

## Πίνακας περιεχομένων

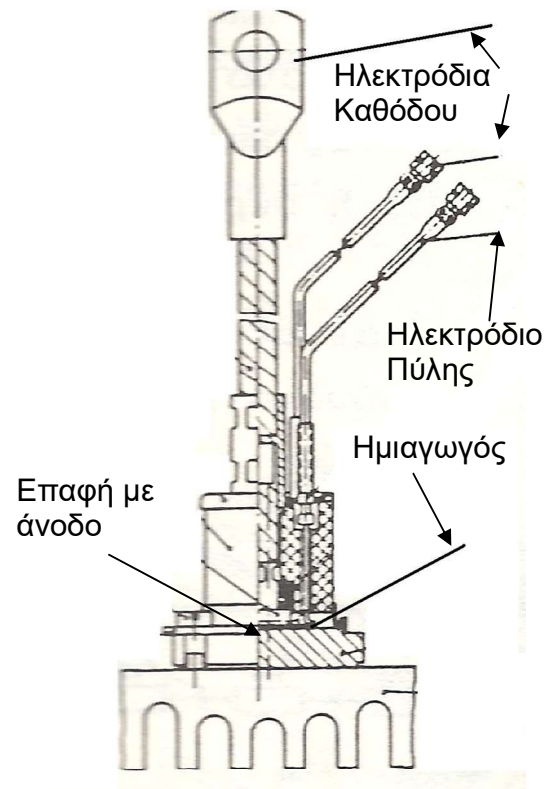
<b>Άσκηση 1: Μελέτη θυρίστορ</b> .....	1
1.1 Γενικά για το θυρίστορ (SCR).....	3
<b>1.2 Στατική χαρακτηριστική του θυρίστορ</b> .....	4
<b>1.3 Χαρακτηριστική πύλης καθόδου</b> .....	7
1.4 Ζητούμενα Άσκησης.....	7
<b>Άσκηση 2: Ρυθμιζόμενος διακόπτης εναλλασσόμενου ρεύματος σταθερής συχνότητας (AC - controller)</b> 9	
2.1 Γενικά.....	11
<b>2.2 Αρχή Λειτουργίας</b> .....	12
<b>2.2.1 Ωμικό φορτίο</b> .....	12
<b>2.2.2 Επαγωγικό φορτίο</b> .....	14
<b>2.2.3 Ωμικό - Επαγωγικό φορτίο</b> .....	15
2.3 Ζητούμενα Άσκησης.....	16
<b>Η εργαστηριακή άσκηση 2α</b> .....	17
<b>Η εργαστηριακή άσκηση 2β</b> .....	18
<b>Άσκηση 3: Ψαλιδιστής (DCchopper)</b> .....	19
<b>3.1 Εισαγωγή</b> .....	21
<b>3.2 Αρχή λειτουργίας</b> .....	21
<b>3.2.1 Ωμικό Φορτίο</b> .....	21
<b>3.2.2 Ωμικό-Επαγωγικό Φορτίο</b> .....	22
<b>Άσκηση 3α</b> .....	26
3.3 Ζητούμενα Άσκησης 3α.....	27
<b>Άσκηση 3β</b> .....	28
3.4 Ζητούμενα Άσκησης 3β.....	30
<b>Άσκηση 4: Μονοφασικός Μετατροπέας AC/DC</b> .....	31
<b>Άσκηση 4α: Μονοφασικός Μετατροπέας AC/DC πλήρως ελεγχόμενος με Μ/Σ με μεσαία λήψη</b> .....	33
4.1 Εισαγωγή.....	33
4.1.1 Αρχή λειτουργίας-Ωμικό φορτίο.....	33
4.1.2 Τάση Ανόδου – Καθόδου του θυρίστορ.....	37
4.2 Ζητούμενα Άσκησης 4α.....	37

<b>Άσκηση 4β: Μονοφασική ανορθωτική γέφυρα πλήρως ελεγχόμενη – ημιελεγχόμενη</b> .....	38
4.3  Εισαγωγή.....	38
4.3.1  Μονοφασική ανορθωτική γέφυρα πλήρως ελεγχόμενη .....	38
4.3.1.1  Ωμικό φορτίο .....	39
4.3.1.2  Ωμικό-Επαγωγικό Φορτίο .....	40
4.3.2  Μονοφασική ανορθωτική γέφυρα ημιελεγχόμενη .....	42
4.3.2.1  Ωμικό – Επαγωγικό φορτίο .....	42
4.4  Ζητούμενα Άσκησης 4β.....	43
Άσκηση 5:  Μονοφασικός Μετατροπέας DC/AC (Μονοφασικός Αντιστροφέας) .....	45
<b>Άσκηση 5α:</b> .....	47
5.1  Εισαγωγή.....	47
<b>1  Μονοφασικός Αντιστροφέας με εξαναγκασμένη οδήγηση</b> .....	48
5.2  Αρχή λειτουργίας.....	48
5.3  Ζητούμενα Άσκησης 5α.....	50
<b>2  Μονοφασικός Αντιστροφέας με οδήγηση φορτίου</b> .....	51
5.4  Αρχή λειτουργίας.....	51
5.5  Ζητούμενα Άσκησης 5β.....	54
<b>Άσκηση 5β:Αντιστροφείς εξαναγκασμένης οδήγησης με παλμοδότηση PWM και sPWM</b> .....	55
5.6  Εισαγωγή: Αντιστροφείς εξαναγκασμένης οδήγησης με παλμοδότηση PWM και sPWM .....	55
5.7  Τεχνική παλμοδότησης PWM – Pulse Width Modulation (διαμόρφωση εύρους παλμών). ....	55
5.8  Τεχνική παλμοδότησης sPWM – sinusoidalPulseWidthModulation (ημιτονοειδής διαμόρφωση εύρους παλμών).....	58
5.9  Τεχνική παλμοδότησης HCC – HysteresisCurrentControl (έλεγχος βρόχου υστέρησης). ....	59
5.10  Διεκπεραίωση άσκησης .....	59
<b>Άσκηση 6:  ΤριφασικόςΜετατροπέαςΕξιΠαλμών</b> .....	63
6.1  Θεωρία .....	65
6.1.1  Εισαγωγή .....	65
6.1.2  Τροφοδοσίαμετριφασικό.....	67
6.1.3  Βασικόκύκλωμα καιΣυνδεσμολογία .....	69
6.1.4  Ψύξη.....	70
6.1.5  Έλεγχος .....	71
6.1.6  Ανάλυση λειτουργίας .....	72

6.1.7	Ανάλυση κυματομορφών .....	74
6.1.8	Άεργος Ισχύς .....	75
6.2	Διεξαγωγή Πειράματος .....	76
<b>1° Μέρος:</b>	<i>Μετατροπέας Πλήρως Ελεγχόμενος χωρίς Δίοδο Ελεύθερης Διέλευσης</i> .....	77
	<b>A) Φασικές και Πολικές Τάσεις του Δευτερεύοντος τυλίγματος του Μετασχηματιστή</b> .....	77
	<b>B) Παρατήρηση των Παλμών Πυροδότησης των Έξι Θυρίστρος</b> .....	78
	<b>Γ) Μετρήσεις με Ωμικό φορτίο</b> .....	78
	<b>Δ) Μέτρηση της 3Φ Ενεργού Ισχύος <math>P_{εν}</math>, της 3Φ Φαινόμενης Ισχύος (<math>S_{3Phase}</math>), της Άεργου Ισχύος και του συντελεστή Ισχύος . Χρησιμοποιήστε δυο γωνίες έναυσης (<math>\alpha = 30^\circ</math>, και <math>108^\circ</math>)</b> .....	78
<b>2° Μέρος:</b>	<i>Μετατροπέας Πλήρως Ελεγχόμενος Με Δίοδο Ελεύθερης Αγωγής</i> .....	79
<b>3° Μέρος:</b>	<i>Μετατροπέας Μερικά Ελεγχόμενος</i> .....	79
<b>4ο Μέρος:</b>	<i>Κύκλωμα Ελέγχου</i> .....	79



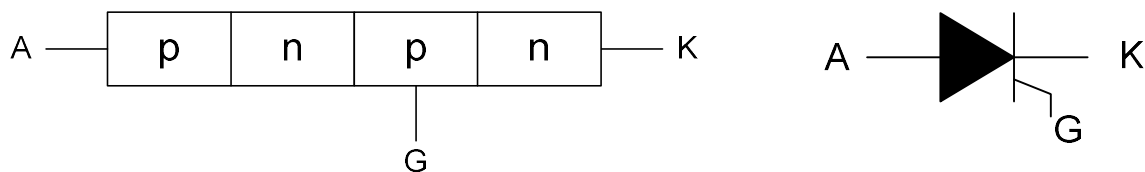
## Άσκηση 1: Μελέτη θυρίστορ





## 1.1 Γενικά για το θυρίστορ (SCR)

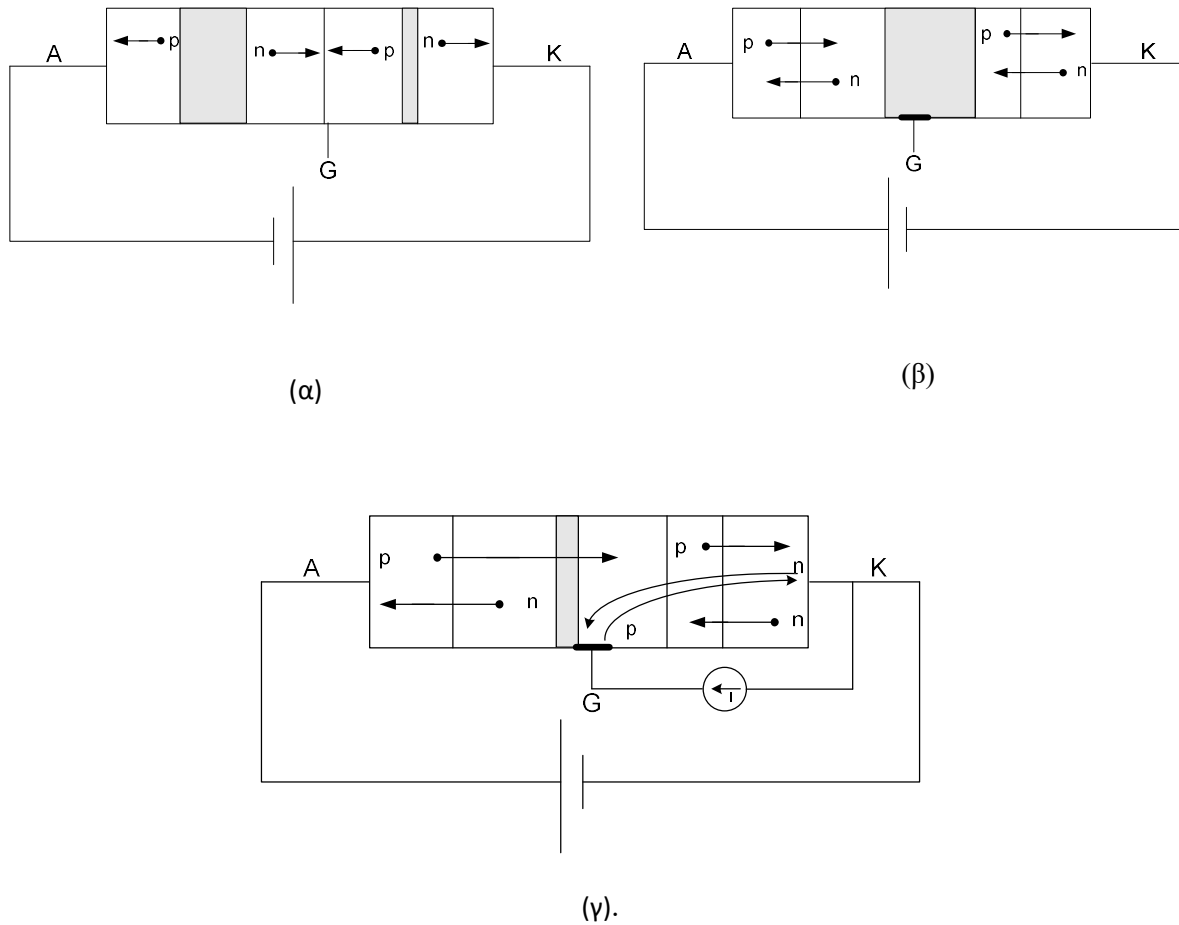
Το θυρίστορ είναι ένα ημιαγωγικό στοιχείο ισχύος το οποίο επιτρέπει τη ροή ρεύματος προς τη μία κατεύθυνση. Μπορούμε να πούμε πως είναι ένας διακόπτης του οποίου ελέγχεται η έναυση αλλά όχι η σβέση και επιτρέπει τη ροή ρεύματος μόνο προς τη μία κατεύθυνση. **Η σβέση του μπορεί να επέλθει μόνο αν το ρεύμα μειωθεί κάτω από μία συγκεκριμένη τιμή.** Αυτό μπορεί να γίνει αν διακοπεί εξωτερικά η ροή του ρεύματος ή αν εφαρμοστεί κατάλληλη ανάστροφη τάση εξωτερικά. Δηλαδή, θα μπορούσε κάποιος να πει ότι λειτουργεί σαν μία δίοδος ελεγχόμενης έναυσης που μπορεί να διαχειριστεί υψηλές τάσεις και ρεύματα.



Σχήμα 1.1: Δομή και συμβολισμός του θυρίστορ

Το θυρίστορ (σχ.1.1) αποτελείται από τέσσερις περιοχές η καθεμία εμπλουτισμένη με ηλεκτρόνια ( $n^-$ ) ή οπές ( $p^+$ ). Ανάλογα με τη φόρτιση μεταξύ αυτών των περιοχών δημιουργούνται: α) μεγάλες ουδέτερες ζώνες καθιστώντας το θυρίστορ μονωτή, β) μικρές ουδέτερες ζώνες, όπου το θυρίστορ είναι έτοιμο να μπει σε αγωγή όταν παλμοδοτηθεί, και γ) αυτές οι ζώνες διασπώνται και έτσι το θυρίστορ μπαίνει σε αγωγή. Στο σχήμα 1.2 παρουσιάζονται αυτές οι περιπτώσεις.

Στην πρώτη περίπτωση (σχ.1.2.α) το θυρίστορ τροφοδοτείται ανάστροφα και δεν μπορεί να μπει σε αγωγή, ακόμη και αν δοθεί παλμός στην πύλη. Στη δεύτερη περίπτωση το θυρίστορ πολώνεται ορθά (+ στην άνοδο και - στην κάθοδο) αλλά δεν παλμοδοτείται και έτσι δεν άγει. Στις δύο αυτές περιπτώσεις αν η τάση της πηγής ξεπεράσει μία τιμή τότε το θυρίστορ θα μπει σε αγωγή και θα καταστραφεί (σχ.1.3  $U_{Bo}$ ,  $-U_{Bo}$ ). Στην τρίτη περίπτωση είναι ορθά πολωμένο και παλμοδοτείται μεταξύ πύλης και καθόδου. Τότε το στοιχείο μπαίνει σε αγωγή με κατεύθυνση του ρεύματος από την άνοδο προς την κάθοδο.



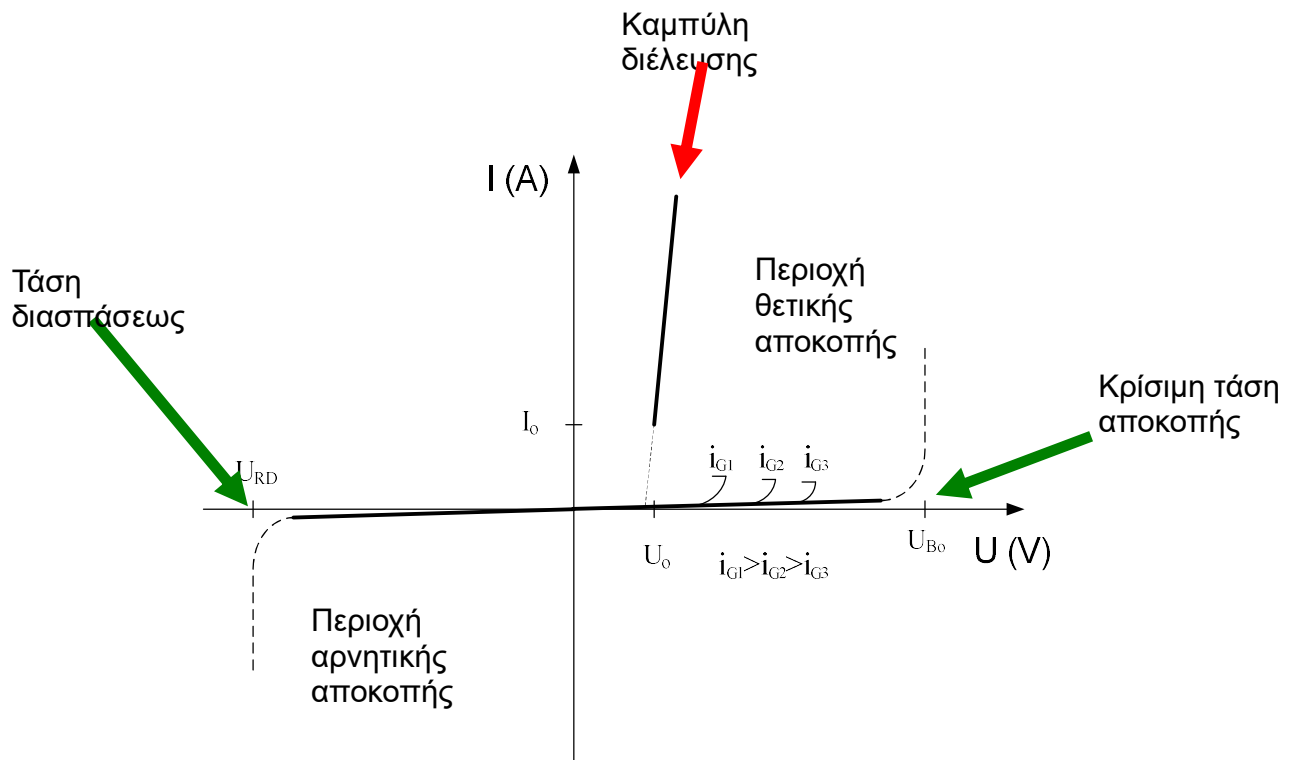
**Σχήμα 1.2:** Πόλωση του θυρίστορ. α) Ανάστροφη πόλωση  
 β) Ορθή πόλωση χωρίς παλμό έναυσης.  
 γ) Ορθή πόλωση με παλμό έναυσης

## 1.2 Στατική χαρακτηριστική του θυρίστορ

Η στατική χαρακτηριστική περιγράφει σχηματικά τις περιοχές λειτουργίας ενός θυρίστορ. Ο σχεδιασμός της πειραματικά στο εργαστήριο είναι ο βασικός στόχος της εργαστηριακής άσκησης. Τυπική μορφή της χαρακτηριστικής αυτής ενός θυρίστορ φαίνεται στο σχήμα 1.3. Στον άξονα χαποτυπώνεται η τάση ανόδου καθόδου ενός θυρίστορ, ενώ στον άξονα  $y$  το ρεύμα που το διαρρέει. Προφανώς, στην εργαστηριακή άσκηση δεν μπορούμε να υπολογίσουμε τα  $U_{B0}$ ,  $-U_{B0}$  και για το λόγο αυτό στο σχεδιασμό των καμπυλών θετικής και αρνητικής αποκοπής θα θεωρηθούν τυχαία κάποιες λογικές τιμές. Στις μετρήσεις της εργαστηριακής άσκησης το θυρίστορ θα πολωθεί ορθά και ανάστροφα με τάσεις από 0 - 200 V και θα μετρηθεί ένα ελάχιστο ρεύμα, το ρεύμα διαρροής. Έτσι, θα κατασκευαστούν οι καμπύλες θετικής και αρνητικής

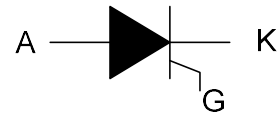


αποκοπής αντίστοιχα. Στη μέτρηση αυτή θα χρησιμοποιηθεί τροφοδοτικό τάσης (HEATHKIT) καθώς το ρεύμα λαμβάνει πολύ χαμηλές τιμές.

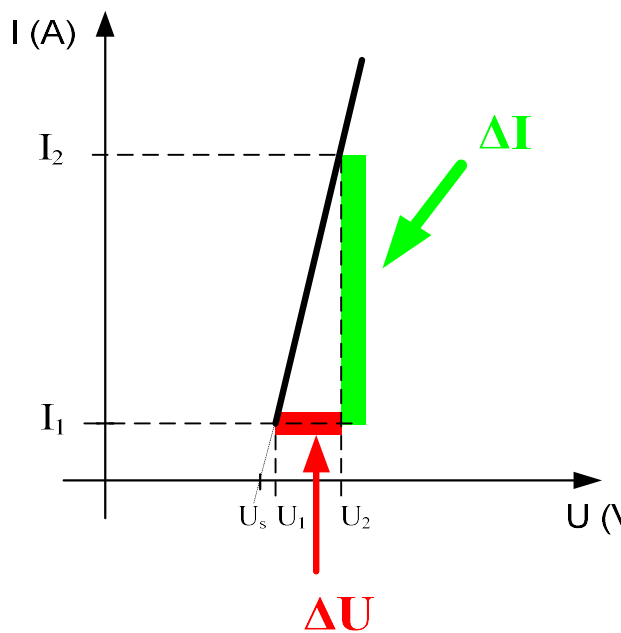


Σχήμα 1.3: Η στατική χαρακτηριστική ενός θυρίστορ

Ύστερα θα κατασκευαστεί η καμπύλη διέλευσης. Το στοιχείο θα πολωθεί ορθά μεταξύ ανόδου καθόδου μέσω ενός τροφοδοτικού ρεύματος (FARNEL) και θα παλμοδοτηθεί με παλμό ρεύματος μεταξύ πύλης καθόδου. Έτσι, θα μπει σε αγωγή και πλέον μεταβάλλοντας το ρεύμα που περνάει από το θυρίστορ θα μετράμε την πτώση τάσης στα άκρα του (μεταξύ ανόδου - καθόδου). Από τις μετρήσεις αυτές μπορούμε να υπολογίσουμε την παρασιτική ωμική αντίσταση του στοιχείου  $R_d$  ή  $R_s$  και την παρασιτική πτώση τάσης  $U_s$ . Με τον τρόπο αυτό μπορούμε να κατασκευάσουμε το απλοποιημένο ισοδύναμο του θυρίστορ όπως φαίνεται παρακάτω. Η χαρακτηριστική διέλευσης θα κατασκευαστεί σε κοινούς άξονες μαζί με την θετική και την αρνητική αποκοπή.



Σχήμα 1.4: Απλοποιημένο ισοδύναμο του θυρίστορ



$$R_d = (U_2 - U_1) / (I_2 - I_1)$$

$$U_2 = U_s + R_d I_2$$

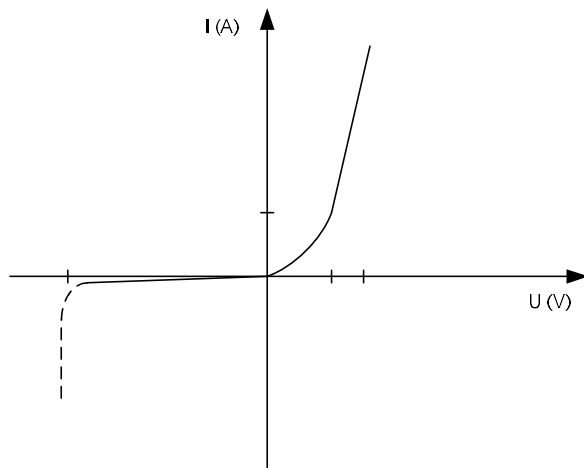
ή Γενικά

$$U = U_s + R_d I$$

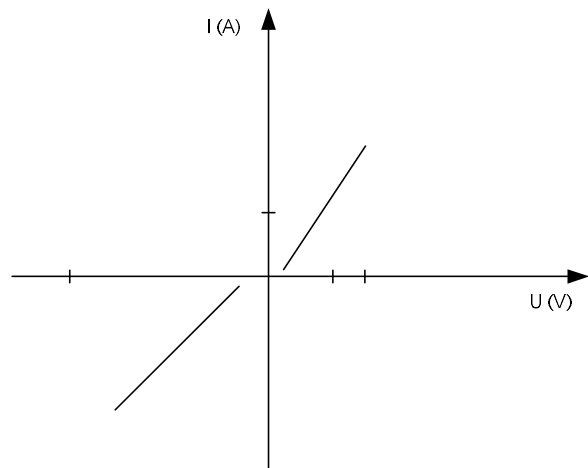
Σχήμα 1.5: Υπολογισμός των παρασιτικών στοιχείων του θυρίστορ

### 1.3 Χαρακτηριστική πύλης καθόδου

Αν παρατηρήσουμε το σχήμα 1.1. θα δούμε ότι μεταξύ πύλης-καθόδου είναι δομημένη μία διόδος. Άρα η χαρακτηριστική αυτή θα είναι παρόμοια με αυτή της διόδου. Όμως, επειδή η πύλη στο θυρίστορ δεν είναι κατασκευασμένη να αντέχει ανάστροφες τάσεις, η μορφή της διαφοροποιείται. Το τροφοδοτικό που θα χρησιμοποιηθεί στην εργαστηριακή άσκηση θα είναι το ίδιο που θέτει σε αγωγή το θυρίστορ στην μέτρηση της διέλευσης.



Σχήμα 1.6: Χαρακτηριστική διόδου



Σχήμα 1.7: Χαρακτηριστική πύλης καθόδου

Τέλος, θα μετρηθούν, το ρεύμα συγκράτησης και το ρεύμα διατήρησης χρησιμοποιώντας τροφοδοτικό υψηλής τάσης (**KIKUSUI**).

- Ρεύμα συγκράτησης – το ελάχιστο ρεύμα κάτω από το οποίο το θυρίστορ θεωρείται πως έχει σβήσει (όταν δεν εφαρμόζεται παλμός στην πύλη).
- Ρεύμα διατήρησης – το ελάχιστο ρεύμα πάνω από το οποίο το θυρίστορ μένει σε αγωγή (όταν δεν εφαρμόζεται παλμός στην πύλη).

### 1.4 Ζητούμενα Άσκησης

**A)** Να σχεδιασθεί η στατική χαρακτηριστική του θυρίστορ, με βάση τις μετρήσεις που πήρατε για την περιοχή θετικής/αρνητικής αποκοπής και για την καμπύλη διέλευσης,

**B)** Να υπολογιστεί η παρασιτική ωμική αντίσταση  $R_d$  και η παρασιτική πτώση τάσης  $U_s$  με βάση την καμπύλη διέλευσης,

**Γ)** Να περιγραφεί ο τρόπος μέτρησης του ρεύματος συγκράτησης και ρεύματος διατήρησης,

Δ) Να σχεδιασθεί η χαρακτηριστική πύλης καθόδου και να περιγράψετε τις διαφορές με την αντίστοιχη της διόδου.

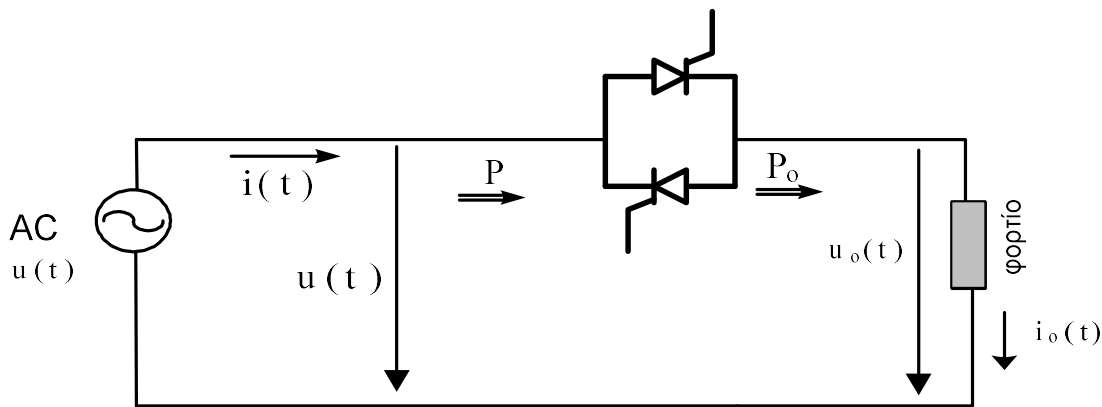


**Άσκηση 2: Ρυθμιζόμενος διακόπτης εναλλασσόμενου ρεύματος σταθερής συχνότητας (AC - controller)**

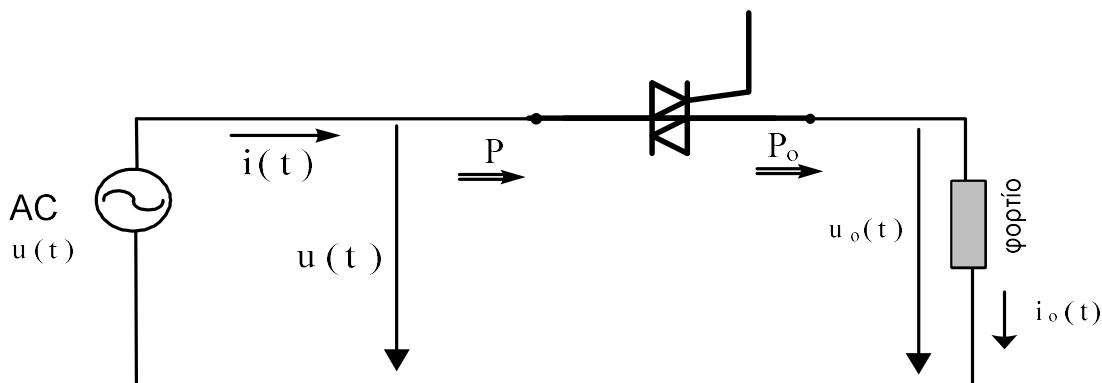


## 2.1 Γενικά

Τέτοιοι μετατροπείς χρησιμοποιούνται συνήθως σε απλές εφαρμογές για τον έλεγχο τάσης παθητικών φορτίων ή ομαλής εκκίνησης ηλεκτρικών μηχανών και σπάνια για τον έλεγχο στροφών ηλεκτρικών μηχανών. Μπορεί να υλοποιηθεί με αντιπαράλληλα θυρίστορ, με triac ή με τρανζίστορ ισχύος (π.χ. IGBT). Όταν χρησιμοποιούνται θυρίστορ αντί triac οι απώλειες είναι χαμηλότερες και η ισχύς που διαχειρίζεται είναι πολύ υψηλότερη όμως, ο όγκος και το κόστος αυξάνονται καθώς υπάρχουν δύο θυρίστορ με δύο κυκλώματα παλμοδότησης. Στα σχήματα 2.1 και 2.2 φαίνεται η τοπολογία του μετατροπέα αυτού.



Σχήμα 2.1: Μετατροπέας με αντιπαράλληλα θυρίστορ



Σχήμα 2.2: Μετατροπέας με triac

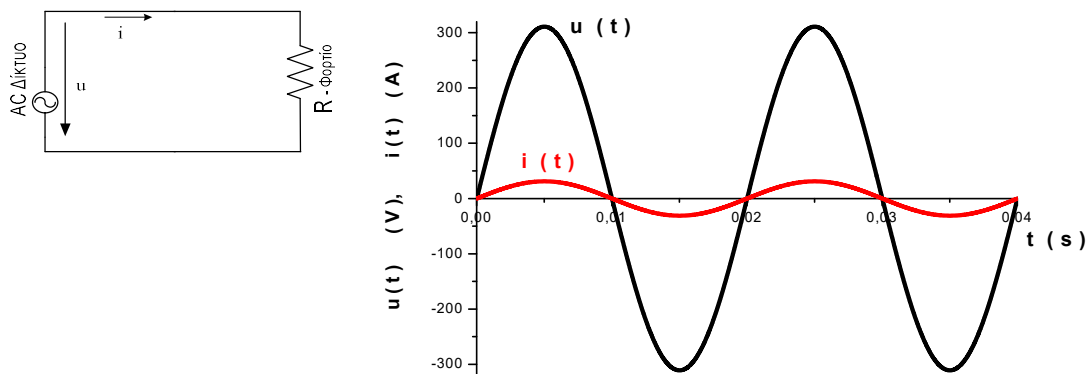


## 2.2 Αρχή Λειτουργίας

Για να εξηγήσουμε τη λειτουργία του μετατροπέα θα εξετάσουμε ξεχωριστά τις περιπτώσεις με ωμικό, επαγωγικό και ωμικό-επαγωγικό φορτίο.

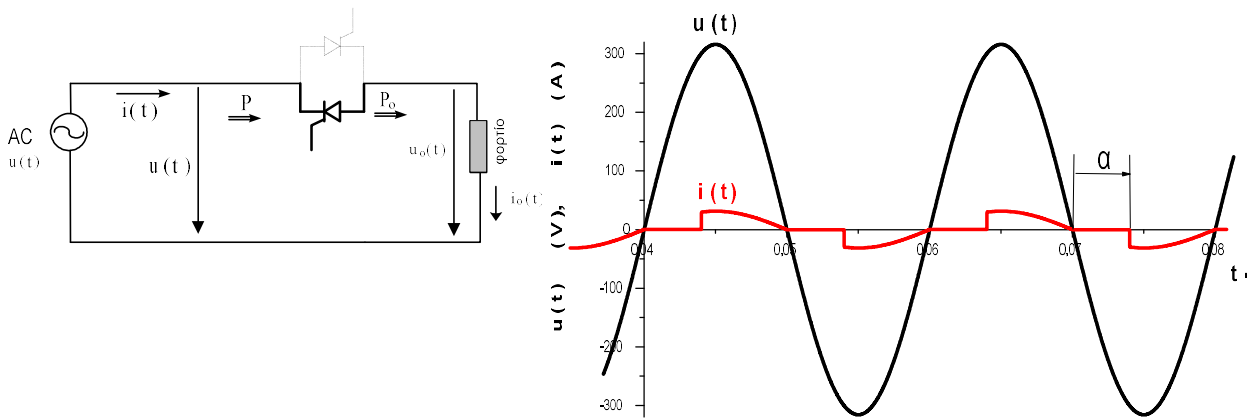
### 2.2.1 Ωμικό φορτίο

Έστω ότι το δίκτυο τροφοδοτεί ένα καθαρά ωμικό φορτίο. Τότε, οι κυματομορφές τάσης και ρεύματος είναι όπως στο σχήμα 2.3.

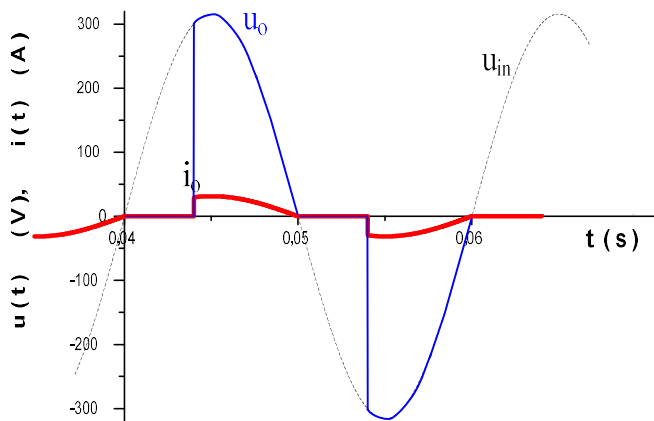


**Σχήμα 2.3:** Κυματομορφές τάσης και ρεύματος δικτύου για καθαρά ωμικό φορτίο χωρίς μετατροπέα

Αν τοποθετήσουμε το ρυθμιζόμενο διακόπτη και σε κάθε ημιπερίοδο καθυστερούμε να παλμοδοτήσουμε το μετατροπέα κατά γωνία " $\alpha$ " τότε, το ρεύμα καθυστερεί να περάσει από το δίκτυο προς το φορτίο και οι κυματομορφή του ρεύματος γίνεται όπως στο σχήμα 2.4. Ενώ η τάση και το ρεύμα φορτίου φαίνονται στο σχήμα 2.5. Από το εμβαδόν που διαγράφεται φαίνεται ότι καθώς αυξάνεται η γωνία έναυσης " $\alpha$ " μειώνεται η ενεργός τιμή της τάσης και του ρεύματος άρα και της ισχύος του φορτίου. Δηλαδή, με αυτό τον τρόπο μπορούμε να ελέγξουμε την τάση το ρεύμα και την ισχύ.



**Σχήμα 2.4:** Κυματομορφές τάσης και ρεύματος δικτύου για καθαρά ωμικό φορτίο με μετατροπέα

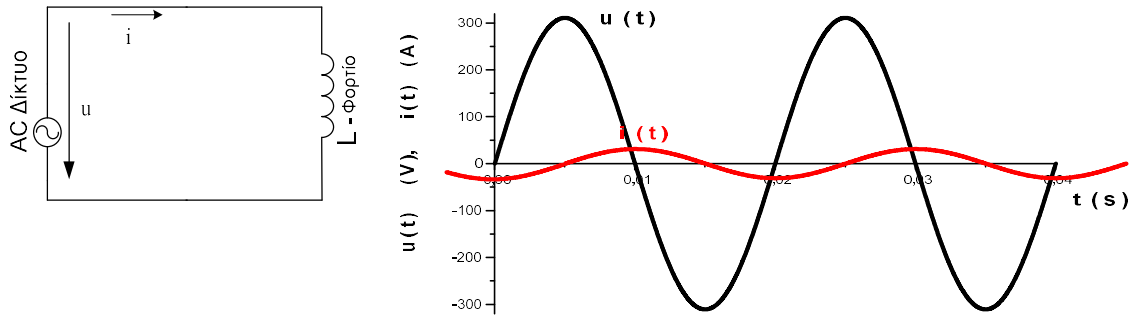


**Σχήμα 2.5:** Κυματομορφές τάσης και ρεύματος φορτίου για καθαρά ωμικό φορτίο με μετατροπέα (με διακεκομμένη φαίνεται και η τάση δικτύου).

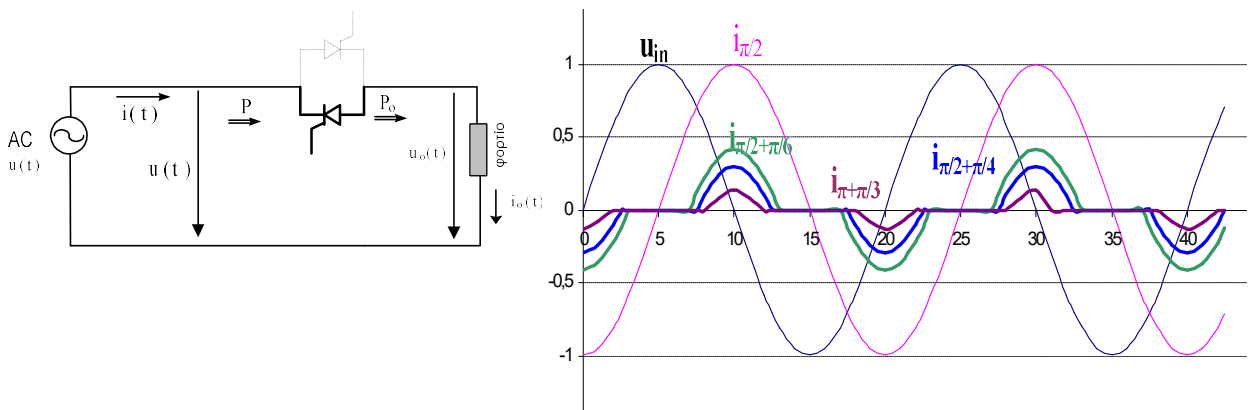
Από το σχήμα 2.4 παρατηρούμε ότι αν και ωμικό φορτίο το ρεύμα καθυστερεί της τάσης του δικτύου. Αυτό σημαίνει ότι δεν είναι πλέον συμφασικά άρα έχουμε άεργο ισχύ. Επίσης, το ρεύμα δεν έχει ημιτονοειδή μορφή ενώ η τάση του δικτύου έχει. Άρα έχουμε εμφάνιση ανώτερων αρμονικών με αποτέλεσμα επίσης στην αύξηση της άεργου ισχύος. Δηλαδή, λόγω της παλμοδότησης αυτής έχουμε άεργο ισχύ ακόμη και σε ωμικό φορτίο.

### 2.2.2 Επαγωγικό φορτίο

Αντίστοιχα με το ωμικό φορτίο λειτουργεί και το επαγωγικό.

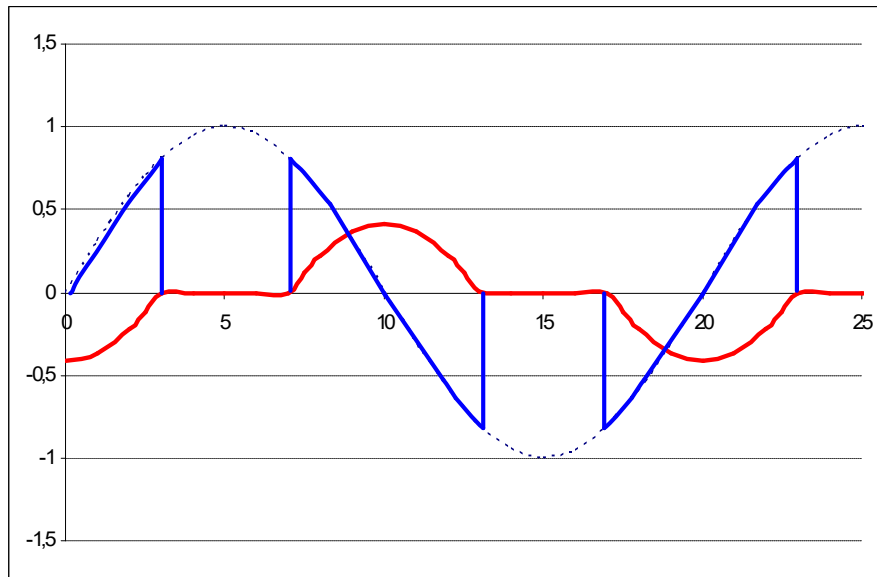


Σχήμα 2.6: Κυματομορφές τάσης και ρεύματος δικτύου για καθαρά επαγωγικό φορτίο χωρίς μετατροπέα



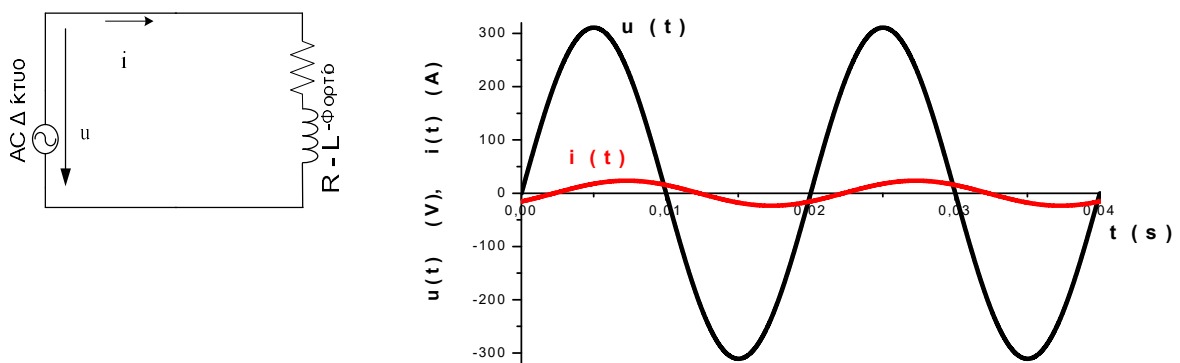
Σχήμα 2.7: Κυματομορφές τάσης και ρεύματος δικτύου για καθαρά επαγωγικό φορτίο με μετατροπέα

Εδώ η παλμοδότηση έχει νόημα για γωνία έναυσης " $\alpha > 90^\circ$ " και όσο αυξάνεται η γωνία έναυσης τόσο μειώνεται και η διάρκεια αγωγής, λαμβάνοντας συμμετρική μορφή ως προς τις  $180^\circ$ .

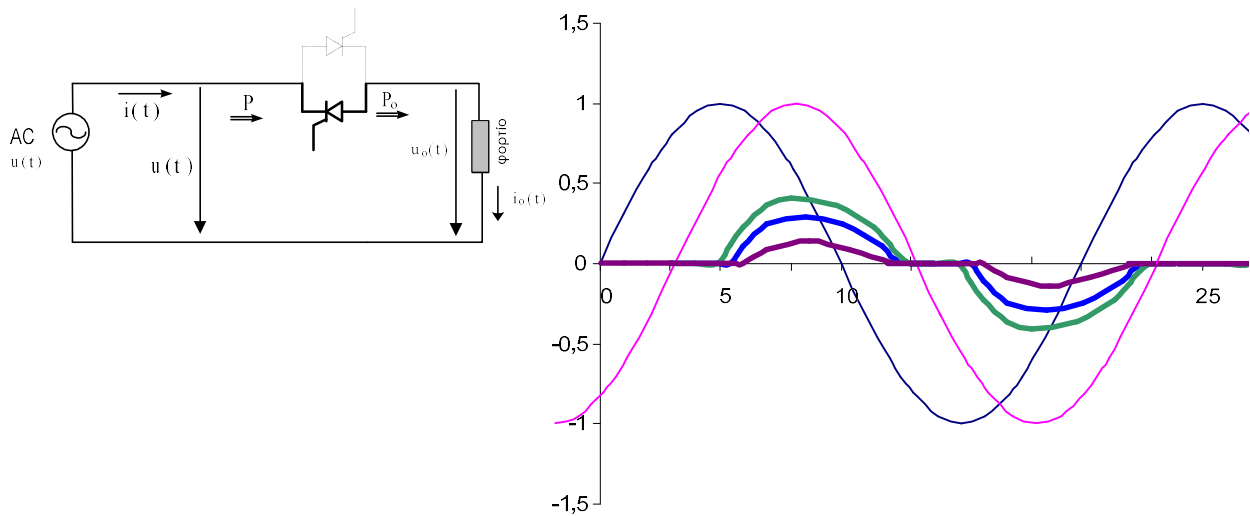


**Σχήμα 2.8:** Κυματομορφές τάσης και ρεύματος φορτίου για καθαρά επαγωγικό φορτίο με μετατροπέα (με διακεκομμένη φαίνεται και η τάση δικτύου).

### 2.2.3 Ωμικό - Επαγωγικό φορτίο



**Σχήμα 2.9:** Κυματομορφές τάσης και ρεύματος δικτύου για σύνθετο φορτίο χωρίς μετατροπέα



**Σχήμα 2.10:** Κυματομορφές τάσης και ρεύματος δικτύου για σύνθετο φορτίο με μετατροπέα

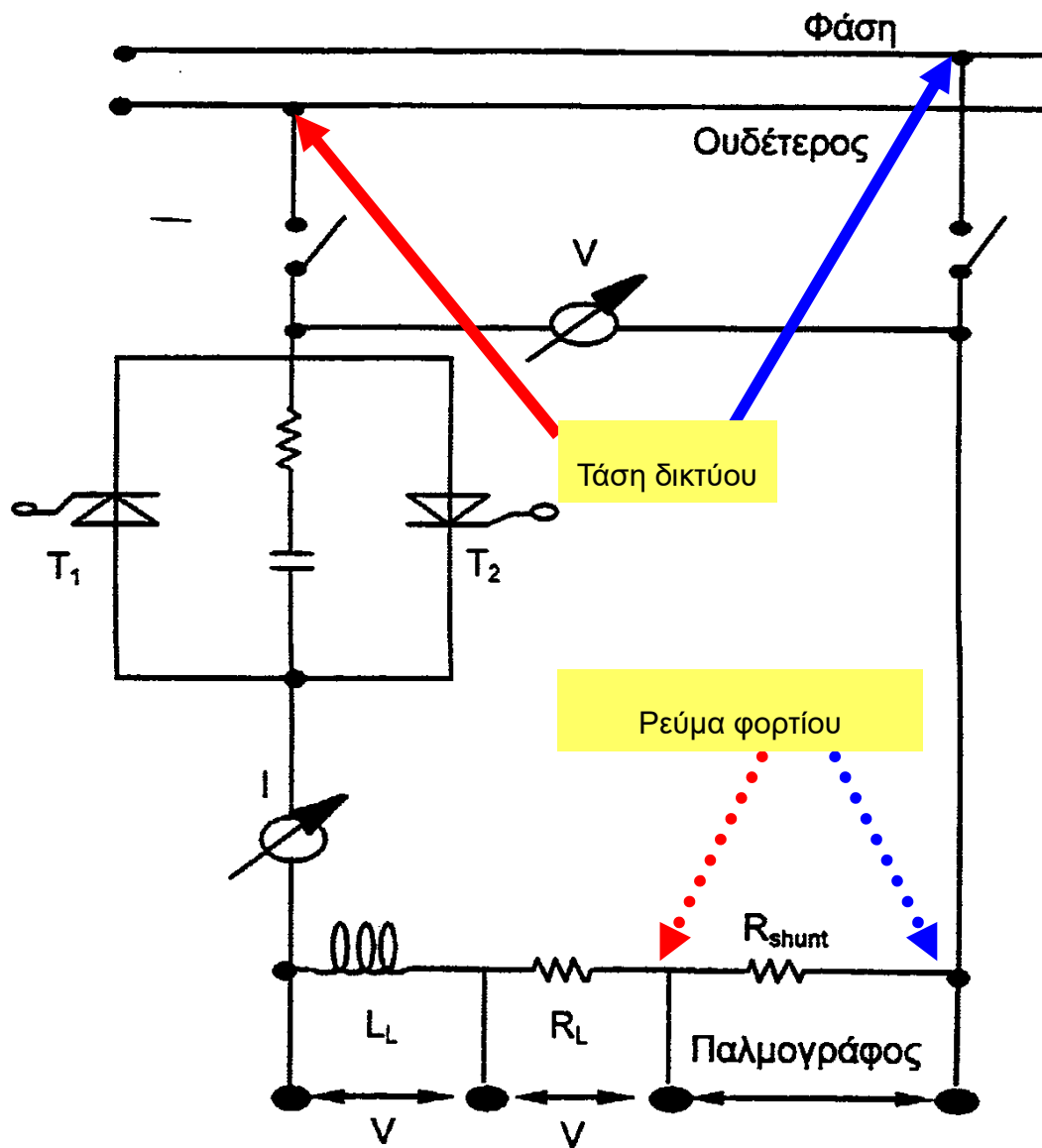
Εδώ η παλμοδότηση έχει νόημα για γωνία έναυσης " $\alpha > \varphi$ " (όπου  $\varphi$  είναι η γωνία του φορτίου ( $\cos\varphi$ )) και καθώς αυξάνεται η γωνία έναυσης μειώνεται και η διάρκεια αγωγής, αλλά όχι με τον ίδιο ρυθμό.

Εναλλακτικά για τον έλεγχο της τάσης του φορτίου θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν κάποιος ροοστάτης ή αυτομετασχηματιστής, όμως δημιουργούνται σημαντικά μειονεκτήματα (π.χ. όγκος διάταξης, εμφάνιση απωλειών κλπ).

### 2.3 Ζητούμενα Άσκησης

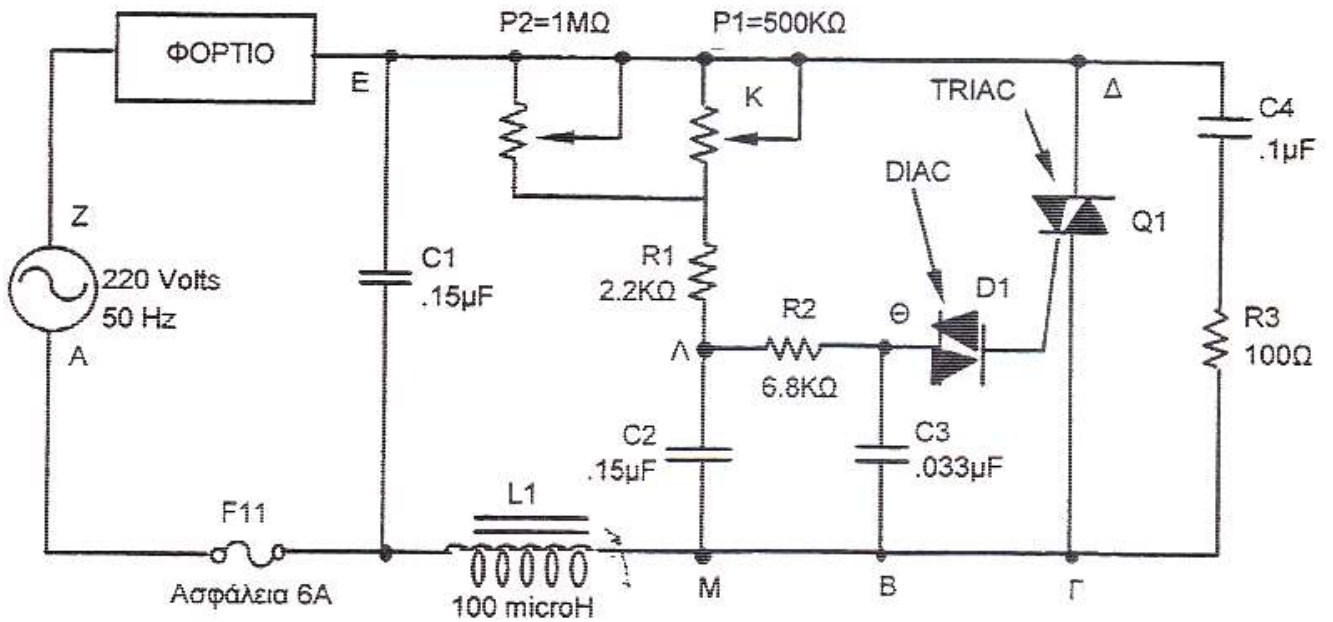
- A) Να κατασκευαστεί η καμπύλη  $PF=f(\alpha)$ .
- B) Να σχολιάσετε τις κυματομορφές και με αυτές να εξηγήσετε την καμπύλη  $PF=f(\alpha)$ .
- Γ) Για το R-L φορτίο να υπολογιστεί η διαφορά φάσης  $\varphi$ .

## Η εργαστηριακή άσκηση 2α



## Η εργαστηριακή άσκηση 2β

### Κύκλωμα παλμοδότησης



## **Άσκηση 3: Ψαλιδιστής (DCchopper)**





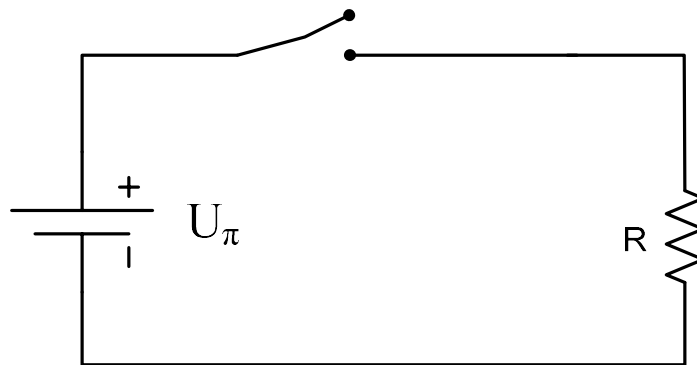
### 3.1 Εισαγωγή

Ο μετατροπέας αυτός χρησιμοποιείται για τη μετατροπή μίας DCτάσης σε μία άλληDC χαμηλότερης τιμής. Χρησιμοποιείται για τον έλεγχο της τάσης DCφορτίων, όπως π.χ. μηχανές συνεχούς τάσης, για την τροφοδοσία αντιστροφέων καθώς επίσης και σε πλήθος άλλες εφαρμογές. Ένας τέτοιος μετατροπέας μπορεί να υλοποιηθεί είτε με θυρίστορ είτε με τρανζίστορ ισχύος, όπως τα IGBT. Η ονομασία του μετατροπέα αυτού προέρχεται από το γεγονός ότι ουσιαστικά ψαλιδίζει την συνεχή τάση με αποτέλεσμα να μειώνει τη μέση τιμή της.

### 3.2 Αρχή λειτουργίας

#### 3.2.1 Ωμικό Φορτίο

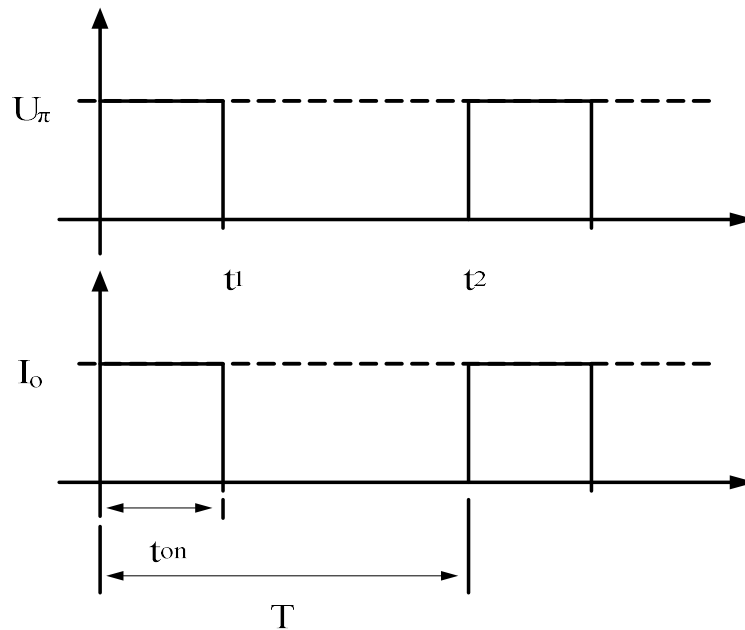
Στο σχήμα 3.1 φαίνεται το απλοποιημένο κύκλωμα για την εξήγηση της αρχής λειτουργίας του ψαλιδιστή.



Σχήμα 3.1: Απλοποιημένο κύκλωμα ψαλιδιστή

Για όσο διάστημα ο διακόπτης είναι ανοιχτός, στο φορτίο δεν εφαρμόζεται τάση (χρονικό διάστημα  $t_{off}$ ). Όταν ο διακόπτης κλείσει ( $t_{on}$ ) τότε στο φορτίο εφαρμόζεται η τάση της πηγής  $U_{\pi}$  (σχ. 3.2.). Αν αυτό το άνοιγμα και το κλείσιμο του διακόπτη επαναλαμβάνεται περιοδικά, με περίοδο  $T$ , τότε η μέση τιμή της τάσης του φορτίου θα ισούται με:  $\bar{U}_{\phi} = a \cdot U_{\pi}$ , όπου  $a = t_{on}/T$ . Ο συντελεστής "α" ονομάζεται **λόγος κατάτμησης** και στη διεθνή βιβλιογραφία

συμβολίζεται με **D (DutyCycle)**. Έτσι, όσο αυξάνεται ο λόγος κατάτμησης, τόσο αυξάνεται η μέση τιμή της τάσης φορτίου, ελέγχεται δηλαδή η DCτάση του φορτίου.

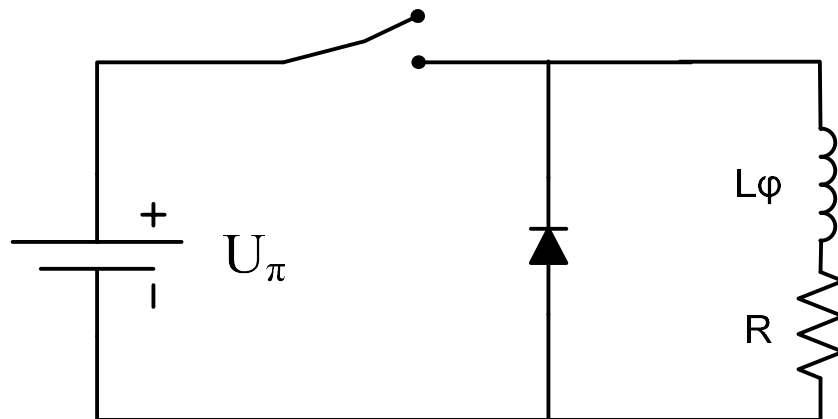


**Σχήμα 3.2:**Κυματομορφή της τάσης και του ρεύματος φορτίου του ψαλιδιστή για **ωμικό φορτίο**

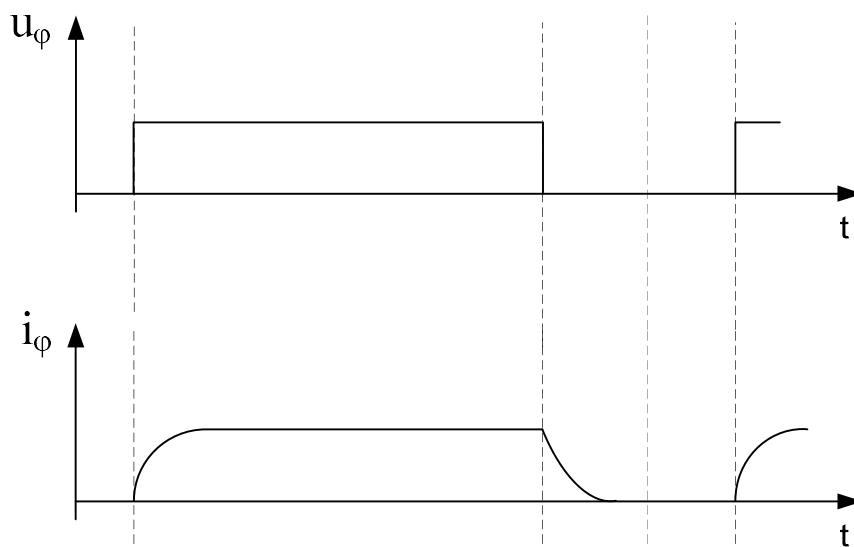
Όπως φαίνεται και από το σχήμα 3.2 αν το φορτίο είναι ωμικό τότε η κυματομορφή του ρεύματος φορτίου είναι ίδια με της τάσης.

### 3.2.2 Ωμικό-Επαγωγικό Φορτίο

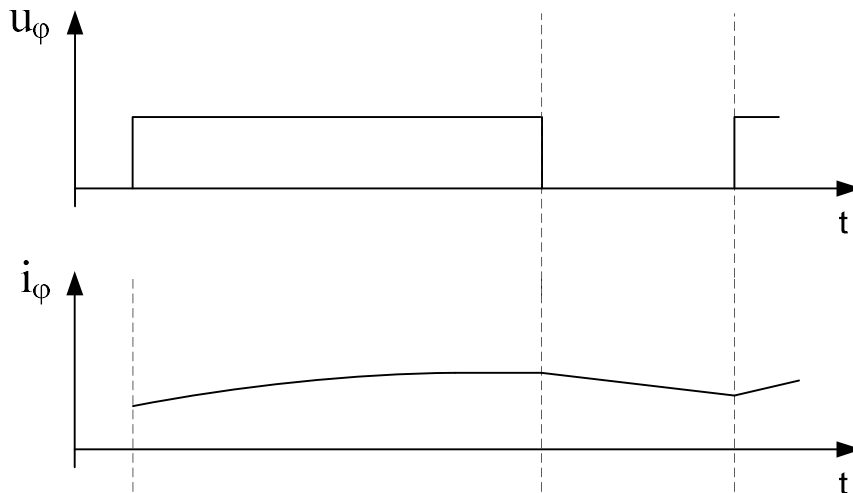
Στην περίπτωση όπου το φορτίο δεν είναι καθαρά ωμικό (υπάρχει και επαγωγή στο φορτίο μας), πρέπει να τοποθετείται και διάδος ελεύθερης διέλευσης, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.3. Η ύπαρξη της επαγωγής καθυστερεί την αύξηση του ρεύματος, όταν η τάση εφαρμόζεται στο φορτίο, ενώ όταν η τάση μηδενιστεί η ενέργεια της επαγωγής εκτονώνεται μέσω της διόδου ελεύθερης διέλευσης (σχ. 3.4). Παρατηρούμε δηλαδή ότι η επαγωγή στο φορτίο δρα ως πηνίο εξομάλυνσης, επομένως μια περεταίρω αύξηση της επαγωγής, θα έχει ως αποτέλεσμα τη μεγαλύτερη εξομάλυνση του ρεύματος (σχ. 3.5).



Σχήμα 3.3: Ψαλιδιστής με επαγωγή σε σειρά με την αντίσταση φορτίου και δίοδο ελεύθερης διέλευσης

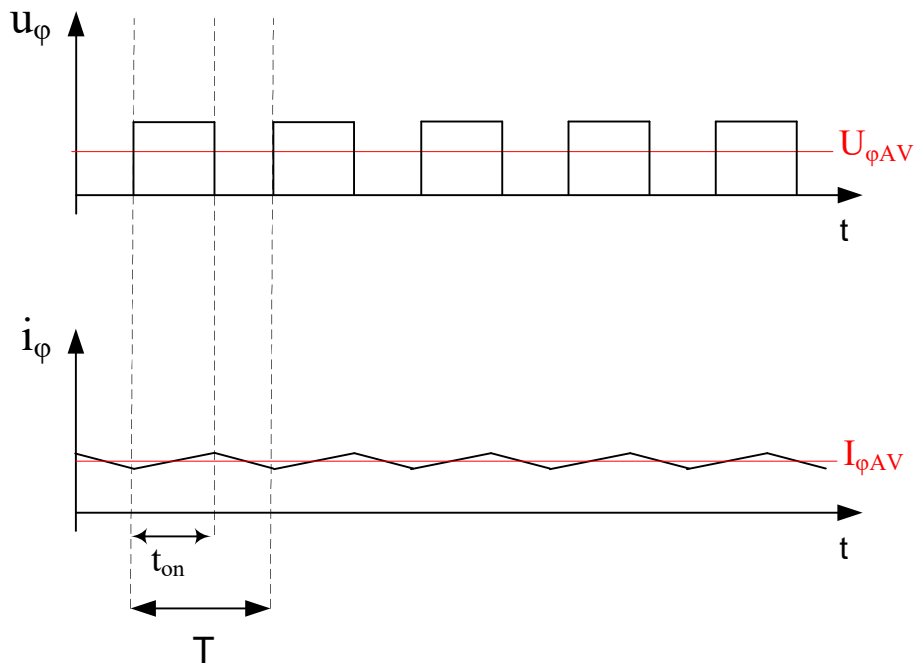


Σχήμα 3.4: Κυματομορφή της τάσης και του ρεύματος φορτίου του ψαλιδιστή για ωμικό φορτίο με πηνίο εξομάλυνσης.



**Σχήμα 3.5:** Κυματομορφή της τάσης και του ρεύματος φορτίου του ψαλιδιστή για ωμικό φορτίο με μεγάλο πηνίο εξομάλυνσης.

Η αύξηση της εξομάλυνσης του ρεύματος στο φορτίο πραγματοποιείται και με άλλους τρόπους, όπως π.χ. με την αύξηση της συχνότητας. Όπως φαίνεται και στο σχήμα 3.6, όσο αυξάνεται η συχνότητα με την οποία ανοιγοκλείνει ο διακόπτης (διακοπτική συχνότητα), τόσο μειώνεται ο χρόνος κατά τον οποίο το ρεύμα στο φορτίο αυξομειώνεται, με αποτέλεσμα να μειώνονται οι κυματώσεις του, πετυχαίνοντας με αυτόν τον τρόπο καλύτερη εξομάλυνση. Στα περισσότερα φορτία η εξομάλυνση του ρεύματος είναι απαραίτητη. Αν π.χ. σε μία μηχανή συνεχούς ρεύματος το ρεύμα μεταβάλλεται, τότε μεταβάλλεται ανάλογα η ηλεκτρομαγνητική ροπή άρα και οι δυνάμεις που ασκούνται στον άξονα, έχοντας ως αποτέλεσμα την αύξηση των μηχανικών ταλαντώσεων. Επομένως, παρατηρείται αύξηση του θορύβου και μείωση του χρόνου ζωής της μηχανής.



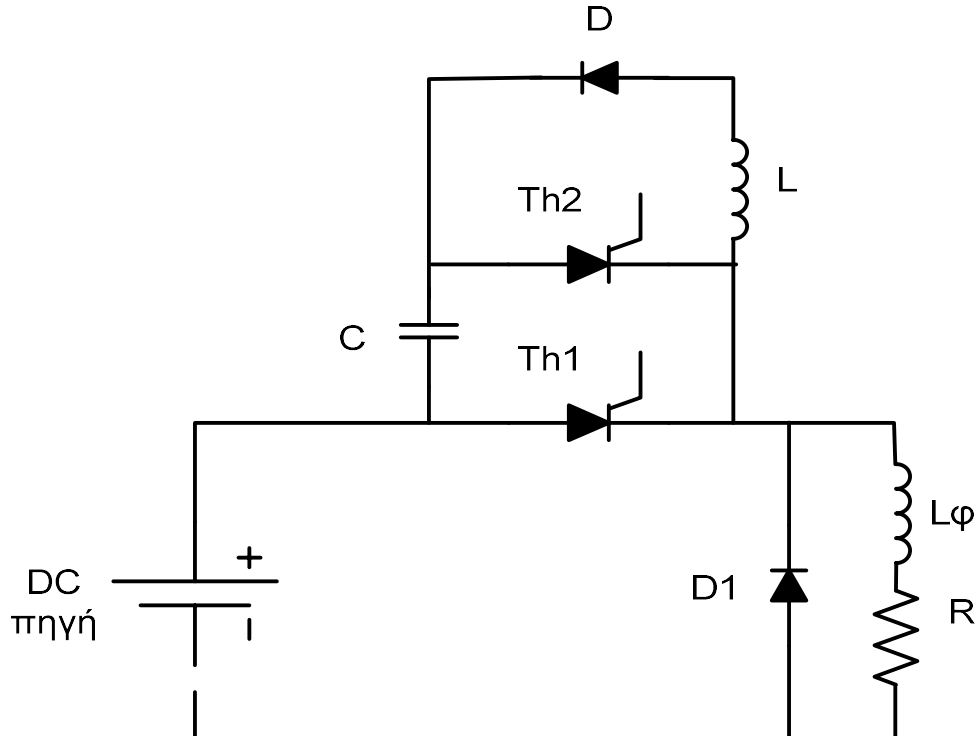
**Σχήμα 3.6:** Κυματομορφή της τάσης και του ρεύματος φορτίου του ψαλιδιστή για ωμικό φορτίο πηνίο εξομάλυνσης και υψηλή διακοπτική συχνότητα

Στην Εργαστηριακή Άσκηση 3α θα μελετηθεί ο ψαλιδιστής με θυρίστορ, ο οποίος διαθέτει κύκλωμα σβέσης (σχ. 3.7).

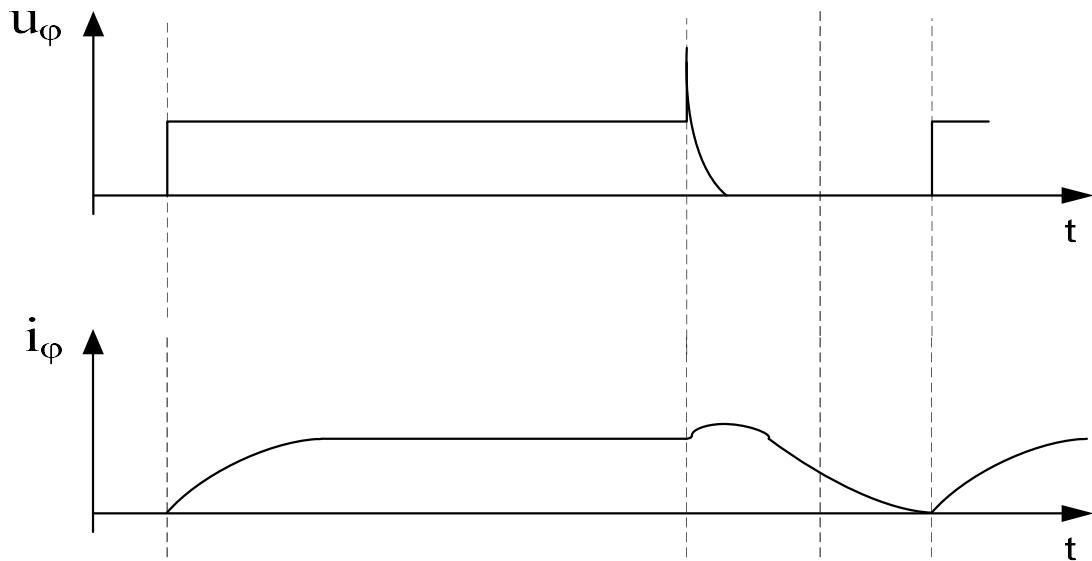
Στην Εργαστηριακή Άσκηση 3β το θυρίστορ αντικαθίσταται από IGBT (σχ. 3.9) οπότε, τόσο η έναυση όσο και η σβέση ελέγχονται από τον παλμό του ημιαγωγικού στοιχείου.

### Άσκηση 3α

Αν ο διακόπτης του ψαλιδιστή υλοποιείται με θυρίστορ, τότε η σβέση του δεν μπορεί να πραγματοποιηθεί από τον παλμό του (όπως συμβαίνει στα τρανζίστορ ισχύος IGBT). Για το λόγο αυτό πρέπει παράλληλα με τον διακόπτη (Th1) να τοποθετηθεί κύκλωμα σβέσης του θυρίστορ Th1 (σχ. 3.7). Όταν δοθεί παλμός στο θυρίστορ Th1 τότε αυτό μπαίνει σε αγωγή και τροφοδοτεί το φορτίο. Συγχρόνως, φορτίζεται ο πυκνωτής με τέτοια τάση, ώστε το θυρίστορ Th2 να είναι ορθά πολωμένο. Όταν αποφασίσουμε να δώσουμε παλμό στο θυρίστορ Th2 τότε αυτό μπαίνει σε αγωγή, διότι είναι ορθά πολωμένο από τον πυκνωτή. Με τον τρόπο αυτό μέσω του πυκνωτή, εφαρμόζεται ανάστροφη τάση στο Th1 με αποτέλεσμα να έρθει σε σβέση. Επομένως, σταματάει η τροφοδότηση του φορτίου έως ότου να δοθεί νέος παλμός έναυσης στο Th1. Όταν δώσουμε παλμό έναυσης στο Th2, τότε το φορτίο τροφοδοτείται με διπλάσια τάση, η οποία προκύπτει από το άθροισμα των τάσεων της πηγής και του φορτισμένου πυκνωτή (σχ. 3.8). Μετά από κάποιο χρονικό διάστημα ο πυκνωτής εκφορτίζεται με αποτέλεσμα το Th2 να σβήνει. Προφανώς ο πυκνωτής σβέσης πρέπει να έχει κατάλληλη χωρητικότητα έτσι ώστε να μπορεί να παρέχει την κατάλληλη ενέργεια για τη σβέση του Th1. Η διάοδος D τοποθετείται ώστε ο πυκνωτής να φορτίζεται όποτε επιθυμούμε εμείς και να μην εκφορτίζεται χωρίς τη θέληση μας. Η επαγωγή L τοποθετείται για την προστασία των ημιαγωγικών στοιχείων από τις απότομες μεταβολές του ρεύματος.



Σχήμα 3.7: Ψαλιδιστής με θυρίστορ



**Σχήμα 3.8:** Κυματομορφή της τάσης και του ρεύματος φορτίου του ψαλιδιστή με θυρίστορ για ωμικό φορτίο με πηνίο εξομάλυνσης.

### 3.3 Ζητούμενα Άσκησης 3α

- A)** Να κατασκευασθεί η καμπύλη  $U=f(\alpha)$ .
- B)** Γιατί έχει αυτή τη μορφή;
- Γ)** Πως επιδρά η επαγωγή και πως η συχνότητα στο ρεύμα φορτίου.
- Δ)** Να εξηγηθούν οι κυματομορφές.



## Άσκηση 3β

Αν ο διακόπτης του ψαλιδιστή υλοποιείται με τρανζίστορ ισχύος IGBT (σχ. 3.9), τότε η σβέση πραγματοποιείται από τον παλμό του. Ισχύει δηλαδή ό,τι αναφέραμε στα γενικά για τον ψαλιδιστή στα κεφάλαια 3.2.1 και 3.2.2.

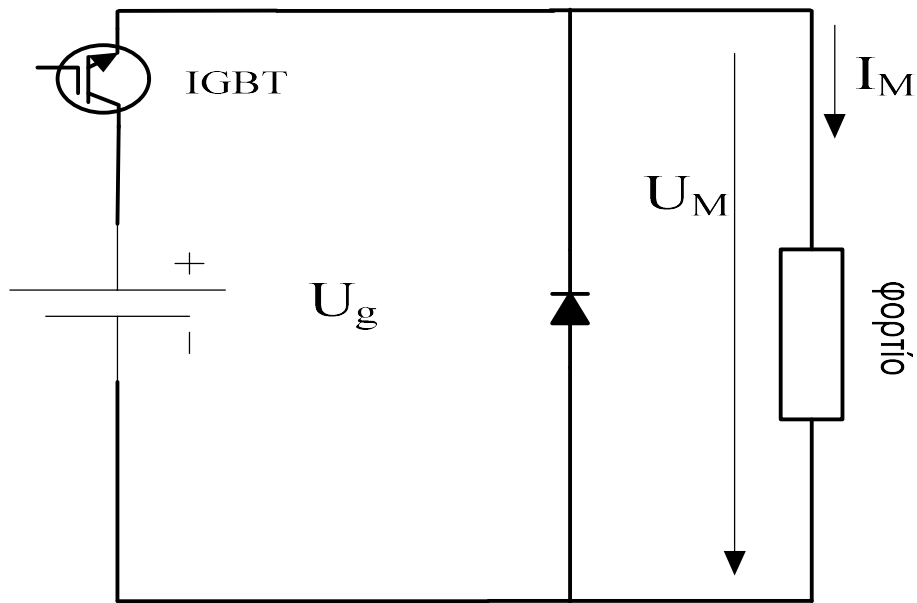
Εδώ μας δίνεται η ευκαιρία να αναφερθούμε στην άεργο ισχύ μιας πηγής συνεχούς τάσης. Επειδή η κυματομορφή της τάσης της DC πηγής διαφέρει από εκείνη του ρεύματος, τότε εμφανίζεται άεργος ισχύς, έχοντας ως αποτέλεσμα τη ροή μεγαλύτερων ρευμάτων στην πηγή, δηλαδή ρεύματα που δεν διαδραματίζουν ρόλο στην μεταφορά ενεργού ισχύος. **Η παρατήρηση αυτών των φαινομένων είναι σημαντικός στόχος της εργασίας αυτής.**

Επίσης, με το μετατροπέα με IGBT θα λειτουργήσουμε σε υψηλότερη συχνότητα σε σύγκριση με τον μετατροπέα με θυρίστορ. Σκοπός μας είναι η κατανόηση του ρόλου που διαδραματίζουν οι διακοπτικές απώλειες στο βαθμό απόδοσης του μετατροπέα. Επομένως, μέσω των μετρήσεων που θα πραγματοποιηθούν κατά τη διάρκεια αυτής της εργαστηριακής άσκησης, θα σχεδιασθούν οι παρακάτω καμπύλες:

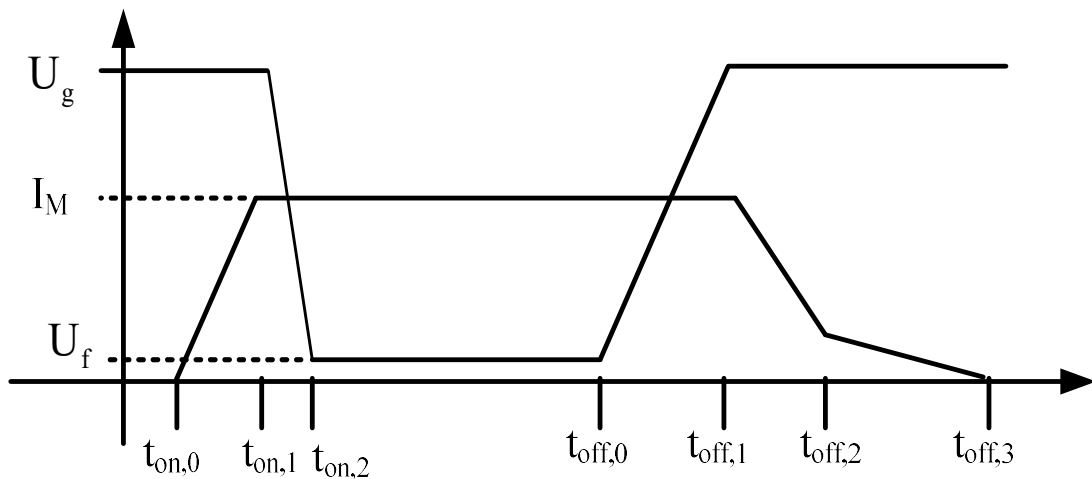
**α)** του βαθμού απόδοσης συναρτήσει του λόγου κατάτμησης για όλες τις περιπτώσεις σε κοινούς άξονες και

**β)** του συντελεστή ισχύος συναρτήσει του λόγου κατάτμησης επίσης για όλες τις περιπτώσεις σε κοινούς άξονες.

Με τον όρο **διακοπτικές απώλειες** εννοούμε τις απώλειες που εμφανίζονται στο ημιαγωγικό στοιχείο κατά τη διάρκεια της έναυσης και της σβέσης του. Εκείνη τη χρονική διάρκεια, όπως βλέπουμε και στο σχήμα 3.10, έχουμε ταυτόχρονα εμφάνιση υψηλού ρεύματος και υψηλής τάσης, επομένως έχουμε την εμφάνιση υψηλής ισχύος. Αν το χρονικό διάστημα έναυσης και σβέσης είναι μικρό τότε, οι διακοπτικές απώλειες είναι μικρές και μπορεί σε κάποιες περιπτώσεις να θεωρηθούν αμελητέες. Αν όμως το χρονικό διάστημα έναυσης και σβέσης είναι σχετικά μεγάλο ως προς την περίοδο του φαινομένου, τότε οι διακοπτικές απώλειες μπορεί να είναι πολύ υψηλές. Καταλήγουμε, επομένως, στο συμπέρασμα ότι ο βαθμός απόδοσης επηρεάζεται από τη συχνότητα και από το είδος του ημιαγωγικού στοιχείου. Συγκεκριμένα για το IGBT η διαδικασία έναυσης και σβέσης του φαίνεται στο σχήμα 3.10.



Σχήμα 3.9: Ψαλιδιστής με IGBT



Σχήμα 3.10: Διαδικασία έναυσης και σβέσης του IGBT

Όπως φαίνεται στο σχήμα 3.10, το χρονικό διάστημα μεταξύ  $t_{on,2}$  και  $t_{off,0}$  το στοιχείο βρίσκεται σε αγωγή και έχει σχεδόν σταθερή πτώση τάσης. Δηλαδή, οι απώλειες είναι ανάλογες του ρεύματος, το οποίο είναι και χαρακτηριστικό στοιχείο του IGBT. Αυτές οι απώλειες ισχύος ονομάζονται **απώλειες αγωγής**.

Για τις απώλειες του IGBT συνοψίζονται τα εξής:

Τόσο κατά την έναυση όσο και κατά τη σβέση εμφανίζεται στο IGBT και τάση και ρεύμα, επομένως ισχύς. Αυτή η ισχύς μετατρέπεται σε θερμότητα επάνω στο IGBT και

προφανώς είναι ανεπιθύμητη καθώς αφ' ενός μεν μπορεί να καταστρέψει το στοιχείο, αφ' εταίρου μεταφράζεται σε απώλειες του στοιχείου. Όταν η διακοπτική συχνότητα είναι χαμηλή (π.χ. 2 kHz), τότε τα χρονικά διαστήματα έναυσης και σβέσης είναι πολύ μικρά, άρα οι διακοπτικές τους απώλειες είναι χαμηλές. Προφανώς, καθώς αυξάνεται η συχνότητα αυξάνονται και οι **διακοπτικές απώλειες**.

Επίσης, απώλειες σε ένα IGBT εμφανίζονται και κατά την αγωγή. Αυτές οι απώλειες ονομάζονται **απώλειες αγωγής** και οφείλονται στην θέρμανση του ημιαγωγικού στοιχείου λόγω ροής του ρεύματος.

### **3.4 Ζητούμενα Άσκησης 3β**

- A)** Να εξηγηθούν οι κυματομορφές.
- B)** Πως επιδρά η επαγωγή και πως η συχνότητα στο ρεύμα φορτίου.
- Γ)** Να κατασκευασθεί η καμπύλη  $\eta=f(\alpha)$ .
- Δ)** Πως επιδρά η συχνότητα επί του βαθμού απόδοσης.
- Ε)** Πότε επιλέγουμε να μετρούν τα όργανα μέσες τιμές και πότε ενεργές.

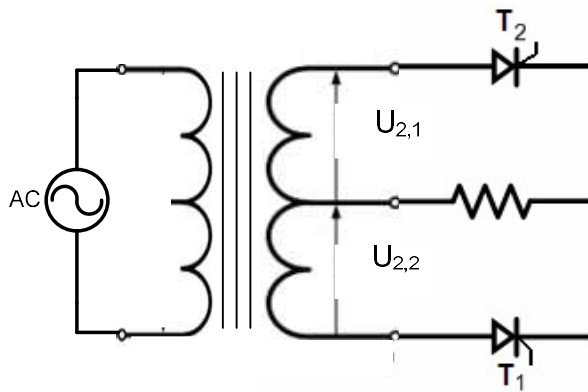
## **Άσκηση 4: Μονοφασικός Μετατροπέας AC/DC**



## Άσκηση 4α: Μονοφασικός Μετατροπέας AC/DC πλήρως ελεγχόμενος με Μ/Σ με μεσαία λήψη

### 4.1 Εισαγωγή

Ο μετατροπέας αυτός χρησιμοποιείται για τη μετατροπή μιας AC τάσης σε μία ελεγχόμενη DC τάση. Αποτελείται από έναν μετασχηματιστή με μεσαία λήψη π.χ. 1:1 ή 1:2, και δύο θυρίστορ. Χρησιμοποιείται για τον έλεγχο της τάσης DC φορτίων, όπως π.χ. μηχανές συνεχούς ρεύματος, για την τροφοδοσία αντιστροφένων καθώς επίσης και σε πλήθος άλλες εφαρμογές. Στο σχήμα 4.1 φαίνεται το σχήμα αυτού του μετατροπέα. Το πιο σημαντικό μειονέκτημα του μετατροπέα αυτού είναι η ύπαρξη του Μ/Σ, ο οποίος αυξάνει υπερβολικά το βάρος και τον όγκο του μετατροπέα αυτού. Όμως, πολλές φορές είναι απαραίτητη η χρήση μετασχηματιστή απομόνωσης οπότε, μπορεί να συμφέρει η χρήση τέτοιου μετατροπέα.

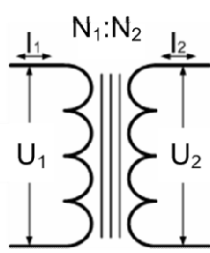


Σχήμα 4.1: Το κύκλωμα μονοφασικού μετατροπέα με Μ/Σ μεσαίας λήψης

#### 4.1.1 Αρχή λειτουργίας-Ωμικό φορτίο

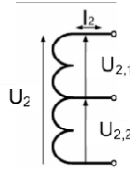
Όπως είναι γνωστό από τη θεωρία των ηλεκτρικών μηχανών υπάρχει άμεση σχέση του λόγου μετασχηματισμού με το λόγο των τάσεων, των ρευμάτων και του λόγου των σπειρών μεταξύ πρωτεύοντος και δευτερεύοντος τυλίγματος, όπως φαίνεται και στο σχήμα 4.2α.

Στην περίπτωση της εργαστηριακής άσκησης 4α, όπου έχουμε Μ/Σ με μεσαία λήψη, η σχέση των τάσεων στο δευτερεύον τυλίγμα παρουσιάζεται στο σχήμα 4.2β όπου ο λόγος μετασχηματισμού είναι 1:2. Παρατηρούμε ότι η τάση σε κάθε ενδιάμεσο τυλίγμα, είναι η μισή από την συνολική τάση του δευτερεύοντος τυλίγματος. Το γεγονός αυτό θα επηρεάσει κάποια στοιχεία του μετατροπέα, όπως θα παρουσιαστεί παρακάτω.



(α)

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{I_2}{I_1}$$



$$U_2 = 2 \cdot U_{2,1} = 2 \cdot U_{2,2}$$

(β)

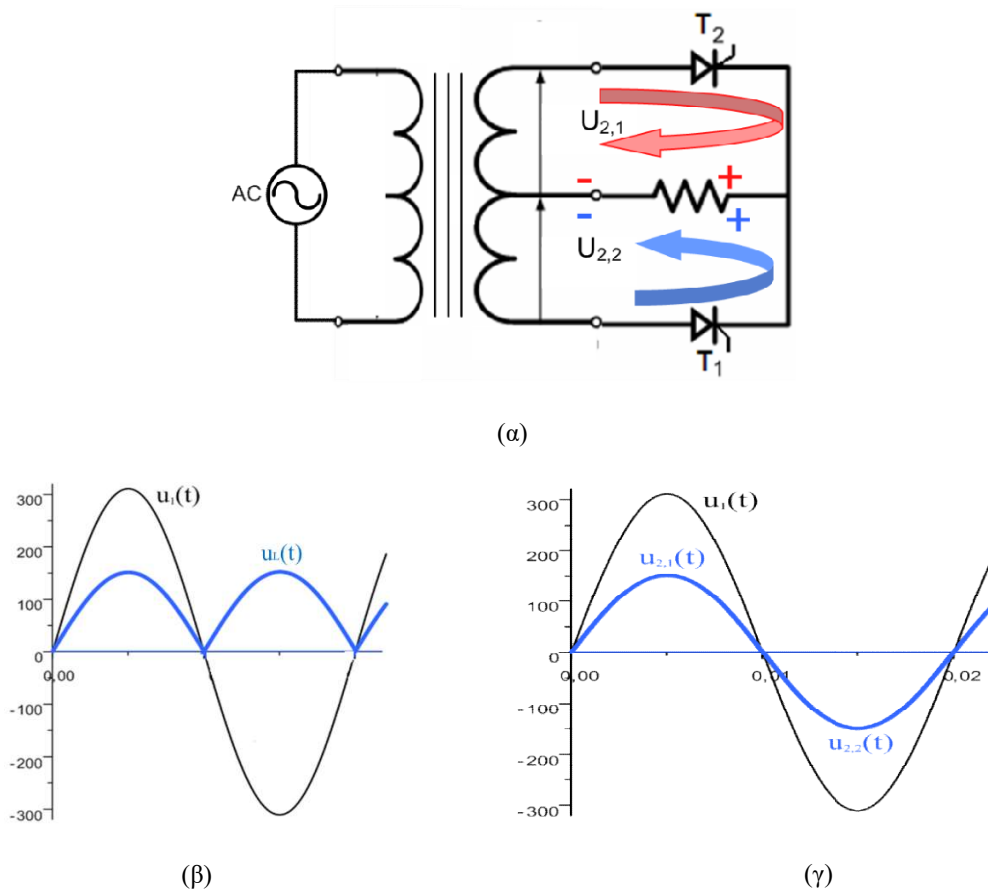
Σχήμα 4.2 α) Λόγος μετασχηματισμού για Μ/Σ

β) Σχέση τάσεων δευτερεύοντος για Μ/Σ με μεσαία λήψη

Ο έλεγχος της DCτάσης εξόδου επιτυγχάνεται με τη χρήση ελεγχόμενων ημιαγωγικών στοιχείων ισχύος (στην περίπτωσή μας θυρίστορ). Μεταβάλλοντας τη γωνία έναυσης των θυρίστορ, μεταβάλλεται και η DCτάση εξόδου, σύμφωνα με τη σχέση 4.1.

$$U_{DC} = \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi} U_0 \sin \omega t \cdot d(\omega t) = U_0 \frac{1 + \cos \alpha}{\pi} \quad (4.1)$$

Ο τρόπος με τον οποίο λειτουργεί αυτός ο μετατροπέας, με γωνία έναυσης  $\alpha=0$  φαίνεται στο σχήμα 4.3. Συγκεκριμένα, κατά την θετική ημιπερίοδο της τάσης μπορεί να άγει το θυρίστορ  $T_2$  και η τάση από το μισό δευτερεύον τυλιγμά του Μ/Σ εφαρμόζεται στο φορτίο, ενώ το θυρίστορ  $T_1$  παραμένει σε σβέση. Κατά την αρνητική ημιπερίοδο, το  $T_2$  πολώνεται ανάστροφα και σβήνει, το  $T_1$  πολώνεται ορθά και είναι έτοιμο να μπει σε αγωγή, ενώ η τάση που εφαρμόζεται στο φορτίο έχει ίδια πολικότητα όπως και στη θετική ημιπερίοδο. Με αυτόν τον τρόπο παίρνουμε ανορθωμένη τάση στο φορτίο. Παρατηρούμε δηλαδή ότι κάθε φορά που άγει κάποιο θυρίστορ, η τάση στο φορτίο είναι η μισή της τάσης στο δευτερεύον του μετασχηματιστή. Αυτό σημαίνει ότι απαιτείται διπλάσιος αριθμός τυλιγμάτων στον μετασχηματιστή πράγμα ασύμφορο. Από την άλλη χρησιμοποιούνται δύο θυρίστορ (με δύο κυκλώματα παλμοδότησης) αντί για τέσσερα, που χρησιμοποιούνται στον αντίστοιχο ανορθωτή τύπου γέφυρας που θα εξεταστεί παρακάτω. Άρα, όταν απαιτείται μετασχηματιστής απομόνωσης η επιλογή είναι θέμα οικονομοτεχνικής μελέτης.



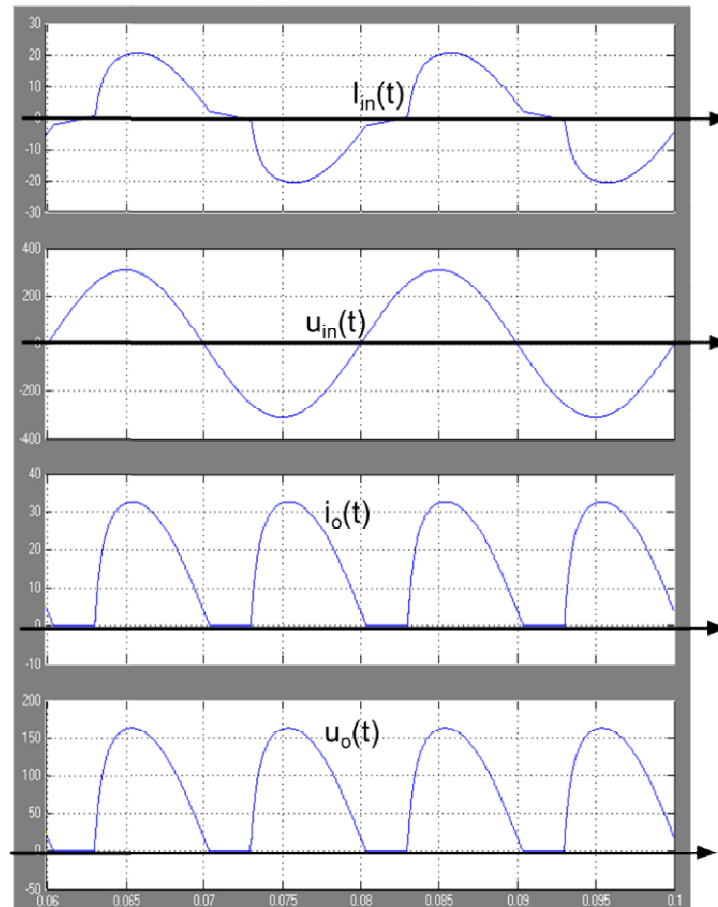
**Σχήμα 4.3 α)** Ο μετατροπέας με Μ/Σ μεσαίας λήψης

**β)** Τάση δικτύου (μεγάλη) και τάση φορτίου (μικρή)

**γ)** Τάση δικτύου (μεγάλη) και τάση μεσαίας λήψης δευτερεύοντος

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, η τάση εξόδου του μετατροπέα εξαρτάται άμεσα από τη γωνία έναυσης. Στο σχήμα 4.4 φαίνονται οι κυματομορφές τάσης και ρεύματος εισόδου και εξόδου του μετατροπέα για γωνία έναυσης  $\alpha$ . Φαίνεται πλέον ο τρόπος με τον οποίο μεταβάλλεται τόσο η τάση όσο και το ρεύμα στο φορτίο συναρτήσει της γωνία  $\alpha$ .



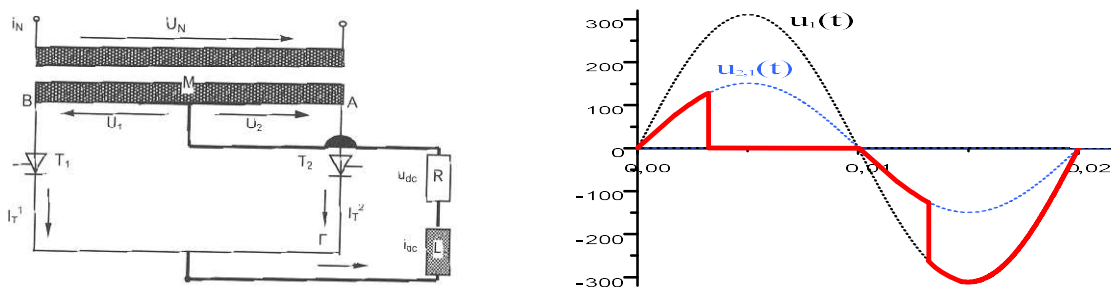


Σχήμα 4.4: Τάσεις και ρεύματα εισόδου-εξόδου του μετατροπέα

Όταν στο φορτίο υπάρχει επαγωγή τότε, το ρεύμα θα καθυστερεί της τάσης και θα υπάρχουν διαστήματα με αρνητική τάση στο φορτίο. Τότε η ισχύς είναι αρνητική δηλαδή επιστρέφεται ισχύς στο δίκτυο. Έτσι, ο μετατροπέας ονομάζεται πλήρως ελεγχόμενος και λειτουργεί σε δύο τεταρτημόρια. Αν παράλληλα με το φορτίο τοποθετηθεί δίοδος τότε δεν υφίσταται αρνητική τάση, ενώ το ρεύμα εξομαλύνεται περαιτέρω. Τότε ο ανορθωτής ονομάζεται ημιελεγχόμενος. Στην εργαστηριακή άσκηση 4α δε θα χρησιμοποιηθεί επαγωγή άρα δεν έχει νόημα η χρήση διόδου ελεύθερης διέλευσης (όπως ονομάζεται). Με τέτοιου είδους φορτία θα ασχοληθούμε στην εργαστηριακή άσκηση 4β. Επίσης, για την άεργο ισχύ στο δίκτυο ισχύει ότι και στην ανορθωτική γέφυρα που εξετάζεται στην άσκηση 4β.

### 4.1.2 Τάση Ανόδου – Καθόδου του θυρίστορ

Η ιδιαιτερότητα αυτού του μετατροπέα επικεντρώνεται στην τάση η οποία εφαρμόζεται στα άκρα των θυρίστορ. Όπως φαίνεται και στο σχήμα 4.5, κατά την έναυση του θυρίστορ  $T_2$ , η τάση που εφαρμόζεται στο θυρίστορ  $T_1$  δεν είναι η τάση  $U_{AM}$  αλλά ολόκληρη η τάση του δευτερεύοντος τυλίγματος του Μ/Σ  $U_2$ . Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να εφαρμόζεται τάση στο θυρίστορ  $T_1$  με πλάτος **διπλάσιο** από αυτό που εφαρμόζεται όταν το  $T_1$  δεν άγει. Επομένως, θα πρέπει να είμαστε πολύ προσεκτικοί στην επιλογή των ημιαγωγικών στοιχείων που θα επιλέξουμε, στην περίπτωση που κατασκευάσουμε αυτό τον τύπο μετατροπέα.



Σχήμα 4.5: Τάση Ανόδου-Καθόδου στο θυρίστορ  $T_1$

## 4.2 Ζητούμενα Άσκησης 4α

- A) Να εξηγηθούν οι κυματομορφές.
- B) Κατασκευάστε την καμπύλη της τάσης συναρτήσει της γωνίας έναυσης και εξηγήστε την μορφή της.

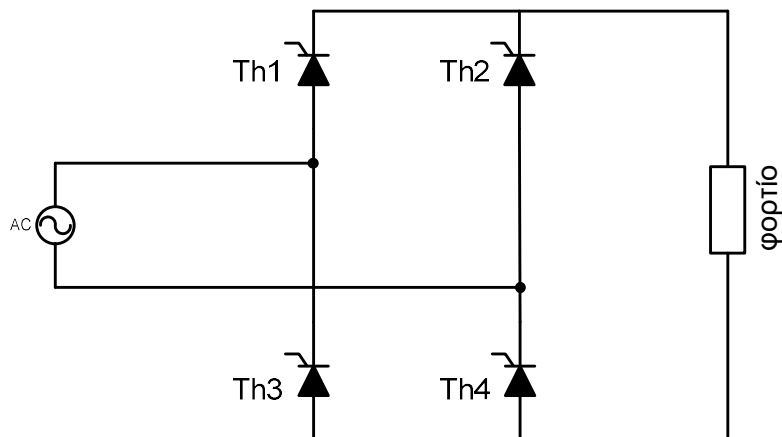
## Άσκηση 4β: Μονοφασική ανορθωτική γέφυρα πλήρως ελεγχόμενη – ημιελεγχόμενη

### 4.3 Εισαγωγή

Στις περισσότερες εφαρμογές ηλεκτρονικών ισχύος η ισχύς εισόδου προέρχεται από την ACτάση του ηλεκτρικού δικτύου των 50 ή 60 Hz. Για τη μετατροπή της ACτάσης σε DC, χρησιμοποιούνται μετατροπείς που ονομάζονται ανορθωτές, όπως αυτός που συναντήσαμε στην Άσκηση 4α. Όμως, η ανορθωτική διάταξη που χρησιμοποιείται περισσότερο από όλες είναι η ανορθωτική γέφυρα τριφασική ή μονοφασική. Η μονοφασική ανορθωτική γέφυρα εξετάζεται σ' αυτή την άσκηση.

#### 4.3.1 Μονοφασική ανορθωτική γέφυρα πλήρως ελεγχόμενη

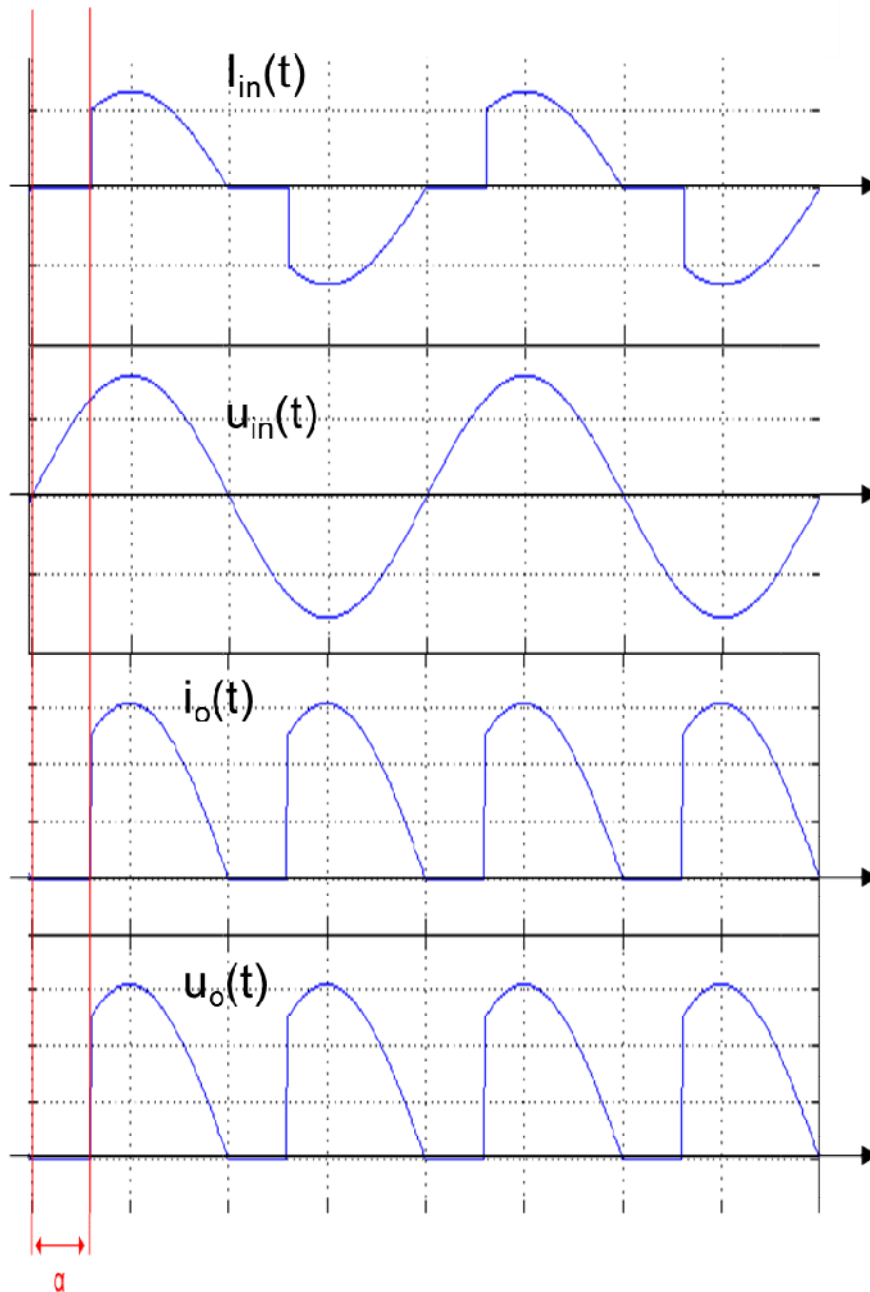
Στο σχήμα 4.6 φαίνεται το κύκλωμα μιας μονοφασικής γέφυρας πλήρως ελεγχόμενης με θυρίστορ. Κατά τη θετική ημιπερίοδο της τάσης άγουν τα θυρίστορ  $Th_1$  και  $Th_4$ , επιτρέποντας το ρεύμα να ρέει προς μια συγκεκριμένη κατεύθυνση στο φορτίο, ενώ κατά την αρνητική ημιπερίοδο άγουν τα θυρίστορ  $Th_2$  και  $Th_3$ , διατηρώντας την ίδια φορά του ρεύματος, το οποίο ρέει στο φορτίο.



Σχήμα 4.6: Μονοφασικός μετατροπέας πλήρως ελεγχόμενος

### 4.3.1.1 Ωμικό φορτίο

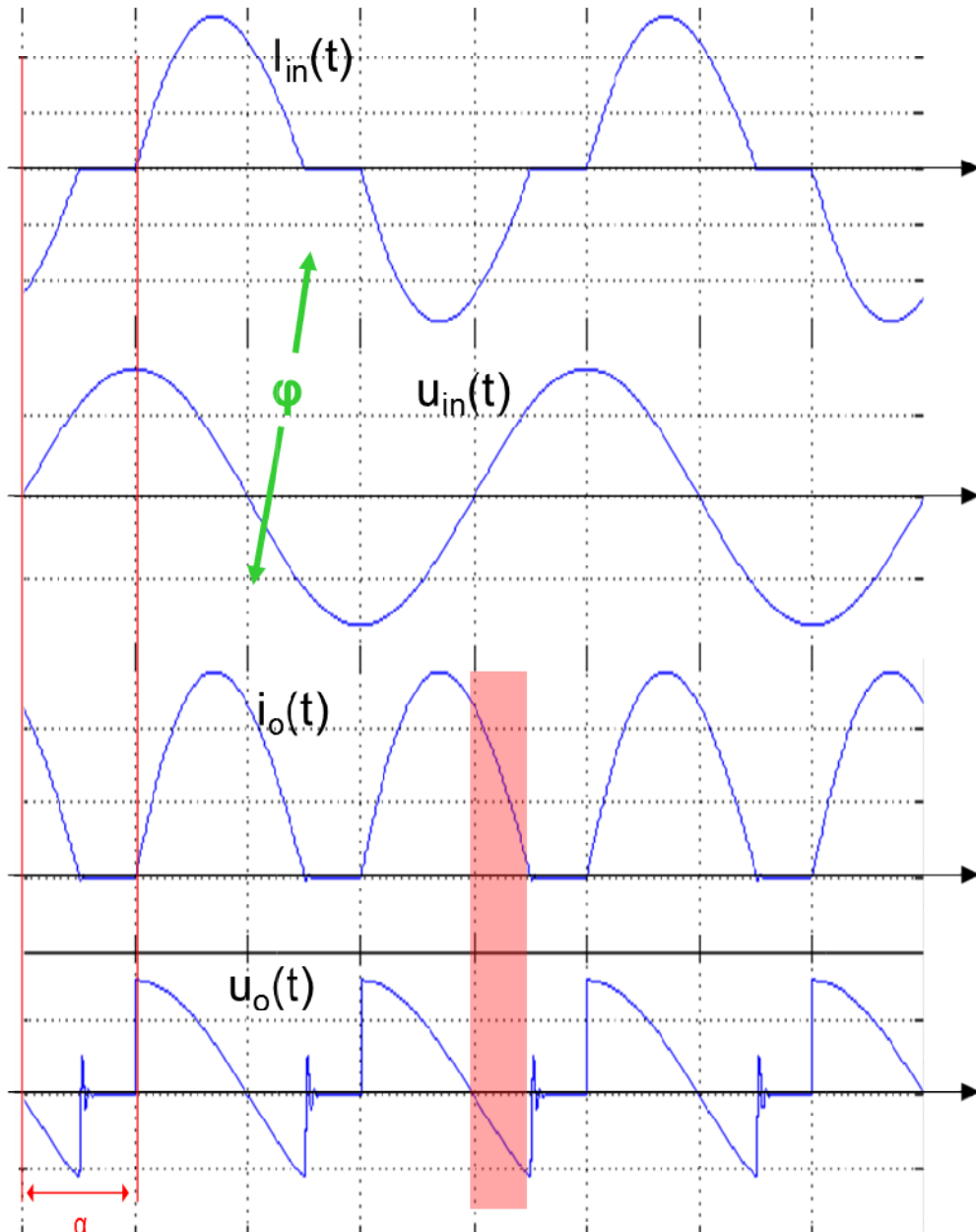
Στην περίπτωση όπου το φορτίο μας είναι καθαρά ωμικό (Σχ. 4.7), τότε αναλόγως με τη γωνία έναυσης  $\alpha$  έχουμε μια καθυστέρηση στο ρεύμα εισόδου σε σχέση με την τάση. Λόγω της καθυστέρησης αυτής, όπως είναι ήδη γνωστό, έχουμε εμφάνιση αέργου ισχύος, παρόλο που το φορτίο μας είναι καθαρά ωμικό (όπως στην Άσκηση 2).



Σχήμα 4.7: Κυματομορφές τάσης–ρεύματος εισόδου εξόδου για καθαρά ωμικό φορτίο

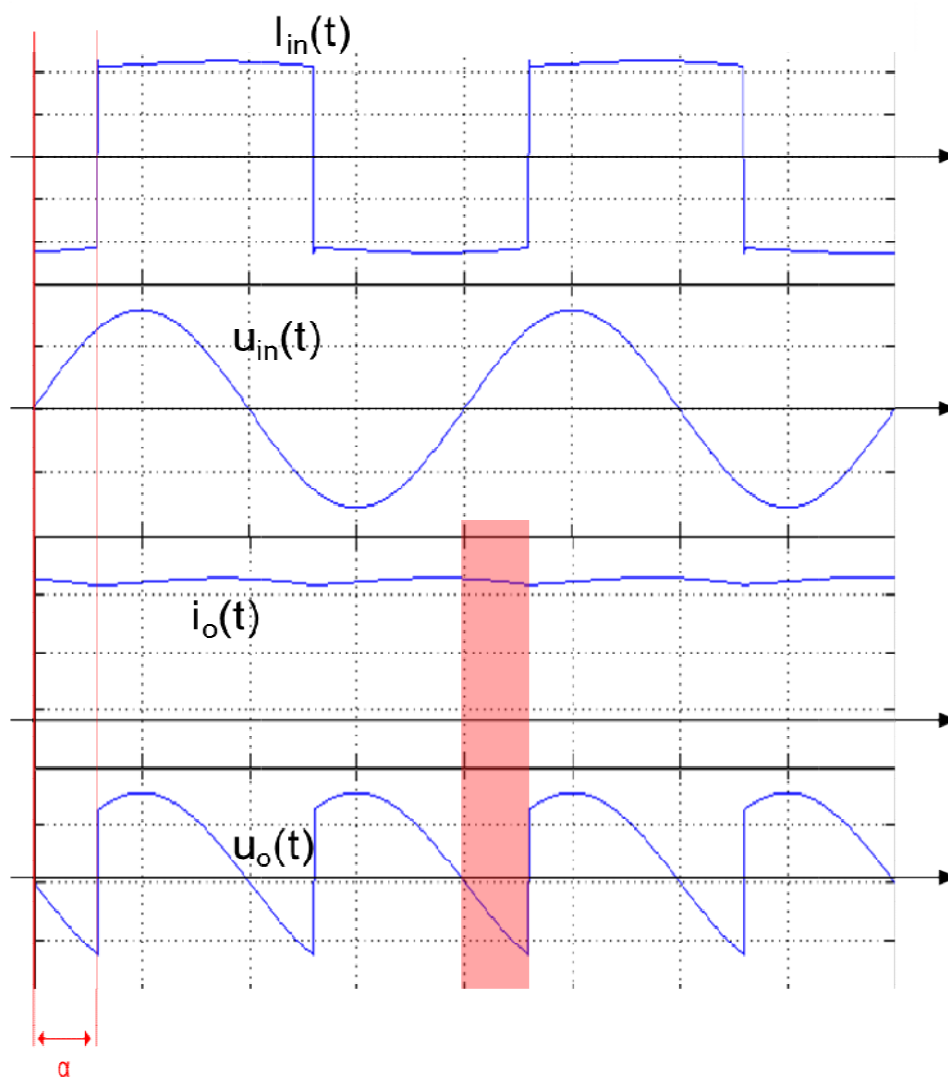
### 4.3.1.2 Ωμικό-Επαγωγικό Φορτίο

Οι ελεγχόμενοι ανορθωτές ισχύος χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές DC κινητήριων συστημάτων, όπως π.χ. στον έλεγχο ενός DC κινητήρα. Συνεπώς, τα συνήθη φορτία μας είναι ωμικά επαγωγικά.



Σχήμα 4.8: Κυματομορφές τάσης –ρεύματος εισόδου εξόδου για ωμικό-επαγωγικό φορτίο

Παρατηρώντας το σχήμα 4.8, βλέπουμε ότι η μορφή του ρεύματος εισόδου, καθώς και του ρεύματος και της τάσης εξόδου είναι διαφορετικά. Η διαφορά φάσης μεταξύ τάσης και ρεύματος, πλέον εξαρτάται και από τη γωνία έναυσης. Συμπεραίνουμε, λοιπόν, ότι η άεργος ισχύς είναι συνάρτηση και τη γωνίας έναυσης αλλά και της επαγωγής του φορτίου. Μια προσεκτική παρατήρηση της τάσης και του ρεύματος εξόδου δείχνει ότι στιγμιαία η τάση και το ρεύμα έχουν αντίθετα πρόσημα, δηλαδή υπάρχει αρνητική ισχύς, η οποία συνεπάγεται επιστροφή ενέργειας στο δίκτυο.

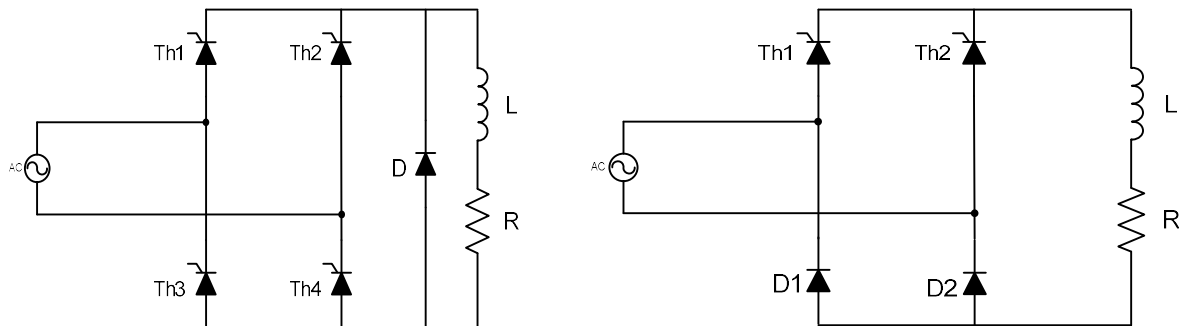


Σχήμα 4.9: Κυματομορφές τάσης –ρεύματος εισόδου εξόδου για ωμικό-επαγωγικό φορτίο για Λάπειρο

Από το σχήμα 4.8 παρατηρούμε ότι το ρεύμα εξόδου, μπορεί να είναι συνεχές, όμως δεν είναι καθόλου εξομαλυσμένο, αντιθέτως παρατηρούνται και περιοχές όπου το ρεύμα είναι μηδέν. Στις περισσότερες DC εφαρμογές, αυτό δεν είναι επιθυμητό, για το λόγο αυτό προσθέτουμε ένα πηνίο εξομάλυνσης αρκετά μεγάλο, τόσο ώστε να το θεωρούμε άπειρο. Στο σχήμα 4.9 παρουσιάζονται οι κυματομορφές τάσης και ρεύματος για  $L \rightarrow \infty$ .

### 4.3.2 Μονοφασική ανορθωτική γέφυρα ημιελεγχόμενη

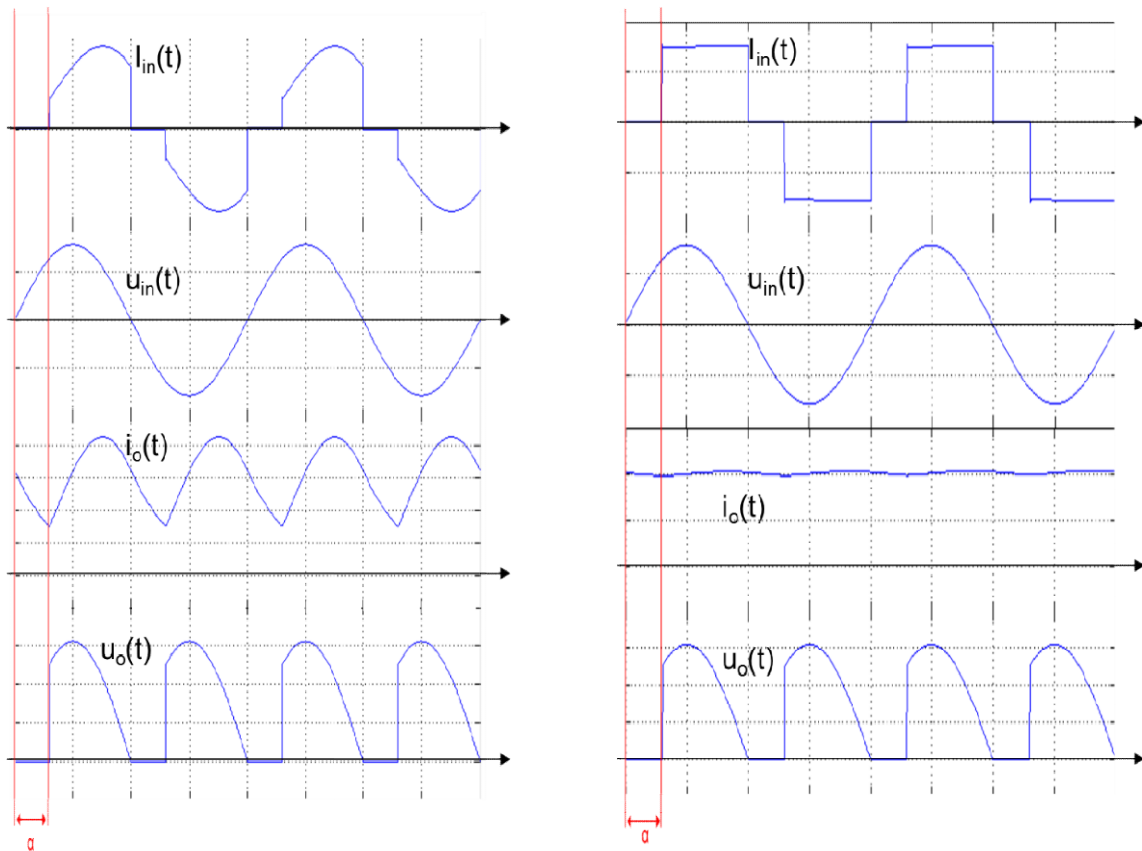
Στην περίπτωση κατά την οποία αντικαταστήσουμε δύο θυρίστορ με δύο διόδους, ή προσθέσουμε μια δίοδο ελεύθερης διέλευσης στο κύκλωμα, τότε προκύπτει η μονοφασική ημιελεγχόμενη ανορθωτική γέφυρα (Σχ. 4.10)



Σχήμα 4.10: Μονοφασικός ημιελεγχόμενος ανορθωτής

#### 4.3.2.1 Ωμικό – Επαγωγικό φορτίο

Η ύπαρξη της/των δίοδου/δίοδων στον ημιελεγχόμενο μετατροπέα δεν επιτρέπει τη ροή ενέργειας προς το δίκτυο, καθώς μετά τη χρονική στιγμή από την οποία η τάση εξόδου μηδενίζεται, στο φορτίο το ρεύμα ρέει μέσα από την/τις δίοδο/δίοδους ως να εκτονωθεί η ενέργεια που είναι αποθηκευμένη στην επαγωγή του φορτίου (Σχ. 4.11α). Αυτό ονομάζεται ελεύθερη διέλευση και με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται μεγαλύτερη εξομάλυνση στο ρεύμα του φορτίου. Για το χρονικό διάστημα που πραγματοποιείται ελεύθερη διέλευση η τάση του φορτίου είναι ίση με μηδέν. Για ακόμη καλύτερη εξομάλυνση του ρεύματος χρησιμοποιούμε και στην περίπτωση αυτή μεγάλο  $L$ , όπως περιγράφηκε και στο κεφάλαιο 4.2.1.2 (Σχ. 4.11β).



Σχήμα 4.11 α) Κυματομορφές τάσης-ρεύματος για ημιελεγχόμενο μετατροπέα με **Λόχι άπειρο**

β) Κυματομορφές τάσης-ρεύματος για ημιελεγχόμενο μετατροπέα με **Λάπειρο**

#### 4.4 Ζητούμενα Άσκησης 4β

**A)** Να εξηγηθούν οι κυματομορφές.

**B)** Πως επηρεάζει η γωνία έναυσης την ενεργό τιμή της τάσης και του ρεύματος φορτίου.

**Γ)** Να κατασκευασθεί η καμπύλη του συντελεστή ισχύος συναρτήσει της γωνίας έναυσης (σε κοινό σύστημα αξόνων για όλα τα φορτία). Εξηγήστε την μορφή της καμπύλης.





**Άσκηση 5: Μονοφασικός Μετατροπέας  
DC/AC (Μονοφασικός Αντιστροφέας)**

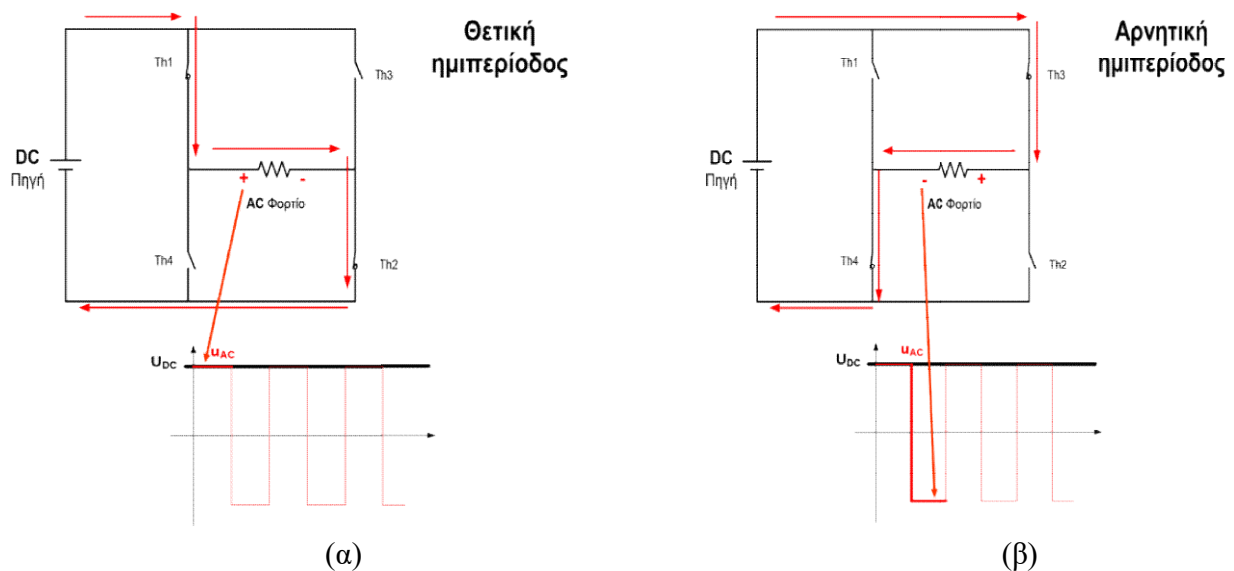


## Άσκηση 5α:

### 5.1 Εισαγωγή

Ο Ηλεκτρονικός Μετατροπέας Ισχύος ο οποίος μετατρέπει την συνεχή τάση σε εναλλασσόμενη ονομάζεται Ηλεκτρονικός Αντιστροφέας Ισχύος. Τέτοιοι μετατροπείς χρησιμοποιούνται σε πλήθος εφαρμογών όπως: στα ηλεκτροκίνητα μέσα μεταφοράς, στη βιομηχανία (κυρίως για τον έλεγχο στροφών ασύγχρονων κινητήρων βραχυκυκλωμένου δρομέα), στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (στην τροφοδοσία AC φορτίων αλλά και στη διασύνδεση τους με το δίκτυο), αλλά και σε οικιακές εφαρμογές (όπως τα κλιματιστικά). Στην είσοδό τους τροφοδοτούνται, είτε απευθείας από μία πηγή συνεχούς ρεύματος, είτε από κάποια ανορθωτική διάταξη. Οι αντιστροφείς συνήθως είναι τριφασικοί ή μονοφασικοί. Υπάρχουν πολλά είδη αντιστροφέων που διαφέρουν ανάλογα με την τοπολογία τους. Εμείς θα εξετάσουμε τρία είδη αντιστροφέα: α) με θυρίστορ και εξαναγκασμένη οδήγηση, β) με θυρίστορ και οδήγηση φορτίου και γ) με IGBT και έλεγχο του λόγου κατάτμησης και της συχνότητας (έλεγχο V/f).

Η αρχή λειτουργίας του μονοφασικού αντιστροφέα παρουσιάζεται παρακάτω. Αρχικά άγουν οι διακόπτες Th1 και Th2 και εφαρμόζεται η τάση της πηγής στο φορτίο εφαρμόζοντας θετική τάση στο φορτίο (σχ. 5.1α).



Σχήμα 5.1: Αποτύπωση της λειτουργίας ενός μονοφασικού αντιστροφέα

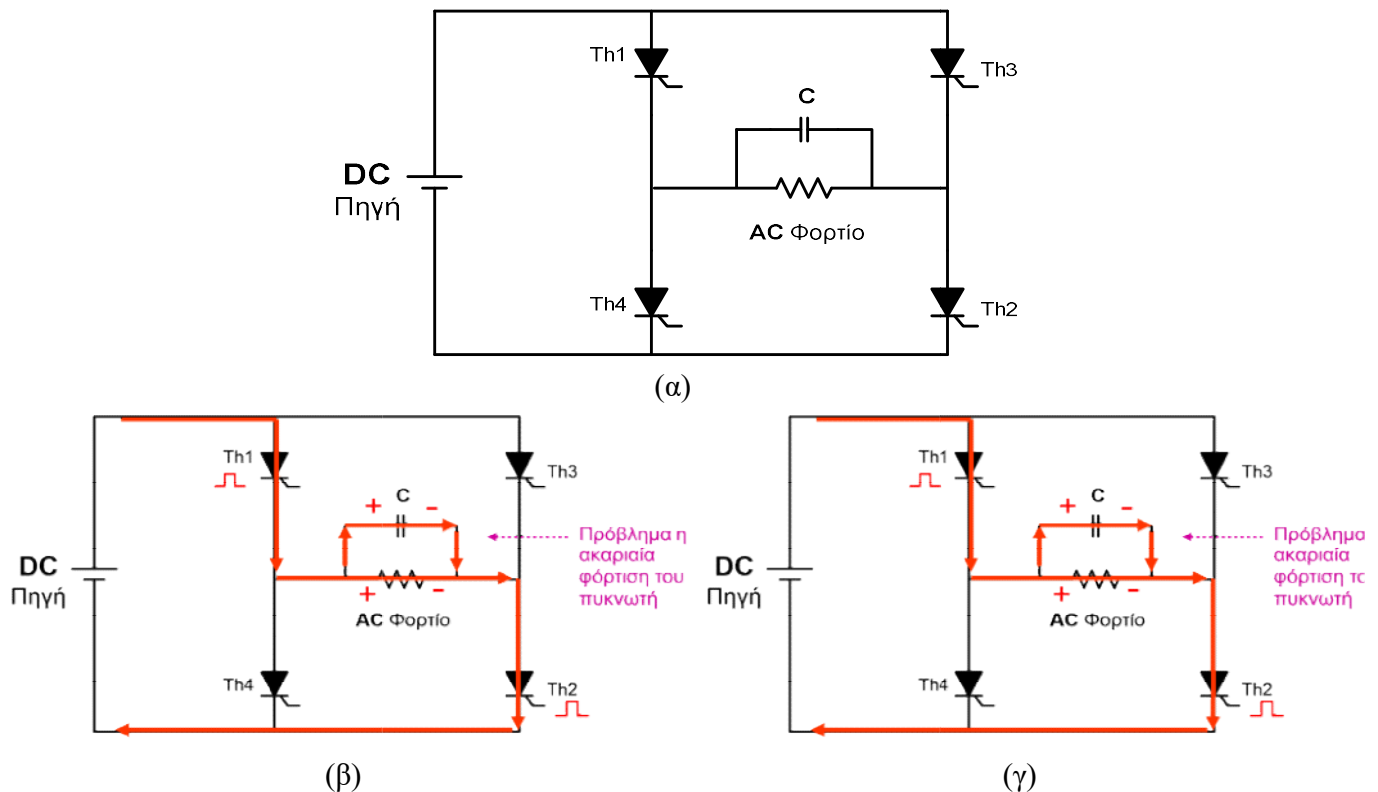
Ύστερα σβήνουν τα δύο πρώτα στοιχεία και ανάβουν τα άλλα δύο (Th3 και Th4) εφαρμόζοντας ανάστροφη τάση στο φορτίο (σχ. 5.1β). Αν αυτό πραγματοποιηθεί περιοδικά,

τότε λαμβάνουμε μία AC τάση τετραγωνικής μορφής. Αν οι διακόπτες αντικατασταθούν από θυρίστορ τότε, σε κάθε περίοδο πρέπει να αναζητηθεί τρόπος να σβήσουν. Στη μία περίπτωση (αντιστροφέας με εξαναγκασμένη οδήγηση) οι διακόπτες εξαναγκάζονται να σβήσουν από μία επιπλέον τάση (όπως στην άσκηση 3<sup>α</sup>), ενώ στην άλλη οι διακόπτες σβήνουν λόγω του μηδενισμού του ρεύματος του φορτίου (αντιστροφέας με οδήγηση φορτίου).

## 1 Μονοφασικός Αντιστροφέας με εξαναγκασμένη οδήγηση

### 5.2 Αρχή λειτουργίας

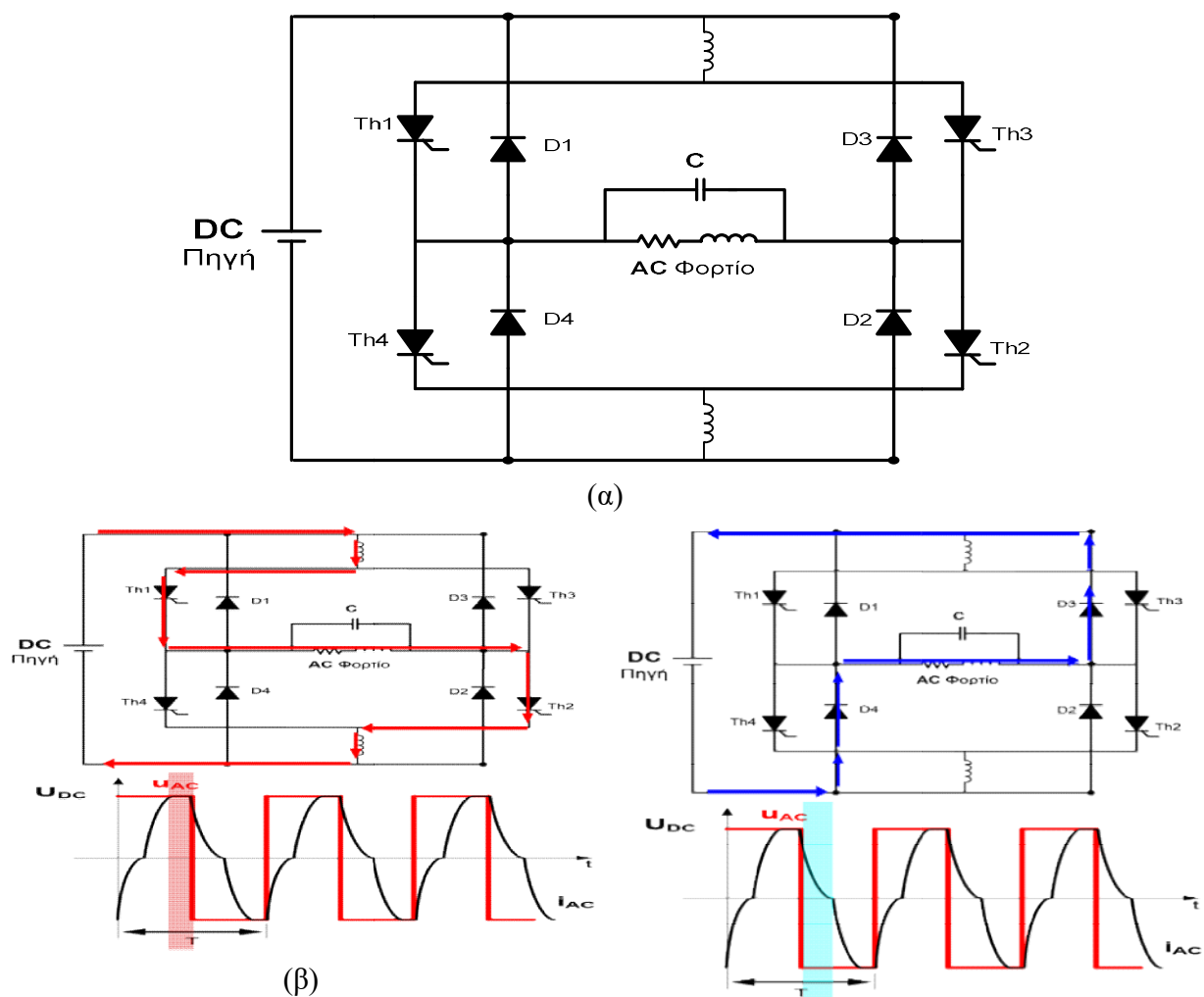
Αν στο σχήμα 5.1 οι διακόπτες αντικατασταθούν από θυρίστορ τότε, παλμοδοτώντας π.χ. τα θυρίστορ Th1 και Th2 εφαρμόζεται στο φορτίο θετική τάση. Όμως, αυτά τα θυρίστορ δεν πρόκειται να σβήσουν ποτέ από μόνα τους. Έτσι, εμείς πρέπει να βρούμε τρόπο να σβήσουν αυτά τα δύο (όπως στην άσκηση 3<sup>α</sup>) και ύστερα να τεθούν σε αγωγή τα άλλα δύο. Για το λόγο αυτό τοποθετείται ένας πυκνωτής παράλληλα στο φορτίο (σχ.5.2).



**Σχήμα 5.2:** Λειτουργία του αντιστροφέα με εξαναγκασμένη οδήγηση. (α) Τοπολογία, (β) θετική τάση φορτίου και (γ) αρνητική τάση φορτίου

Όταν παλμοδοτήσουμε τα thyristor 1 και 2 στο φορτίο εφαρμόζεται θετική τάση και ο πυκνωτής φορτίζεται όπως στο σχήμα 5.2β. Όταν φορτιστεί ο πυκνωτής σταματάει να διαρρέεται από ρεύμα και έτσι μέσα από τα thyristor περνάει το ρεύμα προς το φορτίο και ο πυκνωτής παραμένει φορτισμένος (όπως στο σχήμα 5.2β). Όταν δοθεί παλμός στα thyristor 3 και 4 τότε στα 1 και 2 εφαρμόζεται ανάστροφα η τάση του πυκνωτή. Με τον τρόπο αυτό σβήνουν τα 1 και 2 και τίθενται σε αγωγή τα 3 και 4.

Κατά την μετάβαση από το ένα ζεύγος thyristor στο άλλο στιγμιαία πραγματοποιείται βραχυκύκλωμα πηγής. Για να αποφευχθεί αυτό τοποθετούμε επαγωγές στα άκρα των thyristor (σχ. 5.3α). Όταν η τάση και το ρεύμα φορτίου είναι θετικά τότε η ροή τους παρουσιάζεται στο σχήμα 5.3β. Επίσης τοποθετούνται δίοδοι (αντιπαράλληλα στο ζεύγος επαγωγής - thyristor) ώστε να μπορεί να επιστρέφει το ρεύμα (άρα και η ισχύς) προς την πηγή, όταν υπάρχει αποθήκευση ενέργειας π.χ. στην επαγωγή του φορτίου (σχ. 5.3γ).



(γ)

**Σχήμα 5.3:** (α) Κύκλωμα μονοφασικού αντιστροφέα εξαναγκασμένης οδήγησης με θυρίστορ, (β) θετική τάση και ρεύμα φορτίου, (γ) αρνητική τάση και θετικό ρεύμα φορτίου

### 5.3 Ζητούμενα Άσκησης 5α

**A)** Στην άσκηση αυτή να παλμογραφηθούν για διάφορες τιμές της συχνότητας :

- Τάση και ρεύμα φορτίου (για R και R-L)
- Τάση θυρίστορ-Τάση φορτίου
- Τάση διόδου-Τάση θυρίστορ
- Τάση στο πηνίο της DC πλευράς του αντιστροφέα -Τάση στο θυρίστορ

**B)** Να εξηγηθούν οι κυματομορφές.

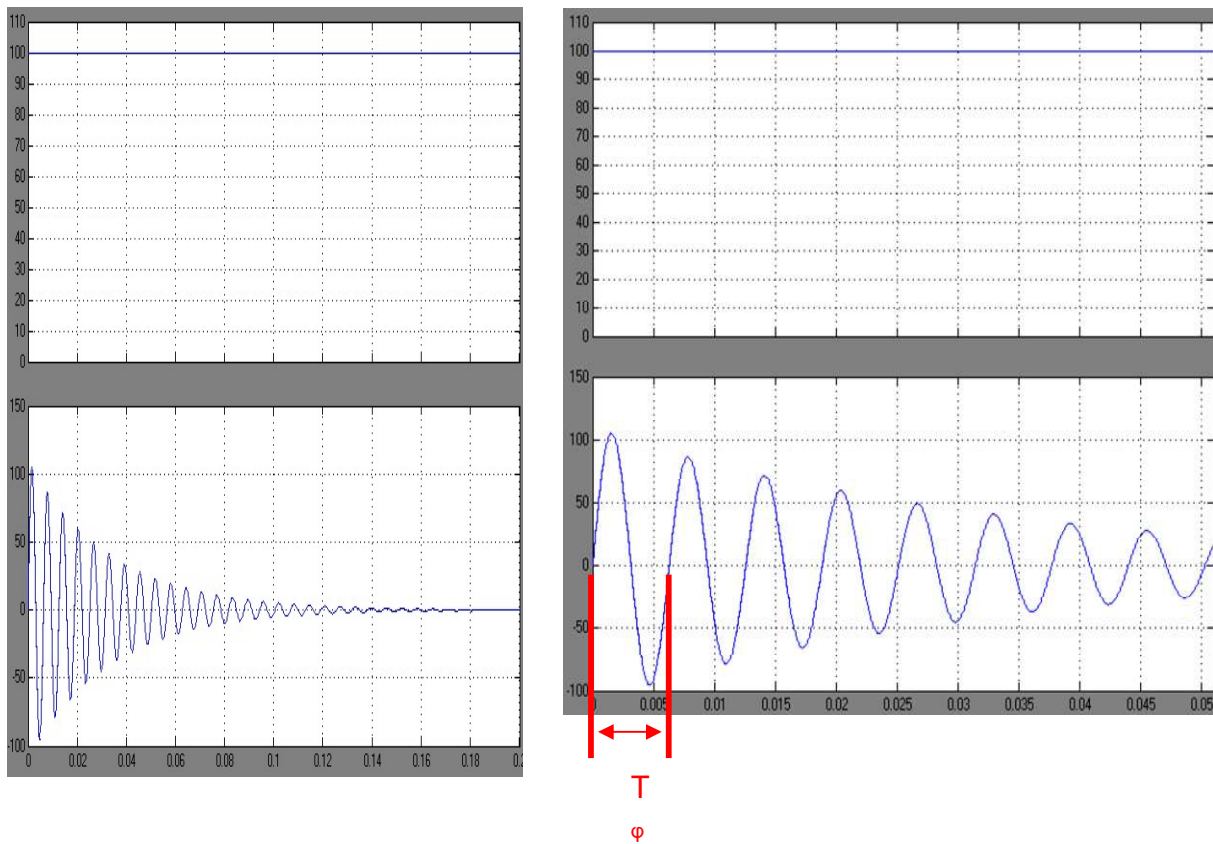
**Γ)** Πως επηρεάζει η επαγωγή το ρεύμα φορτίου.

**Δ)** Από τι εξαρτώνται τα όρια της συχνότητας λειτουργίας του μετατροπέα.

## 2 Μονοφασικός Αντιστροφέας με οδήγηση φορτίου

### 5.4 Αρχή λειτουργίας

Όταν σε ένα R-L-C φορτίο εφαρμοστεί μία DC τάση (π.χ. θετική), τότε το ρεύμα θα ταλαντωθεί με κάποια συχνότητα  $f$  η οποία εξαρτάται από τις τιμές των R-L-C (αυτό το φορτίο είναι ένας ταλαντωτής). Εφ' όσον υπάρχει και ωμική αντίσταση, η ταλάντωση αυτή θα είναι φθίνουσα (σχ. 5.4). Στο σχήμα 5.4 η περίοδος αυτής της ταλάντωσης συμβολίζεται  $T$  και είναι η περίοδος του ρεύματος του R-L-C φορτίου.



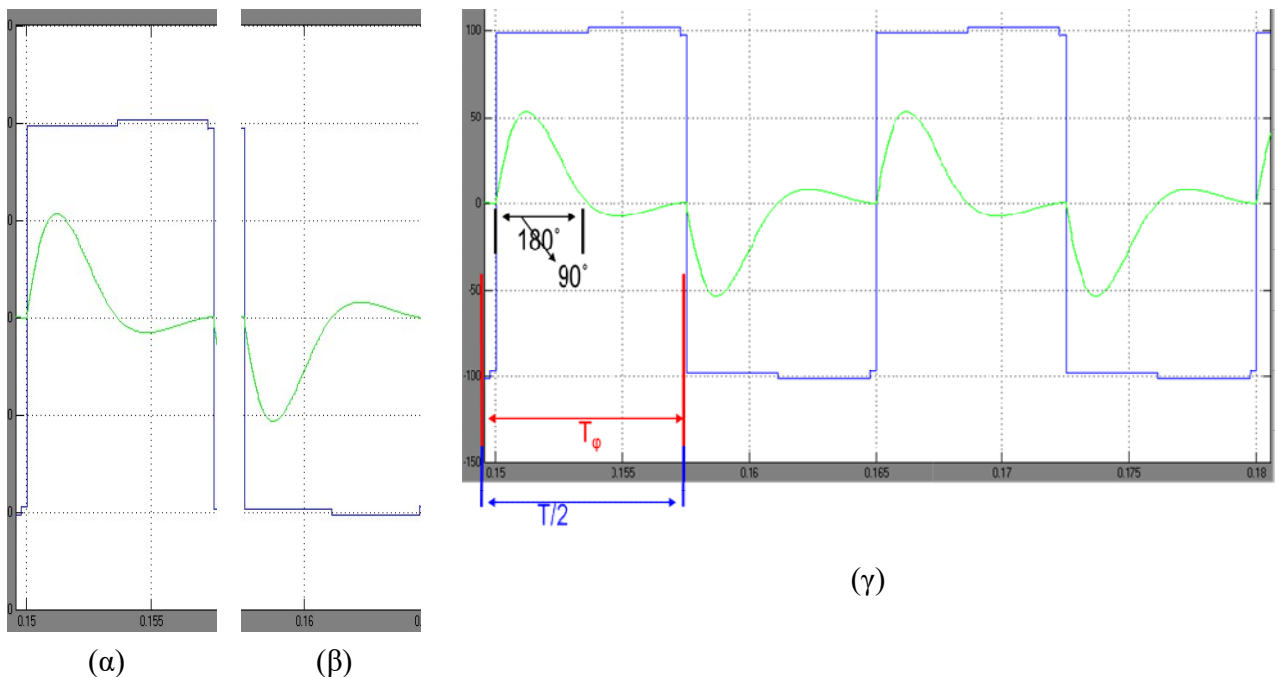
Σχήμα 5.4: R-L-C ταλάντωση

Αν εφαρμοστεί η τάση της DC πηγής ορθά τότε όπως δείξαμε θα υπάρξει ταλάντωση του ρεύματος όπως φαίνεται στο σχήμα 5.5α. Αν εφαρμοστεί η τάση της DC πηγής ανάστροφα τότε θα υπάρξει ταλάντωση του ρεύματος όπως φαίνεται στο σχήμα 5.5β. Έτσι, στο φορτίο η τάση και το ρεύμα θα έχουν κυματομορφές όπως φαίνεται στο σχήμα 5.5γ.

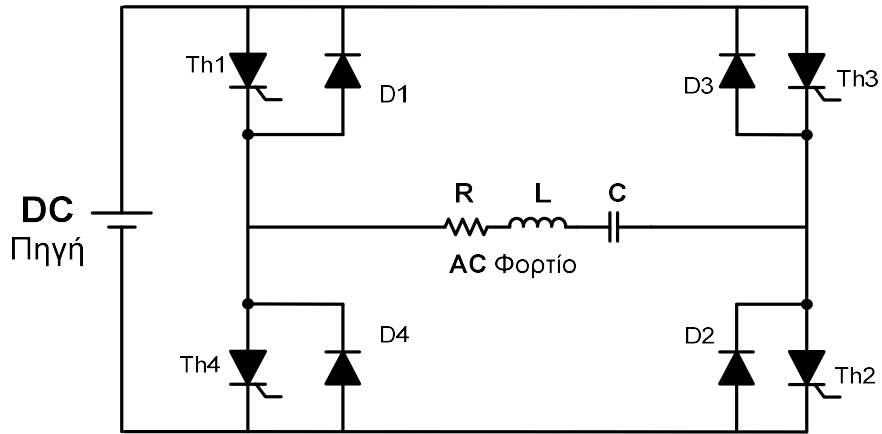
Στο σχήμα αυτό ( Σχ. 5.5γ) εμφανίζονται δύο διαφορετικές και ανεξάρτητες περιόδους. Η πρώτη είναι η περίοδος της τάσης  $T$ , η οποία εξαρτάται αποκλειστικά από τη συχνότητα



λειτουργίας των θυρίστορ, και η περίοδος του ρεύματος (φορτίου)  $T_\phi$ , η οποία είναι ΣΤΑΘΕΡΗ για συγκεκριμένο φορτίο και είναι ίδια με την περίοδο του ταλαντωτή. Ως γωνία « $\gamma$ » ορίζουμε τη γωνία από το σημείο που έχουμε αρνητικό ρεύμα μέχρι το σημείο όπου εμφανίζεται αρνητική τάση. Ο υπολογισμός της γωνίας αυτής είναι σχετικά πολύπλοκος, για το λόγο αυτό χρησιμοποιούμε το εξής «τρικ». Εφόσον η περίοδος του φορτίου είναι σταθερή, ρυθμίζουμε τη συχνότητα παλμοδότησης των θυρίστορ έτσι ώστε η  $T=2 \cdot T_\phi$ . Με αυτόν τον τρόπο οι  $180^\circ$  του ταλαντωτή θα αντιστοιχούν σε  $90^\circ$  της τάσης (Σχ. 5.5γ). Επομένως γνωρίζοντας το time/division του παλμογράφου μπορούμε να καθορίσουμε τη γωνία σε μοίρες για κάθε τετραγωνάκι του παλμογράφου. Στη συνέχεια μετρώντας τα τετραγωνάκια από το σημείο εμφάνισης του αρνητικού ρεύματος μέχρι την εμφάνιση της αρνητικής τάσης υπολογίζουμε τη γωνία « $\gamma$ ». Έτσι, στο παράδειγμα του σχήματος 5.5 η γωνία " $\gamma$ " (όπως ονομάζεται) ισούται με την καθυστέρηση της εφαρμογής του αρνητικού μέρους της τάσης συγκριτικά με την εφαρμογή του αρνητικού μέρους του ρεύματος. Δηλαδή, η γωνία " $\gamma$ " ισούται με  $90^\circ$ . Όταν το ρεύμα γίνεται αντίστροφο της τάσης, τότε η ροή του πραγματοποιείται μέσα από τις διόδους ελεύθερης διέλευσης. Σε σύγκριση με το μετατροπέα της 5α άσκησης δεν είναι πλέον απαραίτητες οι επαγωγές στην DC πλευρά και ο πυκνωτής παράλληλα. Έτσι, η τοπολογία γίνεται όπως φαίνεται στο σχήμα 5.6. Στο σχήμα 5.7 παρουσιάζονται κάποια παραδείγματα για τον καθορισμό της γωνίας  $\gamma$  για την μεταβολή της συχνότητας.

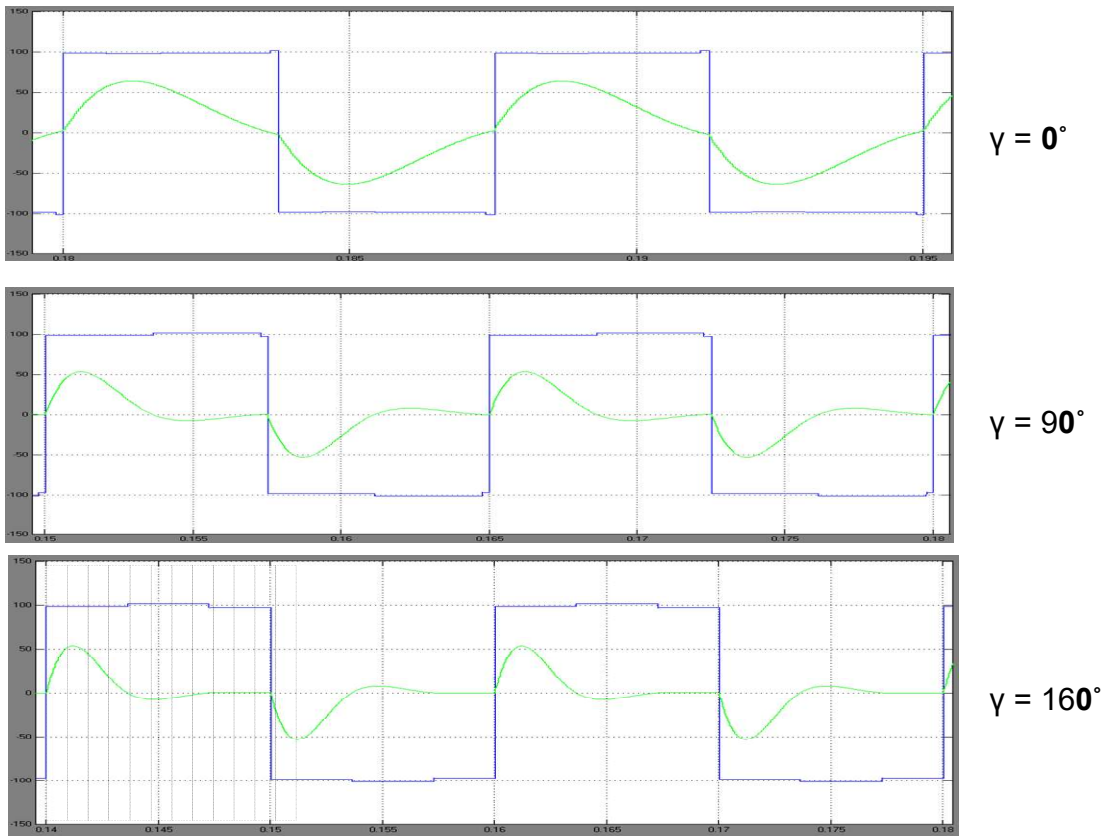


**Σχήμα 5.5:** Εξήγηση της λειτουργίας του αντιστροφέα οδήγησης φορτίου. (α) θετική φόρτιση, (β) αρνητική φόρτιση, (γ) Τάση και ρεύμα φορτίου.



(α)

Σχήμα 5.6: Κύκλωμα μονοφασικού αντιστροφέα οδήγησης φορτίου, με θυρίστορ



Σχήμα 5.7: Τάση και ρεύμα φορτίου μονοφασικού αντιστροφέα οδήγησης φορτίου για διαφορετικές τιμές της γωνίας  $\gamma$

### 5.5 Ζητούμενα Άσκησης 5β

**A)** Στην άσκηση αυτή:

- Να μετρηθούν και να παλμογραφηθούν η τάση και το ρεύμα του φορτίου για διαφορετική γωνία  $\gamma$
- Να παλμογραφηθούν η τάση και το ρεύμα στο φορτίο για διαφορετικές τιμές  $L$  και  $C$
- Να παλμογραφηθούν η τάση στο θυρίστορ και του ρεύμα στο φορτίο για διαφορετικές τιμές  $L$  και  $C$ .

**B)** Να εξηγηθούν οι κυματομορφές.

**Γ)** Πως επηρεάζει η επαγωγή το ρεύμα φορτίου και επίσης από τι εξαρτώνται τα όρια της συχνότητας λειτουργίας του μετατροπέα.

## Άσκηση 5β: Αντιστροφείς εξαναγκασμένης οδήγησης με παλμοδότηση PWM και sPWM

### 5.6 Εισαγωγή: Αντιστροφείς εξαναγκασμένης οδήγησης με παλμοδότηση PWM και sPWM

Οι αντιστροφείς που λειτουργούν σε χαμηλή συχνότητα (π.χ. τα ημιαγωγικά τους στοιχεία ανάβουν και σβήνουν μία φορά κάθε περίοδο της τάσης εξόδου) εξάγουν, συνήθως, κακή ποιότητα ρεύματος και τάσης με αποτέλεσμα να επιδρούν αρνητικά στα ηλεκτρομηχανικά μεγέθη των καταναλωτών ή του δικτύου (στην περίπτωση που ο αντιστροφέας τροφοδοτεί το δίκτυο με ισχύ). Στην προσπάθεια για βελτίωση της ποιότητας του ρεύματος εξόδου στους αντιστροφείς χαμηλής συχνότητας χρησιμοποιούνται τεράστια και ακριβά φίλτρα τα οποία πολλές φορές δημιουργούσαν νέα προβλήματα (ταλαντώσεις, υποαρμονικές, αύξηση απωλειών κ.α.).

Στις σύγχρονες εφαρμογές είναι αναγκαία η δυνατότητα μεταβολής της τάσης αλλά και της συχνότητας εξόδου του αντιστροφέα και μάλιστα ανεξάρτητα. Ένα κλασικό παράδειγμα είναι ο έλεγχος τάσης-συχνότητας (V/f) ασύγχρονης μηχανής βραχυκυκλωμένου δρομέα. Αυτό είναι αδύνατο να πραγματοποιηθεί με τους αντιστροφείς χαμηλής συχνότητας.

Για τους παραπάνω λόγους (ποιότητα τάσης-ρεύματος και έλεγχος V/f) δημιουργήθηκαν οι αντιστροφείς υψηλής συχνότητας. Σε αυτούς τα ημιαγωγικά στοιχεία αναβοσβήνουν πολλές φορές σε μια περίοδο της τάσης φορτίου (ή δικτύου). Τέτοιοι αντιστροφείς μπορούν να υλοποιηθούν σήμερα, καθώς κατασκευάστηκαν ημιαγωγικά στοιχεία ισχύος εξαναγκασμένης σβέσης που λειτουργούν σε υψηλή διακοπτική συχνότητα (π.χ. IGBT, MOSFET κ.α.). Για την παλμοδότηση των ημιαγωγικών στοιχείων των αντιστροφέων αυτών χρησιμοποιούνται διάφορες τεχνικές παλμοδότησης. Οι επικρατέστερες αυτών είναι η PWM, η sPWM και η HCC.

PWM – PulseWidthModulation (διαμόρφωση εύρους παλμών).

sPWM- sinusoidalPulseWidthModulation (ημιτονοειδή διαμόρφωση εύρους παλμών).

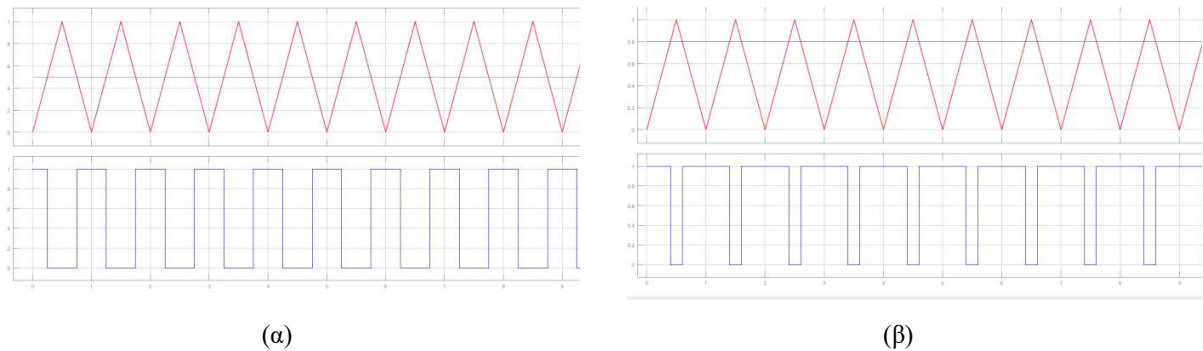
HCC – Hysteresis Current Control (έλεγχος βρόχου στήρησης).

Φυσικά υπάρχουν πολλές ακόμη τεχνικές παλμοδότησης ευρέως χρησιμοποιούμενες ανάλογα με την εφαρμογή. Όμως οι τρεις προαναφερόμενες είναι χαρακτηριστικές τεχνικές πάνω στις οποίες βασίζονται πολλές από τις υπόλοιπες που δεν αναφέρονται εδώ. Στην παρούσα διάλεξη θα αναλυθούν κυρίως οι δύο πρώτες.

### 5.7 Τεχνική παλμοδότησης PWM – PulseWidthModulation (διαμόρφωση εύρους παλμών).

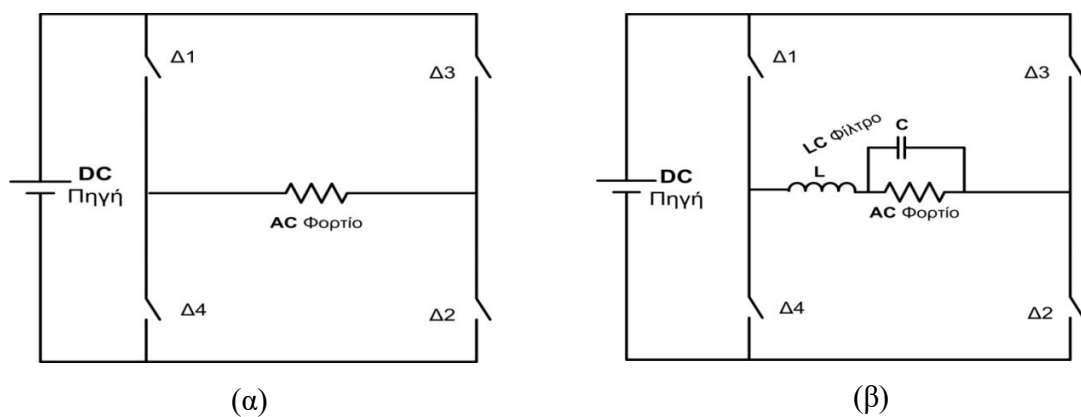
Σ' αυτή την παλμοδότηση οι παλμοί λαμβάνονται από τη σύγκριση ενός τριγωνικού σήματος κάποιας συχνότητας με ένα DC σήμα (σχήμα 5.8). Από τη σύγκριση αυτή λαμβάνονται παλμοί

σταθερού πλάτους και συχνότητας ίσης με του τριγωνικού σήματος. Το πλάτος του DC σήματος μεταβάλλεται από μηδέν ως το πλάτος του τριγωνικού σήματος αυξομειώνοντας το πλάτος των παλμών.

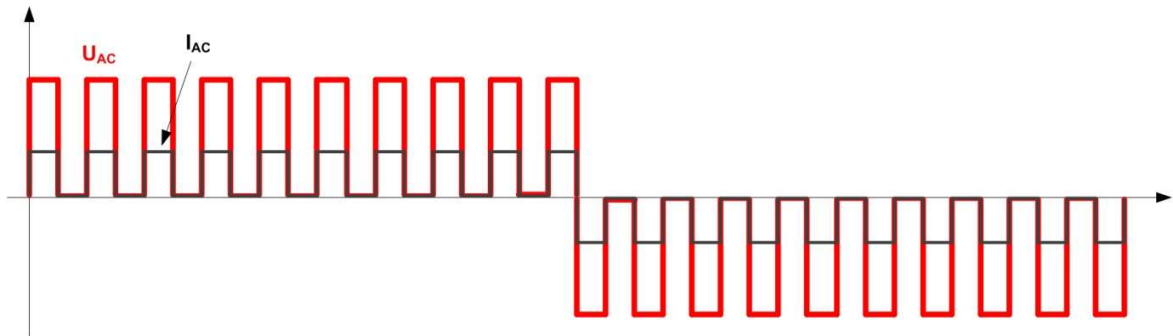


**Σχήμα 5.8:** Δημιουργία παλμών στην PWM για DC συνιστώσα α) 0,5 και β) 0,8.

Από αυτούς τους παλμούς οι μισοί παλμοδοτούν το ένα ζεύγος της γέφυρας του μονοφασικού αντιστροφέα (σχήμα 5.9/  $\Delta 1$  και  $\Delta 2$ ), ενώ οι υπόλοιποι παλμοδοτούν το άλλο ζεύγος (σχήμα 5.9/  $\Delta 3$  και  $\Delta 4$ ). Έτσι, η τάση και το ρεύμα του φορτίου θα έχουν τις κυματομορφές του σχήματος 5.10. Αν το πλάτος των παλμών αυξηθεί, αυξάνεται και η τάση του φορτίου (αφού αυξάνεται το εμβαδόν), ενώ αν αυξηθεί ο αριθμός των παλμών που άγει το κάθε ζεύγος (π.χ. σχ.5.9  $\Delta 1 - \Delta 2$  ή  $\Delta 3 - \Delta 4$ ) αυξάνεται η περίοδος της τάσης του φορτίου (μειώνεται η συχνότητα  $f$ ).

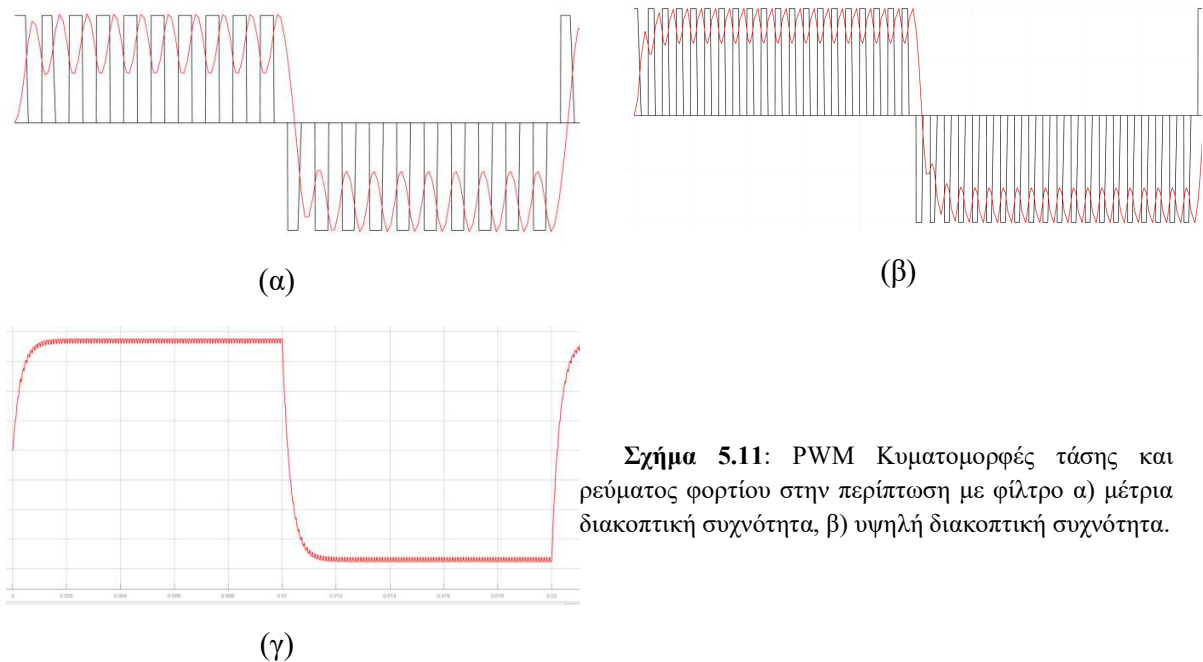


**Σχήμα 5.9:** Μονοφασικός αντιστροφέας τύπου γέφυρας α) χωρίς φίλτρο, β) με φίλτρο.



Σχήμα 5.10: PWM Κυματομορφές τάσης και ρεύματος φορτίου στην περίπτωση χωρίς φίλτρο.

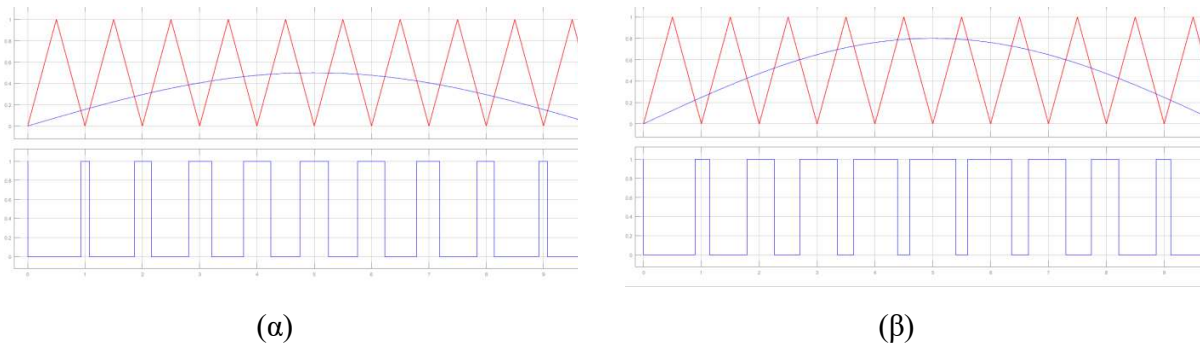
Αν στην έξοδο του αντιστροφέα τοποθετηθεί ένα απλό και σχετικά μικρό φίλτρο σχ.5.9.β (π.χ. L-Σκατωδιαβατό) τότε, η κυματομορφή του ρεύματος βελτιώνεται σχ.5.11. Όσο αυξάνεται η διακοπτική συχνότητα των παλμών σχ.5.11 ή όσο αυξάνεται το μέγεθος του φίλτρου τόσο βελτιώνεται και η κυματομορφή του ρεύματος. Έτσι, μπορούμε να αποκτήσουμε ποιοτική κυματομορφή και συγχρόνως να μεταβάλλουμε την τάση και τη συχνότητα φορτίου.



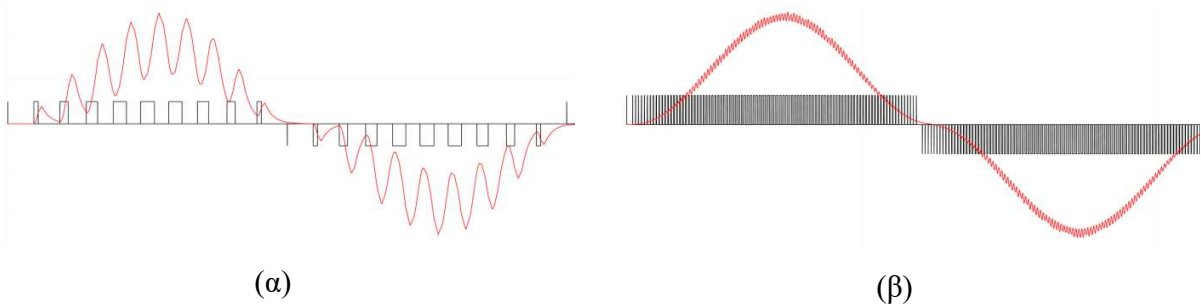
Σχήμα 5.11: PWM Κυματομορφές τάσης και ρεύματος φορτίου στην περίπτωση με φίλτρο α) μέτρια διακοπτική συχνότητα, β) υψηλή διακοπτική συχνότητα.

## 5.8 Τεχνική παλμοδότησης sPWM – sinusoidalPulseWidthModulation (ημιτονοειδής διαμόρφωση εύρους παλμών).

Σ' αυτή την τεχνική παλμοδότησης οι παλμοί λαμβάνονται όπως στην PWM μόνο που το DC σήμα αναφοράς αντικαθιστάται από ένα ανορθωμένο ημίτονο σχ.5.12. Από τη σύγκριση του τριγωνικού σήματος με το ημιτονοειδές λαμβάνονται παλμοί μεταβαλλόμενου πλάτους μέσα στην ημιπερίοδο (ημιπερίοδο ονομάζουμε το ένα μέρος του ανορθωμένου ημιτόνου 'το ένα βουνό'). Ο παλμός μέγιστου πλάτους εμφανίζεται στο μέσο της ημιπεριόδου ενώ στα άκρα εμφανίζονται οι παλμοί ελάχιστου πλάτους. Έτσι, αν υπάρχει φίλτρο στην έξοδο του αντιστροφέα το ρεύμα λαμβάνει σχεδόν ημιτονοειδή μορφή σχ.5.13. Συγκρίνοντας το σχ. 5.11 με το σχ.5.13 καταλαβαίνουμε ότι η sPWM υπερτερεί της απλής PWM.



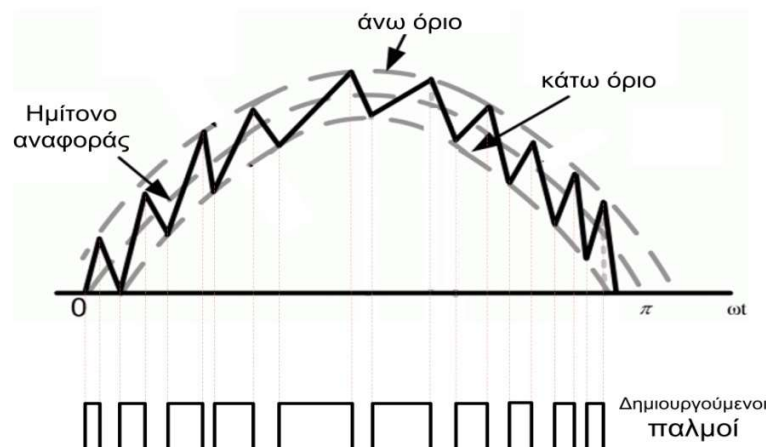
**Σχήμα 5.12:** Δημιουργία παλμών στην sPWM για πλάτος ανορθωμένου ημιτόνου α) 0,5 και β) 0,8.



**Σχήμα 5.13:** sPWM Κυματομορφές τάσης και ρεύματος φορτίου στην περίπτωση με φίλτρο για διακοπτική συχνότητα α) 1kHz και β) 10kHz.

## 5.9 Τεχνική παλμοδότησης HCC – Hysteresis Current Control (έλεγχος βρόχου υστέρησης).

Σε αυτή την τεχνική παλμοδότησης λαμβάνονται ανώτερο και κατώτερο όριο ημιτονοειδούς μορφής και επιβάλλεται στο κατώτερο να ανάψει ο αντιστροφέας ενώ στο κατώτερο να σβήσει σχ.5.14.



Σχήμα 5.14: Σχηματική απεικόνιση της τεχνικής παλμοδότησης HCC.

## 5.10 Διεκπεραίωση άσκησης

Στο εργαστήριο εξετάζεται η λειτουργία του μονοφασικού αντιστροφέα τύπου γέφυρας σχ.5.9 με ημιαγωγικά στοιχεία IGBT χρησιμοποιούμενα ως διακόπτες. Εξετάζεται η λειτουργία χωρίς και με φίλτρο L-C. Το πηνίο και ο πυκνωτής είναι τοποθετημένα μέσα στο «κουτί» του αντιστροφέα και μπορούν να συνδεθούν στη έξοδο της γέφυρας (πρώτα η επαγωγή και ύστερα παράλληλα με το φορτίο ο πυκνωτής). Στην περίπτωση που είναι συνδεδεμένο το φίλτρο η τάση και το ρεύμα παλμογραφούνται στη μεριά του φορτίου (μετά το φίλτρο).

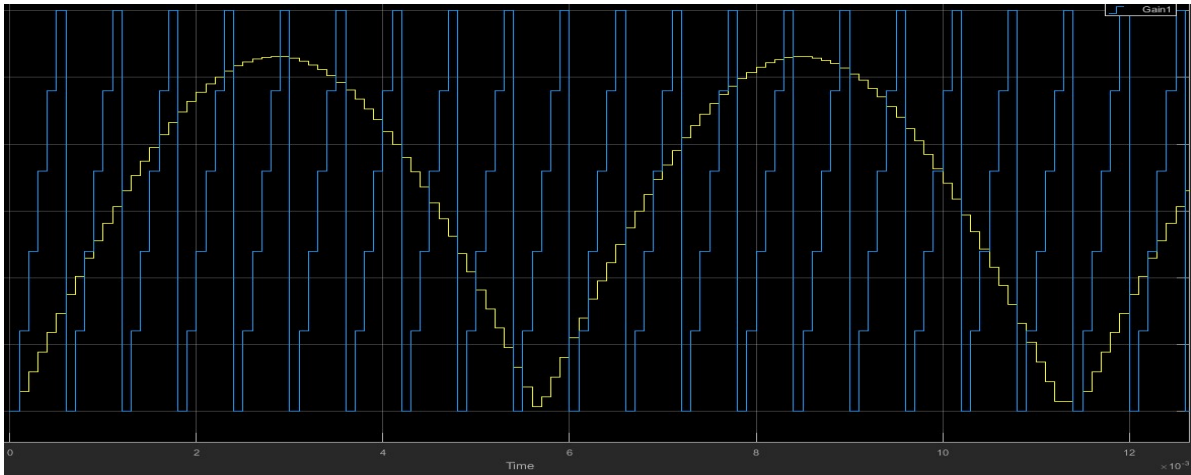
Η τεχνική παλμοδότησης που επιλέγεται να χρησιμοποιηθεί είναι η sPWM και οι κυματομορφές είναι παρόμοιες με αυτές των σχημάτων 5.10 και 5.13. Η διαφορά τους οφείλεται στις περιορισμένες δυνατότητες του φτηνού επεξεργαστή ArduinoDue, ο οποίος χρησιμοποιείται για τη δημιουργία των παλμών των IGBT του αντιστροφέα.

Για την κατανόηση των ατελειών του εργαστηριακού αντιστροφέα εξηγείται περιληπτικά το πρόγραμμα για τη δημιουργία των παλμών. Ο επεξεργαστής λαμβάνει στην αναλογική του είσοδο (A/D) ως σήμα αναφοράς μία DC τάση η οποία μεταβάλλεται από ένα ποτενσιόμετρο (αυτό του κουτιού του αντιστροφέα) από 0-3V. Αυτή η είσοδος μεταφράζεται σε ψηφιακό σήμα λαμβάνοντας τιμές αντίστοιχα από 0-1024. Ο επεξεργαστής δειγματοληπτεί τις τιμές του A/D και ανάλογα μεταβάλλει τη συχνότητα και το πλάτος του ανορθωμένου ημιτόνου. Με τον τρόπο



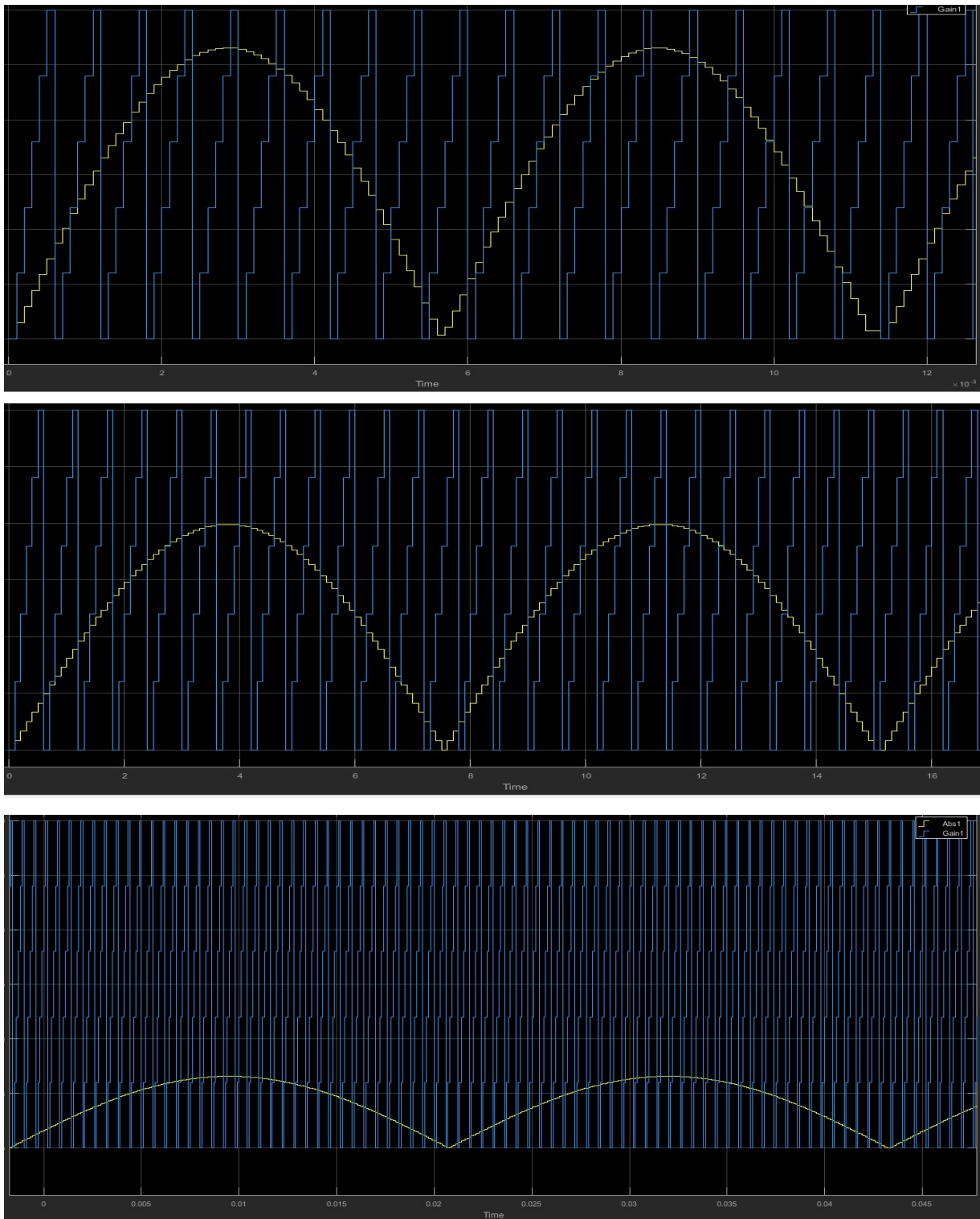
αυτό θα μεταβάλλεται η συχνότητα και το πλάτος της τάσης του αντιστροφέα. Το τριγωνικό σήμα το οποίο συγκρίνεται με το ανορθωμένο ημίτονο (στο πρόγραμμα του επεξεργαστή) δημιουργείται με τη συχνότητα δειγματοληψίας του A/D. Αυτή όμως είναι περιορισμένη στον επεξεργαστή μας, με αποτέλεσμα να κατασκευάζεται ένα τριγωνικό σήμα αναφοράς μικρής συχνότητας και «κακής» διακριτότητας. Δηλαδή, το σήμα αναφοράς δεν είναι τελικά τρίγωνο αλλά έχει μορφή σκαλοπατιών και μάλιστα χαμηλής συχνότητας σχ.5.15 (σκάλα λίγων σκαλοπατιών).

Στην περίπτωση της υψηλής συχνότητας του ημιτόνου (το οποίο δημιουργείται προγραμματιστικά στον επεξεργαστή) η περίοδος είναι μικρή και έτσι περικλείει λίγα τρίγωνα. Δηλαδή λίγα αναβοσβήσιμα ανά περίοδο. Αυτό επηρεάζει αρνητικά την ποιότητα της κυματομορφής του ρεύματος φορτίου.



**Σχήμα 5.15:** Προβληματική δημιουργία «τριγωνικού σήματος» στον arduino.

Η κακή κυματομορφή του τριγωνικού σήματος (σκάλα λίγων σκαλοπατιών όπως την ονομάσαμε) επηρεάζει αρνητικά και την ομαλή μεταβολή της ενεργού τιμής της τάσης εξόδου του μετατροπέα. Δηλαδή καθώς μεταβάλλουμε τη συχνότητα της τάσης η ενεργός τιμή της παραμένει σταθερή, καθώς δεν «αλλάζει σκαλοπάτι» ή ποιο σωστά δε μεταβάλλεται η διάρκεια του παλμού (duty cycle – λόγος κατάτμησης). Αυτό συμβαίνει μέχρι η συχνότητα να λάβει μία συγκεκριμένη τιμή και έτσι να «αλλάξει σκαλοπάτι» σχ.5.16. Στο σχήμα αυτό φαίνονται τα σήματα που συγκρίνονται για τη δημιουργία των παλμών για τρεις διαφορετικές συχνότητες του ημιτονοειδούς σήματος και συνεπώς της τάσης του φορτίου. Όπως φαίνεται και από το σχήμα, το «τριγωνικό» σήμα έχει σταθερή συχνότητα. Μεταβάλλεται γραμμικά η συχνότητα και το πλάτος του ημιτονοειδούς σήματος. Αυτό βέβαια δεν δημιουργεί και γραμμική μεταβολή του λόγου κατάτμησης και της συχνότητας. Άρα δεν είναι και σταθερός ο λόγος V/f.



**Σχήμα 5.16:** Τα σήματα που δημιουργούνται στο πρόγραμμα του επεξεργαστή για τη δημιουργία των παλμών και έτσι έμμεσα τη μεταβολή συχνότητας και τάσης.

Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω γίνεται κατανοητό ότι καθώς στρέφεται το ποτενσιόμετρο μεταβάλλεται η συχνότητα σχετικά ομαλά όμως η τάση μεταβάλλεται κατά βαθμίδες και όχι ομαλά. Άρα όταν σχεδιαστεί η καμπύλη της τάσης συναρτήσει της συχνότητας θα αλλάζει «σε σκαλοπάτια».

Επίσης εμείς δεν κάνουμε έλεγχο  $V/f$ =σταθερό διότι απλά δεν έχουμε έλεγχο (δεν μετράμε ώστε να λαμβάνουμε αποφάσεις). Απλά αλλάζουμε τις τιμές του λόγου κατάτμησης και της συχνότητας προς τα επάνω ή προς τα κάτω. Πρόσθετα θα πρέπει να κατασκευαστεί και η καμπύλη του λόγου  $V/f$  ο οποίος τελικά δε θα είναι σταθερός. Τέλος, η ποιότητα της τάσης και του ρεύματος δεν είναι αρκετά υψηλή (υπάρχουν αρκετά υψηλές ανώτερες αρμονικές) λόγω των χαμηλών δυνατοτήτων του επεξεργαστή που χρησιμοποιείται. Οι εννιά τελευταίες σειρές είναι τα βασικότερα σημεία που πρέπει να αποτυπωθούν στην εργασία για την άσκηση.

## **Άσκηση 6: Τριφασικός Μετατροπέας Έξι Παλμών**



## 6.1 Θεωρία

### 6.1.1 Εισαγωγή

Ο τριφασικός μετατροπέας εξιπαλμών αποτελεί μια σημαντική εφαρμογή των Ηλεκτρονικών Ισχύος, κατά την οποία η ισχύς των τριών φάσεων του δικτύου διοχετεύεται στην καταπόνηση (φορτίο). Με την τεχνική αυτή μπορούμε να επιτύχουμε:

- μεγάλη ισχύ (από τις τρεις φάσεις) των φορτίων.
- πολύ καλή εξομάλυνση.

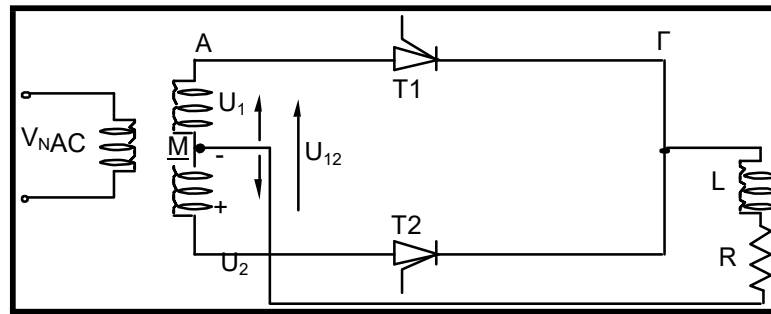
Η αρχή λειτουργίας μπορεί να συνοψιστεί σε δυο περιπτώσεις:

- στον έλεγχο κάθε φάσης με **δύο thyristors** οπότε για τις τρεις φάσεις χρησιμοποιούνται συνολικά έξι thyristors (στην περίπτωση αυτή έχουμε τον πλήρως ελεγχόμενο μετατροπέα).
- στον έλεγχο κάθε φάσης με ένα thyristor (και μια δίοδο που ανορθώνουν μόνο) οπότε για τις τρεις φάσεις χρησιμοποιούνται συνολικά τρία thyristors (στην περίπτωση αυτή έχουμε τον μερικώς ελεγχόμενο μετατροπέα).

Η ισχύς των μετατροπέων που χρησιμοποιούνται μέχρι σήμερα φθάνει σε μερικές δεκάδες MW. Επιπρόσθετα το κύκλωμα μπορεί να περιλαμβάνει (ή να μην περιλαμβάνει) δίοδο ελεύθερης διέλευσης. Οι εφαρμογές ενός τριφασικού μετατροπέα κατατάσσονται σε τρεις κατηγορίες:

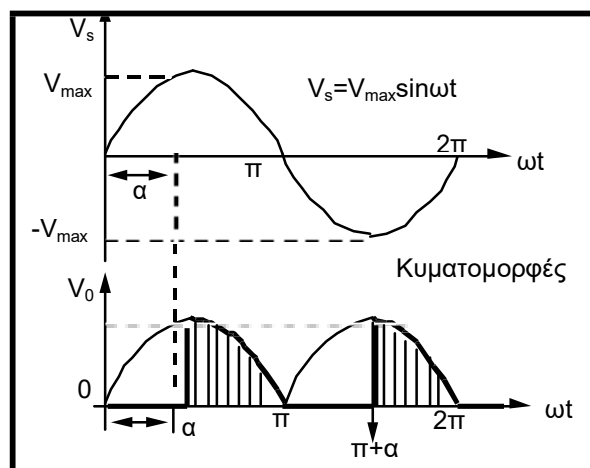
- Παθητικά φορτία: φορτία που αποτελούνται από παθητικά στοιχεία χωρίς πηγές τάσης ή ρεύματος, όπως φωτιστικά ή θερμαντικά σώματα.
- Ηλεκτρικά δίκτυα συνεχούς ρεύματος, π.χ. για φόρτιση συσσωρευτών.
- Ηλεκτρικοί κινητήρες: αποτελούν πηγές τάσης. Εδώ ο μετατροπέας χρησιμοποιείται για την τροφοδοσία κινητήρων συνεχούς ρεύματος με αυτόματο έλεγχο στροφών στην παραγωγή ή στην κίνηση οχημάτων.

Στη μονοφασική τροφοδοσία εναλλασσόμενου, συνήθως τρόπος μετατροπής σε συνεχές είναι η συνδεσμολογία της διπλής ανόρθωσης ή της γέφυρας. Ένα τέτοιο κύκλωμα εξετάστηκε λεπτομερώς στην εφαρμογή του πλήρως ελεγχόμενου μονοφασικού μετατροπέα (με χρήση δυο thyristors) και δίνεται στο σχήμα που ακολουθεί.



**Σχήμα 6.1:** Κύκλωμα πλήρως ελεγχόμενου μονοφασικού μετατροπέα με ωμικό φορτίο

Στην περίπτωση της μονοφασικής τροφοδοσίας, δυο θυρίστορς (ή δυο δίοδοι, όταν  $\alpha = 00$ ) ελέγχουν τη θετική και αρνητική ημιπερίοδο. Παρατηρώντας τις κυματομορφές του μετατροπέα στο επόμενο σχήμα, βλέπουμε ότι η έξοδος δεν είναι καθαρό DC και απαραίτητη προϋπόθεση για να το προσεγγίσουμε σε DC είναι η χρήση πηνίων και πυκνωτών εξομάλυνσης.



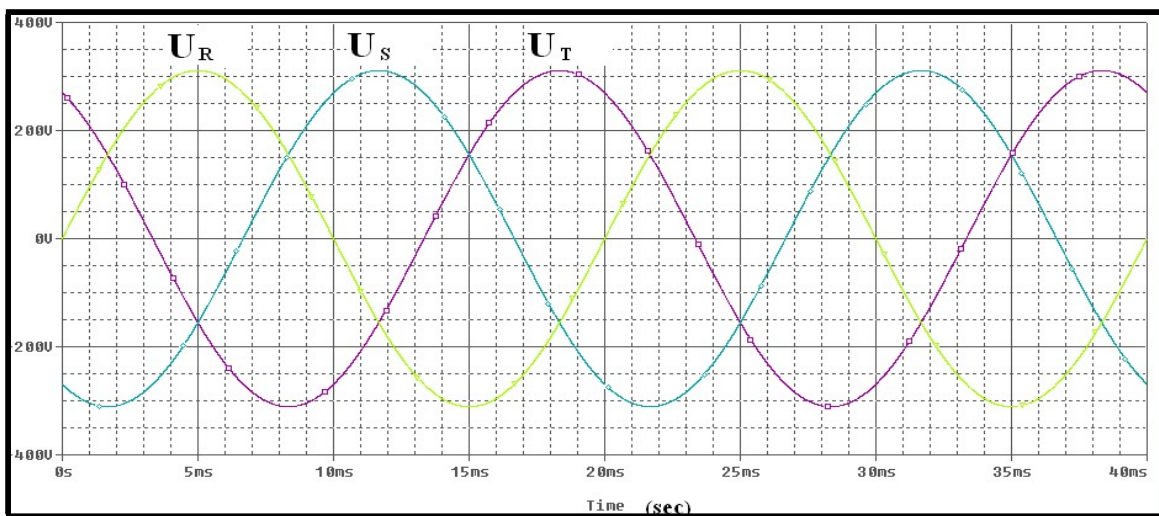
**Σχήμα 6.2:** Κυματομορφές πλήρως ελεγχόμενου μονοφασικού μετατροπέα με ωμικό φορτίο

Θα πρέπει να υπενθυμίσουμε ότι στον πλήρως ελεγχόμενο μετατροπέα μιας φάσης τελικός μας στόχος είναι όχι μόνο να μετατρέψουμε την εναλλασσόμενη τάση του δικτύου σε συνεχή, αλλά ταυτόχρονα να έχουμε κατά το δυνατόν μηδενική κυμάτωση. Ένα σημαντικό μέρος της εξομάλυνσης επιτυγχάνεται από την προσθήκη της διόδου ελεύθερης διέλευσης, η οποία περιορίζει τις περιοχές κενού. Η κυμάτωση μπορεί να περιορισθεί περισσότερο με τη χρήση πηνίων και πυκνωτών εξομάλυνσης. Είναι προφανές ότι καλή εξομάλυνση απαιτεί και μεγάλες τιμές υλικών (π.χ. πηνίου). Στο σημείο αυτό θα πρέπει να τονιστεί ότι για την εξυπηρέτηση του μονοφασικού θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί ένα θυρίστορ, σε αντιστοιχία

της μιας δίοδου για την απλή ανόρθωση. Κατ' αντιστοιχία, στο τριφασικό θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν και τρία θυρίστωρες οπότε θα είχαμε το μετατροπέα τριών παλμών.

### 6.1.2 Τροφοδοσία με τριφασικό

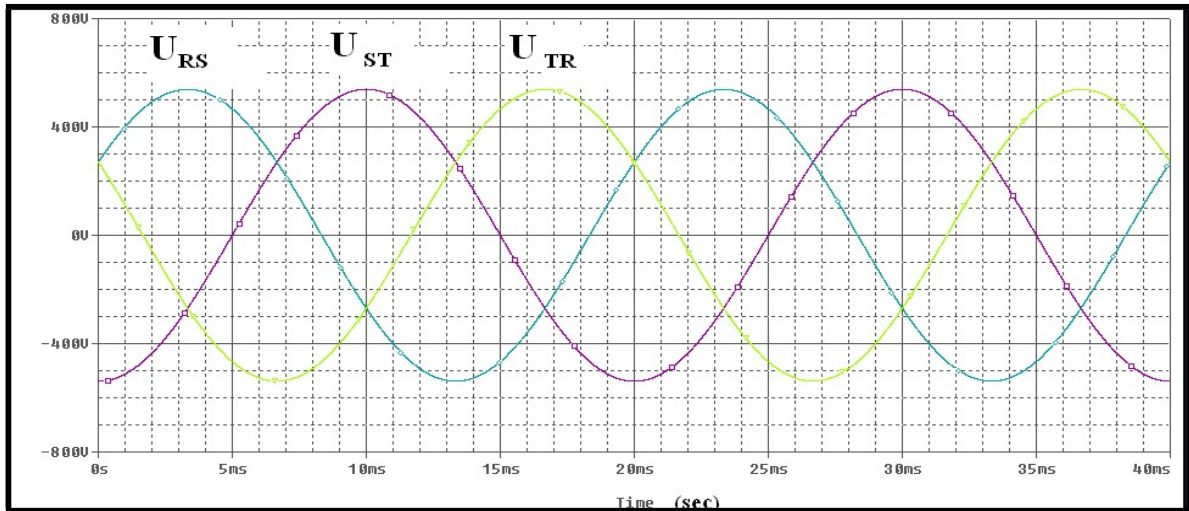
Όταν χρησιμοποιείται τριφασική τροφοδοσία, θα πρέπει να λάβουμε υπόψη τη μορφή των κυματομορφών των τριών φάσεων  $U_R$ ,  $U_S$ ,  $U_T$ , σε σχέση με το κοινό σημείο, όπως φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα, που χαρακτηρίζεται από τη διαφορά γωνίας  $120^\circ$  μεταξύ κάθε φάσης (φασικές κυματομορφές).



**Σχήμα 6.3:** Γραφική αναπαράσταση των τριών φάσεων σε σχέση με το κοινό σημείο (φασικές κυματομορφές)

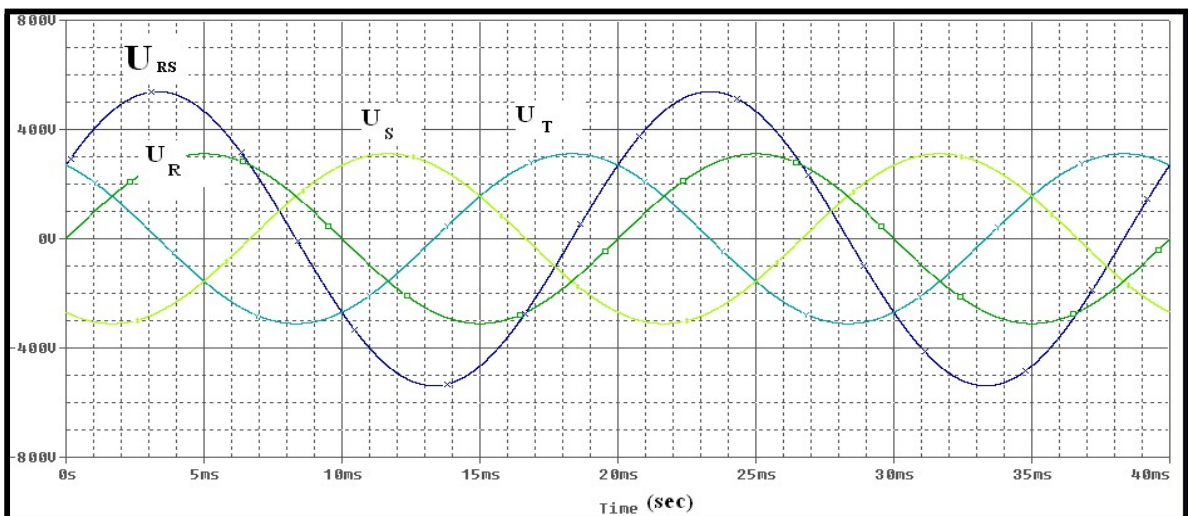
Ο τριφασικός μετατροπέας είναι πιο σύνθετος διότι για να εξυπηρετήσουμε τις τρεις φάσεις χρησιμοποιούμε συνολικά έξι θυρίστωρες. Επειδή δεν χρησιμοποιείται η γείωση (μηδενικός αγωγός), ο μετατροπέας θα μπορούσε να συνδεθεί και απ' ευθείας με το δίκτυο, χωρίς τη μεσολάβηση μετασχηματιστή. Όμως, στην πράξη, η συνδεσμολογία του μετασχηματιστή είναι απαραίτητη αφού εξασφαλίζει απομόνωση μεταξύ πρωτεύοντος και δευτερεύοντος, ώστε να έχουμε διαχωρισμό του δυναμικού των κυκλωμάτων του μετατροπέα από το δίκτυο, με αποτέλεσμα να έχουμε εξομάλυνση των ταλαντώσεων που προέρχονται από το μετατροπέα. Εάν δεν κάναμε χρήση του μετασχηματιστή, οι ταλαντώσεις αυτές θα περνούσαν στο δίκτυο. Από την άλλη πλευρά, εξ αιτίας των μη ημιτονοειδών παραμορφώσεων στα ρεύματα του δευτερεύοντος που δημιουργεί ο μετασχηματιστής (κορεσμός), η χρήση του συνεπάγεται επιπλέον απώλειες. Έτσι, όταν χρησιμοποιείται μετασχηματιστής, η ονομαστική ισχύς που μπορούμε να πάρουμε από τον μετατροπέα μικραίνει. Οι κυματομορφές διαφοράς δυναμικού στο δευτερεύον του μετασχηματιστή μεταξύ των τριών φάσεων (πολικές κυματομορφές) επιδεικνύονται στο ακόλουθο σχήμα.





Σχήμα 6.4: Κυματομορφές των τριών φάσεων σε σχέση με το κοινό σημείο (πολικές κυματομορφές)

Η ταυτόχρονη τοποθέτηση των δυο παραπάνω κυματομορφών έχει σαν αποτέλεσμα την κυματομορφή του σχήματος που ακολουθεί.

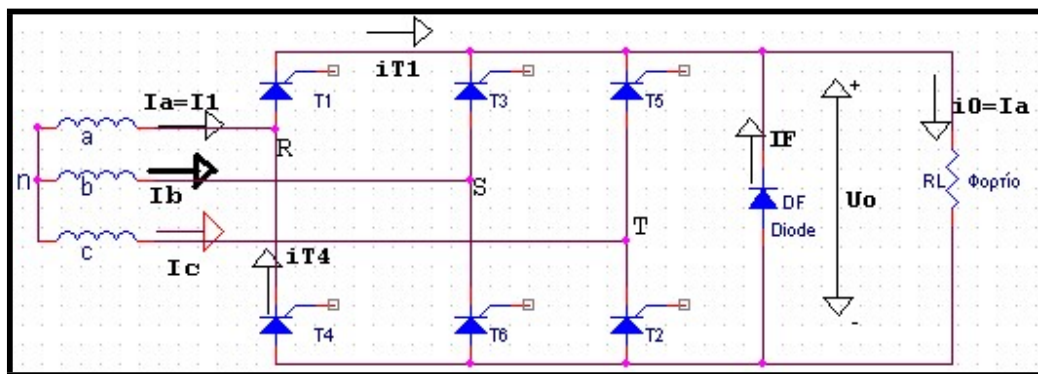


Σχήμα 6.5: Συγκριτική αντιπαράθεση των φασικών και πολικών κυματομορφών

Η διάταξη αυτή αποτελεί ιδανική λύση για την ηλεκτρονική μετατροπή ισχύος τριφασικού ρεύματος σε συνεχές, διότι κατά τη διάρκεια μιας περιόδου παρέχονται έξι παλμοί (ένας από κάθε θύρο), με αποτέλεσμα να έχουμε ελάχιστη κυμάτωση, οπότε το απαιτούμενο πηνίο εξομάλυνσης να είναι σχετικά μικρό και σε ορισμένες περιπτώσεις να μην είναι απαραίτητο. Σε αυτόν το μετατροπέα, κατά τη διάρκεια μιας περιόδου, από μια φάση περνάει ρεύμα για διάστημα  $120^\circ$ , από τις υπόλοιπες για διάστημα  $240^\circ$  και η φάση αυτή βρίσκεται κενή.

### 6.1.3 Βασικό κύκλωμα και Συνδεσμολογία

Το βασικό ηλεκτρονικό κύκλωμα ενός τριφασικού μετατροπέα φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Το δευτερεύον του τριφασικού μετασχηματιστή συνδέεται με τις ανόδους των θυρίστωρς T1, T3 και T5 και συγχρόνως με τις καθόδους των θυρίστωρς T4, T6 και T2. Η αρίθμηση των θυρίστωρς δηλώνει τη σειρά έναυσης, επομένως και την πορεία του ρεύματος από το μετασχηματιστή προς το φορτίο.



Σχήμα 6.6: Βασικό κύκλωμα τριφασικού μετατροπέα

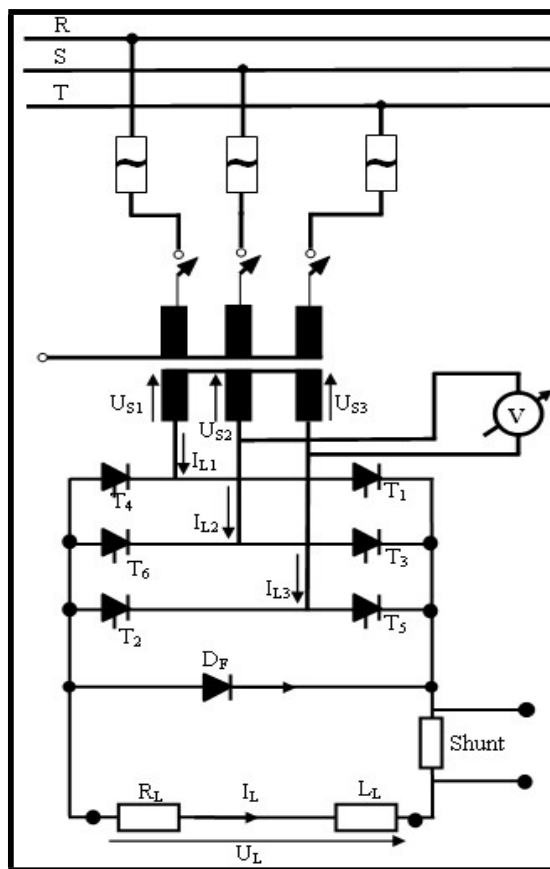
Μεταξύ της γέφυρας και του φορτίου είναι συνδεδεμένη η δίοδος ελεύθερης διέλευσης DF (DiodeFlywheel). Η δίοδος αφ' ενός χρησιμεύει για τη διοχέτευση της Η.Ε.Δ. που συσσωρεύτηκε στο φορτίο (όταν όλα τα θυρίστωρς είναι στην κατάσταση αποκοπής) και αφετέρου βελτιώνει την απόδοση του μετατροπέα περιορίζοντας τις περιοχές κενού, όταν αυτές υπάρχουν. Το τελευταίο, σε μερικές περιπτώσεις είναι σημαντικό γιατί ορισμένα φορτία, από τη φύση τους, δεν επιδέχονται ρεύμα με περιοχές κενού. Επιπρόσθετη βελτίωση της εξόδου του μετατροπέα μπορεί να έχουμε εάν τοποθετήσουμε μεταξύ της γέφυρας και του φορτίου ένα πηνίου  $L_d$ . Στην περίπτωση αυτή τα DF και  $L_d$  αναλαμβάνουν να διατηρούν το ρεύμα σταθερό, με αποτέλεσμα το δίκτυο και η γέφυρα να μην παρέχουν ρεύμα (κατά τη διάρκεια των περιοχών κενού) και συνεπώς να μην επιβαρύνονται με θερμικές απώλειες, γεγονός που διευκολύνει την επιλογή θυρίστωρ με χαμηλότερες προδιαγραφές (άρα έχουμε οικονομική ωφέλεια).

Ο μετατροπέας μπορεί να συνδεθεί και να εργαστεί με δυο τρόπους:

- Εάν όλοι οι ηλεκτρονικοί διακόπτες είναι θυρίστωρς, τότε ο μετατροπέας είναι πλήρως ελεγχόμενος. Σε αυτόν τον τρόπο λειτουργίας, η δίοδος ελεύθερης διέλευσης DF δεν είναι απαραίτητη για τη βασική λειτουργία του κυκλώματος, λόγω της ύπαρξης έξι παλμών μέσα σε μια περίοδο, που σημαίνει καλή εξομάλυνση και σχεδόν καθόλου περιοχές κενού.

- b) Αν οι διακόπτες T4, T6, T2, είναι δίοδοι (δηλαδή τρία θυρίστωρες άνω και τρεις δίοδοι κάτω) τότε ο μετατροπέας ονομάζεται μερικά ελεγχόμενος. Σε αυτόν τον τρόπο λειτουργίας η δίοδος ελεύθερης διέλευσης DF, πέραν μιας γωνίας, είναι απαραίτητη για τη βασική λειτουργία του μετατροπέα γιατί εξυπηρετεί στην αντιστάθμιση αέργου ισχύος και βοηθάει στο να μην υπερφορτίζεται ο μετατροπέας.

Το διάγραμμα της εργαστηριακής άσκησης (εμπρόσθιο panel) φαίνεται παρακάτω.



Σχήμα 6.7: Τριφασική γέφυρα θυρίστορ με και χωρίς δίοδο ελεύθερης διέλευσης DF

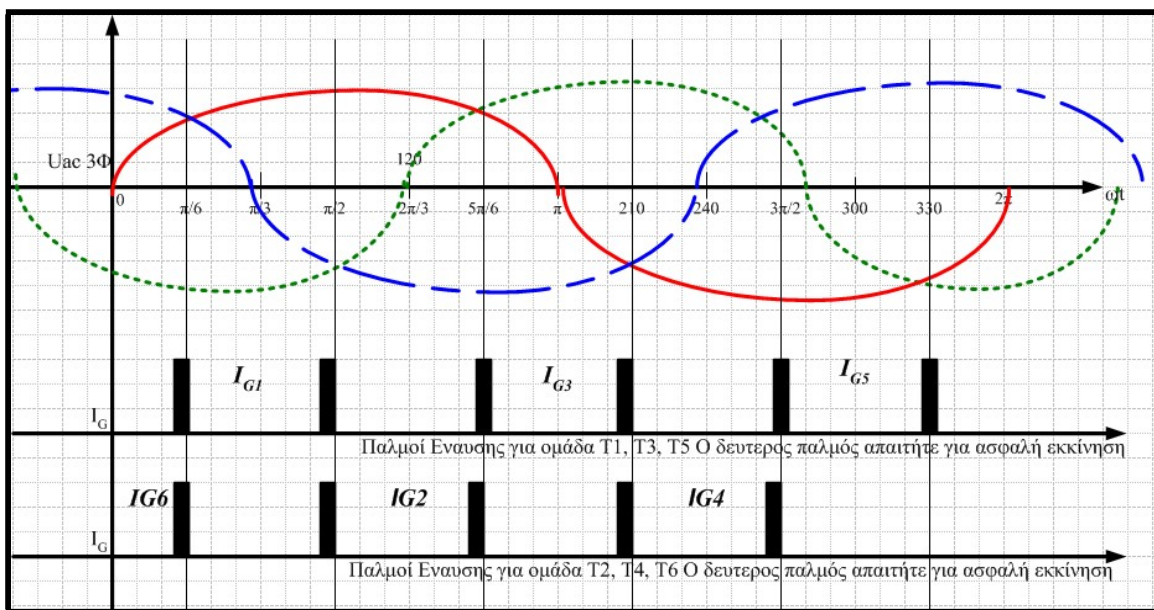
### 6.1.4 Ψύξη

Εξ' αιτίας των μικρών διαστάσεων των θυρίστορ και των μεγάλων ρευμάτων που περνούν μέσα τους, οι διατάξεις αυτές χρειάζονται ειδικά ψυκτικά. Τα θυρίστορ στερεώνονται στην πιο απλή περίπτωση σε βάσεις από αλουμίνιο, οι οποίες αποτελούν συγχρόνως και το ψυκτικό. Όταν

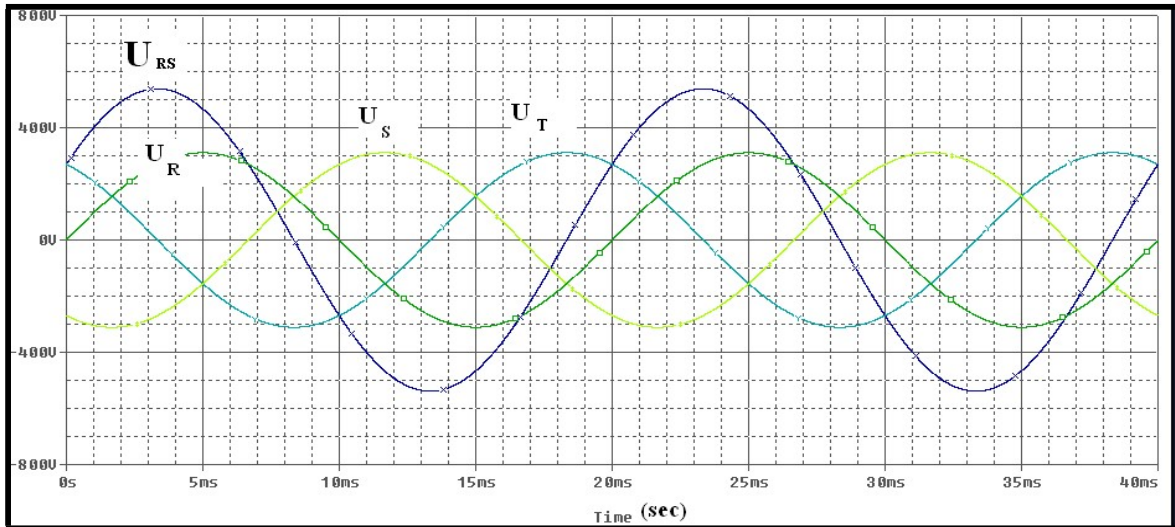
η γέφυρα προορίζεται για να περάσουν μερικές εκατοντάδες AMPERES, σαν μέσο ψύξης χρησιμοποιείται επί πλέον νερό.

### 6.1.5 Έλεγχος

Το κύκλωμα ελέγχου παρέχει τους παλμούς έναυσης για τα επί μέρους θυρίστρος. Οι παλμοί αυτοί πρέπει να συγχρονισθούν με το δίκτυο, ώστε τα θυρίστρος να ανάβουν στην επιθυμητή γωνία έναυσης  $\alpha$ . Η γωνία αυτή μπορεί να ρυθμιστεί μεταξύ 0 και 1500. Κάθε θυρίστρος δέχεται δύο παλμούς έναυσης σε απόσταση 600. Ο λόγος είναι ότι κατά τη μετάβαση του ρεύματος από το ένα θυρίστρο στο άλλο, μπορεί να δημιουργηθούν ταλαντώσεις τάσης, που προκαλούν αθέλητη σβέση. Στην επόμενο σχήμα (Σχ. 5.8) φαίνονται οι σειρές παλμών έναυσης για κάθε θυρίστρο. Ωσημείο αναφοράς των παλμών (δηλαδή το σημείο μηδέν μοίρες) μπορεί να θεωρηθεί το σημείο μηδέντομής δυο φάσεων που φαίνεται στο επόμενο σχήμα.



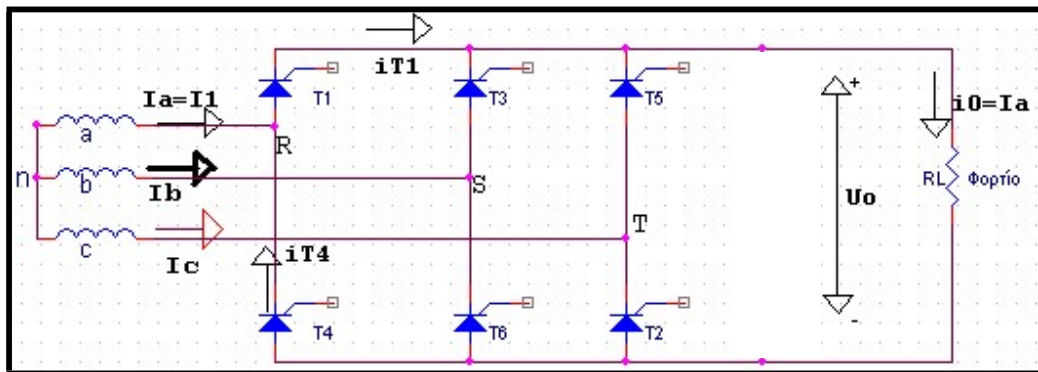
Σχήμα 6.8: Σειρές παλμών του τμήματος ελέγχου



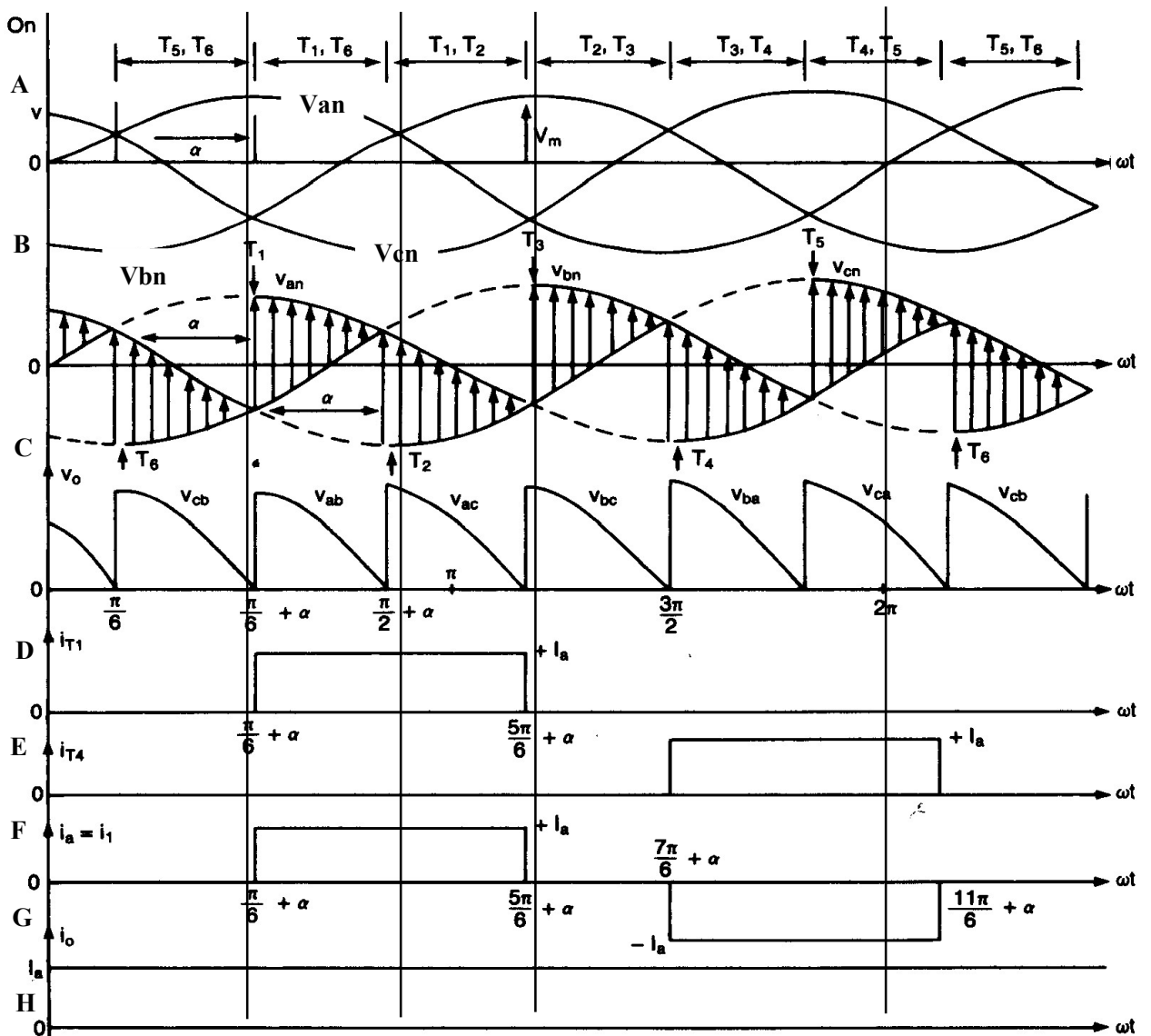
Σχήμα 6.9: Φασικές και Πολικές Κυματομορφές

### 6.1.6 Ανάλυση λειτουργίας

Το παρακάτω σχήμα δείχνει το σχετικό κύκλωμα με επαγωγικό φορτίο μεγάλης τιμής. Οι τρεις φάσεις έχουν διαφορά φάσης  $120^\circ$  και τα θύραριστορς πυροδοτούνται σε διαστήματα  $\pi/3$  ή  $60^\circ$ . Τα ηνία  $a, b, c$  αποτελούν τα δευτερεύοντα του τριφασικού μετασχηματιστή με κοινό σημείο  $n$ . Υπενθυμίζουμε ότι η σειρά πυροδότησης των θύραριστορς είναι  $T_1, T_3, T_5$  και  $T_4, T_6, T_2$ .



Σχήμα 6.10: Κύκλωμα χωρίς δίοδο ελεύθερης διέλευσης



Σχήμα 6.11: Κυματομορφές πλήρως ελεγχόμενου μετατροπέα χωρίς δίοδο ελεύθερης διέλευσης

Στις καμπύλες του παραπάνω σχήματος παρατηρούμε τα ακόλουθα:

- Ποια θυρίστρος άγουν στα καθορισμένα χρονικά διαστήματα και είναι υπεύθυνα για την έξοδο. Τις κυματομορφές των τριών φάσεων με μέγιστη τιμή  $V_m$  και γωνία καθυστέρησης  $\alpha$ .
- Τις κυματομορφές των τριών φάσεων με δείκτες που δηλώνουν το σημείο έναρξης αγωγής στο κάθε θυρίστρο. Τα κάθετα βέλη δηλώνουν την περιοχή αγωγιμότητας.
- Την κυματομορφή που θα εμφανίζεται στην έξοδο (στο φορτίο).
- Το ρεύμα  $i_{T1}$  (διαμέσου του θυρίστρο 1).

- E. Τορεύμα  $\dot{\mathbf{i}}_{T4}$  (διαμέσου του θυρίστορ 4).  
 F. Τορεύμα  $\dot{\mathbf{i}}_{\alpha} = \dot{\mathbf{i}}_1$  (μέσα από τη φάση α).  
 G. Τορεύμα  $\dot{\mathbf{i}}_0$  (μέσω του φορτίου).

### 6.1.7 Ανάλυση κυματομορφών

- 1) Μετά το τέλος της γωνίας καθυστέρησης «α» (δείτε κυματομορφές B και C) στο χρόνο  $\omega t = \frac{\pi}{6} + \alpha$  το θυρίστορ  $T_6$  στο οποίο εφαρμόζεται η κυματομορφή  $V_{bn}$  είναι ήδη αγώγιμο (διότι στην κάθοδό του εφαρμόζεται η αρνητική ημιπερίοδος  $V_{bn}$ ) και το θυρίστορ  $T_1$  μόλις γίνεται αγώγιμο (διότι έληξε η γωνία καθυστέρησης «α» και είναι ορθά πολωμένο).
- 2) Στο διάστημα  $\frac{\pi}{6} + \alpha \leq \omega t \leq \frac{\pi}{2} + \alpha$ , τα θυρίστορ  $T_1$  και  $T_6$  είναι αγώγιμα και η διαφορά δυναμικού μεταξύ των γραμμών α και β  $V_{ab} = V_{an} - V_{bn}$  εμφανίζεται στα άκρα του φορτίου.
- 3) Στο χρόνο  $\omega t = \frac{\pi}{2} + \alpha$ , το θυρίστορ  $T_2$  παλμοδοτείται (τέλος γωνίας καθυστέρησης και ορθά πολωμένο) και το θυρίστορ  $T_6$  μεταπίπτει στην αποκοπή, αφού πολώνεται ανάστροφα άμεσα (λόγω  $T_2$ ).
- 4) Στο διάστημα  $\frac{\pi}{2} + \alpha \leq \omega t \leq \frac{5\pi}{6} + \alpha$ , τα θυρίστορ  $T_1$  και  $T_2$  ( $T_2$  ορθά πολωμένο και παλμοδοτείται) είναι αγώγιμα και η διαφορά δυναμικού μεταξύ των γραμμών α και γ ( $V_{ac} = V_{an} - V_{cn}$ ) θα εμφανίζεται στα άκρα του φορτίου.

Εάν τα θυρίστορ είναι αριθμημένα όπως στο προηγούμενο σχήμα, η σειρά πυροδότησης θα είναι 1-2, 2-3, 3-4, 4-5, 5-6, και 6-1, ενώ οι διαφορές δυναμικού μεταξύ φάσεων και ουδετέρου ορίζονται ως:

$$U_{an} = V_m \sin \omega t$$

$$U_{bn} = V_m \sin \left( \omega t - \frac{2\pi}{3} \right)$$

$$U_{cn} = V_m \sin \left( \omega t + \frac{2\pi}{3} \right)$$

Επομένως ο μέσος όρος του δυναμικού εξόδου μπορεί να ευρεθεί από:

$$V_{dc} = \frac{3}{\pi} \int_{\frac{\pi}{6} + \alpha}^{\frac{\pi}{6} + (\frac{\pi}{6} + \alpha)} V_{ab} d(\omega t) = \int_{\frac{\pi}{6} + \alpha}^{\frac{\pi}{6} + (\frac{\pi}{6} + \alpha)} \sqrt{3} V_m \sin \left( \omega t + \frac{\pi}{6} \right) d(\omega t) = \frac{3\sqrt{3} V_m}{\pi} \cos \alpha$$

Και η μέγιστη τιμή του μέσου όρου του δυναμικού εξόδου για γωνία καθυστέρησης  $\alpha=0$  θα είναι:

$$V_{dc_{max}} = \frac{3\sqrt{3}V_m}{\pi}$$

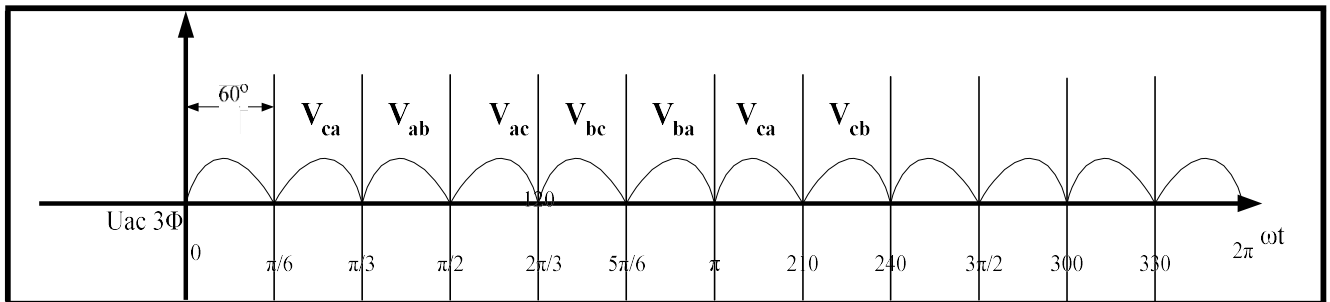
Ενώ η κανονικοποιημένη μέση τιμή του δυναμικού εξόδου είναι:

$$V_n = \frac{V_{dc}}{V_{dc_{max}}} = \cos\alpha$$

Τέλος η ενεργός τιμή του δυναμικού εξόδου είναι:

$$V_{rms} = \left[ \frac{3}{\pi} \int_{\frac{\pi}{6}+\alpha}^{\frac{\pi}{2}+\alpha} 3V_m^2 \sin^2 \left( \omega t + \frac{\pi}{6} \right) d(\omega t) \right]^{\frac{1}{2}} = \sqrt{6}V_m \left( \frac{1}{4} + \frac{3\sqrt{3}}{8\pi} \cos 2\alpha \right)$$

Σε μη ελεγχόμενη κατάσταση, δηλ. για  $\alpha = 0$ , η συνεχής τάση αποτελείται από τις διαφορές των τάσεων στα δευτερεύοντα τυλίγματα του μετασχηματιστή όπως φαίνεται πιο κάτω. Αυτό σημαίνει ότι το ρεύμα περνάει από το θυρίστορ που έχει το μέγιστο (κατ' απόλυτη τιμή) δυναμικό. Τα ρεύματα, εφόσον περνούν από τους αντίστοιχους κλάδους, είναι σταθερά, διότι οι αυτεπαγωγιότητες του κυκλώματος θεωρούνται αρκετά μεγάλες, ώστε να τα εξομαλύνουν.

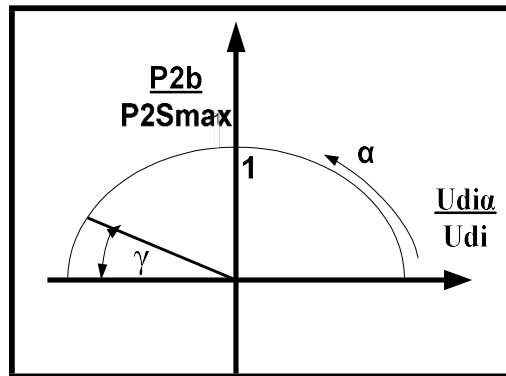


Σχήμα 6.12: Τάση στα άκρα του φορτίου στον τριφασικό μετατροπέα

### 6.1.8 Άεργος Ισχύς

Εξ' αιτίας της διαφοράς φάσης μεταξύ τάσεων και ρευμάτων στα διάφορα θυρίστορς του μετατροπέα, δημιουργείται μια άεργος ισχύς, η οποία εξαρτάται από τη γωνία έναυσης  $\alpha$ . Η άεργος αυτή ισχύς συνήθως παριστάνεται σαν ημικύκλιο (Σχ. 5.13) σε συνάρτηση της συνεχούς τάσης  $U_{dia}$ , με παράμετρο τη γωνία  $\alpha$ .





Σχήμα 6.13: Άεργος ισχύς σε συνάρτηση της συνεχούς τάσης

### Εξήγηση συμβόλων:

- $P_{2b}$  άεργος ισχύς,  
 $P_{2smax}$  μέγιστη φαινόμενη ισχύς,  
 $U_{di}$  μέγιστος μέσος όρος συνεχούς τάσης για  $\alpha=0$ ,  
 $U_{dia}$  μέσος όρος συνεχούς τάσης για γωνία  $\alpha$ .

Έτσι η μέγιστη φαινόμενη ισχύς ισούται με:

$$P_{2S_{max}} = U_{di} \cdot I_d$$

Η γωνία  $\alpha$  δεν μπορεί να φθάσει το όριο των  $180^\circ$ , γιατί τα θυρίστορ χρειάζονται κάποιους χρόνους σβέσης και επανάκτησης, που συνεπάγονται καθυστερήσεις. Χαρακτηριστικό μέγεθος για το μετατροπέα είναι η γωνία  $\alpha$ , που εκφράζει την ελάχιστη απόσταση από το θεωρητικό όριο των  $180^\circ$ , μέχρι την απόσταση στην οποία μπορεί να ελεγχθεί ο μετατροπέας. Συνήθως η γωνία αυτή είναι της τάξης των  $30^\circ$ .

## 6.2 Διεξαγωγή Πειράματος

Προσοχή: Η Άσκηση αυτή θέλει μεγάλη προσοχή διότι η έξοδος της φτάνει τα 500 Volts και αρκετά Α mperes. Θα πρέπει να δοθεί μεγάλη προσοχή από τους σπουδαστές αλλά και τους Διδάσκοντες, ώστε να μην υπάρξει παραμικρή πιθανότητα και δυνατότητα ατυχήματος. Το κύκλωμα πρέπει απαραίτητα πριν την τροφοδοσία τάσης, να ελέγχεται από

τους διδάσκοντες. Πριν από οποιαδήποτε αλλαγές των συνδέσεων διακόπτη τροφοδοσίας πρέπει να τοποθετείται στο off.

Απαιτούμενες συσκευές και όργανα

1. Μονάδα τριφασικού μετατροπέα έξι παλμών
2. Βολτόμετρο 0-500 Volt DC
3. Αμπερόμετρο 0-10 Ampere DC
4. Σειρά αντιστάσεων δυο τεμάχια των  $4 \times 50 \text{ Ohm} / 1.5 \text{ Kw}$
5. Πηνίο  $2 \times 0,06 \text{ H}$
6. Shunt  $5 \text{ A} / 50 \text{ mV}$  (ενσωματωμένο στην άσκηση)
7. Αναλυτής Ενέργειας
8. Παλμογράφος.

### **1<sup>ο</sup> Μέρος:** Μετατροπέας Πλήρως Ελεγχόμενος χωρίς Δίοδο Ελεύθερης Διέλευσης

Εισαγωγικά: Παρατηρήστε το εμπρόσθιο Panel της άσκησης και αναγνωρίστε τα διάφορα μέρη της. Για παράδειγμα προσδιορίστε τις τρεις φάσεις και την αντίστοιχη σηματοδότησή τους (R,S,T), τα σημεία λήψης της διαφοράς δυναμικού του δευτερεύοντος του μετασχηματιστή και τα έξι (6) σημεία λήψης των παλμών παλμοδότησης για τα έξι θυρίστρος.

Βεβαιωθείτε ότι οι τρεις γέφυρες είναι συνδεδεμένες στα σημεία:

- Φάση T
- Στο κύκλωμα παλμοδότησης
- Στα δυο άκρα της διόδου  $D_F$  ελεύθερης διέλευσης.

Αν δεν είναι, ζητήστε από τον επιβλέποντα καθηγητή να τοποθετήσει τις τρεις γέφυρες. Στη συνέχεια τροφοδοτήστε το κύκλωμα ενεργοποιώντας το διακόπτη τροφοδοσίας.

#### **A) Φασικές και Πολικές Τάσεις του Δευτερεύοντος τυλίγματος του Μετασχηματιστή**

Τροφοδοτείστε το κύκλωμα με ισχύ με την παραγωγή παλμών τοποθετημένη στην απαγόρευση (διακόπτης στην άνω θέση).

- Παλμογραφείστε τις φασικές κυματομορφές [κάθε φάση (R,S,T) σε σχέση με το κοινό σημείο ο].
- Παλμογραφείστε τις πολικές κυματομορφές. Συνολικά θα πάρετε τρία ζεύγη μετρήσεων (δηλαδή  $V_{rs}, V_{rt}, V_{st}$ ).

Σε ένα ενιαίο σχεδιάγραμμα καταχωρείστε τις φασικές κυματομορφές και σε ένα άλλο (ενιαίο) τις πολικές κυματομορφές. Σχολιάστε και εξηγήστε τι παρατηρείτε και τι

συμπεράσματα βγάζετε σχετικά με τις γωνίες μεταξύ των τυλιγμάτων του δευτερεύοντος του μετασχηματιστή για τις δυο περιπτώσεις.

### **Β) Παρατήρηση των Παλμών Πυροδότησης των Έξι Θυρίστωρς**

Παρατηρείστε στον παλμογράφο τις κυματομορφές των παλμών πυροδότησης που δέχονται οι πύλες των έξι θυρίστωρς σαν συνάρτηση της τάσης αναφοράς  $V_{ts}$  του δευτερεύοντος του μετασχηματιστή. (Δηλαδή παλμογραφήστε: T1- $V_{ts}$ , T2- $V_{ts}$ , T3-  $V_{ts}$ , T4-  $V_{ts}$ , T5-  $V_{ts}$  και T6- $V_{ts}$ ). Καταχωρείστε τις σε ένα ενιαίο σχεδιάγραμμα, προσέχοντας τη διαφορά φάσης που έχουν μεταξύ τους. Εξηγείστε αυτή τη διαφορά φάσης για κάθε ζεύγος και για όλα τα ζεύγη σαν σύνολο.

### **Γ) Μετρήσεις με Ωμικό φορτίο**

*Προσοχή:* Το φορτίο που θα συνδέσετε πρέπει να είναι αρκετά μεγάλο σε τιμή (π.χ. 400Ω), διαφορετικά μπορεί να καταστραφεί λόγω της μεγάλης ισχύος που παρέχει στην έξοδο του μετατροπέα.

- Συνδέστε για φορτίο μια ωμική αντίσταση  $R_L = 400\Omega$ . Για γωνίες έναυσης  $\alpha = 360$  και  $720$  παρατηρείστε στον παλμογράφο τις κυματομορφές των μεγεθών  $U_L$  και  $I_L$  (τάση και ρεύμα φορτίου). Καταχωρείστε τις σε ένα ενιαίο σχεδιάγραμμα, και σχολιάστε τις. Γιατί η κυματομορφή  $U_L$  έχει αυτό το σχήμα; Τι διαφορές και τι ομοιότητες παρατηρείτε μεταξύ των δυο κυματομορφών;
- Σβήστε το μετατροπέα. Αποσυνδέστε την κυματομορφή ρεύματος και στο 2ο κανάλι του παλμογράφου συνδέστε διαδοχικά τα κοινά σημεία T4-T1, T5-T2, T6-T3 (δηλαδή στο ένα κανάλι θα έχετε την  $U_L$  και στο άλλο το κοινό σημείο T4-T1, στη συνέχεια το T5-T2 και τέλος το T6-T3).

#### ***Παρατηρήστε και καταγράψτε:***

- Τι αλλάζει κάθε φορά που αλλάζουν τα παραπάνω ζεύγη κυματομορφών;
- Στις κυματομορφές  $U_L$  και T4-T1 τοποθετήστε τη μια κυματομορφή πάνω στην άλλη. Ποια είναι και πόση η περιοχή αγωγιμότητας και η περιοχή αποκοπής; Συγκρίνοντας τις δυο κυματομορφές περιγράψτε τι συμβαίνει κατά τη διάρκεια των δυο περιοχών αγωγιμότητας και αποκοπής (σχετικά με την έξοδο  $U_L$ ).
- Μετρείστε την περιοχή λειτουργίας για την οποία έχουμε μέγιστη ανάστροφη τάση στο θυρίστωρ T1. Εξηγείστε την κυματομορφή του ρεύματος φορτίου για γωνία έναυσης μεγαλύτερης των  $60^\circ$ .

**Δ) Μέτρηση της 3Φ Ενεργού Ισχύος  $P_{en}$ , της 3Φ Φαινόμενης Ισχύος ( $S_{3Phase}$ ), της Άεργου Ισχύος και του συντελεστή Ισχύος . Χρησιμοποιήστε δυο γωνίες έναυσης ( $\alpha = 30^\circ$ , και  $108^\circ$ ).**

- Μέτρηση της 3Φ Ενεργού Ισχύος Ρ<sub>εν</sub>: Συνδέστε τους ακροδέκτες του Αναλυτή Ενέργειας (αυτούς μετακροκοδειλάκια) στις φάσεις R και S (δηλαδή την πολική τάση  $V_{RS}$ ) και την αμπεροτσιμπίδα στη γέφυρα της φάσης T (αφού αντικαταστήσετε τη μαύρη σταθερή γέφυρα με γέφυρα καλωδίου αναχωράει η αμπεροτσιμπίδα). Μετρήστε τριφασική ισχύ για τις ανωτέρω δυο γωνίες.
- Μέτρηση της 3Φ Ενεργού Φαινόμενης Ισχύος: Χρησιμοποιώντας την παραπάνω συνδεσμολογία διαβάστε και καταγράψτε από τον αναλυτή την τιμή  $I_{RMS}$ . Επίσης γνωρίζουμε ότι η πολιική τάση  $U_{RMS} = 400 \text{ Volt}$ . Στη συνέχεια υπολογίστε την τριφασική φαινόμενη ισχύ  $S$ .
- Υπολογίστε την άεργο ισχύ  $Q$  και το συντελεστή ισχύος  $PF$ .

### Ωμικό-επαγωγικό φορτίο

Συνδέστε σαν φορτίο μια αντίσταση  $100 \Omega$  και ένα πηνίο  $0,06 \text{ H}$  σε σειρά.

Παρατηρείστε στον παλμογράφο τις κυματομορφές της τάσης και ρεύματος φορτίου. Σχεδιάστε τις κυματομορφές για  $\alpha = 90^\circ$ . Εξηγήστε τις διαφορές από τις αντίστοιχες κυματομορφές της προηγούμενης παραγράφου.

Μετρήστε, υπολογίστε και σχεδιάστε τις συναρτήσεις:  $U_{dia}(\alpha)$ ,  $P(\alpha)$ ,  $Q(\alpha)$  όπως στην προηγούμενη παράγραφο.

### 2<sup>ο</sup> Μέρος: Μετατροπέας Πλήρως Ελεγχόμενος Με Δίοδο Ελεύθερης Αγωγής

Συνδέστε τώρα στο κύκλωμα τη δίοδο ελεύθερης και επαναλάβετε τις παλμογραφήσεις που πραγματοποιήσατε στα “ Γ, Δ, και Ε” του 1ου Μέρους. Εξηγήστε τις διαφορές των αποτελεσμάτων αυτών από τα προηγούμενα.

### 3<sup>ο</sup> Μέρος: Μετατροπέας Μερικά Ελεγχόμενος

Τώρα αφαιρέστε τη δίοδο ελεύθερης διέλευσης, καθώς η ύπαρξη της δεν επηρεάζει τις αντίστοιχες κυματομορφές. Ο Επιβλέπων Καθηγητής αλλάζει τη συνδεσμολογία της συσκευής, ώστε ο μετατροπέας να γίνει ημιελεγχόμενος. Επαναλάβετε τις παλμογραφήσεις που πραγματοποιήσατε στα “ Γ, Δ, και Ε” του 1ου Μέρους. Εξηγήστε τις διαφορές των αποτελεσμάτων αυτών από τα προηγούμενα.

### 4<sup>ο</sup> Μέρος: Κύκλωμα Ελέγχου

Συνδέστε στη συσκευή ένα ωμικό φορτίο  $400 \Omega$ .

- Παρατηρείστε στον παλμογράφο τις πολικές τάσεις  $U_{RT}$  και  $U_{SR}$ .
- Επαναλάβετε την παλμογράφηση για τις τάσεις  $U_{RT}$  και  $U_{TS}$ .
- Παρατηρείστε στον παλμογράφο την αναστραμμένη τάση  $U_{RT}$  (η αναστροφή γίνεται με τη σύνδεση του σήματος στο κανάλι INVERT CHANNEL) και τους παλμούς στο θυρίστορ  $T_1$  (σήμα  $IT_1$ ). Ρυθμίστε τη γωνία άναυσης στις  $30^\circ$ . Μαζί με την ίδια τάση παρατηρείστε τους παλμούς στο θυρίστορ  $T_4$  (σήμα  $IT_4$ ). Προσθέστε τους παλμούς των δύο θυρίστορ στο διάγραμμα.

- Επαναλάβετε τις παραπάνω παλμογραφίες για την τάση  $U_{SR}$  και τους παλμούς των θυρίστωρ  $T_2$  και  $T_5$  (σήματα  $I_{T_2}$  και  $I_{T_5}$ ). Προσθέστε και αυτούς τους παλμούς στο διάγραμμα.
- Επαναλάβετε τα παραπάνω για την τάση  $U_{TS}$  και τους παλμούς των θυρίστωρ  $T_3$  και  $T_6$ .

**Παρατήρηση:** Οι μετρήσεις στο κύκλωμα ελέγχου γίνονται ανεξάρτητα από τη συνδεσμολογία του κυκλώματος ισχύος. Το κύκλωμα ελέγχου δίνει τους ίδιους παλμούς, ασχέτως εάν μετατροπέας είναι πλήρως ή μερικά ελεγχόμενος.