

ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΑ ΙΣΧΥΟΣ

ΣΗΜΕΙΩΣΕΙΣ

Μάθημα 6^ο – Μετατροπέας δύο παλμών

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

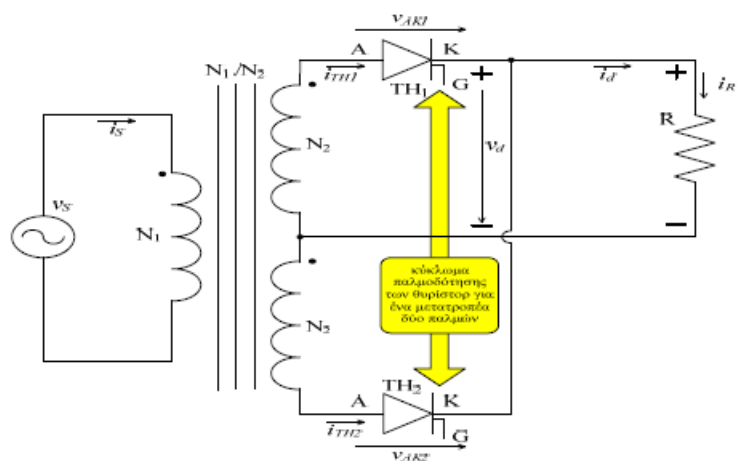
6.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Παρόλο που, ο μετατροπέας ενός παλμού (ανορθωτική διάταξη μισού κύματος), είναι ένα πολύ απλό κύκλωμα, δεν χρησιμοποιείται σε πρακτικά κυκλώματα ισχύος μια και παρουσιάζει το μειονέκτημα του χαμηλού βαθμού εκμετάλλευσης του δικτύου. Σύμφωνα με τη λειτουργία του, η συνεχής τάση εξόδου προκύπτει από την εναλλασσόμενη τάση εισόδου με αποκοπή της αρνητικής ημιπεριόδου. Επομένως, η ενέργεια που μπορεί να προσφερθεί στην έξοδο περιορίζεται στο μισό της μέγιστης δυνατής, ενώ ταυτόχρονα, η κυμάτωση της τάσης εξόδου είναι αρκετά σημαντική. Από την άλλη μεριά, στην ανόρθωση πλήρους κύματος ο μετατροπέας εκμεταλλεύεται πλήρως την παρεχόμενη από το δίκτυο ενέργεια, αφού πραγματοποιείται ανόρθωση και στις δύο ημιπεριόδους, ενώ όπως θα φανεί και στη συνέχεια, περιορίζεται η κυμάτωση της τάσης εξόδου και διπλασιάζεται η συχνότητά της, με αποτέλεσμα να είναι πιο εύκολη η εξομάλυνση της.

Έχουν παρουσιαστεί δύο τοπολογίες ελεγχόμενων ανορθωτικών διατάξεων πλήρους κύματος: ο μετατροπέας δύο παλμών και ο μετατροπέας τεσσάρων παλμών ή η ελεγχόμενη γέφυρα πλήρους ανόρθωσης. Από την ονομασία των δύο τοπολογιών είναι εμφανές ότι η πρώτη τοπολογία αποτελείται από δύο ημιαγωγικά στοιχεία, ενώ η δεύτερη από τέσσερα. Στη συγκεκριμένη άσκηση, αντικείμενο μελέτης αποτελεί ο μετατροπέας δύο παλμών, ενώ στην επόμενη θα αναλυθεί διεξοδικά η λειτουργία του μετατροπέα τεσσάρων παλμών.

6.2 ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΑΣ ΔΥΟ ΠΑΛΜΩΝ

Στο σχήμα 6.1 φαίνεται η τοπολογία ενός μετατροπέα δύο παλμών με ωμικό φορτίο. Παρατηρείται, πως για την υλοποίηση της συγκεκριμένης τοπολογίας είναι απαραίτητη η χρήση δύο θυρίστωρ καθώς και ενός μετασχηματιστή με ενδιάμεση λήψη. Ο μετασχηματιστής αυτός έχει κατάλληλα περιελιγμένα τα τυλίγματά του ούτως ώστε το ένα από αυτά να είναι σε



Σχήμα 6.1: Τοπολογία μετατροπέα δύο παλμών.

φάση με την τάση τροφοδοσίας και το άλλο σε διαφορά φάσης 180° (οι τελείες στο σχήμα καθορίζουν την πολικότητα των τυλίγμάτων). Έτσι, στην θετική ημιπερίοδο της τάσης τροφοδοσίας $[0^\circ - 180^\circ]$ το θυρίστορ ένα (TH_1) που συνδέεται στο πάνω τύλιγμα είναι ορθά πολωμένο (και αν δεχθεί παλμό έναυσης μπορεί να μπει σε κατάσταση αγωγής) και αντίστοιχα, στην αρνητική ημιπερίοδο $[180^\circ - 360^\circ]$ το θυρίστορ δύο (TH_2) που συνδέεται στο κάτω τύλιγμα είναι ορθά πολωμένο. Θα μπορούσε, τόσο ο αριθμός των σπειρών του κάθε δευτερεύοντος τυλίγματος όσο και η γωνία έναυσης του κάθε θυρίστορ να είναι ανεξάρτητα μεταξύ τους και τυχαία επιλεγμένα, αλλά για λόγους συμμετρίας (όσο πιο συμμετρική κυματομορφή τάσης παράγεται στην έξοδο τόσο ελαττώνονται οι ανώτερες αρμονικές άρα και η άεργος ισχύς) επιλέγεται να έχουν τα δύο τυλίγματα του δευτερεύοντος τον ίδιο αριθμό σπειρών, ενώ επίσης, δίνεται παλμός έναυσης σε κάθε θυρίστορ με την ίδια χρονική καθυστέρηση από τη στιγμή που μπορούν να μουν σε κατάσταση αγωγής (δηλαδή, τη χρονική στιγμή α° για το TH_1 και τη χρονική στιγμή $180^\circ + \alpha^\circ$ για το TH_2). Αυτός ο τρόπος λειτουργίας, έχει ως αποτέλεσμα την παραγωγή όσο το δυνατό πιο συμμετρικών κυματομορφών στην έξοδο του μετατροπέα. Τέλος, δεδομένης της παρουσίας του μετασχηματιστή, δίνεται η δυνατότητα επιλογής της τάσης εξόδου μέσω του λόγου μετασχηματισμού ενώ παρέχεται και ηλεκτρική απομόνωση μεταξύ εισόδου και εξόδου. Από τη θεωρία των ιδανικών μετασχηματιστών ισχύει:

$$\frac{V_s}{V_{s2}} = \frac{I_{s2}}{I_s} = \frac{N_1}{N_2} \quad (6.1)$$

όπου :

N_1 : ο αριθμός των σπειρών του πρωτεύοντος

N_2 : ο αριθμός των σπειρών του δευτερεύοντος

V_s : η ενεργός τιμή της τάσης του πρωτεύοντος

V_{s2} : η ενεργός τιμή της τάσης του κάθε δευτερεύοντος

I_s : η ενεργός τιμή του ρεύματος που διαρρέει το πρωτεύον

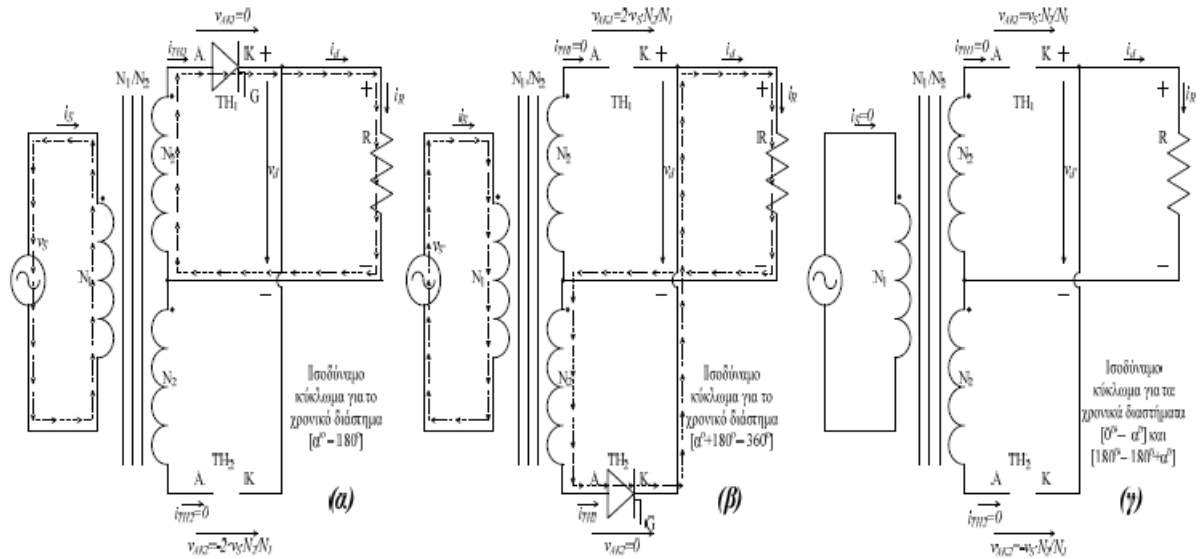
I_{s2} : η ενεργός τιμή του ρεύματος που διαρρέει το κάθε δευτερεύον

Για την ανάλυση της λειτουργίας του μετατροπέα, 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 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).

6.3 ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΜΕ ΩΜΙΚΟ ΦΟΡΤΙΟ

Από το σχήμα 6.1 και από τη τεχνική παραγωγής παλμών έναυσης 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 6.2.α. Είναι προφανές ότι, σ' αυτό το χρονικό διάστημα το TH₂ είναι ανάστροφα πολωμένο και επομένως δεν μπορεί να μπει σε κατάσταση αγωγής.



Σχήμα 6.2: Ισοδύναμα κυκλώματα κατά τη λειτουργία ενός μετατροπέα δύο παλμών.

Οι εξισώσεις που διέπουν τη λειτουργία του κυκλώματος κατά το χρονικό διάστημα αγωγής του θυρίστορ ένα (TH₁), θεωρώντας ότι τα στοιχεία του κυκλώματος είναι ιδανικά, έχουν ως εξής:

$$\begin{aligned}
 v_d(t) &= v_R(t) = v_{s2}(t) = v_s(t) \cdot \frac{N_2}{N_1} \\
 v_{AK1}(t) &= 0 \text{ επειδή το θυρίστορ βρίσκεται σε κατάσταση αγωγής} \\
 v_{AK2}(t) &= -2 \cdot v_{s2}(t) = -2 \cdot v_s(t) \cdot \frac{N_2}{N_1} \text{ αφού τα δύο δευτερεύοντα σε σειρά} \\
 i_d(t) &= i_R(t) = i_{TH1}(t) = \frac{v_R(t)}{R} = -i_s(t) \cdot \frac{N_1}{N_2}
 \end{aligned} \tag{6.2}$$

Το θυρίστορ ένα 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 ένα θα σταματήσει να άγει όταν μηδενιστεί η τάση εξόδου (στις 180° στην περίπτωση μας), άρα τις χρονικές στιγμές ($n \cdot 360^\circ + 180^\circ$). Από εκεί και πέρα το θυρίστορ ένα 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. Από την άλλη μεριά, το TH₂ 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° + α°), 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 6.2.γ):

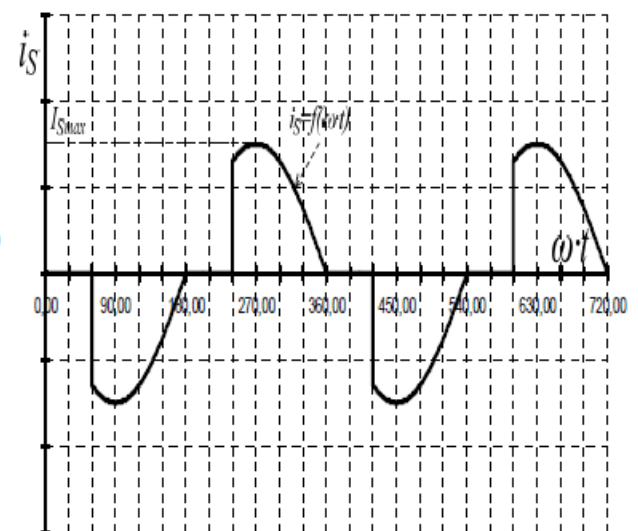
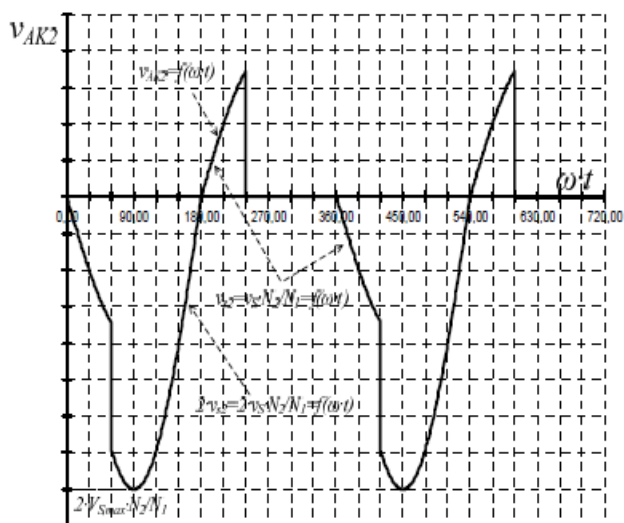
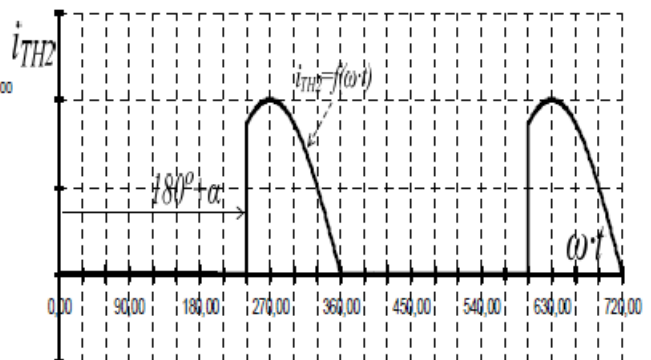
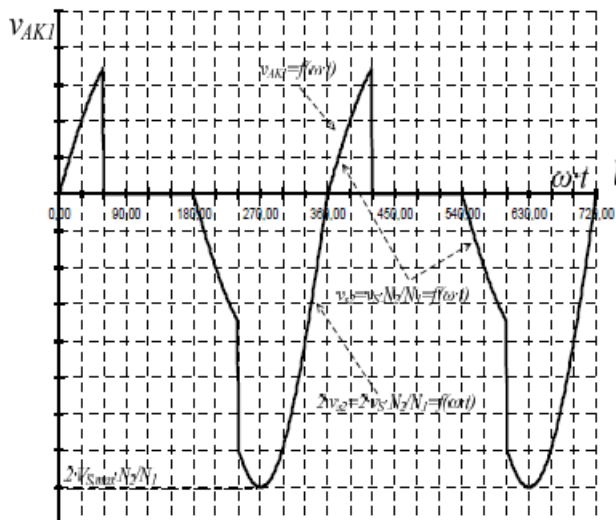
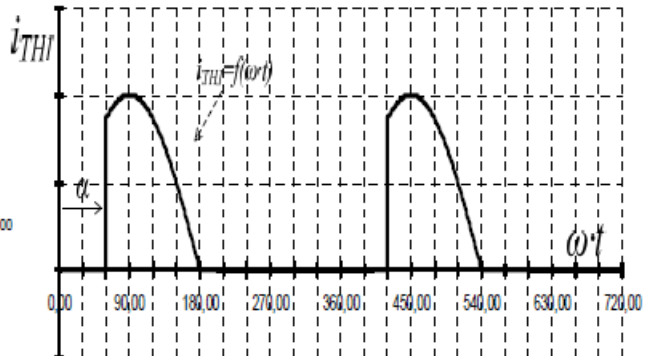
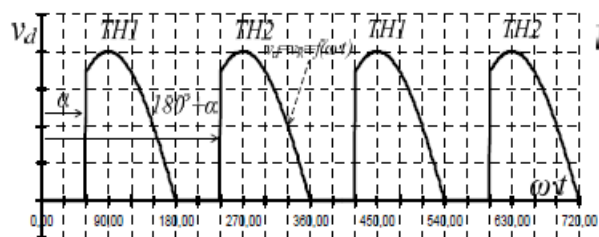
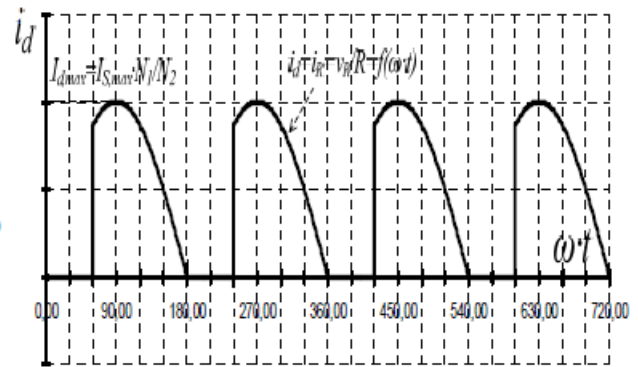
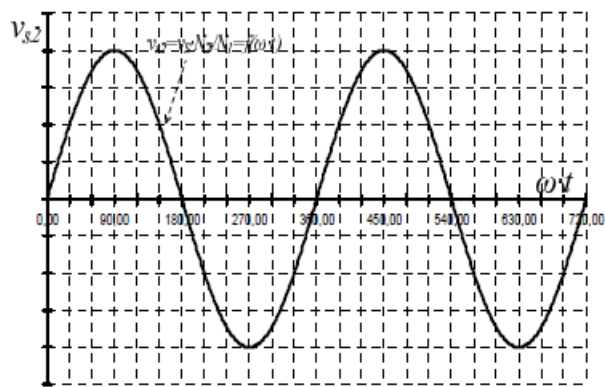
$$\begin{aligned}
 v_d(t) &= v_R(t) = 0 \\
 v_{AK1}(t) &= v_{S2}(t) = v_S(t) \cdot \frac{N_2}{N_1} \quad \text{επειδή το } TH_1 \text{ δεν άγει} \\
 v_{AK2}(t) &= -v_{S2}(t) = -v_S(t) \cdot \frac{N_2}{N_1} \quad \text{επειδή το } TH_2 \text{ δεν άγει} \\
 i_S(t) &= i_d(t) = i_R(t) = i_{AK1}(t) = i_{AK2}(t) = 0
 \end{aligned} \tag{6.3}$$

Τη χρονική στιγμή $180^\circ + \alpha^\circ$ το TH_2 είναι θετικά πολωμένο και δέχεται παλμό έναυσης, επομένως το στοιχείο οδηγείται σε κατάσταση αγωγής και αρχίζει να διαρρέεται από ρεύμα (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 6.2.β. Είναι προφανές ότι, σ' αυτό το χρονικό διάστημα το TH_1 είναι ανάστροφα πολωμένο και επομένως δεν μπορεί να μπει 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:

$$\begin{aligned}
 v_d(t) &= v_R(t) = -v_{S2}(t) = -v_S(t) \cdot \frac{N_2}{N_1} \\
 v_{AK1}(t) &= 2 \cdot v_{S2}(t) = 2 \cdot v_S(t) \cdot \frac{N_2}{N_1} \quad \text{αφού τα δύο δευτερεύοντα σε σειρά} \\
 v_{AK2}(t) &= 0 \quad \text{επειδή το θυρίστορ βρίσκεται σε κατάσταση αγωγής} \\
 i_d(t) &= i_R(t) = i_{TH1}(t) = \frac{v_R(t)}{R} = i_S(t) \cdot \frac{N_1}{N_2}
 \end{aligned} \tag{6.4}$$

Το TH_2 θα οδηγηθεί σε κατάσταση αποκοπής όταν το ρεύμα του γίνει μικρότερο από το ρεύμα συγκρατήσεως δηλαδή, στις 360° όπου 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 6.2.γ) και οι εξισώσεις 6.3 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 περιγράφηκε παραπάνω.

Στο σχήμα 6.3 παρουσιάζονται κυματομορφές της τάσης στο ένα τύλιγμα δευτερεύοντος (αυτό που είναι σε φάση με την τάση 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 6.4 σχεδιάζονται οι κυματομορφές του ρεύματος στην έξοδο του μετατροπέα, του ρεύματος που διαρρέει κάθε ημιαγωγικό στοιχείο (άρα και κάθε τύλιγμα δευτερεύοντος) καθώς και το ρεύμα στην είσοδο του μετατροπέα για λειτουργία του μετατροπέα με το ίδιο γωνία έναυσης και για φορτίο καθαρά ωμικό, πάλι. Για το σχεδιασμό των κυματομορφών των ρευμάτων του κυκλώματος έχουν χρησιμοποιηθεί οι φορές που δίνονται στα σχήματα 6.1 και 6.2.



Σχήμα 6.3: Κυματομορφές τάσεων κατά τη λειτουργία ενός μετατροπέα δύο παλμών με ωμικό φορτίο.

Σχήμα 6.4: Κυματομορφές ρευμάτων κατά τη λειτουργία ενός μετατροπέα δύο παλμών με ωμικό φορτίο.

Από τις παραπάνω κυματομορφές, είναι προφανές, ότι έχουμε λειτουργία πλήρους ανόρθωσης, κάθε θυρίστορ καταπονείται με τάση διπλάσιας τιμής από την τάση του κάθε δευτερεύοντος τυλίγματος, ενώ η εναλλασσόμενη κυματομορφή του ρεύματος εισόδου δικαιολογεί την ονομασία του μετατροπέα. Όπως και στον μετατροπέα ενός παλμού, έτσι και εδώ, 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**. Σύμφωνα με τον ορισμό της μέσης τιμής, για την τάση εξόδου προκύπτει:

$$\begin{aligned}
 V_d &= \frac{1}{T} \int_0^T v_d(t) \cdot dt = \frac{1}{\omega \cdot T} \int_0^T \omega \cdot v_d(t) \cdot d(t) = \frac{1}{\pi} \int_0^\pi v_d(t) \cdot d(\omega \cdot t) \Rightarrow \\
 \Rightarrow V_d &= \frac{1}{\pi} \cdot \int_a^\pi \sqrt{2} \cdot V_{S2} \cdot \sin(\omega \cdot t) \cdot d(\omega \cdot t) = \frac{1}{\pi} \cdot \sqrt{2} \cdot V_{S2} \cdot \int_a^\pi \sin(\omega \cdot t) \cdot d(\omega \cdot t) \Rightarrow \\
 \Rightarrow V_d &= \frac{\sqrt{2} \cdot V_{S2}}{\pi} \cdot [-\cos(\omega \cdot t)]_a^\pi = \frac{\sqrt{2} \cdot V_{S2}}{\pi} \cdot [-\cos \pi - (-\cos \alpha)] \Rightarrow \\
 \Rightarrow V_d &= \frac{\sqrt{2} \cdot V_{S2}}{\pi} \cdot [\cos \alpha + 1] = \frac{\sqrt{2} \cdot V_s \frac{N_2}{N_1}}{\pi} \cdot [\cos \alpha + 1] \quad (6.5)
 \end{aligned}$$

Όπου V_s και V_{S2} η ενεργός τιμή της τάσης εισόδου και η ενεργός τιμή της τάσης σε κάθε τυλίγμα του δευτερεύοντος, αντίστοιχα. Ενώ, για την μέση τιμή του ρεύματος εξόδου καθώς και για την ισχύ στο φορτίο ισχύει:

$$I_d = \frac{\sqrt{2} \cdot V_{S2}}{\pi \cdot R} \cdot [\cos \alpha + 1] = \frac{\sqrt{2} \cdot V_s \frac{N_2}{N_1}}{\pi \cdot R} \cdot [\cos \alpha + 1] \quad (6.6)$$

$$\begin{aligned}
 P_d &= V_d \cdot I_d = \left(\frac{\sqrt{2} \cdot V_{S2}}{\pi} \cdot [\cos \alpha + 1] \right) \cdot \left(\frac{\sqrt{2} \cdot V_{S2}}{\pi \cdot R} \cdot [\cos \alpha + 1] \right) \Rightarrow \\
 \Rightarrow P_d &= \frac{2 \cdot V_{S2}^2}{\pi^2 \cdot R} \cdot [\cos \alpha + 1]^2 = \frac{2 \cdot \left(V_s \frac{N_2}{N_1} \right)^2}{\pi^2 \cdot R} \cdot [\cos \alpha + 1]^2 \quad (6.7)
 \end{aligned}$$

Η ενεργός τιμή της τάσης εξόδου προκύπτει ως εξής:

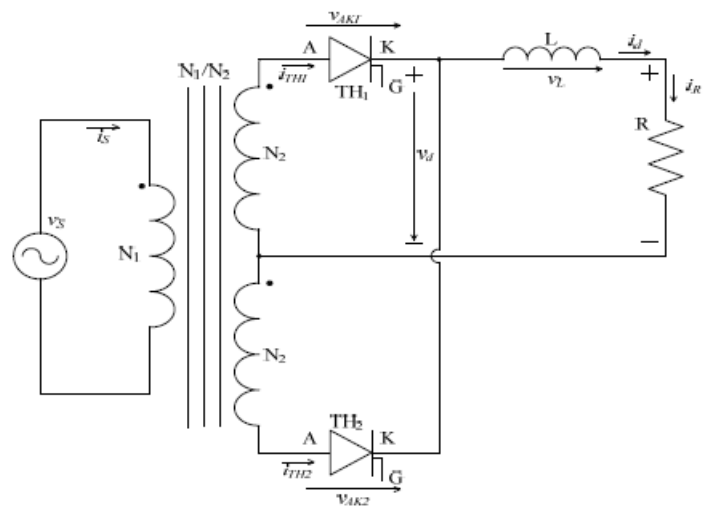
$$\begin{aligned}
 V_{d,rms} &= \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T v_d^2(t) \cdot dt} = \sqrt{\frac{1}{\omega \cdot T} \int_0^T \omega \cdot v_d^2(t) \cdot d(t)} = \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_0^\pi v_d^2(t) \cdot d(\omega \cdot t)} \Rightarrow \\
 \Rightarrow V_{d,rms} &= \sqrt{\frac{1}{\pi} \cdot \int_a^\pi \left(\sqrt{2} \cdot V_{S2} \cdot \sin(\omega \cdot t) \right)^2 \cdot d(\omega \cdot t)} \Rightarrow \\
 \Rightarrow V_{d,rms} &= \sqrt{\frac{1}{\pi} \cdot \left(\sqrt{2} \cdot V_{S2} \right)^2 \cdot \int_a^\pi (\sin(\omega \cdot t))^2 \cdot d(\omega \cdot t)} \Rightarrow
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\Rightarrow V_{d,rms} &= \sqrt{2} \cdot V_{S2} \cdot \sqrt{\frac{1}{\pi} \cdot \left(\frac{\omega \cdot t}{2} - \frac{\sin(2 \cdot \omega \cdot t)}{4} \right) \Big|_{\alpha}^{\pi}} \Rightarrow \\
\Rightarrow V_{d,rms} &= \sqrt{2} \cdot V_{S2} \cdot \sqrt{\frac{1}{\pi} \cdot \left(\frac{\pi}{2} - \frac{\sin(2 \cdot \pi)}{4} - \left(\frac{\alpha}{2} - \frac{\sin(2 \cdot \alpha)}{4} \right) \right)} \Rightarrow \\
\Rightarrow V_{d,rms} &= V_{S2} \cdot \sqrt{\frac{\pi - \alpha + \frac{1}{2} \cdot \sin(2 \cdot \alpha)}{\pi}} = V_S \cdot \frac{N_2}{N_1} \cdot \sqrt{\frac{\pi - \alpha + \frac{1}{2} \cdot \sin(2 \cdot \alpha)}{\pi}} \quad (6.8)
\end{aligned}$$

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.

6.4 ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΜΕ ΩΜΙΚΟ - ΕΠΑΓΩΓΙΚΟ ΦΟΡΤΙΟ

Στο σχήμα 6.5 φαίνεται ο μετατροπέας δύο παλμών με ωμικό – επαγωγικό φορτίο στην έξοδο. Η διαφορά κατά τη λειτουργία του συγκεκριμένου κυκλώματος, σε σχέση με αυτό της προηγούμενης παραγράφου, 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.



Σχήμα 6.5: Τοπολογία μετατροπέα δύο παλμών με ωμικό – επαγωγικό φορτίο.

Συνεπώς, στο συγκεκριμένο κύκλωμα 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, στις θετικές

ημιπεριόδους της εναλλασσόμενης τάσης εισόδου για το TH₁ και στις αρνητικές ημιπεριόδους για το TH₂). Από εκείνη τη στιγμή το αντίστοιχο κύκλωμα θα αρχίσει να διαρρέεται από ρεύμα (σχήμα 6.2.α για το TH₁ και σχήμα 6.2.β για το TH₂), ενώ στα άκρα του αντίστοιχου ημιαγωγικού στοιχείου θα εμφανίζεται μηδενική πτώση τάσεως (για ιδανικό θυρίστορ). Επομένως, κατά την αγωγή του TH₁ ισχύει :

$$v_d(t) = v_R(t) + v_L(t) = v_{s2}(t) = v_s(t) \cdot \frac{N_2}{N_1}$$

$$v_{AK1}(t) = 0 \text{ επειδή το θυρίστορ βρίσκεται σε κατάσταση αγωγής}$$

$$v_{AK2}(t) = -2 \cdot v_{s2}(t) = -2 \cdot v_s(t) \cdot \frac{N_2}{N_1} \text{ αφού τα δύο δευτερεύοντα σε σειρά}$$

$$i_d(t) = i_R(t) = i_{TH1}(t) = \frac{v_R(t)}{R} = -i_s(t) \cdot \frac{N_1}{N_2}$$

Επίσης, έχουμε ότι :

$$L \frac{di_d(t)}{dt} + R \cdot i_d(t) = \sqrt{2} \cdot V_{s2} \cdot \sin(\omega \cdot t) = \sqrt{2} \cdot V_s \cdot \frac{N_2}{N_1} \cdot \sin(\omega \cdot t) \Rightarrow$$

$$\Rightarrow i_d(t) = \frac{\sqrt{2} \cdot V_s}{|Z|} \cdot \frac{N_2}{N_1} \cdot \sin(\omega \cdot t - \varphi) + A e^{-\frac{R}{L}t}$$

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

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

$$i_d(t) = \frac{\sqrt{2} \cdot V_s}{|Z|} \cdot \frac{N_2}{N_1} \cdot \left[\sin(\omega \cdot t - \varphi) - \sin(a - \varphi) e^{-\frac{R}{L} \left(\frac{a}{\omega} - t \right)} \right] \quad (6.9)$$

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 .

A). Κατάσταση λειτουργίας ασυνεχούς αγωγής

Αν η ενέργεια της επαγωγής άρα και το ρεύμα που διαρρέει το κύκλωμα μηδενίζονται πριν να έρθει παλμός για το άλλο θυρίστορ, δηλαδή αν:

$$\beta_1^\circ < 180^\circ + \alpha^\circ, \text{ ή } \beta^\circ < \alpha^\circ \quad (6.10)$$

Τότε θα έχουμε χρονικά διαστήματα στη λειτουργία του κυκλώματος όπου το ρεύμα που διαρρέει την επαγωγή μηδενίζεται (στο διάστημα $[180^\circ + \beta - 180^\circ + \alpha]$). Αυτή τη κατάσταση λειτουργίας την ονομάζουμε **κατάσταση λειτουργίας ασυνεχούς αγωγής**.

Τη χρονική στιγμή $(180^\circ + \alpha^\circ)$ θα δοθεί παλμός στο TH_2 όπου θα αρχίσει να άγει και θα ισχύουν οι εξισώσεις :

$$v_d(t) = v_R(t) = v_{S2}(t) = v_S(t) \cdot \frac{N_2}{N_1}$$

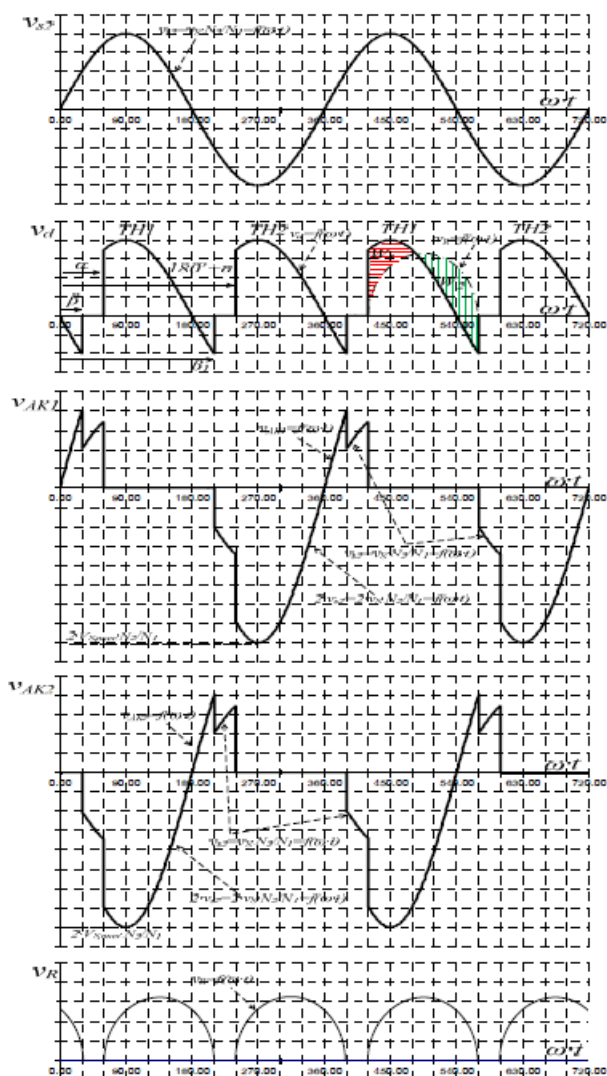
$$v_{AK1}(t) = 2 \cdot v_{S2}(t) = 2 \cdot v_S(t) \cdot \frac{N_2}{N_1} \text{ αφού τα δύο δευτερεύοντα σε σειρά}$$

$$v_{AK2}(t) = 0 \text{ επειδή το θυρίστορ βρίσκεται σε κατάσταση αγωγής}$$

$$i_d(t) = i_R(t) = i_{TH1}(t) = \frac{v_R(t)}{R} = i_S(t) \cdot \frac{N_1}{N_2}$$

Στο διάστημα $[360^\circ + \beta^\circ - 360^\circ + \alpha^\circ]$ το κύκλωμα δεν θα διαρρέεται από ρεύμα και θα επαναληφθεί η ίδια περιοδική λειτουργία από τη χρονική στιγμή $(360^\circ + \alpha^\circ)$ που θα δοθεί παλμός στο TH_1 και αυτή η περίοδος θα ολοκληρωθεί τη στιγμή $(720^\circ + \alpha^\circ)$, κ.ο.κ..

Στο σχήμα 6.6 παρουσιάζονται κυματομορφές της τάσης v_{S2} στο δευτερεύον τύλιγμα που είναι σε φάση με την τάση εισόδου v_S , της τάσης στην έξοδο του μετατροπέα v_d , της τάσης στα άκρα των θυρίστορ v_{AK1} και v_{AK2} καθώς και η κυματομορφή της τάσης στα άκρα της ωμικής αντίστασης v_R , για τυχαία γωνία έναυσης α . Παρατηρείται πως, παρόλο που η τάση στην έξοδο του μετατροπέα λαμβάνει θετικές και αρνητικές τιμές η τάση στα άκρα της αντίστασης είναι μονίμως θετική, μια και τα θυρίστορ δεν επιτρέπουν την αγωγή αρνητικού ρεύματος. Αφού η λειτουργία του κυκλώματος είναι σε ασυνεχή αγωγή η γωνία αγωγής γ



Σχήμα 6.6: Κυματομορφές των τάσεων κατά τη λειτουργία ενός μετατροπέα δύο παλμών με ωμικό – επαγωγικό φορτίο και σε ασυνεχή κατάσταση αγωγής.

είναι μικρότερη από 180° ενώ εφαρμόζοντας το νόμο των τάσεων του kirchhoff προκύπτει ότι:

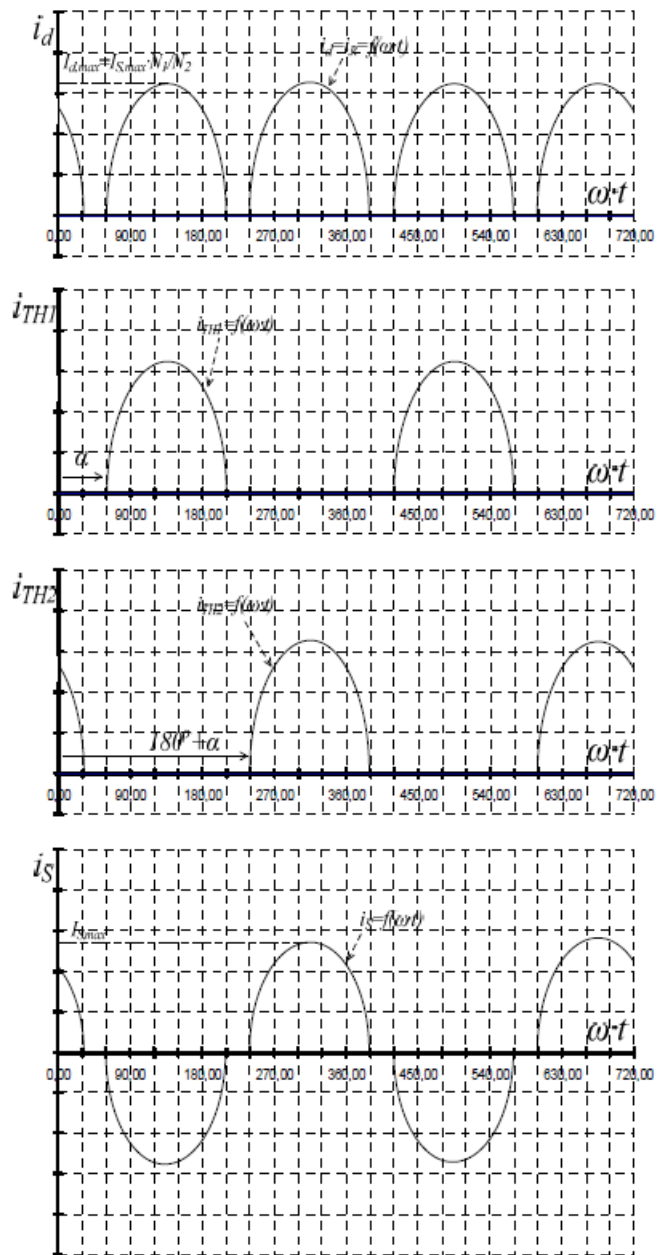
$$v_L(t) = v_d(t) - v_R(t)$$

Επομένως, η κυματομορφή της v_L μπορεί να βρεθεί γραφικά. Επιπλέον, τα δύο εμβαδά W_1 και W_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 τομής των καμπυλών, ενώ από τη χρονική στιγμή εκείνη μέχρι τη στιγμή β_1 η επαγωγή συμπεριφέρεται ως ενεργητικό στοιχείο αφού $v_d(t) < v_R(t)$. Επιπλέον, αφού στην έξοδο έχουμε παθητικό φορτίο η μέση τιμή της τάσης εξόδου V_d θα πρέπει να είναι θετική για να ισχύει η αρχή διατήρησης της ενέργειας.

Τέλος, στο σχήμα 6.7 παρουσιάζονται, σε συνάρτηση του χρόνου, οι κυματομορφές όλων των ρευμάτων κατά τη λειτουργία του κυκλώματος σε ασυνεχή αγωγή με ωμικό – επαγωγικό φορτίο και για την ίδια γωνία έναυσης.

Η μέση τιμή της τάσης εξόδου για τη συγκεκριμένη κατάσταση λειτουργίας προκύπτει ως εξής:

$$\begin{aligned} V_d &= \frac{1}{T} \int_0^T v_d(t) \cdot dt = \frac{1}{\omega \cdot T} \int_0^T \omega \cdot v_d(t) \cdot d(t) = \frac{1}{\pi} \int_0^\pi v_d(t) \cdot d(\omega \cdot t) \Rightarrow \\ \Rightarrow V_d &= \frac{1}{\pi} \cdot \int_a^{\beta_1} \sqrt{2} \cdot V_{s2} \cdot \sin(\omega \cdot t) \cdot d(\omega \cdot t) = \frac{1}{\pi} \cdot \sqrt{2} \cdot V_{s2} \cdot \int_a^{\beta_1} \sin(\omega \cdot t) \cdot d(\omega \cdot t) \Rightarrow \\ \Rightarrow V_d &= \frac{\sqrt{2} \cdot V_{s2}}{\pi} \cdot [-\cos(\omega \cdot t)]_a^{\beta_1} = \frac{\sqrt{2} \cdot V_{s2}}{\pi} \cdot [-\cos \beta_1 - (-\cos \alpha)] \Rightarrow \end{aligned}$$



Σχήμα 6.7: Κυματομορφές των ρευμάτων κατά τη λειτουργία ενός μετατροπέα δύο παλμών με ωμικό – επαγωγικό φορτίο και σε ασυνεχή κατάσταση αγωγής.

$$\begin{aligned}
\Rightarrow V_d &= \frac{\sqrt{2} \cdot V_{S2}}{\pi} \cdot [-\cos(\pi + \beta) - (-\cos a)] = \frac{\sqrt{2} \cdot V_{S2}}{\pi} \cdot [-(-\cos \beta) - (-\cos a)] \\
\Rightarrow V_d &= \frac{\sqrt{2} \cdot V_{S2}}{\pi} \cdot [\cos a + \cos \beta] = \frac{\sqrt{2} \cdot V_S \cdot \frac{N_2}{N_1}}{\pi} \cdot [\cos a + \cos \beta] \quad (6.11)
\end{aligned}$$

Όπου V_S και V_{S2} η ενεργός τιμή της τάσης εισόδου και η ενεργός τιμή στο κάθε δευτερεύον του μετασχηματιστή, αντίστοιχα. Για την μέση τιμή του ρεύματος εξόδου καθώς και την ισχύ στο φορτίο ισχύει:

$$I_d = \frac{\sqrt{2} \cdot V_{S2}}{\pi \cdot R} \cdot [\cos a + \cos \beta] = \frac{\sqrt{2} \cdot V_S \cdot \frac{N_2}{N_1}}{\pi \cdot R} \cdot [\cos a + \cos \beta] \quad (6.12)$$

$$\begin{aligned}
P_d &= V_d \cdot I_d = \left(\frac{\sqrt{2} \cdot V_{S2}}{\pi} \cdot [\cos a + \cos \beta] \right) \cdot \left(\frac{\sqrt{2} \cdot V_{S2}}{\pi \cdot R} \cdot [\cos a + \cos \beta] \right) \Rightarrow \\
\Rightarrow P_d &= \frac{2 \cdot V_{S2}^2}{\pi^2 \cdot R} \cdot [\cos a + \cos \beta]^2 = \frac{2 \cdot V_S^2 \cdot \left(\frac{N_2}{N_1} \right)^2}{\pi^2 \cdot R} \cdot [\cos a + \cos \beta]^2 \quad (6.13)
\end{aligned}$$

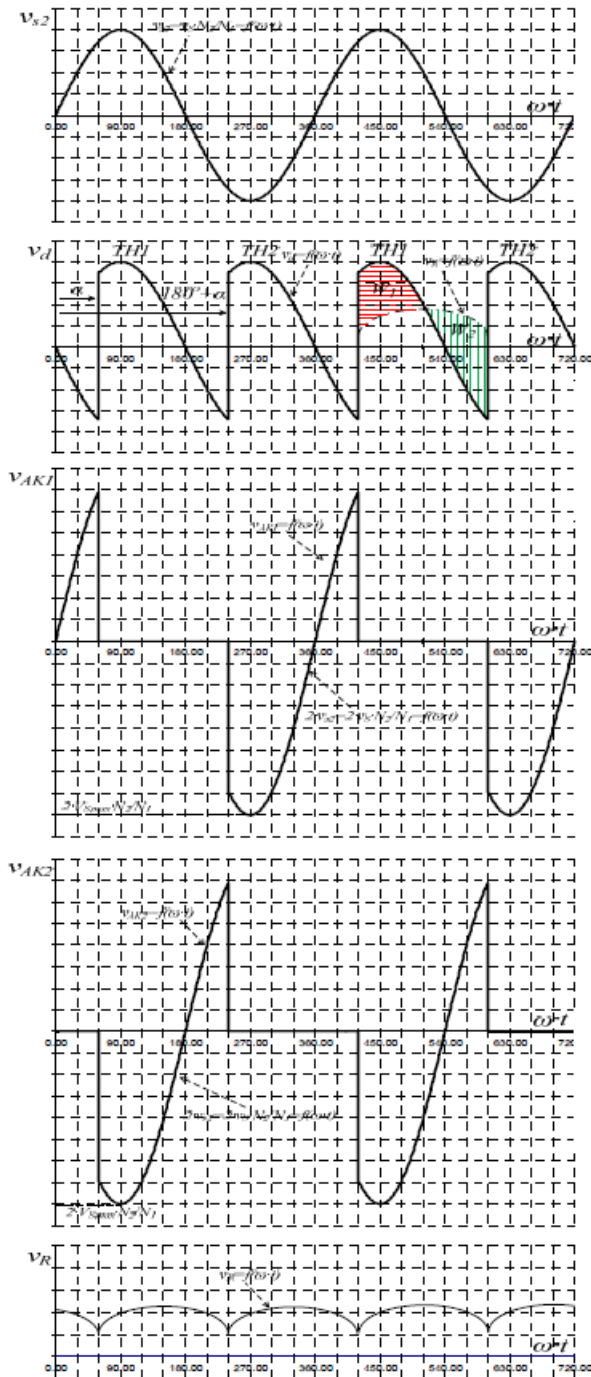
Ενώ η εξίσωση που δίνει την ενεργό τιμή της τάσης εξόδου προκύπτει ως εξής:

$$\begin{aligned}
V_{d,rms} &= \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T v_d^2(t) \cdot dt} = \sqrt{\frac{1}{\omega \cdot T} \int_0^T \omega \cdot v_d^2(t) \cdot d(t)} = \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_0^\pi v_d^2(t) \cdot d(\omega \cdot t)} \Rightarrow \\
\Rightarrow V_{d,rms} &= \sqrt{\frac{1}{\pi} \cdot \int_a^{\beta_1} (\sqrt{2} \cdot V_{S2} \cdot \sin(\omega \cdot t))^2 \cdot d(\omega \cdot t)} \Rightarrow \\
\Rightarrow V_{d,rms} &= \sqrt{\frac{1}{\pi} \cdot (\sqrt{2} \cdot V_{S2})^2 \cdot \int_a^{\beta_1} (\sin(\omega \cdot t))^2 \cdot d(\omega \cdot t)} \Rightarrow \\
\Rightarrow V_{d,rms} &= \sqrt{2} \cdot V_{S2} \cdot \sqrt{\frac{1}{\pi} \cdot \left(\frac{\omega \cdot t}{2} - \frac{\sin(2 \cdot \omega \cdot t)}{4} \right) \Big|_a^{\beta_1}} \Rightarrow \\
\Rightarrow V_{d,rms} &= \sqrt{2} \cdot V_{S2} \cdot \sqrt{\frac{1}{\pi} \cdot \left(\frac{\beta_1}{2} - \frac{\sin(2 \cdot \beta_1)}{4} - \left(\frac{\alpha}{2} - \frac{\sin(2 \cdot \alpha)}{4} \right) \right)} \Rightarrow \\
\Rightarrow V_{d,rms} &= \sqrt{2} \cdot V_{S2} \cdot \sqrt{\frac{1}{\pi} \cdot \left(\frac{\pi + \beta}{2} - \frac{\sin(2 \cdot \pi + 2 \cdot \beta)}{4} - \left(\frac{\alpha}{2} - \frac{\sin(2 \cdot \alpha)}{4} \right) \right)} \Rightarrow \\
\Rightarrow V_{d,rms} &= V_{S2} \cdot \sqrt{\frac{(\pi + \beta) - \alpha + \frac{1}{2} \cdot (\sin(2 \cdot \alpha) - \sin(2 \cdot \beta))}{\pi}} \Rightarrow \\
\Rightarrow V_{d,rms} &= V_S \cdot \frac{N_2}{N_1} \cdot \sqrt{\frac{(\pi + \beta) - \alpha + \frac{1}{2} \cdot (\sin(2 \cdot \alpha) - \sin(2 \cdot \beta))}{\pi}} \quad (6.14)
\end{aligned}$$

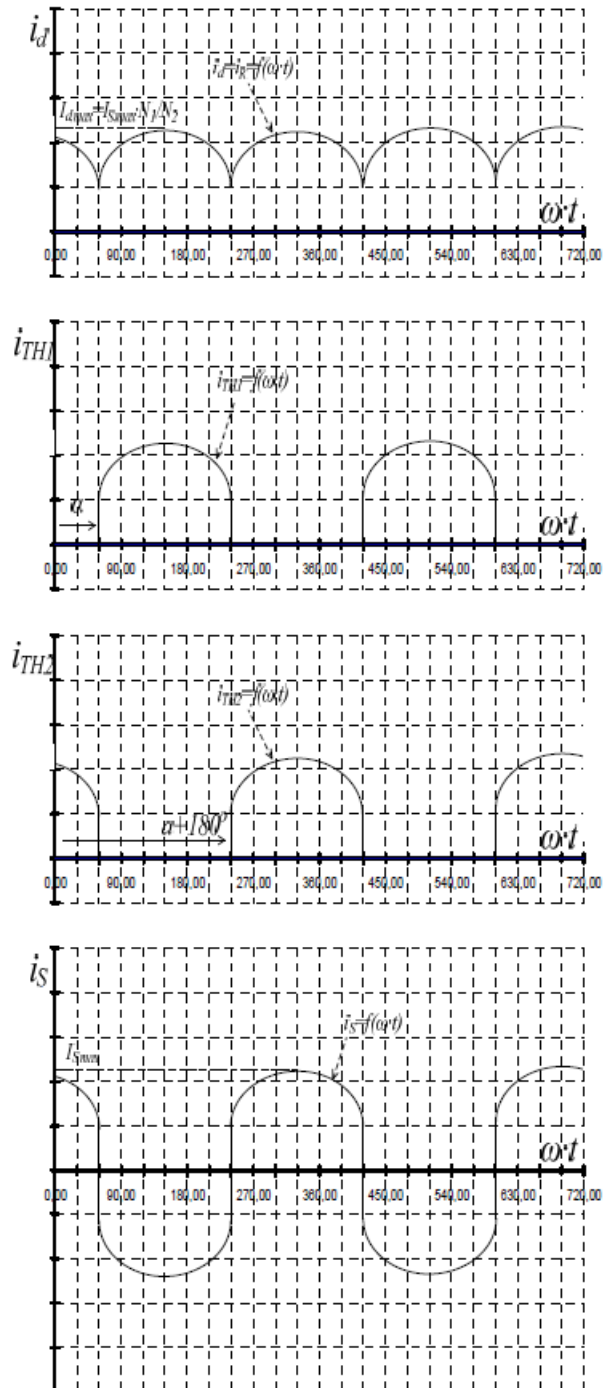
B). Κατάσταση λειτουργίας συνεχούς αγωγής

Αν η ενέργεια της επαγωγής άρα και το ρεύμα που διαρρέει το κύκλωμα, δεν μηδενίζονται μέχρι να έρθει παλμός για το επόμενο θυρίστορ, δηλαδή πάντα βρίσκεται

ένα ημιαγωγικό στοιχείο σε κατάσταση αγωγής, τότε η έξοδος του κυκλώματος διαρρέεται συνεχώς από ρεύμα και αυτή η κατάσταση λειτουργίας ονομάζεται **κατάσταση λειτουργίας συνεχούς αγωγής**. Στα σχήματα 6.8 και 6.9 παρουσιάζονται οι κυματομορφές των τάσεων και των ρευμάτων για τη λειτουργία του μετατροπέα δύο παλμών με ωμικό – επαγωγικό φορτίο σε συνεχή κατάσταση αγωγής, σε συνάρτηση του χρόνου, και για μια γωνία έναυσης α .



Σχήμα 6.8: Κυματομορφές των τάσεων κατά τη λειτουργία ενός μετατροπέα δύο παλμών με ωμικό – επαγωγικό φορτίο και σε συνεχή κατάσταση αγωγής.



Σχήμα 6.9: Κυματομορφές των ρευμάτων κατά τη λειτουργία ενός μετατροπέα δύο παλμών με ωμικό – επαγωγικό φορτίο και σε συνεχή κατάσταση αγωγής.

Από τη λειτουργία του κυκλώματος, είναι προφανές πως, αν στην έξοδο του μετατροπέα έχουμε παθητικό φορτίο τότε συνεχή αγωγή μπορούμε να έχουμε μόνο για γωνίες έναυσης μικρότερες από 90° , ενώ στην περίπτωση που στην έξοδο του μετατροπέα, έχουμε κατάλληλα συνδεδεμένο ενεργητικό φορτίο, η συγκεκριμένη διάταξη δύνανται να λειτουργεί σε συνεχή αγωγή και για γωνίες έναυσης μεγαλύτερες από 90° . Σ' αυτή τη κατάσταση λειτουργίας ο μετατροπέας λειτουργεί ως **αντιστροφέας** με αποτέλεσμα να μεταφέρεται ισχύς από την έξοδο στην είσοδο.

Για τη μέση τιμή της τάσης εξόδου ισχύει:

$$\begin{aligned}
 V_d &= \frac{1}{T} \int_0^T v_d(t) \cdot dt = \frac{1}{\omega \cdot T} \int_0^T \omega \cdot v_d(t) \cdot d(t) = \frac{1}{\pi} \int_0^\pi v_d(t) \cdot d(\omega \cdot t) \Rightarrow \\
 \Rightarrow V_d &= \frac{1}{\pi} \cdot \int_a^{\pi+a} \sqrt{2} \cdot V_{s2} \cdot \sin(\omega \cdot t) \cdot d(\omega \cdot t) = \frac{1}{\pi} \cdot \sqrt{2} \cdot V_{s2} \cdot \int_a^{\pi+a} \sin(\omega \cdot t) \cdot d(\omega \cdot t) \Rightarrow \\
 \Rightarrow V_d &= \frac{\sqrt{2} \cdot V_{s2}}{\pi} \cdot [-\cos(\omega \cdot t)]_a^{\pi+a} = \frac{\sqrt{2} \cdot V_{s2}}{\pi} \cdot [-\cos(\pi + a) - (-\cos a)] \Rightarrow \\
 \Rightarrow V_d &= \frac{\sqrt{2} \cdot V_{s2}}{\pi} \cdot [-(-\cos(a)) - (-\cos a)] = \frac{\sqrt{2} \cdot V_{s2}}{\pi} \cdot [(\cos a) + (\cos a)] \\
 \Rightarrow V_d &= \frac{2 \cdot \sqrt{2} \cdot V_{s2}}{\pi} \cdot (\cos a) = \frac{2 \cdot \sqrt{2} \cdot V_s \cdot \frac{N_2}{N_1}}{\pi} \cdot (\cos a) \quad (6.15)
 \end{aligned}$$

Όπου V_s και V_{s2} η ενεργός τιμή της τάσης εισόδου και η ενεργός τιμή στο κάθε δευτερεύον του μετασχηματιστή, αντίστοιχα. Ενώ, για τη μέση τιμή του ρεύματος εξόδου καθώς και την ισχύ στο φορτίο ισχύει:

$$I_d = \frac{2 \cdot \sqrt{2} \cdot V_{s2}}{\pi \cdot R} \cdot (\cos a) = \frac{2 \cdot \sqrt{2} \cdot V_s \cdot \frac{N_2}{N_1}}{\pi \cdot R} \cdot (\cos a) \quad (6.16)$$

$$\begin{aligned}
 P_d &= V_d \cdot I_d = \left(\frac{2 \cdot \sqrt{2} \cdot V_{s2}}{\pi} \cdot (\cos a) \right) \cdot \left(\frac{2 \cdot \sqrt{2} \cdot V_{s2}}{\pi \cdot R} \cdot (\cos a) \right) \Rightarrow \\
 \Rightarrow P_d &= \frac{8 \cdot V_{s2}^2}{\pi^2 \cdot R} \cdot (\cos a)^2 = \frac{8 \cdot V_s^2 \cdot \left(\frac{N_2}{N_1} \right)^2}{\pi^2 \cdot R} \cdot (\cos a)^2 \quad (6.17)
 \end{aligned}$$

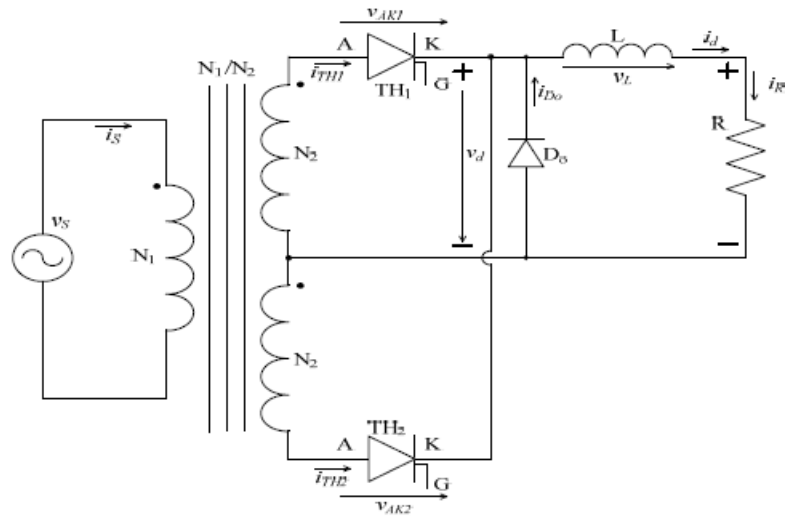
Ενώ η εξίσωση που δίνει την ενεργό τιμή της τάσης εξόδου προκύπτει ως εξής:

$$\begin{aligned}
 V_{d,rms} &= \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T v_d^2(t) \cdot dt} = \sqrt{\frac{1}{\omega \cdot T} \int_0^T \omega \cdot v_d^2(t) \cdot d(t)} = \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_0^\pi v_d^2(t) \cdot d(\omega \cdot t)} \Rightarrow \\
 \Rightarrow V_{d,rms} &= \sqrt{\frac{1}{\pi} \cdot \int_a^{\pi+a} (\sqrt{2} \cdot V_{s2} \cdot \sin(\omega \cdot t))^2 \cdot d(\omega \cdot t)} \Rightarrow \\
 \Rightarrow V_{d,rms} &= \sqrt{\frac{1}{\pi} \cdot (\sqrt{2} \cdot V_{s2})^2 \cdot \int_a^{\pi+a} (\sin(\omega \cdot t))^2 \cdot d(\omega \cdot t)} \Rightarrow \\
 \Rightarrow V_{d,rms} &= \sqrt{2} \cdot V_{s2} \cdot \sqrt{\frac{1}{\pi} \cdot \left(\frac{\omega \cdot t}{2} - \frac{\sin(2 \cdot \omega \cdot t)}{4} \right) \Big|_a^{\pi+a}} \Rightarrow
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\Rightarrow V_{d,rms} &= \sqrt{2} \cdot V_{S2} \cdot \sqrt{\frac{1}{\pi} \cdot \left(\frac{\pi + a}{2} - \frac{\sin(2 \cdot (\pi + a))}{4} - \left(\frac{\alpha}{2} - \frac{\sin(2 \cdot \alpha)}{4} \right) \right)} \\
\Rightarrow V_{d,rms} &= \sqrt{2} \cdot V_{S2} \cdot \sqrt{\frac{1}{\pi} \cdot \left(\frac{\pi + a}{2} - \frac{\sin(2 \cdot \pi + 2 \cdot a)}{4} - \left(\frac{\alpha}{2} - \frac{\sin(2 \cdot \alpha)}{4} \right) \right)} \Rightarrow \\
\Rightarrow V_{d,rms} &= V_{S2} \cdot \sqrt{\frac{(\pi + a) - a + \frac{1}{2} \cdot (\sin(2 \cdot \alpha) - \sin(2 \cdot a))}{\pi}} \Rightarrow \\
\Rightarrow V_{d,rms} &= V_{S2} = V_S \cdot \frac{N_2}{N_1} \quad (6.18)
\end{aligned}$$

6.5 ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΜΕ ΩΜΙΚΟ - ΕΠΑΓΩΓΙΚΟ ΦΟΡΤΙΟ ΚΑΙ ΔΙΟΔΟ ΕΛΕΥΘΕΡΗΣ ΔΙΕΛΕΥΣΗΣ

Όπως συμβαίνει στο μετατροπέα ενός παλμού, έτσι και στην τοπολογία δύο παλμών, η ύπαρξη αυτεπαγωγής στην έξοδο του μετατροπέα περιορίζει την ικανότητα μεταφοράς ισχύος. Για να αντιμετωπισθεί αυτή η ανεπιθύμητη συμπεριφορά, είναι αρκετό να συνδεθεί μία δίοδος ανάστροφα στην έξοδο του μετατροπέα (*δίοδος ελεύθερης διέλευσης*), σκοπός της οποίας είναι να παρέχει τη δυνατότητα εκφόρτισης της ενέργειας της επαγωγής διαμέσου αυτής στο



Σχήμα 6.10: Τοπολογία μετατροπέα δύο παλμών με ωμικό – επαγωγικό φορτίο και δίοδο ελεύθερης διέλευσης.

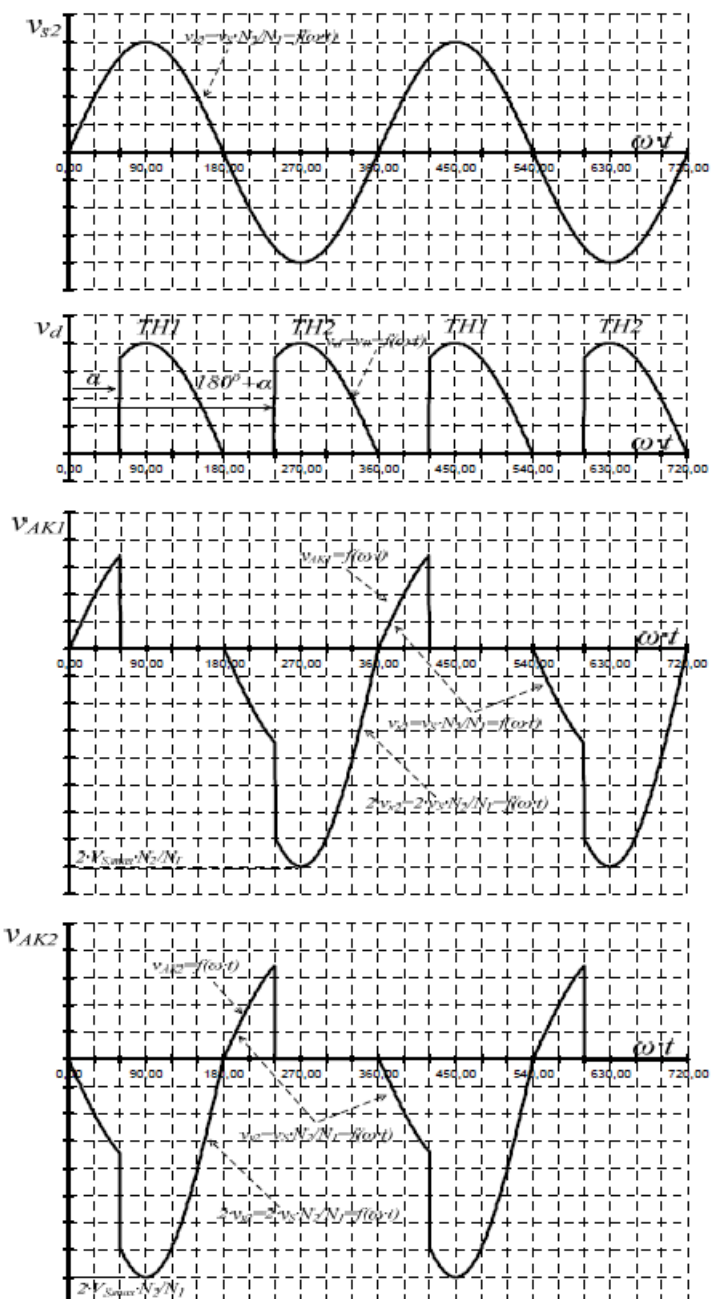
φορτίο. Στο σχήμα 6.10 παρουσιάζεται το κυκλωματικό διάγραμμα ενός μετατροπέα δύο παλμών όπου στην έξοδό του έχει συνδεθεί και μία δίοδος ελεύθερης διέλευσης ενώ τροφοδοτεί ένα ωμικό – επαγωγικό φορτίο. Αναλύοντας τη λειτουργία του κυκλώματος είναι προφανές ότι, από τη χρονική στιγμή a , που θα δοθεί κατάλληλος παλμός έναρξης στο ημιαγωγικό στοιχείο TH_1 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, αφού η επαγωγή πολώνει θετικά τη δίοδο ελεύθερης διέλευσης και δημιουργείται αγωγίσιμος 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. Η ενέργεια της επαγωγής είναι δυνατό να τελειώνει, και επομένως να μηδενίζεται το ρεύμα που διαρρέει την επαγωγή, πριν δοθεί παλμός έναυσης στο ημιαγωγικό στοιχείο TH_2 (τη χρονική στιγμή $180^\circ + \alpha^\circ$), τότε έχουμε **κατάσταση λειτουργίας ασυνεχούς αγωγής** ή να μην μηδενίζεται καθόλου το ρεύμα ($i_L > 0$ για κάθε χρονική στιγμή) και τότε έχουμε **κατάσταση λειτουργίας συνεχούς αγωγής**.

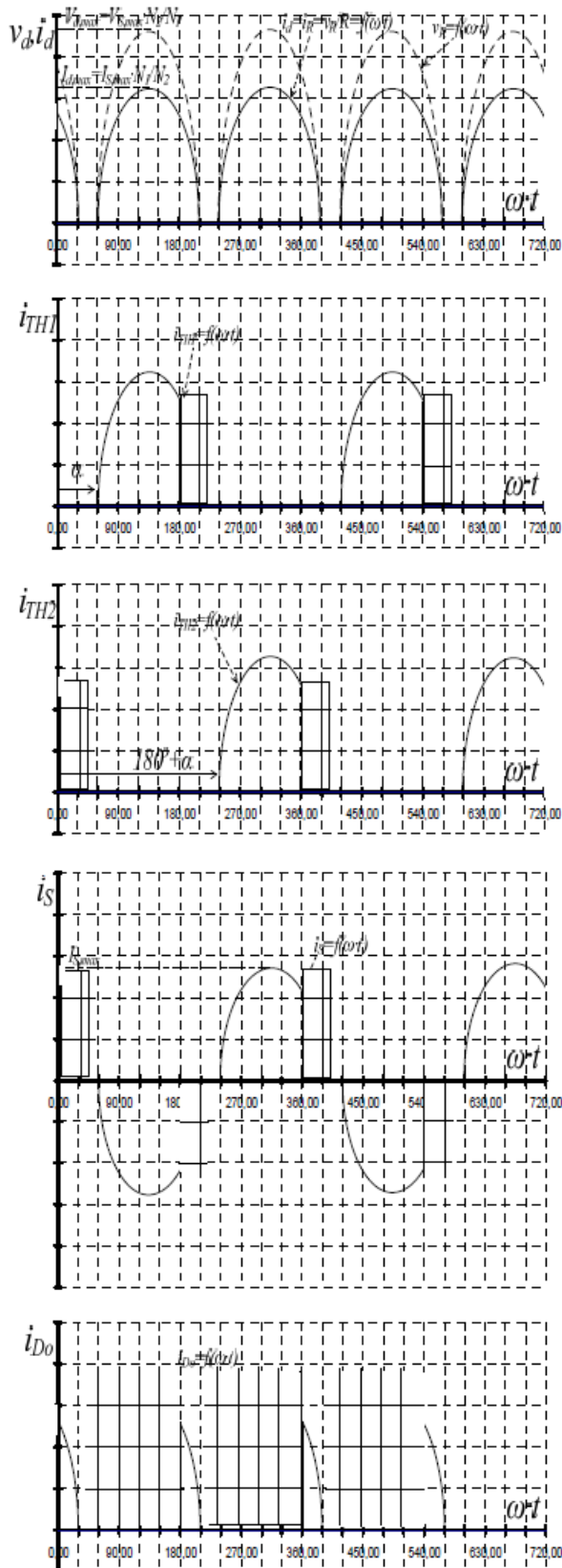
Στο σχήμα 6.11 σχεδιάζονται οι κυματομορφές των τάσεων για τη λειτουργία ενός μετατροπέα δύο παλμών με δίοδο ελεύθερης διέλευσης και με ωμικό – επαγωγικό φορτίο για μια τυχαία γωνία έναυσης και σα συνάρτηση του χρόνου, ενώ στα σχήματα 6.12 και 6.13 δίνονται αντίστοιχα οι κυματομορφές των ρευμάτων τόσο για λειτουργία ασυνεχούς αγωγής όσο και για λειτουργία συνεχούς αγωγής για την ίδια τοπολογία κυκλώματος και για τις ίδιες συνθήκες λειτουργίας. Παρατηρούμε πως οι κυματομορφές των τάσεων είναι όμοιες με αυτές που έχουμε κατά τη λειτουργία με ωμικό φορτίο άρα και οι ίδιες εξισώσεις θα μας δίνουν τις μέσες και ενεργές τιμές των τάσεων στην έξοδο του μετατροπέα.

Επίσης, παρατηρείται πως η δίοδος ελεύθερης διέλευσης μπαίνει σε κατάσταση αγωγής μετά το μηδενισμό της τάσης στην έξοδο του μετατροπέα και τότε σταματάει η είσοδος να διαρρέεται από ρεύμα. Η διάρκεια αγωγής της διόδου ελεύθερης διέλευσης εξαρτάται από τη γωνία έναυσης α και την ενέργεια της επαγωγής.

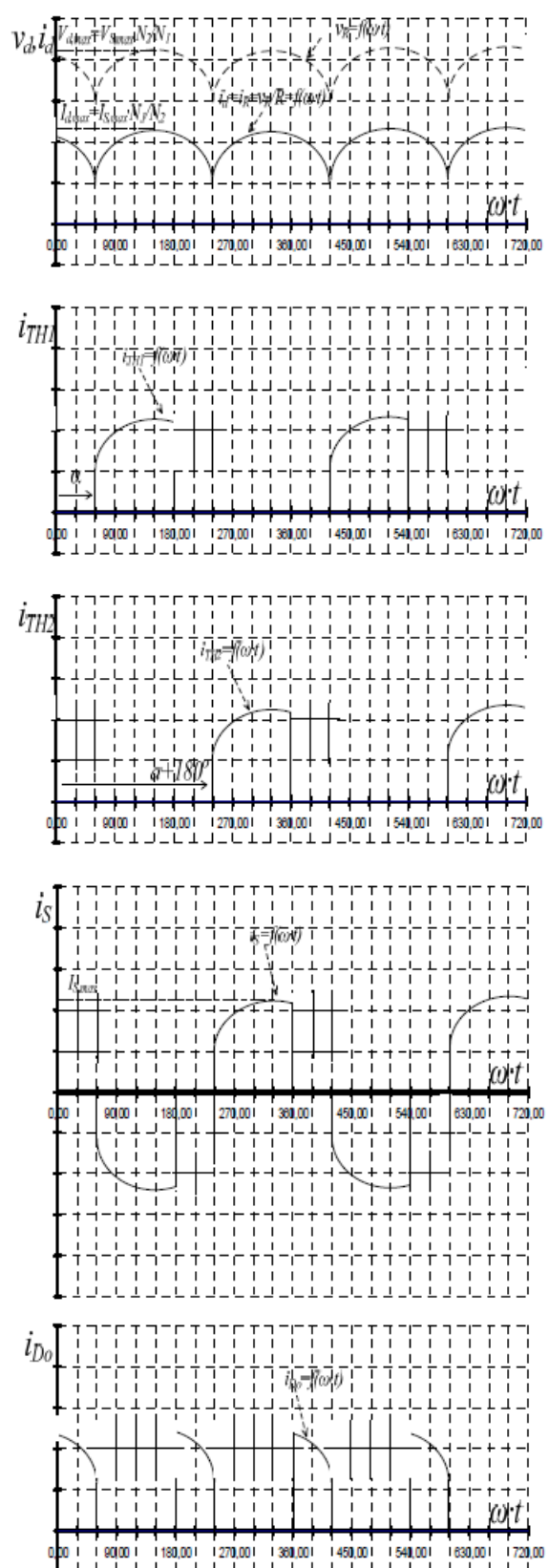
Ακόμα, είναι προφανές ότι αυτή η τοπολογία δε δύναται να λειτουργεί ως αντιστροφέας, αφού δε δίνει αρνητική τάση στην έξοδό της.



Σχήμα 6.11: Κυματομορφές των τάσεων κατά τη λειτουργία ενός μετατροπέα δύο παλμών με ωμικό – επαγωγικό φορτίο και με δίοδο ελεύθερης διέλευσης.



Σχήμα 6.12: Κυματομορφές των ρευμάτων κατά τη λειτουργία ενός μετατροπέα δύο παλμών με δίοδο ελεύθερης διέλευσης και ωμικό – επαγωγικό φορτίο σε ασυνεχή κατάσταση αγωγής.



Σχήμα 6.13: Κυματομορφές των ρευμάτων κατά τη λειτουργία ενός μετατροπέα δύο παλμών με δίοδο ελεύθερης διέλευσης και ωμικό – επαγωγικό φορτίο σε συνεχή κατάσταση αγωγής.

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

$$\begin{aligned}
 & \left. \begin{aligned} V_d &= V_L + V_R \\ V_L &= 0, \text{ γιατί έχουμε μόνιμη κατάσταση λειτουργίας} \end{aligned} \right\} \Rightarrow V_d = V_R \text{ και} \\
 & V_d = \frac{1}{T} \int_0^T v_d(t) \cdot dt = \frac{1}{\omega \cdot T} \int_0^T \omega \cdot v_d(t) \cdot d(t) = \frac{1}{\pi} \int_0^\pi v_d(t) \cdot d(\omega \cdot t) \Rightarrow \\
 & \Rightarrow V_d = \frac{1}{\pi} \cdot \int_a^\pi \sqrt{2} \cdot V_{S2} \cdot \sin(\omega \cdot t) \cdot d(\omega \cdot t) = \frac{1}{\pi} \cdot \sqrt{2} \cdot V_{S2} \cdot \int_a^\pi \sin(\omega \cdot t) \cdot d(\omega \cdot t) \Rightarrow \\
 & \Rightarrow V_d = \frac{\sqrt{2} \cdot V_{S2}}{\pi} \cdot [-\cos(\omega \cdot t)]_a^\pi = \frac{\sqrt{2} \cdot V_{S2}}{\pi} \cdot [-\cos \pi - (-\cos a)] \Rightarrow \\
 & \Rightarrow V_d = \frac{\sqrt{2} \cdot V_{S2}}{\pi} \cdot [\cos a + 1] = \frac{\sqrt{2} \cdot V_S \frac{N_2}{N_1}}{\pi} \cdot [\cos a + 1] \quad (6.19)
 \end{aligned}$$

Όπου V_S και V_{S2} η ενεργός τιμή της τάσης εισόδου και η ενεργός τιμή της τάσης σε κάθε τύλιγμα του δευτερεύοντος, αντίστοιχα. Ενώ, για την μέση τιμή του ρεύματος εξόδου καθώς και για την ισχύ στο φορτίο ισχύει:

$$I_d = \frac{\sqrt{2} \cdot V_{S2}}{\pi \cdot R} \cdot [\cos a + 1] = \frac{\sqrt{2} \cdot V_S \frac{N_2}{N_1}}{\pi \cdot R} \cdot [\cos a + 1] \quad (6.20)$$

$$\begin{aligned}
 P_d &= V_d \cdot I_d = \left(\frac{\sqrt{2} \cdot V_{S2}}{\pi} \cdot [\cos a + 1] \right) \cdot \left(\frac{\sqrt{2} \cdot V_{S2}}{\pi \cdot R} \cdot [\cos a + 1] \right) \Rightarrow \\
 & \Rightarrow P_d = \frac{2 \cdot V_{S2}^2}{\pi^2 \cdot R} \cdot [\cos a + 1]^2 = \frac{2 \cdot \left(V_S \frac{N_2}{N_1} \right)^2}{\pi^2 \cdot R} \cdot [\cos a + 1]^2 \quad (6.21)
 \end{aligned}$$

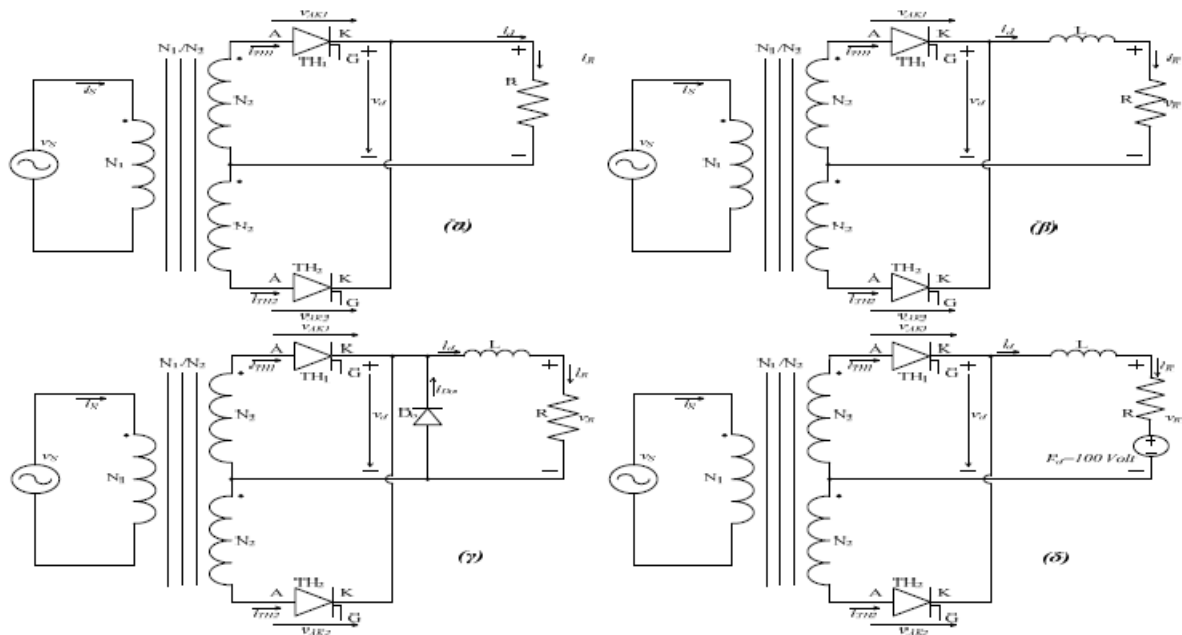
Ενώ η εξίσωση που δίνει την ενεργό τιμή της τάσης εξόδου προκύπτει ως εξής:

$$\begin{aligned}
 V_{d,rms} &= \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T v_d^2(t) \cdot dt} = \sqrt{\frac{1}{\omega \cdot T} \int_0^T \omega \cdot v_d^2(t) \cdot d(t)} = \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_0^\pi v_d^2(t) \cdot d(\omega \cdot t)} \Rightarrow \\
 & \Rightarrow V_{d,rms} = \sqrt{\frac{1}{\pi} \cdot \int_a^\pi \left(\sqrt{2} \cdot V_{S2} \cdot \sin(\omega \cdot t) \right)^2 \cdot d(\omega \cdot t)} \Rightarrow \\
 & \Rightarrow V_{d,rms} = \sqrt{\frac{1}{\pi} \cdot \left(\sqrt{2} \cdot V_{S2} \right)^2 \cdot \int_a^\pi (\sin(\omega \cdot t))^2 \cdot d(\omega \cdot t)} \Rightarrow \\
 & \Rightarrow V_{d,rms} = V_{S2} \cdot \sqrt{\frac{\pi - a + \frac{1}{2} \cdot \sin(2 \cdot a)}{\pi}} = V_S \cdot \frac{N_2}{N_1} \cdot \sqrt{\frac{\pi - a + \frac{1}{2} \cdot \sin(2 \cdot a)}{\pi}} \quad (6.22)
 \end{aligned}$$

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.**

6.7 ΕΡΓΑΣΙΑ

- 1) Για τα παρακάτω κυκλώματα, του σχήματος 6.19, να σχεδιάσετε τις κυματομορφές των ακόλουθων ηλεκτρικών μεγεθών $v_{S2}=f(\omega t)$, $v_d=f(\omega t)$, $v_{AK1}=f(\omega t)$, $v_{AK2}=f(\omega t)$, $v_R=f(\omega t)$, $v_L=f(\omega t)$, $i_S=f(\omega t)$, $i_d=f(\omega t)$, $i_{TH1}=f(\omega t)$, $i_{TH2}=f(\omega t)$ και $i_{D0}=f(\omega t)$, για τις ακόλουθες γωνίες έναυσης : $\alpha=60^\circ$ για το κύκλωμα (α), $\alpha=90^\circ$ για το κύκλωμα (β), $\alpha=120^\circ$ για το κύκλωμα (γ) και $\alpha=30^\circ$ για το κύκλωμα (δ) (για ευκολία χρησιμοποιήστε τις έτοιμες καμπύλες των ημιτόνων που σας δίνονται, στο τέλος της άσκησης, όπου με συνεχή γραμμή σχεδιάζεται η v_{S2} και η $-2 \cdot v_{S2}$ και με διακεκομμένη η $-v_{S2}$ και η $2 \cdot v_{S2}$). Επίσης: v_S : ημιτονοειδής τάση του δικτύου με $V_{S,rms}=230\text{Volt}$, $f=50\text{Hz}$, $R=100\Omega$, $L=400\text{mH}$ και $E_d=100\text{Volt}$.



Σχήμα 6.19: Μετατροπείς δύο παλμών με διάφορα φορτία στην έξοδό του.

- 5) Οι μέσες τιμές της τάσης στην έξοδο των κυκλωμάτων (α), (β) και (γ) τι σχέση έχουν μεταξύ τους, για την ίδια γωνία έναυσης και για το ίδιο ωμικό φορτίο;
- 6) Σε ποια από τα κυκλώματα που φαίνονται στο σχήμα 6.19 η μέση τιμή της τάσης εξόδου εκτός από τη γωνία έναυσης εξαρτάται και από τη τιμή του φορτίου και γιατί;
- 7) Να υπολογιστεί η μέγιστη ανάστροφη τάση που εμφανίζεται στα άκρα των ημιαγωγικών στοιχείων για τα κυκλώματα α και β και για γωνία έναυσης ίση με 60° και ίση με 120° .

Κύκλωμα με γωνία έναυσης α^-

