

**Εργαστήριο**

**Ηλεκτρονικά Ισχύος**

**και**

**Βιομηχανικά Ηλεκτρονικά:**

**Διευθυντής Εργαστηρίου  
Δρ. Μ. Χατζηπροκοπίου  
Καθηγητής Ηλεκτρολογίας  
Σεπτέμβριος 2006**

## Περιεχόμενα

0. 1 Γενικές Πληροφορίες .....	Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.
Πρόλογος .....	Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.
0. 2 Προβλήματα που συναντώνται στο Εργαστήριο .....	Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.
0. 3 Προαπαιτούμενες Γνώσεις .....	Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.
0. 4 Ασκήσεις που εκτελούνται στο Εργαστήριο Ηλεκτρονικών Ισχύος .....	Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.
0. 5 Αξιολόγηση φοιτητών Εργαστηρίου.....	Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.
0. 6 Βιβλιογραφία.....	Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.
0.6.1 Κύριο Βιβλίο: .....	Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.
0.6.2 Άλλη Βιβλιογραφία: .....	Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.
0. 7 Πτυχιακές Εργασίες.....	Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.
0.7.1 Αποπερατωθείσες.....	Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.
0. 8 Οδηγίες ορθής χρήσης των Ασκήσεων.....	Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.
0.8.1 Έναρξη λειτουργίας των συσκευών .....	Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.
0.8.2 Διακοπή λειτουργίας της συσκευής.....	Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.
0.8.3 Μέτρα ασφαλείας .....	Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.
<b>Άσκηση 1. Προκαταρκτική Άσκηση.....</b>	<b>Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.</b>
1. 1 Εισαγωγή.....	Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.
<i>Σκοπός της προκαταρκτικής Άσκησης είναι η ανασκόπηση βασικών εννοιών και η σύντομη περιγραφή της λειτουργίας των εξειδικευμένων οργάνων μετρήσεων που χρησιμοποιούνται στο εργαστήριο. ....</i>	<i>Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.</i>
1. 2 Ανασκόπηση Βασικών Εννοιών .....	Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.
1.2.1 Μέση Τιμή και Ενεργός Τιμή Μεγεθών.....	Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.
1.2.2 Ισχύς Εναλλασσόμενου – οι Έννοιες της Πραγματικής και της Αέργου Ισχύος.....	Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.
<b>σελιδοδείκτης.</b>	
1.2.3 Αεργος Ισχύς και Συντελεστής Ισχύος για μη Ημιτονοειδείς Κυματομορφές.....	Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.
<b>σελιδοδείκτης.</b>	
1. 3 Περιγραφή Βασικών Οργάνων που Χρησιμοποιούνται στο εργαστήριο.....	Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.
1.3.1 Καταγραφή των μετρήσεων .....	Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.
1.3.2 Ο Ψηφιακός παλμογράφος HM205-3.....	Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.
1.3.3 Ο Εκτυπωτής γραφικών HM 8148-2 (Graphics Printer) .....	Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.
1. 4 Θεωρητικό Μέρος.....	Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.
1.4.1 Εξήγηση πλήκτρων (Controls and Indicators).....	Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.
1.4.2 Παρατήρηση .....	Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.
1.4.3 Παράδειγμα .....	Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.
1.4.4 Πειραματικό Μέρος.....	Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.
1.4.5 Πραγματοποίηση μετρήσεων με χρήση Ηλεκτρονικού Υπολογιστή.....	Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.
<b>Άσκηση 2. Μελέτη του Θυρίστρον .....</b>	<b>0-6</b>
2. 1 Διεξαγωγή Πειράματος.....	0-6
2.1.1 Χαρακτηριστικές Ανόδου-Καθόδου.....	0-6
2.1.2 Χαρακτηριστικές Πύλης - Καθόδου.....	0-9

2. 2 ΡΕΥΜΑ ΔΙΑΤΗΡΗΣΗΣ ΚΑΙ ΣΥΓΚΡΑΤΗΣΗΣ .....	0-11
2.2.1 Ρεύμα διατήρησης .....	0-11
2.2.2 Ρεύμα συγκράτησης .....	0-12
2. 3 Κύκλωμα Ελέγχου .....	0-12
<b>Άσκηση 3. Ρυθμιζόμενος Διακόπτης Εναλλασσόμενου Ρεύματος (AC-Controller).....</b>	<b>1-13</b>
3. 1 ΔΙΕΞΑΓΩΓΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ .....	<i>Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.</i>
3.1.1 Απαιτούμενες συσκευές και όργανα για την Άσκηση 2 .....	1-13
3.1.2 ΩΜΙΚΟ ΦΟΡΤΙΟ .....	1-13
3.1.3 Κυματομορφές .....	1-13
3.1.4 Συναρτήσεις.....	1-14
3. 2 ΕΠΑΓΩΓΙΚΟ ΦΟΡΤΙΟ .....	1-14
3.2.1 Κυματομορφές .....	1-14
3.2.2 Συναρτήσεις.....	1-14
3. 3 ΩΜΙΚΟ-ΕΠΑΓΩΓΙΚΟ ΦΟΡΤΙΟ .....	1-14
3.3.1 Κυματομορφές .....	1-14
3.3.2 Συναρτήσεις.....	1-14
3.3.3 Ελάχιστη γωνία έναυσης .....	1-14
3.3.4 ΚΥΚΛΩΜΑ ΕΛΕΓΧΟΥ .....	<i>Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.</i>
3.3.5 ΠΙΝΑΚΕΣ, ΚΑΜΠΥΛΕΣ ΓΙΑ ΑΣΚΗΣΗ 2 .....	1-15
3.3.6 Συναρτήσεις.....	1-16
3.3.7 Κυματομορφές .....	1-16
<b>Άσκηση 4. Μέρος 2<sup>ο</sup> Άσκηση 2β .....</b>	<b>1-19</b>
4. 1 Ρυθμιζόμενος Διακόπτης Εναλλασσόμενου με TRIACs (AC-AC Converter).....	1-19
4.1.1 Διεξαγωγή Πειραμάτων.....	1-19
4.1.2 Ωμικό φορτίο.....	1-20
4.1.3 Τροφοδοσία Τάσης: Προσοχή στην τάση του Δικτύου.....	1-21
4.1.4 Κυματομορφές .....	1-21
4.1.5 Συναρτήσεις.....	1-21
4.1.6 Επαγωγικό φορτίο .....	1-22
4.1.7 Ωμικό - επαγωγικό φορτίο .....	1-22
4.1.8 Συναρτήσεις.....	1-22
4.1.9 Ελάχιστη γωνία έναυσης .....	1-22
4.1.10 Σχεδίαση κυκλώματος.....	1-23
4.1.11 Συναρτήσεις.....	1-23
4.1.12 Κυματομορφές .....	1-24
<b>Άσκηση 5. Μετατροπείας Συνεχούς Ρεύματος (Chopper-Ψαλιδιστής) .....</b>	<b>2-25</b>
5. 1 Διεξαγωγή Πειράματος.....	2-25
5. 2 Προκαταρκτικά .....	2-25
5. 3 ΩΜΙΚΟ ΦΟΡΤΙΟ .....	2-25
5. 4 ΩΜΙΚΟ-ΕΠΑΓΩΓΙΚΟ ΦΟΡΤΙΟ .....	2-26
<b>Άσκηση 6. Μονοφασικός Μετατροπείας Πλήρως Ελεγχόμενος .....</b>	<b>3-28</b>

6. 1 ΔΙΕΞΑΓΩΓΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ.....	3-28
6. 2 Μετατροπές χωρίς δίοδο ελεύθερης διέλευσης.....	3-28
6.2.1 Ωμικό φορτίο.....	3-28
6.2.2 Ωμικό - επαγωγικό φορτίο.....	3-28
6. 3 ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΑΣ ΜΕ ΔΙΟΔΟ ΕΛΕΥΘΕΡΗΣ ΔΙΕΛΕΥΣΗΣ.....	3-29
6.3.1 ΚΥΚΛΩΜΑ ΕΛΕΓΧΟΥ.....	3-29
<b>Άσκηση 7. Μετατροπές Συνεχούς σε Εναλλασσόμενο.....</b>	<b>4-30</b>
7. 1 ΔΙΕΞΑΓΩΓΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ.....	4-30
7.1.1 Απαιτούμενες συσκευές και όργανα για την Άσκηση 6.....	4-30
7.1.2 ΓΕΝΙΚΕΣ ΟΔΗΓΙΕΣ.....	4-30
7.1.3 ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΕΑΣ ΜΕ ΕΞΑΝΑΓΚΑΣΜΕΝΗ ΟΔΗΓΗΣΗ.....	4-30
7.1.4 ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΕΑΣ ΜΕ ΟΔΗΓΗΣΗ ΦΟΡΤΙΟΥ.....	4-30
<b>Άσκηση 8. Τριφασικός Μετατροπές Έξι Παλμών.....</b>	<b>5-32</b>
8. 1 Θεωρία.....	5-32
8.1.1 Εισαγωγή.....	5-32
8.1.2 Τροφοδοσία με τριφασικό.....	5-33
8.1.3 Βασικό κύκλωμα και Συνδεσμολογία.....	5-35
8.1.4 Ψύξη.....	5-36
8.1.5 Έλεγχος.....	5-36
8.1.6 Ανάλυση Λειτουργίας.....	5-37
8.1.7 Ανάλυση Κυματομορφών.....	5-39
8.1.8 Άεργος ισχύς.....	5-40
8.1.9 Διεξαγωγή Πειράματος.....	5-42
I.....	5-42
<sup>ο</sup> Μέρος. Μετατροπές Πλήρως Ελεγχόμενος χωρίς Δίοδο Ελεύθερης Διέλευσης.....	5-42
B) Παρατήρηση των Παλμών Πυροδότησης των Έξι Θυρίστωρ.....	5-42
8.1.10 Ωμικό - επαγωγικό φορτίο.....	5-44
4.....	5-44
<sup>ο</sup> Μέρος Κύκλωμα Ελέγχου.....	5-44
<b>Άσκηση 9. Έλεγχος Στροφών Κινητήρα Συνεχούς Ρεύματος με Μονοφασική Ανορθωτική Γέφυρα Μερικώς Ελεγχόμενη.....</b>	<b>6-45</b>
9. 1 Εισαγωγή.....	6-45
9. 2 Θεωρία.....	6-45
9. 3 Βασικές Αρχές Λειτουργίας των Μονοφασικών Μετατροπέων με Έλεγχο Φάσης.....	6-46
9. 4 Μονοφασικός Ημιμετατροπέας.....	6-47
9. 5 Μονοφασικός Πλήρης Μετατροπέας.....	6-49
9. 6 Μονοφασικός Διπλός Μετατροπέας.....	6-50
9. 7 Κύκλωμα της Άσκησης.....	6-54
9.7.1 Ρύθμιση στροφών μηχανής συνεχούς ρεύματος μέσω της τάσης του τυμπάνου.....	6-54

9.7.2 Περιγραφή της λειτουργίας της πειραματικής διάταξης.....	6-55
9.7.3 Κύκλωμα Τροφοδοσίας.....	6-55
9.7.4 Κύκλωμα Παλμοδότησης.....	6-55
9.7.5 Πραγματοποίηση Εργαστηριακής Άσκησης.....	6-58
9.7.6 Παλμογραφήσεις.....	6-61

## Άσκηση 0. Μελέτη του Θυρίστορ

### 0.1 Διεξαγωγή Πειράματος

Απαιτούμενες συσκευές και όργανα για την Άσκηση 1:

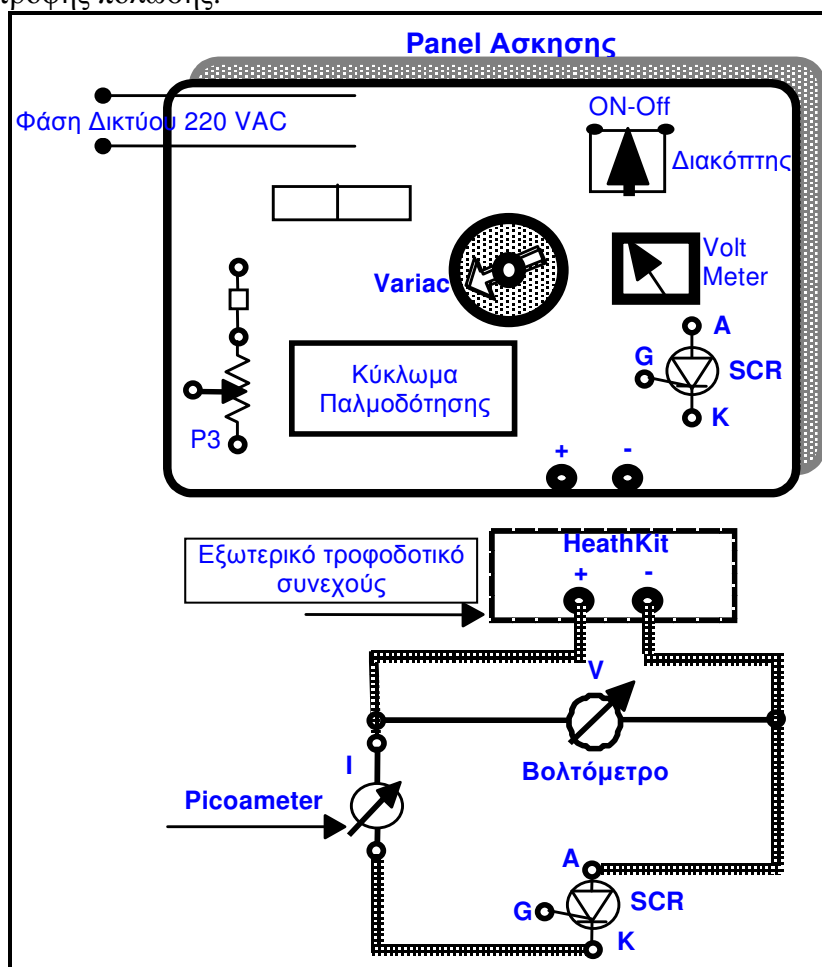
- ♦ Μονάδα μέτρησης SCR ή εξωτερικό SCR
- ♦ Παλμογράφος συνδεδεμένος με Η/Υ
- ♦ Τροφοδοτικό Heathkit (παραγωγή DC)
- ♦ Τροφοδοτικό Farnel
- ♦ Τροφοδοτικό Kikusui (πηγή της πηγής ρεύματος)
- ♦ Βολτόμετρο 0-500 Volt DC και Βολτόμετρο 0-25 Volt DC
- ♦ Αμπερόμετρο 0-5 Amper DC και MiliΑμπερόμετρο 0-100 mA DC
- ♦ KETHLEY picoammeter.

#### 0.1.1 Χαρακτηριστικές Ανόδου-Καθόδου

##### 0.1.1.1 Περιοχή αρνητικής αποκοπής

Για την πραγματοποίηση των μετρήσεων στην περιοχή αυτή απαιτείται τροφοδοτικό υψηλής τάσης 0-200 Volt που παρέχεται από το τροφοδοτικό της εταιρίας **Heathkit**. Πραγματοποιείτε το κύλωμα **ανάστροφης πόλωσης** (επόμενη εικόνα). Μεταβάλλετε την τάση εξόδου του τροφοδοτικού από 0 μέχρι 200 V και μετρείστε στο picoammeter τις αντίστοιχες τιμές του ρεύματος διαρροής  $I_{Leak}$ . Καταχωρείστε σε πίνακα τα ζεύγη τιμών τάσεως U και  $I_{Leak}$ .

- Μπορείτε; Τι παρατηρείτε; Εξηγήστε τη συμπεριφορά της καμπύλης.
- Διαπιστώστε την αδυναμία του θυρίστορ να μεταβεί στην περιοχή Zenner, παρά την ύπαρξη συνθηκών ανάστροφης πόλωσης.



Εικ. 1. Μέτρηση χαρακτηριστικών στην περιοχή αρνητικής αποκοπής

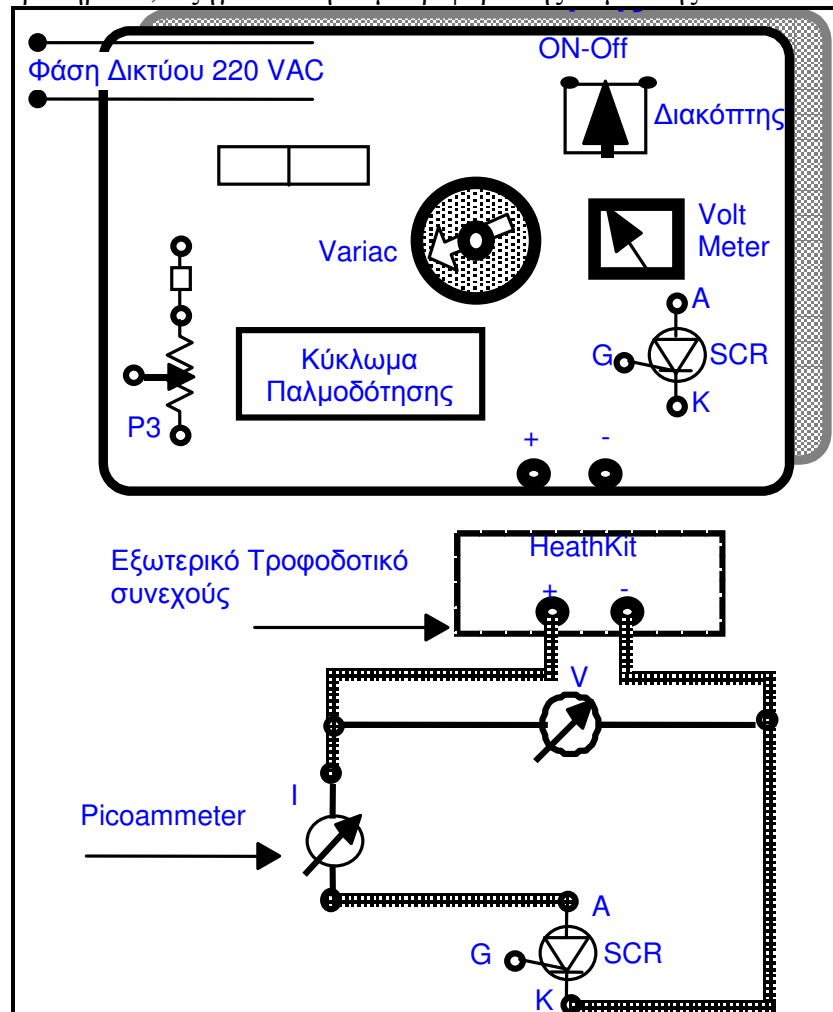
Σαν θυρίστορ μπορεί να χρησιμοποιηθεί αυτό της άσκησης ή το εξωτερικό. Προσέξτε ιδιαίτερα, διότι θα χρησιμοποιήσετε υψηλή τάση.

### 0.1.1.2 Περιοχή θετικής αποκοπής

Συνδέστε το κύκλωμα σε συνδεσμολογία **ορθής πόλωσης** όπως στην (επόμενη εικόνα). Μεταβάλλετε την τάση εξόδου  $U$  του τροφοδοτικού από 0 μέχρι 200 V και μετρείστε στο picoameter τις αντίστοιχες τιμές του ρεύματος διαροής  $I_{Leak}$ . Καταχωρείστε σε πίνακα τα ζεύγη τιμών τάσεως  $U_{AK}$  και  $I_{Leak}$ .

Διαπιστώστε την αδυναμία του θυρίστορ να έρθει σε αγωγιμότητα, παρά την ύπαρξη συνθηκών ορθής πόλωσης.

- Μπορείτε; Τι παρατηρείτε; Εξηγήστε τη συμπεριφορά της καμπύλης.



Εικ. 2. Μέτρηση χαρακτηριστικών στην περιοχή θετικής αποκοπής

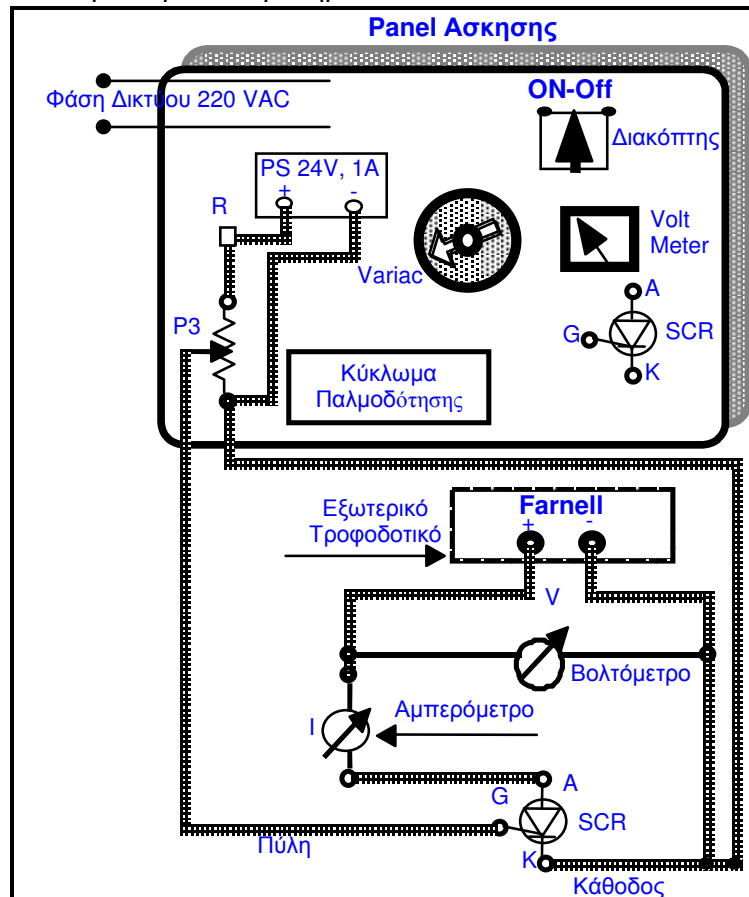
### 0.1.1.3 Περιοχή διέλευσης

Θα πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι στην παρούσα μέτρηση δεν υπάρχει φορτίο συνδεδεμένο. Επομένως η τροφοδοσία ρεύματος φορτίου θα γίνει από το τροφοδοτικό σταθερής πηγής ρεύματος (Farnel). Με τον τρόπο αυτό το SCR θα εξαναγκαστεί να γίνει αγωγίμο.

Συνδέστε το θυρίστορ σε ορθή πόλωση με πηγή ρυθμιζόμενης τάσης 0-24 V (εικόνα που ακολουθεί). Το  $U_{AK}$  παρέχεται από το εξωτερικό τροφοδοτικό Farnel. Το κύκλωμα πύλης-καθόδου να συνδεθεί μέσω του διαιρέτη P3 με το τροφοδοτικό σταθερής τάσης 24 V του πάνελ της άσκησης.

- Τοποθετείστε τα ποτενσιόμετρα I, V, P3 στη μηδενική τους θέση.
- Εφαρμόστε τη μέγιστη τάση μεταξύ ανόδου-καθόδου, μεταβάλλοντας το ποτενσιόμετρο U (τροφοδοτικό FARNEL).
- Ρυθμίστε το ποτενσιόμετρο P3 για σίγουρη έναυση του θυρίστορ.

- δ. Μεταβάλλετε, μέσω του ρυθμιστή ρεύματος του Farnell, το ρεύμα αγωγής του θυρίστορ από 0 μέχρι 2 A περίπου. Μετρείστε και καταχωρείστε σε αντίστοιχο πίνακα τις τιμές της τάσης  $U_{AK}$  και του ρεύματος  $I_{AK}$  του θυρίστορ. Τί παρατηρείτε;



Εικ. 3. Μέτρηση Χαρακτηριστικής Διέλευσης

Όταν φτάσετε τη μέγιστη τιμή ρεύματος μεταξύ Ανόδου-Καθόδου, μηδενίσετε την τιμή του ποτενσιόμετρου P3. Τί παρατηρείτε;

Στο σημείο αυτό έχετε πραγματοποιήσει τα τρία μέρη της χαρακτηριστικής καμπύλης. Σχεδιάστε τη χαρακτηριστική θυρίστορ από τις τιμές που πήρατε.

#### 0.1.1.4 Περιοχή μετάπτωσης

Σκοπός αυτού του μέρους της άσκησης είναι να αντιληφθείτε πότε και με ποιές συνθήκες γίνεται η **μετάπτωση** του θυρίστορ από την περιοχή της θετικής αποκοπής στην περιοχή διέλευσης.

Πραγματοποιείτε το κύκλωμα της (επόμενη εικόνα).

Ρυθμίστε το ρεύμα πύλης με το **P3** σε μηδενική τιμή (πχ. το ποτενσιόμετρο στην αριστερή θέση) και στη συνέχεια αυξήστε την τάση  $U_{AK}$  (μέσω του Variac) ενώ ταυτόχρονα παρακολουθήστε το  $I_{AK}$  στο Αμπερόμετρο (ρεύμα Ανόδου Καθόδου). Παρατηρήστε ότι όσο και αν αυξήσετε την τάση  $U_{AK}$  δεν θα παρατηρήσετε ροή ρεύματος στο αμπερόμετρο.

\* Εξηγείστε γιατί.

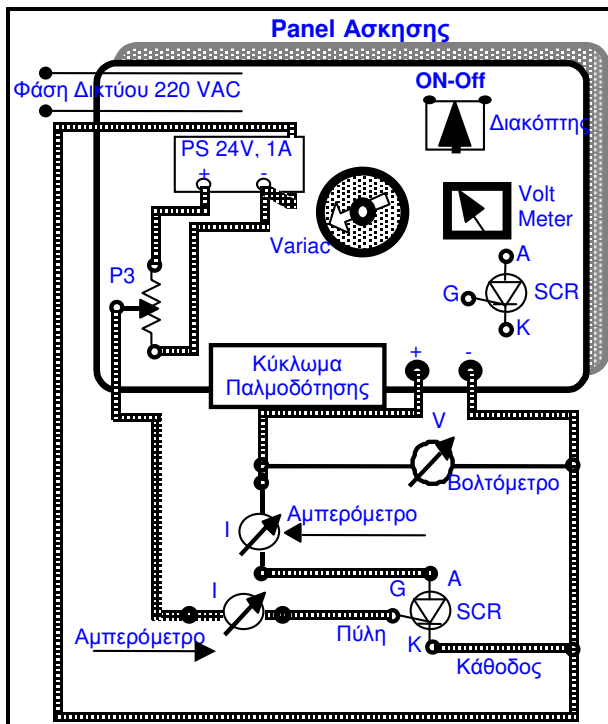
\* Πότε θα έχετε ροή ρεύματος;

- Μέσω του **P3** ρυθμίστε το ρεύμα πύλης σε μια υψηλότερη τιμή (πχ. 5 mA, στη συνέχεια αυξήστε την τάση  $U_{AK}$  (μέσω του Variac) και ταυτόχρονα παρακολουθήστε το  $I_{AK}$  στο Αμπερόμετρο (ρεύμα Ανόδου Καθόδου). Παρατηρήστε ότι καθώς αυξάνεται η  $U_{AK}$  σε μια τιμή θα υπάρχει ροή ρεύματος στο αμπερόμετρο.
- Σημειώστε την τιμή  $U_{AK}$  στην οποία έχετε έναρξη ροής ρεύματος και μηδενίστε την.
- Ρυθμίστε (μέσω του **P3**) το ρεύμα πύλης σε μια υψηλότερη τιμή (πχ. 10 mA) και στη συνέχεια αυξήστε βαθμιαία την τάση  $U_{AK}$  (μέσω του Variac) παρακολουθώντας ταυτόχρονα στο



Αμπερόμετρο την έναρξη αγωγιμότητας (ροή ρεύματος). Σημειώστε τις τιμές  $I_G$  και  $U_{AK}$  στις οποίες έχουμε έναρξη αγωγιμότητας.

4. Επαναλάβετε την ανωτέρω διαδικασία για 15 και 20 mA.
5. Σημειώστε σε πίνακα όλες τις τιμές  $U$  και  $I_G$ . Σχεδιάστε τη συνάρτηση  $U=F(I_G)$ . Σημειώστε ότι η περιοχή τιμών του  $I_G$  μέσω του P3 είναι πολύ μικρή. Στο συγκεκριμένο Thyristor και για το συγκεκριμένο κύκλωμα της Άσκησης, το  $I_G$  είναι στην περιοχή των 10 ως 25 mA. Η  $U_{AK}$  είναι στην περιοχή των 1.7 έως 350 Volts.

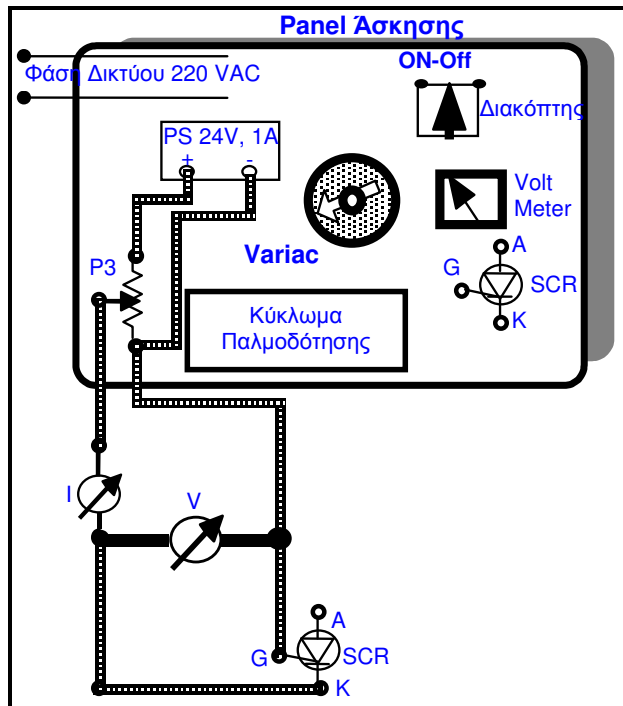


Εικ. 4. Κύκλωμα για μέτρηση χαρακτηριστικής μετάπτωσης

## 0.1.2 Χαρακτηριστικές Πύλης - Καθόδου

### 0.1.2.1 Ανάστροφη πόλωση

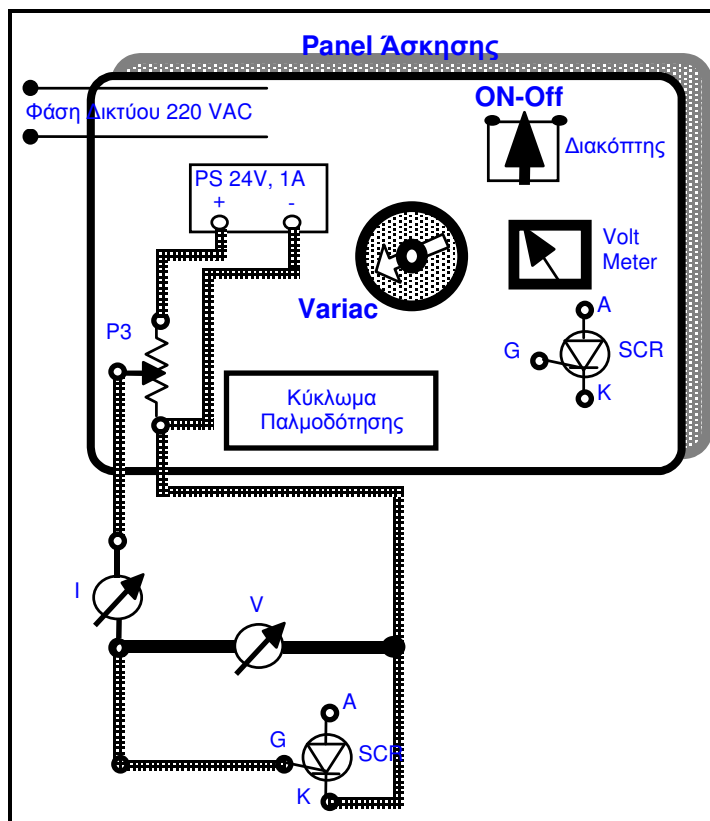
Συνδεσμολογίστε το κύκλωμα της (επόμενη εικόνα). Μεταβάλλετε μέσω του ποτενσιόμετρου P3 το ανάστροφο ρεύμα πύλης  $I_G$  από 0 μέχρι 80 mA. Μετρείστε το ρεύμα και την ανάστροφη τάση  $U_{GK}$  και καταχωρείστε τα σε πίνακα. Το θυρίστορ μπορεί να είναι αυτό της άσκησης ή εξωτερικό.



Εικ. 5. Μέτρηση χαρακτηριστικών πύλης – καθόδου σε ανάστροφη πόλωση

### 0.1.2.2 Ορθή Πόλωση

Πραγματοποιήστε το κύκλωμα της (επόμενη εικόνα). Μεταβάλλετε την πόλωση της τάσης  $U_{GK}$  μέσω του ποτενσιομέτρου P3 και επαναλάβετε τις μετρήσεις για ρεύμα πύλης από 0 μέχρι 100 mA. Καταχωρείστε τις σε πίνακα και σχεδιάστε με τις τιμές τις χαρακτηριστικές πύλης-καθόδου σε ένα διάγραμμα (και για τις δύο περιπτώσεις). Από τη χαρακτηριστική που σχεδιάσατε θα διαπιστώσετε ότι δεν είναι μίας απλής διόδου. Αυτό οφείλεται στο ότι (παράλληλα με τη δίοδο πύλης-καθόδου) υπάρχει μέσα στο ολοκληρωμένο μία αντίσταση, που προστατεύει από τυχαία έναυση, όταν η πύλη είναι ανοικτή.



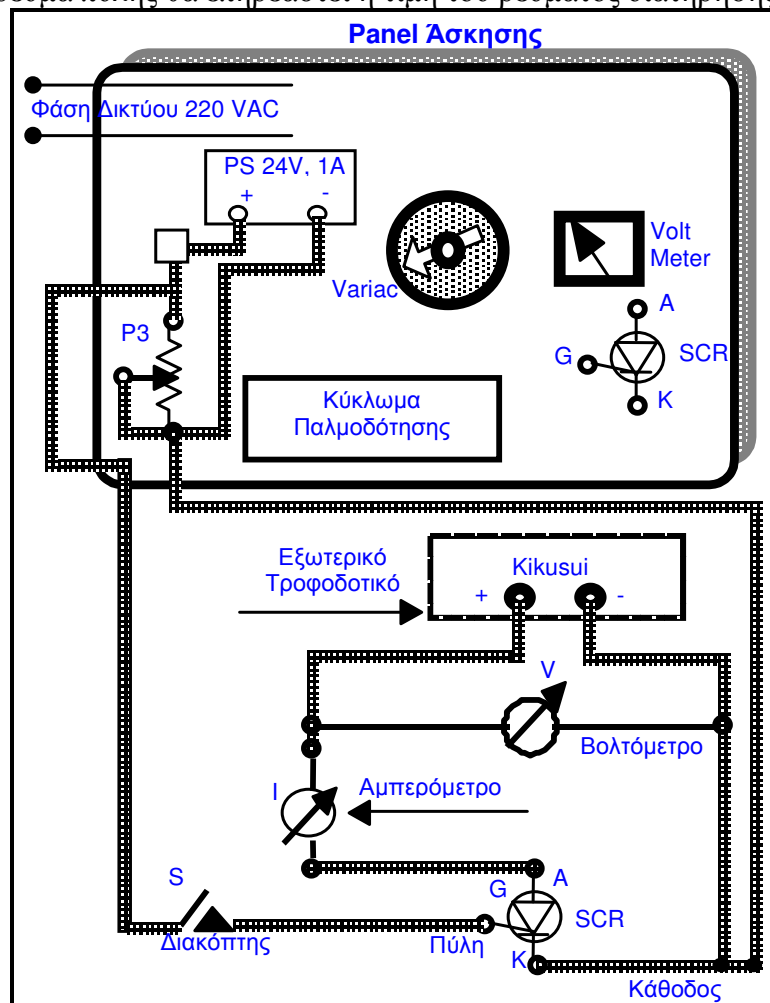
Εικ. 6. Μέτρηση χαρακτηριστικών πύλης – καθόδου σε ορθή πόλωση

## 0.2 Ρεύμα Διατήρησης και Συγκράτησης

### 0.2.1 Ρεύμα διατήρησης

Συνδεσμολογήστε το κύκλωμα της ακόλουθης εικόνας. Χρησιμοποιείτε το τροφοδοτικό υψηλής τάσης συνεχούς Kikusui.

- 1 Τοποθετείστε τον διακόπτη S (πάνω στο πάνελ της άσκησης και δίπλα στο P3) στην **κλειστή θέση** και ρυθμίστε με το **P3** το ρεύμα πύλης σε μια τιμή, ώστε η πύλη να τροφοδοτείται επαρκώς με ρεύμα (πχ. το ποτενσιόμετρο στη μέση περίπου).
- 2 Αυξήστε την τάση  $U_{AK}$  (μέσω του Kikusui) και παρακολουθήστε μέσω του  $I_{AK}$  (ρεύμα Ανόδου Καθόδου) πότε θα έχουμε αγωγιμότητα. Όταν το SCR έρθει σε αγωγιμότητα τοποθετείστε τον διακόπτη S στην **ανοικτή θέση** (διακοπή ρεύματος πύλης) και παρατηρήστε ότι το SCR έρχεται σε σβέση.
- 3 Εξηγείστε γιατί;
- 4 Σε ποια τιμή τάσης και ρεύματος συμβαίνει το ανωτέρω;
- 5 Τοποθετείστε τον διακόπτη S (πάνω στο πάνελ της άσκησης και δίπλα στο P3) στην **κλειστή θέση**. Από το ποτενσιόμετρο ρεύματος του Kikusui αυξήστε το ρεύμα θυρίστορ αυξάνοντας το ρεύμα μέχρι την τιμή εκείνη, που ακόμα και αν διακοπεί το ρεύμα πύλης (με τον διακόπτη), το θυρίστορ θα παραμείνει αγωγίμο. **Το ρεύμα αυτό είναι ρεύμα διατήρησης.**
- 6 Ποία η διαφορά στην τιμή ρεύματος μεταξύ της πρώτης και τελευταίας τιμής;
- 7 Σχολιάστε τη διαφορά τιμών ρεύματος.
- 8 Εάν αυξήσετε το ρεύμα πύλης θα επηρεαστεί η τιμή του ρεύματος διατήρησης;



Εικ. 7. Μέτρηση ρεύματος διατήρησης και συγκράτησης

### 0.2.2 Ρεύμα συγκράτησης

Το ρεύμα συγκράτησης είναι το ελάχιστο εκείνο ρεύμα ανόδου-καθόδου, που χρειάζεται το θυρίστορ σε ορθή πόλωση, ώστε να συνεχίσει να παραμένει αγωγίμο, ακόμη και όταν δεν υπάρχει ρεύμα πύλης. Για αγωγίμο θυρίστορ, μειώστε μέσω του Kikusui το ρεύμα θυρίστορ, με ανοιχτό κύκλωμα πύλης-καθόδου, μέχρις ότου το θυρίστορ σβήσει. Σημειώστε την αντίστοιχη τιμή του ρεύματος θυρίστορ (ρεύμα συγκράτησης).

- \* Εάν αυξήσετε το ρεύμα πύλης θα αλλάξει η τιμή του ρεύματος συγκράτησης;
- \* Από τι επηρεάζεται το ρεύμα συγκράτησης και διατήρησης;
- \* Επηρεάζει η μεταβολή του ρεύματος πύλης τις τιμές των ανωτέρω ρευμάτων;

### 0.3 Κύκλωμα Ελέγχου

Δώστε τα σήματα  $V_{SYN}$  (τάση συγχρονισμού) και  $I_T$  (παλμοί έναυσης) στον παλμογράφο και ρυθμίστε με το ποτενσιόμετρο τη γωνία έναυσης στις  $60^{\circ}$ . Η γωνία αυτή θα παραμείνει σταθερή για όλες τις μετρήσεις αυτής της παραγράφου. Επίσης, η σχεδίαση όλων των κυματομορφών που ζητούνται παρακάτω θα γίνει στο ίδιο διάγραμμα.

Παλμογραφήστε την τάση συγχρονισμού και την πριονωτή τάση. Σχεδιάστε τις κυματομορφές. Επαναλάβετε την παλμογράφιση με την πριονωτή τάση και τη συνεχή τάση ελέγχου ( $U_{ST}$ ), προσέχοντας να υπάρχει η ίδια ευαισθησία και ίδιο μηδενικό ύψος και στα δύο κανάλια. Προσδιορίστε τη γωνία του σημείου τομής των δύο κυματομορφών, λαμβάνοντας υπόψη ότι ένα δόντι της πριονωτής τάσης ισοδυναμεί με  $180^{\circ}$ . Σχεδιάστε την κυματομορφή της τάσης ελέγχου στο διάγραμμα. Παλμογραφήστε την πριονωτή τάση και τους παλμούς έναυσης και σχεδιάστε τους παλμούς έναυσης στο ίδιο διάγραμμα.

# Άσκηση 1. Ρυθμιζόμενος Διακόπτης Εναλλασσόμενου Ρεύματος (AC-Controller)

## 1.1 Διεξαγωγή Πειράματος

### 1.1.1 Απαιτούμενες συσκευές και όργανα για την Άσκηση 2

1. Μονάδα ρυθμιζόμενου διακόπτη εναλλασσόμενου
2. Βολτόμετρο 0-400 Volt AC
3. Αμπερόμετρο 0-10 Amper AC
4. Σειρά Αντιστάσεων 4 x 50 Ohm/1.5Kw
5. Πηνίο 2 x 0,06H
6. Βαττόμετρο (0-400V 10A 400W)
7. Βαριόμετρο (0-400V 10A 400VAR)
8. Παλμογράφος

### 1.1.2 Ωμικό Φορτίο

Το συγκρότημα της Άσκησης περιέχει μπροστά στο panel:

- διακόπτη on-off
- βολτόμετρο τάσεως δικτύου
- κύκλωμα δύο αντιπαράλληλων θυρίστωρ
- μετασχηματιστή στην κορυφή του panel, ο οποίος χρησιμοποιείται:
  - α. για να τροφοδοτήσει το διπλό τροφοδοτικό, που δίνει τάσεις +15V και -15V ως προς τη στάθμη αναφοράς.
  - β για να δώσει παλμό συγχρονισμού στις πύλες μέσω ενός διπλού μετασχηματιστή.
  - γ. για να τροφοδοτήσει ένα κύκλωμα παραγωγής μιας αργά μεταβαλλόμενης συνεχούς τάσης  $u_{st}$ , η οποία χρησιμοποιείται για να ελέγχει τη θέση του παλμού και μέσω αυτού, τη γωνία έναυσης.

Επίσης υπάρχει και μια αντίσταση τύπου shunt, την οποία θα χρησιμοποιήσουμε για να μετράμε έμμεσα την τιμή του ρεύματος που περνάει μέσα από το φορτίο. Η σημασία της αντίστασης αυτής είναι μεγάλη. Πρέπει να είναι κατά πολύ μικρότερη του φορτίου, να είναι ισχύος μια και το ρεύμα φορτίου θα περάσει μέσα της και να έχει την κατάλληλη τιμή αφού το ρεύμα θα πολλαπλασιάζεται επί την τιμή της (π.χ. εάν είναι 1Ω τότε η τάση που θα διαβάζουμε θα είναι απευθείας ανάλογη του ρεύματος που περνάει μέσα της).

Η τάση του δικτύου  $U_{ενδικτυου}$  μετριέται από το όργανο του Panel. Το  $U_{ενφορτιου}$  μετριέται με true RMS multimeter στα άκρα του φορτίου.

Το  $I_{εν}$  μετριέται επίσης με true RMS τοποθετημένο σε σειρά στη θέση του shunt.

Η γωνία  $\alpha$  μπορεί να μετριέται μέσω των msec του παλμογράφου αν υπολογιστεί ότι ολόκληρη η περίοδος αντιστοιχεί σε  $360^\circ$ .

### 1.1.3 Κυματομορφές

1. Αναγνωρίστε, μελετήστε, σχεδιάστε και πραγματοποιείστε το κύκλωμα της Εικ. 14, τροποποιημένο ώστε να περιέχει και τη συνδεσμολογία του παλμογράφου και μία εξήγηση του τρόπου μέτρησης του ρεύματος μέσω shunt. Σε περίπτωση που έχετε πρόβλημα συμβουλευτείτε το τέλος των σημειώσεων.
2. Συνδέστε, στην έξοδο του κυκλώματος σαν φορτίο, μια ωμική αντίσταση  $RL=50 \Omega$  και τα αντίστοιχα όργανα μετρήσεων. Η αντίσταση φορτίου 50Ω βρίσκεται στα ειδικά κουτιά πάνω από την κύρια άσκηση. Για να μπορέσετε να δείτε την κυματομορφή του ρεύματος στον παλμογράφο, παρεμβάλετε μία μικρή αντίσταση και μετρήστε την πτώση τάσης πάνω σε αυτή (η κυματομορφή τάσεως θα είναι ίδια με του ρεύματος).

Τροφοδοτείστε το κύκλωμα με τάση δικτύου 220V (διακόπτης ON-OFF στο 1). Μέσω του ποτενσιόμετρου ρύθμισης της γωνίας έναυσης, δώστε διάφορες τιμές του  $\alpha$  και παρατηρείστε στον παλμογράφο διπλής δέσμης τις κυματομορφές:

- α) της τάσης δικτύου και του ρεύματος φορτίου και
- β) της τάσης φορτίου και του ρεύματος φορτίου.

Σχεδιάστε τις αντίστοιχες κυματομορφές για  $\alpha=90^\circ$ .

Η μέτρηση της γωνίας έναυσης θα γίνεται στον παλμογράφο με σύγκριση των δύο κυματομορφών (τάση δικτύου-τάση φορτίου).

#### 1.1.4 Συναρτήσεις

Αντικαταστήστε τη shunt αντίσταση με το αμπερόμετρο και συνδέστε το βολτόμετρο στα άκρα του φορτίου. Για διαφορετικές τιμές της γωνίας  $\alpha$  μετρείστε και καταχωρείστε σε αντίστοιχους πίνακες τις ενεργές τιμές τάσης φορτίου και ρεύματος φορτίου ( $U_{Ev}$ ,  $I_{Ev}$ ) και την ενεργό και, εφόσον υπάρχει η δυνατότητα, την άεργο ισχύ ( $P$ ,  $Q$ ). Το  $I_{Ev}$  θα μετρηθεί με αμπερόμετρο στη θέση του shunt. Με βάση τους πίνακες αυτούς υπολογίστε και σχεδιάστε τις συναρτήσεις:

$$S = U_{Ev} I_{Ev} = F(\alpha), \quad I_{Ev}/I_{Ev\max} = F(\alpha), \quad P = F(\alpha), \quad Q = F(\alpha)$$

όπου  $I_{Ev\max}$  η μέγιστη τιμή του ενεργού ρεύματος. Από τις τιμές αυτές υπολογίστε και σχεδιάστε τη συνάρτηση:

$$K = P / S = F(\alpha),$$

αποδεικνύοντας έτσι την ύπαρξη αέργου ισχύος ελέγχου σε ωμικό φορτίο, όταν η τελευταία δεν μπορεί να μετρηθεί άμεσα. Να διατυπώσετε αν τα αποτελέσματα των μετρήσεών σας επαληθεύονται από τη θεωρία και αν πράγματι γίνεται ρύθμιση της ισχύος με τη μεταβολή της γωνίας έναυσης.

### 1.2 ΕΠΑΓΩΓΙΚΟ ΦΟΡΤΙΟ

#### 1.2.1 Κυματομορφές

Συνδέστε σαν φορτίο ένα πηνίο  $L_L = 0,06H$ . Για διαφορετικές τιμές της γωνίας  $\alpha$  μετρείστε και καταχωρείστε τις ενεργές τιμές τάσης φορτίου και ρεύματος φορτίου ( $U_{Lev}$ ,  $I_{Ev}$ ).

Σχεδιάστε τις συναρτήσεις:

$U_{Lev} / U_{Lev\max} = F(\alpha)$  (χαρακτηριστική ελέγχου) και  $I_{Ev} / I_{Ev\max} = F(\alpha)$ , όπου  $U_{Lev\max}$ ,  $I_{Ev\max}$  μέγιστες τιμές.

#### 1.2.2 Συναρτήσεις

Βγάλετε το αμπερόμετρο και αντικαταστήστε το με τη shunt αντίσταση. Επαναλάβετε τις παλμογραφήσεις της παραγράφου 2.1.1. και σχεδιάστε τις κυματομορφές για  $\alpha = 90^\circ$  και  $\alpha = 110^\circ$ . Προσοχή να παρακολουθείτε μήπως η ένταση του ρεύματος υπερβεί τα 8 A.

### 1.3 ΩΜΙΚΟ-ΕΠΑΓΩΓΙΚΟ ΦΟΡΤΙΟ

#### 1.3.1 Κυματομορφές

Συνδέστε σε σειρά σαν φορτίο μία ωμική αντίσταση  $100\Omega$  και ένα πηνίο  $0,06H$ . Επαναλάβετε τις παλμογραφήσεις της παραγράφου 2.1.1. και σχεδιάστε τις κυματομορφές  $U_\delta = f(t)$  και  $i_L = f(t)$  καθώς και  $U_L = f(t)$  και  $i_L = f(t)$  για  $\alpha=90^\circ$ .

#### 1.3.2 Συναρτήσεις

Αντικαταστήστε τη shunt αντίσταση με το αμπερόμετρο. Πάρτε μετρήσεις των  $U_{Lev}$  και  $i_{Ev}$  για διάφορες τιμές της γωνίας  $\alpha$  και σχεδιάστε τις καμπύλες  $S = U_{Lev} i_{Ev} = f(\alpha)$  και  $i_{Ev} / i_{Ev\max} = f(\alpha)$ .

#### 1.3.3 Ελάχιστη γωνία έναυσης

Ρυθμίστε τη γωνία έναυσης μέχρις ότου στον παλμογράφο η κυματομορφή του ρεύματος φορτίου γίνει σχεδόν ημιτονοειδής και περιορισθούν στο ελάχιστο τα κενά ρεύματος. Με σύγκριση των κυματομορφών τάσης δικτύου και τάσης φορτίου υπολογίστε την ελάχιστη γωνία έναυσης  $\alpha=\varphi$ . Επιβεβαιώστε τη μέτρησή σας για τη γωνία  $\varphi$  με λύση της εξίσωσης:

$$\varphi = \arctan(\omega L/R)$$

### 1.3.4 Κύκλωμα Ελέγχου

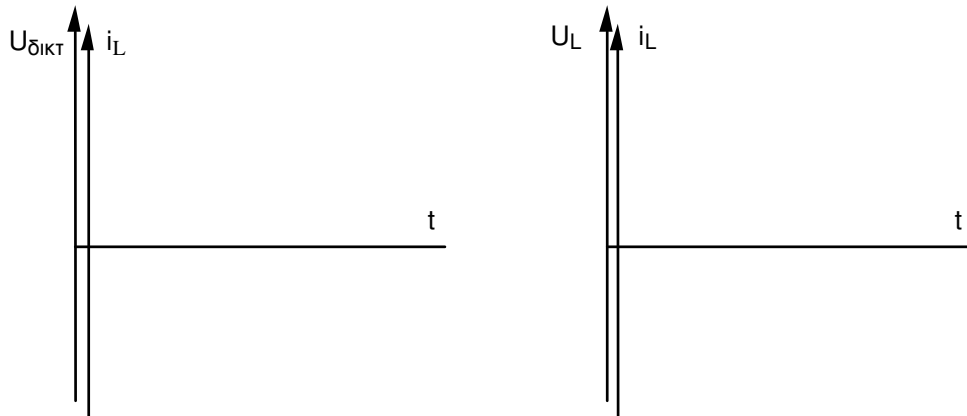
Συνδέστε στη συσκευή ωμικό φορτίο  $100 \Omega$ .

Παρατηρείστε στον παλμογράφο διπλής δέσμης την τάση συγχρονισμού (σήμα  $V_{\text{SYN}}$ ) και τους παλμούς στο θυρίστορ T1 (σήμα  $I_{T1}$ ). Ρυθμίστε τη γωνία έναυσης στις  $30^\circ$ . Σχεδιάστε τις κυματομορφές σε διάγραμμα.

Παρατηρείστε στον παλμογράφο την τάση συγχρονισμού και τους παλμούς στο θυρίστορ T2 (σήμα  $I_{T2}$ ). Σχεδιάστε τους παλμούς στο παραπάνω διάγραμμα.

### 1.3.5 Πίνακες, Καμπύλες για Άσκηση 3

1. Σχεδίαση κυκλώματος



Εικ. 8. Κυματομορφή για  $RL=50\Omega$  και γωνία  $\alpha=90^\circ$

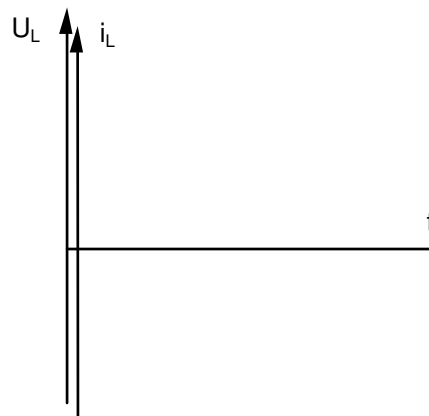
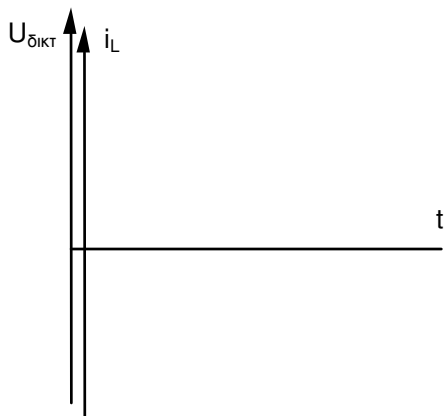
$\alpha$ μοίρες	$U_{L_{\text{ev}}}$ volts	$i_{L_{\text{en}}}$ A	$S = U_{L_{\text{ev}}} i_{L_{\text{ev}}}$	$i_{\text{ev}} / I_{\text{evmax}}$

### 1.3.6 Συναρτήσεις

α μοίρες	$U_{Lev}$ volts	$i_{Lev}$ A	$S = U_{Lev} i_{Lev}$	$i_{ev} / I_{evmax}$

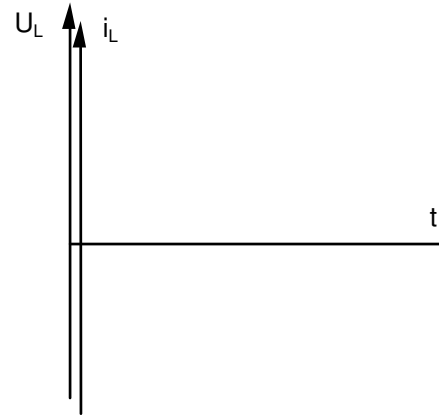
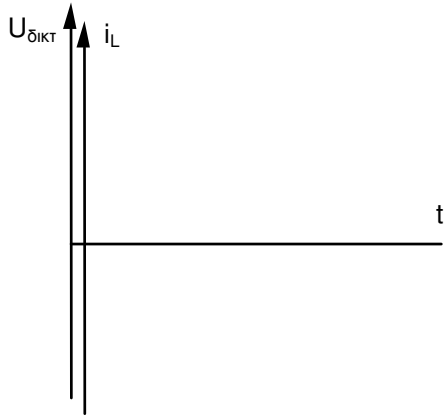
### 1.3.7 Κυματομορφές

Για  $\alpha=90^0$



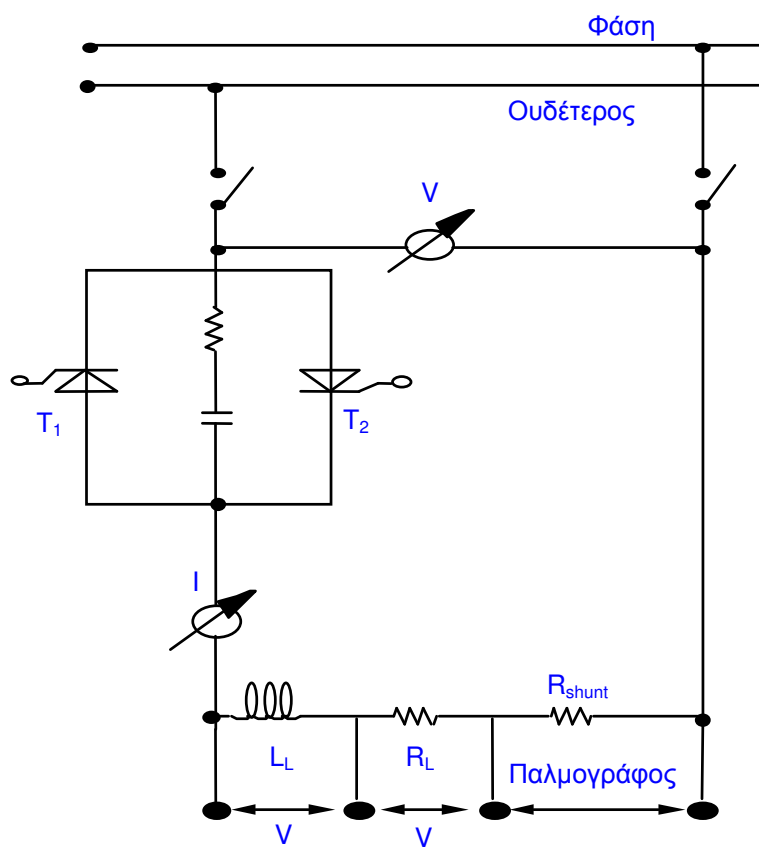
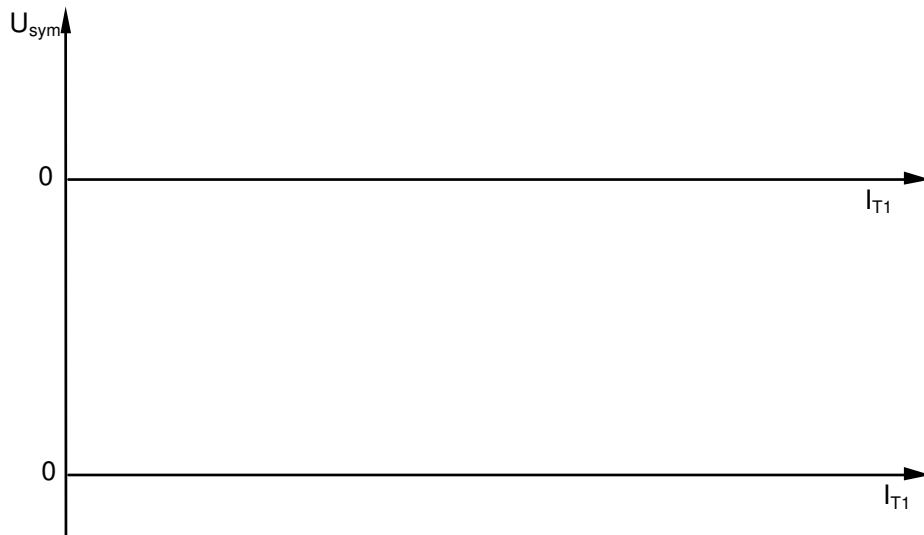
Για  $\alpha=135^0$





α μοίρες	$U_{Lev}$ volts	$i_{Lev}$ A	$S = U_{Lev} i_{Lev}$	$i_{ev} / I_{evmax}$

Ελάχιστη γωνία έναυσης  $\alpha = \varphi = \dots$



Εικ. 9. Βασικό κύκλωμα ρυθμιζόμενου διακόπτη εναλλασσόμενου

## Μέρος 2<sup>ο</sup> Άσκηση 2β

### 1. 4 Ρυθμιζόμενος Διακόπτης Εναλλασσόμενου με TRIACs (AC-AC Converter)

#### 1.4.1 Διεξαγωγή Πειραμάτων

Απαιτούμενες συσκευές και όργανα για την Άσκηση 2β:

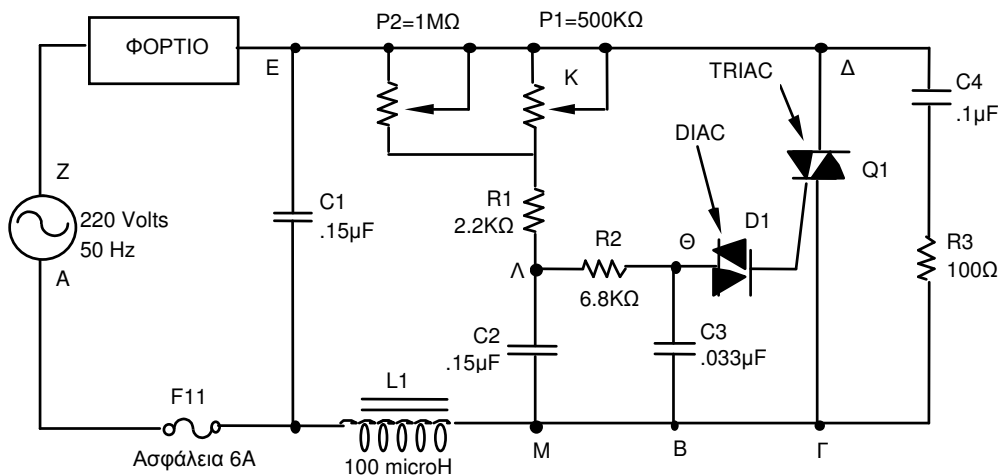
1. Συσκευή ρυθμιζόμενου διακόπτη εναλλασσόμενου 2β
2. Βολτόμετρο 0-400 Volts AC και Αμπερόμετρο 0-10 Amperes AC.
4. Σειρά αντιστάσεων 4 x 50 Ohms / 1.5 KΩ και πηνίο 2 x 0,06 H
6. Παλμογράφος

#### 1.4.1.1 Θεωρία στο Κύκλωμα του TRIAC

Βασικό στοιχείο σε ένα AC Converter είναι το Triac. Το Triac είναι ένας διακόπτης ισχύος, τον οποίο μπορούμε να ελέγξουμε εφαρμόζοντας στην πύλη έναν θετικό ή αρνητικό παλμό. Το Triac θα αποκοπεί όταν το ρεύμα που περνάει μέσα από αυτό, πέσει κάτω από το ρεύμα αυτοσυγκράτησης ( $I_{Triac} \ll I_{hold}$ ). Για να έρθει το Triac πάλι σε αγωγιμότητα θα πρέπει να δώσουμε έναν καινούργιο παλμό στην πύλη του. Με τον τρόπο αυτό μπορούμε να ελέγξουμε την ενεργό τιμή του ρεύματος φορτίου. Αυτό γίνεται κατανοητό με το παρακάτω παράδειγμα: Έστω ότι δίνουμε στην πύλη του Triac έναν παλμό με γωνία καθυστέρησης  $\alpha$  (σε σχέση με την ημιτονική τιμή του δικτύου). Το Triac θα άγει μετά τη γωνία  $\alpha$  και θα σβήσει στις  $180^\circ$  για την θετική ημιπερίοδο. Για την αρνητική ημιπερίοδο έχουμε γωνία εναύσεως  $180^\circ + \alpha$  και σβέση  $360^\circ$ . Αυτό θα επαναληφθεί και στις επόμενες ημιπεριόδους. Έτσι η ενεργός τιμή της τάσης και του ρεύματος είναι ανάλογη της γωνίας  $\alpha$ . Είναι προφανές ότι όταν η γωνία  $\alpha$  είναι  $0^\circ$ , η ενεργός τιμή της τάσης του φορτίου είναι ίση με την ενεργό τιμή της τάσης δικτύου και όταν η γωνία  $\alpha$  είναι  $180^\circ$ , η ενεργός τιμή είναι μηδέν (ο διακόπτης συνεχώς είναι ανοικτός). Ας δούμε τώρα ποια θα είναι η ενεργός τιμή τάσης ανάλογα με τη γωνία  $\alpha$ . Εάν έχουμε ωμικό φορτίο και θεωρήσουμε ιδανικό το διακόπτη, η μέση τιμή του ρεύματος είναι:

$$I_{DC} = \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi} \sqrt{2} I \sin \omega t d(\omega t) = \frac{\sqrt{2} I}{\pi} (1 + \cos \alpha) \quad \text{το } I_{rms} \text{ είναι:}$$

$$I_{rms} = \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi} (\sqrt{2} U \sin(\omega t))^2 d(\omega t)} = \frac{U}{R} \sqrt{\frac{\pi - \alpha + \frac{1}{2} \sin 2\alpha}{\pi}}$$



Εικ. 10. Διάγραμμα της Άσκησης 2β

#### 1.4.1.2 Παρατηρήσεις:

1. Το Triac δεν άγει το ίδιο και στις δύο ημιπεριόδους.
2. Θα πρέπει να συνδέσουμε δύο πηνία σε σειρά, γιατί το ρεύμα εδώ δεν πρέπει να ξεπεράσει το 6A.
3. Εδώ δεν έχουμε μετασχηματιστή παλμών, γι' αυτό και στην πύλη εμφανίζονται μεγάλες κορυφές τάσης.
4. Δεν χρησιμοποιείται κάποιο ειδικό κύκλωμα παλμών γι' αυτό και τα σήματα πύλης δεν είναι τετραγωνικά.

#### 1.4.2 Ωμικό φορτίο

Για την εργαστηριακή μελέτη ενός AC Converter με τη χρήση ενός TRIAC κατασκευάστηκε το κύκλωμα της Εικ. 15. Οι μαύροι κύκλοι στην Εικόνα αντιστοιχούν στις θέσεις που υπάρχουν στο σασί του κυκλώματος. Η ασφάλεια F1 (6A) και τα δύο ποτενσιόμετρα P1 και P2 για λόγους ευχέρειας τοποθετήθηκαν σε άλλη θέση στο σασί.

##### 1.4.2.1 Λειτουργία

Όσο το DIAC είναι σε αποκοπή (δηλαδή δεν άγει) τότε το άκρο που συνδέεται με C3 και R2, βρίσκεται στο δυναμικό του πυκνωτή ως προς τη στάθμη αναφοράς, το δε άλλο άκρο του βρίσκεται στο δυναμικό της πύλης του TRIAC, ο οποίος είναι σε αποκοπή. Συνεπώς όσο το DIAC δεν άγει, η τάση στα άκρα του είναι (ουσιαστικά) όση η τάση στα άκρα του C3. Μόλις ο πυκνωτής αρχίζει να φορτίζεται και η τάση στα άκρα του γίνει ίση με την τάση έναυσης του DIAC, τότε αυτό άγει και η τάση στα άκρα του πέφτει περίπου στο 1V. Στο σημείο Θ (πύλη του TRIAC) εμφανίζεται απότομα ένας παλμός με αποτέλεσμα να έχουμε έναυση.

Το κύριο ρεύμα που θα διέρχεται από το κύκλωμα τώρα θα ακολουθεί τη διαδρομή AMBΓΔΕΖΑ, δηλαδή μέσα από το φορτίο στα E, Z. Προηγουμένως κυκλοφορούσε ρεύμα στις διαδρομές ZEKΛΑΜΑ και ZEKΛΘΒΜΑ (πολύ μικρό λόγω των μεγάλων τιμών των αντιστάσεων P1 και P2) και ήταν αυτό που θα φόρτιζε τους πυκνωτές C2 και C3.

Οι τιμές των μεταβλητών αντιστάσεων P1 και P2 και των σταθερών αντιστάσεων R1 και R2 σε συνδυασμό με τις τιμές των πυκνωτών C2 και C3 είναι εκείνες που θα καθορίσουν πόσο γρήγορα θα φορτιστεί ο C3 στην τάση που θα είναι ικανή να κάνει έναυση το DIAC. Ο C1 τοποθετείται για να καταπνίξει τις απότομες διακυμάνσεις της τάσης του δικτύου. Η αυτεπαγωγή L1 είναι για να καταπνίξει τις απότομες διακυμάνσεις του ρεύματος που θα ήταν ενδεχόμενο να δημιουργήσουν μη ελεγχόμενη έναυση στο DIAC και πιθανή **καταστροφή του TRIAC (di/dt)**.

Ο πυκνωτής C4 και η αντίσταση R3 είναι για να καταπνίξει τις απότομες μεταβολές της τάσεως στα άκρα του TRIAC, που μπορεί να καταστρέψουν το TRIAC (di/dt, κύκλωμα Snapper).

Για να μετρηθεί το ρεύμα που θα περνά από το φορτίο ή για να δούμε την κυματομορφή του μπορούμε να τοποθετήσουμε (σε σειρά με την αντίσταση του φορτίου) μια μικρή αντίσταση τύπου Shunt. Στα άκρα αυτής της αντίστασης η τάση θα είναι όμοιας μορφής με το ρεύμα που τη διαρρέει και η τιμή του θα είναι UR/R.

Πρέπει να είναι κατά πολύ μικρότερη του φορτίου, να είναι ισχύος μιας και το ρεύμα φορτίου θα περάσει μέσα της, να έχει την κατάλληλη τιμή αφού το ρεύμα θα πολλαπλασιάζεται επί την τιμή της (πχ. εάν είναι 1 Ω τότε η τάση που θα διαβάζουμε θα είναι απευθείας ανάλογη του ρεύματος που περνάει μέσα της). Η τάση του δικτύου  $U_{ενδ\text{ικτύου}}$  μετριέται με πολύμετρο εναλλασσομένου.

Η τάση του δικτύου  $U_{ενδ\text{ικτύου}}$  μετριέται από το όργανο του Panel. Το  $U_{ενφ\text{ορτίου}}$  μετριέται με το 3210 true RMS multimeter στα άκρα του φορτίου. Το I<sub>εν</sub> μετριέται με το 3210 τοποθετημένο σε σειρά στη θέση του shunt. Η γωνία α μπορεί να μετριέται μέσω των msec του παλμογράφου αν υπολογιστεί ότι ολόκληρη η περίοδος αντιστοιχεί σε 360°.

Για την εργαστηριακή μελέτη ενός AC Converter με τη χρήση ενός TRIAC κατασκευάστηκε το κύκλωμα που φαίνεται στην Εικ. 15.

### 1.4.3 Τροφοδοσία Τάσης: Προσοχή στην τάση του Δικτύου

Για την άσκηση αυτή και επειδή η τάση δικτύου μπορεί να είναι επικίνδυνη, χρησιμοποιείτε μόνο 50-60 Volts μέσω τροφοδοτικού ή του VARIAC.

### 1.4.4 Κυματομορφές

- α. Αναγνωρίστε, μελετήστε, σχεδιάστε και πραγματοποιείτε το κύκλωμα της Εικ. 15, που όμως να έχει μέσα και τη συνδεσμολογία του παλμογράφου και μια εξήγηση του τρόπου που θα μετρήσει το ρεύμα (μέσω της shunt). Σε περίπτωση που έχετε πρόβλημα συμβουλευτείτε το τέλος των σημειώσεων.
- β. Συνδέστε στην έξοδο του κυκλώματος σαν φορτίο μια ωμική αντίσταση  $RL=50 \Omega$  και τα αντίστοιχα όργανα μετρήσεων. Η αντίσταση φορτίου  $50\Omega$  βρίσκεται στα ειδικά κουτιά πάνω από την κύρια άσκηση.

Για να μπορέσουμε να δούμε την κυματομορφή του ρεύματος στον παλμογράφο, παρεμβάλουμε μια μικρή αντίσταση και μετρούμε την πτώση τάσης πάνω σε αυτή (η κυματομορφή τάσεως θα είναι ίδια με του ρεύματος).

Τροφοδοτείτε το κύκλωμα με τάση δικτύου 220V. Μέσω του ποτενσιόμετρου ρύθμισης της γωνίας έναυσης, δώστε διάφορες τιμές του  $\alpha$  και παρατηρείστε στον παλμογράφο διπλής δέσμης τις κυματομορφές:

- α) της τάσης δικτύου  $U_s$  και του ρεύματος φορτίου  $I_L$
- β) της τάσης φορτίου  $U_L$  και του ρεύματος φορτίου  $I_L$
- γ) της τάσης φορτίου  $U_L$  και της τάσης του TRIAC
- δ) της τάσης πύλης του TRIAC και παρατηρείστε την μέγιστη και ελάχιστη γωνία έναυσης
- ε) της τάσης στα άκρα του πυκνωτή  $U_C$  σε συνάρτηση της γωνίας έναυσης.

Ερμηνεύστε την παραπάνω καμπύλη.

Σχεδιάστε τις αντίστοιχες κυματομορφές για  $\alpha = 90^\circ$ .

Η μέτρηση της γωνίας έναυσης θα γίνεται με σύγκριση των δύο κυματομορφών (τάση δικτύου - τάση φορτίου) στον παλμογράφο.

### 1.4.5 Συναρτήσεις

Αντικαταστήστε τη shunt αντίσταση με το αμπερόμετρο και συνδέστε το βολτόμετρο στα άκρα του φορτίου. Για διαφορετικές τιμές της γωνίας  $\alpha$  μετρείστε και καταχωρείστε σε αντίστοιχους πίνακες τις ενεργές τιμές τάσης φορτίου και ρεύματος φορτίου ( $U_{ev}$ ,  $I_{ev}$ ), καθώς και την ενεργό και -εφόσον υπάρχει η δυνατότητα- άεργο ισχύ ( $P$ ,  $Q$ ). Το  $I_{ev}$  θα μετρηθεί με αμπερόμετρο στη θέση του shunt. Με βάση τους πίνακες αυτούς υπολογίστε και σχεδιάστε τις συναρτήσεις:

$$S = U_{ev} I_{ev} = F(\alpha), I_{ev} / I_{evm} = F(\alpha),$$

$$P = F(\alpha), Q = F(\alpha)$$

όπου  $I_{evm}$  η μέγιστη τιμή του ενεργού ρεύματος. Από τις τιμές αυτές υπολογίστε και σχεδιάστε τη συνάρτηση:

$$K=P/S=F(\alpha)$$

αποδεικνύοντας έτσι την ύπαρξη άεργου ισχύος ελέγχου σε ωμικό φορτίο, όταν η τελευταία δεν μπορεί να μετρηθεί άμεσα. Να διατυπώσετε αν τα αποτελέσματα των μετρήσεών σας επαληθεύονται από τη θεωρία και αν πράγματι γίνεται ρύθμιση της ισχύος με τη μεταβολή της γωνίας έναυσης.

## 1.4.6 Επαγωγικό φορτίο

### 1.4.6.1 Συναρτήσεις

Βγάλτε το αμπερόμετρο και αντικαταστήστε το με την shunt αντίσταση. Επαναλάβετε τις παλμογραφήσεις της παραπάνω παραγράφου και σχεδιάστε τις κυματομορφές για  $\alpha = 90^{\circ}$  και  $\alpha = 110^{\circ}$ .

**Προσοχή:** παρακολουθείτε ώστε η ένταση του ρεύματος να μην υπερβεί τα 6 A.

### 1.4.6.2 Κυματομορφές

Συνδέστε σαν φορτίο ένα πηνίο  $L_L = 0,06H$ . Για διαφορετικές τιμές της γωνίας  $\alpha$  μετρήστε και καταχωρείστε τις ενεργές τιμές τάσης φορτίου και ρεύματος φορτίου ( $U_{Lev}$ ,  $I_{ev}$ ).

Σχεδιάστε τις συναρτήσεις:

$U_{Lev} / U_{Levm} = F(\alpha)$  (χαρακτηριστική ελέγχου) και  $I_{ev} / I_{evm} = F(\alpha)$ , όπου  $U_{Levm}$ ,  $I_{evm}$  μέγιστες τιμές.

## 1.4.7 Ωμικό - επαγωγικό φορτίο

### 1.4.7.1 Κυματομορφές

Συνδέστε σε σειρά σαν φορτίο μια ωμική αντίσταση  $100\Omega$  και ένα πηνίο  $0,06H$ . Επαναλάβετε τις παλμογραφήσεις της παραπάνω παραγράφου και σχεδιάστε τις κυματομορφές  $U_{\delta} = f(t)$  και  $i_L = f(t)$  καθώς και  $U_L = f(t)$  και  $i_L = f(t)$  για  $\alpha = 90^{\circ}$ .

## 1.4.8 Συναρτήσεις

Αντικαταστήστε την shunt αντίσταση με το αμπερόμετρο. Πάρτε μετρήσεις των  $U_{Lev}$  και  $i_{ev}$  για διάφορες τιμές της γωνίας  $\alpha$  και σχεδιάστε τις καμπύλες  $S=U_{Lev.i_{ev}} = f(\alpha)$  και  $i_{ev} / i_{evmax} = f(\alpha)$ .

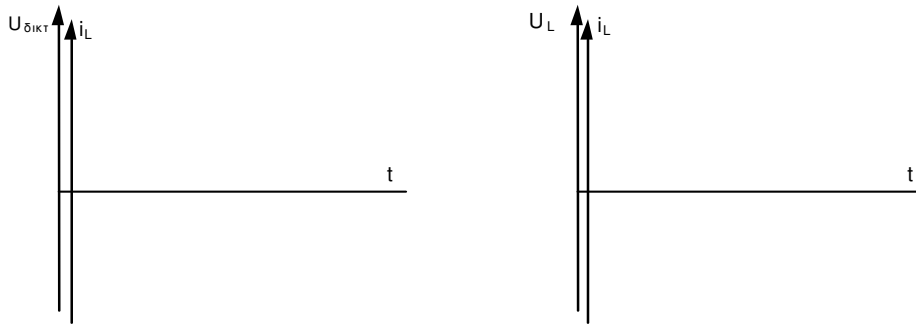
## 1.4.9 Ελάχιστη γωνία έναυσης

Ρυθμίστε τη γωνία έναυσης μέχρις ότου στον παλμογράφο η κυματομορφή του ρεύματος φορτίου γίνει σχεδόν ημιτονοειδής και περιορισθούν στο ελάχιστο τα κενά ρεύματος. Με σύγκριση των κυματομορφών τάσης δικτύου και τάσης φορτίου υπολογίστε την ελάχιστη γωνία έναυσης  $\alpha = \varphi$ . Επιβεβαιώστε τη μέτρησή σας για τη γωνία  $\varphi$  με λύση της εξίσωσης:

$$\varphi = \text{τοξεφ} (\omega L / R)$$

## Πίνακες, Καμπύλες για την Άσκηση 2β

### 1.4.10 Σχεδίαση κυκλώματος



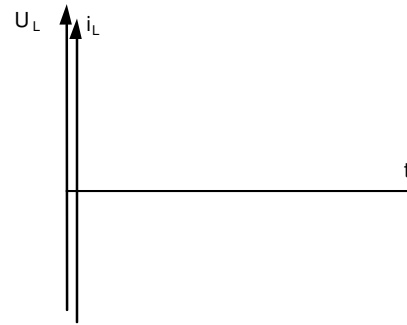
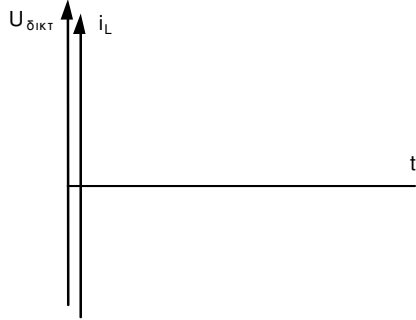
Εικ. 11. Κυματομορφή για  $R_L = 50\Omega$  και γωνία  $\alpha = 90^\circ$

α μοίρες	U <sub>Lev</sub> volts	i <sub>Lev</sub> A	S = U <sub>Lev</sub> i <sub>Lev</sub>	i <sub>εV</sub> / I <sub>εVmax</sub>

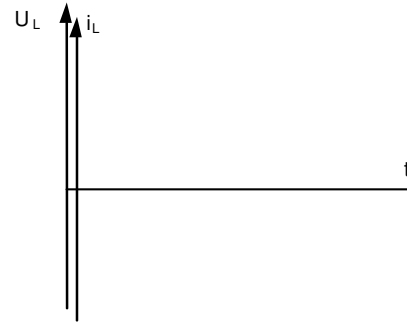
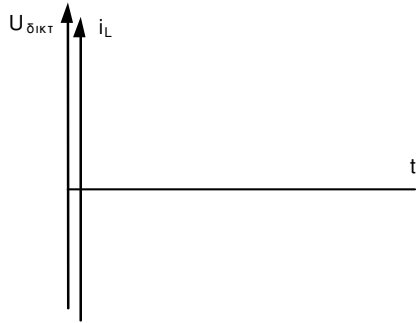
### 1.4.11 Συναρτήσεις

α μοίρες	U <sub>Lev</sub> volts	I <sub>Lev</sub> A	S = U <sub>Lev</sub> i <sub>Lev</sub>	I <sub>εV</sub> / I <sub>εVmax</sub>

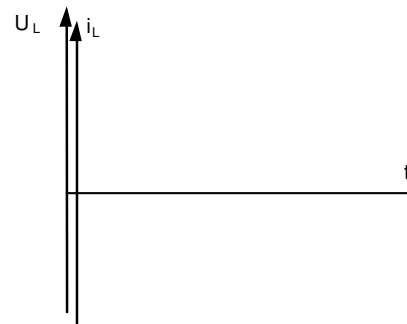
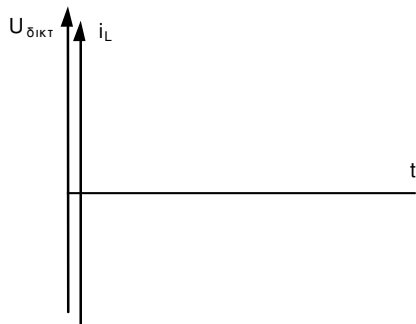
### 1.4.12 Κυματομορφές



Για  $\alpha = 90^0$



Για  $\alpha = 135^0$



$\alpha$ μοίρες	$U_{Lev}$ volts	$I_{Len}$ A	$S = U_{Lev} i_{Lev}$	$I_{ev} / I_{evmax}$

Ελάχιστη γωνία έναυσης  $\alpha = \varphi = \dots$



## Άσκηση 2. Μετατροπéας Συνεχούς Ρεύματος (Chopper-Ψαλιδιστής)

### 2.1 Διεξαγωγή Πειράματος

Απαιτούμενες συσκευές και όργανα για την Άσκηση 3.

5. Μονάδα Chopper
6. Βολτόμετρο 0-500 Volt DC
7. Αμπερόμετρο 0-10 Amper DC
8. Σειρά αντιστάσεων 4 x 50 Ohm/1.5Kw
9. Πηνίο 2 x 0,06H
10. Παλμογράφος
11. Εξωτερικό τροφοδοτικό συνεχούς
12. Probes.

### 2.2 Προκαταρκτικά

Στην άσκηση αυτή έχουμε να ρυθμίσουμε δύο ποσότητες:

1. τη συχνότητα ή περίοδο, με το control F (ποτενσιόμετρο στο panel) και
2. το εύρος των παλμών (pulse width), με το control  $U_{T1}$  (ποτενσιόμετρο στο panel).

Σκοπός της Άσκησης είναι να σας διδάξει τη μετατροπή μιας συνεχούς τάσης (DC), σε μια άλλη συνεχή τάση μικρότερης τιμής. Η μονάδα μόνη της δεν έχει τροφοδοτικό, γι' αυτό η συνεχής τάση εισόδου δίδεται από ένα εξωτερικό τροφοδοτικό συνεχούς, που είναι δίπλα στην Άσκηση. Η εναλλακτική αυτή λύση προτιμάται επειδή είναι δυνατόν να παρατηρούμε και το ρεύμα που δίνει το τροφοδοτικό κατά την διεξαγωγή του πειράματος. Συνδέστε στην έξοδο του τροφοδοτικού (power supply) το καλώδιο της συνεχούς τάσης εισόδου για τη συσκευή της Άσκησης SCR3.

Σημειώστε ακόμη ότι (για την αρχή μόνο) ο διακόπτης παλμοδότησης πρέπει να είναι στη θέση ON, για να μην παραχθούν παλμοί στην εκκίνηση, οι οποίοι θα έφερναν αμέσως το θυρίστορ σε αγωγιμότητα. Επίσης τα κουμπιά  $U_{T1}$  και  $T_1$  να είναι στη μικρότερη ένδειξη (ελάχιστο εύρος παλμού και ελάχιστη περίοδος).

Οι παλμοί αυτοί είναι σχετικά δύσκολο να παρατηρηθούν στον παλμογράφο γιατί είναι μη συμμετρικοί και μη περιοδικοί (σχετικά μιλώντας), δηλαδή ο χρόνος ON δεν είναι ίσος με τον χρόνο OFF. Πρέπει λοιπόν να είστε ιδιαίτερα προσεκτικοί στον τρόπο που κάνετε Triggering, για να μπορείτε να δείτε τις κυματομορφές στον παλμογράφο. Συνιστούμε τη χρήση εξωτερικού trigger για να είναι δυνατή η απεικόνιση στην οθόνη του παλμογράφου. Προχωρήστε τώρα στην πραγματοποίηση της Άσκησης.

### 2.3 ΩΜΙΚΟ ΦΟΡΤΙΟ

1. Αναγνωρίστε, μελετήστε, σχεδιάστε και πραγματοποιείστε το κύκλωμα της επόμενης εικόνας.

Συνδέστε σαν φορτίο μια ωμική αντίσταση  $R_L=50\Omega$ . Συνδέστε στα άκρα του φορτίου μόνιμα ένα βολτόμετρο για την παρακολούθηση της τάσεως φορτίου. Ανοίξτε τώρα τον διακόπτη ισχύος του CHOPPER και μετά τον διακόπτη του τροφοδοτικού, αφού προηγουμένως βεβαιωθείτε ότι το ποτενσιόμετρο ρύθμισης εξόδου του τροφοδοτικού είναι στο 0. Αυξήστε την τάση εξόδου του τροφοδοτικού στο μέγιστο. Η μεγαλύτερη τιμή που μπορείτε να επιτύχετε είναι 50 Volts, 1.5 Amp. Σημειώστε ότι εσωτερικά το τροφοδοτικό έχει κύκλωμα προστασίας, που σημαίνει ότι θα διακόψει αυτόματα την τροφοδοσία αν ξεκινήσετε από τιμή μεγαλύτερη του 0.

Αφού τροφοδοτήσετε το κύκλωμα με συνεχή τάση, τώρα βάλτε το διακόπτη παλμών στη θέση INH (ενεργοποιείται το κύκλωμα παραγωγής παλμών) και ρυθμίστε την συχνότητα των παλμών στα 75Hz, μεταβάλλοντας το control F. Σε περίπτωση που έχετε πρόβλημα συμβουλευτείτε το τέλος των σημειώσεων.

- 1) Παλμογραφήστε την κυματομορφή της τάσης εισόδου και μετρήστε το ripple (κυμάτωση).
- 2) Συνδέστε στο κανάλι 1 τον παλμό έναυσης  $U_{T1}$ , και στο κανάλι 2 τον παλμό σβέσης  $U_{T2}$  και προσδιορίστε τη διάρκεια της περιόδου αγωγιμότητας του SCR.
- 3) Επαναλάβετε το ερώτημα 2 αλλά στο κανάλι δύο του παλμογράφου συνδέστε διαδοχικά το  $U_L$ ,  $I_L$ ,  $U_C$  και πάρτε τις αντίστοιχες κυματομορφές για  $\alpha=1/2$ .
- 4) Δείτε στον παλμογράφο την κυματομορφή της τάσης φορτίου  $U_L$ , για διάφορες τιμές της σχετικής διάρκειας παλμών  $\alpha=T_E/T$ . Σχεδιάστε τις κυματομορφές για  $\alpha=1/4$ ,  $\alpha=2/4$  και  $\alpha=3/4$  (χρησιμοποιήσετε το καταγραφικό του παλμογράφου).
- 5) Μετρήστε και καταχωρείστε στον πίνακα Α (στο τέλος των σημειώσεων) τη μέση τιμή του ρεύματος φορτίου  $I_L$  και της τάσης φορτίου  $U_L$  για διάφορες τιμές του  $\alpha$ . Σχεδιάστε τις συναρτήσεις  $I_L=F(\alpha)$ ,  $U_L=F(\alpha)$ .

## 2.4 ΩΜΙΚΟ-ΕΠΑΓΩΓΙΚΟ ΦΟΡΤΙΟ

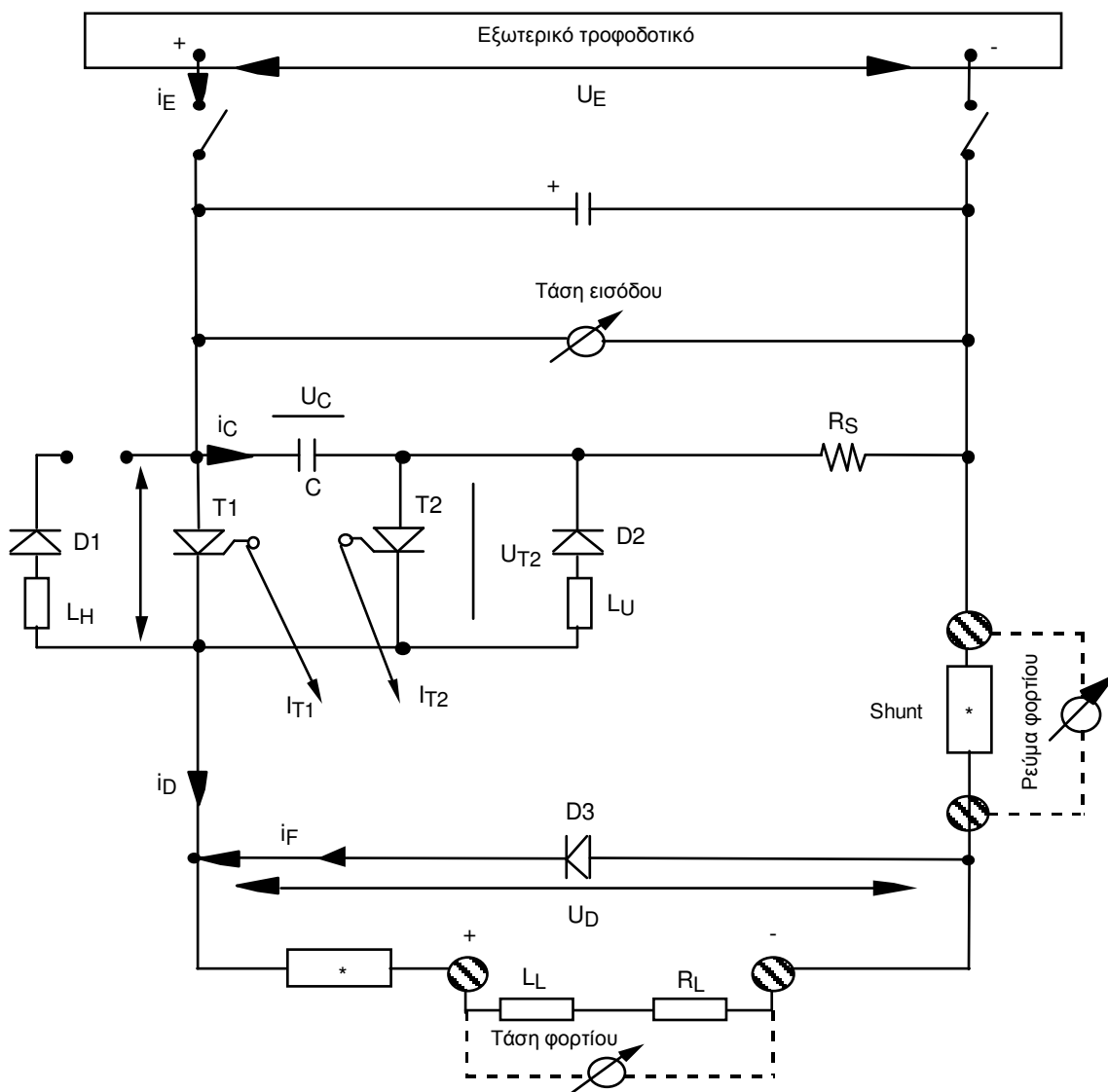
- 1) Συνδέστε σαν φορτίο μια ωμική αντίσταση  $R_L = 50\Omega$  και ένα πηνίο  $L_L=0.05H$  σε σειρά.
- 2) Παλμογραφήστε και σχεδιάστε τις κυματομορφές των εξής μεγεθών: τάση φορτίου  $U_L$  και ρεύμα φορτίου  $I_L$  (μέσω SHUNT), τάση κυρίου θυρίστορ  $U_{T1}$  και τάση πυκνωτή σβέσης  $U_C$ , για δύο τιμές του  $\alpha$  ( $\alpha=1/4$ ,  $\alpha=2/4$  και  $\alpha=3/4$ ).
- 3) Μετρήστε για διάφορες τιμές του  $\alpha$  τη μέση τιμή του ρεύματος φορτίου  $I_L$  και τη μέση τιμή τάσης  $U_L$ , καταχωρείστε τις τιμές στον πίνακα Β και σχεδιάστε τις συναρτήσεις  $I_L = F(\alpha)$  και  $U_L = F(\alpha)$ .
- 4) Συνδέστε το κύκλωμα και τον κλάδο ταχείας επαναφόρτισης. Επαναλάβετε τις παραπάνω παλμογραφήσεις και μετρήσεις. Συγκρίνετε τις μετρήσεις με και χωρίς κλάδο ταχείας επαναφόρτισης.

Πίνακας Α

$\alpha$	$U_L$ Μέσο (Volts)	$I_L$ Μέσο (amp)
0		
1		
2		
3		
4		
5		
6		
7		
8		
9		

Πίνακας Β

$\alpha$	$U_L$ Μέσο (Volts)	$I_L$ Μέσο (amp)
0		
1		
2		
3		
4		
5		
6		
7		
8		
9		



Εικ. 12. Κυκλωματικό Διάγραμμα Άσκησης 4

## Άσκηση 3. Μονοφασικός Μετατροπέας Πλήρως Ελεγχόμενος

### 3.1 Διεξαγωγή Πειράματος

Απαιτούμενες συσκευές και όργανα για την Άσκηση 4:

1. Μονάδα μονοφασικού μετατροπέα πλήρως ελεγχόμενου.
2. Βολτόμετρο 0-500 Volt DC
3. Αμπερόμετρο 0-10 Amper DC
4. Σειρά αντιστάσεων 4 x 50 Ohm/1.5Kw
5. Πηνίο 2 x 0,06H
6. Shunt 5A
7. Παλμογράφος
8. Βαριόμετρο (400V 10A 400VA)
9. Βαττόμετρο (400V 10A 400W)

### 3.2 Μετατροπέας χωρίς δίοδο ελεύθερης διέλευσης

#### 3.2.1 Ωμικό φορτίο

Συνδέστε σαν φορτίο μια ωμική αντίσταση  $R = 50\Omega$ . Παρατηρείστε στον παλμογράφο διπλής δέσμης α) την τάση δικτύου  $U_N$  μαζί με την τάση φορτίου  $U_L$  και β) την τάση φορτίου μαζί με τους παλμούς έναυσης, για τιμές της γωνίας έναυσης  $\alpha = 90^\circ$  και  $\alpha = 150^\circ$ . Σχεδιάστε τις κυματομορφές αυτές. Αναφέρετε πώς μεταβάλλονται οι περιοχές κενού όταν μεγαλώνει η γωνία  $\alpha$ . (η μέτρηση της τελευταίας γίνεται με τη σύγκριση των δύο κυματομορφών  $U_N$  και  $U_L$  στον παλμογράφο).

Για διαφορετικές τιμές της γωνίας  $\alpha$  μετρείστε και καταχωρείστε σε πίνακα τις αντίστοιχες μέσες τιμές της τάσης φορτίου  $U_{dca}$ . Σχεδιάστε τη χαρακτηριστική ελέγχου  $U_{dca} / U_{dc} = F(\alpha)$ , όπου  $U_{dc}$  η μέγιστη τιμή της μέσης τιμής για  $\alpha = 0$ . Παρατηρείστε στον παλμογράφο την τάση που εφαρμόζεται σε ένα θυρίστορ για διαφορετικές γωνίες έναυσης. Διαπιστώστε για ποιες τιμές της γωνίας  $\alpha$  δέχεται το θυρίστορ τη μέγιστη ανάστροφη τάση.

#### 3.2.2 Ωμικό - επαγωγικό φορτίο

Συνδέστε σαν φορτίο μια ωμική αντίσταση  $R = 50\Omega$  και ένα πηνίο  $L=0,06H$  σε σειρά.

Για διαφορετικές τιμές της γωνίας έναυσης  $\alpha$  παρατηρείστε στον παλμογράφο την τάση φορτίου  $U_L$  και το ρεύμα φορτίου  $i_d$ . Σχεδιάστε τις αντίστοιχες κυματομορφές για  $\alpha = 90^\circ$  και  $\alpha = 150^\circ$ .

Για διαφορετικές τιμές της γωνίας  $\alpha$  μετρείστε τη μέση τιμή της τάσης εξόδου  $U_{dca}$ , την ενεργό ισχύ  $P$  και (εφόσον υπάρχει η δυνατότητα) την άεργο ισχύ  $Q$ . Σχεδιάστε τις συναρτήσεις:

$$U_{Gdca} / U_{dc} = F(\alpha), \quad P = F(\alpha), \quad Q = F(\alpha).$$

Για  $\alpha = 0$  και για διαφορετικές σταθερές χρόνου  $T = \omega L/R$  (δηλ. διαφορετικούς συνδυασμούς πηνίων και αντιστάσεων φορτίου), παρατηρείστε στον παλμογράφο τις κυματομορφές του ρεύματος φορτίου (τάση πάνω στο SHUNT) και σχεδιάστε τις. Εξηγήστε τις διαφορές.

Για διαφορετικές σταθερές χρόνου υπολογίστε με τη βοήθεια του παλμογράφου την οριακή γωνία κενού  $\alpha_G$  (είναι η γωνία όπου το ρεύμα αρχίζει να έχει περιοχές κενού). Εξηγήστε τις διαφορές.

Για διαφορετικές αντιστάσεις φορτίου  $R$  μετρείστε με το πολύμετρο τις μέσες τιμές της τάσης φορτίου και ρεύματος φορτίου (χαρακτηριστική φορτίου). Επαναλάβετε τη μέτρηση για διάφορες τιμές της γωνίας έναυσης.

α. Σχεδιάστε όλες τις χαρακτηριστικές φορτίου (για όλες τις γωνίες α) σε ένα διάγραμμα:

$$U_{dca} = F(id).$$

### 3.3 ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΑΣ ΜΕ ΔΙΟΔΟ ΕΛΕΥΘΕΡΗΣ ΔΙΕΛΕΥΣΗΣ

Επαναλάβετε τις μετρήσεις και παλμογραφήσεις της προηγούμενης παραγράφου συνδέοντας στο κύκλωμα τη δίοδο ελεύθερης διέλευσης. Συγκρίνετε τα αποτελέσματα των μετρήσεων των δύο κυκλωμάτων.

#### 3.3.1 ΚΥΚΛΩΜΑ ΕΛΕΓΧΟΥ

Συνδέστε στη συσκευή ωμικό φορτίο 100Ω.

Παρατηρείστε στον παλμογράφο διπλής δέσμης την τάση συγχρονισμού (σήμα USYN) και τους παλμούς στο θύριстор T<sub>1</sub> (σήμα i<sub>T1</sub>). Ρυθμίστε τη γωνία έναυσης στις 30<sup>0</sup>. Σχεδιάστε τις κυματομορφές σε διάγραμμα.

Παρατηρείστε στον παλμογράφο την τάση συγχρονισμού και τους παλμούς στο θυρίстор T<sub>2</sub> (σήμα i<sub>T2</sub>). Σχεδιάστε τους παλμούς στο παραπάνω διάγραμμα.

##### 3.3.1.1 Παράρτημα Α

Αν έχουμε ανόρθωση με διόδους και μετασχηματιστή με μεσαία λήψη, τότε η DC τάση σε ωμικό φορτίο θα είναι:

$$U_{dc} = \frac{2U_{\text{πλάτος}}}{\pi}$$

Για να μεταβληθεί αυτή η DC τάση πρέπει να μεταβληθεί το πλάτος της εναλλασσόμενης τάσης του δευτερεύοντος. Αυτό σημαίνει ότι αλλάζω τον λόγο των σπειρών ή την τάση του πρωτεύοντος.

Οι παραπάνω λύσεις είναι δύσχρηστες, συνήθως δεν εξυπηρετούν και επιπλέον δημιουργούν σοβαρά προβλήματα (π.χ. πρέπει να υπάρχει δευτερεύον με πολλαπλές εξόδους και με μεταλλάκτη να καθορίζει κάθε φορά ποιες θα χρησιμοποιηθούν ή VARIAC για να δίνουμε διαφορετική τάση στο πρωτεύον).

Οι παραπάνω δυσκολίες επέβαλαν την αντικατάσταση των διόδων με SCR και ρύθμιση της U<sub>dc</sub> μέσω της γωνίας α.

## Άσκηση 4. Μετατροπές Συνεχούς σε Εναλλασσόμενο

### 4.1 ΔΙΕΞΑΓΩΓΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ

#### 4.1.1 Απαιτούμενες συσκευές και όργανα για την Άσκηση 6

1. Μονάδα Inverter (μονοφασικός αντιστροφέας)
2. Σειρά αντιστάσεων 4 x 50 Ohm/1.5 w
3. Πηνίο 2 x 0,06H
4. Βολτόμετρο 0-500 Volt DC
5. Αμπερόμετρο 0-5 Amper DC
6. Παλμογράφος
7. Καταγραφικό Παλμογράφου

#### 4.1.2 ΓΕΝΙΚΕΣ ΟΔΗΓΙΕΣ

Η αλλαγή λειτουργίας της πειραματικής διάταξης από εξαναγκασμένη οδήγηση σε οδήγηση φορτίου γίνεται μέσω ενός διακόπτη, που βρίσκεται στο εσωτερικό της συσκευής. Για έλεγχο ανάβει στο πλαίσιο μετρήσεων της διάταξης το αντίστοιχο LED, που δείχνει τη μορφή παλμοδότησης.

Για την πραγματοποίηση των μετρήσεων και κυματομορφών θα χρησιμοποιηθεί ο Ηλεκτρονικός Υπολογιστής που είναι συνδεδεμένος με τον παλμογράφο. Στη συνέχεια οι μετρήσεις θα επεξεργαστούν με το ειδικό πρόγραμμα προσομοίωσης του παλμογράφου και θα εκτυπωθούν στον αντίστοιχο printer. Για την επίτευξη των ανωτέρω είναι απαραίτητη η γνώση και εμπειρία του interface IEEE, το οποίο έχει καλυφθεί στην προκαταρκτική άσκηση.

#### 4.1.3 ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΕΑΣ ΜΕ ΕΞΑΝΑΓΚΑΣΜΕΝΗ ΟΔΗΓΗΣΗ

Στον αντιστροφέα αυτού του τύπου είναι απαραίτητο, πριν από οποιαδήποτε αλλαγή φορτίου, να κλείνεται ο γενικός διακόπτης και αυτό, διότι μετά τη διακοπή παλμοδότησης παραμένει πάντα ένας κλάδος σε αγωγιμότητα.

1. Συνδέστε τον αντιστροφέα εξαναγκασμένης οδήγησης με ωμικό-επαγωγικό φορτίο. Παρατηρείστε στον παλμογράφο το παραπάνω φαινόμενο, παίρνοντας την κυματομορφή της τάσης εξόδου με κλειστή την παλμοδότηση.
2. Παρατηρείστε στον παλμογράφο και σχεδιάστε πιστά τις κυματομορφές των παρακάτω μεγεθών:  
α)  $U_L, I_L$  β)  $U_{T1}, U_{D1}$  γ)  $U_{L1}, U_{T1}$  δ)  $U_L, U_{T1}$  ε)  $I_L$ , παλμός έναυσης.
3. Από τη σωστή παλμογράφιση της τάσης θυρίστορ  $U_{T1}$ , υπολογίστε τον χρόνο αρνητικής αποκοπής  $t_H$  (εικόνα). Ο χρόνος αυτός θα πρέπει φυσικά να είναι μεγαλύτερος από το χρόνο ανάκτησης  $t_F$  των θυρίστορς.
  - Συγκρίνατε τις κυματομορφές  $U_L$  και  $U_{T1}$  που σχεδιάσατε. Ποιο τμήμα της κυματομορφής  $U_L$  αντιστοιχεί στον χρόνο αρνητικής αποκοπής  $T_H$ ;
  - Μετρείστε με τη βοήθεια του παλμογράφου τη μέγιστη και ελάχιστη συχνότητα της τάσης εξόδου.
  - Για διαφορετικές τιμές της αντίστασης φορτίου, υπολογίστε με τη βοήθεια του παλμογράφου τον χρόνο αρνητικής αποκοπής  $t_H$ . Σημειώστε τις αντίστοιχες τιμές. Τι συμπεράσματα βγάζετε;

#### 4.1.4 ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΕΑΣ ΜΕ ΟΔΗΓΗΣΗ ΦΟΡΤΙΟΥ

Συνδέστε στην πειραματική διάταξη του αντιστροφέα για φορτίο έναν σειριακό ταλαντωτή RLC με τις εξής τιμές:

$$R = 12, 5\Omega, \quad L = 0, 06\Omega, \quad C = 60\mu F.$$

Υπολογίστε την ιδιοσυχνότητα του ταλαντωτή.

1. Παρατηρείστε στα δύο κανάλια του παλμογράφου τις κυματομορφές

- α) τάσης και ρεύματος φορτίου ( $U_L, I_L$ ),  
β) ρεύματος φορτίου και παλμών έναυσης, για διαφορετικές τιμές της γωνίας έναυσης  $\gamma$ .
2. Μεταβάλετε τις τιμές των στοιχείων RLC του σειριακού ταλαντωτή και παρατηρήστε στον παλμογράφο τις κυματομορφές τάσης και ρεύματος φορτίου. Σχεδιάστε και συγκρίνετε μεταξύ τους τις κυματομορφές ρεύματος. Τι παρατηρείτε;
3. Για τις αρχικές τιμές των στοιχείων R, L, C (2.3.1) μετρήστε, με τη βοήθεια του παλμογράφου, τη μέγιστη και την ελάχιστη γωνία έναυσης. Υπολογίστε την αντιστοιχία μεταξύ γωνίας έναυσης  $\gamma$  σε μοίρες και κλίμακας του ρυθμιστή  $\gamma$  (κλίμακα 0 έως 10).
4. Για διαφορετικές τιμές της γωνίας  $\gamma$  μετρήστε, μέσω των παλμογραφημάτων  $U_L, I_L$ , τις αντίστοιχες συχνότητες  $F$  της τάσης εξόδου. Καταχωρείστε τις τιμές σε αντίστοιχο πίνακα. Σχεδιάστε τη συνάρτηση  $F = F(\gamma)$ .
5. Για τις τρεις περιπτώσεις α) ελάχιστη γωνία έναυσης, β) μέγιστη γωνία έναυσης, γ)  $\gamma = 90$ , σχεδιάστε τις κυματομορφές των εξής μεγεθών:  
α)  $U_L, I_L$ , β)  $U_{T1}, U_{D1}$ , γ)  $I_L, U_{T2}$ , δ)  $I_L, U_{T4}$ .

## Άσκηση 5. Τριφασικός Μετατροπέας Έξι Παλμών

### 5.1 Θεωρία

#### 5.1.1 Εισαγωγή

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

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

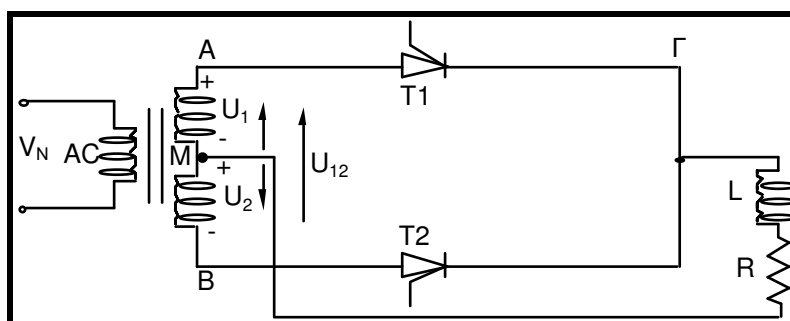
**Η αρχή λειτουργίας μπορεί να συνοψιστεί σε δυο περιπτώσεις:**

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

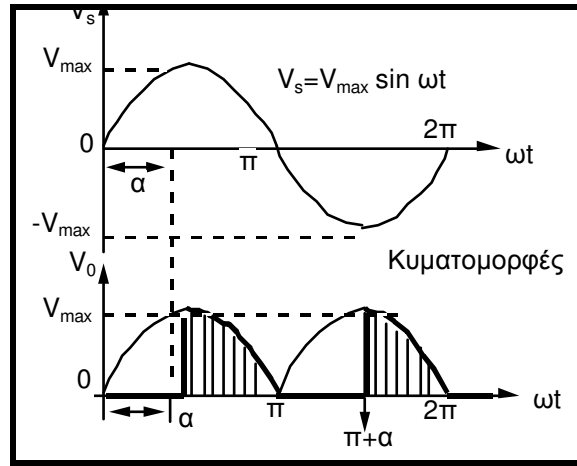
Στη μονοφασική τροφοδοσία εναλλασσόμενου, συνήθης τρόπος μετατροπής σε **συνεχές** είναι η συνδεσμολογία της διπλής ανόρθωσης ή της γέφυρας. Ένα τέτοιο κύκλωμα εξετάστηκε λεπτομερώς στην εφαρμογή του πλήρως ελεγχόμενου μονοφασικού μετατροπέα (με χρήση δυο θυρίστορες) και δίνεται στην Εικόνα που ακολουθεί.



Εικ. 13. Κύκλωμα πλήρως ελεγχόμενου μονοφασικού μετατροπέα με ωμικό φορτίο

Στην περίπτωση της μονοφασικής τροφοδοσίας, δυο θυρίστορες (ή δυο δίοδοι, όταν  $\alpha = 0^0$ ) ελέγχουν τη θετική και αρνητική ημιπερίοδο. Παρατηρώντας τις κυματομορφές του μετατροπέα στην (επόμενη εικόνα), βλέπουμε ότι η έξοδος δεν είναι καθαρό DC και απαραίτητη προϋπόθεση για να το προσεγγίσουμε σε DC είναι η **χρήση πηνίων και πυκνωτών** εξομάλυνσης.



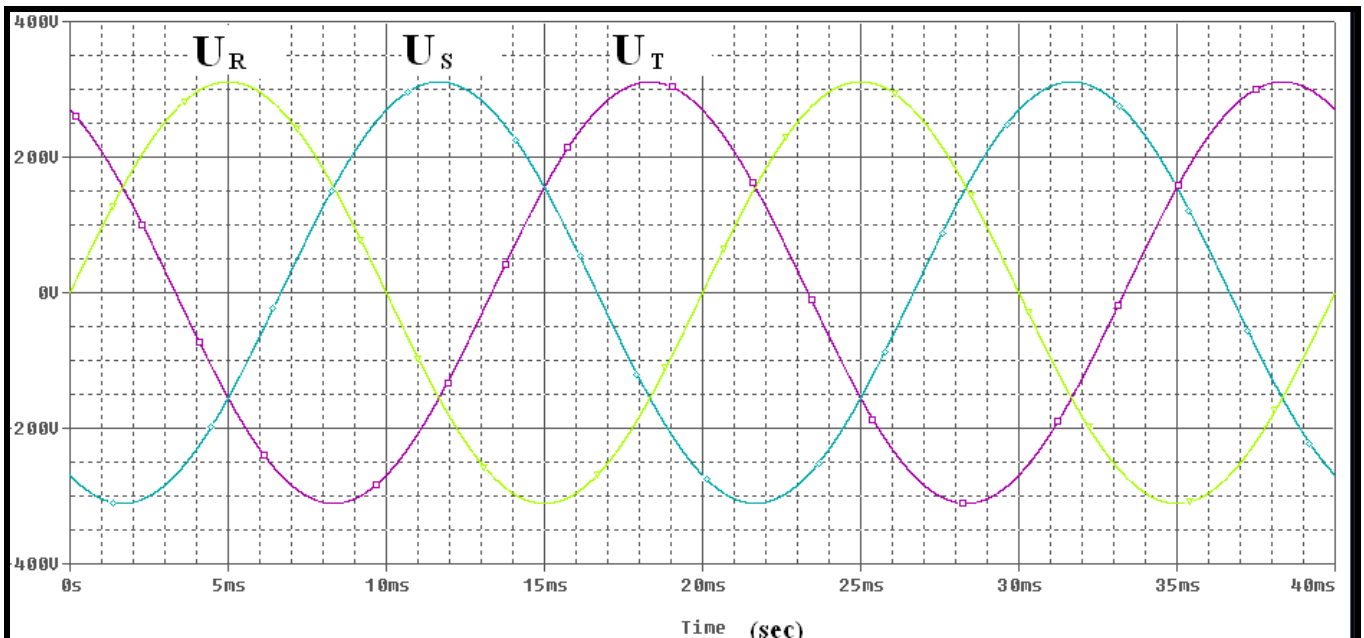


Εικ. 14. Κυματομορφές πλήρως ελεγχόμενου μονοφασικού μετατροπέα με ωμικό φορτίο

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 διόδου για την απλή ανόρθωση. Κατ' αντιστοιχία, στο τριφασικό θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν και τρία θυρίστορς οπότε θα είχαμε το **μετατροπέα τριών παλμών**.

### 5.1.2 Τροφοδοσία με τριφασικό

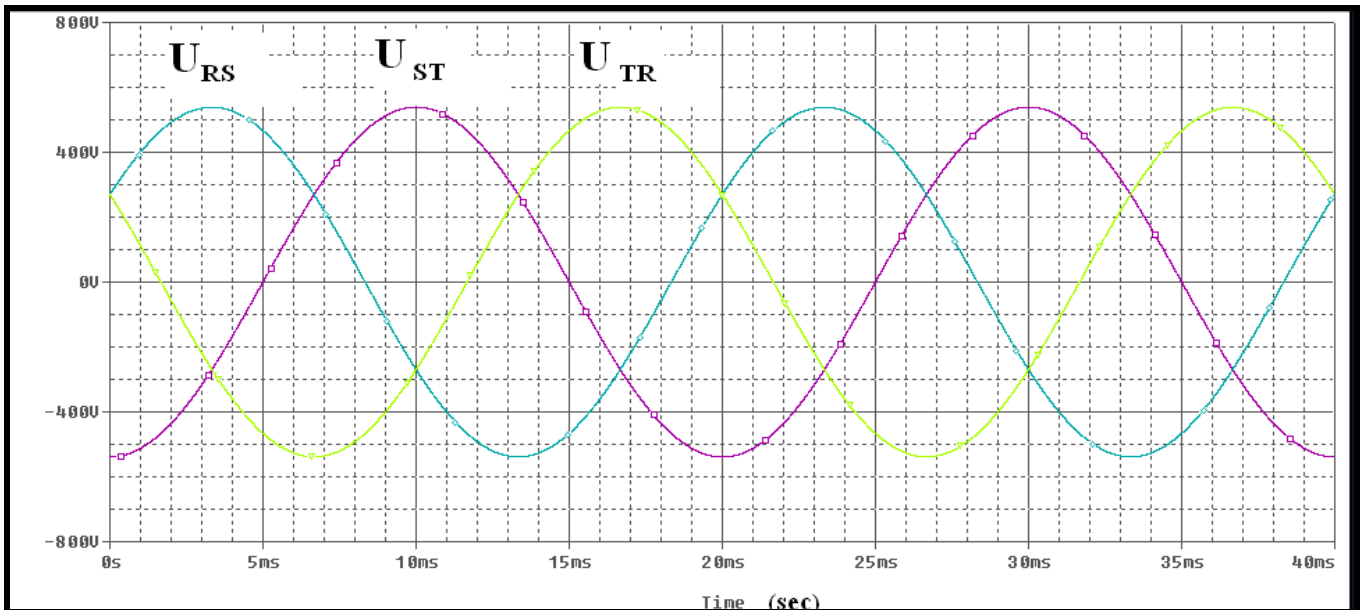
Όταν χρησιμοποιείται τριφασική τροφοδοσία, θα πρέπει να λάβουμε υπόψη τη μορφή των κυματομορφών των τριών φάσεων R, S, T, σε σχέση με το κοινό σημείο, όπως φαίνεται στην ακόλουθη εικόνα, που χαρακτηρίζεται από τη διαφορά γωνίας  $120^\circ$  μεταξύ κάθε φάσης (φασικές κυματομορφές).



Εικ. 15. Γραφική αναπαράσταση των τριών φάσεων σε σχέση με το κοινό σημείο (φασικές κυματομορφές)

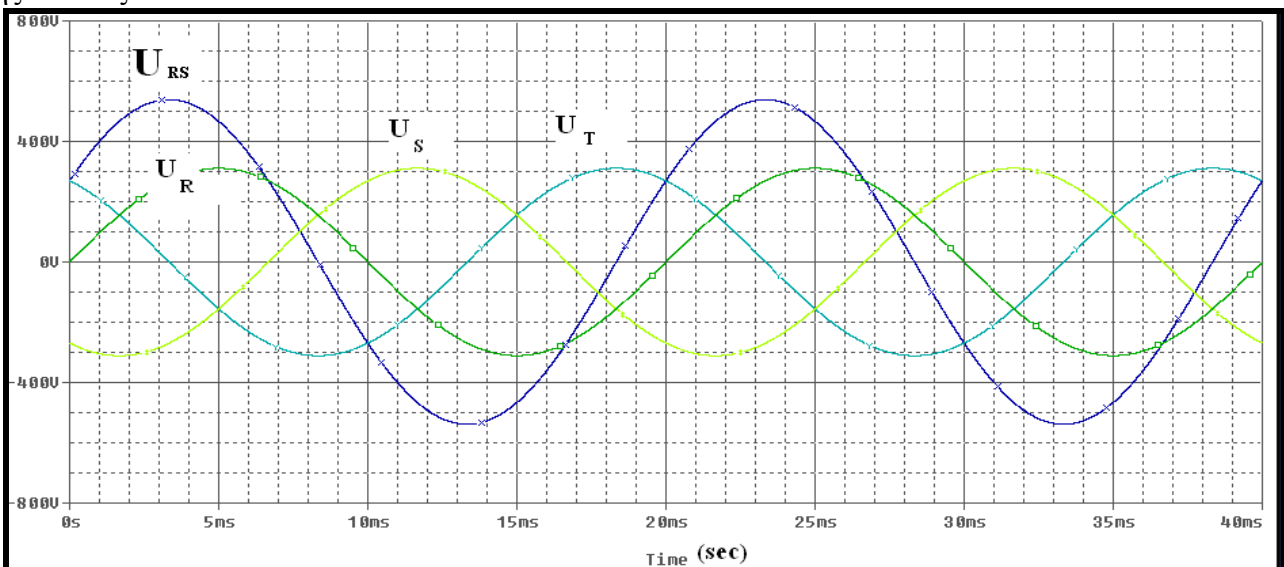
Ο τριφασικός μετατροπέας είναι πιο σύνθετος διότι για να εξυπηρετήσουμε τις τρεις φάσεις χρησιμοποιούμε συνολικά **έξι θυρίστορς**. Επειδή δεν χρησιμοποιείται η γείωση (μηδενικός αγωγός), ο μετατροπέας θα μπορούσε να συνδεθεί και απ' ευθείας με το δίκτυο, χωρίς τη μεσολάβηση μετασχηματιστή. Όμως, στην 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 στην ακόλουθη εικόνα.



**Εικ. 16. Κυματομορφές των τριών φάσεων σε σχέση με το κοινό σημείο (πολικές κυματομορφές)**

Η ταυτόχρονη τοποθέτηση των δυο παραπάνω κυματομορφών έχει σαν αποτέλεσμα την κυματομορφή της εικόνας που ακολουθεί.



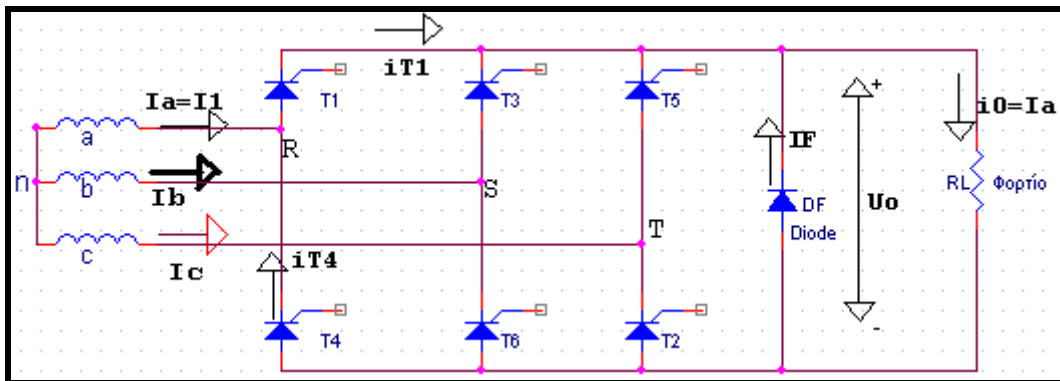
**Εικ. 17. Συγκριτική αντιπαράθεση των φασικών και πολικών κυματομορφών**

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 θυρίστωρ), 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 εν κενώ.

### 5.1.3 Βασικό κύκλωμα και Συνδεσμολογία.

Το βασικό ηλεκτρονικό κύκλωμα ενός τριφασικού μετατροπέα φαίνεται στην παρακάτω εικόνα. Το δευτερεύον του τριφασικού μετασχηματιστή συνδέεται με τις ανόδους των θυρίστωρ  $T_1$ ,  $T_3$  και  $T_5$  και συγχρόνως με τις καθόδους των θυρίστωρ  $T_4$ ,  $T_6$  και  $T_2$ . Η αρίθμηση των θυρίστωρ δηλώνει τη σειρά έναυσης, επομένως και την πορεία του ρεύματος από το μετασχηματιστή προς το φορτίο.



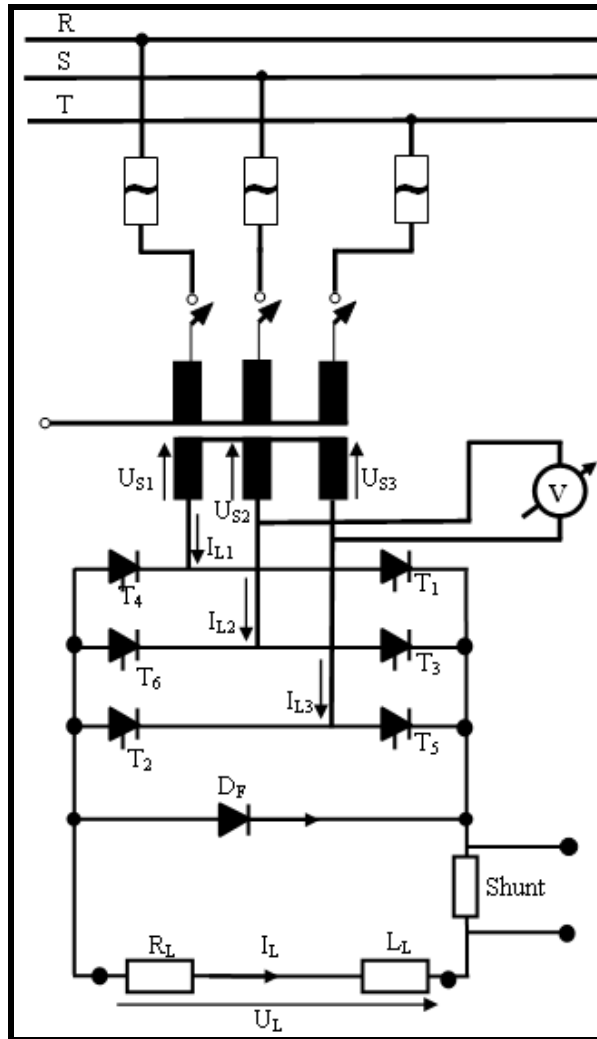
Εικ. 18. Βασικό κύκλωμα τριφασικού μετατροπέα

Μεταξύ της γέφυρας και του φορτίου είναι συνδεδεμένη η δίοδος ελεύθερης διέλευσης  $D_F$  (Diode Flywheel). Η δίοδος αφ' ενός χρησιμεύει για τη διοχέτευση της Η.Ε.Δ. που συσσωρεύτηκε στο φορτίο (όταν όλα τα θυρίστωρ 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 πηνίο  $L_d$ . Στην περίπτωση αυτή τα  $D_F$  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:

- 1<sup>ος</sup>:** Εάν όλοι οι ηλεκτρονικοί διακόπτες είναι **θυρίστωρ**, τότε ο μετατροπέας είναι **πλήρως ελεγχόμενος**. Σε αυτόν τον τρόπο λειτουργίας, η δίοδος ελεύθερης διέλευσης  $D_F$  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.
- 2<sup>ος</sup>:** Αν οι διακόπτες  $T_4$ ,  $T_6$ ,  $T_2$ , είναι **δίοδοι** (δηλαδή τρία θυρίστωρ άνω και τρεις δίοδοι κάτω) τότε ο **μετατροπέας** ονομάζεται **μερικά ελεγχόμενος**. Σε αυτόν τον τρόπο λειτουργίας η δίοδος ελεύθερης διέλευσης  $D_F$ , 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.



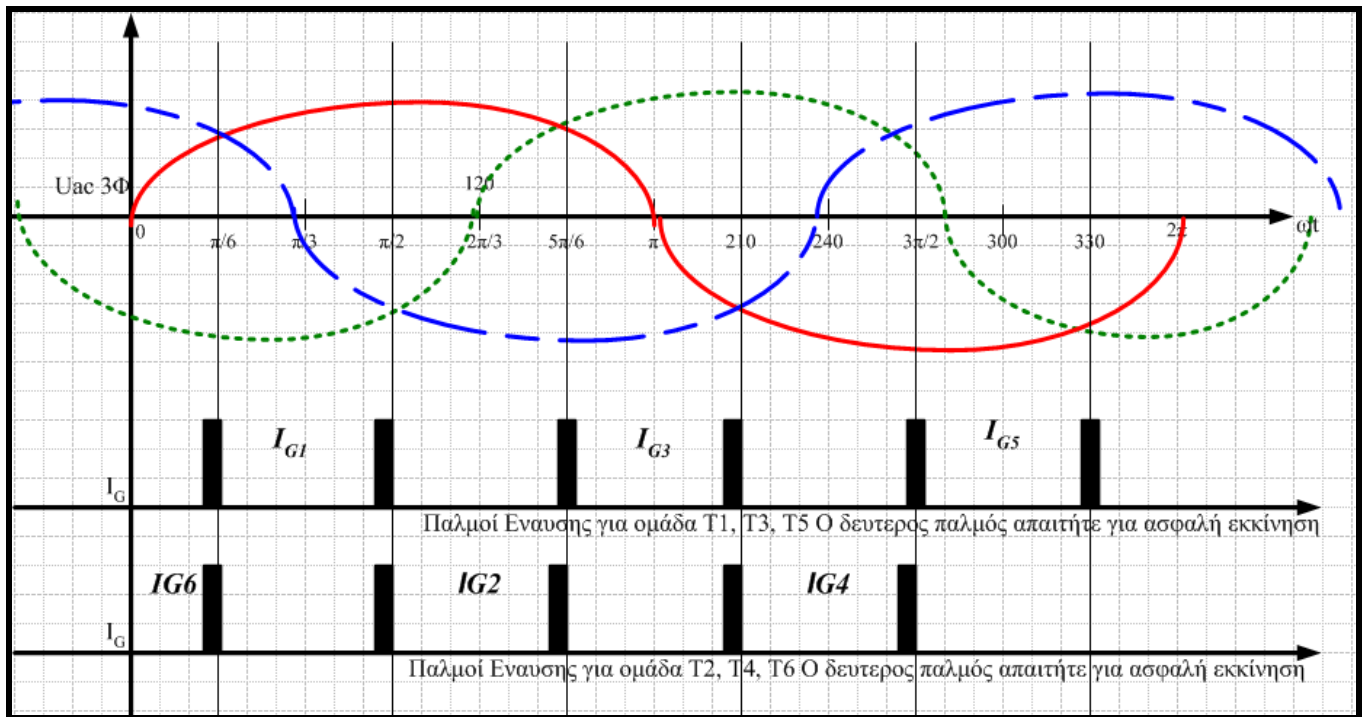
Εικ. 19. Τριφασική γέφυρα θυρίστορ με και χωρίς δίοδο ελεύθερης διέλευσης  $D_F$

#### 5.1.4 Ψύξη

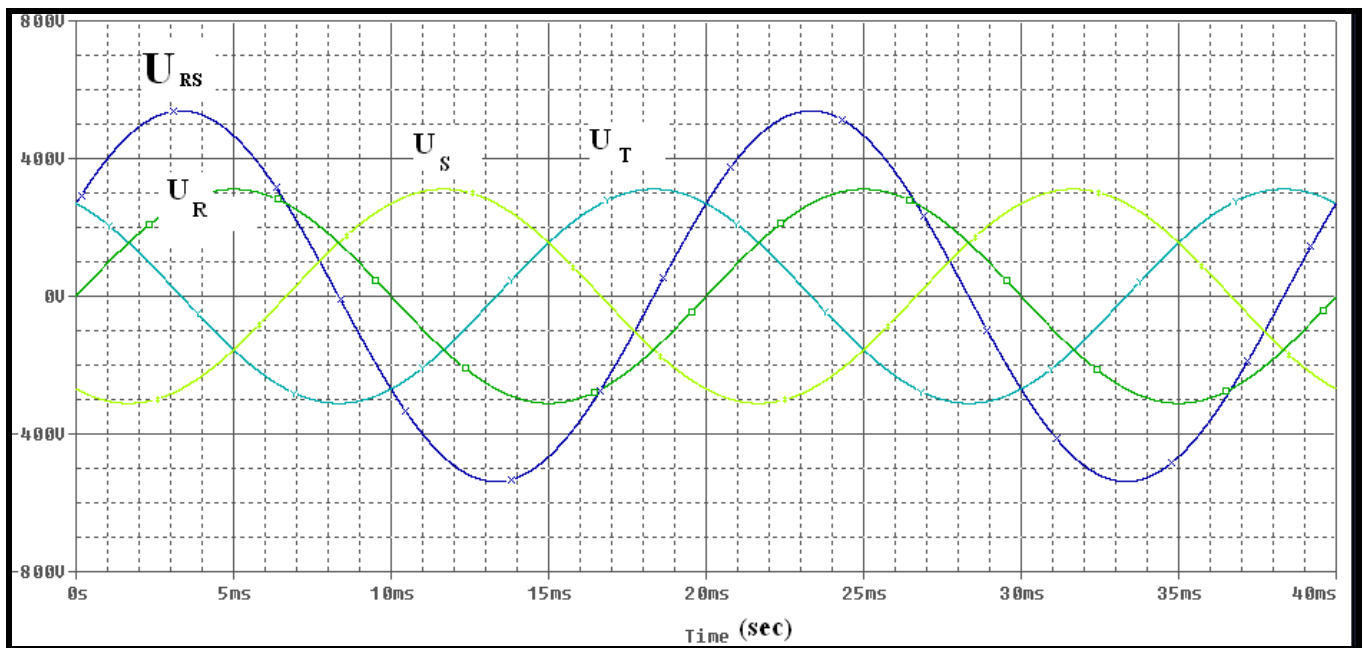
Εξ αιτίας των μικρών διαστάσεων των θυρίστορ και των μεγάλων ρευμάτων που περνούν μέσα τους, οι διατάξεις αυτές χρειάζονται ειδικά ψυκτικά. Τα θυρίστορ στερεώνονται στην πιο απλή περίπτωση σε βάσεις από αλουμίνιο, οι οποίες αποτελούν συγχρόνως και το ψυκτικό. Όταν η γέφυρα προορίζεται για να περάσουν μερικές εκατοντάδες AMPERES, σαν μέσο ψύξης χρησιμοποιείται επί πλέον νερό.

#### 5.1.5 Έλεγχος

Το κύκλωμα ελέγχου παρέχει τους παλμούς έναυσης για τα επί μέρους θυρίστορ. Οι παλμοί αυτοί πρέπει να συγχρονισθούν με το δίκτυο, ώστε τα θυρίστορ να ανάβουν στην επιθυμητή γωνία έναυσης  $\alpha$ . Η γωνία αυτή μπορεί να ρυθμιστεί μεταξύ  $0$  και  $150^\circ$ . Κάθε θυρίστορ δέχεται δύο παλμούς έναυσης σε απόσταση  $60^\circ$ . Ο λόγος είναι ότι κατά τη μετάβαση του ρεύματος από το ένα θυρίστορ στο άλλο, μπορεί να δημιουργηθούν ταλαντώσεις τάσης, που προκαλούν αθέλητη σβέση. Στην επόμενη Εικόνα 6-8 φαίνονται οι σειρές παλμών έναυσης για κάθε θυρίστορ. Ως σημείο αναφοράς των παλμών (δηλαδή το σημείο μηδέν μοίρες) μπορεί να θεωρηθεί το σημείο μηδέν τομής δυο φάσεων που φαίνεται στην επόμενη Εικόνα.



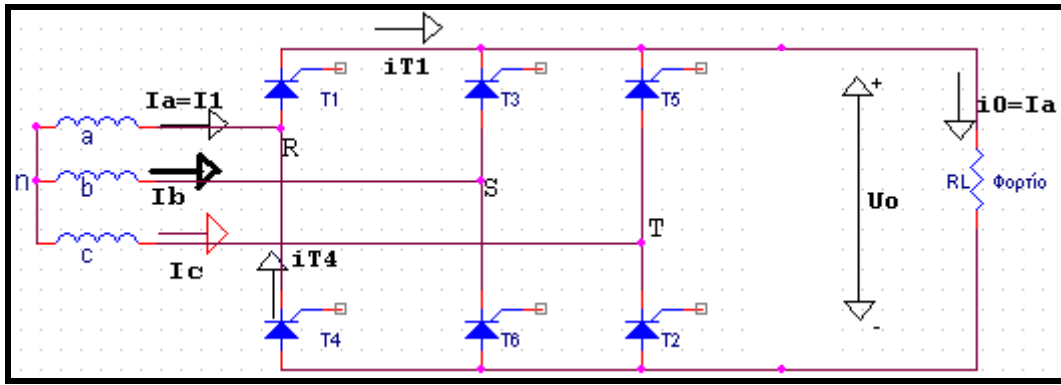
Εικ. 20. Σειρές παλμών του τμήματος ελέγχου



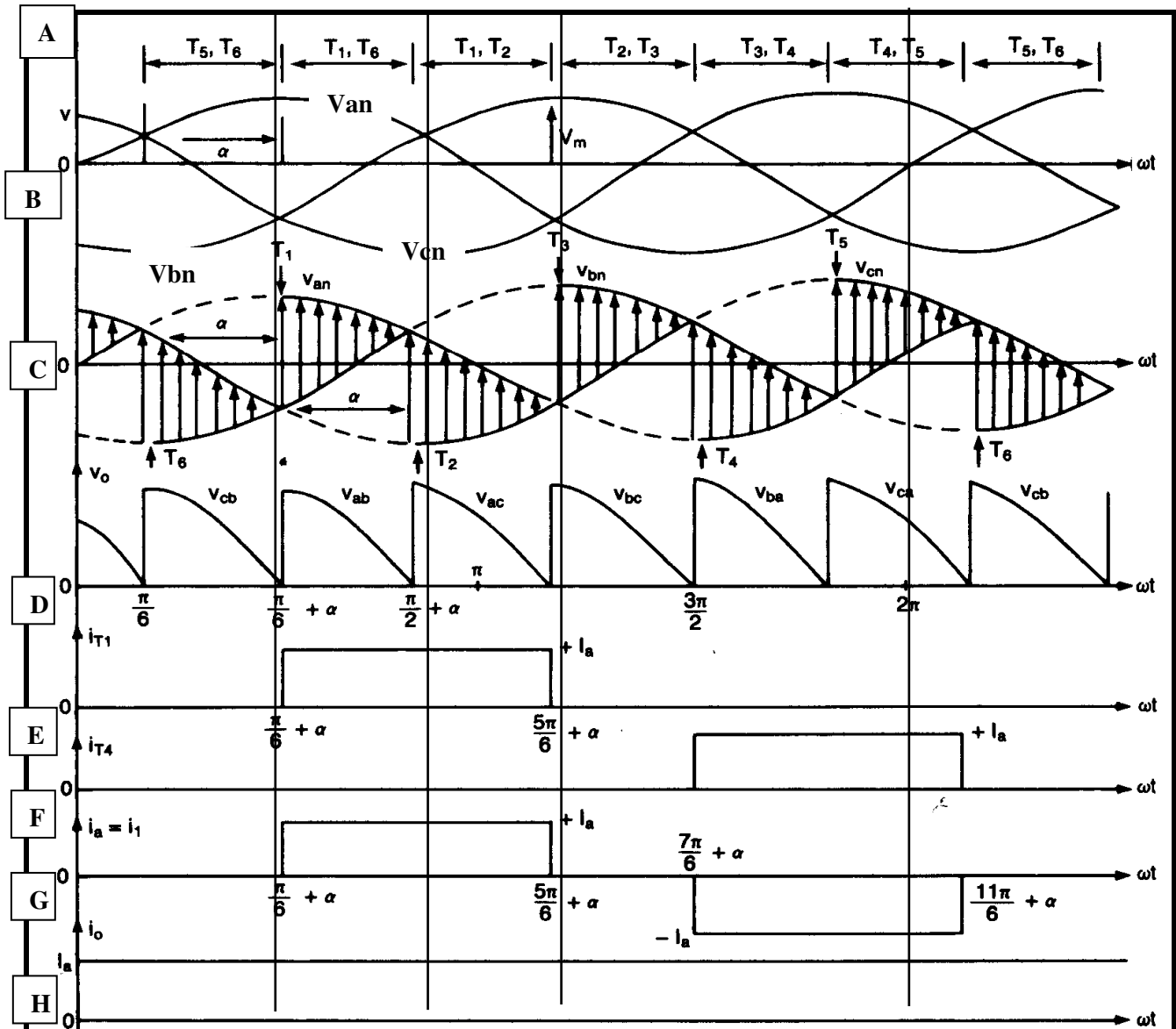
Εικ. 21. Φασικές και Πολικές Κυματομορφές

### 5.1.6 Ανάλυση Λειτουργίας

Η πιο κάτω εικόνα δείχνει το σχετικό κύκλωμα με επαγωγικό φορτίο μεγάλης τιμής. Οι τρεις φάσεις έχουν διαφορά μεταξύ τους  $120^\circ$  και τα θυρίστορες πυροδοτούνται σε διαστήματα  $\pi/3$  ή  $60^\circ$ . Τα πηνία a, b, c αποτελούν τα δευτερεύοντα του τριφασικού μετασχηματιστή με κοινό σημείο n. Υπενθυμίζουμε ότι η σειρά πυροδότησης των θυρίστορες είναι T<sub>1</sub>, T<sub>3</sub>, T<sub>5</sub> και T<sub>4</sub>, T<sub>6</sub>, T<sub>2</sub>.



Εικ. 22. Κύκλωμα χωρίς δίοδο ελεύθερης διέλευσης



Εικ. 23. Κυματομορφές πλήρως ελεγχόμενου μετατροπέα χωρίς δίοδο ελεύθερης διέλευσης

Στις καμπύλες της παραπάνω εικόνας παρατηρούμε τα ακόλουθα:

- Ποια θυρίστορς άγουν στα καθορισμένα χρονικά διαστήματα και είναι υπεύθυνα για την έξοδο. Τις κυματομορφές των τριών φάσεων με μέγιστη τιμή  $V_m$  και γωνία καθυστέρησης "α".
- Τις κυματομορφές των τριών φάσεων με δείκτες που δηλώνουν το σημείο έναρξης αγωγής του κάθε θυρίστορ. Τα κάθετα βέλη δηλώνουν την περιοχή αγωγιμότητας.
- Την κυματομορφή που θα εμφανίζεται στην έξοδο (στο φορτίο).

- D. Το ρεύμα  $\mathbf{i}_{T1}$  (δια μέσου του θυρίστορ 1).
- E. Το ρεύμα  $\mathbf{i}_{T4}$  (δια μέσου του θυρίστορ 4).
- F. Το ρεύμα  $\mathbf{i}_\alpha = \mathbf{i}_1$  (μέσα από τη φάση α).
- G. Το ρεύμα  $\mathbf{i}_0$  (μέσω του φορτίου).

### 5.1.7 Ανάλυση Κυματομορφών

- 1) Μετά το τέλος της γωνίας καθυστέρησης “α” (δείτε κυματομορφές B και C) στο χρόνο  $\omega t = \frac{\pi}{6} + a$  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  $\frac{\pi}{6} + a \leq \omega t \leq \left(\frac{\pi}{2} + a\right)$ , 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  $\omega t = \frac{\pi}{2} + a$ , το θυρίστορ  $T_2$  πυροδοτείται (τέλος γωνίας καθυστέρησης και ορθά πολωμένο) και το θυρίστορ  $T_6$  μεταπίπτει στην αποκοπή, αφού πολώνεται ανάστροφα άμεσα (λόγω  $T_2$ ).
- 4) Στο διάστημα  $\frac{\pi}{2} + a \leq \omega t \leq \left(\frac{5\pi}{6} + a\right)$ , τα θυρίστορ  $T_1$  και  $T_2$  ( $T_2$  ορθά πολωμένο και παλμοδοτείται) είναι αγώγιμα και η διαφορά δυναμικού μεταξύ των γραμμών α και c ( $V_{ac} = (V_{an} - V_{cn})$ ) θα εμφανίζεται στα άκρα του φορτίου.

Εάν τα θυρίστορ είναι αριθμημένα όπως στην προηγούμενη εικόνα, η σειρά πυροδότησης θα είναι 1&2, 2&3, 3&4, 4&5, 5&6 και 6&1 και οι **διαφορές δυναμικού μεταξύ φάσεων και ουδέτερου** ορίζονται σαν:

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

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

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

Τότε η αντίστοιχη **διαφορά δυναμικού από φάση σε φάση** θα είναι:

$$U_{ab} = U_{an} - U_{bn} = \sqrt{3} V_m \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{6}\right)$$

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

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

ο μέσος όρος του δυναμικού εξόδου μπορεί να ευρεθεί από:

$$V_{dc} = \frac{3}{\pi} \int_{\pi/2+a}^{\pi/2+a} V_{ab} d(\omega t) = \int_{\pi/2+a}^{\pi/2+a} \sqrt{3} V_m \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{6}\right) d(\omega t) = \frac{3\sqrt{3} V_m}{\pi} \cos a$$



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

$$V_{dm} = 3\sqrt{3} \frac{V_m}{\pi}$$

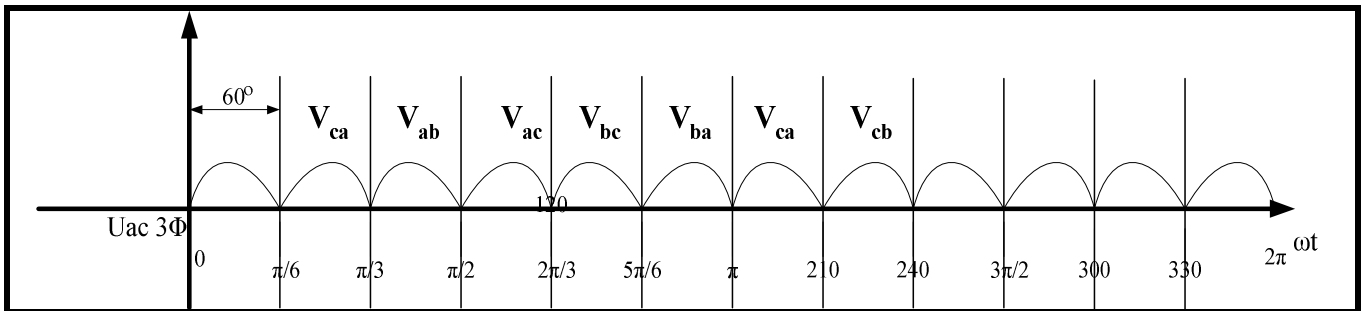
Η κανονικοποιημένη μέση τιμή του δυναμικού εξόδου είναι:

$$V_n = \frac{V_{dc}}{V_{dm}} = \cos \alpha$$

Η ενεργός τιμή του δυναμικού εξόδου είναι:

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

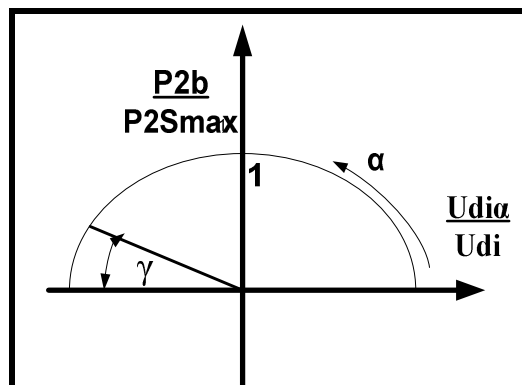
Σε μη ελεγχόμενη κατάσταση, δηλ. για  $\alpha = 0$ , η συνεχής τάση αποτελείται από τις διαφορές των τάσεων στα δευτερεύοντα τυλίγματα του μετασχηματιστή όπως φαίνεται πιο κάτω. Αυτό σημαίνει ότι το ρεύμα περνάει από το θυρίστορ που έχει το μέγιστο (κατ' απόλυτη τιμή) δυναμικό. Τα ρεύματα, εφόσον περνούν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



Εικ. 24. Τάση στα άκρα του φορτίου στον τριφασικό μετατροπέα

### 5.1.8 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 (ακόλουθη εικόνα) σε συνάρτηση της συνεχούς τάσης  $U_{dia}$ , με παράμετρο τη γωνία  $\alpha$ .



Εικ. 25. Άεργος ισχύς σε συνάρτηση της συνεχούς τάσης



### Εξήγηση συμβόλων:

$P_{2b}$      άεργος ισχύς,

$P_{2smax}$      μέγιστη φαινομενική ισχύς,

$U_{di}$      μέγιστος μέσος όρος συνεχούς τάσης για  $\alpha = 0$ ,

$U_{dia}$      μέσος όρος συνεχούς τάσης για γωνία  $\alpha$ .

Η μέγιστη φαινομενική ισχύς ισούται με:

$$P_{2Smax} = U_{di} * I_d$$

Η γωνία  $\alpha$  δεν μπορεί να φθάσει το όριο των  $180^0$ , γιατί τα θυρίστορς χρειάζονται κάποιους χρόνους σβέσης και επανάκτησης, που συνεπάγονται καθυστερήσεις. Χαρακτηριστικό μέγεθος για το μετατροπέα είναι η γωνία  $\gamma$ , που εκφράζει την ελάχιστη απόσταση από το θεωρητικό όριο των  $180^0$ , μέχρι την απόσταση στην οποία μπορεί να ελεγχθεί ο μετατροπέας. Συνήθως η γωνία αυτή είναι της τάξης των  $30^0$ .

### 5.1.9 Διεξαγωγή Πειράματος

**Προσοχή:** Η Άσκηση αυτή θέλει μεγάλη προσοχή διότι η έξοδος της φτάνει τα 500 Volts και αρκετά Amperes. Θα πρέπει να δοθεί μεγάλη προσοχή από τους σπουδαστές αλλά και τους Διδάσκοντες, ώστε να μην υπάρξει η παραμικρή πιθανότητα και δυνατότητα ατυχήματος. Το κύκλωμα πρέπει απαραίτητως, πριν την τροφοδοσία τάσης, να ελέγχεται από τους διδάσκοντες. Πριν από οποιαδήποτε αλλαγή των συνδέσεων ο διακόπτης 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 Amper DC
4. Σειρά αντιστάσεων δυο τεμάχια των 4 x 50 Ohm/1.5Kw
5. Πηνίο 2 x 0,06H
6. Shunt 5A / 50 mV (ενσωματωμένο στην άσκηση)
7. Αναλυτής Ενέργειας
8. Παλμογράφος.

#### 1<sup>ο</sup> Μέρος. Μετατροπές 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 θυρίστορς.

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).

- Παλμογραφέιτε τις **φασικές κυματομορφές** [κάθε φάση (R,S,T) σε σχέση με το κοινό σημείο].
- Παλμογραφέιτε 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.

#### **B) Παρατήρηση των Παλμών Πυροδότησης των Έξι Θυρίστορς**

Παρατηρείστε στον παλμογράφο τις κυματομορφές των παλμών πυροδότησης που δέχονται οι πύλες των έξι θυρίστορς σαν συνάρτηση της τάσης αναφοράς  $V_{ts}$  του δευτερεύοντος του μετασχηματιστή. Δηλαδή παλμογραφέιτε:  $T1 \& V_{ts}$ ,  $T2 \& V_{ts}$ ,  $T3 \& V_{ts}$ ,  $T4 \& V_{ts}$ ,  $T5 \& V_{ts}$ ,  $T6 \& V_{ts}$ . Καταχωρείστε τις σε

ένα ενιαίο σχεδιάγραμμα, προσέχοντας τη διαφορά φάσης που έχουν μεταξύ τους. Εξηγήστε 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 έξοδό του ο μετατροπέας.

- Συνδέστε για φορτίο μια ωμική αντίσταση  $RL = 400\Omega$ . Για γωνίες έναυσης  $\alpha = 36^\circ$  και  $72^\circ$  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 2<sup>ο</sup> 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 θυρίστορ **T1**. Εξηγήστε την κυματομορφή του ρεύματος φορτίου για γωνία έναυσης μεγαλύτερης των  $60^\circ$ .

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

- Μέτρηση της 3Φ Ενεργού Ισχύος  $P_{εν}$ : Συνδέστε τους ακροδέκτες του Αναλυτή Ενέργειας (αυτούς με τα κροκοδειλάκια) στις φάσεις R και S (δηλαδή την πολική τάση  $V_{RS}$ ) και την αμπεροτσιμπίδα στη γέφυρα της φάσης T (αφού αντικαταστήσετε την μαύρη σταθερή γέφυρα με γέφυρα καλωδίου για να χωράει η αμπεροτσιμπίδα). Μετρήστε το  $P_{εν3-\Phi}$  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 πολική τάση  $U_{RMS} = 400 \text{ Volt}$ . Στη συνέχεια υπολογίστε την τριφασική φαινόμενη Ισχύ  $S$  σύμφωνα με την

$$S_{\Phi-3\Phi} = \sqrt{3} * U_{RMS} * I_{RMS}$$

- Υπολογίστε τώρα την άεργο Ισχύ από τη σχέση.  $Q = \sqrt{S_{3\Phi}^2 - P_{εν3\Phi}^2}$

- Τέλος Υπολογίστε τον συντελεστή Ισχύος (Power Factor)  $PF = \frac{P_{ενε3-\Phi}}{S_{\Phi-3\Phi}}$

### 5.1.10 Ωμικό - επαγωγικό φορτίο

Συνδέστε σαν φορτίο μια αντίσταση  $100\Omega$  και ένα πηνίο  $0,06H$  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 Μετατροπéας 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 1<sup>ου</sup> Μέρους. Εξηγήστε τις διαφορές των αποτελεσμάτων αυτών από τα προηγούμενα.

## 3<sup>ο</sup> Μέρος Μετατροπéας 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 1<sup>ου</sup> 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  $U_{SR}$ . Σχεδιάστε τις ανεστραμμένες τάσεις  $U_{RT}' = -U_{RT}$  και  $U_{SR}' = -U_{SR}$  σε διάγραμμα.
- Επαναλάβετε την παλμογράφιση για τις τάσεις  $U_{RT}$  και  $U_{TS}$ . Προσθέστε την ανεστραμμένη τάση  $U_{TS}' = -U_{TS}$  στο διάγραμμα.
- Παρατηρείστε στον παλμογράφο την ανεστραμμένη τάση  $U_{RT}$  (η αναστροφή γίνεται με τη σύνδεση του σήματος στο κανάλι INVERT CHANNEL) και τους παλμούς στο θυρίστορ T1 (σήμα IT1). Ρυθμίστε τη γωνία έναυσης στις  $30^\circ$ . Μαζί με την ίδια τάση παρατηρείστε τους παλμούς στο θυρίστορ T4 (σήμα IT4). Προσθέστε τους παλμούς των δύο θυρίστορς στο διάγραμμα.
- Επαναλάβετε τις παραπάνω παλμογραφήσεις για την τάση  $U_{SR}'$  και τους παλμούς των θυρίστορς T2 και T5 (σήματα IT2 και IT5). Προσθέστε και αυτούς τους παλμούς στο διάγραμμα.
- Επαναλάβετε τα παραπάνω για την τάση  $U_{TS}'$  και τους παλμούς των θυρίστορς T3 και T6.

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

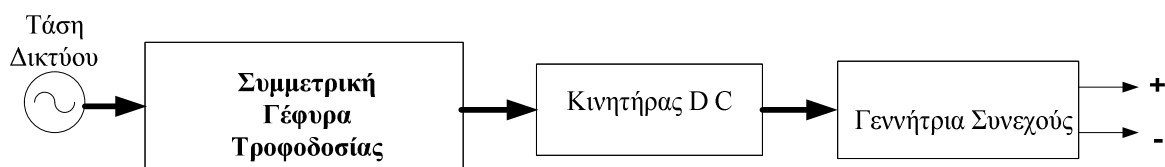
## Άσκηση 6.<sup>1</sup> Έλεγχος Στροφών Κινητήρα Συνεχούς Ρεύματος με Μονοφασική Ανορθωτική Γέφυρα Μερικώς Ελεγχόμενη

### 6.1 Εισαγωγή

Έχουμε μελετήσει σε προηγούμενες ασκήσεις τρόπους παραγωγής ελεγχόμενης συνεχούς τάσης με διαφορετικές εισόδους. Για παράδειγμα:

- στην άσκηση 3 εξετάσαμε τον **μετατροπέα συνεχούς** ή **Chopper** και μελετήσαμε τη μετατροπή συνεχούς τάσης σε μια άλλη **μεταβαλλόμενη** συνεχή, της οποίας η μέση τιμή μπορούσε να είναι μεταβλητή σαν συνάρτηση του βαθμού εργασίας. Τελικός στόχος ήταν η παραγωγή μιας συνεχούς τάσης της οποίας η μέση τιμή μεταβάλλεται.
- στην άσκηση 4 εξετάσαμε το **μονοφασικό μετατροπέα κοινού σημείου** ή **μετατροπέα δυο παλμών** και μελετήσαμε τη μετατροπή της εναλλασσόμενης τάσης του δικτύου σε μια **μεταβαλλόμενη συνεχή**, της οποίας η μέση τιμή μπορούσε να είναι μεταβλητή σαν συνάρτηση της γωνίας  $\alpha$ .

Στην άσκηση αυτή θα μελετήσουμε εναλλακτικούς τρόπους παραγωγής **μεταβαλλόμενης συνεχούς τάσης**, την οποία στη συνέχεια θα χρησιμοποιήσουμε για την οδήγηση ενός κινητήρα συνεχούς. Θα είναι σε απευθείας ζεύξη με μια γεννήτρια (κινητήρα) παραγωγής συνεχούς όπως φαίνεται στην επόμενη εικόνα.



Εικ. 26. Διάγραμμα Άσκησης 7

### 6.2 Θεωρία

Έχουμε δει σε προηγούμενα κεφάλαια ότι δίοδοι σε κυκλώματα ανόρθωσης παρέχουν σταθερή έξοδο, ενώ η αντικατάσταση των διόδων με θυρίστορ δίνει τη δυνατότητα ελέγχου, με την έξοδο να μεταβάλλεται, μεταβάλλοντας το χρόνο εφαρμογής της γωνίας πυροδότησης. Αυτού του είδους οι ελεγχόμενοι ανορθωτές είναι απλοί και χαμηλού κόστους και γενικά έχουν ένα βαθμό απόδοσης πάνω από 90%. Λόγω της μετατροπής από εναλλασσόμενο σε συνεχές, οι μετατροπείς αυτού του τύπου (ανορθωτές) αποκαλούνται και μετατροπείς AC→DC και χρησιμοποιούνται ευρέως στη βιομηχανία για τη μεταβολή της ταχύτητας σε κινητήρες από κλάσμα του Watt μέχρι και κινητήρες ισχύος Megawatt.

Οι μετατροπείς αυτοί μπορεί να ταξινομηθούν σε δυο κατηγορίες, ανάλογα με το πώς τροφοδοτούνται στην είσοδο:

- ❖ Μονοφασικοί Μετατροπείς και
- ❖ Τριφασικοί Μετατροπείς.

Κάθε κατηγορία με τη σειρά της υποδιαιρείται σε:

1. Ημιμετατροπείς (Semi converters),
2. Πλήρεις μετατροπείς (Full Converters) και

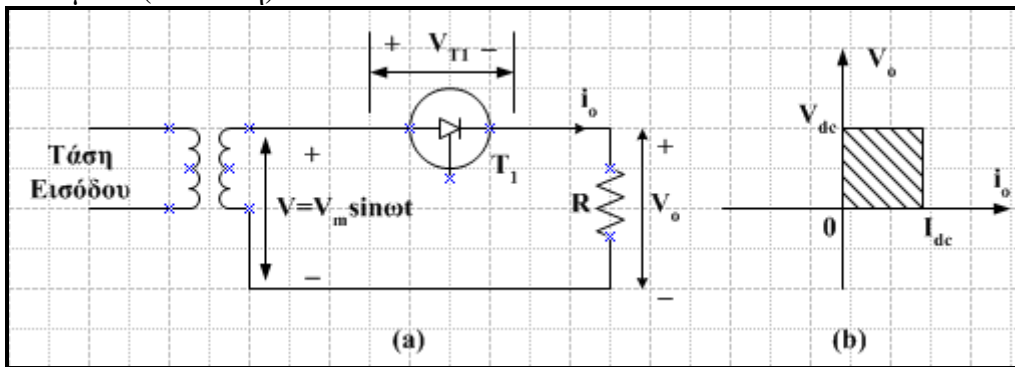
<sup>1</sup> Σε αυτές τις σημειώσεις συνέβαλαν και οι Εργαστηριακοί συνεργάτες **Τσούμας Ιωάννης** και **Μαράντης Αθανάσιος**, τους οποίους ευχαριστώ ιδιαίτερα.

### 3. Διπλούς μετατροπείς (Dual Converters).

Οι **Ημιμετατροπείς** λειτουργούν στο πρώτο τεταρτημόριο μόνο με ρεύμα και τάση να παίρνουν τιμές μιας πολικότητας (θετικές τιμές). Οι **Πλήρεις μετατροπείς** λειτουργούν στα δυο τεταρτημόρια με την **τάση εξόδου να παίρνει θετικές ή αρνητικές** ενώ το ρεύμα εξόδου **παίρνει μόνο θετικές**. Τέλος ο διπλός μετατροπέας λειτουργεί και στα τέσσερα τεταρτημόρια και η τάση και το ρεύμα εξόδου μπορεί να παίρνουν θετικές ή και αρνητικές τιμές. Σε μερικές εφαρμογές οι μετατροπείς συνδέονται σε σειρά, ώστε να λειτουργούν σε υψηλότερες τάσεις και να βελτιώνουν το συντελεστή ισχύος εισόδου.

### 6.3 Βασικές Αρχές Λειτουργίας των Μονοφασικών Μετατροπέων με Έλεγχο Φάσης

Στο κύκλωμα της εικόνας που ακολουθεί έχουμε ένα μετατροπέα με ωμικό φορτίο. Κατά τη θετική ημιπερίοδο το θυρίστορ T1 είναι ορθά πολωμένο και όταν πυροδοτηθεί ( $\omega t = \alpha$ ) έρχεται σε αγωγιμότητα, με αποτέλεσμα η τάση εισόδου να εμφανίζεται στο φορτίο. Όταν η τάση εισόδου γίνει αρνητική ( $\omega t = \pi$ ) τότε η άνοδος είναι αρνητική σε σχέση με την κάθοδο, με αποτέλεσμα το T1 να είναι ανάστροφα πολωμένο (αποκοπή).

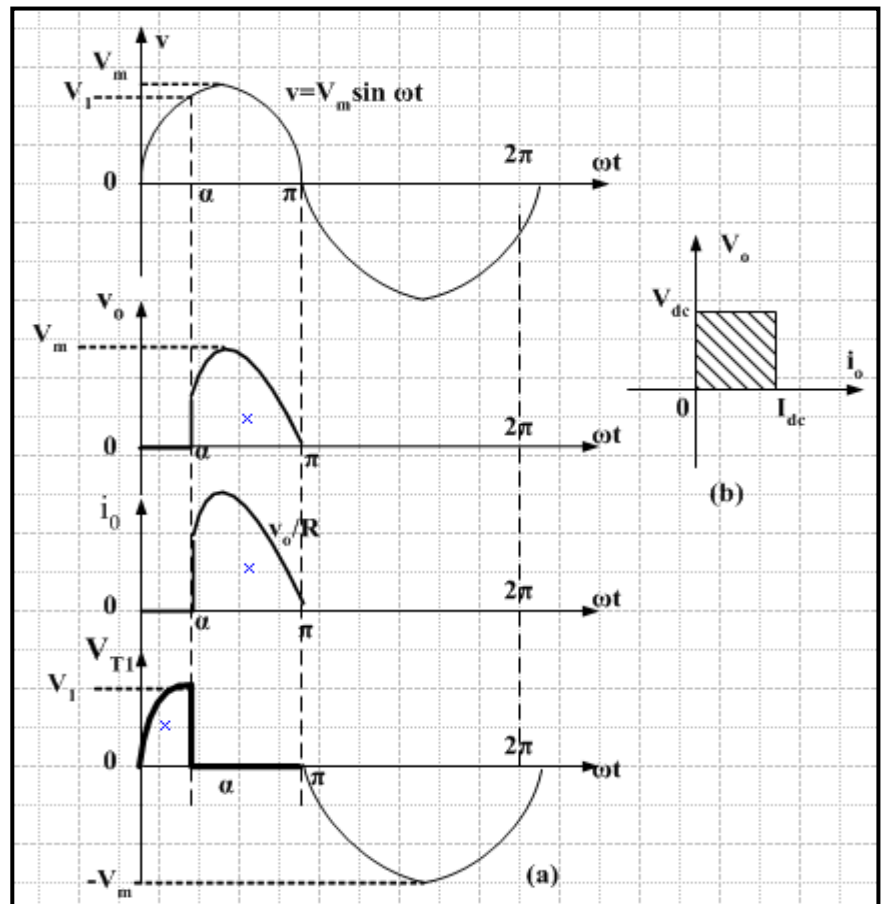


Εικ. 27. Κύκλωμα και Τεταρτημόρια Λειτουργίας

Η επόμενη εικόνα παρουσιάζει την περιοχή λειτουργίας του μετατροπέα στην οποία το ρεύμα και η τάση εξόδου έχουν την ίδια πολικότητα. Η μεθεπόμενη εικόνα παρουσιάζει την τάση εισόδου και εξόδου, το ρεύμα φορτίου καθώς και την τάση στα άκρα του θυρίστορ T1.

Αυτός ο μετατροπέας, λόγω της μεγάλης κυμάτωσης που παρουσιάζει στην έξοδο, δεν χρησιμοποιείται ευρέως σε βιομηχανικές εφαρμογές.

Εάν  $V_m$  είναι η μέγιστη τάση εισόδου (τάση κορυφής), η μέση τιμή της τάσης εξόδου ( $V_{dc}$ ) μπορεί να ευρεθεί από την εξίσωση



Εικ. 28. Κυματομορφές του κυκλώματος

$$V_{dc} = \frac{1}{2\pi} \int_{\alpha}^{\pi} V_m \sin \omega t d(\omega t) = \frac{V_m}{2\pi} [-\cos \omega t]_{\alpha}^{\pi} = \frac{V_m}{2\pi} (1 + \cos \alpha) \quad (7-1)$$

Από την ανωτέρω σχέση συμπεραίνουμε ότι το  $V_{dc}$  μπορεί να μεταβάλλεται από  $\frac{V_m}{\pi}$  μέχρι 0, όταν το  $\alpha$  μεταβάλλεται **από 0 έως  $\pi$**  ( $180^\circ$ ). Όταν  $\alpha = 0$  η τιμή της μέσης τάσης εξόδου γίνεται μέγιστη και

$$\text{ισούται με } V_{max} = \frac{V_m}{\pi}. \quad (7-2)$$

$$\text{Εφαρμόζοντας κανονικοποίηση θα έχουμε } V_{norm} = \frac{V_{dc}}{V_{max}} = 0.5(1 + \cos \alpha). \quad (7-3)$$

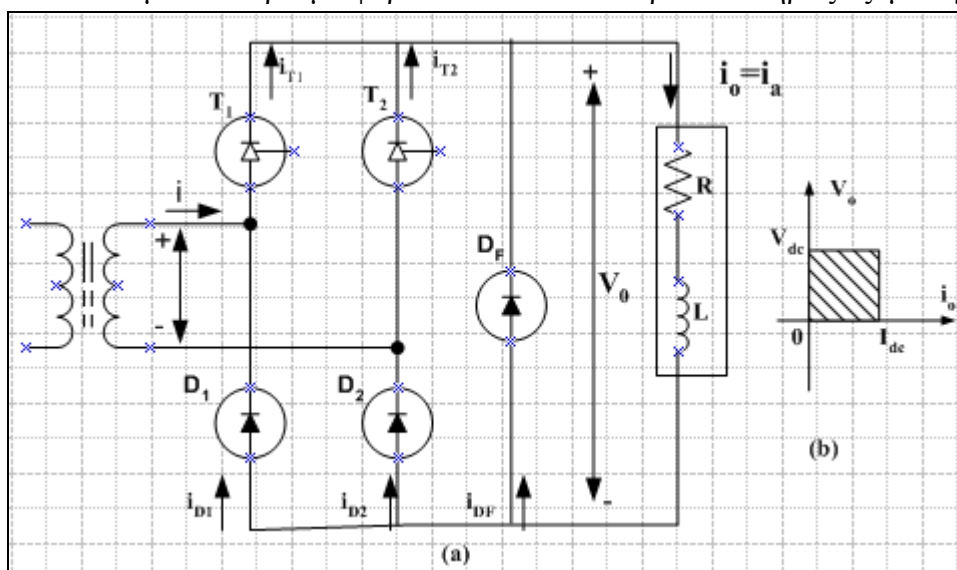
Τέλος η ενεργός τιμή της τάσης εξόδου δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$V_{rms} = \left[ \frac{2}{2\pi} \int_{\alpha}^{\pi} V_m^2 \sin^2 \omega t d(\omega t) \right]^{\frac{1}{2}} = \left[ \frac{V_m^2}{2\pi} \int_{\alpha}^{\pi} (1 - \cos 2\omega t) d(\omega t) \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$V_{rms} = \frac{V_m}{2} \left[ \frac{1}{\pi} \left( \pi - \alpha + \frac{\sin 2\alpha}{2} \right) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (7-4)$$

#### 6. 4 Μονοφασικός Ημιμετατροπέας

Το κύκλωμα ενός μονοφασικού ημιμετατροπέα φαίνεται παρακάτω με μεγάλο επαγωγικό φορτίο. Αποτελείται από τα θυρίστωρες  $T_1$  και  $T_2$ , τις διόδους  $D_1$  και  $D_2$ , το φορτίο και τη δίοδο ελεύθερης διέλευσης  $D_F$ . Υποθέτουμε ότι το ρεύμα φορτίου θα είναι σταθερό και πλήρως εξομαλυσμένο.



Εικ. 29. Μονοφασικός Ημιμετατροπέας

- Κατά τη θετική ημιπερίοδο, το Θυρίστωρ  $T_1$  είναι **ορθά πολωμένο** και ως υποθέσουμε ότι πυροδοτείται όταν  $\omega t = \alpha$  οπότε γίνεται αγωγίμο. Σαν αποτέλεσμα το υψηλό δυναμικό που είχε αναπτυχθεί στα άκρα του θυρίστωρ πριν την παλμοδότηση, εμφανίζεται τώρα στα άκρα του φορτίου δια μέσου του  $T_1$  και  $D_2$  και κατά το διάστημα  $\alpha \leq \omega t \leq \pi$  (δηλαδή για το διάστημα μετά τη γωνία  $\alpha$  και μέχρι τις  $180^\circ$ ).
- Κατά τη διάρκεια του διαστήματος από  $\pi \leq \omega t \leq (\pi + \alpha)$  δηλαδή κατά την έναρξη της αρνητικής ημιπεριόδου η τάση εισόδου γίνεται αρνητική οπότε η δίοδος ελεύθερης διέλευσης  $D_F$  πολώνεται ορθά και άγει, παρέχοντας την ωμική διαδρομή για την κυκλοφορία του



ρεύματος του επαγωγικού φορτίου. Δηλαδή το ρεύμα φορτίου παρέχεται όχι πλέον από το ζεύγος  $T_1-D_2$  αλλά από τη δίοδο  $D_F$ . Ταυτόχρονα και κατά την έναρξη της αρνητικής ημιπεριόδου  $T_1-D_2$  πολώνονται ανάστροφα και έρχονται σε σβέση.

- Κατά τη περίοδο αυτή (αρνητική ημιπερίοδο) το Thyristor  $T_2$  είναι ορθά πολωμένο και όταν παλμοδοτηθεί ( $\omega t = \pi + \alpha$ ) μεταπίπτει στην αγώγιμη κατάσταση με αποτέλεσμα να πολώσει ανάστροφα τη δίοδο  $D_F$  φέρνοντάς την σε σβέση, οπότε το φορτίο θα τροφοδοτείται μέσω του ζεύγους  $T_2$  και  $D_1$ .

Η εικόνα β παρουσιάζει την περιοχή λειτουργίας του μετατροπέα, στην οποία η τάση εξόδου και το ρεύμα έχουν θετικό πρόσημο. Η παρακάτω εικόνα παρουσιάζει τις κυματομορφές της τάσης εισόδου, ρεύματος εισόδου, τάσης εξόδου και τα ρεύματα δια μέσου των Thyristors  $T_1$  και  $T_2$  και των διόδων  $D_1$  και  $D_2$ . Η μέση τιμή της τάσης εξόδου μπορεί να εξευρεθεί από τη σχέση που ακολουθεί

$$V_{dc} = \frac{2}{2\pi} \int_a^{\pi} V_m \sin \omega t d(\omega t) = \frac{2V_m}{2\pi} [-\cos \omega t]_a^{\pi} = \frac{V_m}{\pi} (1 + \cos \alpha) \quad [7-5]$$

και μπορεί να διακυμαίνεται από  $\frac{2V_m}{\pi}$  μέχρι 0

όταν το  $\alpha$  μεταβάλλεται από 0 μέχρι  $\pi$ . Η μέγιστη τάση εξόδου είναι  $V_{max\,aver} = \frac{2V_m}{\pi}$

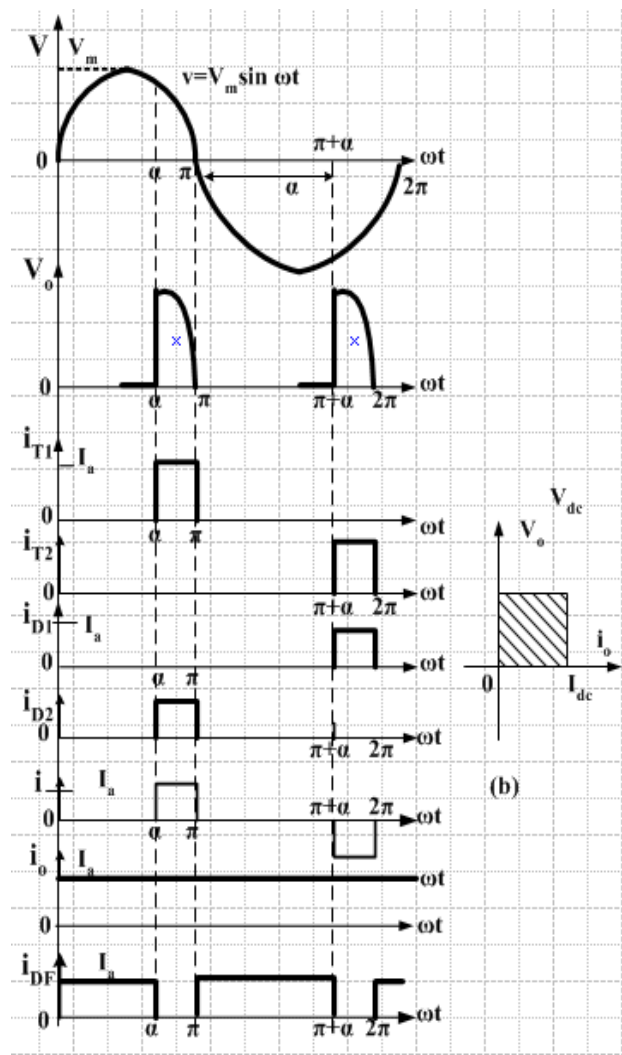
και ο μέσος όρος της κανονικοποιημένης τάσης εξόδου είναι:

$$V_{norm} \frac{V_{dc}}{V_{dm}} = 0.5(1 + \cos \alpha) \quad [7-6]$$

Ο μετατροπέας αυτού του τύπου έχει ένα βελτιωμένο συντελεστή Ισχύος λόγω της δίοδου ελεύθερης διέλευσης και χρησιμοποιείται σε εφαρμογές μέχρι 15 Watt.

Τέλος η ενεργός τάση εξόδου θα είναι:

$$V_{rms} = \left[ \frac{2}{2\pi} \int_a^{\pi} V_m^2 \sin^2 \omega t d(\omega t) \right]^{1/2} = \left[ \frac{V_m^2}{2\pi} \int_a^{\pi} (1 - \cos 2\omega t) d(\omega t) \right]^{1/2} = \frac{V_m}{\sqrt{2}} \left[ \frac{1}{\pi} (\pi - \alpha + \sin 2\alpha) \right]^{1/2} \quad [7-7]$$



Εικ. 30. Καμπύλες Λειτουργίας του Μονοφασικού Ημμετατροπέα



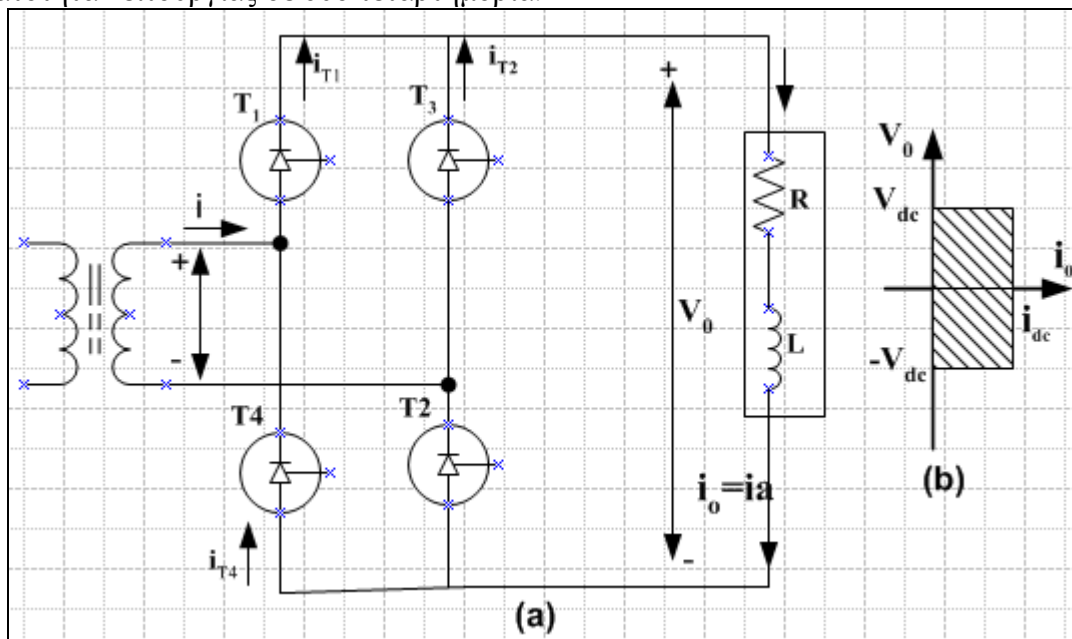
## 6.5 Μονοφασικός Πλήρης Μετατροπέας

Το κύκλωμα ενός μονοφασικού μετατροπέα με επαγωγικό φορτίο φαίνεται παρακάτω. Κατά τη θετική ημιπερίοδο τα Θυρίστωρες  $T_1$  και  $T_2$  είναι ορθά πολωμένα και όταν στο χρόνο  $\omega t = \alpha$  πυροδοτούν ταυτόχρονα, το φορτίο τροφοδοτείται από την πηγή δια μέσου του  $T_1$  και  $T_2$ . Λόγω της ύπαρξης του επαγωγικού φορτίου, αυτά τα Θυρίστωρες θα συνεχίσουν να άγουν και πέραν των  $180^\circ$  ( $\omega t = \pi$ ) ακόμη και όταν η τάση εισόδου παίρνει αρνητικές τιμές.

Κατά την αρνητική ημιπερίοδο τα Θυρίστωρες  $T_3$  και  $T_4$  είναι ορθά πολωμένα και η ταυτόχρονη πυροδότησή τους θα έχει σαν αποτέλεσμα την εφαρμογή ανάστροφης τάσης στα άκρα των  $T_1$  και  $T_2$  (που ήταν αγωγή μέχρι τώρα), προκαλώντας τη σβέση τους και το ρεύμα φορτίου θα μεταφερθεί από το ζεύγος  $T_1$  και  $T_2$  στο ζεύγος  $T_3$  και  $T_4$ . Στην Εικόνα 5β φαίνονται τα τεταρτημόρια λειτουργίας του κυκλώματος ενώ στην Εικόνα 6 παρουσιάζονται αντίστοιχα οι κυματομορφές τάσης και ρεύματος εισόδου-εξόδου.

- Κατά τη διάρκεια του διαστήματος από  $\alpha$  έως  $\pi$ , η τάση εισόδου  $V$  και το ρεύμα εισόδου έχουν θετικό πρόσημο, ισχύς ρέει από την είσοδο (πηγή) στο φορτίο και ο μετατροπέας “**λειτουργεί σαν ανορθωτής**”.
- Κατά τη διάρκεια του διαστήματος από  $\pi$  έως  $\pi+\alpha$ , η **τάση εισόδου είναι αρνητική** και το **ρεύμα εισόδου θετικό** με αποτέλεσμα να έχουμε ανάστροφη ροή ενέργειας από το φορτίο στην είσοδο. Στην περίπτωση αυτή ο μετατροπέας “**λειτουργεί σαν αντιστροφέας**”.

Αυτός ο τύπος μετατροπέα χρησιμοποιείται ευρέως στη βιομηχανία μέχρι και 15 K Watt και ανάλογα με την τιμή της γωνίας  $\alpha$ , η τάση εξόδου μπορεί να είναι θετική ή αρνητική παρέχοντας με τον τρόπο αυτό δυνατότητα λειτουργίας σε δυο τεταρτημόρια.



Εικ. 31. Μονοφασικός Πλήρης Μετατροπέας

Η μέση τιμή της τάσης εξόδου μπορεί να ευρεθεί από την εξίσωση:

$$V_{dc} = \frac{2}{2\pi} \int_{\alpha}^{\pi+\alpha} V_m \sin \omega t d(\omega t) = \frac{2V_m}{2\pi} [-\cos \omega t]_{\alpha}^{\pi+\alpha} = \frac{2V_m}{\pi} (\cos \alpha) \quad [7-8]$$

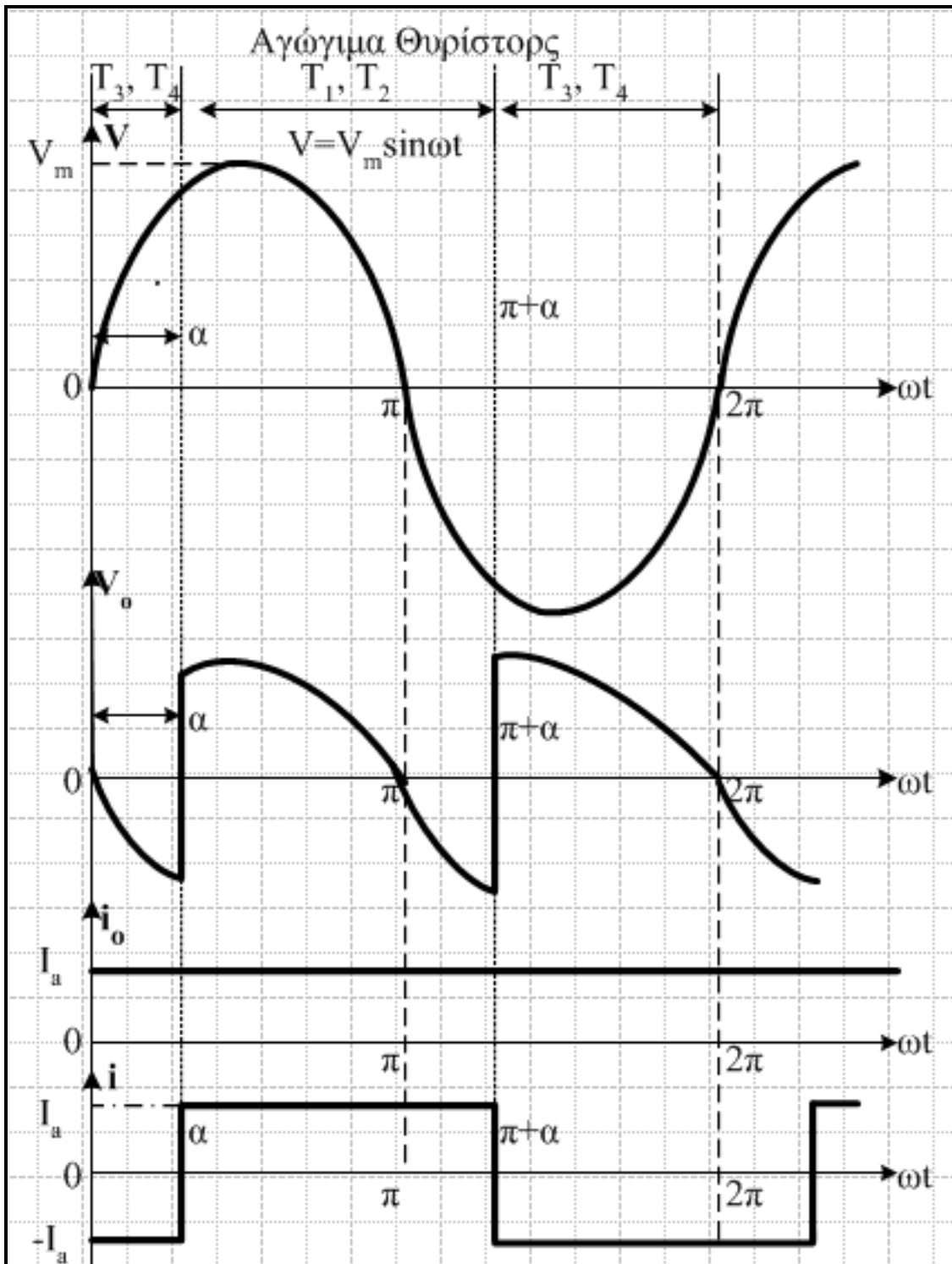
Από την ανωτέρω εξίσωση συμπεραίνουμε ότι η  $V_{dc}$  μπορεί να κυμαίνεται από  $\frac{2V_m}{\pi}$  μέχρι  $-\frac{2V_m}{\pi}$  όταν η γωνία  $\alpha$  μεταβάλλεται από γωνία  $0$  μέχρι  $180^\circ$  ( $\pi$ ). Η μέγιστη τιμή της μέσης τάσης εξόδου θα

είναι  $V_{max} = \frac{2V_m}{\pi}$  και η κανονικοποιημένη μέση τιμή τάσης εξόδου θα είναι

$$V_{\text{norm}} = \frac{V_{dc}}{V_{\text{max}}} = \cos \alpha \quad [7-9]$$

Τέλος η ενεργός τάση εξόδου δίνεται από τη σχέση:

$$V_{\text{rms}} = \left[ \frac{2}{2\pi} \int_a^{\pi+\alpha} V_m^2 \sin^2 \omega t \, d(\omega t) \right]^{1/2} = \left[ \frac{V_m^2}{2\pi} \int_a^{\pi+\alpha} (1 - \cos 2\omega t) \, d(\omega t) \right]^{1/2} = \frac{V_m}{\sqrt{2}} \quad [7-10]$$

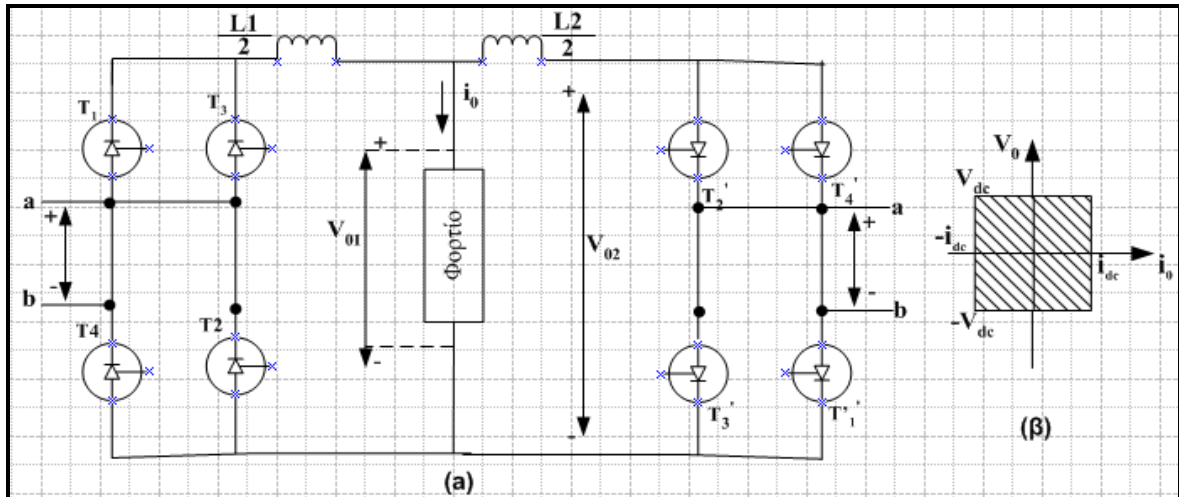


Εκ. 32. Κυματομορφές Διπλού Ανορθωτή

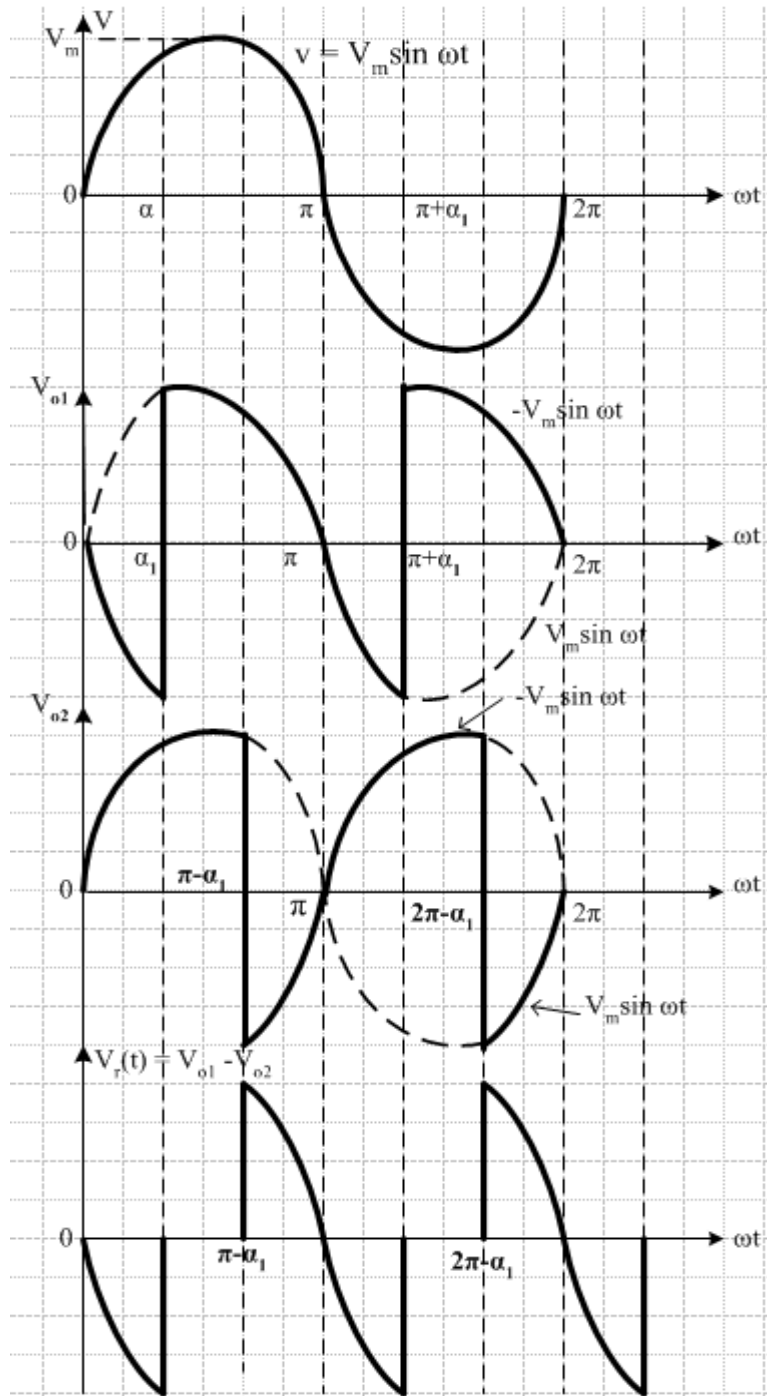
### 6.6 Μονοφασικός Διπλός Μετατροπέας

Είδαμε προηγουμένως ότι ο πλήρης μονοφασικός μετατροπέας μπορεί να λειτουργήσει σε δυο τεταρτημόρια. Εάν δυο από αυτούς τους μετατροπείς συνδεθούν πλάτη με πλάτη όπως φαίνεται

παρακάτω (α) τότε η τάση και το ρεύμα εξόδου μπορεί να αντιστραφούν, το σύστημα παρέχει λειτουργία και στα τέσσερα τεταρτημόρια και αποκαλείται **Διπλός Μονοφασικός Μετατροπέας**. Αυτοί οι μετατροπέες χρησιμοποιούνται συνήθως για την οδήγηση κινητήρων μεγάλης Ισχύος. Εάν  $\alpha_1$  και  $\alpha_2$  είναι οι γωνίες καθυστέρησης των μετατροπέων 1 και 2 αντίστοιχα, η αντίστοιχη μέση τάση εξόδου είναι  $V_{dc1}$  και  $V_{dc2}$ . Οι γωνίες καθυστέρησης ρυθμίζονται ώστε ο ένας μετατροπέας να λειτουργεί σαν ανορθωτής και ο άλλος να λειτουργεί σαν αναστροφέας, αλλά και οι δυο μετατροπέες παράγουν την ίδια μέση τάση εξόδου.



**Εικ. 33. Μονοφασικός Διπλός Μετατροπέας**



Εικ. 34. Κυματομορφές του Μονοφασικού Διπλού Μετατροπέα

Η εικόνα β παρουσιάζει τις χαρακτηριστικές τάσης/ρεύματος (λειτουργία στα τεταρτημόρια) του **Μονοφασικού Διπλού Μετατροπέα** και η επόμενη εικόνα τις κυματομορφές εξόδου των δυο μετατροπέων στα σημεία που οι δυο τάσεις εξόδου είναι ίδιες.

Από την εξίσωση [7-8]

$$V_{dc} = \frac{2}{2\pi} \int_a^{\pi+a} V_m \sin \omega t d(\omega t) = \frac{2V_m}{2\pi} [-\cos \omega t]_a^{\pi+a} = \frac{2V_m}{\pi} (\cos a)$$

οι μέσες τιμές τάσης εξόδου θα είναι:

$$V_{dc1} = \frac{2V_m}{\pi} \cos a_1 \quad \text{και} \quad V_{dc2} = \frac{2V_m}{\pi} \cos a_2.$$

Εφόσον ο ένας μετατροπέας είναι ανορθωτής και ο άλλος αναστροφέας έχουμε:

$$V_{dc1} = -V_{dc2} \quad \text{ή} \quad \cos a_2 = -\cos a_1 = \cos (\pi - a_1) \quad \text{οπότε} \quad a_2 = \pi - a_1$$

Εφόσον οι στιγμιαίες τάσεις εξόδου των δυο μετατροπέων είναι εκτός φάσης, θα υπάρξει μια **στιγμιαία διαφορά τάσης** με αποτέλεσμα να έχουμε κυκλοφορία ρεύματος μεταξύ των δυο μετατροπέων (**Σφάλμα! Το αρχείο προέλευσης της αναφοράς δεν βρέθηκε.**). Αυτό το ρεύμα δεν θα διέρχεται από το φορτίο και περιορίζεται από την αυτεπαγωγή  $L_L$  ( $L_{L1}$  και  $L_{L2}$ ) όπως φαίνεται στην πιο πάνω.

Εάν  $u_{01}$  και  $u_{02}$  είναι οι στιγμιαίες τάσεις εξόδου των μετατροπέων 1 και 2 αντίστοιχα, το ρεύμα που κυκλοφορεί μπορεί να ευρεθεί ολοκληρώνοντας τη στιγμιαία διαφορά τάσης ξεκινώντας από  $\omega t = 2\pi = \alpha_1$ . Εφόσον οι δυο τάσεις εξόδου κατά το διάστημα από  $\omega t = \pi + \alpha_1$  μέχρι  $2\pi - \alpha_1$  είναι ίσες, η συνεισφορά τους στο ρεύμα που κυκλοφορεί  $i_r$  είναι μηδέν.

$$\begin{aligned}
 i_r &= \frac{1}{\omega L_r} \int_{2\pi - \alpha_1}^{\omega t} v_r d(\omega t) = \frac{1}{\omega L_r} \int_{2\pi - \alpha_1}^{\omega t} (v_{o1} - v_{o2}) d(\omega t) = \\
 &= \frac{V_m}{\omega L_r} \left[ \int_{2\pi - \alpha_1}^{\omega t} -\sin \omega t d(\omega t) - \int_{2\pi - \alpha_1}^{\omega t} \sin \omega t d(\omega t) \right] = \\
 &= \frac{2V_m}{\omega L_r} (\cos \omega t - \cos \alpha_1)
 \end{aligned}
 \tag{7-11}$$

Τα ρεύμα που κυκλοφορεί εξαρτάται από τη γωνία καθυστέρησης και:

- Παίρνει μέγιστη τιμή όταν  $\alpha_1 = \pi$  και  $\omega t = n\pi / n = 0, 2, 4, \dots$
- Παίρνει ελάχιστη τιμή όταν  $\alpha_1 = 0$  και  $\omega t = n\pi / n = 1, 3, 5, \dots$

Ο διπλός μετατροπέας μπορεί να λειτουργεί με ή χωρίς **ρεύμα κυκλοφορίας**. Στην περίπτωση λειτουργίας χωρίς ρεύμα κυκλοφορίας, κάθε φορά λειτουργεί μόνο ο ένας μετατροπέας, ο οποίος παρέχει και το ρεύμα φορτίου ενώ ο άλλος τίθεται σε κατάσταση μη λειτουργίας μέσω παλμών απαγόρευσης (**inhibit pulses**). Θα πρέπει να παρατηρηθεί ότι η λειτουργία με ρεύμα κυκλοφορίας έχει τα ακόλουθα πλεονεκτήματα:

1. Το ρεύμα κυκλοφορίας καθιστά και τους δυο μετατροπείς αγωγίμους σε σχέση με τη συνολική περιοχή λειτουργίας, ανεξαρτήτως του φορτίου.
2. Από τη στιγμή που ο ένας μετατροπέας λειτουργεί σαν ανορθωτής και ο άλλος σαν αναστροφέας, η ροή ισχύος και προς τις δυο κατευθύνσεις είναι δυνατή.
3. Επειδή και οι δυο μετατροπείς είναι σε κατάσταση συνεχούς λειτουργίας ο χρόνος μεταφοράς από το ένα τεταρτημόριο στο άλλο είναι πολύ μικρός( άρα έχουμε γρήγορη απόκριση).

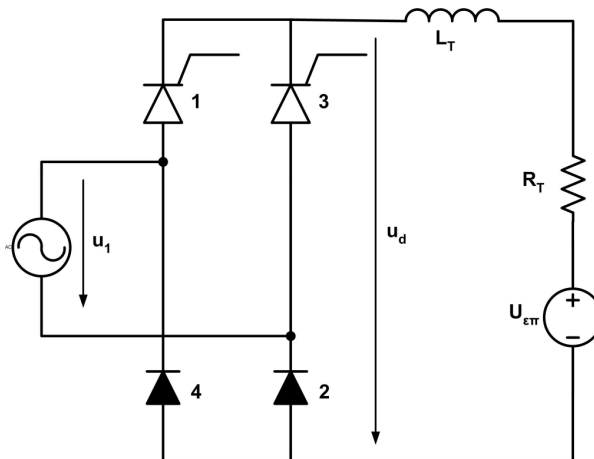
## 6.7 Κύκλωμα της Άσκησης

Για την οδήγηση του τυμπάνου του κινητήρα χρησιμοποιείται ένας μονοφασικός ημιμετατροπέας που αποτελείται από τέσσερα στοιχεία ισχύος (δύο θυρίστωρες και δύο διόδους).

**Συμμετρικός Μετατροπέας:** Επειδή καθένας από τους δύο κλάδους της γέφυρας αποτελείται από μία δίοδο και ένα θυρίστωρ η γέφυρα αυτή ονομάζεται **συμμετρική**. Στη συμμετρική γέφυρα δεν χρειάζονται μετασχηματιστές γαλβανικής απομόνωσης για την παλμοδότηση των θυρίστωρες, αφού οι κάθοδοι των δύο θυρίστωρες βρίσκονται στο ίδιο δυναμικό.

**Ασύμμετρος Μετατροπέας:** Εάν το στοιχείο 2 ήταν θυρίστωρ και το 3 ήταν δίοδος, τότε στον ένα κλάδο της γέφυρας θα είχαμε μόνο διόδους και στον άλλο μόνο θυρίστωρ, οπότε η γέφυρα θα ονομαζόταν **ασύμμετρη**. Σε αυτόν τον τύπο, το ρεύμα ρέει για το ίδιο χρονικό διάστημα στις διόδους και τα θυρίστωρες. Στην ασύμμετρη γέφυρα η χρονική διάρκεια της διέλευσης του ρεύματος στις διόδους είναι μεγαλύτερη από εκείνη των θυρίστωρες.

Αυτός ο τύπος σε σύγκριση με τον πλήρη μονοφασικό μετατροπέα (τέσσερα θυρίστωρες), πλεονεκτεί γιατί χρησιμοποιεί μικρότερο αριθμό θυρίστωρες και έχει μικρότερη κατανάλωση αέργου ισχύος. Όμως, μειονεκτεί ως προς το γεγονός ότι δεν επιτρέπει αντιστροφή ισχύος και προκαλεί περισσότερες αρμονικές.

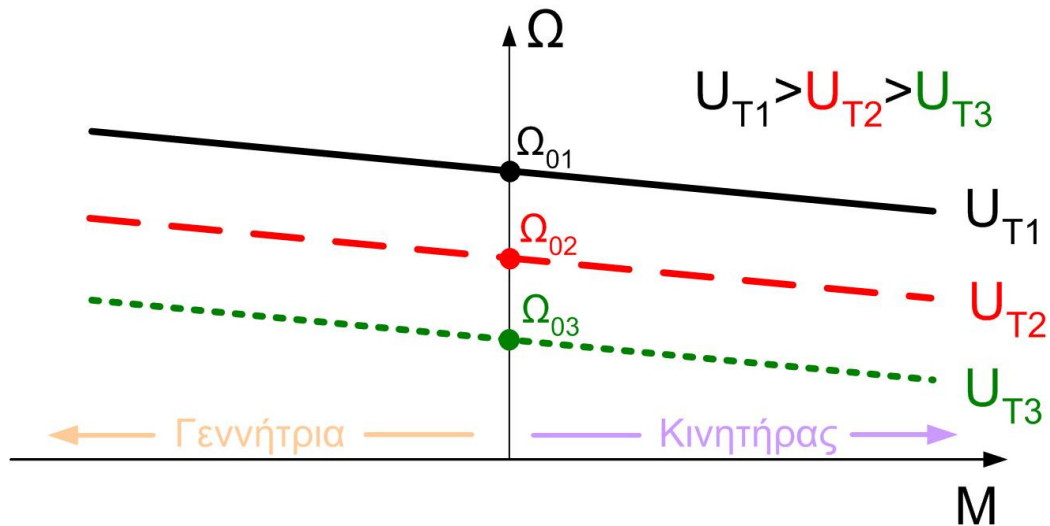


Εικ. 35. Μονοφασικός ημιμετατροπέας. Ως φορτίο έχει συνδεθεί το τύλιγμα τυμπάνου μιας μηχανής συνεχούς ρεύματος

Στην προηγούμενη εικόνα ο μονοφασικός ημιμετατροπέας έχει σαν φορτίο το τύλιγμα τυμπάνου ενός κινητήρα συνεχούς ρεύματος. Η αντίσταση  $R_T$  είναι η αντίσταση του τυλίγματος του τυμπάνου της μηχανής συνεχούς ρεύματος,  $L_T$  είναι η αυτεπαγωγή του τυλίγματος του τυμπάνου και  $U_{\varepsilon\pi}$  είναι η ΗΕΔ που αναπτύσσεται στο τύλιγμα του τυμπάνου. Όπως εξηγήθηκε πιο πριν, αυτός ο τύπος μετατροπέα λειτουργεί μόνο στο 1<sup>ο</sup> τεταρτημόριο άρα η τάση  $u_d$  δεν μπορεί να γίνει αρνητική, πράγμα που σημαίνει ότι δεν μπορεί να σταλεί ενέργεια προς το δίκτυο.

### 6.7.1 Ρύθμιση στροφών μηχανής συνεχούς ρεύματος μέσω της τάσης του τυμπάνου.

Στο σχήμα 2 απεικονίζονται οι καμπύλες ροπής-στροφών ενός κινητήρα συνεχούς ρεύματος ξένης διέγερσης, οι οποίες προκύπτουν όταν μεταβάλλεται η τάση  $U_T$ , με την οποία τροφοδοτείται το τύλιγμα του τυμπάνου του κινητήρα. Η τάση στο τύλιγμα διέγερσης διατηρείται σταθερή.



Εικ. 36. Ρύθμιση στροφών μηχανής συνεχούς ρεύματος μέσω της τάσης τυμπάνου

Ο αριθμός των στροφών της μηχανής εν κενώ  $\Omega_0$  μεταβάλλεται ανάλογα με την τιμή της τάσης του τυμπάνου και οι καμπύλες είναι παράλληλες μεταξύ τους. Η μεταβολή της τάσης τυμπάνου μπορεί να γίνει με μεταβολή της γωνίας έναυσης της ανορθωτικής γέφυρας που περιγράψαμε στην προηγούμενη ενότητα.

### 6.7.2 Περιγραφή της λειτουργίας της πειραματικής διάταξης

Στην εικόνα που ακολουθεί φαίνεται το κυκλωματικό διάγραμμα του ηλεκτρονικού μετατροπέα που θα χρησιμοποιηθεί στην εργαστηριακή άσκηση. Το κύκλωμα ισχύος αποτελείται από:

### 6.7.3 Κύκλωμα Τροφοδοσίας

Υπάρχουν:

- Μία μη ελεγχόμενη ανορθωτική γέφυρα με 4 διόδους, η οποία προορίζεται να τροφοδοτήσει με συνεχή τάση σταθερής μέσης τιμής το τύλιγμα διέγερσης ενός κινητήρα συνεχούς ρεύματος και
- Μία μερικώς ελεγχόμενη ανορθωτική γέφυρα (2 διόδοι & 2 Θυρίστωρες), η οποία θα χρησιμοποιηθεί για να τροφοδοτήσει με μεταβλητή συνεχή τάση το τύλιγμα του κινητήρα συνεχούς ρεύματος. Οι δυο διόδοι είναι ίδιες με αυτές της προηγούμενης γέφυρας ανόρθωσης.

### 6.7.4 Κύκλωμα Παλμοδότησης

Το κύκλωμα παλμοδότησης ελέγχει την παλμοδότηση των δύο θυρίστωρες του μετατροπέα, ώστε να γίνει ο επιθυμητός έλεγχος των στροφών.

A) Η επιθυμητή τιμή των στροφών του κινητήρα ( $n_{ref}$ ) ρυθμίζεται με το ποτενσιόμετρο P. Ο ολοκληρωτής (1) φροντίζει για την ομαλή εκκίνηση του κινητήρα, ολοκληρώνοντας την τάση  $n_{ref}$  που δίνει το ποτενσιόμετρο P. Η χρονική σταθερά ολοκλήρωσης ρυθμίζεται με το ποτενσιόμετρο  $P_1$ , το οποίο βρίσκεται στο εξωτερικό της συσκευής και δίπλα σε αυτό αναγράφεται η λεζάντα “RAMP”.

B) Το ανώτατο όριο των στροφών ρυθμίζεται από το ποτενσιόμετρο  $P_2$  που βρίσκεται στην έξοδο του ολοκληρωτή και ρυθμίζει την περιοχή του ποτενσιόμετρου P (βρίσκεται στο εξωτερικό της συσκευής και δίπλα σε αυτό αναγράφεται η λεζάντα “ $n_{max}$ ”). Από την καινούργια τάση  $n_{ref}^*$  αφαιρείται η τάση τυμπάνου του κινητήρα και προστίθεται η πτώση τάσης στην ωμική αντίσταση

του τυμπάνου, η οποία είναι ίση με  $I_T R_T$ . Η τάση του τυμπάνου  $U_T$  μείον την πτώση τάσης  $I_T R_T$  είναι ίση με την τάση εξ επαγωγής  $U_{επ}$ , που αναπτύσσεται στο επαγωγικό τύμπανο του κινητήρα (αν βέβαια θεωρήσουμε ότι το ρεύμα του τυμπάνου είναι πλήρως εξομαλυμένο έτσι ώστε

$$L_T \frac{dI_T}{dt} = 0$$

$$U_{επ} = U_T - R_T I_T \quad [7-12]$$

Στο σημείο αυτό θα πρέπει να θυμηθούμε ότι η τάση εξ επαγωγής εξαρτάται από το μαγνητικό πεδίο και από την ταχύτητα περιστροφής της μηχανής μέσω της σχέσης:

$$U_{επ} = C \Phi \Omega \quad [7-13]$$

όπου  $C$  είναι κατασκευαστική σταθερά,  $\Phi$  η μαγνητική ροή και  $\Omega$  η ταχύτητα του κινητήρα.

Στην περίπτωση που εξετάζουμε, επειδή η διέγερση είναι ανεξάρτητη και σταθερή, η μαγνητική ροή  $\Phi$  θα είναι σταθερή και επομένως **θα υπάρξει μια γραμμική εξάρτηση μεταξύ τάσεως εξ επαγωγής και ταχύτητας περιστροφής του κινητήρα**. Επομένως η σχέση (6) μπορεί να γραφεί με τη μορφή:

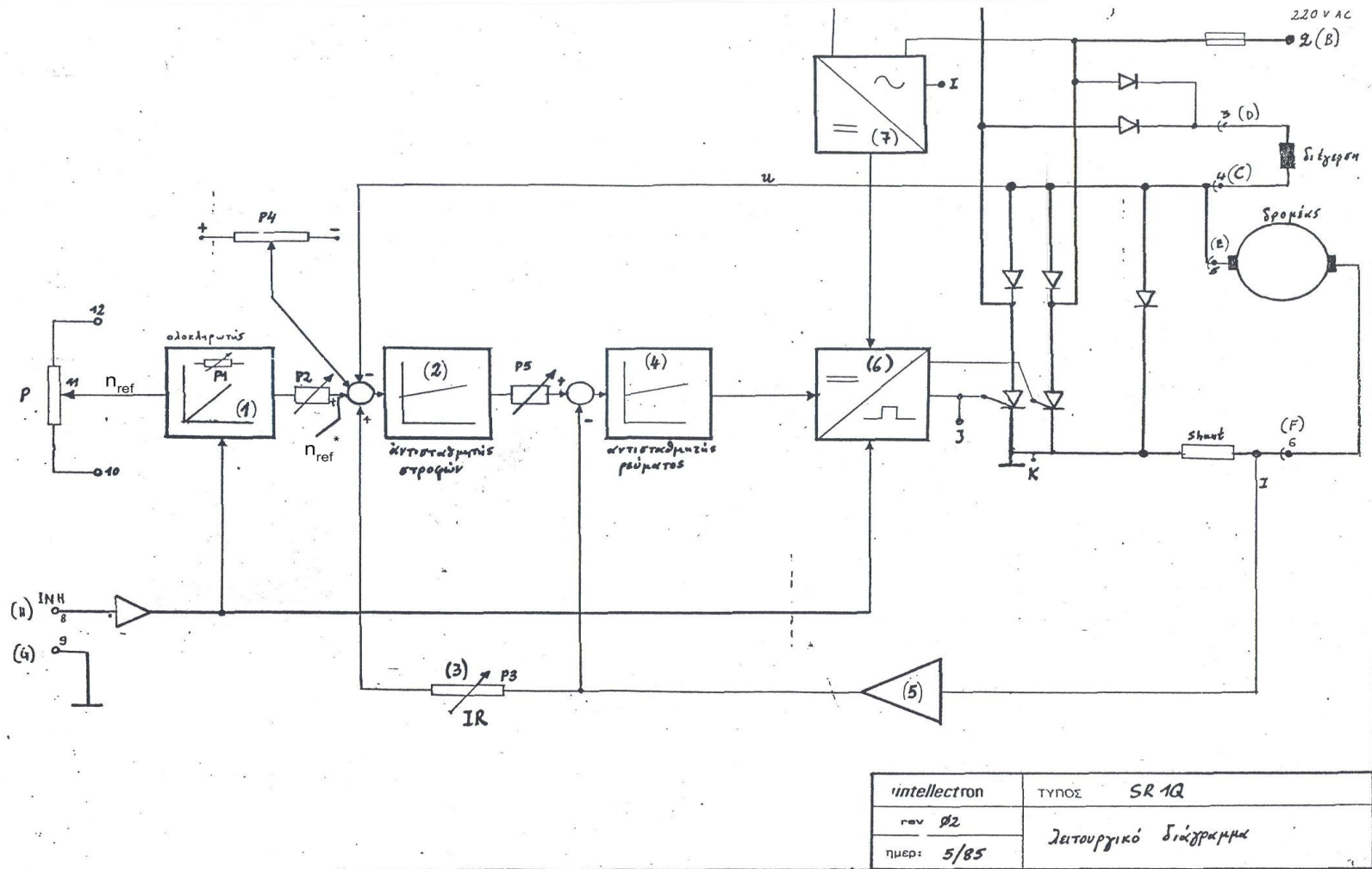
$$U_{επ} = k \Omega \quad [7-14]$$

όπου  $k = C \Phi$  σταθερά. Για να υπολογιστεί από την τάση τυμπάνου  $U_T$  (η οποία μπορεί να μετρηθεί εύκολα) η τάση εξ επαγωγής  $U_{επ}$ , πρέπει να είναι γνωστή η πτώση τάσης  $I_T R_T$ . Το ρεύμα  $I_T$  μετριέται και αυτό εύκολα με τη βοήθεια μιας μετρητικής αντίστασης (shunt). Το σήμα από τη shunt ενισχύεται (5) και ένα ποσοστό της τάσης εξόδου του ενισχυτή ρυθμιζόμενο με το ποτενσιόμετρο  $P_3$  αποτελεί την τάση  $I_T R_T$  (3). Το ποτενσιόμετρο  $P_3$  βρίσκεται στο εξωτερικό της συσκευής και δίπλα σε αυτό αναγράφεται η λεζάντα “IxR”.

Από την τάση  $u_{ref}^*$  αφαιρείται όπως είδαμε η τάση  $U_{επ}$ , δηλαδή πρακτικά αφαιρείται η τάση  $U_T$  και προστίθεται η τάση  $I_T R_T$ . Επιπλέον με το τρίμμερ  $P_4$  μηδενίζεται η τάση offset του αντισταθμητή στροφών (2). Η τάση εξόδου του αντισταθμητή στροφών συγκρίνεται με την τρέχουσα τιμή του ρεύματος (έξοδος του ενισχυτή (5)) και οδηγεί στον αντισταθμητή ρεύματος. Η έξοδος του αντισταθμητή ρεύματος (4) συγκρίνεται με την πριονωτή τάση που παράγεται από το κύκλωμα τροφοδοσίας και συγχρονισμού με την τάση του δικτύου (7). Η σύγκριση γίνεται στο συγκριτή (6), του οποίου η έξοδος καθορίζει τη γωνία έναυσης οδηγώντας την παλμογεννήτρια. Το αποτέλεσμα είναι ένας συρμός παλμών που μετακινείται ανάλογα με την τάση εξόδου του αντισταθμητή ρεύματος στην περιοχή  $\alpha = 30^\circ - 180^\circ$ .

Η είσοδος ελέγχου “inh” φροντίζει για την άμεση ακύρωση των παλμών και της τάσης εξόδου του ολοκληρωτή (1). Έτσι επιτυγχάνεται, αν χρειαστεί, ο γρήγορος μηδενισμός του ρεύματος στο δρομέα.





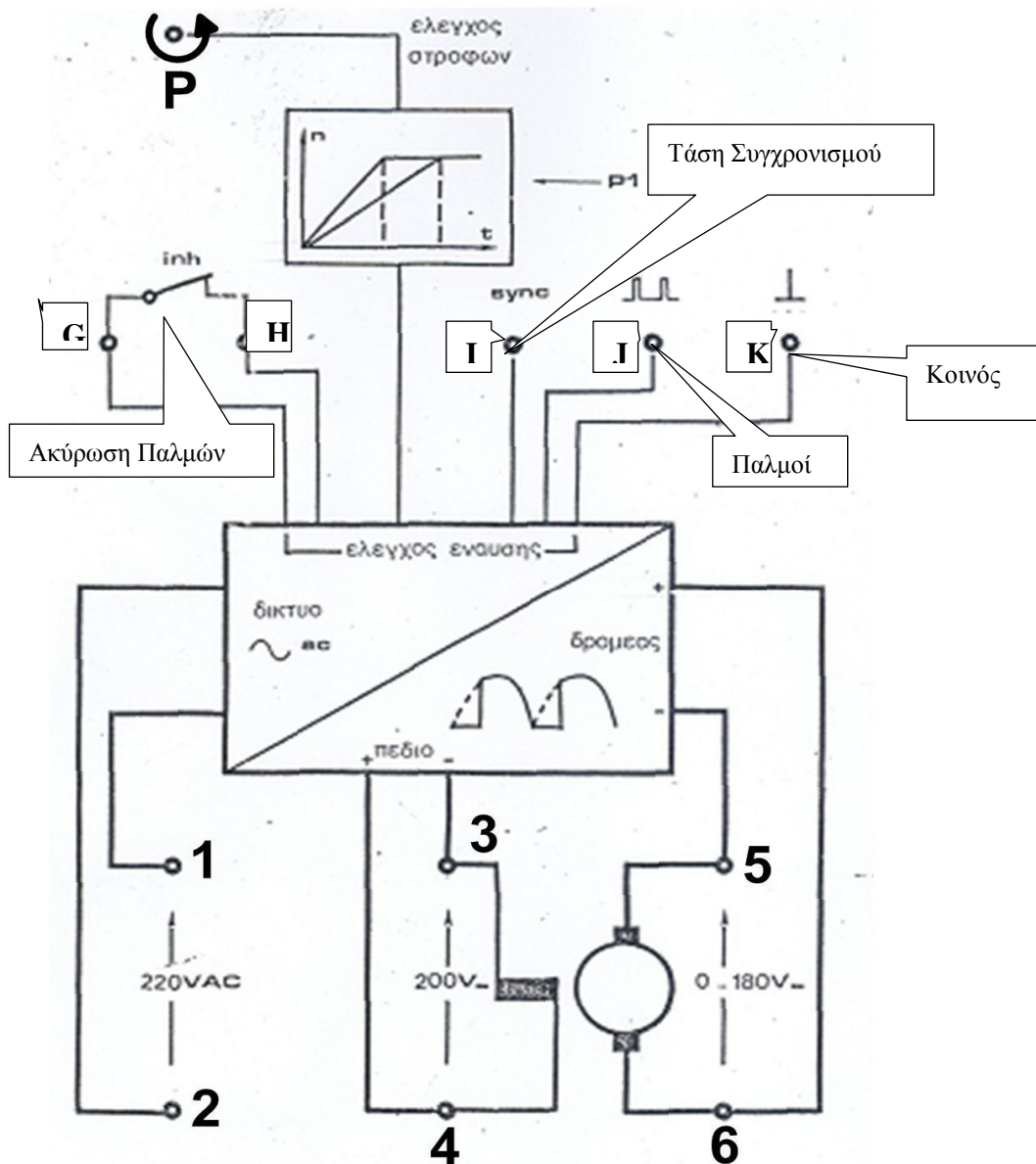
Εικ. 37. Κυκλωματικό διάγραμμα του ηλεκτρονικού μετατροπέα της πειραματικής διάταξης

## 6.7.5 Πραγματοποίηση Εργαστηριακής Άσκησης

### 6.7.5.1 Γενικά

Παρατηρήστε και συνειδητοποιήστε ότι από τις δύο μηχανές, αυτή που συνδέεται με τη γέφυρα είναι **κινητήρας** και ο δεύτερος (που είναι συνδεδεμένος με τον κινητήρα) είναι **γεννήτρια**. Στο σχήμα (παρουσίαση της εμπρόσθιας εξωτερικής όψης του ηλεκτρονικού μετατροπέα) παρατηρήστε τους διαφόρους ρυθμιστές:

- Άνω και αριστερά βρίσκεται το ποτενσιόμετρο P, με το οποίο ρυθμίζεται η επιθυμητή τιμή των στροφών του κινητήρα.
- Τα υπόλοιπα τρία ποτενσιόμετρα, δηλαδή το P<sub>1</sub> “RAMP”, το P<sub>2</sub> “n<sub>max</sub>” και το P<sub>3</sub> “IxR”, βρίσκονται τοποθετημένα στην πλαϊνή όψη του μετατροπέα.



Εικ. 38. Εμπρόσθια εξωτερική όψη του ηλεκτρονικού μετατροπέα της πειραματικής διάταξης

### 6.7.5.2 Μέτρηση Χαρακτηριστικών Κινητήρα

#### Συνδεσμολογίες

Συνδέστε το δρομέα του κινητήρα (1<sup>η</sup> μηχανή) με τα σημεία τροφοδοσίας του δρομέα στο τροφοδοτικό SR1Q (σημεία **5, 6**).

Συνδέστε τη διέγερση του κινητήρα με τα σημεία διέγερσης στο τροφοδοτικό SR1Q (σημεία **3, 4**).

Γεφυρώστε τους ακροδέκτες INH (ακύρωση παλμών) σημεία G, H, στο τροφοδοτικό SR1Q.

Τροφοδοτήστε τον μετατροπέα, συνδέστε τους ακροδέκτες **1 και 2** με πηγή εναλλασσόμενης τάσης 220 V rms.

#### Μετρήσεις

Τοποθετήστε: Το ποτενσιόμετρο **P** στη θέση max (μέγιστος αριθμός στροφών),

Το ποτενσιόμετρο **P1** στη μέση,

Το **P2** στο μέγιστο (θέση max),

Το **P3** στο ελάχιστο (θέση min).

Συνδέστε στο δρομέα της γεννήτριας (2<sup>η</sup> μηχανή, μεταβλητή αντίσταση (π.χ. 500Ω 1 KWatt).

Μεταβάλλετε την αντίσταση σε βήματα, ώστε το ρεύμα στο δρομέα του κινητήρα να παίρνει τιμές ανά .5A και ταυτόχρονα μετρήστε τον αντίστοιχο αριθμό στροφών του κινητήρα και συμπληρώστε τον επόμενο Πίνακα.

Όταν P = 100%		
A/A	Ρεύμα του δρομέα (A)	Στροφές του κινητήρα
1.	.5	
2.	1	
3.	1.5	
4.	2	
5.	2.5	
6.	3	
7.	3.5	
8.	4	

Τοποθετήστε τώρα το ποτενσιόμετρο P στο 80% του max και επαναλάβετε τη μέτρηση.

Όταν P = 80%		
A/A	Ρεύμα του δρομέα (A)	Στροφές του κινητήρα
1.	.5	
2.	1	
3.	1.5	
4.	2	
5.	2.5	
6.	3	
7.	3.5	
8.	4	

Τι παρατηρείτε στη σχέση ρεύματος δρομέα και στροφών κινητήρα για τις δυο περιπτώσεις;

### 6.7.5.3 Μετρήσεις με αντιστάθμιση IR

Τοποθετήστε:

- Το ποτενσιόμετρο **P** (επιθυμητές στροφές) στο 50% της θέσης max (δηλαδή στο 1/2 του μέγιστου αριθμού στροφών).
- Το ποτενσιόμετρο **P1** στη μέση.
- Το ποτενσιόμετρο **P2** στο μέγιστο (θέση max).

Συνδέστε το δρομέα της γεννήτριας ( $2^{05}$  κινητήρας) με μεταβλητή αντίσταση 500Ω 1 KWatt και επαναλάβετε τις μετρήσεις του προηγούμενου Πίνακα.

Όταν P = 50% P3=min		
A/A	Ρεύμα του δρομέα (A)	Στροφές του κινητήρα
1.	.5	
2.	1	
3.	1.5	
4.	2	
5.	2.5	
6.	3	
7.	3.5	
8.	4	

Τώρα τοποθετήστε το ποτενσιόμετρο **P3** στη θέση 1 και επαναλάβετε τις μετρήσεις του προηγούμενου Πίνακα.

Όταν P = 50% P3=1		
A/A	Ρεύμα του δρομέα (A)	Στροφές του κινητήρα
1.	.5	
2.	1	
3.	1.5	
4.	2	
5.	2.5	
6.	3	
7.	3.5	
8.	4	

Τοποθετήστε το ποτενσιόμετρο **P3** στη θέση 2 και επαναλάβετε τις μετρήσεις του προηγούμενου Πίνακα.

Όταν P = 50% P3=2		
A/A	Ρεύμα του δρομέα (A)	Στροφές του κινητήρα
1.	.5	
2.	1	
3.	1.5	
4.	2	
5.	2.5	
6.	3	
7.	3.5	
8.	4	

Τι παρατηρείτε στη σχέση ρεύματος δρομέα και στροφών κινητήρα για τις τρεις περιπτώσεις;

### 6.7.6 Παλμογραφήσεις

Ο παλμογράφος που θα χρησιμοποιηθεί πρέπει να είναι γαλβανικά απομονωμένος από το δίκτυο, δηλαδή το κοινό σημείο του (COMMON, κέλυφος) να μην έχει επαφή με τη γείωση του δικτύου ή με γειωμένο περιβάλλον. Κατά τη διάρκεια των μετρήσεων πρέπει να έχουμε υπόψη ότι το σώμα του παλμογράφου είναι σε υψηλό δυναμικό.

#### 6.7.6.1 Παλμογράφιση παλμών και τάσης συγχρονισμού

Συνδέστε:

- Το κανάλι του παλμογράφου 1 με το σημείο **I** του **SR1Q**.
- Το κανάλι του παλμογράφου 2 με το σημείο **J** του **SR1Q**.
- Το κοινό του παλμογράφου με το σημείο **K** του **SR1Q**.

Αφού πάρετε τις κυματομορφές, σχολιάστε τις. Τι πληροφορίες μας δίνει η κάθε κυματομορφή;

#### 6.7.6.2 Παλμογράφιση παλμών και τάσης εξόδου

Συνδέστε:

- Το κανάλι του παλμογράφου 1 με το σημείο **E** του **SR1Q**.
- Το κανάλι του παλμογράφου 2 με το σημείο **J** του **SR1Q**.
- Το κοινό του παλμογράφου με το σημείο **K** του **SR1Q**.

Καταγράψτε και σχολιάστε τις κυματομορφές.

Τι πληροφορίες μας δίνει η κάθε κυματομορφή;