

ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΑ ΙΣΧΥΟΣ

ΣΗΜΕΙΩΣΕΙΣ

Μάθημα 9^ο – Μετατροπείς εναλλασσόμενης τάσης σε εναλλασσόμενη τάση

(Επιλογές θεωρίας από τις «Σημειώσεις Εργαστηρίου Ηλεκτρονικών Ισχύος»
του Δρ.–Μηχ. Νικολάου Π. Πολύζου, Επίκουρου Καθηγητή, έτος 2008)

10.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στην κατηγορία των ηλεκτρονικών *μετατροπέων εναλλασσόμενης τάσης σε εναλλασσόμενη τάση*, ανήκουν όλες οι τοπολογίες των μετατροπέων που στην είσοδό τους δέχονται ηλεκτρική ενέργεια από ένα σύστημα εναλλασσόμενης τάσης με συγκεκριμένα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά και τη μετατρέπουν σε εναλλασσόμενη τάση με διαφορετικά ηλεκτρικά χαρακτηριστικά, είτε όσον αφορά την ενεργό τιμή της τάσης, είτε τη συχνότητα, είτε τον αριθμό των φάσεων. Εδώ, η ηλεκτρική ενέργεια από ένα σύστημα εναλλασσόμενης τάσης μετατρέπεται και μεταφέρεται σε ένα άλλο σύστημα εναλλασσόμενης τάσης με διαφορετικά ηλεκτρικά χαρακτηριστικά. Στη διεθνή βιβλιογραφία, έχουν παρουσιαστεί τοπολογίες μετατροπέων εναλλασσόμενης τάσης σε εναλλασσόμενη τάση είτε μονοφασικές είτε τριφασικές, που χρησιμοποιούνται ανάλογα με την εκάστοτε εφαρμογή. Επειδή, κύρια εφαρμογή αυτού του είδους των μετατροπέων είναι ο έλεγχος της ενεργού τιμής της τάσης εξόδου, άρα και ο έλεγχος της ισχύος, ενώ η συχνότητα στην έξοδο παραμένει σταθερή και ίση με τη συχνότητα στην είσοδό τους αποκαλούνται και *ελεγκτές εναλλασσόμενης τάσης* ή *ρυθμιστές εναλλασσόμενης τάσης*.

Ο έλεγχος της ενεργού τιμής της τάσης εξόδου μπορεί να γίνει, είτε χρησιμοποιώντας ημι-ελεγχόμενους ημιαγωγικούς διακόπτες (*thyristor*, ή *TRIAC*) είτε χρησιμοποιώντας πλήρως ελεγχόμενους ημιαγωγικούς διακόπτες ανάλογα με την τοπολογία και την τεχνική ελέγχου που χρησιμοποιείται.

Οι μετατροπείς εναλλασσόμενης τάσης σε εναλλασσόμενη τάση στους οποίους εκτός από την ενεργό τιμή της τάσης μεταβάλλεται και η συχνότητα της τάσης εξόδου, χωρίς να μεσολαβεί καμία διάταξη μετατροπέα εναλλασ. τάσης σε συνεχή τάση, αποκαλούνται και *κυκλωμετατροπείς*. Σ' αυτή τη κατηγορία μετατροπέων η συχνότητα εισόδου είναι ακέραιο πολλαπλάσιο της συχνότητας εξόδου.

Στους μετατροπείς εναλλασσόμενης τάσης σε εναλλασσόμενη τάση δεν εμφανίζεται το φαινόμενο της μετάβασης, μια και δεν υπάρχει χρονικό διάστημα που να διαρρέονται ταυτόχρονα από ρεύμα δύο ημιαγωγικά στοιχεία, ενώ διεξάγεται η διαδικασία μετάβασης του ρεύματος από έναν κλάδο σε έναν άλλο, και γι' αυτό αποκαλούνται και *μετατροπείς χωρίς μετάβαση*.

Μια από τις κυριότερες εφαρμογές αυτού του είδους των μετατροπέων είναι η χρησιμοποίησή τους ως *ηλεκτρονικούς διακόπτες εναλλασσόμενου ρεύματος* (*solid state relay*) είτε μονοφασικοί είτε τριφασικοί. Εκτός από την απλή διακοπή όμως, μπορούν να χρησιμοποιηθούν και ως *στοιχεία ρυθμίσεως της ισχύος*, μέσω της διακοπής και της σύνδεσης της πηγής τροφοδοσίας με το φορτίο σε προκαθορισμένες χρονικές στιγμές.

Οι ηλεκτρονικοί διακόπτες παρουσιάζουν αρκετά πλεονεκτήματα αλλά και κάποια μειονεκτήματα όταν συγκριθούν με τους κλασσικούς μηχανικούς διακόπτες. Βασικά πλεονεκτήματα των ηλεκτρονικών διακοπών είναι:

- α) πολύ μεγάλος αριθμός συνδέσεων και αποσυνδέσεων χωρίς να μειώνεται η διάρκεια ζωής τους
- β) πολύ μεγάλες ταχύτητες σύνδεσης και αποσύνδεσης
- γ) δυνατότητα σύνδεσης και αποσύνδεσης, με μεγάλη ακρίβεια, σε επιθυμητές χρονικές στιγμές (π.χ. κατά το μηδενισμό του ρεύματος για περιορισμό των διακοπτικών απωλειών που εμφανίζονται στο διακόπτη)
- δ) δεν υπάρχουν μεταλλικές επαφές και άρα δεν έχουμε φθορές κατά την σύνδεση ή αποσύνδεση του διακόπτη
- ε) η αποσύνδεση του φορτίου γίνεται χωρίς την παρουσία φωτεινού τόξου, μια και μπορούμε να αποσυνδέσουμε το φορτίο τη στιγμή που το ρεύμα διέρχεται από το μηδέν.

Μειονεκτήματα των ηλεκτρονικών διακοπών σε σχέση με τους κλασσικούς μηχανικούς διακόπτες είναι:

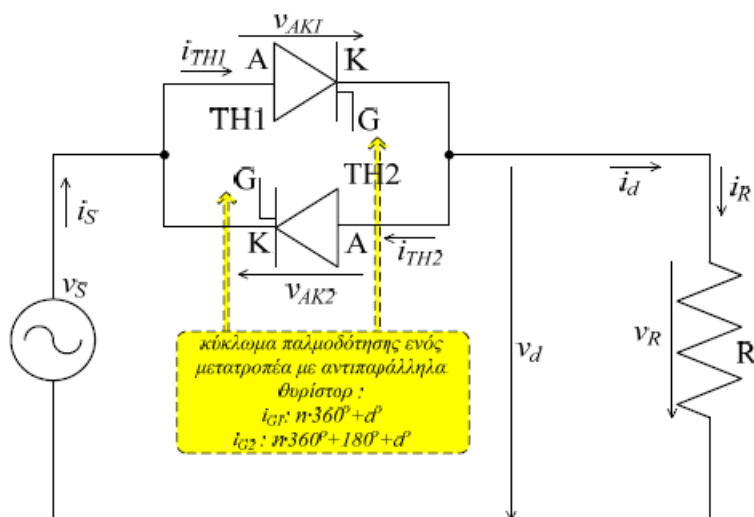
- α) εμφανίζουν σημαντική πτώση τάσης κατά την αγωγή, η οποία προκαλεί θερμικές απώλειες και καθιστά αναγκαία την ψύξη τους
- β) κατά την αποκοπή υπάρχει ένα ρεύμα διαρροής με αποτέλεσμα να μην έχουμε τέλεια αποκοπή
- γ) δεν έχουν αντοχές σε υπερτάσεις και υπερρεύματα με αποτέλεσμα να είναι αρκετά ευαίσθητοι σε μεταβατικές καταστάσεις
- δ) το μεγάλο κόστος τους
- ε) τα απαραίτητα κυκλώματα οδήγησης και ελέγχου που απαιτούνται για τον έλεγχο των ηλεκτρονικών διακοπών

Μια άλλη βασική εφαρμογή των μετατροπών εναλλασσόμενης τάσης σε εναλλασσόμενη τάση είναι για τον έλεγχο των επαγωγικών κινητήρων. Παλαιότερα αυτά τα συστήματα χρησιμοποιούνταν κατά κόρο, αλλά σήμερα μετά την εμφάνιση των αντιστροφών ισχύος που λειτουργούν με την τεχνική του V/f ή E/f σταθερό, οι μετατροπείς αυτοί χρησιμοποιούνται κυρίως για την ομαλή εκκίνηση του κινητήρα (και περιορισμού του ρεύματος εκκίνησης) και για μικρή ρύθμιση της ταχύτητας περιστροφής γιατί ο έλεγχος της ταχύτητας περιστροφής μέσω του ελέγχου της ενεργού τιμής της τάσης είναι μη αποδοτικός. Λόγο της συγκεκριμένης εφαρμογής, τα συστήματα αυτά αποκαλούνται και **ομαλοί εκκινήτες** (*soft starters*). Επίσης, ευρεία χρήση οι συγκεκριμένοι μετατροπείς βρίσκουν στον έλεγχο της φωτεινότητας των ηλεκτρικών λαμπτήρων (*dimmer*).

10.2 ΜΟΝΟΦΑΣΙΚΟΣ ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΑΣ ΕΝΑΛΛΑΣΣΟΜΕΝΗΣ ΤΑΣΗΣ ΣΕ ΕΝΑΛΛΑΣΣΟΜΕΝΗ ΤΑΣΗ ΜΕ ΑΝΤΙΠΑΡΑΛΛΗΛΑ ΘΥΡΙΣΤΟΡ

Στο σχήμα 10.1 φαίνεται η τοπολογία ενός μονοφασικού μετατροπέα εναλλασσόμενης τάσης σε εναλλασσόμενη τάση με ωμικό φορτίο. Όπως φαίνεται από το κυκλωματικό διάγραμμα του μετατροπέα, αποτελείται από δύο θυρίστρορ τα οποία είναι

συνδεδεμένα αντιπαράλληλα, γι' αυτό και οι συγκεκριμένοι μετατροπείς αποκαλούνται και ως *μετατροπείς εναλλασσόμενης τάσης σε εναλλασσόμενη τάση με αντιπαράλληλα θυρίστωρ*. Επομένως είναι προφανές ότι, όταν το θυρίστωρ ένα (TH_1) είναι θετικά πολωμένο και μπορεί να μπει σε κατάσταση αγωγής αν του δοθεί κατάλληλος παλμός έναυσης, δηλαδή κατά τη θετική ημιπερίοδο της τάσης εισόδου, το θυρίστωρ δύο



Σχήμα 10.1: Τοπολογία μονοφασικού μετατροπέα εναλλασσόμενης τάσης σε εναλλασσόμενη τάση με αντιπαράλληλα θυρίστωρ.

(TH_2) είναι ανάστροφα πολωμένο και δε δύναται να άγει. Ενώ, κατά την αρνητική ημιπερίοδο της τάσης εισόδου το θυρίστωρ δύο (TH_2) είναι θετικά πολωμένο και μπορεί να μπει σε κατάσταση αγωγής αν του δοθεί κατάλληλος παλμός έναυσης, το θυρίστωρ ένα (TH_1) είναι ανάστροφα πολωμένο και δε δύναται να άγει. Επειδή στην έξοδο της διάταξης, επιθυμείτε να παράγεται όσο το δυνατό πιο συμμετρική κυματομορφή τάσης με σκοπό να ελαττώνονται οι ανώτερες αρμονικές άρα και η άεργος ισχύς, επιλέγεται το θυρίστωρ ένα (TH_1) να δέχεται παλμό έναυσης, τη χρονική στιγμή α° ($0^\circ \leq \alpha^\circ \leq 180^\circ$) ενώ, το θυρίστωρ δύο (TH_2) δέχεται παλμό έναυσης, τη χρονική στιγμή $180^\circ + \alpha^\circ$. Αυτή είναι και η τεχνική παλμοδότησης για την ομαλή λειτουργία του συγκεκριμένου μετατροπέα. Επίσης, για την ανάλυση της λειτουργίας του μετατροπέα, όπως θα δούμε στη συνέχεια, θα πρέπει να είναι γνωστή η λειτουργία του θυρίστωρ καθώς επίσης και η φύση του φορτίου. Όσον αφορά το θυρίστωρ είναι γνωστό ότι, για να μπει σε κατάσταση αγωγής θα πρέπει να είναι θετικά πολωμένο και να του δοθεί κατάλληλος παλμός έναυσης μέσω του κυκλώματος παλμοδότησης, ενώ θα σταματήσει να άγει μόνο αν το ρεύμα που το διαρρέει γίνει μικρότερο από το ρεύμα συγκρατήσεως ή ελάχιστο ρεύμα διέλευσης (i_h).

10.3 ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΜΕ ΩΜΙΚΟ ΦΟΡΤΙΟ

Από το σχήμα 10.1 και από τη τεχνική παραγωγής παλμών έναυσης για τη συγκεκριμένη τοπολογία, που περιγράφηκε παραπάνω, είναι προφανές ότι το TH_1 είναι θετικά πολωμένο όταν η εναλλασσόμενη τάση εισόδου βρίσκεται στις θετικές ημιπεριόδους (δηλαδή, τα διαστήματα $[n \cdot 360^\circ + 0^\circ - n \cdot 360^\circ + 180^\circ]$) και αν του δοθεί παλμός έναυσης μέσα σ' αυτά τα χρονικά διαστήματα το στοιχείο θα μπει αμέσως σε κατάσταση αγωγής και θα αρχίσει να διαρρέεται από ρεύμα (π.χ. στο διάστημα $[\alpha^\circ - 180^\circ]$), ενώ θα εμφανίζει μηδενική πτώση τάσης στα άκρα του (θεωρώντας ιδανικό στοιχείο). Το ισοδύναμο κύκλωμα που θα διαρρέεται από ρεύμα σ' αυτό το χρονικό διάστημα είναι αυτό του σχήματος 10.2.α. Είναι προφανές ότι, σ' αυτό το χρονικό διάστημα το TH_2 δεν μπορεί να μπει σε κατάσταση αγωγής, ενώ η τάση που εμφανίζεται

στα άκρα του είναι ίση με μηδέν λόγω τοπολογίας και αγωγής του θυρίστορ TH_1 . Οι εξισώσεις που διέπουν τη λειτουργία του κυκλώματος κατά το χρονικό διάστημα αγωγής του TH_1 έχουν ως εξής:

$$\begin{aligned} v_d(t) &= v_R(t) = v_s(t) \\ v_{AK1}(t) &= v_{KA2}(t) = 0, \text{ το } TH_1 \text{ βρίσκεται σε κατάσταση αγωγής} \\ i_d(t) &= i_R(t) = i_{TH1}(t) = \frac{v_R(t)}{R} = i_s(t) \\ i_{TH2}(t) &= 0 \end{aligned} \quad (10.1)$$

Το TH_1 θα οδηγηθεί σε κατάσταση αποκοπής όταν το ρεύμα που το διαρρέει γίνει μικρότερο από το ρεύμα συγκρατήσεως. Επειδή, στην έξοδο υπάρχει καθαρά ωμικό φορτίο η κυματομορφή του ρεύματος είναι όμοια με αυτή της τάσης στο φορτίο, επομένως, είναι προφανές ότι, το θυρίστορ θα σταματήσει να άγει όταν μηδενιστεί η τάση εξόδου (δηλαδή στις 180°). Από εκεί και πέρα το συγκεκριμένο θυρίστορ θα παραμείνει σε κατάσταση αποκοπής μέχρι να πολωθεί ξανά θετικά (δηλαδή, στην επόμενη θετική ημιπερίοδο) και του ξαναδοθεί νέος παλμός έναυσης για να επαναληφθεί η ίδια περιοδική λειτουργία. Από την άλλη μεριά, το TH_2 είναι θετικά πολωμένο όταν η εναλλασσόμενη τάση εισόδου βρίσκεται στις αρνητικές ημιπεριόδους (δηλαδή, τα διαστήματα $[n \cdot 360^\circ + 180^\circ - n \cdot 360^\circ + 360^\circ]$), αλλά για να οδηγηθεί σε κατάσταση αγωγής θα πρέπει να του δοθεί παλμός έναυσης, ο οποίος δίνεται τη χρονική στιγμή $(180^\circ + \alpha^\circ)$, άρα στο διάστημα $[180^\circ - 180^\circ + \alpha^\circ]$ κανένα ημιαγωγικό στοιχείο δεν δύναται να βρίσκεται σε κατάσταση αγωγής και οι ακόλουθες εξισώσεις περιγράφουν τη λειτουργία του κυκλώματος (σχήμα 10.2.γ):

$$\begin{aligned} v_d(t) &= v_R(t) = 0 \\ v_{AK1}(t) &= v_{KA2}(t) = v_s(t) \text{ επειδή το } TH_1 \text{ και } TH_2 \text{ σε κατάσταση αποκοπής} \\ v_{AK2}(t) &= v_{KA1}(t) = -v_s(t) \text{ επειδή το } TH_1 \text{ και } TH_2 \text{ σε κατάσταση αποκοπής} \\ i_s(t) &= i_d(t) = i_R(t) = i_{AK1}(t) = i_{AK2}(t) = 0 \end{aligned} \quad (10.2)$$

Τη χρονική στιγμή $180^\circ + \alpha^\circ$ το TH_2 είναι θετικά πολωμένο και δέχεται παλμό έναυσης, επομένως το στοιχείο οδηγείται σε κατάσταση αγωγής (για το διάστημα $[180^\circ + \alpha^\circ - 360^\circ]$), ενώ εμφανίζει μηδενική πτώση τάσης στα άκρα του. Το ισοδύναμο κύκλωμα που θα διαρρέεται από ρεύμα σ' αυτό το χρονικό διάστημα είναι αυτό του σχήματος 10.2.β. Είναι προφανές ότι, σ' αυτό το χρονικό διάστημα το TH_1 δε μπορεί να οδηγηθεί σε κατάσταση αγωγής. Οι εξισώσεις που διέπουν τη λειτουργία του κυκλώματος κατά το χρονικό διάστημα αγωγής του TH_2 θεωρώντας ότι τα στοιχεία του κυκλώματος είναι ιδανικά, έχουν ως εξής:

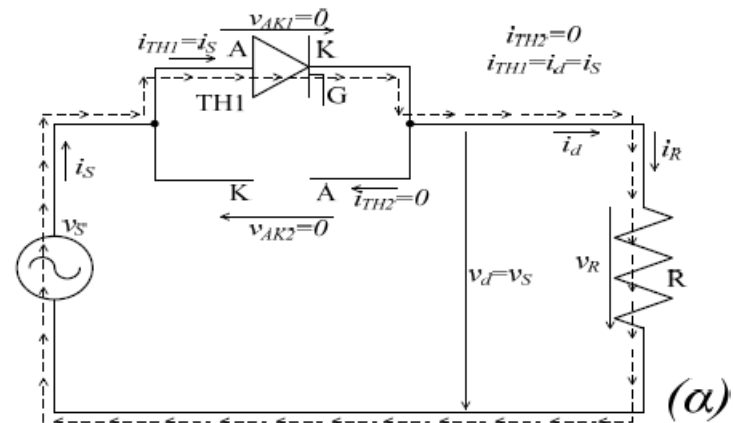
$$\begin{aligned} v_d(t) &= v_R(t) = v_s(t) \\ v_{AK2}(t) &= v_{KA1}(t) = 0, \text{ το } TH_2 \text{ βρίσκεται σε κατάσταση αγωγής} \\ i_d(t) &= i_R(t) = -i_{TH2}(t) = \frac{v_R(t)}{R} = i_s(t) \\ i_{TH1}(t) &= 0 \end{aligned} \quad (10.3)$$

Το TH_2 θα οδηγηθεί σε κατάσταση αποκοπής όταν το ρεύμα του γίνει μικρότερο από το ρεύμα συγκρατήσεως στις 360° και πολωθεί ανάστροφα. Στο διάστημα $[360^\circ -$

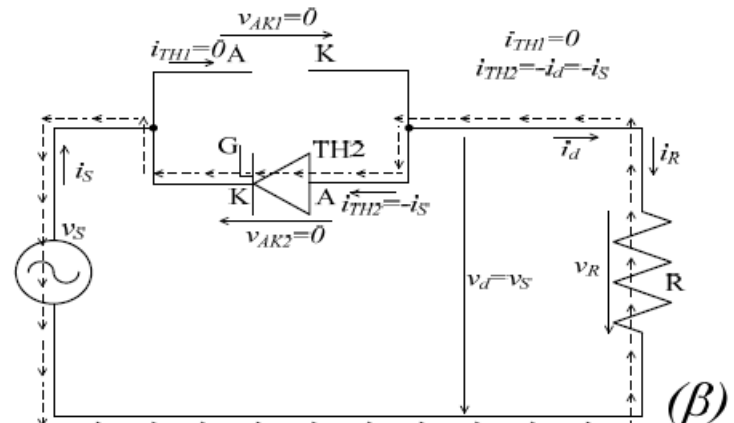
$360^\circ + \alpha^\circ$] το TH_1 είναι θετικά πολωμένο αλλά δεν έχει παλμό έναυσης, άρα σ' αυτό το διάστημα κανένα θυρίστορ δε διαρρέεται από ρεύμα (σχήμα 10.2.γ) και οι εξισώσεις 10.2 περιγράφουν τη λειτουργία του κυκλώματος. Τη χρονική στιγμή $360^\circ + \alpha^\circ$ δίνεται νέος παλμός έναυσης στο TH_1 και επαναλαμβάνεται η ίδια περιοδική λειτουργία, που αναλύθηκε παραπάνω.

Στο σχήμα 10.3 παρουσιάζονται κυματομορφές της τάσης εισόδου, της τάσης εξόδου και της τάσης στα άκρα των ημιαγωγικών στοιχείων για μια γωνία έναυσης α και για λειτουργία με ωμικό φορτίο. Επίσης, στο σχήμα 10.4 σχεδιάζονται οι κυματομορφές του ρεύματος στην έξοδο του μετατροπέα, του ρεύματος που διαρρέει κάθε ημιαγωγικό στοιχείο καθώς και του ρεύματος στην είσοδο του μετατροπέα, για λειτουργία του μετατροπέα με την ίδια γωνία έναυσης και για καθαρά ωμικό φορτίο. Για το σχεδιασμό των ρευμάτων έχουν χρησιμοποιηθεί οι φορές που δίνονται στα σχήματα 10.1 και 10.2. Από τις κυματομορφές είναι εμφανές πως στην έξοδο του μετατροπέα έχουμε εναλλασσόμενη τάση της ίδιας συχνότητας με αυτή της εναλλασσόμενης τάσης εισόδου αλλά διαφορετικής ενεργού τιμής. Ακόμα, όπως και στις προηγούμενες τοπολογίες, έτσι και εδώ, προφανές ότι, όσο πιο μικρή τιμή έχει η γωνία έναυσης α τόσο πιο μεγάλη είναι η ενεργός τιμή της τάσης εξόδου, ξεκινώντας από μία μέγιστη τιμή για $\alpha=0^\circ$ και καταλήγοντας στο μηδέν για $\alpha=180^\circ$. Επομένως, **ελέγχοντας τη γωνία έναυσης α** (μέσω του κυκλώματος παλμοδότησης) **επιτυγχάνεται ο έλεγχος της ενεργού τιμής της τάσης εξόδου** (υψηλή τάση) **άρα και της ισχύς**. Σύμφωνα λοιπόν με τον ορισμό της ενεργού τιμής, για την τάση εξόδου προκύπτει ότι:

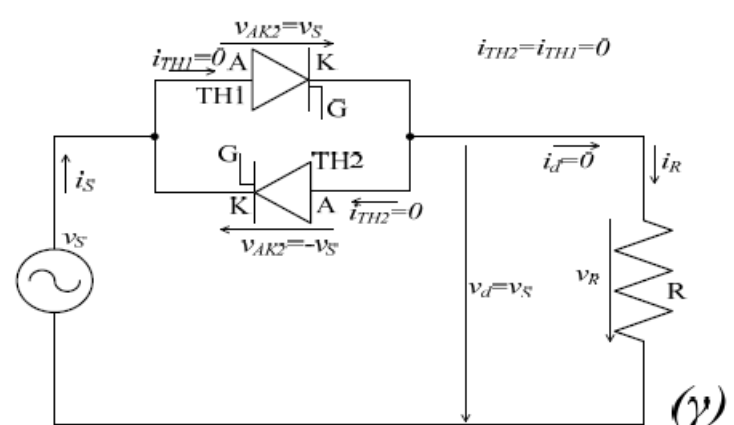
Διάστημα: $[n \cdot 360^\circ + \alpha^\circ - n \cdot 360^\circ + 180^\circ]$



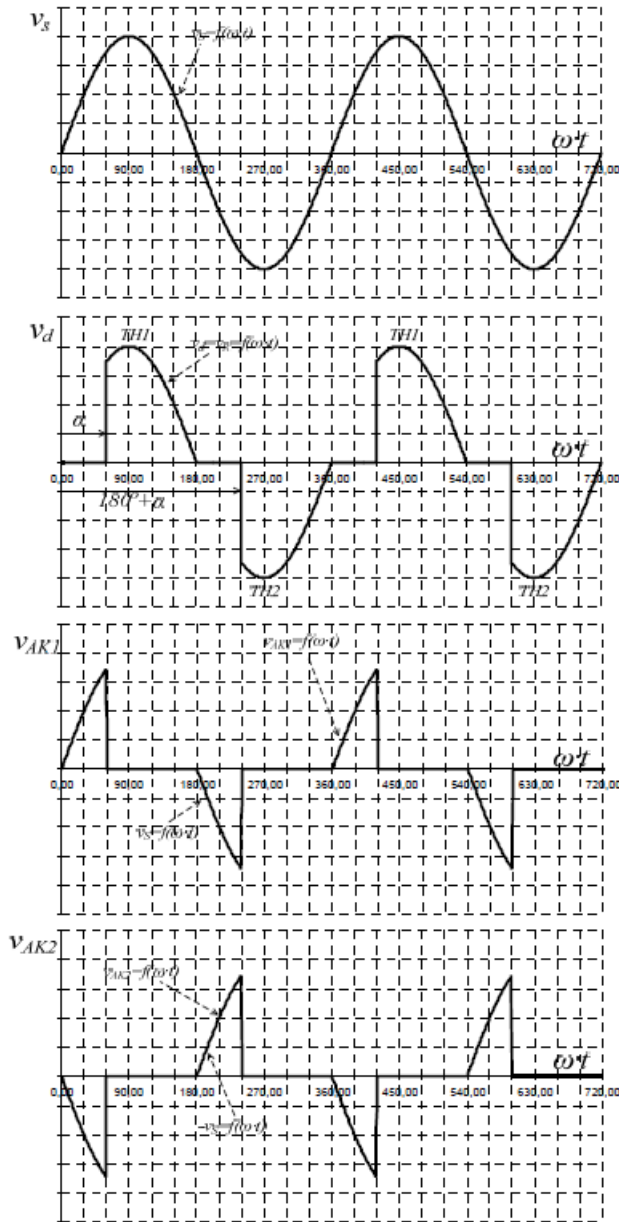
Διάστημα: $[n \cdot 360^\circ + 180^\circ + \alpha^\circ - n \cdot 360^\circ + 360^\circ]$



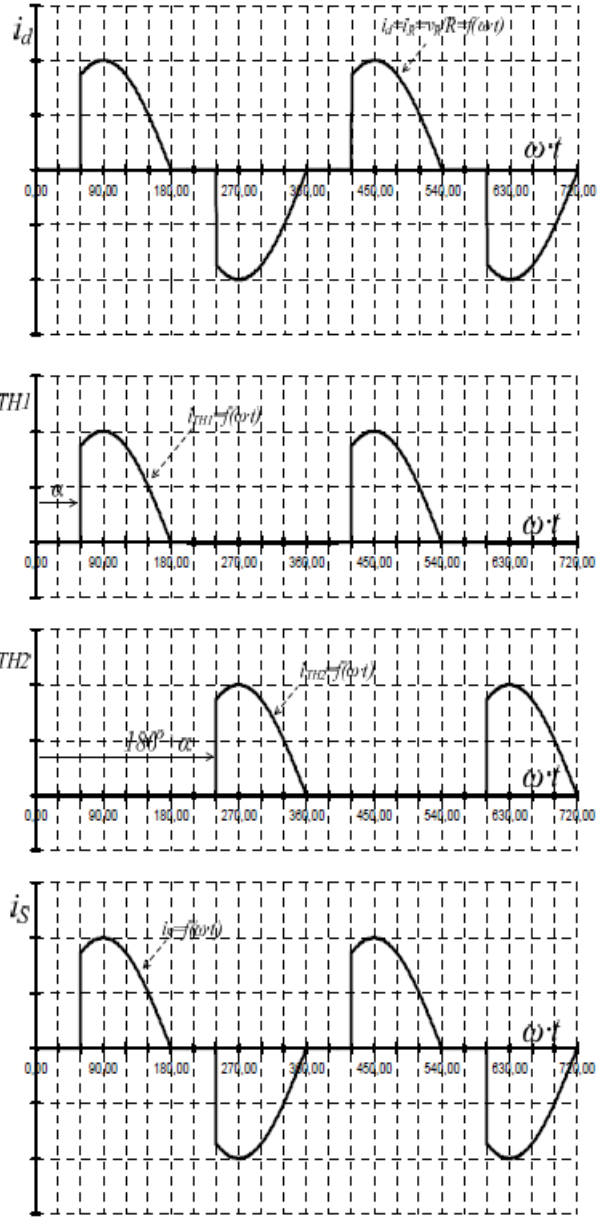
Διάστημα: $[n \cdot 360^\circ - n \cdot 360^\circ + \alpha^\circ]$ & $[n \cdot 360^\circ + 180^\circ - n \cdot 360^\circ + 180^\circ + \alpha^\circ]$



Σχήμα 10.2: Ισοδύναμα κυκλώματα κατά τη λειτουργία ενός μετατροπέα με αντιπαράλληλα θυρίστορ.



Σχήμα 10.3: Κυματομορφές ρευμάτων κατά τη λειτουργία ενός μετατροπέα με αντιπαράλληλα θυρίστορ και ωμικό φορτίο.



Σχήμα 10.4: Κυματομορφές ρευμάτων κατά τη λειτουργία ενός μετατροπέα με αντιπαράλληλα θυρίστορ και ωμικό φορτίο.

$$\begin{aligned}
 V_{d,rms} &= \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T v_d^2(t) \cdot dt} = \sqrt{\frac{1}{\omega \cdot T} \int_0^T \omega \cdot v_d^2(t) \cdot d(t)} = \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_0^\pi v_d^2(t) \cdot d(\omega \cdot t)} \Rightarrow \\
 &\Rightarrow V_{d,rms} = \sqrt{\frac{1}{\pi} \cdot \int_\alpha^\pi (\sqrt{2} \cdot V_s \cdot \sin(\omega \cdot t))^2 \cdot d(\omega \cdot t)} \Rightarrow \\
 &\Rightarrow V_{d,rms} = \sqrt{2} \cdot V_s \cdot \sqrt{\frac{1}{\pi} \cdot \left(\frac{\omega \cdot t}{2} - \frac{\sin(2 \cdot \omega \cdot t)}{4} \right) \Big|_\alpha^\pi} \Rightarrow \\
 &\Rightarrow V_{d,rms} = \sqrt{2} \cdot V_s \cdot \sqrt{\frac{1}{\pi} \cdot \left(\frac{\pi}{2} - \frac{\sin(2 \cdot \pi)}{4} - \left(\frac{\alpha}{2} - \frac{\sin(2 \cdot \alpha)}{4} \right) \right)} \Rightarrow
 \end{aligned}$$

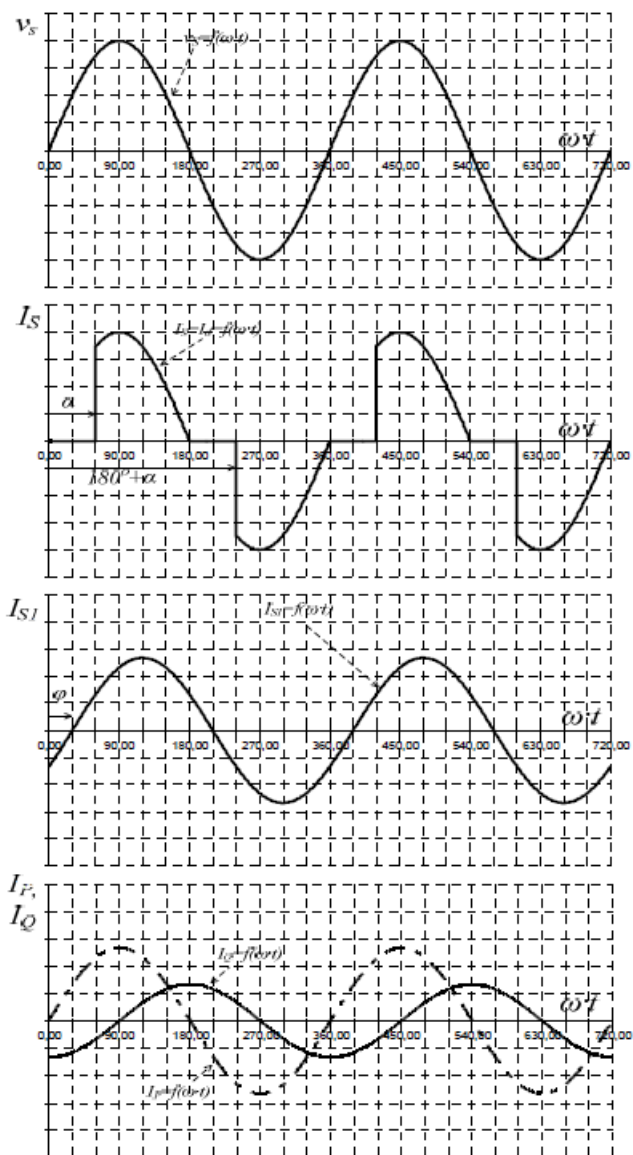
$$\Rightarrow V_{d,rms} = V_S \cdot \sqrt{\frac{\pi - a + \frac{1}{2} \cdot \sin(2 \cdot a)}{\pi}} \quad (10.1)$$

Όπου V_S η ενεργός τιμή της τάσης εισόδου. Ενώ, για την ενεργό τιμή του ρεύματος εξόδου (είναι ίσο με το ρεύμα εισόδου) καθώς και για την ισχύ στο φορτίο ισχύει:

$$I_{d,rms} = \frac{V_S}{R} \cdot \sqrt{\frac{\pi - a + \frac{1}{2} \cdot \sin(2 \cdot a)}{\pi}} \quad (10.2)$$

$$P_{d,rms} = \frac{V_S^2}{R} \cdot \frac{\pi - a + \frac{1}{2} \cdot \sin(2 \cdot a)}{\pi} \quad (10.3)$$

Από την εξίσωση 10.3 προκύπτει ότι η ποσότητα της ισχύος που τροφοδοτείται στο φορτίο, ελέγχεται με μεταβολή της γωνίας έναυσης a . Το ωμικό φορτίο απορροφά μόνο ενεργό ισχύ από την πηγή τροφοδοσίας, η οποία δίδει στο κύκλωμα φαινόμενη ισχύ διαφορετική από αυτήν που καταλήγει στο φορτίο, αφού το γινόμενο της τάσης εισόδου είναι διαφορετικό από το γινόμενο της τάσης εξόδου με το ρεύμα εξόδου. Έτσι προκύπτει το ερώτημα σχετικά με την ισχύ που περισσεύει. Αν για παράδειγμα, στην θέση των θυρίστορ υπήρχε μια ωμική αντίσταση, τότε η επιπλέον ισχύς θα καταναλώνονταν πάνω στην αντίσταση. Στην συγκεκριμένη περίπτωση όμως δεν έχουμε κατανάλωση τέτοιας ποσότητας ισχύος πάνω στα θυρίστορ. Επιπλέον, αφού ενεργό ισχύ απορροφά μόνο το ωμικό φορτίο η επιπλέον ισχύς δε μπορεί να είναι τίποτα άλλο εκτός από άεργος ισχύς. Η απάντηση στο ερώτημα προκύπτει αν χρησιμοποιήσουμε την ανάλυση Fourier για την κυματομορφή του ρεύματος. Στο σχήμα 10.5 σχεδιάζονται η τάση εισόδου (v_s), το ρεύμα εισόδου (i_s) και εξόδου (i_d) σε ένα κύκλωμα μονοφασικού μετατροπέα με αντιπαράλληλα θυρίστορ



Σχήμα 10.5: Κυματομορφές της τάσης και του ρεύματος εισόδου καθώς και των αρμονικών συνιστωσών του ρεύματος.

κατά τη λειτουργία του με ωμικό φορτίο και για μια τυχαία γωνία έναυσης α . Επίσης, σχεδιάζεται η βασική αρμονική του ρεύματος (i_{S1}) η οποία έχει μία διαφορά φάσης (φ) σε σχέση με την τάση εισόδου, επομένως η πηγή τροφοδοσίας παρέχει και ένα ποσό άεργου ισχύος για την ομαλή λειτουργία του κυκλώματος. Από την άλλη επειδή η κυματομορφή της τάσης εξόδου (v_a) είναι όμοια με αυτή του ρεύματος εξόδου στο φορτίο, όπως αναμενόταν, παρέχεται μόνο ενεργός ισχύς. Επιπλέον, στο σχήμα 10.3 η βασική αρμονική του ρεύματος αναλύεται σε δύο συνιστώσες, την ενεργό συνιστώσα (i_P) η οποία είναι σε φάση με την τάση εισόδου και την άεργο συνιστώσα (i_Q) η οποία παρουσιάζει διαφορά τάσης 90° σε σχέση με την τάση. Ουσιαστικά, η ενεργός συνιστώσα εκφράζει το ποσοστό του ρεύματος που μεταφέρει ενεργό ισχύ στο φορτίο (διαφορά φάσης $\varphi=0^\circ$) και η άεργος συνιστώσα εκφράζει μια ποσότητα άεργου ισχύος (διαφορά φάσης $\varphi=90^\circ$) που είναι απαραίτητη για την ομαλή λειτουργία του κυκλώματος. Αυτό το γεγονός, είναι και το βασικότερο μειονέκτημα των ηλεκτρονικών μετατροπέων ισχύος με εναλλασσόμενη τάση εισόδου, αφού για την ομαλή λειτουργία τους απαιτούν ένα ποσό άεργου ισχύος από την πηγή τροφοδοσίας τους ακόμα και κατά τη λειτουργία τους με ωμικό φορτίο.

Στο σημείο αυτό πρέπει να σημειωθεί ότι άεργος ισχύς παρέχεται από την πηγή όχι μόνο λόγω της διαφοράς φάσης (φ στην παραπάνω παράγραφο, ή σωστότερα φ_1) μεταξύ της θεμελιώδους αρμονικής του ρεύματος (i_{S1}) και της τάσης της πηγής. Παρέχεται επίσης και λόγω της παραμόρφωσης του ρεύματος της πηγής (i_S), δηλαδή λόγω του ότι το ρεύμα αυτό περιέχει και ανώτερης τάξης αρμονικές. Για να αναλυθεί η φαινόμενη ισχύς, S , που παρέχεται από την πηγή, σε ενεργό P και άεργο Q , πρέπει να ακολουθηθεί η διαδικασία που περιλαμβάνεται στις σημειώσεις του Μαθήματος 3:

1. Αρχικά το ρεύμα της πηγής αναλύεται σε συνιστώσες με χρήση της ανάλυσης Fourier. Η ανάλυση Fourier δίνει την rms τιμή ($I_{S1,rms}$) και τη φάση (φ_1) της θεμελιώδους συνιστώσας του ρεύματος, καθώς και την συνολική rms τιμή ($I_{S,rms}$) του ρεύματος της πηγής.
2. Στη συνέχεια υπολογίζονται οι συντελεστές
 - μετατόπισης $PF_{disp} = DPF = \cos(\varphi_1)$,
 - παραμόρφωσης $PF_{dist} = \frac{I_{S1,rms}}{I_{S,rms}}$,
 - και από αυτούς ο πραγματικός συντελεστής ισχύος $PF_{true} = PF_{disp} \times PF_{dist}$.
3. Έπειτα, τα P και Q υπολογίζονται ως:

$$P = S \cdot PF_{true}$$

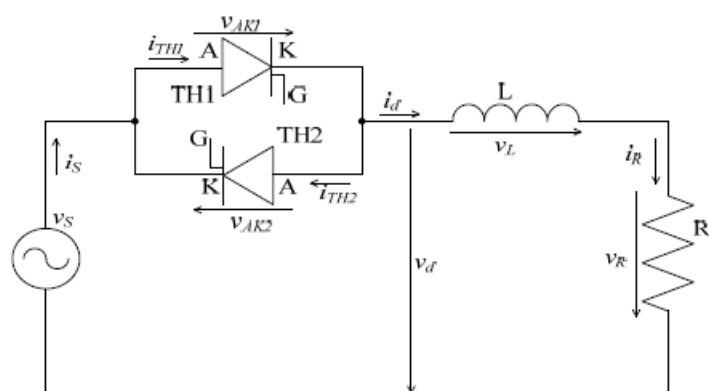
και

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2},$$

$$\text{όπου } S = V_{S,rms} \times I_{S,rms}$$

10.5 ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΜΕ ΩΜΙΚΟ - ΕΠΑΓΩΓΙΚΟ ΦΟΡΤΙΟ

Στο σχήμα 10.9 σχεδιάζεται η τοπολογία ενός μονοφασικού μετατροπέα εναλλασσόμενης τάσης σε εναλλασσόμενη με ωμικό - επαγωγικό φορτίο. Είναι προφανές ότι ομαλή λειτουργία του κυκλώματος είναι εφικτή μόνο για γωνίες έναυσης μεγαλύτερες ή ίσες με τη γωνία φορτίου (φ), αφού και στο ωμικό - επαγωγικό φορτίο υπάρχει διαφορά μεταξύ τάσης και ρεύματος. Άρα η γωνία έναυσης στην συγκεκριμένη περίπτωση μπορεί να μεταβληθεί στο διάστημα $[\varphi^\circ - 180^\circ]$, μέσα στο οποίο επιτυγχάνεται και έλεγχος της ενεργού τιμής της τάσης εξόδου. Είναι προφανές ότι, για γωνία έναυσης $\alpha = \varphi$ έχουμε συνεχή αγωγή ρεύματος στο κύκλωμα και η τάση εισόδου εμφανίζεται στην έξοδο του κυκλώματος. Τα ισοδύναμα κυκλώματα που περιγράφουν τη λειτουργία του κυκλώματος είναι όμοια με αυτά του σχήματος 10.2. Για ωμικό-επαγωγικό φορτίο όταν ένα από τα δύο θυρίστορ άγει, ισχύει η σχέση :



Σχήμα 10.9: Μονοφασικός μετατροπέας εναλλασσόμενης τάσης σε εναλλασσόμενη τάση με αντιπαράλληλα θυρίστορ και ωμικό - επαγωγικό φορτίο.

$$L \cdot \frac{di_s(t)}{dt} + R \cdot i_s(t) = v_s(t) \Rightarrow L \cdot \frac{di_s(t)}{dt} + R \cdot i_s(t) = \sqrt{2} \cdot V_s \cdot \sin(\omega \cdot t) \quad (10.4)$$

Η λύση της παραπάνω διαφορικής εξίσωσης δίνεται από την σχέση :

$$i_s(t) = i_d(t) = \frac{\sqrt{2} \cdot V_s}{|Z|} \left[\sin(\omega \cdot t - \varphi) - \sin(\alpha - \varphi) \cdot e^{(R/L) \cdot \left(\frac{\alpha}{\omega} - t\right)} \right] \quad (10.5)$$

Όπου :

α : η γωνία έναυσης του κυκλώματος

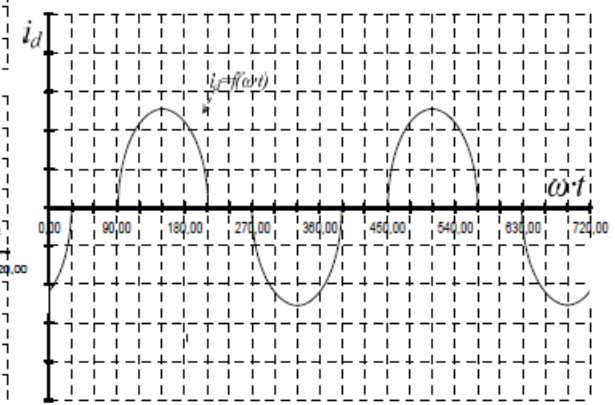
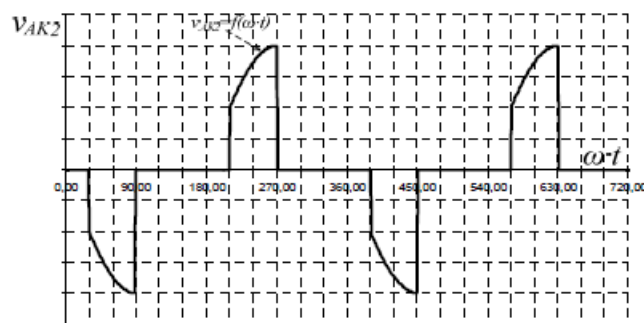
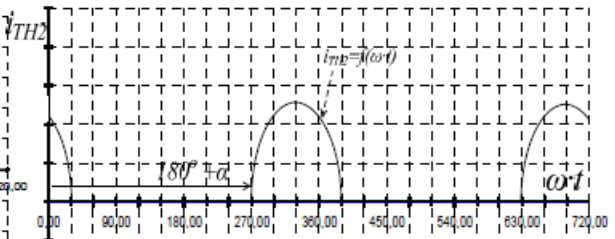
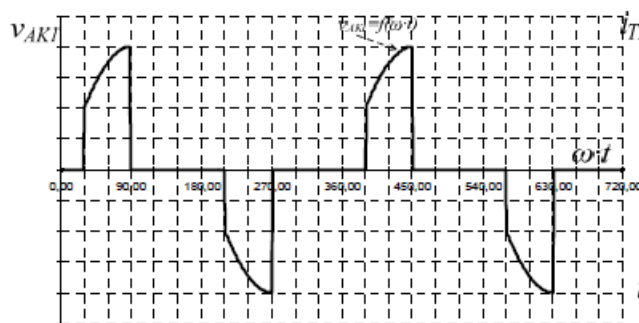
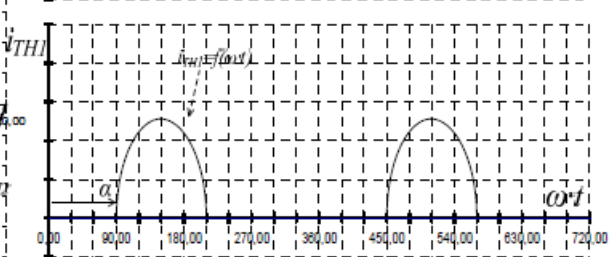
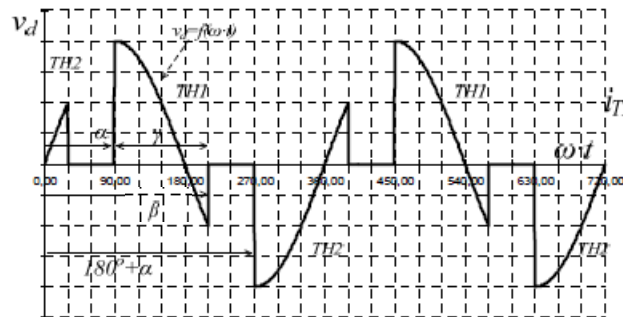
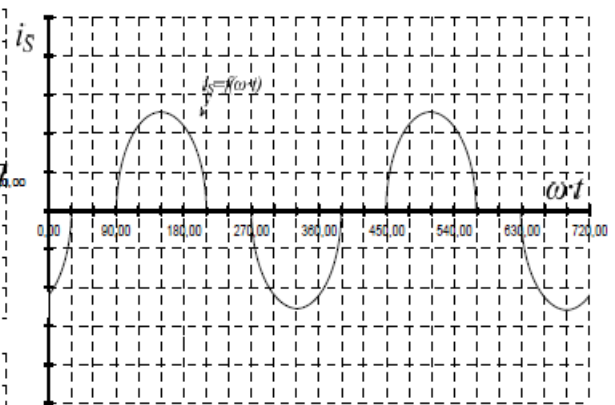
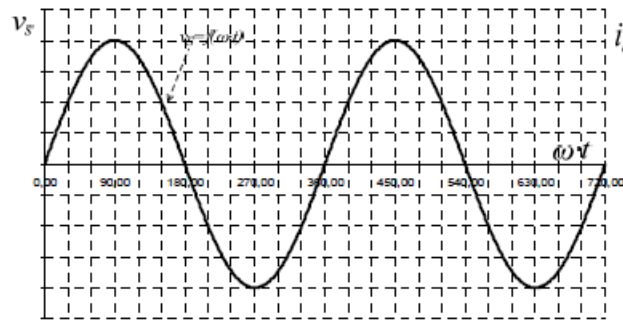
φ : η γωνία φορτίου, ενώ : $\varphi = \tan^{-1} \left(\frac{\omega \cdot L}{R} \right)$

$|Z|$: το μέτρο της σύνθετης αντίστασης του φορτίου, ενώ : $|Z| = \sqrt{R^2 + (\omega \cdot L)^2}$

ω : η γωνιακή συχνότητα της τάσης εισόδου, ενώ : $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$

Η πιο ακατάλληλη στιγμή για έναυση των ημιαγωγικών στοιχείων του κυκλώματος είναι η χρονική στιγμή $(\alpha/\omega) - t$, διότι τότε το ρεύμα αποκτά τη μέγιστή του τιμή. Επιπλέον η κυματομορφή του ρεύματος δεν είναι πια ημιτονοειδής, όπως φαίνεται από την εξίσωση 10.5, αλλά αποτελείται από μια ημιτονοειδή και μια εκθετική συνιστώσα η οποία φθίνει με τη χρονική σταθερά $\tau = L/R$. Το κύκλωμα θα αρχίσει να διαρρέεται από ρεύμα αμέσως μόλις δοθεί παλμός έναυσης στα ημιαγωγικά στοιχεία δηλαδή, για το θυρίστορ TH₁ στη γωνία α και στη γωνία $\pi + \alpha$ για το θυρίστορ TH₂.

Στα σχήματα 10.10 και 10.11 παρουσιάζονται οι κυματομορφές των τάσεων και των ρευμάτων κατά τη λειτουργία ενός μονοφασικού μετατροπέα εναλλασσόμενης τάσης σε εναλλασσόμενη με ωμικό - επαγωγικό φορτίο.



Σχήμα 10.10: Κυματομορφές τάσεων κατά τη λειτουργία ενός μετατροπέα με αντιπαράλληλα θυρίστωρ και ωμικό - επαγωγικό φορτίο.

Σχήμα 10.11: Κυματομορφές ρευμάτων κατά τη λειτουργία ενός μετατροπέα με αντιπαράλληλα θυρίστωρ και ωμικό - επαγωγικό φορτίο.

Η γωνία σβέσης β_1 , η γωνία που μηδενίζεται το ρεύμα που διαρρέει το θυρίστορ, μπορεί να υπολογιστεί από την εξίσωση 10.5 αν θέσουμε $i_s=0$ για $\omega \cdot t = \beta_1$. Άρα:

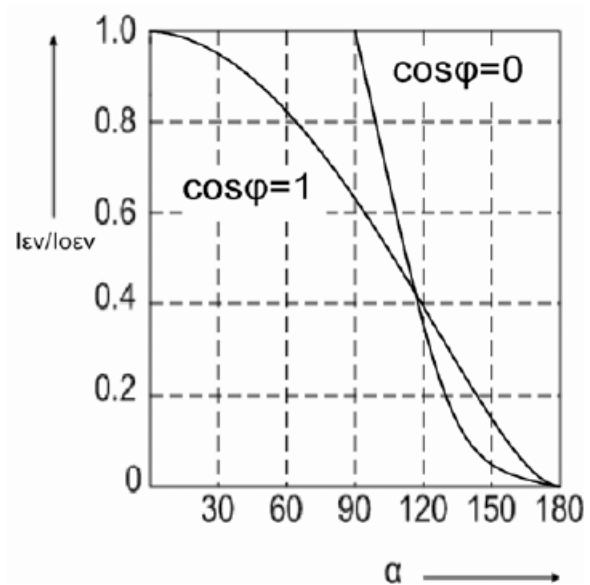
$$i_s = 0 = \left[\sin(\beta_1 - \varphi) - \sin(\alpha - \varphi) \cdot e^{\frac{(R/L)\left(\frac{\alpha - \beta_1}{\omega}\right)}{}} \right] \quad (10.6)$$

Ενώ, η γωνία αγωγής γ , δηλαδή η γωνία που δίνει το χρόνο αγωγής του κάθε ημιαγωγικού στοιχείου για κάθε θυρίστορ δίνεται από την σχέση:

$$\gamma = \beta_1 - \alpha$$

(10.7)

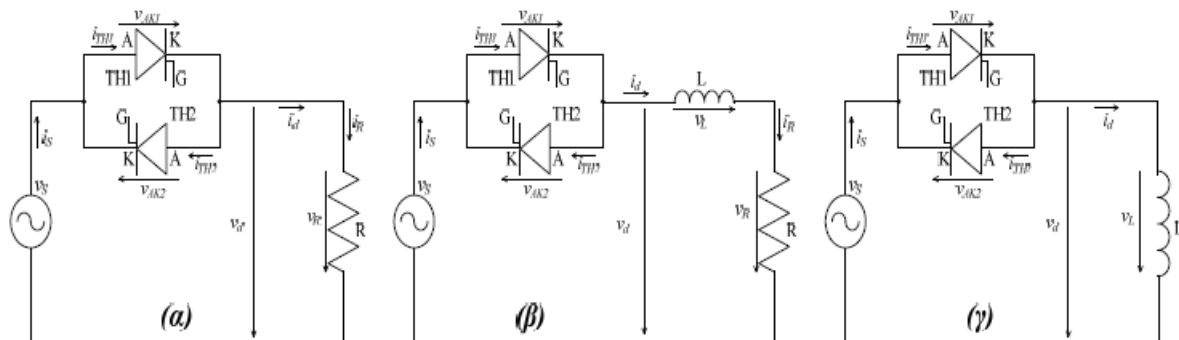
Στο σχήμα 10.12 σχεδιάζεται η χαρακτηριστική ελέγχου των μονοφασικών μετατροπέων εναλλασσόμενης τάσης σε εναλλασσόμενη τάση με αντιπαράλληλα θυρίστορ. Η χαρακτηριστική ελέγχου είναι ο λόγος της ενεργού τιμής του ρεύματος προς τη ενεργό τιμή του ρεύματος για γωνία έναυσης ίση με μηδέν μοίρες (μέγιστη τιμή) σε συνάρτηση της γωνίας έναυσης και με παράμετρο τη φύση του φορτίου. Μεταξύ των καμπυλών για $\cos\varphi=1$ (ωμικό φορτίο) και $\cos\varphi=0$ (επαγωγικό φορτίο), βρίσκονται όλες οι καμπύλες για ωμικό-επαγωγικό φορτίο. Η γωνία έναυσης σ' αυτή τη περίπτωση θα πρέπει να παίρνει τιμές μεγαλύτερες της γωνίας του φορτίου για να έχουμε ομαλή λειτουργία του κυκλώματος.



Σχήμα 10.12: Χαρακτηριστική ελέγχου μονοφασικού μετατροπέα εναλλασσόμενης τάσης σε εναλλασσόμενη τάση με αντιπαράλληλα θυρίστορ.

10.7 ΕΡΓΑΣΙΑ

- 1) Για τα παρακάτω κυκλώματα, του σχήματος 10.17, να σχεδιάσετε τις κυματομορφές των ακόλουθων ηλεκτρικών μεγεθών $v_s=f(\omega t)$, $v_d=f(\omega t)$, $v_{AK1}=f(\omega t)$, $v_{AK2}=f(\omega t)$, $i_s=f(\omega t)$, $i_d=f(\omega t)$, $i_{TH1}=f(\omega t)$ και $i_{TH2}=f(\omega t)$, για τις ακόλουθες γωνίες έναυσης : $\alpha=60^\circ$ και $\alpha=120^\circ$ και για τα τρία κυκλώματα (για ευκολία χρησιμοποιήστε τις έτοιμες καμπύλες των ημιτόνων που σας δίνονται, στο τέλος της άσκησης, όπου με συνεχή γραμμή σχεδιάζεται η v_s και με διακεκομμένη η $-v_s$). Επίσης: v_s : ημιτονοειδής τάση του δικτύου με $V_{s,rms}=230\text{Volt}$, $f=50\text{Hz}$, $R=100\Omega$ και $L=400\text{mH}$.



Σχήμα 10.17: Μονοφασικός μετατροπέας εναλλασσόμενης τάσης σε εναλλασσόμενη τάση με αντιπαράλληλα θυρίστορ με διάφορα φορτία στην έξοδο.

- 5) Για την περίπτωση των κυκλωμάτων β και γ του σχήματος 10.17 να υπολογίσετε τις θεωρητικές τιμές της μέσης τιμής της τάσης εξόδου V_d για τις ακόλουθες γωνίες : $\alpha=36^\circ$, και 72° μοίρες.
- 6) Τι επιτυγχάνετε μεταβάλλοντας τη γωνία έναυσης α σε ένα μετατροπέα εναλλασσόμενης τάσης σε εναλλασσόμενη τάση με αντιπαράλληλα θυρίστορ και ποια είναι τα όρια μέσα στα οποία μπορεί να κυμανθεί η τιμή αυτής της γωνίας (να γίνει διερεύνηση με το φορτίο);
- 7) Σε έναν μονοφασικό μετατροπέα εναλλασσόμενης τάσης σε εναλλασσόμενη τάση με αντιπαράλληλα θυρίστορ θα μπορούσατε να χρησιμοποιήσετε δίοδο ελεύθερης διέλευσης (όπως κάνουντε στις ανορθωτικές διατάξεις) με σκοπό να αυξήσετε τη μέση τιμή της τάσης στο φορτίο; Δικαιολογείστε πλήρως την απάντησή σας.
- 8) Σε έναν μονοφασικό μετατροπέα εναλλασσόμενης τάσης σε εναλλασσόμενη τάση με αντιπαράλληλα θυρίστορ και με ωμικό-επαγωγικό φορτίο να υπολογίσετε την ελάχιστη τιμή που μπορεί να πάρει η γωνία έναυσης α και γι' αυτή τη γωνία να σχεδιάσετε τις κυματομορφές των ακόλουθων ηλεκτρικών μεγεθών $v_s=f(\omega t)$, $v_d=f(\omega t)$, $v_{AK1}=f(\omega t)$, $v_{AK2}=f(\omega t)$, $i_s=f(\omega t)$, $i_d=f(\omega t)$, $i_{TH1}=f(\omega t)$ και $i_{TH2}=f(\omega t)$. Έχουμε ότι : $V_{s,rms}=230\text{Volt}$, $f=50\text{Hz}$, $R=10\Omega$, $L=20\text{mH}$.
- 9) Κατά τη λειτουργία ενός μονοφασικού μετατροπέα εναλλασσόμενης τάσης σε εναλλασσόμενη τάση με αντιπαράλληλα θυρίστορ και με ωμικό φορτίο απαιτείται ή όχι άεργος ισχύς από το τη πηγή τροφοδοσίας; Να εξηγήσετε την απάντησή σας. Όσο μεγαλώνει η γωνία έναυσης μεγαλώνει ή όχι η διαφορά φάσης μεταξύ της τάσης εισόδου και της βασικής αρμονικής του ρεύματος για την ίδια λειτουργία.

- 10) Ποιες είναι σήμερα οι κυριότερες εφαρμογές των μετατροπέων εναλλασσόμενης τάσης σε εναλλασσόμενη τάση με αντιπαράλληλα θυρίστορ.
- 11) Τι συμβαίνει κατά τη λειτουργία ενός μονοφασικού μετατροπέα εναλλασσόμενης τάσης σε εναλλασσόμενη τάση με αντιπαράλληλα θυρίστορ και με επαγωγικό φορτίο αν παλμοδοτηθεί με παλμούς έναυσης μορφής $[α^\circ - 180^\circ]$ και αν παλμοδοτηθεί με στενούς παλμούς για $α=45^\circ$; Να δικαιολογήσετε την απάντησή σας.
- 12) Τι δείχνει η χαρακτηριστική ελέγχου των μονοφασικών μετατροπέων εναλλασσόμενης τάσης σε εναλλασσόμενη τάση με αντιπαράλληλα θυρίστορ;

