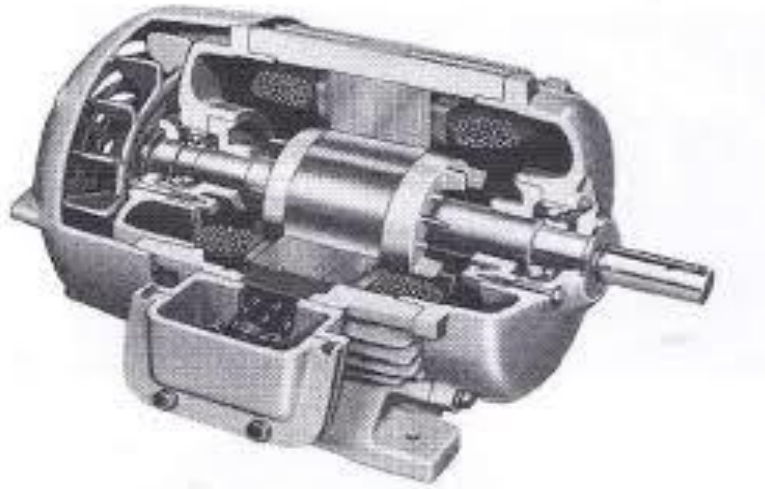




ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ & ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Διπλωματική Εργασία

**ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΡΙΦΑΣΙΚΟΥ ΚΙΝΗΤΗΡΑ ΕΠΑΓΩΓΗΣ ΥΠΟ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΑΣΥΜΜΕΤΡΗΣ
ΤΑΣΗΣ ΤΡΟΦΟΔΟΣΙΑΣ**



Φοιτητής : ΠΑΠΑΝΙΚΟΛΑΟΥ ΓΕΩΡΓΙΟΣ

ΑΜ: 45720

Επιβλέπων μέλος ΔΕΠ

Συγγερίδου Ολυμπιάδα

Λέκτορας

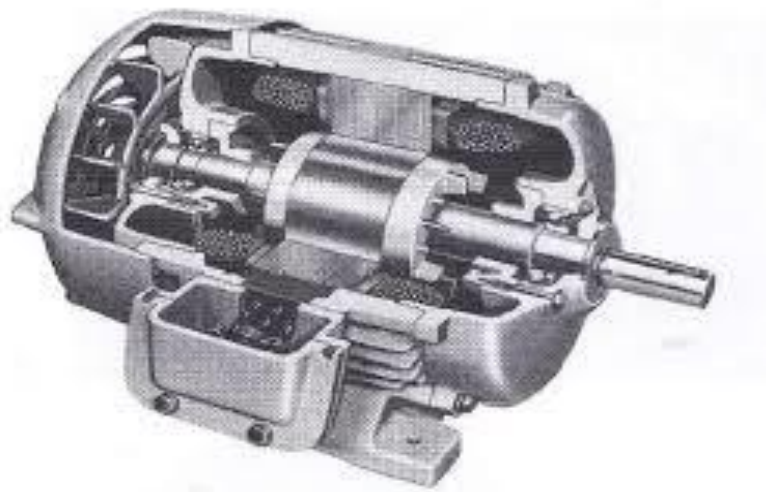
ΑΘΗΝΑ-ΑΙΓΑΛΕΩ, ΜΑΡΤΙΟΣ 2024



**UNIVERSITY OF WEST ATTICA
FACULTY OF ENGINEERING
DEPARTMENT OF ELECTRICAL & ELECTRONICS
ENGINEERING**

Diploma Thesis

THREE-PHASE INDUCTION MOTOR BEHAVIOUR UNDER UNBALANCED VOLTAGE SUPPLY



Student: PAPANIKOLAOU GEORGIOS

Registration Number: 45720

Supervisor

Syggeridou Olympiada

Lecturer

ATHENS-EGALEO, MARCH 2024

Η Διπλωματική Εργασία έγινε αποδεκτή και βαθμολογήθηκε από την εξής τριμελή επιτροπή:

ΣΥΓΓΕΡΙΔΟΥ ΟΛΥΜΠΙΑΔΑ ΛΕΚΤΟΡΑΣ	ΚΑΡΑΪΣΑΣ ΠΕΤΡΟΣ ΑΝΑΠΛΗΡΩΤΗΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ	ΚΑΛΚΑΝΗΣ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ ΕΠΙΚΟΥΡΟΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ

Copyright © Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ – ΓΕΩΡΓΙΟΣ ΠΑΠΑΝΙΚΟΛΑΟΥ, ΜΑΡΤΙΟΣ, 2024

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

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα του και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις θέσεις του επιβλέποντος, της επιτροπής εξέτασης ή τις επίσημες θέσεις του Τμήματος και του Ιδρύματος.

ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ο κάτωθι υπογεγραμμένος ΠΑΠΑΝΙΚΟΛΑΟΥ ΓΕΩΡΓΙΟΣ του ΣΠΥΡΙΔΩΝΑ, με αριθμό μητρώου 45720 φοιτητής του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής της Σχολής ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ του Τμήματος ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ,

δηλώνω υπεύθυνα ότι:

«Είμαι συγγραφέας αυτής της διπλωματικής εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, οι όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε ακριβώς είτε παραφρασμένες, αναφέρονται στο σύνολό τους, με πλήρη αναφορά στους συγγραφείς, τον εκδοτικό οίκο ή το περιοδικό, συμπεριλαμβανομένων και των πηγών που ενδεχομένως χρησιμοποιήθηκαν από το διαδίκτυο. Επίσης, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία έχει συγγραφεί από μένα αποκλειστικά και αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο δικής μου, όσο και του Ιδρύματος.

Παράβαση της ανωτέρω ακαδημαϊκής μου ευθύνης αποτελεί ουσιώδη λόγο για την ανάκληση του διπλώματός μου.

Επιθυμώ την απαγόρευση πρόσβασης στο πλήρες κείμενο της εργασίας μου μέχρι και έπειτα από αίτησή μου στη Βιβλιοθήκη και έγκριση του επιβλέποντος/ουσας καθηγητή/ήτριας.»

Ο Δηλών

Παπανικολάου Γεώργιος



(Υπογραφή φοιτητή)

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους τους ανθρώπους που συνέβαλλαν με τη βοήθεια τους για την διεκπεραίωση των υποχρεώσεων μου απέναντι στη σχολή μου και κατόρθωσα να τη βγάλω εις πέρας αποκτώντας το πτυχίο για να είμαι έτοιμος να βγω στην αγορά εργασίας. Οι κύριοι παράγοντες που με βοήθησαν είναι η οικογένεια μου που με στήριξαν και με την υπομονή τους με βοήθησαν δίνοντας μου δύναμη να ανταπεξέλθω στο δύσκολο και επίπονο δρόμο των σπουδών.

Στο μερίδιο της επιτυχίας έχουν οι καθηγητές που με την αλόγιστη τους υπομονή τους μας μετέφεραν τις πολύτιμες γνώσεις σε όλους τους φοιτητές παίρνοντας τα απαραίτητα και βασικά εφόδια γνώσεων όπου θα προχωρήσουμε χτίζοντας πάνω σε αυτά τις δεξιότητες μας.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω την κα. Ολυμπιάδα Συγγερίδου, Λέκτορα ΠΑΔΑ, για τις πολύτιμες συμβουλές και την επιστημονική καθοδήγηση που υπέδειξε στην εκπόνηση της διπλωματικής μου εργασίας.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η διπλωματική εργασία πραγματεύεται την ανάλυση της λειτουργίας του τριφασικού κινητήρα επαγωγής. Αρχικά, έγινε μια σύντομη ανασκόπηση στην ιστορία των ηλεκτρικών μηχανών. Δεύτερον, αναλύθηκαν η κατασκευή του τριφασικού κινητήρα επαγωγής, ο προσδιορισμός του ισοδύναμου κυκλώματος και οι τρόποι εκκίνησής του. Τρίτον, εξετάσθηκε η λειτουργία του κινητήρα επαγωγής υπό της ασύμμετρης τάσης τροφοδοσίας, περίπτωση εσφαλμένης λειτουργίας. Επίσης, πραγματοποιήθηκε το πειραματικό μέρος: δοκιμή ανοιχτού κυκλώματος ή κενού φορτίου και ακινητοποιημένου δρομέα για την περίπτωση κανονικής λειτουργίας και υπολογίστηκαν οι παράμετροι του ισοδύναμου κυκλώματος, καθώς και σχεδιάστηκε η καμπύλη ροπής-στροφών. Στη συνέχεια, αναπτύχθηκε η προσομοίωση του πειραματικού μέρους και η προσομοίωση της εσφαλμένης λειτουργίας του κινητήρα επαγωγής (ασύμμετρη τάση τροφοδοσίας), οι οποίες πραγματοποιήθηκαν σε περιβάλλον Matlab/Simulink. Τέλος, παρουσιάστηκαν τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων σε σύγκριση με τις περιπτώσεις της κανονικής και εσφαλμένης λειτουργίας του κινητήρα, καθώς και τα συμπεράσματα.

Λέξεις – κλειδιά

Ασύγχρονος κινητήρας, δοκιμή ανοιχτού κυκλώματος, δοκιμή ακινητοποιημένου δρομέα, χαρακτηριστική καμπύλη κινητήρα, ασύμμετρη τάση τροφοδοσίας, προσομοίωση κινητήρα

ABSTRACT

The thesis deals with the analysis of the operation of the three-phase induction motor. First, a brief review of the history of electric motors was made. Secondly, the construction of the three-phase induction motor, the determination of the equivalent circuit, and its starting modes were analyzed. Thirdly, the operation of the induction motor under the voltage unbalance supply, case of failure operation was examined. Also, the experimental part was carried out: open circuit (no load test) and blocked rotor test for the normal operation case, and the parameters of the equivalent circuit were calculated and the torque-speed curve was drawn. Then, the simulation of the experimental part and the simulation of the failure operation of the induction motor (voltage unbalance supply) were developed and carried out in a Matlab/Simulink environment. Finally, the results of the simulations were presented in comparison with the cases of normal and failed operations, as well as the conclusions.

Keywords

Induction motor, open circuit (no load test), blocked rotor test, motor characteristic curve, voltage unbalance supply, motor simulation

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	6
ABSTRACT	7
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1ο: ΤΡΙΦΑΣΙΚΟΣ ΑΣΥΓΧΡΟΝΟΣ ΚΙΝΗΤΗΡΑΣ	
1.1 Εισαγωγή	12
1.2 Ιστορική Αναδρομή	12
1.3 Κατασκευή Τριφασικών Κινητήρων Επαγωγής	13
1.4 Αρχή Λειτουργίας	17
1.4.1 Δημιουργία Στρεφόμενου Μαγνητικού Πεδίου	18
1.4.2 Ακίνητοποιημένος και Ανοιχτοκυκλωμένος Δρομέας	20
1.4.3 Βραχυκυκλωμένος Δρομέας	21
1.4.4 Παραγωγή Ροπής και Χαρακτηριστική Ροπής – Στροφών	22
1.5 Ισοδύναμο Κύκλωμα	24
1.5.1 Ισοδύναμο Κύκλωμα Μιας Φάσης	24
1.5.2 Ισοδύναμο Κύκλωμα Μιας Φάσης Ανοιγμένο στο Τύλιγμα του Στάτη	25
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2ο: ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΚΚΙΝΗΣΗΣ ΤΡΙΦΑΣΙΚΩΝ ΑΣΥΓΧΡΟΝΩΝ ΚΙΝΗΤΗΡΩΝ	
2.1 Εισαγωγή	28
2.2 Απ' ευθείας Εκκίνηση	28
2.3 Εκκίνηση με Αντιστάσεις στο Στάτη	29
2.4 Εκκίνηση με Αυτομετασχηματιστή	30
2.5 Εκκίνηση με Διακόπτη Αστέρα – Τρίγωνο (Υ – Δ)	32
2.6 Εκκίνηση με Αντιστάσεις στο Δρομέα	35
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3ο: ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΤΟΥ ΙΣΟΔΥΝΑΜΟΥ ΚΥΚΛΩΜΑΤΟΣ ΤΡΙΦΑΣΙΚΟΥ ΑΣΥΓΧΡΟΝΟΥ ΚΙΝΗΤΗΡΑ.	
3.1 Εισαγωγή	37
3.2 Τεχνικά Χαρακτηριστικά του Κινητήρα	37
3.3 Πειραματικό Μέρος	38
3.3.1 Υπολογιστικό Μέρος των Παραμέτρων του Ισοδύναμου Κυκλώματος	42

3.3.2 Υπολογισμός της Καμπύλης Ροπής – Στροφών (Ολίσθησης)	43
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο:ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΑΣΥΓΧΡΟΝΟΥ ΤΡΙΦΑΣΙΚΟΥ ΚΙΝΗΤΗΡΑ ΜΕ ΧΡΗΣΗ MATLAB-SIMULINK	
4.1 Εισαγωγή	48
4.2 Τύποι της Τριφασικής Ασύμμετρης Τάσης Τροφοδοσίας	48
4.3 Επιπτώσεις της Ασύμμετρης Τάσης Τροφοδοσίας στους Τριφασικούς Κινητήρες Επαγωγής	48
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο: ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΑΣΥΓΧΡΟΝΟΥ ΤΡΙΦΑΣΙΚΟΥ ΚΙΝΗΤΗΡΑ ΜΕ ΧΡΗΣΗ MATLAB-SIMULINK.	
5.1 Εισαγωγή	50
5.2 Δυναμική Ανάλυση	50
5.3 Υλοποίηση SIMULINK	50
5.3.1 Υπό τις Συνθήκες Ονομαστικής (συμμετρικής) Τάσης Τροφοδοσίας.	50
5.3.2 Υπό τις Συνθήκες Ασύμμετρης Τάση Τροφοδοσίας.	54
5.4 Συμπεράσματα Προσομοίωσης.	58
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	59

ΠΙΝΑΚΑΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

1. Εικόνα 1.1: Δομή ενός τριφασικού επαγωγικού κινητήρα της εταιρείας κατασκευής Leroy-Somer	13
2. Εικόνα 1.2: Σχηματική τοποθέτηση των τυλιγμάτων του στάτη	14
3. Εικόνα 1.3 Συνδεσμολογία των τυλιγμάτων του στάτη σε αστέρα	14
4. Εικόνα 1.4: Συνδεσμολογία των τυλιγμάτων του στάτη σε τρίγωνο	14
5. Εικόνα 1.5: Κινητήρας τυλιγμένου δρομέα	15
6. Εικόνα 1.6: Κινητήρας βραχυκυκλωμένου δρομέα	16
7. Εικόνα 1.7: Παρεμβολή πρόσθετης εξωτερικής ρυθμιστικής τριφασικής ωμικής αντίστασης	16
8. Εικόνα 1.8: Τύλιγμα κλωβού και ο δρομέας του κινητήρα βραχυκυκλωμένου δρομέα	16
9. Εικόνα 1.9: Οδεύον κύμα συνισταμένης μαγνητεγερτικής δύναμης	19
10. Εικόνα 1.10: Παραγωγή του στρεφόμενου μαγνητικού πεδίου σε μια διπολική τριφασική μηχανή	20
11. Εικόνα 1.11: Θεμελιώδεις συνιστώσες χωρικών κατανομών της μαγνητεγερτικής δύναμης του δρομέα και της συνισταμένης μαγνητικής ροής	23
12. Εικόνα 1.12: Χαρακτηριστική ροπής – στροφών (ολίσθησης)	23
13. Εικόνα 1.13: (α) Ισοδύναμο κύκλωμα μιας φάσης.(β) Διανυσματικό διάγραμμα	24
14. Εικόνα 1.14: Ισοδύναμο κύκλωμα μιας φάσης τριφασικού ασύγχρονου κινητήρα	26
15. Εικόνα 1.15: Απλουστευμένη μορφή ισοδύναμου κυκλώματος μιας φάσης τριφασικού ασύγχρονου κινητήρα	27
16. Εικόνα 2.1: Συνδεσμολογία απ' ευθείας εκκίνησης	29
17. Εικόνα 2.2: Συνδεσμολογία εκκίνησης με αντιστάσεις στο στάτη	30
18. Εικόνα 2.3: Συνδεσμολογία εκκίνησης τριφασικού ασύγχρονου κινητήρα μέσω τριφασικού αυτομετασχηματιστή	31
19. Εικόνα 2.4: Κύκλωμα τροφοδοσίας του τυλίγματος της μιας φάσης του τριφασικού ασύγχρονου κινητήρα	31
20. Εικόνα 2.5: Συνδεσμολογία εκκίνησης με διακόπτη Υ/Δ	33
21. Εικόνα 2.6: Μεταβολή της ζεύξεως από αστέρα σε τρίγωνο	34
22. Εικόνα 2.7: Συνδεσμολογία εκκίνησης με μεταβολή της αντίστασης στο δρομέα	35
23. Εικόνα 2.8: Επίδραση της πρόσθετης αντίστασης R_2 στη χαρακτηριστική ροπής – στροφών	36

24. Εικόνα 3.1: Η πινακίδα του κινητήρα	37
25. Εικόνα 3.2: Συνδεσμολογία για δοκιμή κενού φορτίου ($n_r=n_s$) και ακινοτοποιημένου δρομέα ($n_{br}=0$).	38
26. Εικόνα 3.3: Απλοποιημένο ισοδύναμο κύκλωμα κατά τη δοκιμή κενού φορτίου	39
27. Εικόνα 3.4: Απλοποιημένο ισοδύναμο κύκλωμα κατά δοκιμή ακινοτοποιημένου δρομέα.	40
28. Εικόνα 3.5: Ισοδύναμο κύκλωμα μιας φάσης τριφασικού ασύγχρονου κινητήρα	43
29. Εικόνα 3.6: Κύκλωμα για τον υπολογισμό της τάσης V_{TH} του ισοδύναμου κυκλώματος κατά Thevenin	44
30. Εικόνα 3.7: Κύκλωμα για τον υπολογισμό της σύνθετης αντίστασης Z_{TH} του ισοδύναμου κυκλώματος κατά Thevenin	44
31. Εικόνα 3.8: Ισοδύναμο κύκλωμα κατά Thevenin της μιας φάσης του τριφασικού ασύγχρονου κινητήρα	45
32. Εικόνα 3.9: Χαρακτηριστική ροπής – στροφών (ολίσθησης) $T=f(n_s)$	47
33. Εικόνα 5.1: Μοντέλο προσομοίωσης ασύγχρονου κινητήρα με ονομαστική τάση τροφοδοσίας.	52
34. Εικόνα 5.2: Κυματομορφές στροφών και ηλεκτρομαγνητικής ροπής με ονομαστική τάση τροφοδοσίας.	54
35. Εικόνα 5.3: Κυματομορφή ρεύματος του δρομέα και του στάτη με ονομαστική τάση τροφοδοσίας.	54
36. Εικόνα 5.4: Μοντέλο προσομοίωσης ασύγχρονου κινητήρα με ασύμμετρη τάση τροφοδοσίας.	55
37. Εικόνα 5.5: Κυματομορφές στροφών και ηλεκτρομαγνητικής ροπής με ασύμμετρη τάση τροφοδοσίας.	56
38. Εικόνα 5.6: Κυματομορφή ρεύματος του δρομέα και του στάτη με ασύμμετρη τάση τροφοδοσίας.	57

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1ο: ΤΡΙΦΑΣΙΚΟΣ ΑΣΥΓΧΡΟΝΟΣ ΚΙΝΗΤΗΡΑΣ

1.1 Εισαγωγή

Τα είδη των ηλεκτρικών μηχανών που υπάρχουν στις μέρες μας διακρίνονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες στις μηχανές συνεχούς ρεύματος (ΣΡ) και μηχανές εναλλασσόμενου ρεύματος (ΕΡ). Οι μηχανές ΕΡ με την σειρά τους χωρίζονται σε ασύγχρονες μηχανές και σύγχρονες μηχανές.

Η σημαντική διαφορά μεταξύ των δύο κατηγοριών είναι, πως στις ασύγχρονες μηχανές η ταχύτητα του δρομέα είναι μικρότερη από την ταχύτητα του στρεφόμενου μαγνητικού πεδίου του στάτη και εξαρτάται από το μέγεθος του φορτίου, ενώ στις σύγχρονες μηχανές η ταχύτητα περιστροφής του δρομέα είναι ίση με την ταχύτητα που περιστρέφεται το πεδίο του στάτη (γνωστό ως σύγχρονο αριθμό στροφών). Επίσης κατασκευαστικά, οι ασύγχρονες μηχανές είναι απλής τροφοδότησης (αφού το τύλιγμα του δρομέα τροφοδοτείται εξ' αλληλεπαγωγής από το τύλιγμα του στάτη), ενώ οι σύγχρονες μηχανές είναι διπλής τροφοδότησης.

Οι ασύγχρονες μηχανές στην πλειοψηφία τους χρησιμοποιούνται ως κινητήρες λόγω της στιβαρότητας της κατασκευής τους, καλύπτοντας σχεδόν το σύνολο των βιομηχανικών εφαρμογών. Όμως, τις τελευταίες δεκαετίες, έχουν καθιερωθεί και ως γεννήτριες για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από τον άνεμο (ανεμογεννήτριες). Στη συγκεκριμένη περίπτωση, μέσω της προσλαμβάνουσας μηχανικής ενέργειας από τον άνεμο, η ασύγχρονη μηχανή λειτουργεί σε υπερσύγχρονο αριθμό στροφών ως γεννήτρια πλέον, παρέχοντας ηλεκτρική ισχύ στο δίκτυο με το οποίο είναι διασυνδεδεμένη.

Οι σύγχρονες ηλεκτρικές μηχανές χρησιμοποιούνται ως επί το πλείστον ως γεννήτριες. Το σύνολο σχεδόν της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας παγκοσμίως, παράγεται από σύγχρονες γεννήτριες μεγάλης ισχύος.

Η βασική διαφορά η οποία διακρίνει τους κινητήρες από τις γεννήτριες είναι ότι, οι κινητήρες μετατρέπουν την ηλεκτρική ενέργεια σε μηχανική και οι γεννήτριες την μηχανική ενέργεια σε ηλεκτρική.

1.2 Ιστορική Αναδρομή

Η αρχή λειτουργίας των επαγωγικών μηχανών βρέθηκε και δημοσιεύτηκε για πρώτη φορά από τον ηλεκτρολόγο και μηχανολόγο N. Tesla στα τέλη της δεκαετίας του 1880, και το 1896 κατασκευάστηκε ο πρώτος κινητήρας επαγωγής.

Οι ασύγχρονοι κινητήρες υπήρχαν από το 1896 στην αγορά. Έως σήμερα έχουν υποστεί πολλές βελτιώσεις τόσο όσο αφορά τα υλικά κατασκευής, ώστε να είναι πιο ανθεκτικά στις καταπονήσεις που δέχονται από την συχνή λειτουργία τους, όσο και στην αξιοπιστία και απόδοση τους. Επιπλέον στην μακριά πορεία βελτίωσης τους οι κινητήρες άρχισαν να μικραίνουν σε όγκο και να αυξάνουν σε ιπποδύναμη, με αποτέλεσμα σήμερα να έχουμε κινητήρες πολύ μεγαλύτερης ισχύος με μικρότερες

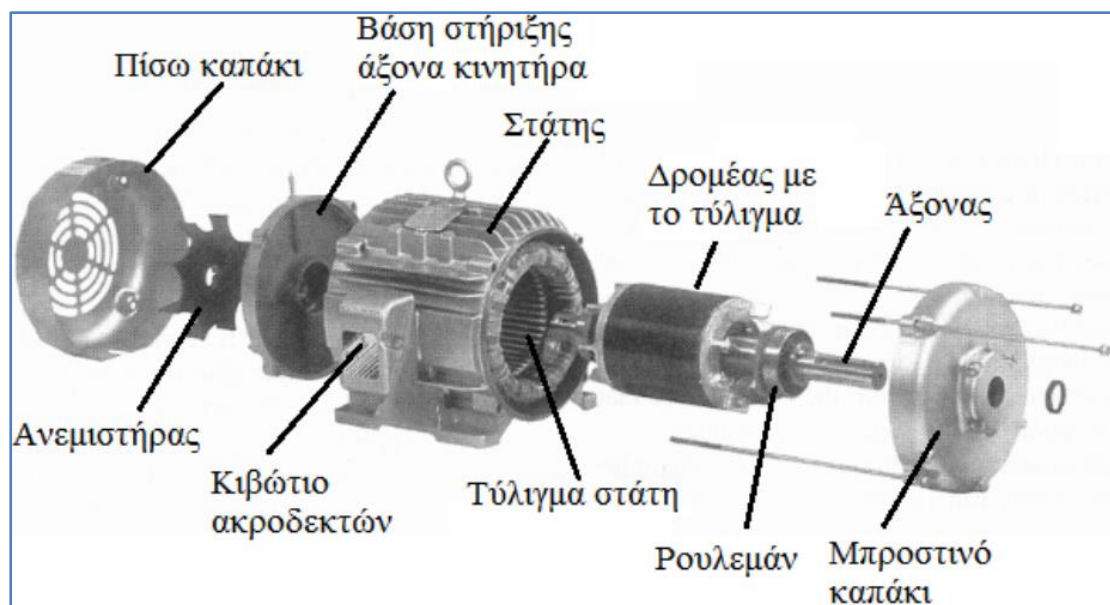
διαστάσεις. Για παράδειγμα, ένας σημερινός ασύγχρονος κινητήρας των 100hp, έχει τις ίδιες διαστάσεις με ένα κινητήρα 7.5hp του 1897.

Παρόλο που οι διαστάσεις των επαγωγικών κινητήρων μειώθηκαν, δεν υπήρξε βελτίωση στον βαθμό απόδοσης τους μέχρι την πετρελαϊκή κρίση το 1973, όπου η απότομη αύξηση του κόστους της ηλεκτρικής ενέργειας, προκάλεσε μια τάση για όλο και υψηλότερες αποδόσεις και μείωση των απωλειών στους επαγωγικούς κινητήρες. Έτσι οι κατασκευαστές φτιάξαν επαγωγικούς κινητήρες με υψηλές αποδόσεις. Αυτού του τύπου κινητήρες είναι πιο ακριβοί από τους απλούς κινητήρες, παρόλα αυτά λόγω της υψηλής τους απόδοσης αντικαθιστούν σιγά σιγά τους κλασικούς επαγωγικούς κινητήρες.

1.3 Κατασκευή Τριφασικών Κινητήρων Επαγωγής

Το ότι σε κάθε ηλεκτρική μηχανή έχουμε κίνηση αγωγών εντός μαγνητικού πεδίου σημαίνει ότι, κάθε μηχανή αποτελείται από ένα σταθερό και ένα κινητό μέρος. Τα βασικά μέρη μιας ηλεκτρικής μηχανής είναι:

- ✚ Σταθερό μέρος (πυρήνας στάτη και τύλιγμα)
- ✚ Στρεφόμενο μέρος (πυρήνας δρομέα και τύλιγμα)
- ✚ Διάκενο αέρα, απαραίτητο για τη σχετική κίνηση στάτη και δρομέα

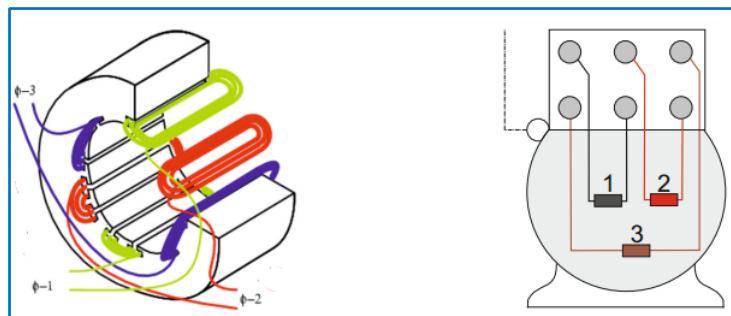


Εικόνα 1.1: Δομή ενός τριφασικού επαγωγικού κινητήρα της εταιρείας κατασκευής Leroy-Somer

Ο ασύγχρονος τριφασικός κινητήρας αποτελείται από δύο βασικά μέρη: το σταθερό μέρος το οποίο αποκαλείται στάτης και το κινούμενο μέρος, που καλείται δρομέας ή ρότορας.

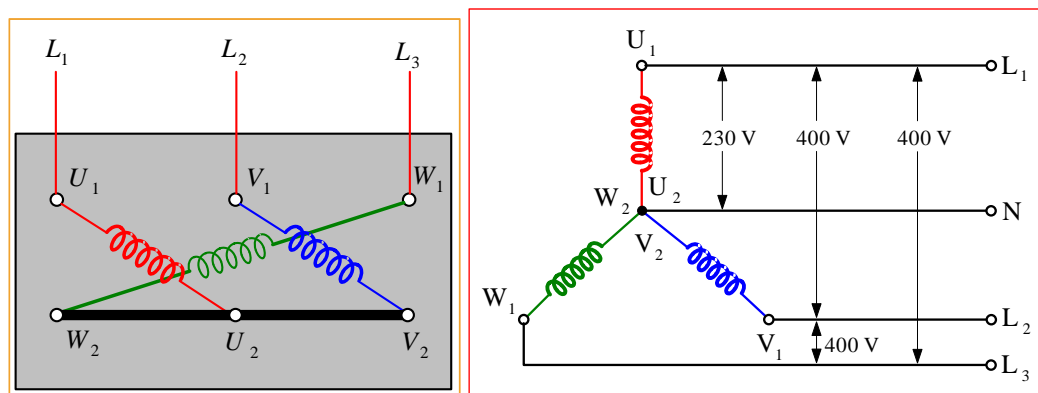
Για την ελάττωση των μαγνητικών απωλειών, οι πυρήνες του στάτη και του δρομέα κατασκευάζονται από ελάσματα σιδηρομαγνητικού υλικού μονωμένων μεταξύ τους. Στην εσωτερική κυλινδρική επιφάνεια του στάτη και την εξωτερική επιφάνεια του δρομέα, τοποθετούνται τα τυλίγματα του στάτη και του δρομέα.

Το τύλιγμα του στάτη, είναι γνωστό και ως τύλιγμα τυμπάνου. Ο σκοπός του τυλίγματος τυμπάνου είναι η δημιουργία διέγερσης, δηλαδή ή παραγωγή του μαγνητικού πεδίου. Κατασκευαστικά το τύλιγμα του στάτη, στην περίπτωση του τριφασικού κινητήρα αποτελείται από τρία όμοια διανεμημένα μονοφασικά τυλίγματα, μετατιθέμενα στο χώρο κατά 120 ηλεκτρικές μοίρες (Εικόνα 1.2). Οι αρχές και τα τέλη του τριφασικού τυλίγματος των έξι συνολικά ακροδεκτών εμφανίζονται στο κουτί ακροδεκτών.

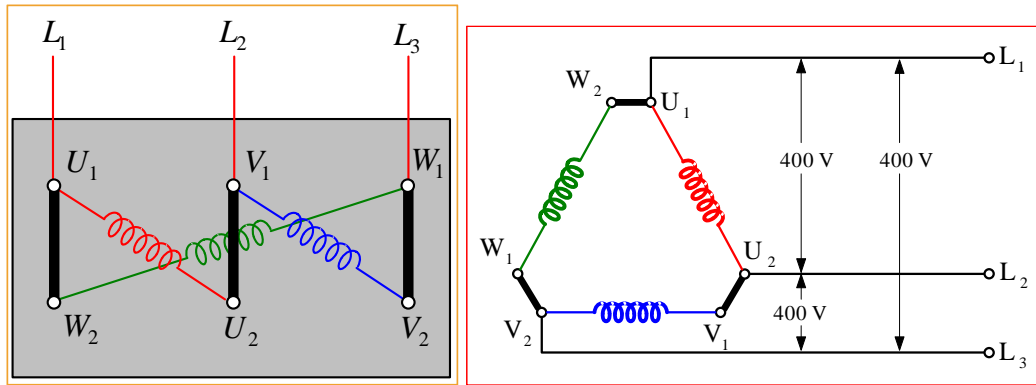


Εικόνα 1.2: Σχηματική τοποθέτηση των τυλιγμάτων του στάτη

Ανάλογα δε με τις τάσεις τροφοδοσίας και τον τύπο του κινητήρα, τα τυλίγματα του στάτη συνδέονται είτε σε αστέρα (Εικόνα 1.3) είτε σε τρίγωνο (Εικόνα 1.4).



Εικόνα 1.3: Συνδεσμολογία των τυλιγμάτων του στάτη σε αστέρα

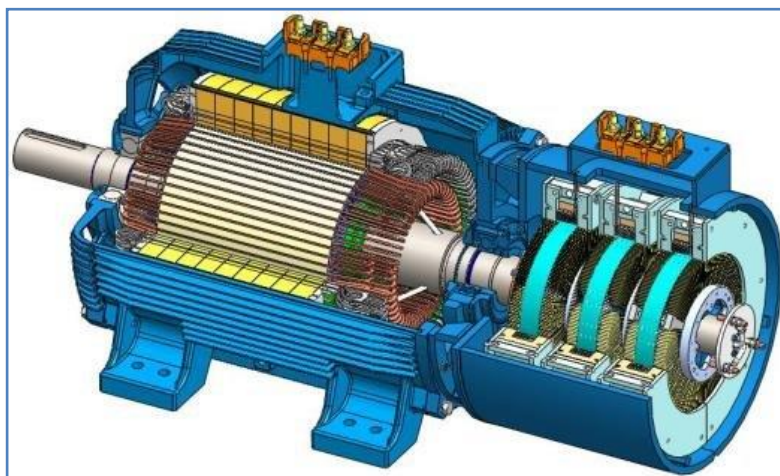


Εικόνα 1.4: Συνδεσμολογία των τυλιγμάτων του στάτη σε τρήγωνο

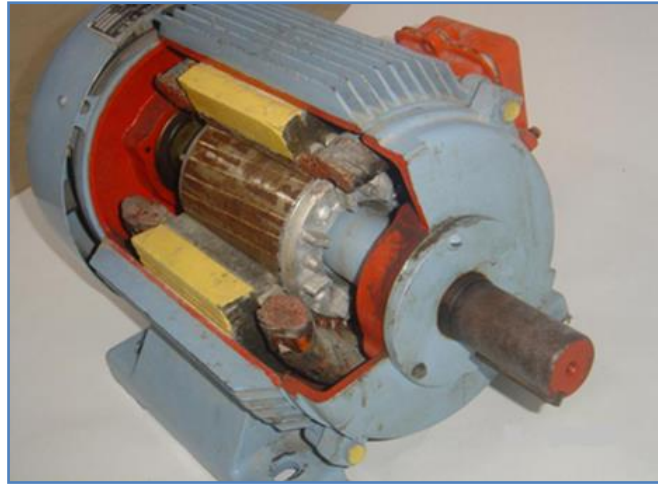
Ο δρομέας αποτελείται από τον άξονα, τον πυρήνα και τα τυλίγματα και μπορεί να περιστρέφεται ελεύθερα μέσω ρουλεμάν που τοποθετούνται σε κατάλληλο σημείο συνδεόμενο με το στάτη ή το σύστημα στήριξης του κινητήρα. Ο δρομέας δεν έχει σύνδεση με πηγή ηλεκτρικής ενέργειας.

Ως προς την κατασκευή του τυλιγματος του δρομέα, οι ασύγχρονοι κινητήρες χωρίζονται σε δύο κατηγορίες:

- ✚ Κινητήρες τυλιγμένου δρομέα ή δακτυλιοφόροι (Εικόνα 1.5)
- ✚ Κινητήρες βραχυκυκλωμένου δρομέα ή τύπου κλωβού (Εικόνα 1.6)



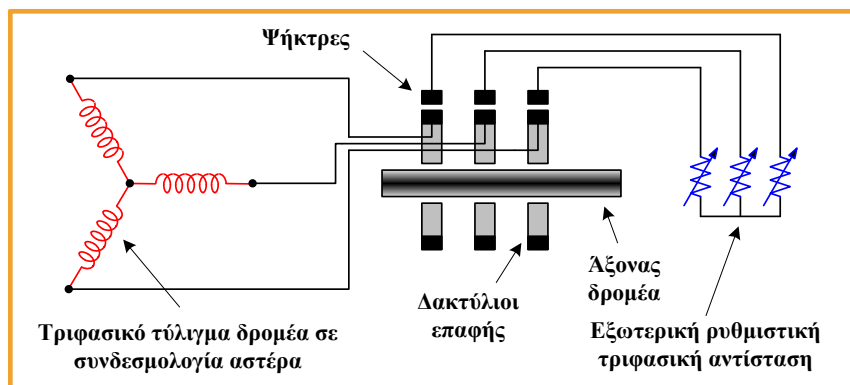
Εικόνα 1.5: Κινητήρας τυλιγμένου δρομέα



Εικόνα 1.6: Κινητήρας βραχυκυκλωμένου δρομέα

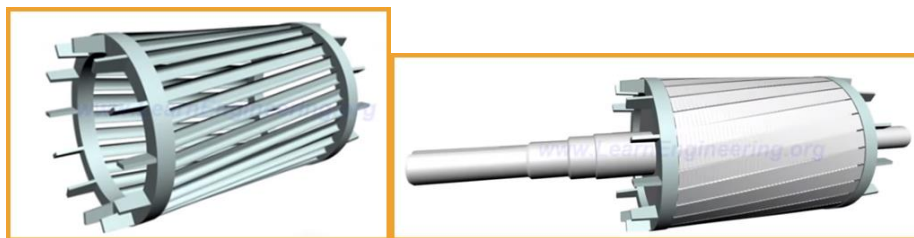
Το τύλιγμα των δακτυλιοφόρων κινητήρων, είναι ένα διανεμημένο τριφασικό τύλιγμα, του ίδιου αριθμού πόλων με το τύλιγμα τυμπάνου του στάτη.

Στους κινητήρες τυλιγμένου δρομέα, υπάρχει η δυνατότητα μέσω των ψηκτρών, παρεμβολής πρόσθετης εξωτερικής ωμικής αντίστασης σε σειρά σε κάθε φάση του τυλίγματος του δρομέα (Εικόνα 1.7). Χρησιμοποιούνται κυρίως σε μεγάλες ισχείς και σε περιπτώσεις υψηλών απαιτήσεων σε ροπή εκκίνησης.



Εικόνα 1.7: Παρεμβολή πρόσθετης εξωτερικής ρυθμιστικής τριφασικής ωμικής αντίστασης

Στους κινητήρες τύπου κλωβού, το τύλιγμα του δρομέα αποτελείται από χάλκινες ή αλουμιένιες μπάρες (ράβδοι), τοποθετημένες κατά μήκος των αυλακώσεων και οι οποίες βραχυκυκλώνονται περιμετρικά στα δύο άκρα μέσω κατάλληλων δακτυλίων. Οι ράβδοι τοποθετούνται περαστοί μέσα στις οδοντώσεις του πυρήνα, με κάποια κλίση μεταξύ τους για την αποφυγή μαγνητικού θορύβου (Εικόνα 1.8).



Εικόνα 1.8: Τύλιγμα κλωβού και ο δρομέας του κινητήρα βραχυκυκλωμένου δρομέα

Ένα πλεονέκτημα του δρομέα τύπου κλωβού, είναι ότι ο ίδιος δρομέας μπορεί να χρησιμοποιηθεί και σε κινητήρα με μονοφασικό τύλιγμα στάτη, καθόσον ο αριθμός των επαγομένων πόλων καθορίζεται από το τύλιγμα του στάτη. Το τύλιγμα κλωβού μπορεί να θεωρηθεί σαν ένα πολυφασικό τύλιγμα με αριθμό φάσεων ίσο με τον αριθμό των ράβδων του κλωβού, οι οποίες φάσεις μέσω του ενός από τους δύο δακτυλίους συνδέονται μεταξύ τους σε αστέρα και μέσω του άλλου δακτυλίου βραχυκυκλώνονται.

Αν και οι κινητήρες τυλιγμένου δρομέα, παρέχουν μεγαλύτερη ευελιξία για τον έλεγχο της ροπής και των στροφών, οι κινητήρες βραχυκυκλωμένου δρομέα, λόγω χαμηλότερου κόστους, μικρότερου όγκου και στιβαρότερης κατασκευής, προτιμώνται περισσότερο στις συνηθισμένες βιομηχανικές εφαρμογές. Σε περιπτώσεις που απαιτούνται υψηλές ροπές κατά την εκκίνηση μπορεί να γίνει χρήση δρομέα διπλού κλωβού.

Η μείωση των στροφών από την κενή λειτουργία στο πλήρες φορτίο, αποτελεί ένα μικρό ποσοστό της ταχύτητας κενού φορτίου και για το λόγο αυτό οι κινητήρες επαγωγής χαρακτηρίζονται και σαν κινητήρες σταθερών στροφών.

1.4 Αρχή Λειτουργίας

Όταν τροφοδοτηθεί το τύλιγμα του στάτη με ένα τριφασικό συμμετρικό σύστημα τάσεων, δημιουργείται στο διάκενο της μηχανής ένα στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο.

Η ταχύτητα περιστροφής του μαγνητικού πεδίου, είναι συνάρτηση της συχνότητας της τάσης τροφοδοσίας f_1 και του αριθμού των πόλων P του τυλίγματος.

$$n_s = 120 \frac{f_1}{P} \quad (1.1)$$

$$\omega_s = \frac{2\pi n_s}{60} = \frac{2}{P} 2\pi f_1 = \frac{2}{P} \omega_1 \quad (1.2)$$

n_s = σύγχρονη ταχύτητα, rpm

ω_s = σύγχρονη γωνιακή ταχύτητα, rad/s

$$\omega_1 = 2\pi f_1 = \text{ηλεκτρική κυκλική συχνότητα των τυλιγμάτων του στάτη, rad/s}$$

$$P = \text{αριθμός των πόλων της μηχανής}$$

Το τύλιγμα του δρομέα, είναι βραχυκυκλωμένο και τροφοδοτείται με Ε.Ρ. έμμεσα από το στάτη λόγω επαγωγής, όπως ακριβώς και το δευτερεύον τύλιγμα στην περίπτωση των μετασχηματιστών. Για το λόγο αυτό, ο ασύγχρονος κινητήρας ονομάζεται και ως κινητήρας επαγωγής.

Με δεδομένο πως για τη λειτουργία του ασύγχρονου κινητήρα, απαιτείται η τροφοδότηση με εναλλασσόμενη τάση μόνο του ενός από τα δύο τυλίγματα (και συγκεκριμένα του τυλίγματος του στάτη), ο ασύγχρονος κινητήρας χαρακτηρίζεται και σαν κινητήρας απλής τροφοδότησης.

Σε αντίθεση με το μετασχηματιστή, το ρεύμα διέγερσης που απαιτείται για τη δημιουργία της συνισταμένης μαγνητικής ροής στο διάκενο της μηχανής, είναι αρκετά μεγαλύτερο (40% περίπου του ονομαστικού ρεύματος), λόγω της σημαντικά αυξημένης μαγνητικής αντίστασης που εισάγεται στο σιδηρομαγνητικό κύκλωμα από την ύπαρξη του διακένου.

1.4.1 Δημιουργία Στρεφόμενου Μαγνητικού Πεδίου

Το τριφασικό τύλιγμα του οποίου οι μαγνητικοί άξονες των επιμέρους φάσεων είναι μετατιθέμενοι στο χώρο κατά 120 ηλεκτρικές μοίρες και το οποίο τροφοδοτείται από συμμετρικό σύστημα ρευμάτων (ευθύ ή ανάστροφο), δημιουργεί στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο σταθερού πλάτους και σταθερής γωνιακής ταχύτητας περιστροφής (εξαρτώμενης από τη συχνότητα των τάσεων τροφοδοσίας). Η συνισταμένη μαγνητεγερτική δύναμη σε μια τυχαία γωνία ϑ , προκύπτει από το αλγεβρικό άθροισμα των επιμέρους θεμελιωδών μαγνητεγερτικών δυνάμεων των τριών φάσεων.

$$F(\vartheta, t) = \frac{3}{2} F_{1,max} \cos(\vartheta - \omega t) = F_{max} \cos(\vartheta - \omega t) \quad (1.3)$$

$$F_{max} = \frac{3}{2} \left(\frac{4}{\pi} K_w \frac{N_{ph}}{P} \right) I_m \quad (1.4)$$

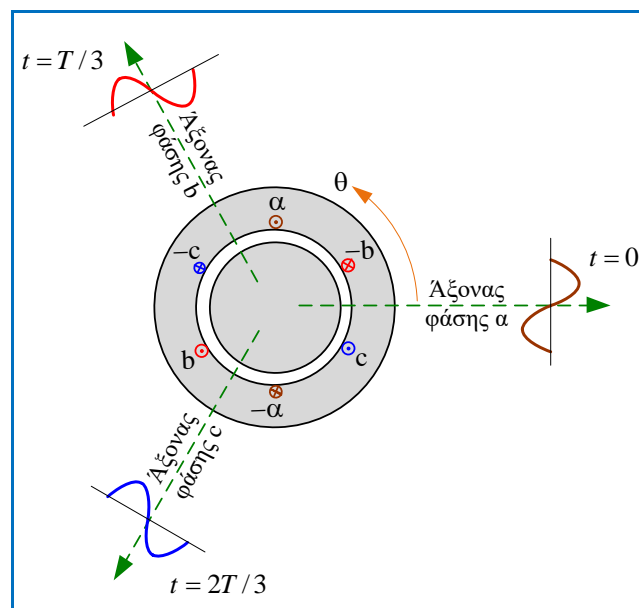
Η συνισταμένη μαγνητεγερτική δύναμη σύμφωνα με τις (1.3) και (1.4), αποτελεί οδεύον κύμα σταθερού πλάτους και με φάση χώρου, που μεταβάλλεται γραμμικά με το χρόνο με γωνία:

$$\vartheta(t) = \omega t \quad (1.5)$$

Τη χρονική στιγμή, έστω για $t = 0$, σύμφωνα με την (1.3) η κορυφή του κύματος χώρου της μαγνητεγερτικής δύναμης, ταυτίζεται με το μαγνητικό άξονα της φάσης α.

Τη χρονική στιγμή $t = T/3$, δηλαδή το $1/3$ της περιόδου της τάσης τροφοδοσίας, η κορυφή του κύματος χώρου έχει μετατοπιστεί κατά 120 ηλεκτρικές μοίρες και ταυτίζεται με το μαγνητικό άξονα της φάσης b.

Αντίστοιχα, τη χρονική στιγμή $t = 2T/3$, το κύμα έχει μετατοπιστεί επιπλέον κατά 120 ηλεκτρικές μοίρες και ταυτίζεται με το μαγνητικό άξονα της φάσης c, Εικόνα 1.9.



Εικόνα 1.9: Οδύον κύμα συνισταμένης μαγνητεγερτικής δύναμης

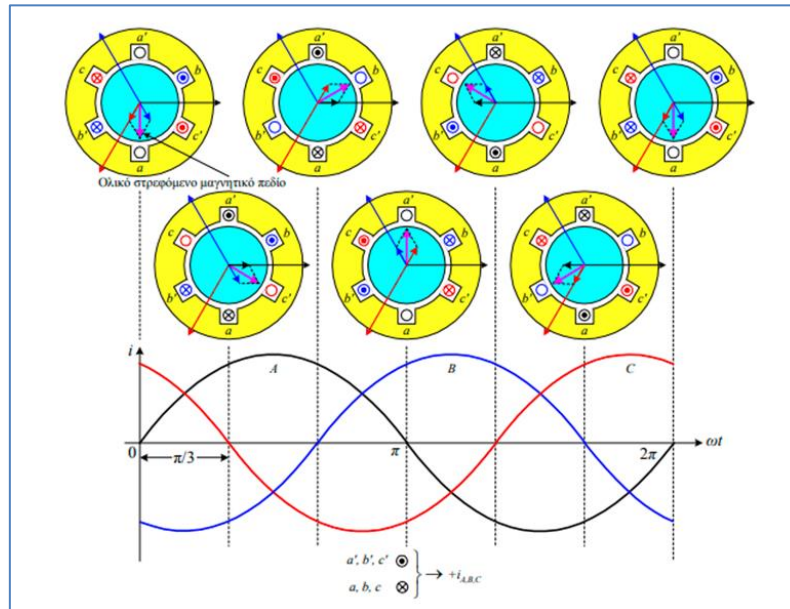
Επομένως, η γωνία $\vartheta(t) = \omega t$, παρέχει περιστροφή του συνιστάμενου κύματος περιφερειακά του διακένου με σταθερή γωνιακή ταχύτητα ω (ηλεκτρικά ακτίνια ανά δευτερόλεπτο).

Στο εσωτερικό του στάτη δημιουργούνται τρία ίδια μαγνητικά πεδία, τα οποία μεταβάλλονται ημιτονοειδώς συναρτήσει του χρόνου και είναι σταθερά σε θέση, με τη διαφορά ότι τα τρία μαγνητικά πεδία παίρνουν τις μέγιστες τιμές τους με διαφορά φάσης 120 ηλεκτρικές μοίρες. Το συνολικό μαγνητικό πεδίο που αναπτύσσεται στο εσωτερικό του στάτη, θα είναι το άθροισμα των τριών επιμέρους μαγνητικών πεδίων (Εικόνα 1.10). Το μαγνητικό πεδίο εκτελεί μια πλήρη περιστροφή, με φορά αντίθετη των δεικτών του ρολογιού, σε κάθε περίοδο των ρευμάτων. Το χαρακτηριστικό αυτού του συνολικού μαγνητικού πεδίου είναι ότι:

- ✚ Έχει σταθερό πλήθος μαγνητικών γραμμών

- ✚ Έχει ημιτονοειδή κατανομή στις 360 μοίρες του στάτη και
- ✚ Περιστρέφεται με συγκεκριμένο αριθμό στροφών που ονομάζεται σύγχρονος αριθμός στροφών.

$$n_s = 120 \frac{f_1}{p} \quad (1.6)$$



Εικόνα 1.10: Παραγωγή του στρεφόμενου μαγνητικού πεδίου σε μια διπολική τριφασική μηχανή.

1.4.2 Ακίνητοποιημένοι και Ανοιχτοκυκλωμένοι Δρομέας

Όταν ο δρομέας είναι ακίνητοποιημένος, η συμπεριφορά του ασύγχρονου κινητήρα είναι όμοια με ένα μετασχηματιστή, στο μαγνητικό κύκλωμα του οποίου παρεμβάλλεται και κάποιο διάκενο αέρος. Αρχικά τα τυλίγματα του δρομέα είναι ανοιχτοκυκλωμένα. Οι επαγόμενες τάσεις στα τυλίγματα του ακίνητοποιημένου δρομέα, οι οποίες σε αντίθεση με το μετασχηματιστή δεν οφείλονται στη χρονική μεταβολή της μαγνητικής ροής, αλλά στο στρεφόμενο κύμα σταθερού μεγέθους της μαγνητικής ροής στο διάκενο, έχουν την ίδια συχνότητα με εκείνη των τάσεων τροφοδοσίας των τυλιγμάτων του στάτη. Στη γενική περίπτωση διανεμημένου τυλίγματος P -πολικής μηχανής, με N_{ph} ελίγματα ανά παράλληλο κλάδο και φάση, οι επαγόμενες Η.Ε.Δ. στα τυλίγματα στάτη και δρομέα θα είναι αντίστοιχα:

$$E_s = \frac{E_{s,m}}{\sqrt{2}} = 4.44 f_1 K_{ws} N_{ph,s} \Phi_{sr,m} \quad (1.7)$$

$$E_r = \frac{E_{r,m}}{\sqrt{2}} = 4.44f_1 K_{wr} N_{ph,r} \Phi_{sr,m} \quad (1.8)$$

Η μέγιστη τιμή της συνισταμένης μαγνητικής ροής διακένου αμελώντας την πτώση τάσης στην ωμική αντίσταση και την αντίδραση σκέδασης του τυλίγματος τυμπάνου, θα είναι

$$\Phi_{sr,m} = \frac{E_s}{4.44f_1 K_{ws} N_{ph,s}} = \frac{V_1}{4.44f_1 K_{wr} N_{ph,r}} \quad (1.9)$$

όπου

E_s, E_r = ενεργές τιμές επαγόμενων Η.Ε.Δ. στα τυλίγματα στάτη και δρομέα, (V)

K_{ws}, K_{wr} = κατασκευαστικοί συντελεστές των τυλιγμάτων

$N_{ph,s}, N_{ph,r}$ = συνολικοί αριθμοί σπειρών ανά παράλληλο κλάδο και φάση

$\Phi_{sr,m}$ = μέγιστη τιμή της συνισταμένης μαγνητικής ροής διακένου, (Wb)

V_1 = ενεργός τιμή της τάσης τροφοδοσίας του τυλίγματος του στάτη (τυμπάνου), (V)

Για τάσεις τροφοδοσίας των τυλιγμάτων του στάτη σταθερού μεγέθους και συχνότητας, η μέγιστη μαγνητική ροή ανά πόλο, παραμένει πρακτικά σταθερή ανεξάρτητα από τις συνθήκες φόρτισης του κινητήρα. Τότε προκύπτει ότι

$$a = \frac{E_s}{E_r} = \frac{K_{ws} N_{ph,s}}{K_{wr} N_{ph,r}} \quad (1.10)$$

είναι η σχέση μετασχηματισμού των τυλιγμάτων στάτη και δρομέα.

1.4.3 Βραχυκυκλωμένος Δρομέας

Στην περίπτωση τώρα που ο αρχικά ακινητοποιημένος δρομέας βραχυκυκλωθεί, λόγω των επαγόμενων Η.Ε.Δ. θα κυκλοφορήσουν ρεύματα στο δρομέα, της ίδιας συχνότητας με τη συχνότητα των τάσεων τροφοδοσίας των τυλιγμάτων του στάτη.

Τα ρεύματα αυτά στο δρομέα, θα δημιουργήσουν και αυτά με τη σειρά τους ένα στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο στο δρομέα, στρεφόμενο επίσης με τη σύγχρονη ταχύτητα (ως προς το στάτη, ως προς το δρομέα θα περιστρέφεται με ταχύτητα ολίσθησης $s\omega_s$) και με την ίδια φορά περιστροφής με το αντίστοιχο στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο του τυλίγματος του στάτη.

Η αλληλεπίδραση των δύο μαγνητικών πεδίων στάτη και δρομέα ή του συνιστάμενου μαγνητικού πεδίου με το μαγνητικό πεδίο του δρομέα (τα οποία στρέφονται με την ίδια ταχύτητα, είναι δηλαδή ακίνητα το ένα ως προς το άλλο και έτσι έχουμε τις συνθήκες για ανάπτυξη σταθερής ροπής), δημιουργούν κινούσα ΠΑΔΑ, Τμήμα Η&ΗΜ, Διπλωματική Εργασία,

ροπή στην κατεύθυνση της φοράς περιστροφής του μαγνητικού πεδίου του στάτη. Σε αντίθεση με αλλά είδη κινητήρων, ο ασύγχρονος τριφασικός κινητήρας είναι αυτοεκκινούμενος.

Στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας του κινητήρα ο δρομέας στρέφεται με την ταχύτητα περιστροφής n_r μικρότερη της σύγχρονης ταχύτητας n_s . Η διαφορά στροφών μαγνητικού πεδίου (του διακένου) και δρομέα ονομάζεται ταχύτητα ολίσθησης του κινητήρα sn_s :

$$sn_s = n_{slip} = n_s - n_r \quad (1.11)$$

Η τιμή της ταχύτητας ολίσθησης, εκφράζει στην ουσία το πόσο μεγάλο ή μικρό είναι το μηχανικό φορτίο που φέρει ο δρομέας. Οπότε, ως ολίσθηση εκφράζεται ο λόγος της σχετικής ταχύτητας του πεδίου ως προς τη ταχύτητα του δρομέα προς τη σύγχρονη ταχύτητα:

$$s = \frac{n_s - n_r}{n_s} \quad \text{ή} \quad s(\%) = \frac{n_s - n_r}{n_s} \times 100 \quad (1.12)$$

Συνηθισμένες τιμές της ολίσθησης για ονομαστική λειτουργία κινητήρων κυμαίνεται από 2 – 5%.

Η συχνότητα των επαγόμενων τάσεων στα τυλίγματα του δρομέα, είναι γνωστή ως συχνότητα ολίσθησης και συνδέεται με τη συχνότητα του δικτύου, με τη σχέση:

$$f_2 = \frac{P}{2} \frac{(n_s - n_r)}{60} = \frac{P}{2} s \frac{n_s}{60} = sf_1 \quad (1.13)$$

1.4.4 Παραγωγή Ροπής και Χαρακτηριστική Ροπής – Στροφών

Ο ασύγχρονος κινητήρας παράγει μη μηδενική μέση ροπή για όλες τις ταχύτητες περιστροφής εκτός από τη σύγχρονη και για το λόγο αυτό η παραγόμενη ροπή καλείται και ασύγχρονη ροπή. Η παραγωγή ροπής, οφείλεται στην προσπάθεια ευθυγράμμισης των δύο μαγνητικών πεδίων στάτη και δρομέα. Για λειτουργία κινητήρα, ανεξάρτητα του είδους της μηχανής, το μαγνητικό πεδίο του στάτη προηγείται πάντα του πεδίου του δρομέα.

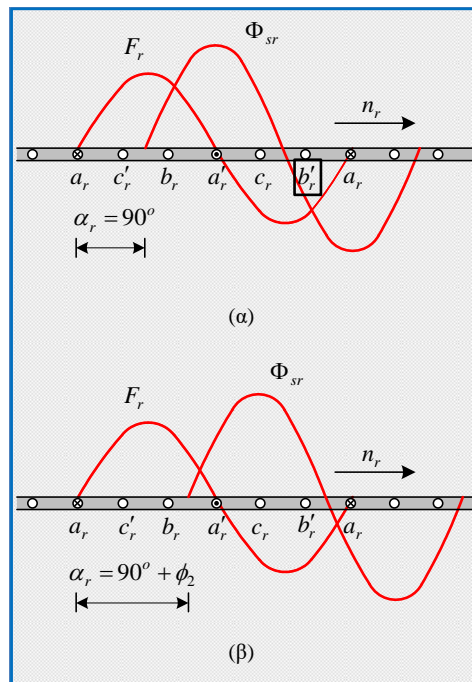
Το μέγεθος της παραγόμενης ροπής, είναι ανάλογο του γινόμενου των μεγεθών των δύο πεδίων καθώς και της μεταξύ τους γωνίας. Στην περίπτωση P -πολικής μηχανής ισχύει ότι:

$$\tau = - \left(\frac{P}{2} \right) \frac{\mu_0 \pi D l}{2g} F_{s,m} F_{r,m} \sin \vartheta \quad (1.14)$$

Δηλαδή, η παραγόμενη ροπή είναι ανάλογη του γινομένου των μέγιστων τιμών ($F_{s,m}$, $F_{r,m}$) των θεμελιωδών συνιστωσών των χωρικών κατανομών των μαγνητεγερτικών δυνάμεων στάτη και δρομέα, καθώς επίσης και του ημιτόνου της γωνίας των αξόνων των δύο πεδίων. Το αρνητικό πρόσημο, δηλώνει ότι η ροπή ενεργεί προς την κατεύθυνση μείωσης της γωνίας των δύο πεδίων και την ευθυγράμμιση τους. Επίσης μια αρκετά χρήσιμη εναλλακτική έκφραση για την παραγόμενη ροπή, είναι με τη χρήση της συνισταμένης μαγνητικής ροής διακένου.

$$\tau = -\frac{\pi}{2} \left(\frac{P}{2} \right)^2 \Phi_{sr,m} F_{r,m} \sin \alpha_r \quad (1.15)$$

Τα κύματα της μαγνητεγερτικής δύναμης του δρομέα και της συνισταμένης μαγνητικής ροής στο διάκενο φαίνονται σε ανάπτυγμα στην Εικόνα 1.11.



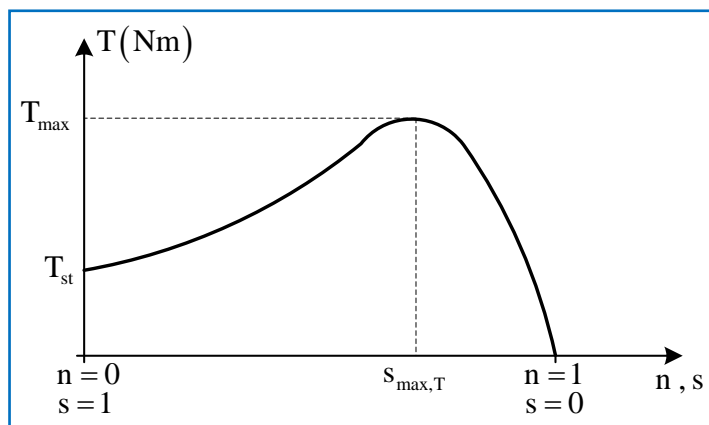
Εικόνα 1.11: Θεμελιώδεις συνιστώσες χωρικών κατανομών της μαγνητεγερτικής δύναμης του δρομέα και της συνισταμένης μαγνητικής ροής:

(α) Μηδενική αντίδραση σκέδασης τυλίγματος δρομέα $\cos \phi_2 = 1$,

(β) Μη μηδενική αντίδραση σκέδασης τυλίγματος δρομέα $\cos \phi_2 \neq 1$

Στην περίπτωση (α) υπερισχύει η ωμική αντίσταση από την αντίδραση σκέδασης του τυλίγματος του δρομέα και το τύλιγμα του δρομέα εμφανίζει ωμική συμπεριφορά, δηλαδή το ρεύμα του δρομέα θα είναι συμφασικό με την επαγόμενη Η.Ε.Δ.. Η παραγόμενη ροπή μεγιστοποιείται ($\alpha_r = 90^\circ$).

Στην περίπτωση (β) η αντίδραση σκέδασης του τυλίγματος του δρομέα είναι συγκρίσιμη με την ωμική αντίσταση του τυλίγματος, δηλαδή το ρεύμα του δρομέα θα καθυστερεί της επαγόμενης τάσης κατά μια γωνία έστω φ_2 με αποτέλεσμα η γωνία α_r να αυξηθεί στην τιμή $\alpha_r = 90^\circ + \varphi_2$.



Εικόνα 1.12: Χαρακτηριστική ροπής – στροφών (ολίσθησης)

Η χαρακτηριστική ροπής – στροφών του ασύγχρονου τριφασικού κινητήρα παρουσιάζεται στην Εικόνα 1.12, από την οποία προκύπτει:

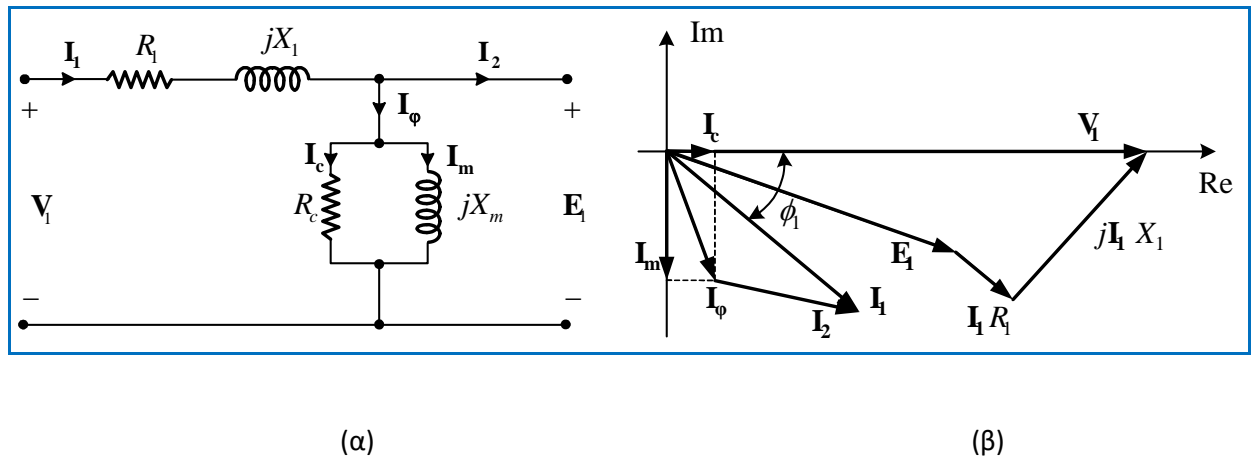
- ✚ Για μικρές ολισθήσεις, η παραγόμενη ροπή μεταβάλλεται γραμμικά με την ολίσθηση (το τυλίγμα του δρομέα εμφανίζει ωμική συμπεριφορά)
- ✚ Η αύξηση της ολίσθησης οδηγεί σε αύξηση του ρεύματος, όχι όμως σε γραμμική σχέση πλέον με την ολίσθηση. Επομένως, η αύξηση της ολίσθησης προκαλεί αύξηση της παραγόμενης ροπής, όχι σε γραμμική σχέση πλέον, μέχρι μιας μέγιστης τιμής η οποία καθορίζει και τα μέγιστα όρια βραχείας υπερφόρτισης του κινητήρα. Κάθε αύξηση της ολίσθησης, πάνω από την τιμή $s_{max,T}$, που αντιστοιχεί στη μέγιστη ροπή ή ροπή ανατροπής, T_{max} , προκαλεί μείωση της παραγόμενης ροπής και σταδιακή μείωση των στροφών, καθώς στο συγκεκριμένο κλάδο της χαρακτηριστικής ο κινητήρας αδυνατεί να ανταπεξέλθει στις απαιτήσεις του φορτίου.

1.5 Ισοδύναμο Κυκλωμα

1.5.1 Ισοδύναμο Κύκλωμα Μιας Φάσης

Ο κινητήρας επαγωγής ως προς την αρχή λειτουργίας του μοιάζει πολύ με ένα μετασχηματιστή με βραχυκυκλωμένο δευτερεύον. Η βασική διαφορά είναι πως στο δευτερεύον του «μετασχηματιστή» δηλαδή στο δρομέα εμφανίζονται τα ρεύματα με τη συχνότητα ολίσθησης (sf_1), από ότι στο «πρωτεύον», δηλαδή στο στάτη (f_1). Το ισοδύναμο κύκλωμα του τυλίγματος του στάτη είναι ακριβώς ίδιο με το

ισοδύναμο κύκλωμα του πρωτεύοντος ενός μετασχηματιστή και παρουσιάζεται στην Εικόνα 1.13.



Εικόνα 1.13: (α) Ισοδύναμο κύκλωμα μιας φάσης. (β) Διανυσματικό διάγραμμα

$$V_1 = I_1 (R_1 + jX_1) + E_1$$

I_1 = ενεργός τιμή του ρεύματος του στάτη (A)

E_1 = ενεργός τιμή της επαγόμενης ΑΗΕΔ στο στάτη (V)

I_2 = ρεύμα φορτίου (A)

I_ϕ = ρεύμα διέγερσης (A)

I_m = συνιστώσα του ρεύματος μαγνήτισης (A)

I_c = συνιστώσα απωλειών μαγνητικής υστέρησης και δινορρευμάτων (A)

R_1 = ωμική αντίσταση τυλίγματος στάτη (Ω)

X_1 = αντίδραση σκέδασης τυλίγματος στάτη (Ω)

Σε πλήρη αναλογία με το Μ/Σ, το ρεύμα του τυλίγματος του στάτη αποτελείται από δύο συνιστώσες, τη συνιστώσα διέγερσης και τη συνιστώσα φορτίου.

$$I_1 = I_\phi + I_2 \quad (1.16)$$

Η συνιστώσα της διέγερσης, παρέχει το ρεύμα που απαιτείται για την εγκατάσταση της συνιστάμενης μαγνητικής ροής στο διάκενο της μηχανής και το οποίο είναι πρακτικά σταθερό και ανεξάρτητο από τις συνθήκες φόρτισης του κινητήρα ($I_\phi = (40 - 50\%) I_{no}$), οπότε:

$$I_\phi = I_m + I_c \quad (1.17)$$

Η συνιστώσα φορτίου του ρεύματος του στάτη (όπως ισχύει στους Μ/Σ μετασχηματιστές, το ρεύμα του δρομέα ανηγμένο στο στάτη), αντισταθμίζει πλήρως τη Μ.Ε.Δ. που δημιουργεί το αντίστοιχο ρεύμα στο τύλιγμα του δρομέα και ευθύνεται για την ηλεκτρομηχανική μετατροπή της ενέργειας.

1.5.2 Ισοδύναμο Κύκλωμα Μιας Φάσης Ανηγμένο στο Τύλιγμα του Στάτη

Με δεδομένο ότι το τύλιγμα του στάτη, αντιλαμβάνεται τι συμβαίνει λειτουργικά στον κινητήρα, μόνο μέσω των στρεφόμενων κυμάτων στο διάκενο της συνισταμένης μαγνητικής ροής και της Μ.Ε.Δ. του τυλίγματος του δρομέα (σε σχέση με το σταθερό τύλιγμα του στάτη στρέφονται με τη σύγχρονη ταχύτητα), για την ολοκλήρωση του ισοδύναμου κυκλώματος (σε αναλογία με το μετασχηματιστή), δίνεται σε πρώτη φάση να θεωρηθεί ένα μαγνητικά ισοδύναμο τύλιγμα στο δρομέα (το υποθετικό τύλιγμα), με τους ίδιους πόλους και φάσεις και τον ίδιο αριθμό σπειρών με το τύλιγμα του στάτη. Για να είναι το πραγματικό κύκλωμα του δρομέα με το υποθετικό τύλιγμα του δρομέα μαγνητικά ισοδύναμο, θα πρέπει για τις ίδιες συνθήκες φόρτισης και την ίδια ταχύτητα περιστροφής, να παράγουν το ίδιο κύμα Μ.Ε.Δ. στο διάκενο της μηχανής και να έχουν τον ίδιο συντελεστή ισχύος.

Εάν δεν υπήρχε η επίδραση της ταχύτητας περιστροφής του δρομέα, η επαγόμενη Η.Ε.Δ. στο μαγνητικά ισοδύναμο ανηγμένο υποθετικό τύλιγμα στο δρομέα, θα ήταν ίση με την αντίστοιχη στο τύλιγμα του στάτη αφού και υποθετικά τα δύο τυλίγματα είναι πανομοιότυπα. Λόγω όμως της σχετικής ταχύτητας του κύματος της συνιστάμενης μαγνητικής ροής στο διάκενο σε σχέση με το δρομέα, μεταξύ των επαγομένων Η.Ε.Δ. στο τύλιγμα του στάτη και στο υποθετικό τύλιγμα στο δρομέα, θα ισχύει η σχέση:

$$E_{2s} = sE_1 \quad (1.18)$$

Για σταθερού μεγέθους συνιστάμενη μαγνητική ροή στο διάκενο της μηχανής, η Μ.Ε.Δ. της συνιστώσας φορτίου του τυλίγματος του στάτη θα πρέπει να αντισταθμίζει πλήρως τη Μ.Ε.Δ. του τυλίγματος του δρομέα. Αφού το τύλιγμα του στάτη με το υποθετικό τύλιγμα του δρομέα είναι καθόλα όμοια, προφανώς θα ισχύει ότι:

$$I_{2s} = I_2 \quad (1.19)$$

Επιπλέον, η φασική απόκλιση μεταξύ της επαγόμενης Η.Ε.Δ. E_1 και της συνιστώσας φορτίου I_2 στο τύλιγμα του στάτη, ισούται με την αντίστοιχη γωνία φ_2 του Σ.Ι. του δρομέα.

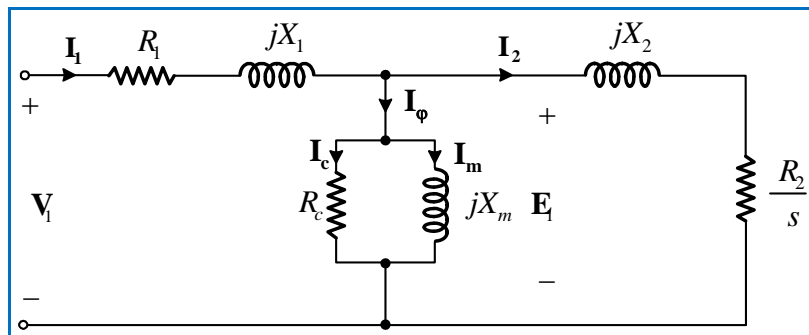
$$\frac{E_{2s}}{I_{2s}} = \frac{sE_1}{I_2} = R_2 + jsX_2 \quad (1.20)$$

και

$$\frac{E_1}{I_2} = z_2 = \frac{R_2}{s} + jX_2 \quad (1.21)$$

όπου: s η ολίσθηση του δρομέα.

Με βάση λοιπόν την τελευταία σχέση η επίδραση του τυλίγματος του δρομέα λαμβάνεται υπόψη στο μονοφασικό ισοδύναμο κύκλωμα της εικόνας 1.13, με τη σύνδεση στο δεξί άκρο, της ανηγμένης στο τύλιγμα του στάτη ισοδύναμης σύνθετης αντίστασης του τυλίγματος του δρομέα. Στην περίπτωση αυτή, το ισοδύναμο μονοφασικό κύκλωμα του τριφασικού ασύγχρονου κινητήρα, παίρνει τη μορφή της εικόνας 1.14.



Εικόνα 1.14: Ισοδύναμο κύκλωμα μιας φάσης τριφασικού ασύγχρονου κινητήρα

R_1 = ωμική αντίσταση του τυλίγματος τυμπάνου (Ω)

X_1 = αντίδραση σκέδασης του τυλίγματος τυμπάνου (Ω)

R_2 = ωμική αντίσταση του τυλίγματος του δρομέα ανηγμένη στο στάτη (Ω)

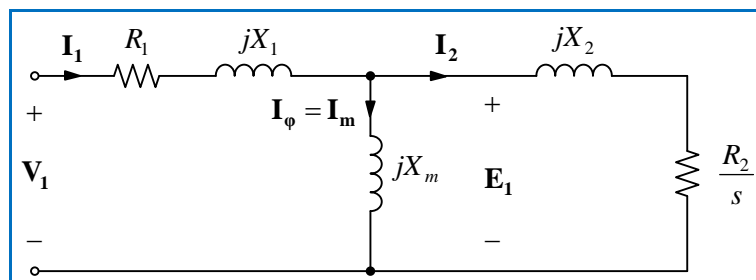
X_2 = αντίδραση σκέδασης του τυλίγματος του δρομέα ανοιγμένη στο στάτη (Ω)

R_c = αντίσταση μαγνήτισης (Ω)

X_m = αντίδραση μαγνήτισης (Ω)

Για την απλοποίηση του ισοδυναμού κυκλώματος του ασύγχρονου κινητήρα, γίνεται να αμεληθεί η συνιστώσα των απωλειών πυρήνα (μαγνητικής υστέρησης και δινορρευμάτων) του ρεύματος του στάτη και μαζί της η ωμική αντίσταση R_c του παράλληλου κλάδου, υπό την προϋπόθεση ότι οι συγκεκριμένες απώλειες θα ενσωματωθούν μαζί με τις μηχανικές απώλειες τριβών και ανεμισμού, οι οποίες συνήθως θεωρούνται σταθερές (ανεξάρτητες από το φορτίο και την ταχύτητα περιστροφής). Στην περίπτωση αυτή, το ισοδύναμο μονοφασικό κύκλωμα του τριφασικού ασύγχρονου κινητήρα παίρνει τη μορφή της εικόνας 1.15.

Το σφάλμα που εισάγεται στους διάφορους υπολογισμούς από τη χρήση του απλοποιημένου κυκλώματος, είναι πρακτικά αμελητέο. Ταυτόχρονα, η συγκεκριμένη απλοποίηση μας παρέχει τη δυνατότητα και την ευκολία, κατά τη δοκιμή κενού φορτίου του κινητήρα, να μην απαιτείται ο διαχωρισμός των απωλειών του πυρήνα από τις μηχανικές απώλειες που οφείλονται στις τριβές των εδράνων του άξονα και τον ανεμισμό.










Εικόνα 1.15: Απλουστευμένη μορφή ισοδύναμου κυκλώματος μιας φάσης τριφασικού ασύγχρονου κινητήρα

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο: ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΚΚΙΝΗΣΗΣ ΤΡΙΦΑΣΙΚΩΝ ΑΣΥΓΧΡΟΝΩΝ ΚΙΝΗΤΗΡΩΝ

2.1 Εισαγωγή

Ένας επαγωγικός κινητήρας πρέπει να έχει ομαλή εκκίνηση, και να παράγει την απαιτούμενη ροπή εκκίνησης του φορτίου με όσο το δυνατό μικρότερο ρεύμα. Αν η αναπτυσσόμενη ροπή είναι μικρότερη από αυτή που απαιτείται από το φορτίο, ο κινητήρας δε θα κινηθεί. Το ηλεκτρικό δίκτυο καθορίζει τελικά το μέγιστο επιτρεπτό ρεύμα εκκίνησης. Ο χρόνος επιτάχυνσης (μέχρι ο κινητήρας να πάρει τις ονομαστικές στροφές) εξαρτάται από τον τρόπο εκκίνησης αλλά και από το είδος του φορτίου, και παίζει σημαντικό ρόλο στην θερμική καταπόνηση του κινητήρα. Ένα αυξημένο ρεύμα εκκίνησης μπορεί να προκαλέσει βύθιση της τάσης του δικτύου (και να επηρεάσουν δυσμενώς τη λειτουργία γειτονικών συσκευών), ή ακόμη να προκαλέσουν μη αποδεκτές μηχανικές καταπονήσεις στα μηχανικά μέρη του συστήματος. Σύμφωνα με τους κανονισμούς της Δ.Ε.Η., η βύθιση της τάσης κατά την εκκίνηση στο σημείο τροφοδοσίας, δεν πρέπει να υπερβαίνει το 5%. Επιτρέπεται δε ακόμη από την πλευρά της Δ.Ε.Η. και η απευθείας εκκίνηση, τόσο στη χαμηλή, όσο και στη μέση τάση (ανεξάρτητα της ισχύος), αρκεί να μην υπερβαίνει το μέγιστο όριο βύθισης και εφόσον είναι εφικτό σε θέματα καταπόνησης του κινητήρα και του φορτίου. Η ρύθμιση του ρεύματος εκκίνησης στις διάφορες διατάξεις, πρακτικά γίνεται είτε μέσω της τάσης τροφοδοσίας του κινητήρα είτε μέσω της αντίστασης του δρομέα (προκειμένου για δακτυλιοφόρους κινητήρες). Μια ιδανική τεχνική εκκίνησης θα πρέπει να εξασφαλίζει τη μέγιστη δυνατή ροπή εκκίνησης, με το μικρότερο δυνατό ρεύμα εκκίνησης.

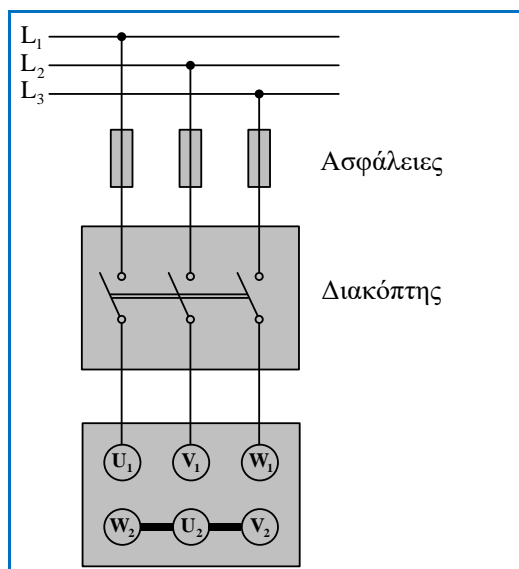
Οι επικρατέστερες διατάξεις εκκίνησης των τριφασικών ασύγχρονων κινητήρων, είναι:

-  Απ' ευθείας εκκίνηση
-  Εκκίνηση με αντιστάσεις στον στάτη
-  Εκκίνηση με αυτομετασχηματιστή
-  Εκκίνηση με διακόπτη αστέρα – τριγώνου
-  Εκκίνηση με αντιστάσεις στον δρομέα
-  Εκκίνηση με συσκευές στερεάς κατάστασης
-  Με ρύθμιση του λόγου V/f (χρήση τεχνικών ηλεκτρονικών ισχύος)

Όλες οι προαναφερθείσες μέθοδοι, παρέχουν χαμηλές ροπές εκκίνησης και βεβαίως για ομαλή εκκίνηση, απαιτείται το αρχικό φορτίο στον άξονα του κινητήρα να είναι και αυτό κατάλληλα μειωμένο.

2.2 Απ' ευθείας Εκκίνηση

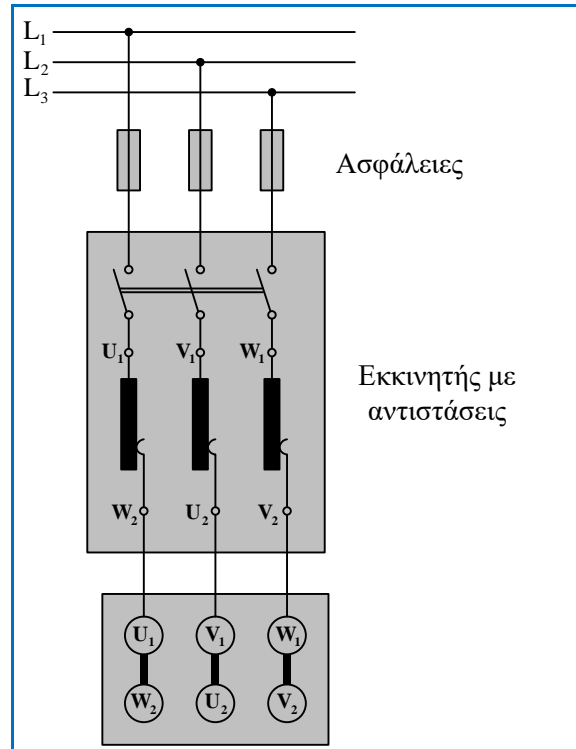
Η μέθοδος αυτή εφαρμόζεται σε ορισμένες περιπτώσεις στη βιομηχανία, κυρίως για κινητήρες μικρής ισχύος μέχρι 1.5 – 2 KW. Υπάρχουν περιπτώσεις όπου η ΔΕΗ επιτρέπει την απευθείας εκκίνηση κινητήρων μεγαλύτερης ισχύος τόσο στη χαμηλή όσο και στη μέση τάση. Είναι απλή μέθοδος, έχει υψηλή ροπή εκκίνησης, όμως μεγάλο ρεύμα εκκίνησης.



Εικόνα 2.1: Συνδεσμολογία απ' ευθείας εκκίνησης

2.3 Εκκίνηση με Αντιστάσεις στο Στάτη

Η μέθοδος αυτή γίνεται με χρήση του εκκινητή, που αποτελείται από τρεις αντιστάσεις, οι οποίες παρεμβάλλονται στο τριφασικό κύκλωμα τροφοδοσίας του στάτη. Ο κινητήρας ξεκινάει με μειωμένη τάση και ελαττωμένη ένταση. Με αύξηση της ταχύτητας του κινητήρα αφαιρούνται σταδιακά οι αντιστάσεις, έως ότου ο κινητήρας αποκτήσει τις κανονικές στροφές, οπότε ο εκκινητής τίθεται εκτός λειτουργίας. Η μέθοδος αυτή είναι κατάλληλη μόνο για κινητήρες μικρής ισχύος και για περιπτώσεις που δεν απαιτείται μεγάλη ροπή εκκίνησης.



Εικόνα 2.2: Συνδεσμολογία εκκίνησης με αντιστάσεις στο στάτη

Η απαιτούμενη αντίσταση R , ώστε το I_{st} να μην υπερβαίνει ορισμένη τιμή, δίνεται από τη σχέση

$$I_{st} = \frac{V_1}{\sqrt{R^2 + r_1^2 + X_1^2}} \Rightarrow R = \sqrt{\left(\frac{V_1}{I_{st}}\right)^2 - X_1^2 - r_1^2} \quad (2.1)$$

Προφανώς με την παραπάνω μέθοδο, λαμβάνουμε πολύ μικρή ροπή στρέψης.

$$\frac{T_{st}}{T_{no}} = \alpha_\varepsilon^2 \times s_{no} \quad (2.2)$$

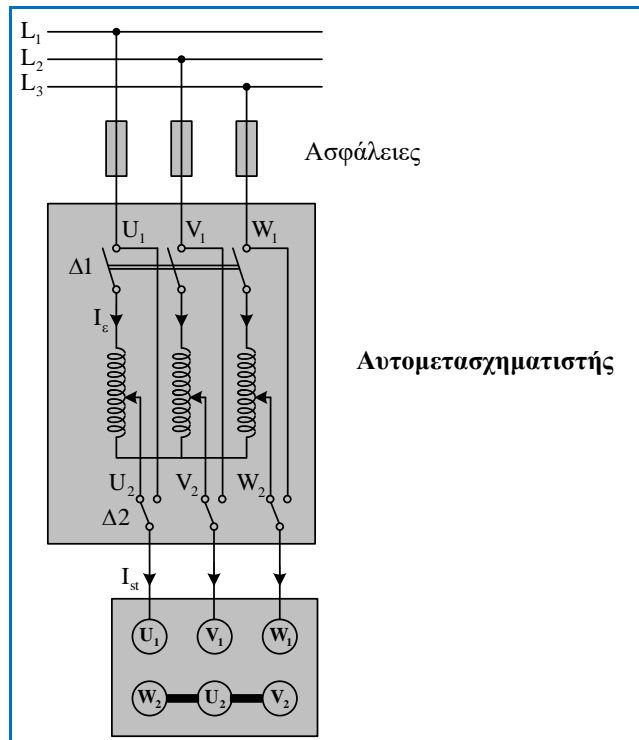
όπου:

$\alpha_\varepsilon = \text{επιτρεπόμενο } I_{st}/I_{no}$

2.4 Εκκίνηση με Αυτομετασχηματιστή

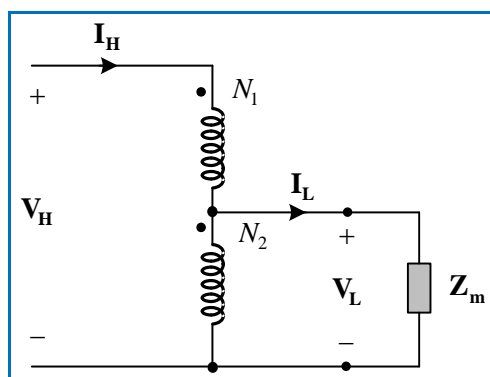
Χρησιμοποιείται για την εκκίνηση μεγάλων ασύγχρονων κινητήρων βραχυκυκλωμένου δρομέα. Με τη μέθοδο αυτή υπάρχει η δυνατότητα να έχουμε ελαφρός μεγαλύτερη ροπή εκκίνησης απ' ότι στην εκκίνηση με αντιστάσεις στο στάτη. Η πλήρης τάση παρέχεται κλιμακωτά έως ο κινητήρας να αποκτήσει την ονομαστική του ταχύτητα, και μέσω του διακόπτη διπλής ενέργειας $\Delta 1$ (είτε

χειροκίνητα είτε αυτόματα μέσω καταλλήλου ηλεκτροκίνητου μηχανισμού) ο κινητήρας αποσυνδέεται από τον αυτομετασχηματιστή και συνδέεται απ' ευθείας με το δίκτυο για την κανονική του λειτουργία.



Εικόνα 2.3: Συνδεσμολογία εκκίνησης τριφασικού ασύγχρονου κινητήρα μέσω τριφασικού αυτομετασχηματιστή

Στην εικόνα 2.4 φαίνεται το κύκλωμα της τροφοδοσίας του τυλίγματος της μιας φάσης του τριφασικού ασύγχρονου κινητήρα.



Εικόνα 2.4: Κύκλωμα τροφοδοσίας του τυλίγματος της μιας φάσης του τριφασικού ασύγχρονου κινητήρα

V_H, I_H = τάσεις και ρεύματα από την πλευρά του πρωτεύοντος (φασικά μεγέθη)

V_L, I_L = τάσεις και ρεύματα από την πλευρά του δευτερεύοντος (φασικά μεγέθη)

N_1, N_2 = αριθμός ελιγμάτων τυλιγμάτων πρωτεύοντος και δευτερεύοντος

Z_m = ισοδύναμη σύνθετη αντίσταση μιας φάσης του τριφασικού κινητήρα

Έστω,

$$\alpha_T = \frac{N_1 + N_2}{N_2} \quad (2.3)$$

η σχέση μεταφοράς του αυτομετασχηματιστή.

Στην περίπτωση του ιδανικού αυτομετασχηματιστή, ισχύουν οι παρακάτω σχέσεις, τόσο σε διανυσματική μορφή όσο και σε μέτρα,

$$V_H = \alpha_T V_L \quad (2.4)$$

και

$$I_H = \frac{I_L}{\alpha_T} \quad (2.5)$$

Μεταξύ των ρευμάτων κατά την εκκίνηση, στην είσοδο του κινητήρα και από την πλευρά του δικτύου στην είσοδο του αυτομετασχηματιστή, θα ισχύει η σχέση:

$$I_{H,st} = \frac{I_{L,st}}{\alpha_T} \quad (2.6)$$

Σύμφωνα με το κύκλωμα της εικόνας 2.4, για μια τυχαία θέση στην κινητή λήψη του αυτομετασχηματιστή, θα ισχύει:

$$I_{L,st} = \frac{V_{L,st}}{Z_m} = \frac{V_H}{\alpha_T Z_m} \quad (2.7)$$

Και από τη πλευρά του δικτύου:

$$I_{H,st} = \frac{I_{L,st}}{\alpha_T} = \frac{1}{\alpha_T^2} \frac{V_H}{Z_m} = \frac{1}{\alpha_T^2} I_{st} \quad (2.8)$$

$$I_{st} = \frac{V_H}{Z_m} \quad (2.9)$$

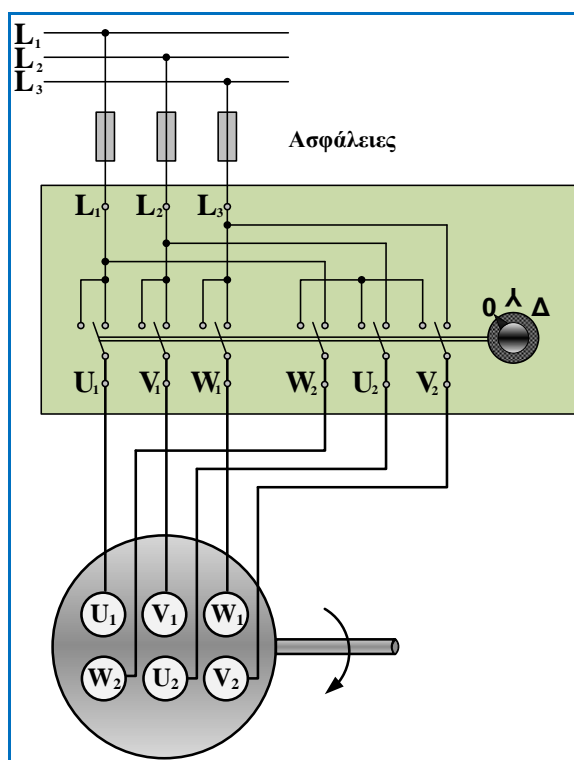
Το ρεύμα που απορροφά ο κινητήρας κατά την απευθείας εκκίνηση με την ονομαστική τάση. Επειδή η παραγόμενη ροπή είναι ανάλογη του τετραγώνου της

τάσης τροφοδοσίας, σύμφωνα με την (2.4) και η ροπή εκκίνησης θα μειωθεί κατά α_r^2 σε σχέση με τη ροπή εκκίνησης κατά την απευθείας σύνδεση με την ονομαστική τάση. Η συγκεκριμένη μέθοδος εκκίνησης είναι κατάλληλη για φορτία που απαιτούν μικρή ροπή εκκίνησης.

2.5 Εκκίνηση με Διακόπτη Αστέρα – Τρίγωνο (Y – Δ)

Η μέθοδος εκκίνησης με διακόπτη Y/Δ βασίζεται στην αρχή ελέγχου των στροφών του κινητήρα με τη μεταβολή της τάσης τροφοδοσίας (διατηρώντας σταθερή τη συχνότητα).

Για την εκκίνηση του κινητήρα, ο στάτης συνδέεται σε αστέρα Y, ενώ για τη κανονική λειτουργία του σε τρίγωνο Δ.

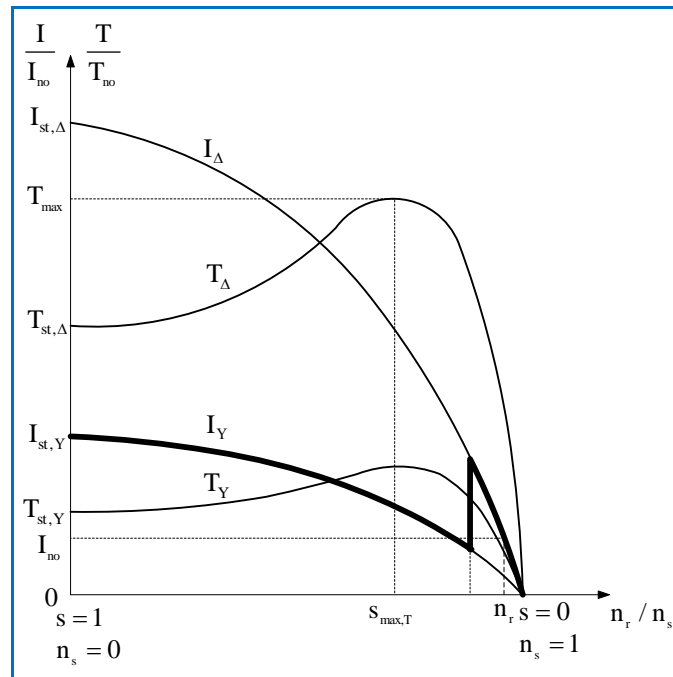


Εικόνα 2.5: Συνδεσμολογία εκκίνησης με διακόπτη Y/Δ

Ξεκινώντας τον κινητήρα σε συνδεσμολογία του Y, η φασική τάση των τυλιγμάτων τυμπάνου είναι μικρότερη σε μέγεθος από την αντίστοιχη πολική τάση κατά φορές. Ο κινητήρας αρχίζει να περιστρέφεται και μετά από σύντομο χρονικό διάστημα, όπου η ταχύτητα περιστροφής (και κατ' επέκταση η επαγόμενη Α.Η.Ε.Δ.)

έχει φτάσει σε ικανοποιητικά επίπεδα, γίνεται η μεταγωγή στο τρίγωνο Δ όπου πλέον ο κινητήρας τροφοδοτείται με την ονομαστική τάση.

Η ένταση του ρεύματος την οποία ο κινητήρας απορροφά από το δίκτυο στην εκκίνηση με ζεύξη σε αστέρα, είναι το 1/3 από την ένταση του ρεύματος που απορροφά με απευθείας ζεύξη σε τρίγωνο.



Εικόνα 2.6: Μεταβολή της ζεύξεως από αστέρα σε τρίγωνο

$$I_{1st,\gamma} = \frac{I_{1st,\Delta}}{3} \quad (2.10)$$

$$T_{st,\gamma} = \frac{T_{st,\Delta}}{3} \quad (2.11)$$

Κατά το ίδιο ποσοστό, μειώνεται και η ροπή εκκίνησης του κινητήρα, αφού είναι ανάλογη προς το τετράγωνο της φασικής τάσης.

Συνεπώς, κατά τη σύνδεση σε αστέρα, έχουμε μείωση της ροπής στο 1/3 σε συνάρτηση με αυτή που θα αναπτυσσόταν κατά τη σύνδεση σε τρίγωνο. Λόγω κορεσμού, η πραγματική μείωση αυτή, ανέρχεται από 0.23 έως 0.3.

Αυτή η μέθοδος εκκίνησης μπορεί να θεωρηθεί ως ειδική περίπτωση εκκίνησης μέσω αυτομετασχηματιστή, με σχέση μεταφοράς $a = \sqrt{3}$.

Αυτή η μέθοδος εκκίνησης εφαρμόζεται σε μικρής και μέσης ισχύος κινητήρες.

Ιδιαίτερη προσοχή, χρειάζεται στην επιλογή της κατάλληλης τιμής της χρονικής διάρκειας μεταγωγής από τη συνδεσμολογία αστέρα στη συνδεσμολογία τριγώνου.

- ✚ Εάν η μεταγωγή γίνει πολύ νωρίς, ο κινητήρας δεν θα έχει αναπτύξει αρκετές στροφές και κατ' επέκταση αξιόλογη Α.Η.Ε.Δ., με αποτέλεσμα την ανάπτυξη σημαντικών εντάσεων, της τάξης των αντίστοιχων κατά την απευθείας εκκίνηση.
- ✚ Από την άλλη πλευρά, εάν η μεταγωγή γίνει καθυστερημένα, ο κινητήρας θα έχει αναπτύξει σχεδόν τις ονομαστικές στροφές, δεν θα έχουμε ανάπτυξη υπερεντάσεων, αλλά η χρονική διάρκεια της εκκίνησης θα είναι σημαντικά μεγαλύτερη.

Ο χρόνος εκκίνησης υπολογίζεται ανάλογα με την ισχύ του κινητήρα σε (sec) :

$$t_{st} = 4 + 2\sqrt{P_{(kW)}} \quad (2.12)$$

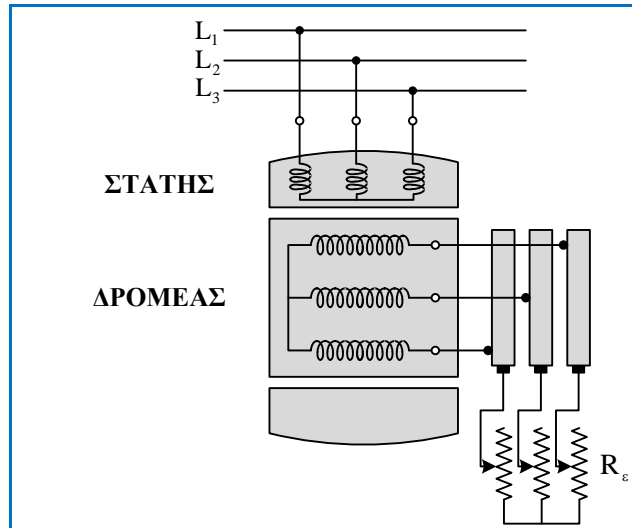
Το είδος του φορτίου και πιο συγκεκριμένα η δυναμική συμπεριφορά του, η οποία καθορίζεται από τη μορφή της χαρακτηριστικής ροπής-στροφών, παίζει πρωταρχικό ρόλο στη σωστή επιλογή και ρύθμιση οποιουδήποτε συστήματος εκκίνησης καθόσον επηρεάζει άμεσα τη δυναμική του κινητήρα.

Δηλαδή, το υπό έλεγχο σύστημα δεν είναι μόνο ο κινητήρας, αλλά το σύστημα κινητήρας-φορτίο.

2.6 Εκκίνηση με Αντιστάσεις στο Δρομέα

Η συγκεκριμένη μέθοδος εκκίνησης βασίζεται στην αρχή ελέγχου των στροφών του κινητήρα με μεταβολή της αντίστασης στο κλάδο του δρομέα. Είναι εφαρμόσιμη μόνο σε δακτυλιοφόρους κινητήρες και είναι κατάλληλη για φορτία που παρουσιάζουν υψηλή στατική ροπή είτε μεγάλη αδράνεια.

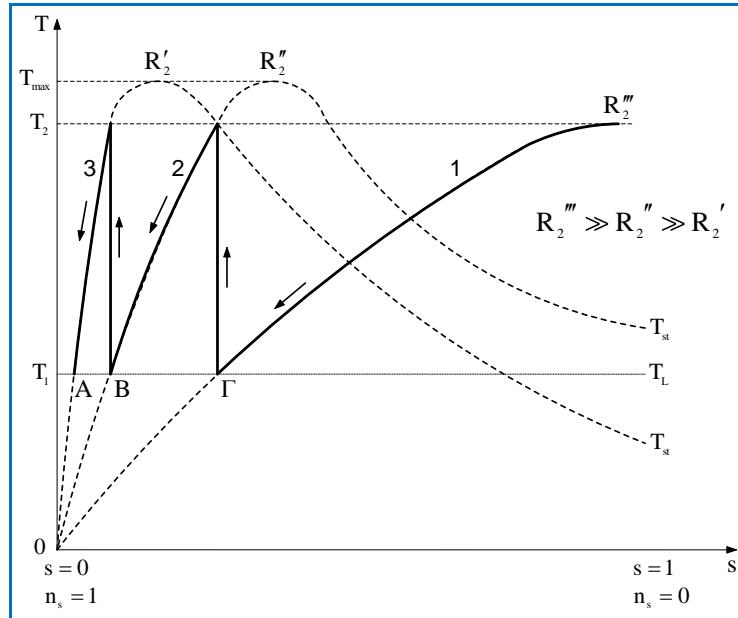
Η παρεμβολή πρόσθετης ωμικής αντίστασης στο τύλιγμα του δρομέα, έχει σαν αποτέλεσμα τη μετακίνηση του σημείου ανατροπής σε μεγαλύτερες ολισθήσεις (μικρότερες ταχύτητες) και την ταυτόχρονη αύξηση του μεγέθους της ροπής εκκίνησης.



Εικόνα 2.7: Συνδεσμολογία εκκίνησης με μεταβολή της αντίστασης στο δρομέα

Με κατάλληλη επιλογή της τιμής της εξωτερικής αντίστασης, μπορούμε να έχουμε τη μέγιστη ροπή κατά την εκκίνηση.

Η αύξηση της ροπής εκκίνησης συνοδεύεται με αντίστοιχη μείωση του ρεύματος κατά την εκκίνηση.



Εικόνα 2.8: Επίδραση της πρόσθετης αντίστασης R_2 στη χαρακτηριστική ροπής – στροφών

Όμως, η αύξηση της ωμικής αντίστασης του δρομέα έχει σαν αποτέλεσμα τη μείωση της απόδοσης στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας, λόγω της υψηλής ολίσθησης και των αυξημένων απωλειών χαλκού στα τυλίγματα του δρομέα.

Για το λόγο αυτό, η πρόσθετη εξωτερική αντίσταση θα πρέπει να τίθεται εκτός, μετά την ολοκλήρωση του μεταβατικού φαινομένου της εκκίνησης. Η μεταβολή της αντίστασης μπορεί να γίνεται σε βήματα ή και γραμμικά, χειροκίνητα ή και αυτόματα.

Αυτή η μέθοδος εκκίνησης είναι η ιδανικότερη από όλες τις προηγούμενες μεθόδους.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3ο: ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΤΟΥ ΙΣΟΔΥΝΑΜΟΥ ΚΥΚΛΩΜΑΤΟΣ ΤΡΙΦΑΣΙΚΟΥ ΑΣΥΓΧΡΟΝΟΥ ΚΙΝΗΤΗΡΑ.

3.1 Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο αναλύεται το βασικό θεωρητικό υπόβαθρο των δοκίμων που θα εκτελέσουμε στη τριφασική μηχανή. Παρουσιάζεται μια περιληπτική αναφορά των βασικών μαθηματικών εξισώσεων για το ισοδύναμο κύκλωμα.

3.2 Τεχνικά Χαρακτηριστικά του Κινητήρα



Εικόνα 3.1: Η πινακίδα του κινητήρα

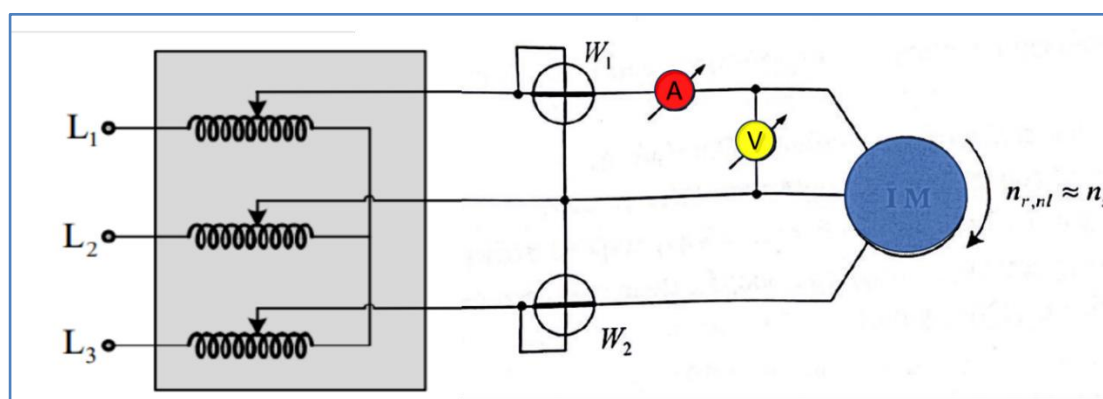
Ο εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε είναι:

1. Τριφασικός ασύγχρονος κινητήρας βραχυκυκλωμένου δρομέα:
 - ✚ Ονομαστική ισχύ $P=1,1$ KW.
 - ✚ Σύγχρονη ταχύτητα $n_s = 3000$ rpm (2 πόλοι).
 - ✚ Ονομαστική τάση 230-400 V.
 - ✚ Ονομαστικό ρεύμα 1,55-1 A.
2. Βολτόμετρο

3. Αμπερόμετρο
4. Δύο Βατόμετρα

3.3 Πειραματικό Μέρος

Ο σκοπός του πειραματικού μέρους είναι ο προσδιορισμός των παραμέτρων του ισοδύναμου κυκλώματος κινητήρα επαγωγής και η χάραξη της χαρακτηριστικής ροπής – στροφών (ολίσθησης) μέσω των δοκιμών ανοιχτού κυκλώματος (κενού φορτίου) και ακινητοποιημένου δρομέα. Η πειραματική διάταξη παρουσιάζεται στην Εικόνα 3.2.



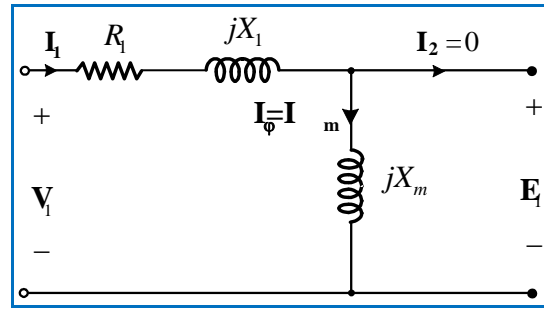
Εικόνα 3.2: Συνδεσμολογία για δοκιμή κενού φορτίου ($n_r = n_s$) και ακινητοποιημένου δρομέα ($n_{br} = 0$).

Για εν κενώ λειτουργία ισχύει η σχέση της ισχύος:

$$P_{nl} = P_{w,c} + 3I_{1,nl}^2 R_1 = P_{w,c} + P_{Cu,s} \quad (3.1)$$

Όπου P_{nl} είναι η συνολική τριφασική ισχύ εισόδου, $P_{w,c}$ είναι οι μηχανικές απώλειες και οι απώλειες πυρήνα, και $P_{Cu,s}$ οι απώλειες χαλκού στα τυλίγματα του στάτη.

Κατά τη δοκιμή κενού φορτίου, η ταχύτητα περιστροφής του δρομέα είναι πολύ κοντά στη σύγχρονη ταχύτητα, δηλαδή με αρκετά καλή προσέγγιση μπορούμε να αμελήσουμε τον ισοδύναμο ανηγμένο κλάδο του τυλίγματος του δρομέα και το απλοποιημένο ισοδύναμο κύκλωμα, παίρνει τη μορφή της Εικόνας 3.3.



Εικόνα 3.3: Απλοποιημένο ισοδύναμο κύκλωμα κατά τη δοκιμή κενού φορτίου

Οι απώλειες περιστροφής κενού φορτίου, οι οποίες περιλαμβάνουν τις μηχανικές απώλειες τριβών και ανεμισμού, καθώς και τις απώλειες μαγνητικής υστέρησης και δινορρευμάτων του πυρήνα του σιδηρομαγνητικού κυκλώματος, θεωρούνται σταθερές και ανεξάρτητες της ταχύτητας περιστροφής. Κατά τη δοκιμή κενού φορτίου, λόγω της σχεδόν μηδενικής ολίσθησης, οι απώλειες χαλκού του δρομέα με αρκετά καλή προσέγγιση αμελούνται. Δεν μπορεί όμως να γίνει το ίδιο και με τις απώλειες χαλκού του τυλίγματος του στάτη, εφόσον σε αντίθεση με το μετασχηματιστή, λόγω της ύπαρξης του διακένου και της παρεμβαλλόμενης μαγνητικής αντίστασης, το ρεύμα στην εν κενώ λειτουργία το οποίο είναι συγχρόνως και το ρεύμα διέγερσης του κινητήρα, αποτελεί σημαντικό ποσοστό του ονομαστικού ρεύματος. Σύμφωνα λοιπόν με τα παραπάνω και με βάση της εικόνας 3.5, ισχύει ότι

$$P_{w,c} = P_{nl} - 3I_{1,nl}^2 R_1 \quad (3.2)$$

Όπου P_{nl} , οι απώλειες κενού φορτίου όπως προκύπτουν από το άθροισμα των ενδείξεων των δύο βατομέτρων. Δηλαδή

$$P_{nl} = P_{W_1} + P_{W_2} \quad (3.3)$$

Η συνολική αντίδραση κενού φορτίου είναι

$$X_{nl} = X_1 + X_m \quad (3.4)$$

$$X_{nl} = \sqrt{Z_{nl}^2 - R_{nl}^2} \quad (3.5)$$

$$Z_{nl} = \frac{V_{nl}}{\sqrt{3} I_{nl}} \quad (3.6)$$

$$R_{nl} = \frac{P_{nl}}{3 I_{nl}^2} \quad (3.7)$$

Όπου:

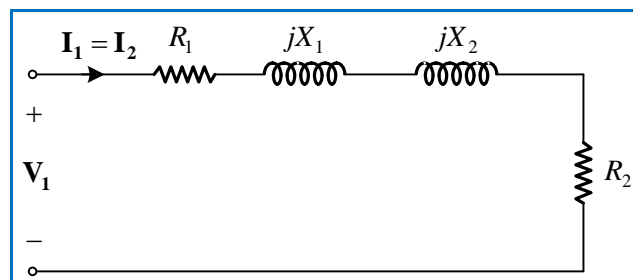
V_{nl} = ένδειξη του βολτομέτρου στη συνδεσμολογία της εικόνας 3.2 (V)

I_{nl} = ένδειξη του αμπερομέτρου στη συνδεσμολογία της εικόνας 3.2 (A)

P_{nl} = άθροισμα ενδείξεων των βατομέτρων στη συνδεσμολογία της εικόνας 3.2 (W)

Ανάλογα με τη δοκιμή βραχυκύκλωσης του μετασχηματιστή, από τη δοκιμή ακινητοποιημένου δρομέα, λαμβάνουμε πληροφορίες για τις αντιδράσεις σκέδασης των τυλιγμάτων στάτη και δρομέα. Κατά τη διάρκεια της δοκιμής αυτής, ακινητοποιούμε (μπλοκάρουμε) το δρομέα, έτσι ώστε να μη μπορεί να περιστραφεί και εφαρμόζουμε τάση στα τυλίγματα του στάτη. Η δοκιμή αυτή πρέπει να γίνεται σε τέτοιες συνθήκες, ώστε τα ρεύματα και η συχνότητα του δρομέα να είναι περίπου ίδια με εκείνα της κανονικής λειτουργίας. Οι διεθνείς κανονισμοί, προτείνουν μια συχνότητα της τάσης τροφοδοσίας, ίση με το 1/4 της ονομαστικής. Επίσης, αν η ισχύς της μηχανής είναι κάτω των 25 Hp, η δοκιμή μπορεί να γίνει χωρίς σημαντικό σφάλμα στην ονομαστική συχνότητα. Κατά τη διάρκεια της δοκιμής αυτής, το μέγεθος της τάσης τροφοδοσίας αυξάνεται προοδευτικά, μέχρι ο κινητήρας να απορροφά από το δίκτυο το ονομαστικό του ρεύμα.

Κατά τη δοκιμή ακινητοποιημένου δρομέα, η οποία γίνεται με μειωμένη τάση, το ρεύμα διέγερσης αποτελεί μικρό ποσοστό της αντίστοιχης τιμής του κατά την ονομαστική λειτουργία, με αποτέλεσμα (σε πλήρη αναλογία με τη δοκιμή βραχυκύκλωσης του μετασχηματιστή), ο παράλληλος κλάδος με αρκετά καλή προσέγγιση να αμεληθεί. Το ισοδύναμο κύκλωμα στην περίπτωση αυτή, παίρνει τη μορφή



Εικόνα 3.4: Απλοποιημένο ισοδύναμο κύκλωμα κατά δοκιμή ακινητοποιημένου δρομέα.

Με βάση την εικόνα 3.4, η συνολική επαγωγική αντίδραση κατά τη δοκιμή ακινητοποιημένου δρομέα, είναι ίση με το άθροισμα των αντιδράσεων σκέδασης των τυλιγμάτων στάτη και δρομέα. Δηλαδή

$$X_{br} = X_1 + X_2 \quad (3.8)$$

$$X_{br} = \sqrt{Z_{br}^2 - R_{br}^2} \quad (3.9)$$

$$Z_{br} = \frac{V_{br}}{\sqrt{3} I_{br}} \quad (3.10)$$

$$R_{br} = \frac{P_{br}}{3 I_{br}^2} \quad (3.11)$$

$$X_1 = X_2 = \frac{X_{br}}{2} \quad (3.12)$$

Στις συνηθισμένες μηχανές του εμπορίου (κλάσης A), ισχύει $X_1 = X_2$. Οπότε:

$$X_1 = X_2 = \frac{X_{br}}{2} \quad (3.13)$$

Γνωρίζοντας την αντίδραση σκέδασης X_1 , μπορούμε πλέον να υπολογίσουμε την αντίδραση μαγνήτισης X_m . Δηλαδή:

$$X_m = X_{nl} - X_1 \quad (3.14)$$

Η τιμή της ωμικής αντίστασης R_1 του τυλίγματος του δρομέα, υπολογίζεται με απ' ευθείας μέτρηση με συνεχές ρεύμα στα τυλίγματα του στάτη. Επομένως, η αντίστοιχη τιμή R_2 της ωμικής αντίστασης του τυλίγματος του δρομέα, υπολογίζεται σύμφωνα με τη σχέση

$$R_2 = R_{br} - R_1 \quad (3.15)$$

Μετά και τον υπολογισμό της ωμικής αντίστασης R_2 , έχουμε πλέον υπολογίσει όλα τα στοιχεία του ισοδύναμου κυκλώματος της ασύγχρονης μηχανής.

3.3.1 Υπολογιστικό Μέρος των Παραμέτρων του Ισοδύναμου Κυκλώματος

Τα αποτελέσματα των μετρήσεων αναφέρονται στους παρακάτω Πίνακες:

1. Δοκιμή κενού φορτίου

Πίνακας 1		
V_{nl} (V)	I_{nl} (A)	P_{nl} (W)
400	0,94	370

2. Δοκιμή ακινητοποιημένου δρομέα

Πίνακας 2		
V_{br} (V)	I_{br} (A)	P_{br} (W)
47	1,04	55

Από τη δοκιμή κενού φορτίου:

$$R_{nl} = \frac{P_{nl}}{3I_{nl}^2} = \frac{370}{3 \times 0,94^2} = 139,58\Omega$$

$$Z_{nl} = \frac{V_{nl}}{\sqrt{3} I_{nl}} = \frac{400}{\sqrt{3} \times 0,94} = 245,68\Omega$$

$$X_{nl} = \sqrt{Z_{nl}^2 - R_{nl}^2} = \sqrt{245,68^2 - 139,58^2} = 202,18\Omega$$

Από τη δοκιμή ακινητοποιημένου δρομέα:

$$Z_{br} = \frac{V_{br}}{\sqrt{3} I_{br}} = \frac{47}{\sqrt{3} \times 1,04} = 26,09\Omega$$

$$R_{br} = \frac{P_{br}}{3I_{br}^2} = \frac{55}{3 \times 1,04^2} = 16,95\Omega$$

$$X_{br} = \sqrt{Z_{br}^2 - R_{br}^2} = \sqrt{26,09^2 - 16,95^2} = 19,83\Omega$$

Οπότε

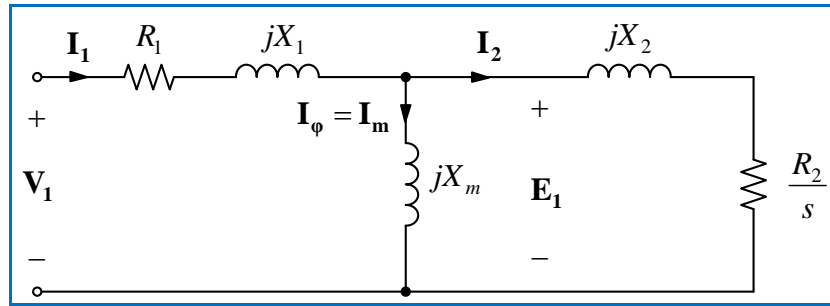
$$X_1 = X_2 = \frac{X_{br}}{2} = \frac{19,83}{2} = 9,92\Omega$$

$$X_m = X_{nl} - X_1 = 202,18 - 9,92 = 192,26 \Omega$$

$$R_2 = R_{br} - R_1 = 16,95 - 7,00 = 9,95 \Omega$$

Όπου R_1 είναι η ωμική αντίσταση μιας φάσης του τυλίγματος του στάτη και η τιμή της είναι 7Ω .

Το ισοδύναμο κύκλωμα του ασύγχρονου κινητήρα παίρνει τη μορφή



Εικόνα 3.5: Ισοδύναμο κύκλωμα μιας φάσης τριφασικού ασύγχρονου κινητήρα, όπου $R_1 = 7\Omega$, $jX_1 = jX_2 = j9,92\Omega$, $jX_m = j192,26\Omega$ και $R_2 = 9,95\Omega$

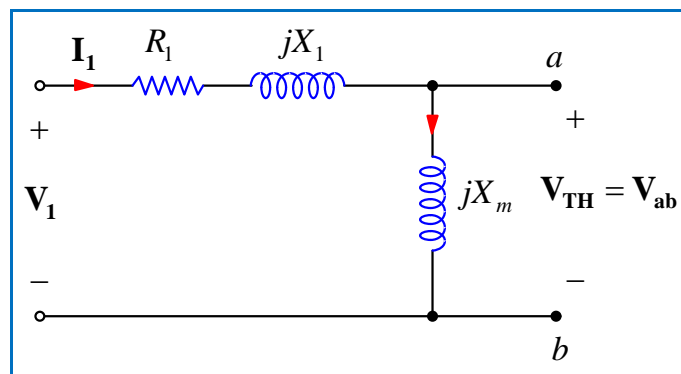
3.3.2 Υπολογισμός της Καμπύλης Ροπής – Στροφών (Ολίσθησης)

Μιας και η παραγόμενη ροπή είναι το αποτέλεσμα της αλληλεπίδρασης των κυμάτων της συνισταμένης μαγνητικής ροής διακένου και της Μ.Ε.Δ. του δρομέα, στην αναλυτική έκφραση της παραγόμενης εσωτερικής ροπής, υπεισέρχεται και το ρεύμα του ισοδύναμου ανηγμένου τυλίγματος του δρομέα στο στάτη.

$$T_{int} = \frac{3}{\omega_r} I_2^2 R_2 \left(\frac{1-s}{s} \right) = \frac{3}{\omega_s} I_2^2 \frac{R_2}{s} \quad (3.16)$$

Για τον πιο απλό υπολογισμό του ρεύματος αυτού, ως της τη διερεύνηση της χαρακτηριστικής ροπής-στροφών του ασύγχρονου κινητήρα, της εξυπηρετεί ο υπολογισμός του ισοδύναμου κατά Thevenin του απλοποιημένου μονοφασικού ισοδύναμου κυκλώματος της εικόνας 1.15, ως τις ακροδέκτες (α, β) του κλάδου της ισοδύναμης σύνθετης αντίστασης του τυλίγματος του δρομέα.

Η τάση V_{TH} (εικόνα 3.6) και η ισοδύναμη σύνθετη αντίσταση Z_{TH} (εικόνα 3.7), θα προκύψουν μετά την απομάκρυνση του κλάδου της σύνθετης αντίστασης του τυλίγματος του δρομέα, από το ισοδύναμο κύκλωμα της εικόνας 1.15.



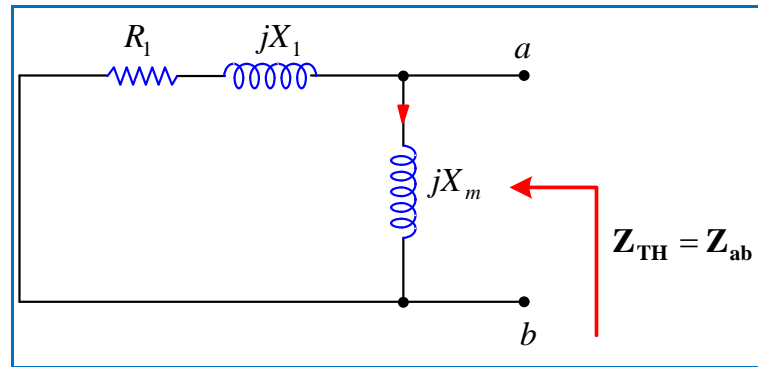
Εικόνα 3.6: Κύκλωμα για τον υπολογισμό της τάσης V_{TH} του ισοδύναμου κυκλώματος κατά Thevenin

Η τάση του ισοδύναμου κυκλώματος κατά Thevenin V_{TH} είναι:

$$V_{TH} = jX_m I_1 = jX_m \frac{V_1}{R_1 + j(X_1 + X_m)} = V_1 \frac{jX_m}{R_1 + jX_{11}} \quad (3.17)$$

Όπου:

$$X_{11} = X_1 + X_m \quad (3.18)$$



Εικόνα 3.7: Κύκλωμα για τον υπολογισμό της σύνθετης αντίστασης Z_{TH} του ισοδύναμου κυκλώματος κατά Thevenin

Η ισοδύναμη σύνθετη αντίσταση κατά Thevenin Z_{TH} , είναι:

$$Z_{TH} = R_{TH} + jX_{TH} = jX_m // (R_1 + jX_1) = \frac{jX_m (R_1 + jX_1)}{R_1 + jX_{11}} \quad (3.19)$$

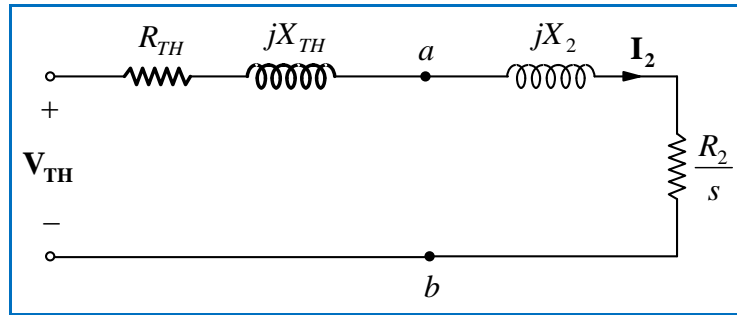
Επίσης, και:

$$R_{TH} = \frac{X_m^2 R_1}{R_1^2 + X_{11}^2} \quad (3.20)$$

και

$$X_{TH} = \frac{X_m (R_1^2 + X_1 X_{11})}{R_1^2 + X_{11}^2} \quad (3.21)$$

Το ισοδύναμο κατά Thevenin, του απλοποιημένου μονοφασικού ισοδύναμου κυκλώματος του τριφασικού ασύγχρονου κινητήρα, είναι:



Εικόνα 3.8: Ισοδύναμο κύκλωμα κατά Thevenin της μιας φάσης του τριφασικού ασύγχρονου κινητήρα

Με βάση λοιπόν τις παραπάνω σχέσεις, η εξίσωση της εσωτερικής παραγόμενης ροπής, παίρνει τη μορφή:

$$T_{int} = \frac{3}{\omega_s} \frac{V_{TH}^2 \left(\frac{R_2}{s} \right)}{\left(R_{TH} + \frac{R_2}{s} \right)^2 + (X_{TH} + X_2)^2} \quad (3.22)$$

Για λειτουργία κινητήρα, η έκφραση της μέγιστης ροπής ή ροπής ανατροπής, είναι:

$$T_{max} = \frac{3}{2\omega_s} \frac{V_{TH}^2}{R_{TH} + \sqrt{R_{TH}^2 + (X_{TH} + X_2)^2}} \quad (3.23)$$

Υπάρχει μια τιμή της ολίσθησης, $s = s_{maxT}$, για την οποία έχουμε τη μέγιστη ροπή και η οποία δίνεται από στη σχέση:

$$s_{maxT} = \pm \frac{R_2}{\sqrt{R_{TH}^2 + (X_{TH} + X_2)^2}} \quad (3.24)$$

Το θετικό πρόσημο αντιστοιχεί στην περίπτωση λειτουργίας κινητήρα, ενώ το αρνητικό πρόσημο στην περίπτωση λειτουργίας ως γεννήτρια.

Από τη παραπάνω σχέση, είναι προφανές ότι για σταθερή τάση και συχνότητα τροφοδοσίας, η μέγιστη ροπή είναι μια σταθερή ποσότητα. Επομένως, η ολίσθηση για την οποία έχουμε τη μέγιστη ροπή, είναι μια σταθερή ποσότητα εξαρτώμενη από τις εσωτερικές κατασκευαστικές παραμέτρους της μηχανής. Ο μόνος τρόπος με τον οποίο μπορούμε να επεμβούμε για να επηρεάσουμε την ολίσθηση για την οποία μεγιστοποιείται η παραγόμενη εσωτερική ροπή, είναι με την παρεμβολή εξωτερικής ωμικής αντίστασης σε σειρά με το τύλιγμα του δρομέα και αυτό, μόνο στην περίπτωση των κινητήρων τυλιγμένου δρομέα.

Η ροπή εκκίνησης, βρίσκεται από τη σχέση της εσωτερικής ή ηλεκτρομαγνητικής ροπής εάν θέσουμε όπου $s = 1$.

Επομένως:

$$T_{st} = \frac{3}{\omega_s} \frac{V_{TH}^2 R_2}{(R_{TH} + R_2)^2 + (X_{TH} + X_2)^2} \quad (3.25)$$

Σύμφωνα με τις παραπάνω σχέσεις και συγκεκριμένα (3.17), (3.18), (3.20), (3.21), (3.23), (3.24), (3.25) έγινε ο υπολογισμός του ισοδύναμου κυκλώματος Thevenin, της μέγιστης ροπής, της ολίσθησης μέγιστης ροπής και της ροπής εκκίνησης.

Για το υπολογισμό του ισοδύναμου κυκλώματος Thevenin ισχύει ότι:

$$V_{TH} = jX_m I_1 = jX_m \frac{V_1}{R_1 + j(X_1 + X_m)} = V_1 \frac{jX_m}{R_1 + jX_{11}} = \frac{400}{\sqrt{3}} \times \frac{j192,26}{7 + j(9,92 + 202,18)} = 208,37 \angle 1,89^\circ V$$

$$X_{11} = X_1 + X_m = 9,92 + 192,26 = 202,18 \Omega$$

$$R_{TH} = \frac{X_m^2 R_1}{R_1^2 + X_{11}^2} = \frac{192,26^2 \times 7}{7^2 + 202,18^2} = 6,32 \Omega$$

$$X_{TH} = \frac{X_m (R_1^2 + X_1 X_{11})}{R_1^2 + X_{11}^2} = \frac{192,26(7^2 + 9,92 \times 202,18)}{7^2 + 202,18^2} = 9,65 \Omega$$

Η μέγιστη ροπή, είναι:

$$T_{max} = \frac{3}{2\omega_s} \frac{V_{TH}^2}{R_{TH} + \sqrt{R_{TH}^2 + (X_{TH} + X_2)^2}} = \frac{3}{2 \times 314,16} \times \frac{208,37^2}{6,32 + \sqrt{6,32^2 + (9,65 + 9,92)^2}} = 7,71 Nm$$

Όπου η σύγχρονη ταχύτητα περιστροφής, είναι:

$$\omega_s = \frac{2\pi n_s}{60} = \frac{2\pi \times 3000}{60} = 314,16 \frac{rad}{s}$$

Η ολίσθηση που αντιστοιχεί στη μέγιστη ροπή και η ολίσθηση στις ονομαστικές στροφές είναι αντίστοιχα:

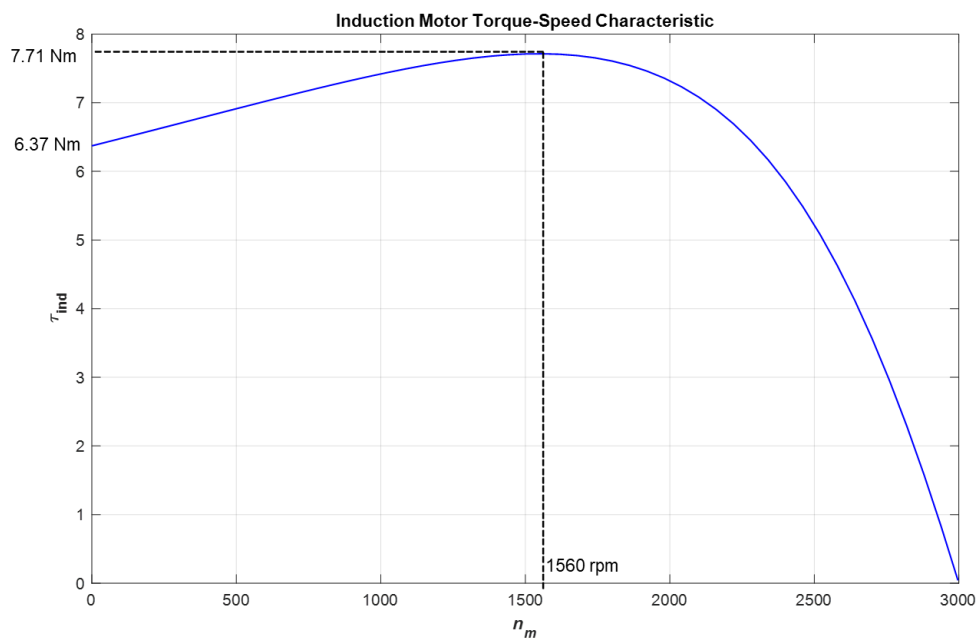
$$s_{maxT} = \frac{R_2}{\sqrt{R_{TH}^2 + (X_{TH} + X_2)^2}} = \frac{9,95}{\sqrt{6,32^2 + (9,65 + 9,92)^2}} = 0,48$$

$$s = \frac{n_s - n_r}{n_s} = \frac{3000 - 2860}{3000} = 0,047 \quad \text{ή} \quad 4,7\%$$

Η ροπή εκκίνησης, είναι:

$$T_{st} = \frac{3}{\omega_s} \frac{V_{TH}^2 R_2}{(R_{TH} + R_2)^2 + (X_{TH} + X_2)^2} = \frac{3}{314,16} \times \frac{208,37^2 \times 9,95}{(6,32 + 9,95)^2 + (9,65 + 9,92)^2} = 6,37Nm$$

Η γραφική παράσταση της ροπής – στροφών (ολίσθησης) παρουσιάζεται στην εικόνα 3.9.



Εικόνα 3.9: Χαρακτηριστική ροπής – στροφών (ολίσθησης) $T=f(n_s)$

Οι στροφές του κινητήρα κατά τη μέγιστη ροπή ή την ροπή ανατροπής είναι:
 $n_{max,\tau}=1560 rpm$.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4ο: ΑΣΥΜΜΕΤΡΗ ΤΑΣΗ ΤΡΟΦΟΔΟΣΙΑΣ ΑΣΥΓΧΡΟΝΟΥ ΤΡΙΦΑΣΙΚΟΥ ΚΙΝΗΤΗΡΑ

4.1 Εισαγωγή

Η ασύμμετρη τάση είναι ένα σύνηθες φαινόμενο στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας και προέρχεται από την ασύμμετρη τριφασική τάση τροφοδοσίας των διαφόρων εγκαταστάσεων ηλεκτρικής ενέργειας. Είναι ένα σοβαρό μειονέκτημα, το οποίο εμποδίζει στη κανονική λειτουργία των βιομηχανικών εγκαταστάσεων ηλεκτρικής ενέργειας και μπορεί να οδηγήσει σε ανεπανόρθωτες βλάβες του ηλεκτρικού εξοπλισμού, όπου οι ηλεκτρικές μηχανές αποτελούν το βασικό μέρος.

Η ασύμμετρη τάση τροφοδοσίας μπορεί να προκληθεί στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας ως:

- ✚ από την ανομοιόμορφη κατανομή των μονοφασικών φορτίων,
- ✚ από την ξαφνική διακοπή ενός ή μερικών φορτίων.

Σε αυτό το κεφάλαιο αναλύεται η συμπεριφορά του τριφασικού κινητήρα επαγωγής κατά την ασύμμετρη τάση τροφοδοσίας.

4.2 Τύποι της Τριφασικής Ασύμμετρης Τάσης Τροφοδοσίας

Οι τύποι της ασύμμετρης τάσης τροφοδοσίας οποιασδήποτε τριφασικής ηλεκτρικής μηχανής χωρίζονται σε δύο κατηγορίες:

- ✚ Δεν είναι ίσες οι τιμές των τάσεων του τριφασικού συστήματος τροφοδοσίας, και
- ✚ Δεν είναι ίσες οι τιμές των διαφορών των φάσεων (δεν είναι ίσες οι γωνίες μεταξύ των τριών τάσεων τροφοδοσίας).

Η ασύμμετρη τάση τροφοδοσίας μπορεί να εμφανιστεί σε κάθε περίπτωση ξεχωριστά ή και στις δύο μαζί.

4.3 Επιπτώσεις της Ασύμμετρης Τάσης Τροφοδοσίας στους Τριφασικούς Κινητήρες Επαγωγής

Οι επιπτώσεις της ασύμμετρης τάσης τροφοδοσίας στους τριφασικούς κινητήρες επαγωγής αναφέρονται παρακάτω:

- ✚ Μειωμένη ροπή στρέψης
- ✚ Μειωμένη απόδοση

- ✚ Υπερθέρμανση
- ✚ Αύξηση των κραδασμών και του θορύβου

Η ασυμμετρία της τάσης τροφοδοσίας δημιουργεί αλλαγή των τιμών των μεγεθών του μαγνητικού πεδίου στο διάκενο του κινητήρα, με αποτέλεσμα της μείωσης της ροπής στρέψης. Η μείωση της ροπής στρέψης είναι πιο εμφανής στη περίπτωση που το φορτίο στον άξονα του κινητήρα είναι μικρό και λιγότερο εμφανής όταν ο κινητήρας λειτουργεί υπό πλήρες φορτίο.

Επίσης, γίνεται και η μείωση του βαθμού απόδοσης του κινητήρα, η οποία είναι πιο αισθητή υπό πλήρες φορτίο του κινητήρα και λιγότερο αισθητή στη περίπτωση μικρού φορτίου.

Παρατηρείται και η αύξηση της θερμοκρασίας στα τυλίγματα του στάτη με αποτέλεσμα υπερθέρμανσης του κινητήρα που μειώνει τη διάρκεια της κανονικής του λειτουργίας. Στη περίπτωση που ο κινητήρας είναι υπό πλήρες φορτίο και συνεχίζει να περιστρέφεται θα καταπονηθεί πολύ έως ότου θα καταστραφεί το τύλιγμα του στάτη.

Οι άνισες Μ.Ε.Δ. προκαλούν τους κραδασμούς του άξονα του κινητήρα, οι οποίες συνοδεύονται με την εμφάνιση του θορύβου με αποτέλεσμα δημιουργίας μηχανικής βλάβης στο κινητήρα. Δηλαδή, μπορεί να καταστραφούν ή τα ρουλεμάν του κινητήρα ή ακόμα και οι φωλιές που τοποθετούνται τα ρουλεμάν, οι οποίες βρίσκονται στα καπάκια μπροστά και πίσω του κινητήρα. Επίσης αυτή η βλάβη μπορεί να μεταδοθεί και σε άλλο εξοπλισμό που είναι συνδεδεμένο με τον άξονα του κινητήρα, όπως για παράδειγμα κάποια αντλία.

Για να προστατευθεί ο κινητήρας από τις συνέπειες της ασύμμετρης τάσης τροφοδοσίας χρησιμοποιούνται διάφορες τεχνικές, μέσω των οποίων η τάση τροφοδοσίας κρατιέται συμμετρική και σταθερή.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο: ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΑΣΥΓΧΡΟΝΟΥ ΤΡΙΦΑΣΙΚΟΥ ΚΙΝΗΤΗΡΑ ΜΕ ΧΡΗΣΗ MATLAB-SIMULINK.

5.1 Εισαγωγή

Το SIMULINK είναι μια επέκταση της MATLAB που δίνει εμφάνιση στις ηλεκτρομηχανολογικές εφαρμογές, όπως το παράδειγμα της τριφασικής ασύγχρονης μηχανής. Η MATLAB είναι μια γλώσσα προγραμματισμού που βασίζεται στη γραμμική άλγεβρα και ιδιαίτερα το φορμαλισμό με μήτρες. Σε αντίθεση με τις συνήθεις γλώσσες προγραμματισμού, η επίλυση του συστήματος στο SIMULINK γίνεται με την σύνδεση συγκεκριμένου πακέτου με τις παραμέτρους να δίνονται από το χρήστη.

Η προσομοίωση με Matlab του Τριφασικό Κινητήρα Επαγωγής πραγματοποιείται σε δυο λειτουργικές καταστάσεις:

- ✚ Υπό τις συνθήκες ονομαστικής (συμμετρικής) τάσης.
- ✚ Υπό τις συνθήκες ασύμμετρης τάση τροφοδοσίας.

5.2 Υλοποίηση SIMULINK

5.2.1 Υπό τις Συνθήκες Ονομαστικής (συμμετρικής) Τάσης Τροφοδοσίας.

Στον έλεγχο του ανάλογου συστήματος στο SIMULINK για τη περίπτωση ονομαστικής τάσης τροφοδοσίας, διενεργείται μέτρηση των απωλειών περιστροφής του κινητήρα. Ο προσδιορισμός των παραμέτρων γίνεται με βάση το πείραμα: χρησιμοποιείται ένα μπλοκ κινητήρα του οποίου οι ηλεκτρικές παράμετροι (όπως η ονομαστική τάση και οι παράμετροι ισοδύναμου κυκλώματος) και οι μηχανικές παράμετροι (όπως η αδράνεια και ο αριθμός πόλων), αντικατοπτρίζουν τις αντίστοιχες με αυτές του κινητήρα του εργαστηρίου.

Σε αυτή τη δοκιμή, μια (ίση με την ονομαστική) εναλλασσόμενη τάση με (ίση με την ονομαστική) συχνότητα εφαρμόζεται στον στάτη, ενώ ο κινητήρας λειτουργεί υπό ονομαστική τάση τροφοδοσίας. Η ισχύς, η τάση και το ρεύμα μετρούνται σε αυτή την κατάσταση. Παρόμοια με την πειραματική εγκατάσταση, στο SIMULINK, μια τριφασική πηγή εναλλασσόμενης ελεγχόμενης τάσης εφαρμόζεται συνδεδεμένη στις δύο φάσεις (φάσεις A και B) του κινητήρα. Η τάση DC ή AC είναι συνδεδεμένη με ένα διαμορφωτή παλμού. Η επαγόμενη απώλεια του στατη είναι διπλάσια της πραγματικής τιμής κατά τη προσομοίωση της διεργασίας μεταξύ του στατη και του δρομέα.

Οι παράμετροι του ισοδύναμου κυκλώματος που λαμβάνονται από τα πειραματικά δεδομένα και ο αριθμός των πόλων, καθορίζονται χρησιμοποιώντας το πλαίσιο διαλόγου του μπλοκ «κινητήρα» στο SIMULINK.

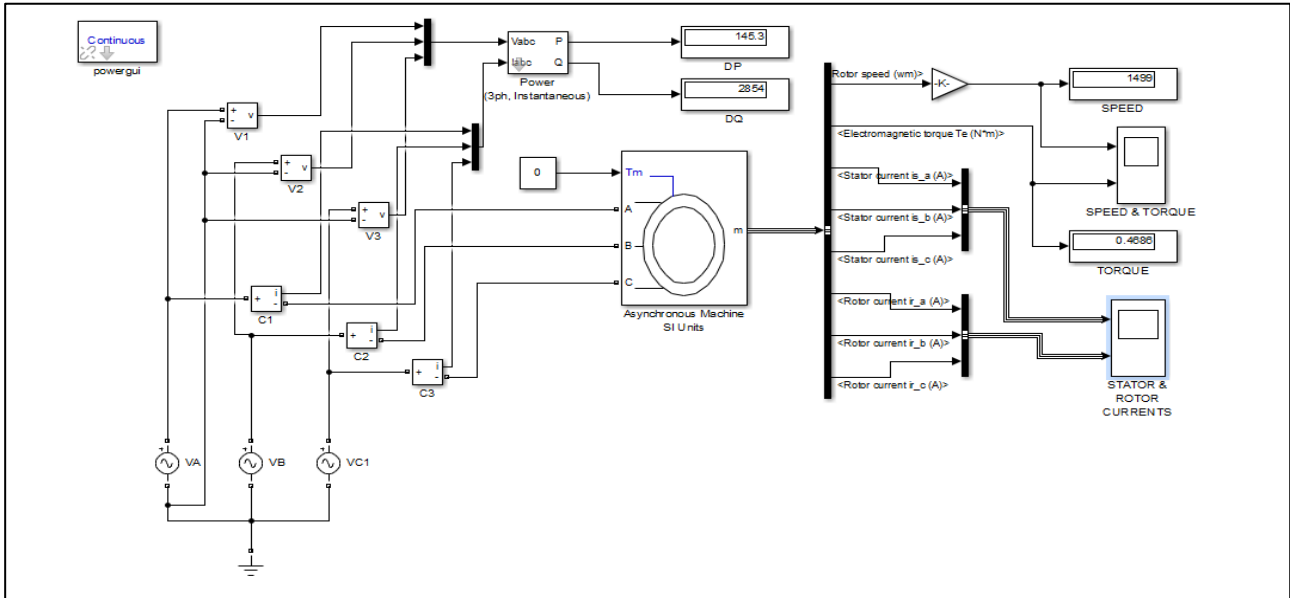
Στην Εικόνα 5.1 απεικονίζεται το μοντέλο προσομοίωσης με τα μπλοκ που έχουν επιλεχθεί. Συγκεκριμένα, ελεγχόμενες πηγές εναλλασσόμενης τάσης, ασύγχρονη μηχανή, μπλοκ μέτρησης πολικών τάσεων στην είσοδο του κινητήρα, μπλοκ ψηφιακών σημάτων για την υλοποίηση του ελέγχου των πηγών τροφοδοσίας.

A.M. MODEL: 5.4 HP (4KW) 400V 50HZ 1430 RPM

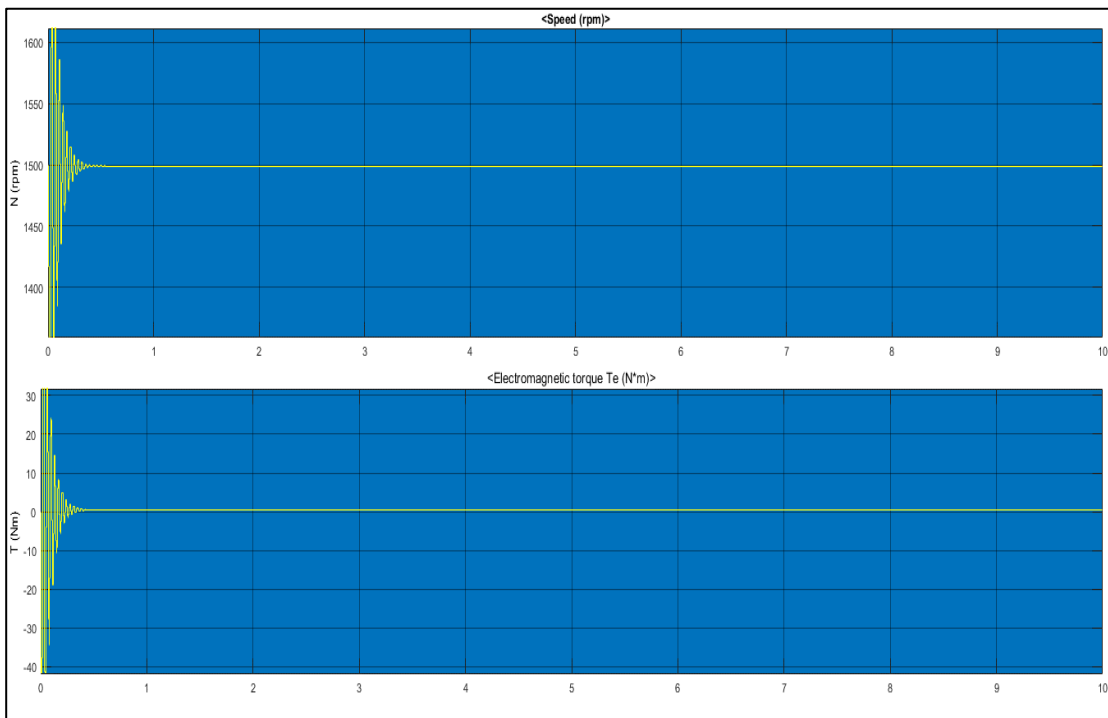
Vrms: 400V

Vmax: 326.54V

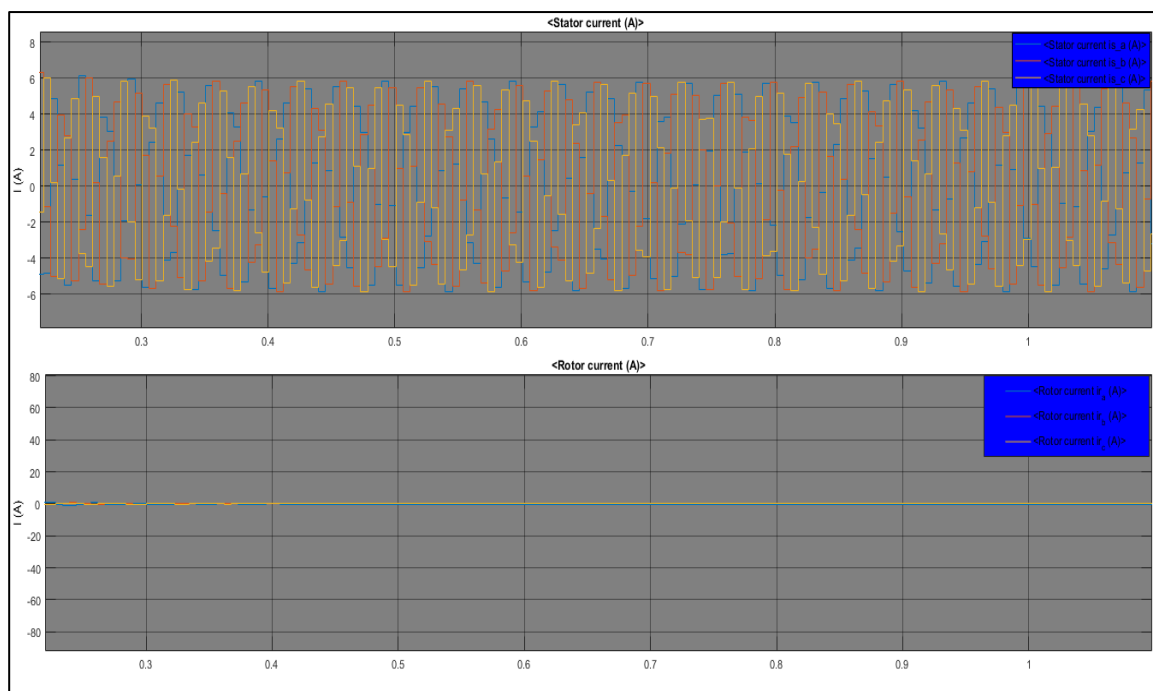
VC2: 120V



Εικόνα 5.1: Μοντέλο προσομοίωσης ασύγχρονου κινητήρα με ονομαστική τάση τροφοδοσίας



Εικόνα 5.2: Κυματομορφές στροφών και ηλεκτρομαγνητικής ροπής με ονομαστική τάση τροφοδοσίας



Εικόνα 5.3: Κυματομορφή ρεύματος του δρομέα και του στάτη με ονομαστική τάση τροφοδοσίας

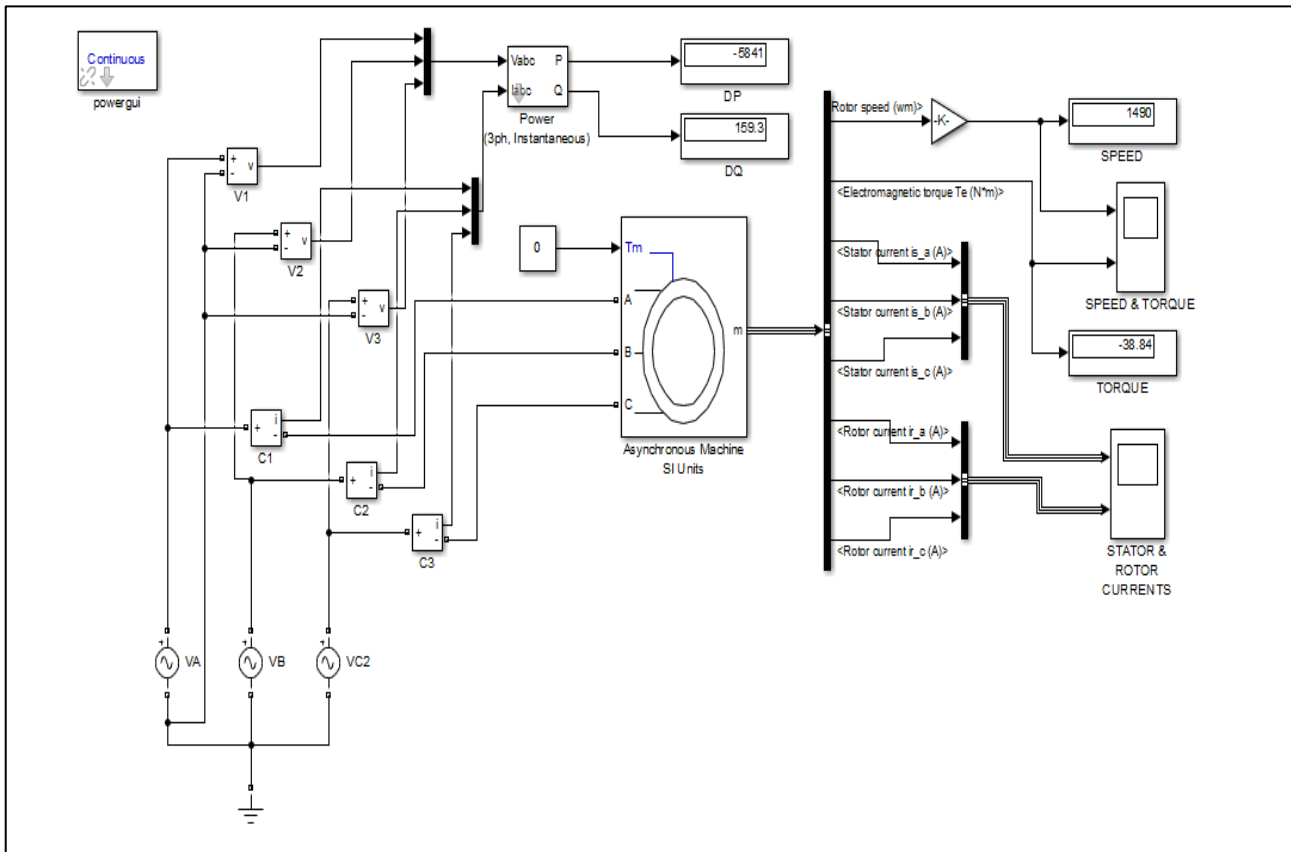
Στην Εικόνα 5.3 απεικονίζονται οι κυματομορφές του ρεύματος του στάτη και του δρομέα. Οι κυματομορφές λαμβάνονται υπό το πρίσμα του σταθερού συστήματος αναφοράς (α - β). Οπότε, η ημιτονοειδής μορφή του ρεύματος του στάτη είναι δικαιολογημένη.

5.3.2 Υπό τις Συνθήκες Ασύμμετρης Τάσης Τροφοδοσίας

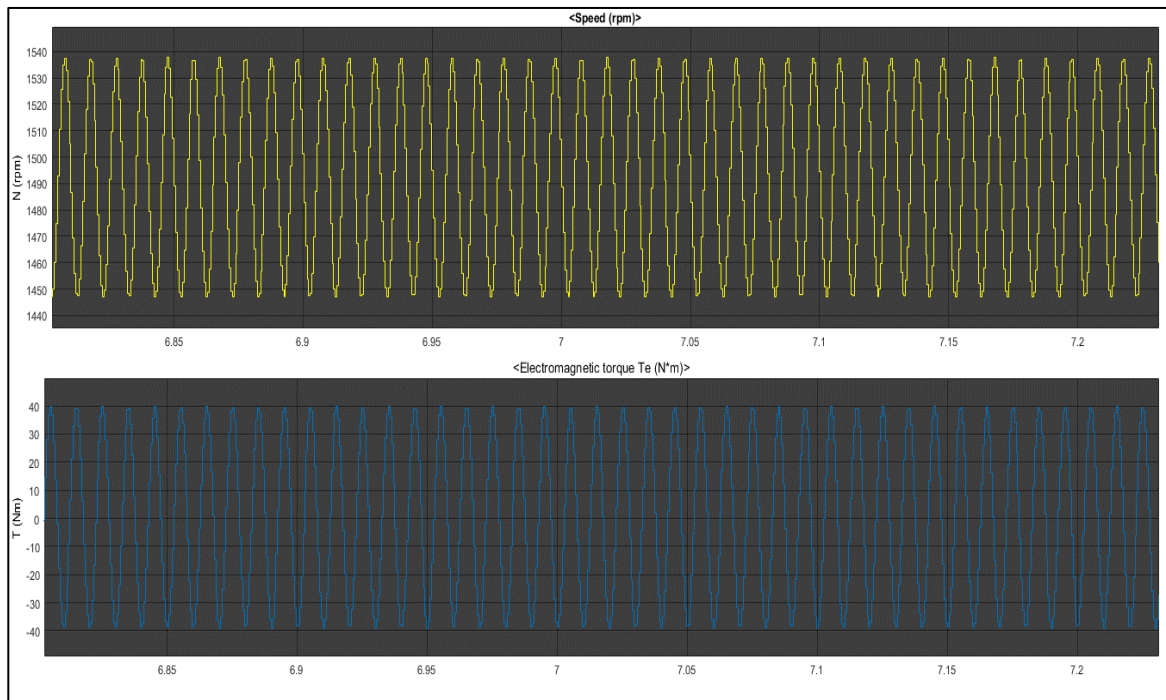
Στην παρούσα ενότητα, έχει τεθεί ως στόχος η μελέτη της συμπεριφοράς ενός τριφασικού κινητήρα επαγωγής υπό συνθήκες ασύμμετρης τάσης τροφοδοσίας. Η ασύμμετρη τάση τροφοδοσίας αναδεικνύεται ως κρίσιμος παράγοντας που επηρεάζει τη συνολική απόδοση και συμπεριφορά του κινητήρα. Καθώς μέσα από κάθε φάση μεταφέρεται διαφορετική ισχύ με αποτέλεσμα να επηρεάζεται δραστικά τόσο η ροπή όσο και οι στροφές στην έξοδο της επαγωγικής μηχανής.

Για την επίτευξη των στόχων της εργασίας, θα προβούμε σε λεπτομερή προσομοίωση του τριφασικού κινητήρα. Κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης, θα εφαρμόσουμε ασύμμετρες τάσεις τροφοδοσίας προκειμένου να μελετήσουμε τις αντιδράσεις του κινητήρα σε αυτές τις συνθήκες.

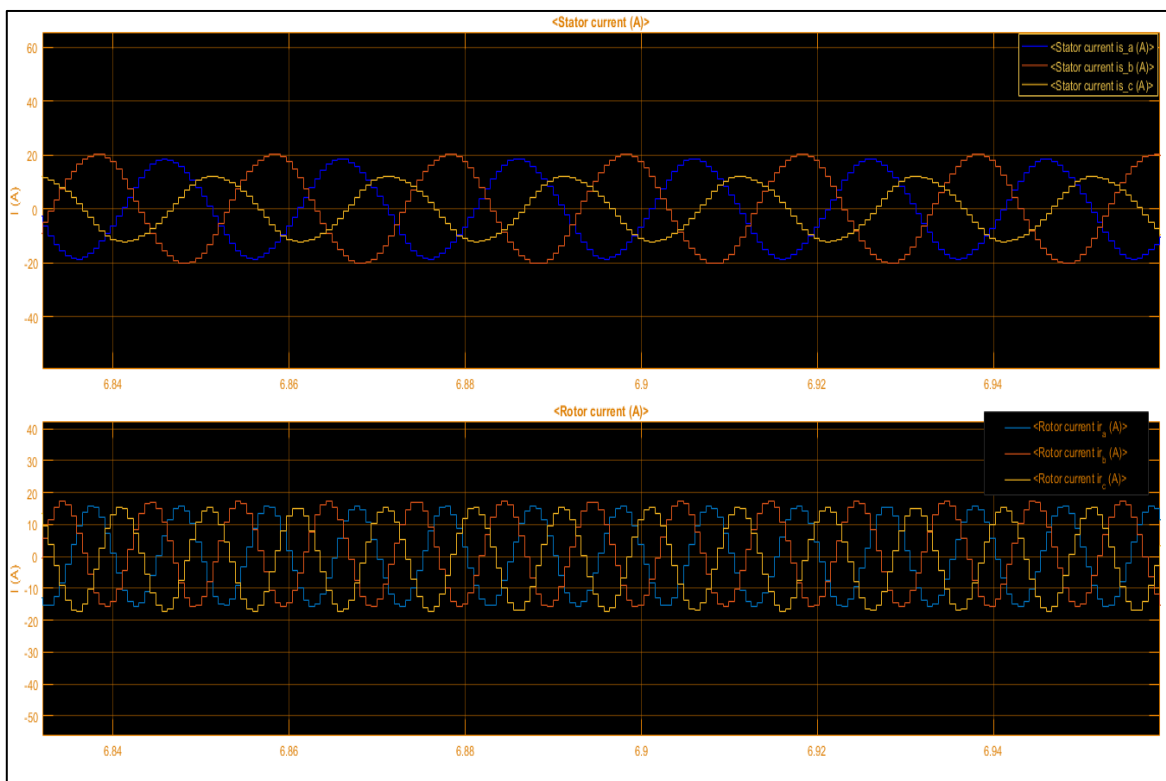
Μέσω αναλυτικών παρατηρήσεων και προσομοιώσεων, θα αξιολογηθεί η επίδραση των ασύμμετρων τάσεων τροφοδοσίας στην λειτουργία του κινητήρα. Τα αποτελέσματα αυτά θα παρέχουν πολύτιμες πληροφορίες για την κατανόηση των δυναμικών παραμέτρων του τριφασικού κινητήρα κάτω από ασύμμετρες συνθήκες τροφοδοσίας.



Εικόνα 5.4: Μοντέλο προσομοίωσης ασύγχρονου κινητήρα με ασύμμετρη τάση τροφοδοσίας



Εικόνα 5.5: Κυματομορφές στροφών και ηλεκτρομαγνητικής ροπής με ασύμμετρη τάση τροφοδοσίας



Εικόνα 5.6: Κυματομορφή ρεύματος του δρομέα και του στάτη με ασύμμετρη τάση τροφοδοσίας

5.4 Συμπεράσματα Προσομοίωσης

Η προσομοίωση παρουσιάζει ικανοποιητική απόκριση όσον αφορά τα χαρακτηριστικά των κυματομορφών ροπής, ρεύματος και ταχύτητας. Παρόλα αυτά, οι κυματομορφές περιέχουν σημαντικό ποσοστό κυμάτωσης. Αυτό είναι σε ένα βαθμό αναμενόμενο, λόγω της παλμικής τάσης τροφοδοσίας του κινητήρα.

Με τις δοκιμές σκοπεύαμε να αναδείξουμε τις δυνατότητες του προγράμματος MATLAB/SIMULINK στην προσομοίωση δυναμικών συστημάτων. Από την άλλη, τα αποτελέσματα δείχνουν ότι το MATLAB/SIMULINK είναι ένας αξιόπιστος και εξελιγμένος τρόπος ανάλυσης και πρόβλεψης της συμπεριφοράς των επαγωγικών κινητήρων χρησιμοποιώντας τη θεωρία των πλαισίων αναφοράς.

Επιπλέον βλέπουμε πως η ασύμμετρη τάση τροφοδοσίας οδηγεί σε μικρότερη μέση τιμή ρεύματος, αλλά μεγαλύτερης κυμάτωσης, μικρότερη ροπή, ενεργή ισχύ και μικρότερο συντελεστή ισχύος. Σε αντίθεση με την συμμετρική τάση τροφοδοσίας που οδηγεί σε μεγαλύτερη μέση τιμή ρεύματος, ροπής, ενεργής ισχύος και μεγαλύτερο συντελεστή ισχύος.

Τελικά, συμπεραίνουμε πως η ασύμμετρη τάση τροφοδοσίας μπορεί να οδηγήσει σε υπερθέρμανση του κινητήρα και να βλάψει τον κινητήρα μακροπρόθεσμα.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Μαλατέστας Β. Π., Ηλεκτρικές Μηχανές, 3η Έκδοση, , Εκδόσεις Τζιόλα, 2015.
2. Βυλλιώτης Η., Ηλεκτρικές Μηχανές II, Εργαστηριακές Σημειώσεις, ΠΑΔΑ, 2022 - 2023
3. Μαλατέστας Β. Π., Βυλλιώτης Αθ. Η., Εργαστηριακές Ασκήσεις Ηλεκτρικής Κίνησης, Εκδόσεις Τζιόλα, 2005.
4. Παπαδόπουλος Ε, Ηλεκτρομηχανικά Συστήματα Μετατροπής Ενέργειας, Εκδόσεις Ε.Μ.Π., 1999.
5. Τεγόπουλος Ι. Α., Ηλεκτρικές Μηχανές, Μέρος Α΄, Β΄, Εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα, 1986.
6. Charman J.S., Ηλεκτρικές Μηχανές AC-DC, 3η Έκδοση, Εκδόσεις Τζιόλα, 2003.
7. Συγγερίδου Ο., Διερεύνηση Μεθόδων Διάγνωσης των Ηλεκτρικών Σφαλμάτων στους Κινητήρες Επαγωγής, Διδακτορική Διατριβή, ΕΜΠ, Αθήνα, 2010.