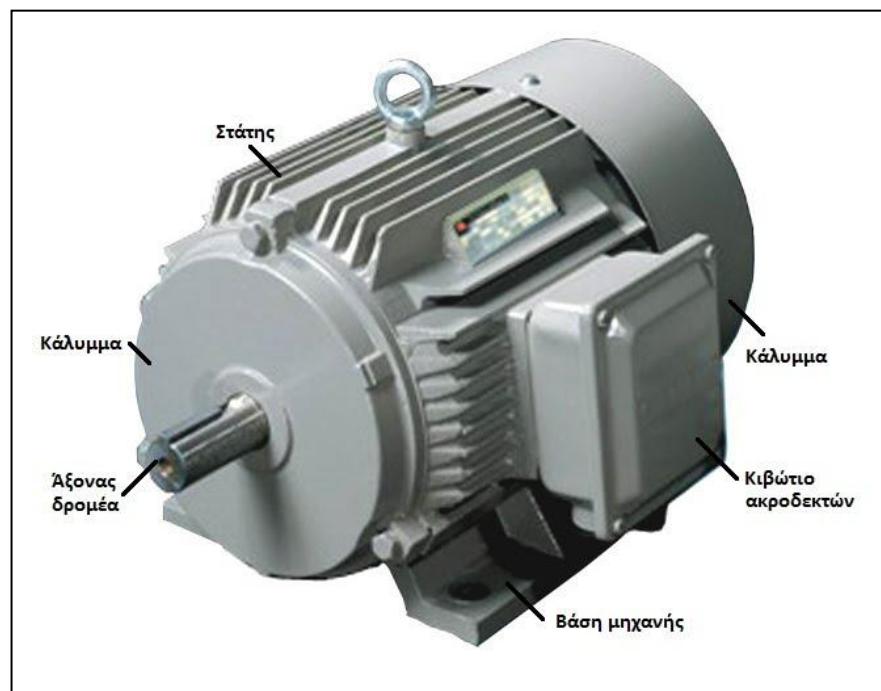


Διπλωματική Εργασία

Μελέτη κινητήρων συνεχούς ρεύματος



Φοιτητής: Δούλος Γεώργιος
ΑΜ: 48345486

Επιβλέπων Καθηγητής

Πέτρος Καραϊσάς
Αναπληρωτής καθηγητής

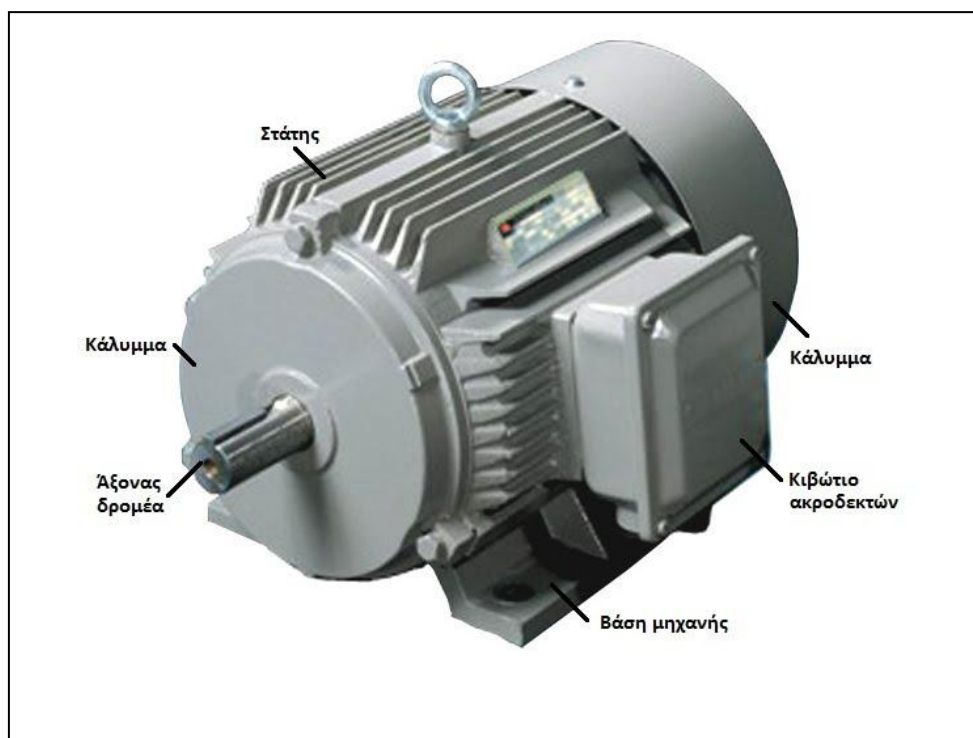
ΑΘΗΝΑ-ΑΙΓΑΛΕΩ, Οκτώβριος 2021



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

Diploma Thesis

Study of dc motors



Student: Doulos George
Registration Number: 48345486

Supervisor

Karaisas Petros
Associate Professor

ATHENS-EGALEO, October 2021

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

ΚΑΡΑΙΣΑΣ ΠΕΤΡΟΣ ΑΝΑΠΛΗΡΩΤΗΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ	ΚΑΛΚΑΝΗΣ ΚΩΣΤΑΣ ΕΠΙΚΟΥΡΟΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ	ΣΥΓΓΕΡΙΔΟΥ ΟΛΥΜΠΙΑΔΑ ΛΕΚΤΟΡΑΣ
(Υπογραφή)	(Υπογραφή)	(Υπογραφή)

Copyright © Δούλος Γεώργιος 2021

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον/την 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 Γεώργιος Δούλος του Ιωάννη, με αριθμό μητρώου 48345486 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 καθηγητή»

Ο Δηλών
Δούλος Γεώργιος

(Υπογραφή φοιτητή)

Η αφιέρωση της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας στην μνήμη της πολυαγαπημένης μου γιαγιάς, αποτελεί το ελάχιστο ευχαριστώ απέναντι στην υποστήριξη της καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η εκπόνηση της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας θα ήταν αδύνατη, δίχως το ενδιαφέρον και την καθοδήγηση του αναπληρωτή καθηγητή του τμήματος ηλεκτρολόγων και ηλεκτρονικών μηχανικών κ. Πέτρου Καραϊσά. Τον ευχαριστώ εκ βάθους για τις χρήσιμες συμβουλές και παρατηρήσεις του, οι οποίες ήταν καθοριστικές για την υλοποίηση της παρούσας εργασίας.

Περίληψη

Η παρούσα εργασία με τίτλο «Μελέτη κινητήρων συνεχούς ρεύματος» έχει εκπονηθεί από τον Δούλο Γεώργιο (Α.Μ 48345486) στο πλαίσιο του προγράμματος προπτυχιακών σπουδών, του τμήματος Ηλεκτρολόγων και Ηλεκτρονικών Μηχανικών της Σχολής Μηχανικών του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής. Κύριος στόχος της διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη των κινητήρων συνεχούς ρεύματος και πιο συγκεκριμένα η προσομοίωση ενός κινητήρα ξένης διέγερσης με την βοήθεια του λογισμικού Matlab/Simulink.

Στη συνέχεια μέσω του λογισμικού αυτού και με την βοήθεια της χαρακτηριστικής φορτίου του κινητήρα, θα μελετηθεί ο έλεγχος της ταχύτητας περιστροφής του κινητήρα, εφαρμόζοντας την μέθοδο μεταβολής της τάσης στον οπλισμό του.

Η εργασία χωρίζεται σε οκτώ τμήματα. Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται μια εισαγωγή στις ηλεκτρικές μηχανές. Στα επόμενα πέντε κεφάλαια παρουσιάζονται και αναλύονται οι κινητήρες συνεχούς ρεύματος και γίνεται εκτενής αναφορά στους κινητήρες ξένης διέγερσης. Έπειτα στα τελευταία δυο κεφάλαια παρουσιάζεται το λογισμικό Matlab/Simulink και πραγματοποιείται η προσομοίωση του κινητήρα και τέλος παρατίθενται τα συμπεράσματα, οι βελτιώσεις καθώς και οι μελλοντικοί στόχοι της εργασίας.

Λέξεις – κλειδιά

Ηλεκτρικές μηχανές, Κινητήρες συνεχούς ρεύματος, Ανεξάρτητη διέγερση, Χαρακτηριστική καμπύλη ροπής-ταχύτητας, Μοντελοποίηση, Έλεγχος στροφών, Προσομοίωση

Abstract

The present paper titled «Study of dc motors» has been elaborated by Doulo Georgios (A.M 48345486) in the framework of the Undergraduates Studies Program, the Department of Electrical and Electronic Engineering, the school of Engineering, University of Western Attica. The main aim of the dissertation is the study of dc motors and more specifically the simulation of an external excitation motor with the help of Matlab/Simulink software.

Then through this software and with the help of the characteristic load of the motor, will be studied the control of the motor rotation speed, applying the method of changing the voltage in its armature.

The work is divided into eight sections. In the first chapter there is an introduction to electric motors. The next five chapters present and analyze dc motors and make extensive reference to external excitation motors. Then in the last two chapters the Matlab/Simulink software is presented and the engine is simulated and finally the conclusions, the improvements as well as the future goals of the work are presented.

Keywords

Electric machines, DC motors, External excitation, Characteristic torque-speed curve, Modeling, Speed control, Simulation

1	ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο:ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ	13
1.1	Γενικά	13
1.2	Βασικές λειτουργίες ηλεκτρικών μηχανών	13
1.3	Κύρια μέρη ηλεκτρικών μηχανών	14
1.4	Λειτουργία στα τέσσερα τεταρτημόρια	15
1.5	Απώλειες και βαθμός απόδοσης	16
2	ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο:ΚΙΝΗΤΗΡΕΣ ΣΥΝΕΧΟΥΣ ΡΕΥΜΑΤΟΣ	18
2.1	Μηχανές συνεχούς ρεύματος	18
2.2	Ιστορική εξέλιξη των ηλεκτρικών μηχανών συνεχούς ρεύματος	18
2.3	Χρήση των μηχανών συνεχούς ρεύματος	21
2.4	Βασικά μέρη ηλεκτρικών μηχανών συνεχούς ρεύματος	21
2.4.1	Στάτης	21
2.4.2	Δρομέας	23
2.5	Τυλίγματα μηχανών συνεχούς ρεύματος	25
2.5.1	Βροχουτύλιγματα	26
2.5.2	Κυματοτύλιγματα	26
2.6	Αρχή λειτουργίας κινητήρων συνεχούς ρεύματος	27
2.6.1	Ισοδύναμο κύκλωμα	30
2.6.2	Καμπύλη μαγνήτισης	32
2.6.3	Αντίδραση τυμπάνου	33
2.6.4	Βοηθητικοί πόλοι	34
2.6.5	Τύλιγμα αντιστάθμισης	36
2.6.6	Άλλοι τρόποι για την αντιμετώπιση της αντίδρασης τυμπάνου	37
2.7	Ροή ισχύος και απώλειες	37
3	ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο:ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΚΙΝΗΤΗΡΩΝ ΣΥΝΕΧΟΥΣ ΡΕΥΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΕΛΕΓΧΟΣ ΣΤΡΟΦΩΝ	40
3.1	Είδη κινητήρων συνεχούς ρεύματος	40
3.2	Κινητήρες με μόνιμους μαγνήτες	41
3.3	Κινητήρας συνεχούς ρεύματος ανεξάρτητης και παράλληλης διέγερσης	42
3.3.1	Χαρακτηριστική φορτίου κινητήρα συνεχούς ρεύματος παράλληλης διέγερσης	43
3.3.2	Ρύθμιση της ταχύτητας περιστροφής σε κινητήρα παράλληλης διέγερσης	46
3.3.3	Μεταβολή της αντίστασης διέγερσης (R_f)	46
3.3.4	Μεταβολή της εφαρμοζόμενης τάσης στον σπλισμό του κινητήρα	49
3.3.5	Τοποθέτηση αντίστασης σε συνδεσμολογία σειράς με το κύκλωμα σπλισμού	50
3.4	Κινητήρες συνεχούς ρεύματος με διέγερση σειράς	50
3.4.1	Χαρακτηριστική φορτίου κινητήρα συνεχούς ρεύματος με διέγερση σειράς	51
3.4.2	Έλεγχος της ταχύτητας περιστροφής σε κινητήρες συνεχούς ρεύματος με διέγερση σειράς	52
3.5	Κινητήρες συνεχούς ρεύματος σύνθετης διέγερσης	53
3.5.1	Χαρακτηριστικές ροπής-ταχύτητας σε κινητήρα συνεχούς ρεύματος αθροιστικής σύνθετης διέγερσης	54
3.5.2	Χαρακτηριστική ροπής-ταχύτητας σε κινητήρα συνεχούς ρεύματος διαφορικής σύνθετης διέγερσης	55
3.5.3	Έλεγχος της ταχύτητας σε κινητήρες συνεχούς ρεύματος αθροιστικής σύνθετης διέγερσης	57

4	ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο:ΕΚΚΙΝΗΣΗ ΚΙΝΗΤΗΡΩΝ ΣΥΝΕΧΟΥΣ ΡΕΥΜΑΤΟΣ.....	58
4.1	Προβλήματα κατά την εκκίνηση κινητήρων συνεχούς ρεύματος.....	58
4.2	Κλασσικοί εκκινήτες κινητήρων συνεχούς ρεύματος	59
4.2.1	Εκκινήτης με τρεις ακροδέκτες	60
4.2.2	Εκκινήτης με τέσσερεις ακροδέκτες.....	61
4.3	Κυκλώματα αυτοματισμού για την εκκίνηση κινητήρων συνεχούς ρεύματος	62
4.4	Πέδηση κινητήρων συνεχούς ρεύματος	67
4.4.1	Ηλεκτρική πέδηση	68
4.4.2	Δυναμική πέδηση.....	68
4.4.3	Αναγεννητική πέδηση.....	69
4.4.4	Ακαριαία πέδηση (plugging)	69
5	ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο:ΒΛΑΒΕΣ ΚΙΝΗΤΗΡΩΝ ΣΥΝΕΧΟΥΣ ΡΕΥΜΑΤΟΣ	70
6	ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6^ο:ΤΕΧΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΚΙΝΗΤΗΡΩΝ ΣΥΝΕΧΟΥΣ ΡΕΥΜΑΤΟΣ.....	73
7	ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7^ο:ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ ΜΑΤΛΑΒ	76
7.1	Εισαγωγή Matlab-Simulink.....	76
7.2	Περιγραφή μελέτης	77
7.3	Σχεδίαση μοντέλου.....	78
7.3.1	Χαρακτηριστική ροπής-ταχύτητας περιστροφής του κινητήρα	87
7.3.2	Ρύθμιση της ταχύτητας περιστροφής μεταβάλλοντας την τάση σπλισμού	88
8	ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8^ο: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ	91
8.1	Γενικά συμπεράσματα.....	91
8.2	Βελτιώσεις	91
8.3	Μελλοντικοί στόχοι	92
9	Βιβλιογραφία.....	93

ΠΙΝΑΚΑΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1-1 Στοιχειώδης ηλεκτρική μηχανή.....	15
Εικόνα 1-2 Απεικόνιση λειτουργίας στα τέσσερα τεταρτημόρια	16
Εικόνα 2-1 Σχηματική παράσταση ηλεκτρικής μηχανής.....	18
Εικόνα 2-2 Η πρώτη μηχανή συνεχούς ρεύματος (ΣΡ).....	19
Εικόνα 2-3 Μηχανή Pacinotti (δυναμό).....	20
Εικόνα 2-4 Μηχανή Hefner-Alteneck.....	20
Εικόνα 2-5 Στάτης μηχανής συνεχούς ρεύματος	23
Εικόνα 2-6 Δρομέας μηχανής συνεχούς ρεύματος	24
Εικόνα 2-7 Βροχοτύλιγμα	26
Εικόνα 2-8 Κυματοτύλιγμα	26
Εικόνα 2-9 Κινητήρας συνεχούς ρεύματος με ένα ζευγάρι δακτυλιδιών στον συλλέκτη	27
Εικόνα 2-10 Κινητήρας συνεχούς ρεύματος με έναν επιπλέον βρόγχο και ξεχωριστό ζευγάρι δακτυλιδιών στο συλλέκτη.....	28
Εικόνα 2-11 Κινητήρας συνεχούς ρεύματος με περισσότερους βρόγχους και με ελατήρια τα οποία πιέζουν τις ψήκτρες πάνω στο συλλέκτη.....	29
Εικόνα 2-12 Ισοδύναμο κύκλωμα κινητήρα συνεχούς ρεύματος	31
Εικόνα 2-13 Απλοποιημένο ισοδύναμο κύκλωμα του κινητήρα	31
Εικόνα 2-14 Καμπύλη μαγνήτισης ενός κινητήρα συνεχούς ρεύματος.....	33
Εικόνα 2-15 Διάγραμμα ροής ισχύος κινητήρα συνεχούς ρεύματος	39
Εικόνα 3-1 Κατηγορίες ηλεκτρικών κινητήρων συνεχούς ρεύματος.....	41
Εικόνα 3-2 Ισοδύναμο κύκλωμα κινητήρα ξένης διέγερσης	42
Εικόνα 3-3 Ισοδύναμο κύκλωμα κινητήρα παράλληλης διέγερσης.....	43
Εικόνα 3-4 Χαρακτηριστική ροπής-ταχύτητας κινητήρα παράλληλης ή ανεξάρτητης διέγερσης με τύλιγμα αντιστάθμισης για την εξάλειψη της αντίδρασης τυμπάνου	45
Εικόνα 3-5 Χαρακτηριστική ροπής-ταχύτητας του κινητήρα που παρουσιάζει αντίδραση οπλισμού	46
Εικόνα 3-6 Αποτελέσματα από την αύξηση της αντίστασης διέγερσης στο κανονικό εύρος ταχυτήτων του κινητήρα.....	47
Εικόνα 3-7 Αποτελέσματα από την αύξηση της αντίστασης διέγερσης από τη λειτουργία χωρίς φορτίο μέχρι και τις συνθήκες ακινητοποιημένου δρομέα του κινητήρα.....	48
Εικόνα 3-8 Χαρακτηριστική ροπής-ταχύτητας κινητήρα παράλληλης διέγερσης με ρύθμιση της τάσης οπλισμού	49
Εικόνα 3-9 Ισοδύναμο κύκλωμα κινητήρα συνεχούς ρεύματος με διέγερση σειράς.....	50
Εικόνα 3-10 Χαρακτηριστική ροπής-ταχύτητας κινητήρα συνεχούς ρεύματος με διέγερση σειράς.....	52
Εικόνα 3-11 Ισοδύναμο κύκλωμα κινητήρα σύνθετης διέγερσης	53
Εικόνα 3-12 Σύγκριση της χαρακτηριστικής ροπής-ταχύτητας κινητήρα αθροιστικής σύνθετης διέγερσης με τις αντίστοιχες χαρακτηριστικές των κινητήρων διέγερσης σειράς και παράλληλης διέγερσης που έχουν τα ίδια ονομαστικά στοιχεία πλήρους φόρτισης	55
Εικόνα 3-13 Σύγκριση της χαρακτηριστικής ροπής-ταχύτητας κινητήρα αθροιστικής σύνθετης διέγερσης με την αντίστοιχη χαρακτηριστική ενός κινητήρα παράλληλης διέγερσης που έχει την ίδια ταχύτητα στη λειτουργία χωρίς φορτίο	55
Εικόνα 3-14 Χαρακτηριστική ροπής-ταχύτητας σε κινητήρα συνεχούς ρεύματος διαφορικής σύνθετης διέγερσης	56
Εικόνα 4-1 Συνδεσμολογία εκκινητή τριών ακροδεκτών	60
Εικόνα 4-2 Συνδεσμολογία εκκινητή τεσσάρων ακροδεκτών	61
Εικόνα 4-3 Βασικά σύμβολα των κυκλωμάτων ελέγχου κινητήρων.....	63
Εικόνα 4-4 Κύκλωμα αυτοματισμού για την εκκίνηση κινητήρα συνεχούς ρεύματος που χρησιμοποιεί ρελέ με χρονική καθυστέρηση για την τμηματική αποσύνδεση της αντίστασης εκκίνησης	65
Εικόνα 4-5 Κύκλωμα αυτοματισμού για την εκκίνηση κινητήρα συνεχούς ρεύματος που χρησιμοποιεί ρελέ τα οποία ελέγχουν την τιμή της αντίστασης E_A για την τμηματική αποσύνδεση της αντίστασης εκκίνησης	66

Εικόνα 6-1 Πινακίδα τεχνικών χαρακτηριστικών κινητήρα συνεχούς ρεύματος της General Electric.....	74
Εικόνα 7-1 Λογισμικό Matlab	76
Εικόνα 7-2 Παράθυρο παραμέτρων κινητήρα.....	77
Εικόνα 7-3 Εικονίδιο του λογισμικού Simulink	78
Εικόνα 7-4 Εικονίδιο Simulink Library Browser	79
Εικόνα 7-5 DC machine.....	80
Εικόνα 7-6 DC Πηγή Τάσης	80
Εικόνα 7-7 Gain.....	80
Εικόνα 7-8 Constant	81
Εικόνα 7-9 Bus Selector	81
Εικόνα 7-10 Παράθυρο παραμέτρων bus selector.....	82
Εικόνα 7-11 Display.....	82
Εικόνα 7-12 Scope.....	83
Εικόνα 7-13 Powergui.....	84
Εικόνα 7-14 To workspace	84
Εικόνα 7-15 XY Graph.....	85
Εικόνα 7-16 Μοντέλο Simulink/Matlab κινητήρα Σ.Ρ ανεξάρτητης διέγερσης	85
Εικόνα 7-17 Χαρακτηριστική ροπής-ταχύτητας του κινητήρα	87
Εικόνα 7-18 Χαρακτηριστική ροπής-στροφών (α).....	88
Εικόνα 7-19 Χαρακτηριστική ροπής-στροφών (β).....	89
Εικόνα 7-20 Χαρακτηριστική ροπής-στροφών (γ).....	89
Εικόνα 7-21 Χαρακτηριστική ροπής-στροφών (δ).....	90

1 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο: ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ

1.1 Γενικά

Είναι ευρέως διαδεδομένο ότι η ποσότητα της ηλεκτρικής ενέργειας που δαπανάει μια χώρα, αντικατοπτρίζει και το επίπεδο της τεχνικής ανάπτυξης στην οποία βρίσκεται.

Ο ηλεκτρισμός διαδόθηκε χάρη στην κατασκευή ηλεκτρικών μηχανών με χαμηλό κόστος αλλά ταυτόχρονα με μεγάλη απόδοση. Στις μέρες μας οποιαδήποτε βιομηχανική εγκατάσταση βασίζεται στην εκμετάλλευση και αξιοποίηση των ηλεκτρικών μηχανών. Ο τρόπος λειτουργίας αλλά και η γνώση των βασικών χαρακτηριστικών τους είναι σημαντικά στοιχεία για την καλύτερη δυνατή αντιμετώπιση των προβλημάτων που έχουν να κάνουν τόσο με την επιλογή και την εγκατάσταση των ηλεκτρικών μηχανών όσο και με την χρησιμοποίηση και την συντήρησή τους.

Οι ηλεκτρικές μηχανές δεν συναντώνται μόνο στις βιομηχανίες και στις μονάδες παραγωγής αλλά αποτελούν αναπόσπαστο κομμάτι της καθημερινής ζωής των ανθρώπων. Χωρίς αυτές θα ήταν αδύνατο να παραχθεί ενέργεια, προϊόντα και υπηρεσίες. Επίσης είναι αρκετά σημαντικές για την βελτίωση του τρόπου ζωής καθώς χρησιμοποιούνται για την ασφάλεια, την άνεση και την διασκέδαση των ανθρώπων.

Όπως γίνεται εύκολα αντιληπτό η μελέτη και η βελτίωση των ηλεκτρικών μηχανών αποτελεί επιτακτική ανάγκη για την πρόοδο και την εξέλιξη του ανθρώπου αφού με την πάροδο του χρόνου οι απαιτήσεις του συνεχώς αυξάνονται. [1]

1.2 Βασικές λειτουργίες ηλεκτρικών μηχανών

Σε κάθε στρεφομένη ηλεκτρική μηχανή συμβαίνουν ταυτόχρονα δυο λειτουργίες, η λειτουργία παραγωγής ροπής και η λειτουργία παραγωγής τάσης. Πάνω σε αυτές τις δυο λειτουργίες στηρίζεται ολόκληρο το φαινόμενο της ηλεκτρομηχανικής μετατροπής της ενέργειας.

Η λειτουργία παραγωγής της ροπής βασίζεται στην προσπάθεια τοποθέτησης των δυο μαγνητικών πεδίων, που δημιουργούνται από τα τυλίγματα του στάτη και του δρομέα, έτσι ώστε να βρίσκονται σε ευθεία γραμμή μεταξύ τους. Αντίστοιχα η λειτουργία παραγωγής της τάσης σε ένα τύλιγμα έχει να κάνει άμεσα με την χρονική μεταβολή της πεπλεγμένης μαγνητικής ροής που εφαρμόζεται στο ίδιο το τύλιγμα. Η ταυτόχρονη ύπαρξη αυτών των δυο λειτουργιών υλοποιεί την ηλεκτρομηχανική μετατροπή της ενέργειας με την απαίτηση της χρήσης δυο βασικών τυλιγμάτων από τα οποία το ένα βρίσκεται στον στάτη και το άλλο τύλιγμα στον δρομέα.

Η μετατροπή της ενέργειας από μια μορφή σε μια άλλη δεν επηρεάζεται από το είδος λειτουργίας της μηχανής. Δηλαδή είναι ανεξάρτητη τόσο αν η ηλεκτρική μηχανή λειτουργεί ως κινητήρας όσο και αν λειτουργεί ως γεννήτρια.

Το ένα από τα δυο βασικά τυλίγματα που προαναφέρθηκε χρησιμοποιείται για την δημιουργία του μαγνητικού πεδίου στο εσωτερικό (διάκενο της μηχανής) και ονομάζεται τύλιγμα διέγερσης (field winding). Το συγκεκριμένο τύλιγμα τις περισσότερες φορές είναι τύλιγμα χαμηλής ισχύος συγκριτικά με την ολική ηλεκτρική ισχύς της μηχανής. Σε περίπτωση που η ηλεκτρική μηχανή είναι χαμηλής ισχύος τότε οι μόνιμοι μαγνήτες αντικαθιστούν το τύλιγμα διέγερσης.

Όσον αφορά το δεύτερο τύλιγμα, αυτό ονομάζεται τύλιγμα τυμπάνου. Σε αυτό το τύλιγμα επάγονται τάσεις και ροπές. Επίσης το τύλιγμα αυτό έχει την ικανότητα να στρέφεται σε σχέση με το μαγνητικό πεδίο το οποίο υπάρχει χάρη στο τύλιγμα διέγερσης.

Το τύλιγμα τυμπάνου (armature winding) αποτελεί ένα τύλιγμα ισχύος και έχει σημαντικό ρολό στην διαδικασία της ηλεκτρομηχανικής μετατροπής ενέργειας. Η θέση του εξαρτάται από το είδος της ηλεκτρικής μηχανής. Έτσι μπορεί να βρίσκεται στον στάτη ή στον δρομέα. [2]

1.3 Κύρια μέρη ηλεκτρικών μηχανών

Ανάλογα με την τάση που πραγματεύονται οι στρεφόμενες ηλεκτρικές μηχανές διακρίνονται σε μηχανές συνεχούς ρεύματος (ΣΡ) και σε μηχανές εναλλασσόμενου ρεύματος (ΕΡ).

Το γεγονός πως σε κάθε ηλεκτρική μηχανή υπάρχει κίνηση των αγωγών εντός μαγνητικού πεδίου μαρτυράει ότι κάθε ηλεκτρική μηχανή απαρτίζεται από ένα σταθερό και ένα κινητό μέρος.

1. Σταθερό μέρος (πυρήνας στάτη και τύλιγμα).
2. Στρεφόμενο μέρος (πυρήνας δρομέα και τύλιγμα).
3. Διάκενο αέρα, απαραίτητη προϋπόθεση για να επιτραπεί η κίνηση ανάμεσα σε στάτη και δρομέα.

Οι πυρήνες του στάτη και του δρομέα είναι φτιαγμένοι από σιδηρομαγνητικά υλικά, κάποιες φορές από συμπαγή και κάποιες άλλες υπό μορφή ελασμάτων για τον περιορισμό της μαγνητικής αντίστασης των δρόμων της μαγνητικής ροής. Επίσης για τον περιορισμό των απωλειών από τα δινορεύματα απαιτείται η χρησιμοποίηση ελασμάτων τα οποία είναι μονωμένα, συνήθως με κάποιο βερνίκι.

Το είδος της ηλεκτρικής μηχανής καθορίζει τις εξωτερικές συνδέσεις των τυλιγμάτων του δρομέα. Οι εξωτερικές αυτές συνδέσεις πραγματοποιούνται μέσω ψηκτρών ή δακτυλίων.[3]



Εικόνα 1-1 Στοιχειώδης ηλεκτρική μηχανή

1.4 Λειτουργία στα τέσσερα τεταρτημόρια

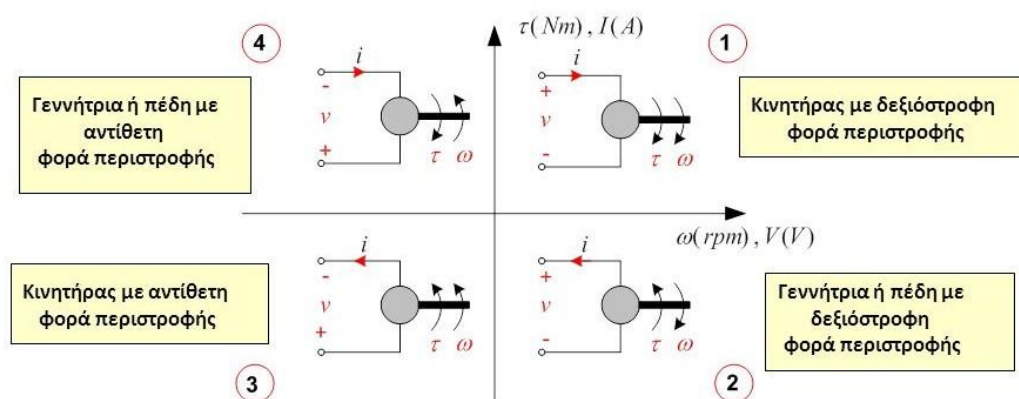
Οι περισσότερες ηλεκτρικές μηχανές έχουν την δυνατότητα να λειτουργούν και στα τέσσερα τεταρτημόρια της χαρακτηριστικής ροπής-στροφών ή της χαρακτηριστικής τάσης-ρεύματος τυμπάνου αντίστοιχα.

Η συμπεριφορά μιας ηλεκτρικής μηχανής ανάλογα με το τεταρτημόριο στο οποίο λειτουργεί αναλύεται παρακάτω.

1. Η ηλεκτρική μηχανή στο πρώτο τεταρτημόριο συμπεριφέρεται ως κινητήρας με φορά περιστροφής προς τα δεξιά. Σε αυτήν την περίπτωση η φορά της παραγόμενης ηλεκτρικής ροπής είναι ίδια με την φορά περιστροφής του δρομέα, αφού η ροπή αυτή αποτελεί την κινούσα ροπή της μηχανής. Σε αυτή την κατάσταση λειτουργίας το τύλιγμα τυμπάνου καταναλώνει ηλεκτρική ενέργεια από το δίκτυο. Αν αλλάξει η φορά του ρεύματος τυμπάνου τότε η ηλεκτρική μηχανή σταματάει να λειτουργεί ως κινητήρας και μετατρέπεται σε γεννήτρια. Με αυτόν τον τρόπο πραγματοποιείται η μεταφορά από το πρώτο στο δεύτερο τεταρτημόριο.

2. Στο δεύτερο τεταρτημόριο η παραγόμενη ηλεκτρική ροπή αποτελεί την αντιδρώσα ροπή της μηχανής αφού αυτή συνεχίζει να έχει φορά περιστροφής προς τα δεξιά. Είναι δηλαδή αντίθετης φοράς με την φορά περιστροφής του δρομέα. Στην συγκεκριμένη περίπτωση η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια δίνεται σε βάρος της κινητικής ενέργειας των στρεφόμενων μαζών της, μειώνοντας έτσι συνεχώς τις στροφές της ηλεκτρικής μηχανής. Με απλά λόγια η μηχανή θα λειτουργεί ως ηλεκτρική πέδη. Το χρονικό διάστημα που θα διαρκέσει η πέδη είναι άμεσα συνδεδεμένο με τον ρυθμό με τον οποίο απορροφάται η κινητική ενέργεια του συστήματος. Αν όμως το μηχανικό σύστημα

παρέχει την ενέργεια που χρειάζεται έτσι ώστε να διατηρείται η κίνηση τότε η ηλεκτρική μηχανή θα λειτουργεί ως γεννήτρια τροφοδοτώντας με ενέργεια το ηλεκτρικό σύστημα.
 3. Στο τρίτο τεταρτημόριο η ηλεκτρική μηχανή λειτουργεί σαν κινητήρας ακριβώς όπως στο πρώτο τεταρτημόριο με την μόνη διαφορά ότι πλέον έχει αντίθετη φορά περιστροφής.
 4. Στο τελευταίο τεταρτημόριο η ηλεκτρική μηχανή λειτουργεί ξανά σαν γεννήτρια ή πέδη με φορά περιστροφής προς τα αριστερά. [4]



Εικόνα 1-2 Απεικόνιση λειτουργίας στα τέσσερα τεταρτημόρια

1.5 Απώλειες και βαθμός απόδοσης

Έχει μεγάλη σημασία για τεχνικούς αλλά και για οικονομικούς λόγους η μελέτη της επίδρασης των παραγόντων που καθορίζουν τις απώλειες των ηλεκτρικών μηχανών και επηρεάζουν την απόδοσή τους.

Υπάρχουν δυο τρόποι με τους οποίους μπορεί να βρεθεί ο βαθμός απόδοσης (efficiency) μια ηλεκτρικής μηχανής.

- Ο πρώτος τρόπος έχει να κάνει με την απευθείας μέτρηση της ισχύς που παρέχεται στην είσοδο και της ισχύς που αποδίδεται στη έξοδο, κάτω από ορισμένες λειτουργικές συνθήκες.
- Ο δεύτερος τρόπος αφορά υπολογισμούς των διάφορων απωλειών ισχύος που πραγματοποιούνται σε συγκεκριμένες λειτουργικές συνθήκες φόρτισης.

Τις περισσότερες φορές ο δεύτερος τρόπος συνιστάται για ηλεκτρικές μηχανές μέσης και μεγάλης ισχύος στις οποίες η οικονομική επιβάρυνση της διαδικασίας μέτρησης είναι πολύ μεγάλη.

Όταν κατασκευάζεται μια ηλεκτρική μηχανή το πρώτο πράγμα που ενδιαφέρει τους κατασκευαστές είναι ο περιορισμός των απωλειών της, όσο αυτό είναι δυνατό.

Η μείωση των απωλειών είναι βασικός παράγοντας για την απόδοση της μηχανής όπως επίσης και για την αποφυγή της υπερθέρμανσης της ηλεκτρικής μηχανής, πράγμα το οποίο θα οδηγήσει σε λειτουργικά προβλήματα.

Ανάλογα με την λειτουργική κατάσταση της ηλεκτρικής μηχανής και αφού έχουν γίνει γνωστές οι διάφορες απώλειες, ο βαθμός απόδοσης μπορεί να προσδιοριστεί από τις σχέσεις που ακολουθούν.

Στην περίπτωση που η ηλεκτρική μηχανή λειτουργεί ως γεννήτρια :

$$n(\%) = \frac{P_{out}}{P_{out} + P_{loss}} \times 100 \quad (1.1)$$

Στην περίπτωση που η ηλεκτρική μηχανή λειτουργεί ως κινητήρας :

$$n(\%) = \frac{P_{in} - P_{loss}}{P_{in}} \times 100 \quad (1.2)$$

Όταν σε μια ηλεκτρική μηχανή παρατηρείται μετατροπή μιας μορφής ενέργειας σε μια άλλη τότε εμφανίζονται διάφορες απώλειες οι οποίες δεν έχουν να κάνουν με το εάν η μηχανή λειτουργεί σαν γεννήτρια ή σαν κινητήρας.

Έτσι λοιπόν υπάρχουν οι ηλεκτρικές απώλειες που δημιουργούνται από τους αγωγούς της μηχανής που διαρρέονται από ρεύματα, οι μαγνητικές απώλειες οι οποίες οφείλονται στα σιδηρομαγνητικά υλικά και τέλος οι μηχανικές απώλειες που εμφανίζονται από τα κινούμενα μέρη της ηλεκτρικής μηχανής. [5]

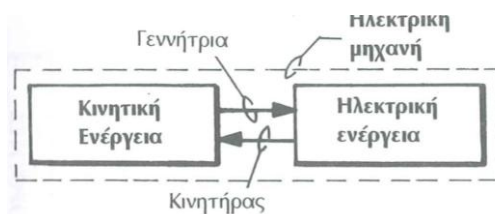
2 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^Ο: ΚΙΝΗΤΗΡΕΣ ΣΥΝΕΧΟΥΣ ΡΕΥΜΑΤΟΣ

2.1 Μηχανές συνεχούς ρεύματος

Οι μηχανές συνεχούς ρεύματος αποτελούν μηχανές που έχουν την ικανότητα να μετατρέπουν μια συγκεκριμένη μορφή ενέργειας σε μια άλλη.

Πιο συγκεκριμένα οι μηχανές που μετατρέπουν την κινητική ενέργεια σε ηλεκτρική ονομάζονται γεννήτριες ενώ όταν συμβαίνει το αντίθετο οι ηλεκτρικές αυτές μηχανές ονομάζονται κινητήρες.

Τα ρεύματα και οι τάσεις με τα οποία τροφοδοτούνται οι μηχανές συνεχούς ρεύματος είναι εναλλασσόμενα. Όμως με την βοήθεια του συλλέκτη ο οποίος είναι υπεύθυνος να μετατρέπει τις εναλλασσόμενες τάσεις που υπάρχουν στο εσωτερικό των μηχανών σε συνέχεις, επιτυγχάνεται συνέχεις έξοδος. [6]



Εικόνα 2-1 Σχηματική παράσταση ηλεκτρικής μηχανής

2.2 Ιστορική εξέλιξη των ηλεκτρικών μηχανών συνεχούς ρεύματος

Ο Faraday ο οποίος για να ανακαλύψει τον νόμο της επαγωγής στηρίχτηκε στα πειράματα του Oersted και του Ampere το 1820, αποτέλεσε πηγή έμπνευσης για τον Γάλλο Hippolyte Pixii το 1832 στην ανακάλυψη και κατασκευή της πρώτης μηχανής συνεχούς ρεύματος ως γεννήτρια.

Αξίζει να αναφερθεί πως η συγκεκριμένη μηχανή είχε συλλέκτη δυο τομέων με μεγάλη κυμάτωση της ανορθωμένης τάσης.



Εικόνα 2-2 Η πρώτη μηχανή συνεχούς ρεύματος (ΣΡ)

Το 1856 ένας μηχανικός ηλεκτρολόγος γερμανικής καταγωγής, ο Werner Von Siemens κατασκεύασε για πρώτη φορά την μηχανή συνεχούς ρεύματος με περιέλιξη τυμπάνου τοποθετημένη μέσα στα λούκια του δρομέα και με συλλέκτη δυο τομέων. Η συγκεκριμένη κατασκευή ήταν αυτή που έδωσε το έναυσμα για την μετέπειτα εξέλιξη των ηλεκτρικών μηχανών.

Το 1860 ο Ιταλός καθηγητής Antonio Pacinotti κατασκεύασε την διάσημη μηχανή με επαγωγικό δακτύλιο και συλλέκτη με πολλούς τομείς, που δέκα χρόνια αργότερα κατασκευάστηκε εκ νέου από τον Gramme.



Εικόνα 2-3 Μηχανή Pacinotti (δυναμό)

Τελικά το είδος της μηχανής το οποίο κυριάρχησε ήταν του F.V Hefner-Alteneck (1872) που είχε περιέλιξη τυμπάνου και συλλέκτη με πολλούς τομείς.[7]



Εικόνα 2-4 Μηχανή Hefner-Alteneck

2.3 Χρήση των μηχανών συνεχούς ρεύματος

Παρά το γεγονός πως το εναλλασσόμενο ρεύμα χρησιμοποιείται για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, οι μηχανές συνεχούς ρεύματος έχουν μεγάλη σημασία για την ηλεκτρική κίνηση μικρών, μεσαίων αλλά και μεγάλων ισχύων.

Αρκετά από τα εργοστάσια θέλοντας να ικανοποιήσουν την ανάγκη για την τροφοδοσία κινητήρων συνεχούς ρεύματος με την απαιτούμενη ισχύς, χρησιμοποιούν γεννήτριες συνεχούς ρεύματος. [8]

Οι κινητήρες συνεχούς ρεύματος λόγω του πλεονεκτήματος που έχουν σχετικά με τον έλεγχο της ταχύτητας περιστροφής τους, χρησιμοποιούνται κατά κύριο λόγο για να δώσουν ηλεκτρική κίνηση σε διάφορους μηχανισμούς. Επίσης συναντώνται για την κάλυψη διάφορων εφαρμογών σε βιομηχανικές εγκαταστάσεις και σε μηχανήματα οικιακής χρήσης.

Εκτός όμως από την χρησιμότητα τους στις βιομηχανικές εγκαταστάσεις οι συγκεκριμένοι κινητήρες είναι απαραίτητοι και σε εφαρμογές όπου χρειάζεται υψηλή μηχανική ροπή εκκίνησης όπως συμβαίνει με τους γερανούς και τα αναβατόρια.

Τέλος η χρήση των κινητήρων συνεχούς ρεύματος είναι παγκοσμίως γνωστή αφού τα ηλεκτροκίνητα μέσα μεταφοράς λειτουργούν με τέτοιου είδους κινητήρες. [9]

2.4 Βασικά μέρη ηλεκτρικών μηχανών συνεχούς ρεύματος

Όλες οι μηχανές συνεχούς ρεύματος αποτελούνται από το ακίνητο μέρος που ονομάζεται στάτης και από το κινητό μέρος το οποίο ονομάζεται δρομέας. Σε κάθε ηλεκτρική μηχανή συνεχούς ρεύματος ο ρόλος του στάτη είναι να παρέχει στήριξη και να αναπτύσσει συγκεκριμένη μαγνητική ροή στο εσωτερικό της μηχανής. Από την άλλη μεριά ο προορισμός του δρομέα είναι να βρίσκεται μέσα στο μαγνητικό πεδίο των πόλων και να καθορίζει την λειτουργική συμπεριφορά της μηχανής δημιουργώντας τα απαραίτητα ηλεκτρομαγνητικά φαινόμενα.

2.4.1 Στάτης

Ο στάτης σε μία ηλεκτρική μηχανή συνεχούς ρεύματος αποτελείται από τα παρακάτω στοιχεία:

Ζύγωμα: Το ζύγωμα είναι κατασκευασμένο από χυτοχάλυβα ή ελατό σίδηρο και αποτελεί τον κορμό της ηλεκτρικής μηχανής. Συνήθως έχει κυλινδρικό σχήμα και αποτελεί την βάση της μηχανής. Ο ρόλος του ζυγώματος είναι η δημιουργία κλειστού μαγνητικού κυκλώματος στην ηλεκτρική μηχανή.

Μαγνητικοί πόλοι: Οι μαγνητικοί πόλοι στηρίζονται με ειδικές βίδες στο εσωτερικό μέρος του ζυγώματος. Είναι φτιαγμένοι από ελάσματα αρκετού λεπτού πάχους, σκληρού σιδηρομαγνητικού

υλικού τα οποία είναι μονωμένα μεταξύ τους. Ο σκοπός της ύπαρξης τους είναι η εξασφάλιση της μαγνητικής ροής που δημιουργείται από τα τυλίγματα τα οποία περιβάλλουν τους πόλους. Οι μαγνητικοί πόλοι είναι πάντα ζυγός αριθμός. Έτσι γίνεται πάντα αναφορά στα ζεύγη των μαγνητικών πόλων και ανάλογα με αυτά τα ζεύγη οι μηχανές διακρίνονται σε διπολικές, τετραπολικές, εξαπολικές κλπ.

Πέδιλα των πόλων: Αποτελούν ανεξάρτητο τμήμα και προσαρμόζονται βιδωτά κάτω από τους πόλους. Σκοπός του πεδίου είναι να εξασφαλίζει όσο το δυνατόν καλύτερο ομογενές μαγνητικό πεδίο στο εσωτερικό της μηχανής. Είναι κατασκευασμένα από μονωμένα φύλλα σιδήρου έτσι ώστε να μην αυξάνεται η θερμοκρασία τους και έχουν ως στόχο να περιοριστούν οι απώλειες από τα ρεύματα Φουκώ. Τα ρεύματα αυτά που είναι γνωστά και ως δινορεύματα οφείλουν την ύπαρξη τους στις διαταραχές του μαγνητικού πεδίου κατά την λειτουργία της μηχανής.

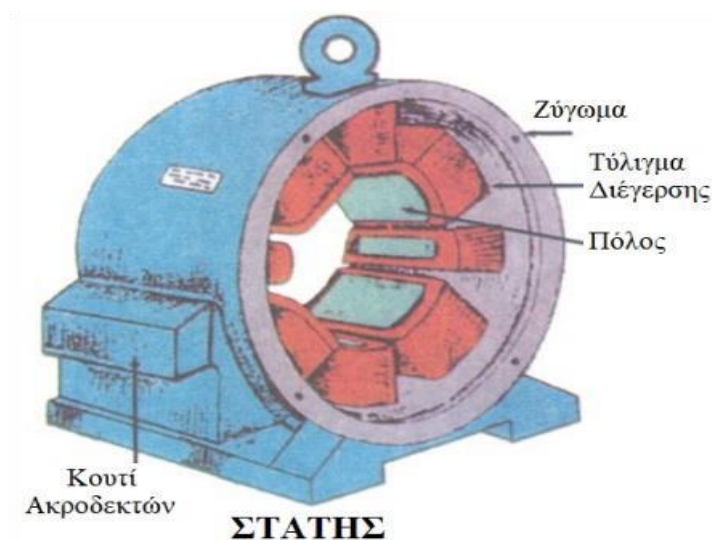
Τύλιγμα των πόλων: Το τύλιγμα των πόλων ή τύλιγμα διέγερσης είναι κατασκευασμένο από σπείρες επισμαλτωμένου σύρματος χαλκού. Οι σπείρες αυτές παίρνουν την μορφή του πυρήνα αφού χρησιμοποιηθεί ειδικό καλούπι και στην συνέχεια τυλίγονται με ταινία από βαμβάκι και βαφτίζονται σε μονωτικό βερνίκι. Τα άκρα του τυλίγματος των πόλων μένουν ελεύθερα έτσι ώστε να δώσουν την δυνατότητα για την ηλεκτρική τους σύνδεση. Το σύνολο των τυλιγμάτων των μαγνητικών πόλων καλείται τύλιγμα διέγερσης της μηχανής. Σε κάθε ηλεκτρική μηχανή συνεχούς ρεύματος έχουμε δυο ανεξάρτητα μεταξύ τους τυλίγματα στον κάθε μαγνητικό πόλο. Το ένα τύλιγμα το οποίο είναι κατασκευασμένο από πολλές σπείρες σύρματος μικρής διατομής ονομάζεται παράλληλο τύλιγμα, ενώ το άλλο τύλιγμα που αποτελείται από λίγες σπείρες σύρματος μεγάλης διατομής, ονομάζεται τύλιγμα σειράς.

Καλύμματα: Τα καλύμματα ή καπάκια στερεώνονται με βίδες στο ζύγωμα και βρίσκονται σε ζευγάρια. Χρησιμεύουν στο να στηρίζουν τον άξονα του δρομέα και τον ψυκτροφορέα και προφυλάσσουν το εσωτερικό μέρος της μηχανής από την είσοδο σκουπιδιών ή μικροαντικειμένων. Επίσης έχουν ενσωματωμένο και από ένα έδρανο έτσι ώστε να επιτυγχάνεται η περιστροφή του άξονα του δρομέα.

Ψυκτροφορέας: Ο ψυκτροφορέας αποτελεί το σύστημα πάνω στο οποίο στηρίζονται οι ψυκτροθήκες. Ο ψυκτροφορέας στερεώνεται στο κάλυμμα της μηχανής το οποίο είναι τοποθετημένο στην πλευρά του συλλέκτη. Το σύστημα του ψυκτροφορέα είναι αυτό που παρέχει την δυνατότητα μετακίνησης των ψηκτρών πάνω στον συλλέκτη.

Ψήκτρες: Οι ψήκτρες είναι συνήθως τεμάχια από σκληρό άνθρακα, ή γραφίτη, ή από ένα μίγμα άνθρακα και χαλκού. Βρίσκονται μέσα στις ψυκτροθήκες και πιέζονται από έναν μηχανισμό που αποτελείται από ελατήρια έτσι ώστε να εφάπτονται με την επιφάνεια του συλλέκτη. Τα ελατήρια

αυτά είναι κατάλληλα προσαρμοσμένα έτσι ώστε η πίεση που ασκεί η ψήκτρα στον συλλέκτη να είναι στα επιτρεπτά όρια. Αν η πίεση είναι μικρή τότε δεν θα υπάρχει καλή επαφή ανάμεσα στις ψήκτρες και στον συλλέκτη πράγμα το οποίο θα δημιουργήσει σπινθηρισμούς και θα οδηγήσει στο κάψιμο του συλλέκτη. Αντίθετα αν η πίεση είναι πολύ μεγάλη θα υπάρξει σημαντική φθορά των ψηκτρών και αύξηση της θερμοκρασίας του συλλέκτη. [10]



Εικόνα 2-5 Στάτης μηχανής συνεχούς ρεύματος

2.4.2 Δρομέας

Ο δρομέας σε μια ηλεκτρική μηχανή συνεχούς ρεύματος αποτελείται από τα ακόλουθα στοιχεία:

Άξονας: Ο άξονας ο οποίος είναι κατασκευασμένος από ατσάλι φέρει το επαγωγικό τύμπανο, το συλλέκτη και τον ανεμιστήρα. Κατά μήκος της επιφάνειάς του, διαθέτει προεξοχή που δίνει την δυνατότητα προσαρμογής σε αυτόν διαφόρων εξαρτημάτων. Τα άκρα του άξονα προσαρμόζονται στα έδρανα. Έτσι επιτυγχάνεται η εύκολη περιστροφή του δρομέα στο εσωτερικό της μηχανής. [11]

Πυρήνας: Ο πυρήνας του επαγωγικού τυμπάνου παρέχει την απαραίτητη μαγνητική αντίσταση για την διόδο των μαγνητικών γραμμών των πόλων και φέρει σε αυτό το τύλιγμα τυμπάνου. Είναι φτιαγμένος από πολλά μαγνητικά ελάσματα τα οποία κάμπτονται σε ειδικές πρέσες. Για να περιοριστούν οι απώλειες που οφείλονται στα δινορεύματα τα μαγνητικά ελάσματα είναι μονωμένα μεταξύ τους.[10]

Τυλίγματα του επαγωγικού τυμπάνου: Το τύλιγμα του επαγωγικού τυμπάνου αποτελείται από επισμαλτωμένο αγωγό χαλκού κυκλικής διατομής, για ηλεκτρικές μηχανές με μικρή ισχύ και ορθογωνικής διατομής για ηλεκτρικές μηχανές με μεγάλη ισχύ. Τις περισσότερες φορές το τύλιγμα αυτό είναι τοποθετημένο στον πυρήνα απ' ευθείας ή με προσαρμογή σε ειδικά καλούπια. Ο ρόλος του συγκεκριμένου τυλίγματος είναι να δημιουργεί μέσα στο μαγνητικό πεδίο, τα απαραίτητα ηλεκτρομαγνητικά φαινόμενα σύμφωνα με τα οποία καθορίζεται η συμπεριφορά της ηλεκτρικής μηχανής.[12]

Συλλέκτης: Ο συλλέκτης είναι φτιαγμένος από πολλά χάλκινα ελάσματα τα οποία είναι γνωστά ως τομείς του συλλέκτη. Για να μην υπάρξει βραχυκύκλωση των τομέων του συλλέκτη, χρησιμοποιούνται μονώσεις μεταξύ τους αλλά και προς τις πλευρές των τεμαχίων συγκράτησης. Η δουλειά του συλλέκτη είναι να παίρνει ή να μεταβιβάζει το ρεύμα.[10]

Ανεμιστήρας: Ο ανεμιστήρας είναι τοποθετημένος πάνω στον άξονα της μηχανής και προς την αντίθετη πλευρά από αυτή που είναι ο συλλέκτης. Είναι υπεύθυνος να παρέχει την απαραίτητη ψύξη στα τυλίγματα του επαγωγικού τυμπάνου αφού κατά την λειτουργία της ηλεκτρικής μηχανής αυτά διαρρέονται από ρεύμα και συνεπώς αναπτύσσουν θερμότητα. Το σχήμα του ανεμιστήρα έχει την μορφή πτερωτής και είναι κατασκευασμένος από πλαστικό ή αλουμίνιο, πράγμα το οποίο εξαρτάται από την ισχύ της ηλεκτρικής μηχανής. [13]

Πλήμνη: Η πλήμνη χρησιμοποιείται στις μηχανές με μεγάλη ισχύ με σκοπό να μειωθεί το βάρος των μαγνητικών ελασμάτων. Αυτό συμβαίνει εξαιτίας του μεγάλου κόστους που έχουν τα συγκεκριμένα ελάσματα. Επίσης αποτελεί σημαντικό παράγοντα για την εύρυθμη λειτουργία της μηχανής καθώς μέσω αυτής η ψύξη του πυρήνα γίνεται πιο εύκολα. [10]



Εικόνα 2-6 Δρομέας μηχανής συνεχούς ρεύματος

2.5 Τυλίγματα μηχανών συνεχούς ρεύματος

Κάθε μηχανή συνεχούς ρεύματος αποτελείται από δυο βασικά τυλίγματα. Το τύλιγμα διέγερσης το οποίο βρίσκεται στον στάτη και το τύλιγμα τυμπάνου που βρίσκεται στον δρομέα.

Από κατασκευαστικής πλευράς τα τυλίγματα διέγερσης είναι συγκεντρωμένα. Αυτό σημαίνει ότι κάθε πόλος αποτελείται από μια ομάδα, στην οποία N ελίγματα διασυνδεδεμένα σε σειρά καταλήγουν σε δυο ακροδέκτες.

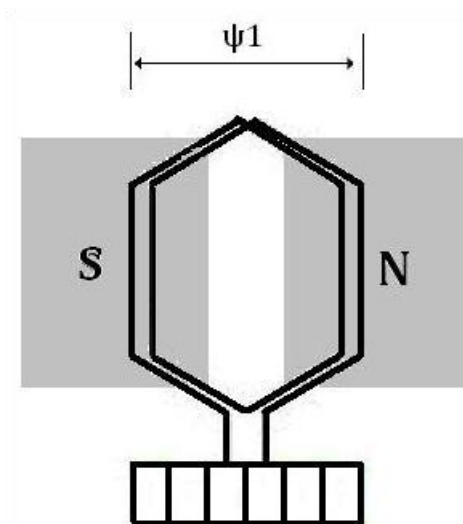
Όσο αναφορά τον αριθμό των ελιγμάτων αυτών και την διατομή τους, εξαρτώνται από την ισχύ και κατ' επέκταση από την εγκατεστημένη μαγνητική ροή στο διάκενο, από τη γεωμετρία της μηχανής και από το είδος των σιδηρομαγνητικών υλικών.

Το τύλιγμα τυμπάνου είναι διανεμημένο και αποτελείται από ομάδες ομοιόμορφα διανεμημένες και κατάλληλα συνδεδεμένες στις οδοντώσεις (αύλακες), περί την περιφέρεια του διακένου. Τα άκρα της κάθε ομάδας συνδέονται στους τομείς του συλλέκτη. Το συγκεκριμένο τύλιγμα είναι ένα τύλιγμα ισχύος και είναι σημαντικό για την ηλεκτρομηχανική μετατροπή της ενέργειας.

Οι βασικές κατηγορίες τυλιγμάτων τυμπάνου είναι δυο, τα βροχοτυλίγματα (lap windings) και τα κυματοτυλίγματα (wave windings). Οι σπείρες του τυλίγματος τυμπάνου διαμορφώνονται σε πηνία ή ομάδες. Τα δυο άκρα της κάθε ομάδας συνδέονται με τους τομείς του συλλέκτη, ενώ τα στοιχεία της τοποθετούνται εντός των αυλακώσεων (διάκενα των οδοντώσεων) του δρομέα. [14]

2.5.1 Βροχοτυλίγματα

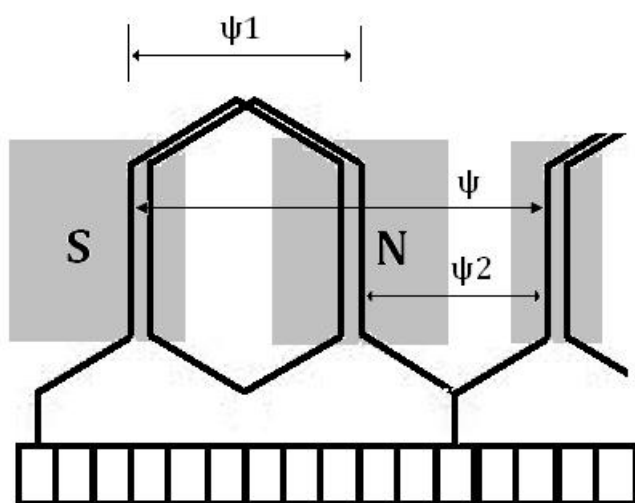
Βροχοτυλίγματα ονομάζονται τα τυλίγματα συνεχούς ρεύματος στα οποία τα άκρα της ομάδας συνδέονται σε διαδοχικούς τομείς συλλέκτη ή σε τομείς συλλέκτη με απόσταση ένα ή το πολύ δυο τομείς.



Εικόνα 2-7 Βροχοτύλιγμα

2.5.2 Κυματοτυλίγματα

Κυματοτυλίγματα ονομάζονται τα τυλίγματα συνεχούς ρεύματος που τα άκρα της ομάδας συνδέονται σε απομακρυσμένους τομείς συλλέκτη.



Εικόνα 2-8 Κυματοτύλιγμα

Όπου:

ψ_1 ονομάζεται πρώτο μερικό βήμα και είναι η απόσταση των στοιχείων κάθε ομάδας

ψ_2 ονομάζεται δεύτερο μερικό βήμα και είναι η απόσταση του δεύτερου στοιχείου μιας ομάδας από το πρώτο στοιχείο της αμέσως επόμενης.

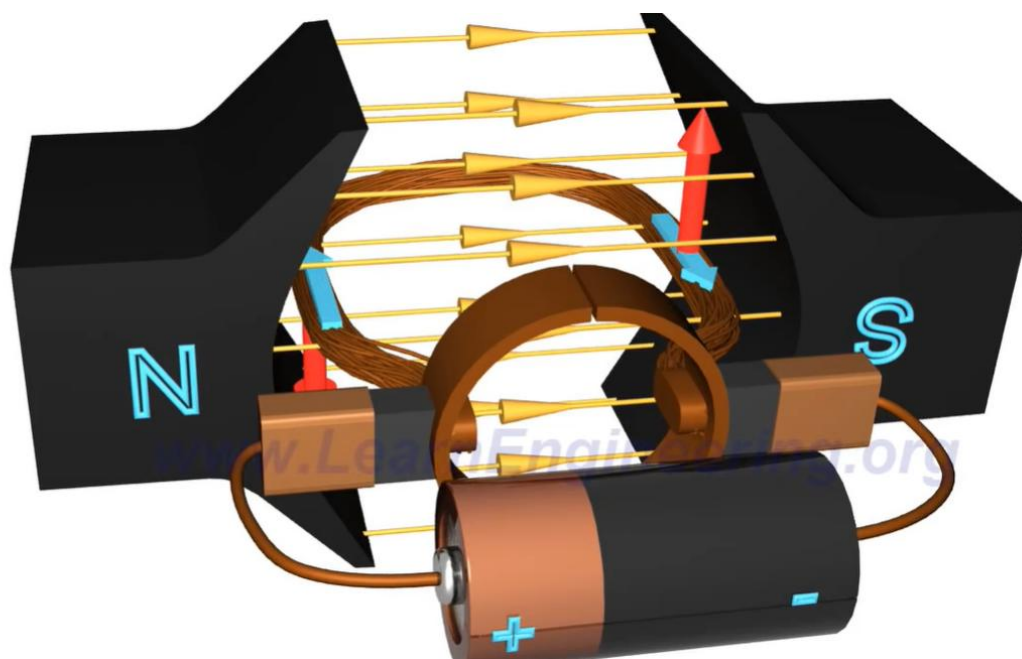
ψ ονομάζεται βήμα του τυλίγματος και είναι η απόσταση του πρώτου στοιχείου μιας ομάδας και του πρώτου στοιχείου της αμέσως επόμενης συνδεδεμένης σε σειρά ομάδας.[15]

2.6 Αρχή λειτουργίας κινητήρων συνεχούς ρεύματος

Ο στάτης δημιουργεί ένα σταθερό μαγνητικό πεδίο και ο οπλισμός, δηλαδή το στρεφόμενο μέρος είναι ένα απλό πηνίο. Ο οπλισμός συνδέεται με μια πηγή συνεχούς ρεύματος μέσω ενός ζεύγους δαχτυλιδιών.

Όταν το ρεύμα ρέει μέσα από το πηνίο, αναπτύσσεται πάνω του μια δύναμη εξ επαγωγής, σύμφωνα με τον νόμο του Lorentz. Έτσι το πηνίο θα αρχίσει να περιστρέφεται. Καθώς το πηνίο περιστρέφεται, τα δαχτυλίδια του συλλέκτη συνδέονται εναλλάξ και με τους δυο πόλους της πηγής. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα στην αριστερή πλευρά του πηνίου η φορά του ρεύματος να απομακρύνεται από τα δαχτυλίδια του συλλέκτη ενώ στην δεξιά πλευρά η φορά του ρεύματος να πλησιάζει προς αυτά.

Αυτό εξασφαλίζει ότι και η φορά της ροπής παραμένει η ίδια, καθόλη την διάρκεια της κίνησης έτσι ώστε το πηνίο να συνεχίσει να περιστρέφεται.



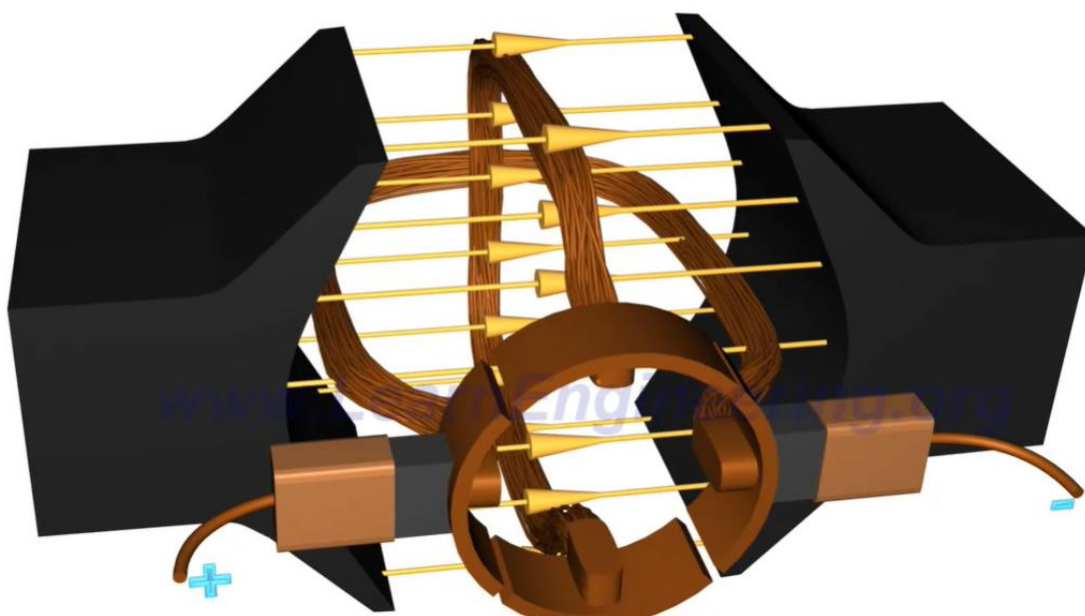
Εικόνα 2-9 Κινητήρας συνεχούς ρεύματος με ένα ζευγάρι δαχτυλιδιών στον συλλέκτη

Όμως αν παρατηρήσει κάποιος προσεκτικά την επίδραση της ροπής στο πηνίο, θα διαπιστώσει ότι όταν το πηνίο είναι σχεδόν κάθετο προς την διεύθυνση της μαγνητικής ροής, η ροπή μηδενίζεται. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα η κίνηση του ρότορα να μην είναι ομαλή.

Το συγκεκριμένο πρόβλημα μπορεί να αντιμετωπιστεί αν προστεθεί ένας επιπλέον βρόγχος στο ρότορα, με ξεχωριστό ζευγάρι δακτυλιδιών στο συλλέκτη.

Άρα με αυτόν τον τρόπο, όταν ο πρώτος βρόγχος θα είναι σε κατακόρυφη θέση ο δεύτερος βρόγχος θα συνδέεται με την πηγή τροφοδοσίας. Έτσι πάντα θα ασκείται μια δύναμη στον δρομέα.

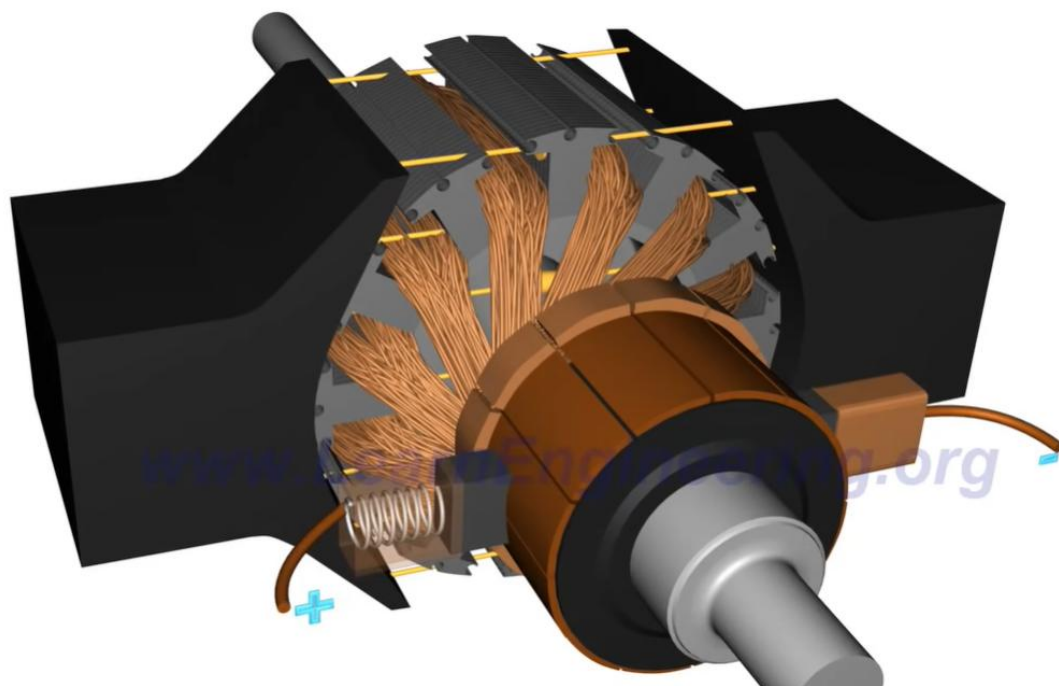
Επιπλέον, όσο περισσότεροι βρόγχοι προστεθούν τόσο ομαλότερη θα γίνει η κίνηση του δρομέα.



Εικόνα 2-10 Κινητήρας συνεχούς ρεύματος με έναν επιπλέον βρόγχο και ξεχωριστό ζευγάρι δακτυλιδιών στο συλλέκτη

Στην πράξη, οι αγωγοί του κυκλώματος του οπλισμού (δρομέα) βρίσκονται μέσα σε αυλακώσεις από ελάσματα ατσαλιού υψηλής μαγνητικής διαπερατότητας. Αυτό (η χαμηλή μαγνητική αντίσταση) αυξάνει την επίδραση της μαγνητικής ροής.

Ελατήρια πιέζουν σταθερά τις ψήκτρες πάνω στο συλλέκτη, έτσι ώστε να διατηρείται επαφή με την πηγή τροφοδοσίας.



Εικόνα 2-11 Κινητήρας συνεχούς ρεύματος με περισσότερους βρόγχους και με ελατήρια τα οποία πιέζουν τις ψήκτρες πάνω στο συλλέκτη

Η χρήση μόνιμων μαγνητών στο στάτη περιορίζεται μόνο σε κινητήρες συνεχούς ρεύματος με πολύ μικρή ισχύς. Συνήθως αντί γι' αυτούς χρησιμοποιούνται ηλεκτρομαγνήτες. Το πηνίο των ηλεκτρομαγνητών τροφοδοτείται από την ίδια πηγή συνεχούς ρεύματος.

Το τύλιγμα του στάτη (που δημιουργεί το μαγνητικό πεδίο) μπορεί να συνδεθεί με το τύλιγμα του δρομέα με δυο τρόπους. Ο πρώτος τρόπος είναι να συνδεθεί παράλληλα ενώ ο δεύτερος να συνδεθεί σε σειρά. Το αποτέλεσμα είναι δυο διαφορετικοί τύποι κινητήρων συνεχούς ρεύματος, παράλληλης διέγερσης και διέγερσης σειράς.

Ο κινητήρας διέγερσης σειράς έχει καλή ροπή εκκίνησης, αλλά η ταχύτητα περιστροφής του μειώνεται δραστικά με την αύξηση του φορτίου. Αντίθετα ο κινητήρας παράλληλης διέγερσης έχει χαμηλή ροπή εκκίνησης, αλλά μπορεί να διατηρήσει σχεδόν σταθερή την ταχύτητα περιστροφής του ανεξάρτητα από το φορτίο.

Σε αντίθεση με άλλες ηλεκτρικές μηχανές, οι κινητήρες συνεχούς ρεύματος παρουσιάζουν ένα ιδιαίτερο χαρακτηριστικό. Την εμφάνιση αντιηλεκτρεγερτικής δύναμης (ΑΗΕΔ). Στα άκρα ενός αγωγού που κινείται μέσα σε ένα μαγνητικό πεδίο, αναπτύσσεται ηλεκτρεγερτική δύναμη, σύμφωνα με τον νόμο της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής. Το ίδιο συμβαίνει και στα τυλίγματα του οπλισμού. Θα αναπτυχθεί μια ηλεκτρεγερτική δύναμη εξ επαγωγής, η οποία θα έχει αντίθετη φορά από την εφαρμοζόμενη τάση εισόδου.

Αυτή η αντιηλεκτρεγερτική δύναμη μειώνει σημαντικά την ένταση του ρεύματος στο κύκλωμα του οπλισμού όπως φαίνεται και στην παρακάτω σχέση.

$$I = \frac{V_a - E_a}{R_a} \quad (2.3)$$

Όπου:

V_a = τάση τυλίγματος τυμπάνου (V)

E_a = αντιηλεκτρεγερτική δύναμη (V)

R_a = αντίσταση τυλίγματος τυμπάνου (Ω)

Η αντιηλεκτρεγερτική δύναμη είναι ανάλογη με την ταχύτητα περιστροφής του δρομέα. Κατά την εκκίνηση του κινητήρα η αντιηλεκτρεγερτική δύναμη είναι πολύ μικρή και έτσι το ρεύμα του οπλισμού παίρνει πολύ υψηλές τιμές σε σχέση με το ονομαστικό ρεύμα λειτουργίας με αποτέλεσμα σε αυτή την περίπτωση να καεί ο δρομέας.[16]

$$I_{a, εκ} = \frac{V_a}{R_a} \cong (7 - 10)I_{a, ον} \quad (2.4)$$

Όπου:

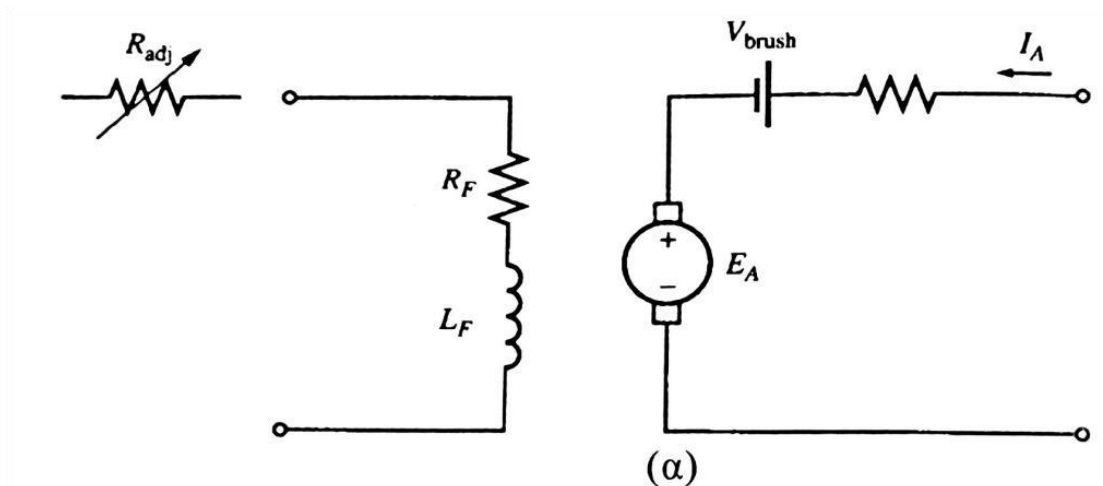
$I_{a, ον}$ = ονομαστικό ρεύμα τυμπάνου

$I_{a, εκ}$ = ρεύμα εκκίνησης

2.6.1 Ισοδύναμο κύκλωμα

Το ισοδύναμο κύκλωμα ενός κινητήρα συνεχούς ρεύματος παρουσιάζεται στην εικόνα 2.12. Το κύκλωμα οπλισμού παριστάνεται με μια ιδανική πηγή τάσης E_A και με μια αντίσταση R_A . Αυτό το κύκλωμα ουσιαστικά είναι το κύκλωμα Thevenin της συνολικής δομής του δρομέα, που περιλαμβάνει τους αγωγούς του δρομέα, τους βοηθητικούς πόλους και το τυλίγμα αντιστάθμισης, αν υπάρχει.

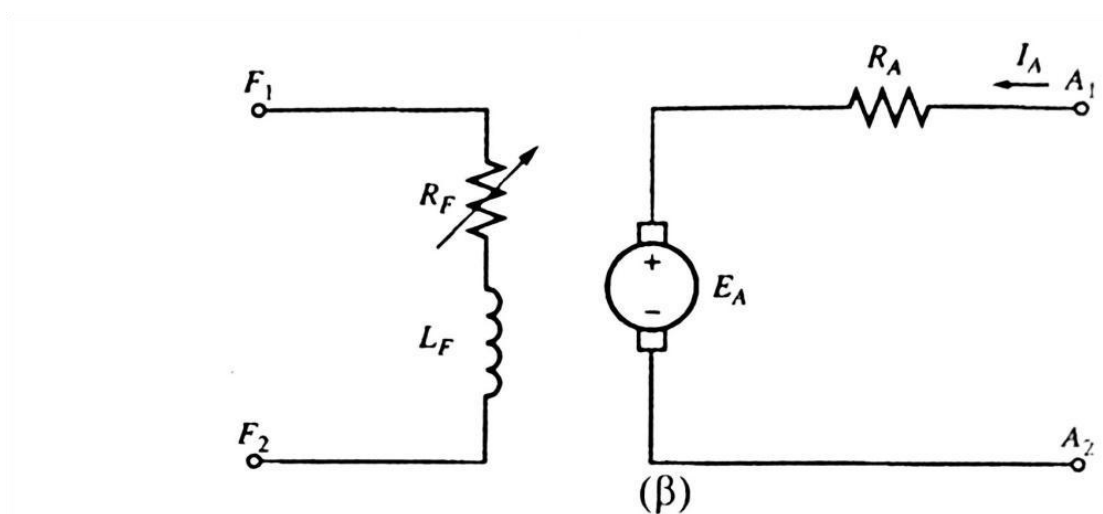
Η πτώση τάσης V_{brush} στις ψήκτρες, απεικονίζεται με μια μικρή πηγή συνεχούς τάσης η οποία έχει αντίθετη πολικότητα ως προς το ρεύμα του δρομέα της μηχανής. Τα τυλίγματα της διέγερσης που είναι υπεύθυνα για την παραγωγή της κύριας μαγνητικής ροής του κινητήρα, απεικονίζονται με την αυτεπαγωγή L_F και με την αντίσταση R_F . Η αντίσταση R_{adj} αναπαριστά την εξωτερική μεταβλητή αντίσταση που χρησιμοποιείται για τον έλεγχο της ποσότητας του ρεύματος διέγερσης.



Εικόνα 2-12 Ισοδύναμο κύκλωμα κινητήρα συνεχούς ρεύματος

Στο ισοδύναμο κύκλωμα της εικόνας 2.12 μπορούν να γίνουν κάποιες απλοποιήσεις όπως φαίνεται στην εικόνα 2.13.

Η πτώση τάσης στις ψήκτρες είναι ένα πολύ μικρό κλάσμα της παραγμένης τάσης στα άκρα του κινητήρα. Έτσι σε περιπτώσεις που δεν είναι σημαντική μπορεί να μην ληφθεί υπόψιν ή να περιληφθεί κατά προσέγγιση στην τιμή της αντίστασης R_A . Επίσης η εσωτερική αντίσταση των αγωγών διέγερσης μπορεί να συμπεριληφθεί στην τιμή της μεταβλητής αντίστασης R_{adj} , άρα η συνολική τιμή των δυο αυτών αντιστάσεων συμβολίζεται με R_F .



Εικόνα 2-13 Απλοποιημένο ισοδύναμο κύκλωμα του κινητήρα

Η τάση εξ επαγωγής που αναπτύσσεται στο εσωτερικό της μηχανής είναι:

$$E_A = K \times \Phi \times \omega \quad (2.5)$$

Ενώ η επαγόμενη ροπή στον άξονα της μηχανής είναι:

$$\tau = K \times n \times \Phi \times I_A \quad (2.6)$$

Όπου:

K : κατασκευαστική σταθερά της μηχανής

Φ : μαγνητική ροή σε κάθε πόλο της μηχανής

ω : γωνιακή ταχύτητα του δρομέα (rad/s)

n : γωνιακή ταχύτητα του δρομέα (rpm/s)

I_A : ρεύμα τυλίγματος δρομέα

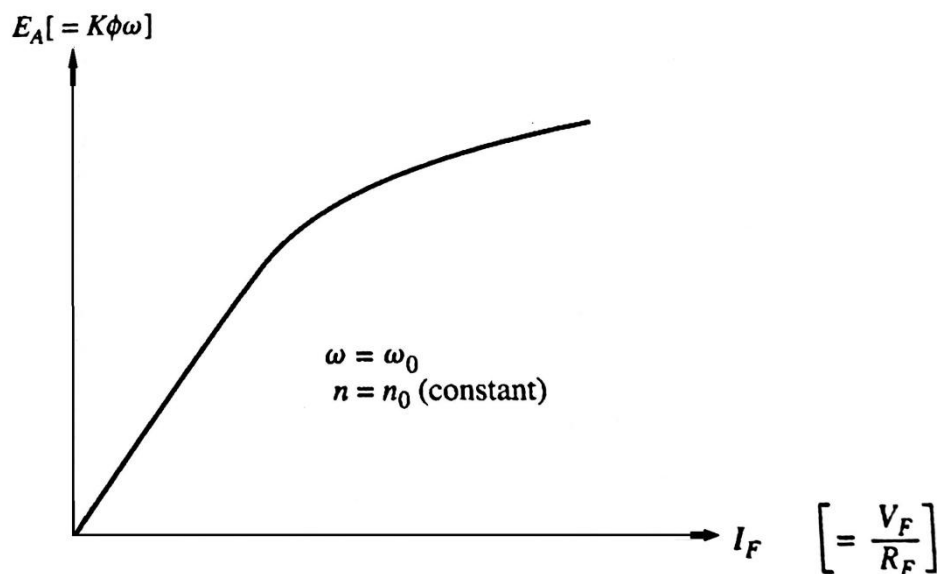
Οι σχέσεις (5) και (6) όπως επίσης, ο νόμος τάσεων του Kirchhoff για το κύκλωμα οπλισμού και η καμπύλη μαγνήτισης της μηχανής αποτελούν βασικά εργαλεία για την ανάλυση και την κατανόηση της συμπεριφοράς ενός κινητήρα συνεχούς ρεύματος. [17]

2.6.2 Καμπύλη μαγνήτισης

Η τάση εξ επαγωγής E_A είναι ανάλογη τόσο της ροής που δημιουργείται στο εσωτερικό της μηχανής όσο και της ταχύτητας περιστροφής της.

Κατά την λειτουργία ενός κινητήρα, το ρεύμα διέγερσης I_F είναι αρκετά σημαντικό αφού χάρη σε αυτό εμφανίζεται η μαγνητική ροή Φ η οποία είναι απαραίτητη για την περιστροφή του κινητήρα. Επίσης ισχύει ότι η μαγνητική ροή είναι ανάλογη του ρεύματος διέγερσης που την προκαλεί.

Έτσι αφού η τάση εξ επαγωγής E_A και το ρεύμα διέγερσης I_F είναι ανάλογα μεγέθη σε σχέση με την μαγνητική ροή Φ μπορεί να σχεδιαστεί η καμπύλη μαγνήτισης του κινητήρα σύμφωνα με την οποία προσδιορίζεται η εσωτερική τάση του κινητήρα, αφού πρώτα θεωρηθεί ότι η ταχύτητα περιστροφής είναι σταθερή.



Εικόνα 2-14 Καμπύλη μαγνήτισης ενός κινητήρα συνεχούς ρεύματος

Αφού παρατηρηθεί η καμπύλη μαγνήτισης της εικόνας 2.14, γίνεται εύκολα αντιληπτό πως οι περισσότεροι κινητήρες κατασκευάζονται με σκοπό να λειτουργούν κοντά στο σημείο κορεσμού της καμπύλης αυτής. Αυτό συμβαίνει με σκοπό να παραχθεί η μέγιστη δυνατή ισχύς που μπορεί να αποδώσει ο κινητήρας. Άρα πολλές φορές μια σημαντική αύξηση στο ρεύμα διέγερσης συνεπάγεται με μια μικρή αύξηση στην τάση E_A κατά την λειτουργία του κινητήρα με πλήρες φορτίο.[18]

2.6.3 Αντίδραση τυμπάνου

Όταν ένα κινητήρας συνεχούς ρεύματος βρίσκεται σε λειτουργία, στο εσωτερικό του δημιουργείται το μαγνητικό πεδίο των πόλων καθώς και το μαγνητικό πεδίο γύρω από τον κάθε ρευματοφόρο αγωγό του επαγωγικού τυμπάνου (Νόμος Ampere-Oersted). Το μαγνητικό πεδίο των πόλων ή κύριο μαγνητικό πεδίο όπως αλλιώς ονομάζεται δημιουργείται χάρη στη διέλευση του ηλεκτρικού ρεύματος I_δ μέσα από το τύλιγμα διέγερσης. Αντίστοιχα το πεδίο γύρω από τον κάθε ρευματοφόρο αγωγό του επαγωγικού τυμπάνου ή αλλιώς το πεδίο επαγωγικού τυμπάνου οφείλει την ύπαρξη του στην διέλευση του ηλεκτρικού ρεύματος I_T μέσα από το τύλιγμα του επαγωγικού τυμπάνου. Τα δυο αυτά διαφορετικά μαγνητικά πεδία αθροίζονται γεωμετρικά και σχηματίζουν ένα συνιστάμενο μαγνητικό πεδίο.

Ουσιαστικά η επίδραση του μαγνητικού πεδίου των ρευματοφόρων αγωγών του τυλίγματος του επαγωγικού τυμπάνου στο μαγνητικό πεδίο των πόλων που δημιουργείται από την διέγερση του κινητήρα, ονομάζεται αντίδραση τυμπάνου (armature reaction).

Το συνιστάμενο μαγνητικό πεδίο που υπάρχει πλέον στο εσωτερικό του κινητήρα δεν μηδενίζεται στις θέσεις των ουδέτερων ζωνών, δηλαδή στον άξονα εκείνο όπου το συνιστάμενο πεδίο στο διάκενο είναι μηδενικό, αλλά σε καινούριες θέσεις οι οποίες καθυστερούν κατά την φορά περιστροφής του επαγωγικού τυμπάνου. Αυτή η μετατόπιση της ουδέτερης ζώνης του μαγνητικού πεδίου έχει σαν αποτέλεσμα την μείωση του ολικού μαγνητικού πεδίου του κινητήρα. Τέλος το μέγεθος της μετατόπισης της ουδέτερης ζώνης εξαρτάται από το φορτίο που έχει συνδεθεί στον άξονα του κινητήρα. Έτσι η μηχανική φόρτιση του άξονα επηρεάζει το εύρος της μετατόπισης της ουδέτερης ζώνης.

Η συγκεκριμένη μετατόπιση οδηγεί στην μείωση της αντιηλεκτρεγερτικής δύναμης (ΑΗΕΔ) του κινητήρα καθώς επίσης και της ροπής του. Αυτό συμβαίνει επειδή και η αντιηλεκτρεγερτική δύναμη αλλά και η ροπή είναι δυνάμεις οι οποίες εξαρτώνται από την μαγνητική ροή. Άρα αφού μειώνεται η μαγνητική ροή εξαιτίας της αντίδρασης τυμπάνου, θα μειωθούν και οι αντίστοιχες σχέσεις (ροπή και ΑΗΕΔ) του κινητήρα.

Επίσης, μετά την μετατόπιση της ουδέτερης ζώνης, οι ψήκτρες βραχυκυκλώνουν ομάδες του τυλίγματος του επαγωγικού τυμπάνου που βρίσκονται πλέον σε τάση με αποτέλεσμα να εμφανίζονται σπινθηρισμοί μεταξύ αυτών και του συλλέκτη. Συνέπεια του γεγονότος αυτού είναι η ανάπτυξη μεγάλων θερμοκρασιών, η απώλεια ενέργειας και η πρόωρη καταστροφή των ψηκτρών.[19]

Κατά την βραχυκύκλωσή μεταξύ των ψηκτρών και των τομέων του συλλέκτη εμφανίζεται η υπέρταση $L(di/dt)$ που ονομάζεται και επαγωγική κρουστική τάση (inductive kick). Η συγκεκριμένη τάση είναι υπεύθυνη για την εμφάνιση σπινθηρισμών στις ψήκτρες της μηχανής γεγονός που μπορεί να προκαλέσει εκκενώσεις. Έτσι η διάρκεια ζωής των ψηκτρών θα μειωθεί δραστικά και το κόστος για την συντήρηση της μηχανής θα αυξηθεί σημαντικά.

Συνοψίζοντας η αντίδραση τυμπάνου έχει αρνητικό αντίκτυπο κατά την λειτουργία ενός κινητήρα συνεχούς ρεύματος. Για τον λόγο αυτό η αντιμετώπιση αυτού του φαινομένου μπορεί να γίνει με την τοποθέτηση βοηθητικών πόλων ή και με την χρησιμοποίηση μαγνητικών πόλων με τύλιγμα αντιστάθμισης. [20]

2.6.4 Βοηθητικοί πόλοι

Το πρόβλημα των σπινθηρισμών μπορεί να αντιμετωπιστεί αν η διαφορά δυναμικού ανάμεσα στους αγωγούς που υφίστανται την μεταγωγή γίνει μηδέν. Για να συμβεί αυτό θα πρέπει μεταξύ των διαστημάτων των πόλων να τοποθετηθούν μικροί πόλοι οι οποίοι ονομάζονται βοηθητικοί ή εσωτερικοί πόλοι (commutation poles-interpoles). Αυτοί βρίσκονται ακριβώς πάνω από τους

αγωγούς που υφίστανται την μεταγωγή έτσι ώστε να προσδίδουν επιπλέον μαγνητική ροή στο πεδίο της μηχανής. Με αυτόν τον τρόπο η τάση μεταξύ των αγωγών αυτών γίνεται μηδέν, γεγονός που οδηγεί στην εξαφάνιση των σπινθηρισμών στις ψήκτρες.

Οι βοηθητικοί πόλοι εξαιτίας του μικρού τους μεγέθους επιδρούν μόνο στους λίγους αγωγούς που υφίστανται μεταγωγή με αποτέλεσμα να μην επηρεάζουν την λειτουργία της μηχανής. Συνεπώς το πρόβλημα που αφορά την εξασθένηση της μαγνητικής ροής της μηχανής, δεν έχει καμία σχέση με την εισαγωγή των βοηθητικών πόλων.

Η σύνδεση των τυλιγμάτων των βοηθητικών πόλων σε σειρά με τα τυλίγματα του δρομέα οδηγεί στον μηδενισμό της τάσης μεταξύ των συγκεκριμένων τομέων του συλλέκτη και μάλιστα για οποιαδήποτε τιμή του φορτίου. Πιο αναλυτικά, καθώς το φορτίο της μηχανής και το ρεύμα του δρομέα αυξάνονται, το μέγεθος της μετακίνησης της ουδέτερης ζώνης αλλά και τα φαινόμενα $L(di/dt)$ επίσης αυξάνονται. Άρα η τάση μεταξύ των αγωγών που υφίστανται μεταγωγή μεγαλώνει. Όμως οι βοηθητικοί πόλοι λόγω της αυξημένης ροής που προσδίδουν προκαλούν μεγαλύτερη τάση στους παραπάνω αγωγούς, η οποία είναι αντίθετη σε σχέση με την τάση που οφείλεται στην μετακίνηση της ουδέτερης ζώνης. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την εξάλειψη των επιπτώσεων που δημιουργούνται από την μετακίνηση της ουδέτερης ζώνης καθώς και των επιπτώσεων από τα φαινόμενα $L(di/dt)$.

Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δοθεί στην πολικότητα των βοηθητικών πόλων καθώς θα πρέπει να είναι τέτοια έτσι ώστε να δημιουργείται μια αντίθετη τάση σε σχέση με την τάση που παράγεται από την μετακίνηση της ουδέτερης ζώνης και από τα φαινόμενα $L(di/dt)$. Για να επιτευχθεί αυτό σε έναν κινητήρα, θα πρέπει οι βοηθητικοί πόλοι να έχουν την ίδια πολικότητα με τον προηγούμενο πόλο.

Είναι συχνό το φαινόμενο να χρησιμοποιούνται βοηθητικοί πόλοι σε μηχανές συνεχούς ρεύματος, αφού με αυτό τον τρόπο εξαφανίζονται οι σπινθηρισμοί που δημιουργούνται στις ψήκτρες, με σχετικά μικρή οικονομική επιβάρυνση. Κατά κύριο λόγο τοποθετούνται σε μηχανές συνεχούς ρεύματος οι οποίες έχουν ισχύ μεγαλύτερη από 1hp. Όμως το πρόβλημα που αφορά την εξασθένηση της μαγνητικής ροής εξακολουθεί να υπάρχει, αφού οι βοηθητικοί πόλοι δεν διορθώνουν τον τρόπο με τον οποίο κατανέμεται η μαγνητική ροή κάτω από τις επιφάνειες των πόλων.

2.6.5 Τύλιγμα αντιστάθμισης

Σε κινητήρες οι οποίοι έχουν αρκετά μεγάλη ισχύς και είναι κατασκευασμένοι υπό αυστηρές προδιαγραφές, η εξασθένηση της μαγνητικής ροής στο εσωτερικό τους αποτελεί ένα πολύ σοβαρό ζήτημα που απαιτεί επίλυση. Για την αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος αναπτύχθηκε μια διαφορετική τεχνική που εξαφανίζει τις επιπτώσεις της αντίδρασης τυμπάνου μειώνοντας όσο αυτό είναι δυνατό, το εύρος μετακίνησης της ουδέτερης ζώνης και την εξασθένηση της μαγνητικής ροής.

Σε αυτή την συγκεκριμένη τεχνική εγκαθίστανται τυλίγματα αντιστάθμισης (compensating windings) σε αυλάκια τα οποία είναι τοποθετημένα στις επιφάνειες των πόλων και απέναντι από τους αγωγούς του δρομέα, με σκοπό να περιοριστούν τα αρνητικά αποτελέσματα της αντίδρασης τυμπάνου. Τα τυλίγματα αυτά όπως επίσης και τα τυλίγματα του δρομέα είναι συνδεδεμένα μεταξύ τους σε σειρά έτσι ώστε οποιαδήποτε μεταβολή του ρεύματος του δρομέα, να προξενεί ανάλογη μεταβολή στο ρεύμα των τυλιγμάτων αντιστάθμισης.

Αν πραγματοποιηθεί μια πιο προσεκτική μελέτη σε σχέση με την επίδραση των τυλιγμάτων αντιστάθμισης σε μια μηχανή συνεχούς ρεύματος, θα διαπιστωθεί πως η μαγνητεγερτική δύναμη λόγω των τυλιγμάτων αντιστάθμισης, είναι ίση και αντίθετη με την αντίστοιχη μαγνητεγερτική δύναμη λόγω του δρομέα σε κάθε ένα σημείο κάτω από τις επιφάνειες του πόλου. Ουσιαστικά η μαγνητεγερτική δύναμη που προκύπτει δεν είναι τίποτα περισσότερο από την μαγνητεγερτική δύναμη που προέρχεται από τους πόλους. Με αυτόν τον τρόπο η μαγνητική ροή στην μηχανή παραμένει σταθερή, χωρίς να εξαρτάται από το φορτίο της μηχανής.

Όμως αν και τα τυλίγματα αντιστάθμισης εξαλείφουν την παραμόρφωση του μαγνητικού πεδίου κάτω από τους πόλους, έχουν ένα σημαντικό μειονέκτημα. Τα τυλίγματα αυτά έχουν αρκετά μεγάλο κόστος αφού είναι απαραίτητο να εισχωρήσουν στις επιφάνειες των πόλων.

Ακόμα σε οποιαδήποτε μηχανή που διαθέτει τυλίγματα αντιστάθμισης είναι απαραίτητο να υπάρχουν και βοηθητικοί πόλοι επειδή είναι αδύνατο γι' αυτά, να περιορίσουν από μόνα τους τα φαινόμενα $L(di/dt)$. Σε αυτή την περίπτωση όμως οι βοηθητικοί πόλοι δεν είναι υπεύθυνοι για την διόρθωση της μετακίνησης της ουδέτερης ζώνης, οπότε δεν είναι απαραίτητο να είναι τόσο ισχυροί όσο θα ήταν αν δεν υπήρχαν τα τυλίγματα αντιστάθμισης.

Εξαιτίας λοιπόν της μεγάλης δαπάνης που απαιτείται για την τοποθέτηση τυλιγματος αντιστάθμισης και βοηθητικών πόλων σε μια μηχανή, το τύλιγμα αυτό τοποθετείται μόνο όταν το απαιτούν οι αυστηρές προδιαγραφές του κινητήρα. Δεν είναι λίγες οι φορές άλλωστε, που μικρές μηχανές έχουν μόνο βοηθητικούς πόλους, οι οποίοι είναι περισσότερο απαραίτητοι. Έτσι επιτυγχάνεται μικρότερο κόστος καθώς η κατασκευή είναι αρκετά πιο απλή. [21]

2.6.6 Άλλοι τρόποι για την αντιμετώπιση της αντίδρασης τυμπάνου

Το βοηθητικό τυλίγμα και το τυλίγμα αντιστάθμισης που εισάγονται στην μηχανή με σκοπό να εξασθενήσουν το μαγνητικό πεδίο, δεν είναι οι μόνες λύσεις για την αντιμετώπιση της αντίδρασης τυμπάνου.

Αν οι πόλοι κατασκευαστούν από ελάσματα τότε το πέλμα θα βρίσκεται στον μαγνητικό κορεσμό, άρα η μαγνητική διαπερατότητα θα μειωθεί. Αυτό σημαίνει ότι και η παραμόρφωση του πεδίου θα ελαττωθεί.

Επίσης αν δημιουργηθούν μία ή περισσότερες αυλακώσεις στους πόλους, θα αυξηθεί η μαγνητική αντίσταση για την μαγνητική ροή του τυμπάνου, η οποία ρέει μέσω των κύριων πόλων, ενώ η μαγνητική ροή των κύριων πόλων θα μείνει ανεπηρέαστη. Με λίγα λόγια λοιπόν, παρέχεται η δυνατότητα εξασθένησης του πεδίου του τυμπάνου.[22]

2.7 Ροή ισχύος και απώλειες

Οι απώλειες που προκύπτουν στις μηχανές συνεχούς ρεύματος διακρίνονται στις παρακάτω βασικές κατηγορίες:

- Απώλειες χαλκού (Απώλειες I^2R)
- Απώλειες ψηκτρών
- Απώλειες πυρήνα
- Μηχανικές απώλειες
- Κατανεμημένες απώλειες

Απώλειες χαλκού: Οι απώλειες αυτές παρατηρούνται στα τυλίγματα του οπλισμού, καθώς και στα τυλίγματα της διέγερσης και περιγράφονται από τις ακόλουθες εξισώσεις:

$$\text{Απώλειες τυλίγματος οπλισμού } P_A = I_A^2 R_A \quad (2.7)$$

$$\text{Απώλειες τυλίγματος διέγερσης } P_F = I_F^2 R_F \quad (2.8)$$

Όπου: P_A = οι απώλειες οπλισμού

P_F = οι απώλειες διέγερσης

I_A = το ρεύμα οπλισμού

I_F = το ρεύμα στα τυλίγματα του πεδίου

R_A = η αντίσταση των τυλιγμάτων οπλισμού

R_F = η αντίσταση των τυλιγμάτων διέγερσης

Οι αντιστάσεις, οι οποίες συμμετέχουν στις παραπάνω εξισώσεις είναι οι αντιστάσεις των τυλιγμάτων στη θερμοκρασία κανονικής λειτουργίας. Δηλαδή στην θερμοκρασία στην οποία η μηχανή λειτουργεί με τα ονομαστικά μεγέθη.

Απώλειες ψηκτρών: Είναι οι απώλειες οι οποίες υπάρχουν εξαιτίας της τάσης επαφής των ψηκτρών της μηχανής και υπολογίζονται με την βοήθεια της παρακάτω εξίσωσης:

$$P_{BD} = V_{BD} I_A \quad (2.9)$$

Όπου: P_{BD} = οι απώλειες ψηκτρών

V_{BD} = η πτώση τάσης στις ψήκτρες

I_A = το ρεύμα οπλισμού

Οι απώλειες ψηκτρών υπολογίζονται με τον παραπάνω τρόπο, αφού η πτώση τάσης στην επαφή, έχει σχεδόν σταθερή τιμή για διάφορες τιμές του ρεύματος οπλισμού. Τις περισσότερες φορές η τιμή της πτώσης τάσης στις ψήκτρες είναι 2V.

Απώλειες πυρήνα: Είναι αυτές που περιλαμβάνουν τις απώλειες υστέρησης και τις απώλειες δινορρευμάτων του μετάλλου της μηχανής. Οι απώλειες υστέρησης εξαρτώνται από την επιφάνεια του βρόγχου υστέρησης και από την συχνότητα της επαγόμενης ηλεκτρεγερτικής δύναμης. Ενώ οι απώλειες των δινορρευμάτων εξαρτώνται και αυτές από την συχνότητα της επαγόμενης ΗΕΔ, αλλά και από την πυκνότητα της μαγνητικής ροής. Άρα αφού οι συγκεκριμένες απώλειες είναι άμεσα σχετιζόμενες με την συχνότητα της επαγόμενης ΗΕΔ, τότε επηρεάζονται από την ταχύτητα του άξονα περιστροφής της μηχανής, αφού τα μεγέθη αυτά είναι ανάλογα μεταξύ τους.

Μηχανικές απώλειες: Πρόκειται για τις απώλειες που έχουν να κάνουν με τα μηχανικά φαινόμενα. Οι μηχανικές απώλειες χωρίζονται σε δυο βασικές κατηγορίες. Στις απώλειες τριβών (friction losses) και στις απώλειες εξαερισμού (windage losses). Οι απώλειες τριβών οφείλονται στα ρουλεμάν του άξονα της μηχανής καθώς επίσης και σε ένα αρκετά μικρό ποσοστό, στις τριβές που δημιουργούνται ανάμεσα στο σύστημα συλλέκτη-ψηκτρών. Οι απώλειες εξαερισμού δημιουργούνται από την τριβή των κινητών μερών της μηχανής με τον αέρα. Οι απώλειες που ανήκουν στην κατηγορία των μηχανικών απωλειών είναι ανάλογες της ταχύτητας του άξονα περιστροφής.

Κατανεμημένες απώλειες: Σε αυτή την κατηγορία γίνεται λόγος για τις απώλειες, που δεν είναι εφικτό να συμπεριληφθούν σε μια από τις προηγούμενες κατηγορίες. Είναι πρακτικά αδύνατο να υπολογιστούν εξολοκλήρου οι απώλειες της μηχανής, αφού κάθε φορά ένα μικρό ποσοστό διαφεύγει από τους υπολογισμούς που πραγματοποιούνται με βάση τις τέσσερις προηγούμενες σχέσεις. Το ποσοστό αυτό ισοδυναμεί με τις κατανεμημένες απώλειες που στις περισσότερες

μηχανές θεωρείται ότι αποτελούν το 1% της ισχύος εξόδου, κατά τη λειτουργία της μηχανής με πλήρες φορτίο.

Μια από τις πιο εύκολες και συνηθισμένες μεθόδους παράστασης των απωλειών σε έναν κινητήρα συνεχούς ρεύματος είναι το διάγραμμα ροής ισχύος (power-flow diagram). Σε ένα τέτοιο διάγραμμα εμφανίζεται η ηλεκτρική ισχύς εισόδου από την οποία αφαιρούνται οι απώλειες χαλκού. Το ποσοστό της ισχύς που απομένει θεωρείται ότι μετατρέπεται (ιδανικά) από ηλεκτρική σε μηχανική ισχύς (P_{conv}).

Η ηλεκτρική ισχύς που μετατρέπεται είναι:

$$P_{conv} = E_A I_A \quad (2.10)$$

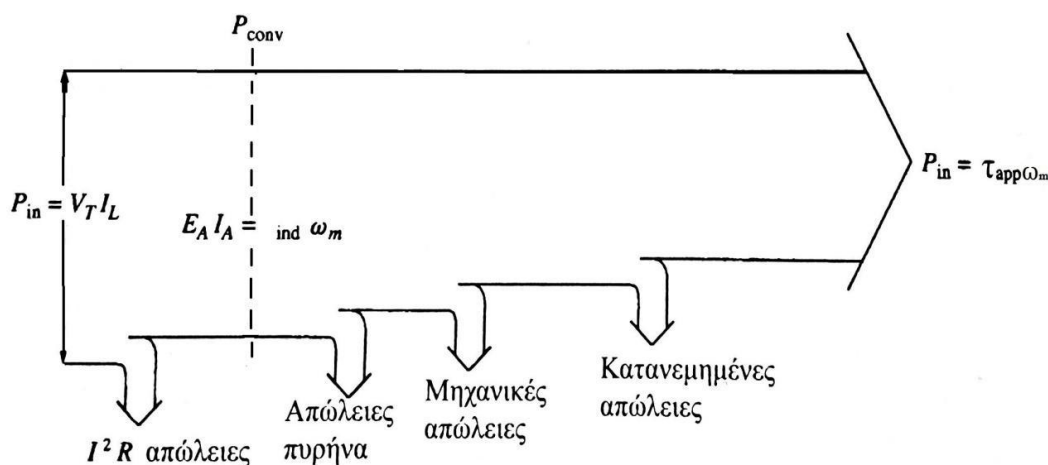
Και η μηχανική ισχύς που προκύπτει δίνεται από την σχέση:

$$P_{conv} = \tau_{ind} \omega_m \quad (2.11)$$

Η ισχύς αυτή όμως, δεν είναι αυτή που εμφανίζεται στα άκρα του κινητήρα. Η ισχύς η οποία θα εμφανιστεί, θα προκύψει αν αφαιρεθούν οι απώλειες πυρήνα, οι μηχανικές απώλειες και οι κατανεμημένες απώλειες από την μηχανική ισχύς που προήλθε από την σχέση...

Άρα η τελική αυτή ισχύς αποτελεί την ισχύς εξόδου του κινητήρα η οποία συνήθως μετριέται σε ίππους (1HP=746Watt).

[23]



Εικόνα 2-15 Διάγραμμα ροής ισχύος κινητήρα συνεχούς ρεύματος

3 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο:ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΚΙΝΗΤΗΡΩΝ ΣΥΝΕΧΟΥΣ ΡΕΥΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΕΛΕΓΧΟΣ ΣΤΡΟΦΩΝ

3.1 Είδη κινητήρων συνεχούς ρεύματος

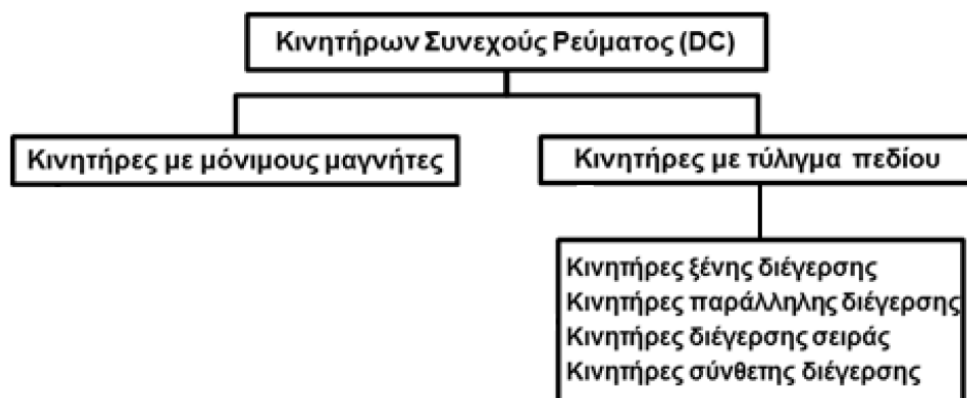
Η αρχή λειτουργίας των κινητήρων συνεχούς ρεύματος στηρίζεται στην αλληλεπίδραση δυο μαγνητικών πεδίων. Ανάλογα με τον τρόπο που δημιουργείται, το κύριο μαγνητικό πεδίο ή πεδίο διέγερσης, είναι αυτό που διακρίνει τους κινητήρες σε δυο διαφορετικές κατηγορίες. Η πρώτη κατηγορία αφορά τους κινητήρες με μόνιμους μαγνήτες (permanent magnet motors) ενώ η δεύτερη κατηγορία, αναφέρεται στους κινητήρες με τύλιγμα πεδίου.

Το κύριο πεδίο των κινητήρων που ανήκουν στην πρώτη κατηγορία, δημιουργείται από μόνιμους μαγνήτες (διέγερση), οι οποίοι τις περισσότερες φορές βρίσκονται τοποθετημένοι στον στάτη της μηχανής. Από την άλλη μεριά στους κινητήρες με τύλιγμα πεδίου το πεδίο δημιουργείται από τύλιγμα ηλεκτρομαγνήτη. Οι κινητήρες αυτοί, χαρακτηρίζονται ως κινητήρες συνεχούς ρεύματος με τύλιγμα πεδίου. Στους συγκεκριμένους κινητήρες αλλάζοντας την τιμή του ρεύματος που διέρχεται από τον ηλεκτρομαγνήτη (τύλιγμα πεδίου ή τύλιγμα διέγερσης) μεταβάλλεται η χαρακτηριστική ταχύτητας-ροπής του κινητήρα.

Οι κινητήρες συνεχούς ρεύματος, ανάλογα με τον τρόπο με τον οποίο είναι συνδεδεμένο το τύλιγμα διέγερσης σε σχέση με αυτό του δρομέα, διακρίνονται στις παρακάτω κατηγορίες.

1. Κινητήρες ξένης διέγερσης
2. Κινητήρες παράλληλης διέγερσης
3. Κινητήρες διέγερσης σειράς
4. Κινητήρες σύνθετης διέγερσης

Όλοι οι κινητήρες που προαναφέρθηκαν ανήκουν στην κατηγορία των κινητήρων συνεχούς ρεύματος με ψήκτες. Εκτός από την κατηγορία αυτή, υπάρχει και η κατηγορία των κινητήρων συνεχούς ρεύματος χωρίς ψήκτες, που χωρίζονται σε κινητήρες με μόνιμο μαγνήτη και σε κινητήρες με διακοπτόμενη μαγνητική αντίσταση. Οι κινητήρες με μόνιμους μαγνήτες, αποτελούν κινητήρες που παρουσιάζουν χαμηλή ισχύς και ανάλογα με την κατασκευή του δρομέα διακρίνονται σε κινητήρες με δρομέα σιδήρου, κινητήρες χωρίς δρομέα σιδήρου και σε επίπεδους κινητήρες.



Εικόνα 3-1 Κατηγορίες ηλεκτρικών κινητήρων συνεχούς ρεύματος

3.2 Κινητήρες με μόνιμους μαγνήτες

Οι κινητήρες με μόνιμους μαγνήτες έχουν σχεδόν ίδιο τρόπο λειτουργίας με τους κινητήρες παράλληλης και ξένης διέγερσης. Αυτό που τους κάνει να ξεχωρίζουν σε σχέση με αυτούς, είναι το γεγονός ότι δεν έχουν τύλιγμα διέγερσης, αλλά πόλους οι οποίοι είναι κατασκευασμένοι από μόνιμους μαγνήτες. Εξαιτίας της απουσίας του τυλίγματος αυτού, ο κινητήρας μπορεί να κατασκευάζεται και να χρησιμοποιείται σε εφαρμογές που απαιτούν χαμηλή ισχύς. Χωρίς ρεύμα διέγερσης εμφανίζει μειωμένες απώλειες και λόγω των μόνιμων μαγνητών έχει σταθερή μαγνητική ροή.

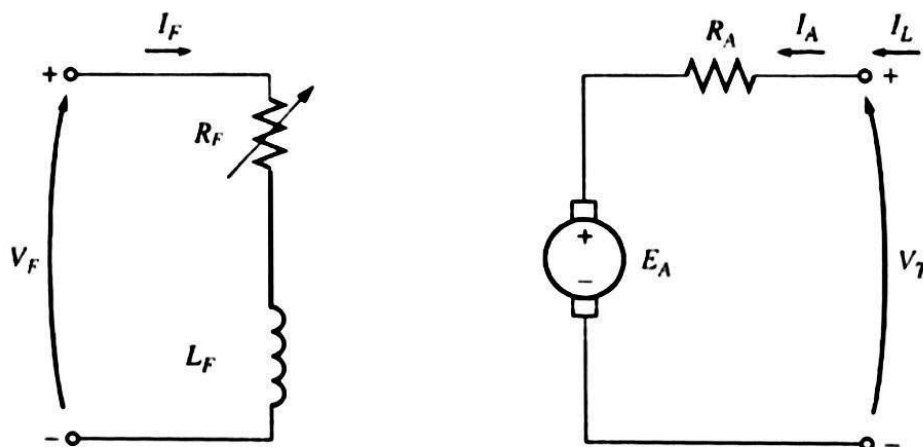
Οι κινητήρες αυτοί έχουν την δυνατότητα καλύτερης ρύθμισης στροφών, μετά βέβαια από τους κινητήρες σύνθετης διέγερσης και παρουσιάζουν άριστη ροπή εκκίνησης. Οι ηλεκτρικές και οι μαγνητικές απώλειες που κάνουν την εμφάνισή τους στους συγκεκριμένους κινητήρες, έχουν αρκετά χαμηλή τιμή συγκριτικά με τους άλλους κινητήρες λόγω της έλλειψης των πηνίων πεδίου. Ένα ακόμα σημαντικό πλεονέκτημα που έχουν, είναι ότι μπορεί να αντιστραφεί η φορά περιστροφής τους με σχετικά χαμηλή τάση. Για την αλλαγή της φοράς τους λοιπόν, χωρίς να εμφανιστεί κάποιο πρόβλημα, απαιτείται η εφαρμογή χαμηλής τάσης κοντά στο 10% της ονομαστικής τάσης. Απαραίτητη προϋπόθεση για να συμβεί αυτό είναι το ρεύμα αντιστροφής να μην ξεπερνάει το ρεύμα που θα διαρρέει τον κινητήρα με σταματημένο δρομέα.

Αν και οι κινητήρες μόνιμων μαγνητών έχουν σημαντικά πλεονεκτήματα τόσο για την ρύθμιση των στροφών όσο και για την ροπή τους κατά της εκκίνησης, παρουσιάζουν και κάποια αξιοσημείωτα μειονεκτήματα. Ένα μειονέκτημα που αξίζει να αναφερθεί είναι ο κίνδυνος απομαγνητισμού των μαγνητών, που οφείλεται στην πολύ μεγάλη αύξηση της θερμοκρασίας στο εσωτερικό τους ή σε

περίπτωση που το ρεύμα οπλισμού πάρει αρκετά μεγάλη τιμή. Άλλο ένα σημαντικό μειονέκτημα που παρουσιάζουν, αφορά την ροπή την οποία μπορούν να αναπτύξουν. Με λίγα λόγια η ροπή που παράγουν είναι αρκετά περιορισμένη, αφού οι μόνιμοι μαγνήτες μπορούν να μαγνητιστούν μέχρι ένα απαράβατο αλλά χαμηλό επίπεδο. Επομένως, δεν μπορούν να έχουν αυξημένη μαγνητική ροή ή τουλάχιστον όση μπορούν να προσφέρουν τα τυλίγματα διέγερσης.

3.3 Κινητήρας συνεχούς ρεύματος ανεξάρτητης και παράλληλης διέγερσης

Κινητήρας ξένης διέγερσης καλείται ο κινητήρας, στον οποίο το τύλιγμα διέγερσης του, τροφοδοτείται από εξωτερική ηλεκτρική πηγή. Η εξωτερική αυτή ηλεκτρική πηγή, που τροφοδοτεί το τύλιγμα διέγερσης του κινητήρα, δεν έχει καμία σχέση με το εσωτερικό ηλεκτρικό κύκλωμα. Αντίθετα με του κινητήρες ξένης διέγερσης, στους κινητήρες παράλληλης διέγερσης, δεν υπάρχει η ανάγκη για ξεχωριστή πηγή τροφοδοσίας του τυλίγματος διέγερσης, καθώς στους κινητήρες αυτού του είδους τα τυλίγματα τυμπάνου και διέγερσης είναι σε παράλληλη σύνδεση.[24]



Εικόνα 3-2 Ισοδύναμο κύκλωμα κινητήρα ξένης διέγερσης

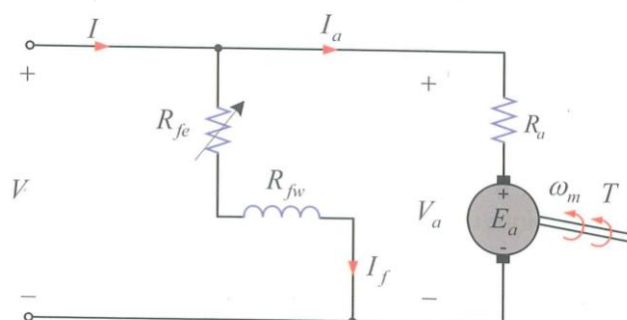
Οι εξισώσεις που προέρχονται από το ισοδύναμο κύκλωμα της εικόνας 3.2 είναι:

$$I_F = \frac{V_F}{R_F} \quad (3.1)$$

$$V_T = E_A + I_A R_A \quad (3.2)$$

$$I_L = I_A \quad (3.3)$$

Το ισοδύναμο κύκλωμα ενός κινητήρα συνεχούς ρεύματος παράλληλης διέγερσης απεικονίζεται στην εικόνα 3.3. Σε περίπτωση που η τάση τροφοδοσίας από το δίκτυο είναι σταθερή, τότε και η τάση διέγερσης παραμένει και αυτή σταθερή. Έτσι όταν συμβαίνει αυτό, η συμπεριφορά του κινητήρα συνεχούς ρεύματος παράλληλης διέγερσης, δεν έχει απολύτως καμία διαφορά με το πως συμπεριφέρεται ένας κινητήρας συνεχούς ρεύματος ξένης διέγερσης. Για το λόγο αυτό, οι δυο αυτές κατηγορίες κινητήρων εξετάζονται ταυτόχρονα.



Εικόνα 3-3 Ισοδύναμο κύκλωμα κινητήρα παράλληλης διέγερσης

Το άθροισμα των ρευμάτων του τυλίγματος τυμπάνου και της κύριας διέγερσης αποτελεί το συνολικό ρεύμα, το οποίο απορροφά ο κινητήρας από το δίκτυο.

$$I=I_a+I_f \quad (3.4)$$

Αφού παρατηρηθεί το ισοδύναμο κύκλωμα της εικόνας 3.3, προκύπτει πως η τάση τροφοδοσίας ενός κινητήρα παράλληλης διέγερσης, ισούται με το άθροισμα της επαγόμενης αντιηλεκτρεγερτικής δύναμης (ΑΗΕΔ) στο τύλιγμα τυμπάνου, καθώς και της πτώσης τάσης στην ωμική αντίσταση του τυλίγματος τυμπάνου. [25]

$$V=V_a=E_a+R_a I_a \quad (3.5)$$

3.3.1 Χαρακτηριστική φορτίου κινητήρα συνεχούς ρεύματος παράλληλης διέγερσης

Η γραφική παράσταση μεταξύ των ποσοτήτων εξόδου μιας μηχανής, ονομάζεται χαρακτηριστική φορτίου της μηχανής αυτής. Αφού λοιπόν τα μεγέθη που συναντώνται στην έξοδο ενός κινητήρα, είναι η ταχύτητα περιστροφής και η ροπή του στον άξονα, τότε την χαρακτηριστική φορτίου του κινητήρα, αποτελεί το διάγραμμα της ροπής εξόδου συναρτήσει της ταχύτητας του.

Σε έναν κινητήρα συνεχούς ρεύματος παράλληλης διέγερσης, αν αυξηθεί το φορτίο που εφαρμόζεται στον άξονα του, η ροπή του φορτίου τ_{load} θα γίνει μεγαλύτερη από την ροπή που παράγει η μηχανή τ_{ind} , με αποτέλεσμα η ταχύτητα περιστροφής να αρχίσει να μειώνεται. Σε αυτή την περίπτωση, η τάση που παράγει στο εσωτερικό του ο κινητήρας, αρχίζει και αυτή με την σειρά της να μειώνεται ($E_A = K\Phi\omega_m \downarrow$) και έτσι το ρεύμα οπλισμού αυξάνεται $I_A = (V_T - E_A \downarrow) / R_A$. Αυτή η αύξηση που παρατηρείται στο ρεύμα οπλισμού είναι υπεύθυνη για την παραγωγή μεγαλύτερης ροπής από τον κινητήρα $\tau_{ind} = K\Phi I_A \uparrow$ με αποτέλεσμα η ροπή του κινητήρα να γίνει ίση, με την ροπή που εφαρμόζει σε αυτόν το φορτίο. Αυτό συμβαίνει όταν η ταχύτητα περιστροφής είναι μικρότερη από την αρχική.

Με την βοήθεια των εξισώσεων της επαγόμενης τάσης, της ροπής στον κινητήρα, καθώς και από τον νόμο τάσεων του Kirchhoff, σχηματίζεται η χαρακτηριστική εξόδου ενός κινητήρα συνεχούς ρεύματος παράλληλης διέγερσης.

Η εξίσωση για τον νόμο τάσεων του Kirchhoff είναι της μορφής:

$$V_T = E + I_A R_A \quad (3.6)$$

Αφού η τάση εξ επαγωγής που αναπτύσσεται στο εσωτερικό του κινητήρα είναι $E_A = K\Phi\omega_m$, η εξίσωση (3.6) γίνεται:

$$V_T = K\Phi\omega_m + I_A R_A \quad (3.7)$$

Επίσης, επειδή η επαγόμενη ροπή στον άξονα του κινητήρα είναι $\tau_{ind} = K\Phi I_A$, το ρεύμα I_A εκφράζεται ως:

$$I_A = \frac{\tau_{ind}}{K\Phi} \quad (3.8)$$

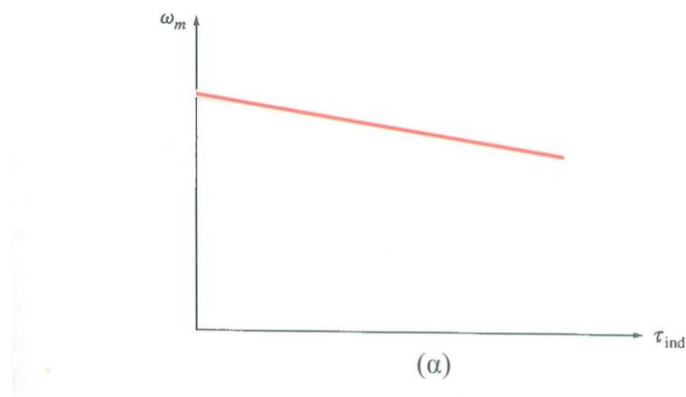
Από τον συνδυασμό των εξισώσεων (3.7) και (3.8) προκύπτει:

$$V_T = K\Phi\omega_m + \frac{\tau_{ind}}{K\Phi} R_A \quad (3.9)$$

Αν η εξίσωση (3.9) λυθεί ως προς την ταχύτητα ω του κινητήρα τότε:

$$\omega_m = \frac{V_T}{K\Phi} - \frac{R_A}{(K\Phi)^2} \tau_{ind} \quad (3.10)$$

Η εξίσωση (3.10) είναι μια ευθεία με αρνητική κλίση. Στην εικόνα 3.4 αναπαρίσταται η χαρακτηριστική ροπής-ταχύτητας για έναν κινητήρα συνεχούς ρεύματος παράλληλης διέγερσης.

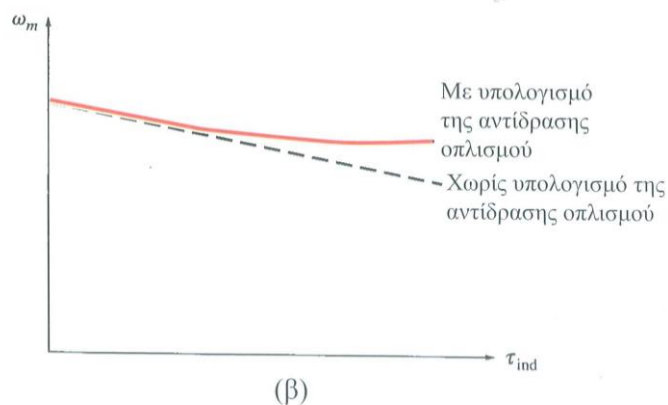


Εικόνα 3-4 Χαρακτηριστική ροπής-ταχύτητας κινητήρα παράλληλης ή ανεξάρτητης διέγερσης με τύλιγμα αντιστάθμισης για την εξάλειψη της αντίδρασης τυμπάνου

Σε αυτό το σημείο, αξίζει να αναφερθεί ένα σημαντικό στοιχείο. Όλοι οι άλλοι παράγοντες της έκφρασης, θα πρέπει να διατηρούνται σταθεροί, έτσι ώστε να ισχύει η παραπάνω γραμμική σχέση ανάμεσα στην ταχύτητα και στην ροπή του κινητήρα, καθώς το φορτίο μεταβάλλεται. Σε ότι έχει να κάνει με την πηγή εισόδου, αυτή υποτίθεται πως τροφοδοτεί τον κινητήρα με σταθερή τάση. Σε περίπτωση που η τάση δεν είναι σταθερή, αλλά η τιμή της μεταβάλλεται, τότε οι μεταβολές αυτές θα επηρεάσουν την μορφή της καμπύλης ροπής-ταχύτητας του κινητήρα.

Επίσης η αντίδραση τυμπάνου, η οποία μπορεί να εμφανίζεται στο εσωτερικό του κινητήρα, είναι άλλος ένα παράγοντας, ο οποίος μπορεί και αυτός να επηρεάσει την μορφή της καμπύλης ροπής-ταχύτητας. Αν ένας κινητήρας εμφανίζει αντίδραση οπλισμού κατά την αύξηση του φορτίου του, τα φαινόμενα εξασθένησης της μαγνητικής ροής, οδηγούν στην μείωση της ροής στο εσωτερικό του. Σύμφωνα με την εξίσωση (3.10), η μείωση της μαγνητικής ροής οδηγεί στην αύξηση της ταχύτητας χωρίς αντίδραση οπλισμού. Η χαρακτηριστική ροπής-ταχύτητας ενός κινητήρα παράλληλης διέγερσης στον οποίο υπολογίζεται και η αντίδραση οπλισμού, παρουσιάζεται στην εικόνα 3.5. Σε περίπτωση που ο κινητήρας διαθέτει τύλιγμα αντιστάθμισης, δεν παρατηρείται εξασθένηση της μαγνητικής ροής στο εσωτερικό του, αλλά αντίθετα η ροή αυτή παραμένει σταθερή.

Αν για οποιαδήποτε τιμή του φορτίου δίνεται το ρεύμα οπλισμού και η ταχύτητα ενός κινητήρα συνεχούς ρεύματος παράλληλης διέγερσης, δηλαδή αν η καμπύλη ροπής-ταχύτητας είναι δεδομένη, τότε υπάρχει η δυνατότητα να υπολογιστεί η ταχύτητα σε οποιαδήποτε άλλη φόρτιση, με την μόνη προϋπόθεση ότι είναι ήδη γνωστό ή μπορεί να προσδιοριστεί το ρεύμα οπλισμού σε αυτή την φόρτιση.[26]



Εικόνα 3-5 Χαρακτηριστική ροπής-ταχύτητας του κινητήρα που παρουσιάζει αντίδραση οπλισμού

3.3.2 Ρύθμιση της ταχύτητας περιστροφής σε κινητήρα παράλληλης διέγερσης

Προκειμένου να ελεγχθεί η ταχύτητα περιστροφής σε έναν κινητήρα συνεχούς ρεύματος παράλληλης διέγερσης, χρησιμοποιούνται συγκεκριμένες τεχνικές οι οποίες θα αναφερθούν και στην συνέχεια θα αναλυθούν παρακάτω. Οι τεχνικές είναι οι εξής:

1. Μεταβολή της αντίστασης διέγερσης (R_F)
2. Μεταβολή της εφαρμοζόμενης τάσης στον οπλισμό του κινητήρα
3. Τοποθέτηση αντίστασης σε συνδεσμολογία σειράς με το κύκλωμα οπλισμού

Οι πρώτες δυο τεχνικές, αποτελούν τις επικρατέστερες μεθόδους για τον έλεγχο της ταχύτητας σε κινητήρες συνεχούς ρεύματος παράλληλης διέγερσης, ενώ η τρίτη μέθοδος, είναι αυτή που χρησιμοποιείται πιο σπάνια για τον σκοπό αυτό.[27]

3.3.3 Μεταβολή της αντίστασης διέγερσης (R_F)

Για να γίνει πιο εύκολα κατανοητή η διαδικασία που λαμβάνει χώρα όταν μεταβάλλεται η τιμή της αντίστασης διέγερσης σε έναν κινητήρα συνεχούς ρεύματος, θα αναλυθεί η συμπεριφορά του, στην περίπτωση κατά την οποία η τιμή της αντίστασης αυτής θα αυξηθεί. Όταν λοιπόν αυξηθεί η τιμή της αντίστασης διέγερσης, τότε το ρεύμα διέγερσης θα μειωθεί ($I_F = V_T / R_F \uparrow$). Αυτό έχει ως επακόλουθο και την μείωση της μαγνητικής ροής ϕ του κινητήρα στο εσωτερικό του. Η ελάττωση της μαγνητικής ροής, προκαλεί στιγμιαία μείωση στην τάση $E_A (K\Phi \downarrow \omega_m)$, η οποία παράγεται στο εσωτερικό του κινητήρα. Από την σχέση (3.11), γίνεται εύκολα αντιληπτό, πως εξαιτίας της μείωσης της E_A η τιμή του ρεύματος οπλισμού θα αυξηθεί αρκετά.

$$I_A \uparrow = \frac{V_T - E_A \downarrow}{R_A} \quad (3.11)$$

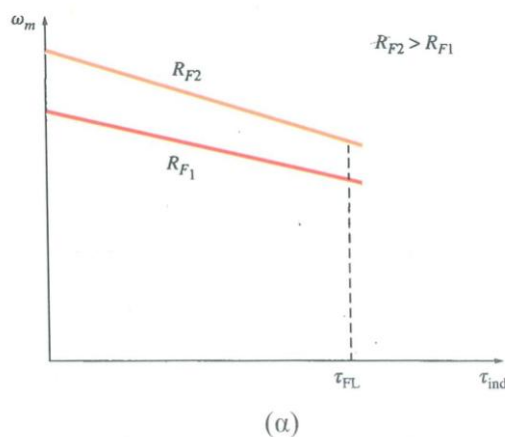
Η αύξηση του ρεύματος οπλισμού είναι σημαντικά μεγαλύτερη σε σχέση με την μείωση της τιμής της μαγνητικής ροής, πράγμα το οποίο θα οδηγήσει τελικά, στην αύξηση της επαγόμενης ροπής του κινητήρα.

$$\tau_{ind} = K\Phi I_A \quad (3.12)$$

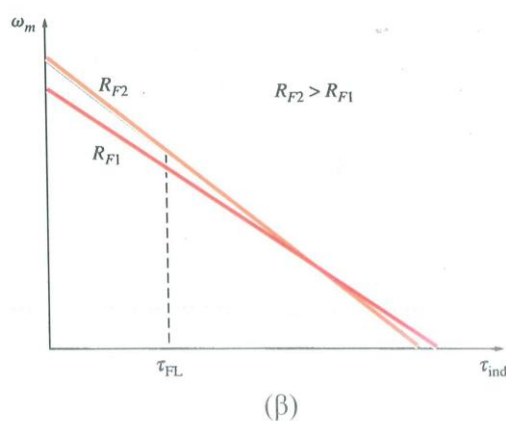
Επειδή ισχύει $\tau_{ind} > \tau_{load}$ η μηχανή θα αρχίσει να περιστρέφεται πιο γρήγορα σε σχέση με πριν. Όμως, καθώς η ταχύτητα του κινητήρα έχει μεγαλύτερη τιμή, τότε η τάση E_A που παράγεται στο εσωτερικό του κινητήρα, θα αυξηθεί με αποτέλεσμα να μειωθεί η τιμή του ρεύματος οπλισμού I_A . Αυτό το γεγονός οδηγεί στην μείωση της επαγόμενης ροπής τ_{ind} , έως ότου αυτή να εξισωθεί με την ροπή του φορτίου τ_{load} , σε μια καινούρια ταχύτητα ισορροπίας μεγαλύτερη από αυτήν που υπήρχε πριν.

Στην εικόνα 3.6 και στην εικόνα 3.7 διακρίνονται τα αποτελέσματα από την αύξηση της αντίστασης διέγερσης πάνω στην χαρακτηριστική φορτίου, σε έναν κινητήρα συνεχούς ρεύματος παράλληλης διέγερσης. Από τις συγκεκριμένες εικόνες γίνεται εύκολα κατανοητό πως αν μειωθεί η μαγνητική ροή στο εσωτερικό της μηχανής, τότε θα αυξηθεί η ταχύτητα του κινητήρα, όταν αυτός λειτουργεί χωρίς φορτίο, ενώ ταυτόχρονα θα γίνει πιο απότομη η κλίση της καμπύλης ροπής-ταχύτητας.

Η αύξηση λοιπόν, της τιμής της αντίστασης διέγερσης προκαλεί την αύξηση στην ταχύτητα του κινητήρα. Σε αντίθετη περίπτωση, δηλαδή αν η τιμή της αντίστασης διέγερσης μειωθεί, τότε είναι δυνατό να αντιστραφεί η όλη διαδικασία και με αυτόν τον τρόπο να πραγματοποιηθεί η μείωση της ταχύτητας του κινητήρα.



Εικόνα 3-6 Αποτελέσματα από την αύξηση της αντίστασης διέγερσης στο κανονικό εύρος ταχυτήτων του κινητήρα



Εικόνα 3-7 Αποτελέσματα από την αύξηση της αντίστασης διέγερσης από τη λειτουργία χωρίς φορτίο μέχρι και τις συνθήκες ακινητοποιημένου δρομέα του κινητήρα

Τα σχήματα που παρουσιάζουν οι χαρακτηριστικές στις εικόνες 3.6 και 3.7 είναι συνέπεια της εξίσωσης (3.10) με την βοήθεια της οποίας περιγράφεται η χαρακτηριστική φορτίου του κινητήρα. Σύμφωνα με αυτήν, η ταχύτητα του κινητήρα όταν αυτός βρίσκεται στην αφόρτιστη λειτουργία, είναι αντιστρόφως ανάλογη της μαγνητικής ροής, ενώ η κλίση της καμπύλης είναι αντιστρόφως ανάλογη της ροής στο τετράγωνο. Με αυτόν τον τρόπο η μείωση της μαγνητικής ροής κάνει πιο απότομη την χαρακτηριστική ροπής-ταχύτητας.

Πιο αναλυτικά, η εικόνα 3.6 απεικονίζει την χαρακτηριστική φορτίου του κινητήρα, σε συνθήκες που βρίσκονται ανάμεσα στη λειτουργία χωρίς φορτίο, καθώς και στην λειτουργία υπό πλήρες φορτίο. Μια αύξηση στην αντίσταση διέγερσης έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση της ταχύτητας του κινητήρα, όπως περιγράφηκε προηγουμένως. Έτσι για τους κινητήρες οι οποίοι λειτουργούν σε συνθήκες ανάμεσα στην αφόρτιστη λειτουργία και στην λειτουργία υπό φορτίο, μια αύξηση στην τιμή της αντίστασης διέγερσης οδηγεί σιγουρά σε αύξηση της ταχύτητας περιστροφής του κινητήρα.

Σε ότι έχει να κάνει με την γραφική παράσταση στην εικόνα 3.7, αυτή παρουσιάζει την χαρακτηριστική φορτίου του κινητήρα, σε όλο το εύρος της λειτουργίας του. Δηλαδή από την λειτουργία χωρίς φορτίο, έως και την κατάσταση ακινητοποίησης. Η γραφική αυτή παράσταση μαρτυράει πως σε πολύ μικρές ταχύτητες, η αύξηση της αντίστασης διέγερσης έχει σαν αποτέλεσμα την μείωση της ταχύτητας του κινητήρα. Αυτό οφείλεται στο γεγονός, πως στις πολύ μικρές ταχύτητες, η αύξηση του ρεύματος οπλισμού, που προκαλείται από την μείωση της E_A , δεν είναι πια αρκετά μεγάλη έτσι ώστε να αντισταθμίσει την μείωση της μαγνητικής ροής στην εξίσωση της επαγόμενης ροπής. Επομένως, αφού η μείωση της μαγνητικής ροής είναι πιο μεγάλη

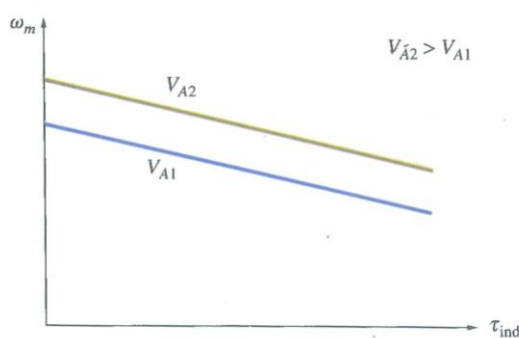
σε σχέση με την αύξηση του ρεύματος οπλισμού, η επαγόμενη ροπή θα μειωθεί και έτσι θα μειωθεί η ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα.

Αρκετοί κινητήρες συνεχούς ρεύματος που χρησιμοποιούνται προκειμένου να ελεγχθεί η ταχύτητα, λειτουργούν με ταχύτητα που πλησιάζει στις συνθήκες ακινητοποίησης. Στους συγκεκριμένους κινητήρες μια αύξηση στην αντίσταση διέγερσης μπορεί να μην επηρεάσει καθόλου την λειτουργία του κινητήρα ή μπορεί ακόμα και να επιβραδύνει την ταχύτητα του κινητήρα. Επειδή η μέθοδος ελέγχου της ταχύτητας μέσω της αντίστασης διέγερσης δεν είναι αρκετά αξιόπιστη, αφού τα αποτελέσματα από την μέθοδο αυτή δεν είναι προβλέψιμα, δεν θα πρέπει να εφαρμόζεται σε τέτοιους τύπους κινητήρων συνεχούς ρεύματος. Αντίθετα, είναι προτιμότερο να εφαρμόζεται η μέθοδος ελέγχου της ταχύτητας, με ρύθμιση της τάσης στα άκρα του οπλισμού.[28]

3.3.4 Μεταβολή της εφαρμοζόμενης τάσης στον οπλισμό του κινητήρα

Για τον έλεγχο της ταχύτητας ενός κινητήρα με αυτή τη μέθοδο, η τάση που εφαρμόζεται στα άκρα του οπλισμού, μεταβάλλεται χωρίς όμως να επηρεάζεται η τάση στα άκρα του κυκλώματος διέγερσης. Εύκολα λοιπόν προκύπτει, πως ο κινητήρας που χρησιμοποιεί τη μέθοδο μεταβολής της τάσης οπλισμού, για τον έλεγχο της ταχύτητας του, είναι κινητήρας ανεξάρτητης διέγερσης.

Καθώς η τιμή της τάσης V_A αυξάνεται, θα αυξηθεί και το ρεύμα οπλισμού του κινητήρα σύμφωνα με την σχέση $I_A = \frac{V_T \uparrow - E_A}{R_A}$. Η αύξηση αυτή επηρεάζει με την σειρά της την επαγόμενη ροπή του κινητήρα, με αποτέλεσμα και αυτή να αποκτήσει μεγαλύτερη τιμή $\tau_{ind} = (K\Phi I_A \uparrow)$ και τότε θα ισχύει $\tau_{ind} > \tau_{load}$, γεγονός που επιταχύνει τον κινητήρα. Όμως η αύξηση της ταχύτητας περιστροφής του κινητήρα προκαλεί αύξηση της τάσης ($E_A = K\Phi\omega_m \uparrow$) και έτσι το ρεύμα οπλισμού ελαττώνεται ξανά. Άρα όπως αναφέρθηκε και πριν, η επαγόμενη ροπή τ_{ind} μειώνεται και αποκτά ίδια τιμή με την ροπή φορτίου τ_{load} , σε μια ταχύτητα περιστροφής ω_m , η οποία είναι μεγαλύτερη σε σχέση με την αρχική ταχύτητα.



Εικόνα 3-8 Χαρακτηριστική ροπής-ταχύτητας κινητήρα παράλληλης διέγερσης με ρύθμιση της τάσης οπλισμού

Σύμφωνα με την χαρακτηριστική ροπής-ταχύτητας που παρουσιάζεται στην εικόνα 3.8, η αύξηση της τάσης οπλισμού του κινητήρα, τον οδηγεί σε μεγαλύτερες ταχύτητες περιστροφής, ενώ η κλίση της καμπύλης αυτής στην συγκεκριμένη περίπτωση παραμένει σταθερή.

3.3.5 Τοποθέτηση αντίστασης σε συνδεσμολογία σειράς με το κύκλωμα οπλισμού

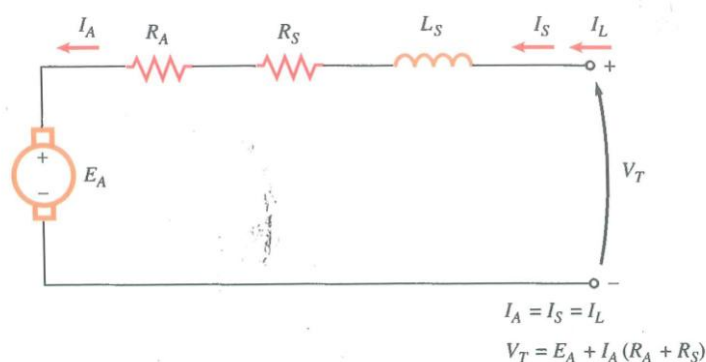
Όταν τοποθετηθεί μια αντίσταση σε συνδεσμολογία σειράς με το κύκλωμα οπλισμού του κινητήρα, τότε θα παρατηρηθεί μια αύξηση στην κλίση της χαρακτηριστικής ροπής-ταχύτητας, με αποτέλεσμα αυτός να περιστρέφεται πιο αργά κατά τη φόρτιση του. Η σύνδεση μιας αντίστασης στο κύκλωμα οπλισμού, αποτελεί μια μέθοδο ελέγχου της ταχύτητας με αρκετά υψηλό κόστος, καθώς οι απώλειες που εμφανίζονται πάνω στην αντίσταση που εισάγεται, είναι μεγάλες. Εξαιτίας αυτού του γεγονότος η συγκεκριμένη μέθοδος χρησιμοποιείται σπάνια. Όμως είναι πολύ πιθανό να εφαρμοστεί σε εφαρμογές στις οποίες ο κινητήρας λειτουργεί σχεδόν συνέχεια με την μέγιστη δυνατή ταχύτητα περιστροφής ή σε περιπτώσεις όπου η σχεδίαση και η δημιουργία μιας άλλης τεχνικής ελέγχου της ταχύτητας, είναι σημαντικά ακριβότερη.[29]

3.4 Κινητήρες συνεχούς ρεύματος με διέγερση σειράς

Οι κινητήρες συνεχούς ρεύματος, των οποίων τα τυλίγματα διέγερσης έχουν σχετικά μικρό αριθμό σπειρών συνδεδεμένες στη σειρά με το κύκλωμα οπλισμού, ονομάζονται κινητήρες συνεχούς ρεύματος με διέγερση σειράς. Σε τέτοιου είδους κινητήρες το ρεύμα οπλισμού, το ρεύμα διέγερσης καθώς και το ρεύμα εισόδου, έχουν την ίδια τιμή. Σύμφωνα με τον νομό των τάσεων του Kirchhoff σε αυτούς τους κινητήρες ισχύει η παρακάτω σχέση: [30]

$$V_T = E_A + I_A(R_A + R_S) \quad (3.13)$$

Το ισοδύναμο κύκλωμα ενός τέτοιου κινητήρα συνεχούς ρεύματος παρουσιάζεται στην εικόνα 3.9



Εικόνα 3-9 Ισοδύναμο κύκλωμα κινητήρα συνεχούς ρεύματος με διέγερση σειράς

3.4.1 Χαρακτηριστική φορτίου κινητήρα συνεχούς ρεύματος με διέγερση σειράς

Η μορφή της χαρακτηριστικής φορτίου σε έναν κινητήρα με διέγερση σειράς, είναι πολύ διαφορετική συγκριτικά με αυτήν που συναντάται σε έναν κινητήρα παράλληλης διέγερσης. Η μαγνητική ροή ενός κινητήρα με διέγερση σειράς, αποτελεί το βασικό χαρακτηριστικό, αφού αυτή είναι ανάλογη σε σχέση με το ρεύμα οπλισμού του κινητήρα. Έτσι αν αυξηθεί το ρεύμα εισόδου, τότε προκαλείται αύξηση της μαγνητικής ροής στο εσωτερικό του κινητήρα. Όπως επισημάνθηκε και στους κινητήρες παράλληλης και ανεξάρτητης διέγερσης, αυτή η αύξηση της μαγνητικής ροής ελαττώνει την ταχύτητα περιστροφής. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την απότομη κλίση της καμπύλης ροπής-ταχύτητας.

Η επαγόμενη ροπή ενός τέτοιου κινητήρα είναι:

$$\tau_{\text{ind}} = K\Phi I_A \quad (3.14)$$

Η μαγνητική ροή στο εσωτερικό του κινητήρα είναι ανάλογη σε σχέση με το ρεύμα οπλισμού. Άρα η μαγνητική ροή μπορεί να οριστεί ως εξής:

$$\Phi = cI_A \quad (3.15)$$

Όπου: c = σταθερός συντελεστής αναλογίας

Άρα η επαγόμενη ροπή στον κινητήρα είναι:

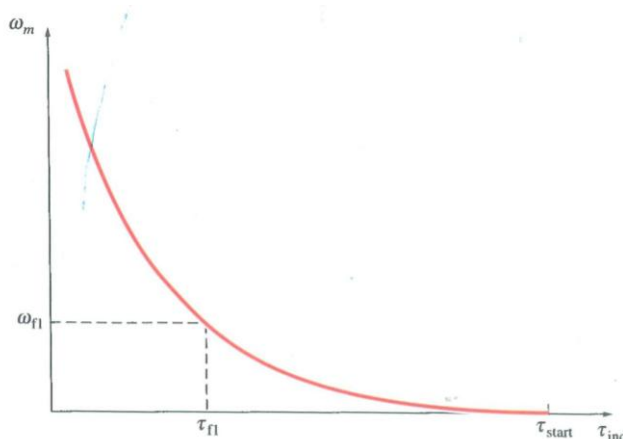
$$\tau_{\text{ind}} = K\Phi I_A = KcI_A^2 \quad (3.16)$$

Σύμφωνα με την σχέση (3.16) η ροπή του κινητήρα είναι ανάλογη με το τετράγωνο του ρεύματος οπλισμού του. Επίσης από την παραπάνω σχέση προκύπτει, πως ο κινητήρας με διέγερση σειράς δίνει την μεγαλύτερη ροπή ανά μονάδα ρεύματος από όλους τους άλλους κινητήρες συνεχούς ρεύματος. Για τον λόγο αυτό, αυτοί οι κινητήρες χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές, όπου η απαίτηση ροπής είναι αρκετά μεγάλη. Ενδεικτικά, τέτοιου είδους εφαρμογές είναι οι κινητήρες εκκίνησης (μίζες) στα αυτοκίνητα, οι κινητήρες των μηχανών έλξης στην ηλεκτροκίνηση και οι κινητήρες των ανελκυστήρων.

Η σχέση η οποία δίνει την χαρακτηριστική ροπής-ταχύτητας του κινητήρα είναι η παρακάτω:

$$\omega_m = \frac{v_T}{\sqrt{k_c}} \frac{1}{\tau_{\text{ind}}} - \frac{RA+RS}{k_c} \quad (3.17)$$

Η εξίσωση (3.17) οδηγεί στο συμπέρασμα, πως η ταχύτητα ενός κινητήρα με διέγερση σειράς μεταβάλλεται αντιστρόφως ανάλογα προς την τετραγωνική ρίζα της ροπής του.



Εικόνα 3-10 Χαρακτηριστική ροπής-ταχύτητας κινητήρα συνεχούς ρεύματος με διέγερση σειράς

Ένα σημαντικό μειονέκτημα που παρουσιάζουν οι κινητήρες με διέγερση σειράς, γίνεται εύκολα αντιληπτό αν παρατηρηθεί η εξίσωση (3.17). Το μειονέκτημα αυτό έχει να κάνει με την ροπή του κινητήρα και με το γεγονός πως όταν αυτή πλησιάζει την μηδενική τιμή, η ταχύτητα του γίνεται άπειρη. Πρακτικά είναι αδύνατο να μηδενιστεί η ροπή του κινητήρα, επειδή πρέπει να ξεπεραστούν τουλάχιστον οι απώλειες πυρήνα, οι καταναμημένες απώλειες και οι μηχανικές απώλειες. Όμως σε περίπτωση που δεν συνδεθεί κανένα άλλο φορτίο στον κινητήρα, τότε η ταχύτητα του θα αυξηθεί πάρα πολύ, με αποτέλεσμα να προκληθούν σημαντικές βλάβες στον κινητήρα. Σε καμία περίπτωση ένας κινητήρας διέγερσης σειράς δεν πρέπει να μένει χωρίς φορτίο, όπως επίσης δεν πρέπει να συνδέεται στο φορτίο του μέσω κάποιου υμάντα ή άλλου μηχανισμού ο οποίος θα μπορούσε να σπάσει. Στην δεύτερη περίπτωση καθώς ο κινητήρας περιστρέφεται, αν αυτός μείνει χωρίς φορτίο, τα αποτελέσματα θα επηρεάσουν σημαντικά τον κινητήρα, οδηγώντας ακόμα και στην καταστροφή του.[31]

3.4.2 Έλεγχος της ταχύτητας περιστροφής σε κινητήρες συνεχούς ρεύματος με διέγερση σειράς

Σε αντίθεση με τις τεχνικές που χρησιμοποιούνται στους κινητήρες συνεχούς ρεύματος παράλληλης διέγερσης, στους κινητήρες με διέγερση σειράς εφαρμόζεται μόνο μια αποδοτική μέθοδος για την ρύθμιση της ταχύτητας. Η μέθοδος αυτή αφορά την ρύθμιση της τάσης εισόδου στον κινητήρα. Καθώς αυξάνεται η τάση εισόδου, αυξάνεται και ο πρώτος όρος της εξίσωσης (3.17) με αποτέλεσμα ο κινητήρας να αρχίσει να περιστρέφεται γρηγορότερα για οποιαδήποτε δεδομένη τιμή της ροπής.

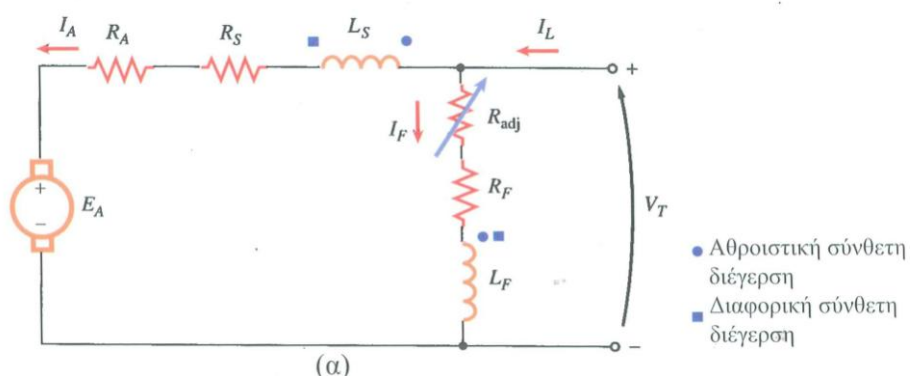
Η μέθοδος που αναφέρθηκε παραπάνω, δεν είναι η μοναδική που χρησιμοποιείται για την ρύθμιση της ταχύτητας. Αλλά για τον σκοπό αυτό μπορεί να εισαχθεί μια αντίσταση, σε σειρά με το κύκλωμα του κινητήρα. Όμως λόγω του ότι αυτή η πρακτική είναι αρκετά δαπανηρή και επειδή αυτή εφαρμόζεται μόνο στις ενδιάμεσες περιόδους της εκκίνησης ορισμένων κινητήρων, δεν συνηθίζεται να χρησιμοποιείται και προτιμάται η προηγούμενη μέθοδος.

Παλαιότερα δεν υπήρχε η δυνατότητα για την μεταβολή της τάσης εισόδου του κινητήρα και έτσι η μοναδική τεχνική για τον έλεγχο της ταχύτητας ενός τέτοιου είδους κινητήρα, ήταν η σύνδεση μιας αντίστασης σε σειρά με τον οπλισμό του. Επειδή όμως το κόστος ήταν αρκετά μεγάλο αναζητήθηκαν και άλλες τεχνικές. Πλέον η ανάπτυξη κυκλωμάτων με θυρίστορ έχει δώσει λύση σε αυτό το πρόβλημα.[32]

3.5 Κινητήρες συνεχούς ρεύματος σύνθετης διέγερσης

Στους κινητήρες συνεχούς ρεύματος σύνθετης διέγερσης υπάρχουν ταυτόχρονα και τα δυο τυλίγματα διέγερσης. Δηλαδή το τύλιγμα διέγερσης σειράς καθώς και το τύλιγμα παράλληλης διέγερσης. Στην εικόνα 3.11 παρουσιάζεται ένας τέτοιου είδους κινητήρας. Σύμφωνα με τις συνδέσεις των τυλιγμάτων διέγερσης που διαθέτουν τα μαγνητικά πεδία που δημιουργούν, μπορούν να δρουν μεταξύ τους είτε αθροιστικά είτε αφαιρετικά. Με πιο απλά λόγια δηλαδή οι αντίστοιχες μαγνητεγερτικές δυνάμεις των τυλιγμάτων, να προστίθενται ή να αφαιρούνται.

Στην εικόνα 3.11 τα κυκλικά σημάδια αφορούν έναν κινητήρα αθροιστικής σύνθετης διέγερσης, όπου οι μαγνητεγερτικές δυνάμεις προστίθενται, ενώ τα τετράγωνα σημάδια, αντιστοιχούν σε κινητήρα διαφορικής σύνθετης διέγερσης, όπου οι μαγνητεγερτικές δυνάμεις αφαιρούνται. [33]



Εικόνα 3-11 Ισοδύναμο κύκλωμα κινητήρα σύνθετης διέγερσης

Σε έναν κινητήρα συνεχούς ρεύματος σύνθετης διέγερσης ο νόμος των τάσεων Kirchhoff είναι:

$$V_T = E_A + I_A(R_A + R_S) \quad (3.13)$$

Τα ρεύματα τα οποία υπάρχουν στο εσωτερικό του κινητήρα είναι:

$$I_A = I_L - I_F \quad (3.18)$$

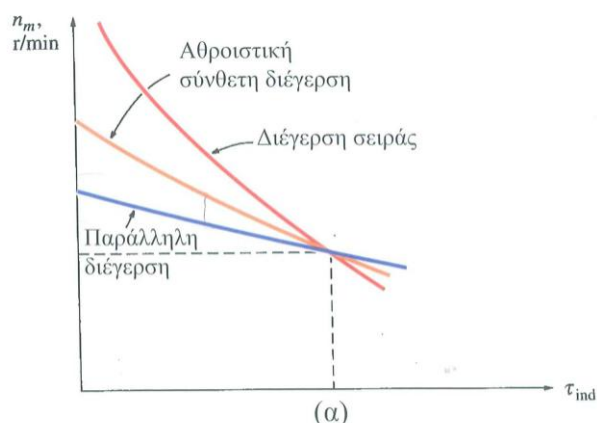
$$I_F = \frac{V_T}{R_F} \quad (3.19)$$

3.5.1 Χαρακτηριστικές ροπής-ταχύτητας σε κινητήρα συνεχούς ρεύματος αθροιστικής σύνθετης διέγερσης

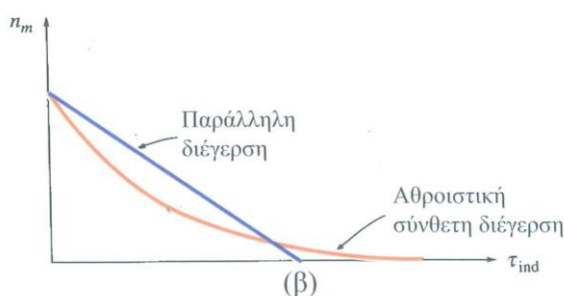
Το ένα μέρος της μαγνητικής ροής που υφίσταται στο εσωτερικό ενός κινητήρα συνεχούς ρεύματος αθροιστικής σύνθετης διέγερσης, παραμένει σταθερό, ενώ το υπόλοιπο είναι ανάλογο του ρεύματος οπλισμού. Αυτό οδηγεί στο συμπέρασμα, πως ένας τέτοιος κινητήρας έχει πολύ μεγαλύτερη ροπή εκκίνησης, αν συγκριθεί με έναν αντίστοιχο κινητήρα παράλληλης διέγερσης και μικρότερη ροπή εκκίνησης από έναν κινητήρα διέγερσης σειράς.

Επομένως, ο κινητήρας αθροιστικής σύνθετης διέγερσης είναι ένας συνδυασμός των πλεονεκτημάτων που παρουσιάζουν οι κινητήρες διέγερσης σειράς και οι κινητήρες παράλληλης διέγερσης. Δεν επιταχύνεται ασταμάτητα κατά την αφόρτιστη λειτουργία, όπως συμβαίνει σε έναν κινητήρα παράλληλης διέγερσης και διαθέτει αρκετά υψηλή ροπή εκκίνησης, όπως ακριβώς και ένας κινητήρας διέγερσης σειράς.

Σε έναν τέτοιο κινητήρα όταν το φορτίο είναι μικρό, ο κινητήρας συμπεριφέρεται σχεδόν ως κινητήρας παράλληλης διέγερσης, αφού το τυλίγμα διέγερσης σειράς δεν παίζει μεγάλο ρόλο. Όμως αν αυξηθεί το φορτίο, η μαγνητική ροή του τυλίγματος διέγερσης σειράς γίνεται πολύ σημαντική, με αποτέλεσμα η καμπύλη ροπής-ταχύτητας να μοιάζει με την καμπύλη που έχει ένας κινητήρας διέγερσης σειράς.[34]



Εικόνα 3-12 Σύγκριση της χαρακτηριστικής ροπής-ταχύτητας κινητήρα αθροιστικής σύνθετης διέγερσης με τις αντίστοιχες χαρακτηριστικές των κινητήρων διέγερσης σειράς και παράλληλης διέγερσης που έχουν τα ίδια ονομαστικά στοιχεία πλήρους φόρτισης



Εικόνα 3-13 Σύγκριση της χαρακτηριστικής ροπής-ταχύτητας κινητήρα αθροιστικής σύνθετης διέγερσης με την αντίστοιχη χαρακτηριστική ενός κινητήρα παράλληλης διέγερσης που έχει την ίδια ταχύτητα στη λειτουργία χωρίς φορτίο

3.5.2 Χαρακτηριστική ροπής-ταχύτητας σε κινητήρα συνεχούς ρεύματος διαφορικής σύνθετης διέγερσης

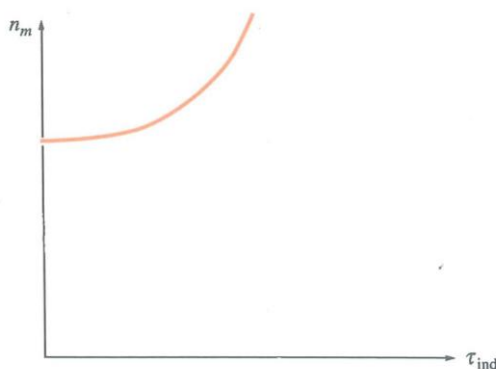
Σε έναν κινητήρα διαφορικής σύνθετης διέγερσης, αφαιρείται η μαγνητεγερτική δύναμη του τυλίγματος διέγερσης σειράς από την αντίστοιχη μαγνητεγερτική δύναμη του τυλίγματος παράλληλης διέγερσης. Έτσι η αύξηση του ρεύματος I_A και η αύξηση του φορτίου του κινητήρα, οδηγούν στην μείωση της μαγνητικής ροής στο εσωτερικό του. Αυτό συνεπάγεται με αύξηση της ταχύτητας του κινητήρα, με αποτέλεσμα εξαιτίας της επιτάχυνσης αυτής να αυξηθεί περισσότερο

το φορτίο και το ρεύμα I_A . Δηλαδή να μειωθεί η μαγνητική ροή και να αυξηθεί η ταχύτητα του κινητήρα σε σχέση με πριν. Από τα παραπάνω, προκύπτει πως ο κινητήρας διαφορικής σύνθετης διέγερσης είναι ασταθής και οδηγείται σε διαφυγή. Η αστάθεια αυτή είναι αρκετά χειρότερης μορφής, αν συγκριθεί με εκείνη ενός κινητήρα παράλληλης διέγερσης ο οποίος έχει αυξημένη αντίδραση οπλισμού. Επίσης η μεγάλη αστάθεια που παρουσιάζει, καθιστά τον κινητήρα διαφορικής σύνθετης διέγερσης, ακατάλληλο για σχεδόν όλες τις εφαρμογές.

Σε ότι έχει να κάνει με την εκκίνηση ενός τέτοιου κινητήρα, η κατάσταση γίνεται ακόμα χειρότερη, αφού αυτή είναι αδύνατο να πραγματοποιηθεί. Κατά την εκκίνηση τόσο το ρεύμα οπλισμού όσο και το ρεύμα διέγερσης σειράς, έχουν πολύ μεγάλη τιμή. Αφού αφαιρείται η μαγνητική ροή του τυλίγματος σειράς από αυτή του παράλληλου τυλίγματος, είναι εφικτό η πολικότητα των πόλων στην μηχανή να αντιστραφεί. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα ο κινητήρας να περιστρέφεται με χαμηλή ταχύτητα προς την λάθος κατεύθυνση ή να παραμένει ακίνητος. Ακόμα θα αρχίσει να υπερθερμαίνεται εξαιτίας του υψηλού ρεύματος οπλισμού. Κατά την εκκίνηση ενός τέτοιου κινητήρα θα πρέπει να βραχυκυκλωθεί το τύλιγμα σειράς, έτσι ώστε να συμπεριφέρεται σαν κινητήρας παράλληλης διέγερσης.

Ένας κινητήρας συνεχούς ρεύματος διαφορικής σύνθετης διέγερσης, εξαιτίας των προβλημάτων που αναφέρθηκαν, δεν χρησιμοποιείται σχεδόν ποτέ σκόπιμα. Σε περίπτωση όμως που η ροή ισχύος σε μια γεννήτρια αθροιστικής σύνθετης διέγερσης αντιστραφεί, τότε μπορεί να συναντηθεί ένας τέτοιος κινητήρας. Για το λόγο αυτό, αν υπάρχει κάποιο σύστημα που τροφοδοτείται από μια τέτοια γεννήτρια, είναι αναγκαίο να υπάρχει ένα κύκλωμα ασφάλειας το οποίο σε περίπτωση αντίστροφης της ισχύος, θα διακόπτει τη γεννήτρια από τις γραμμές τροφοδοσίας.

Στην εικόνα 3.14 παρουσιάζεται η χαρακτηριστική φορτίου ενός κινητήρα συνεχούς ρεύματος διαφορικής σύνθετης διέγερσης.[35]



Εικόνα 3-14 Χαρακτηριστική ροπής-ταχύτητας σε κινητήρα συνεχούς ρεύματος διαφορικής σύνθετης διέγερσης

3.5.3 Έλεγχος της ταχύτητας σε κινητήρες συνεχούς ρεύματος αθροιστικής σύνθετης διέγερσης

Ότι ακριβώς συμβαίνει στους κινητήρες παράλληλης διέγερσης για τον έλεγχο της ταχύτητας, το ίδιο ισχύει και για τους κινητήρες συνεχούς ρεύματος αθροιστικής σύνθετης διέγερσης. Οι τεχνικές που χρησιμοποιούνται για τον σκοπό αυτό είναι οι ίδιες.

1. Μεταβολή της αντίστασης διέγερσης (R_F)
2. Μεταβολή της εφαρμοζόμενης τάσης στον οπλισμό του κινητήρα
3. Τοποθέτηση αντίστασης σε συνδεσμολογία σειράς με το κύκλωμα οπλισμού

Για την μεταβολή της ταχύτητας ενός κινητήρα συνεχούς ρεύματος διαφορικής σύνθετης διέγερσης, χρησιμοποιούνται οι τεχνικές που προαναφέρθηκαν. Το θέμα όμως αυτό, παρουσιάζει ελάχιστο ενδιαφέρον, καθώς ο συγκεκριμένος τύπος κινητήρα δεν χρησιμοποιείται σχεδόν καθόλου.[36]

4 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο:ΕΚΚΙΝΗΣΗ ΚΙΝΗΤΗΡΩΝ ΣΥΝΕΧΟΥΣ ΡΕΥΜΑΤΟΣ

4.1 Προβλήματα κατά την εκκίνηση κινητήρων συνεχούς ρεύματος

Ένας κινητήρας συνεχούς ρεύματος, για να λειτουργεί σωστά, είναι αναγκαίο να προστατεύεται από τα προβλήματα που εμφανίζονται κατά την διαδικασία εκκίνησης του. Η τάση η οποία αναπτύσσεται στο εσωτερικό του, πριν αυτός αρχίσει να περιστρέφεται, έχει μηδενική τιμή ($E_A=0$). Άρα, αφού η εσωτερική αντίσταση ενός κλασσικού κινητήρα συνεχούς ρεύματος είναι αρκετά πιο μικρή, συγκριτικά με το μέγεθος του, στο εσωτερικό του θα εμφανιστεί ένα μεγάλο ρεύμα. Αν μελετηθεί ένας κινητήρας με γνωστά ονομαστικά στοιχεία και δεδομένο ρεύμα στο εσωτερικό του, κατά την πλήρη φόρτιση, θα διαπιστωθεί πως η τιμή του ρεύματος κατά την εκκίνηση, θα είναι περίπου είκοσι φορές μεγαλύτερη από ότι η τιμή του ρεύματος στην πλήρη φόρτιση. Έτσι όταν συμβεί αυτό, η μηχανή είναι πολύ πιθανό να υποστεί σοβαρή ζημιά, ακόμα και σε περίπτωση που το ρεύμα αυτό, θα διαρκέσει μικρό χρονικό διάστημα.

Για να αντιμετωπιστεί το πρόβλημα αυτό, μια καλή πρακτική είναι να εισαχθεί μια αντίσταση εκκίνησης (starting resistor), σε συνδεσμολογία σειράς με το τύλιγμα οπλισμού του κινητήρα. Η χρησιμότητα της αντίστασης αυτής είναι μεγάλη, καθώς αυτή περιορίζει το ρεύμα οπλισμού κατά την εκκίνηση, ώσπου η τάση που αναπτύσσεται στο εσωτερικό του κινητήρα να γίνει αρκετά μεγάλη, έτσι ώστε να περιορίζει την τιμή του από μόνη της. Όμως η αντίσταση εκκίνησης δεν θα πρέπει να είναι συνδεδεμένη μονίμως στο κύκλωμα, γιατί αυτή είναι ο λόγος που η χαρακτηριστική ροπής-ταχύτητας παρουσιάζει πολύ μεγάλη κλίση, αλλά και για το γεγονός ότι προκαλεί πρόσθετες απώλειες.

Η αντίσταση εκκίνησης λοιπόν, τοποθετείται στο κύκλωμα του οπλισμού με στόχο να περιορίσει το ρεύμα εκκίνησης και αποσυνδέεται από αυτό, όταν ο κινητήρας φτάσει σε μια ικανοποιητική ταχύτητα. Σήμερα, η αντίσταση εκκίνησης, κατά κύριο λόγο απαρτίζεται από πολλά τμήματα, τα οποία αφαιρούνται το ένα μετά το άλλο από το κύκλωμα του κινητήρα. Αυτό συμβαίνει με σκοπό να περιοριστεί το ρεύμα του κινητήρα σε συγκεκριμένα όρια ασφαλείας, χωρίς όμως να μειωθεί πάρα πολύ η τιμή του, ώστε η εκκίνηση να πραγματοποιηθεί με αρκετά αργό ρυθμό.

Για να σχεδιαστεί ένας σωστός εκκινητής για οποιονδήποτε κινητήρα συνεχούς ρεύματος, αρχικά θα πρέπει να επιλεχθεί ο αριθμός των τμημάτων της αντίστασης εκκίνησης, καθώς και το μέγεθος για το καθένα από αυτά, έτσι ώστε το ρεύμα εκκίνησης να περιοριστεί στα αποδεκτά όρια. Στη συνέχεια θα πρέπει να κατασκευαστεί το κύκλωμα ελέγχου, το οποίο είναι υπεύθυνο για το κλείσιμο των επαφών. Η σχεδίαση του κυκλώματος αυτού είναι πολύ σημαντική, διότι σύμφωνα με

αυτό, τα τμήματα από τα οποία αποτελείται η αντίσταση εκκίνησης, αποσυνδέονται ακριβώς την κατάλληλη στιγμή.

Στους παλαιότερους κινητήρες συνεχούς ρεύματος, χρησιμοποιούνταν μία μόνο αντίσταση εκκίνησης από τους εκκινητές, η οποία απομακρυνόταν σταδιακά από το κύκλωμα με χειροκίνητο τρόπο. Τέτοιου είδους εκκινητές, εμφάνιζαν σημαντικά προβλήματα, αφού η λειτουργία τους εξαρτιόταν αποκλειστικά από αυτόν που τους χειρίζονταν. Ο χειριστής ενός τέτοιου εκκινητή, δεν θα έπρεπε να περιστρέφει την χειρολαβή της αντίστασης ούτε πολύ γρήγορα αλλά ούτε και πολύ αργά. Η πολύ αργή διαδικασία εκκίνησης, μπορούσε να αυξήσει την θερμοκρασία της αντίστασης, ενώ η πολύ γρήγορη αποσύνδεση της αντίστασης, οδηγούσε σε μεγάλη αύξηση, το ρεύμα εκκίνησης. Εξαιτίας λοιπόν του γεγονότος, πως η σωστή λειτουργία ενός τέτοιου εκκινητή, εξαρτιόταν αποκλειστικά από τον χειριστή και τις ικανότητες του, οι συγκεκριμένοι εκκινητές έχουν αντικατασταθεί σχεδόν σε όλες τις εφαρμογές από αυτόματους εκκινητές. [37]

4.2 Κλασικοί εκκινητές κινητήρων συνεχούς ρεύματος

Η εκκίνηση ενός κινητήρα συνεχούς ρεύματος αποτελεί μια διαδικασία η οποία πραγματοποιείται σε αρκετά σύντομο χρονικό διάστημα. Εξαιτίας των υψηλών ρευμάτων που δημιουργούνται κατά την εκκίνηση, είναι πολύ πιθανό να εμφανιστούν προβλήματα σε γειτονικά παρευρισκόμενες συσκευές λόγω βύθιση της τάσης, όπως επίσης μπορεί να προκληθούν έντονα φαινόμενα υπερθέρμανσης του κινητήρα. Οι κινητήρες οι οποίοι επηρεάζονται περισσότερο από την υψηλή τιμή του ρεύματος εκκίνησης, είναι εκείνοι οι οποίοι έχουν μεγάλη συχνότητα εκκινήσεων/διακοπών όπως συμβαίνει ακριβώς σε έναν ανελκυστήρα. Επομένως, κυρίως σε κινητήρες μεγάλης ισχύος, η χρήση διατάξεων εκκίνησης και προστασίας είναι αναγκαία. [38]

Όταν η μηχανή είναι σε στάση, η αναπτυσσόμενη ΑΗΕΔ έχει μηδενική τιμή. Άρα κατά την διαδικασία της εκκίνησης για το ρεύμα τυμπάνου ισχύει:

$$I_{\alpha} = \frac{V_{\alpha} - E_{\alpha}}{R_{\alpha}} \quad (4.1)$$

Έτσι στην αρχή της εκκίνησης ισχύει:

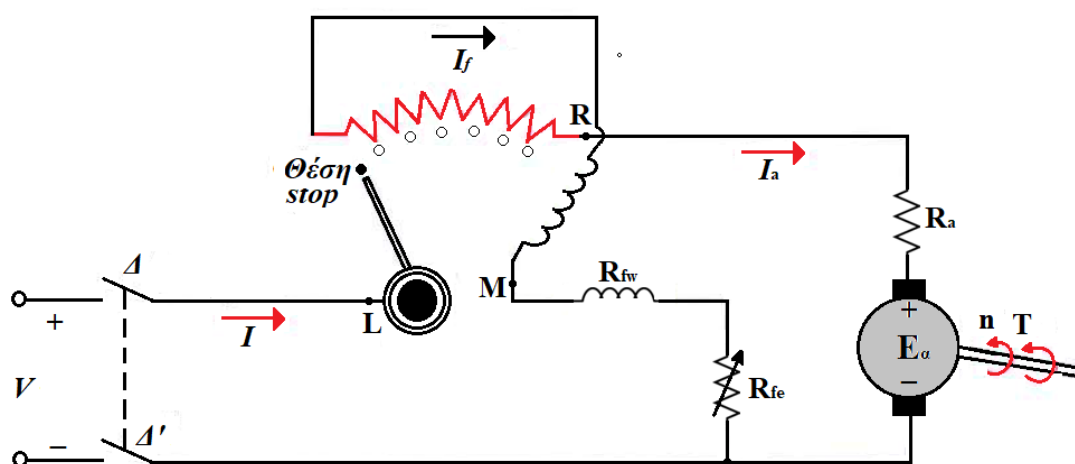
$$I_{\alpha, st} = I_{\alpha}(n = E_{\alpha} = 0) = \frac{V_{\alpha}}{R_{\alpha}} \gg I_{\alpha, n} \quad (4.2)$$

Αυτό σημαίνει, πως σχεδόν όλη η τάση με την οποία τροφοδοτείται ο κινητήρας, εφαρμόζεται στην ωμική αντίσταση του τυλίγματος τυμπάνου. Επειδή η τιμή της αντίστασης αυτής είναι πάρα πολύ μικρή, αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την ανάπτυξη μεγάλων ρευμάτων. Όπως επισημάνθηκε πριν, τα ρεύματα αυτά έχουν αρνητικές συνέπειες, τόσο για τον ίδιο τον κινητήρα, όσο και για τις γειτονικά παρευρισκόμενες ηλεκτρικές συσκευές.

Με την παρεμβολή αντιστάσεων σε σειρά με το τύλιγμα τυμπάνου και με την τμηματική αποσύνδεση αυτών, την κατάλληλη στιγμή κατά την εκκίνηση, μέσω των κλασσικών εκκινητών, το πρόβλημα που οφείλεται στα υψηλά ρεύματα εκκίνησης μπορεί να αντιμετωπιστεί. Όπως επίσης και η βαθμιαία αύξηση της τάσης, με την οποία τροφοδοτείται το τύλιγμα τυμπάνου, μέσω διατάξεων ηλεκτρονικών ισχύος, αποτελεί μια μέθοδο για την λύση αυτού του προβλήματος.

4.2.1 Εκκινητής με τρεις ακροδέκτες

Ο εκκινητής της εικόνας 4.1, είναι κατάλληλος για κινητήρες παράλληλης και σύνθετης διέγερσης.



Εικόνα 4-1 Συνδεσμολογία εκκινητή τριών ακροδεκτών

Σύμφωνα με την εικόνα 4.1, το δίκτυο που τροφοδοτεί τον εκκινητή, είναι συνδεδεμένο με τον ακροδέκτη L. Το τύλιγμα τυμπάνου συνδέεται στον ακροδέκτη R ενώ η ρυθμιστική αντίσταση ή απλά το τύλιγμα της κύριας διέγερσης του κινητήρα, συνδέεται με τον ακροδέκτη M. Όπως φαίνεται και στην παραπάνω εικόνα ο εκκινητής βρίσκεται εκτός λειτουργίας. Όταν ο στρόφαλος μετακινηθεί προς τα δεξιά στην πρώτη επαφή, τότε το δίκτυο τροφοδοτεί το τύλιγμα διέγερσης, ενώ το άθροισμα της αντίστασης του εκκινητή, βρίσκεται σε συνδεσμολογία σειράς με το τύλιγμα του δρομέα, με αποτέλεσμα ο κινητήρας να ξεκινήσει να περιστρέφεται με μειωμένο ρεύμα εκκίνησης. Καθώς ο στρόφαλος μετακινείται προς την επαφή R, μειώνεται σταδιακά η αντίσταση από το κύκλωμα του δρομέα, ενώ προστίθεται παράλληλα στο τύλιγμα διέγερσης. Όμως παρόλα αυτά, η αντίσταση διέγερσης μένει σταθερή αφού $R_{εκκ} \ll R_{fw} + R_{fe}$.

Ο ρυθμός με τον οποίο μετακινείται ο στρόφαλος, δεν θα πρέπει να είναι ούτε πολύ αργός, αλλά ούτε και πολύ γρήγορος. Αν αυτός, μετακινηθεί αργά, τότε ελλοχεύει ο κίνδυνος να καούν οι αντιστάσεις του εκκινητή, σε περίπτωση που αυτές δεν είναι της απαιτούμενης ισχύος. Αντίθετα,

αν μετακινηθεί γρήγορα, η αντίσταση εκκίνησης θα αποσυνδεθεί πριν καλά καλά προλάβει ο κινητήρας να αναπτύξει μεγάλη ταχύτητα και κατά συνέπεια σημαντικό ποσοστό ΑΗΕΔ, με αποτέλεσμα να δημιουργηθούν υψηλά ρεύματα εκκίνησης.

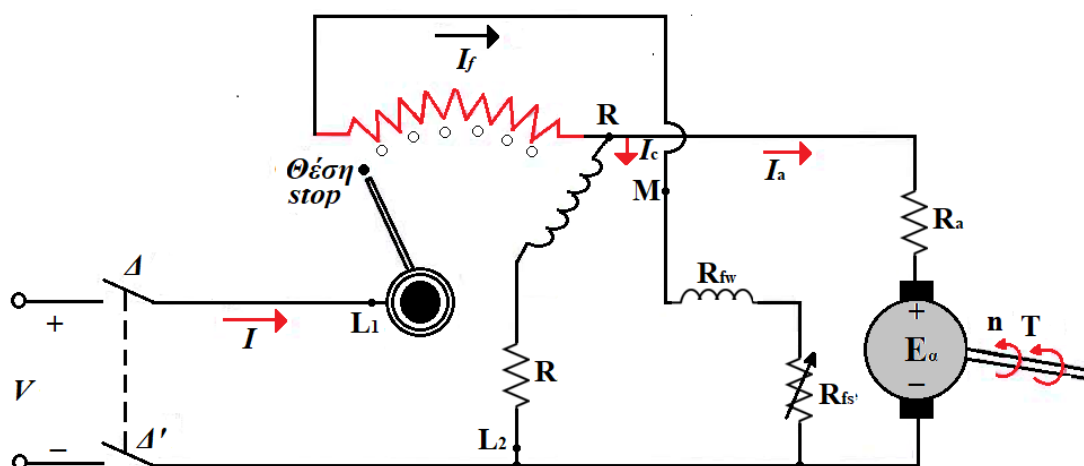
Ο εκκινητής για λόγους προστασίας διαθέτει ελατήριο επαναφοράς καθώς και πηνίο συγκράτησης του στροφάλου. Έτσι αν υπάρξει διακοπή του κυκλώματος διέγερσης, το πηνίο αυτοσυγκράτησης απομαγνητίζεται και έτσι ο στρόφαλος, με τη βοήθεια του ελατηρίου επαναφοράς μετακινείται στη θέση stop, εκεί όπου ο κινητήρας αποσυνδέεται από την τάση τροφοδοσίας.

Ακόμα, αν διακοπεί τυχαία η τάση του δικτύου, τότε πάλι απομαγνητίζεται το πηνίο εξαιτίας της συνεχής μείωσης των στροφών και επομένως της ΑΗΕΔ. Έτσι, αποκλείεται το ενδεχόμενο, ο κινητήρας να βρεθεί δίχως αντίσταση εκκίνησης, μετά την επαναφορά της τάσης από το δίκτυο.

Ο συγκεκριμένος εκκινητής όμως, έχει ένα σημαντικό μειονέκτημα. Εάν σε περίπτωση που τοποθετηθεί εξωτερική αντίσταση μεγάλης τιμής, για την αύξηση της ταχύτητας του κινητήρα, σε σειρά με την ρυθμιστική αντίσταση διέγερσης, τότε θα εξασθενήσει το ρεύμα διέγερσης. Η εξασθένιση αυτή, θα οδηγήσει στην ελάττωση του ρεύματος, του πηνίου συγκράτησης του στροφάλου και έτσι θα διακοπεί η τροφοδοσία του κινητήρα.[39]

4.2.2 Εκκινητής με τέσσερις ακροδέκτες

Οι εκκινητές οι οποίοι διαθέτουν τέσσερις ακροδέκτες, χρησιμοποιούνται σε κινητήρες που λειτουργούν με υψηλό αριθμό στροφών και η ρύθμιση της ταχύτητας, πραγματοποιείται με την βοήθεια του πηνίου διέγερσης.



Εικόνα 4-2 Συνδεσμολογία εκκινητή τεσσάρων ακροδεκτών

Με την προσθήκη ενός επιπλέον ακροδέκτη L_2 , επιτυγχάνεται η τροφοδότηση του πηνίου συγκράτησης, απευθείας από το δίκτυο. Ενώ η ωμική αντίσταση R , είναι αρκετά σημαντική, καθώς μέσω αυτής ρυθμίζεται το ρεύμα και επομένως η δύναμη συγκράτησης του πηνίου.

Το μεγάλο μειονέκτημα του συγκεκριμένου εκκινητή, είναι πως δεν παρέχει την απαραίτητη προστασία, σε περίπτωση διακοπής του τυλίγματος του πεδίου, γεγονός που μπορεί να οδηγήσει σε υπερτάχυνση τον κινητήρα. Σε τέτοιες καταστάσεις, η προστασία επιτυγχάνεται μέσω φυγοκεντρικών διακοπών, οι οποίοι είναι προσαρμοσμένοι κατάλληλα στον άξονα του κινητήρα. Επίσης υπάρχουν και εκκινητές με τέσσερις ακροδέκτες, με δυο στρόφαλους, οι οποίοι είναι εφοδιασμένοι με μια ρυθμιστική αντίσταση για τον έλεγχο του πεδίου διέγερσης. Ακόμα παρόμοιοι εκκινητές με δυο αλλά και τρεις ακροδέκτες χρησιμοποιούνται και στους κινητήρες διέγερσης σειράς.

Πιο παλιά, προκειμένου να μειωθεί σταδιακά η αντίσταση εκκίνησης, ο στρόφαλος του κάθε εκκινητή, μετακινούνταν με χειροκίνητο τρόπο. Η απομάκρυνση της αντίστασης εκκίνησης, πρέπει να γίνει σταδιακά και είναι απαραίτητο να πραγματοποιηθεί σε συγκεκριμένο χρονικό διάστημα. Η γρήγορη απομάκρυνση της αντίστασης εκκίνησης, είναι ικανή να προκαλέσει σημαντικά ρεύματα τυμπάνου, ενώ η καθυστερημένη απομάκρυνση αυτής, μπορεί να οδηγήσει στην υπερθέρμανση της συγκεκριμένης αντίστασης.

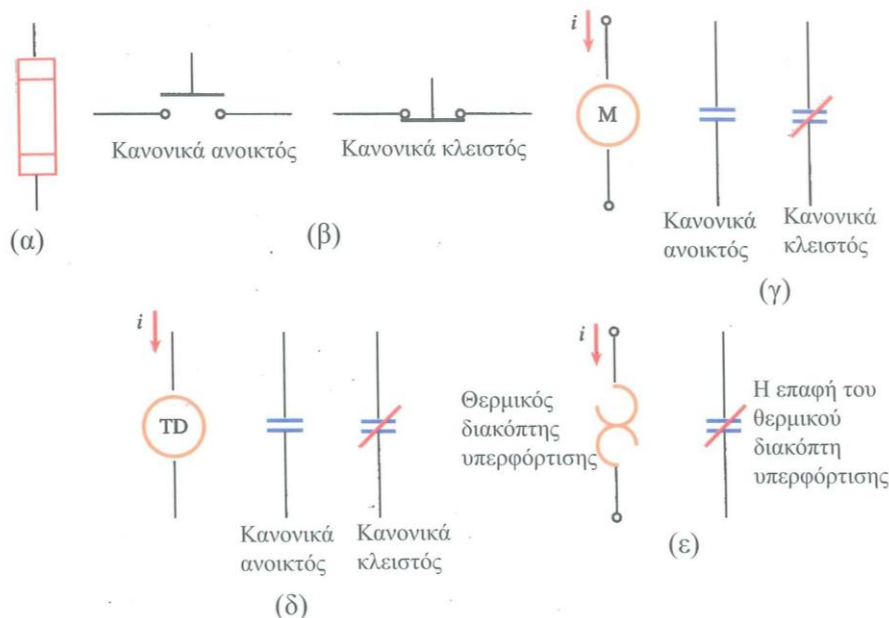
Με λίγα λόγια, ο σωστός χειρισμός του χειροκίνητου εκκινητή, προϋπέθετε μεγάλη ικανότητα και εμπειρία από τον χειριστή της εγκατάστασης. Με την πρόοδο της τεχνολογίας όμως, η κίνηση του στρόφαλου γίνεται πλέον, με αυτόματο τρόπο. Έτσι η αντίσταση εκκίνησης, αφαιρείται σταδιακά σε προκαθορισμένα χρονικά διαστήματα, έτσι ώστε το ρεύμα που εμφανίζεται κατά την εκκίνηση, να εναλλάσσεται σε συγκεκριμένα αποδεκτά όρια.[40]

4.3 Κυκλώματα αυτοματισμού για την εκκίνηση κινητήρων συνεχούς ρεύματος

Αφού επιλεχθούν τα κατάλληλα τμήματα από τα οποία θα απαρτίζεται η αντίσταση εκκίνησης, είναι αναγκαίο να σχεδιαστεί το κύκλωμα ελέγχου, το οποίο θα βραχυκυκλώνει διαδοχικά και την κατάλληλη στιγμή ακριβώς, τις επαφές των τμημάτων της αντίστασης αυτής. Για αυτό το κύκλωμα ελέγχου έχουν αναπτυχθεί πολλές και διάφορες τεχνικές. Παρακάτω θα παρουσιαστούν οι δυο μέθοδοι που εφαρμόζονται πιο συχνά. Πριν όμως από την παρουσίαση τους, αξίζει να γίνει μια εισαγωγή στα στοιχεία που χρησιμοποιούνται στα κυκλώματα εκκίνησης, έτσι ώστε να γίνει ακόμα πιο κατανοητή η λειτουργία τους.

Στην εικόνα 4.3, διακρίνονται μερικά από τα βασικότερα στοιχεία, που συναντώνται στα κυκλώματα ελέγχου κινητήρων. Τα στοιχεία αυτά είναι ασφάλειες (fuse), διακόπτες επαφής

(pushbutton switch), ρελέ (relay), ρελέ με χρονική καθυστέρηση (time delay relay) καθώς και θερμικοί διακόπτες υπερφόρτισης (overload).



Εικόνα 4-3 Βασικά σύμβολα των κυκλωμάτων ελέγχου κινητήρων

Στην εικόνα 4.3α, παρουσιάζεται ο συμβολισμός μιας ασφάλειας. Ο ρόλος της είναι να προστατεύει τον κινητήρα από βραχυκυκλώματα. Βρίσκεται τοποθετημένη στις γραμμές της τροφοδοσίας πριν αυτές συνδεθούν στον κινητήρα. Σε περίπτωση που στην μηχανή παρουσιαστεί κάποιο βραχυκύκλωμα, η ασφάλεια θα σταματήσει αμέσως την τροφοδοσία πριν προλάβει να υποστεί κάποια βλάβη η ίδια η μηχανή.

Στην εικόνα 4.3β, φαίνονται δύο διακόπτες επαφής. Οι διακόπτες διακρίνονται στους κανονικά κλειστούς και στους κανονικά ανοιχτούς. Οι επαφές σε έναν κανονικά ανοιχτό διακόπτη επαφής, είναι ανοιχτές πριν πατηθεί ο διακόπτης και κλείνουν σε περίπτωση που αυτός πατηθεί. Ενώ σε έναν κανονικά κλειστό διακόπτη επαφής, αυτές είναι κλειστές πριν και ανοίγουν αφού πατηθεί ο διακόπτης.

Ένα τυπικό ρελέ, παρουσιάζεται στην εικόνα 4.3γ. Το ρελέ αυτό διαθέτει ένα πηνίο και μερικές επαφές. Ο κύκλος συμβολίζει το πηνίο, ενώ οι δύο παράλληλες γραμμές, τις επαφές του. Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως σχετικά με τους διακόπτες επαφής, έτσι και εδώ, οι επαφές διακρίνονται σε κανονικά ανοιχτές και κανονικά κλειστές. Όταν το αντίστοιχο ρελέ είναι απενεργοποιημένο, τότε μια κανονικά ανοιχτή επαφή, είναι ανοιχτή, ενώ μια κανονικά κλειστή επαφή, παραμένει κλειστή. Σε περίπτωση που ένα ρελέ ενεργοποιηθεί, δηλαδή όταν αυτό

τροφοδοτηθεί με ηλεκτρικό ρεύμα, οι επαφές του θα αλλάξουν κατάσταση. Οι κανονικά ανοιχτές επαφές, θα κλείσουν και οι κανονικά κλειστές, θα ανοίξουν.

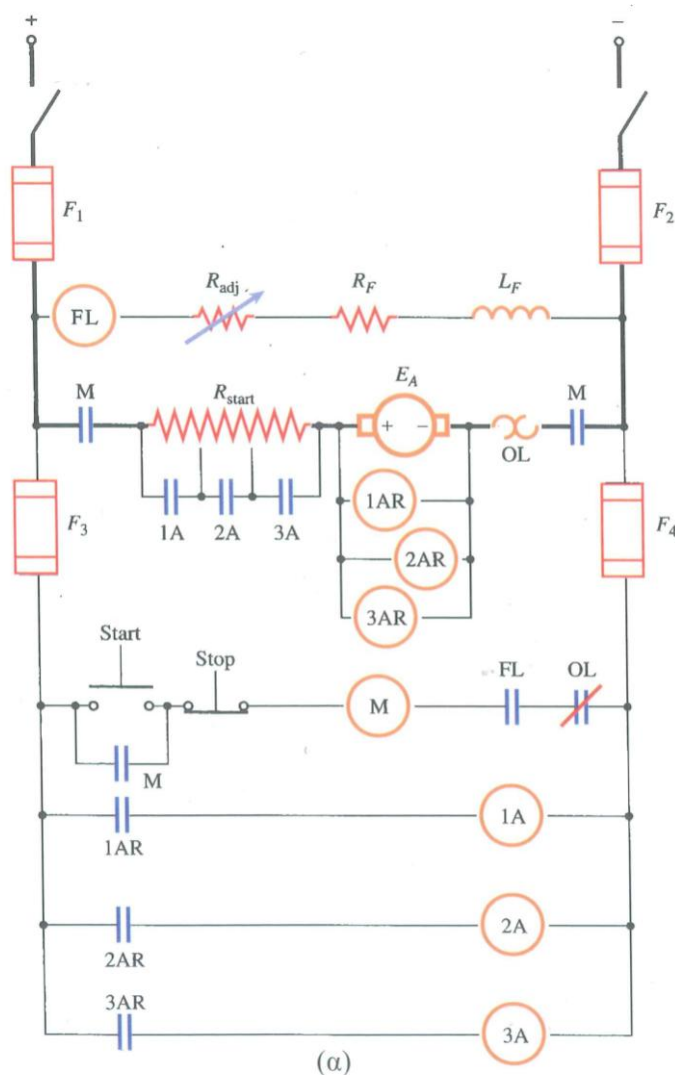
Στην εικόνα 4.3δ, διακρίνεται ένα ρελέ με χρονική καθυστέρηση. Ουσιαστικά, πρόκειται για ένα ρελέ διαφορετικού τύπου, το οποίο όμως λειτουργεί με τον ίδιο ακριβώς τρόπο, όπως συμβαίνει σε ένα τυπικό ρελέ. Η μόνη διαφορά που έχει, είναι το γεγονός, πως όταν τροφοδοτείται με ηλεκτρικό ρεύμα, οι επαφές του δεν αλλάζουν απευθείας κατάσταση, αλλά αυτό γίνεται μετά το πέρασ κάποιου χρόνου, ο οποίος είναι εφικτό να ρυθμιστεί.

Τέλος στην εικόνα 4.3ε, φαίνεται ένας θερμικός διακόπτης υπερφόρτισης, ο οποίος αποτελείται από ένα θερμικό πηνίο και από μερικές κανονικά κλειστές επαφές. Από το πηνίο ενός τέτοιου διακόπτη, διέρχεται το ρεύμα στο εσωτερικό του κινητήρα. Αν αυξηθεί πάρα πολύ το φορτίο του κινητήρα, τότε θα αυξηθεί η θερμοκρασία στο πηνίο του διακόπτη, με αποτέλεσμα να ανοίξουν οι κανονικά κλειστές επαφές.

Η παραπάνω λειτουργία είναι μια καλή πρακτική, η οποία μπορεί να εφαρμοστεί για την ενεργοποίηση ενός κυκλώματος προστασίας.

την διαδικασία που περιγράφηκε προηγουμένως, ώστε τελικά ο κινητήρας να καταλήξει να περιστρέφεται με πλήρη ταχύτητα, δίχως την αντίσταση εκκίνησης. Το ρεύμα του κινητήρα, είναι δυνατό να περιοριστεί στα επιθυμητά όρια, μόνο σε περίπτωση που οι χρονικές καθυστερήσεις των ρελέ που αναφέρθηκαν, έχουν ρυθμιστεί σωστά, έτσι ώστε οι αντιστάσεις εκκίνησης να απομακρύνονται την σωστή χρονική στιγμή.

Ένα σαφώς πιο βελτιωμένο κύκλωμα εκκινητή, παρουσιάζεται στην εικόνα 4.4. Εδώ μια σειρά από ρελέ, ανταποκρίνονται στην τιμή της τάσης E_A και αποσυνδέουν τα τμήματα της αντίστασης εκκίνησης, όταν η τιμή της τάσης E_A , ξεπεράσει το όριο που έχει καθοριστεί. Το συγκεκριμένο κύκλωμα είναι καλύτερο αν συγκριθεί με το προηγούμενο, διότι όταν ο κινητήρας αρχίζει να περιστρέφεται με πολύ μικρή ταχύτητα και σε περίπτωση που κατά την εκκίνηση, το φορτίο είναι πολύ μεγάλο, τότε η αντίσταση εκκίνησης, είναι εφικτό να αποσυνδεθεί πολύ πιο γρήγορα.



Εικόνα 4-5 Κύκλωμα αυτοματισμού για την εκκίνηση κινητήρα συνεχούς ρεύματος που χρησιμοποιεί ρελέ τα οποία ελέγχουν την τιμή της αντίστασης E_A για την τμηματική αποσύνδεση της αντίστασης εκκίνησης

Αξίζει να αναφερθεί, πως και στα δυο κυκλώματα εκκίνησης, στο κύκλωμα διέγερσης, υπάρχει ένα ρελέ FL. Αυτό το ρελέ, είναι υπεύθυνο για την προστασία της μηχανής, από την απώλεια της διέγερσης (field loss relay). Αν για τον οποιονδήποτε λόγο το ρεύμα της διέγερσης διακοπεί, τότε το ρελέ FL, θα απενεργοποιηθεί, πράγμα το οποίο σημαίνει, πως θα διακοπεί και η τροφοδοσία του ρελέ M. Αφού λοιπόν, απενεργοποιηθεί το ρελέ M, οι επαφές του θα ανοίξουν, αποσυνδέοντας με αυτόν τον τρόπο, τον κινητήρα από την πηγή τροφοδοσίας. Αυτό σημαίνει, πως ο κινητήρας θα προστατευθεί από την κατάσταση διαφυγής, που οφείλεται στην διακοπή του ρεύματος στο κύκλωμα διέγερσης.

Τέλος, και τα δυο κυκλώματα είναι εφοδιασμένα με ένα θερμικό διακόπτη υπερφόρτισης. Η λειτουργία του έχει να κάνει με την θερμότητα που αναπτύσσεται στον κινητήρα. Έτσι αν γίνει πολύ μεγάλη η ισχύς που προσφέρει ο κινητήρας, οι διακόπτες θα θερμανθούν, οι επαφές τους θα ανοίξουν και επομένως θα απενεργοποιηθεί το ρελέ M. Σε αυτή την περίπτωση, διακόπτεται η τροφοδοσία του κινητήρα και με τον τρόπο αυτό, αυτός προστατεύεται από απρόβλεπτες υπερφορτίσεις.[41]

4.4 Πέδηση κινητήρων συνεχούς ρεύματος

Αρκετές φορές όταν η λειτουργία ενός κινητήρα συνεχούς ρεύματος, φτάσει στο τέλος της, απαιτείται το γρήγορο και δυναμικό σταμάτημα του δρομέα του. Όμως, πρέπει να περάσει κάποιο σχετικά μεγάλο χρονικό διάστημα, από την διακοπή του ηλεκτρικού κυκλώματος τροφοδοσίας του κινητήρα, μέχρι τη στιγμή που θα ακινητοποιηθεί εντελώς ο δρομέας του. Η αδράνεια της μάζας του, είναι αυτή που καθορίζει το χρονικό διάστημα, για την ελεύθερη ακινητοποίηση του δρομέα. Πρακτικά, τις περισσότερες φορές, είναι αναγκαίο να πραγματοποιηθεί η άμεση και δυναμική ακινητοποίηση του δρομέα του κινητήρα, πράγμα το οποίο σημαίνει την πέδηση (φρενάρισμα) του κινητήρα.

Η πέδηση σε έναν κινητήρα συνεχούς ρεύματος, διακρίνεται στην μηχανική καθώς και στην ηλεκτρική πέδηση. Κατά την μηχανική πέδηση, η ακινητοποίηση του δρομέα, συμβαίνει με μηχανικό τρόπο (π.χ. σύστημα φρένου). Αντίθετα, στην ηλεκτρική πέδηση, ο δρομέας ακινητοποιείται με ηλεκτρικούς τρόπους, οι οποίοι θα αναφερθούν στην συνέχεια.[42]

4.4.1 Ηλεκτρική πέδηση

Η μετατροπή της μηχανικής ενέργειας των στρεφόμενων μαζών του συστήματος κινητήρα-φορτίου, είναι απόρροια της ηλεκτρικής πέδησης. Όσον αφορά το χρόνο πέδησης, αυτός είναι ανάλογος του χρονικού ρυθμού μετατροπής της ενέργειας.

Ηλεκτρική πέδηση, καλείται η πέδηση κατά την οποία σε μια μηχανή συνεχούς ρεύματος που λειτουργεί ως κινητήρας, αντιστρέφεται η φορά του ρεύματος τυμπάνου ή η φορά της μαγνητικής ροής. Η παραγόμενη εσωτερική ηλεκτρική ροπή, αποκτά αντίθετο πρόσημο και μαζί με τη ροπή του φορτίου αντιστέκεται στην κίνηση, ελαττώνοντας με αυτόν τον τρόπο τις στροφές του κινητήρα. Συνήθως η αντιστροφή της ροπής, πραγματοποιείται με την αντιστροφή του ρεύματος τυμπάνου, επειδή η σταθερά του τυλίγματος τυμπάνου είναι αρκετά πιο μικρή σε σχέση με αυτήν του τυλίγματος διέγερσης.

Κατά τη διάρκεια της ηλεκτρικής πέδησης, ο κινητήρας λειτουργεί ως γεννήτρια και παράγει ηλεκτρική ενέργεια εις βάρος της αποθηκευμένης μηχανικής ενέργειας. Η παραγόμενη ηλεκτρική αυτή ενέργεια, επιστρέφει πίσω στο ηλεκτρικό δίκτυο, ή καταναλώνεται υπό μορφή θερμότητας σε μια εξωτερική ωμική αντίσταση, η οποία αποτελεί την αντίσταση πέδησης.

Η ηλεκτρική πέδηση, αποτελεί μια πολύ σημαντική διαδικασία για τις ηλεκτρικές μηχανές συνεχούς ρεύματος. Τα τρία είδη πέδησης που μπορούν να εφαρμοστούν στον κινητήρα, είναι η δυναμική πέδηση, η αναγεννητική πέδηση καθώς και η ακαριαία πέδηση (plugging).[10]

4.4.2 Δυναμική πέδηση

Προκειμένου να αντιστραφεί η φορά του ρεύματος τυμπάνου και επομένως η εσωτερική ροπή του κινητήρα, θα βραχυκυκλωθούν οι ακροδέκτες του τυλίγματος τυμπάνου και έτσι θα περιοριστεί ταυτόχρονα και το ρεύμα τυμπάνου, με την βοήθεια κατάλληλης αντίστασης. Το συγκεκριμένο είδος πέδησης ονομάζεται δυναμική πέδηση. Κατά τη διαδικασία της πέδησης αυτής, το συνολικό ποσό το οποίο δαπανάται (σε μηχανικές και ηλεκτρικές απώλειες), είναι ίσο με την αποθηκευμένη κινητική ενέργεια των στρεφόμενων μαζών του συστήματος, κατά την έναρξη της πέδησης. Στην συγκεκριμένη διαδικασία, ο χρόνος πέδησης εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη μηχανική σταθερά.[43]

Η ανάπτυξη ροπής με αντίθετη φορά από αυτήν του δρομέα, οδηγεί τον δρομέα σε κατάσταση ηρεμίας, αρκετά ομαλά και σε σχετικά μικρό χρονικό διάστημα. Πρακτικά η αντίσταση πέδησης είναι τέτοιας τιμής ούτως ώστε το ρεύμα πέδησης να είναι σχεδόν διπλάσιο από το ονομαστικό. Άρα, εφόσον η διέγερση είναι σταθερή τότε και η αρχική ροπή θα είναι δυο φορές μεγαλύτερη από την ονομαστική. Στη συνέχεια, καθώς η ταχύτητα του κινητήρα μειώνεται, ελαττώνεται συνεχώς το

ρεύμα και επομένως η ροπή, μέχρι αυτή να μηδενιστεί και να σταματήσει ο κινητήρας. Ένα σημαντικό στοιχείο για την συγκεκριμένη διαδικασία πέδησης, είναι το γεγονός πως ο κινητήρας δεν είναι δυνατό να επανεκκινηθεί.

4.4.3 Αναγεννητική πέδηση

Κατά την πραγματοποίηση της αναγεννητικής πέδησης, ένα σημαντικό ποσοστό της μηχανικής ενέργειας των στρεφόμενων μαζών, επιστρέφει πίσω στο δίκτυο ως ηλεκτρική ενέργεια και έτσι δεν καταναλίσκεται ως θερμότητα στην αντίσταση πέδησης. Απαραίτητη προϋπόθεση για την υλοποίηση αυτής της μεθόδου πέδησης, είναι ο κινητήρας να βρίσκεται σε συνδεσμολογία ξένης και όχι παράλληλης διέγερσης, έτσι ώστε η τάση τροφοδοσίας του τυλίγματος διέγερσης να είναι σταθερή και να μην επηρεάζεται από τις μεταβολές της τάσης τυμπάνου.

Η αναγεννητική πέδηση, εφαρμόζεται σε φορτία στα οποία οι δυνάμεις βαρύτητας, μπορούν να οδηγήσουν στην αύξηση της επαγόμενης ΑΗΕΔ, εξαιτίας της αύξησης των στροφών, σε μεγαλύτερες τιμές από την τάση τροφοδοσίας. Δηλαδή σε φορτία όπως είναι τα ηλεκτρικά τρένα, τα ηλεκτρικά οχήματα ακόμα και οι ανελκυστήρες. Σε τέτοιες περιπτώσεις η μηχανή λειτουργεί ως γεννήτρια, η ενέργεια που παράγεται επιστρέφει πίσω στο δίκτυο και η αντιρροπή τείνει να μειώσει την ταχύτητα μέχρις ότου η επαγομένη ΑΗΕΔ να γίνει μικρότερη από την εφαρμοζόμενη τάση. Άρα για τέτοιου είδους φορτία, η αναγεννητική πέδηση εμποδίζει την αύξηση των στροφών.

4.4.4 Ακαριαία πέδηση (plugging)

Με την εφαρμογή της συγκεκριμένης μεθόδου, ακόμα και όταν μηδενιστούν οι στροφές, εξακολουθεί να υπάρχει ρεύμα στο τύμπανο και επομένως αντιρροπή. Για αυτό, όταν οι στροφές του κινητήρα πλησιάσουν στο μηδέν, κατά τη διάρκεια της πέδησης, είναι αναγκαίο να διακοπεί είτε χειροκίνητα είτε με αυτόματο τρόπο, η τάση τροφοδοσίας. Σε περίπτωση που δεν συμβεί αυτό, η μηχανή θα αλλάξει τεταρτημόριο λειτουργίας και θα εξακολουθεί να συμπεριφέρεται ως κινητήρας, αλλά αυτή τη φορά με αντίθετη φορά περιστροφής.

Η ακαριαία πέδηση (plugging), αποτελεί την πιο αποτελεσματική μέθοδο πέδησης, αφού μέσω αυτής επιτυγχάνεται μικρότερος χρόνος πέδησης, συγκριτικά με την δυναμική και την αναγεννητική πέδηση, πράγμα το οποίο εξηγείται από το γεγονός πως για την ίδια αντίσταση πέδησης, το ρεύμα τυμπάνου είναι πολύ μεγαλύτερο.[44]

5 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο:ΒΛΑΒΕΣ ΚΙΝΗΤΗΡΩΝ ΣΥΝΕΧΟΥΣ ΡΕΥΜΑΤΟΣ

Στον παρακάτω πίνακα, παρουσιάζονται οι πιο συνηθισμένες βλάβες που μπορούν να εμφανιστούν σε κινητήρες συνεχούς ρεύματος. Ακόμα στον πίνακα αυτό, γίνεται λόγος για τις πιθανές αιτίες που τις προκαλούν και αναφέρονται λύσεις για την αντιμετώπιση τους.[45]

Πίνακας 5.1 Βλάβες κινητήρων συνεχούς ρεύματος

Πρόβλημα κινητήρα	Πιθανή αιτία	Αντιμετώπιση προβλήματος
1)Ο κινητήρας δεν εκκινείτε	α)Υπάρχει διακοπή στο κύκλωμα τροφοδοσίας	Εξακριβωση για την ύπαρξη διακοπής ή έλεγχος των ρελέ ή των ασφαλειών
	β)Πρόβλημα στον εκκινητή	Έλεγχος σύνδεσης εκκινητή
	γ)Διακοπή στο κύκλωμα της διέγερσης	Έλεγχος τυλίγματος διέγερσης και ρυθμιστικής αντίστασης
	δ)Βραχυκύκλωμα ή διακοπή στο τύλιγμα του επαγωγικού τυμπάνου	Έλεγχος και αποκατάσταση της διακοπής
	ε)Κακή επαφή ψηκτρών	Έλεγχος ψηκτρών
2)Ο κινητήρας εκκινείτε με δυσκολία	α)Αρκετά μικρό ρεύμα διέγερσης	Μέτρηση του ρεύματος διέγερσης και ρύθμιση της αντίστασης διέγερσης
	β)Λάθος συνδεσμολογία στο τύλιγμα διέγερσης	Έλεγχος ηλεκτρολογικής σύνδεσης
	γ)Όχι καλή επαφή μεταξύ των ακροδεκτών του κινητήρα	Επανεξέταση και σφίξιμο των ακροδεκτών
3)Ο κινητήρας εκκινείτε απότομα	α)Λάθος συνδεσμολογία της αντίστασης εκκινητή	Να πραγματοποιηθεί σωστή σύνδεση
	β)Διακοπή μέρους από την αντίσταση εκκίνησης	Μέτρηση της αντίστασης και διόρθωση της
	γ)Μικρή τιμή της αντίστασης εκκινητή	Αύξηση της τιμής της αντίστασης εκκινητή

4)Ο κινητήρας έχει μικρή ταχύτητα περιστροφής	α)Υπερφόρτιση	Έλεγχος των σημείων τριβής (έδρανα-φορτίο)
	β)Μικρή τάση τροφοδοσίας από το δίκτυο	Μέτρηση της τάσης τροφοδοσίας του δικτύου και ρύθμιση στην κατάλληλη τιμή
	γ)Εξακολουθεί να υπάρχει τμήμα του εκκινητή κατά την λειτουργία του κινητήρα	Να ελεγχθεί το κύκλωμα αυτοματισμού
	δ)Οι ψήκτρες βρίσκονται σε λάθος θέση	Μετακίνηση των ψηκτρών στην σωστή θέση
5)Ο κινητήρας αναπτύσσει μεγαλύτερη ταχύτητα περιστροφής από την κανονική	α)Η τάση τροφοδοσίας που παρέχει το δίκτυο, είναι πολύ υψηλή	Να μετρηθεί η τάση του δικτύου και να ρυθμιστεί στην κατάλληλη τιμή
	β)Το τύλιγμα διέγερσης έχει συνδεθεί ανάποδα ή έχει βραχυκυκλωθεί	Σωστή σύνδεση του τυλίγματος διέγερσης ή αλλαγή αυτού
	γ)Λάθος θέση των ψηκτρών (μετακινήθηκαν αντίθετα, από την φορά με την οποία περιστρέφεται ο δρομέας)	Μετατόπιση των ψηκτρών στην σωστή θέση
6)Εμφάνιση σπινθηρισμών στον συλλέκτη του κινητήρα	α)Βραχυκύκλωμα ή διακοπή στο τύλιγμα του επαγωγικού τυμπάνου	Νέα περιέλιξη ή αποκατάσταση της διακοπής
	β)Ο συλλέκτης έχει υποστεί φθορές	Να ελεγχθεί και στην συνέχεια να επισκευαστεί ο συλλέκτης

	γ)Υπερφόρτιση	Να ελαττωθεί το φορτίο
7)Τήξη των ασφαλειών	α)Υπαρξη βραχυκυκλώματος στο κύκλωμα τροφοδοσίας του κινητήρα	Να πραγματοποιηθεί έλεγχος στις γραμμές καθώς και στις βοηθητικές συσκευές του κινητήρα
	β)Υπερφόρτιση του κινητήρα	Να μετρηθεί και να επαληθευτεί η ένταση που απορροφάται
	γ)Υπαρξη διακοπής στο τύλιγμα διεγέρσεως	Αποκατάσταση της διακοπής στο τύλιγμα διέγερσης

6 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6^Ο:ΤΕΧΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΚΙΝΗΤΗΡΩΝ ΣΥΝΕΧΟΥΣ ΡΕΥΜΑΤΟΣ

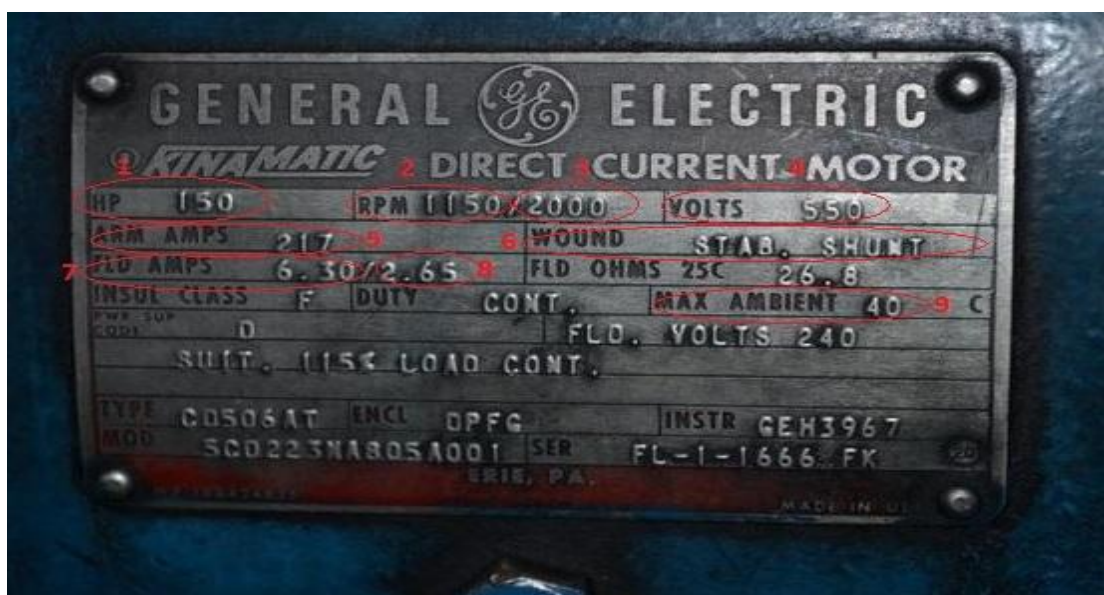
Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο θα παρουσιαστούν τα τεχνικά χαρακτηριστικά των κινητήρων συνεχούς ρεύματος. Η γνώση τους είναι αρκετά σημαντική αφού βάση αυτών γίνεται η τελική επιλογή του κατάλληλου κινητήρα από την αγορά. Τα χαρακτηριστικά αυτά που αναγράφονται στην πινακίδα του κινητήρα παρουσιάζονται στην εικόνα 6.1 και είναι τα εξής:

1. Ονομαστική ισχύς κινητήρα (P_N): Η ονομαστική ισχύς ενός κινητήρα αναφέρεται στην ωφέλιμη μηχανική ισχύ που μπορεί να αποδώσει στον άξονα του, όταν αυτός τροφοδοτείται με την ονομαστική τάση που έχει ορίσει ο κατασκευαστής. Μονάδα μέτρησης είναι τα Watts(W). Στην Ελλάδα συνηθίζεται να χρησιμοποιείται σαν μονάδα μέτρησης ο ίππος (HP).
2. Ονομαστική ταχύτητα περιστροφής (n_N): Είναι η ταχύτητα που αναπτύσσει ο κινητήρας σε στροφές ανά λεπτό (rpm), όταν αυτός τροφοδοτείται με την ονομαστική του τάση και στο άξονα του δίνει την ονομαστική ροπή.
3. Ταχύτητα περιστροφής εν κενό (n_0): Είναι η ταχύτητα περιστροφής του δρομέα του κινητήρα σε στροφές ανά λεπτό (rpm), όταν δεν εφαρμόζεται κάποιο μηχανικό φορτίο στον άξονα του. Δηλαδή όταν αυτός τροφοδοτείται με την ονομαστική του τάση στον αέρα.
4. Ονομαστική τάση (V_N): Είναι η τάση του κινητήρα που έχει ορίσει ο κατασκευαστής στην οποία μπορεί να λειτουργεί, αποδίδοντας την ονομαστική ροπή και ταχύτητα περιστροφής χωρίς να υπάρχει κίνδυνος υπερθέρμανσης.
5. Ονομαστικό ρεύμα λειτουργίας (I_N): Είναι το ρεύμα που απορροφάει το τύλιγμα του επαγωγικού τυμπάνου του κινητήρα, όταν αυτός τροφοδοτείται με ονομαστική τάση και αποδίδει τις ονομαστικές στροφές και την ονομαστική ροπή στον άξονα του.
6. Τρόπος σύνδεσης τυλιγμάτων διέγερσης (WOUND): Το τύλιγμα διέγερσης μπορεί να συνδεθεί με το τύλιγμα του επαγωγικού τυμπάνου με δυο τρόπους. Ο ένας τρόπος είναι σε σειρά και ο άλλος τρόπος είναι να συνδεθεί παράλληλα. Στην πρώτη περίπτωση γίνεται λόγος για κινητήρες σειράς ενώ στην δεύτερη για κινητήρες παράλληλης διέγερσης. Αν το τύλιγμα διέγερσης σε μια μηχανή συνδεθεί σε σειρά με το τύλιγμα του επαγωγικού τυμπάνου και στην ίδια μηχανή ένα άλλο τύλιγμα διέγερσης συνδεθεί παράλληλα με το τύλιγμα του επαγωγικού τυμπάνου τότε γίνεται λόγος για κινητήρα σύνθετης διέγερσης. Τέλος αν το τύλιγμα διέγερσης τροφοδοτείται με ρεύμα από μία ανεξάρτητη πηγή τότε ο κινητήρας ονομάζεται κινητήρας ξένης διέγερσης.

7. Ονομαστικό ρεύμα διέγερσης (I_{FN}): Αναφέρεται στο μέγιστο συνεχές ρεύμα με το οποίο πρέπει να τροφοδοτηθεί το τύλιγμα των μαγνητικών πόλων έτσι ώστε αυτοί να αποδώσουν το μέγιστο απαιτούμενο μαγνητικό πεδίο της μηχανής.

8. Ρεύμα διέγερσης εν κενό λειτουργίας (I_{F0}): Αναφέρεται στο ελάχιστο συνεχές ρεύμα με το οποίο πρέπει να τροφοδοτηθεί το τύλιγμα των μαγνητικών πόλων προκειμένου αυτοί, να αποδώσουν το απαιτούμενο μαγνητικό πεδίο για την λειτουργία της μηχανής χωρίς φορτίο.

9. Μέγιστη επιτρεπόμενη θερμοκρασία περιβάλλοντος: Αναφέρεται στη μέγιστη τιμή θερμοκρασίας περιβάλλοντος στην οποία μπορεί να λειτουργεί ο κινητήρας με ασφάλεια. Δηλαδή στο όριο που έχει θέσει ο κατασκευαστής έτσι ώστε ο κινητήρας κατά την λειτουργία του να μην μπορεί να καταστραφεί από υπερθέρμανση.



Εικόνα 6-1 Πινακίδα τεχνικών χαρακτηριστικών κινητήρα συνεχούς ρεύματος της General Electric

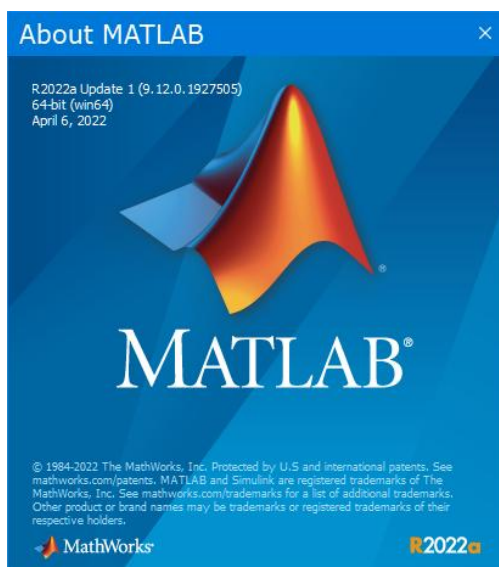
Εκτός από τα τεχνικά χαρακτηριστικά που απεικονίζονται στην εικόνα 6.1, σε μια πινακίδα ενός κινητήρα συνεχούς ρεύματος μπορεί να υπάρχουν και τα παρακάτω:

1. Ονομαστική ροπή κινητήρα (M_N): Αντικατοπτρίζει το μηχανικό φορτίο το οποίο μπορεί να παραλαμβάνει συνεχώς ο άξονας του κινητήρα υπό κανονικές συνθήκες λειτουργίας, χωρίς να υπάρχει κίνδυνος υπερθέρμανσης. Κατά την διάρκεια λειτουργίας του κινητήρα στην ονομαστική ροπή και όταν αυτός τροφοδοτείται με ονομαστική τάση τότε απορροφά το ονομαστικό του ρεύμα.

2. Μέγιστο ρεύμα (I_{\max}): Εκφράζει το μέγιστο στιγμιαίο ρεύμα με το οποίο μπορεί να τροφοδοτηθεί ο κινητήρας από μια μπαταρία σε περίπτωση που ο άξονας σταματήσει να περιστρέφεται εξαιτίας κάποιας βλάβης.
3. Βαθμός απόδοσης κινητήρα (η): Είναι ο λόγος της ωφέλιμης ισχύος που αποδίδει στον άξονα, προς την ισχύ που απορροφάει, δηλαδή προς της ισχύ που δέχεται από το δίκτυο συνεχούς ρεύματος. Ο βαθμός απόδοσης είναι πάντα μικρότερος από την μονάδα, αφού δεν έχει ανακαλυφτεί ακόμα μηχανή η οποία να μην παρουσιάζει απώλειες. Ένας κινητήρας θεωρείται καλύτερος ποιοτικά όσο ο βαθμός απόδοσης του πλησιάζει την μονάδα. Οι πιο συνηθισμένοι βαθμοί απόδοσης που συναντώνται σε κινητήρες συνεχούς ρεύματος είναι της τάξης του 75-85%. [46]

7 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7^ο: ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ MATLAB

7.1 Εισαγωγή Matlab-Simulink



Εικόνα 7-1 Λογισμικό Matlab

Το λογισμικό Matlab παίρνει την ονομασία του από τις λέξεις MATrix & LABoratory. Πρόκειται για ένα διαδραστικό πρόγραμμα σύμφωνα με το οποίο πραγματοποιούνται αριθμητικοί υπολογισμοί και κατασκευάζονται γραφήματα. Επίσης παρέχει δυνατότητες προγραμματισμού, γεγονός που το καθιστά ένα πολύ ισχυρό εργαλείο. Είναι ειδικά κατασκευασμένο για να υλοποιεί υπολογισμούς με πίνακες, όπως είναι για παράδειγμα η επίλυση γραμμικών συστημάτων, εύρεση ιδιοτιμών και ιδιοδιανυσμάτων κλπ. Ακόμα είναι σχεδιασμένο έτσι ώστε να επιλύει μη γραμμικά συστήματα καθώς και προβλήματα με διάφορες εξισώσεις κλπ.

Το Matlab αποτελεί ένα περιβάλλον προγραμματισμού τόσο για επιστημονικούς όσο και για τεχνικούς υπολογισμούς, δομημένο επάνω στην έννοια των πινάκων και είναι χρήσιμο για την επίλυση πολύπλοκων μαθηματικών μοντέλων με εύκολο και ταυτόχρονα γρήγορο τρόπο. Αποτελεί λοιπόν μια πανίσχυρη πλατφόρμα, μια γλώσσα υψηλού επιπέδου για ανάπτυξη αλγορίθμων, συλλογή και ανάλυση δεδομένων και πληροφορίας.

Το λογισμικό Simulink, το οποίο ουσιαστικά είναι επέκταση του ίδιου του λογισμικού Matlab, είναι ένα γραφικό περιβάλλον με την βοήθεια του οποίου μοντελοποιούνται και προσομοιώνονται διάφορα συστήματα (φυσικά, ηλεκτρικά κλπ). Είναι εύκολο στη χρήση του, αφού έχει σχετικά

απλό και κατανοητό γραφικό περιβάλλον. Αυτό σημαίνει ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί από κάποιον ο οποίος δεν είναι απαραίτητα γνωστής λογισμικού Matlab. [47]

7.2 Περιγραφή μελέτης

Η παρούσα μελέτη έχει ως στόχο την μοντελοποίηση και την προσομοίωση ενός κινητήρα συνεχούς ρεύματος ανεξάρτητης διέγερσης σε περιβάλλον Matlab. Αφού σχεδιαστεί το μοντέλο, στη συνέχεια θα παρουσιαστεί η χαρακτηριστική ροπής-στροφών του κινητήρα στο ίδιο περιβάλλον και θα πραγματοποιηθεί έλεγχος της ταχύτητας μεταβάλλοντας την τάση στον οπλισμό του.

Ο κινητήρας ο οποίος έχει επιλεγεί για την υλοποίηση της προσομοίωσης έχει τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

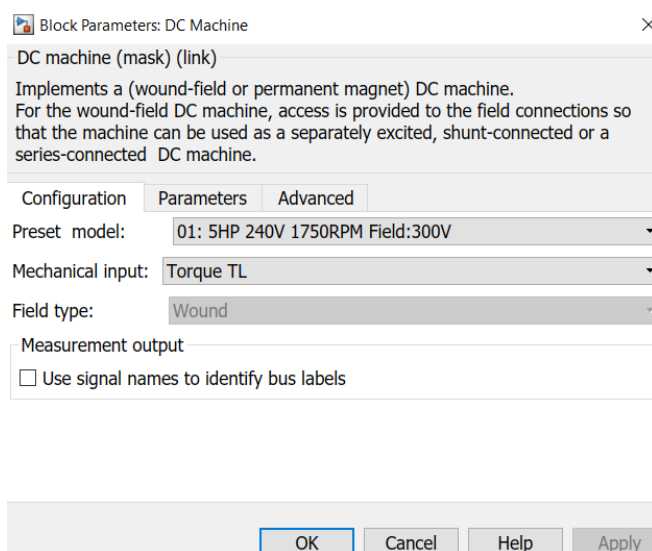
Ονομαστική ισχύς: $P=5\text{HP}=5*746=3730\text{W}$

Ονομαστική τάση: $V_a=240\text{V}$

Ονομαστικές στροφές: $n=1750\text{rpm}$

Τάση διέγερσης: $V_f=300\text{V}$

Η επιλογή του κινητήρα γίνεται από το παράθυρο παραμέτρων του κινητήρα, το οποίο παρουσιάζεται στην παρακάτω εικόνα:



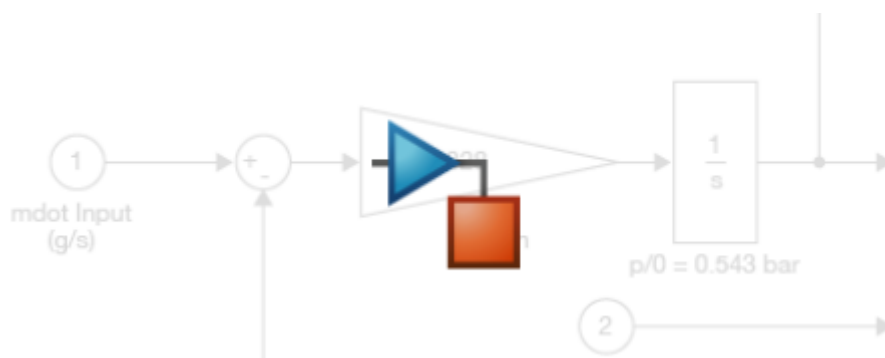
Εικόνα 7-2 Παράθυρο παραμέτρων κινητήρα

Όταν ολοκληρωθεί η προσομοίωση και αφού πλέον έχει δημιουργηθεί η χαρακτηριστική φορτιού του κινητήρα σύμφωνα με τις ονομαστικές του τιμές, έπειτα θα γίνει έλεγχος της ταχύτητας περιστροφής μεταβάλλοντας την τάση οπλισμού και πιο συγκεκριμένα, θα παρουσιαστούν οι μεταβολές των αντίστοιχων μεγεθών της χαρακτηριστικής αυτής όταν η τάση στον οπλισμό θα μειωθεί.

7.3 Σχεδίαση μοντέλου

Κατά την μοντελοποίηση του κινητήρα επιλέχθηκε το λογισμικό Simulink, το οποίο αποτελεί ένα εργαλείο μοντελοποίησης, ανάλυσης και προσομοίωσης συστημάτων. Το λογισμικό αυτό έχει ως πυρήνα το περιβάλλον του λογισμικού Matlab.

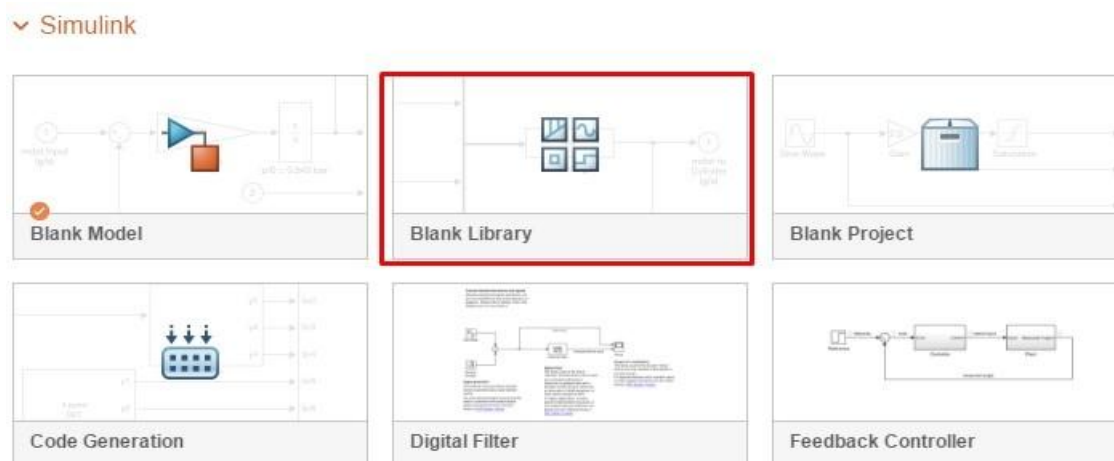
Για να ανοίξει το περιβάλλον Simulink, ο χρήστης θα πρέπει να πληκτρολογήσει στην γραμμή εντολών του Matlab την εντολή "Simulink" ή να πατήσει το παρακάτω εικονίδιο της εικόνας 7.3, που βρίσκεται στην μπάρα με τα εργαλεία του Matlab.



Εικόνα 7-3 Εικονίδιο του λογισμικού Simulink

Με την παραπάνω ενέργεια θα ανοίξει ο εξερευνητής της βιβλιοθήκης του Simulink, με την βοήθεια του οποίου ο χρήστης θα μπορεί περιηγηθεί στα διάφορα γραφικά στοιχεία προγραμματισμού και να επιλέξει τα καταλληλά μπλοκ για την μοντελοποίηση. Η βιβλιοθήκη του Simulink αποτελείται από διάφορα σύνολα γραφικών μπλοκ, η επίλυση των οποίων καθορίζεται από την μοντελοποίηση που έχει αποφασίσει να πραγματοποιήσει ο χρήστης.

Κάνοντας κλικ στο εικονίδιο του Simulink Library Browser που απεικονίζεται στην εικόνα 7.4, θα ανοίξει ένα καινούριο μοντέλο. Με τον τρόπο αυτό ο χρήστης έχει την δυνατότητα να δημιουργήσει ένα νέο παράθυρο στο οποίο θα σχεδιάσει το νέο μοντέλο που επιθυμεί. Σε αυτό το νέο παράθυρο υπάρχει ένας χώρος εργασίας που θα τοποθετηθούν τα γραφικά μπλοκ για την σχεδίαση του μοντέλου.[10]



Εικόνα 7-4 Εικονίδιο Simulink Library Browser

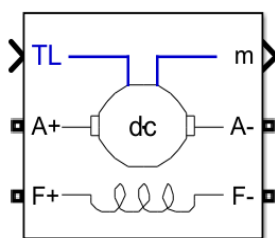
Το λογισμικό Simulink λοιπόν, είναι εφοδιασμένο με ένα αρκετά μεγάλο πλήθος διαφορετικών λειτουργικών μπλοκ, τα οποία βρίσκονται ταξινομημένα σε διαφορετικά υποσύνολα (εργαλειοθήκες) και ο τίτλος τους περιγράφει τον σκοπό και την ειδίκευση τους.

Πριν παρουσιαστεί η σχεδίαση του μοντέλου σύμφωνα με το οποίο θα δημιουργηθεί η χαρακτηριστική φορτιού του κινητήρα, είναι πολύ σημαντικό να αναλυθούν, το καθένα ξεχωριστά, όλα τα μπλοκ που χρησιμοποιήθηκαν κατά την μοντελοποίηση, προκειμένου να γίνει κατανοητή τόσο η λειτουργία τους όσο και η χρησιμότητάς τους.[48]

Τα μπλοκ που χρησιμοποιήθηκαν κατά την μοντελοποίηση για την μελέτη ενός κινητήρα συνεχούς ρεύματος ανεξάρτητης διέγερσης είναι:

DC MACHINE

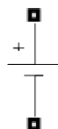
Το μπλοκ μηχανής συνεχούς ρεύματος μπορεί να είναι μηχανή με μόνιμους μαγνήτες ή μηχανή με τύλιγμα πεδίου. Επειδή η μοντελοποίηση αφορά κινητήρα συνεχούς ρεύματος ανεξάρτητης διέγερσης, πρόκειται για κινητήρα συνεχούς ρεύματος με τύλιγμα πεδίου. Το τύλιγμα πεδίου του κινητήρα τροφοδοτείται με τάση μέσω των ακροδεκτών F_+ και F_- και είναι εκείνο το οποίο ανάλογα με την συνδεσμολογία του καθορίζει το είδος του κινητήρα. Σε ότι αφορά το τύλιγμα του οπλισμού, αυτό τροφοδοτείται με τάση μέσω των ακροδεκτών A_+ και A_- και αποτελείται από έναν επαγωγέα L_a και μια αντίσταση R_a σε σειρά με αντίθετη ηλεκτρομαγνητική ροπή. Η ροπή που εφαρμόζεται στον άξονα του κινητήρα παρέχεται στην είσοδο TL. Η θετική τιμή της ροπής σημαίνει πως η μηχανή λειτουργεί ως κινητήρας συνεχούς ρεύματος ενώ αντίθετα, η αρνητική ροπή δηλώνει πως λειτουργεί ως γεννήτρια.[49]



Εικόνα 7-5 DC machine

DC ΠΗΓΗ ΤΑΣΗΣ

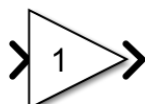
Το μπλοκ πηγής dc τάσης εφαρμόζει μια ιδανική πηγή τάσης dc. Ο θετικός ακροδέκτης αντιπροσωπεύεται από ένα σύμβολο συν σε μια θύρα. Η τιμή της τάσης μπορεί να αλλάξει ανά πάσα στιγμή κατά την διάρκεια της προσομοίωσης. Αυτό μπορεί να γίνει από το μπλοκ παραμέτρων.



Εικόνα 7-6 DC Πηγή Τάσης

GAIN

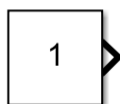
Το μπλοκ gain παίζει τον ρόλο του ενισχυτή ενός σήματος. Συνήθως πολλαπλασιάζει το σήμα εισόδου με μια σταθερά που έχει οριστεί από τον χρήστη. Από το μπλοκ παραμέτρων μπορεί να καθοριστεί τόσο η τιμή της ενίσχυσης όσο και η χρονική στιγμή κατά την οποία θα ξεκινήσει η ενίσχυση.[48]



Εικόνα 7-7 Gain

CONSTANT

Το σταθερό αυτό μπλοκ δημιουργεί μια πραγματική ή πολύπλοκη σταθερή τιμή. Η τιμή αυτή παραμένει σταθερή καθόλη την διάρκεια της προσομοίωσης. Το μπλοκ έχει ως έξοδο, είτε βαθμωτό μέγεθος, είτε διάνυσμα ή μήτρα. Αυτό καθορίζεται από την διαστασιολόγηση της παραμέτρου σταθερής τιμής ή από την ρύθμιση των παραμέτρων διανυσματικού φορέα ως παραμέτρου 1-D.[50]



Εικόνα 7-8 Constant

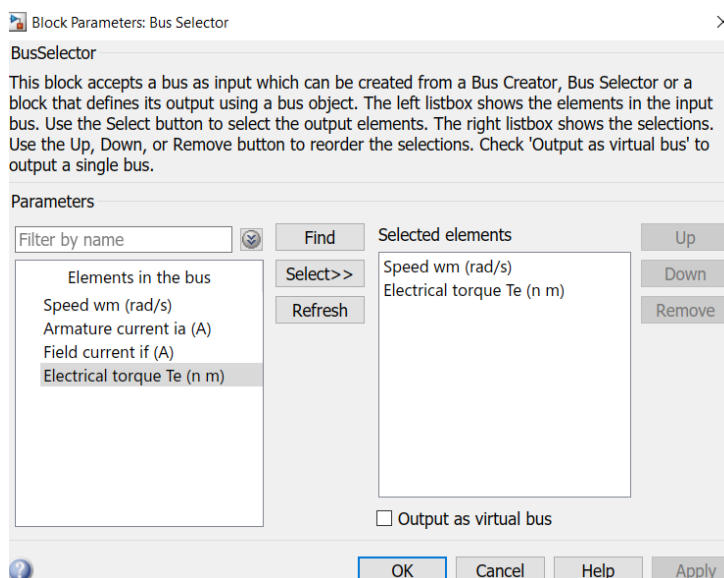
BUS SELECTOR

Το μπλοκ bus selector εξάγει τα στοιχεία που επιλέγονται από τον δίαυλο εισόδου. Το μπλοκ αυτό έχει την δυνατότητα να εξάγει τα επιλεγμένα στοιχεία χωριστά ή σε έναν νέο εικονικό δίαυλο. Επίσης δεν υποστηρίζει την μίξη μηνυμάτων και στοιχείων σήματος ως εξόδους. Είναι αρκετά χρήσιμο, διότι χάρη σε αυτό επιτυγχάνεται η εξαγωγή της ροπής αλλά και της ταχύτητας περιστροφής του κινητήρα. Έτσι οι τιμές αυτές μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην απεικόνιση της χαρακτηριστικής ροπής-στροφών του κινητήρα.[51]



Εικόνα 7-9 Bus Selector

Αυτό το μπλοκ βρίσκεται στην βιβλιοθήκη Commonly Used Blocks. Διαθέτει μια μοναδική είσοδο και το πλήθος των εξόδων του είναι δυνατό να καθοριστεί από το παράθυρο παραμέτρων.

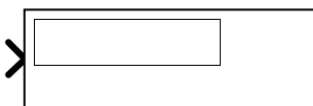


Εικόνα 7-10 Παράθυρο παραμέτρων bus selector

Στο αριστερό πλαίσιο της εικόνας του παραθύρου παραμέτρων, διακρίνεται η λίστα με τις επιλογές σημάτων που μπορούν να εμφανιστούν, ενώ στο δεξί πλαίσιο είναι τοποθετημένα τα σήματα που έχουν επιλεγθεί να εμφανιστούν ως έξοδοι.

DISPLAY

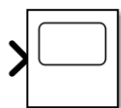
Για να εμφανιστεί οποιαδήποτε ένδειξη είναι αναγκαίο να χρησιμοποιηθεί κάποιο απεικονιστικό όργανο. Το πιο συνηθισμένο και ταυτόχρονα πιο απλό όργανο, είναι μια οθόνη για την οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί το μπλοκ display. Για να γίνει πιο εύκολη και πιο γρήγορη η εύρεση του συγκεκριμένου μπλοκ, προτείνεται στον χρήστη να χρησιμοποιήσει την δυνατότητα αναζήτησης από την βιβλιοθήκη του Simulink.



Εικόνα 7-11 Display

SCOPE

Για την κατάλληλη απεικόνιση μια κυματομορφής, είναι αναγκαίο το σήμα εισόδου να συνδεθεί στο κατάλληλο απεικονιστικό όργανο. Αυτό συμβαίνει με την εισαγωγή ενός παλμογράφου (scope). Το εργαλείο αυτό δηλαδή, δίνει την δυνατότητα αναπαράστασης γραφικών παραστάσεων ενός σήματος, σε σχέση με το χρόνο. Από το παράθυρο παραμέτρων του συγκεκριμένου μπλοκ είναι εφικτό να καθοριστεί η μέγιστη και η ελάχιστη τιμή του άξονα Υ. Έτσι μπορεί να μελετηθεί καλύτερα οποιοδήποτε μέγεθος εμφανίζεται σε αυτόν τον άξονα του γραφήματος, αφού με αυτόν τον τρόπο μπορεί να προσδιοριστεί με ακρίβεια το εύρος των τιμών, που ενδιαφέρει τον χρήστη.



Εικόνα 7-12 Scope

POWERGUI BLOCK

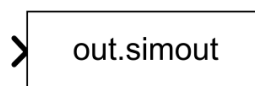
Απαραίτητη προϋπόθεση για να λειτουργήσει οποιοδήποτε μοντέλο έχει σχεδιαστεί με διάφορα μπλοκ από την βιβλιοθήκη Simulink Library Browser, αποτελεί η εισαγωγή του μπλοκ powergui στο μοντέλο που σχεδιάζεται. Το μπλοκ αυτό, παρέχει ένα γραφικό περιβάλλον (για αυτό στην ονομασία του υπάρχουν τα γράμματα g,u και i τα οποία αναφέρονται στις λέξεις graphical user interface). Αυτό το γραφικό περιβάλλον επιτρέπει τη ρύθμιση των παραμέτρων του μοντέλου, αλλά και την εύκολη εκτέλεση πολύπλοκων αναλύσεων και λειτουργιών (όπως για παράδειγμα η ανάλυση Fourier). Στις πιο παλιές εκδόσεις του Matlab, η εισαγωγή του μπλοκ powergui γινόταν με αυτόματο τρόπο κατά την προσομοίωση («τρέξιμο») του μοντέλου, ακόμα και σε περίπτωση που ο χρήστης είχε ξεχάσει να το τοποθετήσει ο ίδιος νωρίτερα. Πλέον, σε πιο καινούριες εκδόσεις του Matlab, η απουσία του, θα έχει σαν αποτέλεσμα την εμφάνιση μηνύματος σφάλματος. Άρα από τα παραπάνω γίνεται κατανοητή η σημασία και η χρησιμότητα του, διότι δίχως αυτό δεν είναι δυνατόν να πραγματοποιηθεί η οποιαδήποτε προσομοίωση.[48]



Εικόνα 7-13 Powergui

TO WORKSPACE

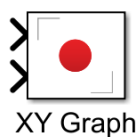
Το μπλοκ το workspace καταγράφει τα δεδομένα που είναι συνδεδεμένα στη θύρα εισόδου του, σε έναν χώρο εργασίας από ένα μοντέλο Simulink. Συνήθως τα δεδομένα που έχουν καταγραφεί, επιστρέφονται στον βασικό χώρο εργασίας. Όταν γίνει προσομοίωση ενός μοντέλου μέσω προγραμματισμού, μέσα σε μια συνάρτηση, τότε τα καταγεγραμμένα δεδομένα επιστρέφονται στο χώρο εργασίας για τη συνάρτηση. Ακόμα και σε περίπτωση όπου η προσομοίωση διακοπεί, τα δεδομένα αυτά, εγγράφονται και παραμένουν στον χώρο εργασίας. Το μπλοκ αυτό είναι αρκετά χρήσιμο καθώς εκεί καταγράφονται δεδομένα για ένα σήμα, έναν διάυλο ή μια σειρά διαύλων. Επίσης υποστηρίζει την καταγραφή βαθμωτών και πολυδιάστατων δεδομένων, συμπεριλαμβανομένων δεδομένων για σήματα μεταβλητού μεγέθους.[52]



Εικόνα 7-14 To workspace

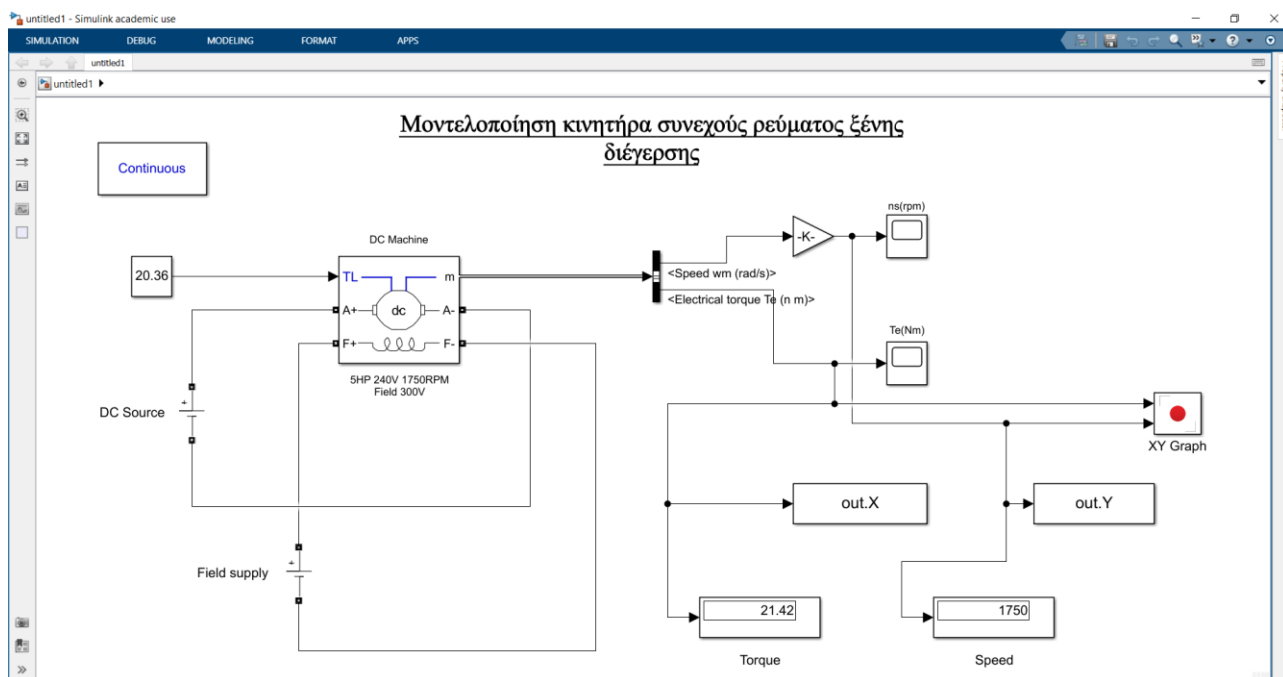
XY GRAPH

Με την βοήθεια του μπλοκ xy graph είναι δυνατό να γίνει η καταγραφή δεδομένων στον χώρο εργασίας ή σε ένα αρχείο ή και στα δυο. Εάν μετά την προσομοίωση, υπάρχει ανάγκη για αποθήκευση δεδομένων τότε δίνεται η δυνατότητα από το συγκεκριμένο μπλοκ, να εξαχθούν τα δεδομένα τα οποία έχουν καταγραφεί είτε στον χώρο εργασίας, είτε σε οποιονδήποτε υποστηριζόμενο τύπο αρχείου. Χάρη σε αυτό το μπλοκ επίσης, μπορεί να γίνει οπτικοποίηση των σημάτων που έχουν συνδεθεί σε αυτό. Κάνοντας διπλό κλικ σε αυτό το μπλοκ, προβάλλονται διάφορα δεδομένα για τα σήματα που είναι συνδεδεμένα σε αυτό, ενώ παρέχεται η δυνατότητα πρόσβασης σε στοιχεία ελέγχου της προσομοίωσης, όπως είναι για παράδειγμα το κουμπί εκτέλεσης.[53]



Εικόνα 7-15 XY Graph

Στη συνέχεια και αφού πλέον έχουν παρουσιαστεί και αναλυθεί, το καθένα ξεχωριστά, όλα τα απαραίτητα μπλοκ που χρησιμοποιήθηκαν κατά την μοντελοποίηση, σχεδιάστηκε στο περιβάλλον του Simulink το μοντέλο της εικόνας 7.16.



Εικόνα 7-16 Μοντέλο Simulink/Matlab κινητήρα Σ.Ρ ανεξάρτητης διέγερσης

Το μοντέλο της παραπάνω εικόνας, αναφέρεται σε έναν κινητήρα συνεχούς ρεύματος ανεξάρτητης διέγερσης.

Είναι σημαντικό, να γίνουν ορισμένοι υπολογισμοί που αφορούν τον κινητήρα, έτσι ώστε να μπορεί να πραγματοποιηθεί η προσομοίωση χωρίς σφάλματα.

Η γωνιακή ταχύτητα του άξονα του είναι:

$$\omega = 2\pi \frac{n}{60} = 2\pi \frac{1750}{60} = 183,17 \text{ rad/s} \quad (7.1)$$

Η τιμή της ροπής φορτίου δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$T_e = \frac{pe}{\omega} = \frac{3740W}{183,17 \text{ rad/s}} = 20,4 \text{ N/m} \quad (7.2)$$

Όπου p_e : η ηλεκτρική ισχύς εξόδου του κινητήρα

n : οι ονομαστικές στροφές του κινητήρα

Στο μοντέλο της εικόνας 7.14, διακρίνεται μια μηχανή συνεχούς ρεύματος και συγκεκριμένα ένας κινητήρας ανεξάρτητης διέγερσης. Το τύλιγμα πεδίου του κινητήρα τροφοδοτείται με τάση 300V από μια πηγή συνεχούς ρεύματος. Ενώ μια άλλη πηγή συνεχούς ρεύματος τροφοδοτεί το τύλιγμα οπλισμού με τάση 240V.

Προκειμένου ο κινητήρας να αποκτήσει τις ονομαστικές του στροφές, στην είσοδο της μηχανικής ροπής TL, πρέπει να εισαχθεί η τιμή της ονομαστικής ροπής του κινητήρα. Δηλαδή πρέπει να τροφοδοτηθεί με το κατάλληλο φορτίο. Αυτό επιτυγχάνεται με την σύνδεση του μπλοκ constant στον ακροδέκτη TL της μηχανής. Το θετικό πρόσημο που έχει δοθεί στην τιμή από το παράθυρο παραμέτρων, δηλώνει πως η μηχανή λειτουργεί ως κινητήρας. Με πιο απλά λόγια σημαίνει ότι δέχεται θετική ροπή.

Επίσης υπάρχει ένας ενισχυτής gain, ο οποίος αφού του δοθεί η εξίσωση (7.3), θα μετατρέψει την γωνιακή ταχύτητα του κινητήρα (rad/s), σε στροφές ανά λεπτό (rpm), για να μπορέσει να σχηματιστεί η χαρακτηριστική φορτίου του κινητήρα.

Εξίσωση για μετατροπή της γωνιακής ταχύτητας (rad/s) σε στροφές ανά λεπτό(rpm):

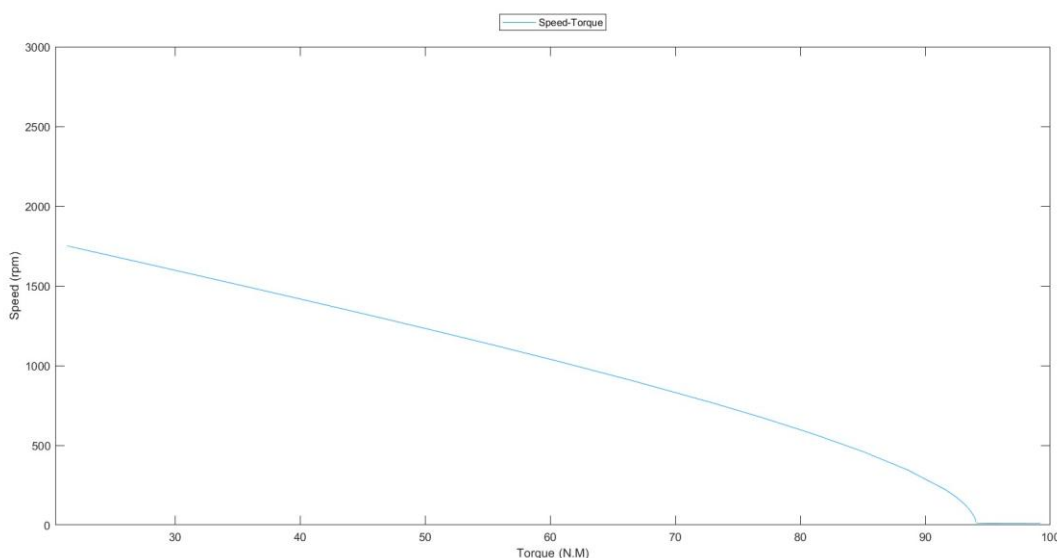
$$\frac{30}{\pi} \quad (7.3)$$

Ακόμα έχουν τοποθετηθεί δυο παλμογράφοι (scope), οι οποίοι παρέχουν την δυνατότητα αναπαράστασης της ταχύτητας καθώς και της ροπής του κινητήρα σε συνάρτηση με τον χρόνο προσομοίωσης. Επιπλέον, υπάρχουν δυο οθόνες, που δείχνουν την ροπή και την ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα αφού ολοκληρωθεί η προσομοίωση.

Τέλος υπάρχει το μπλοκ xy graph, το οποίο θα δώσει την χαρακτηριστική ροπής-ταχύτητας περιστροφής του κινητήρα. Απαραίτητη προϋπόθεση για να γίνει αυτό, είναι να πραγματοποιηθεί η προσομοίωση πατώντας το κουμπί play και στη συνέχεια να γίνει διπλό κλικ στο συγκεκριμένο μπλοκ.

7.3.1 Χαρακτηριστική ροπής-ταχύτητας περιστροφής του κινητήρα

Αφού λοιπόν σχεδιαστεί κατάλληλα το αντίστοιχο κύκλωμα, με την βοήθεια του Matlab, ο χρήστης μπορεί να εξάγει την χαρακτηριστική ροπής-ταχύτητας περιστροφής του κινητήρα. Η χαρακτηριστική αυτή παρουσιάζεται στην εικόνας 7.15.



Εικόνα 7-17 Χαρακτηριστική ροπής-ταχύτητας του κινητήρα

Από την χαρακτηριστική της εικόνας 7.17, παρατηρείται πως οι στροφές του κινητήρα μεταβάλλονται ελάχιστα συναρτήσει του ονομαστικού φορτίου. Για ένα αρκετά μεγάλο εύρος φορτίου η ταχύτητα περιστροφής του είναι σχεδόν σταθερή. Όταν η ροπή του φορτίου ξεπεράσει την ροπή του κινητήρα η ταχύτητα με την οποία περιστρέφεται ο κινητήρας θα αρχίσει να μειώνεται όλο και περισσότερο, μέχρι αυτή να μηδενιστεί, δηλαδή μέχρι να σταματήσει ο κινητήρας. Επομένως για πολύ μεγάλες ροπές η συγκεκριμένη γραφική παράσταση τέμνει τον οριζόντιο άξονα σε σημείο όπου προφανώς ακινητοποιείται ο κινητήρας. Το σημείο όμως αυτό, δεν αντιστοιχεί σε επιτρεπτή λειτουργία, αφού ισοδυναμεί με απαγορευτικά μεγάλη τιμή του ρεύματος, με αποτέλεσμα να υπάρχει ο κίνδυνος να καταστραφεί ο κινητήρας.

7.3.2 Ρύθμιση της ταχύτητας περιστροφής μεταβάλλοντας την τάση οπλισμού

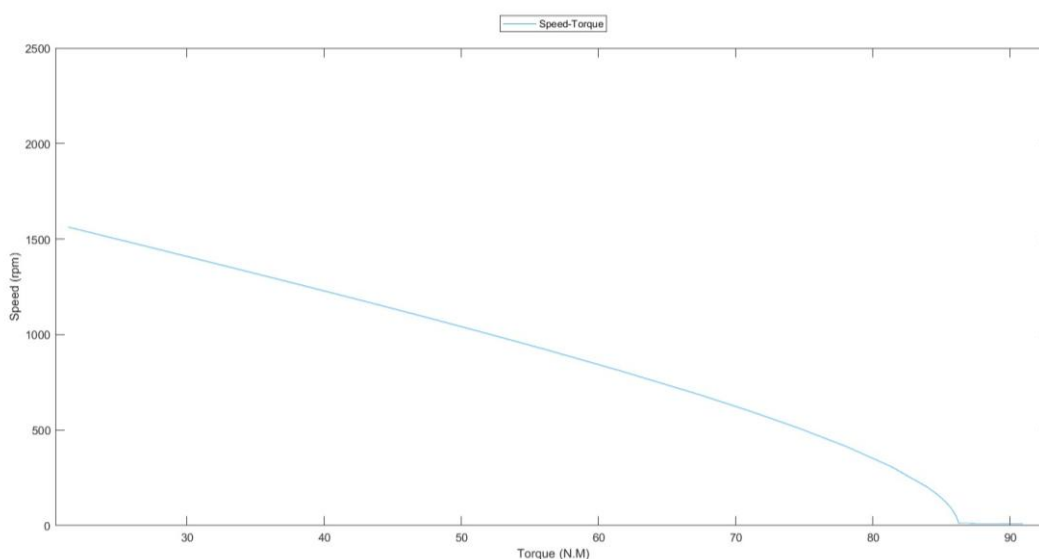
Κατά την δεύτερη φάση της μελέτης, θα παρουσιαστούν οι χαρακτηριστικές ροπής-ταχύτητας περιστροφής του κινητήρα, καθώς θα πραγματοποιείται μείωση της τάση κάθε φορά που θα ξεκινάει η προσομοίωση. Η τάση στα άκρα του οπλισμού είναι δυνατόν να ελεγχθεί αφού γίνει διπλό κλικ στην πηγή συνεχούς ρεύματος (DC Source), η οποία τροφοδοτεί το συγκεκριμένο τύλιγμα με τάση. Όταν γίνει διπλό κλικ σε αυτό το μπλοκ, τότε θα ανοίξει το παράθυρο παραμέτρων. Εκεί θα εισαχθούν οι διαφορετικές τιμές της τάσης, με τις οποίες θα τροφοδοτείται ο κινητήρα, για την κάθε προσομοίωση ξεχωριστά.

Οι τάσεις που έχουν δοθεί είναι:

- $V_1=220V$
- $V_2=200V$
- $V_3=180V$
- $V_4=160V$

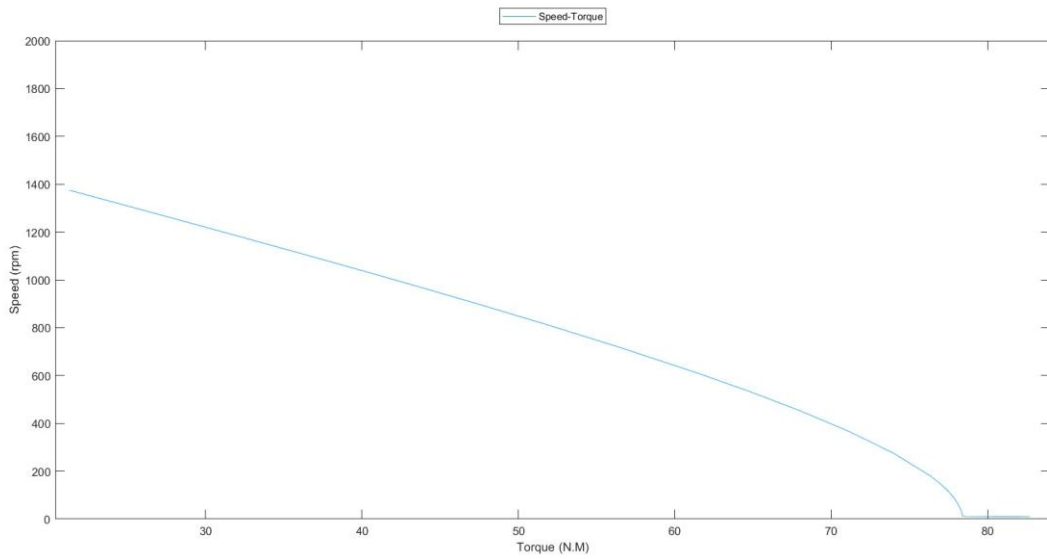
Σύμφωνα με το μοντέλο της εικόνας 7.16, για τις παραπάνω τιμές τάσης και αφού πραγματοποιηθούν τέσσερεις διαφορετικές προσομοιώσεις, θα προκύψουν οι εξής χαρακτηριστικές:

Για $V=V_1$:



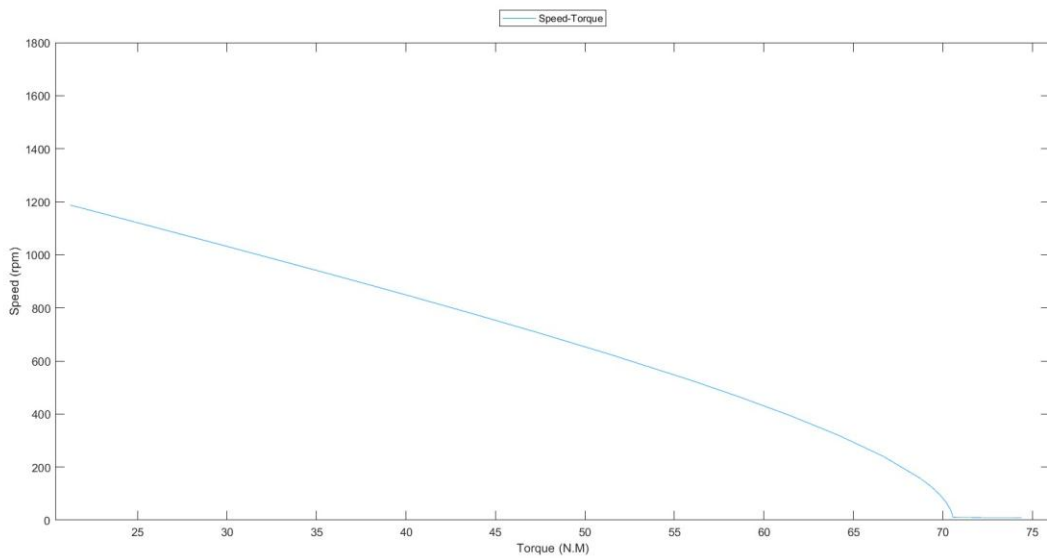
Εικόνα 7-18 Χαρακτηριστική ροπής-στροφών (α)

Για $V=V_2$:



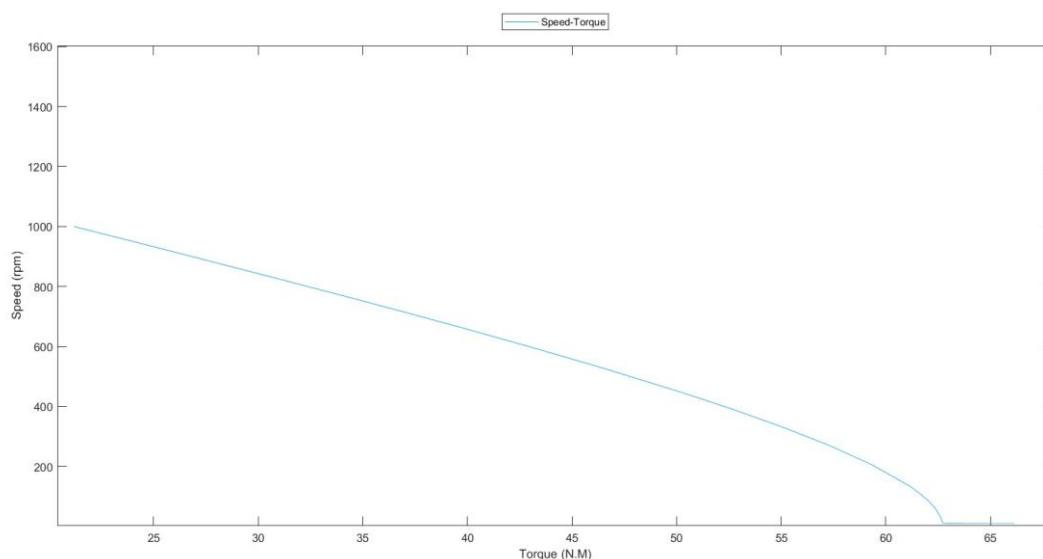
Εικόνα 7-19 Χαρακτηριστική ροπής-στροφών (β)

Για $V=V_3$:



Εικόνα 7-20 Χαρακτηριστική ροπής-στροφών (γ)

Για $V=V_4$:



Εικόνα 7-21 Χαρακτηριστική ροπής-στροφών (δ)

Από τις παραπάνω χαρακτηριστικές, γίνεται ευκολά αντιληπτό, πως υπάρχει εξάρτηση της τάσης που εφαρμόζεται στον οπλισμό του κινητήρα, με την ταχύτητα περιστροφής του. Πιο αναλυτικά, όταν η τάση V_A μειώνεται, τότε το ρεύμα οπλισμού του κινητήρα θα ξεκινήσει να μειώνεται και αυτό $[I_A=(V_A-E_A)/R_A]$. Με τη σειρά της, η επαγόμενη ροπή ($\tau_{ind}=K\Phi I_A$) μειώνεται και τότε ισχύει ότι $\tau_{ind}<\tau_{load}$ γεγονός που επιβραδύνει τον κινητήρα. Όμως η μείωση της γωνιακής ταχύτητας, προκαλεί μείωση της $E_A=K\Phi\omega_n$ και επομένως το ρεύμα οπλισμού αυξάνεται. Έτσι η επαγόμενη ροπή τ_{ind} αυξάνεται και γίνεται ίση με την ροπή του φορτίου τ_{load} σε μια ταχύτητα περιστροφής μικρότερη από την αρχική.

Η μεταβολή της τάσης οπλισμού λοιπόν, επηρεάζει την ταχύτητα με την οποία περιστρέφεται ο κινητήρας, σε όλο το εύρος ταχυτήτων του. Κάθε φορά που η τάση στον οπλισμό μειώνεται, θα μειώνονται και οι στροφές, από την λειτουργία χωρίς φορτίο, έως την λειτουργία υπό πλήρες φορτίο, ακόμα και μέχρι να ακινητοποιηθεί τελείως ο δρομέας του.

Ο έλεγχος της ταχύτητας περιστροφής με μεταβολή της τάσης στο τύλιγμα οπλισμού, εφαρμόζεται μόνο όταν είναι αναγκαίο να ελεγχθεί η ταχύτητα του κινητήρα, σε ένα εύρη φάσμα ταχυτήτων, που αφορά την λειτουργία από μηδενική ταχύτητα έως και την ονομαστική ταχύτητα λειτουργίας.

Έτσι από τις χαρακτηριστικές φορτίου που παρουσιάστηκαν προηγουμένως προκύπτει πως η συγκεκριμένη μέθοδος εξασφαλίζει μια ομαλή μεταβολή της ταχύτητας περιστροφής του κινητήρα σε ένα αρκετά μεγάλο φάσμα φορτίων, που όμως είναι πάντα μικρότερο από την βασική ταχύτητα του κινητήρα. Σε περίπτωση που απαιτείται να γίνει έλεγχος για λειτουργία άνω των ονομαστικών στροφών και προς αποφυγή φαινομένων υπερφόρτισης, συνήθως προτιμάται η σύνδεση μιας αντίστασης σε σειρά με το κύκλωμα οπλισμού.

8 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8^ο: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ

8.1 Γενικά συμπεράσματα

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, μελετήθηκε η συμπεριφορά ενός κινητήρα συνεχούς ρεύματος ξένης διέγερσης. Η συμπεριφορά αυτή έχει να κάνει με την μεταβολή της τάσης στον οπλισμό του κινητήρα και πιο συγκεκριμένα σε μεταβολές που αφορούν την μείωση της τάσης αυτής. Η μείωση της τάσης έχει σαν αποτέλεσμα την μεταβολή σχεδόν όλων των ηλεκτρικών μεγεθών του κινητήρα, όμως η διπλωματική αυτή εργασία, εστιάζει κυρίως στις μεταβολές που παρατηρούνται στην ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα και με την βοήθεια του λογισμικού Matlab στο πως αυτή η μέθοδος μπορεί να εφαρμοστεί στο μοντέλο του κινητήρα που προσομοιώνεται.

Αφού παρατηρηθούν οι χαρακτηριστικές φορτίου, που έχουν σχηματιστεί σύμφωνα με το μοντέλο της μελέτης, προκύπτει πως η διακύμανση της ταχύτητας περιστροφής του κινητήρα είναι σχεδόν σταθερή για ένα αρκετά μεγάλο εύρος φορτίου. Αυτό συμβαίνει γιατί για δεδομένη τιμή φορτίου η κλίση της χαρακτηριστικής ροπής-στροφών είναι αρνητική (εξίσωση 3.10). Άλλο ένα σημαντικό συμπέρασμα που προκύπτει, είναι πως υπάρχει μια σχέση αναλογίας αναμεσα στην τάση που εφαρμόζεται στον οπλισμό και στην ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα. Αυτό σημαίνει πως με την μεταβολή της τάσης μπορεί να γίνει έλεγχος της ταχύτητας για τιμές μικρότερες της βασικής του ταχύτητας. Αξίζει επίσης να αναφερθεί ότι η ρύθμιση των στροφών ενός κινητήρα με αυτή την μέθοδο, παρέχει την δυνατότητα στον κινητήρα να λειτουργεί με την ονομαστική του ροπή σε όλο το εύρος των ταχυτήτων γεγονός που καθιστά τους συγκεκριμένους κινητήρες κατάλληλους για εφαρμογές όπου απαιτείται σταθερή ροπή.

Ανακεφαλαιώνοντας, η ρύθμιση της ταχύτητας σε έναν κινητήρα ανεξάρτητης διέγερσης, εφαρμόζεται σε εφαρμογές όπου ζητείται να γίνει έλεγχος των στροφών σε τιμές μικρότερες από την ονομαστική του ταχύτητα. Ενώ σε αντίθετη περίπτωση, θα πρέπει να αυξηθεί η τάση πάνω από την ονομαστική τάσης λειτουργίας του κινητήρα, πράγμα το οποίο μπορεί να καταστρέφει τον κινητήρα.

8.2 Βελτιώσεις

Μετά την ολοκλήρωση της εργασίας, διαπιστώθηκε πως υπάρχουν περιθώρια βελτίωσης του μοντέλου. Τα περιθώρια αυτά, έχουν να κάνουν τόσο με τον τρόπο ελέγχου της τάσης στο οπλισμό, όσο και με την μελέτη περισσότερων μεγεθών του κινητήρα και η εξέταση αυτών αν και εφόσον, επηρεάζονται από την μεταβολή της τάσης αυτής. Αρχικά η τάση στον οπλισμό του κινητήρα είναι

εφικτό να ελαττώνεται διαδοχικά κατά την ολοκλήρωση μιας και μόνο προσομοίωσης. Αυτό θα διευκόλυνε σιγουρά τον χρήστη, αφού τα αποτελέσματα που προκύπτουν από αυτή την μείωση, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον σχηματισμό της χαρακτηριστικών ροπής-στροφών σε ένα μόνο διάγραμμα. Έτσι η μελέτη των χαρακτηριστικών μπορεί να γίνει αρκετά πιο εύκολη και απλή οντάς πλέον σε κοινούς άξονες. Έπειτα το μοντέλο είναι δυνατό, να βελτιωθεί με την προσθήκη εργαλείων όπως είναι οι παλμογράφοι (scope), έτσι ώστε να υπάρξει καλύτερο οπτικό αποτέλεσμα των μεταβολών των μετρήσεων. Τέλος στο υπάρχον μοντέλο, με τις κατάλληλες τροποποιήσεις, μπορεί να πραγματοποιηθεί έλεγχος της ταχύτητας περιστροφής του κινητήρα και με άλλες τεχνικές. Τέτοιες τεχνικές είναι για παράδειγμα, μέσω της μεταβολής μια αντίστασης διέγερσης ή η τοποθέτηση μιας αντίστασης σε σειρά με το κύκλωμα οπλισμού του κινητήρα.

8.3 Μελλοντικοί στόχοι

Κάθε ερευνητική εργασία αποτελεί μια πρόκληση και μετά την ολοκλήρωση της δημιουργεί την ανάγκη επέκτασή της. Για το λόγο αυτό, θέτονται καινούριοι στόχοι για αναζήτηση, έρευνα και πειραματισμούς. Για αρχή, οι μελλοντικοί στόχοι για το μοντέλο αυτής της εργασίας, είναι να υπάρξει μεγαλύτερη ακρίβεια στον τομέα των αποτελεσμάτων. Παράλληλα, να υλοποιηθεί ένα πείραμα, έτσι ώστε να μπορούν να συγκριθούν τα αποτελέσματα που υπάρχουν στην μελέτη, με τη βοήθεια του προγράμματος προσομοίωσης Simulink, με αυτά ενός πραγματικού κινητήρα συνεχούς ρεύματος ανεξάρτητης διέγερσης και ενός συστήματος ελέγχου της τάσης στον οπλισμό του (π.χ chopper), με σκοπό να φανεί η ακρίβεια του προγράμματος και να εξετασθούν οι πιθανές διαφορές. Το αντικείμενο συγκριτικών μελετών παρουσιάζει εξαιρετικό ενδιαφέρον, αφού το ένα σύστημα επαληθεύει το άλλο, καθώς επίσης εντοπίζει πιθανά σφάλματα. Επιπρόσθετα θα μπορούσε να μελετηθεί ο έλεγχος της ταχύτητας περιστροφής του κινητήρα, από τις ονομαστικές στροφές και πάνω, χρησιμοποιώντας ένα διαφορετικό αυτή τη φορά τρόπο, για την ρύθμιση των στροφών. Τέλος, ένας κάλος τρόπος για να γίνει κατανοητό πόσο ακριβείς είναι ο έλεγχος της συγκεκριμένης κατηγορίας κινητήρων, είναι να πραγματοποιηθεί έλεγχος και για τις υπόλοιπες κατηγορίες κινητήρων και να γίνει σύγκριση των αποτελεσμάτων με τη βοήθεια των χαρακτηριστικών φορτίου που θα προκύψουν.

9 Βιβλιογραφία

- [1] Σ. Γαντζούδης, Μ. Λαγουδάκος και Α. Μπινιάρης, Ηλεκτρικές μηχανές, Αθήνα: ΟΡΓΑΝΙΣΜΟΣ ΕΚΔΟΣΕΩΝ ΔΙΔΑΚΤΙΚΩΝ ΒΙΒΛΙΩΝ, p. 75.
- [2] Π. Μαλατέστας και Μ. Τερζή, ΗΛΕΚΤΡΟΜΗΧΑΝΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΜΕΤΑΤΡΟΠΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ, 2η επιμ., Θεσσαλονίκη: ΤΖΙΟΛΑ, 2020, pp. 221-222.
- [3] Π. Μαλατέστας, Ηλεκτρικές Μηχανές, 3η επιμ., Θεσσαλονίκη: ΤΖΙΟΛΑ, 2015, pp. 226-227.
- [4] Π. Μαλατέστας, Ηλεκτρικές Μηχανές, 3η επιμ., Θεσσαλονίκη: ΤΖΙΟΛΑ, 2015, pp. 230-231.
- [5] Π. Μαλατέστας, Ηλεκτρικές Μηχανές, 3η επιμ., Θεσσαλονίκη: ΤΖΙΟΛΑ, 2015, pp. 251-252.
- [6] Χ. Τσικλίδης και Κ. Τσαρχόσι, «Μελέτη συστημάτων ελέγχου κινητήρων συνεχούς ρεύματος,» 2017.
- [7] <https://www.timetoast.com/timelines/3e4a7a82-1654-49cb-bd70-d90f8cc33677>
- [8] Σ. Γαντζούδης, Μ. Λαγουδάκος και Α. Μπινιάρης, Ηλεκτρικές Μηχανές, Αθήνα: ΟΡΓΑΝΙΣΜΟΣ ΕΚΔΟΣΕΩΝ ΔΙΔΑΚΤΙΚΩΝ ΒΙΒΛΙΩΝ, pp. 76-77.
- [9] <https://dimitrisefthimiou.weebly.com/epsilonphialpharhomuomicrongammaepsilonpsilonsigmaf.html>
- [10] Γ. Καββαδά, «ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΚΑΙ ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΙΝΗΤΗΡΑ ΣΥΝΕΧΟΥΣ ΡΕΥΜΑΤΟΣ ΞΕΝΗΣ ΔΙΕΓΕΡΣΗΣ,» Αθήνα, 2018.
- [11] Σ. Τουλόγλου και Β. Στεργίου, ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ Συνεχούς και Εναλλασσομένου Ρεύματος, ΙΩΝ, 1999, p. 34.
- [12] Σ. Τουλόγλου και Β. Στεργίου, ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ Συνεχούς και Εναλλασσομένου Ρεύματος, ΙΩΝ, 1999, p. 35.
- [13] Σ. Τουλόγλου και Β. Στεργίου, ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ Συνεχούς και Εναλλασσομένου Ρεύματος, ΙΩΝ, 1999, p. 36.
- [14] Π. Μαλατέστας και Μ. Τερζή, ΗΛΕΚΤΡΟΜΗΧΑΝΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΜΕΤΑΤΡΟΠΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ, Θεσσαλονίκη: ΤΖΙΟΛΑ, 2020, p. 252.
- [15] Σ. Τουλόγλου και Β. Στεργίου, ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ Συνεχούς και Εναλλασσομένου Ρεύματος, ΙΩΝ, 1999, p. 39.
- [16] <https://www.youtube.com/watch?v=LAtPHANefQo&t=175s>
- [17] Α. Βέννης, «Μελέτη για την κατασκευή κινητήρα συνεχούς ρεύματος παράλληλης διεγερσης,» Αιγάλεω, 2018.
- [18] Γ. Ασημινάκης, «Εφαρμογή ηλεκτρικών μηχανών σε συστήματα ηλεκτρικής έλξης (ηλεκτρικός σιδηρόδρομος),» Ηράκλειο, 2012.
- [19] Σ. Τουλόγλου και Β. Στεργίου, ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ Συνεχούς και Εναλλασσομένου Ρεύματος, ΙΩΝ, 1999, pp. 84-85.
- [20] S. J. Charpan, ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ AC-DC, 5η επιμ., Θ. Θεοδουλίδης, Επιμ., Θεσσαλονίκη: ΤΖΙΟΛΑ, 2019, p. 506.
- [21] S. J. Charpan, ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ AC-DC, 5η επιμ., Θ. Θεοδουλίδης, Επιμ., Θεσσαλονίκη: ΤΖΙΟΛΑ, 2019, pp. 509-514.
- [22] Α. Σαφάκας, Ηλεκτρικές Μηχανές, Θεσσαλονίκη: ΖΗΤΗ, 2019, p. 196.
- [23] S. J. Charpan, ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ AC-DC, 5η επιμ., Θ. Θεοδουλίδης, Επιμ., Θεσσαλονίκη: ΤΖΙΟΛΑ, 2019, pp. 525-528.

- [24] Β. Γούσιας και Α. Δούσης, «ΤΕΧΝΙΚΗ ΑΝΤΖΕΝΤΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΚΙΝΗΤΗΡΩΝ,» Πάτρα, 2016.
- [25] Π. Μαλατέστας και Μ. Τερζή, ΗΛΕΚΤΡΟΜΗΧΑΝΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΜΕΤΑΤΡΟΠΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ, 2η επιμ., Θεσσαλονίκη: ΤΖΙΟΛΑ, 2020, p. 317.
- [26] S. J. Charpan, ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ AC-DC, 5η επιμ., Θ. Θεοδοουλίδης, Επιμ., Θεσσαλονίκη: ΤΖΙΟΛΑ, 2019, pp. 542-544.
- [27] S. J. Charpan, ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ AC-DC, 5η επιμ., Θ. Θεοδοουλίδης, Επιμ., Θεσσαλονίκη: ΤΖΙΟΛΑ, 2019, pp. 552-553.
- [28] S. J. Charpan, ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ AC-DC, 5η επιμ., Θ. Θεοδοουλίδης, Επιμ., Θεσσαλονίκη: ΤΖΙΟΛΑ, 2019, pp. 553-557.
- [29] S. J. Charpan, ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ AC-DC, 5η επιμ., Θ. Θεοδοουλίδης, Επιμ., Θεσσαλονίκη: ΤΖΙΟΛΑ, 2019, pp. 557-558.
- [30] S. J. Charpan, ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ AC-DC, 5η επιμ., Θ. Θεοδοουλίδης, Επιμ., Θεσσαλονίκη: ΤΖΙΟΛΑ, 2019, p. 570.
- [31] S. J. Charpan, ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ AC-DC, 5η επιμ., Θ. Θεοδοουλίδης, Επιμ., Θεσσαλονίκη: ΤΖΙΟΛΑ, 2019, pp. 571-573.
- [32] S. J. Charpan, ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ AC-DC, 5η επιμ., Θ. Θεοδοουλίδης, Επιμ., Θεσσαλονίκη: ΤΖΙΟΛΑ, 2019, pp. 576-577.
- [33] S. J. Charpan, ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ AC-DC, 5η επιμ., Θ. Θεοδοουλίδης, Επιμ., Θεσσαλονίκη: ΤΖΙΟΛΑ, 2019, pp. 577-578.
- [34] S. J. Charpan, ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ AC-DC, 5η επιμ., Θ. Θεοδοουλίδης, Επιμ., Θεσσαλονίκη: ΤΖΙΟΛΑ, 2019, pp. 579-580.
- [35] S. J. Charpan, ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ AC-DC, 5η επιμ., Θ. Θεοδοουλίδης, Επιμ., Θεσσαλονίκη: ΤΖΙΟΛΑ, 2019, pp. 580-581.
- [36] S. J. Charpan, ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ AC-DC, 5η επιμ., Θ. Θεοδοουλίδης, Επιμ., Θεσσαλονίκη: ΤΖΙΟΛΑ, 2019, p. 583.
- [37] S. J. Charpan, ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ AC-DC, 5η επιμ., Θ. Θεοδοουλίδης, Επιμ., Θεσσαλονίκη: ΤΖΙΟΛΑ, 2019, pp. 584-585.
- [38] Π. Μαλατέστας και Μ. Τερζή, ΗΛΕΚΤΡΟΜΗΧΑΝΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΜΕΤΑΤΡΟΠΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ, 2η επιμ., Θεσσαλονίκη: ΤΖΙΟΛΑ, 2020, p. 340.
- [39] Π. Μαλατέστας και Μ. Τερζή, ΗΛΕΚΤΡΟΜΗΧΑΝΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΜΕΤΑΤΡΟΠΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ, 2η επιμ., Θεσσαλονίκη: ΤΖΙΟΛΑ, 2020, pp. 340-341.
- [40] Π. Μαλατέστας και Μ. Τερζή, ΗΛΕΚΤΡΟΜΗΧΑΝΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΜΕΤΑΤΡΟΠΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ, 2η επιμ., Θεσσαλονίκη: ΤΖΙΟΛΑ, 2020, p. 342.
- [41] S. J. Charpan, ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ AC-DC, 5η επιμ., Θ. Θεοδοουλίδης, Επιμ., Θεσσαλονίκη: ΤΖΙΟΛΑ, 2019, pp. 591-594.
- [42] Σ. Τουλόγλου και Β. Στεργίου, ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ Σενεχούς και Εναλλασσομένου Ρεύματος, ΙΩΝ, 1999, p. 101.
- [43] Π. Μαλατέστας, ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΚΙΝΗΣΗ, 4η επιμ., Θεσσαλονίκη: ΤΖΙΟΛΑ, 2015, p. 221.
- [44] Π. Μαλατέστας, Ηλεκτρικές Μηχανές, 3η επιμ., Θεσσαλονίκη: ΤΖΙΟΛΑ, 2015, pp. 377-380.
- [45] Π. Βατικιώτης και Α. Μαύρος, «Κατασκευή και διαστασιολόγηση ηλεκτρικής μηχανής,» Αιγάλεω, 2018.
- [46] <https://sites.google.com/site/ngeralis11/technika-charakteristika-kineteron-s-r>
- [47] Κ. Νικόλαος, «Ανάλυση και προσομοίωση κυκλωμάτων οδήγησης dc κινητήρων,» Πειραιάς, 2013.

- [48] Δ. Δ. Μ. Ραμαδάν, «Έλεγχος dc κινητήρα μέσω dc/dc μετατροπέα και κατασκευή κυκλώματος ελέγχου μονοφασικής πλήρους ελεγχόμενης γέφυρας,» Αιγάλεω, 2018.
- [49] <https://www.mathworks.com/help/physmod/sps/powersys/ref/dcmachine.html>
- [50] <https://www.mathworks.com/help/simulink/slref/constant.html>
- [51] <https://www.mathworks.com/help/simulink/slref/busselector.html>
- [52] https://www.mathworks.com/help/simulink/slref/toworkspace.html?searchHighlight=workspace&s_tid=srchtitle_workspace_4
- [53] https://www.mathworks.com/help/simulink/slref/record.html?searchHighlight=xy&s_tid=srchtitle_xy_1