

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ



ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΙ ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΤΡΙΦΑΣΙΚΟΥ ΚΙΝΗΤΗΡΑ ΤΕΣΣΑΡΩΝ ΠΟΛΩΝ/37 Κ_W

ΑΡΙΘΜΟΣ ΠΤΥΧΙΑΚΗΣ 1732

ΣΠΟΥΔΑΣΤΕΣ:

ΜΑΥΡΟΚΟΤΑΣ ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΣ ΑΜ:6451

ΠΑΠΑΔΟΠΟΥΛΟΣ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ ΑΜ:6347

ΕΠΟΠΤΕΥΟΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ:

ΧΑΡΑΛΑΜΠΑΚΟΣ ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ

ΠΑΤΡΑ 2019

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Οι ηλεκτρικές μηχανές εναλλασσόμενου ρεύματος χωρίζονται σε δύο βασικές κατηγορίες, τις σύγχρονες μηχανές και τις ασύγχρονες ή επαγωγικές μηχανές. Οι δυο επιμέρους κατηγορίες ασύγχρονων μηχανών είναι ο βραχυκυκλωμένου και δακτυλιοφόρου δρομέα αντίστοιχα. Από τα διάφορα είδη ηλεκτρικών μηχανών εναλλασσόμενου ρεύματος, ο τριφασικός ασύγχρονος ή επαγωγικός κινητήρας (induction motor), χρησιμοποιείται ευρύτατα στις βιομηχανικές εφαρμογές. Αυτό διότι οι προαναφερθείς κινητήρας κατασκευαστικά είναι απλός, χρήζει ελαχίστων συντηρήσεων, ενώ ταυτόχρονα συναντά τα ενεργειακά κριτήρια. Ένα ακόμα πλεονέκτημά του απέναντι στην σύγχρονη μηχανή είναι η απουσία του τυλίγματος διέγερσης το οποίο απαιτείται για την εκκίνηση της τελευταίας. Κατά αυτόν τον τρόπο οι ασύγχρονες μηχανές καθίστανται ίσως ως η βέλτιστη επιλογή. Στην παρακάτω εικόνα, (Εικόνα 1), φαίνεται η εξωτερική μορφή μιας ασύγχρονης μηχανής.



Εικόνα 1

Η αλήθεια είναι πως εξωτερικά η σύγχρονη μηχανή δεν διαφέρει. Οι διαφορές βρίσκονται στο εσωτερικό, όμως εμείς θα επεκταθούμε στην ανάλυση της εσωτερικής δομής της ασύγχρονης μηχανής.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα πτυχιακή πραγματοποιείται η μελέτη ενός ήδη υπάρχοντος τετραπολικού κινητήρα τεσσάρων πόλων, με ονομαστική ισχύ 37 kW της εταιρίας VALIADIS S.A. Πρόκειται για ασύγχρονο κινητήρα βραχυκυκλωμένου δρομέα(κλωβού) με τα εξής χαρακτηριστικά:

Ονομαστική ισχύς : 37 kW / 50 hp

Ονομαστική ταχύτητα : 1480 rpm

Σύγχρονη Ταχύτητα: 1500 rpm

Τάση τροφοδοσίας (Πολική) : 400 Volt

Συχνότητα : 50Hz

Αριθμός φάσεων : 3

Συνδεσμολογία τυλιγμάτων : Τρίγωνο (Y)

Συντελεστής Ισχύος : 0,88

Βαθμός Απόδοσης : 0,923

Ροπή Εκκίνησης : 434,6 Nm

Ονομαστικό ρεύμα : 65,79 Amp

Σκοπός της μελέτης είναι , σε θεωρητικό επίπεδο μέσω συγκεκριμένων μοντέλων, η σχεδίαση του κινητήρα αυτού.Αναλυτικά η μελέτη θα περιλαμβάνει πέραν των λειτουργικών στοιχείων, λεπτομέρειες που αφορούν το στάτη και το δρομέα ως προς τα χαρακτηριστικά της κατασκευής τους.Δηλαδή: διαστασιολόγηση στάτη-δρομέα,αριθμός περιελίξεων και αυλακιών στάτη-δρομέα,το διάκενο ανάμεσα στο στάτη και το δρομέα,την διάμετρο του στάτη και του άξονα του δρομέα.Η πτυχιακή θα αποτελείται από 4 κεφάλαια.Στο πρώτο κεφάλαιο θα γίνει μια αναφορά στις ηλεκτρικές μηχανές.Θα περιλαμβάνει μια ιστορική αναδρομή στην εξέλιξη των κινητήρων ,την βασική αρχή λειτουργίας και τη δομή τους, τους τρόπους συνδεσμολογίας και προστασίας καθώς και κάποια διαγράμματα τα οποία θα βοηθούν στην κατανόηση.Στο δεύτερο κεφάλαιο θα γίνουν όλοι οι υπολογισμοί όσον αφορά τη δομή(μεταλλικά μέρη της μηχανής), την διαστασιολόγηση του κινητήρα, αυλακώσεις και περιελίξεις.Στο τρίτο κεφάλαιο θα γίνει ο υπολογισμός των ισοδύναμων στοιχείων,των ωμικών αντιστάσεων και επαγωγικών αντιδράσεων, ο υπολογισμός των απωλειών και του βαθμού απόδοσης και τέλος ο υπολογισμός των χαρακτηριστικών λειτουργίας(ροπές,ρεύματα,ολίσθηση).Στο τέταρτο κεφάλαιο θα γίνει η σύγκριση των αποτελεσμάτων της πτυχιακής μας με αυτά της εταιρίας VALIADIS S.A. Εκεί θα δούμε τις διαφορές που θα προκύψουν και τους τρόπους με τους οποίους μπορούμε να ελαττώσουμε ή να βελτιστοποιήσουμε ακόμα τις αποκλίσεις των αποτελεσμάτων μας,τα οποία γίνονται σε θεωρητικό επίπεδο πάντα, με τα ήδη υπάρχοντα.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Πρόλογος.....	3
Περίληψη.....	5
Κεφάλαιο 1.....	9
Εισαγωγή στις ηλεκτρικές μηχανές, αρχή λειτουργίας	9
1.1 Ασύγχρονες μηχανές - Σύγχρονες μηχανές.....	9
1.2 Επαγωγικός κινητήρας βραχυκυκλωμένου δρομέα(κλωβού).....	10
1.3 Δομή επαγωγικού κινητήρα βραχυκυκλωμένου δρομέα(κλωβού).....	11
1.4 Αρχή λειτουργίας επαγωγικού κινητήρα.....	12
1.4.1 Στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο.....	12
1.5 Ρύθμιση στροφών.....	16
1.5.1 Ολίσθηση.....	18
1.6 Διάγραμμα Ροπής-Ταχύτητας.....	19
1.7 Προστασία κινητήρα.....	21
1.7.1 Εκκίνηση επαγωγικού κινητήρα.....	23
1.7.2 Κλάσεις κινητήρα, διαφορές στην εκκίνηση.....	25
1.8 Απώλειες κινητήρα.....	27
1.9 Συντήρηση τριφασικών κινητήρων.....	30
Κεφάλαιο 2.....	32
Μελέτη τριφασικού επαγωγικού κινητήρα 4 πόλων, 37 kW.....	32
<u>A Μέρος – Στάτης</u>	
2.1 Διαστασιολόγηση στάτη.....	32
2.2 Διάκενο μηχανής και τυλίγματα.....	35
2.3 Διαστασιολόγηση αυλακιών στο στάτη.....	41
<u>B Μέρος – Δρομέας</u>	
2.4 Υπολογισμός στοιχείων κλωβού.....	46
2.5 Διαστασιολόγηση αγωγών και άξονα δρομέα.....	48
2.6 Ρεύμα μαγνήτισης.....	51
Κεφάλαιο 3.....	55
Υπολογισμός ισοδύναμων στοιχείων του κυκλώματος.....	55
3.1 Υπολογισμός αντιστάσεων στάτη-δρομέα.....	55
3.2 Υπολογισμός ανοιγμένων αντιστάσεων.....	58
3.3 Υπολογισμός επαγωγικών αντιδράσεων.....	58
3.4 Υπολογισμός συνολικών και επιμέρους απωλειών κινητήρα.....	62

3.5 Βαθμός απόδοσης κινητήρα.....	64
3.6 Υπολογισμός σημαντικών χαρακτηριστικών λειτουργίας.....	64
3.6.1 Ολίσθηση.....	64
3.6.2 Ροπές.....	64
3.6.3 Ρεύμα εκκίνησης.....	65
Κεφάλαιο 4.....	66
Σύγκριση αποτελεσμάτων με ήδη υπάρχοντα στοιχεία,βελτιώσεις.....	66
4.1 Δεδομένα επαναυπολογισμού.....	66
4.2 Σύγκριση δεδομένων για εξαγωγή συμπερασμάτων.....	69
4.3 Λοιπά συμπεράσματα για πιθανή βελτίωση.....	70
Κεφάλαιο 5.....	71
Φυλλάδια στοιχείων κινητήρα	71
Βιβλιογραφία.....	76

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

Εισαγωγή στις ηλεκτρικές μηχανές, αρχή λειτουργίας

1.1 Ασύγχρονες - Σύγχρονες μηχανές

Ηλεκτρική μηχανή είναι η διάταξη που έχει τη δυνατότητα να μετατρέπει την ηλεκτρική ενέργεια σε μηχανική και αντίστροφα. Μια τέτοια συσκευή, όταν χρησιμοποιείται για τη μετατροπή μηχανικής ενέργειας σε ηλεκτρική ονομάζεται γεννήτρια (generator). Όταν η συσκευή μετατρέπει ηλεκτρική ενέργεια σε μηχανική ονομάζεται κινητήρας (motor). Μια μηχανή η οποία έχει τη δυνατότητα να μετατρέπει ενέργεια και προς τις δύο κατευθύνσεις μπορεί να χρησιμοποιηθεί είτε ως γεννήτρια είτε ως κινητήρας ανάλογα με τις ανάγκες του και την εφαρμογή για την οποία προορίζεται. Σχεδόν όλες οι υπάρχουσες γεννήτριες και κινητήρες μετατρέπουν ενέργεια από τη μια μορφή στην άλλη μέσω της δράσης ενός μαγνητικού πεδίου.

Υπάρχουν μηχανές συνεχούς(Σ.Ρ) και εναλλασόμενου ρεύματος(Ε.Ρ). Τα ηλεκτρικά δίκτυα παροχής ηλεκτρικής ενέργειας λειτουργούν με εναλλασόμενο συνεπώς οι μηχανές Ε.Ρ δεσπόζουν στη βιομηχανία. Εκτός αυτού μια μηχανή Σ.Ρ κοστίζει αρκετά περισσότερο από μια Ε.Ρ, απαιτεί τακτική συντήρηση η οποία είναι και σημαντικά κοστοβόρα. Ανεξαρτήτως αν η μηχανή είναι Ε.Ρ ή Σ.Ρ αποτελείται από το στάτη(σταθερό μέλος) και το δρομέα(στρεφόμενο μέλος), ηλεκτρικά ανεξάρτητα μεταξύ τους.

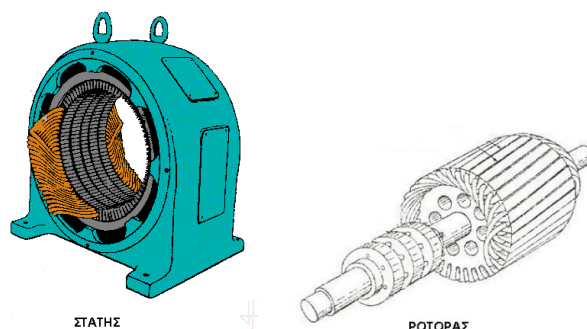
Οι ηλεκτρικές μηχανές Ε.Ρ χωρίζονται σε δύο κατηγορίες, τις Σύγχρονες και τις Ασύγχρονες(Επαγωγικές). Η βασικότερη κατασκευαστική διαφορά της Σύγχρονης με την Ασύγχρονη είναι στο δρομέα. Στις Σύγχρονες μηχανές υπάρχει σε αυτόν το τύλιγμα διέγερσης. Το ρεύμα δρομέα των σύγχρονων μηχανών παράγεται από ανεξάρτητες πηγές Σ.Ρ ενώ το ρεύμα δρομέα των επαγωγικών μηχανών παράγεται επαγωγικά (με βάση την αρχή λειτουργίας μετασχηματιστή). Αυτού του είδους οι μηχανές έλαβαν την ονομασία επαγωγικές λόγω του ότι η τάση στο δρομέα ουσιαστικά επάγεται στο κύκλωμα διέγερσης αντί να προσφέρεται σε αυτό με κάποια εξωτερική ηλεκτρική σύνδεση. Αρκεί να συνδεθεί απευθείας στο

δίκτυο ηλεκτροδότησης, εφόσον η επιτρεπτή τιμή της τάσης που θα εφαρμοστεί στα τυλίγματα του ανάλογα την συνδεσμολογία (αστέρας ή τρίγωνο), είναι αυτή του δικτύου.

Συνεπώς η κατανάλωση μιας Ασύγχρονης μηχανής(ίδιας ισχύος με τη Σύγχρονη) είναι σημαντικά λιγότερη εφόσον δεν απαιτείται επιπλέον ενέργεια από πηγή συνεχούς ρεύματος για τη δημιουργία μαγνητικού πεδίου στο δρομέα. Να υπενθυμίσουμε πάλι πως η επιλογή κινητήρα ποικίλει ανάλογα με τις ανάγκες τις εκάστοτε εφαρμογής προς υλοποίηση.

1.2 Επαγωγικός κινητήρας βραχυκυκλωμένου δρομέα(κλωβού)

Ο κινητήρας αυτός ανήκει στις Ασύγχρονες μηχανές μαζί με τον κινητήρα δακτυλιοφόρου δρομέα. Αποτελείται όπως έχουμε ήδη αναφέρει από δύο μέρη, ένα σταθερό μέρος που λέγεται στάτης(stator) και ένα στρεφόμενο μέρος που λέγεται δρομέας(rotor). Ο στάτης και ο δρομέας χωρίζονται από ένα μικρό διάκενο αέρα.



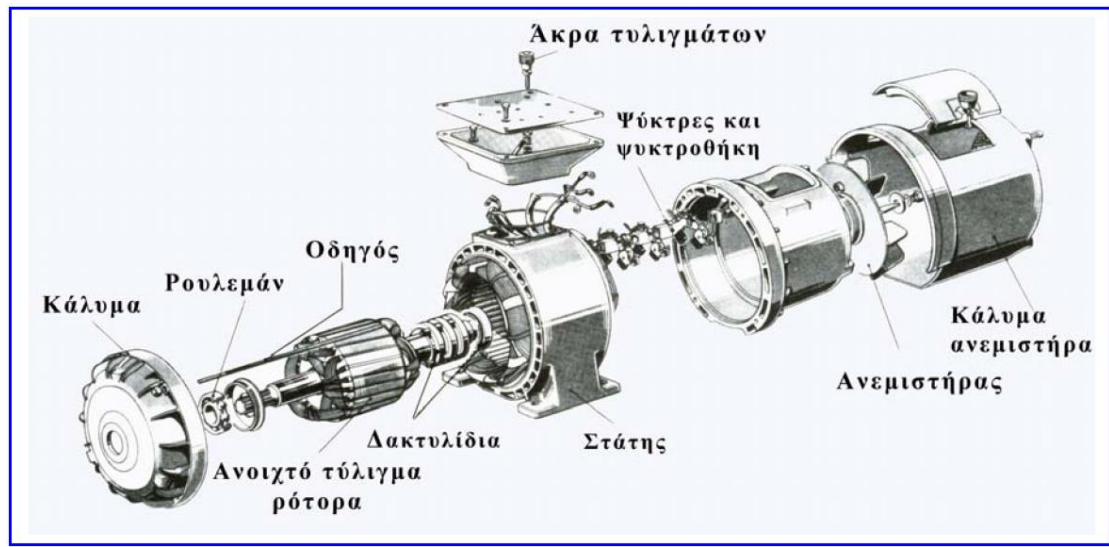
Σημασία διακένου αέρα

Η αύξηση του μήκους του διακένου ελαττώνει τις διακυμάνσεις του πεδίου στην επιφάνεια του δρομέα, αλλά επίσης αυξάνει το ρεύμα μαγνήτισης και ταυτόχρονα ελαττώνει το συντελεστή ισχύος. Σε Ασύγχρονες μηχανές, το μήκος του διακένου παίζει σημαντικό ρόλο όταν μελετάμε τις αρμονικές(παραμορφώσεις) του πεδίου στην επιφάνεια του δρομέα. Εάν το μήκος του διακένου αυξηθεί, η κατανομή του πεδίου θα εξομαλυνθεί στην επιφάνεια του. Ωστόσο ένα ακόμα μεγαλύτερο μήκος διακένου θα προκαλέσει αύξηση του ρεύματος μαγνήτισης της μηχανής και κατά συνέπεια αύξηση των απωλειών χαλκού στο στάτη.

Οι πυρήνες του στάτη και του δρομέα κατασκευάζονται από σιδηρομαγνητικό υλικό σε μορφή μονωμένων μεταξύ τους

ελασμάτων. Αυτό αποσκοπεί στην ελάττωση των απωλειών λόγω δινορρευσμάτων(ρεύματα σε μορφή δίνης που δρουν αρνητικά).

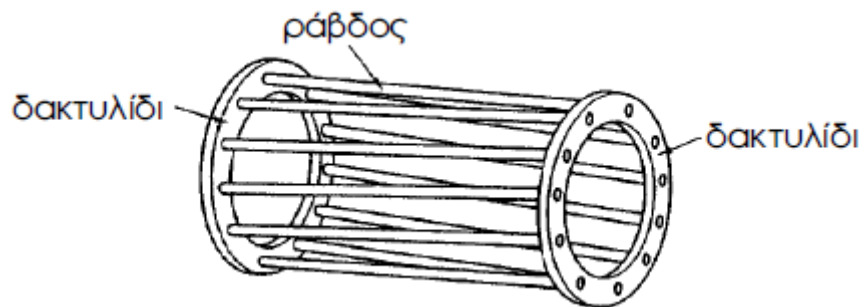
1.3 Δομή επαγωγικού κινητήρα βραχυκυκλ. δρομέα(κλωβού)



Στο στάτη υπάρχουν οι μαγνητικοί πόλοι τοποθετημένοι εναλλάξ(βόρειος,νότιος,βόρειος,νότιος κ.ο.κ), οι οποίοι ουσιαστικά χαρακτηρίζονται ως βόρειος ή νότιος ανάλογα με το πώς τοποθετούνται τα τυλίγματα(φορά ρεύματος), το μεταλλικό κέλυφος οι οδοντώσεις μέσα στις οποίες περιελίσσονται τα τυλίγματα καθώς και το ακροκιβώτιο σύνδεσης. Τα τυλίγματα γνωστά και ως τυλίγματα τυμπάνου τοποθετούνται μετατεθειμένα μεταξύ τους κατά 120 ηλεκτρικές μοίρες.

Στο δρομέα υπάρχει σιδηρομαγνητικό υλικό στον πυρήνα ο οποίος έχει κυλινδρική μορφή, οδοντώσεις στις οποίες ανάμεσα τοποθετούνται οι μεταλλικοί ράβδοι στα άκρα των οποίων τοποθετείται ο δακτύλιος ο οποίος τις βραχυκυκλώνει(Εικόνα 1.3).

Όλα αυτά είναι προσκολλημένα σε ένα συμπαγή μεταλλικό άξονα.



Εικόνα 1.3

1.4 Αρχή λειτουργίας επαγωγικού κινητήρα

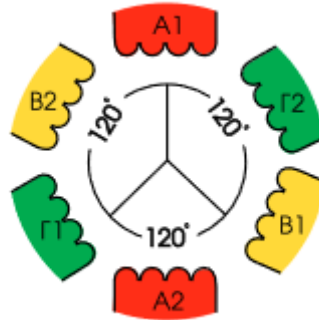
Το 1831 ο Άγγλος φυσικός Μάικλ Φαραντέι διατύπωσε το νόμο της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής υποστηρίζοντας πως εμφάνιση ηλεκτρισμού μπορεί να υπάρξει εξαιτίας της επίδρασης μαγνητικού πεδίου. Συγκεκριμένα είναι το φαινόμενο της ανάπτυξης διαφοράς δυναμικού στα άκρα ενός αγωγού, η οποία λαμβάνει χώρα όταν μεταβάλλεται η μαγνητική ροή που διέρχεται από την επιφάνεια που ο συγκεκριμένος αγωγός ορίζει. Έτσι, η διαταραχή του μαγνητικού πεδίου προκαλεί διαταραχή του ηλεκτρικού πεδίου. Σύμφωνα με τον ορισμό της, η μαγνητική ροή που διέρχεται από μία επιφάνεια μπορεί να μεταβληθεί με δύο τρόπους. Πρώτον, αυτό μπορεί να γίνει αν μεταβληθεί η ένταση του μαγνητικού πεδίου εντός του οποίου βρίσκεται η επιφάνεια. Δεύτερον, σε ένα μη μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο η μαγνητική ροή που διέρχεται από την επιφάνεια μπορεί να μεταβληθεί αν αλλάξει ο προσανατολισμός της επιφάνειας σε σχέση με τις δυναμικές γραμμές του μαγνητικού πεδίου.

Αντίστοιχα, εντοπίζονται δύο δυνατότητες προκειμένου να παρατηρηθεί το φαινόμενο της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής: Είτε μεταβάλλοντας την ένταση του μαγνητικού πεδίου στα σημεία της επιφάνειας που ορίζει ο αγωγός, είτε μετακινώντας τον αγωγό εντός του μαγνητικού πεδίου. Σε κάθε περίπτωση, στα άκρα του αγωγού αναπτύσσεται διαφορά δυναμικού στην οποία έχει, λόγω της προέλευσής της, αποδοθεί η ονομασία επαγωγική τάση ή τάση από επαγωγή. Στην περίπτωση που τα άκρα του αγωγού είναι συνδεδεμένα με αγωγίμο υλικό, οπότε δημιουργείται κλειστό ηλεκτρικό κύκλωμα, το φαινόμενο της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής εκφράζεται με την ανάπτυξη ηλεκτρεγερτικής δύναμης (ΗΕΔ) στο κύκλωμα.

Στην περίπτωση της Ασύγχρονης μηχανής ο νόμος βρίσκει εφαρμογή ως εξής. Όταν τα τυλίγματα του στάτη τα οποία τροφοδοτούνται από μια πηγή (έστω τριφασικό δίκτυο ηλεκτροδότησης), μέσω του ακροκιβωτίου τότε διαρρέονται από ένα τριφασικό σύστημα ρευμάτων, με αποτέλεσμα να αναπτύσσεται το στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο. Η έννοια στρεφόμενο συνδέεται με την διαφορά των 120 ηλεκτρικών μοιρών που αναφέραμε προηγουμένως. Σε ένα τριφασικό σύστημα έχουμε τρεις φάσεις όπου η μια διαδέχεται την άλλη με διαφορά 120 μοίρες.

1.4.1 Στρεφόμενο Μαγνητικό Πεδίο

Όταν εφαρμοστεί εναλλασσόμενη τάση στο στάτη, έχουμε ροή ρεύματος μέσα στα πηνία (τυλίγματα, Εικόνα 1.4.α). Η μαγνητική ροή εξαρτάται από τη φορά του ρεύματος.



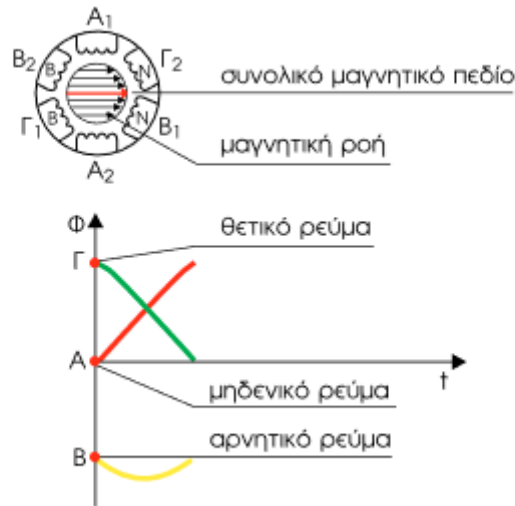
Εικόνα 1.4.α: Τριφασικό τύλιγμα στάτη.

Εάν υποθέσουμε ότι η θετική φορά ρεύματος δημιουργεί στα πηνία A1,B1,Γ1 βόρειο μαγνητικό πόλο(B) και στα A2,B2,Γ2 νότιο μαγνητικό πόλο(N) καταλήγουμε στον εξής πίνακα(πίνακας 1.4) :

Πηνίο	Φορά Ρεύματος	
	A ₁	Θετική (+)
	Βόρειος (B)	Νότιος (N)
A ₂	Νότιος (N)	Βόρειος (B)
B ₁	Βόρειος (B)	Νότιος (N)
B ₂	Νότιος (N)	Βόρειος (B)
Γ ₁	Βόρειος (B)	Νότιος (N)
Γ ₂	Νότιος (N)	Βόρειος (B)

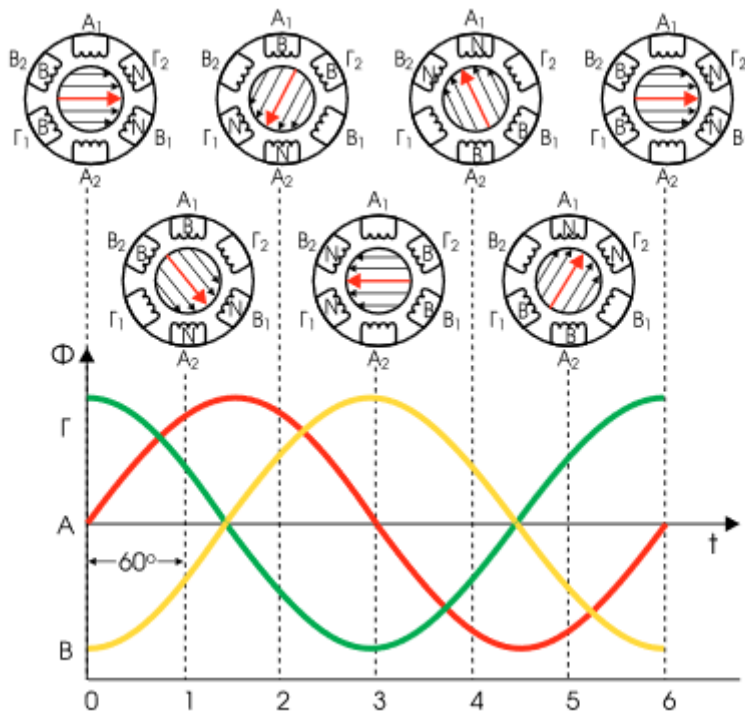
Πίνακας 1.4: Δημιουργία μαγνητικών πόλων

Τα τρία τυλίγματα του στάτη τροφοδοτούνται με τριφασικό ρεύμα. Για να γίνει κατανοητή η δημιουργία του μαγνητικού πεδίου επιλέγουμε τη χρονική στιγμή μηδέν($t=0$). Το ρεύμα στο πηνίο A είναι μηδέν, στο B είναι αρνητικό και στο Γ θετικό. Με βάση τον προηγούμενο πίνακα τα B1 και Γ2 είναι νότιοι πόλοι και τα B2 και Γ1 βόρειοι πόλοι. Η δημιουργούμενη συνολική μαγνητική ροή(Φ) φαίνεται στο σχήμα A.



Σχήμα Α: Δημιουργία μαγνητικής ροής

Αν με τον ίδιο τρόπο εξετάσουμε το δημιουργούμενο μαγνητικό πεδίο για τριφασικό σύστημα παροχής και για χρόνους που αντιστοιχούν σε γωνίες 60 μοίρες, όταν το ρεύμα συμπληρώσει φάση 360 μοίρες, το μαγνητικό πεδίο έχει περιστραφεί αντίστοιχα κατά 360 μοίρες (Σχήμα Β).

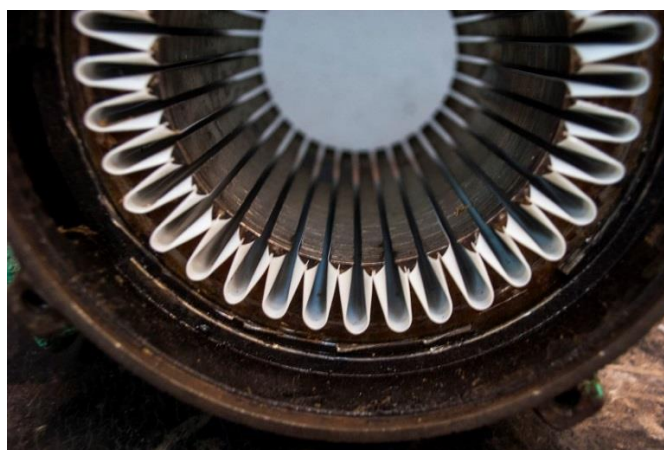


Σχήμα Β: Στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο

Έτσι εξηγείται ο όρος στρεφόμενο. Εάν η μηχανή τροφοδοτείται με Συνεχές Ρεύμα(Σ.Ρ), τότε θα μιλούσαμε για σταθερό μαγνητικό πεδίο.

Συνέχεια Αρχής Λειτουργίας

Τροφοδοτώντας λοιπόν το στάτη μέσω του ακροκιβωτίου δημιουργείται στο εσωτερικό της μηχανής μέσω των τυλιγμάτων του τα οποία βρίσκονται ενσωματωμένα στις αυλακώσεις(Εικόνα 1.4.β), το μαγνητικό πεδίο <<περιστρέφεται>> με κάποια ταχύτητα.



Εικόνα 1.4.β: Αυλακώσεις στάτη. Το λευκό αυτό υλικό είναι ένα είδος μόνωσης για κάθε αυλάκι ξεχωριστά.

Σε αυτό ακριβώς το σημείο γίνεται κατανοητός ο νόμος του φυσικού Μάικλ Φάραντσει. Όπως προαναφέραμε στο κινούμενο μέρος της μηχανής (δρομέας) υπάρχει ένας κλωβός. Ο δρομέας είναι φτιαγμένος από σιδηρομαγνητικό υλικό το οποίο μαγνητίζεται με αποτέλεσμα την εμφάνιση ενός ακόμα μαγνητικού πεδίου. Εφόσον ο κλωβός είναι βραχυκυκλωμένος και έχουμε δημιουργία τάσης εξ'επαγωγής, έχουμε εμφάνιση ρεύματος. Η αλληλεπίδραση αυτών των δυο μαγνητικών πεδίων δημιουργεί ροπή η οποία τείνει να τα ευθυγραμμίσει. Αν το ένα μαγνητικό πεδίο δημιουργείται από το στάτη της μηχανής, όπως και συμβαίνει, τότε η ροπή θα επάγεται στο δρομέα κάτι που θα κάνει το δρομέα να περιστραφεί και να ευθυγραμμιστεί με το μαγνητικό πεδίο του στάτη.

Ουσιαστικά ο κινητήρας ξεκινά μόνος του. Αυτή ακριβώς η ιδιότητα τον καθιστά πρωτοπόρο. Εν αντιθέση ο σύγχρονος κινητήρας χρειάζεται το τύλιγμα της διέγερσης(τροφοδοσία με Σ.Ρ) για να δημιουργήσει το μαγνητικό πεδίο ώστε να ξεκινήσει!!

1.5 Ρύθμιση στροφών

Ιδιαίτερα σημαντική παράμετρος στους επαγωγικούς κινητήρες είναι η ρύθμιση στροφών. Οι στροφές σε έναν επαγωγικό κινητήρα είναι άμεσα συνδεδεμένες με το μαγνητικό πεδίο (μαγνητικοί πόλοι) καθώς και με τη συχνότητα τροφοδοσίας (50 Hz Ευρωπαϊκά πρότυπα).

Δηλαδή:

$$n=f/P$$

όπου: n =αριθμός στροφών, σε rpm (στροφές ανά δευτερόλεπτο)

f =συχνότητα τροφοδοσίας (σε Hertz)

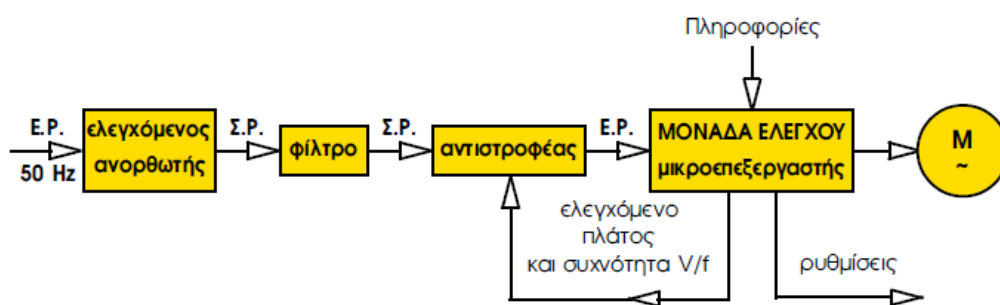
P =ζεύγη μαγνητικών πόλων

Πρίν αναλύσουμε τον τρόπο με τον οποίο μπορεί να αλλάξει η ταχύτητα περιστροφής θα επισημάνουμε μια στοιχειώδη διαφορά στον αριθμό των στροφών ανάμεσα στον Σύγχρονο και το Ασύγχρονο κινητήρα.

Γενικά ανάλογα με τους πόλους της μηχανής οι ονομαστικές στροφές του κινητήρα έχουν τυποποιημένες τιμές (σύγχρονη ταχύτητα). Για παράδειγμα ένας τετραπολικός κινητήρας έχει ονομαστικές στροφές 1500rpm. Η ονομασία σύγχρονος λοιπόν οφείλεται σε αυτή την ιδιαιτερότητα. Το μαγνητικό πεδίο του στάτη και του δρομέα στρέφονται με την ίδια ταχύτητα δηλαδή με τον σύγχρονο αριθμό στροφών. Στην περίπτωση του ασύγχρονου κινητήρα το γεγονός ότι το μαγνητικό πεδίο του δρομέα δεν δημιουργείται εκ των προτέρων με τη βοήθεια εξωτερικής πηγής Σ.Ρ κάνει το δρομέα να υστερεί. Ως αποτέλεσμα προκύπτει μια μικρή διαφορά στον αριθμό στροφών. Ο δρομέας στρέφεται με την ίδια φορά που στρέφεται το μαγνητικό πεδίο του στάτη, αλλά η ταχύτητά του δεν γίνεται ποτέ ίση με την σύγχρονη επειδή σε μια τέτοια περίπτωση δεν θα υπήρχε σχετική κίνηση των αγωγών του δρομέα ως προς το μαγνητικό πεδίο του στάτη και δεν θα αναπτυσσόταν τάση εξ'επαγωγής στα άκρα του. Εάν η επαγόμενη τάση ήταν μηδενική, οι αγωγοί του δρομέα δεν θα διαρρέονταν από ρεύμα και δεν θα αναπτυσσόταν μαγνητικό πεδίο. Έτσι στην περίπτωση τετραπολικού κινητήρα για παράδειγμα, η ταχύτητα περιστροφής του άξονα του δρομέα θα είναι 1480-1485 rpm.

Οι στροφές του άξονα ενός κινητήρα είναι ιδιαίτερα σημαντικές για ευνόητους λόγους. Μέχρι και πριν κάποια χρόνια ο επαγωγικός κινητήρας διατηρούσε σταθερό αριθμό στροφών. Όμως δεν χρειάζονται όλες οι εφαρμογές σταθερές στροφές. Το παρόν πρόβλημα επιλύθηκε με την εισαγωγή των ηλεκτρονικών ισχύος στο χώρο. Οι διατάξεις των ηλεκτρονικών ισχύος επιτρέπουν την επέμβαση και αλλαγή στη συχνότητα τροφοδοσίας (f) και τάσης στο στάτη. Εάν και η τάση δεν αναφέρθηκε μέχρι στιγμής ο έλεγχος της

είναι αναγκαίος στην περίπτωση τροποποίησης της συχνότητας. Αυτό διότι η συχνότητα εκτός των στροφών παίζει σημαντικό ρόλο και στη διαμόρφωση των τιμών των εσωτερικών αντιστάσεων της μηχανής. Σε μείωση της συχνότητας θα υπάρξει μείωση της επαγωγικής αντίδρασης της μηχανής, συνεπώς μια αξιοσημείωτη αύξηση του ρεύματος πράγμα ανεπιθύμητο. Με τον έλεγχο λοιπόν της τάσης και στην προκειμένη περίπτωση την μείωση της αποκαθίσταται το πρόβλημα. Οι διατάξεις αυτές συνήθως είναι τέτοιες ώστε να αλλάζουν τη συχνότητα που δέχεται στην είσοδό του ο κινητήρας συναρτήσει της τάσης, το τετράγωνο της οποίας είναι ανάλογο της ροπής, χωρίς παράλληλα να δημιουργούν ανεπιθύμητες διαστρευλώσεις στο δίκτυο τροφοδοσίας. Ακολουθεί η απλούστερη διάταξη για την επίτευξη του παραπάνω στόχου(Εικόνα 1.5.α).

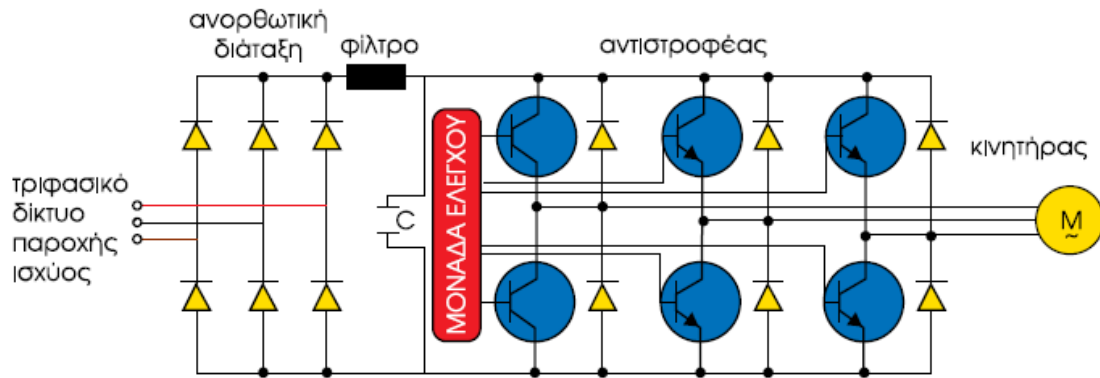


Εικόνα 1.5.α: Δομικό διάγραμμα ηλεκτρονικού ρυθμιστή στροφών.

Ο ηλεκτρονικός ρυθμιστής στροφών περιλαμβάνει έναν ελεγχόμενο ανορθωτή, ένα φίλτρο, έναν αντιστροφέα που μετατρέπει το συνεχές ρεύμα σε εναλλασσόμενο ρυθμιζόμενης τάσης και συχνότητας και μια μονάδα ελέγχου. Αναλυτικά ο ηλεκτρονικός ρυθμιστής περιλαμβάνει:

- **Ανορθωτική διάταξη** αποτελούμενη από διόδους ή θυρίστορ. Σκοπός της διάταξης είναι η μετατροπή εναλλασσόμενης τάσης του δικτύου σε συνεχή με σταθερή ή ρυθμιζόμενη τιμή.
- Η συνεχής τάση που προκύπτει περνά από ένα **φίλτρο** για εξομάλυνση. Το φίλτρο αποτελείται από συστοιχία πυκνωτών και πηνίων.
- Η τάση που έχει δεχθεί εξομάλυνση, τροφοδοτεί τον **αντιστροφέα** ο οποίος την μετατρέπει σε εναλλασσόμενη μεταβλητής συχνότητας και πλάτους. Ο αντιστροφέας αποτελείται από θυρίστορ ή τρανζίστορ. Ο τύπος καθορίζεται από την ισχύ και τη συχνότητα λειτουργίας.
- Η **μονάδα ελέγχου** επικοινωνεί με όλα τα τμήματα, εποπτεύει και ελέγχει τη λειτουργία του συστήματος. Περιλαμβάνει ένα μικροεπεξεργαστή στη μνήμη του οποίου εγγράφονται διάφορες ρυθμίσεις ώστε να αναγνωρίζει τα χαρακτηριστικά του κινητήρα και να αυτοπροσαρμόζεται,

να δίνει επιπλέον ροπή κατά την εκκίνηση όταν ζητηθεί από το φορτίο.



Εικόνα 1.5.β: Κύκλωμα ισχύος ηλεκτρονικού ρυθμιστή στροφών.

Όσον αφορά τους πόλους υπάρχει η μέθοδος αλλαγής στροφών μέσω των **διαδοχικών πόλων**. Στη μέθοδο των διαδοχικών πόλων, με κάποιες απλές αλλαγές στη σύνδεση των ομάδων του τυλίγματος του στάτη, ο αριθμός των πόλων του μεταβάλλεται με ένα λόγο 2 προς 1. Έτσι, ο επαγωγικός κινητήρας μπορεί να έχει δύο ή τέσσερις πόλους και σύγχρονη ταχύτητα 3000rpm ή 1500rpm αντίστοιχα.

1.5.1 Ολίσθηση

Στους Ασύγχρονους κινητήρες η έννοια της ολίσθησης είναι σημαντική. Όπως προαναφέραμε η τάση που επάγεται σε κάποιον από τους αγωγούς του δρομέα εξαρτάται από τη σχετική κίνηση του δρομέα ως προς τα μαγνητικά πεδία. Ο δρομέας δεν στρέφεται ποτέ με τη σύγχρονη ταχύτητα περιστροφής καθώς τότε δεν θα επάγονταν τάσεις σε αυτόν. Δυο είναι συνήθως τα μεγέθη που περιγράφουν τη σχετική κίνηση του δρομέα ως προς τα μαγνητικά πεδία. Το πρώτο από αυτά είναι η ταχύτητα ολίσθησης (slip speed), που ορίζεται ως η διαφορά της ταχύτητας του δρομέα από τη σύγχρονη ταχύτητα και δίνεται από την εξίσωση:

$$n_{slip} = n_{sync} - n_m$$

Όπου :

n_{slip} η ταχύτητα ολίσθησης

n_{sync} η σύγχρονη ταχύτητα

n_m η ταχύτητα περιστροφής του δρομέα

Το δεύτερο μέγεθος με το οποίο εκφράζεται η σχετική κίνηση είναι η ολίσθηση (slip) και ουσιαστικά πρόκειται για σχετική ταχύτητα ολίσθησης εκφρασμένη σε εκατοστιαία ή σε ανά μονάδα βάση. Έτσι, η ολίσθηση ορίζεται από τη σχέση:

$$s = \frac{n_{sync} - n_m}{n_{sync}} \cdot 100\%$$

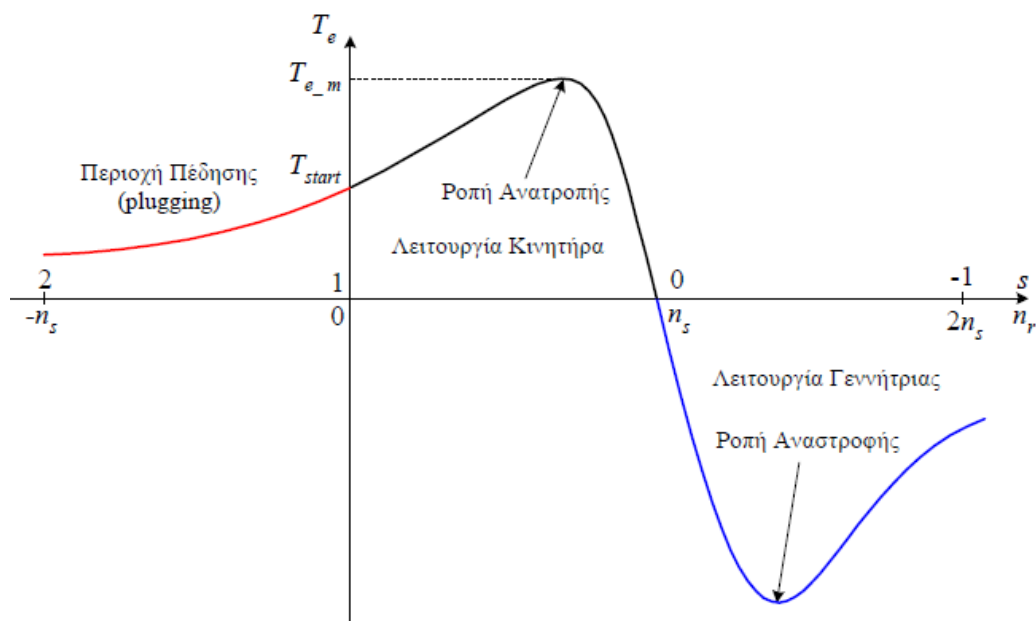
Όταν ο κινητήρας είναι ακίνητος, η ολίσθηση είναι ίση με τη μονάδα ($s=1$). Αν ο δρομέας στρεφόταν με τη σύγχρονη ταχύτητα, η ολίσθηση θα ήταν μηδέν ($s=0$). Έτσι λοιπόν προκύπτει η παρακάτω σχέση της ταχύτητας του κινητήρα, ως συνάρτηση της σύγχρονης ταχύτητας και ολίσθησης.

$$n_r = (1 - s)n_s$$

Η ονομασία Ασύγχρονος λοιπόν προέρχεται από τη διαφορά της ταχύτητας του δρομέα από τη σύγχρονη, η οποία είναι ανάλογη με τη ροπή του φορτίου.

1.6 Διάγραμμα ροπής-ταχύτητας

Σύμφωνα σε αυτά που έχουμε αναφέρει μέχρι στιγμής περί συσχετισμού ροπής και ταχύτητας, βασίζεται το διάγραμμα των μεταξύ των μεγεθών. Κάθε κινητήρας συνοδεύεται από το δικό του ξεχωριστά.

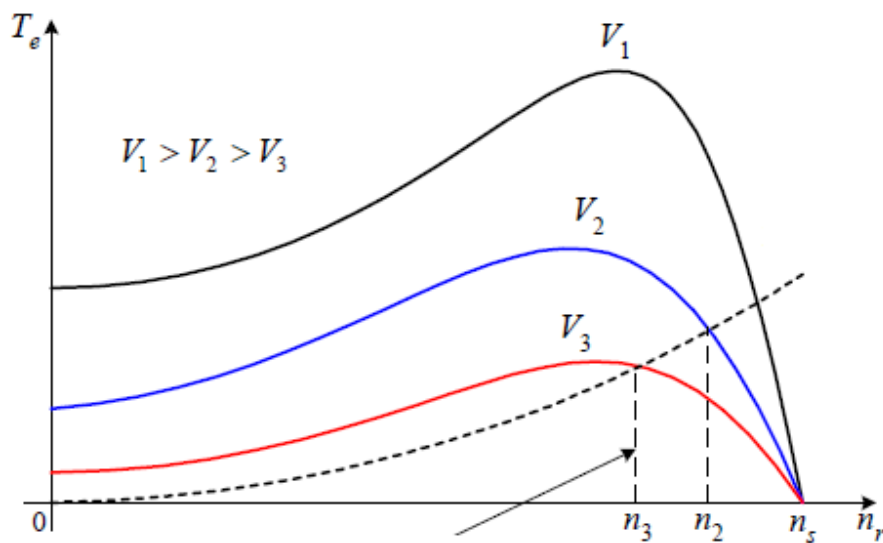


Διάγραμμα 1.6.α: Τυπική χαρακτηριστική Ροπής-Ταχύτητας κινητήρα

Η τυπική μορφή τέτοιου διαγράμματος είναι σύμφωνη με το προηγούμενο διάγραμμα, όπου T_{start} η ροπή εκκίνησης, S η ολίσθηση και n_s ο σύγχρονος αριθμός στροφών.

Όπως είπαμε η ροπή του κινητήρα μεταβάλλεται ανάλογα με το τετράγωνο της τάσης τροφοδοσίας. Επομένως μια μεταβολή στην τάση προκαλεί σημαντική μεταβολή στην αναπτυσσόμενη ροπή. Η επαγωγική μηχανή λειτουργεί ως γεννήτρια, όταν η ταχύτητα του δρομέα είναι μεγαλύτερη από τη σύγχρονη με αποτέλεσμα την αντιστροφή της φοράς της επαγόμενης ροπής, οπότε η ολίσθηση γίνεται αρνητική. Στην περιοχή πέδησης ο κινητήρας υφίσταται ηλεκτρομαγνητική πέδηση αποτέλεσμα της αντιστροφής της φοράς ανάμεσα στα μαγνητικά πεδία στο εσωτερικό της μηχανής και του άξονα του κινητήρα.

Κατά την εκκίνηση, όταν οι στροφές του κινητήρα είναι πρακτικά μηδέν, η ροπή του κινητήρα έχει τιμή T_{start} . Καθώς αυξάνονται οι στροφές αυξάνεται και η ροπή μέχρι την ροπή ανατροπής. Η ροπή εκκίνησης πρέπει να είναι αρκετά μεγαλύτερη από την αντίστοιχη ονομαστική ροπή του φορτίου. Η ροπή του κινητήρα πρέπει να παραμένει μεγαλύτερη από τη ροπή του φορτίου όλο το διάστημα όπου ο κινητήρας επιταχύνεται μέχρι να φτάσει την ταχύτητα λειτουργίας του. Η λειτουργία του κινητήρα στο τμήμα της καμπύλης πριν τη ροπή ανατροπής ονομάζεται ασταθής λειτουργία ενώ αυτή μετά τη ροπή ανατροπής ευσταθής. Ο κινητήρας εργάζεται στην ευσταθή για να μπορεί να προσαρμόζεται αυτόματα στις διακυμάνσεις του φορτίου. Στην περιοχή αυτή, αν για κάποιο λόγο αυξηθεί το φορτίο, θα μειωθεί η ταχύτητα και κατόπιν θα αυξηθεί η ροπή ώστε να μπορέσει ο κινητήρας να ανταποκριθεί στη ζήτηση του φορτίου.



Διάγραμμα 1.6.β: Μεταβολή Ροπής-Ταχύτητας συναρτήσει της τάσης

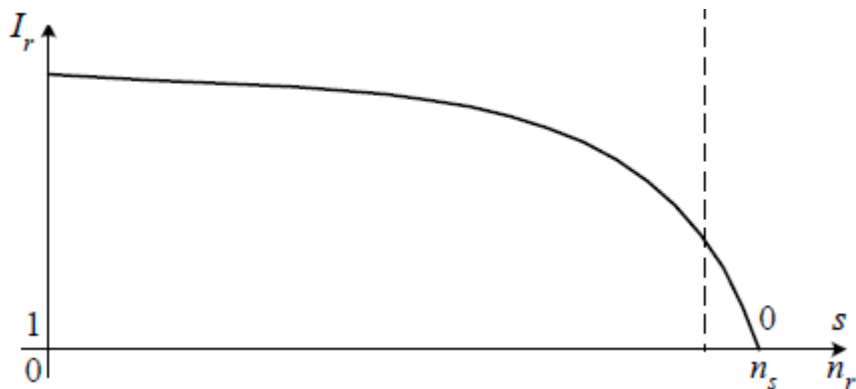
Στο άνωθεν διάγραμμα βλέπουμε πως μεταβάλλεται η ροπή εκκίνησης συναρτήσει της τάσης. Η διακεκομμένη γραμμή που τέμνει τις τρεις καμπύλες είναι η χαρακτηριστική του φορτίου όπου το βέλτιστο σημείο λειτουργίας της καθεμίας αλλάζει καθώς της αλλάζουν και οι στροφές.

Της όσο μεγαλύτερη είναι η αντίσταση του δρομέα σε τόσο μικρότερη ταχύτητα θα εμφανίζεται η μέγιστη ροπή.

$$T_{\epsilon-m} = \frac{3V_T^2}{2\omega_s \left[R_T + \sqrt{R_T^2 + (X_T + X'_b)^2} \right]} \approx \frac{3V_T^2}{2\omega_s [X_L + X'_b]}$$

Η παραπάνω εξίσωση περιγράφει της σχέσεις. Βλέπουμε πως η μέγιστη ροπή είναι ανάλογη του τετραγώνου της τάσης και αντιστρόφως ανάλογη των επαγωγικών αντιδράσεων(αντιστάσεων) του στάτη και του δρομέα. Έτσι, οι αντιδράσεις πρέπει να είναι μικρές για να έχουμε μεγάλη ροπή ανατροπής.

Ιδιαίτερα σημαντική είναι και η συμπεριφορά του ρεύματος η οποία αποτυπώνεται στο παρακάτω διάγραμμα.

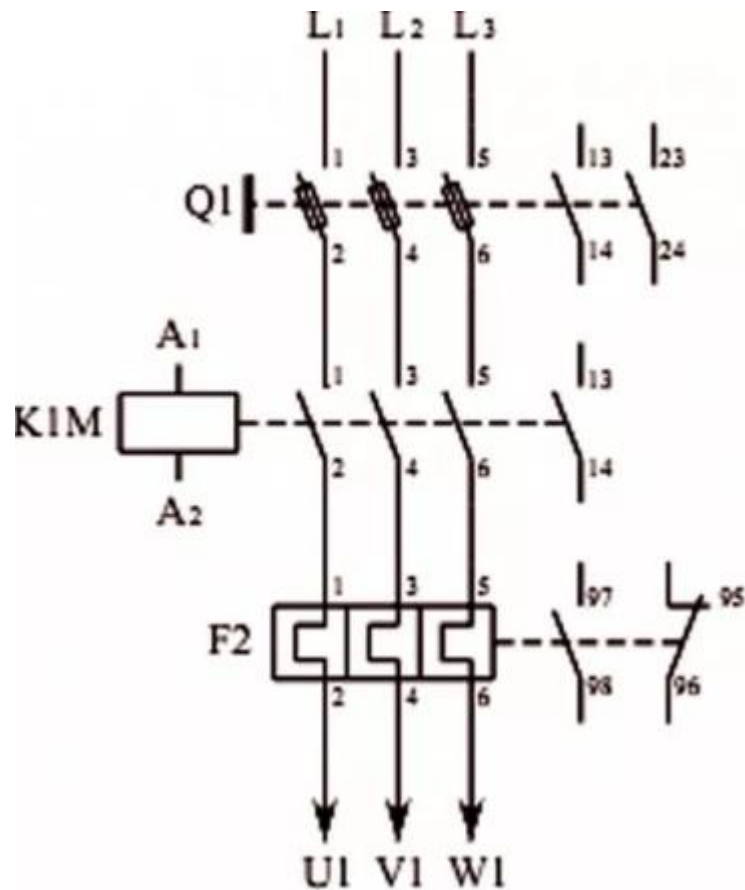


Διάγραμμα 1.6.γ: Χαρακτηριστική Ρεύματος-Ταχύτητας κινητήρα

Παρατηρούμε πως κατά την εκκίνηση το ρεύμα εκκίνησης είναι ιδιαίτερα υψηλό, και όσο ο κινητήρας πλησιάζει τις ονομαστικές του στροφές ελαττώνεται.

1.7 Προστασία κινητήρα

Γενικά όπως κάθε ηλεκτρικό στοιχείο έτσι και ο ηλεκτρικός κινητήρας απαιτεί κατάλληλα μέτρα προστασίας από βραχυκύκλωμα και υπερφόρτιση. Ακολουθεί απλό κύκλωμα για κατανόηση. Ενοείται πως ανάλογα την διάταξη το κύκλωμα προστασίας διαφέρει.



Εικόνα 1.7.α: Τυπικό κύκλωμα προστασίας κινητήρα

Το παρόν κύκλωμα είναι κύκλωμα ισχύος. Έπειτα την τροφοδοσία των τριών φάσεων(L1,L2,L3), ακολουθούν οι ασφάλειες με Q1 διακόπτη ο οποίος τις ελέγχει μαζί. Έπειτα υπάρχει ο ηλεκτρονόμος KM. Πρόκειται για ένα διακόπτη πολλαπλών επαφών ο οποίος ανοίγει και κλείνει ένα κύκλωμα κάτω από τον έλεγχο ενός άλλου κυκλώματος. Ένας ηλεκτρονόμος μπορεί να έχει και ανοικτές και κλειστές επαφές οι οποίες χρησιμοποιούνται αναλόγως. Επίσης έχει και βοηθητικές επαφές πέραν των κύριων επαφών, οι οποίες κύριες συνήθως διαρρέονται από ισχυρότερα ρεύματα. Τέλος υπάρχει η ασφάλεια F το λεγόμενο θερμικό στοιχείο προστασίας. Με U1,V1,W1 τα τυλίγματα της μηχανής.

Λειτουργία του κάθε στοιχείου

Οι ασφάλειες Q1 προσφέρουν στο κύκλωμα προστασία από βραχυκύκλωμα. Χαρακτηρίζονται βραδείας τήξεως για τον εξής λόγο. Εάν ξαφνικά στο εσωτερικό του κινητήρα εμφανιστεί βραχυκύκλωμα και το ρεύμα γίνει πολλές φορές μεγαλύτερο του ονομαστικού του, οι ασφάλειες θα καούν αποσυνδέοντας έτσι τον κινητήρα από το δίκτυο ισχύος και προστατεύοντάς τον από

καταστροφή. Όμως λόγω των υψηλών ρευμάτων εκκίνησης κάτι το οποίο είναι αναπόφευκτο, οι ασφάλειες αυτές δε θα πρέπει να καίγονται κατά την εκκίνηση, και έτσι κατασκευάζονται, ώστε να αντέχουν σε ρεύματα πολύ μεγαλύτερα από το ρεύμα πλήρους φόρτισης, πριν διακόψουν την τροφοδοσία. Αυτό σημαίνει πως τα βραχυκυκλώματα μέσω μιας πολύ μεγάλης αντίστασης και/ή εξαιτίας εξαιρετικά μεγάλων φορτίων δεν αντιμετωπίζονται με τις ασφάλειες. Το θερμικό στοιχείο προστασίας F προστατεύει τον κινητήρα από υπερφόρτιση. Τα στοιχεία αυτά εν αντιθέσει με τις προαναφερθείς ασφάλειες ρυθμίζονται να αντέχουν ρεύμα ίσο με το ονομαστικό ρεύμα του κινητήρα για άμεση διακοπή της τροφοδοσίας σε περίπτωση αθέμιτης αύξησης του ρεύματος και της θερμοκρασίας υπό κανονικές συνθήκες λειτουργίας. Αυτές οι συσκευές προστασίας από υπερφορτίσεις αποτελούνται από δύο μέρη : από ένα θερμικό στοιχείο και από τις επαφές υπερφόρτισης. Κάτω από κανονικές συνθήκες οι επαφές υπερφόρτισης είναι κλειστές. Όμως, όταν η θερμοκρασία των θερμικών αυξάνεται υπερβολικά, οι επαφές ανοίγουν απενεργοποιώντας τον ηλεκτρονόμο KM, ο οποίος με τη σειρά του ανοίγει τις επαφές του διακόπτοντας την τροφοδοσία του κινητήρα.

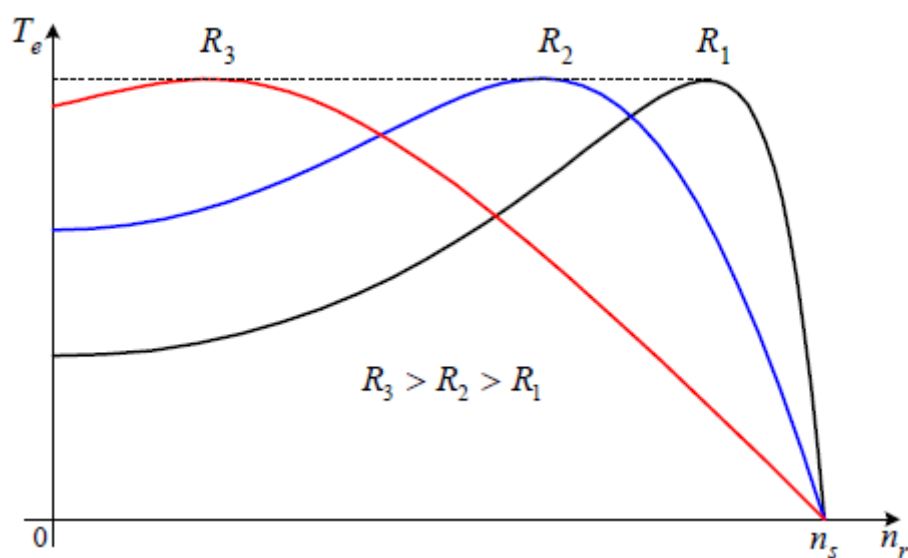
1.7.1 Εκκίνηση επαγωγικού κινητήρα

Η εκκίνηση του κινητήρα όπως προαναφέρθηκε είναι μια διαδικασία που χρήζει προσοχής. Τα μεγάλα ρεύματα εκκίνησης που χρειάζονται δεν δημιουργούν μόνο τοπικό πρόβλημα στην διάταξη, αλλά και στο δίκτυο τροφοδοσίας. Αν και η εμφάνιση τους είναι στιγμιαία η βύθιση τάσης που προκαλούν στο δίκτυο ενδέχεται να δημιουργήσει προβλήματα και σε άλλους καταναλωτές. Οι πιο διαδεδομένοι τρόποι εκκίνησης είναι οι εξής:

- **Με απευθείας εκκίνηση** σε κινητήρες μικρής ισχύος για αποφυγή των βυθίσεων τάσης. Γενικά και σε αυτή την περίπτωση έχουμε βύθιση απλά ο εκάστοτε πάροχος ενέργειας προσδιορίζει το μέγιστο ρεύμα εκκίνησης στην περίπτωση αυτή.
- **Εκκίνηση με τη χρήση ηλεκτρονικού/ομαλού εκκινητή (soft starter).** Ο ηλεκτρονικός εκκινητής είναι μια συσκευή που επιτρέπει το έλεγχο(πλέον και απομακρυσμένο) της διαδικασίας εκκίνησης. Μέσω των ηλεκτρονικών στοιχείων που περιέχει (θυρίστορς), τα οποία λειτουργούν μέσω του μηχανισμού της γωνίας έναυσης(διαδικασία ελεγχόμενης αύξησης και μείωσης της τάσης!!) τροφοδοτούν προοδευτικά τον κινητήρα με τάση. Ανάλογα με τη ροπή του φορτίου, ρυθμίζουμε την τάση τροφοδοσίας του κινητήρα, πετυχαίνοντας ικανοποιητικό ρεύμα εκκίνησης και ικανοποιητική ροπή εκκίνησης. Το ρεύμα εκκίνησης μπορεί να κυμανθεί από δυο έως πέντε φορές μεγαλύτερο του

ονομαστικού ενώ η ροπή εκκίνησης μπορεί να κυμανθεί έως και μια φορά μεγαλύτερη της ονομαστικής.

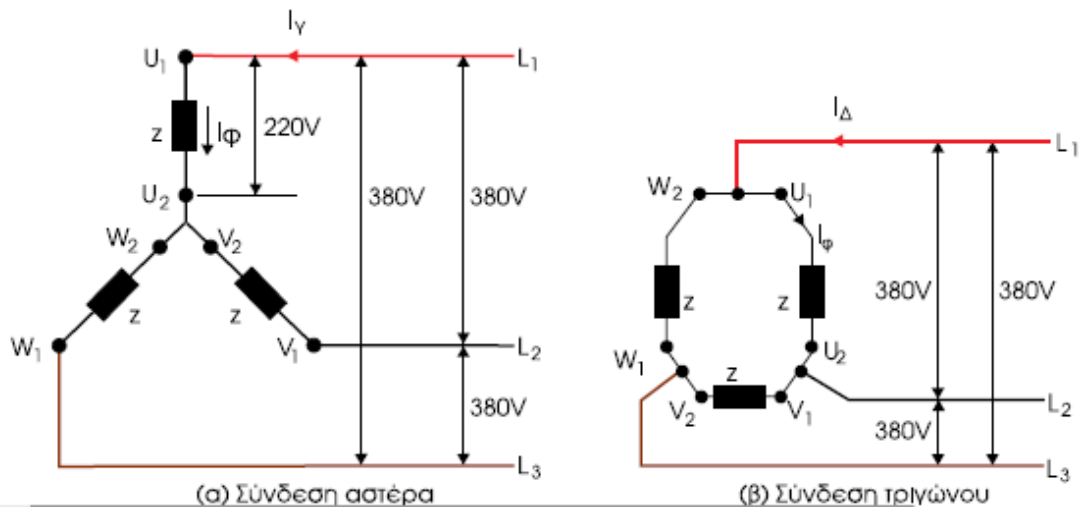
- **Εκκίνηση με τη χρήση αυτομετασχηματιστή.** Ο κινητήρας τροφοδοτείται με μειωμένη τάση μέσω του αυτομετασχηματιστή. Όταν ο κινητήρας φθάσει στο 80% της ονομαστικής του ταχύτητας κλείνει ένας μεταγωγικός διακόπτης και η τροφοδοσία του κινητήρα γίνεται απευθείας ενώ ο αυτομετασχηματιστής τίθεται εκτός τάσης δικτύου. Το ρεύμα εκκίνησης είναι τρεις φορές μεγαλύτερο του ονομαστικού και η ροπή περίπου μια φορά μεγαλύτερη της ονομαστικής.
- **Εκκίνηση με τη χρήση αντιστάσεων(εκκινητή) στο δρομέα.** Η εκκίνηση του κινητήρα γίνεται με μειωμένη τάση άρα και μειωμένη ένταση. Καθώς αυξάνεται η ταχύτητα του κινητήρα, αρχίζουμε να μειώνουμε την ωμική τιμή των αντιστάσεων και μόλις ο κινητήρας φθάσει την ονομαστική του ταχύτητα, οι αντιστάσεις τίθενται εκτός δικτύου. Εάν και αυτός ο τρόπος εκκίνησης προτιμάται σε Ασύγχρονους κινητήρες δακτυλιοφόρου δρομέα.



Εικόνα 1.7.1.α: Χαρακτηριστική Ροπής-Ταχύτητας με χρήση εκκινητή

Παρατηρούμε πως οι κινητήρες δακτυλιοφόρου δρομέα παρουσιάζουν σε μεγάλη αντίσταση εκκίνησης πολύ υψηλή ροπή εκκίνησης. Όσο η αντίσταση μειώνεται η ροπή εκκίνησης ελαττώνεται. Η ροπή ανατροπής σαφώς είναι ίδια.

- **Εκκίνηση με διακόπτη αστέρα-τριγώνου,** χειροκίνητο ή αυτόματο. Ο διακόπτης αυτός αποτελείται από ηλεκτρονόμους οι οποίοι ξεκινούν τον κινητήρα με τα τυλίγματά του σε σύνδεση αστέρα και έπειτα η συνδεσμολογία αλλάζει σε τρίγωνο. Δηλαδή:



Εικόνα 1.7.1.β: Συνδεσμολογίες τριφασικού τυλίγματος

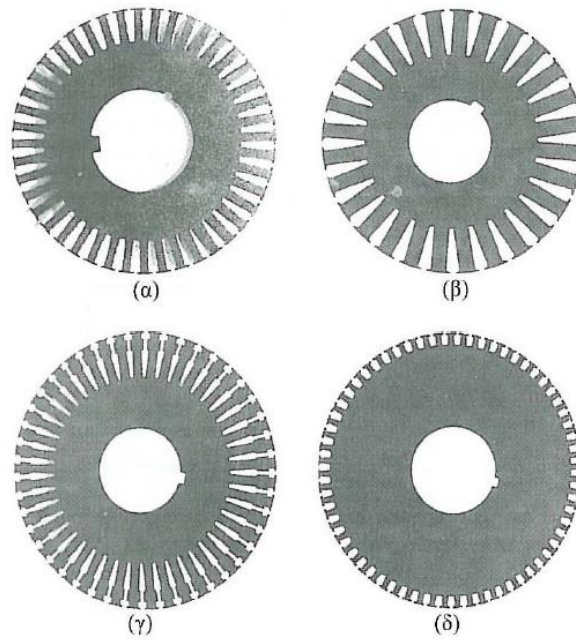
Τα U,V,W είναι τα τριφασικά τυλίγματα της μηχανής. Παρατηρούμε πως στον αστέρα η τάση που δέχεται παραδείγματος χάριν το τυλίγμα U1-U2 στα άκρα του είναι 220 βολτ φασική τάση. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα ένα πολύ μικρότερο ρεύμα εκκίνησης. Όταν ο κινητήρας αναπτύξει στροφές τότε οι ηλεκτρονόμοι αλλάζουν την συνδεσμολογία σε τρίγωνο τροφοδοτώντας τα άκρα των τυλιγμάτων με 380 βολτ, πολική πλέον τάση.

Διευκρίνιση!

Όμως δεν μπορούν όλοι οι κινητήρες να δουλέψουν με διακόπτη αστέρα-τριγώνου. Απαραίτητη προϋπόθεση είναι η εφαρμογή κατάλληλης τάσης στα άκρα του τυλίγματος. Το ελληνικό δίκτυο παροχής ηλεκτρικής ενέργειας διαθέτει στους καταναλωτές φασική τάση 220 βολτ και πολική 380 βολτ. Η φασική τάση είναι μικρότερη κατά $\sqrt{3}$ της πολικής. Εάν λοιπόν το παραπάνω παράδειγμα αφορούσε έναν κινητήρα είναι προφανές ότι συναντά τα κριτήρια έτσι ώστε να συνδεθεί στο ελληνικό δίκτυο. Όμως εάν αυτός ο κινητήρας σε πολική τάση άντεχε τα 220 βόλτ δηλαδή 110 βολτ φασική τότε θα ήταν αδύνατο και τα τυλίγματά του θα καταστρέφονταν ολοσχερώς.

1.7.2 Κλάσεις κινητήρα, διαφορές στην εκκίνηση

Οι κλάσεις σχεδίασης ενός κινητήρα αφορούν την μεταβολή των χαρακτηριστικών του δρομέα ενός επαγωγικού κινητήρα για την υλοποίηση μεγάλης ποικιλίας χαρακτηριστικών ροπής-ταχύτητας. Η κλάση λοιπόν του κάθε κινητήρα παίζει σημαντικό ρόλο στην επιλογή του. Τα χαρακτηριστικά του δρομέα είναι ιδιαίτερα σημαντικά στην εκκίνηση του κινητήρα. Ακολουθούν τα σχήματα των δυναμοελασμάτων του δρομέα ανάλογα την κλάση σχεδίασης.



Εικόνα 1.7.α: Μορφές δυναμοελασμάτων δρομέα

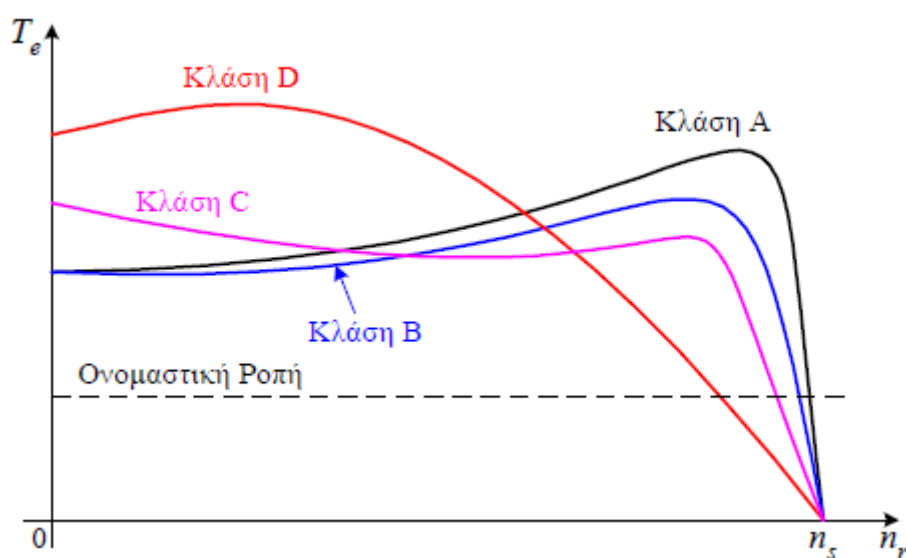
ΚΛΑΣΗ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ Α. Οι κινητήρες κλάσης Α είναι κινητήρες με τυποποιημένη σχεδίαση που παρουσιάζουν κανονική ροπή εκκίνησης, κανονικό ρεύμα εκκίνησης και χαμηλή ολίσθηση. Το σημαντικότερο πρόβλημα αυτής της κλάσης σχεδίασης είναι το υψηλό ρεύμα εκκίνησης. Τα τυπικά ρεύματα εκκίνησης για τέτοιους κινητήρες είναι 500% ως 800% του ονομαστικού ρεύματος. Για τέτοιου είδους κινητήρες με μέγεθος από 7,5 hp θα πρέπει να χρησιμοποιείται μία μέθοδος μείωσης της τάσης κατά την εκκίνηση, για να μην έχουμε μεγάλες πτώσεις τάσης. Στο παρελθόν οι κινητήρες κλάσης Α σχεδιάζονταν για εφαρμογές κάτω από 7,5 hp και πάνω από 200 hp. Στις μέρες μας έχουν αντικατασταθεί από τους κινητήρες κλάσης Β που θα αναλυθούν παρακάτω. Τυπικές εφαρμογές αυτών των κινητήρων είναι η οδήγηση ανεμιστήρων, φυσερών, αντλιών, τόνων και άλλων εργαλειομηχανών.

ΚΛΑΣΗ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ Β. Οι κινητήρες αυτοί έχουν κανονική ροπή εκκίνησης, μικρότερο ρεύμα εκκίνησης (σε σχέση με τους κινητήρες κλάσης Α) και χαμηλή ολίσθηση. Οι εφαρμογές αυτών των κινητήρων είναι παρόμοιες με αυτές των κινητήρων κλάσης Α, μόνο που προτιμούνται εξαιτίας του μικρότερου ρεύματος εκκίνησης.

ΚΛΑΣΗ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ Γ. Οι κινητήρες κλάσης Γ παρουσιάζουν μεγάλη ροπή εκκίνησης, μικρό ρεύμα εκκίνησης και χαμηλή ολίσθηση στη λειτουργία υπό πλήρες φορτίο (μικρότερη από 5%). Η ροπή ανατροπής είναι λίγο μικρότερη από αυτή των κινητήρων κλάσης Α. Οι κινητήρες αυτού του είδους κατασκευάζονται με διπλό δρομέα και έτσι είναι ακριβότεροι από τους κινητήρες των προηγούμενων κλάσεων. Οι κινητήρες αυτοί συνήθως χρησιμοποιούνται σε φορτία που απαιτούν υψηλή ροπή εκκίνησης,

όπως φορτισμένες αντλίες, συμπιεστές, μεταφορείς και άλλα παρόμοια φορτία.

ΚΛΑΣΗ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ Δ. Οι κινητήρες κλάσης Δ έχουν πάρα πολύ μεγάλη ροπή εκκίνησης (πάνω από 275% της ονομαστικής ροπής) και μικρό ρεύμα εκκίνησης, αλλά παρουσιάζουν υψηλή ολίσθηση στη λειτουργία υπό πλήρες φορτίο. Ουσιαστικά, πρόκειται για απλούς επαγωγικούς κινητήρες κλάσης Α, που διαθέτουν όμως ράβδους μικρότερης διατομής κατασκευασμένες από υλικό μεγαλύτερης αντίστασης. Η μεγάλη αντίσταση στον δρομέα μετακινεί τη μέγιστη ροπή σε πολύ μικρή ταχύτητα. Επίσης, είναι δυνατή η μετακίνηση της μέγιστης ροπής στη μηδενική ταχύτητα. Η ολίσθηση αυτών των κινητήρων στην πλήρη φόρτιση είναι αρκετά υψηλή λόγω της μεγάλης αντίστασης του δρομέα που διαθέτουν. Αυτού του είδους οι κινητήρες έχουν εφαρμογή στην επιτάχυνση φορτίων με μεγάλη αδράνεια όπως οι ιδιαίτερα μεγάλοι σφόνδυλοι που χρησιμοποιούνται σε διατρητικές πρέσες ή ψαλίδια.



Διάγραμμα 1.7.α: Χαρακτηριστικές ροπής-ταχύτητας επαγωγικών κινητήρων βραχυκυκλωμένου κλωβού για τις διάφορες κλάσεις σχεδίασης.

1.8 Απώλειες κινητήρα

Οι ωμικές αντιστάσεις του στάτη και του δρομέα εξαρτώνται από τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά του κινητήρα (όπως το μήκος και τη διατομή των τυλιγμάτων του, την ποιότητα του χαλκού του, την κλάση μόνωσης) καθώς και από τη θερμοκρασιακή κατάσταση του. Επίσης οι τιμές των ωμικών αντιστάσεων επηρεάζονται και από το επιδερμικό φαινόμενο. Η ηλεκτρική ισχύς εισόδου στον κινητήρα P_{in} έχει την μορφή τριφασικού συστήματος τάσεων και ρευμάτων. Το

πρώτο είδος απωλειών που υπολογίζεται στον κινητήρα είναι οι ωμικές ($I^2 \cdot R$) απώλειες στο τύλιγμα του στάτη (απώλειες χαλκού στο στάτη – PSCCL). Έπειτα, κάποιο ποσό ισχύος χάνεται με την μορφή απωλειών υστέρησης και απωλειών εξαιτίας των δινορρευμάτων στο στάτη (Pcore). Η ισχύς που απομένει μεταφέρεται στο δρομέα της μηχανής περνώντας από το διάκενο που υπάρχει μεταξύ του στάτη και του δρομέα. Αυτή η ισχύς ονομάζεται ισχύς διακένου PAG της μηχανής (air – gap power). Ένα μέρος της ισχύος που μεταφέρεται στον δρομέα χάνεται με την μορφή ωμικών απωλειών ($I^2 \cdot R$) στα τυλίγματα του δρομέα (απώλειες χαλκού στον δρομέα – PRCL), ενώ η ισχύς που απομένει μετατρέπεται από ηλεκτρική σε μηχανική (Pconv). Από αυτή την ισχύ αφαιρούνται τελικά οι απώλειες τριβής και εξαερισμού PF&W, καθώς και οι κατανεμημένες απώλειες Pmisc. Η εναπομείνουσα μηχανική ισχύ αποτελεί την ισχύ εξόδου Pout της μηχανής.

- **Οι απώλειες πυρήνα Pcore** (ή αλλιώς σιδήρου) οφείλονται στα φαινόμενα υστέρησης και δινορρευμάτων που αναπτύσσονται στα σιδηρομαγνητικά υλικά των κινητήρων
- **Οι απώλειες υστέρησης (hysteresis losses) Pcore,h** αναφέρονται στη μαγνητική ενέργεια που καταναλώνεται κατά τη μαγνήτιση του πυρήνα, δηλαδή την αναδιάταξη των μαγνητικών τμημάτων του όπως αυτή συμβαίνει σε κάθε περίοδο της εναλλασσόμενης τάσης τροφοδοσίας του κινητήρα. Μπορεί ν' αποδειχτεί ότι οι απώλειες ενέργειας σε κάθε περίοδο είναι ανάλογες του εμβαδού που καλύπτει ο βρόχος υστέρησης. Όσο μικρότερη είναι η μέγιστη τιμή της μαγνητεγερτικής δύναμης που εφαρμόζεται στον πυρήνα, τόσο μικρότερο είναι το εμβαδό του βρόχου υστέρησης, άρα και οι αντίστοιχες απώλειες.
- **Οι απώλειες δινορρευμάτων (eddy current losses) Pcore,e** αποτελούν μια ακόμα κατηγορία απωλειών προκαλούμενων από τις μεταβολές της επιβαλλόμενης μαγνητεγερτικής δύναμης σ' έναν πυρήνα. Οφείλονται στην ανάπτυξη δινορρευμάτων στον πυρήνα από τάσεις που επάγει μια χρονικά μεταβαλλόμενη μαγνητική ροή και είναι ουσιαστικά οι θερμικές απώλειες που καταναλώνονται στην αντίσταση του μετάλλου του πυρήνα. Εξαρτώνται από τη γεωμετρία του πυρήνα, την ηλεκτρική αγωγιμότητα του υλικού του, την πυκνότητα του ρεύματος και το πάχος των δυναμοελασμάτων.
- **Οι μηχανικές απώλειες** ενός επαγωγικού κινητήρα συνίστανται στις απώλειες λόγω τριβών μεταξύ των μηχανικών τμημάτων της μηχανής (friction losses) PF, και στις απώλειες εξαερισμού (windage losses) PW. Οι τελευταίες είναι οι απώλειες που προκύπτουν από τις τριβές των μηχανικών τμημάτων του κινητήρα με τον αέρα λόγω περιστροφής. Για τις μηχανικές απώλειες χρησιμοποιείται ο συμβολισμός PF&W.

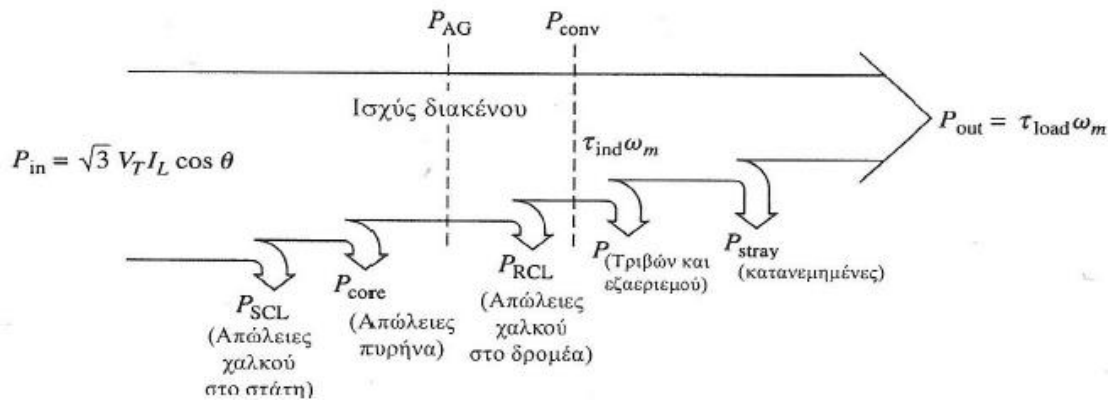
Κατά προσέγγιση θεωρούνται ανάλογες του κύβου της περιστροφικής ταχύτητας του κινητήρα.

- Τέλος στις **κατανεμημένες απώλειες Pstray** περιλαμβάνονται όλες οι απώλειες που δεν μπορούν να υπολογιστούν σε καμία από τις προηγούμενες κατηγορίες και συνήθως οφείλονται στην αύξηση της μαγνητικής ροής σκέδασης κατά την αύξηση φορτίου και στις υψίσυχνες διακυμάνσεις της ροής αυτής (οι διακυμάνσεις της ροής προέρχονται από την παραμόρφωση της ημιτονοειδούς ιδανικά κατανομής της μαγνητικής επαγωγής στο διάκενο, λόγω της κατανομής των αγωγών στα αυλάκια). Τέτοιες μη υπολογίσιμες απώλειες μπορεί να είναι:
 - i. Απώλειες δινορρευμάτων στις περιελίξεις εξαιτίας του επιδερμικού φαινομένου που προκαλεί η μαγνητική ροή σκέδασης, με συνέπεια την μείωση της ενεργού διατομής των αγωγών και άρα την αύξηση της ωμικής των αντιστάσεως.
 - ii. Απώλειες δινορρευμάτων λόγω της μαγνητικής ροής σκέδασης στις κεφαλές των τυλιγμάτων του στάτη, με αποτέλεσμα την αύξηση των απωλειών πυρήνα και την πρόκληση απωλειών σιδήρου στο περίβλημα και σε άλλα μη ενεργά μέρη του κινητήρα. Οι απώλειες αυτές εξαρτώνται από τη γεωμετρία των κεφαλών του κινητήρα.

Οι μηχανικές απώλειες και οι απώλειες πυρήνα συνήθως υπολογίζονται μαζί και ονομάζονται **απώλειες χωρίς φορτίο ή απώλειες της εν κενώ λειτουργίας.**

Οι απώλειες πυρήνα, οι μηχανικές και οι κατανεμημένες απώλειες πολλές φορές προστίθενται όλες μαζί και ονομάζονται απώλειες περιστροφής (rotational losses). Ο λόγος είναι ότι οι τιμές των παραπάνω απωλειών εξαρτώνται από την ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα. Έτσι όσο μεγαλύτερη είναι η ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα, τόσο μεγαλύτερες είναι οι απώλειες τριβών, εξερισμού και οι κατανεμημένες απώλειες. Από την άλλη μεριά οι απώλειες πυρήνα μειώνονται με την αύξηση της ταχύτητας περιστροφής του κινητήρα (όταν δηλαδή η n_m προσεγγίζει την n_{sync}).

Παρά την παραπάνω εξάρτηση των επιμέρους απωλειών περιστροφής από την ταχύτητα περιστροφής, η συνολική τιμή τους θεωρείται σταθερή ακόμα και για μεταβαλλόμενη περιστροφική ταχύτητα κινητήρα, αφού οι επιμέρους απώλειες μεταβάλλονται προς αντίθετες κατευθύνσεις.



Εικόνα 1.8.α: Διάγραμμα ροής ισχύος επαγωγικού κινητήρα.

1.9 Συντήρηση τριφασικών κινητήρων

Όσον αφορά την συντήρηση του κινητήρα, αυτή περιλαμβάνει τα ακόλουθα :

- Έλεγχος στα έδρανα για τυχόν εμφάνιση σκουριάς , έλλειψης γράσου ή ακόμη και φθοράς αυτών.
- Έλεγχος για τυχόν εμφάνιση σκουριάς πάνω στον ίδιο τον κινητήρα, από τον οποίο θα πρέπει να αφαιρείται άμεσα.
- Έλεγχος στη γείωση του κινητήρα.
- Έλεγχος για τυχόν υγρασία πάνω στα τυλίγματα του στάτη. Στη περίπτωση της μη αποδεκτής υγρασίας, πρέπει να ακολουθείται η διαδικασία στεγνώματος του κινητήρα.
- Έλεγχος στη σωστή ευθυγράμμιση μεταξύ του άξονα του κινητήρα και του άξονα της οδηγούμενης μηχανής. Μειώνουμε κατά αυτόν τον τρόπο τους κραδασμούς ή τις πιέσεις στον άξονα, κατά τη διάρκεια της εκκίνησης ή της κανονικής λειτουργίας του κινητήρα.
- Έλεγχος στη ζυγοστάθμιση της τροχαλίας που είναι εφαρμοσμένη πάνω στον άξονα του κινητήρα. Στη περίπτωση που έχουμε κίνηση με ιμάντα ελέγχουμε το τέντωμα του ιμάντα.
- Έλεγχος για πιθανή ύπαρξη σκόνης ή ξένων σωμάτων εντός του κινητήρα.
- Έλεγχος στην αντίσταση της μόνωσης των τυλιγμάτων του στάτη με τη χρήση του οργάνου Μέγγερ, αλλά και στην αντίσταση που θα πρέπει να υπάρχει μεταξύ τυλιγμάτων και γης.
- Έλεγχος στη σύσφιξη των ακροδεκτών των αγωγών πάνω στο ακροκιβώτιο, όπου καταλήγουν τα έξι άκρα των τυλιγμάτων του στάτη.
- Έλεγχος στα καλύμματα (καπάκια) του κινητήρα αλλά και στον εξαερισμό του χώρου στον οποίο είναι εγκατεστημένος ο κινητήρας.

- Έλεγχος στη ταχύτητα κραδασμών του κινητήρα. Η ταχύτητα κραδασμών στη σύγχρονη ταχύτητα του στρεφόμενου μαγνητικού πεδίου δεν πρέπει να ξεπερνάει τα 4,5mm/sec.
- Έλεγχος στη θερμοκρασία των διαφόρων τμημάτων του κινητήρα, όπως είναι τα τυλίγματα και τα έδρανα, κατά τη διάρκεια της εκκίνησης αλλά και της κανονικής λειτουργίας του κινητήρα.
- Καθαρισμός των καναλιών αερισμού του κινητήρα, αλλά και του πλέγματος του καλύμματος του ανεμιστήρα ψύξης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

Μελέτη τριφασικού επαγωγικού κινητήρα 4 πόλων, 37 kW

Στοιχεία κινητήρα:

Ονομαστική ισχύς : 37 kW / 50 hp

Ονομαστική ταχύτητα : 1480 rpm

Σύγχρονη Ταχύτητα: 1500 rpm

Τάση τροφοδοσίας (Πολική) : 400 Volt

Συχνότητα : 50Hz

Αριθμός φάσεων : 3

Συνδεσμολογία τυλιγμάτων : Τρίγωνο (Y)

Συντελεστής Ισχύος : 0,88

Βαθμός Απόδοσης : 0,923

Ροπή Εκκίνησης : 434,6 Nm

Ονομαστικό ρεύμα : 65,79 Amp

Α Μέρος-Στάτης

2.1 Διαστασιολόγηση στάτη

Η εσωτερική διάμετρος του στάτη δίνεται από τον τύπο:

$$D_{IS} = \sqrt[3]{\frac{2p_i}{\pi \cdot \lambda} \cdot \frac{p_i}{f} \cdot \frac{S_{gap}}{C_0}}$$

Όπου f η συχνότητα λειτουργίας, S_{gap} η φαινόμενη ισχύς διακένου, λ ο λόγος του μήκους πυρήνα προς το πολικό βήμα και $C0$ μια σταθερά.

Η ισχύς διακένου υπολογίζεται από τη σχέση:

$$S_{gap} = \frac{K_E \cdot P_n}{n_N \cdot \cos\varphi}$$

Όπου:

$$K_E = \frac{E_A}{V_\varphi} \approx 0.98 - 0.005 \cdot p_i = 0.98 - 0.005 \cdot 2 = 0.97$$

Ο λόγος του μήκους πυρήνα προς το πολικό βήμα, είναι ανάλογο με τον αριθμό των πόλων και δίνεται από τον παρακάτω πίνακα:

$2p_1$	2	4	6	8
λ	0.6 – 1.0	1.2 – 1.8	1.6 – 2.2	2 – 3

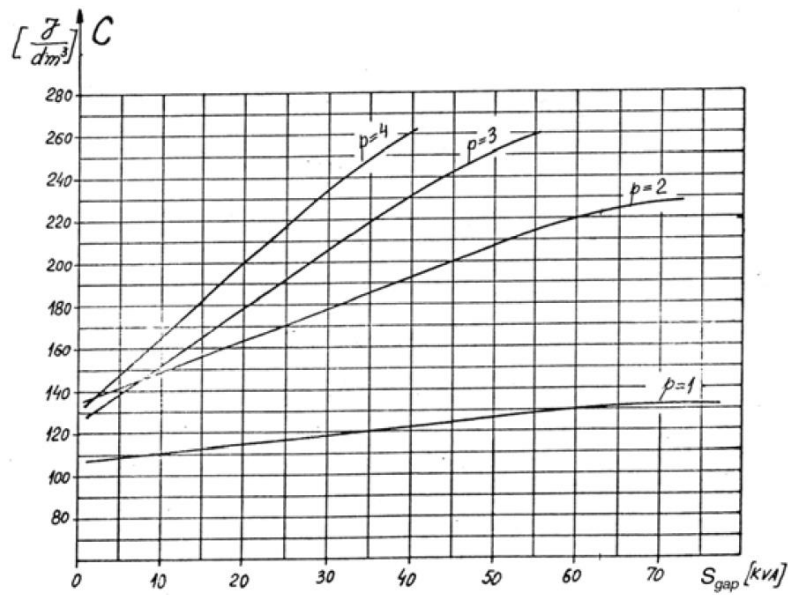
Πίνακας 2.1.α: Λόγος του μήκους πυρήνα προς το πολικό βήμα

Ο συντελεστής λ είναι ο λόγος του μήκους πυρήνα προς το πολικό βήμα και όταν πρόκειται για τετραπολικούς κινητήρες παίρνει τιμή 1,2 έως 1,8. Στη συγκεκριμένη περίπτωση επιλέγουμε μια ενδιάμεση τιμή ίση με 1,5.

Άρα:

$$S_{gap} = \frac{K_E \cdot P_n}{\eta_N \cdot \cos\varphi} = \frac{0.97 \cdot 37000}{0.923 \cdot 0.88} = 44186,44736VA$$

Το C_0 ονομάζεται σταθερά του Esson και μπορεί να υπολογιστεί αναλυτικά. Εξαρτάται από πολλούς παράγοντες όπως οι σπείρες ανά φάση, η μαγνητική επαγωγή στο διάκενο του κινητήρα, η πυκνότητα του ρεύματος στα τυλίγματα του στάτη. Μπορεί όμως να υπολογιστεί και από την παρακάτω γραφική παράσταση η οποία ισχύει για μικρής ισχύος κινητήρες:



Εικόνα 2.1: Διάγραμμα για εύρεση της σταθεράς Esson

Από το παραπάνω διάγραμμα παίρνουμε μια προσεγγιστική τιμή:

Για $S_{gap}=44186,44736VA$, το $C_0=198 \cdot 10^3 J/m^3$ και λ είναι ίσο με 1.5.

$$D_{IS} = \sqrt[3]{\frac{2p_i}{\pi \cdot \lambda} \cdot \frac{p_i}{f} \cdot \frac{S_{gap}}{C_0}} \Rightarrow D_{IS} = \sqrt[3]{\frac{2 \cdot 2}{\pi \cdot 1.5} \cdot \frac{2}{50} \cdot \frac{44186,44736}{198 \cdot 10^3}} = 0.196445m$$

$$= 19,6445cm$$

Στη συνέχεια υπολογίζουμε το μήκος πυρήνα, αφού πρώτα βρούμε το **πολικό βήμα**. Δηλαδή την απόσταση ανάμεσα σε δυο διαδοχικούς πόλους.

$$\tau = \frac{\pi \cdot D_{IS}}{2 \cdot p_i} = \frac{3.14 \cdot 0.196445m}{2 \cdot 2} = 0.1542m = 15,42cm$$

Άρα το **μήκος πυρήνα** είναι:

$$\lambda = \frac{L}{\tau} \rightarrow L = \lambda \cdot \tau = 1.5 \cdot 15,42cm \rightarrow L = 0,23079m = 23,1cm$$

Επίσης το **βήμα των αυλακιών** του στάτη, δηλαδή η απόσταση δυο διαδοχικών αυλακιών δίνεται από τον τύπο:

$$\tau_s = \frac{\tau}{3q} = \frac{0,1542}{3 \cdot 2} = 25,7 \cdot 10^{-3} m$$

Όπου q ο αριθμός των αυλακιών ανά πόλο και ανά φάση. Εδώ λαμβάνουμε q ίσο με 2.

Τώρα όσον αφορά την **εξωτερική διάμετρο** του κινητήρα ο υπολογισμός γίνεται εμπειρικά από την σχέση:

$$\frac{D_{IS}}{D_{out}} = 0.62 \rightarrow D_{out} = \frac{D_{IS}}{0.62} = \frac{0,196445}{0.62} = 31,68cm$$

Η παραπάνω σχέση προκύπτει από εμπειρικά δεδομένα που εμφανίζονται στον παρακάτω πίνακα:

$2p_1$	2	4	6	8
$\frac{D_{is}}{D_{out}}$	0.54 – 0.58	0.61 – 0.63	0.68 – 0.71	0.72 – 0.74

Πίνακας 2.1.β: Το K_D , λόγος $\frac{D_{IS}}{D_{out}}$ ο οποίος εξαρτάται από τον αριθμό των πόλων

Στη συγκεκριμένη περίπτωση επιλέγουμε μια ενδιάμεση τιμή για 4 πόλους.

2.2 Διάκενο μηχανής και τυλίγματα

Αυτό που μένει να υπολογίσουμε το **διάκενο** μεταξύ του δρομέα και του στάτη. Το διάκενο υπολογίζεται από την σχέση:

$$g = (0.1 + 0.02 \cdot \sqrt[3]{P_n}) \cdot 10^{-3} m \quad \text{for } 2p_1 = 2$$

$$g = (0.1 + 0.012 \cdot \sqrt[3]{P_n}) \cdot 10^{-3} m \quad \text{for } 2p_1 \geq 2$$

Για p_1 ίσο με 2, το διάκενο είναι:

$$g = (0.1 + 0.012 \cdot \sqrt[3]{P_n}) \cdot 10^{-3} m = (0.1 + 0.012 \cdot \sqrt[3]{37000}) \cdot 10^{-3} \\ = 0.49986 \times 10^{-3} m$$

Να σημειωθεί πως οι τιμές των διακένων είναι συγκεκριμένες.

Δηλαδή 0,35mm, 0,4mm, 0,45mm, 0,5mm κτλ. **Εμείς επιλέγουμε διάκενο 0,4mm.** Ένα πολύ μικρό διάκενο προκαλεί μαγνητικά πεδία με υψηλότερες αρμονικές και μεγαλύτερες απώλειες, ενώ ένα μεγάλο διάκενο μειώνει τον συντελεστή ισχύος και την απόδοση του κινητήρα.

Τυλίγματα Στάτη

Η μελέτη των τυλιγμάτων του στάτη ξεκινά με την επιλογή του αριθμού των αυλακιών μέσα στα οποία θα μούν τα τυλίγματα. Για να υπολογίσουμε τον συνολικό **αριθμό των αυλακιών** χρησιμοποιούμε τη σχέση:

$$N_s = 2 \cdot p_i \cdot q \cdot m$$

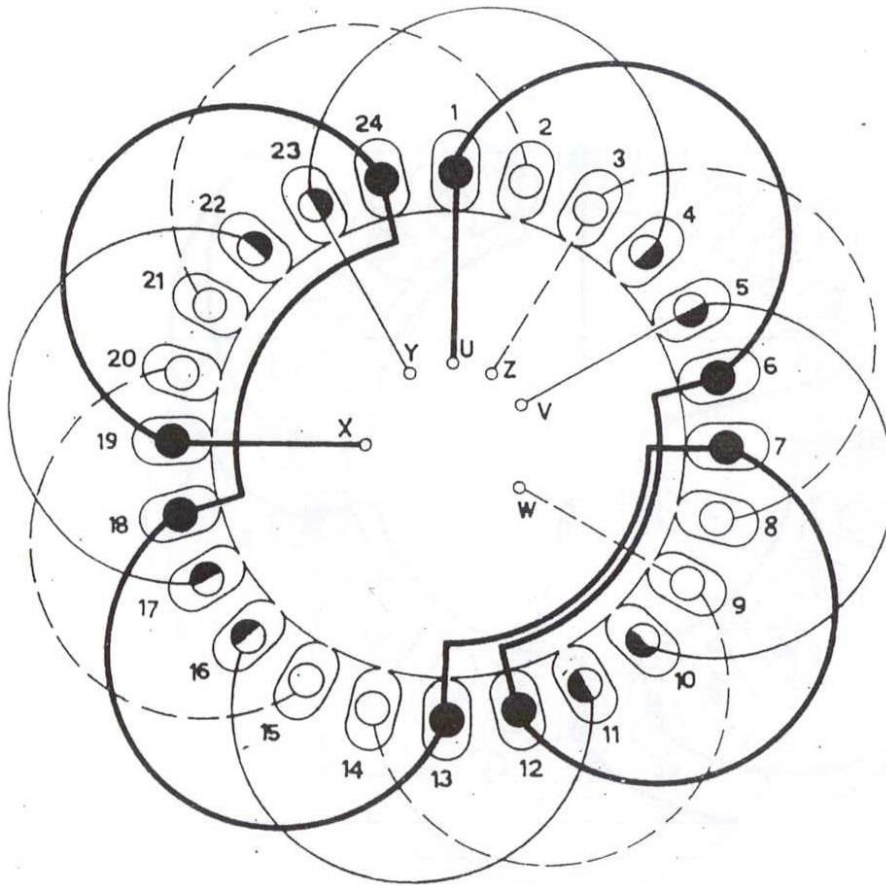
Όπου m ο αριθμός των φάσεων και q ίσο με 2 ο αριθμός των αυλακιών ανά πόλο ανά φάση:

$$N_s = 2 \cdot 2 \cdot 2 \cdot 3 = 24 \text{ αυλάκια}$$

Το πολικό βήμα του κινητήρα θα είναι:

$$y_\pi = \frac{24}{2 \cdot 2} = 6 \text{ αυλάκια}$$

Θα φτιάξουμε ένα τύλιγμα με μια στρώση (ένα μάτσο ανά αυλάκι), με τέσσερις πραγματικούς πόλους, το οποίο φαίνεται στην παρακάτω εικόνα:



Εικόνα 2.2.α: Μια στρώση (ένα μάτσο ανά αυλάκι), με τέσσερις πραγματικούς πόλους

Η απόσταση ανάμεσα σε δυο διαδοχικά αυλάκια εκφρασμένη σε ηλεκτρικές μοίρες είναι:

$$\alpha = \frac{2 \cdot p_i \cdot \pi}{N_s} = \frac{2 \cdot 2 \cdot \pi}{24} = \frac{\pi}{6} = 30 \text{ μοίρες}$$

Άρα ο συντελεστής ζώνης είναι:

$$K_r = \frac{\sin \frac{q \cdot a}{2}}{q \cdot \sin \frac{a}{2}} = \frac{\sin \frac{\pi}{6}}{2 \cdot \sin \frac{\pi}{12}} = 0.966$$

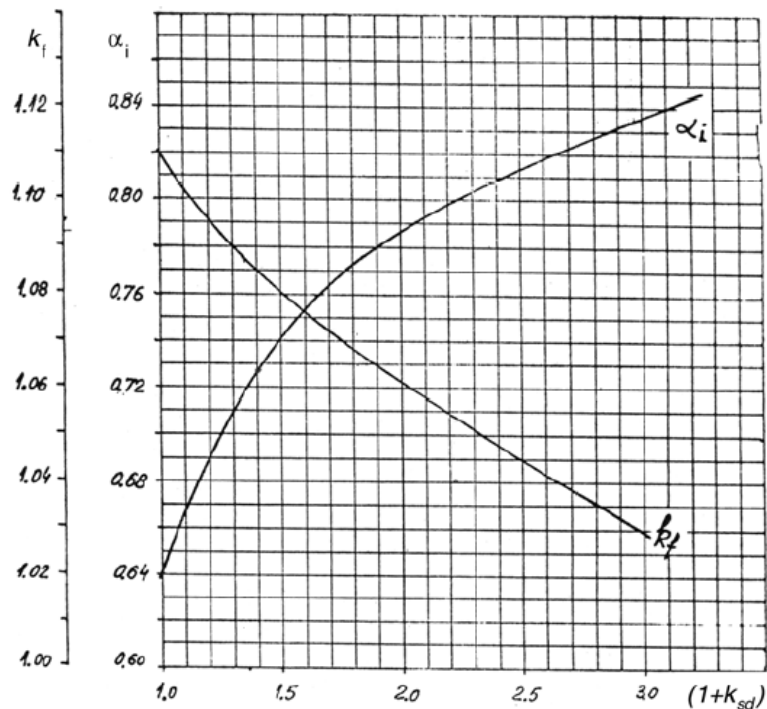
Επειδή όμως χρησιμοποιείται στρώμα ενός επιπέδου ο συντελεστής κουρδίσματος είναι ίσος με ένα ($K_y=1$). Ο **συντελεστής τυλίγματος** δίνεται από τον τύπο:

$$K_W = K_T = K_q K_y = 0.966 \cdot 1 = 0.966$$

Στη συνέχεια, υπολογίζεται ο **αριθμός σπειρών ανά φάση**. Ο υπολογισμός βασίζεται στη μαγνητική ροή που περνά από το στάτη στο δρομέα.

$$\varphi = a_i \cdot \tau \cdot L \cdot B_g$$

Όπου φ η μαγνητική ροή, τ το πολικό βήμα σε μέτρα, L το μήκος του πυρήνα του στάτη, B_g η πυκνότητα ροής στο διάκενο. Η σταθερά a_i ονομάζεται συντελεστής σχήματος πυκνότητας ροής (flux density shape) και εξαρτάται από τον μαγνητικό κορεσμό στις οδοντώσεις και προσδιορίζεται από την παρακάτω γραφική:



Εικόνα 2.2.β: Καμπύλη εύρεσης συντελεστή σχήματος πυκνότητας

Η σταθερά a_i εξαρτάται από τον συντελεστή $1+K_{sd}$ ο οποίος ονομάζεται συντελεστής κορεσμού οδοντώσεων (tooth saturation factor). Η σταθερά K_f ονομάζεται συντελεστής μορφής (form factor) και εξαρτάται από τα μαγνητικά χαρακτηριστικά του υλικού του πυρήνα.

Υποθέτοντας πως ο συντελεστής κορεσμού οδοντώσεων $1+K_{sd}$ είναι ίσος με 1,5 από την γραφική προκύπτει πως:

$$a_i \text{ (συντελεστής σχήματος πυκνότητας ροής)} = 0,74$$

$$K_f \text{ (συντελεστής μορφής)} = 1,08$$

Η πυκνότητα ροής διακένου B_g εξαρτάται από τον αριθμό των πόλων.

$$B_g = (0.5 - 0.75)T \quad \text{for } 2p_1 = 2$$

$$B_g = (0.65 - 0.78)T \quad \text{for } 2p_1 = 4$$

$$B_g = (0.7 - 0.82)T \quad \text{for } 2p_1 = 6$$

$$B_g = (0.75 - 0.85)T \quad \text{for } 2p_1 = 8$$

Σε αυτή την περίπτωση για $2p_1=4$ η πυκνότητα παίρνει τιμές από 0,65 έως 0,78 T. Επιλέγουμε μια ενδιάμεση τιμή ίση με 0,72 T.

Συνεπώς η **μαγνητική ροή** είναι ίση με:

$$\varphi = a_i \cdot \tau \cdot L \cdot B_g = 0,74 \cdot 0,1542 \cdot 0,23079 \cdot 0,72 = 18,961189 \cdot 10^{-3} Wb$$

Στη συνέχεια υπολογίζουμε των **αριθμό σπειρών ανά φάση** ο οποίος δίνεται από τη σχέση:

$$W_1 = \frac{K_E \cdot V_\pi}{4 \cdot K_f \cdot K_\tau \cdot f \cdot \varphi} = \frac{0,97 \cdot 400}{4 \cdot 1,08 \cdot 0,966 \cdot 50 \cdot 18,961189 \cdot 10^{-3}} = 98,067$$

$$= 98 \frac{\text{σπειρες}}{\text{φάση}}$$

Επαναυπολογίζουμε την **πυκνότητα ροής διακένου** για καλύτερη ακρίβεια:

$$B_g = 0,72 \cdot \frac{98,067}{98} = 0,7204 T$$

Στη συνέχεια υπολογίζουμε τον **αριθμό αγωγών ανά αυλάκι**:

$$n_s = \frac{a_1 \cdot W_1}{p_1 \cdot q} = \frac{1 \cdot 98}{2 \cdot 2} = 24,51 \approx 25 \frac{\text{αγωγοί}}{\text{αυλάκι}}$$

Το a_1 είναι ο αριθμός των **παράλληλων αγωγών**. Στη συνέχεια θα πρέπει να υπολογιστεί η διατομή των αγωγών. Για να γίνει αυτό πρέπει να προσδιοριστεί το ονομαστικό ρεύμα του κινητήρα:

$$I_{ov} = \frac{P_n}{\sqrt{3} \cdot V_\pi \cdot \cos\varphi \cdot \eta} = \frac{37000W}{\sqrt{3} \cdot 400 \cdot 0,88 \cdot 0,923} = 65,79A$$

Για να υπολογιστεί όμως η διατομή των αγωγών μας είναι απαραίτητη και η **πυκνότητα ρεύματος**.

$$J_{\cos} = (4 \dots 7) \text{ A/mm}^2 \text{ for } 2p_1 = 2,4 ,$$

$$J_{\cos} = (5 \dots 8) \text{ A/mm}^2 \text{ for } 2p_1 = 6,8$$

Για $2p_1 = 4$ δηλαδή κινητήρα τεσσάρων πόλων επιλέγουμε

$$J_{\cos} (4 \dots 7) \text{ A/mm}^2$$

Όσο μεγαλώνει η πυκνότητα του ρεύματος μειώνεται η διατομή των αγωγών αλλά μεγαλώνουν οι απώλειες χαλκού. Επιλέγουμε μια πυκνότητα ρεύματος ίση με $5,5 \text{ A/mm}^2$ για να μην έχουμε μεγάλες απώλειες και υπολογίζουμε την διατομή:

$$A_{co} = \frac{I_{ov}}{J_{\cos} \cdot a_1} = \frac{65,79}{5,5 \cdot 1} = 11,9618 \text{ mm}^2$$

Η **διάμετρος του αγωγού** θα είναι ίση με:

$$d_{co} = \sqrt{\frac{4 \cdot A_{co}}{\pi \cdot \alpha_1}} = 3,903583 \text{ mm}$$

Σύμφωνα όμως με τους κανονισμούς αν η διάμετρος είναι μεγαλύτερη από 1,3mm τότε για κινητήρες μικρής ισχύος επιλέγουμε να χρησιμοποιήσουμε παράλληλους αγωγούς μικρότερης διαμέτρου έως ότου ικανοποιηθεί η συνθήκη.

Έτσι λοιπόν έπειτα από δοκιμές καταλήξαμε να χρησιμοποιήσουμε 9 παράλληλους κλάδους διότι έτσι η διάμετρος του αγωγού θα είναι μικρότερη από 1,3mm.

$$d_{co} = \sqrt{\frac{4 \cdot A_{co}}{\pi \cdot \alpha_p}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 11,9618}{\pi \cdot 9}} = 1.30 \text{ mm}$$

Rated diameter [mm]	Insulated diameter [mm]
0.3	0.327
0.32	0.348
0.33	0.359
0.35	0.3795
0.38	0.4105
0.40	0.4315
0.42	0.4625
0.45	0.4835
0.48	0.515
0.50	0.536
0.53	0.567
0.55	0.5875
0.58	0.6185
0.60	0.639
0.63	0.6705
0.65	0.691
0.67	0.7145
0.70	0.742
0.71	0.7525
0.75	0.749
0.80	0.8455
0.85	0.897
0.90	0.948
0.95	1.0
1.0	1.051
1.05	1.102
1.10	1.153
1.12	1.173
1.15	1.2035
1.18	1.2345
1.20	1.305
1.25	1.305
1.30	1.356
1.32	1.3765
1.35	1.407
1.40	1.4575
1.45	1.508
1.5	1.559

Πίνακας 2.2: Τυποποιημένες διατομές

2.3 Διαστασιολόγηση αυλακιών στο στάτη

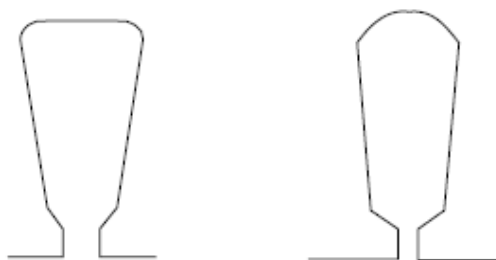
Από τη στιγμή που γνωρίζουμε την διατομή των αγωγών και τον αριθμό τους μπορούμε να υπολογίσουμε την απαιτούμενη διατομή του στάτη από τη σχέση:

$$A_{su} = \frac{\pi \cdot d_{cu}^2 \cdot a_p \cdot n_s}{4 \cdot K_{fill}}$$

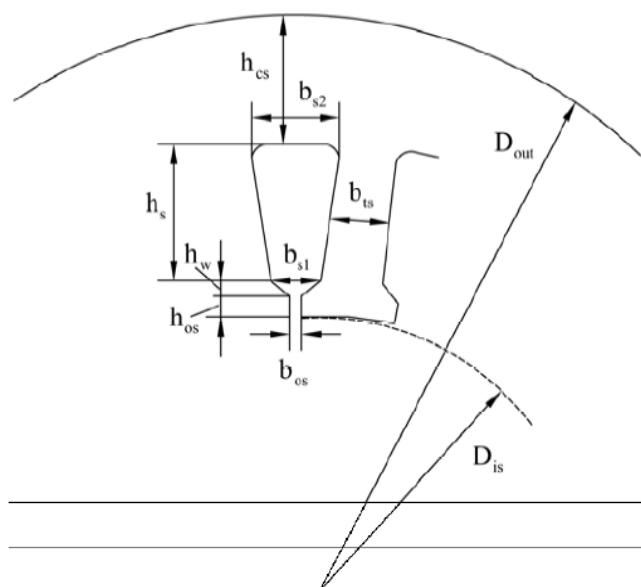
Όπου K_{fill} είναι μια σταθερά (fill factor), η οποία εξαρτάται από το πάχος της μόνωσης που χρησιμοποιούμε, και παίρνει τιμές για κινητήρες άνω των 10kW από 0,4 έως 0,44. Επιλέγουμε μια ενδιάμεση τιμή 0,42.

$$A_{su} = \frac{\pi \cdot d_{cu}^2 \cdot a_i \cdot n_s}{4 \cdot K_{fill}} = \frac{\pi \cdot 1.301^2 \cdot 9 \cdot 25}{4 \cdot 0.42} = 711,8 \text{ mm}^2$$

Η μορφή των αυλακιών του στάτη έχει συνήθως μία από τις παρακάτω μορφές:



Εικόνα 2.3.α: Συνήθειες μορφές αυλακιών του στάτη



Εικόνα 2.3.β: Αναλυτικές διαστάσεις στάτη που υπολογίζονται

Κάποιες από αυτές τις διαστάσεις υπολογίζονται εμπειρικά. Πιο συγκεκριμένα:

$b_{os} = 2-3 \text{ mm}$, επιλέγουμε 2,5 mm

$h_{os} = 0,5-1 \text{ mm}$, επιλέγουμε 0,7 mm

$h_w = 1-4 \text{ mm}$, επιλέγουμε 1 mm

Εάν υποθέσουμε πως όλη η μαγνητική ροή περνά μέσα από το <<δόντι>> του στάτη, τότε ισχύει η σχέση:

$$B_g \cdot \tau_s \cdot L = B_{ts} \cdot b_{ts} \cdot L \cdot K_{Fe}$$

μαγνητική ροή στο διάκενο και δεξιά η μαγνητική ροή στο <<δόντι>> του αυλακιού. Ο συντελεστής $K_{Fe} = 0,96$ είναι ένας συντελεστής που λαμβάνει υπόψη τα αποτελέσματα της μόνωσης μεταξύ των μεταλλικών ελασμάτων από τα οποία αποτελείται ο στάτης και B_{ts} άτη μαγνητική επαγωγή στο στάτη η οποία παίρνει τιμές μεταξύ 1,5T έως 1,65T. Η μαγνητική επαγωγή είναι φυσικά μεγαλύτερη σε σχέση με την μαγνητική επαγωγή του διακένου λόγω της παρουσίας του σιδηρομαγνητικού υλικού.

Το b_{ts} είναι το πλάτος δοντιών του στάτη.

Οπότε για $B_{ts} = 1,5T$ το b_{ts} γίνεται:

Με:

$$\tau_s = \frac{\tau}{3q} = \frac{0,1542}{3 \cdot 2} = 25,7 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

$$b_{ts} = \frac{B_g \cdot \tau_s}{B_{ts} \cdot K_{Fe}} = \frac{0,7204 \cdot 25,7 \cdot 10^{-3}}{1,5 \cdot 0,96} = 12,857139 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι το πλάτος του δοντιού ΔΕΝ θα πρέπει να είναι μικρότερο από 3,5mm για κατασκευαστικούς λόγους.

Από την γεωμετρία του αυλακιού προκύπτει ότι:

$$\begin{aligned} b_{s1} &= \frac{\pi \cdot (D_{is} + 2h_{os} + 2h_w)}{N_s} - b_{ts} \\ &= \frac{\pi \cdot (196 + 2 \cdot 0,7 + 2 \cdot 1) \cdot 10^{-3}}{24} - 12,857139 \cdot 10^{-3} \end{aligned}$$

$$b_{s1} = 13,231028 \cdot 10^{-3} \text{ m} = 13.23 \text{ mm}$$

Το κάτω μέρος του δοντιού του στάτη.

Επίσης:

$$b_{s2} = \sqrt{4 \cdot A_{su} \cdot \tan\left(\frac{\pi}{N_s}\right) + b_{s1}^2} = \sqrt{4 \cdot 711,8 \cdot \tan\left(\frac{\pi}{24}\right) + 13,231028^2} \text{ mm}$$

$$= 19,36115243 \text{ mm}$$

Το πάνω μέρος του δοντιού.

Σύμφωνα με την εξίσωση:

$$A_{su} = h_s \cdot \frac{(b_{s1} + b_{s2})}{2}$$

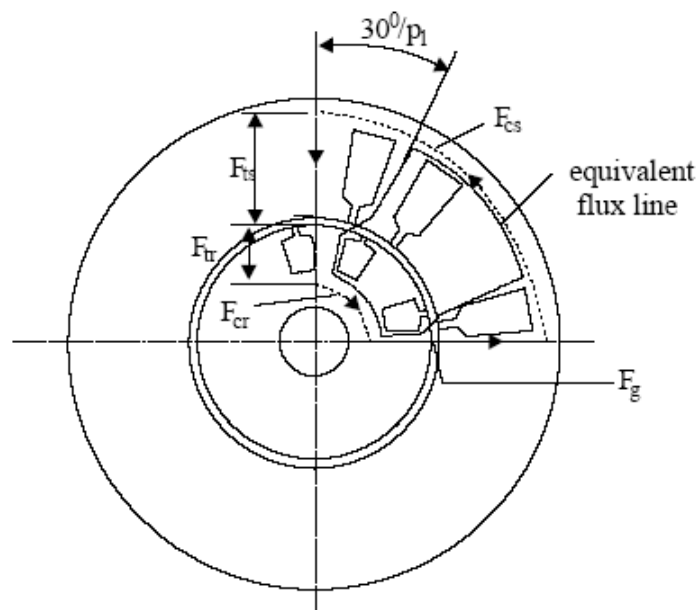
Λύνοντας ως προς h_s βρίσκουμε το ύψος του δοντιού:

$$h_s = \frac{2 \cdot A_{su}}{(b_{s1} + b_{s2})} \rightarrow h_s = \frac{2 \cdot 711,8}{(13,231028 + 19,36115243)} = 43,68 \text{ mm}$$

Στη συνέχεια θα υπολογίσουμε το συντελεστή $1 + K_{st}$ (συντελεστής κορεσμού δοντιού), στον οποίο αυθαίρετα είχαμε δώσει μια τιμή ίση με 1,5.

$$1 + K_{st} = 1 + \frac{F_{mts} + F_{mtr}}{F_{mg}}$$

Όπου F_{mts} , F_{mtr} και F_{mg} είναι η μαγνητιγερτική δύναμη στον στάτη, στον δρομέα και στο διάκενο αντίστοιχα, όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα:



Η μαγνητιγερτική δύναμη στο διάκενο ανάμεσα στο στάτη και το δρομέα δίνονται από τη σχέση:

$$F_{mg} = K_C \cdot g \cdot \frac{B_g}{\mu_0}$$

Όπου μ_0 η μαγνητική διαπερατότητα στο κενό, ίση με $1.256 \cdot 10^{-6}$

και K_C ο συντελεστής Carter (Carter coefficient). Θα θεωρηθεί ίσος με 1,2. Τότε η μαγνητιγερτική δύναμη του διακένου θα είναι:

$$F_{mg} = K_C \cdot g \cdot \frac{B_g}{\mu_0} = 1.2 \cdot 0.4 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{0.7204}{1,256 \cdot 10^{-6}} = 275,3121 \text{ At}$$

Η μαγνητιγερτική δύναμη στο στάτη F_{mts} δίνεται από τη σχέση:

$$F_{mts} = H_{ts}(h_s + h_{os} + h_w)$$

όπου H_{ts} είναι η ένταση του μαγνητικού πεδίου στο στάτη. Από τον παρακάτω πίνακα παίρνουμε τυποποιημένες τιμές της καμπύλης μαγνήτισης για σιδηρομαγνητικά υλικά που χρησιμοποιούνται στις ηλεκτρικές μηχανές:

B[T]	H[A/m]	B[T]	H[A/m]
0.05	22.8	1.05	237
0.1	35	1.1	273
0.15	45	1.15	310
0.2	49	1.2	356
0.25	57	1.25	417
0.3	65	1.3	482
0.35	70	1.35	585
0.4	76	1.4	760
0.45	83	1.45	1050
0.5	90	1.5	1340
0.55	98	1.55	1760
0.6	106	1.6	2460
0.65	115	1.65	3460
0.7	124	1.7	4800
0.75	135	1.75	6160
0.8	148	1.8	8270
0.85	162	1.85	11170
0.9	177	1.9	15220
0.95	198	1.95	22000
1.0	220	2.0	34000

Πίνακας 2.3.α: Τιμές της έντασης του μαγνητικού πεδίου σε σχέση με την μαγνητική πυκνότητα για δρομέα με ελάσματα.

Για $B_{ts}=1.5T$ προκύπτει $H_{ts}=1340 \text{ At}$

Άρα:

$$F_{mts} = H_{ts}(h_s + h_{os} + h_w) = 1340 \cdot (43,67918 + 0.5 + 1) \cdot 10^{-3} = 60,80 \text{ At}$$

Η μαγνητιγερτική δύναμη στον δρομέα υπολογίζεται από τη σχέση:

$$F_{mtr} = K_{st} \cdot F_{mg} - F_{mts} = 0,5 \cdot 275,3121 \text{ At} - 60,80 \text{ At} = 76,848 \text{ At}$$

Η διαφορά του F_{mts} και F_{mtr} είναι πολύ μικρή άρα η τιμή που θεωρήθηκε για το K_{st} είναι σωστή. Εάν το $F_{mtr} \ll F_{mts}$ τότε θα πρέπει να θεωρήσουμε μικρότερη μαγνητική επαγωγή στο διάκενο και να επιστρέψουμε στον υπολογισμό της μαγνητικής ροής Φ .

Στη συνέχεια θα υπολογίσουμε τη μαγνητική πυκνότητα πίσω από τον πυρήνα (back core flux density). Υπολογίζεται από την σχέση:

$$B_{cs} = \frac{\Phi}{2 \cdot L \cdot h_{cs}}$$

Με h_{cs} (απόσταση από άνω μέρος δοντιού μέχρι εξωτερικό πυρήνα):

$$\begin{aligned} h_{cs} &= \frac{D_{out} - (D_{IS} + 2 \cdot (h_{os} + h_w + h_s))}{2} \\ &= \frac{316,8 - (196,445 + 2 \cdot (0.7 + 1 + 43,67918))}{2} \\ &\rightarrow h_{cs} = \frac{316,8 - 287,2033}{2} \rightarrow h_{cs} = 10,05566 \text{ mm} \end{aligned}$$

Συνεπώς:

$$B_{cs} = \frac{\Phi}{2 \cdot L \cdot h_{cs}} = \frac{18,961189 \cdot 10^{-3} \text{ Wb}}{2 \cdot 0.23079 \text{ m} \cdot 10,05566 \cdot 10^{-3} \text{ m}} = 4,085 \text{ T}$$

Όμως η τιμή της μαγνητικής πυκνότητας πίσω από τον πυρήνα είναι αρκετά μεγάλη. Οι επιτρεπτές τιμές είναι από 1,4T έως 1,7T. Για την επίλυση του προβλήματος αυτού παρουσιάζονται τρεις δυνατότητες:

1. Να αυξηθεί το μήκος του πίσω πυρήνα, όπου με την σειρά της θα αυξηθεί η εξωτερική διάμετρος του κινητήρα.
2. Να εισαχθεί μια μεγαλύτερη τιμή για τον συντελεστή λ (stack aspect ratio) κάτι που θα οδηγήσει σε μικρότερη εσωτερική διάμετρο του στάτη άρα και μικρότερο δρομέα
3. Να μειωθεί περισσότερο το h_s δηλαδή να μειωθεί η διατομή των αυλακιών, κάτι που δεν μπορεί να γίνει στην περίπτωση αυτή.

Επιλέγουμε την πρώτη περίπτωση. Για να μειωθεί η μαγνητική πυκνότητα στον πυρήνα του στάτη σε 1,5T τότε το h_{cs} πρέπει να γίνει:

$$h_{cs} = \frac{\Phi}{2 \cdot L \cdot B_{cs}} = \frac{18,961189 \cdot 10^{-3} Wb}{2 \cdot 0,23079m \cdot 1.5T} = 27,385919 \text{ mm}$$

Άρα η εξωτερική διάμετρος πρέπει να αυξηθεί και θα γίνει:

$$D_{out} = 316,8 + (2 \cdot (27,385919 - 10,05566)) = 351,46 \text{ mm}$$

B Μέρος-Δρομέας

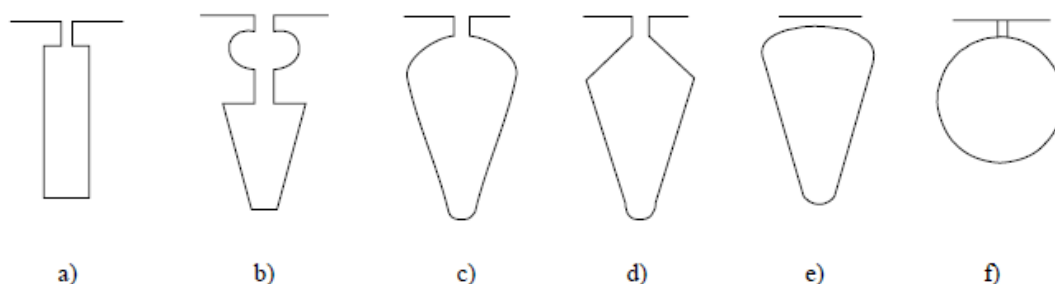
2.4 Υπολογισμός στοιχείων κλωβού

Αρχικά θα γίνει η επιλογή του πλήθους των αυλακιών του δρομέα. Ο αριθμός των αυλακιών του δρομέα σχετίζεται με τον αριθμό των μαγνητικών πόλων και με το πλήθος των αυλακιών του στάτη. Η επιλογή γίνεται με βάση τον παρακάτω πίνακα:

$2p_1$	N_s	N_r – skewed rotor slots
2	24	18, 20, 22, 28, 30, 33,34
	36	25,27,28,29,30,43
	48	30,37,39,40,41
4	24	16,18,20,30,33,34,35,36
	36	28,30,32,34,45,48
	48	36,40,44,57,59
	72	42,48,54,56,60,61,62,68,76
6	36	20,22,28,44,47,49
	54	34,36,38,40,44,46
	72	44,46,50,60,61,62,82,83
8	48	26,30,34,35,36,38,58
	72	42,46,48,50,52,56,60
12	72	69,75,80
	90	86,87,93,94

Πίνακας 2.4: Πλήθος αυλακιών δρομέα σε σχέση με αυτά στο στάτη

Υπάρχουν επίσης και τυποποιημένες μορφές όσον αφορά τους αγωγούς του δρομέα:



Εικόνα 2.4.α: Τύποι αυλακιών δρομέα

Εμείς επιλέγουμε για $2p_i=4$ και $N_s=24$ (αυλάκια στάτη), 20 αυλάκια στο δρομέα και τη μορφή C. **Με την αύξηση του αριθμού των αυλακιών του δρομέα θα μειωθεί η αντίδραση του δρομέα η οποία εν συνεχεία θα οδηγήσει σε αύξηση του ρεύματος του δρομέα.**

Επίσης επηρεάζονται οι διαστάσεις των αυλακιών στο δρομέα με αποτέλεσμα την μείωση της μαγνητιγερτικής δύναμης αυτού.

Εφόσον επιλέχθηκε το σχήμα και ο αριθμός των αυλακιών στο δρομέα στη συνέχεια θα υπολογιστεί το ονομαστικό ρεύμα σε **μια μπάρα** του δρομέα με βάση τον τύπο:

$$I_b = \frac{2 \cdot m \cdot W_i \cdot K_w \cdot I_{ov} \cdot K_I}{N_r}$$

$$K_I = 0.8 \cdot \cos\varphi + 0.2 = 0.8 \cdot 0.88 + 0.2 = 0.904$$

Άρα το ρεύμα μπάρας είναι:

$$I_b = \frac{2 \cdot m \cdot W_i \cdot K_w \cdot I_{ov} \cdot K_I}{N_r} = \frac{2 \cdot 3 \cdot 98 \cdot 0.966 \cdot 65.79 \cdot 0.904}{20} = 1689.089 \text{ A}$$

Για κινητήρες με μεγάλη απόδοση θα πρέπει η πυκνότητα ρεύματος(j_b) στον αγωγό(μπάρα) του δρομέα να είναι ίση με $3,42\text{A/mm}^2$ Η διάμετρος της μπάρας με αυτή την πυκνότητα θα είναι:

$$A_b = \frac{1689.089}{3.42 \text{ A/mm}^2} = 493.88 \text{ mm}^2$$

Το ρεύμα δακτυλίου βραχυκύκλωσης θα είναι:

$$I_{er} = \frac{I_b}{2 \cdot \sin \frac{\pi \cdot p_i}{N_r}} = \frac{1689.089}{2 \cdot \sin \frac{\pi \cdot 2}{20}} = 2734,34 \text{ A}$$

Η πυκνότητα του ρεύματος δακτυλίου είναι $J_{er} = (0.75 \text{ εως } 0.8)J_b$

$$J_{er} = 0.775 \cdot J_b = 0.775 \cdot 3.42 = 2.6505 \text{ A/mm}^2$$

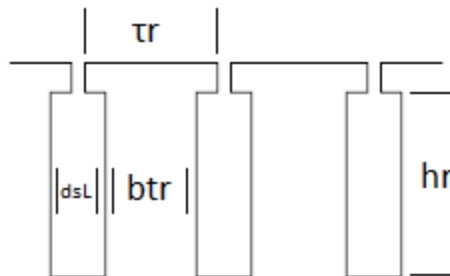
Συνεπώς η διατομή του δακτυλίου βραχυκύκλωσης υπολογίζεται από τη σχέση:

$$A_{er} = \frac{I_{er}}{J_{er}} = \frac{2734.34}{2.65 \text{ A/mm}^2} = 1031.63 \text{ mm}^2$$

2.5 Διαστασιολόγηση αγωγών και άξονα δρομέα

Θα υπολογίσουμε αρχικά την απόσταση ανάμεσα σε δυο αγωγούς του δρομέα (rotor slot pitch).

$$\tau_r = \frac{\pi \cdot (D_{is} - 2g)}{N_r} = \frac{\pi \cdot (196.446 - 2 \cdot 0.4)}{20} = 30,716422 \text{ mm}$$



Εικόνα 2.5.α: Βασικές διαστάσεις αγωγών δρομέα

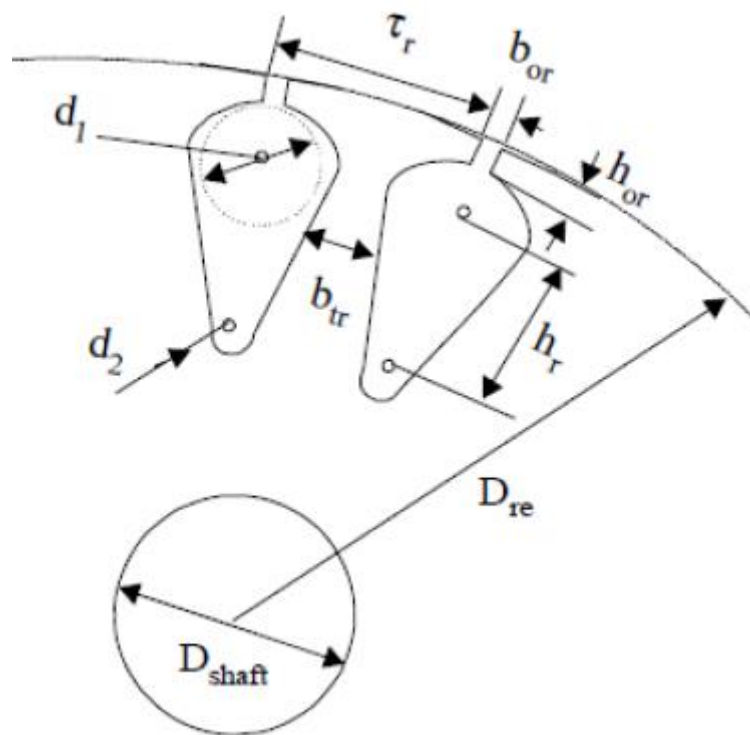
Αυτές είναι οι βασικές διαστάσεις των αγωγών του δρομέα με τη διαφορά ότι στην παραπάνω εικόνα οι αγωγοί του δρομέα είναι τύπου A, ενώ εμείς έχουμε διαλέξει τύπου C.

Θεωρώντας ότι η μαγνητική πυκνότητα στο <<δόντι>> του δρομέα είναι ίση με $B_{tr} = 1.5T$ υπολογίζουμε το b_{tr} από τη σχέση:

$$b_{tr} = \frac{B_g \cdot \tau_r}{K_{fe} \cdot B_{tr}} = \frac{0.7204T \cdot 30,716422 \cdot 10^{-3}}{0.96 \cdot 1.5T} = 15,366743 \text{ mm}$$

Εξαιτίας του μικρού μεγέθους διακένου του κινητήρα η διάμετρος δρομέα θα θεωρηθεί ίση με την εσωτερική διάμετρο του στάτη. Οπότε το $D_{re} = D_{is} = 0.196445 \text{ m}$.

Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται αναλυτικά η μορφή του δρομέα και η ονομασία των διαστάσεων του.



Εικόνα 2.5.β: Γενική μορφή δρομέα

Η διάμετρος d_1 υπολογίζεται από τη σχέση:

$$d_1 = \frac{\pi * (D_{re} - 2 * h_{or}) - N_r * b_{tr}}{\pi + N_r}$$

$$= \frac{3.14 * (196.445 - 2 * 0.5) - 20 * 15.366743}{3.14 + 20}$$

$$= 13.23951772 \text{ mm}$$

Για να υπολογίσουμε ολοκληρωτικά τη γεωμετρία χρησιμοποιούμε τις εξισώσεις:

$$A_b = \frac{\pi}{8} \cdot (d_1^2 + d_2^2) + \frac{(d_1 + d_2) \cdot h_r}{2}$$

$$d_1 - d_2 = 2 \cdot h_r \cdot \tan \frac{\pi}{N_r}$$

Από τις παραπάνω εξισώσεις φθάναμε σε μαθηματικό αδύνατο. Οπότε για να μοιάζει η μορφή του δρομέα σε τύπου C με βάση το d_1 θέσαμε $d_2=4 \text{ mm}$

Συνεπώς:

$$h_r = \frac{d1 - d2}{2 * \tan\left(\frac{\pi}{Nr}\right)} = \frac{13,2395\text{mm} - 4\text{mm}}{0.3166} = 29.183568 \text{ mm}$$

Με πιο βαθιά αυλάκια δρομέα, θα αυξάνονταν η αντίσταση του δρομέα με αποτέλεσμα να αυξάνονταν η ροπή εκκίνησης και η ονομαστική ολίσθηση του κινητήρα.

Γνωρίζοντας τις διαστάσεις του δρομέα και των αγωγών του θα υπολογίσουμε την μαγνητιγερτική δύναμη στο <<δόντι>> του δρομέα. Εάν θέλουμε η μαγνητική πυκνότητα να είναι ίση με 1.5T τότε από τον ΠΙΝΑΚΑ1 η ένταση του μαγνητικού πεδίου θα είναι 1340 A/m. Συνεπώς η μαγνητιγερτική δύναμη στο δρομέα είναι:

$$F_{mtr} = H_{tr} \cdot \left(h_r + h_{or} + \frac{d1 + d2}{2} \right) \\ = 1340 \left(29,183568 + 0.5 + \frac{13.23951772 + 4}{2} \right) = 51.32 \text{ At}$$

Η νέα τιμή που υπολογίσαμε είναι κοντά στη μαγνητιγερτική δύναμη του στάτη F_{mts} όπως πρέπει να είναι, κάτι που κάνει τη σχεδίαση μέχρι τώρα αποδεκτή. Μένει ο υπολογισμός της απόστασης του δρομέα πίσω από τα αυλάκια. Η μαγνητική πυκνότητα στο χώρο αυτό του δρομέα θα πρέπει να είναι μεταξύ 1,4T και 1,7T. Επιλέγοντας τιμή ίση με 1,5T το ύψος του πίσω πυρήνα στο δρομέα είναι:

$$h_{cr} = \frac{\Phi}{2 \cdot L \cdot B_{cr}} = \frac{18,961189 \cdot 10^{-3} \text{Wb}}{2 \cdot 0.23079 \cdot 1.5} = 27,385 \text{ mm}$$

Άξονας

Η μέγιστη δυνατή διάμετρος που μπορεί να έχει ο άξονας του κινητήρα υπολογίζεται από τον εξής τύπο:

$$D_{shaft} \leq D_{is} - 2 \cdot (h_r + h_{or} + h_{cr}) - 2 \cdot g \\ \Rightarrow D_{shaft} \leq 196,445 - 2 \cdot (29,183568\text{mm} + 0.5 + 27,385) - 2 \cdot 0.4 = 81,507864 \text{ mm}$$

Με την αύξηση της εσωτερικής διαμέτρου του κινητήρα θα προκαλούνταν αύξηση του D_{shaft} , αλλά και μείωση στην ροπή εκκίνησης και ανατροπής. Μια άλλη λύση αποτελεί η μείωση της διατομής στα αυλάκια του δρομέα για να μειωθεί το ύψος τους. Αυτό καθίσταται δυνατό με την αύξηση του αριθμού των αυλακιών ή με την απευθείας μείωση της διατομής αυλακιών δρομέα (Ab).

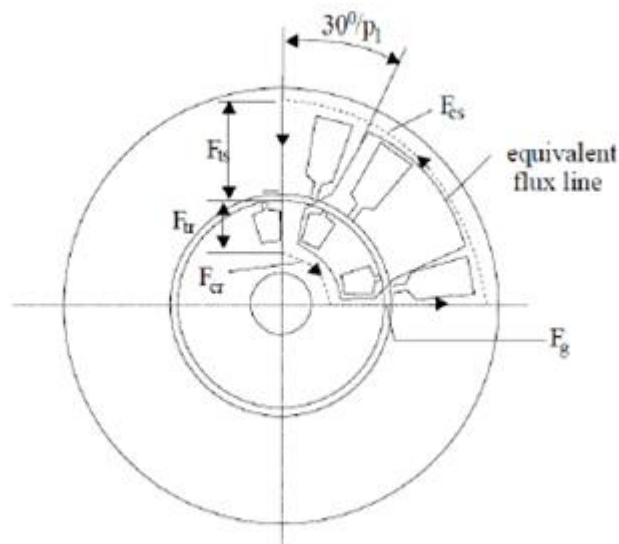
Η ροπή στον άξονα αντιστοιχεί στην ονομαστική ροπή του κινητήρα, για ονομαστική ολίσθηση 0,01359 , η ονομαστική ροπή είναι:

$$T = \frac{P_n}{2 \cdot \pi \cdot \frac{f_1}{p_1} \cdot (1 - s)} = \frac{37000W}{2 \cdot \pi \cdot \frac{50}{2} \cdot (1 - 0.01359)} = 238,9156 \text{ Nm}$$

2.6 Ρεύμα μαγνήτισης

Έχοντας καθορίσει τις διαστάσεις της μηχανής και γνωρίζοντας την απαιτούμενη μαγνητιγερτική δύναμη, ώστε να έχουμε την μαγνητική επαγωγή που θέλουμε στα διάφορα σημεία του κινητήρα, θα υπολογίσουμε το ρεύμα μαγνήτισης που απαιτείται για τη δημιουργία των μαγνητικών πεδίων.

Αρχικά θα υπολογίσουμε την ολική μαγνητιγερτική δύναμη που απαιτείται, η οποία είναι το άθροισμα των επιμέρους μαγνητιγερτικών δυνάμεων:



Εικόνα 2.6.α: Μαγνητιγερτικές δυνάμεις στον κινητήρα

$$F_{1m} = 2 \cdot (K_C \cdot g \cdot \frac{B_g}{\mu_0} + F_{mts} + F_{mtr} + F_{mcs} + F_{mcr})$$

Όπου K_c ο συντελεστής Carter ο οποίος μέχρι τώρα είχε θεωρηθεί ίσος με 1,2. Πρόκειται για τον λόγο της μέγιστης πυκνότητας διακένου με την παρούσα. Η μέγιστη πυκνότητα διακένου λαμβάνεται όταν υπάρχει απουσία αυλακιών και αρμονικών.

$$K_c = K_{c1} \cdot K_{c2}$$

Όπου:

$$K_{c1} = \frac{\tau_s}{\tau_s - \gamma_1}$$

$$K_{c2} = \frac{\tau_r}{\tau_r - \gamma_2}$$

Και:

$$\gamma_1 = \frac{b_{os}^2}{5 \cdot g + b_{os}} = \frac{2.5^2}{5 \cdot 0.4 + 2.5} = 1.39$$

$$\gamma_2 = \frac{b_{or}^2}{5 \cdot g + b_{or}} = \frac{1.5^2}{5 \cdot 0.4 + 1.5} = 0.64$$

Άρα:

$$K_{c1} = \frac{\tau_s}{\tau_s - \gamma_1} = \frac{25,7}{25,7 - 1.39} = 1.057$$

$$K_{c2} = \frac{\tau_r}{\tau_r - \gamma_2} = \frac{30,7164}{30,7164 - 0,64} = 1,0213$$

$$K_c = K_{c1} \cdot K_{c2} = 1.057 \cdot 1.0213 = 1,021$$

Η τιμή του K_c που υπολογίστηκε είναι σχετικά κοντά στην θεωρούμενη τιμή που είχε τεθεί αρχικά ($K_c=1.2$). Άρα οι υπολογισμοί που έχουν γίνει θεωρούνται σωστοί.

Η μαγνητιγερτική στον πίσω πυρήνα του στάτη και του δρομέα υπολογίζεται:

Στάτης:

$$F_{mcs} = C_{cs} \frac{\pi \cdot (D_{out} - h_{cs})}{2 \cdot p_i} \cdot H_{cs}$$

με:

$$C_{CS} = 0.88 \cdot e^{-0.4 \cdot B_{cs}^2}$$

Δρομέας:

$$F_{mcr} = C_{cr} \frac{\pi \cdot (D_{shaft} + h_{cr})}{2 \cdot p_i} \cdot H_{cr}$$

με:

$$C_{Cr} = 0.88 \cdot e^{-0.4 \cdot B_{Cr}^2}$$

όπου $C_{cs,r}$ ένας συντελεστής που ορίζει το μέσο μήκος ροής στον πίσω πυρήνα. Για $B_{cs}=1,5T$ και $B_{cr}=1,7$ η ένταση του μαγνητικού πεδίου είναι ίση με $H_{cs}=1340A/m$ και $H_{cr}=4800A/m$.

Άρα:

$$C_{CS} = 0.88 \cdot e^{-0.4 \cdot B_{cs}^2} = 0.88 \cdot e^{-0.4 \cdot 1.5^2} = 0,35$$

$$C_{Cr} = 0.88 \cdot e^{-0.4 \cdot B_{cr}^2} = 0.88 \cdot e^{-0.4 \cdot 1.7^2} = 0,3147$$

$$F_{mcs} = C_{cs} \frac{\pi \cdot (D_{Out} - h_{cs})}{2 \cdot p_i} \cdot H_{cs} = 0.35 \frac{\pi \cdot (351,46 - 27,3859)}{4} \cdot 1340 = 119,3127 \text{ Aturns}$$

$$F_{mcr} = C_{cr} \frac{\pi \cdot (D_{shaft} + h_{cr})}{2 \cdot p_i} \cdot H_{cr} = 0.3147 \frac{\pi \cdot (81,507 + 27,385)}{4} \cdot 4800 = 129,1239 \text{ Aturns}$$

Δηλαδή η συνολική μαγνητιγερτική mmf του κινητήρα είναι:

$$F_{1m} = 2 \cdot (F_{mg} + F_{mts} + F_{mtr} + F_{mcs} + F_{mcr}) = 2(275.3121 + 60.86 + 51.32 + 119.3127 + 129.1239) = 1271.85 \text{ Aturns}$$

Ο συνολικός συντελεστής κορεσμού είναι:

$$K_s = \frac{F_{1m}}{2 \cdot F_{mg}} - 1 = \frac{1271,85}{2 \cdot 275,3121} - 1 = 1,309$$

Σε ήπιο κορεσμό ο συνολικός συντελεστής κορεσμού παίρνει τιμές από 1,3 έως 1,6. Εφόσον υπολογίστηκε η συνολική mmf μπορούμε να

υπολογίσουμε το ρεύμα μαγνήτισης. Το ρεύμα μαγνήτισης δίνεται από τον τύπο:

$$I_{\mu} = \frac{\pi \cdot p_1 \cdot \frac{F_{1m}}{2}}{3 \cdot \sqrt{2} \cdot W_i \cdot K_w} = \frac{3.14 \cdot 2 \cdot \frac{1271,85}{2}}{3 \cdot \sqrt{2} \cdot 98 \cdot 0.966} = 10 \text{ A}$$

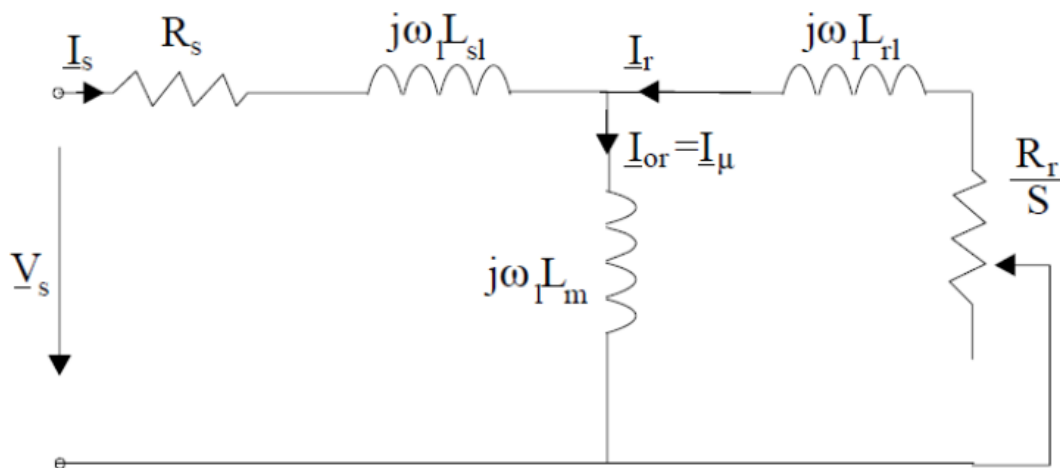
Το ρεύμα μαγνήτισης εξαρτάται από την μαγνητική αντίσταση του διακένου. Όσο μεγαλύτερη είναι αυτή τόσο μεγαλύτερο θα είναι το ρεύμα μαγνήτισης, για την παραγωγή δεδομένης μαγνητικής ροής.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

Υπολογισμός ισοδύναμων στοιχείων του κυκλώματος

3.1 Υπολογισμός αντιστάσεων στάτη-δρομέα

Το ισοδύναμο κύκλωμα ενός επαγωγικού κινητήρα είναι το παρακάτω:



Εικόνα 3.1.α: Αντιστάσεις και επαγωγικές αντιδράσεις επαγωγικού κινητήρα στο ισοδύναμο κύκλωμα

Στο παραπάνω ισοδύναμο κύκλωμα δεν εμφανίζεται η ωμική αντίσταση R_{fe} που αντιστοιχεί στις απώλειες σιδήρου. Οι απώλειες χαλκού στα τυλίγματα του στάτη αντιπροσωπεύονται από μια ωμική αντίσταση (R_s). Η αντίσταση του στάτη δίνεται από τον τύπο:

$$R_s = \rho_{co} \cdot \frac{l_c \cdot W_i}{A_{co} \cdot a_i}$$

Όπου ρ_{co} η ειδική αντίσταση του χαλκού στους 80°C . Στους 20°C η ειδική αντίσταση είναι ίση με $\rho_{20} = 1,78 \times 10^{-8} \Omega\text{m}$. Για τους 80° υπολογίζεται από τον εξής τύπο:

$$\rho_{80} = \rho_{20} \cdot \left(1 + \frac{1}{273} \cdot (80 - 20) \right) = 2,17 \cdot 10^{-8} \Omega\text{m}$$

Το l_c είναι το μήκος των πηνίων και υπολογίζεται σύμφωνα με τον τύπο:

$$l_c = 2 \cdot (L + l_{end})$$

Το μήκος τέλος σύνδεσης (l_{end}) είναι ουσιαστικά το μήκος των τυλιγμάτων που βρίσκονται έξω από τα αυλάκια. Το l_{end} εξαρτάται από τον αριθμό των πόλων, τον αριθμό των επιπέδων των περιελίξεων και το βήμα πηνίου:

$$l_{end} = 2y - 0.04 \text{ m for } 2p_1 = 2$$

$$l_{end} = 2y - 0.02 \text{ m for } 2p_1 = 4$$

$$l_{end} = \frac{\pi}{2}y + 0.018 \text{ m for } 2p_1 = 6$$

$$l_{end} = 2.2y - 0.012 \text{ m for } 2p_1 = 8$$

Στην περίπτωση μας χρησιμοποιείται μονό επίπεδο περιέλιξης άρα: $y = \tau = 0,1542 \text{ m}$. Για 4 πόλους έχουμε l_{end} ίσο με:

$$l_{end} = 2 \cdot y - 0.02 = 2 \cdot 0.1542 - 0.02 = 0.2884 \text{ m}$$

$$l_c = 2 \cdot (L + l_{end}) = 2 \cdot (0.23079 + 0.2884) = 1.03838 \text{ m}$$

Η αντίσταση λοιπόν των τυλιγμάτων του στάτη είναι:

$$R_S = \rho_{CO} \cdot \frac{l_c \cdot W_i}{A_{CO} \cdot a_i} = 2.17 \cdot 10^{-8} \Omega m \cdot \frac{1,03838 m \cdot 98}{11,9618 \cdot 10^{-6} m^2 \cdot 1} = 0.1846 \Omega$$

Αντίσταση δρομέα

Η συνδυασμένη αντίσταση δρομέα και δακτυλίων δίνεται από τον τύπο:

$$(R_{be}^{80})_{s=1} = \rho_{Al} \cdot \left[\frac{L}{A_b} \cdot K_R + \frac{l_{er}}{2 \cdot A_{er} \cdot \sin^2 \left(\frac{\pi P_1}{N_r} \right)} \right]$$

Όπου K_R ο συντελεστής επιδερμικού φαινομένου και ρ_{Al} η ειδική αντίσταση του αλουμινίου σε θερμοκρασία λειτουργίας του κινητήρα. Στους 20°C η ειδική αντίσταση αλουμινίου είναι ίση με $\rho_{Al} = 3,1 \times 10^{-8} \Omega \text{ m}$.

$$\rho_{Al80} = \rho_{Al20} \cdot \left(1 + \frac{1}{273} \cdot (80 - 20) \right) = 3.78 \cdot 10^{-8} \Omega m$$

Το μήκος του τομέα του δακτυλίου βραχυκύκλωσης που αντιστοιχεί σε έναν αγωγό του δρομέα θα είναι:

$$l_{er} = \frac{\pi \cdot (D_{er} - b)}{N_r}$$

ο το ύψος του δακτυλίου βραχυκύκλωσης.

$$b = h_r + h_{or} + d_{SL} = 29,1835 + 0.5 + \frac{13,2395 + 4}{2} = 38,3033 \text{ mm}$$

$$D_{er} = D_{re} - 6 - 2 \cdot g = 0.196445 - 6 - 2 \cdot 0.0004 = 0.189646 \text{ m}$$

Οπότε το μήκος του δακτυλίου βραχυκύκλωσης είναι:

$$l_{er} = \frac{\pi \cdot (D_{er} - b)}{N_r} = \frac{\pi \cdot (0.189646 - 0,0383033)}{20} = 23,76064 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

Ο συντελεστής επιδερμικού φαινομένου υπολογίζεται από τον εξής τύπο:

$$K_R = \xi \cdot \frac{(\sinh 2\xi + \sin 2\xi)}{(\cos 2\xi - \cos 2\xi)} \approx \xi$$

με

$$\xi = \beta_s \cdot h_r \cdot \sqrt{s}$$

το β_s είναι ο λόγος του βάθους του αγωγού προς το μέρος εκείνο του αγωγού που διαπερνάται από μαγνητικό πεδίο:

$$\beta_s = \sqrt{\frac{\omega \cdot \mu_o}{2 \cdot \rho_{Al}}} = \sqrt{\frac{2\pi \cdot 50 \cdot 1.256 \cdot 10^{-6}}{2 \cdot 3,78 \cdot 10^{-8}}} = 72.23 \text{ m}^{-1}$$

$$\xi = \beta_s \cdot h_r \cdot \sqrt{s} = 72.23 \text{ m}^{-1} \cdot 0.0291835 \text{ m} \cdot 1 = 2,107$$

Συνεπώς η σύνθετη αντίσταση δρομέα και δακτυλιδιών είναι:

$$(R_{be}^{80})_{s=1} = \rho_{Al} \cdot \left[\frac{L}{A_b} \cdot K_R + \frac{l_{er}}{2 \cdot A_{er} \cdot \sin^2 \left(\frac{\pi P_1}{N_r} \right)} \right]$$

$$3.78 \cdot 10^{-8} \cdot \left[\frac{0.23079 \cdot 2.107}{493.88 \cdot 10^{-6}} + \frac{23.76064 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 1031.63 \cdot 10^{-6} \cdot \sin^2 \left(\frac{2\pi}{20} \right)} \right] = 0.41776 \cdot 10^{-4} \Omega$$

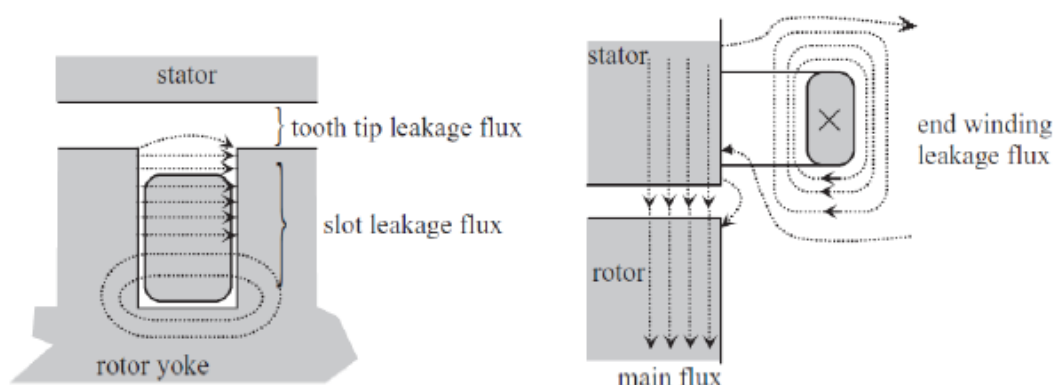
3.2 Υπολογισμός ανοιγμένων αντιστάσεων

Η παραπάνω αντίσταση είναι η πραγματική αντίσταση του δρομέα. Αυτή η αντίσταση είναι σταθερή και δεν εξαρτάται από την ολίσθηση. Στο τελικό ισοδύναμο κύκλωμα η αντίσταση ανοιγμένη στο στάτη επηρεάζεται από την ολίσθηση και δίνεται από τον τύπο:

$$(R_r)_{s=1} = \frac{4 \cdot m}{N_r} \cdot (W_1 \cdot K_w)^2 \cdot (R_{be}^{80})_{s=1} = \frac{4 \cdot 3}{20} \cdot (98 \cdot 0.966)^2 \cdot 0.41766 \cdot 10^{-4} = 0.2245 \Omega$$

3.3 Υπολογισμός επαγωγικών αντιδράσεων

Πέραν των ωμικών αντιστάσεων που εμφανίζονται στα τυλίγματα του στάτη και του δρομέα εκδηλώνονται και οι αντιδράσεις διαρροής. Οι αντιδράσεις διαρροής οφείλονται στις μαγνητικές γραμμές του πεδίου. Σε μια επαγωγική μηχανή ένα μέρος του μαγνητικού πεδίου διαπερνά τόσο το στάτη όσο και το δρομέα (αμοιβαία ροή) ενώ υπάρχουν και δυναμικές γραμμές που περνούν μόνο από το στάτη ή μόνο από το δρομέα (ροή σκέδασης).



Εικόνα 3.3.α: Οι αντιδράσεις διαρροής μεταξύ στάτη και δρομέα

Η επαγωγική αντίδραση στο στάτη δίνεται από τον τύπο:

$$X_{SL} = 2 \cdot \mu_0 \cdot \omega_1 \cdot L \cdot \frac{W_i^2}{p_1 \cdot q} \cdot (\lambda_s + \lambda_{ds} + \lambda_{er})$$

Όπου $\lambda_s, \lambda_{ds}, \lambda_{er}$ είναι οι συντελεστές που ονομάζονται geometrical coefficient slot, differential coefficient και end ring coefficient αντίστοιχα. Το λ_s εξαρτάται από την γεωμετρία των αυλακιών, και από τον αριθμό των επιπέδων περιελίξεων. Για τον υπολογισμό του slot coefficient πρέπει να ληφθεί υπόψη η μεταβαλλόμενη διατομή του αυλακιού στάτη. Το λ_s δίνεται από τον τύπο:

$$\lambda_s = \left[\frac{2}{3} \cdot \frac{h_s}{[(b)_{s1} + b_{s2}] + \frac{2h_w}{b_{os} + b_{s1}} + \frac{h_{os}}{b_{os}}} + \frac{3\beta}{4} \right] \cdot \left[1 + \frac{3\beta}{4} \right]$$

$$= \left[\frac{2}{3} \cdot \frac{43.6791}{(13.2310 + 19.3611)} + \frac{2 \cdot 1}{2.5 + 13.2310} + \frac{0.7}{2.5} \right] \cdot \left[1 + \frac{3}{4} \right] = 1.3$$

Όπου $\beta=y/t=1$. Οι υπόλοιποι όροι της εξίσωσης αντιστοιχούν στις διαστάσεις των αυλακιών του στάτη.

Ο συντελεστής λ_{ds} υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\lambda_{ds} = \frac{0.9 \cdot \tau_s \cdot q^2 \cdot K_w^2 \cdot C_s \cdot \gamma_{ds}}{K_c \cdot g \cdot (1 + K_{st})}$$

Όπου

$$C_s = 1 - 0.033 \cdot \frac{b_{os}^2}{g \cdot \tau_s} = 1 - 0.033 \cdot \frac{2.5^2}{0.4 \cdot 25.7} = 0.5879$$

Και

$$\gamma_{ds} = (0.11 \sin \varphi_1 + 0.28) \cdot 10^{-2}; \text{ for } q = 8$$

$$\gamma_{ds} = (0.11 \sin \varphi_1 + 0.41) \cdot 10^{-2}; \text{ for } q = 6$$

$$\gamma_{ds} = (0.14 \sin \varphi_1 + 0.76) \cdot 10^{-2}; \text{ for } q = 4$$

$$\gamma_{ds} = (0.18 \sin \varphi_1 + 1.24) \cdot 10^{-2}; \text{ for } q = 3$$

$$\gamma_{ds} = (0.25 \sin \varphi_1 + 2.6) \cdot 10^{-2}; \text{ for } q = 2$$

$$\gamma_{ds} = 9.5 \cdot 10^{-2}; \text{ for } q = 1$$

Το γ_{ds} εξαρτάται από τον αριθμό των αυλακιών ανά πόλο και ανά φάση ($q=2$). Το φ είναι ίσο με:

$$\varphi = \pi \cdot (6\beta - 5.5) = \pi(6 \cdot 1 - 5.5) = 1.57 \text{ rad}$$

Για $q=2$ το γ_{ds} δίνεται από τον τύπο:

$$\gamma_{ds} = (0.25 \cdot \sin \varphi_1 + 2.6) \cdot 10^{-2} = 2.8499 \cdot 10^{-2}$$

Ο συντελεστής λ_{ds} λοιπόν είναι:

$$\lambda_{ds} = \frac{0.9 \cdot \tau_s \cdot q^2 \cdot K_w^2 \cdot C_s \cdot \gamma_{ds}}{K_c \cdot g \cdot (1 + K_{sd})}$$

$$= \frac{0.9 \cdot 25.7 \cdot 10^{-3} \cdot 2^2 \cdot 0.966^2 \cdot 0.587 \cdot 2.849 \cdot 10^{-2}}{1.08 \cdot 0.4 \cdot 10^{-3} \cdot (1 + 1.309)} = 1.45$$

Ο συντελεστής λ_{er} υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\begin{aligned}\lambda_{er} &= 0.34 \cdot \frac{q}{L} \cdot (l_{end} - 0.64 \cdot \beta \cdot \tau) \\ &= 0.34 \cdot \frac{2}{0.23079} \cdot (0.2884 - 0.64 \cdot 1 \cdot 0.1542) \Rightarrow \lambda_{er} = 0.5589\end{aligned}$$

Από τα παραπάνω υπολογίζεται η επαγωγική αντίδραση του στάτη από τη σχέση:

$$\begin{aligned}X_{SL} &= 2 \cdot \mu_0 \cdot \omega \cdot L \cdot \frac{W_1^2}{p_1 \cdot q} \cdot (\lambda_s + \lambda_{ds} + \lambda_{er}) \\ &= 2 \cdot 1.256 \cdot 10^{-6} \cdot 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 0.23079 \cdot \frac{98^2}{2 \cdot 2} \cdot (1.3 + 1.45 + 0.5589) \\ &= 1.29 \Omega\end{aligned}$$

Η επαγωγική αντίδραση του δρομέα δίνεται από τον τύπο:

$$X_{be} = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot \mu_0 \cdot L \cdot (\lambda_r \cdot K_X + \lambda_{dr} + \lambda_{er})$$

Όπου λ_r είναι η geometrical coefficient slot για τα αυλάκια του δρομέα. Όπως και στο στάτη το λ_r εξαρτάται από τον αριθμό των επιπέδων περιελίξεων, και από την μεταβαλλόμενη διατομή του τύπου του αυλακιού. Το λ_r δίνεται από τον τύπο:

$$\lambda_r = 0.66 + \frac{2 \cdot h_r}{3 \cdot d_{SL}} + \frac{h_{or}}{b_{or}} = 0.66 + \frac{2 \cdot 29.18}{3 \cdot (13.2395 + 4)} + \frac{0.5}{1.5} = 2.12$$

Ο συντελεστής διαφορικής διαρροής λ_{dr} δίνεται από τον τύπο:

$$\lambda_{dr} = \frac{0.9 \cdot \tau_r \cdot \gamma_{dr} \cdot N_r^2}{K_c \cdot g \cdot 6 \cdot p_1}$$

Όπου γ_{dr} :

$$\gamma_{dr} = 9 \cdot \left(\frac{6 \cdot p_i}{N_r}\right)^2 \cdot 10^{-2} = 9 \cdot \left(\frac{6 \cdot 2}{20}\right)^2 \cdot 10^{-2} = 3.24 \cdot 10^{-2}$$

Άρα:

$$\lambda_{dr} = \frac{0.9 \cdot \tau_r \cdot \gamma_{dr} \cdot N_r^2}{K_c \cdot g \cdot (6 \cdot p_1)^2} = \frac{0.9 \cdot 30.7164 \cdot 3.24 \cdot 10^{-3} \cdot 20^2}{1.08 \cdot 0.4 \cdot (6 \cdot 2)^2} = 5.79$$

Στη συνέχεια υπολογίζεται ο συντελεστής λ_{er} από τη σχέση:

$$\begin{aligned}\lambda_{er} &= \frac{2.3 \cdot (D_{er} - b)}{N_r \cdot L \cdot 4 \cdot \sin^2\left(\frac{\pi \cdot P_1}{N_r}\right)} \cdot \log \frac{4.7 \cdot (D_{er} - b)}{b + 2a} \\ &= \frac{2.3 \cdot (189.645 - 38.3033)}{20 \cdot 230.79 \cdot 4 \cdot \sin^2\left(\frac{\pi \cdot 2}{20}\right)} \cdot \log \frac{4.7 \cdot (189.645 - 38.3033)}{38.3033 + 2 \cdot 26.93} \\ &= 0.17539\end{aligned}$$

Όπου:

$$\alpha = \frac{A_{er}}{b} = \frac{1031.63 \cdot 10^{-3} \text{mm}^2}{38.3033 \text{mm}} = 26.93 \text{mm}$$

Το πλάτος του δακτυλίου βραχυκύκλωσης και b το βάθος του δακτυλίου βραχυκύκλωσης.

Ο συντελεστής επιδερμικού φαινομένου K_x λαμβάνεται από τον εξής τύπο:

$$K_x = \frac{3 \cdot [\sinh(2\xi) - \sin(2\xi)]}{2 \cdot \xi \cdot [\cosh(2\xi) - \cos(2\xi)]} \approx \frac{3}{2 \cdot \xi} = 0.6465$$

Η αντίδραση του δρομέα είναι:

$$\begin{aligned}X_{be} &= 2 \cdot \pi \cdot f \cdot \mu_0 \cdot L \cdot (\lambda_r \cdot K_x + \lambda_{dr} + \lambda_{er}) \\ &= 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 1.256 \cdot 10^{-6} \cdot 0.23079 \cdot (2.12 \cdot 0.6465 + 5.18 + 0.175) \\ &= 6.12197 \cdot 10^{-4} \Omega\end{aligned}$$

Η αντίδραση του δρομέα ανοιγμένη στο στάτη είναι:

$$X_2 = 4 \cdot m \cdot \frac{(W_1 \cdot K_w)^2}{N_r} \cdot X_{be} = 4 \cdot 3 \cdot \frac{(98 \cdot 0.966)^2}{20} \cdot 6.12197 \cdot 10^{-4} \Omega = 3.2919 \Omega$$

Τέλος η αντίδραση μαγνήτισης δίνεται από τη σχέση:

$$X_m = \sqrt{\left(\frac{V_{ph}}{I_\mu}\right)^2 - R_s^2} - X_{sl} = \sqrt{\left(\frac{400}{10}\right)^2 - 0.1846^2} - 1.29 = 38.7 \Omega$$

3.4 Υπολογισμός συνολικών και επιμέρους απωλειών κινητήρα

Το επόμενο βήμα της μελέτης περιλαμβάνει τον υπολογισμό των απωλειών του κινητήρα καθώς και του βαθμού απόδοσης. Οι συνολικές απώλειες του κινητήρα υπολογίζονται από τη σχέση:

$$\sum losses = P_{co} + P_{al} + P_{iron} + P_{mv} + P_{stray}$$

Οι **απώλειες χαλκού** αναφέρονται στις απώλειες των τυλιγμάτων στάτη. Αυτές οι απώλειες δίνονται από τον τύπο:

$$P_{co} = 3 \cdot I_{ov}^2 \cdot R_s = 3 \cdot 65.79^2 \cdot 0.1846 = 2397.0258 \text{ W}$$

Οι **απώλειες αλουμινίου** αναφέρονται στις απώλειες στις μπάρες του δρομέα. Αυτές οι απώλειες δίνονται για $S=S_n$:

$$P_{al} = 3 \cdot I_{rn}^2 \cdot (R_r)_{sn} = 3 \cdot K_f^2 \cdot I_n^2 \cdot R_r = 3 \cdot 0.904^2 \cdot 65.79^2 \cdot 0.2245 = 2382.28 \text{ W}$$

Οι **μηχανικές απώλειες** εξαρτώνται από τον αριθμό των ζευγών πόλων:

Για $p=1$ το $P_{mv}=0.03 \cdot P_n$

Για $p=2$ το $P_{mv}=0.012 \cdot P_n$

Για $p=3,4$ το $P_{mv}=0.008 \cdot P_n$

Οπότε η **μηχανική ισχύς** είναι:

$$P_{mv} = 0.012 \cdot P_{ov} = 0.012 \cdot 37000 \text{ W} = 445 \text{ W}$$

Οι **κατανεμημένες απώλειες** υπολογίζονται από τον τύπο:

$$P_{stray} = 0.001 \cdot P_{ov} = 0.001 \cdot 37000 \text{ W} = 37 \text{ W}$$

Οι **απώλειες σιδήρου** εμφανίζονται κατά κύριο λόγο στο στάτη, εφόσον στο δρομέα η συχνότητα του ρεύματος είναι πάρα πολύ μικρή (3-4 Hz). Οι απώλειες σιδήρου χωρίζονται σε απώλειες στα δόντια του στάτη και στο πίσω μέρος του πυρήνα.

Οι **απώλειες στα δόντια** υπολογίζονται από τη σχέση:

$$p_{t1} = K_{y1} \cdot p_{10} \cdot \left(\frac{f_1}{50}\right)^{1,3} \cdot B_{ts}^{1,7} \cdot G_{t1}$$

Όπου p_{10} είναι οι ειδικές απώλειες σε W/Kg σε 1 Tesla και παίρνει τιμές για 50 Hz, $p_{10}=(2-3)$ Kg

Το K_{y1} εξαρτάται από την ποιότητα των υλικών και από ακανόνιστες ροπές και παίρνει τιμές 1,6-1,8.

Το G_{t1} είναι το βάρος των δοντιών του στάτη:

$$G_{t1} = \gamma_{iron} \cdot N_s \cdot b_{ts} \cdot (h_s + h_w + h_{os}) \cdot L \cdot K_{Fe}$$

$$\Rightarrow G_{t1} = 7800 \cdot 24 \cdot 12.8571 \cdot 10^{-3} \cdot (43.6791 + 1 + 0.7) \cdot 10^{-3} \cdot 0.231 \cdot 0.96 = 24.22089 \text{ kgr}$$

Για $B_{ts}=1.5T$ και $f=50$ το p_{t1} είναι ίσο με:

$$p_{t1} = K_t \cdot p_{10} \cdot \left(\frac{f_1}{50}\right)^{1,3} \cdot B_{ts}^{1,7} \cdot G_{t1} = 1,7 \cdot 3 \cdot \left(\frac{50}{50}\right)^{1,3} \cdot 1.5^{1,7} \cdot 24.22089 = 246.10 \text{ W}$$

Ενώ οι **απώλειες του υπόλοιπου πυρήνα** δίνονται από τη σχέση:

$$p_{y1} = K_y \cdot p_{10} \cdot \left(\frac{f_1}{50}\right)^{1,3} \cdot B_{cs}^{1,7} \cdot G_{y1}$$

Με $K_y=(1.6-1.9)$

Το G_{y1} δίνεται από τον τύπο:

$$G_{y1} = \gamma_{iron} \cdot \frac{\pi}{4} \cdot [D_{out}^2 - (D_{out} - 2 \cdot h_{cs})^2] \cdot L \cdot K_{Fe}$$

$$\Rightarrow G_{y1} = 7800 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot [0.35146^2 - (0.35146 - 2 \cdot 0.0273)^2] \cdot 0.231 \cdot 0.96 \Rightarrow G_{y1} = 48.2265 \text{ Kg}$$

Άρα:

$$p_{y1} = K_y \cdot p_{10} \cdot \left(\frac{f_1}{50}\right)^{1,3} \cdot B_{cs}^{1,7} \cdot G_{y1} = 1,7 \cdot 3 \cdot \left(\frac{50}{50}\right)^2 \cdot 1.5^{1,7} \cdot 48.2265 = 490.017 \text{ W}$$

Οι **απώλειες πυρήνα** είναι το άθροισμα των απωλειών δοντιών και πίσω πυρήνα.

$$P_{iron} = p_{t1} + p_{y1} = 246.1021 \text{ W} + 490.0171 \text{ W} = 736.1192 \text{ W}$$

Οι συνολικές απώλειες του κινητήρα θα είναι:

$$\sum losses = P_{co} + P_{al} + P_{iron} + P_{mv} + P_{stray}$$

$$= 2397.025 + 2382.28 + 736.1192 + 445 + 37 = 5997.424 \text{ W}$$

3.5 Υπολογισμός βαθμού απόδοσης

Έπειτα τον υπολογισμό των απωλειών προκύπτει ο βαθμός απόδοσης του κινητήρα:

$$\eta = \frac{37000W}{37000 + 5997.424} \cdot 100\% = 86.051 \%$$

3.6 Υπολογισμός σημαντικών χαρακτηριστικών λειτουργίας

3.6.1 Ολίσθηση

Η ονομαστική ολίσθηση υπολογίζεται από τον τύπο:

$$s = \frac{P_{Al}}{P_{AG}} = \frac{P_{Al}}{P_n + P_{Al} + P_{mv} + P_{stray}} = \frac{2382.28}{37000 + 2382.28 + 445 + 37} = 0.0597$$

3.6.2 Ροπές

Η ονομαστική ροπή είναι ίση με:

$$T_n = \frac{P_n}{2\pi \cdot \frac{f}{p_1} (1 - s_n)} = \frac{37000W}{2\pi \cdot \frac{50}{2} (1 - 0.0597)} = 250.504 Nm$$

Η ροπή ανατροπής υπολογίζεται:

$$T_{bk} = \frac{3 \cdot p_1}{2 \cdot \omega_1} \cdot \frac{V_{ph}^2}{[R_s + \sqrt{R_s^2 + (X_{sl} + C_1 \cdot X_{rl})^2}]^2}$$

$$\text{Με } X_{s1} = X_{s1} \cdot (0.7 \sim 0.8) = 1.29 \cdot 0.75 = 0.9675 \Omega$$

&

$$X_{r1} = X_{r1} \cdot (0.6 \sim 0.7) = 3.2919 \cdot 0.65 = 2.1397 \Omega$$

&

$$C_1 = 1 + \frac{X_{sl}}{X_{m,skew}} = 1 + \frac{0.9675}{38.7} = 1.025$$

Συνεπώς:

$$\begin{aligned} T_{bk} &= \frac{3 \cdot p_1}{2 \cdot \omega_1} \cdot \frac{V_{ph}^2}{[R_s + \sqrt{R_s^2 + (X_{sl} + C_1 \cdot X_2)^2}]^2} \\ &= \frac{3 \cdot 2}{2 \cdot 2\pi 50} \cdot \frac{400^2}{[0.1846 + \sqrt{0.1846^2 + (0.9675 + 1.025 \cdot 2.1397)^2}]^2} \\ &= 456 \text{ Nm} \end{aligned}$$

3.6.3 Ρεύμα εκκίνησης

Το ρεύμα εκκίνησης του κινητήρα υπολογίζεται από τον τύπο:

$$\begin{aligned} I_{LR} &= \frac{V_{ph}}{\sqrt{(R_s + R_r)^2 + (X_{sl} + X_{rl})^2}} = \frac{400}{\sqrt{(0.1846 + 0.2245)^2 + (0.9675 + 2.1397)^2}} \\ &= 127 \text{ A} \end{aligned}$$

Τέλος η ροπή εκκίνησης του κινητήρα είναι:

$$T_{LR} = \frac{3 \cdot I_{LR}^2 \cdot R_r}{\omega} \cdot p_1 = \frac{3 \cdot 127^2 \cdot 0.2245}{2 \cdot \pi \cdot 50} \cdot 2 = 34.57 \text{ Nm}$$

Και ο συντελεστής ισχύος που προκύπτει:

$$\cos\varphi = \frac{P_n}{\sqrt{3} \cdot V_{ph} \cdot I_n \cdot \eta} = \frac{37000}{\sqrt{3} \cdot 400 \cdot 65.79 \cdot 0.86051} = 0.9433$$

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

Σύγκριση αποτελεσμάτων με ήδη υπάρχοντα στοιχεία,βελτιώσεις

4.1 Δεδομένα επαναυπολογισμού

Παρατηρούμε πως παρόλο που η πλειοψηφία των αποτελεσμάτων μας συμπίπτει με τα δεδομένα της εταιρίας VALIADIS υπάρχουν μερικές σημαντικές διαφορές στα εξής μεγέθη:

1. Ροπή ανατροπής
2. Ροπή εκκίνησης
3. Ρεύμα εκκίνησης

Αν και η ροπή ανατροπής είναι υψηλή, η ροπή εκκίνησης, ένα από τα σημαντικότερα μεγέθη του κινητήρα είναι ιδιαίτερα μικρή. Στους συγκεκριμένους κινητήρες, η ροπή εκκίνησης πρέπει να είναι υψηλή ειδικά ο κινητήρας ΔΕΝ εκκινεί. Όπως αναφέραμε στο Κεφάλαιο 2, με την αύξηση της εσωτερικής διαμέτρου του κινητήρα θα προκαλούνταν αύξηση του **Dshaft**(μέγιστη διάμετρος του άξονα), αλλά και μείωση στην ροπή εκκίνησης και ανατροπής. Συνεπώς πρέπει να ελαττωθεί η διάμετρος του άξονα για αύξηση της ροπής. Επίσης με την αύξηση του αριθμού των αυλακιών του δρομέα θα μειωθεί η **αντίδραση** του δρομέα η οποία εν συνεχεία θα οδηγήσει σε αύξηση του ρεύματος του δρομέα. Η αύξηση του ρεύματος θα επέφερε αύξηση της ροπής. Τέλος, σε συνδυασμό με την αλλαγή του βάθους των αυλακιών του δρομέα, θα αυξάνονταν η **αντίσταση** του δρομέα με αποτέλεσμα να αυξάνονταν η ροπή εκκίνησης και η ονομαστική ολίσθηση του κινητήρα.

Έτσι λοιπόν υπολογίσαμε ξανά αυτά τα στοιχεία για να επιβεβαιώσουμε εάν όντως θα πλησιάζαμε τα ονομαστικά αυτά μεγέθη. Έπειτα από δοκιμές καταλήξαμε πως για αρχή θα αυξήσουμε τα **αυλάκια στο δρομέα σε 36**. Επεμβαίνουμε λοιπόν σε όλα τα μεγέθη που επηρεάζονται άμεσα από αυτή την αλλαγή.

Σύμφωνα με τον Πίνακα 2.4 του Κεφαλαίου 2 βλέπουμε πως για μηχανή τεσσάρων πόλων με 24 αυλάκια στο στάτη μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε στο δρομέα 36 αυλάκια. Έτσι:

Για 36 αυλάκια στο δρομέα:

Ρεύμα/αγωγό

$$I_b = \frac{2 \cdot m \cdot W_i \cdot K_w \cdot I_{ov} \cdot K_I}{N_r} = \frac{2 \cdot 3 \cdot 98 \cdot 0.966 \cdot 65.79 \cdot 0.904}{36} = 938 \text{ A}$$

Απόσταση αυλακιών

$$A_b = \frac{938}{3.42 \text{ A/mm}^2} = 274.26 \text{ mm}^2$$

Ρεύμα δακτυλίου

$$I_{er} = \frac{I_b}{2 \cdot \sin \frac{\pi \cdot p_i}{N_r}} = \frac{938}{2 \cdot \sin \frac{\pi \cdot 2}{36}} = 2700 \text{ A}$$

Διατομή δακτυλίου

$$A_{er} = \frac{I_{er}}{J_{er}} = \frac{2700}{2.65 \text{ A/mm}^2} = 1019.19 \text{ mm}^2$$

Απόσταση ανάμεσα σε 2 αγωγούς του δρομέα

$$\tau_r = \frac{\pi \cdot (D_{is} - 2g)}{N_r} = \frac{\pi \cdot (196.446 - 2 \cdot 0.4)}{36} = 17.064 \text{ mm}$$

Πλάτος δοντιού του δρομέα

$$b_{tr} = \frac{B_g \cdot \tau_r}{K_{fe} \cdot B_{tr}} = \frac{0.7204T \cdot 17.064 \cdot 10^{-3}}{0.96 \cdot 1.5T} = 8.536 \text{ mm}$$

Με άνω μέρος δοντιού

$$d1 = \frac{\pi \cdot (D_{re} - 2 \cdot h_{or}) - N_r \cdot b_{tr}}{\pi + N_r} = \frac{3.14 \cdot (196.445 - 2 \cdot 0.5) - 36 \cdot 8.536}{3.14 + 36} = 7.828 \text{ mm}$$

και κάτω μέρος δοντιού

$$d_2 = 1.5 \text{ mm}$$

το ύψος του δοντιού

$$h_r = \frac{d_1 - d_2}{2 \cdot \tan\left(\frac{\pi}{N_r}\right)} = \frac{7.828 \text{ mm} - 1.5 \text{ mm}}{0.17} = 37.22 \text{ mm}$$

η μαγνητιγερτική δύναμη στο δόντι του δρομέα

$$F_{\text{mtr}} = H_{\text{tr}} \cdot \left(h_r + h_{\text{or}} + \frac{d_1 + d_2}{2} \right) = 1340 \left(37.22 + 0.5 + \frac{7.828 + 1.5}{2} \right) = 56.8 \text{ At}$$

Καταλήγουμε λοιπόν πως η διάμετρος του άξονα είναι:

$$D_{\text{shaft}} \leq D_{\text{is}} - 2 \cdot (h_r + h_{\text{or}} + h_{\text{cr}}) - 2 \cdot g$$

$$\Rightarrow D_{\text{shaft}} \leq 196,445 - 2 \cdot (37.22 \text{ mm} + 0.5 + 27,385) - 2 \cdot 0.4 = 65.645 \text{ mm}$$

Εφόσον επιτύχαμε την μείωση της διαμέτρου του άξονα προχωράμε στον υπολογισμό της αντίδρασης και αντίστασης του δρομέα για 36 αυλάκια. Μεγέθη άμεσα συνυφασμένα με το ρεύμα και τη ροπή.

Έπειτα τον υπολογισμό των συντελεστών l_x και $R_{be} 80^\circ\text{C}$ προκύπτει πως η αντίσταση στο δρομέα είναι:

$$(R_r)_{s=1} = \frac{4 \cdot m}{N_r} \cdot (W_1 \cdot K_w)^2 \cdot (R_{be}^{80})_{s=1} = \frac{4 \cdot 3}{36} \cdot (98 \cdot 0.966)^2 \cdot 1,01984 \cdot 10^{-4} = 0.3046 \Omega$$

ενώ η επαγωγική αντίδραση έπειτα τον υπολογισμό των συντελεστών $\lambda_r, \lambda_{dr}, \lambda_{er}$ και αντίδρασης X_{be} :

$$X_2 = 4 \cdot m \cdot \frac{(W_1 \cdot K_w)^2}{N_r} \cdot X_{be} = 4 \cdot 3 \cdot \frac{(98 \cdot 0.966)^2}{36} \cdot 5.43 \cdot 10^{-4} \Omega = 1.62 \Omega$$

Βλέπουμε λοιπόν πως με αυτή την αλλαγή πετύχαμε και αύξηση της αντίστασης και μείωση της επαγωγικής αντίδρασης.

4.2 Σύγκριση δεδομένων για εξαγωγή συμπερασμάτων

Με τις παραπάνω αλλαγές λοιπόν προκύπτει:

Ροπή ανατροπής:

$$T_{bk} = \frac{3 \cdot p_1}{2 \cdot \omega_1} \cdot \frac{V_{ph}^2}{[R_s + \sqrt{R_s^2 + (X_{sl} + C_1 \cdot X_{rl})^2}]^2}$$

$$\text{Με } X_{s1} = X_{s1} \cdot (0.7 \sim 0.8) = 1.29 \cdot 0.75 = 0.9675 \text{ } \Omega$$

&

$$X_{r1} = X_{r1} \cdot (0.6 \sim 0.7) = 1.62 \cdot 0.65 = 1.053 \text{ } \Omega$$

&

$$C_1 = 1 + \frac{X_{sl}}{X_{m,skew}} = 1 + \frac{0.9675}{38.7} = 1.025$$

$$\begin{aligned} T_{bk} &= \frac{3 \cdot p_1}{2 \cdot \omega_1} \cdot \frac{V_{ph}^2}{[R_s + \sqrt{R_s^2 + (X_{sl} + C_1 \cdot X_2)^2}]^2} \\ &= \frac{3 \cdot 2}{2 \cdot 2\pi 50} \cdot \frac{400^2}{[0.1846 + \sqrt{0.1846^2 + (0.9675 + 1.025 \cdot 1.053)^2}]^2} \\ &= 682 \text{ Nm} \end{aligned}$$

Με ονομαστική ροπή ανατροπής στα 709 Nm. Σημαντική αύξηση έναντι των 456 Nm με 20 αυλάκια!!!

Ρεύμα εκκίνησης:

$$\begin{aligned} I_{LR} &= \frac{V_{ph}}{\sqrt{(R_s + R_r)^2 + (X_{sl} + X_{rl})^2}} = \frac{400}{\sqrt{(0.1846 + 0.3046)^2 + (0.9675 + 1.053)^2}} \\ &= 190 \text{ A} \end{aligned}$$

Το ονομαστικό ρεύμα εκκίνησης δεν αναγράφεται στα στοιχεία του φυλλαδίου της εταιρίας VALIADIS. Το ρεύμα εκκίνησης σε έναν κινητήρα είναι 5~6 φορές το ονομαστικό. Παρατηρούμε πως με τις αλλαγές το ρεύμα έγινε 3 φορές το ονομαστικό!!!

Ροπή εκκίνησης:

$$T_{LR} = \frac{3 \cdot I_{LR}^2 \cdot R_r}{\omega} \cdot p_1 = \frac{3 \cdot 190^2 \cdot 0.3046}{2 \cdot \pi \cdot 50} \cdot 2 = 210 \text{ Nm}$$

Με ονομαστική ροπή εκκίνησης στα 434.6 Nm. Παρατηρούμε πως το πλέον σημαντικό μέγεθος του κινητήρα με τις παραπάνω αλλαγές εκτοξεύθηκε από 34.57Nm σε 210 Nm!!!!!!

4.3 Λοιπά συμπεράσματα για πιθανή βελτίωση

Εν τέλει καταλήγουμε στα εξής συμπεράσματα.

Ο κινητήρας μας χρειάζεται επιπλέον αυλάκια στο δρομέα. Είναι φανερό πως με την παρούσα επέμβαση τα ζωτικής σημασίας μεγέθη του κινητήρα πλησιάζουν τα ονομαστικά, τα οποία έχουν υπολογιστεί από την εταιρία VALIADIS, η οποία είναι σαφώς υπεύθυνη και ειδική στη δημιουργία κινητήρων.

Το επόμενο βήμα είναι να επέμβουμε στο στάτη. Η ροπή εκκίνησης είναι άμεσα συνδεδεμένη με το ρεύμα εκκίνησης και ο μόνος τρόπος πλέον να αλλάξει αυτή είναι η αλλαγή της αντίστασης στο στάτη. Η εταιρία VALIADIS έχει σαν ονομαστική αντίσταση στο δρομέα 0.14 Ω έναντι των 0.18 Ω που υπολογίσαμε εμείς. Μια τέτοια αλλαγή θα επέφερε αύξηση του ρεύματος εκκίνησης, συνεπώς αύξηση της ροπής εκκίνησης ίσως και ιδιαίτερα κοντά της ονομαστικής. Η αντίσταση αυτή όπως είδαμε συνδέεται άμεσα με τα τυλίγματα (W_i) στο στάτη.

Κατά τα άλλα σαν πρώτη προσέγγιση τα συμπεράσματα μας επιβεβαιώνονται. Δηλαδή:

1. Ο αριθμός των αυλακώσεων
2. Το ύψος των οδοντώσεων στο δρομέα
3. Το βάθος τους
4. Η διάμετρος του άξονα

παίζουν το μεγαλύτερο ρόλο στην λειτουργία του κινητήρα.

Δυστυχώς ο πλήρης υπολογισμός του στάτη δεν είναι εφικτός διότι οι υπολογισμοί έγιναν στο χέρι και είναι ιδιαίτερα πολύπλοκοι. Με τη χρήση προγράμματος σε ηλεκτρονικό υπολογιστή ίσως βρίσκαμε με απόλυτη ακρίβεια τα επιθυμητά αποτελέσματα. Δηλαδή σύμφωνα με τον Πίνακα 2.4 του Κεφαλαίου 2 μπορεί η αύξηση των αυλακώσεων του στάτη να αντισταθμίζει το πρόβλημα αλλά τα αυλάκια του δρομέα να μην χρειαστεί να αυξηθούν από 20 αλλά όχι σε 36. Ίσως σε 33 ή 34 ή 35. Επίσης μπορεί με κάποια αμυδρή αλλαγή στις διαστάσεις των αυλακώσεων του στάτη το πρόβλημα να αντισταθμίζεται.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

Φυλλάδια στοιχείων κινητήρα

VALIADIS S.A.

ELECTRIC MOTOR TEST REPORT - THREE PHASE INDUCTION MOTOR

NAMEPLATE DATA		IEC TYPE		37 KW		1480 RPM	
K225S-4 FRAME		3 PHASE		400 VOLTS		50 HZ / CYCLES	
92,3 EFFICIENCY		65,79 AMPS		55 IP		IC411 IC	
4 POLE		S1 DUTY		0,880 PF		N/A EFF2	
VALIADIS MANUFACTURER		SERIAL NO.		F INS.CLASS		DELTA CONNECTION	

TEST DATA	NO LOAD	25% LOAD	50% LOAD	75% LOAD	100% LOAD	110% LOAD	125% LOAD	LOCKED ROTOR
EFFICIENCY	0	84,96	90,38	92,07	92,29	92,22	92,04	
PF	0,097	0,592	0,777	0,861	0,880	0,882	0,885	0,378
RPM	1500	1495	1490	1485	1480	1477	1473	0
SLIP	0,00%	0,32%	0,66%	0,99%	1,36%	1,53%	1,80%	100,00%
AMPS	22,44	26,53	38,03	50,52	65,79	72,23	81,97	458,1
VOLTS	400	400	400	400	400	400	400	400
TORQUE NM	0	59,1	118,6	178,5	238,9	263,3	300,0	524,9
KW INPUT	1,483	10,89	20,47	30,14	40,09	44,13	50,25	119,89
KW OUTPUT	0	9,25	18,50	27,75	37,00	40,70	46,25	

LOSSES(kW)	25% LOAD	50% LOAD	75% LOAD	100% LOAD	110% LOAD	125%LOAD
STATOR LOSS Pcu1	0,157	0,322	0,569	0,643	1,16	1,50
STATOR LOSS %	1,44%	1,57%	1,89%	1,60%	2,63%	2,98%
ROTOR LOSS Pcu2	0,032	0,127	0,284	0,525	0,65	0,86
ROTOR LOSS %	0,29%	0,62%	0,94%	1,31%	1,46%	1,72%
CORE LOSS Pfe	0,816	0,816	0,816	0,816	0,816	0,816
CORE LOSS %	7,50%	3,99%	2,71%	2,04%	1,85%	1,62%
WINDAGE/FRICTION Pfw	0,573	0,573	0,573	0,573	0,573	0,573
WINDAGE/FRICTION %	5,26%	2,80%	1,90%	1,43%	1,30%	1,14%
STRAY LOAD LOSS Ps	0,054	0,102	0,151	0,200	0,221	0,251
STRAY LOAD LOSS %	0,50%	0,50%	0,50%	0,50%	0,50%	0,50%

Losses are measured/calculated as per IEC 34-2 - The Summation of Losses Method
All data is measured at Nominal Volts

TEMPERATURES			
STATOR RESISTANCE COLD	0,1104 OHMS @	6,5 DEG.C.	BETWEEN STATOR LEADS
STATOR RESISTANCE ADJUSTED	0,149 OHMS @	90 DEG.C.	BETWEEN STATOR LEADS
STATOR RESISTANCE HOT	0,144 OHMS	after test of temp rise	BETWEEN STATOR LEADS
WINDING TEMPERATURE RISE	67,5 DEG.C.	at full load steady state at	30 SECS
WINDING TEMPERATURE RISE	70,0 DEG.C.	at full load steady state at	0 SECS
PT100 TEMPERATURE OF DE WINDING	80,7 DEG.C.	at full load steady state at ambient	9 DEG.C.
PT100 TEMPERATURE OF NDE WINDING	N/A DEG.C.	at full load steady state at ambient	9 DEG.C.
PT100 TEMPERATURE DE BEARING	73,5 DEG.C.	at full load steady state at ambient	9 DEG.C.
PT100 TEMPERATURE NDE BEARING	N/A DEG.C.	at full load steady state at ambient	9 DEG.C.
PT100 TEMPERATURE IN TERMINAL BOX	37,4 DEG.C.	at full load steady state at ambient	9 DEG.C.
PT100 TEMPERATURE ON STATOR LEADS	48,2 DEG.C.	at full load steady state at ambient	9 DEG.C.

OTHER			
NOISE LEVEL(Lp)	72	dB(A) @ 1meter	INSULATION RESISTANCE
VIBRATION LEVEL	1,8	mm/sec on no load	D.E. BEARING
WEIGHT	284	kg	N.D.E.BEARING
H-POT TEST VOLTS	1800	VOLTS	

VALIADIS S.A.		SCALE	N/A
K225S-4		DATE	REV
37 kW		DRAWN	DOCUMENT NO.
400 VOLTS 50 Hz		APPRVD	
		CHECKED	

RESULT SUMMARY

VALIADIS S.A.

ELECTRIC MOTOR TEST REPORT - THREE PHASE INDUCTION MOTOR

NAMEPLATE DATA		IEC TYPE	37 KW	1480 RPM
K225S-4 FRAME		3 PHASE	400 VOLTS	50 HZ / CYCLES
92,3 EFFICIENCY		65,79 AMPS	55 IP	IC411 IC
4 POLE		S1 DUTY	0,880 PF	N/A EFF2
VALIADIS MANUFACTURER		SERIAL NO.	F INS.CLASS	DELTA CONNECTION

MAJOR CONTENTS	UNIT	TEST VALUE
STATOR RESISTANCE OF PHASE TO PHASE	90 DEG.C	OHM 0,149
NO LOAD CURRENT		AMP 22,44
NO LOAD INPUT		kW 1,483
CORE LOSS(Pfe)		kW 0,816
WINDAGE FRICTION LOSS(Pfw)		kW 0,573
STATOR WINDING LOSS(Pcu1)		kW 0,643
ROTOR WINDING LOSS(Pcu2)		kW 0,525
STRAY LOAD LOSS(Ps)		kW 0,200
FULL LOAD CURRENT		AMP 65,79
LOCKED ROTOR CURRENT		AMP 458,1
LOCKED ROTOR CURRENT/FULL LOAD CURRENT		P.U. 7,0
LOCKED ROTOR INPUT @ FULL LOAD		kW 119,89
FULL LOAD TORQUE <i>ΟΝΟΜΑ ΣΤΙΚΗ</i>		N.m 238,92
LOCKED ROTOR TORQUE		N.m 524,89
LOCKED ROTOR TORQUE/FULL LOAD TORQUE		P.U. 2,20
PULL OUT TORQUE <i>→ ΑΝΑΤΡΟΜΗ</i>		N.m 709,4
PULL OUT TORQUE/FULL LOAD TORQUE		P.U. 2,97
PULL UP TORQUE <i>→ ΣΕΚΙΝΗΣΗ</i>		N.m 434,6
PULL UP TORQUE/FULL LOAD TORQUE		P.U. 1,82
EFFICIENCY @ FULL LOAD		% 92,29
POWER FACTOR @ FULL LOAD		% 0,880
FULL LOAD SLIP		% 1,359
FULL LOAD SPEED		r/min 1480
STATOR WINDING TEMPERATURE RISE	30 SECS	K 67,5
D.E. BEARINGS TEMPERATURE BY PT100		Deg. C 73,5
TEMPERATURE ON LEADS BY PT100		Deg. C 48,2
TEMPERATURE IN TERMINAL BOX BY PT100		Deg. C 37,4
AMBIENT TEMPERATURE OF TESTING		Deg. C 9,0
SOUND PRESSURE LEVEL		dB(A) 72
VIBRATION		mm/s 1,8
MOMENT OF INERTIA		kgm ² 0,406
WEIGHT		kg 284

The data above is calculated as per IEC 34-2, all data at nominal Volts.

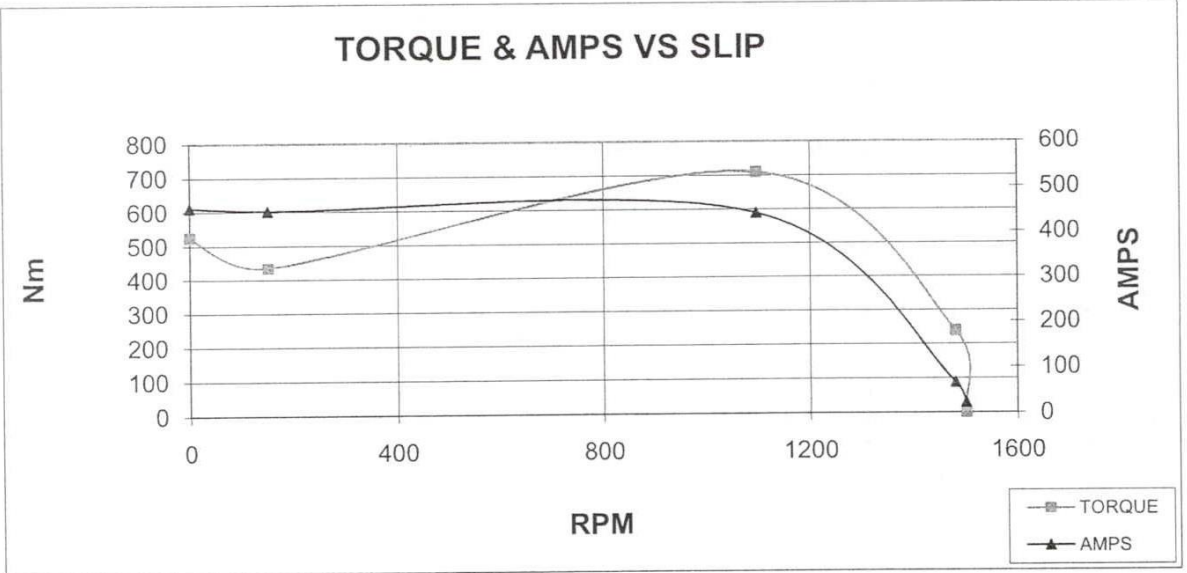
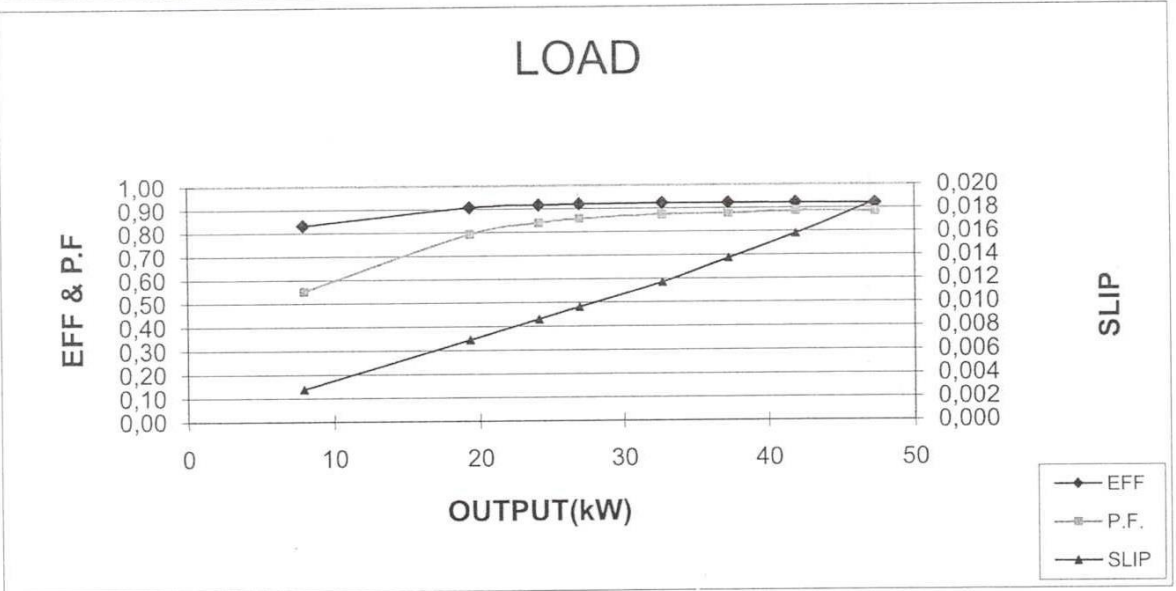
VALIADIS S.A.		SCALE	N/A	
		DATE		REV
K225S-4 37 kW 400 VOLTS 50 Hz		DRAWN		DOCUMENT NO.
		APPRVD		
		CHECKED		

PERFORMANCE

VALIADIS S.A.

ELECTRIC MOTOR TEST REPORT - THREE PHASE INDUCTION MOTOR

NAMEPLATE DATA	IEC TYPE	37 KW	1480 RPM
K225S-4 FRAME	3 PHASE	400 VOLTS	50 HZ / CYCLES
92,3 EFFICIENCY	65,79 AMPS	55 IP	IC411 IC
4 POLE	S1 DUTY	0,880 PF	N/A EFF2
VALIADIS MANUFACTURER	SERIAL NO.	F INS.CLASS	DELTA CONNECTION

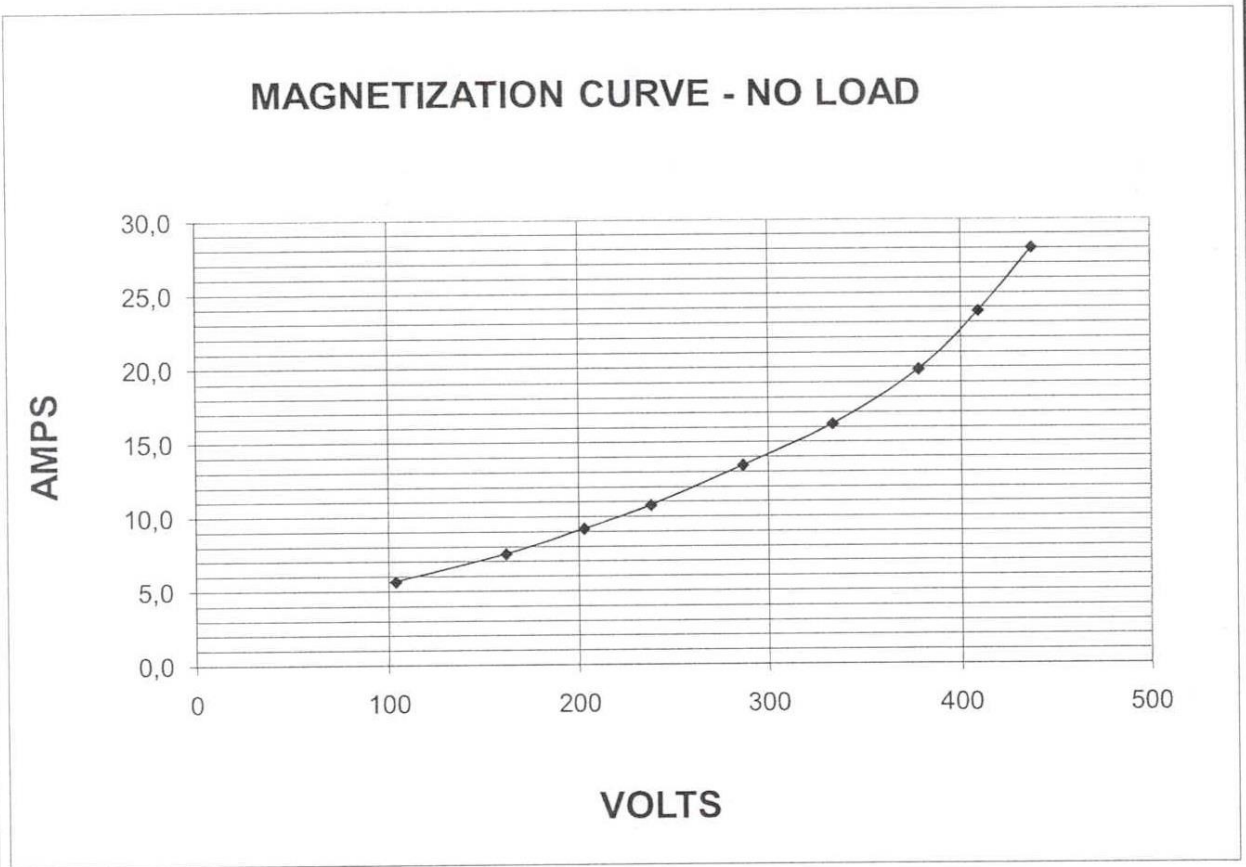


VALIADIS S.A. K225S-4 37 kW 400 VOLTS 50 Hz	SCALE	N/A	
	DATE		REV
	DRAWN		DOCUMENT NO.
	APPRVD		
	CHECKED		

VALIADIS S.A.

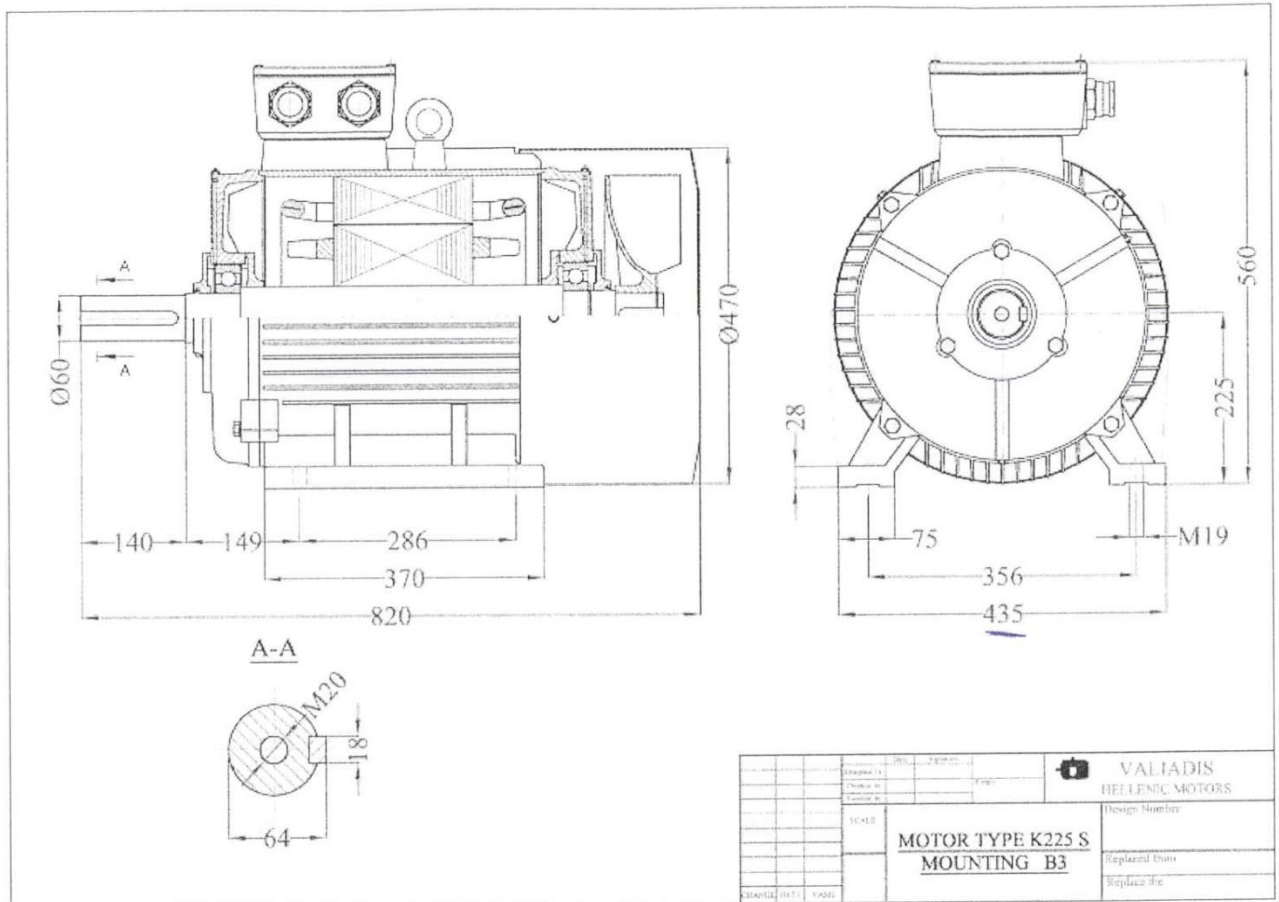
ELECTRIC MOTOR TEST REPORT - THREE PHASE INDUCTION MOTOR

NAMEPLATE DATA	IEC TYPE	37 KW	1480 RPM
K225S-4 FRAME	3 PHASE	400 VOLTS	50 HZ / CYCLES
92,3 EFFICIENCY	65,79 AMPS	55 IP	IC411 IC
4 POLE	S1 DUTY	0,880 PF	N/A EFF2
VALIADIS MANUFACTURER	SERIAL NO.	F INS.CLASS	DELTA CONNECTION



VALIADIS S.A.	SCALE	N/A	
	DATE		REV
K225S-4 37 kW 400 VOLTS 50 Hz	DRAWN		DOCUMENT NO.
	APPRVD		
	CHECKED		

Φυλλάδια διαστάσεων κινητήρα



	Valiadis SA (1m)	72 dB(A)
	Series K Resistance R	0.223 Ω
/	K225S Resistance of phase to phase	0.149 Ω
/	37.00 kW / 50.00 hp Moment of inertia	0.4060
	1,480	238.92
	B3	2.20
Voltage /	400- Δ /690-Y	0.69

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- STEPHEN J. CHAPMAN «ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ AC-DC», 3η ΕΚΔΟΣΗ, ΕΚΔΟΣΕΙΣ ΤΖΙΟΛΑ, ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ 2003
- Ion Boldea & Syed A. Nasar ‘‘The Induction Machines Desing Handbook’’, Second Edition
- Παντελής Β. Μαλατέστας, Ηλεκτρική Κίνηση,3 έκδοση, εκδόσεις ΤΖΙΟΛΑ,2010
- Κοσμόπουλος Γεώργιος,πτυχιακή εργασία,ΤΕΙ Πατρών 2014