



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΠΕΛΟΠΟΝΝΗΣΟΥ

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΛΟΠΟΝΝΗΣΟΥ

Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΙ ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΜΟΝΟΦΑΣΙΚΟΥ ΚΙΝΗΤΗΡΑ

ΦΕΡΕΤΟΣ ΧΡΥΣΟΒΑΛΑΝΤΗΣ 7567

ΑΝΑΣΤΑΣΟΠΟΥΛΟΣ ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ 7393

Επιβλέπων Καθηγητής: Βασίλειος Χαραλαμπίκος – Επίκουρος Καθηγητής

ΠΑΤΡΑ 2023

Περιεχόμενα

Σχήματα	vii
Λέξεις κλειδιά	ix
Περίληψη	x
Abstract	xi
1 Εισαγωγή	1
1.1 Στοιχεία Μηχανικής	1
1.1.1 Θεμελιώδη μεγέθη	1
1.1.2 Δεύτερος Νόμος Νεύτωνα	3
1.1.3 Ενέργειες	4
1.2 Στοιχεία Ηλεκτρομαγνητισμού	5
1.2.1 Ηλεκτροστατική στο κενό	5
1.2.2 Ηλεκτροστατική στην ύλη	7
1.2.3 Μαγνητοστατική στο κενό	8
1.2.4 Μαγνητοστατικά πεδία στην ύλη	9
1.2.5 Ηλεκτροδυναμική	11
1.3 Μιγαδικοί Αριθμοί	12
1.4 Στοιχεία Ηλεκτρονικής	14
1.5 Η Πιο Απλή Μηχανή Εναλλασσόμενου Ρεύματος	16
2 Ηλεκτρικές Μηχανές	18
2.1 Ιστορική αναδρομή	18
2.2 Βασική δομή Μηχανών Εναλλασσόμενου ρεύματος	19
2.3 Το μαγνητικό πεδίο σε μια μηχανή εναλλασσόμενου ρεύματος	20
2.4 Σύγχρονες Μηχανές	23
2.5 Ασύγχρονες Μηχανές	27
2.6 Κατηγοριοποίηση Μηχανών Επαγωγής	34
2.7 Έναρξη και Έλεγχος Ταχύτητας Κινητήρων Επαγωγής	36
3 Μονοφασικοί Κινητήρες	40
3.1 Κινητήρας γενικής χρήσης	40
3.2 Δομή και Μαγνητικό Πεδίο Μονοφασική Επαγωγική Μηχανής	41
3.2.1 Διπλά Στρεφόμενο Πεδίο	41
3.2.2 Θεώρημα διασταυρωμένων πεδίων	44
3.3 Εκκίνηση Μονοφασικής Επαγωγικής Μηχανής	45
3.4 Έλεγχος της ταχύτητας	49
3.5 Ισοδύναμο κύκλωμα μονοφασικού επαγωγικού κινητήρα	50
4 Σχεδίαση Μονοφασικού Κινητήρα	53
4.1 Προδιαγραφές Σχεδιασμού	53
4.2 Υλικά και Σχεδιασμός	53

4.3	Διαδικασία Σχεδίασης Επαγωγικής Μονοφασικής Μηχανής με Πυκνωτή Εναρξης και Λειτουργίας.....	55
4.4	Σχεδιασμός Πραγματικού Μονοφασικού Επαγωγικού Κινητήρα	58
4.5	Διορθώσεις τιμών και υπολογισμός σταθερών για λειτουργία σε πλήρες φορτίο	75
4.6	Υπολογισμοί απόδοσης.....	75
4.7	Σχεδιασμός Βοηθητικού Τυλίγματος	76
	Βιβλιογραφία	82

Σχήματα

ΣΧΗΜΑ 1 ΚΑΡΤΕΣΙΑΝΕΣ ΣΥΝΤΕΤΑΓΜΕΝΕΣ	1
ΣΧΗΜΑ 2 ΠΕΡΙΣΤΡΟΦΙΚΗ ΚΙΝΗΣΗ.....	2
ΣΧΗΜΑ 3 ΡΟΠΗ.....	4
ΣΧΗΜΑ 4 ΡΟΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ.....	4
ΣΧΗΜΑ 5 ΝΟΜΟΣ COULOMB.....	6
ΣΧΗΜΑ 6 ΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΦΟΡΤΙΑ.....	6
ΣΧΗΜΑ 7 ΜΑΓΝΗΤΙΚΑ ΠΕΔΙΑ.....	9
ΣΧΗΜΑ 8 ΠΡΟΣΑΝΑΤΟΛΙΣΜΟΣ ΤΟΥ SPIN ΛΟΓΩ ΜΑΓΝΗΤΙΚΟΥ ΠΕΔΙΟΥ.....	10
ΣΧΗΜΑ 9 ΔΕΣΜΙΑ ΡΕΥΜΑΤΑ.....	10
ΣΧΗΜΑ 10 ΝΟΜΟΣ FARADAY.....	11
ΣΧΗΜΑ 11 ΜΑΓΝΗΤΙΚΗ ΡΟΗ.....	11
ΣΧΗΜΑ 12 ΚΑΡΤΕΣΙΑΝΗ ΜΟΡΦΗ ΜΙΓΑΔΙΚΟΥ.....	13
ΣΧΗΜΑ 13 ΠΟΛΙΚΗ ΜΟΡΦΗ ΜΙΓΑΔΙΚΟΥ.....	13
ΣΧΗΜΑ 14 ΕΝΑΛΛΑΣΣΟΜΕΝΟ ΡΕΥΜΑ ΚΑΙ ΤΑΣΗ.....	15
ΣΧΗΜΑ 15 ΗΛΕΚΤΡΕΓΕΡΤΙΚΗ ΔΥΝΑΜΗ.....	16
ΣΧΗΜΑ 16 ΗΕΔ ΚΑΙ ΡΟΠΗ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΤΟΥ ΧΡΟΝΟ.....	17
ΣΧΗΜΑ 17 ΕΠΑΓΩΓΙΚΟΣ ΚΙΝΗΤΗΡΑΣ.....	18
ΣΧΗΜΑ 18 ΤΥΛΙΓΜΑ ΣΤΑΤΗ.....	19
ΣΧΗΜΑ 19 ΔΡΟΜΕΑΣ.....	20
ΣΧΗΜΑ 20 ΜΑΓΝΗΤΙΚΟ ΠΕΔΙΟ ΣΤΑΤΗ.....	21
ΣΧΗΜΑ 21 ΤΕΤΡΑΠΟΛΙΚΟΣ ΣΤΑΤΗΣ.....	22
ΣΧΗΜΑ 22 ΙΣΟΔΥΝΑΜΗ ΑΝΑΠΑΡΑΣΤΑΣΗ ΤΕΤΡΑΠΟΛΙΚΟΥ ΣΤΑΤΗ.....	22
ΣΧΗΜΑ 23 ΣΥΓΧΡΟΝΗ ΜΗΧΑΝΗ.....	24
ΣΧΗΜΑ 24 ΙΣΟΔΥΝΑΜΟ ΚΥΚΛΩΜΑ ΣΥΓΧΡΟΝΗΣ ΜΗΧΑΝΗΣ.....	24
ΣΧΗΜΑ 25 ΤΡΙΦΑΣΙΚΗ ΠΗΓΗ ΑΣΤΕΡΑ.....	25
ΣΧΗΜΑ 26 ΡΟΗ ΙΣΧΥΟΣ ΣΕ ΣΥΓΧΡΟΝΗ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑ.....	26
ΣΧΗΜΑ 27 ΡΟΗ ΙΣΧΥΟΣ ΣΕ ΣΥΓΧΡΟΝΟ ΚΙΝΗΤΗΡΑ.....	27
ΣΧΗΜΑ 28 ΑΣΥΓΧΡΟΝΗ ΜΗΧΑΝΗ.....	27
ΣΧΗΜΑ 29 ΙΣΟΔΥΝΑΜΟ ΑΣΥΓΧΡΟΝΗ ΜΗΧΑΝΗΣ.....	29
ΣΧΗΜΑ 30 ΡΟΗ ΙΣΧΥΟΣ ΣΕ ΑΣΥΓΧΟΝΟ ΕΠΑΓΩΓΙΚΟ ΚΙΝΗΤΗΡΑ.....	30
ΣΧΗΜΑ 31 ΙΣΟΔΥΝΑΜΟ ΚΥΚΛΩΜΑ ΑΣΥΓΧΡΟΝΗΣ ΜΗΧΑΝΗΣ ΑΝΟΙΓΜΕΝΟ ΣΤΟΝ ΣΤΑΤΗ.....	30
ΣΧΗΜΑ 32 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΘΕΩΡΗΜΑΤΟΣ THEVENIN.....	32
ΣΧΗΜΑ 33 ΡΟΠΗ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ.....	32
ΣΧΗΜΑ 34 ΕΠΑΓΟΜΕΝΗ ΡΟΠΗ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ.....	34
ΣΧΗΜΑ 35 ΚΛΑΣΕΙΣ ΜΗΧΑΝΩΝ ΕΠΑΓΩΓΗΣ.....	35
ΣΧΗΜΑ 36 ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΜΗΧΑΝΩΝ ΕΠΑΓΩΓΗΣ.....	36
ΣΧΗΜΑ 37 ΠΟΛΟΙ ΕΠΑΓΩΓΙΚΟΥ ΚΙΝΗΤΗΡΑ.....	37
ΣΧΗΜΑ 38 ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΠΛΑΤΟΣ ΠΟΛΟΥ.....	38
ΣΧΗΜΑ 39 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΕΣ ΡΟΠΗΣ.....	38
ΣΧΗΜΑ 40 ΚΙΝΗΤΗΡΑΣ ΓΕΝΙΚΗΣ ΧΡΗΣΗΣ.....	40
ΣΧΗΜΑ 41 ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΤΗΣ ΕΠΑΓΟΜΕΝΗΣ ΡΟΠΗΣ ΓΙΑ DC ΚΑΙ AC ΚΙΝΗΤΗΡΕΣ.....	41
ΣΧΗΜΑ 42 ΜΑΓΝΗΤΙΚΟ ΠΕΔΙΟ ΜΗΧΑΝΗΣ ΕΠΑΓΩΓΗΣ.....	42
ΣΧΗΜΑ 43 ΜΑΓΝΗΤΙΚΟ ΠΕΔΙΟ ΜΟΝΟΦΑΣΙΚΗΣ ΜΗΧΑΝΗΣ.....	43
ΣΧΗΜΑ 44 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΗ ΚΑΜΠΥΛΗΣ ΕΠΑΓΟΜΕΝΗΣ ΡΟΠΗΣ ΚΑΙ ΣΥΓΧΡΟΝΗΣ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ.....	43
ΣΧΗΜΑ 45 ΘΕΩΡΗΜΑ ΔΙΑΣΤΑΥΡΩΜΕΝΩΝ ΠΕΔΙΩΝ.....	44
ΣΧΗΜΑ 46 ΘΕΩΡΗΜΑ ΔΙΑΣΤΑΥΡΩΜΕΝΩΝ ΠΕΔΙΩΝ.....	45
ΣΧΗΜΑ 47 ΒΟΗΘΗΤΙΚΟ ΤΥΛΙΓΜΑ ΚΑΙ ΙΣΟΔΥΝΑΜΟ ΚΥΚΛΩΜΑ.....	46
ΣΧΗΜΑ 48 ΜΟΝΟΦΑΣΙΚΟΣ ΕΠΑΓΩΓΙΚΟΣ ΚΙΝΗΤΗΡΑ.....	46
ΣΧΗΜΑ 49 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΗ ΡΕΥΜΑΤΟΣ ΧΡΟΝΟΥ.....	47

ΣΧΗΜΑ 50 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΗ ΡΟΠΗΣ ΧΡΟΝΟΥ	47
ΣΧΗΜΑ 51 ΒΟΗΘΗΤΙΚΟΙ ΠΟΛΟΙ ΣΤΟΝ ΣΤΑΤΗ	47
ΣΧΗΜΑ 52 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΗ ΡΟΠΗΣ – ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ	48
ΣΧΗΜΑ 53 ΠΥΚΝΩΤΗΣ ΕΚΚΙΝΗΣΗΣ	49
ΣΧΗΜΑ 54 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΗ ΡΟΠΗΣ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΜΕ ΠΥΚΝΩΤΗ ΕΠΑΓΩΓΗΣ.....	49
ΣΧΗΜΑ 55 ΙΣΟΔΥΝΑΜΟ ΚΥΚΛΩΜΑ ΜΟΝΟΦΑΣΙΚΟΥ ΕΠΑΓΩΓΙΚΟΥ ΚΙΝΗΤΗΡΑ	50
ΣΧΗΜΑ 56 ΙΣΟΔΥΝΑΜΟ ΚΥΚΛΩΜΑ ΜΟΝΟΦΑΣΙΚΟΥ ΕΠΑΓΩΓΙΚΟΥ ΚΙΝΗΤΗΡΑ	51
ΣΧΗΜΑ 57 ΙΣΟΔΥΝΑΜΟ ΚΥΚΛΩΜΑ ΜΟΝΟΦΑΣΙΚΟΥ ΕΠΑΓΩΓΙΚΟΥ ΚΙΝΗΤΗΡΑ	52
ΣΧΗΜΑ 58 ΣΤΑΤΗΣ ΜΟΝΟΦΑΣΙΚΟΥ ΕΠΑΓΩΓΙΚΟΥ ΚΙΝΗΤΗΡΑ	54
ΣΧΗΜΑ 59 ΜΗΚΟΣ ΠΟΛΟΥ	55
ΣΧΗΜΑ 60 ΔΟΝΤΙΑ ΣΤΑΤΗ	56
ΣΧΗΜΑ 61 ΔΙΑΤΡΗΣΗ ΔΡΟΜΕΑ	57
ΣΧΗΜΑ 62 ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΔΟΝΤΙΩΝ ΤΟΥ ΣΤΑΤΗ	61
ΣΧΗΜΑ 63 ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΔΡΟΜΕΑ	64
ΣΧΗΜΑ 64 ΤΜΗΜΑΤΑ ΤΟΥ ΣΤΑΤΗ.....	65
ΣΧΗΜΑ 65 ΜΑΓΝΗΤΙΚΗ ΡΟΗ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΤΗΣ ΕΝΤΑΣΗΣ ΜΑΓΝΗΤΙΚΟΥ ΠΕΔΙΟΥ.....	66
ΣΧΗΜΑ 66 ΒΑΣΙΚΟ ΤΥΛΙΓΜΑ	69
ΣΧΗΜΑ 67 ΕΓΚΟΠΕΣ ΣΤΑΤΗ ΚΑΙ ΔΡΟΜΕΑ.....	72
ΣΧΗΜΑ 68 ΒΑΣΙΚΟ ΚΑΙ ΒΟΗΘΗΤΙΚΟ ΤΥΛΙΓΜΑ	78

Λέξεις κλειδιά

Ηλεκτρικές Μηχανές, Μονοφασικοί Κινητήρες, Μηχανές Επαγωγής

Περίληψη

Σε αυτή την εργασία γίνεται θεωρητική μελέτη των επαγωγικών μονοφασικών κινητήρων. Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται μια περιγραφή της βασικής θεωρίας που απαιτείται για την μελέτη ηλεκτρικών μηχανών σε συνοπτική μορφή. Παρουσιάζονται τα βασικά στοιχεία κλασικής μηχανικής, ηλεκτρομαγνητισμού, ηλεκτρονικών και μιγαδικών αριθμών.

Στο δεύτερο κεφάλαιο γίνεται μια περιγραφή των ηλεκτρικών μηχανών. Η περιγραφή αφορά την ιστορική εξέλιξη του ηλεκτρικού κινητήρα και την βασική φυσική μέσα σε μια ηλεκτρική μηχανή. Παρουσιάζονται οι 2 κατηγορίες ηλεκτρικών μηχανών σύγχρονες και ασύγχρονες και η κατηγοριοποίηση αυτών.

Στο τρίτο κεφάλαιο γίνεται πλήρης ανάπτυξη της θεωρίας των μονοφασικών επαγωγικών κινητήρων. Η θεωρία περιλαμβάνει την μορφή του μαγνητικού πεδίου, το πρόβλημα της εκκίνησης, τον έλεγχο της ταχύτητας και το ισοδύναμο κύκλωμα.

Τέλος, στο τέταρτο κεφάλαιο γίνεται πλήρης ανάλυση και σχεδίαση μονοφασικού επαγωγικού κινητήρα. Αναλύονται οι προδιαγραφές σχεδιασμού για τον κινητήρα τα υλικά και ο σχεδιασμός. Στο κομμάτι του σχεδιασμού γίνεται αναλυτική περιγραφή για κάθε τμήμα του κινητήρα και στον στάτη και στον δρομέα. Και στα 2 τμήματα στάτη και δρομέα αναλύονται πλήρως τα μεγέθη του δοντιού και του τυλίγματος και υπολογίζονται όλες οι αντιστάσεις, οι αντιδράσεις, μαγνητικές ροές και τα ρεύματα που απαιτούνται για την σχεδίαση μονοφασικού επαγωγικού κινητήρα.

Abstract

In this dissertation, a theoretical study of induction single-phase motors is made. In the first chapter there is a description of the basic theory required for the study of electric machines in a concise form. The basics of classical mechanics, electromagnetism, electronics, and complex numbers are introduced.

In the second chapter there is a description of electric machines. The description covers the historical development of the electric motor and the basic physics inside an electric machine. The 2 categories of electric machines, synchronous and asynchronous, and their categorization are presented.

In the third chapter, the theory of single-phase induction motors is fully developed. The theory includes the form of the magnetic field, the starting problem, speed control, and the equivalent circuit.

Finally, in the fourth chapter, a complete analysis and design of a single-phase induction motor is done. The design specifications for the engine, materials and design are analyzed. In the design part, a detailed description is made for each part of the motor and the stator and the rotor. In both sections stator and rotor the tooth and winding sizes are fully analyzed and all resistances, reactance, magnetic fluxes, number of slots and currents required for the design of the a single phase induction machine are calculated.

1 Εισαγωγή

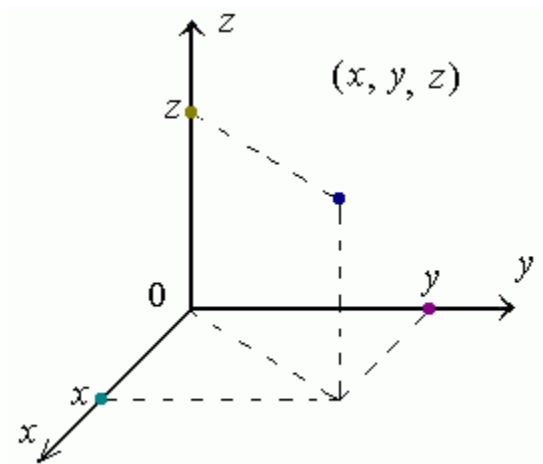
Ως ηλεκτρική μηχανική ορίζεται μια συσκευή που μπορεί να μετατρέψει τη μηχανική ενέργεια σε ηλεκτρική ή το αντίστροφο. Στην περίπτωση που μετατρέπει την μηχανική ενέργεια σε ηλεκτρική ονομάζεται γεννήτρια και στην περίπτωση που μετατρέπει την ηλεκτρική σε μηχανική κινητήρας. Αυτή η μετατροπή γίνεται μέσω ενός μαγνητικού πεδίου. Οι μετασχηματιστές είναι ηλεκτρικές συσκευές που σχετίζονται με τις ηλεκτρικές μηχανές και η βασική τους λειτουργία είναι να μετασχηματίζουν τάσεις. Οι παραπάνω 3 τύποι ηλεκτρικών συσκευών είναι άρρηκτα συνδεδεμένοι με την καθημερινή μας ζωή, οι ηλεκτρικές μηχανές βρίσκονται μέσα στο air condition, στους ανεμιστήρες, στις σκούπες καθαρισμού και στις περισσότερες συσκευές που χρησιμοποιούμε στην καθημερινότητα μας. Ο ηλεκτρισμός είναι μια καθαρή και αποδοτική πηγή ενέργειας η οποία ελέγχεται σχετικά εύκολα μπορεί να μεταδοθεί σε μεγάλες αποστάσεις.

1.1 Στοιχεία Μηχανικής

Σε αυτή την εργασία χρησιμοποιείται το διεθνές σύστημα μονάδων SI, όπου ο χρόνος μετριέται σε δευτερόλεπτα (s), οι αποστάσεις σε μέτρα (m) και η μάζα σε κιλά (kg).

1.1.1 Θεμελιώδη μεγέθη

Ως καρτεσιανό σύστημα αναφοράς ορίζεται το τρις ορθογώνιο σύστημα αξόνων που δημιουργείται από έναν παρατηρητή. Ο παρατηρητής μελετάει ένα σώμα με χρονική εξέλιξη, το οποίο έχει διάνυσμα θέσης $r(t) [m]$ με συντεταγμένες $(x(t), y(t), z(t))$.



Σχήμα 1 Καρτεσιανές Συντεταγμένες

Η ταχύτητα του σώματος ορίζεται ως

$$u(t) = \frac{dr(t)}{dt} [m/s] \quad (1.1.1)$$

και η επιτάχυνση ως:

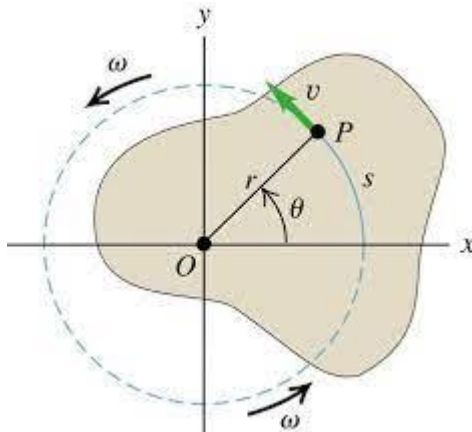
$$a = \frac{du(t)}{dt} [m/s^2] \quad (1.1.2)$$

Σε πλήρη αντιστοιχία, αν το σωματίδιο κάνει περιστροφική κίνηση γύρω από έναν άξονα η γωνία του ως προς τον άξονα δίνεται από το διάνυσμα $\theta(t)[rad]$ και η γωνιακή του ταχύτητα από

$$\omega(t) = \frac{d\theta(t)}{dt} [rad/s] \quad (1.1.3)$$

Και η γωνιακή επιτάχυνση από την σχέση

$$a_\gamma = \frac{d\omega(t)}{dt} [rad/s^2] \quad (1.1.4)$$



Σχήμα 2 Περιστροφική Κίνηση

Αν ένα σώμα εκτελεί σύνθετη κίνηση τα περιστροφικά μεγέθη σχετίζονται με τα μεταφορικά με τις εξισώσεις

$$x = r \theta \quad (1.1.5)$$

$$u = r \omega \quad (1.1.6)$$

$$a = r a_{\gamma} \quad (1.1.7)$$

Αν μια κίνηση επαναλαμβάνεται ανά σταθερά χρονικά διαστήματα ονομάζεται περιοδική. Χαρακτηριστικό μέγεθος των περιοδικών κινήσεων η περίοδος T , δηλαδή ο χρόνος μέχρι το σύστημα να επανέλθει στην ίδια κατάσταση. Η σχέση που συνδέει περίοδο, συχνότητα και γωνιακή ταχύτητα είναι

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{1}{f} [s] \quad (1.1.8)$$

1.1.2 Δεύτερος Νόμος Νεύτωνα

Ο δεύτερος νόμος του Νεύτωνα ονομάζεται και θεμελιώδης νόμος της μηχανικής. Πρόκειται για έναν εμπειρικό νόμο και στην περίπτωση σταθερής μάζας παίρνει την μορφή

$$\sum F = ma \quad (1.1.9)$$

Όπου

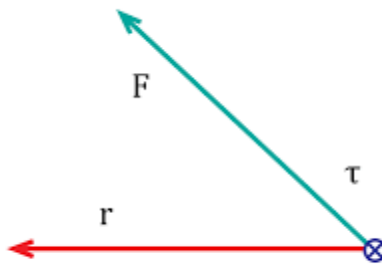
- F οι δυνάμεις
- m η μάζα του σώματος
- a η επιτάχυνση

Αν το σώμα εκτελεί περιστροφική ο δεύτερος νόμος του Νεύτωνα γράφεται ως

$$\sum F = I a_{\gamma} \quad (1.1.10)$$

Όπου

- Η ροπή τ είναι το περιστροφικό ανάλογο της δύναμης και ορίζεται ως
- $$\tau = r \times F = r F \sin\theta \quad (1.1.11)$$



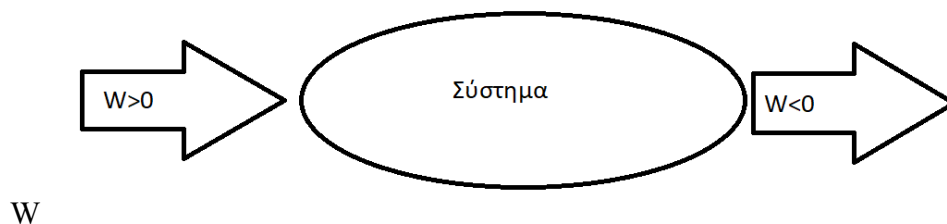
Σχήμα 3 Ροπή

- Η ροπή αδράνειας I είναι το περιστροφικό ανάλογο της μάζας

1.1.3 Ενέργειες

Η ενέργεια είναι μια έννοια που δίνει την δυνατότητα πρόβλεψης της εξέλιξης ή της κίνησης ενός συστήματος. Η παρουσία ενέργειας ανιχνεύεται από έναν παρατηρητή κάθε φορά μέσω της αλλαγής στις ιδιότητες ενός αντικειμένου ή ενός συστήματος. Βασική ιδιότητα είναι ότι η συνολική ενέργεια ενός απομονωμένου συστήματος είναι σταθερή.

Ένα σύστημα μπορεί να περιέχει διάφορες μορφές ενέργειας όπως κινητική, δυναμική, ηλεκτρική, μαγνητική, πυρηνική, θερμική, χημική κτλ. και μπορεί να γίνονται μετασχηματισμοί μεταξύ αυτών των ενεργειών. Το σύστημα λαμβάνει και αποβάλλει ενέργεια, αυτή ενέργεια ονομάζεται έργο



Σχήμα 4 Ροή Ενέργειας

Αν η κίνηση είναι μεταφορική το έργο ορίζεται ως

$$W = \int \mathbf{F} \cdot d\mathbf{r} [J] \quad (1.1.11)$$

Αν η κίνηση είναι περιστροφική το έργο ορίζεται ως

$$W = \int \boldsymbol{\tau} \cdot d\mathbf{r} [J] \quad (1.1.12)$$

Ο ρυθμός μεταβολής του έργου ονομάζεται ισχύς

$$P = \frac{dW}{dt} [W] \quad (1.1.13)$$

Αν η κίνηση είναι μεταφορική η ισχύς υπολογίζεται ως

$$P = \frac{dW}{dt} = \frac{d(Fr)}{dt} = F \frac{dr}{dt} = F u [W] \quad (1.1.14)$$

Αν η κίνηση είναι περιστροφική η ισχύς υπολογίζεται ως

$$P = \frac{dW}{dt} = \frac{d(\tau\theta)}{dt} = \tau \frac{d\theta}{dt} = \tau \omega [W] \quad (1.1.15)$$

[1]

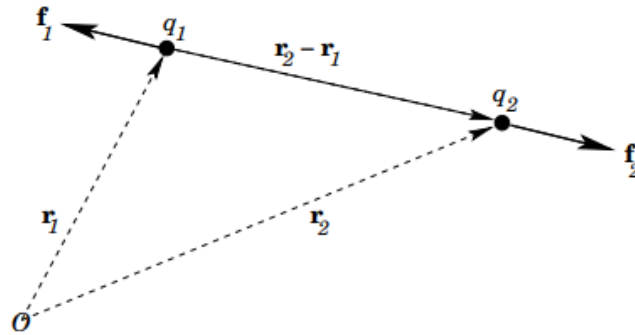
1.2 Στοιχεία Ηλεκτρομαγνητισμού

Η θεωρία του ηλεκτρομαγνητισμού έχει την ικανότητα να ενώνει αρκετούς διαφορετικούς τομείς όπως η διάδοση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων και η λειτουργία του δυναμό. Ο ηλεκτρομαγνητισμός περιστρέφεται γύρω από τέσσερις απλές εξισώσεις που ονομάζονται εξισώσεις Maxwell. Από αυτές τις εξισώσεις περιγράφεται η εκπομπή και η λήψη ραδιοκυμάτων, διάδοση ρεύματος, η λειτουργία ηλεκτροκινητήρων και μετασχηματιστών..

1.2.1 Ηλεκτροστατική στο κενό

Ο νόμος του Coulomb έχει την ίδια μαθηματική μορφή με τον νόμο της παγκόσμιας έλξης του Νεύτωνα, είναι ένας εμπειρικός νόμος που δίνει την δύναμη που ασκείται μεταξύ 2 φορτιών

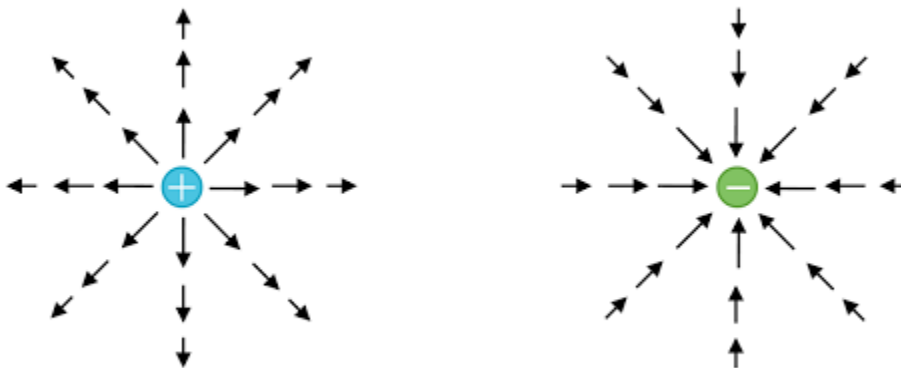
$$F_{1,2} = F_{2,1} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{|r_2 - r_1|^3} (r_2 - r_1) \quad (1.2.1)$$



Σχήμα 5 Νόμος Coulomb

Μια χρήσιμη περιγραφή για τις δυνάμεις που ασκούνται σε φορτισμένα σωματίδια είναι το ηλεκτρικό πεδίο. Η δύναμη που νιώθει ένα φορτισμένο σωματίδιο, με φορτίο q , είναι ίση με φορτίο του επί το ηλεκτρικό πεδίο που το περιβάλλει. Το ηλεκτρικό πεδίο δημιουργείται από τα υπόλοιπα φορτία Q_i που βρίσκονται στον χώρο.

$$F = q \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \sum_i \frac{q_i}{r_i^2} = q E \quad (1.2.2)$$



Σχήμα 6 Ηλεκτρικά Φορτία

Αν η κατανομή φορτίου είναι συνεχής με πυκνότητα φορτίου ρ , το ηλεκτρικό πεδίο υπολογίζεται από τον νόμο του Gauss

$$\int \int_S E \, dS = \frac{Q_{in}}{\epsilon_0} \Rightarrow \nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0} \quad (1.2.3)$$

Όπου Q_{in} το έγκλειστο φορτίο που μέσα στον χώρο που θέλουμε να υπολογίζουμε το ηλεκτρικό πεδίο.

1.2.2 Ηλεκτροστατική στην ύλη

Τα περισσότερα αντικείμενα της καθημερινής ζωής ανήκουν σε 2 κατηγορίες: αγωγούς και μονωτές (διηλεκτρικά). Οι αγωγοί περιέχουν ένα μεγάλο απόθεμα ελεύθερων ηλεκτρονίων, δηλαδή ηλεκτρόνια τα οποία δεν είναι προσκολλημένα σε κάποιον πυρήνα αλλά περιπλανώνται στο κενό μεταξύ των ατόμων. Αυτά τα ηλεκτρόνια είναι υπεύθυνα για την διάδοση του ρεύματος στους αγωγούς. Αντίθετα, στα διηλεκτρικά τα ηλεκτρόνια είναι προσκολλημένα σε άτομα ή πυρήνες έχοντας την δυνατότητα να κινούνται λιγάκι στο εσωτερικό του μορίου. Αυτές οι μικρές μετατοπίσεις μπορούν να δημιουργηθούν από την παρουσία ενός εξωτερικού ηλεκτρικού πεδίου.

Αν ένα κομμάτι διηλεκτρικού τοποθετηθεί μέσα σε ένα ηλεκτρικό πεδίο, το πεδίο θα δημιουργήσει μια διπολική ροπή σε κάθε ένα μόριο ομοπαράλληλη με αυτό. Αυτή η διπολική ροπή αλλάζει την κατανομή του φορτίου και με την σειρά της δημιουργεί ένα νέο ηλεκτρικό

\mathbf{P}

πεδίο. Αυτό το ηλεκτρικό πεδίο ονομάζεται πόλωση . Η ανακατανομή των φορτίων δεσμεύει συγκεκριμένα φορτία στην επιφάνεια και στον όγκο του μονωτή. Τα δέσμια φορτία της επιφάνειας έχουν πυκνότητα ίση με

$$\sigma_b = \mathbf{P} \cdot \hat{n} \quad (1.2.4)$$

και τα δέσμια χωρικά έχουν πυκνότητα

$$\rho_b = -\nabla \cdot \mathbf{P} \quad (1.2.5)$$

Έτσι η συνολική πυκνότητα φορτίου πλέον αποτελείται από τα δέσμια φορτία και από τα υπόλοιπα φορτία που δημιουργούν το αρχικό ηλεκτρικό πεδίο, τα οποία ονομάζονται ελεύθερα ηλεκτρόνια και στην περίπτωση των διηλεκτρικών μπορεί να είναι ιόντα που έχουν εμφυτευτεί στον αγωγό. Άρα η συνολική πυκνότητα φορτίου είναι

$$\rho = \rho_f + \rho_b \quad (1.2.6)$$

Και ο νόμος του Gauss γίνεται:

$$\epsilon_0 \nabla E = \rho = -\nabla \cdot \mathbf{P} + \rho_f \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \nabla \cdot (\epsilon_0 \mathbf{E} + \mathbf{P}) = \rho_f \quad (1.2.7)$$

Η έκφραση μέσα στην παρένθεση ονομάζεται ηλεκτρική μετατόπιση

$$D = \epsilon_0 E + P$$

Και ο νόμος του Gauss παρουσία ύλης γράφεται ως

$$\int \int_S D \cdot dS = Q_{in,f} \Rightarrow \nabla \cdot D = \rho_f \quad (1.2.8)$$

1.2.3 Μαγνητοσταστική στο κενό

Τα μεταβαλλόμενα ρεύματα παράγουν μαγνητικά πεδία στον χρόνο. Τα σταθερά ρεύματα είναι μια ροή φορτίου που δεν μεταβάλλεται και δεν συσσωρεύεται πουθενά. Στην πράξη βεβαίως δεν γίνεται να υπάρχουν σταθερά ρεύματα όπως και δεν γίνεται να υπάρχουν σταθερά φορτία, σαν αυτά που περιεγράφηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο. Όμως αποτελούν καλές προσεγγίσεις για ρεύματα με σχετικά μικρές χρονικές μεταβολές.

Τα μαγνητικά πεδία B είναι ο θεμελιώδης μηχανισμός με τον οποίο η ενέργεια μετατρέπεται από ηλεκτρική σε μηχανική ή το αντίστροφο σε κινητήρες, γεννήτριες και μετασχηματιστές.

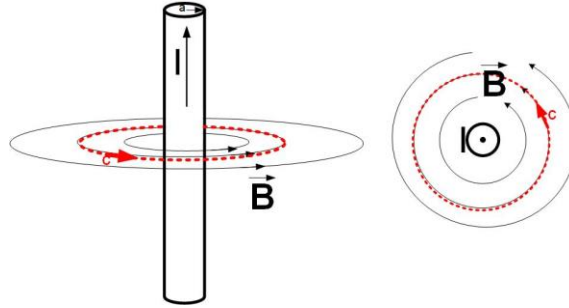
- Ένα ρεύμα σε ένα καλώδιο παράγει μαγνητικό πεδίο γύρω από αυτό
- Ένα χρονικά μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο επάγει τάση σε έναν αγωγό (βασική αρχή μετασχηματιστών).
- Αν ένα ρευματοφόρο καλώδιο βρεθεί μέσα σε ένα μαγνητικό πεδίο του ασκείται δύναμη (βασική αρχή των κινητήρων).
- Όταν ένα κινούμενο καλώδιο βρίσκεται μέσα σε μαγνητικό πεδίο επάγεται τάση σε αυτό (βασική αρχή της γεννήτριας).

Τα μαγνητικά πεδία περιγράφονται από τον νόμο του Ampere

$$\oint B \cdot dl = \mu_0 I_{in} \Rightarrow \nabla \times B = \mu_0 J \quad (1.2.9)$$

Όπου:

- μ_0 η μαγνητική διαπερατότητα του κενού
- I_{in} το έγκλειστο ρεύμα μέσα στον βρόγχο Ampere
 dl
- το στοιχειώδες μήκος του βρόχου
 J
- η χωρική πυκνότητα ρεύματος



Σχήμα 7 Μαγνητικά Πεδία

Αν ένα σώμα με φορτίο q κινείται με ταχύτητα \mathbf{u} μέσα σε μαγνητικό πεδίο του ασκείται η μαγνητική δύναμη

$$\mathbf{F}_B = q(\mathbf{u} \times \mathbf{B}) \quad (1.2.10)$$

Αν βρεθεί μέσα σε ηλεκτρομαγνητικό πεδίο, του ασκείται η μαγνητική δύναμη και η δύναμη Coulomb. Το άθροισμα αυτών των δυνάμεων ονομάζεται δύναμη Lorentz

$$\mathbf{F}_L = q\mathbf{E} + q(\mathbf{u} \times \mathbf{B}) \quad (1.2.11)$$

Οι μαγνητικές δυναμικές γραμμές είναι κλειστές και δεν στροβιλίζονται, αυτό μαθηματικά σημαίνει

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (1.2.12)$$

1.2.4 Μαγνητοστατικά πεδία στην ύλη

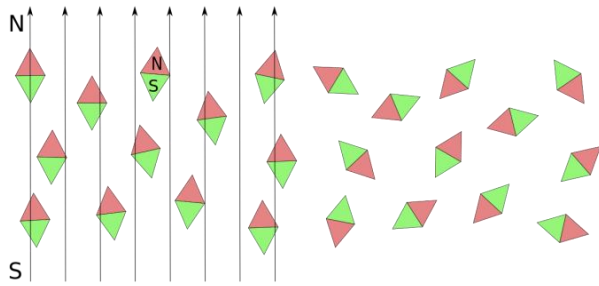
Όλα τα μαγνητικά πεδία οφείλονται σε κινούμενα ηλεκτρικά φορτία. Σε ατομικό επίπεδο αυτά τα μικροσκοπικά ρεύματα προέρχονται από τα κινούμενα ηλεκτρόνια των πυρήνων. Σε μεγάλη κλίμακα αυτοί οι βρόγχοι ρεύματος είναι τόσο μικροί που μπορούν να θεωρηθούν σαν μαγνητικά δίπολα. Σε μακροσκοπική κλίμακα αυτά τα δίπολα αλληλοαναιρούνται λόγω του τυχαίου προσανατολισμού των ατόμων. Όμως αν εφαρμόσουμε ένα εξωτερικό μαγνητικό πεδίο σε αυτά τα δίπολα ευθυγραμμίζονται με το εξωτερικό μαγνητικό πεδίο.

Σε αντίθεση με την ηλεκτρική πόλωση που έχει την ίδια κατεύθυνση με το ηλεκτρικό πεδίο τα υλικά που αποκτούν μαγνήτιση παράλληλη με το μαγνητικό πεδίο ονομάζονται παραμαγνητικά και τα άλλα διαμαγνητικά. Αν ένα υλικό διατηρεί την μαγνήτιση του επ' αόριστον μετά από την απομάκρυνση του εξωτερικού πεδίου ονομάζεται σιδηρομαγνητικό. Η μαγνήτιση \mathbf{M} , δηλαδή η μαγνητική διπολική ροπή ανα μονάδα όγκου δημιουργεί μια ανακατανομή στα ρεύματα με αποτέλεσμα να δημιουργούνται δέσμια ρεύματα. Συγκεκριμένα μια δέσμια επιφανειακή πυκνότητα ρεύματος

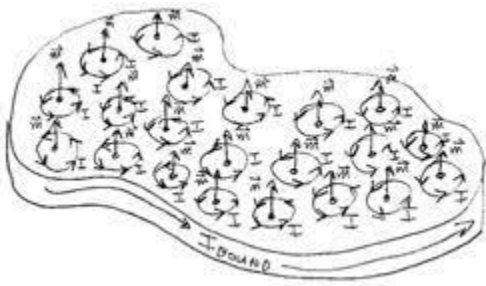
$$\mathbf{K} = \mathbf{M} \times \hat{\mathbf{n}} \quad (1.2.13)$$

Και μια χωρική πυκνότητα ρεύματος

$$J_b = \nabla \times M \quad (1.2.14)$$



Σχήμα 8 Προσανατολισμός του spin λόγω μαγνητικού Πεδίου



Σχήμα 9 Δέσμια Ρεύματα

Το συνολικό μαγνητικό πεδίο που δημιουργείται προέρχεται από τα ελεύθερα ρεύματα και από τα δέσμια

$$J = J_b + J_f \quad (1.2.15)$$

Συνδυάζοντας τα 2 παραπάνω ο νόμος του Ampere μπορεί να γραφτεί ως:

$$\nabla \times B = \mu_0 J = \mu_0 (J_f + \nabla \times M) \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \nabla \times \left(\frac{B}{\mu_0} - M \right) = J_f \quad (1.2.16)$$

Όπου

$$\left(\frac{B}{\mu_0} - M \right) = H \quad (1.2.17)$$

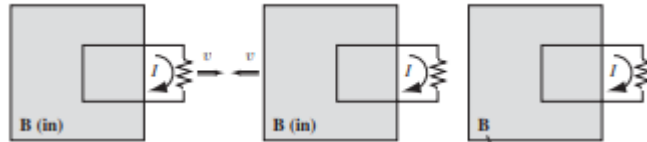
Το μαγνητικό πεδίο παρουσία ύλης και ο νόμος του Ampere παρουσία ύλης σε ολοκληρωτική μορφή μπορεί να γραφτεί ως

$$\oint H \cdot dl = I_{in} \quad (1.2.18)$$

1.2.5 Ηλεκτροδυναμική

Το 1831 ο Michael Faraday παρουσίασε μια σειρά από πειράματα

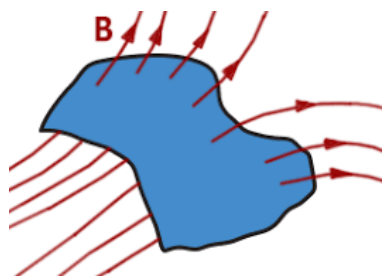
- **Πείραμα 1]** Παρουσία ενός μαγνητικού πεδίου, τράβηξε έναν συρμάτινο βρόχο προς τα δεξιά και στον βρόχο δημιουργήθηκε ροή ρεύματος.
- **Πείραμα 2]** Κρατώντας τον βρόχο ακίνητο, μετακίνησε το μαγνητικό πεδίο προς τα αριστερά και παρατήρησε ροή ρεύματος στον βρόχο.
- **Πείραμα 3]** Κρατώντας τον βρόχο σταθερό μέσα σε χρονικά μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο παρατήρησε ροή ρεύματος στον βρόχο.



Σχήμα 10 Νόμος Faraday

Ο Faraday συνειδητοποίησε ότι δεν έχει σημασία η κίνηση για την παραγωγή του ρεύματος αλλά η σχετική μεταβολή της ροής του μαγνητικού πεδίου μέσα από τον βρόχο και έτσι διατύπωσε το νόμο του: Ένα μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο δημιουργεί επαγωγικά ένα ηλεκτρικό πεδίο. Αυτό το επαγόμενο ηλεκτρικό πεδίο δημιουργεί μια διαφορά δυναμικού στο βρόχο, άρα ένα ρεύμα. Αυτή η τάση ονομάζεται ηλεκτρεγερτική δύναμη \mathcal{E} (αν και δεν είναι δύναμη). Ορίζοντας την μαγνητική ροή μέσα από μια επιφάνεια ως:

$$\Phi = \iint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{A} \quad (1.2.19)$$



Σχήμα 11 Μαγνητική Ροή

Ο νόμος του Faraday διατυπώνεται ως:

$$\mathcal{E} = \oint E \cdot dl = -\frac{d\Phi}{dt} \Rightarrow \nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (1.2.20)$$

Όπου αυτή η τάση όταν εφαρμοστεί σε υλικό με αντίσταση R δημιουργεί ρεύμα I που υπολογίζεται από τον νόμο του Ohm

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R} \quad (1.2.21)$$

Ο Maxwell με μαθηματικά παρατήρησε ότι ένα μεταβαλλόμενο ηλεκτρικό πεδίο επάγει ένα μαγνητικό πεδίο και έτσι διόρθωσε τον νόμο του Ampere

$$\nabla \times B = \mu_0 J + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial E}{\partial t} \quad (1.2.22)$$

Τέλος ο Maxwell είναι αυτός που συνειδητοποιούσε ότι ο νόμος του Gauss, ο νόμος του Faraday και ο νόμος του Ampere περιγράφουν πλήρως την θεωρία του ηλεκτρομαγνητισμού

- Νόμος Gauss $\nabla \cdot D = \rho_f$ (1.2.23)
- Νόμος Gauss για μαγνητισμό $\nabla \cdot H = 0$ (1.2.24)
- Νόμος Faraday $\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t}$ (1.2.25)
- Νόμος Ampere – Maxwell $\nabla \times H = J_f + \frac{\partial D}{\partial t}$ (1.2.26)

Οι παραπάνω νόμοι περιγράφουν τις ενδομοριακές αλληλεπιδράσεις, το ραδιόφωνο, το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα των αστερών, τους κινητήρες, τις γεννήτριες και τους μετασχηματιστές.

[2], [3]

1.3 Μιγαδικοί Αριθμοί

Στα μαθηματικά οι μιγαδικοί αριθμοί είναι ένα σύνολο \mathbb{C} το οποίο περιέχει τους αριθμούς της μορφής:

$$z = a + jb \quad (1.3.1)$$

όπου j η μιγαδική μονάδα. Η μιγαδική μονάδα είναι ο μόνος αριθμός που ικανοποιεί την ιδιότητα

$$j^2 = -1 \quad (1.3.2)$$

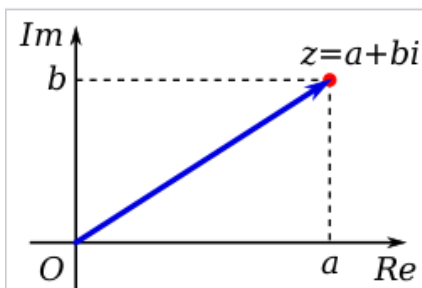
Και χωρίζονται σε πραγματικό μέρος

$$\operatorname{Re}(z) = a \quad (1.3.3)$$

Και

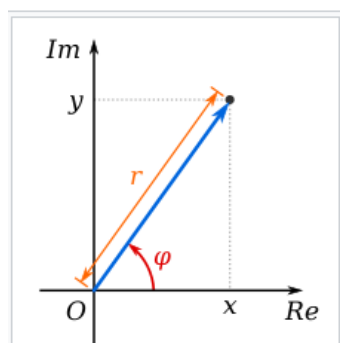
$$\operatorname{Im}(z) = b \quad (1.3.4)$$

Άρα είναι δισδιάστατοι αριθμοί πάνω σε ένα επίπεδο που ορίζουν ο πραγματικός και ο φανταστικός άξονας



Σχήμα 12 Καρτεσιανή Μορφή Μιγαδικού

Αν και ονομάζονται φανταστικοί είναι ιδιαίτερα χρήσιμοι στις θετικές και πολυτεχνικές επιστήμες κυρίως γιατί κάνουν ποιο εύκολες τις πράξεις όταν υπάρχουν περιοδικά φαινόμενα, όπως το εναλλασσόμενο ρεύμα. Ιδιαίτερα χρήσιμη είναι η πολική μορφή των μιγαδικών. Μπορούμε να προσδιορίσουμε οποιοδήποτε σημείο στο μιγαδικό επίπεδο με 2 σημεία, ένα στον φανταστικό και ένα στον πραγματικό άξονα (a,b). Αντίστοιχα μπορούμε να προσδιορίσουμε οποιοδήποτε σημείο στο επίπεδο με 2 πληροφορίες, την γωνία του σημείου από τον άξονα τον πραγματικών και την ακτίνα του. Αυτό το σύστημα συντεταγμένων ονομάζεται πολικές συντεταγμένες.



Σχήμα 13 Πολική Μορφή Μιγαδικού

Όπου η ακτίνα του μιγαδικού

$$|z| = r = \sqrt{x^2 + y^2} \quad (1.3.5)$$

Και η γωνία δίνεται από την σχέση

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{y}{x}\right) \quad (1.3.6)$$

Έτσι ο μιγαδικός γράφεται στην πολική μορφή ως

$$z = |z|e^{j\theta} = |z| \angle \theta \quad (1.3.7)$$

Τα περιοδικά φαινόμενα περιγράφονται από περιοδικές συναρτήσεις, δηλαδή από ημίτονα και συνημίτονα και αυτές με την σειρά τους από εκθετικές συναρτήσεις με τον νόμο του Euler

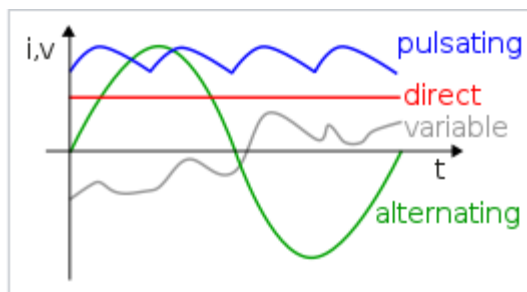
$$e^{j\theta} = \cos\theta + j\sin\theta \quad (1.3.8)$$

[4]

1.4 Στοιχεία Ηλεκτρονικής

Το εναλλασσόμενο ρεύμα (AC) είναι το ηλεκτρικό ρεύμα που αντιστρέφει περιοδικά την κατεύθυνση και αλλάζει το μέγεθός του συνεχώς με το χρόνο σε αντίθεση με το συνεχές ρεύμα (DC) που ρέει μόνο προς μία κατεύθυνση. Το εναλλασσόμενο ρεύμα είναι η μορφή με την οποία παρέχεται ηλεκτρική ενέργεια σε επιχειρήσεις και κατοικίες και είναι η μορφή ηλεκτρικής ενέργειας που χρησιμοποιούν συνήθως οι καταναλωτές όταν συνδέουν συσκευές κουζίνας, τηλεοράσεις, ανεμιστήρες και ηλεκτρικούς λαμπτήρες σε μια πρίζα τοίχου. Μια κοινή πηγή ισχύος συνεχούς ρεύματος είναι ένα στοιχείο μπαταρίας σε φακό. Οι συντομογραφίες AC και DC χρησιμοποιούνται συχνά για να σημαίνουν απλώς εναλλασσόμενο και άμεσο

Η συνήθης κυματομορφή εναλλασσόμενου ρεύματος στα περισσότερα κυκλώματα ηλεκτρικής ισχύος είναι ένα ημιτονοειδές κύμα, του οποίου η θετική μισή περίοδος αντιστοιχεί στη θετική κατεύθυνση του ρεύματος και αντίστροφα. Σε ορισμένες εφαρμογές, όπως οι ενισχυτές κιθάρας, χρησιμοποιούνται διαφορετικές κυματομορφές, όπως τριγωνικά κύματα ή τετράγωνα κύματα. Τα ηχητικά και ραδιοφωνικά σήματα που μεταφέρονται στα ηλεκτρικά καλώδια είναι επίσης παραδείγματα εναλλασσόμενου ρεύματος. Αυτοί οι τύποι εναλλασσόμενου ρεύματος μεταφέρουν πληροφορίες όπως ήχος (ήχος) ή εικόνες (βίντεο) που μερικές φορές μεταφέρονται από τη διαμόρφωση ενός σήματος φέροντος AC. Αυτά τα ρεύματα συνήθως εναλλάσσονται σε υψηλότερες συχνότητες από αυτές που χρησιμοποιούνται στη μετάδοση ισχύος.



Σχήμα 14 Εναλλασσόμενο Ρεύμα και τάση

Στην ηλεκτρολογία, η σύνθετη αντίσταση στο εναλλασσόμενο ρεύμα περιγράφει τη συνδυασμένη επίδραση αντίστασης και αντίδρασης σε ένα κύκλωμα. Ποσοτικά, η σύνθετη αντίσταση ενός στοιχείου κυκλώματος δύο ακροδεκτών είναι ο λόγος της μιγαδικής αναπαράστασης της ημιτονοειδούς τάσης μεταξύ των ακροδεκτών του, προς τη μιγαδική αναπαράσταση του ρεύματος που διαρρέει από αυτό. Η σύνθετη αντίσταση επεκτείνει την έννοια της αντίστασης σε κυκλώματα εναλλασσόμενου ρεύματος και διαθέτει και μέγεθος και φάση, σε αντίθεση με την αντίσταση, η οποία έχει μόνο μέγεθος. Η σύνθετη αντίσταση μπορεί να αναπαρασταθεί ως μιγαδικός αριθμός, με τις ίδιες μονάδες με την αντίσταση, για την οποία η μονάδα SI είναι το Ω (Ω). Το σύμβολό του είναι συνήθως Z , και μπορεί να αναπαρασταθεί γράφοντας το μέγεθος και τη φάση του στην πολική μορφή $|Z|\angle\theta$.

Στο εναλλασσόμενο αφού η τάση έχει περιοδική μορφή

$$V = V_0 \sin(\omega t) \quad (1.4.1)$$

Και το ρεύμα έχει την μορφή

$$I = I_0 \sin(\omega t - \phi) \quad (1.4.2)$$

Και μπορούν να αναπαρασταθούν σε πολική μορφή ως:

$$V = V_m e^{j\omega t} \quad (1.4.3)$$

$$I = I_0 e^{j\omega t - \phi} \quad (1.4.4)$$

Ο νόμος το Ohm γίνεται

$$Z = \frac{V}{I} e^{-j\phi} = R + jX \quad (1.4.5)$$

Και ανάλογα με το είδος του φορτίου η εμπέδηση είναι:

- Ωμική αντίσταση R
- Πηνίο $j\omega L$

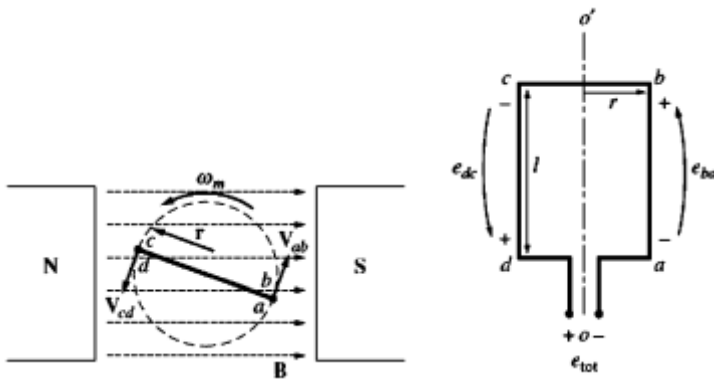
- Πυκνωτής $\frac{1}{j\omega C}$

[5]

1.5 Η Πιο Απλή Μηχανή Εναλλασσόμενου Ρεύματος

Οι μηχανές εναλλασσόμενου και οι γεννήτριες μετατρέπουν την μηχανική ενέργεια σε ηλεκτρική και το αντίστροφο. Υπάρχουν 2 κατηγορίες ηλεκτρικών μηχανών εναλλασσόμενου ρεύματος οι σύγχρονες και οι ασύγχρονες (ή αλλιώς μηχανές επαγωγής). Οι σύγχρονες μηχανές είναι κινητήρες ή γεννήτριες όπου το μαγνητικό τους πεδίο δημιουργείται από μια εξωτερική πηγή συνεχούς ρεύματος.

Η πιο απλή μηχανή εναλλασσόμενου ρεύματος είναι ένα κλειστός βρόγχος που περιστρέφεται μέσα σε ένα μαγνητικό πεδίο.



Σχήμα 15 Ηλεκτρεγερτική δύναμη

Η Η.Ε.Δ. που δημιουργείται λόγω της περιστροφής τους βρόγχου είναι ίση με

$$\epsilon = (\mathbf{v} \times \mathbf{B}) \cdot d\mathbf{l} \quad (1.5.1)$$

Λόγο του εξωτερικού γινομένου, στις πλευρές του βρόγχου που είναι παράλληλες με την ταχύτητα περιστροφής δεν αναπτύσσεται ΗΕΔ, άρα συνεισφέρουν μόνο οι πλευρές cd και ab και η ΗΕΔ δίνεται από την σχέση

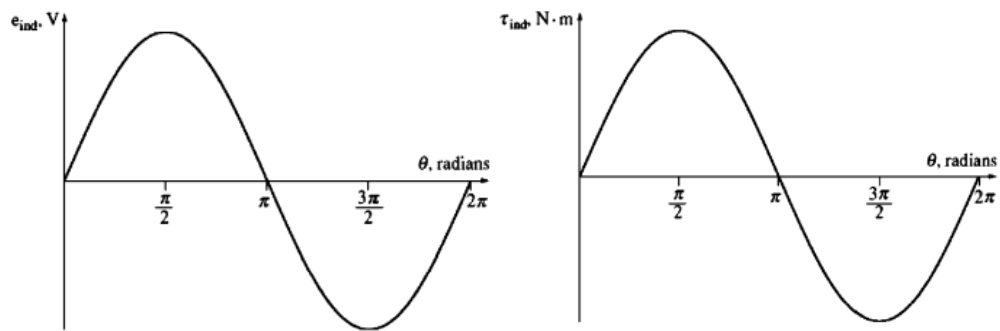
$$\epsilon = 2vBL\sin\theta = 2vBL\sin(\omega t) \quad (1.5.2)$$

Και από τον νόμο του Ohm αν ο αγωγός έχει αντίσταση R το συνολικό εναλλασσόμενο ρεύμα που τον διαρρέει είναι ίσο με

$$I = \frac{\epsilon}{R} = \frac{2vBL}{R} \sin(\omega t) \quad (1.5.3)$$

Ταυτόχρονα όμως αναπτύσσεται η δύναμη Lorentz και αυτή με την σειρά της δημιουργεί μια ροπή.

$$\tau = r \times F = 2rlB \sin\theta \quad (1.5.4)$$



Σχήμα 16 ΗΕΔ και ροπή συναρτήσει του χρόνου

2 Ηλεκτρικές Μηχανές

2.1 Ιστορική αναδρομή

Με τα χρόνια, ο ηλεκτροκινητήρας έχει εξελιχθεί εκτενώς και συνεχίζει να παίζει βασικό (και αυξανόμενο) ρόλο στη σημερινή κοινωνία.

1740

Οι πρώτες μορφές του ηλεκτροκινητήρα εμφανίστηκαν για πρώτη φορά στη δεκαετία του 1740 μέσα από το έργο του Σκωτσέζου Βενεδικτίνου μοναχού και επιστήμονα, Andrew Gordon. Άλλοι επιστήμονες όπως ο Michael Faraday και ο Joseph Henry συνέχισαν να αναπτύσσουν πρώιμους ηλεκτρικούς κινητήρες, πειραματιζόμενοι με ηλεκτρομαγνητικά πεδία και ανακαλύπτοντας πώς να μετατρέπουν την ηλεκτρική ενέργεια σε μηχανική ενέργεια.

1834

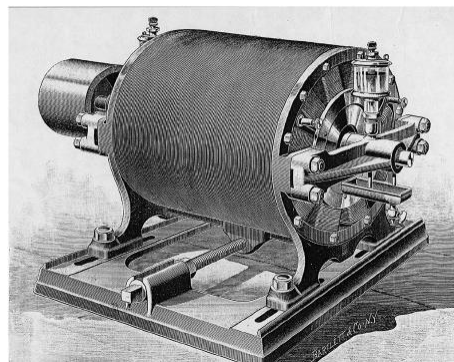
Η ιστορία γράφτηκε όταν ο Thomas Davenport του Βερμόντ εφηύρε τον πρώτο επίσημο ηλεκτρικό κινητήρα με μπαταρία το 1834. Αυτός ήταν ο πρώτος ηλεκτροκινητήρας που είχε αρκετή ισχύ για να εκτελέσει μια εργασία και η εφεύρεσή του χρησιμοποιήθηκε για να τροφοδοτήσει μια μικρής κλίμακας τυπογραφική μηχανή.

1880

Παρά τη μεγάλη ανακάλυψη του Davenport πολλά χρόνια νωρίτερα, οι ηλεκτροκινητήρες δεν χρησιμοποιήθηκαν ευρέως σε εμπορικό επίπεδο για άλλα 50 χρόνια. Οι επιστήμονες και οι μηχανικοί συνέχισαν να αναπτύσσουν διάφορους τύπους ηλεκτρικών κινητήρων με στόχο να τους καταστήσουν κατάλληλους για χρήση σε εμπορικούς χώρους. Σύντομα, οι ηλεκτροκινητήρες άρχισαν να χρησιμοποιούνται σε όλη τη βιομηχανία, στα εργοστάσια και στο σπίτι.

1888

Το 1887, ο Νικόλα Τέσλα εφηύρε έναν επαγωγικό κινητήρα AC που κατοχύρωσε με επιτυχία ένα χρόνο αργότερα. Δεν ήταν κατάλληλο για οδικά οχήματα, αλλά αργότερα προσαρμόστηκε από μηχανικούς της Westinghouse. Το 1892 σχεδιάστηκε ο πρώτος πρακτικός κινητήρας επαγωγής, ακολουθούμενος από έναν δρομέα περιέλιξης περιστρεφόμενης ράβδου, καθιστώντας τη μονάδα κατάλληλη για χρήση σε εφαρμογές αυτοκινήτων.



Σχήμα 17 Επαγωγικός Κινητήρας

1891

Αυτό το έτος, η General Electric άρχισε να αναπτύσσει τριφασικούς κινητήρες επαγωγής. Προκειμένου να χρησιμοποιηθεί ο σχεδιασμός του δρομέα με περιέλιξη ράβδου, η GE και η Westinghouse υπέγραψαν μια συμφωνία πολλαπλής άδειας το 1896.

2.2 Βασική δομή Μηχανών Εναλλασσόμενου ρεύματος

Τα δύο μηχανικά μέρη ενός ηλεκτροκινητήρα είναι ο ρότορας που κινείται και ο στάτης (ή στάτορας) που δεν κινείται. Περιλαμβάνει επίσης δύο ηλεκτρικά μέρη, ένα σύνολο μαγνητών και έναν οπλισμό, ο ένας από τους οποίους συνδέεται στον ρότορα (ή αλλιώς δρομέα) και ο άλλος στον στάτη, σχηματίζοντας μαζί ένα μαγνητικό κύκλωμα. Επίσης ένας ηλεκτρικό κινητήρας περιλαμβάνει τις ψήκτρες, που έρχονται σε επαφή με τον δρομέα τροφοδοτώντας τον με ρεύμα. Τέλος το διάκενο είναι ο χώρος αέρα μεταξύ του στάτη και του δρομέα.

Ο στάτης είναι ένας κυλινδρικός φλοιός με μικρό πάχος και ομοιόμορφα διανεμημένες αύλακες στο εσωτερικό του. Στους αύλακες τοποθετούνται αγωγοί σε μορφή τυλίγματος, δηλαδή πηνίων. Αυτά τα τυλίγματα συνδέονται μεταξύ τους ανάλογα με το είδος της μηχανής και τον αριθμό των φάσεων. Όταν αυτά τα τυλίγματα διαρρέονται από ρεύμα δημιουργείται το κύριο μαγνητικό πεδίο.



Σχήμα 18 Τύλιγμα Στάτη

Για την αποφυγή των δινορευμάτων χρησιμοποιούνται ελάσματα πολύ καλά μονωμένα μεταξύ τους. Ανάλογα με το μαγνητικό πεδίο που δημιουργείται στον στάτη, το οποίο εξαρτάται από το την μορφή του τυλίγματος, μπορούμε να τον χαρακτηρίσουμε από τους πόλους που δημιουργούνται.

Ο δρομέας είναι ένα βραχυκλωμένο τύλιγμα στις μηχανές επαγωγής. Υπάρχουν διάφοροι τύποι δρομέα ανάλογα με το τύλιγμα που χρησιμοποιείται. Ένα παράδειγμα είναι ο δρομέας κλωβού. Αυτός ο δρομέας αποτελείται από φτηνούς αγωγούς, όπως ο χαλκός, σε μορφή ράβδουπάνω σε αύλακες γύρω από τον πυρήνα.



Σχήμα 19 Δρομέας

2.3 Το μαγνητικό πεδίο σε μια μηχανή εναλλασσόμενου ρεύματος

Αν 2 μαγνητικά πεδία δημιουργούνται μέσα στο εσωτερικό μιας μηχανής, δημιουργείται μια ροπή με σκοπό να ευθυγραμμιστούν τα 2 μαγνητικά πεδία. Το ένα πεδίο δημιουργείται από τον στάτη και το άλλο από τον ρότορα, η ροπή δημιουργείται πάνω στον ρότορα και τον προσανατολίζει σύμφωνα με την κατεύθυνση του μαγνητικού πεδίου. Αντίστοιχα αν το μαγνητικό πεδίο του στάτη περιστρέφεται τότε και ο ρότορας θα περιστρέφεται. Αυτή είναι και η αρχή λειτουργίας των μηχανών εναλλασσόμενου.

Για να δημιουργηθεί ένα περιστρεφόμενο μαγνητικό πεδίο θα πρέπει να χρησιμοποιηθούν τριφασικά ρεύματα. Τα τριφασικά ρεύματα είναι ρεύματα με το ίδιο πλάτος και διαφορά φάσης 120°

$$i_{aa'} = I_M \sin(\omega t) \quad (A) \quad (2.3.1)$$

$$i_{bb'} = I_M \sin(\omega t - 120^\circ) \quad (A) \quad (2.3.2)$$

$$i_{cc'} = I_M \sin(\omega t - 240^\circ) \quad (A) \quad (2.3.3)$$

Όπου δημιουργούν τα μαγνητικά πεδία

$$H_{aa'} = H_M \sin \omega t \angle 0^\circ \quad (T) \quad (2.3.4)$$

$$H_{bb'} = H_M \sin(\omega t - 120^\circ) \angle 120^\circ \quad (T) \quad (2.3.5)$$

$$H_{cc'}(t) = H_M \sin(\omega t - 240^\circ) \angle 240^\circ \quad (T) \quad (2.3.6)$$

Το συνολικό μαγνητικό πεδίο είναι το διανυσματικό άθροισμα των παραπάνω

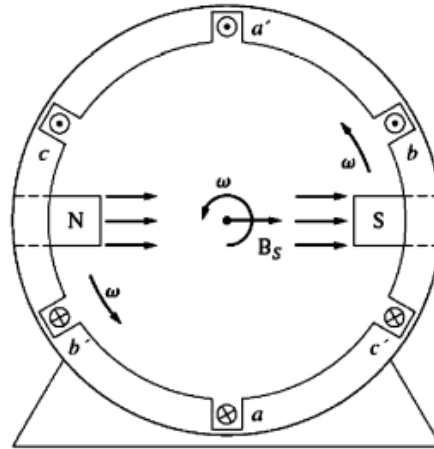
$$\begin{aligned}
 \mathbf{H}_{net} &= \mathbf{H}_{aa'} + \mathbf{H}_{bb'} + \mathbf{H}_{cc'} \\
 &= H_M \sin \omega t \angle 0^\circ + H_M \sin(\omega t - 120^\circ) \angle 120^\circ \\
 &\quad + H_M \sin(\omega t - 240^\circ) \angle 240^\circ \quad (2.3.7)
 \end{aligned}$$

Χρησιμοποιώντας τον νόμο του Euler η παραπάνω σχέση γράφεται ως:

$$\begin{aligned}
 \mathbf{H}_{net} &= H_M \sin(\omega t) \hat{\mathbf{x}} - (0.5 H_M \sin(\omega t - 120^\circ) \hat{\mathbf{x}} + \left(\frac{\sqrt{3}}{2} H_M \sin(\omega t - 120^\circ) \right) \hat{\mathbf{y}} \\
 &\quad - (0.5 H_M \sin(\omega t - 240^\circ) \hat{\mathbf{x}} + \left(\frac{\sqrt{3}}{2} H_M \sin(\omega t - 240^\circ) \right) \hat{\mathbf{y}} \Rightarrow
 \end{aligned}$$

$$\Rightarrow \mathbf{H}_{net} = (1.5 H_M \sin \omega t) \hat{\mathbf{x}} - (1.5 H_M \cos \omega t) \hat{\mathbf{y}} \quad (2.3.8)$$

Άρα το μαγνητικό πεδίο στον στάτη μπορεί να αναπαρασταθεί με ένα νότιο πόλο όπου από τον Βόρειο πόλο όπου η μαγνητική ροή φεύγει από τον στάτη και και από τον Νότιο όπου εισέρχεται στον στάτη.



Σχήμα 20 Μαγνητικό Πεδίο Στάτη

Για μηχανή με 2 πόλους, οι πόλοι ολοκληρώνουν μια περιστροφή για κάθε περίοδο ρεύματος άρα η συχνότητα περιστροφής τους f_m είναι ίση με την συχνότητα του ρεύματος f_s . Για μηχανή με P πόλους ισχύουν οι παρακάτω σχέσεις:

$$\theta_s = \frac{P}{2} \theta_m \quad [rad] \quad (2.3.9)$$

$$f_s = \frac{P}{2} f_m \text{ [rev/min]} \quad (2.3.10)$$

$$\omega_s = \frac{P}{2} \omega_m \text{ [rad/sec]} \quad (2.3.11)$$

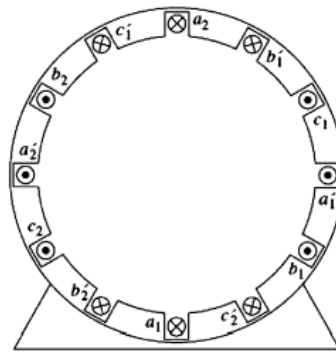
Αντικαθιστώντας την σχέση

$$f_m = \frac{n_m}{60} \text{ [Hz]} \quad (2.3.12)$$

Υπολογίζουμε στην σχέση μεταξύ των συχνοτήτων σε μονάδες Hertz

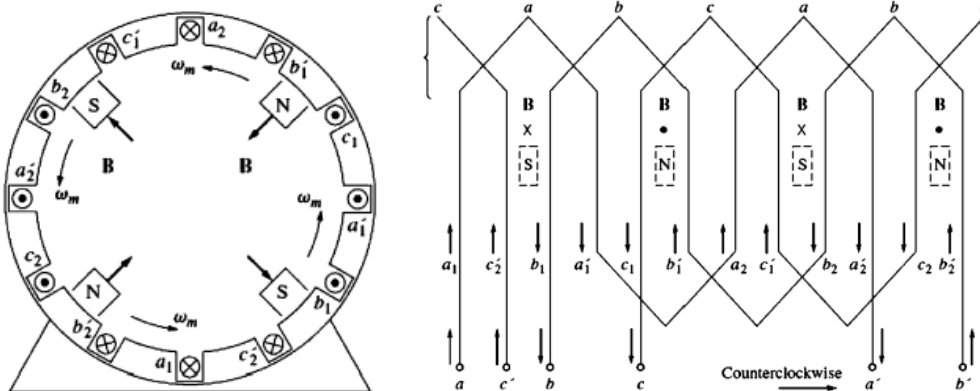
$$f_s = \frac{n_m P}{120} \quad (2.3.13)$$

Αντίστοιχα ένα στάτης με 4 πόλους



Σχήμα 21 Τετραπολικός Στάτης

Μπορεί να αναπαρασταθεί ως



Σχήμα 22 Ισοδύναμη Αναπαράσταση Τετραπολικού Στάτη

Υπάρχουν 2 τύποι μηχανών εναλλασσόμενου, οι σύγχρονες και οι ασύγχρονες μηχανές. Η θεμελιώδης διαφορά μεταξύ τους είναι ότι οι σύγχρονες απαιτούν ένα dc ρεύμα για τον ρότορα.

2.4 Σύγχρονες Μηχανές

Οι σύγχρονες μηχανές ονομάζονται σύγχρονες γιατί η ηλεκτρική τους συχνότητα είναι «κλειδωμένη» δηλαδή σύγχρονη με την μηχανική. Ο δρομέας φέρει τύλιγμα που διαρρέεται από συνεχές ρεύμα και το μαγνητικό πεδίο που παράγει είναι όμοιο με αυτό που παράγουν $P/2$ ραβδόμορφοι μαγνήτες. Ο στάτης φέρει συμμετρικό τριφασικό τύλιγμα, που διαρρέεται από εναλλασσόμενο ρεύμα σε συμμετρικό σύστημα τάσεων. Η ταχύτητα περιστροφής του δρομέα δίνεται από την σχέση:

$$n_s = \frac{120f}{P} [\text{rev}/\text{min}] \quad (2.4.1)$$

Που είναι η σύγχρονη ταχύτητα, ενώ η γωνιακή ταχύτητα περιστροφής του δρομέα είναι

$$\omega_s = 2\pi \frac{n_s}{60} \Rightarrow \omega_s = \frac{4\pi f}{P} \quad (2.4.2)$$

Η σύγχρονη γεννήτρια μετατρέπει την μηχανική ισχύ σε ηλεκτρική. Το τύλιγμα του δρομέα τροφοδοτείται με συνεχές ρεύμα I_f από μια βοηθητική πηγή συνεχούς τάσεως. Ταυτόχρονα ο δρομέας περιστρέφεται με κυκλική συχνότητα ω_m με την βοήθεια μηχανικής ροπής τ_m . Έτσι δίνουμε μηχανική ισχύ P_m στο δρομέα.

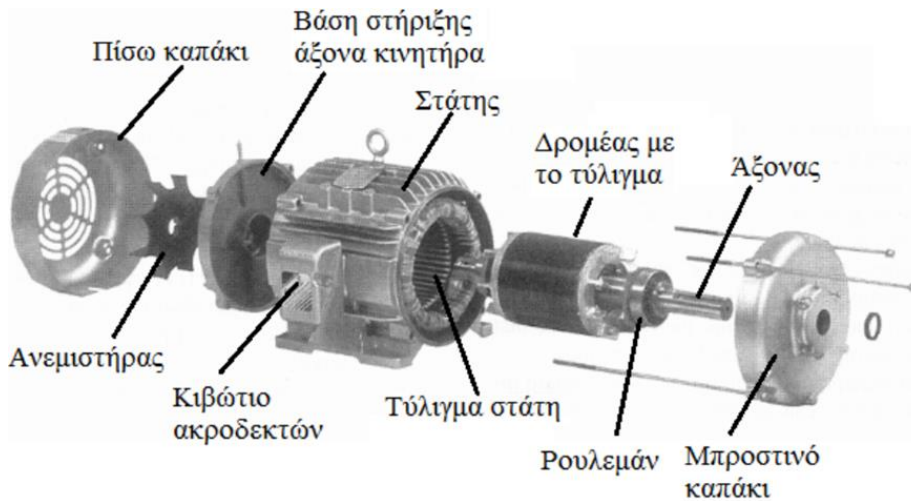
$$P_m = \tau_m \omega_s \quad (2.4.3)$$

Το πλάτος της ηλεκτρικής τάσης που επάγεται σε μια φάση του στάτη είναι

$$E_A = \sqrt{2}\pi N_c \phi f \quad (2.4.4)$$

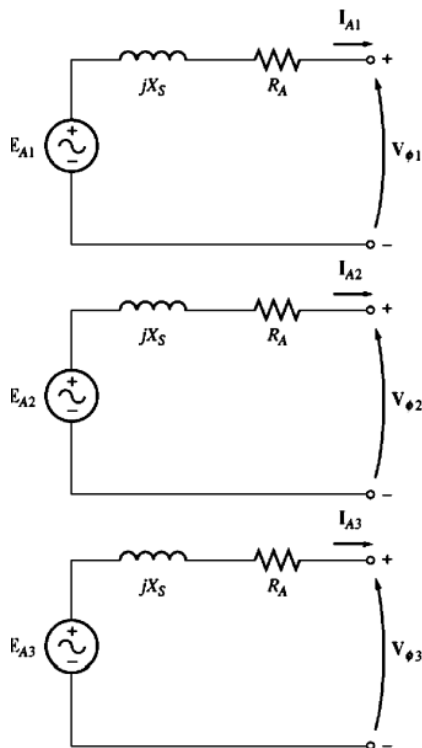
Όπου:

- ϕ : Η μαγνητική ροή ανά πόλο που οφείλεται στο I_f
- N_c : Ο αριθμός ελιγμάτων σε σειρά ανά φάση



Σχήμα 23 Σύγχρονη Μηχανή

Για την πραγματοποίηση των υπολογισμών χρησιμοποιείται το ισοδύναμο κύκλωμα της μηχανής ανά φάση



Όπου

- R_A Η ωμική αντίσταση του τυλίγματος του στάτη ανά φάση. Η αντίσταση αυτή είναι η ωμική αντίσταση που παρουσιάζει το χάλκινο σύρμα από το οποίο αποτελούνται τα τυλίγματα του στάτη.
- $X_s = X_m + X_\sigma$ Αντίσταση μαγνήτισης ανά φάση και η αντίδραση σκεδάσεως του στάτη. Η αντίδραση σκεδάσεως του στάτη αντιστοιχεί στη μαγνητική ροή που σκεδάζεται, δηλαδή φεύγει στο αέρα, για κάθε φάση.
- E Ηλεκτρεγερτική δύναμη τυμπάνου ή τάση διέγερσης ανά φάση
- V Τάση ακροδεκτών ανά φάση

Σχήμα 24 Ισοδύναμο Κύκλωμα Σύγχρονης Μηχανής

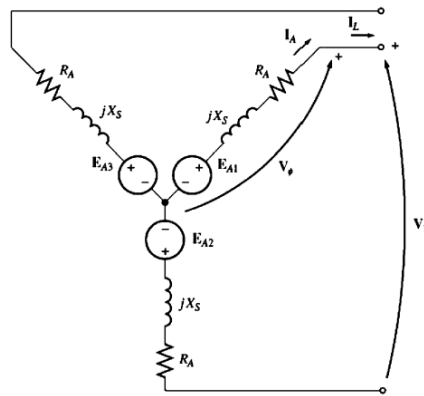
Ανάλογα με το είδος της σύνδεση των φάσεων η τάση των ακροδεκτών υπολογίζεται ως:

- Αν υπάρχει συνδεσμολογία αστέρα: Η τάση των ακροδεκτών συνδέεται με την πολική τάση από την σχέση

$$V_{\phi} = \frac{V_T}{\sqrt{3}} \quad (2.4.5)$$

Και το ρεύμα γραμμής είναι

$$I_L = I_A \quad (2.4.6)$$



Σχήμα 25 Τριφασική Πηγή Αστέρα

- Αν υπάρχει συνδεσμολογία τριγώνου: Η τάση ακροδεκτών συνδέεται με την πολική τάση από την σχέση

$$V_{\phi} = V_T \quad (2.4.7)$$

Και το ρεύμα γραμμής είναι

$$I_L = \sqrt{3} I_A \quad (2.4.8)$$

Η φάση της τάσης διέγερσης E_f : δ ονομάζεται γωνία ισχύος ή γωνία ροπής της σύγχρονης γεννήτριας.

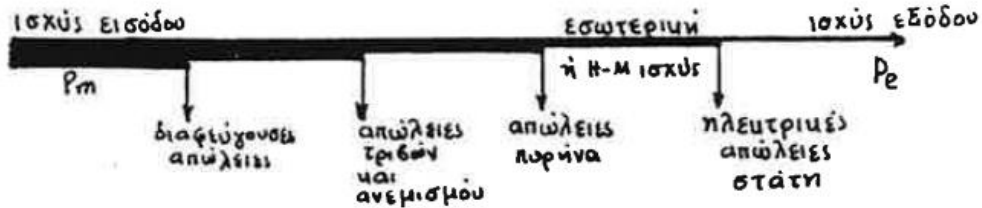
Αν P_m είναι η μηχανική ισχύς στον άξονα της ηλεκτρικής γεννήτριας, η ροπή στον άξονα είναι

$$\tau_m = \frac{P_m}{\omega_m} \quad (2.4.9)$$

Οι απώλειες ισχύος είναι δύο ειδών: Οι μηχανικές και οι ηλεκτρικές απώλειες. Η απομένουσα ισχύς μετά από την αφαίρεση των απωλειών είναι η ισχύς εξόδου (ηλεκτρική ισχύς). Ο βαθμός απόδοσης ορίζεται ως:

$$k = \frac{P_{in}}{P_{out}} \quad (2.4.10)$$

Ένα μέρος της μηχανική ισχύος (εισόδου) μετατρέπεται σε μηχανικές απώλειες, αυτές οι απώλειες είναι λόγω τριβών, ανεμισμού και διαφεύγοντες και στη συνέχεια ένα μέρος σε απώλειες πυρήνα. Η απομένουσα ισχύς είναι η εσωτερική ή ηλεκτρομαγνητική ισχύς. Αυτή μετατρέπεται σε ηλεκτρική ισχύ. Αφαιρούνται στη συνέχεια οι ωμικές (ηλεκτρικές απώλειες). Η απομένουσα ισχύς ισούται με την ισχύ εξόδου της γεννήτριας.



Σχήμα 26 Ροή Ισχύος σε Σύγχρονη Γεννήτρια

Στην περίπτωση που η ωμική αντίσταση είναι αμελητέα. Τότε η ηλεκτρική ισχύς είναι ίση με την ισχύ εξόδου και η εσωτερική ισχύς για τις 3 φάσεις δίνεται από την σχέση

$$P_{3\phi} = \frac{2EV \sin \delta}{X_s} \quad (2.4.11)$$

Όπου παίρνει την μέγιστη τιμή της για γωνία ροπής $\delta = 90^\circ$

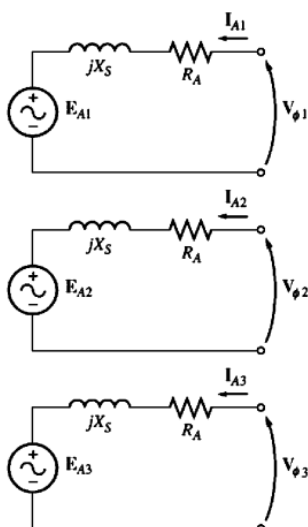
$$P_{max} = \frac{3EV}{X_s} \quad (2.4.12)$$

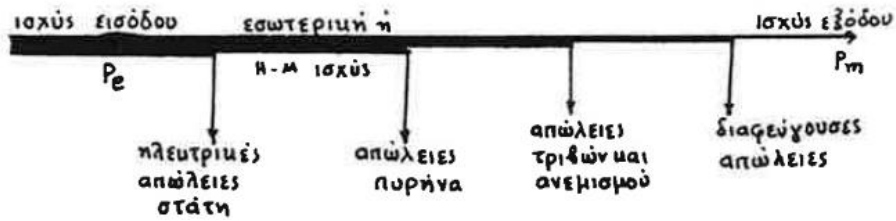
$$E \cos \delta > V$$

Η μέγιστη ισχύς ονομάζεται και ισχύς αποσυγχρονισμού. Αν $E \cos \delta < V$ λέμε ότι η μηχανή

λειτουργεί σε υπερδιέγερση ενώ όταν $E \cos \delta > V$ σε υποδιέγερση.

Η κατασκευή του σύγχρονου κινητήρα είναι ίδια ακριβώς με την κατασκευή της σύγχρονης γεννήτριας. Διαφέρουν μόνο στη φορά της ροής ισχύος. Ο κινητήρας μετατρέπει την ηλεκτρική ισχύ σε μηχανική. Ο στάτης του τριφασικού σύγχρονου κινητήρα τροφοδοτείται από πηγή εναλλασσόμενης τάσης. Στο διάκενο παράγεται στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο Ρ πόλων και ταυτόχρονα διαβιβάζεται συνεχές ρεύμα στο δρομέα που περιστρέφεται με τη σύγχρονη ταχύτητα. Το ισοδύναμο κύκλωμα και το διάγραμμα ροής ισχύος είναι ίδια με της σύγχρονης γεννήτριας με την μόνη διαφορά ότι η ροή του ρεύματος και η ροή ισχύος έχουν αντίθετη κατεύθυνση.



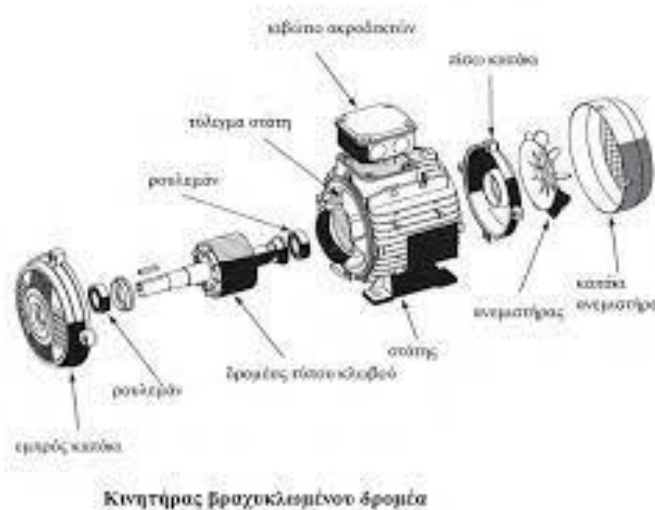


Σχήμα 27 Ροή Ισχύος σε Σύγχρονο Κινητήρα

[5], [6]

2.5 Ασύγχρονες Μηχανές

Οι ασύγχρονες μηχανές ή μηχανές επαγωγής απαντώνται πολύ συχνά στην πράξη ως κινητήρες και σε ελάχιστες περιπτώσεις ως γεννήτριες. Η απλή κατασκευή των κινητήρων επαγωγής είναι η αιτία της πολύ διαδεδομένης χρήσης τους.



Σχήμα 28 Ασύγχρονη Μηχανή

Ο στάτης ενός κινητήρα επαγωγής φέρει συμμετρικό τριφασικό τύλιγμα, που είναι συμμετρικά τοποθετημένο. Αν το τύλιγμα αυτό συνδεθεί με συμμετρική τριφασική πηγή το τριφασικό συμμετρικό σύστημα ρευμάτων, που διαρρέουν το τύλιγμα του στάτη, προκαλεί μαγνητικό πεδίο στο διάκενο. Αυτό το μαγνητικό πεδίο έχει μορφή όμοια με το πεδίο περιστρεφόμενων μαγνητών που έχουν πλήθος $P/2$. Η ταχύτητα περιστροφής του πεδίου δίνεται από την σχέση

$$n_s = \frac{120f}{P} [\text{rev}/\text{min}] = \frac{4\pi f}{P} [\text{rad}/\text{sec}] \quad (2.5.1)$$

Όπου f η συχνότητα της εναλλασσόμενης τάσης στο στάτη. Η n_s είναι η σύγχρονη ταχύτητα, όπως και στις σύγχρονες μηχανές αφού όπως φαίνεται δεν υπάρχει διαφορά ως προς το στάτη.

Ο δρομέας όμως της ασύγχρονης μηχανής είναι ένα τύλιγμα βραχυκυκλωμένο, που βρίσκεται μέσα στο στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο του στάτη. Η μεταβολή της μαγνητικής ροής, από το τύλιγμα του δρομέα έχει σαν αποτέλεσμα να επάγεται ΗΕΔ στο τύλιγμα του δρομέα. Επειδή το τύλιγμα είναι βραχυκυκλωμένο, έχουμε τελικά επαγωγικό ρεύμα στο τύλιγμα του δρομέα. Το ρεύμα του δρομέα δέχεται μαγνητική δύναμη από το πεδίο του στάτη οπότε έχουν την εμφάνιση ροπής. Αυτή η ροπή περιστρέφει το δρομέα. Η ταχύτητα περιστροφής του δρομέα n είναι γενικά διαφορετική από τη σύγχρονη ταχύτητα n_s . Από αυτό το γεγονός προέρχεται η ονομασία ασύγχρονη μηχανή. Η ολίσθηση είναι ένα μέγεθος που δείχνει την διαφορά μεταξύ της ταχύτητας περιστροφής και της σύγχρονης ταχύτητας και ορίζεται ως:

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} \quad (2.5.2)$$

Που είναι ένας καθαρός αριθμός με τον περιορισμό $0 \leq s \leq 1$ αφού πάντα $0 \leq n \leq n_s$. Από την τιμή της ολίσθησης s εξαρτάται η κατάσταση λειτουργίας του κινητήρα επαγωγής. Αν f η συχνότητα της επιβαλλόμενης τάσης στο στάτη, το ρεύμα του δρομέα έχει συχνότητα sf .

Κατά την εκκίνηση της μηχανής, ο δρομέας δεν περιστρέφεται άρα η ολίσθηση εκκίνησης είναι $s = 1$ και σε λειτουργία χωρίς φορτίο $n = n_s$. Σε πολλές περιπτώσεις, ο δρομέας αντί για τύλιγμα φέρει ράβδους χαλκού βραχυκυκλωμένες μεταξύ τους, αυτοί οι κινητήρες ονομάζονται τύπου κλωβού. Για τους ασύγχρονους κινητήρες ισχύουν οι παρακάτω σχέσεις:

$$\omega_s = \frac{2\pi n_s}{60} \quad (2.5.3)$$

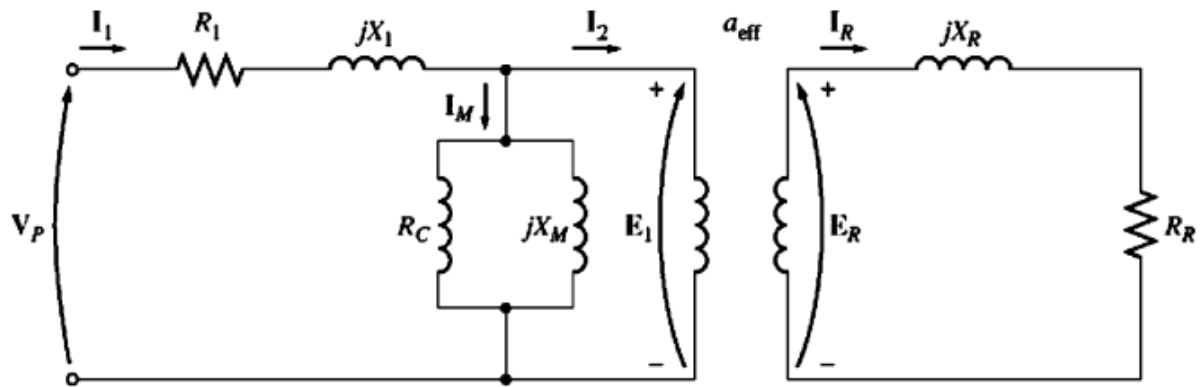
$$\omega_m = \frac{2\pi n}{60} \quad (2.5.4)$$

Οπότε η ολίσθηση δίνεται και από την σχέση

$$s = 1 - \frac{\omega_m}{\omega_s} \quad (2.5.5)$$

Όπως και στην περίπτωση των σύγχρονων μηχανών για την εκτέλεση των υπολογισμών χρησιμοποιούμε το ισοδύναμο κύκλωμα μιας φάσης. Ένα πρόβλημα που δημιουργείται στην αναπαράσταση του ισοδύναμου είναι ότι η συχνότητα ρευμάτων στο δρομέα είναι διαφορετική από την συχνότητα ρευμάτων του στάτη. Το πρόβλημα αυτό λύνεται με κατάλληλη αναγωγή των μεγεθών του δρομέα στο στάτη. Προκύπτει λοιπόν ισοδύναμο κύκλωμα του κινητήρα, σαν

όλα τα μεγέθη να ανήκουν στο κύκλωμα του στάση(ανοιγμένα στον στάτη).

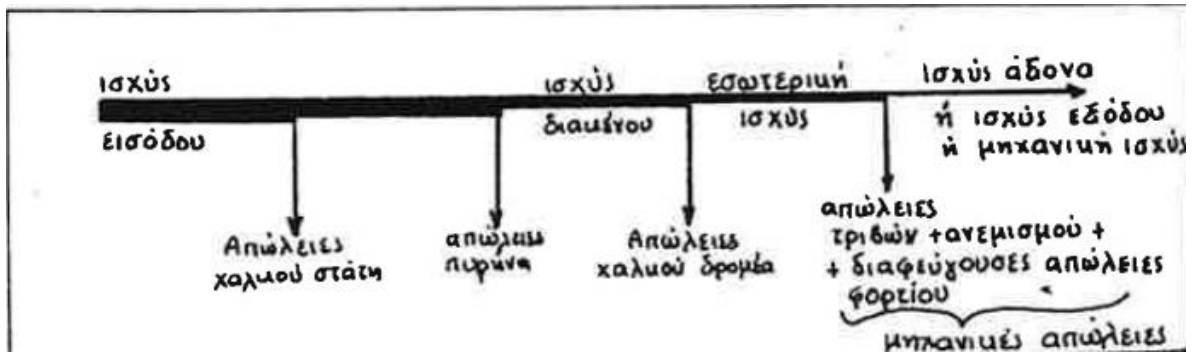


Σχήμα 29 Ισοδύναμο Ασύγχρονη Μηχανής

Όπου:

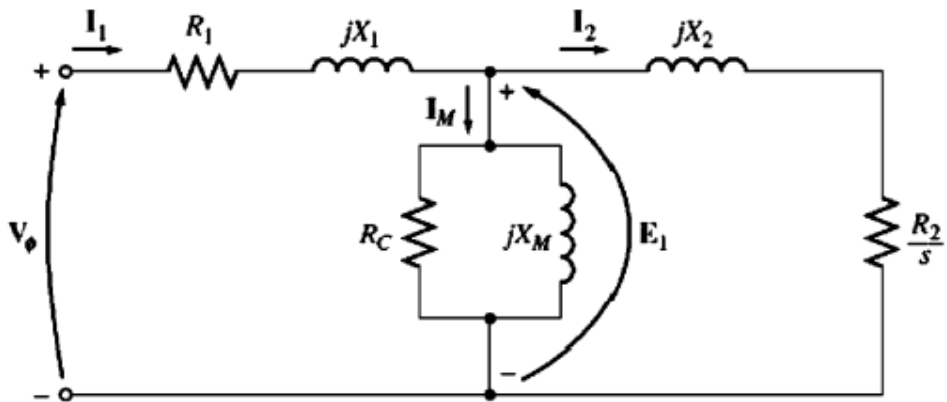
- V_p : Η φασική τάση ακροδεκτών του στάτη
- I_1 : Ρεύμα φάσης στάτη
- R_1 : Η ωμική αντίσταση του τυλίγματος του στάτη ανά φάση
- X_1 : Η αντίδραση τυλίγματος στάτη ανά φάση που οφείλεται στη μαγνητική ροή σκεδάσεως στο στάτη ανά φάση
- R_2 : Αντίσταση τυλίγματος δρομέα ανά φάση, ανοιγμένη στο στάτη.
- X_2 : Η αντίδραση σκεδάσεως τυλίγματος δρομέα ανοιγμένη στο στάτη, στη συχνότητα του στάτη
- X_M : Η αντίδραση μαγνήτισης
- I_M : Ρεύμα μιας φάσης στάτη
- I_R : Ρεύμα μιας φάσεως δρομέα ανηγμένο στο στάτη
- $I_M = I_c + I_m$: Το άθροισμα τους ρεύματος απωλειών πυρήνα και του ρεύματος μαγνήτισης που ονομάζεται και ρεύμα διέγερσης.

Η ροή ισχύος σε ένα ασύγχρονο επαγωγικό κινητήρα είναι:



Σχήμα 30 Ροή Ισχύος σε Ασύγχρονο επαγωγικό Κινητήρα

Το ανοιγμένο κύκλωμα στον στάτη



Σχήμα 31 Ισοδύναμο Κύκλωμα Ασύγχρονης Μηχανής Ανοιγμένο στον στάτη

Όπου το ρεύμα εισόδου I_1 είναι ίσο με

$$I_1 = \frac{V_\phi}{Z_{\text{ε}q}} \quad (2.5.6)$$

Και η ισοδύναμη εμπέδιση

$$Z_{\text{ε}q} = R_1 + jX_1 = \frac{1}{G_c - jB_M + \frac{1}{V_2/s + jX_2}} \quad (2.5.7)$$

- Οι απώλειες στάτη

$$P_{\text{SCCL}} = 3I_1^2 R_1 \quad (2.5.8)$$
- Οι απώλειες πυρήνα

$$P_{\text{core}} = 3E_1^2 G_c \quad (2.5.9)$$

- Οι απώλειες χαλκού

$$P_{RCL} = 3I_2^2 R_2 \quad (2.5.10)$$

Η ισχύς εισόδου είναι

$$P_{in} = \sqrt{3}V_T I_L \cos\theta \quad (2.5.11)$$

Αν αφαιρέσουμε από την ισχύ εισόδου την απώλειες στάτη και τις απώλειες πυρήνα υπολογίζουμε την ισχύ διάκενου

$$P_{AG} = P_{in} - P_{SCL} - P_{core} \quad (2.5.12)$$

Αν αφαιρέσουμε από την ισχύ διάκενου τις απώλειες χαλκού βρίσκουμε την ισχύ που μετατρέπεται σε μηχανική

$$P_{conv} = P_{AG} - P_{RCL} \quad (2.5.13)$$

Αν αφαιρέσουμε από την μετατρεπόμενη ισχύ τις απώλειες τριβών, ανεμισμού και τις διαφεύγουσες υπολογίζουμε την ισχύ εξόδου

$$P_{out} = P_{conv} - P_{F\&W} - P_{misc} \quad (2.5.14)$$

Η επαγόμενη ροπή υπολογίζεται ως

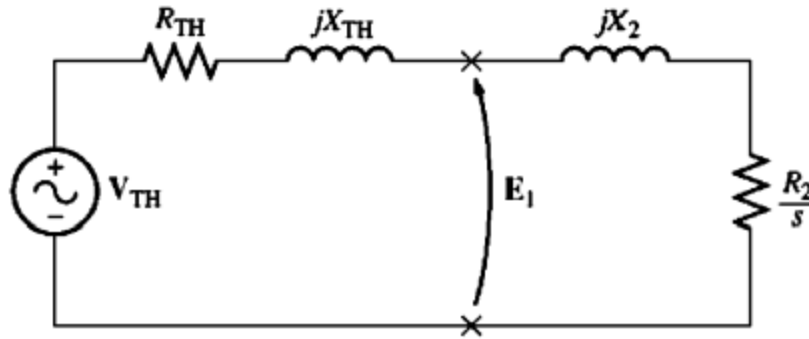
$$\tau_{ind} = \frac{P_{conv}}{\omega_m} = \frac{P_{AG}}{\omega_m} \quad (2.5.15)$$

Χρησιμοποιώντας το θεώρημα Thevenin μπορούμε να αναπαραστήσουμε την ασύγχρονη μηχανή ως ένα κύκλωμα με πηγή

$$V_{TH} = \frac{V_\phi X_M}{X_1 + X_M} \quad (2.5.16)$$

και εμπέδισης

$$Z_{TH} = \frac{jX_M(R_1 + jX_1)}{R_1 + j(X_1 + X_M)} \quad (2.5.17)$$

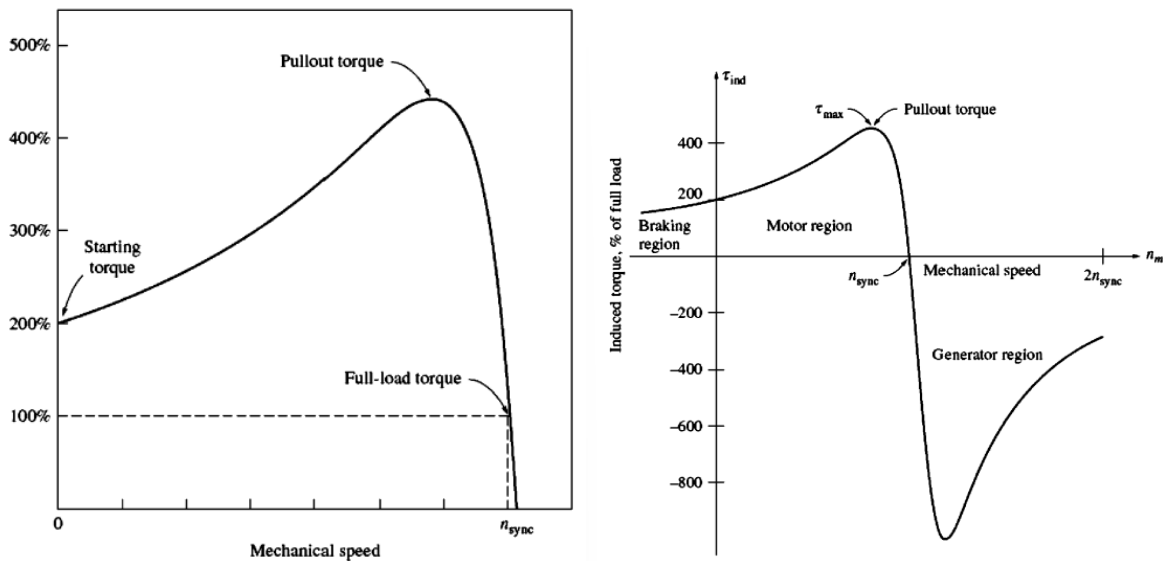


Σχήμα 32 Εφαρμογή Θεωρήματος Thevenin

Άρα και η επαγόμενη ροπή υπολογίζεται ως

$$\tau_{ind} = \frac{3V_{TH}^2 R_2/s}{\omega_s (R_{TH} + R_2/s)^2 + (X_{TH} + X_2)^2} \quad (2.5.18)$$

Παρακάτω φαίνεται το διάγραμμα της επαγόμενης ροπής συναρτήσει της μηχανικής ταχύτητας



Σχήμα 33 Ροπή συναρτήσει Μηχανικής Ταχύτητας

- Η επαγόμενη ροπή στον κινητήρα είναι μηδενική σε σύγχρονη ταχύτητα
- Η καμπύλη ροπής-ταχύτητας είναι σχεδόν γραμμική μεταξύ του πλήρους και του καθόλου φορτίου. Σε αυτή την περιοχή η αντίδραση του στάτη είναι πολύ μεγαλύτερη από του δρομέα.
- Υπάρχει μέγιστη τιμή της ροπής και ονομάζεται ροπή εξόδου.
- Η εναρκτήρια ροπή είναι λίγο μεγαλύτερη από την ροπή σε πλήρες φορτίο

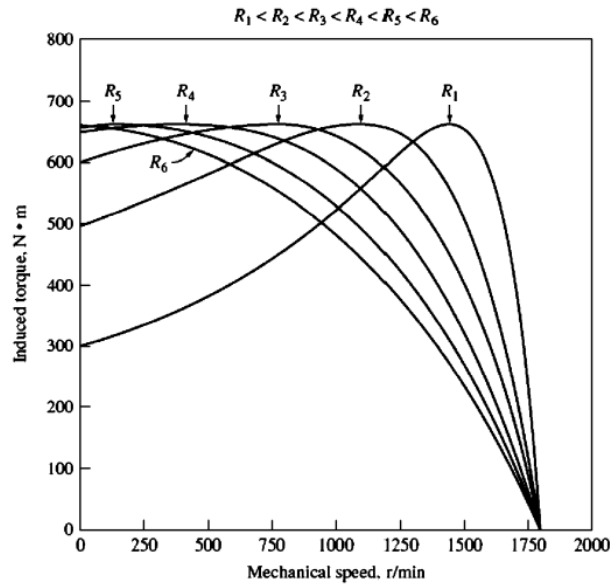
- Η ροπή εκκίνησης στον κινητήρα για μια δεδομένη ολίσθηση ποικίλλει ανάλογα με το τετράγωνο της εφαρμοζόμενης τάσης.
- Εάν ο ρότορας του επαγωγικού κινητήρα κινείται ταχύτερα από τη σύγχρονη ταχύτητα, τότε η κατεύθυνση της επαγόμενης ροπής στη μηχανή αντιστρέφεται και η μηχανή γίνεται γεννήτρια, μετατρέποντας τη μηχανική ισχύ σε ηλεκτρική ισχύ.
- Εάν ο κινητήρας γυρίζει προς τα πίσω σε σχέση με την κατεύθυνση των μαγνητικών πεδίων, η επαγόμενη ροπή στο μηχανήμα θα σταματήσει το μηχανήμα πολύ γρήγορα και θα προσπαθήσει να το περιστρέψετε προς την άλλη κατεύθυνση. Από την αντιστροφή της κατεύθυνσης του μαγνητικού πεδίου. Η περιστροφή του πεδίου είναι απλώς θέμα εναλλαγής δύο φάσεων στο στάτη, αυτό το γεγονός μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως τρόπος για να σταματήσει πολύ γρήγορα έναν επαγωγικό κινητήρα. Η εναλλαγή δύο φάσεων για να σταματήσει ο κινητήρας πολύ γρήγορα ονομάζεται ηλεκτρική πέδηση.

Η μέγιστη δυνατή ροπή εμφανίζεται όταν η ισχύς διάκενου είναι μέγιστη, άρα και η μέγιστη επαγόμενη ροπή θα δημιουργηθεί όταν που καταναλώνεται από την αντίσταση γίνει μέγιστη. Η μέγιστη ολίσθηση δίνεται από την σχέση:

$$s_{max} = \frac{R_2}{\sqrt{R_{TH}^2 + (X_{TH}^2 + X_2^2)}} \quad (2.5.19)$$

Και η τιμή της μέγιστης ροπής από την εξίσωση:

$$\tau_{max} = \frac{2V_{TH}^2}{2\omega_s \left(R_{TH} + \sqrt{R_{TH}^2 + (X_{TH} + X_2)^2} \right)} \quad (2.5.20)$$



Σχήμα 34 Επαγόμενη Ροπή Συναρτήσει Μηχανικής Ταχύτητας

[7], [8]

2.6 Κατηγοριοποίηση Μηχανών Επαγωγής

Εξαιτίας των διαφόρων εφαρμογών που έχουν οι κινητήρες επαγωγής ο διεθνής οργανισμός κατασκευαστών ηλεκτρικών μηχανών NEMA (National Electrical Manufacturer Association), κατάταξε τους κινητήρες σε διάφορες κλάσεις ανάλογα με τη χαρακτηριστική ροπής – στροφών του κάθε κινητήρα.

Κλάση Α:

Είναι οι που παρουσιάζουν ολίσθηση 5% μικρότερο από τις μηχανές κλάσης Β κατά την λειτουργία σε πλήρες φορτίο. Η ροπή ανατροπής είναι στο εύρος 200% - 300% κατά την πλήρη φόρτιση. Για μεγάλους κινητήρες η ροπή εκκίνησης είναι τουλάχιστον ίση με την ονομαστική ροπή ενώ στους μικρούς είναι έως και 200% μεγαλύτερη από την ονομαστική. Το κρουστικό ρεύμα είναι 500% - 80 0% μεγαλύτερο από το ονομαστικό. Αυτοί οι τύποι κινητήρα αποτελούσαν την καθιερωμένη σχεδίαση για εφαρμογές με ισχύ κάτω των 7.7 hp και άνω των 200hp. Με βασικές εφαρμογές πάνω στις εργαλειομηχανές όπως οι τόννοι.

Κλάση Β:

Η ροπή εκκίνησης που παράγουν είναι ίδια με τις μηχανές τύπου Α και το ρεύμα εκκίνησης μικρότερο έως και 25%. Το ρεύμα εκκίνησης είναι μικρότερο επειδή έχει αυξηθεί η αντίδραση σκέδασης, ενώ η ροπή εκκίνησης διατηρείται με χρήση δρομέα διπλού κλωβού ή βαθιών αυλάκων. Η μεγάλη αντίδραση μειώνει ελαφρά το συντελεστή ισχύος σε σχέση με τις μηχανές

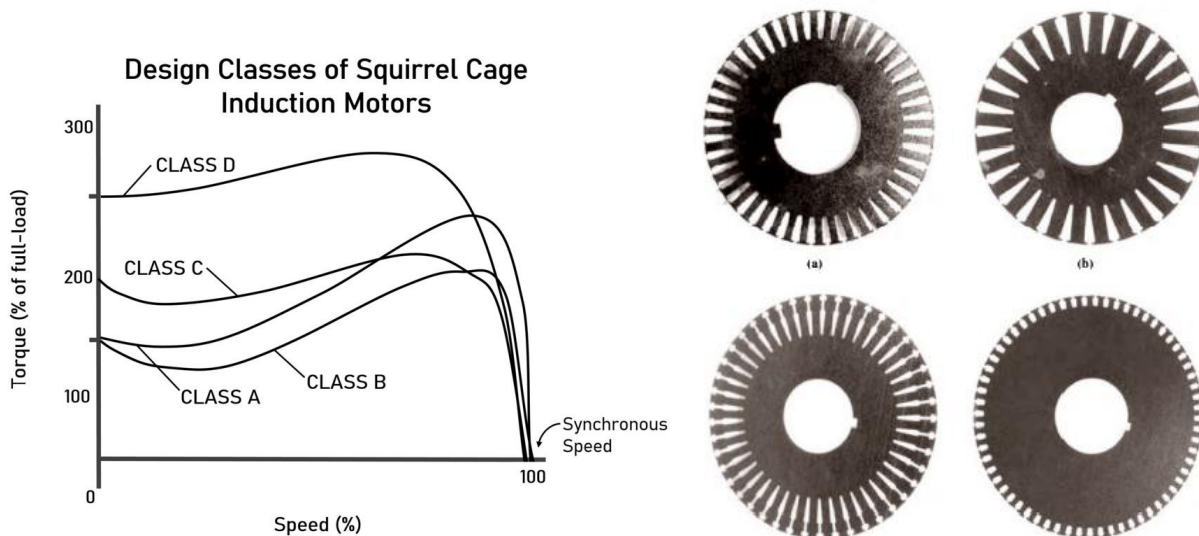
τύπου Α. Οι εφαρμογές αυτών των κινητήρων αφορούν συστήματα σταθερής ταχύτητας που απαιτούν μικρή ροπή εκκίνησης.

Κλάση Γ:

Αυτοί οι κινητήρες παρουσιάζουν μεγάλη ροπή κατά την εκκίνηση και χαμηλό ρεύμα. Συνήθως ο δρομέας είναι τύπου διπλού κλωβού με μεγάλη αντίσταση. Μερικές εφαρμογές αυτών των μηχανών είναι οι συμπιεστές και οι ταινιόδρομοι.

Κλάση Δ:

Αυτοί οι κινητήρες έχουν μικρό ρεύμα εκκίνησης και τεράστια ροπή, έως και 300% μεγαλύτερη από την ονομαστική. Σχεδιαστικά είναι παρόμοιοι με τους κινητήρες κλάσης Α αλλά διαθέτουν ράβδους μικρότερης διατομής και μεγαλύτερης αντίστασης. Λόγω της μεγάλης αντίστασης υπάρχει μέγιστη ροπή σε μικρή ταχύτητα. Αυτοί οι κινητήρες βρίσκουν εφαρμογές σε συστήματα που απαιτούν επιτάχυνση φορτίων με μεγάλη μάζα.



Σχήμα 35 Κλάσεις Μηχανών Επαγωγής

[10], [11]

2.7 Έναρξη και Έλεγχος Ταχύτητας Κινητήρων Επαγωγής

Οι επαγωγικοί κινητήρες δεν παρουσιάζουν τους τύπους προβλημάτων εκκίνησης που παρουσιάζουν οι σύγχρονοι. Μπορούν να λειτουργήσουν ακόμη και αν συνδεθούν κατευθείαν στην γραμμή ισχύος. Ωστόσο υπάρχουν κάποιοι λόγοι που αυτό δεν είναι καλό να συμβαίνει. Μια περίπτωση είναι το απαιτούμενο ρεύμα εκκίνησης να προκαλέσει πτώση στην ισχύ της γραμμής. Επίσης, η εκκίνηση μπορεί να επιτευχθεί σε σχετικά χαμηλά ρεύματα εισάγοντας περισσότερη αντίσταση στο κύκλωμα του ρότορα κατά την εκκίνηση. Οι κινητήρες τύπου κλωβού έχουν μεγάλο εύρος στα ρεύματα εκκίνησης. Για να υπάρχει σωστή εκτίμηση του ρεύματος εκκίνησης όλοι οι επαγωγικοί κινητήρες τύπου κλωβού έχουν ένα χαρακτηριστικό γράμμα στην πινακίδα τους που υποδεικνύει το εύρος του ρεύματος εκκίνησης. Αυτό το εύρος καθορίζεται από την αρχική φαινόμενη ισχύ του κινητήρα ως συνάρτηση της ιπποδύναμης του.

Nominal code letter	Locked rotor, kVA/hp	Nominal code letter	Locked rotor, kVA/hp
A	0-3.15	L	9.00-10.00
B	3.15-3.55	M	10.00-11.00
C	3.55-4.00	N	11.20-12.50
D	4.00-4.50	P	12.50-14.00
E	4.50-5.00	R	14.00-16.00
F	5.00-5.60	S	16.00-18.00
G	5.60-6.30	T	18.00-20.00
H	6.30-7.10	U	20.00-22.40
J	7.7-8.00	V	22.40 and up
K	8.00-9.00		

Σχήμα 36 Κατηγορίες Μηχανών Επαγωγής

Συγκεκριμένα η αρχική φαινόμενη ισχύς καθορίζεται ως:

$$S_{start} = (\text{Ονομαστικ Ισχύς}) \times (\text{Τιμή χαρακτηριστικού γράμματος})$$

Και το ρεύμα έναρξης ως:

$$I_L = \frac{S_{start}}{\sqrt{3}V_T} \quad (2.7.1)$$

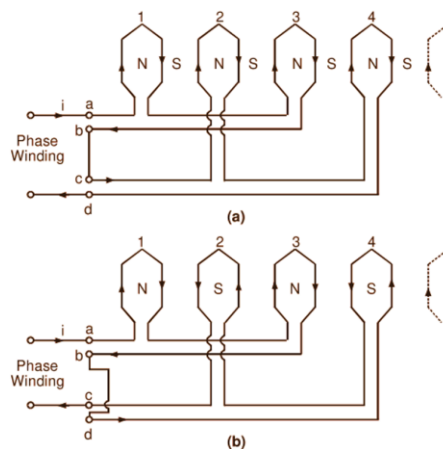
Όπου V_T η ονομαστική ισχύς.

Αν χρειαστεί, μπορεί να γίνει έλεγχος της ταχύτητας εκκίνησης στους κινητήρες επαγωγής. Μερικοί τρόποι είναι οι εξής:

Αλλαγή των πόλων ενός επαγωγικού κινητήρα:

Οι πόλοι ενός κινητήρα μπορούν να αλλάξουν με διάφορες μεθόδους. Μερικές από αυτές είναι:

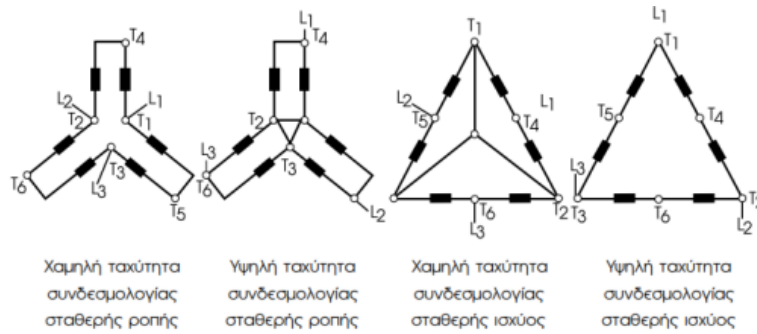
- Μέθοδος διαδοχής των πόλων: Πρόκειται για την παλαιότερη μέθοδο όπου μεταβάλλεται το τυλίγμα του στάτη με αλλαγές στις συνδέσεις των συστάδων. Πρακτικά η εναλλαγή της φοράς του ρεύματος μεταβάλει το μαγνητικό πεδίο, άρα έχουμε και νέο αριθμό πόλων.



Σχήμα 37 Πόλοι επαγωγικού Κινητήρα

ο τρόπος που αναδιοργανώνονται τα τυλίγματα του στάτη κατά την μεταβολή της συνδεσμολογίας τους μπορεί να αλλάξει την μέγιστη ροπή του κινητήρα έτσι ώστε να διπλασιαστεί ή να μειωθεί στο μισό. Η συγκεκριμένη μέθοδος έχει ένα σημαντικό μειονέκτημα, ο λόγος των ταχυτήτων είναι 2/1. Πράγμα που μπορεί να ξεπεραστεί με την εισαγωγή πολλαπλών τυλιγμάτων στον στάτη.

- Διαμόρφωση του Πλάτους Πόλου:
Η συγκεκριμένη μέθοδος γνωστή ως PAM (pole amplitude modulation) χρησιμοποιεί την μεταβολή των συνδέσεων.



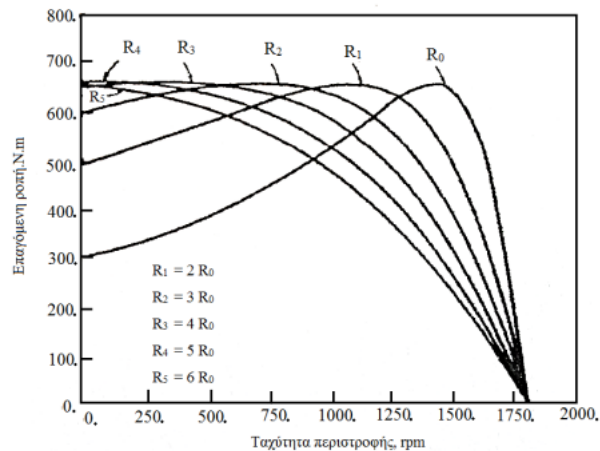
Σχήμα 38 Διαμόρφωση Πλάτος Πόλου

Έλεγχος με την μεταβολή της συχνότητας του δικτύου.

Σε αυτή την μέθοδο, η τροφοδοσία έχει μεταβλητή συχνότητα με αποτέλεσμα να μεταβάλλεται η σύγχρονη ταχύτητα. Όταν ο κινητήρας βρίσκεται στις ονομαστικές συνθήκες η σύγχρονη ταχύτητα ονομάζεται βασική. Με αυτή την τεχνική η ταχύτητα του κινητήρα μπορεί να είναι μικρότερη ακόμη και μεγαλύτερη από την βασική. Για την ασφαλή λειτουργία όταν η ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα είναι μικρότερη της βασικής εφαρμόζεται υποβιβασμός της τάσης. Δηλαδή, η τάση στον στάτη μειώνεται για να μην γίνει το ρεύμα μαγνήτισης πολύ μεγάλο.

Έλεγχος με τη μεταβολή της αντίστασης του δρομέα:

Για επαγωγικούς κινητήρες με δακτυλιοφόρο δρομέα μπορεί να γίνει έλεγχος της ταχύτητας μεταβάλλοντας τις αντιστάσεις στο κύκλωμα του δρομέα. Το πρόβλημα είναι ότι με την αύξηση της αντίστασης μειώνεται η απόδοση της μηχανής. Ανάλογα με την τιμή της αντίστασης μεταβάλλεται η χαρακτηριστική της επαγόμενης ροπής σε σχέση με την ταχύτητα περιστροφής.



Σχήμα 39 Χαρακτηριστικές Ροπής

3 Μονοφασικοί Κινητήρες

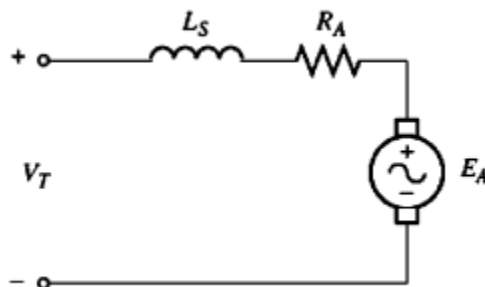
Οι μονοφασικοί κινητήρες είναι σχεδιασμένοι για λειτουργούν με πηγή μιας φάσης και έχουν τεράστιο εύρος εφαρμογών σε σπίτια, γραφεία και εργοστάσια και αφού έχουν τόσες και διαφορετικές εφαρμογές κατηγοριοποιούνται ανάλογα με τον τρόπο κατασκευής τους και τον τρόπο εκκίνησης σε μηχανές επαγωγής, κινητήρες απώθησης, κινητήρες υστέρησης και βηματικοί κινητήρες. Συνήθως είναι μικροί κινητήρες με ισχύ στην τάξη μεγέθους KW. Η βασική διαφορά με τους τριφασικούς κινητήρες είναι ότι οι μονοφασικοί δεν παράγουν περιστρεφόμενο μαγνητικό πεδίο. Το μαγνητικό του πεδίο είναι στατικό και μεταβάλλεται με τον χρόνο.

3.1 Κινητήρας γενικής χρήσης

Η πιο απλή σχεδίαση ενός κινητήρα universal περιλαμβάνει μια πηγή εναλλασσόμενου που εφαρμόζεται σε μια μηχανή συνεχούς. Η επαγόμενη ροπή σε έναν κινητήρα συνεχούς δίνεται από την σχέση:

$$\tau_{ind} = K\Phi I_A \quad (3.1.1)$$

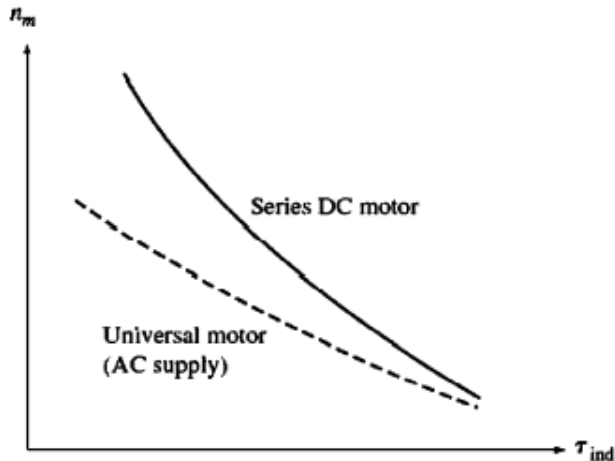
Εάν η πολικότητα της τάσης που εφαρμόζεται σε έναν κινητήρα συνεχούς αντιστραφεί, η κατεύθυνση της ροής του μαγνητικού πεδίου και η κατεύθυνση της ροής του ρεύματος οπλισμού αντιστρέφονται. Ενώ η επαγόμενη ροπή έχει την ίδια κατεύθυνση. Έτσι παράγεται μια παλλόμενη και μονοδρομική και ροπή. Τέτοιο σχεδιασμό έχουν οι σε σειρά συνεχούς ρεύματος μηχανές.



Σχήμα 40 Κινητήρας γενικής χρήσης

Το ρεύμα οπλισμού και το ρεύμα πεδίο πρέπει να αναστραφούν ακριβώς την ίδια χρονική στιγμή. Όμως, η τεράστια επαγωγή του πεδίο δημιουργεί καθυστέρηση στην αναστροφή του ρεύματος του πεδίου με αποτέλεσμα να μειώνεται η επαγόμενη ροπή στο κινητήρα. Για να λειτουργεί σωστά ένας τέτοιος κινητήρας οι πόλοι και ο στάτης θα πρέπει να είναι εντελώς μονωμένοι ώστε να αποφεύγονται οι τεράστιες απώλειες πυρήνα. Ένας τέτοιος κινητήρας ονομάζεται κινητήρας γενικής χρήσης, αφού λειτουργεί και με εναλλασσόμενο και με συνεχές. Η χαρακτηριστική καμπύλη της ταχύτητας ως συνάρτηση με την επαγόμενη ροπή για λειτουργία στο συνεχές και στο εναλλασσόμενο παρουσιάζεται παρακάτω. Όπως φαίνεται από το σχήμα για λειτουργία στο εναλλασσόμενο η καμπύλη βρίσκεται χαμηλότερα. Αυτό οφείλεται

στο ότι οι περιελίξεις οπλισμού και πεδίου έχουν μεγάλη αντίδραση για συχνότητες 50 και 60 Hz. Ένα σημαντικό μέρος της τάσης εισόδου πέφτει από αυτές τις αντιδράσεις.



Σχήμα 41 Ταχύτητα συναρτήσει της επαγόμενης ροπής για DC και AC κινητήρες

Τέτοιοι κινητήρες βρίσκουν εφαρμογή σε συστήματα που απαιτούν σταθερή ταχύτητα ή σε συστήματα που απαιτούν χαμηλό βάρος και υψηλή ροπή.

3.2 Δομή και Μαγνητικό Πεδίο Μονοφασική Επαγωγική Μηχανής

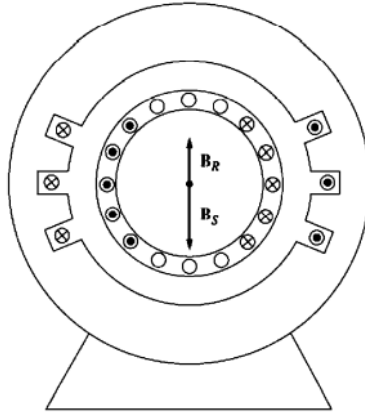
Τα 2 παρακάτω υποκεφάλαια περιγράφουν το τρόπο που δημιουργείται το μαγνητικό πεδίο στο εσωτερικό των μονοφασικών επαγωγικών μηχανών.

3.2.1 Διπλά Στρεφόμενο Πεδίο

Οι επιδόσεις αυτών των κινητήρων είναι χαμηλότερες σε σχέση του αντίστοιχους τριφασικούς της ίδιας ισχύος, βρίσκουν εφαρμογές κυρίως σε οικιακές συσκευές όπως τα πλυντήρια, ψυγεία, συστήματα κλιματισμού, συστήματα εξαερισμού αλλά και στην βιομηχανία όπως σε αντλίες και εργαλειομηχανές. Με την χρήση ηλεκτρονικών ισχύος τέτοιες μηχανές μπορεί να έχουν τεράστια απόδοση, καθώς ένας ελεγκτής καθορίζει την ταχύτητα με βάση τις συνθήκες που απαιτούνται.

Ένας επαγωγικός μονοφασικός κινητήρας αποτελείται από το στάτη και τον δρομέα. Ο στάτης έχει μονοφασικό τύλιγμα και ο δρομέας είναι βραχυκυκλωμένος, τύπου κλωβού και αποτελείται από αγώγιμες ράβδους τοποθετημένες σε αυλάκια. Όπως αναφέρθηκε και προηγούμενος, το μονοφασικό τύλιγμα δεν δημιουργεί περιστρεφόμενο μαγνητικό πεδίο. Αντίθετα πάλλεται. Ο κινητήρας την στιγμή που είναι ακίνητος μέχρι να αρχίσει να κινείται η μαγνητική ροή που δημιουργεί ο στάτης από υψηλή μειώνεται. Αυτή η μεταβολή επάγει ρεύμα

στον δρομέα όμως το μαγνητικό πεδίο του στάση και το επαγόμενο είναι αντιπαράλληλα με αποτέλεσμα η συνολική ροπή στο δρομέα να είναι μηδέν.



Σχήμα 42 Μαγνητικό Πεδίο Μηχανής Επαγωγής

Όπου B_s η μαγνητική επαγωγή του στάτη και B_R η μαγνητική επαγωγή του δρομέα.

$$B_s(t) = B_{max} \cos(\omega t) \hat{j} \quad (3.1.2)$$

Αν το μαγνητικό πεδίο περιστρέφεται ωρολογιακά εκφράζετε ως εξής:

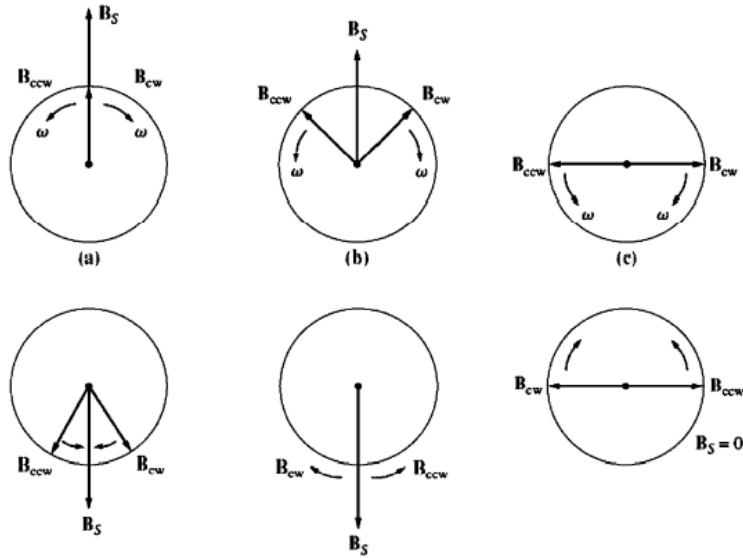
$$B_{cw}(t) = \frac{1}{2} B_{max} \cos(\omega t) \hat{j} - \frac{1}{2} B_{max} \sin(\omega t) \hat{i} \quad (3.1.3)$$

Αν το μαγνητικό πεδίο περιστρέφεται ανθωρολογιακά εκφράζετε ως εξής:

$$B_{ccw}(t) = \frac{1}{2} B_{max} \cos(\omega t) \hat{j} + \frac{1}{2} B_{max} \sin(\omega t) \hat{i} \quad (3.1.4)$$

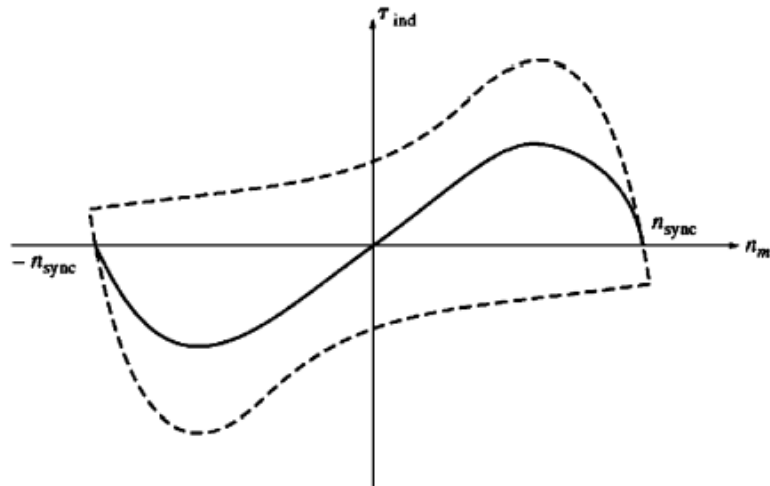
Όπου:

$$B_s(t) = B_{cw}(t) + B_{ccw}(t) \quad (3.1.5)$$

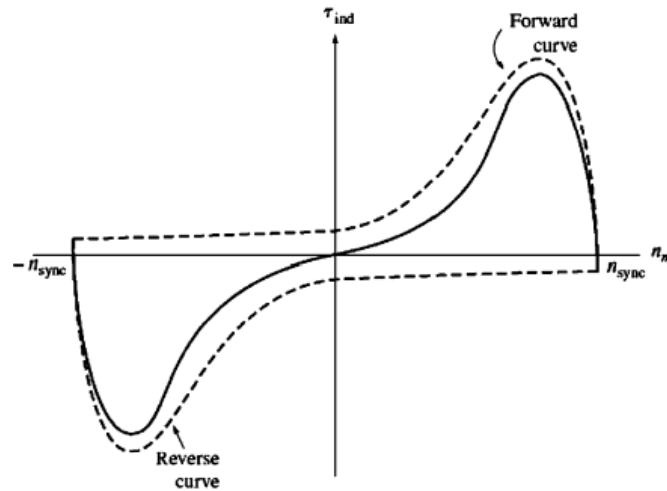


Σχήμα 43 Μαγνητικό Πεδίο Μονοφασικής Μηχανής

Άρα ο μονοφασικός επαγωγικός κινητήρας έχει 2 μαγνητικά πεδία στο εσωτερικό του, άρα και η συνισταμένη επαγόμενη ροπή είναι η διαφορά των 2 χαρακτηριστικών ροπής ταχύτητας. Στη μέση συνισταμένη ροπή υπάρχουν και υπάρχει και μια παλμική ροπή που δημιουργείται 2 φορές σε κάθε περίοδο όταν το ορθό και το αντίστροφο μαγνητικό πεδίο έχουν αντίστροφη φορά. Αυτοί οι παλμοί κάνουν τους μονοφασικούς κινητήρες πιο θορυβώδεις.

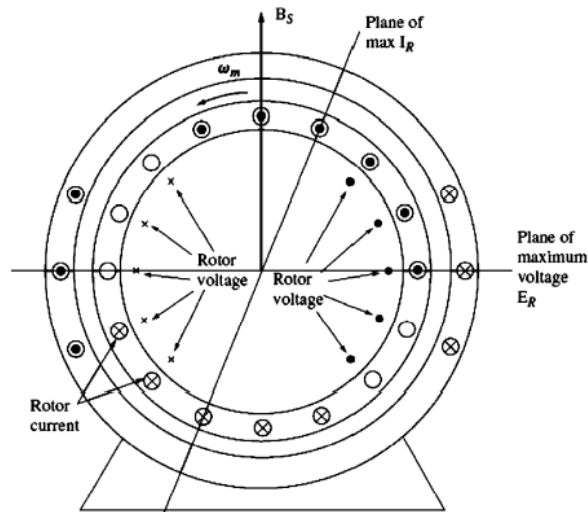


Σχήμα 44 Χαρακτηριστική καμπύλης επαγόμενης ροπής και σύγχρονης ταχύτητας



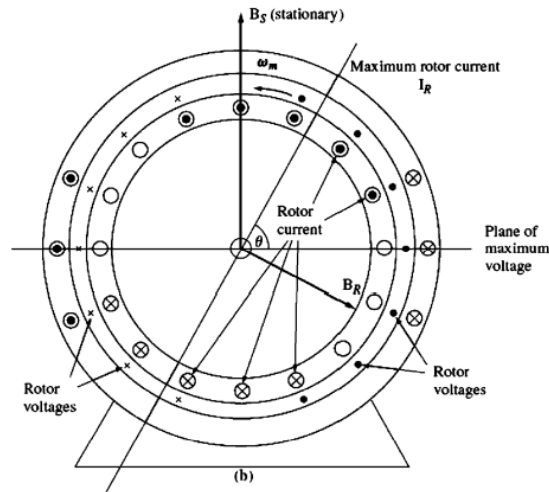
3.2.2 Θεώρημα διασταυρωμένων πεδίων

Η δημιουργία της επαγόμενης ροπής σε μονοφασικό επαγωγικό κινητήρα βασίζεται στο θεώρημα διασταυρωμένων πεδίων (cross field theory). Σε αυτή την θεωρία περιγράφονται τα επαγόμενα ρεύματα από τον στάση στον δρομέα. Έστω ένα μονοφασικός επαγωγικός κινητήρας που έχει ξεκινήσει με κάποια από τις τεχνικές εκκίνησης που περιγράψαμε παραπάνω.



Σχήμα 45 Θεώρημα Διασταυρωμένων Πεδίων

Τάση επάγεται στις μπάρες του δρομέα, με την μέγιστη επαγόμενη τάση να βρίσκεται κάτω από το τύλιγμα του στάτη. Έτσι προκαλείται ροή ρεύματος στον δρομέα, όμως λόγω της υψηλής αντίδρασης που έχει, η διαφορά φάσης μεταξύ ρεύματος και τάσης είναι περίπου 90 μοίρες. Αν ο δρομέας περιστρέφεται με ταχύτητα κοντά στην σύγχρονη, η διαφορά φάση δημιουργεί γωνιακή μετατόπιση 90 μοίρες μεταξύ του επιπέδου που υπάρχει μέγιστο ρεύμα στον δρομέα και μέγιστη τάση.



Σχήμα 46 Θεώρημα Διασταυρωμένων Πεδίων

Το μαγνητικό πεδίο στο στάτη B_s έχει μικρότερη ένταση από το μαγνητικό πεδίο στον δρομέα B_R , επειδή υπάρχουν απώλειες στον δρομέα. Το συνιστάμενο μαγνητικό πεδίο από τα 2 παραπάνω μαγνητικά πεδία είναι περιστρεφόμενο.

3.3 Εκκίνηση Μονοφασικής Επαγωγικής Μηχανής

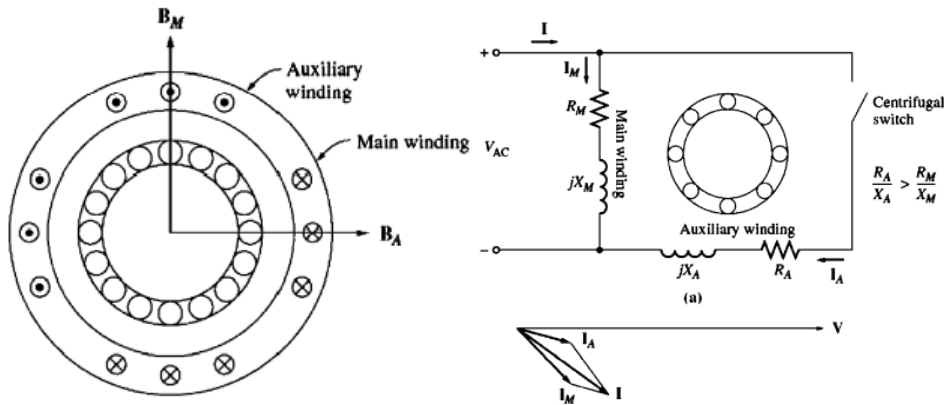
Επειδή το τύλιγμα τυμπάνου είναι μονοφασικό δεν δημιουργεί ροπή από περιστρεφόμενο μαγνητικό πεδίο, άρα δεν υπάρχει και ροπή εκκίνησης. Υπάρχουν 5 διαφορετικοί τρόποι για την εκκίνηση τέτοιων κινητήρων και οι μονοφασικές μηχανές επαγωγής είναι κατηγοριοποιημένες σύμφωνα με την μέθοδο εκκίνησης. Αυτές οι τεχνικές έχουν διαφορετικό κόστος και διαφορετική ροπή εκκίνησης. Ένας μηχανικός θα πρέπει να επιλέγει την τεχνική με το λιγότερο κόστος ανάλογα με την τιμή της ροπής που απαιτείται. Οι τεχνικές για την εκκίνηση είναι οι εξής:

1. Με βοηθητικό τύλιγμα
2. Με βοηθητικούς πόλους στο στάτη
3. Με πυκνωτή εκκίνησης
4. Με πυκνωτή λειτουργίας
5. Με πυκνωτή εκκίνησης και λειτουργίας

Με βοηθητικό Τύλιγμα:

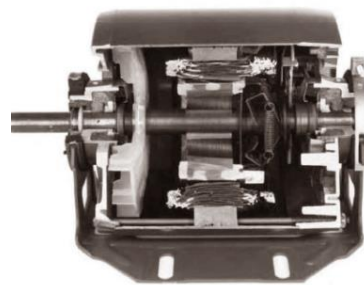
Σε αυτή την τεχνική χρησιμοποιείται ένα βοηθητικό τύλιγμα στο στάτη που ονομάζεται τύλιγμα εκκίνησης. Ο μαγνητικός άξονας του βοηθητικού τυλίγματος είναι κάθετος στον μαγνητικό

άξονα του κύριου τυλίγματος του στάτη ώστε να δημιουργείται ροπή πάνω σε αυτό. Δηλαδή τα 2 τυλίγματα αν και έχουν την ίδια τάση τροφοδοσίας, δημιουργούν την εικόνα μιας διαφασικής μηχανής. Αν και τα μέτρα των ρευμάτων είναι ίδια, η διαφορά φάσης τους είναι 90 μοίρες και έτσι έχουμε την μορφή ενός περιστρεφόμενου μαγνητικού πεδίου. Συγκεκριμένα, το βοηθητικό τυλίγμα **A** θα πρέπει να έχει μεγαλύτερο λόγο αντίστασης προς αντίδρασης από το βασικό τυλίγμα **M**, ώστε το ρεύμα σε αυτό να προπορεύεται αυτό του κυρίου τυλίγματος. Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται το ισοδύναμο κύκλωμα.



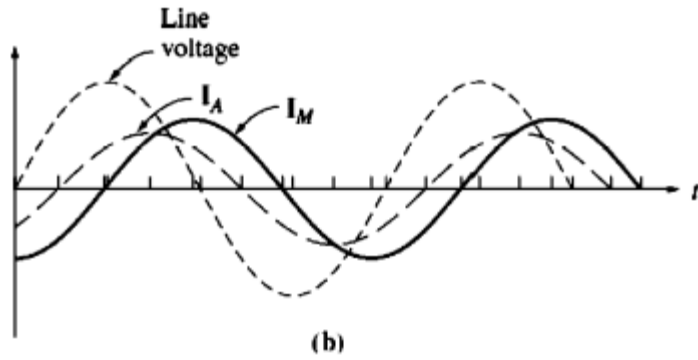
Σχήμα 47 Βοηθητικό Τύλιγμα και Ισοδύναμο Κύκλωμα

Όταν ξεκινήσει να περιστρέφεται ο δρομέας το βοηθητικό τυλίγμα δεν είναι απαραίτητο, μετά από την εκκίνηση το βασικό τυλίγμα θα έχει κυρίαρχη συνιστώσα μαγνητικού πεδίου την συνιστώσα που περιστρέφεται ομόρροπα με το άξονα και έτσι η περιστροφή διατηρείται. Για να σταματήσει η λειτουργία του βοηθητικού τυλίγματος, συνήθως χρησιμοποιείται ένας φυγοκεντρικός διακόπτης που βγάζει εκτός λειτουργίας το βοηθητικό τυλίγμα όταν ο δρομέας πλησιάσει το 70% - 80% της σύγχρονης ταχύτητας ή ένα ρελέ υπερέντασης που αποκόπτει το ρεύμα σε μια συγκεκριμένη τιμή.

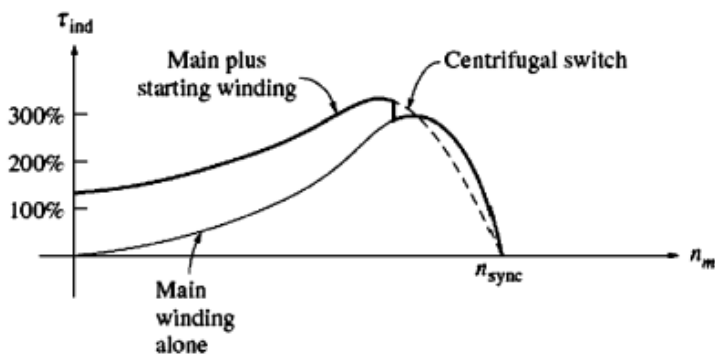


Σχήμα 48 Μονοφασικός Επαγωγικός Κινητήρα

Η χαρακτηριστικές ρεύματος – χρόνου και ροπής – στροφών παρουσιάζονται παρακάτω:



Σχήμα 49 Χαρακτηριστική Ρεύματος Χρόνου

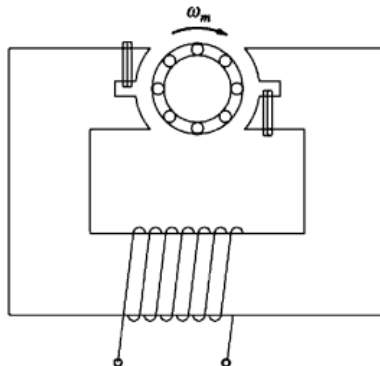


Σχήμα 50 Χαρακτηριστική Ροπής Χρόνου

Τέτοιου είδους μονοφασικές μηχανές έχουν εφαρμογές σε συστήματα που απαιτούν μικρές ροπές εκκίνησης, είναι οικονομικές και σχετικά μικρές σε μέγεθος.

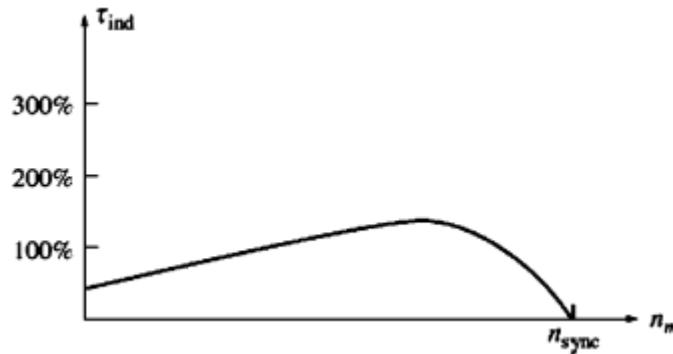
Με βοηθητικούς πόλους στον στάτη:

Σε αντίθεση με την προηγούμενη περίπτωση, υπάρχει μόνο το βασικό τύλιγμα και αντί για βοηθητικό τύλιγμα χρησιμοποιούνται βοηθητικοί πόλοι όπου το ένα τμήμα τους αποτελείται από ένα βραχυκυκλωμένο πηνίο.



Σχήμα 51 Βοηθητικοί Πόλοι στον Στάτη

Το βασικό τύλιγμα δημιουργεί μια μαγνητική επαγωγή και αυτή με την σειρά της μια μαγνητική ροή ως προς τους πόλους. Η μεταβολή της μαγνητικής ροής δημιουργεί μια ΗΕΔ με αποτέλεσμα να επάγεται ρεύμα. Από τον νόμο του Lenz αυτό το ρεύμα έχει ρεύμα τέτοιο ώστε το μαγνητικό πεδίο να αντιστέκεται στην μεταβολή, άρα αντίθετη από την μαγνητική ροή που επάγεται [12]. Με αυτό τον τρόπο δημιουργείται μια ροπή στους βοηθητικούς πόλους. Αυτή η μέθοδος χρησιμοποιείται σε πολύ μικρές μονοφασικές μηχανές γιατί η επαγόμενη ροπή στους βοηθητικούς πόλους είναι πολύ μικρή και είναι η οικονομικότερη μέθοδος που μπορεί να χρησιμοποιηθεί. Η χαρακτηριστική ροπής – ταχύτητας παρουσιάζεται παρακάτω.



Σχήμα 52 Χαρακτηριστική Ροπής – Ταχύτητας

Με πυκνωτή εκκίνησης:

Αυτή η τεχνική χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με τα βοηθητικά τυλίγματα για να δημιουργηθεί μεγαλύτερη ροπή εκκίνησης. Ένας πυκνωτής συνδέεται σε σειρά με τον φυγοκεντρικό διακόπτη. Η χωρητικότητα του πυκνωτή επιλέγεται έτσι ώστε η ΜΕΔ που δημιουργείται από το ρεύμα εκκίνησης στο βοηθητικό τύλιγμα να είναι ίση με την ΜΕΔ που υπάρχει στο κύριο τύλιγμα αλλά να υπάρχει μια διαφορά φάσης μεταξύ τους, ώστε να προηγείται το ρεύμα του βοηθητικού τυλίγματος. Έτσι δημιουργείται ισοδύναμο στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο.

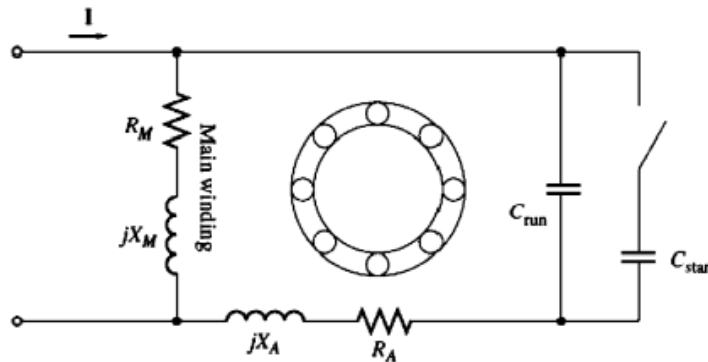
Η παραπάνω τεχνική δημιουργεί πολύ μεγάλη ροπή εκκίνησης και η αποσύνδεση του τυλίγματος γίνεται όπως στην πρώτη περίπτωση. Οι εφαρμογές τις είναι πάνω σε αντλίες, αεροσυμπιεστές και συσκευές που κάνουν εκκίνηση υπό φορτίο.

Με Πυκνωτή λειτουργίας

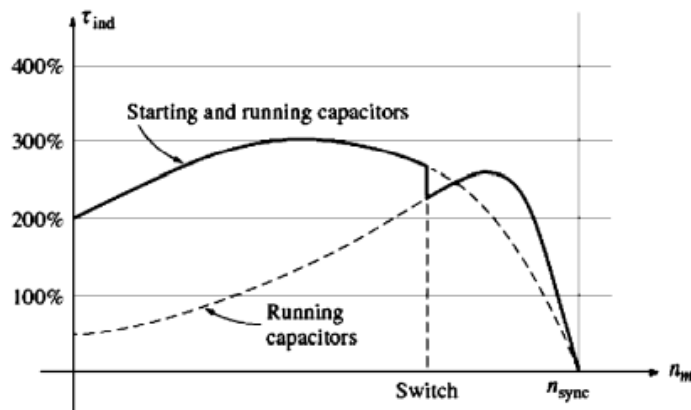
Αυτή η τεχνική χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με τα βοηθητικά τυλίγματα. Σε αντίθεση με την προηγούμενη περίπτωση δεν απαιτείται φυγοκεντρικός διακόπτης. Ο πυκνωτής είναι σε σειρά και παραμένει στο κύκλωμα και μετά από την εκκίνηση. Η τιμή της χωρητικότητας επιλέγεται ανάλογα με την τιμή του φορτίου και δημιουργεί ένα περιστρεφόμενο μαγνητικό πεδίο όπως και στις προηγούμενες περιπτώσεις. Αφού δεν υπάρχει βοηθητικό τύλιγμα η ροπή της μονοφασικής μηχανής είναι μικρότερη από την προηγούμενη περίπτωση.

Με πυκνωτή εκκίνησης και λειτουργίας:

Είναι μια κατηγορία συνδυασμός από τις 2 προηγούμενες με αποτέλεσμα να επιτυγχάνεται η μέγιστη ροπή εκκίνησης. Ο πυκνωτής λειτουργία είναι σε σειρά με το βασικό τύλιγμα και ο πυκνωτής εκκίνησης παράλληλα. Ο πυκνωτής εκκίνησης μετά από την εκκίνηση βγαίνει εκτός λειτουργίας μέσω φυγοκεντρικού διακόπτη στο 70% -80% της ονομαστικής ταχύτητας. Το ισοδύναμο κύκλωμα και η χαρακτηριστική ροπής – ταχύτητας παρουσιάζονται παρακάτω.



Σχήμα 53 Πυκνωτής Εκκίνησης



Σχήμα 54 Χαρακτηριστική Ροπής Ταχύτητας με Πυκνωτή Επαγωγής

3.4 Έλεγχος της ταχύτητας

Για μονοφασικό επαγωγικό κινητήρα οι τεχνικές ελέγχου της ταχύτητας είναι οι εξής:

- Μεταβολή της συχνότητας του στάση
- Μεταβολή του αριθμού των πόλων

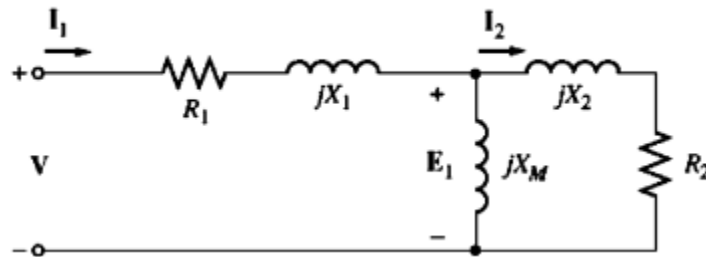
- Μεταβολή της τάσης εισόδου

Από τις παραπάνω η πιο συνηθισμένη είναι η μεταβολή της τάσης εισόδου και μπορεί να γίνει με διάφορους τρόπους. Ένας τρόπος είναι η χρήση αυτομετασχηματιστή που μεταβάλλει την τάση γραμμής με συνεχή τρόπο. Μια τέτοια μέθοδος για τον έλεγχο της ταχύτητας έχει υψηλό κόστος και εφαρμόζεται μόνο όταν απαιτείται η ομαλή μεταβολή της. Ένας δεύτερος τρόπος είναι η χρήση κυκλωμάτων SRC και TRIAC. Αυτά τα κυκλώματα ελέγχουν την διαφορά φάσης με αποτέλεσμα την μείωση της τάσης V_T . Αυτή η μέθοδος παρουσιάζει κάποια προβλήματα αφού είναι ιδιαίτερα ακριβή και προκαλεί δονήσεις στον κινητήρα, κάτι που οφείλεται στον τεμαχισμό της κυματομορφής εισόδου της τάσης. Μια ακόμη μέθοδος για τον έλεγχο της τάσης εισόδου, άρα και της ταχύτητας είναι η εισαγωγή μιας μεταβλητής αντίστασης σε σειρά με τον στάτη. Αυτή η τεχνική είναι σχετικά φτηνή αλλά δημιουργεί απώλειες στην ισχύ, άρα και μείωση της απόδοσης της μηχανής.

3.5 Ισοδύναμο κύκλωμα μονοφασικού επαγωγικού κινητήρα

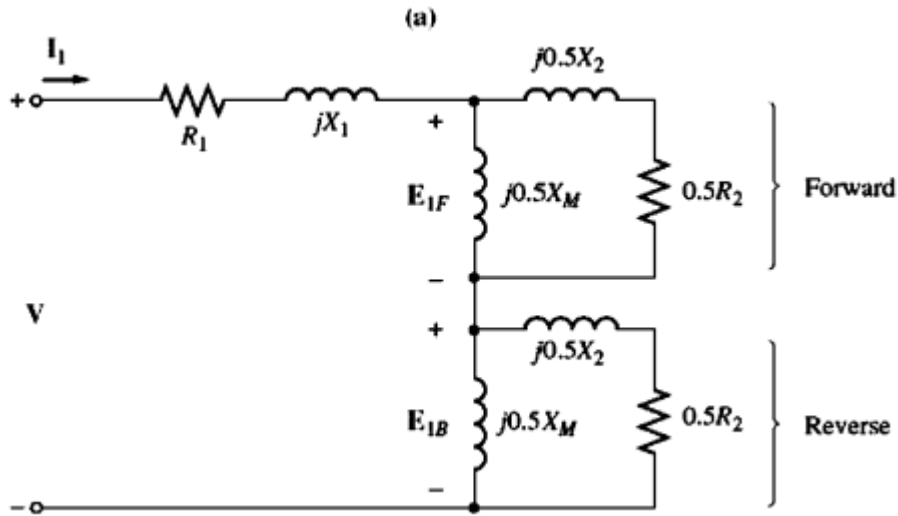
Όπως αναφέρθηκε στο κεφάλαιο 3.2 υπάρχουν 2 περιγραφές για την επαγόμενη ροπή στους μονοφασικούς κινητήρες. Κάθε μια από αυτές οδηγεί σε ένα ισοδύναμο κύκλωμα. Σε αυτό το κεφάλαιο θα γίνει περιγραφή για το ισοδύναμο κύκλωμα που δημιουργείται από την θεωρία του διπλά στρεφόμενου πεδίου.

Έστω μονοφασικός κινητήρας που λειτουργεί μόνο με το κύριο τύλιγμα. Στην φάση που είναι ακίνητος, συμπεριφέρεται σαν μονοφασικός μετασχηματιστής, άρα και το ισοδύναμο κύκλωμα του είναι ίδιο με έναν μετασχηματιστή με το δευτερεύον τύλιγμα να είναι ανηγμένο στο πρωτεύον. Αφού η μηχανή είναι ακίνητη ολίσθηση είναι $s = 1$.



Σχήμα 55 Ισοδύναμο Κύκλωμα Μονοφασικού Επαγωγικού Κινητήρα

Όπου R_1, X_1 η αντίσταση και η αντίδραση του στάτη, X_M η μαγνητική αντίδραση και R_2, X_2 η αντίσταση και η αντίδραση του δρομέα. Οι απώλειες πυρήνα θα συμπεριληφθούν μαζί με τις μηχανικές απώλειες και τις διαφεύγουσες. Σύμφωνα με την θεωρία του διπλά περιστρεφόμενου πεδίου, υπάρχουν 2 πεδία αντίθετης κατεύθυνσης, άρα κάθε ένα δημιουργεί την ίδια πτώση τάσης στον δρομέα. Άρα το δευτερεύον κύκλωμα μπορεί να διασπαστεί σε 2 κυκλώματα, όπου το πρώτο δημιουργεί μαγνητικό πεδίο με ωρολογιακή φορά και το δεύτερο με την αντίθετη.



Σχήμα 56 Ισοδύναμο Κύκλωμα Μονοφασικού Επαγωγικού Κινητήρα

Έστω τώρα μηχανή 2 τυλιγμάτων, το βασικό και το βοηθητικό για την εκκίνηση. Το βοηθητικό τύλιγμα απομακρύνεται την στιγμή που η ταχύτητα πλησιάζει το 70%-80% της σύγχρονης. Σε μια μονοφασική μηχανή επαγωγής η ενεργή αντίσταση του δρομέα επηρεάζεται από την τιμή της σχετικής κίνησης μεταξύ στάτη και δρομέα. Όμως στο εσωτερικό του μονοφασικού κινητήρα τα 2 πεδία έχουν διαφορετικό ποσοστό σχετικής κίνησης. Στο ορθό μαγνητικό πεδίο η ολίσθηση s ορίζεται ως η ανά μονάδα της ταχύτητας του δρομέα και της ταχύτητας του μαγνητικού πεδίου. Η αντίσταση του δρομέα στο τμήμα του κυκλώματος που

$$0.5R_2/s$$

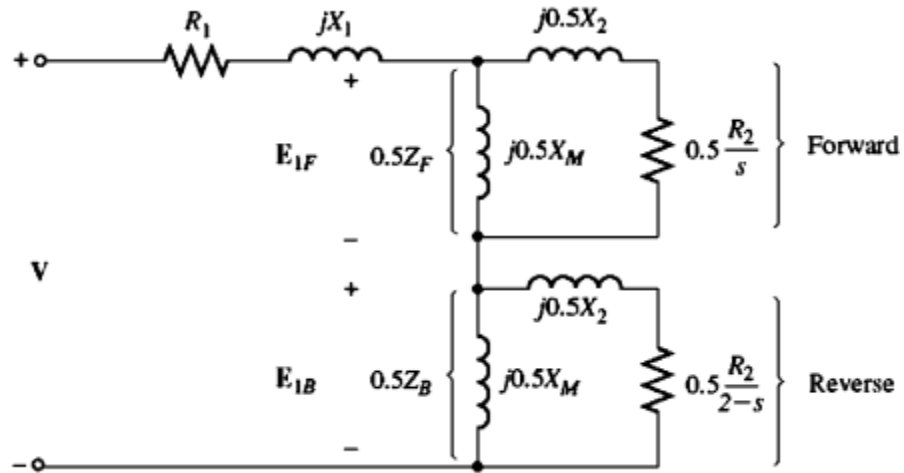
σχετίζεται με το ορθό μαγνητικό πεδίο είναι ίση με $0.5R_2/s$. Το ορθό μαγνητικό πεδίο περιστρέφεται με ταχύτητα n_{sync} το ανάστροφο περιστρέφεται με ταχύτητα $-n_{sync}$, άρα η συνολική ανά μονάδα διαφορά είναι ίση με 2. Όμως αφού ο δρομέας περιστρέφεται με μικρότερη κατά s ταχύτητα από το ορθό μαγνητικό πεδίο, η ανά μονάδα διαφορά της ταχύτητας μεταξύ του δρομέα και του ανάστροφου μαγνητικού πεδίου είναι $2-s$. Έτσι η ενεργή αντίσταση του δρομέα που σχετίζεται το ανάστροφο μαγνητικό πεδίο είναι ίση με $0.5R_2/(2-s)$.

$$S_F = \frac{n_{sync} - n_m}{n_{sync}} = 1 - \frac{n_m}{n_{sync}} \quad (3.4.2)$$

$$S_b = 1 - \frac{n_m}{-n_{sync}} = 1 + \frac{n_m}{n_{sync}} \quad (3.4.3)$$

$$S_b = 1 + (1 - S_F) = 2 - s \quad (3.1.4)$$

Άρα το ισοδύναμο κύκλωμα έχει αυτή την μορφή:



Σχήμα 57 Ισοδύναμο Κύκλωμα Μονοφασικού Επαγωγικού Κινητήρα

Για να απλοποιηθούν οι υπολογισμοί ορίζουμε τις εμπεδίσσεις για το ορθό και το ανάστροφο πεδίο ως:

$$Z_F = R_F + jX_F = \frac{(R_2/s + jX_2)jX_M}{R_2/s + jX_2 + jX_M} \quad (3.1.5)$$

$$Z_B = R_B + jX_B = \frac{(R_2/(2-s) + jX_2)jX_M}{R_2/(2-s) + jX_2 + jX_M} \quad (3.1.6)$$

Αρα το ρεύμα που ρέει από στον στάτη δίνεται από την σχέση

$$I_1 = \frac{V}{R_1 + jX_1 + 0.5Z_F + 0.5Z_B} \quad (3.1.7)$$

4 Σχεδίαση Μονοφασικού Κινητήρα

4.1 Προδιαγραφές Σχεδιασμού

Τα βασικά ζητήματα που πρέπει κάποιος να ελέγξει στον σχεδιασμό ενός επαγωγικού μονοφασικού κινητήρα είναι:

1. Η ροπή εξόδου. Ανάλογα με το είδος της εφαρμογής για την οποία κατασκευάζεται ο μονοφασικός κινητήρας χαρακτηρίζεται ως χαμηλής, μέτριας ή υψηλής ροπής πέδησης.
2. Η ροπή εκκίνησης. Ανάλογα με το είδος της εφαρμογής για την οποία κατασκευάζεται ο μονοφασικός κινητήρας και ανάλογα με την μέθοδο εκκίνησης που χρησιμοποιείται χαρακτηρίζεται ως χαμηλής, μέτριας με πυκνωτή ή υψηλής ροπής εκκίνησης. Για χαμηλή ροπή εκκίνησης χρησιμοποιείται το σύστημα εκκίνησης με αντίσταση (resistance start induction run – RSIR) και για μέτρια ροπή εκκίνησης η μέθοδος έναρξης με πυκνωτή (capacitor start induction run – CSIR) και για υψηλή ροπή εκκίνησης η μέθοδος έναρξης και λειτουργίας με πυκνωτή (capacitor start capacitor run – CSCR).
3. Η συμπεριφορά στις μεταβολές της τάσης εισόδου.
4. Η ψύξη

Σε γενικές γραμμές ένας μονοφασικός κινητήρας διαιρούμενης τάσης κατασκευάζεται για να έχει ροπή εκκίνησης 110% - 225% της ροπής σε πλήρες φορτίο και ροπή εξόδου το 200% - 280% της ροπής σε πλήρες φορτίο. Αν η μονοφασική μηχανή έχει εφαρμογές με υψηλή ροπή, τότε τα παραπάνω νούμερα διαμορφώνονται στο 200% - 300% για την ροπή έναρξης και 250% - 350% για την ροπή πέδησης. Αν η μονοφασική μηχανή έχει σύστημα εκκίνησης πυκνωτή, η ροπή εκκίνησης διαμορφώνεται στο 300% - 400% της ροπής σε πλήρες φορτίο και η ροπή πέδησης στο 225% - 300% και όπως αναφέραμε σε προηγούμενο κεφάλαιο ο πυκνωτής θα αποσυνδεθεί στο 70% - 80% της σύγχρονης ταχύτητας μέσω ενός φυγοκεντρικού διακόπτη.

4.2 Υλικά και Σχεδιασμός

Για τον πυρήνα του στάτη και του δρομέα συνήθως χρησιμοποιείται χάλυβας με διατρήσεις διαμέτρου 0.5mm υψηλής έλασης. Για τα αγωγία βασικά ή βοηθητικά τυλίγματα στον στάτη συνήθως χρησιμοποιείται εμαγιέ χαλκός και για τον δρομέα αλουμίνιο. Ανάλογα με την εφαρμογή της μηχανής μπορεί να χρησιμοποιηθεί και μόνωση π.χ. για ένα ψυγείο και συνήθως τέτοιες μηχανές ανήκουν στην κλάση B. Για μηχανές που πρέπει να είναι ερμητικά μονωμένες (όπως το ψυγείο) συνήθως χρησιμοποιείται τερεφθαλικός πολυεστέρας, όπου το εμπορικό του όνομα είναι Mylar Mellinex.

Το βοηθητικό τύλιγμα στις μονοφασικές μηχανές αποτελεί το 1/3 της συνολικής έκτασης του συνολικού τυλίγματος. Για να γίνει υπολογισμός του μήκους και της διαμέτρου του πυρήνα, χρησιμοποιείται ο παρακάτω αλγόριθμος:

- Βρες την ονομαστική ισχύ S που απαιτείται για την συγκεκριμένη εφαρμογή θεωρώντας ότι η μηχανής είναι τριφασική.

$$D^2L$$

- Λύσε την παρακάτω σχέση ως προς

$$S \sim KD^2L \quad (4.2.1)$$

Όπου K μια σταθερά που εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά της μηχανής.

$$D^2 L$$

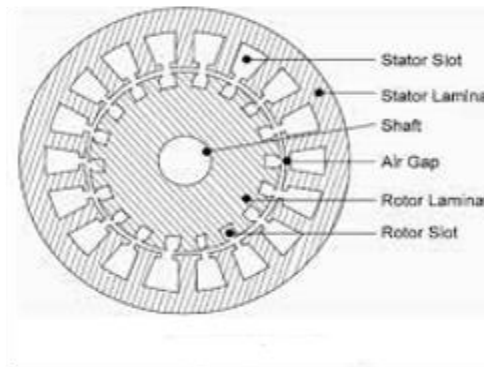
- Πολλαπλασίασε το με 1.5.
- Επέλεξε τις κατάλληλες τιμές για την διάμετρο D και το μήκος L

Για πρακτικούς λόγους συνήθως επιλέγεται μικρή διάμετρος και μεγάλο μήκος. Αυτό όμως δεν είναι υποχρεωτικό και μπορεί να αλλάξει ανάλογα με την σχεδίαση της μηχανής.

Το διάκενο μπορεί να είναι οσοδήποτε μικρό. Αν το διάκενο γίνει σχετικά μεγάλο, τότε παρατηρούνται τα εξής φαινόμενα:

- Αυξάνεται το ρεύμα μαγνήτισης και με αποτέλεσμα να αυξηθούν οι απώλειες σιδήρου (πυρήνα) και να μειωθεί ο συντελεστής απόδοσης της μηχανής. Αυτό το φαινόμενο είναι πιο ισχυρό όταν υπάρχει μεγάλος αριθμός πόλων.
- Οι διαφεύγουσες απώλειες μειώνονται.
- Η παλινδρομική ροπή αυξάνεται με αποτέλεσμα η μηχανή να είναι πιο θορυβώδης.

Για μονοφασικούς επαγωγικούς κινητήρες, ο αριθμός των εγκοπών του στάτη (stator slots) πρέπει να διαιρείται με τον αριθμό των πόλων ώστε να είναι σταθερό το τύλιγμα



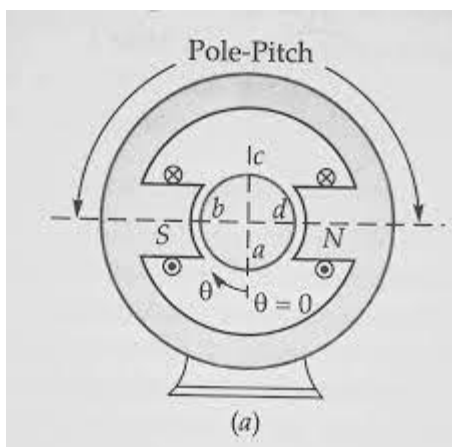
Σχήμα 58 Στάτης Μονοφασικού Επαγωγικού Κινητήρα

Το τύλιγμα του στάτη μιας μονοφασικής επαγωγικής μηχανής συνήθως είναι ομοκεντρικό και ο αριθμός των πόλων κατανέμεται ημιτονικά στις εσοχές. Ο ημιτονικός τρόπος κατανομής μειώνει τις αρμονικές στο διάκενο. Το βοηθητικό τύλιγμα είναι επίσης ομοκεντρικό κατανέμεται όπως και το βασικό τύλιγμα με τον αριθμό των στροφών να είναι 1.3 φορές μεγαλύτερος σε κάθε αυλάκι (slot).

4.3 Διαδικασία Σχεδίασης Επαγωγικής Μονοφασικής Μηχανής με Πυκνωτή Έναρξης και Λειτουργίας

Για να γίνει μια πλήρης σχεδίαση ενός μονοφασικού επαγωγικού κινητήρα με πυκνωτή έναρξης και λειτουργίας θα πρέπει να ακολουθηθεί η παρακάτω διαδικασία:

1. Βρες το ρεύμα και την τάση εισόδου.
2. Ακολούθησε τον αλγόριθμο που περιεγράφηκε στο κεφάλαιο 4.2 για τον υπολογισμό της D^2L του γινομένου.
3. Επέλεξε το μήκος L ώστε να είναι περίπου ίσο με την απόσταση μεταξύ 2 διαδοχικών πόλων (pole pitch).



Σχήμα 59 Μήκος Πόλου

4. Βρες την ροή ανά πόλο.
5. Υπολόγισε τον αριθμό των στροφών σε σειρά ανά φάση T .
6. Επέλεξε τον αριθμό των στροφών ανά πόλο ανάλογα με την ροπή. Αν χρειάζεται να μειωθεί ή να αυξηθεί η αντίδραση μείωση ή αύξηση τις στροφές ανά πόλο αντίστοιχα.
7. Ξανά υπολόγισε την μέση πυκνότητα μαγνητικής ροής και την μαγνητική ροή ανά πόλο.
8. Σχεδίαση την διάτρηση του στάτη (stator punching). Δηλαδή το μέγεθος του «δοντιού» (stator tooth) και το πλάτος και το βάθος της εσοχής (stator slot).



Σχήμα 60 Δόντια Στάτη

9. Επέλεξε το είδος και το μέγεθος του αγωγού για το βασικό τύλιγμα.
10. Σχεδίασε την ημιτονοειδή κατανομή του βασικού τυλίγματος στις εσοχές του στάτη.
11. Βρες το συντελεστή περιέλιξης C_w . Ο συντελεστής περιέλιξης προκύπτει από το γινόμενο των συντελεστών

$$C_w = k_p k_d k_s$$

Όπου k_p ο συντελεστής βήματος (pitch factor). Ο συντελεστής βήματος αντικατοπτρίζει το γεγονός ότι οι περιελίξεις συχνά δεν έχουν πλήρη κλίση και παίρνει τιμές από 0 έως 1. k_d ο συντελεστής κατανομής (distribution factor) που δείχνει το γεγονός ότι τα τυλίγματα κάθε φάσης κατανέμονται σε έναν αριθμό εσοχών. Επειδή η ΗΕΔ που δημιουργούνται στις διάφορες εσοχές δεν είναι σε φάση, η συνολική ΗΕΔ είναι μικρότερο του αθροίσματος των επιμέρους. Αυτός ο συντελεστής παίρνει τιμές από 0.9 έως 1 συνήθως. k_s ο συντελεστής λοξότητας (skew factor) αντικατοπτρίζει το γεγονός ότι τα τυλίγματα είναι γωνιακά στριμμένα με αποτέλεσμα να μειώνεται η ΗΕΔ. [13]

12. Πάρε το μήκος του διάκενου όσο το δυνατόν μικρότερο.
13. Σχεδίασε την διάτρηση του δρομέα (rotor punching), δηλαδή το μήκος του δοντιού (rotor tooth) και το πλάτος της εσοχής.



Σχήμα 61 Διάτρηση Δρομέα

14. Υπολόγισε την μαγνητική ροή που δημιουργείται στο διάκενο.
15. Υπολόγισε το ρεύμα μαγνήτισης, το μέγιστο ρεύμα και το ενεργό.
16. Υπολόγισε το μέγεθος πυρήνα του στάτη και των δοντιών.
17. Υπολόγισε τις απώλειες σιδήρου.
18. Βρες την αντίδραση ανοιχτού κυκλώματος (χωρίς φορτίο)

$$X_0 = 2 \frac{E'}{I_m} - X \quad (4.3.1)$$

19. Σχεδιάσε το βασικό τύλιγμα. Δηλαδή βρες τους τον αριθμό των αγωγών σε κάθε εσοχή, την κατανομή των αγωγών και την αντίσταση r_1 του βασικού τυλίγματος.
20. Επέλεξε το μέγεθος του αγωγού που υπάρχει στον δρομέα.
21. Υπολόγισε την αντίσταση του δρομέα.
22. Υπολόγισε την αντίσταση του δρομέα ανοιγμένη στον στάτη.
23. Υπολόγισε την αντίδραση διαρροής (leakage reactance)
24. Υπολόγισε όλες τις αντιστάσεις/ αντιδράσεις που εμφανίζονται στο ισοδύναμο κύκλωμα.
25. Βρες τους συντελεστές K_r και K_p και την αντίδραση ανοιχτού κυκλώματος X_0 .

26. Βρες τον λόγο r_2'/X από την καμπύλη και βρες την ταχύτητα της μηχανής όπου η ροπή γίνεται μέγιστη.

27. Υπολόγισε το X_1 και τις σταθερές M_1, M_2, M_3 και M_4

28. Κάνε τους υπολογισμούς απόδοσης με την μέθοδο G.G. Veinott

29. Βρες: Ισχύ εξόδου, rpm, ροπή, απόδοση, συντελεστή ισχύος σε πλήρες φορτίο.

30. Από την καμπύλη r_2'/X βρες την ταχύτητα που η ροπή γίνεται μέγιστη.

31. Βρες την ροπή εξόδου.

32. Σχεδιάσε το βοηθητικό τύλιγμα.

33. Υπολόγισε την ροπή έναρξης

4.4 Σχεδιασμός Πραγματικού Μονοφασικού Επαγωγικού Κινητήρα

Παρακάτω θα γίνει σχεδιασμός ενός τετραπολικού μονοφασικού επαγωγικού κινητήρα με πυκνωτή εκκίνησης. Τα ονομαστικά μεγέθη είναι 50Hz, 200 W, 230 V, 1420 rpm, ροπή εξόδου 225%, απόδοση 55%, συντελεστής ισχύος 65% και ροπή εκκίνησης 350%.

Τα βήματα της διαδικασίας που περιεγράφηκε στο κεφάλαιο 4.3 υποδεικνύονται παρακάτω με τον αντίστοιχο αριθμό.

1) Το ρεύμα και οι τάση εισόδου έχουν καθοριστεί από τα δεδομένα.

2) Το πρώτο πράγμα που πρέπει να κάνουμε, αφού έχουμε τάση και ρεύμα εισόδου, είναι να υπολογίσουμε την ονομαστική ισχύ.

$$S = \frac{200}{0.55 \times 0.65} = 560VA \quad (4.4.1)$$

Χρησιμοποιώντας τον τύπο τριφασικές επαγωγικές μηχανές, υπολογίζουμε το γινόμενο D^2L

$$S = 1.11\pi^2 \bar{B}acD^2Ln \quad (4.4.2)$$

Όπου:

- \bar{B} η μέση πυκνότητα μαγνητικής ροπής στο διάκενο. Για αυτή την εφαρμογή θεωρούμε ότι $\bar{B} = 0.4Wb/m^2$.
- Το γινόμενο ac είναι το ειδικό ηλεκτρικό φορτίο και ορίζεται ως ο αριθμός των αγωγών σπλισμού ανά μέτρο πάνω στην περιφέρεια του σπλισμού στο διάκενο. Για την συγκεκριμένη εφαρμογή επιλέγουμε $ac = 15000$.
- Για τετραπολικό κινητήρα με συχνότητα $f = 50$ Hz το $n = 25$.

Αντικαθιστούμε στην (4.4.1)

$$560 = 1.11 \times \pi^2 \times 0.4 \times 15000 \times D^2L \times 25 \quad (4.4.3)$$

$$D^2L$$

Και λύνουμε ως προς το

$$D^2L = 0.355 \times 10^6 mm^3 \quad (4.4.4)$$

Στην συνέχεια πολλαπλασιάζουμε με 1.5

$$1.5D^2L = 1.5 \times 0.355 \times 10^6$$

$$D = 90 \text{ mm}$$

$$L = 65 \text{ mm}$$

3) Επιλέγουμε , άρα το μήκος του πυρήνα θα πρέπει να είναι ίσο με .

4) Το ρεύμα σε πλήρες φορτίο είναι ίσο με

$$I = \frac{S}{V} = \frac{560}{230} = 2.43 \text{ A} \quad (4.4.5)$$

Υποθέτουμε ότι η πυκνότητα ρεύματος είναι ίσης με:

$$J = 4 \text{ A/mm}^2 \quad (4.4.6)$$

Η επιφάνεια του αγωγού, υποθέτοντας ομοιόμορφη κατανομή ρεύματος, υπολογίζεται από την σχέση:

$$J = \frac{I}{A} \Rightarrow A = 0.6075 \text{ mm}^2 \quad (4.4.7)$$

Υπολογίζουμε την διάμετρο του εμαγιέ χαλκού από την προσέγγιση που έγινε για την επιφάνεια

$$A \sim \pi \times \left(\frac{d}{2}\right)^2 \Rightarrow d = 0.9 \text{ mm} \quad (4.4.8)$$

Από τα παραπάνω στοιχεία, η αντίσταση, ανά μονάδα μήκους ανά μονάδα επιφανείας του αγωγού στους 20 βαθμούς κελσίου είναι ίση με:

$$R = 0.02710 \text{ ohms/m/mm}^2 \quad (4.4.9)$$

[14]

Αφου επιλέξαμε την ακριβή διάμετρο του αγωγού, μπορούμε να υπολογίσουμε και την ακριβή τιμή της επιφάνειας:

$$A = \pi \times \left(\frac{d}{2}\right)^2 = 0.635 \text{ mm}^2 \quad (4.4.10)$$

Υπολογίζουμε το ύψος πόλου:

$$\text{polepitch} = \frac{\pi \times 90}{4} = 71 \text{ mm} \quad (4.4.11)$$

Και την επιφάνεια του διάκενου:

$$\text{airgap} = L \times \text{polepitch} = 71 \times 65 = 4610 \text{ mm}^2 \quad (4.4.12)$$

Τέλος υπολογίζουμε την μαγνητική ροή ανά πόλο:

$$\Phi_{B/pole} = \bar{B} \times airgap = 0.4 \times 4610 \times 10^{-4} = 1.84 \times 10^{-3} Wb \quad (4.4.13)$$

5) Για μονοφασική επαγωγική μηχανή με ομοκεντρικό τύλιγμα, ο συντελεστής

$$C_w = 0.795 \quad (4.4.14)$$

Επιλέγουμε ο αριθμός των εσοχών στον στάτη να είναι ίσος με 36, άρα οι εσοχές ανά πόλο είναι 9. Έτσι μπορούμε να υπολογίσουμε τον αριθμό των στροφών ανά φάση

$$E = 4.44 \Phi_{B/pole} f C_w T \quad (4.4.15)$$

Αντικαθιστούμε στην παραπάνω τις εξισώσεις (4.4.13), (4.4.14), την συχνότητα, την ονομαστική τάση και λύνουμε ως προς T για να βρούμε τον αριθμό των στροφών ανά φάση.

$$T = \frac{230}{4.44 \times 1.84 \times 10^{-3} \times 50 \times 0.795} = 708 \quad (4.4.16)$$

6) Ας υποθέσουμε ότι η μηχανή δεν χρειάζεται να αποδίδει μεγάλη ροπή, μπορούμε να μειώσουμε τον αριθμό των στροφών ανά πόλο. Επιλέγουμε

$$T = 640 \quad (4.4.17)$$

7) Ξανά υπολογίζουμε την μαγνητική ροή ανά πόλο και την μέση πυκνότητα μαγνητικής ροής

$$\Phi_{B/pole} = 1.84 \times 10^{-3} \times \frac{708}{640} = 2.04 mWb \quad (4.4.18)$$

$$\bar{B} = \frac{\Phi_{B/pole}}{A} = \frac{2.04 \times 10^{-3}}{4610 \times 10^{-6}} = 0.44 \quad (4.4.19)$$

Έστω ότι θέλουμε να μειώσουμε την τιμή της μέσης πυκνότητας της μαγνητικής ροής, μπορούμε να το κάνουμε αυξάνοντας το μήκος. Έστω μήκος $L = 70$ mm

Το νέο διάκενο έχει επιφάνεια

$$airgap = polepitch \times L = 71 \times 70 = 4970 mm^2 \quad (4.4.20)$$

Και η νέα μέση πυκνότητα μαγνητικής ροής είναι ίση με:

$$\bar{B} = \frac{\Phi_{B/pole}}{airgap} = \frac{2.04 \times 10^{-3}}{4970 \times 10^{-6}} = 0.41 Wb/m^2 \quad (4.4.21)$$

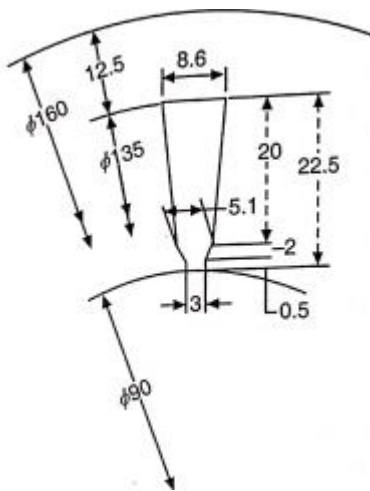
Συνοψίζοντας οι τιμές για τα παραπάνω μεγέθη είναι:

$$D = 90\text{mm}$$

- Διάμετρος
 $L = 70\text{mm}$
- Μήκος
- Μέση πυκνότητα μαγνητικής ροής $\bar{B} = 0.41\text{Wb/m}^2$
- Συνολικός στροφών ανά φάση $T = 640$
- Αριθμός στροφών ανά φάση ανά πόλο $640/4 = 160$
- Συνολικός αριθμός αγωγών $640 \times 2 = 1280$
- Ύψος εσοχής στάτης (stator slot pitch)

$$\text{stator slot pitch} = \frac{\pi \times 90}{36} = 7.85\text{mm} \quad (4.4.22)$$

8) Επιλέγουμε το μήκος του δοντιού 3.2 mm. Οι εσοχές φαίνονται στο παρακάτω σχήμα



Σχήμα 62 Σχεδιασμός δοντιών του στάτη

Το τόξο της εσοχής στην διάμετρο είναι ίσο με

$$\frac{\pi(90 + (2.5 \times 2))}{36} = 8.3\text{mm} \quad (4.4.23)$$

Και στο κέντρο είναι ίσο με

$$8.3 - 3.2 = 5.1\text{mm} \quad (4.4.24)$$

Επιλέγουμε το ύψος της εσοχής 20 mm, άρα η διάμετρος στο πάνω μέρος της εσοχής

$$\frac{(90 + (22.5 \times 2))\pi}{36} = 11.8\text{mm} \quad (4.4.25)$$

Το πλάτος της σχισμής στο πάνω μέρος θα είναι.

$$11.8 - 3.2 = 8.6\text{mm} \quad (4.4.26)$$

9 εως 13) Επιλέγουμε να υπάρχουν 56 στροφές ανά εσοχή ανά πόλο. Αν επιλέξουμε την διάμετρο του αγωγού 0.9mm και την διάμετρο του καλωδίου που μπαίνει το τύλιγμα 0.99mm. Η επιφάνεια ανά στρόφη είναι ίση με:

$$A_{turn} = \frac{\pi \times 0.99^2}{4} = 0.78 \text{ mm}^2 \quad (4.4.27)$$

Και η συνολική επιφάνεια

$$A = 56 \times 0.78 = 47.5 \text{ mm}^2 \quad (4.4.28)$$

Υποθέτοντας ότι ο συντελεστής επιφάνειας του μονωμένου αγωγού είναι 35% η συνολική επιφάνεια που απαιτείται για το τυλίγμα είναι:

$$A_{winding} = \frac{47.5}{0.35} = 136 \text{ mm}^2 \quad (4.4.29)$$

Από τις εξισώσεις (4.4.24) και (4.4.26) το μέσο πλάτος της εσοχής είναι

$$\frac{8.6 + 5.1}{2} = 6.85 \text{ mm} \quad (4.4.30)$$

Άρα η επιφάνεια θα είναι:

$$A_{slot} = 20 \times 6.85 = 137 \text{ mm}^2 \quad (4.4.31)$$

Που είναι μεγαλύτερη από την επιφάνεια του τυλίγματος (4.4.29), άρα υπάρχει αρκετός χώρος.

13 εως 19)

Δόντι του στάτη:

Επιλέγουμε το πλάτος του δοντιού του στάτη $w = 3.2 \text{ mm}$ και το ύψος του δοντιού $h = 22.5 \text{ mm}$. Άρα η επιφάνεια του κάθε δοντιού είναι ίση με

$$A = L \times w = 70 \times 3.2 = 224 \text{ mm}^2 \quad (4.4.32)$$

Ως συντελεστή στοίβαξης sf (stacking factor) ορίζεται ως ο λόγος της πραγματικής διατομής του πυρήνα με την ενεργό διατομή του πυρήνα (πράγμα που αλλάζει ανάλογα με την κατασκευή). Για την συγκεκριμένη εφαρμογή επιλέγουμε $sf = 0.95$. Η μέση τιμή του μαγνητικού πεδίου σε κάθε δόντι ορίζεται ως:

$$B_{average} = \frac{\Phi_{B/Pole}}{A_{tooth} \times Npoles \times sf} = \frac{2.04 \times 10^{-3}}{224 \times 10^{-6} \times 9 \times 0.95} = 1.06 \text{ Wb/m}^2 \quad (4.4.33)$$

Η μέγιστη τιμή του μαγνητικού πεδίου στο δόντι είναι:

$$B_{max-teeth} = \frac{\pi \times B_{average}}{2} = 1.66 \text{ Wb/m}^2 \quad (4.4.34)$$

Και το μήκος της μαγνητικής διαδρομής είναι ίσο με:

$$L_{magn} = 22.5mm \quad (4.4.34)$$

Πυρήνας του στάτη:

Το βάθος του πυρήνα του στάτη είναι $depth = 12.5mm$ και εξωτερική διάμετρος του στάτη

$$135 + (2 \times 12.5) = 160mm \quad (4.4.35)$$

Η μέση πυκνότητα ροής στον πυρήνα υπολογίζεται από την σχέση:

$$\begin{aligned} \text{average flux density in core} &= \frac{\Phi_{B/Polis}}{2 \times \text{depth} \times sf} = \frac{2.04 \times 10^{-3}}{2 \times 12.5 \times 70 \times 10^{-6} \times 0.95} \\ &= 1.23Wb/m^2 \quad (4.4.36) \end{aligned}$$

Και το μέσο μήκος της μαγνητικής στον πυρήνα είναι:

$$\frac{\pi(135 + 12.5)}{4} = 115.5mm \quad (4.4.37)$$

Δρομέας:

Επιλέγουμε το μήκος του διάκενου είναι $0.3mm$. Η διάμετρος του δρομέα είναι ίση με:

$$Diameter = D - 2l_g = 90 - (0.3 \times 2) = 89.4mm \quad (4.4.38)$$

Επιλέγουμε τον αριθμό των εσοχών επιλέγεται στα 28 για να ταιριάζει με τον αριθμό των εσοχών στο στάτη που είναι 36. Η επιφάνεια των αγωγών του στάτη είναι ίση με :

$$1280 \times 0.625 = 813mm^2 \quad (4.4.39)$$

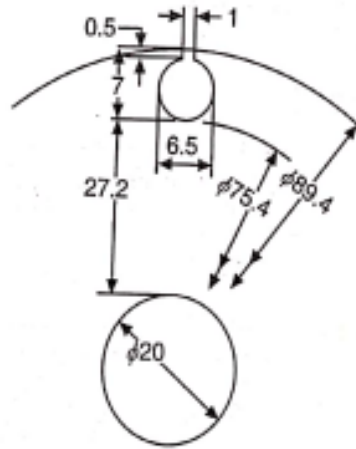
Οι αγωγοί στον δρομέα αποτελούνται από χαλκό και αλουμίνιο. Χρησιμοποιούμε το 80% της υπολογισμένης επιφάνειας με χαλκό και λίγο παραπάνω από το 20% με αλουμίνιο, ώστε η συνολική επιφάνεια να γίνει:

$$A_{stator-cond} = 900mm^2 \quad (4.4.40)$$

Για 28 εσοχές, η επιφάνεια της κάθε εσοχής είναι ίση με:

$$A_{slot} = \frac{900}{28} = 33mm^2 \quad (4.4.41)$$

Το σχεδιάγραμμα με τις διαστάσεις του δρομέα παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 63 Σχεδιασμός Δρομέα

Το ύψος εσοχής του δρομέα (rotor slot pitch) είναι:

$$\frac{89.4 \times \pi}{28} = 10 \text{ mm} \quad (4.4.42)$$

Το ελάχιστο πάχος του δοντιού είναι $10 \text{ mm} - 6.5 \text{ mm}$. Ας επιλέξουμε 4 mm και χρησιμοποιώντας την σχέση (4.4.33) την μέση μαγνητική ροή στο δόντι:

$$\frac{2.04 \times 10^{-3}}{7 \times 4 \times 70 \times 10^{-6} \times 0.95} = 1.1 \text{ Wb/m}^2 \quad (4.4.43)$$

Και από την σχέση (4.4.34) την μέγιστη

$$\frac{\pi \times 1.1}{2} = 1.73 \text{ Wb/m}^3 \quad (4.4.44)$$

Και το μήκος της μαγνητικής διαδρομής είναι 7 mm .

Πυρήνας του δρομέα:

Επιλέγουμε ο άξονας του δρομέα να έχει διάμετρο 20 mm .

$$d_{shaft} = 20 \text{ mm} \quad (4.4.45)$$

Η διάμετρος στο τέλος των εσοχών είναι ίση με

$$d_{bottomslot} = 89.4 \times 2 \times 7 = 75.4 \text{ mm} \quad (4.4.46)$$

Το βάθος του πυρήνα:

$$d_{depth} = \frac{75.4 - 20}{2} = 27.7 \text{ mm} \quad (4.4.47)$$

Και η μέση διάμετρος:

$$d_{mean} = d_{depth} + d_{shaft} = 20 + 27.7 = 47.7mm \quad (4.4.48)$$

Τι μέσο μήκος της μαγνητικής διαδρομής:

$$MP_{average} = \frac{\pi \times d_{mean}}{4} = \frac{\pi \times 47.7}{4} = 37.2mm \quad (4.4.49)$$

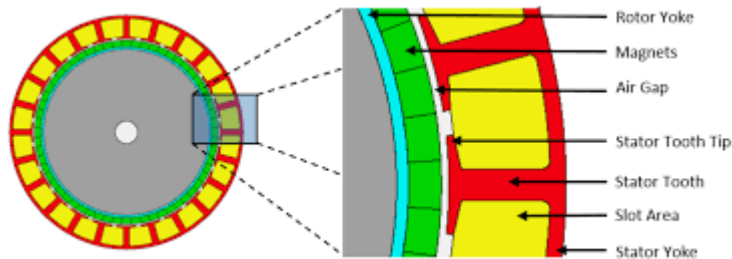
Και η πυκνότητα μαγνητικής ροής στον πυρήνα του δρομέα:

$$B_{cr} = \frac{\Phi_{B/pole}}{2 \times d_{mean} \times L \times sf} = \frac{2.04 \times 10^{-3}}{2 \times 27.7 \times 70 \times 10^{-6} \times 0.95} = 0.55Wb/m^2 \quad (4.4.50)$$

Βάρος του στάτη:

Το βάρος του δοντιού του στάτη υπολογίζεται από την σχέση:

$$\begin{aligned} w_{stator\tooth} &= n_{tooth} \times L_{magn} \times L \times sf \times stator\slotpitch \\ &= 36 \times 0.0225 \times 0.0032 \times 0.070 \times 0.95 \times 7.78 \times 1000 \\ &= 1.344Kg \quad (4.4.51) \end{aligned}$$



Σχήμα 64 Τμήματα του Στάτη

Βάρος του ζυγού του στάτη (stator yoke):

Το βάρος του ζυγού του στάτη δίνεται από την σχέση:

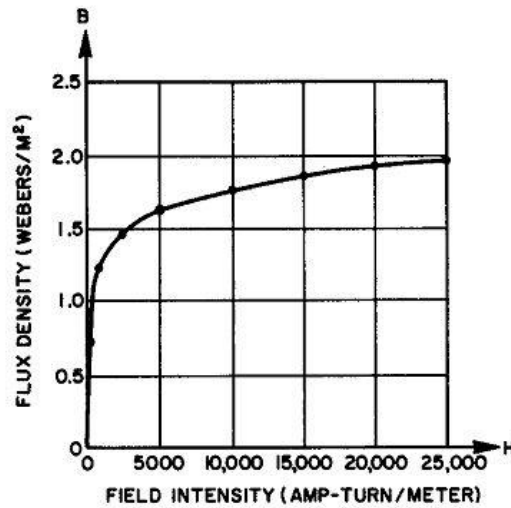
$$w_{yoke} = \frac{\pi}{4} (160^2 - 135^2) \times 70 \times 0.95 \times 7.78 \times 1000 \times 10^{-9} = 3.52Kg \quad (4.4.52)$$

Μαγνητικές ροές και Απώλειες στο στάτη:

Χρησιμοποιώντας την σχέση (4.4.50) για τα δόντια του στάτη

$$B_{st/t} = 1.66Wb/m^2 \quad (4.4.53)$$

Από την καμπύλη μαγνήτισης υπολογίζουμε την ένταση του πεδίου σε μονάδες ampere turns ανά μέτρο.



Σχήμα 65 Μαγνητική ροή συναρτήσει της έντασης μαγνητικού Πεδίου

Για την συγκεκριμένη πυκνότητα μαγνητικής ροής η ένταση του πεδίο είναι:

$$FieldInt_{teeth} = 1600At/m \quad (4.4.54)$$

Για το υλικό του πυρήνα, οι απώλειες είναι 9.2 W/Kg

Άρα οι συνολικές απώλειες στα δόντια είναι

$$loss_{teeth} = 9.2 \times 1.344 = 12.4W \quad (4.4.55)$$

Πυρήνας του στάτη:

Χρησιμοποιώντας την σχέση (4.4.50) για τα δόντια του στάτη

$$B_{st/t} = 1.23Wb/m^2 \quad (4.4.53)$$

Από την καμπύλη μαγνήτισης υπολογίζουμε την ένταση του πεδίου σε μονάδες ampere turns ανά μέτρο.

$$FieldInt_{core} = 210At/m \quad (4.4.54)$$

Θεωρώντας ότι οι απώλειες του πυρήνα είναι 4.4 W/kg και το συνολικό του βάρος είναι 3.52 kg, οι απώλειες πυρήνα είναι

$$loss_{core} = 4.4 \times 3.52 = 15.5W \quad (4.4.55)$$

Άρα οι συνολικές απώλειες σιδήρου είναι

$$ironloss = 12.4 + 15.5 = 27.9W \quad (4.4.56)$$

Επειδή σχεδιάζουμε μονοφασική μηχανή, άρα το πεδίο είναι παλλόμενο, υπάρχουν απώλειες υψηλής συχνότητας. Για να τις συμπεριλάβουμε, χονδρικά υπολογίζουμε ότι λόγω της υψηλής συχνότητας οι συνολικές απώλειες είναι 2.2 φορές μεγαλύτερες από την απώλεια σιδήρου που υπολογίστηκε παραπάνω

$$ironloss_{total} = 27.9 \times 2.2 = 61.4W \quad (4.4.57)$$

Οι απώλειες τριβών και ανιμισμού υπολογίζονται ως 5% - 6% της ισχύς εξόδου

$$frwloss = 0.06 \times 200 = 12W \quad (4.4.58)$$

Δρομέας:

Χρησιμοποιώντας την σχέση (4.4.50) για τα δόντια του δρομέα

$$B_{rot/t} = 1.73Wb/m^2 \quad (4.4.59)$$

Από την καμπύλη μαγνήτισης υπολογίζουμε την ένταση του πεδίου σε μονάδες ampere turns ανά μέτρο.

$$RotorFieldInt_{teeth} = 2400 At/m \quad (4.4.60)$$

Χρησιμοποιώντας τις 2 παραπάνω σχέσεις για τον πυρήνα του δρομέα

$$B_{rot/core} = 0.55 Wb/m^2 \quad (4.4.61)$$

Από την καμπύλη μαγνήτισης υπολογίζουμε την ένταση του πεδίου

$$RotorFieldInt_{core} = 70 At/m \quad (4.4.62)$$

Διάκενο

Χρησιμοποιώντας την σχέση (4.4.50) για το διάκενο

$$\bar{B} = 0.41Wb/m^2 \quad (4.4.63)$$

Από την καμπύλη μαγνήτισης υπολογίζουμε την ένταση του πεδίου σε μονάδες ampere turns ανά μέτρο.

$$FieldInt_{air\ gap} = 80At/m \quad (4.4.64)$$

Στροφές Ampere ανά Πόλο

Χρησιμοποιώντας την εξίσωση (4.4.54) για τα δόντια του στάση μπορούμε να υπολογίσουμε τον συνολικό αριθμό των At , πολλαπλασιάζοντας με το μήκος του που το έχουμε υπολογίσει 22.5 mm

$$AT_{st/tooth} = 1600 \times 0.0225 = 36 \quad (4.4.65)$$

Ομοίως για τον πυρήνα του στάτη, τα δόντια του δρομέα και τον πυρήνα του δρομέα, χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις (4.4.57), (4.4.59), (4.4.62), (4.4.64) και πολλαπλασιάζοντας με τα αντίστοιχα μήκη βρίσκουμε τον αριθμό των στροφών ανά πόλο

$$AT_{st/core} = 210 \times 0.1155 = 24 \text{ At} \quad (4.4.66)$$

$$AT_{rot/teeth} = 2400 \times 0.007 = 17 \text{ At} \quad (4.4.67)$$

$$AT_{rot/core} = 70 \times 0.0372 = 2 \text{ At} \quad (4.4.68)$$

$$AT_{airgap} = 237 \text{ At} \quad (4.4.69)$$

Αθροίζοντας τις 4 παραπάνω εξισώσεις υπολογίζουμε τον συνολικό αριθμό στροφών ανά πόλο

$$AT_{total} = 316 \text{ At} \quad (4.4.70)$$

Έτσι μπορούμε να υπολογίσουμε το μέγιστο ρεύμα μαγνήτισης

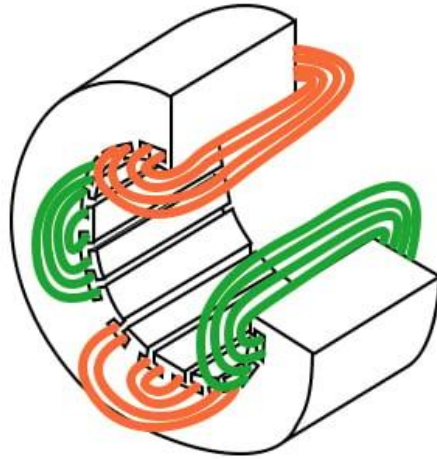
$$I_{magn/max} = \frac{AT_{total}}{n_{turns/pole} \times 0.795} = \frac{316}{160 \times 0.795} = 2.33 \text{ A} \quad (4.4.71)$$

Και την ενεργό τιμή

$$I_{magn/rms} = \frac{I_{magn/max}}{\sqrt{2}} = 1.65 \text{ A} \quad (4.4.72)$$

19) Βασικό Τύλιγμα

Όπως έχει αναφερθεί παραπάνω το βασικό τύλιγμα είναι ομοκεντρικό και κατανομημένο ημιτονικά. Ο αριθμός κατανέμεται με τον παρακάτω τρόπο



Σχήμα 66 Βασικό Τύλιγμα

Όπως έχει υπολογιστεί παραπάνω, ο αριθμός των στροφών ανά φάση είναι 640, ο αριθμός των στροφών ανά πόλο είναι 160 και ο αριθμός των εσοχών είναι 9. Πρώτα πρέπει να υπολογίσουμε το ημίτονο του μισού τυλίγματος

- Τύλιγμα 4 – 6: $\sin\left(\frac{2}{9} \times 90\right) = 0.342$ (4.4.73)
- Τύλιγμα 3 – 7: $\sin\left(\frac{4}{9} \times 90\right) = 0.643$ (4.4.74)
- Τύλιγμα 2 – 8: $\sin\left(\frac{6}{9} \times 90\right) = 0.866$ (4.4.75)
- Τύλιγμα 1 – 9: $\sin\left(\frac{8}{9} \times 90\right) = 0.985$ (4.4.76)

Αθροίζουμε τους παραπάνω αριθμούς $0.342 + 0.643 + 0.866 + 0.985 = 2.836$ και υπολογίζουμε το ποσοστό του τυλίγματος σε κάθε ένα πηνίο που δημιουργείται στις εσοχές

- Τύλιγμα 4 – 6: $\frac{0.342 \times 100}{2.836} = 12.10\%$ (4.4.77)
- Τύλιγμα 3 – 7: $\frac{0.643 \times 100}{2.836} = 22.70\%$ (4.4.78)
- Τύλιγμα 2 – 8: $\frac{0.866 \times 100}{2.836} = 30.60\%$ (4.4.79)
- Τύλιγμα 1 – 9: $\frac{0.985 \times 100}{2.836} = 34.60\%$ (4.4.80)

Για να επαληθεύσουμε ότι τα αποτελέσματα είναι σωστά, θα πρέπει τα παραπάνω ποσοστά να αθροίζονται στο 100%. Πράγμα που ισχύει, $12.1 + 22.7 + 30.6 + 34.6 = 100$

Και πολλαπλασιάζοντας με τον αριθμό των στροφών ανά πόλο υπολογίζουμε τον αριθμό των στροφών που δημιουργείται σε κάθε πηνίο

- Αριθμός στροφών στο πηνίο 4 – 6: $160 \times 0.121 = 20$ (4.4.81)

- Αριθμός στροφών στο πηνίο 3 – 7: $160 \times 0.227 = 36$ (4.4.82)
- Αριθμός στροφών στο πηνίο 2 – 8: $160 \times 0.306 = 49$ (4.4.83)
- Αριθμός στροφών στο πηνίο 1 – 9: $160 \times 0.346 = 55$ (4.4.84)

Για να επαληθεύσουμε ότι τα αποτελέσματα είναι σωστά οι παραπάνω αριθμοί θα πρέπει όταν αθροίζονται να είναι ίσοι με 160. Πράγμα που ισχύει $20 + 36 + 49 + 55 = 160$.

Χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις (4.4.73) έως (4.4.76) και (4.4.81) έως (4.4.84), μπορούμε να υπολογίσουμε την σταθερά ανεμισμού:

$$C_w = \frac{(20 \times 0.342) + (36 \times 0.643) + (49 \times 0.866) + (0.985 \times 55)}{160} = 6.84 + 23.15 + 42.43 + 54.18$$

$$= \frac{126.6}{160} = 0.795 \quad (4.4.85)$$

Αντίσταση του βασικού τυλίγματος:

Για να υπολογιστεί η αντίσταση του βασικού τυλίγματος, θα πρέπει να υπολογίσουμε το μέσο μήκος μισής στροφής σε κάθε πηνίο που δημιουργείται. Αυτό το μήκος υπολογίζεται από την σχέση:

$$meanlength = \frac{O \times slotspanned + L}{totalturns} \times turns \quad (4.4.85)$$

Όπου

$$O = \frac{4.2(D + d_a)}{S} = \frac{4.2(90 + 22.5)}{36} = 13.125 \quad (4.4.86)$$

Χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις (4.4.85) και (4.4.86)

- Τύλιγμα 4 -6 : $(13.125 \times 2 + 70) \times 20 = 1920$ (4.4.87)
- Τύλιγμα 3 -7 : $(13.125 \times 4 + 70) \times 36 = 4428$ (4.4.88)
- Τύλιγμα 2 -8 : $(13.125 \times 6 + 70) \times 49 = 7289$ (4.4.89)
- Τύλιγμα 1 -9 : $(13.125 \times 8 + 70) \times 55 = 9625$ (4.4.90)

Χρησιμοποιώντας τις 4 παραπάνω εξισώσεις, υπολογίζουμε το μέσο μήκος μισής στροφής

$$meanlength = \frac{23262}{160} = 145.38mm \quad (4.4.91)$$

Για αγωγό με αντίσταση

0.0329 Ω/m

Η συνολική αντίσταση του τυλίγματος δίνεται από την εξίσωση:

αντίσταση ανά μέτρο X μέσο μήκος στροφής X συνολικές στροφές

$$r_1 = 0.0329 \times 0.14538 \times 2 \times 160 \times 4 = 6.11 \text{ } \Omega \text{ (4.4.92)}$$

19 έως 24)

Αντίσταση δρομέα:

Το μήκος άξονα του δρομέα είναι 70.7 mm. Ο δρομέας είναι ασύμμετρος, από τα δόντια του που έχουν μήκος 10 mm. Η αντίσταση του άξονα του δρομέα είναι

$$r_{r/bar} = \frac{0.034 \times 0.0707}{33} = 72.8 \times 10^{-6} \Omega \quad (4.4.93)$$

Και η αντίσταση κάθε δακτυλίου

$$r_{r/ring} = \frac{6.034 \times \pi \times 76.9 \times 10^{-3}}{75} \quad (4.4.94)$$

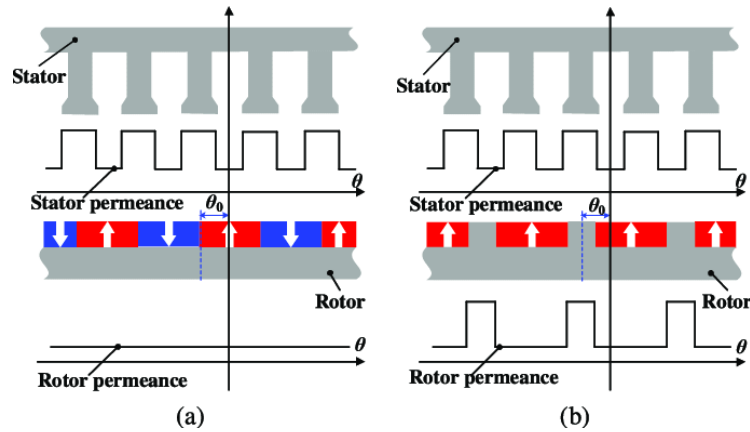
Και η συνολική αντίσταση του δρομέα ανοιγμένη στον στάση είναι ίσης με

$$r_2' = 8.06 \text{ } \Omega \text{ (4.4.95)}$$

Αντιδράσεις:

Μαγνητική Διαπερατότητα εσοχής στάτη και δρομέα:

Σε μια μονοφασική επαγωγική μηχανή η διαπερατότητα της εσοχής του στάτη ή του δρομέα είναι ένα μέτρο που δείχνει το πόσο μαγνητική ροή περνάει μέσα από τις εσοχές του στάτη. Είναι μια σημαντική παράμετρος που επηρεάζει την απόδοση της μηχανής. Η διαπερατότητα της εσοχής εξαρτάται από την γεωμετρία της εσοχής όπως το βάθος, το πλάτος και η γωνία ανοίγματος. Μια υψηλότερη γωνία ανοίγματος αυξάνει την περμεαντική αγωγιμότητα των υποδοχών του στάτη, ενώ μια χαμηλότερη γωνία μειώνει αυτήν την αγωγιμότητα. Η αγωγιμότητα επίσης εξαρτάται από τη διάταξη των επιστρωμάτων του αγωγού, τον αριθμό των στροφών και το ρεύμα που ρέει μέσα από τις αγωγούς του στάτη.



Σχήμα 67 Εγκοπές Στάτη και Δρομέα

Για τον στάτη είναι ίση με

$$\lambda_{s1} = 1.78 \quad (4.4.96)$$

Και για τον δρομέα

$$\lambda_{s2} = 1.16 \quad (4.4.97)$$

Η αντίδραση του στάτη ορίζεται ως

$$\begin{aligned} X_{s1} &= 15.8 \times 10^{-6} \times f \times (ck_w) \times \frac{L}{S_1} \text{ times } \lambda_{s1} \times c_x \\ &= 15.8 \times 10^{-6} \times 50 \times 4 \times (640)^2 \times (0.795)^2 \times \frac{0.070}{36} \times 1.78 = 1.59 \times 1.78 \\ &= 1.84 \Omega \quad (4.4.98) \end{aligned}$$

Και η αντίδραση του δρομέα:

$$X_{s2} = 1.59 \times 1.16 = 1.18 \Omega \quad (4.4.99)$$

Και στην συνέχεια την υπολογίζουμε ανοιγμένη στον στάτη:

$$X'_{s2} = X_{s2} \left(\frac{S_1}{S_2} \right) = 1.18 \times \frac{36}{28} = 2.36 \Omega \quad (4.4.100)$$

Η συνολική αντίδραση είναι ίση με

$$X_s = 2.8 + 2.36 = 5.16 \Omega \quad (4.4.101)$$

Αντίδραση Διαρροής Προεξοχής (Overhang leakage Reactance):

Η αντίδραση διαρροής προεξοχής αναφέρεται στην επαγωγή στις άκρες του στάτη ή του δρομέα και εκτείνεται έξω από τον πυρήνα. Αυτά τα τελικά σημεία ονομάζονται «προεξοχές», και δημιουργούν μια διαρροή ροής με αποτέλεσμα να επηρεάζεται η απόδοση της μηχανής. Η αντίδραση διαρροής προεξοχής επηρεάζεται από την γεωμετρία της προεξοχής. Μεγάλο μήκος προεξοχής ή μικρή επιφάνεια διατομής ή μεγάλη μαγνητική διαπερατότητα του υλικού δημιουργούν και μεγαλύτερες απώλειες αυτού του είδους.

$$X_0 = 3.88 \times 10^{-6} \times 50 \times 4 \times (1.59) \times 2 \times D_s \times \frac{ACT}{S_1 \times p} \quad (4.4.102)$$

Όπου:

$$D_s = 90 + 22.5 = 112.5 \text{ mm} \quad (4.4.103)$$

Όπου D_s η διάμετρος του στάτη

Και

$$ACT = \text{average coil throw} = \frac{20 \times 2 + 36 \times 4 + 49 \times 6 + 55 \times 8}{160} = 5.73 \quad (4.4.104)$$

Αντικαθιστώντας τις εξισώσεις (4.4.103) και (4.4.103) στην (4.4.102) υπολογίζουμε την αντίδραση διαρροής προεξοχής:

$$X_0 = 3.88 \times 10^{-6} \times 50 \times 4 \times 1.59 \times 2 \times 0.1125 \times \frac{5.73}{36 \times 4} = 11 \Omega \quad (4.4.105)$$

Αντίδραση Διαρροής Ζιγκ-Ζαγκ (Zigzag Leakage Reactance):

Η αντίδραση διαρροής ζιγκ-ζαγκ, αναφέρεται στο επαγωγή που δημιουργείται από την μαγνητική ροή του διαφεύγει από το βηματικό μέρος του τυλίγματος του στάτη ή του δρομέα. Το βηματικό (ή αλλιώς ζιγκ - ζαγκ) του τυλίγματος δημιουργείται από μικρότερα τμήματα τυλίγματος που είναι συνδεδεμένα σε σειρά, σχηματίζοντας ένα βηματικό μοτίβο. Αυτό το μοτίβο δημιουργείται για να μειώσει τις απώλειες διαρροής, παρόλα αυτά υπάρχει ακόμη απώλειες λόγω της μη ομοιόμορφης κατανομής του μαγνητικού πεδίου.

$$X_z = 2.63 \times 10^{-6} \times 50 \times (1.59) \times 2 \times 0.070 \times \frac{K_z}{36 \times 0.3} \quad (4.4.106)$$

Όπου

$$K_z = \frac{(t_{10} - t_{20})^2}{4(\tau_{s1} - \tau_{s2})} \quad (4.4.107)$$

Και

$$t_{10} = 7.85 - 3.2 = 5.65 \text{ mm} \quad (4.4.108)$$

$$t_{20} = 10 - 1 = 9 \text{ mm} \quad (4.4.109)$$

$$\tau_{s1} = 7.85 \text{ mm} \quad (4.4.110)$$

$$\tau_{s2} = 10 \text{ mm} \quad (4.4.111)$$

Αντικαθιστούμε τις (4.4.108) έως (4.4.111) στην (4.4.107) και το αποτέλεσμα στην (4.4.106)

$$X_z = 8.24 \Omega \quad (4.4.112)$$

Ασύμμετρη Αντίδραση (Skew Reactance)

Σε μια μονοφασική επαγωγική μηχανή, το τύλιγμα του στάτη παράγει μαγνητικό πεδίο που αντιδράσει με τον δρομέα, επάγοντας τάση και ρεύμα. Καθώς ο δρομέας περιστρέφεται «αισθάνεται» εναλλασσόμενο μαγνητικό πεδίο με αποτέλεσμα το ρεύμα στον δρομέα να έχει μια διαφορά φάσης (καθυστερήση) σε σχέση με την τάση. Αυτή η διαφορά φάσης μπορεί να αναπαρασταθεί ισοδύναμα με μια αντίδραση στο κύκλωμα του δρομέα. Η ασύμμετρη αντίδραση προέρχεται από την λοξή γεωμετρία του δρομέα. Αυτή η λοξότητα δημιουργεί ένα ασύμμετρο μαγνητικό πεδίο που και αυτό δημιουργεί επιπλέον επαγωγή στο κύκλωμα του δρομέα. Η λοξή αντίδραση συνήθως υπολογίζεται χρησιμοποιώντας ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων (finite element analysis – FEA) ή πειραματικά. Για τον σχεδιασμό της συγκεκριμένης μηχανής την θεωρούμε ίση με

$$X_{skew} = 1.35 \Omega \quad (4.4.113)$$

Προσθέτοντας τις εξισώσεις (4.4.104), (4.4.108), (4.4.113) και (4.4.101) υπολογίζουμε την συνολική αντίδραση διαρροής:

$$X_{leakage} = x_1 = 5.16 + 11 + 8.24 + 1.35 = 25.75 \Omega \quad (4.4.114)$$

Συνοψίζοντας η αντίσταση το δρομέα είναι:

$$\boxed{r_1 = 6.11 \Omega} \quad (4.4.115)$$

Η αντίσταση του στάτη ανοιγμένη στον δρομέα είναι:

$$\boxed{r_2 = 8.06 \Omega} \quad (4.4.116)$$

Και η αντίδραση διαρροής είναι

$$\boxed{x_1 = 25.75 \Omega} \quad (4.4.117)$$

4.5 Διορθώσεις τιμών και υπολογισμός σταθερών για λειτουργία σε πλήρες φορτίο

Για λειτουργία σε πλήρες φορτίο, υπάρχει μια πτώση τάσης

$$drop = I(r_1 \cos \phi + x_1 \sin \phi) = 2.43(6.11 \times 0.65 + 25.75 \times 0.76) = 57.20 \quad (4.5.1)$$

Άρα η νέα ονομαστική τάση πρέπει να διορθωθεί, με αποτέλεσμα να αλλάξουν και σχεδόν όλες οι παράμετροι του προβλήματος

$$E' = V - drop = 230 - 57.20 = 172.80V \quad (4.5.2)$$

$$X_0' = \frac{2E'}{I_m} - X_0 = \frac{2 \times 172.8}{1.65} - 25.75 = 183.70 \Omega \quad (4.5.3)$$

$$K_r' = \frac{X_0' - x_1}{X_0} = \frac{183.70 - 25.75}{183.70} = 0.86 \quad (4.5.4)$$

$$K_p = \sqrt{K_r'} = \sqrt{0.86} = 0.927 \quad (4.5.6)$$

$$x_1 = \frac{25.75}{1 + K_p} = \frac{25.75}{1.927} = 12.36 \quad (4.5.7)$$

$$M_1 = 0.5 \times K_r' \times r_2' = 0.5 \times 0.86 \times 8.06 = 3.46 \quad (4.5.8)$$

$$M_2 = \frac{r_2'}{X_0'} = \frac{8.06}{183.7} = 0.044 \quad (4.5.9)$$

$$M_3 = 0.5 \times K_p \times X_0' = 0.5 \times 0.927 \times 183.7 = 85.14 \quad (4.5.10)$$

$$M_4 = 0.5 K_p x_1 = 0.5 \times 0.927 \times 12.36 = 6.19 \quad (4.5.11)$$

4.6 Υπολογισμοί απόδοσης

Για τον υπολογισμό της απόδοσης παρακάτω χρησιμοποιείται η τεχνική C.G. Veinott

- Ολίσθηση $s = 0.04$ (4.6.1)
- $2 - s = 1.96$ (4.6.2)
- $\frac{M_1}{s} = \frac{3.46}{0.04} = 86.5$ (4.6.3)
- $M_1/2 - s = 1.76$ (4.6.4)
- $(M_2/s)^2 = 1.21$ (4.6.5)
- $(M_2/2 - s)^2 = 0.005$ (4.6.6)
- $(M_2/s)^2 + 1 = 2.21$ (4.6.7)

- $(M_2/2 - s)^2 + 1 = 1.0005$ (4.6.8)
- $R_f = \frac{\frac{M_1}{s}}{(M_2/s)^2 + 1} = 39.14$ (4.6.9)
- $R_b = \frac{M_1/2-s}{(M_2/2-s)^2 + 1}$ (4.6.10)
- $r_1 = 6.11$ (4.6.11)
- $R = R_f + R_b + r_1 = 39.14 + 1.76 + 6.11$ (4.6.12)
- $M_3 \times (M_2/s)^2 = 103$ (4.6.13)
- $M_3 \times (M_2/2 - s)^2 = 0.0426$ (4.6.14)
- $M_4 = 6.19$ (4.6.15)
- $M_3 \times (M_2/s)^2 + M_4 = 109.19$ (4.6.16)
- $M_3 \times (M_2/2 - s)^2 + M_4 = 6.23$ (4.6.17)
- $X_f = \frac{M_3 \times (M_2/s)^2 + M_4}{M_3 \times (M_2/2 - s)^2 + M_4} = 49.41$ (4.6.18)
- $X_b = \frac{M_3 \times (M_2/2 - s)^2 + M_4}{(M_2/2 - s)^2 + 1} = 6.227$ (4.6.19)
- $x_1 = 13.36$ (4.6.20)
- $X = X_f + x_b + x_1 = 49.41 + 6.23 + 13.36 = 69$ (4.6.21)
- $Z = \sqrt{(47^2 + 69^2)} = 83.49$ (4.6.22)
- $I = \frac{230}{83.49} = 2.75$ (4.6.23)
- $I_{corrected} = 23 + \frac{27.9}{230} \times \frac{47}{83.49}$ (4.6.24)
- $R_f - R_b = 39.14 - 1.758 = 37.382$ (4.6.25)
- $Pri-loss = (24)^2 \times r_1 = 2.818^2 \times 6.11 = 48.5$ (4.6.26)
- $Sec - loss(f) = (23)^2 \times s \times R_f = 2.75^2 \times 0.04 \times 39.14 = 11.8$ (4.6.27)
- $Sec - loss(\beta) = (23)^2 \times (2 - s) \times R_\beta = 2.75^2 \times 1.96 \times 1.76 = 11.8$ (4.6.28)
- $FE - loss = 27.9$ (4.6.29)
- $I^2 \times (R_f - R_b) \times (1 - s) = 271$ (4.6.30)
- $Input = \sum (4.6.27) \epsilon\omega\zeta$ (4.4.30) = 385.2 (4.6.31)
- $FE + F_r = 33.5 + 12 = 45.5$ (4.6.32)
- $output = I^2 \times (R_f - R_b) \times (1 - s) \times (FE + F_r) = 225.5$ (4.6.33)
- $rpm = 1500(1-s) = 1440$ (4.6.34)
- $\tau = output / (1 - s) = 235$ (4.6.35)
- $efficiency = \frac{output}{Input} = 58.4\%$ (4.6.36)
- $Power - Factor = \frac{Input}{V} \times I_{corrected} = 59.4$ (4.6.37)
- $Apparent\ efficiency = efficiency \times Power - Factor = 34.7\%$ (4.6.38)
- $Percentage\ of\ full\ load = \frac{225.5}{200} = 1.1275$ (4.6.39)

4.7 Σχεδιασμός Βοηθητικού Τυλίγματος

Επιλέγουμε τον λόγο βοηθητικού τυλίγματος / Βασικού Τυλίγματος

$$K = 1.3 \quad (4.7.1)$$

Και η σταθερά τυλίγματος

$$C_{wa} = 0.85 \quad (4.7.2)$$

$$N_a = \frac{KN_m C_{wm}}{C_{wa}} = \frac{1.3 \times 1280 \times 0.795}{0.85} = 1536 \quad (4.7.3)$$

Κάνουμε τους αντίστοιχους υπολογισμούς για τις στροφές του τυλίγματος:

Ο αριθμός των στροφών ανά πόλο, είναι

$$n_{turns} = \frac{1536}{2 \times 4} = 192 \quad (4.7.2)$$

- Για το τύλιγμα 2-8: $\sin\left(\frac{3}{9} \times 90\right) = 0.500 \quad (4.7.3)$
- Για το τύλιγμα 3-7: $\sin\left(\frac{5}{9} \times 90\right) = 0.766 \quad (4.7.4)$
- Για το τύλιγμα 4-6: $\sin\left(\frac{7}{9} \times 90\right) = 0.94 \quad (4.7.5)$
- Για το τύλιγμα 5-5: $\sin\left(\frac{9}{9} \times 90\right) = 1.00 \quad (4.7.6)$

Αθροίζουμε τις παραπάνω τιμές για να υπολογίσουμε το ποσοστό που κατανέμεται σε κάθε τύλιγμα:

- Για το τύλιγμα 2-8: $\sin\left(\frac{0.5}{3.206}\right) = 0.156 \quad (4.7.7)$
- Για το τύλιγμα 3-7: $\sin\left(\frac{0.766}{3.206}\right) = 0.239 \quad (4.7.8)$
- Για το τύλιγμα 4-6: $\sin\left(\frac{0.94}{3.206}\right) = 0.293 \quad (4.7.9)$
- Για το τύλιγμα 5-5: $\sin\left(\frac{1}{3.206}\right) = 0.312 \quad (4.7.10)$

Και τον αριθμό των στροφών:

- Για το τύλιγμα 2-8: $0.156 \times 192 = 30 \quad (4.7.11)$
- Για το τύλιγμα 3-7: $0.239 \times 192 = 46 \quad (4.7.12)$
- Για το τύλιγμα 4-6: $0.293 \times 192 = 56 \quad (4.7.13)$
- Για το τύλιγμα 5-5: $0.312 \times 192 = 60 \quad (4.7.14)$

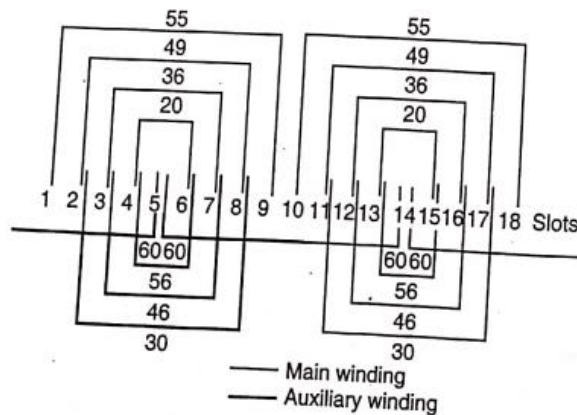
Και για επαλήθευση αθροίζουμε την παραπάνω: $30 + 46 + 56 + 60 = 192$.

Και για επαλήθευση την σταθερά ανεμισμου

$$(0.5 \times 30) + (0.766 \times 46) + (0.94 \times 56) + (1 \times 60) = 162.88 \quad (4.7.15)$$

$$C_{ws} = \frac{162.88}{192} = 0.85 \quad (4.7.16)$$

$$K = \frac{192 \times 2 \times 4 \times 0.85}{160 \times 2 \times 4 \times 0.795} \quad (4.7.17)$$



Σχήμα 68 Βασικό και Βοηθητικό Τύλιγμα

Και στην συνέχεια υπολογίζουμε το μέσο μήκος

- Για το τύλιγμα 2 -8' $(13.125 \times 3 + 70) \times 30 = 3281 \quad (4.7.18)$
- Για το τύλιγμα 3 -7' $(13.125 \times 5 + 70) \times 46 = 6238 \quad (4.7.19)$
- Για το τύλιγμα 4 -6 ' $(13.125 \times 7 + 70) \times 56 = 9065 \quad (4.7.20)$
- Για το τύλιγμα 5 -5' $(13.125 \times 9 + 70) \times 60 = 11287 \quad (4.7.21)$

Αθροίζοντας τις 4 παραπάνω σχέσεις και διαιρώντας με 192 βρίσκουμε το μέσο μήκος

$$\frac{29871}{192} = 155.5 \text{ mm} \quad (4.7.22)$$

Το μέγεθος του αγωγού στο βοηθητικό τύλιγμα είναι 4 με 5 φορές μικρότερο από το βασικό τύλιγμα. Για αυτή την εφαρμογή μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε εμαγιέ χαλκό, με διάμετρο 0.710 mm. Η επιφάνεια του αγωγού είναι:

$$A = \frac{\pi \times 0.71^2}{2^2} = 0.396 \text{ mm}^2 \quad (4.7.22)$$

Ο εμαγιέ χαλκός έχει αντίσταση 0.04255Ω ανά μέτρο στους 20°C και $1.215 \times 0.04355 \Omega$ στους 75°C

στον 75°C . Ο αγωγός μαζί με το κάλυμμα του έχει συνολική διάμετρο 0.79 mm. Άρα η συνολική του επιφάνεια είναι

$$A_{total} = \frac{\pi \times 0.79^2}{4} = 0.49mm^2 \quad (4.7.23)$$

Τέλος ελέγχουμε αν οι αγωγοί μπορούν να χωρέσουν

Ο μεγαλύτερος αριθμός σε εσοχή είναι $60+60=120$, άρα η μέγιστη επιφάνεια είναι

$$A_{max} = 120 \times 0.49 = 60mm^2 \quad (4.7.24)$$

Άρα οι διαστάσεις που υπολογίστηκαν είναι κατάλληλες.

75°C

Υπολογίζουμε την ολική αντίσταση του τυλίγματος στους

$$r_{total} = 1.1 \times r_2' = 1.1 \times 8.06 = 8.87\Omega \quad (4.7.25)$$

Η συνολική αντίσταση του βασικού τυλίγματος είναι:

$$R_m = 6.11 + 8.87 = 15\Omega \quad (4.7.26)$$

Η αντίσταση του δρομέα ανοιγμένη στο τύλιγμα είναι

$$r_{ra} = (1.3)^2 \times 8.87 = 15\Omega \quad (4.7.27)$$

Η συνολική αντίδραση διαρροής ανοιγμένη στο βοηθητικό τύλιγμα είναι:

$$X_{la} = (1.3)^2 \times X_{lm} = (1.3)^2 \times 25.75 = 43.5\Omega \quad (4.7.28)$$

Και η συνολική εμπέδιση του βασικού τυλίγματος

$$Z_m = \sqrt{X_{lm}^2 + R_m^2} = \sqrt{25.75^2 + 15^2} = 29.8\Omega \quad (4.7.29)$$

Άρα το ρεύμα εκκίνησης είναι:

$$I_{start} = \frac{230}{29.8} \quad (4.7.30)$$

Για να αποδίδει μέγιστη ροπή ο πυκνωτής εκκίνησης θα πρέπει να έχει αντίδραση

$$X_c = X_{la} + \frac{R_a}{R_m}(Z_m - X_{lm}) = 43.5 + \frac{27.65}{15}(29.8 - 25.75) = 50.95\Omega \quad (4.7.31)$$

Άρα η χωρητικότητα του είναι

$$C = \frac{10^6}{2\pi \times 50 \times 50.95} = 62.5\mu F \quad (4.6.32)$$

Και αφού ο πυκνωτής μπαίνει σε σειρά. Η συνολική εμπέδηση του βοηθητικού τυλίγματος είναι

$$Z_{ac} = \sqrt{(R_a + (X_l - X_c))} = \sqrt{27.65^2 + (43.5 - 50.95)^2} = 28.6\Omega \quad (4.7.33)$$

Και το ρεύμα στο βοηθητικό τύλιγμα είναι

$$I_{ac/start} = \frac{8.04}{0.396} = 20.3 A/mm^2 \quad (4.7.34)$$

Αυτό το ρεύμα θα υπάρχει κατά την εκκίνηση και μέχρι το 75% της σύγχρονης ταχύτητας, όπου θα διακοπεί από τον φυγοκεντρικό διακόπτη.

Το ρεύμα έναρξης όταν και τα 2 τυλίγματα είναι παράλληλα υπολογίζεται ως

$$I_{sm} = 7.7 \left(\frac{15}{29.8} - j \frac{25.75}{29.8} \right) = 3.86 - j6.68 \quad (4.7.35)$$

$$I_{sa} = 8.04 \left(\frac{27.65}{28.6} - j \frac{7.45}{28.6} \right) = 7.77 + j2.09 \quad (4.7.36)$$

$$I_{sc} = I_{sm} + I_{sa} = 11.62 + j4.56 \quad (4.7.37)$$

Και το μέτρο του

$$I_{sc} = \sqrt{11.62^2 + 4.56^2} = 12.48 \quad (4.7.38)$$

Τέλος η ροπή εκκίνησης υπολογίζεται από την σχέση

$$\tau_{start} = \frac{25pV^2KR_{rm}}{f} \frac{R_a X_{1m} - R_m (X_{1a} - X_c)}{(R_m^2 + X_{1m}^2)(R_a^2 + (X_{1a} - X_c)^2)} \times K_r = 864 \text{ Nm} \quad (4.7.39)$$

Και η ροπή σε πλήρες φορτίο είναι

$$\tau_{fullload} = \frac{P_{out}}{1-s} = \frac{200}{1-0.04} = 208 \text{ synchronous Watt} \quad (4.7.40)$$

$$\tau_{start}/\tau_{fullload} = 4.15 \text{ Nm} \quad (4.7.41)$$

Βιβλιογραφία

- [1] Serway, Raymond A., and John W. Jewett. *Physics for scientists and engineers*. Cengage learning, 2018.
- [2] Griffiths, David J. "Introduction to electrodynamics." (2005): 574-574.
- [3] J Chapman, Stephen. *Electric machinery fundamentals*. McGraw-Hill, 2004.
- [4] Andreescu, Titu, and Dorin Andrica, eds. *Complex Numbers from A to... Z*. Boston, MA: Birkhäuser Boston, 2006.
- [5] Erickson, Robert W., and Dragan Maksimovic. *Fundamentals of power electronics*. Springer Science & Business Media, 2007.
- [6] Hubert, Charles I. *Electric machines*. Prentice Hall, 1990.
- [7] Fitzgerald, Arthur Eugene, et al. *Electric machinery*. Vol. 5. New York: McGRAW-hill, 2003.
- [8] Yamamura, Sakae. "Theory of linear induction motors." *New York* (1979).
- [9] Trzynadlowski, Andrzej M. *Control of induction motors*. Elsevier, 2000.
- [10] National Electrical Manufacturers Association. *A Chronological History of Electrical Development from 600 BC...* National Electrical Manufacturers Association, 1946.
- [11] Bocker, Joachim, and Shashidhar Mathapati. "State of the art of induction motor control." *2007 IEEE International Electric Machines & Drives Conference*. Vol. 2. IEEE, 2007.
- [12] Zangwill, Andrew. *Modern electrodynamics*. Cambridge University Press, 2013.
- [13] Upadhyay, K. G. *Design of electrical machines*. New Age International, 2011.
- [14] Dauphinee, T. M., and H. Preston-Thomas. "A copper resistance temperature scale." *Review of scientific instruments* 25.9 (1954): 884-886.
- [15] Veinott, Cyril George. *Theory and design of small induction motors: an introduction to the engineering principles and characteristics, theory, design, and performance calculations of split-phase, capacitor, and polyphase induction motors in the fractional-horsepower and small integral-horsepower ranges*. McGraw-Hill, 1959.
- [16] Toliyat, Hamid A., and Gerald B. Kliman, eds. *Handbook of electric motors*. Vol. 120. CRC press, 2018.
- [17] Vickers, Herbert. *The Induction Motor: The Theory, Design, and Application of Alternating-current Machines Including Fractional HP Motors*. Pitman, 1953.
- [18] Bhattacharya, Bimal K. *Electric Machines: Analysis and Design Applying MATLAB*. Boca Raton, FL: CRC Press, 2018.
- [19] Boldea, Ion, and Syed A. Nasar. *Electric Machine Dynamics*. Boca Raton, FL: CRC Press, 2018.

[20] Bose, Bimal K. Modern Power Electronics and AC Drives. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 2001.

[21] Fitzgerald, A. E., Charles Kingsley, and Jr. Stephen D. Umans. Electric Machinery. 6th ed. New York: McGraw Hill, 2003.

[22] Krishnan, Ramu. Electric Motor Drives: Modeling, Analysis, and Control. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 2001.

[23] Lipo, Thomas A. Introduction to AC Machine Design. Madison, WI: Wisconsin Power Electronics Research Center, 2012.

[24] Miller, James L. Single-Phase Motors and Controls. New York: McGraw Hill, 2001.

[25] Sathyan, A., and S. Sivanagaraju. Electrical Machine Design. New Delhi: Pearson India Education Services Pvt. Ltd., 2014.

