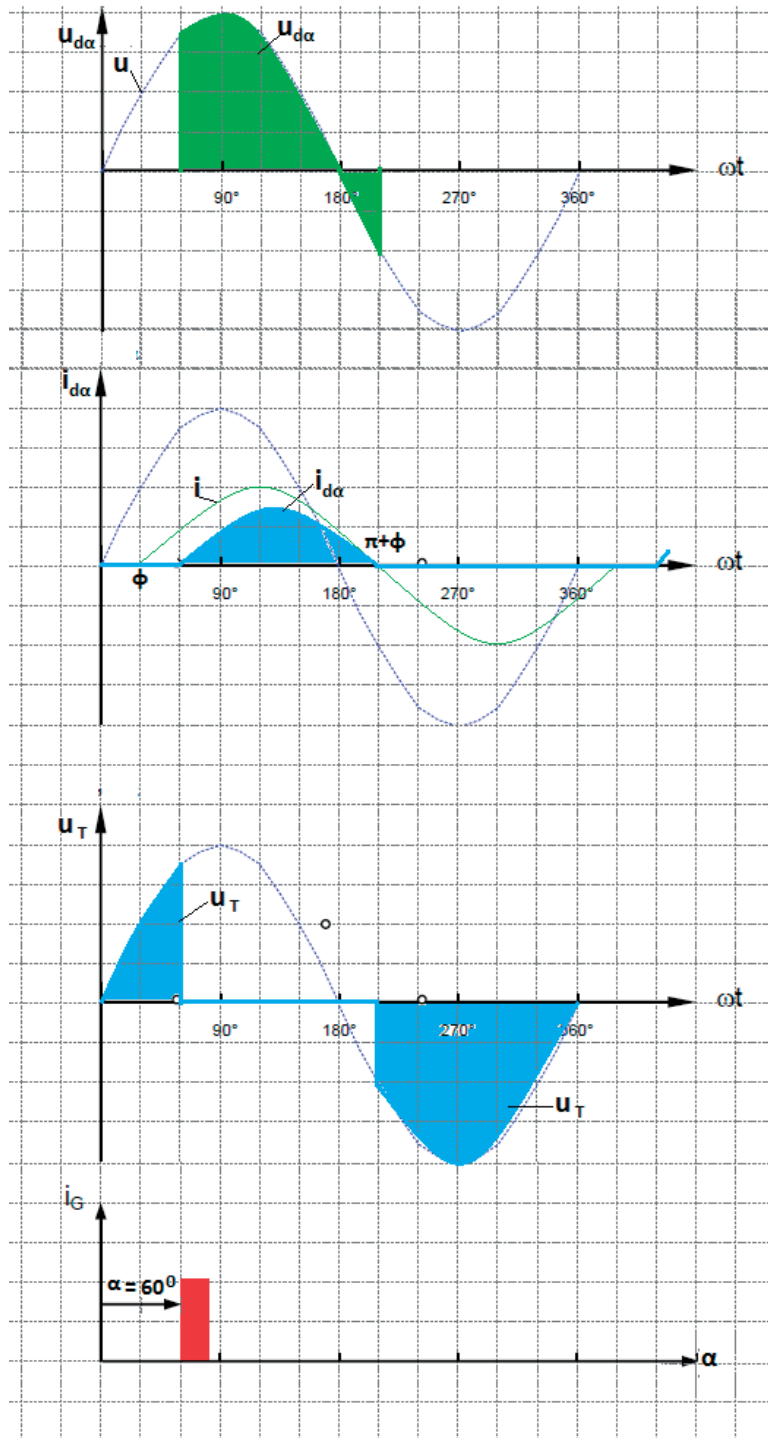
$$i_{d\alpha} = i_{st} + i_\alpha = I_m \cdot \eta\mu(\omega t - \phi) - I_m \cdot \eta\mu(\alpha - \phi) \cdot e^{-\frac{\alpha}{\omega t}}$$

Η μέση τιμή της τάσης του φορτίου δίνεται από τη σχέση

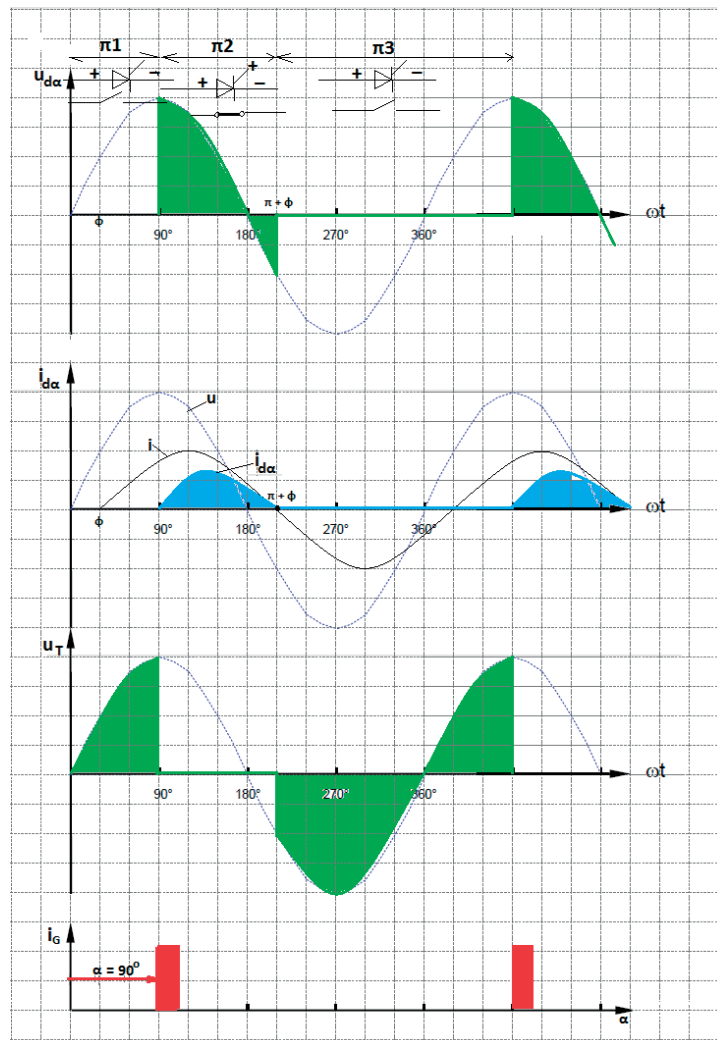
$$u_{d\alpha} = \frac{U_m}{2\pi} (\sigma\upsilon\eta\alpha - \sigma\upsilon\eta\gamma), \text{ όπου } \gamma = \pi + \phi.$$



Σχ. 2.10: Κυματομορφές τάσης $u_{d\alpha}$, ρευμάτων i_{st} , $i_{d\alpha}$.



Σχ. 2.11: Κυματομορφές των τάσεων του δικτύου (u_s), του φορτίου $u_{d\alpha}$, του ρεύματος $i_{d\alpha}$ και του παλμού έναυσης για γωνία έναυσης $\alpha=60^\circ$.



Σχ. 2.12: Κυματομορφές τάσεων και ρεύματος του κυκλώματος M1C με RL-φορτίο και γωνία έναυσης $\alpha = 90^\circ$.

2.1.4 Μονοφασικός μετατροπέας EP/EP (κοινώς, “TRIAC”) ή Μονοφασικός ρυθμιστής εναλλασσόμενου ρεύματος (W1C)

Με το TRIAC μπορούμε να κάνουμε ρύθμιση της κατανάλωσης ισχύος σ' ένα μονοφασικό ή τριφασικό φορτίο. Η ρύθμιση γίνεται με τμηματικό έλεγχο της θετικής και αρνητικής ημιπεριόδου της φάσης του δικτύου. Ο έλεγχος επιτυγχάνεται με τη χρονικά μετατοπισμένη σύνδεση τμημάτων της ημιτονοειδούς φάσης του δικτύου με το φορτίο. Η σύνδεση πραγματοποιείται με τη βοήθεια του TRIAC.

Το TRIAC αποτελείται από δύο θυρίστορ αντιπαράλληλα συνδεδεμένα και τοποθετημένα μέσα σ' ένα περίβλημα. Η έναυση των θυρίστορς γίνεται με τη βοήθεια ενός κοινού ακροδέκτη πύλης (G). Η παλμογεννήτρια του TRIAC παράγει παλμούς έναυσης για κάθε ημιπερίοδο της τάσης του δικτύου. Οι παλμοί αυτοί έχουν μεταξύ τους διαφορά φάσης 180° .

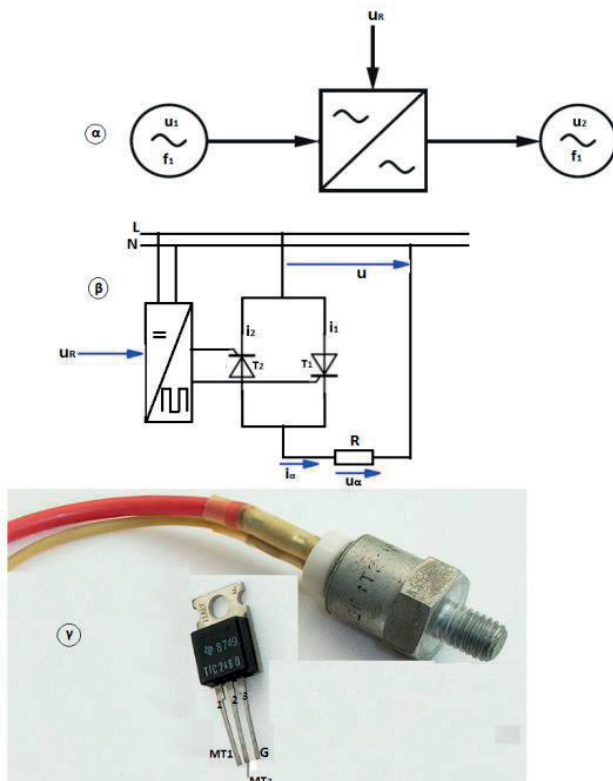
Οι γωνίες έναυσης μετριοούνται από τα σημεία μηδέν, από τα οποία περνά η κυματομορφή της τάσης του δικτύου.

Όπως θα διαπιστώσουμε και από τις γραφικές παραστάσεις του κυκλώματος, με τον μετατροπέα εναλλασσόμενου ρεύματος επιτυγχάνουμε ρύθμιση της ενεργού τιμής της τάσης του φορτίου και όχι της συχνότητας.

Το TRIAC χρησιμοποιείται για μικρές ισχύς. Για μεγαλύτερες ισχύς χρησιμοποιούνται δύο ξεχωριστά θυρίστορ με αντιπαράλληλη συνδεσμολογία.

Κύκλωμα μετατροπέα EP/EP (AC/AC) με ωμικό φορτίο

Στο παρακάτω σχήμα (σχ. 2.13) φαίνεται το κύκλωμα του μετατροπέα με ωμικό φορτίο.

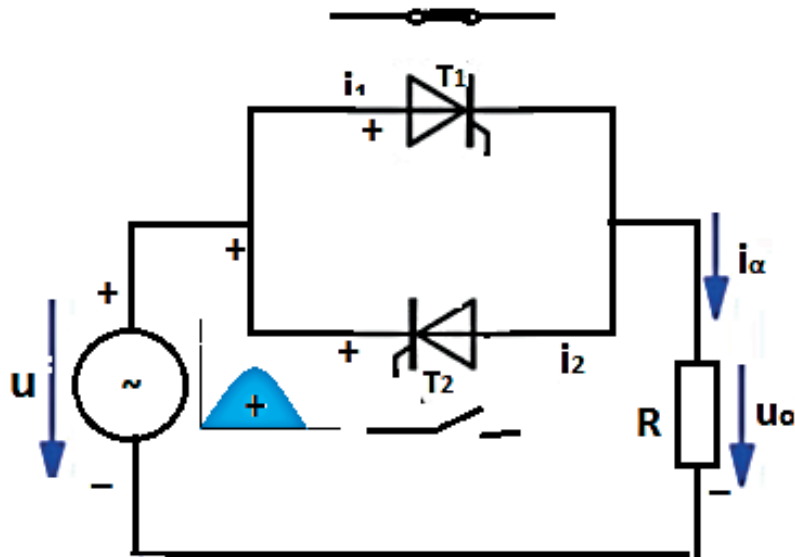


Σχ. 2.13: α) Σύμβολο μετατροπέα AC/AC
 β) Κύκλωμα μετατροπέα AC/AC με R-φορτίο
 γ) Εμπορικό σύμβολο TRIAC

Λειτουργία

Το κύκλωμα λειτουργεί, όπως ο μονοφασικός ανορθωτής μισού κύματος.

Για να κατανοήσουμε τη λειτουργία του κυκλώματος, εξετάζουμε κάθε ημιπερίοδο ξεχωριστά.



Σχ. 2.14: Δυναμικά του κυκλώματος από 0 έως π .

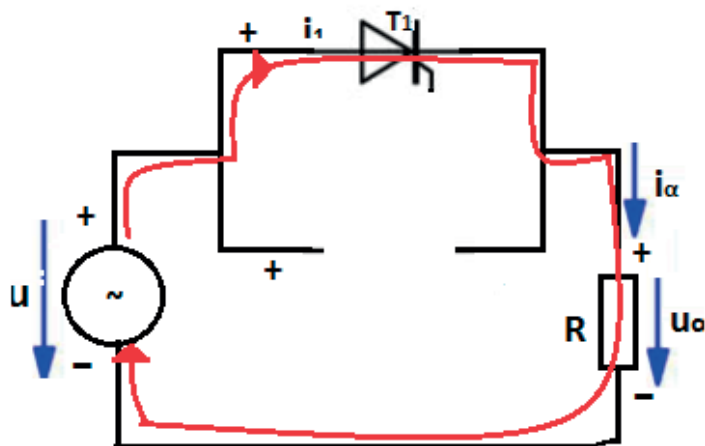
Στο διάστημα από 0 έως π , η τάση (u) του δικτύου είναι θετική. Τα δυναμικά του κυκλώματος φαίνονται στο παραπάνω σχήμα. Διαπιστώνουμε, λοιπόν, ότι το θυρίστορ T_1 είναι *ορθά πολωμένο*, ενώ το θυρίστορ T_2 είναι *ανάστροφα πολωμένο* και συμπεριφέρεται σαν ανοικτός διακόπτης. Μέχρι να δοθεί *παλμός έναυσης* στην πύλη, το θυρίστορ T_1 είναι ανοικτός διακόπτης και το ρεύμα του κυκλώματος ($i_\alpha = 0$) είναι μηδέν, η δε τάση της πηγής εφαρμόζεται στα άκρα του θυρίστορ.

$$u = u_T$$

$$i_\alpha = 0$$

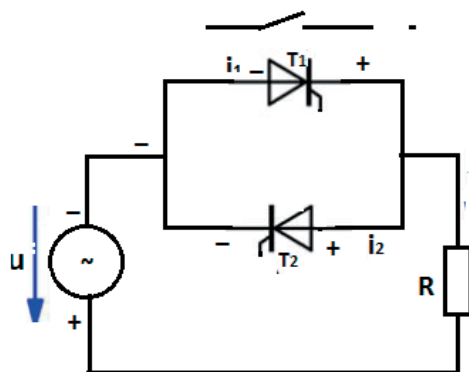
$$u_\alpha = i_\alpha \cdot R = 0$$

Με την εφαρμογή του παλμού έναυσης I_{G1} τη χρονική στιγμή $\omega t_1 = \alpha$, το θυρίστορ άγει και συνδέει το θετικό δυναμικό (+) της πηγής (u) στον επάνω ακροδέκτη της ωμικής αντίστασης (R).



Σχ. 2.15 Triac κατά την θετική ημιπερίοδο αγωγής του T_1 .

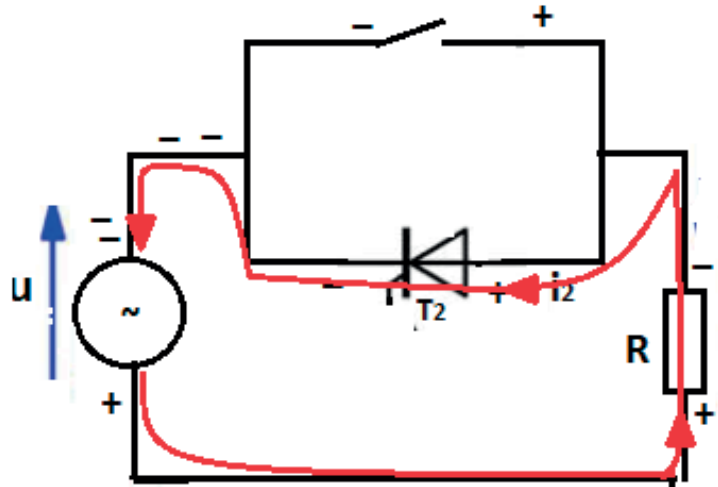
Στην περιοχή από π έως 2π , η τάση της πηγής είναι αρνητική. Τα δυναμικά του κυκλώματος απεικονίζονται στο παρακάτω σχήμα:



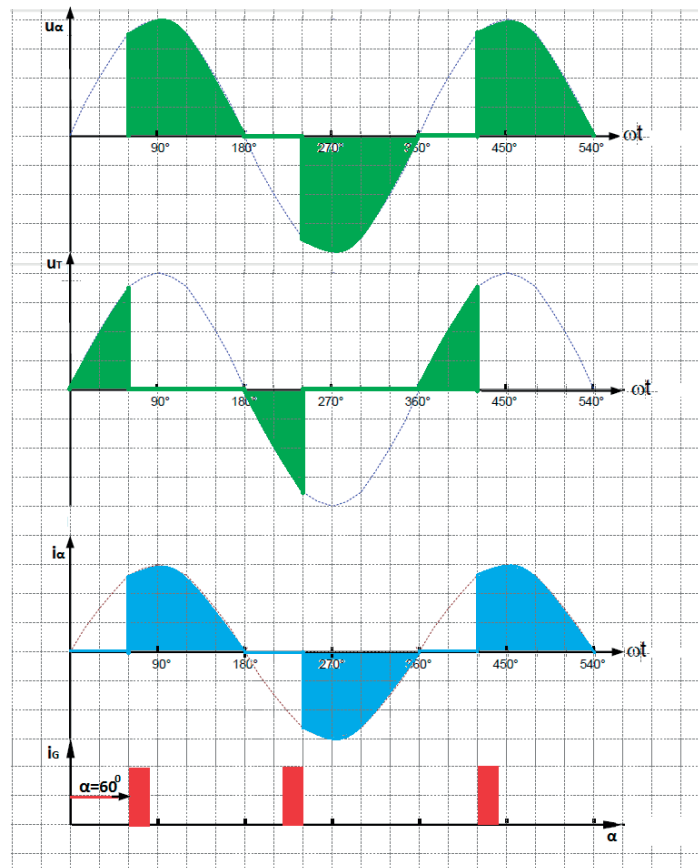
Σχ. 2.16: TRIAC με τα δυναμικά του κυκλώματος, όταν η τάση (u) είναι αρνητική.

Όπως φαίνεται και από το σχήμα 2.16, το θυρίστορ T_1 είναι *ανάστροφα* πολωμένο και επομένως δεν άγει (ανοικτός διακόπτης). Αντίθετα, το

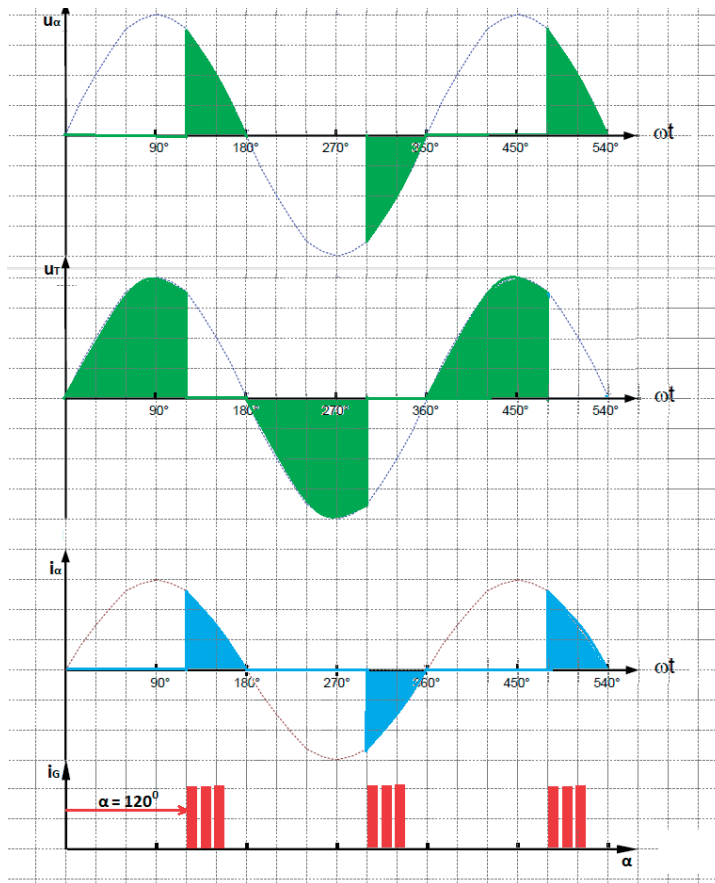
Θυρίστωρ T_2 είναι ορθά πολωμένο και, αν δεχθεί παλμό έναυσης, γίνεται αγώγιμο. Η ροή του ρεύματος φαίνεται στο σχήμα που ακολουθεί:



Σχ. 2.17: Κύκλωμα ροής του ρεύματος κατά την αρνητική ημιπερίοδο.



Σχ. 2.18: TRIAC με ωμικό, κυματομορφές τάσεων και ρευμάτων για $\alpha=60^\circ$.



Σχ. 2.19: TRIAC με ωμικό, κυματομορφές τάσεων και ρευμάτων για $\alpha=120^\circ$.

Μερικοί βασικοί υπολογισμοί

Υπολογισμός της ενεργού τιμής της τάσης και του ρεύματος φορτίου

Επειδή οι κυματομορφές της τάσης και του ρεύματος είναι συμμετρικές ως προς τον οριζόντιο άξονα (ωt) και η μέση τιμή είναι μηδέν, υπολογίζουμε την ενεργό τιμή των μεγεθών.

Η ενεργός τιμή της τάσης και του ρεύματος υπολογίζεται από τις σχέσεις:

$$u_{\text{εν}\alpha} = u_{\text{εν}} \sqrt{\frac{1}{\pi} \left(\pi - \hat{\alpha} + \frac{1}{2} \eta \mu 2\alpha \right)}$$

$$I_{\text{εν}\alpha} = I_{\text{εν}} \sqrt{\frac{1}{\pi} \left(\pi - \hat{\alpha} + \frac{1}{2} \eta \mu 2\alpha \right)}$$

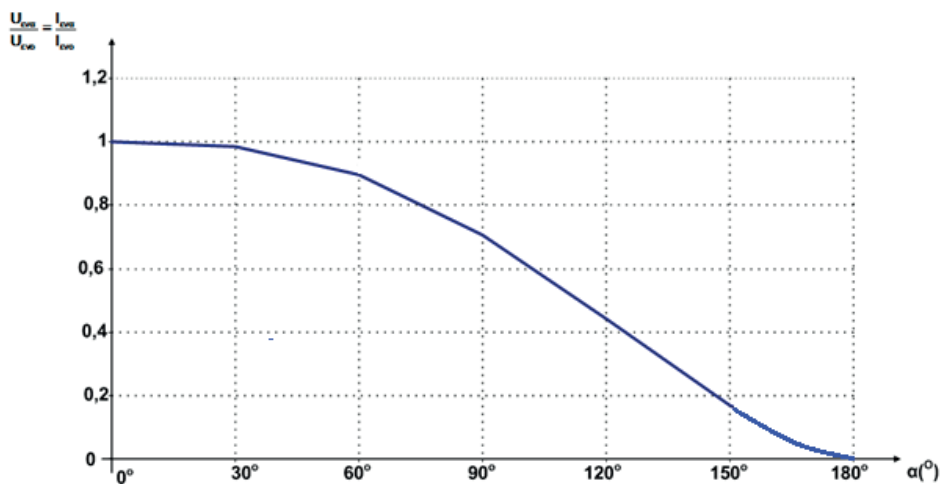
όπου: και $I_{\varepsilon\nu} = \frac{I_m}{\sqrt{2}}$

Από τις παραπάνω σχέσεις διαπιστώνουμε ότι οι τιμές $u_{\varepsilon\nu\alpha}$ και $I_{\varepsilon\nu\alpha}$ εξαρτώνται μόνο από τη γωνία έναυσης (α). Εάν αναπαραστήσουμε γραφικά τις ανηγμένες τιμές των παραπάνω μεγεθών, λαμβάνουμε τη χαρακτηριστική ρύθμιση του TRIAC για ωμικό φορτίο.

$$\frac{u_{\varepsilon\nu\alpha}}{u_{\varepsilon\nu}} = \frac{I_{\varepsilon\nu\alpha}}{I_{\varepsilon\nu}} = \sqrt{\frac{1}{\pi} \left(\pi - \alpha + \frac{1}{2} \eta \mu 2\alpha \right)}$$

Πίνακας

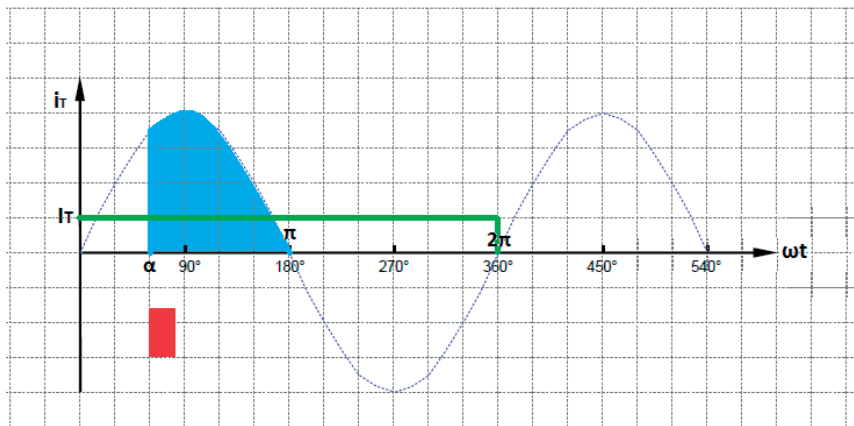
α	0°	30°	60°	90°	120°	150°	180°
$\frac{u_{\varepsilon\nu\alpha}}{u_{\varepsilon\nu}} = \frac{I_{\varepsilon\nu\alpha}}{I_{\varepsilon\nu}}$	1	0,085	0,897	0,707	0,442	0,17	0



Σχ. 2.20: Χαρακτηριστική ρύθμισης του TRIAC για ωμικό φορτίο.

Από τη λειτουργία του κυκλώματος διαπιστώσαμε, ότι κάθε θυρίστορ διαρρέεται μόνο από τη μία ημιπερίοδο του ρεύματος φορτίου. Επομένως, η

επιλογή του θυρίστορ πρέπει να γίνει με βάση τη μέση τιμή αυτού του ημικύματος στο διάστημα μιας περιόδου. Δηλαδή:



Σχ. 2.21: Η μέση τιμή του ρεύματος I_T .

Η μέση τιμή του ρεύματος I_{T1} υπολογίζεται από τη σχέση:

$$I_{T1} = \frac{I_m}{2\pi} (1 + \sigma\upsilon\nu\alpha)$$

Επειδή, όμως, μας ενδιαφέρει το μέγιστο ρεύμα αντοχής του θυρίστορ, θέτουμε $\alpha = 0^\circ$ και λαμβάνουμε:

$$I_{T1} = \frac{I_m}{\pi} = 0,45 \cdot I_{\epsilon\nu}$$

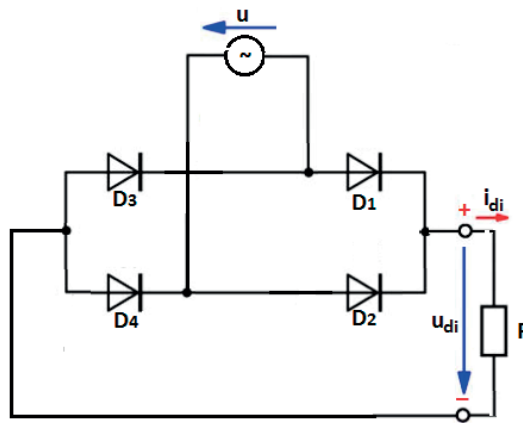
Επομένως, τα θυρίστορ που θα αγοράσουμε, πρέπει να αντέχουν τουλάχιστον στο $\approx 50\%$ του ρεύματος του φορτίου.

3. ΕΤΕΡΟΟΔΗΓΟΥΜΕΝΑ ΚΥΚΛΩΜΑΤΑ

Ετεροοδηγούμενα ονομάζονται τα κυκλώματα, στα οποία η τάση μετάβασης προέρχεται από το δίκτυο, δηλαδή λαμβάνει χώρα το φαινόμενο της φυσικής μετάβασης.

3.1 Μη ελεγχόμενη μονοφασική γέφυρα (Γέφυρα B2U)

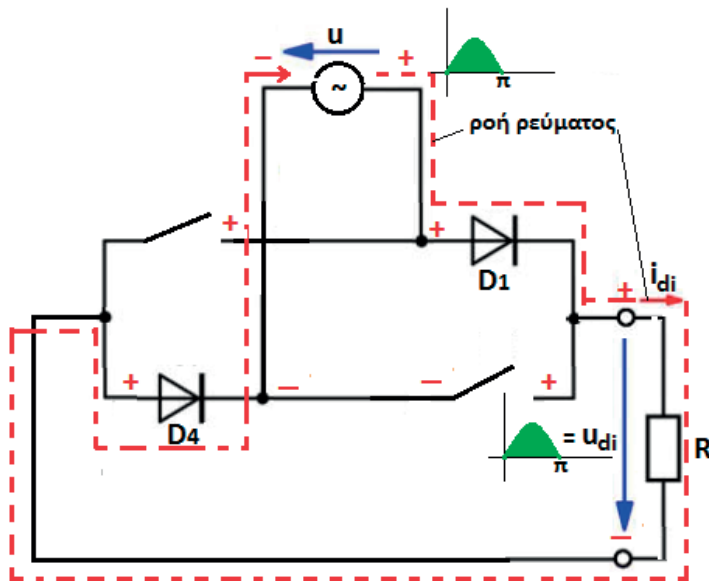
Η μη ελεγχόμενη μονοφασική γέφυρα αποτελείται από τέσσερις διόδους (σχ. 3.1). Η γέφυρα-B2 είναι το πλέον διαδεδομένο κύκλωμα ανόρθωσης της μονοφασικής εναλλασσόμενης τάσης $u(t)$.



Σχ. 3.1: Μη ελεγχόμενη μονοφασική γέφυρα B2 .

Λειτουργία

Περιοχή 0 – π: Σύμφωνα με την πολικότητα του κυκλώματος (σχ. 3.2), οι διόδοι D_1 και D_4 είναι ορθά πολωμένες (η διάδος D_1 έχει θετική άνοδο και η διάδος D_4 έχει αρνητική κάθοδο) και, επομένως, είναι κλειστοί διακόπτες. Η ροή του ρεύματος i_{di} φαίνεται στο σχ. 3.2.



Σχ. 3.2: Ροή ρεύματος και δυναμικά κατά τη θετική ημιπερίοδο .

Παρατηρήσεις:

- Στην περιοχή $0 - \pi$, η τάση του δικτύου είναι θετική (θετική ημιπερίοδος).
- Με το θετικό δυναμικό της τάσης του δικτύου *πολώνονται ορθά* οι δίοδοι D_1 και D_4 και άγουν (αφήνουν, δηλαδή, το ρεύμα i_{di} να περάσει μέσα από αυτές).
- Η θετική ημιπερίοδος της τάσης του δικτύου (u) εφαρμόζεται στα άκρα του φορτίου (R), όπως φαίνεται στο σχήμα 3.2, με το συν (+) στο επάνω μέρος και το πλην (-) στο κάτω μέρος της αντίστασης (R).
- Το ρεύμα του φορτίου (i_{di}) ρέει από το πάνω μέρος (+) της αντίστασης προς το κάτω μέρος (-).
- Αντίθετα, οι δίοδοι D_2 και D_3 είναι *ανάστροφα πολωμένες* και δεν άγουν.
- Στην περιοχή $0 - \pi$ ισχύουν οι σχέσεις:

$$u = u_m \cdot \eta \mu \omega t \quad \text{τάση δικτύου}$$

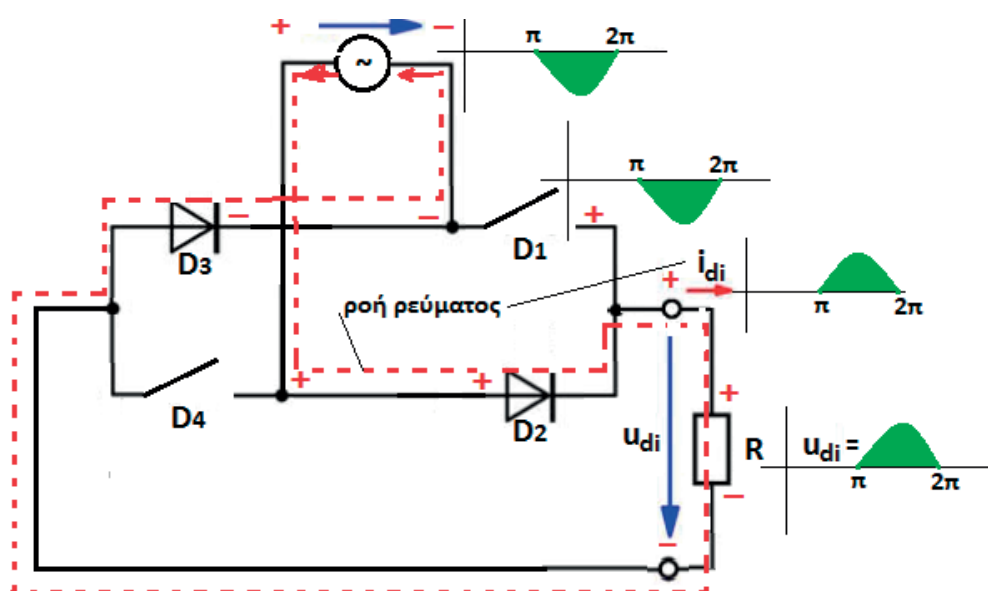
$$u_{di} = u_m \cdot \eta \mu \omega t \quad 0 \leq \omega t \leq \pi \quad \text{τάση φορτίου}$$

$$i_{di} = I_m \cdot \eta \mu \omega t = \frac{U_m}{R} \cdot \eta \mu \omega t \quad \text{ρεύμα φορτίου}$$

$$u_{D2} = u_{D3} = -u_m \cdot \eta \mu \omega t$$

$$u_{D1} = u_{D4} = 0 \quad \text{ιδανικές διόδους}$$

Περιοχή $\pi - 2\pi$: Στην περιοχή $\pi - 2\pi$, η τάση του δικτύου αλλάζει πολικότητα και γίνεται αρνητική. Επομένως, τα δυναμικά έχουν ως εξής:



Σχ. 3.3: Ροή ρεύματος και δυναμικά της γέφυρας B2U στην περιοχή $\pi - 2\pi$.

Παρατηρήσεις:

- Σύμφωνα με την πολικότητα του κυκλώματος (σχ. 3.3), η διάδος D_2 έχει συν στην άνοδο και η διάδος D_3 έχει πλην στην κάθοδο και, επομένως, άγουν. Το θετικό δυναμικό (+) της τάσης (u) του δικτύου εφαρμόζεται, μέσω της διόδου D_2 , στο επάνω μέρος της αντίστασης (R). Το αρνητικό δυναμικό (-) της τάσης του δικτύου (u) εφαρμόζεται, μέσω της διόδου D_3 , στο κάτω μέρος της αντίστασης (R).

- Αν και η τάση (u) του δικτύου είναι αρνητική, η πολικότητα της τάσης (u_{di}) στα άκρα του φορτίου (R) δεν άλλαξε. Δηλαδή, έχει συν (+) στο επάνω μέρος και πλην (–) στο κάτω μέρος της αντίστασης (R), όπως και στη θετική ημιπερίοδο της τάσης.
- Επειδή η πολικότητα της τάσης (u_{di}) του φορτίου δεν άλλαξε, έπεται ότι και το ρεύμα του φορτίου i_{di} δεν άλλαξε φορά ροής (συνεχές ρεύμα). Διαρρέει, με άλλα λόγια, την αντίσταση (R) από το επάνω προς το κάτω μέρος. Αυτή η λειτουργία λέγεται *ανόρθωση*. Όταν λέμε ανόρθωση, εννοούμε, κυρίως, ανόρθωση ρεύματος.
- Το κύκλωμα διαθέτει δύο κλάδους και κάθε κλάδος δύο διόδους, μία εμπρός και μία όπισθεν. Σε κάθε ημιπερίοδο λειτουργεί μία από τις έμπροσθεν διόδους μαζί με μία από τις όπισθεν διόδους του άλλου κλάδου και, συγκεκριμένα, D_1 με D_4 και D_2 με D_3 .
- Στο χρονικό διάστημα από π έως 2π ισχύουν οι σχέσεις:

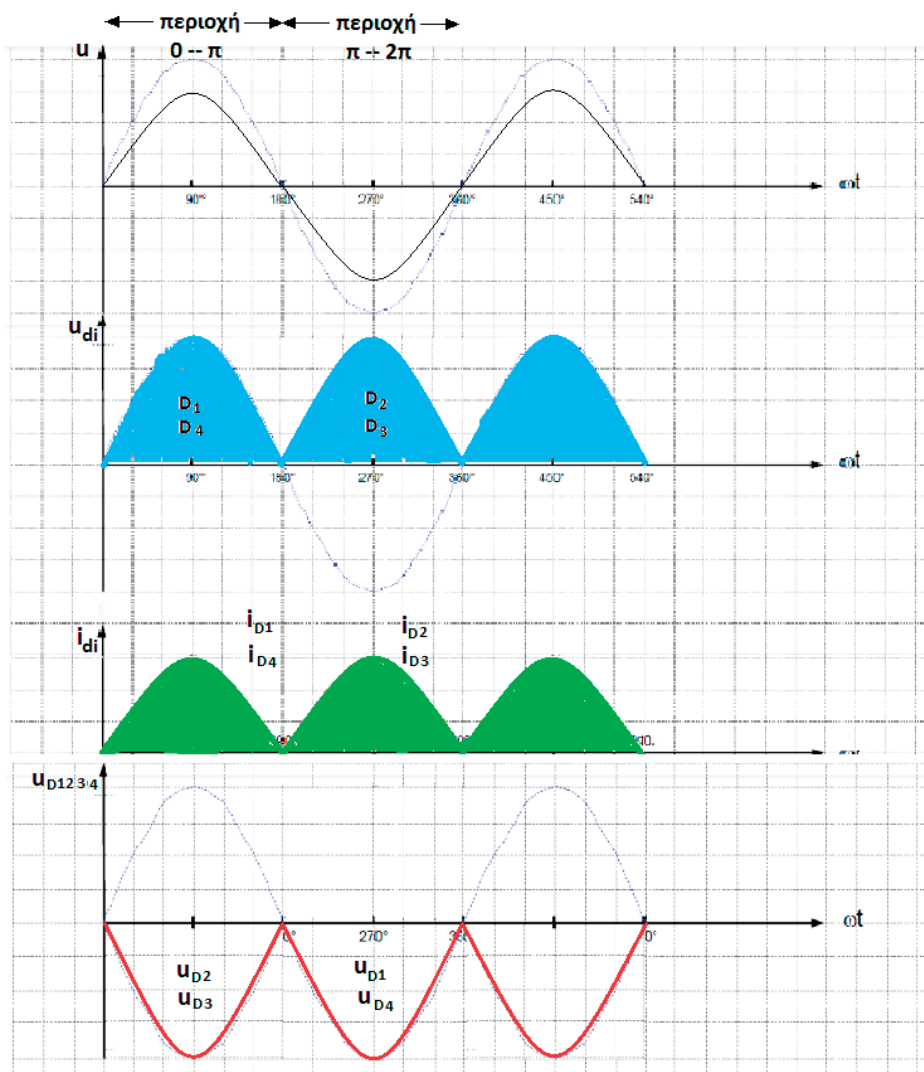
$$u = u_m \cdot \eta \mu \omega t$$

$$u + u_{di} = 0 \Rightarrow u_{di} = -(-u_m \cdot \eta \mu \omega t) = u_m \cdot \eta \mu \omega t \text{ (θετική)}$$

$$i_{di} = I_m \eta \mu \omega t$$

Στα άκρα των διόδων D_1 και D_4 εφαρμόζεται η τάση

$$u_{D1} = u_{D4} = u_m \cdot \eta \mu \omega t \quad (\text{ανάστροφα πολωμένες})$$



Σχ. 3.4: Τάσεις και ρεύματα της μη ελεγχόμενης μονοφασικής γέφυρας B2U .

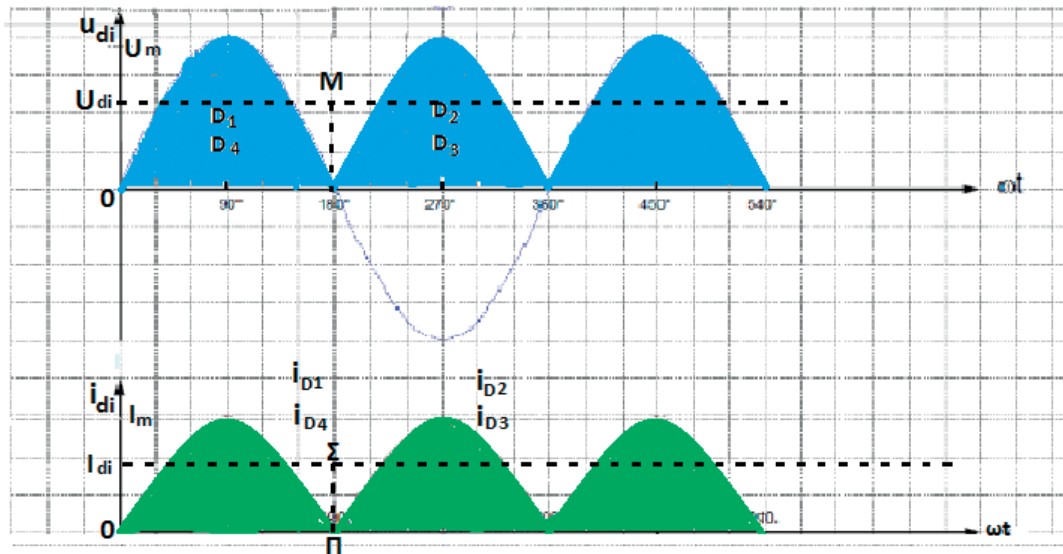
3.1.1 Μερικές χρήσιμες εξισώσεις

Μέση αριθμητική τιμή της τάσης φορτίου (R)

Η μέση αριθμητική τιμή ενός ηλεκτρικού μεγέθους είναι η τιμή, η οποία επιφέρει τα ίδια ηλεκτροχημικά αποτελέσματα με ένα αντίστοιχο συνεχές μέγεθος.

Στην περίπτωση της τάσης (u_{di}) και του ρεύματος, ο υπολογισμός γίνεται με εξίσωση των επιφανειών. Κατασκευάζουμε ένα ορθογώνιο

παραλληλόγραμμο πλάτους π (ή και 2π) και ύψους u_{di} τέτοιου, ώστε το εμβαδόν του ορθογωνίου παραλληλογράμμου ($0\pi Mu_{di}$) να είναι ίσο με το εμβαδό του ημικύματος $u = u_m \cdot \eta \mu \omega t$ (σχ. 3.5).



Σχ. 3.5: Γραφικός υπολογισμός της μέσης αριθμητικής τιμής της τάσης u_{di} και του ρεύματος I_{di} .

Η μέση αριθμητική τιμή του ρεύματος και της τάσης ισούται:

$$u_{di} = 0,9 \cdot u_{εν}$$

$$I_{di} = 0,9 \cdot I_{εν} = 0,9 \cdot \frac{u_{εν}}{R}$$

Η μέση αριθμητική τιμή του ρεύματος μιας διόδου υπολογίζεται με τον ίδιο τρόπο. Επομένως, έχουμε:

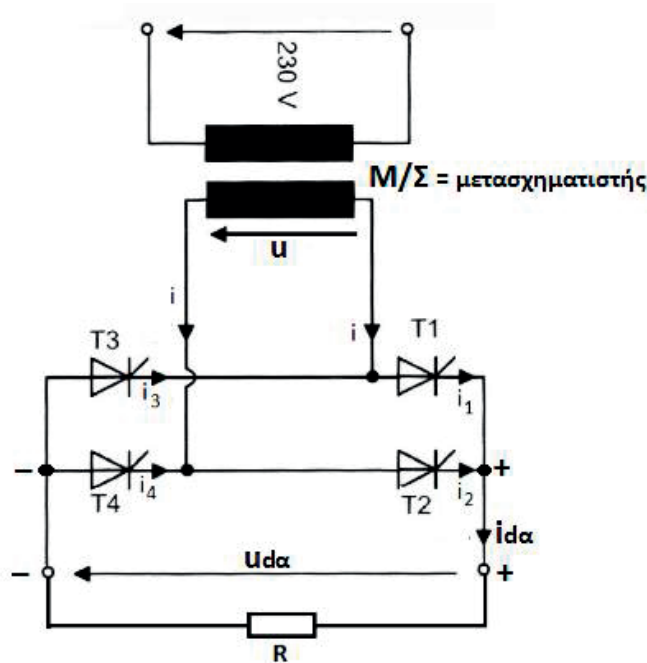
$$I_D = 0,45 \cdot \frac{u_m}{R} \quad \text{ή} \quad I_D = 0,5 \cdot I_{di}$$

Η μέγιστη τάση καταπόνησης των διόδων ισούται:

$$u_{Dmax} = \sqrt{2} u_{εν} = u_m$$

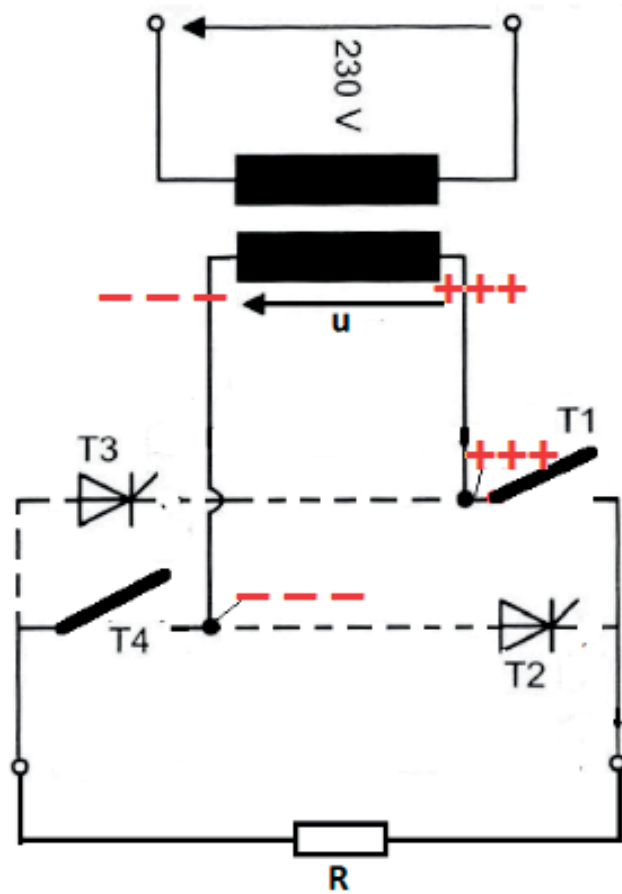
3.2 Πλήρως ελεγχόμενη μονοφασική γέφυρα με ωμικό φορτίο (R)-(Γέφυρα B2C με ωμικό φορτίο)

Παρακάτω, φαίνεται το κύκλωμα της γέφυρας B2C (σχ. 3.6). Το κύκλωμα αυτό προέκυψε από το κύκλωμα του σχ. 3.1, αφού πρώτα αντικαταστήσαμε τις διόδους με θυρίστορες.



Σχ. 3.6: Ελεγχόμενη γέφυρα B2 με ωμικό φορτίο

Η περιγραφή λειτουργίας που παραθέσαμε στην προηγούμενη ενότητα ισχύει και για το κύκλωμα της γέφυρας B2C με θυρίστορ. Άλλωστε, αν οι παλμοί έναυσης στα θυρίστορ δοθούν με γωνία έναυσης $\alpha = 0^\circ$, τότε λαμβάνουμε τις ίδιες γραφικές παραστάσεις τάσεων και ρευμάτων που πήραμε από τη γέφυρα B2U με διόδους (σχ. 3.4).



Σχ. 3.8: Κύκλωμα δυναμικών και ροής ρεύματος για το διάστημα: 0 έως π.

Παρατηρούμε, λοιπόν, ότι τα θυρίστορ T_1 και T_4 είναι ορθά πολωμένα, αλλά λόγω έλλειψης παλμού έναυσης βρίσκονται σε αποκοπή. Επομένως, δεν υπάρχει ροή ρεύματος ($i_{d\alpha} = 0$) και η τάση του δικτύου εφαρμόζεται στα θυρίστορ T_1 και T_4 . Ισχύουν, λοιπόν, οι σχέσεις:

$$u = u_m \cdot \eta \mu \omega t$$

$$i_{d\alpha} = 0$$

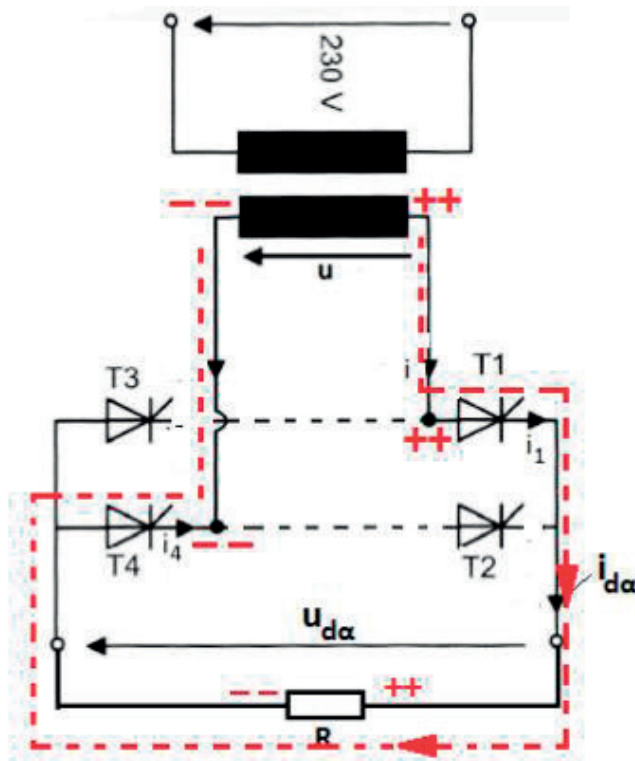
$$u_{d\alpha} = i_{d\alpha} \cdot R = 0$$

$$u_{T1,4} = u_m \cdot \eta \mu \omega t \quad 0 \leq \omega t < \alpha$$

$$u_{T2,3} = -u_m \cdot \eta \mu \omega t \quad 0 \leq \omega t \leq \alpha$$

β) Περιοχή α έως π:

Στην περιοχή αυτή, η τάση του δικτύου συνεχίζει να είναι θετική και στο σημείο $\omega t = \alpha$ δίνεται ταυτόχρονα παλμός έναυσης στα θυρίστορ T_1 και T_4 , τα οποία είναι ορθά πολωμένα (σχ. 3.8) και άγουν (σχ. 3.9).



Σχ. 3.9: Ελεγχόμενη γέφυρα με ωμικό φορτίο (B2C).

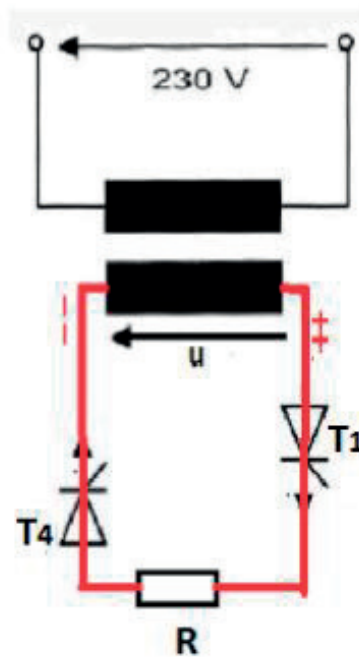
Δυναμικά και ροή ρεύματος στην περιοχή α έως π.

Στο χρονικό διάστημα από α έως π, το τμήμα της τάσης, που αντιστοιχεί σ' αυτό το χρονικό διάστημα, εφαρμόζεται στο φορτίο (R). Επειδή το φορτίο είναι ωμικό (R), το ρεύμα και η τάση είναι συμφασικά. Επομένως, η κυματομορφή του ρεύματος είναι όμοια με αυτή της τάσης.

Από το κύκλωμα του σχ. 3.9 διαπιστώνουμε τα εξής:

– Το ρεύμα $i_{d\alpha} = i_1 = i_4 = i = I_m \cdot \eta \mu \omega t$ και $u_{d\alpha} = u = u_m \cdot \eta \mu \omega t$

- Τα θυρίστορ T_2 και T_3 πολώνονται ανάστροφα από τη θετική ημιπερίοδο της τάσης $u = u_m \cdot \eta\mu\omega t$ και βρίσκονται σε αποκοπή (εκτός λειτουργίας).
- Για να τεθεί σε λειτουργία το κύκλωμα, πρέπει οι παλμοί έναυσης στα συνεργαζόμενα ζεύγη των θυρίστορ (T_1, T_4 και T_2, T_3) να δίνονται ταυτόχρονα.
- Το κύκλωμα που λειτουργεί, είναι ένα κύκλωμα ελεγχόμενης ημιανόρθωσης με ωμικό φορτίο (R), αλλά με δύο (2) θυρίστορ στη σειρά.



Σχ. 3.10: Ισοδύναμο κύκλωμα της γέφυρας B2C για το διάστημα από α έως π .

γ) Περιοχή από π έως $\pi + \alpha$

Στο χρονικό διάστημα από π έως 2π η τάση (u) του δικτύου είναι αρνητική. Τα θυρίστορ T_2 και T_3 είναι ορθά πολωμένα, ενώ τα θυρίστορ T_1 και T_4 είναι ανάστροφα πολωμένα και βρίσκονται εκτός λειτουργίας κατά τη διάρκεια της αρνητικής ημιπεριόδου.

Στο χρονικό διάστημα π έως $\pi + \alpha$ τα θυρίστορ T_2 και T_3 δεν άγουν, διότι αν και είναι ορθά πολωμένα δεν έχουν παλμό έναυσης. Τα δυναμικά του κυκλώματος έχουν ως εξής (σχ. 3.11):

Ισχύουν οι σχέσεις:

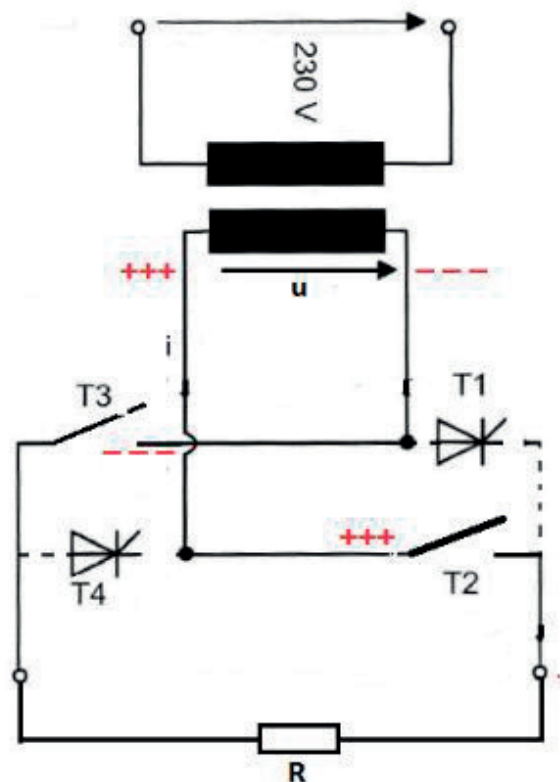
$$u = u_m \cdot \eta \mu \omega t$$

$$i_{d\alpha} = 0$$

$$u_{d\alpha} = i_{d\alpha} \cdot R = 0$$

$$u_{T2,3} = u_m \cdot \eta \mu \omega t$$

$$u_{T1,4} = - u_m \cdot \eta \mu \omega t$$



Σχ. 3.11: Γέφυρα B2C με ωμικό φορτίο (R). Δυναμικά για το χρονικό διάστημα $\pi - 2\pi$

δ) Περιοχή $\pi + \alpha$ έως 2π :

Στην περιοχή αυτή, η τάση του δικτύου είναι αρνητική και στο σημείο $\pi + \alpha$ δέχονται παλμό έναυσης τα θυρίστορ T_2 και T_3 , τα οποία είναι ορθά πολωμένα και άγουν μέχρι το 2π (σχ. 3.12).

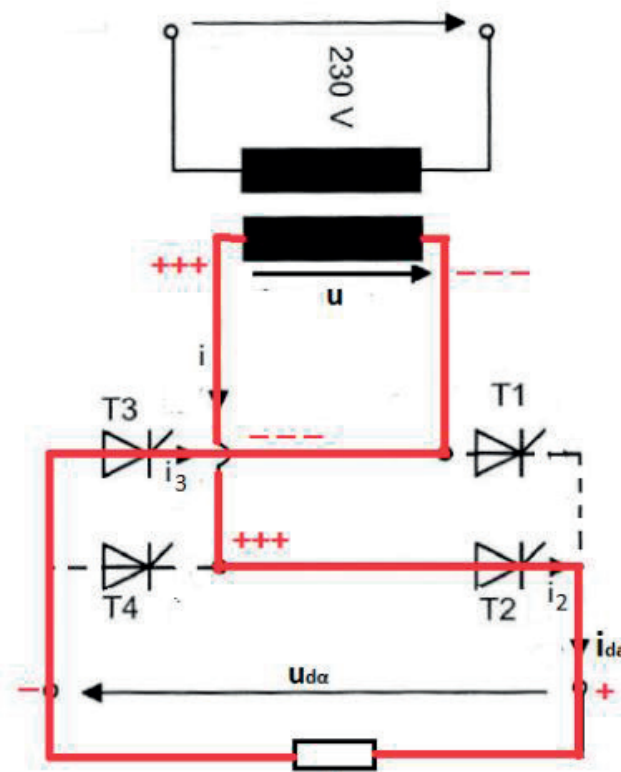
Ισχύουν οι σχέσεις:

$$u = u_m \cdot \eta \mu \omega t$$

$$u_{d\alpha} = - u_m \cdot \eta \mu \omega t$$

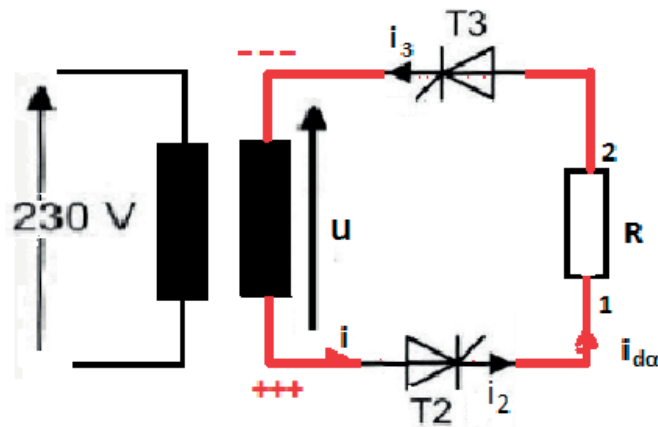
$$u_{T2,3} = 0$$

$$u_{T1,4} = u_m \cdot \eta \mu \omega t$$



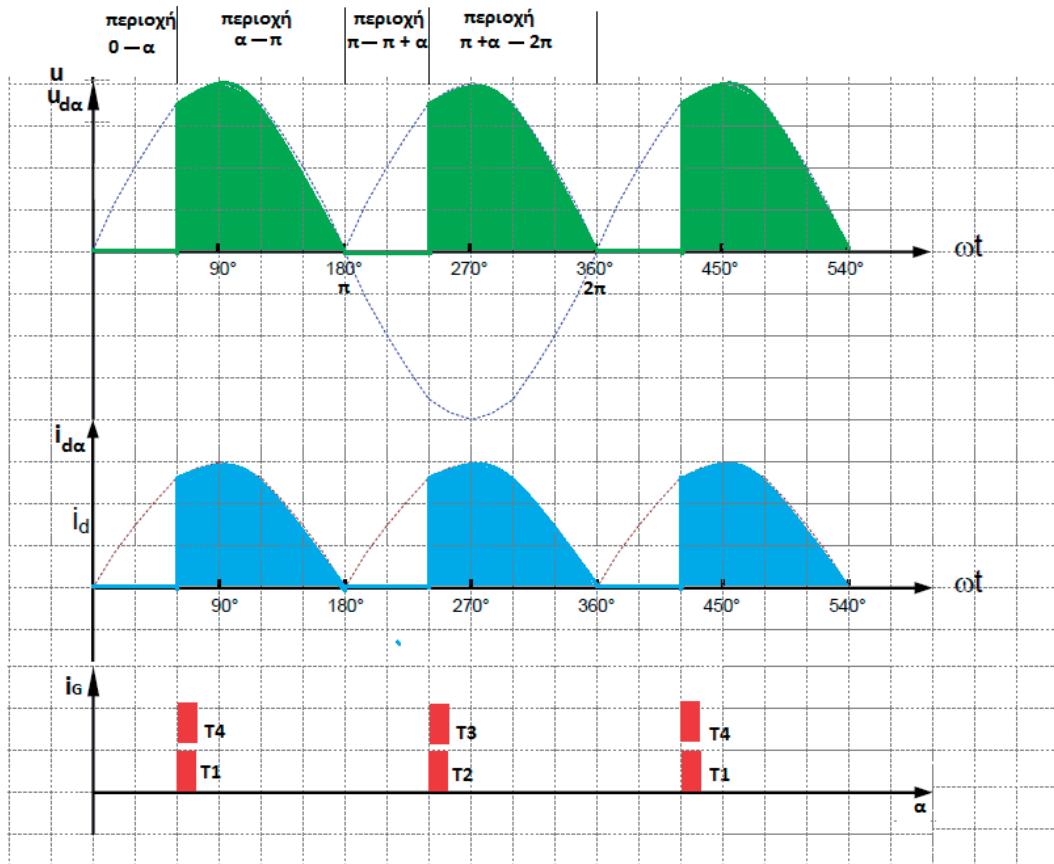
Σχ. 3.12: Γέφυρα B2. Δυναμικά και ροή ρεύματος στο χρονικό διάστημα $\pi + \alpha$ έως 2π

- Τα thyristor T_1 και T_4 είναι ανάστροφα πολωμένα και οδηγούνται στην αποκοπή.
- Και σ' αυτή την περιοχή, το ισοδύναμο κύκλωμα είναι ένα κύκλωμα ελεγχόμενης ημιανόρθωσης με ωμικό φορτίο (R), αλλά με δύο thyristor (T_2, T_3) σε σειρά (σχ. 3.13).

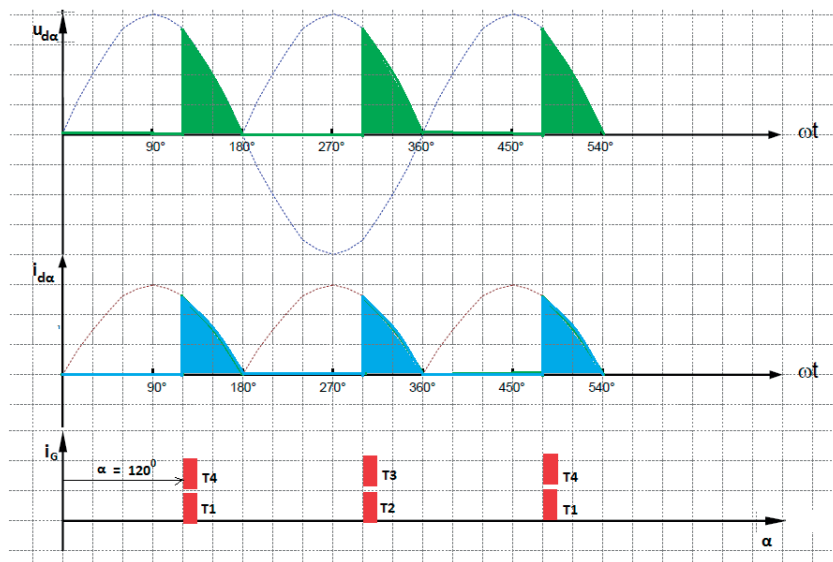


Σχ. 3.13: Γέφυρα B2C. Ισοδύναμο κύκλωμα για το διάστημα $\pi + \alpha$ έως 2π .

Μετά την παραπάνω ανάλυση, οι κυματομορφές των τάσεων και του ρεύματος του κυκλώματος για διάφορες γωνίες έναυσης (α) αποτυπώνονται στα παρακάτω σχήματα:



Σχ. 3.14: Κυματομορφές τάσεων και ρεύματος της γέφυρας B2C με ωμικό φορτίο για γωνία έναυσης $\alpha = 60^\circ$.



Σχ. 3.15: Κυματομορφές τάσεων και ρεύματος της γέφυρας B2C με ωμικό φορτίο για γωνία έναυσης $\alpha = 120^\circ$.

3.2.1 Μερικοί χρήσιμοι μαθηματικοί τύποι και υπολογισμοί

Παρατηρώντας τις κυματομορφές τάσεων και ρευμάτων των σχημάτων 3.14 και 3.15, διαπιστώνουμε ότι στα χρονικά διαστήματα 0 έως α και π έως $\pi + \alpha$ δεν υπάρχει τάση στο φορτίο. Ονομάζουμε αυτή τη λειτουργία *μη συνεχή ή ασυνεχή λειτουργία*.

Η *γωνία έναυσης* στην ασυνεχή λειτουργία μπορεί να μεταβληθεί από 0° έως 180° .

α) Υπολογισμός της μέσης τιμής της τάσης του φορτίου $u_{d\alpha}$ για ασυνεχή λειτουργία:

$$u_{d\alpha} = 0,45 \cdot u_{\varepsilon\nu} (1 + \sigma\upsilon\nu\alpha)$$

π.χ. :

$$\left. \begin{array}{l} u_{\varepsilon\nu}=230\text{V} \\ \alpha=60^\circ \end{array} \right\} \Rightarrow u_{d\alpha} = 0,45 \cdot 230 \cdot (1 + \sigma\upsilon\nu 60^\circ) = 155,25\text{V}$$

β) Υπολογισμός της μέσης τιμής του ρεύματος του φορτίου για ασυνεχή λειτουργία:

$$I_{d\alpha} = 0,45 \cdot I_{\varepsilon\nu} (1 + \cos\alpha)$$

π.χ.

$$\left. \begin{array}{l} u_{\varepsilon\nu}=230\text{V} \\ \alpha=60^\circ \\ R=15\Omega \end{array} \right\} \Rightarrow I_{\varepsilon\nu} = \frac{230}{15} = 15,34\text{A} \text{ και } I_{d\alpha} = 0,45 \cdot 15,34 \cdot (1 + \sigma\upsilon\nu 60^\circ) = 10,35\text{A}$$

Υπολογισμός της ενεργού τιμής της τάσης και του ρεύματος φορτίου:

$$u_{\varepsilon\nu\alpha} = u_{\varepsilon\nu} \sqrt{\frac{1}{\pi} (\pi - \alpha + \frac{1}{2} \eta\mu 2\alpha)}$$

π.χ. :

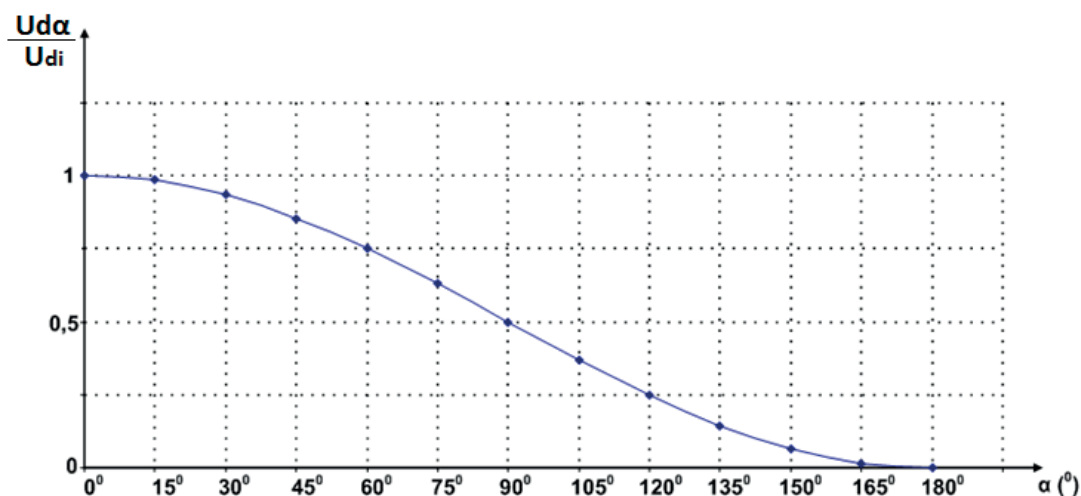
$$u_{\varepsilon\nu\alpha} = 230 \cdot \sqrt{\frac{1}{3,14} \left(3,14 - \frac{3,14}{3} + \frac{1}{2} \eta\mu 2 \cdot 60^\circ \right)} = 206,3\text{V}$$

$$I_{\varepsilon\nu\alpha} = 15,34 \cdot \sqrt{\frac{1}{3,14} \left(3,14 - \frac{3,14}{3} + \frac{1}{2} \eta\mu 2 \cdot 60^\circ \right)} = 13,76\text{A}$$

Εάν διαιρέσουμε τις σχέσεις των $u_{d\alpha}$ και u_{di} κατά μέλη, καθώς επίσης τις σχέσεις των $I_{d\alpha}$ και I_{di} , λαμβάνουμε τη σχέση:

$$\frac{u_{d\alpha}}{u_{di}} = \frac{I_{d\alpha}}{I_{di}} = \frac{1 + \sigma\upsilon\nu\alpha}{2}$$

Αναπαριστώντας γραφικά την τελευταία σχέση, λαμβάνουμε τη χαρακτηριστική ρύθμισης της γέφυρας B2 για ωμικό φορτίο.

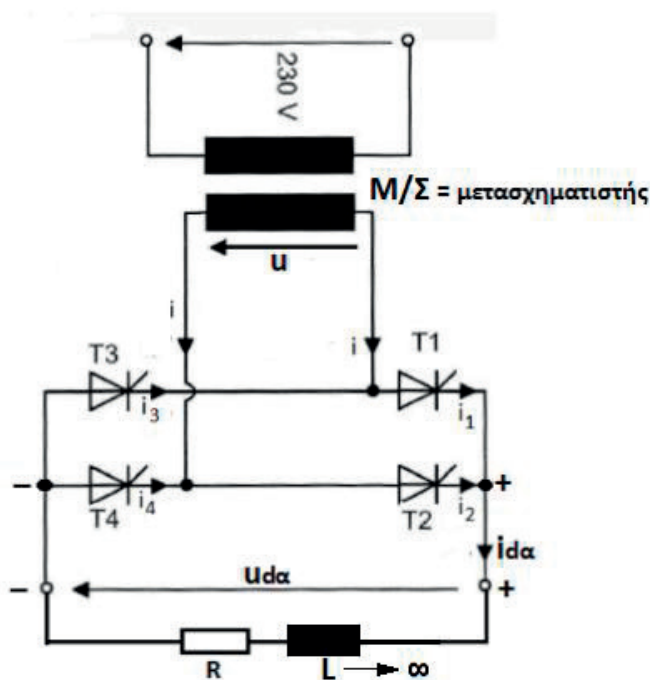


Σχ. 3.16: Χαρακτηριστική ρύθμισης της γέφυρας B2C για ωμικό φορτίο

3.3 Πλήρως ελεγχόμενη μονοφασική γέφυρα με RL-φορτίο ($\omega L \gg R$)

(Γέφυρα B2C με ωμικό-επαγωγικό φορτίο $R, L \rightarrow \infty$)

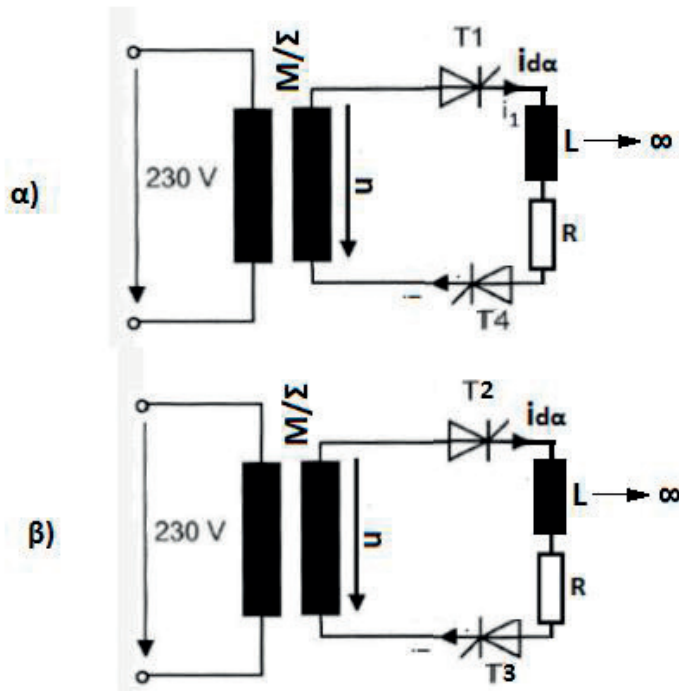
Το κύκλωμα της γέφυρας B2C με RL-φορτίο απεικονίζεται στο παρακάτω σχήμα (σχ. 3.17):



Σχήμα 3.17: Κύκλωμα γέφυρας BC2 με ωμικό-επαγωγικό φορτίο και $L \rightarrow \infty$

Λειτουργία

Η λειτουργία της γέφυρας έχει περιγραφεί επαρκώς στις προηγούμενες ενότητες. Όταν τα θυρίστορ άγουν, τότε έχουμε κάθε φορά ένα ισοδύναμο κύκλωμα, όπου τα θυρίστορ είναι σε σειρά με το φορτίο. Δηλαδή:



Σχ. 3.17.1 Ισοδύναμα κυκλώματα για την αγωγή των θυρίστορ T_1 , T_4 και T_2 , T_3

Η συμπεριφορά των παραπάνω κυκλωμάτων είναι ήδη γνωστή. Η διαφορά με το προηγούμενο κύκλωμα είναι η μεγάλη αντεπαγωγή (L) του πηνίου, λόγω της οποίας επιτυγχάνεται η πλήρης εξομάλυνση του ρεύματος φορτίου. Έτσι, το ρεύμα του φορτίου είναι συνεχές και δεν εμφανίζει νεκρές ζώνες.

Γνωρίσαμε, επίσης, ότι λόγω του πηνίου η τάση στα άκρα του φορτίου βυθίζεται και προς τα αρνητικά. Το αρνητικό τμήμα της τάσης διαρκεί, όσο χρονικό διάστημα το ρεύμα είναι θετικό. Επειδή, όμως, το ρεύμα είναι πάντα θετικό (εξαιτίας της εξομάλυνσης), έπεται ότι η αρνητική ημιπερίοδος της τάσης, μόνο κάτω από ορισμένες προϋποθέσεις, μπορεί να εμφανιστεί στην έξοδο.

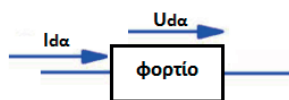
Παρακάτω απεικονίζονται οι κυματομορφές για διάφορες γωνίες έναυσης (σχ. 3.18, 3.19, 3.20).

Για την κατανόηση των κυματομορφών του κυκλώματος, διακρίνουμε δύο περιοχές:

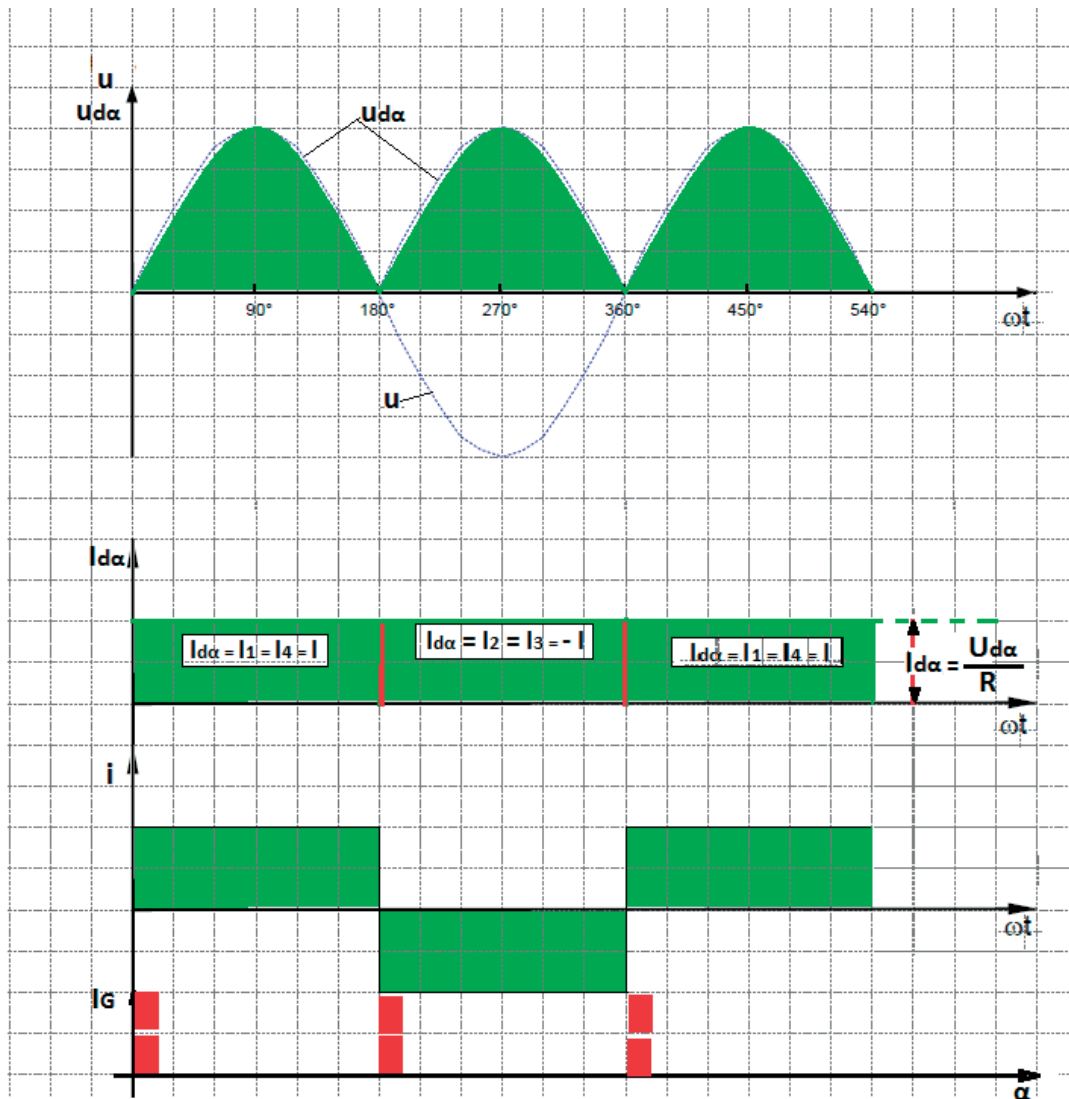
α) Περιοχή $0 \leq \alpha \leq \frac{\pi}{2}$ (λειτουργία ανορθωτή)

Δίνοντας παλμούς έναυσης με $\alpha = 0^\circ, 60^\circ$ και 90° , λαμβάνουμε τις κυματομορφές των σχημάτων (σχ. 3.18, 3.19, 3.20). Από τις κυματομορφές αυτές διαπιστώνουμε τα εξής:

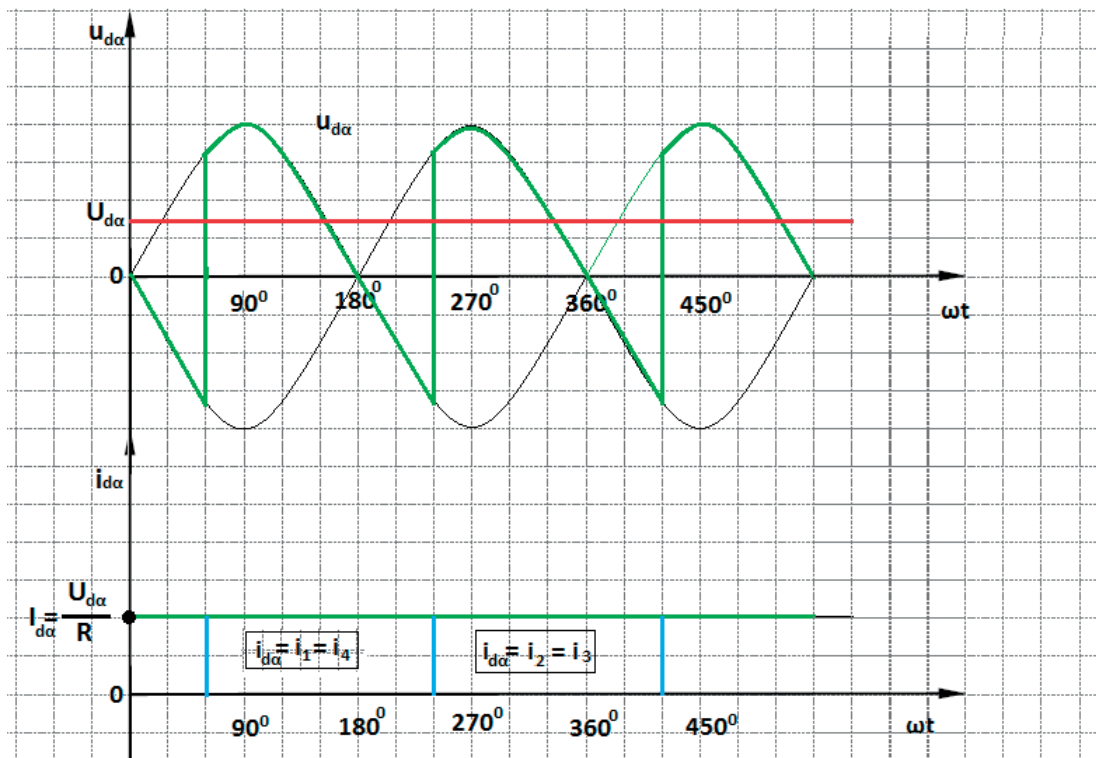
- Η τάση $u_{d\alpha}$ και το ρεύμα $I_{d\alpha}$ δεν έχουν νεκρές ζώνες. Κατά συνέπεια, έχουμε *συνεχή λειτουργία*.
- Η μέση τιμή της τάσης φορτίου ($u_{d\alpha}$) μειώνεται, καθώς αυξάνεται η *γωνία έναυσης*. Τα εμβαδά των θετικών τμημάτων της τάσης $u_{d\alpha}$ είναι μεγαλύτερα από τα αρνητικά. Επομένως, η μέση τιμή της τάσης $u_{d\alpha} \geq 0$. Τελικά, όταν η *γωνία έναυσης* είναι $\alpha = 90^\circ$, τότε η μέση τιμή της τάσης είναι μηδέν ($u_{d\alpha} = 0$).
- Το ρεύμα φορτίου $I_{d\alpha}$ είναι σταθερό και αποτελείται από ορθογώνια παραλληλόγραμμα βάσης (διάρκειας) π και ύψους $\frac{u_{d\alpha}}{R} > 0$.
- Το διάνυσμα της τάσης $u_{d\alpha}$ και του ρεύματος $I_{d\alpha}$ έχουν την ίδια φορά, άρα έχουμε απορρόφηση ενέργειας από το δίκτυο.



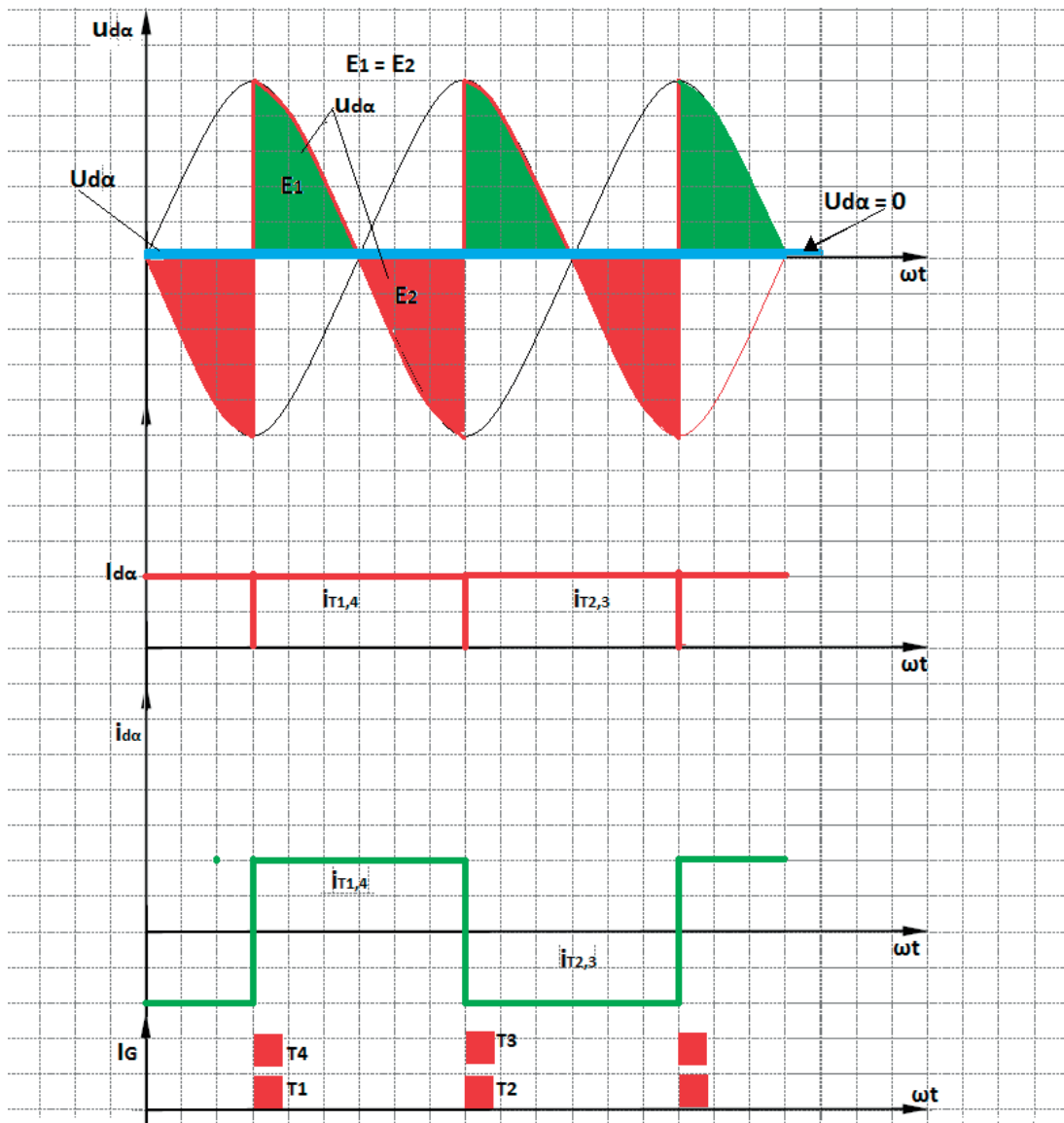
- Μέσα σ' αυτό το χρονικό διάστημα, το πηνίο οικοδομεί και, στη συνέχεια, αποδομεί το μαγνητικό του πεδίο.
- Αν μεγαλώσουμε τη γωνία έναυσης πέραν των 90° ($\alpha > 90^\circ$), τότε η μέση τιμή της τάσης ($u_{d\alpha}$) είναι μηδέν ($u_{d\alpha} = 0$).



Σχ. 3.18: Γέφυρα B2C με RL ($L \rightarrow \infty$) φορτίο. Κυματομορφές τάσεων και ρευμάτων για γωνία έναυσης $\alpha = 0^\circ$. Τις ίδιες κυματομορφές θα λαμβάναμε, αν η γέφυρα, αντί για θυρίστορ, είχε διόδους.



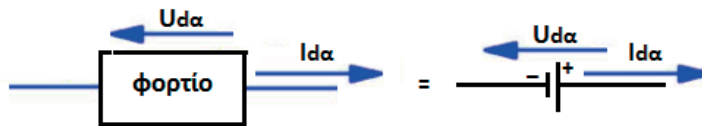
Σχ. 3.19: Γέφυρα B2C με RL ($L \rightarrow \infty$) φορτίο. Κυματομορφές τάσεων και ρευμάτων για γωνία έναυσης $\alpha = 60^\circ$.



Σχ. 3.20: Γέφυρα B2C με RL ($L \rightarrow \infty$) φορτίο. Κυματομορφές τάσεων και ρευμάτων για γωνία έναυσης $\alpha = 90^\circ$.

β) Περιοχή $\frac{\pi}{2} < \alpha < \pi$ (λειτουργία αντιστροφής)

Στην περιοχή αυτή, η μέση τιμή της τάσης είναι αρνητική. Το ρεύμα, αντίθετα, παραμένει θετικό και συνεχές. Η διάταξη των διανυσμάτων του ρεύματος ($I_{d\alpha}$) και της τάσης ($u_{d\alpha}$) του φορτίου έχουν ως εξής:



Είναι προφανές ότι η παραπάνω περιοχή λειτουργίας έχει νόημα (εφαρμογή), όταν το φορτίο είναι μια πηγή συνεχούς ρεύματος (π.χ. DC-γεννήτρια), η οποία, μέσω του αντιστροφέα, τροφοδοτεί με ενέργεια το εναλλασσόμενο δίκτυο. Ένα *παθητικό φορτίο* στη συγκεκριμένη περιοχή λειτουργίας δεν έχει νόημα, διότι δεν παράγει ενέργεια.

- Η τάση $u_{d\alpha}$ και το ρεύμα $I_{d\alpha}$ δεν εμφανίζουν νεκρές ζώνες. Συνεπώς η λειτουργία και σ' αυτό το χρονικό διάστημα είναι, επίσης, *συνεχής λειτουργία*.
- Η μέση τιμή της τάσης έχει αρνητικό πρόσημο, ενώ το ρεύμα παραμένει θετικό και σταθερό.
- Στην ανάστροφη λειτουργία, ο κινητήρας μετατρέπεται σε γεννήτρια. Σ' αυτή την περίπτωση, δεν αρκεί να αυξήσουμε τη *γωνία έναυσης* πέραν των 90° , αλλά πρέπει με τη βοήθεια εξωτερικής μηχανής να αυξήσουμε τις στροφές του ρότορα πάνω από τις *ονομαστικές* του. Η περίπτωση αυτή βρίσκει εφαρμογή στην πέδηση κινητήρων.

3.3.1 Χρήσιμοι μαθηματικοί τύποι και υπολογισμοί

Υπολογισμός της μέσης τιμής της τάσης και του ρεύματος στη συνεχή λειτουργία.

$$u_{d\alpha} = 0,9 \cdot u_{ev} \cdot \sigma_{\text{συνα}} \quad (\text{ισχύει για συνεχή λειτουργία})$$

$$I_{d\alpha} = \frac{u_{d\alpha}}{R}$$

$$u_{d\alpha} = u_R$$

$$I_{T1} = I_{T2} = I_{T3} = I_{T4} = \frac{I_{d\alpha}}{2}$$

$$u_{Tmax} = \sqrt{2} u_{εν} \quad \text{η μέγιστη τάση καταπόνησης των θυρίστρον}$$

π.χ.

$$u = 311V \cdot \eta\mu\omega t$$

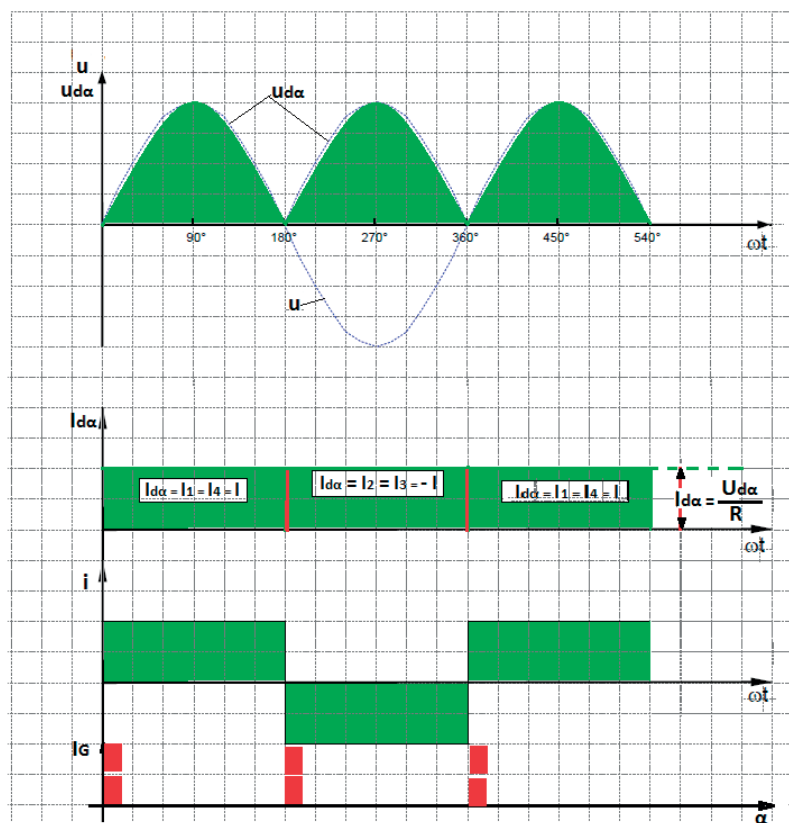
$$f = 50Hz$$

$$R = 12\Omega$$

$$L \gg$$

Να υπολογιστούν οι μέσες αριθμητικές τιμές των μεγεθών τάσης και ρεύματος φορτίων των σχημάτων:

1.



Σχήμα 3.18: Κυματομορφές τάσεων και ρευμάτων της γέφυρας B2 με RL-φορτίο, για $\alpha = 0^\circ$.

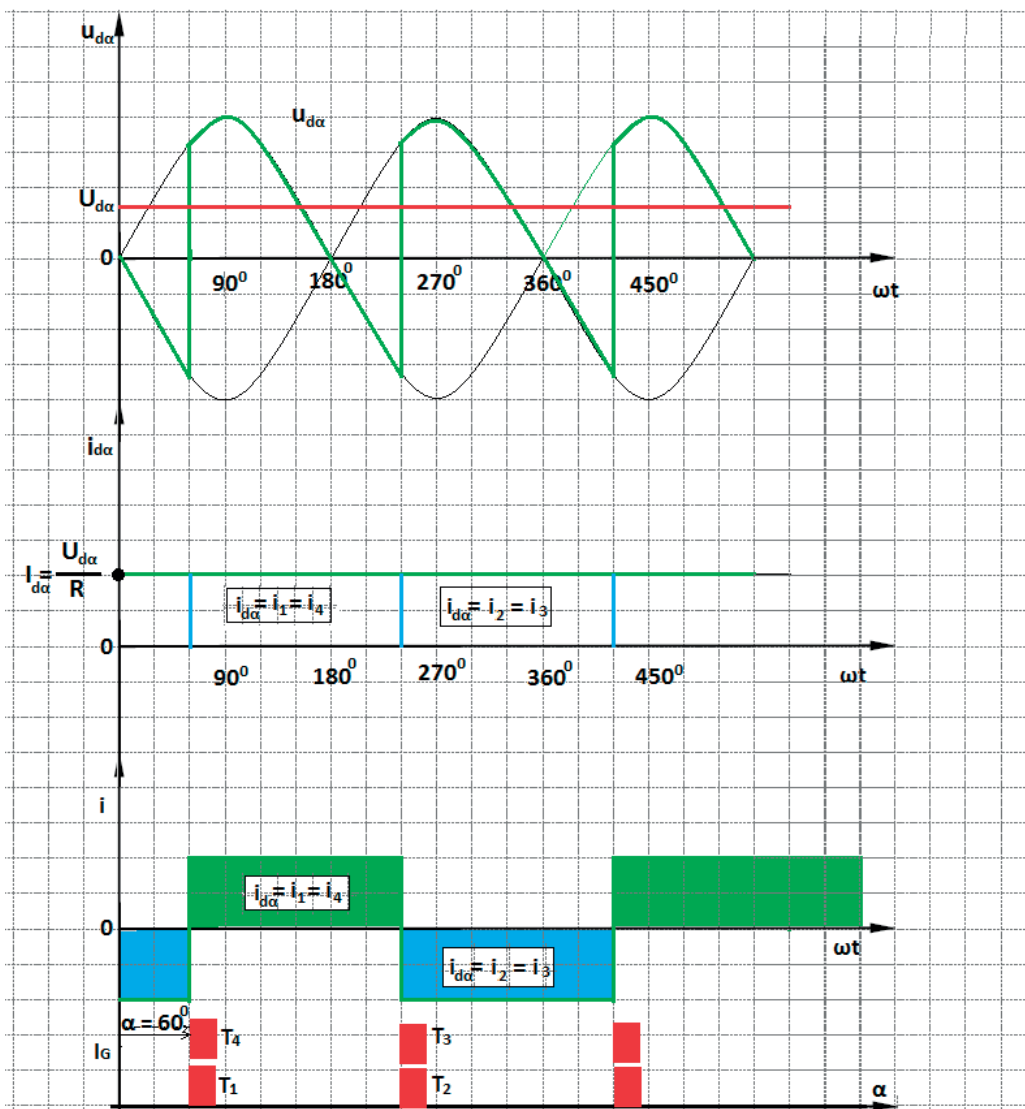
$$u_{d\alpha} = 0,9 \cdot 230 \cdot \cos 0^\circ = 207V \text{ μέγιστη τιμή}$$

$$I_{d\alpha} = \frac{u_{d\alpha}}{R} = \frac{207}{12} = 17,25A$$

$$I_{T1} = I_{T2} = I_{T3} = I_{T4} = \frac{I_{d\alpha}}{2} = \frac{17,25}{2} = 8,625A$$

$$u_{Tmax} = \sqrt{2} u_{EV} = \sqrt{2} \cdot 230 = 311V$$

2.

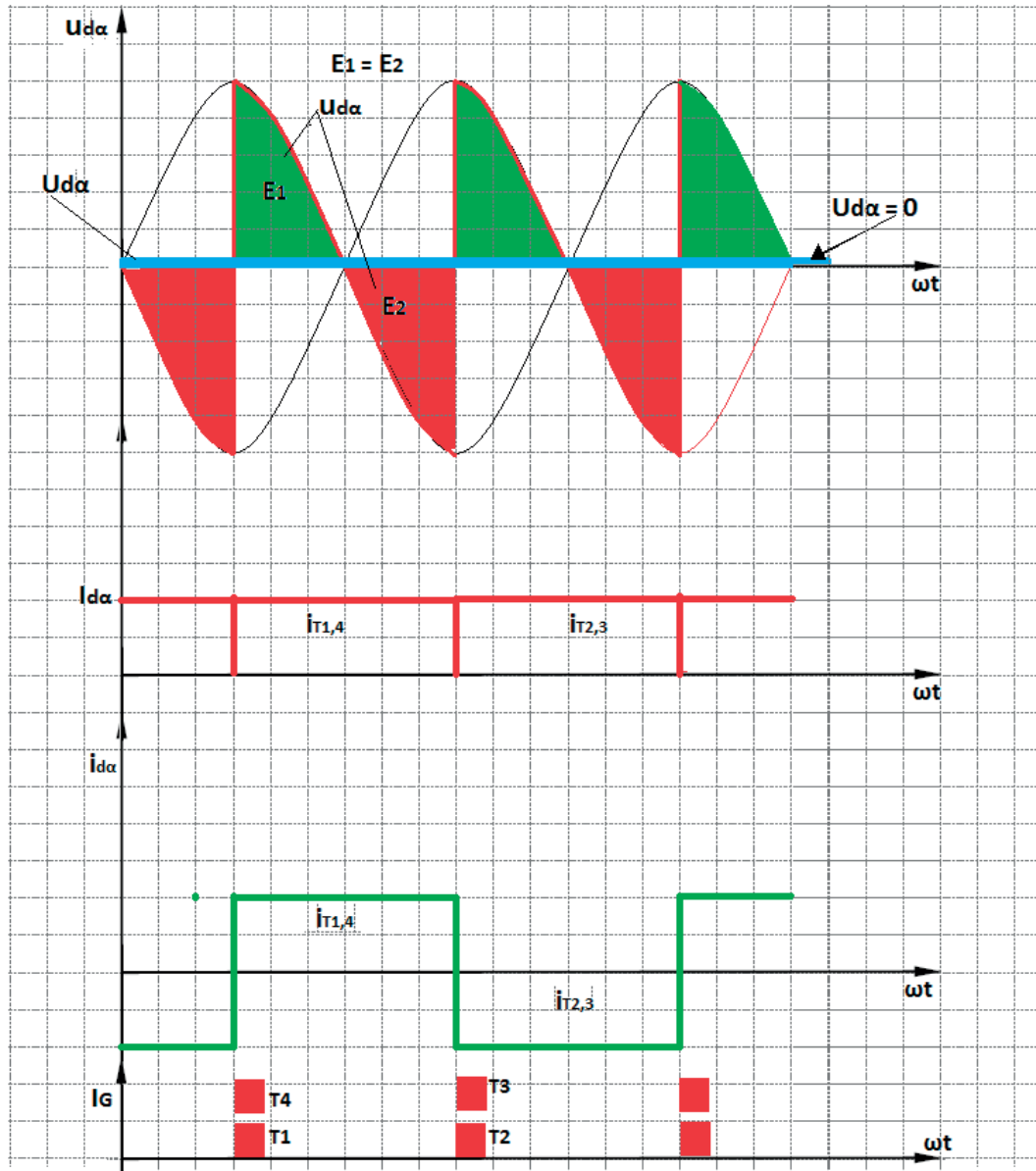


Σχήμα 3.19: Κυματομορφές τάσεων και ρευμάτων της γέφυρας B2 με RL-φορτίο, για $\alpha = 60^\circ$.

$$u_{d\alpha} = 0,9 \cdot u_{ev} \cdot \cos\alpha = 0,9 \cdot 230 \cdot \cos 60^\circ = 103,5V$$

$$I_{d\alpha} = \frac{u_{d\alpha}}{R} = \frac{103,5}{12} = 8,625A$$

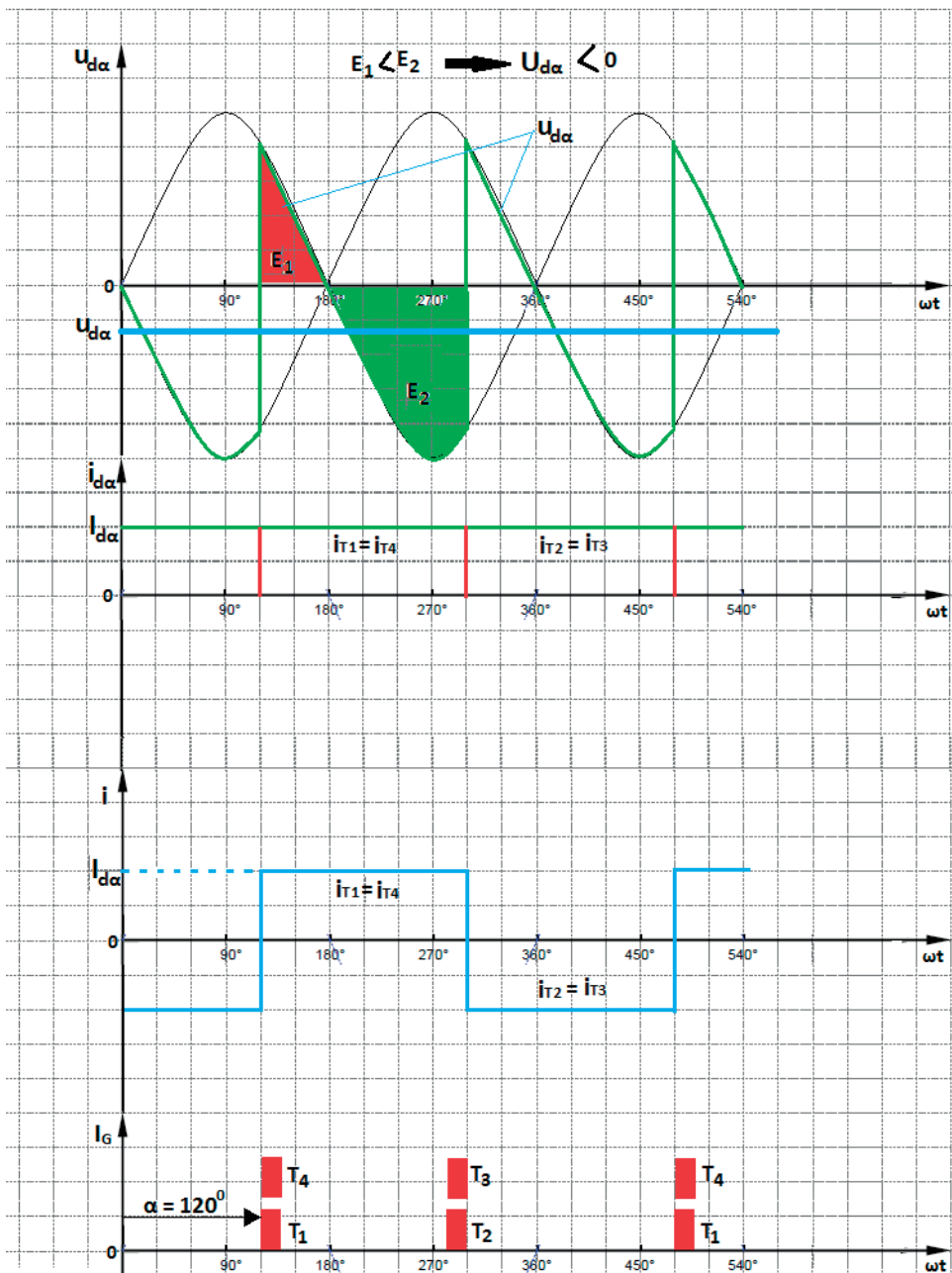
3.



Σχήμα 3.20: Κυματομορφές τάσεων και ρευμάτων της γέφυρας B2 με RL-φορτίο, για $\alpha = 90^\circ$.

$$u_{d\alpha} = 0,9 \cdot u_{ev} \cdot \cos\alpha = 0,9 \cdot 230 \cdot \cos 90^\circ = 0$$

4.

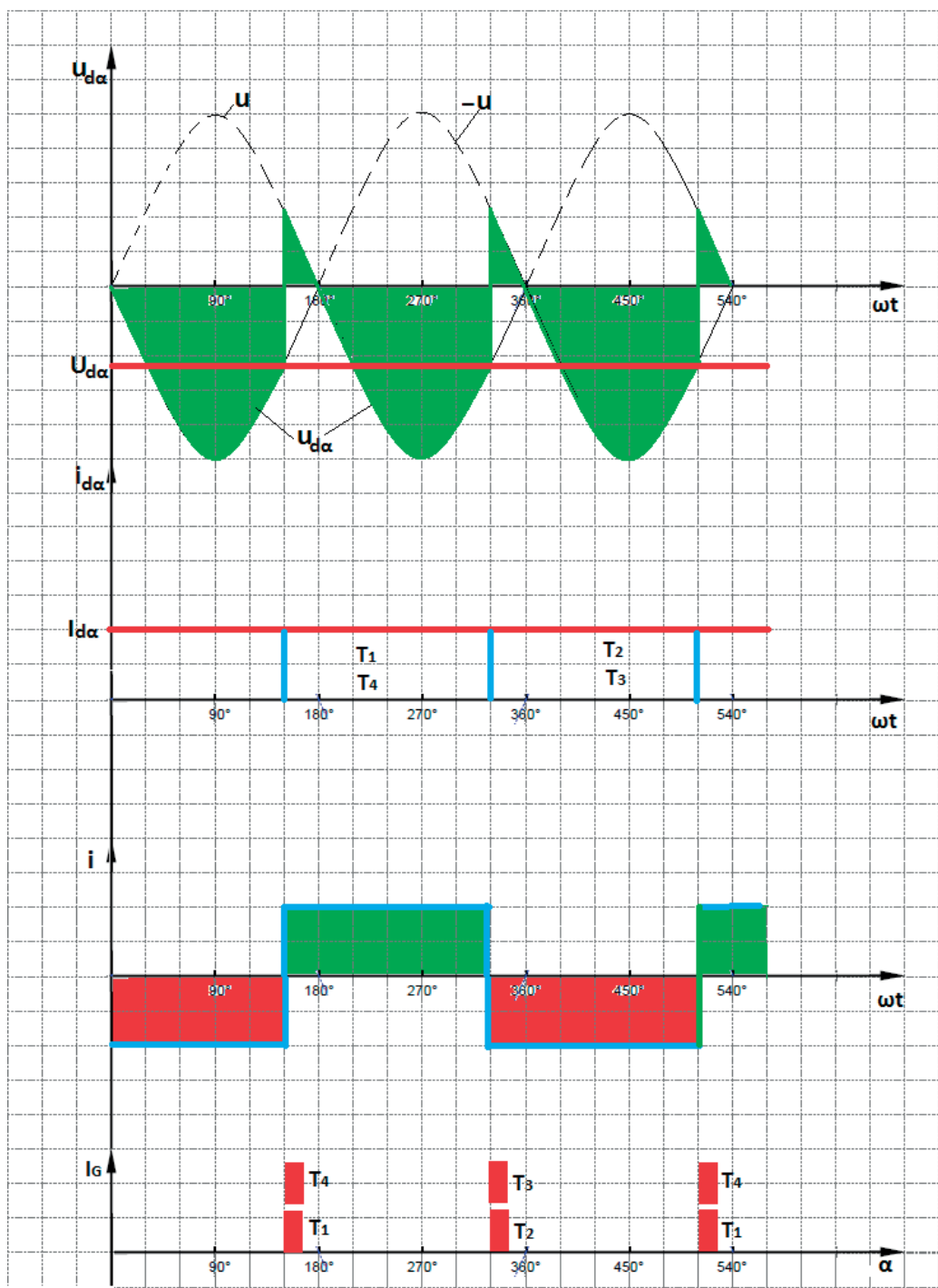


Σχ. 3.21: Κυματομορφές τάσεων και ρευμάτων της γέφυρας B2 με RL-φορτίο, για $\alpha = 120^\circ$.

$$U_{d\alpha} = 0,9 \cdot U_{EV} \cdot \cos\alpha = 0,9 \cdot 230 \cdot \cos 120^\circ = 103,5V$$

$$I_{d\alpha} = \frac{103,5}{12} = 8,625A$$

5.

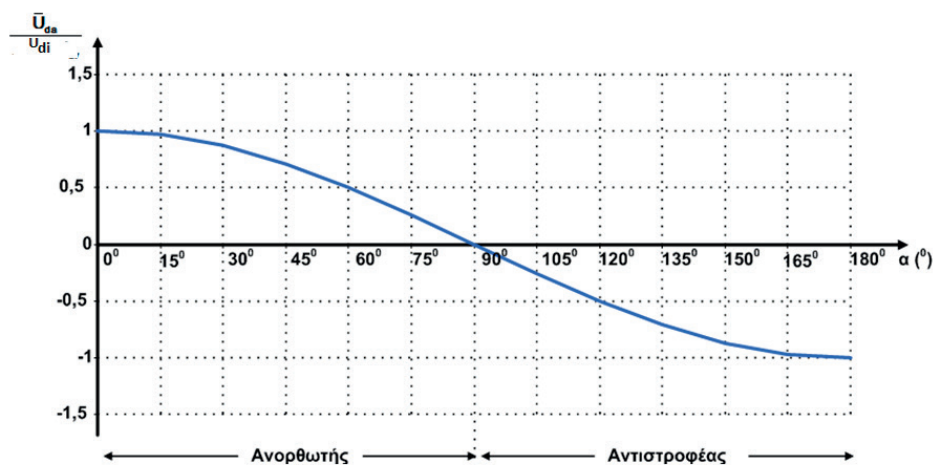


Σχ. 3.22: Κυματομορφές τάσεων και ρευμάτων της γέφυρας B2 με RL-φορτίο, για $\alpha = 150^\circ$.

$$u_{d\alpha} = 0,9 \cdot u_{EV} \cdot \cos\alpha = 0,9 \cdot 230 \cdot \cos 150^\circ = -179,2V$$

$$I_{d\alpha} = \frac{179,2}{12} = 14,93A$$

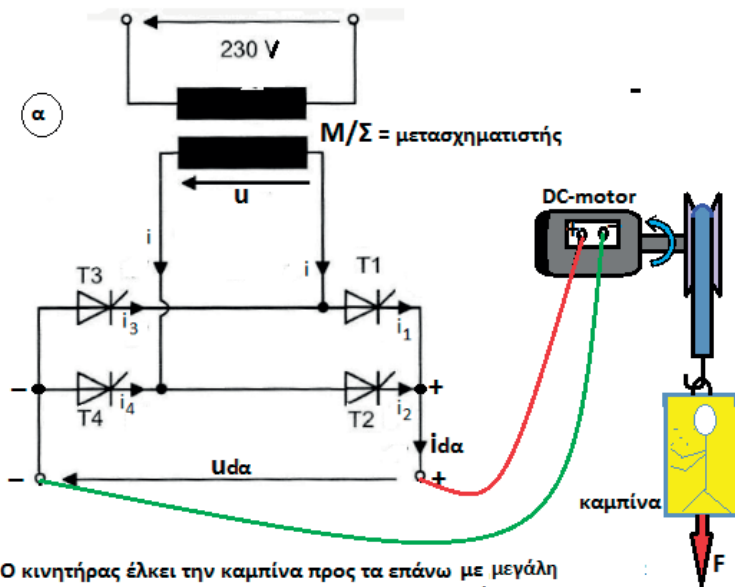
Εάν αναπαραστήσουμε γραφικά τη σχέση $\frac{u_{d\alpha}}{u_{di}} = \cos\alpha$ λαμβάνουμε τη χαρακτηριστική ρύθμισης (σχ. 3.22.1).



Σχ. 3.22.1: Χαρακτηριστική ρύθμισης της γέφυρας B2 με RL-φορτίο.

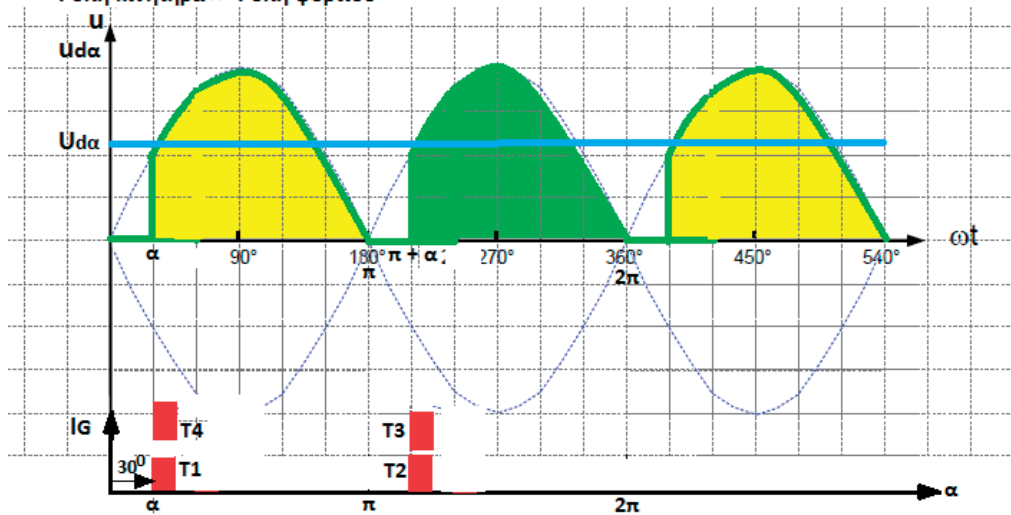
3.3.2 Μετάβαση της ελεγχόμενης μονοφασικής γέφυρας B2 από τη λειτουργία της ανόρθωσης στη λειτουργία της αντιστροφής.

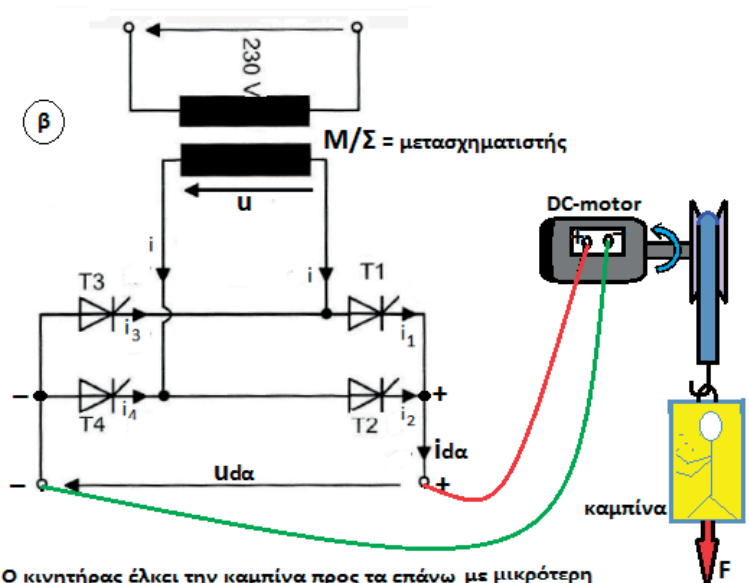
Στα παρακάτω κυκλώματα φαίνεται η μετάβαση ενός κυκλώματος ανόρθωσης στη λειτουργία αντιστροφής. Ως αντιπροσωπευτικό παράδειγμα, για την κατανόηση της λειτουργίας αυτής, χρησιμοποιήθηκε η λειτουργία ενός ανελκυστήρα. Συγκεκριμένα, παρουσιάζονται τέσσερις λειτουργικές καταστάσεις με γωνίες έναυσης $\alpha = 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ, 120^\circ$.



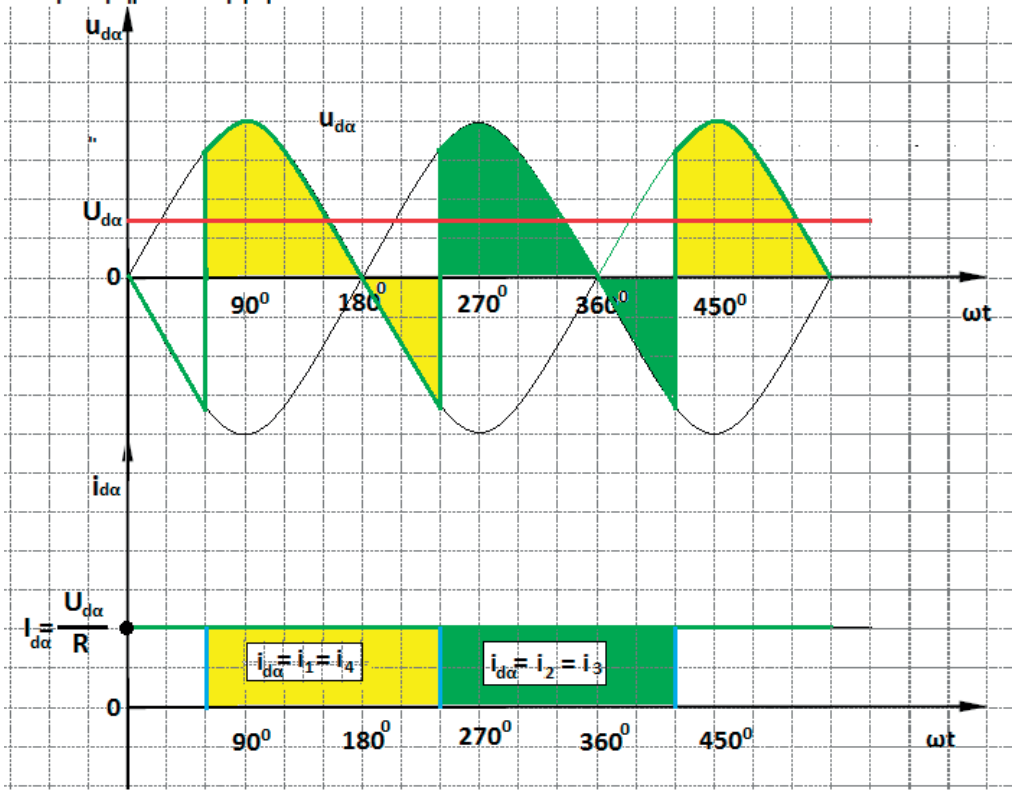
Ο κινητήρας έλκει την καμπίνα προς τα επάνω με μεγάλη ταχύτητα. Λειτουργία DC-κινητήρα.

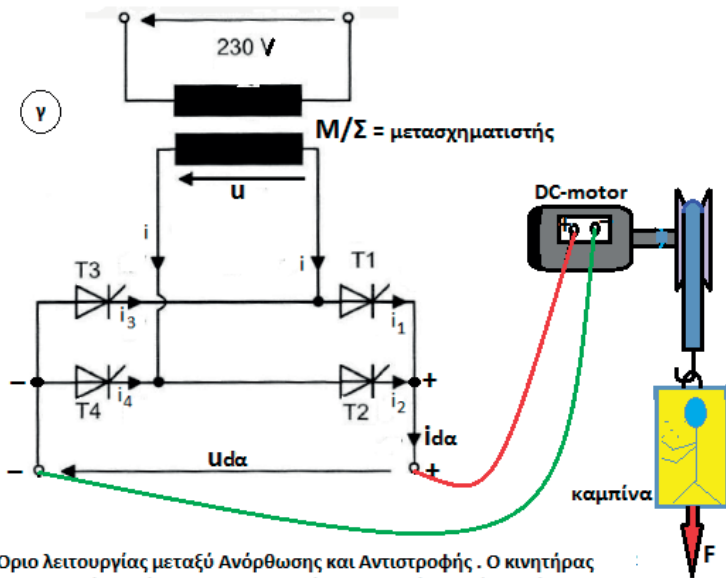
Ροπή κινητήρα \gg Ροπή φορτίου



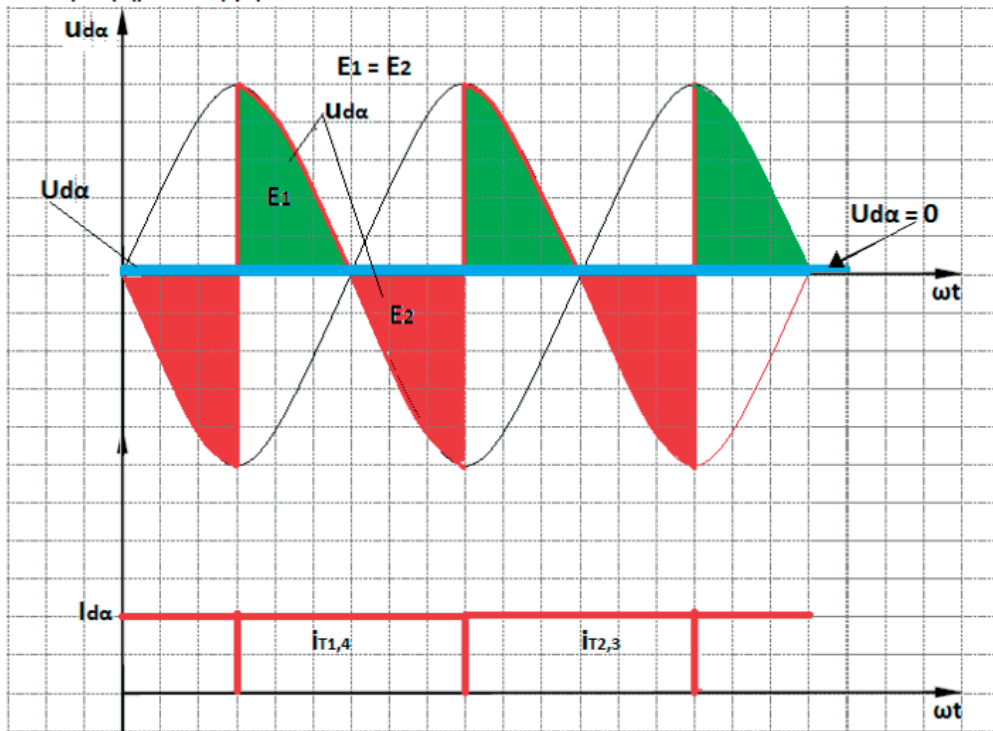


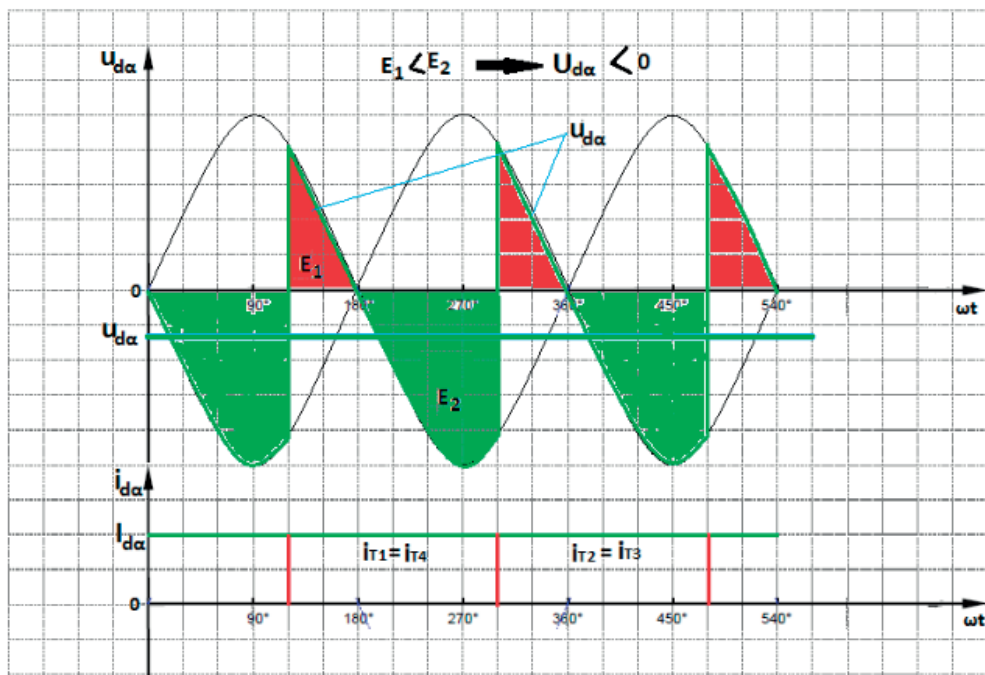
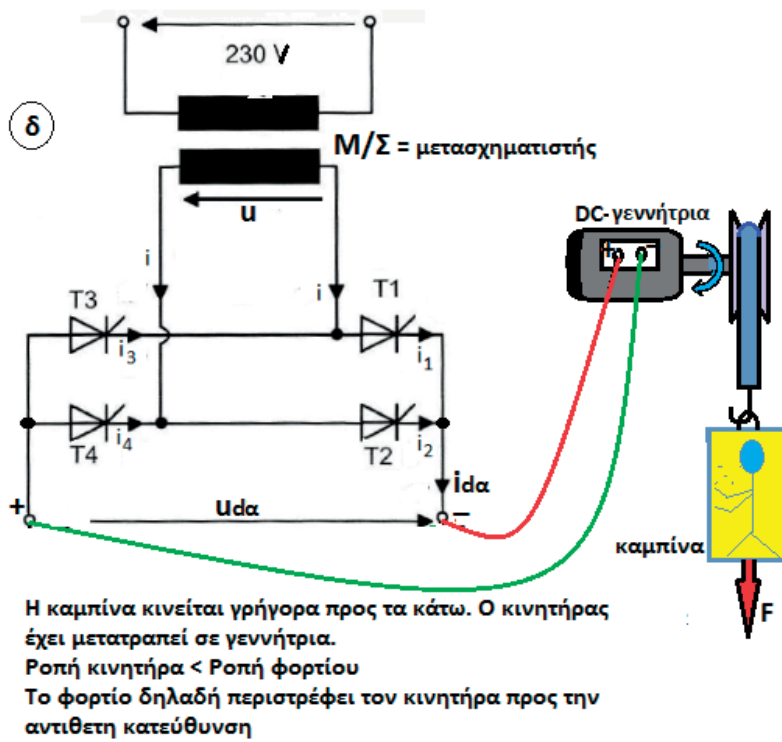
Ο κινητήρας έλκει την καμπίνα προς τα επάνω με μικρότερη ταχύτητα σε σχέση με τη περίπτωση (α). Λειτουργία DC-κινητήρα.
 Ροπή κινητήρα > Ροπή φορτίου





Όριο λειτουργίας μεταξύ Ανόρθωσης και Αντιστροφής . Ο κινητήρας και η καμπίνα βρίσκονται σε ακινησία, διότι η μέση τιμή της τάσης είναι μηδέν ($\alpha=90^\circ$).
 Ροπή κινητήρα = Ροπή φορτίου





Σχ. 3.23 α, β, γ, δ: Λειτουργικές καταστάσεις ηλεκτρονικά ελεγχόμενου ανελκυστήρα.

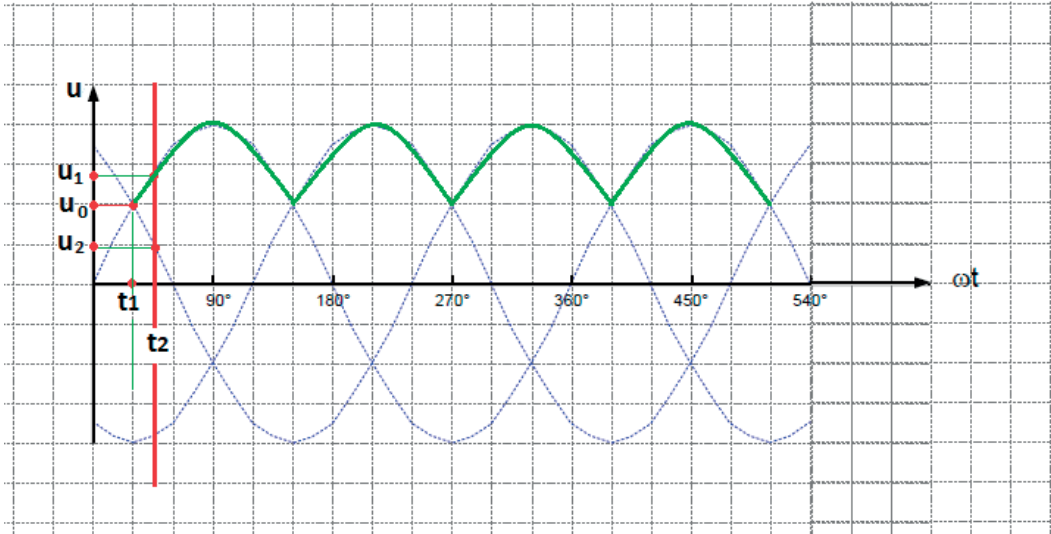
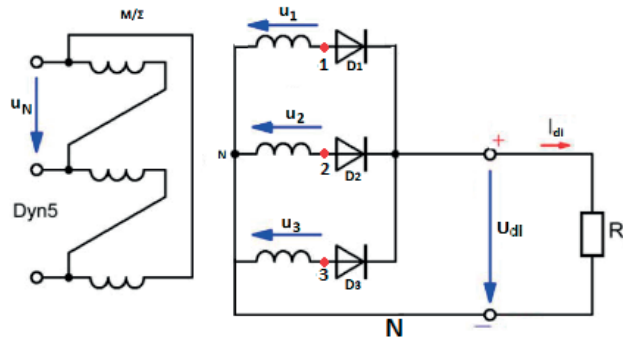
3.4 Τριφασικός ανορθωτής τριών παλμών. Τριφασικός ανορθωτής M3

Οι ανορθωτές, των οποίων η ισχύς είναι μεγαλύτερη από 1,5KW, συνδέονται συνήθως στο τριφασικό δίκτυο. Ένα απλό κύκλωμα ανορθωτή είναι ο τριφασικός ανορθωτής-M3 (“M”, γιατί χρησιμοποιεί τον ουδέτερο και “3”, γιατί εντός μιας περιόδου η τάση και το ρεύμα αποτελούνται από τρία παλμικά τμήματα). Ο ανορθωτής M3 δεν έχει, πάντως, μεγάλη πρακτική εφαρμογή. Η λειτουργία του παρουσιάζεται όμως εδώ, αλλά και σε κάθε βιβλιογραφία, διότι είναι απαραίτητη για την κατανόηση της τριφασικής γέφυρας B6.

3.4.1: Μη ελεγχόμενος τριφασικός ανορθωτής τριών παλμών (M3U)

Ο ανορθωτής-M3 μετατρέπει τις τριφασικές τάσεις u_1 , u_2 και u_3 σε μια παλμικά μεταβαλλόμενη συνεχή τάση (σχ. 3.24β).

Παρακάτω φαίνεται το κύκλωμα του μη ελεγχόμενου τριφασικού ανορθωτή (σχ. 3.24α), ο οποίος αποτελείται από τρεις διόδους των οποίων οι άνοδοι συνδέονται με τις τρεις φάσεις του δικτύου. Οι κάθοδοι βραχυκυκλώνονται μεταξύ τους και, στη συνέχεια, συνδέονται με τον ουδέτερο (N) του μετασχηματιστή.



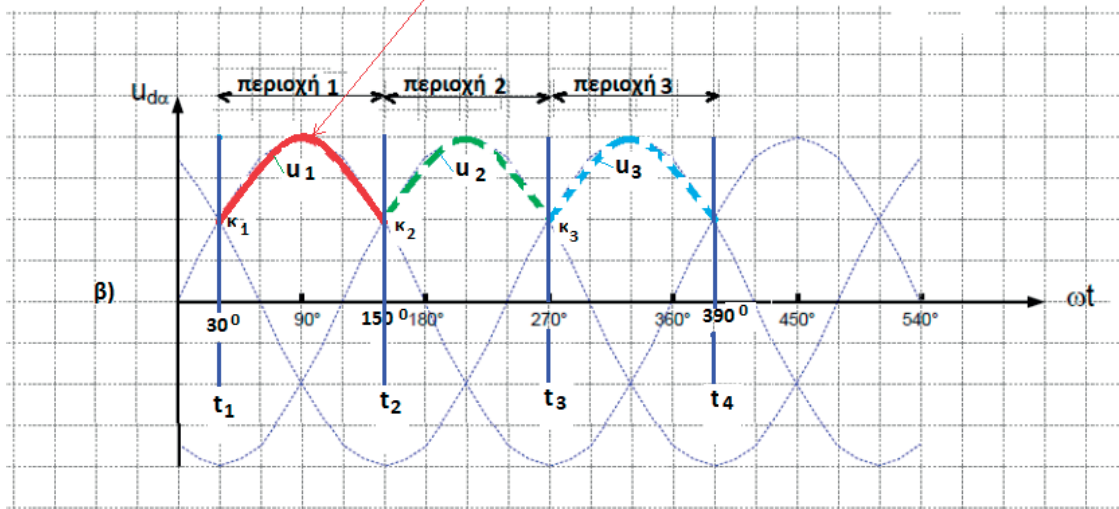
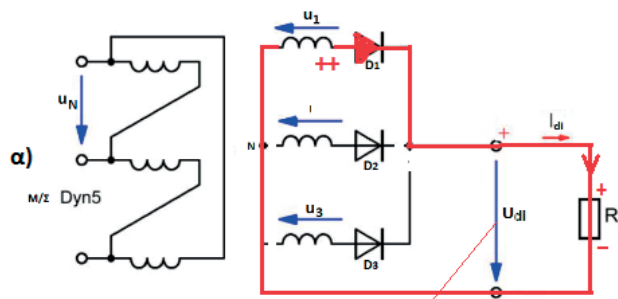
Σχ. 3.24: Μη ελεγχόμενος τριφασικός ανορθωτής: α) κύκλωμα β) τριφασικές κυματομορφές τάσης.

Λειτουργία

Για την κατανόηση της λειτουργίας του κυκλώματος, χωρίζουμε τις τριφασικές κυματομορφές των τάσεων u_1 , u_2 και u_3 σε τρεις περιοχές (σχ. 3.25α).

α) Περιοχή (1): $30^\circ \leq \omega t < 150^\circ$ ή $0^\circ \leq \alpha < 120^\circ$

Στην περιοχή αυτή, η τάση u_1 είναι θετική και θετικότερη από τις u_2 και u_3 (σχ. 3.25).



Σχ. 3.25: Τάση φορτίου u_{dI} και ροή ρεύματος στην περιοχή (1).

Η διάδος D_1 πολώνεται ορθά από το χρονικό σημείο t_1 και παραμένει ορθά πολωμένη μέχρι το χρονικό σημείο t_2 . Σ' αυτή την περιοχή, η διάδος (D_1) άγει και πολώνει ανάστροφα τις διόδους D_2 και D_3 και δεν άγουν.

Παρατηρήσεις

- Η φάση u_1 αναλαμβάνει τη ροή του ρεύματος της προηγούμενης φάσης u_3 από το σημείο τομής (κ_1) των δύο φάσεων. Η μετάβαση του ρεύματος, από την προηγούμενη φάση u_3 στην επόμενη φάση u_1 , θεωρούμε ότι γίνεται ακαριαία.
- Το σημείο τομής των δύο φάσεων ονομάζεται *φυσικό σημείο έναυσης*.
- Η διάρκεια λειτουργίας της διόδου D_1 ισούται με τη διάρκεια της περιοχής (1), δηλαδή 120° .
- Στο φορτίο εφαρμόζεται η φασική τάση u_1 της περιοχής (1).

– Η τάση μετάβασης, η τάση δηλαδή που πολώνει ανάστροφα την προηγούμενη δίοδο, είναι η πολική τάση.

– Στην περιοχή (1) ισχύουν οι σχέσεις:

Από το κύκλωμα του σχήματος 3.24, με εφαρμογή του νόμου του Kirchhoff λαμβάνουμε:

$$u_{D2} + u_1 - u_2 = 0 \quad u_{D2} = u_2 - u_1 \quad \text{τάση μετάβασης}$$

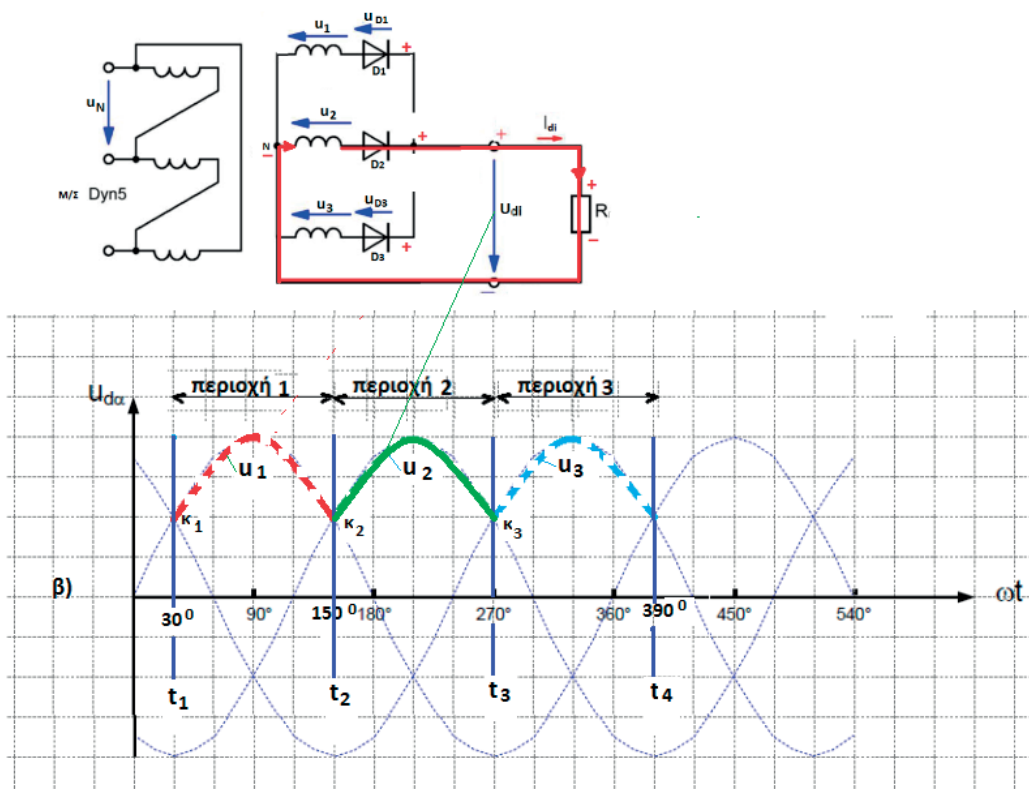
$$u_{D3} + u_1 - u_3 = 0 \quad u_{D3} = u_3 - u_1 \quad \text{τάση μετάβασης}$$

$$i_1 = I_{di} = \frac{u_1}{R} = \frac{u_m}{R} \cdot \eta \mu \omega t$$

β) Περιοχή (2): $150^\circ \leq \omega t < 270^\circ$

Στην περιοχή (2), η τάση u_2 είναι θετικότερη των τάσεων u_1 και u_3 (σχ. 3.25).

Τα δυναμικά του κυκλώματος και η ροή του ρεύματος στο χρονικό διάστημα της περιοχής (2) φαίνονται στα σχήματα 3.25α και 3.26.



Σχ. 3.26: Ισοδύναμο κύκλωμα, δυναμικά και ροή ρεύματος της περιοχής (2).

Η διάδος D_2 είναι *ορθά πολωμένη* και άγει. Θεωρούμε τη διάοδο ιδανική, οπότε το δυναμικό της ανόδου μεταφέρεται στην κάθοδο, με αποτέλεσμα να *πολωθούν ανάστροφα* οι διάοδοι D_1 και D_3 και να οδηγηθούν στην *αποκοπή* (ανοικτός διακόπτης). Το ρεύμα ρέει από τη φάση u_2 διαμέσου της διάόδου D_2 στο φορτίο (R) και από εκεί στον ουδέτερο (N).

Παρατηρήσεις

- Η φάση u_2 αναλαμβάνει τη ροή του ρεύματος της προηγούμενης φάσης u_1 από το σημείο K_2 , το οποίο είναι το *φυσικό σημείο έναυσης* της περιοχής (2).
- Η διάρκεια λειτουργίας της διάόδου D_2 ισούται με 120° .
- Στο φορτίο εφαρμόζεται η φασική τάση u_2 της περιοχής (2).
- Το ρεύμα I_{di} , αν και άλλαξε η τάση τροφοδοσίας, συνεχίζει να διαρρέει το φορτίο R από πάνω προς τα κάτω.
- Στην περιοχή (2) ισχύουν οι σχέσεις:

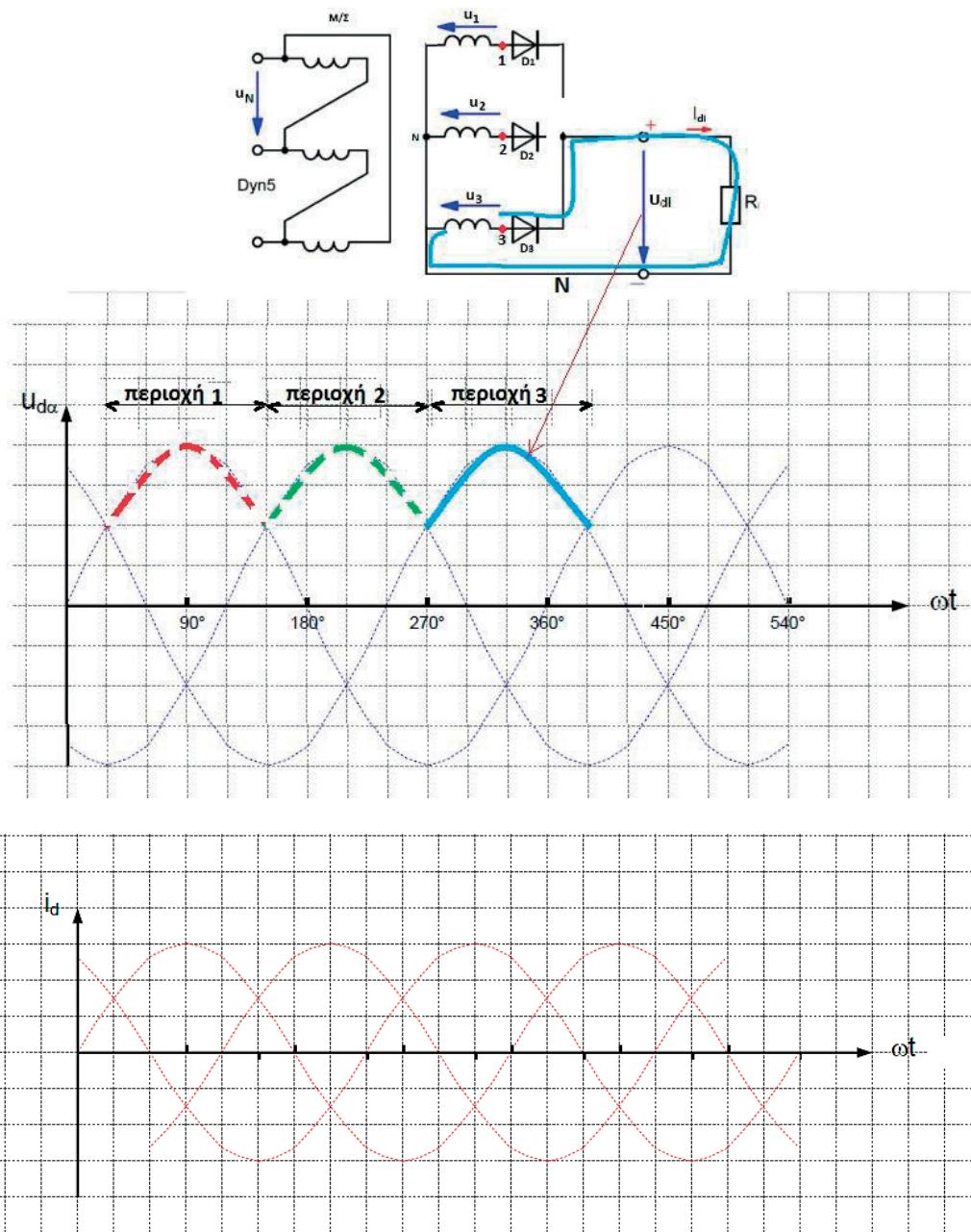
$$u_{D1} + u_2 - u_1 = 0 \Rightarrow u_{D1} = u_1 - u_2 = u_{12} \quad \text{τάση μετάβασης}$$

$$u_{D3} + u_2 - u_3 = 0 \Rightarrow u_{D3} = u_3 - u_2 = u_{32} \quad \text{τάση μετάβασης}$$

$$i_2 = I_{di} = \frac{u_2}{R} = \frac{u_m}{R} \cdot \eta\mu(\omega t - 120^\circ)$$

γ) Περιοχή (3): $270^\circ \leq \omega t < 390^\circ$

Στην περιοχή (3), η τάση u_3 είναι θετικότερη των τάσεων u_1 και u_2 (σχ. 3.27α). Τα δυναμικά του κυκλώματος και η ροή του ρεύματος στο χρονικό διάστημα της περιοχής (3) φαίνονται στο σχήμα 3.27.



Σχ. 3.27: Δυναμικά και ροή ρεύματος της περιοχής (3).

Η διάδος D_3 είναι ορθά πολωμένη και άγει. Θεωρούμε τη διάοδο ιδανική, οπότε το δυναμικό της ανόδου μεταφέρεται στην κάθοδο, με αποτέλεσμα να πολωθούν ανάστροφα οι διάοδοι D_1 και D_3 και να οδηγηθούν στην αποκοπή (ανοικτοί διακόπτες). Το ρεύμα ρέει από τη φάση u_3 διαμέσου της διάόδου D_3 στο φορτίο (R) και από εκεί στον ουδέτερο (N).

Παρατηρήσεις

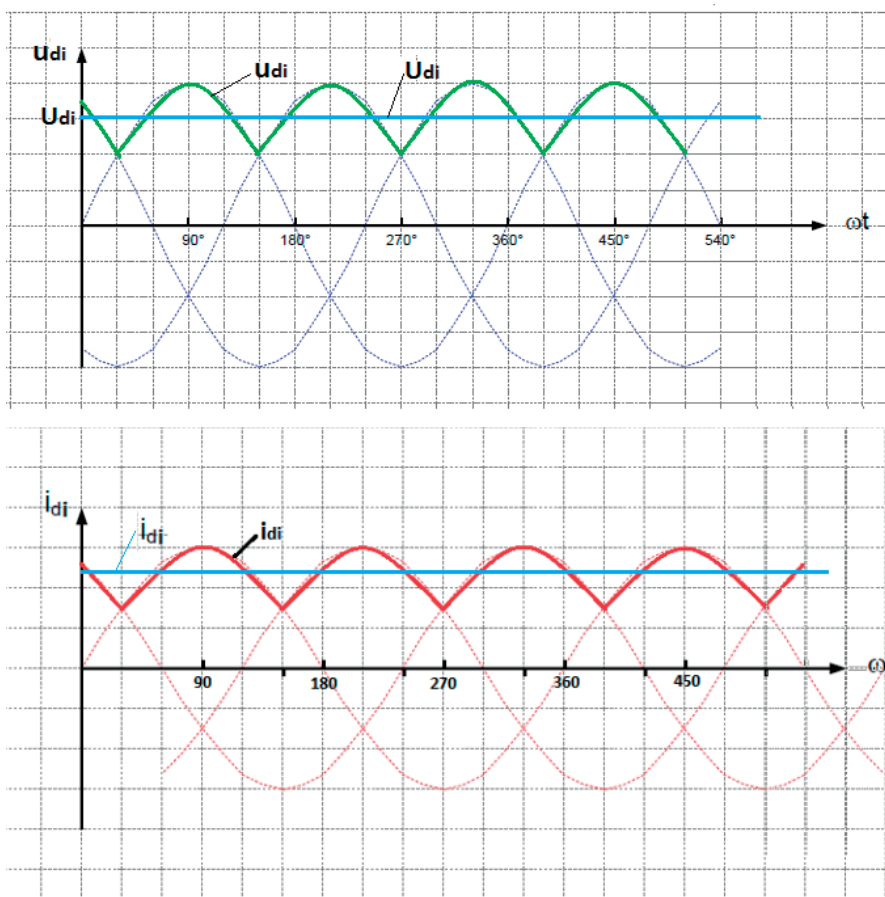
- Η φάση u_3 αναλαμβάνει τη ροή του ρεύματος της προηγούμενης φάσης u_2 από το σημείο K_3 , το οποίο είναι το φυσικό σημείο έναυσης της περιοχής (3), μέχρι το επόμενο σημείο K_1 .
- Η διάρκεια λειτουργίας της διόδου D_3 ισούται με 120° .
- Στο φορτίο εφαρμόζεται η φασική τάση (u_3) της περιοχής (3).
- Το ρεύμα I_{di} συνεχίζει να διαρρέει το φορτίο (R) από πάνω προς τα κάτω. Τα ρεύματα και των τριών περιοχών διαρρέουν την αντίσταση (R) με την ίδια φορά. Επομένως, έχουμε ανόρθωση ρεύματος.
- Στην περιοχή (3) ισχύουν οι σχέσεις:

$$u_{D1} + u_3 - u_1 = 0 \Rightarrow u_{D1} = u_1 - u_3 = u_{13} \quad \text{τάση μετάβασης}$$

$$u_{D2} + u_3 - u_2 = 0 \Rightarrow u_{D2} = u_2 - u_3 = u_{23} \quad \text{τάση μετάβασης}$$

$$i_3 = I_{di} = \frac{u_3}{R} = \frac{u_m}{R} \cdot \eta\mu(\omega t - 240^\circ)$$

Μετά την παραπάνω ανάλυση της λειτουργίας των περιοχών (1), (2) και (3), η τάση u_{d1} και το ρεύμα φορτίου i_{d1} έχουν:



Σχ. 3.29: Κυματομορφές τάσης και ρεύματος φορτίου του μη ελεγχόμενου

3.4.1.1 Χρήσιμοι μαθηματικοί τύποι και υπολογισμοί

Υπολογισμός της μέσης τιμής της τάσης και του ρεύματος

$$u_{di} = 1,17 u_{εV}$$

$$I_{di} = 1,17 I_{εV}$$

π.χ. $u = 311V \cdot \eta \mu \omega t$

$$R = 16\Omega$$

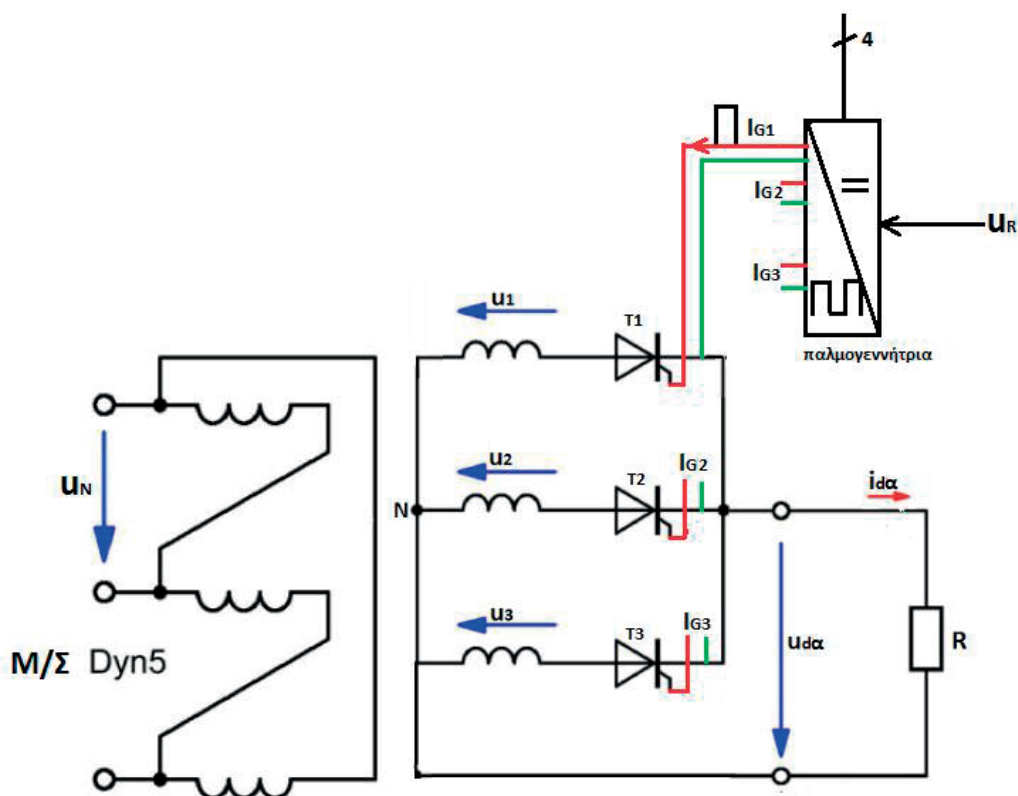
$$u_{di} = 1,17 \cdot \frac{311}{\sqrt{2}} = 257,3V$$

$$I_{di} = 1,17 \cdot \frac{230}{16} = 16,8A$$

$$I_{εV} = \frac{230}{16} = 14,375A$$

3.4.2 Ελεγχόμενος τριφασικός ανορθωτής τριών παλμών με ωμικό φορτίο (R) (M3C)

Αντικαθιστούμε τις διόδους του μη ελεγχόμενου τριφασικού ανορθωτή (σχ. 3.24.α) με θυρίστορ και λαμβάνουμε το κύκλωμα (σχ. 3.29) του ελεγχόμενου τριφασικού ανορθωτή τριών παλμών (M3C), που απεικονίζεται παρακάτω:



Σχ. 3.29: Ελεγχόμενος τριφασικός ανορθωτής τριών παλμών με ωμικό φορτίο (R) M3C.

Η παλμογεννήτρια του κυκλώματος αυτού παράγει τρεις παλμούς εντός μιας περιόδου (360°). Οι παλμοί έχουν μεταξύ τους σταθερή διαφορά φάσης (120°) και είναι συγχρονισμένοι με τις τρεις φάσεις του δικτύου (u_1 , u_2 και u_3). Αυτό σημαίνει ότι οι τρεις παλμοί I_{G1} , I_{G2} και I_{G3} εμφανίζονται στην πύλη των αντίστοιχων θυρίστορ, όταν αυτά είναι *ορθά πολωμένα*. Έτσι, ο παλμός I_{G1} δίνεται στην πύλη του θυρίστορ T_1 κατά τη διάρκεια της περιοχής (1), ο παλμός I_{G2} στο θυρίστορ T_2 κατά τη διάρκεια της περιοχής (2) και, τέλος, ο παλμός I_{G3} δίνεται στο θυρίστορ T_3 κατά τη διάρκεια της περιοχής (3). Η

μετακίνηση των παλμών γίνεται με τη βοήθεια της τάσης ελέγχου u_R . Η γωνία έναυσης μετριέται από τα φυσικά σημεία έναυσης (K_1, K_2, K_3). Όταν οι παλμοί εμφανίζονται στα σημεία K_1, K_2, K_3 , τότε η γωνία έναυσης είναι $\alpha = 0^\circ$, ενώ ο άξονας (ωt) δείχνει αντίστοιχα $30^\circ, 150^\circ$ και 270° .

Λειτουργία

Περιοχή (1): $0 \leq \alpha < 30^\circ$ συνεχής λειτουργία

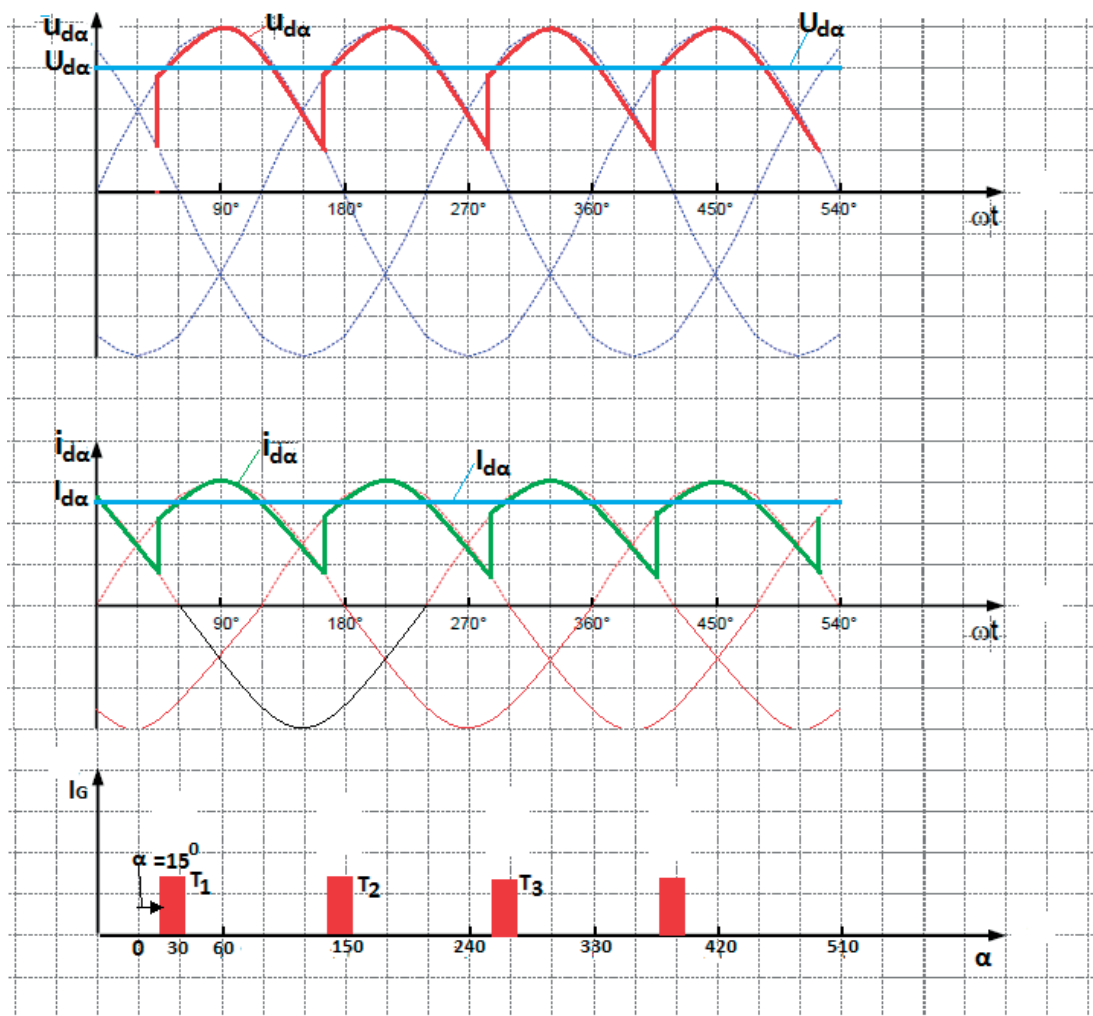
Μέχρι να δοθεί παλμός έναυσης στα θυρίστορ, το κύκλωμα δεν λειτουργεί. Εάν δώσουμε παλμό έναυσης με γωνία $\alpha = 0^\circ$, τότε η τάση $u_{d\alpha}$ και το ρεύμα $i_{d\alpha}$ έχουν τις ίδιες κυματομορφές με το κύκλωμα του ανορθωτή με διόδους (σχ. 3.28).

Δίνοντας παλμό έναυσης $\alpha = 15^\circ$, παρατηρούμε ότι το θυρίστορ T_1 γίνεται αγωγίμο. Το δυναμικό της φάσης u_1 εφαρμόζεται στις καθόδους T_2 και T_3 .

Στην άνοδο των θυρίστορ T_2 και T_3 εφαρμόζονται, αντίστοιχα, τα δυναμικά των φάσεων u_2 και u_3 , τα οποία είναι αρνητικά. Στα άκρα των θυρίστορ, που δεν λειτουργούν, εφαρμόζεται η πολική τάση του δικτύου, η οποία δρα σαν τάση μετάβασης.

Παρατηρούμε, επίσης, ότι η τάση φορτίου $u_{d\alpha}$ δεν εμφανίζει νεκρές ζώνες. Η συνέχειά της ισχύει για γωνίες έναυσης $0 \leq \alpha < 30^\circ$ ή για $30^\circ \leq \omega t < 60^\circ$.

Στο σχήμα 3.30 φαίνονται οι κυματομορφές του κυκλώματος εντός της περιοχής $0^\circ \leq \alpha < 30^\circ$.



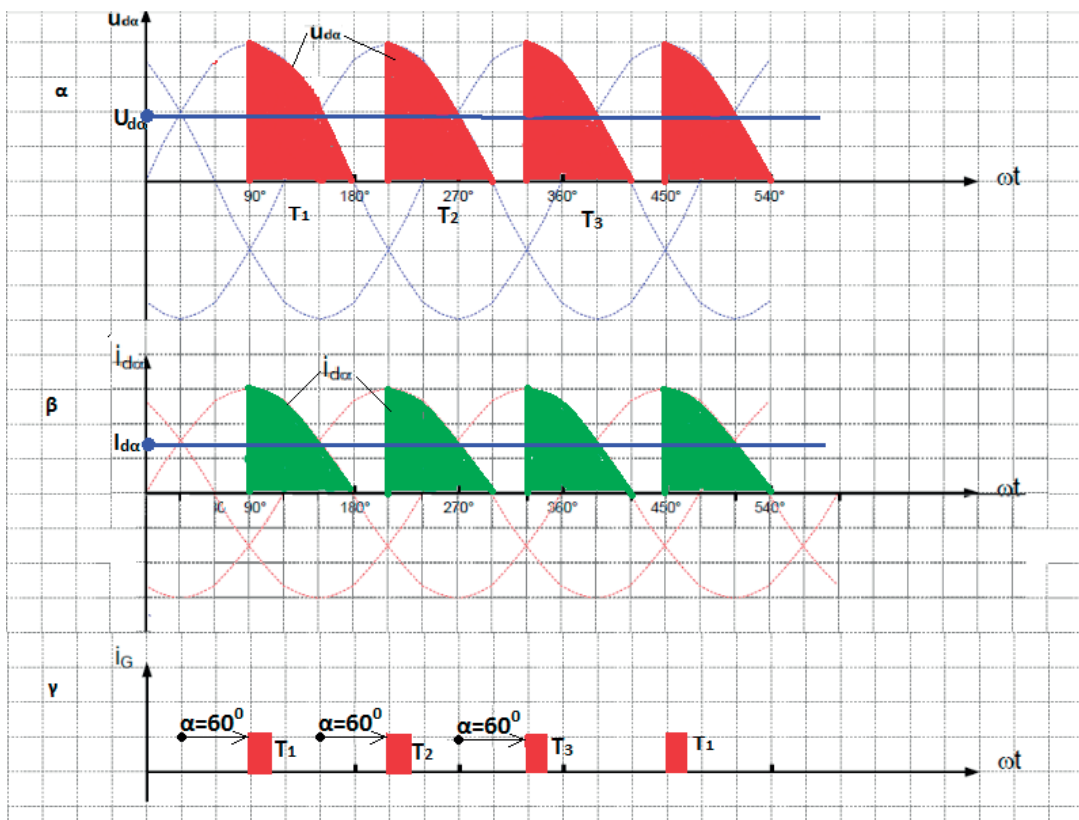
Σχ. 3.30: Ελεγχόμενος τριφασικός ανορθωτής Μ3C.

- α) Κυματομορφές τάσης φορτίου $u_{d\alpha}$ και μέσης τιμής $U_{d\alpha}$
- β) Κυματομορφές ρεύματος φορτίου $i_{d\alpha}$ και μέσης τιμής $I_{d\alpha}$
- γ) Παλμοί έναυσης με $\alpha = 15^\circ$

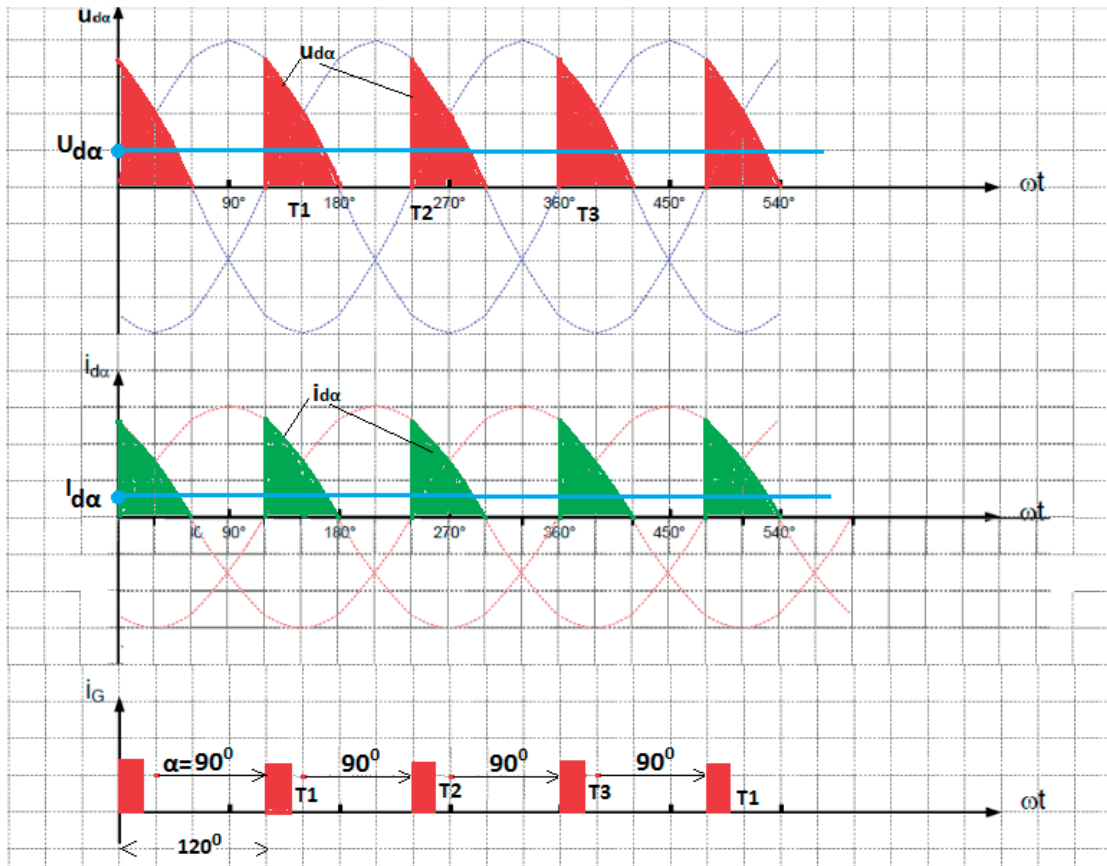
Περιοχή (2): $30^\circ \leq \alpha < 120^\circ$ ασυνεχής λειτουργία

Σ' αυτή την περιοχή λειτουργίας, το επόμενο θυρίστορ (T_1) δέχεται παλμό έναυσης, όταν το ρεύμα του προηγούμενου θυρίστορ (T_3) έχει μηδενιστεί. Κάθε κλάδος (θυρίστορ T_1 , T_2 και T_3) λειτουργεί αυτοδύναμα, όπως ακριβώς

ένα κύκλωμα ελεγχόμενου ανορθωτή μισού κύματος (M1C) με ωμικό φορτίο (R) (σχ. 3.32).



Σχ. 3.31: Κυματομορφές: α) τάσης φορτίου $u_{d\alpha}$ και $U_{d\alpha}$
 β) ρεύματος φορτίου $i_{d\alpha}$ και $I_{d\alpha}$
 γ) παλμών έναυσης με $\alpha = 60^\circ$



Σχ. 3.32: Κυματομορφές τάσεων και ρευμάτων του τριφασικού ανορθωτή M3C για γωνία έναυσης $\alpha = 90^\circ$

3.4.2.1 Χρήσιμοι μαθηματικοί τύποι και υπολογισμοί

Υπολογισμός της μέσης τιμής της τάσης $u_{d\alpha}$:

α) Πλήρους ανόρθωσης με διόδους

$$u_{di} = 1,17 \cdot u_{\epsilon\nu} \quad I_{di} = 1,17 \cdot \frac{u_{\epsilon\nu}}{R} = 1,17 \cdot I_{\epsilon\nu}$$

β) Συνεχούς λειτουργίας

$$u_{d\alpha} = 1,17 \cdot u_{\epsilon\nu} \cdot \sigma\upsilon\alpha$$

γ) Μη συνεχούς λειτουργίας

$$u_{d\alpha} = 0,675 \cdot u_{\epsilon\nu} [1 + \cos(\alpha + 30^\circ)]$$

$$I_{d\alpha} = 0,675 \cdot \frac{u_{\epsilon\nu}}{R} \cdot [1 + \sigma\upsilon\upsilon(\alpha + 30^\circ)]$$

δ) Τάση καταπόνησης των θυρίστορ

$$u_T = \sqrt{3} \cdot \sqrt{2} \cdot u_{\text{EV}}$$

ε) Μέση τιμή ρεύματος που διέρχεται από ένα θυρίστορ

$$i_T = \frac{1}{3} I_{\text{di}}$$

$$\text{π.χ. } u = 325V \cdot \eta \mu \omega t$$

$$R = 25\Omega$$

α) Να υπολογιστεί η μέση τιμή της τάσης και του ρεύματος του μη ελεγχόμενου ανορθωτή τριών παλμών:

$$u_{\text{di}} = 1,17 \cdot \frac{325}{\sqrt{2}} = 269,1V$$

$$I_{\text{di}} = \frac{u_{\text{di}}}{R} = \frac{269,1}{25} = 10,764A$$

β) Να υπολογιστεί η μέση τιμή της τάσης και του ρεύματος του ελεγχόμενου ανορθωτή Μ3C για γωνία έναυσης $\alpha = 20^\circ$ (συνεχής λειτουργία):

$$u_{\text{d}\alpha} = 1,17 \cdot u_{\text{EV}} \cdot \sigma \nu \alpha = 1,17 \cdot \frac{325}{\sqrt{2}} \cdot \sigma \nu 20^\circ = 252,87V$$

$$I_{\text{d}\alpha} = 1,17 \cdot \frac{u_{\text{EV}}}{R} \cdot \sigma \nu \alpha = 1,17 \cdot \frac{230}{25} \cdot \sigma \nu 20^\circ = 10,11A$$

γ) Να υπολογιστεί η μέση τιμή της τάσης και του ρεύματος του ανορθωτή Μ3C για γωνία έναυσης $\alpha = 60^\circ$:

$$u_{\text{d}\alpha} = 0,675 \cdot u_{\text{EV}} [1 + \sigma \nu (\alpha + 30^\circ)]$$

$$u_{\text{d}\alpha} = 0,675 \cdot 230 [1 + \sigma \nu (60^\circ + 30^\circ)] = 155,25V$$

$$I_{\text{d}\alpha} = \frac{155,25}{25} = 6,21A$$

δ) Τάση καταπόνησης των θυρίστορ:

$$u_{\text{Tmax}} = \sqrt{3} \cdot \sqrt{2} \cdot u_{\text{EV}} = \sqrt{3} \cdot \sqrt{2} \cdot 230 = 563V$$

4. ΑΥΤΟΟΔΗΓΟΥΜΕΝΑ ΚΥΚΛΩΜΑΤΑ

Μέχρι τώρα μάθαμε ότι η αλλαγή του ρεύματος από έναν κλάδο σ' έναν άλλο κλάδο γινόταν με τη βοήθεια της τάσης του δικτύου. Η τάση αυτή ονομάστηκε *τάση μετάβασης* και τα κυκλώματα αυτής της κατηγορίας *ετεροοδηγούμενα* κυκλώματα (οδηγούμενα από το δίκτυο).

Εάν, όμως, έχουμε μια σταθερή συνεχή τάση και θέλουμε να τη μετατρέψουμε σε μια μεταβλητή συνεχή τάση, μικρότερη ή μεγαλύτερη της αρχικής, τότε δεν υπάρχει η απαιτούμενη *τάση μετάβασης* του δικτύου. Στην περίπτωση αυτή χρησιμοποιούνται κυρίως διακοπτικά ημιαγωγά στοιχεία, όπως IGBT, MOS-FET, διπολικά τρανζίστορ κλπ., τα οποία έχουν μεγάλη συχνότητα λειτουργίας. Η τεχνολογία χρησιμοποίησης θυρίστορ συχνότητας σπάνια εφαρμόζεται. Ένα τέτοιο κύκλωμα μεταχειριστήκαμε στην αρχή, για να εξηγήσουμε το φαινόμενο της *αυτοοδηγούμενης μετάβασης*.

Στην παρούσα φάση, θα μελετήσουμε ένα κύκλωμα της κατηγορίας αυτής και, συγκεκριμένα, τον μετατροπέα υποβιβασμού συνεχούς τάσης σε συνεχή τάση.

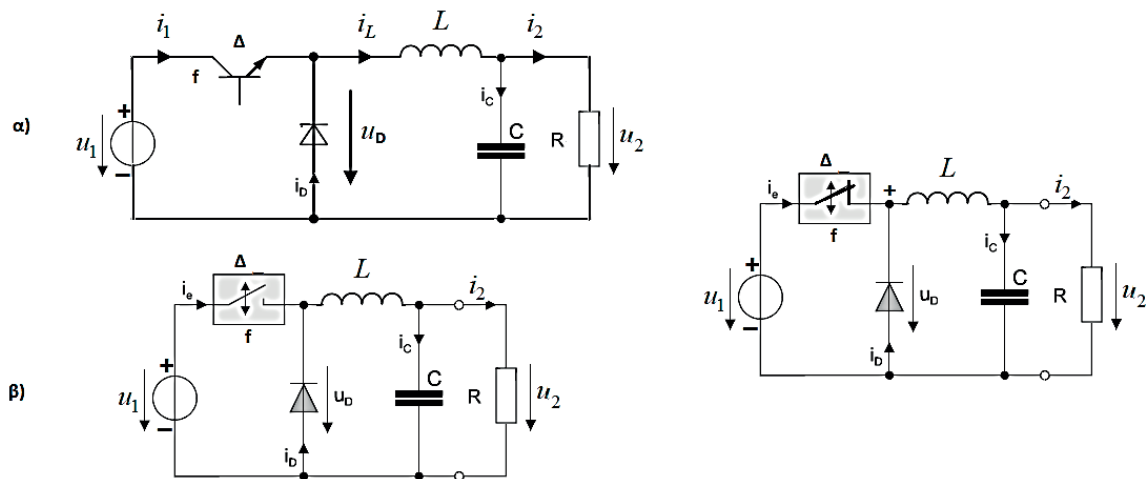
Τα κυκλώματα της κατηγορίας αυτής χρησιμοποιούνται:

- στον έλεγχο κινητήρων
- σε κυκλώματα αδιάλειπτης παροχής ισχύος (UPS)
- στην τεχνολογία ήπιων μορφών ενέργειας κτλ.

4.1. Μετατροπέας υποβιβασμού συνεχούς τάσης σε συνεχή τάση ή Ψαλιδιστές υποβιβασμού τάσης ή Step-down dc/dc converter ή Buck dc/dc converter ή DC choppers

Ο μετατροπέας που εξετάζουμε, μετατρέπει μια πηγή συνεχούς τάσης σε μια άλλη, επίσης συνεχή τάση μικρότερης τιμής. Στο σχήμα 4.1α απεικονίζεται το

κύκλωμα του μετατροπέα. Στο κύκλωμα του σχήματος 4.1β, αντικαταστήσαμε το τρανζίστορ μ' έναν διακόπτη (Δ), για να γίνει κατανοητό ότι το τρανζίστορ λειτουργεί σαν διακόπτης, δηλαδή, ότι είναι εντελώς ανοικτός ή εντελώς κλειστός.



Σχ. 4.1: α) Κύκλωμα step-down converter

β) Ισοδύναμο κύκλωμα του converter με αντικατάσταση του transistor με τον διακόπτη, f : συχνότητα λειτουργίας

Λειτουργία

α) Συνεχής λειτουργία

Πριν εξηγήσουμε τη λειτουργία του κυκλώματος, είναι αναγκαίο να δώσουμε μερικές πληροφορίες για τα στοιχεία του:

u_1 = τάση εισόδου, πηγή συνεχούς τάσης

Tr = n-pn-τρανζίστορ, το οποίο λειτουργεί σαν διακόπτης. Το τρανζίστορ μπορεί να είναι IGBT ή MOSFET

D = Δίοδος, η οποία λειτουργεί σαν δίοδος ελεύθερης αγωγής

L = πηνίο με αυτεπαγωγή (L), που χρησιμεύει για την αποθήκευση ενέργειας και για να διατηρεί το ρεύμα i_1 σταθερό

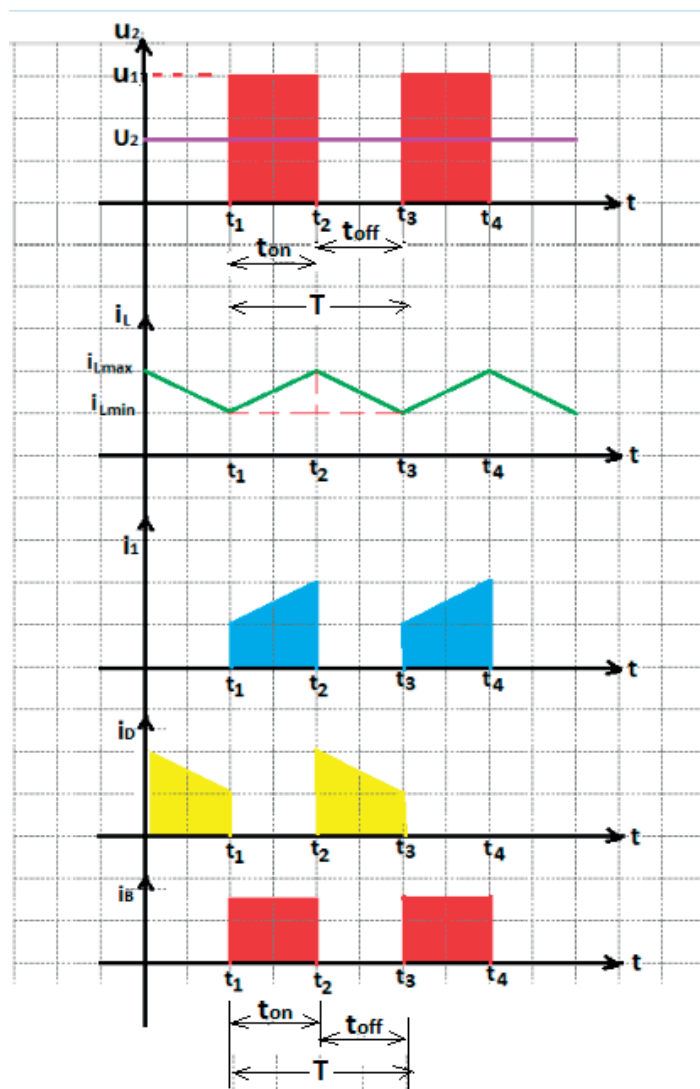
R = ωμικό φορτίο

u_2 = τάση εξόδου

C = πυκνωτής, ο οποίος χρησιμοποιείται για να διατηρεί την τάση εξόδου (u_2) σταθερή. Δεν είναι απαραίτητος για τη λειτουργία.

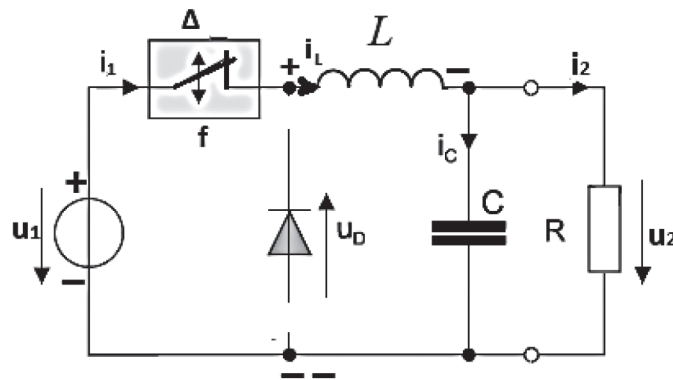
Συνεχή λειτουργία έχουμε, όταν δεν μηδενίζεται το ρεύμα i_1 του πηνίου.

Η λειτουργία του μετατροπέα βασίζεται στη γρήγορη εναλλαγή των ON-OFF καταστάσεων λειτουργίας του τρανζίστορ.



Σχ. 4.2 Κυματομορφές τάσεων και ρευμάτων του Buck Converter

Τη χρονική στιγμή t_1 δίνουμε παλμό I_B (σχ. 4.2ε) στη βάση του τρανζίστορ, το οποίο είναι μονίμως *ορθά πολωμένο* και τίθεται σε λειτουργία (κλειστός διακόπτης). Με το κλείσιμο του διακόπτη (Δ), ο θετικός πόλος της πηγής u_1 εφαρμόζεται στην άνοδο της διόδου. Η διόδος είναι *ανάστροφα πολωμένη* (ανοιχτός διακόπτης) (σχ. 4.3).



Σχ. 4.3 Δυναμικά και ρεύματα στο χρονικό διάστημα t_1 έως t_2

Λόγω του πηνίου, το ρεύμα i_1 δεν αναπτύσσεται απότομα, αλλά γραμμικά από το χρονικό σημείο t_1 έως t_2 (σχ. 4.2γ).

Ισχύουν:

$$u_L = u_1 - u_2$$

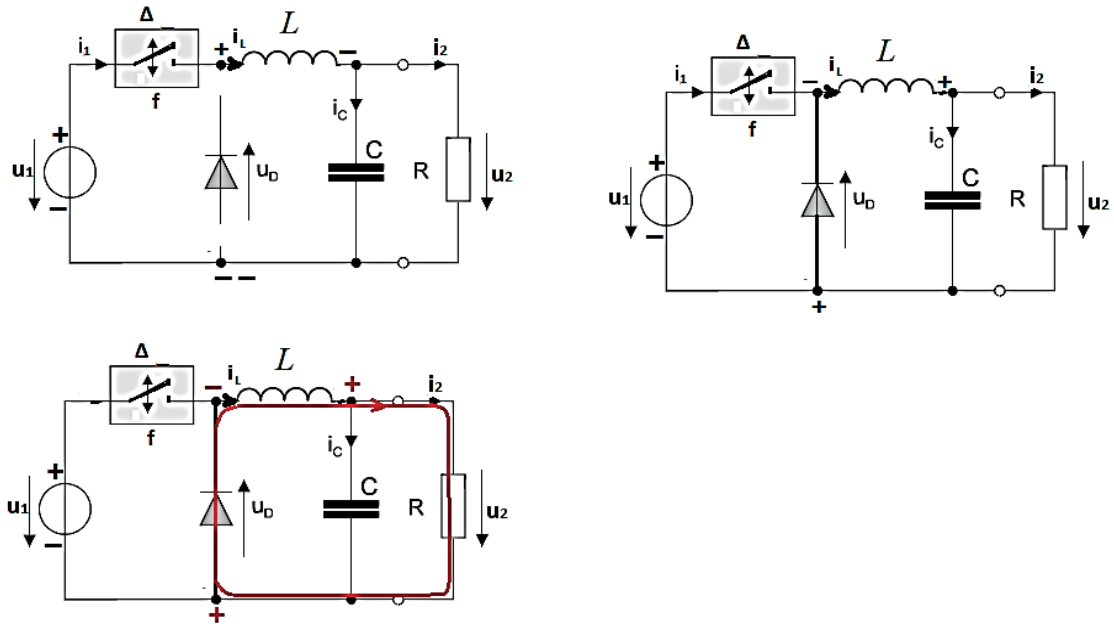
$$L \frac{\Delta i_L}{\Delta t} = u_1 - u_2$$

$i_L = \frac{u_1 - u_2}{L} \cdot t$, που είναι της μορφής $y = \alpha \cdot x$ και παριστάνεται γραφικά με ευθεία

Καθώς το ρεύμα (i_1) αυξάνει, επιτυγχάνεται η δημιουργία μαγνητικού πεδίου στο πηνίο, η φόρτιση του πυκνωτή και η ροή ρεύματος i_2 στο φορτίο (R).

Τη χρονική στιγμή t_2 (και μέχρι το σημείο t_3) μηδενίζεται ο παλμός στη βάση του τρανζίστορ (σχ. 4.2ε). Το ρεύμα i_1 της πηγής διακόπτεται ακαριαία. Το

πηνίο, σύμφωνα με τον Lenz, αντιδρά στην απότομη μεταβολή του ρεύματος. Προκειμένου δε να κρατήσει το ρεύμα του κυκλώματος σταθερό, το πηνίο αλλάζει πολικότητα και μετατρέπεται σε πηγή ρεύματος (σχ. 4.4).



Σχ. 4.4 Δυναμικά και ρεύματα στο χρονικό διάστημα $t_2 - t_3$

Στον βρόχο ροής του ρεύματος (σχ. 4.4) ισχύει:

$$u_L + u_2 = 0$$

$$u_L = -u_2 \Rightarrow i_L = -\frac{u_2}{L} \cdot t, \quad \text{που είναι της μορφής } y = -\alpha \cdot x$$

Από την τελευταία σχέση, διαπιστώνουμε ότι το ρεύμα του πηνίου είναι, επίσης, γραμμικό με αρνητική κλίση. Η κλίση του ρεύματος, τόσο κατά την άνοδο όσο και κατά την πτώση, καθορίζεται από την αυτεπαγωγή (L) του πηνίου.

Είναι, λοιπόν, φανερό ότι, αν θέλουμε συνεχή λειτουργία, θα πρέπει το ρεύμα i_{Lmin} να μην αγγίξει τον άξονα του χρόνου (t). Επομένως, θα πρέπει να επιλέξουμε πηνίο με μεγάλη αυτεπαγωγή (L).

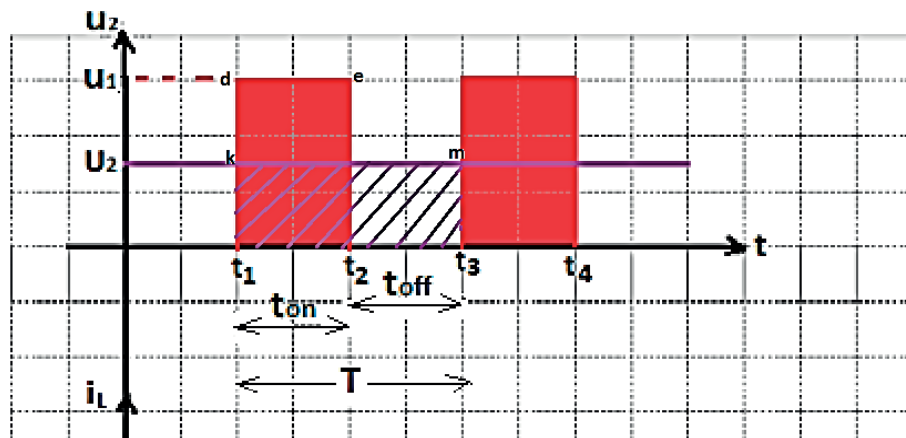
Η συμπεριφορά του buck converter περιγράφεται πλήρως με τους χρόνους t_{ON} και t_{OFF} . Τα μεγέθη αυτά δεν μεταβάλλονται ταυτόχρονα. Συνήθως ο ένας χρόνος διατηρείται σταθερός και ο άλλος μεταβάλλεται. Η πιο συνηθισμένη μέθοδος ελέγχου του κυκλώματος είναι με σταθερή περίοδο (T) και μεταβλητό χρόνο t_{ON} . Ο λόγος t_{ON} προς T λέγεται *βαθμός ελέγχου* ή *λόγος κατάτμησης* ή *βαθμός χρησιμοποίησης (duty-cycle)* και συμβολίζεται με το γράμμα (λ).

$$\lambda = \frac{t_{ON}}{T}$$

$$T = t_{ON} + t_{OFF}$$

$$f = \frac{1}{T} , \quad \text{συχνότητα λειτουργίας}$$

Στο σχήμα 4.2α είναι χαραγμένη η μέση τιμή της τάσης εξόδου u_2 , η οποία υπολογίζεται με εξίσωση των επιφανειών (σχ. 4.5).



Σχ. 4.5 Γραφικός υπολογισμός της μέσης τιμής της τάσης εξόδου (u_2) του μετατροπέα

$$E_1 (t_1 t_2 e d) = (t_1 t_2) \cdot (t_1 d) = t_{ON} \cdot u_1$$

$$E_2 (t_1 t_3 m k) = (t_1 t_3) \cdot (t_1 k) = T \cdot U_2$$

$$E_1 = E_2 \Rightarrow t_{ON} \cdot u_1 = T \cdot U_2$$

$$u_2 = \frac{t_{ON}}{T} \cdot u_1 = \lambda \cdot u_1$$

Από τη σχέση της μέσης τιμής της τάσης εξόδου $u_2 = \frac{t_{ON}}{T} \cdot u_1 = \lambda \cdot u_1$,

συμπεραίνουμε ότι μεταβάλλοντας τον βαθμό ελέγχου έχουμε μια γραμμική μεταβολή της τάσης εξόδου U_2 από το μηδέν έως την τιμή U_1 .

Η μεταβολή του βαθμού ελέγχου μπορεί να γίνει με τους εξής τρόπους:

- i) Μεταβάλλοντας τον χρόνο αγωγής (t_{ON}) και διατηρώντας την περίοδο (T) σταθερή (διαμόρφωση πλάτους παλμών = *pulse-width modulation*).
- ii) Έχοντας σταθερό τον t_{ON} ή τον t_{OFF} και μεταβάλλοντας την περίοδο T του παλμού (διαμόρφωση συχνότητας = *frequency modulation*).
- iii) Έλεγχος με τη βοήθεια ελεγκτή δύο θέσεων (two position control).

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Πολίτης, Γ., Τσάλας, Ι. (2010). *Ηλεκτρονικά Ισχύος*. Πειραιάς. Έκδοση των ιδίων.
2. Πολίτης, Γ., Τσεκούρας, Γ. *Ηλεκτρικές Μηχανές*. Έκδοση των ιδίων, χ.χ.
3. Prof.Dr.-Ing. Bernett, F. *Vorlesungsskript Leistungselektronik*. TU-Berlin.
4. Prof.Dr.-Ing. Böcker, J. *Vorlesungsskript Leistungselektronik*. Uni-Paderborn.
5. Felderhoff, R., Busch, U. *Leistungselektronik*. Hanser-Verlag.
6. Prof.Dr.-Ing. Hagmann, G. *Leistungselectronik, Grundlagen und Anwendungen*. AULA-Verlag.
7. Heumann, K. *Grundlagen der Leistungselectronik*. Teubner-Verlag.
8. Prof.Dr.-Ing. Kennel, R. *Vorlesungsskript Leistungselektronik*. Uni-Muenchen.
9. Prof.Dr.-Ing. Mertens, A. *Vorlesungsskript Leistungselektronik*. Uni-Hannover.
10. Michel, M. *Leistungselectronik, Einfuerung, Grundlagen, Uberblick*. Springer-Verlag.
11. Prof.Dr.-Ing. Mueller, J. *Vorlesungsskript Leistungselektronik-Praktikum*. FH-Schmalkalden.
12. SIEMENS-Hoffmann/Stocker: *Thyristor-Handbuch*.
13. SIEMENS. *Schulung fuer Industrieelektronik*.
14. Prof.Dr.-Ing. Steimel, A., *Vorlesungsskript Leistungselektronik und Stromrichtertechnik, I+II*. Uni-Bochum.

Βάσει του ν. 3966/2011 τα διδακτικά βιβλία του Δημοτικού, του Γυμνασίου, του Λυκείου, των ΕΠΑ.Λ. και των ΕΠΑ.Σ. τυπώνονται από το ΙΤΥΕ - ΔΙΟΦΑΝΤΟΣ και διανέμονται δωρεάν στα Δημόσια Σχολεία. Τα βιβλία μπορεί να διατίθενται προς πώληση, όταν φέρουν στη δεξιά κάτω γωνία του εμπροσθόφυλλου ένδειξη «ΔΙΑΤΙΘΕΤΑΙ ΜΕ ΤΙΜΗ ΠΩΛΗΣΗΣ». Κάθε αντίτυπο που διατίθεται προς πώληση και δεν φέρει την παραπάνω ένδειξη θεωρείται κλεψίτυπο και ο παραβάτης διώκεται σύμφωνα με τις διατάξεις του άρθρου 7 του νόμου 1129 της 15/21 Μαρτίου 1946 (ΦΕΚ 1946, 108, Α').

Απαγορεύεται η αναπαραγωγή οποιουδήποτε τμήματος αυτού του βιβλίου, που καλύπτεται από δικαιώματα (copyright), ή η χρήση του σε οποιαδήποτε μορφή, χωρίς τη γραπτή άδεια του Υπουργείου Παιδείας και Θρησκευμάτων / ΙΤΥΕ - ΔΙΟΦΑΝΤΟΣ.