



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ

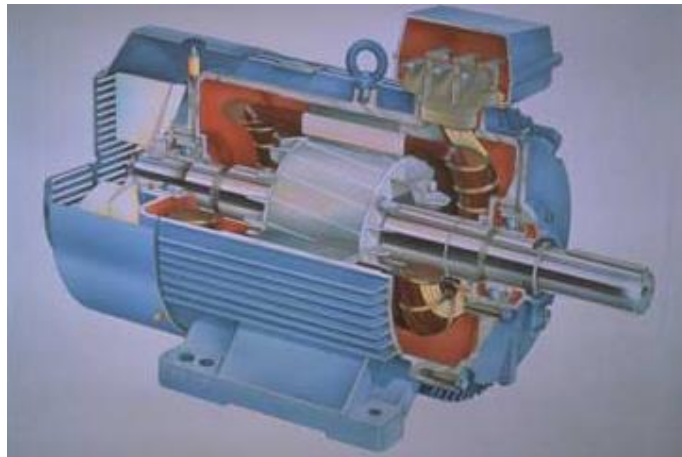
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

**"Διαχείριση και Ενεργειακή Βελτιστοποίηση Συστημάτων"
ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

***«ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΚΑΙ ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ
ΚΙΝΗΤΗΡΑ ΣΥΝΕΧΟΥΣ ΡΕΥΜΑΤΟΣ ΞΕΝΗΣ
ΔΙΕΓΕΡΣΗΣ»***



Του Μεταπτυχιακού Φοιτητή

Γεωργίου Καββαδά Α.Μ. 74

Επιβλέπων

**Παντελής Μαλατέστας, Καθηγητής, Ηλεκτρολόγων και Ηλεκτρονικών
Μηχανικών**

Αθήνα, Οκτώβριος 2018



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

"Διαχείριση και Ενεργειακή Βελτιστοποίηση Συστημάτων"

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ:	«Μοντελοποίηση και Δυναμική Ανάλυση Κινητήρα Συνεχούς Ρεύματος Ξένης Διέγερσης»
ΦΟΙΤΗΤΗΣ:	Γεώργιος Καββαδάς Α.Μ. 74
ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ:	Παντελής Μαλατέστας, Καθηγητής, Ηλεκτρολόγων και Ηλεκτρονικών Μηχανικών
ΑΚΑΔΗΜΑΪΚΟ ΕΤΟΣ:	2017-18

Σύνοψη

Η παρούσα εργασία με τίτλο «Μοντελοποίηση και δυναμική ανάλυση κινητήρα συνεχούς ρεύματος ξένης διέγερσης» έχει εκπονηθεί από τον Καββαδά Γεώργιο (Α.Μ.:74), στο πλαίσιο του Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών, του τμήματος Ηλεκτρολόγων και Ηλεκτρονικών Μηχανικών, της Σχολής Μηχανικών, του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής. Βασικός στόχος της εργασίας είναι η ανάδειξη των συμπεριφορών του κινητήρα συνεχούς ρεύματος ξένης διέγερσης σε βηματικές μεταβολές της τάσης τυμπάνου καθώς και η ανάλυση των αποτελεσμάτων και αυτά υπό την καθοδήγηση του διδάσκοντα καθηγητή κυρίου Π. Μαλατέστα. Τα εργαλεία μεθοδολογίας που χρησιμοποιήθηκαν είναι η εμπειρική προσέγγιση μέσω προσομοίωσης ενός κινητήρα συνεχούς ρεύματος ξένης διέγερσης με την βοήθεια του λογισμικού Matlab/ Simulink.

Η διπλωματική διαρθρώνεται σε πέντε τμήματα. Στα τρία πρώτα κεφάλαια γίνεται μία θεωρητική προσέγγιση στις μηχανές και στους κινητήρες συνεχούς ρεύματος και εν συνεχεία αναλύονται οι κινητήρες ξένης διέγερσης. Στα δύο τελευταία κεφάλαια παρουσιάζονται η προσομοίωση ενός τέτοιου κινητήρα καθώς και τέλος παρατίθενται τα συμπεράσματα της εργασίας. Πιο συγκεκριμένα:

Στο 1ο κεφάλαιο γίνεται μία ιστορική αναδρομή των μηχανών συνεχούς ρεύματος. Περιγράφονται οι βασικές αρχές των μηχανών, τα κατασκευαστικά μέρη και τέλος γίνεται αναφορά στην ροή ισχύος των μηχανών συνεχούς ρεύματος.

Στο 2ο κεφάλαιο αναλύεται ο κινητήρας συνεχούς ρεύματος καθώς και πόσο σημαντικό ρόλο διαδραματίζει. Έτσι, γίνεται μια εισαγωγή στους κινητήρες συνεχούς ρεύματος και περιγράφεται αναλυτικά η αρχή λειτουργίας τους καθώς και οι τρόποι εκκίνησης και πέδησής τους.

Στο 3ο κεφάλαιο κλείνει το θεωρητικό μέρος της εργασίας, αναλύοντας τους κινητήρες συνεχούς ρεύματος ξένης διέγερσης σε μόνιμη και δυναμική κατάσταση και μέσω των διαφορικών εξισώσεων του κινητήρα παρουσιάζεται το διάγραμμα βαθμίδων κινητήρων συνεχούς ρεύματος ξένης διέγερσης.

Στο 4ο κεφάλαιο γίνεται προσομοίωση του κινητήρα με τη βοήθεια του Simulink μέσω της πλατφόρμας του Matlab.

Στο 5ο (τελευταίο) κεφάλαιο αναλύονται τα αποτελέσματα και εξάγονται τα κατάλληλα αποτελέσματα.

Λέξεις Κλειδιά : Κινητήρας Συνεχούς ρεύματος, Ξένη διέγερση, Προσομοίωση, Δυναμική Κατάσταση.



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

"Διαχείριση και Ενεργειακή Βελτιστοποίηση Συστημάτων"

POST-GRADUATE THESIS: « Modelling and Dynamic Analysis of a Direct Current External Excitation Motor »

STUDENT: George Kavvadas A.M. 74

SUPERVISOR: Padelis Malatestas, Professor, Electrical and Electronic Engineering

ACADEMIC YEAR: 2017-18

Summary

The present paper titled "Modeling and dynamic analysis of a motor of direct current of external excitation" has been elaborated by Kavvada Georgios (AM: 74), in the framework of the Postgraduate Studies Program, the Department of Electrical and Electronic Engineering, the School of Engineering, University of Western Attica. The main aim of the work is to highlight the behavior of the DC excitation motor in step changes of the drum voltage and to analyze the results under the guidance of Professor P. Malatesta. The methodology tools used are the empirical approach by simulating a DC motor with the help of the Matlab / Simulink software.

The diploma is structured into five sections. In the first three chapters a theoretical approach is made to motors and DC motors and in particular to the motors of external excitation. The last two chapters present the simulation of such an engine and the conclusions of the work.

More specifically, chapter 1 presents a historical overview of DC motors as they describe the basic principles of machines, components and finally the power flow of DC motors.

Chapter 2 analyzes the DC motor as well as how important a role it plays. An introduction to the DC motors is made and their operating principle and the ways of starting and braking are described in detail.

In the third chapter, the theoretical part of the work ends with the analysis of the DC excitation motor in a permanent and dynamic state and with the help of the differential equations the diagram of the engine stages is presented.

In the 4th chapter, there is modeling / simulation of the external excitation DC motor with the Matlab / Simulink software and finally

In the 5th and final chapter the results of the simulation are presented and analyzed.

Keywords

Dynamic state, DC motor, Modeling, External excitation, Simulation.



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

"Διαχείριση και Ενεργειακή Βελτιστοποίηση Συστημάτων"

Copyright © Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής, Σχολή Μηχανικών, Τμήματος Ηλεκτρολόγων και Ηλεκτρονικών Μηχανικών

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. Allrightsreserved.

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

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν το συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής, Σχολής Μηχανικών, Τμήματος Ηλεκτρολόγων και Ηλεκτρονικών Μηχανικών.



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

"Διαχείριση και Ενεργειακή Βελτιστοποίηση Συστημάτων"

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία με θέμα «Μοντελοποίηση και Δυναμική Ανάλυση Κινητήρα Συνεχούς Ρεύματος Ξένης Διέγερσης», πραγματοποιήθηκε, στο πλαίσιο του Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών, του τμήματος Ηλεκτρολόγων και Ηλεκτρονικών Μηχανικών, της Σχολής Μηχανικών, του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής.

Στο σημείο αυτό αισθάνομαι την ανάγκη να εκφράσω τις ειλικρινείς και θερμές ευχαριστίες μου σε όσους συνέβαλαν στην ολοκλήρωση αυτής της προσπάθειας:

Πρώτα απ' όλα, τον επιβλέποντα καθηγητή μου κύριο Π. Μαλατέστα για τη συνεχή του καθοδήγηση, την αμέριστη υποστήριξή του, τις ουσιώδεις συμβουλές του καθώς και την αδιάκοπη συμπαράσταση και ενθάρρυνση που μου παρείχε όλο αυτό το διάστημα.

Ένα μεγάλο ευχαριστώ σε όλους εκείνους που με έμαθαν να «προσπερνώ» και βοήθησαν να γίνουν «ανεκτοί» οι συμβιβασμοί των τελευταίων χρόνων: Στη μητέρα μου Κωνσταστινιά, αυτή που με την υπομονή της, τη συμπαράσταση και τη θετική της σκέψη, με βοήθησε να εκπληρώσω έναν ακόμη στόχο μου. Τον αγαπημένο μου φίλο Φράγκο Δ. για την πολύτιμη βοήθειά του και τέλος δε θα μπορούσα να παραλείψω τον το φίλο και καθηγητή κύριο Α. Μαϊργιώτη που εδώ και πολλά χρόνια είναι δίπλα μου σε κάθε μου προσπάθεια.



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

"Διαχείριση και Ενεργειακή Βελτιστοποίηση Συστημάτων"

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	1
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 ^ο	3
ΜΗΧΑΝΕΣ ΣΥΝΕΧΟΥΣ ΡΕΥΜΑΤΟΣ.....	3
1.1. Δυο Λόγια για τις Μηχανές Συνεχούς Ρεύματος.....	3
1.1.1. Ιστορική Αναδρομή των Μηχανών Συνεχούς Ρεύματος.....	3
1.2. Ανάλυση των Μηχανών Συνεχούς Ρεύματος	4
1.2.1. Κατασκευαστικά Μέρη Μηχανών Συνεχούς Ρεύματος	4
1.2.2. Βασικές Αρχές Μηχανών Συνεχούς Ρεύματος	7
1.2.3. Ροή Ισχύος σε Μηχανές Συνεχούς Ρεύματος.....	18
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ^ο	22
ΚΙΝΗΤΗΡΕΣ ΣΥΝΕΧΟΥΣ ΡΕΥΜΑΤΟΣ	22
2.1. Δυο Λόγια για τους Κινητήρες Συνεχούς Ρεύματος	22
2.1.1. Εισαγωγή στους Κινητήρες Συνεχούς Ρεύματος.....	22
2.1.2. Αρχή Λειτουργίας Κινητήρων Συνεχούς Ρεύματος.....	23
2.2. Εκκινητές - Πέδηση Κινητήρων Συνεχούς Ρεύματος	31
2.2.1. Εκκινητής Κινητήρα Συνεχούς Ρεύματος Τριών Ακροδεκτών.....	32
2.2.2. Εκκινητής Κινητήρα Συνεχούς Ρεύματος Τεσσάρων Ακροδεκτών.....	34
2.2.3. Πέδηση Κινητήρων Συνεχούς Ρεύματος.....	35
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 ^ο	36
ΚΙΝΗΤΗΡΕΣ ΣΥΝΕΧΟΥΣ ΡΕΥΜΑΤΟΣ ΞΕΝΗΣ ΔΙΕΓΕΡΣΗΣ.....	36
3.1. Μόνιμη Κατάσταση.....	36
3.2. Δυναμική Κατάσταση	45
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 ^ο	52
ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΚΙΝΗΤΗΡΑ ΜΕ MATLAB.....	52
4.1. Περιγραφή Μελέτης.....	52
4.2. Μοντελοποίηση Κινητήρων Συνεχούς Ρεύματος Ξένης Διέγερσης	53
4.2.1. Πρώτο μέρος Μοντελοποίησης του Κινητήρα στο Matlab	53



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

"Διαχείριση και Ενεργειακή Βελτιστοποίηση Συστημάτων"

4.2.2.	Δεύτερο μέρος Μοντελοποίησης του Κινητήρα στο Simulink	54
4.2.3.	Τρίτο μέρος Μοντελοποίησης του Κινητήρα στο Matlab	60
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 ^ο		66
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ		66
5.1.	Επιμέρους Συμπεράσματα	66
5.2.	Γενικά Συμπεράσματα	67
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ		68
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 1 ^ο		70



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

"Διαχείριση και Ενεργειακή Βελτιστοποίηση Συστημάτων"

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η εργασία αυτή αποτελεί την διπλωματική μου, στο πλαίσιο του Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών, του τμήματος Τμήμα Ηλεκτρολόγων και Ηλεκτρονικών Μηχανικών, της Σχολής Μηχανικών, του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής.

Η εκπόνησή της ξεκίνησε το Φεβρουάριο του 2018 και ολοκληρώθηκε το Γενάρη του 2019, υπό την επίβλεψη του Κ. Μαλατέστα, Π., Κοσμήτορα της Σχολής Μηχανικών, του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής.

Η παρούσα εργασία, έχει ως σκοπό την παρουσίαση και την ανάλυση κινητήρων συνεχούς ρεύματος, ξένης διέγερσης, μέσω της μοντελοποίησης του Matlab. Ο τελικός στόχος αυτής ήταν η συγκέντρωση στοιχείων, η διατύπωση παρατηρήσεων και η εξαγωγή συμπερασμάτων τα οποία πιθανό να φανούν χρήσιμα για μελλοντική ευρεία χρήση.

Οι ηλεκτρικοί κινητήρες είναι πολύ σημαντικοί γιατί αποτελούν τις κυριότερες διατάξεις για τη μεταφορά και την αξιοποίηση της ηλεκτρικής ενέργειας αλλά και ταυτόχρονα δημιουργούν προβλήματα γιατί ο τρόπος με τον οποίο λειτουργούν προκαλούν αυξημένες απώλειες που είναι ένα από τα μεγαλύτερα προβλήματα του σήμερα με καταστροφικές συνέπειες για τον πλανήτη και τον άνθρωπο. Εμείς στην εργασία θα παραμείνουμε στα πλεονεκτήματα των κινητήρων και πιο συγκεκριμένα των κινητήρων συνεχούς ρεύματος ξένης διέγερσης.

Τα κυριότερα πλεονεκτήματα των κινητήρων συνεχούς ρεύματος είναι ότι έχουν ευκολία στον έλεγχο της ροπής και της ταχύτητας, και κυρίως στους κινητήρες ξένης διέγερσης:

- Το ρεύμα στο τύλιγμα διέγερσης, ρυθμίζεται συνήθως στη μέγιστη τιμή του και αυτό μας οδηγεί στην αύξηση της παραγόμενης ροπής και στον περιορισμό της παραμόρφωσης της ροής διακένου λόγω της αντίδρασης τυμπάνου. Ο έλεγχος των στροφών με μεταβολή της τάσης στο τύλιγμα τυμπάνου, αφορά την περιοχή μεταβολής των στροφών, από μηδενική ταχύτητα έως και την ονομαστική ταχύτητα λειτουργίας. Σε αυτή την περίπτωση μέσω συστήματος κλειστού βρόχου, το ρεύμα τυμπάνου, άρα και στην παραγόμενη εσωτερική ροπή διατηρείται σταθερά στις αντίστοιχες ονομαστικές τιμές τους, παράγοντας με αυτό τον τρόπο τη δυνατότητα λειτουργίας με ονομαστική ροπή σε όλο το εύρος των ταχυτήτων.



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

"Διαχείριση και Ενεργειακή Βελτιστοποίηση Συστημάτων"

- Η μεταβολή της τάσης τροφοδοσίας του τυλίγματος τυμπάνου, έχει σαν αποτέλεσμα την παράλληλη μετατόπιση των χαρακτηριστικών $\omega_m=f(T)$. Ο έλεγχος των στροφών με μεταβολή της τάσης στο τύλιγμα τυμπάνου αφορά, την περιοχή μεταβολής των στροφών από μηδενική ταχύτητα έως και την ονομαστική ταχύτητα λειτουργίας.

Οι κινητήρες συνεχούς ρεύματος ξένης διέγερσης είναι σημαντικοί επίσης γιατί διαθέτουν σύστημα προστασίας το οποίο μόλις αντιληφθεί ασυνέχεια στον κλάδο της διέγερσης, διακόπτει αυτόματα την τάση τροφοδοσίας του κινητήρα, για να μην προκληθούν μόνιμες βλάβες στον κινητήρα, κυρίως λόγω των φυγοκεντρικών δυνάμεων που αναπτύσσονται από την υπερβολικά μεγάλη ταχύτητα.



ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

"Διαχείριση και Ενεργειακή Βελτιστοποίηση Συστημάτων"

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο

ΜΗΧΑΝΕΣ ΣΥΝΕΧΟΥΣ ΡΕΥΜΑΤΟΣ

1.1. Δυο Λόγια για τις Μηχανές Συνεχούς Ρεύματος

1.1.1. Ιστορική Αναδρομή των Μηχανών Συνεχούς Ρεύματος

Οι ηλεκτρικές μηχανές συνεχούς ρεύματος, έχουν την δυνατότητα να λειτουργούν τόσο ως γεννήτριες, όσο και ως κινητήρες, ανάλογα με την φορά ροής της ισχύος. Η κατασκευή των μηχανών συνεχούς ρεύματος προηγήθηκε των μηχανών εναλλασσόμενου ρεύματος, καθώς οι ερευνητές του 19ου αιώνα προσπαθούσαν να κατασκευάσουν μια μηχανή, η οποία να παράγει συνεχές ρεύμα όπως οι συσσωρευτές.

Το 1832 ο Γάλλος Hippolyte Pixii, επηρεασμένος από τα πειράματα των Oersted και Ampere και την ανακάλυψη του νόμου της επαγωγής από τον Faraday, κατασκευάζει την πρώτη μηχανή Συνεχούς Ρεύματος ως γεννήτρια και το ίδιο έτος κατασκευάζει και μια απλή γεννήτρια εναλλασσόμενου ρεύματος. Η μηχανή του Pixii αποτελούνταν από συλλέκτη δύο τομέων για την ανόρθωση της εναλλασσόμενης τάσης που παραγόταν στους αγωγούς.

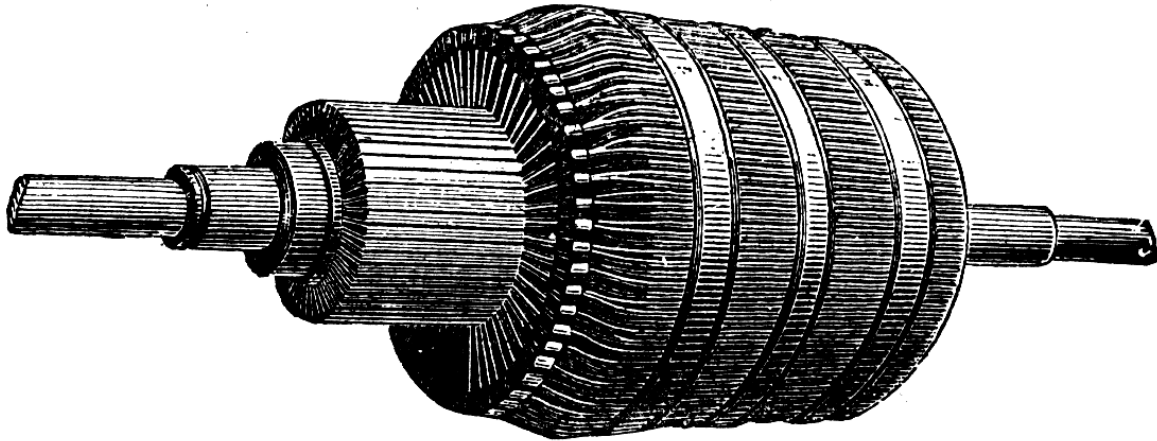
Το 1856 ο Werner Von Siemens, δημιουργεί την πρώτη μηχανή συνεχούς ρεύματος, που είναι ο προάγγελος για τις σημερινές μηχανές, με περιέλιξη τυμπάνου, τοποθετημένη μέσα στα λούκια του δρομέα και με συλλέκτη δύο τομέων.

Το 1860 ο Pacinotti κατασκεύασε τη μηχανή με τον επαγωγικό δακτύλιο και συλλέκτη με πολλούς τομείς.

Το 1870 ο Gramme κατασκεύασε μηχανή με μικρή κυμάτωση της ανορθωμένης τάσης. Σύντομα αυτό το είδος μηχανής σταμάτησε να εξελίσσεται, λόγω των μεγάλων τεχνικοοικονομικών μειονεκτημάτων της δακτυλιοειδούς της περιέλιξης (Γαντζούδης, Λαγουδάκος & Μπινιάρος, 2004).

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

"Διαχείριση και Ενεργειακή Βελτιστοποίηση Συστημάτων"



Σχήμα 1.1. Απεικόνιση τυμπάνου μηχανής του Gramme, 1870, (Kiddle, 2018).

Το 1872, τελικά επικράτησε, ο τύπος της μηχανής Σ.Ρ. του F.V. Hefner – Alteneck, που είχε περιέλιξη τυμπάνου και συλλέκτη με πολλούς τομείς.

Το 1872 ο F.V. Hefner Alteneck δημιούργησε την μηχανή συνεχούς ρεύματος που επικράτησε και έχει και την σημερινή μορφή, με περιέλιξη τυμπάνου και συλλέκτη με πολλούς τομείς (Γαντζούδης, Λαγουδάκος & Μπινιάρος, 2004).

1.2. Ανάλυση των Μηχανών Συνεχούς Ρεύματος

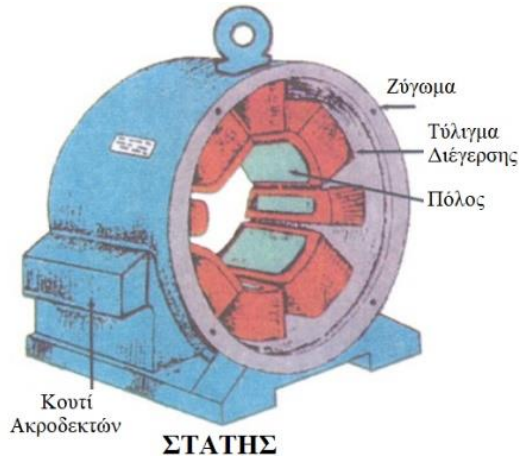
1.2.1. Κατασκευαστικά Μέρη Μηχανών Συνεχούς Ρεύματος

Οι μηχανές συνεχούς ρεύματος αποτελούνται από το ακίνητο μέρος, το οποίο ονομάζεται στάτης και από το κινητό μέρος, το οποίο ονομάζεται δρομέας.

- **Στάτης:** είναι το συγκρότημα των ακίνητων τμημάτων της μηχανής και έχει ως κύριο προορισμό του να δημιουργεί καθορισμένη μαγνητική ροή και αποτελείται από:

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

"Διαχείριση και Ενεργειακή Βελτιστοποίηση Συστημάτων"



Σχήμα 1.10. Στάτης μηχανής συνεχούς ρεύματος

- i. Ζύγωμα: Το ζύγωμα αποτελεί τον κορμό της μηχανής και κατασκευάζεται από χυτοχάλυβα ή ελατό σίδηρο. Μέσα από το ζύγωμα κλείνει το μαγνητικό κύκλωμα.
- ii. Μαγνητικοί πόλοι: Οι μαγνητικοί πόλοι στερεώνονται στο ζύγωμα και κατασκευάζονται από ελατό σίδηρο, εφόσον ανήκουν σε γεννήτρια που έχει τύλιγμα στους πόλους. Προορισμός των πόλων είναι να εξασφαλίσουν τη μαγνητική ροή που γεννιέται από τα τυλίγματα, τα οποία περιβάλλουν τους πόλους.
- iii. Πέδιλα των πόλων: Αποτελούν συνήθως ξεχωριστή κατασκευή και βιδώνονται στερεότατα κάτω από τους πόλους. Σκοπός του πέλδου είναι να διαχέει τη ροή σε ένα μεγαλύτερο μέρος της περιφέρειας του δρομέα, από όσο καλύπτει ο κορμός του πυρήνα και να υποβαστάζει το τύλιγμα του πόλου. Κατασκευάζονται από μονωμένα φύλλα σιδήρου, για την αποφυγή θερμάνσεων και απωλειών από τα ρεύματα Φουκώ, τα οποία εμφανίζονται εδώ εξ αιτίας των διαταραχών του μαγνητικού πεδίου κατά τη λειτουργία της μηχανής.
- iv. Τύλιγμα των πόλων: Το τύλιγμα των πόλων αποτελείται από πολλές σπείρες χάλκινου μονωμένου σύρματος, οι οποίες, αφού λάβουν με τη βοήθεια καλουπιού τη μορφή του πυρήνα, τυλίγονται με βαμβακερή ταινία και βαφτίζονται σε μονωτικό βερνίκι. Τα άκρα του τυλίγματος μένουν ελεύθερα για την ηλεκτρική του σύνδεση. Το σύνολο των τυλιγμάτων των μαγνητικών πόλων ονομάζεται τύλιγμα διέγερσης της μηχανής. Σε πολλές μηχανές συνεχούς ρεύματος έχουμε δύο τυλίγματα σε κάθε πόλο, το καθένα

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

"Διαχείριση και Ενεργειακή Βελτιστοποίηση Συστημάτων"

ανεξάρτητο από το άλλο. Το ένα τύλιγμα, που αποτελείται από πολλές σπείρες με λεπτό σύρμα, ονομάζεται παράλληλο τύλιγμα, ενώ το άλλο που αποτελείται από λίγες σπείρες και χονδρό σύρμα, ονομάζεται τύλιγμα σειράς.

- v. Καλύμματα: Τα καλύμματα (καπάκια) στερεώνονται με κοχλίες στο ζύγωμα και χρησιμεύουν στο να στηρίζουν τον άξονα του δρομέα και τον ψηκτροφορέα και να προφυλάσσουν το εσωτερικό της μηχανής. Τα καλύμματα φέρουν ενσωματωμένο και από ένα έδρανο μέσω του οποίου στρέφεται ο άξονας του δρομέα (Γαντζούδης, Λαγουδάκος & Μπινιάρος, 2004).
 - vi. Ψηκτροφορέας: Ο ψηκτροφορέας είναι το σύστημα στο οποίο στερεώνονται οι ψηκτροθήκες. Ο ψηκτροφορέας στερεώνεται στο κάλυμμα της μηχανής το οποίο βρίσκεται από την πλευρά του συλλέκτη. Η στερέωση γίνεται κατά τρόπο ώστε να είναι δυνατή η μετάθεση της θέσης επαφής των ψηκτρών πάνω στο συλλέκτη [11].
 - vii. Ψήκτρες: Οι ψήκτρες είναι συνήθως τεμάχια από σκληρό άνθρακα ή γραφίτη ή από ένα μίγμα άνθρακα και χαλκού. Τοποθετούνται μέσα στις ψηκτροθήκες και πιέζονται από ελατήριο, ώστε να επιτυγχάνεται καλή επαφή με την επιφάνεια του συλλέκτη. Τα ελατήρια αυτά ρυθμίζονται έτσι, ώστε η πίεση που ασκεί η ψήκτρα στο συλλέκτη να μην είναι ούτε πολύ μεγάλη, ούτε πολύ μικρή. Αν η πίεση είναι μικρή, θα έχουμε κακή επαφή ψηκτρών και συλλέκτη, σπινθηρισμούς και κάψιμο του συλλέκτη. Αντίθετα, αν η πίεση είναι πολύ μεγάλη, θα έχουμε μεγάλη φθορά των ψηκτρών και υπερθέρμανση του συλλέκτη.
- **Δρομέας**. Ο δρομέας είναι το κινητό μέρος μιας μηχανής και αποτελείται από:



Σχήμα 1.11. Δρομέας μηχανής συνεχούς ρεύματος.



ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

"Διαχείριση και Ενεργειακή Βελτιστοποίηση Συστημάτων"

- i. Άξονας: Ο άξονας, φέρει το επαγωγικό τύμπανο, το συλλέκτη και τον ανεμιστήρα και στρέφεται πάντοτε μαζί με αυτά.
- ii. Πυρήνας: Ο πυρήνας του επαγωγικού τυμπάνου, ο οποίος παρέχει μια οδό μικρής μαγνητικής αντίστασης για τη δίοδο των μαγνητικών γραμμών των πόλων και φέρει σε αυτό, το τυλίγμα του τυμπάνου. Κατασκευάζεται από πολλά μαγνητικά ελάσματα, τα οποία κάμπτονται σε ειδικές πρέσες. Τα μαγνητικά ελάσματα είναι μονωμένα μεταξύ τους, για να μειωθούν οι απώλειες λόγω δινορευμάτων.
- iii. Τυλίγματα του επαγωγικού τυμπάνου: Τα τυλίγματα του επαγωγικού τυμπάνου, τα οποία κατασκευάζονται από μονωμένο χάλκινο αγωγό κυκλικής ή ορθογωνικής διατομής.
- iv. Συλλέκτης: Ο συλλέκτης κατασκευάζεται από πολλά χάλκινα ελάσματα τα οποία ονομάζονται τομείς του συλλέκτη. Για να αποφευχθεί βραχυκύκλωση των τομέων του συλλέκτη, τοποθετούνται μονώσεις μεταξύ τους και προς τις πλευρές των τεμαχίων συγκράτησης. Ο σκοπός του συλλέκτη είναι να παίρνει ή να μεταβιβάζει το ρεύμα.
- v. Ανεμιστήρας: Ο ανεμιστήρας στερεώνεται στον άξονα και δημιουργεί κατά την περιστροφή του ρεύμα αέρα, που εισέρχεται στη μηχανή από το άνοιγμα του ενός καλύμματος και εξέρχεται από το άνοιγμα του άλλου καλύμματος.
- vi. Πλήμνη: Η πλήμνη χρησιμοποιείται στις μηχανές μεγάλης ισχύος, για να μειώσουμε το βάρος των μαγνητικών ελασμάτων, που στοιχίζουν ακριβά, αλλά και για να διευκολύνουμε την ψύξη του πυρήνα (Γαντζούδης, Λαγουδάκος & Μπινιάρος, 2004).

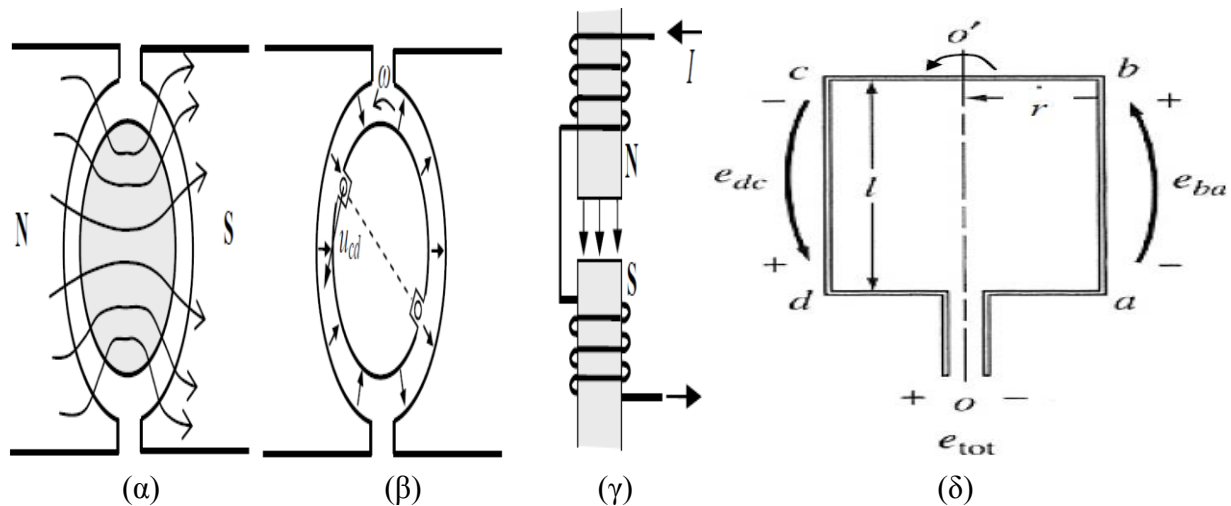
1.2.2. Βασικές Αρχές Μηχανών Συνεχούς Ρεύματος

Οι περισσότερες μηχανές συνεχούς ρεύματος μοιάζουν με τις μηχανές εναλλασσόμενου ρεύματος, αφού και στις δυο κατηγορίες τα ρεύματα και οι τάσεις στο εσωτερικό των μηχανών είναι εναλλασσόμενα. Οι μηχανές συνεχούς ρεύματος έχουν συνεχή έξοδο μόνο επειδή υπάρχει ένας μηχανισμός που μετατρέπει τις εσωτερικές εναλλασσόμενες τάσεις σε συνεχείς. Ο συγκεκριμένος μηχανισμός ονομάζεται συλλέκτης και οι μηχανές συνεχούς ρεύματος ονομάζονται μηχανές με συλλέκτη (Charman, 2003).

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

"Διαχείριση και Ενεργειακή Βελτιστοποίηση Συστημάτων"

Σε μια ηλεκτρική μηχανή το περιστρεφόμενο τμήμα της ονομάζεται δρομέας ή ρότορας, ενώ το ακίνητο τμήμα στάτης. Θεωρούμε το ακόλουθο απλό παράδειγμα στρεφόμενης μηχανής, που είναι ένα στρεφόμενο αγώγιμο πλαίσιο μέσα σε μαγνητικό πεδίο. Το τελευταίο δημιουργείται από τους πόλους μόνιμου μαγνήτη, ενώ και ο πυρήνας είναι κατασκευασμένος από σιδηρομαγνητικό υλικό.



Σχήμα 1.2. Απεικόνιση περιστρεφόμενου πλαισίου, (α) Δυναμικές γραμμές, (β) Πρόσωση, (γ) Πόλοι μόνιμου μαγνήτη (δ) Κάτοψη.

Το αγώγιμο πλαίσιο είναι τοποθετημένο σε μια εγκοπή του σιδηρομαγνητικού πυρήνα. Το διάκενο έχει το ίδιο πλάτος σε κάθε σημείο, γεγονός που συμβάλλει στην ομοιογένεια του μαγνητικού πεδίου. Επειδή ο αέρας έχει μεγάλη μαγνητική αντίσταση, αντιστρόφως ανάλογη του μ , επιθυμούμε η μαγνητική ροή να διαγράφει τη μικρότερη δυνατή διαδρομή, κάτι που γίνεται όταν το πεδίο είναι κάθετο στην επιφάνεια του δρομέα. Οι τάσεις και τα ρεύματα μέσα στη μηχανή είναι και αυτά εναλλασσόμενα, ωστόσο προκύπτει συνεχής έξοδος χάρη στο μηχανισμό ανόρθωσης που ονομάζεται συλλέκτης. Είναι φανερό πως το μαγνητικό πεδίο είναι κάθετο σε οποιοδήποτε σημείο της κυλινδρικής επιφάνειας του περιστρεφόμενου ρότορα, άρα και στις πλευρές του αγώγιμου πλαισίου (Πλατφόρμα Τηλεκπαίδευσης, 2018).

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

"Διαχείριση και Ενεργειακή Βελτιστοποίηση Συστημάτων"

Επαγομένη Τάση σε Στρεφόμενο Πλαίσιο

Θεωρώντας ότι ο δρομέας περιστρέφεται, λόγω της παρουσίας του μαγνητικού πεδίου εμφανίζεται τάση στα άκρα του πλαισίου, η οποία είναι το άθροισμα των τάσεων που επάγονται στις 4 πλευρές του. Η γενική σχέση που ισχύει είναι:

$$e_{ind} = (uxB) \cdot l \quad (1.1)$$

- **Πλευρά ad:** Η ταχύτητα u αυτής της πλευράς είναι η εφαπτόμενη της τροχιάς της. Η μαγνητική επαγωγή B είναι κάθετη στην περιστροφή της επιφάνειας που σχηματίζει το πλαίσιο και έχει φορά προς τα έξω και το διάνυσμα uxB είναι κάθετο του χαρτιού, προς τα μέσα (\otimes).

$$e_{ad} = (uxB) \cdot l = \begin{cases} uBl \text{ θετική στο μέσα της σελίδας κάτω από τον πόλο} \\ 0 \text{ έξω από την επιφάνεια του πόλου} \end{cases} \quad (1.2)$$

- **Πλευρά dc:** Κατά μήκος αυτής της πλευράς το διάνυσμα uxB έχει φορά άλλοτε προς τα μέσα και άλλοτε προς τα έξω της σελίδας, ενώ το l είναι κάθετο μεταξύ τους και η τάση εξ επαγωγής σε αυτή την πλευρά είναι μηδενική.

$$e_{dc} = 0 \quad (1.3)$$

- **Πλευρά cd:** Η ταχύτητα u αυτής της πλευράς είναι εφαπτόμενη της τροχιάς της. Η μαγνητική επαγωγή B είναι κάθετη στην επιφάνεια του πλαισίου και έχει σταθερό μέτρο σε οποιοδήποτε σημείο κάτω από την επιφάνεια του πόλου, ενώ μηδενίζει στα άκρα της επιφάνειας του. Η ταχύτητα u είναι κάθετη στο B κάτω από το πόλο και το διάνυσμα uxB έχει φορά από την σελίδα προς τα έξω (\odot).

$$e_{cd} = (uxB) \cdot l = \begin{cases} uBl \text{ θετική στο μέσα της σελίδας κάτω από τον πόλο} \\ 0 \text{ έξω από την επιφάνεια του πόλου} \end{cases} \quad (1.4)$$

- **Πλευρά da:** Όπως και στην πλευρά dc, το uxB είναι κάθετο στο l .

$$e_{da} = 0 \quad (1.5)$$

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

"Διαχείριση και Ενεργειακή Βελτιστοποίηση Συστημάτων"

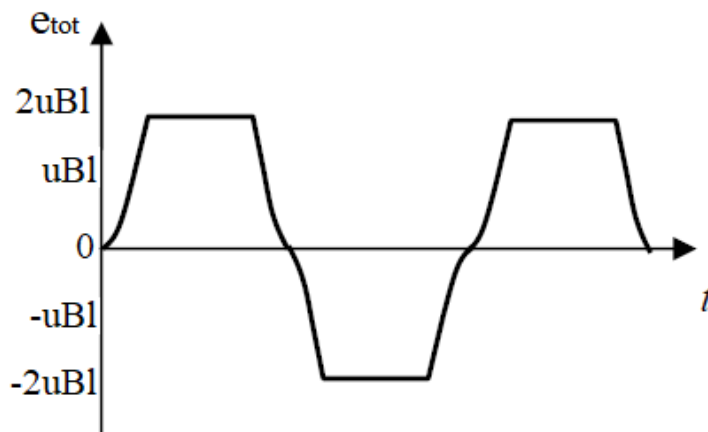
Άρα η συνολική επαγόμενη τάση στα άκρα του πλαισίου είναι:

$$e_{ind} = e_{ad} + e_{dc} + e_{cd} + e_{da} = \begin{cases} 2uBl \text{ κάτω από τους πόλους} \\ 0 \text{ έξω από την επιφάνεια των πόλων} \end{cases} \quad (1.6)$$

Όταν ο δρομέας δεν βρίσκεται κάτω από κάποιον πόλο, το μαγνητικό πεδίο είναι 0, οπότε $e_{ind} = 0$.

Όταν το αγωγίμο πλαίσιο περιστρέφεται κατά 180 μοίρες, η πολικότητα της τάσης θα αλλάξει, ενώ το πλάτος παραμένει το ίδιο.

$$\begin{aligned} e_{ind} &= \begin{cases} 2r\omega Bl \text{ κάτω από τους πόλους} \\ 0 \text{ έξω από την επιφάνεια των πόλων} \end{cases} \\ &= \begin{cases} 2rBl\omega \text{ κάτω από τους πόλους} \\ 0 \text{ έξω από την επιφάνεια των πόλων} \end{cases} \end{aligned} \quad (1.7)$$



Σχήμα 1.3. Απεικόνιση κυματομορφής της τάσης εξόδου του πλαισίου.

Η επιφάνεια που βρίσκεται κάτω από κάθε πόλο, ισούται σχεδόν με $A = \pi r l$ όσο είναι και η παράπλευρη επιφάνεια του ρότορα. Συνεπώς η μαγνητική ροή που διέρχεται από την επιφάνεια κάτω από κάθε πόλο δίνεται από τον τύπο $\Phi = B\pi r l \Rightarrow B = \Phi / \pi r l$, άρα και η επαγόμενη τάση παίρνει την μορφή:

$$e_{ind} = 2 \frac{\Phi}{\pi r l} \omega r l = \frac{2}{\pi} \Phi \omega \quad (1.8)$$

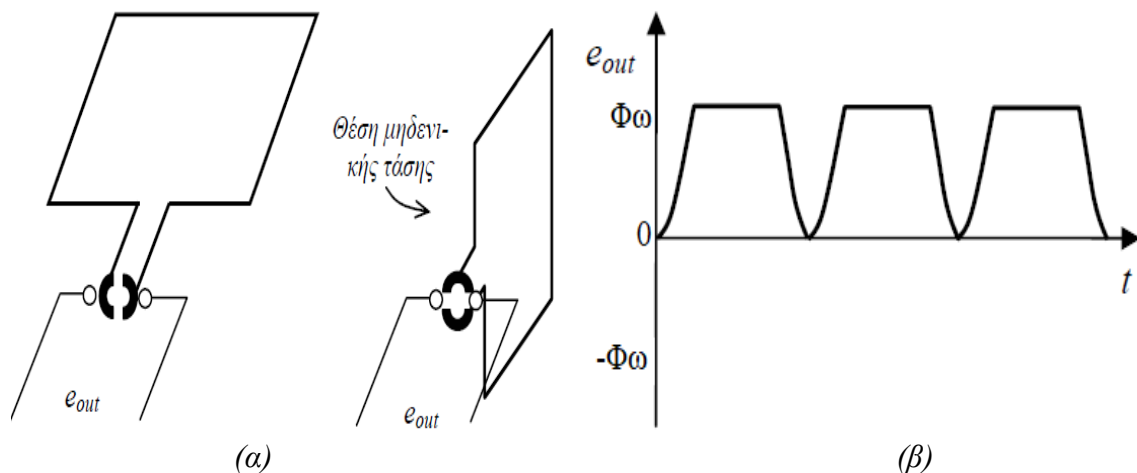
ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

"Διαχείριση και Ενεργειακή Βελτιστοποίηση Συστημάτων"

Επομένως η επαγόμενη τάση εξαρτάται από:

- i. Τη μαγνητική ροή του πεδίου της μηχανής,
- ii. Την ταχύτητα περιστροφής της και
- iii. Από μια σταθερά που εξαρτάται από τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά της μηχανής.

Για την παραγωγή συνεχούς τάσης, προσθέτουμε 2 αγώγιμα ημικυκλικά τμήματα στα άκρα του πλαισίου, ενώ 2 σταθεροί ακροδέκτες (ψηκτρες) σχηματίζουν τέτοια γωνία, ώστε να ανταλλάσσουν μεταξύ τους αγώγιμα τμήματα όταν η επαγόμενη τάση σε αυτά είναι 0. Σε εκείνο το σημείο αλλάζει πρόσημο η e_{ind} , οπότε η τάση των σταθερών ακροδεκτών έχει πάντα σταθερό πρόσημο. Δηλαδή η θετική ψηκτρα συνδέεται πάντα, μέσω του συλλέκτη, άμεσα με την πλευρά του πλαισίου που βρίσκεται απέναντι από το βόρειο πόλο του μαγνήτη. Η διαδικασία αυτή ονομάζεται μεταγωγή. Σημειώνεται πως στις γεννήτριες απάγεται ηλεκτρικό ρεύμα μέσω των ψηκτρών, ενώ στους κινητήρες προσάγεται ρεύμα.



Σχήμα 1.4. Απεικόνιση παραγωγής συνεχής τάσης από πλαίσιο, (α) Θέσεις πλαισίου στην παραγωγή συνεχούς τάσης, (β) Κυματομορφή της συνεχής τάσης.

Επαγομένη Ροπή σε Στρεφόμενο Πλαίσιο

Συνδέοντας στα άκρα του πλαισίου μια πηγή σταθερής τάσης, αυτό θα διαρρέεται από ρεύμα, οπότε λόγω της παρουσίας του μαγνητικού πεδίου θα ασκούνται δυνάμεις στο πλαίσιο. Υπενθυμίζεται ότι γενικά η δύναμη που ασκείται είναι της μορφής:

$$F = I(l \times B) \quad (1.9)$$

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

"Διαχείριση και Ενεργειακή Βελτιστοποίηση Συστημάτων"

και η αντίστοιχη ροπή έχει μέτρο:

$$\tau = rF \sin \theta \quad (1.10)$$

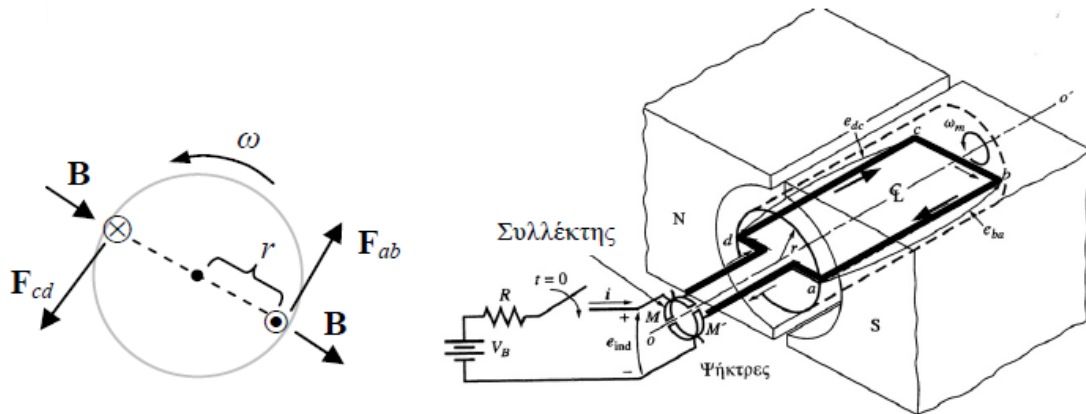
Αναλυτικά, σε κάθε πλευρά έχουμε:

- **Πλευρά ad:** Σε αυτή την πλευρά το ρεύμα που προσφέρει η πηγή τάσης έχει φορά από την σελίδα προς τα έξω. Το πεδίο είναι ακτινικό με φορά από το δρομέα προς το στάτη και η δύναμη στον αγωγό είναι:

$$F_{ad} = i(lxB) \cdot l = ilB \text{ με φορά εφαπτόμενη στην κατεύθυνση της κίνησης} \quad (1.11)$$

Η αντίστοιχη ροπή προκαλεί αυτή η δύναμη είναι:

$$\tau_{ad} = rF \sin \theta \quad (1.12)$$



Σχήμα 1.5. Απεικόνιση παραγωγής συνεχής τάσης από το πλαίσιο με συλλέκτη και ψήκτρες.

- **Πλευρά dc:** Σε αυτή την πλευρά το ρεύμα οδηγείται από το πάνω αριστερό μέρος του προς το κάτω δεξιό. Η επαγόμενη δύναμη στον αγωγό δίνεται από τη σχέση:

$$F_{dc} = i(lxB) = 0 \text{ αφού το } l \text{ είναι παράλληλο με το } B \quad (1.13)$$

Η αντίστοιχη ροπή που προκαλεί αυτή η δύναμη είναι:

$$\tau_{dc} = 0 \quad (1.14)$$

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

"Διαχείριση και Ενεργειακή Βελτιστοποίηση Συστημάτων"

- **Πλευρά cd:** Σε αυτήν την πλευρά το ρεύμα που προσφέρει η πηγή τάσης έχει φορά προς τα μέσα της σελίδας. Το πεδίο είναι ακτινικό με φορά από το στάτη προς το δρομέα και η δύναμη στον αγωγό είναι:

$$F_{cd} = i(I \times B) = ilB \text{ με φορά εφαπτομενική στην κατεύθυνση της κίνησης} \quad (1.15)$$

Η αντίστοιχη ροπή που προκαλεί αυτή η δύναμη είναι:

$$\tau_{cd} = rF \sin \theta = \begin{cases} rF \sin \theta \\ r(ilB) \sin 90^\circ \\ rilB \text{ με ανθρωρολογιακή φορά} \end{cases} \quad (1.16)$$

- **Πλευρά da:** Σε αυτήν την πλευρά το ρεύμα οδηγείται από το κάτω δεξιό του μέρος προς τα πάνω αριστερά του. Η επαγόμενη δύναμη στον αγωγό είναι:

$$F_{da} = i(I \times B) = 0 \text{ αφού το } I \text{ είναι παράλληλο με το } B \quad (1.17)$$

Η αντίστοιχη ροπή που προκαλεί αυτή η δύναμη είναι:

$$\tau_{da} = 0 \quad (1.18)$$

Άρα η συνολική επαγόμενη ροπή που ασκείται στο πλαίσιο είναι:

$$\tau_{ind} = \tau_{ab} + \tau_{dc} + \tau_{cd} + \tau_{da} = \begin{cases} 2rilB \text{ κάτω από τους πόλους} \\ 0 \text{ έξω από την επιφάνεια των πόλων} \end{cases} \quad (1.19)$$

Γνωρίζοντας ότι:

$$A_p = \pi r l \quad (1.20)$$

$$\varphi = A_p B \quad (1.21)$$

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

"Διαχείριση και Ενεργειακή Βελτιστοποίηση Συστημάτων"

Η ροπή γίνεται:

$$\tau_{ind} = \begin{cases} \frac{2}{\pi} \phi i & \text{κάτω από τους πόλους} \\ 0 & \text{έξω από την επιφάνεια των πόλων} \end{cases} \quad (1.22)$$

Αυτή η εξίσωση εκφράζει το ότι η ροπή που επάγεται στο δρομέα της μηχανής είναι ίση με το γινόμενο της ροής του μαγνητικού πεδίου με το ρεύμα του δρομέα.

Επομένως η επαγόμενη ροπή εξαρτάται από:

- i. Τη μαγνητική ροή του πεδίου της μηχανής,
- ii. Το ρεύμα στο δρομέα της μηχανής και
- iii. Από μια σταθερά η οποία εξαρτάται από τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά της μηχανής (Chapman, 2003).

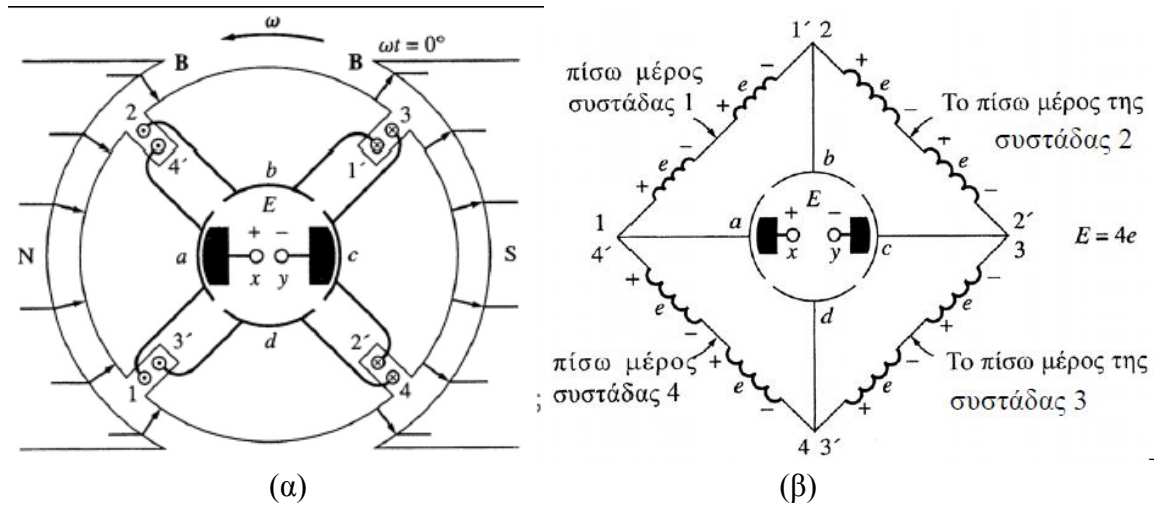
Μεταγωγή σε Μηχανή Συνεχούς Ρεύματος με τέσσερα Πλαίσια

Η διαδικασία κατά την οποία οι εναλλασσόμενες τάσεις και τα ρεύματα του εσωτερικού μιας μηχανής συνεχούς ρεύματος μετατρέπονται σε συνεχείς, με σταθερό πρόσημο στην έξοδό της, ονομάζεται μεταγωγή και αποτελεί κρίσιμο σημείο για τη σχεδίαση και τη λειτουργία μιας μηχανής συνεχούς ρεύματος.

Θα παρουσιάσουμε τη μεταγωγή μιας μηχανής συνεχούς ρεύματος με 4 πλαίσια και 2 πόλους. Οι πλευρές των πλαισίων τοποθετούνται σε αυλάκια που βρίσκονται σε πλήρως αντιδιαμετρικές θέσεις. Σε κάθε μία από τις πλευρές των πλαισίων αναπτύσσεται τάση με μέτρο $e_{1nd} = Bv$. Οι φορές τους σημειώνονται στα παρακάτω ισοδύναμο κύκλωμα, όπου φαίνεται πως η τάση ανάμεσα στους τομείς που βρίσκονται σε επαφή με τις ψήκτρες να είναι ίση με $E = 4e_{ind} = 4Bv$, όταν και τα 4 πλαίσια βρίσκονται εντός του μαγνητικού πεδίου κάτω από πόλους. Όταν 2 από τα πλαίσια βρίσκονται στο χώρο που δεν υφίσταται μαγνητικό πεδίο, αυτά βραχυκυκλώνονται από τις ψήκτρες, ενώ τα άλλα 2 παραμένουν εντός μαγνητικού πεδίου. Από το αντίστοιχο ισοδύναμο κύκλωμα τώρα φαίνεται πως $E' = 2e_{ind}$. Ουσιαστικά αλλάζει η σύνδεση των πλαισίων στις ψήκτρες ταυτόχρονα με την αλλαγή πολικότητας της τάσης. Τελικά, η προσέγγιση μιας σταθερής τάσης τώρα είναι πολύ καλύτερη και γενικώς βελτιώνεται, όσο ο αριθμός των βρόχων αυξάνεται (Πλατφόρμα Τηλεκπαίδευσης, 2018).

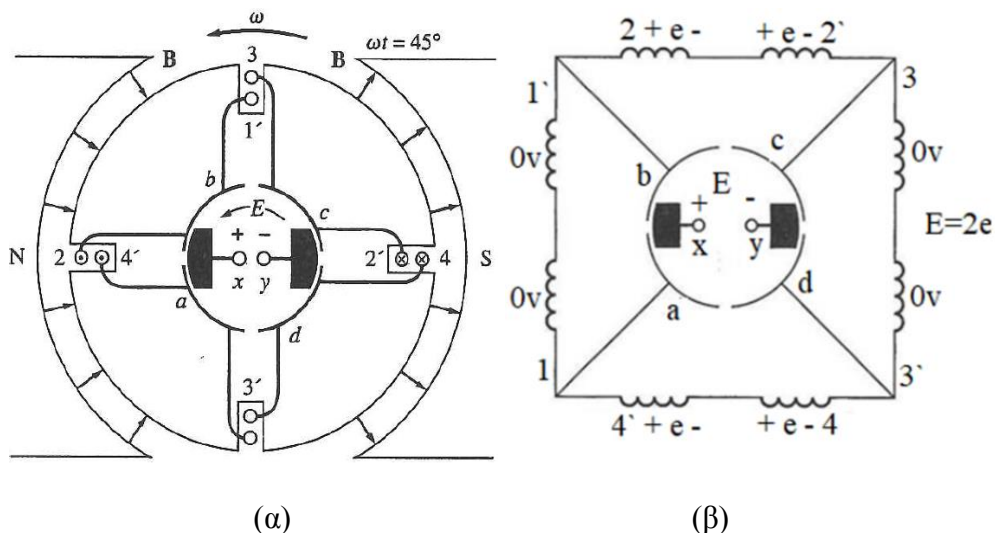
ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

"Διαχείριση και Ενεργειακή Βελτιστοποίηση Συστημάτων"



Σχήμα 1.6. (α) Μηχανή συνεχούς ρεύματος δυο πόλων και τεσσάρων πλαισίων τη χρονική στιγμή $\omega t = 0^\circ$, (β) Οι τάσεις στους αγωγούς του δρομέα την ίδια χρονική στιγμή

Όταν η μηχανή συνεχίζει να περιστρέφεται, (βλέπε το σχήμα 1.8) την στιγμή που ισχύει $\omega t = 45^\circ$, τότε τα πλαίσια 1 και 3 περιστρέφονται έτσι ώστε να βρίσκονται έξω από τα άκρα των πόλων, οπότε και η τάση στα άκρα τους θα είναι μηδενική.

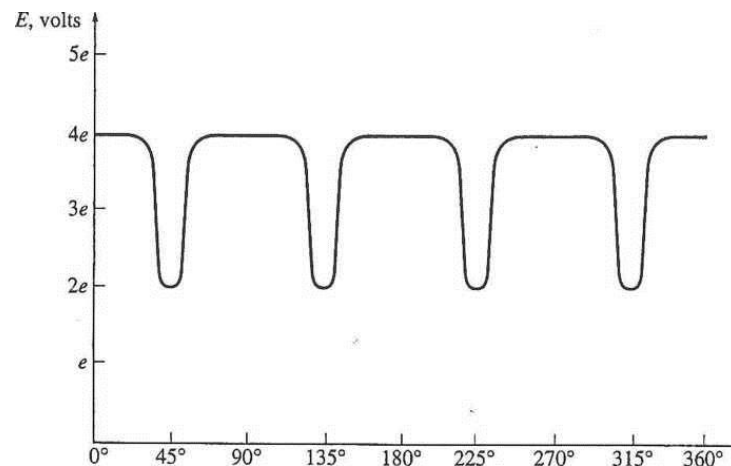


Σχήμα 1.7. (α) Μηχανή συνεχούς ρεύματος δυο πόλων και τεσσάρων πλαισίων τη χρονική στιγμή $\omega t = 45^\circ$, (β) Οι τάσεις στους αγωγούς του δρομέα την ίδια χρονική στιγμή.

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

"Διαχείριση και Ενεργειακή Βελτιστοποίηση Συστημάτων"

Στο παρακάτω σχήμα, παρατηρούμε την τάση στα άκρα της μηχανής, συναρτήσει του χρόνου



Σχήμα 1.8. Απεικόνιση της συνεχής τάσεως εξόδου της μηχανής (Πλατφόρμα Τηλεκπαίδευσης, 2018).

Διαδικασία Μεταγωγής και Δομή Οπλισμού Μηχανών Συνεχούς Ρεύματος

Στις μηχανές συνεχούς ρεύματος απαντώνται αρκετοί διαφορετικοί τρόποι σύνδεσης των πλαισίων του δρομέα, ο οποίος ονομάζεται και *οπλισμός* ή και *τύμπανο* της μηχανής, με τους τομείς του συλλέκτη. Αυτοί οι διαφορετικοί τρόποι σύνδεσης προσδιορίζουν τον αριθμό των παράλληλων κλάδων ρεύματος στο δρομέα, την τάση εξόδου, τον αριθμό και τη θέση των ψηκτρών. Εδώ εξετάζεται η δομή των τυλιγμάτων σ' ένα δρομέα πραγματικής μηχανής, καθώς και ο τρόπος σύνδεσής τους στο συλλέκτη, για την παραγωγή της συνεχούς τάσης εξόδου.

- *Τυλίγματα του Δρομέα:* Για να επιτευχθεί καλύτερη δυνατή σύνδεση των τυλιγμάτων του δρομέα στους τομείς του συλλέκτη, αυτά τα *τυλίγματα* αποτελούνται από *συστάδες αγωγών*, που έχουν σχήμα διαμαντιού και η καθεμιά τους εισάγεται στο αντίστοιχο αυλάκι του οπλισμού. Η κάθε συστάδα αποτελείται από έναν αριθμό αγωγίμων *πλαισίων*. Αυτά τα πλαίσια είναι όλα μαζί τοποθετημένα στη συστάδα, μονωμένα μεταξύ τους και μονωμένα επίσης από το αντίστοιχο αυλάκι του δρομέα. Η κάθε πλευρά του πλαισίου ονομάζεται *αγωγός*. Ο συνολικός αριθμός των αγωγών στον οπλισμό μιας μηχανής δίνεται από τη σχέση:

$$Z = 2CN_C \quad (1.23)$$

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

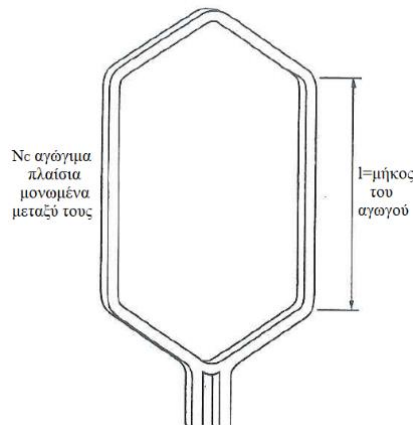
"Διαχείριση και Ενεργειακή Βελτιστοποίηση Συστημάτων"

Όπου:

Z = ο αριθμός των αγωγών του δρομέα

C = ο αριθμός των συστάδων του δρομέα

N_c = ο αριθμός των πλαισίων σε μία συστάδα



Σχήμα 1.9. Σχεδιάγραμμα απλής συστάδας ενός δρομέα.

- **Σύνδεση Τυλίγματος στους Τομείς του Συλλέκτη:** Οι συστάδες του τυλίγματος της μηχανής είναι τοποθετημένες πάνω στον οπλισμό και συνδεδεμένες με τους τομείς του συλλέκτη. Υπάρχουν πολλοί διαφορετικοί τρόποι για να γίνουν αυτές οι συνδέσεις και οι διάφοροι τύποι οπλισμού που προκύπτουν παρουσιάζουν πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα, όταν συγκρίνονται μεταξύ τους. Η απόσταση, μεταξύ των τομέων του συλλέκτη, στους οποίους συνδέονται τα δυο άκρα μιας συστάδας, ονομάζεται βήμα του συλλέκτη. Τα τυλίγματα του δρομέα διαφοροποιούνται μεταξύ τους ανάλογα με την πολλαπλότητά τους. Τα τυλίγματα του οπλισμού χωρίζονται σε κατηγορίες ανάλογα με τη διαδοχή των συνδέσεών τους στους τομείς του συλλέκτη. Υπάρχουν δυο τέτοιες βασικές κατηγορίες:
 - **Βροχοτυλίγματα:** Ο πιο απλός τρόπος κατασκευής του τυλίγματος μιας μηχανής συνεχούς ρεύματος είναι το απλό βροχοτύλιγμα. Σε ένα δρομέα με βροχοτύλιγμα οι συστάδες αγωγών περιέχουν ένα ή και περισσότερα αγωγία πλαίσια, τα άκρα των οποίων συνδέονται σε γειτονικούς τομείς του συλλέκτη. Αν το τελικό άκρο της κάθε συστάδας συνδέεται στον επόμενο τομέα του συλλέκτη απ' αυτόν στο οποίο συνδέεται το αρχικό άκρο της, τότε το βροχοτύλιγμα είναι προοδευτικό ($\gamma_c = 1$). Αντίθετα, στην περίπτωση που το τελικό άκρο κάθε συστάδας συνδέεται στον προηγούμενο τομέα του συλλέκτη από

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

"Διαχείριση και Ενεργειακή Βελτιστοποίηση Συστημάτων"

αυτόν που συνδέεται το αρχικό άκρο της, το βροχοτύλιγμα είναι οπισθοδρομικό ($\gamma_c = -1$). Μια πολύ ενδιαφέρουσα ιδιότητα των βροχοτυλιγμάτων είναι ότι σε αυτά υφίστανται τόσες παράλληλες διαδρομές για το ρεύμα της μηχανής όσες ακριβώς είναι και οι πόλοι της.

- **Κυματοτυλίγματα:** Σε αυτό το τύλιγμα δυο διαδοχικές συστάδες συνδέουν τα αρχικά τους άκρα σε γειτονικούς τομείς του συλλέκτη. Έτσι, μεταξύ δυο διαδοχικών τομέων του συλλέκτη βρίσκονται δυο συστάδες συνδεδεμένες σε σειρά. Ακόμη, κάθε ζευγάρι συστάδων συνδεδεμένων σε σειρά έχει μια πλευρά κάτω από την επιφάνεια του κάθε πόλου κι έτσι οι τάσεις εξόδου είναι το άθροισμα της επίδρασης όλων των πόλων. Το τελικό άκρο της δεύτερης συστάδας ενός ζεύγους μπορεί να συνδέεται στον επόμενο ή στον προηγούμενο τομέα του συλλέκτη απ' αυτό που συνδέεται το αρχικό άκρο της πρώτης συστάδας. Αν η δεύτερη συστάδα συνδέεται στον επόμενο τομέα από αυτόν που είναι συνδεδεμένη η πρώτη συστάδα, το τύλιγμα είναι προοδευτικό. Στην αντίθετη περίπτωση το τύλιγμα είναι οπισθοδρομικό.
- **Ισοσταθμισμένα τυλίγματα:** Ονομάζονται και βατραχοειδή τυλίγματα εξαιτίας του σχήματος των συστάδων τους. Πρόκειται για το συνδυασμό ενός βροχοτυλίγματος και ενός κυματοτυλίγματος. Στα βροχοτυλίγματα οι ισοσταθμιστές συνδέονται σε ισοδυναμικά σημεία του τυλίγματος. Από την άλλη, τα ζεύγη συστάδων στα κυματοτυλίγματα εκτείνονται μεταξύ ισοδυναμικών σημείων κάτω από διαδοχικούς πόλους με την ίδια πολικότητα. Αυτά τα σημεία είναι ακριβώς εκείνα στα οποία οι ισοσταθμιστές του βροχοτυλίγματος βραχυκυκλώνονται μεταξύ τους. Έτσι, στο ισοσταθμισμένο τύλιγμα το κυματοτύλιγμα παίζει το ρόλο των ισοσταθμιστών του βροχοτυλίγματος (Chapman, 2003).

1.2.3. Ροή Ισχύος σε Μηχανές Συνεχούς Ρεύματος

Οι κινητήρες συνεχούς ρεύματος μετατρέπουν την ηλεκτρική ισχύ σε μηχανική και οι γεννήτριες συνεχούς ρεύματος μετατρέπουν ως γνωστό τη μηχανική σε ηλεκτρική ισχύ. Και στις δυο περιπτώσεις η ισχύς εισόδου δε μετατρέπεται όλη σε χρήσιμη μορφή ισχύος στην έξοδο της μηχανής. Πάντα κατά τη διαδικασία της μετατροπής της ισχύος εμφανίζονται κάποιες απώλειες.

Ο συντελεστής απόδοσης (efficiency) μιας μηχανής συνεχούς ρεύματος ορίζεται ως εξής:

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

"Διαχείριση και Ενεργειακή Βελτιστοποίηση Συστημάτων"

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\% \quad (1.24)$$

Η διαφορά μεταξύ της ισχύος εισόδου και της ισχύος εξόδου είναι οι απώλειες της μηχανής:

$$\eta = \frac{P_{in} - P_{loss}}{P_{in}} \times 100\% \quad (1.25)$$

Απώλειες στις Μηχανές Συνεχούς Ρεύματος

Οι απώλειες που εμφανίζονται στις μηχανές συνεχούς ρεύματος χωρίζονται σε πέντε βασικές κατηγορίες:

- **Απώλειες Χαλκού:** Εμφανίζονται στα τυλίγματα του οπλισμού και του πεδίου. Οι απώλειες αυτές δίνονται για τον οπλισμό και τα τυλίγματα του πεδίου και ισούνται:

➤ Απώλειες τυλίγματος οπλισμού: $P_a = I_a^2 \cdot R_a$ (1.26)

➤ Απώλειες τυλίγματος πεδίου: $P_f = I_f^2 \cdot R_f$ (1.27)

Όπου:

- P_a = Απώλειες οπλισμού
- P_f = Απώλειες πεδίου
- I_a = Ρεύμα οπλισμού
- I_f = Ρεύμα στα τυλίγματα πεδίου
- R_a = Αντίσταση των τυλιγμάτων οπλισμού
- R_f = Αντίσταση των τυλιγμάτων πεδίου

- **Απώλειες Ψηκτρών:** Πρόκειται για τις απώλειες που οφείλονται στην τάση επαφής των ψηκτρών της μηχανής και δίνονται από την εξίσωση:

$$P_{BD} = V_{BD} \cdot I_a \quad (1.28)$$

Όπου:

- P_{BD} = Απώλειες ψηκτρών
- V_{BD} = Πτώση τάσης στις ψήκτρες
- I_a = Ρεύμα οπλισμού



ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

"Διαχείριση και Ενεργειακή Βελτιστοποίηση Συστημάτων"

- **Απώλειες Πυρήνα:** Πρόκειται για την κατηγορία που περιλαμβάνει τις απώλειες υστέρησης και δινορευμάτων του μετάλλου της μηχανής.
- **Μηχανικές Απώλειες:** Είναι αυτές που σχετίζονται με τα μηχανικά φαινόμενα. Οι δυο βασικοί τύποι μηχανικών απωλειών είναι:
 - **Απώλειες τριβών:** Οι απώλειες τριβών οφείλονται στα ρουλεμάν της μηχανής και
 - **Απώλειες εξαερισμού:** Οι απώλειες εξαερισμού οφείλονται στην τριβή των κινητών μερών της μηχανής με τον αέρα. Οι απώλειες αυτής της κατηγορίας μεταβάλλονται με τον κύβο της ταχύτητας περιστροφής της μηχανής.
- **Κατανεμημένες Απώλειες:** Εδώ περιλαμβάνονται απώλειες που δεν είναι δυνατό να ενταχθούν σε μια από τις προηγούμενες κατηγορίες. Όσο προσεκτικά κι αν υπολογιστούν οι απώλειες της μηχανής, ένα ποσοστό τους ξεφεύγει από τους υπολογισμούς, που γίνονται σύμφωνα με τις προηγούμενες τέσσερις σχέσεις. Αυτό το ποσοστό αντιπροσωπεύεται στους υπολογισμούς με τις κατανεμημένες απώλειες, οι οποίες στις περισσότερες μηχανές θεωρείται ότι είναι το 1% της ισχύος εξόδου κατά τη λειτουργία με πλήρες φορτίο.

Διάγραμμα Ροής Ισχύος

Το διάγραμμα ροής ισχύος, είναι μία από τις καλύτερες μεθόδους απεικόνισης των απωλειών ισχύος μιας μηχανής συνεχούς ρεύματος. Παρακάτω παρατηρούμε ένα διάγραμμά ροής ισχύος, για μια γεννήτρια συνεχούς ρεύματος, όπως φαίνεται στο σχήμα 1.12β. Σε αυτό εμφανίζεται η μηχανική ισχύς εισόδου από την οποία αφαιρούνται διαδοχικά οι κατανεμημένες απώλειες, οι μηχανικές απώλειες και τέλος οι απώλειες πυρήνα. Το ποσοστό της ισχύος που απομένει θεωρείται ότι μετατρέπεται (ιδανικά) από μηχανική σε ηλεκτρική ισχύ (P_{conv}). Η μηχανική ισχύς που μετατρέπεται ισούται:

$$P_{conv} = \tau_{ind} \cdot \omega_m \quad (1.29)$$

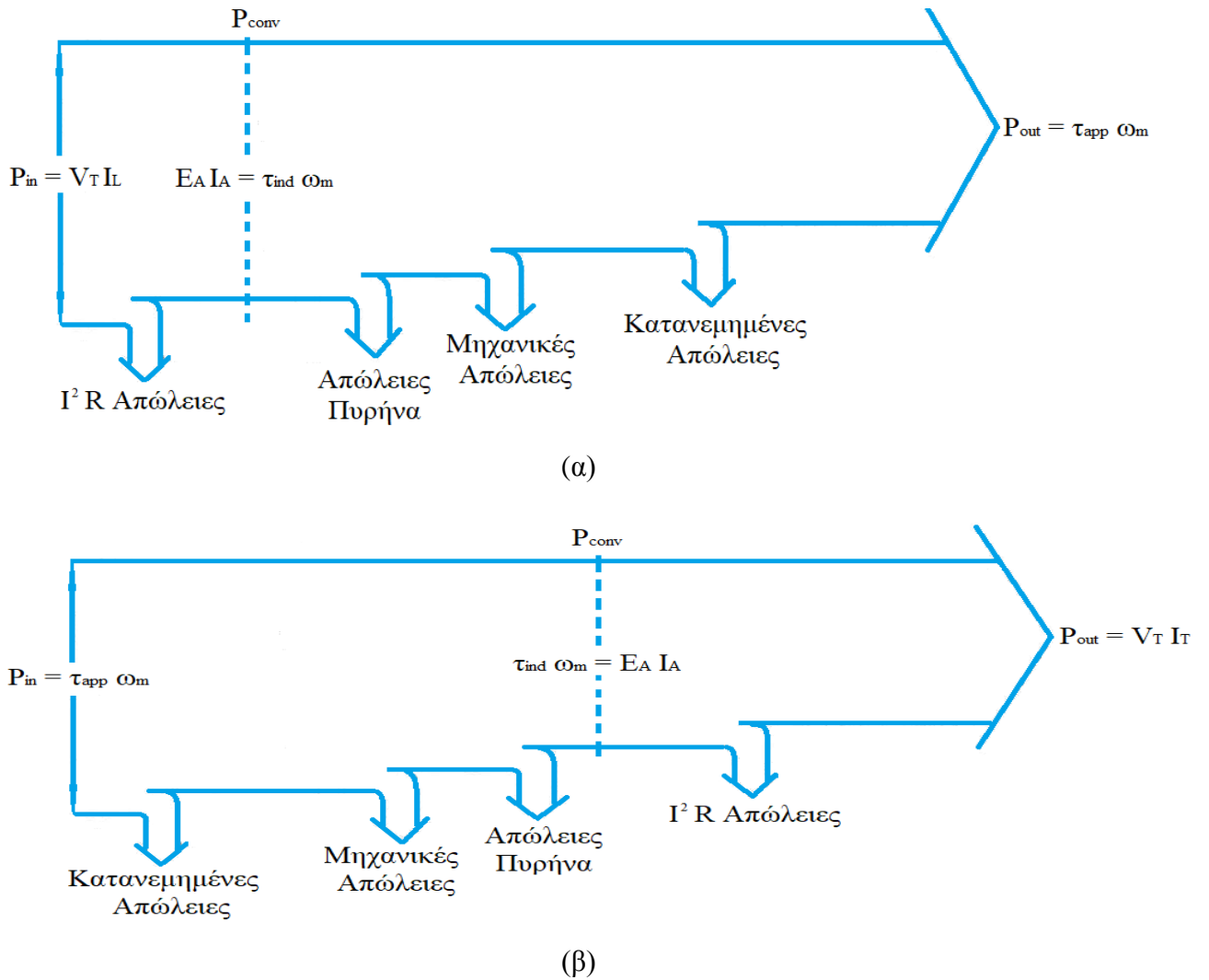
και η ηλεκτρική ισχύς που προκύπτει ισούται:

$$P_{conv} = E_A \cdot I_A \quad (1.30)$$

Αφαιρώντας τις απώλειες χαλκού και ψηκτρών παίρνουμε την ισχύ που εμφανίζεται στα άκρα της μηχανής. Όταν έχουμε να κάνουμε με κινητήρα συνεχούς ρεύματος το διάγραμμα ροής ισχύος είναι το ίδιο απλά αντίστροφα (Charman, 2003).

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

"Διαχείριση και Ενεργειακή Βελτιστοποίηση Συστημάτων"



Σχήμα 1.12. Διάγραμμα ροής ισχύος μηχανών συνεχούς ρεύματος. (α) Κινητήρα, (β) Γεννήτριας (Charman, 2003).



ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

"Διαχείριση και Ενεργειακή Βελτιστοποίηση Συστημάτων"

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο

ΚΙΝΗΤΗΡΕΣ ΣΥΝΕΧΟΥΣ ΡΕΥΜΑΤΟΣ

2.1. Δυο Λόγια για τους Κινητήρες Συνεχούς Ρεύματος

2.1.1. Εισαγωγή στους Κινητήρες Συνεχούς Ρεύματος

Τα πρώτα συστήματα ισχύος που αναπτύχθηκαν στις ΗΠΑ ήταν συστήματα συνεχούς ρεύματος. Οι κινητήρες συνεχούς ρεύματος συνέχισαν να κατέχουν μεγάλο ποσοστό των ετήσιων πωλήσεων ηλεκτρικών μηχανών έως και τη δεκαετία του 1960 (Charman, 2003).

Οι μηχανές συνεχούς ρεύματος που λειτουργούν ως κινητήρες, ονομάζονται κινητήρες συνεχούς ρεύματος. Η ίδια ηλεκτρική μηχανή είναι δυνατόν να λειτουργεί τόσο ως γεννήτρια, όσο και ως κινητήρας, γεγονός που προσδιορίζεται αποκλειστικά από τη φορά ροής της ισχύος.

Στις βιομηχανικές χώρες, οι ηλεκτρικοί κινητήρες καταναλώνουν περίπου το 65% της συνολικής διαθέσιμης ενέργειας. Το 8% αυτής της κατανάλωσης οφείλεται σε κινητήρες συνεχούς ρεύματος, που χρησιμοποιούνται συνήθως σε συστήματα ελεγχόμενης λειτουργίας (Γαντζούδης, Λαγουδάκος & Μπινιάρος, 2004).

Υπάρχουν μερικοί λόγοι που κάνουν αρκετά δημοφιλείς στις μέρες μας τους κινητήρες συνεχούς ρεύματος. Ένας από αυτούς είναι το γεγονός ότι τα συστήματα συνεχούς ρεύματος είναι ακόμη αναντικατάστατα στα επιβατικά αυτοκίνητα, στα φορτηγά και στα αεροπλάνα. Όταν ένα όχημα διαθέτει κάποιο σύστημα ισχύος που τροφοδοτείται με συνεχές ρεύμα, προφανώς θα χρησιμοποιεί κινητήρες συνεχούς ρεύματος. Οι κινητήρες αυτοί εμφανίζονται επίσης πολύ συχνά σε εφαρμογές όπου απαιτούνται μεγάλες μεταβολές στην ταχύτητα περιστροφής. Σε τέτοιες εφαρμογές ελέγχου της ταχύτητας οι κινητήρες συνεχούς ρεύματος είναι πραγματικά αξεπέραστοι. Ακόμη κι όταν δεν είναι διαθέσιμη μια πηγή συνεχούς ρεύματος, συνήθως χρησιμοποιούνται ηλεκτρονικοί ανορθωτές ή κυκλώματα chopper για την παραγωγή της απαιτούμενης συνεχούς τάσης ενώ οι κινητήρες dc χρησιμοποιούνται για την παροχή του επιθυμητού ελέγχου της ταχύτητας (Charman, 2003).



ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

"Διαχείριση και Ενεργειακή Βελτιστοποίηση Συστημάτων"

2.1.2. Αρχή Λειτουργίας Κινητήρων Συνεχούς Ρεύματος

Όπως είδαμε και στην αρχή λειτουργίας της μηχανής συνεχούς ρεύματος, το μέτρο της δύναμης (F) που ασκείται στον αγωγό δίνεται από τη σχέση:

$$F = B \cdot l \cdot I \cdot \sin\alpha \quad (\sigma\epsilon N) \quad (2.1)$$

Το κύκλωμα οπλισμού ενός κινητήρα συνεχούς ρεύματος μπορούμε να το δείξουμε χρησιμοποιώντας ισοδύναμο Thevenin, με μια ιδανική πηγή τάσης E_A και με μια αντίσταση R_A , και έτσι βλέπουμε την συνολική δομή του δρομέα, που περιλαμβάνει τους αγωγούς του δρομέα, τους βοηθητικούς πόλους και το τύλιγμα αντιστάθμισης, αν υπάρχει. Η πτώση τάσης V_{brush} στις ψήκτρες παρουσιάζεται με μια μικρή πηγή συνεχούς τάσης που έχει πολικότητα αντίθετη προς το ρεύμα του δρομέα της μηχανής. Τα τυλίγματα της διέγερσης, που παράγουν την κύρια μαγνητική ροή του κινητήρα παρουσιάζονται με την αυτεπαγωγή L_F και την αντίσταση R_F . Η αντίσταση R_{adj} παρουσιάζει την εξωτερική μεταβλητή αντίσταση που χρησιμοποιείται για τη ρύθμιση της ποσότητας του ρεύματος της διέγερσης.

Η πτώση τάσης στις ψήκτρες είναι ένα πολύ μικρό κλάσμα της παραγόμενης τάσης στα άκρα του κινητήρα. Έτσι, σε περιπτώσεις που δεν είναι σημαντική, μπορεί να παραλειφθεί ή να περιληφθεί προσεγγιστικά στην τιμή της R_A . Η εσωτερική αντίσταση των αγωγών διέγερσης μπορεί επίσης να συμπεριληφθεί στην τιμή της μεταβλητής αντίστασης R_{adj} , οπότε η συνολική τιμή των δύο αντιστάσεων συμβολίζεται με R_F . Μια ακόμη παραλλαγή του ισοδύναμου κυκλώματος περιλαμβάνει όλους τους αγωγούς διέγερσης του κινητήρα.

Η τάση εξ επαγωγής που αναπτύσσεται στο εσωτερικό της μηχανής δίνεται από την παρακάτω σχέση:

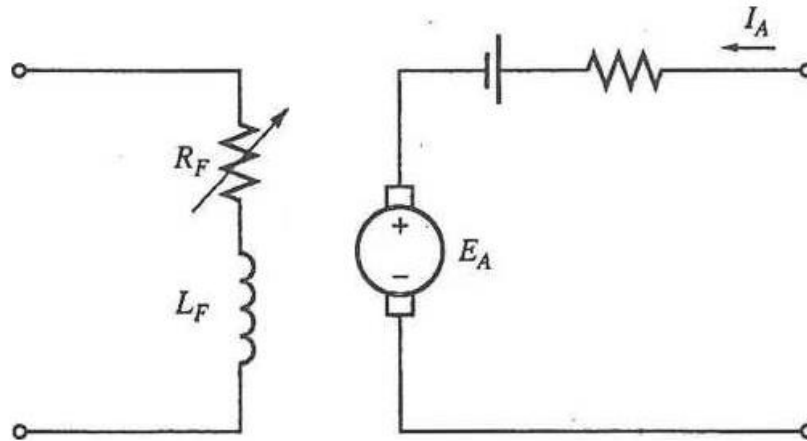
$$E_a = K\phi\omega \quad (2.2)$$

ενώ η επαγόμενη ροπή στον άξονά της ισούται:

$$\tau_{ind} = K\phi I_a \quad (2.3)$$

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

"Διαχείριση και Ενεργειακή Βελτιστοποίηση Συστημάτων"



Σχήμα 2.1. Ισοδύναμο κύκλωμα κινητήρα συνεχούς ρεύματος.

E_A είναι ανάλογη της ροής που αναπτύσσεται στο εσωτερικό της μηχανής και της ταχύτητας περιστροφής της. Το ρεύμα διέγερσης παράγει τη μαγνητεγερτική δύναμη του πεδίου της μηχανής και ισούται:

$$f = N_f I_f \quad (2.4)$$

Η μαγνητεγερτική δύναμη αντιστοιχίζεται στη μαγνητική ροή διέγερσης μέσω της καμπύλης μαγνήτισης του μετάλλου των πόλων. Επειδή το ρεύμα διέγερσης είναι ανάλογο της μαγνητεγερτικής δύναμης, και η τάση E_A είναι ανάλογη της μαγνητικής ροής, η καμπύλη μαγνήτισης ή στατική χαρακτηριστική ενός κινητήρα παρουσιάζει την E_A ως προς το ρεύμα διέγερσης σε κάποια σταθερή ταχύτητα ω_0 περιστροφής.

Οι περισσότεροι κινητήρες σχεδιάζονται ώστε να λειτουργούν κοντά στο σημείο κορεσμού της καμπύλης μαγνήτισης με σκοπό να παράγεται η μεγίστη δυνατή ισχύς. Αυτό σημαίνει ότι συχνά μια αρκετά μεγάλη αύξηση στο ρεύμα διέγερσης μιας μηχανής προκαλεί μικρή αύξηση στην τάση E_A , κατά τη λειτουργία με πλήρες φορτίο (Chapman, 2003).



ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

"Διαχείριση και Ενεργειακή Βελτιστοποίηση Συστημάτων"

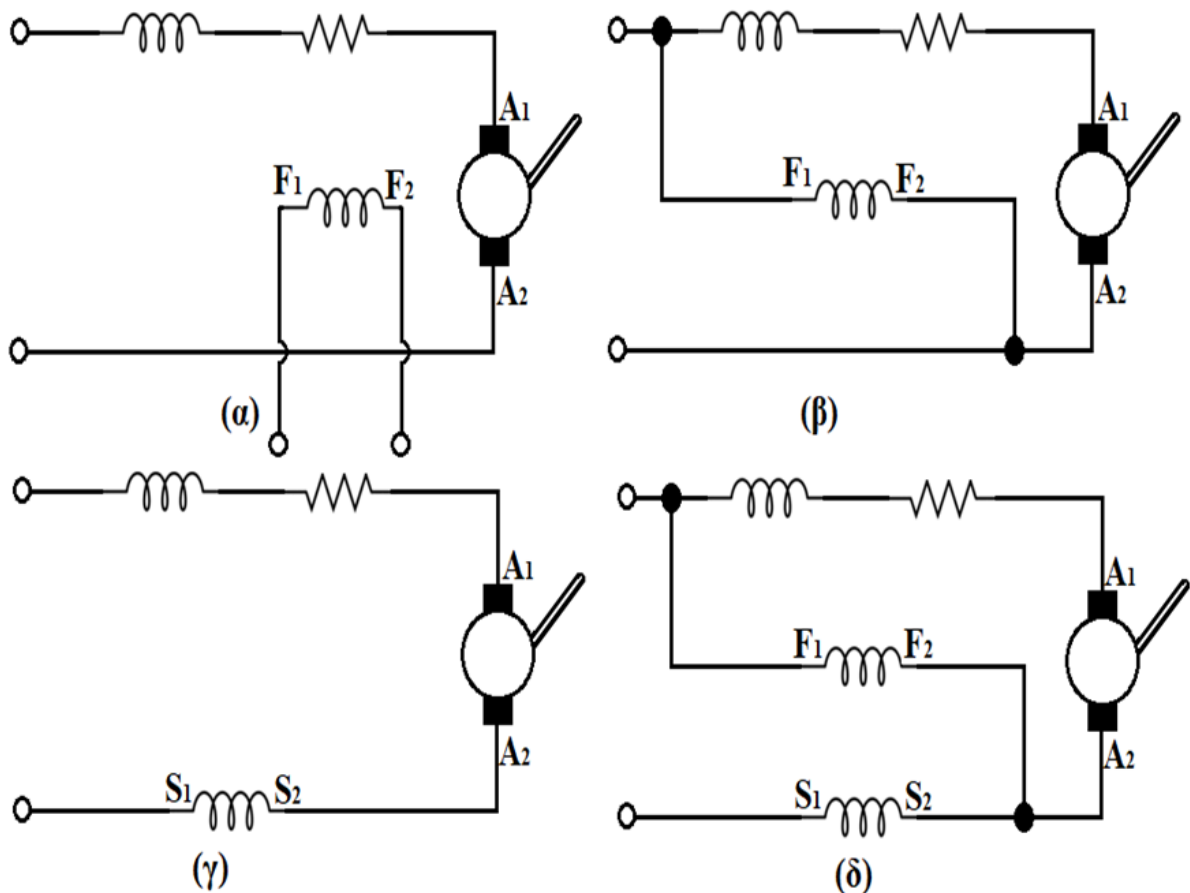
Κατηγορίες Κινητήρων Συνεχούς Ρεύματος

Οι κινητήρες συνεχούς ρεύματος, διακρίνονται ανάλογα με τα τύλιγματα διέγερσης τα οποία διαθέτουν και με τον τρόπο που αυτά συνδέονται στις εξής κατηγορίες:

- i. **Κινητήρας Ξένης Διέγερσης:** Οι κινητήρες με ξένη διέγερση που κατασκευάζονται για ειδικές χρήσεις, έχουν περίπου όμοιες ιδιότητες με τους κινητήρες παράλληλης διέγερσης. Σε ειδικές περιπτώσεις όπου χρησιμοποιούνται κινητήρες με ξένη διέγερση είναι κυρίως εκείνες κατά τις οποίες γίνεται ρύθμιση της ταχύτητας περιστροφής του κινητήρα σε μεγάλα όρια.
- ii. **Κινητήρας Παράλληλης Διέγερσης:** Στους κινητήρες αυτούς το τύλιγμα διεγέρσεως συνδέεται παράλληλα με το τύλιγμα του επαγωγικού τυμπάνου, ακριβώς όπως στις αντίστοιχες γεννήτριες.
- iii. **Κινητήρας Διέγερσης Σειράς:** Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται η συνδεσμολογία ενός κινητήρα με διέγερση σειράς. Το τύλιγμα διεγέρσεως S1-S2 είναι συνδεδεμένο σε σειρά με το τύλιγμα του επαγωγικού τυμπάνου της μηχανής. Επίσης σε σειρά με αυτά συνδέεται και ο εκκινητής.
- iv. **Κινητήρας Σύνθετης Διέγερσης:** Όπως στις γεννήτριες, έτσι και στους κινητήρες με σύνθετη διέγερση, κάθε κύριος μαγνητικός πόλος έχει δύο τύλιγματα, το παράλληλο τύλιγμα και το τύλιγμα σειράς. Επίσης, όπως και στις γεννήτριες έχουμε κινητήρες με αθροιστική σύνθετη διέγερση και κινητήρες με διαφορική σύνθετη διέγερση, αντίστοιχα με το αν το τύλιγμα σειράς ενισχύει ή εξασθενίζει το μαγνητικό πεδίο που δημιουργεί το παράλληλο τύλιγμα. Η συνδεσμολογία ενός κινητήρα με αθροιστική σύνθετη διέγερση και βοηθητικούς πόλους. Η εκκίνηση γίνεται και εδώ, όπως στους κινητήρες με παράλληλη διέγερση, με τη βοήθεια ενός εκκινητή που συνδέεται, σε σειρά με το επαγωγικό τύμπανο (Βασιλακόπουλου, 2006).

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

"Διαχείριση και Ενεργειακή Βελτιστοποίηση Συστημάτων"

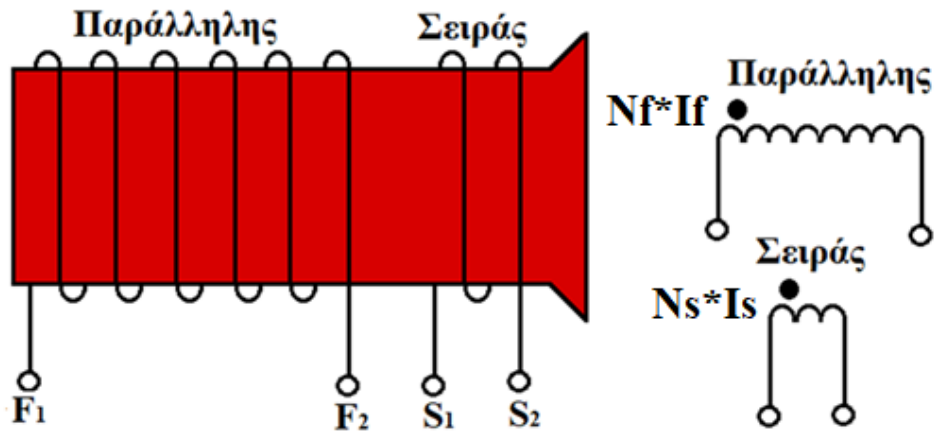


Σχήμα 2.2. Κατηγορίες κινητήρων συνεχούς ρεύματος, (α) Κινητήρας ξένης διέγερσης, (β) Κινητήρας παράλληλης διέγερσης, (γ) Κινητήρας διέγερσης σειράς, (δ) Κινητήρας σύνθετης διέγερσης (Μαλατέστας, 2010).

Στη σύνθετη διέγερση, το τύλιγμα σειράς, βρίσκεται και αυτό στο σταθερό μέρος μηχανής και διαρρέεται από το ρεύμα τυμπάνου που απορροφά ο κινητήρας. Για να μας δώσει το τύλιγμα αυτό τα απαραίτητα αμπερελίγματα, απαιτείται σχετικά μικρός αριθμός σπειρών, διατομής ανάλογης των αγωγών του τυλίγματος τυμπάνου, σε αντίθεση με το τύλιγμα της κύριας διέγερσης, το οποίο διαθέτει κατά πολύ μεγαλύτερο αριθμό σπειρών μικρής διατομής και διαρρέεται από αρκετά μικρότερο ρεύμα.

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

"Διαχείριση και Ενεργειακή Βελτιστοποίηση Συστημάτων"



Σχήμα 2.3. Τύλιγμα διέγερσης

Όπου:

N_f = Αριθμός σπειρών του τυλίγματος παράλληλης διέγερσης

N_s = Αριθμός σπειρών του τυλίγματος διέγερσης σειράς

I_f = Ρεύμα του τυλίγματος παράλληλης διέγερσης

I_s = Ρεύμα του τυλίγματος διέγερσης σειράς

Ορίζουμε ως ισοδύναμο ρεύμα πεδίου, I_{fed} , το ρεύμα που πρέπει να διαρρέει το τύλιγμα παράλληλης διέγερσης ώστε να παράγει την ίδια μαγνητεγερτική δύναμη με την πραγματική μηχανή σε οποιοδήποτε λειτουργικό σημείο και ισούται:

$$F_{ed} = N_f I_f + N_s I_s = N_f I_{fed} \quad (2.5)$$

Και

$$I_{fed} = I_f + \frac{N_s I_s}{N_f} \quad (2.6)$$

Οι κινητήρες σύνθετης διέγερσης ανάλογα με την πολικότητα του πεδίου διέγερσης σειράς σε σχέση με το πεδίο της κύριας διέγερσης, χωρίζονται σε δύο υποκατηγορίες.



ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

"Διαχείριση και Ενεργειακή Βελτιστοποίηση Συστημάτων"

Εξισώσεις Κινητήρα Συνεχούς Ρεύματος

Το ρεύμα του τυλίγματος τυμπάνου στην μόνιμη κατάσταση λειτουργίας, ισούται:

$$I_a = \frac{V_a - E_a}{R_a} \quad (2.7)$$

Όπου:

V_a = Τάση Τυλίγματος Τυμπάνου (σε V)

R_a = Αντίσταση Τυλίγματος Τυμπάνου (σε Ω)

Την ώρα της εκκίνησης του κινητήρα $E_A=0$, επειδή E_A είναι ανάλογη της n και $n=0$.

Χωρίς αντιηλεκτρική δύναμη (Α.Η.Ε.Δ.) κατά τη διάρκεια της εκκίνησης του κινητήρα, έχει ως συνέπεια τη δημιουργία ενός ρεύματος αρκετά μεγάλο από του ονομαστικού. Συνήθως στους κινητήρες στην εκκίνηση τους ισχύει:

$$I_{a,εκ} = \frac{V_a}{R_a} \approx (7 - 10)I_{a,av} \quad (2.8)$$

Όπου:

$I_{a,εκ}$ = Ρεύμα εκκίνησης, (σε A)

$I_{a,av}$ = Ρεύμα εκκίνησης, (σε A)

Για να αποφύγουμε υψηλά ρεύματα στην εκκίνηση, συνδέουμε σε σειρά με το τύλιγμα τυμπάνου βοηθητική αντίσταση που είναι πολύ μεγαλύτερη από την αντίσταση τυμπάνου ($R_{A,εκ} \gg R_A$), έτσι ώστε το αντίστοιχο ρεύμα να ελαττωθεί στα επιτρεπόμενα όρια φόρτισης του κινητήρα. Με την έναρξη της επιτάχυνσης του δρομέα, παρατηρούμε σταδιακή αύξηση της επαγόμενης Α.Η.Ε.Δ.. Όταν ο κινητήρας πάρει τις ονομαστικές στροφές του (σταθεροποιηθεί), η αντίσταση εκκίνησης αφαιρείται (Μαλατέστας, 2010).

Ο ποιο απλός κινητήρας συνεχούς ρεύματος είναι ο κινητήρας διέγερσης σειράς και περιγράφεται από τις παρακάτω εξισώσεις (Γούτης, 2006):

Ισοδύναμο Ρεύματα:

$$I = I_f = I_a \quad (2.9)$$



ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

"Διαχείριση και Ενεργειακή Βελτιστοποίηση Συστημάτων"

Ισοδύναμη Αντίσταση:

$$R = R_f + R_a \quad (2.10)$$

Τάση Τροφοδοσίας:

$$V_T = E_a + I \cdot R \quad (2.11)$$

Επαγόμενη Τάση Τυμπάνου (Α.Η.Ε.Δ.):

$$E_a = k_f I \omega_m = k_f I \frac{2\pi n}{60} = k_f I \frac{\pi n}{30} \quad (2.12)$$

και η

Ροπή:

$$T = k_f I_f I_a = k_f I^2 \quad (2.13)$$

Από την σχέση (2.13), το ισοδύναμο ρεύμα γίνεται:

$$I = \sqrt{\frac{T}{K_f}} \quad (2.14)$$

Χαρακτηριστικές υπό Φορτίο Κινητήρων Συνεχούς Ρεύματος

Οι κινητήρες συνεχούς ρεύματος, μας παρέχουν μια μεγάλη ποικιλία χαρακτηριστικών στροφών - ροπής και ένα μεγάλο εύρος μεταβολής της ταχύτητας περιστροφής χωρίς την απαίτηση χρήσης πολύπλοκων και δαπανηρών μετατροπέων ελέγχου, εξασφαλίζοντας ταυτόχρονα υψηλή απόδοση. Όλες οι μηχανές συνεχούς ρεύματος, μπορούν να συμπεριφερθούν σαν κινητήρας ή σαν γεννήτρια, οι διαφοροποιήσεις τους είναι στην φορά ροής ισχύος και δεν έχουν καμία κατασκευαστική διαφορά. Στη γεννήτρια έχουμε μετατροπή από μηχανική σε ηλεκτρική ισχύ, ενώ στον κινητήρα από ηλεκτρική σε μηχανική. Επομένως στον κινητήρα σημαντικό ρόλο παίζει η χαρακτηριστική στροφών - ροπής, που είναι το αποτύπωμα της εξάρτησης της ταχύτητας περιστροφής από τη μηχανική ροπή που παρουσιάζεται στον άξονα. Ένα βασικό κριτήριο επιλογής κινητήρα είναι και η χαρακτηριστική στροφών - ροπής. Άλλη μια σημαντική βάση πληροφοριών για τις απαιτήσεις του φορτίου σε ροπή σε μια ευρεία περιοχή στροφών, είναι και η χαρακτηριστική στροφών- ροπής για το φορτίο που θα κινήσει ο κινητήρας. Για τη βέλτιστη

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

"Διαχείριση και Ενεργειακή Βελτιστοποίηση Συστημάτων"

λειτουργία τόσο από τεχνικής όσο και από οικονομικής πλευράς, η λύση βρίσκεται στη σωστή επιλογή κινητήρα που γίνεται μέσα από την χαρακτηριστική στροφών - ροπής για το φορτίο. Σε αναλογία με τις ηλεκτρικές γεννήτριες, όπου ο συντελεστής ρύθμισης της τάσης αποτελεί ένα μέτρο σύγκρισης της μεταβολής της τάσης για τα διάφορα είδη γεννητριών, στους κινητήρες συνεχούς ρεύματος ορίζεται ο συντελεστής ρύθμισης των στροφών, σύμφωνα με τις σχέσεις:

$$SR = \frac{\omega_{m,nl} - \omega_{m,fl}}{\omega_{m,fl}} \times 100 \quad (2.15)$$

Ή ισοδύναμα

$$SR = \frac{n_{nl} - n_{fl}}{n_{fl}} \times 100 \quad (2.16)$$

Όπου:

$\omega_{m,nl}$ = Γωνιακή ταχύτητα περιστροφής σε κενό φορτίο (σε rad/s)

$\omega_{m,fl}$ = Γωνιακή ταχύτητα περιστροφής σε πλήρες φορτίο (σε rad/s)

n_{nl} = Ταχύτητα περιστροφής σε κενό φορτίο (σε rpm)

n_{fl} = Ταχύτητα περιστροφής σε πλήρες φορτίο (σε rpm)

Ο συντελεστής ρύθμισης στροφών αποτελεί ένα μεγάλο μέτρο σύγκρισης της μεταβολής της ταχύτητας περιστροφής για τα διάφορα είδη κινητήρων συνεχούς ρεύματος και μας δίνει μια πρώτη εικόνα για τη μορφή της χαρακτηριστικής στροφών - ροπής.

Ο συντελεστής ρύθμισης στροφών στους κινητήρες συνεχούς ρεύματος με ξένη διέγερση είναι αρκετά χαμηλός, η εξάρτηση των στροφών από το φορτίο είναι ελάχιστα δυνατή και για το λόγο αυτό οι κινητήρες των κατηγοριών αυτών, θεωρούνται ως κινητήρες σταθερών στροφών.

Η παραγόμενη εσωτερική ροπή σε ένα κινητήρα συνεχούς ρεύματος ισούται:

$$T = \frac{P_{sw}}{4\alpha\pi} \Phi I_a = K_m \Phi I_a \quad (2.17)$$

Βάση της παραπάνω εξίσωσης, ο έλεγχος της ροπής και των στροφών, βάση της σχέσης στροφών - ροπής σε ένα κινητήρα συνεχούς ρεύματος, μπορεί να γίνει με δύο τρόπους:

- Με τον έλεγχο στροφών της μαγνητικής ροής μέσω του ρεύματος της κύριας διέγερσης,

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

"Διαχείριση και Ενεργειακή Βελτιστοποίηση Συστημάτων"

- Με τη μεταβολή του ρεύματος του τυλίγματος τυμπάνου και
- Με συνδυασμένο έλεγχο και των δύο ρευμάτων.

Ο έλεγχος μέσω του πεδίου διέγερσης, λόγω των σημαντικά μικρότερων ρευμάτων σε σχέση με τα αντίστοιχα του τυλίγματος τυμπάνου, οδηγεί σε πιο οικονομικά και με μικρότερο όγκο συστήματα ελέγχου. Ο λόγος είναι ότι η αυτεπαγωγή του τυλίγματος διέγερσης είναι κατά πολύ μεγαλύτερη από την αντίστοιχη αυτεπαγωγή του τυλίγματος τυμπάνου, με αποτέλεσμα και η αντίστοιχη σταθερά χρόνου του τυλίγματος διέγερσης να είναι και αυτή με τη σειρά της αρκετά μεγαλύτερη από την αντίστοιχη σταθερά χρόνου του τυλίγματος τυμπάνου:

$$L_f \gg L_a \quad (2.18)$$

και

$$\tau_f = \frac{L_f}{R_f} \gg \tau_a = \frac{L_a}{R_a} \quad (2.19)$$

Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα, τα συστήματα ελέγχου μέσω του τυλίγματος τυμπάνου να είναι πολύ ταχύτερα από τα αντίστοιχα που ο έλεγχος γίνεται μέσω του ρεύματος της κύριας διέγερσης (Μαλατέστας, 2015).

2.2. Εκκινήτες - Πέδηση Κινητήρων Συνεχούς Ρεύματος

Η εκκίνηση του κινητήρα διαρκεί πολύ λίγο χρόνο, μερικά δέκατα του δευτερολέπτου έως μερικά δευτερόλεπτα και είναι μια δυναμική διαδικασία. Συνήθως λόγω βύθισης της τάσης δημιουργούνται προβλήματα σε γειτονικά παρευρισκόμενες συσκευές, αλλά μπορεί να εμφανιστούν έντονα φαινόμενα υπερθέρμανσης στον κινητήρα λόγω των υψηλών ρευμάτων. Σε κινητήρες με συχνές εκκινήσεις - διακοπές όπως στον κινητήρα ενός ανελκυστήρα, το πρόβλημα αυτό είναι ιδιαίτερα έντονο. Για τους παραπάνω λόγους η χρήση διατάξεων εκκίνησης και προστασίας και ιδιαίτερα σε κινητήρες μεγάλης ισχύος είναι απαραίτητες. Κατά τη στιγμή της εκκίνησης, ο δρομέας της μηχανής είναι σε στάση και η αναπτυσσόμενη Α.Η.Ε.Δ. είναι μηδενική. Για το ρεύμα τυμπάνου ισχύει:

$$I_a = \frac{V_a - E_a}{R_a} = \frac{V_a - K_g \Phi n}{R_a} \quad (2.20)$$

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

"Διαχείριση και Ενεργειακή Βελτιστοποίηση Συστημάτων"

Επομένως, κατά την αρχική στιγμή της εκκίνησης

$$I_{\alpha,st} = I_{\alpha}(n = E_a = 0) = \frac{V_a}{R_a} \gg I_{\alpha,no} \quad (2.21)$$

Σχεδόν όλη ή και όλη η τάση τροφοδοσίας του κινητήρα εφαρμόζεται στην ωμική αντίσταση του τυμπάνου, που κυμαίνεται από μερικά δέκατα έως μερικά Ohm, με αποτέλεσμα την ανάπτυξη ισχυρών ρευμάτων. Τα ρεύματα αυτά λόγω της προκαλούμενης βύθισης της τάσης, είναι ανεπιθύμητα στον κινητήρα αλλά και στις γειτονικά παρευρισκόμενες ηλεκτρικές συσκευές.

Για να εξαλείψουμε αυτά τα προβλήματα, πρέπει είτε να αυξήσουμε βαθμιαία την τάση τροφοδοσίας του τυλίγματος τυμπάνου, με την βοήθεια ηλεκτρονικών ισχύος είτε κατά τη διάρκεια της εκκίνησης να παρεμβάλουμε αντίσταση σε σειρά με το τύλιγμα τυμπάνου, που τις αποσυνδέουμε σταδιακά (Μαλατέστας, 2015).

2.2.1. Εκκινητής Κινητήρα Συνεχούς Ρεύματος Τριών Ακροδεκτών

Ο εκκινητής τριών ακροδεκτών, είναι ιδανικό για κινητήρες παράλληλης και σύνθετης διέγερσης, όπου οι τρεις ακροδέκτες συνδέονται ως εξής:

- Στον ακροδέκτη L συνδέεται το δίκτυο,
- Στον ακροδέκτη R συνδέεται το τύμπανο και
- Στον ακροδέκτη M συνδέεται η ρυθμιστική αντίσταση ή απλά το τύλιγμα της κύριας διέγερσης του κινητήρα.

Στο παρακάτω σχήμα ο εκκινητής είναι σε εκτός λειτουργίας θέση. Όταν μετακινήσουμε το στρόφαλο προς τα δεξιά στην πρώτη επαφή, το τύλιγμα διέγερσης τίθεται υπο την πλήρη τάση του δικτύου, ενώ το σύνολο της αντίστασης του εκκινητή παρεμβάλλεται σε σειρά με το τύλιγμα του δρομέα, με αποτέλεσμα ο κινητήρας να αρχίζει να περιστρέφεται με ελαττωμένο ρεύμα εκκίνησης.

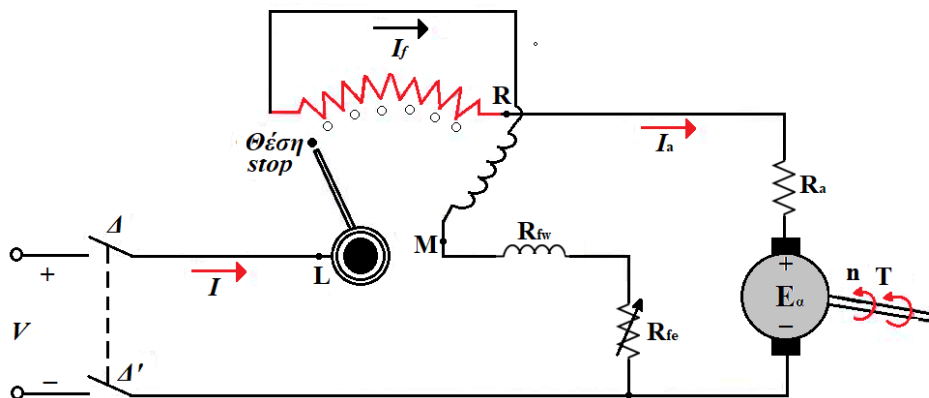
Όταν μετακινήσουμε το στρόφαλο προς την επαφή R, έχουμε σταδιακή μείωση της αντίστασης από το κύκλωμα του δρομέα και παράλληλα πρόσθεση αυτής στο τύλιγμα διέγερσης. Παρόλα αυτά όμως, η αντίσταση διέγερσης παραμένει πρακτικά σταθερή διότι: $R_{εκκ} \ll R_{fw} + R_{fe}$.

Ο χρόνος μετακίνησης του στρόφαλου πρέπει να είναι σε νορμάλ κατάσταση, δεν πρέπει να είναι πολύ αργός αλλά ούτε και πολύ γρήγορος, γιατί αλλιώς έχουμε τα παρακάτω προβλήματα:

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

"Διαχείριση και Ενεργειακή Βελτιστοποίηση Συστημάτων"

- Αν έχουμε πολύ γρήγορη μετακίνηση του στρόφαλου, η αντίσταση εκκίνησης αποσυνδέεται προτού αναπτυχθούν αρκετές στροφές και με συνέπεια αυξημένη Α.Η.Ε.Δ, που δημιουργεί αυξημένα ρεύματα εκκίνησης.
- Όταν έχουμε πολύ αργή μετακίνηση του στρόφαλου, αν οι αντιστάσεις του εκκινητή δεν είναι ικανής ισχύος υπάρχει κίνδυνος να καούν.



Σχήμα 2.4. Συνδεσμολογία εκκινητή τριών ακροδεκτών για κινητήρα παράλληλης και σύνθετης διέγερσης.

Ο εκκινητής για λόγους ασφαλείας, σε περίπτωση διακοπής του κυκλώματος διέγερσης, έχει ελατήριο επαναφοράς και πηνίο συγκράτησης του στρόφαλου, όπου το πηνίο αυτοσυγκράτησης απομαγνητίζεται και ο στρόφαλος μέσω του επανατακτικού ελατηρίου πηγαίνει στη θέση stop, όπου έχουν την αποσύνδεση του κινητήρα από την τάση τροφοδοσίας και έτσι προστατεύεται έναντι υπερτάχυνσης.

Το ίδιο πρόβλημα δημιουργείται σε περίπτωση τυχαίας διακοπής του δικτύου με αποτέλεσμα να έχουμε απομαγνήτιση του πηνίου λόγω της διαρκούς μείωσης των στροφών και αντίστοιχα της Α.Η.Ε.Δ. και με ενδεχόμενο ο κινητήρας να βρεθεί χωρίς αντίσταση εκκίνησης μετά την επαναφορά της τάσης.

Το μόνο μειονέκτημα του εκκινητή τριών ακροδεκτών είναι ότι προκαλείται εξασθένιση του ρεύματος διέγερσης και του ρεύματος του πηνίου συγκράτησης του στρόφαλου, όταν παρεμβάλουμε σε σειρά με την ρυθμιστική αντίσταση διέγερσης, εξωτερική αντίσταση μεγάλης τιμής για την αύξηση των στροφών του κινητήρα (Μαλατέστας, 2015).

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

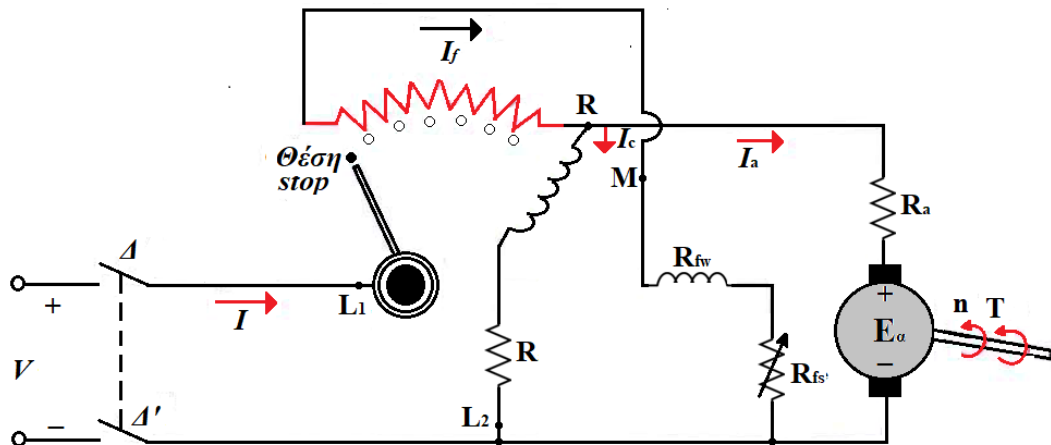
"Διαχείριση και Ενεργειακή Βελτιστοποίηση Συστημάτων"

2.2.2. Εκκινήτης Κινητήρα Συνεχούς Ρεύματος Τεσσάρων Ακροδεκτών

Το παρακάτω κύκλωμα εκκίνησης τεσσάρων ακροδεκτών, είναι ιδανικό για κινητήρες οι οποίοι λειτουργούν σε υψηλές ταχύτητες και η ρύθμιση τους γίνεται μέσω του πεδίου διέγερσης και οι τέσσερις ακροδέκτες συνδέονται ως εξής:

- Στον ακροδέκτη L1 συνδέεται το δίκτυο,
- Στον ακροδέκτη R συνδέεται το τύμπανο,
- Στον ακροδέκτη M συνδέεται η ρυθμιστική αντίσταση ή απλά το τυλίγμα της κύριας διέγερσης του κινητήρα και
- Στον ακροδέκτη L2 συνδέεται το πηνίο συγκράτησης με το δίκτυο.

Με τον ακροδέκτη L2, εξασφαλίζεται η απευθείας τροφοδοσία του πηνίου συγκράτησης από το δίκτυο. Έχει μπει ενδιάμεσα μια ωμική αντίσταση R, για να ρυθμιστεί το ρεύμα και η δύναμη συγκράτησης του πηνίου.



Σχήμα 2.5. Συνδεσμολογία εκκινήτη τεσσάρων ακροδεκτών για κινητήρες συνεχούς ρεύματος.

Το μόνο μειονέκτημα του εκκινήτη τεσσάρων ακροδεκτών είναι ότι σε περίπτωση διακοπής του τυλίγματος του πεδίου και με αυτόν τον ρυθμιστή, δεν έχουμε προστασία του κινητήρα από υπερτάχυνση και η προστασία επιτυγχάνεται με φυγοκεντρικούς διακόπτες κατάλληλα προσαρμοσμένους στον άξονα του κινητήρα. Επίσης υπάρχουν ρυθμιστές τεσσάρων ακροδεκτών, με δυο στρόφαλους, οι οποίοι διαθέτουν ρυθμιστική αντίσταση για τη ρύθμιση του πεδίου διέγερσης (Μαλατέστας, 2015).



ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

"Διαχείριση και Ενεργειακή Βελτιστοποίηση Συστημάτων"

2.2.3. Πέδηση Κινητήρων Συνεχούς Ρεύματος

Η μετατροπή της μηχανικής ενέργειας των στρεφόμενων μαζών του συστήματος κινητήρα-φορτίου, σε ηλεκτρική ενέργεια, είναι αποτέλεσμα της ηλεκτρικής πέδησης. Ο χρόνος πέδησης είναι ανάλογος του χρονικού ρυθμού μετατροπής της ενέργειας.

Ηλεκτρική πέδηση ονομάζεται όταν σε μια μηχανή συνεχούς ρεύματος που λειτουργεί ως κινητήρας, αντιστραφεί είτε η φορά της μαγνητικής ροής είτε η φορά του ρεύματος τυμπάνου, η παραγόμενη εσωτερική ηλεκτρική ροπή αλλάζει πρόσημο και μαζί με τη ροπή του φορτίου αντιτίθεται στην κίνηση, μειώνοντας τις στροφές. Η αντιστροφή της ροπής συνήθως γίνεται με την αντιστροφή του ρεύματος τυμπάνου, γιατί η σταθερά του τυλίγματος τυμπάνου είναι πολύ μικρότερη από την αντίστοιχη του τυλίγματος διέγερσης.

Στη διαδικασία της ηλεκτρικής πέδησης, ο κινητήρας μετατρέπεται σε γεννήτρια και παράγει ηλεκτρική ενέργεια σε βάρος της αποθηκευμένης μηχανικής ενέργειας. Η ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται, είτε επιστρέφει στο ηλεκτρικό δίκτυο, ή καταναλώνεται ως θερμότητα σε μια εξωτερική ωμική αντίσταση, που ονομάζεται αντίσταση πέδησης.

Υπάρχουν τριών ειδών πέδησης σε ένα κινητήρα συνεχούς ρεύματος:

- Η Δυναμική Πέδηση
- Η Αναγεννητική Πέδηση και
- Η Ακραία Πέδηση (Plugging)

Η ηλεκτρική πέδηση είναι πολύ σημαντική για τις ηλεκτρικές μηχανές συνεχούς ρεύματος (Μαλατέστας, 2015).

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

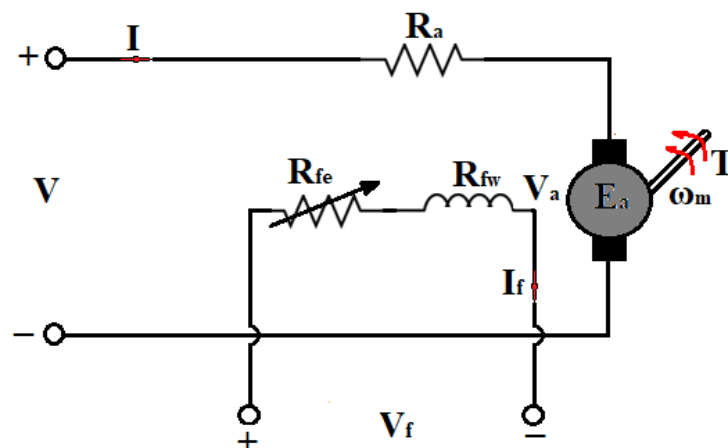
"Διαχείριση και Ενεργειακή Βελτιστοποίηση Συστημάτων"

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο

ΚΙΝΗΤΗΡΕΣ ΣΥΝΕΧΟΥΣ ΡΕΥΜΑΤΟΣ ΞΕΝΗΣ ΔΙΕΓΕΡΣΗΣ

3.1. Μόνιμη Κατάσταση

Το κύκλωμα διέγερσης ενός κινητήρα συνεχούς ρεύματος ξένης διέγερσης τροφοδοτείται από μια ανεξάρτητη πηγή συνεχούς τάσης.



Σχήμα 3.1. Ισοδύναμο κύκλωμα κινητήρα συνεχούς ρεύματος ξένης διέγερσης.

Το συνολικό ρεύμα που απορροφά ο κινητήρας από το δίκτυο, ισούται με το ρεύμα του τυλίγματος τυμπάνου, όπως βλέπουμε στο παραπάνω σχήμα.

$$I = I_a \quad (3.1)$$

Η τάση τροφοδοσίας, είναι ίση με το άθροισμα της επαγόμενης αντιηλεκτρεργερτικής δύναμης (Α.Η.Ε.Δ.) στο τυλίγμα τυμπάνου και της πτώσης τάσης στην ωμική αντίσταση του τυλίγματος τυμπάνου και ισούται:

$$V = V_a = E_a + R_a I_a \quad (3.2)$$

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

"Διαχείριση και Ενεργειακή Βελτιστοποίηση Συστημάτων"

και

$$E_a = K_g \Phi n = K_m \Phi \omega_m \quad (3.3)$$

Γνωρίζουμε ότι η μηχανική γωνιακή ταχύτητα δίνεται από τον τύπο:

$$\omega_m = \frac{2\pi n}{60} \quad (3.4)$$

Άρα η σχέση (3.3) μπορεί να πάρει την μορφή:

$$E_a = K_g \Phi n = K_m \Phi \omega_m = \frac{\pi n K_m \Phi}{30} \quad (3.5)$$

Μερικές φορές στους κινητήρες συνεχούς ρεύματος ξένης διέγερσης τις αντιστάσεις R_{fe} και R_{fw} τις υπολογίζουμε μαζί και την ονομάζουμε R_{fw} , επομένως το ρεύμα διέγερσης I_f ισούται:

$$I_f = \frac{V_f}{R_{fw}} \quad (3.6)$$

Στους κινητήρες ξένης διέγερσης με τυλίγματα αντιστάθμισης και βοηθητικούς πόλους, η ροή ανά πόλο του πεδίου διέγερσης, δεν επηρεάζεται από το ρεύμα τυμπάνου και θεωρείται σταθερή, όταν έχουμε σταθερό ρεύμα διέγερσης. Βάση των παραπάνω και με σταθερή ροή, υπάρχει αναλογία μεταξύ της παραγόμενης ροπής και του ρεύματος του τυλίγματος τυμπάνου και ισούται:

$$T = K_m \Phi (I_f = \sigma \tau \alpha \theta) I_a = K_m \dot{I}_a \quad (3.7)$$

Βάση των εξισώσεων (3.2) και (3.3) μπορούμε να πούμε ότι η ταχύτητα ω_m του κινητήρα ισούται:

$$\omega_m = \frac{E_a}{K_m \Phi} = \frac{V - I_a R_a}{K_m \Phi} = \frac{V}{K_m \Phi} - \frac{R_a}{(K_m \Phi)^2} T \quad (3.8)$$

Αν θέλουμε σταθερή τάση στους ακροδέκτες του τυλίγματος τυμπάνου και σταθερή μαγνητική ροή, η παραπάνω εξίσωση παίρνει την μορφή μιας γραμμικής εξίσωσης με αρνητική κλίση του τύπου $\psi = \alpha - \beta x$ και γίνεται:

$$\omega_m = A - BT \quad (3.9)$$

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

"Διαχείριση και Ενεργειακή Βελτιστοποίηση Συστημάτων"

Όπου

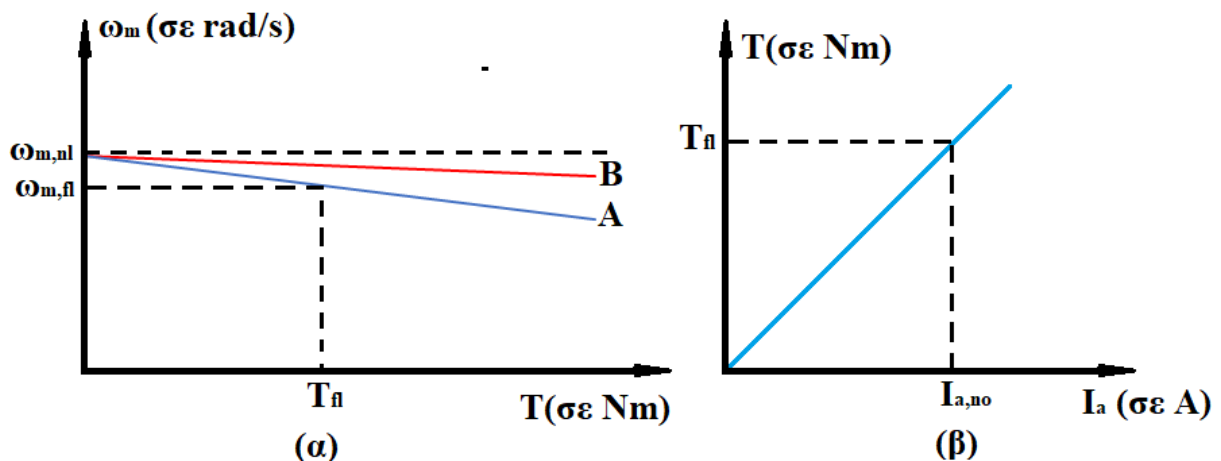
$A =$ Η γωνιακή ταχύτητα περιστροφής σε συνθήκες κενού φορτίου ($T=0$), άρα

$$\omega_m(T = 0) = \omega_{m,nl} = A = \frac{V}{K_m \Phi} \quad (3.10)$$

$B =$ αποτελεί την κλίση της ευθείας και ισούται:

$$B = -\frac{R_a}{(K_m \Phi)^2} \quad (3.11)$$

Βάση της εξίσωσης (3.10) η κλίση της χαρακτηριστικής $\omega_m = f(T)$ έχει αρνητική κλίση, άρα εάν ο κινητήρας στρέφεται με κάποιο συγκεκριμένο αριθμό στροφών, μια απόλυτη αύξηση του φορτίου προκαλεί ελάττωση των στροφών και της Α.Η.Ε.Δ., με αποτέλεσμα την αύξηση του ρεύματος τυμπάνου στην τιμή που απαιτείται από την αύξηση της ροπής. Όταν ισχύουν τα παραπάνω, έχουμε γραμμική εξάρτηση της χαρακτηριστικής $\omega_m = f(T)$.



Σχήμα 3.2. (α) Χαρακτηριστική γωνιακής Ταχύτητας - ροπής (β) Χαρακτηριστική ροπής – ρεύματος τυμπάνου.

Όταν ο κινητήρας δε διαθέτει τυλίγματα αντιστάθμισης και βοηθητικών πόλων, θα υπάρξει μια μικρή εξασθένιση της μαγνητικής ροής λόγω της αντίδρασης του τυλίγματος τυμπάνου, με αποτέλεσμα η μείωση των στροφών για τα ίδια φορτία, να είναι μικρότερη από την αντίστοιχη



ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

"Διαχείριση και Ενεργειακή Βελτιστοποίηση Συστημάτων"

της καμπύλης Α. Αυτό σημαίνει ότι, η αντίδραση του τυλίγματος τυμπάνου βελτιώνει την τιμή του συντελεστή ρύθμισης στροφών. Επίσης, η διακύμανση των στροφών για μια μεγάλη περιοχή μεταβολής του φορτίου και για τις δύο καμπύλες (Α και Β), είναι αρκετά μικρή για αυτό ονομάζονται και κινητήρες σταθερής ταχύτητας.

Οι κινητήρες ξένης διέγερσης, χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές που δεν απαιτούν υψηλή ροπή εκκίνησης, αλλά απαιτούν σχεδόν σταθερή ταχύτητα.

Η γωνιακή ταχύτητα περιστροφής είναι εξαρτημένη από τα παρακάτω:

- i. Τάση του τυλίγματος τυμπάνου,
- ii. Μαγνητική ροή,
- iii. Ωμική αντίσταση του τυλίγματος τυμπάνου και
- iv. Φορτίο στον άξονα του κινητήρα.

Η εξάρτηση της γωνιακής ταχύτητας περιστροφής από τα παραπάνω αποδεικνύεται από την εξίσωση (3.8), άρα:

$$\omega_m = (V_a, \Phi, R_a, T) \quad (3.12)$$

Όλα τα παραπάνω μας οδηγούν στο συμπέρασμα, ότι ο έλεγχος του κινητήρα ξένης διέγερσης γίνεται με τους τρεις παρακάτω τρόπους ή τον συνδυασμό αυτών:

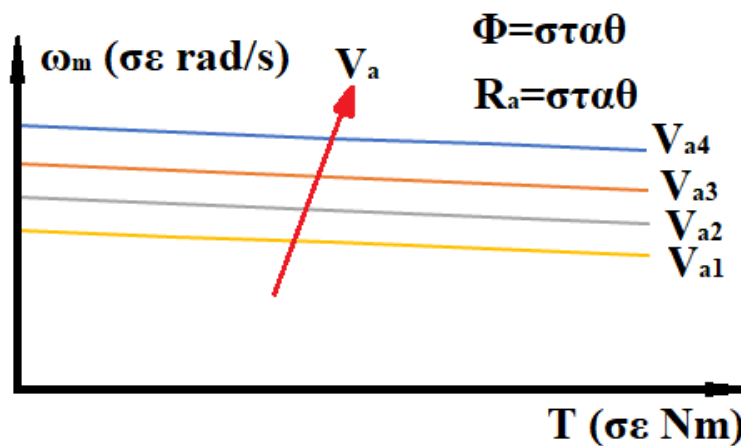
- Έλεγχος με Μεταβολή της Τάσης Ακροδεκτών του Τυλίγματος τυμπάνου: Για να γίνει αυτός ο έλεγχος θα πρέπει το τύλιγμα της διέγερσης να τροφοδοτηθεί ξεχωριστά με σταθερή τάση. Η ωμική αντίσταση στον κλάδο του τυλίγματος τυμπάνου, παραμένει σταθερή. Επίσης, σταθερή παραμένει και η τάση στον κλάδο της διέγερσης στην τιμή που εξασφαλίζει το ονομαστικό ρεύμα διέγερσης. Η ρύθμιση της τάσης, άρα και το ρεύμα του τυλίγματος τυμπάνου, συχνά γίνεται:
 - Μέσω πλήρως ελεγχόμενης
 - Ημιελεγχόμενης γέφυρας και
 - Μέσω μετατροπέα Σ.Ρ./Σ.Ρ..

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

"Διαχείριση και Ενεργειακή Βελτιστοποίηση Συστημάτων"

Το ρεύμα στο τύλιγμα διέγερσης, ρυθμίζεται συνήθως στη μέγιστη τιμή του και αυτό μας οδηγεί στην αύξηση της παραγόμενης ροπής και στον περιορισμό της παραμόρφωσης της ροής διακένου λόγω της αντίδρασης τυμπάνου. Ο έλεγχος των στροφών με μεταβολή της τάσης στο τύλιγμα τυμπάνου, αφορά την περιοχή μεταβολής των στροφών, από μηδενική ταχύτητα έως και την ονομαστική ταχύτητα λειτουργίας. Σε αυτή την περίπτωση μέσω συστήματος κλειστού βρόχου, το ρεύμα τυμπάνου, άρα και στην παραγόμενη εσωτερική ροπή διατηρούνται σταθερά στις αντίστοιχες ονομαστικές τιμές τους, παρέχοντας με αυτό τον τρόπο τη δυνατότητα λειτουργίας με ονομαστική ροπή σε όλο το εύρος των ταχυτήτων.

Αμελώντας την αντίδραση τυμπάνου, για σταθερή μαγνητική ροή και σταθερή ωμική αντίσταση στον κλάδο τυμπάνου, η κλίση της χαρακτηριστικής $\omega_m=f(T)$ βάση την σταθερά B , παραμένει σταθερή, ενώ η σταθερά A (γωνιακή ταχύτητα περιστροφής σε συνθήκες κενού φορτίου), μεταβάλλεται ανάλογα με την τιμή της εφαρμοζόμενης τάσης στο τύλιγμα τυμπάνου.

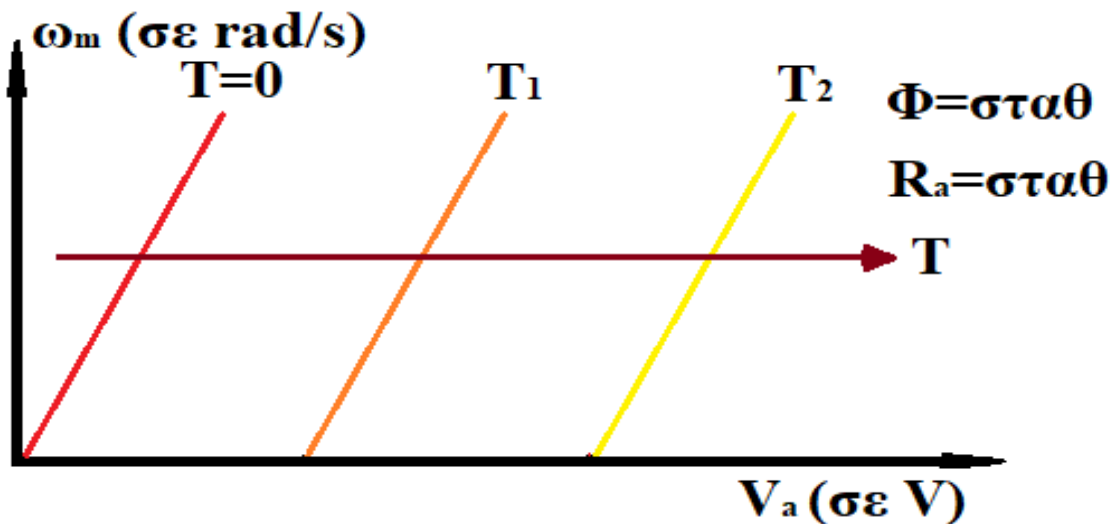


Σχήμα 3.3. Επίδραση της μεταβολής της τάσης του τυλίγματος τυμπάνου στην χαρακτηριστική γωνιακής ταχύτητας – ροπής.

Η μεταβολή της τάσης τροφοδοσίας του τυλίγματος τυμπάνου, έχει σαν αποτέλεσμα την παράλληλη μετατόπιση των χαρακτηριστικών $\omega_m=f(T)$ και αυτό αποδεικνύεται στο παραπάνω σχήμα. Ο έλεγχος των στροφών με μεταβολή της τάσης στο τύλιγμα τυμπάνου αφορά, την περιοχή μεταβολής των στροφών από μηδενική ταχύτητα έως και την ονομαστική ταχύτητα λειτουργίας. Οι χαρακτηριστικές $\omega_m=f(V_a)$ με παράμετρο την εσωτερική ροπή T είναι σημαντικές σε έναν κινητήρα συνεχούς ρεύματος ξένης διέγερσης.

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

"Διαχείριση και Ενεργειακή Βελτιστοποίηση Συστημάτων"



Σχήμα 3.4. Εξάρτηση της γωνιακής ταχύτητας από την τάση τυμπάνου, με παράμετρο την εσωτερική ροπή.

Η συγκεκριμένη μέθοδος εξασφαλίζει μια ομαλή μεταβολή των στροφών σε ένα αρκετά ευρύ φάσμα λειτουργίας, πρακτικά από μηδενικές στροφές μέχρι και τις ονομαστικές. Όταν λειτουργεί πάνω από τις ονομαστικές στροφές, ο έλεγχος των στροφών γίνεται μέσω του ρεύματος της διέγερσης διακλάδωσης και αυτό για να αποφύγουμε το φαινόμενο υπερφόρτισης.

- Έλεγχος με Μεταβολή του Ρεύματος Διέγερσης: Για να γίνει αυτός ο έλεγχος θα πρέπει η τάση τροφοδοσίας και η ωμική αντίσταση του τυμπάνου να παραμείνουν σταθερά. Με την παρεμβολή εξωτερικής σειράς ωμικής αντίστασης στον κλάδο της διέγερσης επιτυγχάνεται ο έλεγχος του ρεύματος διέγερσης. Η μαγνητική ροή και το ρεύμα διέγερσης συνδέονται γραμμικά, εάν αγνοήσουμε τον κορεσμό του σιδηρομαγνητικού κυκλώματος και εκφράζονται με την σχέση:

$$\Phi = KI_f \quad (3.13)$$

και γνωρίζοντας:

$$K_f = KK_f \quad (3.14)$$

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

"Διαχείριση και Ενεργειακή Βελτιστοποίηση Συστημάτων"

Βάση των δύο παραπάνω σχέσεων μπορούμε να διαμορφώσουμε την εξίσωση (3.6) στην μορφή:

$$\omega_m = \frac{V}{K_f I_f} - \frac{R_a}{(K_f I_f)^2} T \quad (3.15)$$

Όταν ο κινητήρας λειτουργεί χωρίς φορτίο η παραπάνω σχέση γίνεται:

$$\omega_m(T = 0) = \frac{V}{K_f I_f} \quad (3.16)$$

Η γωνιακή ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα είναι αντιστρόφως ανάλογη με το ρεύμα διέγερσης βάσει της παραπάνω εξίσωσης.

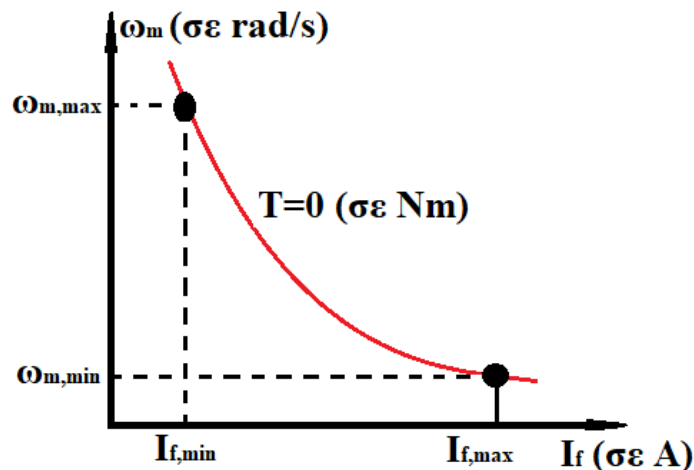
Για να περιοριστεί το εύρος ρύθμισης των στροφών σε ταχύτητα μεγαλύτερη της ονομαστικής και αυτό γιατί μόνο τη μείωση της μαγνητικής ροής μπορούμε να προκαλέσουμε σε ένα δεδομένο κινητήρα, κάνουμε έλεγχο στροφών με παρεμβολή εξωτερικής σε σειρά ωμικής αντίστασης στον κλάδο της διέγερσης. Για το ρεύμα τυμπάνου, η γωνιακή ταχύτητα περιστροφής είναι αντιστρόφως ανάλογη της μαγνητικής ροής, ενώ η παραγόμενη ροπή απευθείας ανάλογη. Ο έλεγχος με μεταβολή του ρεύματος διέγερσης προσφέρεται για έλεγχο σταθερής ισχύος στην περιοχή λειτουργίας άνω των ονομαστικών στροφών, αποφεύγοντας με αυτό τον τρόπο προβλήματα υπερφόρτισης του κινητήρα.

Για να έχουμε υπερβολικά υψηλές στροφές στον άξονα του δρομέα, το επιτυγχάνουμε αυτό με χαμηλές τιμές στο ρεύμα διέγερσης. Όταν για τυχαίο λόγο, παρουσιαστεί ασυνέχεια στον κλάδο διέγερσης, το ρεύμα διέγερσης θα μηδενιστεί και η μαγνητική ροή θα περιοριστεί στην ελάχιστη τιμή που επιβάλλεται από τον παραμένοντα μαγνητισμό. Βάσει του παραπάνω, έχουμε υπερβολική αύξηση των στροφών και αυτό εκφράζεται στον παρακάτω τύπο:

$$\omega_{m,rm} = \frac{V}{K_m \Phi_{rm}} \quad (3.17)$$

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

"Διαχείριση και Ενεργειακή Βελτιστοποίηση Συστημάτων"



Σχήμα 3.5. Μεταβολή ταχύτητας κενού φορτίου συναρτήσει του ρεύματος διέγερσης διακλάδωσης.

Οι κινητήρες συνεχούς ρεύματος ξένης διέγερσης διαθέτουν σύστημα προστασίας το οποίο μόλις αντιληφθεί ασυνέχεια στον κλάδο της διέγερσης να μπορεί να διακόψει αυτόματα την τάση τροφοδοσίας του κινητήρα, για να μην προκληθούν μόνιμες βλάβες στον κινητήρα, κυρίως λόγω των φυγοκεντρικών δυνάμεων που αναπτύσσονται από την υπερβολικά μεγάλη ταχύτητα. Για σταθερή τάση στο τύλιγμα τυμπάνου, η ταχύτητα περιστροφής κενού φορτίου μεταβάλλεται αντιστρόφως ανάλογα με το ρεύμα της διέγερσης διακλάδωσης και αυτό φαίνεται στην εξίσωση (3.16). Με τη μετατόπιση των χαρακτηριστικών προς τα επάνω και με την ταυτόχρονη όμως αύξηση της κλίσης τους, έχουμε σαν αποτέλεσμα η κλίση της χαρακτηριστικής $\omega_m=f(T)$ για σταθερή ωμική αντίσταση στον κλάδο του τυλίγματος τυμπάνου, να μεταβάλλεται αντιστρόφως με το ρεύμα διέγερσης, η οποία επιτυγχάνεται με την παρεμβολή πρόσθετης εξωτερικής ωμικής αντίστασης σε σειρά με το τύλιγμα της διέγερσης διακλάδωσης. Η ελάττωση του ρεύματος διέγερσης, η οποία επιτυγχάνεται με την παρεμβολή πρόσθετης εξωτερικής ωμικής αντίστασης σε σειρά με το τύλιγμα της διέγερσης διακλάδωσης, έχει σαν αποτέλεσμα τη μετατόπιση των χαρακτηριστικών προς τα επάνω με την ταυτόχρονη όμως αύξηση της κλίσης τους.

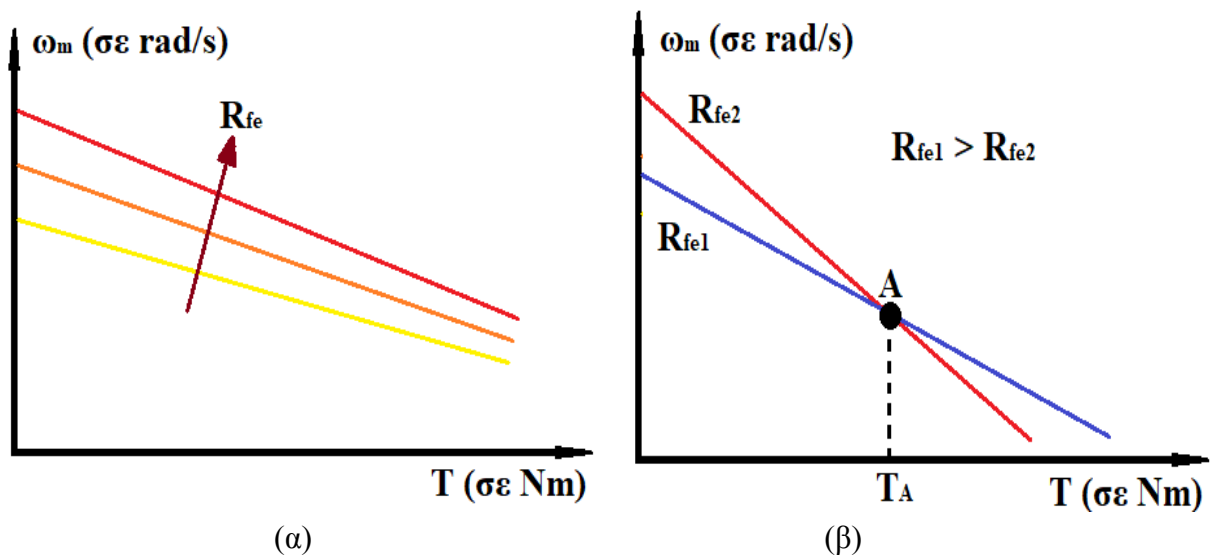
Η προσθήκη εξωτερικής αντίστασης στον κλάδο διέγερσης, προκαλεί μείωση της μαγνητικής ροής στο διάκενο της μηχανής και αυτό με τη σειρά του οδηγεί στη μείωση της επαγόμενης Α.Η.Ε.Δ. στο τύλιγμα. Η μείωση της επαγόμενης Α.Η.Ε.Δ., έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση του ρεύματος τυμπάνου σε ποσοστό μεγαλύτερο από την αντίστοιχη μείωση της μαγνητικής ροής, με αποτέλεσμα την αύξηση της εσωτερικής ροπής και των στροφών. Όταν η παρεμβολή με πρόσθεση

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

"Διαχείριση και Ενεργειακή Βελτιστοποίηση Συστημάτων"

με αντίσταση σε σειρά στον κλάδο διέγερσης, προκαλεί ως αποτέλεσμα τη μείωση της ταχύτητας περιστροφής του κινητήρα.

Στις χαμηλές ταχύτητες, η αύξηση στο ρεύμα τυμπάνου που προκαλείται από τη μείωση της επαγόμενης Α.Η.Ε.Δ. δεν είναι πια τόσο μεγάλη, ώστε να αντισταθμίζει τη μεταβολή της ροπής που οφείλεται στην εξασθένηση της μαγνητικής ροής.



Σχήμα 3.6. Επίδραση της μεταβολής του ρεύματος τυλίγματος διέγερσης στην χαρακτηριστική γωνιακής ταχύτητας -ροπής, (α) Σε υψηλές ταχύτητες λειτουργίας, (β) Σε χαμηλές ταχύτητες λειτουργίας.

- Έλεγχος με Παρεμβολή Ωμικής Αντίστασης στον κλάδο τυμπάνου:

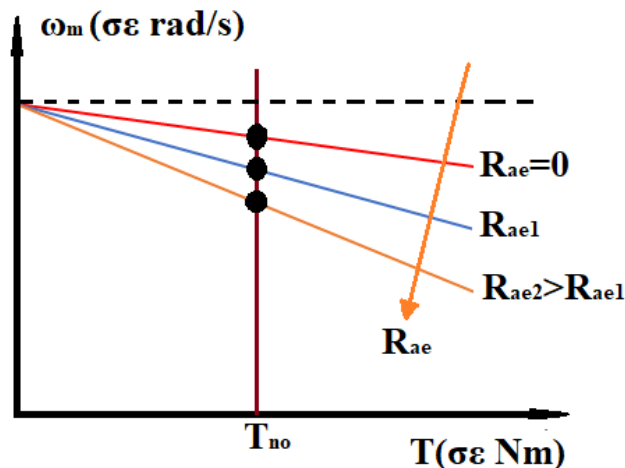
Σύμφωνα με την σχέση (3.8), η παρεμβολή ωμικής αντίστασης σε σειρά με το τύλιγμα τυμπάνου για σταθερή τάση τροφοδοσίας και σταθερό ρεύμα στον κλάδο διέγερσης αφήνει ανεπηρέαστα την ταχύτητα περιστροφής κενού φορτίου, αλλά αυξάνει σημαντικά την κλίση, με αποτέλεσμα την περαιτέρω μείωση των στροφών με την αύξηση του φορτίου.

Η ηλεκτρομαγνητική ισχύς μειώνεται ανάλογα με τη μείωση των στροφών, με αποτέλεσμα την ανάλογη μείωση του βαθμού απόδοσης, και αυτό επιτυγχάνεται όταν η λειτουργία γίνεται με σταθερή ροπή και κατά συνέπεια σταθερό ρεύμα. Όταν έχουμε μείωση του βαθμού απόδοσης οφείλεται στην ανάγκη αύξησης των απωλειών χαλκού στην πρόσθετη αντίσταση. Όλα αυτά γίνονται διότι η παρεμβολή ωμικής αντίστασης στο κλάδο του τυμπάνου, είναι

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

"Διαχείριση και Ενεργειακή Βελτιστοποίηση Συστημάτων"

αρκετά ενεργοβόρα και συνήθως εφαρμόζεται για μικρά χρονικά διαστήματα. Μια από αυτές της εφαρμογές είναι η διαδικασία εκκίνησης για τον περιορισμό του ρεύματος τυμπάνου.



Σχήμα 3.7. Επίδραση της παρεμβολής εξωτερικής ωμικής αντίστασης σε σειρά με το τύλιγμα τυμπάνου (Μαλατέστας, 2015).

3.2. Δυναμική Κατάσταση

Αν αναλύσουμε μια στοιχειώδη διπολική μηχανή Συνεχούς ρεύματος, παρατηρούμε πως δυο συγκεντρωμένα πανομοιότυπα τυλίγματα συνδεδεμένα σε σειρά αποτελούν το τύλιγμα της κύριας διέγερσης. Έχουμε το τύλιγμα του δρομέα που τροφοδοτείται μέσω σταθερών ψηκτρών και το οποίο είναι και τύλιγμα συλλέκτη. Η διεύθυνση του μαγνητικού πεδίου που παράγεται, είναι κάθετη στον άξονα φυσικής τοποθέτησης των ψηκτρών. Βάση των αγωγών του τυλίγματος συλλέκτη που περιστρέφονται μέσα στο μαγνητικό πεδίο του τυλίγματος διέγερσης, αναπτύσσονται στους αγωγούς τάσεις από αλληλεπαγωγή και αυτό μας κάνει τα τυλίγματα να μην είναι τελείως ισοδύναμα με τα σταθερά τυλίγματα του συλλέκτη.

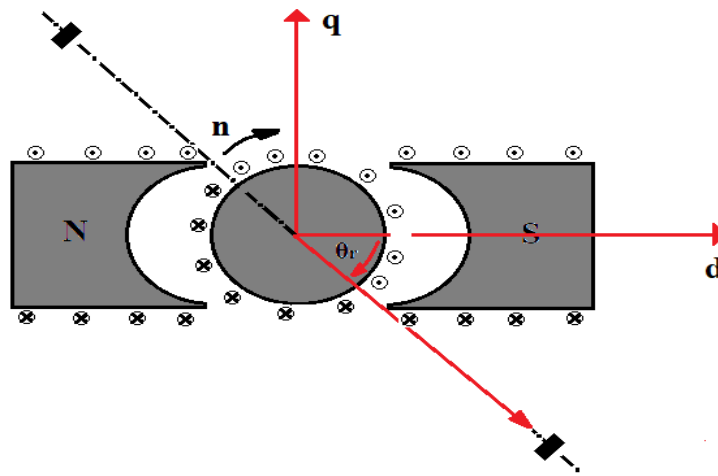
Βάση των παραπάνω μπορούμε να πούμε ότι το τύλιγμα του δρομέα μέσω του οποίου παρίσταται το τύλιγμα τυμπάνου, παρατηρούμε:

- Ότι και αν περιστρέφεται ο δρομέας, το ρεύμα, που διαρρέει το πηνίο, παράγει μαγνητικό πεδίο το οποίο παραμένει στάσιμο στο χώρο και

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

"Διαχείριση και Ενεργειακή Βελτιστοποίηση Συστημάτων"

- Ότι στο πηνίο επάγονται τάσεις ταχύτητας κατά την περιστροφή του δρομέα. Ένα πηνίο με αυτές τις ιδιότητες, ονομάζεται ψευδοσταθερό τυλίγμα.



Σχήμα 3.8. Στοιχειώδης διπολική μηχανή συνεχούς ρεύματος.

Στην γενική τους μορφή, οι εξισώσεις τάσεων – ρεύματος στα δύο τυλίγματα είναι:

$$V_f(t) = R_f i_f(t) + \frac{d\lambda_f(t)}{dt} \quad (3.18)$$

Και

$$V_a(t) = \pm R_a i_a(t) + \frac{d\lambda_a(t)}{dt} \quad (3.19)$$

Όπου:

- V_f = τάση του τυλίγματος της κύριας διέγερσης, (σε V)
- I_f = ρεύμα του τυλίγματος της κύριας διέγερσης, (σε A)
- R_f = αντίσταση του τυλίγματος της κύριας διέγερσης, (σε Ω)
- λ_f = πεπλεγμένη ροή του τυλίγματος της κύριας διέγερσης, (σε Wb)
- V_a = τάση του τυλίγματος τυμπάνου, (σε V)
- I_a = ρεύμα του τυλίγματος τυμπάνου, (σε A)
- R_a = αντίσταση του τυλίγματος τυμπάνου, (σε Ω)
- λ_a = πεπλεγμένη ροή του τυλίγματος τυμπάνου, (σε Wb)

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

"Διαχείριση και Ενεργειακή Βελτιστοποίηση Συστημάτων"

Με την υπόθεση ότι, η μηχανή λειτουργεί στο γραμμικό τμήμα της μαγνητικής χαρακτηριστικής, ισχύει:

$$\lambda_{f(t)} = L_f i_f(t) \pm L_{\alpha} i_{\alpha}(t) \quad (3.20)$$

Και

$$\lambda_{\alpha(t)} = L_{\alpha f} i_f(t) \pm L_{\alpha} i_{\alpha}(t) \quad (3.21)$$

Όπου:

L_f = αυτεπαγωγή του τυλίγματος διέγερσης, (σε H)

L_{α} = αυτεπαγωγή του τυλίγματος τυμπάνου, (σε H)

$L_{\alpha f}$ = αλληλεπαγωγή τυλιγμάτων τυμπάνου και διέγερσης, (σε H)

Λύνοντας τις εξισώσεις (3.18) και (3.19) και με την βοήθεια των εξισώσεων (3.20) και (3.21) έχουμε τις εξής εξισώσεις:

$$V_{f(t)} = R_f i_f(t) + L_f \frac{di_f(t)}{dt} \pm L_{\alpha f} \frac{di_{\alpha}(t)}{dt} + i_f(t) \frac{dL_f}{dt} \pm i_{\alpha}(t) \frac{dL_{\alpha f}}{dt} \quad (3.22)$$

και

$$V_{\alpha(t)} = \pm R_{\alpha} i_{\alpha}(t) + L_{\alpha f} \frac{di_f(t)}{dt} \pm L_{\alpha} \frac{di_{\alpha}(t)}{dt} + i_f(t) \frac{dL_{\alpha f}}{dt} \pm i_{\alpha}(t) \frac{dL_{\alpha}}{dt} \quad (3.23)$$

➤ Όπου υπάρχει διπλό πρόσημο στις εξισώσεις, ανάλογα με το αν έχουμε λειτουργία κινητήρα ή λειτουργία γεννήτριας αντίστοιχα έχουμε το πρόσημο + και -

➤ Για κυλινδρικό δρομέα έχουμε:

$$L_f = \text{σταθ.} \quad (3.24)$$

$$L_{\alpha f} = L_{f\alpha} = L_{m,\alpha f} \cos\theta_r \quad (3.25)$$

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

"Διαχείριση και Ενεργειακή Βελτιστοποίηση Συστημάτων"

και

$$L_\alpha = L_b = L_c \cos 2\theta_r \quad (3.26)$$

Οι όροι της μορφής:

$$\frac{dL}{dt} = \frac{dL}{d\theta_r} \frac{d\theta_r}{dt} \quad (3.27)$$

Βάση των παρακάτω, μπορούμε να πούμε ότι οι εξισώσεις της μηχανής συνεχούς ρεύματος, βγαίνουν μέσα από πιο γενικές σχέσεις:

- i. Στο τύλιγμα του στάτη δεν αναπτύσσονται τάσεις ταχύτητας από αλληλεπαγωγή και αυτό οφείλεται στο ότι δεν υπάρχει σχετική κίνηση μεταξύ της ροής που παράγει το ψευδοσταθερό τύλιγμα του δρομέα και των αγωγών του τυλίγματος του στάτη. Ενώ παρατηρούμε ότι μεταξύ της ροής που παράγει το τύλιγμα διέγερσης και των αγωγών του ψευδοσταθερού τυλίγματος του δρομέα, υπάρχει κίνηση.
- ii. Το τύλιγμα του στάτη, παρουσιάζει ομοιόμορφη μαγνητική αντίσταση από την περιφέρεια του διακένου, και αυτό οφείλεται στο ότι ο δρομέας είναι κυλινδρικός. Αυτό μας δίνει το εξής αποτέλεσμα:

$$\frac{dL_{ff}}{d\theta_r} = 0 \quad (3.28)$$

Βάση όλων των παραπάνω οι εξισώσεις των τάσεων παίρνουν την εξής μορφή:

$$V_{f(t)} = R_f i_f(t) + L_f \frac{di_f(t)}{dt} \pm L_{m,af} \cos \theta_r \frac{di_a(t)}{dt} \quad (3.29)$$

και

$$V_{a(t)} = \pm R_a i_a(t) + L_a \frac{di_a(t)}{dt} \pm L_{m,af} \cos \theta_r \frac{di_f(t)}{dt} \mp 2\omega_m(t) i_a(t) L_c \sin 2\theta_r - \omega_m(t) L_{m,af} i_f(t) \sin \theta_r \quad (3.30)$$

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

"Διαχείριση και Ενεργειακή Βελτιστοποίηση Συστημάτων"

Για να έχουμε σταθερή τοποθέτηση των ψηκτρών στην φυσική θέση με γωνία $\pi/2$, οι παραπάνω εξισώσεις γίνονται:

$$V_f(t) = R_f i_f(t) + L_f \frac{di_f(t)}{dt} \quad (3.31)$$

$$V_a(t) = \pm R_a i_a(t) + L_a \frac{di_a(t)}{dt} + \omega_m(t) L_{m,af} i_f(t) \quad (3.32)$$

Η επαγόμενη Α.Η.Ε.Δ. του τυλίγματος ισούται:

$$e_a(t) = K_m \varphi(t) \omega_m(t) = \omega_m(t) L_{m,af} i_f(t) \quad (3.33)$$

Βάση του νόμο του Νεύτωνα για την περιστροφική κίνηση, για την περίπτωση του κινητήρα και της γεννήτριας αντίστοιχα, η διαφορική εξίσωση του μηχανικού μέρους του συστήματος, παίρνει την εξής μορφή:

$$J \frac{d\omega_m(t)}{dt} + B \omega_m(t) = \tau(t) - \tau_L(t) \quad (3.34)$$

και

$$J \frac{d\omega_m(t)}{dt} + B \omega_m(t) = \tau_m(t) - \tau(t) \quad (3.35)$$

Όπου $\tau(t)$:

$$\tau(t) = K_m \varphi(t) i_a(t) = L_{m,af} i_f(t) i_a(t) \quad (3.36)$$

Όπου:

τ = εσωτερική ή ηλεκτρομαγνητική ροπή, (σε Nm)

τ_L = αποδιδόμενη μηχανική ροπή στο φορτίο του κινητήρα (σε Nm)

τ_m = αποδιδόμενη μηχανική ροπή στη γεννήτρια (σε Nm)

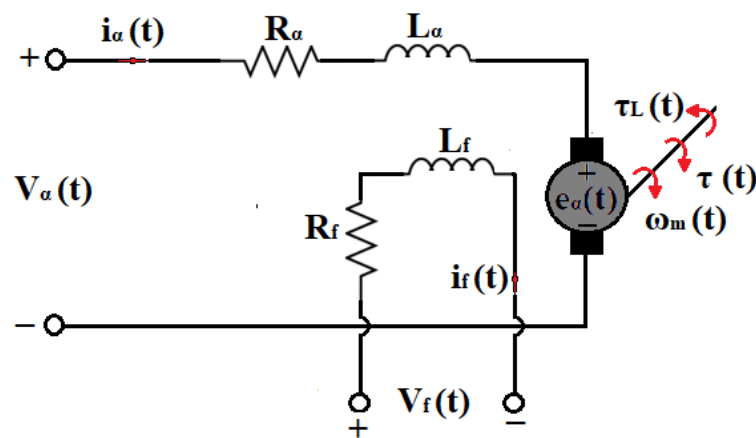
J = ροπή αδράνειας στρεφόμενων μαζών (σε Kgm^2)

B = σταθερά απόσβεσης (σε Nms) (Μαλατέστας, 2015).

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

"Διαχείριση και Ενεργειακή Βελτιστοποίηση Συστημάτων"

Βάση των παραπάνω δυναμικών γενικών εξισώσεων και του ισοδύναμου κυκλώματος κινητήρα συνεχούς ρεύματος που βλέπουμε παρακάτω, σχηματίζονται οι δυναμικές εξισώσεις του κινητήρα ξένης διέγερσης.



Σχήμα 3.9. Ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα συνεχούς ρεύματος ξένης διέγερσης.

Οι εξισώσεις για το ηλεκτρικό μέρος όπως και για το μηχανικό μέρος ((3.31), (3.32), (3.33), (3.34) και (3.36)), παραμένουν οι ίδιες όπως είναι οι γενικές, απλώς όπου υπάρχει διπλό πρόσημο, κρατάμε μόνο το +.

Οι τάσεις τροφοδοσίας των τυλιγμάτων διέγερσης και τυμπάνου, καθώς και η μηχανική ροπή του φορτίου, αποτελούν εισόδους του συστήματος. Μεταβλητές κατάστασης είναι τα ρεύματα των τυλιγμάτων, καθώς, αποτελούν τη παραγόμενη ηλεκτρική ροπή και τη γωνιακή ταχύτητα περιστροφής. Αν θέσουμε:

$$\frac{d}{dt} = D \tag{3.37}$$

Όπου:

D = διαφορικός τελεστής

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

"Διαχείριση και Ενεργειακή Βελτιστοποίηση Συστημάτων"

Βάση του διαφορικού τελεστή D , οι διαφορικές εξισώσεις ((3.31), (3.32) και (3.34)), γίνονται:

$$i_a(t) = \frac{(V_a(t) - L_{m,af} i_f(t) \omega_m(t)) / R_a}{1 + T_a D} \quad (3.38)$$

$$i_f(t) = \frac{V_f(t) / R_f}{1 + T_f D} \quad (3.39)$$

Και

$$\omega_m(t) = \frac{(\tau(t) - \tau_L(t)) / B}{1 + T_m D} \quad (3.40)$$

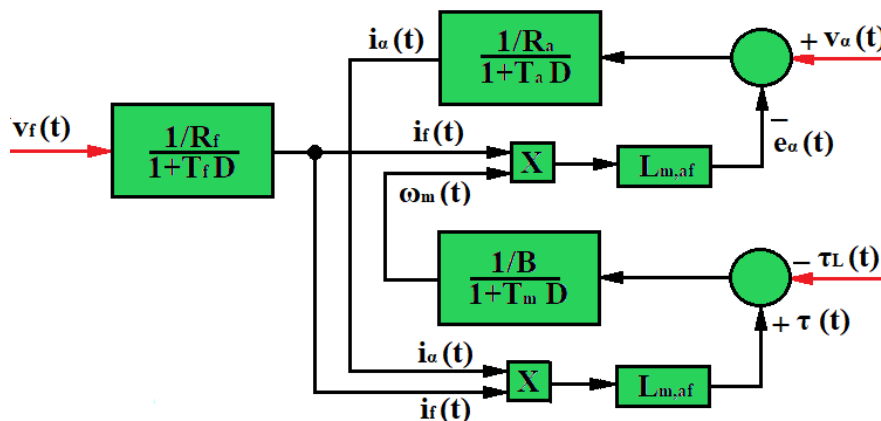
Όπου:

$$\text{Σταθερά χρόνου του τυλίγματος τυμπάνου: } T_a = \frac{L_a}{R_a} \quad (3.41)$$

$$\text{Σταθερά χρόνου του τυλίγματος διέγερσης: } T_f = \frac{L_f}{R_f} \quad (3.42)$$

$$\text{Σταθερά χρόνου του μηχανικού μέρους: } T_m = \frac{J}{B} \quad (3.43)$$

Με την βοήθεια των παραπάνω μπορούμε να απεικονίσουμε τη μορφή του διαγράμματος βαθμίδων του κινητήρα συνεχούς ρεύματος ξένης διέγερσης.



Σχήμα 3.10. Διάγραμμα Βαθμίδων κινητήρων συνεχούς ρεύματος ξένης διέγερσης Μαλατέστας, 2015).



ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

"Διαχείριση και Ενεργειακή Βελτιστοποίηση Συστημάτων"

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο

ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΚΙΝΗΤΗΡΑ ΜΕ MATLAB

4.1. Περιγραφή Μελέτης

Έχουμε έναν κινητήρα συνεχούς ρεύματος που παρουσιάζεται παραπάνω (σχήμα 3.9):

Τα στοιχεία του κινητήρα σε αρχικές συνθήκες είναι:

$$P = 5\text{Hp} = 5 \times 746 = 3730\text{W}, V_f = V_a = 240\text{V}, R_a = 0.6\Omega, R_f = 240\Omega, L_a = 0.05\text{H}, L_f = 120\text{H}, \\ L_{m,af} = 2\text{H}, J = 1.2 \text{ Kg}\cdot\text{m}^2, B = 0.35\text{Nms} \text{ και } n = 1200\text{rpm}$$

Αρχικά ο κινητήρας λειτουργεί στη μόνιμη κατάσταση, με ονομαστικό φορτίο $T_L = T_{on}$. Τη χρονική στιγμή, $t = 5.2\text{s}$, έχουμε βηματική βύθιση της τάσης $\Delta V = (20, 40, 60, 80, 100)\text{V}$ και στη συνέχεια επαναφορά στην ονομαστική της τιμή, τη χρονική στιγμή $t = 5.3\text{s}$.

Με εκκίνηση $t=0$ και διαφορικές εξισώσεις:

$$v_a = R_a i_a + L_a \frac{di_a}{dt} + \omega_m L_{m,af} I_f,$$

$$J \frac{d\omega_m}{dt} + B\omega_m = \tau,$$

$$\tau = L_{m,af} I_f i_a$$

Οι αρχικές συνθήκες είναι: $i_a(0) = \omega_m(0) = 0$

Οι διαφορικές εξισώσεις του μοντέλου σε δυναμική κατάσταση είναι οι εξής:

$$e_a(t): \text{Επαγόμενη Α.Η.Ε.Δ.: } e_a(t) = \omega_m(t) L_{m,af} i_f(t)$$

$$\tau(t): \text{Εσωτερική ή Ηλεκτρομαγνητική ροπή: } \tau(t) = L_{m,af} i_f(t) i_a(t)$$

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

"Διαχείριση και Ενεργειακή Βελτιστοποίηση Συστημάτων"

D: Διαφορικός τελεστής: $D = \frac{d}{dt}$

$i_a(t)$: Ρεύμα Τυμπάνου: $i_a(t) = \frac{(V_{a(t)} - L_{m,af} i_f(t) \omega_m(t)) / R_a}{1 + T_a D}$

$i_f(t)$: Ρεύμα Διέγερσης: $i_f(t) = \frac{V_f(t) / R_f}{1 + T_f D}$

$\omega_m(t)$: Γωνιακή Ταχύτητα Περιστροφής του Κινητήρα: $\omega_m(t) = \frac{(\tau(t) - \tau_L(t)) / B}{1 + T_m D}$

T_a : Σταθερά χρόνου του τυλίγματος του τυμπάνου: $T_a = \frac{L_a}{R_a}$

T_f : Σταθερά χρόνου του τυλίγματος διέγερσης: $T_f = \frac{L_f}{R_f}$

T_m : Σταθερά χρόνου του μηχανικού μέρους: $T_m = \frac{J}{B}$

Βάση των παραπάνω διαφορικών εξισώσεων και του διαγράμματος βαθμίδων που βλέπουμε παραπάνω (σχήμα 3.10), υλοποιήσαμε την μοντελοποίηση - προσομοίωση στην πλατφόρμα του λογισμικού Matlab/Simulink R2018b.

4.2. Μοντελοποίηση Κινητήρων Συνεχούς Ρεύματος Ξένης Διέγερσης

Η προσομοίωση του κινητήρα συνεχούς ρεύματος ξένης διέγερσης έγινε στην πλατφόρμα του Matlab / Simulink R2018b

4.2.1. Πρώτο μέρος Μοντελοποίησης του Κινητήρα στο Matlab

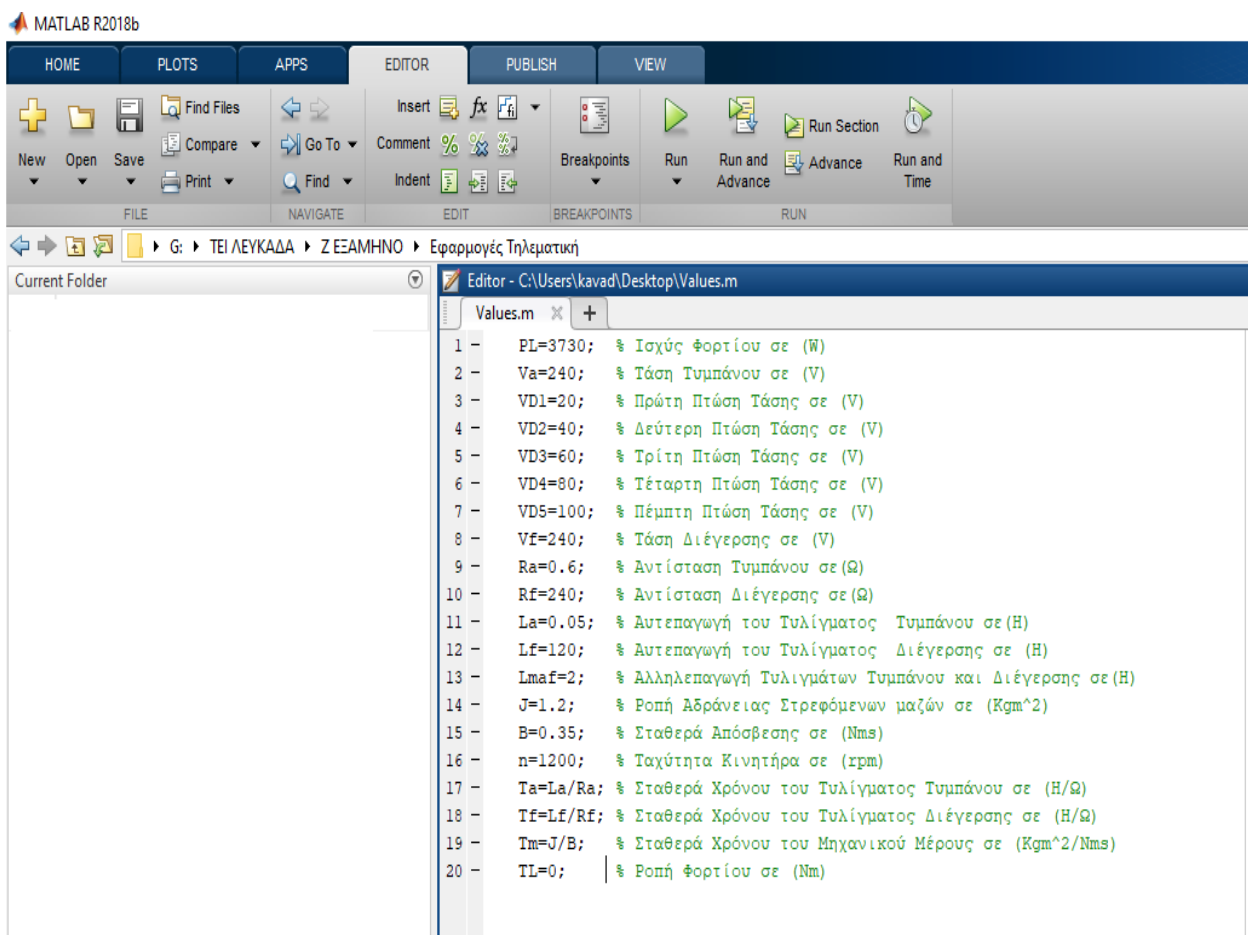
Στο πρώτο μέρος της μοντελοποίησης του κινητήρα, δημιουργήσαμε ένα αρχείο Matlab με το όνομα Values και αποθηκεύσαμε τις τιμές των μεταβλητών.

Επιλέξαμε το προγραμματιστικό/ υπολογιστικό εργαλείο της Matlab για την προσομοίωση του κινητήρα γιατί αποτελεί ένα λογισμικό περιβάλλον προγραμματισμού αριθμητικών μεθόδων, προσομοίωσης και γραφικής αναπαράστασης. Είναι ένα ολοκληρωμένο σύστημα ανάλυσης

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

"Διαχείριση και Ενεργειακή Βελτιστοποίηση Συστημάτων"

δεδομένων και ανάπτυξης επιστημονικών εφαρμογών με πολλές δυνατότητες και υψηλές υπολογιστικές επιδόσεις. Πέρα από τις πολλαπλές δυνατότητες υπολογισμών σε διάφορα επιστημονικά πεδία, το Matlab παρέχει μεγάλη πληθώρα εντολών και συναρτήσεων, που είναι χρήσιμες για την υλοποίηση ενός κινητήρα (Παπαοδυσσεύς, Καλοβρέκτης, & Μυλωνάς, (2017).



Σχήμα 4.1. Απεικόνιση αρχείο τιμών στο Matlab.

4.2.2. Δεύτερο μέρος Μοντελοποίησης του Κινητήρα στο Simulink

Στο δεύτερο Μέρος της μοντελοποίησης του κινητήρα επιλέξαμε το Simulink που είναι ένα εργαλείο μοντελοποίησης, ανάλυσης και προσομοίωσης συστημάτων το οποίο λειτουργεί με πυρήνα το περιβάλλον του λογισμικού Matlab. Με το περιβάλλον Simulink μπορούμε να προσομοιώσουμε γραμμικά και μη γραμμικά συστήματα σε συνεχή ή διακριτό χρόνο ή συνδυασμό των δύο (Παπαοδυσσεύς, Καλοβρέκτης, & Μυλωνάς, (2017).

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

"Διαχείριση και Ενεργειακή Βελτιστοποίηση Συστημάτων"

Χρησιμοποιεί ένα γραφικό περιβάλλον διεπαφής το οποίο αποτελεί ένα χώρο εργασίας με μενού επιλογών και εργαλεία προγραμματισμού καθώς και μια βιβλιοθήκη από διάφορα δομικά στοιχεία που χρησιμοποιήσαμε για τη δομή μοντέλου μας. Η μέθοδος που χρησιμοποιεί το περιβάλλον του Simulink για τη δημιουργία μοντέλων είναι διαγραμματική. Κάθε διάγραμμα μοντέλου το περιβάλλον Simulink κατέχει μια ιεραρχία στο σύστημα και υπάρχει η δυνατότητα δημιουργίας διαγραμμάτων χαμηλότερης ιεραρχίας που λειτουργούν ως υποσυστήματα σε ένα μεγαλύτερο σύστημα (Παπαοδυσσεύς, Καλοβρέκτης, & Μυλωνάς, (2017).

Για να ανοίξουμε το περιβάλλον Simulink πληκτρολογούμε στην γραμμή εντολών του Matlab την



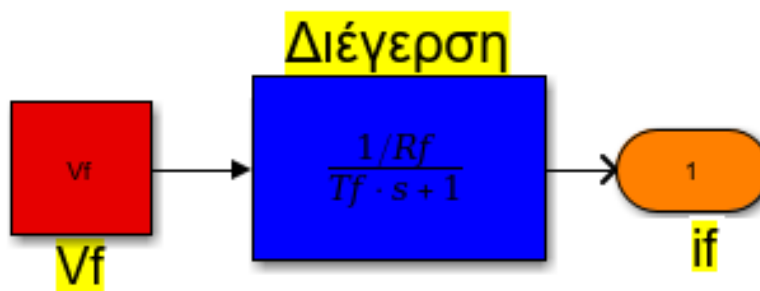
εντολή 'simulink' ή πατάμε το πλήκτρο: , στην μπάρα με τα εργαλεία του Matlab. Με αυτή την ενέργεια ανοίγουμε τον εξερευνητή της βιβλιοθήκης του Simulink μέσα από τον οποίο μπορούσαμε να περιηγηθούμε στα διάφορα γραφικά στοιχεία προγραμματισμού που χρειαστήκαμε. Η βιβλιοθήκη του Simulink χωρίζεται σε διάφορα σύνολα γραφικών μπλοκ για την εφαρμογή που θέλουμε να μοντελοποιήσουμε (Παπαοδυσσεύς, Καλοβρέκτης, & Μυλωνάς, (2017).



Κάνοντας κλικ στο εικονίδιο του Simulink Library Browser: , μπορούμε να ανοίξουμε ένα νέο μοντέλο. Με αυτόν τον τρόπο ανοίγουμε ένα νέο παράθυρο για τη δημιουργία του νέου μοντέλου. Σε αυτό το παράθυρο υπάρχει ένας χώρος εργασίας μέσα στον οποίον τοποθετήσαμε τα γραφικά μπλοκ για την δημιουργία του διαγράμματος (Palm & William, 2019).

Στη συνέχεια βάση των διαφορικών εξισώσεων, κατασκευάσαμε το διάγραμμα βαθμίδων του κινητήρα συνεχούς ρεύματος ξένης διέγερσης.

- Κατασκευή του μπλοκ διαγράμματος του ρεύματος διέγερσης:

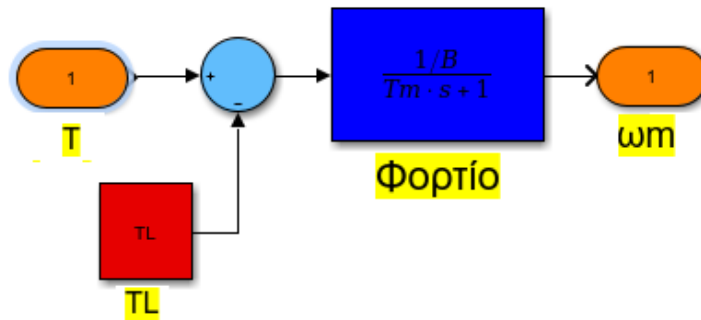


Σχήμα 4.2. Απεικόνιση μπλοκ διαγράμματος του ρεύματος διέγερσης στο Simulink.

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

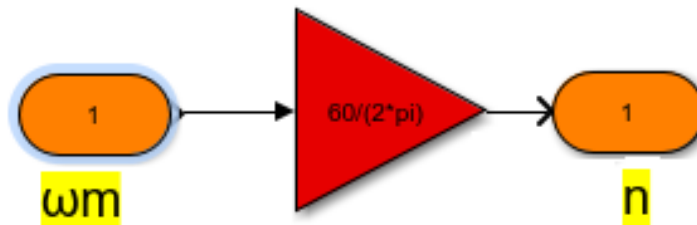
"Διαχείριση και Ενεργειακή Βελτιστοποίηση Συστημάτων"

- Κατασκευή του μπλοκ διαγράμματος της γωνιακής ταχύτητας περιστροφής του κινητήρα



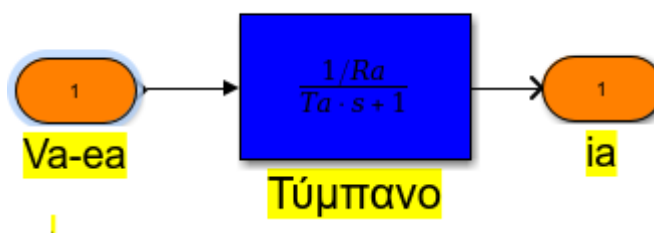
Σχήμα 4.3. Απεικόνιση μπλοκ διαγράμματος της γωνιακής ταχύτητας περιστροφής του κινητήρα στο Simulink.

- Μετατροπή της γωνιακής ταχύτητας περιστροφής του κινητήρα, σε ταχύτητα σε rpm στο Simulink.



Σχήμα 4.4. Απεικόνιση μπλοκ διαγράμματος της ταχύτητας περιστροφής του κινητήρα στο Simulink.

- Κατασκευή του μπλοκ διαγράμματος του ρεύματος τυμπάνου του κινητήρα

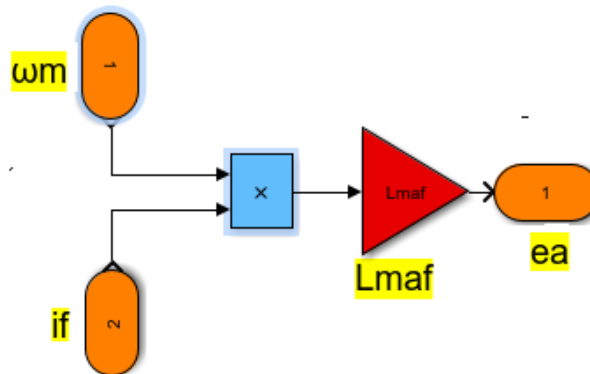


Σχήμα 4.5. Απεικόνιση μπλοκ διαγράμματος του ρεύματος τυμπάνου του κινητήρα στο Simulink.

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

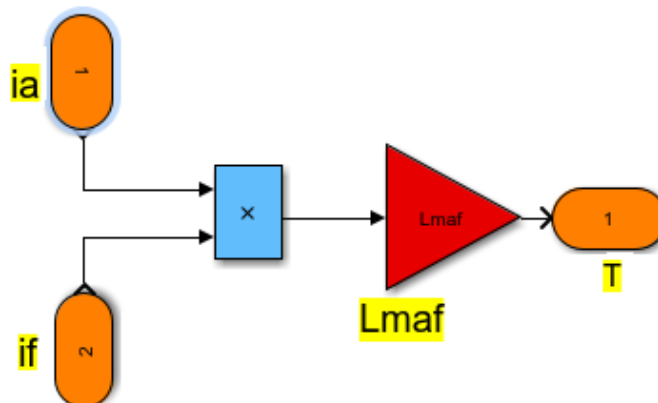
"Διαχείριση και Ενεργειακή Βελτιστοποίηση Συστημάτων"

- Κατασκευή του μπλοκ διαγράμματος της Α.Η.Ε.Δ. του κινητήρα



Σχήμα 4.6. Απεικόνιση μπλοκ διαγράμματος της Α.Η.Ε.Δ. του κινητήρα στο Simulink.

- Κατασκευή του μπλοκ διαγράμματος της εσωτερικής ροπής του κινητήρα

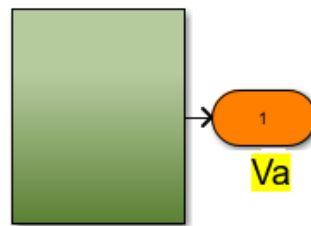


Σχήμα 4.7. Απεικόνιση μπλοκ διαγράμματος της εσωτερικής ροπής του κινητήρα στο Simulink.

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

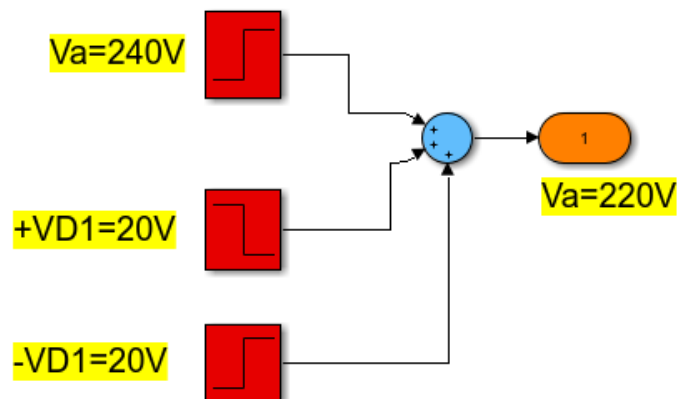
"Διαχείριση και Ενεργειακή Βελτιστοποίηση Συστημάτων"

- Κατασκευή του μπλοκ διαγράμματος της τάσης τυμπάνου του κινητήρα



Σχήμα 4.7. Απεικόνιση μπλοκ διαγράμματος της τάσης τυμπάνου του κινητήρα στο Simulink.

- Κατασκευή του μπλοκ διαγράμματος της βηματικής βύθισης της τάσης του κινητήρα

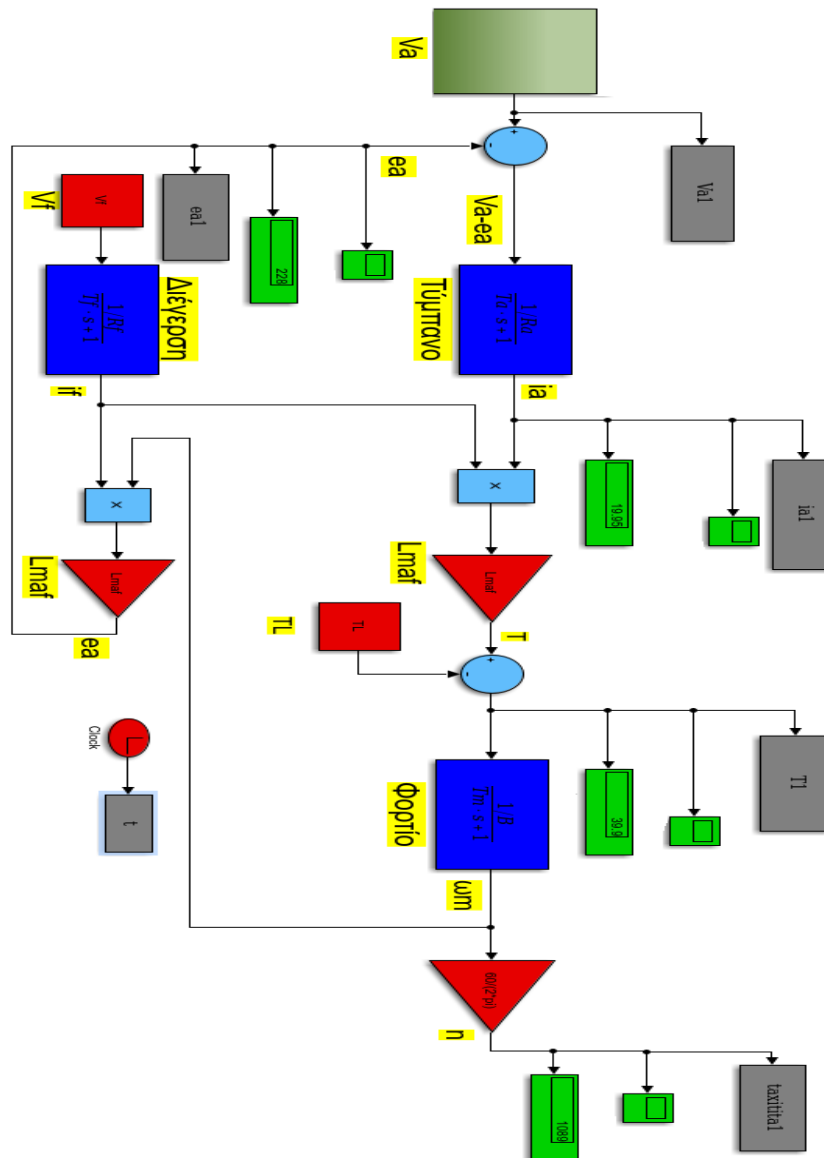


Σχήμα 4.8. Απεικόνιση μπλοκ διαγράμματος της βηματικής βύθισης της τάσης του κινητήρα στο Simulink.

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

"Διαχείριση και Ενεργειακή Βελτιστοποίηση Συστημάτων"

- Κατασκευή του διαγράμματος βαθμίδων του κινητήρα στο Simulink, συνδέοντας τις παραπάνω κατασκευές.



Σχήμα 4.8. Απεικόνιση του διαγράμματος βαθμίδων του κινητήρα στο Simulink.

Στο τέλος αυτού του βήματος δημιουργήσαμε άλλες 4 φορές τα διαγράμματα βαθμίδων του κινητήρα για τις βηματικές μεταβολές της τάσης ΔV (40,60,80,100)V.

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

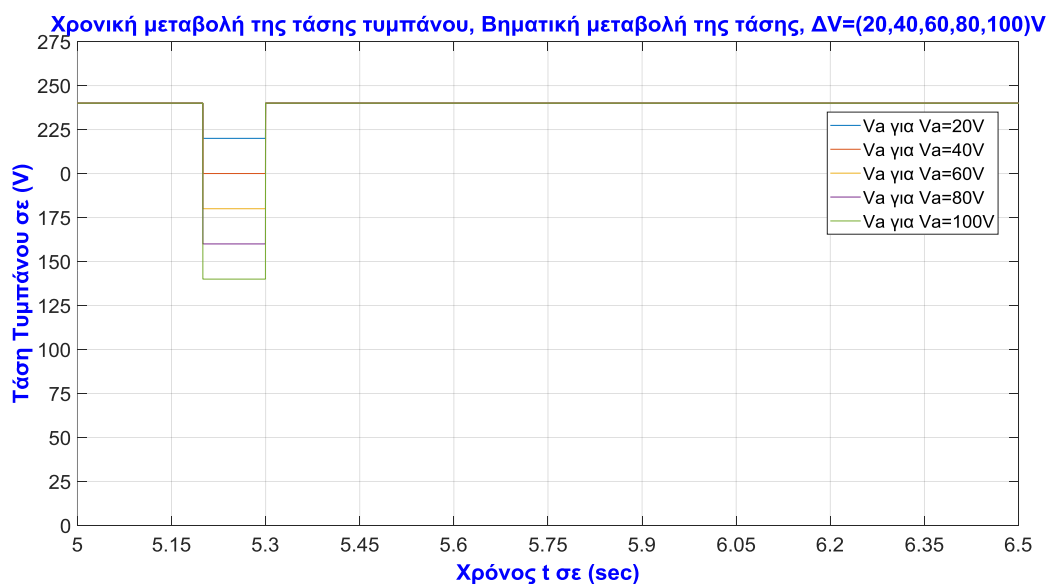
"Διαχείριση και Ενεργειακή Βελτιστοποίηση Συστημάτων"

4.2.3. Τρίτο μέρος Μοντελοποίησης του Κινητήρα στο Matlab

Στο τρίτο μέρος της μοντελοποίησης του κινητήρα κατασκευάσαμε τις χρονικές μεταβολές των διαφόρων μεγεθών του κινητήρα:

- Για την κατασκευή της χρονικής μεταβολής της τάσης τυμπάνου, βάση της μεταβολής της τάσης $\Delta V=(20,40,60,80,100)V$, πληκτρολογούμε στο Matlab την εντολή:

```
>> plot(t, Va1,t,Va2,t,Va3,t,Va4,t,Va5)
>> axis([5 6.5 0 275]);
>> Vaaxes=axis;
>> grid on
>>title('Χρονική μεταβολή της τάσης τυμπάνου, Βηματική μεταβολή της τάσης,
ΔV=(20,40,60,80,100)V','color','b','Fontweight','Bold')
>> set(gca,'FontSize',20)
>> xlabel('Χρόνος t σε (sec)','color','b','Fontweight','Bold')
>> ylabel('Τάση Τυμπάνου σε (V)','color','b','Fontweight','Bold')
>>legend ('Va για Va=20V','Va για Va=40V','Va για Va=60V','Va για Va=80V','Va για
Va=100V')
```



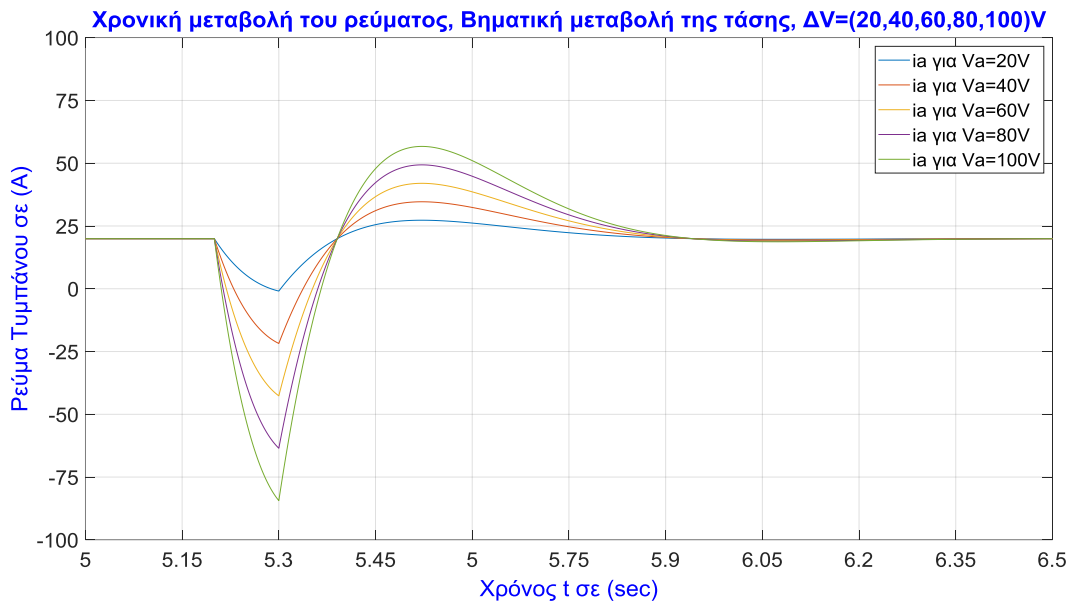
Σχήμα 4.9. Η χρονική μεταβολή της τάσης του κινητήρα, Βηματική μεταβολή της τάσης, $\Delta V = (20,40, 60, 80,100) V$.

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

"Διαχείριση και Ενεργειακή Βελτιστοποίηση Συστημάτων"

- Για την κατασκευή των χρονικών μεταβολών του ρεύματος τυμπάνου, βάση της μεταβολής της τάσης $\Delta V = (20, 40, 60, 80, 100)V$, πληκτρολογούμε στο Matlab τις εντολές:

```
>> plot(t, ia1, t, ia2, t, ia3, t, ia4, t, ia5)
>> axis([5 6.5 -100 100]);
>> axes=axis;
>> grid on
>> title('Χρονική μεταβολή του ρεύματος, Βηματική μεταβολή της τάσης,
ΔV=(20,40,60,80,100)V', 'color', 'b', 'Fontweight', 'Bold')
>> set(gca, 'FontSize', 20)
>> xlabel('Χρόνος t σε (sec)', 'color', 'b', 'Fontweight', 'Bold')
>> ylabel('Ρεύμα Τυμπάνου σε (A)', 'color', 'b', 'Fontweight', 'Bold')
>> legend('ia για Va=20V', 'ia για Va=40V', 'ia για Va=60V', 'ia για Va=80V', 'ia για Va=100V')
```



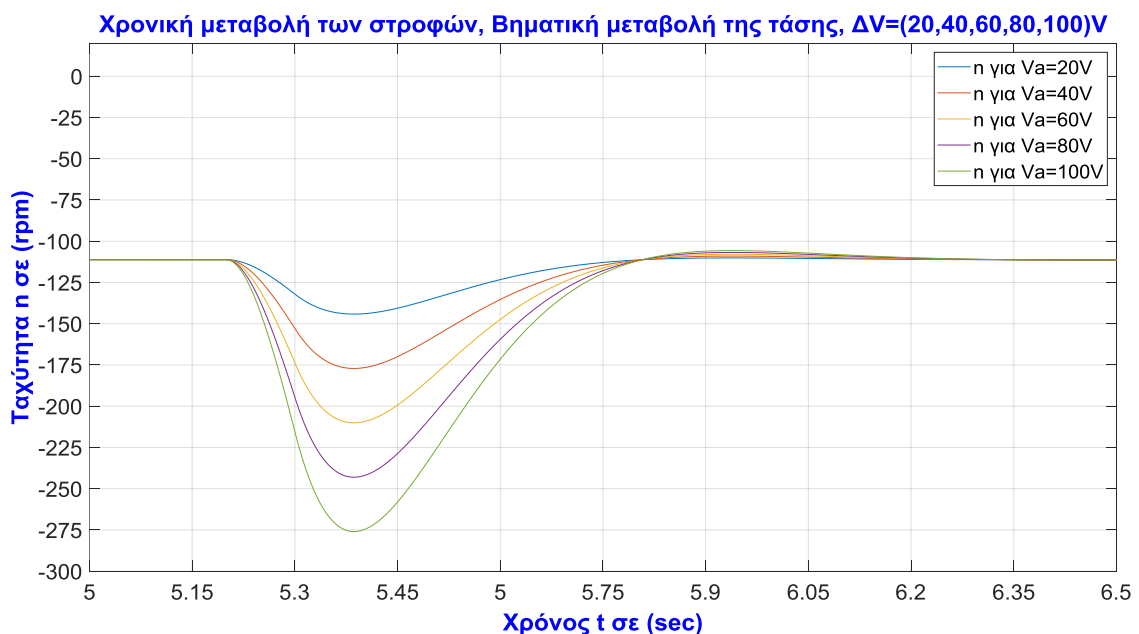
Σχήμα 4.10. Χρονική μεταβολή του ρεύματος, Βηματική μεταβολή της τάσης, $\Delta V = (20, 40, 60, 80, 100) V$

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

"Διαχείριση και Ενεργειακή Βελτιστοποίηση Συστημάτων"

- Για την κατασκευή των χρονικών μεταβολών των στροφών, αφαιρώντας την ταχύτητα ισορροπίας, βάση της μεταβολής της τάσης $\Delta V=(20,40,60,80,100)V$, πληκτρολογούμε στο Matlab την εντολή:

```
>> non=1200;
>> plot(t,(taxitita1-non),t,(taxitita2-non),t,(taxitita3-non),t,(taxitita4-non),t,(taxitita5- non))
>> axis([5 6.5 -300 20]);
>> naxes=axis;
>> grid on
>>title('Χρονική μεταβολή των στροφών, Βηματική μεταβολή της τάσης,
ΔV=(20,40,60,80,100)V','color','b','Fontweight','Bold')
>> set(gca,'FontSize',20)
>> xlabel ('Χρόνος t σε (sec)','color','b','Fontweight','Bold')
>> ylabel ('Ταχύτητα n σε (rpm)','color','b','Fontweight','Bold')
>> legend ('n για Va=20V','n για Va=40V','n για Va=60V','n για Va=80V','n για Va=100V')
```



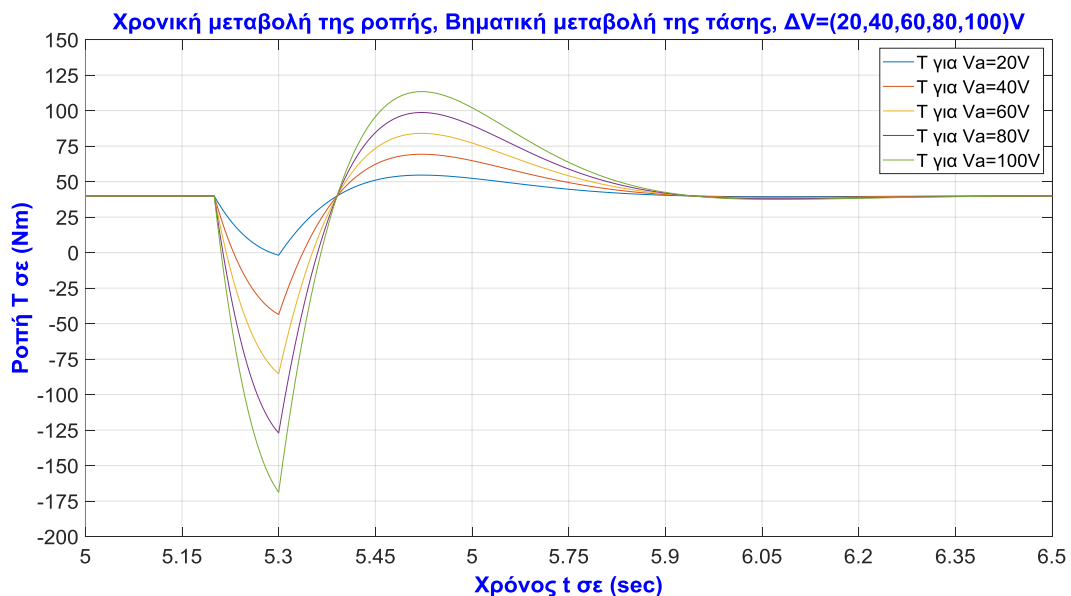
Σχήμα 4.11. Χρονική μεταβολή των στροφών Βηματική μεταβολή της τάσης, $\Delta V = (20,40,60, 80,100) V$.

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

"Διαχείριση και Ενεργειακή Βελτιστοποίηση Συστημάτων"

- Για την κατασκευή της χρονικής μεταβολής της ροπής, βάση της μεταβολής της τάσης $\Delta V=(20,40,60,80,100)V$, πληκτρολογούμε στο Matlab την εντολή:

```
>> plot(t,T1,t,T2,t,T3,t,T4,t,T5)
>> axis([5 6.5 -200 150]);
>> Txaxes=axis;
>> grid on
>> title('Χρονική μεταβολή της ροπής, Βηματική μεταβολή της τάσης,
ΔV=(20,40,60,80,100)V','color','b','Fontweight','Bold')
>> set(gca,'FontSize',20)
>> xlabel('Χρόνος t σε (sec)','color','b','Fontweight','Bold')
>> ylabel('Ροπή T σε (Nm)','color','b','Fontweight','Bold')
>> legend('T για Va=20V','T για Va=40V','T για Va=60V','T για Va=80V','T για Va=100V')
```



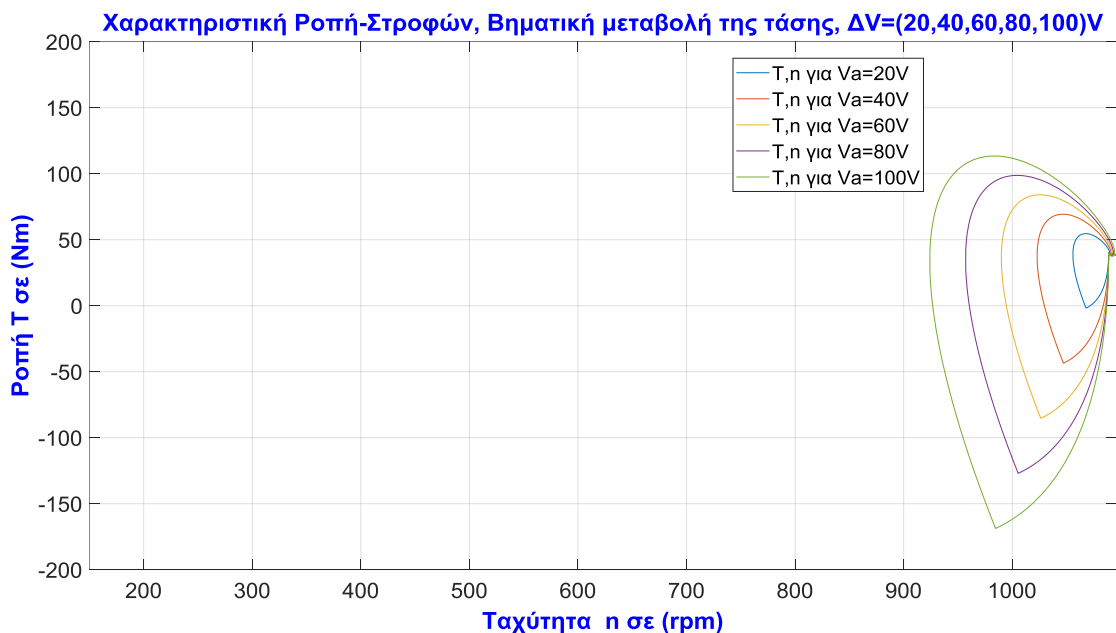
Σχήμα 4.12. Χρονική μεταβολή της ροπής. Βηματική μεταβολή της τάσης, $\Delta V = (20,40,60,80,100)$ V

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

"Διαχείριση και Ενεργειακή Βελτιστοποίηση Συστημάτων"

- Για την κατασκευή της χαρακτηριστικής ροπής- στροφών, βάση της μεταβολής της τάσης $\Delta V=(20,40,60,80,100)V$, πληκτρολογούμε στο Matlab την εντολή:

```
>> plot(taxitita1,T1,taxitita2,T2,taxitita3,T3,taxitita4,T4,taxitita5,T5)
>> axis([150 1096 -200 200]);
>> T_nxaxes=axis;
>> grid on
>> title('Χαρακτηριστική Ροπή-Στροφών, Βηματική μεταβολή της τάσης,
ΔV=(20,40,60,80,100)V','color','b','Fontweight','Bold')
>> set(gca,'FontSize',20)
>> xlabel('Ταχύτητα n σε (rpm)','color','b','Fontweight','Bold')
>> ylabel('Ροπή T σε (Nm)','color','b','Fontweight','Bold')
>> legend('T,n για Va=20V','T,n για Va=40V','T,n για Va=60V','T,n για Va=80V','T,n για
Va=100V')
```



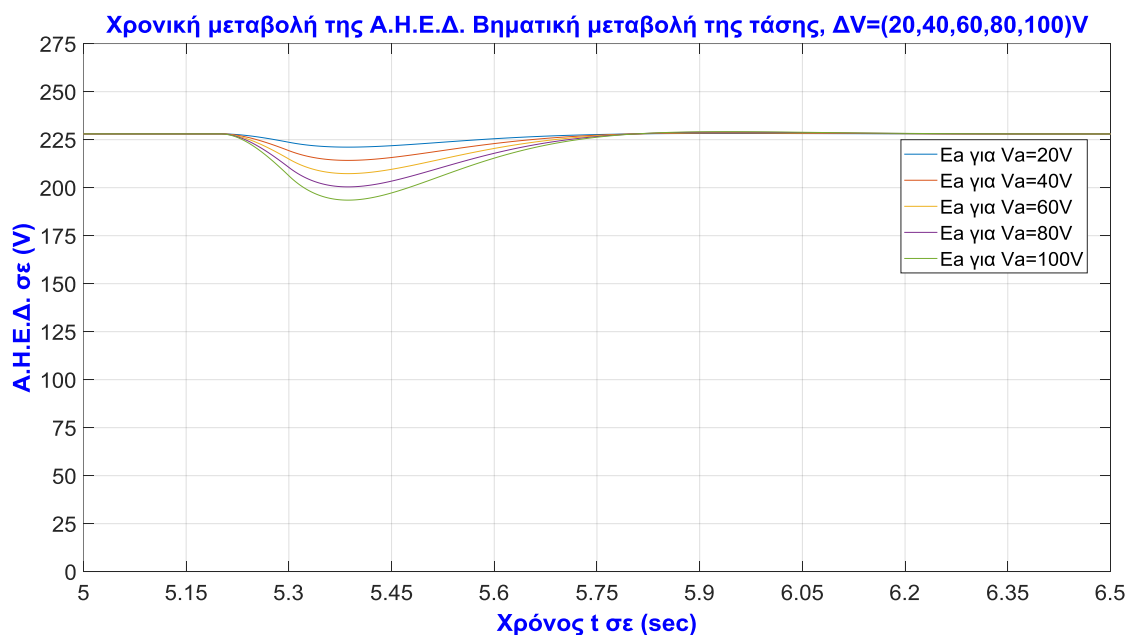
Σχήμα 4.13. Χαρακτηριστική ροπής - στροφών. Βηματική μεταβολή της τάσης, $\Delta V = (20,40,60,80,100) V$.

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

"Διαχείριση και Ενεργειακή Βελτιστοποίηση Συστημάτων"

- Για την κατασκευή της χρονικής μεταβολής της Α.Η.Ε.Δ., βάση της μεταβολής της τάσης $\Delta V=(20,40,60,80,100)V$, πληκτρολογούμε στο Matlab την εντολή:

```
>> plot(t,ea1,t,ea2,t,ea3,t,ea4,t,ea5)
>> axis([5 6.5 0 275]);
>> eaaxes=axis;
>> grid on
>> title('Χρονική μεταβολή της Α.Η.Ε.Δ. Βηματική μεταβολή της τάσης,
ΔV=(20,40,60,80,100)V','color','b','Fontweight','Bold')
>> set(gca,'FontSize',20)
>> xlabel('Χρόνος t σε (sec)','color','b','Fontweight','Bold')
>> ylabel('Α.Η.Ε.Δ. σε (V)','color','b','Fontweight','Bold')
>> legend('Ea για Va=20V','Ea για Va=40V','Ea για Va=60V','Ea για Va=80V','Ea για Va=100V')
(Χατζίκος, 2016).
```



Σχήμα 4.14. Χρονική μεταβολή της Α.Η.Ε.Δ. Βηματική μεταβολή της τάσης, $\Delta V = (20, 40, 60, 80, 100)V$.

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

"Διαχείριση και Ενεργειακή Βελτιστοποίηση Συστημάτων"

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

5.1. Επιμέρους Συμπεράσματα

- Στη παρούσα διπλωματική εργασία μελετήσαμε τη συμπεριφορά κινητήρα συνεχούς ρεύματος ξένης διέγερσης, σε μεταβολές της τάσης στο τυλίγμα τυμπάνου, που έχει ως αποτέλεσμα την μεταβολή σχεδόν όλων των ηλεκτρικών μεγεθών του κινητήρα.
- Μελετώντας των κινητήρα, μπορούμε να αναλύσουμε τις χρονικές μεταβολές των διαφόρων μεγεθών του κινητήρα, που παρουσιάζονται παρακάτω:
 - Χρονική μεταβολή του ρεύματος:
 - ✓ Το ρεύμα τυμπάνου είναι ανάλογο της τάσης τυμπάνου.
 - ✓ Όσο μικρότερη είναι πτώση του ρεύματος, τόσο μικρότερη είναι και η αύξηση του πριν την ισορροπία.
 - ✓ Το ρεύμα παίρνει και αρνητικές τιμές.
 - Χρονική μεταβολή των στροφών:
 - ✓ Η ταχύτητα είναι ανάλογη της τάσης τυμπάνου.
 - ✓ Η ταχύτητα ισορροπίας είναι μικρότερη από την ονομαστική.
 - ✓ Το ρεύμα παίρνει και αρνητικές τιμές.
 - Χρονική μεταβολή της ροπής:
 - ✓ Η παραγόμενη ηλεκτρική ροπή είναι ανάλογη της τάσης τυμπάνου.
 - ✓ Όσο μικρότερη είναι πτώση της παραγόμενης ηλεκτρικής ροπής, τόσο μικρότερη είναι και η αύξηση της πριν την ισορροπία.
 - ✓ Η παραγόμενη ηλεκτρική ροπή παίρνει και αρνητικές τιμές.
 - Χρονική μεταβολή της Α.Η.Ε.Δ.:
 - ✓ Η Α.Η.Ε.Δ. είναι ανάλογη της τάσης τυμπάνου.
 - ✓ Η Α.Η.Ε.Δ τη χρονική περίοδο της βύθισης της τάσης είναι μεγαλύτερη της τάσης του τυλίγματος τυμπάνου.

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

"Διαχείριση και Ενεργειακή Βελτιστοποίηση Συστημάτων"

- Χαρακτηριστική ροπής – στροφών:
 - ✓ Στη χρονική περίοδο της βύθισης της τάσης, η ταχύτητα περιστροφής αρχίζει να μειώνεται μέχρι ένα σημείο και μετά αρχίζει να αυξάνεται και τέλος επανέρχεται στην τιμή ισορροπίας.
 - ✓ Η μείωση της ταχύτητας δεν είναι μεγάλη, ενώ η ροπή έχει μεγάλη μείωση και παίρνει αρνητικές τιμές, όπως είδαμε και παραπάνω στη βηματική μεταβολή της ροπής.
 - ✓ Όσο πιο μεγάλη είναι η βύθισή της τάσης, τόσο μεγαλύτερες είναι οι μεταβολές.

5.2. Γενικά Συμπεράσματα

- Μετά την ολοκλήρωση της διπλωματικής εργασίας μπορούμε με βεβαιότητα να πούμε ότι στη χρονική περίοδο που έχουμε την βύθιση της τάσης:
 - Το ρεύμα τυμπάνου και η παραγόμενη ηλεκτρική ροπή, μειώνονται και παίρνουν και αρνητικές τιμές.
 - Η τάση τυλίγματος του τυμπάνου παίρνει μικρότερες τιμές από την Α.Η.Ε.Δ, $V_a < E_a$.
 - Από τις δύο παραπάνω παρατηρήσεις, συμπεραίνουμε ότι ο κινητήρας αντί να καταναλώνει ενέργεια, παράγει σε βάρος της αποθηκευμένης μηχανικής ενέργειας και την επιστρέφει στο δίκτυο.
 - Άρα σταματάει να δουλεύει σαν κινητήρας και λειτουργεί σαν γεννήτρια ή πέδη.
- Μετά την χρονική περίοδο της βύθισης της τάσης, η παραγόμενη ηλεκτρική ροπή και το ρεύμα, επιστρέφουν στις θετικές τιμές και ο κινητήρας επιστρέφει σε λειτουργία κινητήρα.
- Οι τιμές των μεγεθών του κινητήρα στην κατάσταση ισορροπίας είναι:
 - $I_a = 19.95A$, $n = 1089rpm$, $T = 39.90Nm$, $V_a = 240V$, $E_a = 228V$.
- Οι μικρότερες τιμές που πήραν τα μεγέθη του κινητήρα στην περίοδο της βύθισης της τάσης είναι:
 - $I_a = -84.38A$, $n = 924rpm$, $T = -168.8Nm$, $V_a = 140V$, $E_a = 193.5V$.



ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

"Διαχείριση και Ενεργειακή Βελτιστοποίηση Συστημάτων"

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ

Βασιλακόπουλου, Σ., (2006), *Ηλεκτρικές Μηχανές*, Εκδόσεις Ιδρύματος Ευγενίδου, Αθήνα.

Beucher, O. & Weeks, M. (2006), *Introduction to Matlab & Simulink. A project Approach*, Edition^{3th}, Infiniti Science Prees LLC, New Delhi.

Γαντζούδης, Σ., Λαγουδάκος, Μ. & Μπινιάρος, Μ., (2004), *Ηλεκτρικές Μηχανές*, Έκδοση 5^η, Εκδόσεις ΟΕΔΒ, Αθήνα.

Charman, J.C., (2003), *Ηλεκτρικές Μηχανές AC-DC*, Έκδοση 3^η, Εκδόσεις Τζιόλα, Θεσσαλονίκη.

Γούτης, Α., (2006), *Ηλεκτρικές Μηχανές. Θεωρία, Εφαρμογές, Εργαστήριο*, Έκδοση 3^η, Εκδόσεις Ίων, Αθήνα.

Kiddle.co, (2018), «Gramme machine», [online], Διαθέσιμο στην: https://kids.kiddle.co/Gramme_machine, [προσπ. 20/03/2018].

Μαλατέστας, Π., (2010), *Ηλεκτρική Κίνηση*, Έκδοση 3^η, Εκδόσεις Τζιόλα, Θεσσαλονίκη.

Μαλατέστας, Π., (2015), *Ηλεκτρικές Μηχανές*, Έκδοση 3^η, Εκδόσεις Τζιόλα, Θεσσαλονίκη.

Palm, III. & William, J., (2019), *MATLAB for Engineering Applications*, Edition 4th, McGraw-Hill Education, Australia.

Παπαοδυσσεύς, Κ., Καλοβρέκτης, Π. & Μυλωνάς, Ν., (2017), *Matlab -Εισαγωγή και Εφαρμογές για Μηχανικούς*, Εκδόσεις Τζιόλα, Θεσσαλονίκη.

Πλατφόρμα Τηλεκπαίδευσης, Open Eclass, (2018) «Σημειώσεις Ηλεκτρικών Μηχανών», *Βασικές Αρχές Μηχανών ΣΡ*, [online], Διαθέσιμο στην: [https://www.google.gr/search?q=mix_hm_02_BASIKES_ARXES+\(1\)&oq=mix_hm_02_BASIKES_ARXES+\(1\)&aqs=chrome..69i57.1449j0j7&sourceid=chrome&ie=UTF-8](https://www.google.gr/search?q=mix_hm_02_BASIKES_ARXES+(1)&oq=mix_hm_02_BASIKES_ARXES+(1)&aqs=chrome..69i57.1449j0j7&sourceid=chrome&ie=UTF-8), [προσπ. 23/03/2018].



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

"Διαχείριση και Ενεργειακή Βελτιστοποίηση Συστημάτων"

Χατζίκος, Ε., (2016), *MATLAB για Επιστήμονες και Μηχανικούς*, Έκδοση 4^η, Εκδόσεις Τζιόλα, Θεσσαλονίκη.

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

"Διαχείριση και Ενεργειακή Βελτιστοποίηση Συστημάτων"

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 1^ο

«Βιβλιοθήκες και Δομικά Στοιχεία Συναρτήσεων του Simulink»

Η βιβλιοθήκη Simulink αποτελείται από ένα σύνολο εργαλείων για διαφορετικούς σκοπούς. Η βιβλιοθήκη αυτή είναι οργανωμένη σε 16 βασικές υπό-βιβλιοθήκες στις οποίες μπορούμε να έχουμε πρόσβαση από τον εξερευνητή Simulink Library Browser. Για να ενεργοποιήσουμε καθεμιά από αυτές τις βιβλιοθήκες και να δούμε τα μπλοκ που περιέχει πρέπει να κάνουμε διπλό κλικ πάνω στο όνομα της βιβλιοθήκης που βρίσκεται στο παράθυρο του Simulink Library Browser (Παπαοδυσσεύς, Καλοβρέκτης, & Μυλωνάς, (2017).



- **Βιβλιοθήκη Continuous:**

Η βιβλιοθήκη «Continuous» περιέχει στοιχεία σχετικά με μοντέλα χώρου κατάστασης, με συναρτήσεις μεταφοράς, με ελεγκτές, με συναρτήσεις σχετικές με νεκρό χρόνο καθώς και μοντέλα παραγωγής σημάτων:

- Συνάρτηση Καυστήρησης Μεταφοράς (Transport Delay):

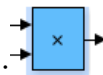
$$\frac{1/T_d}{T_d \cdot s + 1}$$



- **Βιβλιοθήκη Math Operations:**

Η βιβλιοθήκη «Math Operations» περιέχει στοιχεία που αφορούν μαθηματικές συναρτήσεις:

- Γενική Συνάρτηση Γινομένου (Product):



- Συνάρτηση Αθροίσματος-Διαφοράς (Sum):



- Συνάρτηση Κέρδους (Gain):



(Παπαοδυσσεύς, Καλοβρέκτης, & Μυλωνάς, (2017).

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

"Διαχείριση και Ενεργειακή Βελτιστοποίηση Συστημάτων"



- **Βιβλιοθήκη Sinks:**

Η βιβλιοθήκη 'Sinks' συμπεριλαμβάνονται στοιχεία που αφορούν κυρίως διάφορα καταγραφικά σημάτων, εγγραφή δεδομένων σε αρχεία καθώς και εξαγωγή δεδομένων από το περιβάλλον Simulink προς το χώρο εργασίας του MATLAB:

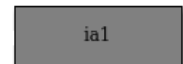
- Συνάρτηση Εξερχόμενου Σήματος (Out):



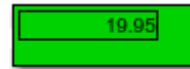
- Συνάρτηση Μεταφοράς Δεδομένων σε Αναλογική Οθόνη (Scope):



- Συνάρτηση Μεταφοράς Δεδομένων στο χώρο εργασίας (To Workspace):



- Συνάρτηση Μεταφοράς σε Ψηφιακή Οθόνη (Display):



- **Βιβλιοθήκη Sources:**

Στη βιβλιοθήκη «Sources» περιέχει στοιχεία που αφορούν διάφορα σήματα εισόδου, στοιχεία ανάγνωσης αρχείων δεδομένων και ανάγνωσης δεδομένων από το workspace του MATLAB. Συμπεριλαμβάνονται επίσης και στοιχεία που αφορούν τον χρόνο εκτέλεσης ενός μοντέλου:

- Πηγή Βηματικής Συνάρτησης (Step):



- Συνάρτηση Αναλογικού Χρονομέτρου (Clock):



- Συνάρτηση Εισερχόμενου Σήματος (In):



- Συνάρτηση Σταθερής Πηγής (Constant):



(Beucher & Weeks, 2006).