

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΛΟΠΟΝΝΗΣΟΥ

ΣΧΟΛΗ: ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΜΗΜΑ: ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ (ΠΡΩΗΝ
ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Τ.Ε.)

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΤΙΤΛΟΣ: ΒΕΛΤΙΩΣΗ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ 3Φ ΕΠΑΓΩΓΙΚΟΥ ΚΙΝΗΤΗΡΑ 22kW, 2 ΠΟΛΩΝ

ΦΟΙΤΗΤΗΣ: ΘΑΝΕΛΛΑΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ

ΕΠΟΠΤΕΥΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΧΑΡΑΛΑΜΠΑΚΟΣ ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ-ΝΕΚΤΑΡΙΟΣ

ΠΑΤΡΑ - 2022



ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον καθηγητή κύριο Βασίλειο-Νεκτάριο Χαραλαμπάκο για την μεγάλη βοήθειά και συμβολή του μέσω συμβούλων και γνώσεων του για την υλοποίηση της παρακάτω πτυχιακής εργασίας.

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Στη παρακάτω πτυχιακή θα αναλυθούν σε σύγκριση, μέσω υπολογισμών, δυο περιπτώσεις αριθμού αγωγών δρομέα με σκοπό τη βελτίωση των χαρακτηριστικών λειτουργίας ενός επαγωγικού κινητήρα. Ειδικότερα, στόχος της παρακάτω μελέτης είναι η βελτίωση της ροπής εκκίνησης και ροπή ανατροπής της μηχανής, όπως και άλλων παραμέτρων.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η πτυχιακή που ακολουθεί πραγματεύεται τη μελέτη όσον αφορά την όπιοια βελτίωση στα χαρακτηριστικά λειτουργίας της μηχανής, στη περίπτωση που αυξηθούν οι αγωγοί (αυλάκια) στον δρομέα. Αυτό πραγματοποιείται μέσω των μαθηματικών σχέσεων που χρησιμοποιούνται ομοίως σε δυο περιπτώσεις αριθμού αγωγών. Στόχος είναι μέσω της σύγκρισης των τιμών που προκύπτουν να οδηγηθούμε στη λήψη ασφαλούς συμπεράσματος. Ως συμπέρασμα εννοούμε, μετά τη μελέτη των αποτελεσμάτων, αν καταλήξουμε στη βελτίωση των βασικών χαρακτηριστικών τα οποία είναι η ροπή εκκίνησης, η ροπή ανατροπής, το ρεύμα εκκίνησης ο βαθμός απόδοσης κ.α. Άλλα μεγέθη τα οποία συμπεριλαμβάνονται στους υπολογισμούς και κατ' επέκταση στη σύγκριση και αξίζει να αναφερθούν είναι οι επαγωγικές αντιδράσεις και ωμικές αντιστάσεις του ρότορα. Αυτές μέσω αλλαγής των τιμών τους μπορούν να προκαλέσουν μεταβολή στο ονομαστικό ρεύμα του κινητήρα κατά την εκκίνηση άρα και στη ροπή εκκίνησης και ανατροπής. Στο τελευταίο κεφάλαιο αναφέρονται τα τελικά συμπεράσματα στα οποία καταλήξαμε βάσει των αποτελεσμάτων όπως κι εναλλακτικές προτάσεις για τη βελτίωση των χαρακτηριστικών λειτουργίας του κινητήρα. Τέλος, παρουσιάζεται σε μορφή πίνακα η συνολική σύγκριση των σημαντικών μεγεθών για τη λειτουργία της μηχανής στις δυο περιπτώσεις αριθμού αγωγών που είχαμε επιλέξει στην αρχή της πτυχιακής.

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ

Κινητήρας, ροπή εκκίνησης, ροπή ανατροπής, ορθή λειτουργία, ρευμά εκκίνησης, ωμική αντίσταση, επαγωγική αντίδραση, ταχύτητα, δρομέας, στάτης, αυλάκια, στροφές, ολίσθηση, βαθμός απόδοσης, ισοδύναμο κύκλωμα.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 - ΕΠΑΓΩΓΙΚΟΙ ΚΙΝΗΤΗΡΕΣ

ΑΡΧΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΕΠΑΓΩΓΙΚΟΥ ΚΙΝΗΤΗΡΑ

- i. ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΗ ΡΟΠΗΣ-ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΕΠΑΓΩΓΙΚΟΥ ΚΙΝΗΤΗΡΑ
- ii. ΑΠΩΛΕΙΕΣ ΚΑΙ ΡΟΗ ΙΣΧΥΟΣ
- iii. ΙΣΟΔΥΝΑΜΟ ΚΥΚΛΩΜΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 - ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΙ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΩΝ ΜΕΡΩΝ ΤΡΙΦΑΣΙΚΟΥ ΕΠΑΓΩΓΙΚΟΥ ΚΙΝΗΤΗΡΑ 2 ΠΟΛΩΝ 22kW

- i. ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΟ ΚΙΝΗΤΗΡΑ
- ii. ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΥΛΙΓΜΑΤΩΝ ΣΤΑΤΗ
- iii. ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΑΥΛΑΚΙΩΝ ΣΤΑΤΗ
- iv. ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΔΙΑΣΤΑΣΕΩΝ ΔΡΟΜΕΑ
 - i. ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΜΕ 18 ΑΓΩΓΟΥΣ (Nr=18)
 - ii. ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΜΕ 28 ΑΓΩΓΟΥΣ (Nr=28)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 - ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ

- i. ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΙΣΟΔΥΝΑΜΟΥ ΚΥΚΛΩΜΑΤΟΣ
 - i. ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΜΕ 18 ΑΓΩΓΟΥΣ (Nr=18)
 - ii. ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΜΕ 28 ΑΓΩΓΟΥΣ (Nr=28)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 - ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ , ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

ΔΙΑΔΙΚΤΥΟ

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στην πτυχιακή που ακολουθεί έγινε η επιλογή για μελέτη ενός ασύγχρονου κινητήρα 2-πόλων ο οποίος φέρει τα παρακάτω χαρακτηριστικά:

ΟΝΟΜΑΣΤΙΚΗ ΙΣΧΥΣ (P_n) : 22kW

ΟΝΟΜΑΣΤΙΚΗ ΤΑΧΥΤΗΤΑ (R_n): 2492rpm

ΑΡΙΘΜΟΣ ΦΑΣΕΩΝ: 3

ΣΥΝΔΕΣΜΟΛΟΓΙΑ: ΑΣΤΕΡΑΣ

ΒΑΘΜΟΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ (η): 0,910

ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΙΣΧΥΟΣ($\cos\phi$) : 0,89

Σκοπός της μελέτης είναι, μέσω μελέτης σε παλαιότερη πτυχιακή(“Μελέτη τριφασικού επαγωγικού κινητήρα δυο πόλων ισχύος 22KW Σπουδαστές: Μανταλίδης Νικόλαος, Λουκανάρης Σπυρίδων”), να ελέγξουμε κατά πόσο βελτιώνονται τα χαρακτηριστικά λειτουργίας της μηχανής αν μεταβάλουμε (αυξήσουμε στη προκειμένη περίπτωση) τον αριθμό των αυλακιών (αγωγών) στον δρομέα κι αν φτάνουμε στα επιθυμητά αποτελέσματα ροπής εκκίνησης και ροπής ανατροπής.

Τα κεφάλαια από τα οποία απαρτίζεται η πτυχιακή είναι τέσσερα. Στο **πρώτο κεφάλαιο** θα αναφερθούν εισαγωγικές έννοιες και πληροφορίες επάνω στους επαγωγικούς κινητήρες, αρχή λειτουργίας τους, από ποια μέρη αποτελείται ο κινητήρας, οι απώλειες και τα χαρακτηριστικά λειτουργίας του, όπως και το ισοδύναμο κύκλωμά του.

Το **δεύτερο κεφάλαιο** θα περιέχει τη μελέτη ενός τριφασικού κινητήρα, η σχεδίαση του με συγκεκριμένα θεωρητικού επιπέδου χαρακτηριστικά και θα γίνει μια σύγκριση των διαστάσεων του δρομέα του κινητήρα σε σχέση με εκείνες παλαιότερης πτυχιακής [1]. Συγκεκριμένα θα γίνει ο υπολογισμός των τυλιγμάτων του στάτη (αριθμός αυλακιών στάτη, αριθμός σπειρών κλπ.), η μελέτη για τη μορφή του δρομέα στην αρχική τμήμα αυλακιών που είχε τεθεί(18 αυλάκια ή αγωγοί). Αφού ολοκληρωθεί εν συνεχεία με μεταβολές στον αριθμό των αυλακιών του δρομέα (υπολογιστικά) θα γίνουν εκ νέου οι υπολογισμοί στο κατασκευαστικό κομμάτι του κινητήρα ώστε να οδηγηθούμε στα κατάλληλα συμπεράσματα όσον αφορά την βελτίωση των χαρακτηριστικών της μηχανής σε δυο διαφορετικές περιπτώσεις.

Στο **τρίτο κεφάλαιο** θα συναντήσουμε τα χαρακτηριστικά λειτουργίας που προαναφέρθηκαν. Κάποια από τα οποία είναι ο υπολογισμός του ισοδύναμου κυκλώματος, των αντιστάσεων και επαγωγικών αντιδράσεων στάτη και δρομέα αλλά και το ρεύμα μαγνήτισης και κυρίως η ροπή ανατροπής και εκκίνησης. Θα ακολουθήσει μια περαιτέρω σύγκριση μέσω σχολίων για τις μεταβολές που θα υπάρξουν στα στοιχεία του δρομέα, με κύριο στόχο την όποια αλλαγή στη ροπή. Σε αυτό το κεφάλαιο επίσης υπολογίζονται οι απώλειες και ο βαθμός απόδοσης.

Τέλος, το **τέταρτο κεφάλαιο** θα αναφέρεται στα συμπεράσματα που οδηγηθήκαμε έπειτα από τη σύγκριση καθώς και ο σχολιασμός κι επίλογος της πτυχιακής.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 - ΕΠΑΓΩΓΙΚΟΙ ΚΙΝΗΤΗΡΕΣ

Με τον όρο **ηλεκτρική μηχανή** εννοούμε τη συσκευή μέσω της οποίας μπορεί να γίνει μετατροπή της ενέργειας (μηχανική, ηλεκτρική). Στη περίπτωση που η μηχανική ενέργεια μπορεί να μετατραπεί σε ηλεκτρική, τότε λέμε ότι η μηχανή δουλεύει ως **κινητήρας** ενώ όταν η ηλεκτρική ενέργεια μετατρέπεται σε μηχανική, η μηχανή δουλεύει ως **γεννήτρια**. Επίσης άλλα είδη μηχανών είναι οι **μετασχηματιστές (Μ/Σ)** αλλά και οι **μετατροπείς**.

Αναλυτικά τα κυριότερα είδη ηλεκτρικών μηχανών είναι:

- α) Οι ηλεκτρογεννήτριες ή απλά γεννήτριες που χρήση τους είναι για να παράγουν ηλεκτρικής ενέργεια. Ανάλογα με το είδος του ηλεκτρικού ρεύματος χωρίζονται σε δυο κατηγορίες, σε γεννήτριες Συνεχούς Ρεύματος (Σ.Ρ.) και γεννήτριες Εναλλασσόμενου Ρεύματος (Ε.Ρ.).
- β) Οι ηλεκτροκινητήρες ή απλά κινητήρες που χρησιμοποιούνται για την κίνηση μηχανημάτων και διακρίνονται σε κινητήρες συνεχούς ρεύματος και κινητήρες εναλλασσόμενου ρεύματος, ανάλογα με ποια κατηγορία ρεύματος εργάζονται.
- γ) Οι μετασχηματιστές που χρησιμοποιούνται για να ανυψώσουν ή να υποβιβάσουν την τάση του εναλλασσόμενου ρεύματος (Ε.Ρ.).
- δ) οι στρεφόμενοι μετατροπείς και τα ζεύγη κινητήρα γεννήτριας που μετατρέπουν το Ε.Ρ σε συνεχές και αντίστροφα το Σ.Ρ σε Ε.Ρ. [2]

Από τα πολλά είδη των ηλεκτρικών μηχανών που αναφέραμε αυτές που χρησιμοποιούνται σε πολλές περιπτώσεις στη βιομηχανία είναι ο τριφασικός ασύγχρονος (ή επαγωγικός) κινητήρας. Οι ασύγχρονοι κινητήρες είναι κινητήρες γενικής χρήσης και χρησιμοποιούνται στις περισσότερες των περιπτώσεων, εκτός αν ειδικές συνθήκες επιβάλλουν την χρησιμοποίηση άλλων τύπων κινητήρων.

Οι κινητήρες αυτοί επικράτησαν διότι είναι απλοί στην κατασκευή, οικονομικοί, εύκολοι στην συντήρηση, ασφαλείς στην λειτουργία και έχουν καλό βαθμό απόδοσης. Επίσης να αναφέρουμε ότι οι τριφασικοί ασύγχρονοι κινητήρες χωρίζονται σε δύο κύριες κατηγορίες, τους κινητήρες με βραχυκυκλωμένο δρομέα και τους δακτυλιοφόρους κινητήρες. [3]

1.1) ΑΡΧΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΕΠΑΓΩΓΙΚΟΥ ΚΙΝΗΤΗΡΑ

Αρχικά, ξεκινάμε με τη περιγραφή όσον αφορά **τα μέρη από τα οποία αποτελείται ένας κινητήρας**. Κατασκευαστικά η μηχανή αποτελείται από δυο κύρια μέρη, το ένα είναι το ακίνητο μέρος της μηχανής, που φέρει τυλίγματα-ηλεκτρομαγνήτες και ονομάζεται **στάτης** ενώ το άλλο είναι το κινητό μέρος της μηχανής που φέρει και αυτός τυλίγματα-ηλεκτρομαγνήτες ονομάζεται **δρομέας**. Πάντα το ένα από τα δύο τυλίγματα τροφοδοτείται με ηλεκτρικό ρεύμα, απαραίτητο για τη δημιουργία ηλεκτρομαγνήτη (τύλιγμα διέγερσης) και μαγνητικού πεδίου.

Ο **στάτης**, αποτελεί το μόνο στοιχείο που συνδέεται ηλεκτρικά με το δίκτυο. Μέσα στο κέλυφος είναι τοποθετημένος ο πυρήνας του τυμπάνου, που κατασκευάζεται από πολλά μαγνητικά ελάσματα, συνήθως πυριπιούχου χάλυβα, που κόβονται σε ειδικές πρέσες. Τα ελάσματα αυτά είναι περασμένα με ειδικό βερνίκι, συγκρατούνται με κοχλίες και αποτελούν το ζύγωμα της μηχανής. Στα αυλάκια (αγωγοί) που σχηματίζονται τοποθετούνται οι τρεις φάσεις του τυλίγματος, ώστε να δημιουργείται στο εσωτερικό ένα μαγνητικό πεδίο.

Εξωτερικά στην επιφάνεια του στάτη, υπάρχουν πτερύγια που συμβάλλουν στο να ψύχεται η μηχανή.

Ο **δρομέας (ή ρότορας)** είναι το δεύτερο κύριο μέρος της μηχανής και βρίσκεται στο εσωτερικό του στάτη. Η μορφή του δρομέα εξαρτάται από το είδος της μηχανής. Έτσι έχουμε δυο κατηγορίες, τους κινητήρες δακτυλιοφόρου δρομέα (wound rotor) και βραχυκυκλωμένου δρομέα ή τύπου κλωβού (squirrel-cage rotor). Το τύλιγμα δακτυλιοφόρου είναι ένα τριφασικό τύλιγμα με αριθμό πόλων ανάλογο με του τυλίγματος του στάτη. Σε εκείνους που είναι τύπου κλώβου, όπως αυτός που θα μελετήσουμε, το τύλιγμα του δρομέα αποτελείται από ράβδους (χαλκού ή αλουμινίου) που τοποθετούνται κατά μήκος των αυλακιών οι οποίες βραχυκυκλώνονται περιμετρικά στα δυο άκρα.



Εικόνα 1: Στάτης και δρομέας κινητήρα [1]



Εικόνα 2: Κατασκευαστικά μέρη της μηχανής [8]

Η αρχή λειτουργίας του ασύγχρονου κινητήρα έχει ως εξής.

Όπως αναφέραμε και πριν, όταν το τυλίγμα του στάτη τροφοδοτηθεί μέσω του συστήματος τάσεων, δημιουργείται στο διάκενο ένα στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο. Αποτέλεσμα είναι η δημιουργία της ταχύτητας περιστροφής του Μ.Π. που είναι συνάρτηση της συχνότητας f και του αριθμού των πόλων κι έχουμε την παρακάτω σχέση:

$$n_s = 120 \cdot \left(\frac{f}{P}\right)$$

Και:

$$\omega_s = \frac{(2\pi \cdot n_s)}{60} = \frac{2}{P} \omega_1$$

όπου:

n_s = σύγχρονη ταχύτητα (rpm)

ω_s = σύγχρονη γωνιακή ταχύτητα (rad/s)

$\omega_1 = 2\pi f_1$ = κυκλική συχνότητα (rad/s)

P = αριθμός των πόλων

Αν υποθέσουμε ότι ο δρομέας είναι ακίνητος ($n_r=0$), οι επαγόμενες τάσεις στα τυλίγματα του έχουν την ίδια συχνότητα με εκείνη των τάσεων τροφοδοσίας στα τυλίγματα του στάτη. Αν ο δρομέας βραχυκυκλωθεί, λόγω των επαγόμενων Η.Ε.Δ. θα κυκλοφορούν ρεύματα στο δρομέα με ίδια συχνότητα με εκείνη των τάσεων του στάτη.

Αυτά τα ρεύματα θα δημιουργήσουν ένα στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο που θα έχει την ίδια σύγχρονη ταχύτητα και φορά περιστροφής με εκείνο του στάτη. Μέσω των δυο μαγνητικών πεδίων (δρομέα και στάτη) δημιουργείται ροπή με φορά περιστροφής ίδια με εκείνη του Μ.Π. του στάτη. Έστω τώρα ότι ο κινητήρας λειτουργεί στη μόνιμη κατάσταση ($n_r < n_s$). σε αυτή τη περίπτωση, εμφανίζεται η ολίσθηση (slip) δηλαδή ο λόγος της ταχύτητας του πεδίου ως προς τον δρομέα προς τη σύγχρονη ταχύτητα.

$$s = \frac{n_s - n_r}{n_s} \quad s(\%) = \frac{n_s - n_r}{n_s} \times 100$$

Επίσης , ενώ στον στάτη έχουμε την ίδια συχνότητα, στον δρομέα οι επαγόμενες Η.Ε.Δ. είναι ανάλογες της κίνησης των Μ.Π. στάτη και δρομέα. Ως αποτέλεσμα έχουμε την συχνότητα ολίσθησης (slip frequency) [4]

$$f_2 = \frac{P}{2} \frac{(n_s - n_r)}{60} = \frac{P}{2} s \frac{n_s}{60} = s f_1$$

όπου:

f_1 = συχνότητα των τάσεων στα τυλίγματα του στάτη (Hz)

f_2 = συχνότητα των τάσεων στα τυλίγματα του δρομέα (Hz)

Επιπρόσθετα το στρεφόμενο Μ.Π. του δρομέα το οποίο παράγεται από τις επαγόμενες Η.Ε.Δ. θα στρέφεται με φορά όμοια του φορέα και με ταχύτητα:

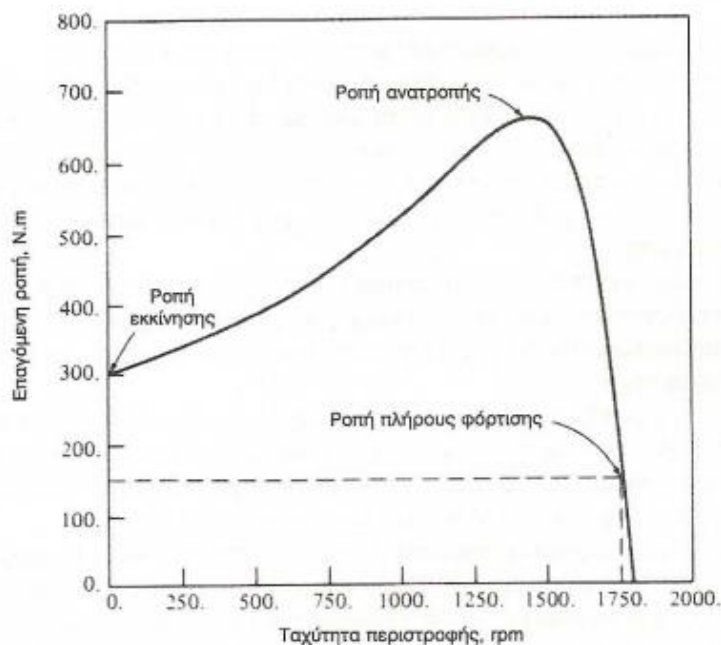
$$S_{nr} = n_s - n_r$$

Είναι εύκολο να κατανοήσουμε ότι η μέση τιμή της ροπής που παράγεται θα είναι διάφορη του μηδενός καθώς κατά τη περιστροφή του δρομέα, τα μαγνητικά πεδία στάτη και δρομέα έχουν την ίδια ταχύτητα περιστροφής. Όταν ο δρομέας θα έχει τη σύγχρονη ταχύτητα, οι επαγόμενες τάσεις όπως και τα ρεύματα στο δρομέα θα είναι μηδενικά. Ως αποτέλεσμα, οι στροφές θα ελαττωθούν λόγω της ροπής φορτίου και θα κυμαίνονται μεταξύ:

$$0 < n_r < n_s$$

1.2) ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΗ ΡΟΠΗΣ-ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΕΠΑΓΩΓΙΚΟΥ ΚΙΝΗΤΗΡΑ

Στη συνέχεια, θα αναφερθούμε στην **χαρακτηριστική ροπής-ταχύτητας** ενός ασύγχρονου κινητήρα, η οποία μας δίνει απαραίτητες πληροφορίες που φαίνονται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 1: Χαρακτηριστική Ροπής-Ταχύτητας ασύγχρονου κινητήρα [8]

Η γενική εξίσωση για τη σχέση επαγόμενης ροπής και ταχύτητας περιστροφής κινητήρα είναι η παρακάτω. Ο πιο εύκολος τρόπος να τη προσδιορίσουμε είναι μέσω του ισοδύναμου κατά Thevenin. Σύμφωνα με αυτό, κάθε γραμμικό κύκλωμα που έχει τη δυνατότητα να χωριστεί σε 2 σημεία από το υπόλοιπο σύστημα μπορεί να αντικατασταθεί από μια πηγή τάσης σε σειρά με μια σύνθετη αντίσταση. Μέσω των παραπάνω προκύπτει ότι:

$$T_{ind} = \frac{3V_{TH}^2 \cdot R_2/s}{\omega_{sync} \cdot [(R_{TH} + R_2/s)^2 + (X_{TH} + X_2)^2]}$$

Όπου:

ω_{sync} = σύγχρονη γωνιακή ταχύτητα

V_{th} = ισοδύναμη τάση κατά Thevenin

R_{th} = ωμική αντίσταση κατά Thevenin

X_{th} = επαγωγική αντίδραση κατά Thevenin

$R_{Th} + X_{Th}$ = σύνθετη αντίσταση ZTh

Οι πληροφορίες που μας δίνει η χαρακτηριστική που είδαμε παραπάνω είναι σημαντικές για τη κατανόηση λειτουργίας της ασύγχρονης μηχανής. Κατά την εκκίνηση, όπου οι στροφές είναι πρακτικά μηδέν, η ροπή του κινητήρα έχει τιμή $T_{εκκ}$ και λέγεται **ροπή εκκίνησης**. Καθώς αυξάνονται οι στροφές, αυξάνεται και η ροπή μέχρι την τιμή T_{max} και καταλήγει στη **μέγιστη ροπή ή ροπή ανατροπής**. Όταν η ταχύτητα του κινητήρα φθάσει τη **σύγχρονη ταχύτητα (ns)** τότε συμπεραίνουμε ότι η ροπή μειώθηκε απότομα και κατέληξε να είναι μηδέν. [5]

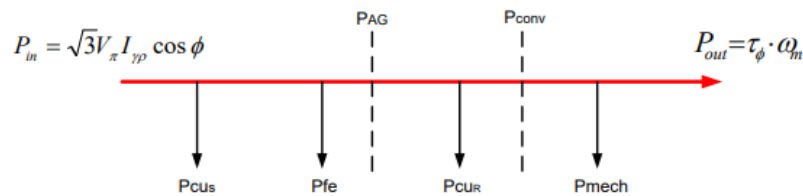
1.3) ΑΠΩΛΕΙΕΣ ΚΑΙ ΡΟΗ ΙΣΧΥΟΣ

Το επόμενο σκέλος που θα μελετήσουμε είναι εκείνο των **απωλειών** και της **ροής ισχύος** της μηχανής μας. Οι απώλειες των ασύγχρονων κινητήρων διακρίνονται σε:

1. Απώλειες χαλκού ή ηλεκτρικές στους αγωγούς του στάτη (P_{cuS}) και του δρομέα (P_{cuR}). Στα τυλίγματα του στάτη χάνεται ένα μέρος της ισχύος της εισόδου στα τυλίγματα του στάτη σε μορφή ηλεκτρικών απωλειών. Αυτή που απομένει περνά στον δρομέα μέσω του διακένου κι έτσι έχουμε τις απώλειες στο διάκενο (P_{AG}).

2. Απώλειες σιδήρου ή πυρήνα (P_{fe}) λόγω δινορευμάτων και υστέρησης. 3. Μηχανικές απώλειες λόγω τριβών και αντίστασης του αέρα.

Η ισχύς P_{conv} (ή P_{ind}) ονομάζεται ηλεκτρομηχανική ισχύς και είναι η ισχύς η οποία μετατρέπεται σε μηχανική. Ένα μέρος της ισχύος αυτής χάνεται σε μηχανικές απώλειες και το υπόλοιπο αποδίδεται στην έξοδο. Η σταδιακή μετατροπή της ισχύος παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα συνοπτικά. [4]

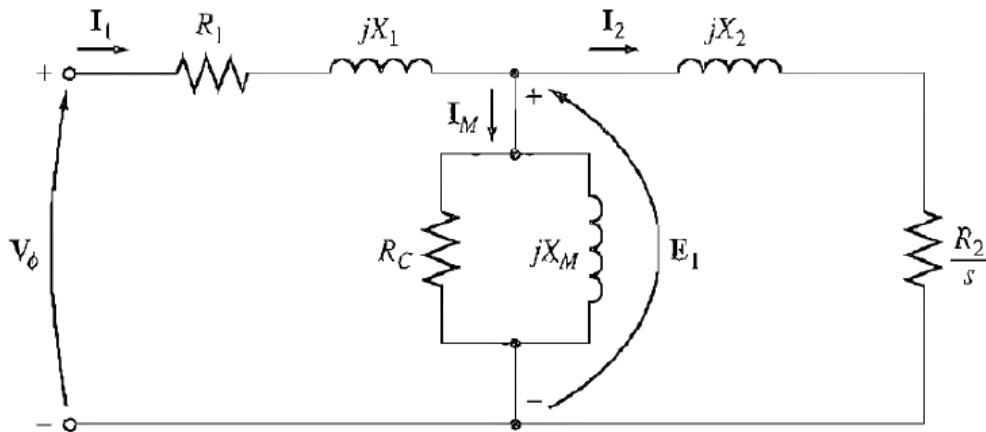


Σχήμα 2: Διάγραμμα ροής της ισχύος τριφασικού ασύγχρονου κινητήρα [4]

1.4) ΙΣΟΔΥΝΑΜΟ ΚΥΚΛΩΜΑ

Το τελευταίο και πολύ σημαντικό σκέλος που θα αναλύσουμε είναι το ισοδύναμο κύκλωμα της μηχανής. Η αρχή λειτουργίας του ασύγχρονου κινητήρα είναι παρόμοια με αυτή ενός μετασχηματιστή, όπου ως πρωτεύον θεωρούμε το τύλιγμα του στάτη ενώ ο δρομέας αποτελεί το δευτερεύον. Ωστόσο, το ισοδύναμο κύκλωμα του ασύγχρονου κινητήρα έχει και κάποιες διαφορές σε σχέση με τον μετασχηματιστή. Ο δρομέας του ασύγχρονου κινητήρα είναι μόνιμα (κατασκευαστικά) βραχυκυκλωμένος. Συνεπώς στο ισοδύναμο κύκλωμα θα είναι και αυτό βραχυκυκλωμένο στο δευτερεύον. Μια ακόμα διαφορά έχει να κάνει με τον λόγο μετασχηματισμού. Στον μετασχηματιστή ο λόγος μετασχηματισμού είναι σταθερός. Στον ασύγχρονο κινητήρα η επαγόμενη τάση στον δρομέα δεν είναι σταθερή αλλά εξαρτάται από τις στροφές του κινητήρα (άρα και από την ολίσθηση). Η μεγαλύτερη τάση επάγεται όταν ο δρομέας είναι ακίνητος (κατά την εκκίνηση όπου $s=1$), ενώ όσο η ταχύτητα αυξάνεται ($s<1$) και πλησιάζει την σύγχρονη η επαγόμενη τάση μειώνεται. Το φαινόμενο αυτό λαμβάνεται υπόψη εισάγοντας τη ολίσθηση ως παράμετρο στο δευτερεύον του ισοδύναμο κυκλώματος. Στο σχήμα 3 φαίνεται το ανά φάση ισοδύναμο κύκλωμα του ασύγχρονου τριφασικού κινητήρα με τα στοιχεία να είναι ανηγμένα ως προς τον στάτη. Λόγω της τριφασικής συμμετρίας είναι αρκετό να ελέγξουμε τη συμπεριφορά του κινητήρα μέσω του μονοφασικού ισοδύναμου. Το ρεύμα I_1 είναι το ρεύμα του στάτη ενώ το I_2 είναι το ρεύμα του δρομέα. Το ρεύμα του δρομέα μεταβάλλεται με την ταχύτητα του κινητήρα καθώς αλλάζει η τιμή της αντίστασης του δευτερεύοντος (R_2/s). Αυτό που αλλάζει με την ταχύτητα είναι η επαγόμενη τάση στον δρομέα και άρα το ρεύμα I_2 , άρα καταλαβαίνουμε ότι αυτό που αλλάζει δεν είναι η αντίσταση στον δρομέα.

Για να φτιάξουμε όμως το ισοδύναμο του κινητήρα θα πρέπει ο λόγος μετασχηματισμού να είναι σταθερός. Για αυτό επιλέγουμε έναν σταθερό λόγο μετασχηματισμού κι αλλάζουμε το ρεύμα στον δρομέα (I_2). Όπου X_1 , X_2 και X_m είναι οι επαγωγικές αντιδράσεις στάτη, δρομέα και μαγνήτισης αντίστοιχα, ενώ R_c η ωμική αντίσταση που εμπεριέχει τις απώλειες πυρήνα (μαγνητικής υστέρησης και δινορευμάτων). [6]



Σχήμα 3: Ισοδύναμο κύκλωμα επαγωγικού κινητήρα [6]

Για τον λόγο ότι το ισοδύναμο κύκλωμα είναι ένα υποθετικό κύκλωμα χρειάζονται και οι ανάλογοι υπολογισμοί των στοιχείων του. Έτσι, γίνεται η χρήση των παρακάτω τύπων.

Το E_1 ισούται με την ενεργό τιμή της Α.Η.Ε.Δ που επάγεται στον στάτη και υπολογίζεται ως:

$$E_1 = \alpha \cdot E_{R0}$$

Όπου:

α = λόγος μετασχηματισμού

E_{R0} = επαγόμενη τάση δρομέα

Η ωμική αντίσταση R_2 και η επαγωγική αντίδραση προκύπτουν από τα παρακάτω:

$$R_2 = \alpha^2 \cdot R_{R0}$$

$$X_2 = \alpha^2 \cdot X_{R0}$$

Όπου:

R_{R0} = Πραγματική ωμική αντίσταση δρομέα

X_{R0} = Πραγματική επαγωγική αντίδραση δρομέα

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 - ΑΝΑΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΤΡΙΦΑΣΙΚΟΥ ΕΠΑΓΩΓΙΚΟΥ ΚΙΝΗΤΗΡΑ 2 ΠΟΛΩΝ 22kW ΓΙΑ ΤΗ ΒΕΛΤΙΩΣΗ ΤΩΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΟΥ

Στο παρακάτω κεφάλαιο θα αναφέρουν τα βασικά βήματα για την σχεδίαση ενός τριφασικού επαγωγικού κινητήρα και θα ακολουθήσει η σύγκριση των υπολογισμών της μελέτης σύμφωνα με τις περιπτώσεις που έχουμε επιλέξει. Οι προδιαγραφές του κινητήρα που θα γίνουν τα παραπάνω έχει τις παρακάτω προδιαγραφές:

ΟΝΟΜΑΣΤΙΚΗ ΙΣΧΥΣ	22kW
ΣΥΓΧΡΟΝΗ ΤΑΧΥΤΗΤΑ	2942rpm
ΤΑΣΗ ΤΡΟΦΟΔΟΣΙΑΣ ΠΟΛΙΚΗ	400 V
ΣΥΧΝΟΤΗΤΑ	50Hz
ΑΡΙΘΜΟΣ ΦΑΣΕΩΝ	3
ΣΥΝΔΕΣΜΟΛΟΓΙΑ	ΑΣΤΕΡΑΣ
ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΙΣΧΥΟΣ	0,89
ΒΑΘΜΟΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ	0,910
ΟΝΟΜΑΣΤΙΚΗ ΡΟΠΗ	71,45Nm
ΡΟΠΗ ΕΚΚΙΝΗΣΗΣ	221,49 Nm
ΡΟΠΗ ΑΝΑΤΡΟΠΗΣ	142,9 Nm
ΡΕΥΜΑ ΜΕ ΔΡΟΜΕΑ ΑΚΙΝΗΤΟΠΟΙΗΜΕΝΟ	7,6 A

Πίνακας 1: Προδιαγραφές κινητήρα

Στη πτυχιακή την οποία μελετήσαμε, είδαμε ότι κάποια από τα παραπάνω στοιχεία (ροπή εκκίνησης, ροπή ανατροπής, ονομαστικό ρεύμα) δεν έφτασαν στα επιθυμητά επίπεδα. Μέσω μεταβολών στα χαρακτηριστικά του κινητήρα (συγκεκριμένα στον δρομέα) θα ερευνήσουμε κατά πόσο είναι εφικτό να φτάσουμε στα αποτελέσματα που θέλουμε.

2.1) ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΟΥ ΚΙΝΗΤΗΡΑ

Το πρώτο στάδιο είναι να ξεκινήσουμε με την αρχική διαστασιολόγηση του κινητήρα. Πρώτα θα γίνει ο υπολογισμός της εσωτερικής διαμέτρου του στάτη Dis μέσω του τύπου:

$$Dis = \sqrt[3]{\frac{2 \cdot p_i}{\pi \cdot \lambda} \cdot \frac{p_i}{f} \cdot \frac{S_{gap}}{c_0}} \quad (1)$$

όπου:

P_i = ζεύγη πόλων

S_{gap} = φαινόμενη ισχύς διακένου

f = συχνότητα λειτουργίας

λ = λόγος του μήκους πυρήνα προς το πολικό βήμα

C0 = σταθερά του Esson

Η ισχύς διακένου υπολογίζεται από τον τύπο:

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

Όπου:

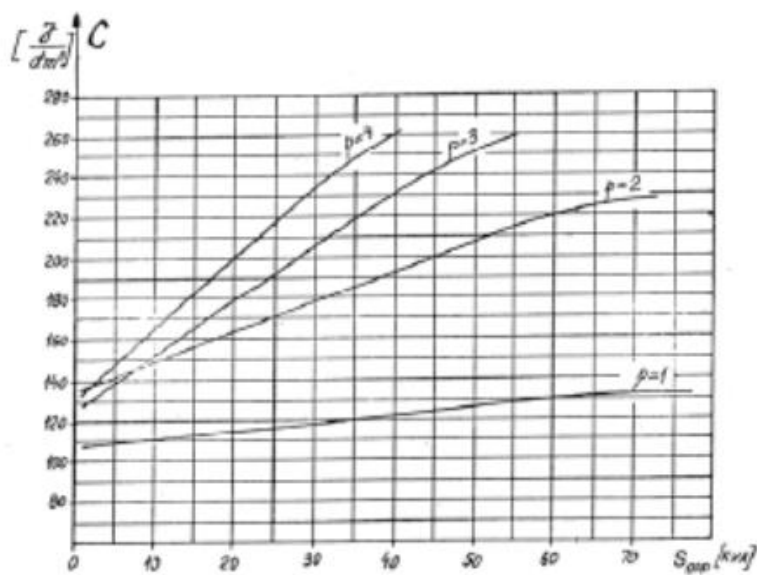
$$K_E = \frac{E_A}{V_\varphi} \approx 0,98 - 0,005 \cdot p_i = 0,98 - 0,005 \cdot 1 = 0,975$$

Άρα:

$$S_{gap} = \frac{K_E \cdot P_N}{n_n \cdot \cos\varphi} \Rightarrow S_{gap} = \frac{0,975 \cdot 22000}{0,91 \cdot 0,89} = 26484,75 \text{ VA}$$

Ο συντελεστής λ όταν πρόκειται για κινητήρα 2 πόλων τότε παίρνει τιμές από 0,6 έως 1. Στη συγκεκριμένη περίπτωση θα επιλέξουμε τιμή 0,8.

Το C0 εξαρτάται και το υπολογίζουμε από πολλούς παράγοντες όπως οι σπείρες ανά φάση, η πυκνότητα του ρεύματος, η μαγνητική επαγωγή στο διάκενο κ.α. Υπάρχει και η δυνατότητα να υπολογιστεί κι από τη γραφική παράσταση που βλέπουμε στη παρακάτω εικόνα:



Από το διάγραμμα παίρνουμε τη τιμή:

$$C_0 \approx 118 \cdot 10^3 \frac{J}{m^3}$$

Αντικαθιστώντας όλα τα παραπάνω στην σχέση (1) υπολογίζουμε:

$$D_{IS} = \sqrt[3]{\frac{2 \cdot 1}{\pi \cdot 0,8} \cdot \frac{1}{50} \cdot \frac{26484,75}{118 \cdot 10^3}} = 15,2 \text{ cm}$$

Υπολογίζουμε το μήκος του πυρήνα λ μέσω της σχέσης:

$$\lambda = \frac{L}{t} \Rightarrow L = \lambda \cdot \pi \cdot \frac{D_{is}}{2 \cdot \rho i} = \frac{(0,8 \cdot 3,14 \cdot 0,152)}{2 \cdot 1} = 19,1 \text{ cm}$$

Όπου:

t = το πολικό βήμα (η απόσταση ανάμεσα σε δυο διαδοχικούς πόλους).

$$\tau = \frac{(\pi \cdot D_{is})}{(2 \cdot \rho i)} = 3,14 \cdot 0,152 \frac{m}{2} = 24 \text{ cm}$$

Η εξωτερική διάμετρος του κινητήρα υπολογίζεται αρχικά από την σχέση:

$$\frac{D_{is}}{D_{out}} = 0,58 \Rightarrow D_{out} = \frac{D_{is}}{0,58} = 26 \text{ cm}$$

Η παραπάνω σχέση προκύπτει από τα δεδομένα που παίρνουμε από τον παρακάτω πίνακα:

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

[4]

Τέλος, υπολογίζουμε το διάκενο μεταξύ του δρομέα και του στάτη. Η σχέση που θα χρησιμοποιήσουμε είναι:

$$g = (0,1 + 0,012 \cdot \sqrt[3]{P_n}) \cdot 10^{-3} \text{ m} = (0,1 + 0,012 \cdot \sqrt[3]{22000}) \cdot 10^{-3} \text{ m} = 0,44 \text{ m}$$

Πρέπει να αναφερθεί ότι τα διάκενα είναι συγκεκριμένα, π.χ. 0,35mm, 0,4mm, 0,45mm, 0,5mm κλπ. **Εμείς θα διαλέξουμε διάκενο ίσο με 0,45mm.**

Όταν έχουμε ένα μικρό διάκενο στα μαγνητικά πεδία παρουσιάζονται περισσότερες απώλειες λόγω των υψηλότερων αρμονικών ενώ ένα μεγάλο διάκενο μειώνει τον συντελεστή ισχύος και την απόδοση του κινητήρα.

2.2) ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΥΛΙΓΜΑΤΩΝ ΣΤΑΤΗ

Για να υπολογίσουμε τα τυλίγματα του στάτη ξεκινά με την επιλογή του αριθμού των αυλακιών μέσα στα οποία θα μπουν τα τυλίγματα. Αυτό το υπολογίζουμε από την παρακάτω σχέση:

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

Όπου:

p_i = τα ζεύγη πόλων

m = αριθμός των φάσεων

q = αριθμός των αυλακιών ανά φάση και ανά πόλο

Εμείς στη συγκεκριμένη περίπτωση επιλέγουμε 4 αυλάκια ανά φάση και πόλο άρα:

$$N_s = 2 \cdot 1 \cdot 4 \cdot 3 = 24 \text{ αυλακία}$$

$$2 \cdot 1 \cdot 4 \cdot 3 = 24 \text{ αυλακία}$$

ενώ το πολικό βήμα θα είναι:

$$y_p = \frac{24}{2 \cdot 1} = 12$$

Ο συντελεστής τυλίγματος θα δίνεται από την σχέση:

$$K_t = K_w = \frac{\sin \frac{q \cdot a}{2}}{q \cdot \sin \frac{a}{2}} = \frac{\sin \frac{4 \cdot 15}{2}}{4 \cdot \sin \frac{15}{2}} = 0,96$$

Όπου:

a = η απόσταση μεταξύ δυο διαδοχικών αυλακιών σε ηλεκτρικές μοίρες

Το a δίνεται από την σχέση:

$$a = p_i \cdot a_r$$

Όπου:

a_r = γεωμετρική γωνία ($360^\circ/24$ αυλάκια= 15° στην περίπτωση μας).

Ο υπολογισμός για τον αριθμό των σπειρών 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:

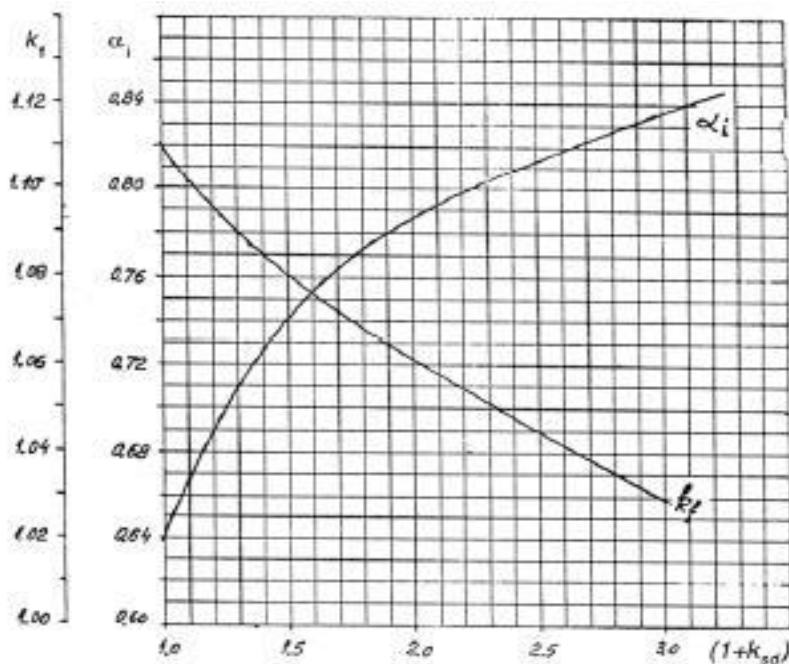
φ = μαγνητική ροή

T = το πολικό βήμα σε μέτρα

L = μήκος του πυρήνα άρα και του διακένου

B_g = μαγνητική επαγωγή στο διάκενο.

Η σταθερά a_i ονομάζεται flux density shape factor και προσδιορίζεται από την παρακάτω γραφική παράσταση:



Από το σχήμα καταλαβαίνουμε ότι η σταθερά εξαρτάται από το $1+K_{st}$ που ονομάζεται **tooth saturation factor**. Σύμφωνα με τα παραπάνω δεδομένα, οδηγούμαστε στην υπόθεση ότι η σταθερά παίρνει τιμή ίση με 1,5 άρα από την γραφική παράσταση το $a_i=0,73$.

Για μηχανές με 2 πόλους η μαγνητική επαγωγή στο διάκενο πρέπει να είναι μεταξύ 0,5-0,75T. Εμείς διαλέγουμε μια μαγνητική επαγωγή ίση με 0,5T. Άρα η μαγνητική ροή στο διάκενο θα είναι ίση με:

$$\varphi = 0,73 \cdot 0,24 \cdot 0,191 \cdot 0,5 = 16,7 \cdot 10^{-3} Wb$$

Ο επόμενος υπολογισμός είναι αυτός του αριθμού των σπειρών ανά φάση ο οποίος δίνεται από την σχέση:

$$Wi = \frac{K_E \cdot V_\phi}{4 \cdot K_f \cdot K_r \cdot f \cdot \phi}$$

Όπου:

K_f = σταθερά **form factor** η οποία 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 γραφική παράσταση 2.

Στην περίπτωση μας παίρνει τιμή 1,07.

Άρα:

$$Wi = \frac{K_E \cdot V_\phi}{4 \cdot K_f \cdot K_r \cdot f \cdot \phi} \Rightarrow Wi = \frac{0,975 \cdot \frac{400}{\sqrt{3}}}{4 \cdot 1,07 \cdot 0,96 \cdot 50 \cdot (16,7 \cdot 10^{-3})} = 65 \text{ σπειρες / φαση}$$

Ο αριθμός των αγωγών ανά αυλάκι είναι:

$$n_s = \frac{a_i \cdot Wi}{p_i \cdot q} \Rightarrow n_s = \frac{1 \cdot 65}{1 \cdot 4} = 16 \text{ αγωγοι / αυλακι}$$

Όπου:

a_i = αριθμός παράλληλων αγωγών = 1 στη περίπτωση αυτή

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

$$I_{ov} = \frac{P_n}{\sqrt{3} \cdot V_n \cdot \cos\phi \cdot \eta} \Rightarrow I_{ov} = \frac{22000W}{\sqrt{3} \cdot 400 \cdot 0,89 \cdot 0,910} = 39,2 \text{ A}$$

Για να υπολογίσουμε την διατομή των αγωγών θα επιλέξουμε μια πυκνότητα ρεύματος. Για κινητήρες 2 πόλων συνίσταται η πυκνότητα ρεύματος να βρίσκεται μεταξύ:

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

Στη συνέχεια θέλουμε να υπολογίσουμε τη διατομή των αγωγών. Για τον σκοπό αυτό, θα επιλέξουμε μια τιμή της πυκνότητας ρεύματος. Αυτά τα δυο στοιχεία συνδέονται μεταξύ τους καθώς όσο μεγαλώνει η πυκνότητα του ρεύματος μειώνεται η διατομή των αγωγών.

Επιλέγουμε μια πυκνότητα ρεύματος ίση με 7 A/mm^2 και υπολογίζουμε την διατομή:

$$A_{cu} = \frac{I_{ov}}{J_{cos}} \Rightarrow A_{cu} = \frac{39,2}{7} = 5,6 \text{ mm}^2$$

Ενώ η διάμετρος του αγωγού θα είναι:

$$d_{cu} = \sqrt{\frac{4 \cdot A_{cu}}{\pi \cdot 5}} = 1,19 \text{ mm}$$

Στον πίνακα που ακολουθεί στην επόμενη σελίδα, αναγράφονται οι τυποποιημένες τιμές των εκάστοτε διαμέτρων. Θα επιλέξουμε την διάμετρο με τιμή 1,20mm επειδή είναι η πιο κοντινή στο αποτέλεσμα.

Αν η διάμετρος είναι μεγαλύτερη από 1,3mm τότε για κινητήρες μικρής ισχύος επιλέγουμε να χρησιμοποιήσουμε παράλληλους κλάδους μικρότερης διαμέτρου. [1]

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: τυποποιημένες διαμέτροι αγωγών στάτη [1]

2.3) ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΑΥΛΑΚΙΩΝ ΤΟΥ ΣΤΑΤΗ

Αρχικά, υπολογίζουμε τη απαιτούμενη διατομή των αυλακιών του στάτη μέσω του τύπου:

$$A_{su} = \frac{\pi \cdot d_{cu}^2 \cdot a_i \cdot n_s}{4 \cdot K_{fill}} \quad (3)$$

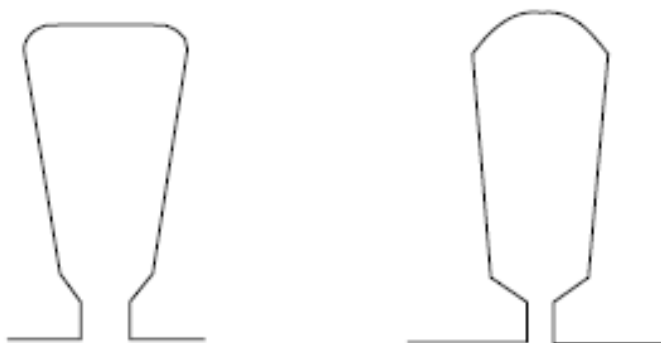
Το K_{fill} είναι μια σταθερά η οποία εξαρτάται από το πάχος της μόνωσης.

Για κινητήρες μεγαλύτερους από 10kW παίρνει τιμές από

0,4 έως 0,44. Για την περίπτωση αυτή θα επιλέξουμε τη τιμή 0,44 άρα η τιμή των αυλακιών θα είναι:

$$A_{su} = \frac{\pi \cdot d_{cu}^2 \cdot a_i \cdot n_s}{4 \cdot K_{fill}} = \frac{\pi \cdot 1,2^2 \cdot 5 \cdot 16}{4 \cdot 0,44} = 206 \text{mm}^2$$

Στη παρακάτω εικόνα είναι οι πιο συνηθισμένες μορφές των αυλακιών του στάτη:



Εικόνα 3: συνηθισμένη μορφή αυλακιών στάτη [1]

Θα πρέπει να αναφέρουμε σε αυτό το σημείο και τις διαστάσεις οι οποίες θα πρέπει να υπολογιστούν. Κάποιες από αυτές υπολογίζονται εμπειρικά και είναι οι παρακάτω:

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

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

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

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

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

KFe: συντελεστής που λαμβάνει υπόψη τα αποτελέσματα της μόνωσης μεταξύ των μεταλλικών φύλλων από τα οποία αποτελείται ο στάτης.

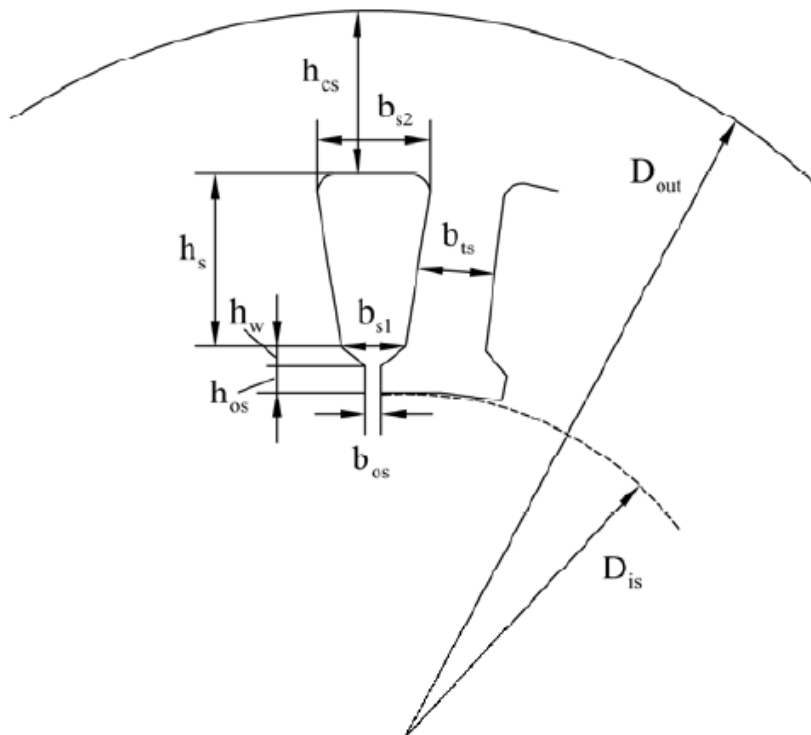
Bts: μαγνητική επαγωγή στον στάτη (παίρνει τιμές μεταξύ 1,5T έως 1,65T).

Υπολογίζουμε το b_{ts} που είναι η απόσταση μεταξύ των <<δοντιών>> του στάτη:

$$b_{ts} = \frac{B_g \cdot \tau_s \cdot L}{B_{ts} \cdot K_{Fe} \cdot L} = \frac{0,5 \cdot 0,02}{1,65 \cdot 0,96} = 6,3 \cdot 10^{-3} m$$

Σημείωση: Το πλάτος του δοντιού δεν θα πρέπει να είναι μικρότερο από 3,5mm για κατασκευαστικούς λόγους.

Στην παρακάτω εικόνα της επόμενης σελίδας φαίνονται αναλυτικά οι διαστάσεις του στάτη:



Εικόνα 4: Αναλυτική απεικόνιση διαστάσεων του στάτη [1]

Επιλέγουμε τις ακόλουθες τιμές για τα μεγέθη τα οποία προαναφέρθηκαν. Έτσι έχουμε:

$$b_{os} = 2,5mm$$

$$h_{os} = 0,5mm$$

$$h_w = 1mm$$

Υπολογίζουμε το b_{s1} :

$$b_{s1} = \frac{\pi \cdot (D_{is} + 2h_{os} + 2h_w)}{N_s} - b_{ts} = \frac{\pi \cdot (152 + 2 \cdot 0,5 + 2 \cdot 1) \cdot 10^{-3}}{24} - 6,3 \cdot 10^{-3} = 14 \text{ mm}$$

Επίσης:

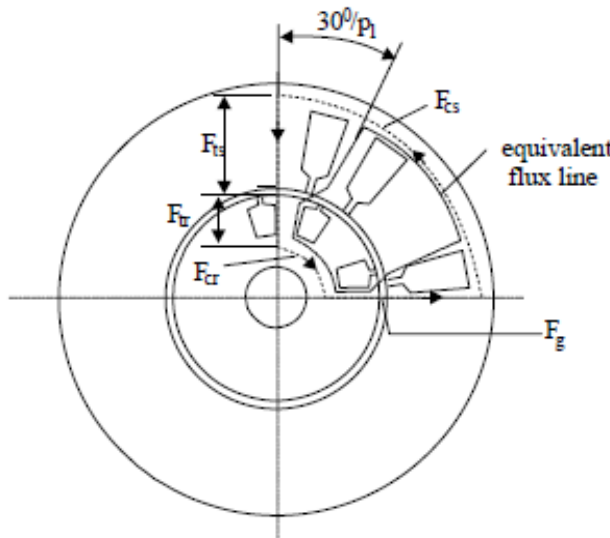
$$b_{s2} = \sqrt{4 \cdot A_{su} \cdot \tan\left(\frac{\pi}{N_s}\right) + b_{s1}^2} = \sqrt{4 \cdot 206 \cdot \tan\left(\frac{\pi}{24}\right) + 14^2} = 17,4 \text{ mm}$$

$$A_{su} = h_s \cdot \frac{(b_{s1} + b_{s2})}{2} \Rightarrow h_s = \frac{2 \cdot A_{su}}{(b_{s1} + b_{s2})} \Rightarrow h_s = \frac{2 \cdot 206}{(14 + 17,4)} = 13,1 \text{ mm}$$

Στη συνέχεια θα υπολογίσουμε τον συντελεστή $1+K_{st}$ (tooth saturation factor) στον οποίο αυθαίρετα είχαμε δώσει μια 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 μαγνητεγερτική δύναμη στον σάτη, στον δρομέα και στο διάκενο αντίστοιχα, όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα:



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

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

Όπου:

K_c = συντελεστής Carter (Carter coefficient)

Υπολογίζεται μέσω του τύπου:

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

Όπου:

B_{gmax} = μαγνητική επαγωγή στο διάκενο χωρίς ανώτερες αρμονικές B_{g1} = μαγνητική επαγωγή στο διάκενο με ανώτερες αρμονικές.

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

$$F_{mg} = K_c \cdot g \cdot \frac{B_g}{\mu_0} = 1,2 \cdot 0,45 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{0,5}{1,256 \cdot 10^{-6}} = 215 At$$

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 παρακάτω πίνακα παίρνουμε συνηθισμένες (τυποποιημένες) τιμές της καμπύλης μαγνήτισης για σιδηρομαγνητικά υλικά που χρησιμοποιούνται στις ηλεκτρικές μηχανές:[1]

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 3: Δεδομένα από την καμπύλη μαγνήτισης του σιδηρομαγνητικού υλικού. [1]

Από τον παραπάνω πίνακα, επιλέγουμε μια τιμή του Bts. Συνήθως οι τιμές που λαμβάνει είναι μεταξύ 1.5T και 1.65T. Επιλέγοντας Bts=1.65T προκύπτει για το Hts ότι παίρνει τιμή 3460At.

Έτσι:

$$Fmts = Hts(hs + hos + hw) = 3460 \cdot (13,1 + 0,5 + 1) \cdot 10^{-3} = 50,5At$$

Υπολογίζουμε τη μαγνητεγερτική δύναμη στον δρομέα:

$$Fmtr = Kst \cdot Fmg - Fmts = 0,5 \cdot 215 - 50,5 = 57At$$

Οι τιμές των Fmts και Fmtr πρέπει να είναι κοντά. Εάν το $Fmtr \ll Fmts'$, θα πρέπει να θεωρήσουμε μικρότερη μαγνητική επαγωγή στο διάκενο και να επιστρέψουμε στον υπολογισμό της **μαγνητικής ροής Φ**. [1]

Στη συνέχεια θα υπολογίσουμε το hCS μέσα από την σχέση:

$$h_{cs} = \frac{D_{out} - (D_{is} - 2 \cdot (h_{os} + h_w + h_s))}{2} = \frac{260 - (152 - 2 \cdot (0,5 + 1 + 13,1))}{2} = 39,4mm$$

Υπολογίζουμε την μαγνητική επαγωγή στον στάτη, στον χώρο μεταξύ των αυλακιών και της εξωτερικής περιμέτρου Bcs (Back core flux density). Αυτή θα υπολογιστεί από την σχέση:

$$B_{cs} = \frac{\Phi}{2 \cdot L \cdot h_{cs}} = \frac{16,7 \cdot 10^{-3} \text{ Wb}}{2 \cdot 0,191m \cdot 39,4 \cdot 10^{-3}m} = 1,11T$$

Η συγκεκριμένη τιμή της μαγνητικής επαγωγής είναι μικρή αν λάβουμε υπόψη μας ότι θέλουμε να βρίσκεται μεταξύ 1,4T-1,7T.

Για να επιλύσουμε το πρόβλημα έχουμε τρεις δυνατότητες:

1. Να μειώσουμε την εξωτερική διάμετρο του στάτη.
2. Να εισάγουμε μια μικρότερη τιμή για τον συντελεστή λ (stack aspect ratio) κάτι που θα οδηγήσει σε μεγαλύτερη εσωτερική διάμετρο του στάτη άρα και σε μεγαλύτερο δρομέα.
3. Να αυξήσουμε και άλλο το hs δηλαδή να αυξήσουμε την διατομή των αυλακιών.

Επιλέγουμε την πρώτη λύση. Η μαγνητική επαγωγή στον πυρήνα του στάτη πρέπει να έχει τιμή ίση με 1,5T, για να επιτευχθεί αυτό έχουμε αλλαγή στη τιμή του hcs η οποία προκύπτει από τη παρακάτω σχέση:

$$h_{cs} = \frac{\Phi}{2 \cdot L \cdot B_{cs}} = \frac{16,7 \cdot 10^{-3} \text{ Wb}}{2 \cdot 0,191m \cdot 1,5T} = 29,1mm$$

Άρα η εξωτερική διάμετρος θα πρέπει να μειωθεί κατά:

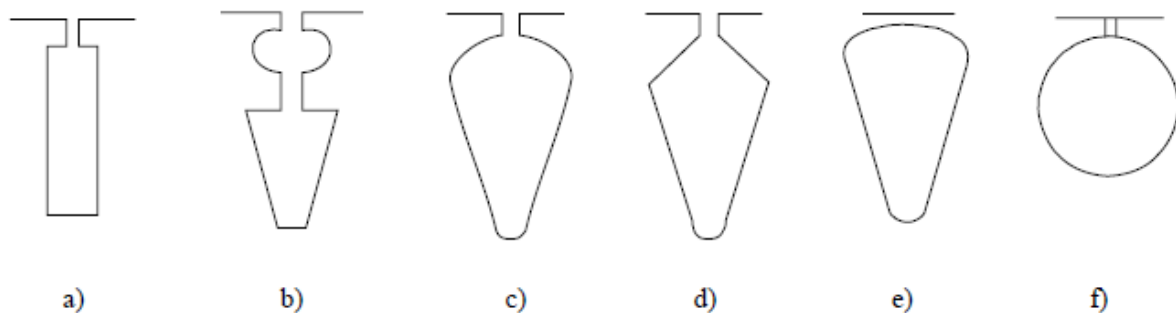
$$2 \cdot (29,1 - 5)mm = 48,2mm$$

Έτσι η τελική εξωτερική διάμετρος τη μηχανής είναι:

$$D_{out} = 260 - 48,2 = 211,8 = 212mm$$

2.4) ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ ΔΙΑΣΤΑΣΕΩΝ ΔΡΟΜΕΑ

Παρακάτω παρουσιάζεται μια σύγκριση δυο διαφορετικών τιμών στους αγωγούς του δρομέα (πρώτα στοιχεία από τη πτυχιακή: “Μελέτη τριφασικού επαγωγικού κινητήρα δυο πόλων ισχύος 22KW Σπουδαστές: Μανταλίδης Νικόλαος, Λουκανάρης Σπυρίδων”) με σκοπό τη βελτίωση των χαρακτηριστικών λειτουργίας του ασύγχρονου κινητήρα και πιο συγκεκριμένα της ροπής εκκίνησης και της ροπής ανατροπής. Στο σχήμα που ακολουθεί παρουσιάζονται οι μορφές των αγωγών του δρομέα:



Η μορφή που επιλέχθηκε είναι η (c). Το επόμενο βήμα είναι να επιλέξουμε τον αριθμό των αγωγών ώστε να δούμε τις αλλαγές που θα προκύψουν κατά τη σύγκριση. Στον πίνακα που ακολουθεί φαίνονται οι τιμές που χρησιμοποιούνται στη 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

Στον πίνακα απεικονίζονται ο αριθμός αγωγών δρομέα (N_r) καθώς και ο αριθμός των πόλων (p_1) και των αυλακιών του στάτη (N_s).

Στην αρχική μελέτη είχε γίνει η επιλογή των 18 αγωγών. Στη δική μας περίπτωση, επιλέγουμε 28 αγωγούς ($N_r=28$) και παρακάτω ακολουθούν οι υπολογισμοί με την εκάστοτε επιλογή και η σύγκριση των δύο.

2.4.1) ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΜΕ 18 ΑΓΩΓΟΥΣ ($N_r=18$)

Ξεκινάμε με τον υπολογισμό του ονομαστικού ρεύματος ενός αγωγού του δρομέα μέσω της σχέσης:

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

Όπου:

$$K_I = 0,8 \cdot \cos\varphi + 0,2 = 0,912$$

$\cos\varphi$: επιθυμητός συντελεστής ισχύος της μηχανής (0,89 στην περίπτωση μας).

Οπότε έχουμε:

$$I_b = \frac{2 \cdot m \cdot W_i \cdot K_{wi} \cdot I_{1n} \cdot K_i}{N_r} = \frac{2 \cdot 3 \cdot 65 \cdot 0,96 \cdot 39,2 \cdot 0,912}{18} = 743,6A$$

Υπολογίζουμε τη διατομή της κάθε μπάρας του δρομέα, η πυκνότητα του ρεύματος στη μπάρα του δρομέα πρέπει να είναι ίση με $3,42 \text{ A/mm}^2$ για κινητήρα με μεγάλη απόδοση. Άρα έχουμε:

$$A_b = \frac{743,6}{3,42} = 217,4 \cdot 10^{-6} m^2$$

Το ρεύμα που διαπερνά τους δακτυλίους που βραχυκυκλώνουν τους αγωγούς του δρομέα ισούται:

$$I_{er} = \frac{I_b}{2 \cdot \sin \frac{\pi \cdot p_1}{N_r}} = \frac{743,6}{2 \cdot \sin \frac{\pi \cdot 1}{18}} = 2141A$$

Υπολογίζουμε τη διατομή του δακτυλίου βραχυκύκλωσης:

$$A_{er} = \frac{I_{er}}{J_{er}} = \frac{2141}{0,8 \cdot 3,42} = 782,5 \cdot 10^{-6} m^2$$

Έπειτα θα συνεχίσουμε με τον υπολογισμό στις διαστάσεις των αγωγών του δρομέα.

Ξεκινάμε με τον υπολογισμό της απόστασης ανάμεσα σε δυο αγωγούς του δρομέα, έτσι έχουμε:

$$\tau_r = \frac{\pi \cdot (D_{is-2 \cdot g})}{N_r} = \frac{\pi \cdot (152 - 2 \cdot 0,45)}{18} = 16,95mm$$

Η μαγνητική επαγωγή θεωρούμε πως στο «δόντι» του δρομέα είναι 1,6Τ. Έτσι, υπολογίζουμε την διάσταση b_{tr} ως εξής:

$$b_{tr} \cdot K_{fe} \cdot B_{tr} = B_g \cdot \tau_r$$

Η παραπάνω σχέση ισχύει έχοντας θεωρήσει ότι η μαγνητική ροή στο «δόντι» του στάτη και στο διάκενο είναι ίση. Οπότε έχουμε:

$$b_{tr} = \frac{B_g \cdot \tau_r}{K_{fe} \cdot B_{tr}} = \frac{0,5 \cdot 26,37 \cdot 10^{-3}}{0,96 \cdot 1,6} = 8,58 \cdot 10^{-3} m$$

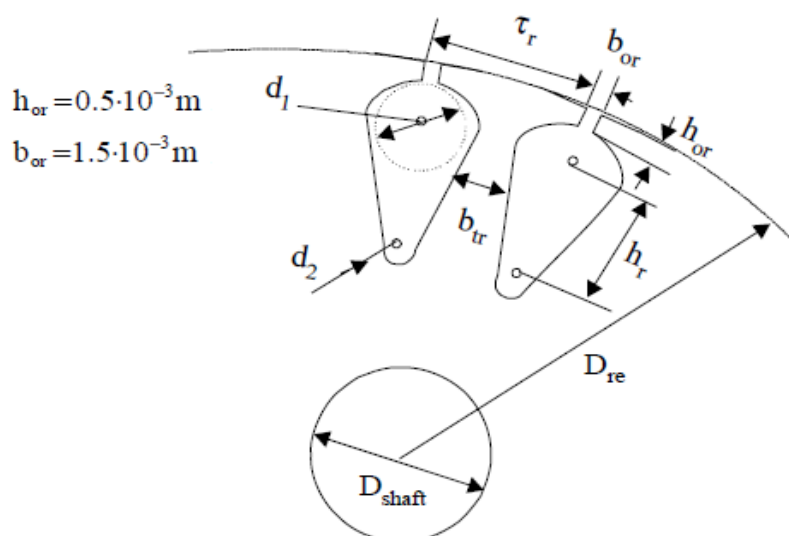
Κατά προσέγγιση, έχοντας λάβει υπόψιν τη μικρή απόσταση του δρομέα από την εσωτερική πλευρά του στάτη, η διάμετρος του δρομέα είναι ίση με:

$$D_{re} = D_{is} = 152mm$$

Άρα η περιφέρεια του δρομέα θα είναι:

$$C = 2 \cdot \pi \cdot r = 2 \cdot \pi \cdot \frac{152}{2} = 477,5mm$$

Οι διαστάσεις b_{or} και h_{or} παίρνουν τυποποιημένες τιμές 1,5mm και 0,5mm αντίστοιχα. Στο παρακάτω σχήμα είναι η γενική μορφή του δρομέα:



Εικόνα 5: Γενική μορφή διαστάσεων του δρομέα [1]

Βρίσκουμε τη διάμετρο d_1 ως εξής, κάνουμε χρήση του τύπου:

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

Λύνοντας ως προς d_1 :

$$d_1 = \frac{\pi \cdot (D_{re} - 2 \cdot h_{or}) - N_r \cdot b_{tr}}{\pi + N_r} = \frac{\pi \cdot (152 - 0,9 - 1) - 18}{\pi + 18} \cdot 8,58 \cdot 10^{-3} = 15 \cdot 10^{-3} m$$

Μέσω των σχέσεων που ακολουθούν θα υπολογίσουμε τα d_2 και h_r :

$$A_b = \frac{\pi}{8} \cdot (d_1^2 + d_2^2) + \frac{(d_1 + d_2) \cdot h_r}{2} \quad (1)$$

$$(d_1 - d_2) = 2 \cdot h_r \cdot \tan\left(\frac{\pi}{N_r}\right) \quad (2)$$

Λύνοντας τις (1) και (2) (με $d_1 = 15 \cdot 10^{-3} m$ και $A_b = 217,4 \cdot 10^{-6} m^2$) έχουμε:

$$d_2 = 4 \cdot 10^{-3} m \text{ και } h_r = 13 \cdot 10^{-3} m$$

Καθώς γνωρίζουμε τις ακριβείς διαστάσεις του δρομέα και των αγωγών του, μπορεί να γίνει ο υπολογισμός της μαγνητεγερτικής δύναμης στο «δόντι» του δρομέα. Επειδή επιθυμούμε η μαγνητική επαγωγή να είναι ίση με 1,6T μέσω του πίνακα 3 βλέπουμε ότι για το υλικό που χρησιμοποιούμε η ένταση του μαγνητικού πεδίου θα είναι 2460A/m. Άρα η μαγνητεγερτική δύναμη που χρειάζεται είναι:

$$F_{mtr} = H_{tr} \cdot \left(h_r + h_{or} + \frac{d_1 + d_2}{2} \right) = 2460 \cdot \left(13 + 0,5 + \frac{15+4}{2} \right) \cdot 10^{-3} = 56,6 \text{ Aturns}$$

Το επόμενο βήμα είναι να υπολογίσουμε την απόσταση του δρομέα κάτω από τα αυλάκια. Η επιθυμητή τιμή της μαγνητικής επαγωγής στον δρομέα είναι από 1,4T έως 1,7T. Επιλέγουμε τιμή ίση με 1,6T οπότε:

$$h_{cr} = \frac{\Phi}{2} \cdot \frac{1}{L \cdot B_{cr}} = \frac{16,7 \cdot 10^{-3}}{2} \cdot \frac{1}{0,191 \cdot 1,6} = 29mm$$

Στη συνέχεια θα γίνουν οι υπολογισμοί που αφορούν τη διάμετρο του άξονα.

Η μέγιστη διάμετρος εξαρτάται από τις διαστάσεις του δρομέα και των αυλακιών και υπολογίζεται ως:

$$D_{shaft} \leq D_{is} - 2 \cdot \left(h_r + h_{or} + h_{cr} + \frac{d_1 + d_2}{2} \right) - 2 \cdot g \Rightarrow D_{shaft} \leq 152 - 2 \cdot (13 + 0,5 + 26,5 + 9,5) - 2 \cdot 0,45 = 47,4mm$$

Έχοντας υποθέσει ότι η ολίσθηση είναι ίση με 0,02 υπολογίζεται η ροπή στον άξονα του κινητήρα ως εξής:

$$T = \frac{P_{out}}{\omega_m} = \frac{22000W}{2 \cdot \pi \cdot \frac{3000}{60} \cdot (1-0,02)} = 71,5Nm$$

Επίσης έχουμε:

$$b = 1 \cdot \left(h_r + h_{or} + \frac{d_1 + d_2}{2} \right) = 1 \cdot \left(0,5 + 13 + \frac{15 + 4}{2} \right) = 23 \cdot 10^{-3}m$$

$$\alpha = \frac{A_{er}}{b} = \frac{782,5 \cdot 10^{-6}m^2}{23 \cdot 10^{-3}m} = 34 \cdot 10^{-3}m$$

Έχοντας ολοκληρώσει τους υπολογισμούς για τις διαστάσεις της μηχανής κι εφόσον έχουμε την μαγνητική επαγωγή που θέλουμε στα διάφορα σημεία του κινητήρα μέσω της απαραίτητης μαγνητεγερτικής δύναμης, επόμενο βήμα είναι ο υπολογισμός του ρεύματος μαγνήτισης που απαιτείται για την δημιουργία των πεδίων αυτών.

Σε πρώτο στάδιο, θα βρούμε την ολική μαγνητεγερτική δύναμη που απαιτείται, η οποία προκύπτει από το άθροισμα των επιμέρους μαγνητεγερτικών δυνάμεων. Υπολογίζεται μέσω της σχέσης:

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

Όπου:

K_c : συντελεστής Carter

Για τον παραπάνω συντελεστή είχαμε θέσει μια τυπική τιμή ίση με 1,2. Πλέον γνωρίζουμε τις διαστάσεις του κινητήρα οπότε είναι δυνατός ο αναλυτικός υπολογισμός του ως εξής:

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

Όπου:

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

Και:

$$\gamma_1 = \frac{b_{os}^2}{5 \cdot g + b_{os}} = \frac{2,5^2}{5 \cdot 0,45 + 2,5} = 1,32$$

$$\gamma_2 = \frac{b_{or}^2}{5 \cdot g + b_{or}} = \frac{1,5^2}{5 \cdot 0,45 + 1,5} = 0,6$$

Άρα για K_{c1} , K_{c2} :

$$K_c = \frac{\tau_s}{\tau_s - \gamma_1} = \frac{20}{20 - 1,32} = 1,07$$

$$K_{c2} = \frac{\tau_r}{\tau_r - \gamma_2} = \frac{26,37}{26,37 - 0,6} = 1,02$$

Έτσι έχουμε για το K_c :

$$K_c = K_{c1} \cdot K_{c2} = 1,07 \cdot 1,02 = 1,09$$

Η τιμή του συντελεστή είναι δεκτή καθώς βρίσκεται κοντά στην τιμή 1,2 που υποθέσαμε αρχικά άρα μπορούμε να θεωρήσουμε ότι οι υπολογισμοί μας ως τώρα είναι σωστοί.

Για τις τιμές $B_{cs}=1,5T$ και $B_{cr}=1,6T$ (βλ. πίνακα 3) οι εντάσεις του μαγνητικού πεδίου στον στάτη και στον δρομέα είναι $H_{cs}=1340A/m$ και $H_{cr}=2460A/m$ αντίστοιχα.

Για τις μαγνητεγερτικές δυνάμεις του στάτη και του δρομέα χρησιμοποιούμε τους παρακάτω τύπους. Έτσι έχουμε:

$$F_{mcs} = C_{cs} \cdot \frac{\pi \cdot (D_{out} - h_{cs})}{2 \cdot \pi} \cdot H_{cs} = 0,35 \cdot \frac{\pi \cdot (212 - 29,1) \cdot 10^{-3}}{2} \cdot 1340 = 134,4At$$

$$F_{mcr} = C_{cr} \cdot \frac{\pi \cdot (D_{shaft} + h_{cr})}{2 \cdot \pi} \cdot H_{cr} = 0,316 \cdot \frac{\pi \cdot (47,4 + 29) \cdot 10^{-3}}{2} \cdot 2460 = 93,2At$$

Οπότε:

$$F_{1m} = 2 \cdot \left(1,09 \cdot 0,45 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{0,5}{1,256 \cdot 10^{-6}} + 50,5 + 56,6 + 134,4 + 93,2 \right) = 1063,5At$$

Ο συντελεστής $1+K_{st}$ είναι:

$$1 + K_{st} = \frac{F_{1m}}{2 \cdot F_{mg}} = \frac{1063,5}{2 \cdot 215} = 2,47$$

Πλέον μετά τον υπολογισμό της ολικής μαγνητεγερτικής δύναμης μπορούμε να υπολογίσουμε και το ρεύμα μαγνήτισης το οποίο δίνεται από τη σχέση:

$$I_\mu = \frac{\pi \cdot 2 \cdot \left(\frac{F_{m1}}{2}\right)}{3 \cdot \sqrt{2} \cdot W_i \cdot K_{wi}} = \frac{\pi \cdot 2 \cdot \left(\frac{1063,5}{2}\right)}{3 \cdot \sqrt{2} \cdot 65 \cdot 0,96} = 12,62A$$

Και:

$$i_\mu = \frac{12,62}{39,2} = 0,322 = 32,2\%$$

2.4.2) ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΜΕ 28 ΑΓΩΓΟΥΣ (Nr=28)

Παρακάτω ακολουθούν τα αποτελέσματα που θα προκύψουν αν αυξήσουμε τον αριθμό των αυλακιών σε 28 και ποιες θα είναι η τυχών αλλαγές στο κομμάτι των βασικών παραμέτρων. Να επισημάνουμε ότι η μορφή των αυλακιών παραμένει η προκαθορισμένη.

Ξεκινάμε με τον υπολογισμό του ονομαστικού ρεύματος ενός αγωγού του δρομέα:

$$I_b = \frac{2 \cdot m \cdot W_i \cdot K_{wi} \cdot I_{1N} \cdot K_I}{28} = \frac{2 \cdot 3 \cdot 65 \cdot 0,96 \cdot 39,2 \cdot 0,912}{28} = 478,03A$$

Υπολογίζουμε τη διατομή της κάθε μπάρας η οποία πρέπει να είναι:

$$A_b = \frac{478,03}{3,42} = 139,7 \cdot 10^{-6} m^2$$

Το ρεύμα βραχυκύκλωσης στους δακτυλίους του δρομέα θα είναι ίσο με:

$$I_{er} = \frac{I_b}{2 \cdot \sin \frac{\pi \cdot p_i}{N_r}} = \frac{478,03}{2 \cdot \sin \frac{\pi \cdot 1}{28}} = 2135A$$

Για τον υπολογισμό της διατομής του δακτυλίου βραχυκύκλωσης έχουμε:

$$A_{er} = \frac{I_{er}}{J_{er}} = \frac{2135}{0,8 \cdot 3,42} = 780,33 \cdot 10^{-6} m^2$$

Όπου:

3,42A/mm²: συντελεστής για κινητήρες με μεγάλη απόδοση

Παρακάτω υπολογίζουμε τις διαστάσεις των αγωγών του δρομέα. Αρχικά θα υπολογίσουμε την απόσταση μεταξύ δυο αγωγών του δρομέα μέσω της σχέσης:

$$\tau_r = \frac{\pi \cdot (D_{is} - 2 \cdot g)}{N_r} = \frac{\pi \cdot (152 - 2 \cdot 0,45)}{28} = 16,95mm$$

Αν θεωρήσουμε ότι η μαγνητική επαγωγή στο «δόντι» του δρομέα είναι ίση με 1,6T τότε υπολογίζουμε την διάσταση btr ως εξής:

$$btr \cdot K_{fe} \cdot Btr = Bg \cdot \tau_r$$

Η παραπάνω σχέση ισχύει έχοντας αποδεχθεί ότι οι μαγνητική ροές στο δόντι του στάτη και στο διάκενο είναι ίσες (δηλαδή 1,6T). Άρα:

$$btr = \frac{Bg \cdot \tau_r}{K_{fe} \cdot Btr} = \frac{0,5T \cdot 16,95 \cdot 10^{-3}}{0,96 \cdot 1,6T} = 5,52 \cdot 10^{-3}m$$

Από προηγούμενη ενότητα έχουμε θεωρήσει ότι $D_{re}=D_{is}=152\text{mm}$ οπότε η περιφέρεια του δρομέα θα είναι:

$$C = 477,5\text{mm}$$

Και:

$$b_{or} = 1,5\text{mm}$$

$$h_{or} = 0,5\text{mm} \text{ (βλ. Εικόνα 5).}$$

Η διάμετρος d_1 βρίσκεται από:

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

Αν λύσουμε ως προς d_1 έχουμε:

$$d_1 = \frac{\pi \cdot (D_{re} - 2 \cdot h_{or}) - N_r \cdot b_{tr}}{\pi + N_r} = \frac{\pi \cdot (152 - 2 \cdot 0,5\text{mm}) - 28 \cdot 5,52 \cdot 10^{-3}\text{m}}{\pi + 28} = 10,1 \cdot 10^{-3}\text{m}$$

Μέσω των σχέσεων:

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

$$d_1 - d_2 = 2 \cdot h_r \cdot \tan\left(\frac{\pi}{N_r}\right)$$

Υπολογίζουμε τα ζητούμενα d_2 και h_r . Άρα προκύπτουν τα εξής:

$$d_2 = 7,2 \cdot 10^{-3}\text{m}$$

$$h_r = 13,05 \cdot 10^{-3}\text{m}$$

Επόμενο βήμα είναι να βρούμε τη μαγνητεγερτική δύναμη η οποία είναι ίση με:

$$F_{mtr} = H_{tr} \cdot \left(h_r + h_{or} + \frac{(d_1 + d_2)}{2} \right) = 2460 \cdot \left(13,05 + 0,5 + \frac{(10,1 + 7,2)}{2} \right) \cdot 10^{-3} = 54,65 \text{ Aturns}$$

Η τιμή που προέκυψε είναι κοντά στην αντίστοιχη τιμή του στάτη άρα είναι αποδεκτή.

Για τον υπολογισμό της απόστασης του δρομέα πίσω από τους αγωγούς επιλέγουμε η μαγνητική επαγωγή στο χώρο αυτό του δρομέα να είναι 1,5T (πρέπει να είναι 1,4-1,7). Έτσι έχουμε:

$$h_{cr} = \frac{\Phi}{2} \cdot \frac{1}{L \cdot B_{cr}} = \frac{16,7 \cdot 10^{-3}}{2} \cdot \frac{1}{0,191 \cdot 1,5\text{T}} = 29\text{mm}$$

Το επόμενο σκέλος είναι ο υπολογισμός της διαμέτρου του άξονα η οποία εξαρτάται από τις διαστάσεις του δρομέα και των αυλακιών. Έχουμε:

$$D_{shaft} \leq D_{is} - 2 \cdot \left(hr + hor + hcr + \frac{d_1 + d_2}{2} \right) - 2 \cdot g \Rightarrow D_{shaft} \leq 152 - 2 \cdot (13,05 + 0,5 + 29 + 8,65) - 2 \cdot 0,45 \Rightarrow D_{shaft} \leq 152 - 2 \cdot 51,2 - 0,9$$

$$\Rightarrow D_{shaft} \leq 50,5mm$$

Η ροπή στον άξονα θα είναι (θεωρούμε $s = 0,02$):

$$T = \frac{P_{out}}{\omega_m} = \frac{22000}{2 \cdot \pi \cdot \frac{3000}{60} \cdot (1 - 0,02)} = 71,5 Nm$$

Επίσης:

$$b = 1 \cdot \left(hr + hor + \frac{d_1 + d_2}{2} \right) = 1 \cdot \left(13,05 + 0,5 + \frac{10,1 + 7,2}{2} \right) = 22,2 \cdot 10^{-3} m$$

$$a = \frac{A_{er}}{b} = \frac{780,33 \cdot 10^{-6}}{22,2 \cdot 10^{-3}} = 35,15 \cdot 10^{-3} m$$

Επόμενο βήμα είναι ο υπολογισμός του ρεύματος μαγνήτισης που απαιτείται για την δημιουργία των πεδίων αυτών, με την επιλογή των 28 αγωγών, έχοντας πάντα υπόψιν την μαγνητεγερτική δύναμη που απαιτείται. Έτσι θα υπολογίσουμε το άθροισμα των επιμέρους μαγνητεγερτικών δυνάμεων:

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

Για τον συντελεστή Carter (K_c) έχουμε:

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

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

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

Βρίσκουμε τα γ_1 και γ_2 με τον ίδιο τρόπο που ακολουθήσαμε και στην ενότητα 2.4.1. Οπότε:

$$\gamma_1 = \frac{bos^2}{5 \cdot g + bos} = \frac{2,5^2}{5 \cdot 0,45 + 2,5} = 1,32$$

$$\gamma_2 = \frac{bor^2}{5 \cdot g + bor} = \frac{1,5^2}{5 \cdot 0,45 + 1,5} = 0,6$$

Έτσι, για K_{c1} και K_{c2} έχουμε:

$$K_{c1} = \frac{20}{20-1,32} = 1,07$$

$$K_{c2} = \frac{16,95}{16,95 - 0,6} = 1,04$$

Από τα παραπάνω προκύπτει:

$$K_c = K_{c1} \cdot K_{c2} = 1,11$$

Η τιμή που βγάλαμε είναι κοντά στο 1,2 που είχαμε θέσει αρχικά οπότε είναι δεκτή.

Για $B_{cr}=1,5T$ και $B_{cs}=1,5T$ μέσω του πίνακα 3 έχουμε τις αντιστοίχες εντάσεις μαγνητικού πεδίου $H_{cs}=H_{cr}= 1340A/m$.

Άρα:

$$F_{mcs} = C_{cs} \cdot \frac{\pi \cdot (D_{out} - h_{cs})}{2 \cdot \pi} \cdot H_{cs} = 0,35 \cdot \frac{\pi \cdot (212 - 29,1) \cdot 10^{-3}}{2} \cdot 1340 = 134,6 \text{ At}$$

$$F_{mcr} = C_{cr} \cdot \frac{\pi \cdot (D_{shaft} + h_{cr})}{2 \cdot \pi} \cdot H_{cr} = 0,35 \cdot \frac{\pi \cdot (50,5 - 29) \cdot 10^{-3}}{2} \cdot 1340 = 52,85 \text{ At}$$

Τώρα μπορούμε να προχωρήσουμε στον υπολογισμό του F_{1m} :

$$F_{1m} = 2 \cdot \left(1,11 \cdot 0,45 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{0,5}{1,256 \cdot 10^{-6}} + 50,5 + 54,65 + 134,6 + 52,85 \right) = 982,9 \text{ At}$$

Ο συντελεστής $1+K_s$:

$$1 + K_s = \frac{F_{1m}}{2 \cdot F_{mg}} = \frac{982,9}{2 \cdot 199} = 2,47$$

Όπου:

$$F_{mg} = K_c \cdot g \cdot \frac{Bg}{\mu_0} = 1,11 \cdot 0,45 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{0,5}{1,256 \cdot 10^{-6}} = 199 \text{ At}$$

Για το ρεύμα μαγνήτισης:

$$I_\mu = \frac{\pi \cdot 2 \cdot \left(\frac{F_{1m}}{2}\right)}{3 \cdot \sqrt{2} \cdot W_i \cdot K_{wi}} = \frac{\pi \cdot 2 \cdot \left(\frac{982,9}{2}\right)}{3 \cdot \sqrt{2} \cdot 65 \cdot 0,96} = 11,65 \text{ A}$$

$$i_\mu = \frac{I_\mu}{I_{ov}} = \frac{11,65}{39,2} \cdot 100\% = 29,7\%$$

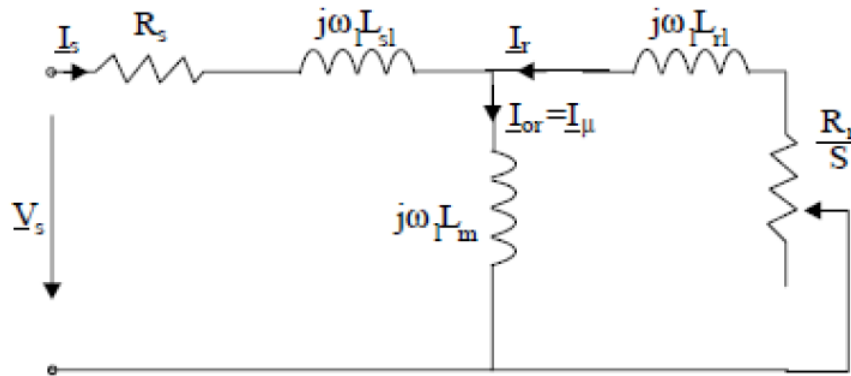
Όπου:

$$I_{ov} = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot V_n \cdot \cos\varphi \cdot n} = \frac{22000W}{\sqrt{3} \cdot 400 \cdot 0,89 \cdot 0,910} = 39,2 \text{ A}$$

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 – ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ

3.1 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΙΣΟΔΥΝΑΜΟΥ ΚΥΚΛΩΜΑΤΟΣ

Στο σχήμα που ακολουθεί βλέπουμε το ισοδύναμο κύκλωμα ενός επαγωγικού κινητήρα:



Σχήμα 4: Ισοδύναμο κύκλωμα επαγωγικού κινητήρα [1]

Αρχικά, θα ξεκινήσουμε με τους υπολογισμούς των στοιχείων που βλέπουμε στο παραπάνω σχήμα του ισοδύναμου κυκλώματος. Αξίζει να σημειωθεί ότι στο κύκλωμα δεν υπάρχει η ωμική αντίσταση (R_{fe}) η οποία αντιστοιχεί στις απώλειες σιδήρου.

Η ωμική αντίσταση (ανά φάση) του στάτη δίνεται από τη σχέση:

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

όπου:

ρ_{co} : ειδική αντίσταση του χαλκού στους 80 βαθμούς Κελσίου

l_c : μήκος του τυλίγματος κάθε φάσης

Το l_c υπολογίζεται από τη παρακάτω σχέση:

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

όπου:

L : το μήκος του στάτη

l_{end} : το μήκος του τυλίγματος έξω από τους αγωγούς του στάτη.

Το l_{end} μπορούμε να το υπολογίσουμε (για 2πολικές μηχανές) προσεγγιστικά ως εξής:

$$l_{end} = 2 \cdot y - 0,04$$

όπου:

y : το βήμα του τυλίγματος.

Στην περίπτωση μας ισχύει:

$$\frac{y}{\tau} = \frac{7}{9} \Rightarrow y = \frac{7}{9} \cdot 0,24 \Rightarrow y = 0,186m$$

Άρα τώρα μπορούμε να υπολογίσουμε το l_{end} :

$$l_{end} = 2 \cdot 0,186 - 0,04 = 0,332m$$

Η ειδική αντίσταση του χαλκού στους 20 βαθμούς κελσίου είναι $1,78 \cdot 10^{-8} \Omega m$. Στους 0 βαθμούς κελσίου (πιθανή θερμοκρασία 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 ολικό μήκος του τυλίγματος κάθε φάσης είναι:

$$l_c = 2 \cdot (L + l_{end}) = 2 \cdot (0,191 + 0,332) = 1,046m$$

Για τον υπολογισμό της αντίστασης των τυλιγμάτων στον στάτη έχουμε:

$$R_s = \rho_{co} \cdot \frac{l_c \cdot W_i}{A_{co} \cdot a_i} = 2,17 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{1,046 \cdot 65}{5,6 \cdot 10^{-6} \cdot 1} = 0,263 \Omega$$

Στην συνέχεια υπολογίζουμε την συνδυασμένη αντίσταση του δρομέα. Όπως πράξαμε και στο προηγούμενο κεφάλαιο και τώρα, θα γίνει διαχωρισμός των αποτελεσμάτων για 18 αγωγούς και 28 αγωγούς ενώ στη συνέχεια θα υπάρξει η σύγκριση των αποτελεσμάτων.

3.1.1) ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΜΕ 18 ΑΓΩΓΟΥΣ ($N_r=18$)

Πρώτα θα υπολογίσουμε την συνδυασμένη αντίσταση των αγωγών του δρομέα και των δακτυλίων βραχυκύκλωσης:

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

όπου:

KR: συντελεστής επιδερμικού φαινομένου

ρ_{Al} : ειδική αντίσταση του αλουμινίου $= 3,1 \cdot 10^{-8} \Omega$

l_{er} : μήκος του τομέα του δακτυλίου βραχυκύκλωσης που αντιστοιχεί σε έναν αγωγό του δρομέα. Το βρίσκουμε μέσω του παρακάτω τύπου:

$$l_{er} = \frac{\pi \cdot (D_{er} - b)}{N_r} = \frac{\pi \cdot (152 - 2 \cdot 0,45 - 23)}{18} \cdot 10^{-3} = 22,4 \cdot 10^{-3} m$$

Στη συνέχεια υπολογίζουμε την σταθερά KR:

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

Όπου:

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

Και:

h_r : το βάθος των αγωγών του δρομέα

β_s : ο συντελεστής που εκφράζει το λόγο του βάθους του αγωγού, προς το μέρος του αγωγού που το διαπερνά το μαγνητικό πεδίο. Το βρίσκουμε μέσω της σχέσης:

$$\beta_s = \sqrt{\frac{\omega \cdot \mu_0}{2 \cdot \rho_{Al}}} = \sqrt{\frac{2\pi \cdot 50 \cdot 1,256 \cdot 10^{-6}}{2 \cdot 3,1 \cdot 10^{-8}}} = 79,8 m^{-1}$$

$$\xi = \beta_s \cdot h_r \cdot \sqrt{s} = 79,8 m^{-1} \cdot 13 \cdot 10^{-3} m \cdot 1 = 1,04$$

Άρα μπορούμε να υπολογίσουμε την αντίσταση του δρομέα στους 80 βαθμούς ως εξής:

$$R_{be}^{80} = \rho_{Al} \cdot \left[1 + \frac{1}{273} \cdot (80 - 20) \right] \cdot \left[\frac{L}{Ab} \cdot K_R + \frac{l_{er}}{2 \cdot A_{er} \cdot \sin^2 \left(\frac{\pi \cdot P_1}{N_r} \right)} \right]$$

$$\Rightarrow R_{be}^{80} = 3,78 \cdot 10^{-8} \cdot \left[\frac{0,191 \cdot 1,04}{217,4 \cdot 10^{-6}} + \frac{22,4 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 782,5 \cdot 10^{-6}} \cdot \sin^2 \left(\frac{\pi}{18} \right) \right]$$

$$\Rightarrow R_{be}^{80} = 0,525 \cdot 10^{-4} \Omega$$

Η αντίσταση που μόλις υπολογίστηκε είναι η πραγματική αντίσταση του δρομέα. Στο ισοδύναμο κύκλωμα η αντίσταση είναι ανηγμένη στον στάτη. Η ανηγμένη αντίσταση υπολογίζεται ως εξής:

$$R_2 = \frac{4 \cdot m}{N_r} \cdot (W_i \cdot K_w)^2 \cdot R_{be}^{80} = \frac{4 \cdot 3}{18} \cdot (65 \cdot 0,96)^2 \cdot 0,525 \cdot 10^{-4} = 0,13 \Omega$$

Θα συνεχίσουμε με τον υπολογισμό των επαγωγικών αντιδράσεων του κινητήρα. Θα ξεκινήσουμε τους υπολογισμούς από την επαγωγική αντίδραση του στάτη (ανά φάση) ως εξής:

$$X_{SL} = 2 \cdot \mu_0 \cdot \omega_1 \cdot L \cdot \frac{W_i^2}{p1 \cdot q} \cdot (\lambda_s + \lambda_{ds} + \lambda_{er})$$

Όπου:

λ_s : συντελεστής slot coefficient

λ_{ds} συντελεστής differential coefficient

λ_{er} συντελεστής end ring coefficient

Για τον συντελεστή λ_s έχουμε:

$$\begin{aligned} \lambda_s &= \left[\frac{2}{3} \cdot \frac{h_s}{(b_{s1} + b_{s2})} + \frac{2 \cdot h_w}{(b_{os} + b_{s1})} + \frac{h_{os}}{b_{os}} \right] \cdot \left(\frac{1 + 3\beta}{4} \right) \Rightarrow \lambda_s \\ &= \left[\frac{2}{3} \cdot \frac{13,1}{(14 + 17,4)} + \frac{2 \cdot 1}{(2,5 + 14)} + \frac{0,5}{2,5} \right] \cdot \left(\frac{1 + 3 \cdot \left(\frac{7}{9}\right)}{4} \right) \Rightarrow \\ &\lambda_s = 0,5 \end{aligned}$$

Όπου:

$\beta = \gamma/\tau = 7/9$. Οι υπόλοιποι όροι αντιστοιχούν στις διαστάσεις που έχουν τα αυλάκια του στάτη (βλέπε εικόνα 4).

Αντίστοιχα για τον συντελεστή λ_{ds} έχουμε:

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

Όπου:

$$\begin{aligned} \lambda_{ds} &= 1 - 0,033 \cdot \frac{bos^2}{g \cdot \tau_s} \\ \gamma_{ds} &= (0,14 \cdot \sin\varphi_1 + 0,76) \cdot 10^{-2} \\ \varphi_1 &= \pi \cdot (6\beta - 5,5) \end{aligned}$$

Από τα παραπάνω προκύπτει ότι:

$$\begin{aligned} \gamma_{ds} &= 0,69 \cdot 10^{-2} \\ C_s &= 1 - 0,033 \cdot \frac{bos^2}{g \cdot \tau_s} = 1 - 0,033 \frac{2,5^2}{0,45 \cdot 20} = 0,977 \end{aligned}$$

Έτσι καταλήγουμε ότι:

$$\lambda_{ds} = \frac{0,9 \cdot 20 \cdot 10^{-3} \cdot 4^2 \cdot 0,96^2 \cdot 0,977 \cdot 0,69 \cdot 10^{-2}}{1,09 \cdot 0,45 \cdot 10^{-3} \cdot 2,47} = 1,46$$

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

$$\lambda_{er} = 0,67 \cdot \frac{q}{L} \cdot (l_{end} - 0,64 \cdot \beta \cdot \tau) = 0,67 \cdot \frac{4}{0,191} \cdot \left(0,332 - 0,64 \cdot \frac{7}{9} \cdot 0,24\right) = 2,97$$

Από τα παραπάνω υπολογίζεται η επαγωγική αντίδραση του στάτη:

$$X_{SL} = 2 \cdot \mu_0 \cdot \omega_1 \cdot L \cdot \frac{W_i^2}{p1 \cdot q} \cdot (\lambda_s + \lambda_{ds} + \lambda_{er}) \Rightarrow$$
$$X_{SL} = 2 \cdot 1,256 \cdot 10^{-6} \cdot 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 0,191 \cdot \frac{65^2}{1 \cdot 4} \cdot (0,5 + 1,6 + 2,97) \Rightarrow$$
$$X_{SL} = 0,7861$$

Βρίσκουμε την επαγωγική αντίδραση του δρομέα (δεν είναι ανηγμένη στο στάτη) από τη σχέση:

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

Όπου:

$$\lambda_r = 0,66 + \frac{2 \cdot h_r}{3 \cdot (d_1 + d_2)} + \frac{h_{or}}{b_{or}} = 0,66 + \frac{2 \cdot 13}{3 \cdot (15 + 4)} + \frac{0,5}{1,5} = 1,45$$

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

Ο συντελεστής γ_{dr} δίνεται από τη σχέση:

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

Άρα:

$$\lambda_{dr} = \frac{0,9 \cdot \tau_r \cdot \gamma_{dr}}{K_c \cdot g} \cdot \left(\frac{N_r}{6 \cdot \pi i}\right)^2 = \frac{0,9 \cdot 26,37 \cdot 10^{-2}}{1,09 \cdot 0,45} \cdot \left(\frac{18}{6 \cdot 1}\right)^2 = 4,32$$

Στη συνέχεια βρίσκουμε τον συντελεστή λ_{er} από τη σχέση:

$$\lambda_{er} = \frac{2,3 \cdot (D_{er} - b)}{N_r \cdot L \cdot 4 \cdot \sin^2\left(\frac{\pi \cdot P1}{N_r}\right)} \cdot \log\left[\frac{4,7 \cdot (D_{er} - b)}{b + 2a}\right] \Rightarrow$$

$$\lambda_{er} = \frac{2,3 \cdot 128,1}{18 \cdot 191 \cdot 4 \cdot \sin^2\left(\frac{\pi}{18}\right)} \cdot \log\left[\frac{4,7 \cdot 128,1}{23 + 2 \cdot 34}\right] \Rightarrow$$

$$\lambda_{er} = 0,58$$

Ο επόμενος υπολογισμός αφορά τον συντελεστή επιδερμικού φαινομένου K_x :

$$K_x = \frac{3 \cdot [\sinh(2\xi) - \sin(2\xi)]}{2 \cdot \xi \cdot [\cosh(2\xi) - \cos(2\xi)]} = 1,44$$

Στην παραπάνω σχέση όπου $\xi=1,04$.

Άρα η επαγωγική αντίδραση του δρομέα θα είναι:

$$X_{be} = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot \mu_0 \cdot L \cdot (\lambda_r \cdot K_x + \lambda_{dr} + \lambda_{er}) = 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 1,256 \cdot 10^{-6} \cdot 0,191 \cdot (1,45 \cdot 1,44 + 4,32 + 0,58) = 5,27 \cdot 10^{-4} \Omega$$

Η ανηγμένη στο στάτη επαγωγική αντίδραση του δρομέα θα είναι:

$$X_2 = 4 \cdot m \cdot \frac{(W_1 \cdot K_{w1})^2}{N_r} \cdot X_{be} = 4 \cdot 3 \cdot \frac{(65 \cdot 0,96)^2}{18} \cdot 5,27 \cdot 10^{-4} = 1,37 \Omega$$

Απομένει ο υπολογισμός της αντίδρασης μαγνήτισης:

$$X_m = \sqrt{\left(\frac{V_{ph}}{I_\mu}\right)^2 - R_s^2 - X_{sl}} = \sqrt{\left(\frac{230}{12,62}\right)^2 - 0,263^2 - 0,8} = 17,42 \Omega$$

Οι παραπάνω τιμές είναι για ακίνητο δρομέα. Για ονομαστική ταχύτητα οι τιμές διαφοροποιούνται κυρίως λόγω εξάλειψης του επιδερμικού φαινομένου. Τις υπολογίζουμε ως εξής:

Για $S=1$:

$$(X_{sl}) = X_{sl}(0,7-0,8) = 0,8 \cdot 0,75 = 0,6 \Omega$$

$$(X_{rl}) = X_{rl}(0,6-0,7) = 1,37 \cdot 0,65 = 0,89 \Omega$$

Για $K_x=K_R=1$ έχουμε:

$$R_{be}^{80} = \rho_{Al} \cdot \left[1 + \frac{1}{273} \cdot (80 - 20) \right] \cdot \left[\frac{L}{A_b} \cdot K_R + \frac{l_{er}}{2 \cdot A_{er} \cdot \sin^2\left(\frac{\pi \cdot P_1}{N_r}\right)} \right] \Rightarrow$$

$$R_{be}^{80} = 3,78 \cdot 10^{-8} \cdot \left[\frac{0,191 \cdot 1}{217,4 \cdot 10^{-6}} + \frac{22,4 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 782,5 \cdot 10^{-6} \cdot \sin^2\left(\frac{\pi}{18}\right)} \right] \Rightarrow$$

$$R_{be}^{80} = 0,5 \cdot 10^{-4} \Omega$$

$$R_r = 0,089 \cdot \frac{0,5 \cdot 10^{-4}}{0,525 \cdot 10^{-4}} = 0,085 \Omega$$

Στη συνέχεια:

$$X_m = X_m \cdot K_{skew}$$

$$K_{skew} = \frac{\sin\left(\frac{\pi}{18}\right)}{\frac{\pi}{18}} = 0,9954$$

Οπότε:

$$X_m = 17,42 \cdot 0,9954 = 17,34 \Omega$$

$$X_{r1skew} = X_m \cdot (1 - K_{skew}^2) = 18,95 \cdot (1 - 0,9954^2) = 0,174 \omega$$

Για $S = 1$:

$$X_{rl} = X_{rl} + K_{skew} = 0,89 + 0,16 = 1,05 \Omega$$

Για $S = S_n$:

$$X_{rl} = X_{rl} + X_{rskew} = 1,37 + 0,16 = 1,53 \Omega$$

Επόμενο βήμα είναι ο υπολογισμός των απωλειών και του βαθμού απόδοσης για τον κινητήρα:

Ο τύπος που θα χρησιμοποιήσουμε για την εύρεση του βαθμού απόδοσης είναι ο ακόλουθος:

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{P_{out}}{P_{in} + \Sigma losses}$$

Οι συνολικές απώλειες του κινητήρα υπολογίζονται από τη σχέση:

$$\Sigma losses = P_{cu} + P_{Al} + P_{fe} + P_{MHX} + P_{KAT}$$

Παρακάτω υπολογίζουμε αναλυτικά την κάθε παράμετρο απωλειών:

Απώλειες χαλκού στον στάτη:

$$P_{cu} = 3 \cdot I_{ov}^2 \cdot R_s = 3 \cdot 39,2^2 \cdot 0,263W = 1212,4W$$

Απώλειες στον δρομέα (οι αγωγοί του είναι κατασκευασμένοι από αλουμίνιο):

$$P_{cu} = 3 \cdot I_{rn}^2 \cdot R_r = 3 \cdot K_I^2 \cdot I_n^2 \cdot R_r = 3 \cdot 0,912^2 \cdot 39,2^2 \cdot 0,13 = 485W$$

Οι μηχανικές απώλειες υπολογίζονται ως εξής:

$$P_{MHX} = 0,03 \cdot P_{ov} = 0,03 \cdot 22000W = 660W$$

Για τις κατανεμημένες απώλειες:

$$P_{KAT} = 0,01 \cdot P_{ov} = 0,01 \cdot 22000W = 220W$$

Επόμενος υπολογισμός είναι αυτός των απωλειών σιδήρου. Το μεγαλύτερο ποσοστό των απωλειών σιδήρου εμφανίζονται κυρίως στον στάτη γιατί η συχνότητα του ρεύματος είναι πολύ μικρή στον ρότορα. Οι απώλειες σιδήρου στο στάτη χωρίζονται σε απώλειες στα «δόντια» (ανάμεσα στα λούκια) $pt1$ και στο πυρήνα που βρίσκεται πίσω από τα λούκια $py1$.

Οι απώλειες $pt1$ υπολογίζονται ως εξής :

$$pt1 = K_t \cdot p_{10} \cdot \left(\frac{f1}{50}\right)^{1,3} \cdot B_{ts}^{1,7} \cdot G_{t1}$$

Όπου:

$p_{10}=2-3W/kg$

K_t : συντελεστής που εξαρτάται από την ποιότητα του υλικού του πυρήνα.

G_{t1} : παράμετρος που εκφράζει το βάρος των δοντιών του πυρήνα.

Η παράμετρος G_{t1} υπολογίζεται ως εξής:

$$G_{t1} = \gamma_{iron} \cdot N_s \cdot b_{ts} \cdot (h_s + h_w + h_{os}) \cdot L \cdot K_{Fe}$$
$$\Rightarrow G_{t1} = 7800 \cdot 24 \cdot 6,3 \cdot 10 - 3 \cdot (13,1 + 1 + 0,5) \cdot 10 - 3 \cdot 0,191 \cdot 0,96 = 3,157 \text{ } kg$$

Άρα βρίσκουμε το $pt1$:

$$pt1 = 1,7 \cdot 3 \cdot \left(\frac{50}{50}\right)^{1,3} \cdot 1,65^{1,7} \cdot 3,157 = 38W$$

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:

$$\begin{aligned} G_{y1} &= \gamma_{iron} \cdot \frac{\pi}{4} \cdot [Dout^2 - (Dout - 2 \cdot h_{cs})^2] \cdot L \cdot K_{fe} = \\ &= 7800 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot [0,212^2 - (0,212 - 2 \cdot 0,0291)^2] \cdot 0,191 \cdot 0,96 = 23,9W \end{aligned}$$

Άρα οι απώλειες στον υπόλοιπο πυρήνα θα είναι:

$$p_{y1} = K_y \cdot p_{10} \cdot \left(\frac{f_1}{50}\right)^{1,3} \cdot B_{cs}^{1,7} \cdot G_{y1} = 1,7 \cdot 3 \cdot \left(\frac{50}{50}\right)^{1,3} \cdot 1,5^{1,7} \cdot 23,9W = 242,5W$$

Οι συνολικές απώλειες σιδήρου θα είναι ίσες με:

$$P_{fe} = 38W + 242,5W = 280,5W$$

$$P_{iron} = 0,5 \cdot 10^{-4} \cdot \left(\left[\left(N_r \cdot \frac{f_1}{p_1} K_{ps} \cdot B_{ps} \right)^2 \right] \cdot G_{ts} + \left[\left(N_s \cdot \frac{f_1}{p_1} \cdot K_{pr} \cdot B_{pr} \right)^2 \cdot G_{tr} \right] \right)$$

$$K_{ps} = \frac{1}{2,2 - B_{ts}} = \frac{1}{2,2 - 1,65} = 1,82$$

$$K_{pr} = \frac{1}{2,2 - B_{tr}} = \frac{1}{2,2 - 1,6} = 1,66$$

$$B_{ps} = (K_{c2} - 1) \cdot B_g = (1,023 - 1) \cdot 0,5 = 0,0115T$$

$$B_{pr} = (K_{c1} - 1) \cdot B_g = (1,07 - 1) \cdot 0,5 = 0,0365T$$

$$\begin{aligned} G_{tr} &= \gamma_{iron} \cdot N_r \cdot b_{tr} \cdot \left(h_r + \frac{d_1 + d_2}{2} \right) \cdot L \cdot K_{Fe} = 7800 \cdot 18 \cdot 8,58 \cdot 10^{-3} \cdot \left(13 + \frac{15+4}{2} \right) \cdot 10^{-3} \cdot \\ &0,191 \cdot 0,96 = 5Kg \end{aligned}$$

Οπότε:

$$\begin{aligned} P_{iron} &= 0,5 \cdot 10^{-4} \cdot \left(\left[\left(18 \cdot \frac{50}{1} \cdot 1,82 \cdot 0,0115 \right)^2 \right] \cdot 3,157 + \left[\left(24 \cdot \frac{50}{1} \cdot 1,54 \cdot 0,0365 \right)^2 \cdot 5 \right] \right) \\ &= 1385W \end{aligned}$$

Άρα:

$$P_{ironολ} = 280,5 + 1,385 = 281,9W$$

Οι συνολικές απώλειες είναι:

$$\Sigma losses = P_{cu} + P_{Al} + P_{fe} + P_{MHX} + P_{KAT} = 1212,4 + 485 + 281,9 + 660 + 220 = 2859,3W$$

Αντίστοιχα ο βαθμός απόδοσης του κινητήρα θα είναι:

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{P_{out}}{P_{in} + \Sigma losses} = \frac{22000}{22000 + 2859,3} = 0,885$$

Επόμενη σημαντική παράμετρος που πρέπει να υπολογιστεί είναι το ρεύμα του κινητήρα χωρίς φορτίο, το οποίο είναι το ενεργό και δε συμπεριλαμβάνεται στο ρεύμα μαγνήτισης. Το υπολογίζουμε ως εξής:

$$I_0 = \frac{P_{fe} + P_{MHX} + 3 \cdot I_{\mu}^2 \cdot R_s}{3 \cdot V_{ph}} = \frac{281,9 + 660 + 3 \cdot 12,62^2 \cdot 0,263}{3 \cdot 230} = 1,55A$$

Η ολίσθηση υπολογίζεται από την σχέση:

$$s = \frac{P_{Al}}{P_{AG}} = \frac{485W}{22000 + 485 + 600 + 220W} = 0,021 = 2,1\%$$

Και:

$$n_m = (1 - s)n_{sync} = (1 - 0,021) \cdot 3000 = 2937rpm$$

Υπολογίζουμε την ονομαστική ροπή:

$$T_n = \frac{22000W}{2\pi \cdot \frac{50}{1} \cdot (1 - 0,021)} = \frac{22000W}{307,56} = 71,5Nm$$

Επίσης:

$$T_e = \frac{3 \cdot p_1}{\omega_1} \cdot \frac{V_{ph}^2 \cdot \frac{R_r}{S}}{\left(R_s + C_m \cdot \frac{R_r}{S}\right)^2 + (X_{sl} + C_m \cdot X_2)^2}$$

$$C_1 = C_m = \frac{X_{sl}}{X_m} = 1 + \frac{0,8}{17,42} = 1,046$$

Στη συνέχεια βρίσκουμε την ροπή ανατροπής:

$$\begin{aligned} T_{bk} &= \frac{3 \cdot p_1}{2 \cdot \omega_1} \cdot \frac{V_{ph}^2}{R_s + \sqrt{R_s^2 + (X_{sl} + C_1 \cdot X_2)^2}} \Rightarrow T_{bk} \\ &= \frac{3 \cdot 1}{2 \cdot 2\pi \cdot 50} \cdot \frac{230^2}{0,263 + \sqrt{0,263^2 + (0,8 + 1,046 \cdot 1,37)^2}} = 100,6Nm \end{aligned}$$

Το ρεύμα εκκίνησης του κινητήρα είναι:

$$I_{LR} = \frac{V_{ph}}{\sqrt{(R_s + R_r)^2 + (X_{sl} + X_{rl})^2}} = \frac{230}{\sqrt{(0,263 + 0,13)^2 + (0,8 + 1,37)^2}} = 104,3A$$

Η ροπή εκκίνησης υπολογίζεται ως:

$$T_{LR} = \frac{3 \cdot I_{LR}^2 \cdot R_r}{\omega_s} = \frac{3 \cdot 104,3^2 \cdot 0,13}{2 \cdot \pi \cdot \frac{3000}{60}} = 13,5Nm$$

Τέλος βρίσκουμε τον συντελεστή ισχύος της μηχανής μέσω της σχέσης:

$$\cos\varphi = \frac{P_n}{3 \cdot V_{ph} \cdot I_n \cdot \eta} = \frac{22000}{3 \cdot 230 \cdot 39,2 \cdot 0,885} = 0,92$$

3.1.2) ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΜΕ 28 ΑΓΩΓΟΥΣ (Nr=28)

Σε αυτή την ενότητα του κεφαλαίου θα γίνουν οι εκ νέου υπολογισμοί των στοιχείων και παραμέτρων που είδαμε στη παραπάνω ενότητα, αλλά αυτή τη φορά στη περίπτωση που ο δρομέας έχει 28 αυλάκια.

Υπολογίζουμε την συνδυασμένη αντίσταση των αγωγών του δρομέα και των δακτυλίων βραχυκύκλωσης:

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

Το μήκος του τομέα δακτυλίου βραχυκύκλωσης θα είναι:

$$l_{er} = \frac{\pi \cdot (D_{er} - b)}{N_r} = \frac{\pi \cdot (152 - 2 \cdot 0,45 - 22,2)}{28} \cdot 10^{-3} = 14,4 \cdot 10^{-3}m$$

Θα συνεχίσουμε με τον υπολογισμό για τη σταθερά KR. Έτσι έχουμε:

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

Όπου:

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

Ο συντελεστής β_s θα είναι ο ίδιος με τη περίπτωση των 18 αγωγών καθώς δεν υπάρχει κάποια παράμετρος που να τον μεταβάλλει.

Έτσι έχουμε για $\beta_s = 79,8 m^{-1}$:

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

$$R_{be}^{80} = \rho_{Al} \cdot \left[1 + \frac{1}{273} \cdot (80 - 20) \right] \cdot \left[\frac{L}{Ab} \cdot K_R + \frac{l_{er}}{2 \cdot A_{er} \cdot \sin^2 \left(\frac{\pi \cdot P_1}{Nr} \right)} \right]$$

$$\Rightarrow R_{be}^{80} = 3,78 \cdot 10^{-8} \cdot \left[\frac{0,191 \cdot 1,042}{139,7 \cdot 10^{-6}} + \frac{14,4 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 780,33 \cdot 10^{-6}} \cdot \sin^2 \left(\frac{\pi}{28} \right) \right]$$

$$\Rightarrow R_{be}^{80} = 0,817 \cdot 10^{-4} \Omega$$

Ακολουθεί ο υπολογισμός της ανηγμένης αντίστασης στον δρομέα:

$$R_2 = \frac{4 \cdot m}{Nr} \cdot (Wi \cdot K_{w1})^2 \cdot R_{be}^{80} =$$

Επόμενο βήμα είναι ο υπολογισμός των επαγωγικών αντιδράσεων. Η επαγωγική αντίδραση του στάτη δεν έχει κάποια μεταβολή είτε στους συντελεστές από τους οποίους εξαρτάται είτε στην τελική τιμή, οπότε η επόμενη σχέση που θα αναλύσουμε είναι εκείνη της επαγωγικής αντίδρασης του δρομέα.

Η επαγωγική αντίδραση του δρομέα (δεν είναι ανηγμένη στο στάτη) υπολογίζεται από τη σχέση:

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

Για το λ_r :

$$\lambda_r = 0,66 + \frac{2 \cdot hr}{3 \cdot (d_1 + d_2)} + \frac{hor}{bor} = 0,66 + \frac{2 \cdot 13,05}{3 \cdot (10,1 + 7,2)} + \frac{0,5}{1,5} = 1,492$$

Όπου:

$$\gamma_{dr} = 9 \cdot \left(\frac{6 \cdot \pi i}{28} \right)^2 \cdot 10^{-2} = 0,4 \cdot 10^{-2}$$

Οπότε:

$$\lambda_{dr} = \frac{0,9 \cdot \tau_r \cdot \gamma_{dr}}{K_c \cdot g} + \left(\frac{Nr}{6 \cdot \pi i} \right)^2 = \frac{0,9 \cdot 16,95 \cdot 0,4 \cdot 10^{-2}}{1,11 \cdot 0,45} \cdot \left(\frac{28}{6 \cdot 1} \right)^2 = 2,61$$

Για τον συντελεστή λ_{er} έχουμε:

$$\lambda_{er} = \frac{2,3 \cdot (Der - b)}{Nr \cdot L \cdot 4 \cdot \sin^2 \left(\frac{\pi \cdot P_1}{Nr} \right)} \cdot \log \frac{4,7 \cdot (Der - b)}{b + 2\alpha}$$

$$= \frac{2,3 \cdot (152 - 22,2)}{28 \cdot 191 \cdot 4 \cdot \sin^2 \left(\frac{\pi}{28} \right)} \cdot \log \left[\frac{4,7 \cdot 129,8}{22,2 + 2 \cdot 35,15} \right] = 0,89$$

Βρίσκουμε τη σταθερά Kx :

$$Kx = \frac{3 \cdot [\sinh(2\xi) - \sin(2\xi)]}{2 \cdot \xi \cdot [\cosh(2\xi) - \cos(2\xi)]} = 0,964$$

Για την παραπάνω σχέση η τιμή του $\xi=1,042$. Υπολογίζουμε την επαγωγική αντίδραση του δρομέα:

$$X_{be} = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot \mu_0 \cdot L \cdot (\lambda r \cdot Kx + \lambda dr + \lambda er) = 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 1,256 \cdot 10^{-6} \cdot 0,191 \cdot (1,492 \cdot 0,964 + 2,61 + 0,89) = 3,72 \cdot 10^{-4} \Omega$$

Η ανηγμένη στο στάτη επαγωγική αντίδραση του δρομέα θα είναι:

$$X_2 = 4 \cdot m \cdot \frac{(W1 \cdot Kw1)^2}{Nr} \cdot X_{be} = 4 \cdot 3 \cdot \frac{(65 \cdot 0,96)^2}{28} \cdot 3,72 \cdot 10^{-4} = 0,62 \Omega$$

Απομένει ο υπολογισμός της αντίδρασης μαγνήτισης:

$$X_m = \sqrt{\left(\frac{V_{ph}}{I_\mu} \right)^2 - R_s^2 - X_{sl}} = \sqrt{\left(\frac{230}{11,65} \right)^2 - 0,263^2 - 0,78} = 18,95 \Omega$$

Πρέπει να επισημάνουμε σε αυτό το σημείο ότι οι παραπάνω τιμές που βρήκαμε αναφέρονται στη περίπτωση που έχουμε ακίνητο δρομέα. Για ονομαστική ταχύτητα οι τιμές διαφοροποιούνται λίγο λόγω εξάλειψης του επιδερμικού φαινομένου. Τις υπολογίζουμε αναλυτικά παρακάτω:

Για $S=1$:

$$(X_{sl}) = X_{sl}(0,7 - 0,8) = 0,76 \cdot 0,75 = 0,57 \Omega$$

$$(X_{rl}) = X_{rl}(0,6 - 0,7) = 0,62 \cdot 0,65 = 0,41 \Omega$$

Για $K_x=K_r=1$:

$$R_{be}^{80} = \rho_{Al} \cdot \left[1 + \frac{1}{273} \cdot (80 - 20) \right] \cdot \left[\frac{L}{Ab} \cdot K_R + \frac{ler}{2 \cdot A_{er} \cdot \sin^2\left(\frac{\pi \cdot P_1}{Nr}\right)} \right] = 3,78 \cdot 10^{-8} \cdot \left[1 + \frac{1}{273} \cdot (80 - 20) \right] \cdot \left[\frac{0,191}{139,7 \cdot 10^{-6}} \cdot 1 + \frac{14,4 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 780,33 \cdot 10^{-6} \cdot \sin^2\left(\frac{\pi}{28}\right)} \right] = 0,8 \cdot 10^{-4} \Omega$$

Και:

$$R_r = 0,089 \cdot \frac{0,5 \cdot 10^{-4}}{0,525 \cdot 10^{-4}} = 0,085 \Omega$$

Στη συνέχεια:

$$X_m = X_m \cdot K_{skew}$$
$$K_{skew} = \frac{\sin\left(\frac{\pi}{28}\right)}{\frac{\pi}{28}} = 0,9954$$

Άρα:

$$X_m = 18,95 \cdot 0,9954 = 18,86 \Omega$$
$$X_{rlskew} = X_m \cdot (1 - K_{skew}^2) = 18,95(1 - 0,9954^2) = 0,174 \Omega$$

Για $S=1$:

$$(X_{rl}) = (X_{rl}) + X_{rlskew} = 0,41 + 0,174 = 0,58 \Omega$$

Για $S=S_n$:

$$(X_{rl}) = (X_{rl}) + X_{rlskew} = 0,62 + 0,174 = 0,794 \Omega$$

Στη συνέχεια θα υπολογίσουμε τις απώλειες και τον βαθμού απόδοσης για τον κινητήρα με 28 αγωγούς στο δρομέα:

Αρχικά υπολογίζουμε τις εκάστοτε απώλειες που υπάρχουν ώστε να φτάσουμε στις συνολικές απώλειες του κινητήρα:

Απώλειες στον στάτη:

$$P_{cu} = 3 \cdot I_{ov}^2 \cdot R_s = 3 \cdot 39,2^2 \cdot 0,263 W = 1212,4 W$$

Απώλειες στον δρομέα:

$$P_{Al} = 3 \cdot I_m^2 \cdot R_r = 3 \cdot K_f^2 \cdot I_n^2 \cdot R_r = 3 \cdot 0,912^2 \cdot 39,2^2 \cdot 0,13 = 485 W$$

Μηχανικές απώλειες υπολογίζονται προσεγγιστικά ως εξής:

$$P_{MHX} = 0,03 \cdot P_{ov} = 0,03 \cdot 22000W = 660W$$

Κατανεμημένες απώλειες:

$$P_{KAT} = 0,01 \cdot P_{ov} = 0,01 \cdot 22000W = 220W$$

Οι απώλειες στα “δόντια” υπολογίζονται από τη σχέση:

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

Όπως είδαμε και στη προηγούμενη ενότητα $p_{10}=2-3W/Kg$ κι επόμενο βήμα είναι ο υπολογισμός της παραμέτρου G_{t1} , με τα νέα δεδομένα που έχουμε θέσει, δηλαδή το βάρος των δοντιών του πυρήνα. Ο υπολογισμός της παραμέτρου γίνεται ως εξής:

$$\begin{aligned} G_{t1} &= \gamma_{iron} \cdot N_s \cdot b_{ts} \cdot (h_s + h_w + h_{os}) \cdot L \cdot K_{fe} \\ &= 7800 \cdot 24 \cdot 6,3 \cdot 10^{-3} \cdot (13,1 + 1 + 0,5) \cdot 10^{-3} \cdot 0,191 \cdot 0,96 = 3,157Kg \end{aligned}$$

Άρα:

$$p_{t1} = 1,7 \cdot 3 \cdot \left(\frac{50}{50}\right)^{1,3} \cdot 1,65^{1,7} \cdot 3,157 = 38W$$

Βρίσκουμε τις απώλειες στον υπόλοιπο πυρήνα:

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

Το G_{y1} παραμένει το ίδιο καθώς δεν εξαρτάται από κάποιο στοιχείο που μεταβάλλεται σε σχέση με τον υπολογισμό στην ενότητα 3.1.1.

Οπότε: $G_{y1}=23,9W$, άρα:

$$p_{y1} = 1,7 \cdot 3 \cdot \left(\frac{50}{50}\right)^{1,3} \cdot 1,5^{1,7} \cdot 23,9 = 242,5W$$

Οι συνολικές απώλειες σιδήρου θα είναι ίσες με:

$$P_{fe} = 38 + 242,5 = 280,5W$$

$$P_{iron} = 0,5 \cdot 10^{-4} \left(\left[\left(N_r \cdot \frac{f_1}{P_1} \cdot K_{ps} \cdot B_{ps} \right)^2 \right] G_{ts} + \left[\left(N_s \cdot \frac{f_1}{P_1} \cdot K_{pr} \cdot B_{pr} \right)^2 \cdot G_{tr} \right] \right)$$

Όπου:

$$K_{ps} = \frac{1}{2,2 - Bts} = \frac{1}{2,2 - 1,65} = 1,82$$

$$K_{pr} = \frac{1}{2,2 - Btr} = \frac{1}{2,2 - 1,6} = 1,66$$

$$B_{ps} = (K_{c2} - 1) \cdot B_g = (1,02 - 1) \cdot 0,5 = 0,01T$$

$$B_{ps} = (K_{c1} - 1) \cdot B_g = (1,07 - 1) \cdot 0,5 = 0,035T$$

$$G_{tr} = \gamma_{iron} \cdot N_r \cdot btr \cdot \left(h_r + \frac{d_1 + d_2}{2} \right) \cdot L \cdot K_{Fe} \Rightarrow$$

$$G_{tr} = 7800 \cdot 28 \cdot 5,52 \cdot 10^{-3} \cdot \left(13,05 + \frac{10,1 + 7,2}{2} \right) \cdot 10^{-3} \cdot 0,191 \cdot 0,69 = 3,5Kg$$

Άρα:

$$P_{iron} = 0,5 \cdot 10^{-4} \cdot ([(28 \cdot 50 \cdot 1,82 \cdot 0,01)^2] \cdot 3,157 + [(24 \cdot 50 \cdot 1,66 \cdot 0,035)^2 \cdot 3,5]) = 3,5Kg$$

Έτσι, οι συνολικές απώλειες του κινητήρα θα είναι:

$$\Sigma_{losses} = P_{cu} + P_{Al} + P_{fe} + P_{MHX} + P_{KAT} \Rightarrow \Sigma_{losses} = 1212,4 + 485 + 281,45 + 660 + 220 \Rightarrow$$

$$\Sigma_{losses} = 2858,8W$$

Βρίσκω τον βαθμό απόδοσης του κινητήρα:

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in} + \Sigma_{losses}} = \frac{22000}{22000 + 2858,8} = 0,88$$

Υπολογίζουμε το ενεργό ρεύμα του κινητήρα χωρίς φορτίο:

$$I_0 = \frac{P_{fe} + P_{MHX} + 3 \cdot I_{\mu}^2 \cdot R_s}{3 \cdot V_{ph}} = \frac{281,45 + 660 + 3 \cdot 11,65^2 \cdot 0,263}{3 \cdot 230} = 1,52A$$

Για την ολίσθηση έχουμε:

$$s = \frac{P_{Al}}{P_{AG}} = \frac{485}{22000 + 485 + 660 + 220} = 0,021 = 2,1\%$$

Και:

$$n_m = (1 - s) \cdot n_s = 2937rpm$$

Βρίσκουμε τη ονομαστική ροπή:

$$T_n = \frac{22000}{2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot (1 - 0,021)} = 71,4 Nm$$

Επίσης:

$$T_e = \frac{3 \cdot p_1}{\omega_1} \cdot \frac{V_{ph}^2 \cdot \frac{Rr}{S}}{\left(Rs + Cm \cdot \frac{Rr}{S}\right)^2 + (X_{sl} + Cm + X_{rl})^2}$$

Η ροπή ανατροπής υπολογίζεται ως εξής:

$$T_{bk} = \frac{3 \cdot P_1}{2 \cdot \omega_1} \cdot \frac{V_{ph}^2}{R_s + \sqrt{R_s^2 + (X_{sl} + C_1 \cdot X_2)^2}} \Rightarrow$$
$$T_{bk} = \frac{3}{200 \cdot \pi} \cdot \frac{230^2}{0,263 + \sqrt{0,263^2 + (0,57 + 1,03 \cdot 0,62)^2}} \Rightarrow$$
$$T_{bk} = 181,1 Nm$$

Στη συνέχεια υπολογίζουμε το ρεύμα εκκίνησης:

$$I_{εκκ} = \frac{V_{ph}}{\sqrt{(R_s + R_r)^2 + (X_{sl} + X_{rl})^2}} = \frac{230}{\sqrt{(0,263 + 0,13)^2 + (0,8 + 0,62)^2}} = 156,46 A$$

Η ροπή εκκίνησης είναι ίση με:

$$T_{εκκ} = \frac{3 \cdot I_{LR}^2 \cdot R_r}{\omega_s} = \frac{3 \cdot 156,46^2 \cdot 0,13}{2 \cdot \pi \cdot \frac{3000}{60}} = 30,5 Nm$$

Τέλος, υπολογίζουμε τον συντελεστή ισχύος της μηχανής:

$$\cos\varphi = \frac{P}{3 \cdot V_{ph} \cdot I_n \cdot \eta} = \frac{22000}{3 \cdot 230 \cdot 39,2 \cdot 0,88} = 0,92$$

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 - ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Ολοκληρώνοντας την μελέτη είναι σημαντικό να προχωρήσουμε στην σύγκριση των μεγεθών που υπολογίσαμε στα παραπάνω κεφάλαια (Κεφάλαιο 2 , Κεφάλαιο 3) με στόχο να φτάσουμε σε ασφαλή συμπεράσματα για την ορθότητα των αποτελεσμάτων. Στη παραπάνω πτυχιακή προχωρήσαμε σε ανάλυση και σύγκριση μέσω υπολογισμών, επιλέγοντας δυο περιπτώσεις αριθμού αυλακιών. Σκοπός ήταν να ελεγχθεί αν και κατά πόσο βελτιώνονται τα χαρακτηριστικά λειτουργίας του επιλεγμένου κινητήρα με την αλλαγή των αγωγών (αυλακιών) του δρομέα.

Κάνοντας τη σύγκριση σε στοιχεία τα οποία είναι κρίσιμα για την ορθή λειτουργία της μηχανής, παρατηρήσαμε ότι μεταβάλλοντας τα αυλάκια του δρομέα σε 28 υπάρχει, στα περισσότερα στοιχεία, βελτίωση των τιμών. Χαρακτηριστικό είναι πως η ροπή ανατροπής του κινητήρα αυξήθηκε σχεδόν στη διπλάσια τιμή σε σχέση με εκείνη των 18 αυλακιών, πετυχαίνοντας το επιθυμητό αποτέλεσμα (περίπου 2.5*Τον.) . Επίσης το ρεύμα εκκίνησης του κινητήρα αυξήθηκε κι αυτό σημαντικά χωρίς αύξηση των απωλειών. Αυτό μας βοηθάει να φτάσουμε πιο κοντά στη βελτίωση της ροπής εκκίνησης που είναι και το κύριο ζητούμενο. Η ολίσθηση και ο βαθμός απόδοσης παραμένουν σταθερά στις τιμές που είχαν προκύψει από τους υπολογισμούς των 18 αυλακιών οπότε δε προκύπτει κάτι διαφορετικό στην ταχύτητα περιστροφής.

Όσον αφορά την ροπή εκκίνησης, παρατηρούμε ότι με την μεταβολή των αυλακιών του δρομέα, έχουμε μια σημαντική αύξηση της τιμής της αλλά όχι την απαιτούμενη (θα πρέπει να είναι 3 φορές πάνω από την ονομαστική). Ένας ακόμα τρόπος για αύξηση της ροπής εκκίνησης είναι η επιλογή μικρότερων επαγωγικών αντιδράσεων ή των αντιστάσεων.

Στην επόμενη σελίδα ακολουθούν, σε μορφή πίνακα, τα πιο κρίσιμα σημεία υπολογισμού με τις μεταβολές των τιμών τους στις 2 επιλογές αριθμού αυλακιών του δρομέα, ώστε να είναι πιο εμφανείς οι όποιες διαφορές και να γίνει πιο εύκολα η σύγκριση τους.

ΣΗΜΕΙΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ	18 ΑΥΛΑΚΙΑ	28 ΑΥΛΑΚΙΑ
ΒΑΘΜΟΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ	0,88	0,88
ΟΛΙΣΘΗΣΗ	2,1%	2,1%
ΟΝΟΜΑΣΤΙΚΗ ΡΟΠΗ	71,5 Nm	71,4 Nm
ΡΟΠΗ ΑΝΑΤΡΟΠΗΣ	100,6 Nm	181,1 Nm
ΡΟΠΗ ΕΚΚΙΝΗΣΗΣ	13,5 Nm	30,5 Nm
ΡΕΥΜΑ ΕΚΚΙΝΗΣΗΣ	104,3 A	156,46 A
ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΙΣΧΥΟΣ	0,92	0,92

Πίνακας 4: Σύγκριση μεγεθών σε δυο περιπτώσεις αγωγών δρομέα

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ-ΠΑΡΑΠΟΜΠΕΣ

Παραπομπή [1]: ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ ΜΑΝΤΑΛΙΔΗΣ ΝΙΚΟΣ - ΛΟΥΚΑΝΑΡΗΣ ΣΠΥΡΟΣ

Παραπομπή [4]: ΠΑΝΤΕΛΗΣ Β. ΜΑΛΑΤΕΣΤΑΣ “ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ 3Η ΕΚΔΟΣΗ”

Παραπομπή [6]: ΣΗΜΕΙΩΣΕΙΣ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟΥ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ ΙΙ

Παραπομπή [7]: ION BOLDEA “THE INDUCTION OF MACHINES DESIGN HANDBOOK”

ΔΙΑΔΙΚΤΥΟ

Παραπομπή [2]: <https://hrionas.blogspot.com/2010/08/blog-post.html>

Παραπομπή [3]:

<https://dimitriseftimiou.weebly.com/taurhoiotaphialphasigmaiotakappaomicroniota-alphasigmaupsilongammachirhoomicronnuomicroniota-kappaiotanuetatauetarhoepsilonsigmaf.html>

Παραπομπή [5]:

<http://eclass.teipir.gr/openeclass/modules/document/file.php/ELEC106/II.%20CE%94%CE%B9%CE%B1%CF%86%CE%AC%CE%BD%CE%B5%CE%B9%CE%B5%CF%82%20CE%95%CF%81%CE%B3%CE%B1%CF%83%CF%84%CE%B7%CF%81%CE%AF%CE%BF%CF%85/VI.%20CE%A7%CE%B1%CF%81%CE%B1%CE%BA%CF%84%CE%B7%CF%81%CE%B9%CF%83%CF%84%CE%B9%CE%BA%CE%AE%20CE%A6%CF%8C%CF%81%CF%84%CE%B9%CF%83%CE%B7%CF%82%20CE%A3%CF%8D%CE%B3%CF%87%CF%81%CE%BF%CE%BD%CE%B7%CF%82%20CE%93%CE%B5%CE%BD%CE%BD%CE%AE%CF%84%CF%81%CE%B9%CE%B1%CF%82.pdf>

Παραπομπή [8]:

<https://eclass.uniwa.gr/modules/document/file.php/EEE261/%CE%95%CE%9D%CE%99%CE%A3%CE%A7%CE%A5%CE%A4%CE%99%CE%9A%CE%97%20CE%94%CE%99%CE%94%CE%91%CE%A3%CE%9A%CE%91%CE%9B%CE%99%CE%91%20%281%29.pdf>

Εικόνα εξωφύλλου: <https://pumpsuae.com/wp-content/uploads/2018/11/Valiadis-AK-550x669.jpg>