

ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΑ ΙΣΧΥΟΣ

ΣΗΜΕΙΩΣΕΙΣ

Μάθημα 7^ο – Μετατροπέας τεσσάρων παλμών

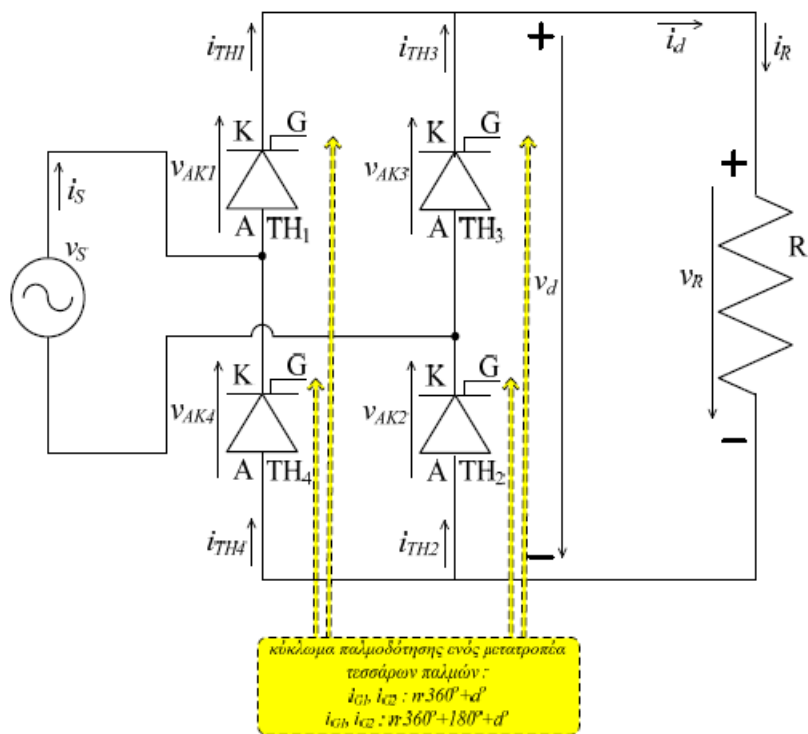
(Επιλογές θεωρίας από τις «Σημειώσεις Εργαστηρίου Ηλεκτρονικών Ισχύος» του Δρ.-Μηχ. Νικολάου Π. Πολύζου, Επίκουρου Καθηγητή, έτος 2008)

7.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η πιο συνηθισμένη τοπολογία πλήρους κύματος που χρησιμοποιείται είναι ο μετατροπέας τεσσάρων παλμών ή η ελεγχόμενη γέφυρα πλήρους ανόρθωσης. Η συγκεκριμένη τοπολογία αποτελείται από τέσσερα ημιαγωγικά στοιχεία και δεν απαιτεί την ύπαρξη ενός μετασχηματιστή με δύο δευτερεύοντα, όπως ο μετατροπέας δύο παλμών, ενώ δίνει στην έξοδο της κυματομορφές τάσεων με όμοια χαρακτηριστικά όπως αυτά του μετατροπέα δύο παλμών, που συζητήθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο.

7.2 ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΑΣ ΤΕΣΣΑΡΩΝ ΠΑΛΜΩΝ

Στο σχήμα 7.1 φαίνεται η τοπολογία του μετατροπέα τεσσάρων παλμών με ωμικό φορτίο. Σημειώνεται, πως η αρίθμηση των ημιαγωγικών στοιχείων δεν είναι τυχαία αλλά γίνεται με τέτοιο τρόπο ώστε να φαίνεται η σειρά με την οποία οδηγούνται σε αγωγή, όπως θα φανεί και από την ανάλυση της λειτουργίας του μετατροπέα, δηλαδή πρώτα το TH₁, μετά το TH₂, κ.ο.κ.. Καταρχήν, παρατηρείται πως στην πάνω μεριά είναι



Σχήμα 7.1: Τοπολογία μετατροπέα τεσσάρων παλμών.

συνδεδεμένα δύο θυρίστορ με κοινή κάθοδο, άρα αυτό που δύναται να μπει σε κατάσταση αγωγής είναι αυτό που στην άνοδο έχει θετικότερο δυναμικό και δεχθεί και παλμό έναυσης. Ομοίως, για την κάτω μεριά του μετατροπέα, παρατηρείτε ότι βρίσκονται δύο θυρίστορ με κοινή κάθοδο, όπου αυτό που δύναται να μπει σε κατάσταση αγωγής είναι αυτό που έχει αρνητικότερο δυναμικό στην κάθοδό του και δεχθεί παλμό έναυσης. Επομένως, στην θετική ημιπερίοδο της τάσης τροφοδοσίας $[0^\circ - 180^\circ]$ το θυρίστορ ένα (TH₁) και το θυρίστορ δύο (TH₂) είναι θετικά πολωμένα εξαιτίας της πολικότητας της

τάσης εισόδου (και αν δεχθούν παλμό έναυσης θα μουν σε κατάσταση αγωγής) και αντίστοιχα, στην αρνητική ημιπερίοδο $[180^\circ - 360^\circ]$ το θυρίστορ τρία (TH₃) και το θυρίστορ τέσσερα (TH₄) είναι θετικά πολωμένα εξαιτίας της πολικότητας της τάσης εισόδου και αν δεχθούν παλμό έναυσης θα μουν αυτά σε κατάσταση αγωγής. 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 τα θυρίστορ ένα (TH₁) και δύο (TH₂) να δέχονται παλμό έναυσης ταυτόχρονα, τη χρονική στιγμή α° ($0^\circ \leq \alpha^\circ \leq 180^\circ$) ενώ, τα θυρίστορ τρία (TH₃) και τέσσερα (TH₄) να δέχονται παλμό έναυσης ταυτόχρονα, τη χρονική στιγμή $180^\circ + \alpha^\circ$. Αυτή είναι και η τεχνική παλμοδότησης που επιλέγεται 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 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).

7.3 ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΜΕ ΩΜΙΚΟ ΦΟΡΤΙΟ

Από το σχήμα 7.1 και από τη τεχνική παραγωγής παλμών έναυσης για τη συγκεκριμένη τοπολογία, που περιγράφηκε παραπάνω, είναι προφανές ότι τα TH₁ και TH₂ είναι θετικά πολωμένα 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 τους δοθεί παλμός έναυσης μέσα σ' αυτά τα χρονικά διαστήματα τα στοιχεία θα μουν αμέσως σε κατάσταση αγωγής και θα αρχίσουν να διαρρέονται από ρεύμα (π.χ. στο διάστημα $[0^\circ - 180^\circ]$), ενώ θα εμφανίζουν μηδενική πτώση τάσης στα άκρα τους (θεωρώντας ιδανικά στοιχεία). Το ισοδύναμο κύκλωμα που θα διαρρέεται από ρεύμα σ' αυτό το χρονικό διάστημα είναι αυτό του σχήματος 7.2.α. Είναι προφανές ότι, σ' αυτό το χρονικό διάστημα τα TH₃ και TH₄ είναι ανάστροφα πολωμένα και επομένως δεν μπορούν να μουν σε κατάσταση αγωγής. Οι εξισώσεις που διέπουν τη λειτουργία του κυκλώματος κατά το χρονικό διάστημα αγωγής των TH₁ και TH₂ έχουν ως εξής:

$$\begin{aligned} v_d(t) &= v_R(t) = v_s(t) \\ v_{AK1}(t) &= v_{AK2}(t) = 0, \text{ τα } TH_1 \text{ και } TH_2 \text{ βρίσκονται σε κατάσταση αγωγής} \\ v_{AK3}(t) &= v_{AK4}(t) = -v_s(t), \text{ τα } TH_3 \text{ και } TH_4 \text{ βρίσκονται σε κατάσταση αποκοπής} \quad (7.1) \\ i_d(t) &= i_R(t) = i_{TH1}(t) = i_{TH2}(t) = \frac{v_R(t)}{R} = i_s(t) \\ i_{TH3}(t) &= i_{TH4}(t) = 0 \end{aligned}$$

Τα TH₁ και TH₂ θα οδηγηθούν σε κατάσταση αποκοπής όταν το ρεύμα τους 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, τα θυρίστορ θα σταματήσουν να άγουν όταν μηδενιστεί η

τάση εξόδου (δηλαδή στις 180°). Από εκεί και πέρα τα συγκεκριμένα θυρίστορ θα παραμείνουν σε κατάσταση αποκοπής μέχρι να πολωθούν ξανά θετικά (στην επόμενη θετική ημιπερίοδο) και να τους ξαναδοθεί νέος παλμός έναυσης για να επαναληφθεί η ίδια περιοδική λειτουργία. Από την άλλη μεριά, τα TH_3 και TH_4 είναι θετικά πολωμένα 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 οδηγηθούν σε κατάσταση αγωγής θα πρέπει να τους 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 7.2.γ):

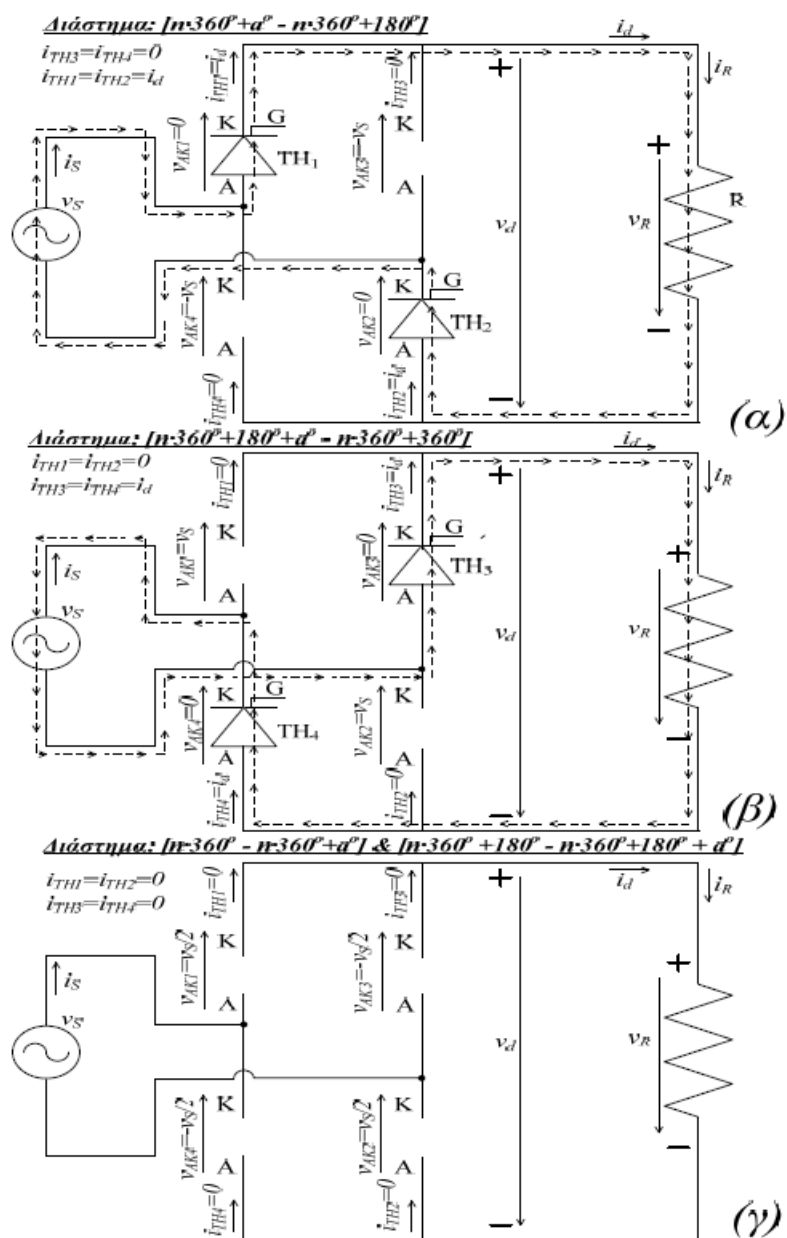
$$v_d(t) = v_R(t) = 0$$

$$v_{AK1}(t) = v_{AK2}(t) = \frac{1}{2} \cdot v_s(t) \text{ επειδή το } TH_1 \text{ και } TH_2 \text{ σε κατάσταση αποκοπής} \quad (7.2)$$

$$v_{AK3}(t) = v_{AK4}(t) = -\frac{1}{2} \cdot v_s(t) \text{ επειδή το } TH_3 \text{ και } TH_4 \text{ σε κατάσταση αποκοπής}$$

$$i_s(t) = i_d(t) = i_R(t) = i_{AK1}(t) = i_{AK2}(t) = i_{AK3}(t) = i_{AK4}(t) = 0$$

Τη χρονική στιγμή $180^\circ + \alpha^\circ$ τα TH_3 και TH_4 είναι θετικά πολωμένα και δέχονται παλμό έναυσης, επομένως τα στοιχεία οδηγούνται σε κατάσταση αγωγής (για το διάστημα $[180^\circ + \alpha^\circ - 360^\circ]$), ενώ εμφανίζουν μηδενική πτώση τάσης στα άκρα τους. Το ισοδύναμο κύκλωμα που θα διαρρέεται από ρεύμα σ' αυτό το χρονικό διάστημα είναι αυτό του σχήματος 7.2.β. Είναι προφανές ότι, σ' αυτό το χρονικό διάστημα το TH_1 και το



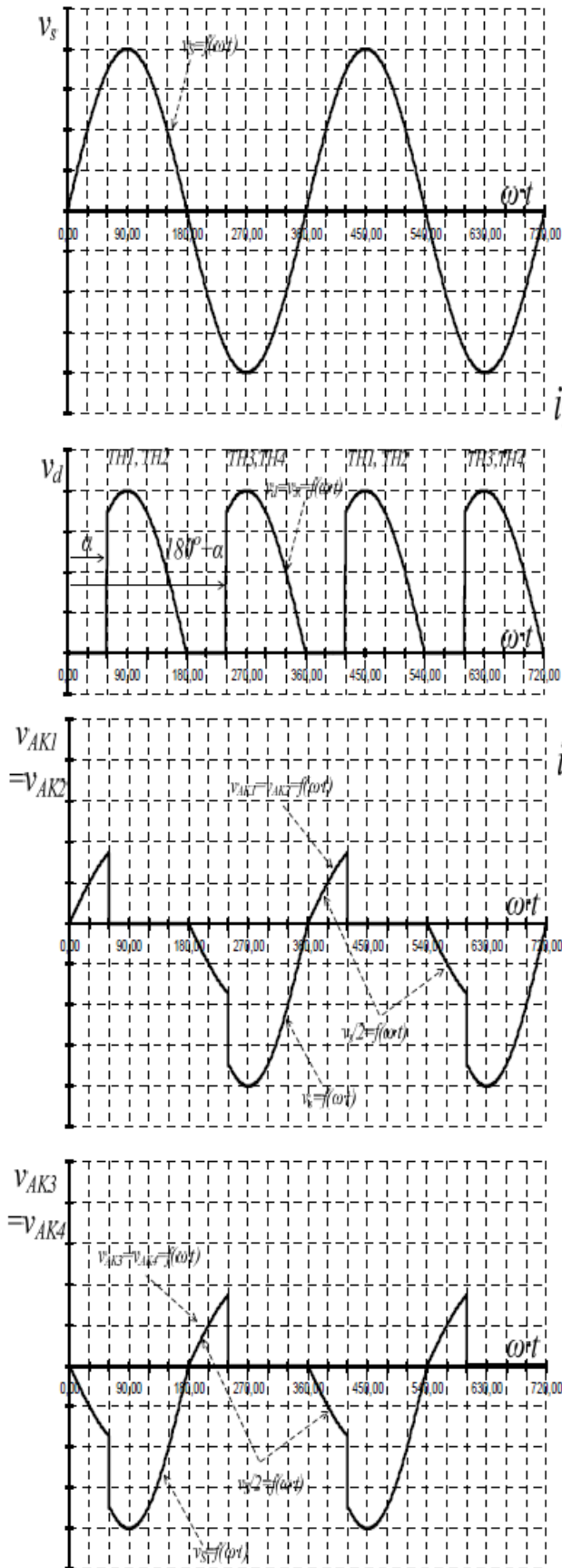
Σχήμα 7.2: Ισοδύναμα κυκλώματα κατά τη λειτουργία ενός μετατροπέα τεσσάρων παλμών.

ΤΗ₂ είναι ανάστροφα πολωμένα και επομένως δεν μπορούν να οδηγηθούν σε κατάσταση αγωγής. Οι εξισώσεις που διέπουν τη λειτουργία του κυκλώματος κατά το χρονικό διάστημα αγωγής των ΤΗ₃ και ΤΗ₄, θεωρώντας ότι τα στοιχεία του κυκλώματος είναι ιδανικά, έχουν ως εξής:

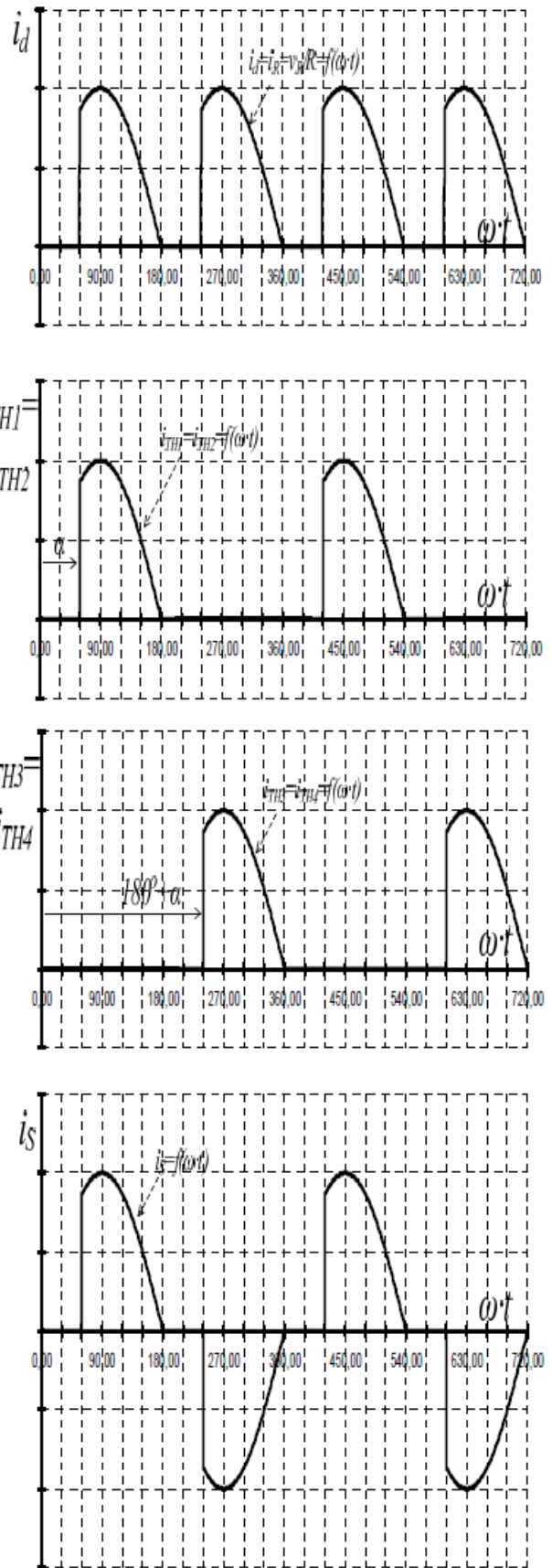
$$\begin{aligned} v_d(t) &= v_R(t) = -v_S(t) \\ v_{AK3}(t) &= v_{AK4}(t) = 0, \text{ τα } TH_3 \text{ και } TH_4 \text{ βρίσκονται σε κατάσταση αγωγής} \\ v_{AK1}(t) &= v_{AK2}(t) = v_S(t), \text{ τα } TH_1 \text{ και } TH_2 \text{ βρίσκονται σε κατάσταση αποκοπής} \quad (7.3) \\ i_d(t) &= i_R(t) = i_{TH3}(t) = i_{TH4}(t) = \frac{v_R(t)}{R} = -i_S(t) \\ i_{TH1}(t) &= i_{TH2}(t) = 0 \end{aligned}$$

Τα ΤΗ₃ και ΤΗ₄ θα οδηγηθούν σε κατάσταση αποκοπής όταν το ρεύμα που τα διαρρέει γίνει μικρότερο από το ρεύμα συγκρατήσεως, δηλαδή, στις 360° οπότε και θα πολωθούν ανάστροφα. Στο διάστημα [360° - 360°+α°] τα ΤΗ₁ και ΤΗ₂ είναι θετικά πολωμένα αλλά δεν έχουν παλμό έναυσης, άρα σ' αυτό το διάστημα κανένα θυρίστορ δε διαρρέεται από ρεύμα (σχήμα 7.2.γ) και οι εξισώσεις 7.2 περιγράφουν τη λειτουργία του κυκλώματος. Τη χρονική στιγμή 360°+α° δίνεται νέος παλμός έναυσης στα ΤΗ₁ και ΤΗ₂ και επαναλαμβάνεται η ίδια περιοδική λειτουργία, που περιγράφηκε παραπάνω.

Στο σχήμα 7.3 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 7.4 σχεδιάζονται οι κυματομορφές του ρεύματος στην έξοδο του μετατροπέα, του ρεύματος που διαρρέει κάθε ημιαγωγικό στοιχείο καθώς και το ρεύμα 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 7.1 και 7.2. Από τις κυματομορφές είναι εμφανές πως τα περισσότερα ηλεκτρικά μεγέθη μεταβάλλονται με τον ίδιο τρόπο που μεταβάλλονται και στο μετατροπέα δύο παλμών, αν θεωρήσουμε ότι ο λόγος μετασχηματισμού είναι ίσος με τη μονάδα. Τα μόνα ηλεκτρικά μεγέθη που οι κυματομορφές τους είναι διαφορετικές στον μετατροπέα δύο παλμών σε σχέση με το μετατροπέα τεσσάρων παλμών, είναι οι τάσεις στα άκρα των ημιαγωγικών στοιχείων, όπου είναι εμφανές ότι τα ημιαγωγικά στοιχεία ενός μετατροπέα δύο παλμών καταπονούνται από ανάστροφη τάση, διπλάσιας τιμής σε σχέση με την τάση του δευτερεύοντος (τάση εισόδου για N₁/N₂=1), ενώ τα ημιαγωγικά στοιχεία σε ένα μετατροπέα τεσσάρων παλμών καταπονούνται με τάση ίση με την τάση εισόδου του μετατροπέα. Επίσης, είναι εμφανής η πλήρης ανόρθωση και η διπλάσια συχνότητα της τάσης εξόδου. 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 μέση τιμή της τάσης εξόδου, ξεκινώντας από μία μέγιστη τιμή για α=0° και καταλήγοντας στο μηδέν για α=180°. 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 λοιπόν με τον ορισμό της μέσης τιμής, για την τάση εξόδου προκύπτει ότι:



Σχήμα 7.3: Κυματομορφές τάσεων κατά τη λειτουργία ενός μετατροπέα τεσσάρων παλμών με ωμικό φορτίο.



Σχήμα 7.4: Κυματομορφές ρευμάτων κατά τη λειτουργία ενός μετατροπέα τεσσάρων παλμών με ωμικό φορτίο.

$$\begin{aligned}
V_d &= \frac{1}{T} \int_0^T v_d(t) \cdot dt = \frac{1}{\omega \cdot T} \int_0^T \omega \cdot v_d(t) \cdot d(t) = \frac{1}{\pi} \int_0^\pi v_d(t) \cdot d(\omega \cdot t) \Rightarrow \\
\Rightarrow V_d &= \frac{1}{\pi} \cdot \int_a^\pi \sqrt{2} \cdot V_s \cdot \sin(\omega \cdot t) \cdot d(\omega \cdot t) = \frac{1}{\pi} \cdot \sqrt{2} \cdot V_s \cdot \int_a^\pi \sin(\omega \cdot t) \cdot d(\omega \cdot t) \Rightarrow \\
\Rightarrow V_d &= \frac{\sqrt{2} \cdot V_s}{\pi} \cdot [-\cos(\omega \cdot t)]_a^\pi = \frac{\sqrt{2} \cdot V_s}{\pi} \cdot [-\cos \pi - (-\cos a)] \Rightarrow \\
\Rightarrow V_d &= \frac{\sqrt{2} \cdot V_s}{\pi} \cdot [\cos a + 1] \tag{7.4}
\end{aligned}$$

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:

$$I_d = \frac{\sqrt{2} \cdot V_s}{\pi \cdot R} \cdot [\cos a + 1] \tag{7.5}$$

$$\begin{aligned}
P_d &= V_d \cdot I_d = \left(\frac{\sqrt{2} \cdot V_s}{\pi} \cdot [\cos a + 1] \right) \cdot \left(\frac{\sqrt{2} \cdot V_s}{\pi \cdot R} \cdot [\cos a + 1] \right) \Rightarrow \\
\Rightarrow P_d &= \frac{2 \cdot V_s^2}{\pi^2 \cdot R} \cdot [\cos a + 1]^2 \tag{7.6}
\end{aligned}$$

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

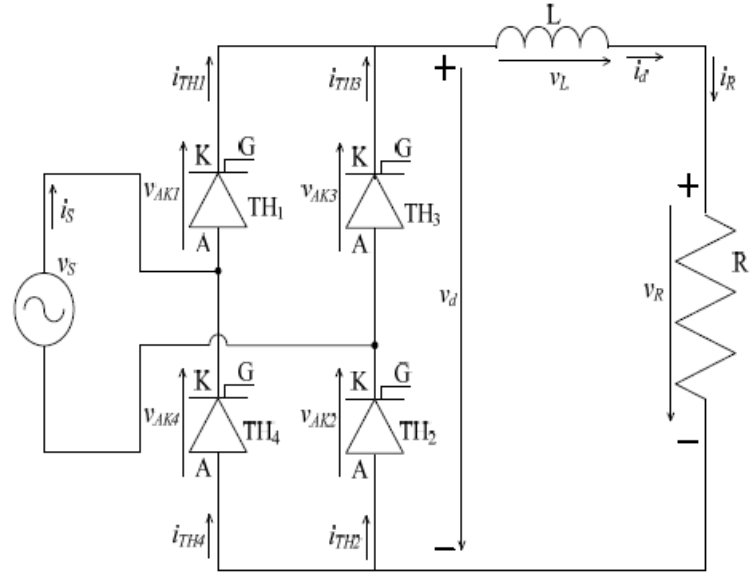
$$\begin{aligned}
V_{d,rms} &= \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T v_d^2(t) \cdot dt} = \sqrt{\frac{1}{\omega \cdot T} \int_0^T \omega \cdot v_d^2(t) \cdot d(t)} = \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_0^\pi v_d^2(t) \cdot d(\omega \cdot t)} \Rightarrow \\
\Rightarrow V_{d,rms} &= \sqrt{\frac{1}{\pi} \cdot \int_a^\pi \left(\sqrt{2} \cdot V_s \cdot \sin(\omega \cdot t) \right)^2 \cdot d(\omega \cdot t)} \Rightarrow \\
\Rightarrow V_{d,rms} &= \sqrt{2} \cdot V_s \cdot \sqrt{\frac{1}{\pi} \cdot \left(\frac{\omega \cdot t}{2} - \frac{\sin(2 \cdot \omega \cdot t)}{4} \right) \Big|_a^\pi} \Rightarrow \\
\Rightarrow V_{d,rms} &= \sqrt{2} \cdot V_s \cdot \sqrt{\frac{1}{\pi} \cdot \left(\frac{\pi}{2} - \frac{\sin(2 \cdot \pi)}{4} - \left(\frac{\alpha}{2} - \frac{\sin(2 \cdot \alpha)}{4} \right) \right)} \Rightarrow \\
\Rightarrow V_{d,rms} &= V_s \cdot \sqrt{\frac{\pi - \alpha + \frac{1}{2} \cdot \sin(2 \cdot \alpha)}{\pi}} \tag{7.7}
\end{aligned}$$

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.

7.4 ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΜΕ ΩΜΙΚΟ - ΕΠΑΓΩΓΙΚΟ ΦΟΡΤΙΟ

Στο σχήμα 7.5 παρουσιάζεται ο μετατροπέας τεσσάρων 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 (γεγονός που έγινε και στις προηγούμενες τοπολογίες).

Αναλύοντας τη λειτουργία του κυκλώματος, είναι προφανές ότι τα ημιαγωγικά στοιχεία θα μουν σε κατάσταση αγωγής τη στιγμή που θα τους δοθεί κατάλληλος παλμός έναυσης και εφόσον είναι θετικά πολωμένα (άρα, τις θετικές ημιπεριόδους της εναλλασσόμενης τάσης εισόδου για το TH₁ και TH₂ και στις αρνητικές ημιπεριόδους για το TH₃ και TH₄). Από εκείνη τη στιγμή και μετά το αντίστοιχο κύκλωμα θα αρχίσει να διαρρέεται από ρεύμα (σχήμα 7.2.α για τα TH₁ και TH₂ και σχήμα 7.2.β για τα TH₃ και TH₄), ενώ στα άκρα των



Σχήμα 7.5: Τοπολογία μετατροπέα τεσσάρων παλμών με ωμικό – επαγωγικό φορτίο.

αντίστοιχων ημιαγωγικών στοιχείων που βρίσκονται σε κατάσταση αγωγής θα εμφανίζεται μηδενική πτώση τάσεως. Επομένως, κατά την αγωγή των TH₁ και TH₂ ισχύει:

$$\begin{aligned} v_d(t) &= v_R(t) + v_L(t) = v_s(t) \\ v_{AK1}(t) &= v_{AK2}(t) = 0 \text{ επειδή } TH_1 \text{ και } TH_2 \text{ σε κατάσταση αγωγής} \\ v_{AK3}(t) &= v_{AK4}(t) = -v_s(t) \text{ επειδή } TH_3 \text{ και } TH_4 \text{ σε κατάσταση αποκοπής} \\ i_d(t) &= i_R(t) = i_{TH1}(t) = i_{TH2}(t) = \frac{v_R(t)}{R} = i_s(t) \\ i_{TH3}(t) &= i_{TH4}(t) = 0 \end{aligned} \quad (7.8)$$

Επίσης, έχουμε ότι :

$$\begin{aligned} L \frac{di_d(t)}{dt} + R \cdot i_d(t) &= \sqrt{2} \cdot V_s \cdot \sin(\omega \cdot t) = \sqrt{2} \cdot V_s \cdot \sin(\omega \cdot t) \Rightarrow \\ \Rightarrow i_d(t) &= \frac{\sqrt{2} \cdot V_s}{|Z|} \cdot \sin(\omega \cdot t - \varphi) + A e^{-\frac{R}{L}t} \end{aligned} \quad (7.9)$$

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

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 :

$$i_d(t) = \frac{\sqrt{2} \cdot V_s}{|Z|} \cdot \left[\sin(\omega \cdot t - \varphi) - \sin(a - \varphi) e^{-\frac{R}{L}(\frac{a}{\omega} - t)} \right] \quad (7.10)$$

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 τα θυρίστορ να συνεχίσουν να άγουν 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 τα θυρίστορ τρία και τέσσερα, δηλαδή αν:

$$\beta_1^\circ < 180^\circ + \alpha^\circ, \quad \text{ή} \quad \beta^\circ < \alpha^\circ \quad (7.11)$$

Τότε θα έχουμε χρονικά διαστήματα στη λειτουργία του κυκλώματος όπου το ρεύμα που διαρρέει την επαγωγή θα είναι μηδέν (στα διαστήματα $[n \cdot 180^\circ + \beta - n \cdot 180^\circ + \alpha]$ όπου n : ακέραιος αριθμός). Αυτή τη κατάσταση λειτουργίας την ονομάζουμε **κατάσταση λειτουργίας ασυνεχούς αγωγής**.

Τη χρονική στιγμή $(180^\circ + \alpha^\circ)$ θα δοθεί παλμός στα TH_3 και TH_4 όπου θα αρχίσουν να άγουν και θα ισχύουν οι εξισώσεις :

$$\begin{aligned} v_d(t) &= v_R(t) + v_L(t) = -v_S(t) \\ v_{AK3}(t) &= v_{AK4}(t) = 0 \text{ επειδή } TH_3 \text{ και } TH_4 \text{ σε κατάσταση αγωγής} \\ v_{AK1}(t) &= v_{AK2}(t) = v_S(t) \text{ επειδή } TH_1 \text{ και } TH_2 \text{ σε κατάσταση αποκοπής} \\ i_d(t) &= i_R(t) = i_{TH3}(t) = i_{TH4}(t) = \frac{v_R(t)}{R} = -i_S(t) \\ i_{TH1}(t) &= i_{TH2}(t) = 0 \end{aligned} \quad (7.12)$$

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 στα TH_1 και TH_2 και αυτή η περίοδος θα ολοκληρωθεί τη στιγμή $(720^\circ + \alpha^\circ)$, κ.ο.κ..

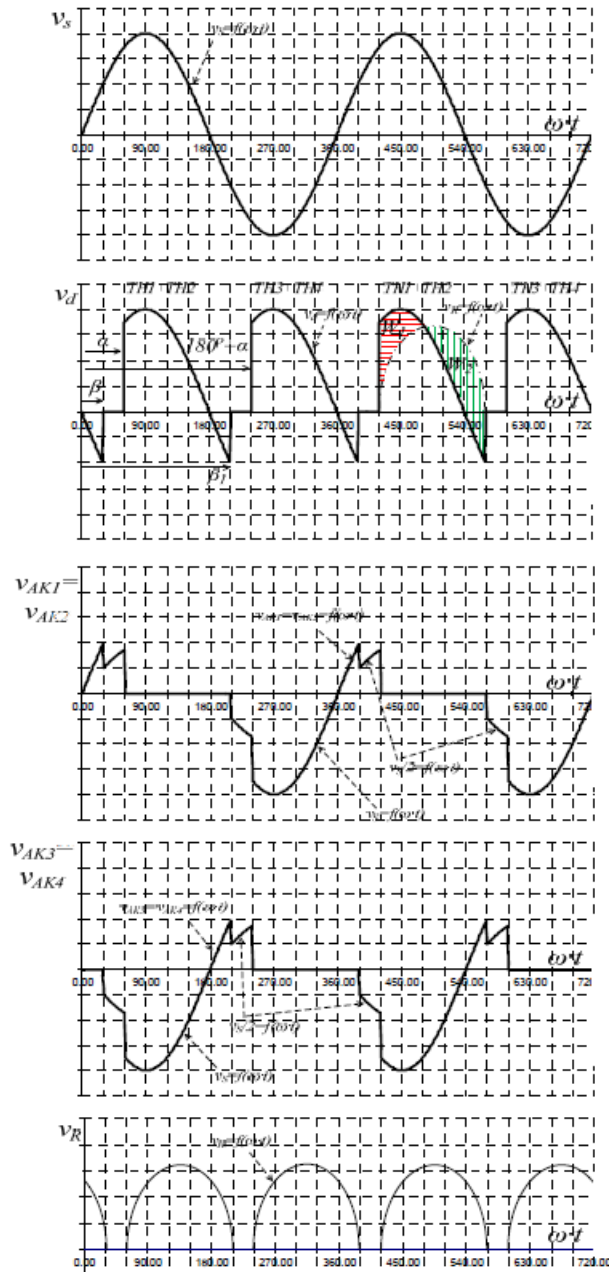
Στο *σχήμα 7.6* παρουσιάζονται κυματομορφές της τάσης εισόδου v_S , της τάσης στην έξοδο του μετατροπέα v_d , της τάσης στα άκρα των θυρίστορ καθώς και η κυματομορφή της τάσης στα άκρα της ωμικής αντίστασης v_R , για τυχαία γωνία έναυσης α και σε συνάρτηση του χρόνου. Παρατηρείται πως, παρόλο που η τάση 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 είναι μικρότερη από 180° ενώ εφαρμόζοντας το νόμο των τάσεων του Kirchhoff προκύπτει ότι:

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

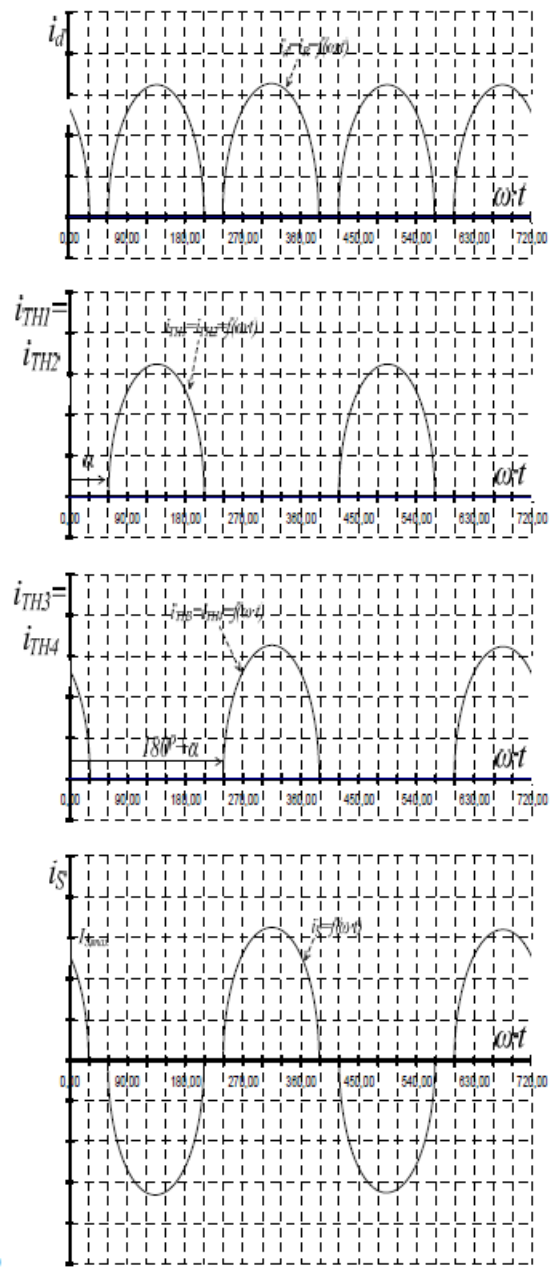
Επομένως, η κυματομορφή της v_L μπορεί να βρεθεί γραφικά. Επιπλέον, **τα δύο εμβαδά W_1 και W_2** , που φαίνονται γραμμοσκιασμένα **θα πρέπει να είναι ίσα μεταξύ τους** μια και η ανάλυση του κυκλώματος γίνεται στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας και η μέση τιμή της τάσης στα άκρα της επαγωγής είναι ίση 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 $v_d(t) < v_R(t)$. Τέλος, 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 7.7* παρουσιάζονται, σα 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.



Σχήμα 7.6: Κυματομορφές των τάσεων κατά τη λειτουργία ενός μετατροπέα τεσσάρων παλμών με ωμικό – επαγωγικό φορτίο και σε ασυνεχή κατάσταση αγωγής.



Σχήμα 7.7: Κυματομορφές των ρευμάτων κατά τη λειτουργία ενός μετατροπέα τεσσάρων παλμών με ωμικό – επαγωγικό φορτίο και σε ασυνεχή κατάσταση αγωγής.

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

$$\begin{aligned}
 V_d &= \frac{1}{T} \int_0^T v_d(t) \cdot dt = \frac{1}{\omega \cdot T} \int_0^T \omega \cdot v_d(t) \cdot d(t) = \frac{1}{\pi} \int_0^\pi v_d(t) \cdot d(\omega \cdot t) \Rightarrow \\
 \Rightarrow V_d &= \frac{1}{\pi} \cdot \int_a^{\beta_1} \sqrt{2} \cdot V_s \cdot \sin(\omega \cdot t) \cdot d(\omega \cdot t) = \frac{1}{\pi} \cdot \sqrt{2} \cdot V_s \cdot \int_a^{\beta_1} \sin(\omega \cdot t) \cdot d(\omega \cdot t) \Rightarrow \\
 \Rightarrow V_d &= \frac{\sqrt{2} \cdot V_s}{\pi} \cdot [-\cos(\omega \cdot t)]_a^{\beta_1} = \frac{\sqrt{2} \cdot V_s}{\pi} \cdot [-\cos \beta_1 - (-\cos a)] \Rightarrow \\
 \Rightarrow V_d &= \frac{\sqrt{2} \cdot V_s}{\pi} \cdot [-\cos(\pi + \beta) - (-\cos a)] = \frac{\sqrt{2} \cdot V_s}{\pi} \cdot [-(-\cos \beta) - (-\cos a)] \\
 \Rightarrow V_d &= \frac{\sqrt{2} \cdot V_s}{\pi} \cdot [\cos a + \cos \beta] \quad (7.13)
 \end{aligned}$$

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

$$I_d = \frac{\sqrt{2} \cdot V_s}{\pi \cdot R} \cdot [\cos a + \cos \beta] \quad (7.14)$$

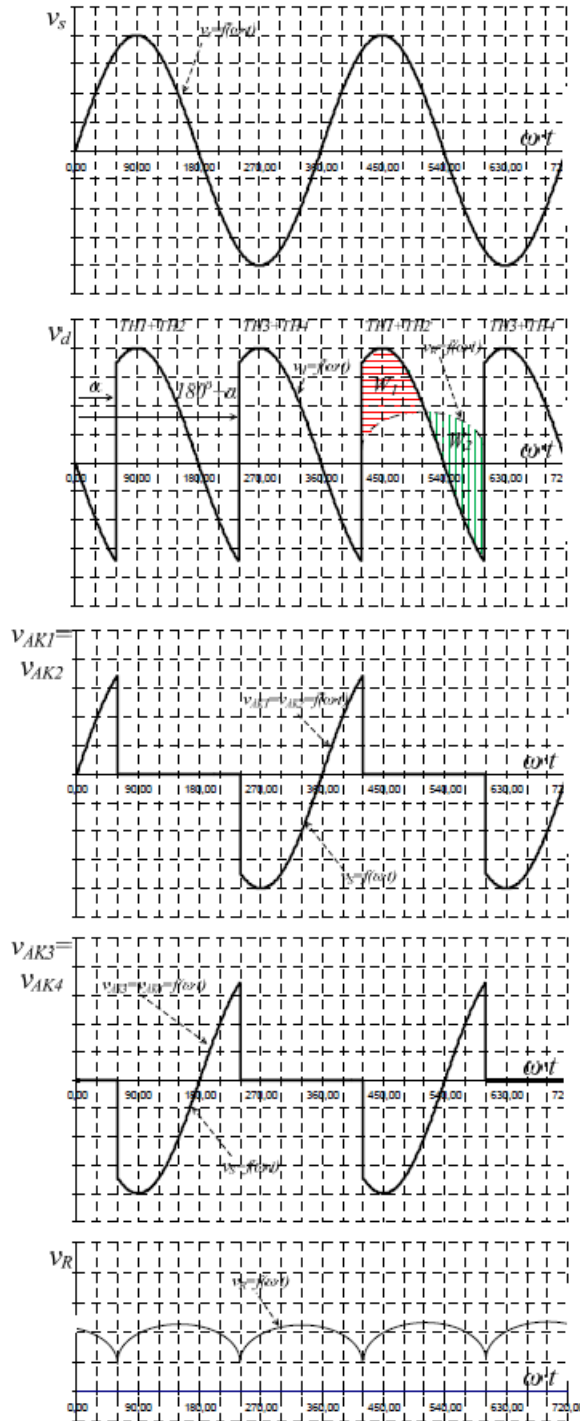
$$P_d = V_d \cdot I_d = \frac{2 \cdot V_s^2}{\pi^2 \cdot R} \cdot [\cos a + \cos \beta]^2 \quad (7.15)$$

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

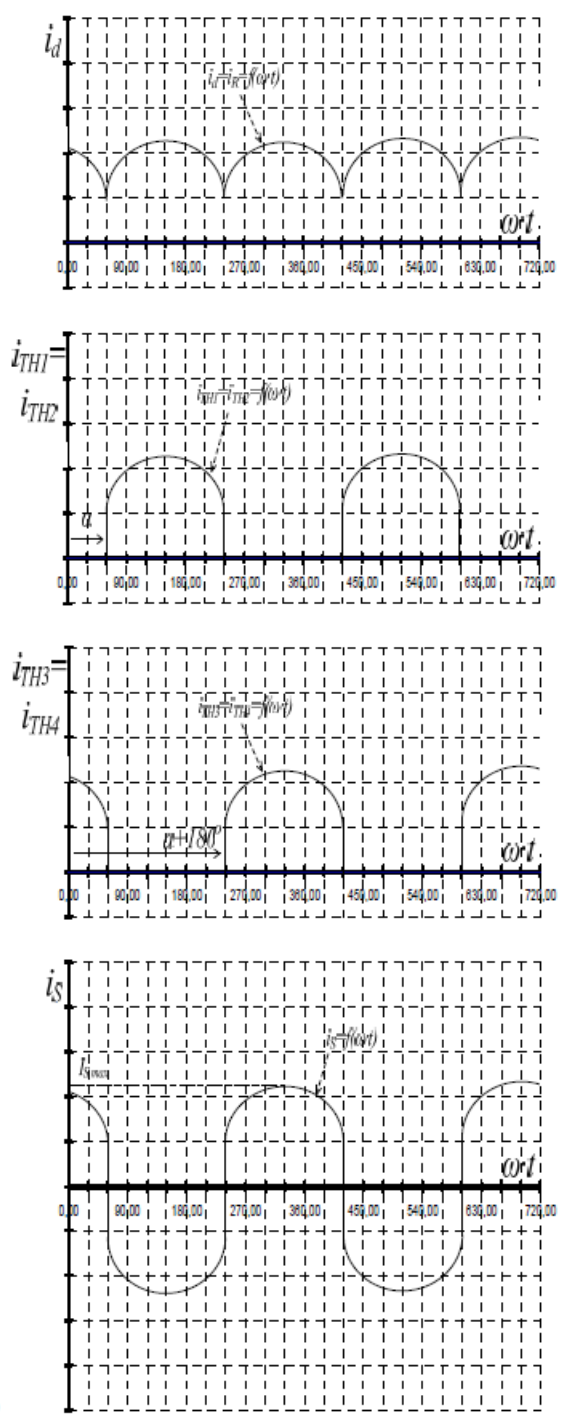
$$\begin{aligned}
 V_{d,rms} &= \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T v_d^2(t) \cdot dt} = \sqrt{\frac{1}{\omega \cdot T} \int_0^T \omega \cdot v_d^2(t) \cdot d(t)} = \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_0^\pi v_d^2(t) \cdot d(\omega \cdot t)} \Rightarrow \\
 \Rightarrow V_{d,rms} &= \sqrt{\frac{1}{\pi} \cdot \int_a^{\beta_1} (\sqrt{2} \cdot V_s \cdot \sin(\omega \cdot t))^2 \cdot d(\omega \cdot t)} \Rightarrow \\
 \Rightarrow V_{d,rms} &= \sqrt{\frac{1}{\pi} \cdot (\sqrt{2} \cdot V_s)^2 \cdot \int_a^{\beta_1} (\sin(\omega \cdot t))^2 \cdot d(\omega \cdot t)} \Rightarrow \\
 \Rightarrow V_{d,rms} &= \sqrt{2} \cdot V_s \cdot \sqrt{\frac{1}{\pi} \cdot \left(\frac{\omega \cdot t}{2} - \frac{\sin(2 \cdot \omega \cdot t)}{4} \right) \Big|_a^{\beta_1}} \Rightarrow \\
 \Rightarrow V_{d,rms} &= V_s \cdot \sqrt{\frac{(\pi + \beta) - a + \frac{1}{2} \cdot (\sin(2 \cdot a) - \sin(2 \cdot \beta))}{\pi}} \quad (7.16)
 \end{aligned}$$

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 τα επόμενα θυρίστορ, δηλαδή πάντα βρίσκονται δύο ημιαγωγικά στοιχεία σε κατάσταση αγωγής, τότε η έξοδος του κυκλώματος διαρρέεται συνεχώς από ρεύμα και αυτή η κατάσταση λειτουργίας ονομάζεται **κατάσταση λειτουργίας συνεχούς αγωγής**. Στα σχήματα 7.8 και 7.9 παρουσιάζονται οι κυματομορφές των τάσεων και των ρευμάτων για τη λειτουργία του μετατροπέα τεσσάρων παλμών με ωμικό – επαγωγικό φορτίο σε συνεχή κατάσταση αγωγής, σε συνάρτηση του χρόνου, και για μια γωνία έναυσης α .



Σχήμα 7.8: Κυματομορφές των τάσεων κατά τη λειτουργία ενός μετατροπέα τεσσάρων παλμών με ωμικό – επαγωγικό φορτίο και σε συνεχή κατάσταση αγωγής.



Σχήμα 7.9: Κυματομορφές των ρευμάτων κατά τη λειτουργία ενός μετατροπέα τεσσάρων 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 δύναται να λειτουργεί σε συνεχή αγωγή και για γωνίες έναυσης μεγαλύτερες από 90° όπου τότε λειτουργεί ως αντιστροφέας μεταφέροντας ισχύ από την έξοδο στην είσοδο.

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

$$\begin{aligned} V_d &= \frac{1}{T} \int_0^T v_d(t) \cdot dt = \frac{1}{\omega \cdot T} \int_0^T \omega \cdot v_d(t) \cdot d(t) = \frac{1}{\pi} \int_0^\pi v_d(t) \cdot d(\omega \cdot t) \Rightarrow \\ \Rightarrow V_d &= \frac{1}{\pi} \cdot \int_a^{\pi+a} \sqrt{2} \cdot V_s \cdot \sin(\omega \cdot t) \cdot d(\omega \cdot t) = \frac{1}{\pi} \cdot \sqrt{2} \cdot V_s \cdot \int_a^{\pi+a} \sin(\omega \cdot t) \cdot d(\omega \cdot t) \Rightarrow \\ \Rightarrow V_d &= \frac{\sqrt{2} \cdot V_s}{\pi} \cdot [-\cos(\omega \cdot t)]_a^{\pi+a} = \frac{\sqrt{2} \cdot V_s}{\pi} \cdot [-\cos(\pi + a) - (-\cos a)] \Rightarrow \\ \Rightarrow V_d &= \frac{2 \cdot \sqrt{2} \cdot V_s}{\pi} \cdot \cos a \end{aligned} \quad (7.17)$$

Ενώ, για την μέση τιμή του ρεύματος εξόδου καθώς και για την ισχύ ισχύει:

$$I_d = \frac{2 \cdot \sqrt{2} \cdot V_s}{\pi \cdot R} \cdot \cos a \quad (7.18)$$

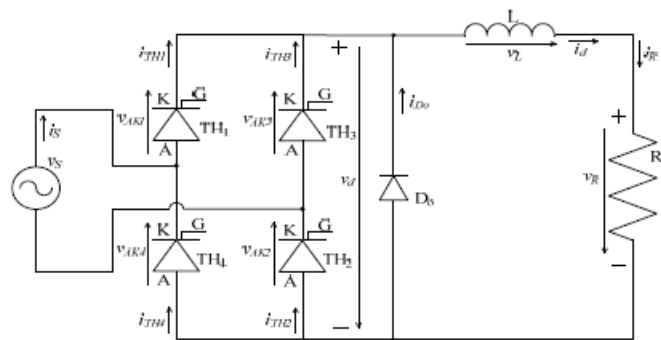
$$P_d = V_d \cdot I_d = \frac{8 \cdot V_s^2}{\pi^2 \cdot R} \cdot \cos a^2 \quad (7.19)$$

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

$$\begin{aligned} V_{d,rms} &= \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T v_d^2(t) \cdot dt} = \sqrt{\frac{1}{\omega \cdot T} \int_0^T \omega \cdot v_d^2(t) \cdot d(t)} = \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_0^\pi v_d^2(t) \cdot d(\omega \cdot t)} \Rightarrow \\ \Rightarrow V_{d,rms} &= \sqrt{\frac{1}{\pi} \cdot \int_a^{\pi+a} (\sqrt{2} \cdot V_s \cdot \sin(\omega \cdot t))^2 \cdot d(\omega \cdot t)} \Rightarrow \\ \Rightarrow V_{d,rms} &= V_s \end{aligned} \quad (7.20)$$

7.5 ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΜΕ ΩΜΙΚΟ - ΕΠΑΓΩΓΙΚΟ ΦΟΡΤΙΟ ΚΑΙ ΔΙΟΔΟ ΕΛΕΥΘΕΡΗΣ ΔΙΕΛΕΥΣΗΣ

Όπως συμβαίνει και στις υπόλοιπες τοπολογίες ανορθωτικών διατάξεων με θυρίστορ, έτσι και στην τοπολογία τεσσάρων 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

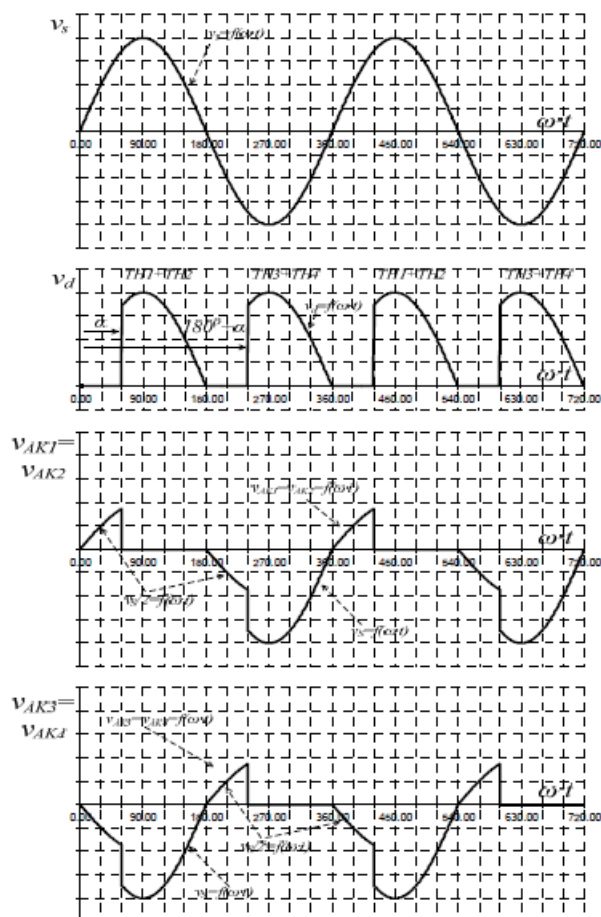


Σχήμα 7.10: Τοπολογία μετατροπέα τεσσάρων παλμών με ωμικό – επαγωγικό φορτίο και δίοδο ελεύθερης διέλευσης.

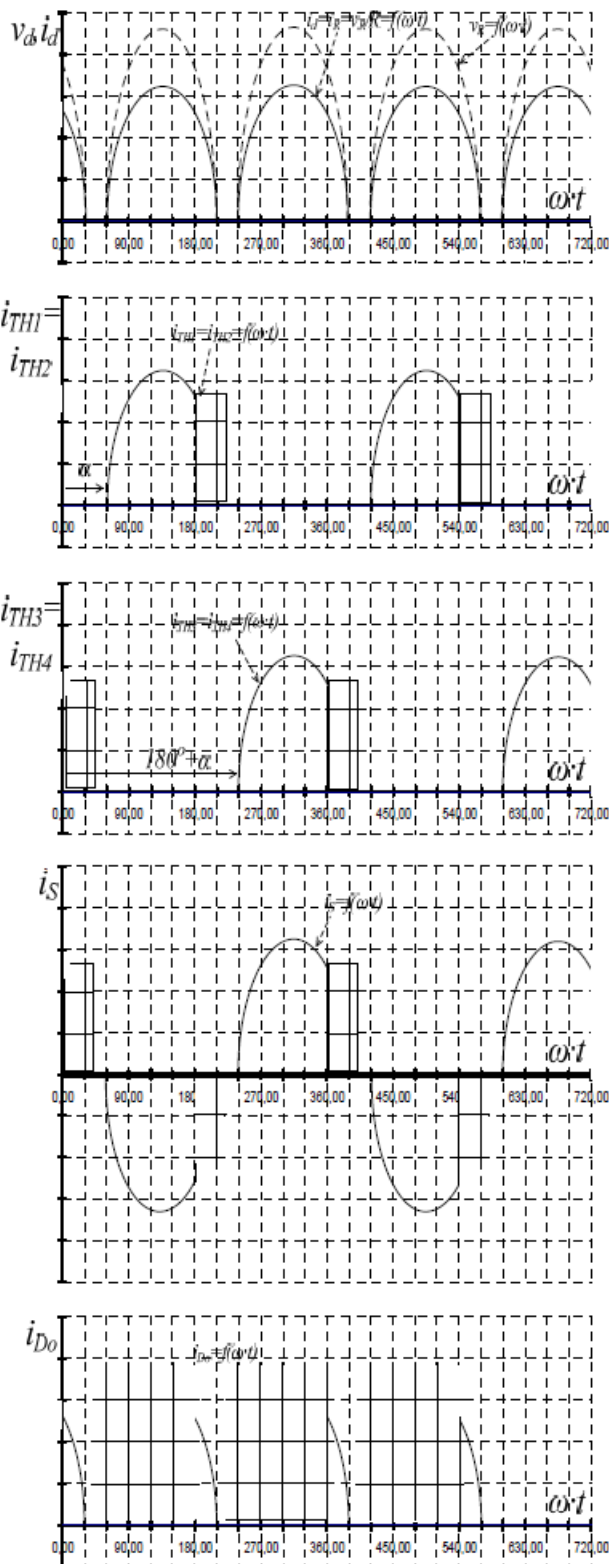
δίοδος ελεύθερης διέλευσης με σκοπό να παρέχει τη δυνατότητα εκφόρτισης της ενέργειας της επαγωγής διαμέσου αυτής στο φορτίο. Στο σχήμα 7.10 παρουσιάζεται το κυκλωματικό διάγραμμα ενός μετατροπέα τεσσάρων παλμών με ωμικό – επαγωγικό φορτίο και δίοδο ελεύθερης διέλευσης. Αναλύοντας τη λειτουργία του κυκλώματος είναι

προφανές ότι, από τη χρονική στιγμή α , που θα δοθεί κατάλληλος παλμός έναυσης στα ημιαγωγικά στοιχεία TH_1 και TH_2 , το αντίστοιχο κύκλωμα θα αρχίσει να διαρρέεται από ρεύμα και μέχρι τις 180° η λειτουργία του κυκλώματος είναι όμοια 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 μετά τις 180° , όπου η επαγωγή πολώνει θετικά τη δίοδο ελεύθερης διέλευσης και δημιουργείται αγωγίμος δρόμος μεταξύ φορτίου και δίοδου. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα η ενέργεια που είχε αποθηκευτεί στην επαγωγή να καταλήγει τελικά στο φορτίο, σε αντίθεση με τα κυκλώματα χωρίς δίοδο ελεύθερης διέλευσης όπου ένα μέρος της αποθηκευμένης, στην επαγωγή, ενέργειας πήγαινε στο φορτίο και το υπόλοιπο 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 στα ημιαγωγικά στοιχεία TH_3 και TH_4 (τη χρονική στιγμή $180^\circ + \alpha^\circ$), και το κύκλωμα να βρίσκεται σε **κατάσταση λειτουργίας ασυνεχούς αγωγής** ή να μη μηδενίζεται το ρεύμα ($i_L > 0$ για κάθε χρονική στιγμή) και το κύκλωμα να λειτουργεί σε **κατάσταση συνεχούς αγωγής**.

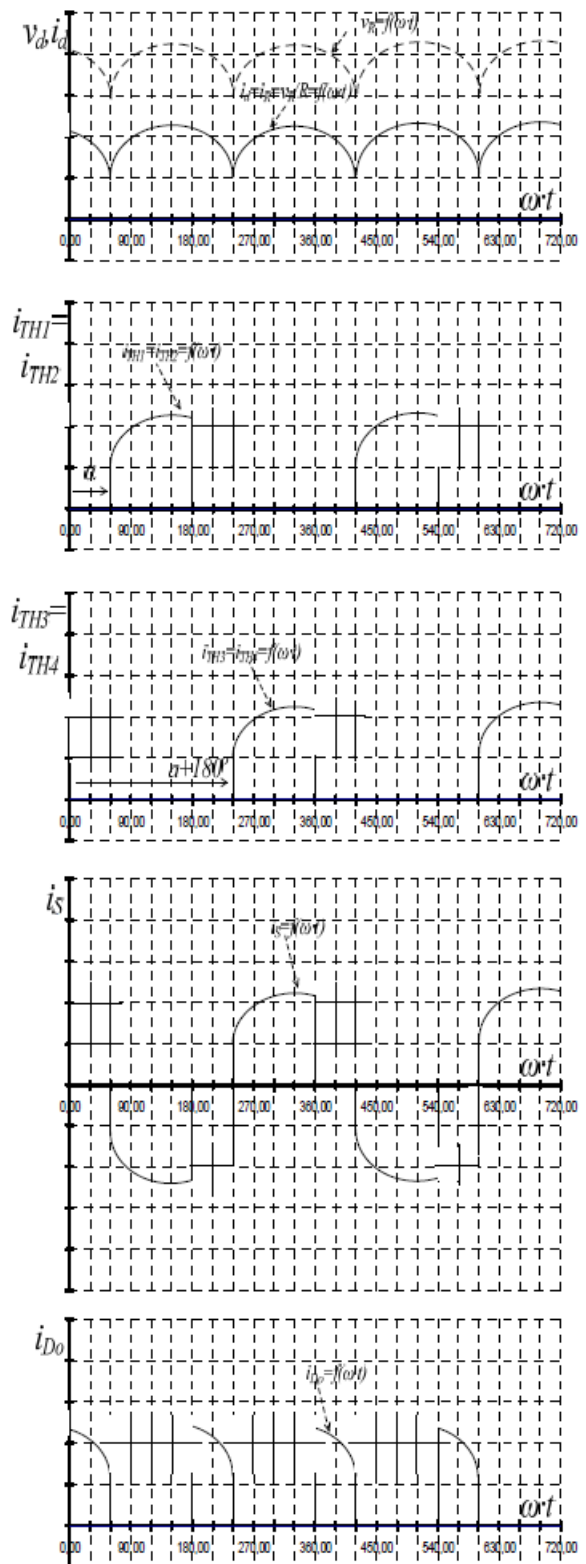
Στο σχήμα 7.11 σχεδιάζονται οι κυματομορφές των τάσεων για τη λειτουργία ενός μετατροπέα τεσσάρων παλμών με δίοδο ελεύθερης διέλευσης και με ωμικό – επαγωγικό φορτίο για μια τυχαία γωνία έναυσης και σε συνάρτηση του χρόνου, ενώ στα σχήματα 7.12 και 7.13 δίνονται αντίστοιχα οι κυματομορφές των ρευμάτων τόσο για λειτουργία ασυνεχούς αγωγής όσο και για λειτουργία συνεχούς αγωγής για την ίδια τοπολογία κυκλώματος και για τις ίδιες συνθήκες λειτουργίας. Από το σχήμα 7.11 είναι εμφανές ότι οι κυματομορφές των τάσεων είναι όμοιες με αυτές της λειτουργίας με ωμικό φορτίο άρα οι ίδιες εξισώσεις που δίνουν τις μέσες και ενεργές τιμές των τάσεων στην έξοδο του μετατροπέα μπορούν να χρησιμοποιηθούν. Επίσης, παρατηρείται πως η δίοδος ελεύθερης διέλευσης μπαίνει σε κατάσταση αγωγής μετά το μηδενισμό της τάσης στην έξοδο του μετατροπέα και η διάρκεια αγωγής της 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 7.11: Κυματομορφές των τάσεων κατά τη λειτουργία ενός μετατροπέα τεσσάρων παλμών με ωμικό – επαγωγικό φορτίο και με δίοδο ελεύθερης διέλευσης.



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



Σχήμα 6.13: Κυματομορφές των ρευμάτων κατά τη λειτουργία ενός μετατροπέα τεσσάρων 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:

$$\begin{aligned}
 & \left. \begin{aligned} V_d &= V_L + V_R \\ V_L &= 0, \text{ γιατί έχουμε μόνιμη κατάσταση λειτουργίας} \end{aligned} \right\} \Rightarrow V_d = V_R \text{ και} \\
 & V_d = \frac{1}{T} \int_0^T v_d(t) \cdot dt = \frac{1}{\omega \cdot T} \int_0^T \omega \cdot v_d(t) \cdot d(t) = \frac{1}{\pi} \int_0^\pi v_d(t) \cdot d(\omega \cdot t) \Rightarrow \\
 & \Rightarrow V_d = \frac{1}{\pi} \cdot \int_a^\pi \sqrt{2} \cdot V_s \cdot \sin(\omega \cdot t) \cdot d(\omega \cdot t) = \frac{1}{\pi} \cdot \sqrt{2} \cdot V_s \cdot \int_a^\pi \sin(\omega \cdot t) \cdot d(\omega \cdot t) \Rightarrow \\
 & \Rightarrow V_d = \frac{\sqrt{2} \cdot V_s}{\pi} \cdot [-\cos(\omega \cdot t)]_a^\pi = \frac{\sqrt{2} \cdot V_s}{\pi} \cdot [-\cos \pi - (-\cos a)] \Rightarrow \\
 & \Rightarrow V_d = \frac{\sqrt{2} \cdot V_s}{\pi} \cdot [\cos a + 1] \quad (7.21)
 \end{aligned}$$

Για τη μέση τιμή του ρεύματος εξόδου καθώς και για την ισχύ στο φορτίο ισχύει:

$$I_d = \frac{\sqrt{2} \cdot V_s}{\pi \cdot R} \cdot [\cos a + 1] \quad (7.22)$$

$$\begin{aligned}
 P_d &= V_d \cdot I_d = \left(\frac{\sqrt{2} \cdot V_s}{\pi} \cdot [\cos a + 1] \right) \cdot \left(\frac{\sqrt{2} \cdot V_s}{\pi \cdot R} \cdot [\cos a + 1] \right) \Rightarrow \\
 & \Rightarrow P_d = \frac{2 \cdot V_s^2}{\pi^2 \cdot R} \cdot [\cos a + 1]^2 \quad (7.23)
 \end{aligned}$$

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

$$\begin{aligned}
 V_{d,rms} &= \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T v_d^2(t) \cdot dt} = \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_0^\pi v_d^2(t) \cdot d(\omega \cdot t)} \Rightarrow \\
 & \Rightarrow V_{d,rms} = \sqrt{\frac{1}{\pi} \cdot \int_a^\pi \left(\sqrt{2} \cdot V_s \cdot \sin(\omega \cdot t) \right)^2 \cdot d(\omega \cdot t)} \Rightarrow \\
 & \Rightarrow V_{d,rms} = V_s \cdot \sqrt{\frac{\pi - a + \frac{1}{2} \cdot \sin(2 \cdot a)}{\pi}} \quad (7.24)
 \end{aligned}$$

7.6 ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΜΕ ΜΕΤΑΒΑΣΗ ΤΟΥ ΡΕΥΜΑΤΟΣ

Η τροφοδοσία του δικτύου συνήθως μοντελοποιείται ως μία ημιτονοειδή πηγή τάσης (v_s) σε σειρά με την εσωτερική της σύνθετη αντίσταση, η οποία έχει ωμικό – επαγωγικό χαρακτήρα, γεγονός που δεν λήφθηκε υπόψη κατά τη λειτουργία όλων των προηγούμενων κυκλωμάτων. Η επαγωγή όμως της εσωτερικής σύνθετης αντίστασης επηρεάζει, όπως θα δούμε στη συνέχεια, τη λειτουργία αυτού του είδους των κυκλωμάτων. Επιπλέον, επειδή η θεωρητική ανάλυση γίνεται με ιδανικά στοιχεία (άρα μοναδιαίος βαθμός απόδοσης), αμελείται το ωμικό μέρος της σύνθετης αντίστασης και γι' αυτό συνήθως η σύνθετη αντίσταση συμβολίζεται ως L_s (ή $X_s = \omega \cdot L_s$). Στο σχήμα 7.14 δίνεται το κυκλωματικό διάγραμμα ενός μετατροπέα τεσσάρων παλμών με εσωτερική σύνθετη αντίσταση στην πηγή τροφοδοσίας και πηγή συνεχούς ρεύματος στην έξοδο, με σκοπό να εξεταστεί η επίδραση της L_s .

Από τη θεωρητική ανάλυση του κυκλώματος είναι φανερό πως η απόλυτη τιμή του ρεύματος εισόδου (i_s) είναι ίση με τη τιμή του ρεύματος εξόδου (I_d) και αν α° η γωνία έναυσης των ημιαγωγικών στοιχείων, τις χρονικές στιγμές $n \cdot 180^\circ + \alpha^\circ$ το ρεύμα εισόδου θα πρέπει να αλλάζει φορά (δηλαδή, από I_d σε $-I_d$ και αντίστροφα). Όταν η εσωτερική αντίσταση της τροφοδοσίας ήταν μηδενική αυτή η αλλαγή συνέβαινε ακαριαία, αν όμως λάβουμε υπόψη την επαγωγική της συμπεριφορά απαιτείται ένα πεπερασμένο χρονικό διάστημα για να γίνει αυτή η μετάβαση του ρεύματος που αποκαλείται **χρόνος μετάβασης** ή **διάστημα μετάβασης** και συμβολίζεται συνήθως με u , ενώ το φαινόμενο ονομάζεται **μετάβαση**.

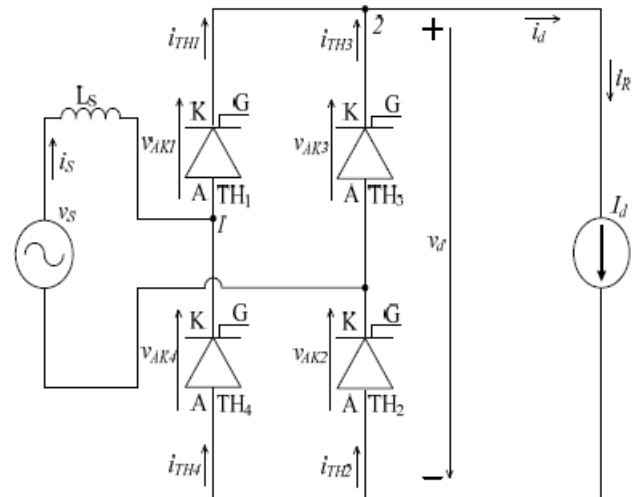
Πιο συγκεκριμένα, λίγο πριν από τη χρονική στιγμή α , και από την ανάλυση της λειτουργίας του κυκλώματος 7.13, είναι σε κατάσταση αγωγής τα ημιαγωγικά στοιχεία TH_3 και TH_4 . Επομένως, για τα ρεύματα που διαρρέουν το κύκλωμα, ισχύει ότι:

$$\begin{aligned} i_{TH3}(t) &= i_{TH4}(t) = -i_s(t) = I_d \\ i_{TH1}(t) &= i_{TH2}(t) = 0 \end{aligned}$$

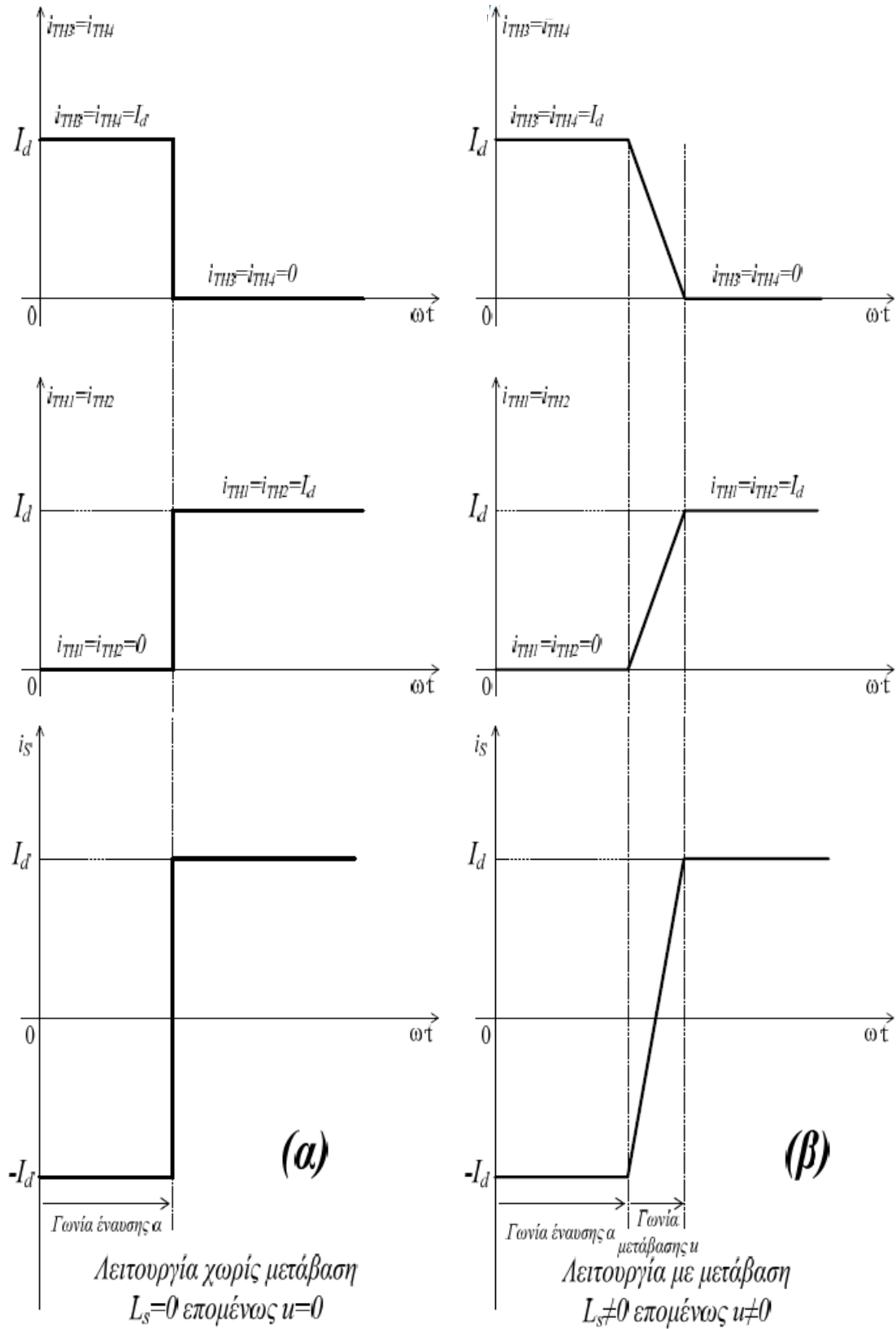
Τη χρονική στιγμή α , δίνεται παλμός έναυσης στα ημιαγωγικά στοιχεία TH_1 και TH_2 τα οποία είναι και θετικά πολωμένα και μπαίνουν σε κατάσταση αγωγής, ενώ τα TH_3 και TH_4 πολώνονται ανάστροφα και οδηγούνται στην αποκοπή. Αν δε ληφθεί υπόψη η σύνθετη εσωτερική αντίσταση της πηγής τροφοδοσίας (δηλαδή, $L_s \neq 0$) τότε τη χρονική στιγμή α^+ θα ισχύει:

$$\begin{aligned} i_{TH1}(t) &= i_{TH2}(t) = i_s(t) = I_d \\ i_{TH3}(t) &= i_{TH4}(t) = 0 \end{aligned}$$

Αν όμως ληφθεί υπόψη η σύνθετη εσωτερική αντίσταση της πηγής τροφοδοσίας (δηλαδή, $L_s \neq 0$) τότε η μετάβαση του ρεύματος από το ένα ημιαγωγικό στοιχείο



Σχήμα 7.13: Κυκλωματικό διάγραμμα μετατροπής τεσσάρων παλμών με L_s και πηγή συνεχούς ρεύματος στην έξοδο.



Σχήμα 7.14: Χρονική μεταβολή των ρευμάτων για τη λειτουργία ενός μετατροπέα τεσσάρων παλμών με πηγή ρεύματος στην έξοδο και κατά τη χρονική στιγμή της μετάβασης. α) με $L_s=0$ και β) με $L_s \neq 0$.

στο άλλο δε μπορεί να γίνει ακαριαία αλλά απαιτείται κάποιο πεπερασμένο χρονικό διάστημα μέσα στο οποίο εξελίσσεται το φαινόμενο της μετάβασης, μια και το ρεύμα δεν μπορεί να αλλάξει απότομα φορά στην είσοδο και να μεταβεί από τη μια ομάδα ημιαγωγικών στοιχείων στην άλλη. Επομένως, το ρεύμα μέσα από τα TH₃ και TH₄ θα αρχίσει να ελαττώνεται, αφού πολώνονται ανάστροφα, ενώ θα αρχίσουν να άγουν τα TH₁ και TH₂, αφού παίρνουν παλμό έναυσης. Από τη λειτουργία του κυκλώματος ισχύει:

$$i_{TH1}(t) = i_{TH2}(t)$$

$$i_{TH3}(t) = i_{TH4}(t)$$

Ενώ, εφαρμόζοντας το πρώτο νόμο του *Kirchhoff* στον κόμβο 1 ισχύει:

$$i_S(t) = i_{TH1}(t) - i_{TH4}(t) = i_{TH1}(t) - i_{TH3}(t)$$

Και από το πρώτο νόμο του *Kirchhoff* για τον κόμβο 2 ισχύει:

$$i_{TH1}(t) + i_{TH3}(t) = I_d$$

Είναι εμφανές από τις παραπάνω εξισώσεις ότι κατά το χρονικό διάστημα της μετάβασης και τα τέσσερα ημιαγωγικά στοιχεία βρίσκονται σε κατάσταση αγωγής και το ρεύμα που διαρρέει τα δύο θυρίστορ ελαττώνεται ενώ από τα άλλα δύο αυξάνει. Επίσης το ρεύμα εισόδου ελαττώνεται και όταν το ρεύμα που διαρρέει τα TH₃ και TH₄ γίνει μικρότερο από το ρεύμα που διαρρέει τα TH₁ και TH₂, αλλάζει πολικότητα. Το φαινόμενο της μετάβασης τελειώνει όταν:

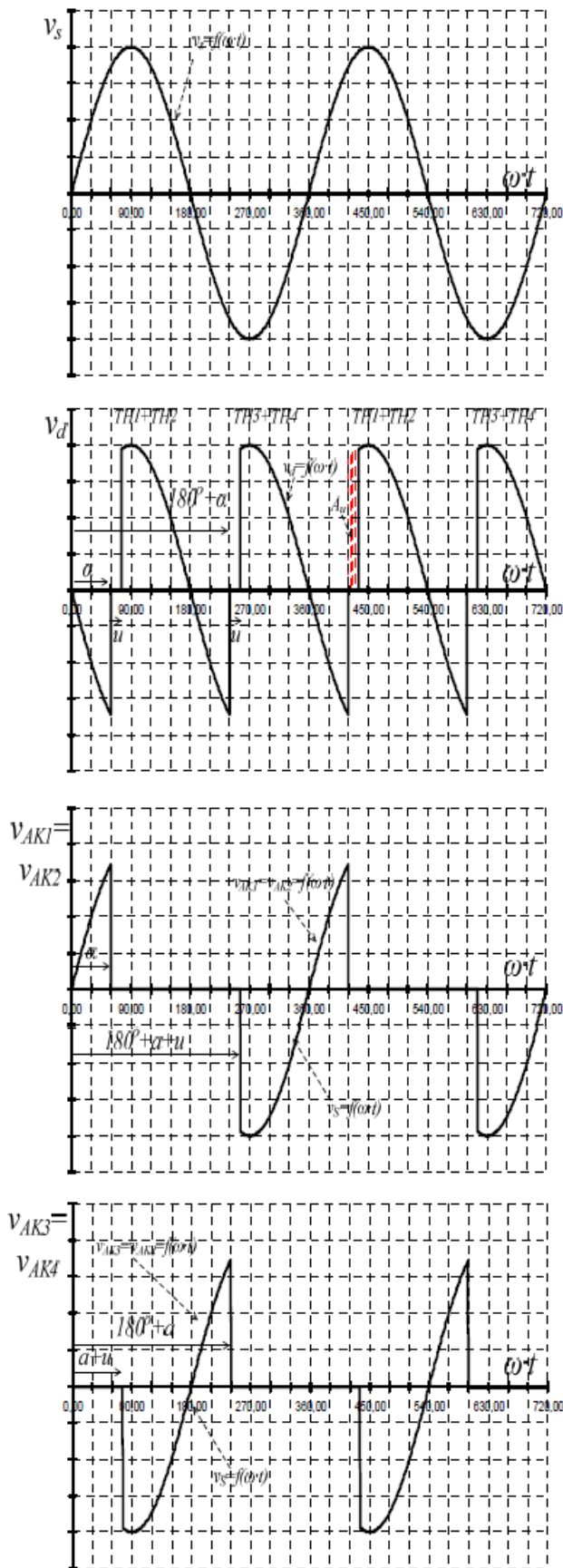
$$i_{TH1}(t) = i_{TH2}(t) = i_S(t) = I_d$$

$$i_{TH3}(t) = i_{TH4}(t) = 0$$

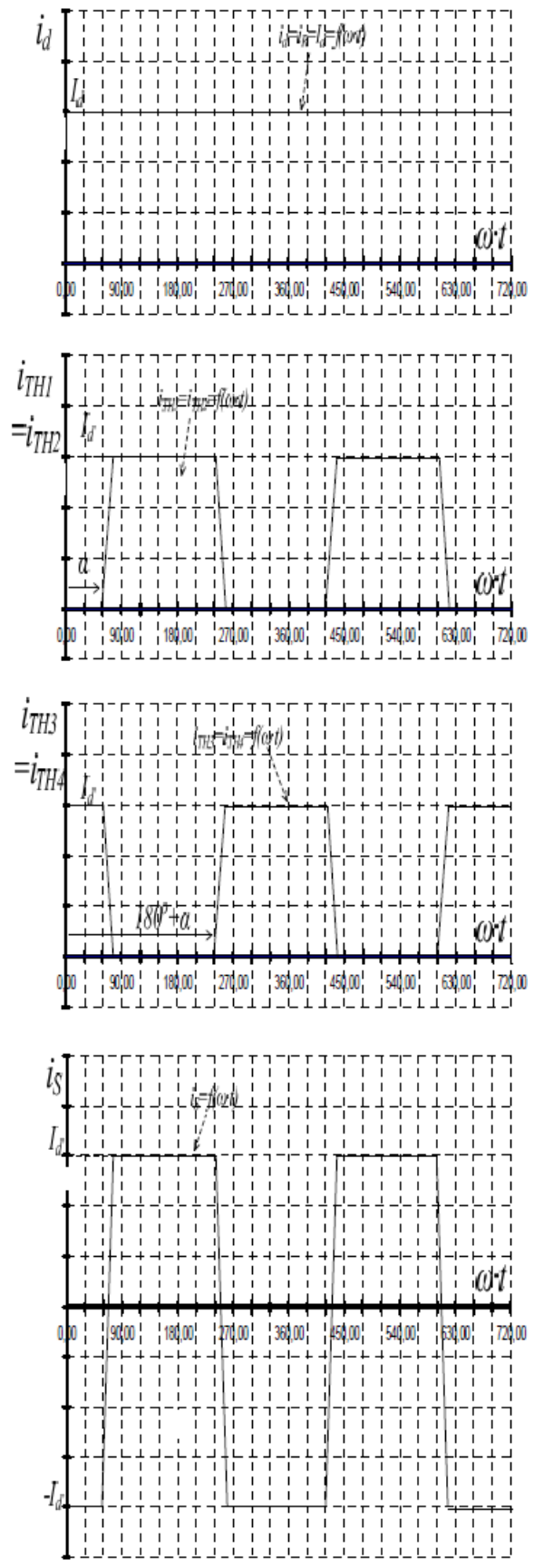
Είναι προφανές ότι το φαινόμενο της μετάβασης θα επαναληφθεί και μετά από 180° όπου πλέον θα συμβεί η ανάποδη διαδικασία δηλαδή, το ρεύμα που διαρρέει πλέον τα TH₁ και TH₂ θα ελαττώνεται ενώ το ρεύμα που διαρρέει τα TH₃ και TH₄ θα αυξάνει.

Στο σχήμα 7.14 δίνονται οι κυματομορφές των ρευμάτων για τη λειτουργία ενός μετατροπέα τεσσάρων παλμών με πηγή ρεύματος στην έξοδο, σε συνάρτηση του χρόνου, και κατά τη χρονική στιγμή της μετάβασης τόσο με $L_s=0$ (α) όσο και με $L_s \neq 0$ (β). Επιπλέον, στα σχήματα 7.15 και 7.16 δίνονται όλες οι κυματομορφές των τάσεων και των ρευμάτων, αντίστοιχα, σε συνάρτηση του χρόνου και για λειτουργία του κυκλώματος του σχήματος 7.13 με μία τυχαία γωνία έναυσης α . Παρατηρείται πως, κατά το χρονικό διάστημα της μετάβασης, αφού όλα τα ημιαγωγικά στοιχεία είναι σε κατάσταση αγωγής η τάση στην έξοδο του μετατροπέα είναι μηδέν. Επομένως, η μέση τιμή της τάσης εξόδου θα είναι μικρότερη από τη μέση τιμή για λειτουργία χωρίς μετάβαση. Άρα :

$$\begin{aligned} v_{L_s}(t) &= v_S(t) \Rightarrow L_s \cdot \frac{di_S(t)}{dt} = \sqrt{2} \cdot V_S \cdot \sin(\omega \cdot t) \Rightarrow \\ &\Rightarrow \omega \cdot L_s \cdot di_S(t) = \omega \cdot \sqrt{2} \cdot V_S \cdot \sin(\omega \cdot t) \cdot dt \Rightarrow \\ &\Rightarrow \int_{-I_d}^{I_d} \omega \cdot L_s \cdot di_S(t) = \int_{\alpha}^{\alpha+\pi} \sqrt{2} \cdot V_S \cdot \sin(\omega \cdot t) \cdot d(\omega \cdot t) \Rightarrow \\ &\Rightarrow \omega \cdot L_s \cdot (i_S(t)) \Big|_{-I_d}^{I_d} = \sqrt{2} \cdot V_S \cdot (\cos(\omega \cdot t)) \Big|_{\alpha}^{\alpha+\pi} \Rightarrow \\ &\Rightarrow \omega \cdot L_s \cdot (I_d - (-I_d)) = \sqrt{2} \cdot V_S \cdot (-\cos(\alpha + \pi) - (-\cos \alpha)) \Rightarrow \end{aligned}$$



Σχήμα 7.15: Κυματομορφές των τάσεων κατά τη λειτουργία ενός μετατροπέα τεσσάρων παλμών με πηγή ρεύματος και μετάβαση.



Σχήμα 7.16: Κυματομορφές των ρευμάτων κατά τη λειτουργία ενός μετατροπέα τεσσάρων παλμών με πηγή ρεύματος και μετάβαση.

$$\begin{aligned}
&\Rightarrow 2 \cdot \omega \cdot L_S \cdot I_d = \sqrt{2} \cdot V_S \cdot (\cos a - \cos(a+u)) \Rightarrow \\
&\Rightarrow \cos(a+u) = \cos a - \frac{2 \cdot \omega \cdot L_S \cdot I_d}{\sqrt{2} \cdot V_S} \quad (7.25)
\end{aligned}$$

Από την εξίσωση 7.25 μπορεί να υπολογιστεί ο χρόνος που διαρκεί το χρονικό διάστημα της μετάβασης το οποίο εξαρτάται από την τιμή της εσωτερικής αυτεπαγωγής της πηγής, το ρεύμα του φορτίου και τα χαρακτηριστικά της τροφοδοσίας. Η μέση τιμή της τάσης εξόδου ελαττώνεται κατά τη μέση τιμή του εμβαδού A_u , που φαίνεται στο σχήμα 7.16. Το εμβαδό αυτό είναι ίσο με:

$$\begin{aligned}
A_u &= \int_a^{a+u} \sqrt{2} \cdot V_S \cdot \sin(\omega \cdot t) \cdot d(\omega \cdot t) = \int_{-I_d}^{I_d} \omega \cdot L_S \cdot di_S(t) \Rightarrow \\
&\Rightarrow A_u = \omega \cdot L_S \cdot (i_S(t)) \Big|_{-I_d}^{I_d} = 2 \cdot \omega \cdot L_S \cdot I_d
\end{aligned}$$

Ενώ η μέση τιμή του εμβαδού A_u δίνεται από:

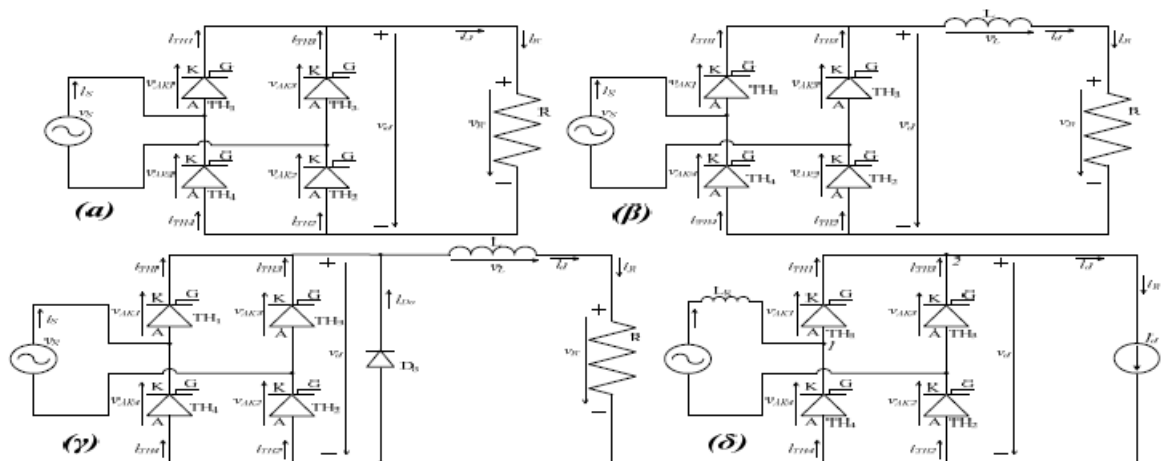
$$\overline{A_u} = \frac{2 \cdot \omega \cdot L_S \cdot I_d}{\pi}$$

Η μέση τιμή της τάσης για ένα μετατροπέα τεσσάρων παλμών δίνεται από την εξίσωση 7.17 σε συνεχή κατάσταση αγωγής χωρίς μετάβαση, ενώ για κατάσταση λειτουργίας με μετάβαση η μέση τιμή δίνεται από την εξίσωση:

$$V_d = \frac{2 \cdot \sqrt{2} \cdot V_S}{\pi} \cdot (\cos a) - \frac{\overline{A_u}}{\pi} \Rightarrow V_d = \frac{2 \cdot \sqrt{2} \cdot V_S}{\pi} \cdot (\cos a) - \frac{2 \cdot \omega \cdot L_S \cdot I_d}{\pi} \quad (7.26)$$

7.7 ΕΡΓΑΣΙΑ

- 1) Για τα παρακάτω κυκλώματα, του σχήματος 7.18, να σχεδιάσετε τις κυματομορφές των ακόλουθων ηλεκτρικών μεγεθών $v_s=f(\omega t)$, $v_d=f(\omega t)$, $v_{AK1}=f(\omega t)$, $v_{AK3}=f(\omega t)$, $v_R=f(\omega t)$, $v_L=f(\omega t)$, $i_s=f(\omega t)$, $i_d=f(\omega t)$, $i_{TH1}=f(\omega t)$, $i_{TH3}=f(\omega t)$ και $i_{D0}=f(\omega t)$, για τις ακόλουθες γωνίες έναυσης : $\alpha=30^\circ$ για το κύκλωμα (α), $\alpha=60^\circ$ για το κύκλωμα (β), $\alpha=90^\circ$ για το κύκλωμα (γ) και $\alpha=0^\circ$ 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_s και η $-v_s/2$ και με διακεκομμένη η $-v_s$ και η $v_s/2$).



Σχήμα 7.18: Μετατροπείς τεσσάρων παλμών με διάφορα φορτία στην έξοδό του.

- 2) Να υπολογίσετε τη μέση τιμή της τάσης εξόδου των παραπάνω κυκλωμάτων και για γωνίες έναυσης ίδιες μ' αυτές του ερωτήματος 1. Να θεωρήσετε ότι $V_s=230$ Volt και ότι η γωνία αγωγής για το κύκλωμα (β) του σχήματος 7.18 είναι 150° , ενώ η γωνία μετάβασης στο κύκλωμα (δ) του σχήματος 7.18 είναι 15° .
- 3) Να υπολογιστεί η μέγιστη τιμή της ανάστροφης τάσης που εμφανίζεται στα άκρα της διόδου ελεύθερης διέλευσης, κύκλωμα (γ) του σχήματος 7.18, για τις ακόλουθες γωνίες έναυσης: $\alpha=30^\circ$ και $\alpha=120^\circ$.
- 4) Η ενεργός τιμή του ρεύματος εισόδου (i_s) του κυκλώματος (δ) του σχήματος 7.18 πότε είναι μεγαλύτερη όταν $L_s=0$ ή όταν $L_s \neq 0$; Να δικαιολογήσετε την απάντησή σας.
- 6) Πότε η μέση τιμή της τάσης εξόδου του κυκλώματος (β) του σχήματος 7.18 είναι μεγαλύτερη, όταν το κύκλωμα λειτουργεί στη συνεχή κατάσταση αγωγής ή όταν λειτουργεί στην ασυνεχή κατάσταση αγωγής;
- 8) Να γίνει σύγκριση μεταξύ των ανορθωτικών διατάξεων ενός, δύο και τεσσάρων παλμών. Να αναφέρετε πλεονεκτήματα μειονεκτήματα της κάθε τοπολογίας.

Κύκλωμα με γωνία έναρξης $\alpha = 0^\circ$

