

LAB B Επαγωγική Μηχανή

Θεωρία και οδηγίες πειράματος

Μηχανές εναλλασσόμενου ρεύματος.

Οι δύο βασικές κατηγορίες στις οποίες χωρίζονται οι ηλεκτρικές μηχανές εναλλασσόμενου ρεύματος είναι οι **σύγχρονες μηχανές** και οι **επαγωγικές μηχανές**.

Οι μηχανές που κατασκευάζονται χωρίς κύκλωμα διέγερσης ονομάζονται επαγωγικές μηχανές (Induction machine). Αυτή η ονομασία οφείλεται στο γεγονός ότι σε μια επαγωγική μηχανή η τάση στον δρομέα ουσιαστικά επάγεται στο κύκλωμα διέγερσης αντί να προσφέρεται σε αυτό με κάποια ηλεκτρική σύνδεση.

Το ρεύμα διέγερσης **των επαγωγικών** μηχανών (γεννητριών και κινητήρων) παράγεται επαγωγικά στα τυλίγματα διέγερσης τους. Ενώ, το ρεύμα διέγερσης **των σύγχρονων** ηλεκτρικών μηχανών (γεννητριών και κινητήρων), παράγεται από ανεξάρτητες πηγές συνεχούς ρεύματος.

Στις ηλεκτρικές μηχανές εναλλασσόμενου ρεύματος το τύλιγμα του σπλισμού βρίσκεται, αντίθετα από ότι στις μηχανές συνεχούς ρεύματος, σχεδόν πάντα τοποθετημένο στο στάτη, ενώ το τύλιγμα διέγερσης τοποθετείται στο δρομέα.

Αρχή λειτουργίας επαγωγικών μηχανών (Induction machine)

- Είναι γνωστό ότι όταν υπάρχει σχετική κίνηση μεταξύ ενός μαγνητικού πεδίου και ενός αγωγού που βρίσκεται μέσα σε αυτό το πεδίο, στα άκρα του αγωγού έχουμε τη δημιουργία ηλεκτρεγερτικής δύναμης $E = -d\Phi_B/dt$. Επίσης είναι γνωστό ότι όταν αγωγός διαρρέεται με ρεύμα και βρίσκεται μέσα σε μαγνητικό πεδίο, αναπτύσσονται σε αυτόν μαγνητικής φύσης δυνάμεις (Laplace).
- Στάτης: Με την κατασκευή του δημιουργείται το επιθυμητό πλήθος ζευγών πόλων. Ο πυρήνας του στάτη κατασκευάζεται από πολλά λεπτά στοιβαγμένα ελάσματα από σιδηρομαγνητικό υλικό (πυριτικό ατσάλι), ηλεκτρικά μονωμένα μεταξύ τους που δημιουργούν αυλάκια. Οι περιελίξεις ή αλλιώς τυλίγματα ενώνονται και ομαδοποιούνται με κατάλληλο τρόπο, έτσι ώστε να δημιουργηθεί ο επιθυμητός αριθμός πόλων και τοποθετούνται μέσα στα αυλάκια του πυρήνα. Κάθε ομάδα τυλιγμάτων μαζί με τον πυρήνα αποτελούν έναν ηλεκτρομαγνήτη. Τα τυλίγματα του στάτη συνδέονται απ' ευθείας με το δίκτυο.



Σχήμα 1.1. Ο πυρήνας του στάτη κατασκευάζεται από πολλά λεπτά στοιβαγμένα ελάσματα ηλεκτρικά μονωμένα μεταξύ τους.

Οι τρεις φάσεις του τυλίγματος οπλισμού (στάτη) μίας μηχανής εναλλασσόμενου ρεύματος πρέπει να απέχουν 120 ηλεκτρικές μοίρες μεταξύ τους (οι μηχανικές μοίρες συμπίπτουν με τις ηλεκτρικές όταν η μηχανή διαθέτει ένα ζευγάρι μαγνητικών πόλων). Αν οι φάσεις αυτές τροφοδοτηθούν με ένα τριφασικό σύστημα ρευμάτων που έχουν το ίδιο πλάτος και διαφορά φάσης 120° μοίρες ανά δύο μεταξύ τους, στο εσωτερικό της μηχανής θα αναπτυχθεί ένα στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο σταθερού μέτρου.

Το μαγνητικό πεδίο του στάτη περιστρέφεται με ταχύτητα n_s , γνωστή ως σύγχρονη ταχύτητα.

$$n_s = 60f / p_{\zeta\omega\gamma\omega\iota} \text{ ή } n_s = 120f / p_{\pi\lambda\eta\theta\omicron\varsigma} \quad (1.1)$$

όπου

f η συχνότητα των ρευμάτων που δημιουργεί το περιστρεφόμενο μαγνητικό πεδίο,

p ο αριθμός των ζευγών μαγνητικών πόλων της μηχανής, ή το πλήθος των πόλων,

Λόγω της μεταβαλλόμενης διεύθυνσης και φοράς του μαγνητικού πεδίου, οι μαγνητικές γραμμές του πεδίου θα αλλάζουν θέση στο εσωτερικό της μηχανής, μέσα στο οποίο υπάρχει ο δρομέας με ένα σύστημα από αγώγιμες μπάρες.

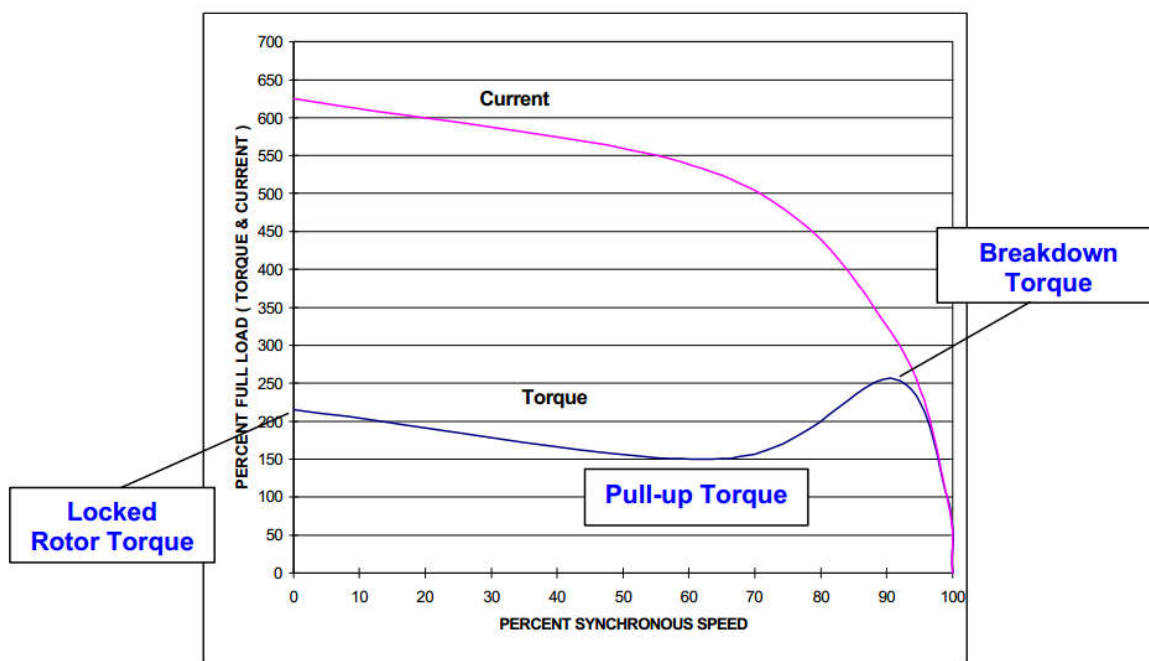
- Ο δρομέας αποτελείται από έναν πυρήνα όπως και ο στάτης, που φέρει ειδικά αυλάκια κατά μήκος του, αλλά αντί τυλίγματα χαλκού έχει για αγωγούς ράβδους (μπάρες) αλουμινίου τοποθετημένες στα αυλάκια (κάθε αυλάκι περιέχει ένα συμπαγή αγωγό). Τα άκρα από τις μπάρες συνδέονται μέσω δύο αγώγιμων δακτυλιδιών. Η επιφάνεια του δρομέα καλύπτεται από ένα στρώμα οξειδίου, που λειτουργεί ως μονωτικό για την αποφυγή των δινορρευσμάτων. Αν ο πυρήνας απομακρυνθεί, ο δρομέας μοιάζει με ένα κλουβί σκίουρου, για αυτό και το όνομα "**Squirrel Cage Induction Motor**", βλέπε Σχήμα 1.6.
- Το περιστρεφόμενο μαγνητικό πεδίο του στάτη «κόβει» το δρομέα και επάγει σε αυτόν ΗΕΔ. Το ρεύμα ρέει μέσα από τις μπάρες προς τον ένα από τους δύο ακριανούς δακτυλίους περνά στην απέναντι πλευρά και μέσω της απέναντι μπάρας επιστρέφει στο άλλο ακριανό δακτύλιο, και ούτω κάθε εξής. Το ρεύμα που διαρρέει τις μπάρες δημιουργεί ένα μαγνητικό πεδίο που ακολουθεί το πεδίο του στάτη.
- Η σχετική ταχύτητα δρομέα - στάτη καθορίζει πόσες γραμμές της μαγνητικής ροής «κόβονται» από τη μπάρα του δρομέα. Όσο μεγαλύτερη η διαφορά ταχύτητας περισσότερο ρεύμα επάγεται.
- Κατά τη διάρκεια της εκκίνησης ο δρομέας είναι εντελώς ακίνητος, έτσι το μέγιστο ρεύμα διαρρέει τις μπάρες. Αυτό το μέγιστο ρεύμα δημιουργεί ροπή «εκκίνησης» (**starting torque**). Αυτό το υπερβολικά μεγάλο ρεύμα δημιουργεί πολλές θερμικές απώλειες $I^2 R$ στο δρομέα. Για αυτό αν ο κινητήρας βρίσκεται σε κατάσταση κράτησης (**stall**) για πολλή ώρα, μπορεί να καταστραφεί εν μέρει ή ολικά ο δρομέας του. Επίσης κατά αυτή τη διάρκεια και ο στάτης βλέπει μεγάλο ρεύμα (λόγω φαινομένου μετασχηματιστή).
- Σχεδόν στιγμιαία, από τη στιγμή που θα εφαρμοστεί τάση στο στάτη, ο δρομέας αρχίζει να κινείται, το ρεύμα να μειώνεται και η ροπή επίσης να μειώνεται ελαφρά. Η ροπή φθάνει σε μια ελάχιστη τιμή που καλείται "**Pull-up torque**".
- Καθώς ο δρομέας πλησιάζει την ονομαστική του ταχύτητα, η ροπή αυξάνει και φτάνει έως ένα μέγιστο (peak) που καλείται "**Breakdown torque**" ή «**ροπή ανατροπής**».
- Όταν ο κινητήρας φτάνει στην πλήρη ταχύτητά του χωρίς φορτίο, ο δρομέας περιστρέφεται με ταχύτητα πολύ κοντά στην ονομαστική του και με ταχύτητα κοντά στη σύγχρονη. Κατά την κατάσταση αυτή που πολύ

λίγες γραμμές του μαγνητικού πεδίου κόβονται από το δρομέα και ελάχιστο ρεύμα επάγεται στις μπάρες του.

- Κατά τις κανονικές συνθήκες λειτουργίας του κινητήρα, καθώς το φορτίο αυξάνεται, η ταχύτητα του δρομέα μειώνεται, περισσότερες μαγνητικές γραμμές κόβονται από το δρομέα και δημιουργείται περισσότερο ρεύμα και μεγαλύτερη ροπή.
- Καθώς το ρεύμα αυξάνει ο δρομέας και ο στάτης αρχίζουν να φτάνουν σε κατάσταση μαγνητικού κορεσμού, που σημαίνει ότι η ροπή που παράγει κάθε ένα αμπέρ αρχίζει να μειώνεται. Για παράδειγμα, στο 100% του φορτίου ο κινητήρας «τραβάει» το 100% της ονομαστικής τιμής του ρεύματος. Στο 250% του φορτίου ο κινητήρας τραβάει το 300% του ονομαστικού ρεύματος.
- Όταν το φορτίο γίνεται μεγαλύτερο από αυτό του σημείου ροπής “ Breakdown”, η ροπή που αναπτύσσει ο κινητήρας πέφτει. Όταν συμβεί αυτό ο κινητήρας «κρατάει» (stall), ο δρομέας θερμαίνεται και θα καταστραφεί αν δεν αποσυνδέσουμε τη μηχανή. Όσο πιο υψηλή είναι η τιμή του “ Breakdown torque”, τόσο πιο χαμηλή η τιμή του “stall torque”.
- Είναι ενδιαφέρον ότι η ταχύτητα είναι αρκετά γραμμική ως προς την ροπή στην περιοχή κοντά στο σημείο “ Breakdown torque”. Αυτό μας επιτρέπει να υπολογίσουμε με ακρίβεια το ποσοστό τρέχοντος φορτίου που δρα στον άξονα του κινητήρα από τη μέτρηση της τρέχουσας ταχύτητάς του με ένα ταχύμετρο ακριβείας.

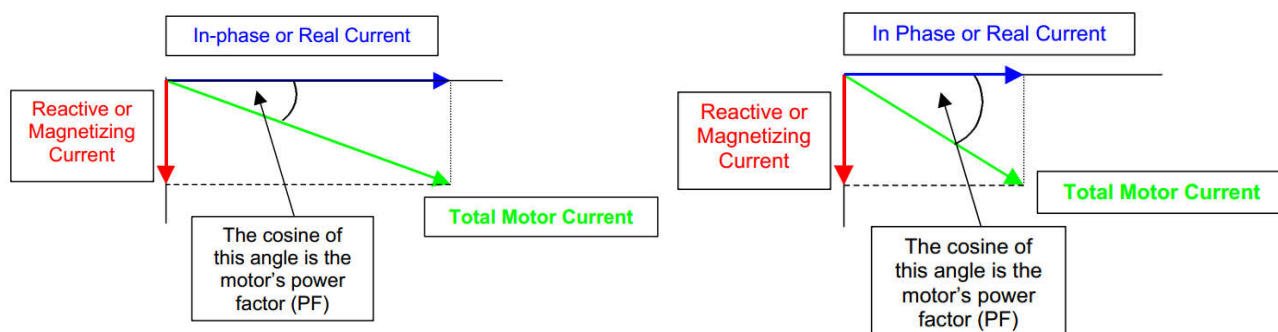
$$\% \text{ of full load} = \frac{\text{Nominal RPM} - \text{Tachometer RPM}}{\text{Nominal RPM} - \text{full load RPM}} \quad (1.2)$$

Η μέτρηση του ρεύματος ή του P.F. δεν είναι καλή μέθοδος γιατί τόσο η απόδοση όσο κι η ολίσθηση της μηχανής μεταβάλλονται με το φορτίο μη αναλογικά. Για παράδειγμα, μηχανή 7.5 Hp, 575 V, τραβάει 2.9 A σε no load, 4.5 A σε ½ load, 7.4 A σε full load.



Σχήμα 1.2. Επαγόμενη ροπή– ρεύμα στάτη σε συνάρτηση με την ταχύτητα του επαγωγικού κινητήρα.

Ο κινητήρας τραβάει δύο συνιστώσες ρεύματος. Η μια είναι συμφασική με την τάση, είναι πραγματικό ρεύμα (in-phase , real) . Η άλλη είναι άεργη ή επαγωγική, βρίσκεται σε διαφορά φάσης 90° ως προς την τάση, που ονομάζεται ρεύμα μαγνήτισης. Η συνιστώσα αυτών των ρευμάτων βρίσκεται υπό γωνία με την τάση, η οποία ονομάζεται συντελεστής ισχύος $\cos \varphi$ ή “power factor” (P.F.). καθώς το φορτίο μειώνεται, το πραγματικό ρεύμα συρρικνώνεται γρηγορότερα από το ρεύμα μαγνήτισης και έχει σαν αποτέλεσμα η γωνία φάσης να γίνεται μεγαλύτερη και ο P.F. μικρότερος.



Σχήμα 1.3. Το ολικό ρεύμα που τραβά ο κινητήρας βρίσκεται σε διαφορά φάσης με την τάση τροφοδοσίας του στάτη. Κατά την μείωση του εξωτερικού φορτίου, η συνιστώσα του ρεύματος μαγνήτισης μειώνεται πιο αργά από το πραγματικό ρεύμα με αποτέλεσμα να μεγαλώνει η διαφορά φάσης.

Ταχύτητα ολίσθησης (slip speed)

Η περιγραφή-συσχέτιση της σχετικής κίνησης του δρομέα ως προς τα μαγνητικά πεδία του στάτη εκφράζεται ως **ταχύτητα ολίσθησης (slip speed)** που ορίζεται ως η διαφορά της ταχύτητας του δρομέα από τη σύγχρονη ταχύτητα (την ταχύτητα περιστροφής των μαγνητικών πεδίων του στάτη)

$$s = n_s - n_m \quad (1.3)$$

$$\text{ή} \quad s = \frac{n_s}{n_m} = \frac{n_s - n_m}{n_s} (100\%) \quad (1.4)$$

όπου

s η ταχύτητα ολίσθησης της μηχανής (rpm),

n_s η ταχύτητα των μαγνητικών πεδίων του στάτη (rpm),

n_m η μηχανική ταχύτητα του άξονα της μηχανής (rpm).

Ένας επαγωγικός κινητήρας μπορεί να περιστρέφεται με ταχύτητα πολύ κοντά στη σύγχρονη ταχύτητα, αλλά δεν είναι ποτέ δυνατό να περιστρέφεται με ταχύτητα ακριβώς ίση με τη σύγχρονη ταχύτητα.

Η ολίσθηση είναι μηδέν ($s=0$) αν ο δρομέας της μηχανής περιστρέφεται με τη σύγχρονη ταχύτητα ($n_m=n_s$).

Η ολίσθηση είναι ένα ($s=1$) αν ο δρομέας είναι ακίνητος ($n_m=0$). Αν η ταχύτητα του άξονα της μηχανής (μηχανική ταχύτητα ή ασύγχρονη ταχύτητα) n_m , ήταν ίση με τη σύγχρονη ταχύτητα (ταχύτητα περιστροφής του μαγνητικού πεδίου του στάτη), δεν θα υπήρχε σχετική κίνηση των αγωγών του δρομέα ως προς το μαγνητικό πεδίο του στάτη και δεν θα αναπτύσσονταν τάση εξ' επαγωγής στα άκρα τους. Οπότε οι αγωγοί του δρομέα δεν θα διαρρέονταν

από ρεύμα και δεν θα αναπτύσσονταν δύναμη στο δρομέα. Σε αυτή την περίπτωση θα προκαλούσαμε επιβράδυνση του κινητήρα λόγω της τριβής μεταξύ των επιφανειών των υλικών του κινητήρα.

Όταν η μηχανή λειτουργεί σαν κινητήρας, σε οποιαδήποτε άλλη περίπτωση, η τιμή της ολίσθησης μεταβάλλεται μεταξύ των δύο ορίων, δηλαδή ($0 \leq s \leq 1$). (Στην περίπτωση κινητήρα, πάντα η ταχύτητα του δρομέα είναι μικρότερη της σύγχρονης).

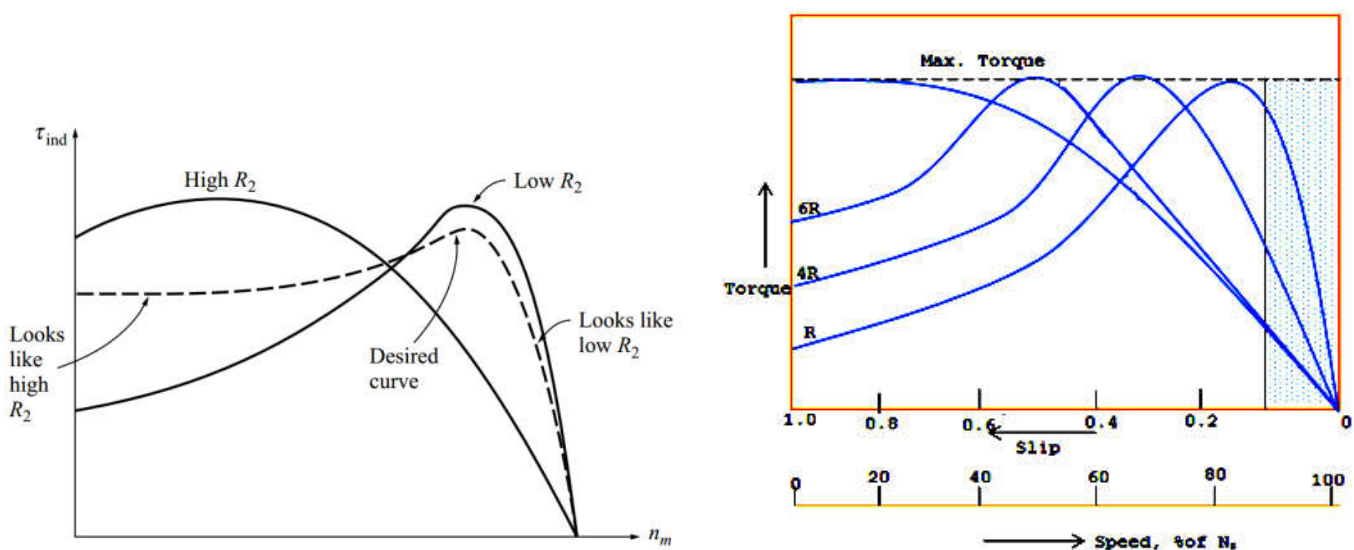
Η ολίσθηση είναι αρνητική όταν λειτουργεί σαν γεννήτρια, ($-1 \leq s < 0$). Στην περίπτωση της γεννήτριας η ταχύτητα του δρομέα είναι μεγαλύτερη της σύγχρονης.

Αν η ταχύτητα του άξονα της μηχανής (μηχανική ταχύτητα του δρομέα) ήταν ίση με τη σύγχρονη ταχύτητα (ταχύτητα περιστροφής του μαγνητικού πεδίου του στάτη), δεν θα υπήρχε σχετική κίνηση των αγωγών του δρομέα ως προς το μαγνητικό πεδίο του στάτη και δεν θα αναπτύσσονταν τάση εξ' επαγωγής στα άκρα τους. Οπότε οι αγωγοί του δρομέα δεν θα διαρρέονταν από ρεύμα και δεν θα αναπτύσσονταν δύναμη στο δρομέα. Σε αυτή την περίπτωση θα προκαλούσαμε επιβράδυνση του κινητήρα λόγω της τριβής μεταξύ των επιφανειών των υλικών του κινητήρα.

Αν η ταχύτητα του δρομέα ήταν μεγαλύτερη από την σύγχρονη ταχύτητα του κινητήρα θα είχαμε αντιστροφή των φαινομένων και ο κινητήρας θα λειτουργούσε ως γεννήτρια.

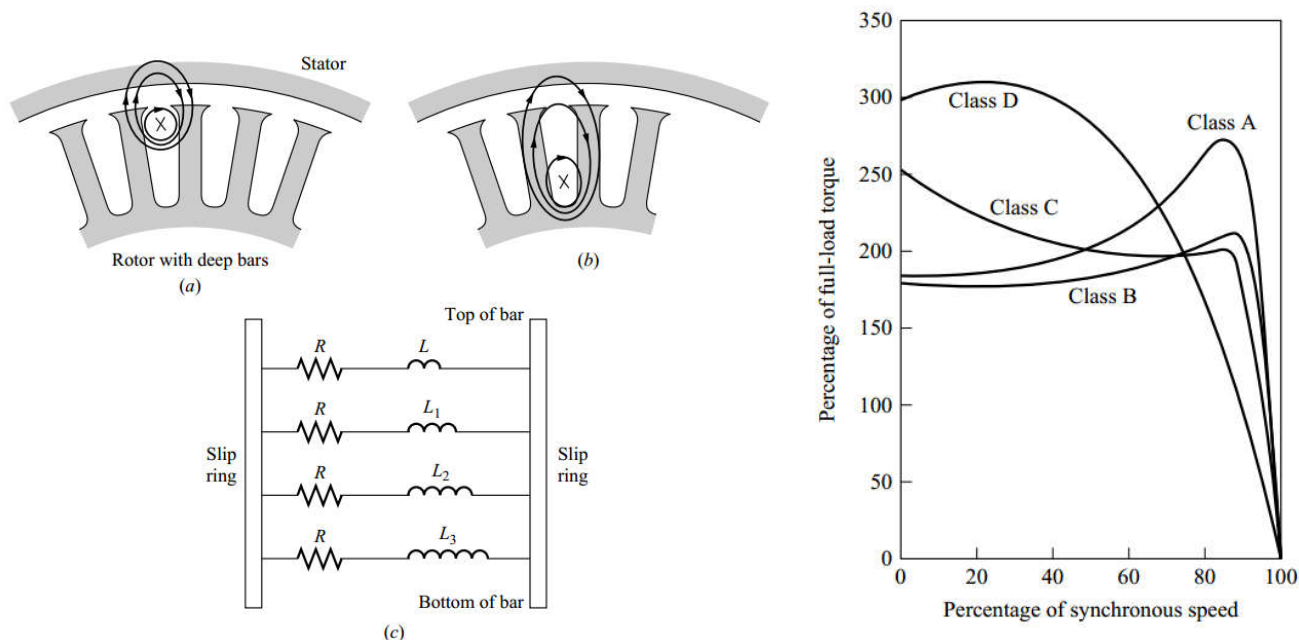
Ένας επαγωγικός κινητήρας μπορεί να περιστρέφεται με ταχύτητα πολύ κοντά στη σύγχρονη ταχύτητα, αλλά δεν είναι ποτέ δυνατό να περιστρέφεται με ταχύτητα ακριβώς ίση με τη σύγχρονη ταχύτητα.

- Η επαγωγική αντίσταση X_2 (Ω) του δρομέα, στο ισοδύναμο κύκλωμα του επαγωγικού κινητήρα βλέπε Σχήμα 1.9, εκφράζει την «αντίδραση σκέδασης» (**leakage reactance**), του δρομέα. Αφορά στις μαγνητικές γραμμές του πεδίου του δρομέα που δεν βρίσκονται σε σύζευξη με το στάτη (δεν φτάνουν σε αυτόν). Από κατασκευή, όσο πιο κοντά στο στάτη τοποθετούνται οι μπάρες, τόσο μικρότερη είναι η αντίδραση σκέδασης.



Σχήμα 1.4. Χαρακτηριστική καμπύλη ροπής – ταχύτητας που συσχετίζουν την επιθυμητή καμπύλη ροπής να έχει υψηλή αντίσταση στις χαμηλές στροφές και χαμηλή τιμή στις υψηλές στροφές. Αυξάνοντας την ωμική αντίσταση του δρομέα μεταφέρεται η «ροπή ανατροπής» σε χαμηλή ταχύτητα.

Στο παρακάτω σχήμα δείχνεται η σκέδαση των μαγνητικών γραμμών του δρομέα προς το στάτη είναι μεγαλύτερη στο σχήμα “α” από ότι στο “b”. Στο σχήμα “c” δείχνεται το ηλεκτρικό ισοδύναμο των αντιστάσεων μιας ράβδου του δρομέα, για διαφορετικές αποστάσεις της από το στάτη. Η ωμική της αντίσταση δεν αλλάζει, ενώ η αντίδραση σκέδασης μικραίνει όσο η ράβδος βρίσκεται πλησιέστερα στο στάτη.



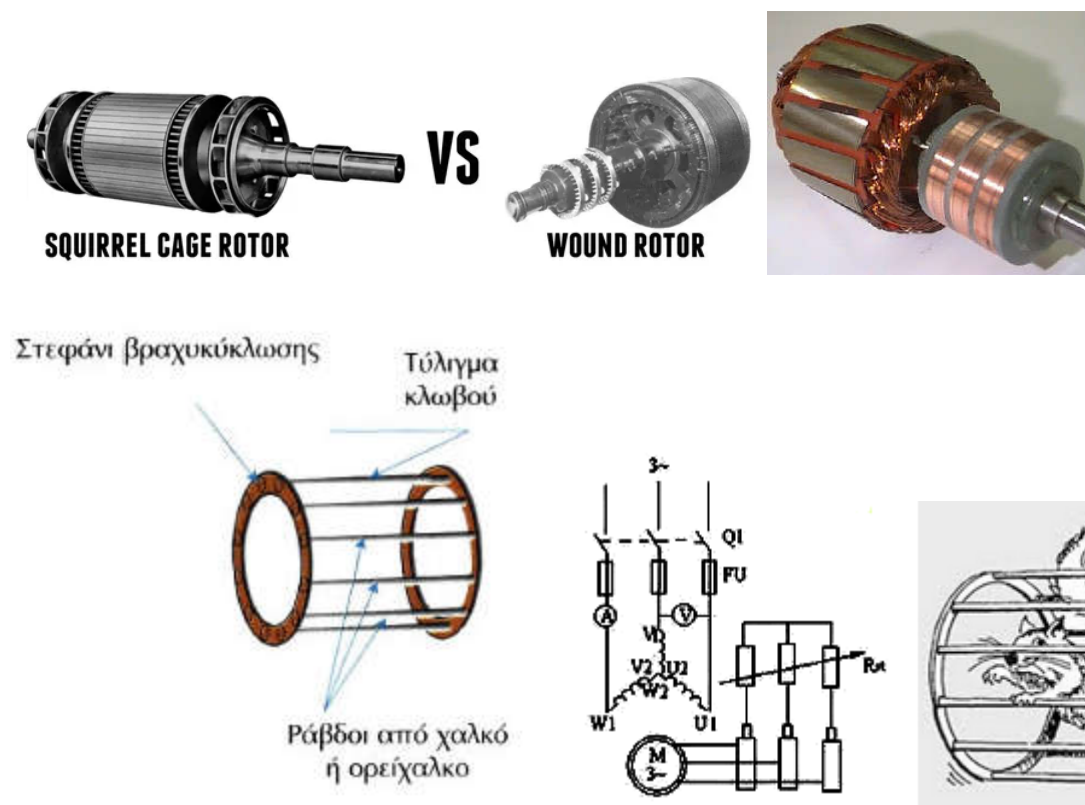
Σχήμα 1.5. Η απόσταση της μπάρας του δρομέα από το στάτη επηρεάζει την αντίσταση σκέδασης. Ανάλογα τον τρόπο κατασκευής των αυλακιών του δρομέα επηρεάζεται η χαρακτηριστική καμπύλη ροπής.

Η κατασκευή του δρομέα αλλάζει τη χαρακτηριστική καμπύλη ροπής του επαγωγικού κινητήρα. Τα μεγάλα αυλάκια στον πυρήνα μειώνουν την ωμική του αντίσταση, ενώ τα μικρά την αυξάνουν. Όταν είναι βαθιά τα αυλάκια μεγαλώνει η απόσταση μεταξύ στάτη αγωγικών ράβδων του δρομέα και μεγαλώνει η σκέδαση του μαγνητικού πεδίου του δρομέα (Δείτε σχετικό σχήμα στην τελευταία σελίδα).

Είδη ασύγχρονων κινητήρων

Ένας επαγωγικός κινητήρας έχει τον ίδιο στάτη με μια σύγχρονη μηχανή, ενώ ο δρομέας του έχει διαφορετική δομή. Οι τύποι των δρομέων που τοποθετούνται στο εσωτερικό του στάτη ενός επαγωγικού κινητήρα είναι δύο.

1. Δρομέας βραχυκυκλωμένου κλωβού (squirrel-cage rotor), δεν διαθέτει slip rings.
2. Δακτυλιοφόρος δρομέας (wound rotor), διαθέτει τρία slip rings για να συνδέονται τρεις ωμικές αντιστάσεις.



Σχήμα 1.6. Στις επαγωγικές μηχανές οι τύποι των δρομέων που τοποθετούνται στο εσωτερικό του στάτη μπορεί να είναι τύπου κλωβού με ή χωρίς βραχυκυκλωμένες μπάρες μέσω αγωγικών δακτυλίων (slip rings). Τα δακτυλίδια εξυπηρετούν για να συνδεθούν με σύστημα τριών εξωτερικών μεταβλητών ωμικών αντιστάσεων. Σε κάθε περίπτωση, ο δρομέας δεν ηλεκτροδοτείται από εξωτερική πηγή.

Στην περίπτωση δρομέα βραχυκυκλωμένου κλωβού, αγωγικά δακτυλίδια στα δύο άκρα των αγωγικών ράβδων τις βραχυκυκλώνουν. Στην περίπτωση δακτυλιοφόρου δρομέα, οι ράβδοι καταλήγουν σε τρία αγωγικά «δακτυλίδια» που επιτρέπουν να γίνουν συνδέσεις με εξωτερική, τριφασική, μεταβλητή ωμική αντίσταση. Με τη βοήθεια αυτών των αντιστάσεων μειώνεται το ρεύμα εκκίνησης.

Η ροή ενέργειας στους επαγωγικούς κινητήρες

Το ποσό ισχύος που θα τροφοδοτήσει το στάτη της μηχανής από εξωτερική εναλλασσόμενου ρεύματος πηγή, υπολογίζεται ως P_{in} ,

$$P_{in} = \sqrt{3} V_{pol_{rms}} I_{rms} \cos(\varphi) \quad (1.5)$$

θα μειωθεί λόγω απωλειών.

Σαν πρώτη αιτία της μείωσης είναι η απώλεια ενέργειας λόγω των θερμικών απωλειών στα τυλίγματα του στάτη, οι οποίες οφείλονται στον χαλκό που χρησιμοποιούμε για του αγωγούς του ρεύματος. Θα τις συμβολίσουμε ως P_{sCu} (Cu: χαλκός) ονομάζονται και απώλειες χαλκού.

Ένα ποσό ενέργειας χάνεται εξαιτίας των απωλειών υστέρησης και των δινορρευμάτων (eddy currents) που αναπτύσσονται στον στάτη του κινητήρα. Θα τις συμβολίσουμε ως P_{core} , ονομάζονται και απώλειες σιδήρου.

Η ισχύς που απομένει είναι

$$P_g = P_{in} - P_{S_{Cu}} - P_{core} \quad (1.6)$$

που θα περάσει το διάκενο (air gap) της μηχανής και θα μεταφερθεί στο δρομέα της. Θα την ονομάσουμε ισχύ διακένου και θα συμβολιστεί ως P_g .

Ένα μέρος της ισχύος P_g που μεταφέρεται στον δρομέα του κινητήρα θα χαθεί εξαιτίας των θερμικών απωλειών στα τυλίγματα του δρομέα οι οποίες οφείλονται στον χαλκό που χρησιμοποιούμε για του αγωγούς του ρεύματος. Θα τις συμβολίσουμε ως $P_{R_{Cu}}$ (R : rotational, Cu : χαλκός), και η απομένουσα ηλεκτρική ισχύ θα μετατραπεί σε μηχανική η οποία ονομάζεται αναπτυσσόμενη μηχανική ισχύς

$$P_{conv} = P_g - P_{R_{Cu}} = (1-s)P_g \quad (1.7)$$

Από αυτή την ισχύ θα έχουμε απώλειες τριβής λόγω των τριβών στις επιφάνειες των εξαρτημάτων της μηχανής και απώλειες εξαερισμού, γιατί πρέπει να ψύχεται η μηχανή. Θα τις συμβολίσουμε ως P_{F-W} .

Επίσης υπάρχουν και οι κατανεμημένες απώλειες P_{misc} .

Στο δρομέα θα υπάρχουν και απώλειες σιδήρου (υστέρησης και δινορευμάτων) όμως είναι πολύ μικρές σε σχέση με αυτές του στάτη και θα αγνοηθούν.

Η ισχύς που θα εξέλθει από την μηχανή όταν λειτουργεί σαν κινητήρας θα είναι

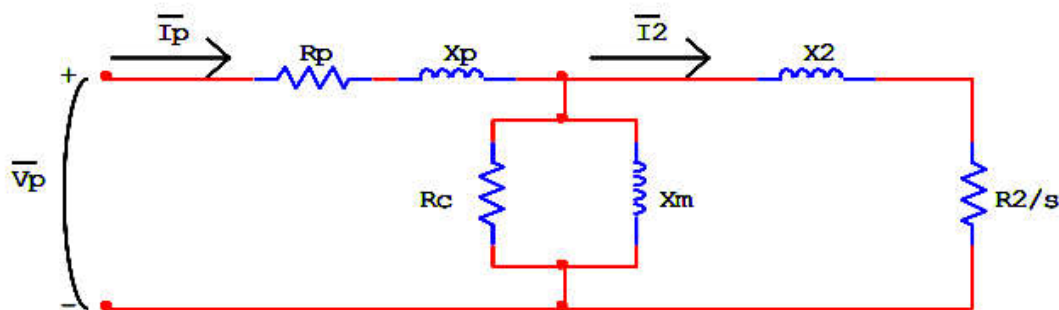
$$P_{out} = P_{conv} - P_{F-W} - P_{misc} \quad (1.8)$$

Ισοδύναμο κύκλωμα του επαγωγικού κινητήρα

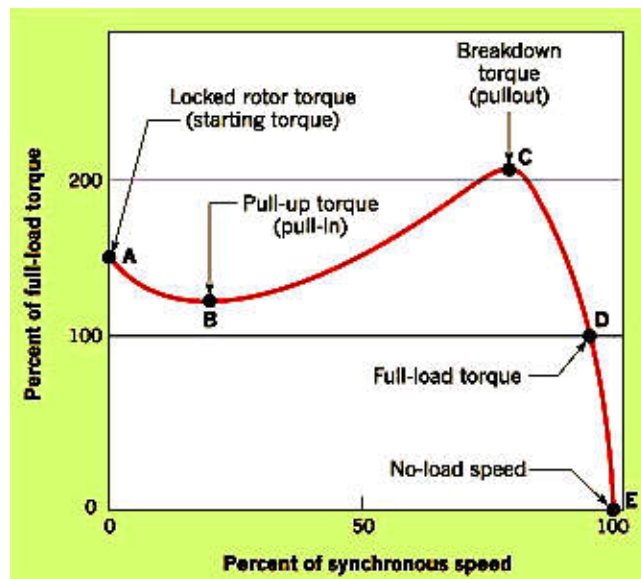
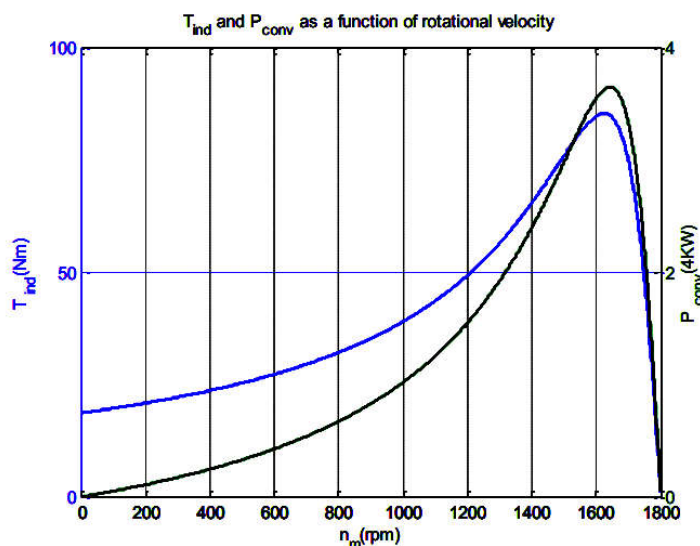
Το ανά φάση ισοδύναμο κύκλωμα του επαγωγικού κινητήρα ανηγμένο ως προς την τάση του κυκλώματος του στάτη δείχνεται παρακάτω.

(«Ανηγμένο» ως προς την τάση του κυκλώματος του στάτη σημαίνει ότι όλες οι μετρήσεις/υπολογισμοί γίνονται από παρατηρητή που βρίσκεται στην είσοδο του στάτη της μηχανής. Όσον αφορά στις μετρήσεις του στάτη είναι οι πραγματικές, όσον αφορά στους υπολογισμούς στο δρομέα αφορούν στο πως φαίνονται από τον στάτη – δεν είναι οι πραγματικές.)

Η ισχύς που θα περάσει από το διάκενο της μηχανής P_g θα μεταφερθεί στο δρομέα και θα καταναλωθεί εξολοκλήρου από την ωμική αντίσταση του κυκλώματος του δρομέα $R2/s$ διότι είναι ο μόνος καταναλωτής ενέργειας.



Σχήμα 1.7. Ανά φάση ισοδύναμο κύκλωμα του επαγωγικού κινητήρα ανηγμένο ως προς την τάση του κυκλώματος του στάτη. R_r , X_r αφορούν στις τιμές του στάτη, R_s , X_m , αφορούν στις τιμές του σιδηροπυρήνα του στάτη, X_2 και R_2/s στο φορτίο του δρομέα. Οι X αντιπροσωπεύουν τις απώλειες σκέδασης των μαγνητικών γραμμών, «αντιδράσεις σκέδασης» ή “leakage reactances”. s είναι η ολίσθηση του κινητήρα.



Σχήμα 1.8. Χαρακτηριστική καμπύλη φορτίου του κινητήρα. Η επαγόμενη ροπή T_{ind} και η αναπτυσσόμενη μηχανική ισχύς P_{conv} σε σχέση με την ταχύτητα του κινητήρα. Η «ροπή ανατροπής» θα εμφανιστεί στο σημείο εκείνο στο οποίο η πρώτη παράγωγος της συνάρτησης της ροπής μηδενίζεται, δηλαδή στο μέγιστο της καμπύλης ροπής. Στο παράδειγμα η ονομαστική ροπή είναι $T_{ind}=50$ Nm.

Πειραματικό μέρος επαγωγικής μηχανής σε λειτουργία κινητήρα

1. Να διαβάσετε την πινακίδα (Nameplate) του επαγωγικού κινητήρα του εργαστηρίου και να καταγράψετε τις τιμές σε δικό σας πίνακα. Από την πινακίδα διαπιστώνεται ότι ο συγκεκριμένος κινητήρας αντέχει ανά τύλιγμα 220V(Δ), ενώ πολικά 380V(Y). Όπως γίνεται αντιληπτό ο κινητήρας μπορεί να συνδεθεί κατά αστέρα στη εγκατάσταση του εργαστηρίου.
2. Να μετρηθεί η ωμική αντίσταση του τυλίγματος του στάτη με πολύμετρο σε λειτουργία ομόμετρου.
3. Να μετρηθούν με πολύμετρα, Power analyser και ταχύμετρο, η τάση, το ρεύμα, ο συντελεστής ισχύος και η ταχύτητα του άξονά του επαγωγικό κινητήρα του εργαστηρίου. Οι τιμές να καταγραφούν για διαφορετικές τιμές τάσης τροφοδοσίας, σε πίνακα (στο φύλλο μετρήσεων). Η μέτρηση της ισχύος μπορεί να γίνει με τη μέθοδο χρήσης δύο μονοφασικών wattmeter ή με τη χρήση ενός. Δείτε Παράρτημα στο τέλος. (Η μέτρηση μπορεί να γίνει χρησιμοποιώντας ένα μόνο μονοφασικό βατόμετρο (ή power analyser) αν υπάρχει έξοδος ουδέτερου στη μηχανή).
4. **Οδηγίες:** Ο κινητήρας θα τροφοδοτηθεί με τριφασικό σύστημα τάσεων και με το ένα πολύμετρο θα μετριέται η εκάστοτε πολική τάση τροφοδοσίας η οποία θα παρέχεται από το εξωτερικό τροφοδοτικό. Με το άλλο πολύμετρο μετριέται το ρεύμα γραμμής. Με το βατόμετρο (Power analyser) μετριέται ο συντελεστής ισχύος και η πραγματική ισχύς με την οποία θα τροφοδοτείται ο κινητήρας). Με το οπτικό ταχύμετρο η εκάστοτε ταχύτητα περιστροφής. Το $\cos\phi$ του κινητήρα, κατά την λειτουργία χωρίς φορτίο, είναι διαφορετικό από αυτό που αναγράφεται στην πινακίδα του. Το αναγραφόμενο αντιστοιχεί στις κανονικές συνθήκες λειτουργίας φορτίου.

Στην δοκιμή αυτή, το ρεύμα εισόδου είναι η συνισταμένη του ρεύματος μαγνήτισης, και του μικρού πραγματικού ρεύματος που απορρόφα ο κινητήρας, για να καλύψει τις απώλειες σιδήρου και τις μηχανικές απώλειες. Στην λειτουργία αυτή ο δρομέας περιστρέφεται σχεδόν με το σύγχρονο αριθμό στροφών n_s , διασχίζεται «κόβεται» πρακτικά από σταθερή μαγνητική ροή. Άρα οι απώλειες δινορρευμάτων και υστέρησης του δρομέα είναι πρακτικά μηδενικές, $P_{core}=0$

Στο δρομέα το ρεύμα είναι πάρα πολύ μικρό γιατί $n_m \approx n_s$, δηλαδή είναι αμελητέες και οι ωμικές απώλειες του δρομέα, απώλειες χαλκού, $vP_{R-Cu}=0$.

Η ενεργειακή εξίσωση που ισχύει στους επαγωγικούς κινητήρες στην εν κενώ λειτουργία, στις τρεις φάσεις του στάτη είναι η παρακάτω

$$P_{stator\ cu} = 3I_1^2 R_1 \quad (1.9)$$

Οι απώλειες σιδήρου και οι μηχανικές υπολογίζονται από τη σχέση

$$P_{Rotation} = P_{in} - P_{stator\ cu} = P_{core} + P_{mech} \quad (1.10)$$

5. Να σχεδιαστούν τα διαγράμματα: $P_{in}=f(V_{pol})$, $\cos\varphi=f(V_{pol})$, $P_R=f(V_{pol})$.
6. Επαναλαμβάνονται οι ίδιες μετρήσεις με το βήμα 3, με την μόνη διαφορά ότι τώρα προστίθεται ένα μεταβλητό φορτίο στην έξοδο του κινητήρα. Οι τιμές να καταγραφούν για διαφορετικές τιμές τάσης τροφοδοσίας, σε πίνακα (στο φύλλο μετρήσεων). Το φορτίο εφαρμόζεται μέσω ενός μαγνητικού φρένου. Η πέδηση αλλάζει μεταβάλλοντας το ρεύμα του ηλεκτρομαγνήτη του μαγνητικού φρένου (Η αρχή λειτουργίας του μαγνητικού φρένου βασίζεται στο μαγνητικό πεδίο που δημιουργούν τα δινορρεύματα που δημιουργούνται λόγω της κίνησης ενός ηλεκτρομαγνήτη. Το επαγόμενο μαγνητικό πεδίο από τα δινορεύματα έλκει το μαγνητικό πεδίο του κινούμενου μαγνήτη.)

Οδηγίες: Ο κινητήρας θα τροφοδοτείται με σταθερή τάση και μεταβάλλοντας το φορτίο του θα μεταβάλλεται η ροπή που αναπτύσσει, όπως θα μεταβάλλεται και το ρεύμα που απορροφά. Το πείραμα θα συνεχιστεί έως ότου το ρεύμα να μην ξεπεράσει το μέγιστο επιτρεπόμενο σύμφωνα με την πινακίδα του κινητήρα. Η μετρούμενη ισχύς εξόδου είναι

$$P_{out} = P_{μηχανική} = T \omega_m = 2\pi \frac{n_m}{60} \quad (1.11)$$

Η πρώτη μέτρηση γίνεται χωρίς φορτίο. Τότε απαιτείται ισχύς για να υπερνικήσει τις εσωτερικές μηχανικές τριβές για να περιστραφεί.

7. Να σχεδιαστεί η χαρακτηριστική καμπύλη φορτίου του κινητήρα (Ροπή σε συνάρτηση με την ταχύτητα δρομέα).
8. Να υπολογιστεί ο βαθμός απόδοσης, η , του κινητήρα από την σχέση

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \quad (1.12)$$

9. Να υπολογιστεί η **ροπή ανατροπής**. Για την ίδια συνδεσμολογία η τάση τροφοδοσίας τίθεται μικρότερη από την ονομαστική (πχ στο 55% ονομαστικής) και μηδενικό φορτίο. Σημειώστε την ροπή που αναπτύσσει στις ονομαστικές στροφές του κινητήρα σε λειτουργία χωρίς φορτίο. Ο κινητήρας όταν αρχίζει να

περιστρέφεται, αρχίζουμε να τον φορτίζουμε με επιπλέον φορτίο σιγά-σιγά. Η ροπή θα αρχίσει να αυξάνεται και οι στροφές να μειώνονται. Στο σημείο που η ροπή αρχίζει να μειώνεται, εκεί δηλαδή που εντοπίζεται το μέγιστο της καμπύλης ροπής-ταχύτητας, σημειώνουμε την ταχύτητα, το ρεύμα του κινητήρα και τη ροπή. Η ροπή αυτή λέγεται **ροπή ανατροπής**.

10. Συνεχίζουμε να αυξάνουμε τη ροπή του φορτίου μέχρι ο κινητήρας να ακινητοποιηθεί σχεδόν. Στο σημείο αυτό σημειώνουμε τη ροπή και το ρεύμα. Η ροπή αυτή λέγεται **ροπή εκκίνησης**.

Ερωτήσεις: Ποια ροπή από τις δύο είναι μεγαλύτερες; Ποιο από τα δύο ρεύματα είναι μεγαλύτερα;

Επιλογή μηχανής

9.7 Ordering check list

Check List

Safe area TEFC Motor Fixed Speed

Supply Volts Ph Hz

Rating kW

Speed r/min Pole

Duty Mounting IM

Drive ☐ Direct ☐ Belt

Insulation/Temp rise /

Torque type ☐ Quadratic ☐ Constant

Environmental conditions

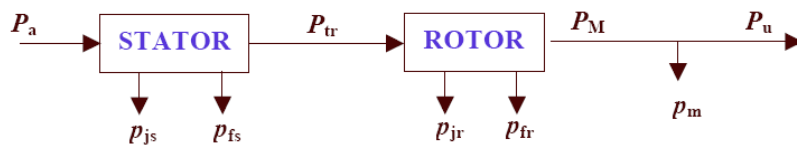
IP Ambient ☐ Relative Humidity

Συμπληρώστε τα στοιχεία του κινητήρα που χρειάζεστε για ένα σενάριο δικής σας ανάγκης.

1. TABLE OF THE ELECTRICAL AND MECHANICAL QUANTITIES OF MOTOR

SYMBOL	QUANTITY	UNIT
U	Voltage between motor phases	volt (V)
I	Line electric current consumed by the motor	ampere (A)
P_a	Active power consumed by the motor	watt (W)
S	Apparent power of the motor	volt-ampere (VA)
Q	Reactive power of the motor	var (var)
$P1$	Power on first supply phase of the motor	watt (W)
$P2$	Power on second supply phase of the motor	watt (W)
P_u	Useful power of the motor	watt (W)
n_s	Synchronism speed of the motor	revolutions per minute (rev/min)
n	Speed of the motor rotor	revolutions per minute (rev/min)
η	Efficiency of the motor	%
ω_r	Angular speed	rad/s
T_u	Effective torque of the motor	newton-metre (Nm)
p	Number of pairs of poles of the motor	
f	Frequency of the network	hertz (Hz)
$S (\dot{\eta} g)$	Slip of the motor	%
$\cos \varphi$	Power factor of the motor	

POWER STATEMENT



$$P_a : \text{power consumed} \quad P_a = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos \varphi$$

$$P_{js} : \text{stator Joule losses} \quad P_{js} = \frac{3}{2} R \cdot I^2$$

$$P_{tr} : \text{power transmitted to the rotor} \quad P_{tr} = P_a - P_{js} - P_{fs}$$

$$P_{fs} : \text{stator iron losses}$$

$$P_{jr} : \text{Joule losses to rotor} \quad P_{jr} \approx g \cdot P_{tr}$$

$$P_{fr} : \text{rotor iron losses}$$

$$P_M : \text{mechanical power} \quad P_M = P_{tr} (1 - g)$$

$$p_m : \text{mechanical losses} \quad p_m = P_M - P_u$$

$$P_u : \text{useful power}$$

$$p_c : \text{"collective" losses} \quad p_c = P_{fs} + p_m$$

With no load, the power consumed corresponds to p_c

$$: P_{a0} = p_c$$

Torque moments

$$T_{em} = \frac{P_{tr}}{\Omega_s} = \frac{P_M}{\Omega} : \text{electromagnetic torque}$$

$$T_p = T_u - T_{em} = \frac{p_c}{\Omega_s} : \text{losses torque}$$

$$T_u = \frac{P_u}{\Omega} : \text{effective torque}$$

$$: \eta = \frac{P_u}{P_a}$$

$$P_a = P_1 \pm P_2 = U_{\text{πολική}} \times I_{\text{γραμμής}} \times \sqrt{3} \times \cos \varphi$$

$$S = U_{\text{πολική}} I_{\text{γραμμής}} \sqrt{3}$$

$$Q = S \times \sin \varphi = P \times \tan \varphi$$

$$\omega_r = (2 \times \pi \times n') \div 60$$

$$P_u = T_u \times \omega_r$$

$$\eta = P_u \div P_a \quad (n: \text{απόδοση})$$

$$\cos \varphi = P_a \div S \quad (\text{Power Factor})$$

Main characteristics of the Laboratory asynchronous motor		
Useful power	:W
Rotation speed	:rev/min
Number of poles	:
Frequency of the network:	:Hz
Power supply voltage with Delta coupling	:V
Power supply voltage with Star coupling: V	
Electric current consumed with Delta coupling	:A
Electric current consumed with Star coupling	:A
Power factor	:

2. TABLE OF THE ELECTRICAL AND MECHANICAL QUANTITIES OF GENERATOR

SYMBOL	NAME	UNIT
E	Electromotive force	volt (V)
U	Voltage at the terminals of the stator	volt (V)
I	Electric current supplied by the stator	ampere (A)
u_e	Power supply voltage of the rotary field	volt (V)
i_e	Electric current consumed by the rotary field	ampere (A)
r	Resistance of the stator between two phases	ohm(Ω)
r'	Resistance of the rotary field	ohm(Ω)
p	Number of pairs of poles of the machine	
ϕ	Flux under one pole	weber (Wb)
F	Frequency	Hz

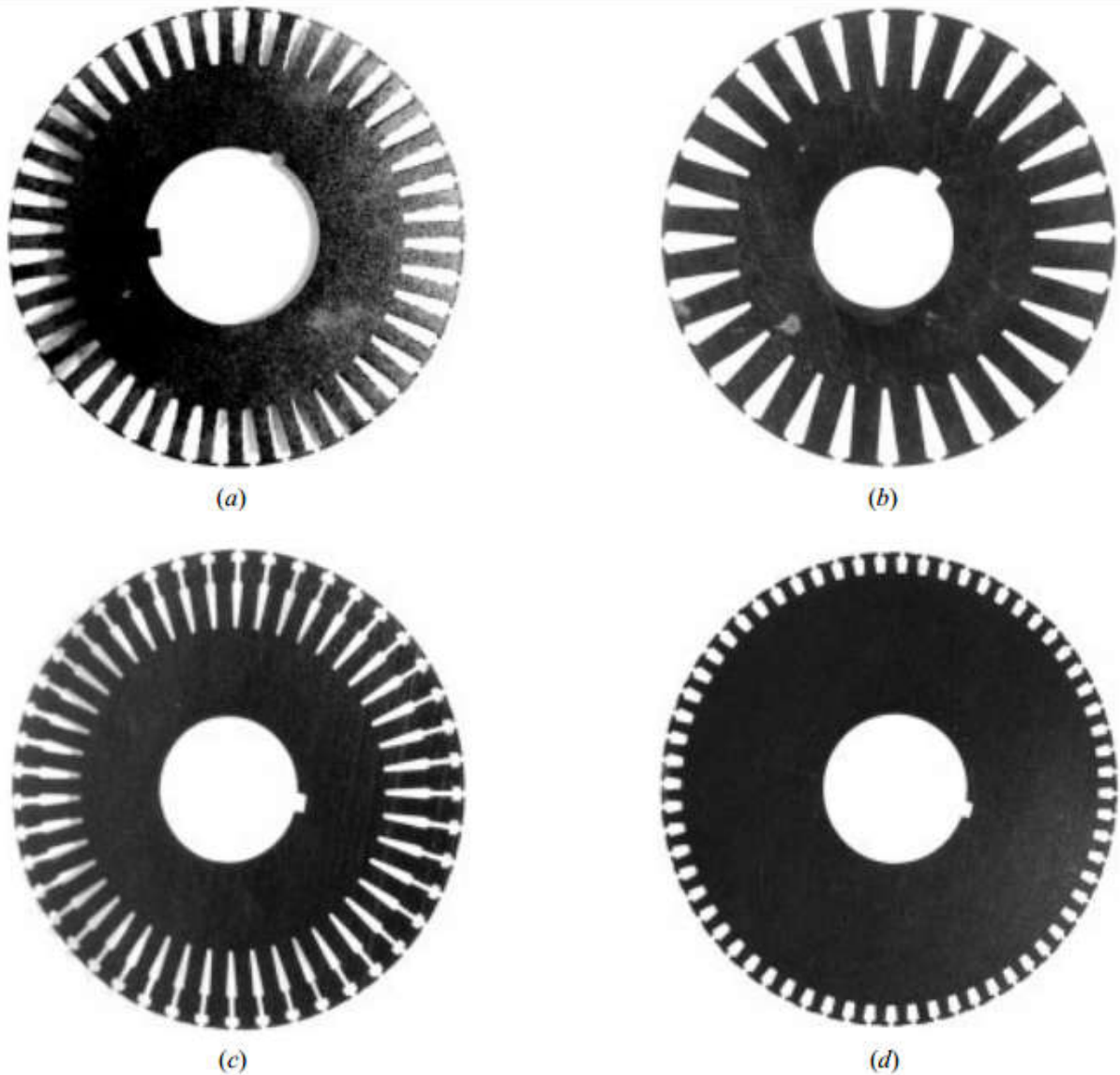


FIGURE 7-25

Laminations from typical squirrel-cage induction motor rotors, showing the cross section of the rotor bars: (a) NEMA design class A—large bars near the surface; (b) NEMA design class B—large, deep rotor bars; (c) NEMA design class C—double-cage rotor design; (d) NEMA design class D—small bars near the surface. (Courtesy of MagneTek, Inc.)