

ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΠΑΤΡΩΝ
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

1365

**Μελέτη ασύγχρονου τριφασικού κινητήρα 4 πόλων
ισχύος 1,5KW**

ΣΠΟΥΔΑΣΤΗΣ:

Χρήστος Παναγιώτου

ΕΙΣΗΓΗΤΗΣ:

Βασίλειος Χαραλαμπάκος

ΠΑΤΡΑ ΔΕΚΕΜΒΡΙΟΣ 2013

Χρήστος Παναγιώτου

Πτυχιούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός ΑΤΕΙ Πατρών

©2013, copyright Χρήστος Παναγιώτου

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος, All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Τεχνολογικού Εκπαιδευτικού ιδρύματος Πάτρας.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Για την διεκπεραίωση αυτής της εργασίας, απαιτήθηκε εκτός από προσωπική εργασία και προσπάθεια, η πολύτιμη βοήθεια που μου προσέφεραν ο επιβλέπων καθηγητής μου και άνθρωποι κατά την πρακτική μου άσκηση που με βοήθησαν να κατανοήσω την επιστήμη των ηλεκτρικών μηχανών. Καθώς και η οικογένειά μου για την πολύτιμη στήριξη που μου προσέφερε. Ευχαριστώ όλους αυτούς τους ανθρώπους για το πολύτιμο αγαθό που μου προσέφεραν, την μάθηση!

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Ο σκοπός της παρούσας πτυχιακής εργασίας είναι ο σχεδιασμός και η μελέτη ενός επαγωγικού ασύγχρονου τριφασικού κινητήρα βραχυκυκλωμένου δρομέα 4 πόλων, ισχύος 1.5kw. Στη μελέτη αυτή υπολογίζονται όλα τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά του κινητήρα όπως το τύλιγμα του στάτη, ο δρομέας, το ισοδύναμο κύκλωμα και τα χαρακτηριστικά λειτουργίας του.

Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται μια εισαγωγή στους επαγωγικούς κινητήρες. Αναφέρονται κάποια ιστορικά στοιχεία, ενώ στην συνέχεια γίνεται μια θεωρητική περιγραφή της δομής του επαγωγικού κινητήρα ως προς τα κατασκευαστικά του μέρη. Επίσης υπάρχει περιγραφή εξαγωγής του ισοδύναμου κυκλώματος και ανάλυση αυτού. Ιδιαίτερη μνεία γίνεται στην ισχύ και την ροπή του κινητήρα, καθώς και της χαρακτηριστικής ροπής-στροφών.

Στο δεύτερο κεφάλαιο είναι το πρώτο μέρος της μελέτης, το οποίο αρχικά περιλαμβάνει τις τεχνικές προδιαγραφές του προς σχεδίαση κινητήρα και γίνεται η αρχική διαστασιολόγησή του. Υπολογίζονται όλα τα χαρακτηριστικά που αφορούν το τύλιγμα του στάτη και επιλέγεται το κατάλληλο τύλιγμα, το οποίο απεικονίζεται στην αντίστοιχη εικόνα. Ακόμη, μελετάται ο δρομέας και τα χαρακτηριστικά του και κλείνει το κεφάλαιο με τον υπολογισμό του ρεύματος μαγνήτισης.

Στο τρίτο και τελευταίο κεφάλαιο γίνεται ο υπολογισμός του ισοδύναμου κυκλώματος, υπολογίζοντας τις ωμικές του αντιστάσεις και τις επαγωγικές του αντιδράσεις. Έπειτα βρίσκονται οι απώλειες του κινητήρα και ο βαθμός απόδοσης. Το κεφάλαιο κλείνει με τα χαρακτηριστικά λειτουργίας του κινητήρα και την χάραξη της χαρακτηριστικής ροπής στροφών.

Χρήστος Παναγιώτου

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα πτυχιακή εργασία έχει ως αντικείμενο τη μελέτη και το σχεδιασμό ενός ασύγχρονου επαγωγικού κινητήρα βραχυκυκλωμένου δρομέα. Σαν πρώτο στάδιο αυτής της μελέτης, θέσαμε κάποιες προδιαγραφές για τον προς σχεδίαση κινητήρα. Οι προδιαγραφές αυτές αφορούν κυρίως τη ροπή, τον συντελεστή ισχύος και το βαθμό απόδοσης. Αρχίζοντας την μελέτη γίνεται μια πρώτη διαστασιολόγηση του κινητήρα, όπου ευρίσκονται μεγέθη όπως η εξωτερική και εσωτερική διάμετρος της μηχανής και το διάκενο.

Έπειτα γίνεται ένας λεπτομερής σχεδιασμός του στάτη και του δρομέα. Επιλέγουμε το είδος του τυλίγματος του στάτη και σχεδιάζονται τα αυλάκια και οι διαστάσεις τους στα οποία θα τοποθετηθεί το τύλιγμα. Αντίστοιχα επιλέγουμε τη μορφή των αυλακιών του δρομέα και υπολογίζουμε τις διαστάσεις των αγωγών του. Εφόσον έχουμε υπολογίσει όλα τα κατασκευαστικά στοιχεία, υπολογίζεται το ρεύμα μαγνήτισης και το ισοδύναμο κύκλωμα του κινητήρα. Το ισοδύναμο κύκλωμα του ασύγχρονου επαγωγικού κινητήρα είναι ίδιο με αυτό του μετασχηματιστή. Υπολογίζονται οι ωμικές αντιστάσεις του στάτη και του δρομέα και αντίστοιχα οι επαγωγικές αντιδράσεις τους, καθώς και η επαγωγική αντίδραση μαγνήτισης.

Στο τελευταίο μέρος της πτυχιακής εργασίας γίνεται μια εκτίμηση των απωλειών, του βαθμού απόδοσης και των χαρακτηριστικών λειτουργίας του κινητήρα. Αναλύονται όλες οι απώλειες του κινητήρα με βάση τα στοιχεία και τις προδιαγραφές που θέσαμε πιο πάνω. Όσον αφορά τα χαρακτηριστικά λειτουργίας της μηχανής, έχουν υπολογιστεί όλα τα στοιχεία που αφορούν τη συμπεριφορά του κινητήρα κατά την εκκίνηση, την κανονική λειτουργία, τη λειτουργία χωρίς φορτίο. Μεγέθη όπως η ονομαστική ροπή, η ροπή εκκίνησης και ο συντελεστής ισχύος. Τέλος κατασκευάζεται και αναλύεται η χαρακτηριστική ροπής-στροφών του κινητήρα.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Πρόλογος	i
Περίληψη	ii
Εισαγωγή	1

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

Διαμόρφωση και Λειτουργικά Χαρακτηριστικά Ηλεκτρικού Κινητήρα Επαγωγής	2
1.1 Ηλεκτρική ενέργεια και επαγωγικές μηχανές	2
1.2 Ιστορικά στοιχεία	4
1.3 Δομή ηλεκτρικών μηχανών επαγωγής	7
1.3.1 Κατασκευαστικά στοιχεία	7
1.3.2 Τυλίγματα δρομέα	9
1.4 Βασικές έννοιες στους επαγωγικούς κινητήρες	11
1.4.1 Η ανάπτυξη της επαγόμενης ροπής στους επαγωγικούς κινητήρες	11
1.4.2 Η έννοια της ολίσθησης του δρομέα	13
1.4.3 Η ηλεκτρική συχνότητα στο δρομέα	14
1.5 Το ισοδύναμο κύκλωμα του επαγωγικού κινητήρα	15
1.5.1 Το ισοδύναμο κύκλωμα του μετασχηματιστή στο ισοδύναμο Κύκλωμα του επαγωγικού κινητήρα	15
1.5.2 Ισοδύναμο κύκλωμα δρομέα του επαγωγικού κινητήρα	17
1.5.3 Το τελικό ισοδύναμο κύκλωμα	19
1.6 Ισχύς και ροπή στους επαγωγικούς κινητήρες	21
1.6.1 Απώλειες και διάγραμμα ροής ισχύος	21
1.6.2 Ισχύς και ροπή επαγωγικού κινητήρα	22
1.6.3 Χαρακτηριστική ροπής-στροφών	24
1.7 Κατάταξη κινητήρων επαγωγής	28

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

Σχεδιασμός Στάτη και Δρομέα	31
2.1 Διαστασιολόγηση κινητήρα	32
2.2 Τυλίγματα στάτη	35
2.3 Υπολογισμός Διαστάσεων των αυλακιών του στάτη	40
2.4 Δρομέας	45
2.4.1 Υπολογισμός των διαστάσεων των αγωγών του δρομέα	47
2.4.2 Υπολογισμός της διαμέτρου του άξονα	48
2.5 Υπολογισμός ρεύματος μαγνήτισης	49

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

Υπολογισμός Ισοδύναμου Κυκλώματος και Χαρακτηριστικών Λειτουργίας Κινητήρα	52
3.1 Υπολογισμός ισοδύναμου κυκλώματος	52
3.2 Απώλειες και βαθμός απόδοσης	59
3.3 Υπολογισμός χαρακτηριστικών λειτουργίας	60
Συμπεράσματα	65
Βιβλιογραφία	66

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στο εισαγωγικό αυτό κεφάλαιο γίνεται αναφορά στους επαγωγικούς κινητήρες και πιο συγκεκριμένα στους ασύγχρονους επαγωγικούς κινητήρες βραχυκυκλωμένου δρομέα. Αρχικά αναφέρονται κάποιες γενικές πληροφορίες για τους επαγωγικούς κινητήρες. Επίσης γίνεται μια ιστορική προσέγγιση των ασύγχρονων επαγωγικών κινητήρων. Στη συνέχεια επιχειρείται μια περιγραφή του κινητήρα (στάτης, δρομέας) και η επεξήγηση της αρχής λειτουργίας του. Εισάγεται το ισοδύναμο κύκλωμα και γίνεται η ανάλυση του. Αναλύονται επίσης η ισχύς και η ροπή και οι απώλειες αυτού του είδους κινητήρων. Τέλος, αναφέρονται οι κλάσεις σχεδίασης ενός επαγωγικού κινητήρα κατά NEMA.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΚΑΙ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΚΙΝΗΤΗΡΑ ΕΠΑΓΩΓΗΣ

1.1 Ηλεκτρική Ενέργεια και Επαγωγικές Μηχανές

Η ευημερία μιας κοινωνίας σχετίζεται άμεσα με την ικανότητα της να παράγει αγαθά και υπηρεσίες. Η παραγωγή αγαθών και υπηρεσιών σχετίζεται έντονα με τη χρήση της ενέργειας με έξυπνο τρόπο.

Η ενέργεια διατίθεται ως επί το πλείστον σε θερμική, μηχανική και ηλεκτρική. Η ηλεκτρική ενέργεια μετράται σε kWh και αντιπροσωπεύει με ανοδική τάση μάλιστα, περισσότερο από 30% της συνολικής χρησιμοποιούμενης ενέργειας. Ένα μέρος της ηλεκτρικής ενέργειας χρησιμοποιείται άμεσα για την παραγωγή θερμότητας ή για φωτισμό. Το μεγαλύτερο μέρος της όμως μετατρέπεται σε μηχανική ενέργεια με τη βοήθεια ηλεκτρικών κινητήρων.

Μεταξύ των ηλεκτρικών κινητήρων, οι κινητήρες επαγωγής είναι αυτοί που χρησιμοποιούνται περισσότερο, τόσο σε οικιακές όσο και στη βιομηχανία. Αυτό συμβαίνει διότι παραδοσιακά οι βιομηχανικοί κινητήρες επαγωγής τροφοδοτούνται με τριφασική εναλλασσόμενη τάση από το δίκτυο μέσω ηλεκτρομαγνητικών διακοπών ισχύος και διατάξεων προστασίας. Επιπλέον, κινητήρες επαγωγής μικρής ισχύος, που συναντώνται σε οικιακές συσκευές, τροφοδοτούνται απευθείας από το μονοφασικό δίκτυο. Ακόμη, είναι κατασκευαστικά απλοί και ανθεκτικοί, εξασφαλίζοντας έτσι χαμηλό κόστος κατασκευής και συντήρησης. Τα βολικά αυτά χαρακτηριστικά των κινητήρων επαγωγής συνέβαλαν στην καθιέρωση τους. Σήμερα, στις ανεπτυγμένες χώρες αντιστοιχούν περισσότερο από 3kw ηλεκτρικών κινητήρων ανά άτομο και η πλειονότητά τους είναι κινητήρες επαγωγής.

Παρά το γεγονός ότι ακόμη οι περισσότεροι κινητήρες επαγωγής τροφοδοτούνται απευθείας από το δίκτυο, περίπου το 10% πλέον χρησιμοποιεί μετατροπείς ηλεκτρονικών

ισχύος τον έλεγχο της ταχύτητας. Κινητήρες επαγωγής με ρυθμιστές ταχύτητας χρησιμοποιούνται κυρίως στις μεταφορές, σε αντλίες, συμπιεστές, σε ανεμιστήρες, στη ρομποτική, σε υβριδικά ή ηλεκτρικά οχήματα, σε πλυντήρια κτλ. Προβλέπεται ότι στην επόμενη δεκαετία, το 50% των κινητήρων επαγωγής θα οδηγείται κατά το πλείστον από ρυθμιστές ταχύτητας (inverters). Το ποσοστό αυτό θα φτάσει στο 60-70% στις νέες ανεπτυγμένες αγορές. Η βαθμονόμηση των επαγωγικών κινητήρων διαφέρει από μερικές δεκάδες watt ως και 33120 kw (45000 HP).

Η κατανομή των βαθμολογιών με ρυθμιστές ταχύτητας δείχνονται στο παρακάτω πίνακα.

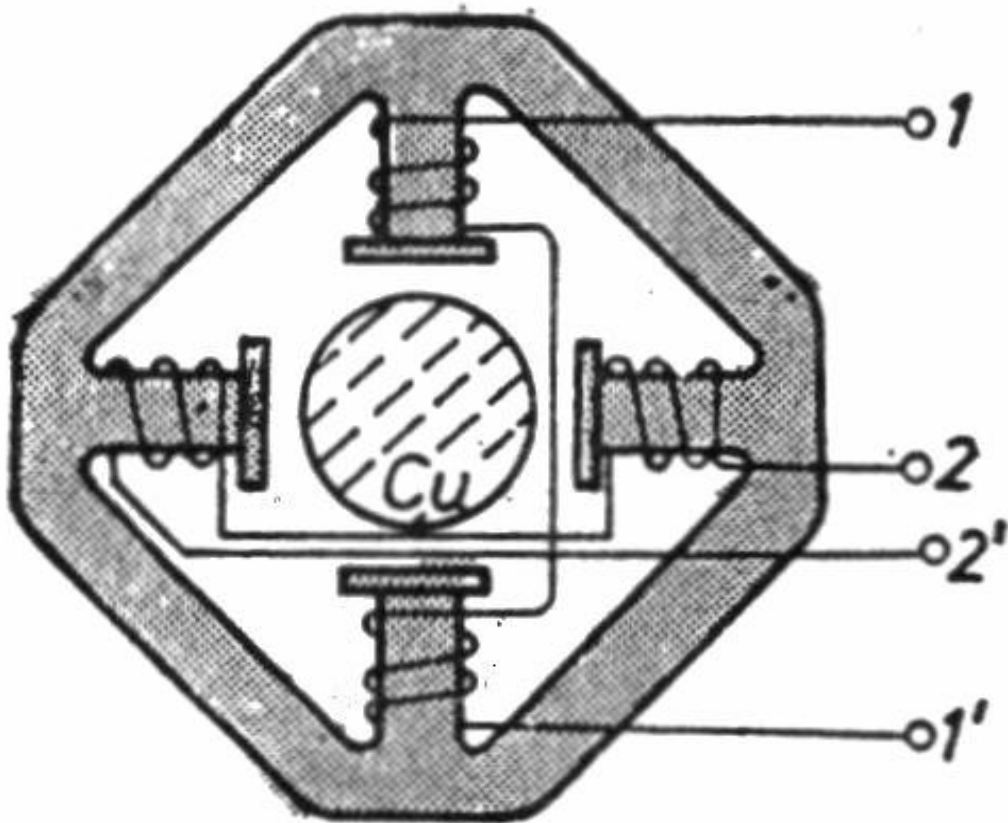
Power(Kw)	1-4	5-40	40-200	200-600	>600
Percentage	21%	26%	26%	16%	11%

Έξυπνη χρήση της ενέργειας σημαίνει υψηλότερη παραγωγικότητα με χαμηλότερες απώλειες και μετριασμένο κόστος. Μειωμένες απώλειες οδηγούν σε μικρότερη περιβαλλοντική, θερμική και χημική επιβάρυνση τόσο στο χώρο που ο κινητήρας δουλεύει, όσο και στη μονάδα παραγωγής της απαιτούμενης ηλεκτρικής ενέργειας. Η μεταβαλλόμενη ταχύτητα μέσω μεταβλητής συχνότητας είναι υψίστης σημασίας για την επίτευξη τέτοιων στόχων. Ωστόσο, η χρήση τέτοιων μετατροπών ταχύτητας οδηγούν στη δημιουργία ανώτερων αρμονικών και κατά συνέπεια η είσοδός τους στο δίκτυο ηλεκτροδότησης με αποτέλεσμα την αύξηση των ηλεκτρομαγνητικών ρύπων στο περιβάλλον. Έτσι, η ποιότητα της ισχύος και η ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα (EMI) είναι νέοι περιορισμοί στην ανάπτυξη μετατροπών για την οδήγηση κινητήρων επαγωγής.

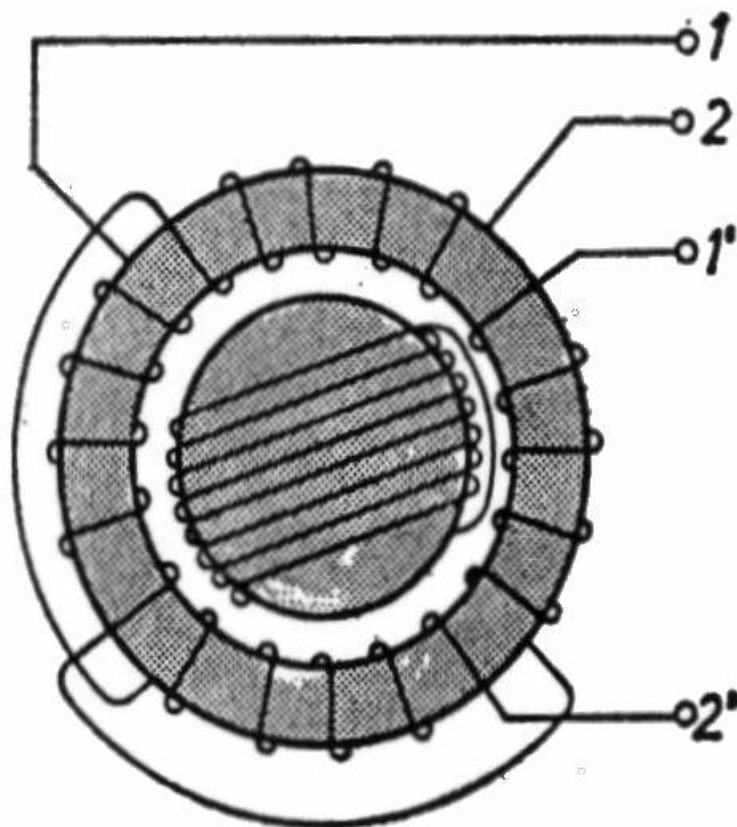
Ο ψηφιακός έλεγχος είναι πλέον δεδομένος στους μετατροπείς, ενώ στο μέλλον θα μπορούν να ελέγχονται και να επισκευάζονται μέσω ίντερνετ. Ακόμη, νέες ευκαιρίες για εφαρμογές αφθονούν: από ψηφιακές συσκευές και υβριδικά ή ηλεκτρικά οχήματα μέχρι και περισσότερο ηλεκτρικά αεροσκάφη.

1.2 ΙΣΤΟΡΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

Ο Faraday ανακάλυψε το νόμο του ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής περίπου το 1831 και ο Maxwell διατύπωσε τις εξισώσεις του ηλεκτρισμού (εξισώσεις Maxwell) το 1860. Οι συνθήκες ήταν ώριμες για την εφεύρεση της επαγωγικής μηχανής, που οφείλεται σε δύο ανθρώπους που δούλεψαν παράλληλα. Αυτοί είναι ο Galileo Ferraris (1885) και ο Nicola Tesla (1886). Οι μηχανές επαγωγής τους φαίνονται στα παρακάτω σχήματα.



Σχήμα 1.1 Η επαγωγική μηχανή του Galileo Ferraris



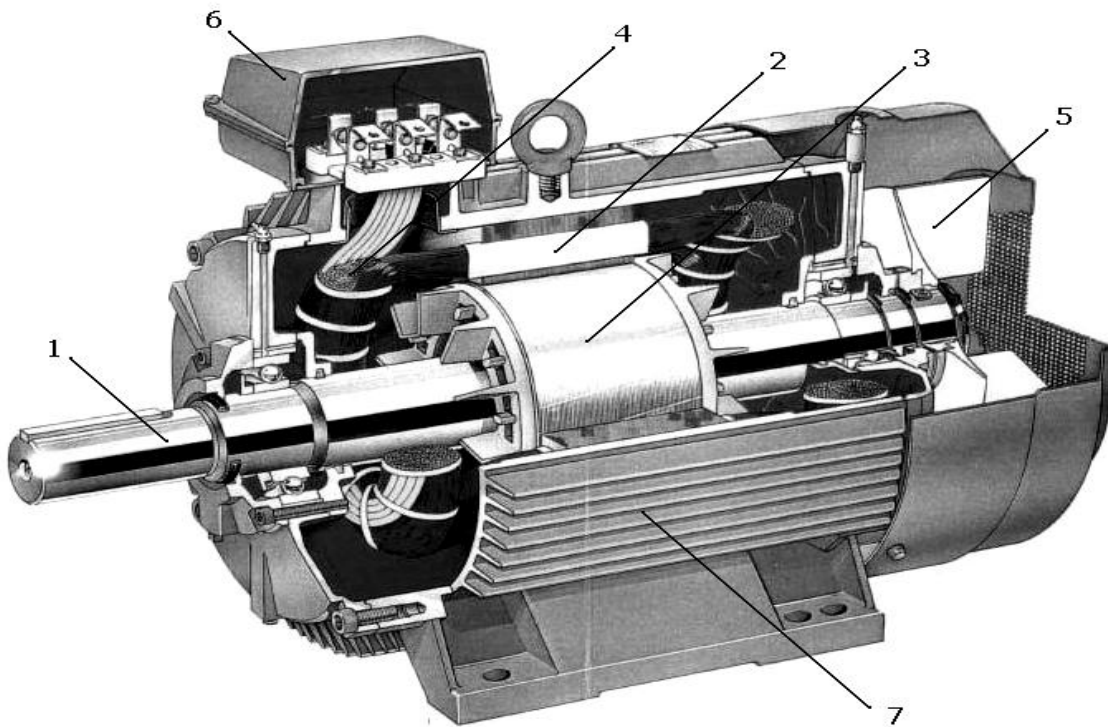
Σχήμα 1.2 Η επαγωγική μηχανή του Nicola Tesla

Και οι δύο μηχανές τροφοδοτούνται από πηγή εναλλασσόμενης τάσης δύο φάσεων και γι' αυτό υπάρχουν τα διφασικά τυλίγματα (1-1' και 2-2') στο σιδηρομαγνητικό πυρήνα του στάτη.

Στην κατασκευή του Ferraris ο δρομέας είναι κατασκευασμένος από έναν χάλκινο κύλινδρο, ενώ του Tesla ο δρομέας είναι σιδηρομαγνητικός κύλινδρος με βραχυκυκλωμένο τύλιγμα. Αν και οι σύγχρονοι κινητήρες επαγωγής έχουν πιο περίτεχνη τοπολογία (Σχήμα 1.3) και η απόδοσή τους είναι πολύ καλύτερη, η βασική αρχή είναι κατά βάση η ίδια.

Δηλαδή, ένα πολυφασικό τύλιγμα στο στάτη δημιουργεί στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο το οποίο επάγει τάση στο δρομέα και λόγω του ότι είναι βραχυκυκλωμένος, δημιουργούνται ρεύματα που κυκλοφορούν στο δρομέα και κατά συνέπεια έχουμε δημιουργία δυνάμεων Laplace που τείνουν να περιστρέψουν το δρομέα. Αν αυτή η ροπή σε μηδενική ταχύτητα δρομέα είναι μη μηδενική, ο κινητήρας μπορεί να ξεκινήσει αυτόνομα. Το τριφασικό εναλλασσόμενο δίκτυο, ικανό για τη μεταφορά ενέργειας σε μεγάλες αποστάσεις ώστε να τροφοδοτεί κινητήρες επαγωγής και άλλους καταναλωτές, προτάθηκε από τον Dolivo Dobronosky γύρω στα 1880.

Το 1889, ο Dolivo Dobronosky εφηύρε τον κινητήρα επαγωγής με τυλιγμένο δρομέα και ακόλουθα τον δρομέα κλωβού με μια τοπολογία πολύ παρόμοια με αυτή που χρησιμοποιείται σήμερα. Επίσης εφηύρε το δρομέα διπλού κλωβού.



Σχήμα 1.3 Ένας τριφασικός επαγωγικός κινητήρας (ABB)

Γύρω στο 1990 ο κινητήρας επαγωγής ήταν έτοιμος για ευρεία βιομηχανική χρήση. Δεν αποτελεί έκπληξη λοιπόν ότι πριν το 1910 οι αμαξοστοιχίες που κινούνταν με κινητήρες επαγωγής έφταναν τα 200 Km/h.

Ωστόσο, τουλάχιστον για τις μεταφορές, οι κινητήρες συνεχούς ρεύματος κατέλαβαν το μεγαλύτερο μερίδιο μέχρι το 1985, οπότε και αναπτύχθηκαν inverter τεχνολογίας IGBT PWM (παλμοκωδική διαμόρφωση με χρήση διακοπών IGBT). Αυτό επέτρεψε την κατασκευή μετατροπέων που οδήγησαν στη δυναμική επιστροφή των κινητήρων επαγωγής σε εφαρμογές μεταβαλλόμενης ταχύτητας σε όλη τη βιομηχανία.

Κυρίως λόγω των ηλεκτρονικών ισχύος και του ψηφιακού ελέγχου, ο κινητήρας επαγωγής, παρά την πολύχρονη παρουσία του στη βιομηχανία, μπορεί να θεωρηθεί αντικείμενο υψηλής και σύγχρονης τεχνολογίας με ευρεία χρήση στην ηλεκτροκίνηση. Πιο κάτω υπάρχει μια λίστα γεγονότων της ιστορίας εξέλιξης του επαγωγικού κινητήρα.

- Όλο και καλύτερα αναλυτικά μοντέλα για σταθερή κατάσταση και σχεδιαστικούς σκοπούς
- Ολοένα και καλύτερα μαγνητικά και μονωτικά υλικά και συστήματα ψύξης
- Σχεδιαστική βελτιστοποίηση και στοχαστικοί μέθοδοι
- Μετατροπείς IGBT PWM με χαμηλές απώλειες και υψηλότερη πυκνότητα ισχύος (KW/m^3) για μειωμένο κόστος.
- Ανάπτυξη επαγωγικών κινητήρων για υπε-υψηλές ταχύτητες και μεγάλης ισχύος.
- Νέοι μέθοδοι για τον έλεγχο και τη συντήρηση των επαγωγικών μηχανών
- Ολοκληρωμένοι επαγωγικοί κινητήρες: επαγωγικοί κινητήρες με ενσωματωμένο PWM μετατροπέα

1.3 ΔΟΜΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ ΕΠΑΓΩΓΗΣ

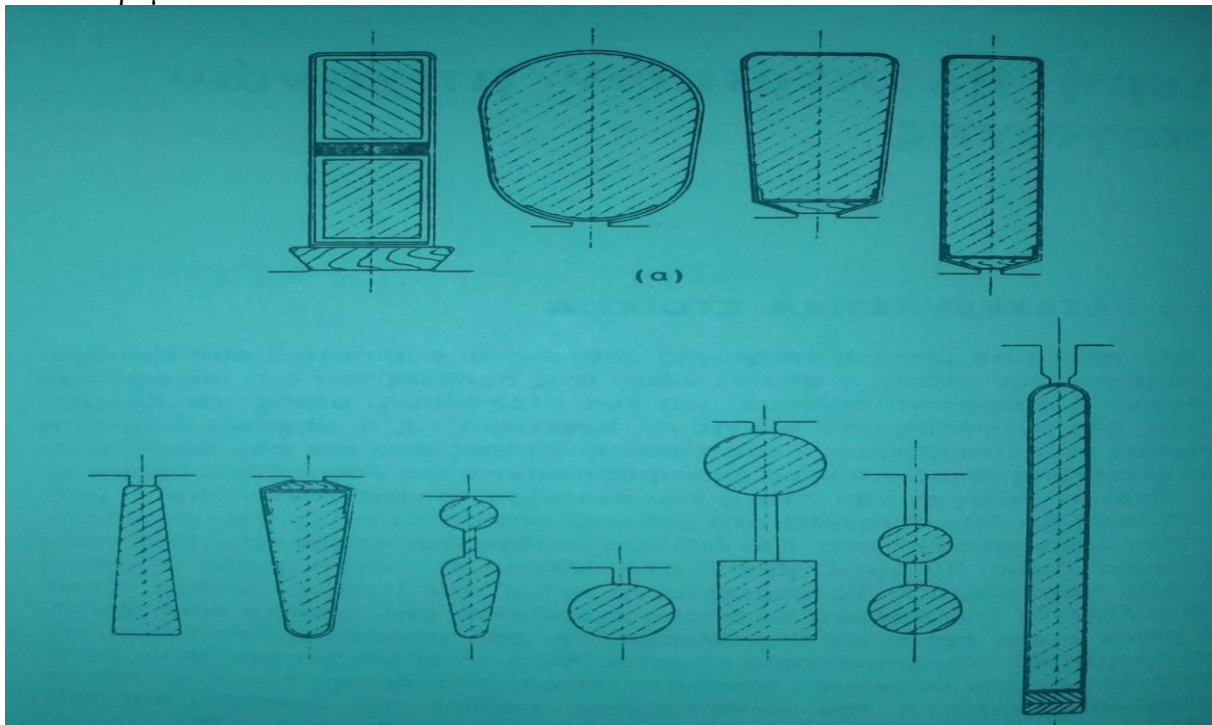
1.3.1 ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

Μια ηλεκτρική μηχανή επαγωγής αποτελείται ουσιαστικά από ένα σταθερό μέρος, τον στάτη, ο οποίος φέρει στα αυλάκια του ένα μονοφασικό ή τριφασικό τύλιγμα (στην περίπτωση μας τριφασικό), και ένα στρεφόμενο μέρος τον δρομέα.

Όταν το τύλιγμα του στάτη τροφοδοτείται από συμμετρική πηγή θα δημιουργηθεί στο διάκενο μαγνητικό πεδίο που στρέφεται με την σύγχρονη ταχύτητα. Το στρεφόμενο πεδίο του διακένου επάγει τάσεις στα τυλίγματα του δρομέα (στην περίπτωση μας έχουμε ράβδους και όχι τύλιγμα, για λόγους ευκολίας το ονομάζουμε τύλιγμα) το οποίο αποτελείται από κλειστά κυκλώματα ή είναι βραχυκυκλωμένο. Οι τάσεις αυτές έχουν ως αποτέλεσμα τη ροή ρευμάτων στα τυλίγματα του δρομέα και την δημιουργία κύματος ΜΕΔ το οποίο στρέφεται ως προς τον στάτη με την σύγχρονη ταχύτητα. Η αλληλεπίδραση των δυο πεδίων στάτη και δρομέα προκαλεί την ροπή της μηχανής επαγωγής.

Η πολυφασική μηχανή επαγωγής, όταν ο δρομέας μένει ακίνητος, μπορεί να θεωρηθεί σαν μετασχηματιστής στον οποίο το παλλόμενο πεδίο έχει αντικατασταθεί από στρεφόμενο πεδίο. Η μόνη διαφορά είναι η ύπαρξη του διακένου στη μηχανή επαγωγής η οποία γι' αυτό απαιτεί πολύ μεγαλύτερο ρεύμα διεγέρσεως που φθάνει το 40% του ονομαστικού ρεύματος αυτής.

Για τον περιορισμό της συνιστάμενης ΜΕΔ του διακένου που είναι αναγκαία για το πεδίο του διακένου λαμβάνονται μέτρα ως εξής. Πρώτο, τα αυλάκια του στάτη διαμορφώνονται μισόκλειστα ενώ του δρομέα μισόκλειστα ή τελείως κλειστά. Δεύτερο το διάκενο μεταξύ στάτη και δρομέα γίνεται μικρό. Παρακάτω δείχνονται κάποιες μορφές αυλακιών του στάτη και του δρομέα.



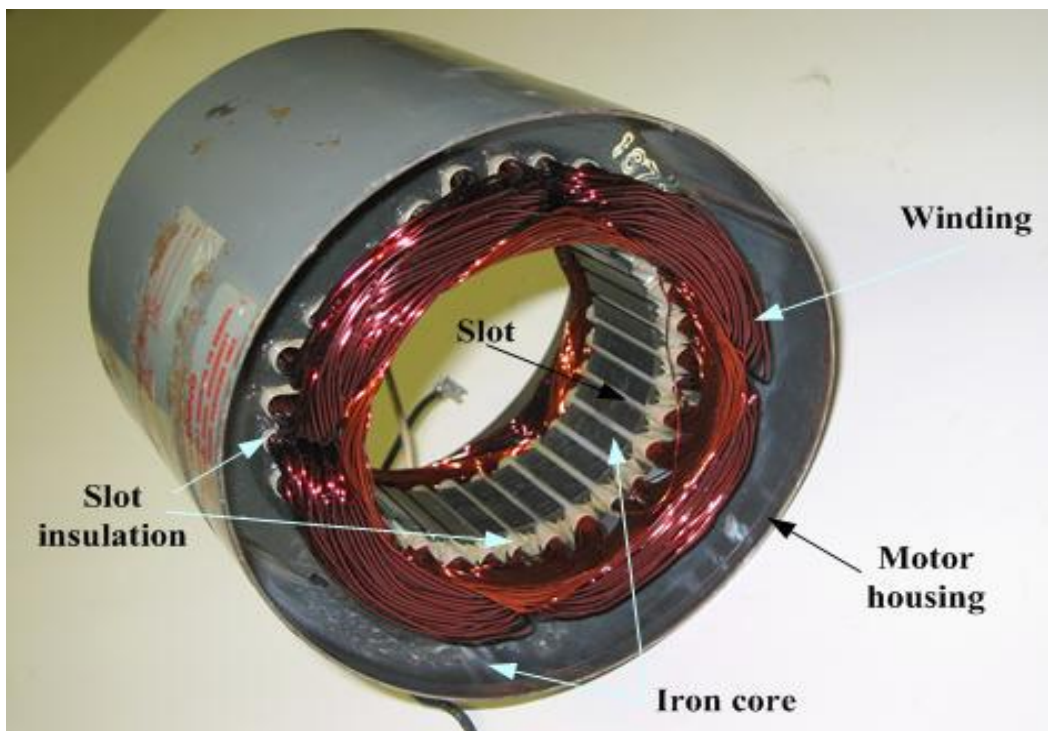
Σχήμα 1.4 Πάνω μέρος εικόνας (στατης), Κάτω μέρος εικόνας (δρομέας)

Πιο σπάνια χρησιμοποιούνται ανοιχτά αυλάκια. Από κατασκευαστική άποψη του τυλίγματος τα ανοιχτά αυλάκια είναι πιο άνετα. Εν τούτοις χρησιμοποιούνται κατά το πλείστο μισόκλειστα αυλάκια διότι τα ανοιχτά παρουσιάζουν πολλά μειονεκτήματα. Επειδή το διάκενο στις μηχανές επαγωγής είναι μικρό, τα ανοιχτά αυλάκια θα απαιτούσαν ένα υψηλό ρεύμα μαγνητίσεως. Επίσης προκαλούνται ισχυρές διακυμάνσεις του πεδίου του στάτη (αρμονικές χώρου) οι οποίες έχουν ως αποτέλεσμα μεγάλες απώλειες σιδήρου στον δρομέα, ιδιαίτερα με τύλιγμα κλωβού. Τέλος παράγονται ανεπιθύμητες αρμονικές ροπές. Για τους λόγους αυτούς, ανοιχτά αυλάκια στον στάτη χρησιμοποιούνται μόνο σε μηχανές επαγωγής υψηλής τάσεως.

Ο πυρήνας του στάτη συντίθεται από ελάσματα χάλυβος πάχους συνήθως 0,3 έως 0,6mm που φέρουν μόνωση από επικάλυψη με βερνίκι ή με ένα οξείδιο. Τα ελάσματα συσφίγγονται με φλάντσες. Με όμοια ελάσματα κατασκευάζεται και το σώμα του δρομέα. Λόγω της χαμηλής συχνότητας στο δρομέα μπορούν να χρησιμοποιηθούν παχύτερα ελάσματα χωρίς υπερβολική αύξηση των απωλειών σιδήρου.

Τα τυλίγματα του στάτη εισάγονται στα αυλάκια είτε ως τυλιγμένα πηνία είτε τυλίγονται μέσα στα αυλάκια είτε ως προκατασκευασμένα πηνία. Τα τυλιγμένα πηνία χρησιμοποιούνται για μηχανές μικρής ή πολύ μικρής ισχύος και για στρόγγυλους αγωγούς διαμέτρου μέχρι 2,5mm περίπου. Τα πηνία τυλίγονται έξω από τη μηχανή σε καλούπια και μετά εισάγονται στα μισόκλειστα αυλάκια από τη σχισμή τους. Στη δεύτερη περίπτωση τα πηνία τυλίγονται μέσα στα μισόκλειστα αυλάκια πάλι από την σχισμή αφού προηγουμένως τοποθετηθεί σε αυτές η μόνωση αύλακος. Τέλος, τα προκατασκευασμένα και μονωμένα πηνία χρησιμοποιούνται για μηχανές υψηλής τάσεως οι οποίες έχουν ανοιχτά αυλάκια. Εφ' όσον τα αυλάκια είναι μισόκλειστα τότε τα πηνία προκατασκευάζονται μονωμένα αλλά χωρίς τη μια κεφαλή(ακραία σύνδεση). Αφού το πηνίο αυτό τοποθετηθεί στη θέση του η κεφαλή που λείπει συγκολλάται στη θέση της.

Παρακάτω δείχνεται εικόνα από το στατό μέρος τριφασικού ασύγχρονου κινητήρα βραχυκυκλωμένου δρομέα.

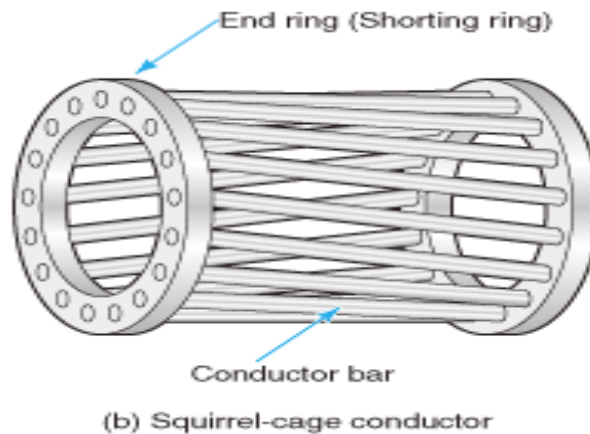


Σχήμα 1.5 Εικόνα στάτη ασύγχρονου τριφασικού κινητήρα βραχυκυκλωμένου δρομέα

1.3.2 ΤΥΛΙΓΜΑΤΑ ΔΡΟΜΕΑ

Ο δρομέας των κινητήρων βραχυκυκλωμένου δρομέα φέρει στερεωμένο επάνω στον άξονα τον πυρήνα που έχει σχήμα κυλινδρικού τυμπάνου και ο οποίος αποτελείται από πολλά μαγνητικά ελάσματα. Τα ελάσματα αυτά έχουν οδοντώσεις και συνεπώς και τα αυλάκια έχουν επίδραση στα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά των κινητήρων. Συνήθως τις διακρίνουμε σε τρεις κατηγορίες: τις **απλές**, τις **βαθιές**, και τις **διπλές οδοντώσεις**.

Μέσα στα αυλάκια του δρομέα τοποθετούνται ράβδοι από χαλκό ή ορείχαλκο χωρίς μόνωση. Οι ράβδοι συγκολλούνται στα δυο άκρα τους σε δυο δαχτυλίδια βραχυκυκλώσεως. Έτσι σχηματίζεται το τύλιγμα κλωβού, όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 1.6 Τύλιγμα Κλωβού

Στους μικρούς κινητήρες το τύλιγμα κλωβού κατασκευάζεται συνήθως από καθαρό αλουμίνιο, το οποίο χύνεται με πίεση απευθείας μέσα στα αυλάκια. Στις περιπτώσεις αυτές τα στεφάνια βραχυκυκλώσεως σχηματίζουν και τα πτερύγια του ανεμιστήρα.

Όταν στον πυρήνα του δρομέα έχουμε διπλές οδοντώσεις, τότε σχηματίζονται δυο τυλίγματα κλωβού, ένα εξωτερικό και ένα εσωτερικό, τα οποία είναι ανεξάρτητα μεταξύ τους. Οι κινητήρες αυτοί ονομάζονται διπλού κλωβού.

Για την ελάττωση του μαγνητικού θορύβου των ασύγχρονων τριφασικών κινητήρων, ο αριθμός των οδοντώσεων του δρομέα πρέπει να είναι διαφορετικός από τον αριθμό των οδοντώσεων του στάτη. Το ίδιο πετυχαίνεται και αν τα αυλάκια του δρομέα δεν είναι απόλυτα παράλληλα με τον άξονα, αλλά έχουν μια μικρή κλίση, όπως φαίνεται και στο σχήμα 1.6



Σχήμα 1.7 Δρομέας τύπου κλωβού (εικόνα από ATK Κλωβού- ΔΕΥΑΜΒ)

Στην παραπάνω φωτογραφία μπορούμε να διακρίνουμε όσα αναφέρθηκαν για το δρομέα κλωβού, όπως οι μπάρες που έχουν μια κλίση ή τα δαχτυλίδια βραχυκύκλωσης.

1.4 ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ ΣΤΟΥΣ ΕΠΑΓΩΓΙΚΟΥΣ ΚΙΝΗΤΗΡΕΣ

1.4.1 Η Ανάπτυξη της επαγόμενης ροπής στους επαγωγικούς κινητήρες

Στο σχήμα 1.8 δείχνει έναν επαγωγικό κινητήρα βραχυκυκλωμένου δρομέα. Στο στάτη της μηχανής εφαρμόζεται τριφασικό σύστημα τάσεων με αποτέλεσμα οι αγωγοί του στάτη να διαρρέονται από τριφασικό σύστημα ρευμάτων. Αυτά τα ρεύματα παράγουν το πεδίο του στάτη B_s που περιστρέφεται με ανθωρολογιακή φορά και με ταχύτητα

$$n_{sync} = \frac{120 * f_e}{P} \quad (1.1)$$

Όπου f_e η συχνότητα του συστήματος σε Hz και P ο αριθμός των πόλων της μηχανής. Το μαγνητικό πεδίο B_s καθώς διέρχεται πάνω από τους αγωγούς του δρομέα επάγει τάση στα άκρα τους.

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

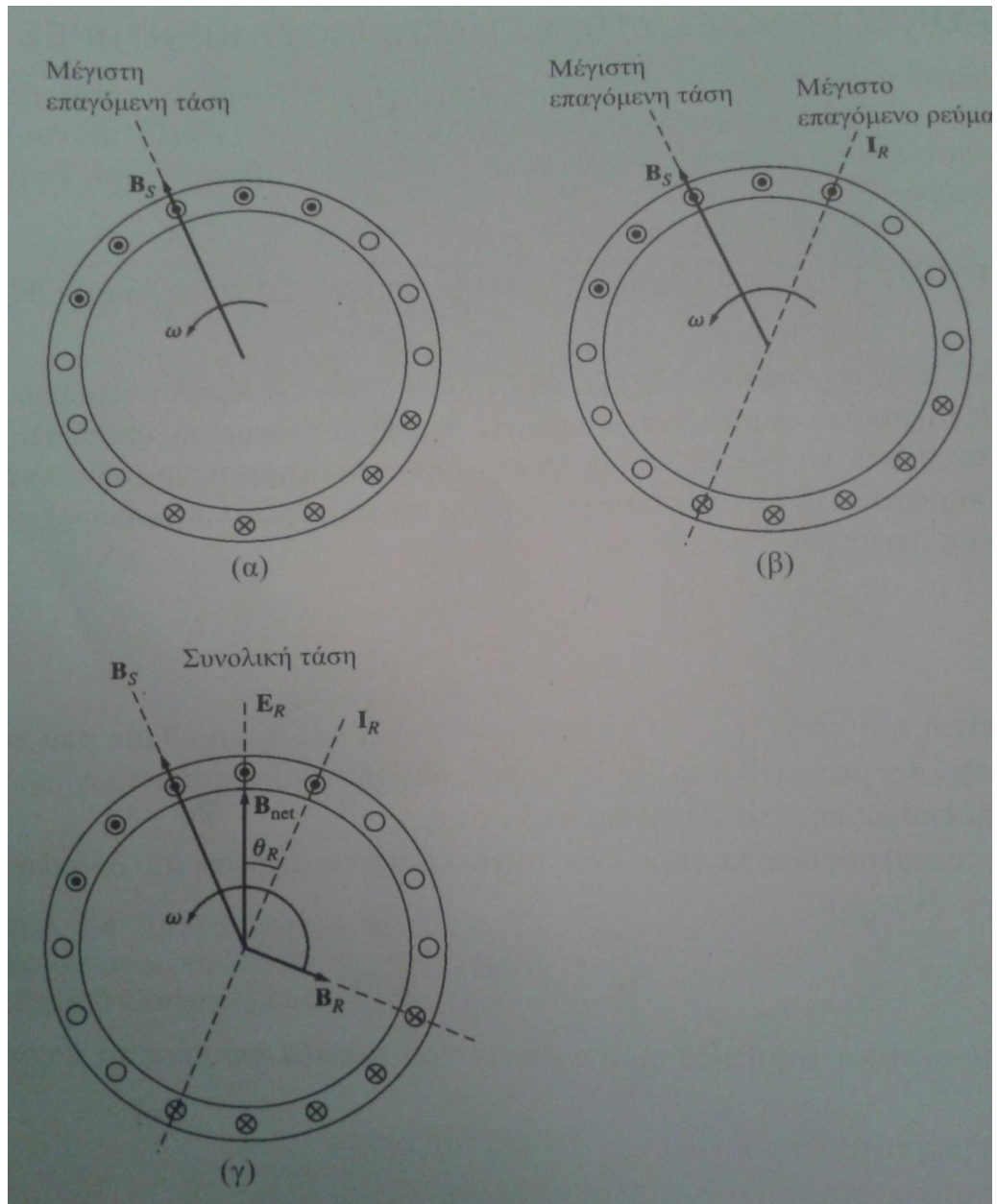
$$e_{ind} = (v \times B) \cdot l \quad (1.2)$$

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 προκαλείται από τη σχετική κίνηση του δρομέα ως προς το μαγνητικό πεδίο του στάτη. Η σχετική ταχύτητα των αγωγών του επάνω μέρους του δρομέα ως προς το μαγνητικό πεδίο έχει φορά προς τα δεξιά κι έτσι η τάση που επάγεται στα άκρα των αγωγών αυτών έχει φορά προς το έξω μέρος της σελίδας. Αντίθετα η τάση στους αγωγούς του κάτω μέρους του δρομέα έχει φορά προς τη σελίδα. Αυτό σημαίνει πως το ρεύμα στους πάνω αγωγούς έχει φορά από τη σελίδα προς τα έξω, ενώ στους κάτω αγωγούς έχει φορά προς τη σελίδα. Όμως, επειδή οι αγωγοί του δρομέα συνθέτουν ένα επαγωγικό φορτίο, η μέγιστη τιμή του ρεύματος του δρομέα καθυστερεί σε σχέση με τη μέγιστη τιμή της τάσης του (Σχ. 1.8β). Το ρεύμα του δρομέα προκαλεί το αντίστοιχο μαγνητικό πεδίο B_R .



Σχήμα 1.8 Η ανάπτυξη της επαγόμενης ροπής σε έναν κινητήρα επαγωγής. Α) Το στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο του στάτη B_S παράγει την τάση εξ επαγωγής στις ράβδους του δρομέα. Β) Η τάση εξ επαγωγής παράγει κάποιο ρεύμα στο δρομέα που έπεται της τάσης εξ αιτίας της αυτεπαγωγής που παρουσιάζει ο δρομέας. Γ) Το ρεύμα του δρομέα παράγει το πεδίο του δρομέα B_R που έπεται του ρεύματος κατά 90° και σε συνδυασμό με το B_{net} παράγουν την ανθρωρολογιακή ροπή στο εσωτερικό της μηχανής.

Τελικά, επειδή η επαγόμενη ροπή στη μηχανή δίνεται από τη σχέση

$$r_{ind} = k B_R \times B_S \quad (1.3)$$

Η φορά της είναι ανθρωρολογιακή. Αυτό σημαίνει ότι ο δρομέας του κινητήρα επιταχύνεται κατά την ανθρωρολογιακή φορά.

Όμως, υπάρχει κάποιο πεπερασμένο πάνω όριο για την ταχύτητα του δρομέα. Αν η ταχύτητα του δρομέα ήταν ίση με την σύγχρονη ταχύτητα, 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. Αν η τάση e_{ind} ήταν μηδενική, οι αγωγοί του δρομέα δεν θα διαρρέονταν από ρεύμα και δεν θα αναπτυσσόταν μαγνητικό πεδίο στο δρομέα. Όμως, σε αυτή την περίπτωση η επαγόμενη ροπή θα ήταν μηδενική και θα επακολουθούσε επιβράδυνση του δρομέα λόγω των απωλειών τριβής. Τελικά, ένας επαγωγικός κινητήρας μπορεί να περιστρέφεται με ταχύτητα πολύ κοντά στην σύγχρονη ταχύτητα, αλλά δεν είναι ποτέ δυνατό να περιστρέφεται με ταχύτητα ακριβώς ίδια με την σύγχρονη ταχύτητα.

1.4.2 Η Έννοια της Ολίσθησης του Δρομέα

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 βασικά από τις τάσεις και τα ρεύματα στο δρομέα, είναι λογικό να γίνεται συχνά λόγος για την παραπάνω σχετική ταχύτητα. Δυο είναι συνήθως τα μεγέθη που περιγράφουν τη σχετική κίνηση του δρομέα ως προς τα μαγνητικά πεδία. Το πρώτο απ' αυτά είναι η ταχύτητα ολίσθησης (slip speed), που ορίζεται ως η διαφορά της ταχύτητας του δρομέα από τη σύγχρονη ταχύτητα.

$$n_{slip} = n_{sync} - n_m \quad (1.4)$$

Όπου n_{slip} = η ταχύτητα ολίσθησης της μηχανής
 n_{sync} = η ταχύτητα των μαγνητικών πεδίων
 n_m = η μηχανική ταχύτητα του άξονα της μηχανής

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

$$s = \frac{n_{slip}}{n_{sync}} (\times 100\%) \quad \text{ή}$$

$$s = \frac{n_{sync} - n_m}{n_{sync}} \times 100\% \quad (1.5)$$

Σημειώνεται ότι, αν ο δρομέας της μηχανής περιστρέφεται με τη σύγχρονη ταχύτητα, είναι $s=0$, ενώ, αν δρομέας είναι ακίνητος, είναι $s=1$. Σε οποιαδήποτε άλλη περίπτωση τιμή της ολίσθησης μεταβάλλεται μεταξύ αυτών των δυο ορίων.

Ακόμη, η ταχύτητα περιστροφής του άξονα της μηχανής μπορεί να εκφραστεί μέσω της ολίσθησης και της σύγχρονης ταχύτητας.

$$n_m = (1-s)n_{sync} \quad (1.7)$$

$$\omega_m = (1-s)\omega_{sync} \quad (1.8)$$

Αυτές οι σχέσεις είναι πολύ σημαντικές κατά την εξαγωγή των εξισώσεων για την επαγόμενη ροπή και την ισχύ ενός επαγωγικού κινητήρα.

1.4.3 Η Ηλεκτρική συχνότητα στο Δρομέα

Ο επαγωγικός κινητήρας λειτουργεί με τάσεις και ρεύματα εξ επαγωγής στο δρομέα της και γι' αυτό το λόγο συχνά ονομάζεται στρεφόμενος μετασχηματιστής. Όπως σε ένα μετασχηματιστή, το πρωτεύον τύλιγμα (του στάτη) επάγει κάποια τάση στο δευτερεύον τύλιγμα (του δρομέα). Αντίθετα, όμως, απ' ότι συμβαίνει σ' ένα μετασχηματιστή, η συχνότητα του πρωτεύοντος δεν είναι απαραίτητα ίση μ' αυτή του δευτερεύοντος

Αν ο δρομέας της μηχανής είναι ακίνητος, τότε η συχνότητα του είναι ίση με τη συχνότητα του στάτη. Όμως, αν ο δρομέας κινείται με τη σύγχρονη ταχύτητα, η συχνότητα της τάσης στο δρομέα θα είναι μηδενική. Ποια θα είναι η συχνότητα στο δρομέα για οποιαδήποτε άλλη ενδιάμεση τιμή της συχνότητάς του;

Όταν $n_m=0$ r/min, η συχνότητα στο δρομέα είναι $f_r = f_e$ και η ολίσθηση $s=1$. Όταν $n_m = n_{sync}$, η συχνότητα στο δρομέα είναι $f_r = 0$ Hz και η ολίσθηση $s=0$. Για κάθε άλλη ενδιάμεση τιμή της ταχύτητας του δρομέα η συχνότητα στο δρομέα είναι ανάλογη της διαφοράς της ταχύτητας του πεδίου του στάτη n_{sync} με την ταχύτητα του δρομέα n_m . Επειδή, η ολίσθηση ορίζεται από την εξίσωση

$$s = \frac{n_{sync} - n_m}{n_{sync}} \quad (1.9)$$

Η συχνότητα στο δρομέα είναι δυνατό να γραφεί ως

$$f_r = s f_e \quad (1.10)$$

Οι διάφορες μορφές που μπορεί να πάρει η παραπάνω εξίσωση είναι μερικές φορές πολύ χρήσιμες. Μια από τις πιο συνηθισμένες εξισώσεις εξάγεται αν αντικαταστήσουμε την πιο πάνω εξίσωση της ολίσθησης στον τύπο της συχνότητας του δρομέα, οπότε, έχουμε:

$$f_r = \frac{n_{sync} - n_m}{n_{sync}} f_e \quad (1.11)$$

Αλλά $n_{sync} = 120f_e/P$, οπότε

$$f_r = \frac{P}{120} (n_{sync} - n_m) \quad (1.12)$$

1.5 ΤΟ ΙΣΟΔΥΝΑΜΟ ΚΥΚΛΩΜΑ ΤΟΥ ΕΠΑΓΩΓΙΚΟΥ ΚΙΝΗΤΗΡΑ

Η λειτουργία του κινητήρα βασίζεται στις τάσεις και τα ρεύματα που παράγονται εξ επαγωγής στο δρομέα και οφείλονται στο μαγνητικό πεδίο του στάτη. Επειδή, κατά την παραγωγή των τάσεων και των ρευμάτων ο επαγωγικός κινητήρας λειτουργεί εντελώς όμοια με έναν μετασχηματιστή, το ισοδύναμο κύκλωμα του κινητήρα θα μοιάζει αρκετά μ' αυτό του μετασχηματιστή. Ο επαγωγικός κινητήρας ονομάζεται και μηχανή απλής διέγερσης, επειδή τροφοδοτείται με ισχύ μόνο το τύλιγμα του στάτη του. Επειδή ο επαγωγικός κινητήρας δεν διαθέτει ξεχωριστό κύκλωμα διέγερσης, στο ισοδύναμο κύκλωμά του δεν υπάρχει εσωτερική πηγή τάσης, όμοια με την εσωτερική τάση E_A των σύγχρονων μηχανών.

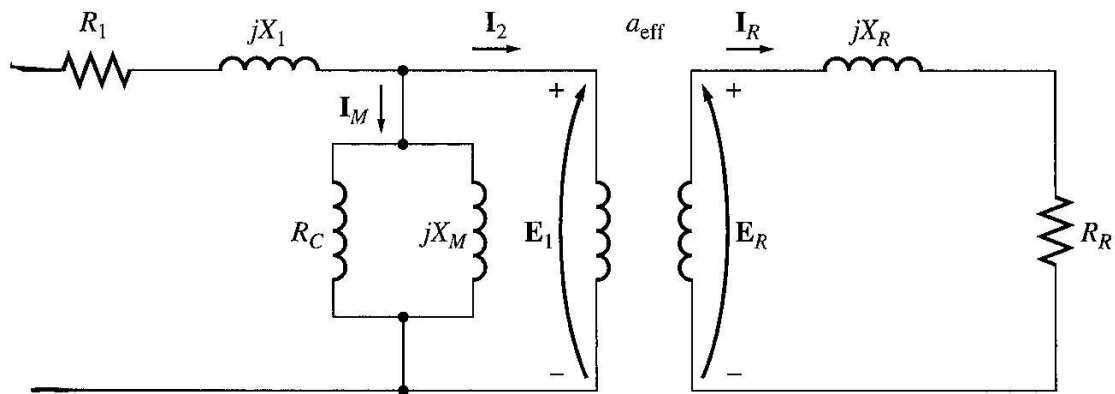
Το ισοδύναμο κύκλωμα του επαγωγικού κινητήρα είναι δυνατό να εξαχθεί, αν είναι γνωστή η λειτουργία των μετασχηματιστών και οι κανόνες που διέπουν την μεταβολή της συχνότητας στο δρομέα με τη μεταβολή της ταχύτητας περιστροφής ενός επαγωγικού κινητήρα. Εδώ, η ανάπτυξη του ισοδύναμου κυκλώματος ενός επαγωγικού κινητήρα ξεκινά με το ισοδύναμο κύκλωμα του μετασχηματιστή και κατόπιν λαμβάνεται υπόψη η μεταβολή της συχνότητας στο δρομέα και κάποια άλλα παραπλήσια φαινόμενα.

1.5.1 Το Ισοδύναμο Κύκλωμα του Μετασχηματιστή στο Ισοδύναμο Κύκλωμα του Επαγωγικού Κινητήρα

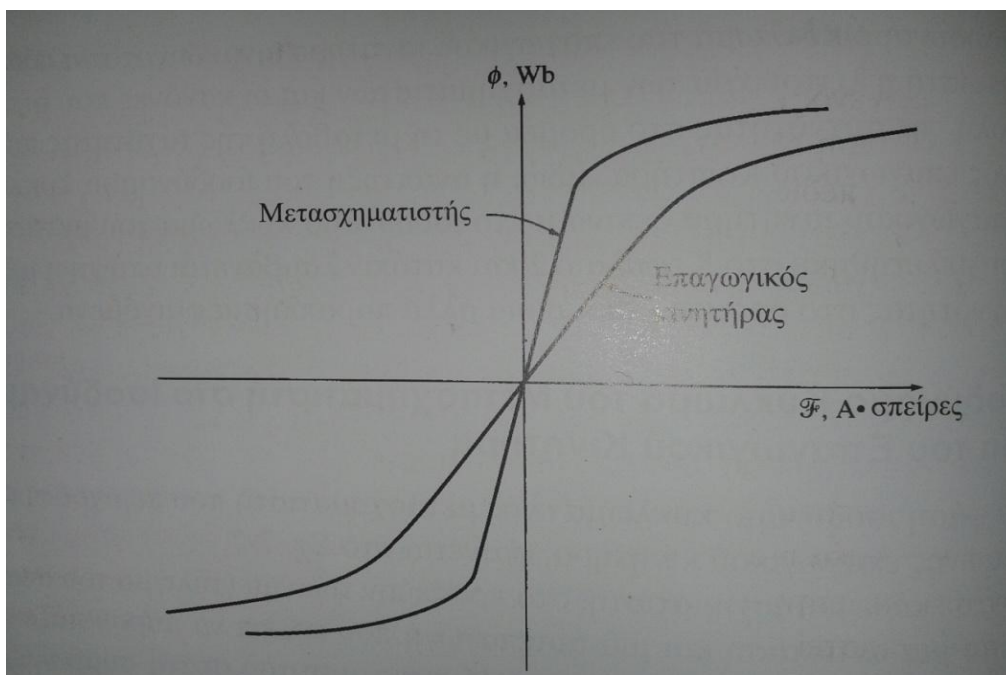
Το ανά φάση ισοδύναμο κύκλωμα ενός μετασχηματιστή που περιγράφει τη λειτουργία ενός επαγωγικού κινητήρα, φαίνεται στο Σχ.1.9 .

Όπως σε κάθε μετασχηματιστή, στο πρωτεύον τύλιγμα (τύλιγμα του στάτη) εμφανίζεται μια αντίσταση και μια αυτεπαγωγή που πρέπει να παρουσιάζονται και στο ισοδύναμο κύκλωμα της μηχανής. Η αντίσταση του στάτη συμβολίζεται με R_1 και η αντίδραση διαρροής με X_1 . Αυτές οι δυο ποσότητες εμφανίζονται στην είσοδο του ισοδύναμου κυκλώματος της μηχανής.

Επίσης, όπως σε κάθε μετασχηματιστή που διαθέτει σιδηρομαγνητικό πυρήνα, η μαγνητική ροή στο εσωτερικό της μηχανής εξαρτάται από το ολοκλήρωμα της εφαρμοζόμενης τάσης E_1 . Στο Σχ. 1.10, η γραφική παράσταση της μαγνητεγερτικής δύναμης ως προς τη μαγνητική ροή στο εσωτερικό της μηχανής (καμπύλη μαγνήτισης) συγκρίνεται με την αντίστοιχη καμπύλη ενός μετασχηματιστή ισχύος. Φαίνεται καθαρά πως η κλίση της καμπύλης μαγνήτισης του επαγωγικού κινητήρα είναι πολύ λιγότερο απότομη απ' αυτή ενός καλά σχεδιασμένου μετασχηματιστή. Αυτό συμβαίνει, επειδή στη μηχανή υπάρχει κάποιο διάκενο που αυξάνει την μαγνητική αντίσταση κατά τη διαδρομή της ροής, πράγμα που μειώνει τη σύζευξη μεταξύ πρωτεύοντος και δευτερεύοντος. Όσο μεγαλύτερη μαγνητική αντίσταση παρουσιάζει το διάκενο της μηχανής, τόσο μεγαλύτερο είναι το ρεύμα μαγνήτισης που απαιτείται για την εξασφάλιση μιας δεδομένης ροής. Έτσι η αντίσταση μαγνήτισης X_M θα έχει πολύ μικρότερη τιμή από αυτή ενός συνηθισμένου μετασχηματιστή.



Σχήμα 1.9 Το ισοδύναμο κύκλωμα μετασχηματιστή σ' έναν επαγωγικό κινητήρα, όπου ο στάτης συνδέεται με το δρομέα μέσω ενός ιδανικού μετασχηματιστή.



Σχήμα 1.10 Η καμπύλη μαγνήτισης ενός επαγωγικού κινητήρα σε σύγκριση μ' αυτή ενός μετασχηματιστή.

Η εσωτερική τάση στο στάτη της μηχανής E_1 συνδέεται με την τάση δευτερεύοντος E_R μέσω του μετασχηματιστή με κάποιον ενεργό λόγο μετασχηματισμού a_{eff} . Στον επαγωγικό κινητήρα δακτυλιοφόρου δρομέα είναι εύκολος ο προσδιορισμός του λόγου μετασχηματισμού. Αυτός είναι ίσος με τον αριθμό των αγωγών ανά φάση του στάτη προς τον αριθμό των αγωγών ανά φάση του δρομέα επί τους συντελεστές βήματος και κατανομής. Όμως, στον κινητήρα βραχυκυκλωμένου κλωβού, του οποίου ο δρομέας δεν διαθέτει

συγκεκριμένο αριθμό αγωγών, είναι δύσκολος ο ακριβής υπολογισμός του λόγου μετασχηματισμού. Πάντως, και στις δυο περιπτώσεις ορίζεται ο λόγος μετασχηματισμού του κινητήρα.

Η τάση E_R που παράγεται στο δρομέα της μηχανής παράγει με τη σειρά της κάποιο ρεύμα στο βραχυκυκλωμένο κύκλωμα του δρομέα (δευτερεύον) της μηχανής.

Οι σύνθετες αντιστάσεις πρωτεύοντος και το ρεύμα μαγνήτισης του επαγωγικού κινητήρα είναι σχεδόν όμοια μεγέθη με τα αντίστοιχα στο ισοδύναμο κύκλωμα του μετασχηματιστή. Το ισοδύναμο κύκλωμα του επαγωγικού κινητήρα διαφέρει από το ισοδύναμο κύκλωμα πρωτεύοντος του μετασχηματιστή στις επιπτώσεις που έχει η μεταβολή της συχνότητας στο δρομέα πάνω στην τάση του δρομέα E_R και στις σύνθετες αντιστάσεις R_R και jX_R .

1.5.2 Ισοδύναμο Κύκλωμα Δρομέα του Επαγωγικού Κινητήρα

Όταν στο στάτη ενός επαγωγικού κινητήρα εφαρμοστεί μια τάση, στο δρομέα του αναπτύσσεται τάση εξ επαγωγής. Γενικά, όσο μεγαλύτερη είναι η σχετική ταχύτητα μεταξύ των πεδίων του στάτη και του δρομέα, τόσο μεγαλύτερη είναι η τάση που αναπτύσσεται στο δρομέα της μηχανής. Η μεγαλύτερη σχετική κίνηση μεταξύ των δυο παραπάνω πεδίων επιτυγχάνεται, όταν ο δρομέας της μηχανής είναι ακίνητος. Σ' αυτή την περίπτωση ο δρομέας ονομάζεται ακινητοποιημένος (Blocked ή locked rotor) και η τάση που επάγεται στα τυλίγματά του είναι η μέγιστη δυνατή. Η ελάχιστη τάση (0V) επάγεται στα τυλίγματα του δρομέα, όταν αυτός περιστρέφεται με ταχύτητα ίση με την ταχύτητα περιστροφής του πεδίου του στάτη, όταν δηλαδή, δεν υφίσταται η σχετική κίνηση. Για κάθε άλλη ενδιάμεση τιμή της ταχύτητας του δρομέα η επαγόμενη τάση είναι ανάλογη της ολίσθησης. Έτσι, αν η επαγόμενη τάση, στην περίπτωση που ο κινητήρας λειτουργεί με ακινητοποιημένο δρομέα, συμβολιστεί με E_{R0} , η τιμή της επαγόμενης τάσης για οποιαδήποτε τιμή της ολίσθησης δίνεται από τη σχέση

$$E_R = sE_{R0} \quad (1.13)$$

Και η συχνότητα της επαγόμενης τάσης σε κάθε ολίσθηση δίνεται από τη σχέση

$$f_r = sf_e \quad (1.14)$$

Αυτή η τάση εμφανίζεται στο δρομέα, ο οποίος παρουσιάζει κάποια αντίσταση και κάποια αντίδραση. Η αντίσταση του δρομέα R_R είναι σταθερή (εκτός κι αν επηρεάζεται από το επιδερμικό φαινόμενο) και ανεξάρτητη της ολίσθησης. Αντίθετα, η αντίδραση του δρομέα εξαρτάται με κάποιον πιο πολύπλοκο τρόπο από την ολίσθηση.

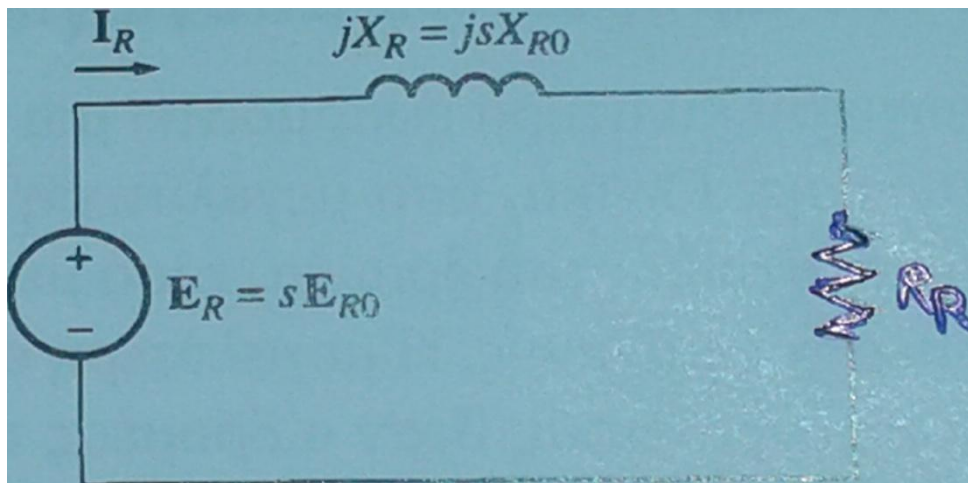
Πιο συγκεκριμένα η αντίδραση του δρομέα εξαρτάται από την αυτεπαγωγή του δρομέα και από τη συχνότητα της τάσης και του ρεύματος του δρομέα. Αν η αυτεπαγωγή του δρομέα έχει τιμή L_R , η αντίδραση του δίνεται από τη σχέση

$$X_R = \omega_r L_R = 2\pi f_r L_R \quad (1.15)$$

Όμως, από την εξίσωση της συχνότητας πιο πάνω προκύπτει $f_r = sf_e$, οπότε

$$\begin{aligned} X_R &= 2\pi sf_e L_R \\ &= s(2\pi f_e L_R) \\ &= sX_{R0} \quad (1.16) \end{aligned}$$

Όπου X_{R0} είναι η αντίδραση του ακινητοποιημένου δρομέα.



Σχήμα 1.11 Το ισοδύναμο κύκλωμα του δρομέα ενός επαγωγικού κινητήρα.

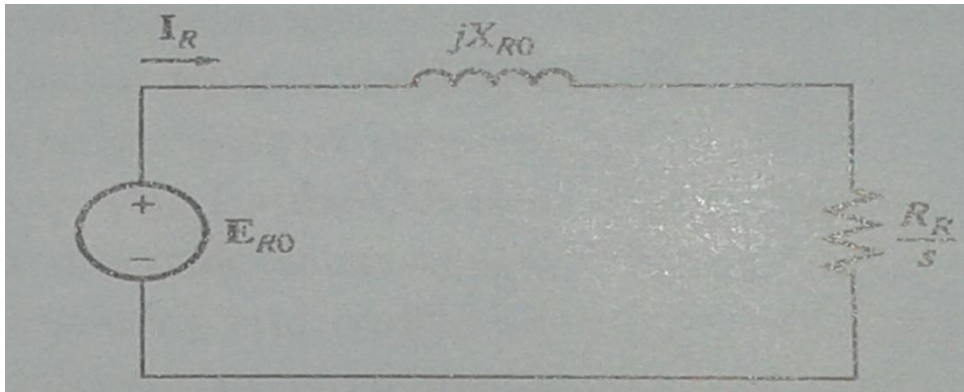
Το ισοδύναμο κύκλωμα που προκύπτει για το δρομέα της μηχανής, φαίνεται στο σχήμα 1.11. Το ρεύμα του δρομέα υπολογίζεται ως εξής

$$I_R = \frac{E_{R0}}{\frac{R_R}{s} + jX_{R0}} \quad (1.17)$$

Η παραπάνω εξίσωση, δείχνει ότι όλα τα αποτελέσματα της μεταβολής στην ταχύτητα του δρομέα είναι δυνατό να εκφραστούν με μια μεταβλητή σύνθετη αντίσταση που τροφοδοτείται από μια πηγή σταθερής τάσης E_{R0} . Σύμφωνα με αυτή τη θεώρηση, η ισοδύναμη σύνθετη αντίσταση του δρομέα θα είναι:

$$Z_{R,eq} = R_R/s + jX_{R0} \quad (1.18)$$

Και το αντίστοιχο κύκλωμα του δρομέα σε αυτή την περίπτωση φαίνεται στο Σχ. 1.12. Στο κύκλωμα αυτό η τάση του δρομέα είναι σταθερή και ίση με E_{R0} V, ενώ η σύνθετη αντίσταση $Z_{R,eq}$ περιλαμβάνει όλες τις επιπτώσεις της μεταβολής στην ολίσθηση του δρομέα.



Σχήμα 1.12 Το ισοδύναμο κύκλωμα του δρομέα, όπου όλες οι επιδράσεις της συχνότητας(ολίσθησης) έχουν συνδυαστεί στην αντίσταση R_R .

Ας σημειωθεί ότι για πολύ μικρές τιμές της ολίσθησης το ωμικό μέρος είναι $R_R/s \gg X_{R0}$, οπότε η αντίσταση υπερισχύει και το ρεύμα μεταβάλλεται γραμμικά με την ολίσθηση. Αντίθετα για μεγάλες τιμές της ολίσθησης η X_{R0} είναι πολύ μεγαλύτερο από την R_R/s , ενώ το ρεύμα του δρομέα προσεγγίζει μια σταθερή τιμή της ολίσθησης γίνεται πολύ μεγάλη.

1.5.3 Το Τελικό Ισοδύναμο Κύκλωμα

Στο τελικό ανά φάση ισοδύναμο κύκλωμα του επαγωγικού κινητήρα είναι απαραίτητη η μεταφορά του τμήματος του δρομέα στο επίπεδο τάσης του κυκλώματος του στάτη. Μετά κι απ' αυτή τη μεταφορά το ισοδύναμο κύκλωμα του επαγωγικού κινητήρα είναι πλήρες. Το κύκλωμα του δρομέα που μεταφέρεται στο κύκλωμα του στάτη είναι αυτό του σχήματος 1.13. Στη σύνθετη αντίστασή του έχουν περιληφθεί όλες οι επιπτώσεις μεταβολής της ταχύτητας.

Στον κανονικό μετασχηματιστή οι τάσεις, τα ρεύματα και οι σύνθετες αντιδράσεις του δευτερεύοντος μεταφέρονται στο πρωτεύον με τη βοήθεια του λόγου μετασχηματισμού

$$V_P = V'_S = aV_S \quad (1.19)$$

$$I_P = I'_S = \frac{I_S}{a} \quad (1.20)$$

Και

$$Z'_S = a^2 Z_S \quad (1.21)$$

Όπου στο αριστερό μέρος των εξισώσεων βρίσκονται οι τιμές της τάσης, του ρεύματος και της σύνθετης αντίστασης που αναφέρονται στο πρωτεύον τύλιγμα.

Ακριβώς οι ίδιες εξισώσεις μετασχηματισμού χρησιμοποιούνται και για το κύκλωμα του δρομέα στον επαγωγικό κινητήρα. Αν ο ενεργός λόγος μετασχηματισμού ενός επαγωγικού κινητήρα είναι a_{eff} , η μετασχηματισμένη τάση του δρομέα είναι

$$E_1 = E'_R = a_{eff} E_{R0} \quad (1.22)$$

Το ρεύμα του δρομέα γίνεται

$$I_2 = \frac{I_R}{a_{eff}} \quad (1.23)$$

Και η σύνθετη αντίσταση

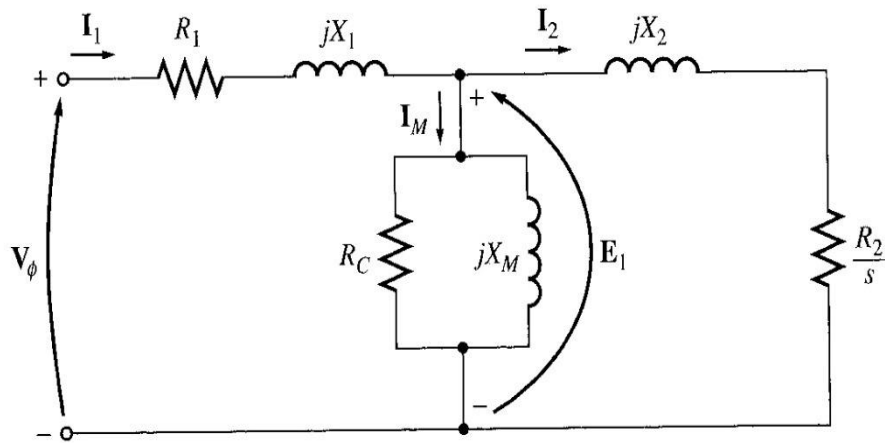
$$Z_2 = a_{eff}^2 \left(\frac{R_R}{s} + jX_{R0} \right) \quad (1.24)$$

Με τους παρακάτω ορισμούς

$$R_2 = a_{eff}^2 R_R \quad (1.25)$$

$$X_2 = a_{eff}^2 X_{R0} \quad (1.26)$$

Το τελικό ανά φάση ισοδύναμο κύκλωμα του επαγωγικού κινητήρα φαίνεται στο Σχ.1.13



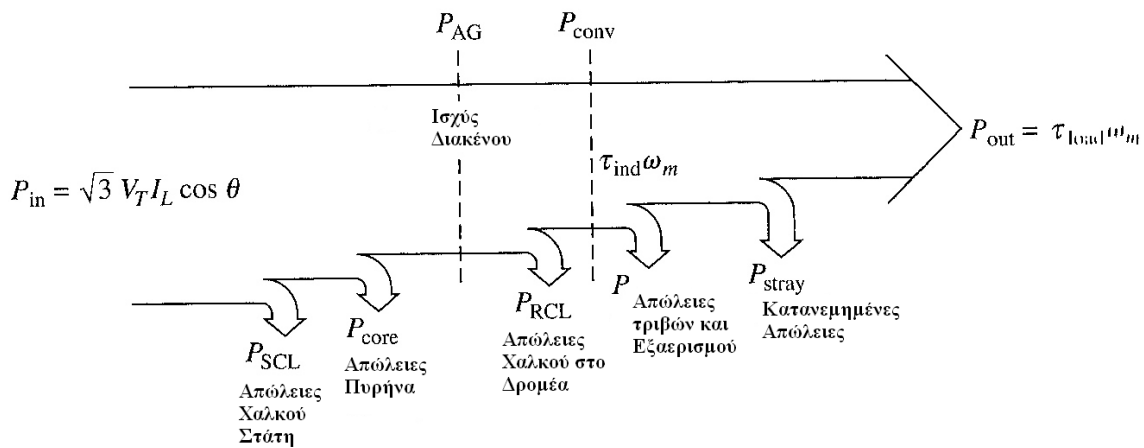
Σχήμα 1.13 Το ανά φάση ισοδύναμο κύκλωμα του επαγωγικού κινητήρα

Η αντίσταση δρομέα R_R καθώς και η αντίδραση ακινητοποιημένου δρομέα X_{R0} , προσδιορίζονται πολύ δύσκολα στον κινητήρα βραχυκυκλωμένου κλωβού. Το ίδιο συμβαίνει και με τον ενεργό λόγο μετασχηματισμού a_{eff} . Ευτυχώς όμως, είναι δυνατές κάποιες μετρήσεις που δίνουν κατευθείαν τις τιμές της ανακλώμενης σύνθετης αντίστασης και αντίδρασης R_2 και X_2 , και a_{eff} .

1.6 ΙΣΧΥΣ ΚΑΙ ΡΟΠΗ ΣΤΟΥΣ ΕΠΑΓΩΓΙΚΟΥΣ ΚΙΝΗΤΗΡΕΣ

1.6.1 Απώλειες και Διάγραμμα Ροής Ισχύος

Όπως αναφέρθηκε, ο επαγωγικός κινητήρας λειτουργεί ως στρεφόμενος μετασχηματιστής. Η είσοδος του είναι κάποιο τριφασικό σύστημα τάσεων και ρευμάτων. Σ' έναν κανονικό μετασχηματιστή η ηλεκτρική ισχύς εξόδου είναι η ισχύς στο δευτερεύον τύλιγμα. Στον επαγωγικό κινητήρα το δευτερεύον τύλιγμα (ο δρομέας) είναι βραχυκυκλωμένο κι 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 ενός επαγωγικού κινητήρα παρουσιάζεται στο διάγραμμα ροής ισχύος του Σχ.1.14.



Σχήμα 1.14 Το διάγραμμα ροής ισχύος ενός επαγωγικού κινητήρα.

Η ηλεκτρική ισχύς εισόδου στον κινητήρα P_{in} έχει τη μορφή τριφασικού συστήματος τάσεων και ρευμάτων. Το πρώτο είδος απωλειών που υπολογίζεται στον κινητήρα είναι οι ωμικές (I^2R) απώλειες στο τύλιγμα του στάτη (απώλειες χαλκού στο στάτη P_{scl}). Κατόπιν κάποιο ποσό ισχύος χάνεται με τη μορφή απωλειών υστέρησης και απωλειών εξαιτίας δινορευμάτων 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 (air gap power) P_{AG} της μηχανής. Ένα μέρος της ισχύος που μεταφέρεται στο δρομέα χάνεται με τη μορφή ωμικών απωλειών στα τυλίγματα του δρομέα (απώλειες χαλκού στο δρομέα P_{RCL}), ενώ η ισχύς που απομένει μετατρέπεται από ηλεκτρική σε μηχανική μορφή (P_{conv}). Από αυτή την ισχύ αφαιρούνται τελικά οι απώλειες τριβής και εξαερισμού $P_{F\&W}$, καθώς και οι κατανεμημένες απώλειες P_{misc} . Το υπόλοιπο ποσό της μηχανικής ισχύος αποτελεί την ισχύ εξόδου P_{out} της μηχανής.

Οι απώλειες πυρήνα δεν εμφανίζονται πάντα στο σημείο του διαγράμματος που φαίνεται στο Σχ.1.14. Η φύση των απωλειών πυρήνα κάνει κάπως αυθαίρετη την επιλογή του σημείου στο οποίο πρόκειται να ληφθούν υπόψη. Στην πραγματικότητα οι απώλειες πυρήνα ενός επαγωγικού κινητήρα προέρχονται κατά ένα μέρος από το κύκλωμα του στάτη και κατά ένα μέρος από το κύκλωμα του δρομέα. Επειδή ο κινητήρας συνήθως περιστρέφεται με ταχύτητα που είναι πολύ κοντά στη σύγχρονη, η σχετική ταχύτητα των μαγνητικών πεδίων είναι πολύ μικρή κι έτσι οι απώλειες πυρήνα στο δρομέα είναι πολύ λίγες σε σχέση με τις αντίστοιχες απώλειες στο στάτη. Έτσι, επειδή το μεγαλύτερο μέρος των απωλειών πυρήνα προέρχεται από το κύκλωμα του στάτη, οι συνολικές απώλειες πυρήνα συνήθως προστίθενται στο σημείο

του διαγράμματος που φαίνεται στο Σχ.1.14. Στο ισοδύναμο κύκλωμα του επαγωγικού κινητήρα αυτές οι απώλειες αντιστοιχίζονται στην αντίσταση R_c (ή στην αγωγιμότητα G_c). Στην περίπτωση που οι απώλειες πυρήνα δίνονται με κάποια αριθμητική τιμή (π.χ. Watts) και όχι με την τιμή κάποιου ηλεκτρικού στοιχείου, αυτές προστίθενται στις μηχανικές απώλειες της μηχανής και αφαιρούνται σ' εκείνο το σημείο του διαγράμματος ροής ισχύος που αφαιρούνται και οι μηχανικές απώλειες.

Όσο μεγαλύτερη είναι η ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα, τόσο μεγαλύτερες είναι οι απώλειες τριβών, εξερισμού και οι κατανεμημένες απώλειες. Από την άλλη όσο μεγαλύτερη είναι η ταχύτητα του κινητήρα, τόσο λιγότερες είναι οι απώλειες πυρήνα. Αυτές οι τρεις κατηγορίες απωλειών συνήθως προστίθενται μεταξύ τους και ονομάζονται απώλειες περιστροφής. Οι συνολικές απώλειες περιστροφής ενός επαγωγικού κινητήρα συνήθως θεωρούνται σταθερές καθώς μεταβάλλεται η ταχύτητα, αφού οι επιμέρους απώλειες μεταβάλλονται σε αντίθετη κατεύθυνση.

1.6.2 Ισχύς και Ροπή Επαγωγικού Κινητήρα

Το σχήμα 1.13, δείχνει το ανά φάση ισοδύναμο κύκλωμα ενός επαγωγικού κινητήρα. Η λεπτομερής μελέτη του ισοδύναμου κυκλώματος βοηθά στην εξαγωγή των εξισώσεων για την ισχύ και τη ροπή που διέπουν τη λειτουργία του επαγωγικού κινητήρα.

$$I_1 = \frac{V_\varphi}{Z_{eq}} \quad (1.27)$$

Όπου

$$Z_{eq} = R_1 + jX_1 + \frac{1}{G_c - jB_M + \frac{1}{V_2/s + jX_2}} \quad (1.28)$$

Έτσι, οι απώλειες χαλκού στο στάτη, οι απώλειες πυρήνα και οι απώλειες χαλκού στο δρομέα είναι δυνατό να υπολογιστούν. Οι απώλειες χαλκού στις τρεις φάσεις του στάτη υπολογίζονται από τη σχέση:

$$P_{SCL} = 3I_1^2 R_1 \quad (1.29)$$

Οι απώλειες πυρήνα δίνονται από τη σχέση:

$$P_{core} = 3E_1^2 G_c \quad (1.30)$$

Έτσι η ισχύς διακένου υπολογίζεται ως εξής

$$P_{AG} = P_{in} - P_{SCL} - P_{core} \quad (1.31)$$

Ας εξεταστεί τώρα, το κύκλωμα του δρομέα. Το μοναδικό στοιχείο του κυκλώματος όπου είναι δυνατό να καταναλώνεται η ισχύς διακένου είναι η αντίσταση R_2/s . Έτσι η ισχύς διακένου δίνεται από τη σχέση

$$P_{AG} = 3I_2^2 \frac{R_2}{s} \quad (1.32)$$

Οι ωμικές απώλειες στο κύκλωμα του δρομέα δίνονται από την εξίσωση

$$P_{RCL} = 3I_R^2 R_R \quad (1.33)$$

Επειδή η ισχύς στις δύο πλευρές ενός ιδανικού μετασχηματιστή είναι πάντα η ίδια, οι απώλειες χαλκού στο δρομέα εκφράζονται επίσης από τη σχέση

$$P_{RCL} = 3I_2^2 R_2 \quad (1.34)$$

Μετά την αφαίρεση των απωλειών χαλκού στο στάτη, των απωλειών πυρήνα και των απωλειών χαλκού στο δρομέα από την ισχύ εισόδου του κινητήρα, η ισχύς που απομένει μετατρέπεται από ηλεκτρική σε μηχανική μορφή. Αυτή η ισχύς, που μερικές φορές ονομάζεται αναπτυσσόμενη μηχανική ισχύς, δίνεται από τη σχέση

$$P_{conv} = P_{AG} - P_{RCL} \quad (1.35) \quad \text{ή}$$

$$P_{conv} = 3I_2^2 R_2 \left(\frac{1-s}{s} \right) \quad (1.36)$$

Από τις εξισώσεις 1.32 και 1.34, φαίνεται ότι οι απώλειες χαλκού στο δρομέα είναι ίσες με το γινόμενο της ισχύος διακένου επί την ολίσθηση

$$P_{RCL} = sP_{AG} \quad (1.37)$$

Δηλαδή, όσο μικρότερη είναι η ολίσθηση, τόσο μικρότερη είναι η τιμή των απωλειών στο δρομέα της μηχανής. Ας σημειωθεί ακόμη ότι, στην περίπτωση που ο κινητήρας δεν περιστρέφεται, η ολίσθηση είναι $s=1$ και η ισχύς διακένου καταναλώνεται εξ ολοκλήρου στο κύκλωμα του δρομέα. Το γεγονός αυτό έχει λογική εξήγηση. Αφού ο κινητήρας δεν περιστρέφεται, η ισχύς εξόδου του $P_{out} = r_{load}\omega_m$, θα πρέπει να είναι μηδενική. Μια άλλη σχέση μεταξύ της ισχύος διακένου και της ισχύος που μετατρέπεται από ηλεκτρική σε μηχανική μορφή εξάγεται από τη σχέση

$$P_{conv} = P_{AG} - P_{RCL} \quad (1.38) \quad \text{ή}$$

$$P_{conv} = (1-s)P_{AG} \quad (1.39)$$

Τελικά, αν οι απώλειες τριβής, εξαερισμού και οι κατανεμημένες απώλειες είναι γνωστές, η ισχύς εξόδου του κινητήρα θα είναι

$$P_{out} = P_{conv} - P_{F\&W} - P_{misc} \quad (1.40)$$

Η επαγόμενη ροπή r_{ind} στο εσωτερικό μιας μηχανής έχει οριστεί στα πιο πριν ως η ροπή εκείνη που παράγεται κατά τη μετατροπή της ηλεκτρικής ισχύος σε μηχανική. Αυτή η ροπή διαφέρει από τη ροπή που είναι πραγματικά αξιοποιήσιμη στην έξοδο του κινητήρα κατά τις ροπές τριβής και εξαιρισμού που καταναλώνονται στη μηχανή. Η επαγόμενη ροπή δίνεται από την εξίσωση

$$r_{ind} = \frac{P_{conv}}{\omega_m} \quad (1.41)$$

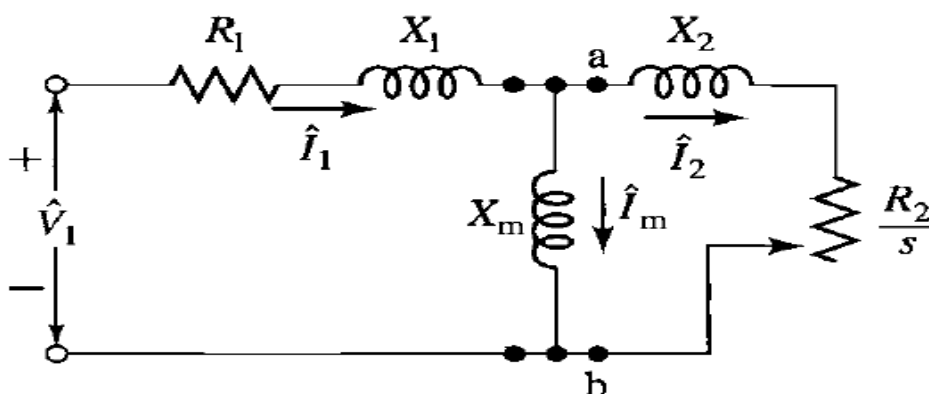
Αυτή η ροπή ονομάζεται και αναπτυσσόμενη ροπή της μηχανής. Η επαγόμενη ροπή ενός επαγωγικού κινητήρα εκφράζεται και με κάποιον διαφορετικό τρόπο. Η εξίσωση 1.8 εκφράζει την πραγματική ταχύτητα περιστροφής σε σχέση με την σύγχρονη ταχύτητα και την ολίσθηση, ενώ η εξ. 1.39 δίνει την P_{conv} σε σχέση με την P_{AG} και την ολίσθηση. Η αντικατάσταση των εξ. 1.8 και 1.39 στην εξ. 1.41 δίνει ως αποτέλεσμα τη σχέση

$$r_{ind} = \frac{P_{AG}}{\omega_{sync}} \quad (1.42)$$

Η τελευταία εξίσωση είναι πολύ χρήσιμη, επειδή εκφράζει την επαγόμενη ροπή σε άμεση σχέση με την ισχύ διακένου και τη σύγχρονη ταχύτητα, η οποία δε μεταβάλλεται. Έτσι η r_{ind} υπολογίζεται αν είναι γνωστή η P_{AG} .

1.6.3 Χαρακτηριστική Ροπής-Στροφών

Για τον καθορισμό της ροπής και της ισχύος της μηχανής επαγωγής με βάση το ισοδύναμο κύκλωμα χρησιμοποιείται το θεώρημα Thevenin για την απλοποίηση του ισοδύναμου κυκλώματος. Με την ανάλυση αυτή η τάση του στάτη V_1 στο κύκλωμα του Σχ.1.15



Σχ.1.15 Απλοποιημένο ισοδύναμο κύκλωμα επαγωγικού κινητήρα

Αντικαθίσταται με την ισοδύναμη τάση V_{th} η οποία υπολογίζεται ως εξής

$$V_{th} = V_1 \frac{jX_m}{R_1 + j(X_1 + X_m)} \quad (1.43)$$

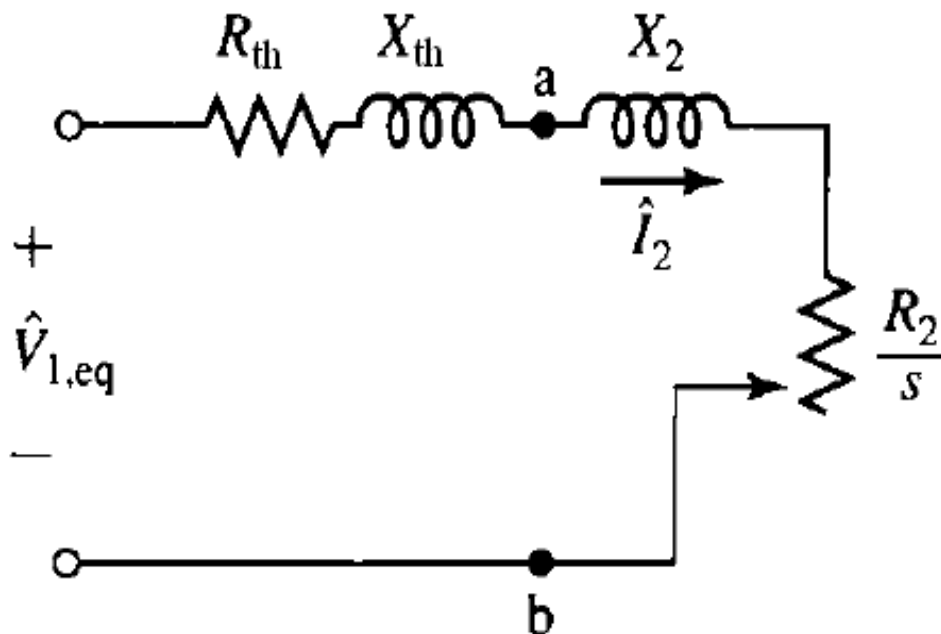
Οι σύνθετες αντιστάσεις αντικαθίστανται με τις ισοδύναμες αντιστάσεις

$$Z_{th} = (R_1 + jX_1) // jX_m \quad (1.44)$$

$$Z_{th} = \frac{(R_1 + jX_1)jX_m}{(R_1 + jX_1 + jX_m)} \quad (1.45)$$

$$Z_{th} = R_{th} + jX_{th} \quad (1.46)$$

Έτσι προκύπτει το απλοποιημένο ισοδύναμο κύκλωμα του Σχήματος 1.16



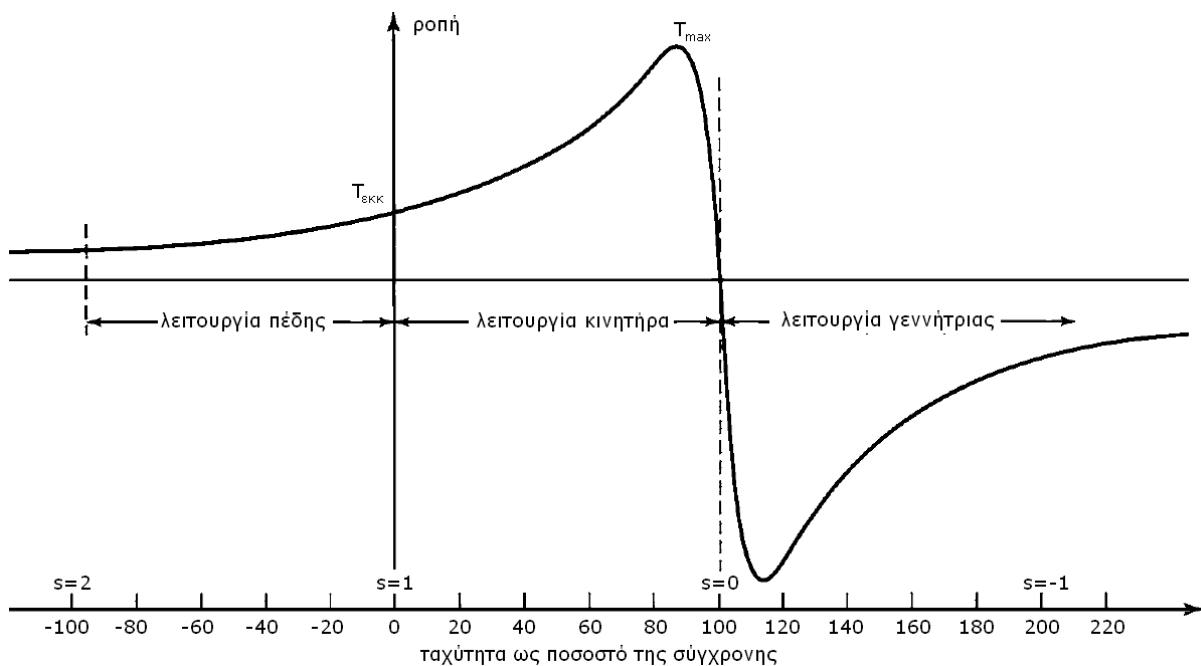
Σχήμα 1.16 Ισοδύναμο κύκλωμα επαγωγικού κινητήρα, απλοποιημένο κατά thevenin

Από το κύκλωμα του σχήματος 1.16 μπορεί εύκολα να προσδιοριστεί το ρεύμα I_2 το οποίο όταν αντικατασταθεί στην εξίσωση ροπής δίνει την έκφραση της ροπής μέσω του ισοδύναμου κυκλώματος.

$$I_2 = \frac{V_{th}}{\left(R_{th} + \frac{R_2}{s}\right) + j(X_{th} + X_2)} \quad (1.47)$$

$$T_{em} = \frac{1}{\omega_s} \frac{3V_{th}^2 \frac{R_2}{s}}{\left(R_{th} + \frac{R_2}{s}\right)^2 + (X_{th} + X_2)^2} \quad (1.48)$$

Από την παραπάνω εξίσωση μπορεί να χαραχθεί η καμπύλη ροπής-ολίσθησεως που φαίνεται στο Σχήμα 1.17



Σχήμα 1.17 Καμπύλη ροής στροφών/ολίσθησης μηχανής επαγωγής

Στο σχήμα 1.17 διακρίνονται οι τρεις περιοχές λειτουργίας της επαγωγικής μηχανής. Ανάλογα με την ολίσθηση η μηχανή συμπεριφέρεται ως κινητήρας ($1 > s > 0$), ως γεννήτρια ($s < 0$) ή βρίσκεται σε κατάσταση πέδησης ($s > 1$).

Η μηχανή εισέρχεται στην περιοχή πέδησης όταν κατά τη διάρκεια λειτουργίας τη ως κινητήρας γίνει αντιστροφή φάσεων στα τυλίγματα τροφοδοσίας. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την άμεση αναστροφή του μαγνητικού πεδίου και την ανάπτυξη μιας αρνητικής ροπής (ηλεκτρομαγνητική) η οποία αντιτίθεται στην ήδη υπάρχουσα ροπή (μηχανική) του δρομέα, πράγμα που οδηγεί στην πέδηση της μηχανής. Αν μόλις εξισωθούν οι δυο ροπές αποσυνδεθεί η τροφοδοσία τότε γίνεται αποτελεσματική πέδηση του κινητήρα.

Η μηχανή συμπεριφέρεται ως κινητήρας όταν $1 > s > 0$. Όταν η ολίσθηση είναι 0 δηλαδή ο κινητήρας είναι στη σύγχρονη ταχύτητα τότε δεν αναπτύσσεται ηλεκτρομαγνητική ροπή. Καθώς η ολίσθηση αυξάνει ενώ η ταχύτητα μειώνεται η ηλεκτρομαγνητική ροπή αυξάνεται μέχρι την μέγιστη ροπή ή ροπή ανατροπής. Σε αυτή την περιοχή λειτουργίας η πτώση τάσεως στο στάτη είναι χαμηλή και η ροή διακένου παραμένει περίπου σταθερή. Πέραν της ροπής ανατροπής η ηλεκτρομαγνητική ροπή μειώνεται με την αύξηση της ολισθήσεως και για $s=1$ βρίσκεται η ροπή εκκινήσεως. Αντικατάσταση του s στην εξίσωση της ροπής δίνει τη ροπή εκκίνησης.

$$T_{εκκ} = \frac{1}{\omega_s} \frac{3V_{th}^2 R_2}{(R_{th} + r_2)^2 + (X_{th} + x_2)^2} \quad (1.49)$$

Η μέγιστη ροπή ή ροπή ανατροπής προκύπτει αν από την εξίσωση της ροπής παρατηρηθεί ότι η ροπή γίνεται μέγιστη όταν η προσδιδόμενη στην αντίσταση R_2/s ισχύς γίνει μέγιστη. Η ισχύς αυτή γίνεται μέγιστη όταν η σύνθετη αντίσταση R_2/s ισούται με το μέτρο της σύνθετης αντίστασης μεταξύ αυτής και της σταθερής τάσης V_1 δηλαδή:

$$\frac{R_2}{s_{maxT}} = \sqrt{R_{th}^2 + (X_{th} + X_2)^2} \quad (1.50)$$

Η ολίσθηση τότε στη μέγιστη ροπή είναι:

$$s_{maxT} = \frac{R_2}{\sqrt{R_{th}^2 + (X_{th} + X_2)^2}} \quad (1.51)$$

Οπότε η μέγιστη ροπή γίνεται:

$$T_{max} = \frac{3}{2} \frac{1}{\omega_s} \frac{V_{th}^2}{R_{th} + \sqrt{R_{th}^2 + (X_{th} + X_2)^2}} \quad (1.52)$$

Από τις παραπάνω εξισώσεις προκύπτει ότι η ολίσθηση είναι ευθέως ανάλογη προς την αντίσταση του δρομέα R_2 . Όταν η αντίσταση του δρομέα αυξηθεί με την προσθήκη μιας παράλληλης εξωτερικής αντίστασης (όταν η μηχανή είναι τυλιγμένου δρομέα) η μέγιστη εσωτερική ροπή είναι ανεπηρέαστη αλλά η ταχύτητα στην οποία λαμβάνεται μπορεί να ελεγχθεί.

Η Τρίτη περιοχή λειτουργίας είναι η περιοχή λειτουργίας της μηχανής ως γεννήτριας. Η συμπεριφορά αυτή λαμβάνει χώρα όταν η ολίσθηση γίνει αρνητική δηλαδή ο δρομέας περιστρέφεται σε συχνότητα μεγαλύτερη της συχνότητας του δικτύου τροφοδοσίας του στάτη. Έτσι υπάρχει ροή ισχύος από το μηχανικό μέρος στο δίκτυο του στάτη.

1.7 ΚΑΤΑΤΑΞΗ ΚΙΝΗΤΗΡΩΝ ΕΠΑΓΩΓΗΣ

Λόγω της ποικιλίας των εφαρμογών και των διαφορετικών λειτουργικών χαρακτηριστικών των κινητήρων επαγωγής η NEMA (National Electrical Manufacturer Association) των ΗΠΑ προχώρησε στην κατάταξη των κινητήρων επαγωγής σε κατηγορίες ανάλογα με την χαρακτηριστική ροπής-στροφών του κάθε κινητήρα. Οι κατηγορίες αυτές ονομάζονται κλάσεις κινητήρων και παρουσιάζονται πιο κάτω.

Κλάση Σχεδίασης A:

Οι κινητήρες κλάσης A είναι κινητήρες με τυποποιημένη σχεδίαση που παρουσιάζουν κανονική ροπή εκκίνησης, κανονικό ρεύμα εκκίνησης και χαμηλή ολίσθηση. Η ολίσθηση στη λειτουργία υπό πλήρες φορτίο θα πρέπει να είναι μικρότερη από 5% και μικρότερη από αυτή ενός κινητήρα κλάσης B αντίστοιχων προδιαγραφών. Η ροπή ανατροπής είναι ίση με 200%-300% της ροπής κατά την πλήρη φόρτιση. Η ροπή εκκίνησης είναι τουλάχιστον ίση με την ονομαστική ροπή στους μεγάλους κινητήρες και ίση ή μεγαλύτερη από το 200% της ονομαστικής ροπής στους μικρούς κινητήρες. Το σημαντικότερο πρόβλημα αυτής της κλάσης σχεδίασης είναι το ιδιαίτερα υψηλό κρουστικό ρεύμα κατά την εκκίνηση. Τα τυπικά ρεύματα εκκίνησης για τέτοιους κινητήρες είναι 500%-800% του ονομαστικού ρεύματος. Στους κινητήρες τέτοιου είδους με μέγεθος πάνω από 7.5Hp θα πρέπει να χρησιμοποιείται κάποια μέθοδος μείωσης της τάσης κατά την εκκίνηση, με σκοπό να προστατεύεται το σύστημα ισχύος, στο οποίο συνδέονται, από μεγάλες πτώσεις τάσης. Στο παρελθόν οι κινητήρες κλάσης A αποτελούσαν καθιερωμένη σχεδίαση για εφαρμογές κάτω από τους 7.5 Hp και πάνω από τους 200Hp. Όμως, στις μέρες μας έχουν αντικατασταθεί από τους κινητήρες κλάσης B. Τυπικές εφαρμογές αυτών των κινητήρων είναι η οδήγηση ανεμιστήρων, φυσερών, αντλιών, τόνων και άλλων εργαλειομηχανών.

Κλάση Σχεδίασης B:

Οι κινητήρες κλάσης B έχουν κανονική ροπή εκκίνησης, μικρότερο ρεύμα εκκίνησης και χαμηλή ολίσθηση. Ένας τέτοιος κινητήρας παράγει σχεδόν την ίδια ροπή με τον κινητήρα κλάσης A, ενώ το ρεύμα εκκίνησης του είναι περίπου 25% μικρότερο. Η ροπή ανατροπής είναι μεγαλύτερη ή ίση με το 200% της ονομαστικής ροπής φορτίου αλλά μικρότερη από αυτή των κινητήρων κλάσης A λόγω της αυξημένης αντίδρασης δρομέα. Κι εδώ, η ολίσθηση στη λειτουργία υπό πλήρες φορτίο παραμένει χαμηλή (μικρότερη από 5%). Οι εφαρμογές αυτών των κινητήρων είναι παρόμοιες μ' αυτές των κινητήρων κλάσης A, μόνο που οι κινητήρες κλάσης B προτιμούνται εξαιτίας του μικρότερου ρεύματος εκκίνησης. Στις σύγχρονες εφαρμογές οι κινητήρες κλάσης B έχουν πια αντικαταστήσει σε μεγάλο βαθμό τους κινητήρες κλάσης A.

Κλάση Σχεδίασης C:

Οι κινητήρες κλάσεως C παρουσιάζουν μεγάλη ροπή εκκίνησης, μικρό ρεύμα εκκίνησης και χαμηλή ολίσθηση στη λειτουργία υπό πλήρες φορτίο (μικρότερη από 5%). Η ροπή ανατροπής εδώ είναι ελαφρά μικρότερη απ' αυτή των κινητήρων κλάσης A, ενώ η ροπή εκκίνησης φτάνει το 250% της ροπής υπό πλήρες φορτίο. Οι κινητήρες αυτού του είδους

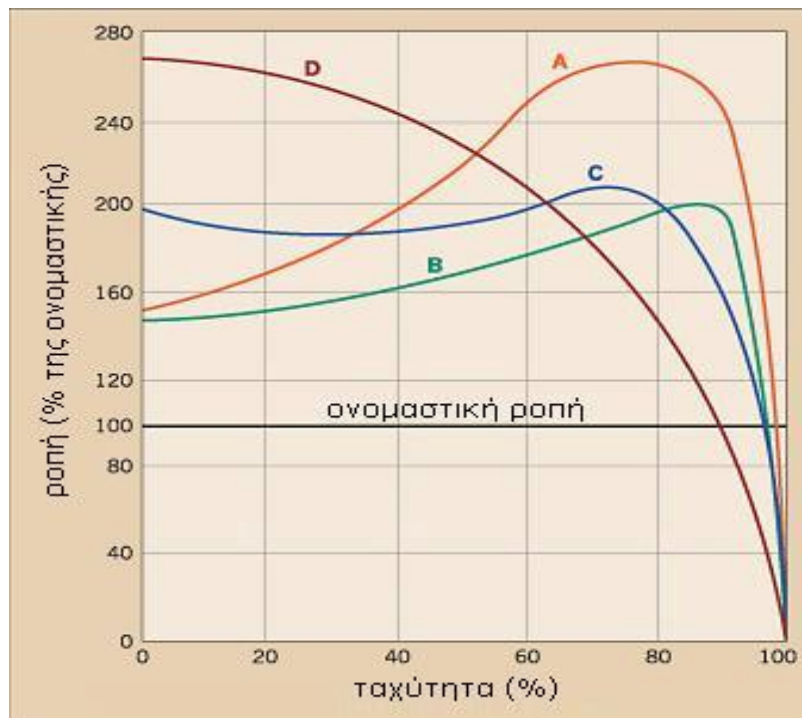
κατασκευάζονται με διπλό δρομέα κι έτσι είναι ακριβότεροι από τους κινητήρες των προηγούμενων κλάσεων. Τέλος, αυτοί οι κινητήρες συνήθως χρησιμοποιούνται σε φορτία που απαιτούν υψηλή ροπή εκκίνησης, όπως οι φορτισμένες αντλίες, οι συμπιεστές και οι μεταφορείς.

Κλάση Σχεδίασης D:

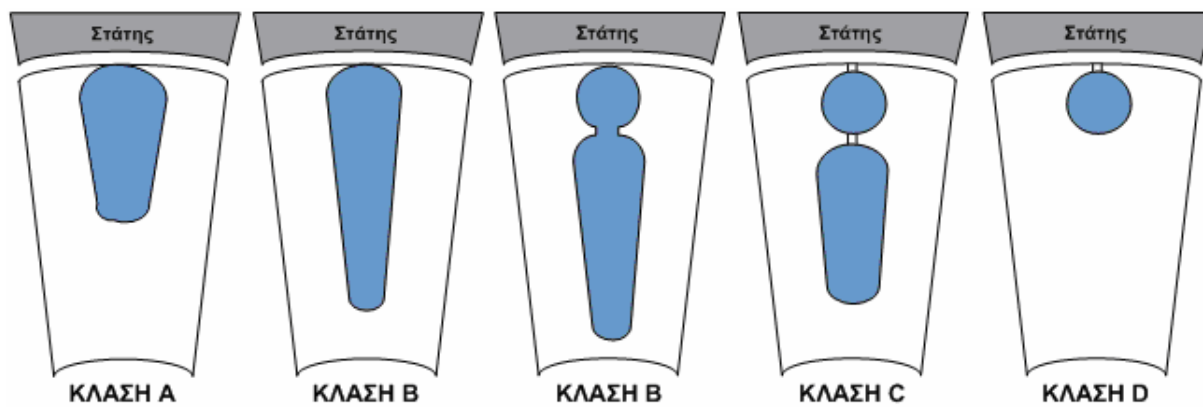
Οι κινητήρες κλάσης D έχουν πάρα πολύ μεγάλη ροπή εκκίνησης (πάνω από το 275% της ονομαστικής ροπής) και μικρό ρεύμα εκκίνησης, αλλά παρουσιάζουν υψηλή ολίσθηση στη λειτουργία υπό πλήρες φορτίο. Ουσιαστικά, πρόκειται για απλούς επαγωγικούς κινητήρες κλάσεις A, που διαθέτουν όμως ράβδους μικρότερης διατομής κατασκευασμένες από υλικό μεγαλύτερης αντίστασης. Η μεγάλη αντίσταση στο δρομέα μετακινεί τη μέγιστη ροπή σε μια πολύ μικρή ταχύτητα. Είναι, επίσης, δυνατή η μετακίνηση της μέγιστης ροπής στη μηδενική ταχύτητα (ολίσθηση 100%). Η ολίσθηση αυτών των κινητήρων στην πλήρη φόρτιση είναι αρκετά υψηλή λόγω της μεγάλης αντίστασης δρομέα που διαθέτουν. Η τυπική τιμή αυτής της ολίσθησης είναι 7%-11%, αλλά μπορεί να φτάσει στο 17% η και πιο πάνω. Αυτού του είδους οι κινητήρες έχουν εφαρμογή στην επιτάχυνση φορτίων με εξαιρετικά μεγάλη αδράνεια, όπως οι ιδιαίτερα μεγάλοι σφόνδυλοι που χρησιμοποιούνται σε διατρητικές πρέσες ή ψαλίδια.

Μαζί με τις τέσσερις προηγούμενες σχεδιάσεις η NEMA συνήθως αναγνώριζε δυο ακόμη κλάσεις σχεδίασης, τις κλάσεις E και F που τις ονόμαζε επαγωγικούς κινητήρες ομαλής εκκίνησης (soft-start). Η ξεχωριστή ιδιότητα αυτών των κινητήρων ήταν το χαμηλό ρεύμα εκκίνησης και χρησιμοποιούνταν σε φορτία μικρής ροπής εκκίνησης, όπου τα μεγάλα ρεύματα εκκίνησης δημιουργούσαν σοβαρό πρόβλημα. Στις μέρες μας αυτές οι κλάσεις σχεδίασης έχουν καταργηθεί.

Στο Σχήμα 1.18 παρουσιάζονται οι χαρακτηριστικές ροπής-στροφών των πιο πάνω κλάσεων κινητήρων, στο Σχήμα 1.19 φαίνονται οι διαφοροποιήσεις στον κλωβό του δρομέα για την επίτευξη των χαρακτηριστικών κάθε κλάσης.



Σχήμα 1.18 Χαρακτηριστικές ροπής-ταχύτητας επαγωγικών κινητήρων σχεδιασμένοι κατά κλάση A,B,C,D της NEMA



Σχήμα 1.19 Τύποι αυλάκων δρομέα κλωβού ανά κατασκευαστική κλάση

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΣΤΑΤΗ ΚΑΙ ΔΡΟΜΕΑ

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται η μελέτη ενός επαγωγικού ασύγχρονου κινητήρα κλωβού. Αρχικά θέτουμε κάποιες προδιαγραφές για τον εν λόγω κινητήρα. Μετέπειτα γίνεται η διαστασιολόγηση του κινητήρα, μελετάτε το τύλιγμα του στάτη και του δρομέα, ενώ υπολογίζεται και το ρεύμα μαγνήτισης. Πιο κάτω φαίνονται οι τεχνικές προδιαγραφές του κινητήρα.

ΟΝΟΜΑΣΤΙΚΗ ΙΣΧΥΣ: 1,5kW

ΣΥΓΧΡΟΝΗ ΤΑΧΥΤΗΤΑ: 1500στρ./λεπτό

ΤΑΣΗ ΤΡΟΦΟΔΟΣΙΑΣ (ΠΟΛΙΚΗ): 400V

ΣΥΧΝΟΤΗΤΑ: 50Hz

ΑΡΙΘΜΟΣ ΦΑΣΕΩΝ: 3

ΤΡΟΠΟΣ ΣΥΝΔΕΣΜΟΛΟΓΙΑΣ: ΑΣΤΕΡΑΣ

ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΙΣΧΥΟΣ: 0,83

ΒΑΘΜΟΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ: 0,83 (Ο βαθμός απόδοσης είναι τυποποιημένος και τον διαλέγουμε από τον πίνακα 14.2 βλέπε υπόμνημα πινάκων)

ΡΟΠΗ ΕΚΚΙΝΗΣΗΣ (LOCKED ROTOR TORQUE): 2 (2 ΦΟΡΕΣ ΜΕΓΑΛΥΤΕΡΗ ΑΠΟ ΤΗΝ ΟΝΟΜΑΣΤΙΚΗ – ΤΥΠΟΙΗΜΕΝΕΣ ΤΙΜΕΣ ΑΠΟ ΤΟΝ ΠΙΝΑΚΑ 14.2)

ΡΕΥΜΑ ΜΕ ΑΚΙΝΗΤΟΠΟΙΗΜΕΝΟ ΔΡΟΜΕΑ (LOCKED ROTOR CURRENT): 6 (6 ΦΟΡΕΣ ΜΕΓΑΛΥΤΕΡΟ ΑΠΟ ΤΟ ΟΝΟΜΑΣΤΙΚΟ - ΤΥΠΟΙΗΜΕΝΕΣ ΤΙΜΕΣ ΑΠΟ ΤΟΝ ΠΙΝΑΚΑ 14.2)

ΡΟΠΗ ΑΝΑΤΡΟΠΗΣ: 2,5 (2,5 ΦΟΡΕΣ ΜΕΓΑΛΥΤΕΡΗ ΑΠΟ ΤΗΝ ΟΝΟΜΑΣΤΙΚΗ – ΤΥΠΟΙΗΜΕΝΕΣ ΤΙΜΕΣ ΑΠΟ ΤΟΝ ΠΙΝΑΚΑ 14.2)

ΚΛΑΣΗ ΚΙΝΗΤΗΡΑ: Β (ΕΧΕΙ ΣΧΕΣΗ ΜΕ ΤΗΝ ΜΟΡΦΗ ΤΗΣ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΗΣ ΡΟΠΗΣ - ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΤΟΥ ΚΙΝΗΤΗΡΑ)

Στην συνέχεια ξεκινάμε την σχεδίαση με την αρχική διαστασιολόγηση του κινητήρα. Κατά την διάρκεια της σχεδίασης αρκετές από τις διαστάσεις θα αλλάξουν!

2.1 ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΟΥ ΚΙΝΗΤΗΡΑ

Ξεκινάμε με τον υπολογισμό της εσωτερικής διαμέτρου του στάτη D_{IS} 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:

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

Όπου:

$$K_E = \frac{E_A}{V_\varphi} \approx 0,98 - 0,005 \cdot p_i = 0,98 - 0,005 \cdot 2 = 0,97$$

Άρα:

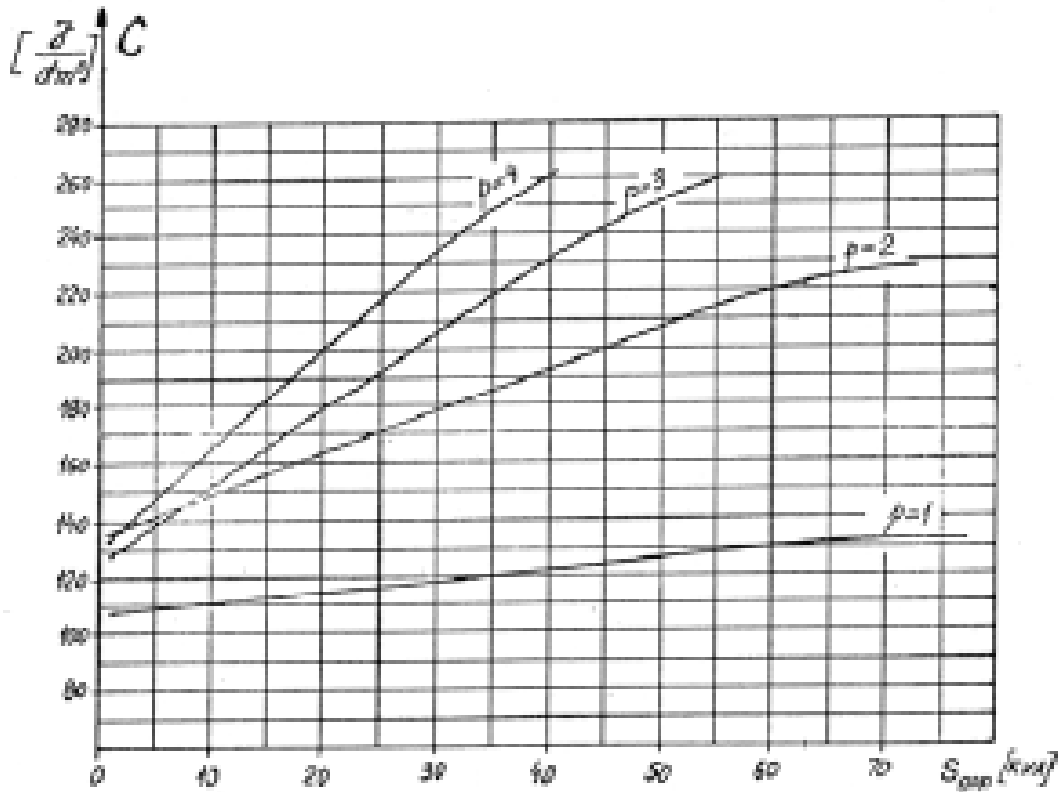
$$S_{gap} = \frac{K_E \cdot P_n}{\eta_N \cdot \cos\varphi} = \frac{0,97 \cdot 1500W}{0,83 \cdot 0,83} = 2112,06VA$$

Ο συντελεστής λ είναι ο λόγος του μήκους του πυρήνα προς το πολικό βήμα και όταν πρόκειται για τετραπολικούς κινητήρες παίρνει τιμή μεταξύ 1,2 και 1,8 εμπειρική τιμή από τον **πίνακα 1.1** που δείχνεται παρακάτω. Στη συγκεκριμένη μελέτη επιλέγουμε τιμή ίση με 1,5.

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

Πίνακας 1.1 Οι τιμές του συντελεστή λ με βάση τους πόλους της μηχανής

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



Σχήμα 2.1 Γραφική παράσταση της σταθεράς ESSON σε συνάρτηση με τη φαινόμενη ισχύ του διακένου

Από το παραπάνω διάγραμμα παίρνουμε μια προσεγγιστική τιμή:

$$C_0 \approx 138 \times 10^3 \text{ J/m}^3$$

Αντικαθιστώντας όλα τα παραπάνω στην σχέση (1) υπολογίζουμε:

$$D_{IS} = \sqrt[3]{\frac{2 \cdot 2}{\pi \cdot 1,5} \cdot \frac{2}{50} \cdot \frac{2112,06}{138 \cdot 10^3}} = 0,0798 \text{ m} = 7,98 \text{ cm}$$

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

$$\lambda = \frac{L}{\tau} \Rightarrow L = \lambda \cdot \tau \Rightarrow L = \frac{\lambda \cdot \pi \cdot D_{IS}}{2 \cdot p_i} = \frac{1,5 \cdot 3,14 \cdot 0,0798}{2 \cdot 2} \text{ m} = 0,093 \text{ m} = 9,395 \text{ cm}$$

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

$$\tau = \frac{\pi \cdot D_{IS}}{2 \cdot p_i} = \frac{3,14 \cdot 0,0798\text{m}}{2 \cdot 2} = 0,062\text{m} = 6,2\text{cm}$$

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

$$\frac{D_{IS}}{D_{out}} = 0,62 \Rightarrow D_{out} = \frac{D_{IS}}{0,62} = 0,12\text{m}$$

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

Πίνακας 1.2

$2p_i$	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:

$$g = (0,1 + 0,012 \cdot \sqrt[3]{P_n}) \cdot 10^{-3}\text{m} = (0,1 + 0,012 \cdot \sqrt[3]{1500}) \cdot 10^{-3}\text{m} = 0,237\text{mm}$$

Θα πρέπει να σημειώσουμε ότι τα διάκενα είναι συγκεκριμένα, π.χ. 0,35mm, 0,4mm, 0,45mm, 0,5mm κλπ. **Εμείς θα διαλέξουμε το μικρότερο διάκενο ίσο με 0,35mm.** 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.

2.2 ΤΥΛΙΓΜΑΤΑ ΣΤΑΤΗ

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

q : ο αριθμός των αυλακιών ανά φάση και ανά πόλο.

Επιλέγουμε 2 αυλάκια ανά φάση και πόλο, άρα:

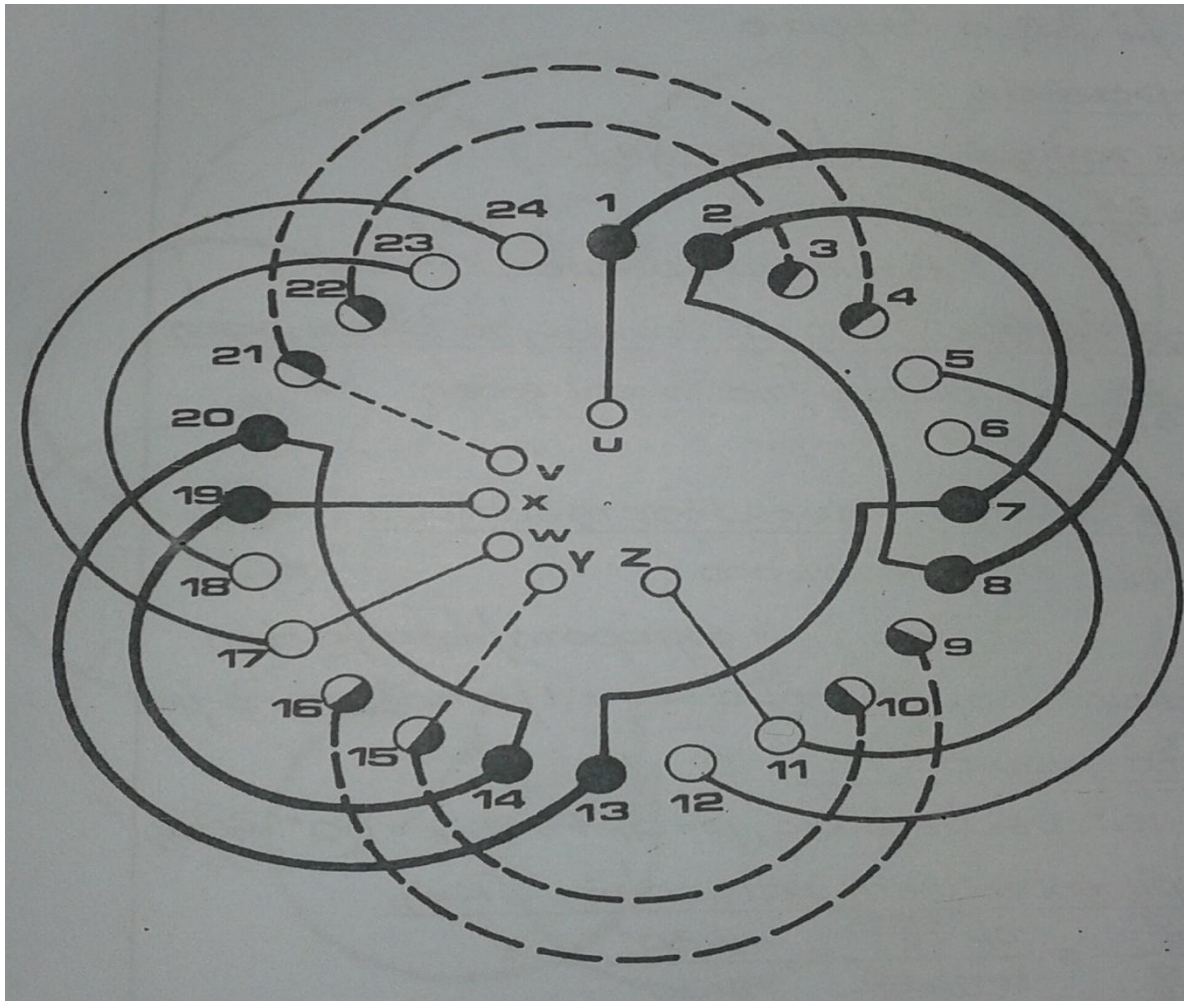
$$N_S = 2 \cdot 2 \cdot 2 \cdot 3 = 24 \text{ αυλάκια}$$

Ο στάτης θέλουμε να έχει 24 αυλάκια και 4 πραγματικούς πόλους, ένα μάτσο ανά αυλάκι και μια στρώση.

Πρέπει τώρα να υπολογίσουμε το πολικό βήμα, το οποίο στα τυλίγματα με βήμα ακέραιο είναι ίσο με το βήμα των αυλακιών. Οπότε έχουμε:

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

Στην εικόνα φαίνεται η μορφή του τυλίγματος του στάτη που θα χρησιμοποιηθεί στον κινητήρα με όλα τα χαρακτηριστικά που υπολογίστηκαν παραπάνω.



Σχήμα 2.2 Εικόνα τυλίγματος του στάτη του κινητήρα

Ο συντελεστής τυλίγματος θα δίνεται από την σχέση:

$$K_t = K_w = \frac{\sin \frac{q \cdot a}{2}}{q \cdot \sin \frac{a}{2}} = \frac{\sin \frac{2 \cdot 30}{2}}{2 \cdot \sin \frac{30}{2}} = 0,98$$

Όπου a είναι η απόσταση μεταξύ δυο διαδοχικών αυλακιών σε ηλεκτρικές μοίρες οι οποίες δίνονται από την σχέση:

$$\alpha = p_i \cdot a_r \quad (2)$$

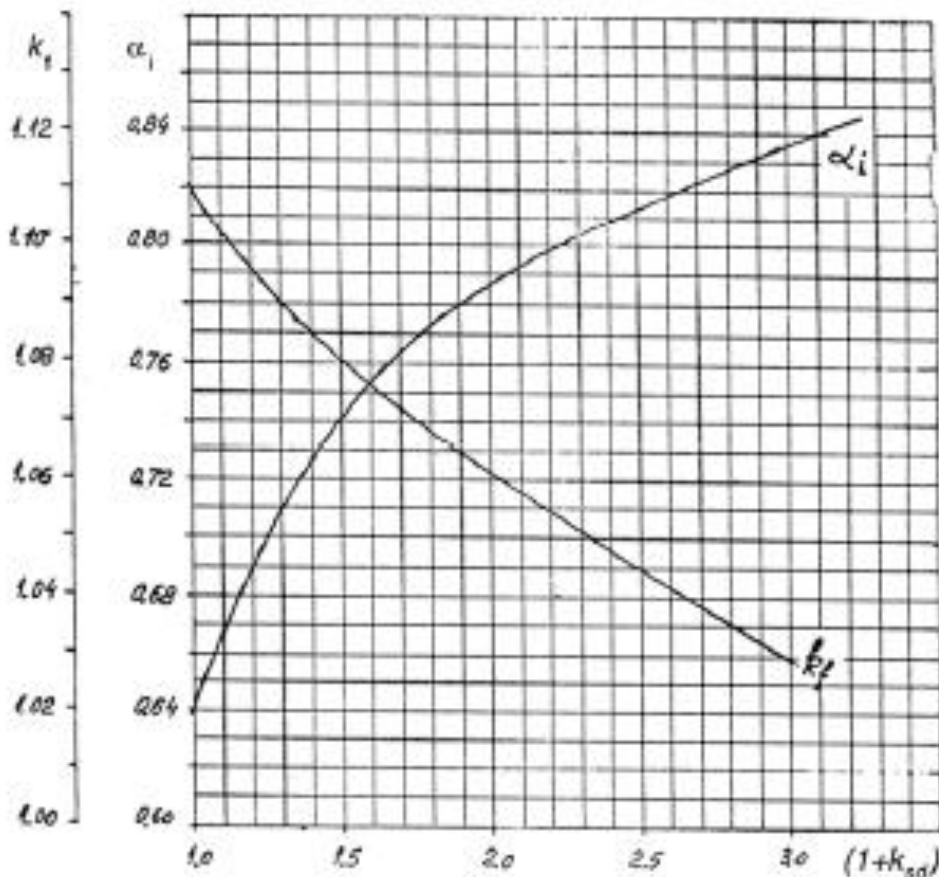
Όπου a_r η γεωμετρική γωνία ($360^\circ/24$ αυλάκια= 15° στην περίπτωση μας).

Αντικαθιστώντας στην (2) έχουμε $\alpha=30^\circ$

Στη συνέχεια υπολογίζουμε τον αριθμό των 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, 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 2.3 : Form Factor K_f και flux density shape factor a_i σαν συνάρτηση του $1+K_{ST}$

Όπως φαίνεται και από το σχήμα η σταθερά εξαρτάται από το $1+K_{ST}$ που ονομάζεται tooth saturation factor. **Υποθέτουμε** ότι η παραπάνω σταθερά παίρνει τιμή ίση με 1,4 άρα από την γραφική παράσταση το $a_i=0,72$.

Αναλυτικός υπολογισμός του $1+K_{ST}$ θα γίνει αργότερα σε άλλη φάση της μελέτης.

Για μηχανές με 4 πόλους συνίσταται η μαγνητική επαγωγή στο διάκενο να είναι μεταξύ 0,65-0,78T. Εμείς θα διαλέξουμε μια μαγνητική επαγωγή ίση με 0,68T. Άρα η μαγνητική ροή στο διάκενο θα είναι ίση με:

$$\varphi = 0,72 \cdot 0,062 \cdot 0,093 \cdot 0,68 = 2,82 \cdot 10^{-3} \text{Wb}$$

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

$$W_i = \frac{K_E \cdot V_\varphi}{4 \cdot K_f \cdot K_\tau \cdot f \cdot \varphi} \quad (3)$$

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 γραφική παράσταση του σχήματος 2.3.

Στην περίπτωσή μας παίρνει τιμή 1,085

Το K_E αυξάνεται ανάλογα με τα ζεύγη πόλων και υπολογίζεται από την σχέση:

$$K_E = 0,98 - 0,005 \cdot p_i = 0,98 - 0,005 \cdot 2 = 0,97$$

Άρα, αντικαθιστώντας στη σχέση (3) έχουμε:

$$W_i = \frac{K_E \cdot V_\varphi}{4 \cdot K_f \cdot K_\tau \cdot f \cdot \varphi} = \frac{0,97 \cdot 400 / \sqrt{3}}{4 \cdot 1,085 \cdot 0,98 \cdot 50 \cdot 2,82 \cdot 10^{-3}} = 373 \text{ σπειρες} / \text{φάση}$$

Στη συνέχεια υπολογίζουμε τον αριθμό αγωγών ανά αυλάκι:

$$n_s = \frac{a_i \cdot W_i}{p_i \cdot q} = \frac{1 \cdot 373}{2 \cdot 2} = 93 \text{ αγωγοί} / \text{αυλάκι}$$

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:

$$I_{ov} = \frac{P_n}{\sqrt{3} \cdot V_\pi \cdot \cos\varphi \cdot \eta} = \frac{1500W}{\sqrt{3} \cdot 400 \cdot 0,83 \cdot 0,83} = 3,14A$$

Για να υπολογίσουμε την διατομή των αγωγών θα επιλέξουμε μια πυκνότητα ρεύματος. Για κινητήρες 4 πόλων συνίσταται η πυκνότητα ρεύματος να βρίσκεται μεταξύ:

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

Όσο μεγαλώνει η πυκνότητα του ρεύματος μειώνεται η διατομή των αγωγών αλλά μεγαλώνουν οι απώλειες χαλκού. Επιλέγουμε μια πυκνότητα ρεύματος ίση με 5.5 A/mm^2 για να μην έχουμε μεγάλες απώλειες και υπολογίζουμε την διατομή:

$$A_{\text{cu}} = \frac{I_{\text{ov}}}{J_{\text{cos}}} = \frac{3,14\text{A}}{5,5\text{A/mm}^2} = 0,57\text{mm}^2$$

Η διάμετρος του αγωγού θα είναι ίση με:

$$d_{\text{cu}} = \sqrt{\frac{4 \cdot A_{\text{cu}}}{\pi}} = 0,85\text{mm}$$

Από τον πίνακα της επόμενης σελίδας επιλέγουμε την αμέσως επόμενη τυποποιημένη διάμετρο η οποία είναι $0,85\text{mm}$. Αν η διάμετρος είναι μεγαλύτερη από $1,3\text{mm}$ τότε για κινητήρες μικρής ισχύος επιλέγουμε να χρησιμοποιήσουμε παράλληλους κλάδους μικρότερης διαμέτρου.

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 1.3: Τυποποιημένες διαμέτροι αγωγών στάτη.

2.3 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΔΙΑΣΤΑΣΕΩΝ ΤΩΝ ΑΥΛΑΚΙΩΝ ΤΟΥ ΣΤΑΤΗ

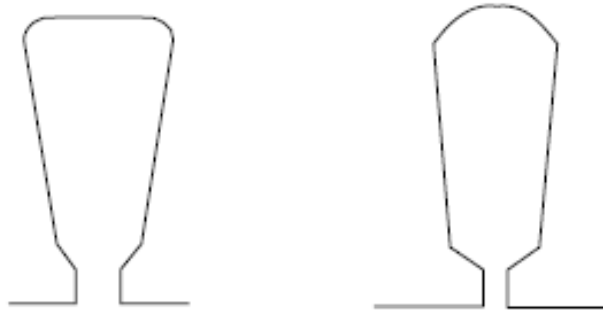
Από την στιγμή που γνωρίζουμε την διατομή των αγωγών και τον αριθμό τους μπορούμε να υπολογίσουμε τη απαιτούμενη διατομή των αυλακίων του στάτη από την σχέση:

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

Όπου K_{fill} είναι μια σταθερά (fill factor) η οποία εξαρτάται από το πάχος της μόνωσης που χρησιμοποιούμε και για κινητήρες μικρότερους από 10kW παίρνει τιμές από 0,35 έως 0,4. Επιλέγουμε τιμή 0.38 οπότε η διατομή των αυλακίων θα είναι ίση με:

$$A_{su} = \frac{\pi \cdot d_{cu}^2 \cdot a_i \cdot n_s}{4 \cdot K_{fill}} = \frac{\pi \cdot 0,85^2 \cdot 1 \cdot 93}{4 \cdot 0,38} = 138,87 \text{mm}^2$$

Η μορφή των αυλακίων του στάτη έχουν συνήθως μια από τις παρακάτω μορφές:



Σχήμα 2.4: Συνηθισμένη μορφή αυλακίων του στάτη.

Στην εικόνα 4 της επόμενης σελίδας φαίνονται αναλυτικά οι διαστάσεις που θα πρέπει να υπολογιστούν. Κάποιες από τις διαστάσεις αυτές υπολογίζονται εμπειρικά από την βιομηχανική εμπειρία. Πιο συγκεκριμένα:

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

$h_{os}=0,5-1\text{mm}$, επιλέγουμε 0,75mm.

$h_w=1-4\text{mm}$, επιλέγουμε 1mm.

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

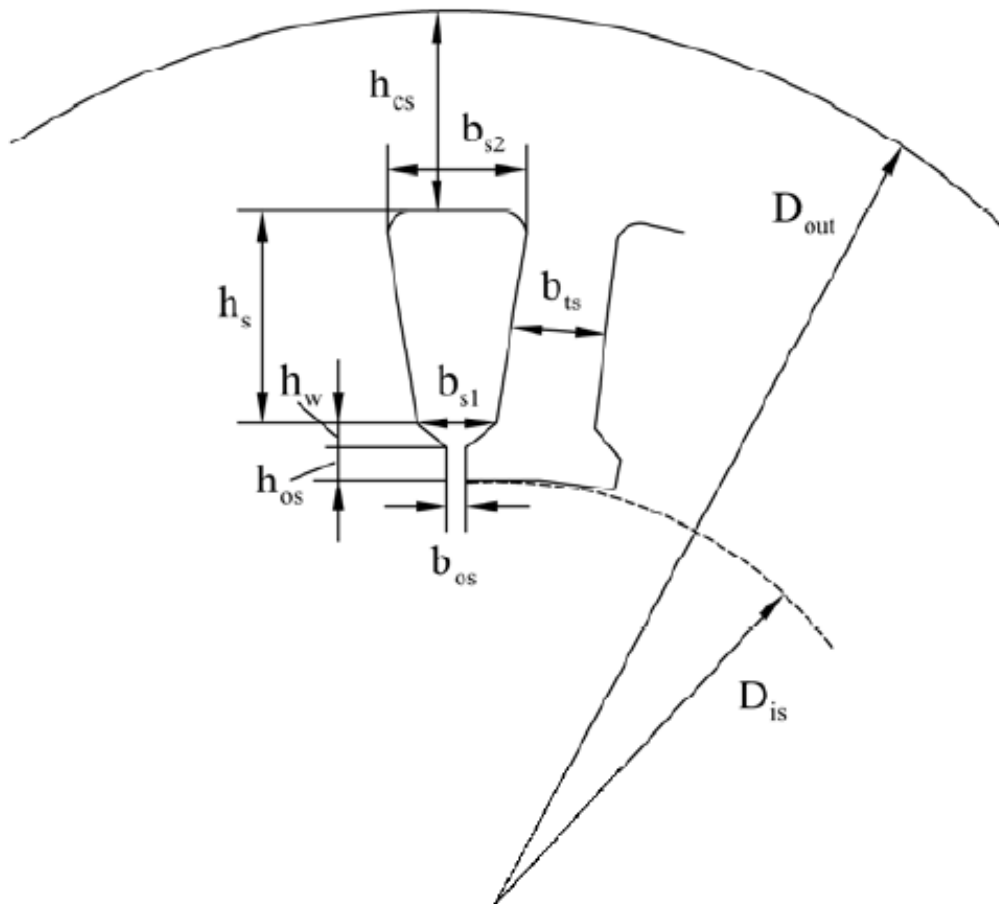
$$B_g \cdot \tau_s \cdot L = B_{ts} \cdot b_{ts} \cdot L \cdot K_{Fe}$$

Όπου τ_s έχουμε:
$$\tau_s = \frac{\tau}{3q} = \frac{0,062}{3 \cdot 2} 10,3 \cdot 10^{-3} \text{m}$$

Αριστερά της παρένθεσης είναι η μαγνητική ροή στο διάκενο και δεξιά η μαγνητική ροή στο «δόντι» του αυλακιού. 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:

$$b_{ts} = \frac{B_g \cdot \tau_s \cdot L}{B_{ts} \cdot L \cdot K_{Fe}} = \frac{0,68 \cdot 10,3 \cdot 10^{-3}}{1,55 \cdot 0,96} = 4,70 \text{ mm}$$

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



Σχήμα 2.5: Οι διαστάσεις του στάτη αναλυτικά

Από την γεωμετρία του αυλακιού προκύπτει ότι:

$$\begin{aligned}
 b_{s1} &= \frac{\pi \cdot (D_{is} + 2h_{os} + 2h_w)}{N_s} - b_{ts} \\
 &= \frac{\pi \cdot (79,8 + 2 \cdot 0,75 + 2 \cdot 1) \cdot 10^{-3}}{24} - 4,7 \cdot 10^{-3} \\
 \Rightarrow b_{s1} &= 6,19 \cdot 10^{-3} \text{m} = 6,19 \text{mm}
 \end{aligned}$$

Επίσης:

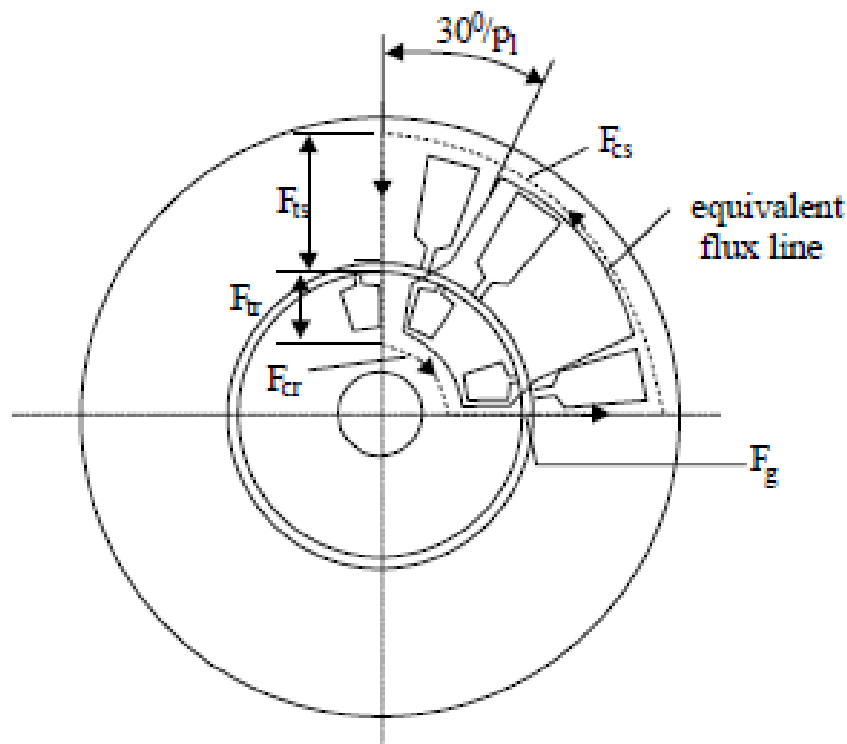
$$b_{s2} = \sqrt{4 \cdot A_{su} \cdot \tan\left(\frac{\pi}{N_s}\right) + b_{s1}^2} = \sqrt{4 \cdot 138,87 \cdot \tan\left(\frac{\pi}{24}\right) + 6,19^2} \text{mm} = 6,28 \text{mm}$$

$$A_{su} = h_s \cdot \frac{(b_{s1} + b_{s2})}{2} \Rightarrow h_s = \frac{2 \cdot A_{su}}{(b_{s1} + b_{s2})} \Rightarrow h_s = \frac{2 \cdot 138,87}{(6,19 + 6,28)} = 22,27 \text{mm}$$

Στη συνέχεια θα υπολογίσουμε τον συντελεστή $1+K_{st}$ (tooth saturation factor) στον οποίο αυθαίρετα είχαμε δώσει μια τιμή ίση με 1,4. 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 μαγνητοεγερτική δύναμη στον στάτη, στον δρομέα και στο διάκενο αντίστοιχα, όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 2.6.

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

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

Όπου K_C είναι ο συντελεστής Carter (Carter coefficient) ο οποίος 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 δρόμεα. Για να συνεχίσουμε την μελέτη θεωρούμε μια τυπική τιμή για τον συντελεστή αυτό ίση με 1,2. Προκύπτει λοιπόν ότι:

$$F_{mg} = K_C \cdot g \cdot \frac{B_g}{\mu_0} = 1,2 \cdot 0,35 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{0,68}{1,256 \cdot 10^{-6}} = 227,38At$$

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:

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 1.4.

Επιλέγοντας $B_{ts}=1,55T$ (συνήθως παίρνει τιμές μεταξύ $1,5T - 1,65T$) προκύπτει ότι $H_{ts}=1760A/m$. Άρα:

$$F_{mts} = H_{ts}(h_s + h_{os} + h_w) = 1760 \cdot (22,27 + 0,75 + 1) \cdot 10^{-3} = 42,27At$$

Η μαγνητεγερτική δύναμη στον δρομέα υπολογίζεται από την σχέση:

$$F_{mtr} = K_{st} \cdot F_{mg} - F_{mts} = 0,4 \cdot 227,38 - 42,27 = 48,68At$$

Οι τιμές των F_{mts} και F_{mtr} πρέπει να είναι κοντά. Αν το $F_{mtr} \ll F_{mts}$ θα πρέπει να θεωρήσουμε μικρότερη μαγνητική επαγωγή στο διάκενο και να ξαναγυρίσουμε πίσω στον υπολογισμό της μαγνητικής ροής Φ .

Στη συνέχεια θα υπολογίσουμε το h_{cs} (βλέπε εικόνα 2.5). Αυτό υπολογίζεται από την σχέση:

$$h_{cs} = \frac{D_{out} - (D_{IS} - 2 \cdot (h_{os} + h_w + h_s))}{2} = \frac{128 - (79,8 + 2 \cdot (0,75 + 1 + 22,7))}{2} \Rightarrow h_{cs} = 0,08mm$$

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:

$$B_{cs} = \frac{\Phi}{2 \cdot L \cdot h_{cs}} = \frac{2,82 \cdot 10^{-3}Wb}{2 \cdot 0,093m \cdot 0,08 \cdot 10^{-3}m} = 189,51T$$

Η συγκεκριμένη τιμή της μαγνητικής επαγωγής είναι πολύ μεγάλη αν λάβουμε υπόψη μας ότι θέλουμε να βρίσκεται μεταξύ $1,4T-1,7T$. Για να επιλύσουμε το πρόβλημα έχουμε τρεις δυνατότητες:

1. Να αυξήσουμε την εξωτερική διάμετρο του στάτη.
2. Να εισάγουμε μια μεγαλύτερη τιμή για τον συντελεστή λ (stack aspect ratio) κάτι 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, κάτι που δεν μπορεί να γίνει στην περίπτωσή μας.
- 4.

Επιλέγουμε την πρώτη λύση. 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:

$$h_{cs} = \frac{\Phi}{2 \cdot L \cdot B_{cs}} = \frac{2,82 \cdot 10^{-3}Wb}{2 \cdot 0,093m \cdot 1,5T} = 10,10mm$$

Άρα η εξωτερική διάμετρος θα πρέπει να αυξηθεί κατά $2 \cdot (10,10 - 0,08)mm = 20,04mm$. Άρα η εξωτερική διάμετρος της μηχανής θα είναι:

$$D_{out} = 128 + 20,04 = 148mm$$

2.4 ΔΡΟΜΕΑΣ

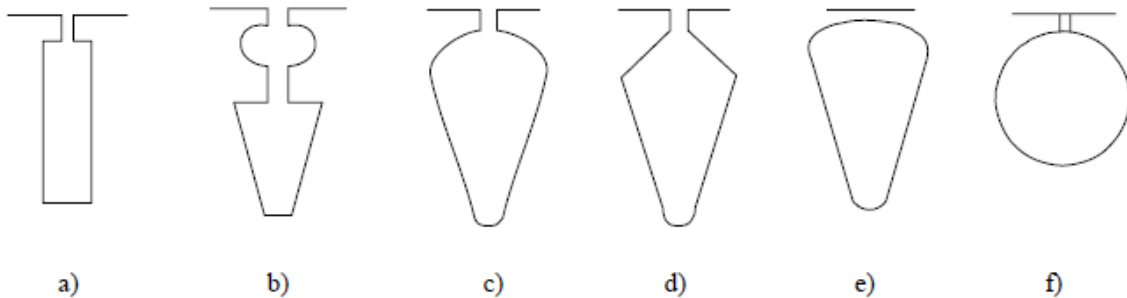
Πρέπει να γνωρίζουμε ότι όταν $N_s = N_r$ τότε η σύγχρονη ροπή παρουσιάζεται όταν η ταχύτητα είναι μηδέν και έτσι ο δρομέας δεν κινείται. Για να αποφευχθεί αυτή η ανεπιθύμητη κατάσταση πρέπει σε κάθε περίπτωση $N_s \neq N_r$

Η πιο κατάλληλη κατάσταση για τετραπολικό κινητήρα με $N_s = 24$ αυλάκια, $f_1 = 50\text{Hz}$ είναι η επιλογή του $N_r = 18$ αγωγούς.

$2p_1$	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 1.5. Αριθμός αγωγών δρομέα σε συνάρτηση με τον αριθμό των πόλων και τον αριθμό των αυλακίων του στάτη

Η μορφή του αυλακιού που θα χρησιμοποιηθεί φαίνεται στο παρακάτω σχήμα και είναι αυτή του α). Επιλέχτηκε αυτή η μορφή για λόγους απλοποίησης των υπολογισμών που θα ακολουθήσουν καθώς η μελέτη είναι στα πλαίσια εκπαιδευτικού σκοπού.



Σχήμα 2.7 Συνηθέστερες μορφές αυλακίων δρομέα

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 :

$$K_I = 0,8 \cdot \cos\varphi + 0,2 = 0,864$$

Το $\cos\varphi$ είναι ο συντελεστής ισχύος της μηχανής που θέλουμε να επιτύχουμε (0,83 στην περίπτωση μας). Άρα:

$$I_b = \frac{2 \cdot m \cdot W_i \cdot K_{w1} \cdot I_{1n} \cdot K_I}{N_r} = \frac{2 \cdot 3 \cdot 373 \cdot 0,98 \cdot 3,14 \cdot 0,864}{18} = 330,5A$$

Για κινητήρες με μεγάλη απόδοση θα πρέπει η πυκνότητα ρεύματος στον αγωγό (μπάρα) του δρομέα να είναι ίση με $3,42A/mm^2$. Για να το επιτύχουμε αυτό θα πρέπει η διατομή της κάθε μπάρας του δρομέα να είναι ίση με:

$$A_b = \frac{330,5A}{3,42 A/mm^2} = 96,63mm^2$$

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

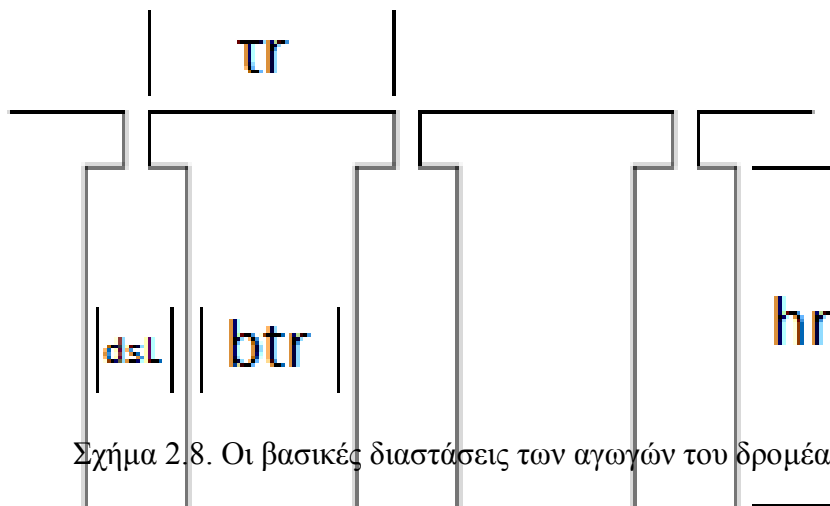
$$I_{er} = \frac{I_b}{2 \cdot \sin \frac{\pi \cdot p_i}{N_r}} = \frac{330,5A}{2 \cdot \sin \frac{\pi \cdot 2}{18}} = 483,18A$$

Η πυκνότητα του ρεύματος στο τέλος του δακτυλίου είναι $J_{er} = (0,75 - 0,8)J_b$. Οι υψηλότερες τιμές αντιστοιχούν στο τέλος των δακτυλίων που συνδέονται στη στοίβα του δρομέα ως μέρος της θερμότητας που μετατρέπεται απευθείας στον πυρήνα του δρομέα.

$$\text{Επιλέγω την τιμή } J_{er} = 0,78 * J_b = 0,78 * 3,42 = 2,66 A/mm^2$$

Η διατομή του δακτυλίου βραχυκύκλωσης υπολογίζεται από την σχέση:

$$A_{er} = \frac{I_{er}}{J_{er}} = \frac{483,18A}{2,66 A/mm^2} = 181,66mm^2$$



Σχήμα 2.8. Οι βασικές διαστάσεις των αγωγών του δρομέα.

2.4.1 Υπολογισμός των διαστάσεων των αγωγών του δρομέα

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

$$\tau_r = \frac{\pi \cdot (D_{is} - 2g)}{N_r} = \frac{\pi \cdot (79.8 - 2 \cdot 0.35)}{18} = 13.8\text{mm}$$

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

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

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

$$b_{tr} = \frac{B_g \cdot \tau_r}{K_{fe} \cdot B_{tr}} = \frac{0,68\text{T} \cdot 13.8}{0,96 \cdot 1,6\text{T}} = 6.10\text{mm}$$

Λόγω της πολύ μικρής απόστασης του δρομέα από την εσωτερική περιφέρεια του στάτη θεωρούμε κατά προσέγγιση ότι η διάμετρος του δρομέα είναι ίση με:

$$D_{re} = D_{is} = 79.8\text{mm}$$

Άρα η περιφέρεια του δρομέα θα είναι:

$$C = 2 \cdot \pi \cdot r = 2 \cdot \pi \cdot \frac{79.8}{2} = 250.69\text{mm}$$

Από το σχήμα των αγωγών του σχήματος 2.8 προκύπτει ότι:

$$d_{SL} = \tau_r - b_{tr} = 13.8\text{mm} - 6.10\text{mm} = 7.7\text{mm}$$

Το βάθος του αγωγού θα είναι:

$$h_r = \frac{A_b}{d_{SL}} = \frac{96.63\text{mm}^2}{7.7\text{mm}} = 12,55\text{mm}$$

Οι άλλες δυο διαστάσεις b_{or} και h_{or} παίρνουν τυποποιημένες τιμές 1,5mm και 0,5mm αντίστοιχα.

Γνωρίζοντας τις ακριβείς διαστάσεις του δρομέα και των αγωγών του θα υπολογίσουμε την μαγνητεγερτική δύναμη στο «δόντι» του δρομέα. Αν θέλουμε η μαγνητική επαγωγή να είναι ίση με 1,6T τότε από τον πίνακα 1.4 για το υλικό που χρησιμοποιούμε η ένταση του

μαγνητικού πεδίου θα είναι 2460A/m. Άρα η μαγνητεγερτική δύναμη που απαιτείται είναι ίση με:

$$F_{mtr} = H_{tr} \cdot (h_r + h_{or} + d_{SL}) = 2460 \cdot A/m \cdot (12,55 + 0,5 + 7,7) \cdot 10^{-3}m = 51,04At$$

Η τιμή που υπολογίσαμε είναι κοντά στη μαγνητεγερτική δύναμη του στάτη F_{mst} 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 έως 1,7T. Επιλέγοντας τιμή ίση με 1,6T έχουμε:

$$h_{cr} = \frac{\Phi}{2} \cdot \frac{1}{L \cdot B_{cr}} = \frac{2,82 \cdot 10^{-3}}{2} \cdot \frac{1}{0,093 \cdot 1,6T} = 9,47mm$$

2.4.2 Υπολογισμός της διαμέτρου του άξονα

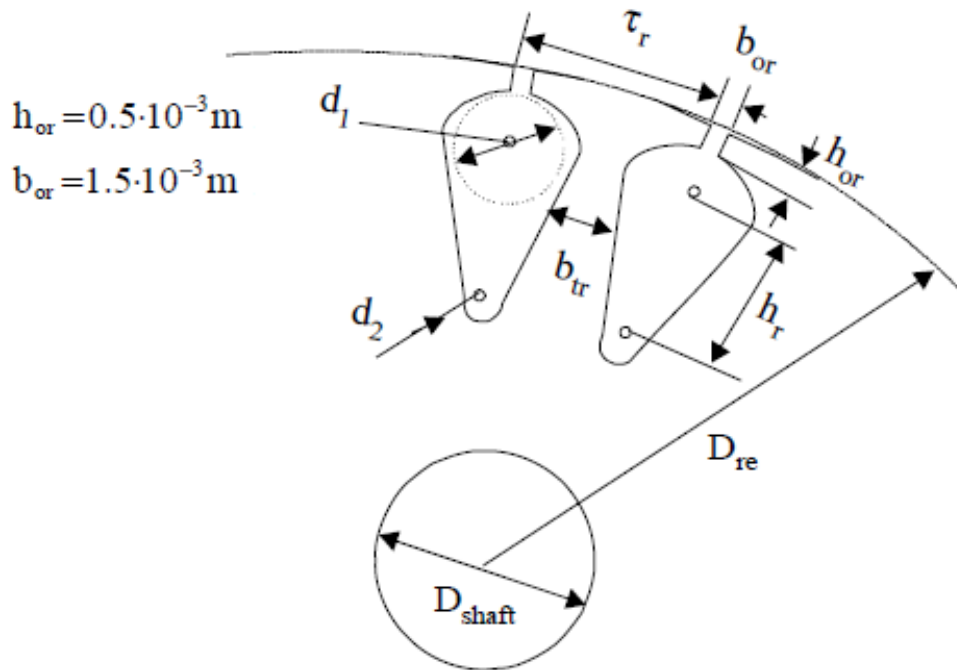
Στην συνέχεια θα υπολογίσουμε την διάμετρο του άξονα της μηχανής. Η μέγιστη δυνατή διάμετρος εξαρτάται από τις διαστάσεις του δρομέα και των αυλακίων και παίρνει τιμή ίση με:

$$D_{shaft} \leq D_{is} - 2 \cdot (h_r + h_{or} + h_{cr}) - 2 \cdot g \\ \Rightarrow D_{shaft} \leq 79,8 - 2 \cdot (12,55 + 0,5 + 9,47) - 2 \cdot 0,35 = 34,06mm$$

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

$$T = \frac{P_{out}}{\omega_m} = \frac{1500W}{2 \cdot \pi \cdot \frac{1500}{60} \cdot (1-0,02)} = 9,74Nm$$

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



Σχήμα 2.9. Γενική μορφή του δρομέα και του άξονα του.

2.5 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΡΕΥΜΑΤΟΣ ΜΑΓΝΗΤΙΣΗΣ

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:

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

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

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

Όπου:

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

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

Και:

$$\gamma_1 = \frac{b_{os}^2}{5 \cdot g + b_{os}} = \frac{2,5^2}{5 \cdot 0,35 + 2,5} = 1,47$$

$$\gamma_2 = \frac{b_{or}^2}{5 \cdot g + b_{or}} = \frac{1,5^2}{5 \cdot 0,35 + 1,5} = 0,69$$

Άρα:

$$K_{c1} = \frac{\tau_s}{\tau_s - \gamma_1} = \frac{10,3}{10,3 - 1,47} = 1,16$$

$$K_{c2} = \frac{\tau_r}{\tau_s - \gamma_2} = \frac{13,8}{13,8 - 0,69} = 1,05$$

$$K_c = K_{c1} \cdot K_{c2} = 1,16 \cdot 1,05 = 1,21$$

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

Για να μπορέσουμε να υπολογίσουμε την F_{lm} θα πρέπει να υπολογίσουμε και τις μαγνητεγερτικές δυνάμεις F_{mcs} και F_{mcr} .

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

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

Τα C_{cs} και C_{cr} είναι εμπειρικές σταθερές οι οποίες ορίζουν μία μέση απόσταση της διαδρομής στον πίσω πυρήνα. Οι σταθερές μπορούν να υπολογιστούν με τη μεθοδολογία ΑΙΜ, δηλαδή:

$$C_{cs,r} \cong 0.88 * e^{-0.4 * B_{cr,s}^2}$$

Από τον πίνακα 1.4 Έχουμε : $B_{cr} = 1.6T$ άρα $H_{cr} = 2460A/m$

Και $B_{cs} = 1.5$ άρα $H_{cs} = 1340 A/m$

$$F_{mcs} = 0.88 * e^{-0.4 * 1.5^2} * \frac{\pi * (128 - 10.10) * 10^{-3}}{2 * 2} * 1340 = 43.42At$$

$$F_{mcr} = 0.88 * e^{-0.4 * 1.6^2} * \frac{\pi * (34.06 + 9.47) * 10^{-3}}{2 * 2} * 2460 = 26.07At$$

Τελικά αντικαθιστούμε στην αρχική σχέση που θα υπολογίσουμε την ολική μαγνητεγερτική δύναμη:

$$F_{1m} = 2 * \left(1,21 * 0,35 * 10^{-3} * \frac{0,68}{1,256 * 10^{-6}} + 42,27 + 51,04 + 43,42 + 26,07 \right) = 784,16At$$

Ο συνολικός συντελεστής κορεσμού K_s υπολογίζεται ως εξής:

$$K_s = \frac{F_{1m}}{2 * F_{mg}} - 1 = 0.724$$

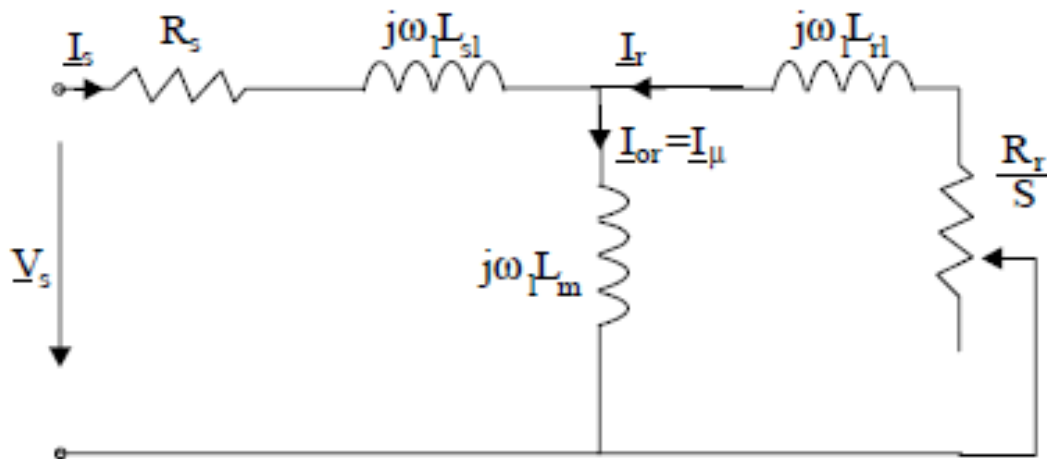
Το ρεύμα μαγνήτισης είναι:

$$I_\mu = \frac{\pi * \rho_i * \left(\frac{F_{1m}}{2}\right)}{3 * \sqrt{2} * W_i * k_w} = \frac{\pi * 2 * 392.08}{3 * 1.41 * 373 * 0.98} = 1.59A$$

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

3.1 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΙΣΟΔΥΝΑΜΟΥ ΚΥΚΛΩΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΚΙΝΗΤΗΡΑ

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 τη σχέση:

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

Όπου:

ρ_{CO} : η ειδική αντίσταση του χαλκού στους 80°C

l_c : το μήκος του τυλίγματος κάθε φάσης

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

Όπου:

L : το μήκος του στάτη

l_{end} : το μήκος του τυλίγματος που είναι ουσιαστικά έξω από τα αυλάκια του στάτη.

Η παραπάνω σχέση περιέχει το ενεργό μέρος $2L$ και το τέλος της σύνδεσης $2l_{end}$.

Το μήκος του τέλους συνδέσεως εξαρτάται από τον αριθμό των πόλων, τη μορφή των τυλιγμάτων και τον αριθμό των πόλων, τη μορφή των τυλιγμάτων και τον αριθμό των στρώσεων των τυλιγμάτων.

Γενικά, οι κατασκευάστριες εταιρίες έχουν αναπτύξει εμπειρικές μεθόδους, όπως:

1. $l_{end} = 2 \cdot y - 0,04m$ για $2\pi = 2$
2. $l_{end} = 2 \cdot y - 0,02m$ για $2\pi = 4$
3. $l_{end} = \frac{\pi}{2}y + 0,018 m$ για $2\pi = 6$
4. $l_{end} = 2.2 \cdot y - 0,012m$ για $2\pi = 8$

Ο κινητήρας που σχεδιάζεται είναι τετραπολικός άρα η σχέση που επιλέγουμε είναι η (2) :

$$l_{end} = 2 \cdot y - 0,02m$$

Όπου y είναι το βήμα του τυλίγματος. Στην περίπτωση μας ισχύει:

$$\frac{y}{\tau} = \frac{7}{9} \Rightarrow y = \frac{7}{9} \cdot \tau = \frac{7}{9} \cdot 0,062m = 0,0482m$$

Άρα:

$$l_{end} = 2 \cdot y - 0,02m = 2 \cdot 0,0482 - 0,02 = 0,0764m$$

Η ειδική αντίσταση του χαλκού στους $20^{\circ}C$ είναι $(\rho_{co})_{20^{\circ}C} = 1,78 \times 10^{-8} \Omega m$. Δεν γνωρίζουμε ακόμη την τιμή της θερμοκρασίας του στάτη αλλά η υψηλή απόδοση μας δείχνει ότι η θερμοκρασία τυλίγματος δεν πρέπει να είναι τόσο μεγάλη ακόμη και αν η κλάση της μόνωσης είναι η F. Στους $80^{\circ}C$ (ενδεικτική περίπτωση θερμοκρασίας κατά την λειτουργία της μηχανής) η ειδική αντίσταση θα είναι ίση με:

$$\rho_{80} = \rho_{20} \cdot \left(1 + \frac{1}{273} \cdot (80 - 20) \right) = 2,171 \cdot 10^{-8} \Omega m$$

Το συνολικό μήκος του τυλίγματος κάθε φάσης θα είναι:

$$l_c = 2 \cdot (L + l_{end}) = 2 \cdot (0,093 + 0,0764) = 0,338m$$

Η αντίσταση των τυλιγμάτων του στάτη θα είναι ίση με:

$$R_s = \rho_{co} \cdot \frac{l_c \cdot W_i}{A_{co} \cdot a_i} = 2,17 \cdot 10^{-8} \Omega m \cdot \frac{0,338m \cdot 373}{0,57 \cdot 10^{-6} m^2 \cdot 0,72} = 6,65 \Omega$$

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

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

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

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

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

$$b = h_r + h_{or} + d_{SL} = 12.55 + 0,5 + 7.7) = 20.75\text{mm}$$

$$D_{er} = D_{re} - 3,5 \cdot 10^{-3} - 2 \cdot g = 0,0798 - 0,0035 - 2 \cdot 0,0035 = 0,0693\text{m}$$

Συνεπώς το μήκος του τομέα του δακτυλίου βραχυκύκλωσης θα είναι:

$$l_{er} = \frac{\pi \cdot (D_{er} - b)}{N_r} = \frac{\pi \cdot (0,0693 - 0,02075)}{18} = 8.47 \cdot 10^{-3}\text{m}$$

Στη συνέχεια υπολογίζουμε την σταθερά K_R (συντελεστής επιδερμικού φαινομένου της αντίστασης για την μπάρα είναι προσεγγιστικά) 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:

$$\beta_s = \sqrt{\frac{\omega \cdot \mu_0}{2 \cdot \rho_{Al}}} = \sqrt{\frac{2\pi \cdot 50 \cdot 1,25 \cdot 10^{-6}}{2 \cdot 3,1 \cdot 10^{-8}}} = 79,5\text{m}^{-1}$$

$$\xi = \beta_s \cdot h_r \cdot \sqrt{s} = 79,5\text{m}^{-1} \cdot 0,01255\text{m} \cdot 1 = 0.997$$

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

$$\begin{aligned}
 R_{be}^{80} &= \rho_{Al} \cdot \left[1 + \frac{1}{273} (80 - 20) \right] \cdot \left[\frac{L}{A_b} \cdot K_R + \frac{l_{er}}{2 \cdot A_{er} \cdot \sin\left(\frac{\pi P_1}{N_r}\right)} \right] \\
 &= 3,1 \cdot 10^{-8} \left[1 + \frac{1}{273} (80 - 20) \right] \\
 &\quad \cdot \left[\frac{0,0935 \cdot 0,997}{96,63 \cdot 10^{-6}} + \frac{8,47 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 181,66 \cdot 10^{-3} \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{18}\right)} \right] = 0,3663 \cdot 10^{-4} \Omega
 \end{aligned}$$

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

$$R_2 = \frac{4 \cdot m}{N_r} \cdot (W_i \cdot K_{w1}) \cdot R_{be}^{80} = \frac{4 \cdot 3}{18} \cdot (373 \cdot 0,98) \cdot 0,3663 \cdot 10^{-4} \Omega = 3,26 \Omega$$

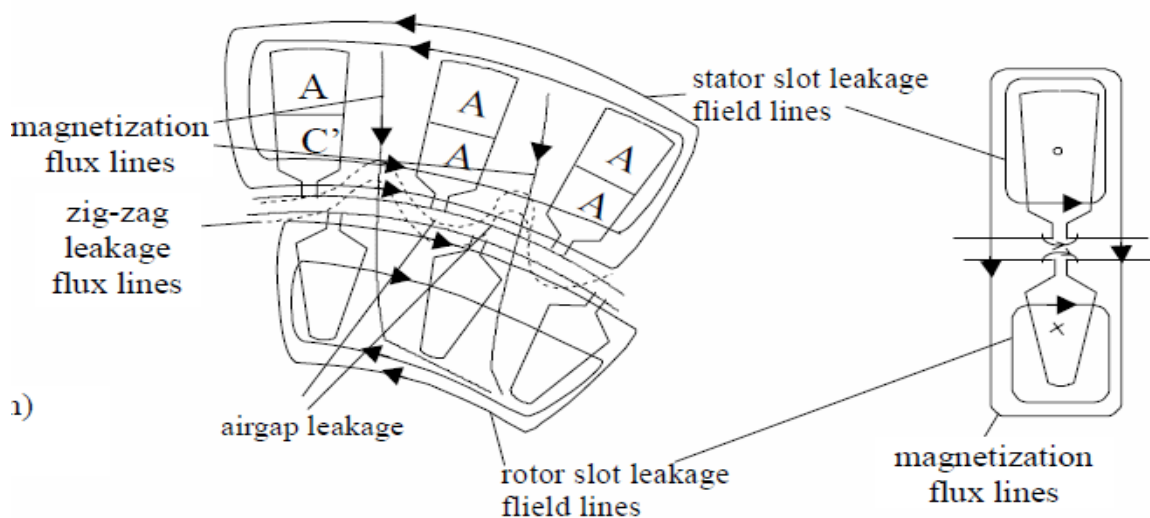
Υπολογισμός επαγωγικών αντιδράσεων

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:

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

Όπου λ_s , λ_{ds} , λ_{er} είναι συντελεστές που ονομάζονται slot coefficient, differential coefficient και end ring coefficient αντίστοιχα).



Σχήμα 2.10 Αμοιβαία ροή και ροή διαρροής στο εσωτερικό μιας επαγωγικής μηχανής

Ο συντελεστής λ_s υπολογίζεται από τη σχέση:

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

Όπου $\beta=y/\tau=7/9$. Οι υπόλοιποι όροι της εξίσωσης αντιστοιχούν στις διαστάσεις των αυλακιών του στάτη (βλέπε Σχήμα 2.5). Αντικαθιστώντας τις τιμές στην παραπάνω εξίσωση έχουμε:

$$\begin{aligned} \lambda_s &= \left[\frac{2}{3} \cdot \frac{h_s}{(b_{s1} + b_{s2})} + \frac{2 \cdot h_w}{(b_{os} + b_{s1})} + \frac{h_{os}}{b_{os}} \right] \cdot \left(\frac{1 + 3\beta}{4} \right) \\ &= \left[\frac{2}{3} \cdot \frac{22,27}{6,19 + 6,28} + \frac{2 \cdot 1}{2,5 + 6,19} + \frac{0,75}{2,5} \right] \cdot \left(\frac{1 + 3 \cdot 7/9}{4} \right) = 1,41 \end{aligned}$$

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

$$\gamma_{ds} = (0,18 \cdot \sin\varphi_1 + 1,24) \cdot 10^{-2}$$

$$\varphi_1 = \pi \cdot (6\beta - 5,5) = -2,76^\circ$$

Από τις παραπάνω σχέσεις προκύπτει ότι:

$$\gamma_{ds} = (0,18 \cdot \sin\varphi_1 + 1,24) \cdot 10^{-2} = 1,23 \cdot 10^{-2}$$

$$C_s = 1 - 0,033 \cdot \frac{b_{os}^2}{g \cdot \tau_s} = 1 - 0,033 \cdot \frac{2,5^2}{0,35 \cdot 10,3} = 0,943$$

Και

$$\lambda_{ds} = \frac{0,9 \cdot \tau_s \cdot q^2 \cdot K_{w1}^2 \cdot C_s \cdot \gamma_{ds}}{K_c \cdot g \cdot (1 + K_{st})} = \frac{0,9 \cdot 10,3 \cdot 10^{-3} \cdot 3^2 \cdot 0,98^2 \cdot 0,943 \cdot 1,23 \cdot 10^{-2}}{1,21 \cdot 0,35 \cdot 10^{-3} \cdot (1 + 0,4)} \rightarrow$$

$$\lambda_{ds} = 1,56$$

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

$$\lambda_{er} = 0,67 \cdot \frac{q}{L} \cdot (l_{end} - 0,64 \cdot \beta \cdot \tau) =$$

$$0,67 \cdot \frac{3}{0,093} \cdot \left(0,0764 - 0,64 \cdot \frac{7}{9} \cdot 0,062\right) \Rightarrow \lambda_{ec} = 1,002$$

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

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

$$= 2 \cdot 1,25 \cdot 10^{-6} \cdot 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 0,093 \cdot \frac{373^2}{2 \cdot 2} \cdot (1,41 + 1,56 + 1,002)$$

$$= 10,09\Omega$$

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

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

Όπου

$$\lambda_r = 0,66 + \frac{2 \cdot h_r}{3 \cdot d_{SL}} + \frac{h_{or}}{b_{or}} = 0,66 + \frac{2 \cdot 12,55}{3 \cdot 7,7} + \frac{0,5}{1,5} = 2,076$$

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

Ο συντελεστής γ_{dr} δίνεται από τη σχέση:

$$\gamma_{dr} = 9 \cdot \left(\frac{6 \cdot p_i}{N_r}\right)^2 \cdot 10^{-2} = 4 \cdot 10^{-2}$$

Άρα:

$$\lambda_{dr} = \frac{0,9 \cdot \tau_r \cdot \gamma_{dr}}{K_c \cdot g} \cdot \left(\frac{N_r}{6 \cdot p_i}\right)^2 = \frac{0,9 \cdot 13,8 \cdot 4 \cdot 10^{-2}}{1,21 \cdot 0,35} \cdot \left(\frac{18}{6 \cdot 2}\right)^2 = 2,63$$

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

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

Στην παραπάνω σχέση το $D_{er}=0,08895\text{m}$ και το b (το βάθος του δακτυλίου βραχυκύκλωσης) είναι ίσο με:

$$b = h_r + h_{or} + d_{SL} = 15,43 + 0,5 + 5,61 = 20,75\text{mm}$$

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

$$\alpha = \frac{A_{er}}{b} = \frac{181,66\text{mm}^2}{20,75\text{mm}} = 8,75\text{mm}$$

Άρα:

$$\begin{aligned} \lambda_{er} &= \frac{2,3 \cdot (D_{er} - b)}{N_r \cdot L \cdot 4 \cdot \sin\left(\frac{\pi \cdot P_1}{N_r}\right)} \cdot \log\left[\frac{4,7 \cdot (D_{er} - b)}{b + 2a}\right] \\ &= \frac{2,3 \cdot (69,3 - 20,75)}{18 \cdot 93 \cdot 4 \cdot \sin^2\left(\frac{2\pi}{18}\right)} \cdot \log\left[\frac{4,7 \cdot (69,3 - 20,75)}{20,75 + 2 \cdot 8,75}\right] = 0,10 \end{aligned}$$

Στη συνέχεια θα υπολογίσουμε τον συντελεστή επιδερμικού φαινομένου K_x (skin effect coefficient for leakage reactance) από τη σχέση:

$$K_x = \frac{3 \cdot [\sinh(2\xi) - \sin(2\xi)]}{2 \cdot \xi \cdot [\cosh(2\xi) - \cos(2\xi)]} = 1,50$$

Στην παραπάνω σχέση το $\xi=1,5$. Η επαγωγική αντίδραση του δρομέα θα είναι ίση με:

$$\begin{aligned} X_{be} &= 2 \cdot \pi \cdot f \cdot \mu_0 \cdot L \cdot (\lambda_r \cdot K_x + \lambda_{dr} + \lambda_{er}) \\ &= 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 1,25 \cdot 10^{-6} \cdot 0,093 \cdot (2,076 \cdot 1,50 + 2,63 + 0,10) \\ &= 2,13 \cdot 10^{-4} \Omega \end{aligned}$$

Η ανηγμένη στο στάτη επαγωγική αντίδραση του δρομέα θα είναι:

$$X_2 = 4 \cdot m \cdot \frac{(W_1 \cdot K_{w1})^2}{N_r} \cdot X_{be} = 4 \cdot 3 \cdot \frac{(373 \cdot 0,98)^2}{18} \cdot 2,13 \cdot 10^{-4} \Omega = 18,97 \Omega$$

Οι παραπάνω τιμές είναι για 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:

$$X_m = \sqrt{\left(\frac{V_{ph}}{I_\mu}\right)^2 - R_s^2} - X_{sl} = \sqrt{\left(\frac{230}{1,59}\right)^2 - 6,65^2} - 10,09 = 134,41 \Omega$$

3.2 ΑΠΩΛΕΙΕΣ ΚΑΙ ΒΑΘΜΟΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ

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

$$P_{\alpha\pi} = P_{cu} + P_{Al} + P_{fe} + P_{MHX} + P_{KAT}$$

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

Απώλειες χαλκού στον στάτη:

$$P_{cu} = 3 \cdot I_{ov}^2 \cdot R_s = 3 \cdot 3,14^2 \cdot 6,65W = 196,7W$$

Απώλειες στον δρομέα:

$$P_{Al} = 3 \cdot I_{rn}^2 \cdot R_r = 3 \cdot K_I^2 \cdot I_n^2 \cdot R_r = 3 \cdot 0,864^2 \cdot 3,14^2 \cdot 3,26 = 71,9W$$

Οι μηχανικές απώλειες υπολογίζονται προσεγγιστικά από την εμπειρική σχέση:

$$P_{MHX} = 0,008 \cdot P_{ov} = 0,008 \cdot 1500W = 12W$$

Οι κατανεμημένες απώλειες υπολογίζονται και αυτές εμπειρικά από τη σχέση:

$$P_{KAT} = 0,01 \cdot 1500W = 15W$$

Οι απώλειες σιδήρου εμφανίζονται κατά κύριο λόγο στον στάτη γιατί στον δρομέα η συχνότητα του ρεύματος είναι πολύ μικρή. Οι απώλειες σιδήρου στο 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 είναι ένας συντελεστής 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:

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

$$\Rightarrow G_{t1} = 7800 \cdot 24 \cdot 4,7 \cdot 10^{-3} \cdot (22,27 + 1 + 0,75) \cdot 10^{-3} \cdot 0,093 \cdot 0,96 = 1,88kgr$$

$$p_{t1} = K_t \cdot p_{10} \cdot \left(\frac{f_1}{50}\right)^{1,3} \cdot B_{ts}^{1,7} \cdot G_{t1} = 1,7 \cdot 3 \cdot \left(\frac{50}{50}\right)^{1,3} \cdot 1,55^{1,7} \cdot 1,88 W = 14,86W$$

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:

$$G_{y1} = \gamma_{iron} \cdot \frac{\pi}{4} \cdot [D_{out}^2 - (D_{out} - 2 \cdot h_{cs})^2] \cdot L \cdot K_{Fe}$$
$$\Rightarrow G_{y1} = 7800 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot [0,12^2 - (0,12 - 2 \cdot 0,08)^2] \cdot 0,093 \cdot 0,96 \Rightarrow G_{y1} = 7W$$

Άρα οι απώλειες στον υπόλοιπο πυρήνα θα είναι:

$$p_{y1} = K_y \cdot p_{10} \cdot \left(\frac{f_1}{50}\right)^{1,3} \cdot B_{cs}^{1,7} \cdot G_{y1} = 1,7 \cdot 3 \cdot \left(\frac{50}{50}\right)^2 \cdot 1,5^{1,7} \cdot 7W = 53,55W$$

Οι συνολικές απώλειες σιδήρου θα είναι ίσες με:

$$P_{fe} = 14,86W + 53,55W = 68,41W$$

Οι συνολικές απώλειες του κινητήρα θα είναι:

$$P_{\alpha\pi} = P_{cu} + P_{Al} + P_{fe} + P_{MHX} + P_{KAT} = 196,7 + 71,9 + 68,41 + 12 + 15W = 364,01W$$

Ο βαθμός απόδοσης του κινητήρα θα είναι:

$$\eta = \frac{1500W}{1500 + 364,01W} \cdot 100\% = 0,8047 \text{ ή } 80\%$$

3.3 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ

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

$$I_0 = \frac{P_{fe} + P_{MHX} + 3 \cdot I_{\mu}^2 \cdot R_s}{3 \cdot V_{ph}} = \frac{68,41 + 12 + 3 \cdot 1,59^2 \cdot 6,65}{3 \cdot 230} = 0,18A$$

Η ολίσθηση υπολογίζεται από την σχέση:

$$P_{Al} = s \cdot P_{AG} \Rightarrow s = \frac{P_{Al}}{P_{AG}} = \frac{71,9W}{1500 + 71,9 + 12 + 15W} = 0,0449 = 4,49\%$$

Η ονομαστική ροπή είναι ίση με:

$$T_n = \frac{1500W}{2\pi \cdot \frac{50}{2} (1 - 0,0449)} = \frac{1500}{150} = 10Nm$$

Η ροπή ανατροπής υπολογίζεται από την σχέση:

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

Όπου:

$$C_1 = 1 + \frac{X_{sl}}{X_m} = 1 + \frac{10,09}{134,41} = 1,075$$

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

$$\begin{aligned} T_{bk} &= \frac{3 \cdot p_1}{2 \cdot \omega_1} \cdot \frac{V_{ph}^2}{[R_s + \sqrt{R_s^2 + (X_{sl} + C_1 \cdot X_2)^2}} \\ &= \frac{3 \cdot 2}{2 \cdot 2\pi \cdot 50} \cdot \frac{230^2}{[6,65 + \sqrt{6,65^2 + (10,09 + 1,078 \cdot 18,97)^2}} = 13,32Nm \end{aligned}$$

Το ρεύμα εκκίνησης του κινητήρα είναι ίσο με:

$$I_{LR} = \frac{V_{ph}}{\sqrt{(R_s + R_r)^2 + (X_{sl} + X_{rl})^2}} = \frac{230}{\sqrt{(6,65 + 3,20)^2 + (10,09 + 18,97)^2}} = 7,49A$$

Η ροπή εκκίνησης είναι ίση με:

$$T_{LR} = \frac{3 \cdot I_{LR}^2 \cdot R_r}{\omega_s} * P = \frac{3 \cdot 7,49^2 \cdot 3,20}{2 \cdot \pi \cdot \frac{1500}{60}} * 2 = 6,84Nm$$

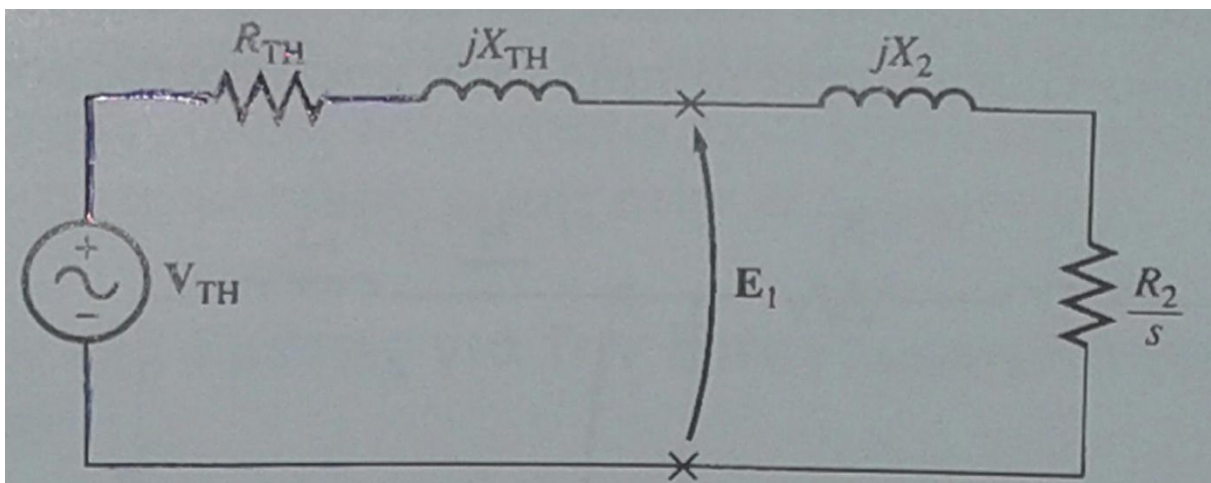
Τέλος ο συντελεστής ισχύος της μηχανής υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\cos\phi = \frac{P_n}{3 \cdot V_{ph} \cdot I_n \cdot \eta} = \frac{1500}{3 \cdot 230 \cdot 3,14 \cdot 0,8047} = 0,86$$

3.4 ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΗΣ ΡΟΠΗΣ-ΣΤΡΟΦΩΝ ΤΟΥ ΚΙΝΗΤΗΡΑ

Η ερμηνεία και η χρησιμότητα της χαρακτηριστικής ροπής-στροφών ενός κινητήρα εξηγήθηκε στο πρώτο κεφάλαιο. Σε αυτό το σημείο θα πραγματοποιηθούν κάποιοι υπολογισμοί ώστε να προσδιορίσουμε κάποια στοιχεία όπως το ρεύμα I_2 , την ισχύ διακένου, την επαγόμενη ροπή και τις μηχανικές στροφές. Θα μεταβάλλουμε την ολίσθηση και θα καταγράψουμε τις αντίστοιχες τιμές ροπής και στροφών.

Για να γίνει όμως αυτό θα πρέπει να απλοποιήσουμε το ισοδύναμο κύκλωμα με χρήση του θεωρήματος του Thevenin. Σύμφωνα με το θεώρημα Thevenin, κάθε γραμμικό κύκλωμα που μπορεί να χωριστεί σε δύο σημεία από το υπόλοιπο σύστημα, είναι δυνατό να αντικατασταθεί από μια πηγή τάσης σε σειρά με μια σύνθετη αντίσταση. Αν κάτι τέτοιο συνέβαινε στο ισοδύναμο κύκλωμα του επαγωγικού κινητήρα, το τελικό κύκλωμα θα ήταν ένας συνδυασμός ηλεκτρικών στοιχείων συνδεδεμένων σε σειρά, όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα 2.11.



Σχήμα 2.11 Ισοδύναμο κύκλωμα κατά thevenin.

Έτσι, θα υπολογίσουμε την V_{th} , R_{th} , X_{th} όπως φαίνεται παρακάτω.

$$V_{th} = V_{\phi} \frac{X_M}{X_1 + X_M} = 230 * \frac{134,41}{10,09 + 134,41} = 213,93 \text{ V}$$

$$R_{th} = R_1 \left(\frac{X_M}{X_1 + X_M} \right)^2 = 6,65 * \left(\frac{134,41}{10,09 + 134,41} \right)^2 = 5,75 \Omega$$

Το $X_{th} = X_1 = 10,09$ διότι $X_M \gg X_1$ και $X_M + X_1 \gg R_1$.

Θα γίνει ο υπολογισμός των $I_2, P_{AG}, r_{ind}, n_m$ για τιμή της ολίσθησης ίση με 1 και τα υπόλοιπα αποτελέσματα φαίνονται στον αντίστοιχο πίνακα. Άρα:

Το μέτρο του ρεύματος I_2 :

$$I_2 = \frac{V_{th}}{\sqrt{\left(R_{th} + \frac{R_2}{s}\right)^2 + (X_{th} + X_2)^2}} = \frac{213,93}{\sqrt{\left(5,75 + \frac{3,26}{1}\right)^2 + (10,09 + 18,97)^2}} = 7A$$

Η ισχύς διακένου:

$$P_{AG} = 3I_2^2 \frac{R_2}{s} = 3 * 7^2 * \frac{3,26}{1} = 479,2 \text{ W}$$

Η επαγόμενη ροπή:

$$\tau_{ind} = \frac{P_{AG}}{\omega_{sync}} = \frac{479,2}{2\pi * \frac{1500}{60}} = 3,05 \text{ Nm}$$

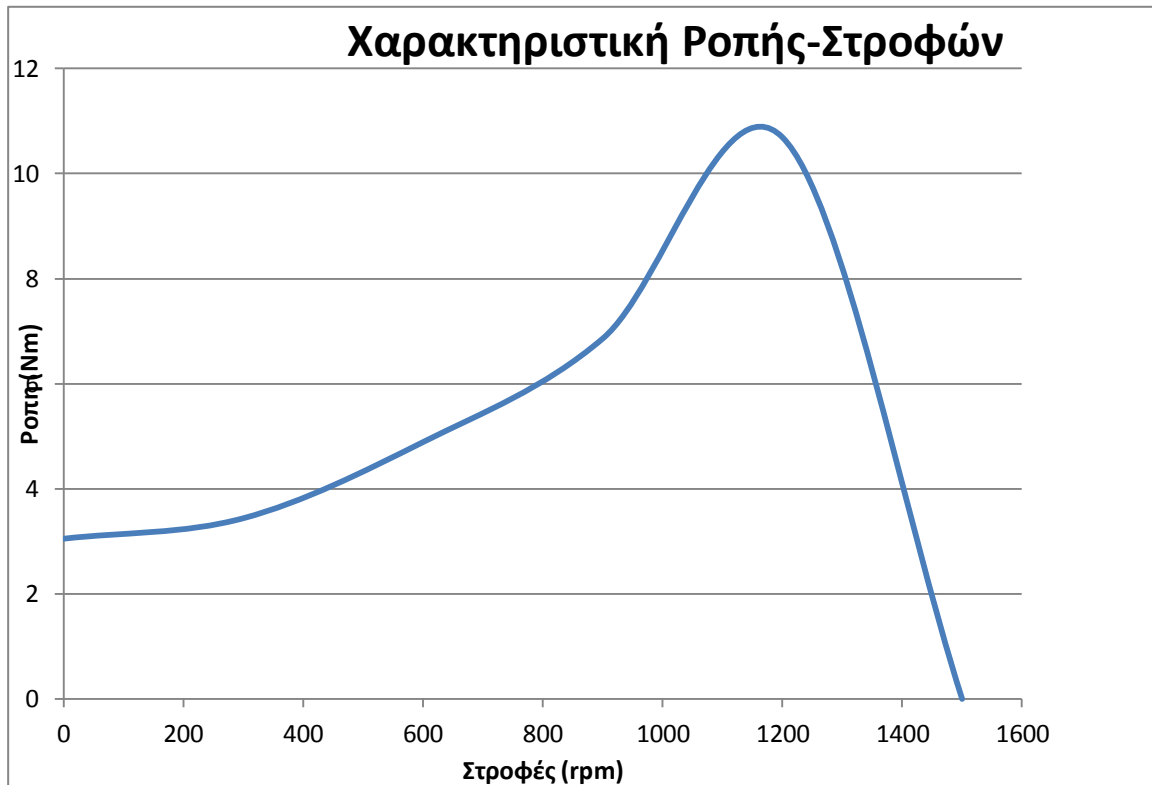
Οι στροφές του κινητήρα:

$$n_m = (1 - s) * n_s = (1 - 1) * 1500 = 0 \text{ rpm}$$

Ολίσθηση (s)	1	0.8	0.6	0.4	0.2	0
Ροπή (Nm)	3,05	3,44	4,89	6,86	10,69	0
Στροφές (rpm)	0	300	600	900	1200	1500

Πίνακας 1.6 Τιμές ροπής και στροφών με την μεταβολή της ολίσθησης.

Πιο κάτω δείχνεται η χαρακτηριστική ροπής στροφών του κινητήρα που μελετήθηκε.



Σχήμα 2.12 Χαρακτηριστική ροπής-στροφών του επαγωγικού κινητήρα

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στο σημείο αυτό θα γίνει μια ανασκόπηση στα όσα πραγματοποιήθηκαν σε αυτή την εργασία. Η εργασία αυτή είχε εκπαιδευτικούς σκοπούς και το αντικείμενο της είναι η μελέτη και η σχεδίαση ενός τριφασικού ασύγχρονου επαγωγικού κινητήρα κλωβού 4 πόλων, 1,5KW. Όπως έχει ήδη ειπωθεί, θέσαμε κάποιες προδιαγραφές γι αυτόν τον κινητήρα οι οποίες πρέπει να τις πετύχουμε. Μπορεί εύκολα κάποιος να διαπιστώσει αν αυτές οι προδιαγραφές πέτυχαν ή όχι με μια απλή σύγκριση των χαρακτηριστικών λειτουργίας με τις προδιαγραφές.

Αρχικά πρέπει να αναφερθούν κάποια από τα προς μελέτη στοιχεία του κινητήρα. Στην αρχική διαστασιολόγηση του κινητήρα υπολογίσαμε την εσωτερική και την εξωτερική διάμετρο του κινητήρα. Ένα πολύ σημαντικό στοιχείο στην εξέλιξη της μελέτης αλλά και στην συμπεριφορά και την απόδοση του κινητήρα είναι το διάκενο. Επιλέχτηκε η πιο μικρή από τα τυποποιημένα μεγέθη καθώς το μέγεθος που υπολογίστηκε ήταν κατώτερο του 0,35mm. Ως γνωστόν 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.

Έπειτα υπολογίστηκε το τύλιγμα του στάτη ο οποίος έχει 24 αυλάκια και 4 πραγματικούς πόλους, ένα μάτσο ανά αυλάκι και μια στρώση. Υπολογίσαμε αναλυτικά τη γεωμετρία των αυλακιών που θα τοποθετηθεί το τύλιγμα και την τιμή της μαγνητικής επαγωγής στο στάτη, η οποία κυμαίνεται μεταξύ 1,4T-1,7T. Η τιμή που υπολογίσαμε ήταν κατά πολύ μεγαλύτερη, γι' αυτό επιλέχτηκε να αυξήσουμε την εξωτερική διάμετρο του στάτη ώστε να επιτύχουμε την επιθυμητή τιμή.

Στη συνέχεια υπολογίστηκε το ισοδύναμο κύκλωμα του επαγωγικού κινητήρα το οποίο είναι ίδιο όπως έχει αναφερθεί και αναλυθεί με αυτό του μετασχηματιστή. Βρέθηκαν οι τιμές των επαγωγικών αντιδράσεων του στάτη, του δρομέα και η αντίδραση μαγνήτισης του κινητήρα, όπως επίσης και οι ωμικές αντιστάσεις αντίστοιχα. Κατόπιν από το ισοδύναμο κύκλωμα και τα στοιχεία του βρέθηκαν οι απώλειες και τα χαρακτηριστικά λειτουργίας αυτού του κινητήρα.

Στο σημείο αυτό πρέπει να γίνει μια τεκμηρίωση για κάποια από τα στοιχεία των χαρακτηριστικών λειτουργίας. Η ροπή εκκίνησης και η ροπή ανατροπής έχουν κάποια απόκλιση από τις προδιαγραφές που ορίσαμε και μάλιστα είναι πιο μικρό το μέγεθος τους. Αυτό οφείλεται κυρίως στο ότι η επαγωγική αντίδραση διαρροής του στάτη και του δρομέα είναι μεγαλύτερη. Για να πετύχουμε την τιμή της ροπής που θέλουμε και στις δύο περιπτώσεις θα πρέπει να μικρύνει η επαγωγική αντίδραση στο στάτη και στο δρομέα. Ένας άλλος τρόπος να αυξήσουμε την ροπή εκκίνησης είναι αυξήσουμε την αντίσταση του δρομέα, όμως κάτι τέτοιο θα επιφέρει αύξηση των θερμικών απωλειών και αύξηση της ολίσθησης κάτι που επίσης θέλουμε να αποφύγουμε.

Πρέπει όμως να αναφερθούμε και σε δύο πολύ σημαντικά μεγέθη της μηχανής που είναι ο βαθμός απόδοσης και ο συντελεστής ισχύος. Εκεί παρατηρούμε ότι έχουν επιτευχθεί οι στόχοι που θέσαμε και αυτό δείχνει την σωστή πορεία της μελέτης που δημιούργησε μια αποδοτική μηχανή.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- 1) Stephen J. Charman- Ηλεκτρικές Μηχανές 4^η έκδοση, εκδόσεις τζιόλα 2010
- 2) Ι.Α. Τεγόπουλος, Ηλεκτρικές Μηχανές Μέρος Β', εκδόσεις Συμμετρία 1986
- 3) Στέφανος Τουλόγλου –Βαγγέλης Στεργίου, Ηλεκτρικές Μηχανές Εναλλασσομένου ρεύματος 1999
- 4) Ion Boldea & S.A. Nasar, The Induction Machine Handbook ,crc press 2001
- 5) Giorgio Rizzoni, Ηλεκτρομηχανική Τόμος 3^{ος}, εκδόσεις παπαζήση 2006
- 6) Σπυρ. Ν. Βασιλακόπουλου, Ηλεκτρικές Μηχανές, εκδόσεις Ίδρυμα Ευγενίδου 1988