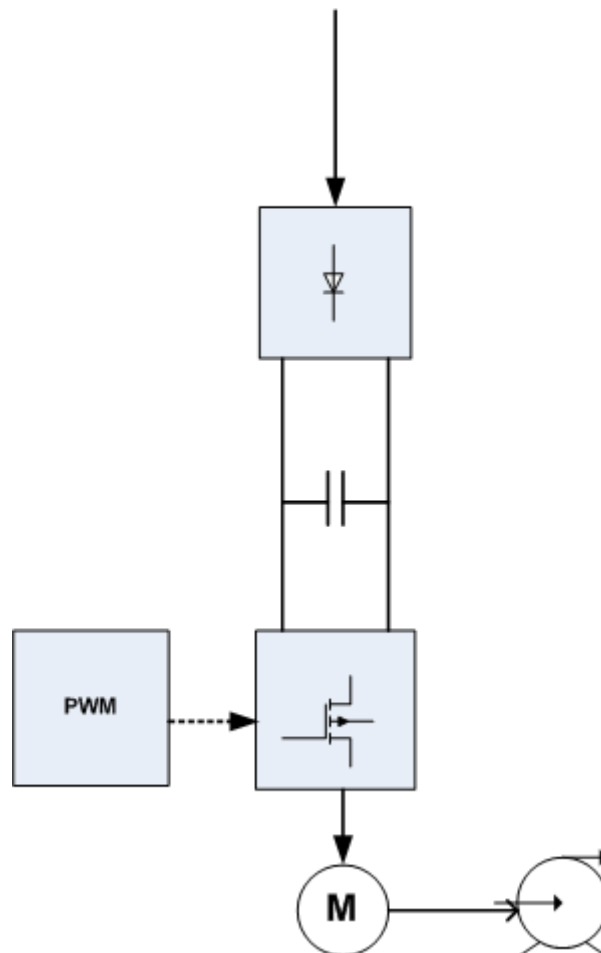


Ηλεκτρικά Κινητήρια Συστήματα

Σημειώσεις εργαστηριακών ασκήσεων



Πάτρα 2018

Γιώργος Αντωνόπουλος

Διπλ. Ηλεκτρολόγος Μηχανικός
Καθηγητής Εφαρμογών ΤΕΙ

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στους συναδέλφους Νίκο Παπαφωτίου και Θανάση Καλαντζόπουλο για την πολύπλευρη συμμετοχή τους και τις υποδείξεις τους κατά τη συγγραφή αυτών των σημειώσεων.

Επί πλέον, ευχαριστώ θερμά το συνάδελφο Θανάση Καλαντζόπουλο για την καθοριστική βοήθειά του στη στοιχειοθέτηση των σχεδίων και εικόνων, που περιλαμβάνονται σε αυτό το φυλλάδιο των σημειώσεων.

Άσκηση 1

Μονοφασική ημιελεγχόμενη γέφυρα (Συσκευή DL 2308)

Σκοπός

Ο σκοπός της πρώτης άσκησης είναι η επανάληψη και σύνδεση των γνώσεων που αποκτήθηκαν σε προηγούμενα μαθήματα, όπως Ηλεκτρονικά Ισχύος και Ηλεκτρικές Μετρήσεις. Για την πραγματοποίηση της άσκησης χρησιμοποιούμε την εκπαιδευτική συσκευή DL 2308 της εταιρείας De Lorenzo. Με τη συσκευή αυτή μελετάμε τη μονοφασική ημιελεγχόμενη γέφυρα με φορτία ωμικά και ωμικά-επαγωγικά και γίνεται υπενθύμιση του ρόλου της διόδου ελεύθερης διέλευσης, όταν το φορτίο είναι ωμικό-επαγωγικό. Επί πλέον, γίνεται υπενθύμιση των λειτουργιών του παλμογράφου και της χρησιμότητάς του στη μέτρηση μεγεθών που συνδέονται με τις ελεγχόμενες γέφυρες (π.χ. γωνία έναυσης). Τέλος, γίνεται συστηματική αναφορά στις μετρήσεις των ηλεκτρικών μεγεθών της τάσης και του ρεύματος, τα οποία παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον και διαφοροποίηση από τις συμβατικές μετρήσεις με όργανα κινητού πηνίου, λόγω του μεγάλου βαθμού παραμόρφωσης που εισάγουν στα μεγέθη αυτά οι ηλεκτρονικοί μετατροπείς ισχύος.

Βήμα 1

Χαρακτηριστική Ελέγχου της γέφυρας $V=f(\alpha)$

Η χαρακτηριστική ελέγχου εκφράζει τη μεταβολή της τάσης εξόδου της γέφυρας σε συνάρτηση με τη γωνία έναυσης. Οι μετρήσεις για τη χάραξη της χαρακτηριστικής ελέγχου μπορούν να γίνουν είτε με κατάλληλο ωμικό, είτε με κατάλληλο ωμικό-επαγωγικό φορτίο. Για να υπάρχει και οπτική αντίληψη των μεταβολών της τάσης, πέραν των ενδείξεων του βολτομέτρου, συνδέουμε στην έξοδο της ημιελεγχόμενης γέφυρας ηλεκτρικό λαμπτήρα πυράκτωσης 230 V.

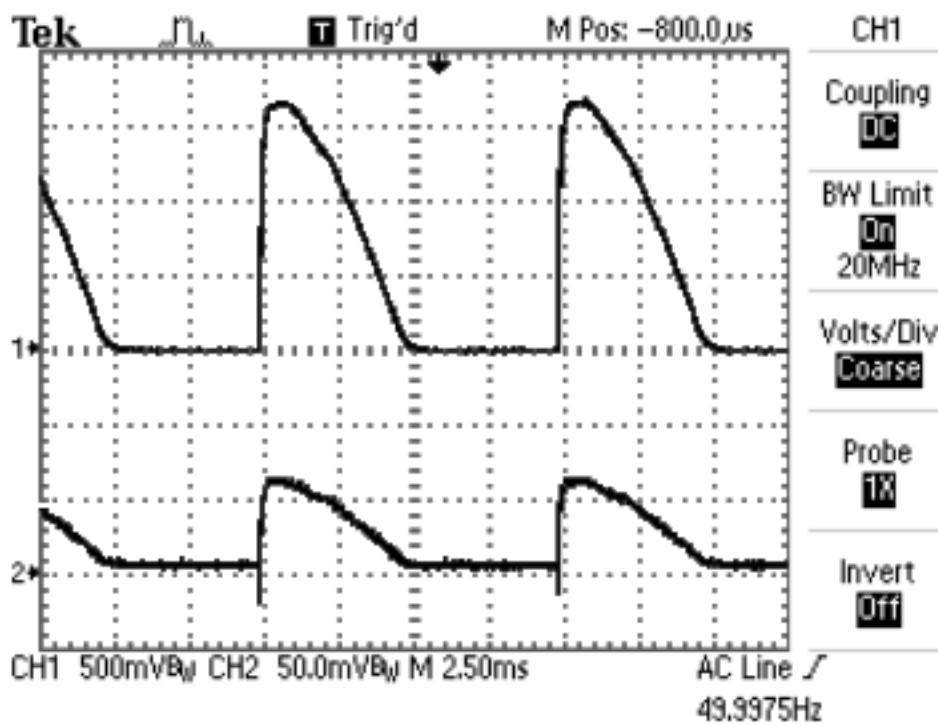
Μεταβάλλουμε τη γωνία έναυσης σε όλο το εύρος μεταβολής της (μέσω του ποτενσιόμετρου **P2** της συσκευής) και καταγράφουμε σε πίνακα τα ζεύγη τιμών (V_{AV} , α).

Βήμα 2

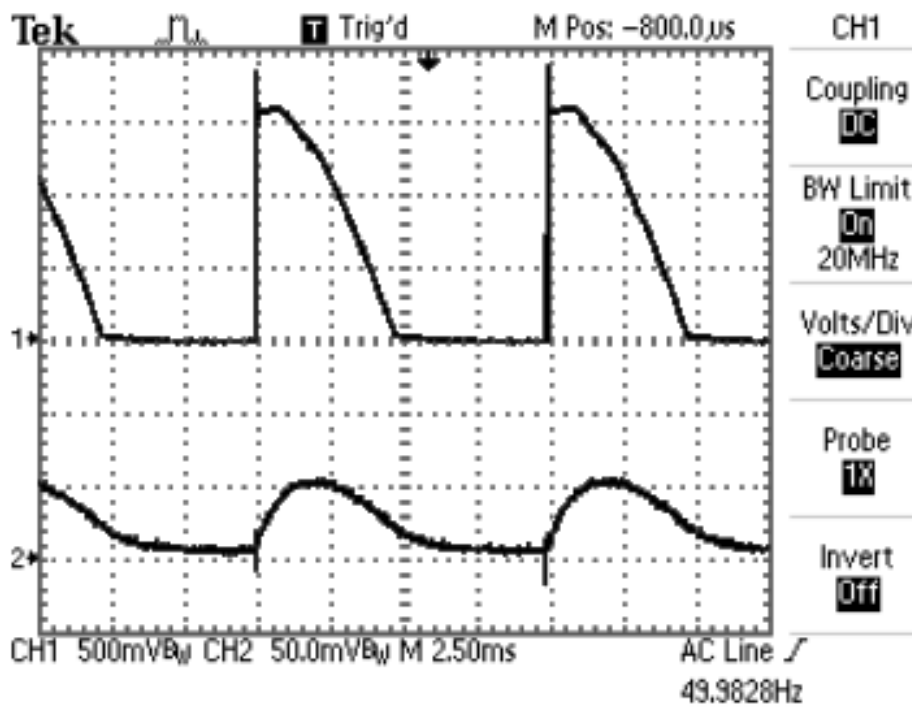
Δίοδος ελεύθερης διέλευσης

Με φορτίο τον ηλεκτρικό λαμπτήρα, παλμογραφούμε στο δεύτερο κανάλι του παλμογράφου το ρεύμα φορτίου (με χρήση R_{shunt} , η αμπεροτσιμπίδας παλμογράφου). Παρατηρούμε τις κυματομορφές της τάσης και του ρεύματος φορτίου της ημιελεγχόμενης γέφυρας, μεταβάλλοντας συνεχώς τη γωνία έναυσης.

Συνδέουμε σε σειρά με τον λαμπτήρα μία μεταβλητή αυτεπαγωγή και παρατηρούμε τις κυματομορφές της τάσης και της έντασης φορτίου για διαφορετικές τιμές της αυτεπαγωγής. Κατανοούμε την λειτουργική συμπεριφορά της γέφυρας, της διόδου ελεύθερης διέλευσης και του πηνίου.



Σχήμα 1.1 Τάση και ρεύμα φορτίου της γέφυρας (φορτίο R , $\alpha=90^\circ$)



Σχήμα 1.2 Τάση και ρεύμα φορτίου της γέφυρας (φορτίο RL , $\alpha=90^\circ$)

ΒΗΜΑ 3

Μετρήσεις τάσης - έντασης

Είναι γνωστό ότι τα ηλεκτρονικά τροφοδοτικά (ελεγχόμενες ανορθωτικές γέφυρες) προκαλούν στη τάση εξόδου κυμάτωση (ripple) σημαντικά μεγαλύτερη από τα συμβατικά τροφοδοτικά (γραμμικά τροφοδοτικά). Το γεγονός αυτό οδηγεί σε αυξημένο περιεχόμενο AC συνιστωσών, κατά την ανάλυση αυτών των κυματομορφών. Έτσι, και η ενεργός τιμή (rms) της τάσης εξόδου των ελεγχόμενων γεφυρών είναι, κατά περίπτωση, σημαντικά μεγαλύτερη από τη μέση τιμή (Average). Συνεπώς, όταν τροφοδοτούμε με ελεγχόμενες γέφυρες κινητήρες συνεχούς, πρέπει να υπολογίζουμε τη μέση τιμή της τάσης, γιατί αυτή προκαλεί την κίνηση. Η ενεργός είναι μία μεικτή τάση αποτελούμενη τόσο από τη συνεχή συνιστώσα (AV), όσο και από τις εναλλασσόμενες συνιστώσες (AC), οι οποίες συνυπάρχουν στην κυματομορφή. Οι μετρήσεις πρέπει να γίνονται με εξειδικευμένα πολύμετρα τα λεγόμενα **T_{ru}e rms**. Είναι γνωστό ότι :

$$V^2_{RMS} = V^2_{AV} + V^2_{AC} \quad \eta \quad I^2_{RMS} = I^2_{AV} + I^2_{AC}$$

Υπάρχουν δύο συντελεστές που συνδέονται με τις κυματομορφές που αποκλίνουν από την καθαρή DC κυματομορφή, την απόλυτα σταθερή με το χρόνο. Ο συντελεστής μορφής (Form Factor, FF), που είναι ο λόγος της ενεργού τιμής προς τη μέση τιμή της τάσης ή της έντασης:

$$FF = \frac{RMS}{AV}$$

Η μονοφασική ανόρθωση πλήρους κύματος έχει FF=1,11. Όσο μεγαλύτερος είναι ο FF για μια δεδομένη κυματομορφή, τόσο μεγαλύτερη κυμάτωση παρουσιάζει.

Εκτός από τον συντελεστή μορφής χρησιμοποιούμε και τον συντελεστή κορυφής (Crest Factor, CF), που είναι ο λόγος της μέγιστης τιμής της κυματομορφής (peak) προς την ενεργό τιμή της:

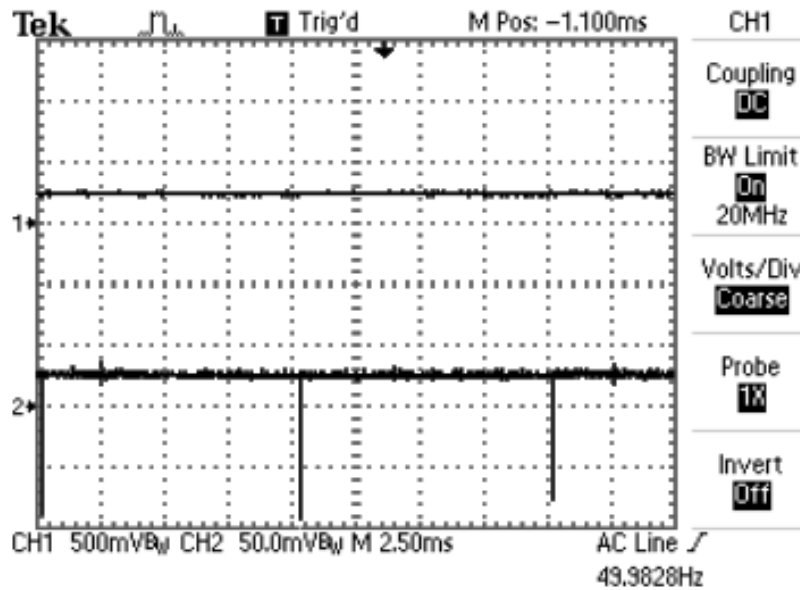
$$CF = \frac{Peak}{RMS}$$

Η μονοφασική ανόρθωση πλήρους κύματος έχει CF=1,41. Όσο μεγαλώνει η τιμή του CF, τόσο μεγαλώνει η ιδιαιτερότητα και δυσκολία μέτρησης του μεγέθους. Γι αυτό ο CF αποτελεί ένα από τα κριτήρια αξιοπιστίας των πολυμέτρων να πραγματοποιούν ακριβείς μετρήσεις σε ακραίες κυματομορφές (π.χ. παλμοί μικρής διάρκειας και μεγάλου πλάτους). Τα πολύμετρα που χρησιμοποιούμε στα πειράματα του εργαστηρίου έχουν CF=10. Για παράδειγμα, έχουν τη δυνατότητα μέτρησης παλμικού ρεύματος πλάτους 30A και με εύρος παλμού το 1/100 της περιόδου της παλμοσειράς και θα δείξουν $I_{RMS}=3A$, $I_{AV}=0,3A$ & $I_{AC}=2,98A$.

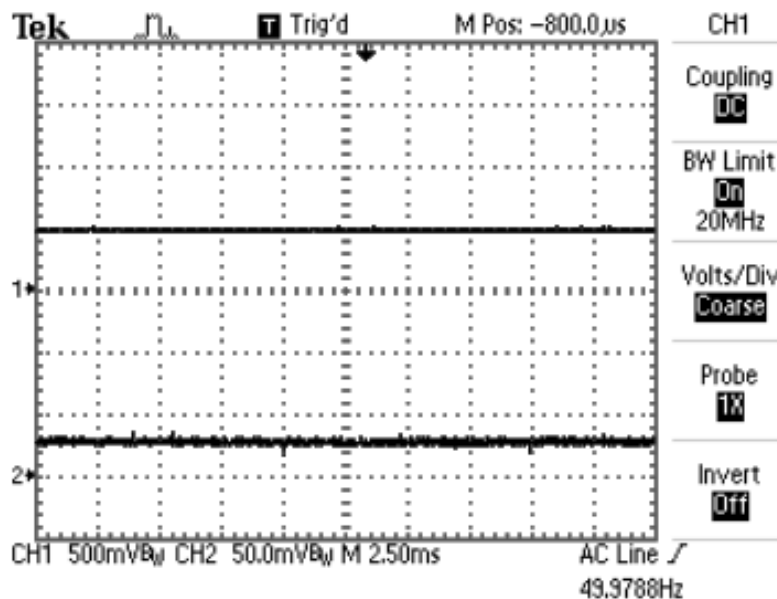
Για την αποσαφήνιση των παραπάνω εννοιών εκτελούμε τα παρακάτω τρία πειράματα:

α. Συνδέουμε ένα ηλεκτρικό λαμπτήρα πυράκτωσης (230 V) στην έξοδο της ημιελεγχόμενης μονοφασικής γέφυρας. Συνδέουμε το βολτόμετρο και τον παλμογράφο για να παρατηρούμε την τάση και το ρεύμα φορτίου της γέφυρας. Ρυθμίζουμε $V_{AV}=100$ Volt και καταγράφουμε και την τιμή V_{rms} . Επαναλαμβάνουμε τη διαδικασία για $V_{AV}=200$ Volt.

β. Συνδέουμε παράλληλα στο κύκλωμα του βήματος α αφόρτιστο ηλεκτρολυτικό πυκνωτή με μεγάλη χωρητικότητα και κατάλληλη τάση και επαναλαμβάνουμε τις ίδιες μετρήσεις, όπως παραπάνω, καταγράφοντας τα αποτελέσματα των μετρήσεων.



Σχήμα 1.3 Τάση και ρεύμα φορτίου με πυκνωτή ($V_{AV}=100V$)

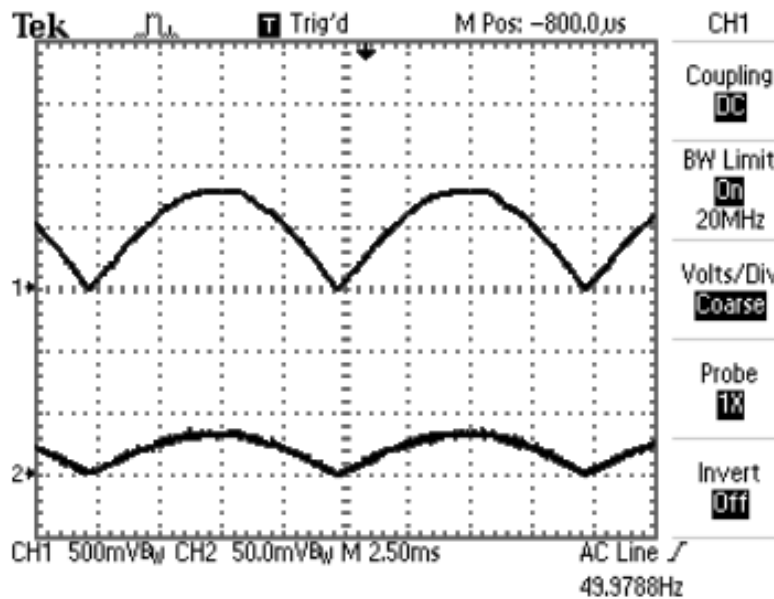


Σχήμα 1.4 Τάση και ρεύμα φορτίου με πυκνωτή ($V_{AV}=200V$)

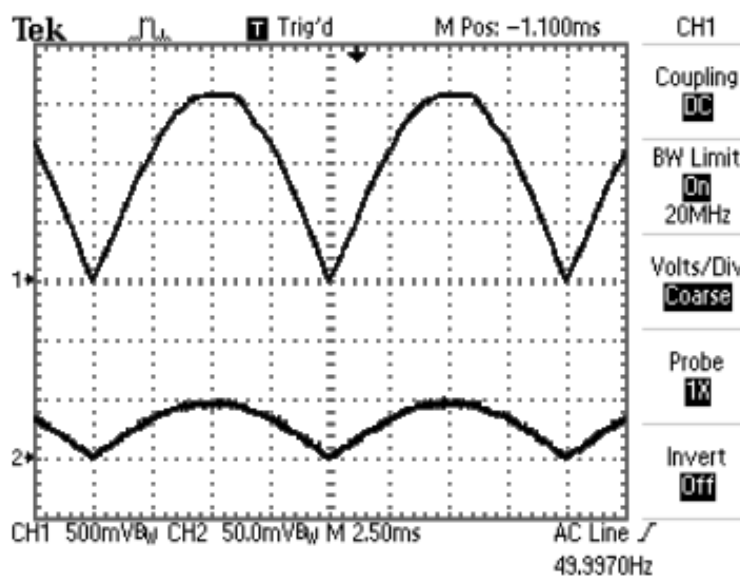
Μεταβάλλουμε προοδευτικά την τάση μέχρι την τιμή $V_{AV}=100$ Volt. Παρατηρούμε τη μορφή της τάσης και του ρεύματος (Σχ. 1.3) και καταγράφουμε και την ενεργό τιμή της τάσης (V_{rms}).

Επιαναλαμβάνουμε τις μετρήσεις για $V_{AV}=200$ Volt (Σχ. 1.4).

γ. Συνδέουμε τώρα τον λαμπτήρα στην έξοδο του γραμμικού τροφοδοτικού (**U2**) που είναι ενσωματωμένο στο πάνελ της συσκευής DL 2308 και μεταβάλλουμε από το **Variac (P4)** την τάση. Επιαναλαμβάνουμε τις ίδιες μετρήσεις, όπως παραπάνω, καταγράφοντας τα αποτελέσματα των μετρήσεων.

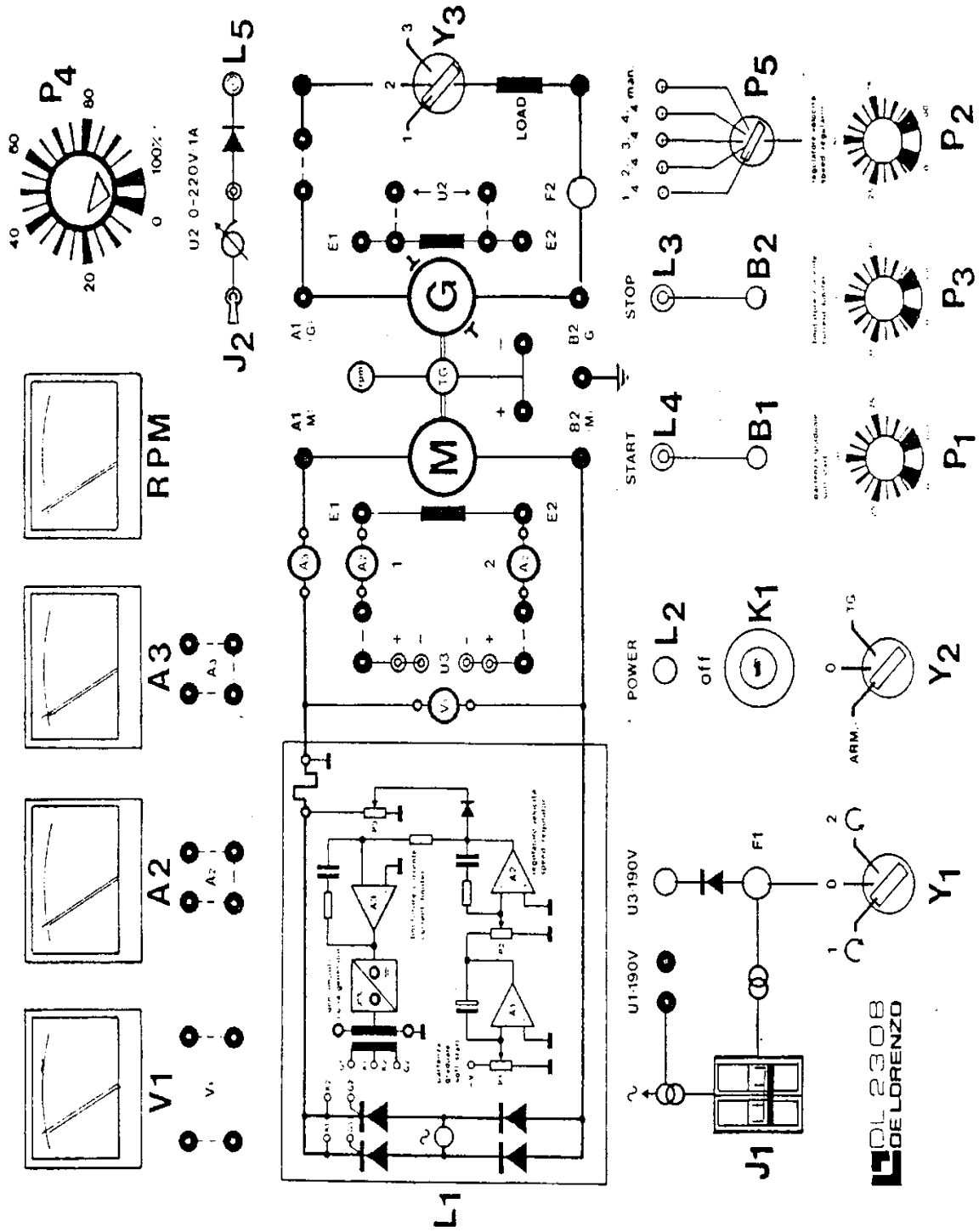


Σχήμα 1.5 Τάση και ρεύμα φορτίου βήματος 3γ ($V_{AV}=100V$)



Σχήμα 1.6 Τάση και ρεύμα φορτίου βήματος 3γ ($V_{AV}=200V$)

Η Συσκευή DL 2308



- J_1 : κύριος αυτόματος διακόπτης
- L_1 : κύρια ενδεικτική λυχνία
- K_1 : μπουτόν έκτακτης ανάγκης
- L_2 : ενδεικτική λυχνία παλμοδότησης
- B_1, B_2 : μπουτόν ελέγχου παλμοδότησης (START - STOP)
- $L_4; L_3$: ενδεικτικές λυχνίες (START - STOP)
- P_1 : ποτενσιόμετρο ράμπας (soft start)
- P_2 : ποτενσιόμετρο ταχύτητας (ενεργοποιείται όταν P_5 είναι στο man)
- P_3 : ποτενσιόμετρο περιορισμού ρεύματος
- P_4 : ρυθμιστής (variac) τροφοδοτικού U_2 (DC: 0 - 220V, 1A)
- J_2 : ON/OFF διακόπτης τροφοδοτικού U_2
- L_5 : ενδεικτική λυχνία τροφοδοτικού U_2
- P_5 : βηματική ρύθμιση της ταχύτητας
- Y_1 : αλλαγή φοράς περιστροφής (πολικότητα διέγερσης)
1: δεξιόστροφα, 2: αριστερόστροφα
- Y_2 : επιλογέας ανοιχτού/κλειστού βρόχου
ARM : έλεγχος κλειστού βρόχου τάσης τυμπάνου
0 : έλεγχος ανοιχτού βρόχου
TG : έλεγχος κλειστού βρόχου στροφών (ταχογεννήτρια)
- Y_3 : επιλογέας φορτίου γεννήτριας
- M** : ακροδέκτες σύνδεσης τυμπάνου κινητήρα Σ.Ρ. ξένης διέγερσης
- G** : ακροδέκτες σύνδεσης τυμπάνου γεννήτριας Σ.Ρ. ξένης διέγερσης
- TG** : ταχογεννήτρια

ΕΡΓΑΣΙΑ

1. Σχεδιάστε σε μιλιμετρέ χαρτί τη χαρακτηριστική ελέγχου του βήματος 1. Ποια συνάρτηση εκφράζει αυτή τη χαρακτηριστική;
2. Σχεδιάστε σε μιλιμετρέ χαρτί τυπικές κυματομορφές τάσης και ρεύματος εξόδου της ημιελεγχόμενης ανορθωτικής γέφυρας για γωνία έναυσης $\alpha=60^{\circ}$ και φορτία (R) & (R,L).
3. Υπολογίστε την τιμή της εναλλασσόμενης συνιστώσας της τάσης (V_{ac}) στα βήματα 3α, 3β, 3γ.
4. Χρησιμοποιώντας τις μετρήσεις του βήματος 3, υπολογίστε τον συντελεστή μορφής (FF) σε κάθε διαφορετική μέτρηση. Σχολιάστε τα συμπεράσματα που προκύπτουν από τη μελέτη των μετρήσεων του βήματος 3.
5. Με τη χρήση των ολοκληρωμάτων της μέσης και ενεργού τιμής, υπολογίστε με αναλυτικό τρόπο τον συντελεστή μορφής (FF) και τον συντελεστή κορυφής (CF) της κυματομορφής τάσης του σχήματος 1.2, αν γνωρίζουμε ότι η τάση λήφθηκε με **probe X200**. Επαναλάβετε τους υπολογισμούς για $\alpha=0^{\circ}$ και $\alpha=150^{\circ}$. Συγκρίνετε και σχολιάστε τις τιμές των συντελεστών (FF) & (CF), που υπολογίσατε.

Άσκηση 2

Έλεγχος κινητήρα Συνεχούς Ρεύματος Ξένης Διέγερσης (Συσκευή DL 2308)

Σκοπός

Ο σκοπός της δεύτερης άσκησης είναι η μελέτη των τρόπων με τους οποίους μπορούμε να μεταβάλλουμε τις στροφές ενός κινητήρα DC ξένης διέγερσης. Το ενδιαφέρον εστιάζεται κυρίως στις δυνατότητες που μας δίνει η τροφοδοσία του τυμπάνου της μηχανής από την ημιελεγχόμενη μονοφασική γέφυρα. Η τροφοδοσία των μηχανών συνεχούς από ελεγχόμενες γέφυρες μας επιτρέπει να έχουμε αυτοματοποιημένες διαδικασίες τόσο στον έλεγχο της λειτουργίας, όσο και στην προστασία των μηχανών. Η εκπαιδευτική συσκευή (DL 2308) μας παρέχει τη δυνατότητα μελέτης της λειτουργίας του κινητήρα χωρίς μηχανικό φορτίο, αλλά και με φορτίο. Επιπλέον μας παρέχει τη δυνατότητα δύο βασικών λειτουργικών καταστάσεων του ηλεκτρικού κινητήριου συστήματος: α) Λειτουργία σε ανοιχτό βρόχο στροφών (ανατροφοδότηση τάσης τυμπάνου) & β) Λειτουργία σε κλειστό βρόχο στροφών (ανατροφοδότηση ταχογεννήτριας).

Συνοπτική θεωρία

Κινητήρας συνεχούς ρεύματος ξένης διέγερσης.

Οι κινητήρες συνεχούς ρεύματος ξένης διέγερσης (τελευταίο στάδιο εξέλιξης περί το 1885) ήταν πάντοτε οι μηχανές με τον πιο απλό, εύκολο και εξαιρετικά αξιόπιστο τρόπο ελέγχου της ταχύτητας και της ροπής. Αυτό οφείλεται στο γεγονός της πλήρους απόζευξης του ρεύματος μαγνήτισης (διέγερσης) από το ρεύμα ροπής (τυμπάνου). Από τη δεκαετία μάλιστα του 1960, με τη χρησιμοποίηση των ελεγχόμενων ημιαγωγικών στοιχείων (θυρίστορ, SCRs) στα ηλεκτρονικά τροφοδοτικά, τα DC κινητήρια συστήματα είχαν την αποκλειστικότητα των εφαρμογών στην ηλεκτρική κίνηση. Τα παραπάνω σημαντικά πλεονεκτήματα ελέγχου έφεραν σε δεύτερη μοίρα τα μειονεκτήματα της μηχανής, που είναι το υψηλό κόστος κατασκευής και η ανάγκη τακτικής συντήρησης, λόγω των ψηκτρών και του συλλέκτη.

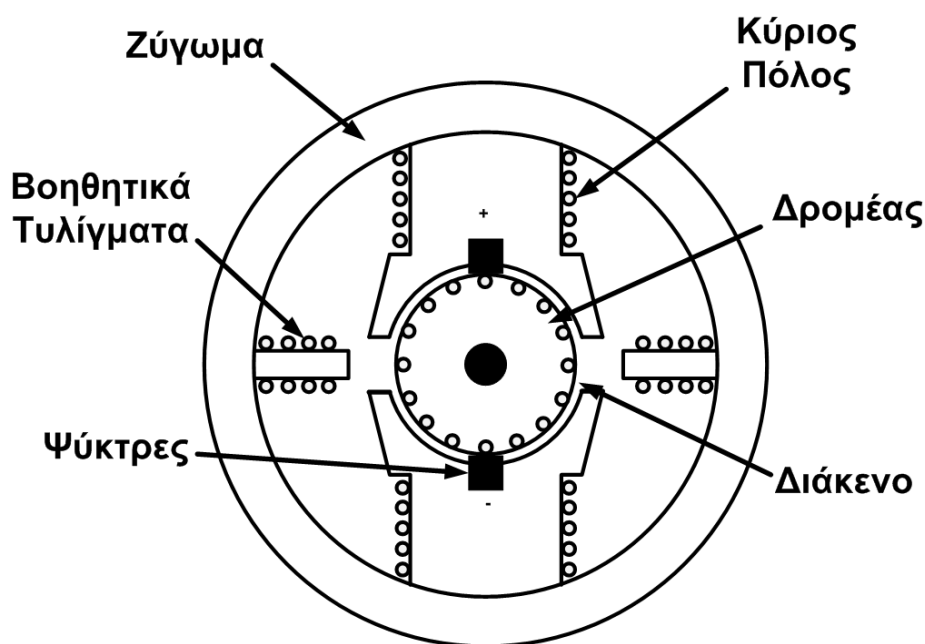
Από τις αρχές της δεκαετίας του 1990 όμως, τα DC κινητήρια συστήματα συρρικνώνονται συνεχώς από τα AC κινητήρια συστήματα. Ο λόγος γι αυτή την τεχνολογική αλλαγή που βρίσκεται σε εξέλιξη είναι αφ' ενός, η αξιοπιστία λειτουργίας, το μικρό κόστος και η παντελής έλλειψη συντήρησης των ασύγχρονων κινητήρων κλωβού και αφ' ετέρου η ραγδαία εξέλιξη των αντιστροφών τάσης (inverters).

Παρ' όλα αυτά οι κινητήρες συνεχούς ρεύματος εξακολουθούν να υπάρχουν σε πολλά αυτοματοποιημένα ηλεκτρικά κινητήρια συστήματα. Σε αρκετές εφαρμογές μάλιστα, παρά το υψηλό κόστος, χρησιμοποιείται και ο κινητήρας Σ.Ρ. με διέγερση που δημιουργείται από μόνιμους μαγνήτες.

Η βασική δομή των μηχανών Σ.Ρ. είναι σε συντομία η ακόλουθη. Ο στάτης αποτελείται από το ζύγωμα, τους μαγνητικούς πόλους, τους βοηθητικούς πόλους, τον ψηκτροφορέα με τις ψήκτρες και το ακροκιβώτιο συνδέσεων. Το ζύγωμα είναι το κύριο μέρος του στάτη, αποτελεί τον κορμό της μηχανής, μέσω του οποίου ενώνονται μηχανικά και μαγνητικά οι πόλοι. Οι μαγνητικοί πόλοι αποτελούν τη διέγερση (field) της μηχανής, δηλαδή την πρωτεύουσα πηγή μαγνητικής ροής στο διάκενο. Οι βοηθητικοί πόλοι τοποθετούνται ανάμεσα στους κύριους και χρησιμεύουν για την αποφυγή των σπινθηρισμών από την στρέβλωση του κύριου μαγνητικού πεδίου από το πεδίο που προκαλούν τα ρεύματα του τυλίγματος του δρομέα, που αποκαλείται τύλιγμα τυμπάνου (armature). Γι αυτό οι βοηθητικοί πόλοι συνδέονται από τον κατασκευαστή της μηχανής, σε σειρά με το τύλιγμα του δρομέα.

Ο δρομέας αποτελείται από τον άξονα περιστροφής, το τύλιγμα και το συλλέκτη. Το τύλιγμα του δρομέα τοποθετείται στις αυλακώσεις του πυρήνα και συνδέεται αγωγίμα με τους τομείς του συλλέκτη.

Στο σχήμα 2.1 φαίνεται η τομή μιας μηχανής Σ.Ρ., όπου διακρίνονται τα βασικά μέρη από τα οποία αποτελείται το σταθερό μέρος της μηχανής (στάτης) και το περιστρεφόμενο (δρομέας).

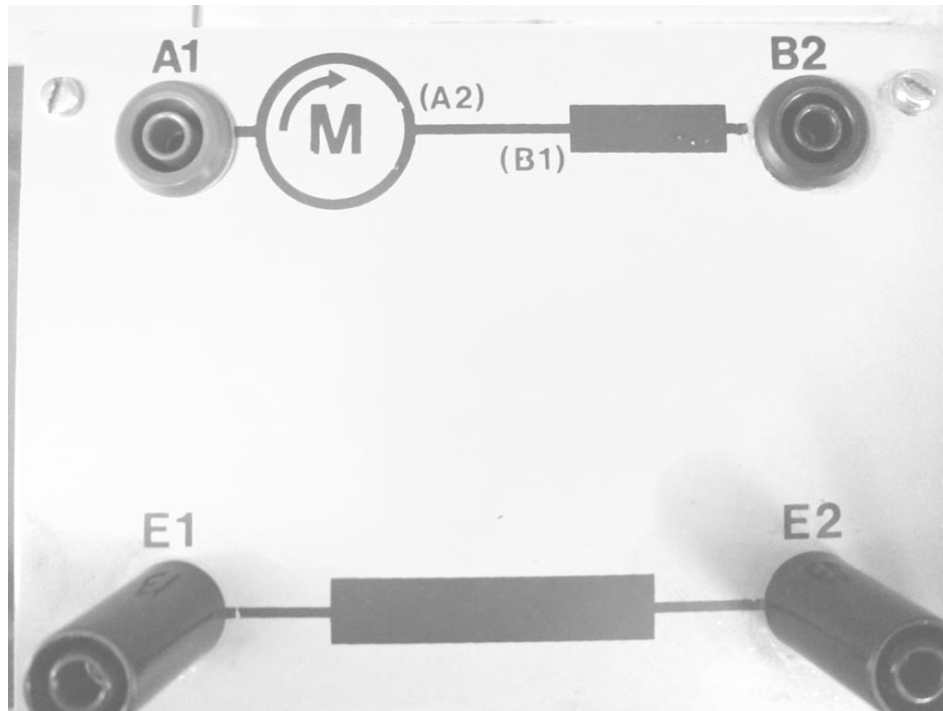


Σχήμα 2.1 Δομή της μηχανής συνεχούς ρεύματος

Η τυποποίηση των ακροδεκτών των τυλιγμάτων στις μηχανές Σ.Ρ. είναι η ακόλουθη:

- A_1, A_2 : ακροδέκτες τυλίγματος τυμπάνου
- B_1, B_2 : ακροδέκτες τυλίγματος βοηθητικών πόλων
- C_1, C_2 : ακροδέκτες τυλίγματος αντιστάθμισης
- D_1, D_2 : ακροδέκτες τυλίγματος διέγερσης σειράς
- E_1, E_2 ή F_1, F_2 : ακροδέκτες ξένης διέγερσης

Στο σχήμα 2.2 φαίνεται το ακροκιβώτιο συνδέσεων της εκπαιδευτικής μηχανής Σ.Ρ. ξένης διέγερσης, με τους ακροδέκτες των τυλιγμάτων να καταλήγουν σε μπόρνες. Στο εσωτερικό της μηχανής έχουν συνδεθεί από τον κατασκευαστή οι ακροδέκτες A_2 και B_1 . Στις μηχανές μεγάλης ισχύος και αυστηρών προδιαγραφών το πρόβλημα της στρέβλωσης του κύριου μαγνητικού πεδίου από το μαγνητικό πεδίο του ρεύματος του τυμπάνου (φαινόμενο της αντίδρασης του επαγωγικού τυμπάνου) αντιμετωπίζεται ριζικά με την τοποθέτηση του τυλίγματος αντιστάθμισης. Αυτό όμως ανεβάζει το κόστος της μηχανής ακόμα περισσότερο. Οι τυποποιημένες μηχανές μικρής και μεσαίας ισχύος δεν έχουν τυλίγματα αντιστάθμισης.



Σχήμα 2.2 Ακροκιβώτιο συνδέσεων κινητήρα συνεχούς ξένης διέγερσης

Οι εξισώσεις που διέπουν τη λειτουργία του κινητήρα Σ.Ρ. στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας είναι οι ακόλουθες:

$$V_A = E_a + I_A R_A$$

$$E_a = C\Phi\omega$$

$$T = C\Phi I_A$$

Όπου:

V_A : τάση τυμπάνου [V]

I_A : ρεύμα τυμπάνου [A]

R_A : αντίσταση τυμπάνου [Ω]

E_a : ΑΗΕΔ [V]

T : ροπή [Nm]

Φ : μαγνητική ροή [Wb], (Φ εξαρτάται από το ρεύμα διέγερσης I_f)

C : αδιάστατη σταθερά

ω : γωνιακή ταχύτητα του άξονα [rad/s]

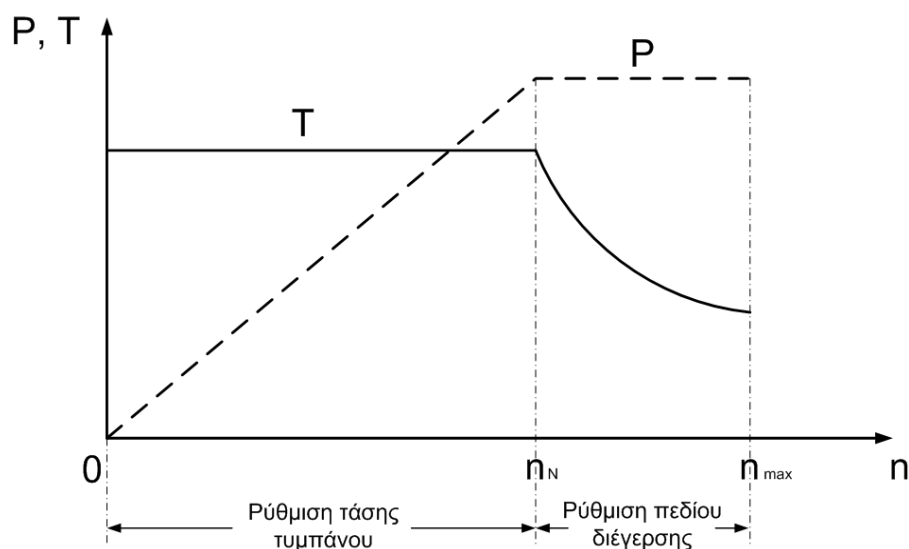
Από την επίλυση του συστήματος των παραπάνω σχέσεων προκύπτει η εξίσωση της γωνιακής ταχύτητας του κινητήρα:

$$\omega = \frac{V_A - I_A R_A}{C\Phi}$$

Η μελέτη της εξίσωσης της ταχύτητας του κινητήρα μας αποκαλύπτει τους τρόπους με τους οποίους μπορούμε να ελέγξουμε τις στροφές του κινητήρα συνεχούς ρεύματος.

- Μεταβάλλοντας την τάση τυμπάνου οι στροφές μεταβάλλονται ανάλογα. Στην περίπτωση αυτή, η διέγερση διατηρείται σταθερή στην ονομαστική της τιμή. Αν επιπλέον, ο κινητήρας φορτίζεται με την ονομαστική του ροπή σε κάθε μεταβολή των στροφών, τότε για ονομαστική τάση τυμπάνου θα έχουμε τον ονομαστικό αριθμό στροφών. Η μηχανική ισχύς της μηχανής θα αυξάνεται γραμμικά με τις στροφές μέχρι την ονομαστική ισχύ. Η περιοχή αυτή ελέγχου, από τη στάση μέχρι τον ονομαστικό αριθμό στροφών (μέσω της αύξησης της τάσης τυμπάνου) καλείται περιοχή σταθερής ροπής.
- Αν απαιτηθεί αύξηση της ταχύτητας πέραν της ονομαστικής, τότε εξασθενούμε το μαγνητικό πεδίο (μείωση I_f) διατηρώντας την τάση τυμπάνου σταθερή και ίση με την ονομαστική της τιμή. Στην περίπτωση αυτή πρέπει η ροπή φορτίου να ελαττώνεται σύμφωνα με τη συνάρτηση $1/x$ (υπερβολή), διαφορετικά ο κινητήρας θα υπερφορτιστεί, αφού $P_{μηχ} = T\omega$. Η περιοχή αυτή ελέγχου, από τις ονομαστικές μέχρι τις μέγιστες στροφές (μέσω της ελάττωσης της μαγνητικής ροής) καλείται περιοχή σταθερής ισχύος.

Οι τρόποι μεταβολής των στροφών του κινητήρα Σ.Ρ. εντός των παραπάνω δύο λειτουργικών περιοχών συνοψίζονται στις χαρακτηριστικές ροπής/ισχύος – στροφών που φαίνονται στο σχήμα 2.3.



Σχήμα 2.3 Τρόποι μεταβολής των στροφών κινητήρα Σ.Ρ.

Μέτρηση της ταχύτητας

Τα συστήματα που χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση της ταχύτητας είναι πολλά. Οι βασικότερες μέθοδοι είναι οι εναλλακτικές μόνιμου μαγνήτη, τα στροφόμετρα χωρητικού τύπου, κ.α.

Στα συστήματα αυτομάτου ελέγχου των στροφών κυριαρχεί η ταχογεννήτρια Σ.Ρ., λόγω των πλεονεκτημάτων που παρουσιάζει απέναντι στις υπόλοιπες διατάξεις μέτρησης. Η ταχογεννήτρια Σ.Ρ. είναι εξαιρετικά αξιόπιστη, γιατί παρουσιάζει χαρακτηριστική τάσης - στροφών απόλυτα γραμμική. Αυτό επιτυγχάνεται κατασκευάζοντας τη διέγερση από μόνιμους μαγνήτες, οι οποίοι παρουσιάζουν πολύ καλά μαγνητικά χαρακτηριστικά. Εξ άλλου, υπάρχει η δυνατότητα ανίχνευσης της φοράς περιστροφής των κινητήριων συστημάτων, επειδή, αν αλλάξει η φορά περιστροφής, αλλάζει και η πολικότητα της τάσης της ταχογεννήτριας.

Κάθε ταχογεννήτρια χαρακτηρίζεται από μία σταθερά Κ.

$$K : [\text{volt}/\text{περιστροφή}]$$

Συνεπώς, μετρώντας με βολτόμετρο DC την τάση της ταχογεννήτριας μπορούμε να υπολογίσουμε τις στροφές από τη σχέση:

$$\text{Στροφές} = V_{TG}/K \text{ [rpm]}$$

Μέτρηση της ροπής

Οι περισσότερες διατάξεις μέτρησης της ροπής χρησιμοποιούν είτε μηχανικού, είτε ηλεκτρικού τύπου φορτία για τη μηχανική φόρτιση των κινητήρων. Τα μηχανικού τύπου φορτία (π.χ. ιμάντες τριβής) έχουν βέβαια μικρό κόστος, όμως δεν είναι αξιόπιστα και συνεπώς δε μπορούμε να κάνουμε ακριβείς μετρήσεις. Τα ηλεκτρικού τύπου φορτία είναι είτε δινορευματικές πέννες, είτε γεννήτριες Σ.Ρ.

Είναι γνωστό πως, όταν μία γεννήτρια φορτίζεται, τότε αναπτύσσεται εσωτερική ροπή που αντιστέκεται στην κίνηση της μηχανής. Την ανθιστάμενη αυτή ροπή, που είναι ευθέως ανάλογη του ρεύματος της γεννήτριας, εκμεταλλευόμαστε για να φορτίζουμε τον κινητήρα. Η γεννήτρια για τη φόρτιση του κινητήρα μπορεί να χρησιμοποιηθεί και σε διατάξεις μέτρησης της ροπής.

Όταν στο δρομέα μιας μηχανής αναπτύσσεται ροπή, τότε και στον ακίνητο στάτη εμφανίζεται ίση και αντίθετη ροπή, σύμφωνα με το αξίωμα της δράσης-αντίδρασης. Συνεπώς, αν ο στάτης της γεννήτριας, στην οποία αναπτύσσεται η εσωτερική ανθιστάμενη ροπή δεν είναι σταθερός, αλλά μπορεί να αιωρείται, τότε η αντιδρώσα ροπή τείνει να τον παρασύρει προς τη φορά περιστροφής. Επομένως, αν ισοροπήσουμε το στάτη μέσω ενός δυναμόμετρου, η ροπή πέδησης της γεννήτριας, που καλύπτει ο κινητήρας μπορεί να μετρηθεί.

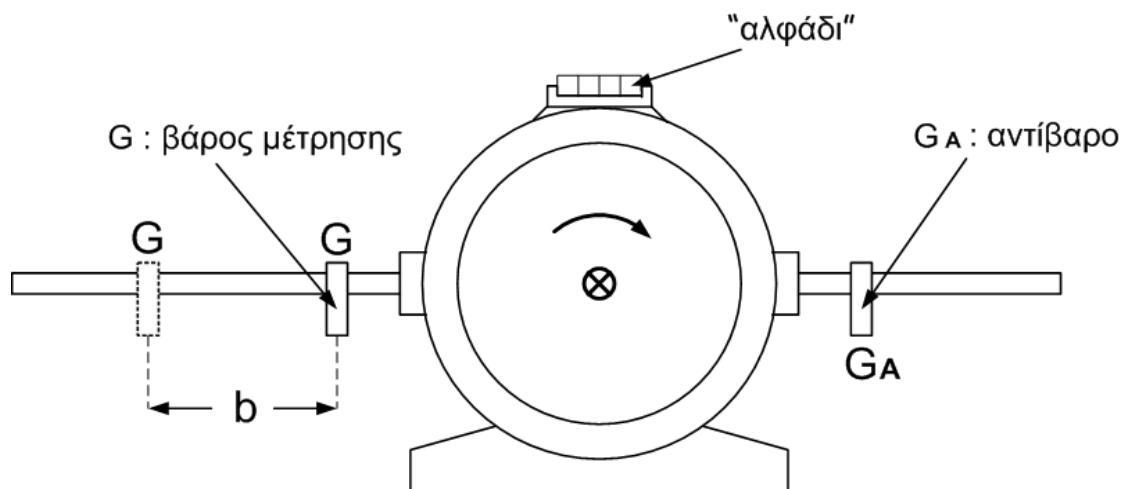
Βέβαια, εκτός από την ηλεκτρομαγνητική ροπή πέδησης υπάρχουν και άλλες ροπές μικρότερες, που οφείλονται σε καθαρά μηχανικές αιτίες.

- Οι μικρότερες αυτές ροπές είναι οι εξής:
- Η ροπή τριβής στα έδρανα περιστροφής (ρουλμάν).
 - Η ροπή τριβής των ψηκτρών στο συλλέκτη.
 - Η ροπή εξαερισμού.

Από τις παραπάνω μηχανικές ροπές (μηχανικές απώλειες) οι δύο ροπές τριβών μεταφέρονται λόγω αντίδρασης στο στάτη της γεννήτριας και συνεπώς μετρούνται εξ ολοκλήρου μαζί με την ηλεκτρομαγνητική ροπή. Η ροπή εξαερισμού αποτελείται από τη ροπή που εμφανίζεται στο στάτη και από ένα μέρος που ισοδυναμεί με την κινητική ενέργεια του αέρα, που διαφεύγει στο περιβάλλον. Συνεπώς δε μπορούμε να μετρήσουμε ολόκληρη τη ροπή εξαερισμού.

Η μέτρηση της ροπής στη συσκευή DL 2308 είναι πολύ απλή και παρουσιάζει πολύ μεγάλη αξιοπιστία. Ο στάτης της γεννήτριας έχει τη δυνατότητα μικρής ταλάντωσης γύρω από τη θέση της οριζόντιας ισορροπίας. Όταν ο άξονας δεν περιστρέφεται, τότε ο στάτης ισορροπεί οριζόντια και η θέση αυτή ελέγχεται από το «αλφάδι». Όταν όμως ο κινητήρας περιστρέφεται και στον άξονα των μηχανών αναπτύσσεται ροπή, τότε ο στάτης της γεννήτριας παρασύρεται προς τη φορά που είναι αντίθετη της ροπής φορτίου (δηλαδή ίδια προς τη φορά περιστροφής του άξονα).

Ο αιωρούμενος στάτης της γεννήτριας είναι εξοπλισμένος με δύο βραχίονες και δύο βάρη. Το αντίβαρο (G_A) είναι σταθερά συνδεδεμένο στον ένα βραχίονα, ενώ το βάρος μέτρησης (G) μπορεί να ολισθαίνει στον άλλο βραχίονα, ο οποίος διαθέτει κανόνα μέτρησης της απόστασης.



Σχήμα 2.4 Άμεση μέτρηση της ροπής στη συσκευή DL 2308

Η ροπή μπορεί να μετρηθεί μόνο όταν ο κινητήρας περιστρέφεται δεξιόστροφα, σχήμα 2.4. Η διαδικασία μέτρησης της ροπής είναι η ακόλουθη; Μετακινούμε το βάρος (G) μέχρι να ισορροπήσει σε οριζόντια θέση ο αιωρούμενος στάτης της γεννήτριας. Ελέγχουμε τη θέση αυτή με το «αλφάδι». Η ροπή σε κάθε θέση ισορροπίας δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$\text{Ροπή } T = G \cdot b \quad [\text{Nm}] \quad \text{όπου : } G=24,5 \quad [\text{N}]$$

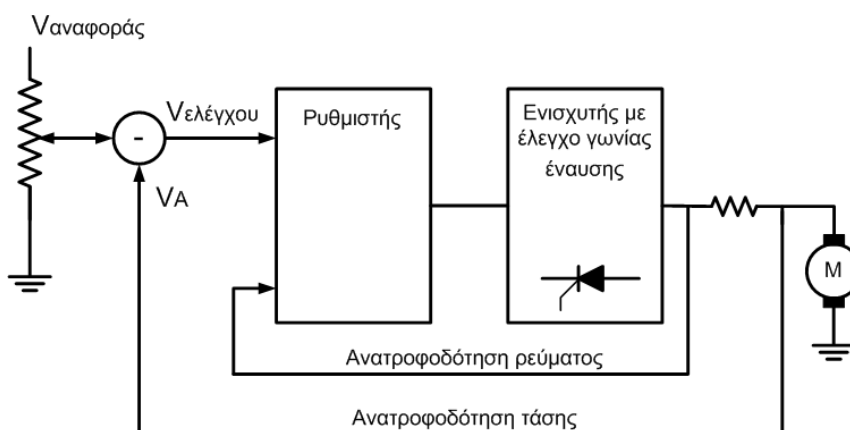
Πειραματικό μέρος

A. Ανοιχτός βρόχος στροφών (κλειστός τάσης)

(Ο επιλογέας **Y2** στη θέση ARM)

Τα ηλεκτρονικά τροφοδοτικά πρέπει να παρέχουν τάση σταθερή σε σχέση με τις μεταβολές του φορτίου. Όταν όμως το ηλεκτρονικό τροφοδοτικό φορτίζεται, εμφανίζεται πτώση τάσης στα ημιαγωγικά στοιχεία του. Για να διατηρείται η τάση σταθερή, υπάρχει εσωτερική ανατροφοδότηση της τάσης στο ρυθμιστή.

Επί πλέον, τέτοια τροφοδοτικά είναι γενικά εξοπλισμένα με αυτόματη διάταξη προστασίας έναντι υπερφορτίσεων, που μπορεί να εμφανιστούν είτε κατά την εκκίνηση των κινητήρων, είτε σε δυσμενείς συνθήκες φόρτισης. Το μπλοκ διάγραμμα των δύο παραπάνω βρόχων ανάδρασης φαίνονται στο σχήμα 2.5.



Σχήμα 2.5 Σύστημα αυτόματης σταθεροποίησης της τάσης τυμπάνου

Βήμα 1

Χαρακτηριστικές στροφών κινητήρα Σ.Ρ. χωρίς φορτίο

Στο βήμα αυτό θα πάρουμε μετρήσεις για τη μελέτη των δύο τρόπων ρύθμισης των στροφών. Στο πρώτο πείραμα θα μεταβάλλουμε τις στροφές από την τάση τυμπάνου, ενώ στο δεύτερο από την τάση της διέγερσης. Και τα δύο πειράματα θα γίνουν χωρίς μηχανικό φορτίο στον κινητήρα (εν κενώ).

- $n=f(V_A)$. Συνδέουμε το τύμπανο του κινητήρα στην 1Φ ημιελεγχόμενη γέφυρα και τη διέγερση στο μεταβλητό γραμμικό τροφοδοτικό **U2**. Τροφοδοτούμε τη διέγερση με το ονομαστικό ρεύμα διέγερσης. Εν συνεχεία, μεταβάλλουμε προοδευτικά την τάση τυμπάνου, μέσω του ποτενσιόμετρου **P2**, από την ελάχιστη μέχρι την ονομαστική τιμή και καταγράφουμε σε πίνακα τα ζεύγη τιμών (τάση τυμπάνου, στροφές).
- $n=f(V_f)$. Συνδέουμε το τύμπανο του κινητήρα στην 1Φ ημιελεγχόμενη γέφυρα και τη διέγερση στο μεταβλητό γραμμικό τροφοδοτικό **U2**. Τροφοδοτούμε τη διέγερση με το ονομαστικό ρεύμα διέγερσης. Εν συνεχεία, τροφοδοτούμε το τύμπανο με τάση έτσι ώστε οι στροφές να γίνουν 1500 rpm. Ελαττώνουμε τώρα προοδευτικά την τάση διέγερσης μέχρι την τιμή που το ρεύμα διέγερσης μειωθεί στα 0,3 A. Καταγράφουμε σε πίνακα τα ζεύγη τιμών (τάση διέγερσης, στροφές).

Βήμα 2

Χαρακτηριστική ροπής $T=f(I_A)$

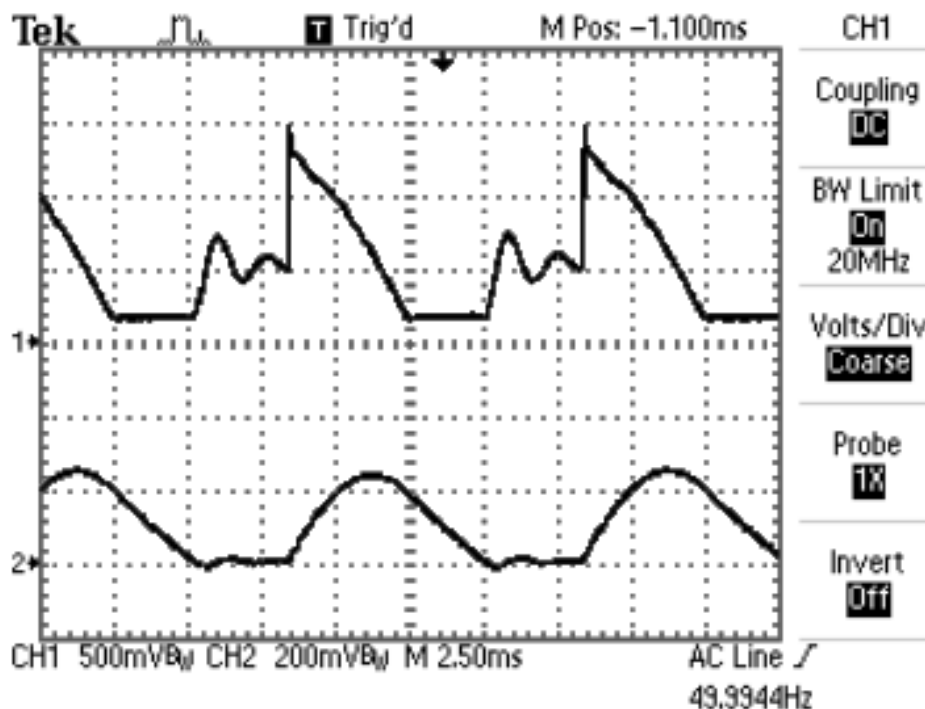
Στο βήμα αυτό θα μεταβάλλουμε μόνο τη φόρτιση του κινητήρα με τη βοήθεια της γεννήτριας Σ.Ρ. ξένης διέγερσης με αποτέλεσμα να μεταβάλλεται ανάλογα το ρεύμα τυμπάνου. Τα υπόλοιπα ηλεκτρικά μεγέθη του κινητήρα θα παραμένουν σταθερά στις ονομαστικές τιμές τους.

Κατ' αρχή συνδέουμε τη διέγερση του κινητήρα στο σταθερό τροφοδοτικό **U3** και το τύμπανο στην 1Φ ημιελεγχόμενη γέφυρα. Ξεκινάμε τον κινητήρα και ρυθμίζουμε ονομαστική τάση τυμπάνου. Εν συνεχεία, φορτίζουμε προοδευτικά τον κινητήρα με τη βοήθεια της γεννήτριας μέχρι το ονομαστικό φορτίο. Καταγράφουμε σε πίνακα τις μεταβολές του ρεύματος τυμπάνου, της ροπής και των στροφών.

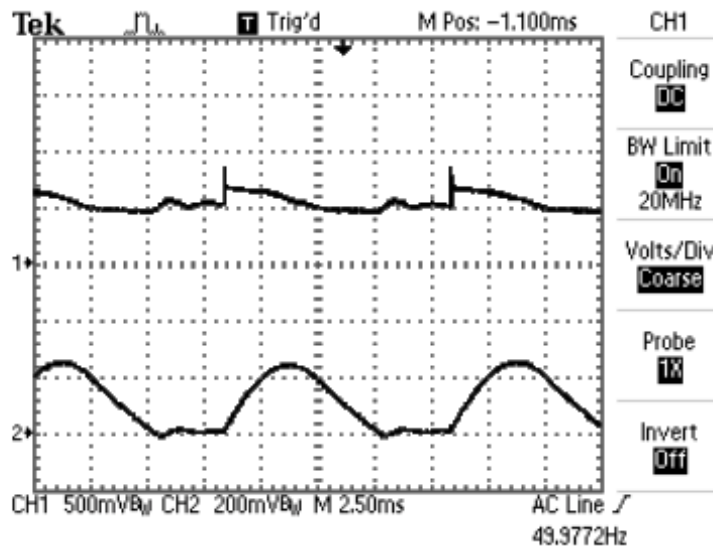
Βήμα 3

Χρήση πηνίου εξομάλυνσης

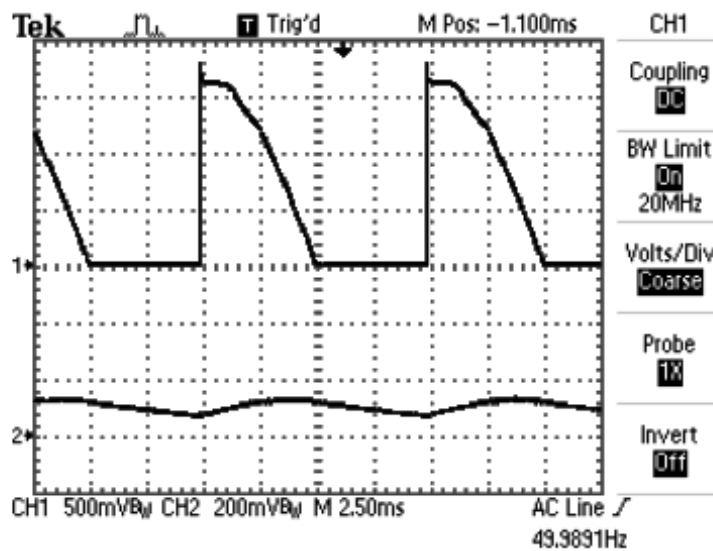
Συνδέουμε σε σειρά με το τύμπανο του κινητήρα ένα μεταβλητό βηματικά πηνίο και επιλέγουμε τη μικρότερη αυτεπαγωγή. Συνδέουμε τον παλμογράφο για να βλέπουμε ταυτόχρονα την τάση εξόδου (τάση πριν το πηνίο) και το ρεύμα φορτίου της 1Φ ημιελεγχόμενης γέφυρας. Ξεκινάμε τον κινητήρα και ρυθμίζουμε $n=1000$ rpm & $I_A=1$ A. Παρατηρούμε τις μεταβολές στα παλμογραφήματα, όταν αυξάνουμε την αυτεπαγωγή του πηνίου. Παρατηρούμε επίσης, σε κάθε αλλαγή της αυτεπαγωγής, τις μεταβολές στις ενδείξεις του αμπερομέτρου. Ενώ ο κινητήρας λειτουργεί στις παραπάνω συνθήκες, παλμογραφούμε τώρα την τάση τυμπάνου (την τάση μετά το πηνίο). Κατανοούμε το ρόλο του πηνίου στη λειτουργία του κινητήρα Σ.Ρ.



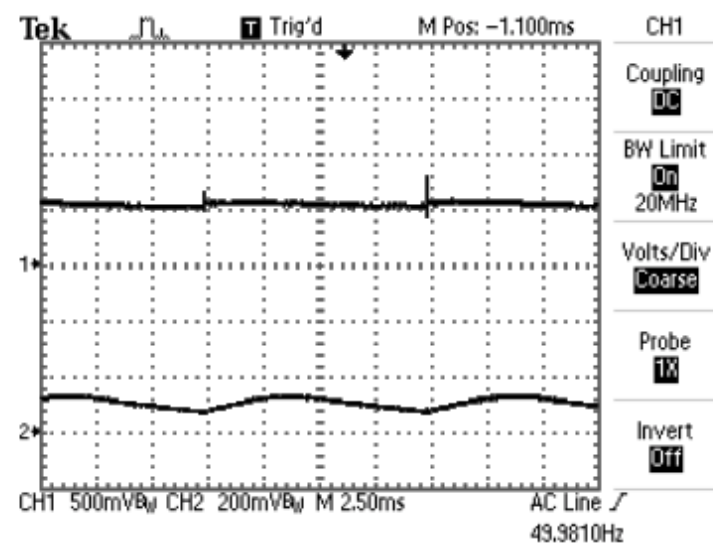
Σχήμα 2.6 Τάση εξόδου και ρεύμα φορτίου της γέφυρας (μικρή αυτεπαγωγή)



Σχήμα 2.7 Τάση και ρεύμα τυμπάνου κινητήρα (μικρή αυτεπαγωγή)



Σχήμα 2.8 Τάση εξόδου & ρεύμα φορτίου της γέφυρας (μεγάλη αυτεπαγωγή)



Σχήμα 2.9 Τάση και ρεύμα τυμπάνου κινητήρα (μεγάλη αυτεπαγωγή)

Βήμα 4

Αυτοματισμοί οδήγησης και προστασίας κινητήρων Σ.Ρ.

Στα κινητήρια συστήματα μηχανών Σ.Ρ. με ελεγχόμενους ηλεκτρονικούς μετατροπείς ισχύος συναντάμε αρκετούς αυτοματισμούς για την οδήγηση των κινητήρων, αλλά και την προστασία τόσο των ίδιων όσο και των ηλεκτρονικών τροφοδοτικών. Οι ηλεκτρονικές διατάξεις ελέγχου ενσωματώνονται στην πλακέτα ελέγχου και υλοποιούνται σχεδόν αποκλειστικά με αναλογικά ηλεκτρονικά που παρέχουν αξιοπιστία, πολύ γρήγορη απόκριση και χαμηλό κόστος. Πολύ σπάνια θα συναντήσει κανείς συστήματα να ελέγχονται από μικροελεγκτές (microcontrollers).

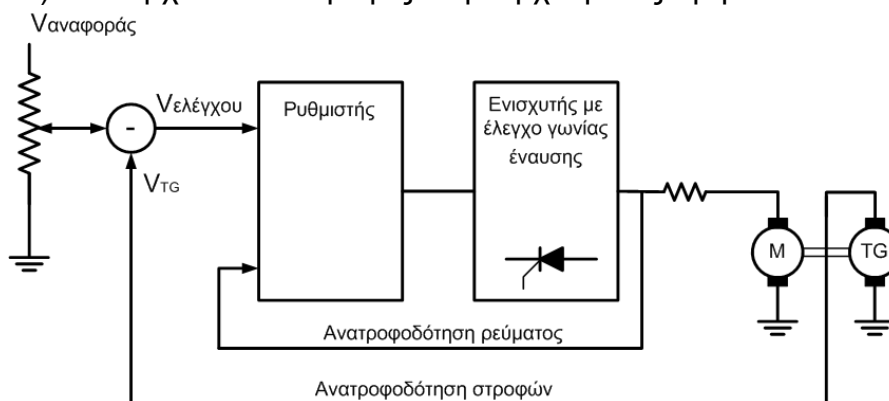
- Ομαλή εκκίνηση (Ράμπτα εκκίνησης. Soft-start). Είναι γνωστά τα προβλήματα κατά την εκκίνηση των ηλεκτροκινητήρων, όταν τροφοδοτηθούν απ ευθείας με την ονομαστική τους τάση. Πριν την έλευση των ηλεκτρονικών τροφοδοτικών ισχύος τα προβλήματα αντιμετωπιζόνταν με τους κλασσικούς εκκινητές (μεταβλητές ωμικές αντιστάσεις συνδεδεμένες σε σειρά με το τύμπανο). Στα ηλεκτρονικά τροφοδοτικά η απαίτηση για προοδευτική αύξηση της τάσης κατά την εκκίνηση, επιτυγχάνεται με την προοδευτική ελάττωση της γωνίας έναυσης. Η διαδικασία είναι αυτοματοποιημένη με δυνατότητα ρύθμισης του χρόνου εκκίνησης, μέσω ποτενσιόμετρου. Το ποτενσιόμετρο ρύθμισης του χρόνου εκκίνησης στη συσκευή DL 2308 είναι το **P1**.
- Περιοριστής ρεύματος (Current Limiter). Ο έλεγχος αυτός δεν επιτρέπει στο ρεύμα, που απορροφά το τύμπανο του κινητήρα να υπερβεί κάποιο όριο που τίθεται μέσω ποτενσιόμετρου. Αν για οποιαδήποτε αιτία (μηχανική υπερφόρτιση ή ακόμα και μπλοκάρισμα του ρότορα της μηχανής) το ρεύμα τυμπάνου τείνει να αυξηθεί, αυτό περιορίζεται αυτόματα στο προκαθορισμένο όριο. Ο μηχανισμός λειτουργίας του περιοριστή ρεύματος είναι απλός. Σε κάθε προσπάθεια αύξησης του ρεύματος, αυξάνεται αυτόματα η γωνία έναυσης με αποτέλεσμα τη μείωση της τάσης τροφοδοσίας και τη διατήρηση του ρεύματος στο προκαθορισμένο όριο. Με αυτό τον τρόπο προστατεύεται τόσο ο κινητήρας, όσο και το τροφοδοτικό. Το ποτενσιόμετρο περιορισμού του ρεύματος στη συσκευή DL 2308 είναι το **P3**.
- Προστασία από υπερστροφή. Όταν οι στροφές υπερβούν ένα μέγιστο αριθμό στροφών, διακόπτεται η τροφοδοσία του κινητήρα. Γι αυτή τη προστασία απαιτείται μέτρηση των στροφών με κατάλληλη διάταξη (ταχογεννήτρια). Ο κίνδυνος της υπερστροφής είναι υπαρκτός στον κινητήρα συνεχούς ρεύματος στην περίπτωση που διακοπεί η τροφοδοσία της διέγερσης και η μηχανή λειτουργεί με μικρό ή χωρίς φορτίο.
- Ωφέλιμη πέδηση-αλλαγή φοράς περιστροφής. Η τροφοδοσία του τυμπάνου γίνεται από 2 αντιπαράλληλες πλήρως ελεγχόμενες γέφυρες. Τον έλεγχο αυτό θα συναντήσουμε σε επόμενα κινητήρια συστήματα Σ.Ρ. (δεν υπάρχει στη DL 2308).
- Ρύθμιση ευσταθούς λειτουργίας του κινητηρίου συστήματος. Τον έλεγχο αυτό θα συναντήσουμε σε επόμενα κινητήρια συστήματα Σ.Ρ. (δεν υπάρχει στη DL 2308).

Β. Κλειστός βρόχος στροφών

(Ο επιλογέας **Y2** στη θέση TG)

Από τη μελέτη λειτουργίας του κινητήρα Σ.Ρ. είναι γνωστό πως οι στρόφες του μειώνονται, όταν φορτίζεται, λόγω της εσωτερικής πτώσης τάσης στην αντίσταση τυμπάνου ($I_A R_A$).

Αν θέλουμε η ταχύτητα να ρυθμίζεται αυτόματα, δηλαδή να διατηρείται σταθερή ανεξάρτητα από τη φόρτιση του κινητήρα, πρέπει να δημιουργήσουμε έναν κλειστό βρόχο ανάδρασης των στροφών. Στην πράξη ανατροφοδοτούμε την τάση μιας ταχογεννήτριας, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.10. Κάθε πτώση των στροφών του κινητήρα αντισταθμίζεται από τον ρυθμιστή και με την αλλαγή της γωνίας έναυσης (αύξηση της τάσης τυμπάνου) επανέρχονται οι στρόφες στην αρχική τους τιμή.



Σχήμα 2.10 Σύστημα αυτόματης σταθεροποίησης των στροφών

ΕΡΓΑΣΙΑ

1. Σχεδιάστε σε μιλιμετρέ χαρτί τις χαρακτηριστικές στροφών. Σχόλια.
2. Σχεδιάστε σε μιλιμετρέ χαρτί τη χαρακτηριστική ροπής-ρεύματος τυμπάνου. Υπολογίστε τη σταθερή ποσότητα $C\Phi$ του κινητήρα.
3. Σχεδιάστε σε μιλιμετρέ χαρτί τη χαρακτηριστική στροφών-ρεύματος τυμπάνου. Υπολογίστε την εκατοστιαία πτώση των στροφών [$\Delta\eta$ %].
4. Να ευρεθούν οι γωνίες έναυσης στα παλμογραφήματα του βήματος 3.
5. Υπολογίστε τον βαθμό απόδοσης του κινητήρα όταν λειτουργεί στην ονομαστική κατάσταση.

Προδιαγραφές κινητήρα

DE LORENZO ITALY
Rated Arm. voltage 170V
Rated Arm. current 7,6A
Rated power 1kW
Rated speed 1500 rpm
Rated exc. voltage 200V
Rated exc. current 0,6A

Άσκηση 3

Μονοφασική πλήρως ελεγχόμενη γέφυρα

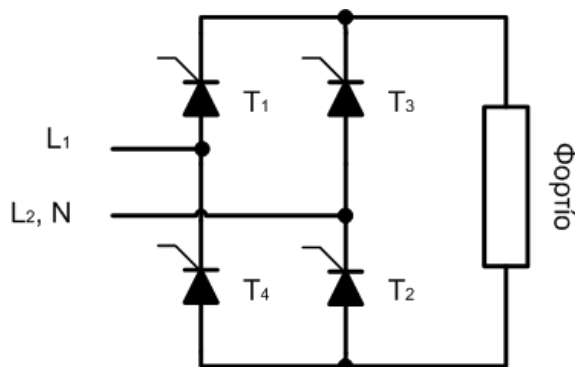
Σκοπός

Ο σκοπός της άσκησης αυτής είναι να γίνει μία σύντομη υπενθύμιση των γνώσεων για τον συγκεκριμένο ηλεκτρονικό μετατροπέα, που αποκτήθηκαν από το μάθημα των Ηλεκτρονικών Ισχύος. Επί πλέον εστιάζουμε σε θέματα που συνδέονται με τον έλεγχο φάσης, όπως η υλοποίηση της παλμοδότησης με το ολοκληρωμένο IC 785 και η ανάγκη χρησιμοποίησης μετασχηματιστών παλμών.

Τα πειράματα μελέτης της μονοφασικής πλήρως ελεγχόμενης γέφυρας θα γίνουν με ωμικό και ωμικό-επαγωγικό φορτίο για να αποσαφηνιστούν οι ουσιώδεις διαφορές στη λειτουργία της γέφυρας και τις κυματομορφές. Τέλος, με ωμικό-επαγωγικό φορτίο θα μελετήσουμε τη λειτουργία του μετατροπέα σε ασυνεχή και συνεχή αγωγή για να καταδειχτούν οι διαφοροποιήσεις, που προκύπτουν.

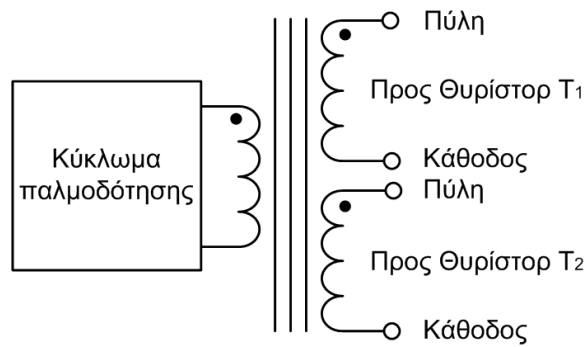
Συνοπτική θεωρία

Η μονοφασική πλήρως ελεγχόμενη γέφυρα που φαίνεται στο σχήμα 3.1 έχει θυρίστορ στη θέση των διόδων της ημieleγχόμενης. Η κυματομορφή της τάσης εξόδου εξαρτάται από τη γωνία έναυσης και από τη φύση του φορτίου (ωμικό, ωμικό-επαγωγικό, τύμπανο κινητήρα). Στην περίπτωση που το φορτίο είναι ωμικό-επαγωγικό ή τύμπανο κινητήρα η κυματομορφή της τάσης εξόδου διαφοροποιείται και από το αν υπάρχει συνεχής ή ασυνεχής αγωγή (ρεύμα με περιοχές κενού) των θυρίστορ.



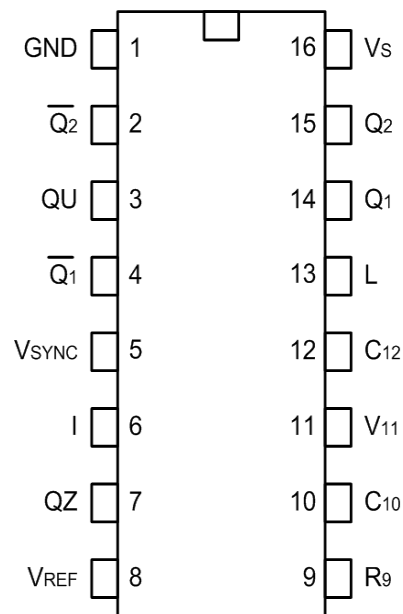
Σχήμα 3.1 Κύκλωμα μονοφασικής πλήρως ελεγχόμενης γέφυρας

Για να είναι δυνατή η λειτουργία και η ροή ρεύματος στο φορτίο, πρέπει να παλμοδοτηθούν μαζί τα θυρίστορ T_1 και T_2 στη θετική ημιπερίοδο της εναλλασσόμενης τάσης εισόδου, ενώ για τα T_3 και T_4 πρέπει να συμβεί το ίδιο στην αρνητική ημιπερίοδο. Για να εξασφαλιστεί η ταυτόχρονη παλμοδότηση των T_1 και T_2 πρέπει οι παλμοί τους να προέρχονται από την ίδια πηγή και να αποδίδονται μέσω μετασχηματιστή παλμών, (σχήμα 3.2), γιατί οι κάθοδοι των αντίστοιχων θυρίστορ συνδέονται σε διαφορετικά δυναμικά στο κύκλωμα εισόδου (δίκτυο).



Σχήμα 3.2 Συνδέσεις κυκλώματος παλμοδότησης

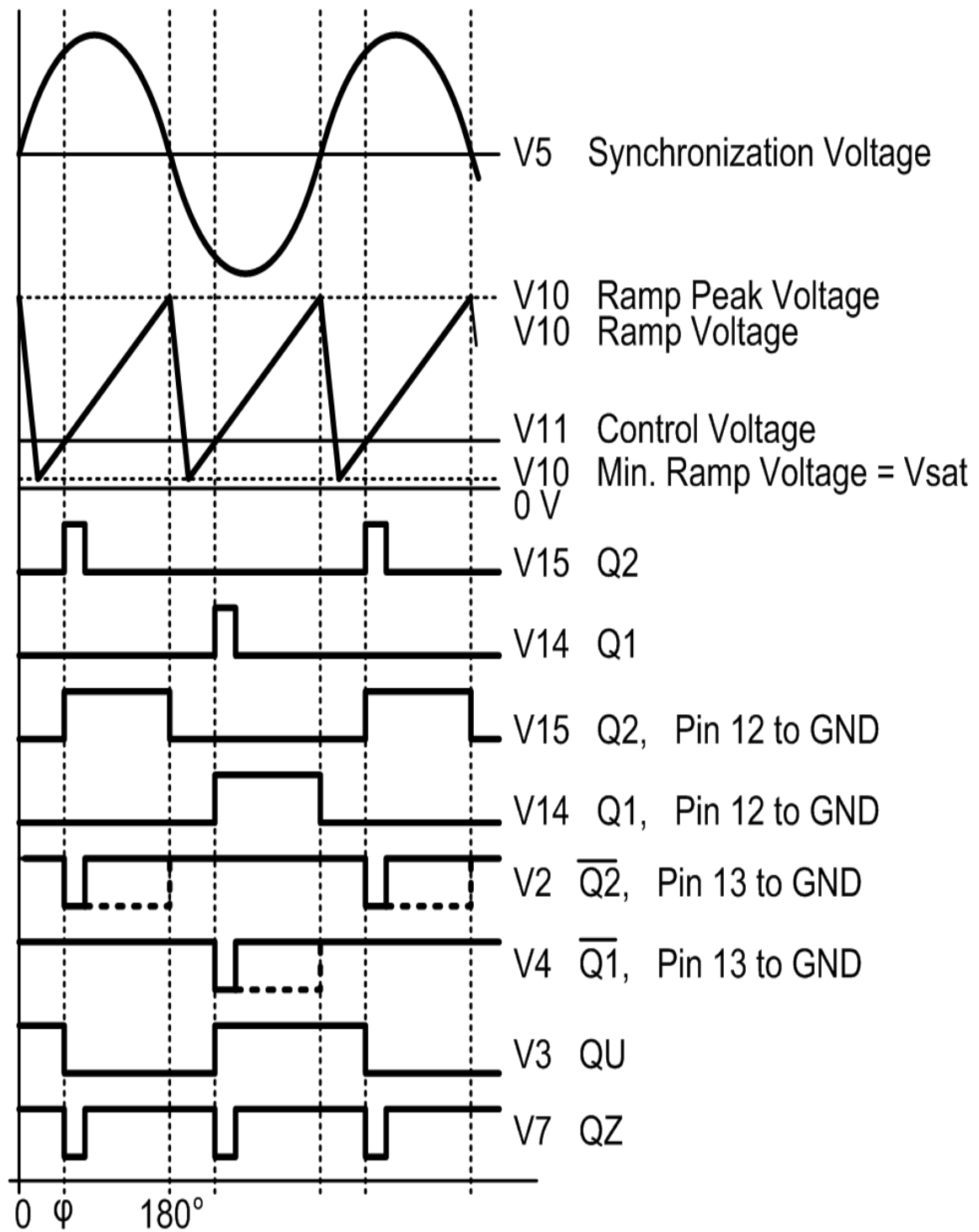
Η παλμοδότηση των θυρίστορ βασίζεται στο γραμμικό έλεγχο φάσης. Ο έλεγχος φάσης υλοποιείται από ολοκληρωμένα κυκλώματα με το πιο δημοφιλές να είναι το TCA 785 της εταιρείας SIEMENS.



Pin Configuration
(top view)

Pin	Symbol	Function
1	GND	Ground
2	$\overline{Q_2}$	Output 2 Inverted
3	QU	Output U
4	$\overline{Q_1}$	Output 1 Inverted
5	V _{SYNC}	Synchronous Voltage
6	I	Inhibit
7	QZ	Output Z
8	V _{REF}	Stabilized Voltage
9	R ₉	Ramp Resistance
10	C ₁₀	Ramp Capacitance
11	V ₁₁	Control Voltage
12	C ₁₂	Pulse Extension
13	L	Long Pulse
14	Q ₁	Output 1
15	Q ₂	Output 2
16	V _s	Supply Voltage

Σχήμα 3.3 Προσδιορισμοί και λειτουργίες των ακροδεκτών του TCA 785



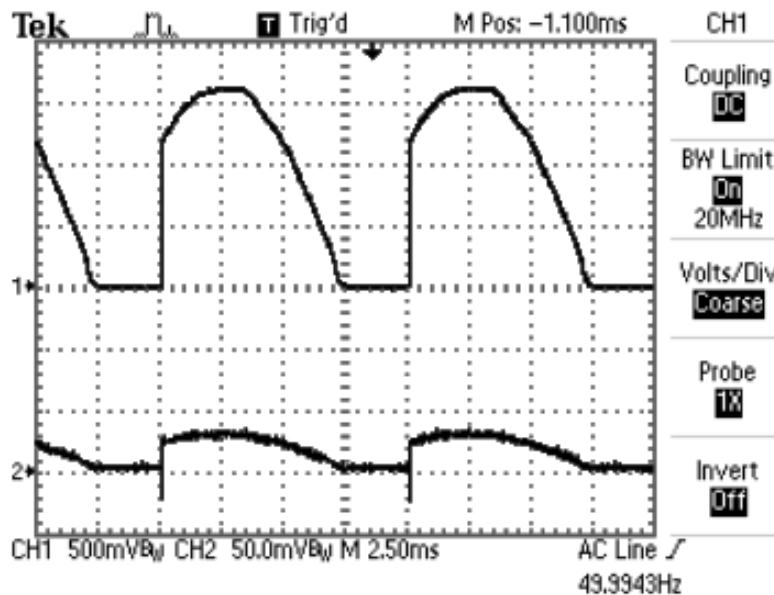
Σχήμα 3.4 Έλεγχος φάσης και παλμοσειρές εξόδου του TCA 785

Πειραματικό μέρος

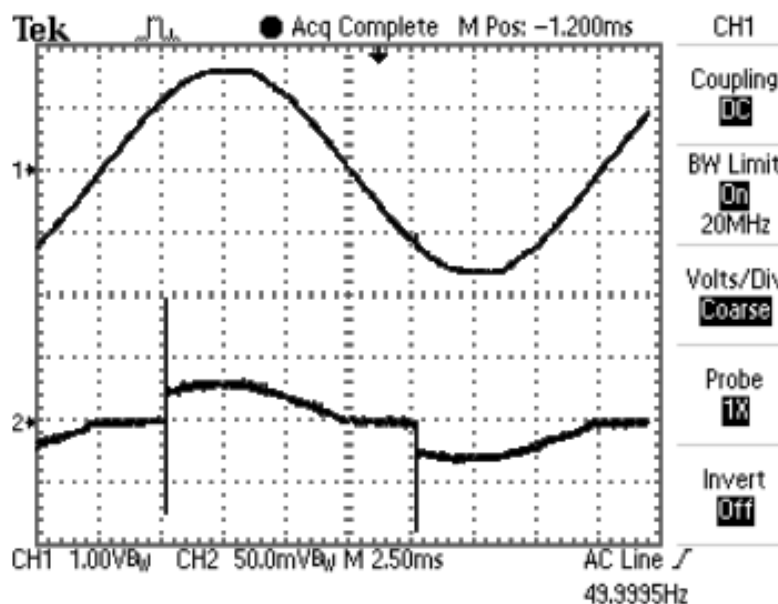
Βήμα 1

Ωμικό φορτίο (R) $[0 \leq \alpha \leq 180^\circ]$

Στην περίπτωση που το φορτίο είναι καθαρό ωμικό φορτίο, η συμπεριφορά της πλήρως ελεγχόμενης γέφυρας δε διαφέρει σε τίποτα από την ημieleγχόμενη και οι διάφορες κυματομορφές είναι ταυτόσημες. Τα ζεύγη των θυρίστορ άγουν από α ως π και από $\pi + \alpha$ ως 2π . Στα παλμογραφήματα που ακολουθούν (Σχ. 3.5α και Σχ. 3.5β) φαίνονται διάφορες κυματομορφές μεγεθών ισχύος.



Σχήμα 3.5α Τάση και ρεύμα εξόδου γέφυρας (φορτίο R)

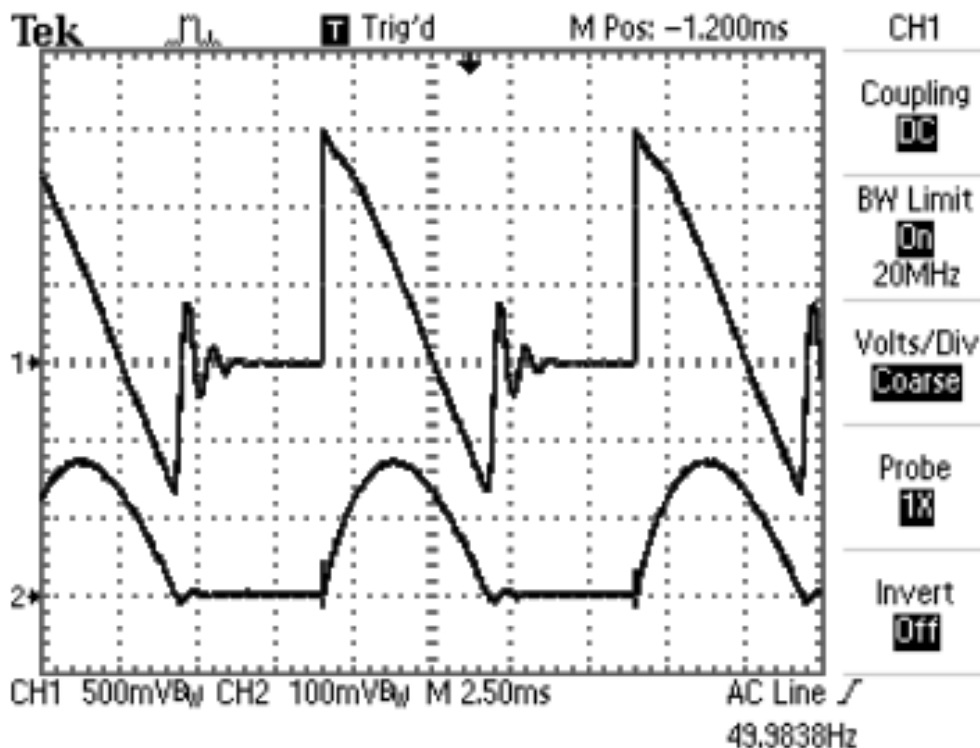


Σχήμα 3.5β Τάση και ρεύμα εισόδου γέφυρας (φορτίο R)

Βήμα 2

Ωμικό-επαγωγικό φορτίο (RL) Ασυνεχής αγωγή [$\varphi \leq \alpha < 180^\circ$]

Σ αυτήν την περίπτωση, λόγω της καθυστέρησης του ρεύματος σε σχέση με την τάση, που προκαλεί το πηνίο, το ζεύγος των θυρίστορ άγει και μετά τα π rad ή τα 2π rad το επόμενο ζεύγος, αλλά σβήνουν πριν παλμοδοτηθούν τα επόμενα. Εφ' όσον λοιπόν δεν άγουν συνεχώς σε όλη την περίοδο της τάσης εξόδου της γέφυρας ($T=\pi$), το ρεύμα παρουσιάζει ασυνέχειες (περιοχές κενού). Η τάση στο φορτίο παρουσιάζει διαστήματα με αρνητική τιμή, αλλά και διαστήματα με μηδενική τιμή. Στο σχήμα 3.6 παρατηρούμε τις κυματομορφές της τάσης και του ρεύματος φορτίου, όπως φαίνονται στον παλμογράφο, ενώ μπορούμε να διακρίνουμε τις ασυνέχειες (κενά) στο ρεύμα.



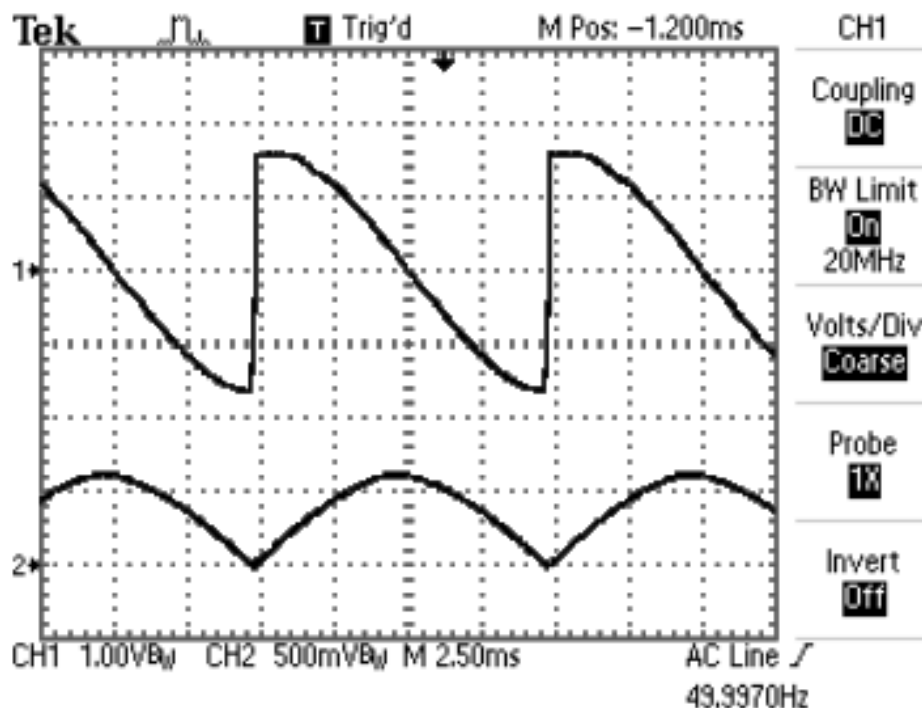
Σχήμα 3.6 Τάση και ρεύμα εξόδου γέφυρας (φορτίο RL, ασυνεχής αγωγή)

Βήμα 3

Ωμικό-επαγωγικό φορτίο (RL) Συνεχής αγωγή [$\varphi \leq \alpha \leq 90^\circ$]

Η αυτεπαγωγή του φορτίου έχει τώρα σημαντική τιμή εις τρόπον ώστε με την εξομάλυνση του ρεύματος να μηδενίζονται οι περιοχές κενού του. Είναι σημαντικό, στην περίπτωση αυτή, να επισημανθεί πως η γωνία έναυσης δεν μπορεί να υπερβεί τις 90° , τιμή για την οποία η μέση τάση εξόδου της γέφυρας μηδενίζεται ($V_{AV}=0$), ενώ η V_{rms} είναι ίση με την V_{rms} της εναλλασσόμενης τάσης εισόδου. Στη περίπτωση που το ρεύμα φορτίου δεν έχει περιοχές κενού, η μέση τάση φορτίου δίνεται από τη σχέση:

$$V_{AV} = \frac{1}{\pi} \int_a^{\pi+a} V_m \sin \theta d\theta = \frac{2V_m}{\pi} \cos \alpha$$



Σχήμα 3.7 Τάση και ρεύμα φορτίου (φορτίο RL, συνεχής αγωγή, $\alpha=85^\circ$)

Άσκηση 4

Λειτουργία μηχανής Σ.Ρ. σε τεταρτημόρια (1Q) & (4Q) Σύγκριση ημieleγχόμενης με πλήρως ελεγχόμενη γέφυρα (Συσκευή MV 4207)

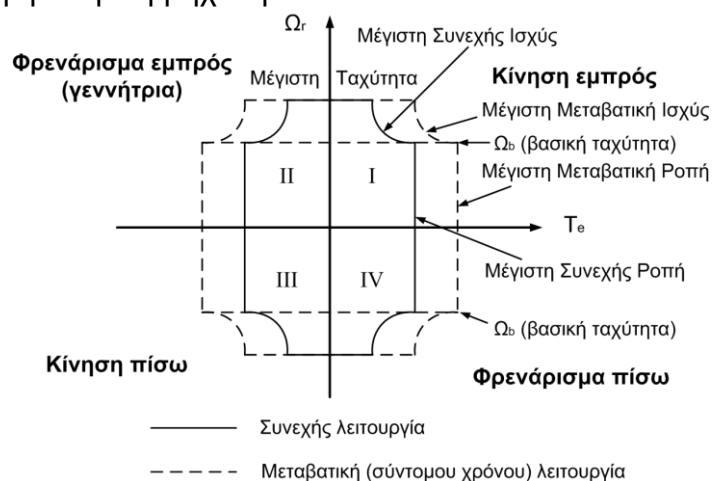
Σκοπός

Ο σκοπός αυτής της άσκησης είναι η κατανόηση του όρου «τεταρτημόρια λειτουργίας κινητηρίου συστήματος». Επί πλέον, η κατανόηση του όρου «ωφέλιμη πέδηση», που συναντάμε στα αυτοματοποιημένα κινητήρια συστήματα Σ.Ρ. Τέλος, θα κάνουμε μια πειραματική σύγκριση της λειτουργίας της 1Φ ημieleγχόμενης με την 1Φ πλήρως ελεγχόμενη γέφυρα και θα κατανοήσουμε το ρόλο της διόδου ελεύθερης διέλευσης.

Συνοπτική θεωρία

Τεταρτημόρια λειτουργίας (Quadrant operation)

Με τον όρο «τεταρτημόρια λειτουργίας» μπορούμε να περιγράψουμε τις διαφορετικές καταστάσεις λειτουργίας, στις οποίες μπορεί να βρεθεί κάθε κινητήριο σύστημα. Στην περίπτωση των κινητηρίων συστημάτων Σ.Ρ., εκτός απ' την ηλεκτρική μηχανή υπάρχουν και οι ηλεκτρονικοί μετατροπείς ισχύος (ελεγχόμενες γέφυρες), που παρεμβάλλονται μεταξύ δικτύου και μηχανής. Η ηλεκτρική μηχανή μπορεί να λειτουργήσει σαν κινητήρας ή γεννήτρια, ανάλογα από ποια πλευρά οδηγείται. Όταν οδηγείται (τροφοδοτείται) από την ηλεκτρική πλευρά λειτουργεί σαν κινητήρας, ενώ όταν οδηγείται (περιστρέφεται) από τη μηχανική πλευρά (άξονας) λειτουργεί σαν γεννήτρια. Εξ άλλου, η περιστροφή της μηχανής μπορεί να είναι είτε δεξιόστροφη (clockwise, forward), είτε αριστερόστροφη (counter-clockwise, reverse). Συνεπώς, τέσσερες είναι συνολικά οι λειτουργικές καταστάσεις, που μπορεί να βρεθεί κάθε ηλεκτρική μηχανή. Οι ελεγχόμενες γέφυρες μπορούν να λειτουργήσουν είτε σαν ανορθωτές τάσης (rectifying mode, οι ημieleγχόμενες και οι πλήρως ελεγχόμενες), είτε σαν αντιστροφείς τάσης (inverting mode, μόνο οι πλήρως ελεγχόμενες). Στο σχήμα 4.1 φαίνονται τα 4 τεταρτημόρια και σε κάθε τεταρτημόριο οριοθετούνται οι περιοχές στις οποίες μπορεί να λειτουργήσει η ηλεκτρική μηχανή.



Σχήμα 4.1 Τα 4 τεταρτημόρια λειτουργίας ηλεκτρικής μηχανής

Οι ηλεκτρονικοί μετατροπείς, που χρησιμοποιούνται για την τροφοδοσία των μηχανών Σ.Ρ., μπορεί να είναι είτε μονοφασικοί (για μηχανές μικρής ισχύος, λίγα kW), είτε τριφασικοί (για μεγάλες μηχανές, ώστε να μην φορτίζεται ασύμμετρα το δίκτυο). Τόσο οι μονοφασικοί, όσο και οι τριφασικοί κατατάσσονται σε τρεις κύριες κατηγορίες, ανάλογα με τον τρόπο λειτουργίας του κινητηρίου συστήματος.

- **Μετατροπείς ενός τεταρτημορίου (1Q)**

Στην κατηγορία αυτή ανήκουν οι ημieleγχόμενες γέφυρες και οι πλήρως ελεγχόμενες γέφυρες με δίοδο ελεύθερης διέλευσης. Οι μετατροπείς (1Q) έχουν μόνο μία λειτουργία. Την οδήγηση (τροφοδοσία με τάση σταθερής πολικότητας) του κινητήρα σε μία μόνο φορά περιστροφής, υπό την προϋπόθεση ότι οι συνδεσμολογίες του τυμπάνου και της διέγερσης παραμένουν αμετάβλητες. Χρησιμοποιώντας επί πλέον εξοπλισμό (π.χ. ρελέ αλλαγής της πολικότητας του τυμπάνου), θα μπορούσαμε να αλλάξουμε φορά περιστροφής του κινητήρα. Αυτό όμως δε σημαίνει πως το σύστημα λειτουργεί σε δύο τεταρτημόρια. Με τον όρο (2Q) αναφερόμαστε σε συστήματα, στα οποία μπορεί να αντιστραφεί η ροή της ισχύος. Οι ημieleγχόμενες γέφυρες πλεονεκτούν απέναντι στις πλήρως ελεγχόμενες γιατί είναι φθηνότερες (έχουν τα μισά θυρίστορ) και παρουσιάζουν λιγότερες αρμονικές στη τάση και στο ρεύμα (λιγότερος θόρυβος και θέρμανση της μηχανής). Όμως, δεν έχουν τη δυνατότητα αντιστροφής της ροής ισχύος (από τη μηχανή προς το δίκτυο), οπότε συμβαίνει ωφέλιμη ηλεκτρική πείδηση της ηλεκτρικής μηχανής.

Μία ακόμα σημαντική διαφορά μεταξύ των δύο γεφυρών είναι το εύρος ελέγχου της γωνίας έναυσης. Στη μονοφασική ημieleγχόμενη είναι 0 – 180 μοίρες πάντα, ανεξάρτητα από τη μορφή του ρεύματος, ενώ στη μονοφασική πλήρως ελεγχόμενη και όταν το ρεύμα δεν παρουσιάζει περιοχές κενού η γωνία έναυσης μεταβάλλεται από 0 – 90 μοίρες.

- **Μετατροπείς δύο τεταρτημορίων (2Q)**

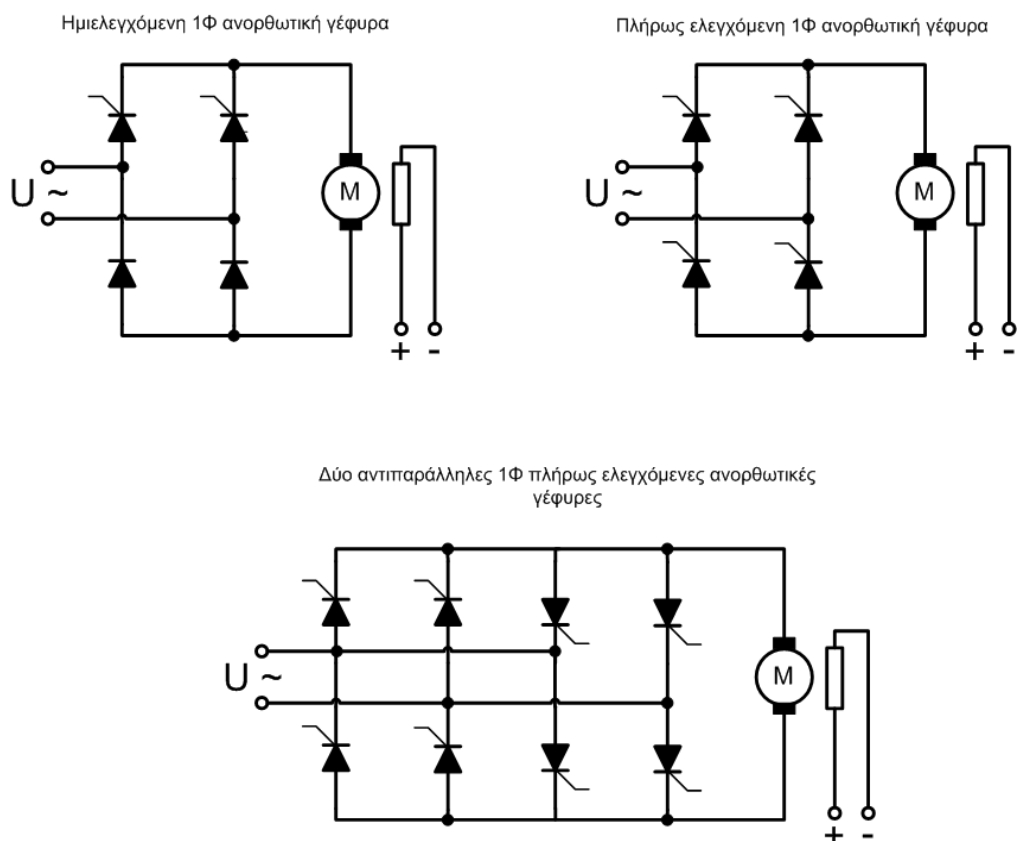
Στην κατηγορία αυτή ανήκουν οι πλήρως ελεγχόμενες γέφυρες. Οι γέφυρες αυτές έχουν το πλεονέκτημα της αντιστροφής της πολικότητας της τάσης εξόδου τους, μέσω της γωνίας έναυσης, με αποτέλεσμα τη δημιουργία ωφέλιμης πείδησης στην κίνηση του ηλεκτρικού κινητήρα. Μετατροπέα 2 τεταρτημορίων θα μελετήσουμε διεξοδικά στην επόμενη άσκηση.

- **Μετατροπείς τεσσάρων τεταρτημορίων (4Q)**

Στην κατηγορία αυτή ανήκουν οι διατάξεις με δύο πλήρως ελεγχόμενες γέφυρες σε σύνδεση αντιπαράλληλη. Με τους μετατροπείς 4(Q) έχουμε τη δυνατότητα οδήγησης και ωφέλιμης πείδησης και προς τις δύο κατευθύνσεις περιστροφής. Έχουν το πιο πολύπλοκο κύκλωμα ελέγχου και χρησιμοποιούνται εκεί που απαιτείται έλεγχος της κίνησης και δεξιόστροφα και αριστερόστροφα με γρήγορη αναστροφή.

Η μέθοδος ελέγχου όλων των παραπάνω μετατροπέων είναι ο έλεγχος φάσης (phase control). Ένα αυξανόμενο ή ελαττούμενο εμβαδό τάσης-χρόνου από την ανορθωμένη τάση προκαλεί μια αύξηση ή ελάττωση της μέσης τάσης στο τύμπανο του κινητήρα, με αποτέλεσμα την ανάλογη μεταβολή των στροφών.

Τα κινητήρια συστήματα με ηλεκτρονικούς μετατροπείς ισχύος χρησιμοποιούν σχεδόν πάντα κινητήρες Σ.Ρ. ξένης διέγερσης, όπως φαίνεται και στο σχήμα 4.2.

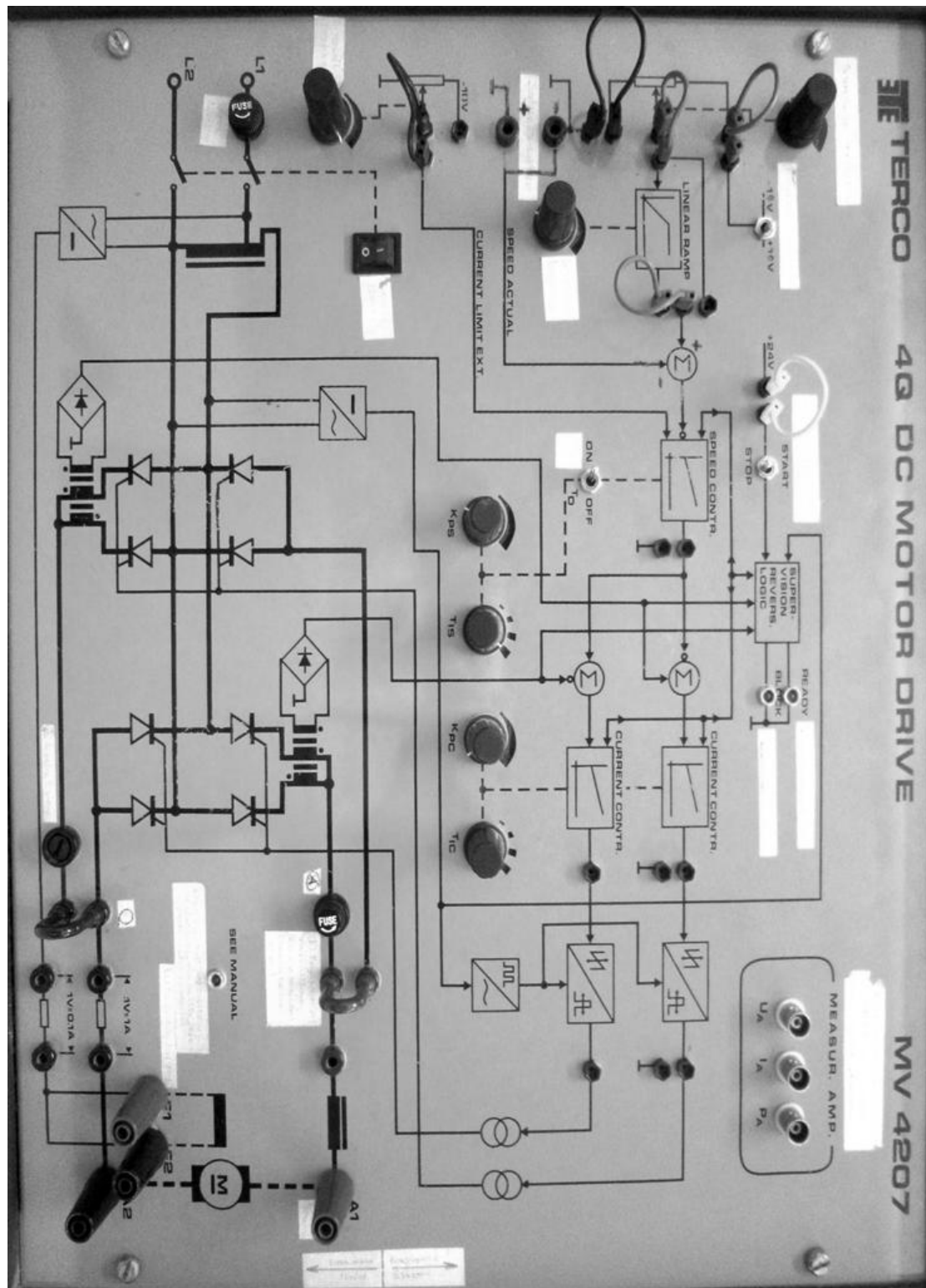


Σχήμα 4.2 Κινητήρια συστήματα Σ.Ρ. με ελεγχόμενες γέφυρες

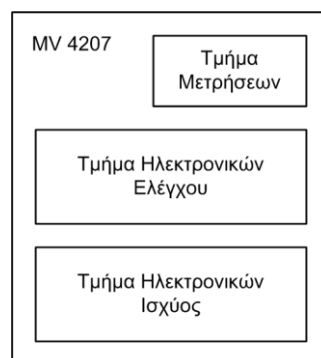
Η συσκευή MV 4207

Η συσκευή MV 4207 είναι μια εκπαιδευτική διάταξη για τον έλεγχο λειτουργίας κινητήρων Σ.Ρ. ξένης διέγερσης. Ο τρόπος λειτουργίας των ηλεκτρονικών ισχύος και των ηλεκτρονικών διατάξεων ελέγχου στο εσωτερικό της συσκευής, αποτυπώνονται με μονογραμμικά και λειτουργικά διαγράμματα στο μπροστινό κάλυμμα της συσκευής. Η MV 4207 έχει σχεδιαστεί κατά τέτοιο τρόπο, ώστε όλοι οι ακροδέκτες ισχύος, κάθε σημείο ελέγχου καθώς και κάθε είσοδος ή έξοδος σημάτων μετρήσεων να βρίσκονται στο μπροστινό κάλυμμα της συσκευής. Τα τρία βασικά τμήματα της συσκευής, που φαίνονται στο σχήμα 4.3, είναι:

- **Τμήμα ισχύος.** Το τμήμα αυτό περιέχει τις τροφοδοσίες για το τύμπανο και τη διέγερση της μηχανής. Η τροφοδοσία της διέγερσης παρέχεται από μία μονοφασική γέφυρα με διόδους (μη ελεγχόμενη). Για την τροφοδοσία του τυμπάνου υπάρχουν 2 μονοφασικές πλήρως ελεγχόμενες γέφυρες, που μπορεί να λειτουργούν ανεξάρτητα, ή να συνδέονται μεταξύ τους αντιπαράλληλα, με βραχυκυκλωτήρες.
- **Τμήμα ελέγχου.** Αποτελείται από αναλογικά ηλεκτρονικά που λειτουργούν με τάση ± 12 V. Ο σκοπός του τμήματος αυτού της συσκευής είναι η δημιουργία και ο έλεγχος της παλμοδότησης των θυρίστορ, με τελικό στόχο τον έλεγχο της λειτουργίας της ηλεκτρικής μηχανής.
Το τμήμα των ηλεκτρονικών ελέγχου περιέχει τα παρακάτω σημεία ελέγχου:



- Διακόπτης αλλαγής φοράς περιστροφής της μηχανής δηλαδή επιλογέας ποια από τις 2 γέφυρες τροφοδοτεί το τύμπανο.
- Ποτενσιόμετρο ελέγχου της ταχύτητας του κινητήρα.
- Ράμπα επιτάχυνσης- επιβράδυνσης.
- Σημείο ανατροφοδότησης της ταχογεννήτριας.
- Περιοριστής ρεύματος τυμπάνου.
- Ελεγκτής ταχύτητας (PI) με ρύθμιση ενίσχυσης K και χρόνου T.
- Ελεγκτής ρεύματος (PI) με ρύθμιση ενίσχυσης K και χρόνου T.
- Κύκλωμα παλμοδότησης.
- Μετασχηματιστές παλμών.
- **Τμήμα μετρήσεων.** Η συσκευή είναι εξοπλισμένη με μονάδα μέτρησης της τάσης, του ρεύματος και της ισχύος εξόδου της γέφυρας (U,I,P). Τα σήματα αυτά μπορούμε να τα πάρουμε με κατάλληλα καλώδια (BNC, BNC) και να παρακολουθούμε τις μεταβολές τους σε παλμογράφο.



Σχήμα 4.3 Τμήματα της συσκευής MV 4207

Πειραματικό μέρος

Βήμα 1

Ωφέλιμη πέδηση

Κατά την ωφέλιμη ή αναγεννητική πέδηση (regenerative braking) εκμεταλλευόμαστε το γεγονός πως η ηλεκτρική μηχανή μπορεί να λειτουργήσει σαν γεννήτρια μετατρέποντας την μηχανική ενέργεια του φορτίου σε ηλεκτρική, η οποία επιστρέφει στο δίκτυο. Λειτουργώντας σαν γεννήτρια και επιστρέφοντας ισχύ στο δίκτυο, η φορά της ροπής που παράγει η μηχανή αντισίθεται στη φορά περιστροφής, με αποτέλεσμα το φρενάρισμα της κίνησης. Η ενέργεια κατά την πέδηση δεν γίνεται θερμότητα, όπως συμβαίνει στους κλασσικούς τρόπους πέδησης, αλλά επιστρέφει στο δίκτυο και καταναλώνεται από τους καταναλωτές του δικτύου. Απομένει στη δυνατότητα των ηλεκτρονικών μετατροπών να επιτρέπουν την επιστροφή της ηλεκτρικής ισχύος, που παράγεται κατά την πέδηση. Οι ημieleγχόμενες γέφυρες δεν έχουν δυνατότητα επιστροφής ισχύος, γιατί δεν μπορεί να αλλάξει το πρόσημο της τάσης στην έξοδό τους ενώ οι πλήρως ελεγχόμενες γέφυρες έχουν αυτή τη δυνατότητα.

- Συνδέουμε την ανατροφοδότηση της ταχογεννήτριας (προσοχή στην πολικότητα) και τη μηχανή Σ.Ρ. στη συσκευή MV 4207. Συνδέουμε τις δύο μονοφασικές πλήρως ελεγχόμενες γέφυρες αντιπαράλληλα. Με τις παρακάτω ρυθμίσεις περιστρέφουμε με μέγιστες στροφές τον κινητήρα:
 - *Ράμπα επιτάχυνσης-επιβράδυνσης 0%*
 - *Περιοριστής ρεύματος 100%*

Μηδενίζοντας απότομα το ποτενσιόμετρο ρύθμισης των στροφών, παρατηρούμε και κατανοούμε το φαινόμενο.

- Επαναλαμβάνουμε τη ίδια διαδικασία με τις παρακάτω ρυθμίσεις:
 - Ράμπα επιτάχυνσης-επιβράδυνσης 0%
 - Περιοριστής ρεύματος 30%
- Αποσυνδέουμε τη μία γέφυρα και επαναλαμβάνουμε την ίδια διαδικασία. Συγκρίνουμε με τα προηγούμενα και κατανοούμε συνολικά τη λειτουργία του συστήματος.

Βήμα 2

Λειτουργία (4Q)

Λειτουργία στα 4 τεταρτημόρια σημαίνει δυνατότητα αλλαγής φοράς περιστροφής του κινητήρα με αυτόματη αλλαγή της γέφυρας τροφοδοσίας. Αν απαιτείται η αλλαγή φοράς περιστροφής να είναι σύντομη, τότε η πέδηση της κίνησης θα πρέπει να γίνεται ωφέλιμα και αυτοματοποιημένα. Τα ηλεκτρικά κινητήρια συστήματα Σ.Ρ. 4Q διαθέτουν αποκλειστικά 2 πλήρως ελεγχόμενες αντιπαράλληλες γέφυρες

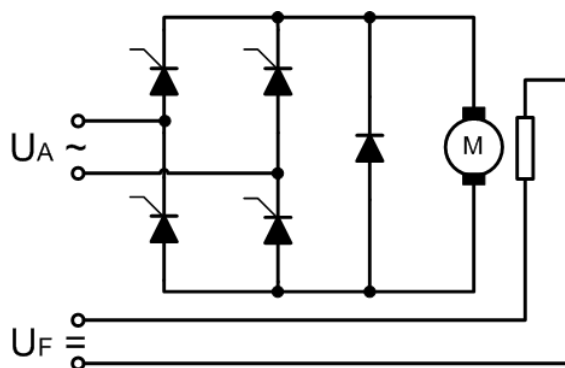
- Αλλάζοντας συνεχώς φορά περιστροφής από τον κατάλληλο επιλογέα, επιβεβαιώνουμε κάθε φορά το τεταρτημόριο λειτουργίας της μηχανής με τη βοήθεια του πολύμετρου, του παλμογράφου και της μηχανής.
- Μεταβάλλουμε τις τιμές των ποτενσιόμετρων ράμπας και περιοριστή ρεύματος και παρατηρούμε τη επίδρασή τους κατά την αλλαγή της φοράς περιστροφής της μηχανής.

Βήμα 3

Λειτουργία (1Q).

Σύγκριση ημieleγχόμενης με πλήρως ελεγχόμενη γέφυρα

Όπως έχει αναφερθεί, ο απλούστερος έλεγχος του κινητήρα Σ.Ρ. πραγματοποιείται με την μονοφασική ημieleγχόμενη γέφυρα (2 θυρίστορ, 2 δίοδοι). Ίδια ακριβώς συμπεριφορά με την ημieleγχόμενη γέφυρα παρουσιάζει και η πλήρως ελεγχόμενη γέφυρα (4 θυρίστορ), αν στην έξοδό της συνδέσουμε μία δίοδο ελεύθερης διέλευσης, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.4.

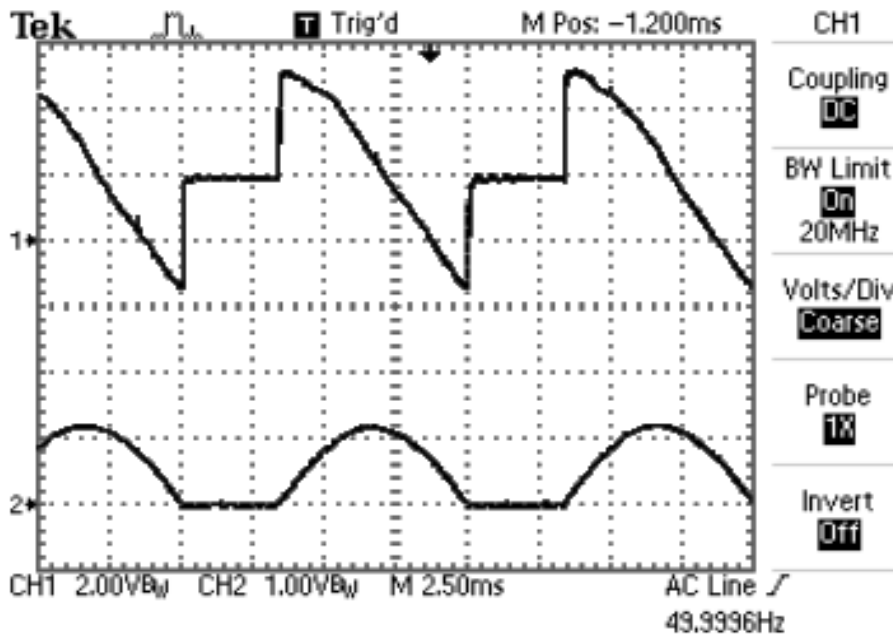


Σχήμα 4.4. Πλήρως ελεγχόμενη 1Φ γέφυρα με Δ.Ε.Δ.

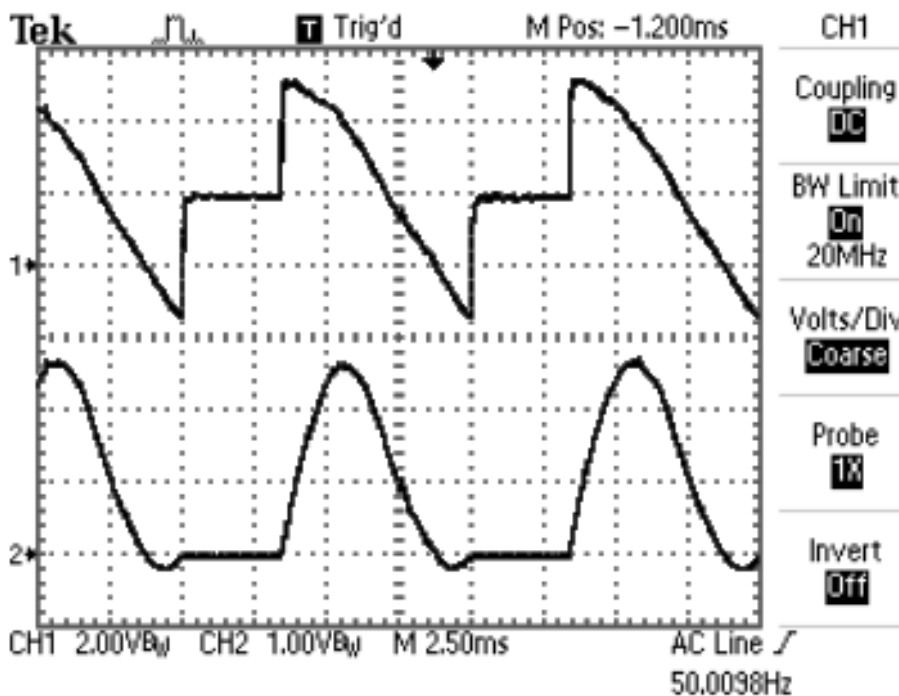
Στις παραπάνω περιπτώσεις λέμε πως το σύστημα μπορεί να λειτουργήσει μόνο σε ένα τεταρτημόριο (1Q). Δηλαδή η ηλεκτρική μηχανή λειτουργεί σαν κινητήρας και η γέφυρα σαν ανορθωτής.

i. Αποσυνδέουμε τους βραχυκυκλωτήρες των γεφυρών. Συνδέουμε τη κύρια μηχανή στη συσκευή MV 4207 και τη βοηθητική μηχανή να λειτουργεί σαν γεννήτρια, ώστε να μπορεί να φορτίζει την κύρια μηχανή. Ρυθμίζουμε τις στροφές στις 800 rpm και στη συνέχεια φορτίζουμε μέχρι η μέση τιμή του ρεύματος της κύριας μηχανής (κινητήρα) να γίνει 5A.

Καταγράφουμε τα ακόλουθα μεγέθη τυμπάνου του κινητήρα: V_{AV} , I_{AV} , I_{rms} .



Σχήμα 4.5α Τάση και ρεύμα εξόδου γέφυρας του βήματος 3i



Σχήμα 4.5β Τάση και ισχύς εξόδου γέφυρας του βήματος 3i

ii. Ενώ το σύστημα λειτουργεί, συνδέουμε στην έξοδο της πλήρως ελεγχόμενης γέφυρας μία δίοδο ελεύθερης διέλευσης (προσοχή στο βραχυκύκλωμα!). Ρυθμίζουμε εν νέου τις στροφές στις 800 rpm και το ρεύμα του κινητήρα στα 5A.

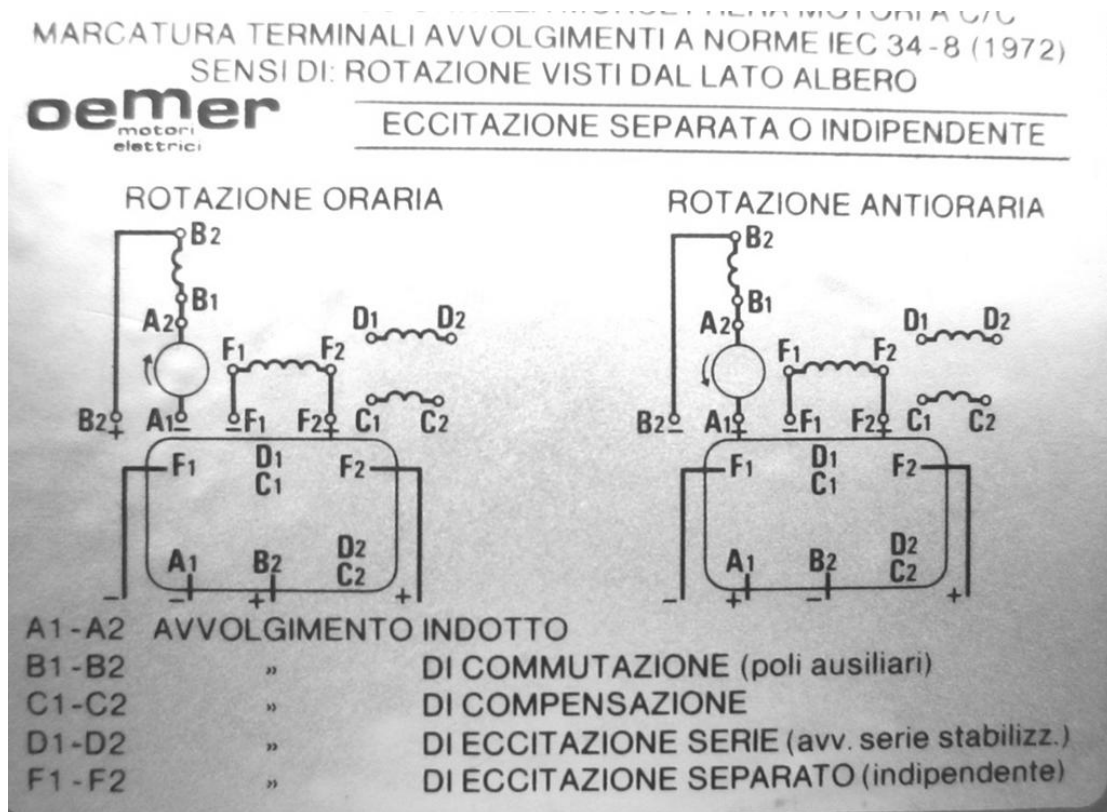
Καταγράφουμε τα ακόλουθα μεγέθη τυμπάνου του κινητήρα: V_{AV} , I_{AV} , I_{rms} .

ΕΡΓΑΣΙΑ

1. Σχεδιάστε σε μιλιμετρέ χαρτί τις κυματομορφές τάσης, ρεύματος και ισχύος εξόδου της γέφυρας του βήματος 3ii.
2. Δώστε ένα συγκριτικό σχολιασμό των μετρήσεων και των παλμογραφημάτων των βημάτων 3i και 3ii.
3. Σχεδιάστε τα παλμογραφήματα των σχημάτων 4.5α και 4.5β αν η σάρωση (*time/div*) του παλμογράφου ρυθμιστεί στα 2 ms και στα 5 ms.



Σχήμα 4.6 Πινακίδα κινητήρα Συνεχούς Ρεύματος



Σχήμα 4.7 Συνδέσεις για δεξιόστροφη ή αριστερόστροφη κίνηση

Άσκηση 5

Έλεγχος σε δύο τεταρτημόρια (2Q) κινητήρα Σ.Ρ. ξένης διέγερσης (Συσκευή MV 4207)

Σκοπός

Με την άσκηση αυτή εμβαθύνουμε στη μελέτη των όρων «τεταρτημόριο λειτουργίας» και «ωφέλιμη πέδηση». Για την πλήρη κατανόηση των παραπάνω όρων μελετάμε, παράλληλα με την τάση και το ρεύμα τυμπάνου, την ισχύ που διακινείται στο τύμπανο της ηλεκτρικής μηχανής. Η λεπτομερειακή μελέτη και κατανόηση των φάσεων λειτουργίας των κινητηρίων συστημάτων στηρίζονται σε μέγιστο βαθμό στην κατανόηση των παλμογραφημάτων τάσης, έντασης και ισχύος τυμπάνου.

Στην προηγούμενη άσκηση, η λειτουργία στα τεταρτημόρια II και IV, όπου εμφανιζόταν ωφέλιμη πέδηση, ήταν μεταβατική και διαρκούσε πολύ λίγο, μέχρι να αλλάξει φορά περιστροφής η μηχανή.

Στην άσκηση αυτή δημιουργούμε τις συνθήκες μόνιμης λειτουργίας σε τεταρτημόριο πέδησης και συνεπώς είμαστε σε θέση να μελετάμε με άνεση και σε βάθος το φαινόμενο.

Συνοπτική θεωρία

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, για να μπορεί ένα κινητήριο σύστημα να λειτουργήσει σε δύο τεταρτημόρια (2Q) πρέπει, κατ' αρχή, να έχει μία πλήρως ελεγχόμενη γέφυρα (μονοφασική ή τριφασική). Κατά δεύτερο λόγο, πρέπει το μηχανικό φορτίο να μπορεί να κινήσει την ηλεκτρική μηχανή σε αντίθετη περιστροφή απ' αυτή που περιστρέφεται, όταν λειτουργεί σαν κινητήρας. Στα κινητήρια συστήματα με την παραπάνω προϋπόθεση ανήκουν εκείνα που κατά τη λειτουργία τους μεταβάλλουν τη δυναμική κατάσταση των μηχανικών φορτίων, όπως γερανοί, αναβατόρια, βαρούλκα κτλ.

Κάθε κινητήριο σύστημα, που μπορεί να λειτουργήσει σε περισσότερα από ένα τεταρτημόρια, μπορεί να αντιστρέψει και τη ροή της ηλεκτρικής ισχύος ($p=vi$). Όταν το κινητήριο σύστημα έχει μία μόνο γέφυρα, τότε το ρεύμα έχει μία μόνο κατεύθυνση, οπότε απομένει να μπορεί να αντιστραφεί η τάση. Αν η τάση μπορεί να αντιστραφεί, τότε η ηλεκτρική ισχύς επιστρέφει στο δίκτυο, συνεπώς η πέδηση είναι ωφέλιμη και αναγεννητική (regenerative braking).

Έστω ότι η ηλεκτρική μηχανή λειτουργεί σαν δεξιόστροφος κινητήρας. Τότε η γέφυρα λειτουργεί σαν ανορθωτής (rectifying mode, μετατροπή AC σε DC) και ο κινητήρας καταναλώνει ηλεκτρική ενέργεια δικτύου περιστρέφοντας το μηχανικό φορτίο. Στην περίπτωση αυτή το κινητήριο σύστημα λειτουργεί στο **I τεταρτημόριο**. Το ρεύμα τυμπάνου είναι θετικό, η τάση τυμπάνου είναι θετική, συνεπώς και η ηλεκτρική ισχύς είναι θετική με κατεύθυνση από το δίκτυο προς τον κινητήρα.

Τι συμβαίνει όμως με την τάση; Μπορεί να γίνει αρνητική; Πράγματι, αν ο άξονας της ηλεκτρικής μηχανής περιστραφεί από το φορτίο αριστερόστροφα, η πολικότητα της τάσης στο τύμπανο αλλάζει πρόσημο. Τέλος, τι συμβαίνει με τη γέφυρα; Με την πλήρως ελεγχόμενη γέφυρα με

δίοδος ελεύθερης διέλευσης δεν μπορούμε να πετύχουμε αντιστροφή της τάσης, γιατί η δίοδος ελεύθερης διέλευσης βραχυκυκλώνει την αρνητική αυτή τάση και τη μηδενίζει. Με την πλήρως ελεγχόμενη γέφυρα μπορούμε να πετύχουμε αντιστροφή της τάσης, υπό την προϋπόθεση ότι υπάρχει ικανή αυτεπαγωγή συνδεδεμένη σε σειρά στο τύμπανο.

Στην περίπτωση αυτή, το αποτέλεσμα του θετικού ρεύματος με την αρνητική τάση είναι η αρνητική ισχύς. Αυτό σημαίνει πως η ηλεκτρική μηχανή λειτουργεί τώρα σαν γεννήτρια (αριστερόστροφη) παράγοντας ηλεκτρική ισχύ, που επιστρέφει στο δίκτυο. Προφανώς η αναπτυσσόμενη στη γεννήτρια ροπή αντίκειται στη φορά της κίνησης, με αποτέλεσμα την ωφέλιμη πέδηση του συστήματος.

Η γέφυρα τώρα λειτουργεί σαν αντιστροφέας τάσης (inverting mode, μετατροπή DC σε AC).

Το σύστημα λειτουργεί πλέον στο **IV τεταρτημόριο**. Σε σύγκριση με το πρώτο τεταρτημόριο έχουν αλλάξει το πρόσημο της τάσης και η φορά περιστροφής, ενώ παραμένουν ίδιες (θετικές) οι φορές του ρεύματος και της αναπτυσσόμενης ροπής.

Συνεπώς, μία πλήρως ελεγχόμενη γέφυρα με φορτίο μηχανή Σ.Ρ. είναι (υπό προϋποθέσεις, που αναφέρθηκαν παραπάνω) κινητήριο σύστημα 2 τεταρτημορίων (2Q), δηλαδή μπορεί να λειτουργήσει στα τεταρτημόρια I, IV ή στα III, II.

Πειραματικό μέρος

Βήμα 1

Λειτουργία στο I τεταρτημόριο

Αποσυνδέουμε τους βραχυκυκλωτήρες των γεφυρών στη συσκευή MV 4207. Συνδέουμε την κύρια ηλεκτρική μηχανή στη συσκευή MV 4207. Δηλαδή συνδέουμε το τύλιγμα του τυμπάνου και το τύλιγμα της διέγερσης, έτσι ώστε, όταν λειτουργεί η μηχανή να περιστρέφεται δεξιόστροφα.

Ανατροφοδοτούμε με σωστή πολικότητα το σήμα της ταχογεννήτριας και ξεκινάμε τη μηχανή ρυθμίζοντας 400 rpm.

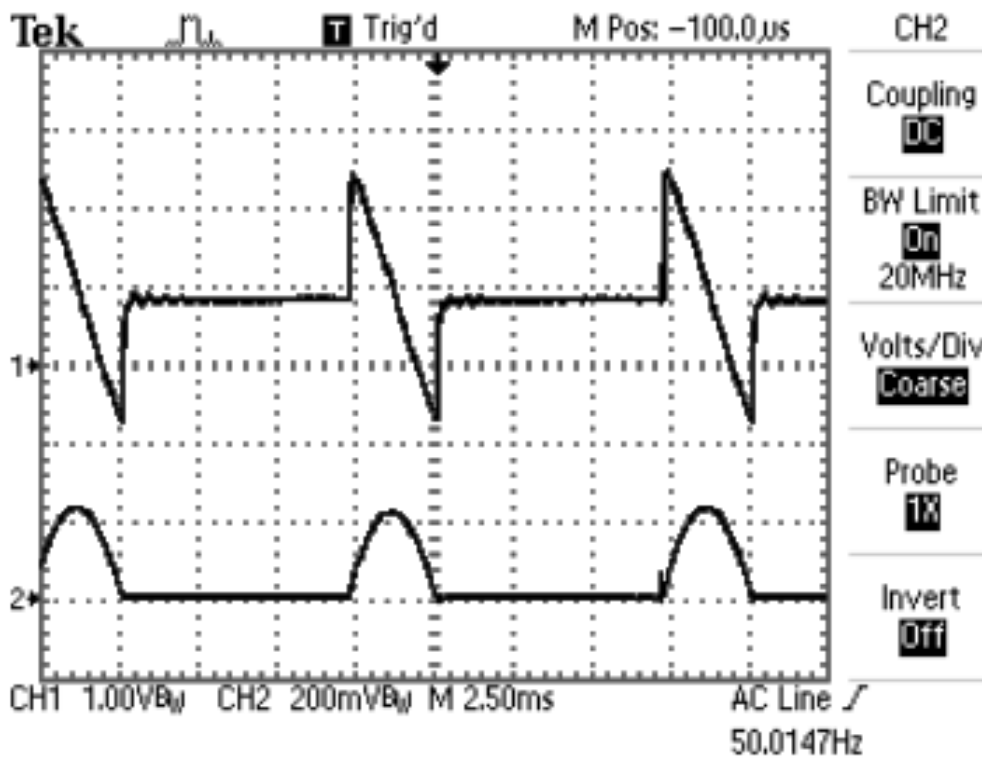
Παρατηρούμε στον παλμογράφο τις κυματομορφές τάσης, ρεύματος και ισχύος στην έξοδο της γέφυρας.

Η τάση παρουσιάζει μεγάλη γωνία έναυσης και μικρή E_a (ΑΗΕΔ), που είναι συνέπεια του μικρού αριθμού στροφών. Φαίνονται ακόμα καθαρά τα αρνητικά τμήματα της τάσης, που είναι χαρακτηριστικό γνώρισμα των πλήρως ελεγχόμενων γεφυρών.

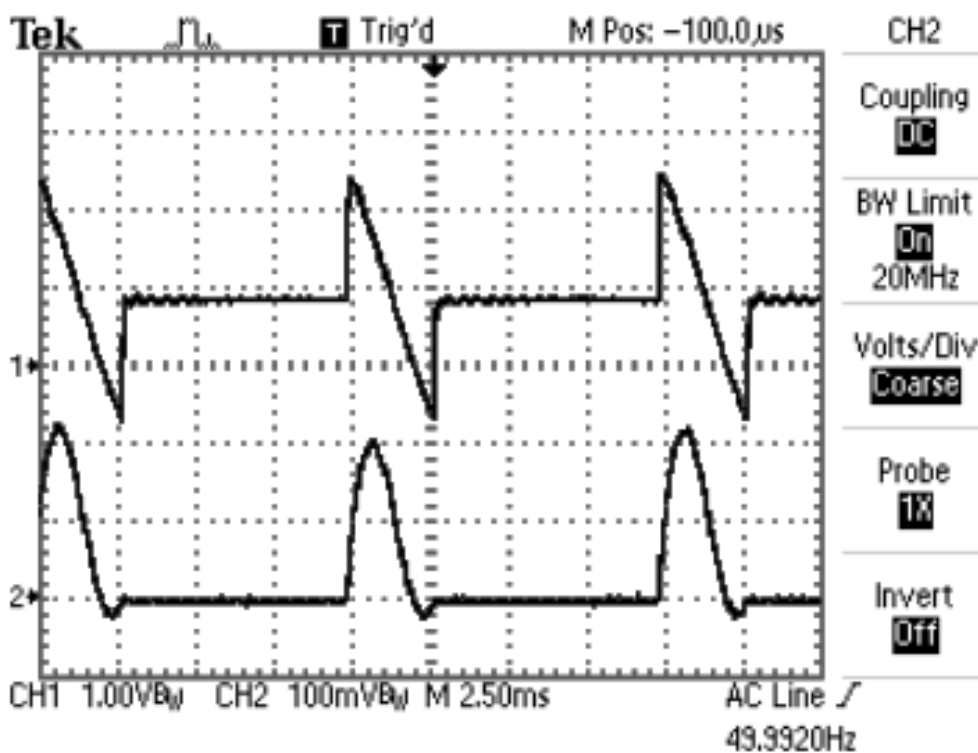
Το ρεύμα αποτελείται συνεχώς από θετικούς παλμούς οι οποίοι παρουσιάζουν ψηλότερο πλάτος και μεγαλύτερη διάρκεια, εξαρτώμενοι από το φορτίο, που κάθε στιγμή αντιμετωπίζει ο κινητήρας.

Η ισχύς ($p=vi$) έχει σ' αυτό το βήμα ένα μεγάλο θετικό μέρος και ένα μικρότερο αρνητικό. Η μέση ισχύς είναι εντούτοις θετική, δηλαδή ρέει από το δίκτυο προς τον κινητήρα και καταναλώνεται σε αυτόν, μετατρεπόμενη σε μηχανική κίνηση. Ο κινητήρας περιστρέφεται με λίγες στροφές, γιατί η μέση τάση τυμπάνου έχει μικρή τιμή.

Στα σχήματα 5.1α και 5.1β φαίνονται τα παλμογραφήματα της τάσης, του ρεύματος και της ισχύος στην έξοδο της γέφυρας του πειράματος που περιγράφηκε παραπάνω, δηλαδή λειτουργία στο πρώτο τεταρτημόριο του κινητήρα με λίγες στροφές και χωρίς μηχανικό φορτίο.



Σχήμα 5.1α Τάση και ρεύμα στην έξοδο της γέφυρας (I τεταρτημόριο)



Σχήμα 5.1β Τάση και ισχύς στην έξοδο της γέφυρας (I τεταρτημόριο)

Βήμα 2

Λειτουργία σε στάση

Στο βήμα 2 θα χρησιμοποιήσουμε τη βοηθητική μηχανή όχι σαν γεννήτρια, αλλά σαν κινητήρα που θα μπορεί να περιστρέφει την κύρια μηχανή αριστερόστροφα.

Ξεκινάμε την κύρια μηχανή, όπως στο βήμα 1 και την περιστρέφουμε με 700 rpm. Το ποτενσιόμετρο του περιοριστή ρεύματος ρυθμίζεται στο 40% περίπου.

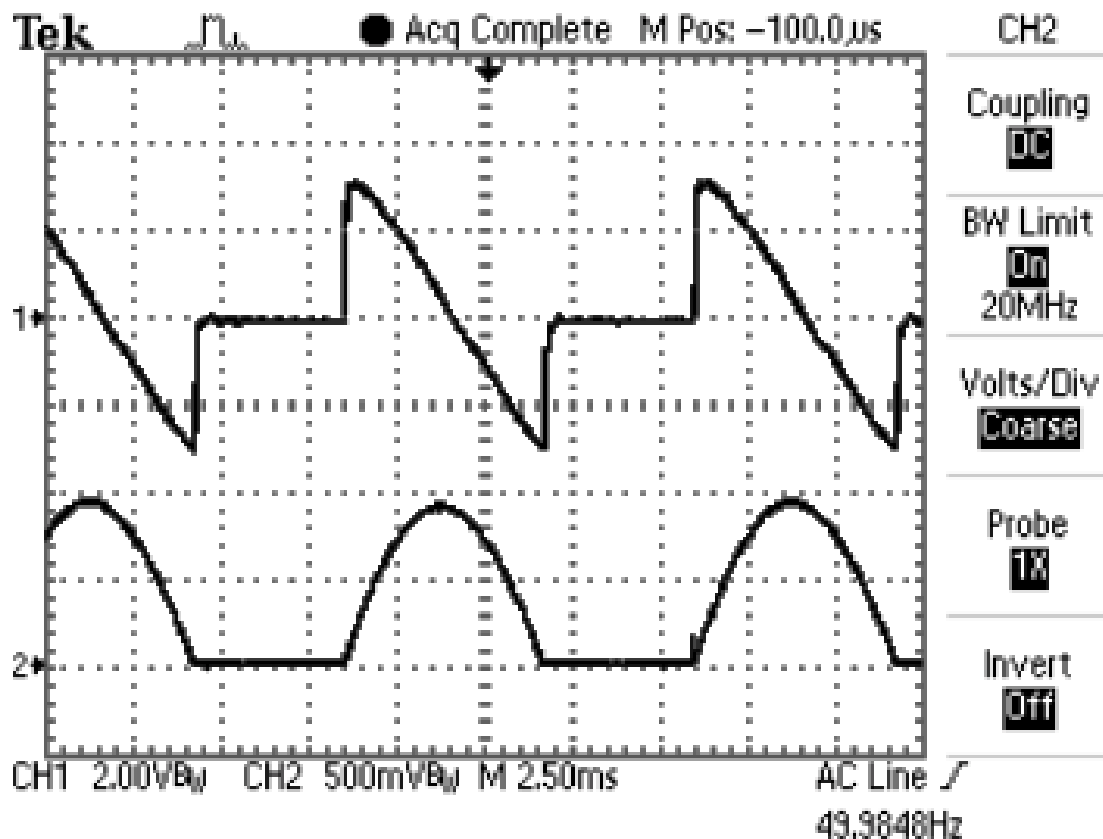
Τροφοδοτούμε αργά τη διέγερση του βοηθητικού κινητήρα, παρατηρώντας την αύξηση του ρεύματος και την ελάττωση των στροφών. Με το ποτενσιόμετρο του περιοριστή ρεύματος περιορίζουμε τη μέση τιμή του ρεύματος στα 4 A. Στη συνέχεια, τροφοδοτούμε αργά το τύμπανο του βοηθητικού κινητήρα μέχρι να σταματήσει η περιστροφή. Μπορούμε να παρατηρήσουμε τώρα τα εξής;

Η τάση παρουσιάζει ένα θετικό και ένα περίπου ίσο αρνητικό τμήμα με αποτέλεσμα να παρουσιάζει μέση τιμή περίπου μηδέν.

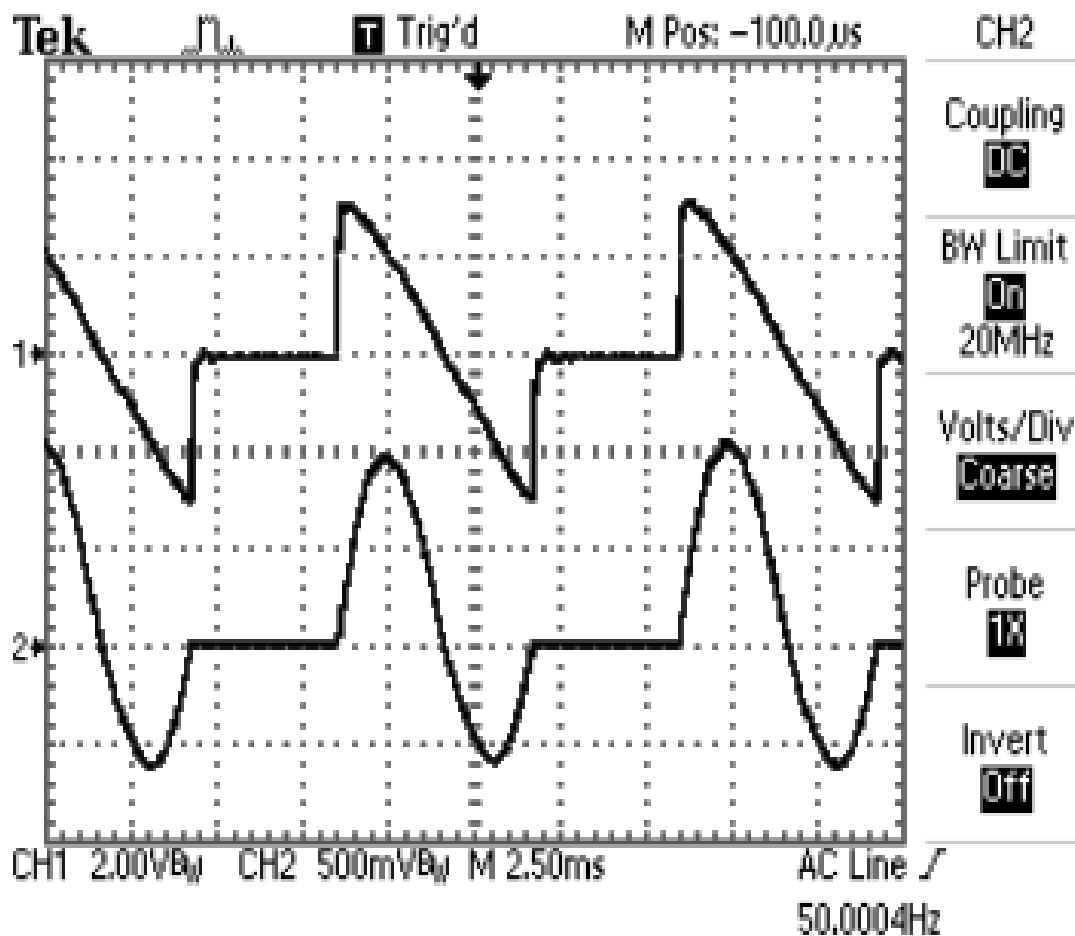
Καταγράφουμε τα ακόλουθα μεγέθη τυμπάνου του κινητήρα: V_{AV} , V_{rms}

Η στιγμιαία ισχύς εμφανίζεται με ένα θετικό και ένα σχεδόν ίσο αρνητικό τμήμα με συνέπεια η μέση ισχύς να είναι σχεδόν μηδενική. Ο κινητήρας δεν αναπτύσσει καμία μηχανική ισχύ, παρ' ότι απορροφά σημαντικό ρεύμα. Εξακολουθεί όμως να καταναλώνει λίγη ισχύ για να καλύψει τις ηλεκτρικές απώλειες χαλκού του.

Τα παλμογραφήματα που αποκαλύπτουν τη λειτουργική συμπεριφορά της μηχανής σε στάση φαίνονται στα σχήματα 5.2α και 5.2β.



Σχήμα 5.2α Τάση και ρεύμα στην έξοδο της γέφυρας (στάση)



Σχήμα 5.2β Τάση και ισχύς στην έξοδο της γέφυρας (στάση)

Βήμα 3

Λειτουργία στο IV τεταρτημόριο

Συνεχίζουμε να αυξάνουμε αργά την τάση τυμπάνου της βοηθητικής μηχανής. Παρατηρούμε πως ο βοηθητικός κινητήρας είναι τώρα πιο ισχυρός με αποτέλεσμα να περιστρέφει αριστερόστροφα την κύρια ηλεκτρική μηχανή.

Η κυματομορφή της τάσης στον παλμογράφο ολισθαίνει προς τα κάτω με συνέπεια να αποκτά αρνητική μέση τιμή.

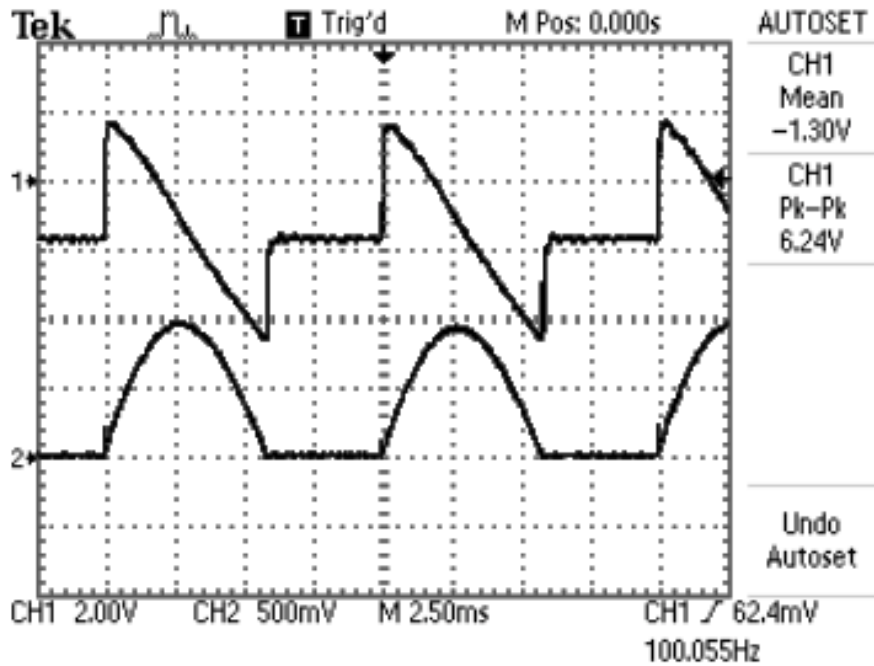
Το ρεύμα εξακολουθεί να παραμένει θετικό, όπως ακριβώς ήταν κατά το προηγούμενο βήμα της στάσης (περιοριστής ρεύματος στην ίδια θέση).

Η μορφή τώρα της στιγμιαίας ισχύος τυμπάνου έχει ένα μικρό θετικό τμήμα και ένα κατά πολύ μεγαλύτερο αρνητικό. Αυτό σημαίνει πως η μέση τιμή της είναι αρνητική. Η κατεύθυνση της ισχύος έχει αναστραφεί και ρέει από την κύρια ηλεκτρική μηχανή, που λειτουργεί σαν γεννήτρια, προς το δίκτυο παροχής της ηλεκτρικής ενέργειας.

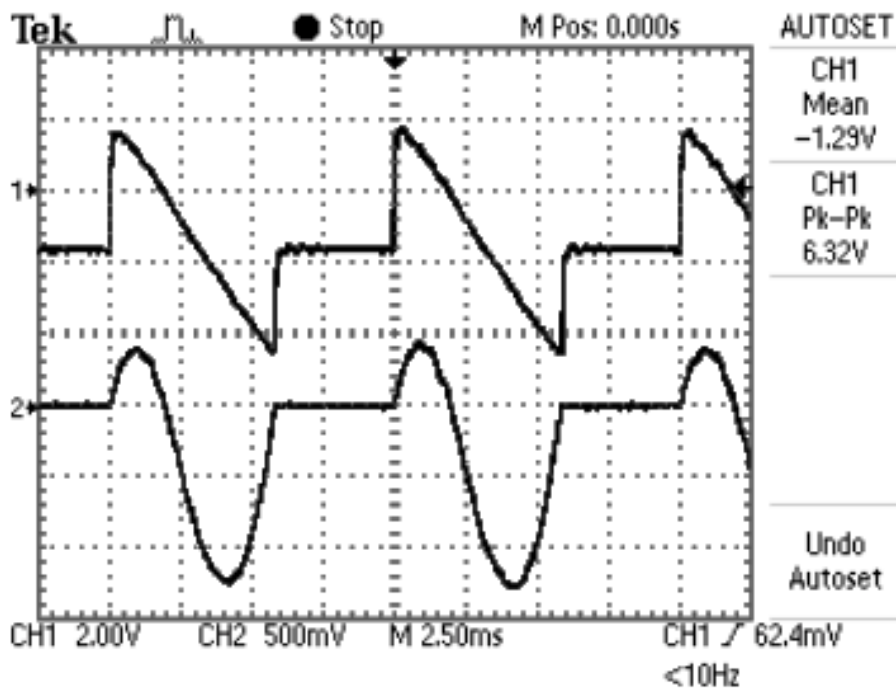
Η γεννήτρια φρενάρει την κίνηση που παρέχεται στον άξονά της και η ενέργεια πέδησης δεν χάνεται σε θερμότητα, αλλά επιστρέφει στο δίκτυο και με αυτό τον τρόπο ανακτάται.

Όλη η λειτουργία του κινητήριου συστήματος κατά το βήμα 3 είναι αυτό που ονομάζουμε λειτουργία στο τέταρτο τεταρτημόριο.

Οι κυματομορφές που συνδέονται με την λειτουργία στο τέταρτο τεταρτημόριο φαίνονται στα σχήματα 5.3α και 5.3β.



Σχήμα 5.3α Τάση και ρεύμα στην έξοδο της γέφυρας (IV τεταρτημόριο)



Σχήμα 5.3β Τάση και ισχύς στην έξοδο της γέφυρας (IV τεταρτημόριο)

Τα θυρίστορ κάθε ελεγχόμενης γέφυρας, είτε λειτουργεί σαν ανορθωτής (rectifier), (I, III τεταρτημόρια), είτε λειτουργεί σαν αντιστροφέας (inverter), (II, IV τεταρτημόρια), αλλάζουν κατάσταση (μετάβαση) από το δίκτυο. Δηλαδή η τάση του δικτύου, που εφαρμόζεται σε αυτά, αλλάζοντας πολικότητα τα μπλοκάρει, (τα σβήνει).

Στο βήμα αυτό θα μελετήσουμε, θεωρητικά μόνο, το εξής ερώτημα: τι θα συμβεί αν συνεχίσουμε να περιστρέφουμε τη μηχανή όλο και πιο γρήγορα, έτσι ώστε η μέση τάση που παράγει να γίνει αρνητικότερη (μεγαλύτερη σε απόλυτη τιμή) από το αρνητικό μέγιστο της εναλλασσόμενης τάσης;

Θα έχουμε ρεύμα που θα ρέει μέσα από ένα μόνο ζεύγος διαγώνιων θυρίστορ. Δυστυχώς το φαινόμενο της σβέσης δεν μπορεί να υπάρξει, γιατί το δυναμικό μπλοκαρίσματος πάνω στα θυρίστορ που άγουν χάνεται. Το ρεύμα συνεπώς θα συνεχίσει να αυξάνει μέχρι να καούν οι ασφάλειες προστασίας των θυρίστορ.

Ανάλογο φαινόμενο συμβαίνει, όταν διακόπτεται ξαφνικά η τάση του δικτύου.

ΠΡΟΣΟΧΗ! ΔΕΝ ΔΙΑΚΟΠΤΟΥΜΕ ΠΟΤΕ ΤΗΝ ΤΑΣΗ ΤΡΟΦΟΔΟΣΙΑΣ ΤΗΣ ΣΥΣΚΕΥΗΣ, ΟΤΑΝ ΓΙΝΕΤΑΙ ΠΕΔΗΣΗ, ΟΤΑΝ ΔΗΛΑΔΗ Ο ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΑΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΕΙ ΣΑΝ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΕΑΣ ΚΑΙ Η ΜΗΧΑΝΗ ΣΑΝ ΓΕΝΗΤΡΙΑ.

ΕΡΓΑΣΙΑ

1. Να σχεδιαστούν τα ηλεκτρικά κυκλώματα του συστήματος, όταν αυτό λειτουργεί στο IV τεταρτημόριο. Ποια είναι η κινητήρια μηχανή κατά τη λειτουργία στο IV τεταρτημόριο;
2. Να ευρεθούν οι γωνίες έναυσης στο βήμα 1 και στο βήμα 3 από τα αντίστοιχα παλμογραφήματα.
3. Να ευρεθεί η μέγιστη τιμή (πλάτος) της AC τάσης από το παλμογράφημα του σχήματος 5.2α, αν γνωρίζουμε ότι το σήμα της τάσης λήφθηκε με **probe x50**.
4. Να υπολογιστούν αναλυτικά η μέση και η ενεργός τιμή της τάσης από το παλμογράφημα του σχήματος 5.2α και να επιβεβαιωθούν οι υπολογισμοί με τις τιμές που μετρήθηκαν.
5. Να σχεδιαστούν σε μιλιμετρέ χαρτί η τάση στο βήμα 1, αν η επιλογή της σάρωσης του παλμογράφου είναι:
 - **time/div = 5 ms**
 - **time/div = 1 ms**

Άσκηση 6

Βιομηχανικός ρυθμιστής στροφών (4Q) κινητήρα Σ.Ρ. ξένης διέγερσης (Συσκευή 4Q2 CONTROL TECHNIQUES)

Σκοπός

Ο σκοπός αυτής της άσκησης είναι η μελέτη της λειτουργίας ενός βιομηχανικού ρυθμιστή στροφών για κινητήρα Σ.Ρ. ξένης διέγερσης ισχύος 2,75 kW. Ο ρυθμιστής στροφών 4Q2 της Control Techniques είναι μια ηλεκτρονική πλακέτα, που περιλαμβάνει τόσο τα ηλεκτρονικά ισχύος, όσο και τα ηλεκτρονικά ελέγχου. Τα ηλεκτρονικά ελέγχου είναι αναλογικά ηλεκτρονικά και όλες οι ρυθμίσεις γίνονται με τα ενσωματωμένα ποτενσιόμετρα (trimmers) στην πλακέτα της συσκευής. Η άσκηση 6 αποτελεί το κλείσιμο της μελέτης των κινητηρίων συστημάτων Σ.Ρ. αντιμετωπίζοντας έναν ρυθμιστή στροφών, όπως ακριβώς θα τον συναντήσουμε στην πράξη σε αντίστοιχα κινητήρια συστήματα της παραγωγικής διαδικασίας.

Οι βιομηχανικοί ρυθμιστές στροφών τροφοδοτούνται απ' ευθείας από τα δίκτυα, συνεπώς τα κυκλώματα ισχύος δεν είναι απομονωμένα και παραμένουν κατά την λειτουργία τους ενεργά ως προς τη γη. Σε αντίθεση με τους βιομηχανικούς ρυθμιστές, οι εκπαιδευτικές διατάξεις που συναντήσαμε μέχρι τώρα στο εργαστήριο διαθέτουν μετασχηματιστή απομόνωσης στην είσοδο. Η απομόνωση δυναμικού επιβάλλεται από τους κανονισμούς, για λόγους ασφαλείας.

Με την ολοκλήρωση της άσκησης αυτής αποκτούμε μια πραγματική εικόνα του μεγέθους ανάλογων ρυθμιστών στροφών, καθώς και του συνόλου των δυνατοτήτων ελέγχου της λειτουργίας των κινητηρίων συστημάτων Σ.Ρ. ξένης διέγερσης

1. ΓΕΝΙΚΑ

1.1 Περιγραφή

Η συσκευή 4Q2 έχει σχεδιαστεί για να λειτουργεί στα 4 τεταρτημόρια βιομηχανικούς κινητήρες συνεχούς ρεύματος ξένης διέγερσης ή μόνιμου μαγνήτη, ισχύος μέχρι 2,75 kW.

Η τροφοδοσία της συσκευής μπορεί να είναι φάση-ουδέτερος ($L_1 - N$), όταν συνδέουμε κινητήρες των 180 V, και φάση-φάση ($L_1 - L_2$) για κινητήρες των 320 V.

Η 4Q2 ενσωματώνει απομονωμένα κυκλώματα ανατροφοδότησης της τάσης τυμπάνου και της τάσης της ταχογεννήτριας. Επί πλέον υπάρχει εναλλακτική δυνατότητα ελέγχου της ταχύτητας ή της ροπής.

Η συσκευή διαθέτει προστασία από υπερφόρτιση. Η επανεκκίνηση μετά από υπερφόρτιση (reset), γίνεται από εξωτερικό N/O μπουτόν, ή με διακοπή της τροφοδοσίας για ένα ως δύο δευτερόλεπτα.

1.2 Προδιαγραφές

	V _{arm}	V _{field}
Supply 220/240 V	180	190/210
Supply 380/415 V	320	340/370

4Q2 Out. Amps average	12
AC Inputs, Amps RMS	25
AC Inputs Fuses (Amps)	32
220/240V Supply Motor kW	1,5
380/415V Supply Motor kW	2,75
Typical Watts Loss	50

Τάση εισόδου

220/240 ή 380 ή 415 Volts AC $\pm 10\%$, 50/60 Hz.

Τάση εξόδου

0-180V DC τύμπανο, 190/210V DC διέγερση.

0-320V DC τύμπανο, 340/370V DC διέγερση.

Υπερφόρτιση

150% του συνεχούς ρεύματος για 15 seconds.

Θερμοκρασία λειτουργίας

-10 ως +40 °C.

Υγρασία

85% R.H. στους 40 °C.

Υψόμετρο

Μείωση της ισχύος κατά 1%/100m σε υψόμετρο μεγαλύτερο των 1000m.

Μέθοδος ελέγχου

Δύο πλήρως ελεγχόμενες αντιπαράλληλες μονοφασικές γέφυρες.

Βάρος

3,6 Kg περίπου.

1.3 Είσοδοι ελέγχου

Start/Stop

N/O επαφή 0 σε +10V, κλειστή κατά την λειτουργία.

Αναφορά στροφών

Ποτενσιόμετρο 10K Ω , 0 / $\pm 10V$

Αναφορά ροπής

Ποτενσιόμετρο 20K Ω

Ανατροφοδοτήσεις (Feedback)

Η συσκευή μπορεί να λειτουργεί σε δύο καταστάσεις αυτομάτου ελέγχου.

- Με ανατροφοδότηση (εσωτερική) της τάσης τυμπάνου (**AVF**) με σκοπό να διατηρείται σταθερή η τάση τυμπάνου, ανεξάρτητα από τη μεταβολή του φορτίου. Στην περίπτωση αυτή, οι στροφές του κινητήρα ελαττώνονται, όταν αυξάνεται το φορτίο.
- Με ανατροφοδότηση (εξωτερική) της ταχογεννήτριας (**TACHO**) με σκοπό να διατηρούνται σταθερές οι στροφές, ανεξάρτητα από τη μεταβολή του φορτίου. Στην περίπτωση αυτή, η τάση τυμπάνου του κινητήρα αυξάνεται, όταν αυξάνεται το φορτίο.

1.4 Ρυθμίσεις

Μέγιστη ταχύτητα (max. speed)

65 - 100% της μέγιστης ταχύτητας.

Ελάχιστη ταχύτητα (min. speed)

0 – 50% της μέγιστης ταχύτητας. Η επιλογή της ελάχιστης ταχύτητας επιτυγχάνεται με ρύθμιση του ποτενσιόμετρου (min. speed), όταν το εξωτερικό ποτενσιόμετρο στροφών τεθεί στο μηδέν.

Ράμπα (ramp)

0,5 ως 15 sec, γραμμική. Η ράμπα είναι κοινή για την επιτάχυνση και την επιβράδυνση. Δεξιόστροφη περιστροφή του ποτενσιόμετρου ράμπας δίνει γρηγορότερη επιτάχυνση/επιβράδυνση, δηλαδή ελαττώνει τον χρόνο.

Αντιστάθμιση IR (IR Comp.)

Χρησιμοποιείται για την βελτίωση της ρύθμισης των στροφών, όταν η επιλογή λειτουργίας είναι η ανατροφοδότηση της τάσης τυμπάνου (AVF). Με το ποτενσιόμετρο αυτό μπορούμε να περιορίσουμε την πτώση των στροφών του κινητήρα, που εμφανίζεται, όταν αυτός φορτίζεται. Μεγάλη αντιστάθμιση IR προκαλεί ασταθή λειτουργία.

Περιοριστής ρεύματος (current limit)

0 – 150% του μέγιστου ρεύματος.

Ευστάθεια (stab)

Βελτιστοποιεί την ευστάθεια του συστήματος σε διαφορετικές συνθήκες φόρτισης.

Ενδείξεις

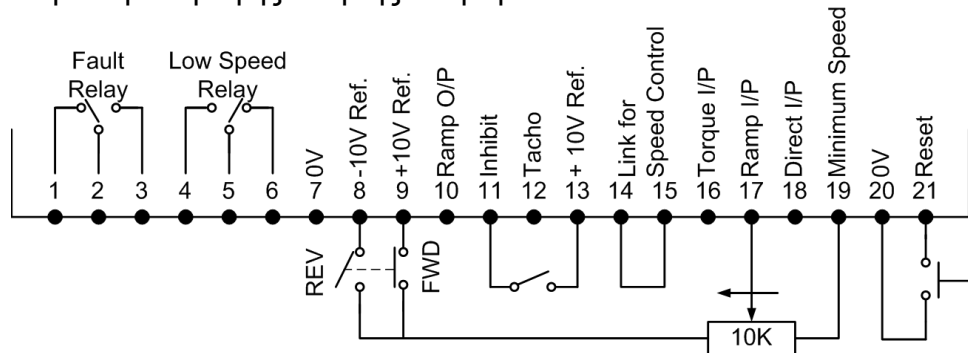
Υπάρχουν 4 φωτοδίοδοι (LEDs):

- Υπερφόρτιση
- Αναστολή λειτουργίας (stand by)
- Λειτουργία γέφυρας A
- Λειτουργία γέφυρας B

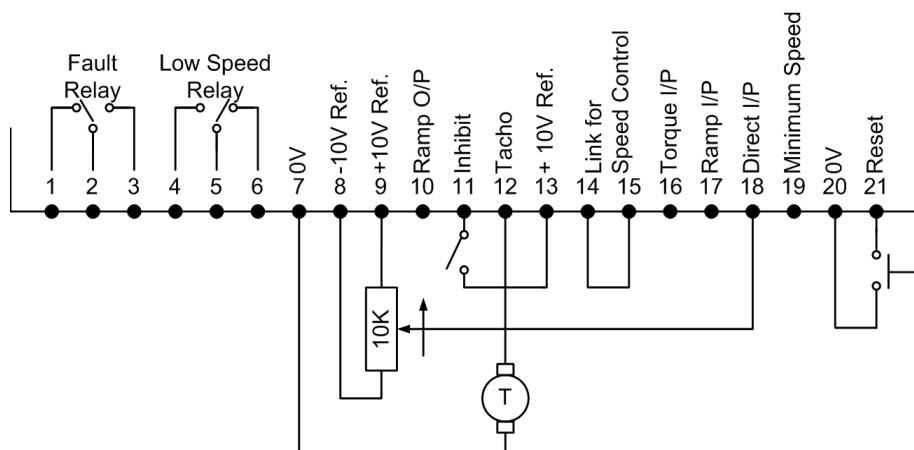
2. ΤΥΠΙΚΕΣ ΣΥΝΔΕΣΕΙΣ

2.1 Συνδέσεις ακροδεκτών ελέγχου

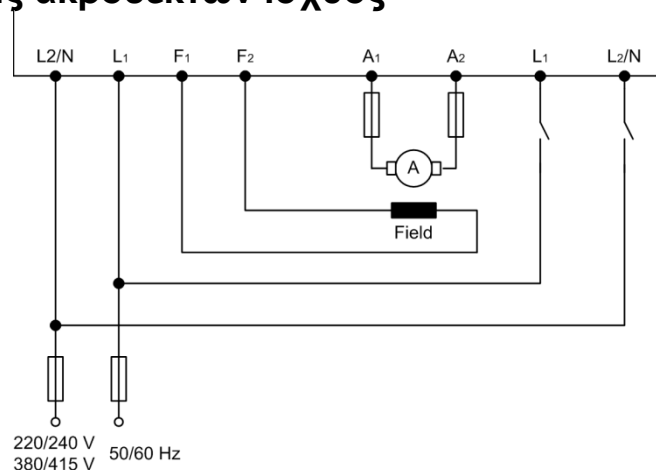
- Ανατροφοδότηση της τάσης τυμπάνου με επιλογή δεξιόστροφης ή αριστερόστροφης κίνησης και ράμπα.



- Ανατροφοδότηση ταχογεννήτριας με έλεγχο από το ποτενσιόμετρο εισόδου και προς τις δύο κατευθύνσεις (χωρίς ράμπα).



2.2 Συνδέσεις ακροδεκτών ισχύος



3. ΕΚΚΙΝΗΣΗ ΚΑΙ ΡΥΘΜΙΣΕΙΣ

Επιλογή ανατροφοδότησης Tacho ή AVF

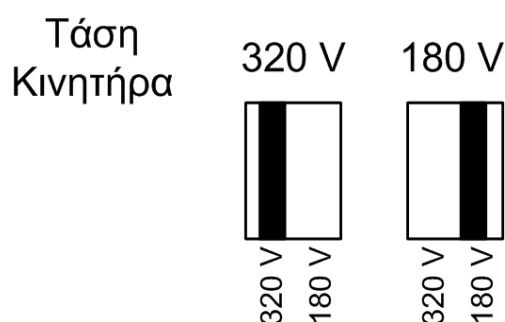
Για να λειτουργεί ο ρυθμιστής στροφών με ανατροφοδότηση της τάσης τυμπάνου, ο βραχυκυκλωτήρας (πάνω αριστερά στην πλακέτα) πρέπει να είναι στη θέση AVF. Αν απαιτείται ανατροφοδότηση της ταχύτητας, τότε συνδέουμε το βραχυκυκλωτήρα στη θέση TG και την τάση της ταχογεννήτριας στους ακροδέκτες ελέγχου 7 και 12. Επειδή η λειτουργία της διάταξης εξαρτάται από την πολικότητα του σήματος ανατροφοδότησης των στροφών, μόνο μια πραγματικά DC ταχογεννήτρια μπορεί να χρησιμοποιηθεί. Η τάση της ταχογεννήτριας πρέπει να έρχεται στη μονάδα με αντίθετη πολικότητα από την τάση αναφοράς. Σε αντίθετη περίπτωση το κινητήριο σύστημα λειτουργεί εκτός ελέγχου, ενώ ο κινητήρας υπερστρέφεται.

Έλεγχος στροφών/ροπής

Για κανονική λειτουργία σαν ελεγκτής ταχύτητας, χρειάζεται να βραχυκυκλωθούν οι ακροδέκτες 14 και 15. Στην περίπτωση που απαιτείται έλεγχος ροπής (ρεύματος), αφαιρείται το βραχυκύκλωμα 14,15 και το σήμα αναφοράς ροπής συνδέεται στον ακροδέκτη 16. Η 4Q2 θα ελέγχει το ρεύμα του τυμπάνου και στις δύο κατευθύνσεις και ο έλεγχος θα εξαρτάται από την πολικότητα και το επίπεδο του σήματος αναφοράς ροπής (ρεύματος). Το ποτενσιόμετρο περιοριστή ρεύματος θα εξακολουθεί να λειτουργεί, περιορίζοντας το εύρος του σήματος που εισέρχεται από το εξωτερικό στοιχείο ελέγχου ρεύματος. Η προστασία υπερφόρτισης θα εξακολουθεί να λειτουργεί κανονικά, αν η ζήτηση ρεύματος υπερβεί το 110% του μέγιστου ρεύματος της μονάδας.

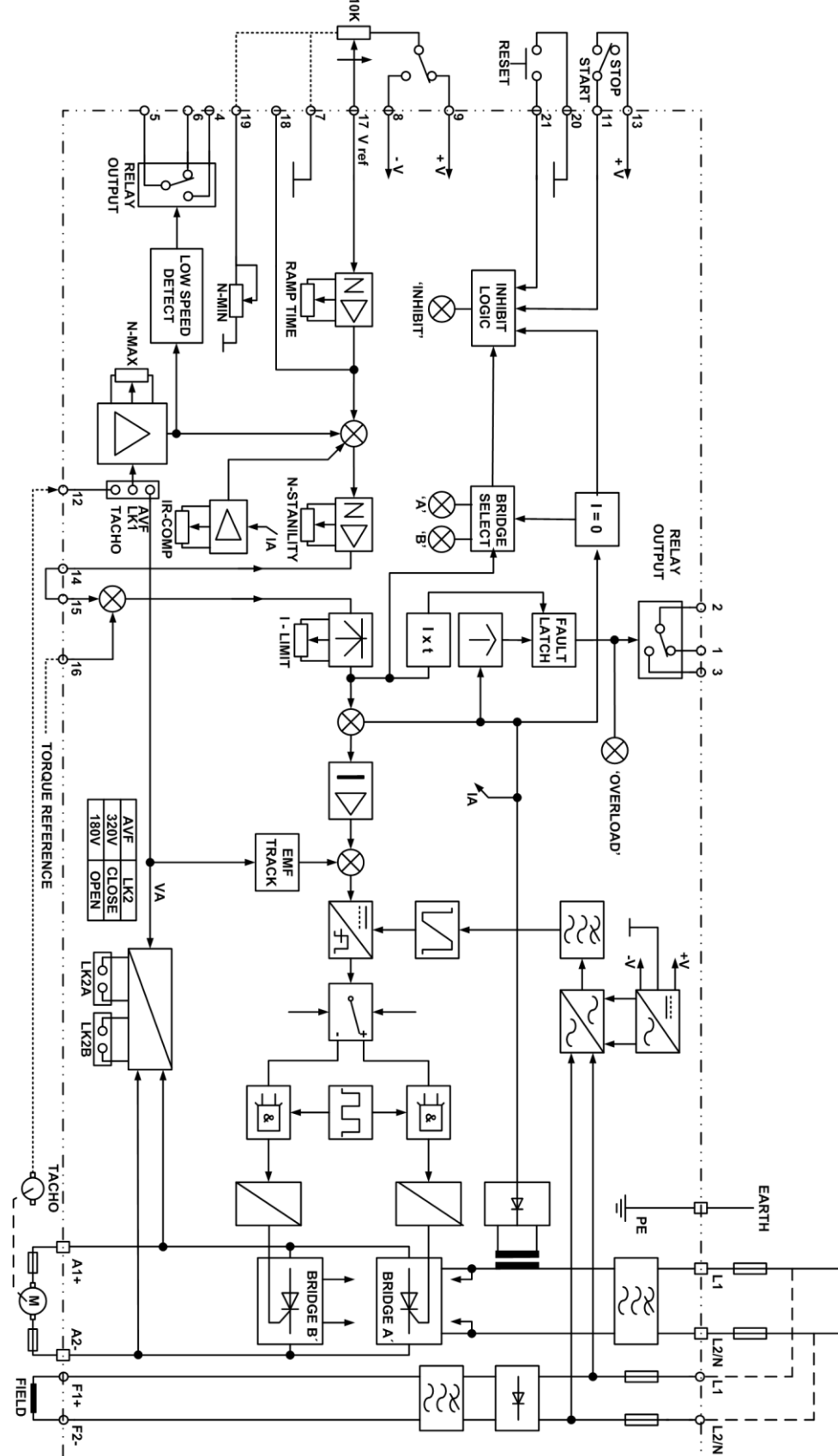
Επιλογή τάσης κινητήρα

Η τάση τυμπάνου λειτουργίας του κινητήρα επιλέγεται από ένα βραχυκυκλωτήρα, η θέση του οποίου φαίνεται παρακάτω:



4. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΚΥΚΛΩΜΑΤΩΝ

4.1 Χονδρικό διάγραμμα



4.2 Μετατροπείας ισχύος

- Μετατροπείας ισχύος

Τέσσερα στοιχεία (modules) αντιπαράλληλων θυρίστορ συνδυάζονται για να δημιουργηθούν δύο μονοφασικές πλήρως ελεγχόμενες γέφυρες με αντιπαράλληλη σύνδεση. Κάθε στοιχείο διαθέτει RC κύκλωμα για προστασία (dv/dt). Ένα βαρίστορ είναι συνδεδεμένο στην τροφοδοσία εισόδου για να αποκόπτει τις μεταβατικές υπερτάσεις.

Η μέτρηση του ρεύματος τυμπάνου γίνεται από έναν AC Μ/Σ έντασης και η ανατροφοδότηση της τάσης τυμπάνου παρέχεται από ένα απομονωμένο κύκλωμα μεγάλης σύνθετης αντίστασης.

Τα θυρίστορ παλμοδοτούνται μέσω τεσσάρων μετασχηματιστών παλμών με διπλά δευτερεύοντα τυλίγματα.

- Τροφοδοσίες

Η ισχύς για τα ηλεκτρονικά κυκλώματα ελέγχου τροφοδοτείται από τον μετασχηματιστή εισόδου. Ο Μ/Σ έχει δύο δευτερεύοντα τυλίγματα με μεσαία λήψη. Το ένα 100/0/100V για σήμα συγχρονισμού των κυκλωμάτων παλμοδότησης και το άλλο 20/0/20V με γέφυρα για την δημιουργία $\pm 20V$. Σταθεροποιητές τάσης μειώνουν την τάση στην τροφοδοσία των $\pm 15V$ για τους τελεστικούς ενισχυτές και τα λογικά κυκλώματα.

- Έλεγχος ταχύτητας

Το σήμα αναφοράς της ταχύτητας λαμβάνεται μέσω της ράμπας ή τροφοδοτείται απ ευθείας στον ενισχυτή σφάλματος ταχύτητας μέσω του ακροδέκτη 18. Το σήμα ανατροφοδότησης επιλέγεται από βραχυκυκλωτήρα είτε για τάση τυμπάνου, είτε για ταχογεννήτρια. Ένα κύκλωμα από αντιστάσεις και πυκνωτές λειτουργεί σταθεροποιητικά και το οποίο ρυθμίζεται από το ποτενσιόμετρο ευστάθειας (stab).

- Λογική επιλογής γέφυρας

Για να πετύχουμε, κατά κανόνα, λειτουργία 4 τεταρτημορίων πρέπει οι γέφυρες των θυρίστορ να επιλέγονται ανάλογα με την πολικότητα του σφάλματος ταχύτητας που προκύπτει στον ελεγκτή ταχύτητας. Αυτή αντανακλά την απαιτούμενη κατεύθυνση ροής του ρεύματος τυμπάνου.

Μία δίοδος βραχυκυκλώνει το δευτερεύον του μετασχηματιστή έντασης, που διαρρέεται από το ρεύμα τυμπάνου. Κάθε ροή ρεύματος προς το τύμπανο δημιουργεί στα άκρα της διόδου μία πτώση τάσης, με αποτέλεσμα να έχουμε ένα εξαιρετικά ευαίσθητο ανιχνευτή ρεύματος. Η μικρή αυτή πτώση τάσης ενισχύεται κατάλληλα και οδηγείται στον ελεγκτή ρεύματος, στη διάταξη υπερφόρτισης και στον επιλογέα της γέφυρας που παλμοδοτείται κάθε φορά. Η παλμοδότηση της γέφυρας που επιλέχθηκε δε γίνεται, παρά μόνο όταν μηδενιστεί το ρεύμα τυμπάνου, γεγονός που σημαίνει πως η προηγούμενη γέφυρα «έσβησε». Αμέσως αρχίζει η ροή ενός αντίθετου ρεύματος, το οποίο στην αρχή φρενάρει και στη συνέχεια επιταχύνει τον κινητήρα στην αντίθετη φορά περιστροφής.

- Προστασία υπερφόρτισης

Η συσκευή 4Q2 διαθέτει και προστασία υπερφόρτισης αντίστροφου χρόνου (θερμική προστασία) και προστασία από στιγμιαία υπερφόρτιση (σφάλματα).

4.3 Μετρήσεις

Χρειάζεται προσοχή όταν χρησιμοποιούμε όργανα μετρήσεων γιατί, αν και οι ακροδέκτες εισόδου στο τμήμα ελέγχου έχουν ηλεκτρική απομόνωση, τα κυκλώματα του τμήματος ισχύος δεν έχουν. Εξ άλλου, τόσο το ρεύμα, όσο και η τάση εξόδου δεν είναι καθαρά DC. Αυτό μπορεί να δώσει εσφαλμένες μετρήσεις, όταν χρησιμοποιούμε συμβατικά όργανα και οι ενδείξεις του AC ρεύματος να διαφέρουν σημαντικά από τις ενδείξεις του ρεύματος τυμπάνου στην DC πλευρά. Η διαφορά μεταξύ των δύο ενδείξεων μεταβάλλεται ανάλογα με την τιμή της ταχύτητας, που έχουμε επιλέξει. Για ακριβείς μετρήσεις πρέπει να χρησιμοποιούνται όργανα κατάλληλα για μετρήσεις μη καθαρών μεγεθών Σ.Ρ., καθώς και αμπεροτσιμπίδες Hall Effect.

5. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΣΦΑΛΜΑΤΩΝ

Σφάλμα	Πιθανή αιτία	Ενέργεια
Αδυναμία εκκίνησης	-τροφοδοσία -ασφάλειες καμένες	Αλλαγή ασφαλειών με τις προτεινόμενες από τον κατασκευαστή
Ο κινητήρας δε γυρίζει Inhibit LED on	-μπουτόν STOP -ανάβει το LED Overcurrent -δεν υπάρχει σήμα αναφοράς στροφών	Έλεγχος για βραχυκύκλωμα προς γη. Έλεγχος ασφαλειών τυμπάνου Reset. Έλεγχος συνδέσεων στους ακροδέκτες 8 και 9.
Ο κινητήρας γυρίζει για λίγο και σταματά Overload LED on	-λάθος ρύθμιση του current limit -υπερφόρτιση κινητήρα -σφάλμα στη διέγερση	
Ο κινητήρας γυρίζει μόνο στη μέγιστη ταχύτητα		
Κινητήριο σύστημα ασταθές	-λάθος ρύθμιση του ποτενσιόμετρου stability -πολύ μεγάλη αντιστάθμιση IR	Ρύθμιση του ποτενσιόμετρου stab. για βέλτιστη ευστάθεια. Ρύθμιση του ποτενσιόμετρου IR comp.

Άσκηση 7

Ασύγχρονος τριφασικός κινητήρας κλωβού

Σκοπός

Σκοπός της άσκησης είναι η υπενθύμιση των βασικών αρχών λειτουργίας του τριφασικού ασύγχρονου κινητήρα κλωβού. Μελετούμε τη συμπεριφορά του κινητήρα, όταν αυτός τροφοδοτείται από τριφασική πηγή με σταθερή τάση και συχνότητα και λειτουργεί σε όλη την κλίμακα φόρτισης, από την εν κενώ λειτουργία μέχρι μία μικρή υπερφόρτιση. Τελικός στόχος είναι η συγκριτική μελέτη λειτουργίας της ίδιας μηχανής, όταν αυτή θα τροφοδοτείται από ρυθμιστή στροφών με έλεγχο V/f , που θα πραγματοποιηθεί στην επόμενη άσκηση.

Συνοπτική θεωρία

Η κατασκευή των τριφασικών ασύγχρονων μηχανών διαφέρει σημαντικά από αυτή των μηχανών συνεχούς ρεύματος, τόσο στο σταθερό τμήμα της ηλεκτρικής μηχανής (στάτης), όσο και στο περιστρεφόμενο (δρομέας).

Ο στάτης των τριφασικών ασύγχρονων μηχανών περιλαμβάνει ένα τριφασικό χάλκινο τύλιγμα, που τοποθετείται περιφερειακά στις εσωτερικές αυλακώσεις του σιδηρομαγνητικού υλικού. Το σιδηρομαγνητικό υλικό του στάτη, που αποτελείται από πολλά μονωμένα σιδηρελάσματα για τον περιορισμό των μαγνητικών απωλειών, είναι το σασί της ηλεκτρικής μηχανής.

Η κατασκευή του δρομέα της ηλεκτρικής τριφασικής μηχανής καθορίζει τα δύο είδη αυτής, που είναι:

- Μηχανή βραχυκυκλωμένου δρομέα ή κλωβού με τύλιγμα αποτελούμενο από βραχυκυκλωμένες μπάρες χυτοπρεσσαριστού αλουμινίου.
- Μηχανή δακτυλιοφόρου δρομέα με τριφασικό χάλκινο τύλιγμα, ανάλογο με αυτό του στάτη.

Οι ασύγχρονοι κινητήρες κλωβού παρουσιάζουν σημαντικά πλεονεκτήματα απέναντι στους δακτυλιοφόρους, όπως πολύ φθηνή κατασκευή δρομέα, πολύ μεγάλη αξιοπιστία λειτουργίας σε δύσκολες συνθήκες (υπερφορτίσεις, δυσμενή περιβάλλοντα λειτουργίας κλπ) και μηδενική ανάγκη συντήρησης.

Τα παραπάνω πλεονεκτήματα έχουν κάνει τον ασύγχρονο τριφασικό κινητήρα κλωβού να κατέχει το μεγαλύτερο ποσοστό των εφαρμογών στην ηλεκτρική κίνηση. Επί πλέον, τα πλεονεκτήματα της μηχανής σε συνδυασμό με την ραγδαία εξέλιξη των ηλεκτρονικών ρυθμιστών στροφών συντελούν στην ολοένα αυξανόμενη χρήση τους στα αυτοματοποιημένα ηλεκτρικά κινητήρια συστήματα.

Η μαγνητική ροή Φ στους κινητήρες εναλλασσόμενου ρεύματος (AC) είναι στρεφόμενη σε σύγκριση με τη στατική μαγνητική ροή των κινητήρων συνεχούς ρεύματος (DC). Η στρεφόμενη μαγνητική ροή, που διατρέχει το εσωτερικό της ηλεκτρικής μηχανής, δημιουργείται όταν το τριφασικό τύλιγμα του στάτη τροφοδοτηθεί από τριφασική πηγή τάσης. Οι τριφασικές πηγές

τάσης μπορεί να είναι είτε τα τριφασικά δίκτυα, είτε οι τριφασικοί στατοί ηλεκτρονικοί μετατροπείς, που ονομάζονται αντιστροφείς τάσης (inverters) ή μετατροπείς συχνότητας (frequency converters).

Η ταχύτητα περιστροφής του μαγνητικού πεδίου των ηλεκτρικών μηχανών καλείται **σύγχρονη ταχύτητα n_s [rps]** και δίνεται από τη σχέση:

$$n_s = \frac{f}{p}$$

όπου:

f : συχνότητα τάσης τροφοδοσίας [Hz]

p : αριθμός ζευγών των μαγνητικών πόλων της μηχανής

Η κίνηση της στρεφόμενης μαγνητικής ροής κατά μήκος των αγωγών του δρομέα επάγει σε αυτούς τάση και επειδή αυτοί είναι βραχυκυκλωμένοι, ρέει ρεύμα. Η αλληλεπίδραση των ρευμάτων του δρομέα με τη μαγνητική ροή προκαλεί ροπή στην ίδια φορά με το στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο, με αποτέλεσμα την περιστροφή του δρομέα.

Ο δρομέας πρέπει να περιστρέφεται πάντα με μικρότερη ταχύτητα από τη σύγχρονη ταχύτητα, για να επάγονται ρεύματα και ροπή σε αυτόν. Η σχετική διαφορά της ταχύτητας περιστροφής του δρομέα σε σχέση με την σύγχρονη ταχύτητα περιστροφής της μαγνητικής ροής του στάτη ονομάζεται **ολίσθηση s** .

$$s = \frac{\text{σύγχρονη ταχύτητα} - \text{ταχύτητα δρομέα}}{\text{σύγχρονη ταχύτητα}} = \frac{n_s - n_r}{n_s}$$

Η συχνότητα των επαγόμενων ρευμάτων στο δρομέα είναι μικρότερη από τη συχνότητα των ρευμάτων του στάτη, λόγω της περιστροφής του δρομέα σε σχέση με τον ακίνητο στάτη.

$$f_2 = s f_1$$

όπου ο δείκτης 1 αναφέρεται στο στάτη (πρωτεύον) και ο δείκτης 2 στο δρομέα (δευτερεύον).

Η ισχύς που μεταφέρεται κατά μήκος του διακένου της ηλεκτρικής μηχανής πρέπει να συσχετίζεται με την περιστρεφόμενη ροή. Η ισχύς διακένου είναι το γινόμενο της ροπής επί τη σύγχρονη γωνιακή ταχύτητα.

$$P_{\text{διακενου}} = T \omega_s$$

Η μηχανική ισχύς εξόδου της μηχανής, όταν αγνοήσουμε τις μηχανικές απώλειες τριβών είναι:

$$P_{\text{μηχανική}} = T \omega_r$$

Αν επιλύσουμε τη σχέση της ολίσθησης ως προς τις στροφές του δρομέα προκύπτει:

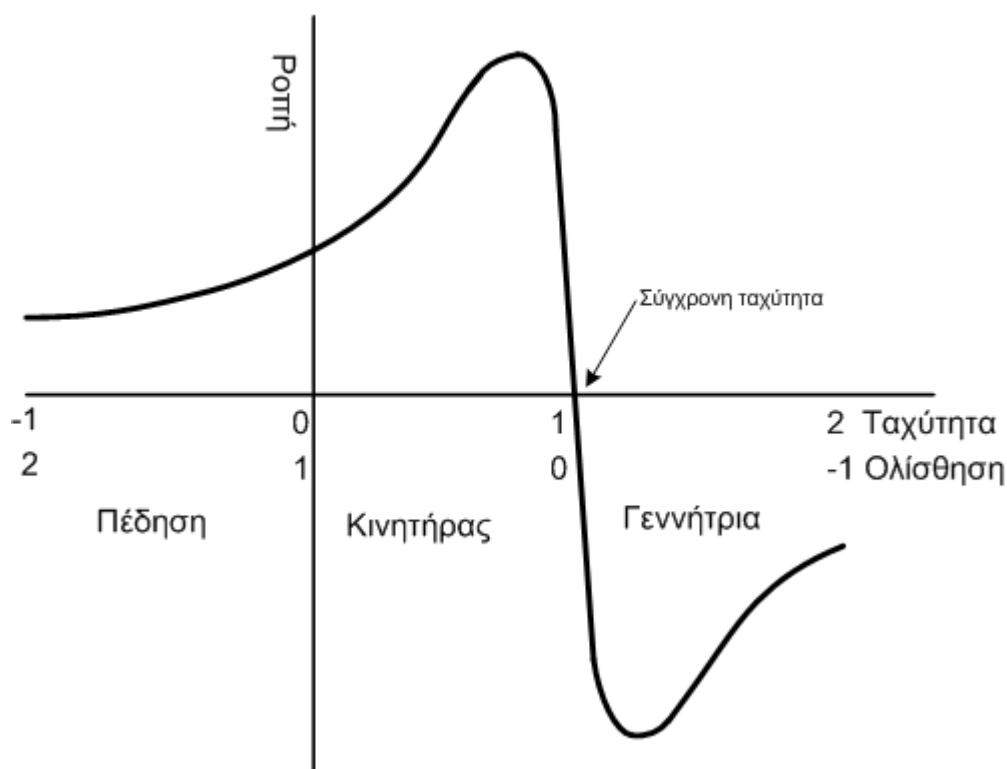
$$n_r = \frac{f}{p} [1 - s]$$

Για να μεταβληθούν συνεπώς οι στροφές του ασύγχρονου κινητήρα, πρέπει να μεταβληθούν οι στροφές του μαγνητικού πεδίου, οι οποίες μεταβάλλονται ανάλογα με τη συχνότητα της τάσης τροφοδοσίας. Αφού όμως τα δίκτυα παρέχουν την ηλεκτρική ενέργεια με σταθερή συχνότητα (50 ή 60 Hz), προκύπτει η ανάγκη δημιουργίας πηγών παροχής εναλλασσόμενης τάσης μεταβλητής συχνότητας για να μπορούμε να ρυθμίζουμε τις στροφές των ασύγχρονων κινητήρων.

Η χαρακτηριστική ροπής-στροφών της ασύγχρονης μηχανής παρουσιάζει, στην πλήρη της μορφή, τρεις περιοχές λειτουργίας, τον κινητήρα, τη γεννήτρια και την πέδηση, όπως φαίνεται στο σχήμα 7.1.

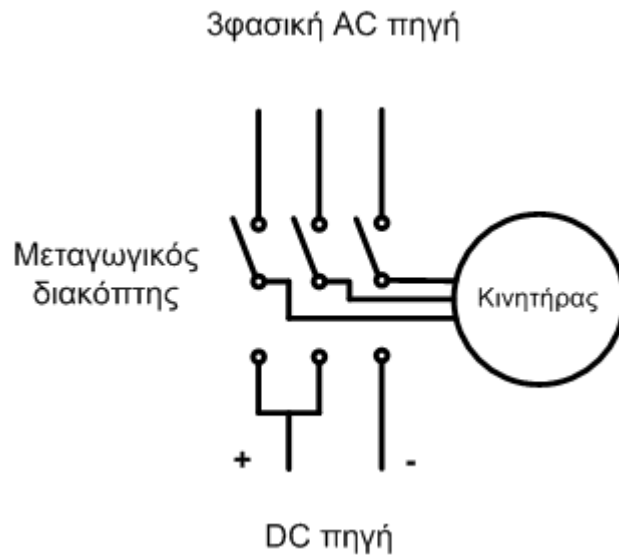
Αν η ασύγχρονη μηχανή περιστρέφεται από εξωτερικά μέσα με στροφές μεγαλύτερες από τις σύγχρονες, η ολίσθηση γίνεται αρνητική, η ροπή αντιστρέφεται και η μηχανή επιστρέφει στο δίκτυο ισχύ με έναν συντελεστή ισχύος χωρητικό. Η χαρακτηριστική ροπής της μηχανής σαν γεννήτρια είναι στην ουσία η αντίστροφη χαρακτηριστική που παρουσιάζει η μηχανή σαν κινητήρας, διότι εφαρμόζονται οι ίδιες εξισώσεις, αλλά με αρνητική ολίσθηση. Το ίδιο συμβαίνει και όταν ελαττώνουμε τη συχνότητα για να ελαττώσουμε τις στροφές. Η μηχανή λειτουργεί σαν γεννήτρια μέχρι ο αριθμός των στροφών να μειωθεί κάτω από τον καινούργιο σύγχρονο αριθμό στροφών.

Σε κατάσταση πέδησης μπορεί βρεθεί ένας περιστρεφόμενος ασύγχρονος κινητήρας, αντιστρέφοντας τη φορά του στρεφόμενου μαγνητικού πεδίου αντιμεταθέτοντας την τροφοδοσία σε δύο από τους τρεις ακροδέκτες στο ακροκιβώτιο. Καθώς το πεδίο και ο δρομέας στρέφονται τότε σε αντίθετες φορές, η ολίσθηση γίνεται μεγαλύτερη από τη μονάδα, δίνοντας τη χαρακτηριστική που φαίνεται στο σχήμα 7.1.



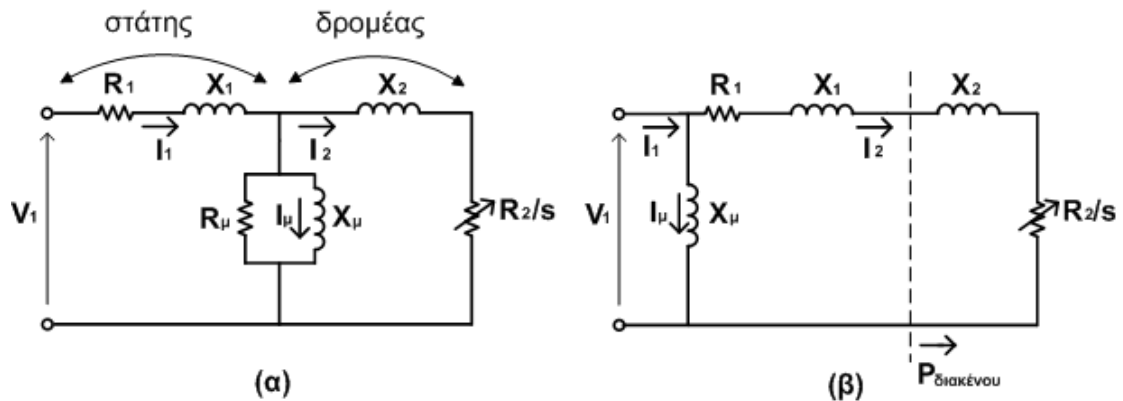
Σχήμα 7.1 Πλήρης χαρακτηριστική ροπής-ταχύτητας με σταθερή συχνότητα

Ένας αποτελεσματικός τρόπος για την πέδηση του επαγωγικού κινητήρα είναι να αποσυνδεθεί από την εναλλασσόμενη πηγή και να συνδεθεί σε κατάλληλη πηγή συνεχούς, όπως φαίνεται στο σχήμα 7.2. Η κατανομή του ρεύματος είναι ταυτόσημη με αυτή του εναλλασσόμενου, όταν μία φάση έχει τη μέγιστη τιμή του ρεύματος. Το μαγνητικό πεδίο είναι τώρα στάσιμο και η μηχανή φρενάρει γρήγορα, λειτουργώντας σαν βραχυκυκλωμένη γεννήτρια συνεχούς ρεύματος. Η κινητική ενέργεια των στρεφόμενων μαζών μετατρέπεται σε θερμότητα Joule στα τυλίγματα της μηχανής.



Σχήμα 7.2 Πέδηση με συνεχές ρεύμα (DC braking)

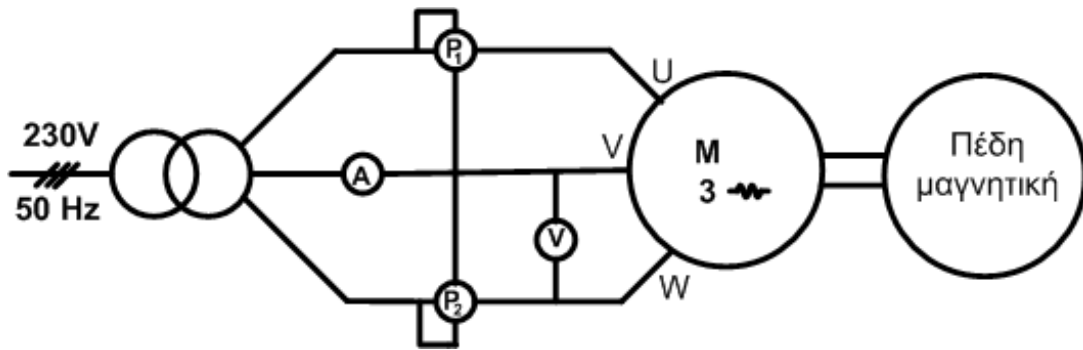
Για τη μελέτη της λειτουργίας του τριφασικού ασύγχρονου κινητήρα στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας χρησιμοποιούμε το ισοδύναμο κύκλωμα μιας φάσης. Το ηλεκτρικό ισοδύναμο κύκλωμα είναι ένα ηλεκτρικό μοντέλο που αποτυπώνει τη διακίνηση και μετατροπή της ισχύος στην ηλεκτρική μηχανή. Στο σχήμα 7.3 φαίνονται δύο ισοδύναμα κυκλώματα. Το (α) είναι το πλήρες ισοδύναμο κύκλωμα, ενώ το (β) είναι ένα απλοποιημένο ισοδύναμο κύκλωμα, με τη χρήση του οποίου απλοποιούνται κατά πολύ οι υπολογισμοί των ρευμάτων του κυκλώματος.



Σχήμα 7.3 (α) πλήρες ισοδύναμο κύκλωμα (β) απλοποιημένο κύκλωμα

Πειραματικό μέρος


Το κινητήριο σύστημα σε αυτή την άσκηση αποτελείται από τον ασύγχρονο τριφασικό κινητήρα και μία μαγνητική πέδη στον ίδιο άξονα για να φορτίζουμε τον κινητήρα μας. Το κινητήριο σύστημα μαζί με τα απαραίτητα όργανα μετρήσεων για τη μελέτη της λειτουργίας του ασύγχρονου κινητήρα φαίνεται στο σχήμα 7.4. Στη μονάδα ελέγχου της μαγνητικής πέδης υπάρχει ροτόμετρο για τη μέτρηση της ροπής στον άξονα του κινητήρα (Σχ. 7.6).



Σχήμα 7.4 Κύκλωμα για τη μελέτη της λειτουργίας του ασύγχρονου κινητήρα

Πραγματοποιούμε το κύκλωμα του Σχ. 7.4. Ξεκινάμε τον κινητήρα απ ευθείας και τον φορτίζουμε διαδοχικά με τη βοήθεια της μαγνητικής πέδης, καταγράφοντας σε πίνακα τα παρακάτω μεγέθη:

- Τάση πολική V
- Ρεύμα πολικό ή γραμμής I
- Πραγματική ισχύς (μέθοδος Arron) $P=P_1 \pm P_2$
- Ροπή T
- Στροφές n

 Lucas-Nuelle Lehr- und Meßgeräte GmbH Germany - 50170 Kerpen - Siemensstr. 2			
SE2673-1H	VDE 0530	IP: 20	Is.Kl. : F
Δ / Y	U: 230 / 400 V	I: 4,7 / 2,7 A	
Mot. DS	1 kW	cos :	0,75
	1400 1/min	f :	50 Hz
U_{err} :	I_{err} :	Made in Germany	
C_A :	C_B :		

Σχήμα 7.5 Πινακίδα ασύγχρονου τριφασικού κινητήρα κλωβού



Σχήμα 7.6 Μονάδα ελέγχου μαγνητικής πέδης

ΕΡΓΑΣΙΑ

Μελέτη συμπεριφοράς γραμμικού ηλεκτρικού φορτίου

1. Συμπληρώστε για κάθε βήμα φόρτισης του επαγωγικού κινητήρα τον πίνακα των μετρήσεων με τα παρακάτω μεγέθη:
 - Ενεργός ισχύς P
 - Άεργος ισχύς Q
 - Φαινόμενη ισχύς S
 - Συντελεστής ισχύος κινητήρα: $\cos\varphi$
 - Μηχανική ισχύς κινητήρα: $P_{μηχ}$
 - Βαθμός απόδοσης κινητήρα: α
2. Να σχεδιαστούν σε μιλιμετρέ χαρτί οι παρακάτω συναρτήσεις :
 - $I = f(P_{μηχ})$
 - $T = f(P_{μηχ})$
 - $\cos\varphi = f(P_{μηχ})$
 - $\alpha = f(P_{μηχ})$
 - $T = f(n)$
3. Να σχολιαστούν οι συναρτήσεις $I = f(P_{μηχ})$ & $\cos\varphi = f(P_{μηχ})$
4. Γιατί κατά την εν κενώ λειτουργία του κινητήρα η ένδειξη του ενός βατομέτρου είναι αρνητική και τι συμβαίνει όταν η ένδειξη ενός βατομέτρου είναι μηδέν;

Άσκηση 8

Έλεγχος Ασύγχρονου τριφασικού κινητήρα (Εκπαιδευτική Συσκευή SO 3636-5E LUCAS-NULLE)

Σκοπός

Ο σκοπός της άσκησης είναι η μελέτη των βασικών διαδικασιών που απαιτούνται για τον έλεγχο των στροφών των ασύγχρονων τριφασικών ή επαγωγικών τριφασικών κινητήρων. Η μελέτη εστιάζεται αποκλειστικά στον τριφασικό ασύγχρονο κινητήρα βραχυκυκλωμένου δρομέα ή κλωβού.

Στην άσκηση αυτή χρησιμοποιούμε την εκπαιδευτική διάταξη SO 3636-5E της γερμανικής εταιρείας LUCAS-NULLE. Η διάταξη είναι ένας εκπαιδευτικός ρυθμιστής στροφών, που ενσωματώνει έναν τριφασικό αντιστροφέα τάσης (inverter), ο έλεγχος του οποίου βασίζεται στην ταυτόχρονη μεταβολή της τάσης και της συχνότητας εξόδου, δηλαδή της τάσης και της συχνότητας τροφοδοσίας του κινητήρα. Η παραπάνω μέθοδος ελέγχου των στροφών των ασύγχρονων κινητήρων είναι γνωστή σαν «**μέθοδος V/f**».

Ο σκοπός της άσκησης ολοκληρώνεται με την εργασία, στην οποία θα επιχειρηθεί η σύγκριση με τις μετρήσεις της άσκησης 7, έτσι ώστε να καταδειχθούν οι ομοιότητες και οι διαφορές στη λειτουργία του κινητήρα, όταν αυτός τροφοδοτείται από τις δύο διαφορετικές πηγές.

Συνοπτική θεωρία

Είναι γνωστό πως για να ρυθμιστούν οι στρόφες σε έναν επαγωγικό κινητήρα κλωβού πρέπει να μεταβληθεί η ταχύτητα του στρεφόμενου μαγνητικού πεδίου, δηλαδή να μεταβληθεί η συχνότητα της τάσης τροφοδοσίας.

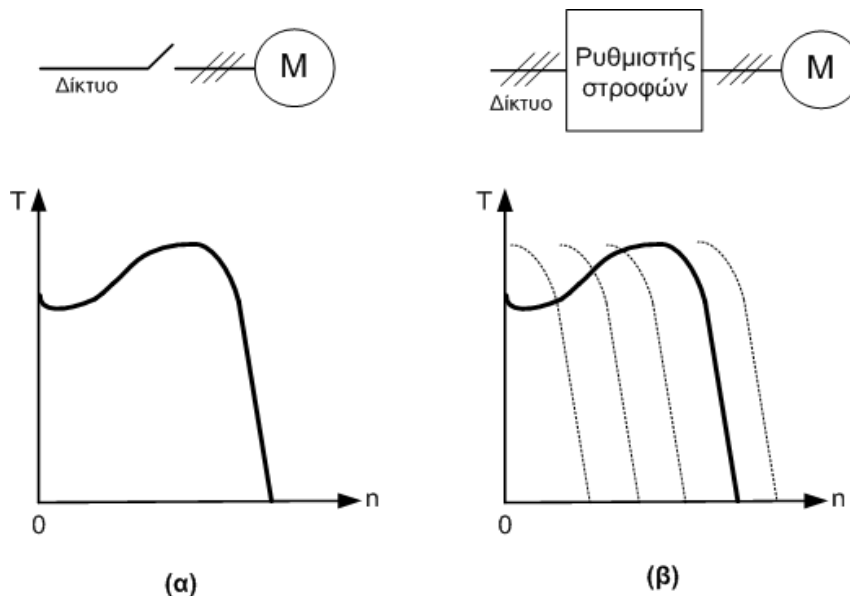
Η μεταβολή όμως στη συχνότητα τροφοδοσίας επιφέρει μεταβολές στις εμπεδήσεις των πηνίων του κινητήρα, με αποτέλεσμα να προκαλούνται μεταβολές στο ρεύμα μαγνήτισης και συνεπώς μεταβολές στο απορροφούμενο από τη μηχανή ρεύμα. Είναι απαραίτητο να διατηρείται η μαγνητική ροή στη βέλτιστη τιμή της, ακριβώς κάτω από το επίπεδο του μαγνητικού κορεσμού, εφ' ενός για την μέγιστη εκμετάλλευση των μαγνητικών κυκλωμάτων της μηχανής και αφ' ετέρου για την ελαχιστοποίηση του απορροφούμενου ρεύματος για τη δημιουργία ροπής (η ροπή είναι ανάλογη του γινομένου: ρεύμα x μαγνητική ροή).

Σύμφωνα λοιπόν με την παραπάνω ανάλυση, πρέπει να μεταβάλλεται και η τάση παράλληλα με τη συχνότητα έτσι ώστε να διατηρούνται τα μαγνητικά χαρακτηριστικά της μηχανής αναλλοίωτα σε κάθε μεταβολή της ταχύτητας περιστροφής του δρομέα. Για παράδειγμα, ένας κινητήρας με ονομαστικές τιμές 400V, 50Hz χρειάζεται να τροφοδοτείται με 320V, 40Hz για να ελαττώνονται κατά 20% οι στρόφες του, αλλά και να διατηρείται σταθερό το ρεύμα που απορροφά κατά τη λειτουργία του.

Η ταυτόχρονη μεταβολή τάσης και συχνότητας εις τρόπον ώστε ο λόγος τους να διατηρείται σταθερός είναι γνωστή σαν μέθοδος ελέγχου Voltage / frequency και με βάση αυτή λειτουργούν οι περισσότεροι ρυθμιστές στροφών των ασύγχρονων κινητήρων.

$$\frac{V}{f} = ct$$

Η εφαρμογή της μεθόδου ελέγχου V/f για τη ρύθμιση των στροφών του ασύγχρονου κινητήρα έχει σαν αποτέλεσμα να παραμένει αμετάβλητη η μορφή της χαρακτηριστικής φορτίου του κινητήρα. Σε κάθε μεταβολή της συχνότητας μεταβάλλονται ανάλογα και οι στροφές, ενώ η χαρακτηριστική μετακινείται παράλληλα, όπως φαίνεται στο σχήμα 8.1.



Σχήμα 8.1 Χαρακτηριστική ροπής-στροφών. α) συχνότητα και τάση σταθερή β) συχνότητα και τάση μεταβλητή με έλεγχο $V/f=ct$

Το ονομαστικό σημείο λειτουργίας του επαγωγικού κινητήρα βρίσκεται πολύ κοντά στη βασική σύγχρονη ταχύτητα, δηλαδή στη σύγχρονη ταχύτητα που αντιστοιχεί στη βασική συχνότητα σχεδίασης της μηχανής (50 ή 60 Hz). Όταν όμως ο κινητήρας λειτουργεί σε πολύ χαμηλές στροφές (συχνότητες), τότε η τάση πρέπει να αυξηθεί ελαφρώς για να αντισταθμιστεί η πτώση τάσης στην εμπέδηση του στάτη, η οποία έχει σαν συνέπεια τη μείωση της μαγνητικής ροής στο διάκενο και την αδυναμία του κινητήρα να αντιμετωπίσει το φορτίο. Η διαδικασία, που προαναφέρθηκε, καλείται «ενίσχυση τάσης» (*voltage boost*) και ενσωματώνεται σε όλους τους ρυθμιστές στροφών, που λειτουργούν με τη μέθοδο ελέγχου V/f .

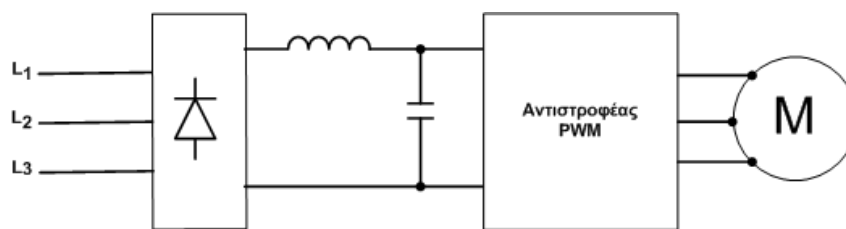
Οι ρυθμιστές στροφών των επαγωγικών κινητήρων είναι πηγές (στατοί μετατροπείς) μεταβλητής συχνότητας και τάσης και απαντώνται και με άλλες ονομασίες, όπως μετατροπείς συχνότητας (*frequency converters*) ή αντιστροφείς τάσης (*inverters*).

Από άποψη κυκλωμάτων ισχύος, τρεις δυνατές κυκλωματικές τοπολογίες μπορεί κανείς να συναντήσει. Στο σχήμα 8.2α φαίνεται ο ρυθμιστής στροφών με την αποκλειστική σχεδόν χρήση στα κινητήρια συστήματα μικρής και μεσαίας ισχύος. Η είσοδος μπορεί να είναι 1Φ ή 3Φ δίκτυο (σταθερή συχνότητα και τάση) και η έξοδος 3Φ (μεταβλητή συχνότητα και τάση). Η συνεχής τάση στην είσοδο του αντιστροφέα τάσης παραμένει σταθερή. Ελέγχοντας τον αντιστροφέα με τις τεχνικές Διαμόρφωσης Εύρους

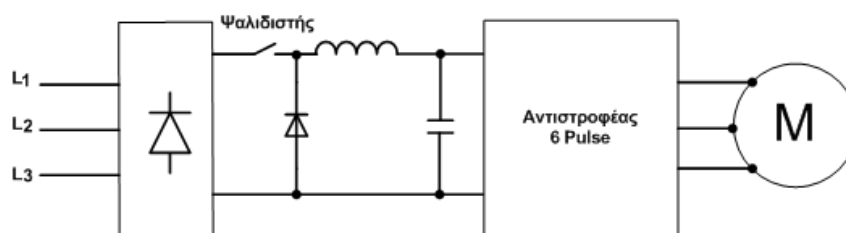
Παλμού (**Pulse Width Modulation**) επιτυγχάνουμε μέσα στον ίδιο τον αντιστροφέα τη διατήρηση του λόγου V/f , μεταβάλλοντας ταυτόχρονα και την τάση και την συχνότητα εξόδου. Λόγω του μη ελεγχόμενου ανορθωτή, η ανάκτηση ενέργειας κατά την πέδηση είναι αδύνατη. Πλεονεκτεί όμως, γιατί το ρεύμα που απορροφά ο κινητήρας είναι σχεδόν απαλλαγμένο από αρμονικό περιεχόμενο (λιγότερος θόρυβος και θέρμανση) και έχει μικρότερο κόστος (μία ελεγχόμενη διάταξη ισχύος).

Στο σχήμα 8.2β ο ψαλιδιστής της τάσης (chopper) μεταβάλλει την συνεχή τάση στην είσοδο (και έμμεσα στην έξοδο) του αντιστροφέα και ο αντιστροφέας ελέγχει μόνο τη συχνότητα. Στην περίπτωση αυτή η μέθοδος ελέγχου του αντιστροφέα είναι γνωστή σαν «μέθοδος 6 παλμών, 6 pulse» ή «τετραγωνικών παλμών, square wave» και παρουσιάζει το μεγαλύτερο ποσοστό εκμετάλλευσης της τάσης κατά την αντιστροφή της (από DC σε AC). Ο ρυθμιστής στροφών αυτού του τύπου έχει πολύ περιορισμένη εφαρμογή.

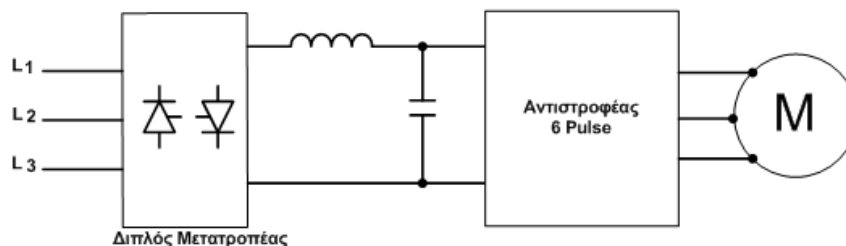
Τέλος, στο σχήμα 8.2γ η τάση μεταβάλλεται από τον διπλό πλήρως ελεγχόμενο μετατροπέα και η συχνότητα από τον αντιστροφέα 6 παλμών. Πλεονέκτημα αυτού του ρυθμιστή είναι ότι επιτρέπει πέδηση με ανάκτηση της ενέργειας, ενώ μειονεκτεί, γιατί λειτουργεί με μικρό συντελεστή ισχύος στις μικρές ταχύτητες (μικρή συχνότητα → μικρή τάση → μεγάλη γωνία έναυσης). Το ρυθμιστή στροφών αυτού του τύπου συναντάμε σε κινητήρια συστήματα μεγάλης ισχύος για να εκμεταλλευόμαστε την αναγεννητική πέδηση.



(α) Σταθερή DC και αντιστροφέας PWM



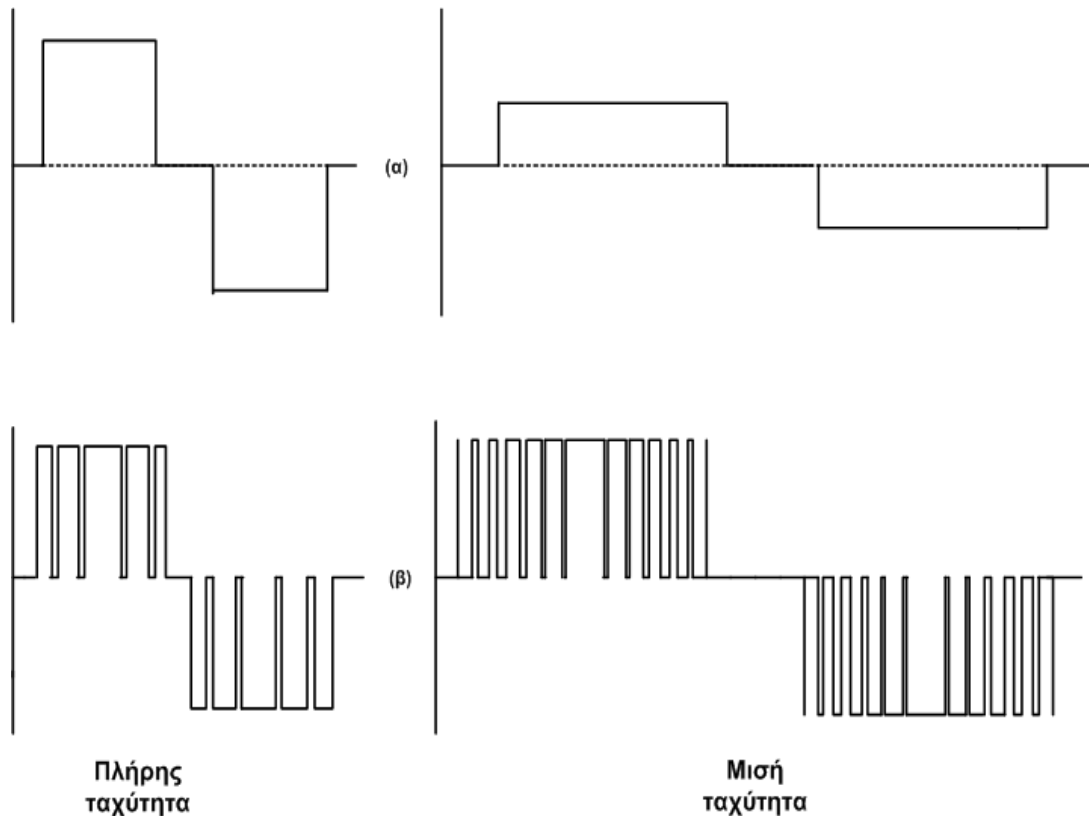
(β) Μεταβλητή DC και αντιστροφέας 6 Pulse



(γ) Μεταβλητή DC και αντιστροφέας 6 Pulse

Σχήμα 8.2 Διάφοροι τύποι ρυθμιστών στροφών επαγωγικών κινητήρων

Αναφορικά με τους ρυθμιστές στροφών, που προαναφέραμε, είναι πολύ χρήσιμο να υπενθυμίσουμε τους διαφορετικούς τρόπους με τους οποίους επιτυγχάνεται η σταθερή σχέση τάσης προς συχνότητα (V/f). Στο σχήμα 8.3 φαίνονται οι δύο διαφορετικές μέθοδοι ελέγχου και ειδικότερα το πώς η βασική τάση ελαττώνεται στο μισό, όταν και η συχνότητα έχει τη μισή τιμή της βασικής συχνότητας. Οι αντιστροφείς 6 παλμών απαιτούν να υπάρχει μεταβλητή τάση (DC) στην είσοδο, σε αντίθεση με τους αντιστροφείς PWM, που η συνεχής τάση στην είσοδο παραμένει σταθερή. Στους αντιστροφείς PWM η μεταβολή της τάσης (AC) στην έξοδο προκαλείται μέσα στον ίδιο τον αντιστροφέα με την τεχνική του ψαλιδισμού. Μία ακόμα σημαντική διαφορά στους δύο προαναφερθέντες τύπους αντιστροφέων είναι η συχνότητα λειτουργίας των ημιαγωγικών διακοπών (διακοπτική συχνότητα), σε σχέση με τη συχνότητα εξόδου. Στους μεν αντιστροφείς 6 Pulse η διακοπτική συχνότητα είναι ίδια με αυτή της εξόδου, ενώ στους αντιστροφείς PWM η διακοπτική συχνότητα είναι πολύ μεγαλύτερη από τη συχνότητα εξόδου. Η παραπάνω βασική διαφοροποίηση φαίνεται εύκολα με την παρατήρηση των κυματομορφών του σχήματος 8.3.



Σχήμα 8.3 Τύποι αντιστροφέων τάσης. α) 6 παλμών. β) PWM

Πειραματικό μέρος

Βήμα 1

Προσδιορισμός της χαρακτηριστικής $V=f(f)$

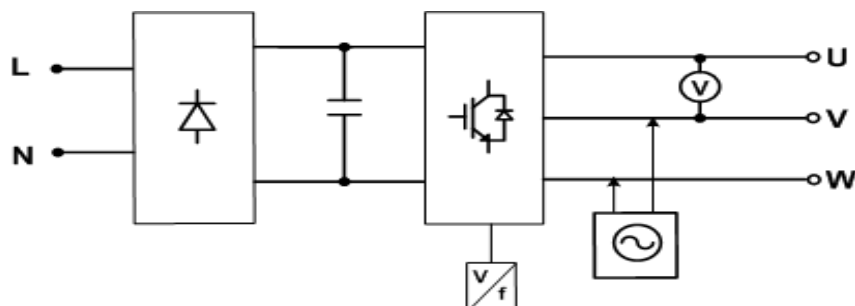
Η χαρακτηριστική συνάρτηση της τάσης προς τη συχνότητα του ρυθμιστή στροφών θα προσδιοριστεί με τη βοήθεια του σχήματος 8.4. Η συχνότητα της τάσης εξόδου του ρυθμιστή στροφών θα υπολογίζεται με τη βοήθεια του παλμογράφου και η τάση θα μετράται με ένα αξιόπιστο βολτόμετρο αληθούς ενεργού τιμής (True RMS).

- Μεταβάλλουμε τη συχνότητα από 0 έως 80 Hz και καταγράφουμε σε πίνακα τα ζεύγη τιμών (τάση, συχνότητα) σε κάθε βήμα μεταβολής. Τα παραπάνω ζεύγη τιμών θα χρησιμοποιήσουμε για να σχεδιάσουμε τη χαρακτηριστική συνάρτηση V/f .

ΕΡΓΑΣΙΑ

Σχεδίαση των χαρακτηριστικών συναρτήσεων $V=f(f)$

Σχεδιάστε τη γραμμική V/f με παράμετρο την ενίσχυση τάσης (boost). Επαναλάβετε τη διαδικασία για την τετραγωνική V/f .



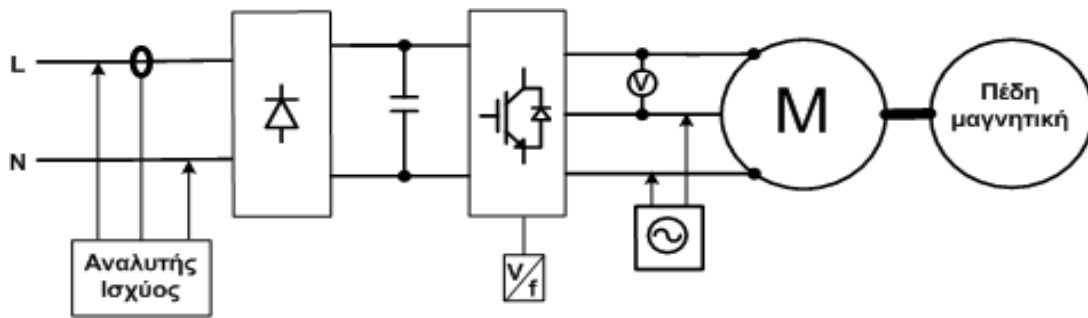
Σχήμα 8.4 Κύκλωμα για τον προσδιορισμό της V/f

Βήμα 2

Προσδιορισμός της λειτουργικής συμπεριφοράς του κινητήριου συστήματος σε διαφορετικές φορτίσεις

Για να προσδιοριστεί η λειτουργική συμπεριφορά του κινητήριου συστήματος, όταν αλλάζει το μηχανικό φορτίο, θα πραγματοποιήσουμε το κύκλωμα του σχήματος 8.5. Ο κινητήρας θα φορτίζεται διαδοχικά με τη βοήθεια της μαγνητικής πέδης.

Αφού ρυθμίσουμε τη συχνότητα εξόδου στα **50Hz** ξεκινάμε, αυξάνοντας διαδοχικά το μηχανικό φορτίο τον κινητήρα, και καταγράφουμε σε πίνακα τις μετρήσεις των ηλεκτρικών και μηχανικών μεγεθών του συστήματος. Τα ηλεκτρικά μεγέθη της 1Φ AC εισόδου μετρούνται με τη βοήθεια του αναλυτή ισχύος (Power Analyzer). Τα ηλεκτρικά μεγέθη συνδέσμου συνεχούς (DC link) και 3Φ AC εξόδου μετρούνται με την βοήθεια της μονάδας μετρήσεων του ρυθμιστή στροφών, ενώ τα μηχανικά μεγέθη με τη βοήθεια της μονάδας ελέγχου της μαγνητικής πέδης του σχήματος 7.6.



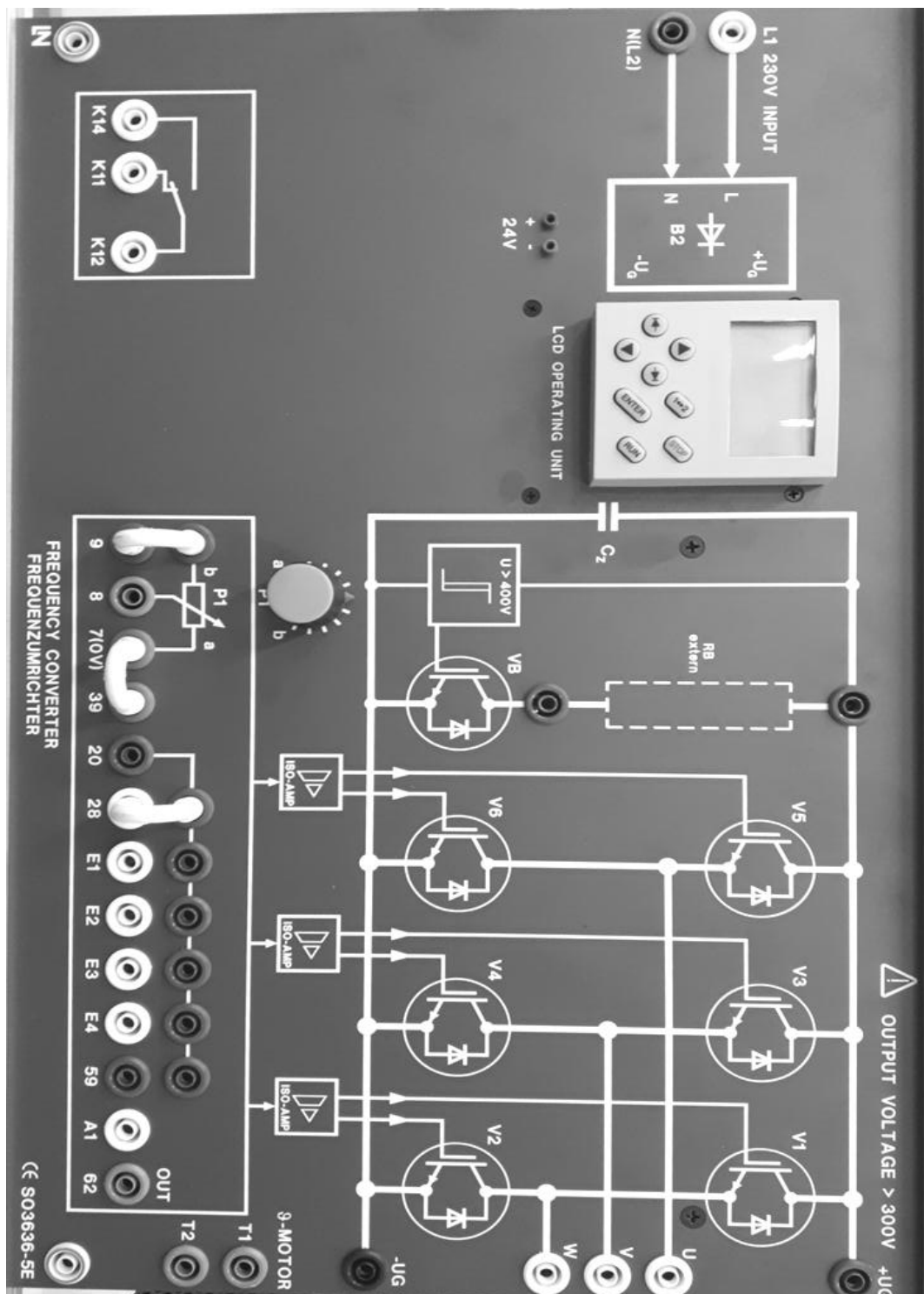
Σχήμα 8.5 Κύκλωμα για τον προσδιορισμό της λειτουργικής συμπεριφοράς του κινητήριου συστήματος

Για να μελετήσουμε τη διαφοροποίηση της λειτουργίας του κινητήριου συστήματος, αλλάζουμε την τροφοδοσία από δίκτυο σε μετασχηματιστή, έτσι ώστε το μη γραμμικό φορτίο να «βλέπει» διαφορετική σύνθετη αντίσταση πηγής τροφοδοσίας. Τέλος, συνδέουμε και AC πηνίο στην είσοδο του ρυθμιστή στροφών, όταν αυτός τροφοδοτείται από το 1Φ δίκτυο, με στόχο να περιορίσουμε τα προβλήματα που συνδέονται με την ύπαρξη των αρμονικών συνιστωσών του ρεύματος λειτουργίας του κινητήριου συστήματος.

ΕΡΓΑΣΙΑ

Μελέτη συμπεριφοράς μη γραμμικού ηλεκτρικού φορτίου

1. Να σχεδιαστούν οι χαρακτηριστικές $V = f(f)$.
2. Να συμπληρωθούν οι κενές στήλες στον πίνακα των μετρήσεων.
3. Να σχεδιαστούν σε κοινούς άξονες οι συναρτήσεις $THD_I = f(P_{μηχ})$ & $TDD = f(P_{μηχ})$. Συμπεράσματα.
4. Να σχεδιαστούν σε κοινούς άξονες οι συναρτήσεις $\alpha = f(P_{μηχ})$ των ασκήσεων 7 & 8. Υπενθυμίζουμε πως α στην άσκηση 7 είναι ο βαθμός απόδοσης του κινητήρα, ενώ στην 8, ο βαθμός απόδοσης του κινητήριου συστήματος (VFD+κινητήρας). Συμπεράσματα.
5. Να υπολογιστούν οι απώλειες του ρυθμιστή στροφών για τις διαφορετικές φορτίσεις, θεωρώντας ότι οι απώλειες του κινητήρα δεν επηρεάζονται από τις διαφορετικές πηγές τροφοδοσίας του ρυθμιστή στροφών.
6. Επεξηγήστε τη μικρή απορρόφηση φαινόμενης ισχύος σε συνθήκες λίγου φορτίου, σε σύγκριση με τις αντίστοιχες μετρήσεις της άσκησης 7.
7. Επεξηγήστε τη διαφορά στο ποσοστό διακύμανσης τάσης (1,2%) στην AC είσοδο, με το ποσοστό διακύμανσης τάσης (6%) στην AC έξοδο.
8. Συμπεράσματα από τη συγκριτική μελέτη των μετρήσεων με διαφορετικές συνθήκες τροφοδοσίας στη φόρτιση των 5 Nm.
9. Να σχεδιαστούν σε κοινούς άξονες οι γραφικές παραστάσεις της συνάρτησης $T = f(n)$ με παράμετρο τη συχνότητα (40Hz, 50Hz, 60Hz).



Σχήμα 8.6 Μετατροπέας συχνότητας SO 3636-5E LUCAS-NULLE

Συμπεράσματα πειραματικών μετρήσεων

• Φόρτιση δικτύου

Σύμφωνα με τη θεωρία της ασύγχρονης μηχανής, η απαραίτητη μαγνητική ροή (στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο) για τη λειτουργία της προέρχεται από την ίδια ηλεκτρική πηγή και συνδέεται με την απορροφούμενη άεργη ισχύ.

Έτσι, όταν ο κινητήρας τροφοδοτείται απ ευθείας από το δίκτυο με ημιτονοειδή τάση, η άεργη ισχύς είναι σχεδόν σταθερή σε όλη την κλίμακα φόρτισης του κινητήρα. Συνεπώς ο συντελεστής ισχύος (**cosφ**) μεταβάλλεται έντονα, από πολύ μικρές τιμές (εν κενώ) μέχρι την ονομαστική τιμή του (ονομαστικό φορτίο), γιατί μεταβάλλεται έντονα η απορρόφηση πραγματικής ισχύος.

Όταν όμως ο κινητήρας τροφοδοτείται με εναλλασσόμενη PWM τάση από ρυθμιστή στροφών, η φόρτιση του δικτύου με άεργη ισχύ αλλάζει ριζικά. Η πρώτη βαθμίδα του PWM ρυθμιστή στροφών είναι ένας μη ελεγχόμενος μετατροπέας (ανορθωτική γέφυρα διόδων), συνεπώς το απορροφούμενο ρεύμα περιέχει αρμονικές συνιστώσες, γιατί το ρεύμα δεν είναι ημιτονοειδές. Συνεπώς, ο συντελεστής ισχύος της θεμελιώδους συνιστώσας (πρώτη αρμονική) του ρεύματος είναι μονάδα, δηλαδή **cosθ_{DISP}=1**. Η θεμελιώδης συνιστώσα του ρεύματος εκφράζει το μεγαλύτερο ποσοστό του συνολικού ρεύματος στην ονομαστική φόρτιση και είναι σε φάση με την τάση. Συνεπώς σχετίζεται με την απορρόφηση μόνο πραγματικής ηλεκτρικής ισχύος. Το άθροισμα των υπόλοιπων ανώτερων αρμονικών του ρεύματος απορροφούν μόνο άεργη ισχύ. Άρα, ο συντελεστής ισχύος (**cosθ_{TRUE}**) του κινητήριου συστήματος (ρυθμιστής στροφών + κινητήρας) είναι πάντοτε τόσο μικρότερος από τη μονάδα, όσο η παραμόρφωση (απόκλιση από την ημιτονοειδή κυματομορφή) του ρεύματος δικτύου μεγαλώνει.

• Βαθμός απόδοσης

Όπως είναι αναμενόμενο, ο βαθμός απόδοσης κινητήριου συστήματος είναι μικρότερος σε σχέση με αυτόν που παρουσιάζει ο κινητήρας με ημιτονοειδή τροφοδοσία. Οι αιτίες είναι οι επιπλέον απώλειες λόγω των ηλεκτρονικών μετατροπέων (γέφυρα ανόρθωσης και γέφυρα αντιστροφής) και λόγω της αρμονικής υπερθέρμανσης του κινητήρα. Η υπερθέρμανση του κινητήρα λόγω παρουσίας αρμονικών συνδέεται άμεσα με την μορφή της εναλλασσόμενης τάσης που παράγει ο αντιστροφέας. Η μορφή της εναλλασσόμενης τάσης με τις μικρότερες συνέπειες είναι η SPWM, γιατί περιέχει πολύ μικρό ποσοστό ανώτερων αρμονικών.

• Κινητήρας

Ο επαγωγικός τριφασικός κινητήρας, που τροφοδοτείται από ρυθμιστή συχνότητας συμπεριφέρεται ($T = f(n)$ με παράμετρο τη συχνότητα) όπως ο κινητήρας συνεχούς ρεύματος ξένης διέγερσης στη ρύθμιση της τάσης του τυμπάνου.

Άσκηση 9 Άσκηση 10

Έλεγχος Ασύγχρονου τριφασικού κινητήρα (Βιομηχανικός Ρυθμιστής Στροφών Control Techniques SK 2,2kW)

Σκοπός

Ο σκοπός των ασκήσεων 9 και 10 είναι η απόκτηση γνώσεων και εμπειρίας πάνω σε ένα βιομηχανικό ρυθμιστή στροφών, ανάλογο αυτών που συναντούμε σήμερα σε πάμπολλες παραγωγικές διαδικασίες στη βιομηχανία, στη βιοτεχνία, αλλά και σε κάθε εφαρμογή που απαιτείται ρύθμιση της λειτουργίας των επαγωγικών τριφασικών κινητήρων.

Συνοπτική θεωρία

Η χρήση των ρυθμιστών στροφών των ασύγχρονων τριφασικών κινητήρων είναι σήμερα ευρύτατα διαδεδομένη σε όλες τις εφαρμογές των ηλεκτρικών κινητηρίων συστημάτων εναλλασσόμενου ρεύματος.

Οι ρυθμιστές στροφών είναι σήμερα προγραμματιζόμενες διατάξεις ελεγχόμενες από μικροελεγκτές (microcontrollers). Έτσι, ενσωματώνουν πληθώρα λειτουργιών ελέγχου τόσο των ηλεκτροκινητήρων, όσο και των ίδιων των ρυθμιστών. Επιπλέον, διαθέτουν λειτουργίες προστασίας και προσδιορισμού των σφαλμάτων.

Ο προγραμματισμός των ρυθμιστών στροφών μπορεί να γίνεται είτε μέσω του ενσωματωμένου σε αυτούς πληκτρολόγιου, είτε μέσω PC, που έχει διασυνδεθεί με αυτούς. Κάθε λειτουργία που διαθέτει ένας ρυθμιστής στροφών συνδέεται και με μία διαφορετική παράμετρο.

Οι παράμετροι διακρίνονται σε δύο κατηγορίες:

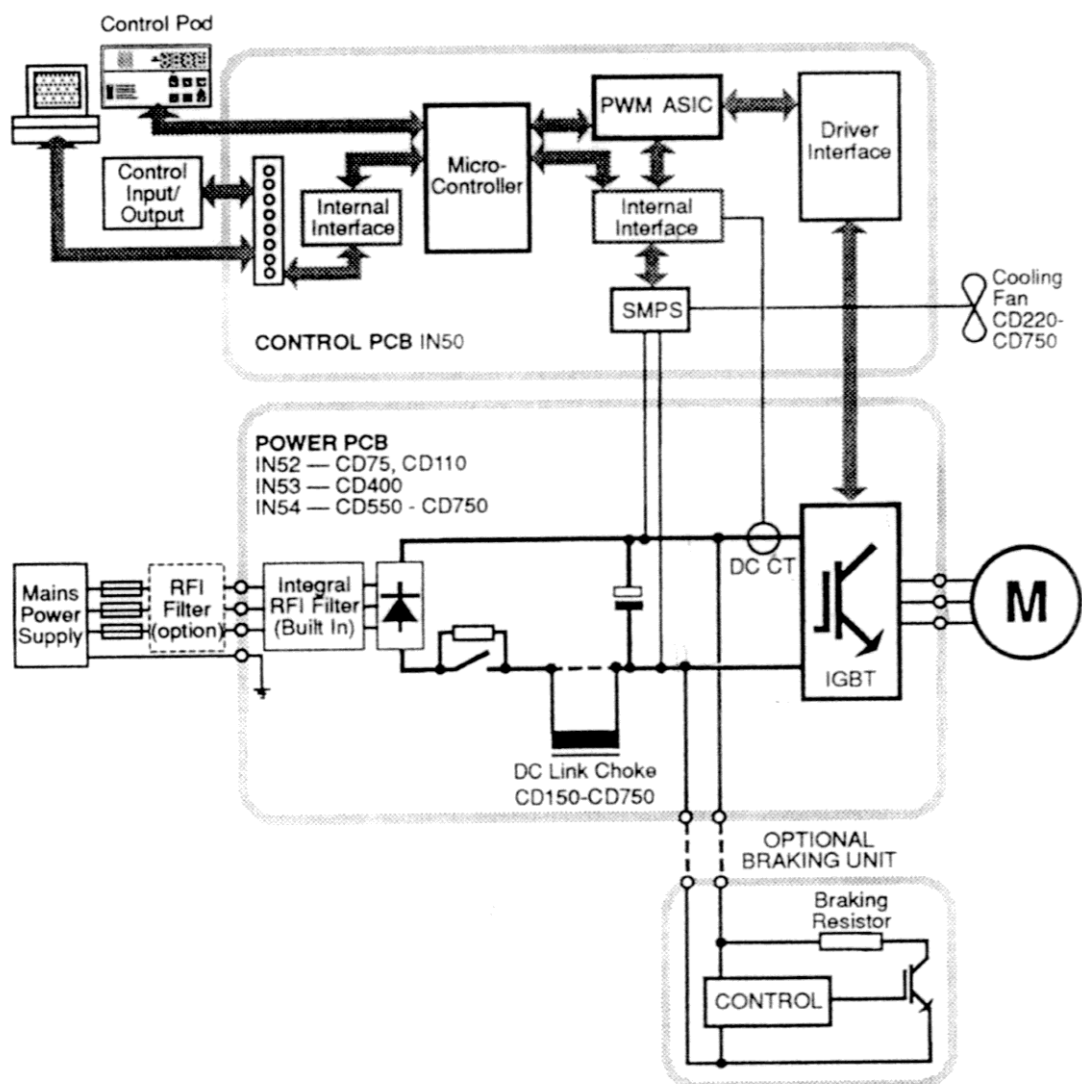
- **(RW)** (Read/Write) Επανεγγράψιμες. Σε αυτές μπορούμε να αλλάζουμε (προγραμματίζουμε) την τιμή, με αποτέλεσμα μία διαφορετική λειτουργική διαδικασία του κινητήριου συστήματος.
- **(RO)** (Read Only) Για ανάγνωση μόνο. Ονομάζονται συχνά και διαγνωστικές παράμετροι. Σε αυτές βρίσκουμε πληροφορίες για τυχόν σφάλματα που εμφανίστηκαν κατά τη λειτουργία του κινητήριου συστήματος.

Ο συνολικός αριθμός των παραμέτρων που διαθέτουν και οι πλέον φθηνοί ρυθμιστές στροφών είναι πολύ μεγάλος, γεγονός που απαιτεί ολοκληρωμένη και προσεκτική μελέτη, πριν αυτός χρησιμοποιηθεί στον έλεγχο της λειτουργίας του ηλεκτροκινητήρα.

Ο ρυθμιστής στροφών που χρησιμοποιούμε στο εργαστήριο είναι μια ηλεκτρονική συσκευή ισχύος με τριφασική είσοδο και έξοδο, κατάλληλη να τροφοδοτήσει κινητήρα 2,2 kW. Διαθέτει 95 βασικές παραμέτρους εκ των οποίων οι 80 (RW) & 15 (RO), που μπορούν να διαχειριστούν με τη βοήθεια του περιληπτικού εγχειριδίου χρήσης. Συνολικά διαθέτει 687 παραμέτρους, οι οποίες αναφέρονται λεπτομερειακά στο προχωρημένο εγχειρίδιο χρήσης. Όλες οι απαραίτητες πληροφορίες για τα χαρακτηριστικά, την εγκατάσταση και τη λειτουργία του ρυθμιστή στροφών περιέχονται σε τρία εγχειρίδια (manuals)

του κατασκευαστή, (Getting Started Guide, Technical Data & Advanced User Guide). Για τη διεξαγωγή των ασκήσεων 9 και 10 είναι αρκετό το περιληπτικό εγχειρίδιο, που επισυνάπτεται στις σημειώσεις.

Στο σχήμα 9.1 βλέπουμε, σε χονδρικό διάγραμμα, την εσωτερική δομή του ρυθμιστή στροφών. Ανάλογη δομή έχουν όλοι οι βιομηχανικοί ρυθμιστές στροφών. Παρατηρούμε τα δύο διακριτά τμήματα. Την πλακέτα ισχύος (POWER PCB) και την πλακέτα ελέγχου (CONTROL PCB). Μεταξύ των ηλεκτρονικών κυκλωμάτων ελέγχου και ισχύος υπάρχει πλήρης απομόνωση. Η μονάδα πέδησης είναι ανεξάρτητη και δεν είναι απαραίτητη για την λειτουργία του ρυθμιστή. Απαιτείται μόνο σε ορισμένα κινητήρια συστήματα για τον έλεγχο της επιβράδυνσης.

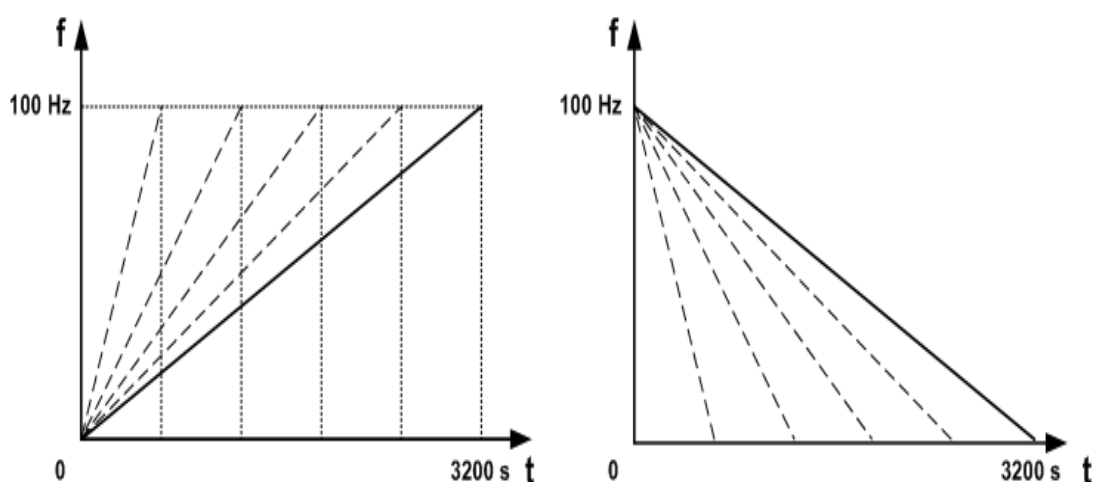


Σχήμα 9.1 Εσωτερική δομή του ρυθμιστή στροφών

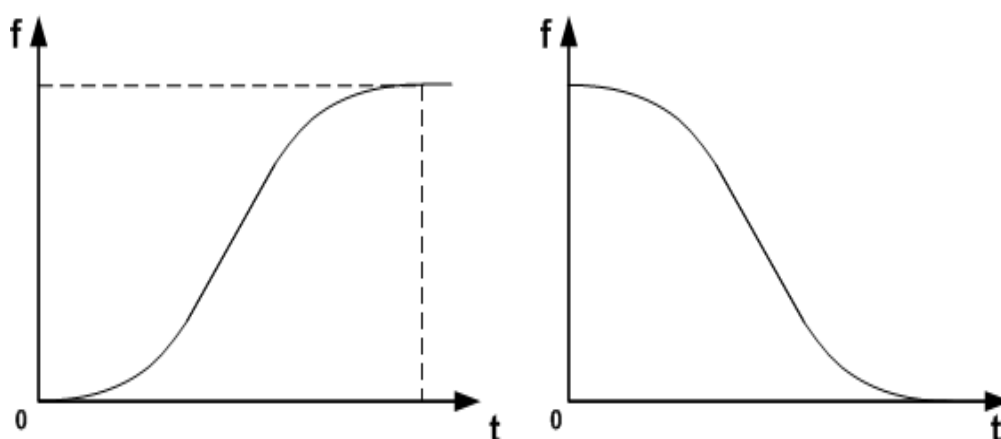
Η λεπτομερής μελέτη όλων των δυνατοτήτων, που μας δίνει ο συγκεκριμένος ρυθμιστής, θα απαιτούσε μεγάλο αριθμό ασκήσεων. Κατά τη διάρκεια των δύο εργαστηριακών ασκήσεων μελετούμε τις πλέον βασικές παραμέτρους, μερικές εκ των οποίων αναλύουμε περαιτέρω.

Επιτάχυνση /Επιβράδυνση (ράμπες)

Η ράμπα επιτάχυνσης ή επιβράδυνσης είναι ο ρυθμός αύξησης της συχνότητας κατά την εκκίνηση του κινητήρα ή ο ρυθμός μείωσης της συχνότητας κατά το σταμάτημα. Οι ράμπες μπορεί να είναι γραμμικές (Σχ. 9.2) ή τύπου S (Σχ. 9.3). Οι ράμπες τύπου S χρησιμοποιούνται για τον περιορισμό των μηχανικών σοκ (χτυπήματα) κατά την στιγμή της εκκίνησης ή του σταματήματος της ηλεκτρικής μηχανής. Εμείς θα προγραμματίσουμε τη γραμμική ράμπα επιτάχυνσης (Pr3) και τη γραμμική ράμπα επιβράδυνσης (Pr4). Δε θα ασχοληθούμε με τις ράμπες τύπου S, για τις οποίες πρέπει να συμβουλευθούμε το προχωρημένο εγχειρίδιο χρήσης (Advanced User Guide) του κατασκευαστή.



Σχήμα 9.2 Γραμμικές ράμπες επιτάχυνσης και επιβράδυνσης



Σχήμα 9.3 Ράμπες επιτάχυνσης και επιβράδυνσης τύπου S

Μέθοδος ελέγχου κινητήρα

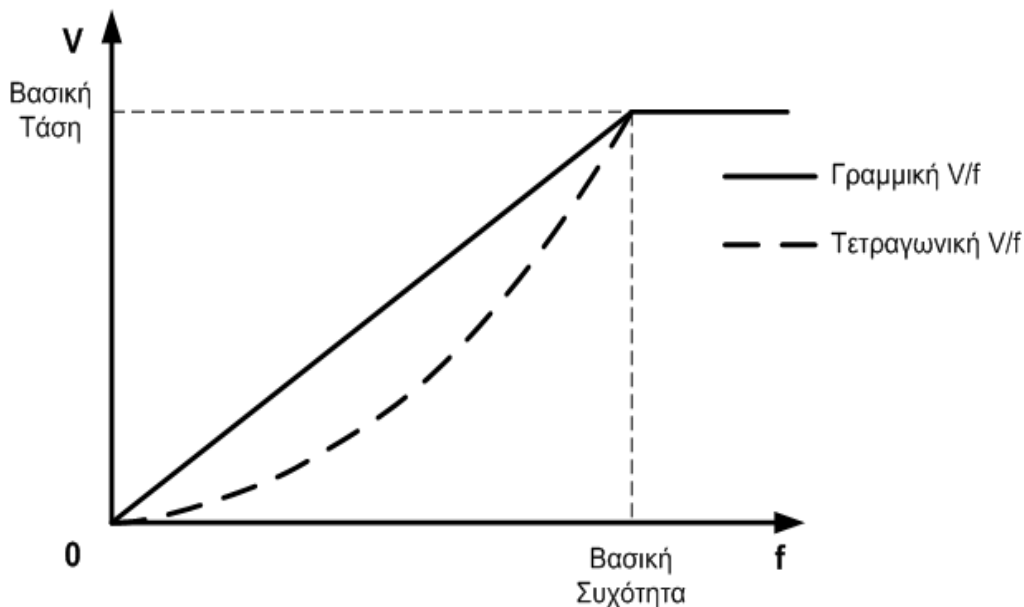
Τα τελευταία χρόνια έχουν αναπτυχθεί πολύπλοκες μέθοδοι ελέγχου των ασύγχρονων κινητήρων. Οι μέθοδοι αυτές υλοποιούνται από τους ρυθμιστές στροφών χάριν στους ισχυρούς και γρήγορους μικροελεγκτές, που μπορούν να επεξεργάζονται μεγάλο όγκο δεδομένων και σε πραγματικό χρόνο να ελέγχουν τους ηλεκτρονικούς διακόπτες του αντιστροφέα. Οι μέθοδοι αυτές, που ανήκουν στη γενική μέθοδο «διανυσματικός έλεγχος» «vector control», παρέχουν εξαιρετικές αποκρίσεις σε δύσκολες συνθήκες, όπως απότομες μεταβατικές καταστάσεις στη λειτουργία του κινητήρα, ή λειτουργία σε πολύ μικρές ταχύτητες (π.χ. 10 rpm). Οι σημερινοί ρυθμιστές στροφών, ακόμα και αυτοί με χαμηλό κόστος, παρέχουν αρκετές μεθόδους ελέγχου του κινητήρα και ο χρήστης επιλέγει την καταλληλότερη, που ικανοποιεί τις απαιτήσεις του κινητήριου συστήματος.

Στις περισσότερες εφαρμογές ρύθμισης των στροφών οι απαιτήσεις του κινητήριου συστήματος ικανοποιούνται απόλυτα από τη μέθοδο ελέγχου **V/f**, με την οποία θα ασχοληθούμε στο εργαστήριο.

Όπως είναι γνωστό οι ρυθμιστές στροφών τροφοδοτούν τους κινητήρες με εναλλασσόμενη τάση, η οποία έχει δύο χαρακτηριστικά μεγέθη, την ενεργό τιμή και τη συχνότητά της. Στη μέθοδο ελέγχου **V/f**, για κάθε συχνότητα αντιστοιχεί μια τιμή τάσης και όλα τα διατεταγμένα ζεύγη (V,f) ανήκουν σε μία χαρακτηριστική, η οποία αποθηκεύεται στη μνήμη του μικροελεγκτή, και αποδίδονται στον κινητήρα κάθε φορά που ανακαλούνται.

Οι χαρακτηριστικές V/f είναι δύο και φαίνονται στο σχήμα 9.4.

- Γραμμική (linear) V/f ($Pr41=Fd$), που χρησιμοποιείται για μηχανικά φορτία με σταθερή ροπή, η οποία δεν μεταβάλλεται όταν μεταβάλλονται οι στροφές (πχ αναβατόρια).
- Τετραγωνική (square law) V/f ($Pr41=SrE$), που χρησιμοποιείται για μηχανικά φορτία που η ροπή τους μεταβάλλεται με το τετράγωνο σε συνάρτηση με τις στροφές (πχ ανεμιστήρες, αντλίες).

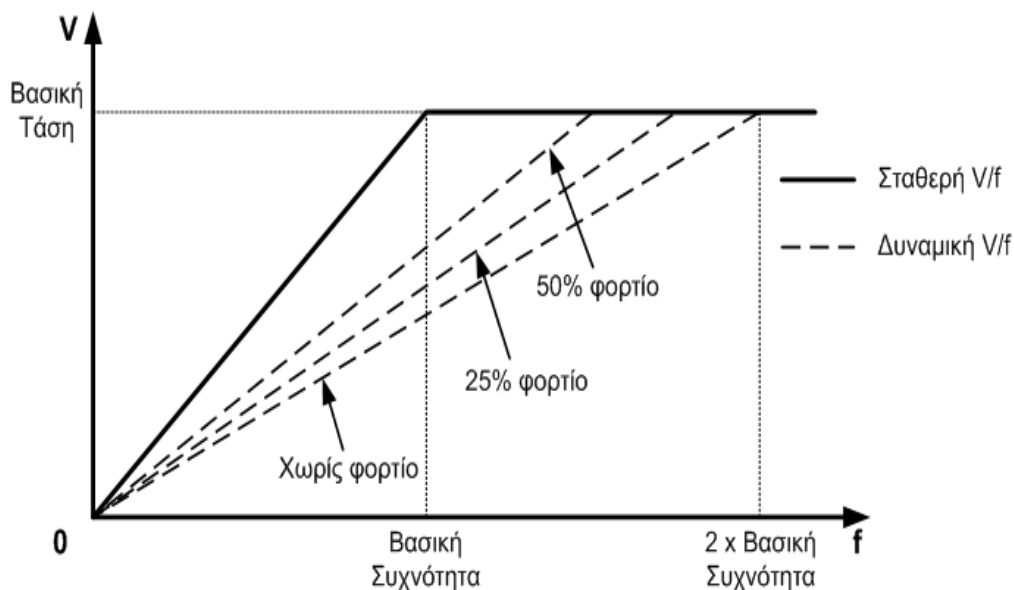


Σχήμα 9.4 Χαρακτηριστικές V/f

Σταθερή ή Δυναμική V/f

Η επιλογή αυτή αναφέρεται στη γραμμική V/f, που μπορεί να είναι σταθερή ευθεία ή μεταβλητή ευθεία, της οποίας η κλίση αλλάζει αυτόματα ανάλογα με τη φόρτιση του κινητήρα. Στο σχήμα 9.5 μπορεί κανείς να διακρίνει τη διαφοροποίηση, που εμφανίζουν οι δύο χαρακτηριστικές.

- Σταθερή V/f (Pr32=OFF). Είναι η γραμμική V/f, που συναντήσαμε πιο πάνω. Ο λόγος V/f παραμένει πάντοτε σταθερός, δεν εξαρτάται από το φορτίο και χρησιμοποιείται για σπάντα φορτία με σταθερή ροπή.
- Δυναμική V/f (Pr32=ON). Ο λόγος V/f δεν παραμένει σταθερός, αλλά εξαρτάται κάθε φορά από το φορτίο. Στην ουσία πρόκειται για μια δυναμική (αυτόματη) λειτουργία που η χαρακτηριστική μεταβάλλεται από τη θέση χωρίς φορτίο μέχρι τη σταθερή, ανάλογα με το ρεύμα που απορροφά ο κινητήρας. Η λειτουργία αυτή δίνει καλύτερη αποδοτικότητα στο κινητήριο σύστημα, αφού για μικρά φορτία η τάση μειώνεται αυτόματα με συνέπεια να μειώνεται και το ρεύμα. Η επιλογή της δυναμικής V/f είναι χρήσιμη όταν έχουμε μεταβλητά φορτία (κυλιόμενες σκάλες, μεταφορικές ταινίες, κ.α.)

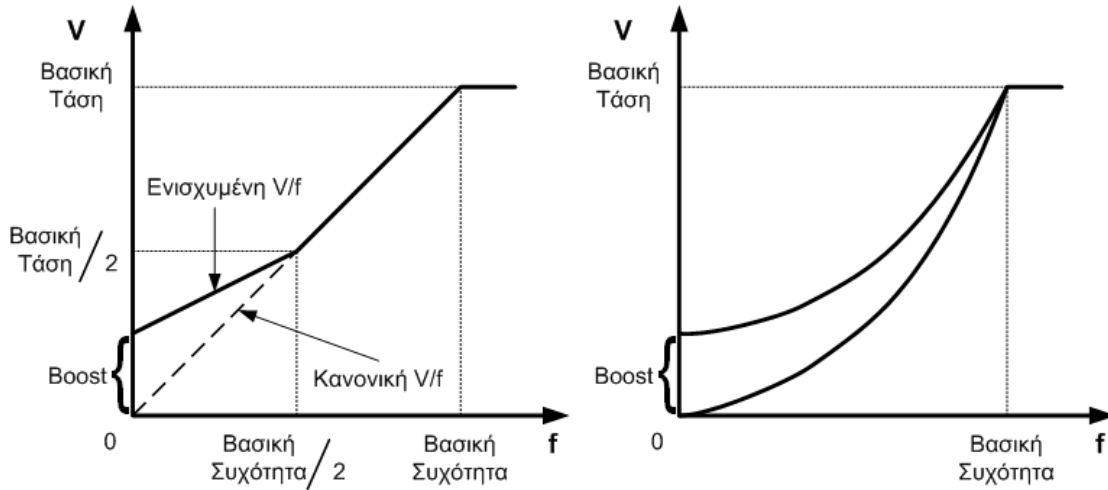


Σχήμα 9.5 Σταθερή και δυναμικές V/f

Ενίσχυση τάσης ή ροπής (boost)

Είναι γνωστό πως στις πολύ μικρές συχνότητες παρατηρείται αδυναμία του κινητήρα να περιστρέψει το φορτίο. Αυτό οφείλεται αφ ενός στη μικρή τάση τροφοδοσίας λόγω V/f και αφ ετέρου στην πτώση τάσης που παρουσιάζεται στις αντιστάσεις του στάτη. Έτσι η απομένουσα τάση, μετά την πτώση τάσης στα τυλίγματα του στάτη, δεν είναι αρκετή να δημιουργήσει ονομαστική μαγνητική ροή στο διάκενο και ικανοποιητικά ρεύματα στο δρομέα. Με την παράμετρο (Pr42) έχουμε τη δυνατότητα να αυξάνουμε την

τάση τροφοδοσίας του κινητήρα, χωρίς να μεταβάλλεται η συχνότητα. Χρειάζεται προσοχή γιατί μία υπερβολική ενίσχυση θα οδηγήσει σε αύξηση του ρεύματος, η οποία θα ενεργοποιήσει πιθανά τον περιοριστή ρεύματος με συνέπεια τη διακοπή της τροφοδοσίας. Η παράμετρος Pr42 (boost) προσδιορίζεται όταν έχουμε επιλέξει ($Pr41=Fd$) ή ($Pr41=SrE$). Στο σχήμα 9.6 φαίνονται λεπτομέρειες στη μορφή της ενισχυμένης V/f , όταν έχει επιλεγεί η γραμμική V/f ($Pr41=Fd$) ή όταν έχει επιλεγεί η τετραγωνική V/f ($Pr41=SrE$).



Σχήμα 9.6 Ενίσχυση τάσης στις χαμηλές συχνότητες