

# Εργαστήριο για το Μάθημα Ηλεκτρομηχανικά Συστήματα Μετατροπής Ενέργειας

## ΠΕΙΡΑΜΑ 1

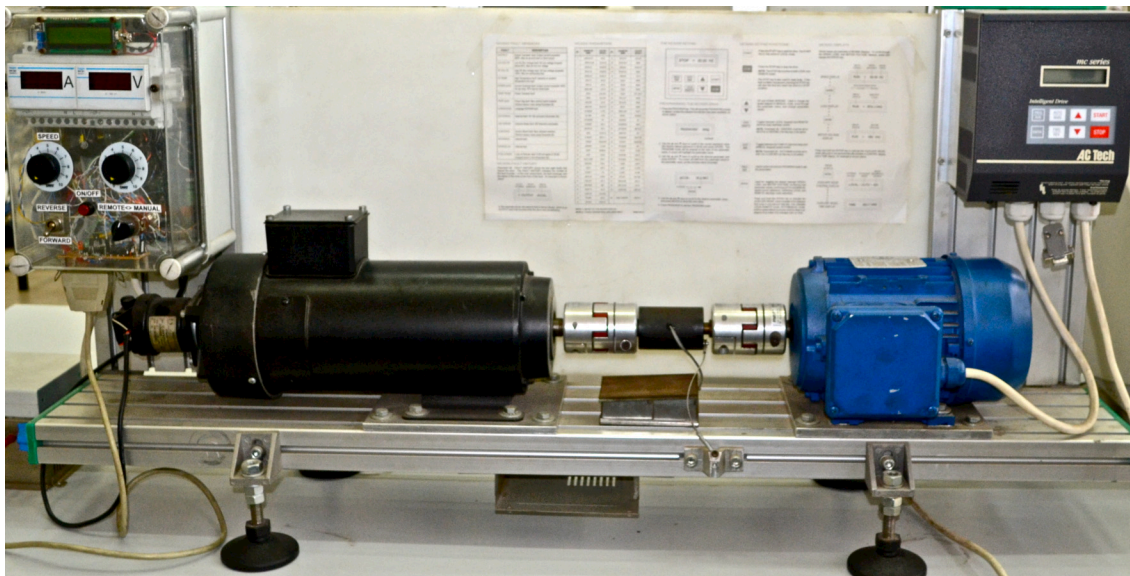
### 1.1 Σκοπός του πειράματος

Λήψη κατάλληλων μετρήσεων με σκοπό την χάραξη χαρακτηριστικών ροπής και συντελεστή απόδοσης σαν συνάρτηση των στροφών του κινητήρα. Για την επιτυχή εκτέλεση του πειράματος απαιτούνται τα παρακάτω:

- Κατανόηση των αρχών λειτουργίας τριφασικής επαγωγικής μηχανής (3-phase induction motor) και μηχανής συνεχούς ρεύματος (DC machine).
- Κατανόηση των αρχών λειτουργίας ηλεκτρομηχανικής διάταξης μετατροπής ενέργειας, αποτελούμενη από επαγωγικό κινητήρα και γεννήτρια συνεχούς ρεύματος.

### 1.2 Εισαγωγή

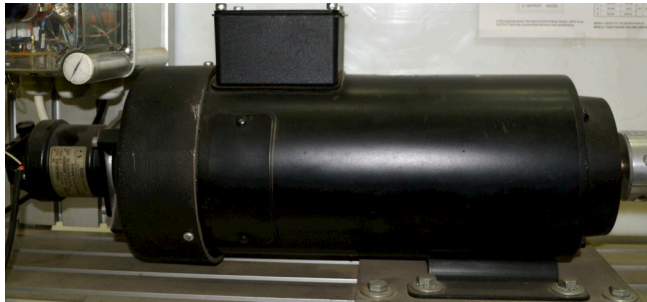
Στο πείραμα αυτό, θα μελετήσουμε τη μεταβολή της ροπής του επαγωγικού κινητήρα ως συνάρτησης των στροφών. Για να γίνει αυτό, θα πρέπει ο επαγωγικός να οδηγεί ένα μεταβλητό φορτίο. Κάθε φορά που αλλάζει το φορτίο θα αλλάζει και η ροπή του επαγωγικού κινητήρα. Έτσι με σταδιακές μεταβολές του φορτίου θα μπορέσετε να χαράξετε τη χαρακτηριστική T-ω αρχίζοντας από τις στροφές σε κενό φορτίο και φτάνοντας έως τις στροφές στο σημείο ανατροπής (μέγιστη ροπή). Στο συγκεκριμένο πείραμα το μεταβλητό φορτίο δίνεται από μια γεννήτρια συνεχούς ρεύματος η οποία είναι συνδεδεμένη με τον επαγωγικό κινητήρα. Όσο αυξάνει το παραγόμενο ρεύμα στα τυλίγματα της γεννήτριας, τόσο αυξάνει το φορτίο του επαγωγικού κινητήρα και κατά συνέπεια αυξάνει και η ροπή του. Η πειραματική διάταξη απεικονίζεται στο Σχήμα 1.1.



Σχήμα 1.1. Η πειραματική διάταξη μέτρησης επαγωγικού κινητήρα.

Αποτελείται από τα στοιχεία που αναφέρονται στη συνέχεια.

- Μηχανή ΣΡ μόνιμου μαγνήτη, 1.5 Hp, Leeson 108373.00, (Σχήμα 1.2)
- Τριφασικός επαγωγικός κινητήρας, 1 Hp (Σχήμα 1.3)
- Αντιστροφέας (inverter), 2 Hp, AC Tech (Σχήμα 1.4)
- Μονοφασικός, ανορθωτής DF8P-10, 2 Hp, τεσσάρων τεταρτημορίων (4-quadrant), Saffronics, Inc. (Σχήμα 1.5)
- Ταχογεννήτρια RE.0315, RADIO ENERGIE (Σχήμα 1.6).



Σχήμα 1.2. Γεννήτρια ΣΡ.



Σχήμα 1.3. Επαγωγικός κινητήρας.



Σχήμα 1.4. Αντιστροφέας (Inverter).



Σχήμα 1.5. Οδήγηση 4 τεταρτημορίων.



Σχήμα 1.6. Ταχογεννήτρια.

### 1.3 Θεωρία

Παρουσίαση της θεωρίας των ηλεκτρομηχανών και των ηλεκτρομηχανικών συστημάτων μετατροπής ενέργειας γίνεται στο αντίστοιχο βιβλίο θεωρίας του Καθ. Ευ. Παπαδόπουλου. Στην παρούσα παράγραφο γίνεται μια συνοπτική περίληψη σχετικών στοιχείων.

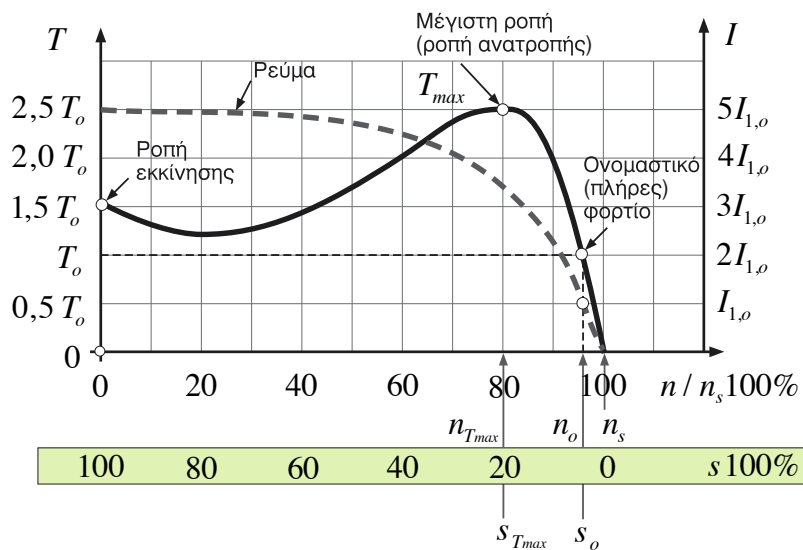
### (α) 3Φ Επαγωγικός Κινητήρας (AC)

Στο συγκεκριμένο πείραμα η επαγωγική μηχανή θα λειτουργήσει ως κινητήρας. Ένας επαγωγικός κινητήρας απαρτίζεται κυρίως από τον ακίνητο στάτη και τον περιστρεφόμενο δρομέα. Το εναλλασσόμενο ρεύμα τροφοδοτεί τα τυλίγματα του στάτη απ' ευθείας, δημιουργώντας ένα περιστρεφόμενο μαγνητικό πεδίο, ενώ στο δρομέα, οι αγωγοί του κλωβού, διαρρέονται από ρεύμα που δημιουργείται λόγω του φαινομένου της επαγωγής. Σε αυτό το τελευταίο οφείλουν το όνομα "επαγωγικοί κινητήρες".

Ο στάτης τροφοδοτείται με 3φ εναλλασσόμενο ρεύμα και αυτό δημιουργεί ένα στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο με ταχύτητα ίση με

$$n_s = \frac{120f}{P} \quad (1-1)$$

Ο συγκεκριμένος επαγωγικός κινητήρας είναι τετραπολικός και η συχνότητα τροφοδοσίας είναι 50 Hz. Συνεπώς η σύγχρονη ταχύτητα είναι  $n_s = 1500$  rpm. Ο δρομέας στρέφεται με ταχύτητα  $n_{μικ}$  η οποία είναι μικρότερη από τη σύγχρονη. Συνεπώς οι αγωγοί του κλωβού αποκρίνουν γραμμές μαγνητικής ροής με ταχύτητα ανάλογη με τη διαφορά  $n_s - n_{μικ}$ . Επομένως αναπτύσσονται σε αυτούς τάσεις και ρεύματα από επαγωγή και τα οποία έχουν ως αποτέλεσμα τη δημιουργία ηλεκτρομαγνητικής ροπής. Η χαρακτηριστική ροπή στροφών για λειτουργία κινητήρα απεικονίζεται στο Σχήμα 1.7. Οι ονομαστικές τιμές του επαγωγικού κινητήρα δίνονται στο παράρτημα.

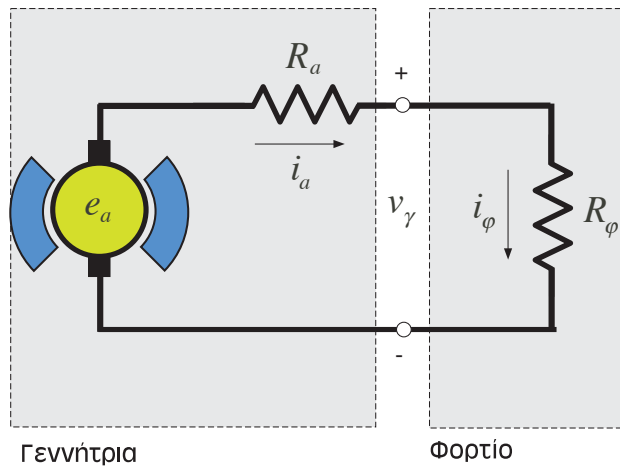


Σχήμα 1.7. Χαρακτηριστική T-ω του επαγωγικού κινητήρα.

Όταν ο κινητήρας δεν έχει φορτίο, τότε περιστρέφεται με στροφές  $\omega_k$ . Καθώς το φορτίο (και η ροπή) αυξάνεται, οι στροφές μειώνονται μέχρι η ροπή να γίνει ίση με τη ροπή ανατροπής  $T_{max}$  (μέγιστη ροπή). Όταν ο επαγωγικός κινητήρας φτάσει στο σημείο αυτό, φρενάρει (stall). Στη περιοχή από  $\omega_a$  (στροφές στο σημείο ανατροπής) μέχρι  $\omega=0$ , ο κινητήρας είναι ασταθής και συνεπώς δεν γίνεται να λάβουμε μετρήσεις ροπής στην περιοχή αυτή. Μπορούμε δηλαδή να χαράξουμε τη χαρακτηριστική T-ω μόνο για την περιοχή μεταξύ των στροφών  $\omega_a$  και  $\omega_k$ . Εάν ο κινητήρας φρενάρει, τότε μπορούμε να πάρουμε μέτρηση και για τη ροπή εκκίνησης.

## (β) Μηχανή Συνεχούς Ρεύματος (ΣΡ)

Στο πείραμα η μηχανή ΣΡ θα λειτουργεί ως γεννήτρια. Στη συγκεκριμένη μηχανή ΣΡ το πεδίο παράγεται από ακίνητους μόνιμους μαγνήτες που βρίσκονται προσαρμοσμένοι στο στάτη. Όταν η μηχανή ΣΡ λειτουργεί ως γεννήτρια, η άτρακτος περιστρέφεται από την κινητήρια μηχανή (επαγωγικός κινητήρας). Τα τυλίγματα του δρομέα περιστρέφονται μέσα στο μαγνητικό πεδίο, οπότε αναπτύσσεται ΗΕΔ. Η γεννήτρια είναι συνδεδεμένη με φορτίο και συνεπώς τα τυλίγματα της διαρρέονται από συνεχές ρεύμα. Εφόσον οι αγωγοί των τυλιγμάτων είναι ρευματοφόροι και κινούνται μέσα σε μαγνητικό πεδίο, εφαρμόζεται σε αυτούς δύναμη κατά Lorentz με φορά αντίθετη προς τη φορά περιστροφής του δρομέα. Προκειμένου να συνεχίζει να περιστρέφεται ο δρομέας με σταθερή ταχύτητα, η επαγωγική μηχανή εφαρμόζει ίση και αντίθετη ροπή. Με το τρόπο αυτό, η μηχανική ισχύς από τον επαγωγικό κινητήρα προσδίδεται στη γεννήτρια και μετατρέπεται σε ηλεκτρική. Το ισοδύναμο κύκλωμα για γεννήτρια υπό φορτίο απεικονίζεται στο Σχήμα 1.8. Ισχύουν οι εξής σχέσεις



Σχήμα 1.8. Ισοδύναμο κύκλωμα για γεννήτρια υπό φορτίο.

$$i_a = i_\phi \quad (1-2\alpha)$$

$$v_\gamma = e_a - R_a i_a \quad (1-2\beta)$$

$$T_{HM,DC} = K_T i_a \quad (1-2\gamma)$$

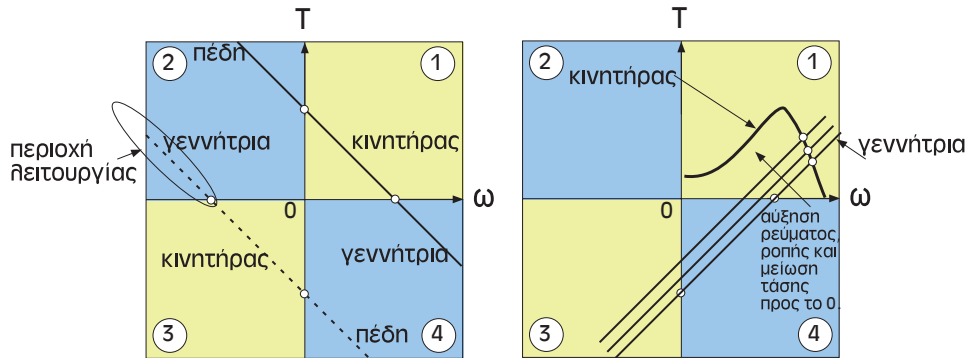
$$v_\gamma = K_T \omega - \frac{R_a}{K_T} T_{HM,DC} \quad (1-2\delta)$$

όπου  $i_a$  είναι το ρεύμα της γεννήτριας,  $K_T$  είναι η σταθερά ροπής της γεννήτριας,  $v_\gamma$  η τάση ακροδεκτών της γεννήτριας,  $e_a$  η ΗΕΔ της,  $T_{HM,DC}$  η ηλεκτρομαγνητική ροπή που εφαρμόζεται στο δρομέα και  $R_a$  η αντίσταση τυλιγμάτων του δρομέα της. Η τιμή της σταθεράς ροπής μπορεί να βρεθεί προσεγγιστικά χρησιμοποιώντας τις ονομαστικές τιμές της μηχανής.

Εάν ο επαγωγικός κινητήρας αναπτύσσει ηλεκτρομαγνητική ροπή  $T_{HM,3\phi}$ , στην άτρακτο αποδίδει ροπή μικρότερη και ίση με  $T_{μηχ}$ . Η μηχανική ισχύς που εισέρχεται στη γεννήτρια υφίσταται μηχανικές απώλειες και επομένως η ηλεκτρομαγνητική ροπή της γεννήτριας  $T_{HM,DC}$  είναι ακόμη μικρότερη.

$$T_{HM,3\phi} > T_{μηχ} > T_{HM,DC} \quad (1-3)$$

Η χαρακτηριστική T-ω της μηχανής απεικονίζεται στη πρώτη γραφική του Σχήματος 1.9, το οποίο δίνει πληροφορίες και για τους τέσσερις τρόπους λειτουργίας της μηχανής. Οι ονομαστικές τιμές της μηχανής ΣΡ δίνονται στο Παράρτημα.



Σχήμα 1.9. Λειτουργία ηλεκτρικής μηχανής ως κινητήρα, γεννήτρια και πέδη.

### (γ) Σύστημα μετατροπής ηλεκτρομηχανικής ενέργειας.

Η διάταξη μετατροπής ηλεκτρομηχανικής ενέργειας του πειράματος απαρτίζεται από ένα επαγωγικό κινητήρα (κινητήρια μηχανή) και από μια μηχανή (γεννήτρια) ΣΡ. Η θετική φορά περιστροφής του επαγωγικού κινητήρα είναι αντίθετη προς τη θετική φορά περιστροφής του κινητήρα ΣΡ.

Ας υποθέσουμε ότι η μηχανή ΣΡ εργάζεται ως κινητήρας. Τότε η ροπή και οι στροφές έχουν την ίδια (θετική) φορά, ενώ το ρεύμα εισέρχεται στη μηχανή ΣΡ από το θετικό (+) ακροδέκτη. Η τάση στα άκρα της μηχανής ΣΡ είναι  $v > 0$  και γι' αυτό λέμε ότι στη περίπτωση αυτή, στη μηχανή ΣΡ εισέρχεται ηλεκτρική ισχύς η οποία μετατρέπεται σε μηχανική ισχύ. Η λειτουργία περιγράφεται από το 1<sup>ο</sup> τεταρτημόριο της χαρακτηριστικής T-ω (βλ. πρώτη γραφική στο Σχήμα 1.9).

Όταν εκκινήσει ο επαγωγικός, τότε η μηχανή ΣΡ σταματάει την (θετική) περιστροφή και αρχίζει να περιστρέφεται με αντίθετη (αρνητική) φορά. Επίσης, η τάση στα άκρα της αλλάζει πολικότητα, δηλαδή τώρα είναι  $v_{\gamma} < 0$ . Το ρεύμα στους αγωγούς του τυμπάνου της μηχανής ΣΡ διατηρεί την ίδια φορά με πριν μόνο που τώρα μπαίνει από τον - ακροδέκτη. Συνεπώς και η ροπή διατηρεί την ίδια φορά με πριν (θετική). Αυτό φαίνεται και από το ότι το άθροισμα των ροπών είναι μηδέν, και γι' αυτό έχουμε σταθερές στροφές. Η συγκεκριμένη λειτουργία της μηχανής αντιστοιχεί σε κίνηση στο 2<sup>ο</sup> τεταρτημόριο (T θετικό, ω αρνητικό) της χαρακτηριστικής T-ω. Επειδή η τάση στα άκρα της μηχανής είναι αρνητική, πρόκειται για γεννήτρια. Στη περίπτωση αυτή, στη μηχανή ΣΡ εισέρχεται μηχανική ισχύς (μια και οι στροφές έχουν διαφορετική φορά, ενώ η ροπή διατηρεί την ίδια φορά) ενώ εξέρχεται ηλεκτρική ισχύς (μια και το ρεύμα έχει ίδια φορά, ενώ η τάση άλλαξε).

Στη δεύτερη γραφική του Σχήματος 1.9 συνδυάζονται οι χαρακτηριστικές ροπής-στροφών θεωρώντας ότι η μηχανή ΣΡ λειτουργεί σαν φορτίο του επαγωγικού κινητήρα. Η χαρακτηριστική της μηχανής ΣΡ είναι η συμμετρική της διακεκομμένης γραμμής της πρώτης γραφικής του Σχήματος 1.9 ως προς τον άξονα της ροπής. Αυτό γίνεται γιατί τώρα θετική φορά περιστροφής θεωρείται η φορά του επαγωγικού κινητήρα και η οποία είναι αντίθετη από τη θετική φορά περιστροφής της μηχανής ΣΡ. Αυξάνοντας το ρεύμα που παρέχει η γεννήτρια ΣΡ στο δίκτυο αυξάνεται η ροπή της ενώ μειώνεται η τάση  $v_{\gamma}$  σύμφωνα με την εξίσωση (1-2δ). Συνεπώς, η χαρακτηριστική της μηχανής ΣΡ κινείται προς τη ροπή ανατροπής του επαγωγικού κινητήρα και όταν φτάσει στο σημείο αυτό, ο επαγωγικός φρενάρει (stall).

## ΠΕΙΡΑΜΑ 2

### 2.1 Σκοπός του πειράματος

Μελέτη της επίδρασης της μειούμενης συχνότητας τροφοδοσίας - επαγωγικού κινητήρα, για  $V/f$  σταθερό - στη χαρακτηριστική T- $\omega$ . Για την επιτυχή εκτέλεση του πειράματος απαιτούνται τα παρακάτω.

- Κατανόηση των αρχών λειτουργίας τριφασικής επαγωγικής μηχανής.
- Κατανόηση των ισοδύναμων κυκλωμάτων που χρησιμοποιούνται για την ανάλυση της τριφασικής επαγωγικής μηχανής και των εξισώσεων που τα περιγράφουν.

### 2.2 Εισαγωγή

Η μορφή της χαρακτηριστικής ροπής-στροφών των επαγωγικών κινητήρων και το ότι αυτοί εργάζονται πολύ κοντά στις σύγχρονες στροφές, τους καθιστούσε μέχρι πρόσφατα ακατάλληλους για εφαρμογές όπου απαιτείται ευρεία μεταβολή στροφών.

Η ρύθμιση των στροφών επαγωγικών κινητήρων είναι εφικτή με τη χρήση ηλεκτρονικών οδηγήσεων. Αυτές μεταβάλουν τη χαρακτηριστική ροπής-στροφών και άρα ρυθμίζουν τις στροφές με τους εξής τρόπους:

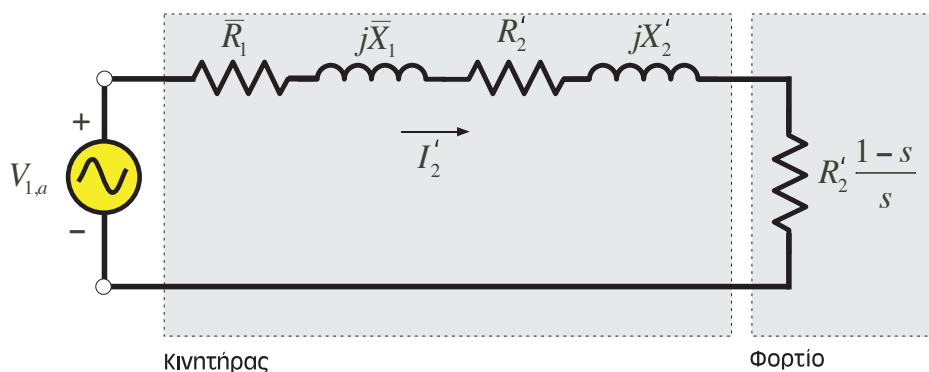
- Με μεταβολή της συχνότητας τροφοδοσίας.
- Με μεταβολή της συχνότητας και σταθερό λόγο Τάσης/ Συχνότητα τροφοδοσίας ( $V/f$ ).
- Με μεταβολή της τάσης τροφοδοσίας.
- Στο συγκεκριμένο πείραμα μελετάται η δεύτερη μέθοδος. Δηλαδή η μεταβολή της συχνότητας με σταθερό λόγο Τάσης/ Συχνότητα τροφοδοσίας.

### 2.3 Θεωρία

Παρουσίαση της θεωρίας των ηλεκτρομηχανών γίνεται στο αντίστοιχο βιβλίο θεωρίας του Καθ. Ευ. Παπαδόπουλου. Εδώ αναφέρονται ορισμένα στοιχεία.

Η ροπή ανατροπής της επαγωγικής μηχανής δίνεται από την εξίσωση (2-1), και η οποία βασίζεται στο ισοδύναμο κύκλωμα Thevenin, βλ. Σχήμα 2.1,

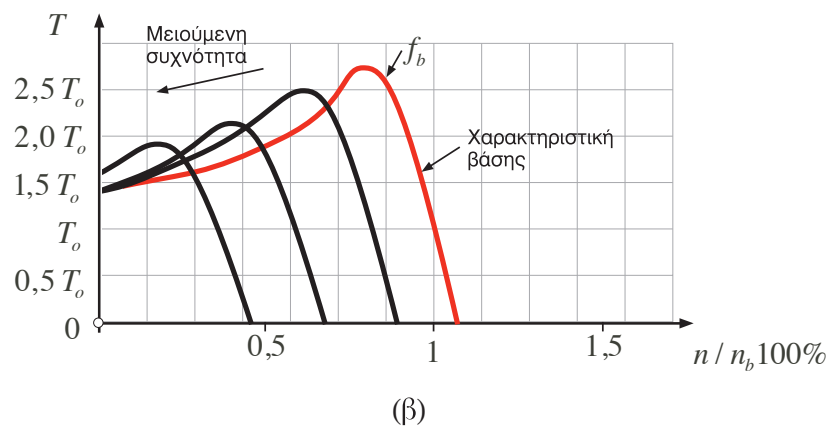
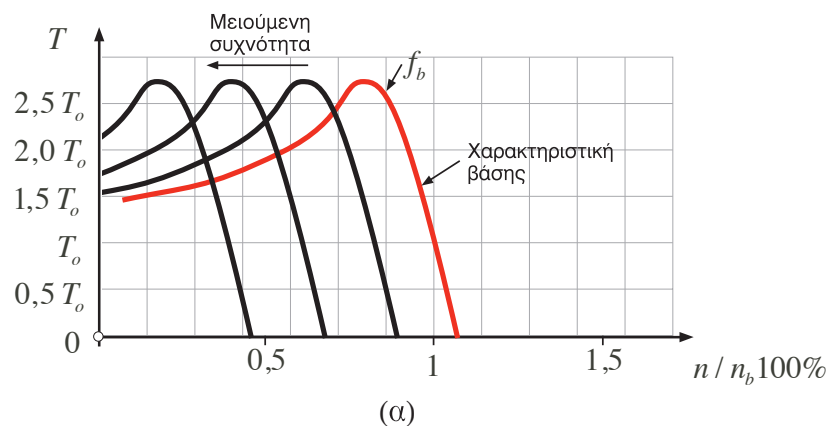
$$T_{\max} = \frac{1}{\omega_s} \cdot \frac{1,5V_{1,a}^2}{R_1 + \sqrt{R_1^2 + (\bar{X}_1 + X_2')^2}} \quad (2-1)$$



Σχήμα 2.1. Ισοδύναμο κύκλωμα 3Φ επαγωγικού κινητήρα.

Εάν υποθέσουμε ότι η αντίσταση των τυλιγμάτων του στάτη  $\bar{R}_1$  είναι αμελητέα, τότε η ροπή ανατροπής είναι ανάλογη του τετραγώνου της Τάσης/Συχνότητα. Επομένως, εάν μειώνουμε τη συχνότητα και κρατάμε το λόγο  $V/f$  σταθερό, τότε η ροπή ανατροπής μένει σταθερή και οι στροφές στις οποίες αυτή επιτυγχάνεται μειώνονται. Το αποτέλεσμα είναι ότι η χαρακτηριστική T-ω κινείται προς τα αριστερά. Βέβαια, η αντίσταση  $\bar{R}_1$  των τυλιγμάτων δεν είναι πάντα αμελητέα, για το λόγο αυτό η ροπή ανατροπής μειώνεται ελαφρά όσο η συχνότητα και η σύγχρονη ταχύτητα μειώνονται.

Παρόμοιες παρατηρήσεις ισχύουν για όλη τη χαρακτηριστική καμπύλη ροπής-στροφών. Για μικρές αντιστάσεις τυλιγμάτων, η καμπύλη μετατίθεται αυτούσια (παράλληλα) προς τα αριστερά βλ. Σχήμα 2.2 (α). Στην πράξη όμως παραμορφώνεται ελαφρά, βλ. Σχήμα 2.2 (β).



**Σχήμα 2.2. Μετάθεση της χαρακτηριστικής T-ω για μειούμενη συχνότητα και λόγο  $V/f$  σταθερό. (α) Αμελητέες αντιστάσεις τυλιγμάτων, (β) μη αμελητέες αντιστάσεις.**

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

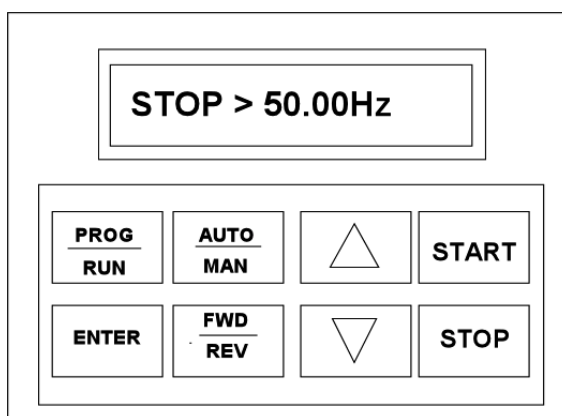
### 1. Αντιστροφέας (Inverter)

(Περισσότερες πληροφορίες αναφέρονται στο εγχειρίδιο του αντιστροφέα)

Ένας αντιστροφέας παράγει ισχύ μεταβλητής συχνότητας και φάσης από συνεχές ρεύμα με τη βοήθεια κυκλωμάτων από θυρίστορ. Ο συγκεκριμένος αντιστροφέας (M1220S της AC Tech) τροφοδοτείται με 1Φ ρεύμα, το οποίο πρώτα το μετατρέπει σε συνεχές ρεύμα χρησιμοποιώντας ανορθωτική διάταξη και στη συνέχεια το μετατρέπει σε 3Φ ρεύμα. Έχει 1Φ είσοδο 220 V και 3Φ έξοδο 0-120Hz. Οι ονομαστικές τιμές του δίνονται στον παρακάτω πίνακα.

ΟΝΟΜΑΣΤΙΚΗ ΙΣΧΥΣ (HP)	ΟΝΟΜΑΣΤΙΚΟ ΡΕΥΜΑ (A)	ΙΣΧΥΣ ΕΙΣΟΔΟΥ (KVA)	ΟΝΟΜΑΣΤΙΚΟ ΡΕΥΜΑ ΕΞΟΔΟΥ (A)	ΙΣΧΥΣ ΕΞΟΔΟΥ (KVA)
2,0	14,9	3,6	6,8	2,7

Ο πίνακας ελέγχου βλ. Σχήμα Π.1 του αντιστροφέα εξυπηρετεί κυρίως δύο σκοπούς (modes). Πρώτον, ρυθμίζει τον τρόπο λειτουργίας της επαγωγικής μηχανής (*RUN mode*). Δεύτερον, προγραμματίζει τις λειτουργίες του αντιστροφέα (*PROGRAM mode*). Το παράρτημα αυτό ασχολείται με τη ρύθμιση της λειτουργίας του επαγωγικού κινητήρα. Πληροφορίες για τον προγραμματισμό του αντιστροφέα μπορούν να βρεθούν στο εγχειρίδιο λειτουργίας του.



Σχήμα Π.1. Ο πίνακας ελέγχου του αντιστροφέα.

#### 1.1 Λειτουργίες του πίνακα ελέγχου

- **START/STOP.** Για να εκκινήσει η τροφοδοσία του επαγωγικού, πρέπει να πιέσετε το *START*. Για να σταματήσει πρέπει να πιέσετε το *STOP*.
- **FWD/REV.** Για να αλλάξετε τη φορά περιστροφής του επαγωγικού κινητήρα πιέστε το *FWD/REV* και στη συνέχεια πιέστε (μέσα σε τρία δευτερόλεπτα) το *ENTER*. (**Προσοχή!** Να μη γίνει καμία αλλαγή.)
- **AUTO/MAN.** Η ένδειξη αυτή καθορίζει την είσοδο (input) του αντιστροφέα από την οποία θα δίνεται το ηλεκτρονικό σήμα για το σημείο λειτουργίας των

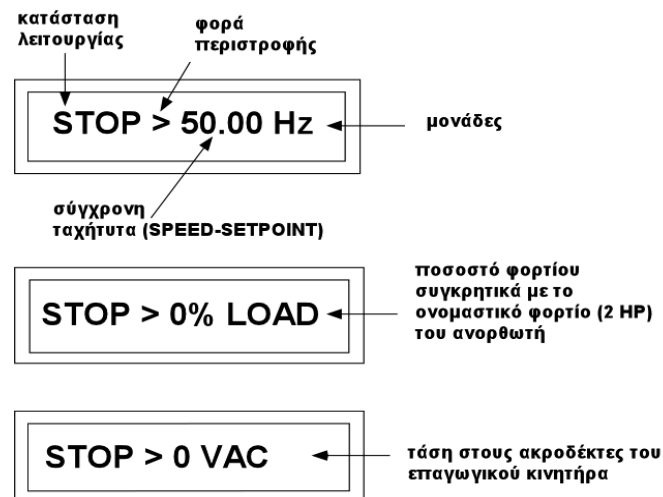


στροφών του κινητήρα. Για να γίνει αλλαγή από το *MANUAL* στο *AUTOMATIC* πρέπει να πιέσετε το *AUTO/MAN* και στη συνέχεια (μέσα σε τρία sec) πιέστε το *ENTER*. Έχει επιλεγεί το *MANUAL* το οποίο επιτρέπει να δίνεται η εντολή από τον πίνακα ελέγχου. (**Προσοχή!** Να μη γίνει καμία αλλαγή)

- *PROGRAM/RUN*. Η εντολή αυτή χρησιμοποιείται ώστε το mode του πίνακα ελέγχου να αλλάζει από το *RUN* mode στο *PROGRAM* mode και αντίστροφα. Για να γίνει αλλαγή από το *RUN* mode σε *PROGRAM* mode, πρέπει να πιέσετε το *PROG/RUN*. Πιέζοντας ξανά το *PROG/RUN* βγαίνετε από το *PROGRAM* mode και επιστρέφετε στο *RUN* mode.
- *ENTER*. Πιέζοντας το *ENTER* στο *PROGRAM* mode αποθηκεύεται η καινούρια τιμή κάποιας μεταβλητής. Πιέζοντας το *ENTER* στο *RUN* mode, αλλάζει η ένδειξη στο display από Hz σε % load και από % load σε VAC. Επίσης, αν γίνει αλλαγή κάποιας ρύθμισης (π.χ. *FWD* σε *REV* ή *AUTO* σε *MAN*), τότε πιέζοντας το *ENTER* αποθηκεύεται η αλλαγή στη μνήμη του αντιστροφέα.
- *UP/DOWN*. Τα βέλη *UP/DOWN* χρησιμοποιούνται για να αυξάνουν ή να μειώνουν την τιμή κάποιας μεταβλητής.

## 1.2 Πιθανές ενδείξεις του πίνακα ελέγχου

- *STOP*. Όταν ο αντιστροφέας δεν τροφοδοτεί τον επαγωγικό κινητήρα με ισχύ, τότε το display του πίνακα ελέγχου θα έχει μια από τις εικονιζόμενες ενδείξεις:



- Πιέζοντας το *ENTER* γίνεται αλλαγή από τη μια ένδειξη στην άλλη. Το *SPEED-SETPOINT* αυξάνεται ή μειώνεται χρησιμοποιώντας τα *UP/DOWN* βέλη.
- *RUN*. Όταν ο αντιστροφέας τροφοδοτεί τον επαγωγικό κινητήρα με ισχύ, τότε το display του πίνακα ελέγχου θα έχει την κατωτέρω ένδειξη.

**RUN > 50 Hz**

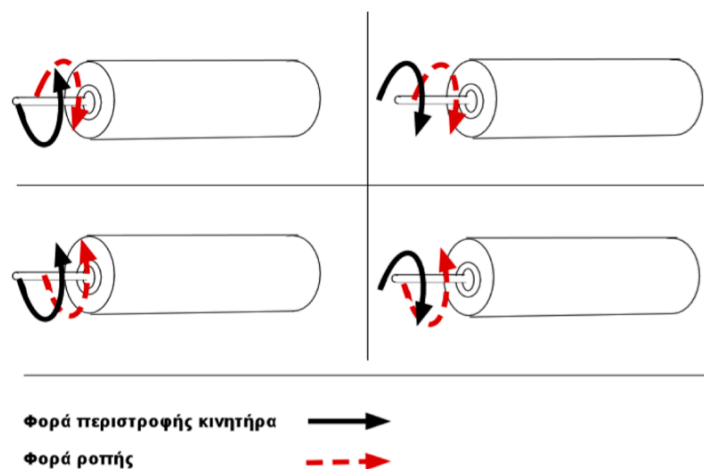
- Όπως και προηγουμένως πιέζοντας το *ENTER* μπορεί να γίνει αλλαγή από τη μια ένδειξη στην άλλη.
- *FAULT*. Σε περίπτωση σφάλματος εμφανίζεται η ένδειξη *FAULT* και ο αντιστροφέας αποκόπτει την τροφοδοσία. Πιέζοντας το *STOP*, ο αντιστροφέας

θα περάσει από την κατάσταση *FAULT* στη κατάσταση *STOP*. Όσο ο αντιστροφέας βρίσκεται στη κατάσταση *FAULT*, πιέζοντας το *ENTER* αλλάζει η ένδειξη από Hz σε % load και αντίστοιχα από % load σε VAC.

### 1.3 Ανορθωτής τεσσάρων τεταρτημορίων (4-quadrant)

(Περισσότερες πληροφορίες αναφέρονται στο εγχειρίδιο του ανορθωτή)

Ο ανορθωτής DF8-PLUS της Saftronics, τεσσάρων τεταρτημορίων (4-quadrant) αναγεννητικής πέδησης, είναι σχεδιασμένος να ελέγχει την ταχύτητα ή την ροπή μηχανής ΣΡ, είναι δηλαδή η οδήγηση της μηχανής ΣΡ. Οι ανορθωτές αυτού του τύπου παρέχουν συνεχή τάση μεταβλητού μέτρου από εναλλασσόμενη τάση χρησιμοποιώντας θυρίστορ. Ο ανορθωτής είναι 4-τεταρτημορίων επειδή επιτρέπει τη λειτουργία της μηχανής ΣΡ σε καθένα από τα τέσσερα τεταρτημόρια του επιπέδου που ορίζουν οι άξονες ροπής-στροφών Σχήμα Π.2.



Σχήμα Π.2. Λειτουργία της μηχανής ΣΡ σε τέσσερα τεταρτημόρια.

### 1.4 Ονομαστικές τιμές του ανορθωτή (50Hz)

ΤΑΣΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ (V)	ΟΝΟΜΑΣΤΙΚΗ ΙΣΧΥΣ (HP)	ΟΝΟΜΑΣΤΙΚΟ ΡΕΥΜΑ ΕΙΣΟΔΟΥ (A)	ΟΝΟΜΑΣΤΙΚΟ ΡΕΥΜΑ ΕΞΟΔΟΥ (A)
240	2	18	10

### 1.5 Περιγραφή του πίνακα ρύθμισης

Ο πίνακας ρύθμισης του ανορθωτή έχει δύο ενδείξεις, δύο ρυθμίσεις και δύο διακόπτες.

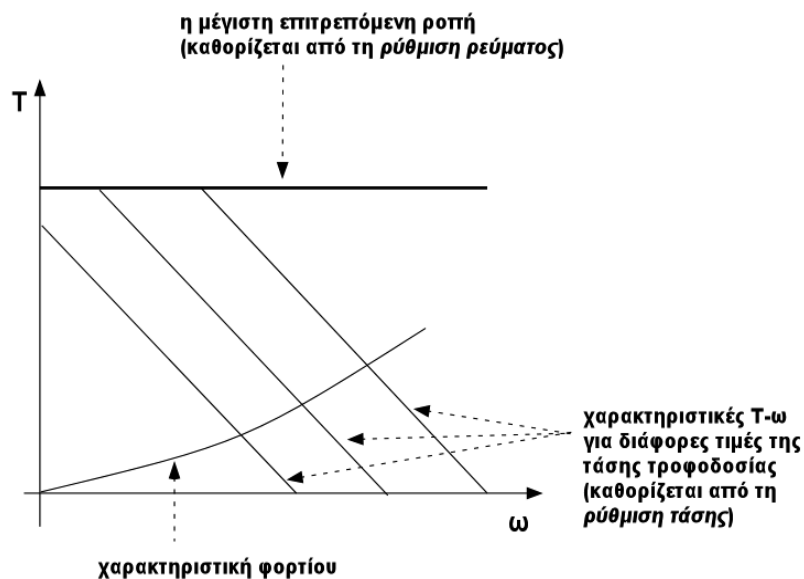
- Η αριστερή ένδειξη (*ένδειξη ρεύματος*) δίνει την τιμή του ρεύματος σε Amperes που διαρρέει τα τυλίγματα. Η δεξιά ένδειξη (*ένδειξη τάσης*) δίνει την τιμή της τάσης της ταχογεννήτριας. Η ταχογεννήτρια παράγει 20 V στις 1000 στροφές το λεπτό. Συνεπώς πολλαπλασιάζοντας τη δεξιά ένδειξη με τη σταθερά 50 υπολογίζετε τις στροφές της μηχανής ΣΡ σε rpm.

- Η αριστερή ρύθμιση (*ρύθμιση τάσης*) αυξάνει ή μειώνει την τάση ακροδεκτών της μηχανής ΣΡ. Η δεξιά ρύθμιση (*ρύθμιση ρεύματος*) αυξάνει ή μειώνει τη μέγιστη τιμή ρεύματος που επιτρέπεται να διαρρέει τα τυλίγματα του τυμπάνου της μηχανής ΣΡ. Συνεπώς καθορίζει και τη ροπή που ασκείται στον άξονα της μηχανής ΣΡ.
- Ο αριστερός διακόπτης (*FWD/REV*) ορίζει τη φορά περιστροφής του άξονα της μηχανής ΣΡ. Ο δεξιός διακόπτης (*AUTO/MAN*) ορίζει τον τρόπο με τον οποίο γίνονται οι ρυθμίσεις για τη λειτουργία της μηχανής. Όταν ο διακόπτης είναι ανεβασμένος οι ρυθμίσεις γίνονται αυτόματα. Όταν ο διακόπτης είναι κατεβασμένος οι ρυθμίσεις γίνονται χρησιμοποιώντας τον πίνακα ρύθμισης.

## 2. Ρύθμιση μηχανής ΣΡ

### 2.1 Λειτουργία κινητήρα ΣΡ

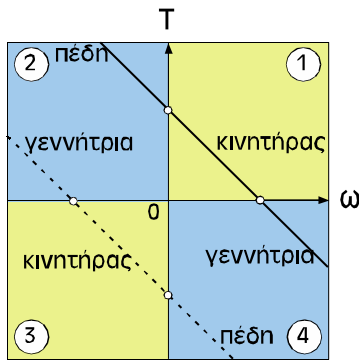
Η αριστερή ρύθμιση αυξάνει ή μειώνει την τάση τροφοδοσίας της μηχανής γι' αυτό ονομάζεται *ρύθμιση τάσης*. Η δεξιά ρύθμιση αυξάνει ή μειώνει το μέγιστο επιτρεπόμενο ρεύμα στα τυλίγματα της μηχανής, γι' αυτό ονομάζεται *ρύθμιση ρεύματος*. Συνεπώς, η τιμή της *ρύθμισης ρεύματος* καθορίζει τη μέγιστη επιτρεπόμενη ροπή η οποία μπορεί να παραχθεί στον άξονα του κινητήρα ΣΡ. Η *ρύθμιση τάσης* καθορίζει την χαρακτηριστική ροπής-στροφών πάνω στην οποία λειτουργεί ο κινητήρας ΣΡ. Σε ποιο σημείο της χαρακτηριστικής λειτουργεί ο κινητήρας ΣΡ, εξαρτάται από το φορτίο με το οποίο είναι συνδεδεμένος βλ. Σχήμα Π.3.



Σχήμα Π.3. Χαρακτηριστικές T-ω, για διάφορες τιμές της τάσης V.

### 2.2 Λειτουργία γεννήτριας ΣΡ

Επιθυμούμε η γεννήτρια ΣΡ να δημιουργεί αναγεννητική πέδηση. Σε αυτή την περίπτωση η τάση στους ακροδέκτες της μηχανής ΣΡ είναι αρνητική. Η μηχανή ΣΡ λειτουργεί πάνω στη διακεκομμένη γραμμή στο 2<sup>ο</sup> τεταρτημόριο του Σχήματος Π.4, δηλαδή λειτουργεί σαν γεννήτρια. Έτσι το μεγαλύτερο μέρος της κινητικής ενέργειας του επαγωγικού κινητήρα αποδίδεται πίσω στο δίκτυο δημιουργώντας αναγεννητική πέδηση.



**Σχήμα Π.4. Τα τέσσερα τεταρτημόρια λειτουργίας της μηχανής ΣΡ.**

Εάν τώρα, χρησιμοποιώντας τη *ρύθμιση τάσης* της οδήγησης της μηχανής ΣΡ, τροφοδοτήσουμε με θετική τάση τους ακροδέκτες της μηχανής ΣΡ, τότε η διακεκομμένη γραμμή του Σχήματος Π.4 θα αρχίσει να κινείται προς την περιοχή της πέδης. Το αποτέλεσμα θα είναι να δημιουργηθεί πέδηση με αντιστροφή τάσης και όχι αναγεννητική πέδηση. Δηλαδή ο κινητήρας θα δέχεται ταυτόχρονα μηχανική ισχύ και ηλεκτρική ισχύ και θα μετατρέπει και τις δύο σε θερμότητα. Για να αποφύγουμε την περίπτωση της πέδησης με αντιστροφή τάσης, η αριστερή ρύθμιση (*ρύθμιση τάσης*) δεν είναι ενεργοποιημένη όσο η μηχανή ΣΡ δουλεύει σαν γεννήτρια.

Χρησιμοποιώντας τη δεξιά ρύθμιση (*ρύθμιση ρεύματος*) καθορίζουμε το μέγιστο επιτρεπόμενο ρεύμα που μπορεί να διοχετευτεί στο δίκτυο. Όσο αυξάνουμε το επιτρεπόμενο ρεύμα τόσο αυξάνουμε και τη μέγιστη ροπή που μπορεί να ασκείται στους αγωγούς του τυμπάνου, ταυτοχρόνως αυξάνουμε και το φορτίο του επαγωγικού κινητήρα.

### 2.3 Ονομαστικές τιμές της επαγωγικής μηχανής

Ο κατασκευαστής της επαγωγικής μηχανής είναι η Ιταλική εταιρία CEG. Το 3-Φ τύλιγμα του στάτη είναι συνδεδεμένο σε διάταξη τριγώνου. Οι ονομαστικές τιμές αναφέρονται στον πίνακα κατωτέρω.

ΟΝΟΜΑΣΤΙΚΗ ΙΣΧΥΣ (HP)	ΣΥΧΝΟΤΗΤΑ (Hz)	ΤΑΣΗ ΕΙΣΟΔΟΥ (V)	ΡΕΥΜΑ ΕΙΣΟΔΟΥ (A)	ΟΝΟΜΑΣΤΙΚΕΣ ΣΤΡΟΦΕΣ (rpm)	cos(φ)
1	50	220	3,64	1410	0,79

### 2.4 Ονομαστικές τιμές της μηχανής ΣΡ

(Περισσότερες πληροφορίες αναφέρονται στο εγχειρίδιο της μηχανής ΣΡ)

Η μηχανή ΣΡ είναι μόνιμου μαγνήτη, χαμηλής τάσης και ο κατασκευαστής είναι η εταιρία LEESON. Η ονομαστικές τιμές αναφέρονται στο πίνακα κατωτέρω.

ΟΝΟΜΑΣΤΙΚΗ ΙΣΧΥΣ (KW)	ΟΝΟΜΑΣΤΙΚΗ ΤΑΣΗ (V)	ΟΝΟΜΑΣΤΙΚΟ ΡΕΥΜΑ (A)	ΟΝΟΜΑΣΤΙΚΕΣ ΣΤΡΟΦΕΣ (rpm)
1,1	180	7,1	3000





## ΠΕΙΡΑΜΑ 3

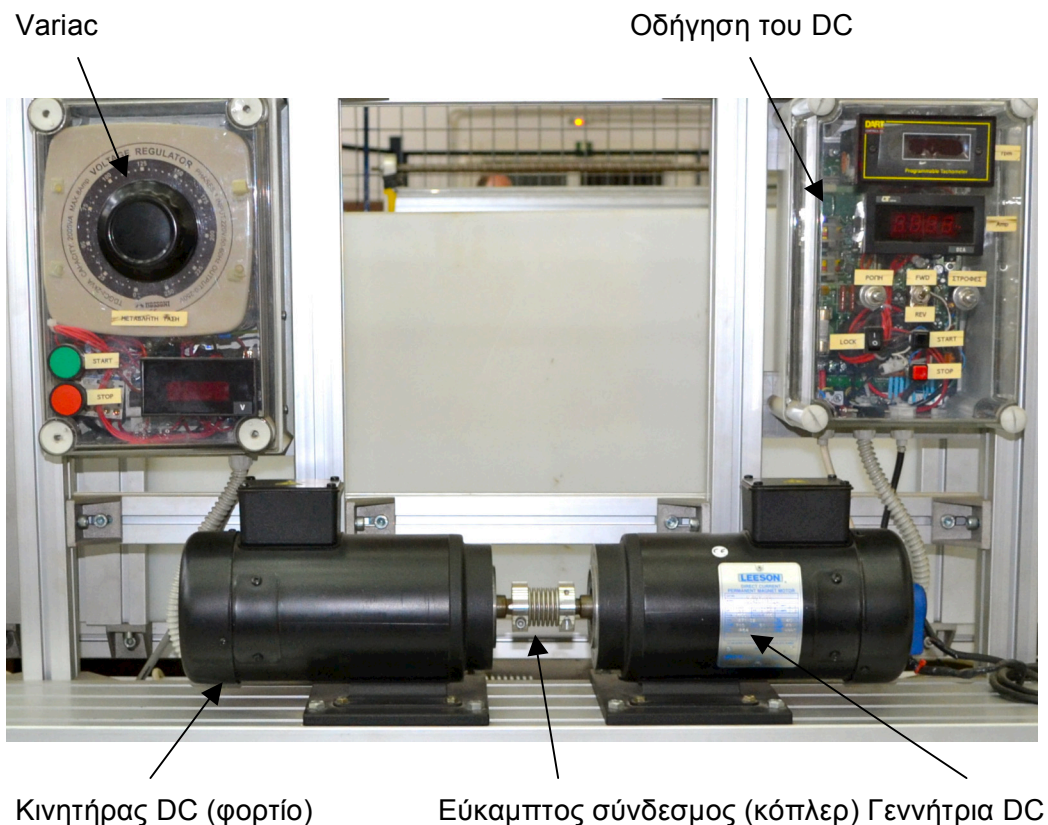
### 3.1 Σκοπός του πειράματος

Σκοπός του πειράματος είναι, η λήψη κατάλληλων μετρήσεων με σκοπό τη χάραξη της χαρακτηριστικής καμπύλης ροπής-στροφών καθώς και ο υπολογισμός του συντελεστή απόδοσης μηχανής συνεχούς ρεύματος.

Για την κατανόηση του πειράματος απαιτούνται βασικές γνώσεις της λειτουργίας των μηχανών συνεχούς ρεύματος (γεννήτριες και κινητήρες). Στο συγκεκριμένο φυλλάδιο θα γίνει μια υπενθύμιση των βασικών νομών που διέπουν την θεωρία των μηχανών ΣΡ. Αναλυτική παρουσίαση της θεωρίας των μηχανών γίνεται στο αντίστοιχο βιβλίο του Καθ. Ευ. Παπαδόπουλου.

### 3.2 Εισαγωγή

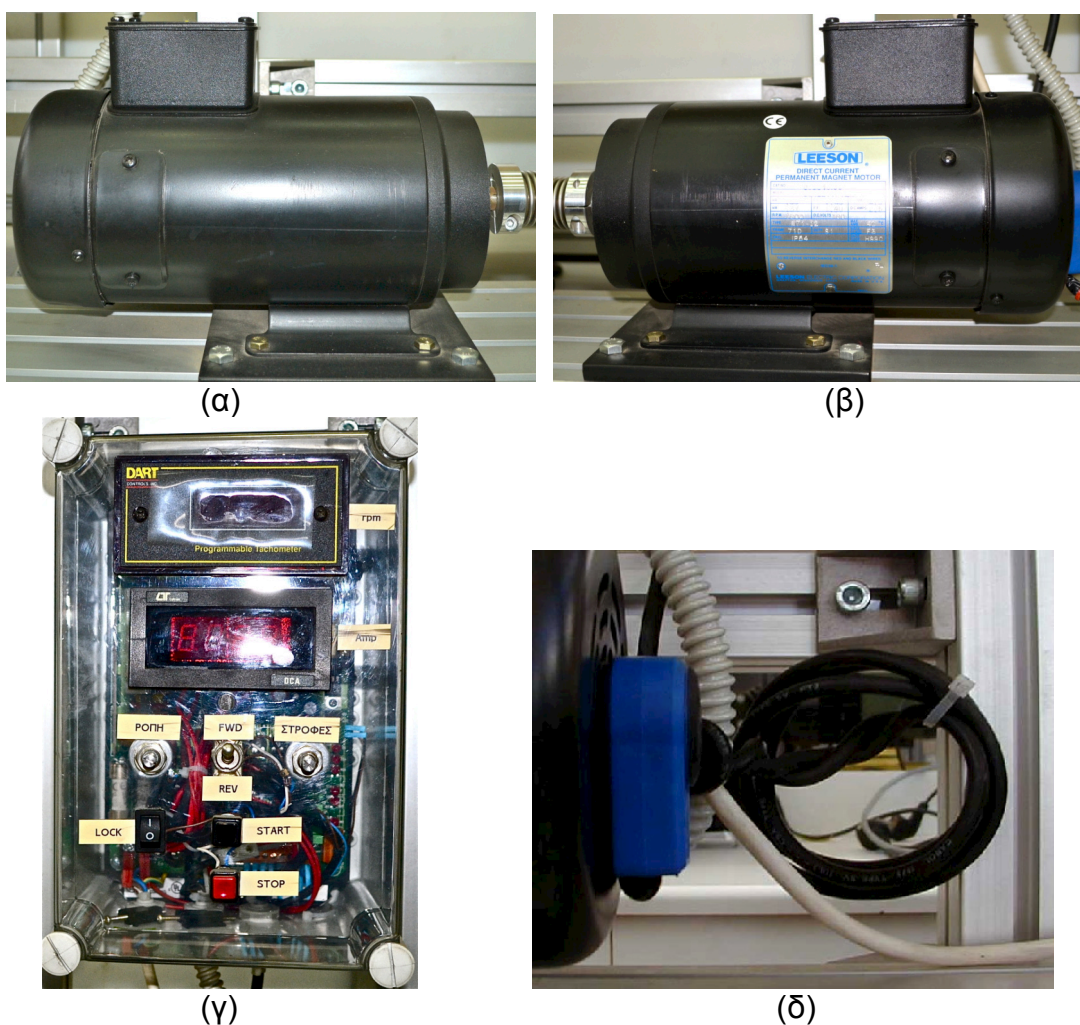
Στο πείραμα αυτό, θα μελετήσετε τη μεταβολή της ροπής της μηχανής συνεχούς ρεύματος σαν συνάρτηση των στροφών. Για να γίνει αυτό, θα πρέπει ο DC κινητήρας να οδηγεί ένα μεταβλητό φορτίο. Κάθε φορά που αλλάζει το φορτίο θα αλλάζει και η ροπή του κινητήρα. Έτσι με σταδιακές μεταβολές του φορτίου θα μπορέσετε να χαράξετε τη χαρακτηριστική T-ω αρχίζοντας από τις στροφές σε κενό φορτίο και φτάνοντας έως τις στροφές στο σημείο ανατροπής (μέγιστη ροπή). Στο συγκεκριμένο πείραμα το μεταβλητό φορτίο δίνεται από μια γεννήτρια συνεχούς ρεύματος η οποία είναι συνδεδεμένη με τον κινητήρα. Όσο αυξάνει το παραγόμενο ρεύμα στα τυλίγματα της γεννήτριας, τόσο αυξάνει το φορτίο του κινητήρα και κατά συνέπεια αυξάνει και η ροπή του. Η πειραματική διάταξη απεικονίζεται στο Σχήμα 3.1.



Σχήμα 3.1. Η ηλεκτρομηχανική διάταξη κινητήρων DC – DC.

Αποτελείται από τα μέρη που αναφέρονται κατωτέρω. Για το συγκεκριμένο πείραμα θα χρειαστούμε, βλ. Σχ. 3.2:

- Ένα κινητήρα συνεχούς ρεύματος μόνιμου μαγνήτη
- Μια γεννήτρια συνεχούς ρεύματος μόνιμου μαγνήτη ½ Hp (Leeson 098015.00)
- Μονοφασικό ανορθωτή τεσσάρων τεταρτημορίων Saffronics, DF8P-10
- Μια παλμογεννήτρια (encoder)
- Ένα Variac (μεταβλητή τάση εξόδου) με ανορθωτή τάσης



Σχήμα 3.2. (α) Ο κινητήρας συνεχούς ρεύματος μόνιμου μαγνήτη, (β) Η γεννήτρια συνεχούς ρεύματος μόνιμου μαγνήτη ½ Hp, (γ) Ο μονοφασικός ανορθωτής τεσσάρων τεταρτημορίων DF8P-10 και (δ) Η παλμογεννήτρια (encoder).

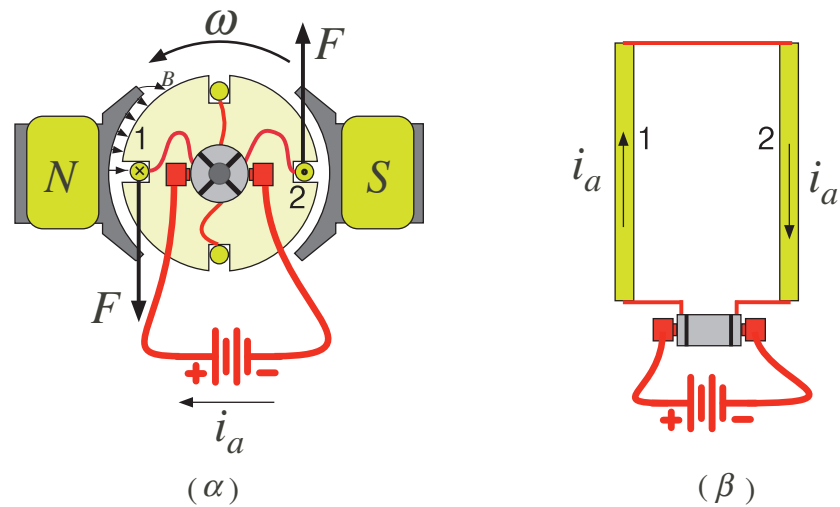
### 3.3 Θεωρία

#### (α) Κινητήρας συνεχούς ρεύματος

Όταν ένας κινητήρας ΣΡ συνδεθεί με συνεχή τάση τροφοδοσίας τότε τα τυλίγματα του δρομέα, διαρρέονται από ρεύμα και λόγω του ότι τα τυλίγματα βρίσκονται σε μαγνητικό πεδίο, αναπτύσσονται πάνω τους δυνάμεις κατά Lorentz. Ο δρομέας και όποιο φορτίο είναι πιθανόν συνδεδεμένο σε αυτόν, κάτω από την επίδραση αυτών των δυνάμεων περιστρέφεται (Σχήμα 3.3α). Με την πιο πάνω διαδικασία έχουμε την μετατροπή της

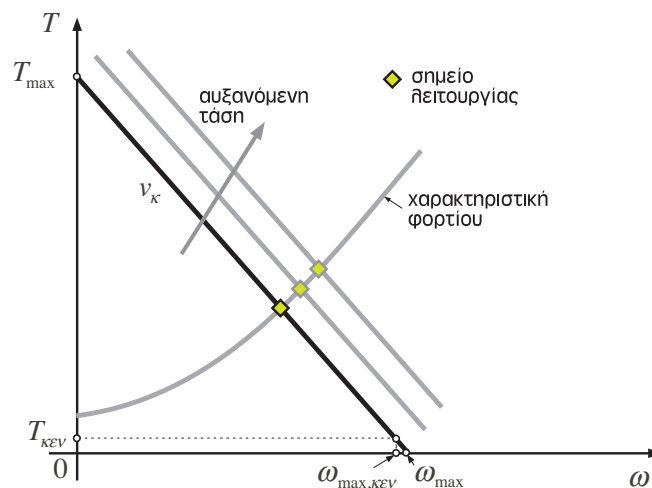


ηλεκτρικής ισχύς και σε μηχανική. Μόλις όμως αρχίσει ο δρομέας την περιστροφή, εμφανίζεται ένα δεύτερο φαινόμενο, αυτό της αντι-ηλεκτρεγερτικής δύναμης (ΑΗΕΔ). Η επαγόμενη ΑΗΕΔ έχει πολικότητα αντίστροφη από αυτή της τάσης τροφοδοσίας, και τείνει να αντισταθμίσει την αιτία που προκάλεσε την κίνηση.



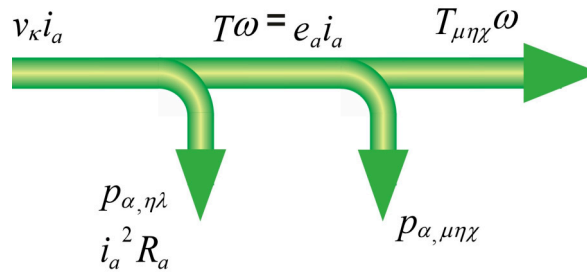
**Σχήμα 3.3. Ανάπτυξη ροπής σε κινητήρα ΣΡ. (α) Δημιουργία δυνάμεων στους ρευματοφόρους αγωγούς 1 και 2. (β) κάτοψη του τυλίγματος που περιλαμβάνει τους αγωγούς 1 και 2 και η σύνδεση του με το συσσωρευτή, μέσω των τομών δακτυλίου και ψηκτρών.**

Η χαρακτηριστική των κινητήρων συνεχούς ρεύματος είναι μια ευθεία γραμμή και για την χάραξη τους θεωρητικά χρειαζόμαστε δύο σημεία (Σχήμα 3.4).



**Σχήμα 3.4. Χαρακτηριστική T-ω κινητήρων ΣΡ ΜΜ. Περιλαμβάνεται η χαρακτηριστική του φορτίου και σημειώνεται το σημείο λειτουργίας.**

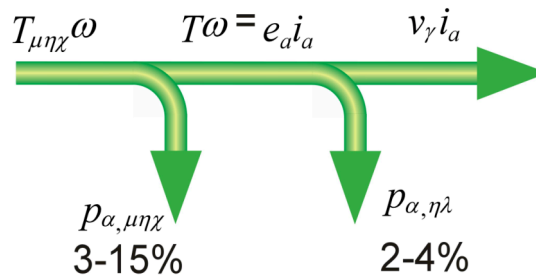
Περισσότερη ανάλυση και εξισώσεις για τους κινητήρες δεν απαιτούνται αφού τα χαρακτηριστικά του κινητήρα στο πείραμα θα θεωρούνται άγνωστα. Η ροή ισχύος για τον κινητήρα απεικονίζεται στο Σχήμα 3.5.



Σχήμα 3.5. Ροή ισχύος κινητήρα ΣΡ.

### (β) Γεννήτρια συνεχούς ρεύματος Μ.Μ.

Η γεννήτρια σε αντίθεση με τον κινητήρα είναι μηχανή η οποία μετατρέπει την μηχανική ισχύ που παίρνει από τον άξονα της σε ηλεκτρική. Η πιο πάνω μετατροπή γίνεται με παρόμοιο τρόπο όπως και στους κινητήρες αλλά με αντίστροφη φορά.



Σχήμα 3.6. Ροή ισχύος γεννήτριας ΣΡ

### 3.4 Πείραμα

Εκκινούμε τον κινητήρα, ο κινητήρας στρέφει την γεννήτρια και αυτή προσδίδει ρεύμα στο δίκτυο. Αρχίζουμε να μεταβάλλουμε (να αυξάνουμε) το ρεύμα που αποδίδει η γεννήτρια (μέσω της οδήγησης της γεννήτριας) συνεπώς αυξάνουμε την ροπή (φορτίο) που εφαρμόζει η γεννήτρια στον κινητήρα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα μια αλλαγή στην κοινή ταχύτητα περιστροφής και ο κινητήρας μεταπηδά σε επόμενο σημείο λειτουργίας της χαρακτηριστικής του.

Αλλάζοντας σταδιακά το ρεύμα που αποδίδει η γεννήτρια επιβάλλουμε συνεχώς διαφορετικό φορτίο στον κινητήρα και έτσι μετακινούμε το σημείο λειτουργίας πάνω στη χαρακτηριστική.

Παρακολουθώντας αυτές τις αλλαγές μπορούμε να χαράξουμε τη χαρακτηριστική ( $T, \omega$ ) της γεννήτριας, που όμως είναι η ίδια μηχανή με τον κινητήρα. Εάν χρειασθούν συμπληρωματικά στοιχεία, μπορούν να ληφθούν από τα φύλλα προδιαγραφών του κατασκευαστή (επισυνάπτονται).

1. Εκτελέστε πειράματα και συμπληρώστε τον πίνακα μετρήσεων που ακολουθεί.
2. Υπολογίστε τη σταθερά ροπής της μηχανής.
3. Υπολογίστε την ηλεκτρομαγνητική ροπή που αντιστοιχεί σε κάθε ταχύτητα και τάση.
4. Σχεδιάστε τη χαρακτηριστική ροπής στροφών της μηχανής.
5. Υπολογίστε την αντίσταση των τυλιγμάτων του δρομέα της μηχανής.
6. Παραδώστε την εργασία σας στο εργαστήριο ΠΡΙΝ τις εξετάσεις.

	V=		V=		V=	
	I (A)	Rpm	I (A)	Rpm	I (A)	Rpm
1						
2						
3						
4						
5						
6						
7						
8						
9						
10						
11						
12						
13						
14						
15						
16						
17						
18						
19						
20						