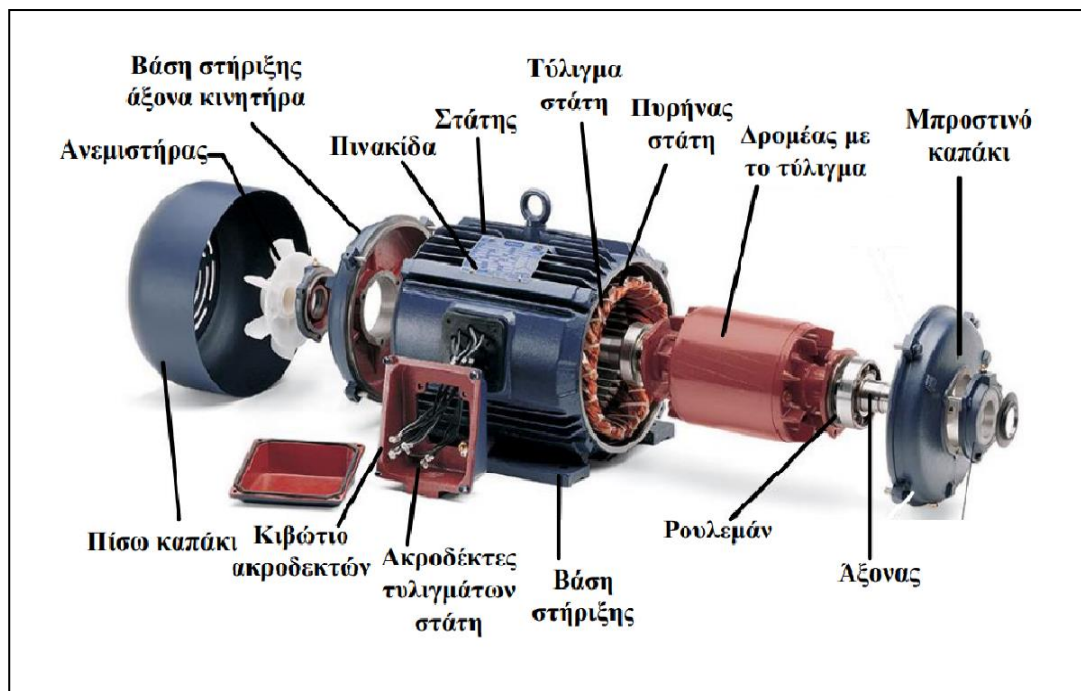


Διπλωματική Εργασία

Μοντελοποίηση και δυναμική ανάλυση κινητήρα ΣΡ ξένης διέγερσης, για διάφορα λειτουργικά σενάρια



Φοιτητής: Τσιτσιός Αντώνιος

ΑΜ: 48345249

Επιβλέπων Καθηγητής

Παντελής Μαλατέστας

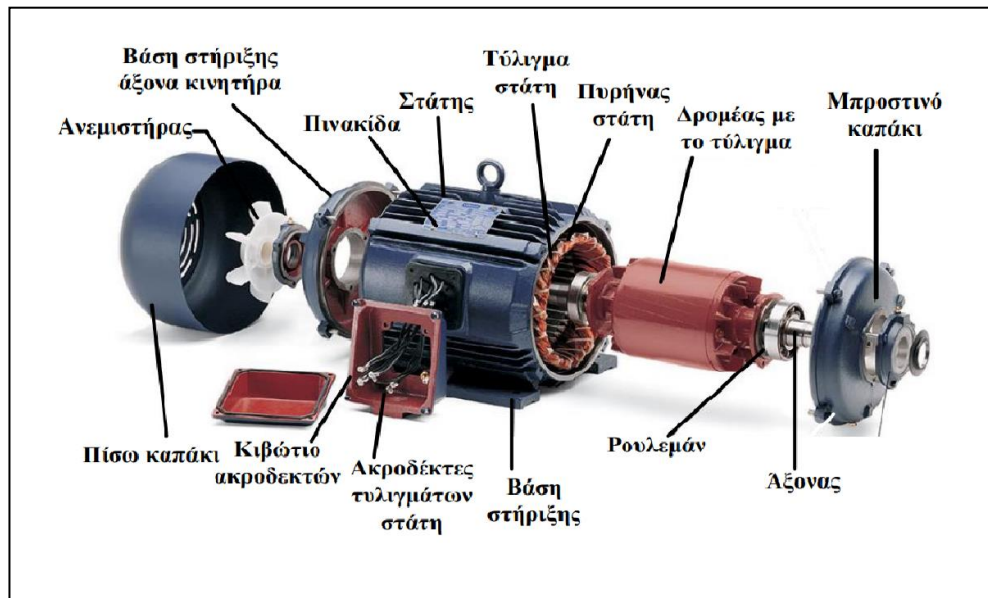
Καθηγητής



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

Diploma Thesis

Modeling and dynamic analysis of a DC separate excitation motor under different operational scenarios



Student: Tsitsios Antonios
Registration Number: 48345249

Supervisor

Pantelis Malatestas
Professor

ATHENS-EGALEO, MARCH 2024

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

Παντελής Μαλατέστας, Καθηγητής	Καραϊσάς Πέτρος, Αναπληρωτής Καθηγητής	Συγγερίδου Ολυμπιάδα, Λέκτορας
(Υπογραφή)	(Υπογραφή)	(Υπογραφή)

Copyright © Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ και Τσιτσιός Αντώνιος,
Μήνας, Έτος**

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

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

ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ο κάτωθι υπογεγραμμένος Τσιτσιός Αντώνιος του Στεφάνου, με αριθμό μητρώου 48345249 φοιτητής του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής της Σχολής ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ του Τμήματος ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ,

δηλώνω υπεύθυνα ότι:

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

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

Επιθυμώ την απαγόρευση πρόσβασης στο πλήρες κείμενο της εργασίας μου μέχρι 20/6/24 και έπειτα από αίτησή μου στη Βιβλιοθήκη και έγκριση του επιβλέποντος καθηγητή.»

Ο Δηλών

Τσιτσιός Αντώνιος

(Υπογραφή φοιτητή)



*Αφιερώνω την συγκεκριμένη διπλωματική εργασία στην
οικογένεια μου, για την υποστήριξη τους καθ' όλη την διάρκεια
των σπουδών μου.*

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου κύριο Παντελή Μαλατέστα για την συνεχή υποστήριξη και καθοδήγηση του. Δίχως τις χρήσιμες συμβουλές του και την πλούσια βιβλιογραφία του, η εργασία αυτή δε θα είχε ολοκληρωθεί.

Περίληψη

Η παρούσα εργασία με τίτλο « Μοντελοποίηση και δυναμική ανάλυση κινητήρα ΣΡ ξένης διέγερσης, για διάφορα λειτουργικά σενάρια » έχει εκπονηθεί από τον Τσιτσιό Αντώνιο (ΑΜ: 48345249) στο πλαίσιο του προγράμματος προπτυχιακών σπουδών, του τμήματος Ηλεκτρολόγων και Ηλεκτρονικών Μηχανικών της Σχολής Μηχανικών του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής. Ο στόχος της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη των κινητήρων συνεχούς ρεύματος και πιο συγκεκριμένα η προσομοίωση ενός κινητήρα ξένης διέγερσης με την βοήθεια του λογισμικού Matlab/Simulink. Η εργασία αποτελείται από έξι κεφάλαια. Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται μια εισαγωγή στις ηλεκτρικές μηχανές. Στα επόμενα τρία κεφάλαια παρουσιάζονται και αναλύονται οι κινητήρες συνεχούς ρεύματος και γίνεται εκτενής αναφορά στους κινητήρες ξένης διέγερσης. Στα τελευταία δυο κεφάλαια παρουσιάζεται το λογισμικό Matlab/Simulink, πραγματοποιείται η προσομοίωση του κινητήρα και τέλος παρατίθενται τα συμπεράσματα.

Λέξεις – κλειδιά

Ηλεκτρικές μηχανές, κινητήρες, κινητήρες ΣΡ ξένης διέγερσης, μοντελοποίηση, δυναμική ανάλυση, προσομοίωση

Abstract

The present paper titled « Modeling and dynamic analysis of a DC separate excitation motor under different operational scenarios » has been elaborated by Tsitsio Antonio (A.M 48345249) in the framework of the Undergraduates Studies Program, the Department of Electrical and Electronic Engineering, the school of Engineering, University of Western Attica. The aim of the dissertation is the study of dc motors and more specifically the simulation of a DC separate excitation motor with the help of Matlab/Simulink software. The paper consists of six chapters. In the first chapter there is an introduction to electric machines. The following three chapters present and analyze DC motors with an extensive reference to separate excitation motors. In the final two chapters the Matlab/Simulink software is presented, the simulation of the motor is performed and conclusions are drawn.

Keywords

Electric machines, motors, DC motors of external stimulation, modelling, dynamic analysis, simulation.

Περιεχόμενα

Κατάλογος Πινάκων	10
Κατάλογος Εικόνων	10
Αλφαβητικό Ευρετήριο.....	15
1 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο : ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ	16
1.1 Αρχές Ηλεκτρικών Μηχανών.....	16
1.2 Κατηγορίες Ηλεκτρικών Μηχανών και βασικά μέρη	17
1.3 Λειτουργία στα τέσσερα τεταρτημόρια	18
1.4 Απώλειες και απόδοση.....	19
2 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο : ΜΗΧΑΝΕΣ ΣΥΝΕΧΟΥΣ ΡΕΥΜΑΤΟΣ	20
2.1 Κατασκευαστικό Μέρος Μηχανών Συνεχούς Ρεύματος	20
2.1.1 Στάτης.....	20
2.1.2 Δρομέας	23
2.2 Βασικές κατηγορίες τυλιγμάτων ηλεκτρικών μηχανών συνεχούς ρεύματος	24
2.2.1 Βροχοτυλίγματα.....	25
2.2.2 Κυματοτυλίγματα	25
2.3 Μηχανισμοί παραγωγής τάσης-ροπής.....	26
2.4 Αντίδραση τυλίγματος τυμπάνου.....	28
2.4.1 Προβλήματα που παρουσιάζει η αντίδραση τυμπάνου	30
2.4.2 Αντιμετώπιση των προβλημάτων που προκαλεί η αντίδραση τυμπάνου	31
2.5 Καμπύλη μαγνήτισης.....	34
2.6 Ροή ισχύος και απώλειες στις μηχανές Σ.Ρ	34
2.6.1 Απώλειες στις μηχανές Σ.Ρ	35
2.6.2 Διάγραμμα ροής ισχύος	36
3 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο : ΚΙΝΗΤΗΡΕΣ ΣΥΝΕΧΟΥΣ ΡΕΥΜΑΤΟΣ.....	38
3.1 Αρχή λειτουργίας κινητήρων Σ.Ρ	38
3.2 Μέθοδοι διέγερσης και είδη κινητήρων Σ.Ρ.....	39
3.3 Παραγωγή τάση – ροπή στους κινητήρες ΣΡ	42
3.4 Διεύρυνση εξισώσεων κινητήρων Σ.Ρ	45
3.5 Χαρακτηριστικές υπό φορτίο κινητήρων ΣΡ.....	47
4 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο : ΚΙΝΗΤΗΡΕΣ ΣΡ ΞΕΝΗΣ ΔΙΕΓΕΡΣΗΣ.....	49
4.1 Μόνιμη Κατάσταση	49
4.2 Δυναμική Κατάσταση.....	57
5 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο : ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΚΙΝΗΤΗΡΑ ΣΡ ΞΕΝΗΣ ΔΙΕΓΕΡΣΗΣ ΜΕ ΤΗΝ ΧΡΗΣΗ MATLAB.....	63
5.1 Περιγραφή μελέτης.....	64
5.2 Εκκίνηση κινητήρα ΣΡ ξένης διέγερσης για διαφορά φορτία	64
5.3 Βηματική μεταβολή στη μηχανική ροπή κινητήρα ΣΡ ξένης διέγερσης και επαναφορά	77
5.4 Βηματική μεταβολή της τάσης τυμπάνου κινητήρα ΣΡ ξένης διέγερσης και επαναφορά.....	91
6 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6^ο : ΓΕΝΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	107
7 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	109

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1 Συμβολισμός τυλιγμάτων κιβωτίου ακροδεκτών	22
--	----

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1 Συνδυασμός ηλεκτρικού και μηχανικού συστήματος.....	17
Εικόνα 2 Στοιχειώδης ηλεκτρική μηχανή.....	18
Εικόνα 3 Λειτουργία στα τέσσερα τεταρτημόρια.....	19
Εικόνα 4 Κατασκευαστικά μέρη μια μηχανής συνεχούς ρεύματος	20
Εικόνα 5 Τυποποίηση και συμβολισμός κιβωτίου ακροδεκτών	22
Εικόνα 6 Στάτης μηχανής συνεχούς ρεύματος	22
Εικόνα 7 Μορφή συστήματος συλλέκτη	24
Εικόνα 8 Δρομέας μηχανής συνεχούς ρεύματος	24
Εικόνα 9 Βροχοτύλιγμα	25
Εικόνα 10 Κυματοτύλιγμα	26
Εικόνα 11 Στοιχειώδεις διπολική μηχανή	27
Εικόνα 12 Πολικότητα επαγόμενων τάσεων	27
Εικόνα 13 Λειτουργικές καταστάσεις μηχανής ΣΡ.....	28
Εικόνα 14 Αλληλεπίδραση πεδίων διέγερσης-τυμπάνου.....	29
Εικόνα 15 Κατανομές ΜΕΔ και πυκνότητας ροπής.....	30
Εικόνα 16 Ουδέτερη ζώνη διπολικής μηχανής.....	30
Εικόνα 17 Μετακίνηση ουδέτερης ζώνης	31
Εικόνα 18 Βοηθητικοί πόλοι.....	32
Εικόνα 19 Τύλιγμα αντιστάθμισης.....	33
Εικόνα 20 Κατασκευή των πόλων.....	34
Εικόνα 21 Χαρακτηριστική καμπύλη μαγνήτισης μηχανής ΣΡ	34
Εικόνα 22 Διάγραμμα ροής ισχύος μηχανής Σ.Ρ. α) Γεννήτρια. β) Κινητήρας.....	37
Εικόνα 23 Αρχή λειτουργίας κινητήρων Σ.Ρ.....	38
Εικόνα 24 Φορά δύναμης F.....	39
Εικόνα 25 Τύλιγμα διέγερσης (χωρική τοποθέτηση)	40
Εικόνα 26 Κατηγορίες κινητήρων ΣΡ	42
Εικόνα 27 Επαγόμενη τάση στους ακροδέκτες των ψηκτρών	42

Εικόνα 28 Μεταβολή ταχύτητας κενού φορτίου συναρτήσει της τάσης τροφοδοσίας	46
Εικόνα 29 Μεταβολή ταχύτητας κενού φορτίου συναρτήσει του ρεύματος τυμπάνου	46
Εικόνα 30 Μεταβολή ταχύτητας κενού φορτίου συναρτήσει του ρεύματος διέγερσης	47
Εικόνα 31 Ισοδύναμο κύκλωμα κινητήρα ΣΡ ξένης διέγερσης	49
Εικόνα 32 Χαρακτηριστική γωνιακής ταχύτητας – ροπής	51
Εικόνα 33 Χαρακτηριστική ροπής -ρεύματος τυμπάνου	51
Εικόνα 34 Επίδραση της μεταβολής της τάσης του τυλίγματος τυμπάνου στη χαρακτηριστική γωνιακής ταχύτητας – ροπής.....	53
Εικόνα 35 Εξάρτηση της γωνιακής ταχύτητας από την τάση τυμπάνου, με παράμετρο την εσωτερική ροπή.	53
Εικόνα 36 Μεταβολή ταχύτητας κενού φορτίου συναρτήσει του ρεύματος διέγερσης διακλάδωσης.	54
Εικόνα 37 Επίδραση της μεταβολής του ρεύματος τυλίγματος διέγερσης στην χαρακτηριστική γωνιακής ταχύτητας -ροπής	55
Εικόνα 38 Επίδραση της μεταβολής του ρεύματος τυλίγματος διέγερσης στην χαρακτηριστική ροπής – στροφών, σε χαμηλές ταχύτητες	56
Εικόνα 39 Επίδραση της παρεμβολής εξωτερικής ωμικής αντίστασης σε σειρά με το τύλιγμα τυμπάνου.....	56
Εικόνα 40 Στοιχειώδης διπολική μηχανή ΣΡ.....	57
Εικόνα 41 Διάγραμμα Βαθμίδων κινητήρων συνεχούς ρεύματος ξένης διέγερσης.	62
Εικόνα 42 Λογισμικό Matlab	63
Εικόνα 43 Διάγραμμα βαθμίδων κινητήρα ΣΡ ξένης διέγερσης υπό φορτίο σχεδιασμένο στο Simulink, μαζί με επιπλέον βαθμίδες για τον υπολογισμό και την μέτρηση μεγεθών	64
Εικόνα 44 Χρονική μεταβολή ρεύματος διέγερσης i_f – Εκκίνηση κινητήρα ΣΡ ξένης διέγερσης με φορτίο $T_L= 1.5 \text{ Nm}$	65
Εικόνα 45 Χρονική μεταβολή ρεύματος τυμπάνου i_a – Εκκίνηση κινητήρα ΣΡ ξένης διέγερσης με φορτίο $T_L= 1.5 \text{ Nm}$	66
Εικόνα 46 Χρονική μεταβολή ΑΗΕΔ e_a – Εκκίνηση κινητήρα ΣΡ ξένης διέγερσης με φορτίο $T_L= 1.5 \text{ Nm}$	66
Εικόνα 47 Χρονική μεταβολή ηλεκτρομαγνητικής ροπής t_{em} – Εκκίνηση κινητήρα ΣΡ ξένης διέγερσης με φορτίο $T_L= 1.5 \text{ Nm}$	67
Εικόνα 48 Χρονική μεταβολή στροφών n – Εκκίνηση κινητήρα ΣΡ ξένης διέγερσης με φορτίο $T_L= 1.5 \text{ Nm}$	67
Εικόνα 49 Χρονική μεταβολή ισχύος εισόδου p_i – Εκκίνηση κινητήρα ΣΡ ξένης διέγερσης με φορτίο $T_L= 1.5 \text{ Nm}$	68
Εικόνα 50 Χρονική μεταβολή ισχύος εξόδου p_o – Εκκίνηση κινητήρα ΣΡ ξένης διέγερσης με φορτίο $T_L= 1.5 \text{ Nm}$	68
Εικόνα 51 Χρονική μεταβολή ρεύματος διέγερσης i_f – Εκκίνηση κινητήρα ΣΡ ξένης διέγερσης με φορτίο $T_L= 3 \text{ Nm}$	69

Εικόνα 52 Χρονική μεταβολή ρεύματος τυμπάνου i_a - Εκκίνηση κινητήρα ΣΡ ξένης διέγερσης με φορτίο $T_L=3\text{ Nm}$	70
Εικόνα 53 Χρονική μεταβολή ΑΗΕΔ e_a - Εκκίνηση κινητήρα ΣΡ ξένης διέγερσης με φορτίο $T_L=3\text{ Nm}$...	70
Εικόνα 54 Χρονική μεταβολή ηλεκτρομαγνητικής ροπής t_{em} - Εκκίνηση κινητήρα ΣΡ ξένης διέγερσης με φορτίο $T_L=3\text{ Nm}$	71
Εικόνα 55 Χρονική μεταβολή στροφών n - Εκκίνηση κινητήρα ΣΡ ξένης διέγερσης με φορτίο $T_L=3\text{ Nm}$..	71
Εικόνα 56 Χρονική μεταβολή ισχύος εισόδου p_i - Εκκίνηση κινητήρα ΣΡ ξένης διέγερσης με φορτίο $T_L=3\text{ Nm}$	72
Εικόνα 57 Χρονική μεταβολή ισχύος εξόδου p_o - Εκκίνηση κινητήρα ΣΡ ξένης διέγερσης με φορτίο $T_L=3\text{ Nm}$	72
Εικόνα 58 Χρονική μεταβολή ρεύματος διέγερσης i_f - Εκκίνηση κινητήρα ΣΡ ξένης διέγερσης με φορτίο $T_L=4.5\text{ Nm}$	73
Εικόνα 59 Χρονική μεταβολή ρεύματος τυμπάνου i_a - Εκκίνηση κινητήρα ΣΡ ξένης διέγερσης με φορτίο $T_L=4.5\text{ Nm}$	74
Εικόνα 60 Χρονική μεταβολή ΑΗΕΔ e_a - Εκκίνηση κινητήρα ΣΡ ξένης διέγερσης με φορτίο $T_L=4.5\text{ Nm}$	74
Εικόνα 61 Χρονική μεταβολή ηλεκτρομαγνητικής ροπής t_{em} - Εκκίνηση κινητήρα ΣΡ ξένης διέγερσης με φορτίο $T_L=4.5\text{ Nm}$	75
Εικόνα 62 Χρονική μεταβολή στροφών n - Εκκίνηση κινητήρα ΣΡ ξένης διέγερσης με φορτίο $T_L=4.5\text{ Nm}$	75
Εικόνα 63 Χρονική μεταβολή ισχύος εισόδου p_i - Εκκίνηση κινητήρα ΣΡ ξένης διέγερσης με φορτίο $T_L=4.5\text{ Nm}$	76
Εικόνα 64 Χρονική μεταβολή ισχύος εξόδου p_o - Εκκίνηση κινητήρα ΣΡ ξένης διέγερσης με φορτίο $T_L=4.5\text{ Nm}$	76
Εικόνα 65 Χρονική μεταβολή ροπής φορτίου t_L – Βηματική μείωση της ροπής φορτίου κατά 0.2 Nm κινητήρα ΣΡ ξένης διέγερσης.....	78
Εικόνα 66 Χρονική μεταβολή ρεύματος διέγερσης i_f – Βηματική μείωση της ροπής φορτίου κατά 0.2 Nm κινητήρα ΣΡ ξένης διέγερσης.....	78
Εικόνα 67 Χρονική μεταβολή ρεύματος τυμπάνου i_a – Βηματική μείωση της ροπής φορτίου κατά 0.2 Nm κινητήρα ΣΡ ξένης διέγερσης.....	79
Εικόνα 68 Χρονική μεταβολή ΑΗΕΔ e_a – Βηματική μείωση της ροπής φορτίου κατά 0.2 Nm κινητήρα ΣΡ ξένης διέγερσης.....	79
Εικόνα 69 Χρονική μεταβολή ηλεκτρομαγνητικής ροπής t_{em} – Βηματική μείωση της ροπής φορτίου κατά 0.2 Nm κινητήρα ΣΡ ξένης διέγερσης	80
Εικόνα 70 Χρονική μεταβολή στροφών n – Βηματική μείωση της ροπής φορτίου κατά 0.2 Nm κινητήρα ΣΡ ξένης διέγερσης.....	80
Εικόνα 71 Χρονική μεταβολή ισχύος εισόδου p_i – Βηματική μείωση της ροπής φορτίου κατά 0.2 Nm κινητήρα ΣΡ ξένης διέγερσης.....	81

Εικόνα 72 Χρονική μεταβολή ισχύος εξόδου p_o – Βηματική μείωση της ροπής φορτίου κατά 0.2 Nm κινητήρα ΣΡ ξένης διέγερσης.....	81
Εικόνα 73 Χρονική μεταβολή ροπής φορτίου τ_L – Βηματική μείωση της ροπής φορτίου κατά 0.4 Nm κινητήρα ΣΡ ξένης διέγερσης.....	82
Εικόνα 74 Χρονική μεταβολή ρεύματος διέγερσης i_f – Βηματική μείωση της ροπής φορτίου κατά 0.4 Nm κινητήρα ΣΡ ξένης διέγερσης.....	83
Εικόνα 75 Χρονική μεταβολή ρεύματος τυμπάνου i_a – Βηματική μείωση της ροπής φορτίου κατά 0.4 Nm κινητήρα ΣΡ ξένης διέγερσης.....	83
Εικόνα 76 Χρονική μεταβολή ΑΗΕΔ e_a – Βηματική μείωση της ροπής φορτίου κατά 0.4 Nm κινητήρα ΣΡ ξένης διέγερσης.....	84
Εικόνα 77 Χρονική μεταβολή ηλεκτρομαγνητικής ροπής t_{em} – Βηματική μείωση της ροπής φορτίου κατά 0.4 Nm κινητήρα ΣΡ ξένης διέγερσης.....	84
Εικόνα 78 Χρονική μεταβολή στροφών n – Βηματική μείωση της ροπής φορτίου κατά 0.4 Nm κινητήρα ΣΡ ξένης διέγερσης.....	85
Εικόνα 79 Χρονική μεταβολή ισχύος εισόδου p_i – Βηματική μείωση της ροπής φορτίου κατά 0.4 Nm κινητήρα ΣΡ ξένης διέγερσης.....	85
Εικόνα 80 Χρονική μεταβολή ισχύος εξόδου p_o – Βηματική μείωση της ροπής φορτίου κατά 0.4 Nm κινητήρα ΣΡ ξένης διέγερσης.....	86
Εικόνα 81 Χρονική μεταβολή ροπής φορτίου τ_L – Βηματική μείωση της ροπής φορτίου κατά 0.6 Nm κινητήρα ΣΡ ξένης διέγερσης.....	87
Εικόνα 82 Χρονική μεταβολή ρεύματος διέγερσης i_f – Βηματική μείωση της ροπής φορτίου κατά 0.6 Nm κινητήρα ΣΡ ξένης διέγερσης.....	87
Εικόνα 83 Χρονική μεταβολή ρεύματος τυμπάνου i_a – Βηματική μείωση της ροπής φορτίου κατά 0.6 Nm κινητήρα ΣΡ ξένης διέγερσης.....	88
Εικόνα 84 Χρονική μεταβολή ΑΗΕΔ e_a – Βηματική μείωση της ροπής φορτίου κατά 0.6 Nm κινητήρα ΣΡ ξένης διέγερσης.....	88
Εικόνα 85 Χρονική μεταβολή ηλεκτρομαγνητικής ροπής t_{em} – Βηματική μείωση της ροπής φορτίου κατά 0.6 Nm κινητήρα ΣΡ ξένης διέγερσης.....	89
Εικόνα 86 Χρονική μεταβολή στροφών n – Βηματική μείωση της ροπής φορτίου κατά 0.6 Nm κινητήρα ΣΡ ξένης διέγερσης.....	89
Εικόνα 87 Χρονική μεταβολή ισχύος εισόδου p_i – Βηματική μείωση της ροπής φορτίου κατά 0.6 Nm κινητήρα ΣΡ ξένης διέγερσης.....	90
Εικόνα 88 Χρονική μεταβολή ισχύος εξόδου p_o – Βηματική μείωση της ροπής φορτίου κατά 0.6 Nm κινητήρα ΣΡ ξένης διέγερσης.....	90
Εικόνα 89 Χρονική μεταβολή τάσης τυμπάνου v_a – Βηματική μείωση της τάσης τυμπάνου κατά 44V κινητήρα ΣΡ ξένης διέγερσης.....	92
Εικόνα 90 Χρονική μεταβολή ρεύματος διέγερσης i_f – Βηματική μείωση της τάσης τυμπάνου κατά 44V κινητήρα ΣΡ ξένης διέγερσης.....	92

Εικόνα 91 Χρονική μεταβολή ρεύματος τυμπάνου ia – Βηματική μείωση της τάσης τυμπάνου κατά 44V κινητήρα ΣΡ ξένης διέγερσης.....	93
Εικόνα 92 Χρονική μεταβολή ΑΗΕΔ ea – Βηματική μείωση της τάσης τυμπάνου κατά 44V κινητήρα ΣΡ ξένης διέγερσης.....	93
Εικόνα 93 Χρονική μεταβολή ΑΗΕΔ va – ea – Βηματική μείωση της τάσης τυμπάνου κατά 44V κινητήρα ΣΡ ξένης διέγερσης	94
Εικόνα 94 Χρονική μεταβολή ηλεκτρομαγνητικής ροπής tem – Βηματική μείωση της τάσης τυμπάνου κατά 44V κινητήρα ΣΡ ξένης διέγερσης	94
Εικόνα 95 Χρονική μεταβολή στροφών n – Βηματική μείωση της τάσης τυμπάνου κατά 44V κινητήρα ΣΡ ξένης διέγερσης.....	95
Εικόνα 96 Χρονική μεταβολή ισχύος εισόδου pi – Βηματική μείωση της τάσης τυμπάνου κατά 44V κινητήρα ΣΡ ξένης διέγερσης.....	95
Εικόνα 97 Χρονική μεταβολή ισχύος εξόδου po – Βηματική μείωση της τάσης τυμπάνου κατά 44V κινητήρα ΣΡ ξένης διέγερσης.....	96
Εικόνα 98 Χρονική μεταβολή τάσης τυμπάνου va – Βηματική μείωση της τάσης τυμπάνου κατά 110V κινητήρα ΣΡ ξένης διέγερσης.....	97
Εικόνα 99 Χρονική μεταβολή ρεύματος διέγερσης if – Βηματική μείωση της τάσης τυμπάνου κατά 110V κινητήρα ΣΡ ξένης διέγερσης.....	97
Εικόνα 100 Χρονική μεταβολή ρεύματος τυμπάνου ia – Βηματική μείωση της τάσης τυμπάνου κατά 110V κινητήρα ΣΡ ξένης διέγερσης.....	98
Εικόνα 101 Χρονική μεταβολή ΑΗΕΔ ea – Βηματική μείωση της τάσης τυμπάνου κατά 110V κινητήρα ΣΡ ξένης διέγερσης.....	98
Εικόνα 102 Χρονική μεταβολή ΑΗΕΔ va – ea – Βηματική μείωση της τάσης τυμπάνου κατά 110V κινητήρα ΣΡ ξένης διέγερσης	99
Εικόνα 103 Χρονική μεταβολή ηλεκτρομαγνητικής ροπής tem – Βηματική μείωση της τάσης τυμπάνου κατά 110V κινητήρα ΣΡ ξένης διέγερσης.....	99
Εικόνα 104 Χρονική μεταβολή στροφών n – Βηματική μείωση της τάσης τυμπάνου κατά 110V κινητήρα ΣΡ ξένης διέγερσης.....	100
Εικόνα 105 Χρονική μεταβολή ισχύος εισόδου pi – Βηματική μείωση της τάσης τυμπάνου κατά 110V κινητήρα ΣΡ ξένης διέγερσης.....	100
Εικόνα 106 Χρονική μεταβολή ισχύος εξόδου po – Βηματική μείωση της τάσης τυμπάνου κατά 44V κινητήρα ΣΡ ξένης διέγερσης.....	101
Εικόνα 107 Χρονική μεταβολή τάσης τυμπάνου va – Βηματική αύξηση της τάσης τυμπάνου κατά 44V κινητήρα ΣΡ ξένης διέγερσης.....	102
Εικόνα 108 Χρονική μεταβολή ρεύματος διέγερσης if – Βηματική αύξηση της τάσης τυμπάνου κατά 44V κινητήρα ΣΡ ξένης διέγερσης.....	102
Εικόνα 109 Χρονική μεταβολή ρεύματος τυμπάνου ia – Βηματική αύξηση της τάσης τυμπάνου κατά 44V κινητήρα ΣΡ ξένης διέγερσης.....	103

Εικόνα 110 Χρονική μεταβολή ΑΗΕΔ e_a – Βηματική αύξηση της τάσης τυμπάνου κατά 44V κινητήρα ΣΡ ξένης διέγερσης.....	103
Εικόνα 111 Χρονική μεταβολή ΑΗΕΔ v_a – e_a – Βηματική αύξηση της τάσης τυμπάνου κατά 44V κινητήρα ΣΡ ξένης διέγερσης	104
Εικόνα 112 Χρονική μεταβολή ηλεκτρομαγνητικής ροπής t_{em} – Βηματική αύξηση της τάσης τυμπάνου κατά 44V κινητήρα ΣΡ ξένης διέγερσης	104
Εικόνα 113 Χρονική μεταβολή στροφών n – Βηματική αύξηση της τάσης τυμπάνου κατά 44V κινητήρα ΣΡ ξένης διέγερσης.....	105
Εικόνα 114 Χρονική μεταβολή ισχύος εισόδου p_i – Βηματική αύξηση της τάσης τυμπάνου κατά 44V κινητήρα ΣΡ ξένης διέγερσης.....	105
Εικόνα 115 Χρονική μεταβολή ισχύος εξόδου p_o – Βηματική αύξηση της τάσης τυμπάνου κατά 44V κινητήρα ΣΡ ξένης διέγερσης.....	106

Αλφαβητικό Ευρετήριο

APA: American Psychological Association

IEEE: The Institute for Electrical and Electronics Engineers

ΣΡ: Συνεχούς ρεύματος

ΕΡ: Εναλλασσόμενου ρεύματος

1 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο : ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ

Η ανακάλυψη της ηλεκτρικής επαγωγής από τον Faraday το 1830 έδωσε το έναυσμα σε πολλούς ερευνητές, φυσικούς και μηχανικούς, να ασχοληθούν με τον σχεδιασμό και την κατασκευή διατάξεων ηλεκτρομηχανικής μετατροπής, δηλαδή Ηλεκτρικών Μηχανών, προκειμένου να εκμεταλλευτούν την ηλεκτρική ενέργεια για τις ανάγκες των ανθρώπων.

Στις μέρες μας, οι Ηλεκτρικές Μηχανές αποτελούν ένα σημαντικό κομμάτι της σύγχρονης τεχνολογίας και έχουν εφαρμογές σε πολλούς τομείς, καθώς μπορούμε να τις συναντήσουμε σε συστήματα Παραγωγής – Μεταφοράς – Διανομής, σε βιομηχανικές εγκαταστάσεις αλλά και στην καθημερινή μας ζωή. Αυτό οφείλεται στο γεγονός, ότι μπορούν να κατασκευαστούν, με χαμηλό κόστος και σε μεγάλη ποικιλία μεγεθών και ισχύων, προσφέροντας μεγάλη απόδοση και προσαρμοστικότητα σε πολλές εφαρμογές.

Η εξέλιξη των ηλεκτρικών μηχανών είναι παράλληλη με την ανάπτυξη των νέων τεχνολογιών, γεγονός, που καθιστά τη μελέτη και τη χρήση τους απαραίτητες για το μέλλον.

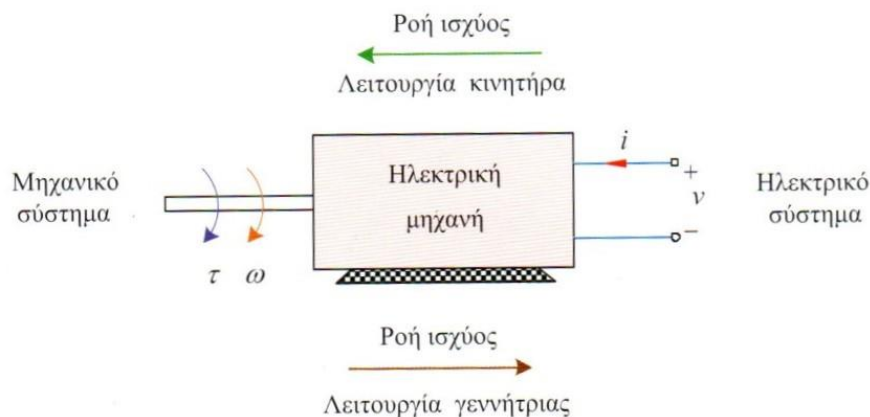
1.1 Αρχές Ηλεκτρικών Μηχανών

Η αρχή των Ηλεκτρικών Μηχανών στηρίζεται στο φαινόμενο της ηλεκτρομηχανικής μετατροπής της ενέργειας, συνδυάζοντας καταλλήλα ένα ηλεκτρικό και ένα μηχανικό σύστημα, ώστε να μετατρέπουν την ενέργεια από ηλεκτρική σε μηχανική και αντίστροφα. Τα δυο αυτά συστήματα δίνουν την δυνατότητα σε κάθε ηλεκτρική μηχανή να λειτουργεί είτε ως γεννήτρια, είτε ως κινητήρας.

Ο κύριος παράγοντας, που συμβάλει στην ηλεκτρομηχανική μετατροπή της ενέργειας, είναι η στρεφομένη μηχανή, στην οποία αλληλοεπιδρούν ταυτόχρονα δυο μηχανισμοί, ο μηχανισμός παραγωγής ροπής και ο μηχανισμός παραγωγής τάσης. Οι δυο μηχανισμοί προκειμένου να αλληλοεπιδράσουν, χρησιμοποιούν, ως μέσον, το μαγνητικό πεδίο, χάρις στο οποίο ανταλλάσσεται η ενέργεια μεταξύ των δυο μηχανισμών.

Η παραγωγή της ροπής, βασίζεται στην προσπάθεια ευθυγράμμισης των δυο μαγνητικών πεδίων, που δημιουργούνται από τα τυλίγματα του στάτη και του δρομέα. Αντιστοίχως, η παραγωγή της τάσης σε ένα τύλιγμα, συνδέεται άμεσα με την χρονική μεταβολή της πεπλεγμένης μαγνητικής ροής που ασκείται στο ίδιο το τύλιγμα. Παρατηρούμε λοιπόν, ότι απαιτούνται τουλάχιστον δυο βασικά τυλίγματα, για να έχουμε ηλεκτρομηχανική μετατροπή, τα οποία είναι τοποθετημένα στο στάτη και στον δρομέα. Το πρώτο τύλιγμα είναι υπεύθυνο για την παραγωγή μαγνητικού πεδίου στο διάκενο της μηχανής και ονομάζεται τύλιγμα διέγερσης. Το δεύτερο τύλιγμα, ονομάζεται τύλιγμα

τυμπάνου, είναι ένα τύλιγμα ισχύος και είναι υπεύθυνο για την ηλεκτρομηχανική μετατροπή της ενέργειας, καθώς επάγονται σε αυτό τάσεις και ροπές. (Μαλατέστας, 2021)



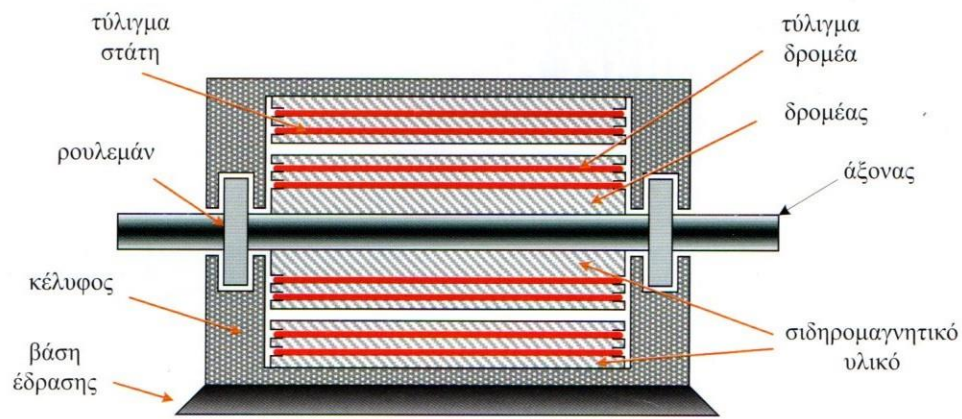
Εικόνα 1 Συνδυασμός ηλεκτρικού και μηχανικού συστήματος

1.2 Κατηγορίες Ηλεκτρικών Μηχανών και βασικά μέρη

Οι ηλεκτρικές μηχανές χωρίζονται σε δυο μεγάλες κατηγορίες, τις μηχανές συνεχούς ρεύματος (ΣΡ) και τις μηχανές εναλλασσόμενου ρεύματος (ΕΡ). Και στις δυο κατηγορίες τα βασικά μέρη παραμένουν ίδια:

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

Τα τυλίγματα του στάτη και του δρομέα διακρίνονται σε συγκεντρωμένα ή διανεμημένα και είναι υπεύθυνα για την δημιουργία των μαγνητικών πεδίων. Οι πυρήνες του στάτη και του δρομέα κατασκευάζονται από σιδηρομαγνητικά υλικά, για την ελάττωση την μαγνητικής αντίστασης. Ο αριθμός των πόλων σε κάθε τύλιγμα είναι πάντα άρτιος και απέχουν μεταξύ τους ίσες αποστάσεις. Η απόσταση αυτή ονομάζεται πολικό βήμα και μετριέται σε μηχανικές μοίρες ή αριθμό αυλακώσεων. (Μαλατέστας, 2021)



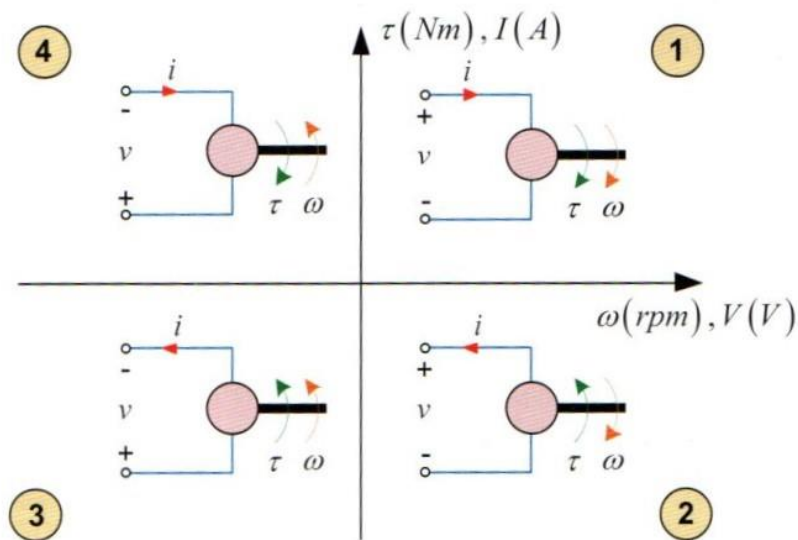
Εικόνα 2 Στοιχειώδης ηλεκτρική μηχανή

1.3 Λειτουργία στα τέσσερα τεταρτημόρια

Η συμπεριφορά των ηλεκτρικών μηχανών αλλάζει ανάλογα με το τεταρτημόριο της χαρακτηριστικής ροπής - στροφών στο οποίο λειτουργούν. Στο πρώτο τεταρτημόριο, η ηλεκτρική μηχανή λειτουργεί ως κινητήρας με φορά προς δεξιά. Σε αυτή τη λειτουργική κατάσταση, η ηλεκτρική μηχανή καταναλώνει ηλεκτρική ενέργεια από το δίκτυο, προκειμένου να παράξει ροπή, η οποία έχει ιδιά φορά με την περιστροφική φορά του κινητήρα.

Η αλλαγή από το πρώτο στο δεύτερο τεταρτημόριο γίνεται με την αλλαγή της φοράς του ρεύματος τυμπάνου. Σε αυτό το τεταρτημόριο, η ηλεκτρική μηχανή παύει να λειτουργεί ως κινητήρας και λειτουργεί ως γεννήτρια, με την προϋπόθεση ότι εξασφαλίζεται κινητική ενέργεια στο μηχανικό σύστημα της μηχανής και αυτή μετατρέπεται πλέον σε ηλεκτρική ενέργεια, η οποία επιστρέφει στο δίκτυο.

Στα υπόλοιπα δυο τεταρτημόρια, η ηλεκτρική μηχανή εξακολουθεί να λειτουργεί ως κινητήρας και γεννήτρια αντίστοιχα, για το τρίτο και για το τέταρτο τεταρτημόριο, αλλά με αντίθετη φορά περιστροφής. (Μαλατέστας, 2021)



Εικόνα 3 Λειτουργία στα τέσσερα τεταρτημόρια

1.4 Απώλειες και απόδοση

Οι απώλειες και ο βαθμός της απόδοσης των ηλεκτρικών μηχανών συνδέονται με τον τρόπο, που λειτουργούν και σχεδιάζονται. Οπότε, η μελέτη τους αποτελεί βασικό παράγοντα για την βελτίωση των ηλεκτρικών μηχανών. Ο βαθμός απόδοσης μπορεί να υπολογιστεί, είτε με απευθείας μέτρηση της ισχύος εισόδου (ισχύ που απορρόφα η μηχανή από το δίκτυο) και της ισχύος εξόδου (ισχύ που αποδίδει η μηχανή), είτε μέσω του υπολογισμού των διάφορων απωλειών της ισχύος που συμβάλουν στη μείωση της απόδοσης.

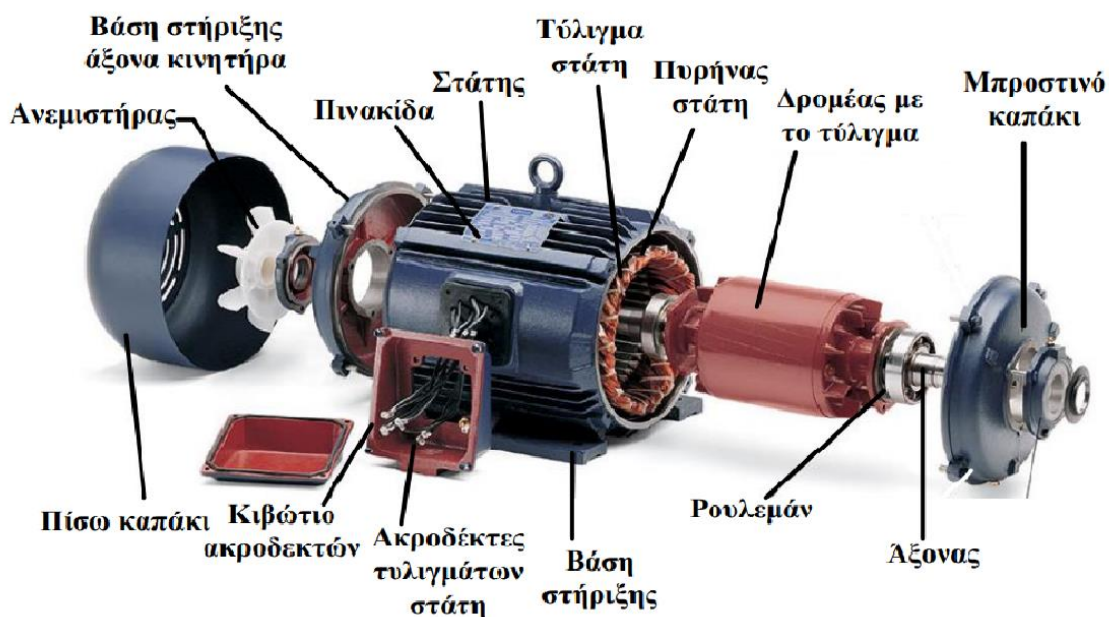
Κατά την σχεδίαση μιας ηλεκτρικής μηχανής, το πρώτο μέλημα είναι η μείωση των απωλειών, προκειμένου η μηχανή να μην καταναλώνει μεγάλα ποσά ενέργειας άσκοπα και κατ' επέκταση να μην δημιουργούνται μεγάλα λειτουργικά προβλήματα εξαιτίας της υπερθέρμανσης. (Μαλατέστας, 2021)

2 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο : ΜΗΧΑΝΕΣ ΣΥΝΕΧΟΥΣ ΡΕΥΜΑΤΟΣ

Οι μηχανές συνεχούς ρεύματος (ΣΡ) είναι γεννήτριες που μετατρέπουν την μηχανική ενέργεια σε ηλεκτρική με τη μορφή συνεχούς ρεύματος και κινητήρες που μετατρέπουν τη συνεχή ηλεκτρική ενέργεια σε μηχανική. Οι μηχανές συνεχούς ρεύματος, ως επί το πλείστον, μοιάζουν με τις μηχανές εναλλασσόμενου ρεύματος, καθώς και στις δυο κατηγορίες τα ρεύματα και οι τάσεις στο εσωτερικό των μηχανών είναι εναλλασσόμενα. Η διαφορά των δυο κατηγοριών οφείλεται, στο ότι οι μηχανές συνεχούς ρεύματος έχουν συνεχή έξοδο, εξαιτίας ενός μηχανισμού που ονομάζεται συλλέκτης. Αυτός ο μηχανισμός μετατρέπει τις εσωτερικές εναλλασσόμενες τάσεις σε συνέχεις. (Charman, 2020)

2.1 Κατασκευαστικό Μέρος Μηχανών Συνεχούς Ρεύματος

Όλες οι μηχανές συνεχούς ρεύματος αποτελούνται από δυο βασικά τμήματα το στάτη, που είναι το ακίνητο μέρος και το δρομέα, δηλαδή το κινητό μέρος.



Εικόνα 4 Κατασκευαστικά μέρη μια μηχανής συνεχούς ρεύματος

2.1.1 Στάτης

Ο στάτης προορίζεται, για να προσφέρει στήριξη, να δημιουργεί μαγνητική ροή στο εσωτερικό της μηχανής και να ρυθμίζει με τους αγωγούς τροφοδοσίας την συμπεριφορά της μηχανής (κινητήρας ή γεννήτρια). Ο στάτης μια μηχανής Σ.Ρ αποτελείται από το ζύγωμα, τους μαγνητικούς πόλους, τους βοηθητικούς πόλους, το τύλιγμα διέγερσης, το τύλιγμα αντιστάθμισης, τα καλύμματα, το κιβώτιο ακροδεκτών και το σύστημα ψηκτροφορέα.

Ζύγωμα: Το ζύγωμα αποτελεί τον κορμό της ηλεκτρικής μηχανής, έχει κυλινδρικό σχήμα και κατασκευάζεται από χυτοχάλυβα ή μαλακό σίδηρο. Προορίζεται για την δημιουργία κλειστού μαγνητικού κυκλώματος στην ηλεκτρική μηχανή.

Μαγνητικοί πόλοι: Οι μαγνητικοί πόλοι στηρίζονται με ειδικές βίδες στο εσωτερικό μέρος του ζυγώματος. Είναι φτιαγμένοι από ελάσματα αρκετού λεπτού πάχους, σκληρού σιδηρομαγνητικού υλικού τα οποία είναι μονωμένα μεταξύ τους. Οι μαγνητικοί πόλοι είναι υπεύθυνοι για την εξασφάλιση ομογενούς μαγνητικού πεδίου στο εσωτερικό της μηχανής. Ο αριθμός τους σε μια ηλεκτρική μηχανή είναι πάντα ζυγός.

Τύλιγμα διέγερσης: Το τύλιγμα διέγερσης αποτελεί το ένα από τα δυο βασικά τυλίγματα που υπάρχουν στις ηλεκτρικές μηχανές και έχει ως σκοπό την παραγωγή του μαγνητικού πεδίου στο εσωτερικό της μηχανής.

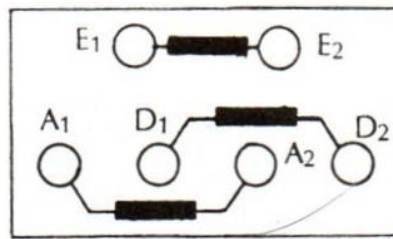
Σε πολλές ηλεκτρικές μηχανές συνεχούς ρεύματος συναντάμε δυο ανεξάρτητα μεταξύ τους τυλίγματα στον κάθε μαγνητικό πόλο. Το παράλληλο τύλιγμα, το οποίο είναι κατασκευασμένο από πολλές σπείρες σύρματος μικρής διατομής και συμβολίζεται με E1-E2 και το τύλιγμα σειράς, το οποίο κατασκευάζεται από λίγες σπείρες, μεγάλης διατομής και συμβολίζεται με D1-D2. Κατασκευαστικά τα τυλίγματα αυτά είναι συγκεντρωμένα και ο αριθμός των ελιγμάτων και η διατομή καθορίζονται από την ισχύ και από τη μαγνητική ροή στο διάκενο.

Βοηθητικοί πόλοι: Οι βοηθητικοί πόλοι είναι τοποθετημένοι αναμεσά στους κύριους μαγνητικούς πόλους, με πολικότητά εξαρτώμενη από την συμπεριφορά της ηλεκτρικής μηχανής. Ο ρόλος τους είναι να εξομαλύνουν το μαγνητικό πεδίο στο εσωτερικό της μηχανής, κατά την λειτουργία υπό φορτίο.

Τύλιγμα αντιστάθμισης: Το τύλιγμα αντιστάθμισης τοποθετείτε σε ειδικές διαμορφώσεις του πύρινα των μαγνητικών πόλων και είναι υπεύθυνο για την αντιστάθμιση του μαγνητικού πεδίου που δημιουργούν οι ρευματοφόροι αγωγοί του τυλίγματος τυμπάνου.

Τα καλύμματα ή καπάκια: Τα καλύμματα ή καπάκια των ηλεκτρικών μηχανών βρίσκονται σε ζευγάρια και κατασκευάζονται από χυτοσίδηρο και στο κέντρο έχουν τοποθετημένα ρουλεμάν. Προσφέρουν στήριξη του άξονα και εξασφαλίζουν την περιστροφή του χάρις στα ρουλεμάν.

Κιβώτιο ακροδεκτών: Το κιβώτιο ακροδεκτών βρίσκεται στο εξωτερικό μέρος του ζυγώματος και έχει ίδια κατασκευή με αυτό. Στο κιβώτιο αυτό καταλήγουν έξι συγκεκριμένες θέσεις, τα άκρα των διαφόρων τυλιγμάτων που περιλαμβάνει μια ηλεκτρική μηχανή συνεχούς ρεύματος και τα οποία έχουν συγκεκριμένη τυποποίηση και διάταξη. (Στεργίου, 2009)

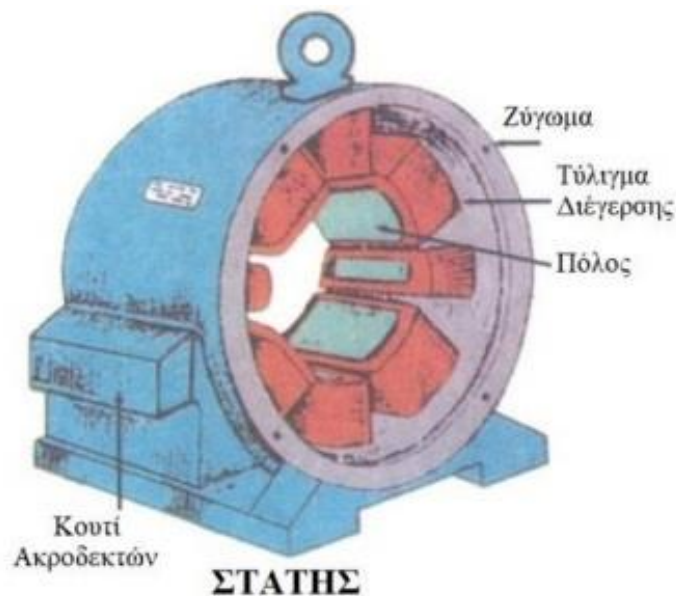


Εικόνα 5 Τυποποίηση και συμβολισμός κιβώτιου ακροδεκτών

Πίνακας 1 Συμβολισμός τυλιγμάτων κιβωτίου ακροδεκτών

α/α	Είδος τυλίγματος ηλεκτρικής μηχανής Σ.Ρ	Συμβολισμός ακροδεκτών
1.	Επαγωγικού τυμπάνου	A1 – A2
2.	Παράλληλης διέγερσης	E1 – E2
3.	Διέγερσης σειράς	D1 – D2

Συστήμα ψηκτροφορέα: Το σύστημα αυτό αποτελείται από τη βάση, η οποία είναι ένα σιδερένιο δαχτυλίδι, που στηρίζει όλο το σύστημα, και τις ψηκτροθήκες, οι οποίες με τη σειρά τους είναι μεταλλικές και στο εσωτερικό τους τοποθετούνται οι ψηκτρες. (Στεργίου, 2009)



Εικόνα 6 Στάτης μηχανής συνεχούς ρεύματος

2.1.2 Δρομέας

Ο δρομέας δημιουργεί διάφορα ηλεκτρομαγνητικά φαινόμενα, τα οποία καθορίζουν την συμπεριφορά της ηλεκτρικής μηχανής ως κινητήρας ή γεννήτρια και αποτελείται από τον άξονα, το συλλέκτη, τον ανεμιστήρα και το επαγωγικό τύμπανο.

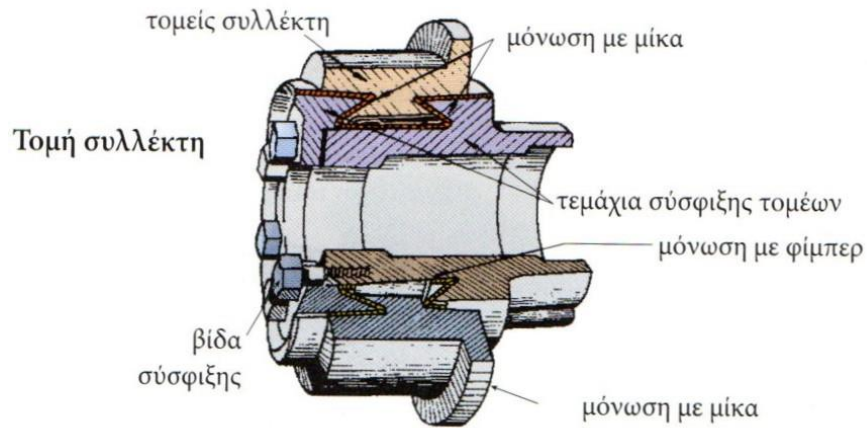
Άξονα: Ο άξονας ο οποίος κατασκευάζεται από ατσάλι, κατά μήκος της επιφάνειας του, είναι τοποθετημένα σε αυτόν το επαγωγικό τύμπανο, ο συλλέκτης και ο ανεμιστήρας. Τα άκρα του άξονα προσαρμόζονται στα έδρανα που βρίσκονται στα καλύμματα της μηχανής και έτσι επιτυγχάνεται η εύκολη περιστροφή του δρομέα στο εσωτερικό της μηχανής.

Το επαγωγικό τύμπανο: το επαγωγικό τύμπανο περιλαμβάνει τον πυρήνα και τα τυλίγματα ισχύος του.

Ο πυρήνας είναι κατασκευασμένος από μαγνητικά ελάσματα, τα οποία για να περιοριστούν οι απώλειες που οφείλονται στα δινορεύματα είναι μονωμένα μεταξύ τους και προσαρμόζονται στον άξονα με ειδικές σφήνες.

Τυλίγματα του επαγωγικού τυμπάνου: Το τύλιγμα του επαγωγικού τυμπάνου αποτελείται από επισμαλτωμένο αγωγό χαλκού κυκλικής διατομής, για ηλεκτρικές μηχανές με μικρή ισχύ και ορθογωνικής διατομής για ηλεκτρικές μηχανές με μεγάλη ισχύ. Ο σκοπός του επαγωγικού τυλίγματος είναι να δημιουργεί μέσα στο μαγνητικό πεδίο, τα καταλληλά ηλεκτρομαγνητικά φαινόμενα σύμφωνα με τα οποία καθορίζεται η συμπεριφορά της ηλεκτρικής μηχανής.

Συλλέκτης: Ο συλλέκτης αποτελείται από τους τομείς και είναι κατασκευασμένοι από ελάσματα ορείχαλκου. Οι τομείς του συλλέκτη είναι μονωμένοι μεταξύ τους με μίκα και ως προς τον άξονα με φίμπερ, συγκρατώνται ανάμεσα σε δύο χαλύβδινα δακτυλίδια και συσφίγγονται με ειδικές βίδες. Στους τομείς του συλλέκτη συγκολλώνται τα άκρα του τυλίγματος ενεργείας σε μικρές εγκοπές ή υπερυψωμένες υποδοχές ή γέφυρες. Ο ρόλος του συλλέκτη είναι καθοριστικός, καθώς ανορθώνει το εναλλασσόμενο ρεύμα που δημιουργείται στο εσωτερικό της μηχανής, σε συνεχές ρευμα. Συμπερασματικά, αποτελεί τον μηχανισμό, που διαφοροποιεί τις μηχανές συνεχούς ρεύματος με τις μηχανές εναλλασσόμενου ρεύματος, για αυτό το λόγο οι μηχανές συνεχούς ρεύματος ονομάζονται και μηχανές με συλλέκτη.



Εικόνα 7 Μορφή συστήματος συλλέκτη

Ανεμιστήρας: Ο ανεμιστήρας είναι τοποθετημένος πάνω στον άξονα της μηχανής και στην αντίθετη πλευρά από αυτή που είναι ο συλλέκτης. Ο ρόλος του είναι να ψύχει τα τυλίγματα του επαγωγικού τυμπάνου, καθώς σε αυτά αναπτύσσεται θερμότητα. Το σχήμα του ανεμιστήρα έχει την μορφή πτερωτής και είναι κατασκευασμένος από πλαστικό ή αλουμίνιο, πράγμα το οποίο εξαρτάται από την ισχύ της ηλεκτρικής μηχανής. (Στεργίου, 2009)



Εικόνα 8 Δρομέας μηχανής συνεχούς ρεύματος

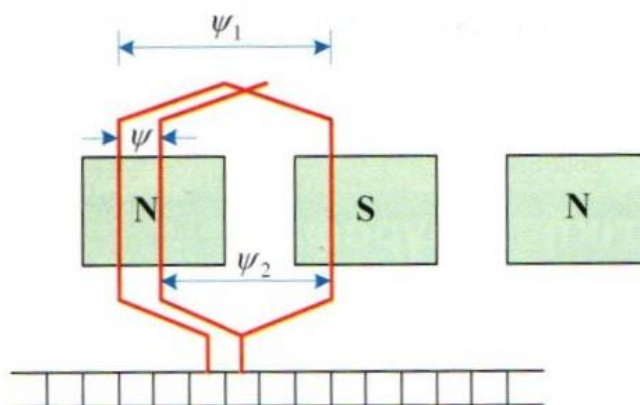
2.2 Βασικές κατηγορίες τυλιγμάτων ηλεκτρικών μηχανών συνεχούς ρεύματος

Τα τυλίγματα των μηχανών συνεχούς ρεύματος χωρίζονται σε δυο βασικές κατηγορίες ανάλογα με τον τρόπο σύνδεσης τους στον συλλέκτη. Οι κατηγορίες αυτές είναι τα βροχοτυλίγματα και τα κυματοτυλίγματα.

2.2.1 Βροχοτυλίγματα

Βροχοτύλιγμα χαρακτηρίζεται το τύλιγμα συνεχούς ρεύματος, όπου τα άκρα, ενός συνόλου σπειρών, συνδέονται σε διαδοχικούς τομείς συλλέκτη ή σε τομείς συλλέκτη που απέχουν ένα ή το πολύ δύο τομείς. Τα βροχοτυλίγματα, τα οποία συνδέονται διαδοχικά ονομάζονται απλά, ενώ εκείνα στα οποία τα άκρα τους απέχουν μεταξύ τους κατά ένα ή δύο τομείς, ονομάζονται διπλά ή τριπλά αντίστοιχα.

Τα βροχοτυλίγματα, τα συναντάμε κυρίως σε ηλεκτρικές μηχανές με μεγάλη ένταση ρεύματος και μικρή τάση. Εξαιτίας της μεγάλης έντασης ρεύματος, τα τυλίγματα αυτά παρουσιάζουν μεγάλη διατομή αγωγών και μικρό αριθμό σπειρών.

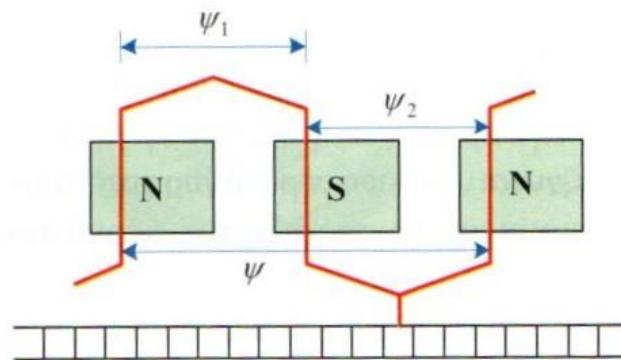


Εικόνα 9 Βροχοτύλιγμα

2.2.2 Κυματοτυλίγματα

Κυματοτύλιγμα χαρακτηρίζεται το τύλιγμα συνεχούς ρεύματος, όπου τα άκρα, ενός συνόλου σπειρών, συνδέονται σε απομακρυσμένους τομείς συλλέκτη, τα οποία απέχουν μεταξύ τους ένα διπλό πολικό βήμα. Απλά, ονομάζονται εκείνα που ο αριθμός των οδοντώσεων είναι ίδιος με τον αριθμό των τομέων του συλλέκτη που χρησιμοποιούνται. Διπλά, ονομάζονται εκείνα που ο αριθμός των οδοντώσεων είναι μισός με τον αριθμό των τομέων του συλλέκτη.

Τα κυματοτυλίγματα, χρησιμοποιούνται σε ηλεκτρικές μηχανές με μικρή ένταση ρεύματος και μεγάλη τάση λειτουργίας. Επειδή, αυτά τα τυλίγματα παρουσιάζουν μεγάλη τάση, ο αριθμός των σπειρών είναι μεγάλος και η διατομή του αγωγού μικρή. (Στεργίου, 2009)



Εικόνα 10 Κυματοτύλιγμα

Όπου:

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

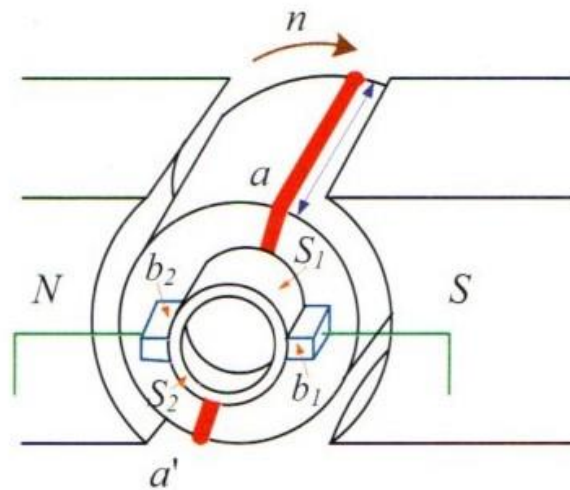
ψ_2 ονομάζεται δεύτερο μερικό βήμα και είναι η απόσταση του δεύτερου στοιχείου μιας ομάδας από το πρώτο στοιχείο της αμέσως επόμενης.

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

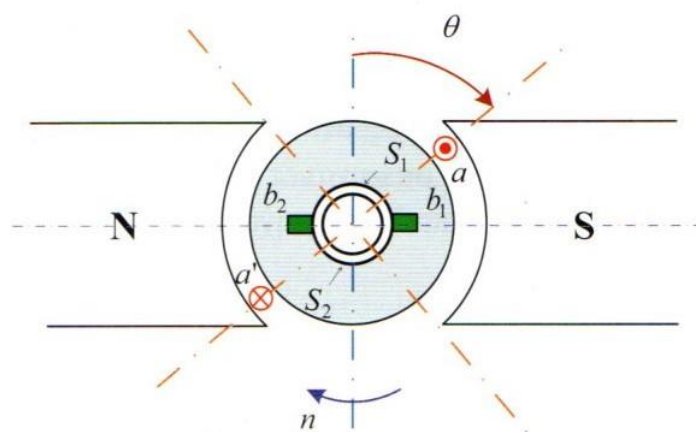
2.3 Μηχανισμοί παραγωγής τάσης-ροπής

Όπως, αναφερθήκαμε προηγουμένως στην ενότητα 2.1.2, ο ρόλος του συλλέκτη παίζει καθοριστικό ρόλο στη λειτουργία μιας μηχανής Σ.Ρ. Για την λειτουργία γεννήτριας, ο συλλέκτης ανορθώνει την εναλλασσόμενη τάση που επάγεται στο δρομέα, με αποτέλεσμα η πολικότητα της τάσης σε κάθε ψήκτρα να παραμένει σταθερή. Για την λειτουργία κινητήρα, διατηρεί το μαγνητικό πεδίο στο τύλιγμα τυμπάνου σταθερό στο χώρο, ανεξάρτητα που οι αγωγοί του δρομέα περιστρέφονται.

Αν υποθέσουμε μια στοιχειώδη διπολική μηχανή της εικ. 2-8, στην οποία το τύλιγμα τυμπάνου αποτελείται από N συγκεντρωμένα ελίγματα ($\alpha, \acute{\alpha}$) και του οποίου τα άκρα συνδέονται στους τομείς S_1, S_2 του συλλέκτη.



Εικόνα 11 Στοιχειώδεις διπολική μηχανή



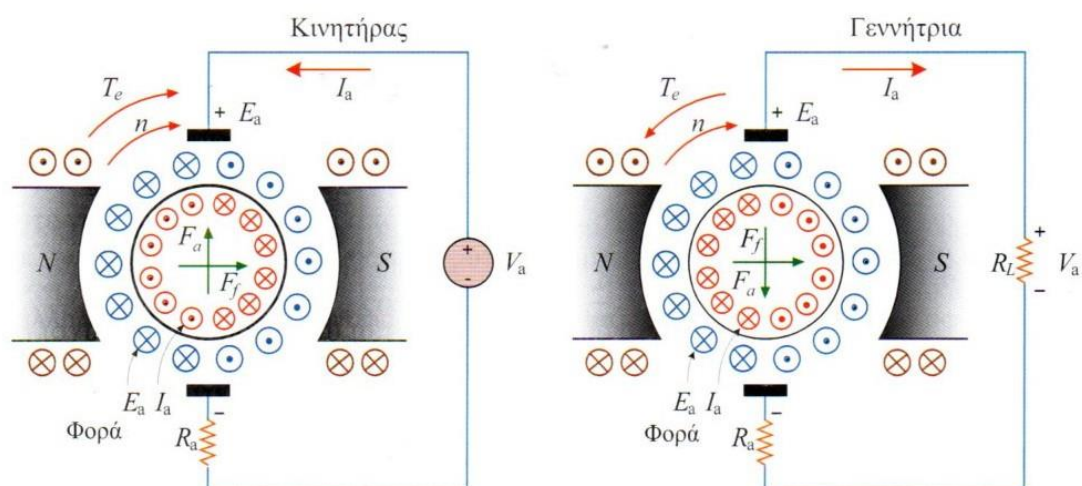
Εικόνα 12 Πολικότητα επαγόμενων τάσεων

Στην εικ. 12 δείχνεται η πολικότητα των επαγόμενων τάσεων στις δύο πλευρές του τυλίγματος τυμπάνου.

Την στιγμή που η γωνία θ των μαγνητικών πεδίων των δυο τυλιγμάτων είναι 0 ή 180° , η επαγόμενη τάση στο τύλιγμα τυμπάνου είναι μηδέν ($B = 0$). Στην περίπτωση, που το πλάτος επαφής των ψηκτρών αμεληθεί, παρατηρείται ότι η ψήκτρα b_1 κινείται πάντοτε επί του νότιου πόλου του τυλίγματος τυμπάνου. Από την άλλη μεριά η ψήκτρα b_2 , κινείται προς την περιοχή του βορείου πόλου. Έτσι, λοιπόν, για τις συγκεκριμένες συνθήκες του πεδίου διέγερσης, η ψήκτρα b_1 έχει πάντα θετικό δυναμικό, ενώ η ψήκτρα b_2 αρνητικό.

Ως αποτέλεσμα, των παραπάνω, η ηλεκτρική μηχανή κατά την λειτουργία γεννήτριας, τα ρεύματα του τυλίγματος τυμπάνου έχουν ίδια φορά με εκείνη των επαγόμενων ΗΕΔ και η αναπτυσσόμενη ροπή είναι αντίρροπή στη φορά περιστροφής. Κατά την λειτουργία κινητήρα, τα ρεύματα τυμπάνου είναι αντίθετα με την φορά των επαγόμενων ΑΗΕΔ, έτσι η επαγόμενη ροπή να έχει ίδια φορά με την φορά περιστροφής.

Στην εικόνα 13, φανερώνονται οι πολικότητες των διάφορων μεγεθών της, για μια μηχανή ΣΡ και στις δυο λειτουργίες.



Εικόνα 13 Λειτουργικές καταστάσεις μηχανής ΣΡ

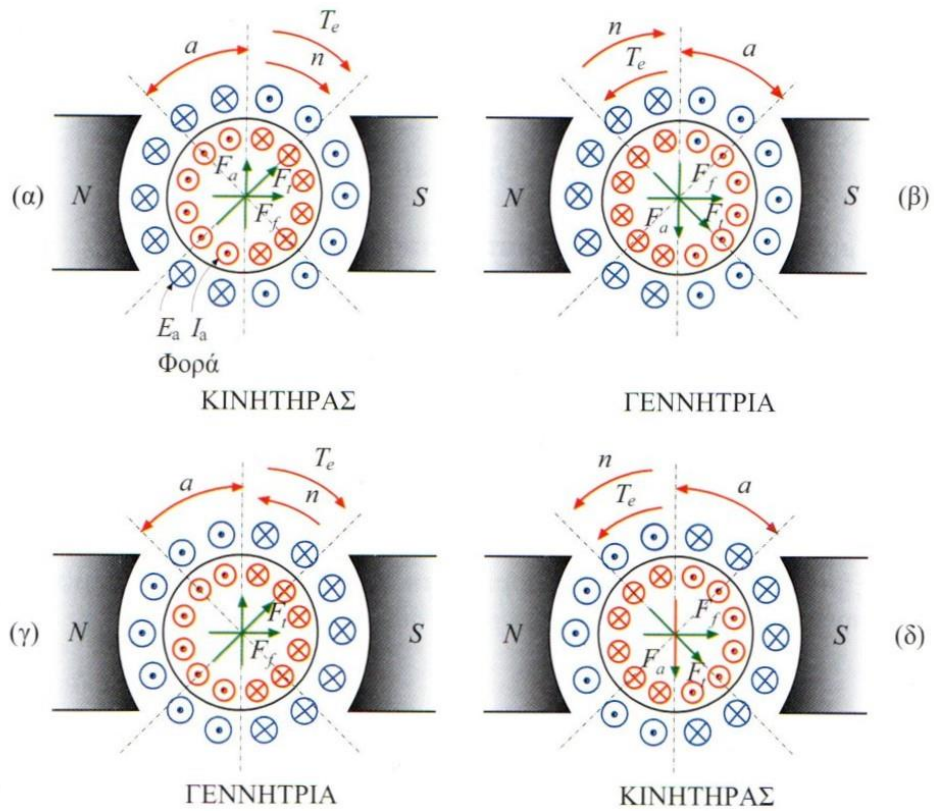
Ανεξάρτητα από την λειτουργική κατάσταση της μηχανής, τα πεδία του στάτη και του δρομέα είναι μεταξύ τους κάθετα, καθώς αποτελεί την καλύτερη επιλογή για την παραγωγή ροπής. (Μαλατέστας, 2021)

2.4 Αντίδραση τυλίγματος τυμπάνου

Αντίδραση τυμπάνου ονομάζεται η επίδραση του ρεύματος του τυμπάνου επί του μαγνητικού πεδίου των κύριων πόλων.

Στη λειτουργία χωρίς φορτίο, το μόνο μαγνητικό πεδίο που βρίσκεται στο διάκενο της μηχανής είναι το μαγνητικό πεδίο του τυλίγματος διέγερσης. Ενώ, στην λειτουργία υπό φορτίο, το τυλίγμα τυμπάνου διαρρέεται από ρεύμα, με αποτέλεσμα τη δημιουργία ενός ακόμα μαγνητικού πεδίου στο διάκενο της μηχανής. Η ύπαρξη ενός νέου μαγνητικού πεδίου στο διάκενο της μηχανής, έχει ως αποτέλεσμα την παραμόρφωση του μαγνητικού πεδίου της διέγερσης. Η παραμόρφωση αυτή, είναι η αιτία εμφάνισης επιμέρους σοβαρών λειτουργικών προβλημάτων, όπως η μετακίνηση της ουδέτερης ζώνης και η εξασθένηση της μαγνητικής ροής στο εσωτερικό της μηχανής.

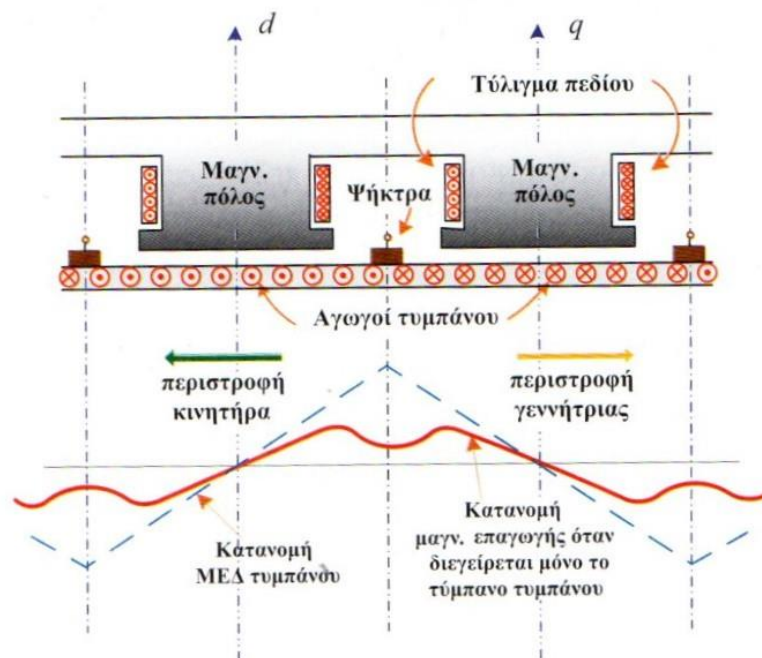
Η μαγνητεγερτική δύναμη (Μ.Ε.Δ.) του τυλίγματος τυμπάνου αλληλοεπιδρά με την αντίστοιχη Μ.Ε.Δ. του τυλίγματος διέγερσης, με αποτέλεσμα τη μεταβολή της πυκνότητας της μαγνητικής ροής στο διάκενο της μηχανής. Η επίδραση αυτή της Μ.Ε.Δ. του τυλίγματος τυμπάνου στην κύρια ροή του πεδίου διέγερσης, είναι γνωστή ως αντίδραση τυμπάνου, εικόνα 14.



Εικόνα 14 Αλληλεπίδραση πεδίων διέγερσης-τυμπάνου

Είναι άξιο παρατήρησης ότι, οι κατανομές των Μ.Ε.Δ. στις περιπτώσεις (α)-(γ) και (β)-(δ), είναι απόλυτα όμοιες, υπό την προϋπόθεση ότι τα αντίστοιχα ρεύματα καθώς και ο αριθμός των ελιγμάτων είναι ίσα.

Στην εικόνα 15, παρουσιάζονται οι αντίστοιχες χωρικές κατανομές της ΜΕΔ και της πυκνότητας ροής του τυλίγματος τυμπάνου.

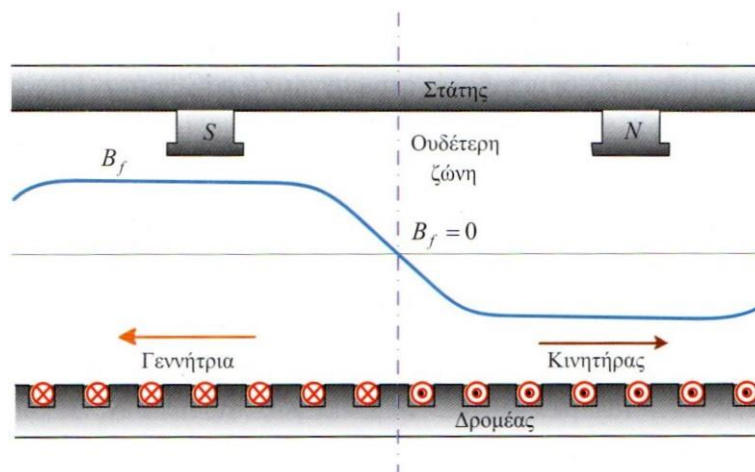


Εικόνα 15 Κατανομές ΜΕΔ και πυκνότητας ροπής

2.4.1 Προβλήματα που παρουσιάζει η αντίδραση τυμπάνου

Το πρώτο από τα προβλήματα που προαναφέραμε είναι η μετακίνηση της ουδέτερης ζώνης της μηχανής. Ως ουδέτερη ζώνη ορίζουμε, τον άξονα εκείνο, όπου το συνιστάμενο πεδίο στο διάκενο είναι μηδενικό.

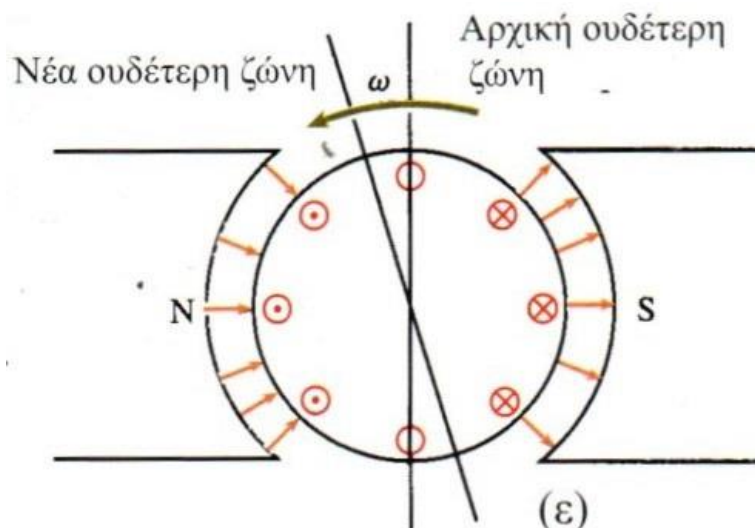
Στη παρακάτω εικόνα 16 φαίνεται μια μηχανή συνεχούς ρεύματος δύο πόλων, όπου η ουδέτερη ζώνη βρίσκεται στη μέση μεταξύ των δύο πόλων. Αυτό συμβαίνει όταν η μηχανή λειτουργεί χωρίς φορτίο, επειδή στο διάκενο της μηχανής βρίσκεται μόνο το μαγνητικό πεδίο της διέγερσης.



Εικόνα 16 Ουδέτερη ζώνη διπολικής μηχανής

Όταν συνδέσουμε στην ηλεκτρική μηχανή κάποιο ηλεκτρικό φορτίο, ανεξάρτητα αν η μηχανή θα λειτουργήσει ως κινητήρας ή γεννήτρια, τότε θα εμφανιστεί ένα καινούργιο ρεύμα από το τύλιγμα τυμπάνου. Αυτό το ρεύμα προκαλεί μαγνητικό πεδίο γύρο από τους αγωγούς του τυλίγματος. Το

καινούργιο μαγνητικό πεδίο επηρεάζει το ήδη υπάρχον μαγνητικό πεδίο στο διάκενο της μηχανής, έχοντας ως αποτέλεσμα την παραμόρφωση της μαγνητικής ροής στο διάκενο και την μετακίνηση της ουδέτερης ζώνης, εικόνα 17.



Εικόνα 17 Μετακίνηση ουδέτερης ζώνης

Γενικά, ισχύει ότι η ουδέτερη ζώνη μετακινείται κατά την φορά της γεννήτριας και αντίθετα προς τη φορά του κινητήρα. Το πόσο θα μετακινηθεί εξαρτάται από την τιμή του ρεύματος του δρομέα και το μέγεθος του φορτίου της μηχανής.

Όσον αφορά τις συνέπειες της μετακινήσεως της ουδέτερης ζώνης, είναι η δημιουργία εκκενώσεων και σπινθήρων στις ψήκτρες της ηλεκτρικής μηχανής. Αυτό αποτελεί σοβαρό πρόβλημα, αφού μειώνει σημαντικά τη ζωή των ψηκτρών και φθείρει τους τομείς του συλλέκτη.

Το δεύτερο πρόβλημα που προκαλεί η αντίδραση οπλισμού είναι η εξασθένηση της μαγνητικής ροής. Το πρόβλημα αυτό, έχει σαν αποτέλεσμα τη μείωση της επαγομένης τάσης στο τύλιγμα τυμπάνου και το γεγονός αυτό δημιουργεί προβλήματα τόσο στις γεννήτριες όσο και στους κινητήρες. Στις γεννήτριες προκαλεί μείωση της παραγομένης τάσης, ενώ στους κινητήρες προκαλεί αύξηση των στροφών. (Μαλατέστας, 2021)

2.4.2 Αντιμετώπιση των προβλημάτων που προκαλεί η αντίδραση τυμπάνου

Η αντίδραση τυμπάνου αντιμετωπίζεται με τους εξής τρόπους

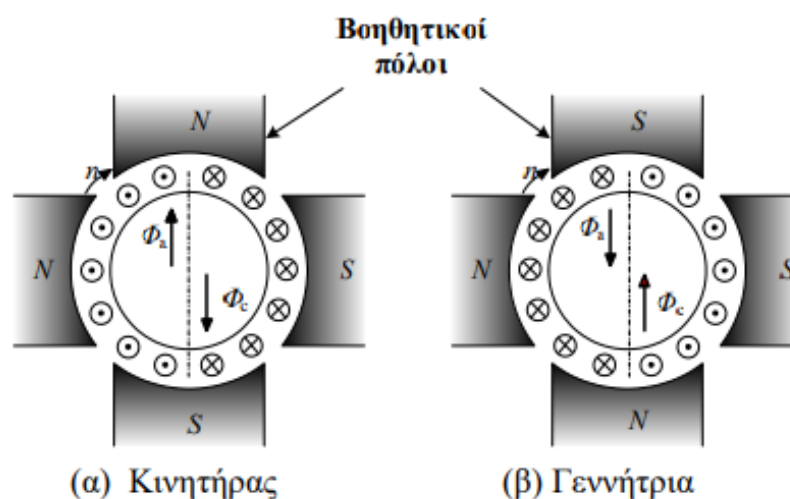
- Βοηθητικοί πόλοι
- Τύλιγμα αντιστάθμισης
- Κατασκευάστηκες μεθόδους

Το σημαντικότερο ρόλο παίζουν οι βοηθητικοί πόλοι, οι οποίοι υπάρχουν στις περισσότερες ηλεκτρικές μηχανές συνεχούς ρεύματος και δημιουργούν ένα κατάλληλο πεδίο τυμπάνου.

2.4.2.1 Βοηθητικοί πόλοι

Οι βοηθητικοί πόλοι ή αλλιώς εσωτερικοί πόλοι, είναι υπεύθυνοι για την αποφυγή των σπινθηρισμών στις ψήκτρες. Για να γίνει αυτό, οι βοηθητικοί πόλοι τοποθετούνται ενδιάμεσα στους κύριους πόλους και διαρρέονται από το ρεύμα τυλίγματος τυμπάνου.

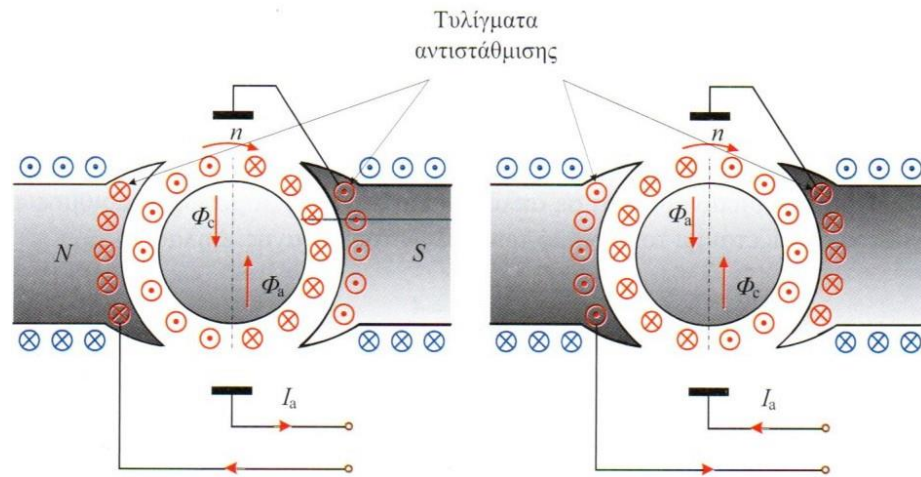
Από την άλλη μεριά, οι βοηθητικοί πόλοι δεν επηρεάζουν την λειτουργία της ηλεκτρικής μηχανής, εξαιτίας του μικρού μεγέθους τους, ωστόσο η πολικότητά τους είναι καθορισμένη. Για την λειτουργία της γεννήτριας, τα τυλίγματα των βοηθητικών πόλων συνδέονται κατά τέτοιον τρόπο, ώστε κατά τη φορά περιστροφής του τυμπάνου μετά από κάθε βόρειο κύριο πόλο να υπάρχει ένας νότιος βοηθητικός πόλος και αντίθετα στην περίπτωση του κινητήρα, εικόνα 18.



Εικόνα 18 Βοηθητικοί πόλοι

2.4.2.2 Τύλιγμα αντιστάθμισης

Τα τυλίγματα αντιστάθμισης τοποθετούνται σε κατάλληλες οδοντώσεις που βρίσκονται στις επιφάνειες των πόλων και απέναντι από τους αγωγούς του δρομέα, ώστε να εξουδετερώνουν την αντίδραση τυμπάνου, εικόνα 19.



Εικόνα 19 Τύλιγμα αντιστάθμισης

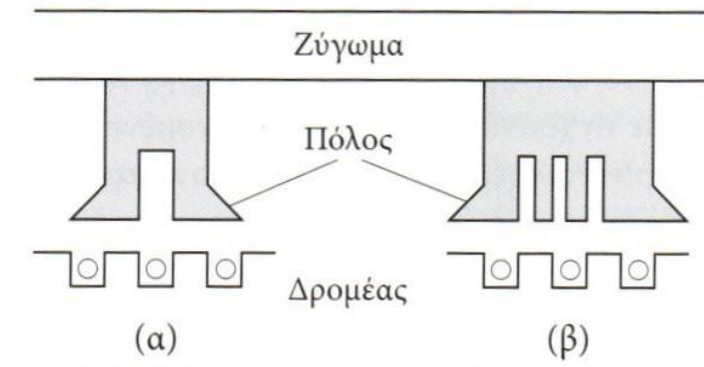
Αυτά τα τυλίγματα συνδέονται σε σειρά με τα τυλίγματα του τυμπάνου, με σκοπό κάθε αγωγός του τυλίγματος αντιστάθμισης να διαρρέεται σε κάθε χρονική στιγμή από ίσο και αντίθετης φοράς ρεύμα, από εκείνο του γειτονικού αγωγού του τυλίγματος τυμπάνου. Στην περίπτωση που τα δυο τυλίγματα έχουν ίδιο αριθμό αμπερελιγμάτων, η αντίδραση τυμπάνου εξουδετερώνεται σε μεγάλο αριθμό, με αποτέλεσμα την μη μετακίνηση της ουδέτερης ζώνης και την μείωση των σπινθηρισμών. (Μαλατέστας, 2021)

2.4.2.3 Κατασκευαστικές μέθοδοι

Εκτός από τους δυο προηγούμενους μεθόδους, υπάρχουν και άλλοι τρόποι αντιμετώπισης που προέρχονται από το δρομέα και την διέλευση του από τους κύριους πόλους.

Μια κατασκευαστική λύση είναι η κατασκευή των πόλων από ελάσματα, προκαλώντας αύξηση της μαγνητικής επαγωγής B λόγω μείωσης της επιφάνειας διέλευσης της μαγνητικής ροής του τυμπάνου μέσω των ελασμάτων, με αποτέλεσμα την μείωση της μαγνητικής διαπερατότητας.

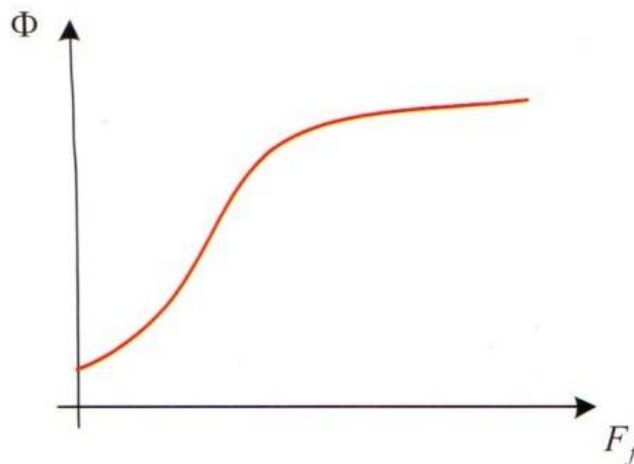
Τέλος, η προσθήκη μιας ή περισσότερων αυλακώσεων στους πόλους, προσφέρει την δυνατότητα εξασθένισης του πεδίου τυμπάνου, λόγω της αύξησης της μαγνητικής αντίστασης για την μαγνητική ροή του τυμπάνου, η οποία ρέει μέσω των πόλων, ενώ δεν επηρεάζεται η μαγνητική ροή στους κύριους πόλους, εικόνα 20. (Σαφάκας, 2019)



Εικόνα 20 Κατασκευή των πόλων

2.5 Καμπύλη μαγνήτισης

Η καμπύλη μαγνήτισης γενικά εκφράζεται από τη μεταβολή της πυκνότητας της μαγνητικής ροής συναρτήσει της έντασης του μαγνητικού πεδίου $B = f(H)$. Για τις ηλεκτρικές μηχανές, η χαρακτηριστική αυτή εκφράζεται με παράγωγα μεγέθη, όπως με την μεταβολή της μαγνητικής ροής ανά πόλο συναρτήσει της μαγνητικής δύναμης του πεδίου της διέγερσης, εικόνα 21.



Εικόνα 21 Χαρακτηριστική καμπύλη μαγνήτισης μηχανής ΣΡ

Ο ρόλος της χαρακτηριστικής αυτής συνδέεται άμεσα με την απόδοση των ηλεκτρικών μηχανών, αφού οι περισσότερες ηλεκτρικές μηχανές σχεδιάζονται ώστε να λειτουργούν κοντά στο σημείο κορεσμού (γόνατο) της καμπύλης αυτής, προκειμένου να παραχθεί η μέγιστη δυνατή ισχύς που μπορεί να αποδώσει η ηλεκτρική μηχανή.

2.6 Ροή ισχύος και απώλειες στις μηχανές Σ.Ρ

Όπως έχει προαναφερθεί στο 1^ο κεφάλαιο, οι ηλεκτρικές μηχανές στηρίζονται στο φαινόμενο της ηλεκτρομηχανικής μετατροπής της ενέργειας, συνδυάζοντας καταλληλά ένα ηλεκτρικό και ένα μηχανικό σύστημα, ώστε να μετατρέπουν την ενέργεια από ηλεκτρική σε μηχανική και αντίστροφα (κινητήρας ή γεννήτρια). Και στις δυο περιπτώσεις η ισχύς εισόδου δε μετατρέπεται εξ ολοκλήρου

σε ωφέλιμη μορφή ισχύος στην έξοδο της μηχανής, πάντα κατά την μετατροπή της ισχύος εμφανίζονται κάποιες απώλειες.

Ο συντελεστής απόδοσης μιας μηχανής Σ.Ρ ορίζεται ως εξής

$$n = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\% \quad (2.1)$$

Η διαφορά μεταξύ της ισχύος εισόδου και της ισχύος εξόδου είναι ακριβώς οι απώλειες μηχανής. Οπότε

$$n = \frac{P_{out} - P_{loss}}{P_{in}} \times 100\% \quad (2.2)$$

2.6.1 Απώλειες στις μηχανές Σ.Ρ

Οι απώλειες που εμφανίζονται στις μηχανές Σ.Ρ χωρίζονται σε πέντε βασικές κατηγορίες:

1. Απώλειες χαλκού
2. Απώλειες ψηκτρών
3. Απώλειες πυρήνα
4. Μηχανικές απώλειες
5. Κατανεμημένες απώλειες

Απώλειες χαλκού

Οι απώλειες αυτές είναι ηλεκτρικές απώλειες και εμφανίζονται στα διαφορά τυλίγματα των ηλεκτρικών μηχανών.

$$\text{Απώλειες τυμπάνου: } P_A = I_A^2 \times R_A \quad (2.3)$$

$$\text{Απώλειες διέγερσης: } P_F = I_F^2 \times R_F \quad (2.4)$$

Όπου:

P_A = απώλειες τυμπάνου

P_F = απώλειες διέγερσης

I_A = ρεύμα τυμπάνου

I_F = ρεύμα διέγερσης

R_A = αντίσταση τυμπάνου

R_F = αντίσταση διέγερσης

Απώλειες ψηκτρών

Οι απώλειες ψηκτρών είναι και αυτές ηλεκτρικές απώλειες και οφείλονται στην τάση επαφής των ψηκτρών.

$$P_{BD} = V_{BD} \times I_A \quad (2.5)$$

Όπου :

P_{BD} = απώλειες ψηκτρών

V_{BD} = πτώση τάσης ψηκτρών

I_A = ρεύμα τυμπάνου

(Charman, 2020)

Απώλειες πυρήνα

Είναι μαγνητικές απώλειες και χωρίζονται σε απώλειες υστέρησης και δινορρευμάτων της μηχανής. Οι απώλειες υστέρησης εξαρτώνται από την επιφάνεια του βρόχου υστέρησης και από τη συχνότητα της επαγόμενης ΗΕΔ. Οι απώλειες δινορρευμάτων εξαρτώνται και αυτές από την συχνότητα επαγόμενης ΗΕΔ και από τη πυκνότητα μαγνητικής ροής.

Μηχανικές απώλειες

Αυτή η κατηγορία απωλειών σχετίζεται με μηχανικά φαινόμενα και διακρίνεται σε δυο βασικούς τύπους. Πρώτον στις απώλειες τριβών, οι οποίες οφείλονται στα έδρανα (ρουλεμάν) του άξονα και στις τριβές μεταξύ συλλέκτη - ψηκτρών. Έπειτα, στις απώλειες ανεμισμού, που οφείλονται στην βεβιασμένη κυκλοφορία αέρα για την ψύξη της μηχανής. Ωστόσο και οι δυο τύποι απωλειών είναι ανάλογες της ταχύτητας του άξονα περιστροφής.

Κατανεμημένες απώλειες

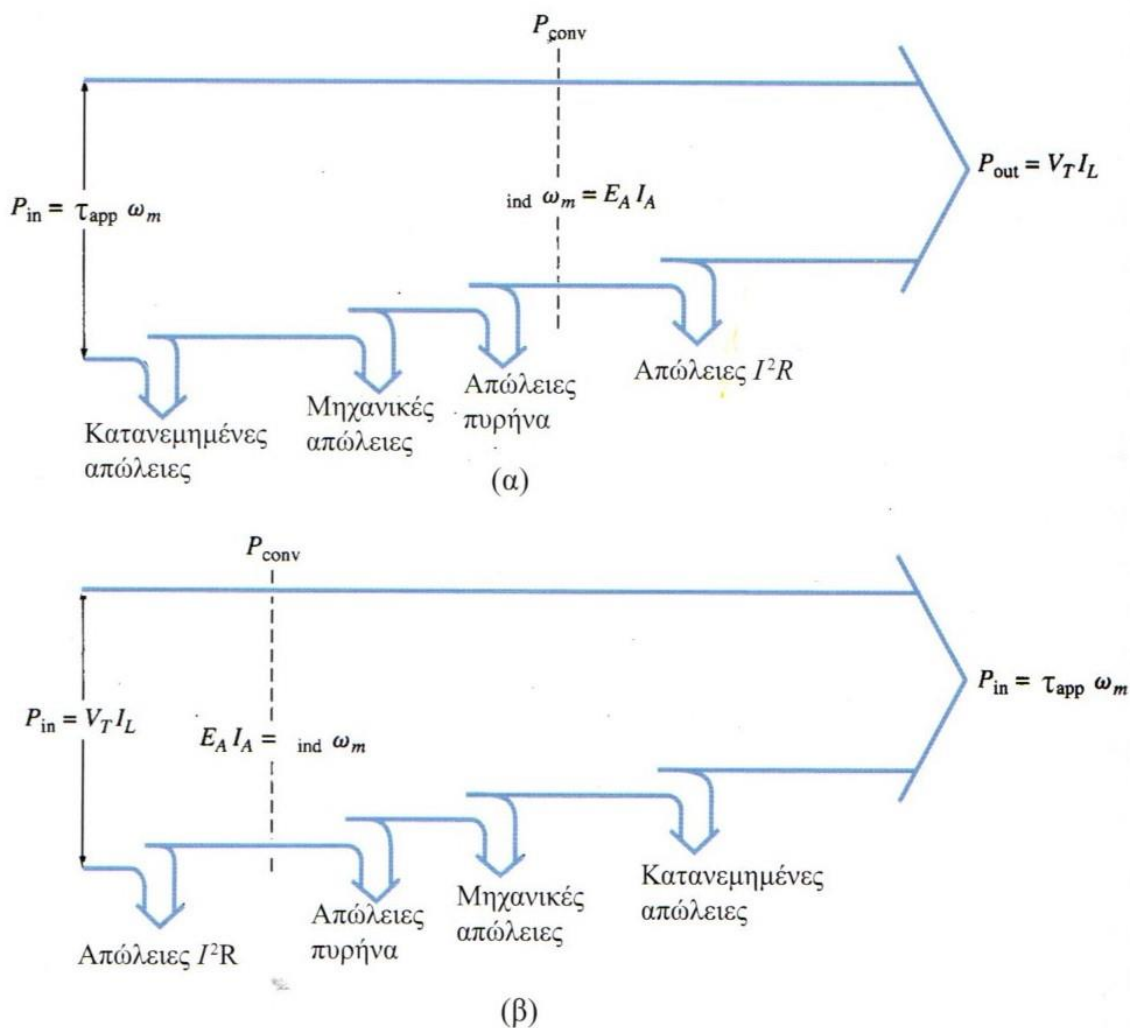
Τέλος, σε αυτή τη κατηγορία απωλειών, εντάσσονται απώλειες που δεν μπορούν να ενταχθούν σε κάποια προηγούμενη κατηγορία. (Μαλατέστας, 2021)

2.6.2 Διάγραμμα ροής ισχύος

Το διάγραμμα ροής αποτελεί μια από τις πιο πρακτικές μεθόδους παράστασης των απωλειών ισχύος στις μηχανές. Για λειτουργία γεννήτριας, το διάγραμμα ροής ισχύος μας δείχνει το ποσοστό της

μηχανικής ενέργεια που μετατρέπεται σε ηλεκτρική ισχύ. Ενώ, για τη λειτουργία κινητήρα, το διάγραμμα αντιστρέφεται.

Στην εικόνα 22, δείχνεται το διάγραμμα ροής ισχύος μιας ηλεκτρικής μηχανής Σ.Ρ.



Εικόνα 22 Διάγραμμα ροής ισχύος μηχανής Σ.Ρ. α) Γεννήτρια. β) Κινητήρας

Οπού:

P_{conv} = μηχανική ισχύ που μετατρέπεται σε ηλεκτρική για γεννήτρια και το αντίθετο για κίνητρα.

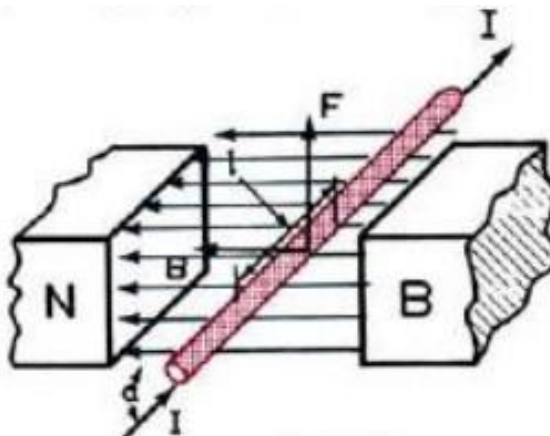
3 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο : ΚΙΝΗΤΗΡΕΣ ΣΥΝΕΧΟΥΣ ΡΕΥΜΑΤΟΣ

Τα πρώτα συστήματα συνεχούς ρεύματος αναπτύχθηκαν στις ΗΠΑ, αλλά γρήγορα κυριαρχήθηκαν από τα συστήματα ισχύος εναλλασσόμενου ρεύματος. Παρόλο το γεγονός ότι τα συστήματα συνεχούς ρεύματος πλέον συναντώνται σπάνια, οι κινητήρες συνεχούς ρεύματος κατέχουν μεγάλο ποσοστό ετήσιων πωλήσεων.

Οι λόγοι που διατηρούν αρκετά δημοφιλής στις μέρες μας τους κινητήρες συνεχούς ρεύματος, είναι, πρώτον, ότι τα συστήματα συνεχούς ρεύματος παραμένουν αναντικατάστατα στα συστήματα των επιβατικών αυτοκινήτων, στα φορτηγά, στα αεροπλάνα και γενικά σε πολλά μέσα μεταφοράς, όπου το όχημα διαθέτει κάποιο σύστημα που τροφοδοτείται με συνεχές ρεύμα. Ένας ακόμα λόγος που καθιστά τους κινητήρες αυτούς αξεπέραστους, είναι η ιδιότητα τους να προσφέρουν τον έλεγχο της ταχύτητας. Για αυτό σε πολλές εφαρμογές που απαιτούνται μεγάλες μεταβολές της ταχύτητας περιστροφής, συναντάμε κινητήρες συνεχούς ρεύματος. (Charman, 2020)

3.1 Αρχή λειτουργίας κινητήρων Σ.Ρ

Όταν αγωγός ενεργού μήκους ℓ βρίσκεται μέσα σε μαγνητικό πεδίο μαγνητικής επαγωγής B και διαρρέεται από ηλεκτρικό ρεύμα, τότε στον αγωγό ασκείται από το μαγνητικό πεδίο δύναμη F που τείνει να τον κινήσει. Αυτό ονομάζεται φαινόμενο κινητήρα.



Εικόνα 23 Αρχή λειτουργίας κινητήρων Σ.Ρ

Το μέτρο της δυνάμεως F που ασκείται στον αγωγό δίνεται από τη σχέση:

$$F=BI \ell \quad (3.1)$$

Όπου:

B = μαγνητική επαγωγή του πεδίου, (T) , (Vs/m²),

I = ένταση του ρεύματος που διαρρέει τον αγωγό, (A)

ℓ = μήκος του αγωγού, (m)



Εικόνα 24 Φορά δύναμης F

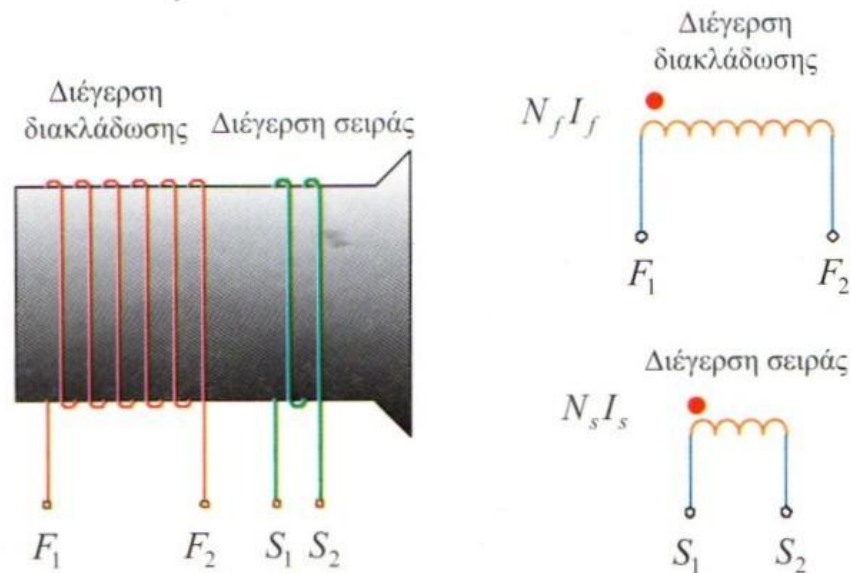
Η κατεύθυνση της δύναμης F (εικ. 24) βρίσκεται εύκολα με τον κανόνα του αριστερού χεριού: όταν ο δείκτης δείχνει την κατεύθυνση των μαγνητικών γραμμών (από το βόρειο πόλο προς το νότιο) και ο μέσος δάκτυλος δείχνει τη φορά ροής του ρεύματος στον αγωγό, τότε ο αντίχειρας προσανατολισμένος κάθετα προς τα δυο άλλα δάκτυλα δείχνει την κατεύθυνση της δύναμης. (Μαλατέστας, 2021)

3.2 Μέθοδοι διέγερσης και είδη κινητήρων Σ.Ρ

Τυλίγματα διέγερσης

Τα τυλίγματα διέγερσης διακρίνονται σε δύο κατηγορίες, στα τυλίγματα διέγερσης διακλάδωσης (shunt field winding) και στα τυλίγματα σειράς (series field winding). Σκοπός των τυλιγμάτων διέγερσης, είναι η δημιουργία του κατάλληλου μαγνητικού πεδίου στο διάκενο της μηχανής. Όπως αναφερθήκαμε και στο 1^ο κεφάλαιο, το μαγνητικό πεδίο αποτελεί το μέσο για την σύζευξη και την ανταλλαγή ενέργειας μεταξύ του ηλεκτρικού και του μηχανικού συστήματος. Η πυκνότητα μαγνητικής ροής στο διάκενο, σχετίζεται άμεσα με το μέγεθος της μαγνητεγερτικής δύναμης (αμπερελίγματα) των τυλιγμάτων διέγερσης.

Το τύλιγμα διέγερσης σειράς, όπως και το τύλιγμα διακλάδωσης, βρίσκονται στο σταθερό μέρος της μηχανής και διαρρέονται από ρεύμα τυμπάνου που απορρόφα ο κινητήρας. Για να μας δώσει το τύλιγμα αυτό τα απαραίτητα αμπερελίγματα, χρειάζεται σχετικά μικρός αριθμός σπειρών, διατομής ανάλογης των αγωγών του τυλιγματος τυμπάνου. Αντίθετα, το τύλιγμα διακλάδωσης διαθέτει κατά πολύ μεγαλύτερο αριθμό σπειρών μικρής διατομής και διαρρέεται από αρκετά μικρότερο ρεύμα, εικόνα 25.



Εικόνα 25 Τύλιγμα διέγερσης (χωρική τοποθέτηση)

Ορίζουμε ως ισοδύναμο ρεύμα πεδίου $I_{f,eq}$, 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.

$$F_{eq} = N_f I_f + N_s I_s = N_f I_{f,eq} \quad (3.2)$$

Και

$$I_{f,eq} = I_f \pm \frac{N_s I_s}{N_f} \quad (3.3)$$

Όπου:

N_f = αριθμός σπειρών του τυλίγματος της διέγερσης διακλάδωσης

N_s = αριθμός σπειρών του τυλίγματος της διέγερσης σειράς

I_f = ρεύμα του τυλίγματος της διέγερσης διακλάδωσης (A)

I_s = ρεύμα του τυλίγματος της διέγερσης σειράς (A)

(Μαλατέστας, 2021)

Κατηγορίες κινητήρων ΣΡ

Οι κινητήρες ΣΡ ανάλογα με τα τυλίγματα διέγερσης που διαθέτουν και με τον τρόπο που αυτά συνδέονται, χωρίζονται στις εξής κατηγορίες:

- Κινητήρες ξένης διέγερσης (separate excitation):

Οι κινητήρες της κατηγορία αυτή διαθέτουν μόνο το τύλιγμα της διέγερσης διακλάδωσης, το οποίο τροφοδοτείται από εξωτερική πηγή συνεχούς ρεύματος. Η κατηγορία αυτή μοιάζει με την ακόλουθη κατηγορία κινητήρων παράλληλης διέγερσης. Ωστόσο, κατασκευάζονται μόνο για ειδικές χρήσεις, κυρίως κατά τις οποίες γίνεται ρύθμιση ταχύτητας.

- Κινητήρες παράλληλης διέγερσης (shunt excitation):

Και αυτή η κατηγορία διαθέτει μόνο το τύλιγμα διακλάδωσης, αλλά σε αυτή τη περίπτωση το τύλιγμα τροφοδοτείται από την τάση τυλίγματος τυμπάνου και συνδέεται παράλληλα με το επαγωγικό τύμπανο.

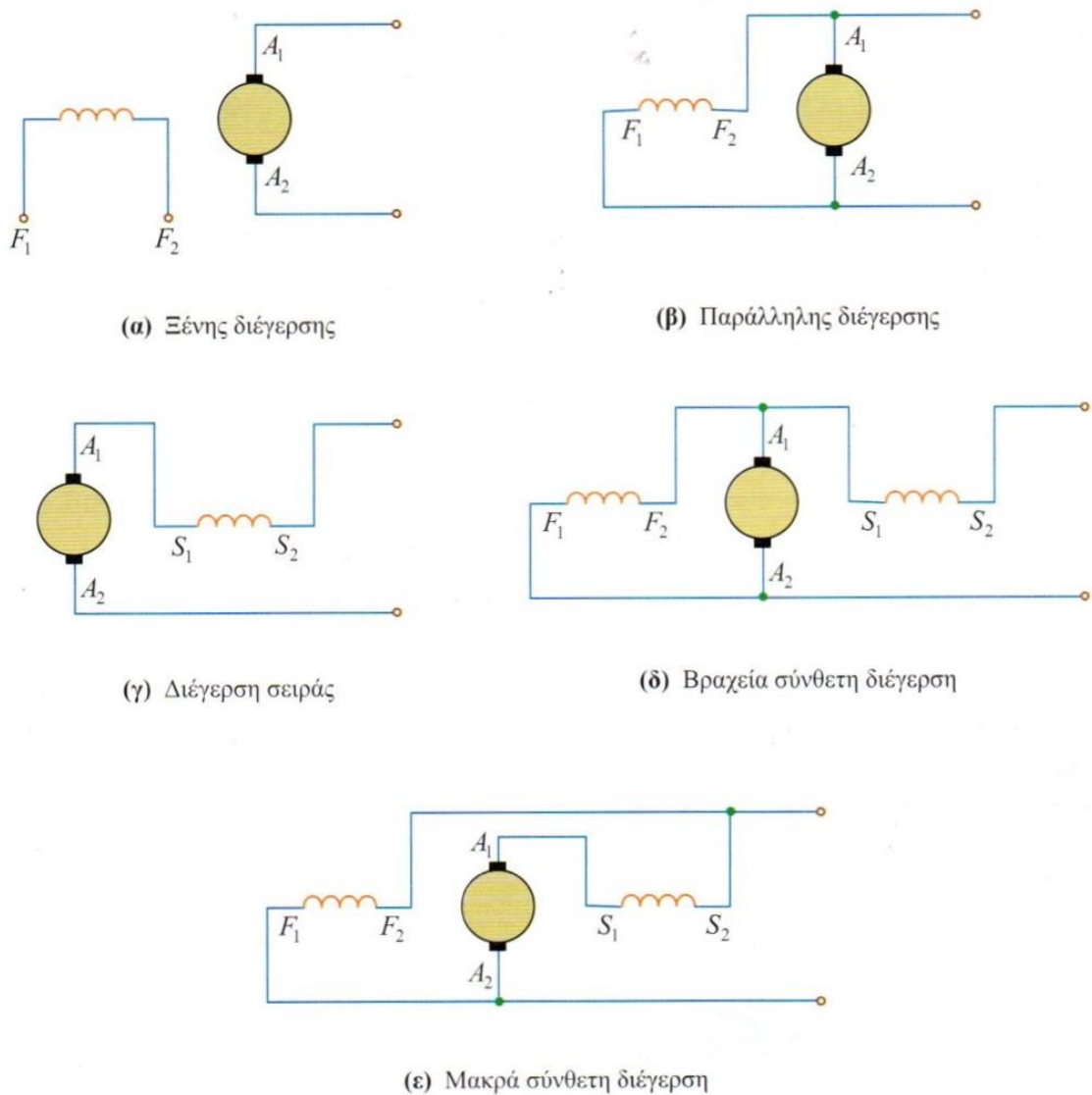
- Κινητήρες διέγερσης σειράς (series excitation).

Στην συγκεκριμένη κατηγορία, ο κινητήρας διαθέτει μόνο το τύλιγμα διέγερσης σειράς και το οποίο συνδέεται σε σειρά με το τύλιγα επαγωγικού τυμπάνου

- Κινητήρες σύνθετης διέγερσης (Βραχεία – Μακρά):

Τέλος, σε αυτή τη κατηγορία κινητήρων, δρουν ταυτόχρονα και τα δυο τυλίγματα διέγερσης. Επίσης, χωρίζεται σε δυο περιπτώσεις, στην περίπτωση βραχείας σύνθετης διέγερσης (short shunt compound excitation) και στην περίπτωση μακράς σύνθετης διέγερσης (long shunt compound excitation). Έπειτα, πρέπει να διευκρινιστεί ότι στους κινητήρες σύνθετης διέγερσης, ανάλογα με τον τρόπο που είναι συνδεδεμένο το τύλιγμα σειράς με το τύλιγμα διακλάδωσης, αντιστοιχεί για αθροιστική ή διαφορική σύνδεση. Η αθροιστική σύνδεση, είναι στην περίπτωση που το μαγνητικό πεδίο του τυλίγματος διέγερσης σειράς δρα προσθετικά (ενισχύει) με το αντίστοιχο μαγνητικό πεδίο του πεδίου της διέγερσης διακλάδωσης. Η διαφορική σύνδεση, είναι στην περίπτωση που το πεδίο του τυλίγματος διέγερσης σειράς δρα αφαιρετικά, δηλαδή έχει αντίθετη φορά από εκείνο του τυλίγματος της κύριας διακλάδωσης. (Μαλατέστας, 2015)

Στην εικόνα 26, απεικονίζονται οι διάφορες κατηγορίες κινητήρων ΣΡ, α) ξένης διέγερσης, β) παράλληλης διέγερσης, γ) διέγερση σειράς, δ) βραχείας συνθέτης διέγερσης και ε) μακράς συνθέτης διέγερσης.

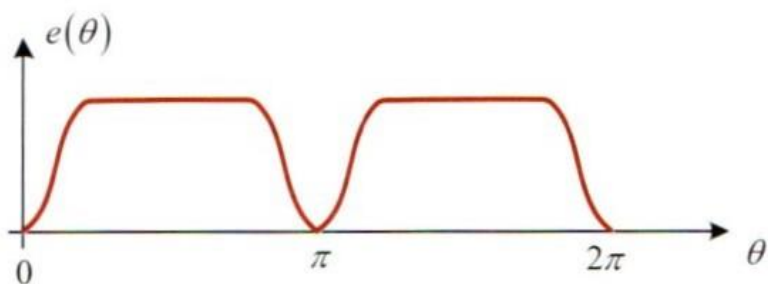


Εικόνα 26 Κατηγορίες κινητήρων ΣΡ

3.3 Παραγωγή τάση – ροπή στους κινητήρες ΣΡ

Παραγωγή τάσης

Σύμφωνα με το κεφ. 2, ενότητα 4 ο συλλέκτης ανορθώνει την τάση, με αποτέλεσμα η τάση που λαμβάνεται από τους ακροδέκτες των ψηκτρών να είναι συνεχής, εικ. 27.



Εικόνα 27 Επαγόμενη τάση στους ακροδέκτες των ψηκτρών

Η μέση τιμή της επαγόμενης τάσης στο δρομέα, στην περίπτωση διπολικής μηχανής ισούται

$$E_{\alpha} = \frac{\omega N}{\pi} \Phi \quad (3.4)$$

όπου:

Φ = Μαγνητική ροή ανά πόλο, (Wb)

ω = ηλεκτρική κυκλική συχνότητα, (rad / s)

Στην περίπτωση Ρ-πολικής μηχανής, ισχύει ότι:

$$\omega_m = \frac{2\pi n}{60} \quad \text{και} \quad \omega = \frac{P}{2} \omega_m = \frac{P\pi n}{60} \quad (3.5)$$

Επομένως:

$$E_{\alpha} = \frac{PN\Phi n}{60} \Phi \quad (3.6)$$

όπου:

ω_m = μηχανική γωνιακή ταχύτητα, (rad / s)

Σε μια τυχαία μηχανή, ο αριθμός των ζευγών των πόλων των στοιχείων του τυλίγματος τυμπάνου, των αγωγών ανά στοιχείο, καθώς και ο αριθμός των παράλληλων κλάδων, είναι σταθερά μεγέθη. Από την άλλη μεριά, η μαγνητική ροή και η στροφές, είναι μεταβλητά μεγέθη. Η μαγνητική ροή εξαρτάται από τα αμπερελίγματα της διέγερσης και οι στροφές, από το μηχανικό φορτίο. Άρα η (3.6) μπορεί να πάρει τη μορφή:

$$E_{\alpha} = \frac{Psw}{2a60} \Phi n = K_g \Phi n \quad (3.7)$$

όπου:

$$K_g = \frac{sw}{2a60}, \left(\frac{V}{Wb \times rpm} \right) \quad (3.8)$$

όπου:

K_g = κατασκευαστική σταθερά

s = αριθμός των στοιχείων του τυλίγματος

w = αριθμός των αγωγών του ανά στοιχείο

α = αριθμός παράλληλων κλάδων

(Μαλατέστας, 2021)

Παραγωγή ροπής

Η παραγωγή ροπής σε έναν κινητήρα Σ.Ρ., οφείλεται στην προσπάθεια ευθυγράμμισης των δυο μαγνητικών πεδίων στο στάτη και το δρομέα. Για λειτουργία κινητήρα, το μαγνητικό πεδίο του στάτη προηγείται πάντα του πεδίου του δρομέα. Η παραγόμενη ηλεκτρική ροπή δίνεται από την έκφραση:

$$T = \frac{P_s w}{4a\pi} \Phi I_\alpha = K_m \Phi I_\alpha \quad (3.9)$$

όπου:

$$K_m = \frac{60}{2\pi} K_g = \frac{P_s w}{4a\pi} \quad (3.10)$$

Σύμφωνα με την (3.9), ο έλεγχος της ροπής (και κατ' επέκταση των στροφών) σε ένα κινητήρα Σ.Ρ., μπορεί να πραγματοποιηθεί είτε με τον έλεγχο της μαγνητικής ροής μέσω του ρεύματος της κύριας διέγερσης, είτε με τη μεταβολή του ρεύματος του τυλίγματος τυμπάνου, είτε και με συνδυασμένο έλεγχο και των δύο ρευμάτων.

Αν και 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, προτιμάται ο έλεγχος μέσω του ρεύματος του τυλίγματος τυμπάνου. 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. Δηλαδή:

$$L_f \gg L_a \quad (3.11)$$

και

$$\tau_f = \frac{L_f}{R_f} \gg \tau_a = \frac{L_a}{R_a} \quad (3.12)$$

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, 2021)

Η αναπτυσσόμενη εσωτερική ή ηλεκτρομαγνητική ισχύς, δίνεται από τη σχέση

$$P_{em} = E_a I_a = K_g \Phi_n I_a = K_g \Phi I_a \frac{60\omega_m}{2\pi} = T \omega_m \quad (3.13)$$

3.4 Διεύρυνση εξισώσεων κινητήρων Σ.Ρ

Αν επιλύσουμε την $V = V_a = E_a + R_a I_a$ ως προς την ένταση τυμπάνου I_a , προκύπτει η σχέση:

$$I_a = \frac{V_a + E_a}{R_a} \quad (3.14)$$

Όπου:

V_a = τάση τυλίγματος τυμπάνου (V),

R_a = αντίσταση τυλίγματος τυμπάνου (A).

Κατά την εκκίνηση του κινητήρα, η επαγόμενη τάση E_a είναι μηδενική ($E_a = 0$), επειδή είναι ανάλογη των στροφών του κινητήρα (n) και οι στροφές εκείνη την στιγμή είναι εξίσου μηδενικές ($n = 0$). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, κατά την εκκίνηση του κινητήρα να απουσιάζει η αντιηλεκτρεγερτική δύναμη (Α.Η.Ε.Δ.) και έτσι να δημιουργείται ένα ρεύμα εκκίνησης πολύ μεγαλύτερο του ονομαστικού. Σε αυτό συμβάλει και η πολύ μικρή τιμή της αντίστασης τυμπάνου ($R_a < 5\Omega$). Συνήθως ισχύει ότι:

$$I_{a,εκ} = \frac{V_a}{R_a} \approx (7 - 10) I_{a,no} \quad (3.15)$$

Όπου:

$I_{a,no}$ = ονομαστικό ρεύμα τυμπάνου, (A),

$I_{a,εκ}$ = ρεύμα εκκίνησης, (A).

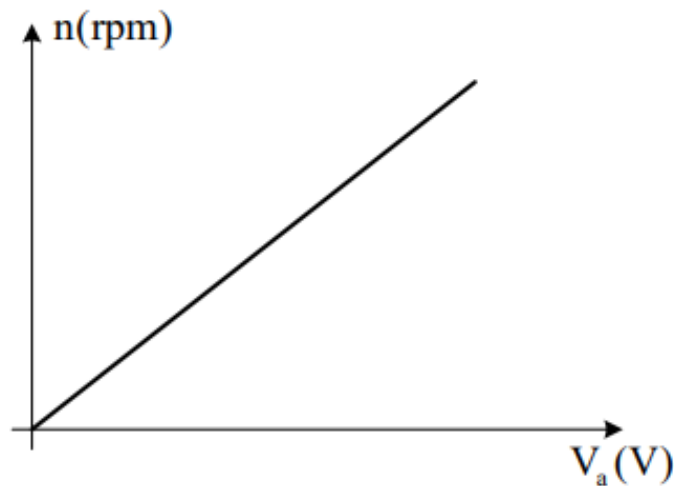
Προκειμένου να αποφύγουμε τα υψηλά ρεύματα εκκίνησης, συνδέουμε σε σειρά το τύλιγμα τυμπάνου με μια βοηθητική αντίσταση εκκίνησης ($R_{a,εκ} \gg R_a$), έτσι ώστε το αντίστοιχο ρεύμα εκκίνησης να μειωθεί στα επιτρεπτά όρια φόρτισης της μηχανής. Εφόσον, ο κινητήρας αρχίσει να αποκτάει στροφές και ο δρομέας του επιταχύνεται, παρατηρείται μια σταδιακή αύξηση της επαγόμενης Α.Η.Ε.Δ. Έπειτα, από την σταδιακή αποκατάσταση των στροφών, η αντίσταση εκκίνησης αφαιρείται. Ένας άλλος πιο αποδοτικός τρόπος εκκίνησης είναι με την βοήθεια ενός τροφοδοτικού AC/DC μεταβλητής τάσης.

Από τις (3.7) και (3.9) προκύπτει η επόμενη σχέση για τις στροφές του κινητήρα.

$$n = \frac{V_a - I_a R_a}{K_g \Phi(I_f)} = f(V_a, I_a, R_a, I_f) \quad (3.16)$$

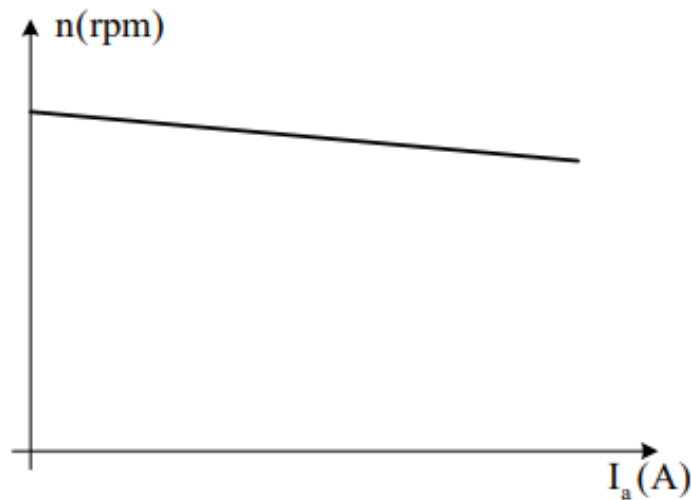
Από την παραπάνω σχέση παρατηρούμε τα εξής:

1. Οι στροφές του κινητήρα, είναι ανάλογες της τάσης τροφοδοσίας.



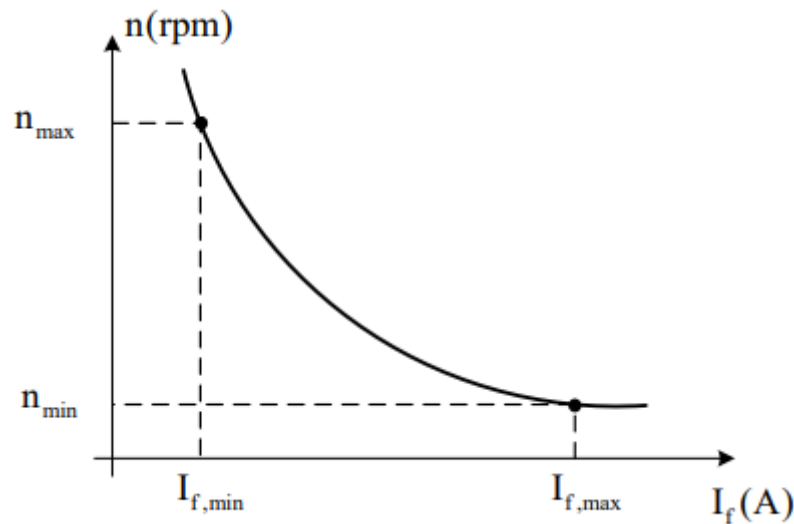
Εικόνα 28 Μεταβολή ταχύτητας κενού φορτίου συναρτήσει της τάσης τροφοδοσίας

2. Οι στροφές είναι αντιστρόφως ανάλογες του φορτίου του κινητήρα.



Εικόνα 29 Μεταβολή ταχύτητας κενού φορτίου συναρτήσει του ρεύματος τυμπάνου

3. Μπορούμε να ελέγξουμε τις στροφές της μηχανής, χωρίς να δαπανήσουμε παραπάνω ισχύ από το δίκτυο, με την εκμετάλλευση του ρεύματος τυλίγματος της κύριας διέγερσης I_f . Η παρεμβολή αντίστασης σε σειρά με το τύλιγμα διέγερσης, έχει σαν αποτέλεσμα την ελάττωση του ρεύματος διέγερσης και την αύξηση των στροφών. (Μαλατέστας, 2015)



Εικόνα 30 Μεταβολή ταχύτητας κενού φορτίου συναρτήσει του ρεύματος διέγερσης

3.5 Χαρακτηριστικές υπό φορτίο κινητήρων ΣΡ

Οι κινητήρες ΣΡ, προσφέρουν πολλές και διάφορες χαρακτηριστικές ροπής – στροφών και ένα μεγάλο εύρος μεταβολής της ταχύτητάς περιστροφής χωρίς την χρήση πολύπλοκων και δαπανηρών μετατροπέων ελέγχου, εξασφαλίζοντας ταυτόχρονα υψηλή απόδοση. Επειδή, οι κινητήρες είναι κατασκευασμένοι για να προσφέρουν μηχανικό έργο, η χαρακτηριστική που μας ενδιαφέρει περισσότερο είναι η χαρακτηριστική ροπής – στροφών (speed – torque characteristic). Η μορφή της χαρακτηριστικής αυτής αποτελεί καθοριστικό παράγοντα για την επιλογή ενός κινητήρα. Το ίδιο σημαντική είναι και η αντίστοιχη χαρακτηριστική ροπής – στροφών για το φορτίο που θα κινήσει ο κινητήρας, καθώς μας δίνει πληροφορίες για την απαραίτητη ροπή σε μια ευρεία περιοχή στροφών που απαιτεί το φορτίο. Έτσι, μέσω των χαρακτηριστικών αυτών επιτυγχάνεται η επιλογή του κατάλληλου κινητήρα, τόσο από οικονομικής πλευράς όσο και από λειτουργικής πλευράς. Για τα διάφορα είδη κινητήρων ΣΡ, το μέτρο σύγκρισης της μεταβολής της ταχύτητας περιστροφής (σε συνθήκες κενού και πλήρους φορτίου) αποτελεί ο συντελεστής ρύθμισης των στροφών (speed regulation – SR), σύμφωνα με τις σχέσεις:

$$SR = \frac{\omega_{m,nl} - \omega_{m,fl}}{\omega_{m,fl}} \times 100 \quad (3.17)$$

ή αλλιώς:

$$SR = \frac{n_{nl} - n_{fl}}{n_{fl}} \times 100 \quad (3.18)$$

Όπου:

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

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

n_{Π} = ταχύτητα περιστροφής σε κενό φορτίο, (rpm)

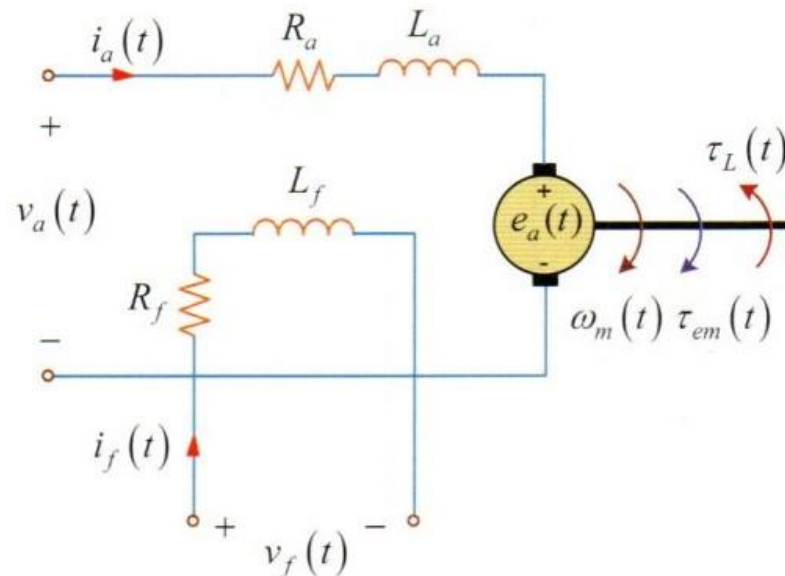
n_{Π} = ταχύτητα περιστροφής σε πλήρες φορτίο, (rpm)

Για τους κινητήρες ΣΡ με διέγερση σειράς, ο συντελεστής ρύθμισης των στροφών έχει πολύ μεγάλη τιμή, αυτό σημαίνει ότι, οι κινητήρες αυτοί εμφανίζουν μεγαλύτερη διακύμανση στροφών, σε σχέση με τους υπολοίπους κινητήρες των άλλων κατηγοριών. Οι κινητήρες με σύνθετη διέγερση, έχουν μικρότερες τιμές, δηλαδή εμφανίζουν λιγότερες διακυμάνσεις των στροφών συνάρτηση του φορτίου, σε σχέση με τους κινητήρες με διέγερση σειράς. Τέλος, στους κινητήρες ξένης και παράλληλης διέγερσης, ο συντελεστής ρύθμισης των στροφών έχει την χαμηλότερη τιμή συγκριτικά με τις υπόλοιπες κατηγορίες κινητήρων ΣΡ, συμπεραίνοντας ότι η εξάρτηση των στροφών από το φορτίο είναι η ελάχιστη δυνατή και για τον λόγο αυτό οι κινητήρες αυτοί θεωρούνται ως κινητήρες σταθερών στροφών. (Μαλατέστας, 2021)

4 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο : ΚΙΝΗΤΗΡΕΣ ΣΡ ΞΕΝΗΣ ΔΙΕΓΕΡΣΗΣ

4.1 Μόνιμη Κατάσταση

Το ισοδύναμο κύκλωμα του κινητήρα ΣΡ ξένης διέγερσης, παρουσιάζεται στην εικόνα 4-1.



Εικόνα 31 Ισοδύναμο κύκλωμα κινητήρα ΣΡ ξένης διέγερσης

Με βάση το ισοδύναμο κύκλωμα της εικόνας 31, ισχύουν τα εξής:

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

$$V = V_a = E_a + R_a I_a \quad (4.1)$$

Όπου:

$$E_a = K_g \Phi_n = K_m \Phi \omega_m \quad (4.2)$$

Το συνολικό ρεύμα που απορροφά ο κινητήρας από το δίκτυο, ισούται με το ρεύμα του τυλίγματος τυμπάνου.

$$I = I_a \quad (4.3)$$

Η τάση τροφοδοσίας, εφαρμόζεται επίσης και στα άκρα του τυλίγματος της διέγερσης διακλάδωσης, για το οποίο ισχύει:

$$V_f = I_f R_f \quad (4.4)$$

Άρα, σύμφωνα με την (4.4) το ρεύμα τυλίγματος διέγερσης ισούται:

$$I_f = \frac{V_f}{R_f} \quad (4.5)$$

Στους κινητήρες ξένης διέγερσης με τυλίγματα αντιστάθμισης και βοηθητικούς πόλους, η μαγνητική ροή ανά πόλο του πεδίου διέγερσης, δεν επηρεάζεται από το ρεύμα τυμπάνου και θεωρείται σταθερή, για σταθερό ρεύμα διέγερσης. Σύμφωνα, με την (3.9), για σταθερή μαγνητική ροή υπάρχει αναλογία μεταξύ της παραγόμενης ροπής και του ρεύματος του τυλίγματος τυμπάνου. Δηλαδή:

$$T = K_m \Phi (I_f = \text{σταθ}) I_\alpha = K'_m \Phi I_\alpha \quad (4.6)$$

όπου

$$K'_m = K_m \Phi \quad (4.7)$$

Σύμφωνα με τις (4.1) και (4.2), είναι:

$$\omega_m = \frac{E_a}{K_m \Phi} = \frac{V - I_\alpha R_a}{K_m \Phi} \quad (4.8)$$

Συνδυάζοντας τις (3.9) και (4.8), προκύπτει η ακόλουθη έκφραση για την $\omega_m = f(T)$

$$\omega_m = \frac{V}{K_m \Phi} - \frac{R_a}{(K_m \Phi)^2} T \quad (4.9)$$

Στην περίπτωση που θέλουμε σταθερή μαγνητική ροή και σταθερή τάση στους ακροδέκτες του τυλίγματος τυμπάνου, η (4.9) παίρνει την μορφή:

$$\omega_m = A - BT \quad (4.10)$$

Όπου:

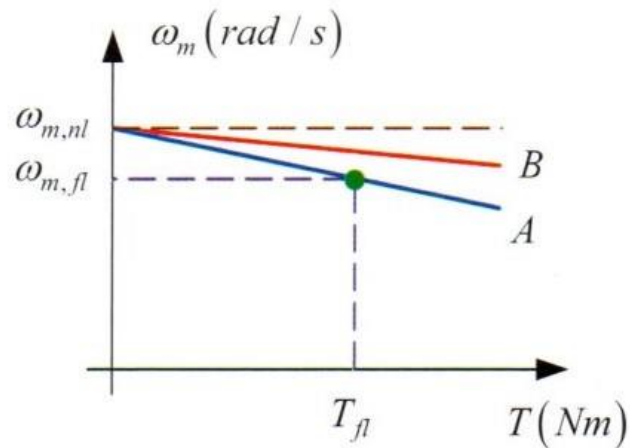
A = η γωνιακή ταχύτητα περιστροφής σε συνθήκες κενού φορτίου (T=0). Δηλαδή

$$\omega_m(T = 0) = \omega_{m,nl} = A = \frac{V}{K_m \Phi} \quad (4.11)$$

B = η κλίση της ευθείας και ισούται

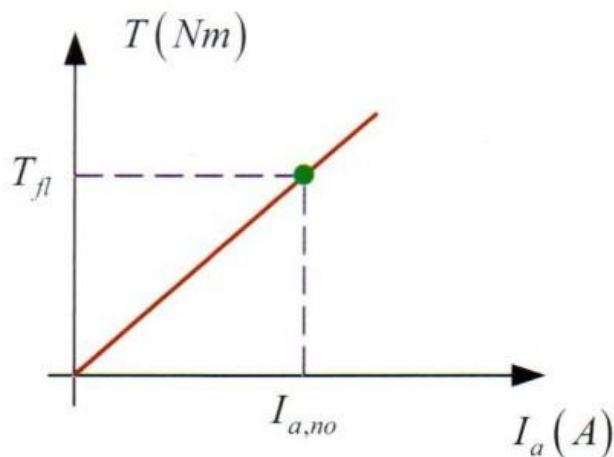
$$B = -\frac{R_a}{(K_m \Phi)^2} \quad (4.12)$$

Σύμφωνα με την (4.12) η κλίση της χαρακτηριστικής $\omega_m = f(T)$ είναι αρνητική. Επομένως, αν υποθέσουμε ότι ο κινητήρας στρέφεται με συγκεκριμένο αριθμό στροφών, μια ξαφνική αύξηση του φορτίου προκαλεί μείωση των στροφών και της επαγόμενης ΑΗΕΔ, με αποτέλεσμα την αύξηση του ρεύματος τυμπάνου. Στην εικόνα 32 απεικονίζεται η γραμμική εξάρτηση της χαρακτηριστικής $\omega_m = f(T)$.



Εικόνα 32 Χαρακτηριστική γωνιακής ταχύτητας – ροπής

Στην περίπτωση που ο κινητήρας δεν έχει τύλιγμα αντιστάθμισης και βοηθητικών πόλων, θα εμφανιστεί μια ελάχιστη εξασθένιση της μαγνητικής ροής εξαιτίας της αντίδρασης τυμπάνου, με αποτέλεσμα την μείωση των στροφών για τα ίδια φορτία, εικόνα 33.



Εικόνα 33 Χαρακτηριστική ροπής -ρεύματος τυμπάνου

Η χρήση των κινητήρων ΣΡ ξένης διέγερσης γίνεται σε εφαρμογές που χρειάζεται σχεδόν σταθερή ταχύτητα, αλλά χαμηλή ροπή εκκίνησης.

Σύμφωνα με την (4.9), η γωνιακή ταχύτητα περιστροφής εξαρτάται από την τάση του τυλίγματος τυμπάνου, από την μαγνητική ροή, από την ωμική αντίσταση του τυλίγματος τυμπάνου και από το φορτίο στον άξονα του κινητήρα. Δηλαδή:

$$\omega_m = f(V_a, \Phi, R_a, T) \quad (4.13)$$

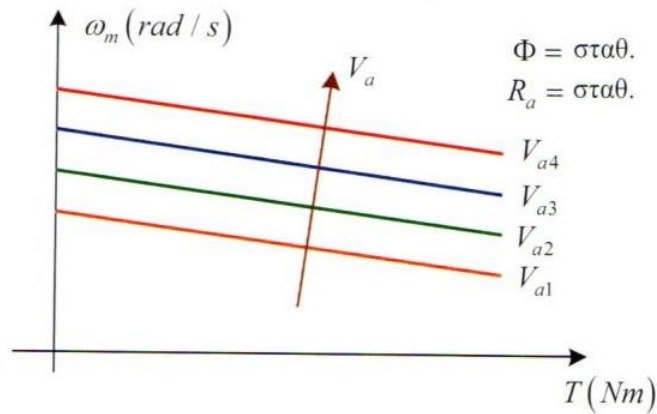
Άρα, καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι ο έλεγχος των στροφών ενός κινητήρα ΣΡ ξένης διέγερσης μπορεί να γίνει με τους παρακάτω τρόπους ή με τον συνδυασμό αυτών:

- Έλεγχος με μεταβολή της τάσης ακροδεκτών του τυλίγματος τυμπάνου

Γενικά, στη συγκεκριμένη μέθοδο ελέγχου στροφών ενός κίνητρα, προαπαιτούμενο αποτελεί η τροφοδότηση του τυλίγματος διέγερσης διακλάδωσης με ξεχωριστή σταθερή τάση. Έπειτα, σταθερή παραμένει η ωμική αντίσταση στον κλάδο του τυλίγματος τυμπάνου. Επίσης, και η τάση στο κλάδο της διέγερσης διακλάδωσής παραμένει σταθερή. Η ρύθμιση της τάσης και κατ' επέκταση του ρεύματος τυμπάνου, γίνεται είτε μέσω πλήρως ελεγχόμενης ή ημιελεγχόμενης γέφυρας είτε μέσω μετατροπέα ΣΡ/ΣΡ. Από τη άλλη μεριά το ρεύμα στο τύλιγμα διέγερσης, ρυθμίζεται στη μέγιστη τιμή του, συμβάλλοντας έτσι στην αύξηση της παραγόμενης ροπής και στη μείωση της παραμόρφωσης της μαγνητικής ροής στο διάκενο. Ο έλεγχος των στροφών με αυτή τη μέθοδο, αναφέρεται στην περιοχή μεταβολής των στροφών, από μηδενική ταχύτητα έως και την ονομαστική ταχύτητα λειτουργίας. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, μέσω συστήματος κλειστού βρόχου, το ρεύμα τυμπάνου και η παραγόμενη εσωτερική ροπή διατηρούνται σταθερά στις ονομαστικές τιμές τους, προσφέροντας έτσι τη δυνατότητα λειτουργίας με ονομαστική ροπή σε όλο το εύρος ταχυτήτων.

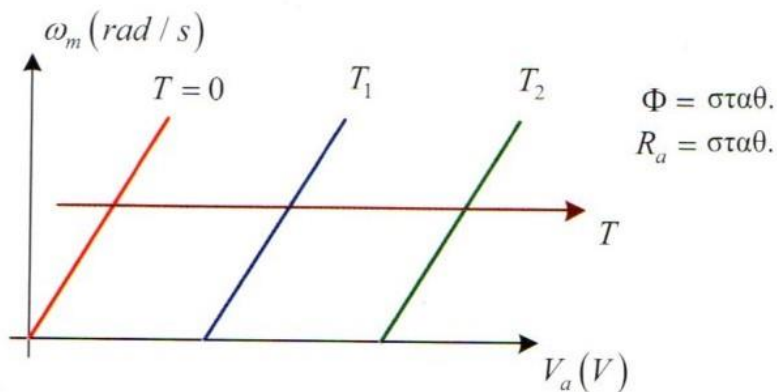
Αμελώντας την αντίδραση τυμπάνου, για σταθερή μαγνητική ροή και σταθερή ωμική αντίσταση στον κλάδο τυμπάνου, η κλίση της χαρακτηριστικής $\omega_m = f(T)$ σύμφωνα με την (4.12) παραμένει σταθερή, ενώ η γωνιακή ταχύτητα περιστροφής σε κενό φορτίο (4.11), μεταβάλλεται ανάλογα με την τιμή της εφαρμοζόμενης τάσης στο τύλιγμα τυμπάνου.

Με βάση την εικόνα 34, η μεταβολή της τάσης τροφοδοσίας του τυμπάνου, προκαλεί την παράλληλη μετατόπιση των χαρακτηριστικών.



Εικόνα 34 Επίδραση της μεταβολής της τάσης του τυλίγματος τυμπάνου στη χαρακτηριστική γωνιακής ταχύτητας – ροπής.

Στην εικόνα 35, παρουσιάζονται οι χαρακτηριστικές $\omega_m = f(V_a)$ με παράμετρο την εσωτερική ροπή T .



Εικόνα 35 Εξάρτηση της γωνιακής ταχύτητας από την τάση τυμπάνου, με παράμετρο την εσωτερική ροπή.

Συμπερασματικά, η μέθοδος αυτή διασφαλίζει μια ομαλή μεταβολή των στροφών σε ένα ευρύ φάσμα λειτουργίας, πιο συγκεκριμένα από μηδενικές στροφές μέχρι τις ονομάστηκες. Σε περίπτωση λειτουργίας πάνω από τις ονομαστικές τιμές στροφών, για να αποφευχθεί το φαινόμενο της υπερφόρτισης, ο έλεγχος γίνεται ,μέσω του ρεύματος της διέγερσης διακλάδωσης.

- Έλεγχος με μεταβολή του ρεύματος διέγερσης διακλάδωσης

Σε αυτή την μέθοδο ελέγχου, η τάση τροφοδοσίας και η ωμική αντίσταση του τυλίγματος τυμπάνου παραμένουν σταθερές. Για να επιτευχθεί ο έλεγχος του ρεύματος διέγερσης, παρεμβάλουμε εξωτερική σε σειρά ωμική αντίσταση στο κλάδο διέγερσης. Αν αγνοήσουμε τον κορεσμό του σιδηρομαγνητικού κυκλώματος, η μαγνητική ροή και το ρεύμα διέγερσης συνδέονται γραμμικά με μία σχέση που ισούται

$$\Phi = KI_f \quad (4.14)$$

Θέτοντας όπου:

$$\kappa_f = K K_m \quad (4.15)$$

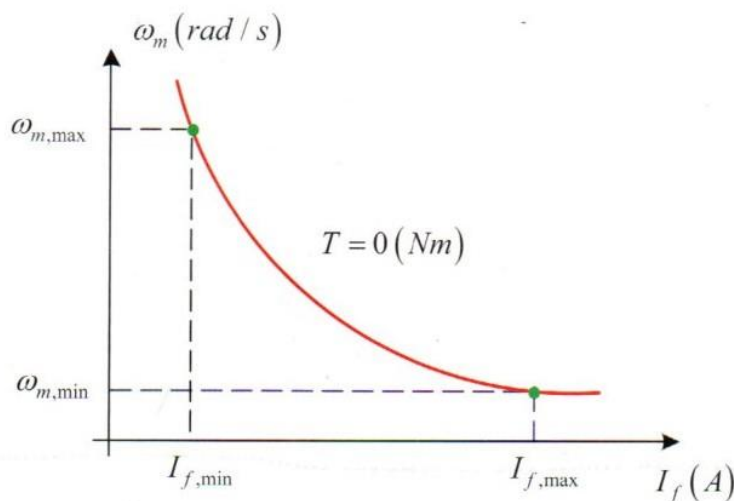
Συμφώνα με τις (4.9), (4.14) και (4.15), προκύπτει ότι

$$\omega_m = \frac{V}{K_f I_f} - \frac{R_a}{(K_f I_f)^2} T \quad (4.16)$$

Για λειτουργία χωρίς φορτίο, η (4.16) παίρνει τη μορφή:

$$\omega_m(T = 0) = \frac{V}{K_f I_f} \quad (4.17)$$

Από την (4.17), η γωνιακή ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα σε κενό φορτίο, μεταβάλλεται αντιστρόφως ανάλογα με το ρεύμα διέγερσης, εικόνα 36.



Εικόνα 36 Μεταβολή ταχύτητας κενού φορτίου συναρτήσει του ρεύματος διέγερσης διακλάδωσης.

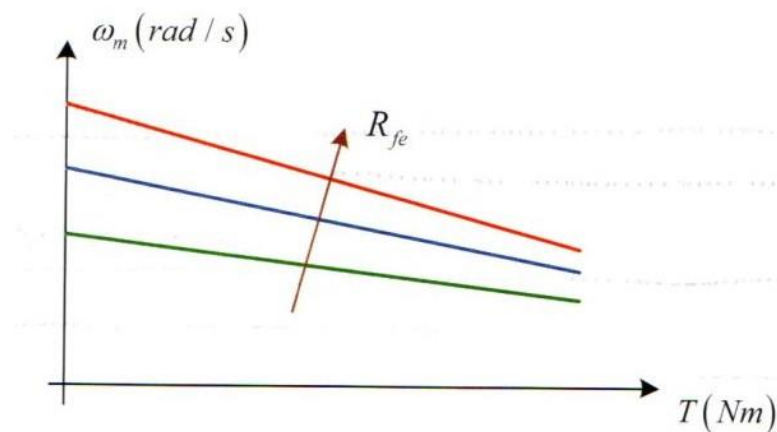
Σε αυτό τον έλεγχο στροφών, το εύρος ρύθμισης των στροφών περιορίζεται σε ταχύτητες μεγαλύτερες της ονομαστικής και αυτό γιατί μπορούμε να προκαλέσουμε μόνο τη μείωση της μαγνητικής ροής σε ένα δεδομένο κινητήρα. Αφού για δεδομένο ρεύμα τυμπάνου, η γωνιακή ταχύτητα είναι αντιστρόφως ανάλογη της μαγνητικής ροής, ενώ η παραγόμενη ροπή είναι ανάλογη. Αυτή η μέθοδος χρησιμοποιείται κυρίως για έλεγχο σταθερής ισχύος στην περιοχή λειτουργίας άνω των ονομαστικών στροφών, χωρίς να υπάρχουν προβλήματα υπερφόρτισης του κινητήρα.

Για χαμηλές τιμές του ρεύματος διέγερσης παρατηρείται, υπερβολική αύξηση των στροφών του δρομέα. Αν για κάποιο τυχαίο λόγο εμφανιστεί ασυνέχεια στο τύλιγμα της διέγερσης, το ρεύμα διέγερσης θα πάρει την τιμή μηδέν και η μαγνητική ροή θα περιοριστεί στην ελάχιστη τιμή που την

αναγκάζει ο εναπομείναντας μαγνητισμός. Σύμφωνα με τα παραπάνω, θα έχουμε υπερβολική αύξηση των στροφών, στην τιμή:

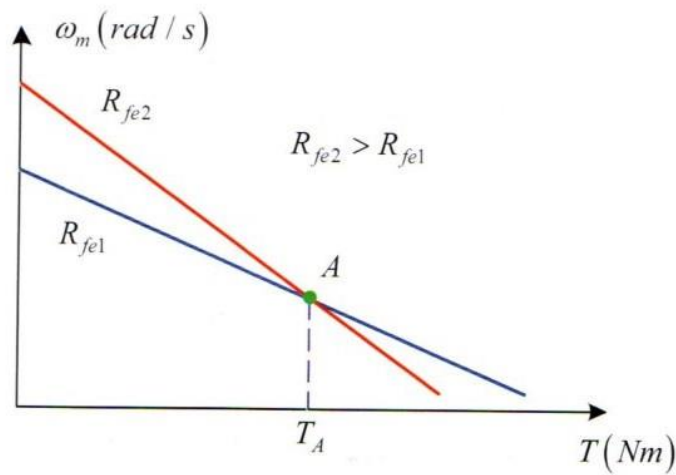
$$\omega_{m,rm} = \frac{V}{K_m \Phi_{rm}} \quad (4.18)$$

Προκειμένου να αποφευχθούν σοβαρές βλάβες στους κινητήρες, εξαιτίας των φυγοκεντρικών δυνάμεων που αναπτύσσονται από την υπερβολική μεγάλη ταχύτητα περιστροφής, οι κινητήρες ΣΡ ξένης διέγερσης πρέπει να διαθέτουν σύστημα προστασίας το οποίο μόλις αντιληφθεί ασυνέχεια στον κλάδο διέγερσης, να διακόψει αυτόματα την τάση τροφοδοσίας. Με βάση την (4.17), υπό σταθερή τάση στο τύλιγμα τυμπάνου, η ταχύτητα περιστροφής κενού φορτιού μεταβάλλεται αντιστρόφως ανάλογα με το ρεύμα διέγερσης. Ακόμα, η κλίση της χαρακτηριστικής $\omega_m = f(T)$ για σταθερή ωμική αντίσταση στο τύλιγμα τυμπάνου, μεταβάλλεται αντιστρόφως ανάλογα του τετραγώνου του ρεύματος διέγερσης. Η μείωση του ρεύματος διέγερσης, εξαιτίας της πρόσθετης εξωτερικής αντίστασης σε σειρά με το τύλιγμα διέγερσης, έχει σαν αποτέλεσμα την μετατόπιση των χαρακτηριστικών προς τα επάνω με την ταυτόχρονη όμως αύξηση της κλίσης τους, εικόνα 37.



Εικόνα 37 Επίδραση της μεταβολής του ρεύματος τυλίγματος διέγερσης στην χαρακτηριστική γωνιακής ταχύτητας -ροπής

Με την χρήση της προσθετικής εξωτερικής αντίστασης στον κλάδο διέγερσης, έχουμε σαν αποτέλεσμα την μείωση της μαγνητικής ροής στο διάκενο της μηχανής και αυτό έπειτα προκαλεί τη μείωση της επαγομένης ΑΗΕΔ στο τύλιγμα τυμπάνου. Η μείωση της επαγομένης ΑΗΕΔ, προκαλεί την αύξηση του ρεύματος τυμπάνου σε μεγαλύτερο ποσοστό από την αντίστοιχη μείωση της μαγνητικής ροής, με αποτέλεσμα την αύξηση της εσωτερικής ροπής και κατ' επέκταση των στροφών. Σε χαμηλές ταχύτητες, έχουμε το αντίθετο αποτέλεσμα. Πιο συγκεκριμένα, η πρόσθετη αντίσταση, επιφέρει την μείωση της ταχύτητας περιστροφής του κινητήρα, εικόνα 38.

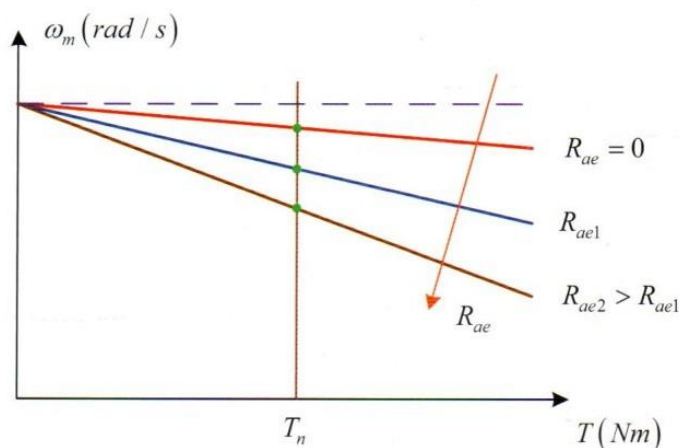


Εικόνα 38 Επίδραση της μεταβολής του ρεύματος τυλίγματος διέγερσης στην χαρακτηριστική ροπής – στροφών, σε χαμηλές ταχύτητες

Ο συγκεκριμένος έλεγχος, στις χαμηλές ταχύτητες, παρατηρείται αύξηση στο ρεύμα τυμπάνου, διότι η μείωση της επαγομένης ΑΗΕΔ δεν είναι αρκετά μεγάλη, προκειμένου να αντισταθμίσει τη μεταβολή της ροπής και έτσι μειώνεται η μαγνητική ροή.

- Έλεγχος με παρεμβολή ωμικής αντίστασης στον κλάδο τυμπάνου

Σύμφωνα με την σχέση (4.9), η παρεμβολή ωμικής αντίστασης σε σειρά με το τύλιγμα τυμπάνου για σταθερή τάση τροφοδοσίας και σταθερό ρεύμα στον κλάδο διέγερσης δεν επηρεάζει την ταχύτητα περιστροφής κενού φορτίου, αλλά αυξάνει σημαντικά την κλίση, με αποτέλεσμα την περεταίρω μείωση των στροφών με την αύξηση του φορτίου, εικόνα 39.

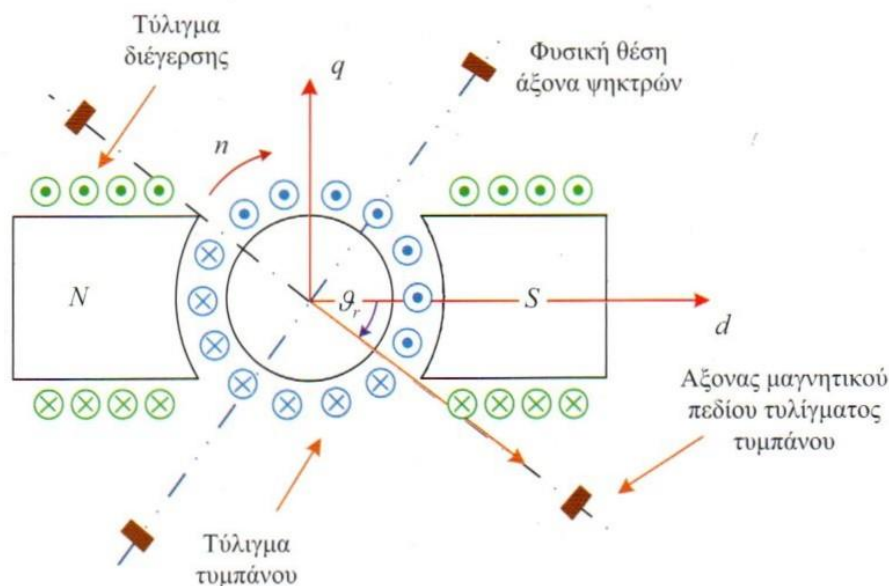


Εικόνα 39 Επίδραση της παρεμβολής εξωτερικής ωμικής αντίστασης σε σειρά με το τύλιγμα τυμπάνου

Η ηλεκτρομαγνητική ισχύς μειώνεται ανάλογα με τη μείωση των στροφών, όταν ο κινητήρας λειτουργεί με σταθερή ροπή και σταθερό ρεύμα τυμπάνου, με αποτέλεσμα την ανάλογη μείωση του βαθμού απόδοσης. Άρα, καταλήγουμε στο ότι αυτή η μέθοδος ελέγχου καταναλώνει αρκετή ενέργεια και για αυτό συνήθως εφαρμόζεται για μικρά χρονικά διαστήματα. (Μαλατέστας, 2021)

4.2 Δυναμική Κατάσταση

Στην εικόνα 40, φαίνεται μια στοιχειώδης διπολική μηχανή ΣΡ, στην οποία το τύλιγμα διέγερσης βρίσκεται στο στάθμη και το τύλιγμα τυμπάνου στο δρομέα.



Εικόνα 40 Στοιχειώδης διπολική μηχανή ΣΡ

Από την εικόνα 40 παρατηρούμε ότι, δυο συγκεντρωμένα όμοια τυλίγματα συνδεδεμένα σε σειρά αποτελούν το τύλιγμα της κύριας διέγερσης. Από την άλλη μεριά, έχουμε το τύλιγμα του δρομέα που τροφοδοτείται μέσω σταθερών ψηκτρών και οποίο είναι τύλιγμα συλλέκτη. Η διεύθυνση του παραγομένου μαγνητικού πεδίου, είναι κάθετη στον άξονα φυσικής τοποθέτησης των ψηκτρών. Επειδή, όμως, οι αγωγοί του συλλέκτη περιστρέφονται μέσα στο μαγνητικό πεδίο του τυλίγματος διέγερσης, αλληλοεπιδρούν με το τύλιγμα του στάτη και δημιουργούνται τάσεις, με αποτέλεσμα το τύλιγμα του συλλέκτη να μην είναι ισοδύναμο με το σταθερό συγκεντρωμένο τύλιγμα. Εξαιτίας των παραπάνω, το τύλιγμα του δρομέα και κατ' επέκταση το τύλιγμα τυμπάνου αποκτά τις εξής ιδιότητες. Το ρεύμα που διαρρέει το πηνίο παράγει μαγνητικό πεδίο το οποίο παραμένει στάσιμο στο χώρο, ανεξάρτητα αν ο δρομέας περιστρέφεται. Τέλος, στο πηνίο επάγονται τάσεις ταχύτητας, ενώ ο δρομέας περιστρέφεται, ένα τέτοιο πηνίο ονομάζεται και ψευδοσταθερό τύλιγμα.

Οι εξισώσεις τάσεων – ρεύματος στα δύο τυλίγματα, στη γενική περίπτωση είναι:

$$V_f(t) = R_f i_f(t) + \frac{d\lambda_f(t)}{dt} \quad (4.19)$$

και

$$V_a(t) = \pm R_a i_a(t) + \frac{d\lambda_a(t)}{dt} \quad (4.20)$$

Όπου

V_f = τάση του τυλίγματος της κύριας διέγερσης, (V)

I_f = ρεύμα του τυλίγματος της κύριας διέγερσης, (A)

R_f = αντίσταση του τυλίγματος της κύριας διέγερσης, (Ω)

λ_f = πεπλεγμένη ροή του τυλίγματος της κύριας διέγερσης, (Wb)

V_a = τάση του τυλίγματος τυμπάνου, (V)

I_a = ρεύμα του τυλίγματος τυμπάνου, (A)

R_a = αντίσταση του τυλίγματος τυμπάνου, (Ω)

λ_a = πεπλεγμένη ροή του τυλίγματος τυμπάνου, (Wb)

Για το σύμβολο (\pm), το (+) αντιπροσωπεύει την λειτουργία κινητήρα και το πρόσημο (-) την λειτουργία γεννήτριας.

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

$$\lambda_f(t) = L_f i_f(t) \pm L_{af} i_a(t) \quad (4.21)$$

Και

$$\lambda_a(t) = L_a i_a(t) \pm L_{af} i_f(t) \quad (4.22)$$

όπου

L_f = αυτεπαγωγή του τυλίγματος διέγερσης, (H)

L_a = αυτεπαγωγή του τυλίγματος τυμπάνου, (H)

L_{af} = αλληλεπαγωγή τυλιγμάτων τυμπάνου και διέγερσης, (H)

Από τις εξισώσεις (4.19), (4.20), (4.21) και (4.22) προκύπτει ότι:

$$V_f(t) = R_f i_f(t) + L_f \frac{di_f(t)}{dt} \pm L_{af} \frac{di_a(t)}{dt} + i_f(t) \frac{dL_f}{dt} \pm i_a(t) \frac{dL_{af}}{dt} \quad (4.23)$$

Και

$$V_{\alpha}(t) = \pm R_{\alpha} i_{\alpha}(t) + L_{\alpha f} \frac{di_f(t)}{dt} \pm L_{\alpha} \frac{di_{\alpha}(t)}{dt} + i_f(t) \frac{dL_{\alpha f}}{dt} \pm i_{\alpha}(t) \frac{dL_{\alpha}}{dt} \quad (4.24)$$

Στην περίπτωση που έχουμε κυλινδρικό δρόμενα:

$$L_f = \text{σταθ} \quad (4.25)$$

$$L_{\alpha f} = L_{f\alpha} = L_{maf} \cos\theta_r \quad (4.26)$$

Και

$$L_{\alpha} = L_b + L_c \cos 2\theta_r \quad (4.27)$$

Οι οροί της παρακάτω εξίσωσης (4.28) ονομάζονται συντελεστές των τάσεων ταχύτητας και αντιπροσωπεύουν τις τάσεις που επάγονται στα τυλίγματα.

$$\frac{dL}{dt} = \frac{dL}{d\theta_r} \frac{d\theta_r}{dt} \quad (4.28)$$

Σύμφωνα με τις παραπάνω γενικές σχέσεις προκύπτουν οι διαφορικές εξισώσεις της μηχανής ΣΡ, αν λάβουμε υπόψη τα εξής:

1. Στο τύλιγμα του στάτη να μην αναπτύσσονται τάσεις ταχύτητας από αλληλεπαγωγή. Ενώ, στο τύλιγμα διέγερσης να υπάρχει σχετική κίνηση της ροής και των αγωγών του ψευδοσταθερού τυλίγματος του δρομέα.
2. Ο δρομέας να είναι κυλινδρικός, ώστε το τύλιγμα του στάτη να έχει ομοιόμορφη μαγνητική αντίσταση.

$$\frac{dL_f}{d\theta_r} = 0 \quad (4.29)$$

Σύμφωνα με τα παραπάνω, οι εξισώσεις (4.23) και (4.24) ισούνται:

$$V_f(t) = R_f i_f(t) + L_f \frac{di_f(t)}{dt} \pm L_{maf} \cos\theta_r \frac{di_{\alpha}(t)}{dt} \quad (4.30)$$

Και

$$V_{\alpha}(t) = \pm R_{\alpha} i_{\alpha}(t) \pm L_{\alpha} \frac{di_{\alpha}(t)}{dt} + L_{maf} \cos\theta_r \frac{di_f(t)}{dt} \pm 2\omega_m(t) i_{\alpha}(t) L_c \sin 2\theta_r - \omega_m(t) L_{maf} i_f(t) \sin\theta_r \quad (4.31)$$

Στη περίπτωση σταθερής τοποθέτησης ψηκτρών με γωνία $\theta_r = -\pi/2$, οι προηγούμενες εξισώσεις ισούνται:

$$V_f(t) = R_f i_f(t) + L_f \frac{di_f(t)}{dt} \quad (4.32)$$

$$V_\alpha(t) = \pm R_\alpha i_\alpha(t) \pm L_\alpha \frac{di_\alpha(t)}{dt} + \omega_m(t) L_{maf} i_f(t) = \pm$$

$$R_\alpha i_\alpha(t) \pm L_\alpha \frac{di_\alpha(t)}{dt} + e_a(t) \quad (4.33)$$

$$e_a(t) = K_m \varphi(t) \omega_m(t) = L_{maf} i_f(t) \omega_m(t) \quad (4.34)$$

Σύμφωνα με τον νόμο του Νεύτωνα για την περιστροφική κίνηση, η διαφορική εξίσωση του μηχανικού μέρους είναι:

$$J \frac{d\omega_m(t)}{dt} + B\omega_m(t) = \tau_{em}(t) - \tau_L(t) \quad (4.35)$$

Και

$$J \frac{d\omega_m(t)}{dt} + B\omega_m(t) = \tau_m(t) - \tau_{em}(t) \quad (4.36)$$

Όπου

$$\tau_{em}(t) = K_m \varphi(t) i_\alpha(t) = L_{maf} i_f(t) i_\alpha(t) \quad (4.37)$$

όπου

τ_{em} = εσωτερική ή ηλεκτρομαγνητική ροπή, (Nm)

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

τ_m = αποδιδόμενη μηχανική ροπή στη γεννήτρια, (Nm)

Σύμφωνα με την δυναμική ανάλυση της στοιχειώδους διπολικής μηχανής ΣΡ (εικόνα 40) και την διερεύνηση των διαφορικών εξισώσεων που την διέπουν, στη παράγραφο αυτή θα αναπτύξουμε το μεταβατικό μοντέλο ενός κινητήρα ΣΡ ξένης διέγερσης και το αντίστοιχο δομικό διάγραμμα.

Στην εικόνα 4-1 παραπάνω, παρουσιάζεται το ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα ενός κινητήρα αυτής της κατηγορίας.

Οι διαφορικές εξισώσεις του ηλεκτρικού μέρους του κινητήρα ΣΡ ξένης διέγερσης είναι όμοιες με τις εξισώσεις (4.32), (4.33) και (4.34), μόνο που θα ισχύει το (+) πρόσημο, εφόσον κάνουμε λόγο για κινητήρα. Για το μηχανικό μέρος ισχύουν ακριβώς οι εξισώσεις (4.35) και (4.37).

Βάση των παραπάνω εξισώσεων, είσοδοι του συστήματος είναι οι τάσεις των δυο τυλιγμάτων (διέγερσης και τυμπάνου), και η μηχανική ροπή του φορτιού. Μεταβλητές καταστάσεις αποτελούν τα ρεύματα των τυλιγμάτων και η γωνιακή ταχύτητα. Τέλος, μεταβλητές εξόδου, είναι η παραγομένη ηλεκτρική ροπή και η γωνιακή ταχύτητα.

Αν θέσουμε:

$$\frac{d}{dt} = p \quad (4.38)$$

Όπου:

p = διαφορικός τελεστής

Εξαιτίας του διαφορικού τελεστή η διαφορικές εξισώσεις του ηλεκτρικού και μηχανικού μέρους του κινητήρα ΣΡ ξένης διέγερσης ισούνται με:

$$i_a(t) = \frac{[V_a(t) - L_{maf} i_f(t) \omega_m(t)] / R_a}{1 + T_a p} \quad (4.39)$$

$$i_f(t) = \frac{V_f(t) / R_f}{1 + T_f p} \quad (4.40)$$

Και

$$\omega_m(t) = \frac{[\tau_{em}(t) - \tau_L(t)] / B}{1 + T_m p} \quad (4.41)$$

όπου

$$T_a(t) = \frac{L_a}{R_a} \quad (4.41)$$

$$T_f(t) = \frac{L_f}{R_f} \quad (4.42)$$

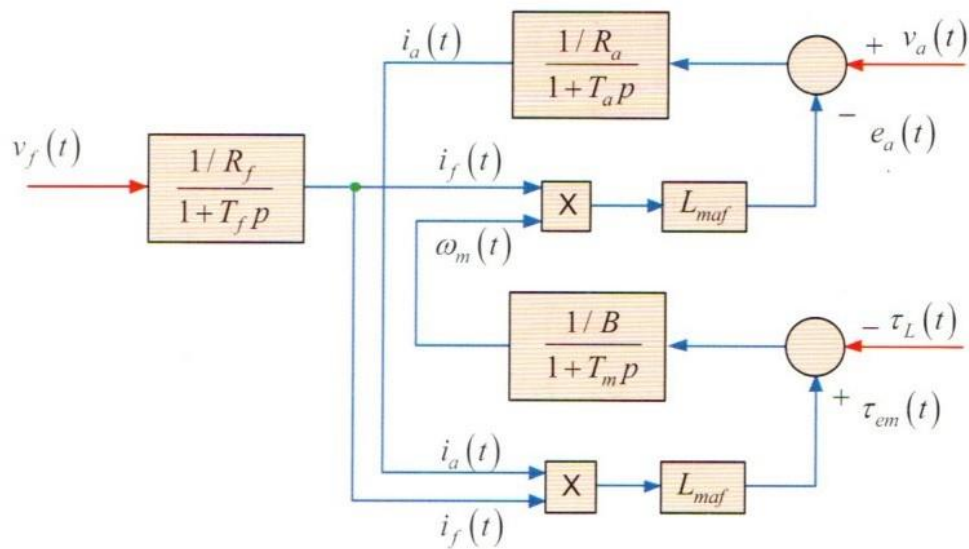
$$T_m(t) = \frac{J}{B} \quad (4.43)$$

T_a = σταθερά χρόνου του τυλίγματος τυμπάνου

T_f = σταθερά χρόνου του τυλίγματος διέγερσης

T_m = σταθερά χρόνου του μηχανικού μέρους

Σύμφωνα με τα παραπάνω, το διάγραμμα βαθμίδων του κινητήρα ΣΡ ξένης διέγερσης παίρνει τη μορφή της εικόνας 41. (Μαλατέστας, 2021)



Εικόνα 41 Διάγραμμα Βαθμίδων κινητήρων συνεχούς ρεύματος ξένης διέγερσης.

5 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο : ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΚΙΝΗΤΗΡΑ ΣΡ ΞΕΝΗΣ ΔΙΕΓΕΡΣΗΣ ΜΕ ΤΗΝ ΧΡΗΣΗ ΜΑΤΛΑΒ



Εικόνα 42 Λογισμικό Matlab

Matlab

Το λογισμικό Matlab είναι ένα τεράστιο περιβάλλον ανάπτυξης εφαρμογών, με εντυπωσιακές λειτουργίες. Για το λόγο αυτό εκατομμύρια μηχανικοί και επιστήμονες παγκοσμίως το χρησιμοποιούν. Το λογισμικό αυτό στηρίζεται σε μήτρες, καθώς είναι ο πιο φυσικός τρόπος για την έκφραση των υπολογιστικών μαθηματικών. Μια από τις πιο βασικές λειτουργίες του είναι η ποικιλία των γραφικών που προσφέρει, τα οποία διευκολύνουν την οπτικοποίηση και την απόκτηση πληροφοριών από δεδομένα. Υπάρχουν συναρτήσεις για γραφικά στις δυο και τρεις διαστάσεις και προσφέρεται ένας έμμεσος τρόπος γραφικών τεσσάρων διαστάσεων. Ακόμη, έχει εργαλεία για αντικειμενοστραφή προγραμματισμό, αλγορίθμους και στοιχεία βάσεων δεδομένων. Καταλαβαίνουμε, λοιπόν ότι το περιβάλλον του Matlab προορίζεται για πειραματισμό, εξερεύνηση και ανακάλυψη.

https://uk.mathworks.com/help/releases/R2022b/matlab/index.html?s_tid=CRUX_lftnav

Simulink

Το Simulink είναι ένα περιβάλλον μπλοκ διαγραμμάτων για προσομοίωση πολλαπλών τομέων και σχεδιασμό βάσει μοντέλου. Υποστηρίζει σχεδιασμό σε επίπεδο συστήματος, προσομοίωση, αυτόματη δημιουργία κώδικα και συνεχή δοκιμή και επαλήθευση των ενσωματωμένων συστημάτων.

Το Simulink παρέχει ένα πρόγραμμα επεξεργασίας γραφικών, προσαρμόσιμες βιβλιοθήκες μπλοκ για μοντελοποίηση και προσομοίωση δυναμικών συστημάτων. Είναι ενσωματωμένο με το MATLAB, επιτρέποντάς την ενσωμάτωση αλγόριθμων σε μοντέλα και να εξάγει αποτελέσματα προσομοίωσης στο MATLAB για περαιτέρω ανάλυση.

https://uk.mathworks.com/help/releases/R2022b/simulink/index.html?s_tid=CRUX_lftnav

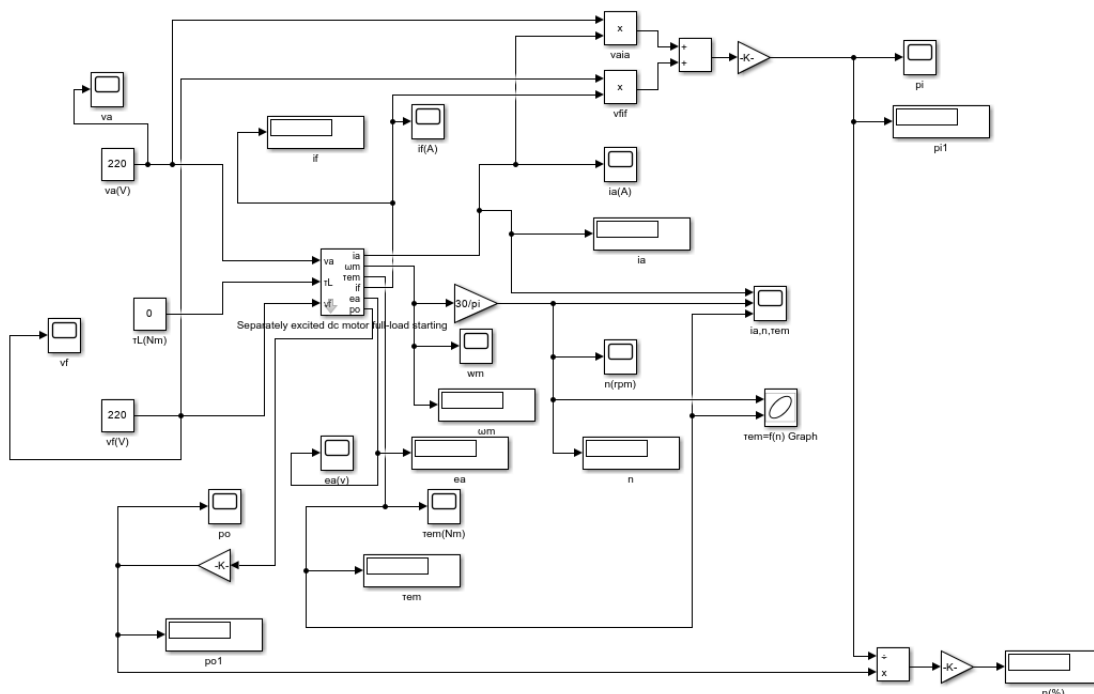
5.1 Περιγραφή μελέτης

Στη συγκεκριμένη μελέτη θα γίνει μοντελοποίηση ενός κινητήρα ΣΡ ξένης διέγερσης στο λογισμικό Matlab/Simulink. Έπειτα, αφού ολοκληρωθεί η σχεδίαση του μοντέλου, θα εκτελεστούν τρεις διαφορετικές αντιπροσωπευτικές εφαρμογές σεναρίων που θα παρουσιαστούν παρακάτω. Ο στόχος της μελέτης αυτής είναι, να παρατηρήσουμε και να σχολιάσουμε πως ανταποκρίνεται ο κινητήρας σε αυτά τα σενάρια.

Τα στοιχεία του κινητήρα ΣΡ που χρησιμοποιήθηκε είναι τα εξής:

$$P = 1 \text{ KW}, V_a = V_f = 220\text{V}, R_a = 1.72\Omega, R_f = 610.94\Omega, L_a = 0.04\text{H}, L_f = 135.58,$$

$$M_{af} = 4.08\text{H}, B = 4.95 \cdot 10^{-4} \text{ N} \cdot \text{m} \cdot \text{s}, J = 7.18 \cdot 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{m}^2, n = 3000 \text{ rpm}$$



Εικόνα 43 Διάγραμμα βαθμίδων κινητήρα ΣΡ ξένης διέγερσης υπό φορτίο σχεδιασμένο στο Simulink, μαζί με επιπλέον βαθμίδες για τον υπολογισμό και την μέτρηση μεγεθών

5.2 Εκκίνηση κινητήρα ΣΡ ξένης διέγερσης για διαφορά φορτία

Η συγκεκριμένη εφαρμογή αποτελείται από τρεις περιπτώσεις, για $T_L = 1.5 \text{ Nm}$, για $T_L = 3 \text{ Nm}$ και $T_L = 4.5 \text{ Nm}$. Και στις τρεις περιπτώσεις ο κινητήρας αρχικά βρίσκεται σε στάση και το τύλιγμα

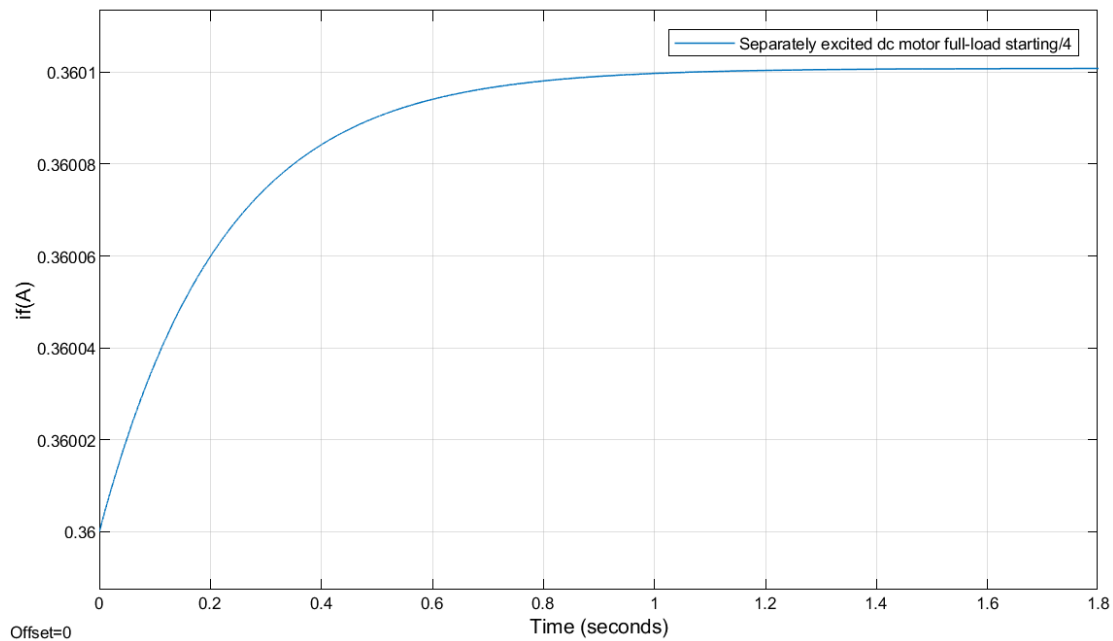
Μοντελοποίηση και δυναμική ανάλυση κινητήρα ΣΡ ξένης διέγερσης, για διάφορα λειτουργικά σενάρια.

διέγερσης τροφοδοτείται με την ονομαστική του τάση. Την χρονική στιγμή $t=0$, το τύλιγμα τυμπάνου τροφοδοτείται με την ονομαστική του τάση, ενώ στον άξονα του κινητήρα συνδέεται το αντίστοιχο σταθερό φορτίο ανάλογα με την περίπτωση που εξετάζουμε.

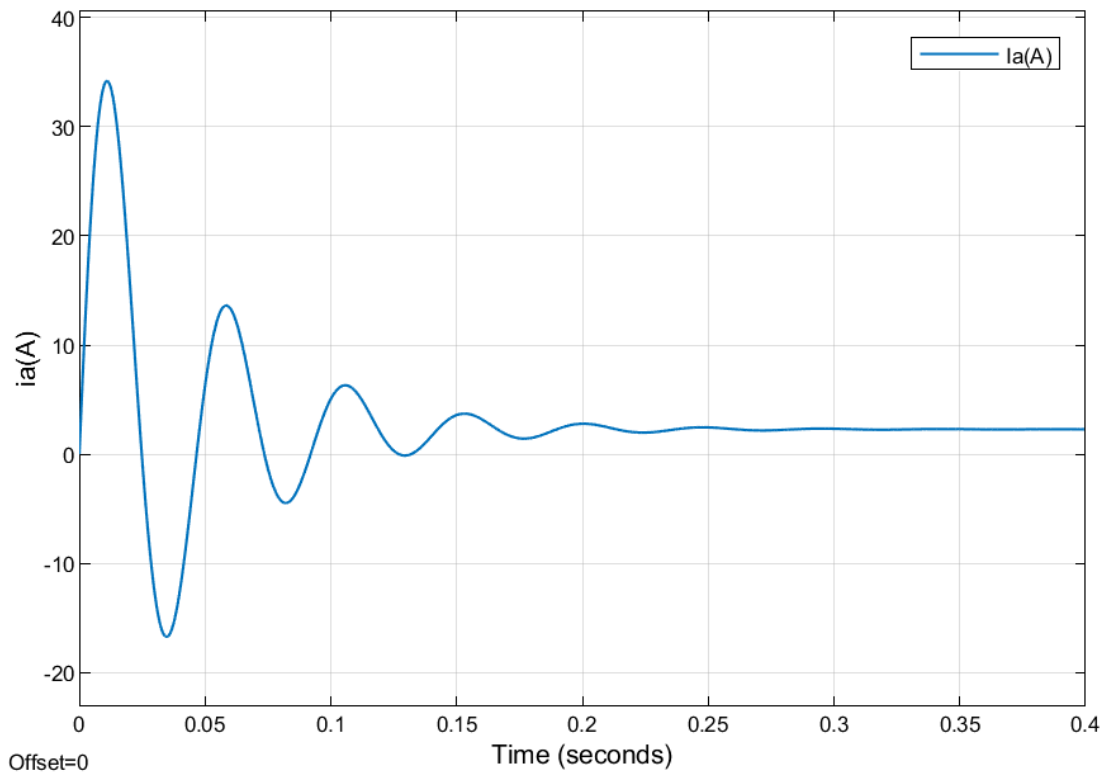
Αξίζει να σημειωθεί ότι η περίπτωση με φορτίο $T_L=3 \text{ Nm}$ αποτελεί και το ονομαστικό φορτίο του κινητήρα ΣΡ που χρησιμοποιήθηκε, οπότε τα αποτελέσματα της συγκεκριμένης περίπτωσης αποτελούν και τις ονομαστικές τιμές των μεγεθών του κινητήρα.

Ακολουθούν οι χρονικές μεταβολές των διαφόρων μεταβλητών του κινητήρα για κάθε περίπτωση.

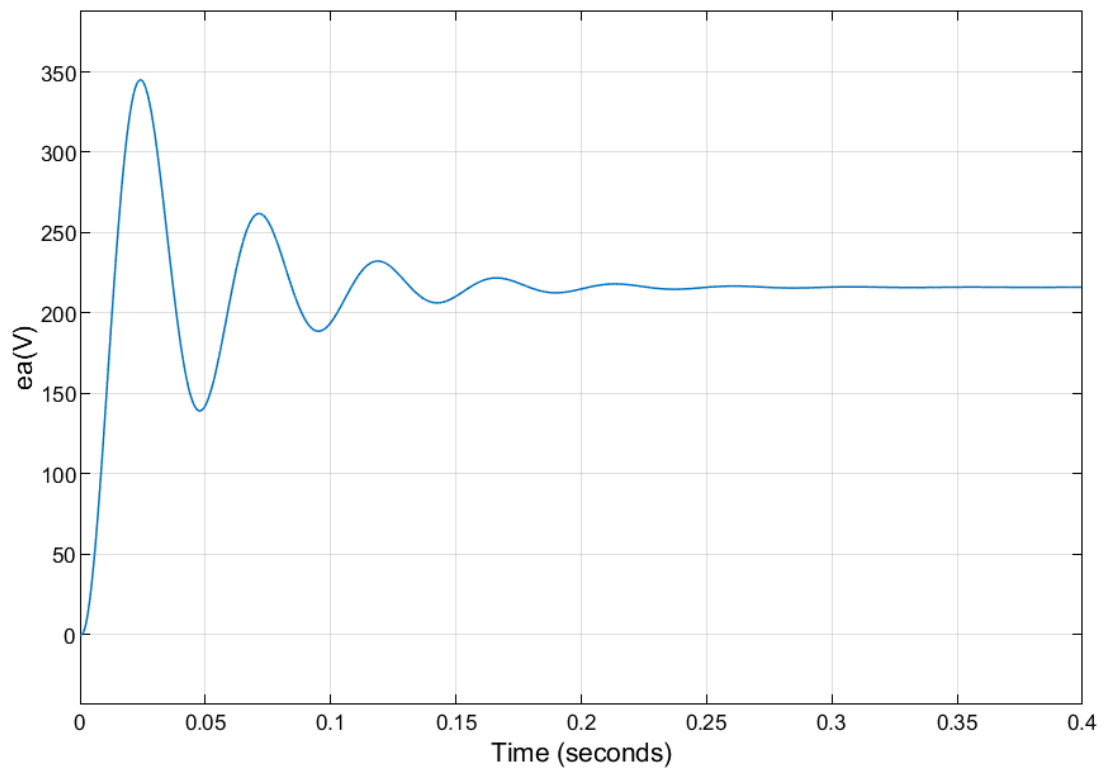
1. Για φορτίο $T_L= 1.5 \text{ Nm}$



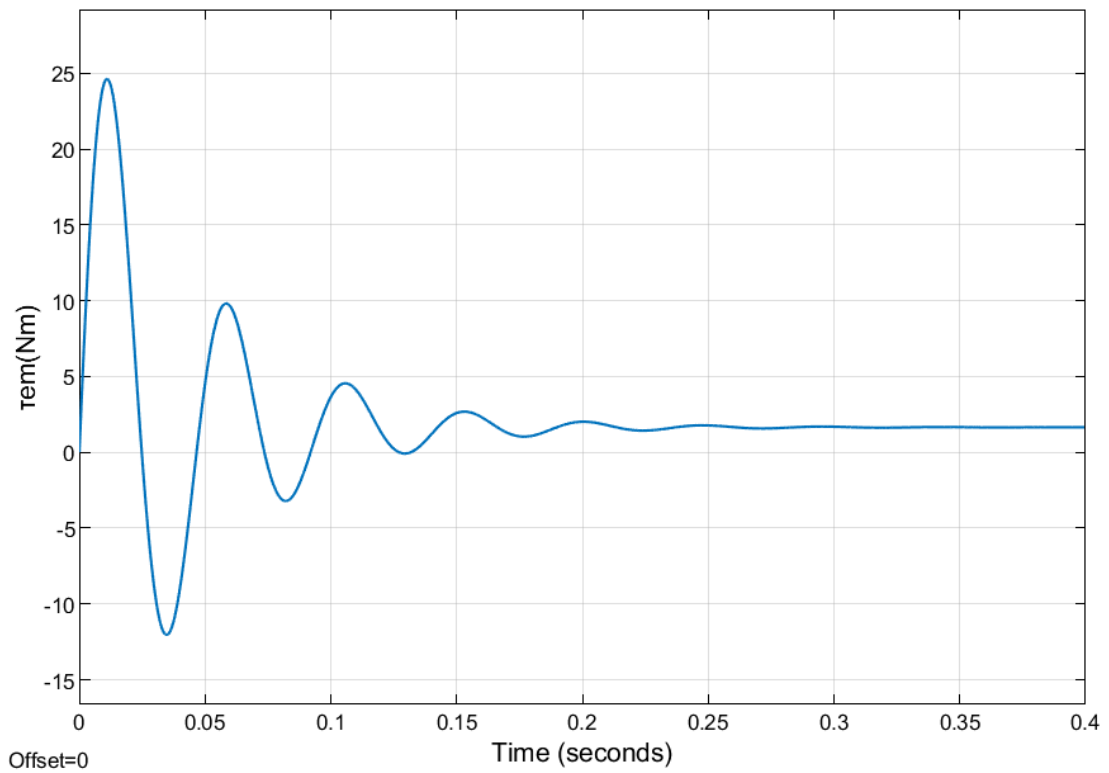
Εικόνα 44 Χρονική μεταβολή ρεύματος διέγερσης i_f – Εκκίνηση κινητήρα ΣΡ ξένης διέγερσης με φορτίο $T_L= 1.5 \text{ Nm}$



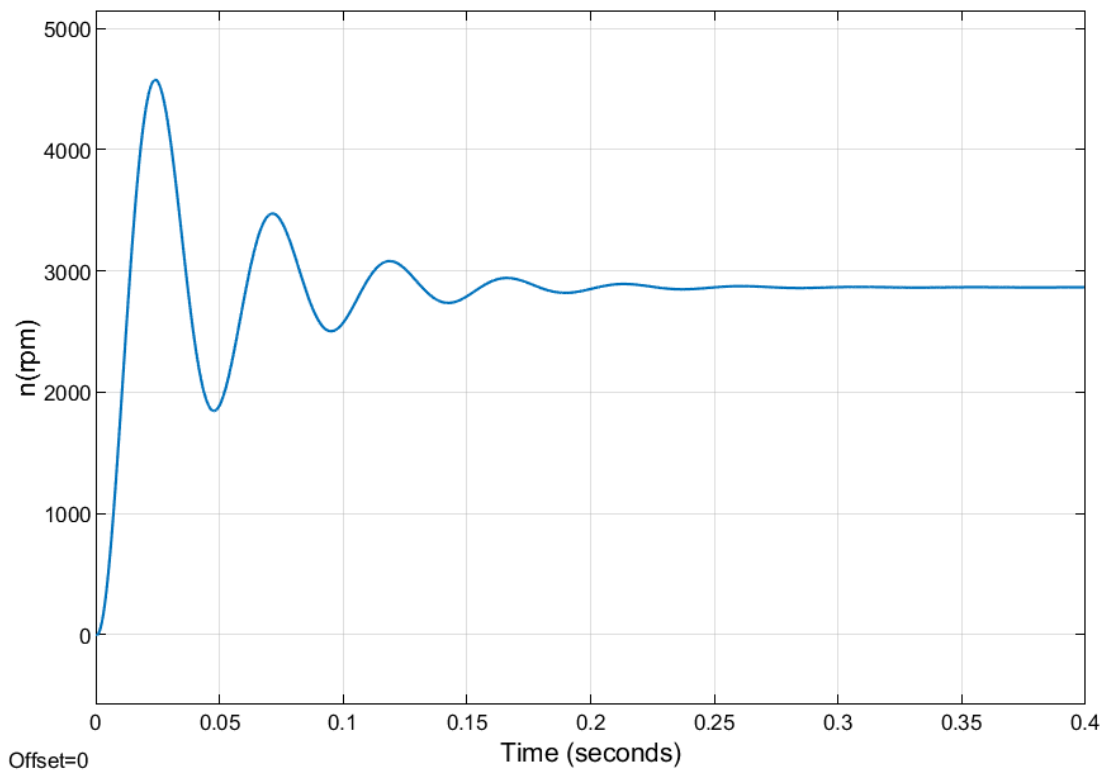
Εικόνα 45 Χρονική μεταβολή ρεύματος τυμπάνου i_a – Εκκίνηση κινητήρα ΣΡ ξένης διέγερσης με φορτίο $T_L=1.5$ Nm



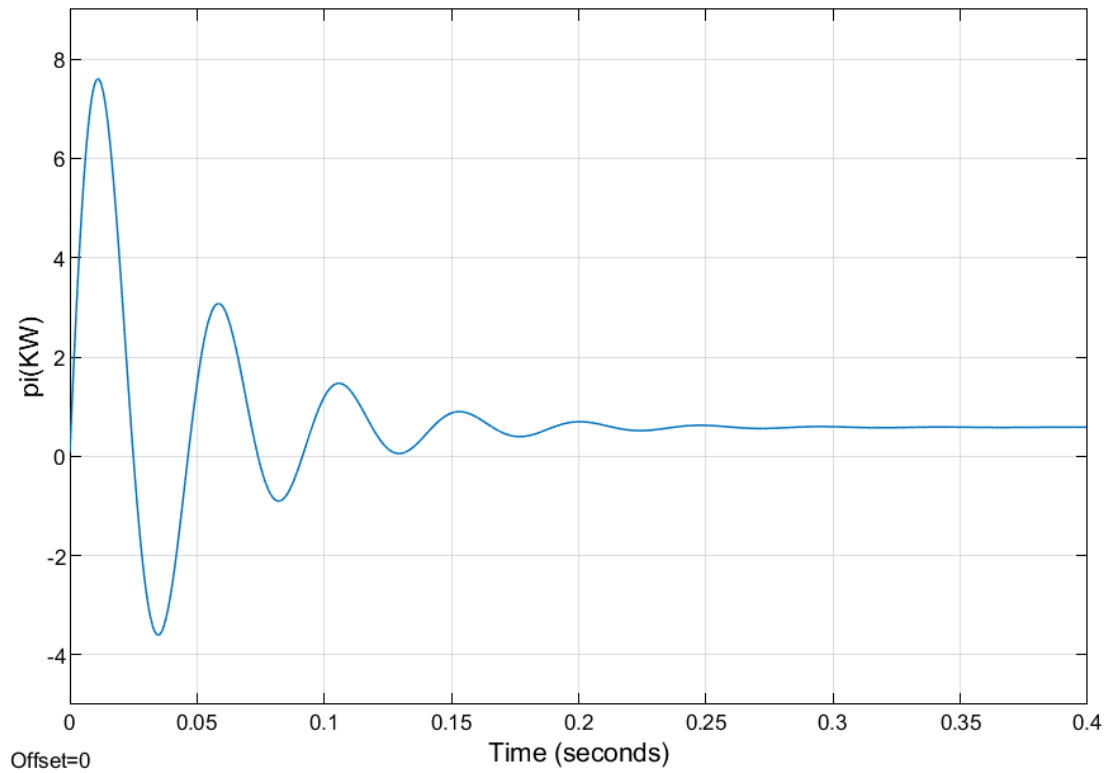
Εικόνα 46 Χρονική μεταβολή ΑΗΕΔ e_a – Εκκίνηση κινητήρα ΣΡ ξένης διέγερσης με φορτίο $T_L=1.5$ Nm



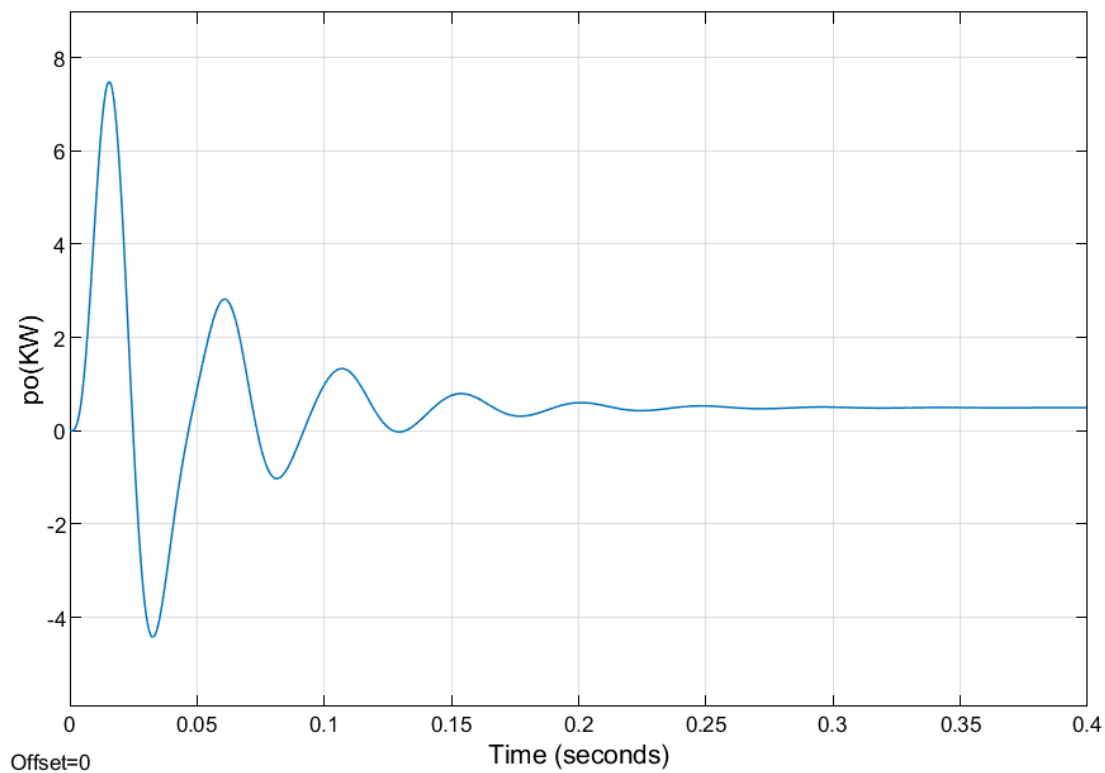
Εικόνα 47 Χρονική μεταβολή ηλεκτρομαγνητικής ροπής tem – Εκκίνηση κινητήρα ΣΡ ξένης διέγερσης με φορτίο $TL= 1.5$ Nm



Εικόνα 48 Χρονική μεταβολή στροφών n – Εκκίνηση κινητήρα ΣΡ ξένης διέγερσης με φορτίο $TL= 1.5$ Nm



Εικόνα 49 Χρονική μεταβολή ισχύος εισόδου p_i – Εκκίνηση κινητήρα ΣΡ ξένης διέγερσης με φορτίο $T_L = 1.5 \text{ Nm}$



Εικόνα 50 Χρονική μεταβολή ισχύος εξόδου p_o – Εκκίνηση κινητήρα ΣΡ ξένης διέγερσης με φορτίο $T_L = 1.5 \text{ Nm}$

Παρατηρήσεις

Παρατηρείται, ότι μετά από διάστημα 0.3s, το σύστημα ισορροπεί και οδηγείται στην μόνιμη κατάσταση όπου:

$$V_a = V_f = 220\text{V}, I_a = 2.29\text{A}, I_f = 0.3601, E_a = 216.1\text{V},$$

Και

$$T_{em} = 1.649\text{Nm}, n = 2865\text{rpm}, P_i = 582\text{W}, P_o = 494\text{W}, \eta(\%) = 84.83$$

Το ρεύμα τυμπάνου I_a παρουσιάζει για χρόνο $t = 0.011\text{s}$ την μέγιστη του τιμή που είναι $I_{a\max} = 34.2\text{A}$ και για χρόνο $t = 0.024\text{s}$ εμφανίζεται η μέγιστη αύξηση των στροφών, με τιμή $n_{\max} = 4574\text{rpm}$.

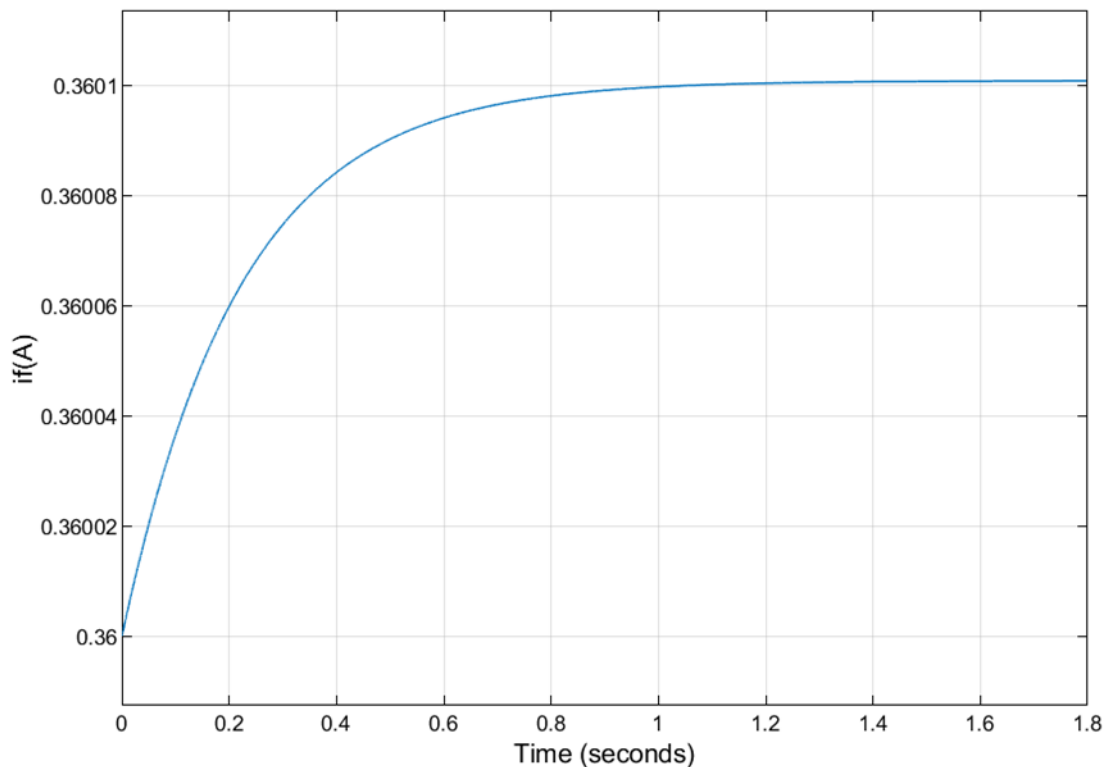
$$\frac{I_{a\max}}{I_{a\text{nom}}} = \frac{34.2}{4.37} = 7.8$$

$$\frac{n_{\max} - n}{n} = \frac{4574 - 2865}{2865} \times 100 = 59\%$$

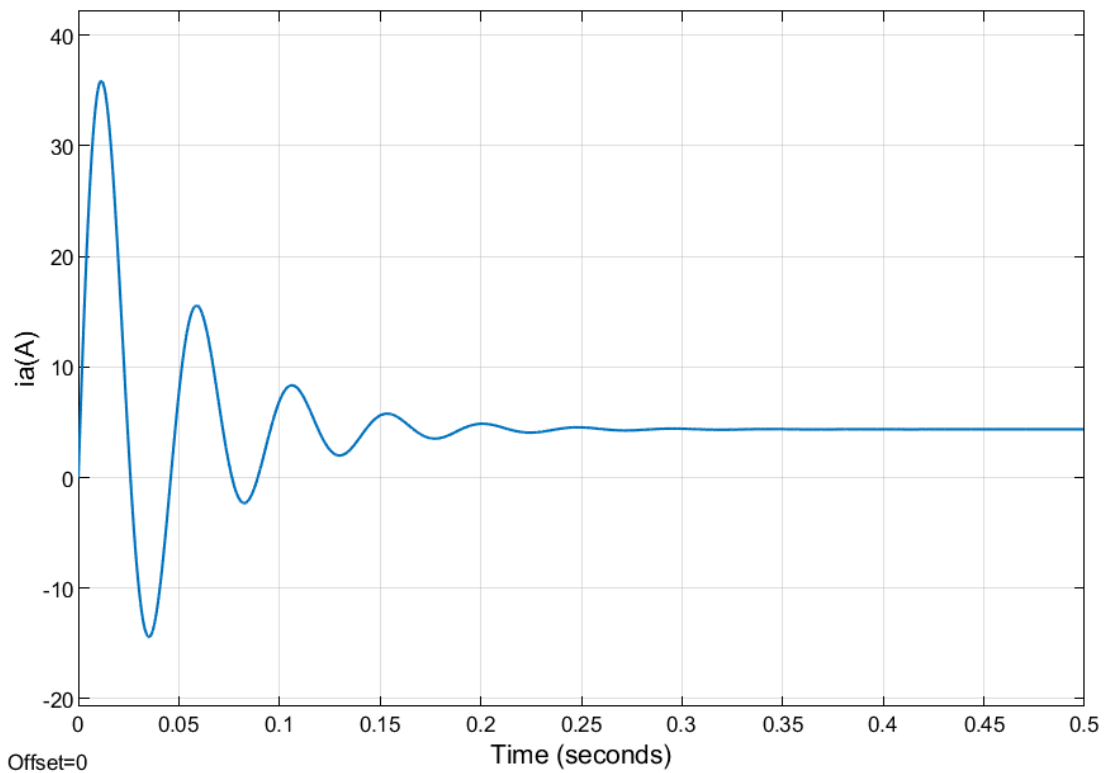
Με βάση τα παραπάνω το μέγιστο ρεύμα εκκίνησης για φορτίο $T_L = 1.5\text{ Nm}$ είναι 7.8 φορές μεγαλύτερου του ονομαστικού ρεύματος και η μέγιστη ποσοστιαία διακύμανση των στροφών είναι 59%.

Ακόμα παρατηρείται ότι το ρεύμα τυμπάνου, η ηλεκτρομαγνητική ροπή, η ισχύς εξόδου και η ισχύς εισόδου αποκτούν και αρνητικές τιμές.

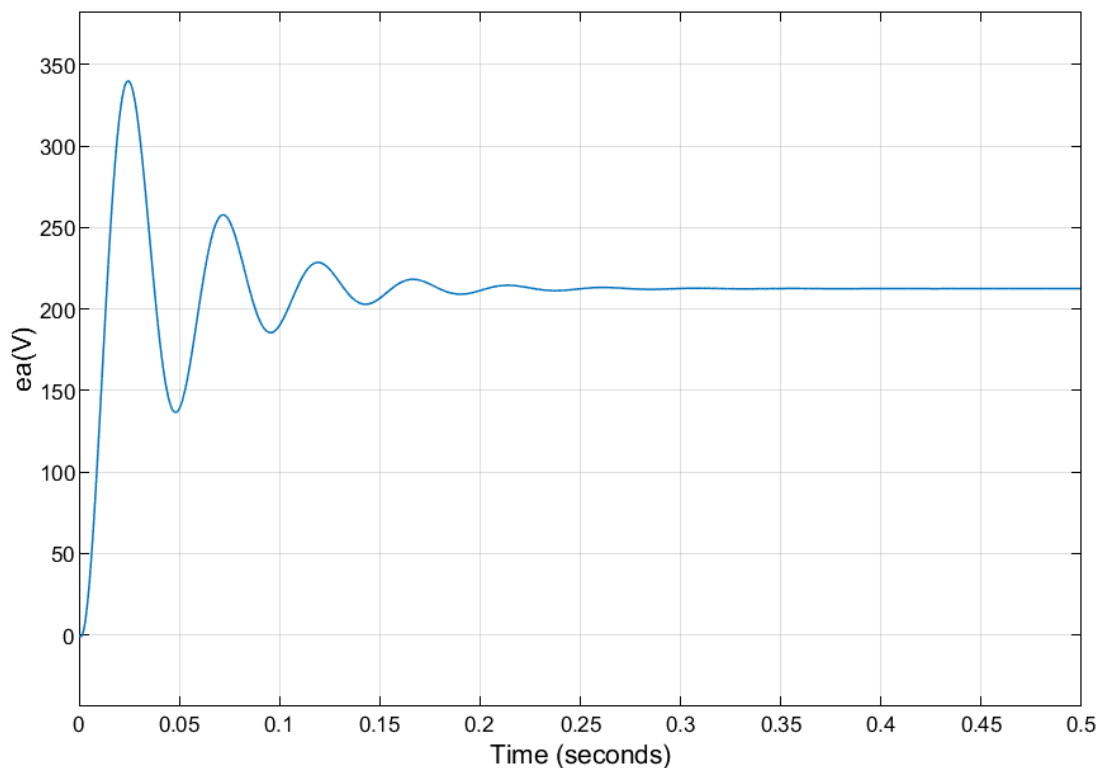
2. Για φορτίο $T_L = 3\text{ Nm}$



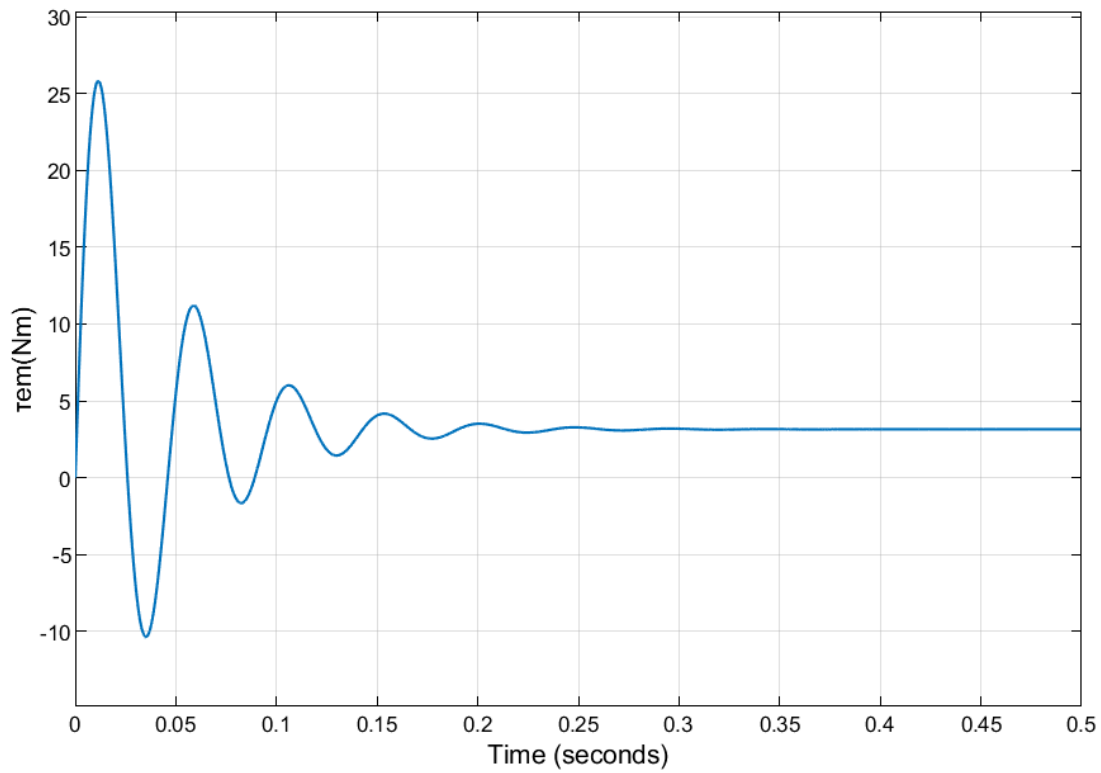
Εικόνα 51 Χρονική μεταβολή ρεύματος διέγερσης i_f – Εκκίνηση κινητήρα ΣΡ ξένης διέγερσης με φορτίο $T_L = 3\text{ Nm}$



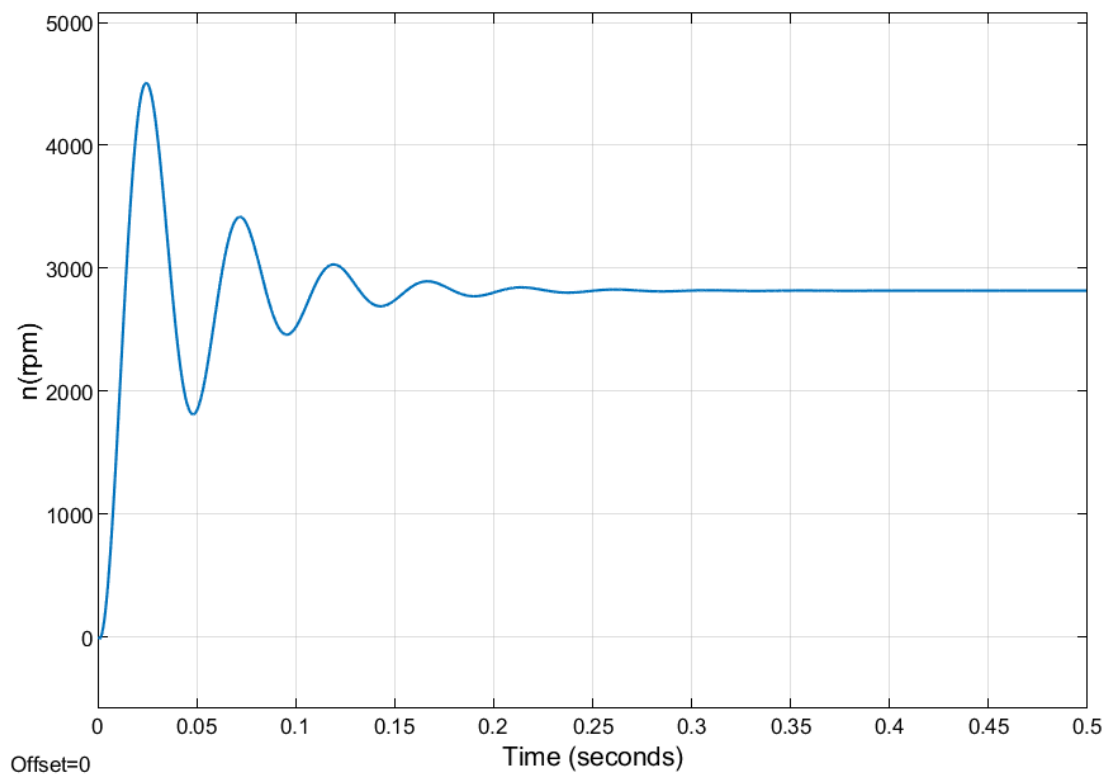
Εικόνα 52 Χρονική μεταβολή ρεύματος τυμπάνου i_a - Εκκίνηση κινητήρα ΣΡ ξένης διέγερσης με φορτίο $T_L=3$ Nm



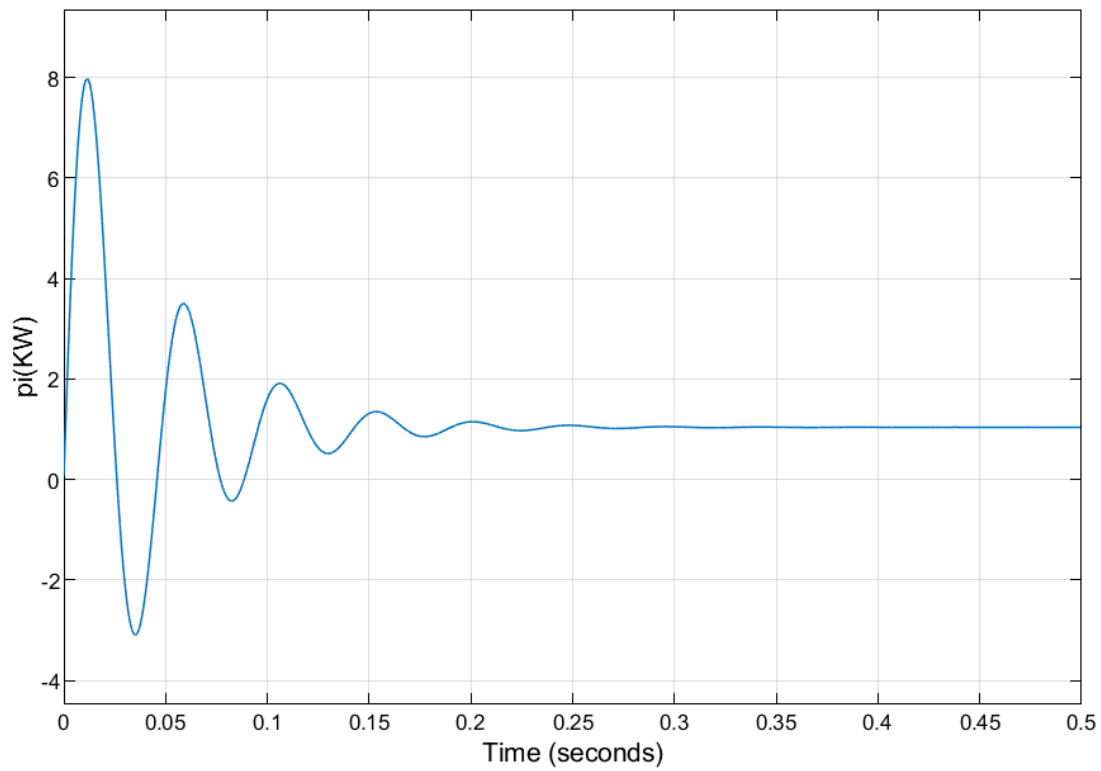
Εικόνα 53 Χρονική μεταβολή ΑΗΕΔ e_a - Εκκίνηση κινητήρα ΣΡ ξένης διέγερσης με φορτίο $T_L=3$ Nm



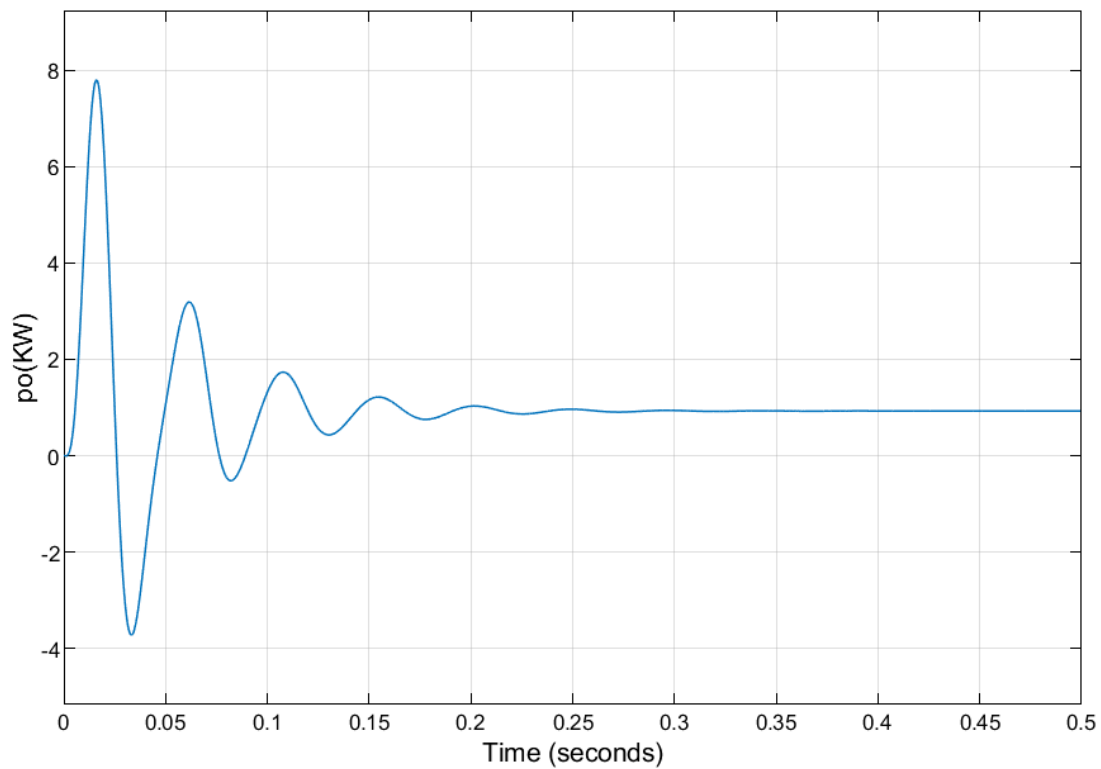
Εικόνα 54 Χρονική μεταβολή ηλεκτρομαγνητικής ροπής tem - Εκκίνηση κινητήρα ΣΡ ξένης διέγερσης με φορτίο $TL=3\text{ Nm}$



Εικόνα 55 Χρονική μεταβολή στροφών n - Εκκίνηση κινητήρα ΣΡ ξένης διέγερσης με φορτίο $TL=3\text{ Nm}$



Εικόνα 56 Χρονική μεταβολή ισχύος εισόδου p_i - Εκκίνηση κινητήρα ΣΡ ξένης διέγερσης με φορτίο $T_L=3\text{ Nm}$



Εικόνα 57 Χρονική μεταβολή ισχύος εξόδου p_o - Εκκίνηση κινητήρα ΣΡ ξένης διέγερσης με φορτίο $T_L=3\text{ Nm}$

Παρατηρήσεις

Παρατηρείται, ότι μετά από διάστημα 0.3s, το σύστημα ισορροπεί και οδηγείται στην μόνιμη κατάσταση όπου:

$$V_{\text{anom}} = V_{\text{fnom}} = 220\text{V}, I_{\text{anom}} = 4.37\text{A}, I_{\text{fnom}} = 0.3601, E_{\text{anom}} = 212.5\text{V},$$

Και

$$T_{\text{emnom}} = 3.146\text{Nm}, n_{\text{nom}} = 2817\text{rpm}, P_{\text{inom}} = 1040\text{W}, P_{\text{onom}} = 928\text{W}, \eta_{\text{nom}} (\%) = 89.22$$

Το ρεύμα τυμπάνου I_a παρουσιάζει για χρόνο $t = 0.01\text{s}$ την μέγιστη του τιμή που είναι $I_{\text{amax}} = 35.83\text{A}$ και για χρόνο $t = 0.024\text{s}$ εμφανίζεται η μέγιστη αύξηση των στροφών, με τιμή $n_{\text{max}} = 4507\text{rpm}$.

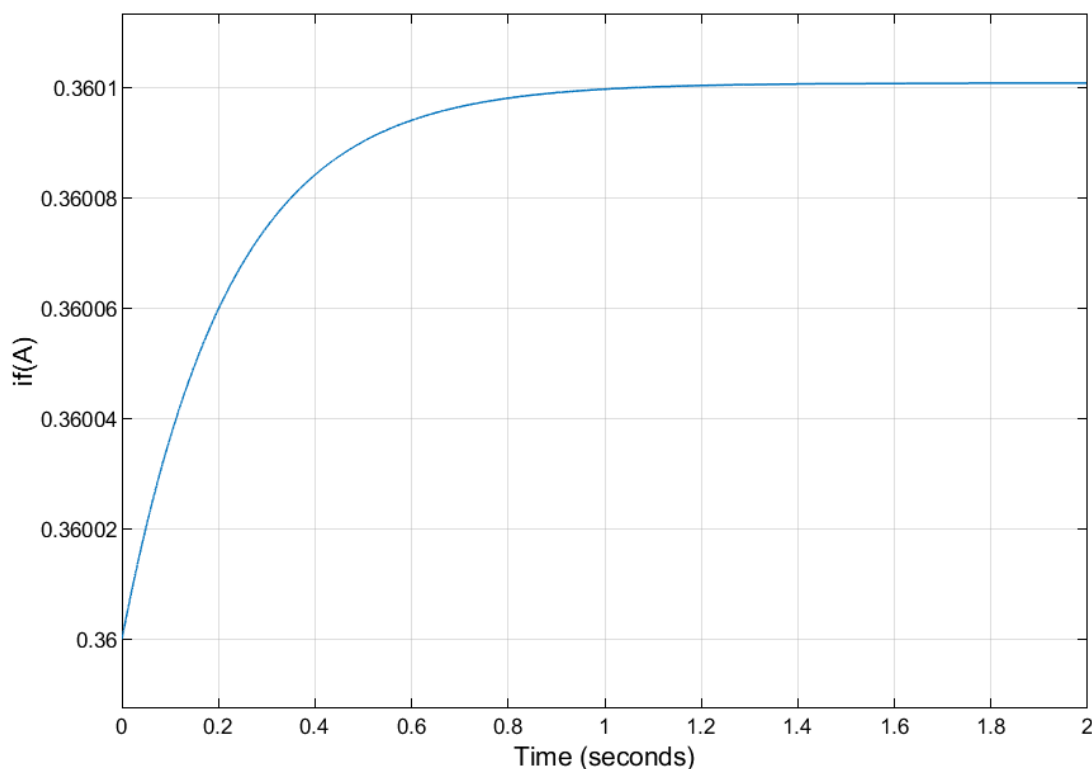
$$\frac{I_{\text{amax}}}{I_{\text{anom}}} = \frac{35.83}{4.37} = 8.2$$

$$\frac{n_{\text{max}} - n}{n} = \frac{4507 - 2817}{2817} \times 100 = 60\%$$

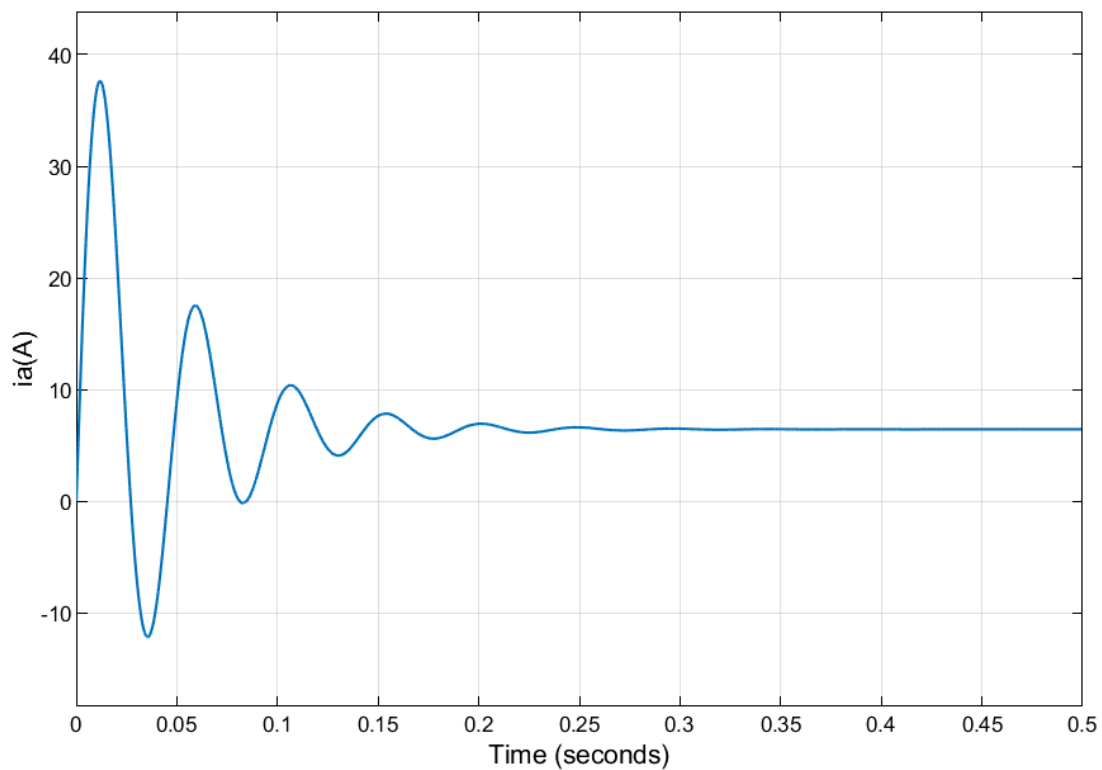
Με βάση τα παραπάνω το μέγιστο ρεύμα εκκίνησης για φορτίο $T_L = 3\text{ Nm}$ είναι 8.2 φορές μεγαλύτερο του ονομαστικού ρεύματος και η μέγιστη ποσοστιαία διακύμανση των στροφών είναι 60%.

Ακόμα παρατηρείται ότι το ρεύμα τυμπάνου, η ηλεκτρομαγνητική ροπή, η ισχύς εξόδου και η ισχύς εισόδου αποκτούν και αρνητικές τιμές.

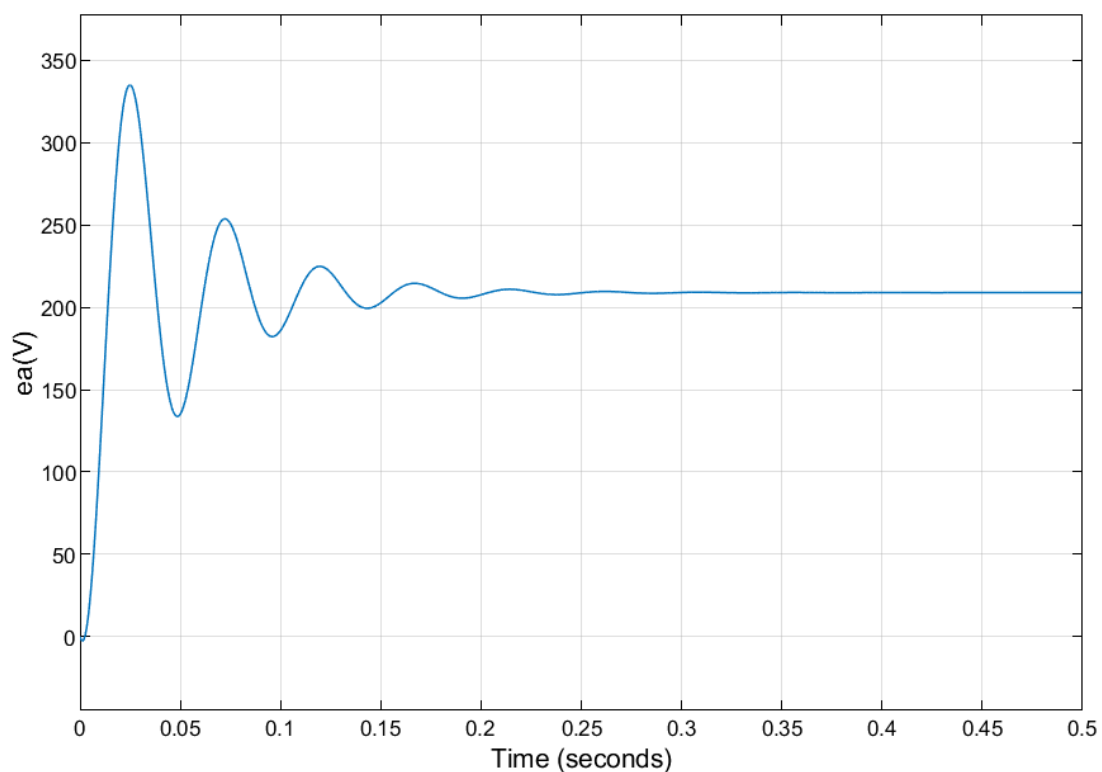
3. Για φορτίο $T_L = 4.5\text{ Nm}$



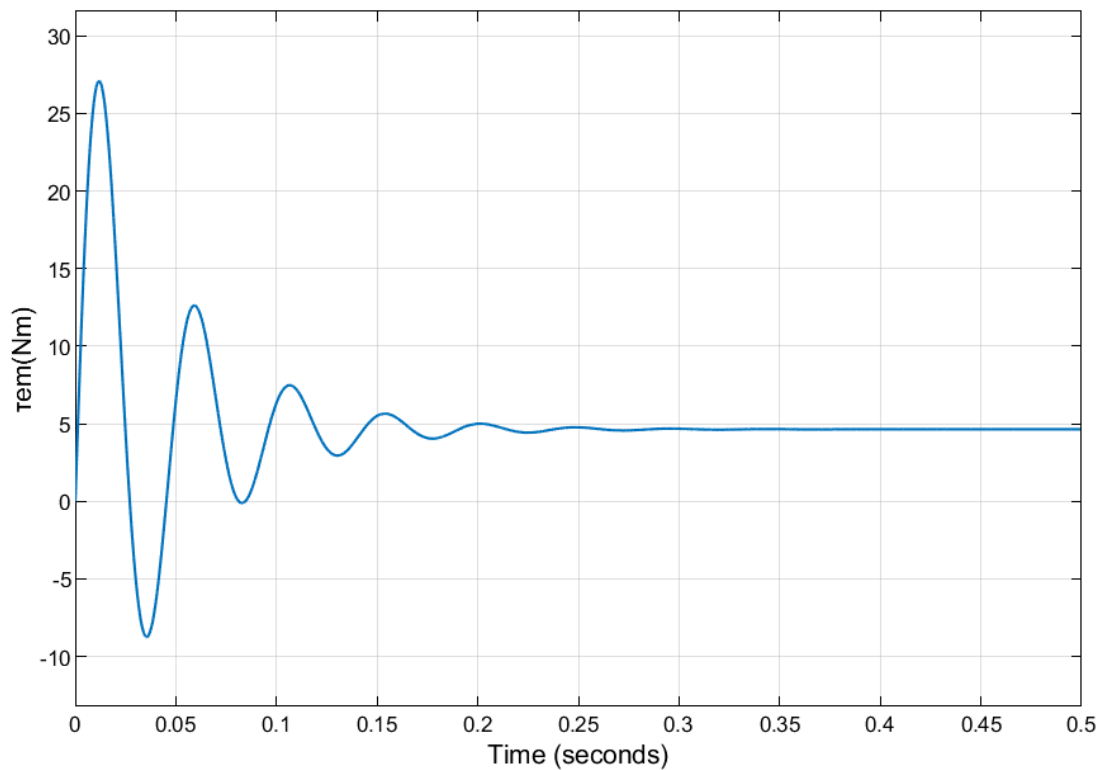
Εικόνα 58 Χρονική μεταβολή ρεύματος διέγερσης i_f - Εκκίνηση κινητήρα ΣΡ ξένης διέγερσης με φορτίο $T_L = 4.5\text{ Nm}$



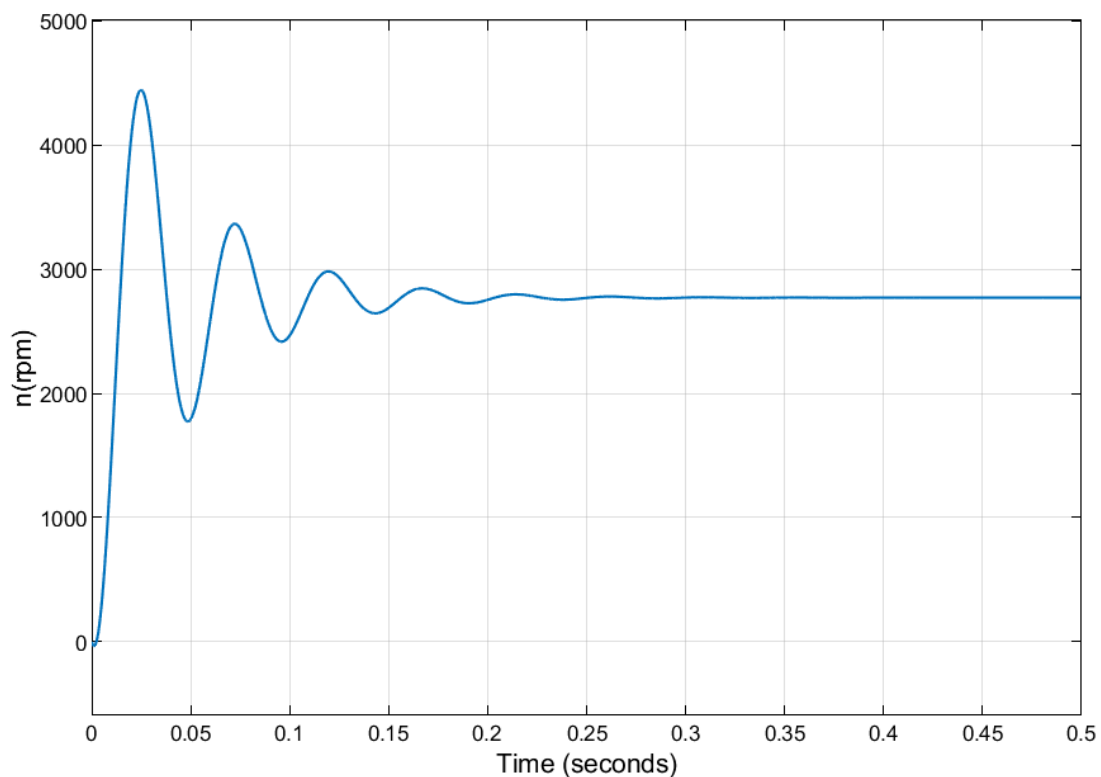
Εικόνα 59 Χρονική μεταβολή ρεύματος τυμπάνου i_a - Εκκίνηση κινητήρα ΣΡ ξένης διέγερσης με φορτίο $T_L= 4.5$ Nm



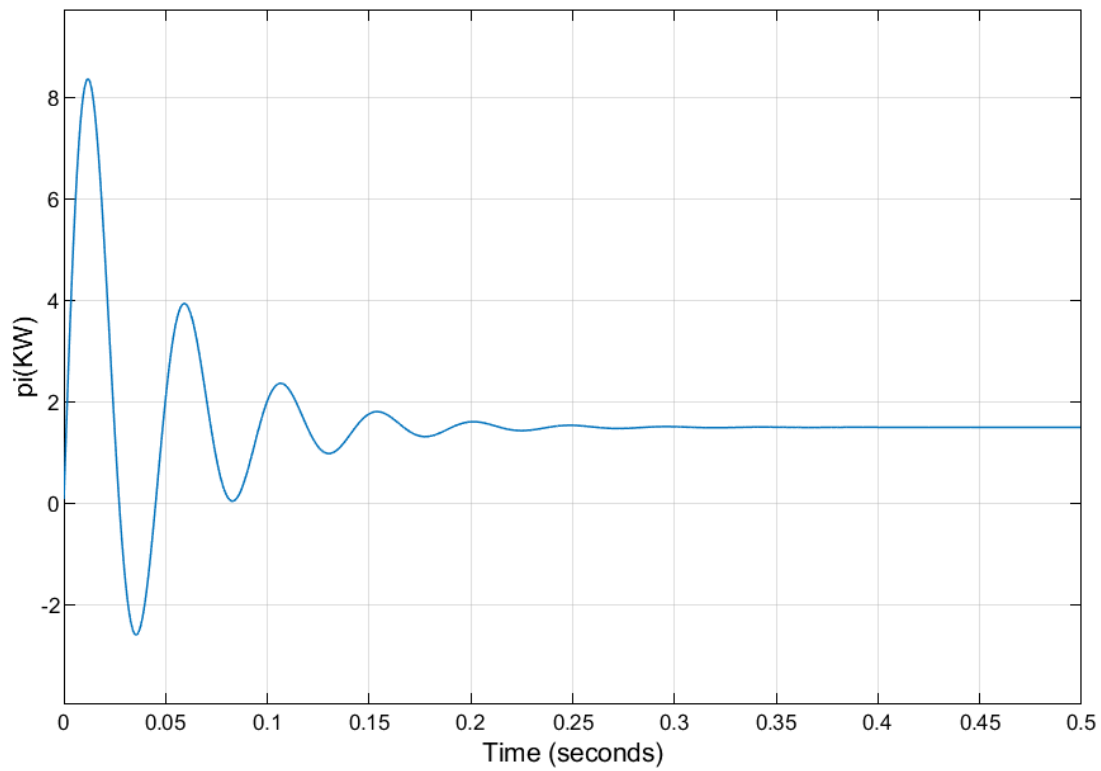
Εικόνα 60 Χρονική μεταβολή ΑΗΕΔ e_a - Εκκίνηση κινητήρα ΣΡ ξένης διέγερσης με φορτίο $T_L= 4.5$ Nm



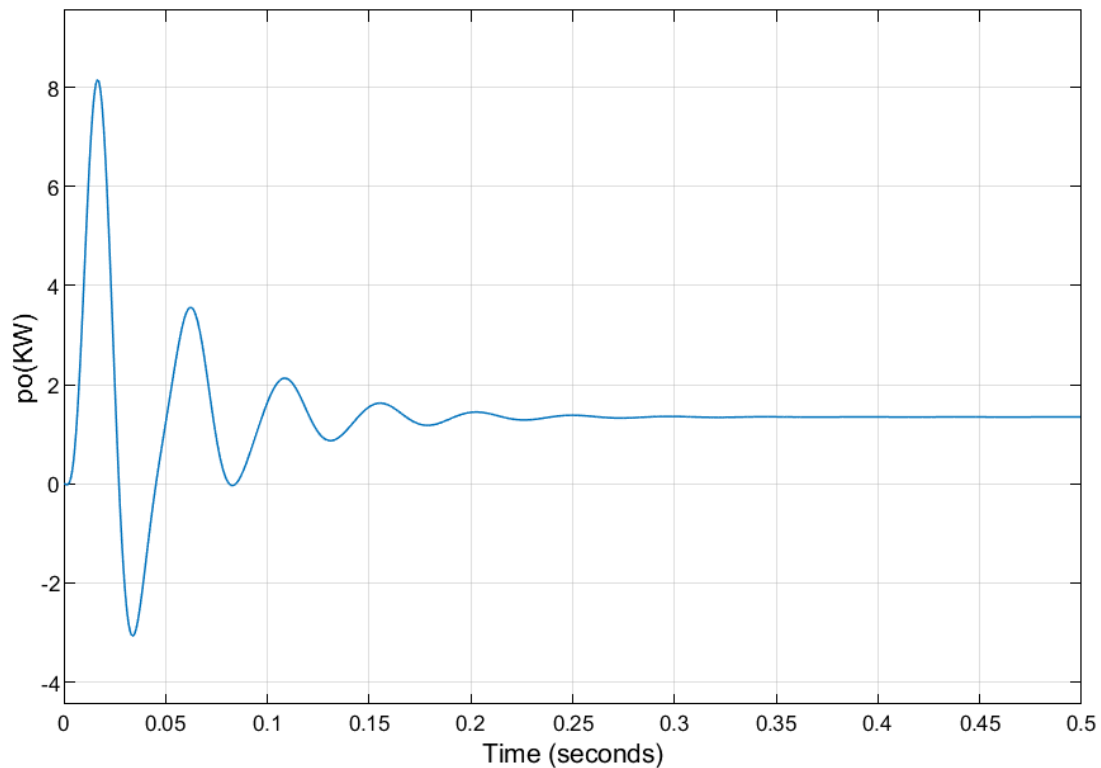
Εικόνα 61 Χρονική μεταβολή ηλεκτρομαγνητικής ροπής tem - Εκκίνηση κινητήρα ΣΡ ξένης διέγερσης με φορτίο $T_L = 4.5$ Nm



Εικόνα 62 Χρονική μεταβολή στροφών n - Εκκίνηση κινητήρα ΣΡ ξένης διέγερσης με φορτίο $T_L = 4.5$ Nm



Εικόνα 63 Χρονική μεταβολή ισχύος εισόδου ρ_i - Εκκίνηση κινητήρα ΣΡ ξένης διέγερσης με φορτίο $T_L = 4.5 \text{ Nm}$



Εικόνα 64 Χρονική μεταβολή ισχύος εξόδου ρ_o - Εκκίνηση κινητήρα ΣΡ ξένης διέγερσης με φορτίο $T_L = 4.5 \text{ Nm}$

Παρατηρήσεις

Παρατηρείται, ότι μετά από διάστημα 0.3s, το σύστημα ισορροπεί και οδηγείται στην μόνιμη κατάσταση όπου:

$$V_a = V_f = 220\text{V}, I_a = 6.45\text{A}, I_f = 0.3601, E_a = 208.9\text{V},$$

Και

$$T_{em} = 4.644\text{Nm}, n = 2770\text{rpm}, P_i = 1498\text{W}, P_o = 1347\text{W}, \eta(\%) = 89.93$$

Το ρεύμα τυμπάνου I_a παρουσιάζει για χρόνο $t = 0.01\text{s}$ την μέγιστη του τιμή που είναι $I_{amax} = 37.47\text{A}$ και για χρόνο $t = 0.024\text{s}$ εμφανίζεται η μέγιστη αύξηση των στροφών, με τιμή $n_{max} = 4440\text{rpm}$.

$$\frac{I_{amax}}{I_{anom}} = \frac{37.47}{4.37} = 8.6$$

$$\frac{n_{max} - n}{n} = \frac{4440 - 2770}{2770} \times 100 = 60\%$$

Με βάση τα παραπάνω το μέγιστο ρεύμα εκκίνησης για φορτίο $T_L = 4.5\text{ Nm}$ είναι 8.6 φορές μεγαλύτερου του ονομαστικού ρεύματος και η μέγιστη ποσοστιαία διακύμανση των στροφών είναι 60%.

Ακόμα παρατηρείται ότι το ρεύμα τυμπάνου, η ηλεκτρομαγνητική ροπή, η ισχύς εξόδου και η ισχύς εισόδου αποκτούν και αρνητικές τιμές.

5.3 Βηματική μεταβολή στη μηχανική ροπή κινητήρα ΣΡ ξένης διέγερσης και επαναφορά

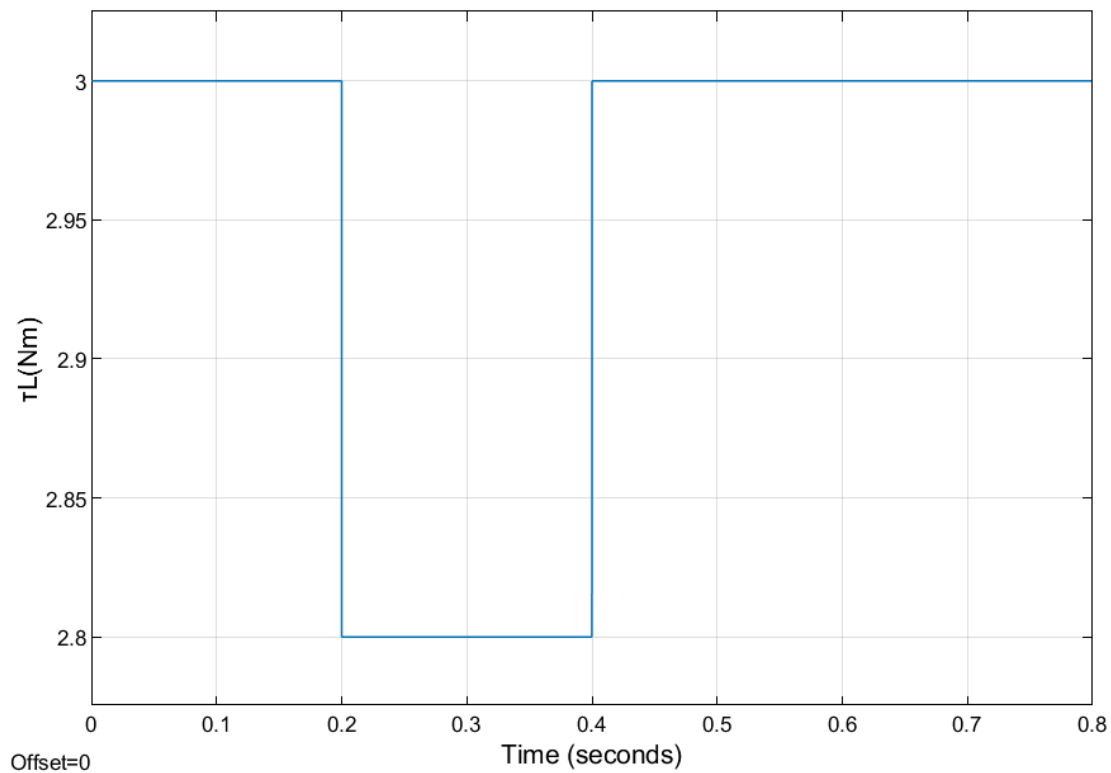
Σε αυτήν την εφαρμογή έχουμε τρεις περιπτώσεις με διαφορετική μεταβολή μηχανικής ροπής, για $\Delta T_L = 0.2\text{ Nm}$, για $\Delta T_L = 0.4\text{ Nm}$ και $\Delta T_L = 0.6\text{ Nm}$. Σε όλες τις περιπτώσεις ο κινητήρας λειτουργούσε αρχικά στη μόνιμη κατάσταση με την ονομαστική του τάση 220 V και ονομαστικό φορτίο σταθερής ροπής 3 Nm (μόνιμη κατάσταση προηγούμενης εφαρμογής περίπτωση 2^η). Τη χρονική στιγμή $t = 0.2\text{ s}$, γίνεται βηματική μείωση της ροπής φορτίου για τα διάφορα ΔT που προαναφέραμε με διάρκεια $\Delta t = 0.2\text{ s}$ και έπειτα επανέρχεται στην αρχική τιμή της. Οι τιμές των μεγεθών του κινητήρα στη μόνιμη κατάσταση είναι:

$$V_a = V_f = 220\text{ V}, I_a = 4.37\text{ A}, I_f = 0.3601\text{ A}, E_a = 212.5\text{ V},$$

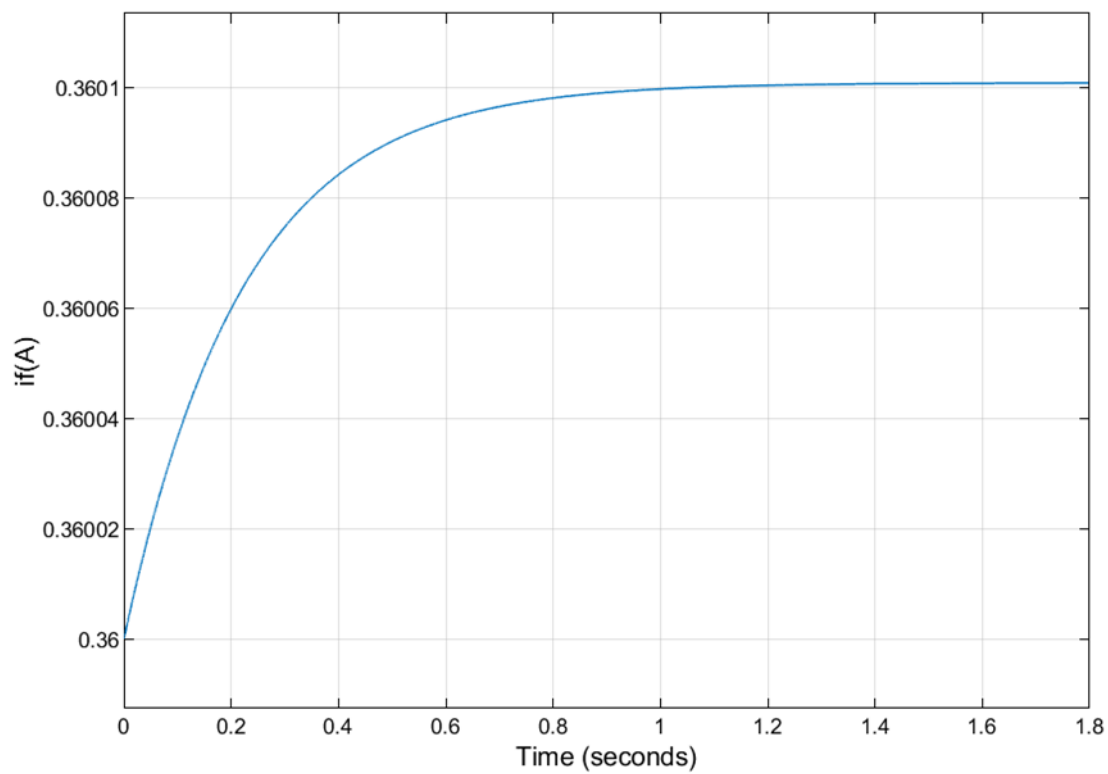
$$T_{em} = 3.146\text{ Nm}, n = 2817\text{ rpm}, P_i = 1040\text{ W}, P_o = 928\text{ W}, \eta(\%) = 89.22$$

Μετά την επαναφορά της μηχανικής ροπής στην ονομαστική τιμή της, τα μεγέθη του κινητήρα σε όλες τις περιπτώσεις επαναφέρεται στην αρχική τους κατάσταση. Στη συνέχεια, δείχνονται οι χρονικές μεταβολές των μεταβλητών του κινητήρα για τις τρεις περιπτώσεις.

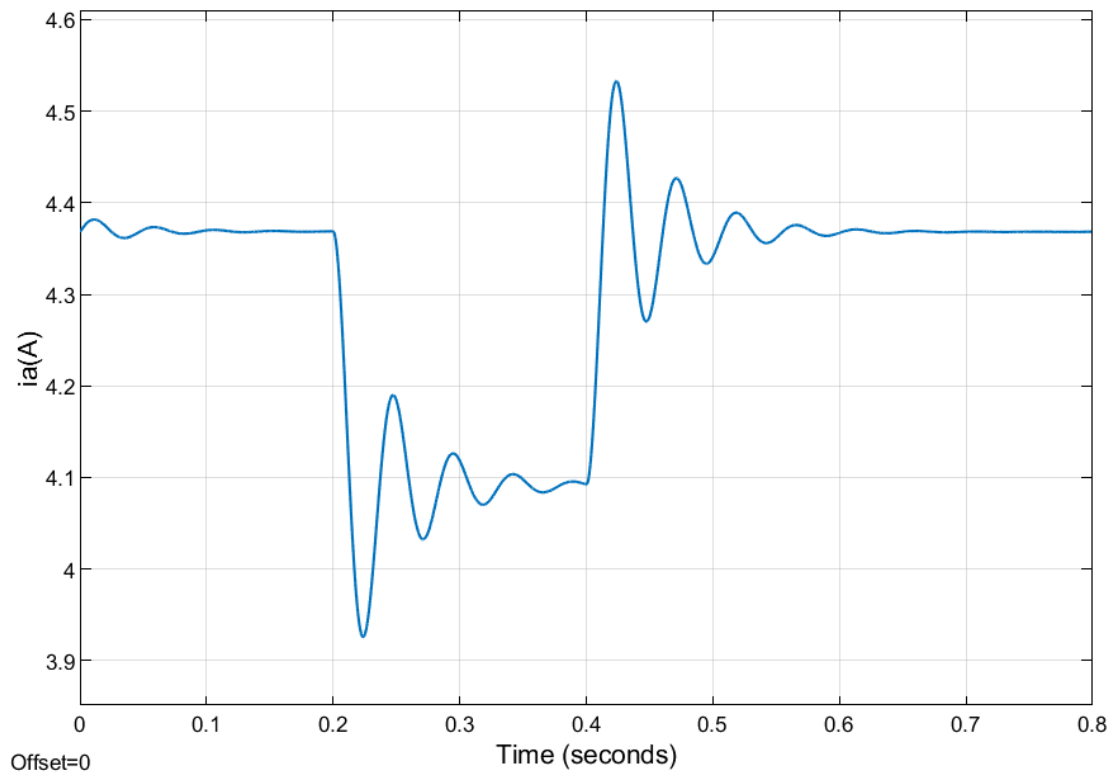
1. Για μεταβολή $\Delta T_L = 0.2\text{ Nm}$



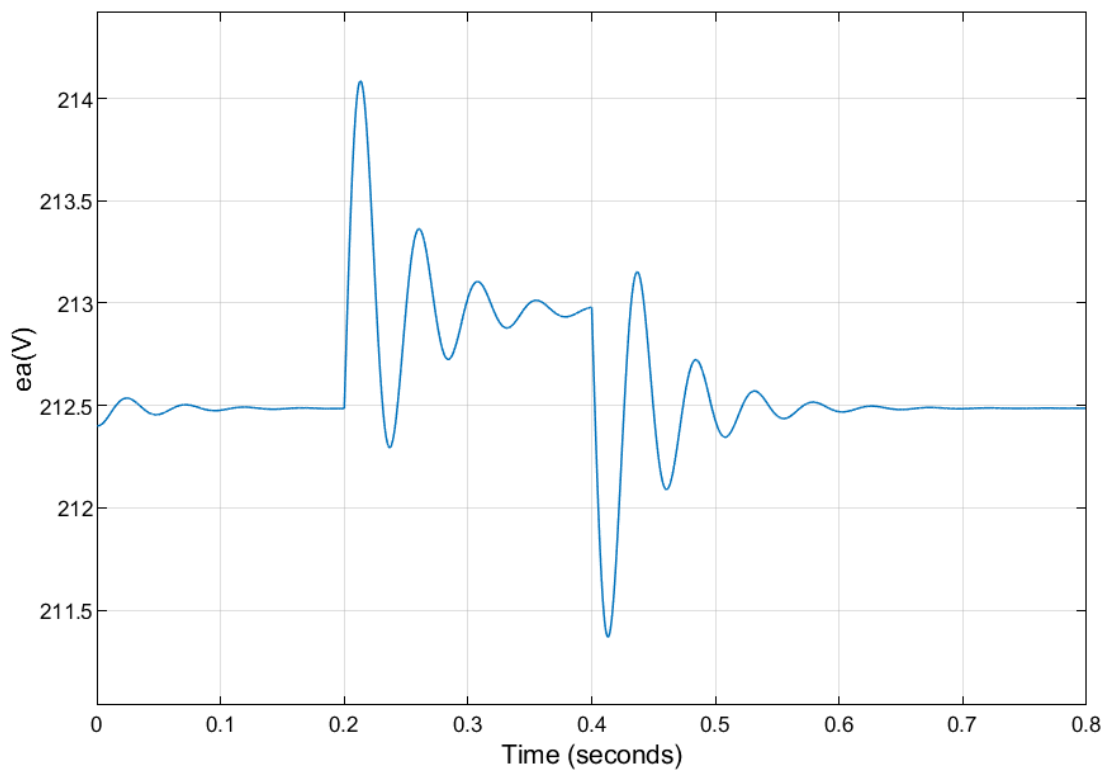
Εικόνα 65 Χρονική μεταβολή ροπής φορτίου τ_L – Βηματική μείωση της ροπής φορτίου κατά 0.2 Nm κινητήρα ΣΡ ξένης διέγερσης



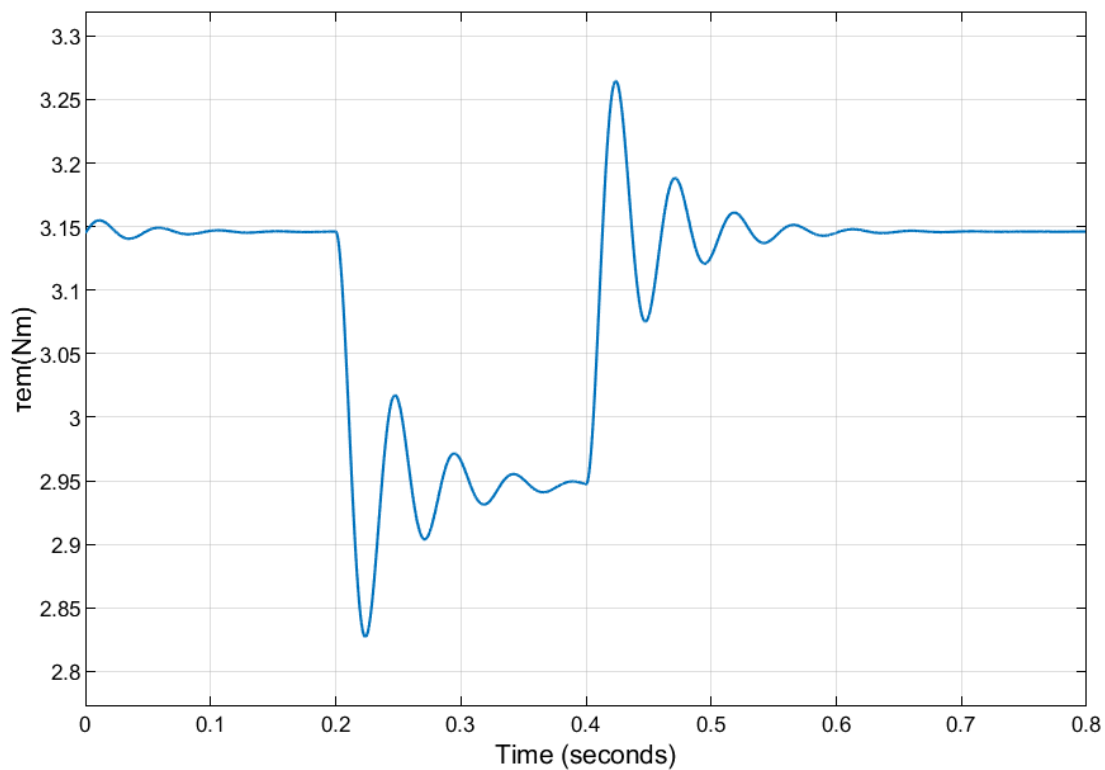
Εικόνα 66 Χρονική μεταβολή ρεύματος διέγερσης i_f – Βηματική μείωση της ροπής φορτίου κατά 0.2 Nm κινητήρα ΣΡ ξένης διέγερσης



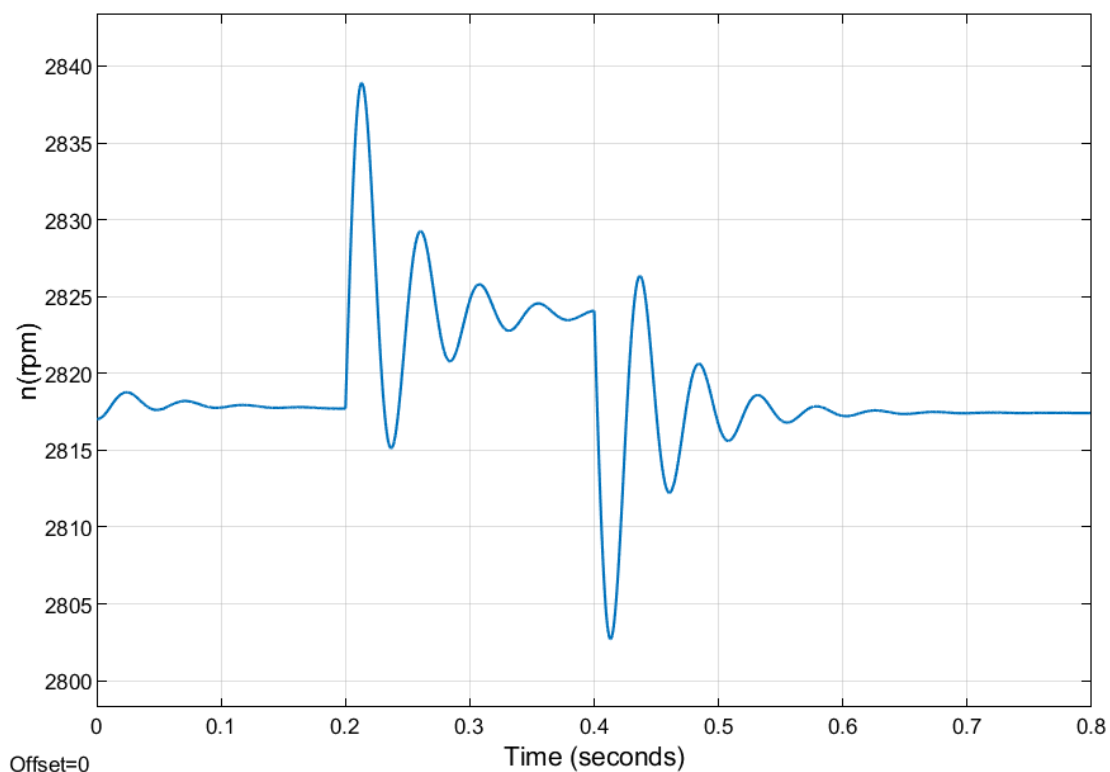
Εικόνα 67 Χρονική μεταβολή ρεύματος τυμπάνου i_a – Βηματική μείωση της ροπής φορτίου κατά 0.2 Nm κινητήρα ΣΡ ξένης διέγερσης



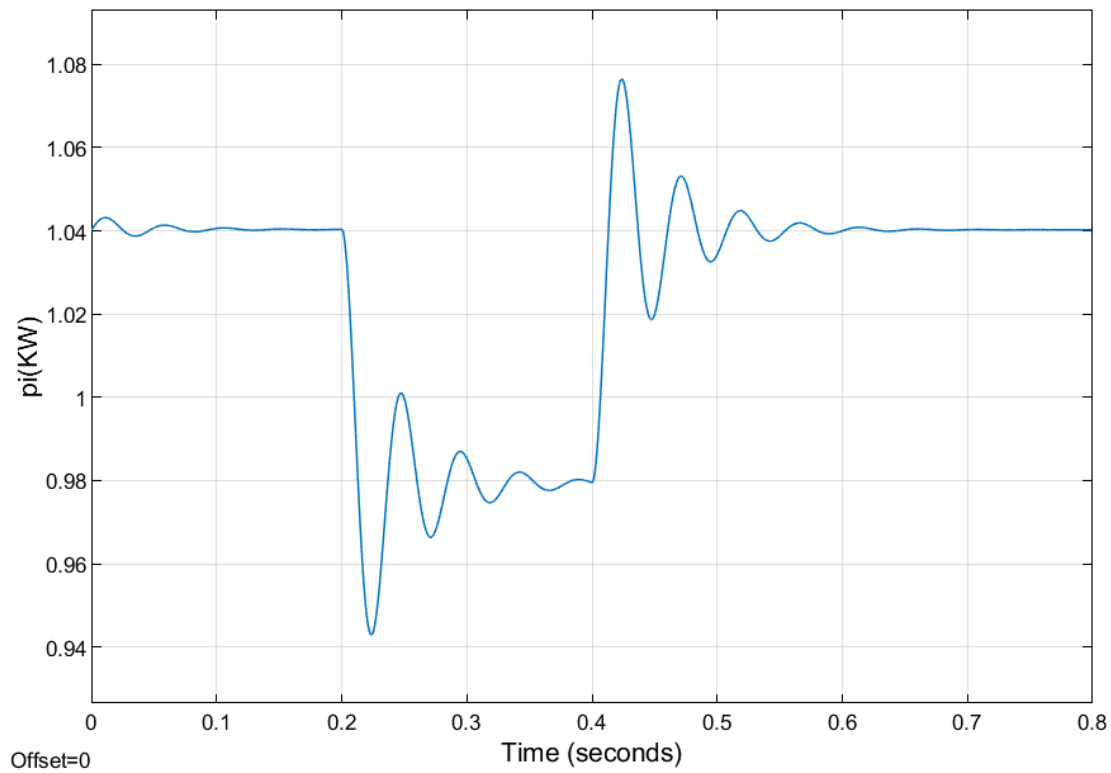
Εικόνα 68 Χρονική μεταβολή ΑΗΕΔ e_a – Βηματική μείωση της ροπής φορτίου κατά 0.2 Nm κινητήρα ΣΡ ξένης διέγερσης



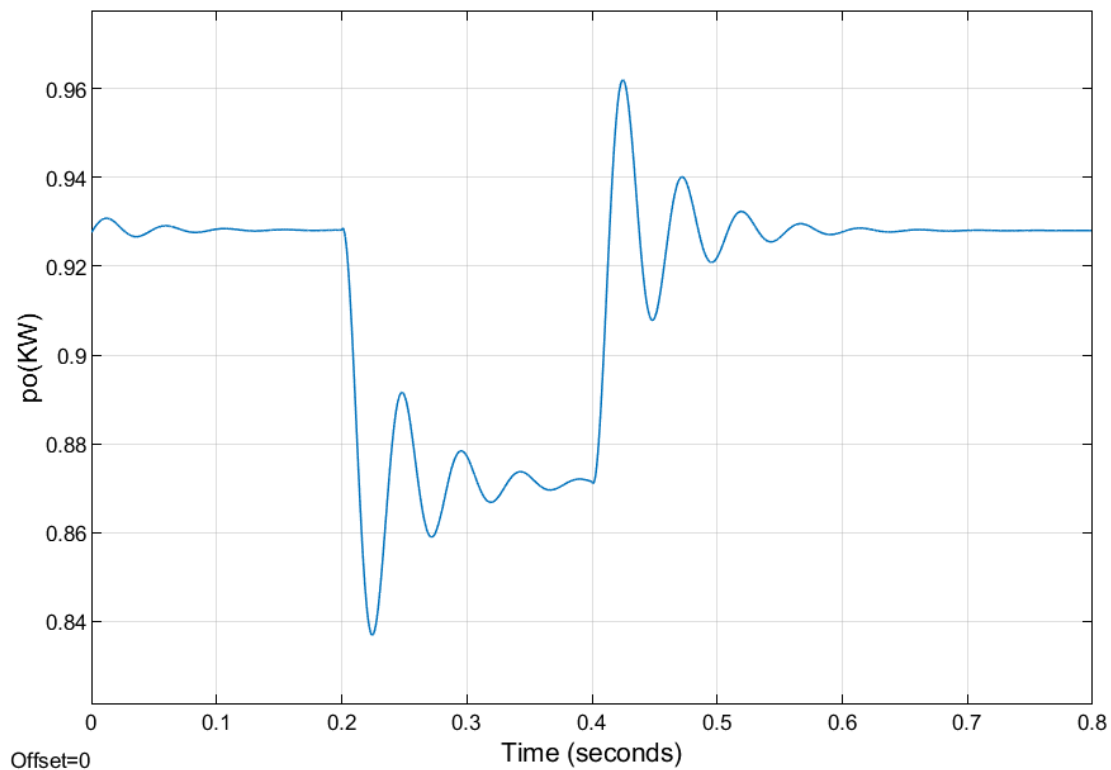
Εικόνα 69 Χρονική μεταβολή ηλεκτρομαγνητικής ροπής tem – Βηματική μείωση της ροπής φορτίου κατά 0.2 Nm κινητήρα ΣΡ ξένης διέγερσης



Εικόνα 70 Χρονική μεταβολή στροφών n – Βηματική μείωση της ροπής φορτίου κατά 0.2 Nm κινητήρα ΣΡ ξένης διέγερσης



Εικόνα 71 Χρονική μεταβολή ισχύος εισόδου p_i – Βηματική μείωση της ροπής φορτίου κατά 0.2 Nm κινητήρα ΣΡ ξένης διέγερσης



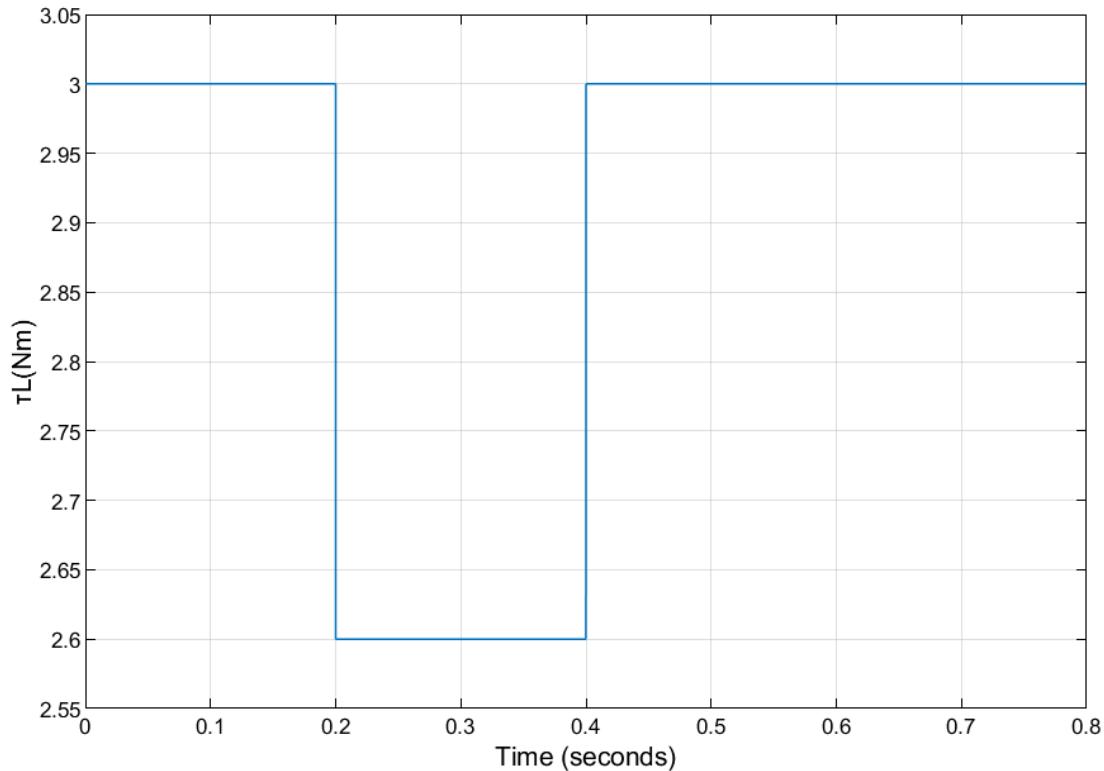
Εικόνα 72 Χρονική μεταβολή ισχύος εξόδου p_o – Βηματική μείωση της ροπής φορτίου κατά 0.2 Nm κινητήρα ΣΡ ξένης διέγερσης

Παρατηρήσεις

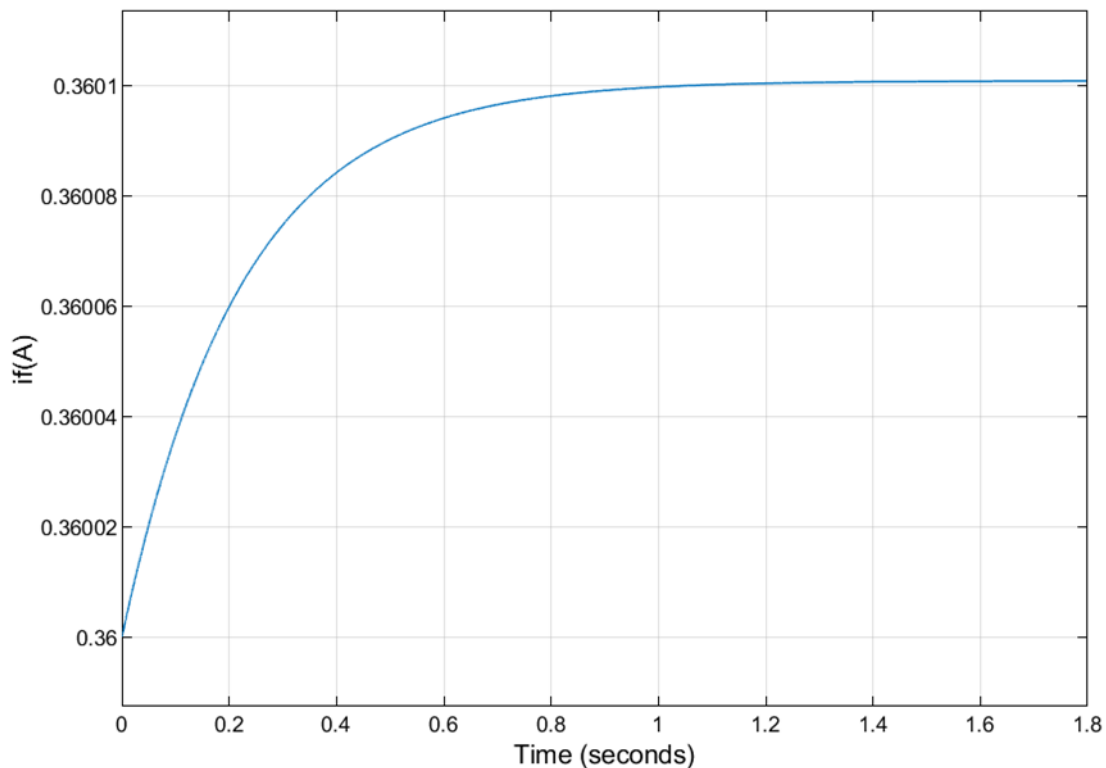
Παρατηρούμε ότι η απότομη βηματική μείωση της ροπής κατά 0.2Nm στο χρονικό διάστημα $0.2s < t < 0.4s$ και στη συνέχεια η επαναφορά στην αρχική της τιμή, έχει σαν αποτέλεσμα την δημιουργία

ενός μεταβατικού φαινομένου για χρονικό διάστημα 0.45s. Κατά την διάρκεια της βηματικής μείωσης της ροπής παρατηρείται μείωση του ρεύματος και κατ' επέκταση της ηλεκτρομαγνητικής ροπής, της ισχύος εισόδου και της ισχύος εξόδου κατά 0.442A, 0.32Nm, 97W και 91W αντίστοιχα. Αντίθετα, παρατηρείται αύξηση της ταχύτητας περιστροφής και της επαγόμενης ΑΗΕΔ κατά 21rpm και 1.6V αντίστοιχα. Για $t > 0.4s$, δηλαδή μετά την βηματική επαναφορά της ροπής στην αρχική τιμή της πριν την διαταραχή, όλες οι παραπάνω μεταβλητές επανέρχονται στην αρχική τιμή τους για $t > 0.65s$.

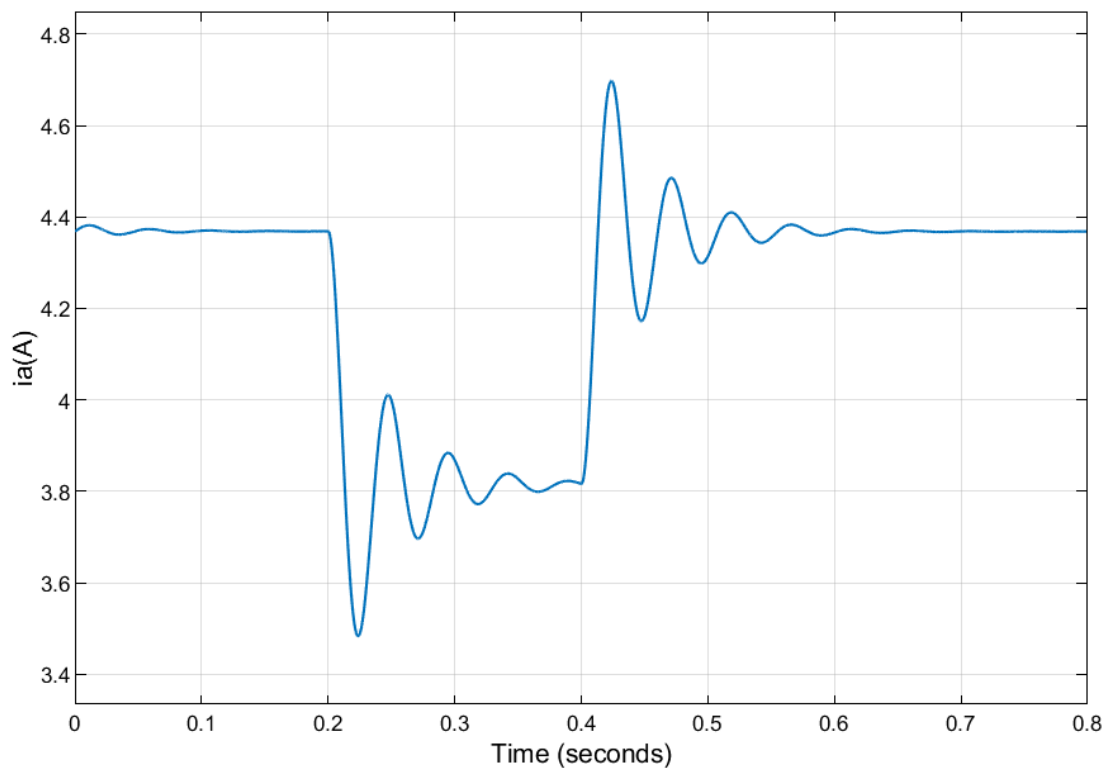
2. Για μεταβολή $\Delta TL = 0.4 \text{ Nm}$



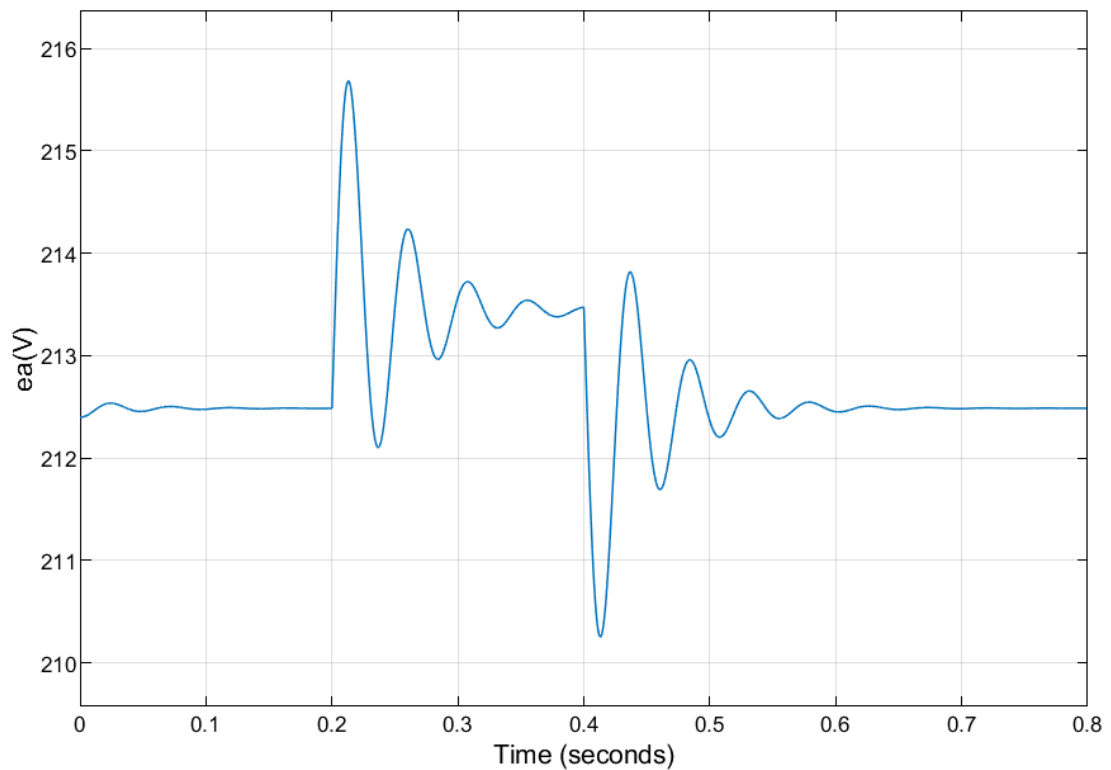
Εικόνα 73 Χρονική μεταβολή ροπής φορτίου τ_L – Βηματική μείωση της ροπής φορτίου κατά 0.4 Nm κινητήρα ΣΡ ξένης διέγερσης



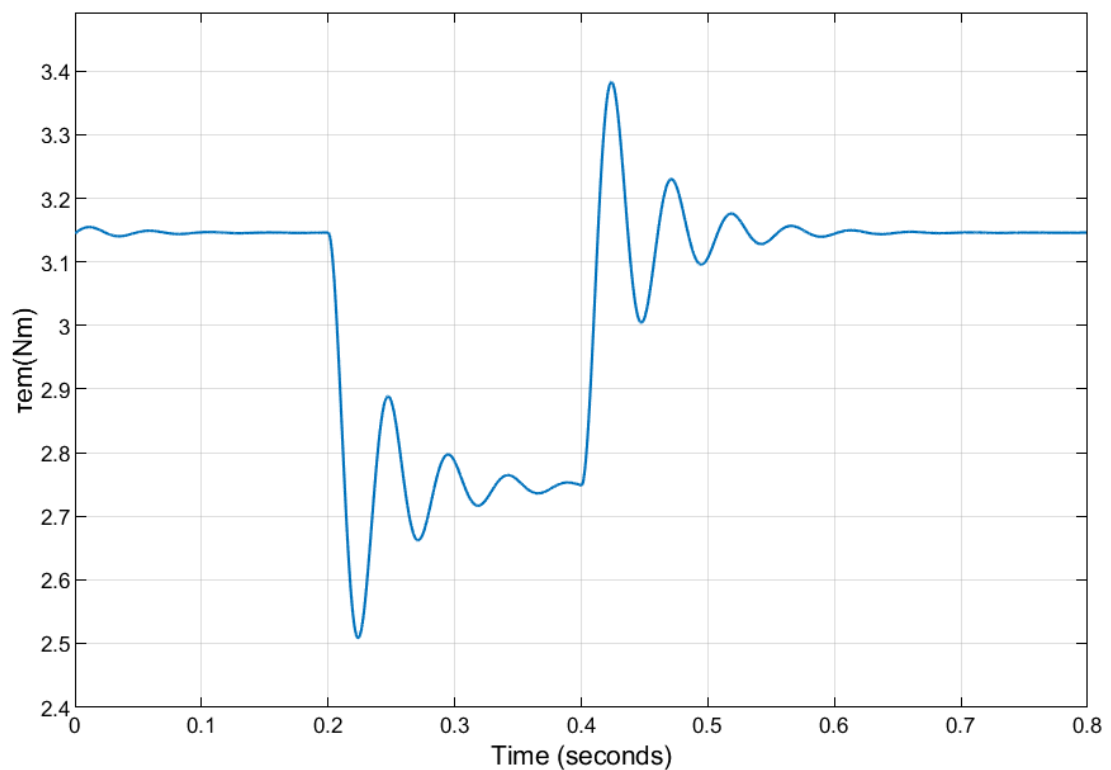
Εικόνα 74 Χρονική μεταβολή ρεύματος διέγερσης i_f – Βηματική μείωση της ροπής φορτίου κατά 0.4 Nm κινητήρα ΣΡ ξένης διέγερσης



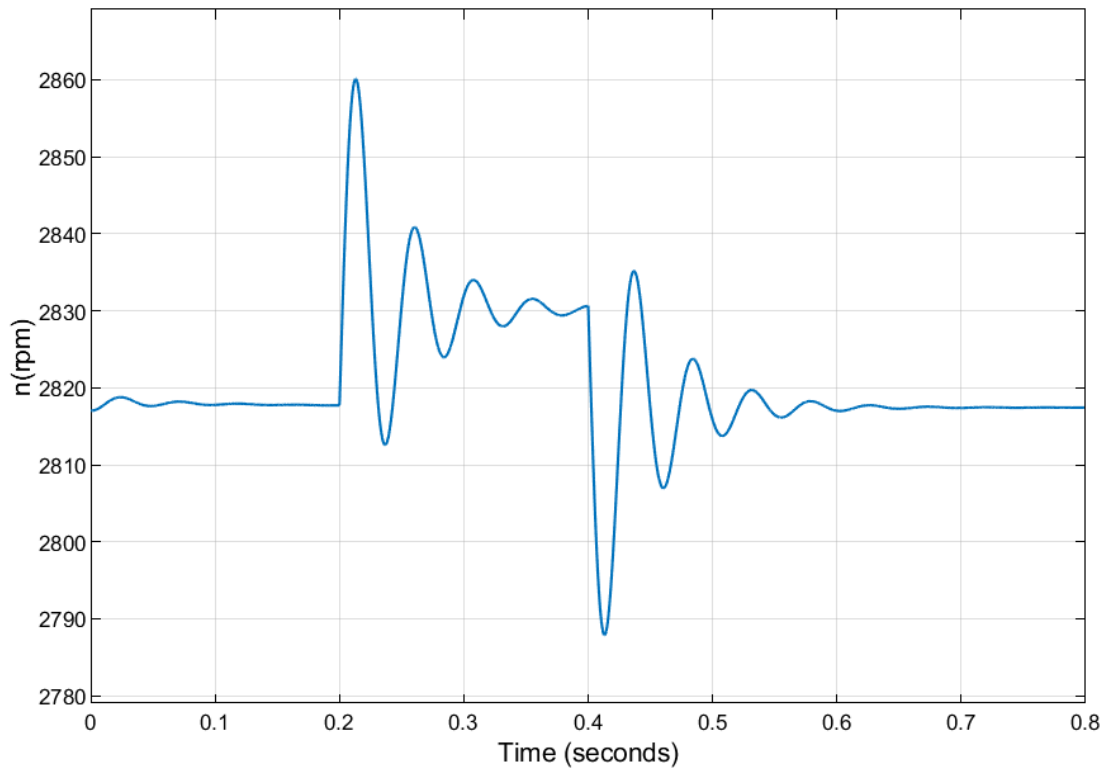
Εικόνα 75 Χρονική μεταβολή ρεύματος τυμπάνου i_a – Βηματική μείωση της ροπής φορτίου κατά 0.4 Nm κινητήρα ΣΡ ξένης διέγερσης



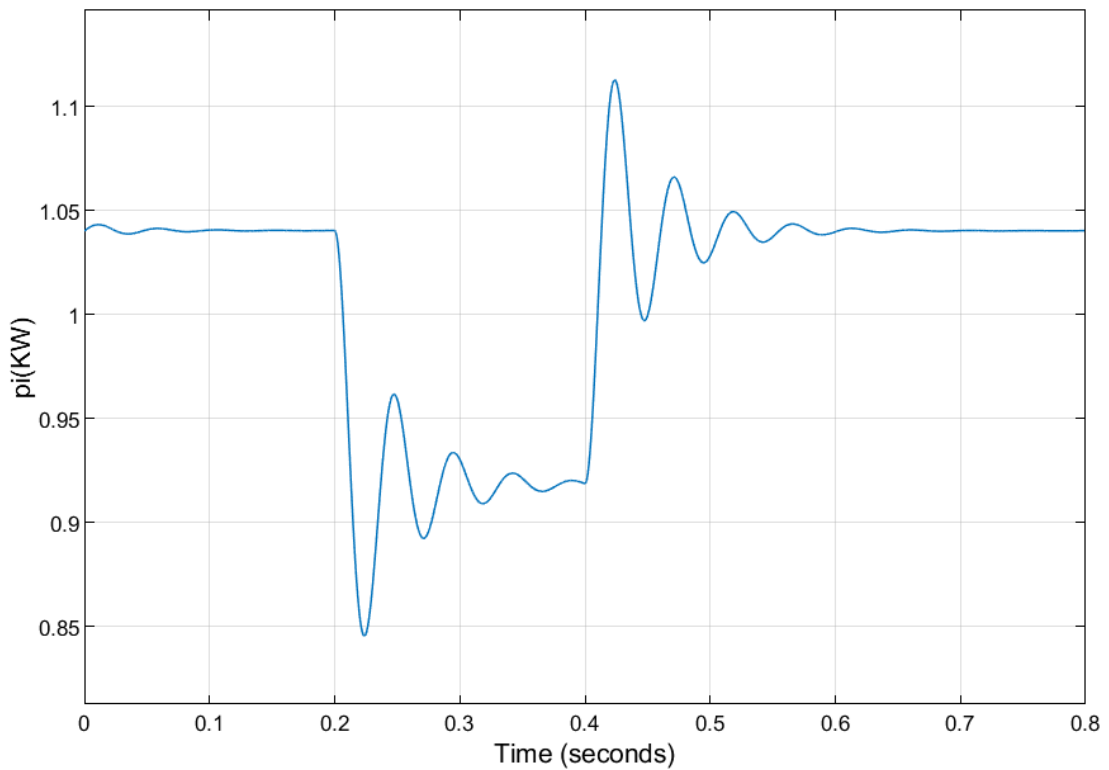
Εικόνα 76 Χρονική μεταβολή ΑΗΕΔ ea – Βηματική μείωση της ροπής φορτίου κατά 0.4 Nm κινητήρα ΣΡ ξένης διέγερσης



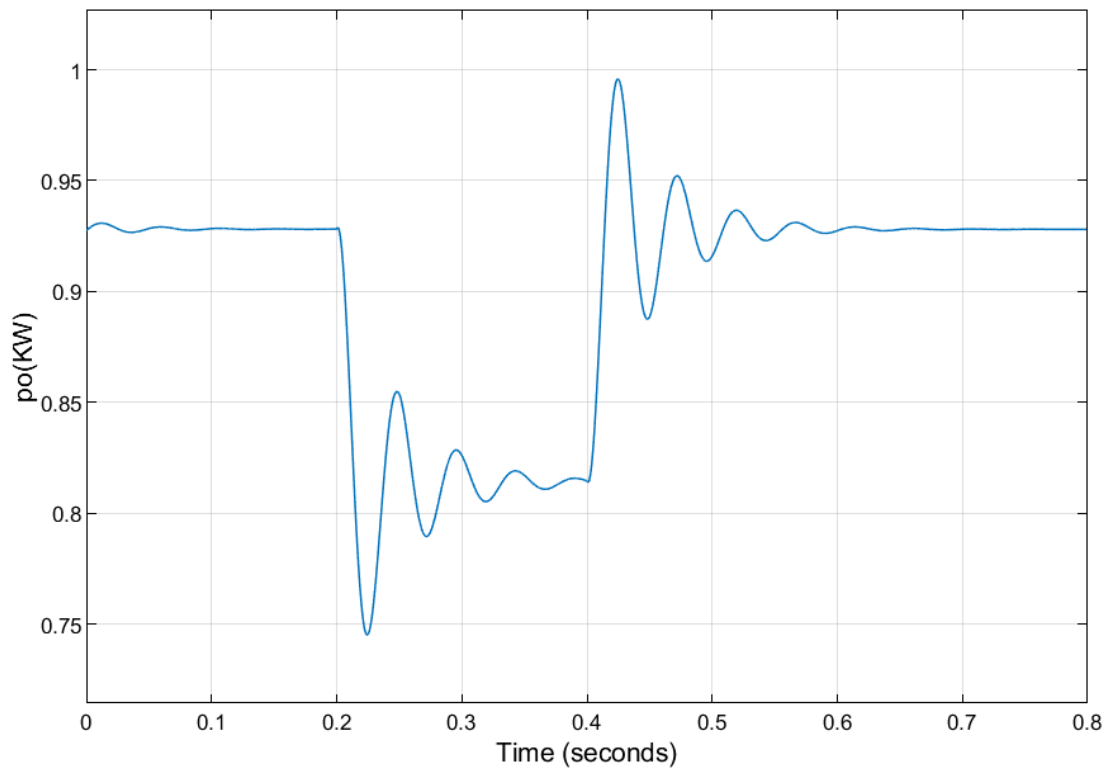
Εικόνα 77 Χρονική μεταβολή ηλεκτρομαγνητικής ροπής tem – Βηματική μείωση της ροπής φορτίου κατά 0.4 Nm κινητήρα ΣΡ ξένης διέγερσης



Εικόνα 78 Χρονική μεταβολή στροφών n – Βηματική μείωση της ροπής φορτίου κατά 0.4 Nm κινητήρα ΣΡ ξένης διέγερσης



Εικόνα 79 Χρονική μεταβολή ισχύος εισόδου pi – Βηματική μείωση της ροπής φορτίου κατά 0.4 Nm κινητήρα ΣΡ ξένης διέγερσης

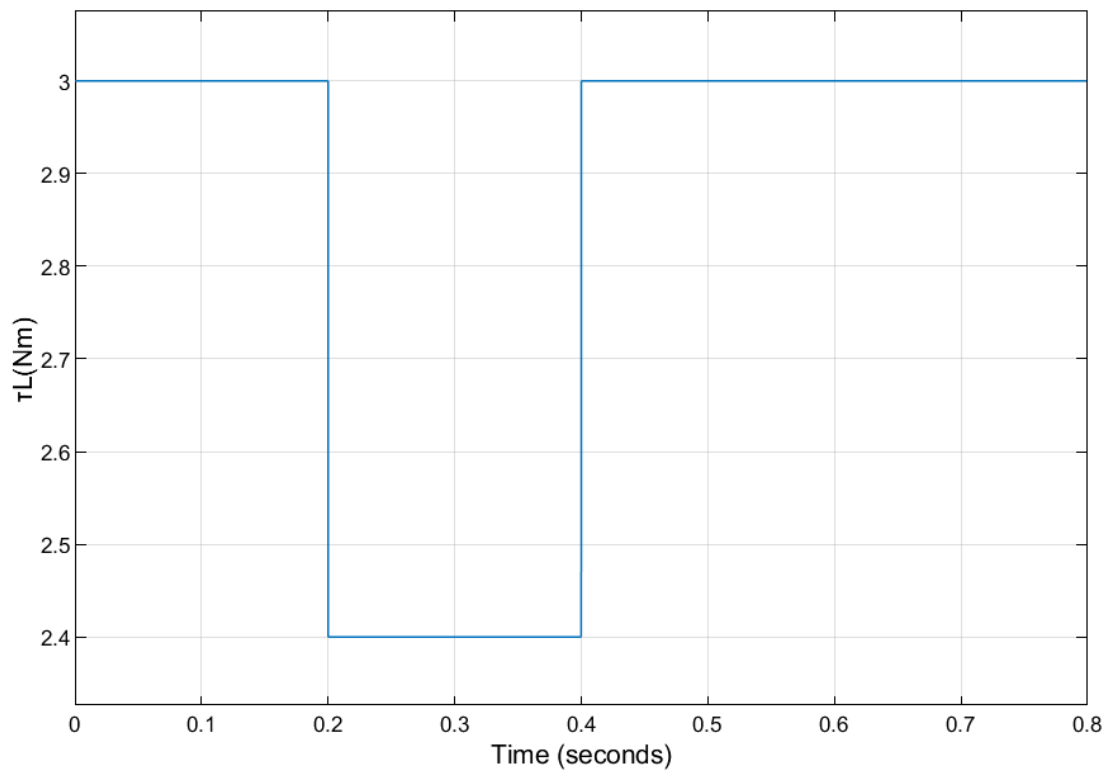


Εικόνα 80 Χρονική μεταβολή ισχύος εξόδου p_o – Βηματική μείωση της ροπής φορτίου κατά 0.4 Nm κινητήρα ΣΡ ξένης διέγερσης

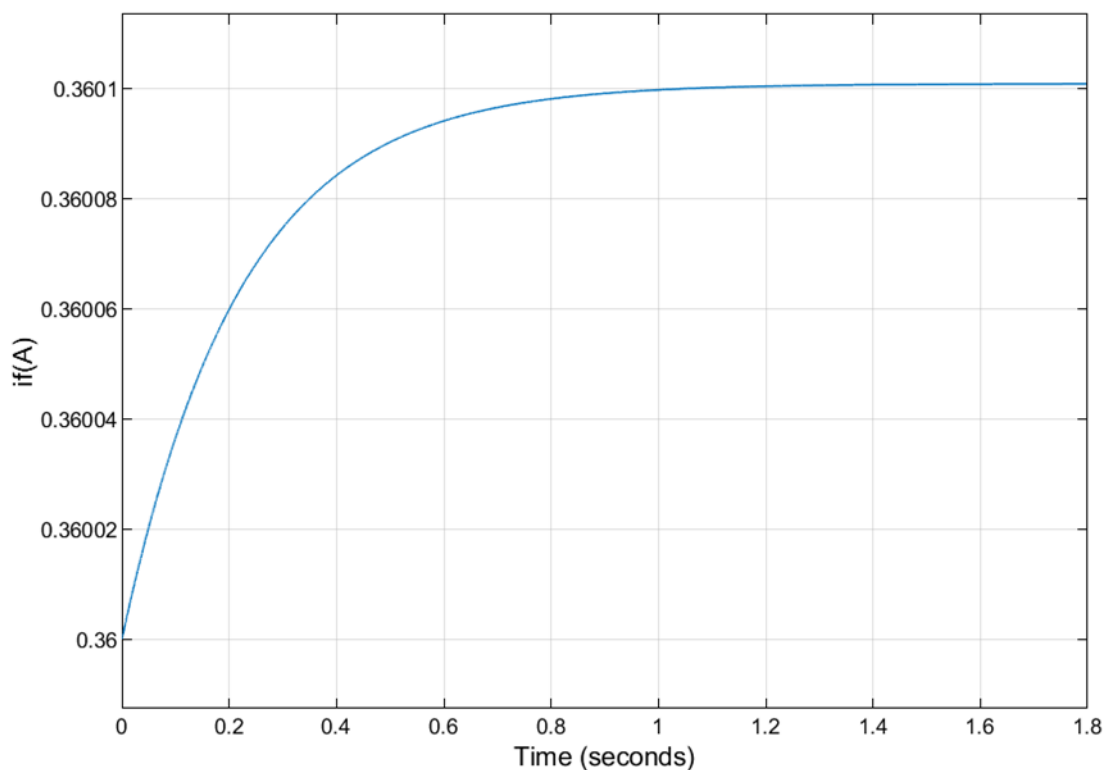
Παρατηρήσεις

Παρατηρούμε ότι η απότομη βηματική μείωση της ροπής κατά 0.4Nm στο χρονικό διάστημα $0.2s < t < 0.4s$ και στη συνέχεια η επαναφορά στην αρχική της τιμή, έχει σαν αποτέλεσμα την δημιουργία ενός μεταβατικού φαινομένου για χρονικό διάστημα 0.45s. Κατά την διάρκεια της βηματικής μείωσης της ροπής παρατηρείται μείωση του ρεύματος και κατ' επέκταση της ηλεκτρομαγνητικής ροπής, της ισχύος εισόδου και της ισχύος εξόδου κατά 0.885A, 0.64Nm, 195W και 183W αντίστοιχα. Αντίθετα, παρατηρείται αύξηση της ταχύτητας περιστροφής και της επαγόμενης ΑΗΕΔ κατά 43rpm και 3.2V αντίστοιχα. Για $t > 0.4s$, δηλαδή μετά την βηματική επαναφορά της ροπής στην αρχική τιμή της πριν την διαταραχή, όλες οι παραπάνω μεταβλητές επανέρχονται στην αρχική τιμή τους για $t > 0.65s$.

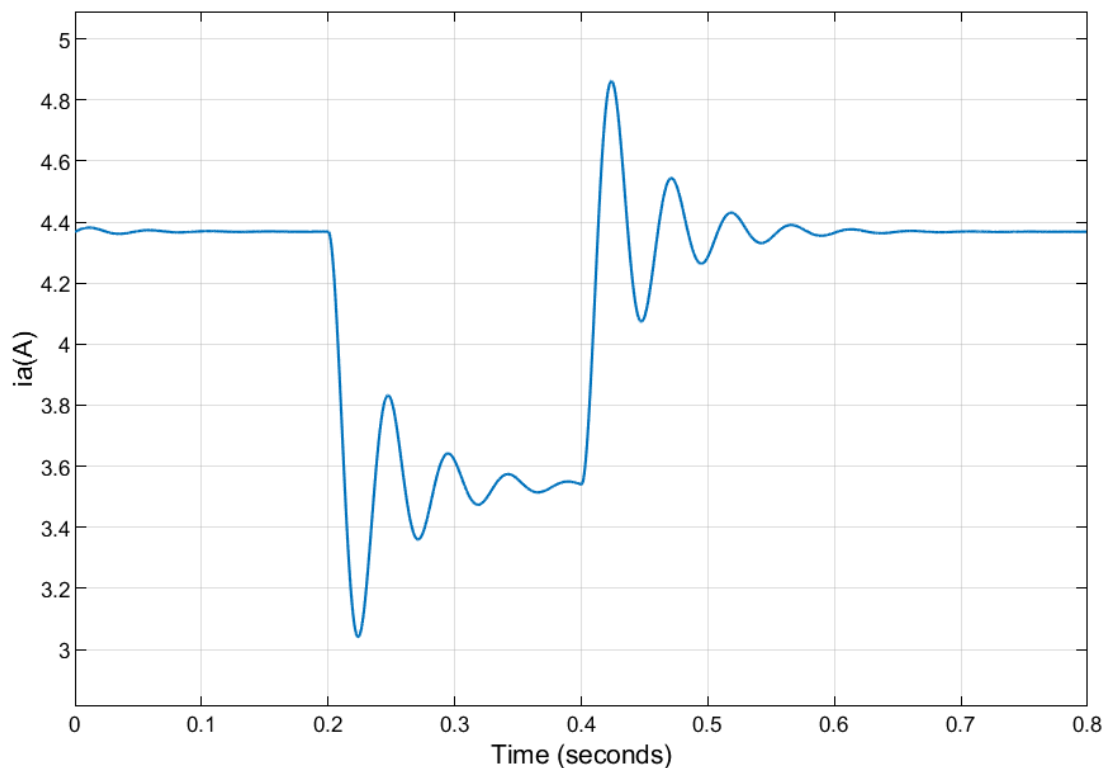
3. Για μεταβολή $\Delta TL = 0.6 Nm$



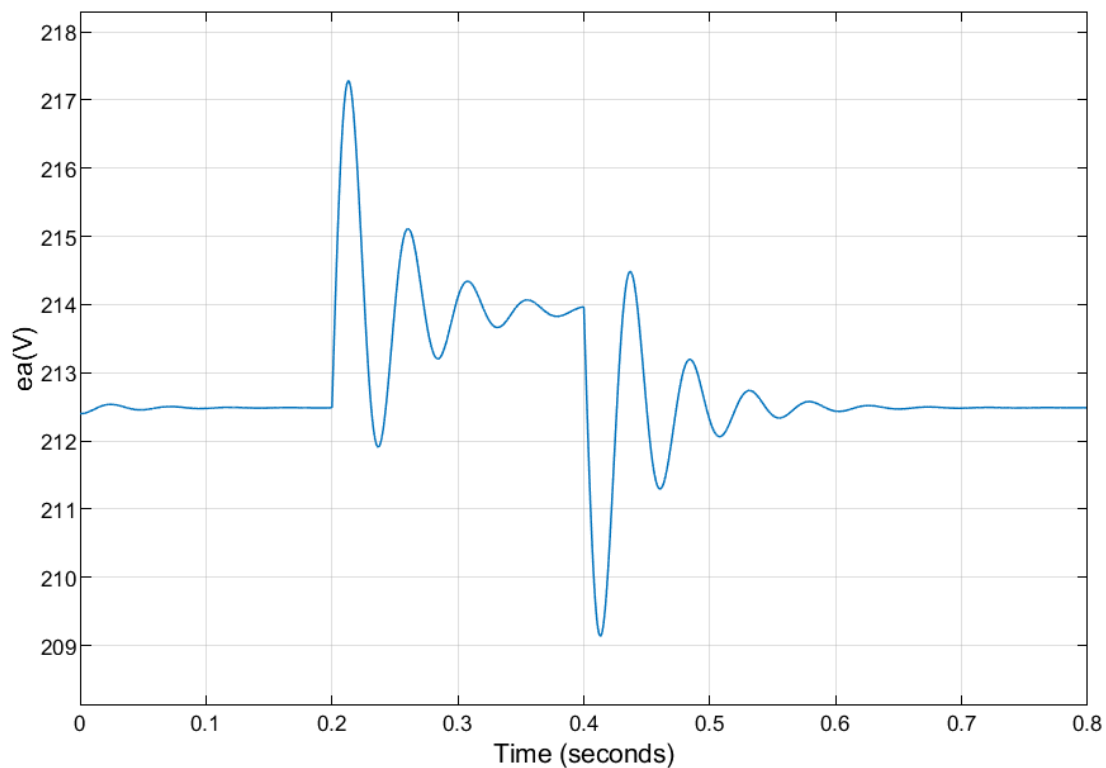
Εικόνα 81 Χρονική μεταβολή ροπής φορτίου τ_L – Βηματική μείωση της ροπής φορτίου κατά 0.6 Nm κινητήρα ΣΡ ξένης διέγερσης



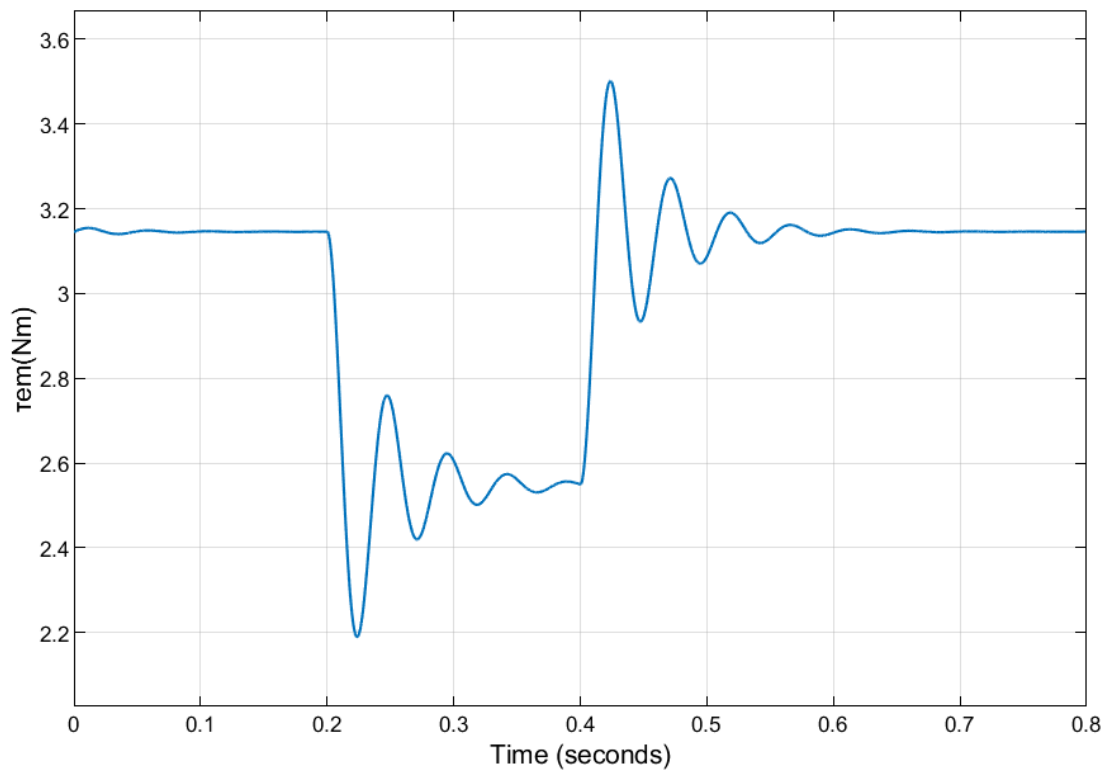
Εικόνα 82 Χρονική μεταβολή ρεύματος διέγερσης i_f – Βηματική μείωση της ροπής φορτίου κατά 0.6 Nm κινητήρα ΣΡ ξένης διέγερσης



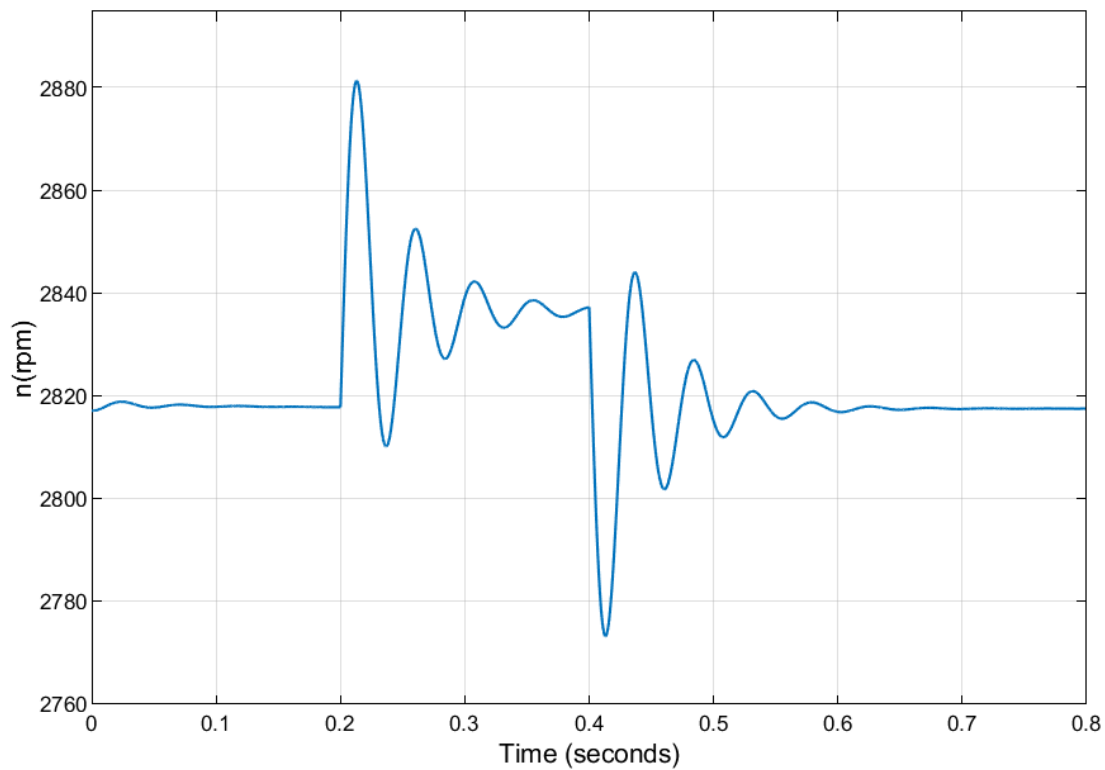
Εικόνα 83 Χρονική μεταβολή ρεύματος τυμπάνου i_a – Βηματική μείωση της ροπής φορτίου κατά 0.6 Nm κινητήρα ΣΡ ξένης διέγερσης



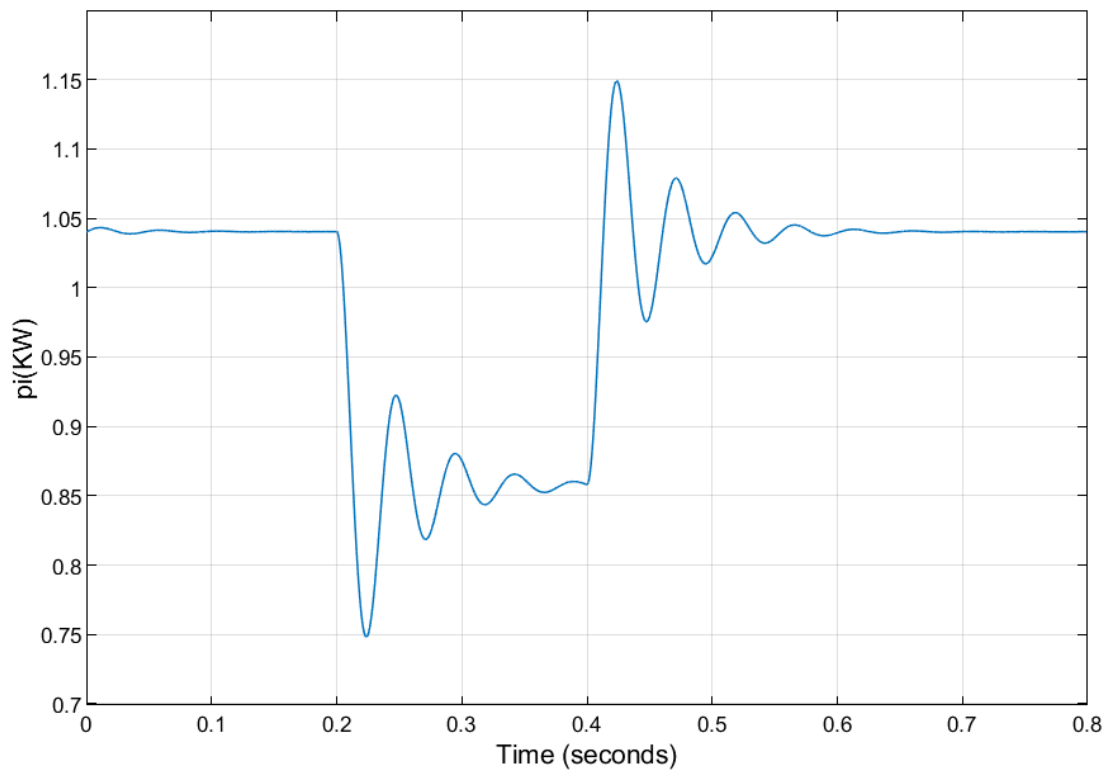
Εικόνα 84 Χρονική μεταβολή ΑΗΕΔ e_a – Βηματική μείωση της ροπής φορτίου κατά 0.6 Nm κινητήρα ΣΡ ξένης διέγερσης



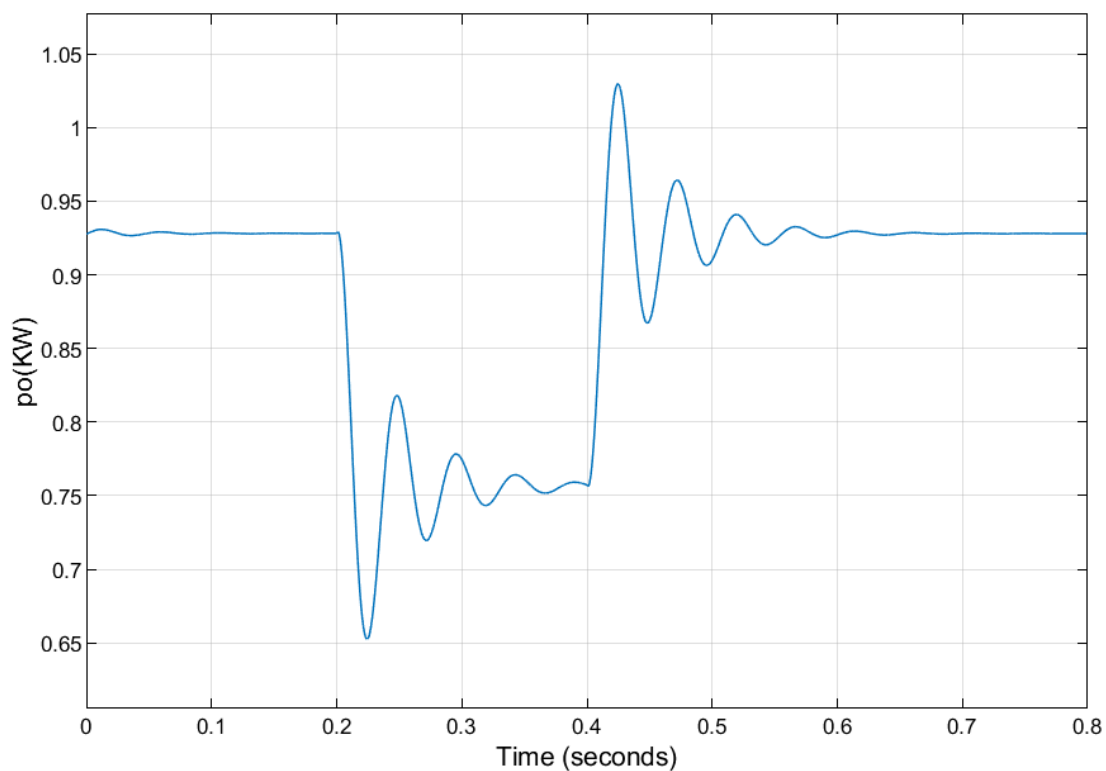
Εικόνα 85 Χρονική μεταβολή ηλεκτρομαγνητικής ροπής tem – Βηματική μείωση της ροπής φορτίου κατά 0.6 Nm κινητήρα ΣΡ ξένης διέγερσης



Εικόνα 86 Χρονική μεταβολή στροφών n – Βηματική μείωση της ροπής φορτίου κατά 0.6 Nm κινητήρα ΣΡ ξένης διέγερσης



Εικόνα 87 Χρονική μεταβολή ισχύος εισόδου p_i – Βηματική μείωση της ροπής φορτίου κατά 0.6 Nm κινητήρα ΣΡ ξένης διέγερσης



Εικόνα 88 Χρονική μεταβολή ισχύος εξόδου p_o – Βηματική μείωση της ροπής φορτίου κατά 0.6 Nm κινητήρα ΣΡ ξένης διέγερσης

Παρατηρήσεις

Παρατηρούμε ότι η απότομη βηματική μείωση της ροπής κατά 0.6Nm στο χρονικό διάστημα $0.2s < t < 0.4s$ και στη συνέχεια η επαναφορά στην αρχική της τιμή, έχει σαν αποτέλεσμα την δημιουργία

ενός μεταβατικού φαινομένου για χρονικό διάστημα 0.45s. Κατά την διάρκεια της βηματικής μείωσης της ροπής παρατηρείται μείωση του ρεύματος και κατ' επέκταση της ηλεκτρομαγνητικής ροπής, της ισχύος εισόδου και της ισχύος εξόδου κατά 1.327A, 0.96Nm, 292W και 276W αντίστοιχα. Αντίθετα, παρατηρείται αύξηση της ταχύτητας περιστροφής και της επαγόμενης ΑΗΕΔ κατά 63rpm και 4.8V αντίστοιχα. Για $t > 0.4s$, δηλαδή μετά την βηματική επαναφορά της ροπής στην αρχική τιμή της πριν την διαταραχή, όλες οι παραπάνω μεταβλητές επανέρχονται στην αρχική τιμή τους για $t > 0.65s$.

5.4 Βηματική μεταβολή της τάσης τυμπάνου κινητήρα ΣΡ ξένης διέγερσης και επαναφορά

Τέλος, αυτή η εφαρμογή αποτελείται από τρεις διαφορετικές περιπτώσεις βηματικής μεταβολής της τάσης τυμπάνου, για μείωση $V=0.8*V_a=176V$ και $V=0.5*V_a=110V$ και για αύξηση $V=1.2*V_a=264V$. Αρχικά, ενώ ο κινητήρας λειτουργεί στη μόνιμη κατάσταση υπό πλήρες φορτίο (μόνιμη κατάσταση πρώτης εφαρμογής περίπτωση 2^η) με ονομαστική τάση 220 V και ονομαστικό φορτίο σταθερής ροπής 3 Nm. Την χρονική στιγμή $t = 0.2 s$, γίνεται βηματική μείωση ή αύξηση ανάλογα στην περίπτωση που βρισκόμαστε με διάρκεια $\Delta t = 0.2s$. Άρα, για χρόνο $t = 0.4s$ η τάση τυμπάνου επανέρχεται στην ονομαστική της τιμή $V_a = 220V$.

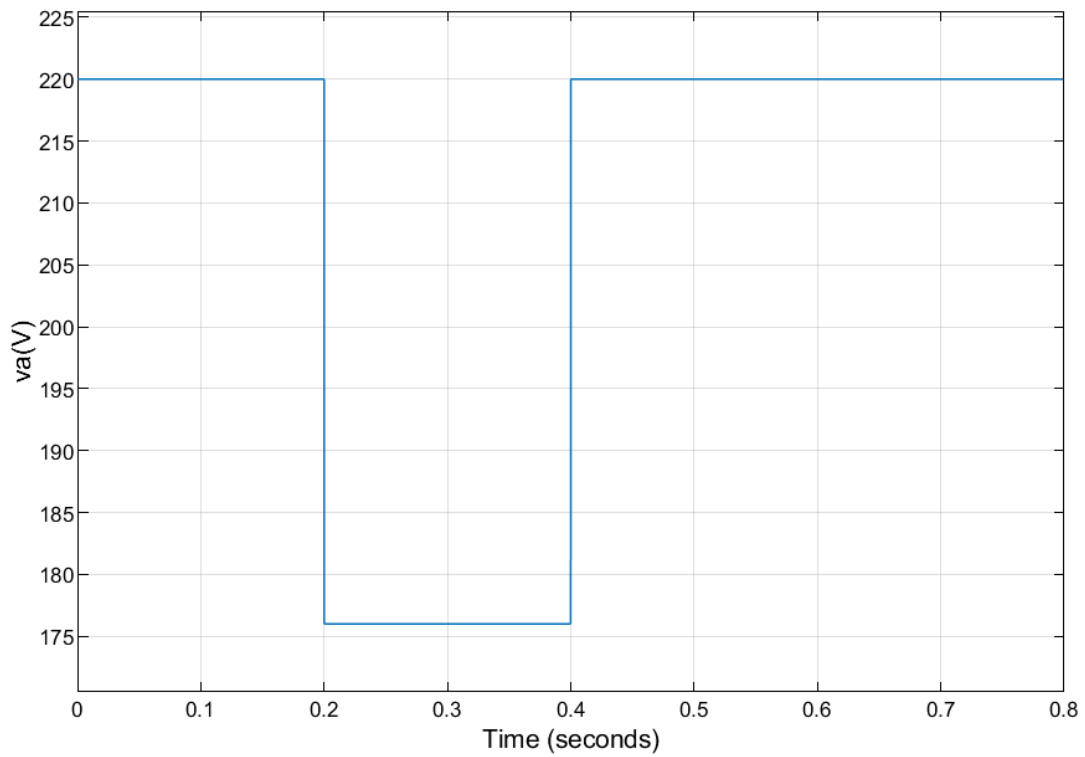
Οι τιμές των μεγεθών του κινητήρα στη μόνιμη κατάσταση είναι

$$V_a = V_f = 220 \text{ V}, I_a = 4.368 \text{ A}, I_f = 0.3601 \text{ A}, E_a = 212.5 \text{ V},$$

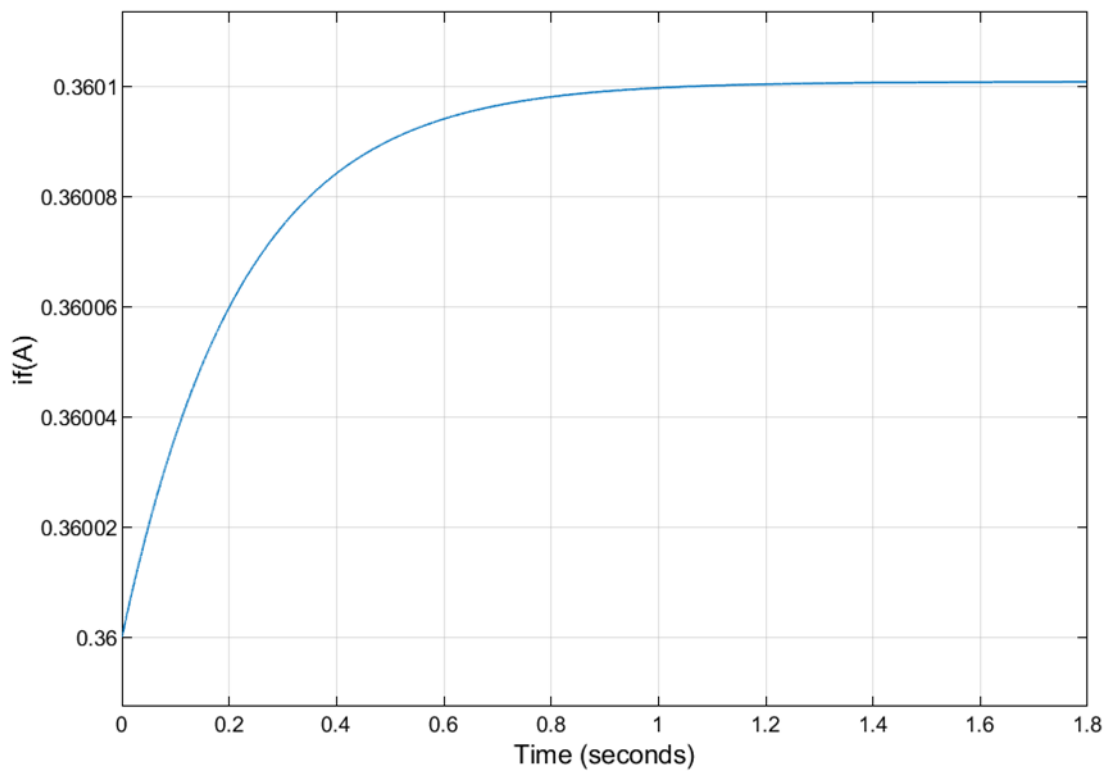
$$T_{em} = 3.146 \text{ Nm}, n = 2817 \text{ rpm}, P_i = 1040 \text{ W}, P_o = 928 \text{ W}, \eta(\%) = 89.22$$

Στη συνέχεια ακολουθούν οι χρονικές μεταβολές των διαφόρων μεταβλητών του κινητήρα για κάθε περίπτωση.

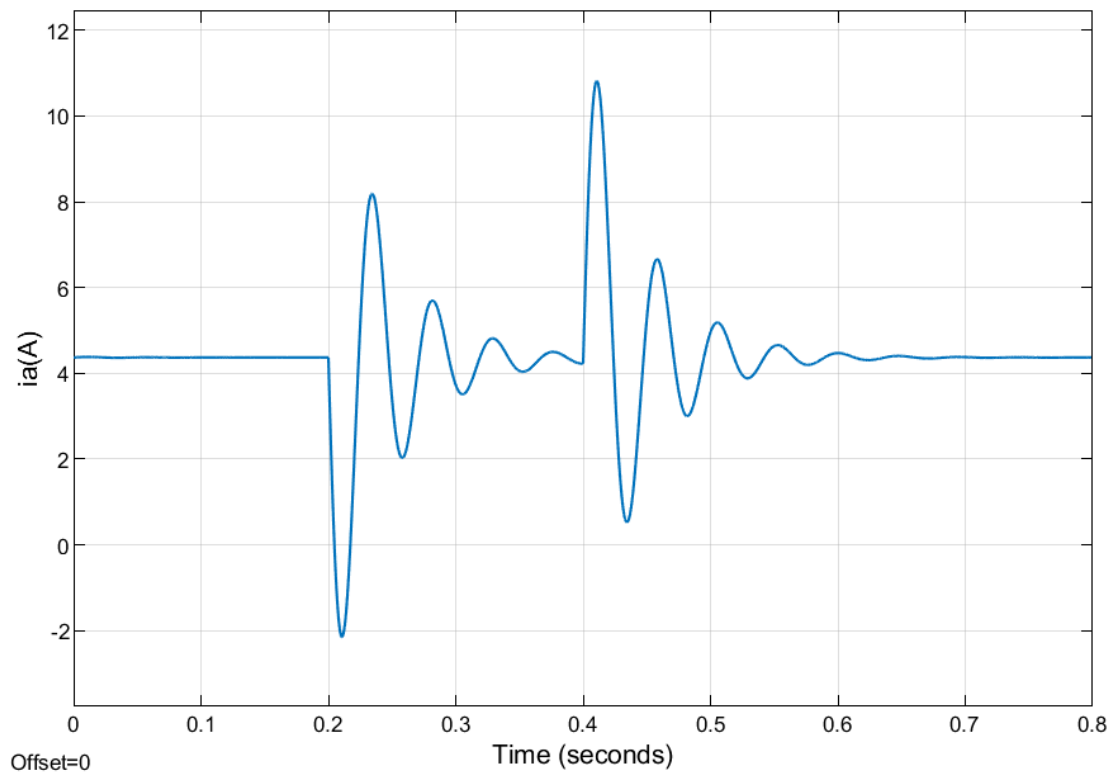
1. Για μείωση τάσης $V=0.8*V_a=176V$



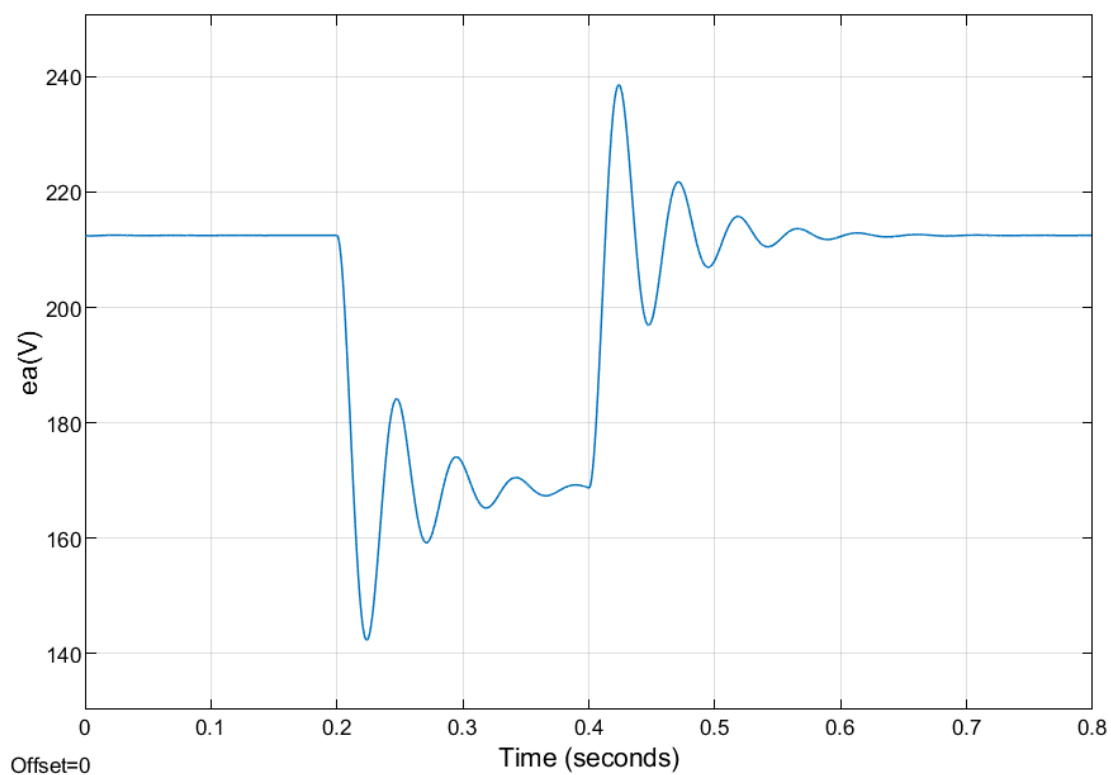
Εικόνα 89 Χρονική μεταβολή τάσης τυμπάνου v_a – Βηματική μείωση της τάσης τυμπάνου κατά 44V κινητήρα ΣΡ ξένης διέγερσης



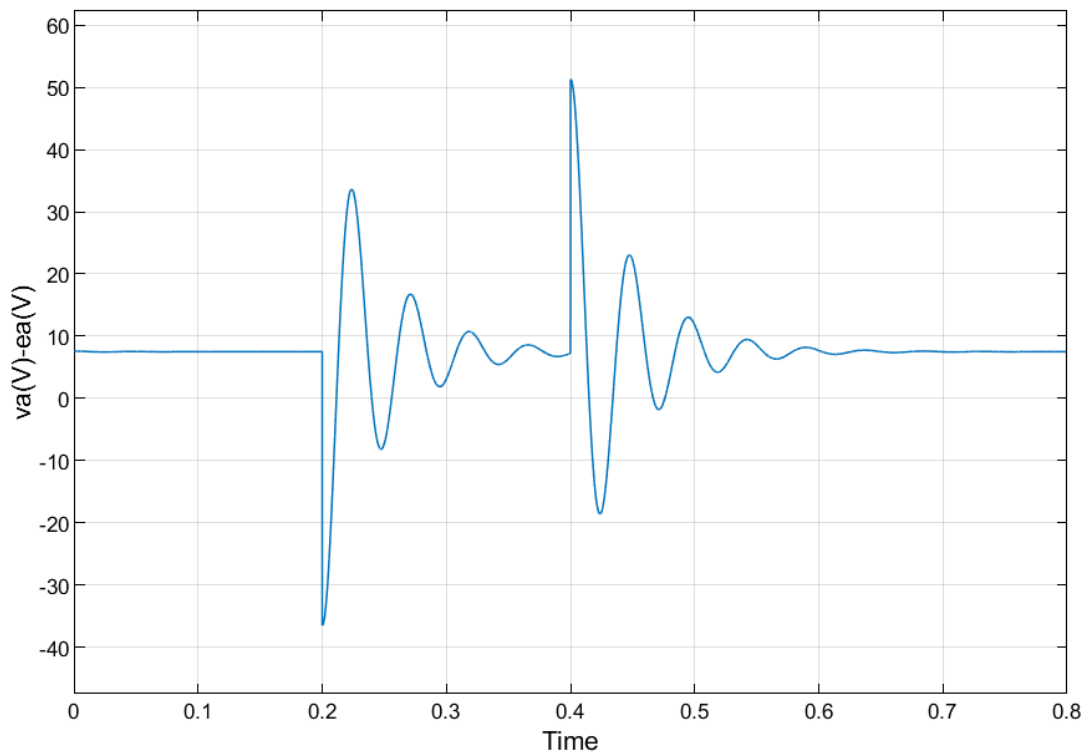
Εικόνα 90 Χρονική μεταβολή ρεύματος διέγερσης i_f – Βηματική μείωση της τάσης τυμπάνου κατά 44V κινητήρα ΣΡ ξένης διέγερσης



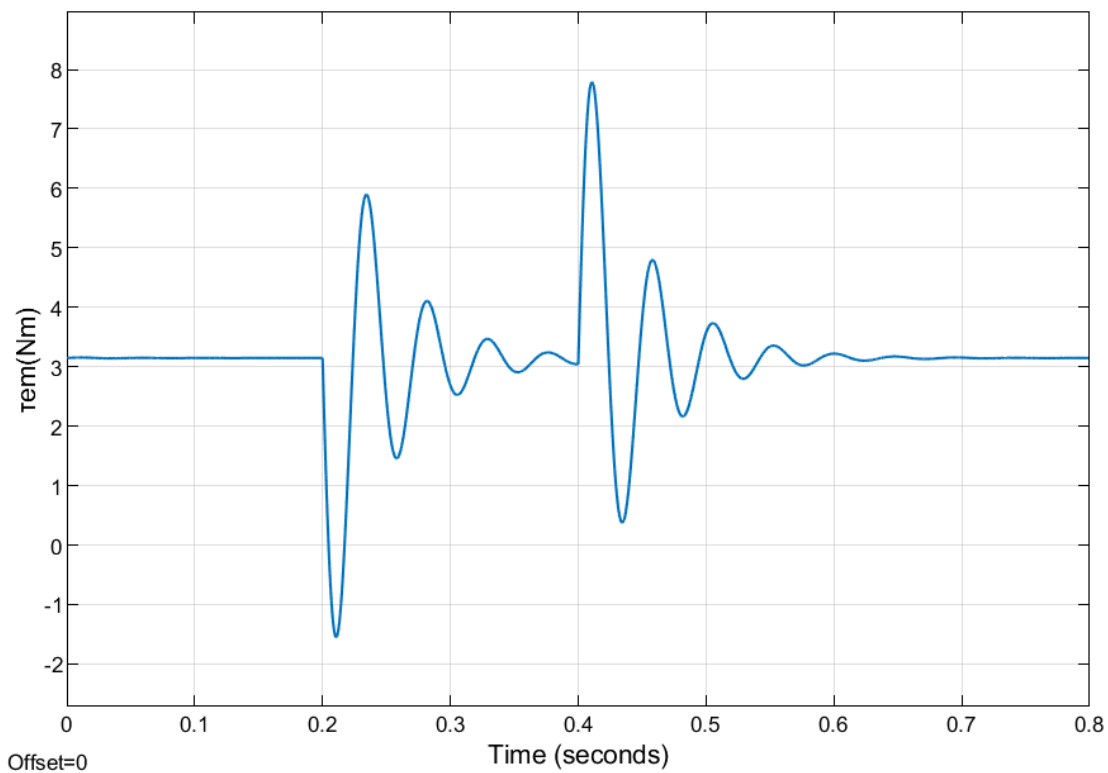
Εικόνα 91 Χρονική μεταβολή ρεύματος τυμπάνου i_a – Βηματική μείωση της τάσης τυμπάνου κατά 44V κινητήρα ΣΡ ξένης διέγερσης



Εικόνα 92 Χρονική μεταβολή ΑΗΕΔ e_a – Βηματική μείωση της τάσης τυμπάνου κατά 44V κινητήρα ΣΡ ξένης διέγερσης

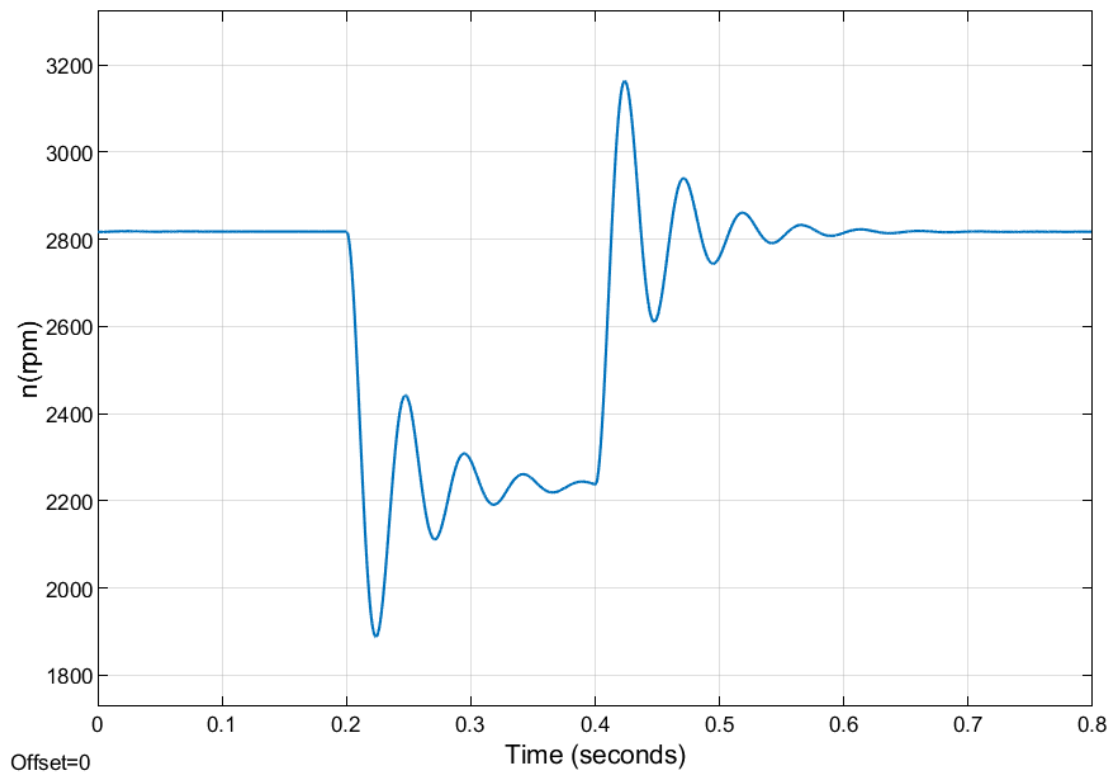


Εικόνα 93 Χρονική μεταβολή ΑΗΕΔ $v_a - e_a$ – Βηματική μείωση της τάσης τυμπάνου κατά 44V κινητήρα ΣΡ ξένης διέγερσης

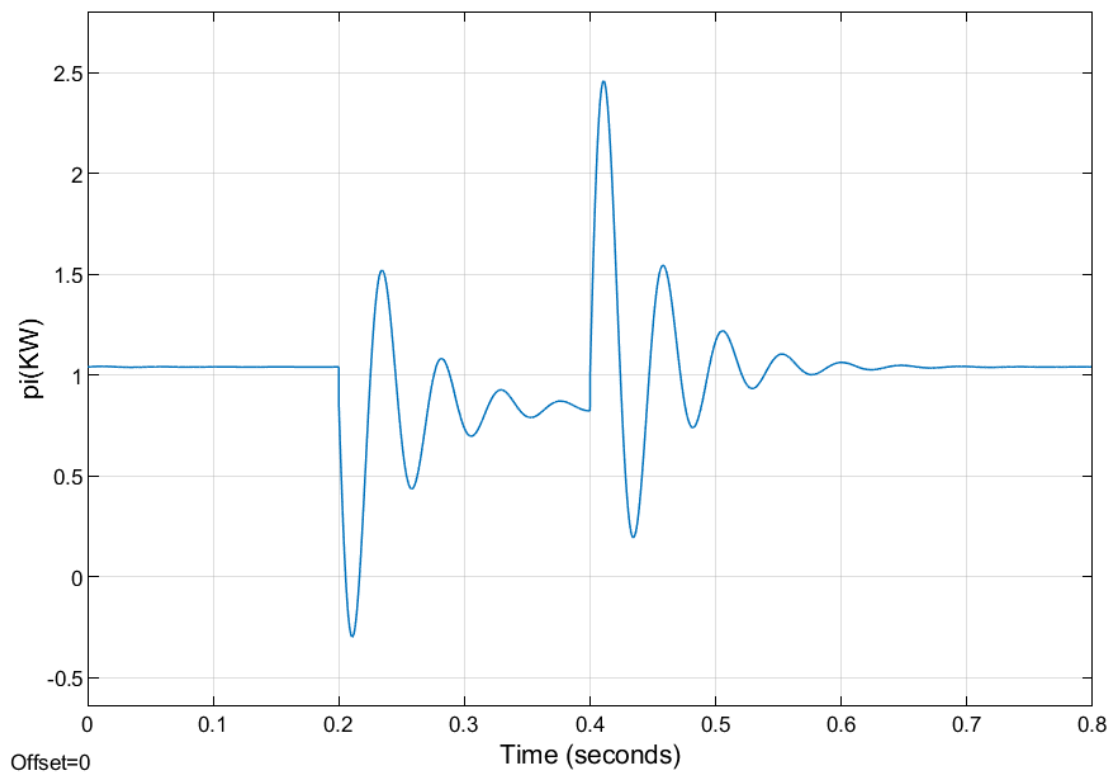


Offset=0

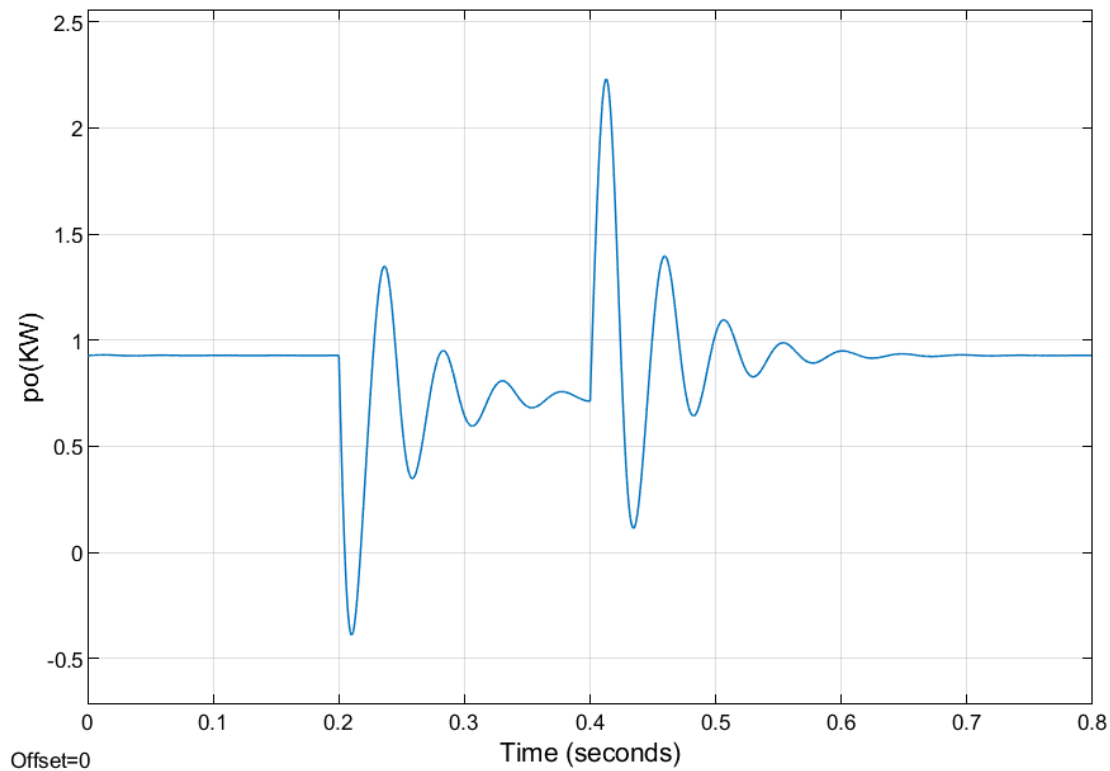
Εικόνα 94 Χρονική μεταβολή ηλεκτρομαγνητικής ροπής t_{em} – Βηματική μείωση της τάσης τυμπάνου κατά 44V κινητήρα ΣΡ ξένης διέγερσης



Εικόνα 95 Χρονική μεταβολή στροφών n – Βηματική μείωση της τάσης τυμπάνου κατά 44V κινητήρα ΣΡ ξένης διέγερσης



Εικόνα 96 Χρονική μεταβολή ισχύος εισόδου π_i – Βηματική μείωση της τάσης τυμπάνου κατά 44V κινητήρα ΣΡ ξένης διέγερσης

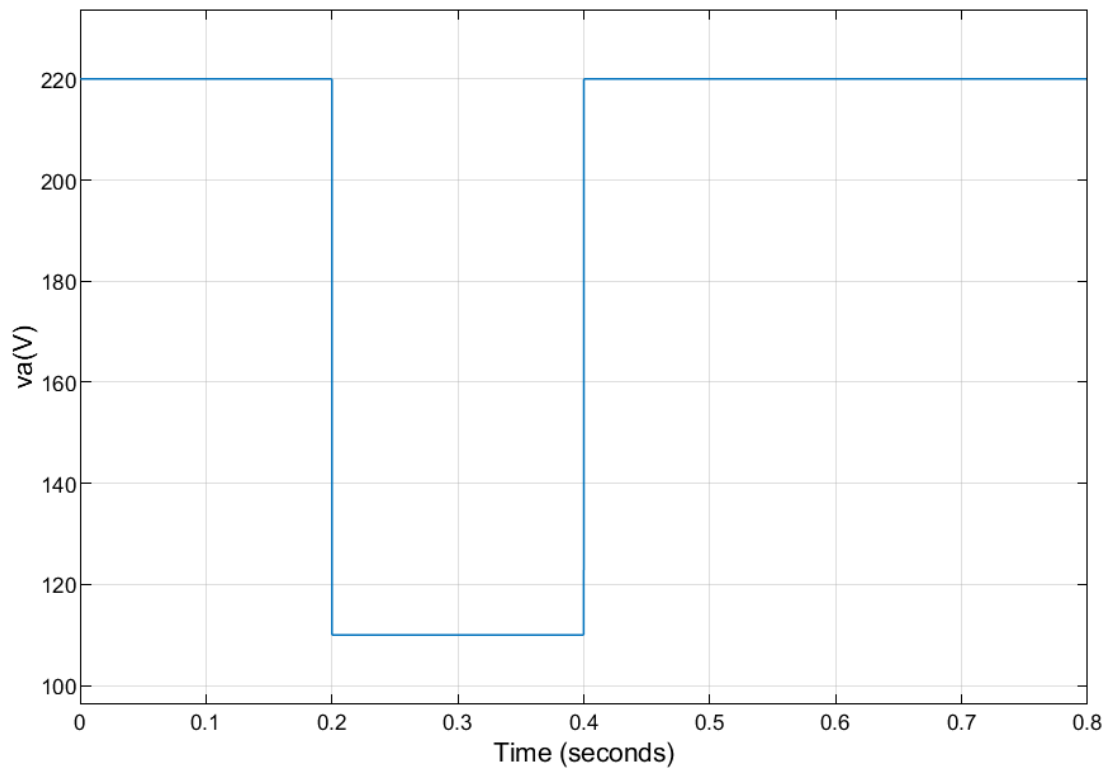


Εικόνα 97 Χρονική μεταβολή ισχύος εξόδου p_o – Βηματική μείωση της τάσης τυμπάνου κατά 44V κινητήρα ΣΡ ξένης διέγερσης

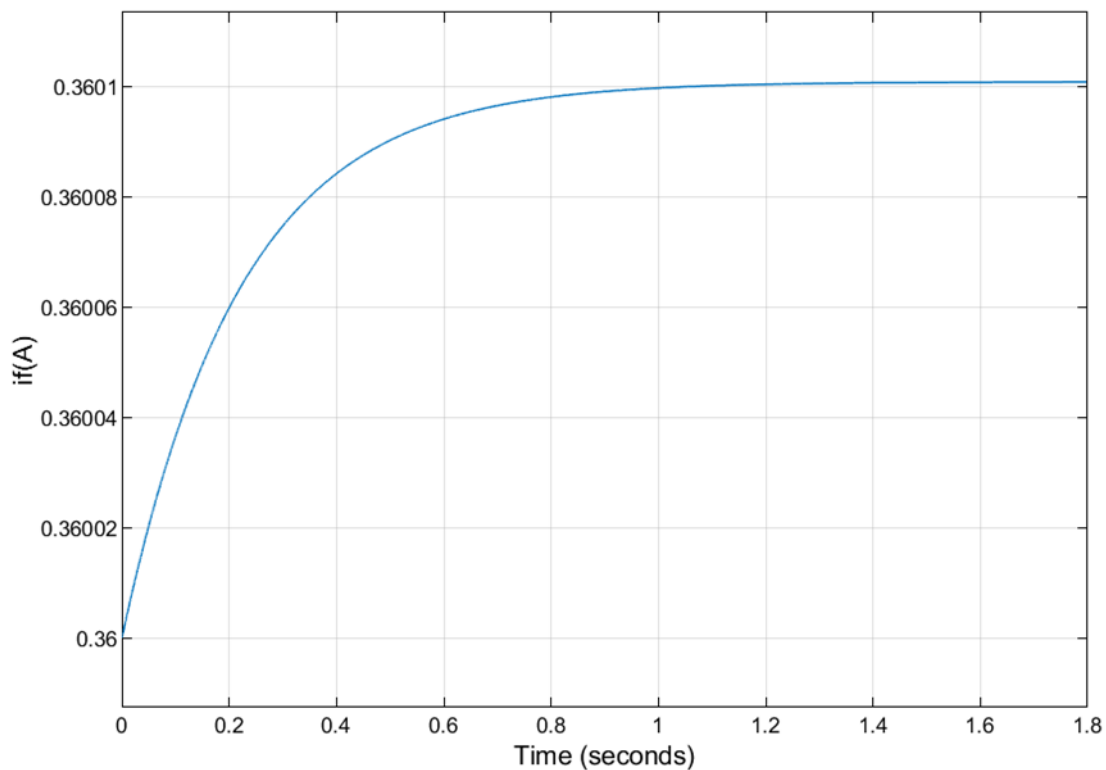
Παρατηρήσεις

Παρατηρούμε ότι η απότομη βηματική μείωση της τάσης τυμπάνου κατά 44V στο χρονικό διάστημα $0.2s < t < 0.4s$ και στη συνέχεια η επαναφορά στην αρχική της τιμή, έχει σαν αποτέλεσμα την δημιουργία ενός μεταβατικού φαινομένου για χρονικό διάστημα 0.45s. Κατά την διάρκεια της βηματικής μείωσης της τάσης τυμπάνου το σύστημα προσπαθεί να οδηγηθεί σε μία νέα μόνιμη κατάσταση που συμφωνεί με την νέα τάση τυμπάνου των 176V. Επιπλέον, παρατηρείται μείωση των στροφών και της επαγόμενης ΑΗΕΔ. Για $t \geq 0.4s$, η τάση τυμπάνου επανέρχεται στην ονομαστική της τιμή πριν την βύθιση, με αποτέλεσμα το σύστημα να επανέρχεται στην αρχική μόνιμη κατάσταση για χρόνο $t \geq 0.7s$. Η μικρότερη τιμή των στροφών και της ΑΗΕΔ παρατηρείται για χρόνο $t = 0.22s$ με τιμή $n_{min} = 1.888rpm$ και $e_{amin} = 142V$ αντίστοιχα.

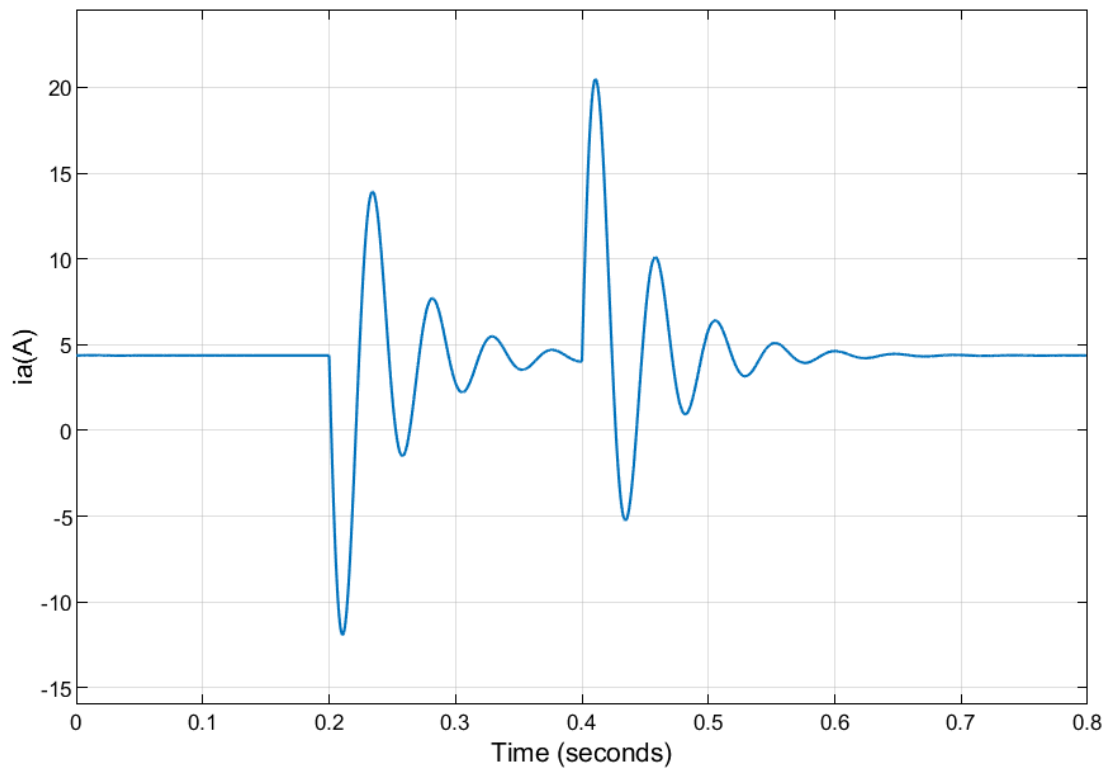
2. Για μείωση τάσης $V=0.5*V_a=110V$



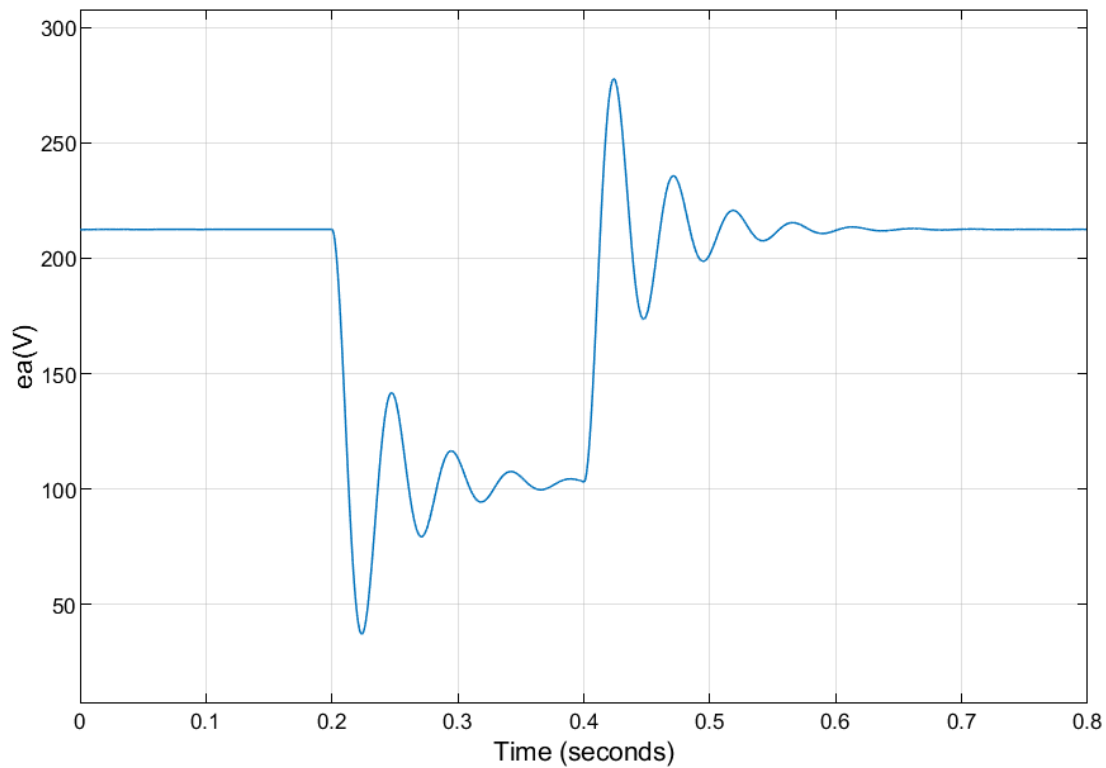
Εικόνα 98 Χρονική μεταβολή τάσης τυμπάνου v_a – Βηματική μείωση της τάσης τυμπάνου κατά 110V κινητήρα ΣΡ ξένης διέγερσης



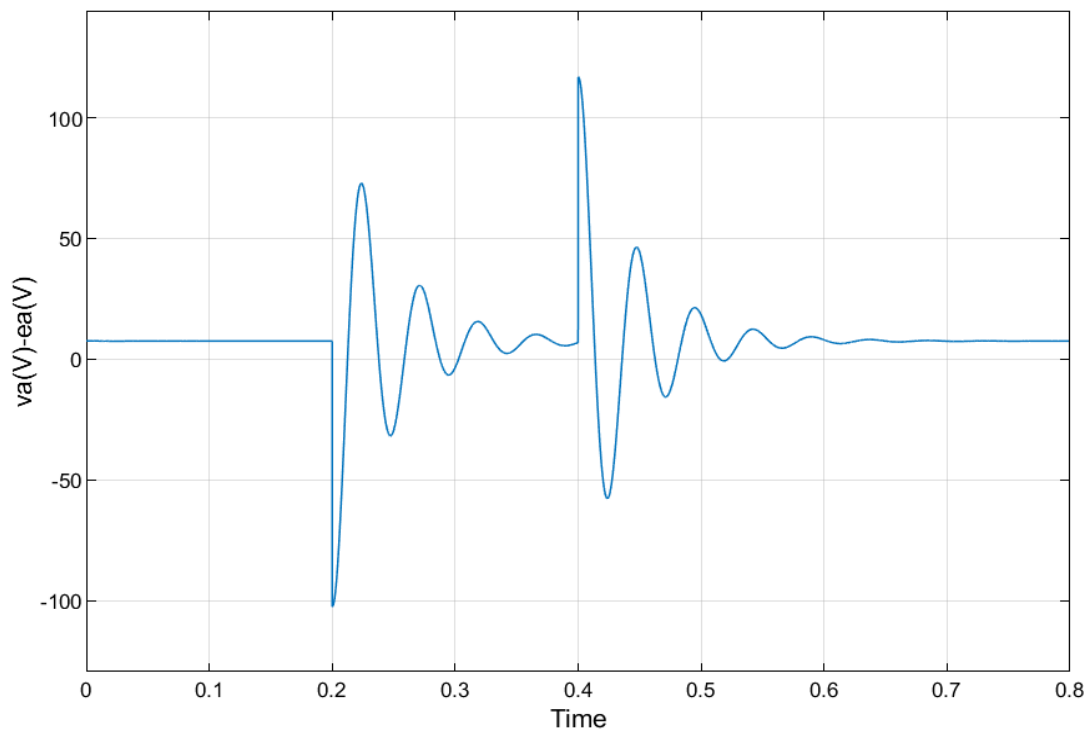
Εικόνα 99 Χρονική μεταβολή ρεύματος διέγερσης i_f – Βηματική μείωση της τάσης τυμπάνου κατά 110V κινητήρα ΣΡ ξένης διέγερσης



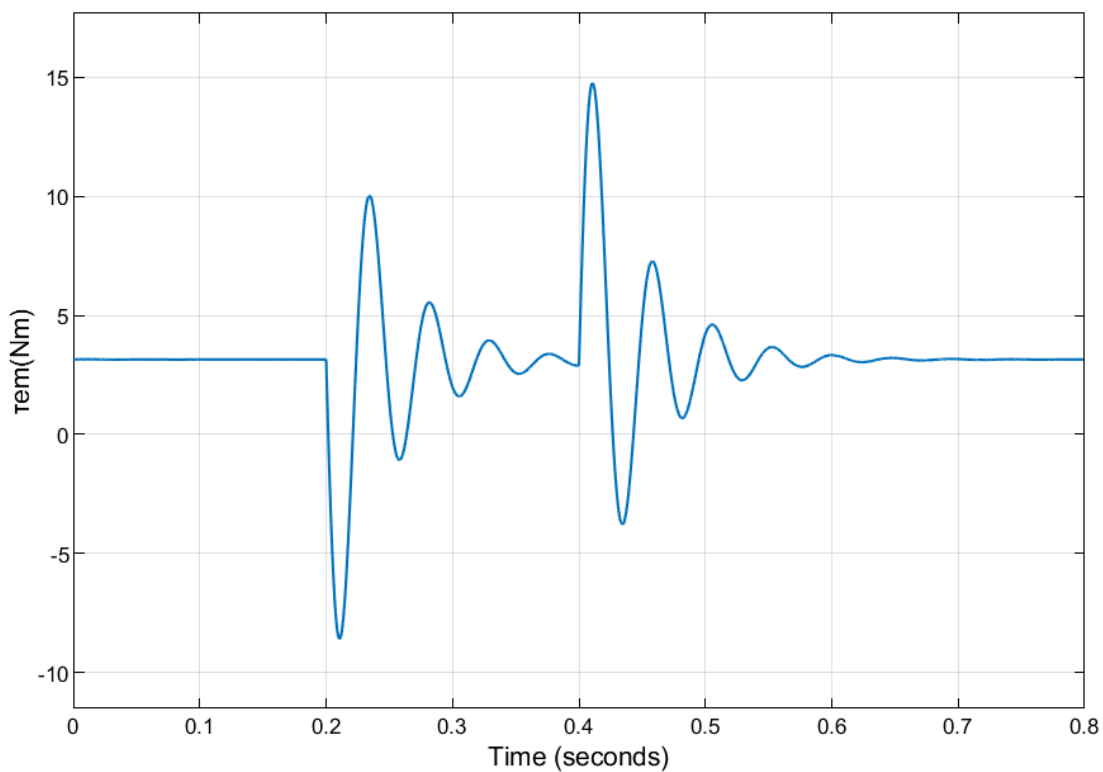
Εικόνα 100 Χρονική μεταβολή ρεύματος τυμπάνου i_a – Βηματική μείωση της τάσης τυμπάνου κατά 110V κινητήρα ΣΡ ξένης διέγερσης



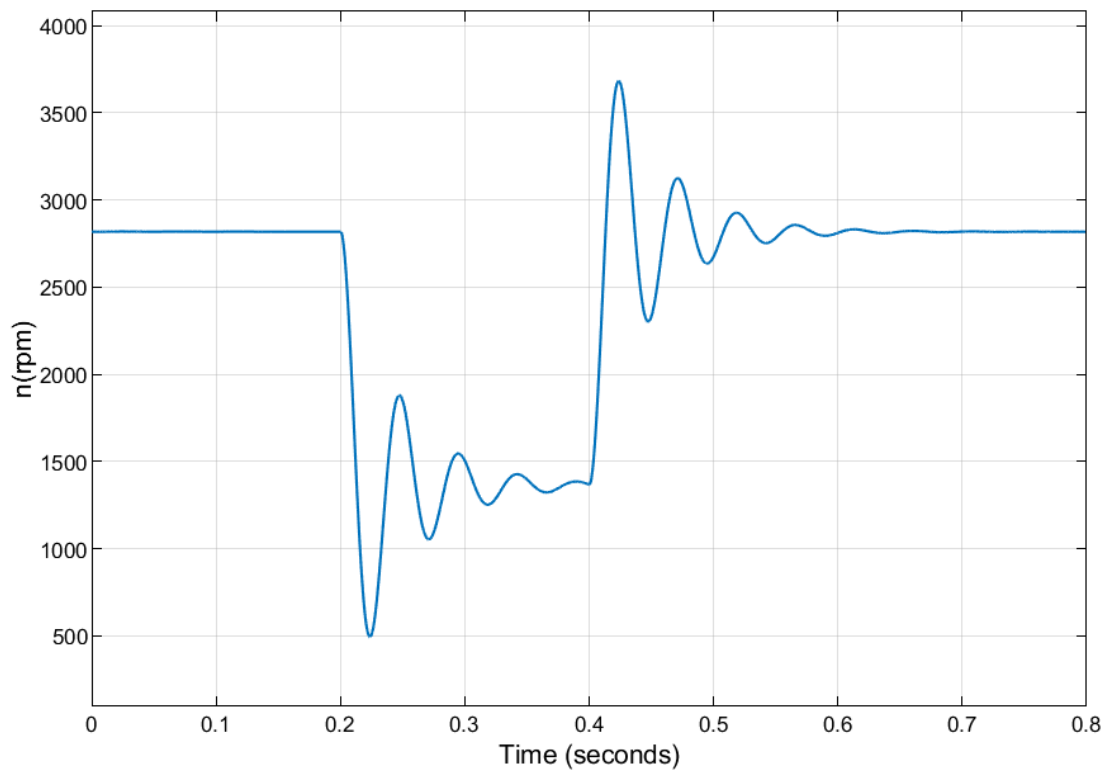
Εικόνα 101 Χρονική μεταβολή ΑΗΕΔ e_a – Βηματική μείωση της τάσης τυμπάνου κατά 110V κινητήρα ΣΡ ξένης διέγερσης



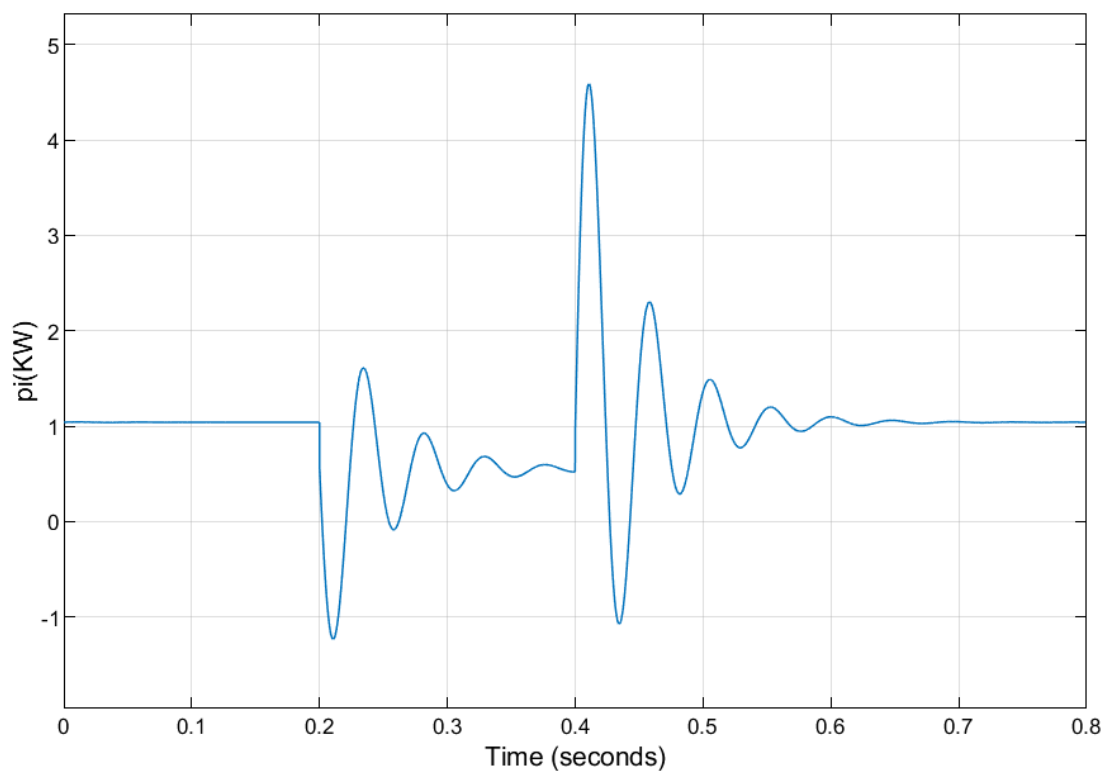
Εικόνα 102 Χρονική μεταβολή ΔΗΕΔ $v_a - e_a$ – Βηματική μείωση της τάσης τυμπάνου κατά 110V κινητήρα ΣΡ ξένης διέγερσης



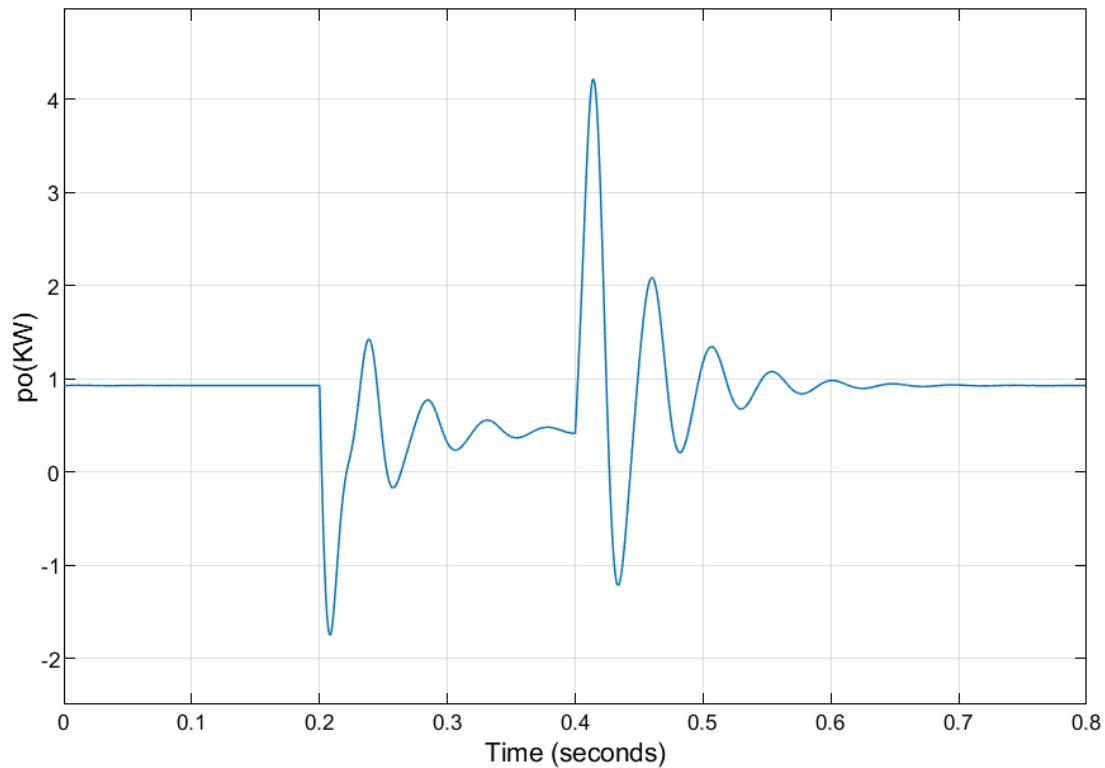
Εικόνα 103 Χρονική μεταβολή ηλεκτρομαγνητικής ροπής tem – Βηματική μείωση της τάσης τυμπάνου κατά 110V κινητήρα ΣΡ ξένης διέγερσης



Εικόνα 104 Χρονική μεταβολή στροφών n – Βηματική μείωση της τάσης τυμπάνου κατά 110V κινητήρα ΣΡ ξένης διέγερσης



Εικόνα 105 Χρονική μεταβολή ισχύος εισόδου π_i – Βηματική μείωση της τάσης τυμπάνου κατά 110V κινητήρα ΣΡ ξένης διέγερσης

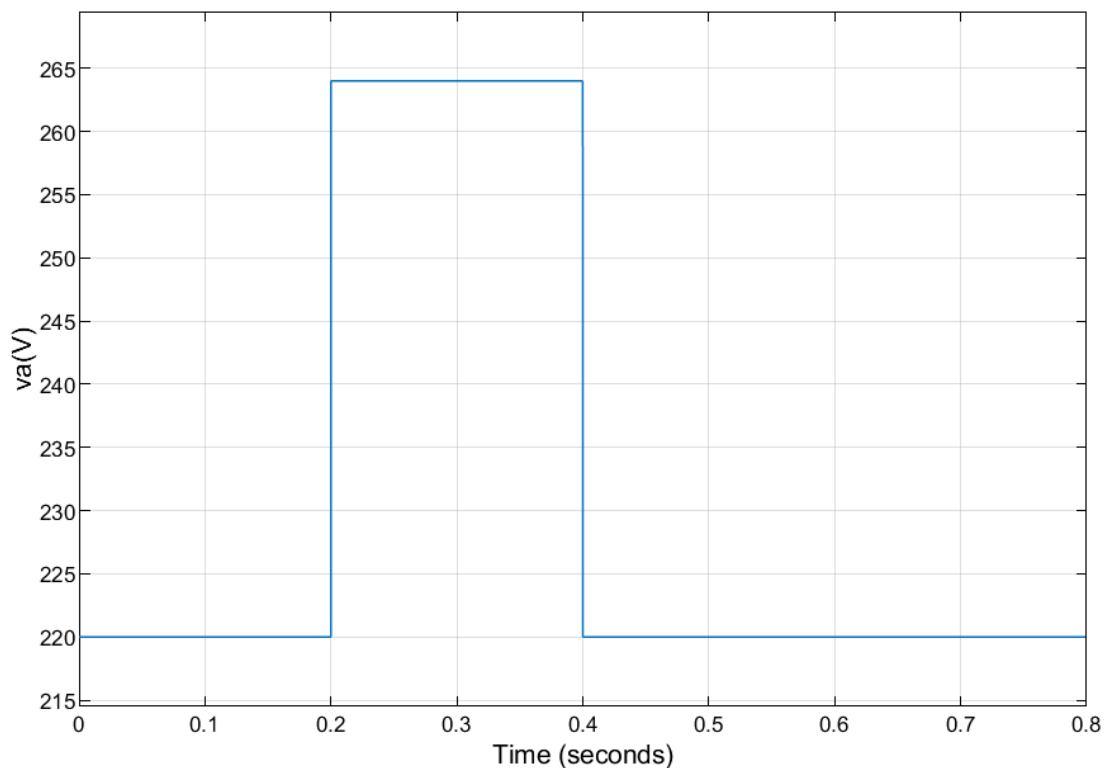


Εικόνα 106 Χρονική μεταβολή ισχύος εξόδου p_o – Βηματική μείωση της τάσης τυμπάνου κατά 44V κινητήρα ΣΡ ξένης διέγερσης

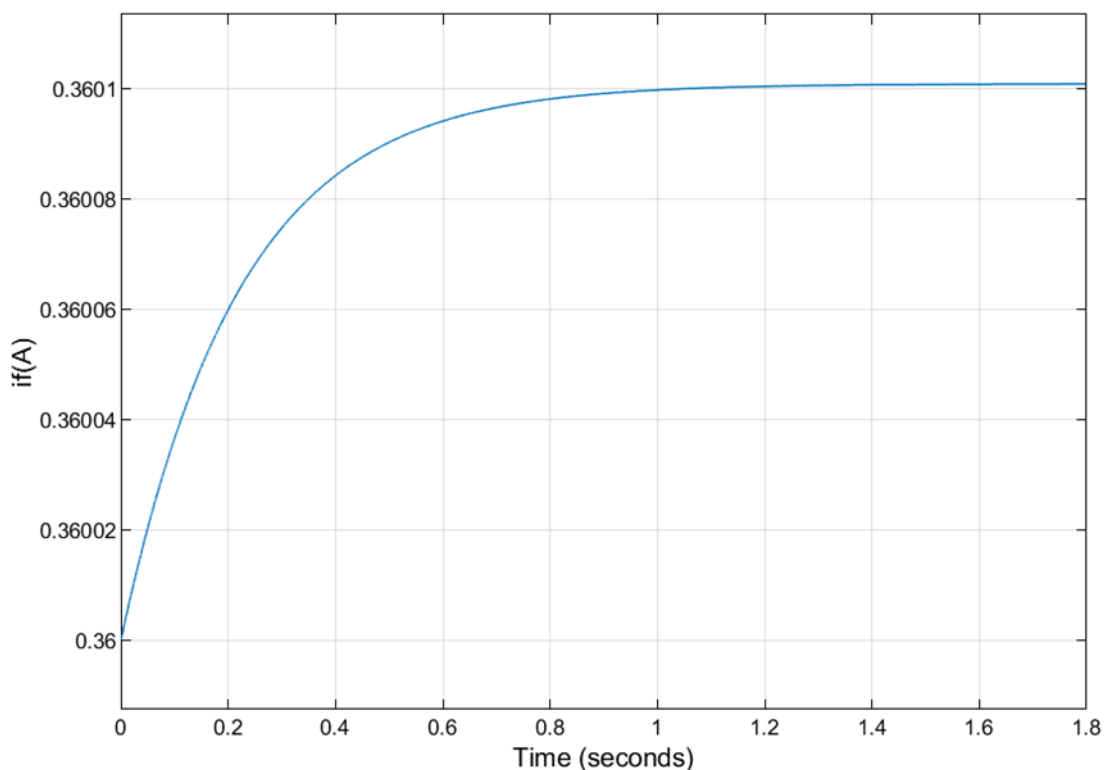
Παρατηρήσεις

Παρατηρούμε ότι η απότομη βηματική μείωση της τάσης τυμπάνου κατά 110V στο χρονικό διάστημα $0.2s < t < 0.4s$ και στη συνέχεια η επαναφορά στην αρχική της τιμή, έχει σαν αποτέλεσμα την δημιουργία ενός μεταβατικού φαινομένου για χρονικό διάστημα 0.45s. Κατά την διάρκεια της βηματικής μείωσης της τάσης τυμπάνου το σύστημα προσπαθεί να οδηγηθεί σε μία νέα μόνιμη κατάσταση που συμφωνεί με την νέα τάση τυμπάνου των 110V. Επιπλέον παρατηρείται μείωση των στροφών και της επαγόμενης ΑΗΕΔ. Για $t \geq 0.4s$, η τάση τυμπάνου επανέρχεται στην ονομαστική της τιμή πριν την βύθιση, με αποτέλεσμα το σύστημα να επανέρχεται στην αρχική μόνιμη κατάσταση για χρόνο $t \geq 0.7s$. Η μικρότερη τιμή των στροφών και της ΑΗΕΔ παρατηρείται για χρόνο $t = 0.22s$ με τιμή $n_{min} = n_{min} = 495rpm$ και $e_{amin} = 37V$ αντίστοιχα.

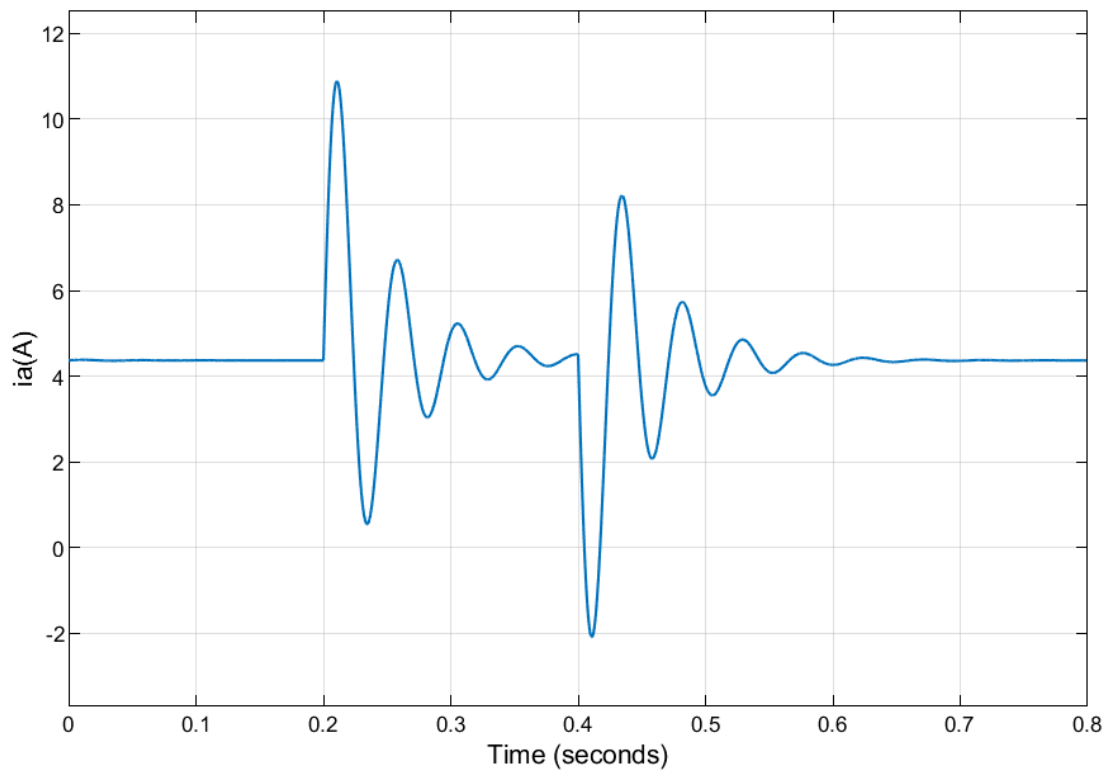
3. Για αύξηση τάσης $V=1.2*V_a=264V$



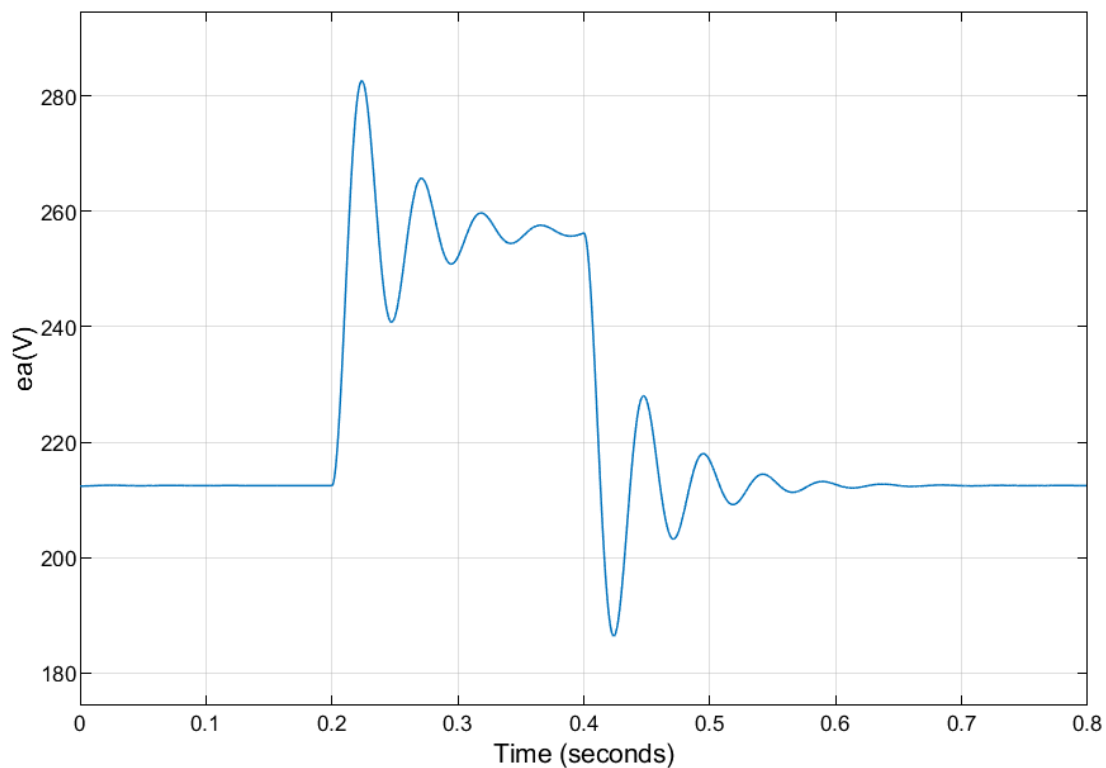
Εικόνα 107 Χρονική μεταβολή τάσης τυμπάνου v_a – Βηματική αύξηση της τάσης τυμπάνου κατά 44V κινητήρα ΣΡ ξένης διέγερσης



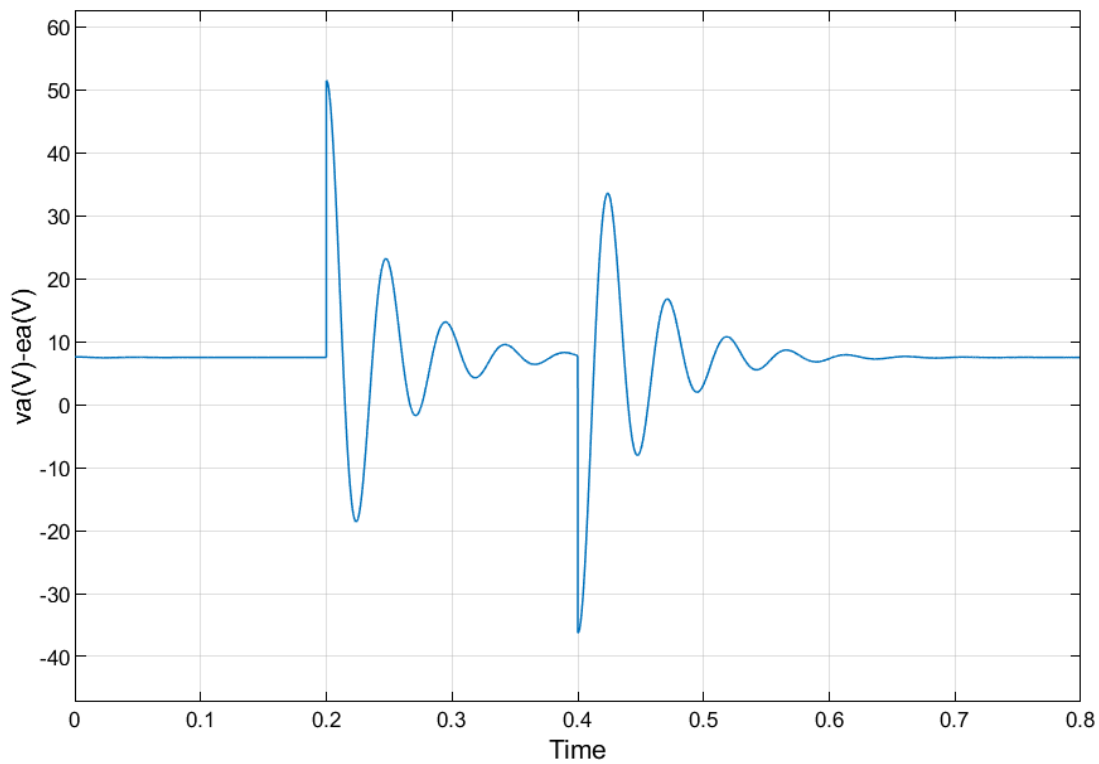
Εικόνα 108 Χρονική μεταβολή ρεύματος διέγερσης i_f – Βηματική αύξηση της τάσης τυμπάνου κατά 44V κινητήρα ΣΡ ξένης διέγερσης



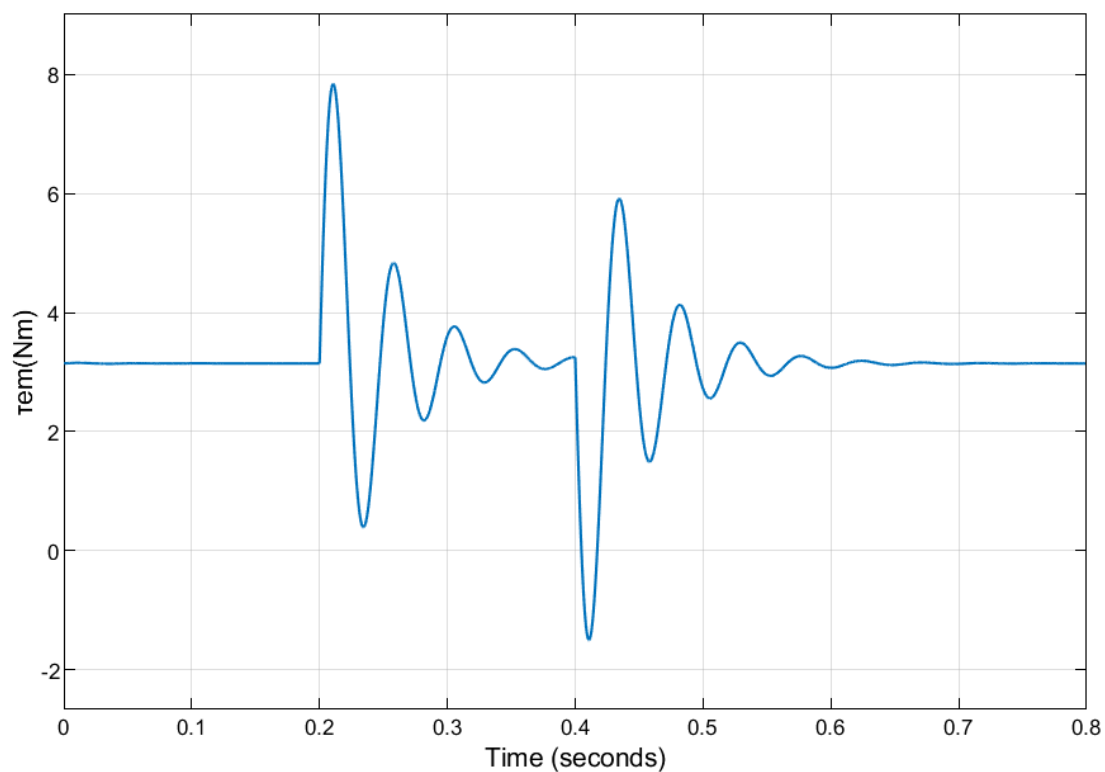
Εικόνα 109 Χρονική μεταβολή ρεύματος τυμπάνου i_a – Βηματική αύξηση της τάσης τυμπάνου κατά 44V κινητήρα ΣΡ ξένης διέγερσης



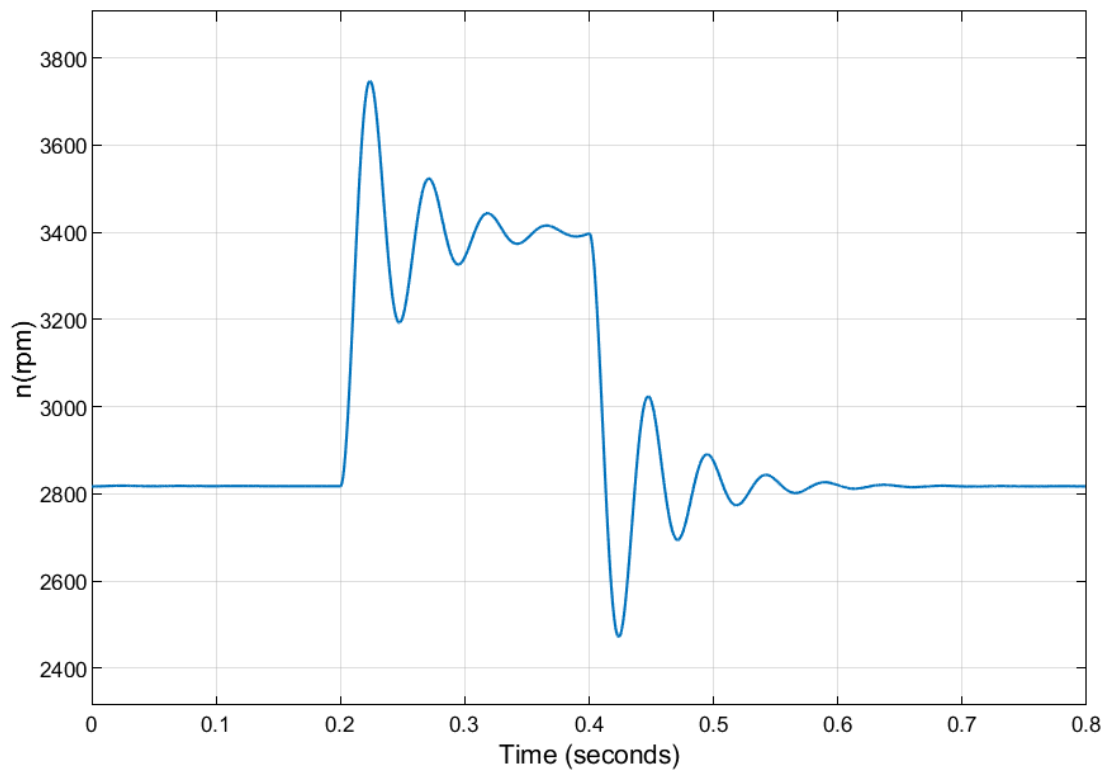
Εικόνα 110 Χρονική μεταβολή ΑΗΕΔ e_a – Βηματική αύξηση της τάσης τυμπάνου κατά 44V κινητήρα ΣΡ ξένης διέγερσης



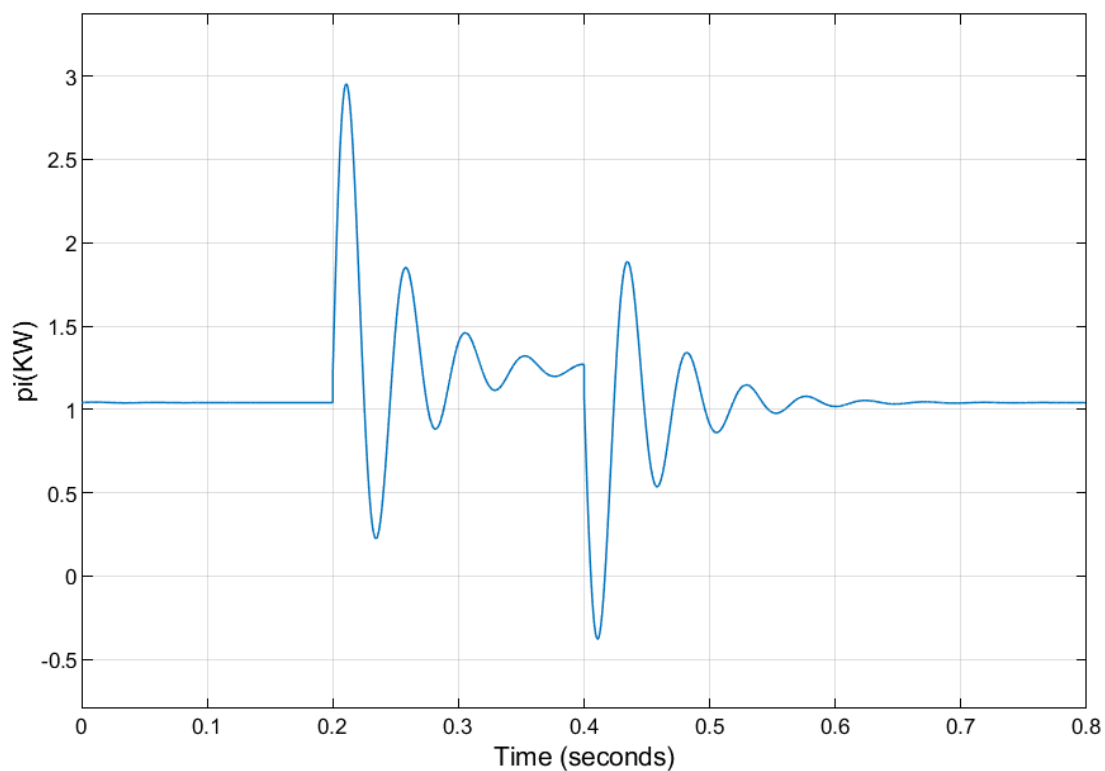
Εικόνα 111 Χρονική μεταβολή ΔΗΕΔ $v_a - e_a$ – Βηματική αύξηση της τάσης τυμπάνου κατά 44V κινητήρα ΣΡ ξένης διέγερσης



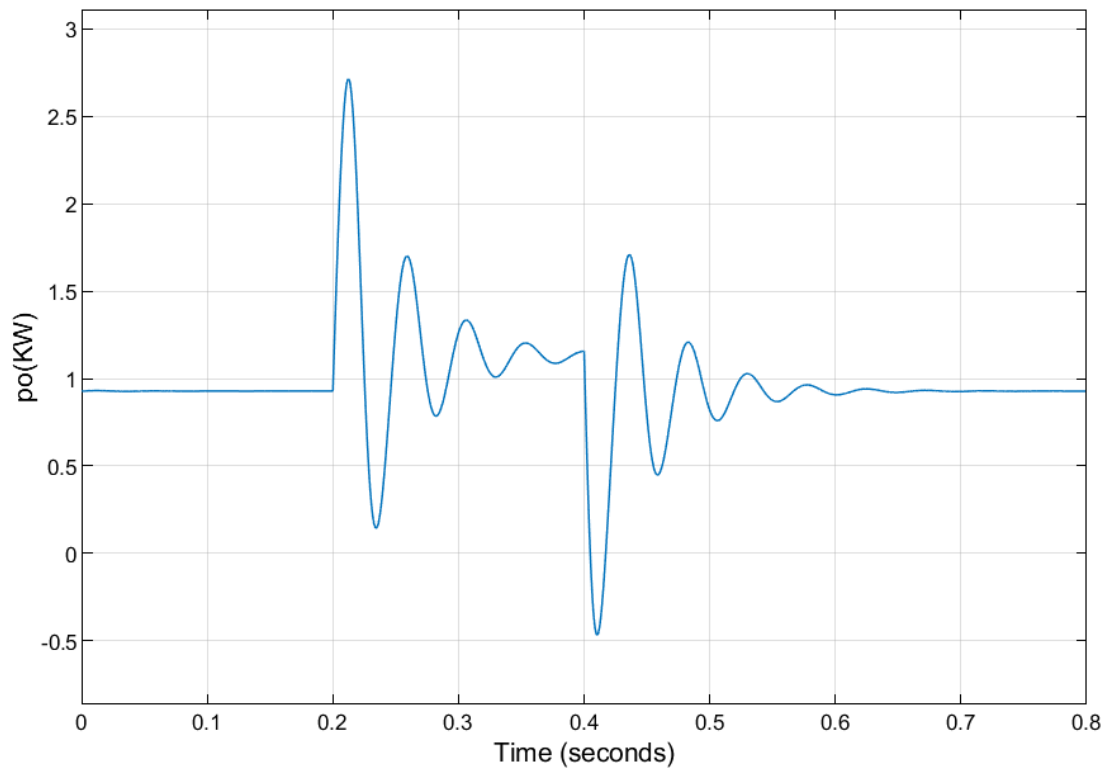
Εικόνα 112 Χρονική μεταβολή ηλεκτρομαγνητικής ροπής t_{em} – Βηματική αύξηση της τάσης τυμπάνου κατά 44V κινητήρα ΣΡ ξένης διέγερσης



Εικόνα 113 Χρονική μεταβολή στροφών n – Βηματική αύξηση της τάσης τυμπάνου κατά 44V κινητήρα ΣΡ ξένης διέγερσης



Εικόνα 114 Χρονική μεταβολή ισχύος εισόδου π_i – Βηματική αύξηση της τάσης τυμπάνου κατά 44V κινητήρα ΣΡ ξένης διέγερσης



Εικόνα 115 Χρονική μεταβολή ισχύος εξόδου p_o – Βηματική αύξηση της τάσης τυμπάνου κατά 44V κινητήρα ΣΡ ξένης διέγερσης

Παρατηρήσεις

Παρατηρούμε ότι η απότομη βηματική αύξηση της τάσης τυμπάνου κατά 44V στο χρονικό διάστημα $0.2s < t < 0.4s$ και στη συνέχεια η επαναφορά στην αρχική της τιμή, έχει σαν αποτέλεσμα την δημιουργία ενός μεταβατικού φαινομένου για χρονικό διάστημα 0.45s. Κατά την διάρκεια της βηματικής αύξησης της τάσης τυμπάνου το σύστημα προσπαθεί να οδηγηθεί σε μία νέα μόνιμη κατάσταση που συμφωνεί με την νέα τάση τυμπάνου των 264V. Αντίθετα με τις προηγούμενες δύο περιπτώσεις, στη συγκεκριμένη περίπτωση παρατηρείται αύξηση των στροφών και της επαγόμενης ΑΗΕΔ. Για $t \geq 0.4s$, η τάση τυμπάνου επανέρχεται στην ονομαστική της τιμή πριν την αύξηση, με αποτέλεσμα το σύστημα να επανέρχεται στην αρχική μόνιμη κατάσταση για χρόνο $t \geq 0.7s$. Η μεγαλύτερη τιμή των στροφών και της ΑΗΕΔ παρατηρείται για χρόνο $t = 0.22s$ με τιμή $n_{max} = 3740rpm$ και $e_{amax} = 282V$ αντίστοιχα.

6 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6^ο : ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

1. Εκκίνηση κινητήρα ΣΡ ξένης διέγερσης

Σε αυτό το σύνολο εφαρμογών πραγματοποιήθηκαν τρεις εκκινήσεις του ίδιου κινητήρα για διαφορετικό μηχανικό φορτίο, οι οποίες είχαν ως αποτέλεσμα την μεταβολή όλων των μεγεθών του κινητήρα.

- Το ρεύμα τυμπάνου είναι ανάλογο της ηλεκτρομαγνητικής ροπής, της ισχύος εισόδου και της ισχύος εξόδου. Επιπλέον, όλα τα παραπάνω μεγέθη παίρνουν και αρνητικές τιμές.
- Οι στροφές του κινητήρα είναι ανάλογες της ΑΗΕΔ.
- Ο βαθμός απόδοσης του κινητήρα ΣΡ κυμαίνεται μεταξύ 84% και 90%.
- Το μέγιστο ρεύμα εκκίνησης κυμαίνεται από 7.8 έως 8.6 φορές μεγαλύτερο του ονομαστικού ρεύματος.
- Όσο μικρότερο είναι το μηχανικό φορτίο, τόσο μικρότερο είναι το ρεύμα τυμπάνου.
- Παρατηρούμε μεγάλη ποσοστιαία διακύμανση των στροφών σε όλες τις περιπτώσεις της τάξεως του 60%, δηλαδή έχουμε υπερτάχυνση του κινητήρα, το οποίο φαινόμενο μπορεί να είναι καταστροφικό.
- Στην τρίτη περίπτωση με μηχανικό φορτίο $TL = 4.5 \text{ Nm}$, επειδή έχουμε υπερβεί το ονομαστικό φορτίο του κινητήρα κατά 1.5 Nm , παρατηρούμε ότι το ρευμα τυμπάνου στη μόνιμη κατάσταση είναι κατά 2 A μεγαλύτερο από το ονομαστικό. Αυτό σημαίνει ότι έχουμε υπερβεί τα όρια λειτουργίας του συγκεκριμένου κινητήρα και μπορεί να τον καταστρέψουμε.

2. Βηματική μεταβολή στη μηχανική ροπή κινητήρα ΣΡ ξένης διέγερσης και επαναφορά

Σε αυτό το σύνολο εφαρμογών πραγματοποιήθηκαν τρεις διαφορετικές βηματικές μειώσεις στη μηχανική ροπή, ενώ ο κινητήρας βρισκόταν στη μόνιμη κατάσταση με ονομαστική τάση και ονομαστικό σταθερό φορτίο, που είχαν ως αποτέλεσμα την μεταβολή όλων των μεγεθών του κινητήρα.

- Καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι η μηχανική ροπή φορτιού είναι ανάλογη με το ρεύμα τυμπάνου, την ηλεκτρομαγνητική ροπή, την ισχύ εισόδου και τη ισχύ εξόδου. Αντίθετα, η μηχανική ροπή φορτιού είναι αντίστροφος ανάλογη με τις στροφές και την επαγομένη ΑΗΕΔ.

3. Βηματική μεταβολή της τάσης τυμπάνου κινητήρα ΣΡ ξένης διέγερσης και επαναφορά

Σε αυτό το σύνολο εφαρμογών πραγματοποιήθηκαν τρεις διαφορετικές βηματικές μεταβολές στη τάση τυμπάνου, ενώ ο κινητήρας βρισκόταν στη μόνιμη κατάσταση με ονομαστική τάση και ονομαστικό σταθερό φορτίο, που είχαν ως αποτέλεσμα την μεταβολή όλων των μεγεθών του κινητήρα. Στις δυο πρώτες εφαρμογές είχαμε μείωση της τάσης, ενώ στη τρίτη είχαμε αύξηση.

- Παρατηρούμε ότι η τάση τυμπάνου είναι ανάλογη με την επαγομένη ΑΗΕΔ και τις στροφές. Τα υπόλοιπα μεγέθη αρχικά επηρεάζονται επειδή αλλάζει η μόνιμη κατάσταση του κινητήρα αλλά γρηγορά προσπαθούν να οδηγηθούν σε μια νέα μόνιμη κατάσταση που

συμφωνεί με την νέα τάση τυμπάνου. Ωστόσο, μετά την επαναφορά της τάσης όλα τα μεγέθη επανέρχονται άμεσα στις αρχικές τους τιμές.

- Στις περιπτώσεις που έχουμε μείωση της τάσης τυμπάνου παρατηρούμε ότι η χρονική μεταβολή $V_a - E_a$ γίνεται αρνητική, δηλαδή η τάση τυμπάνου εκείνη την στιγμή είναι μικρότερη από την επαγόμενη ΑΗΕΔ, $V_a < E_a$. Για αυτό το λόγο παρατηρούμε αρνητικό ρεύμα τυμπάνου και κατ' επέκταση και αρνητική ηλεκτρομαγνητική ροπή. Σύμφωνα με τα παραπάνω καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι η ηλεκτρική μηχανή αλλάζει τεταρτημόριο λειτουργίας και λειτουργεί πλέον ως γεννήτρια, επιστρέφοντας ηλεκτρική ενέργεια στο δίκτυο.

7 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Charman, S. J., 2020. *Ηλεκτρικές Μηχανές AC-DC*. 5η Έκδοση επιμ. Αθήνα: ΕΚΔΟΣΕΙΣ ΤΖΙΟΛΑ.

Μαλατέστας, Π. Β., 2015. *Ηλεκτρική Κίνηση*. 4η Έκδοση επιμ. Αθήνα: ΕΚΔΟΣΕΙΣ ΤΖΙΟΛΑ.

Μαλατέστας, Π. Β., 2021. *Ηλεκτρικές Μηχανές*. 4η Έκδοση επιμ. Αθήνα: ΕΚΔΟΣΕΙΣ ΤΖΙΟΛΑ.

Σαφάκας, Α. Ν., 2019. *Ηλεκτρικές Μηχανές*. Θεσσαλονίκη: ΕΚΔΟΣΕΙΣ ΖΗΤΗ.

Στεργίου, Σ. Τ. & Β., 2009. *Ηλεκτρικές Μηχανές Συνεχούς & Εναλλασσομένου Ρεύματος*. Αθήνα: ΕΚΔΟΣΕΙΣ ΙΩΝ.

https://uk.mathworks.com/help/releases/R2022b/matlab/index.html?s_tid=CRUX_lftnav

https://uk.mathworks.com/help/releases/R2022b/simulink/index.html?s_tid=CRUX_lftnav