

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



ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΙ ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΑΣΥΓΧΡΟΝΟΥ ΤΡΙΦΑΣΙΚΟΥ ΚΙΝΗΤΗΡΑ 55KW

ΣΠΟΥΔΑΣΤΗΣ:

ΚΟΣΜΟΠΟΥΛΟΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ

ΕΙΣΗΓΗΤΗΣ:

ΧΑΡΑΛΑΜΠΑΚΟΣ ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ

ΠΑΤΡΑ ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ 2014

ΠΡΟΛΟΓΟΣ/ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σκοπός αυτής της πτυχιακής εργασίας είναι η μελέτη και ο σχεδιασμός ενός τριφασικού Ασύγχρονου (Επαγωγικού) κινητήρα 55KW(75Hp) βραχυκυκλωμένου δρομέα (κλωβού). Οι κινητήρες αυτοί έχουν τη μεγαλύτερη εφαρμογή από τους υπόλοιπους τύπους κινητήρων σε πληθώρα εφαρμογών κίνησης. Στην κατηγορία των ασύγχρονων μηχανών υπάρχουν δύο κατηγορίες η μια όπως και προανέφερα είναι αυτή του βραχυκυκλωμένου δρομέα η οποία για οικονομικούς, αντοχής (στιβαρότερη κατασκευή) καθώς και συντήρησης έχουν τεράστια εφαρμογή, ενώ η δεύτερη κατηγορία είναι αυτή του δακτυλιοφόρου δρομέα ή τυλιγμένου δρομέα όπου χρησιμοποιούνται κυρίως όπου θέλουμε έλεγχο ροπής και στροφών.

Η εργασία αυτή αποτελείται από ένα θεωρητικό μέρος όπου αναλύονται η αρχή λειτουργίας, τα μέρη που αποτελούνται, καθώς και βασικές αρχές για την κατανόηση της λειτουργίας τους. Στο δεύτερο και σημαντικότερο μέρος ακολουθεί η μελέτη και οι υπολογισμοί που έγιναν, όπως διαστάσεις, υλικά, διατομές και αριθμός αγωγών στάτη και δρομέα, τύπος και διαστάσεις αγωγών στάτη και δρομέα, ρεύματα, ροπές, απώλειες καθώς και ότι άλλο απαιτείτε για την κατασκευή του κινητήρα που θέλαμε. Ο κινητήρας είναι ένας τριφασικός επαγωγικός βραχυκυκλωμένου δρομέα με τρία ζεύγη πόλων, τα χαρακτηριστικά του οποίου είναι αντίστοιχα με αυτά του κινητήρα K280 M-6 της εταιρείας ΒΑΛΙΑΔΗ. Τα χαρακτηριστικά αυτά είναι :

- ΟΝΟΜΑΣΤΙΚΗ ΙΣΧΥΣ: 55kW/75hp
- ΣΥΓΧΡΟΝΗ ΤΑΧΥΤΗΤΑ: 1000στρ./λεπτό
- ΤΑΣΗ ΤΡΟΦΟΔΟΣΙΑΣ (ΠΟΛΙΚΗ): 400V Δ/690V Υ
- ΣΥΧΝΟΤΗΤΑ: 50Hz
- ΑΡΙΘΜΟΣ ΦΑΣΕΩΝ: 3
- ΤΡΟΠΟΣ ΣΥΝΔΕΣΜΟΛΟΓΙΑΣ: Δ/Υ
- ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΙΣΧΥΟΣ: 0,87
- ΒΑΘΜΟΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ: 93,62% (94%)
- ΡΟΠΗ ΕΚΚΙΝΗΣΗΣ (Locked Rotor Torque): 1,83*Τov
- ΡΕΥΜΑ ΜΕ ΑΚΙΝΗΤΟΠΟΙΗΜΕΝΟ ΔΡΟΜΕΑ (Locked Rotor Current): 6,2*Ιov
- ΡΟΠΗ ΑΝΑΤΡΟΠΗΣ: 2,52*Τov

ΚΛΑΣΗ ΚΙΝΗΤΗΡΑ: F (Έχει σχέση με την μορφή της χαρακτηριστικής ροπής – ταχύτητας του κινητήρα)

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Πρόλογος/Περίληψη	(σελ.)	iii
1 Εισαγωγή		1
2 Επαγωγικοί κινητήρες		
2.1 Δομή επαγωγικού κινητήρα		1
2.2 Αρχή λειτουργίας		2
2.3 Ολίσθηση		3
2.4 Απώλειες και διάγραμμα ροής		3
2.5 Χαρακτηριστική Ροπής- Ταχύτητας		4
2.6 Κλάσεις σχεδίασης		6
2.7 Εκκίνηση και έλεγχος στροφών		7
3 Τυλίγματα		
3.1 Συγκρότηση τυλιγμάτων στάτη		8
3.2 Είδη τυλιγμάτων		8
3.3 Τύποι των τυλιγμάτων του στάτη		9
3.4 Ακέραιο και σμικρυμένο βήμα		11
3.5 Σύνδεση των ακροδεκτών		13
4 Μελέτη επαγωγικού κινητήρα K280 M-6		
4.1 Προδιαγραφές του κινητήρα		15
4.2 Διαστασιολόγηση του κινητήρα		15
4.3 Τυλίγματα στάτη		18
4.4 Υπολογισμός διαστάσεων αυλακιών στάτη		23
4.5 Δρομέας		29
4.5.1 Υπολογισμός των διαστάσεων των αγωγών του δρομέα		30
4.5.2 Υπολογισμός της διαμέτρου του άξονα		32
4.6 Υπολογισμός μαγνήτισης		33

4.7 Υπολογισμός ισοδύναμου κυκλώματος	37
4.8 Απώλειες και βαθμός απόδοσης	44
4.9 Υπολογισμός χαρακτηριστικών λειτουργίας	46
Βιβλιογραφία	49

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι ηλεκτρικές μηχανές Ε.Ρ (εναλλασσόμενου ρεύματος) λειτουργούν και σαν γεννήτριες (Σύγχρονες κυρίως) και σαν κινητήρες (Επαγωγικές κυρίως). Οι μηχανές αυτές χωρίζονται σε δύο κατηγορίες, τις Σύγχρονες Ηλεκτρικές Μηχανές και τις Ασύγχρονες Ηλεκτρικές Μηχανές (Επαγωγικές). Οι Σύγχρονες ηλεκτρικές μηχανές χρησιμοποιούνται κυρίως ως γεννήτριες, διότι μετατρέπουν τη μηχανική ενέργεια σε ηλεκτρική συγκεκριμένης τάσης και συχνότητας. Επειδή η συχνότητα της τάσης εξόδου είναι ίδια με την ταχύτητα περιστροφής του δρομέα της μηχανής η μηχανή ονομάζεται Σύγχρονη. Στις Σύγχρονες γεννήτριες ή αλλιώς Εναλακτήρες όπως τις αποκαλούν βασίζεται η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας σε όλο τον κόσμο. Η βασικότερη κατασκευαστική διαφορά της Σύγχρονης με την Ασύγχρονη ηλεκτρική μηχανή είναι κυρίως η κατασκευή του δρομέα όπου στις σύγχρονες βρίσκεται το τύλιγμα διέγερσης και έχουμε τροφοδοσία αυτού με χρήση δακτυλίων και ψηκτρών. Η βασική αρχή λειτουργίας τους είναι ότι όταν εφαρμόζεται στις τρεις συστάδες του στάτη που απέχουν 120ο η μια από την άλλη, στο εσωτερικό του παράγεται στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο, ακριβώς ανάλογα ένα στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο παράγει τριφασικό σύστημα τάσεως στα άκρα των συστάδων του στάτη.

Οι Ασύγχρονες Μηχανές μπορούν να λειτουργήσουν και σαν κινητήρες και σαν γεννήτριες λόγο όμως των πάρα πολλών προβλημάτων που έχουμε όταν λειτουργούν σαν γεννήτριες, χρησιμοποιούνται σπάνια σαν γεννήτριες, αλλά χρησιμοποιούνται σε μεγάλη πλειοψηφία σαν κινητήρες λόγω της απλότητας της κατασκευής γίνονται πιο οικονομικοί από άλλους κινητήρες και επίσης είναι πιο ανθεκτικοί και σε κακές συνθήκες περιβάλλοντος (σκόνη, υγρασία, κ.τ.λ.) και έχουμε πιο σπάνιες και οικονομικές συντηρήσεις (αλλαγή ρουλεμάν).η ονομασία τους ως Επαγωγικές οφείλετε στο γεγονός ότι η τάση στο δρομέα της μηχανής (που παράγει ρεύμα διέγερσης και το πεδίο του δρομέα) επάγεται στα τυλίγματα του αντί να προσφέρεται με κάποια ηλεκτρική σύνδεση

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ΕΠΑΓΩΓΙΚΟΙ ΚΙΝΗΤΗΡΕΣ

2.1 ΔΟΜΗ ΕΠΑΓΩΓΙΚΟΥ ΚΙΝΗΤΗΡΑ

Οι τριφασικοί Ασύγχρονοι κινητήρες αποτελούνται από δύο τυλίγματα το τύλιγμα του Στάτη γνωστό και σαν τύλιγμα τυμπάνου και αποτελείτε από τρία όμοια διανεμημένα μονοφασικά τυλίγματα μετατεθειμένα στο χώρο κατά 120ο ηλεκτρικές μοίρες. Ο αριθμός των πόλων των τυλιγμάτων του στάτη καθορίζει και τις ονομαστικές στροφές του κινητήρα οι οποίες είναι λίγο λιγότερες από την ταχύτητα περιστροφής του μαγνητικού πεδίου στο εσωτερικό της μηχανής. Ο Στάτης είναι όμοιος με αυτόν του Σύγχρονου κινητήρα. Το άλλο τύλιγμα είναι αυτό του δρομέα όπου εδώ έχουμε δύο τύπους, τον δρομέα βραχυκυκλωμένου κλωβού (squirrel-cage rotor) και το δακτυλιοφόρο δρομέα (wound rotor). Ο δρομέας βραχυκυκλωμένου κλωβού αποτελείτε από μια σειρά αγωγίων ράβδων που είναι τοποθετημένες σε αυλάκια στην επιφάνεια του δρομέα και είναι βραχυκυκλωμένες και από

τις δύο άκρες μέσω μεγάλων δακτυλίων βραχυκύκλωσης. Ο δακτυλιοφόρος δρομέας διαθέτει ολοκληρωμένο τριφασικό τύλιγμα με ίσο αριθμό πόλων με του στάτη και το οποίο είναι τοποθετημένο ώστε να αποτελεί κατοπτρικό είδωλο του τυλίγματος του στάτη. Οι φάσεις του δρομέα συνδέονται συνήθως σε αστέρα ενώ τα άκρα τους σε δακτυλίους. Σε αυτούς τους κινητήρες έχουμε τη δυνατότητα σύνδεσης και αντιστάσεων στο κύκλωμα διέγερσης όπου μας δίνετε η δυνατότητα ρύθμισης της χαρακτηριστικής ροπής-ταχύτητας.

2.2 ΑΡΧΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ

Όταν τροφοδοτούμε το τύλιγμα του στάτη με ένα τριφασικό συμμετρικό φορτίο δημιουργείτε στο διάκενο της μηχανής ένα στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο B_s . Η ταχύτητα περιστροφής του πεδίου είναι ανάλογη της συχνότητας της τάσης τροφοδοσίας και του αριθμού των πόλων του τυλίγματος του στάτη.

$$n_{sync} = \frac{60 \cdot f_e}{P}$$

όπου n_{sync} η σύγχρονη ταχύτητα του μαγνητικού πεδίου του στάτη σε rpm (revolution per minute), f_e η συχνότητα του συστήματος σε Hz και P τα ζεύγη των πόλων της μηχανής.

Το μαγνητικό πεδίο B_s καθώς διέρχεται πάνω από τους αγωγούς του δρομέα επάγει κάποια τάση στα άκρα τους.

Η τάση εξ επαγωγής στα άκρα ενός συγκεκριμένου αγωγού του δρομέα δίνεται από την εξίσωση :

$$e_{ind} = (v \times B) \cdot l$$

όπου v η σχετική ταχύτητα των αγωγών του δρομέα ως προς το μαγνητικό πεδίο, B η μαγνητική επαγωγή του πεδίου του στάτη, l το μήκος του αγωγού του δρομέα.

Η τάση στα άκρα των αγωγών του δρομέα προκαλείτε από τη σχετική κίνηση του δρομέα ως προς το μαγνητικό πεδίο του στάτη. Το ρεύμα του δρομέα προκαλεί το αντίστοιχο μαγνητικό πεδίο του δρομέα B_R .

Η επαγόμενη ροπή στη μηχανή δίνεται από τη σχέση :

$$\tau_{ind} = k \cdot B_R \times B_s$$

όπου B_s το στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο του στάτη, B_R το μαγνητικό πεδίο του δρομέα.

Ο δρομέας στρέφεται με την ίδια φορά που στρέφεται το μαγνητικό πεδίο του στάτη, αλλά η ταχύτητα του ποτέ δεν γίνεται ίση με την σύγχρονη, επειδή σε μία 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 τους. Εάν η τάση εινδ ήταν μηδενική, οι αγωγοί του δρομέα δε θα διαρρέονταν από ρεύμα και δεν θα αναπτυσσόταν μαγνητικό πεδίο στον δρομέα. Η επαγόμενη ροπή θα ήταν μηδενική και θα επακολουθούσε επιβράδυνση του δρομέα λόγω των απωλειών τριβής. Τέλος, ένας επαγωγικός κινητήρας μπορεί να περιστρέφεται με ταχύτητα πολύ κοντά στην σύγχρονη ταχύτητα, αλλά δεν είναι ποτέ δυνατό να περιστρέφεται με ταχύτητα ακριβώς ίση με αυτήν.

2.3 Ολίσθηση

Η τάση που επάγεται σε κάποιον από τους αγωγούς του δρομέα ενός επαγωγικού κινητήρα εξαρτάται από τη σχετική κίνηση του δρομέα ως προς τα μαγνητικά πεδία. Όμως, επειδή η συμπεριφορά ενός επαγωγικού κινητήρα εξαρτάται από τις τάσεις και τα ρεύματα του δρομέα, γίνεται αναφορά για την παραπάνω σχετική ταχύτητα. Δύο 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 την σύγχρονη ταχύτητα και δίνεται από την εξίσωση :

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

με n_{slip} η ταχύτητα ολίσθησης της μηχανής και n_m η μηχανική ταχύτητα του άξονα περιστροφής.

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 (per – unit) βάση. Έτσι, η ολίσθηση ορίζεται από τη σχέση :

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

Παρατήρηση: Εάν ο δρομέας περιστρέφεται με τη σύγχρονη ταχύτητα, είναι $s = 0$, ενώ, εάν ο δρομέας είναι ακίνητος, είναι $s = 1$.

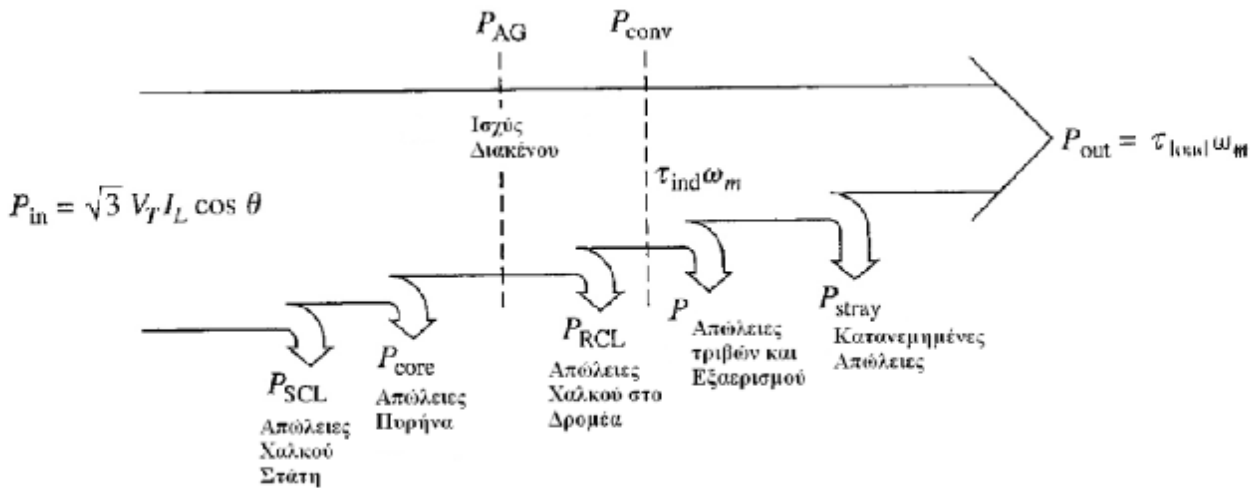
Ακόμα, η ταχύτητα περιστροφής του άξονα της μηχανής μπορεί να εκφραστεί μέσω της ολίσθησης και της σύγχρονης ταχύτητας με την εξίσωση :

$$n_m = (1 - s) \cdot n_{sync}$$

2.4 Απώλειες και διάγραμμα ροής

Ο επαγωγικός κινητήρας λειτουργεί ως στρεφόμενος μετασχηματιστής. Η είσοδος του αποτελεί τριφασικό σύστημα τάσεων και ρευμάτων. Σε έναν κανονικό μετασχηματιστή η ηλεκτρική ισχύς εξόδου είναι η ισχύς στο δευτερεύον τύλιγμα. Στον επαγωγικό κινητήρα το

δευτερεύον τύλιγμα (ο δρομέας) είναι βραχυκυκλωμένο και έτσι δεν εμφανίζεται ηλεκτρική ισχύς στην έξοδο της μηχανής. Αντίθετα, η ισχύς εξόδου του κινητήρα είναι μηχανική. Η σχέση ανάμεσα στην ηλεκτρική ισχύ εισόδου και στη μηχανική ισχύ εξόδου του εν λόγω κινητήρα παρουσιάζεται στο διάγραμμα ροής ισχύος του (σχήμα 1).

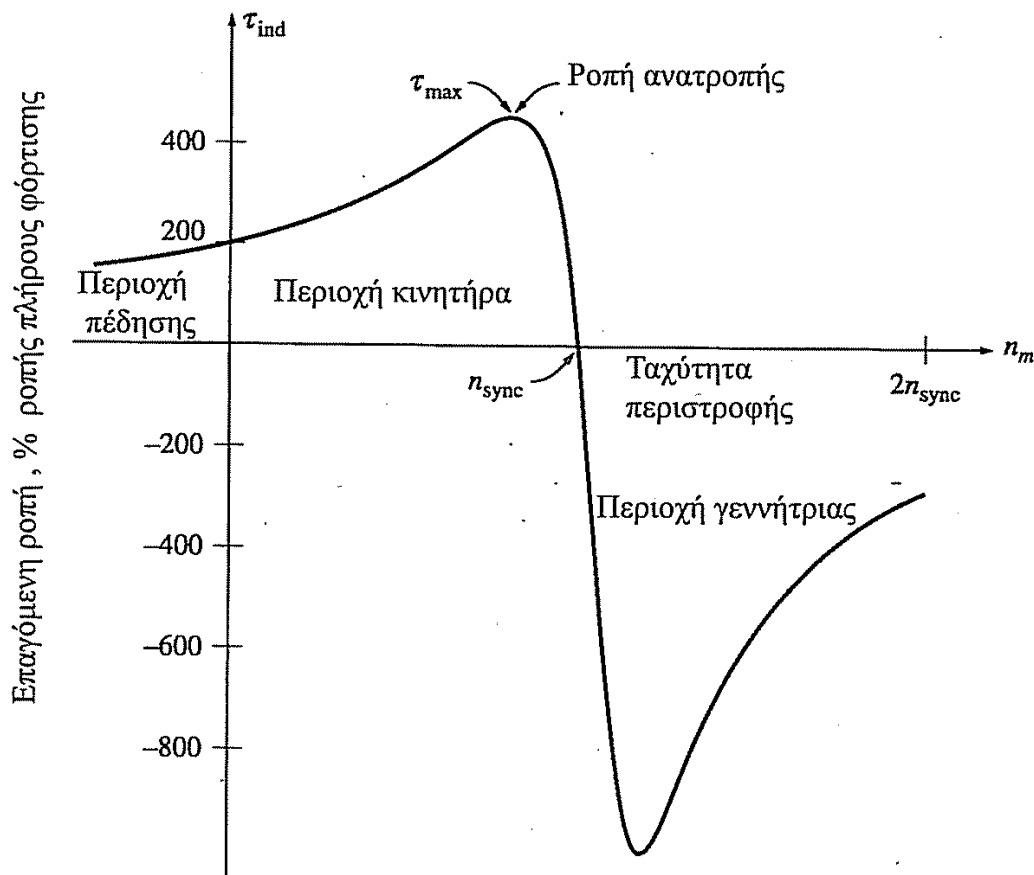


Σχήμα 1 : Το διάγραμμα ροής ισχύος ενός επαγωγικού κινητήρα.

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 – P_{SCL}). Έπειτα, κάποιο ποσό ισχύος χάνεται με την μορφή απωλειών υστέρησης και απωλειών εξαιτίας των δινορρευμάτων στο στάτη (P_{core}). 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 P_{AG} 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 – P_{RCL}), ενώ η ισχύς που απομένει μετατρέπεται από ηλεκτρική σε μηχανική (P_{conv}). Από αυτή την ισχύ αφαιρούνται τελικά οι απώλειες τριβής και εξαερισμού $P_{PF\&W}$, καθώς και οι κατανεμημένες απώλειες P_{misc} . Η εναπομείνουσα μηχανική ισχύ αποτελεί την ισχύ εξόδου P_{out} της μηχανής.

2.5 Χαρακτηριστικά Ροπής – Ταχύτητας

Η καμπύλη ροπής – ταχύτητας του επαγωγικού κινητήρα (σχήμα 2) δίνει τις εξής πληροφορίες:



Σχήμα 2 : Η χαρακτηριστική ροπής – ταχύτητας του επαγωγικού κινητήρα, όπου φαίνονται η περιοχή πέδησης και η περιοχή λειτουργίας.

- Η επαγόμενη ροπή του επαγωγικού κινητήρα είναι μηδενική στη σύγχρονη ταχύτητα όπως προαναφέρθηκε.
- Υπάρχει μία μέγιστη ροπή που είναι αδύνατο να ξεπεραστεί. Αυτή η ροπή ονομάζεται ροπή ανατροπής ή ροπή κατάρρευσης (pullout – breakdown torque) και είναι δύο έως τρεις φορές μεγαλύτερη από την ονομαστική ροπή του κινητήρα κατά την πλήρη φόρτιση.
- Η ροπή εκκίνησης του κινητήρα είναι λίγο μεγαλύτερη από την ροπή κατά την πλήρη φόρτιση. Έτσι, ο επαγωγικός κινητήρας μπορεί να ξεκινήσει με οποιοδήποτε από τα φορτία που είναι ικανός να κινήσει στη λειτουργία υπό πλήρη ισχύ.
- Αν ο δρομέας του κινητήρα περιστρέφεται με ταχύτητα μεγαλύτερη από την σύγχρονη ταχύτητα, η φορά περιστροφής της επαγόμενης ροπής αντιστρέφεται, με αποτέλεσμα η μηχανή να λειτουργεί ως γεννήτρια.

- Αν η φορά περιστροφής του κινητήρα είναι αντίθετη από τη φορά περιστροφής των μαγνητικών πεδίων στο εσωτερικό του, η επαγόμενη ροπή θα σταματήσει τον κινητήρα και θα προσπαθήσει να τον περιστρέψει προς την αντίθετη φορά. Αυτό το στοιχείο μπορεί να χρησιμοποιηθεί με σκοπό το απότομο σταμάτημα του κινητήρα που ονομάζεται ακαριαία πέδηση (plugging).

2.6 Κλάσεις σχεδίασης

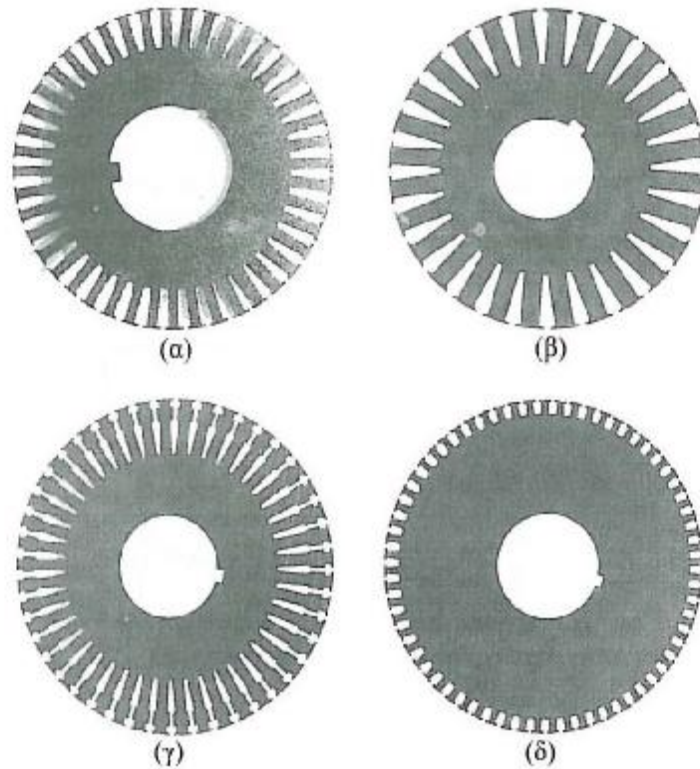
Με την μεταβολή των χαρακτηριστικών του δρομέα ενός επαγωγικού κινητήρα είναι δυνατή η υλοποίηση μεγάλης ποικιλίας χαρακτηριστικών ροπής – ταχύτητας. Με σκοπό να βοηθήσουν τη βιομηχανία στην επιλογή των κατάλληλων κινητήρων σε διαφορετικές εφαρμογές και σε όλα τα εύρη ισχύος, η NEMA στις ΗΠΑ και η International Electrotechnical Commission (IEC) στην Ευρώπη έχουν θεσπίσει μια σειρά από τυποποιημένες σχεδιάσεις κινητήρων με διαφορετικές χαρακτηριστικές ροπής – ταχύτητας. Οι τυποποιημένες αυτές σχεδιάσεις ονομάζονται κλάσεις σχεδίασης (design classes). Οι κλάσεις αυτές και οι ιδιότητές τους αναλύονται παρακάτω :

- **ΚΛΑΣΣ**
Η 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.
- **ΚΛΑΣΣ**
Η 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.
- **ΚΛΑΣΣ**
Η ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ C: Οι κινητήρες κλάσης C 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.

ΚΛΑΣΣ

Η ΣΧΕΔΙΑΣΗ D: Οι κινητήρες κλάσης D 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 A, 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 διατηρητικές πρέσες ή ψαλίδια.



Εικόνα : Τα δυναμοελάσματα που σχηματίζουν τους δρομείς των επαγωγικών κινητήρων βραχυκυκλωμένου κλωβού.

(α): Κλάση σχεδίασης A

(β): Κλάση σχεδίασης B

(γ): Κλάση σχεδίασης Γ

(δ): Κλάση σχεδίασης Δ

2.7 Εκκίνηση και έλεγχος στρόφων

Οι επαγωγικοί κινητήρες δεν παρουσιάζουν κατά την εκκίνηση τους τα προβλήματα των σύγχρονων κινητήρων. Σε πολλές περιπτώσεις η εκκίνηση των επαγωγικών κινητήρων επιτυγχάνετε απλά με την σύνδεση τους στο δίκτυο. Σε αρκετές περιπτώσεις όμως δεν έχουμε την δυνατότητα να ξεκινήσουμε απευθείας είτε λόγο μεγάλου ρεύματος εκκίνησης είτε οδήγηση κάποιου φορτίου που θέλουμε ομαλή εκκίνηση. Στους κινητήρες με δακτυλιοφόρο δρομέα απλά συνδέουμε εξωτερικές αντιστάσεις στο δρομέα οπότε αυξάνετε η ροπή εκκίνησης αλλά το ρεύμα μειώνετε. Στους κινητήρες βραχυκυκλωμένου δρομέα μερικές μέθοδοι εκκίνησης είναι η εκκίνηση κατά αστέρα τρίγωνο εφόσον το επιτρέπουν τα χαρακτηριστικά του κινητήρα, η εισαγωγή αυτεπαγωγών ή αντιστάσεων στο δίκτυο ισχύος κατά την εκκίνηση, η χρήση αυτομετασχηματιστή, η χρήση ηλεκτρονικών ισχύος όπως οι ομαλοί εκκινειτές soft start. Η αλλαγή φοράς περιστροφής των επαγωγικών κινητήρων είναι αρκετά απλή απλώς αλλάζουμε τη φορά περιστροφής του μαγνητικού πεδίου και αυτό το επιτυγχάνουμε με την εναλλαγή δυο εκ των φάσεων. Ο έλεγχος στρόφων των επαγωγικών κινητήρων επιτυγχάνεται με την μεταβολή της σύγχρονης ταχύτητας που είναι η ταχύτητα περιστροφής του μαγνητικού πεδίου του στάτη και του δρομέα, αφού η ταχύτητα του άξονα παραμένει πάντα κοντά στη σύγχρονη ταχύτητα. Αυτό επιτυγχάνεται με τη χρήση inverter όπου αλλάζει τη συχνότητα της τάσης τροφοδοσίας. Άλλος τρόπος είναι η μεταβολή του αριθμού των πόλων εάν το επιτρέπει η κατασκευή του κινητήρα. Επίσης ρύθμιση της ταχύτητας επιτυγχάνουμε με τη μεταβολή της αντίστασης του δρομέα όπου μεταβάλετε η μορφή της χαρακτηριστικής ροπής-ταχύτητας και τέλος μεταβολή της ταχύτητας έχουμε με τη μεταβολή της τάσης τροφοδοσίας σε αυτή την περίπτωση η ταχύτητα ελέγχετε σε μικρό εύρος.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 ΤΥΛΙΓΜΑΤΑ

3.1 Συγκρότηση τυλιγμάτων στάτη

Το τύλιγμα του στάτη είναι συγκροτημένο από μάτσα με χάλκινο σύρμα ή από χάλκινες μπάρες. Τα μάτσα ή οι μπάρες είναι τοποθετημένα μέσα σε κατάλληλα αυλάκια, τα οποία βρίσκονται στην εσωτερική κυλινδρική επιφάνεια του στάτη.

Τα τυλίγματα με μάτσα χρησιμοποιούνται κανονικά για κινητήρες με μικρή ισχύ, αλλά μπορούν να χρησιμοποιηθούν και σε κινητήρες με μεγάλη ισχύ και μεγάλη τάση. Στα τυλίγματα των κινητήρων με μικρή ισχύ η διάμετρος του σύρματος σπάνια ξεπερνάει τα 3mm. Για μεγαλύτερες διατομές συνίσταται η χρήση δυο ή περισσότερων συρμάτων συνδεδεμένων παράλληλα.

Τα τυλίγματα με μπάρες χρησιμοποιούνται στις μηχανές με μεγάλη ισχύ και χαμηλή τάση. Στην περίπτωση που έχουμε υψηλή ένταση ρεύματος δεν ενδείκνυται η χρήση στρογγυλού σύρματος. Στα τυλίγματα με μεγάλη ένταση δεν ενδείκνυται η χρήση μεγάλων μπαρών,

επειδή δημιουργούνται παρασιτικά ρεύματα. Αντίθετα, ενδείκνυται η χρήση αγωγών ορθογώνιας διατομής, μονωμένων μεταξύ τους και συνδεδεμένων παράλληλα.

3.2 Είδη τυλιγμάτων

Οι μηχανές εναλλασσόμενου ρεύματος κατασκευάζονται με τρία είδη τυλιγμάτων τα οποία είναι :

- Τυλίγματα με ένα μάτσο / αυλάκι
- Τυλίγματα με δύο μάτσα / αυλάκι
- Τυλίγματα με ένα και δύο μάτσα / αυλάκι

Τα τυλίγματα με ένα μάτσο / αυλάκι ονομάζονται και τυλίγματα με μια στρώση. Τα τυλίγματα με δύο μάτσα ανά αυλάκι ονομάζονται και τυλίγματα με δύο στρώσεις και τέλος τα τυλίγματα με ένα και δύο μάτσα / αυλάκι ονομάζονται μικτά τυλίγματα.

Τα τυλίγματα μπορεί να είναι μονοφασικά, διφασικά και τριφασικά. Τα πλέον διαδεδομένα τυλίγματα είναι τα τριφασικά, τα οποία μπορούν να θεωρηθούν ότι προκύπτουν από τρία μονοφασικά κυκλώματα μετατοπισμένα μεταξύ τους κατά 120 ηλεκτρικές μοίρες.

3.3 Τύποι των τυλιγμάτων του στάτη

Τα τυλίγματα των ασύγχρονων κινητήρων διακρίνονται σε 3 συστήματα τα οποία είναι :

- Ομόκεντρο
- Βροχοειδές (συνήθως ονομάζεται "στεφάνης")
- Κυματοειδές

Τα τρία συστήματα μπορούν να διακριθούν σε δύο τύπους :

1. Με ομώνυμους πόλους
2. Με εναλλάξ πόλους

Τόσο τα τυλίγματα με εναλλάξ πόλους όσο και εκείνα με ομώνυμους πόλους, ανάλογα με το πλάτος του μάτσου, δηλαδή της αποστάσεως μεταξύ των ενεργών πλευρών, διακρίνονται σε :

1. Τυλίγματα με βήμα ακέραιο
2. Τυλίγματα με βήμα σμικρυνόμενο

Όπως αναφέραμε τα τυλίγματα μπορούν να πραγματοποιηθούν με ένα και με δύο μάτσα σε κάθε αυλάκι. Στα τυλίγματα με ένα μάτσο ανά αυλάκι οι αγωγοί κάθε αυλακιού αποτελούν

ένα στοιχείο, ενώ στα τυλίγματα με δύο μάτσα ανά αυλάκι οι αγωγοί κάθε αυλακιού αποτελούν δύο στοιχεία.

Το βήμα των αυλακιών y_a είναι ίσο με το πολικό βήμα y_p στα τυλίγματα με βήμα ακέραιο :

$$y_a = y_p = N_a/2 \cdot P$$

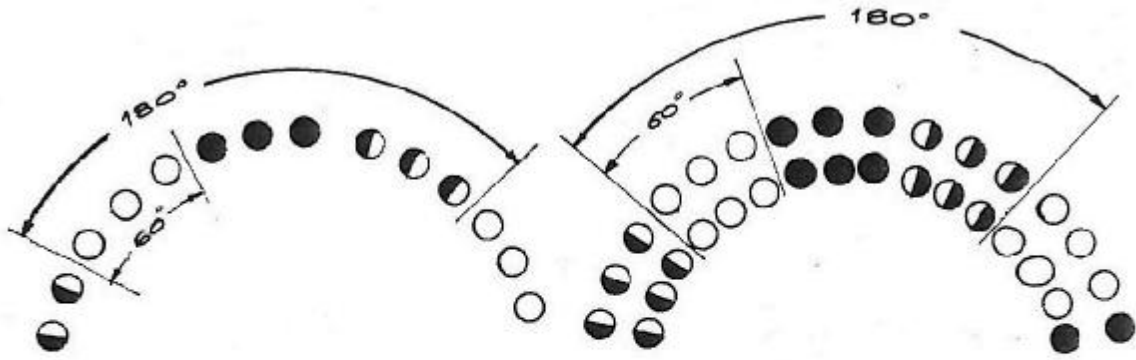
Όπου N_a το πλήθος των αυλακιών του στάτη και P οι πόλοι της μηχανής.

Στα τυλίγματα με βήμα σμικρυνόμενο το βήμα των αυλακιών y_a είναι πάντα μικρότερο του πολικού βήματος y_p :

$$y_a < N_a/2 \cdot P$$

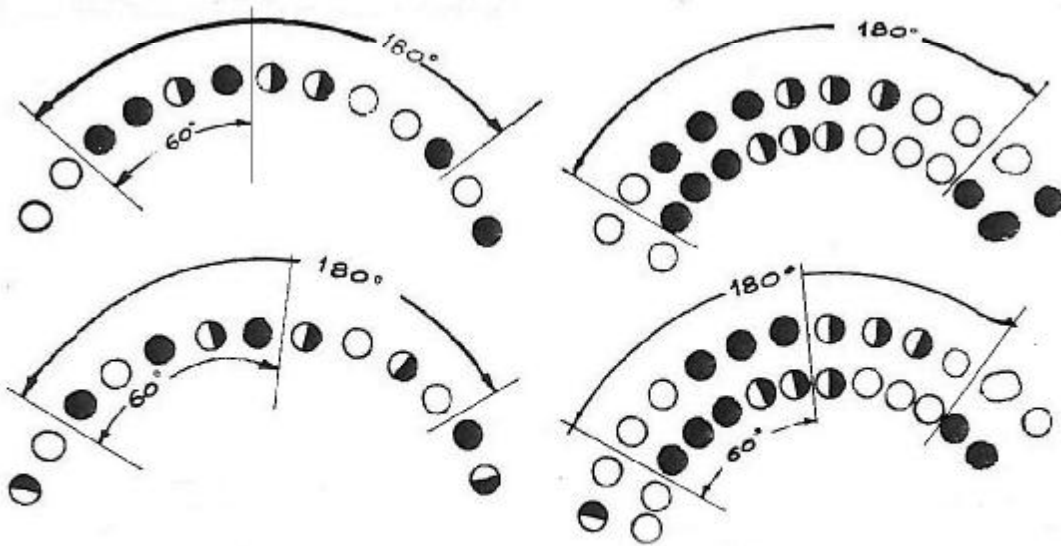
Στα τυλίγματα με βήμα ακέραιο κάθε φάση συνήθως καταλαμβάνει το **1/3** του πολικού βήματος, δηλαδή τα στοιχεία κάθε φάσης είναι κατανεμημένα συνήθως ομοιόμορφα κατά μήκος μιας ζώνης 60 ηλεκτρικών μοιρών σχήμα 1α, 1β.

Στα τυλίγματα με βήμα σμικρυνόμενο κάθε φάση καταλαμβάνει πάντα μια στρώση μεγαλύτερη του **1/3** του πολικού βήματος σχήμα 2α, 2β.



Σχήμα: 1α

Σχήμα: 1β



Σχήμα: 2α

Σχήμα: 2β

Το βήμα των τυλιγμάτων με ένα μάτσο / αυλάκι μπορεί να θεωρηθεί ακέραιο, όταν προκύπτει λίγο διαφορετικό από το πολικό βήμα υπ, αρκεί κάθε φάση να καταλαμβάνει συνέχεια το $1/3$ του πολικού βήματος. Τόσο τα τυλίγματα με μια στρώση όσο και εκείνα με δύο στρώσεις μπορούν να πραγματοποιηθούν με βήμα ακέραιο και βήμα κλασματικό. Συνήθως χρησιμοποιούμε το σμικρυμένο βήμα για τα τυλίγματα με 2 στρώσεις.

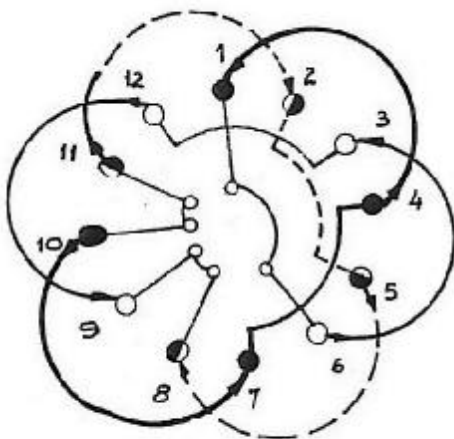
3.4 Ακέραιο και σμικρυμένο βήμα

Όπως είπαμε τα τυλίγματα με ακέραιο αριθμό αυλακιών ανά πόλο και φάση μπορούν να πραγματοποιηθούν με βήμα ακέραιο ή σμικρυμένο.

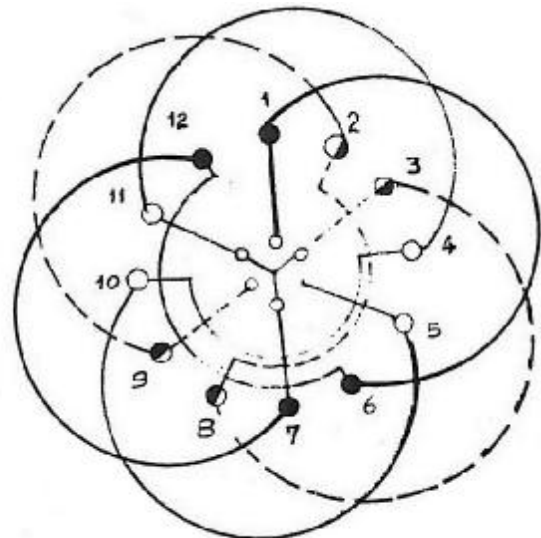
Πιο συγκεκριμένα, στα τυλίγματα με βήμα ακέραιο το βήμα των αυλακιών καθορίζεται από τη σχέση :

$$q = \frac{Na}{3.2 * P}$$

Οι μετωπικές συνδέσεις των μάτσων γίνονται με βάση το βήμα του τυλίγματος για με τέτοιο τρόπο, ώστε να πετυχαίνουμε ίσο αριθμό συγκροτημάτων με τους πόλους ή τα ζεύγη πόλων για τυλίγματα με πόλους εναλλάξ ή ομώνυμους αντίστοιχα. Τα μάτσα κάθε συγκροτήματος συνδέονται πάντα σε σειρά μεταξύ τους. Τα συγκροτήματα κάθε φάσεως συνδέονται είτε σε σειρά είτε παράλληλα είτε σειρά – παράλληλα. Η πραγματοποίηση της συνδέσεως των συγκροτημάτων κάθε φάσεως γίνεται πολύ εύκολα με την τοποθέτηση τόξων στις μετωπικές συνδέσεις. Τα τόξα για κάθε συγκρότημα έχουν όλα την ίδια φορά στα τυλίγματα με ομώνυμους πόλους (σχήμα α), ενώ στα τυλίγματα με πόλους εναλλάξ έχουν αντίθετη φορά εναλλάξ (σχήμα β).



Σχήμα α



Σχήμα β

Στα τυλίγματα με πόλους εναλλάξ με ένα μάτσο / αυλάκι και με q ζυγό αριθμό, ο αριθμός των μάτσων σε κάθε συγκρότημα είναι το $1/2$ του αριθμού των αυλακιών ανά πόλο και φάση, ενώ στα τυλίγματα με ομώνυμους πόλους ο αριθμός των μάτσων σε κάθε συγκρότημα είναι ίσος με q. Στα τυλίγματα με πόλους εναλλάξ και με q μονό αριθμό τα συγκροτήματα από μάτσα κάθε φάσης δεν είναι όλα ίσα. Τα τυλίγματα με δύο μάτσα / αυλάκι γίνονται κυρίως βροχοειδή και κάθε μάτσο θα έχει πάντα μια πλευρά ενεργή στο πάνω στρώμα ενός συγκροτήματος και την άλλη στο κάτω στρώμα διαδοχικού συγκροτήματος της ίδιας φάσης ή αντίστροφα. Ακολούθως, τα στοιχεία του κάτω συγκροτήματος κάθε ζώνης θα πρέπει να συνδέονται με στοιχεία που αντιστοιχούν στο πάνω στρώμα της επόμενης ζώνης.

Όπως προαναφέρθηκε, στα τυλίγματα με βήμα σμικρυνόμενο το βήμα των αυλακιών y_a είναι πάντα μικρότερο του πολικού βήματος y_p . Στα τυλίγματα με δύο μάτσα / αυλάκι και βήμα σμικρυνόμενο τα στοιχεία του κάτω στρώματος ενός συγκροτήματος συνδέονται με εκείνα του πάνω στρώματος διαδοχικού συγκροτήματος της ίδιας φάσης. Σε αυτά τα τυλίγματα έχουμε μείωση κατά ένα αυλάκι της εξαπλώσης του συγκροτήματος κάθε φάσης, όταν μειώνουμε το βήμα των αυλακιών κατά μία μονάδα.

3.5 Σύνδεση των άκρων των φάσεων

Τα άκρα των φάσεων μπορούν να συνδεθούν :

- Σε αστέρα Y
- Σε τρίγωνο Δ
- Σε διπλό αστέρα
- Σε διπλό τρίγωνο

Οι αρχές και τα πέρατα των φάσεων συνδέονται σε ακροδέκτες που είναι τοποθετημένοι συνήθως σε μία μονωμένη πλάκα στην εξωτερική πλευρά του σκελετού. Οι αρχές των τριών φάσεων δηλώνονται με τα γράμματα U, V, W και τα πέρατα με τα γράμματα x, y, z. Το τυλίγμα U – x αποτελεί την πρώτη φάση, το V – y τη δεύτερη φάση και το W – z την τρίτη φάση.

Οι τριφασικοί κινητήρες μπορεί να έχουν 3, 6 ή 12 ακροδέκτες. Η διάταξη των 3 ακροδεκτών χρησιμοποιείται όταν η σύνδεση σε αστέρα ή τρίγωνο έχει γίνει εσωτερικά στη μηχανή. Σε αυτή την περίπτωση ο κινητήρας λειτουργεί κανονικά με την τάση που αναγράφεται στην ταμπέλα. Η διάταξη των 6 ακροδεκτών επιτρέπει την σύνδεση των τυλιγμάτων σε αστέρα και τρίγωνο. Με αυτόν τον τρόπο μπορούμε να εφαρμόσουμε 2 τάσεις διαφορετικές, V σε τρίγωνο και $\sqrt{3} \cdot V_{\pi}$ σε αστέρα.

Η διάταξη των 12 ακροδεκτών δίνει τη δυνατότητα συνδέσεως των τυλιγμάτων :

- 1) Σε διπλό τρίγωνο
- 2) Σε διπλό αστέρα
- 3) Σε τρίγωνο
- 4) Σε αστέρα

Έτσι μπορούμε να εφαρμόσουμε 4 τάσεις διαφορετικές:

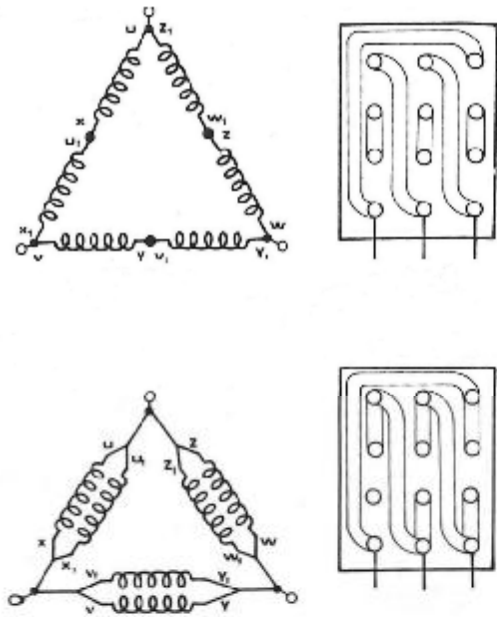
$V / 2$ στο διπλό τρίγωνο, $\sqrt{3} \cdot V / 2$ στο διπλό αστέρα, V στο τρίγωνο, $V \cdot \sqrt{3}$ στον αστέρα.

Όταν συνδέουμε τους ακροδέκτες z, x και y όπως φαίνεται στο σχήμα, τότε οι φάσεις συνδέονται κατά αστέρα. Στους τρεις ακροδέκτες συνδέεται το τριφασικό δίκτυο. Όταν το δίκτυο αποτελείται από τέσσερις αγωγούς, ο ουδέτερος αγωγός συνδέεται στον ουδέτερο κόμβο την μηχανής (z-x-y).

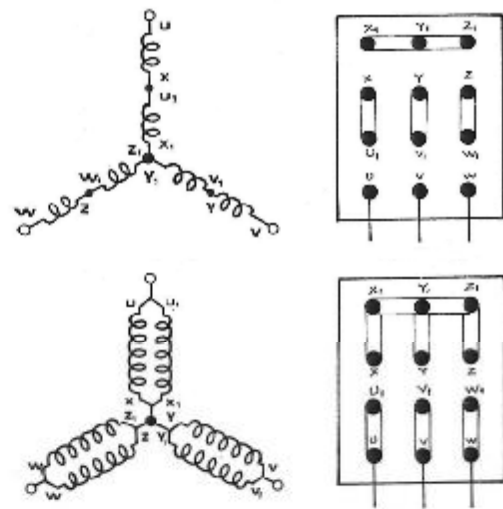
Η σύνδεση κατά τρίγωνο πραγματοποιείται με την τοποθέτηση τριών ελασμάτων όπως φαίνεται στο σχήμα 3. Με το σύστημα των 12 άκρων η διαφοροποίηση στις συνδέσεις γίνεται με την αλλαγή των ελασμάτων στη σύνδεση των ακροδεκτών στην πινακίδα.

Το σχήμα 3 δείχνει τη σχηματική συνδεσμολογία και την διάταξη των ελασμάτων για την σύνδεση των φάσεων σε τρίγωνο και για την σύνδεση σε διπλό τρίγωνο.

Επιπρόσθετα, το σχήμα 4 δείχνει τη σχηματική συνδεσμολογία και τη διάταξη των ελασμάτων για τη σύνδεση των φάσεων σε αστέρα και για την σύνδεση σε διπλό αστέρα.



Σχήμα 3



Σχήμα 4

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 – ΜΕΛΕΤΗ ΕΠΑΓΩΓΙΚΟΥ ΚΙΝΗΤΗΡΑ Κ280 Μ-6

4.1 Προδιαγραφές του κινητήρα

Σκοπός της πτυχιακής εργασίας είναι η μελέτη και ο προσδιορισμός των απαιτούμενων εξαρτημάτων, τυλιγμάτων για την κατασκευή ενός τριφασικού επαγωγικού κινητήρα 6 πόλων 55KW, παρόμοιο με τον Κ280 μ-6 της Ελληνικής εταιρείας Βαλιάδη. Το χαρακτηριστικά που θέλουμε να έχει ο κινητήρας μας είναι τα ακόλουθα :

- ΟΝΟΜΑΣΤΙΚΗ ΙΣΧΥΣ: 55kW/75hp
- ΣΥΓΧΡΟΝΗ ΤΑΧΥΤΗΤΑ: 1000στρ./λεπτό
- ΤΑΣΗ ΤΡΟΦΟΔΟΣΙΑΣ (ΠΟΛΙΚΗ): 400V Δ/690V Υ
- ΣΥΧΝΟΤΗΤΑ: 50Hz
- ΑΡΙΘΜΟΣ ΦΑΣΕΩΝ: 3
- ΤΡΟΠΟΣ ΣΥΝΔΕΣΜΟΛΟΓΙΑΣ: Δ/Υ
- ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΙΣΧΥΟΣ: 0,87
- ΒΑΘΜΟΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ: 93,62% (94%)
- ΡΟΠΗ ΕΚΚΙΝΗΣΗΣ (Locked Rotor Torque): 1,83*Τον
- ΡΕΥΜΑ ΜΕ ΑΚΙΝΗΤΟΠΟΙΗΜΕΝΟ ΔΡΟΜΕΑ (Locked Rotor Current): 6,2*Ιον
- ΡΟΠΗ ΑΝΑΤΡΟΠΗΣ: 2,52*Τον
- ΚΛΑΣΗ ΚΙΝΗΤΗΡΑ: F (Έχει σχέση με την μορφή της χαρακτηριστικής ροπής – ταχύτητας του κινητήρα)

Κάποια από τα παραπάνω στοιχεία (π.χ. συντελεστής απόδοσης, συντελεστής ισχύος, ροπή κλπ) θα επιδιώξουμε να τα πετύχουμε κατά την σχεδίαση του κινητήρα. Εάν δεν τα καταφέρουμε, θα πρέπει να αλλάξουμε κάποια από τα χαρακτηριστικά του κινητήρα μας. Στην συνέχεια, αρχίζουμε την σχεδίαση με την αρχική διαστασιολόγηση του κινητήρα. Κατά την διάρκεια της σχεδίασης αρκετές από τις διαστάσεις θα αλλάξουν!

4.2 Διαστασιολόγηση του κινητήρα

Ξεκινάμε με τον υπολογισμό της εσωτερικής διαμέτρου του στάτη DIS η οποία δίνεται από τον τύπο:

$$D_{IS} = \sqrt[3]{\frac{2P_i \cdot P_i \cdot S_{gap}}{\pi \cdot \lambda \cdot f \cdot C_0}} \quad (1)$$

Στην παραπάνω σχέση P_i είναι τα ζεύγη πόλων, f η συχνότητα λειτουργίας, S_{gap} η φαινόμενη ισχύς διακένου, λ ο λόγος του μήκους του πυρήνα προς το πολικό βήμα και C_0 μια σταθερά.

Η ισχύς διακένου υπολογίζεται από την σχέση:

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

Στην παραπάνω σχέση P_n είναι η ονομαστική ισχύς, nN ο βαθμός απόδοσης και $\cos\varphi$ ο συντελεστής ισχύος.

Όπου:

$$K_E = \frac{E_A}{V_\varphi} \approx 0,98 - 0,005 \cdot p_i = 0,98 - 0,005 \cdot 3 = 0,965$$

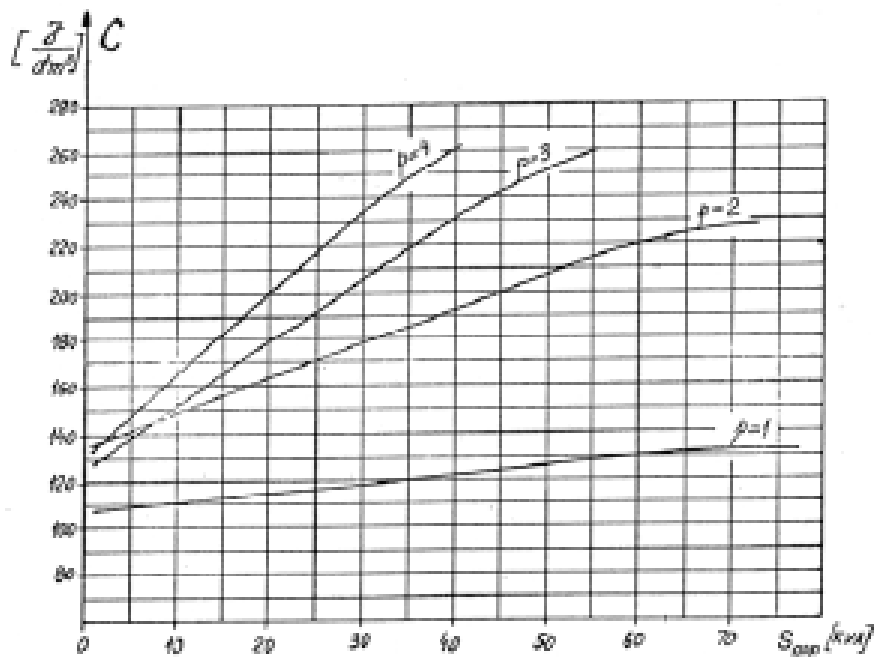
Άρα:

$$S_{app} = \frac{K_E \cdot P_n}{\eta_N \cdot \cos\varphi} = \frac{0,965 \cdot 55000W}{0,94 \cdot 0,87} = 64,9KVA$$

Ο συντελεστής λ είναι ο λόγος του μήκους του πυρήνα προς το πολικό βήμα και όταν πρόκειται για εξαπολικούς κινητήρες παίρνει τιμή μεταξύ 1,6 και 2,2 (εμπειρική τιμή – από τον πίνακα 15.1). Στη συγκεκριμένη μελέτη επιλέγουμε τιμή ίση με 1,9.

$2p_i$	2	4	6	8
λ	0.6 - 1.0	1.2 - 1.8	1.6 - 2.2	2 - 3

Το CO 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 κλπ. Δύναται όμως να υπολογιστεί και από την παρακάτω γραφική παράσταση η οποία ισχύει για μικρής ισχύος κινητήρες:



Από το παραπάνω διάγραμμα για P=3 η καμπύλη σταμάτα στα 55KVA παίρνουμε μία προσεγγιστική προεκτείνοντας νοητά την καμπύλη λόγο αδυναμία κάλυψης της τιμής που Sgar που υπολογίσαμε τιμή:

$$C_0 \approx 270 \times 10^3 \text{ J/m}^3$$

Αντικαθιστώντας όλα τα παραπάνω στην σχέση (1) υπολογίζουμε:

$$D_{IS} = \sqrt[3]{\frac{2 \cdot 3}{\pi \cdot 1,9} \cdot \frac{3}{50} \cdot \frac{64900}{270 \cdot 10^3}} = \sqrt[3]{0,01449706} = 0,244\text{m} = 24,4\text{cm}$$

Οπότε Dis=24,4cm

Στη συνέχεια, υπολογίζουμε το μήκος του πυρήνα. Θα χρησιμοποιήσουμε την σχέση:

$$\lambda = \frac{L}{\tau} \rightarrow L = \lambda \cdot \tau \rightarrow L = 1,9 \cdot 12,78 = 0,24282\text{m} = 24,282\text{cm}$$

, όπου τ είναι το πολικό βήμα, δηλαδή η απόσταση ανάμεσα σε δυο διαδοχικούς πόλους (pole pitch):

$$\tau = \frac{\pi \cdot D_{IS}}{2 \cdot p_i} = \frac{3,14 \cdot 0,24\text{m}}{2 \cdot 3} = 0,1278\text{m} = 12,78\text{cm}$$

Η εξωτερική διάμετρος του κινητήρα υπολογίζεται αρχικά από την εμπειρική σχέση:

Για $2p_i=6$ από τον παρακάτω πίνακα έχουμε $\frac{D_{IS}}{D_{out}} = 0,68 - 0,71$ επιλέγουμε 0,695

$$\frac{D_{IS}}{D_{out}} = 0,695 \rightarrow D_{out} = \frac{D_{IS}}{0,695} = \frac{24,4}{0,695} = 35,11\text{cm}$$

$2p_i$	2	4	6	8
$\frac{D_{in}}{D_{out}}$	0.54 - 0.58	0.61 - 0.63	0.68 - 0.71	0.72 - 0.74

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

$$g = (0,1 + 0,012 \cdot \sqrt[3]{P_n}) \cdot 10^{-3}\text{m} = (0,1 + 0,012 \cdot \sqrt[3]{55000}) \cdot 10^{-3}\text{m} \rightarrow$$

$$g = 5,56 \times 10^{-4}\text{m} = 0,556\text{mm}$$

Θα πρέπει να σημειώσουμε ότι τα διάκενα είναι συγκεκριμένα, π.χ. 0,35mm, 0,4mm, 0,45mm, 0,5mm κλπ. Εμείς θα διαλέξουμε το διάκενο ίσο με 0,6mm. 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.
 $g=0,6\text{mm}$

4.3 Τυλίγματα στάτη

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

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

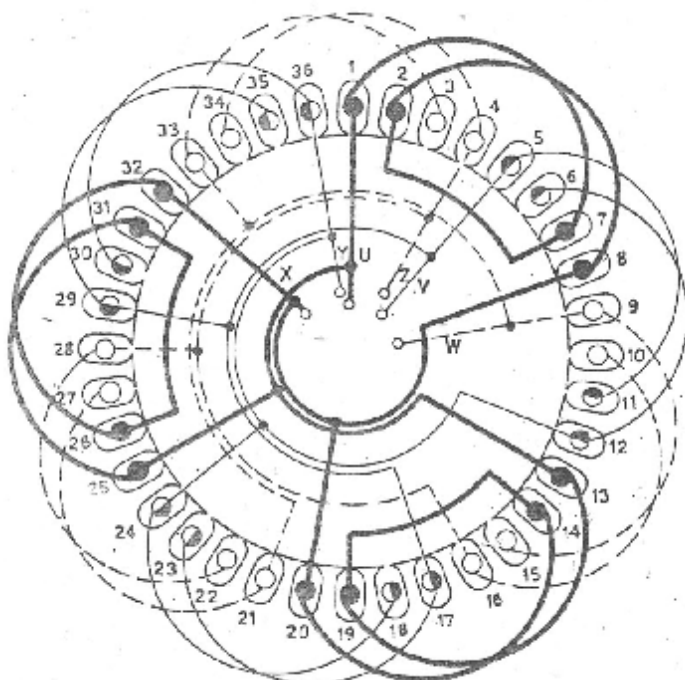
, όπου p_i τα ζεύγη πόλων, m ο αριθμός των φάσεων και q ο αριθμός των αυλακιών ανά φάση και πόλο. Επιλέγουμε δυο αυλάκια ανά φάση και πόλο άρα ($q=2$):

$$N_s = 2 \cdot 3 \cdot 2 \cdot 3 = 36 \text{ αυλάκια}$$

Το πολικό βήμα θα είναι:

$$y_p = \frac{36}{2 \cdot 3} = 6 \text{ αυλάκια}$$

Θα φτιάξουμε ένα τύλιγμα με μια στρώση (ένα μάτσο ανά αυλάκι), με τρεις πραγματικούς και τρεις φανταστικούς πόλους, το οποίο φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 5 : Το τύλιγμα της Μηχανής. 36 αυλάκια, 6 πόλοι (3πραγματικοί και 3 φανταστικοί)
 Ο συντελεστής τυλίγματος δίνεται από την σχέση:

$$K_{\tau} = K_W = \frac{\sin \frac{q \cdot a}{2}}{q \cdot \sin \frac{a}{2}} = \frac{\sin \frac{2 \cdot 30}{2}}{2 \cdot \sin \frac{30}{2}} = 0,966$$

, όπου a είναι η απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών αυλακίων σε ηλεκτρικές μοίρες, οι οποίες δίνονται από την σχέση:

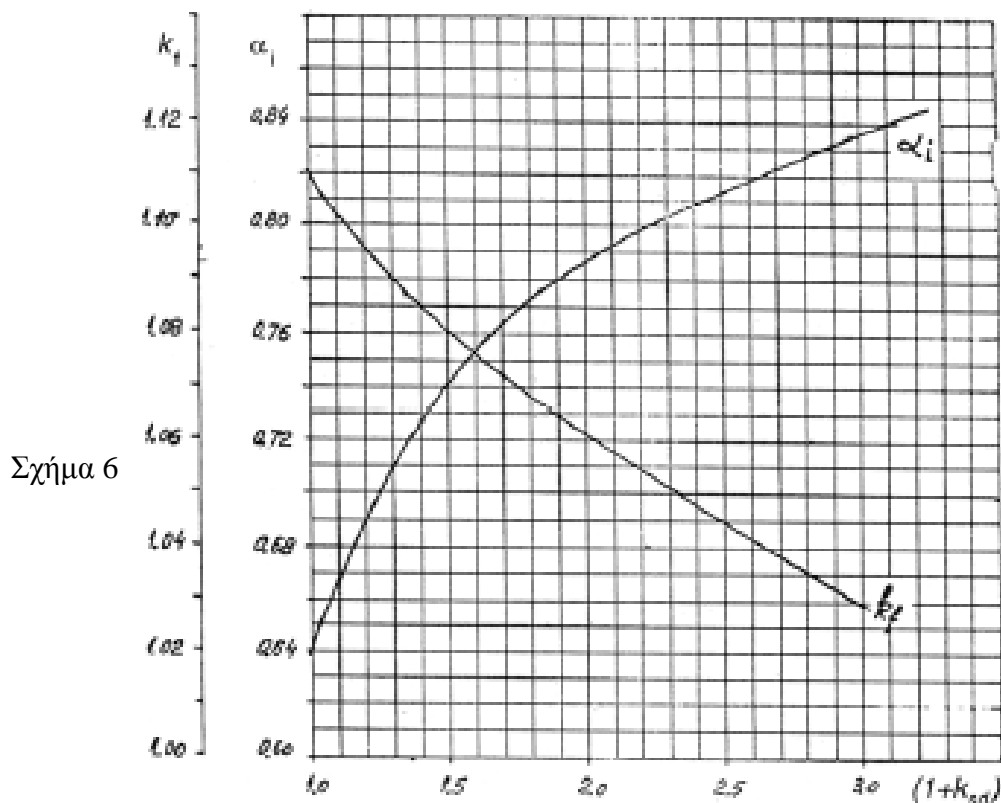
$$a = p_t \cdot a_p$$

, όπου a_p η γεωμετρική γωνία ($360^\circ/36$ αυλάκια= 10° στην περίπτωση μας).

Στη συνέχεια, υπολογίζουμε τον αριθμό σπειρών ανά φάση. Ο υπολογισμός στηρίζεται στην μαγνητική ροή που περνά από το διάκενο μεταξύ στάτη και δρομέα και δίνεται από την σχέση:

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

, όπου φ η μαγνητική ροή, τ το πολικό βήμα σε μέτρα, L το μήκος του πυρήνα άρα και του διακένου και B_g η μαγνητική επαγωγή στο διάκενο. Η σταθερά a_i ονομάζεται flux density shape factor και προσδιορίζεται από την παρακάτω γραφική παράσταση:



Σχήμα 6: Form Factor K_f και flux density shape factor a_i σαν συνάρτηση του $1+KST$. Όπως φαίνεται και από το σχήμα, η σταθερά εξαρτάται από το $1+KST$ που ονομάζεται tooth saturation factor. Υποθέτουμε ότι η παραπάνω σταθερά παίρνει τιμή ίση με 1,5 άρα από την γραφική παράσταση το $a_i=0,73$. Αναλυτικός υπολογισμός του $1+KST$ θα γίνει αργότερα σε άλλη φάση της μελέτης.

Για μηχανές με έξι πόλους συνίσταται η μαγνητική επαγωγή στο διάκενο να είναι μεταξύ 0,7-0,82T.

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

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

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

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

Εμείς θα διαλέξουμε μια μαγνητική επαγωγή ίση με 0,8T. Άρα, η μαγνητική ροή στο διάκενο θα είναι ίση με:

$$\varphi = 0,73 \cdot 0,1278 \cdot 0,24282 \cdot 0,8 = 18,1 \cdot 10^{-3} Wb$$

Στην συνέχεια, υπολογίζουμε τον αριθμό σπειρών ανά φάση, ο οποίος δίνεται από την σχέση:

$$W_i = \frac{K_E \cdot V_\varphi}{4 \cdot K_f \cdot K_r \cdot f \cdot \varphi}$$

, όπου η σταθερά K_f ονομάζεται form factor και εξαρτάται από τα μαγνητικά χαρακτηριστικά του υλικού του πυρήνα και παίρνει τιμές $1,02 < K_f < 1,11$. Όπως και με την σταθερά a_i την βρίσκουμε από την σχήμα 6. Στην εν λόγω περίπτωση παίρνει τιμή $K_f = 1,07$.

Άρα:

$$W_i = \frac{K_E \cdot V_\varphi}{4 \cdot K_f \cdot K_r \cdot f \cdot \varphi} = \frac{0,97 \cdot 400}{4 \cdot 1,07 \cdot 0,966 \cdot 50 \cdot 18,1 \cdot 10^{-3}} \approx 105 \text{ σπειρες / φάση}$$

Εν συνεχεία, υπολογίζουμε τον αριθμό αγωγών ανά αυλάκι:

$$n_s = \frac{a_i \cdot W_i}{p_i \cdot q} = \frac{1 \cdot 105}{3 \cdot 2} = 17,5 \approx 18 \text{ αγωγοί / αυλάκι}$$

Ο συντελεστής a_i εκφράζει τον αριθμό των παράλληλων αγωγών που στην περίπτωσή μας είναι 1.

Στη συνέχεια, θα υπολογίσουμε την διατομή των αγωγών που θα χρησιμοποιήσουμε στον στάτη. Το ονομαστικό ρεύμα του κινητήρα μας θα είναι ίσο με:

$$I_{\sigma v} = \frac{P_n}{\sqrt{3} \cdot V_{\pi} \cdot \cos\varphi \cdot \eta} = \frac{55000W}{\sqrt{3} \cdot 400 \cdot 0,87 \cdot 0,94} = 97,1A$$

Για να υπολογίσουμε την διατομή των αγωγών, θα επιλέξουμε μια πυκνότητα ρεύματος. Για κινητήρες έξι πόλων συνίσταται η πυκνότητα ρεύματος να βρίσκεται μεταξύ:

$$I_{\sigma \sigma s} = (5 \dots 8)A/mm^2$$

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

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

Όσο μεγαλώνει η πυκνότητα του ρεύματος, μειώνεται η διατομή των αγωγών αλλά μεγαλώνουν οι απώλειες χαλκού. Επιλέγουμε μια πυκνότητα ρεύματος ίση με 6 A/mm², για να μην έχουμε μεγάλες απώλειες και υπολογίζουμε την διατομή:

$$A_{\sigma u} = \frac{I_{\sigma v}}{J_{\sigma \sigma s}} = \frac{97,1A}{6A/mm^2} = 16,18 \approx 16,2mm^2$$

Η διάμετρος του αγωγού θα είναι ίση με:

$d_{\sigma u} = \sqrt{\frac{4 \cdot A_{\sigma u}}{\pi}} = 4,54mm > 1,3mm$ η διάμετρος είναι μεγαλύτερη από 1,3mm τότε επιλέγουμε να χρησιμοποιήσουμε παράλληλους κλάδους μικρότερης διαμέτρου αγωγούς έως ότου ικανοποιηθεί η συνθήκη.

$$d_{\sigma u} = \sqrt{\frac{4 \cdot A_{\sigma u}}{\pi \cdot a_p}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 16,2}{\pi \cdot 13}} \rightarrow d_{\sigma u} = 1,26mm$$

Από τον πίνακα 4 επιλέγουμε την αμέσως επόμενη τυποποιημένη διάμετρο η οποία είναι 1,3 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 4 : Τυποποιημένες διάμετροι αγωγών στάτη.

4.4 Υπολογισμός διαστάσεων αυλακιών στάτη

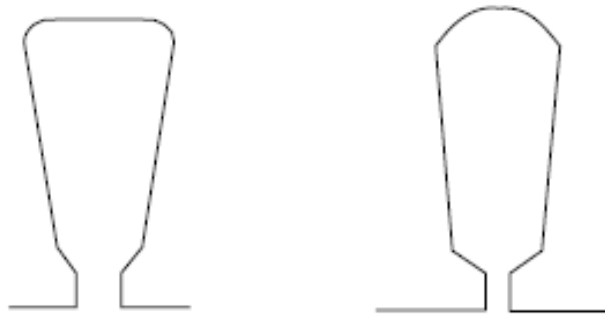
Από την στιγμή που γνωρίζουμε την διατομή των αγωγών και τον αριθμό τους, μπορούμε να υπολογίσουμε τη απαιτούμενη διατομή των αυλακιών του στάτη από την σχέση:

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

Όπου K_{fill} είναι μια σταθερά (fill factor), η οποία εξαρτάται από το πάχος της μόνωσης που χρησιμοποιούμε και παίρνει τιμές από 0,4 έως 0,44. Επιλέγουμε τιμή 0,44 οπότε η διατομή των αυλακιών θα είναι ίση με:

$$A_{su} = \frac{\pi \cdot d_{cu}^2 \cdot a_i \cdot n_s}{4 \cdot K_{fill}} = \frac{\pi \cdot 1,3^2 \cdot 13 \cdot 18}{4 \cdot 0,44} = 705,9mm^2$$

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



Σχήμα 7 : Συνηθισμένη μορφή αυλακιών του στάτη.

Το σχήμα 8 της επόμενης σελίδας απεικονίζει αναλυτικά τις διαστάσεις που θα πρέπει να υπολογιστούν. Κάποιες από τις διαστάσεις αυτές υπολογίζονται εμπειρικά από την βιομηχανική εμπειρία. Πιο συγκεκριμένα:

$b_{os} = 2 - 3mm$, επιλέγουμε 2,5mm.

$h_{os} = 0,5 - 1mm$, επιλέγουμε 0,5mm.

$h_w = 1 - 4mm$, επιλέγουμε 1mm.

Εάν υποθέσουμε ότι όλη η μαγνητική ροή περνά μέσα από το «δόντι» του στάτη, τότε ισχύει η σχέση:

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

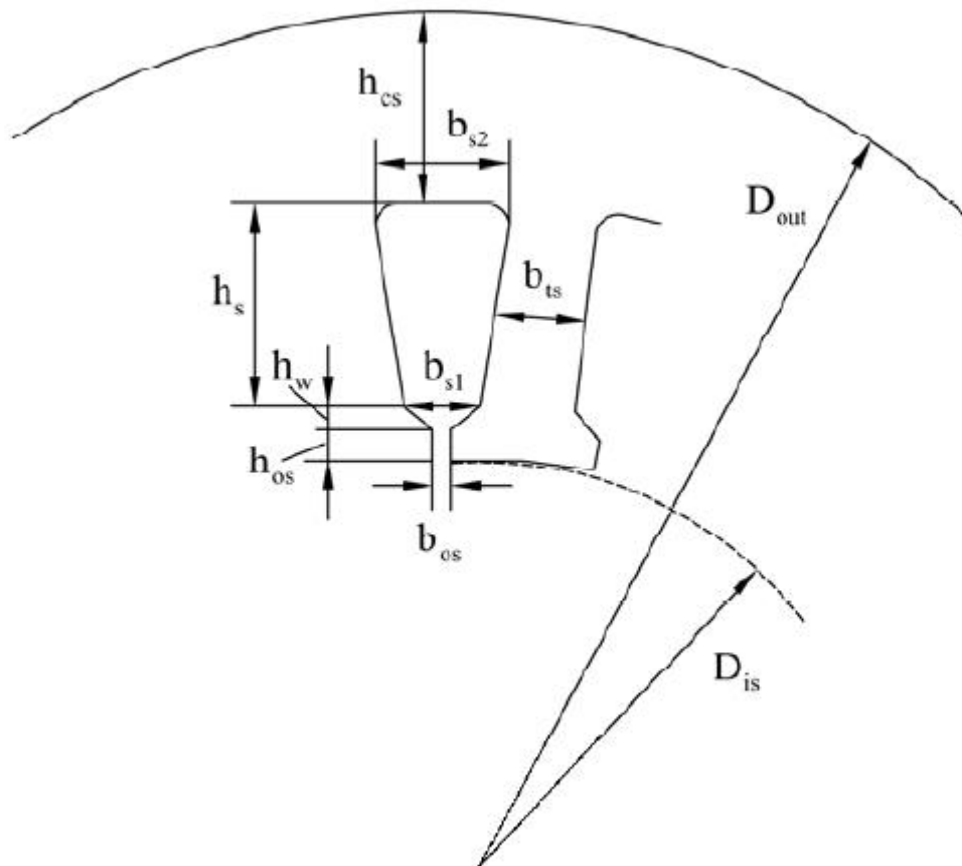
Αριστερά της παρένθεσης είναι η μαγνητική ροή στο διάκενο και δεξιά η μαγνητική ροή στο «δόντι» του αυλακιού. Ο K_{Fe} είναι ένας συντελεστής που λαμβάνει υπόψη τα αποτελέσματα της μόνωσης μεταξύ των μεταλλικών φύλλων από τα οποία αποτελείται ο στάτης και B_{ts} είναι η μαγνητική επαγωγή στον στάτη, η οποία συνίσταται να 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.

Άρα:

$$b_{ts} = \frac{B_g \cdot \tau_s \cdot L}{B_{ts} \cdot L \cdot K_{Fe}} = \frac{0,8 \cdot 21,3 \cdot 10^{-3}}{1,6 \cdot 0,96} = 11,1 \cdot 10^{-3} m$$

$$T_{s=\frac{T}{3 \cdot 2}} = \frac{0,1278}{3 \cdot 2} = 21,3 \cdot 10^{-3} m$$

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



Σχήμα 8 : Οι διαστάσεις του στάτη αναλυτικά.

Από την γεωμετρία του αυλακιού προκύπτει ότι:

$$b_{s1} = \frac{\pi \cdot (D_{ls} + 2h_{os} + 2h_w)}{N_s} - b_{ls}$$

$$= \frac{\pi \cdot (244 + 2 \cdot 0,5 + 2 \cdot 1) \cdot 10^{-3}}{36} - 11,1 \cdot 10^{-3}$$

$$\rightarrow b_{s1} = 10,65 \cdot 10^{-3} m = 10,65 mm$$

Επίσης:

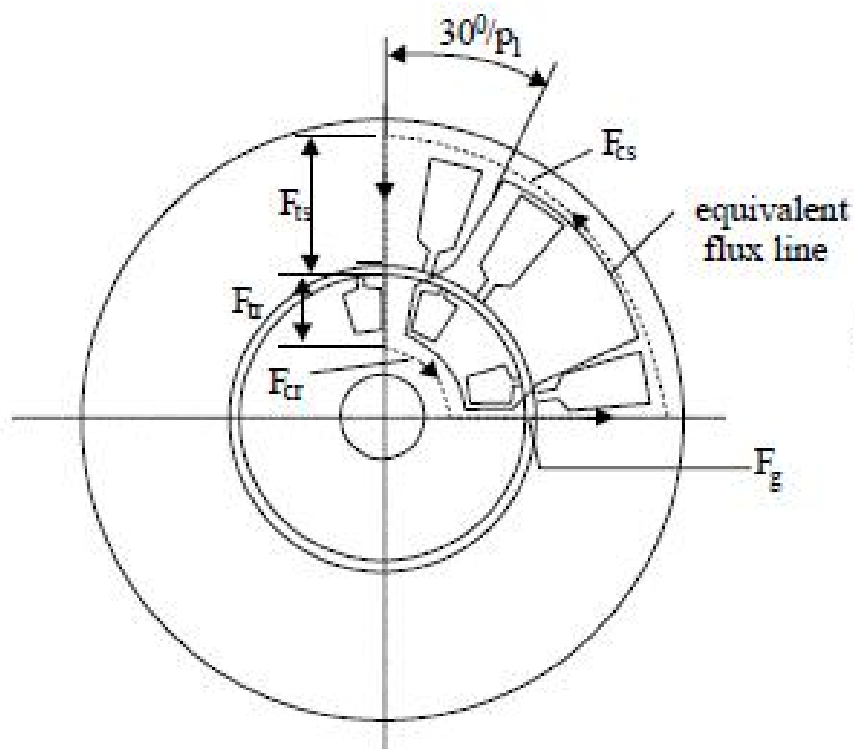
$$b_{s2} = \sqrt{4 \cdot A_{su} \cdot \tan\left(\frac{\pi}{N_r}\right) + b_{s1}^2} = \sqrt{4 \cdot 705,9 \cdot \tan\left(\frac{\pi}{36}\right) + 10,65^2} mm = 18,98 \approx 19 mm$$

$$A_{su} = h_s \cdot \frac{(b_{s1} + b_{s2})}{2} \rightarrow h_s = \frac{2 \cdot A_{su}}{(b_{s1} + b_{s2})} \rightarrow h_s = \frac{2 \cdot 705,9}{(10,65 + 18,98)} = 47,1 mm$$

Στη συνέχεια, θα υπολογίσουμε τον συντελεστή $1+K_{st}$ (tooth saturation factor), στον οποίο αυθαίρετα είχαμε δώσει μία τιμή ίση με 1,5. Ο συντελεστής δίνεται από την σχέση:

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

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



Σχήμα 9.

Η μαγνητεγερτική δύναμη στο διάκενο μεταξύ στάτη και δρομέα δίνεται από την σχέση:

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

, όπου K_C είναι ο συντελεστής Carter (Carter coefficient) που δίνεται από την σχέση:

$$K_C = \frac{B_{g1max}}{B_{g1}}$$

, όπου B_{gmax} είναι η μαγνητική επαγωγή στο διάκενο χωρίς ανώτερες αρμονικές και B_g είναι η μαγνητική επαγωγή στο διάκενο με ανώτερες αρμονικές (αναφέρεται στην βασική).

Ο συντελεστής Κάρτερ μπορεί να υπολογιστεί αναλυτικά αλλά χρειάζονται κατασκευαστικά χαρακτηριστικά του δρομέα. Για να συνεχίσουμε την μελέτη, θεωρούμε μία τυπική τιμή για τον συντελεστή αυτόν ίση με 1,2. Προκύπτει λοιπόν ότι:

$$F_{mg} = K_C \cdot g \cdot \frac{B_g}{\mu_o} = 1,2 \cdot 0,6 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{0,8}{1,256 \cdot 10^{-6}} = 458,6 At$$

Η μαγνητεγερτική δύναμη στον στάτη F_{mts} , δίνεται από την σχέση:

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

, όπου H_{ts} είναι η ένταση του μαγνητικού πεδίου στον στάτη.

Από τον πίνακα που ακολουθεί, παίρνουμε συνηθισμένες (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

Επιλέγοντας $B_{ts}=1,6T$ (συνήθως παίρνει τιμές μεταξύ $1,5T - 1,65T$) προκύπτει ότι $H_{ts}=2460At$.

Άρα:

$$F_{mts} = H_{ts}(h_s + h_{os} + h_w) = 2460 \cdot (47,1 + 0,5 + 1) \cdot 10^{-3} = 119,556At$$

Η μαγνητεγερτική δύναμη στον δρομέα υπολογίζεται από την σχέση:

$$F_{mtr} = K_{st} \cdot F_{mg} - F_{mts} = 0,5 \cdot 458,6 - 119,556 = 109,744At$$

Οι τιμές των F_{mts} και F_{mtr} πρέπει να είναι κοντά. Εάν το $F_{mtr} \ll F_{mts}$, θα πρέπει να θεωρήσουμε μικρότερη μαγνητική επαγωγή στο διάκενο και να επιστρέψουμε στον υπολογισμό της μαγνητικής ροής Φ . (αυτή η διαδικασία πραγματοποιήθηκε για να έχουμε τα παραπάνω αποτελέσματα)

Στη συνέχεια θα υπολογίσουμε το h_{cs} (βλέπε εικόνα 4). Αυτό δίνεται από την σχέση:

$$h_{cs} = \frac{D_{out} - (D_{IS} - 2 \cdot (h_{os} + h_w + h_s))}{2} = \frac{351,1 - (244 + 2 \cdot (0,5 + 1 + 47,1))}{2} \rightarrow h_{cs}$$

$$= \frac{351 - 341,2}{2} = \frac{9,9}{2} = 4,95$$

Από τους αρχικούς υπολογισμούς που έκανα και δεν παρουσιάζονται εδώ διαπίστωσα ότι η εξωτερική διάμετρος του κινητήρα, όπως την υπολόγισα στην αρχή, είναι μικρή. Ένας τρόπος αντιμετώπισης του προβλήματος είναι η μείωση των διαστάσεων των αυλακιών του στάτη μέσω της αύξησης της πυκνότητας ρεύματος.

Θεώρησα μια νέα πυκνότητα ρεύματος ίση με $J_{cos} = 6A/mm^2$ και υπολόγισα εκ νέου την επιφάνεια του αυλακιού και τις επιμέρους διαστάσεις του και έτσι προέκυψαν τα παραπάνω αποτελέσματα .

Στη συνέχεια, θα υπολογίσουμε την μαγνητική επαγωγή στον στάτη και συγκεκριμένα στον χώρο μεταξύ των αυλακιών και της εξωτερικής περιμέτρου B_{cs} (Back core flux density). Η συγκεκριμένη μαγνητική ροή θα υπολογιστεί από την σχέση:

$$B_{cs} = \frac{\Phi}{2 \cdot L \cdot h_{cs}} = \frac{17,2 \cdot 10^{-3} Wb}{2 \cdot 0,24282m \cdot 0,65 \cdot 10^{-3}m} = 54,5T$$

Η συγκεκριμένη τιμή της μαγνητικής επαγωγής είναι πολύ μεγάλη, εάν λάβουμε υπόψη μας ότι θέλουμε να βρίσκεται μεταξύ $1,4T-1,7T$. Αναφορικά με την επίλυση του προβλήματος, υπάρχουν τρεις δυνατότητες:

1. Να αυξήσουμε την εξωτερική διάμετρο του στάτη.

2. Να εισάγουμε μια μεγαλύτερη τιμή για τον συντελεστή λ (stack aspect ratio), γεγονός που θα οδηγήσει σε μικρότερη εσωτερική διάμετρο του στάτη άρα και σε μικρότερο δρομέα.
3. Να μειώσουμε και άλλο το h_s , δηλαδή να μειώσουμε την διατομή των αυλακιών, το οποίο δεν μπορεί να εφαρμοστεί στην περίπτωση μας.

Επιλέγουμε την πρώτη δυνατότητα. Για να μειωθεί η μαγνητική επαγωγή στον πυρήνα του στάτη σε τιμή ίση με 1,5T, θα πρέπει το h_{cs} να γίνει ίσο με:

$$h_{cs} = \frac{\Phi}{2 \cdot L \cdot B_{cs}} = \frac{18,1 \cdot 10^{-3} \text{ Wb}}{2 \cdot 0,24282 \text{ m} \cdot 1,5 \text{ T}} = 24,8 \text{ mm}$$

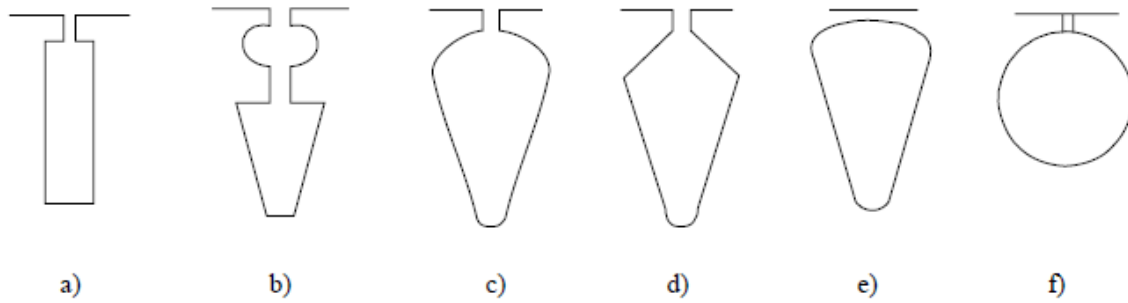
Επομένως, η εξωτερική διάμετρος θα πρέπει να αυξηθεί κατά $2 \cdot (24,8 - 4,95) \text{ mm} = 39,7 \text{ mm}$.

Άρα η εξωτερική διάμετρος της μηχανής θα είναι:

$$D_{out} = 351,1 + 39,7 = 390,8 \text{ mm}$$

4.5 Δρομέας

Αρχικά θα υπολογίσουμε τη μορφή και τον αριθμό των αγωγών του δρομέα. Στο σχήμα που ακολουθεί απεικονίζονται οι τυπικές μορφές των αγωγών του δρομέα:



Η μορφή των αγωγών που επιλέχθηκε είναι η C. Στην συνέχεια, θα επιλέξουμε τον αριθμό των αγωγών. Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται οι τυποποιημένες τιμές που χρησιμοποιούνται στην βιομηχανία:

$2p_1$	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 6 : Αριθμός αγωγών δρομέα σε συνάρτηση με τον αριθμό των πόλων και τον αριθμό των αυλακιών του στάτη.

Διαλέγουμε 28 αγωγούς και συνεχίζουμε με τον υπολογισμό του ονομαστικού ρεύματος ενός αγωγού του δρομέα:

$$I_b = \frac{2 \cdot m \cdot W_i \cdot K_{w1} \cdot I_{1n} \cdot K_I}{N_r}$$

Όπου :

$$K_I = 0,8 \cdot \cos\phi + 0,2 = 0,896$$

Το $\cos\phi$ είναι ο συντελεστής ισχύος της μηχανής που θέλουμε να επιτύχουμε (0,87 στην περίπτωση μας).

Άρα:

$$I_b = \frac{2 \cdot m \cdot W_i \cdot K_{w1} \cdot I_{1n} \cdot K_I}{N_r} = \frac{2 \cdot 3 \cdot 105 \cdot 0,96 \cdot 97,1 \cdot 0,896}{28} = 1879,2A$$

Για κινητήρες με μεγάλη απόδοση θα πρέπει η πυκνότητα ρεύματος στον αγωγό (μπάρα) του δρομέα να είναι ίση με 3,42A/mm². Για να το επιτύχουμε αυτό, θα πρέπει η διατομή της κάθε μπάρας του δρομέα να είναι ίση με:

$$A_b = \frac{1879,2A}{3,42 A/mm^2} = 549,5mm^2$$

Το ρεύμα στους δακτυλίους που βραχυκυκλώνουν τις μπάρες του δρομέα (end ring current) θα είναι ίσο με:

$$I_{er} = \frac{I_b}{2 \cdot \sin \frac{\pi \cdot p_1}{N_r}} = \frac{1879,2A}{2 \cdot \sin \frac{\pi \cdot 3}{28}} = 2844,87A$$

$$J_{er} = (0,75 - 0,8)J_b \rightarrow J_{er} = 0,775 \cdot 3,42 \rightarrow J_{er} = 2,6505A/mm^2$$

Η διατομή του δακτυλίου βραχυκύκλωσης υπολογίζεται από την σχέση:

$$A_{er} = \frac{I_{er}}{J_{er}} = \frac{1879,2A}{2,6505 A/mm^2} = 1073mm^2$$

4.5.1 Υπολογισμός των διαστάσεων των αγωγών του δρομέα.

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

$$\tau_r = \frac{\pi \cdot (D_{is} - 2g)}{N_r} = \frac{\pi \cdot (244 - 2 \cdot 0,6)}{28} = 27,24mm$$

Θεωρώντας ότι η μαγνητική επαγωγή στο «δόντι» του δρομέα είναι ίση με 1,6T, υπολογίζουμε την διάσταση btr από την σχέση:

$$b_{cr} \cdot K_{fs} \cdot B_{cr} = B_g \cdot \tau_r$$

Η παραπάνω σχέση προκύπτει θεωρώντας ότι η μαγνητική ροή στο δόντι του στάτη και στο διάκενο είναι ίδια.

Άρα, προκύπτει ότι:

$$b_{cr} = \frac{B_g \cdot \tau_r}{K_{fs} \cdot B_{cr}} = \frac{0,8T \cdot 27,24}{0,96 \cdot 1,6T} = 14,19mm$$

$$d_1 = \frac{\pi \cdot (D_{rs} - 2 \cdot h_{or}) - N_r \cdot b_{cr}}{\pi + N_r} = \frac{\pi \cdot (244 - 2 \cdot 0,5) - 28 \cdot 14,19}{\pi + 28} = 11,75mm$$

Από τις παρακάτω σχέσεις και κάνοντάς κάποιες παραδοχές επειδή έβγαινα σε μαθηματικό αδύνατο (αρνητική ρίζα). Έθεσα $d_2=10 \cdot 10^{-3} m$ και $h_r=33,45 \cdot 10^{-3} m$

Παρατηρώ ότι η επιλογή αυτών των τιμών δεν ήταν και πάρα πολύ σωστή λόγω του ότι οι τιμές d_1 και d_2 είναι πολύ κοντά με αποτέλεσμα η μορφή των αγωγών να μοιάζει πιο πολύ στην α κατηγορία ορθογώνιο δηλαδή. Θα έπρεπε να λάβω λίγο πιο μεγάλη τιμή h_r . Οι τύποι είναι οι ακόλουθοι

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

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

Γνωρίζοντας τις ακριβείς διαστάσεις του δρομέα και των αγωγών του, θα υπολογίσουμε την μαγνητεγερτική δύναμη στο «δόντι» του δρομέα. Εάν θέλουμε η μαγνητική επαγωγή να είναι ίση με 1,6T, τότε από τον πίνακα 3 για το υλικό που χρησιμοποιείται η ένταση του μαγνητικού πεδίου θα είναι 2460A/m. Άρα, η μαγνητεγερτική δύναμη που απαιτείται είναι ίση με:

$$F_{mcr} = H_{cr} \cdot \left(h_r + h_{or} + \frac{d_1 + d_2}{2} \right) = 2450 \cdot A/m \cdot \left(33,45 + 0,5 + \frac{11,75 + 10}{2} \right) \cdot 10^{-3} m$$

$$= 110,27At$$

Η τιμή που υπολογίσαμε είναι κοντά στη μαγνητεγερτική δύναμη του στάτη F_{mts} όπως πρέπει να είναι κάτι που κάνει την σχεδίαση μέχρι τώρα αποδεκτή.

Αυτό που απομένει είναι ο υπολογισμός της απόστασης του δρομέα πίσω (κάτω) από τα αυλάκια. Η μαγνητική επαγωγή στο χώρο αυτό του δρομέα θα πρέπει να είναι μεταξύ 1,4T και 1,7T. Επιλέγοντας τιμή ίση με 1,65T, έχουμε:

$$h_{cr} = \frac{\Phi}{2} \cdot \frac{1}{L \cdot B_{cr}} = \frac{18,1 \cdot 10^{-3}}{2} \cdot \frac{1}{0,244 \cdot 1,65T} = 22,5mm$$

4.5.2 Υπολογισμός της διαμέτρου του άξονα.

Στην συνέχεια, θα υπολογίσουμε την διάμετρο του άξονα της μηχανής. Η μέγιστη δυνατή διάμετρος εξαρτάται από τις διαστάσεις του δρομέα και των αυλακίων και παίρνει τιμή ίση με:

$$D_{shaft} \leq D_{is} - 2 \cdot \left(h_r + h_{or} + h_{cr} + \frac{d_1 + d_2}{2} \right) - 2 \cdot g$$

$$\rightarrow D_{shaft} \leq 244 - 2 \cdot \left(33,45 + 0,5 + 22,5 + \frac{11,75 + 10}{2} \right) - 2 \cdot 0,6 = 107,8mm$$

Υπολογισμός δακτυλιδιού βραχυκύκλωσης

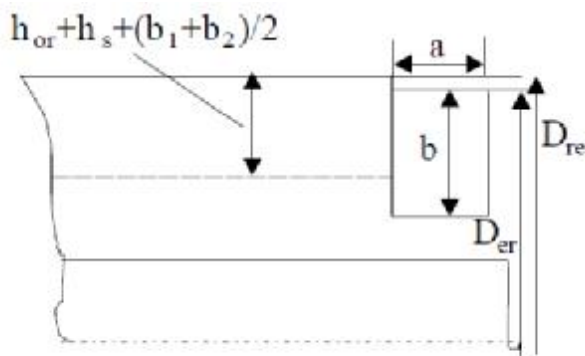


Figure 15.8 End ring cross section

$$D_{re} - D_{er} = (3-4) \cdot 10^{-3}$$

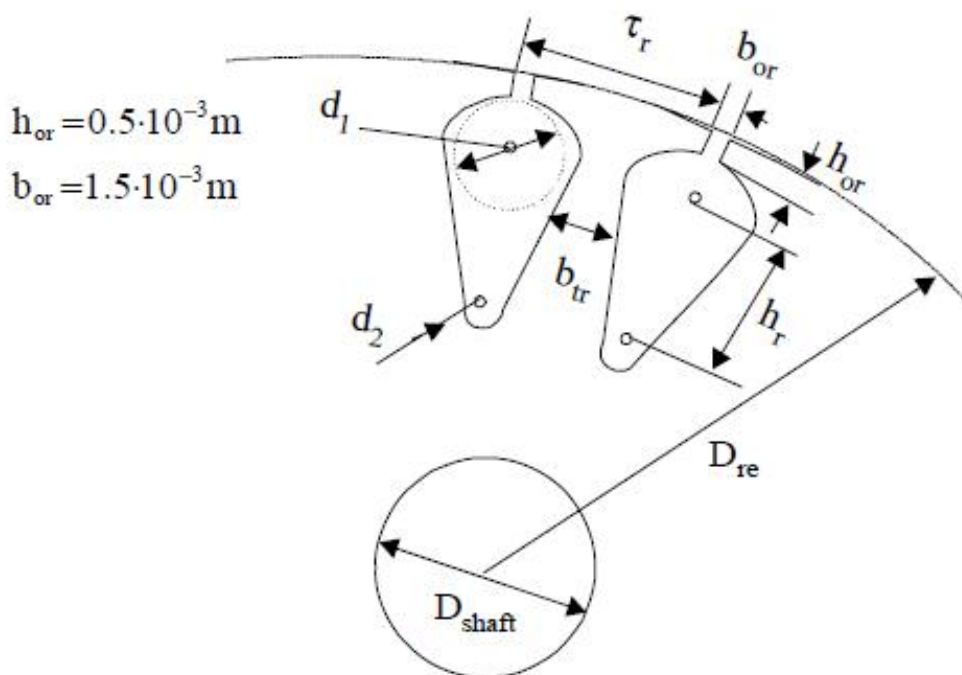
$$b = (1,0 \sim 1,2) \left(h_r + h_{or} + \frac{d_1 + d_2}{2} \right) = 41,931 \cdot 10^{-3}m$$

$$a = \frac{A_{gr}}{b} = \frac{1078 \cdot 10^{-6}}{44,825 \cdot 10^{-3}} = 23,94 \cdot 10^{-3}m$$

Η ροπή στον άξονα του κινητήρα (και υποθέτοντας μια ολίσθηση ίση με 0,02) υπολογίζεται ως εξής:

$$T = \frac{P_{out}}{\omega_m} = \frac{55000W}{2 \cdot \pi \cdot \frac{50}{3} \cdot (1 - 0,02)} = 535,93Nm$$

Με βάση την βιομηχανική εμπειρία για μια τέτοια ροπή η διάμετρος του άξονα είναι ικανοποιητική.



Σχήμα 10 : Γενική μορφή του δρομέα και του άξονα του.

4.6 Υπολογισμός ρεύματος μαγνήτισης

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

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

$$F_{1m} = 2 \cdot (K_c \cdot g \cdot \frac{B_g}{\mu_0} + F_{mts} + F_{mtr} + F_{mes} + F_{mer})$$

, όπου K_c είναι ο συντελεστής Carter για τον οποίο είχαμε έως τώρα θεωρήσει μια τυπική τιμή ίση με 1,2. Τώρα που γνωρίζουμε τις διαστάσεις του κινητήρα, μπορούμε να τον υπολογίσουμε αναλυτικά ως εξής:

$$Fmg = K_C \cdot g \cdot \frac{B_g}{\mu_0} = 411,1At$$

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

Όπου:

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

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

Και:

$$\gamma_1 = \frac{b_{os}^2}{5 \cdot g + b_{os}} = \frac{2,5^2}{5 \cdot 0,6 + 2,5} = 1,136mm$$

$$\gamma_2 = \frac{b_{or}^2}{5 \cdot g + b_{or}} = \frac{1,5^2}{5 \cdot 0,6 + 1,5} = 0,5mm$$

Άρα:

$$K_{c1} = \frac{\tau_s}{\tau_s - \gamma_1} = \frac{21,3}{21,3 - 1,36} = 1,056$$

$$K_{c2} = \frac{\tau_r}{\tau_s - \gamma_2} = \frac{27,24}{27,24 - 0,5} = 1,0187$$

$$K_C = K_{c1} \cdot K_{c2} = 1,056 \cdot 1,0187 = 1,0757$$

Η τιμή του συντελεστή είναι κοντά στην τιμή 1,2 που υποθέσαμε αρχικά, επομένως μπορούμε να θεωρήσουμε ότι οι υπολογισμοί μας έως τώρα είναι σωστοί.

$$Fm_{ts} = 119,556At \quad Fm_{tr} = 110,27$$

$$B_{cs} = 1,456T \quad H_{cs} = 1050A/m$$

$$B_{cr} = 1,6T \quad H_{cr} = 2460A/m$$

$$c_{cs,r} \approx 0,88 \cdot e^{-0,4 \cdot B_{cs,r}^2}$$

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

$$= 0,88 \cdot e^{-0,4 \cdot 1,456^2} \cdot \frac{\pi \cdot (390,8 - 4,95) \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 3} \cdot 1050 = 79,95 \text{ At}$$

$$F_{mcr} = 0,88 \cdot e^{-0,4 \cdot 1,6^2} \cdot \frac{\pi \cdot (158,76 + 22,5) \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 3} \cdot 2460 = 73,79 \text{ At}$$

$$F_{1m} = 2(411,1 + 119,556 + 110,27 + 79,95 + 73,79) = 1589,332 \text{ At}$$

$$K_s = \frac{F_{1m}}{2 \cdot F_{mg}} - 1 = \frac{1589,332}{2 \cdot 411,1} - 1 = 0,933$$

Οπότε το ρεύμα μαγνήτησης

$$I_\mu = \frac{\pi \cdot p_i \cdot \left(\frac{F_{1m}}{2}\right)}{3 \cdot \sqrt{2} \cdot w_1 \cdot K_{w1}} = \frac{\pi \cdot 3 \cdot \left(\frac{1589,332}{2}\right)}{3 \sqrt{2} \cdot 105 \cdot 0,96} \rightarrow I_\mu = 17,5 \text{ A}$$

$$I_\mu = \frac{I_\mu}{I_{1n}} = \frac{17,5}{97,1} = 0,18 \text{ ή } 18\% \text{ του ονομαστικού}$$

Για μεγαλύτερο διάκενο έχουμε

Έστω $g=1\text{mm}$

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

$$F_{mg} = K_C \cdot g \cdot \frac{B_g}{\mu_0} = 671,66 \text{ At}$$

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

Όπου:

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

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

Και:

$$\gamma_1 = \frac{b_{os}^2}{5 \cdot g + b_{os}} = \frac{2,5^2}{5 \cdot 1 + 2,5} = 0,833 \text{ mm}$$

$$\gamma_2 = \frac{b_{or}^2}{5 \cdot g + b_{or}} = \frac{1,5^2}{5 \cdot 1 + 1,5} = 0,346 \text{ mm}$$

Άρα:

$$K_{c1} = \frac{\tau_s}{\tau_s - \gamma_1} = \frac{21,3}{21,3 - 0,833} = 1,041$$

$$K_{c2} = \frac{\tau_r}{\tau_s - \gamma_2} = \frac{27,24}{27,24 - 0,346} = 1,013$$

$$K_c = K_{c1} \cdot K_{c2} = 1,0545$$

$$F_{ms} = 119,556 \text{ At} \quad F_{mr} = 110,27$$

$$B_{cs} = 1,456 \text{ T} \quad H_{cs} = 1050 \text{ A/m}$$

$$B_{cr} = 1,6 \text{ T} \quad H_{cr} = 2460 \text{ A/m}$$

$$c_{cs,r} \approx 0,88 \cdot e^{-0,4 \cdot B_{cs,r}^2}$$

$$F_{mos} = c_{cs} \cdot \frac{\pi \cdot (D_{out} - h_{cs})}{2 \cdot p_i} \cdot H_{cs}(B_{cs})$$
$$= 0,88 \cdot e^{-0,4 \cdot 1,456^2} \cdot \frac{\pi \cdot (390,8 - 4,95) \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 3} \cdot 1050 = 79,95 \text{ At}$$

$$F_{mcr} = 0,88 \cdot e^{-0,4 \cdot 1,6^2} \cdot \frac{\pi \cdot (158,76 + 22,5) \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 3} \cdot 2460 = 73,79 \text{ At}$$

$$F_{1m} = 2(671,66 + 119,556 + 110,27 + 79,95 + 73,79) = 2110,452 \text{ At}$$

$$K_s = \frac{F_{1m}}{2 \cdot F_{mg}} - 1 = \frac{2110,452}{2 \cdot 671,66} - 1 = 0,571$$

Οπότε το ρεύμα μαγνήτισης

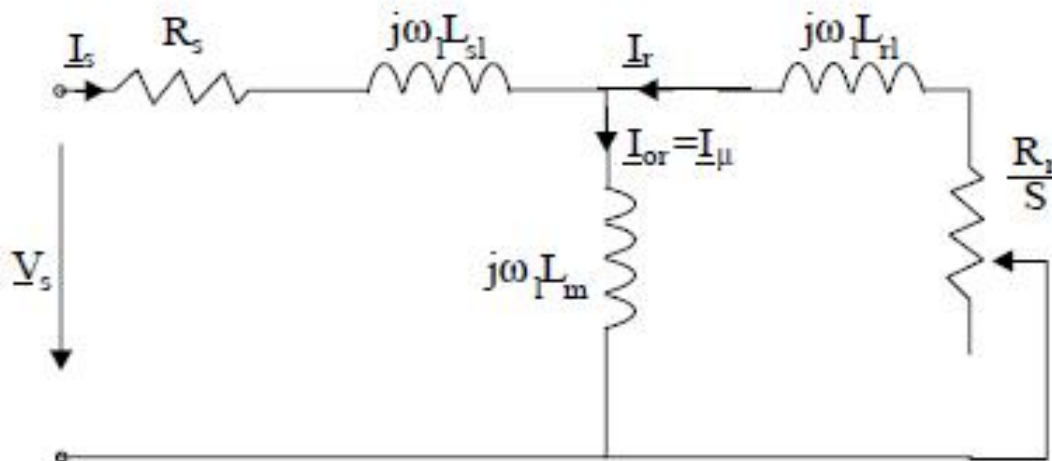
$$I_\mu = \frac{\pi \cdot p_i \cdot \left(\frac{F_{1m}}{2}\right)}{3 \cdot \sqrt{2} \cdot w_1 \cdot K_{w1}} = \frac{\pi \cdot 3 \cdot \left(\frac{2110,452}{2}\right)}{3 \sqrt{2} \cdot 105 \cdot 0,96} \rightarrow I_\mu = 23,25 \text{ A}$$

$$I_{\mu} = \frac{I_{\mu}}{I_{2n}} = \frac{23,25}{97,1} = 0,2394 \text{ ή } 24\% \text{ του ονομαστικού}$$

Παρατηρούμε ότι όσο μεγαλώνουμε το διάκενο έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση του ρεύματος μαγνήτισης.

4.7 Υπολογισμός ισοδύναμου κυκλώματος

Το ισοδύναμο κύκλωμα ενός επαγωγικού κινητήρα είναι το παρακάτω:



Στο παραπάνω ισοδύναμο δεν εμφανίζεται η ωμική αντίσταση R_{fe} που αντιστοιχεί στις απώλειες σιδήρου. Η ωμική αντίσταση (ανά φάση) του στάτη δίνεται από την σχέση:

$$R_s = \rho_{CO} \cdot \frac{l_c \cdot W_t}{A_{CO} \cdot a_t}$$

, όπου ρ_{CO} είναι η ειδική αντίσταση του χαλκού στους 80°C και l_c είναι το μήκος του τυλίγματος κάθε φάσης:

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

, όπου L είναι το μήκος του στάτη και l_{end} είναι το μήκος του τυλίγματος που είναι ουσιαστικά έξω από τα αυλάκια του στάτη. Το μήκος l_{end} για μηχανές έξι πόλων δίνεται προσεγγιστικά από την σχέση:

$$l_{end} = \frac{\pi}{2} \cdot y + 0,018m$$

, όπου y είναι το βήμα του τυλίγματος. Στην περίπτωσή μας ισχύει:

$$\frac{y}{\tau} = 1 \rightarrow y = 1 \cdot \tau = 1 \cdot 0,1278m = 0,1278m$$

Άρα:

$$l_{σπιδ} = \frac{\pi}{2} \cdot 0,1278 + 0,018m = 0,219m$$

Η ειδική αντίσταση του χαλκού στους 20oC είναι $1,78 \times 10^{-8} \Omega m$. Στους 80oC (ενδεικτική περίπτωση θερμοκρασίας κατά την λειτουργία της μηχανής) η ειδική αντίσταση θα είναι ίση με:

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

Το συνολικό μήκος του τυλίγματος κάθε φάσης θα είναι:

$$l_c = 2 \cdot (L + l_{σπιδ}) = 2 \cdot (0,24282 + 0,219) = 0,92364m$$

Η αντίσταση των τυλιγμάτων του στάτη θα είναι ίση με:

$$R_s = \rho_{Co} \cdot \frac{l_c \cdot W_l}{A_{Co} \cdot a_l} = 2,17 \cdot 10^{-8} \Omega m \cdot \frac{0,92364m \cdot 105}{16,2 \cdot 10^{-6} m^2 \cdot 1} = 0,1299 \Omega$$

Στη συνέχεια υπολογίζουμε την αντίσταση του δρομέα. Η συνδυασμένη αντίσταση των αγωγών του δρομέα και των δακτυλίων βραχυκύκλωσης δίνεται από την σχέση:

$$R_{bs} = \rho_{Al} \cdot \left[\frac{L}{A_b} \cdot K_R + \frac{l_{sr}}{2 \cdot A_{sr} \cdot \sin\left(\frac{\pi P_1}{N_r}\right)} \right]$$

Στην παραπάνω σχέση ο συντελεστής K_R ονομάζεται skin effect resistance coefficient. Η ειδική αντίσταση του αλουμινίου στους 20oC είναι ίση με $3,1 \times 10^{-8} \Omega m$ (οι αγωγοί του δρομέα είναι κατασκευασμένοι από αλουμίνιο). Το μήκος του τομέα του δακτυλίου βραχυκύκλωσης που αντιστοιχεί σε έναν αγωγό του δρομέα θα είναι

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

, όπου b είναι το ύψος (ή βάθος) του δακτυλίου βραχυκύκλωσης:

$$b = h_r + h_{or} + d_{SL} = 33,45 + 0,5 + 10,875 = 44,775 \text{ mm}$$

$$d_{SL} = \frac{d_1 + d_2}{2} \cdot 10^{-3} = \frac{11,75 + 10}{2} \cdot 10^{-3} = 10,875 \cdot 10^{-3}$$

$$D_{gr} = D_{re} - 6 - 2 \cdot g = 236,8 \text{ mm}$$

Συνεπώς, το μήκος του τομέα του δακτυλίου βραχυκύκλωσης θα είναι:

$$l_{gr} = \frac{\pi \cdot (D_{gr} - b)}{N_r} = \frac{\pi \cdot (236,8 - 44,775) \cdot 10^{-3}}{28} = 21,54 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

Στη συνέχεια, υπολογίζουμε την σταθερά KR από την σχέση:

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

, όπου

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

Το h_r είναι το βάθος των αγωγών του δρομέα και ο συντελεστής β_s είναι ο λόγος του βάθους του αγωγού προς το μέρος εκείνο του αγωγού που διαπερνάται από μαγνητικό πεδίο. Ο συντελεστής δίνεται από την σχέση:

$$\beta_s = \sqrt{\frac{\omega \cdot \mu_o}{2 \cdot \rho_{Al}}} = \sqrt{\frac{2\pi \cdot 50 \cdot 1,25 \cdot 10^{-6}}{2 \cdot 3,1 \cdot 10^{-8}}} = 79,5 \text{ m}^{-1}$$

$$\xi = \beta_s \cdot h_r \cdot \sqrt{s} = 79,5 \text{ m}^{-1} \cdot 0,03345 \text{ m} \cdot 1 = 2,66$$

Άρα, η αντίσταση του δρομέα στους 80C θα είναι ίση με:

$$\begin{aligned} R_{bs}^{80} &= \rho_{Al} \cdot \left[1 + \frac{1}{273} (80 - 20) \right] \cdot \left[\frac{L}{A_b} \cdot K_R + \frac{l_{gr}}{2 \cdot A_{gr} \cdot \sin\left(\frac{\pi P_1}{N_r}\right)} \right] \\ &= 3,1 \cdot 10^{-8} \left[1 + \frac{1}{273} (80 - 20) \right] \\ &\quad \cdot \left[\frac{0,24282 \cdot 2,66}{549,5 \cdot 10^{-6}} + \frac{0,02154}{2 \cdot 1073 \cdot 10^{-6} \cdot \sin\left(\frac{3\pi}{28}\right)} \right] = 4,56 \times 10^{-5} \Omega \end{aligned}$$

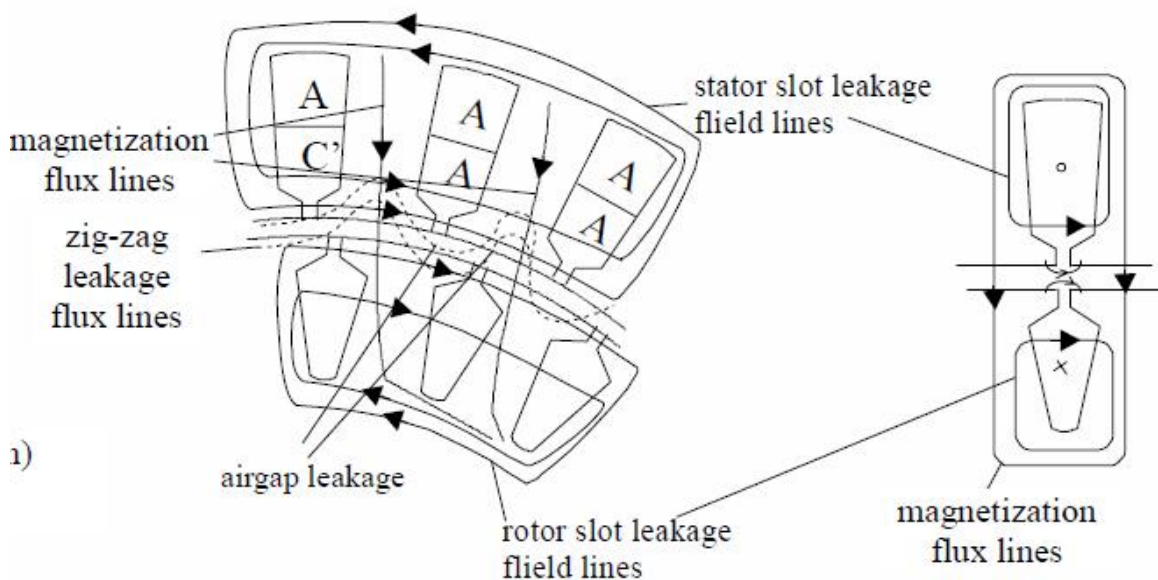
Η παραπάνω αντίσταση είναι η πραγματική αντίσταση του δρομέα. Στο ισοδύναμο κύκλωμα η αντίσταση είναι ανοιγμένη στον στάτη. Η ανοιγμένη αντίσταση υπολογίζεται από την σχέση:

$$R_2 = \frac{4 \cdot m}{N_r} \cdot (W_i \cdot K_{w1}) \cdot R_{bs}^{80} = \frac{4 \cdot 3}{28} \cdot (105 \cdot 0,96) \cdot 4,56 \cdot 10^{-5} \Omega = 1,97 \Omega$$

Σε μια επαγωγική μηχανή ένα μέρος του μαγνητικού πεδίου διαπερνά τόσο τον στάτη όσο και τον δρομέα (magnetization flux lines – αμοιβαία ροή), ενώ υπάρχουν και δυναμικές γραμμές που περνούν μόνο από τον στάτη ή μόνο από τον δρομέα (leakage flux lines – ροή σκέδασης). Τόσο η αμοιβαία ροή όσο και η ροή σκέδασης στο εσωτερικό ενός επαγωγικού κινητήρα απεικονίζονται στο σχήμα της επόμενης σελίδας. Η επαγωγική αντίδραση του στάτη (ανά φάση) δίνεται από τη σχέση:

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

, όπου λ_s , λ_{ds} , λ_{sr} αποτελούν συντελεστές που ονομάζονται slot coefficient, differential coefficient και end ring coefficient αντίστοιχα.



Σχήμα 11 : Αμοιβαία ροή και ροή διαρροής στο εσωτερικό μιας επαγωγικής μηχανής.

Ο συντελεστής λ_S υπολογίζεται από τη σχέση:

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

, όπου $\beta = \gamma/\tau = 1$. Οι υπόλοιποι όροι της εξίσωσης αντιστοιχούν στις διαστάσεις των αυλακιών του στάτη. Αντικαθιστώντας τις τιμές στην παραπάνω εξίσωση, έχουμε:

$$\begin{aligned} \lambda_S &= \left[\frac{2}{3} \cdot \frac{h_x}{(b_{s1} + b_{s2})} + \frac{2 \cdot h_w}{(b_{os} + b_{s1})} + \frac{h_{os}}{b_{os}} \right] \cdot \left(\frac{1 + 3\beta}{4} \right) \\ &= \left[\frac{2}{3} \cdot \frac{47,1}{10,65 + 18,98} + \frac{2 \cdot 1}{2,5 + 10,65} + \frac{0,5}{2,5} \right] \cdot \left(\frac{1 + 3 \cdot 1}{4} \right) = 1,4 \end{aligned}$$

Ο συντελεστής λ_{ds} υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\lambda_{ds} = \frac{0,9 \cdot \tau_s \cdot q^2 \cdot K_{w1}^2 \cdot C_s \cdot \gamma_{ds}}{K_c \cdot g \cdot (1 + K_{st})}$$

, όπου

$$C_s = 1 - 0,033 \cdot \frac{b_{os}^2}{g \cdot \tau_s}$$

και

$$\gamma_{ds} = (0,25 \cdot \sin \varphi_1 + 2,6) \cdot 10^{-2}$$

$$\varphi_1 = \pi \cdot (6\beta - 5,5) = -150^\circ$$

Από τις παραπάνω σχέσεις προκύπτει ότι:

$$\gamma_{ds} = (0,25 \cdot \sin \varphi_1 + 2,6) \cdot 10^{-2} = 2,475 \cdot 10^{-2}$$

$$C_s = 1 - 0,033 \cdot \frac{b_{os}^2}{g \cdot \tau_s} = 1 - 0,033 \cdot \frac{2,5^2}{0,6 \cdot 21,3} = 0,984$$

και

$$\lambda_{ds} = \frac{0,9 \cdot \tau_r \cdot q^2 \cdot K_{w1}^2 \cdot C_x \cdot \gamma_{ds}}{K_c \cdot g \cdot (1 + K_{\sigma})} = \frac{0,9 \cdot 21,3 \cdot 10^{-3} \cdot 2^2 \cdot 0,96^2 \cdot 0,984 \cdot 2,475 \cdot 10^{-2}}{1,0757 \cdot 0,6 \cdot 10^{-3} \cdot (1 + 0,5)} = 1,777$$

Ο συντελεστής λ_{er} για τύλιγμα μονού στρώματος (single layer winding) υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\lambda_{er} = 0,34 \cdot \frac{q}{L} \cdot (l_{end} - 0,64 \cdot \beta \cdot \tau) = 0,34 \cdot \frac{2}{0,24282} \cdot (0,174 - 0,64 \cdot 1 \cdot 0,1278) \rightarrow$$

$$\lambda_{er} = 0,285$$

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

$$\begin{aligned} X_{SL} &= 2 \cdot \mu_0 \cdot \omega_1 \cdot L \cdot \frac{W_i^2}{p_1 \cdot q} \cdot (\lambda_r + \lambda_{ds} + \lambda_{er}) \\ &= 2 \cdot 1,26 \cdot 10^{-6} \cdot 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 0,24282 \cdot \frac{105^2}{3 \cdot 2} \cdot (1,4 + 1,777 + 0,258) \\ &= 1,084 \Omega \end{aligned}$$

Η επαγωγική αντίδραση του δρομέα (δεν είναι ανοιγμένη στο στάτη) δίνεται από τη σχέση:

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

, όπου

$$\lambda_r = 0,66 + \frac{2 \cdot h_r}{3 \cdot (d_1 + d_2)} + \frac{h_{or}}{b_{or}} = 0,66 + \frac{2 \cdot 33,45}{3 \cdot (11,75 + 10)} + \frac{0,5}{1,5} = 2,0186$$

$$\lambda_{dr} = \frac{0,9 \cdot \tau_r \cdot \gamma_{dr}}{K_c \cdot g} \cdot \left(\frac{N_r}{6 \cdot p_i} \right)^2$$

Ο συντελεστής γ_{dr} δίνεται από τη σχέση:

$$\gamma_{dr} = 9 \cdot \left(\frac{6 \cdot p_i}{N_r} \right)^2 \cdot 10^{-2} = 9 \cdot \left(\frac{6 \cdot 3}{28} \right)^2 \cdot 10^{-2} = 3,72 \cdot 10^{-2}$$

Άρα:

$$\lambda_{dr} = \frac{0,9 \cdot \tau_r \cdot \gamma_{dr}}{K_c \cdot g} \cdot \left(\frac{N_r}{6 \cdot p_i} \right)^2 = \frac{0,9 \cdot 27,24 \cdot 3,72 \cdot 10^{-2}}{1,0757 \cdot 0,6} \cdot \left(\frac{28}{6 \cdot 3} \right)^2 = 3,42$$

Στη συνέχεια, υπολογίζουμε τον συντελεστή λει από τη σχέση:

$$\lambda_{er} = \frac{2,3 \cdot (D_{er} - b)}{N_r \cdot L \cdot 4 \cdot \sin^2 \left(\frac{\pi \cdot P_1}{N_r} \right)} \cdot \log \left[\frac{4,7 \cdot (D_{er} - b)}{b + 2a} \right]$$

Στην παραπάνω σχέση το $D_{er} = 0,2368m$ και το b (το βάθος του δακτυλίου βραχυκύκλωσης) είναι ίσο με:

$$b = 44,825mm$$

Το a είναι το πλάτος του δακτυλίου βραχυκύκλωσης και υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\alpha = \frac{A_{er}}{b} = 25,59mm$$

Άρα:

$$\begin{aligned} \lambda_{er} &= \frac{2,3 \cdot (D_{er} - b)}{N_r \cdot L \cdot 4 \cdot \sin^2 \left(\frac{\pi \cdot P_1}{N_r} \right)} \cdot \log \left[\frac{4,7 \cdot (D_{er} - b)}{b + 2a} \right] \\ &= \frac{2,3 \cdot (236,8 - 44,825)}{28 \cdot 242,82 \cdot 4 \cdot \sin^2 \left(\frac{3\pi}{28} \right)} \cdot \log \left[\frac{4,7 \cdot (236,8 - 44,825)}{44,825 + 2 \cdot 25,59} \right] = 0,3883 \cdot 0,973 \\ &\rightarrow \lambda_{er} = 0,378 \end{aligned}$$

Στη συνέχεια, θα υπολογίσουμε τον συντελεστή επιδερμικού φαινομένου K_X (skin effect coefficient for leakage reactance) από την σχέση:

$$K_x = \frac{3 \cdot [\sinh(2\xi) - \sin(2\xi)]}{2 \cdot \xi \cdot [\cosh(2\xi) - \cos(2\xi)]} = 0,862$$

Στην παραπάνω σχέση το $\xi=1,74$. Η επαγωγική αντίδραση του δρομέα θα είναι ίση με:

$$\begin{aligned} X_{be} &= 2 \cdot \pi \cdot f \cdot \mu_0 \cdot L \cdot (\lambda_r \cdot K_x + \lambda_{dr} + \lambda_{er}) \\ &= 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 1,256 \cdot 10^{-6} \cdot 0,24282 \cdot (2,0186 \cdot 0,862 + 3,42 + 0,378) \\ &= 5,3 \cdot 10^{-4} \Omega \end{aligned}$$

Η ανοιγμένη στο στάτη επαγωγική αντίδραση του δρομέα θα είναι:

$$X_z = 4 \cdot m \cdot \frac{(W_1 \cdot K_{w1})^2}{N_r} \cdot X_{ba} = 4 \cdot 3 \cdot \frac{(105 \cdot 0,96)^2}{28} \cdot 5,3 \cdot 10^{-4} \Omega = 2,31 \Omega$$

Οι παραπάνω τιμές αφορούν ακινητοποιημένο δρομέα. Για ονομαστική ταχύτητα οι τιμές διαφοροποιούνται λίγο, κυρίως λόγω εξάλειψης του επιδερμικού φαινομένου. Μπορούν να υπολογιστούν αναλυτικά.

Απομένει ο υπολογισμός της αντίδρασης μαγνήτισης από τη σχέση:

$$X_m = \sqrt{\left(\frac{V_{ph}}{I_\mu}\right)^2 - R_s^2} - X_{sl} = \sqrt{\left(\frac{400}{14,3}\right)^2 - 0,1299^2} - 1,084 = 26,89 \Omega$$

Οι παραπάνω τιμές ωμικών και επαγωγικών αντιστάσεων είναι για ολίσθηση $S=1$ δηλαδή για ακινητοποιημένο δρομέα. Παρακάτω κάνουμε υπολογισμό των ίδιων αντιστάσεων με εμπειρικούς τύπους για να βρούμε όσο το δυνατόν πιο κοντά στις πραγματικές τιμές που έχουν σε ονομαστικό φορτίο.

$$X'_{sl} = X_{sl} (0,7 \sim 0,8) = 1,084 \cdot 0,75 = 0,813 \Omega$$

$$X'_{rl} = X_{rl} \cdot (0,6 \sim 0,7) = 1,586 \Omega$$

$$K_R = K_X = 0,862$$

$$R_{ba \ 80^\circ \text{ st}} = 3,1 \cdot 10^{-8} \cdot \left(1 + \frac{80 - 20}{273}\right) \cdot \left(\frac{0,24282 \cdot 0,862}{549,5 \cdot 10^{-6}}\right) + \frac{0,02154}{2 \cdot 1073 \cdot 10^{-6} \cdot \left(\sin \frac{3 \cdot \pi}{28}\right)^2}$$

$$= 0,1788 \cdot 10^{-5}$$

$$R'_r = 1,97 \cdot \frac{0,1788 \cdot 10^{-5}}{4,56 \cdot 10^{-5}} = 0,077 \Omega$$

4.8 Απώλειες και βαθμός απόδοσης

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

$$P_{\text{κπ}} = P_{\text{cu}} + P_{Al} + P_{fs} + P_{MHX} + P_{KAT}$$

, όπου P_{Al} είναι οι απώλειες στον δρομέα του οποίου οι αγωγοί είναι κατασκευασμένοι από αλουμίνιο. Αναλυτικά:

- Απώλειες χαλκού στον στάτη:

$$P_{cu} = 3 \cdot I_{ov}^2 \cdot R_s = 3 \cdot 97,1^2 \cdot 0,1299 W = 3674,2 W$$

- Απώλειες στον δρομέα:

$$P_{AI} = 3 \cdot I_{TK}^2 \cdot R_r = 3 \cdot K_I^2 \cdot I_M^2 \cdot R_r = 3 \cdot 0,896^2 \cdot 97,1^2 \cdot 0,077 = 1748,5W$$

Οι μηχανικές απώλειες υπολογίζονται προσεγγιστικά από την εμπειρική σχέση:

$$P_{MHX} = 0,008 \cdot P_{ov} = 0,008 \cdot 55000W = 440W$$

Οι κατανεμημένες απώλειες υπολογίζονται και αυτές εμπειρικά από τη σχέση:

$$P_{KAT} = 0,01 \cdot 55000W = 550W$$

Οι απώλειες σιδήρου εμφανίζονται κατά κύριο λόγο στον στάτη, επειδή στον δρομέα η συχνότητα του ρεύματος είναι πολύ μικρή. Οι απώλειες σιδήρου στον στάτη χωρίζονται σε απώλειες στα «δόντια» (ανάμεσα στα λούκια) p_{t1} (stator teeth fundamental losses) και στο πυρήνα που βρίσκεται πίσω (πάνω) από τα λούκια p_{y1} (back iron losses – yoke).

Οι απώλειες στα δόντια υπολογίζονται από τη σχέση:

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

, όπου $p_{10} = 2 - 3W/kg$ και K_t αποτελεί έναν συντελεστή που εξαρτάται από την ποιότητα του υλικού που χρησιμοποιείται για την κατασκευή του πυρήνα. Η παράμετρος G_{t1} είναι το βάρος των δοντιών του πυρήνα (stator tooth weight) και υπολογίζεται από τη σχέση:

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

$$\rightarrow G_{t1} = 7800 \cdot 36 \cdot 11,1 \cdot 10^{-3} \cdot (47,1 + 1 + 0,5) \cdot 10^{-3} \cdot 0,24282 \cdot 0,96 = 35,31kg$$

$$p_{t1} = K_t \cdot p_{10} \cdot \left(\frac{f_1}{50}\right)^{1,3} \cdot B_{ts}^{1,7} \cdot G_{t1} = 0,96 \cdot 3 \cdot \left(\frac{50}{50}\right)^{1,3} \cdot 1,6^{1,7} \cdot 35,31 W = 226,1W$$

Οι απώλειες στον υπόλοιπο πυρήνα δίνονται από τη σχέση:

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

Όπου:

$$\begin{aligned}
G_{y1} &= \gamma_{\text{iron}} \cdot \frac{\pi}{4} \cdot [D_{\text{out}}^2 - (D_{\text{out}} - 2 \cdot h_{\text{cs}})^2] \cdot L \cdot K_{Fs} \\
\rightarrow G_{y1} &= 7800 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot [0,3908^2 - (0,3908 - 2 \cdot 0,0248)^2] \cdot 0,24282 \cdot 0,96 \rightarrow G_{y1} = 51,85W
\end{aligned}$$

Επομένως, οι απώλειες στον υπόλοιπο πυρήνα θα είναι:

$$p_{y1} = K_y \cdot p_{10} \cdot \left(\frac{f_1}{50}\right)^{1,3} \cdot B_{cs}^{1,7} \cdot G_{y1} = 0,96 \cdot 3 \cdot \left(\frac{50}{50}\right)^{1,3} \cdot 1,5^{1,7} \cdot 51,85 W = 297,5W$$

Οι συνολικές απώλειες σιδήρου θα είναι ίσες με:

$$P_{fs} = 226,1W + 297,5W = 523,6W$$

Οι συνολικές απώλειες του κινητήρα θα είναι:

$$\begin{aligned}
P_{\text{απ}} &= P_{cu} + P_{Al} + P_{fs} + P_{MHX} + P_{KAT} = 3674,2 + 1748,5 + 523,6 + 440 + 550 W \\
&= 6936,3W
\end{aligned}$$

Ο βαθμός απόδοσης του κινητήρα θα είναι:

$$\eta = \frac{55000W}{55000 + 6936,3W} \cdot 100\% = 88,8\%$$

4.9 Υπολογισμός χαρακτηριστικών λειτουργίας

Το ρεύμα του κινητήρα χωρίς φορτίο (το ενεργό, δεν συμπεριλαμβάνεται το ρεύμα μαγνήτισης) είναι ίσο με:

$$I_0 = \frac{P_{fs} + P_{MHX} + 3 \cdot I_{\mu}^2 \cdot R_s}{3 \cdot V_{ph}} = \frac{523,6 + 440 + 3 \cdot 17,5^2 \cdot 0,1299}{3 \cdot 400} = 0,9A$$

Η ολίσθηση υπολογίζεται από την σχέση:

$$P_{Al} = s \cdot P_{AG} \rightarrow s = \frac{P_{Al}}{P_{AG}} = \frac{1793,92W}{55000 + 1748,5 + 550 + 440W} = 0,031 = 3,1\%$$

Η ονομαστική ροπή είναι ίση με:

$$T_n = \frac{55000W}{2\pi \cdot \frac{50}{3} (1 - 0,031)} = \frac{55000}{101,47} = 542,014Nm$$

Η ροπή ανατροπής υπολογίζεται από την σχέση:

$$T_{bk} = \frac{3 \cdot p_1}{2 \cdot \omega_1} \cdot \frac{V_{ph}^2}{[R_s + \sqrt{R_s^2 + (X_{sl} + C_1 \cdot X_2)^2}]^2}$$

Όπου:

$$C_1 = 1 + \frac{X_{sl}}{X_m} = 1 + \frac{1,084}{26,89} = 1,04$$

Αντικαθιστώντας τις τιμές των παραμέτρων, η ροπή ανατροπής είναι ίση με:

$$T_{bk} = \frac{3 \cdot p_1}{2 \cdot \omega_1} \cdot \frac{V_{ph}^2}{[R_s + \sqrt{R_s^2 + (X_{sl} + C_1 \cdot X_2)^2}]^2} = 882,9 Nm$$

Το ρεύμα εκκίνησης του κινητήρα είναι ίσο με:

$$I_{LR} = \frac{V_{ph}}{\sqrt{(R_s + R_r)^2 + (X_{sl} + X_{rl})^2}} = \frac{400}{\sqrt{(0,1299 + 1,97)^2 + (1,084 + 1,586)^2}} = 117,8 A$$

Η ροπή εκκίνησης είναι ίση με:

$$T_{LR} = \frac{3 \cdot I_{LR}^2 \cdot R_r}{\omega_s} \cdot p_1 = \frac{3 \cdot 117,8^2 \cdot 1,97}{2 \cdot \pi \cdot \frac{50}{3}} = 783,2 Nm$$

Τέλος, ο συντελεστής ισχύος της μηχανής δίνεται από την σχέση:

$$\cos\varphi = \frac{P_n}{\sqrt{3} \cdot V_{ph} \cdot I_n \cdot \eta} = \frac{55000}{\sqrt{3} \cdot 400 \cdot 97,1 \cdot 0,888} = 0,92$$

Για τη σχεδίαση της χαρακτηριστικής ροπής-ταχύτητας ($T=f(n)$) αφού έχουμε βρει τη ροπή εκκίνησης την ροπή ανατροπής και την ονομαστική ροπή, απομένει να βρούμε την ταχύτητα που εμφανίζονται αυτές οι ροπές. Η μόνη άγνωστη ταχύτητα που έχουμε είναι της ροπής ανατροπής οπότε αρχικά βρίσκουμε την ολίσθηση s (εδώ χρειαζόμαστε τις R_{th} και X_{th})

$$R_{t'h} = R_s \cdot \left(\frac{X_m}{X_{sl}' + X_m} \right)^2 = 0,1299 \left(\frac{26,89}{0,813 + 26,89} \right)^2 = 0,126 \Omega$$

$$X_{t'h} = X_{sl}' = 0,813 \Omega$$

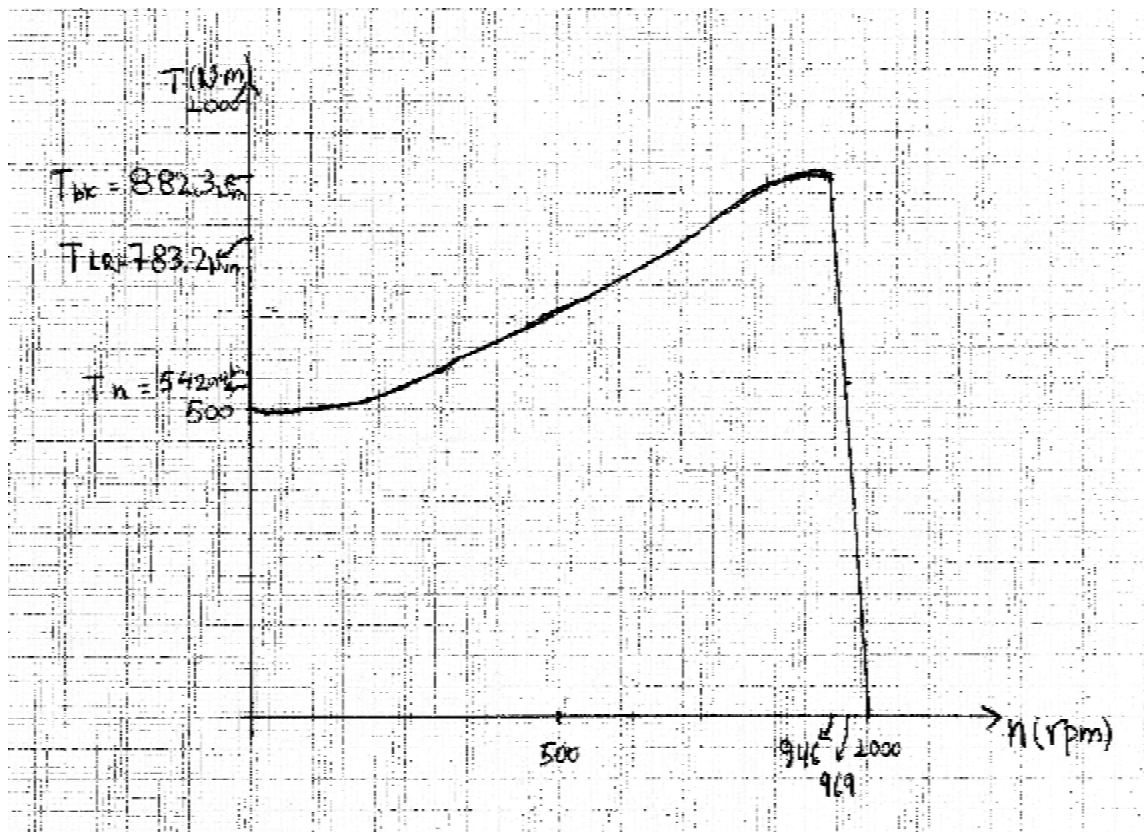
$$s = \frac{R_s}{\sqrt{R_{t'h}^2 + (X_{t'h} + X_2')^2}} = \frac{0,1299}{\sqrt{0,126^2 + (0,813 + 1,586)^2}} = 0,054 \text{ ή } s = 5,4\%$$

Από τον παρακάτω τύπο υπολογίζουμε την ταχύτητα

$$nr = (1-s)ns \quad ns = (f/p)60 = 1000 \text{rpm}$$

nr(rpm)	T(Nm)	
0	783,2	Εκκίνηση
946	882,9	Ανατροπή
969	542,014	Ονομαστικό
1000	0	Σύγχρονη ταχ.

Χαρακτηριστικής ροπής-ταχύτητας ($T=f(n)$)



Βιβλιογραφία

1. Stephen J. Chapman, Ηλεκτρικές Μηχανές AC – DC, 3 έκδοση, εκδόσεις ΤΖΙΟΛΑ,2000
2. Παντελής Β. Μαλατέστας, Ηλεκτρική Κίνηση,3 έκδοση, εκδόσεις ΤΖΙΟΛΑ,2010
3. ION BOLDEA SYED A. NASAR, THE INDUCTION MACHINES DESIGN HANDBOOK, 2 έκδοση, CRC PRESS,2010
4. Τσιμουρτάκης Γεώργιος, Πτυχιακή Εργασία, ΤΕΙ Πατρών 2013