

ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΑ ΙΣΧΥΟΣ

ΣΗΜΕΙΩΣΕΙΣ

Μάθημα 5^ο – Μετατροπείας ενός παλμού

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

5.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

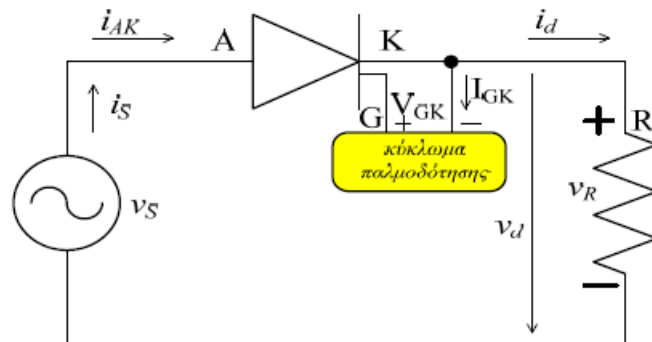
Μετατροπείες εναλλασσόμενης τάσης σε συνεχή τάση ονομάζονται οι τοπολογίες μετατροπέων που τροφοδοτούνται με εναλλασσόμενη τάση στην είσοδό τους ενώ στην έξοδό τους παράγουν μία συνεχή τάση. Όλοι οι μετατροπείς που ανήκουν σ' αυτή τη κατηγορία αποκαλούνται επίσης και **ανορθωτές ή ανορθωτικές διατάξεις**. Στην διεθνή βιβλιογραφία [1-9, 14-22] έχει παρουσιαστεί μία πληθώρα τοπολογιών ανορθωτικών διατάξεων οι οποίες διακρίνονται σε κατηγορίες σύμφωνα με τη δυνατότητα ελέγχου και το είδος της τροφοδοσίας εισόδου. Έτσι λοιπόν, σύμφωνα με τη δυνατότητα ελέγχου που παρέχουν οι ανορθωτικές διατάξεις κατηγοριοποιούνται ως εξής :

- α) Μη ελεγχόμενες ανορθωτικές διατάξεις :* Σ' αυτή την κατηγορία ανήκουν όλες οι ανορθωτικές διατάξεις που αποτελούνται μόνο από μη ελεγχόμενα ημιαγωγικά στοιχεία ισχύος, δηλαδή διόδους. Ονομάζονται έτσι, γιατί *δεν παρέχουν τη δυνατότητα ρύθμισης της τάσης εξόδου* (εξαιτίας των διόδων), αλλά δίδουν μία τάση σταθερής τιμής, η οποία εξαρτάται μόνο από την είσοδο και την τοπολογία του μετατροπέα.
- β) Ημι-ελεγχόμενες ανορθωτικές διατάξεις :* Σ' αυτή την κατηγορία ανήκουν όλες οι ανορθωτικές διατάξεις που αποτελούνται από ημι-ελεγχόμενα ημιαγωγικά στοιχεία (θυρίστορ) καθώς και μη ελεγχόμενα ημιαγωγικά στοιχεία ισχύος (διόδους). Ονομάζονται έτσι, γιατί *παρέχουν κατά ένα μέρος τη δυνατότητα ρύθμισης της τάσης εξόδου* (εξαιτίας των διόδων). Η δυνατότητα ρύθμισης της τάσης εξόδου από μία μέγιστη θετική τιμή μέχρι το μηδέν επιτυγχάνεται μέσω του ελέγχου της γωνίας έναυσης των θυρίστορ.
- γ) Πλήρως ελεγχόμενες ανορθωτικές διατάξεις :* Σ' αυτή την κατηγορία ανήκουν όλες οι ανορθωτικές διατάξεις που αποτελούνται μόνο από ημι-ελεγχόμενα ημιαγωγικά στοιχεία (θυρίστορ). Ονομάζονται έτσι, γιατί *παρέχουν τη δυνατότητα πλήρους ρύθμισης της τάσης εξόδου* από μία μέγιστη θετική τιμή μέχρι το μηδέν ή μέχρι μία ελάχιστη αρνητική τιμή, αν υπάρχει το κατάλληλο φορτίο, μέσω του ελέγχου της γωνίας έναυσης. Αυτή η κατηγορία των ανορθωτικών διατάξεων δύναται να λειτουργεί σε *δύο τεταρτημόρια* (θετικό ρεύμα και θετική ή αρνητική τάση εξόδου), ενώ οι προηγούμενες δύο κατηγορίες λειτουργούν μόνο στο πρώτο τεταρτημόριο (θετικό ρεύμα και τάση εξόδου).

Ακόμη, η τάση τροφοδοσίας των μετατροπέων αυτών μπορεί να είναι είτε μονοφασική είτε τριφασική με αποτέλεσμα να υπάρχουν διάφορες τοπολογίες μονοφασικών και τριφασικών ανορθωτικών διατάξεων. Τέλος, οι ανορθωτικές διατάξεις χαρακτηρίζονται και από το πλήθος των ελεγχόμενων ή εν' δυνάμει ελεγχόμενων ημιαγωγικών στοιχείων που αποτελούνται και αποκαλούνται σύμφωνα με τον αριθμό αυτό. Για παράδειγμα, μετατροπέας ενός παλμού αποκαλείται η ανορθωτική διάταξη που αποτελείται από ένα ελεγχόμενο ημιαγωγικό στοιχείο, μετατροπέας δύο παλμών η ανορθωτική διάταξη που αποτελείται από δύο ελεγχόμενα ημιαγωγικά στοιχεία, μετατροπέας τριών παλμών από τρία, κ.ο.κ.

5.2 ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΑΣ ΕΝΟΣ ΠΑΛΜΟΥ

Στο *σχήμα 5.1* φαίνεται η τοπολογία του μετατροπέα ενός παλμού. Για την ανάλυση της λειτουργίας του, όπως θα δούμε στη συνέχεια, θα πρέπει να είναι γνωστή η λειτουργία του θυρίστορ καθώς επίσης και η φύση του φορτίου. Όσον αφορά το θυρίστορ γνωρίζουμε ότι για να μπει σε κατάσταση αγωγής θα πρέπει να είναι θετικά πολωμένο



Σχήμα 5.1: Τοπολογία μετατροπέα ενός παλμού.

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).

5.3 ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΜΕ ΩΜΙΚΟ ΦΟΡΤΙΟ

Από το *σχήμα 5.1* είναι προφανές ότι το θυρίστορ 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, ενώ θα εμφανίζει μηδενική πτώση τάσης στα άκρα του (θεωρώντας ιδανικό στοιχείο). Οι εξισώσεις που διέπουν τη λειτουργία του κυκλώματος κατά το χρονικό διάστημα αγωγής του θυρίστορ, θεωρώντας ότι τα στοιχεία του κυκλώματος είναι ιδανικά, έχουν ως εξής:

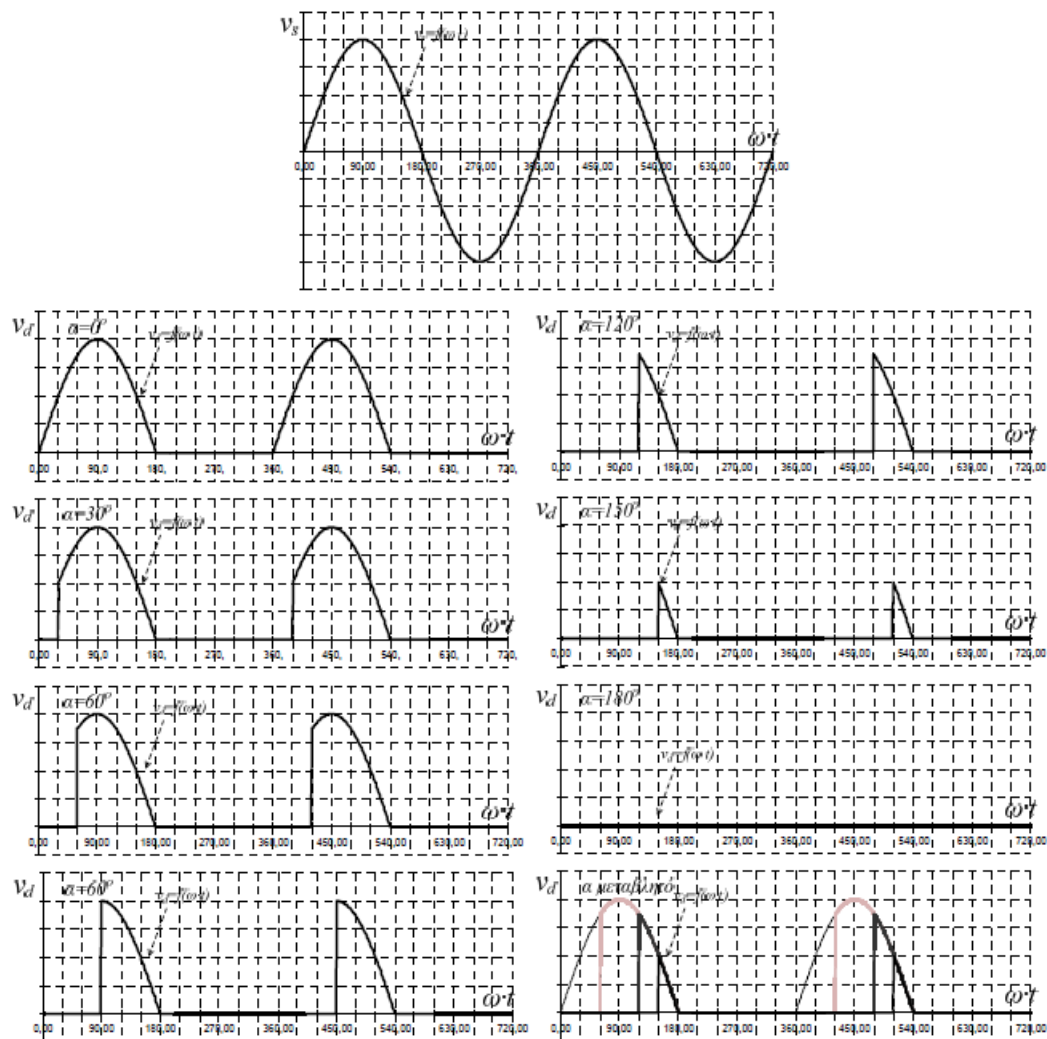
$$\begin{aligned} v_s(t) &= v_d(t) = v_R(t) \\ v_{AK}(t) &= 0 \text{ επειδή το θυρίστορ βρίσκεται σε κατάσταση αγωγής} \\ i_s(t) &= i_d(t) = i_R(t) = i_{AK}(t) = \frac{v_R(t)}{R} \end{aligned} \quad (5.1)$$

Το θυρίστορ θα οδηγηθεί σε κατάσταση αποκοπής όταν το ρεύμα του 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, άρα τις χρονικές στιγμές ($n \cdot 360^\circ + 180^\circ$). Από εκεί και πέρα το θυρίστορ θα παραμένει σε κατάσταση αποκοπής μέχρι να πολωθεί ξανά θετικά (στην επόμενη θετική ημιπερίοδο) και να του ξαναδοθεί νέος παλμός έναυσης για να επαναληφθεί η ίδια περιοδική λειτουργία. Για όσο χρόνο το στοιχείο βρίσκεται σε κατάσταση αποκοπής ισχύουν οι ακόλουθες εξισώσεις :

$$\begin{aligned} v_d(t) &= v_R(t) = 0 \\ v_{AK}(t) &= v_s(t) \text{ επειδή το θυρίστορ βρίσκεται σε κατάσταση αποκοπής} \\ i_s(t) &= i_d(t) = i_R(t) = i_{AK}(t) = 0 \end{aligned} \quad (5.2)$$

Στο σχήμα 5.2 παρουσιάζονται κυματομορφές της τάσης εισόδου και της τάσης εξόδου σε συνάρτηση του χρόνου και με παράμετρο τη γωνία έναυσης α . Παρατηρείστε πως για γωνία έναυσης $\alpha=0^\circ$ το κύκλωμα λειτουργεί ακριβώς, όπως θα λειτουργούσε, αν στη θέση του θυρίστορ υπήρχε ένα μη ελεγχόμενο ημιαγωγικό στοιχείο ισχύος, δηλαδή μία διάδος.



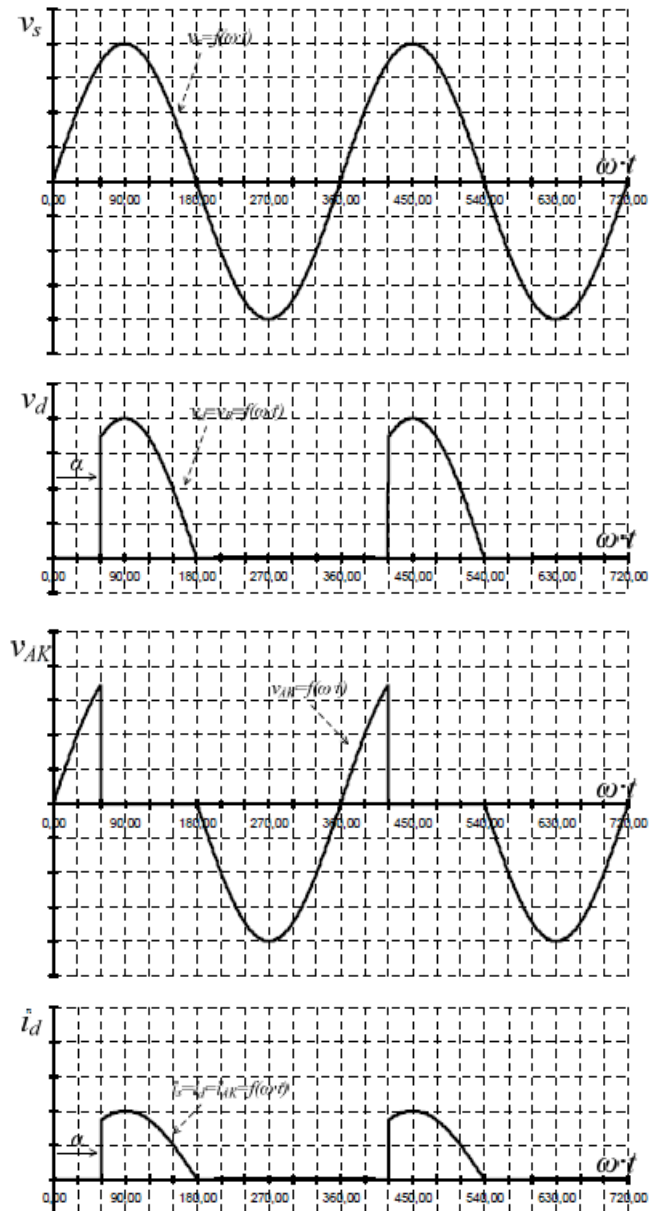
Σχήμα 5.2: Κυματομορφές της τάσης εισόδου και της τάσης εξόδου για μετατροπέα ενός παλμού με ωμικό φορτίο και με παράμετρο τη γωνία έναυσης.

Από τις υπόλοιπες κυματομορφές είναι προφανές ότι, όσο πιο μικρή τιμή έχει η γωνία έναυσης α τόσο πιο μεγάλη είναι η μέση 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 μέσης τιμής της τάσης εξόδου (υψηλή τάση) άρα και της ισχύς εξόδου. Αυτή είναι η κυρίαρχη φιλοσοφία της λειτουργίας όλων των ηλεκτρονικών μετατροπέων ισχύος, δηλαδή να επιτυγχάνεται έλεγχος ισχύος μέσω της ρύθμισης μεγεθών χαμηλής ισχύος και άρα εύκολα ρυθμιζόμενα. Ακόμη, από την μορφή της τάσης εξόδου φαίνεται πως με τη συγκεκριμένη τοπολογία επιτυγχάνεται ανόρθωση μόνο κατά τη μία ημιπερίοδο και γι' αυτό το συγκεκριμένο κύκλωμα αποκαλείται και μονοφασική ανορθωτική διάταξη μισού κύματος.

Στο σχήμα 5.3 δίνονται όλες οι κυματομορφές των τάσεων και των ρευμάτων, σε συνάρτηση του χρόνου, για τη λειτουργία του μετατροπέα ενός παλμού με ωμικό φορτίο και με γωνία έναυσης α .

Σύμφωνα με τον ορισμό της μέσης τιμής, για την τάση εξόδου προκύπτει:

$$\begin{aligned} V_d &= \frac{1}{T} \int_0^T v_d(t) \cdot dt = \frac{1}{\omega \cdot T} \int_0^T \omega \cdot v_d(t) \cdot d(t) = \frac{1}{2 \cdot \pi} \int_0^{2\pi} v_d(t) \cdot d(\omega \cdot t) \Rightarrow \\ \Rightarrow V_d &= \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \int_a^\pi \sqrt{2} \cdot V_s \cdot \sin(\omega \cdot t) \cdot d(\omega \cdot t) = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \sqrt{2} \cdot V_s \cdot \int_a^\pi \sin(\omega \cdot t) \cdot d(\omega \cdot t) \Rightarrow \\ \Rightarrow V_d &= \frac{V_s}{\sqrt{2} \cdot \pi} \cdot [-\cos(\omega \cdot t)]_a^\pi = \frac{V_s}{\sqrt{2} \cdot \pi} \cdot [-\cos \pi - (-\cos a)] \Rightarrow \end{aligned}$$



Σχήμα 5.3: Κυματομορφές τάσεων και ρευμάτων κατά τη λειτουργία ενός μετατροπέα ενός παλμού.

$$\Rightarrow V_d = \frac{V_s}{\sqrt{2} \cdot \pi} \cdot [\cos a + 1] \quad (5.3)$$

Όπου V_s η ενεργός τιμή της τάσης εισόδου. Ενώ, για την μέση τιμή του ρεύματος εξόδου καθώς και για την ισχύ στο φορτίο ισχύει:

$$I_d = \frac{V_s}{\sqrt{2} \cdot \pi \cdot R} \cdot [\cos a + 1] \quad (5.4)$$

$$P_d = V_d \cdot I_d = \left(\frac{V_s}{\sqrt{2} \cdot \pi} \cdot [\cos a + 1] \right) \cdot \left(\frac{V_s}{\sqrt{2} \cdot \pi \cdot R} \cdot [\cos a + 1] \right) \Rightarrow$$

$$\Rightarrow P_d = \frac{V_s^2}{2 \cdot \pi^2 \cdot R} \cdot [\cos a + 1]^2 \quad (5.5)$$

Ενώ η εξίσωση που δίνει την ενεργό τιμή της τάσης εξόδου προκύπτει ως εξής:

$$V_{d,rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T v_d^2(t) \cdot dt} = \sqrt{\frac{1}{\omega \cdot T} \int_0^T \omega \cdot v_d^2(t) \cdot d(t)} = \sqrt{\frac{1}{2 \cdot \pi} \int_0^{2\pi} v_d^2(t) \cdot d(\omega \cdot t)} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow V_{d,rms} = \sqrt{\frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \int_a^\pi (\sqrt{2} \cdot V_s \cdot \sin(\omega \cdot t))^2 \cdot d(\omega \cdot t)} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow V_{d,rms} = \sqrt{\frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot (\sqrt{2} \cdot V_s)^2 \cdot \int_a^\pi (\sin(\omega \cdot t))^2 \cdot d(\omega \cdot t)} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow V_{d,rms} = V_s \cdot \sqrt{\frac{1}{\pi} \cdot \left(\frac{\omega \cdot t}{2} - \frac{\sin(2 \cdot \omega \cdot t)}{4} \right) \Big|_a^\pi} \Rightarrow$$

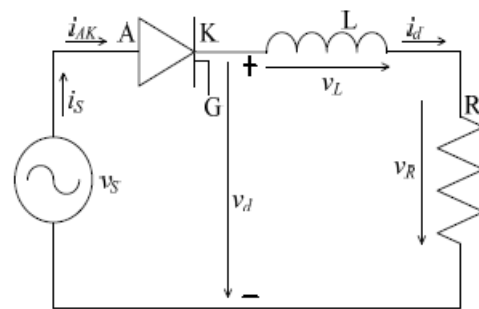
$$\Rightarrow V_{d,rms} = V_s \cdot \sqrt{\frac{1}{\pi} \cdot \left(\frac{\pi}{2} - \frac{\sin(2 \cdot \pi)}{4} - \left(\frac{\alpha}{2} - \frac{\sin(2 \cdot \alpha)}{4} \right) \right)} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow V_{d,rms} = V_s \cdot \sqrt{\frac{\pi - \alpha + \frac{1}{2} \cdot \sin(2 \cdot \alpha)}{2 \cdot \pi}} \quad (5.6)$$

Από όλες τις παραπάνω εξισώσεις είναι εμφανές ότι **όλα τα ηλεκτρικά μεγέθη στην έξοδο του μετατροπέα εξαρτώνται μόνο από τη γωνία έναυσης** και από κανένα άλλο μέγεθος.

5.4 ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΜΕ ΩΜΙΚΟ - ΕΠΑΓΩΓΙΚΟ ΦΟΡΤΙΟ

Στο σχήμα 5.4 φαίνεται ο μετατροπέας ενός παλμού με ωμικό – επαγωγικό φορτίο στην έξοδο. Η διαφορά κατά τη λειτουργία του συγκεκριμένου κυκλώματος οφείλεται καθαρά και μόνο στην επίδραση του πηνίου. Όπως είναι γνωστό, μια επαγωγή στο συνεχές ρεύμα αντιστέκεται συνεχώς σε οποιαδήποτε μεταβολή του ρεύματος προσπαθώντας να διατηρεί σταθερή τη τιμή ρεύματος που τη διαρρέει. Συνεπώς στο συγκεκριμένο κύκλωμα



Σχήμα 5.4: Μετατροπέας ενός παλμού με ωμικό – επαγωγικό φορτίο.

η έναυση και ιδιαίτερα η σβέση του θυρίστορ χρήζουν ιδιαίτερης προσοχής. Καταρχήν, όσον αφορά την έναυση, πρέπει να εξασφαλίζεται η άνοδος του ρεύματος ισχύος πάνω από την τιμή του ρεύματος συγκράτησης, σε χρόνο μικρότερο από τη διάρκεια του παλμού έναυσης ώστε να προλάβει το στοιχείο να μπει σε κατάσταση αγωγιμότητας. Σε αντίθετη περίπτωση, αν δηλαδή το ρεύμα καθυστερήσει να αυξηθεί, το στοιχείο θα επανέλθει σε κατάσταση αποκοπής. Η περίπτωση αυτή θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη κατά την διαδικασία παλμοδότησης του στοιχείου και γι' αυτό δίδονται στην πύλη του στοιχείου περισσότεροι του ενός παλμοί έναυσης (συνήθως δύο συνεχόμενοι παλμοί). Όσον αφορά την σβέση του στοιχείου, όπως είναι γνωστό, απαιτείται η πτώση του ρεύματος ισχύος κάτω από το ρεύμα συγκράτησης.

Αναλύοντας τη λειτουργία του κυκλώματος, είναι προφανές ότι το ημιαγωγικό στοιχείο θα μπει σε κατάσταση αγωγής τη στιγμή που θα του δοθεί κατάλληλος παλμός έναυσης και εφόσον φυσικά το στοιχείο είναι θετικά πολωμένο (άρα, τις θετικές ημιπεριόδους της εναλλασσόμενης τάσης εισόδου). Από εκείνη τη στιγμή το κύκλωμα θα αρχίσει να διαρρέεται από ρεύμα, ενώ στα άκρα του ημιαγωγικού στοιχείου θα εμφανίζεται μηδενική πτώση τάσεως (για ιδανικό θυρίστορ). Επομένως, κατά την αγωγή ισχύει :

$$\begin{aligned} v_s(t) &= v_d(t) = v_R(t) + v_L(t) \\ v_{AK}(t) &= 0 \text{ επειδή το θυρίστορ βρίσκεται σε κατάσταση αγωγής} \\ i_s(t) &= i_d(t) = i_R(t) = i_{AK}(t) \end{aligned} \quad (5.7)$$

Επίσης, έχουμε ότι :

$$L \frac{di_d(t)}{dt} + R \cdot i_d(t) = \sqrt{2} \cdot V_s \cdot \sin(\omega \cdot t) \Rightarrow i_d(t) = \frac{\sqrt{2} \cdot V_s}{|Z|} \cdot \sin(\omega \cdot t - \varphi) + A e^{-\frac{R}{L}t}$$

$$\text{όπου: } |Z| = \sqrt{R^2 + (\omega \cdot L)^2} \text{ και } \omega = \tan^{-1} \left(\frac{\omega \cdot L}{R} \right)$$

Θέτοντας την αρχική συνθήκη, ότι το ρεύμα είναι μηδέν τη χρονική στιγμή $\omega \cdot t = a$ η εξίσωση που μας δίνει το ρεύμα γίνεται :

$$i_d(t) = \frac{\sqrt{2} \cdot V_s}{|Z|} \cdot \left[\sin(\omega \cdot t - \varphi) - \sin(a - \varphi) e^{-\frac{R}{L} \left(\frac{a}{\omega} - t \right)} \right] \quad (5.8)$$

Σ' ένα μεγάλο μέρος του χρονικού διαστήματος που το κύκλωμα διαρρέεται από ρεύμα η επαγωγή αποθηκεύει ενέργεια και συμπεριφέρεται ως παθητικό στοιχείο (για όσο χρονικό διάστημα $v_d(t) > v_R(t)$). Κάποια στιγμή, η εναλλασσόμενη τάση εισόδου αρχίζει να μειώνεται, άρα να παρέχεται λιγότερη στιγμιαία ισχύς στο κύκλωμα, με αποτέλεσμα το ρεύμα εξόδου να φθάσει σε μία μέγιστη τιμή (τη χρονική στιγμή όπου $v_d(t) = v_R(t)$) και από εκεί και πέρα το ρεύμα να αρχίσει να μειώνεται (για όσο χρόνο $v_d(t) < v_R(t)$). Η επαγωγή αντιλαμβάνεται την αρνητική μεταβολή του ρεύματος και αντιδρά σύμφωνα με το νόμο του Lenz, από παθητικό στοιχείο γίνεται ενεργητικό και παρέχει την αποθηκευμένη της ενέργεια με σκοπό να διατηρήσει την ίδια τιμή του ρεύματος. Η συμπεριφορά αυτή έχει ως αποτέλεσμα το θυρίστορ να συνεχίσει να άγει και μετά το μηδενισμό της τάσης εισόδου, μέχρι τη χρονική στιγμή β_1 , όπου η ενέργεια της επαγωγής, όπως και το ρεύμα

που διαρρέει το κύκλωμα, μηδενίζονται. Το thyristor θα παραμείνει σε κατάσταση αποκοπής μέχρι να πολωθεί ξανά θετικά (στην επόμενη θετική ημιπερίοδο) και όταν του δοθεί νέος παλμός έναυσης θα επαναληφθεί η ίδια περιοδική λειτουργία. Για όσο χρόνο το στοιχείο βρίσκεται σε κατάσταση αποκοπής ισχύουν οι ακόλουθες εξισώσεις :

$$v_d(t) = v_R(t) = v_L(t) = 0$$

$$v_{AK}(t) = v_s(t) \text{ επειδή το thyristor βρίσκεται σε κατάσταση αποκοπής} \quad (5.9)$$

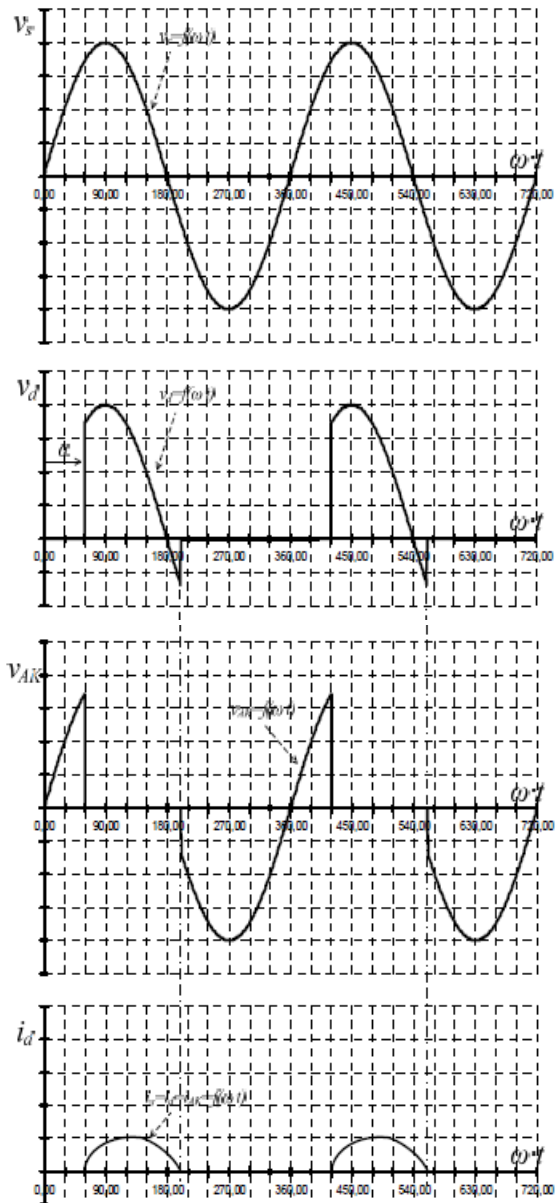
$$i_s(t) = i_d(t) = i_R(t) = i_{AK}(t) = 0$$

Στο σχήμα 5.5 παρουσιάζονται κυματομορφές της τάσης εισόδου v_s , της τάσης στην έξοδο του μετατροπέα v_d , της τάσης στα άκρα του thyristor v_{AK} καθώς και η κυματομορφή του ρεύματος που διαρρέει το κύκλωμα για τυχαία γωνία έναυσης α . Παρατηρείστε πως, παρόλο που η τάση στην έξοδο του μετατροπέα λαμβάνει θετικές και αρνητικές τιμές το ρεύμα είναι μονίμως θετικό, μια και το thyristor δεν επιτρέπει την αγωγή αρνητικού ρεύματος.

Στο σχήμα 5.6.α ορίζονται η γωνία έναυσης α , η γωνία αγωγής γ καθώς και οι γωνίες β και β_1 . Ως, β_1 ορίζεται η γωνία που το κύκλωμα σταματάει να διαρρέεται από ρεύμα και ισχύει ότι: $\beta_1 = \beta + 180^\circ$. Στο σχήμα 5.6.β σχεδιάζονται οι κυματομορφές της τάσης στην έξοδο καθώς και της τάσης πάνω στην ωμική αντίσταση. Εφαρμόζοντας το νόμο των τάσεων του Kirchhoff προκύπτει ότι:

$$v_L(t) = v_d(t) - v_R(t)$$

Επομένως, η κυματομορφή της v_L μπορεί να βρεθεί γραφικά. Επιπλέον, τα δύο εμβαδά E_1 και E_2 , που φαίνονται γραμμοσκιασμένα θα πρέπει να είναι ίσα μεταξύ τους μια και η ανάλυση του κυκλώματος γίνεται στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας και η μέση τιμή της τάσης στα άκρα της επαγωγής είναι ίση με μηδέν. Η επαγωγή συμπεριφέρεται ως παθητικό στοιχείο και αποθηκεύει ενέργεια για όσο $v_d(t) > v_R(t)$, δηλαδή από α μέχρι το σημείο



Σχήμα 5.5: Κυματομορφές τάσεων και ρευμάτων κατά τη λειτουργία ενός μετατροπέα ενός παλμού με ωμικό - επαγωγικό φορτίο.

τομής των καμπυλών, ενώ από τη χρονική στιγμή εκείνη μέχρι τη στιγμή β_1 η επαγωγή συμπεριφέρεται ως ενεργητικό στοιχείο αφού $v_d(t) < v_R(t)$.

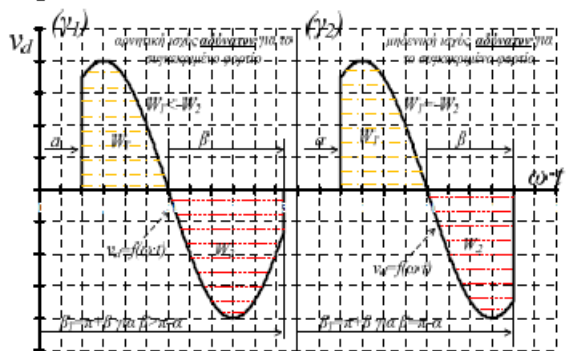
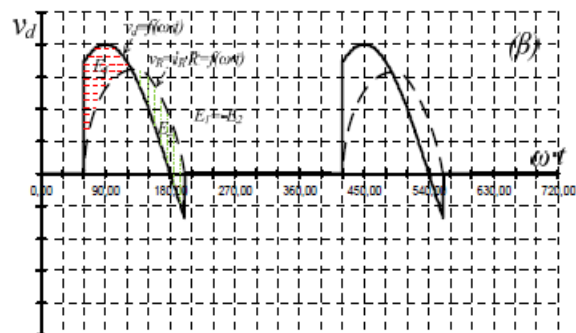
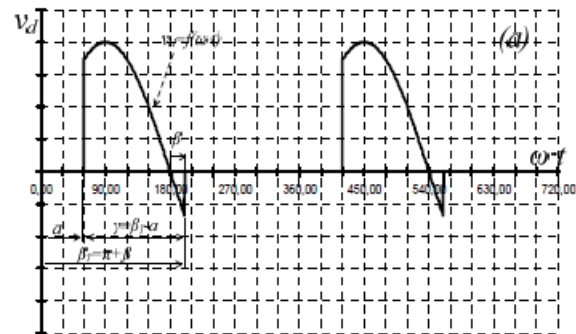
Μεγάλη σημασία έχει η απάντηση στο εξής ερώτημα: «για πόσο χρόνο θα μπορούσε μια επαγωγή να διατηρήσει σε κατάσταση αγωγής το κύκλωμα πέρα από τις 180° ;» Για να απαντήσουμε σ' αυτό το ερώτημα θα λάβουμε υπόψη μας τις περιπτώσεις :

α) Έστω, ότι υπήρχε μια επαγωγή πολύ μεγάλης τιμής η οποία θα μπορούσε να διατηρήσει σε κατάσταση αγωγής το κύκλωμα μέχρι τη χρονική στιγμή β_1 με: $2\pi - \beta_1 < \alpha$ (σχήμα 5.6.γ₁). Αυτό θα σήμαινε ότι το εμβαδό W_1 είναι μικρότερο του εμβαδού W_2 και επομένως η μέση τιμή της τάσης εξόδου V_d θα ήταν αρνητική άρα και η ισχύς στην έξοδο θα ήταν αρνητική γεγονός που είναι αδύνατο αφού στην έξοδο έχουμε παθητικό φορτίο.

β) Έστω, ότι η επαγωγή του κυκλώματος διατηρούσε σε αγωγή το κύκλωμα μέχρι τη χρονική στιγμή β_1 με: $2\pi - \beta_1 = \alpha$ (σχήμα 5.6.γ₂). Αυτό θα σήμαινε ότι το εμβαδό W_1 θα ήταν ίσο με το εμβαδό W_2 και επομένως η μέση τιμή της τάσης εξόδου V_d θα ήταν μηδενική άρα και η ισχύς στην έξοδο θα ήταν μηδενική γεγονός που είναι αδύνατο αφού στην έξοδο έχουμε παθητικό φορτίο το οποίο για

όσο χρόνο διαρρέεται από ρεύμα καταναλώνει ένα ποσό ισχύος.

γ) Επομένως, σε κάθε περίπτωση το εμβαδό W_1 θα πρέπει να είναι μεγαλύτερο του εμβαδού W_2 και επομένως η μέση τιμή της τάσης εξόδου V_d θα είναι θετική άρα και η ισχύς στην έξοδο θετική εφόσον έχουμε παθητικό φορτίο και σύμφωνα με την αρχή διατήρησης της ενέργειας. Στην περίπτωση που στην έξοδο του μετατροπέα, έχουμε κατάλληλα συνδεδεμένο ενεργητικό φορτίο, οι ανορθωτικές διατάξεις δύναται να λειτουργούν και ως αντιστροφείς μεταφέροντας ισχύ από την έξοδο στην είσοδο.

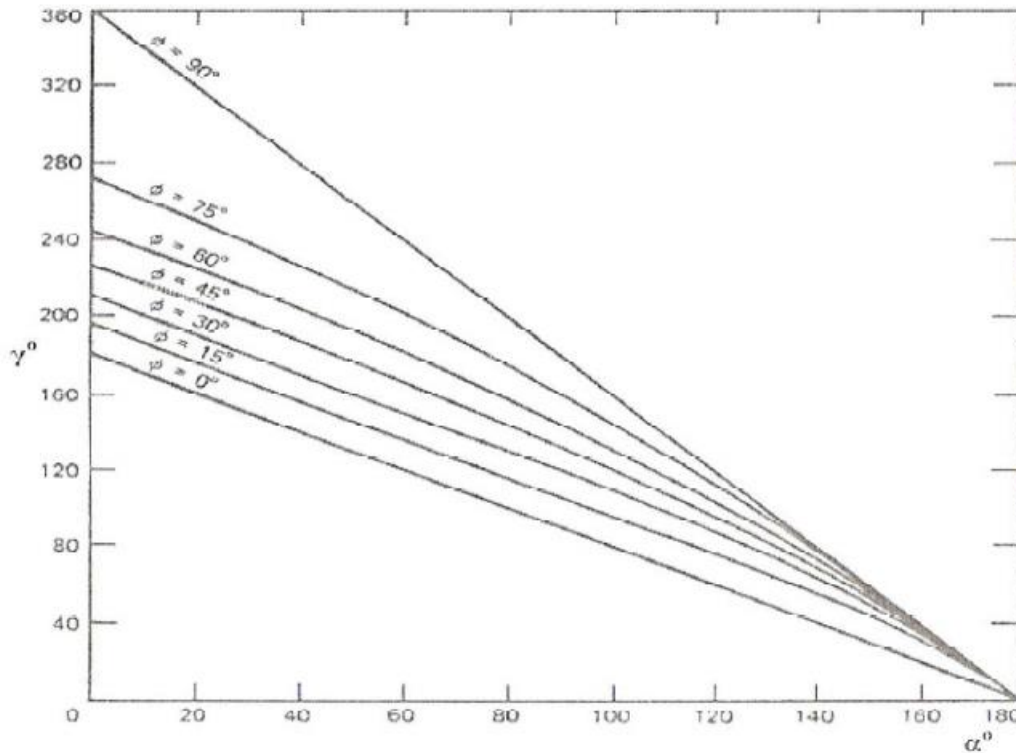


Σχήμα 5.6: Χρονικά διαστήματα που το πηνίο λειτουργεί ως παθητικό ή ενεργητικό στοιχείο και θεωρητικός τρόπος υπολογισμού του διαστήματος αγωγής μετά τις 180° .

Αν στην εξίσωση 5.8 θέσουμε ότι $i_d(t_{\beta 1})=0$, προκύπτει η ακόλουθη εξίσωση από την οποία μπορούν να υπολογιστούν η γωνία β_1 και η γωνία αγωγής γ :

$$\begin{aligned}\sin(\beta_1 - \varphi) &= \sin(a - \varphi) e^{\frac{R}{L} \frac{a - \beta_1}{\omega}} \\ \gamma &= \beta_1 - \alpha\end{aligned}\quad (5.10)$$

Στο σχήμα 5.7 παρουσιάζονται κάποιες καμπύλες από τις οποίες μπορεί να υπολογιστεί γραφικά η γωνία αγωγής του κυκλώματος (γ) αν είναι γνωστή η γωνία έναυσης (α) και η γωνία φορτίου (φ), χωρίς να χρειάζεται να επιλυθούν οι παραπάνω πολύπλοκες εξισώσεις.



Σχήμα 5.7: Καμπύλες υπολογισμού της γωνίας αγωγής γ ως συνάρτηση της γωνίας έναυσης α και με παράμετρο τη γωνία φορτίου φ .

Η μέση τιμή της τάσης εξόδου προκύπτει ως εξής:

$$\begin{aligned}V_d &= \frac{1}{T} \int_0^T v_d(t) \cdot dt = \frac{1}{\omega \cdot T} \int_0^T \omega \cdot v_d(t) \cdot d(t) = \frac{1}{2 \cdot \pi} \int_0^{2\pi} v_d(t) \cdot d(\omega \cdot t) \Rightarrow \\ \Rightarrow V_d &= \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \int_a^{\beta} \sqrt{2} \cdot V_s \cdot \sin(\omega \cdot t) \cdot d(\omega \cdot t) = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \sqrt{2} \cdot V_s \cdot \int_a^{\beta} \sin(\omega \cdot t) \cdot d(\omega \cdot t) \Rightarrow \\ \Rightarrow V_d &= \frac{V_s}{\sqrt{2} \cdot \pi} \cdot [-\cos(\omega \cdot t)]_a^{\beta} = \frac{V_s}{\sqrt{2} \cdot \pi} \cdot [-\cos \beta_1 - (-\cos a)] \Rightarrow \\ \Rightarrow V_d &= \frac{V_s}{\sqrt{2} \cdot \pi} \cdot [-\cos(\pi + \beta) - (-\cos a)] = \frac{V_s}{\sqrt{2} \cdot \pi} \cdot [-(\cos \beta) - (-\cos a)] \\ \Rightarrow V_d &= \frac{V_s}{\sqrt{2} \cdot \pi} \cdot [\cos a + \cos \beta]\end{aligned}\quad (5.11)$$

Όπου V_s η ενεργός τιμή της τάσης εισόδου και α και β πάντα σε ακτίνια (rad).
Για την μέση τιμή του ρεύματος εξόδου καθώς και για την ισχύ στο φορτίο ισχύει:

$$I_d = \frac{V_s}{\sqrt{2} \cdot \pi \cdot R} \cdot [\cos \alpha + \cos \beta] \quad (5.12)$$

$$\begin{aligned} P_d &= V_d \cdot I_d = \left(\frac{V_s}{\sqrt{2} \cdot \pi} \cdot [\cos \alpha + \cos \beta] \right) \cdot \left(\frac{V_s}{\sqrt{2} \cdot \pi \cdot R} \cdot [\cos \alpha + \cos \beta] \right) \Rightarrow \\ &\Rightarrow P_d = \frac{V_s^2}{2 \cdot \pi^2 \cdot R} \cdot [\cos \alpha + \cos \beta]^2 \end{aligned} \quad (5.13)$$

Ενώ η εξίσωση που δίνει την ενεργό τιμή της τάσης εξόδου προκύπτει ως εξής:

$$\begin{aligned} V_{d,rms} &= \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T v_d^2(t) \cdot dt} = \sqrt{\frac{1}{\omega \cdot T} \int_0^T \omega \cdot v_d^2(t) \cdot d(t)} = \sqrt{\frac{1}{2 \cdot \pi} \int_0^{2\pi} v_d^2(t) \cdot d(\omega \cdot t)} \Rightarrow \\ &\Rightarrow V_{d,rms} = \sqrt{\frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \int_{\alpha}^{\beta} (\sqrt{2} \cdot V_s \cdot \sin(\omega \cdot t))^2 \cdot d(\omega \cdot t)} \Rightarrow \\ &\Rightarrow V_{d,rms} = \sqrt{\frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot (\sqrt{2} \cdot V_s)^2 \cdot \int_{\alpha}^{\beta} (\sin(\omega \cdot t))^2 \cdot d(\omega \cdot t)} \Rightarrow \\ &\Rightarrow V_{d,rms} = V_s \cdot \sqrt{\frac{1}{\pi} \cdot \left(\frac{\omega \cdot t}{2} - \frac{\sin(2 \cdot \omega \cdot t)}{4} \right) \Big|_{\alpha}^{\beta}} \Rightarrow \\ &\Rightarrow V_{d,rms} = V_s \cdot \sqrt{\frac{1}{\pi} \cdot \left(\frac{\beta_1}{2} - \frac{\sin(2 \cdot \beta_1)}{4} - \left(\frac{\alpha}{2} - \frac{\sin(2 \cdot \alpha)}{4} \right) \right)} \\ &\Rightarrow V_{d,rms} = V_s \cdot \sqrt{\frac{1}{\pi} \cdot \left(\frac{\pi + \beta}{2} - \frac{\sin(2 \cdot \pi + 2 \cdot \beta)}{4} - \left(\frac{\alpha}{2} - \frac{\sin(2 \cdot \alpha)}{4} \right) \right)} \Rightarrow \\ &\Rightarrow V_{d,rms} = V_s \cdot \sqrt{\frac{(\pi + \beta) - \alpha + \frac{1}{2} \cdot (\sin(2 \cdot \alpha) - \sin(2 \cdot \beta))}{2 \cdot \pi}} \end{aligned} \quad (5.14)$$

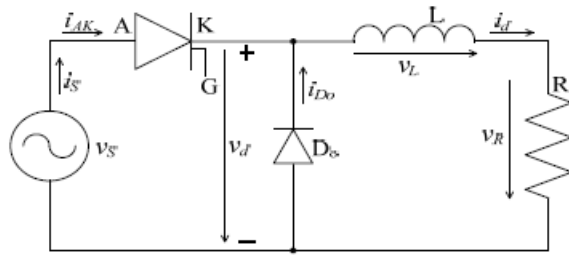
5.5 ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΜΕ ΩΜΙΚΟ - ΕΠΑΓΩΓΙΚΟ ΦΟΡΤΙΟ ΚΑΙ ΔΙΟΔΟ ΕΛΕΥΘΕΡΗΣ ΔΙΕΛΕΥΣΗΣ

Συγκρίνοντας τις εξισώσεις 5.3, 5.4 και 5.5 για το ωμικό φορτίο με τις αντίστοιχες εξισώσεις 5.13, 5.14 και 5.15 για το ωμικό - επαγωγικό φορτίο είναι προφανές ότι οι μέσες τιμές των ηλεκτρικών μεγεθών στην έξοδο ενός μετατροπέα με ωμικό φορτίο είναι πάντα μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες μέσες τιμές, για την ίδια λειτουργία μετατροπέα, αν υπάρχει και επαγωγή στην έξοδο του κυκλώματος (π.χ. για την εξομάλυνση του ρεύματος). Επειδή τα περισσότερα πραγματικά φορτία έχουν ωμική - επαγωγική συμπεριφορά, είναι βέβαιο πως θα περιορίζουν την ικανότητα μεταφοράς ισχύος μεταξύ εισόδου-εξόδου, εξαιτίας των επαγωγών. Για να αντιμετωπισθεί αυτή η ανεπιθύμητη συμπεριφορά, είναι αρκετό να συνδεθεί μία δίοδος ανάστροφα στην έξοδο του μετατροπέα, σκοπός της οποίας είναι να παρέχει τη δυνατότητα εκφόρτισης της ενέργειας επαγωγής διαμέσου αυτής. Όλες οι δίοδοι που τοποθετούνται για τη συγκεκριμένη αιτία (γίνεται σε πάρα πολλές τοπολογίες ηλεκτρονικών μετατροπέων ισχύος) αποκαλούνται **δίοδοι ελεύθερης διέλευσης**. Στο σχήμα 5.8 παρουσιάζεται το κυκλωματικό διάγραμμα

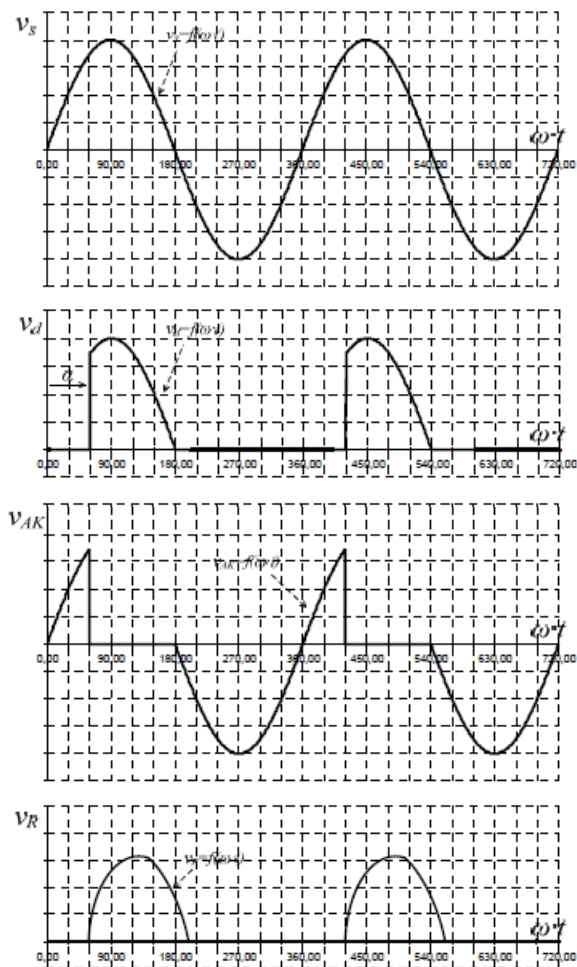
ενός μετατροπέα ενός παλμού όπου στην έξοδό του έχει συνδεθεί και μία δίοδος ελεύθερης διέλευσης ενώ τροφοδοτεί ένα ωμικό – επαγωγικό φορτίο.

Αναλύοντας τη λειτουργία του κυκλώματος είναι προφανές ότι, από τη χρονική στιγμή α , που θα δοθεί κατάλληλος παλμός έναυσης στο ημιαγωγικό στοιχείο και το κύκλωμα θα αρχίσει να διαρρέεται από ρεύμα, μέχρι τις 180° δεν διαφοροποιείται η λειτουργία του κυκλώματος αλλά είναι η ίδια με την προηγούμενη περίπτωση, (δηλαδή χωρίς τη δίοδο ελεύθερης διέλευσης αλλά με ωμικό – επαγωγικό φορτίο) αφού η δίοδος είναι πολωμένη ανάστροφα και δεν δύναται να άγει. Η δίοδος συμμετέχει στη λειτουργία του κυκλώματος από τις 180° και μετά μια και η επαγωγή πολώνει θετικά τη δίοδο ελεύθερης διέλευσης και δημιουργείται αγωγίμος δρόμος μεταξύ φορτίου και διόδου. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα η ενέργεια που είχε αποθηκευτεί στην επαγωγή να καταλήγει όλη στο φορτίο, σε αντίθεση με την προηγούμενη περίπτωση όπου ένα μέρος της ενέργειας αυτής πήγαινε στο φορτίο και ένα μέρος επέστρεφε στην πηγή εισόδου.

Στο *σχήμα 5.9* σχεδιάζονται οι κυματομορφές της τάσης εισόδου v_s , της τάσης στην έξοδο του μετατροπέα v_d , της τάσης στα άκρα του θυρίστορ v_{AK} καθώς και η κυματομορφή της τάσης στα άκρα της ωμικής αντίστασης v_R σε συνάρτηση του χρόνου και για μία τυχαία γωνία έναυσης α . Παρατηρείτε ότι, η κυματομορφή της τάσης εξόδου καθώς και η κυματομορφή της τάσης στα άκρα του θυρίστορ



Σχήμα 5.8: Κυκλωματικό διάγραμμα μετατροπέα ενός παλμού με δίοδο ελεύθερης διέλευσης και ωμικό – επαγωγικό φορτίο.

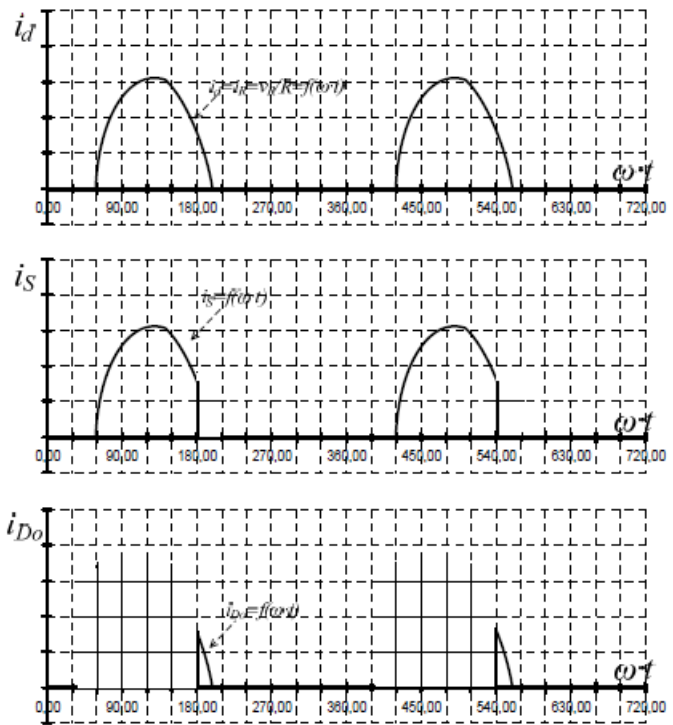


Σχήμα 5.9: Κυματομορφές των τάσεων σε ένα μετατροπέα ενός παλμού με ωμικό – επαγωγικό φορτίο και δίοδο ελεύθερης διέλευσης.

είναι όμοιες με αυτές της λειτουργίας με καθαρά ωμικό φορτίο, ενώ η κυματομορφή της τάσης στα άκρα την ωμικής αντίστασης είναι όμοια με αυτή της λειτουργίας με ωμικό – επαγωγικό φορτίο, λόγω της ενέργειας της επαγωγής.

Τέλος, στο σχήμα 5.9 παρουσιάζονται οι κυματομορφές του ρεύματος εξόδου i_d , του ρεύματος εισόδου i_s και του ρεύματος στη δίοδο ελεύθερης διέλευσης i_{D0} σα συνάρτηση του χρόνου και για την ίδια γωνία έναυσης. Από τις κυματομορφές των ρευμάτων είναι εμφανές ότι η δίοδος ελεύθερης διέλευσης άγει μετά τις 180° και μέχρι να εκφορτιστεί η επαγωγή. Οι παρατηρήσεις της προηγούμενης παραγράφου για το πόσο μπορεί να διατηρήσει σε κατάσταση αγωγής η ενέργεια της επαγωγής το κύκλωμα ισχύουν και σ' αυτή την τοπολογία.

Επομένως, η μέση τιμή της τάσης εξόδου, του ρεύματος εξόδου καθώς και της ισχύος δίνονται από τις ακόλουθες εξισώσεις :



Σχήμα 5.10: Κυματομορφές των ρευμάτων σε ένα μετατροπέα ενός παλμού με ωμικό – επαγωγικό φορτίο και δίοδο ελεύθερης διέλευσης.

$$\left. \begin{aligned} V_d &= V_L + V_R \\ V_L &= 0, \text{ γιατί έχουμε μόνιμη κατάσταση λειτουργίας} \end{aligned} \right\} \Rightarrow V_d = V_R \text{ και}$$

$$\begin{aligned} V_d &= \frac{1}{T} \int_0^T v_d(t) \cdot dt = \frac{1}{\omega \cdot T} \int_0^T \omega \cdot v_d(t) \cdot d(t) = \frac{1}{2 \cdot \pi} \int_0^{2 \cdot \pi} v_d(t) \cdot d(\omega \cdot t) \Rightarrow \\ \Rightarrow V_d &= \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \int_a^\pi \sqrt{2} \cdot V_s \cdot \sin(\omega \cdot t) \cdot d(\omega \cdot t) = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \sqrt{2} \cdot V_s \cdot \int_a^\pi \sin(\omega \cdot t) \cdot d(\omega \cdot t) \Rightarrow \\ \Rightarrow V_d &= \frac{V_s}{\sqrt{2} \cdot \pi} \cdot [-\cos(\omega \cdot t)]_a^\pi = \frac{V_s}{\sqrt{2} \cdot \pi} \cdot [-\cos \pi - (-\cos a)] \Rightarrow \\ \Rightarrow V_d &= V_R = \frac{V_s}{\sqrt{2} \cdot \pi} \cdot [\cos a + 1] \end{aligned} \quad (5.14)$$

$$I_d = I_R = \frac{V_s}{\sqrt{2} \cdot \pi \cdot R} \cdot [\cos a + 1] \quad (5.15)$$

$$\begin{aligned}
P_d &= V_d \cdot I_d = \left(\frac{V_s}{\sqrt{2} \cdot \pi} \cdot [\cos a + 1] \right) \cdot \left(\frac{V_s}{\sqrt{2} \cdot \pi \cdot R} \cdot [\cos a + 1] \right) \Rightarrow \\
\Rightarrow P_d &= \frac{V_s^2}{2 \cdot \pi^2 \cdot R} \cdot [\cos a + 1]^2
\end{aligned} \tag{5.16}$$

Ενώ η εξίσωση που δίνει την ενεργό τιμή της τάσης εξόδου προκύπτει ως εξής :

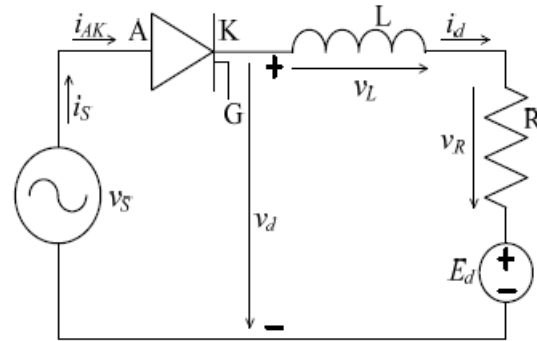
$$\begin{aligned}
V_{d,rms} &= \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T v_d^2(t) \cdot dt} = \sqrt{\frac{1}{\omega \cdot T} \int_0^T \omega \cdot v_d^2(t) \cdot d(t)} = \sqrt{\frac{1}{2 \cdot \pi} \int_0^{2\pi} v_d^2(t) \cdot d(\omega \cdot t)} \Rightarrow \\
\Rightarrow V_{d,rms} &= \sqrt{\frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \int_a^\pi (\sqrt{2} \cdot V_s \cdot \sin(\omega \cdot t))^2 \cdot d(\omega \cdot t)} \Rightarrow \\
\Rightarrow V_{d,rms} &= \sqrt{\frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot (\sqrt{2} \cdot V_s)^2 \cdot \int_a^\pi (\sin(\omega \cdot t))^2 \cdot d(\omega \cdot t)} \Rightarrow \\
\Rightarrow V_{d,rms} &= V_s \cdot \sqrt{\frac{1}{\pi} \cdot \left(\frac{\omega \cdot t}{2} - \frac{\sin(2 \cdot \omega \cdot t)}{4} \right) \Big|_a^\pi} \Rightarrow \\
\Rightarrow V_{d,rms} &= V_s \cdot \sqrt{\frac{1}{\pi} \cdot \left(\frac{\pi}{2} - \frac{\sin(2 \cdot \pi)}{4} - \left(\frac{\alpha}{2} - \frac{\sin(2 \cdot \alpha)}{4} \right) \right)} \Rightarrow \\
\Rightarrow V_{d,rms} &= V_s \cdot \sqrt{\frac{\pi - \alpha + \frac{1}{2} \cdot \sin(2 \cdot \alpha)}{2 \cdot \pi}}
\end{aligned} \tag{5.17}$$

5.6 ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΜΕ ΩΜΙΚΟ - ΕΠΑΓΩΓΙΚΟ ΦΟΡΤΙΟ ΚΑΙ ΠΗΓΗ ΣΥΝΕΧΟΥΣ ΤΑΣΗΣ

Ένα άλλο φορτίο που έχει αρκετό ενδιαφέρον να μελετηθεί στις τοπολογίες των ανορθωτικών διατάξεων, είναι το ωμικό - επαγωγικό σε σειρά με πηγή συνεχούς τάσης E_d όπως φαίνεται στο σχήμα 5.11. Αρχικά για το συγκεκριμένο φορτίο θα πρέπει να προσδιοριστεί το χρονικό διάστημα που το ημιαγωγικό στοιχείο είναι θετικά πολωμένο. Από το νόμο των τάσεων του Kirchhoff έχουμε ότι η τάση που εφαρμόζεται στα άκρα του ημιαγωγικού στοιχείου, όταν το κύκλωμα δε διαρρέεται από ρεύμα είναι :

$$\left. \begin{aligned} v_{AK}(t) &= v_s(t) - v_L(t) - v_R(t) - E_d \\ v_L(t) &= v_R(t) = 0, \text{ επειδή } i_d(t) = 0 \end{aligned} \right\} \Rightarrow v_{AK}(t) = v_s(t) - E_d$$

Και επομένως το ημιαγωγικό στοιχείο μπορεί να μπει σε κατάσταση αγωγής αν του δοθεί παλμός μέσα στο χρονικό διάστημα που είναι θετικά πολωμένο. Επομένως, το στοιχείο θα μπει σε κατάσταση αγωγής αν του δοθεί παλμός με γωνία έναυσης α_1 , όπου α_1 ανήκει στο διάστημα:



Σχήμα 5.11: Κυκλωματικό διάγραμμα μετατροπέα ενός παλμού με πηγή συνεχούς τάσης και ωμικό - επαγωγικό φορτίο στην έξοδό του.

$v_{AK} \geq 0$, όταν γίνεται $v_s \geq E_d$, επομένως:

$$\left. \begin{aligned} v_s(t) \geq E_d &\Rightarrow \sqrt{2} \cdot V_s \cdot \sin(\omega \cdot t) \geq E_d \\ \text{και για } \omega \cdot t_1 &= \alpha_1 \end{aligned} \right\} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \sin^{-1} \frac{E_d}{\sqrt{2} \cdot V_s} \leq \alpha_1 \leq \pi - \sin^{-1} \frac{E_d}{\sqrt{2} \cdot V_s} \quad (5.18)$$

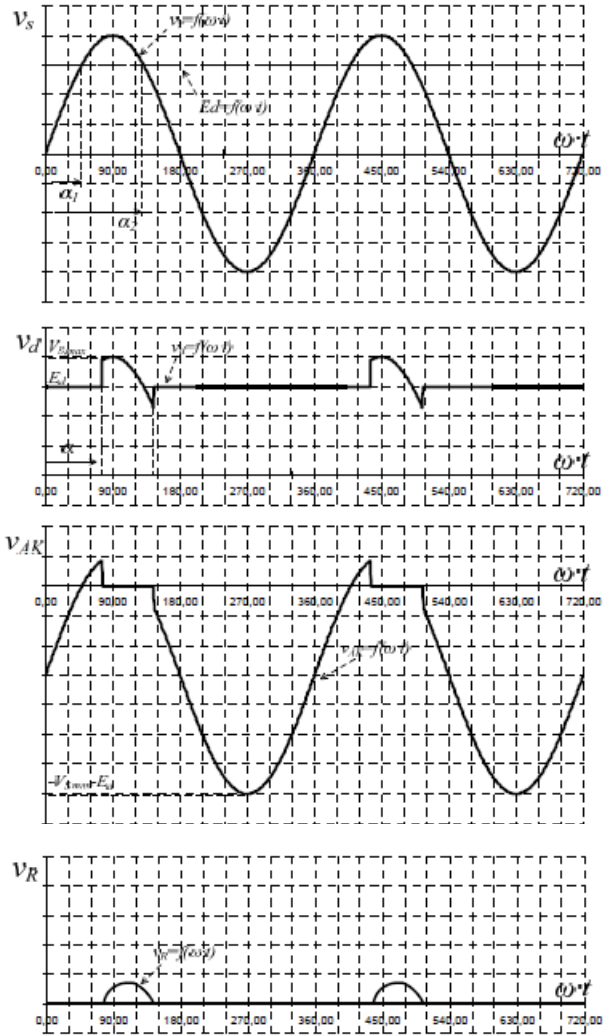
Ενώ, σε όλες τις προηγούμενες περιπτώσεις το κύκλωμα διαρρέεται από ρεύμα αν δοθεί παλμός στο ημιαγωγικό στοιχείο μέσα στο χρονικό διάστημα από 0° έως 180° , στη συγκεκριμένη περίπτωση το χρονικό διάστημα που έχει τη δυνατότητα να μπει σε κατάσταση αγωγής το κύκλωμα περιορίζεται εξαιτίας της πηγής συνεχούς τάσης στην έξοδο.

Στο σχήμα 5.12 παρουσιάζονται οι κυματομορφές της τάσης εισόδου v_s , της τάσης στην έξοδο του μετατροπέα v_d , της τάσης στα άκρα του θυρίστορ v_{AK} καθώς και η κυματομορφή της τάσης στα άκρα της ωμικής αντίστασης v_R σε συνάρτηση του χρόνου και για κατάλληλη γωνία έναυσης. Παρατηρείται ότι, στα άκρα του ημιαγωγικού στοιχείου εφαρμόζεται μεγαλύτερη ανάστροφη τάση ($V_{s,max} + E_d$) από ότι στις προηγούμενες περιπτώσεις, ενώ όταν το κύκλωμα δε διαρρέεται από ρεύμα στην έξοδο εμφανίζεται η πηγή συνεχούς τάσης. Επίσης, όσον αφορά τη μέση τιμή της τάσης στην έξοδο του μετατροπέα ισχύει:

$$\left. \begin{aligned} V_d &= V_L + V_R + E_d \\ \text{ενώ } V_L &= 0, \text{ λόγω μόνιμης κατάστασης} \end{aligned} \right\} \Rightarrow V_d = V_R + E_d$$

ενώ, αν σε ένα κύκλωμα η ωμική αντίσταση είναι μηδενική ($R = 0$) τότε ισχύει:

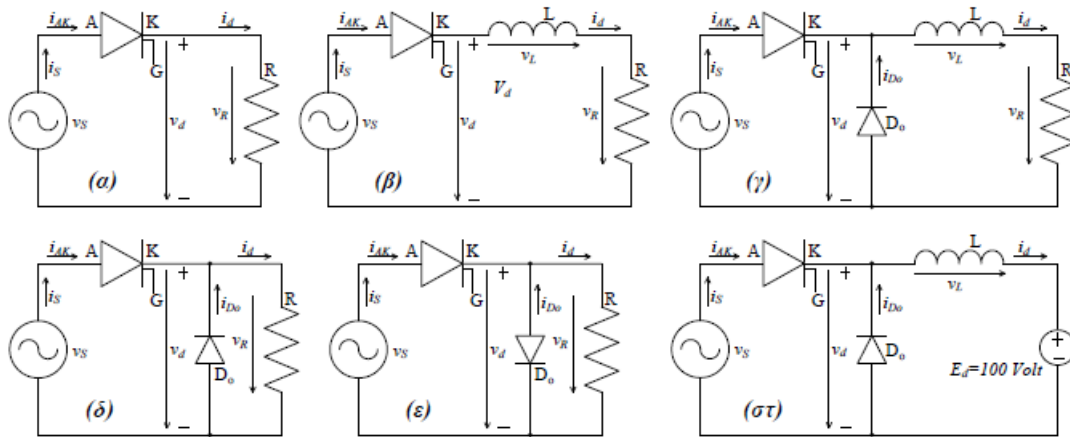
$$V_d = E_d$$



Σχήμα 5.12: Κυματομορφές των τάσεων σε ένα μετατροπέα ενός παλμού με ωμικό – επαγωγικό φορτίο και πηγή συνεχούς τάσης.

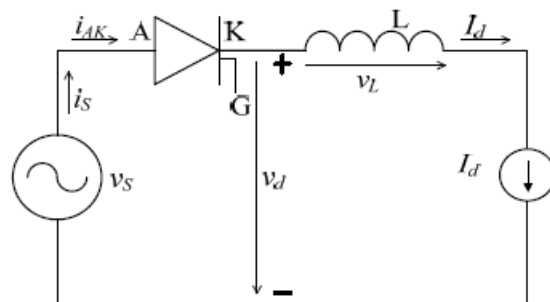
5.8 ΕΡΓΑΣΙΑ

- 1) Για τα παρακάτω κυκλώματα, του σχήματος 5.18, να σχεδιάσετε τις κυματομορφές των ακόλουθων ηλεκτρικών μεγεθών $v_s=f(\omega t)$, $v_d=f(\omega t)$, $v_{AK}=f(\omega t)$, $v_R=f(\omega t)$, $v_L=f(\omega t)$, $i_d=f(\omega t)$, $i_s=f(\omega t)$, για τις ακόλουθες γωνίες έναυσης : $\alpha=60^\circ$ για το κύκλωμα (α), $\alpha=90^\circ$ για το κύκλωμα (β), $\alpha=30^\circ$ για το κύκλωμα (γ), $\alpha=150^\circ$ για το κύκλωμα (δ), $\alpha=120^\circ$ για το κύκλωμα (ε) και $\alpha=0^\circ$ για το κύκλωμα (στ) (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 $v_s - v_s$). Επίσης: v_s : ημιτονοειδής τάση του δικτύου με $V_{s,rms}=230\text{Volt}$, $f=50\text{Hz}$, $R=50\Omega$, $L=300\text{mH}$ και $E_d=100\text{Volt}$.



Σχήμα 5.18: Διάφορες τοπολογίες κυκλωμάτων με ένα θυρίστορ.

- 5) Οι μέσες τιμές της τάσης στην έξοδο των κυκλωμάτων (α), (γ) και (δ) τι σχέση έχουν μεταξύ τους, για την ίδια γωνία έναυσης και για το ίδιο ωμικό φορτίο;
- 6) Ποια είναι η μέση τιμή της τάσης εξόδου στα κυκλώματα (ε) και (στ) του σχήματος 5.18 για γωνία έναυσης $\alpha=15^\circ$ και ποια για γωνία έναυσης $\alpha=75^\circ$; Να δικαιολογήσετε την απάντησή σας.
- 7) Σε ποια από τα κυκλώματα που φαίνονται στο σχήμα 5.18 η μέση τιμή της τάσης εξόδου εκτός από τη γωνία έναυσης εξαρτάται και από τη τιμή του φορτίου και γιατί;
- 11) Για το ίδιο κύκλωμα, δηλαδή το 5.18.στ να υπολογιστεί η μέγιστη ανάστροφη τάση που εμφανίζεται στα άκρα του θυρίστορ για γωνία έναυσης 60° και για γωνία έναυσης 120° ;
- 12) Για το κύκλωμα του σχήματος 5.19 αν η γωνία έναυσης είναι 60° να σχεδιάσετε τη κυματομορφή της τάσης εξόδου και να υπολογίσετε τη μέση της τιμή. Στο συγκεκριμένο κύκλωμα παρέχεται η δυνατότητα ελέγχου της τάσης εξόδου; Να δικαιολογήσετε την απάντησή σας.



Σχήμα 5.19: Μετατροπέας ενός παλμού με πηγή ρεύματος στην έξοδό του.

(για Εργασία 1)

