

ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΑ ΙΣΧΥΟΣ

ΣΗΜΕΙΩΣΕΙΣ

Μάθημα 12^ο – Μετατροπείς συνεχούς τάσης σε εναλλασσόμενη τάση (αντιστροφείς / inverters)

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

12.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ – ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

Σε αυτό το κεφάλαιο θα ασχοληθούμε με τις διατάξεις διακοπτικών μετατροπέων Σ.Τ.-Ε.Τ.. Σκοπός αυτής της κατηγορίας των μετατροπέων είναι η μετατροπή της συνεχούς τάσης εισόδου σε εναλλασσόμενη, είτε σε μονοφασική σύνδεση είτε σε τριφασική συνδεσμολογία.

Όπως είναι ήδη γνωστό, το δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας που μας παρέχεται από την εταιρεία παραγωγής και μεταφοράς (δηλ. της ΔΕΗ) είναι είτε σε μονοφασική είτε σε τριφασική διάταξη σταθερούς ενεργού τιμής (ενεργός τιμή φασικής τάσης 230 Volt, ενεργός τιμή πολικής τάσης 400 Volt) και σταθερής συχνότητας 50Hz. Επίσης, η τριφασική συνδεσμολογία αποτελείται από τρεις φάσεις με όμοια ηλεκτρικά χαρακτηριστικά (ενεργό τιμή και συχνότητα) με τη διαφορά όμως ότι μεταξύ των τριών φάσεων υπάρχει διαφορά φάσης 120° της μίας από την άλλη. Σε αρκετά φορτία όμως, για επιτευχθεί έλεγχος στη λειτουργία τους απαιτείται εναλλασσόμενη τάση μεταβλητής συχνότητας ή/και πλάτους. Για να υλοποιηθεί η συγκεκριμένη απαίτηση χρησιμοποιούνται οι διακοπτικοί μετατροπείς συνεχούς τάσης σε εναλλασσόμενη τάση, οι οποίοι είναι διατάξεις οι οποίες παίρνουν ως είσοδο μια συνεχή τάση και δημιουργούν στην έξοδό του εναλλασσόμενη μονοφασική ή τριφασική τάση, ανάλογα με τη τοπολογία, με δυνατότητα ρύθμισης τόσο της ενεργού τιμής όσο και της συχνότητας. Χαρακτηριστικό παράδειγμα για να γίνει αντιληπτή η χρήση αυτής της κατηγορίας των μετατροπέων είναι στον έλεγχο των στροφών των ασύγχρονων κινητήρων. Όπως είναι ήδη γνωστό, ο έλεγχος των στροφών σ' έναν ασύγχρονο κινητήρα επιτυγχάνεται με ταυτόχρονη ρύθμιση της ενεργού τιμής της τάσης εισόδου και της συχνότητας (π.χ. έλεγχος με V/f σταθερό). Χρησιμοποιώντας μετατροπείς της συγκεκριμένης κατηγορίας μπορούμε να ελέγξουμε ταυτόχρονα την ενεργό τιμή της τάσης εξόδου καθώς και τη συχνότητα άρα και να επιτευχθεί έλεγχος των στροφών σε έναν ασύγχρονο κινητήρα.

Επίσης, σήμερα τέτοιοι μετατροπείς χρησιμοποιούνται ευρέως σε αρκετές εφαρμογές και οι βασικότερες αυτών παρουσιάζονται στη συνέχεια:

- Συστήματα αδιάκοπτης παροχής ισχύος (UPS).
- Συστήματα ελέγχου στροφών ή ροπής ηλεκτρικών κινητήρων εναλλασσομένου ρεύματος.
- Συστήματα ελέγχου της θερμοκρασίας με επαγωγή.

- Συστήματα μετατροπής και ελέγχου της τάσης εξόδου αιολικών γεννητριών.
- Συστήματα μετατροπής και ελέγχου της τάσης εξόδου φωτοβολταϊκών γεννητριών.
- Συστήματα μεταφοράς ενέργειας.
- Φωτισμός με λυχνίες φθορισμού.

Σε όλες τις παραπάνω εφαρμογές, σκοπός του μετατροπέα είναι η παραγωγή μιας ημιτονοειδούς τάσης εξόδου ελεγχόμενη τόσο όσον αφορά την ενεργό τιμή όσο και τη συχνότητα. Επιπλέον, επιδιώκεται η δημιουργία κυματομορφών εξόδου με το μικρότερο δυνατό αρμονικό περιεχόμενο καθώς και η εμφάνιση ανώτερων αρμονικών σε όσο το δυνατόν υψηλότερες συχνότητες, για ευκολότερο φιλτράρισμα αυτών.

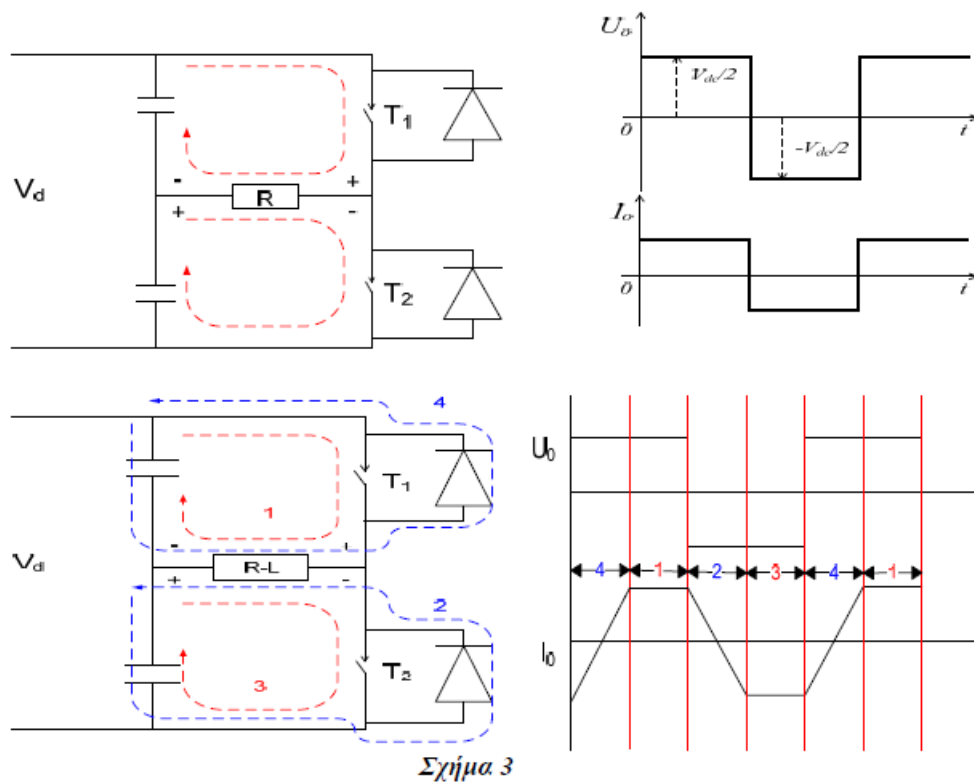
12.2 ΒΑΣΙΚΗ ΔΟΜΗ ΚΑΙ ΗΜΙΑΓΩΓΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΔΙΑΚΟΠΤΙΚΩΝ ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΩΝ ΣΥΝΕΧΟΥΣ ΤΑΣΗΣ ΣΕ ΕΝΑΛΛΑΣΣΟΜΕΝΗ.

Η συνεχής τάση που τροφοδοτεί ένα μετατροπέα μπορεί να προέρχεται είτε από συσσωρευτή είτε από ένα ανορθωτικό σύστημα που αποτελείται από διόδους ή και θυρίστορ. Ως ελεγχόμενα ημιαγωγικά διακοπτικά στοιχεία μπορούν να χρησιμοποιηθούν στοιχεία που ελέγχονται πλήρως και λειτουργούν ως διακόπτες, π.χ. τρανζίστορ BJT, MOSFET, IGBT, GTO, MCT, κ.α. Τα πιο συνήθη ημιαγωγικά στοιχεία που χρησιμοποιούνται σήμερα σε εμπορικές-βιομηχανικές εφαρμογές είναι το IGBT (για ισχύς από 2-50kWatt) και τα MOSFET ισχύος (για διακοπτικές συχνότητες λειτουργίας μεγαλύτερες των 40 kHz).

12.3 ΜΟΝΟΦΑΣΙΚΟΙ ΔΙΑΚΟΠΤΙΚΟΙ ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΙΣ

Οι μονοφασικοί διακοπτικοί μετατροπείς χωρίζονται σε δύο βασικές κατηγορίες ανάλογα με το τι φορτία θέλουμε να οδηγήσουμε. Υπάρχουν μετατροπείς τοπολογίας μισής γέφυρας ή ημιγέφυρας (Half-Bridge Inverter) και της τοπολογίας πλήρους γέφυρας (Full-Bridge Inverter). Στο σχήμα 3 παρατηρούμε τις δύο τοπολογίες όπως ως ημιαγωγικό στοιχείο έχει χρησιμοποιηθεί ένας ιδανικός διακόπτης. Οι ιδανικοί διακόπτες μπορούν να αντικατασταθούν, σε ένα πραγματικό κύκλωμα, από οποιοδήποτε πλήρως ελεγχόμενο ημιαγωγικό στοιχείο ισχύος (IGBT, MOSFET, BJT,...) όπως ακόμα και με θυρίστορ, αν προστεθεί και το κατάλληλο κύκλωμα σβέσης. Και στις δύο περιπτώσεις ημιγέφυρας και πλήρους γέφυρας μπορούμε να έχουμε φορτίο είτε καθαρά ωμικό είτε επαγωγικό. Οι μορφές των κυματομορφών των δύο φορτίων περιγράφεται παρακάτω:

➤ Ημιγέφυρα

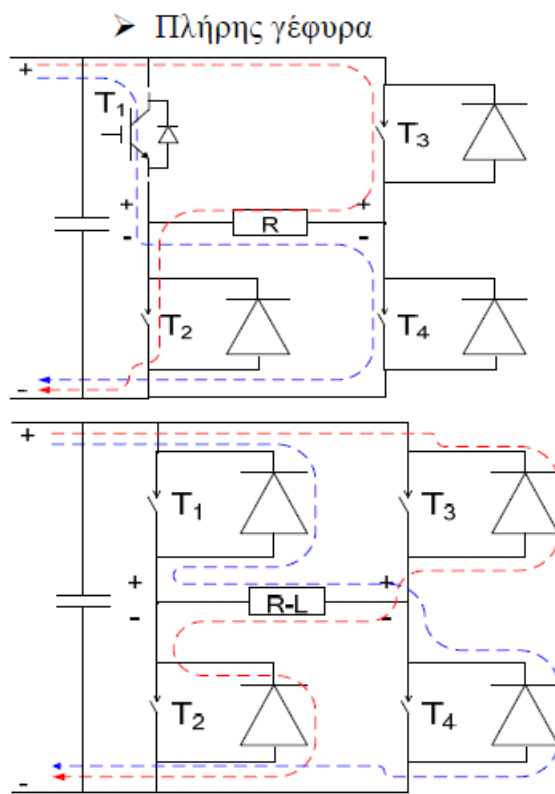


Σχήμα 3

Κάθε ημιαγωγικό στοιχείο επιτρέπει την ροή ρεύματος, όταν αυτό άγει, κατά την μία φορά, ενώ η αντιπαράλληλη διόδος επιτρέπει στο ρεύμα να ρέει κατά την αντίθετη κατεύθυνση. Η παρουσία των αντιπαράλληλων διόδων είναι απαραίτητη όταν το φορτίο είναι επαγωγικής φύσης, διότι δίνουν ένα δρόμο επιστροφής του ρεύματος, άρα και της ενέργειας, από το φορτίο στη συνεχή τάση τροφοδοσίας στην είσοδο του αντιστροφέα.

Στη συνδεσμολογία ημιγέφυρας ανάβοντας και σβήνοντας εναλλάξ τους ελεγχόμενους ημιαγωγικούς διακόπτες T_1 και T_2 παράγεται μια τετραγωνική εναλλασσόμενη κυματομορφή τάσης πάνω στους ακροδέκτες του φορτίου. Η μέγιστη τιμή της τάσης που εφαρμόζεται πάνω στο φορτίο είναι $V_d/2$ και η ελάχιστη $-V_d/2$. Αυτή την τιμή μπορούμε να την δούμε στις κυματομορφές φορτίου.

Η συγκεκριμένη συνδεσμολογία αποτελεί το βασικό στοιχείο δόμησης του μονοφασικού διακοπτικού μετατροπέα πλήρους γέφυρας καθώς και του τριφασικού διακοπτικού μετατροπέα.



Σχήμα 4

Όπως φαίνεται στο σχήμα 4 ο μονοφασικός δικοπτικός μετατροπέας πλήρους γέφυρας αποτελείται από δύο ημιγέφυρες. Έτσι αποφεύγεται η μεσαία λήψη στη συνεχή τροφοδοσία, αλλά χρειάζονται περισσότερα ημιαγωγικά στοιχεία. Η τάση στην έξοδο όμως διπλασιάζεται, και μπορεί να λάβει τρεις διαφορετικές τιμές: $-V_{dc}$, 0, και $+V_{dc}$.

12.4 ΜΟΝΟΦΑΣΙΚΟΣ ΔΙΑΚΟΠΤΙΚΟΣ ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΑΣ ΠΗΓΗΣ ΤΑΣΗΣ ΕΛΕΓΧΟΜΕΝΟΣ ΜΕ ΤΗΝ ΗΜΙΤΟΝΟΕΙΔΗ PWM ΤΕΧΝΙΚΗ

Για την παραγωγή των παλμών έναυσης των διακοπών του μετατροπέα πλήρους γέφυρας, στην περίπτωση που λειτουργεί ως μετατροπέας συνεχούς τάσης σε συνεχή τάση, και ελέγχεται μέσω της τεχνικής διαμόρφωσης του εύρους των παλμών, χρησιμοποιείται μια σταθερή τάση ελέγχου η οποία συγκρίνεται με μια περιοδική τριγωνική κυματομορφή. Η συχνότητα της τριγωνικής κυματομορφής ορίζει την συχνότητα μετάβασης των διακοπών. Η συνεχής τάση στην είσοδο του μετατροπέα συνεχούς ρεύματος, μετασχηματίζεται στην έξοδο του σε μια τετραγωνική κυματομορφή με την επιθυμητή μέση τιμή. Αντίθετα στους μονοφασικούς διακοπτικούς μετατροπείς, οι διακόπτες της πλήρους γέφυρας ελέγχονται από τους παλμούς που προκύπτουν από την σύγκριση της ίδιας της τριγωνικής κυματομορφής, με μια ημιτονοειδή τάση ελέγχου.

$$u_{\text{control}} = \hat{V}_{\text{control}} \sin(\omega_1 t)$$

Η συχνότητα της ημιτονοειδούς τάσης ελέγχου καθορίζει τη θεμελιώδη συχνότητα της τάσης εξόδου, η οποία έχει και πάλι παλμική μορφή. Επομένως, η τάση εξόδου δεν είναι τέλεια ημιτονοειδής, αλλά περιέχει αρμονικές. Οι αρμονικές είναι ελάχιστες όταν η τάση ελέγχου έχει ημιτονοειδή μορφή (ημιτονοειδής PWM τεχνική). Η συχνότητα της πριονωτής κυματομορφής ονομάζεται φέρουσα συχνότητα f_c (carrier frequency).

Ο λόγος της φέρουσας συχνότητας προς την θεμελιώδη ονομάζεται συντελεστής διαμόρφωσης συχνότητας k_f .

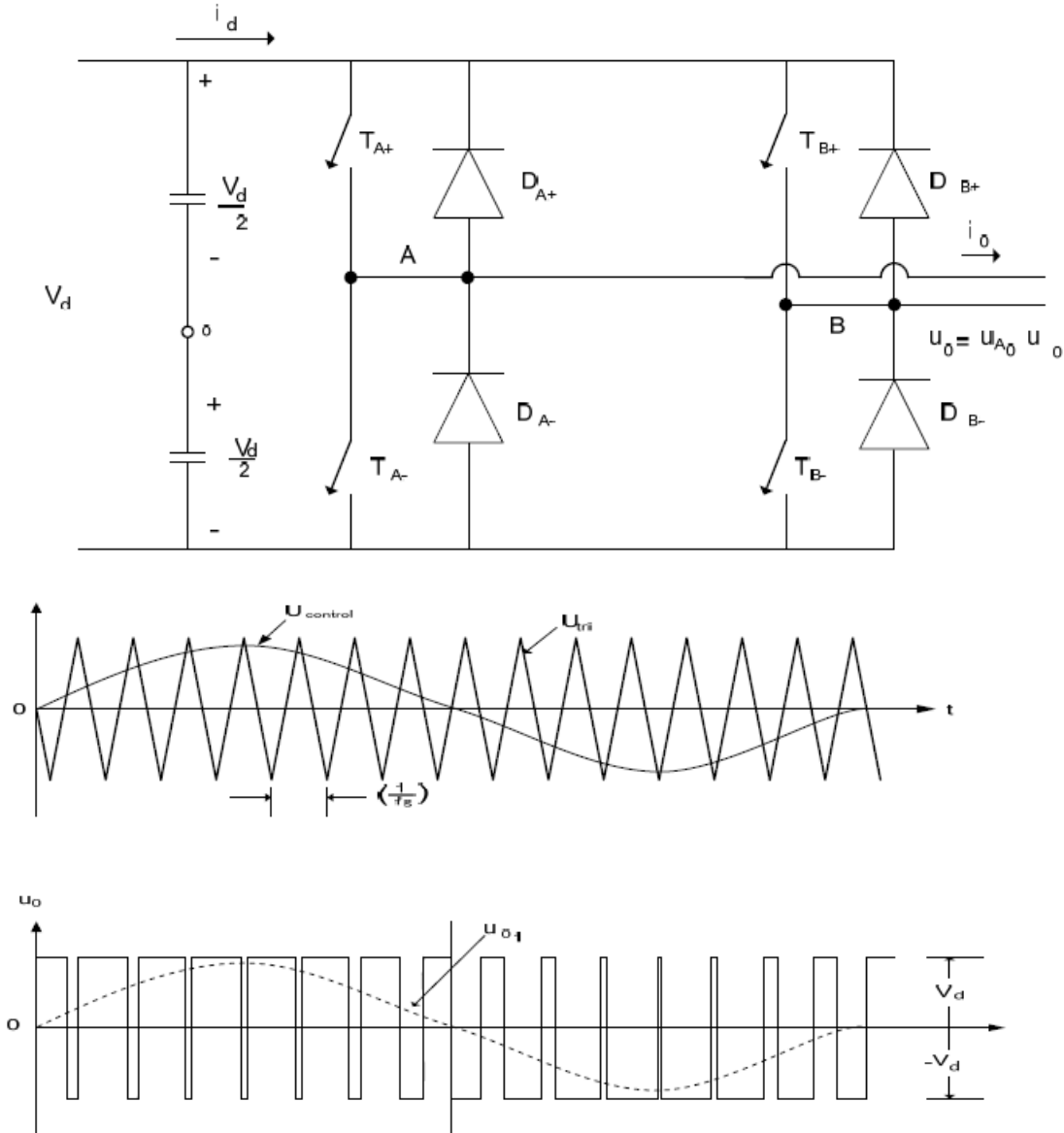
$$k_f = \frac{f_c}{f_1}$$

Ο λόγος του πλάτους του σήματος ελέγχου προς το πλάτος του τριγωνικού σήματος, ονομάζεται συντελεστής διαμόρφωσης πλάτους m ή m_a .

$$m = m_a = \frac{\hat{V}_{\text{control}}}{\hat{V}_{\text{tri}}}$$

12.5 ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ PWM ΜΕ ΔΙΠΟΛΙΚΗ ΤΑΣΗ ΕΞΟΔΟΥ

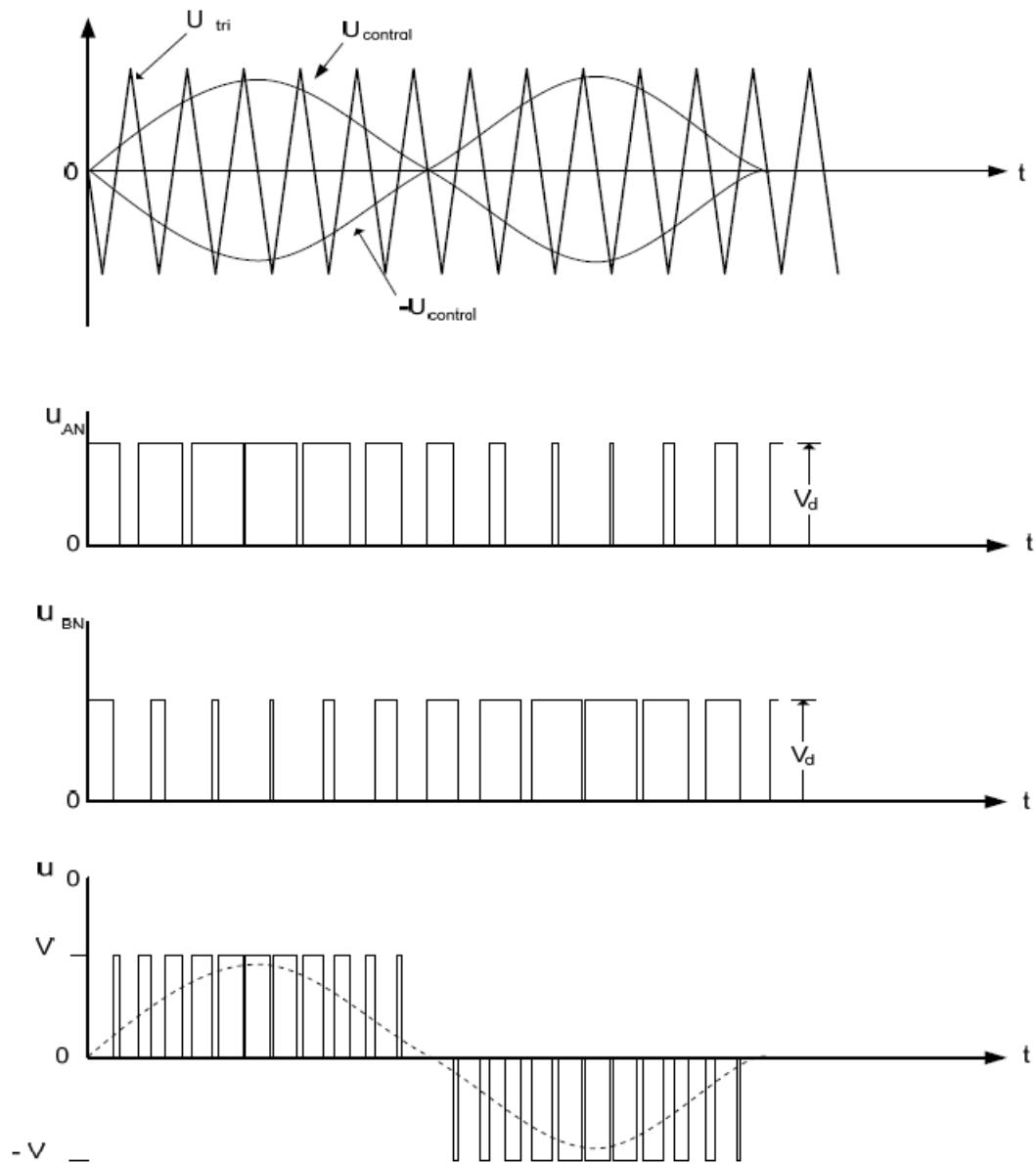
Στα σχήματα 5,6 που ακολουθούν, φαίνεται η συνδεσμολογία για την διαμόρφωση PWM με διπολική τάση εξόδου καθώς και οι κυματομορφές σε τριγωνική και τετραγωνική μορφή.



Σχήμα 6

Αυτή η διάταξη με διαμόρφωση PWM εξετάστηκε σε σχέση με τους μετατροπείς dc-dc με πλήρη γέφυρα. Εδώ τα ζεύγη των διακοπών (T_{A+} , T_{B-}) και (T_{A-} , T_{B+}) από τα δύο σκέλη αλλάζουν κατάσταση ως ζεύγη διακοπών 1 και 2 αντίστοιχα. Με το είδος αυτό της μετάβασης με διαμόρφωση PWM, η κυματομορφή της τάσης εξόδου του πρώτου σκέλους ταυτίζεται με την έξοδο του βασικού διακοπτικού μετατροπέα ενός σκέλους, η οποία καθορίζεται κατά τον ίδιο τρόπο με σύγκριση του $u_{control}$ και της u_{tri} . Η έξοδος του σκέλους B του διακοπτικού μετατροπέα είναι αντίθετη της εξόδου A.

12.6 ΗΜΙΤΟΝΟΕΙΔΗΣ PWM ΤΕΧΝΙΚΗ ΜΕ ΜΟΝΟΠΟΛΙΚΗ ΤΑΣΗ ΕΞΟΔΟΥ



Σχήμα 8

Οι διακόπτες στα δύο σκέλη του αντιστροφέα με πλήρη γέφυρα του σχήματος 5 δεν αλλάζουν κατάσταση ταυτόχρονα, όπως στην προηγούμενη διάταξη διαμόρφωσης PWM. Εδώ τα σκέλη A και B του αντιστροφέα με πλήρη γέφυρα ελέγχονται ξεχωριστά με σύγκριση της U_{tri} με τα $U_{control}$ και $-U_{control}$ αντίστοιχα.

Όπως φαίνεται στο σχήμα 8 για $U_{control}$ ισχύει:

$$V_{control} > V_{tri} : T_{A^+} on \quad \text{και} \quad V_{AN} = V_d$$

$$V_{control} < V_{tri} : T_{A^-} on \quad \text{και} \quad V_{AN} = 0$$

Και για $-U_{control}$

$$(-V_{control}) > V_{tri} : T_{B^+} on \quad \text{και} \quad V_{BN} = V_d$$

$$(-V_{control}) < V_{tri} : T_{B^-} on \quad \text{και} \quad V_{BN} = 0$$

12.7 ΤΑΣΗ ΕΞΟΔΟΥ ΜΟΝΟΦΑΣΙΚΩΝ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΕΩΝ (ΜΕ ΠΛΗΡΗ ΓΕΦΥΡΑ)

➤ Εφόσον ο συντελεστής διαμόρφωσης πλάτους είναι μικρότερος της μονάδας ($m_a < 1$), η θεμελιώδης συνιστώσα της τάσης εξόδου μεταβάλλεται γραμμικά με την τάση ελέγχου

$$V_{out,1,pk} = m \cdot V_{dc}$$

Ισοδύναμα, η rms τιμή της θεμελιώδους συνιστώσας της τάσης εξόδου δίνεται από την έκφραση

$$V_{out,1,rms} = m \cdot V_{dc} / \sqrt{2}$$

Όταν $m_a > 1$, δηλαδή το πλάτος της τάσης ελέγχου είναι μεγαλύτερο από το πλάτος της τριγωνικής κυματομορφής, η θεμελιώδης συνιστώσα της τάσης εξόδου δεν μεταβάλλεται γραμμικά με το σήμα ελέγχου. Σ' αυτή την περιοχή επίσης, το φάσμα της τάσης εξόδου τροποποιείται δραστικά, με κυριότερο χαρακτηριστικό την εμφάνιση αρμονικών συχνοτήτων σε χαμηλές τιμές, οι οποίες ενισχύονται με την αύξηση του m_a .

Συνεπώς, η παραπάνω σχέση, για $m = 1$ δίνει τη μέγιστη θεμελιώδη rms τάση που μπορεί να παράξει στην έξοδό του ένας αντιστροφέας με τάση V_{dc} στην είσοδό του, χωρίς παραμόρφωση χαμηλών συχνοτήτων:

$$V_{out,1,rms,max} = V_{dc} / \sqrt{2}$$