

ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΔΥΤΙΚΗΣ ΕΛΛΑΔΑΣ
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Τ.Ε



ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΑΡΙΘΜΟΣ ΠΤΥΧΙΑΚΗΣ 1441

ΑΝΑΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΑΣΥΓΧΡΟΝΟΥ ΤΡΙΦΑΣΙΚΟΥ ΚΙΝΗΤΗΡΑ

ΟΝΟΜΑΤΕΠΩΝΥΜΟ ΣΠΟΥΔΑΣΤΗ : ΚΑΡΑΓΙΑΝΝΗΣ ΓΚΕΝΤΙΑΝ (6066)

ΕΠΟΠΤΕΥΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΕΣ : ΧΑΡΑΛΑΜΠΑΚΟΣ ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ

ΚΑΛΑΝΤΖΟΠΟΥΛΟΣ ΘΑΝΑΣΗΣ

ΠΑΤΡΑ 2014

Περίληψη

Σκοπός της παρούσας πτυχιακής εργασίας είναι η περιέλιξη ενός ασύγχρονου τριφασικού κινητήρα βραχυκυκλωμένου δρομέα στον οποίο είχαν καεί όλα τα τυλίγματα.

Στο πρώτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά του στάτη και του δρομέα όπου συγκεκριμένα αναφέρονται και οι πέντε τύποι μαγνητικών ελασμάτων ενός επαγωγικού δρομέα . Παρακάτω αναφερόμαστε στην αρχή λειτουργίας του κινητήρα και αναλύονται έννοιες όπως η ολίσθηση και η ροπή. Αποδεικνύεται πως προκύπτουν τα ισοδύναμα κυκλώματα του κινητήρα και το διάγραμμα ροής. Τέλος στο πρώτο κεφάλαιο παρουσιάζονται οι κλάσεις σχεδίασης των επαγωγικών κινητήρων, καθώς και τα κριτήρια επιλογής και η συντήρησή τους.

Στο δεύτερο κεφάλαιο ασχολούμαστε αποκλειστικά με την διαδικασία που ακολουθήσαμε βήμα προς βήμα κατά την οποία πραγματοποιήθηκε η περιέλιξη του κινητήρα, εξηγείτε ο τρόπος με τον οποίο αφαιρέθηκε το παλιό τύλιγμα καθώς και τις χρήσιμες πληροφορίες που πήραμε από το παλιό τύλιγμα, επίσης πως ετοιμάστηκε και καθαρίστηκε ο στάτης για να τοποθετήσουμε το καινούργιο τύλιγμα της περιέλιξης. Τέλος με την τοποθέτηση της περιέλιξης ο τρόπος που συνδέθηκαν τα τυλίγματα, καθώς και οι έλεγχοι και οι μετρήσεις που ακολούθησαν μετά την ολοκλήρωση της διαδικασίας.

Στο τρίτο και τελευταίο κεφάλαιο αναφερόμαστε στα δύο πειράματα που πραγματοποιήθηκαν στο εργαστήριο ηλεκτρικών μηχανών του τμήματός ηλεκτρολόγων μηχανικών του ΤΕΙ Πάτρας, το πείραμα εν κενό (ανοιχτό κύκλωμα) και το πείραμα με ακινητοποιημένο δρομέα. Τα δυο αυτά πειράματα έγιναν για να μπορέσουμε να προσδιορίσουμε διάφορα χαρακτηριστικά του κινητήρα, καθώς και για να βρεθούν τα ισοδύναμα κυκλώματα του κινητήρα μας.

Περιεχόμενα

Κεφάλαιο 1

Τριφασικοί Ασύγχρονη Επαγωγική Κινητήρες	
1.1 Κατασκευή ασύγχρονου τριφασικού κινητήρα.....	3
1.1.1 Στάτης.....	3
1.1.2 Δρομέας.....	5
1.2 Κατασκευαστικά στοιχεία δρομέα – στάτη.....	6
1.3 Αρχή λειτουργίας.....	8
1.4 Ολίσθηση.....	9
1.5 Ροπή.....	9
1.5.1 Χαρακτηριστική ροπής ρεύματος.....	10
1.6 Ισοδύναμο κύκλωμα του επαγωγικού κινητήρα.....	12
1.7 Σχέσεις ισχύος, συντελεστής απόδοσης του κινητήρα.....	15
1.8 Διάγραμμα ροής ισχύος.....	16
1.9 Κλάσεις σχεδίασης.....	18
1.10 Επιλογή και συντήρηση επαγωγικών κινητήρων.....	20

Κεφάλαιο 2

Περιέλιξη Κινητήρα.....	22
2.1 Πινακίδα.....	23
2.2 Αφαίρεση παλιού τυλίγματος.....	24
2.3 Τοποθέτηση της καινούργιας περιέλιξης.....	27

Κεφάλαιο 3

Πείραμα χωρίς φορτίο και με ακινητοποιημένο δρομέα.....	34
3.1 Πείραμα χωρίς φορτίο.....	34
3.2 Πείραμα με ακινητοποιημένο δρομέα.....	38
3.3 Ισοδύναμο κύκλωμα εισόδου κατά Thevenin.....	41
Βιβλιογραφία.....	47

1. Κεφάλαιο Τριφασικοί Ασύγχρονη Επαγωγική Κινητήρες

Η ηλεκτρική μηχανή είναι ένα σύστημα που μετατρέπει την ηλεκτρική ενέργεια σε μηχανική ροπή στον άξονά της και το αντίστροφο.

Πάνω από τα 2/3 της ηλεκτρικής ενέργειας έχει εκτιμηθεί ότι καταναλώνεται πάνω στους ηλεκτροκινητήρες διαφόρων τύπων (μεγάλους, μικρούς). Σε μια κατοικία υπάρχουν 20 – 40 ηλεκτροκινητήρες που βρίσκουν εφαρμογή σε διάφορες εφαρμογές π.χ. ψυγείο, αντλία, πλυντήριο, φούρνοι, κλιματιστικά κλπ.

Οι ασύγχρονοι κινητήρες που αλλιώς ονομάζονται και επαγωγικοί κινητήρες χωρίζονται σε δυο κατηγορίες τους μονοφασικούς και τους τριφασικούς.

Οι κινητήρες αυτοί παρουσιάζουν σημαντικά πλεονεκτήματα που τους καθορίζουν πλέον αναπόφευκτη επιλογή σε πολλές εφαρμογές όπως είναι το χαμηλό κόστος συντήρησης, χαμηλό κόστος αγοράς εύκολη, σύνδεση στο δίκτυο, προσαρμόζεται εύκολα σε διαφορετικά περιβάλλοντα λειτουργίας και έχουν καλό βαθμό απόδοσης. Τα βασικά μειονεκτήματα είναι ότι οι στρόφες αλλάζουν δύσκολα, κατά την εκκίνηση τραβούν πολύ μεγάλο ρεύμα, και καταναλώνουν άεργο ισχύ.

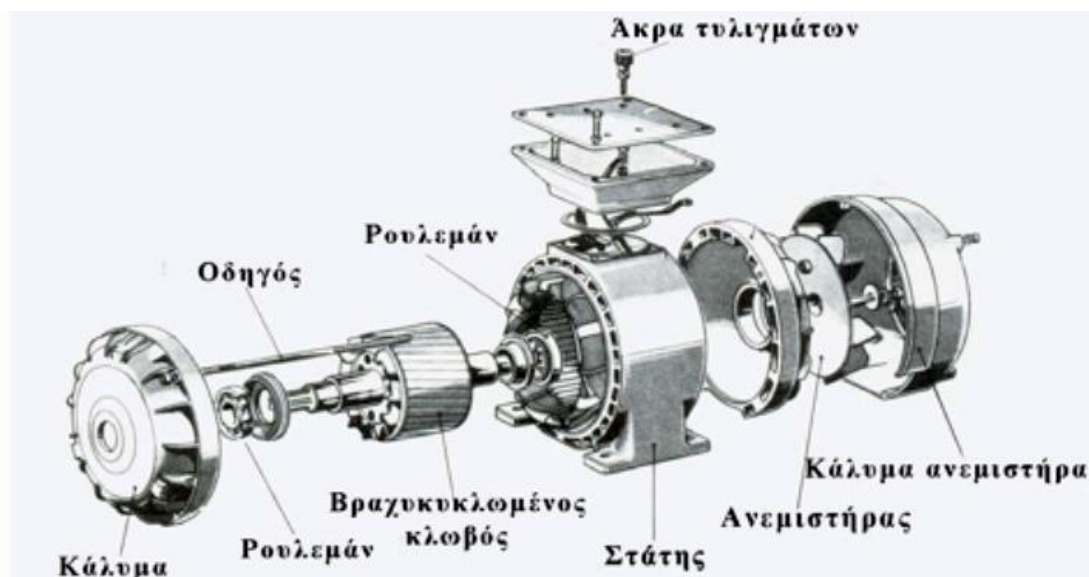
1.1 Κατασκευή ασύγχρονου τριφασικού κινητήρα

1.1.1 Στάτης

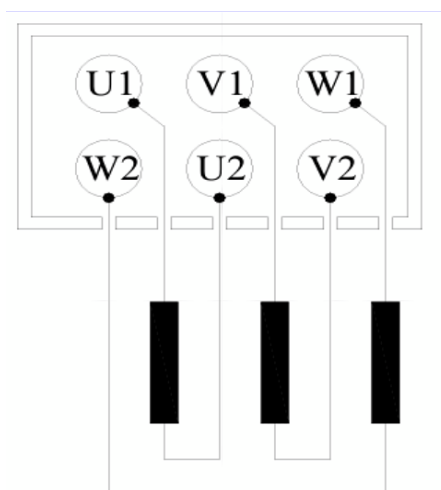
Η κατασκευή του στάτη ενός ασύγχρονου τριφασικού κινητήρα δεν διαφέρει καθόλου από ένα εναλλακτικά με εσωτερικούς πόλους, η μόνη διαφορά που μπορεί να παρατηρηθεί είναι στο κέλυφος, αλλά και αυτό διαφέρει από την έκαστο λειτουργία του κινητήρα. Μέσα στο κέλυφος υπάρχει ο πυρήνας του τυμπάνου (εικόνα 1), ο οποίος είναι διαμορφωμένος από

πολλάμαγνητικάελάσματα, τα οποία έτσι όπως είναι πρεσαρισμέναδημιουργούν αυλάκια στα οποία γίνεται η περιέλιξη (τοποθέτηση τριφασικού τυλίγματος).

Από αυτά τα τρίατυλίγματα θα προκύψουν τα έξι άκρα (δυο από κάθε τύλιγμα)εικόνα 2, στα οποίαανάλογα με την συνδεσμολογία που θα γίνει (αστέρα – τρίγωνο), θα γίνει σύνδεση με λαμάκια, διαφορετικά θα επιλεγεί κατάλληλος διακόπτης.



Εικόνα 1: Η ανατομία ενός ασύγχρονου κινητήρα



Εικόνα 2: Τα έξι άκρα της πινακίδας.

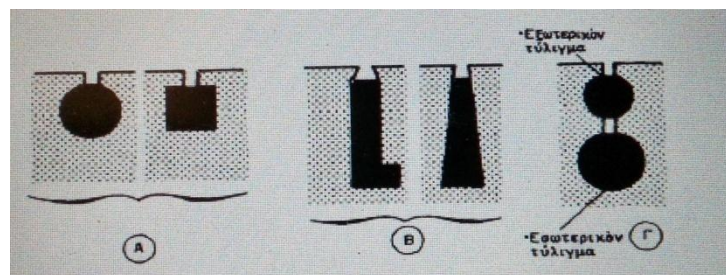
1.1.2 Δρομέας

Ο δρομέας δεν συνδέεται ηλεκτρικά με καμία πηγή ηλεκτρικής ενέργειας πράγμα που απλοποιεί την κατασκευή του με τα πλεονεκτήματα που προαναφερθήκαμε πιο πάνω.

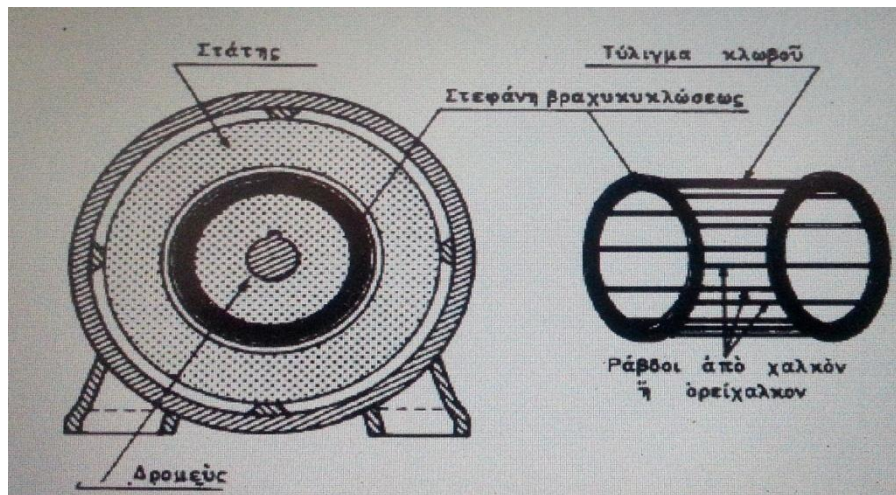
Οι ασύγχρονοι κινητήρες έχουν δυο είδη δρομέα, ο ένας είναι ο βραχυκυκλωμένου δρομέα και ο άλλος ο δακτυλιοφόρου δρομέα. Ο βραχυκυκλωμένου δρομέα φέρει στον άξονα του έναν πυρήνα που αποτελείται από πολλά μαγνητικά ελάσματα που σχηματίζουν οδοντώσεις με την μορφή που φαίνεται παρακάτω εικόνα 3.

Οι οδοντώσεις κατατάσσονται σε απλές, βαθιές, και τις διπλές που προκαλούν και διαφορετικά ηλεκτρικά χαρακτηριστικά. Στα αυλάκια του δρομέα τοποθετούνται ράβδοι από χαλκό η ορείχαλκο χωρισμόνωση που συγκολλούνται στα δυο άκρα σε δυο στεφάνια βραχυκύκλωσης ώστε να σχηματίζουν το τύλιγμα κλωβού που φαίνεται στην παρακάτω εικόνα 4.

Στους μικρούς κινητήρες το τύλιγμα κλωβού κατασκευάζεται από καθαρό αλουμίνιο ούπου και χύνεται απευθείας στα αυλάκια και τα πτερύγια του ανεμιστήρα σχηματίζονται πάνω από τις στεφάνες βραχυκύκλωσης. Στους δρομείς με διπλές οδοντώσεις κατασκευάζονται δύο ανεξάρτητα τυλίγματα κλωβού.



Εικόνα 3: Βραχυκυκλωμένου δρομέα οδοντώσεις.

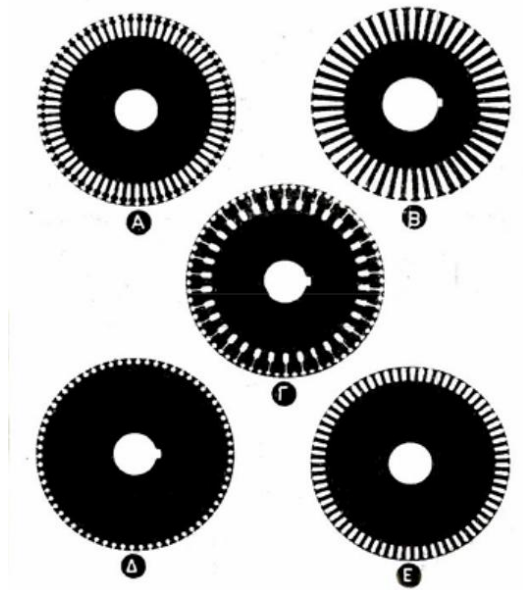


Εικόνα4:Οστάτης και τα στεφάνια βραχυκύκλωσης

1.2ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΑΣΤΟΙΧΕΙΑ ΔΡΟΜΕΑ - ΣΤΑΤΗ:

Οι αυλακώσεις του στάτη μέσα στις οποίες τοποθετείται το τριφασικό τύλιγμα έχουν κατάλληλο σχήμα και αυτές που συναντάμε ευρύτατα σήμερα είναι αυλακώσεις κατά το μισό ανοιχτές και στον δρομέα ανοιχτές κατά το μισό ή τελείως κλειστές, είναι σημαντικό να αναφέρουμε ότι όσο μικραίνει το άνοιγμα μια αυλάκωσης τόσο μικρότερη μαγνητική σκέδαση έχουμε. Αξίζει να σημειωθεί ότι όσο μεγαλώνει το μέγεθος μιας μηχανής τόσο πιο δύσκολο γίνεται και η τοποθέτηση των τυλιγμάτων και η μηχανή γίνεται αντιοικονομική. Σε μηχανές υψηλής τάσης, στον στάτη συναντάμε και ανοιχτές αυλακώσεις (π.χ. 7 KV), αυτού του είδους τυλίγματα απαιτούν ενισχυμένη μόνωση, κατασκευάζονται εκτός της μηχανής και έπειτα τοποθετούνται στις αυλακώσεις.

Στον δρομέα για να ελαττώσουμε τον μαγνητικό θόρυβο πάντα ο αριθμός των αυλακιών διαφέρει από εκείνων του στάτη. Στο ίδιο αποτέλεσμα θα έρθουμε και αν τα αυλάκια του δρομέα έχουν μια μικρή κλίση ως προς τα αυλάκια του στάτη. Στην εικόνα 5 βλέπουμε διάφορους τύπους μαγνητικών ελασμάτων για την κατασκευή δρομέα ασύγχρονου επαγωγικού κινητήρα.



Εικόνα 5: Τύποι μαγνητικών ελασμάτων δρομέα επαγωγικών κινητήρων.

- Α. Τύπος ελάσματος για την κατασκευή κινητήρα βραχυκυκλωμένου δρομέα ομαλής ροπής και μικρού ρεύματος εκκίνησης.
- Β. Τύπος ελάσματος για την κατασκευή κινητήρα δακτυλιοφόρου δρομέα.
- Γ. Τύπος ελάσματος για την κατασκευή κινητήρα βραχυκυκλωμένου δρομέα μεγάλης ροπής και μικρού ρεύματος εκκίνησης.
- Δ. Τύπος ελάσματος για την κατασκευή κινητήρα βραχυκυκλωμένου δρομέα μεγάλης ροπής και μεγάλης ολίσθησης.
- Ε. Τύπος ελάσματος για την κατασκευή κινητήρα βραχυκυκλωμένου δρομέα ομαλής ροπής και ομαλού ρεύματος εκκίνησης.

1.3 ΑΡΧΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ

Σύμφωνα με τον Ferrarici και τον Tesla, οι οποίοι ανεξάρτητα ο ένας από τον άλλον έκαναν μια σημαντική ανακάλυψη, έχοντας κάποια πηνία εν στάση μπορούμε να φτιάξουμε ένα στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο, μόνο που πρέπει τα πηνία να έχουν μια κατάλληλη διάταξη στον χώρο και να τροφοδοτούνται με εναλλασσόμενα ρεύματα με καθορισμένη διαφορά φάσης. Η ανακάλυψη αυτή μαζί με την ιδιότητα μετασχηματισμού του Ε.Ρ αποτέλεσε την αρχή για την κατασκευή των τριφασικών κινητήρων.

Οι επαγωγικοί κινητήρες πήραν το όνομα τους από το φαινόμενο της ανάπτυξης ηλεκτρεγερτικών δυνάμεων με επαγωγή στους αγωγούς του δρομέα.

Όταν τροφοδοτηθεί το τριφασικό τυλίγμα του στάτη από το δίκτυο, θα δημιουργηθεί μαγνητικό πεδίο στο διάκενο της μηχανής που θα περιστρέφεται γύρω από το άξονά της.

Μεταξύ της συχνότητας του ρεύματος που τροφοδοτεί το τυλίγμα, του αριθμού ζευγών πόλων του τυλίγματος που δημιουργεί το πεδίο και της ταχύτητας περιστροφής του μαγνητικού πεδίου θα ισχύει η σχέση:

$$Ns = \frac{f}{p} (rps) = 60 * \frac{f}{p} (rpm)$$

Όπου f συχνότητα

Παριθμός ζευγών πόλων

Η ταχύτητα αυτή ονομάζεται σύγχρονη ταχύτητα του στρεφόμενου μαγνητικού πεδίου, εξαρτάται μόνο από την συχνότητα του ρεύματος του δικτύου τροφοδοσίας και τον αριθμό πόλων του τυλίγματος του στάτη.

Μέσα στο στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο βρίσκονται οι αγωγοί του δρομέα, στα άκρα των οποίων αναπτύσσονται με επαγωγή ηλεκτρεγερτικές δυνάμεις που δημιουργούν ρεύματα στο βραχυκυκλωμένο τυλίγμα του δρομέα. Γύρω από τους αγωγούς του τυλίγματος του δρομέα που βρίσκονται στο πεδίο και διαρρέετε από ρεύμα σκείτε ζεύγος δυνάμεων που τείνει να περιστρέψει τον δρομέα

κατά την φορά περιστροφής του μαγνητικού πεδίου. Υπό την επίδραση των παραπάνω δυνάμεων ο ασύγχρονος κινητήρας εκκινεί και επιταχύνεται μέχρι να φτάσει σε μια ταχύτητα (N) η οποία είναι λίγο πιο μικρή από την σύγχρονη ταχύτητα περιστροφής του μαγνητικού πεδίου.

1.4 ΟΛΙΣΘΗΣΗ

Η διαφορά της πραγματικής ταχύτητας του δρομέα από την σύγχρονη ταχύτητα, εξαρτάται από το φορτίο που είναι συνδεδεμένο στον άξονα, και αυξάνει όσο αυξάνει το φορτίο. Στο ονομαστικό φορτίο η διαφορά είναι μικρή. Ολίσθηση ονομάζουμε το λόγο :

$$s = \frac{N_s - N}{N_s}$$

Η ολίσθηση την στιγμή της εκκίνησης είναι ίση με 1 διότι τότε η ταχύτητα είναι μηδενική. Κατά την λειτουργία του κινητήρα η τιμή της ολίσθησης εξαρτάται από το φορτίο, διότι από το φορτίο εξαρτάται η ταχύτητα του δρομέα. Στην λειτουργία στο κενό η ολίσθηση είναι περίπου στο 0,5% και στο ονομαστικό φορτίο γύρω στο 4,9%

Γνωρίζοντας την ολίσθηση ενός κινητήρα σε ορισμένο φορτίο μπορεί εύκολα να βρεθεί η ταχύτητά του από την σχέση:

$$N = N_s * (1 - s)$$

Παρατήρηση :

Από την παραπάνω σχέση φαίνεται ότι οι ασύγχρονοι κινητήρες έχουν περίπου χαρακτηριστική ταχύτητας ίδια με εκείνη των κινητήρων συνεχούς ρεύματος παράλληλης διέγερσης. Δηλαδή η ταχύτητα είναι σχεδόν σταθερή όταν μεταβάλλεται το φορτίο από το κενό μέχρι το ονομαστικό.

1.5 ΡΟΠΗ

Αν ένας κινητήρας περιστρέφεται με N (rpm) τότε η μηχανική ισχύς που αποδίδει στον άξονά του είναι :

$$P2 = 2 * \pi * N * T(\text{σε W})$$

Όπου T ροπή σε Nm

Νταχύτητα του δρομέα σε rps

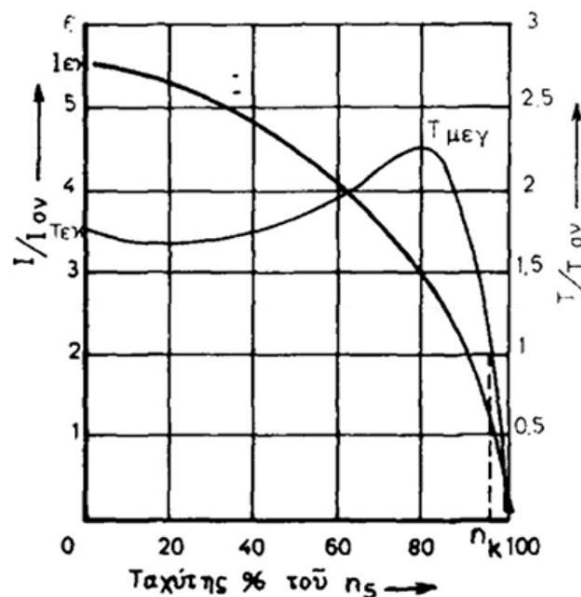
Άρα η αναπτυσσόμενηροπήπροκύπτει ως εξής:

$$T = \frac{P2}{2 * N * \pi}$$

Όταν η αποδιδόμενη ισχύς του κινητήρα είναι η ονομαστική και αποδίδεται υπό ονομαστική τάση και στροφές, τότε η αποδιδόμενη ροπή είναι η ονομαστική ροπή. Η ροπή του ασύγχρονου κινητήρα είναι ανάλογη του τετραγώνου της τάσης του δικτύου τροφοδοσίας.

1.5.1 Χαρακτηριστική ροπής - ρεύματος

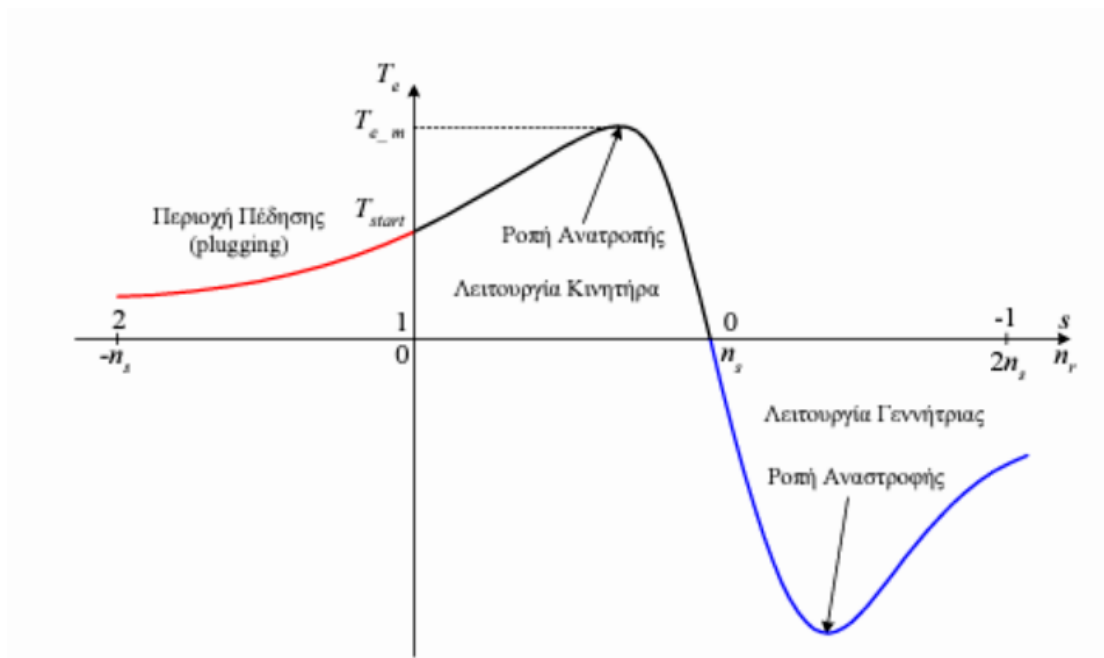
Στην παρακάτω εικόνα δφαινεται πως μεταβάλλεται η ροπή ενός κινητήρα βραχυκυκλωμένου δρομέα και το ρεύμα δικτύου όταν μεταβάλλεται η ταχύτητά του. Από τις καμπύλες φαίνεται ότι οι εντάσεις εκκίνησης στο στάτη είναι σημαντικές και φθάνουν σε ορισμένους κινητήρες τιμές 600 έως 800% της ονομαστικής.



Εικόνα 6α: Μεταβολή ροπής και ρεύματος κινητήρα βραχυκυκλωμένου δρομέα

Από την εικόνα φαίνεται ότι όσο αυξάνονται οι στροφές του κινητήρα, το ρεύμα που απορροφάτε από το δίκτυο μειώνεται η ροπή του όμως αυξάνει μέχρι μιας ορισμένης τιμής που λέγεται ροπή ανατροπής (που εμφανίζεται σε ορισμένη ολίσθηση που λέγεται ολίσθηση ανατροπής) και είναι η μέγιστη ροπή που μπορεί να πάρει κινητήρας και είναι σημαντικά μεγαλύτερη της ονομαστικής ροπής.

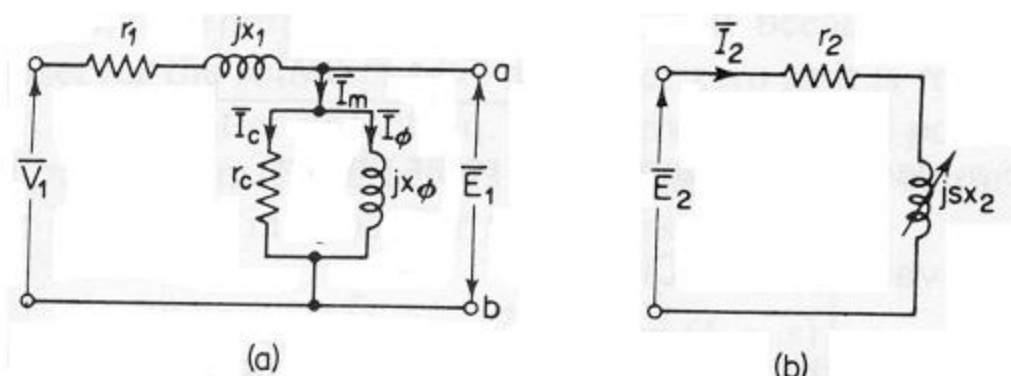
Η λειτουργία του κινητήρα σε ροπές μικρότερες της ροπής ανατροπής με ολισθήσεις μικρότερες της ολίσθησης ανατροπής είναι ευσταθής και ο κινητήρας προσαρμόζεται αυτόματα στις απαιτήσεις του φορτίου μειώνοντας τις στροφές για να αυξηθεί η αναπτυσσόμενη ροπή και αντίστροφος. Αντίθετα η λειτουργία του κινητήρα σε ροπές μικρότερες της ροπής ανατροπής είναι ασταθής και ο κινητήρας διέρχεται από την περιοχή αυτή λειτουργίας μόνο κατά την εκκίνηση.



Εικόνα 6β: Πλήρης χαρακτηριστική ροπής-ταχύτητας του επαγωγικού κινητήρα.

1.6 Ισοδύναμο κύκλωμα του επαγωγικού κινητήρα

Το ισοδύναμο κύκλωμα ενός επαγωγικού κινητήρα μοιάζει με αυτό ενός τριφασικού μετασχηματιστή. Το πρωτεύον κύκλωμα αντιστοιχεί στο στάτη και το δευτερεύον κύκλωμα στο δρομέα. Μάλιστα τη στιγμή που ο δρομέας είναι ακίνητος, το ισοδύναμο κύκλωμα είναι ακριβώς το ίδιο με εκείνο του μετασχηματιστή. Οι αλλαγές που υπάρχουν ανάμεσα στα δύο ισοδύναμα οφείλονται μόνο στο γεγονός ότι το δευτερεύον τύλιγμα (ο δρομέας) περιστρέφεται και παράγει μηχανική ροπή. Το αρχικό ισοδύναμο μονοφασικό κύκλωμα φαίνεται στην εικόνα 7:



Εικόνα 7: Αρχικό ισοδύναμο μονοφασικό κύκλωμα επαγωγικού κινητήρα

Στην εικόνα 7, το κύκλωμα στα αριστερά είναι ανεξάρτητο από το κύκλωμα στα δεξιά. Επίσης η τάση V_1 είναι η φασική τάση που τροφοδοτούμε τον κινητήρα.

Από τα στοιχεία του κυκλώματος, οι ωμικές αντιστάσεις r_1 , r_2 εκφράζουν τις απώλειες χαλκού στα τυλίγματα του στάτη και του δρομέα αντίστοιχα. Οι αντιδράσεις $x_1=L_1\omega$ και sx_2 , όπου $x_2 = L_2\omega$, με $\omega=2\pi f$ rad/sec, εκφράζουν τη σκέδαση στο στάτη και στο δρομέα αντίστοιχα, ενώ στον κλάδο μαγνήτισης οι r_c , x_ϕ , εκφράζουν τις απώλειες σιδήρου και την αντίδραση μαγνήτισης του κινητήρα.

Η πρώτη παρατήρηση αφορά στα μεγέθη του ισοδύναμου κυκλώματος του κινητήρα. Το ρεύμα μαγνήτισης ενός κινητήρα είναι

πολύ μεγαλύτερο από το αντίστοιχο ενός μετασχηματιστή, λόγω του ότι στον κινητήρα το μαγνητικό πεδίο κλείνει μέσα από το διάκενο στάτη δρομέα και όχι αποκλειστικά μέσα από τον πυρήνα όπως στο μετασχηματιστή. Έτσι το ρεύμα μαγνήτισης είναι 25-40% του ονομαστικού ρεύματος, συνεπώς ο κλάδος μαγνήτισης δεν μπορεί να αγνοηθεί. Για τους ίδιους λόγους και οι απώλειες σκέδασης είναι μεγαλύτερες από εκείνες ενός μετασχηματιστή.

Η δεύτερη παρατήρηση αναφέρεται στο ισοδύναμο κύκλωμα του δρομέα. Καθώς η συχνότητα στο δρομέα είναι $f_2 = s f_1$, η αντίδραση σκέδασης θα είναι

$$(s * \omega) * L_2 = s * (\omega * L_2) = s * x_2$$

εισάγοντας έτσι και την ολίσθηση στο ισοδύναμο κύκλωμα.

Είναι προφανές ότι τα ρεύματα και οι τάσεις του κυκλώματος του δρομέα στην εικόνα 7 αναφέρονται σε συχνότητα $f_2 = s f_1$, ενώ τα ρεύματα και οι τάσεις στο κύκλωμα του στάτη στα αριστερά αναφέρονται στη συχνότητα του δικτύου (πχ 50 Hz).

Τα δύο κυκλώματα δεν έχουν καμιά γαλβανική σύνδεση αλλά συνδέονται μόνο μέσα από την πεπλεγμένη ροή στο διάκενο του κινητήρα.

Θεωρώντας ότι Ψ είναι η πεπλεγμένη ροή στο διάκενο, για το πρωτεύον του κινητήρα θα ισχύει:

$$E_1 = j * \omega * \Psi = U_1 - j * \omega * L_1 * I_1 + r_1 * I_1 \quad (1)$$

Αντίστοιχα για το βραχυκυκλωμένο δρομέα (δευτερεύον) και θεωρώντας ότι η συχνότητα είναι $f_2 = s f_1$ ισχύει:

$$E_2 = j * s * \omega * \Psi = j * s * \omega * L_2 * I_2 + r_2 * I_2 \quad (2)$$

$$\text{Καθώς όμως } E_2 = s * E_{20}$$

γνωρίζοντας ότι το ανοιγμένο μέγεθος είναι το E_2 , και E_{20} είναι η ηλεκτρεγερτική δύναμη (ανοιγμένη στο πρωτεύον) που αναπτύσσεται στο δευτερεύον (δρομέα) όταν ο δρομέας είναι ακίνητος.

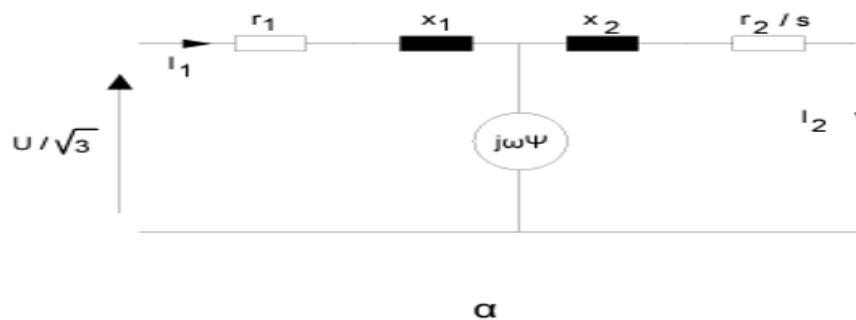
$$\text{Άρα το } E_{20} = E_1.$$

$$\text{Καθώς όμως } E_2 = s * E_1,$$

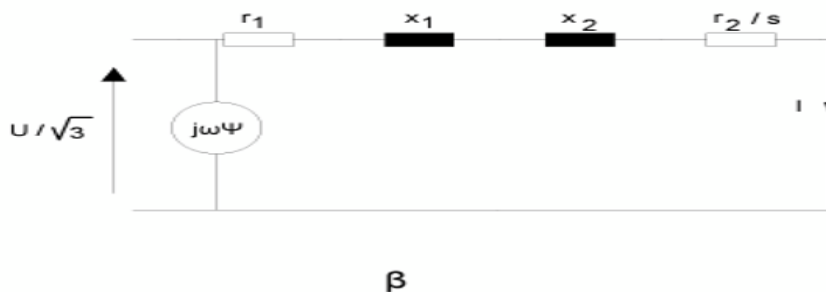
για τη σύνδεση των δύο σχέσεων σε ένα κοινό ισοδύναμο, διαιρείται η (2) με s δίνοντας τελικά:

$$\frac{E_2}{s} = j * \omega * \Psi = E_1 = j * \omega * L_2 * I_2 + \frac{r_2}{s} * I_2 \quad (3)$$

Μετά τη διαίρεση της σχέσης 2 με το s έχουν ταυτόχρονα αναχθεί τα μεγέθη του κυκλώματος του δρομέα στη συχνότητα του δικτύου. Ο συνδυασμός των 1 και 3 οδηγεί στο ισοδύναμο κύκλωματης εικόνας 7α, όπου ο κλάδος με τα στοιχεία μαγνήτισης έχει αντικατασταθεί με την πηγή τάσης $E_1=j*\omega*\Psi$. Η πηγή αυτή είναι δυνατόν να μεταφερθεί στην είσοδο του κυκλώματος όπως φαίνεται στην εικόνα 8β. Σε αυτές τις εικόνες τα U είναι η πολική τάση τροφοδοσίας του κινητήρα.



Εικόνα 8: α) Τελικό ισοδύναμο κύκλωμα επαγωγικού κινητήρα.



Εικόνα8: β) Απλοποιημένο ισοδύναμο κύκλωμα επαγωγικού κινητήρα.

1.7 Σχέσεις ισχύος, συντελεστής απόδοσης του κινητήρα.

Από το κύκλωμα της εικόνας 8β προκύπτει ότι η ισχύς που περνά στο δρομέα από το διάκενο είναι:

$$P\delta = 3 * I^2 * \frac{r2}{s}$$

Από την ισχύ αυτή, ένα μέρος καταναλώνεται στην ωμική αντίσταση του δρομέα σαν απώλειες. Η ισχύς απωλειών χαλκού του δρομέα είναι προφανώς:

$$P_{cu2} = 3 * I^2 * r2 = s * P\delta$$

Συνεπώς η εσωτερική μηχανική ισχύς που αναπτύσσεται στο δρομέα του επαγωγικού κινητήρα θα ισούται με:

$$\begin{aligned} P_m &= P\delta - P_{cu2} = P\delta - sP\delta = (1 - s) * P\delta \\ &= 3 * \left(\frac{1 - s}{s}\right) * r2 * I^2 \end{aligned}$$

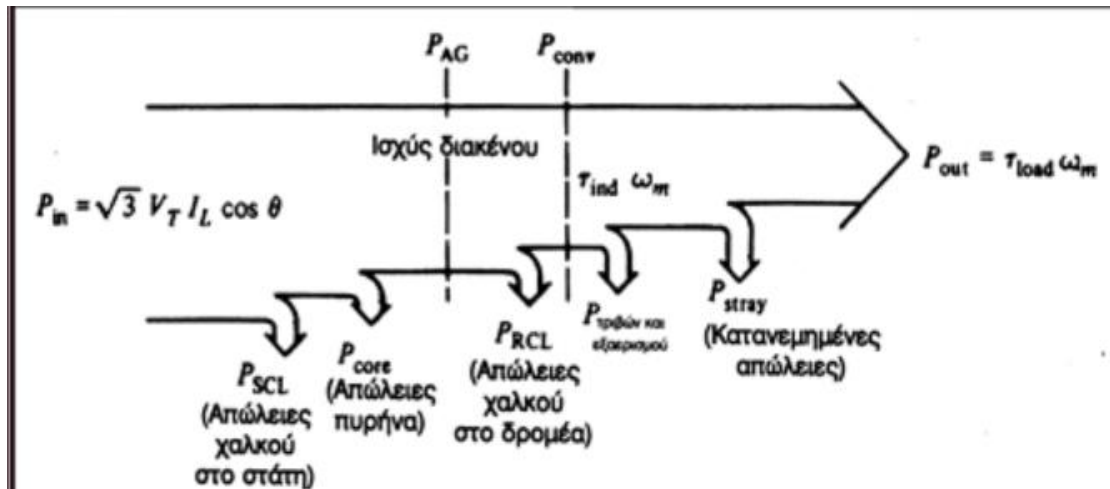
Φαίνεται ότι, από την ισχύ που μεταφέρεται από το στάτη στο δρομέα, ένα ποσοστό $1-s$ μετατρέπεται σε μηχανική, ενώ ένα ποσοστό s μετατρέπεται σε θερμότητα στην αντίσταση του δρομέα. Συνεπώς ένας κινητήρας που λειτουργεί με μεγάλη ολίσθηση δεν είναι ιδιαίτερα αποδοτικός.

Σημειώνεται τέλος ότι η εσωτερική μηχανική ισχύς που αναπτύσσεται στο δρομέα του επαγωγικού κινητήρα δεν είναι η ωφέλιμη μηχανική ισχύς, καθώς πρέπει να αφαιρεθούν οι απώλειες τριβών, αερισμού κλπ, οι οποίες όμως είναι της τάξης του 0.5% και μπορούν να παραλειφθούν. Η ωφέλιμη ισχύς στον άξονα χαρακτηρίζεται σαν $P_{φορτίου}$ και με τον κινητήρα να απορροφά από το δίκτυο ισχύ $P_{ηλεκτρ.ο}$ συντελεστής απόδοσης του κινητήρα προκύπτει από τη σχέση:

$$\text{συντελεστής απόδοσης } n = \frac{P_{\text{φορτίου}}}{P_{\text{ηλεκτρ}}}$$

1.8 Διάγραμμα ροής ισχύος

Η σχέση ανάμεσα στην ηλεκτρική ισχύ εισόδου, την μηχανική ισχύ εξόδου, καθώς και τις επιμέρους απώλειες του επαγωγικού κινητήρα αποδίδεται σχηματικά με το διάγραμμα ροής ισχύος



Εικόνα 9: Διάγραμμα ροής ισχύος επαγωγικού κινητήρα

Σύμφωνα με το διάγραμμα ροής ο κινητήρας τροφοδοτείται αρχικά με την ηλεκτρική ισχύ P_{in} . Οι πρώτες απώλειες της ισχύος εισόδου, εμφανίζονται στο τύλιγμα του στάτη του κινητήρα και είναι οι απώλειες χαλκού του στάτη. Στη συνέχεια χάνεται κάποιο ποσό ισχύος με την μορφή απωλειών υστέρησης και δινορρευμάτων στο στάτη (απώλειες πυρήνα). Η ισχύς που απομένει μεταφέρεται στο δρομέα του κινητήρα διαμέσου του διακένου, και γι' αυτό τολόγο ονομάζεται **ισχύς διακένου** (air-gap power) **PAG** της μηχανής. Ένα μέρος της ισχύος διακένου, δηλαδή της ισχύος που μεταφέρεται μέσω του διακένου στο δρομέα, χάνεται με τη μορφή θερμικών απωλειών στους αγωγούς του δρομέα (απώλειες χαλκού δρομέα).

Σε αυτό το σημείο, μετά δηλαδή από τις θερμικές απώλειες του δρομέα, η ισχύς που απομένει μετατρέπεται από ηλεκτρική σε μηχανική (**Pconv**). Η ισχύς αυτή, που μερικές φορές ονομάζεται **αναπτυσσόμενη μηχανική ισχύς** (ηλεκτρομηχανική ισχύς), δίνεται από τις σχέσεις

$$P_{conv} = P_{ag} - P_{rcl}$$

$$P_{conv} = t_{ind} * \omega m$$

όπου t_{ind} είναι η ροπή που παράγεται κατά τη μετατροπή της ηλεκτρικής ισχύος σε μηχανική. Αυτή η ροπή διαφέρει από εκείνη που είναι πραγματικά αξιοποιήσιμη στην έξοδο του κινητήρα, γεγονός που φαίνεται άλλωστε και από το διάγραμμα ροής ισχύος.

Πράγματι η P_{conv} μειώνεται από τις απώλειες τριβών και εξαιρισμού, δηλαδή τις μηχανικές απώλειες του κινητήρα (PF&W), ενώ στο τέλος αφαιρούνται και οι κατανεμημένες απώλειες (P_{stray}). Το ποσό της μηχανικής ισχύος που απομένει αποτελεί την αξιοποιήσιμη μηχανική ισχύ εξόδου της μηχανής (P_{out}).

Λόγω της φύσης τους, οι απώλειες πυρήνα τοποθετούνται στο διάγραμμα ροής ισχύος σχετικά αυθαίρετα. Στην πραγματικότητα οι συνολικές απώλειες του πυρήνα δεν προέρχονται μόνο από το κύκλωμα του στάτη (όπως υποδηλώνεται από το συγκεκριμένο διάγραμμα), αλλά προέρχονται και από το κύκλωμα του δρομέα. Θα μπορούσαν λοιπόν να τοποθετηθούν στο διάγραμμα μετά τις απώλειες χαλκού του δρομέα.

Ο λόγος για τον οποίο σ' ένα διάγραμμα ροής ισχύος οι συνολικές απώλειες πυρήνα συνήθως τοποθετούνται στο κύκλωμα του στάτη (όπως έγινε και στο διάγραμμα του σχήματος μας), είναι ότι οι απώλειες αυτές, τις περισσότερες φορές, προέρχονται στο μεγαλύτερο ποσοστό τους από το στάτη. Κι αυτό διότι τις περισσότερες φορές ο κινητήρας περιστρέφεται με ταχύτητα πολύ κοντά στην σύγχρονη και κατά συνέπεια η σχετική ταχύτητα που αναπτύσσεται ανάμεσα στα μαγνητικά πεδία είναι πολύ μικρή. Έτσι οι απώλειες πυρήνα στο δρομέα είναι πολύ μικρές συγκριτικά με τις αντίστοιχες του στάτη.

1.9 ΚΛΑΣΕΙΣ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ

Γενικά για τις κλάσεις

Με την μεταβολή των χαρακτηριστικών του δρομέα ενός επαγωγικού κινητήρα είναι δυνατή η υλοποίηση μεγάλης ποικιλίας χαρακτηριστικών ροπής – ταχύτητας. Με σκοπό να βοηθήσουν την βιομηχανία στην επιλογή των κατάλληλων κινητήρων σε διαφορετικές εφαρμογές και για όλο το εύρος ισχύος, η National Electrical Manufacturers Association (NEMA) στις ΗΠΑ και η International Electrotechnical Commission (IEC) στην Ευρώπη, έχουν θεσπίσει μια σειρά από τυποποιημένες σχεδιάσεις κινητήρων με διαφορετικές χαρακτηριστικές ροπής – ταχύτητας. Αυτές οι τυποποιημένες σχεδιάσεις ονομάζονται κλάσεις σχεδίασης. Αναλυτικά παρουσιάζονται παρακάτω όλες οι κλάσεις όπως υπάρχουν τώρα στην αγορά.

Κλάσεις σχεδίασης

Κλάση σχεδίασης A.

Οι κινητήρες κλάσης A είναι κινητήρες με τυποποιημένη σχεδίαση που παρουσιάζουν κανονική ροπή εκκίνησης, κανονικό ρεύμα εκκίνησης και χαμηλή ολίσθηση. Η ολίσθηση του κινητήρα κλάσης A στη λειτουργία υπό πλήρες φορτίο θα πρέπει να είναι από 5% και μικρότερη από αυτή του κινητήρα κλάσης B αντιστοίχων προδιαγραφών. Η ροπή ανατροπής είναι περίπου ίση με 200% ως 300% της ροπής κατά την πλήρη φόρτιση και αντιστοιχεί σε κάποια μικρή τιμή της ολίσθησης (>20%). Έχει ιδιαίτερα υψηλό ρεύμα εκκίνησης συνήθως 500% έως 800% του ονομαστικού ρεύματος. Στο παρελθόν οι κινητήρες με κλάση A αποτελούσαν την καθιερωμένη σχεδίαση για κινητήρες κάτω των 7.5hp, και άνω των 200 hp. Όμως στις μέρες μας οι κινητήρες με κλάση A έχουν αντικατασταθεί από τους κινητήρες κλάσης B. τυπικές εφαρμογές είναι η οδήγηση ανεμιστήρων φυσηρών, τόνων και άλλων εργαλειομηχανών.

Κλάση σχεδίασης B.

Οι κινητήρες κλάσης B έχουν κανονική ροπή εκκίνησης, μικρό ρεύμα εκκίνησης και χαμηλή ολίσθηση. Ένας τέτοιος κινητήρας παράγει σχεδόν την ίδια ροπή με τον κινητήρα κλάσης A, ενώ το ρεύμα εκκίνησης του είναι περίπου 25% μικρότερο. Έχει ροπή ανατροπής περίπου ίση με το 200% της ονομαστικής ροπής φορτίου αλλά μικρότερη από αυτή των κινητήρων κλάσης A λόγω αυξημένης αντίδρασης δρομέα. Έχει χαμηλή ολίσθηση υπό πλήρες φορτίο (>5%). Έχει ίδιες εφαρμογές με εκείνες από την κλάση A, με την διαφορά ότι έχουν μικρότερο ρεύμα εκκίνησης.

Κλάση σχεδίασης C.

Οι κινητήρες αυτοί παρουσιάζουν μεγάλη ροπή εκκίνησης, μικρό ρεύμα εκκίνησης και χαμηλή ολίσθηση στη λειτουργία υπό πλήρες φορτίο (μικρότερη από 5%). Η ροπή ανατροπής είναι μικρότερη από τους κινητήρες κλάσης A, ενώ η ροπή εκκίνησης φτάνει το 250% της ροπής υπό πλήρες φορτίο. Λόγω της κατασκευής τους (διπλού δρομέα) οι κινητήρες αυτοί βρίσκουν εφαρμογή σε φορτία που απαιτούν υψηλή ροπή εκκίνησης, όπως συμπιεστές και μεταφορείς, και για αυτό το λόγο είναι πιο ακριβοί από τις προηγούμενες κλάσεις.

Κλάση σχεδίασης D

Αυτοί οι κινητήρες έχουν πάρα πολύ μεγάλη ροπή εκκίνησης (πάνω από το 270% της ονομαστικής ροπής) και μικρό ρεύμα εκκίνησης, αλλά παρουσιάζουν υψηλή ολίσθηση στη λειτουργία υπό πλήρες φορτίο. Ουσιαστικά πρόκειται για απλούς επαγωγικούς κινητήρες κλάσης A, που διαθέτουν όμως ράβδους μικρότερης διατομής κατασκευασμένες από υλικό μεγαλύτερης αντίστασης.

Αυτού του είδους οι κινητήρες έχουν εφαρμογή στην επιτάχυνση φορτίων με εξαιρετικά μεγάλη αδράνεια, όπως πχ διατρητικές πρέσες ή ψαλίδια.

Μαζί με τις τέσσερις προηγούμενες κλάσεις σχεδίασης η NEMA συνήθως αναγνώριζε ακόμη δυο κλάσεις, την E και την F που τις

ονόμαζε επαγωγικούς κινητήρες ομαλής εκκίνησης (softstarter). Η ξεχωριστή ιδιότητα αυτών των κινητήρων ήταν το χαμηλό ρεύμα εκκίνησης, και χρησιμοποιούνταν σε φορτία μικρής ροπής εκκίνησης, όπου τα μεγάλα ρεύματα εκκίνησης δημιουργούσαν σοβαρό πρόβλημα. Στις μέρες μας αυτές οι κλάσεις σχεδίασης έχουν καταργηθεί.

1.10 Επιλογή και συντήρηση επαγωγικών κινητήρων

Η τεράστια ποικιλία τύπων, μεγεθών και ποιοτήτων επαγωγικών κινητήρων που είναι διαθέσιμη στην αγορά, κάνει ιδιαίτερα σύνθετο το πρόβλημα της επιλογής του κατάλληλου κινητήρα για μια εφαρμογή. Οι κύριοι παράγοντες που επηρεάζουν την επιλογή είναι:

- Διαθέσιμη τάση και συχνότητα.
- Ροπή (ή αντίστοιχα ισχύς) και ταχύτητα περιστροφής που απαιτούνται.
- Μορφή του κύκλου εργασίας του κινητήρα.
- Χαρακτηριστικά περιβάλλοντος εγκατάστασης, (υγρασία, σκόνη, θερμοκρασία, εκρηκτικό περιβάλλον κλπ). Ειδικές προδιαγραφές, γνωστές σαν δείκτης IP XY διέπουν τη προστασία από είσοδο ξένων σωμάτων ή επαφής με το ανθρώπινο σώμα (δείκτης X) και την προστασία από είσοδο νερού (δείκτης Y). Ειδικές προδιαγραφές απαιτούνται για κινητήρες που θα λειτουργήσουν σε ειδικά επικίνδυνα περιβάλλοντα (εκρηκτικά κλπ).
- Χαρακτηριστικά τοποθέτησης, δηλαδή διαστάσεις κινητήρα, τρόπος έδρασης κλπ.
- Δυνατότητες συντήρησης.
- Τύποι κινητήρων που ήδη χρησιμοποιούνται και συντηρούνται στη μονάδα.

- Αξιοπιστία προμηθευτών.

Η προμήθεια του κινητηρίου συστήματος εξετάζεται στο σύνολο και περιλαμβάνει και τις απαραίτητες συσκευές ελέγχου και προστασίας (εκκινητές, θερμικά κλπ.). Εξετάζεται η σκοπιμότητα και δυνατότητα εγκατάστασης συστήματος ελέγχου με μεταβλητή συχνότητα. Σε σχέση με τη διαστασιολόγηση ένας κινητήρας γενικά επιλέγεται με ονομαστική ισχύ ίση με το μέγιστο φορτίο που έχει να αντιμετωπίσει.

Πρέπει να λαμβάνεται σοβαρά υπόψη το γεγονός, ότι όταν ο κινητήρας φορτίζεται ελαφρά υποφέρει και από χαμηλή απόδοση και από μικρό συντελεστή ισχύος, ενώ συνεχίζει να εμφανίζει υψηλά ρεύματα εκκίνησης και απαιτεί συνεπώς μεγαλύτερες διατομές αγωγών τροφοδοσίας και μεγαλύτερα μέσα προστασίας. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση του κόστους εγκατάστασης και την επιδείνωση του συνολικού συντελεστή απόδοσης.

Αντίθετα, σύμφωνα με τους κανονισμούς της IEC και VDE οι κινητήρες μπορούν να υπερφορτωθούν σε ποσοστό 150% του ονομαστικού τους ρεύματος για χρόνους της τάξης των 2 min υπό ονομαστική τάση και συχνότητα, εάν δεν ορίζεται διαφορετικά από τον κατασκευαστή.

Το μεγαλύτερο πρόβλημα στους κινητήρες είναι η υπερθέρμανση, που μπορεί να προκαλέσει καταστροφή της μόνωσης των περιελίξεων. Κατάλληλες διατάξεις προστασίας (θερμικά) προβλέπονται για τους κινητήρες. Παρόλα αυτά σε περιπτώσεις συχνών εκκινήσεων επιλέγονται συνήθως μεγαλύτεροι κινητήρες.




Η σωστή συντήρηση των κινητήρων είναι κυρίως πρόβλημα σωστού προγραμματισμού. Οι μικροί κινητήρες έχουν αυτολίπαντα ρουλεμάν ή κουζινέτα και δεν απαιτούν πρόσθετη λίπανση, εφόσον λειτουργούν σε περιβάλλον που συμφωνεί με τις προδιαγραφές τους. Οι μεγάλοι κινητήρες απαιτούν λίπανση σύμφωνα με τις οδηγίες του κατασκευαστή. Η σκόνη, η βρωμιά, η υγρασία βλάπτουν γενικά. Ιδιαίτερη προσοχή απαιτείται στη σωστή λειτουργία του συστήματος ψύξης.

Οι επαγωγικοί κινητήρες επιδέχονται εύκολα επισκευές, όπως περιελίξεις, ρουλεμάν κλπ. Οι δακτυλιοφόροι κινητήρες απαιτούν συστηματικό έλεγχο στις ψήκτρες και τους συλλέκτες τους.

2. Κεφάλαιο Περιέλιξη Κινητήρα

Σε αυτό το κεφάλαιο θα αναφερθούμε στην πειραματική διαδικασία που ακολουθήσαμε κατά την οποία πραγματοποιήσαμε την περιέλιξη σε έναν ασύγχρονο τριφασικό κινητήρα βραχυκυκλωμένου δρομέα. Ένα από τα πιο σημαντικά κομμάτια αυτής της διαδικασίας ήταν και η καταγραφή όλων των στοιχείων του τυλίγματος του στάτη, αλλά πριν από αυτό θα αναλύσουμε τις πληροφορίες που παίρνουμε από την πινακίδα του κινητήρα μας.

2.1 Πινακίδα

 ELECTRO ADDA SPA COSTRUZIONI ELETTROMECCANICHE BEVERATE - DI BRIVIO (LC) ITALY		 	
MOT.3 ~ C 100L - 4		N° 0712-113 195 EA1	
IP 55	/IEC34-5	cos φ 0.81	I.CI. F S1
50 Hz	2.2 KW	Y 380 - 420 / 220 - 240 V	Δ
	1420 RPM	Y 4.84 / 8.38 A	Δ
60 Hz	2.2 KW	Y 380 - 420 / 220 - 240 V	Δ
	2.64 KW	Y 440 - 480 / 255 - 280 V	Δ
	1700 RPM	Y 4.84 / 8.38 A	Δ

Εικόνα 10: πληροφορίες για τον κινητήρα

Φάσεις : 3

NEMA DESIGN CATEGORY: C άρα $S < 5\%$

Cosφ: 0.81

Insulation Class: Insulation temperature class = F = 155°C

Frame: Motor dimensional characteristics according to NEMA:

100 L-4

Συχνότητα: 50_{HZ} / 60_{HZ}

Σύγχρονη ταχύτητα : $N_s = 1500_{rpm}$

Ασύγχρονη ταχύτητα : $N_r = 1420_{rpm}$

Αριθμός πόλων : 4

Ισχύς: 2.2 KW

Συνδεσμολογία Πινακίδας

Y: 380/420 v - 4.84 A

Δ: 220/240v - 8.38 A

2.2 Αφαίρεση παλιού τυλίγματος

Όπως αναφερθήκαμε και παραπάνω είναι πολύ σημαντικό να καταγράψουμε όλες τις πληροφορίες που παίρνουμε από το παλιό τύλιγμα του στάτη, γιατί διαφορετικά θα είναι από δύσκολο έως και ακατόρθωτο να μπορέσαμε να τοποθετήσουμε το καινούργιο τύλιγμα και να πετύχουμε τα ίδια χαρακτηριστικά που είχε και πριν ο κινητήρας μας.

Πριν βγάλουμε τα καπάκια της μηχανής τα χαράζουμε με ένα κατσαβίδι για να ξέρουμε την ακριβή θέση που έχουν με το στάτη, ώστε να μην τα σφίξουμε παραπάνω και τους προκαλέσουμε ζημιά.

Στη συνέχεια με ένα σφυρί και ένα μεταλλικόκαλέμιχτυπήσαμε τα μάτσαακριβώς στο σημείο που έβγαιναν από τα αυλάκια, (λούκια), για να μην χτυπήσουμε το στάτη της μηχανής το καλέμι στην άκρη του το είχαμευπό μια γωνία που του επέτρεπε να εισχωρεί εφραπτόμενα με το στάτη χωρίς όμως να το παραμορφώνει. Αφού βγήκε από την μια πλευρά το τύλιγμαμετρήθηκαν οι σπείρες από τα μάτσα και βρέθηκαν 34, ενώ η διατομή του κάθε αγωγού μετρήθηκε με μικρόμετροαφού του είχααφαιρεθεί η μόνωση με γυαλόχαρτο N₀00 και βρέθηκε 1.25mm. Επιπλέον ζυγίσαμε το τύλιγμα που είχαμε αφαιρέσει και το πολλαπλασιάσαμε επί 2.5 το βάρος του, αυτός είναι ένας εμπειρικός κανόνας με τον οποίο μπορούμε να υπολογίζουμε το συνολικό βάρος της περιέλιξης που θα χρειαστούμε.

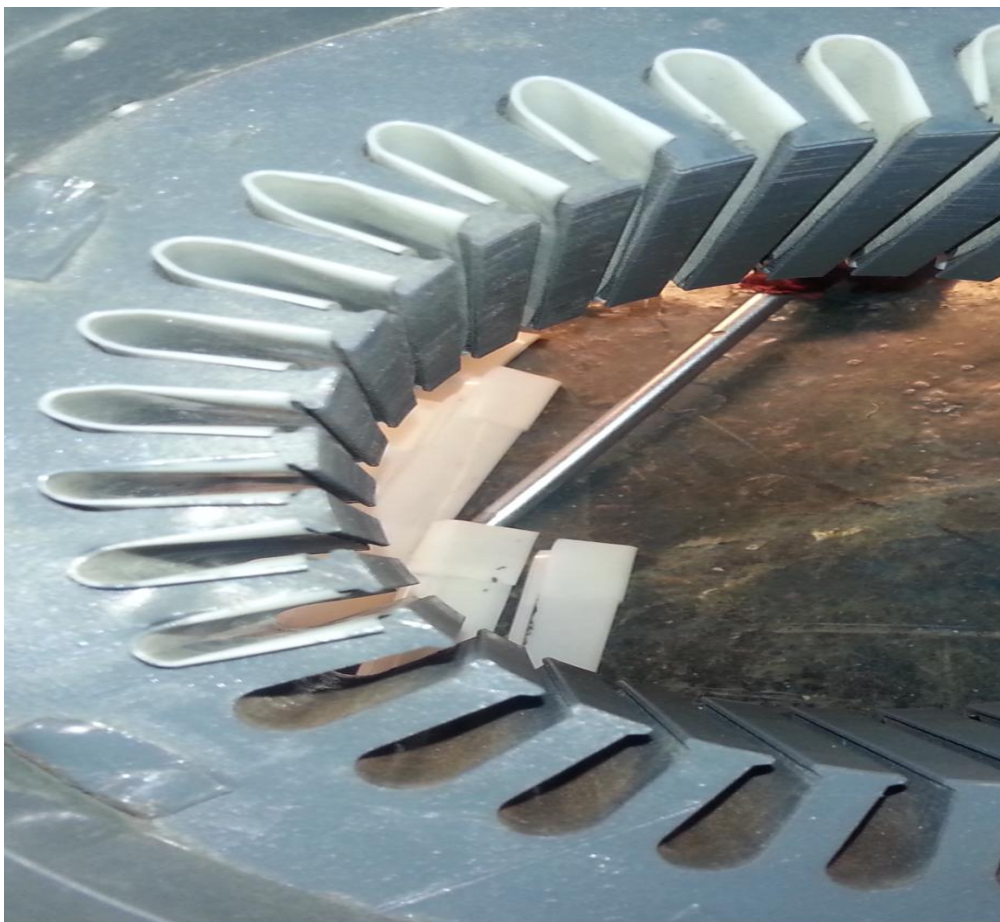


Εικόνα 11: Ο τρόπος με τον οποίο αφαιρέθηκε το καμένοτύλιγμα από την μια πλευρά.

Για να αφαιρέσουμε και το υπόλοιποτύλιγμα από την άλλη μεριά του στάτη χρησιμοποιήθηκε ένα άλλο καλέμι το οποίο στο τέλος του είχε ένα ειδικό σχήμα που του επέτρεπε να «αγκαλιάζει» και τα τρία μάτσα μαζί και χτυπώντας το καλέμι με το σφυρί τα μάτσα βγαίνουν από την άλλη μεριά. Αφούπλέονείχαν βγει όλα τα τυλίγματα από το στάτη ξαναμετρήθηκαν για να επαληθευτούν οι υπολογισμοί που είχαμεκάνει και προηγουμένως, το συνολικό βάροςόλων των σπειρών ήταν 2.4Kgάρα αφού οι σπείρες είναι 6, το βάρος της κάθε σπείρας είναι 400gr. Με ένα τρυπάνι το οποίο το «δουλέψαμε» μέσα στα αυλάκια,καταφέραμε και βγάλαμε ότι είχεαπομείνει από την παλιάπεριέλιξη, αγωγούς και χαρτάκια «πρεσπών». Επιπλέον με ένα γυαλόχαρτο τρίψαμε το εσωτερικό του στάτη προσεχτικά, το φυσήξαμεμε πίεση αέρα για να φύγουν όλες οι σκόνης από τα αυλάκια, και στο τέλος βάρφηκε για επιπλέον μόνωση.



Εικόνα 12: το εσωτερικό του σάττη μόλις αφαιρέθηκε η περιέλιξη



Εικόνα 13 : Ο σάττης αφούτρίφτηκε και βάφτηκε με τοποθετημένα τα πρώτα πρεσπών.

2.3 Τοποθέτηση της καινούργιας περιέλιξης

Όπως φαίνεται και στην εικόνα 13 τοποθετήθηκαν στο στάτη σε όλα τα αυλάκια μονωτικό πεπιεσμένο χαρτί (πρεσπάν).

Η διατομή του αγωγού άλλαξε, γιατί δεν υπήρχε στο μηχανουργείο 1.25mm, και τοποθετήθηκαν δυο αγωγοί παράλληλα, ο ένας ήταν 0.60mm και ο άλλος 0.65mm.

Με αυτό το τρόπο καταφέραμε να κάνουμε την διαδικασία της περιέλιξης πιο εύκολη γιατί πλέον τα μάτσα ήταν πιο εύκολα στο να τα λυγίσουμε (εύκαμπτα), και τα τοποθετούσαμε με σχετική ευκολία μέσα στα αυλάκια.

Για να μπορέσουμε να βρούμε το πλάτος που θα έχουν οι σπείρες, τοποθετήσαμε ένα αγωγό μέσα στα αυλάκια έτσι ώστε να μπορέσουμε να έχουμε μια εικόνα για το πλάτος που θα έχει το μικρότερο μάτσο, και με βάση αυτό να φτιάξουμε και τα υπόλοιπα μάτσα πάνω στο καλούπι που έχουμε. Το καλούπι είναι εγκατεστημένο πάνω σε ένα κινητήρα για να μπορεί και να περιστρέφεται, επίσης έχει και ένα στροφόμετρο για να βλέπαμε τις σπείρες που κάνουμε και να μην χάνεται το μέτρημα. Η διαμόρφωση στο καλούπι γίνεται με τα παξιμάδια που είναι πάνω σε ένα άξονα στον οποίο στηρίζεται και όλο το καλούπι (εικόνα 14), όταν επιτύχουμε το κατάλληλο πλάτος σφίγγουμε τα παξιμάδια για να το κρατήσουμε σταθερό. Η περιέλιξη που επιλέξαμε λέγεται "πλεκτό" και είναι καλύτερη από

την

"μαξιλάρια" γιατί προσφέρει καλύτερες μονωτικές ιδιότητες.

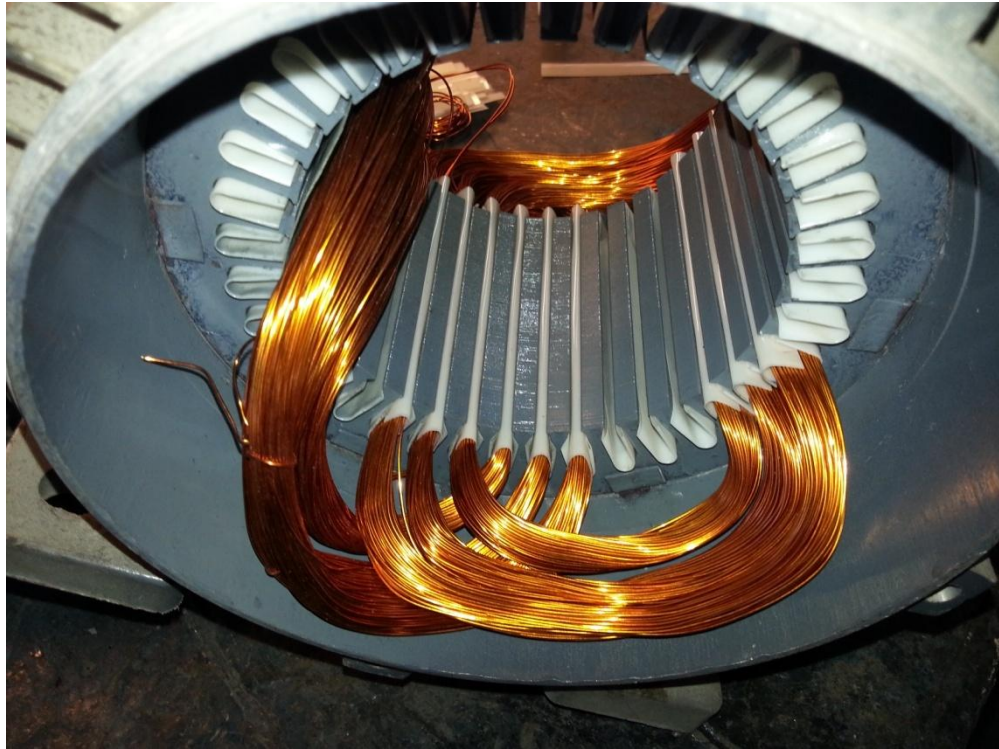
Αφού βγήκε η πρώτη σπείρα από το καλούπι τοποθετήθηκαν τα τρία πρώτα μάτσα και τα υπόλοιπα τρία θα μπουν στο τέλος, μόνο με αυτόν το τρόπο καταφέρνουμε να επιτύχουμε αυτού του είδους περιέλιξη, μετά από κάθε σπείρα που τελειώνουμε τοποθετούμε και επιπλέον χαρτάκια ενδιάμεσα σε κάθε μάτσο. Αφού ολοκληρώθηκαν όλες οι σπείρες και μπήκαν στα λούκια τότε τοποθετήσαμε και τα πρεσπάν από πάνω για επιπλέον μόνωση.



Εικόνα 14 : Η δημιουργία των πρώτων τυλιγμάτων πάνω στο καλούπι.

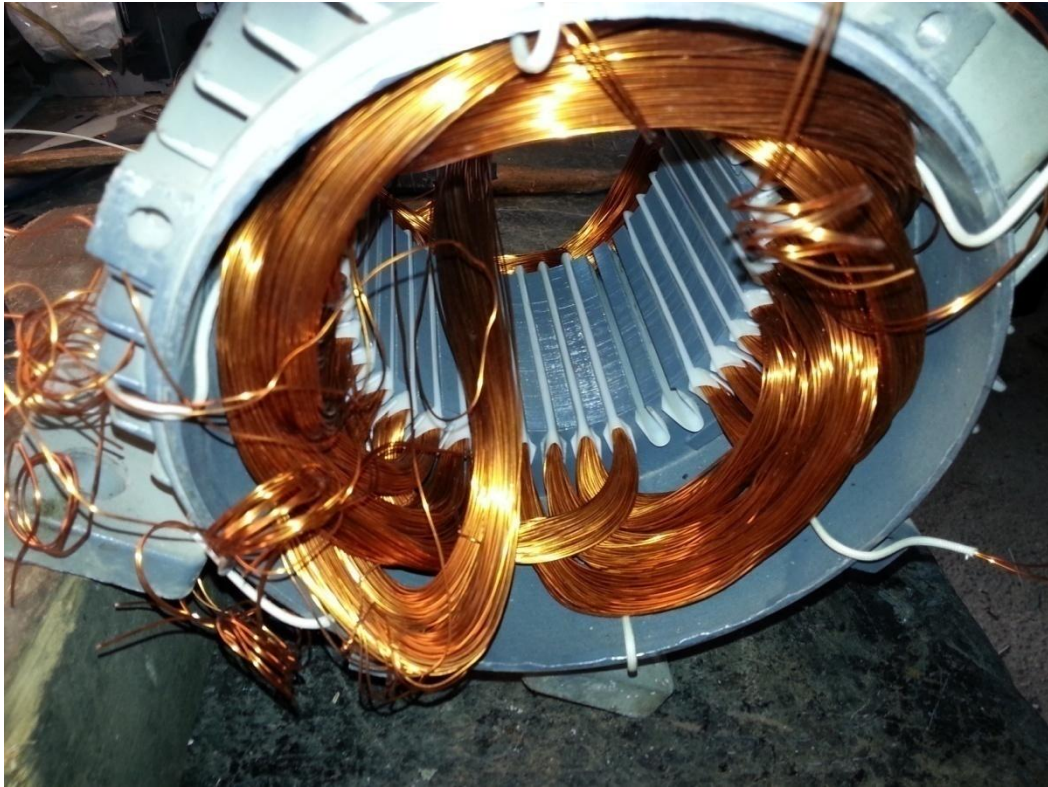


Εικόνα 15: Η τοποθέτηση του πρώτου τυλίγματος στο στάτη



Εικόνα 16: Η συνέχεια της διαδικασίας με την τοποθέτηση του δεύτερου τυλίγματος.

Είναι πολύσημαντικό κατά την τοποθέτηση των σπειρών να είμαστε ιδιαίτερα προσεκτικοί γιατί υπάρχει το ενδεχόμενο να φύγει το βερνίκι από κάποιο αγωγό και να έχουμε κάποιο βραχυκύκλωμα. Για αυτό το λόγο οι αγωγοί τις κάθε σπείρας τοποθετούνται στα λούκια δύο - δύο ώστε να υπάρχει η δυνατότητα να μπορούμε να τα ελέγξουμε και να τους δώσουμε την κατάλληλη πίεση για να χωρέσουν όλοι στα αυλάκια.



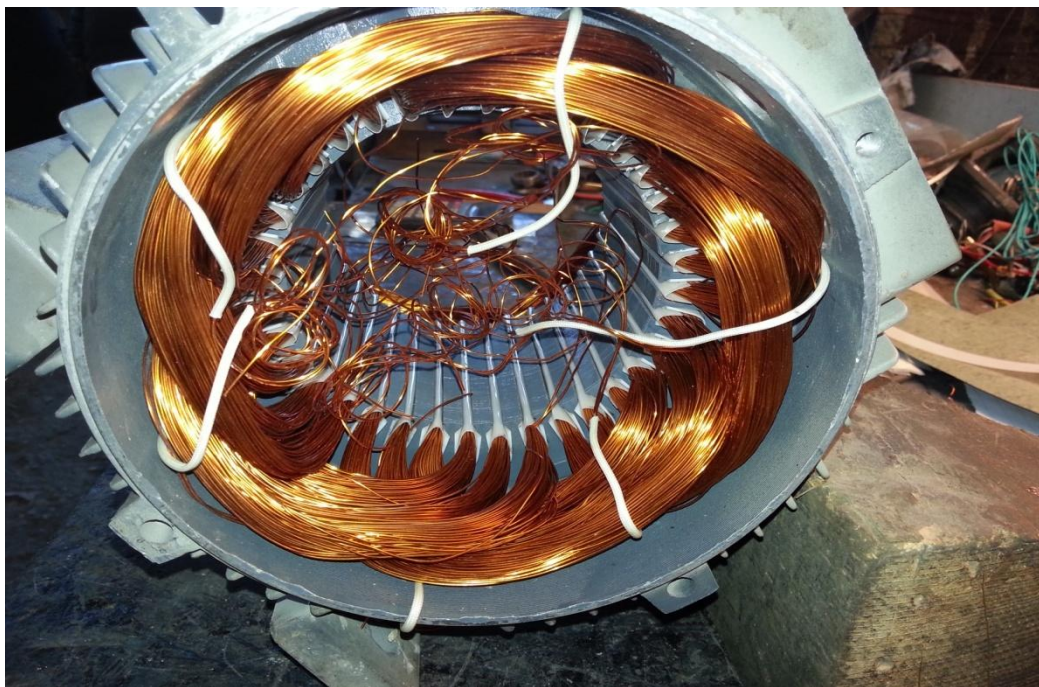
Εικόνα 17: Η τοποθέτηση του τελευταίου τυλίγματος στο στάτη.

Στην εικόνα 17 φαίνεται το τελευταίο κομμάτι της πρώτης σπείρας που μπαίνει στα λούκια που απομένουν, σε αυτό το σημείο προσέχουμε την καμπυλότητα που έχουν οι σπείρες να μην είναι και πολύ μεγάλη γιατί υπάρχει το ενδεχόμενο να μην μπορεί να μπει ο δρομέας. Για αυτό το λόγο χτυπάμε με ένα σφυρί προσεκτικά τις σπείρες ώστε να μην είναι τόσο έξω από το στάτη, και να είναι ομοιόμορφα.

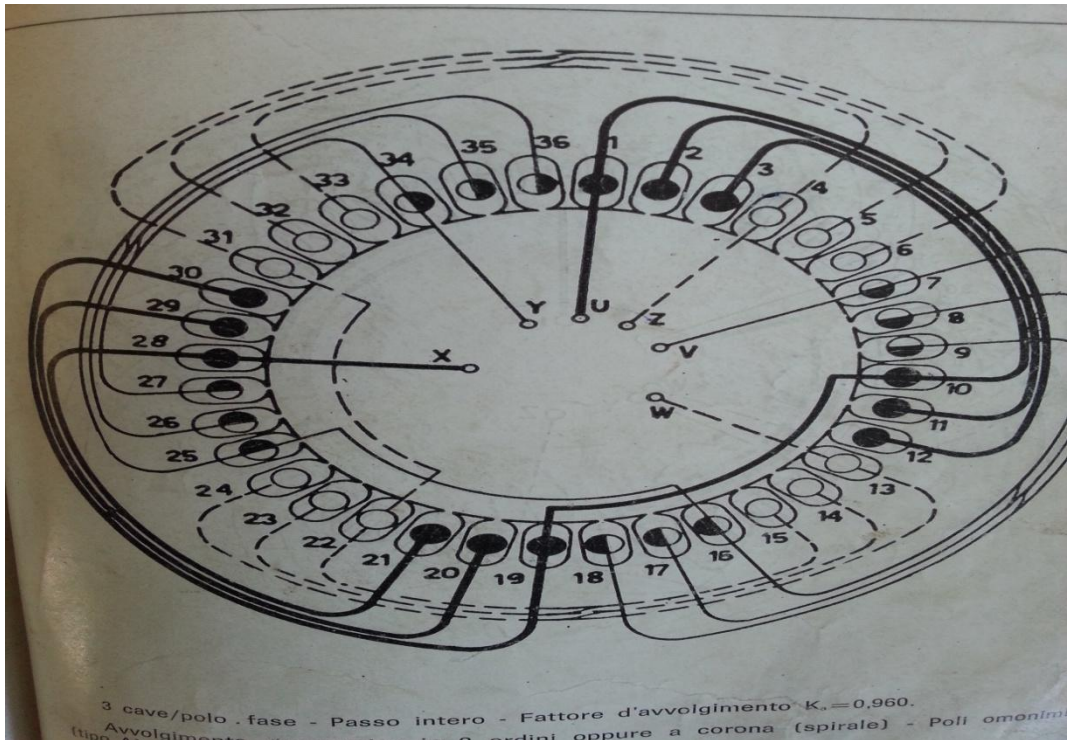


Εικόνα 18: Συνέχεια τις διαδικασίας.

Στην εικόνα 18 - 19 φαίνονται πλέον όλες οι σπείρες μέσα στα λούκια, στην συνέχεια σύμφωνα με το σχέδιο της συνδεσμολογίας της εικόνας 20 συνδέουμε όλα τα τυλίγματα του στάτη ώστε να επιτύχουμε και τους κατάλληλους πόλους (ταχύτητες) της μηχανής.



Εικόνα 19: Ενώσεις των τυλιγμάτων.



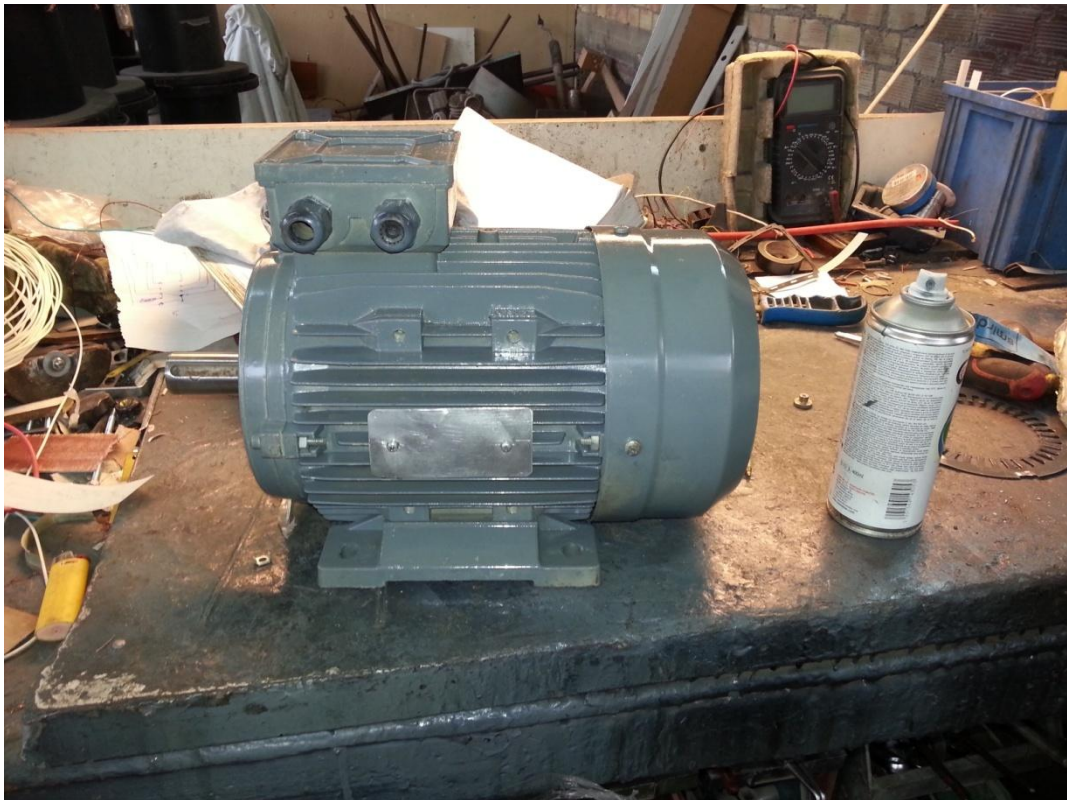
Εικόνα 20: Η συνδεσμολογία που ακολουθήθηκε κατά την οποία συνδέθηκαν τα τυλίγματα.

Στην συνέχεια (Εικόνα 21), δέθηκαν όλα τα τυλίγματα με ένα είδος βαμβακερού σχοινιού για να τα κρατάσταθερά και να μην μετακινηθούν, επίσης ενδιάμεσα σε κάθε τυλίγματοποθετήθηκαν επιπλέον φύλα μόνωσης.



Εικόνα 21: Ολοκλήρωση της διαδικασίας.

Τέλος (εικόνα 21), με μια λάμαπιέσαμε όλα τα λούκια για να μην προεξέχει κάποιο από τα πρεσπάν που είχαμε βάλει, μετά ρίξαμε αρκετό βερνίκι σε όλο το στάτη για επιπλέον μόνωση (αυτή η διαδικασίαδιήρκτησε 24 ώρες) και για να καλύψει τυχόν κενά μέσα στα τυλίγματα και στα λούκια(επίσηςβοηθάει στο να μειώσει τυχόν βουητά που οφείλονται στην διέλευση του ρεύματος από τα τυλίγματα).Στην συνέχεια αφού τοποθετήσαμε το δρομέα και όλα τα καπάκια το βάψαμε (εικόνα 22).



Εικόνα 22: ο κινητήρας πλέον ολοκληρωμένος.

Εφόσον ο κινητήρας μας ήταν πλέον έτοιμος, του κάναμε κάποιες δοκιμές σχετικά με την ορθή και ομαλή λειτουργία του, είδαμε με ένα πολύμετρο αν κατά την τοποθέτηση των τυλιγμάτων νείχε φύγει η μόνωση σε κάποιο αγωγό, με ένα ωμόμετρο μετρήσαμε και τα τρία τυλίγματα και διαπιστώσαμε ότι έχουν την ίδια αντίσταση, και τέλος κατά την λειτουργία του ελέγξαμε αν ο ρότορας έκανε κάποιο θόρυβο ο οποίος θα οφειλότανε στα ρουλεμάν.

3. Κεφάλαιο : Πείραμα χωρίς φορτίο και με ακινητοποιημένο δρομέα

3.1 Πείραμα χωρίς φορτίο

Το πείραμα αυτό γίνεται σύμφωνα με τα διεθνή πρότυπα της INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION (IEC)

Με το πείραμα χωρίς φορτίο θα υπολογίσουμε τις μηχανικές απώλειες του κινητήρα και την αντίσταση μαγνήτισης με την αντίδραση διαρροής στο στάτη.

Σε αυτό το πείραμα τα απαραίτητα όργανα που χρειαστήκαμε ήταν ένα βολτόμετρο για να μετράμε τη τάση των τυλιγμάτων, ένα αμπερόμετρο για το ρεύμα γραμμής – τυλιγμάτων, και ένα αναλυτή ενέργειας που μας παρείχε πληροφορίες σχετικά με την ισχύ και το $\cos\phi$. (εικόνα 23)



Εικόνα 23: Διάταξη για το πείραμα χωρίς φορτίο.

Παρακάτω είναι ο πίνακας με τις τιμές των μετρήσεων όπως έγιναν στο εργαστήριο, ξεκινώντας και δίνοντας τάση από τα 400V (398V) λόγω αδυναμίας του τροφοδοτικού και μειώνοντας σταδιακά, έχουμε τιμές για το ρεύμα (I_s), την ισχύ (P), και το συντελεστή ισχύος ($\cos\phi$).

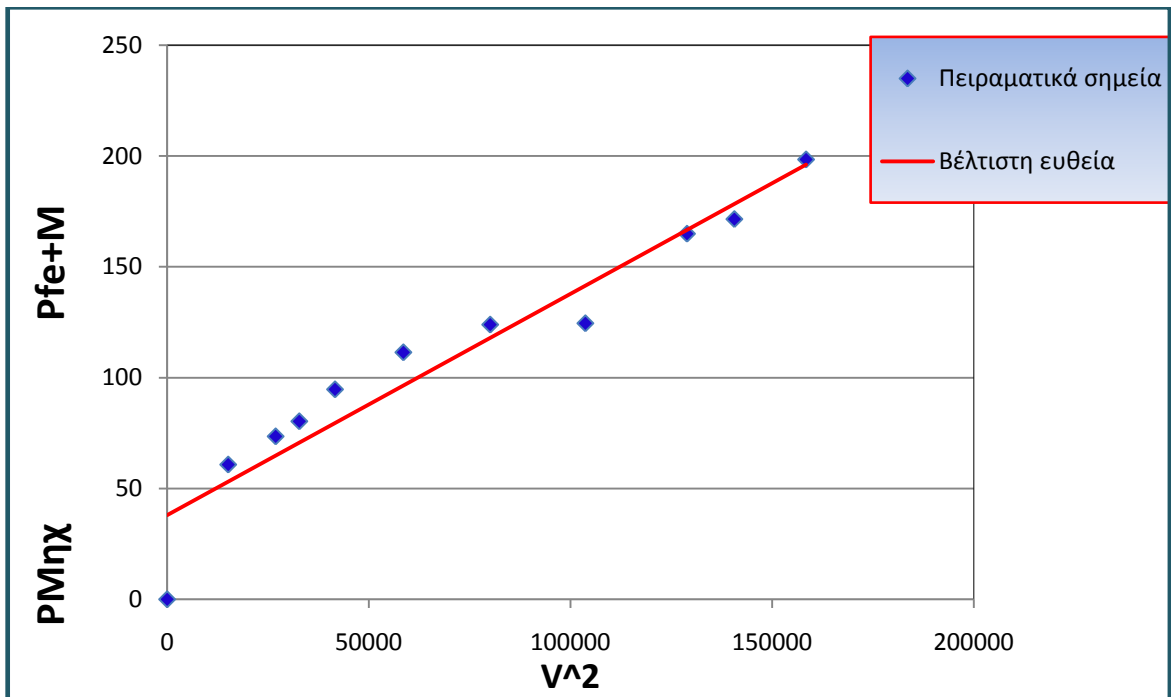
V (volt)	I_s (A)	P (W)	$\cos\phi$
398	2	250	0.17
375	1.75	211	0.17
359	1.6	198	0.19
322	1.35	148	0.19
283	1.15	141	0.24
242	0.95	123	0.27
204	0.85	104	0.33
181	0.72	87	0.37
164	0.65	79	0.42
123	0.5	64	0.53

ΠΙΝΑΚΑΣ 1: Πείραμα χωρίς φορτίο

Με ένα ωμόμετρο μετρήσαμε την αντίσταση χαλκού στο τύλιγμα κάθε φάσης του στάτη $R_s=4.3 \Omega$. Η μέτρηση αυτή έγινε μετά την ολοκλήρωση των πειραμάτων, το γεγονός ότι η αντιστάσεις είχαν αναπτύξει κάποια θερμοκρασία μας βοηθάει στο να έχουμε μια καλύτερη ένδειξη στην τιμή της αντίστασης. Από την σχέση:

$$P_{ολ} = P_{fe} + M + 3 * I_s^2 * R_s$$

Η ακριβής μαθηματική γραφική παράσταση για τον υπολογισμό των μηχανικών απωλειών έγινε με το υπολογιστικό πρόγραμμα **excel**, και παρουσιάζεται στο παρακάτω γράφημα :



Γράφημα 1: Προσδιορισμός μηχανικών απωλειών

Άρα η μηχανικές απώλειες βρέθηκαν :

$$P_{Mηχ} = 38.04 W$$

Από τον πίνακα 1 τις απώλειες σιδήρου για ισχύ $P=250W$, τάση $U= 398 V$ και ρεύμα $I= 2A$

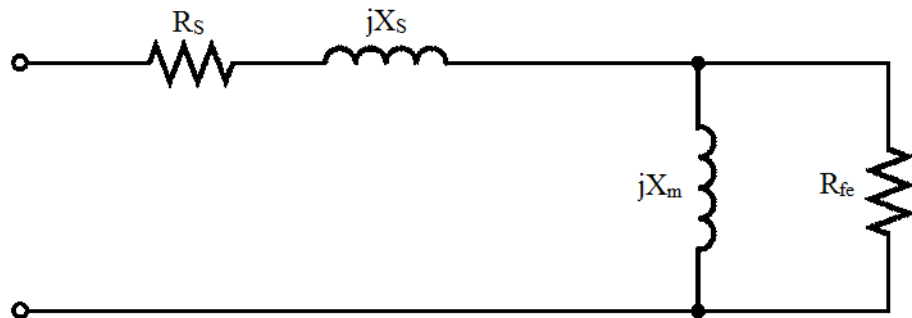
Οι απώλειες σιδήρου P_{fe} προκύπτουν από την σχέση :

$$P_{fe} = P_{ολ} - (3 * I_s^2 * R_s) - P_{Mηχ} = 250 - (3 * 2^2 * 4.3) - 38.04 = 160,36W$$

Για να μπορέσουμε να παρουσιάσουμε το ισοδύναμο κύκλωμα του κινητήρα μας στο πείραμα χωρίς φορτίο θα πρέπει να υπολογίσουμε την σύνθετη αντίσταση Z_k και την αντίσταση σιδήρου R_{fe} :

$$Z_k = \frac{V_s}{I_s} = \frac{398}{2} = 114.9 \Omega$$

$$R_{fe} = \frac{3 * V_s^2}{P_{fe}} = \frac{3 * 398^2}{160.36} = 2963.5 \Omega$$



Εικόνα 24 : Ισοδύναμο κύκλωμα πειράματος χωρίς φορτίο

Στην παραπάνω εικόνα παρουσιάζεται το ισοδύναμο κύκλωμα του κινητήρα στην λειτουργία χωρίς φορτίο. Στους υπολογισμούς που ακολουθούν ο κλάδος με την αντίσταση σιδήρου R_{fe} δεν λαμβάνεται υπόψη λόγω του ότι η αντίσταση είναι πολύ μεγάλη και (προσεγγιστικά) δεν διαρρέεται από ρεύμα.

Άρα για επαγωγική αντίδραση σκέδασης του στάτη και επαγωγική αντίδραση μαγνήτισης έχουμε:

$$Z_k = \sqrt{(jX_m + jX_s)^2 + R_s^2} \gg (X_s + X_m) = \sqrt{Z_k^2 + R_s^2} = 114.98 \Omega.$$

3.2 Πείραμα με ακινητοποιημένο το δρομέα (locked rotor test)

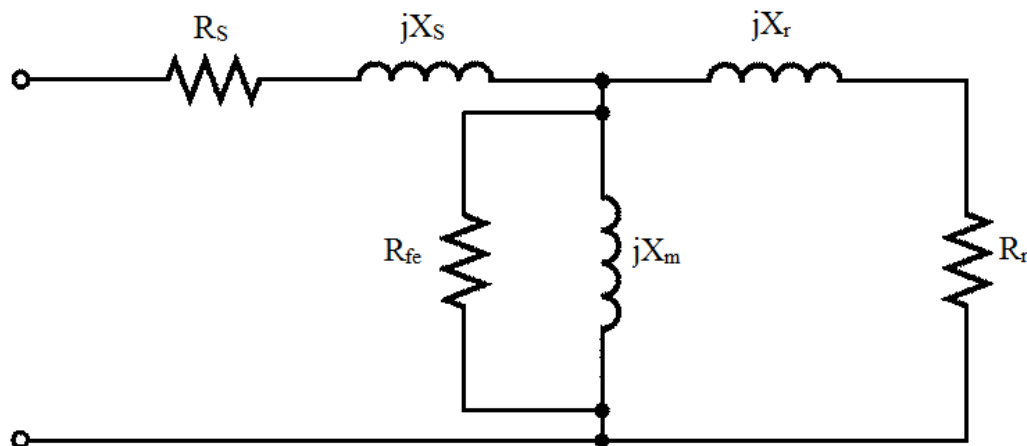
Κλειδώνουμε τον δρομέα με ένα φρένο και του εφαρμόζουμε χαμηλή τάση με την ονομαστική συχνότητα $f=f_N$ στους ακροδέκτες. Η ολίσθηση θα είναι ένα ($S=1$). Αυξάνουμε την τάση μέχρι το ρεύμα της γραμμής I_T να ισούται με 1.5 φορές το ονομαστικό ρεύμα I_N , μετράμε και καταγράφουμε την τάση (V), το ρεύμα (I) και την ισχύ (P), για 10 τιμές περίπου του ρεύματος που θα μεταβάλλεται από 150% μέχρι και το 10% του ονομαστικού ρεύματος I_N . Το πείραμα πρέπει να ολοκληρωθεί όσο το δυνατόν πιο γρήγορα (για να αποφευχθούν φαινόμενα υπερθέρμανσης του κινητήρα) με την ανάγνωση των τιμών της τάσης και του ρεύματος να γίνεται με φθίνουσα σειρά. Παρακάτω παρουσιάζεται ο πίνακας με τις μετρήσεις που έγιναν στο εργαστήριο.

I(A)	V(v)	P(W)	cosφ
6	142	885	0.59
5.5	132	750	0.58
5	121	630	0.59
4.5	111	530	0.59
4	100	411	0.57
3.5	86.5	310.5	0.58
3	748	230.5	0.57
2.5	63.5	169.5	0.58

2	50.7	109	0.58
1.5	37.7	62.5	0.59
1	26.5	31.5	0.6
0.5	12.8	7.5	0.58

Πίνακας 2: μετρήσεις από το πείραμα με κλειδωμένο δρομέα

Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται το ισοδύναμο κύκλωμα του επαγωγικού κινητήρα όπως αυτό είναι στο πείραμα με τον κλειδωμένο δρομέα. Παρατηρούμε ότι οι κλάδοι με την αντίσταση σιδήρου και την επαγωγή μαγνήτισης δεν λαμβάνονται υπόψη γιατί έχουν πολύ μεγάλες τιμές.



Εικόνα 25: Ισοδύναμο κύκλωμα με κλειδωμένο δρομέα

Από την σχέση της ολίσθησης έχουμε:

$$S = \frac{N_s - N_r}{N_s} = \frac{1500 - 0}{1500} = 1$$

Άρα στο κλάδο που παρουσιάζεται η αντίσταση του δρομέα η ολίσθηση έχει τιμή 1 άρα δεν μας μεταβάλλει την τελική τιμή της αντίστασης του δρομέα R_r .

$$\frac{R_r}{s} = R_r$$

Η συνολική αντίσταση θα είναι:

$$Z_{ολ} = \frac{V}{I} = \frac{142}{\sqrt{3}} = 13.66 \Omega$$

Από τον πίνακα 2 παίρνουμε το $\cos\phi$ το οποίοείχεπροκύψει από τον αναλυτή ενέργειας στο παραπάνω πείραμα όπως και τις τιμές της τάσης και του ρεύματος που χρησιμοποιήθηκαν στην παραπάνω σχέση.

$$R_{ολ} = R_s + R_r = Z_{ολ} * \cos\phi = 13.66 * 0.59 = 8.06 \Omega$$

Το γεγονός ότι η ολίσθηση είναι 1 μας βοηθά στον υπολογισμό της αντίστασης του δρομέα R_r (ανηγμένη στον στάτη):

$$R_r = R_{ολ} - R_s = 8.06 - 4.3 = 3.76 \Omega$$

Γνωρίζοντας τώρα την ολική αντίσταση $R_{ολ}$ και την σύνθετη αντίσταση $Z_{ολ}$ μπορούμε να προσδιορίσουμε και τις επαγωγές του στάτη X_s και του δρομέα X_r :

$$\begin{aligned} X_{ολ} &= \sqrt{Z_{ολ}^2 - (R_r + R_s)^2} = \sqrt{Z_{ολ}^2 - R_{ολ}^2} = \sqrt{13.66^2 - 8.06^2} \\ &= 11.1 \Omega \end{aligned}$$

Γνωρίζοντας ότι οι επαγωγές στάτη και δρομέα έχουν την ίδια τιμή με το $\frac{1}{2}$ της ολικής επαγωγής προκύπτει:

$$\frac{X_{ολ}}{2} = X_r = X_s = \frac{11.1}{2} = 5.55 \Omega$$

Άρα:

$$X_m = Z_k - X_s = 114.98 - 5.55 = 109.43 \Omega$$

3.3 Ισοδύναμο κύκλωμα εισόδου κατά Thevenin

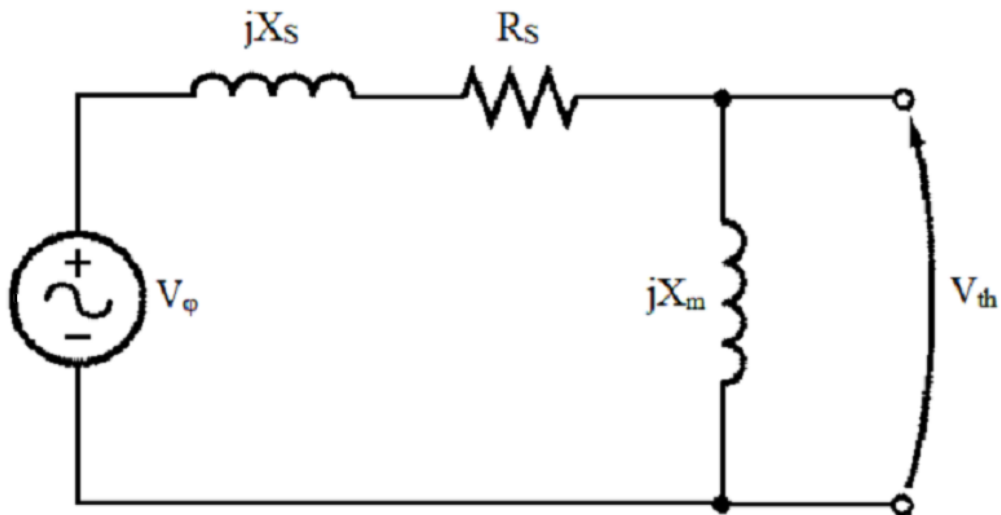
Γενικά για τα ισοδύναμα κατά Thevenin – Norton.

Θεωρούμε ένα γενικό τύπου κυκλώματος το οποίο είναι συνδεδεμένο με ένα οποιοδήποτε φορτίο. Τα θεωρήματα κατά Thevenin – Norton μας επιτρέπουν να πούμε ότι το κύκλωμα μπορεί να αντικατασταθεί από μια πραγματική πηγή τάσης ή ρεύματος αντίστοιχα χωρίς να μεταβληθεί η τάση και το ρεύμα των ακροδεκτών του φορτίου.

Εύρεση του Thevenin ισοδύναμου.

Για να βρούμε το ισοδύναμο κατά Thevenin κύκλωμα πρέπει να υπολογίσουμε τις τιμές της ισοδύναμης αντίστασης Z_{th} και της τάσης V_{th} που παρέχει η ιδανική πηγή τάσης.

Αρχικά θα υπολογίσουμε το ισοδύναμο κατά Thevenin του παρακάτω κυκλώματος:

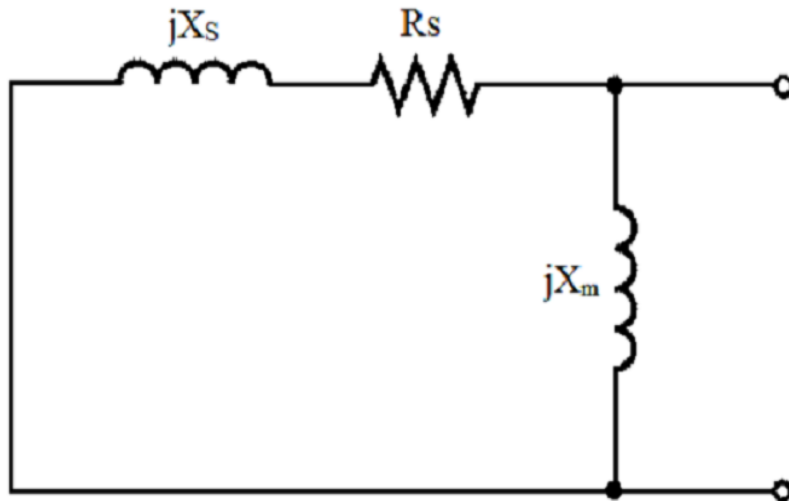


Εικόνα 26: Ισοδύναμο κύκλωμα εισόδου κατά Thevenin.

Για τον προσδιορισμό της τάσης V_{th} θα χρησιμοποιήσουμε τον κανόνα του διαιρέτη τάσης, από όπου προκύπτει και η παρακάτω εξίσωση (εδώ χρειαζόμαστε μόνο το μέτρο της τάσης).

$$V_{th} = V_{\phi} * \left(\frac{X_m}{X_s + X_m + R_s} \right) = 230 * \left(\frac{109.43}{5.55 + 109.43 + 4.3} \right) = 211 V$$

Για τον προσδιορισμό της σύνθετης αντίστασης κατά Thevenin Z_{th} θα πρέπει να βραχυκυκλώσουμε την πηγή τάσης και η τιμή της αντίστασης θα είναι εκείνη που θα φαίνεται στα άκρα του ανοιχτού κυκλώματος στην παρακάτω εικόνα:



Εικόνα 27: Ισοδύναμο κύκλωμα για τον προσδιορισμό της Z_{th} .

Από το παραπάνω κύκλωμα παρατηρούμε ότι η σύνθετη αντίσταση του στάτη είναι παράλληλα με την επαγωγή μαγνήτισης άρα:

$$Z_{th} = \frac{jX_m * (R_s + jX_s)}{R_s + jX_s + jX_m} = \frac{j109.43 * (4.3 + j5.55)}{4.3 + j5.55 + j109.43} \gg R_{th}$$

$$= 3.88 \Omega \quad jX_{th} = 5.42 \Omega$$

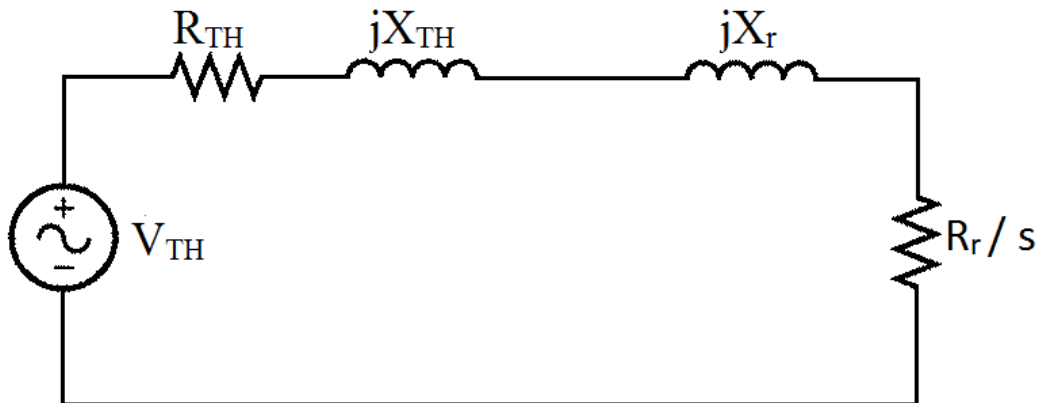
Για να μπορέσουμε να παρουσιάσουμε το τελικό ισοδύναμο κύκλωμα του κινητήρα θα χρειαστούμε την ολίσθηση:

$$S = \frac{N_s - N_r}{N_r} = \frac{1500 - 1420}{1500} = 0.053$$

Τέλος το ρεύμα που θα ρέει στο κύκλωμά μας εφόσον όλα τα στοιχεία είναι σε σειρά θα ισούται με:

$$I_k = \left| \frac{V_{th}}{R_{th} + jX_{th} + \frac{R_r}{s} + jX_r} \right| = \left| \frac{211}{3.88 + j5.42 + \frac{3.76}{0.053} + j5.55} \right|$$

$$= 2.94 \text{ A}$$



Εικόνα 28: Ολοκληρωμένο το ισοδύναμο του κινητήρα

Έχοντας τώρα όλα τα στοιχεία που χρειαζόμαστε από τα παραπάνω δυο πειράματα μπορούμε να προχωρήσουμε στον προσδιορισμό των παρακάτω:

- Ροπή εκκίνησης
- Ροπή ανατροπής
- Ονομαστική ροπή

Η ισχύς διακένου P_{AG} :

$$P_{AG} = 3 * I_k^2 * \left(\frac{3,76}{0,053} \right) = 1839.61 \text{ W}$$

Για να μπορέσουμε να υπολογίσουμε την επαγόμενη ροπή θα χρειαστούμε την σύγχρονη κυκλική συχνότητα $\omega_{\text{συγχρ}}$

$$\omega_{\text{συγχρ}} = 2 * \frac{Ns}{60} * \pi = 2 * \frac{1500}{60} * 3.14 = 157.1 \frac{\text{rad}}{\text{sec}}$$

Άρα η επαγόμενη ροπή είναι:

$$t_{ind} = \frac{PAG}{\omega_{συγχρ}} = \frac{1839.61}{157,1} = 11.71 \text{ Nm}$$

Η ονομαστική συχνότητα περιστροφής του κινητήρα είναι:

$$\omega_{rot} = 2 * \frac{Nr}{60} * \pi = 2 * \frac{1420}{60} * 3.14 = 148.62 \frac{rad}{sec}$$

Άρα η ισχύς που μετατρέπεται σε μηχανική στον κινητήρα ισούται με:

$$P_{conv} = t_{ind} * \omega_{rot} = 11.71 * 148.62 = 1740.32 \text{ W}$$

Η ισχύς που βγάζει στην έξοδο του ο κινητήρας είναι:

$$P_{out} = P_{conv} - P_{μηχ} = 1740,32 - 38,04 = 1702,2 \text{ W}$$

Η ροπή του φορτίου (load) θα δίνεται από την σχέση :

$$T_{load} = \frac{P_{out}}{\omega_{rot}} = \frac{1702.2}{148.62} = 11.45 \text{ Nm}$$

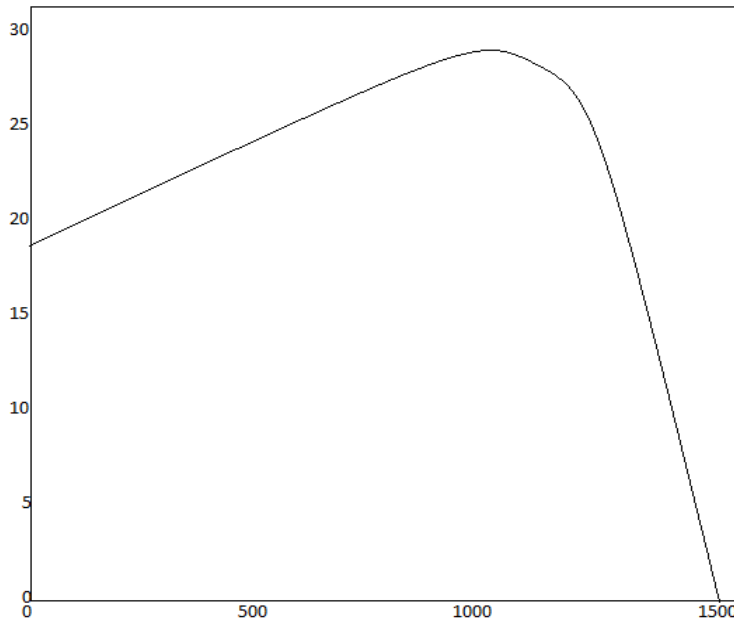
Η ροπή ανατροπής θα δίνεται από την σχέση :

$$\begin{aligned} t_{ind} &= \frac{3 * V_{th}^2}{2 * W_{συγχρ} * \left(R_{th} + \sqrt{R_{th}^2 + (X_{th} + X_r)^2} \right)} \\ &= \frac{3 * 211^2}{\left(2 * 157.1 * \left(3.88 + \sqrt{3.88^2 + (5.42 + 5.55)^2} \right) \right)} \\ &= 27.39 \text{ Nm} \end{aligned}$$

Η ροπή εκκίνησης δίνεται από την σχέση :

$$\begin{aligned} t_{εκκ} &= \frac{3 * V_{th}^2 * R_r}{(W_{συγρ} * ((R_{th} + R_r)^2 + (X_{th} + X_r)^2))} \\ &= \frac{3 * 211^2 * 3.76}{157.1 * ((3.88 + 3.76)^2 + (5.42 + 5.55)^2)} \\ &= 18.37 Nm \end{aligned}$$

Στο παρακάτω γράφημα φαίνεται η χαρακτηριστική ροπής - ταχύτητας του κινητήρα μας όπως προέκυψε από το υπολογιστικό πρόγραμμα του excel.



Γράφημα 2 : Χαρακτηριστική ροπής - ταχύτητας

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

IonBoldea&S.A. Nasar “TheInductionMachineHandbook”

GiogrioRizzoni “Ηλεκτρομηχανική”

Μαλατέστας Παντελής “Ηλεκτρική Κίνηση”

Stephen J. Chapman “Electric Machinery Fundamentals”

International Standard “CEI IEC 60034-28” (first edition)

Αθ. Σαφάκα“Ηλ. ΜηχανέςAC-DC”

Διαδίκτυο: <http://www.en.wikipedia.org/>

Προσωπικές σημειώσεις από το ΑΤΕΙ ΠΑΤΡΑΣ