



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

Σχεδίαση και Έλεγχος Ηλεκτρικής Μηχανής
Μεταβλητής Μαγνητικής Αντίστασης
(Switched Reluctance Machine - SRM)

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΤΟΥ

ΑΝΔΡΕΑ Ν. ΜΟΣΧΟΒΙΤΗ

Επιβλέπων: Αντώνιος Γ. Κλαδάς
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΙΣΧΥΟΣ
Αθήνα, Μάρτιος 2021



Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών
Τομέας Ηλεκτρικής Ισχύος
Εργαστήριο Ηλεκτρικών Μηχανών και Ηλεκτρονικών Ισχύος

Σχεδίαση και Έλεγχος Ηλεκτρικής Μηχανής Μεταβλητής Μαγνητικής Αντίστασης (Switched Reluctance Machine - SRM)

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΤΟΥ

ΑΝΔΡΕΑ Ν. ΜΟΣΧΟΒΙΤΗ

Επιβλέπων: Αντώνιος Γ. Κλαδάς
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 10η Μαρτίου 2021.

(Υπογραφή)

(Υπογραφή)

(Υπογραφή)

.....
Αντώνιος Γ. Κλαδάς
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Σταύρος Παπαθανασίου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Αντώνιος Αντωνόπουλος
Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Μάρτιος 2021

(Υπογραφή)

.....

ΑΝΔΡΕΑΣ Ν. ΜΟΣΧΟΒΙΤΗΣ

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

© 2021 – All rights reserved



Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών
Τομέας Ηλεκτρικής Ισχύος
Εργαστήριο Ηλεκτρικών Μηχανών και Ηλεκτρονικών Ισχύος

Copyright ©–All rights reserved Ανδρέας Ν. Μοσχοβίτης, 2021.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος.

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 τον συγγραφέα.

Ευχαριστίες

Η παρούσα διπλωματική εργασία σηματοδοτεί το κλείσιμο ενός πολύ σημαντικού κύκλου στη ζωή μου, αυτού των σπουδών μου στο Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο. Κοιτώντας πίσω στα χρόνια που πέρασαν, βλέπω μόνο τους ανθρώπους που με ενέπνευσαν, τους ανθρώπους που συνέβαλαν στο να γίνω αυτό που είμαι σήμερα. Νιώθω την ανάγκη, λοιπόν, να ευχαριστήσω αυτούς τους ανθρώπους ξεχωριστά.

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή κ. Αντώνη Κλαδά, καθώς αποτέλεσε πρότυπο και στήριγμα καθόλη τη διάρκεια των σπουδών μου. Πάντα με αμέριστη υπομονή κατανοούσε τους προβληματισμούς μου και οι συμβουλές του στάθηκαν πολύτιμες σε κομβικές επιλογές της ζωής μου. Ακόμα, τον ευχαριστώ για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε στην ανάθεση της συγκεκριμένης εργασίας, η οποία ανήκει στα πλαίσια της συνεργασίας του Εργαστηρίου Ηλεκτρικών Μηχανών και Ηλεκτρονικών Ισχύος με το ερευνητικό παράρτημα της Tesla στον Δημόκριτο. Η έκδηλη αγάπη του για το αντικείμενο των ηλεκτρικών μηχανών με έκανε να θέλω κι εγώ να ανακαλύψω αυτόν τον τομέα.

Επίσης, ευχαριστώ ιδιαίτερα τον κ. Ιάκωβο Μανωλά (Engineering Manager, Tesla) και τον κ. Ηλία Αντωνάκη (Motor Design Engineer, Tesla), οι οποίοι ενήργησαν ως συνεπιβλέποντες κατά τη διάρκεια της εκπόνησης της εργασίας. Με αρρωγό την εμπειρία τους ένοιωθα αυτοπεποίθηση σε κάθε βήμα της μελέτης μου. Η διάθεσή τους να μου μεταλαμπαδεύσουν τις γνώσεις τους ήταν χαρακτηριστική και η καθοδήγησή τους καθοριστική.

Παράλληλα, χρωστάω ένα μεγάλο ευχαριστώ σε όλους τους φίλους μου. Μαζί περάσαμε στιγμές διαβάσματος, στιγμές προβληματισμού, στιγμές χαλάρωσης και διασκέδασης. Τους ευχαριστώ που ήταν πάντα ανιδιοτελώς στο πλευρό μου και εύχομαι όλα τα όνειρα που κάναμε μαζί κάποια στιγμή να γίνουν πραγματικότητα.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου, τους γονείς μου, Νίκο και Μαρία, και τις αδερφές μου, Νατάσα και Αφροδίτη, για την αδιάλειπτη αγάπη, στήριξη και υπομονή που μου προσφέρουν σε κάθε στάδιο της ζωής μου. Ολοκληρώνοντας, ευχαριστώ τον Θεό που μου έδωσε τη τύχη να συναντήσω όλους τους παραπάνω ανθρώπους και που μέσω αυτών φωτίζει τον δρόμο μου.

Ανδρέας Μοσχοβίτης
Μάρτιος 2021

Περίληψη

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη της συμπεριφοράς των μηχανών μεταβλητής μαγνητικής αντίστασης (Switched Reluctance Machine - SRM) σε υψηλές ταχύτητες. Παράλληλα, στόχος είναι η μελέτη των εν λόγω μηχανών από όλες τις οπτικές γωνίες, δηλαδή από τη σχεδίαση μέχρι τη μοντελοποίηση και τον έλεγχο. Ακόμα, αποτελεί σκοπό η υλοποίηση συγκεκριμένης εφαρμογής υψηλών ταχυτήτων ώστε να επιβεβαιωθούν ή όχι τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα των SRM.

Στην εργασία αυτή, αρχικά, τίθενται οι θεωρητικές βάσεις για το αντικείμενο των μηχανών μεταβλητής μαγνητικής αντίστασης και αναλύονται κάποιοι κανόνες σχεδίασής τους. Σύμφωνα με τους κανόνες αυτούς, υλοποιείται ένα παραμετροποιημένο εργαλείο σχεδίασης SRM, με το οποίο σχεδιάζεται ένας 8/6 κινητήρας μεταβλητής μαγνητικής αντίστασης ισχύος περί των 21 kW. Στόχος αυτού του κινητήρα είναι να μπορεί να αποδίδει 20Nm στις 10.000 στροφές ανά λεπτό (ΣΑΛ). Έπειτα, γίνεται εκτενής μελέτη της ηλεκτρομαγνητικής συμπεριφοράς της μηχανής με τη βοήθεια της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων. Ως αποτέλεσμα, συλλέγονται τα απαραίτητα δεδομένα ώστε να εξαχθούν οι μεταβλητές της μηχανής. Η ανάλυση πραγματοποιείται μέσω του λογισμικού MATLAB σε συνδυασμό με το λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων FEMM.

Με τα δεδομένα που συλλέγονται από την ηλεκτρομαγνητική ανάλυση, είναι εφικτή η μοντελοποίηση ενός συστήματος ηλεκτρικής κίνησης με SRM στο περιβάλλον του Simulink χρησιμοποιώντας μεμονωμένα στοιχεία και όχι έτοιμα blocks της βιβλιοθήκης. Όσον αφορά την οδήγηση της μηχανής, πραγματοποιείται στιγμιαίος έλεγχος ροπής, αποτελούμενος από δύο ελεγκτές. Ο ένας ελεγκτής είναι αναλογικός - ολοκληρωτικός και ο άλλος είναι ελεγκτής υστέρησης. Επίσης, αξίζει να σημειωθεί ότι χρησιμοποιείται συνάρτηση κατανομής ροπής αναφοράς σε παραπάνω από μία φάσεις, με σκοπό την επίτευξη βέλτιστου ελέγχου.

Τέλος, το μοντέλο δοκιμάζεται για διάφορες τιμές ταχυτήτων αλλά και ροπών αναφοράς. Σχολιάζονται τα αποτελέσματα των δοκιμών και αναφέρονται τα κύρια συμπεράσματα που προέκυψαν για κάθε ένα από τα στοιχεία του συστήματος ηλεκτρικής κίνησης με SRM.

Λέξεις Κλειδιά

Μηχανές Μεταβλητής Μαγνητικής Αντίστασης, Σχεδιαστικοί κανόνες, Σύστημα ηλεκτρικής κίνησης, Στιγμιαίος έλεγχος ροπής

Abstract

The purpose of this diploma thesis is the analysis of the behaviour of Switched Reluctance Machines - SRMs at high speeds. Meanwhile, it is a goal to examine these electric machines from all angles, from designing an SRM to modeling and controlling it. It is also intended to implement a specific high-speed application to confirm or not the advantages and disadvantages of SRMs.

The basis of this thesis lies in the operating and designing principles of the SRMs. According to these principles, a customizable SRM designing tool is implemented, with which an 8/6 motor of about 21 kW is created. The aim of this motor is to be able to deliver 20 Nm at 10,000 rpm. Then, the electromagnetic behaviour of the machine is extensively studied with the help of the Finite Element Analysis (FEA). As a result, the necessary data is collected to extract the machine variables. The analysis is performed using the MATLAB software in conjunction with the finite element software FEMM.

With the data collected from the electromagnetic analysis, it is possible to model an electrical drive system with an SRM in the Simulink environment using individual components rather than ready-made blocks of the library. As far as the motor control is concerned, an instantaneous torque control is performed, consisting of two controllers. One controller is Proportional - Integral (PI) and the other one is an Hysteresis controller. It is also worth noting that a distribution function is used on the reference torque, in order to be distributed among more than one phase. In that way optimal control is achieved.

Finally, the model is tested for different values of speed and torque references. The tests' results are summarized and the main conclusions reached for each of the components of the SRM electric drive system are reported.

Keywords

Switched Reluctance Machines, Designing principles, Electrical drive system, Instantaneous torque control

Περιεχόμενα

Ευχαριστίες	1
Περίληψη	3
Abstract	5
Περιεχόμενα	9
Κατάλογος Σχημάτων	14
1 Εισαγωγή	15
1.1 Αντικείμενο της διπλωματικής	16
1.2 Οργάνωση του τόμου	16
2 Μηχανές Μεταβλητής Μαγνητικής Αντίστασης	19
2.1 Εισαγωγή	19
2.2 Περιγραφή και λειτουργία των SRMs	20
2.2.1 Ορισμός	20
2.2.2 Αρχή λειτουργίας των SRMs	21
2.2.3 Η εξάρτηση του συντελεστή αυτεπαγωγής L από την θέση του δρομέα	24
2.2.4 Παραγωγή συνεχούς ροπής	26
2.2.5 Ισοδύναμο Κύκλωμα	27
2.3 Πλεονεκτήματα και περιορισμοί	29
3 Σχεδίαση 4-φασικής 8/6 SRM	31
3.1 Εισαγωγή	31
3.2 Εξαγωγή εξίσωσης εξόδου	31
3.3 Επιλογή διαστάσεων	34
3.3.1 Διάμετρος και Μήκος	34
3.4 Επιλογή αριθμού ελιγμάτων	35
3.5 Επιλογή τόξου πόλων	36
3.5.1 Ελάχιστη τιμή τόξου πόλου στάτη για την επίτευξη εκκίνησης της μηχανής	36
3.5.2 Περιορισμοί στη γωνία επικάλυψης θ_0	37

3.5.3	Άνω όριο τόξου πόλου στάτη	38
3.6	Πάχος σώματος στάτη	39
3.7	Εξωτερική διάμετρος στάτη	39
3.8	Πάχος σώματος δρομέα	40
3.9	Ύψος πόλου δρομέα	40
3.10	Εφαρμογή 4-φασικής 8/6 SRM	40
4	Ανάλυση ηλεκτρομαγνητικού πεδίου 8/6 SRM	43
4.1	Εισαγωγή	43
4.2	Η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων	43
4.2.1	Μαγνητοστατικά προβλήματα	44
4.2.2	Οριακές συνθήκες προβλήματος	44
4.2.3	Δημιουργία πλέγματος κατά την προεπεξεργασία	45
4.3	Επεξεργασία δεδομένων	46
4.3.1	Υπολογισμός ροπής μέσω σταθμικού τανυστή τάσης	46
4.3.2	Υπολογισμός πεπλεγμένης μαγνητικής ροής μέσω διανυσματικού δυναμικού	47
4.3.3	Διαδικασία και αποτελέσματα	48
4.4	Αποθήκευση δεδομένων	55
5	Μοντελοποίηση συστήματος ηλεκτρικής κίνησης με SRM	57
5.1	Εισαγωγή	57
5.2	Σύστημα ηλεκτρικής κίνησης	57
5.3	Πηγή ηλεκτρικής ισχύος	58
5.3.1	Πηγή ηλεκτρικής ισχύος της 8/6 SRM	58
5.4	Μετατροπέας ηλεκτρικής ισχύος	58
5.4.1	Ασύμμετρος μονοφασικός αντιστροφέας πηγής τάσεως	59
5.4.2	Μετατροπέας της 8/6 SRM	62
5.5	Μηχανή μεταβλητής μαγνητικής αντίστασης	62
5.5.1	8/6 SRM	62
6	Έλεγχος και οδήγηση της 8/6 SRM	65
6.1	Εισαγωγή	65
6.2	Πίνακες Αναζήτησης (Lookup Tables)	66
6.3	Έλεγχος στιγμιαίας ροπής	67
6.3.1	Συνάρτησης κατανομής ροπής (Torque Distribution Function-TSF)	68
6.3.2	Έλεγχος ροπής με αναλογικό-ολοκληρωτικό ελεγκτή (PI)	70
6.3.3	Έλεγχος ρεύματος με ζώνη υστέρησης (Hysteresis Control)	70
6.4	Αποτελέσματα ελέγχου	71
6.4.1	Έλεγχος ροπής στις 1000 ΣΑΛ	71
6.4.2	Έλεγχος ροπής στις 5000 ΣΑΛ	80
6.4.3	Έλεγχος ροπής στις 1000 ΣΑΛ	89

7 Επίλογος	99
7.1 Σύνοψη και συμπεράσματα	99
7.1.1 Κινητήρας SRM	100
7.1.2 Μετατροπείας	100
7.1.3 Έλεγχος και οδήγηση	100
7.2 Σημεία προαγωγής της επιστήμης	101
7.3 Μελλοντικές επεκτάσεις	101
Βιβλιογραφία	104

Κατάλογος Σχημάτων

2.1	Τυπική μορφή των SRMs (Πηγή: [1])	20
2.2	Δρομέας ευθυγραμμισμένος με φάση c (Πηγή: [1])	21
2.3	Δρομέας ευθυγραμμισμένος με φάση a (Πηγή: [1])	21
2.4	Δεδομένα παραδείγματος (Πηγή: [1])	22
2.5	2/2 Pole SRM (Πηγή: [2])	24
2.6	Ακραίες θέσεις δρομέα (Πηγή: [2])	24
2.7	Εξάρτηση επαγωγής και ροπής από τη θέση του δρομέα (Πηγή: [2])	25
2.8	Τριφασική 6/4 SRM (Πηγή: [2])	26
2.9	Κυματομορφές τριφασικής 6/4 SRM (Πηγή: [2])	27
2.10	Μονοφασικό ισοδύναμο κύκλωμα των SRM	28
3.1	Τριφασική 6/4 SRM (Πηγή: [1])	32
3.2	Πεπλεγμένη ροή συναρτήσε του ρεύματος διέγερσης (Πηγή: [1])	33
3.3	Επαγωγή διαδοχικών φάσεων στάτη συναρτήσε θέσης δρομέα (Πηγή: [1])	37
3.4	Επιλογή τιμών για τόξα πόλων δρομέα και στάτη μιας 8/6 SRM	38
3.5	Γεωμετρία της 4-φασικής 8/6 SRM που θα μελετηθεί	41
4.1	Δημιουργία πλέγματος κατά την προεπεξεργασία	46
4.2	Επιλογή χωρίου δρομέα για υπολογισμό ροπής	47
4.3	Παράδειγμα υπολογισμού πεπλεγμένης ροής (Πηγή: [3])	47
4.4	Επιλογή χωρίων ίδιας φάσης	48
4.5	Αναπτυσσόμενη στατική ροπή ανά φάση, θέση δρομέα και ρεύμα διέγερσης	49
4.6	Συνολική αναπτυσσόμενη ροπή	50
4.7	Μέση συνολική αναπτυσσόμενη ροπή	50
4.8	Πεπλεγμένη ροή ανά φάση, θέση δρομέα και ρεύμα διέγερσης	51
4.8	Πεπλεγμένη ροή ανά φάση, θέση δρομέα και ρεύμα διέγερσης	52
4.9	Αμοιβαία πεπλεγμένη ροή φάσης A με τις υπόλοιπες φάσεις ανά θέση δρομέα και ρεύμα διέγερσης	52
4.9	Αμοιβαία πεπλεγμένη ροή φάσης A με τις υπόλοιπες φάσεις ανά θέση δρομέα και ρεύμα διέγερσης	53
4.10	$d\lambda/d\theta$ ανά φάση, θέση δρομέα και ρεύμα διέγερσης	53
4.10	$d\lambda/d\theta$ ανά φάση, θέση δρομέα και ρεύμα διέγερσης	54

5.1	Δομή τυπικού συστήματος ηλεκτρικής κίνησης	57
5.2	DC Voltage Source στο SIMULINK	58
5.3	Ασύμμετρος μονοφασικός αντιστροφέας πηγής τάσεως	59
5.4	Στρατιγική 1: Λειτουργικές καταστάσεις	60
5.5	Στρατιγική 2: Λειτουργικές καταστάσεις	61
5.6	Υλοποίηση του αντιστροφέα στο SIMULINK	62
5.7	Ωμική αντίσταση στο SIMULINK	63
5.8	Πηνίο μεταβλητού συντελεστή αυτεπαγωγής στο SIMULINK	63
5.9	Ελεγχόμενη πηγή τάσης στο SIMULINK	63
5.10	Ανά φάση κύκλωμα της 8/6 SRM στο SIMULINK	64
6.1	Δομή ελέγχου ροπής της μηχανής	65
6.2	Πίνακας αναζήτησης ροπής της φάσης A για ρεύμα διέγερσης I1 και θέση δρομέα theta mec	66
6.3	Μοντελοποίηση θέσης δρομέα περιστρεφόμενου με σταθερή ταχύτητα 10000 ΣΑΑ	66
6.4	Πίνακας αναζήτησης πεπλεγμένης μαγνητικής ροής λ της φάσης A για ρεύμα διέγερσης I1 και θέση δρομέα theta mec	67
6.5	Πίνακας αναζήτησης $d\lambda/d\theta$ της φάσης A για ρεύμα διέγερσης I1 και θέση δρομέα theta mec	67
6.6	Πίνακας αναζήτησης συντελεστή αυτεπαγωγής της φάσης A για ρεύμα διέγερσης I1 και θέση δρομέα theta mec	67
6.7	Δομή ελέγχου στιγμιαίας ροπής	68
6.8	Τροποποιημένη ημιτονοειδής συνάρτηση κατανομής ροπής (Πηγή: [9])	69
6.9	Παραγωγή αρνητικής ροπής	69
6.10	Αναλογικός-ολοκληρωτικός ελεγκτής (PI) (Πηγή: [4])	70
6.11	Έλεγχος με ζώνη υστέρησης (Hysteresis Control) (Πηγή: [4])	71
6.12	Συνάρτηση κατανομής ροπής όλων των φάσεων για ταχύτητα περιστροφής 1000 ΣΑΑ	72
6.13	Ανά φάση ροπή (Κόκκινο) σε σχέση με την ανά φάση ροπή αναφοράς (Ροζ) σε Nm	73
6.14	Αναπτυσσόμενη ροπή κάθε φάσης σε Nm	73
6.15	Συνολική αναπτυσσόμενη ροπή σε Nm	74
6.16	Ανά φάση ρεύμα διέγερσης (Κόκκινο) σε σχέση με το ανά φάση ρεύμα αναφοράς (Ροζ) σε A	74
6.17	Αναπτυσσόμενα ρεύματα διέγερσης κάθε φάσης σε A	75
6.18	Ανά φάση ροπή (Κόκκινο) σε σχέση με την ανά φάση ροπή αναφοράς (Ροζ) σε Nm	75
6.19	Αναπτυσσόμενη ροπή κάθε φάσης σε Nm	76
6.20	Συνολική αναπτυσσόμενη ροπή σε Nm	76

6.21	Ανά φάση ρεύμα διέγερσης (Κόκκινο) σε σχέση με το ανά φάση ρεύμα αναφοράς (Ροζ) σε A	77
6.22	Αναπτυσσόμενα ρεύματα διέγερσης κάθε φάσης σε A	77
6.23	Ανά φάση ροπή (Κόκκινο) σε σχέση με την ανά φάση ροπή αναφοράς (Ροζ) σε Nm	78
6.24	Αναπτυσσόμενη ροπή κάθε φάσης σε Nm	78
6.25	Συνολική αναπτυσσόμενη ροπή σε Nm	79
6.26	Ανά φάση ρεύμα διέγερσης (Κόκκινο) σε σχέση με το ανά φάση ρεύμα αναφοράς (Ροζ) σε A	79
6.27	Αναπτυσσόμενα ρεύματα διέγερσης κάθε φάσης σε A	80
6.28	Συνάρτηση κατανομής ροπής όλων των φάσεων για ταχύτητα περιστροφής 1000 ΣΑΑ	81
6.29	Ανά φάση ροπή (Κόκκινο) σε σχέση με την ανά φάση ροπή αναφοράς (Ροζ) σε Nm	81
6.30	Αναπτυσσόμενη ροπή κάθε φάσης σε Nm	82
6.31	Συνολική αναπτυσσόμενη ροπή σε Nm	82
6.32	Ανά φάση ρεύμα διέγερσης (Κόκκινο) σε σχέση με το ανά φάση ρεύμα αναφοράς (Ροζ) σε A	83
6.33	Αναπτυσσόμενα ρεύματα διέγερσης κάθε φάσης σε A	83
6.34	Ανά φάση ροπή (Κόκκινο) σε σχέση με την ανά φάση ροπή αναφοράς (Ροζ) σε Nm	84
6.35	Αναπτυσσόμενη ροπή κάθε φάσης σε Nm	84
6.36	Συνολική αναπτυσσόμενη ροπή σε Nm	85
6.37	Ανά φάση ρεύμα διέγερσης (Κόκκινο) σε σχέση με το ανά φάση ρεύμα αναφοράς (Ροζ) σε A	85
6.38	Αναπτυσσόμενα ρεύματα διέγερσης κάθε φάσης σε A	86
6.39	Ανά φάση ροπή (Κόκκινο) σε σχέση με την ανά φάση ροπή αναφοράς (Ροζ) σε Nm	86
6.40	Αναπτυσσόμενη ροπή κάθε φάσης σε Nm	87
6.41	Συνολική αναπτυσσόμενη ροπή σε Nm	87
6.42	Ανά φάση ρεύμα διέγερσης (Κόκκινο) σε σχέση με το ανά φάση ρεύμα αναφοράς (Ροζ) σε A	88
6.43	Αναπτυσσόμενα ρεύματα διέγερσης κάθε φάσης σε A	88
6.44	Συνάρτηση κατανομής ροπής όλων των φάσεων για ταχύτητα περιστροφής 10000 ΣΑΑ	89
6.45	Ανά φάση ροπή (Κόκκινο) σε σχέση με την ανά φάση ροπή αναφοράς (Ροζ) σε Nm	90
6.46	Αναπτυσσόμενη ροπή κάθε φάσης σε Nm	90
6.47	Συνολική αναπτυσσόμενη ροπή σε Nm	91
6.48	Ανά φάση ρεύμα διέγερσης (Κόκκινο) σε σχέση με το ανά φάση ρεύμα αναφοράς (Ροζ) σε A	91

6.49	Αναπτυσσόμενα ρεύματα διέγερσης κάθε φάσης σε A	92
6.50	Ανά φάση ροπή (Κόκκινο) σε σχέση με την ανά φάση ροπή αναφοράς (Ροζ) σε Nm	92
6.51	Αναπτυσσόμενη ροπή κάθε φάσης σε Nm	93
6.52	Συνολική αναπτυσσόμενη ροπή σε Nm	93
6.53	Ανά φάση ρεύμα διέγερσης (Κόκκινο) σε σχέση με το ανά φάση ρεύμα αναφοράς (Ροζ) σε A	94
6.54	Αναπτυσσόμενα ρεύματα διέγερσης κάθε φάσης σε A	94
6.55	Ανά φάση ροπή (Κόκκινο) σε σχέση με την ανά φάση ροπή αναφοράς (Ροζ) σε Nm	95
6.56	Αναπτυσσόμενη ροπή κάθε φάσης σε Nm	95
6.57	Συνολική αναπτυσσόμενη ροπή σε Nm	96
6.58	Ανά φάση ρεύμα διέγερσης (Κόκκινο) σε σχέση με το ανά φάση ρεύμα αναφοράς (Ροζ) σε A	96
6.59	Αναπτυσσόμενα ρεύματα διέγερσης κάθε φάσης σε A	97

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

Η κλιματική αλλαγή είναι ένα πρόβλημα, με το οποίο η ανθρωπότητα είναι αντιμέτωπη τα τελευταία χρόνια. Εκτός άλλων, ένας σημαντικός παράγοντας όξυνσης των περιβαλλοντικών αλλαγών είναι οι υπέρμετρες εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα (CO_2). Ο τρόπος μείωσης των επιβλαβών εκπομπών είναι πλέον προφανής και συνίσταται τόσο από τη διεύθυνση περισσότερων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στα ηλεκτρικά δίκτυα, όσο και από την χρήση της ηλεκτρικής ισχύος με αποδοτικότερο τρόπο. Χαρακτηριστικά, σε παγκόσμιο επίπεδο, η κατανάλωση των ηλεκτρικών μηχανών φτάνει το 28% της συνολικής παραγόμενης ενέργειας. Ειδικότερα, στην Ευρώπη υπάρχουν 8 δισ. ηλεκτρικές μηχανές, οι οποίες καταναλώνουν το 50% της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας. Τα παραπάνω δεδομένα καθιστούν σαφές ότι οποιαδήποτε βελτίωση στην αποδοτικότητα των ηλεκτρικών μηχανών μπορεί να οδηγήσει σε τεράστια εξοικονόμηση ενέργειας. Όπως αναφέρεται και στην Επίσημη Εφημερίδα της Ευρωπαϊκής Ένωσης, οι ηλεκτρικές μηχανές εντάσσονται στο πλαίσιο οικολογικού σχεδιασμού όσον αφορά τα συνδεδεμένα με την ενέργεια προϊόντα και αναμένεται να προσφέρουν ετήσια εκοικονόμηση ενέργειας περίπου 30 TWh το 2030. Φαίνεται, λοιπόν, ότι η ηλεκτρική μηχανή είναι και θα είναι αρωγός του ανθρώπου στην προσπάθειά του για ένα μέλλον πιο φιλικό προς το περιβάλλον.

Η σύγχρονη ροπή προς τις ηλεκτρικές μηχανές δε θα μπορούσε να μην επηρεάσει την αυτοκινητοβιομηχανία. Με την πλειονότητα των αυτοκινήτων να εξοπλίζονται με κινητήρα εσωτερικής κάυσης, υπάρχουν μεγάλα περιθώρια εξηλεκτρισμού και μεταπήδησης στα ηλεκτρικά αυτοκίνητα. Το κύριο χαρακτηριστικό ενός ηλεκτρικού αυτοκινήτου είναι η ηλεκτρική μηχανή, συνεπώς η επιλογή αυτής πρέπει να γίνεται στοχευμένα. Οι Σύγχρονοι Κινητήρες Μονίμων Μαγνητών (PMSMs) είναι ιδιαίτερα διαδεδομένοι στο χώρο της ηλεκτροκίνησης. Ωστόσο, οι κινητήρες αυτοί βασίζονται σε μόνιμους μαγνήτες, δηλαδή μέταλλα εξαιρετικής σπανιότητας. Η εξόρυξη και επεξεργασία αυτών των μετάλλων χαρακτηρίζεται από μεγάλο κόστος και σημαντικό περιβαλλοντικό αντίκτυπο. Ακόμα, η ευαισθησία των μαγνητών στις υψηλές θερμοκρασίες περιορίζει τον κινητήρα όταν απαιτούνται υψηλές οδηγικές επιδόσεις. Αναπόφευκτα, δημιουργείται η ανάγκη υλοποίησης κινητήρων, που αποτελούνται από πιο συνηθισμένα μέταλλα και ανταποκρίνονται σε εφαρμογές υψηλών επιδόσεων.

Ανάμεσα σε πολλούς τύπους μηχανών, οι Μηχανές Μεταβλητής Μαγνητικής Αντίστασης

(Switched Reluctance Motors-SRMs) έχουν κεντρίσει το ενδιαφέρον των ερευνητών και της βιομηχανίας, λόγω των απλών υλικών που τις αποτελούν σε συνδυασμό με τις εξαιρετικές τους επιδόσεις. Οι SRMs έχουν πλεονεκτήματα έναντι άλλων μηχανών, καθώς έχουν απλή δομή, προσφέρουν ευελιξία στον έλεγχο τους, κατασκευάζονται με χαμηλό κόστος, έχουν υψηλή απόδοση και παρουσιάζουν ιδιαίτερη ευρωστία ακόμα και σε περιπτώσεις σφάλματος. Ο δρομέας μιας τέτοιας μηχανής δε φέρει τυλίγματα, ούτε μόνιμους μαγνήτες, καθιστώντας την κατάλληλη για εφαρμογές υψηλών ταχυτήτων. Βέβαια, δε μπορούν να αγνοηθούν κάποια βασικά μειονεκτήματα που χαρακτηρίζουν τις SRMs. Ο έλεγχος αυτών των μηχανών είναι αρκετά απαιτητικός και χρειάζονται προχωρημένες τεχνικές ελέγχου, σε αντίθεση με άλλες μηχανές συνεχούς και εναλλασσόμενης τάσης. Τέλος, οι SRMs παρουσιάζουν ακτινική δόνηση (Radial Vibration) και σημαντική διακύμανση ροπής (Torque Ripple). Τα δύο παραπάνω φαινόμενα οδηγούν σε θόρυβο (Acoustic Noise) κατά τη λειτουργία της μηχανής, το οποίο δεν είναι επιθυμητό σε εφαρμογές ηλεκτροκίνητων αυτοκινήτων.

1.1 Αντικείμενο της διπλωματικής

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη της συμπεριφοράς των μηχανών μεταβλητής μαγνητικής αντίστασης σε υψηλές ταχύτητες. Παράλληλα, στόχος είναι η μελέτη των εν λόγω μηχανών από όλες τις οπτικές γωνίες, δηλαδή από τη σχεδίαση μέχρι τη μοντελοποίηση και τον έλεγχο. Ακόμα, αποτελεί σκοπό η υλοποίηση συγκεκριμένης εφαρμογής υψηλών ταχυτήτων με σκοπό την επιβεβαίωση ή μη των πλεονεκτημάτων και των μειονεκτημάτων των SRM.

Στην εργασία αυτή, αρχικά, θα γίνει σχεδίαση ενός 8/6 κινητήρα μεταβλητής μαγνητικής αντίστασης ισχύος περί των 21 kW. Στόχος αυτού του κινητήρα είναι να μπορεί να αποδίδει 20Nm στις 10.000 στροφές ανά λεπτό (ΣΑΛ).

Έπειτα, θα γίνει εκτενής μελέτη της ηλεκτρομαγνητικής συμπεριφοράς της μηχανής με τη βοήθεια της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων. Ως αποτέλεσμα, θα συλλεχθούν τα απαραίτητα στοιχεία ώστε να εξάχθούν οι μεταβλητές της μηχανής.

Τέλος, με τα δεδομένα που θα συλλεχθούν από την ηλεκτρομαγνητική ανάλυση, θα είναι εφικτή η μοντελοποίηση της μηχανής στο περιβάλλον του SIMULINK. Με τη βοήθεια του μοντέλου θα μπορεί να ελεγχθεί η συμπεριφορά της μηχανής σε διάφορες ταχύτητες. Σε εκείνο το σημείο θα παρατηρηθεί η έντονη διαφορά στην απόδοση των εν λόγω μηχανών ανάμεσα σε χαμηλές και υψηλές ταχύτητες.

1.2 Οργάνωση του τόμου

Το υπόλοιπο της παρούσας διπλωματικής εργασίας δομείται στα εξής Κεφάλαια:

Κεφάλαιο 2: Στο κεφάλαιο αυτό θα γίνει μία εισαγωγή στις Μηχανές Μεταβλητής Μαγνητικής Αντίστασης. Θα αναλυθεί η αρχή λειτουργία τους και ο τρόπος με τον οποίο παράγουν ροπή. Επίσης, θα οριστεί το ισοδύναμο κύκλωμά τους και θα αναφερθούν κάποια από τα κυριότερα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των SRM.

Κεφάλαιο 3: Στο κεφάλαιο αυτό θα ακολουθηθεί μία πλήρης διαδικασία σχεδίασης SRM, όπως ορίζεται από την βιβλιογραφία. Πιο συγκεκριμένα, οι τεχνικές αυτές θα εφαρμοστούν ώστε να σχεδιαστεί ένας 4-φασικός 8/6 κινητήρας μεταβλητής μαγνητικής αντίστασης.

Κεφάλαιο 4: Στο κεφάλαιο αυτό θα γίνει ηλεκτρομαγνητική ανάλυση της 8/6 SRM, που θα σχεδιαστεί στο Κεφ. 3, με τη βοήθεια της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων. Ακόμα, θα γίνει επεξεργασία των αποτελεσμάτων, τα οποία θα αποθηκευτούν σε τρισδιάστατους και τετραδιάστατους πίνακες.

Κεφάλαιο 5: Στο κεφάλαιο αυτό θα αναλυθούν τα συστήματα ηλεκτρικής κίνησης με SRM. Παράλληλα, επιλέγονται τα αντίστοιχα στοιχεία του συστήματος ηλεκτρικής κίνησης, που θα υλοποιηθεί στην παρούσα διπλωματική εργασία.

Κεφάλαιο 6: Στο κεφάλαιο αυτό θα γίνει έλεγχος ροπής στο σύστημα ηλεκτρικής κίνησης που θα υλοποιηθεί στο Κεφ. 5. Επιπρόσθετα, θα εξηγηθεί η δομή του ελέγχου που επιλέχθηκε. Τέλος, ο έλεγχος ροπής θα δοκιμαστεί σε διάφορες ταχύτητες περιστροφής.

Κεφάλαιο 7: Στο κεφάλαιο αυτό θα συγκεντρωθούν τα συμπεράσματα που προκύπτουν από την παρούσα διπλωματική εργασία. Τελειώνοντας, προτείνονται μελλοντικές επεκτάσεις της παρούσας μελέτης προς τις οποίες δύναται να κατευθυνθεί ένας ενδιαφερόμενος ερευνητής.

Κεφάλαιο 2

Μηχανές Μεταβλητής Μαγνητικής Αντίστασης

2.1 Εισαγωγή

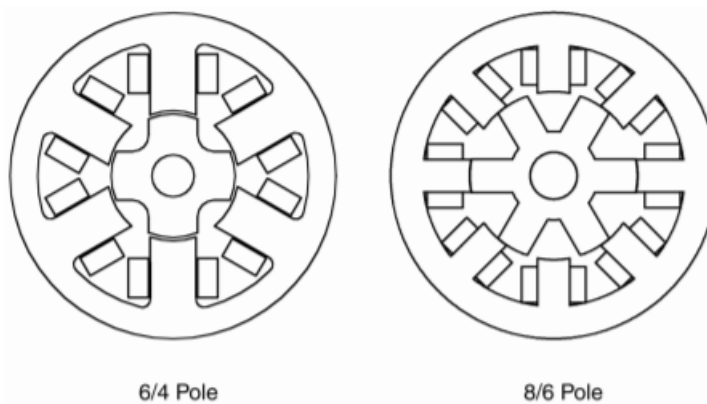
Η ιστορία των Ηλεκτρικών Μηχανών Μεταβλητής Μαγνητικής Αντίστασης (Switched Reluctance Machines - εφεξής SRMs) ξεκινάει περίπου από τις αρχές του 19ου αιώνα. Οι πρώτες απόπειρες πειραματισμού με τις συγκεκριμένες μηχανές αντιμετώπισαν σοβαρούς περιορισμούς, λόγω του φτωχού ηλεκτρομαγνητικού και μηχανικού σχεδιασμού, αλλά και των ανεπαρκών διακοπτικών στοιχείων. Έτσι, έχασαν έδαφος έναντι άλλων πιο διαδεδομένων ηλεκτρικών μηχανών. Με την έλευση των ηλεκτρονικών ισχύος στα μέσα της δεκαετίας του 1960, οι SRMs άρχισαν πάλι να κεντρίζουν το ενδιαφέρον των επιστημόνων. Ο λόγος ήταν ότι με τη βοήθεια των ηλεκτρονικών ισχύος εισήγαγαν ένα νέο ισοζύγιο, στο οποίο ο απαιτούμενος χαλκός και σίδηρος ελαττώνονται σε ποσότητα, πολυπλοκότητα κατασκευής και κόστος με αντιστάθμισμα την επένδυση σε πιο εξελιγμένες και πολύπλοκες τεχνικές ελέγχου. Η ρηξικέλευθη αυτή πρόταση των SRMs είχε κάποιες παράπλευρες απώλειες, όπως σημαντική διακύμανση ροπής και θόρυβο κατά τη περιστροφή, οι οποίες έβλαψαν την εμπορική τους δύναμη. Ωστόσο, η επένδυση που χρειάζεται στον τομέα του ελέγχου σε συνάρτηση με την απλότητα και το κόστος παραγωγής των εν λόγω μηχανών δεν συγκρίνεται με καμία άλλη συμβατική ηλεκτρική μηχανή. Γι' αυτό το λόγο, οι SRMs δεν θα πάψουν ποτέ να είναι ελκυστικές για ορισμένες εφαρμογές και συστήματα ηλεκτρικής κίνησης.

Σε αυτό το κεφάλαιο θα περιγραφεί η δομή των SRMs και ο τρόπος λειτουργίας τους. Έπειτα, θα αναλυθούν οι σχέσεις που εκφράζουν τη λειτουργία τους, ώστε να προκύψει και το ισοδύναμο κύκλωμα των εν λόγω μηχανών. Τέλος, θα αναλυθούν περαιτέρω τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα τους.

2.2 Περιγραφή και λειτουργία των SRMs

2.2.1 Ορισμός

Εξ ορισμού τόσο ο στάτης, όσο και ο δρομέας των SRMs διαθέτουν έκτυπους πόλους, γι' αυτό οι εν λόγω μηχανές κατατάσσονται στην κατηγορία των μηχανών διπλής εκτυπότητας. Οι SRMs διαθέτουν τύλιγμα σταθερής τάσης στον στάτη, ενώ στον δρομέα δε φέρουν τύλιγμα, ούτε μαγνήτες. Η ροπή δημιουργείται από την τάση του κινούμενου μέρους να στρέφεται προς την θέση αυτή, όπου η αυτεπαγωγή του διεγερόμενου τυλίγματος μεγιστοποιείται. Για να οριστεί πλήρως η δομή μιας SRM, πρέπει να αναφερθούν οι πόλοι στάτη και δρομέα χωρισμένοι με μία κάθετο (π.χ. 6/4, δηλαδή 6 πόλοι στάτη και 4 πόλοι δρομέα). Στο Σχ.2.1 φαίνονται δύο τυπικές μηχανές μεταβλητής μαγνητικής αντίστασης.

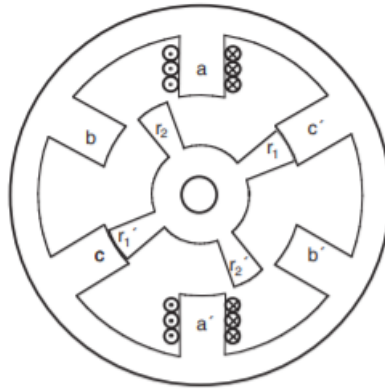


Σχήμα 2.1: Τυπική μορφή των SRMs (Πηγή: [1])

Ο δρομέας τείνει να ευθυγραμμίζεται με δύο αντιδιαμετρικούς πόλους, όταν αυτοί διεγείρονται. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι το κινούμενο μέρος ενός μαγνητικού κυκλώματος, σε αυτή τη περίπτωση ο δρομέας, 'προτιμά' να κινηθεί προς τέτοια θέση, ώστε η μαγνητική ροή να συναντά την μικρότερη δυνατή μαγνητική αντίσταση. Όταν ένα ζεύγος πόλων του δρομέα ευθυγραμμιστεί με ένα ζεύγος πόλων του στάτη, τότε ένα άλλο ζεύγος πόλων του δρομέα θα είναι τελείως απομακρυσμένο σε σχέση με ένα ζεύγος του στάτη. Τότε, το συγκεκριμένο ζεύγος πόλων του στάτη διεγείρεται, ώστε να προκαλέσει την περιστροφή του δρομέα προς ευθυγράμμιση με αυτόν. Με σωστή διαδοχή των φάσεων, μπορεί να επιτευχθεί η επιθυμητή συμπεριφορά της μηχανής. Η παραγωγή ροπής και ισχύος εμπλέκει έλεγχο των ρευμάτων που διαρρέουν τα τυλίγματα του στάτη, κάτι που θα αναλυθεί εκτενώς σε επόμενο κεφάλαιο.

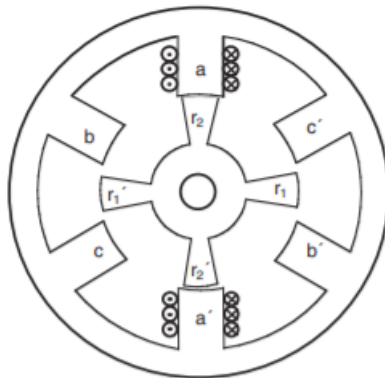
Παράδειγμα: 6/4 Pole SRM

Παρακάτω θα αναλυθεί ένα απλό παράδειγμα για να αναδειχθεί με παραστατικό τρόπο η λειτουργία των SRMs. Στο Σχ.2.2 φαίνεται μία 6/4 μηχανή μεταβλητής μαγνητικής αντίστασης. Στην απεικονιζόμενη θέση, ο δρομέας είναι ευθυγραμμισμένος με την φάση c, ενώ σε σχέση με τις φάσεις a και b είναι πλήρως απομακρυσμένος.



Σχήμα 2.2: Δρομέας ευθυγραμμισμένος με φάση c (Πηγή: [1])

Η φάση a διεγείρεται. Ως αποτέλεσμα, δημιουργείται μαγνητική ροή που διαπερνά του πόλους στάτη a, a' και του πόλους δρομέα r_2, r_2' . Ο δρομέας ξεκινά να στρέφεται με ωρολογιακή φορά μέχρι να ευθυγραμμιστεί με την φάση a, όπως φαίνεται και στο Σχ.2.3. Έπειτα, διεγείρεται η φάση b μέχρι να ευθυγραμμιστούν με αυτήν οι πόλοι δρομέα r_1, r_1' . Τέλος, διεγείρεται η φάση c μέχρι να ευθυγραμμιστούν με αυτήν οι πόλοι δρομέα r_2, r_2' και ούτω καθεξής. Δηλαδή, χρειάστηκε η διαδοχική διέγερση και των τριών φάσεων, ώστε ο δρομέας να περιστραφεί κατά 90° . Αξίζει να σημειωθεί ότι αν η διαδοχή των φάσεων ήταν bac, θα προέκυπτε αντισωρολογιακή περιστροφή.

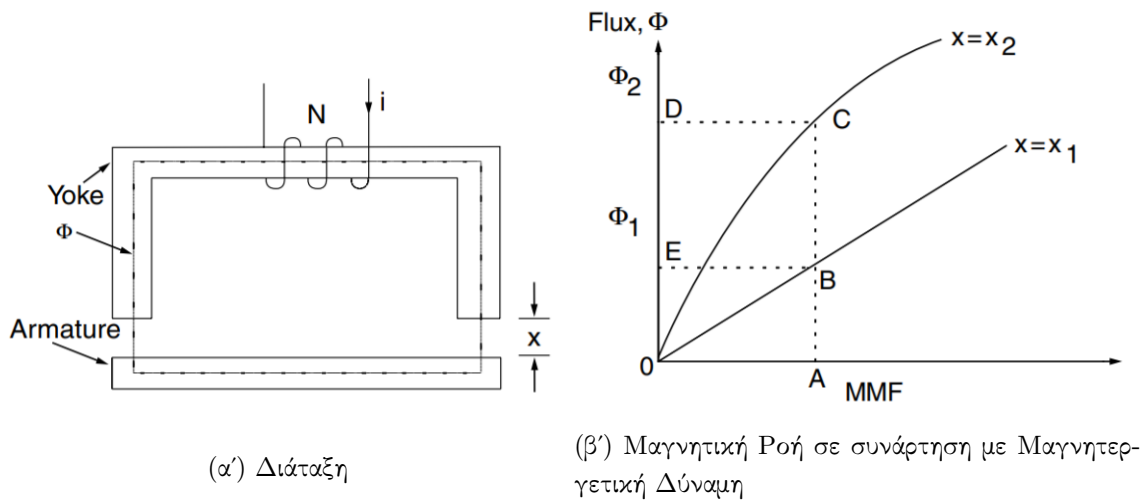


Σχήμα 2.3: Δρομέας ευθυγραμμισμένος με φάση a (Πηγή: [1])

2.2.2 Αρχή λειτουργίας των SRMs

Η απλή δομή των μηχανών μεταβλητής μαγνητικής αντίστασης αντικατοπτρίζει τις βασικές αρχές της ηλεκτρομηχανικής μετατροπής. Γι' αυτό η παραγωγή ροπής σε μία SRM θα εξηγηθεί με ένα απλό παράδειγμα ενός σωληνοειδούς πηνίου, που είναι τυλιγμένο γύρω από σιδηρομαγνητικό πυρήνα και επιδρά σε έναν οπλισμό. Στο Σχ.2.4α' φαίνεται το πηνίο που διαρρέεται από Ηλεκτρικό Ρεύμα i και διαθέτει N Ελίγματα. Ακόμα, φαίνεται το Διάκενο μήκους $en\lambda$ και η διαδρομή που διανύει η Μαγνητική Ροή Φ (Flux) ανάμεσα σε Διάκενο,

Πυρήνα (Yoke) και Οπλισμό (Armature).



Σχήμα 2.4: Δεδομένα παραδείγματος (Πηγή: [1])

Η Μαγνητεργετική Δύναμη (Magnetomotive Force - MMF) ορίζεται ως εξής:

$$F = NI \quad (2.1)$$

Επίσης, όταν ο πυρήνας δεν είναι κορεσμένος και ο οπλισμός σταθερός, η αύξηση του ρεύματος πηνίου προκαλεί αύξηση στη μαγνητική ροή που δημιουργείται. Τα παραπάνω δύο δεδομένα εξηγούν τη συμπεριφορά των δύο γραμμών που απεικονίζονται στο Σχ.2.4β', όπου $x_1 > x_2$. Η γραμμική συμπεριφορά που παρατηρείται για $x = x_1$ οφείλεται στη σημαντικά μεγαλύτερη μαγνητική αντίσταση του διακένου, η οποία κυριαρχεί έναντι αυτής του υπολοίπου κυκλώματος.

Στην περίπτωση που ο οπλισμός αφήνεται ελεύθερος να κινηθεί, η αύξηση του ρεύματος διέγερσης οδηγεί στην μετακίνησή του προς τον πυρήνα. Η ενέργεια που εισάγεται στο κύκλωμα γράφεται ως εξής:

$$W_e = \int e i dt = \int i dt N \frac{d\Phi}{dt} = \int N i d\Phi = \int F d\Phi \quad (2.2)$$

όπου e είναι η επαγόμενη Ηλεκτρεργετική Δύναμη (Induced Electromotive Force - emf). Η ηλεκτρική ενέργεια που εισάγεται στο κύκλωμα W_e ισούται με το άθροισμα της ενέργειας που αποθηκεύεται στο τύλιγμα W_f και της ενέργειας που μετατρέπεται σε μηχανική W_m , δηλαδή

$$W_e = W_f + W_m \quad (2.3)$$

Μελετώντας το κύκλωμα με σταθερή διέγερση, έστω F_1 , που απεικονίζεται με τη βοήθεια του σημείου A στο Σχ.2.4β', έχουμε:

$$\delta W_e = \int_{\phi_1}^{\phi_2} F_1 d\Phi = F_1(\phi_2 - \phi_1) = E(BCDEB) \quad (2.4)$$

όπου $E(BCDEB)$ είναι το εμβαδόν του χωρίου $BCDEB$. Επίσης, ισχύει:

$$\delta W_f = \delta W_f|_{x=x_2} - \delta W_f|_{x=x_1} = E(OCDO) - E(OBEO) \quad (2.5)$$

$$W_m = W_e - W_f = E(OBCO) \quad (2.6)$$

Έχοντας αναλύσει πλήρως την ηλεκτρομηχανική μετατροπή της παραπάνω εφαρμογής, μπορεί να γίνει εύκολα η μεταπήδηση στη περίπτωση μιας περιστρεφόμενης μηχανής. Η μεταβολή της μηχανικής ενέργειας σε σχέση με την ηλεκτρομαγνητική ροπή (T_e) και την μεταβολή της γωνίας του δρομέα γράφεται:

$$\delta W_m = T_e \delta \theta \Rightarrow T_e = \frac{\delta W_m}{\delta \theta} \quad (2.7)$$

Ένα ακόμα μέγεθος που συνεισφέρει στη μελέτη των SRMs είναι η συνενέργεια W'_f . Η συνενέργεια δεν έχει φυσική σημασία και είναι το συμπλήρωμα της ενέργειας που αποθηκεύεται στο πεδίο και προκύπτει ως:

$$W'_f = \int \Phi dF = \int \Phi d(Ni) = \int N \Phi di = \int \lambda(\theta, i) di = \int L(\theta, i) i di \quad (2.8)$$

όπου L είναι ο συντελεστής αυτεπαγωγής του πηνίου και λ η πεπλεγμένη μαγνητική ροή.

$$\delta W_m = E(OBCO) = E(OACO) - E(OABO) = \delta W'_f|_{x=x_2} - \delta W'_f|_{x=x_1} = \delta W'_m \quad (2.9)$$

Με τη βοήθεια της 2.8 και 2.9 μπορούμε να επεκτείνουμε την 2.7 ως εξής:

$$T_e = \frac{\delta W_m}{\delta \theta} = \frac{\delta W'_f(\theta, i)}{\delta \theta} \Big|_{i=constant} \quad (2.10)$$

Αφού μελετάται η περίπτωση της σταθερής μαγνητοεργικής δύναμης, δηλαδή και του σταθερού ρεύματος, καταλήγουμε:

$$T_e = \frac{dL(\theta, i)}{d\theta} \cdot \frac{i^2}{2} \quad (2.11)$$

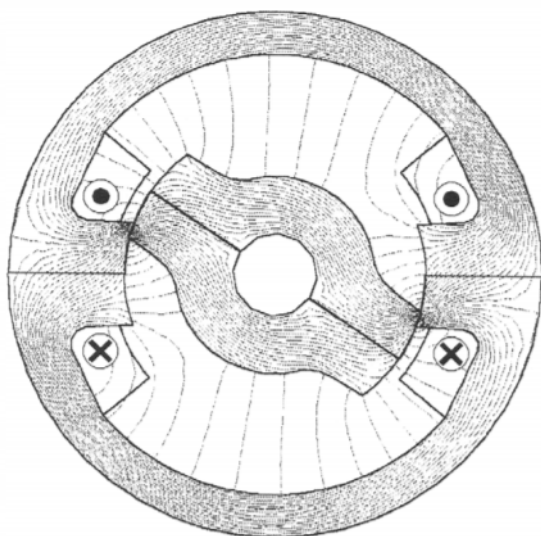
όπου,

$$\frac{dL(\theta, i)}{d\theta} = \frac{L(\theta_2, i) - L(\theta_1, i)}{\theta_2 - \theta_1} \Big|_{i=constant} \quad (2.12)$$

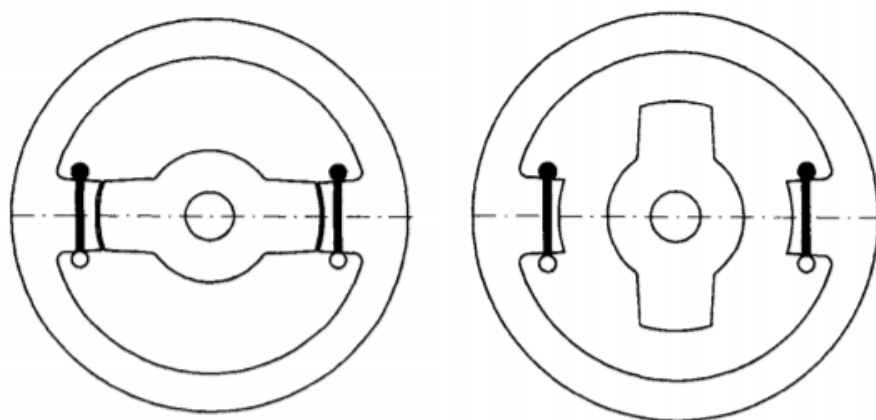
Αξίζει να τονιστεί ότι ο ρυθμός μεταβολής του συντελεστή αυτεπαγωγής του πηνίου ως προς τη γωνία του δρομέα δεν είναι σταθερός κατά τη περιστροφή μιας μηχανής μεταβλητής μαγνητικής αντίστασης. Αυτός ακριβώς είναι ο λόγος για τον οποίο οι εν λόγω μηχανές δεν μπορούν να αναπαρασταθούν με ένα ισοδύναμο κύκλωμα μόνιμης κατάστασης, όπως γίνεται με άλλες μηχανές εναλλασσόμενου και σταθερού ρεύματος.

2.2.3 Η εξάρτηση του συντελεστή αυτεπαγωγής L από την θέση του δρομέα

Έστω η 2/2 μηχανή μεταβλητής μαγνητικής αντίστασης του Σχ.2.5. Υποτίθεται ότι η θετική φορά περιστροφής είναι η αντιωρολογιακή και η μηχανή διεγείρεται από σταθερό ρεύμα. Αρχικά, παρατηρείται ότι κατά τη διέγερση της φάσης δημιουργείται πύκνωμα της μαγνητικής ροής στις δύο γωνίες των πόλων στάτη και δρομέα. Αυτό το πύκνωμα μεταφράζεται σε μεγάλη μαγνητική αντίσταση, όπως έχει αναφερθεί παραπάνω, η θετική ροπή δημιουργείται από την τάση του δρομέα να μετακινηθεί σε τέτοια θέση, όπου η μαγνητική αντίσταση που συναντάει η ροή να ελαχιστοποιείται. Η ελαχιστοποίηση της μαγνητικής αντίστασης είναι ισοδύναμη με την μεγιστοποίηση της επαγωγής.



Σχήμα 2.5: 2/2 Pole SRM (Πηγή: [2])

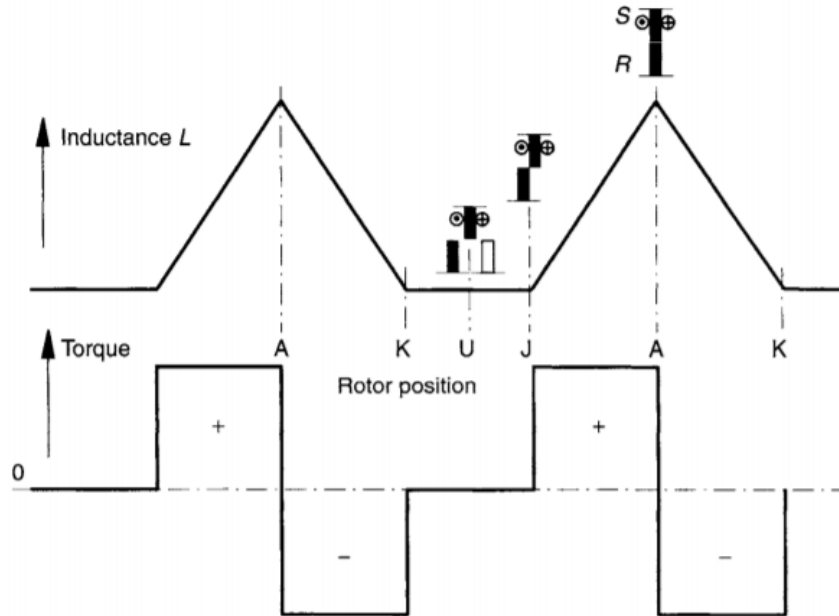


(α') Ευθυγραμμισμένος

(β') Μη ευθυγραμμισμένος

Σχήμα 2.6: Αχραίες θέσεις δρομέα (Πηγή: [2])

Στο Σχ.2.6α' απεικονίζεται ο δρομέας ευθυγραμμισμένος με τον στάτη, ενώ στο Σχ.2.6β' τελείως απομακρυσμένος σε σχέση με αυτόν. Στο Σχ.2.7 φαίνονται όλες οι ενδιάμεσες καταστάσεις της επαγωγής (Inductance L) και της ροπής (Torque).



Σχήμα 2.7: Εξάρτηση επαγωγής και ροπής από τη θέση του δρομέα (Πηγή: [2])

Παρακάτω θα αναλυθούν τα διαγράμματα που απεικονίζει το Σχ.2.7:

- Ξεκινώντας από την θέση U (Unaligned) και μέχρι τη θέση J, η οποία συμβολίζει την αρχή της αλληλοεπικάλυψης των πόλων στάτη και δρομέα, παρατηρείται ότι η ικανότητα ροπής είναι μηδενική. Αυτό συμβαίνει διότι η τιμή της επαγωγής δεν αλλάζει και συνεπώς ο όρος $dL/d\theta$ της Εξ.2.11 ισούται με μηδέν. Στη περιοχή αυτή, η μαγνητική ροή διέρχεται κυρίως μέσω του αέρα και συναντά σημαντική μαγνητική αντίσταση. Έτσι, η επαγωγή είναι ελάχιστη και θεωρητικά σταθερή.
- Από την θέση J (Σχ.2.5) μέχρι και την A (Aligned) ο όρος $dL/d\theta$ αποκτά θετική τιμή, δηλαδή η ικανότητα ροπής είναι θετική. Λόγω της συνεχώς αυξανόμενης επικάλυψης των πόλων στάτη και δρομέα, η μαγνητική ροή πλέον διέρχεται κυρίως από το σιδηρομαγνητικό υλικό και η αντίσταση που συναντά μειώνεται συνεχώς. Συνεπακόλουθα, η τιμή της επαγωγής αυξάνεται, μέχρι να επιτευχθεί πλήρης επικάλυψη.
- Από την θέση A μέχρι και την K, η οποία συμβολίζει το πέρας της αλληλοεπικάλυψης των πόλων στάτη και δρομέα, ο όρος $dL/d\theta$ αποκτά αρνητική τιμή, δηλαδή η ικανότητα ροπής είναι αρνητική. Στη περιοχή αυτή, οι πόλοι αρχίζουν να απομακρύνονται. Ακριβώς αντίστροφα από την περιοχή J έως A, η αντίσταση που η μαγνητική ροή αυξάνεται συνεχώς και η τιμή της επαγωγής μειώνεται, μέχρι να επιτευχθεί πλήρης απομάκρυνση.
- Από την θέση K μέχρι και την U ισχύουν τα ίδια, όπως στην περιοχή U μέχρι την J

Ευθυγραμμισμένος	Μη ευθυγραμμισμένος
$\theta=0, 180^\circ$	$\theta=\pm 90^\circ$
Μέγιστη επαγωγή	Ελάχιστη επαγωγή
Πιθανότητα κορεσμού	Δεν υπάρχει πιθανότητα κορεσμού
Μηδενική ροπή	Μηδενική ροπή
Ευσταθής κατάσταση	Ασταθής Κατάστασης

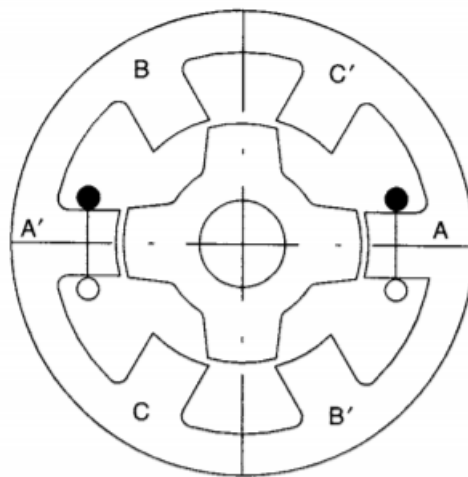
Πίνακας 2.1: Ιδιότητες των ακραίων θέσεων του δρομέα

2.2.4 Παραγωγή συνεχούς ροπής

Η ροπή που παράγεται από ένα παλμό ρεύματος ονομάζεται πλήγμα. Για να παραχθεί, λοιπόν, ένα διάγραμμα συνεχούς ροπής, πρέπει να κενά του Σχ.2.7 να γεμίσουν με πλήγματα. Με άλλα λόγια, πρέπει να προστεθούν κι άλλες φάσεις στο κύκλωμα. Ο αριθμός των πληγμάτων S ως συνάρτηση του αριθμού των φάσεων m και των πόλων του δρομέα N_r εκφράζεται ως εξής:

$$S = m \cdot N_r \quad (2.13)$$

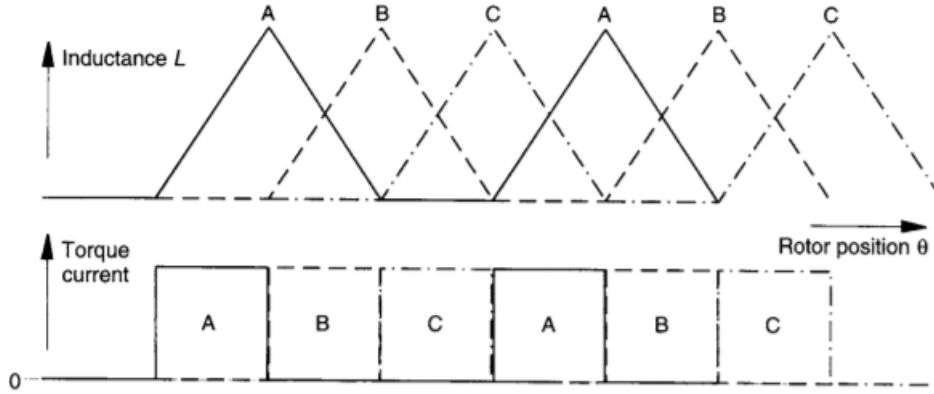
Στο Σχ.2.8 φαίνεται μία τριφασική 6/4 μηχανή μεταβλητής μαγνητικής αντίστασης. Σε αυτή τη περίπτωση, $N_r = 4$, $m=3$ και $S=12$. Με 12 συνολικά πλήγματα, η γωνία κάθε πλήγματος είναι $\epsilon=360/12=30^\circ$.



Σχήμα 2.8: Τριφασική 6/4 SRM (Πηγή: [2])

Στο Σχ.2.9 φαίνεται η ιδανικά σταθερή ροπή που επιτυγχάνεται σε όλο το εύρος μιας περιτροφής. Στη πράξη, η ροπή που επιτυγχάνεται δεν είναι σταθερή, γι' αυτό χρειάζεται εκτενής μελέτη της ηλεκτρομαγνητικής συμπεριφοράς της μηχανής κατά τη διάρκεια του πλήγματος.

Η θεμελιώδης συνιστώσα του ρεύματος προφανώς ισούται με τη συχνότητα, με την οποία



Σχήμα 2.9: Κυματομορφές τριφασικής 6/4 SRM (Πηγή: [2])

περνάνε οι πόλοι του δρομέα από έναν πόλο του στάτη. Δηλαδή,

$$f_1 = \frac{rpm}{60} \cdot N_r \quad (2.14)$$

Ενώ ο αριθμός των συνολικών πληγμάτων ανά δευτερόλεπτο δίνεται από τη σχέση:

$$f = m f_1 \quad (2.15)$$

Η συχνότητα αυτή, αλλά και όλες οι αρμονικές της εμφανίζονται στις κυματομορφές της μαγνητικής ροής πολλών σημείων του μαγνητικού κυκλώματος.

2.2.5 Ισοδύναμο Κύκλωμα

Στην παρούσα εργασία επιλέχθηκε να αγνοηθεί η αμοιβαία επαγωγή μεταξύ των φάσεων. Συνεπώς, σε αυτά τα πλαίσια θα αναλυθεί και το ισοδύναμο κύκλωμα μιας μηχανής μεταβλητής μαγνητικής αντίστασης. Η εφαρμοζόμενη τάση πρέπει να ισούται με το άθροισμα μιας πτώσης τάσης από ωμικό στοιχείο και του ρυθμού μεταβολής της πεπλεγμένης ροής στο χρόνο. Με μαθηματική έκφραση:

$$V = R_s i + \frac{d\lambda(\theta, i)}{dt} \quad (2.16)$$

όπου R_s η ωμική αντίσταση ανά φάση και λ η πεπλεγμένη ροή ανά φάση:

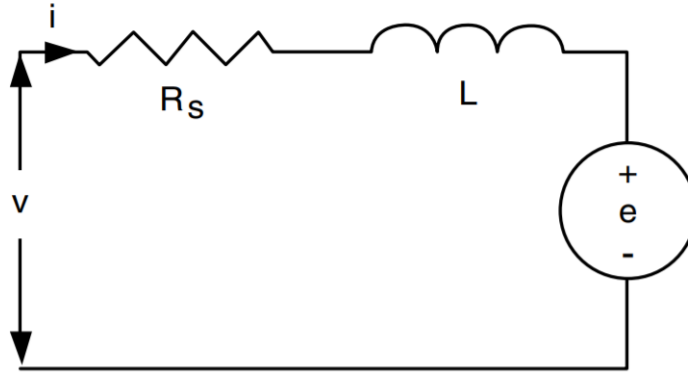
$$\lambda = L(\theta, i) i \quad (2.17)$$

όπου L η επαγωγή ως συνάρτηση της θέσης δρομέα και του ρεύματος διέγερσης.

$$V = R_s i + \frac{d[L(\theta, i) i]}{dt} = R_s i + L(\theta, i) \frac{di}{dt} + i \frac{d\theta}{dt} \cdot \frac{dL(\theta, i)}{d\theta} \Rightarrow$$

$$\boxed{V = R_s i + L(\theta, i) \frac{di}{dt} + i \omega_m \frac{dL(\theta, i)}{d\theta}} \quad (2.18)$$

Στην εξίσωση αυτή, ο πρώτος όρος αντιπροσωπεύει την ωμική πτώση τάσης, ο δεύτερος την πτώση τάσης λόγω αυτεπαγωγής του τυλίγματος και ο τρίτος την επαγόμενη ηλεκτρερρεγτική δύναμη (Induced EMF). Έτσι, προκύπτει το παρακάτω ισοδύναμο κύκλωμα, ωστόσο με μεταβλητά L και e , αφού είναι και τα δύο εξαρτόμενα από το ρεύμα διέγερσης και την θέση του δρομέα.



Σχήμα 2.10: Μονοφασικό ισοδύναμο κύκλωμα των SRM

Η ισχύς εισόδου ισούται με:

$$p_i = vi = R_s i^2 + L(\theta, i) i \frac{di}{dt} + i^2 \frac{dL(\theta, i)}{dt} \quad (2.19)$$

η οποία με την βοήθεια της σχέσης:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2} L(\theta, i) i^2 \right) = L(\theta, i) i \frac{di}{dt} + \frac{1}{2} i^2 \frac{dL(\theta, i)}{dt} \quad (2.20)$$

μετατρέπεται στην εξής γνωστή μορφή της ηλεκτρομηχανικής θεωρίας:

$$p_i = vi = R_s i^2 + \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2} L(\theta, i) i^2 \right) + \frac{1}{2} i^2 \frac{dL(\theta, i)}{dt} \quad (2.21)$$

Η μορφή αυτή χωρίζει την ισχύ εισόδου σε ωμικές απώλειες με τον όρο $R_s i^2$, σε ρυθμό μεταβολής της ενέργειας του πεδίου με τον όρο $\frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2} L(\theta, i) i^2 \right)$ και σε ισχύ διακένου p_a με τον όρο $\frac{1}{2} i^2 \frac{dL(\theta, i)}{dt}$.

$$p_a = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL(\theta, i)}{dt} = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL(\theta, i)}{d\theta} \omega_m \quad (2.22)$$

$$p_a = T_e \omega_m \quad (2.23)$$

Συνεπώς προκύπτει και η εξίσωση ροπής:

$$T_e = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL(\theta, i)}{d\theta} \quad (2.24)$$

Με αυτό το τρόπο, ολοκληρώνεται η ανάπτυξη του ισοδύναμου κυκλώματος, των εξισώσεων ηλεκτρομαγνητικής ροπής, ισχύος διακένου και ισχύος εισόδου μιας SRM τόσο για δυναμική συμπεριφορά όσο και για λειτουργία μόνιμης κατάστασης.

2.3 Πλεονεκτήματα και περιορισμοί

Στις περισσότερες περιπτώσεις, οι SRMs έχουν τυλίγματα στον στάτη και ο δρομέας δε φέρει τυλίγματα ούτε μαγνήτες, γεγονός το οποίο επιτρέπει την λειτουργία σε υψηλές θερμοκρασίες. Η ιδιότητα αυτή οδηγεί επίσης σε χαμηλότερα κόστη παραγωγής, πιο απλή και εύρωστη δομή. Επιπρόσθετα, αν υπάρξει σφάλμα σε κάποια από τα τυλίγματα η λειτουργία δε σταματά και μπορεί να συνεχιστεί με μικρότερο φορτίο. Αυτό το πλεονέκτημα είναι κομβικό, ειδικά για τις εφαρμογές της ηλεκτροκίνησης, όπου ο κινητήρας πρέπει να έχει μεγάλη αντοχή στο σφάλμα και το αυτοκίνητο να μην ακινητοποιείται σε περίπτωση προβλήματος. Ωστόσο, κάποια μη γραμμικά χαρακτηριστικά των SRMs, που οφείλονται στον μαγνητικό κορεσμό, καθιστούν δύσκολο τον έλεγχο της ροπής.

Τα πιο σημαντικά πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των μηχανών μεταβλητής μαγνητικής αντίστασης συνοφίζονται στον Πίνακα 2.2

Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
Χαμηλό κόστος παραγωγής	Σημαντική διακύμανση ροπής (Torque Ripple)
Ευρωστία λόγω της απλότητας δομής και υλικών κατασκευής	Θόρυβος κατά τη λειτουργία (Acoustic Noise)
Εύκολη ψύξη λόγω της απουσίας τυλιγματος στο δρομέα	Σημαντικές ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές (Electromagnetic Interference)
Η απουσία μονίμων μαγνητών μειώνει την εξάρτηση της μηχανής από σπάνια για τη Γη μέταλλα και αυξάνει την ανθεκτικότητα στην υψηλή θερμοκρασία	Σημαντική διακύμανση ρεύματος στο ζυγό συνεχούς τάσης
Ανθεκτικότητα στο σφάλμα και ανεξαρτησία φάσεων	Ο αντιστροφέας πρέπει να επιλέγεται στοχευμένα, ώστε να επιτυγχάνεται η μέγιστη απόδοση της μηχανής
Ενδείκνυται για εφαρμογές υψηλών ταχυτήτων	Απαιτεί περισσότερες συνδέσεις καλωδίων από τις συμβατικές τριφασικές μηχανές επαγωγής και τις σύγχρονες μονίμων μαγνητών
Ο αντιστροφέας λειτουργεί με ρεύμα μίας φοράς (Unidirectional Current) και έτσι αποφεύγονται διακοπτικά σφάλματα	Η ηλεκτρομαγνητική συμπεριφορά είναι κυρίως μη γραμμική

Πίνακας 2.2: Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των SRMs

Κεφάλαιο 3

Σχεδίαση 4-φασικής 8/6 SRM

3.1 Εισαγωγή

Το πρώτο βήμα της ανάλυσης μιας SRM είναι η προκαταρκτική σχεδίαση. Κατά τη προκαταρκτική σχεδίαση προσδιορίζονται προσεγγιστικά όλες οι διαστάσεις της γεωμετρίας, λεπτομέρειες του τυλίγματος, αριθμός πόλων και τόξα πόλων. Στο κεφάλαιο αυτό τίθενται οι βάσεις ενός κώδικα MATLAB, μέσω του οποίου σχεδιάζεται η γεωμετρία σε περιβάλλον FEMM-Finite Element Method Magnetics. Θα αναλυθούν συνοπτικά κάποιιοι από τους βασικότερους κανόνες, που αφορούν στην επιλογή γεωμετρικών διαστάσεων. Ακόμη, θα οριστούν οι διαστάσεις μιας 4-φασικής 8/6 SRM. Η αναπαράσταση της συγκεκριμένης μηχανής στο περιβάλλον FEMM θα χρησιμοποιηθεί στο Κεφ.4 ώστε να μελετηθεί η ηλεκτρομαγνητική της συμπεριφορά.

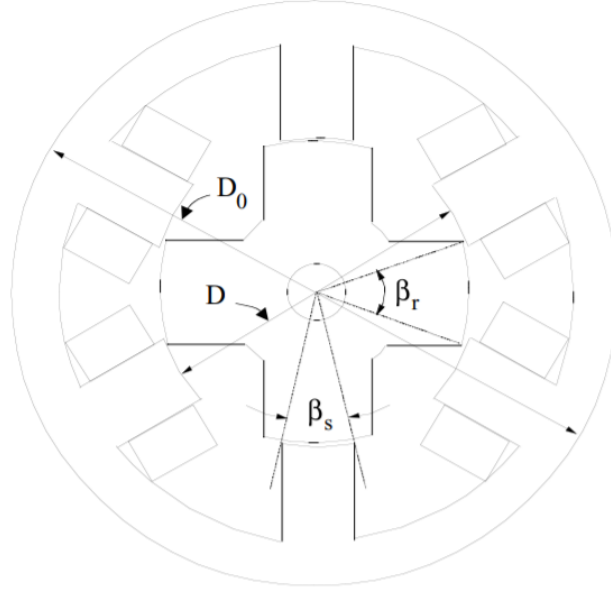
3.2 Εξαγωγή εξίσωσης εξόδου

Η εξίσωση εξόδου συνδέει διάμετρο, μήκος, ταχύτητα και ηλεκτρικά και μαγνητικά φορτία με την ισχύ εξόδου της μηχανής. Παραδοσιακά η σχεδίαση των μηχανών ξεκινάει με την εξίσωση εξόδου. Έτσι θα γίνει και στην παρούσα εργασία, παρόλο που στην περίπτωση των SRM η εξίσωση διαφέρει σημαντικά από αυτές των συμβατικών μηχανών.

Στο Σχ.3.1 φαίνεται μία τριφασική 6/4 SRM με σημειωμένες τις βασικές διαστάσεις της. Στο Σχ.3.2 φαίνεται η πεπλεγμένη ροή σε συνάρτηση με το ρεύμα διέγερσης για την συγκεκριμένη SRM. Το χωρίο που ορίζεται από τα σημεία OABCO αντιπροσωπεύει τη μηχανική ενέργεια εξόδου κατά τη διάρκεια ενός πλήγματος. Αγνοώντας την πτώση τάσης λόγω της ωμικής αντίστασης τυλιγματος, ισχύει:

$$V \cong \frac{d\lambda}{dt} = \frac{(\lambda_a - \lambda_u)}{\Delta t} = \frac{(L_a^s - L_u)i}{t} \quad (3.1)$$

όπου L_a^s είναι η ανά φάση επαγωγή σε θέση ευθυγράμμισης λαμβάνοντας υπόψη τον μαγνητικό κορεσμό, L_u η ανά φάση επαγωγή σε απομακρυσμένη θέση δρομέα, V η εφαρμοζόμενη τάση και t ο χρόνος που χρειάζεται ο δρομέας για να κινηθεί από την απομακρυσμένη θέση στην



Σχήμα 3.1: Τριφασική 6/4 SRM (Πηγή: [1])

θέση ευθυγράμμισης. Ο χρόνος αυτός συναρτήσκει του τόξου πόλου στάτη β_s (σε rad) και της γωνιακής ταχύτητας ω_m (ras/s) γράφεται:

$$t = \frac{\beta_s}{\omega_m} \quad (3.2)$$

Ορίζουμε:

$$\sigma_s = \frac{L_a^s}{L_a^u} \quad (3.3)$$

$$\sigma_u = \frac{L_a^u}{L_u} \quad (3.4)$$

όπου L_a^u είναι η ανά φάση επαγωγή σε απομακρυσμένη θέση δρομέα χωρίς να λαμβάνεται υπόψη ο μαγνητικός κορεσμός. Συνδυάζοντας τις Εξ.3.1, 3.3 και 3.4 προκύπτει:

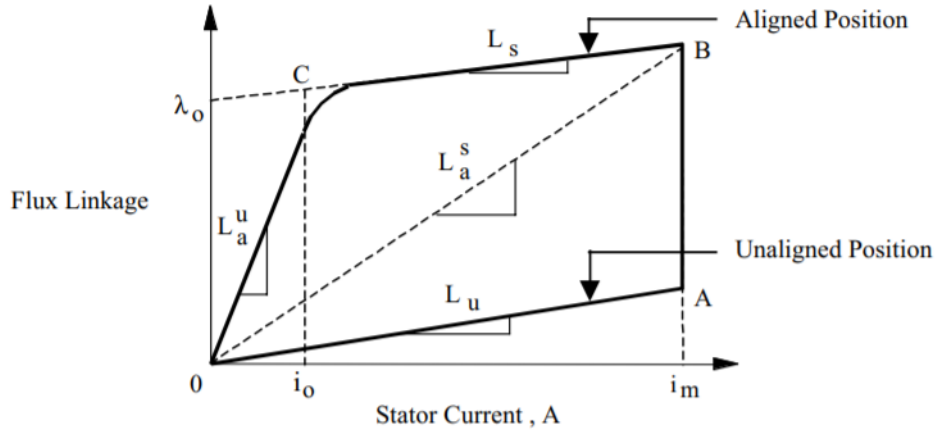
$$V = \frac{\omega_m}{\beta_s} L_a^s i \left(1 - \frac{1}{\sigma_s \sigma_u} \right) \quad (3.5)$$

Η πεπλεγμένη ροή στη θέση ευθυγράμμισης συναρτήσκει της μαγνητικής ροής, του αριθμού ελιγμάτων ανά φάση και των διαστάσεων της μηχανής γράφεται:

$$L_a^s i = \phi N_{ph} = B \times A_{sp} \times N_{ph} = B \times D \times L \times \beta_s \times N_{ph}/2 \quad (3.6)$$

όπου ϕ η μαγνητική ροή σε θέση ευθυγράμμισης, A_{sp} το εμβαδόν πόλου στάτη, D η διάμετρος της μηχανής, L το μήκος της μηχανής, B η μαγνητική επαγωγή σε θέση ευθυγράμμισης και N_{ph} ο αριθμός ελιγμάτων ανά φάση. Το ρεύμα i προκύπτει από το συντελεστή ηλεκτρικής φόρτισης:

$$A_s = \frac{2N_{ph} i m}{\pi D} \quad (3.7)$$



Σχήμα 3.2: Πεπλεγμένη ροή συναρτήσεως του ρεύματος διέγερσης (Πηγή: [1])

όπου m ο αριθμός των φάσεων που είναι ενεργές ταυτόχρονα. Η ισχύς που παράγεται είναι ίση με:

$$P_d = k_e k_d V i m \quad (3.8)$$

όπου V, i οι μέγιστες τιμές ανά φάση (Peak phase values), k_e η απόδοση efficiency και k_d ο κύκλος λειτουργίας (Duty cycle), ο οποίος ορίζεται ως εξής:

$$k_d = \frac{\theta_i q P_r}{360} \quad (3.9)$$

όπου θ_i η γωνία για την οποία η επαγωγή παρουσιάζει αύξουσα πορεία και P_r οι πόλοι του δρομέα.

Συνδυάζοντας τις Εξ.3.5 και 3.6 προκύπτει:

$$P_d = k_e k_d \left(\frac{\pi^2}{120} \right) \left(1 - \frac{1}{\sigma_s \sigma_u} \right) B A_s D^2 L N_r \quad (3.10)$$

όπου N_r η ταχύτητα του δρομέα σε rpm. Για να μοιάζει η παραπάνω εξίσωση με την συμβατική εξίσωση εξόδου των μηχανών εναλλασσόμενης τάσης, μπορεί να γραφτεί ως εξής:

$$P_d = k_e k_d k_1 k_2 B A_s D^2 L N_r \quad (3.11)$$

όπου,

$$k_1 = \frac{\pi^2}{120} \quad (3.12)$$

και

$$k_2 = \left(1 - \frac{1}{\sigma_s \sigma_u} \right) \quad (3.13)$$

Οπότε, η ροπή μπορεί να γραφεί και ως:

$$T = k_e k_d k_2 k_3 B A_s D^2 L \quad (3.14)$$

όπου,

$$k_3 = \frac{\pi}{4} \quad (3.15)$$

Παρατηρώντας τα παραπάνω αξίζει να σημειωθεί ότι:

- Η ισχύς και ροπή εξόδου είναι ανάλογες των συντελεστών ηλεκτρικής και μαγνητικής φόρτισης και των διαστάσεων της μηχανής.
- Ο συντελεστής k_2 είναι ο μόνος που εξαρτάται από τη λειτουργική κατάσταση της μηχανής. Για ένα συγκεκριμένο σημείο λειτουργίας ο k_2 είναι σταθερός. Ωστόσο, για να αναλυθεί πλήρως η συμπεριφορά της μηχανής, πρέπει να μετρηθεί η πεπλεγμένη ροή για διάφορα ρεύματα διέγερσης και για όλες τις θέσεις ανάμεσα στη θέση αυθυγράμμισης και στη θέση αντίθεσης.
- Για $k_d = 1$ θεωρητικά η ισχύς εξόδου μεγιστοποιείται. Ωστόσο, στη πράξη ο μέγιστος κύκλος λειτουργίας είναι πάντα μικρότερος της μονάδας. Ο έλεγχος ισχύος αυτών των μηχανών είναι παρόμοιος με αυτόν των μηχανών συνεχούς τάσης (DC), οι οποίες ελέγχονται από τεμαχιστή (Chopper)
- Η ταχύτητα περιστροφής ρυθμίζεται από τη συχνότητα μεταγωγής των φάσεων, όμοια με την περίπτωση των σύγχρονων μηχανών.

3.3 Επιλογή διαστάσεων

3.3.1 Διάμετρος και Μήκος

Η SRM είναι ένας τύπος μηχανής που χρησιμοποιείται για εφαρμογές μεταβλητής ταχύτητας. Γι' αυτό είναι καλό να οριστεί μία ονομαστική ταχύτητα. Σε αυτή τη ταχύτητα αναμένεται η μηχανή να αποδίδει συγκεκριμένη ροπή, δηλαδή και συγκεκριμένη ισχύ εξόδου. Θεωρούμε το μήκος της μηχανής ανάλογο της διαμέτρου του στάτη, δηλαδή

$$L = kD \quad (3.16)$$

με αυθαίρετη επιλογή του k από τον σχεδιαστή. Έτσι, προκύπτει:

$$P_d = k_e k_d k_1 k_2 B A_s D^3 N_r \quad (3.17)$$

Αν k_d , k_2 , B , A_s , N_r και k είναι γνωστά, τότε μπορεί πολύ εύκολα να προσδιοριστεί το κατάλληλο D . Ωστόσο, για να ξεκινήσει η προκαταρκτική σχεδίαση πρέπει να επιλεχθούν ρεαλιστικές τιμές των παραπάνω μεταβλητών. Γενικά, η τιμή k_2 κυμαίνεται στη περιοχή:

$$0.65 < k_2 < 0.75 \quad (3.18)$$

Ως τιμή του B στην θέση ευθυγράμμισης λαμβάνεται η μέγιστη τιμή που επιτρέπει το σιδηρομαγνητικό υλικό. Ο συντελεστής ηλεκτρικής φόρτισης σε τιμές αμπεροελιγμάτων ανά μέτρο κυμαίνεται στην περιοχή:

$$25000 < A_s < 90000 \quad (3.19)$$

Ο κύκλος λειτουργίας μπορεί να θεωρηθεί ίσος με τη μονάδα για αρχή. Χρησιμοποιώντας, λοιπόν, τις παραπάνω τιμές προκύπτει η διάμετρος στάτη D . Όσον αφορά το μήκος διακένου, επιλέγεται ανάλογα με τις κατασκευαστικές δυνατότητες. Συνήθως οι μικρές μηχανές έχουν

μήκος διακένου από 0.18 έως 0.25 mm. Ενώ για μεγαλύτερες μηχανές, το μήκος διακένου επιλέγεται από 0.3 έως 0.5 mm. Ο συντελεστής αναλογίας k μήκους L και διαμέτρου D συνήθως κυμαίνεται

$$0.25 < k < 0.7 \quad (3.20)$$

ενώ ειδικά για εφαρμογές ελέγχου θέσης (servo) κυμαίνεται

$$1 < k < 3 \quad (3.21)$$

Εφαρμογή 4-φασικής 8/6 SRM:

Ο στόχος που τέθηκε για την εφαρμογή που θα λάβει χώρα στην παρούσα εργασία ήταν η μηχανή να αποδίδει ροπή 20 Nm σε ονομαστική ταχύτητα 10.000 ΣΑΛ. Με άλλα λόγια να αποδίδει ισχύ περί των 21 kW. Επιλέγουμε Μαγνητική Λαμαρίνα τύπου M235 35A – πάχους 0.35 mm με ειδικές απώλειες 2.35 W/kg σε συχνότητα 50 Hz για μέγιστη επαγωγή $B = 1.5T$. Επιλέγουμε επίσης ηλεκτρική φόρτιση $A_s = 40000$ αε/μ και $k_2 = 0.7551$. Έτσι, προκύπτει ότι $D = 82.6mm$. Με συντελεστή αναλογίας $k = 2.5424$ προκύπτει $L = 210mm$.

3.4 Επιλογή αριθμού ελιγμάτων

Από την Εξ.3.7 για δεδομένη ηλεκτρική φόρτιση και διάμετρο στάτη, παρατηρείται ότι το γινόμενο N_{ph} και i είναι σταθερό. Ο αριθμός ελιγμάτων πρέπει να επιλεγεί με τέτοιο τρόπο ώστε:

- Σε μικρές τιμές ρεύματος να υπάρχουν πολλά ελίγματα και να επιτυγχάνεται η αναγκαία πυκνότητα ρεύματος στην αύλακα του στάτη.
- Τα επίπεδα ωμικής αντίστασης και επαγωγής του τυλίγματος να παραμένουν χαμηλά.

Με άλλα λόγια, πρέπει να βρεθεί η χρυσή τομή των δύο αυτών αντικρουόμενων απαιτήσεων ανάλογα με τις ανάγκες της εκάστοτε εφαρμογής. Επίσης, πρέπει να λαμβάνεται υπόψη και η διαθέσιμη συνεχής τάση dc, η οποία λαμβάνεται με ανόρθωση από κάποια εναλλασσόμενη ac πηγή.

Εφαρμογή 4-φασικής 8/6 SRM:

Στην εφαρμογή μας θεωρήσαμε εφικτή την αναπαραγωγή συνεχούς τάσης 200V στη πλευρά της πηγής. Αυτό σημαίνει ότι η επαγόμενη τάση δεν θα πρέπει να ξεπερνάει τα 200 V για οποιοδήποτε ρεύμα λειτουργίας. Στο Κεφ.;; υπολογίζεται ο όρος $d\lambda/d\theta$ για διάφορα ρεύματα λειτουργίας, θεωρώντας ένα έλιγμα ανά πόλο στάτη, δηλαδή δύο ελίγματα ανά φάση. Λύνοντας την παρακάτω ανίσωτητα προσδιορίζουμε τις επιτρεπτές τιμές αριθμού ελιγμάτων:

$$e < 200V \Rightarrow N \frac{d\lambda}{dt}|_{max} < 200 \Rightarrow N\omega \frac{d\lambda}{d\theta}|_{max} < 200 \Rightarrow N < 8$$

Οπότε και επιλέγουμε $N=7$ ελίγματα ανά πόλο στάτη, δηλαδή $N_{ph} = 14$.

3.5 Επιλογή τόξου πόλων

Τα δυο κυρίαρχα κριτήρια για την επιλογή του τόξου των πόλων δρομέα και στάτη είναι τα εξής:

- Να μπορεί η μηχανή να εκκινηθεί χωρίς τη συμβολή εξωτερικού παράγοντα (Self-Start).
- Να διασφαλίζονται τα επιθυμητά χαρακτηριστικά της στατικής ροπής συναρτήσει της θέσης του δρομέα.

Τα κριτήρια αυτά μεταφράζονται σε κάποιους περιορισμούς στις τιμές τόξου των πόλων, οι οποίοι θα αναλυθούν παρακάτω.

3.5.1 Ελάχιστη τιμή τόξου πόλου στάτη για την επίτευξη εκκίνησης της μηχανής

Ας οριστεί το εύρος πόλου δρομέα ως:

$$\theta_{rp} = \frac{2\pi}{Pr} \quad (3.22)$$

Η διαφορά φάσης μεταξύ διαδοχικών επαγωγών των φάσεων του στάτη δίνεται από τη σχέση:

$$\theta_{rs} = \left(\frac{2\pi}{Pr} \right) \cdot \frac{1}{q} \quad (3.23)$$

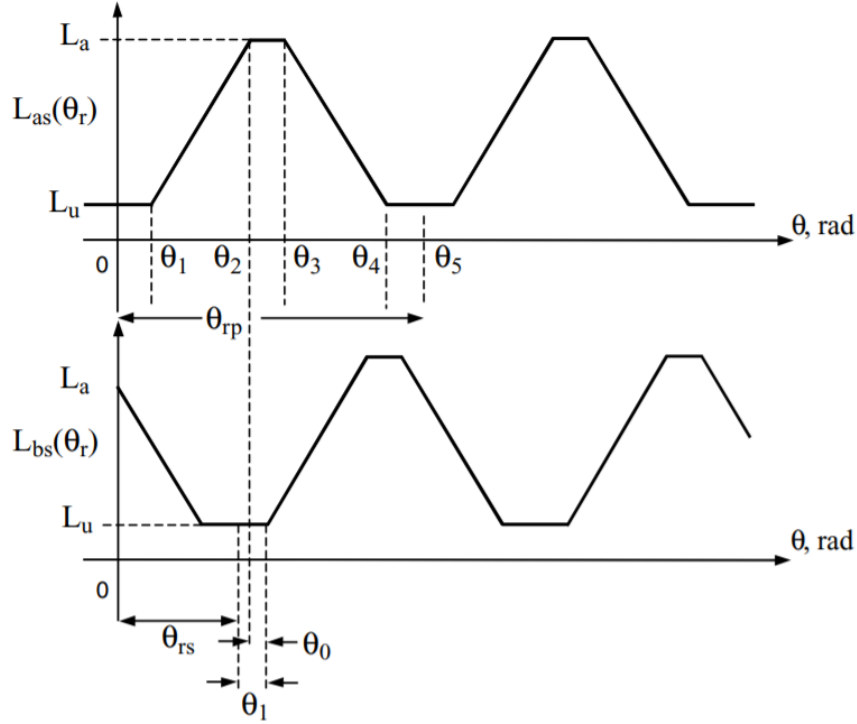
όπου,

$$q = \frac{Ps}{2} \quad (3.24)$$

σε μια απλή δομή δομή, δηλαδή ένα δόντι ανά πόλο.

Στο Σχ.3.3 φαίνονται τα διαγράμματα επαγωγών δύο διαδοχικών φάσεων. Για να υπάρχει συνεχής ροπή εκκίνησης, πρέπει συνεχώς κάποια από τις δύο φάσεις, ή και οι δύο, να έχουν μεταβαλλόμενη επαγωγή. Αυτό συμβαίνει μόνο όταν ισχύει:

$$\theta_0 \leq 0 \quad (3.25)$$



Σχήμα 3.3: Επαγωγή διαδοχικών φάσεων στάτη συναρτήσει θέσης δρομέα (Πηγή: [1])

Για την περίπτωση που το θ_0 λαμβάνει την ελάχιστη τιμή μπορεί να γραφεί το εξής:

$$\theta_0 = \theta_{rs} + \theta_1 - \theta_2 = \theta_{rs} - (\theta_2 - \theta_1) = 0 \quad (3.26)$$

από όπου καταλήγουμε:

$$\theta_2 - \theta_1 = \theta_{rs} = \frac{4\pi}{PrPs} \quad (3.27)$$

και

$$\theta_2 - \theta_1 = \beta_s \quad (3.28)$$

Συνεπώς,

$$\min[\beta_s] = \frac{4\pi}{PrPs} \quad (3.29)$$

3.5.2 Περιορισμοί στη γωνία επικάλυψης θ_0

Τα όρια της γωνίας επικάλυψης θ_0 είναι:

$$\frac{2\pi}{Pr} \left(\frac{1}{q} - \frac{1}{2} \right) \leq \theta_0 \leq 0 \quad (3.30)$$

όπου το κάτω όριο προκύπτει ως εξής:

$$\theta_0 = \theta_{rs} - (\theta_2 - \theta_1)|_{max} = \frac{2\pi}{qPr} - \frac{2\pi}{2Pr} = \frac{2\pi}{qPr} \left(1 - \frac{q}{2} \right) \quad (3.31)$$

Αξίζει να σημειωθεί ότι

$$\theta_3 = \theta_2 + (\beta_r - \beta_s) \Rightarrow$$

$$\theta_3 - \theta_2 = \beta_r - \beta_s \quad (3.32)$$

Στο Σχ.3.3 φαίνεται ότι $\theta_3 - \theta_2$ είναι μεγαλύτερο του μηδενός, άρα

$$\beta_r \geq \beta_s \quad (3.33)$$

δηλαδή το τόξο πόλου δρομέα πρέπει πάντα να είναι μεγαλύτερο ή ίσο με το τόξο πόλου του στάτη.

3.5.3 Άνω όριο τόξου πόλου στάτη

Η γωνία μεταξύ δύο διαδοχικών γωνιών των πόλων του δρομέα πρέπει να είναι μεγαλύτερη από το τόξο πόλου του στάτη, αλλιώς ακόμα και στην θέση αντίθεσης θα υπάρχει επικάλυψη μεταξύ των πόλων δρομέα και στάτη. Αυτό μαθηματικοποιείται ως εξής:

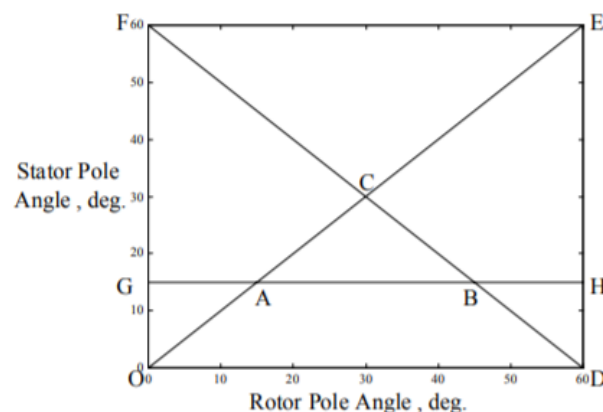
$$\frac{2\pi}{P_r} - \beta_r > \beta_s \Rightarrow \beta_r < \frac{2\pi}{P_r} - \beta_s \quad (3.34)$$

Εφαρμογή 4-φασικής 8/6 SRM:

Στην εφαρμογή μας οι τρεις παραπάνω περιορισμοί συνοψίζονται:

- $\beta_s \geq \frac{4\pi}{48} = 15^\circ$, που απεικονίζεται με την γραμμή GH στο Σχ.3.4
- $\beta_r \geq \beta_s$, που απεικονίζεται με την γραμμή OE στο Σχ.3.4
- $\beta_r < 60 - \beta_s$, που απεικονίζεται με την γραμμή FD στο Σχ.3.4

Έτσι, σχηματίζεται το τρίγωνο ABC του Σχ.3.4, του οποίου όλα τα εσωτερικά σημεία μας δίνουν θεμιτές τιμές για τα τόξα πόλων δρομέα και στάτη. Σε αρχικό στάδιο, επιλέξαμε $\beta_r = 20^\circ$, $\beta_s = 17.5^\circ$. Ωστόσο, για λόγους παραμετροποίησης κώδικα επιλέξαμε την αναλογία $\beta_r = 1.05\beta_s$, δηλαδή με γωνία $\beta_s = 17.5^\circ$ καταλήγουμε σε γωνία $\beta_r = 18.375^\circ$



Σχήμα 3.4: Επιλογή τιμών για τόξα πόλων δρομέα και στάτη μιας 8/6 SRM

3.6 Πάχος σώματος στάτη

Το πάχος σώματος στάτη, b_{sy} , επιλέγεται λαμβάνοντας υπόψη την μέγιστη πυκνότητα της μαγνητικής ροής, την ελαχιστοποίηση των κραδασμών και τη μείωση του ακουστικού θορύβου κατά τη λειτουργία. Η πυκνότητα της μαγνητικής ροής στο σώμα του στάτη είναι προσεγγιστικά η μισή από αυτήν που διέρχεται από τον πόλο. Αν ω_{sp} είναι το πάχος πόλου στάτη, δηλαδή

$$\omega_{sp} = D \sin\left(\frac{\beta_s}{2}\right) \quad (3.35)$$

τότε το πάχος σώματος στάτη θα πρέπει να είναι τουλάχιστον $0.5\omega_{sp}$. Συνυπολογίζοντας την ευρωστία της κατασκευής και την ελαχιστοποίηση των κραδασμών, οι τιμές του πρέπει να βρίσκονται ανάμεσα στο πεδίο:

$$0.5\omega_{sp} \leq b_{sy} \leq \omega_{sp} \quad (3.36)$$

Γενικά, προτείνονται τιμές μεγαλύτερες από την ελάχιστη.

Εφαρμογή 4-φασικής 8/6 SRM:

Στην εφαρμογή μας επιλέξαμε το πάχος σώματος στάτη να είναι ίσο με το πάχος του πόλου. Δηλαδή,

$$b_{sy} = \omega_{sp} = 82.6 \sin\left(\frac{17.5}{2}\right) = 12.57mm \quad (3.37)$$

3.7 Εξωτερική διάμετρος στάτη

Η εξωτερική διάμετρος στάτη συνήθως είναι ορισμένη από την αρχή της σχεδίασης, μιας και η σχεδίαση των ηλεκτρικών μηχανών ξεκινάει από έξω προς τα μέσα. Πολλές φορές το μέγεθος μιας μηχανής εξαρτάται από την κατηγορία στην οποία ανήκουν, κατά τη κατηγοριοποίηση διάφορων οργανισμών όπως ο National Electrical Manufacturers Association (NEMA). Για την εξωτερική διάμετρο στάτη ισχύει:

$$D_0 = D + 2b_{sy} + 2h_s \quad (3.38)$$

όπου h_s το ύψος του πόλου στάτη.

Εφαρμογή 4-φασικής 8/6 SRM:

Στην εφαρμογή μας επιλέξαμε εξωτερική διάμετρο στάτη ίση με:

$$D_0 = 140mm \quad (3.39)$$

Έτσι, το ύψος πόλου στάτη παίρνει τη τιμή:

$$h_s = 16.13mm \quad (3.40)$$

3.8 Πάχος σώματος δρομέα

Η επιλογή τιμής πάχους σώματος δρομέα βασίζεται στην πυκνότητα μαγνητικής ροής κατά τη λειτουργία της μηχανής. Οι κατάλληλες τιμές είναι αυτές που διασφαλίζουν υψηλό λόγο επαγωγών ευθυγράμμισης και αντίθεσης, ενώ ταυτόχρονα κοντένουν αρκετά τους πόλους δρομέα, ώστε να παράγονται οι ελάχιστες δονήσεις.

Εφαρμογή 4-φασικής 8/6 SRM:

Στην εφαρμογή μας επιλέξαμε το πάχος σώματος δρομέα να είναι ίσο με εκείνο του στάτη, δηλαδή:

$$b_{ry} = b_{sy} = 12.57mm \quad (3.41)$$

3.9 Ύψος πόλου δρομέα

Με δεδομένα το μήκος διακένου, l_g , και τη διάμετρο του άξονα, D_{sh} , το ύψος πόλου δρομέα δίνεται από τη σχέση:

$$h_r = \left[\frac{D - 2l_g - D_{sh} - 2b_{ry}}{2} \right] \quad (3.42)$$

Εφαρμογή 4-φασικής 8/6 SRM:

Στην εφαρμογή μας επιλέξαμε $l_g = 0.5mm$ και εμπειρικά $D_{sh} = 0.46(D - 2l_g) = 37.54mm$. Οπότε, το ύψος πόλου δρομέα προέκυψε:

$$h_r = 9.46mm \quad (3.43)$$

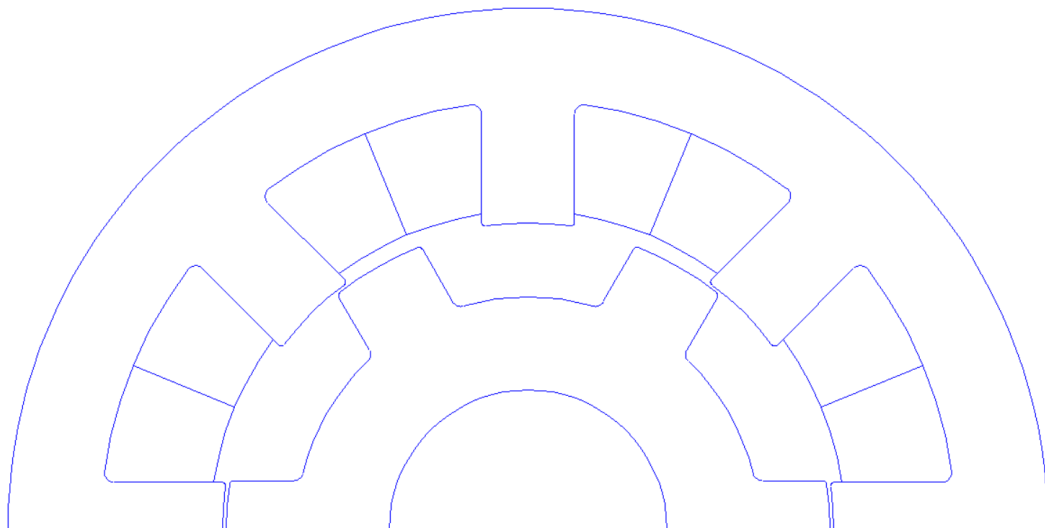
3.10 Εφαρμογή 4-φασικής 8/6 SRM

Στα πλαίσια αυτής της διπλωματικής εργασίας αναπτύχθηκε παραμετροποιημένος κώδικας σε περιβάλλον MATLAB, ο οποίος, εκτός άλλων, σχεδιάζει την γεωμετρία μιας μηχανής μεταβλητής μαγνητικής αντίστασης στο λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων FEMM. Στον κώδικα αυτόν ο χρήστης καλείται να εισάγει τις τιμές που αναγράφονται στον Πίνακα 3.2 ώστε να δημιουργηθεί το μοντέλο. Ενδεικτικά, επιλέχθηκε να μελετηθεί μία 4-φασική 8/6 SRM. Οι τιμές του Πίνακα 3.2 συμπληρώθηκαν σύμφωνα με τους κανόνες σχεδίασης που αναλύθηκαν στις προηγούμενες ενότητες του κεφαλαίου.

Όρισμα	Τιμή
Πόλοι Στάτη	8
Πόλοι Δρομέα	6
Ενεργό Μήκος	210 mm
Εξωτερική Διάμετρος Στάτη	140 mm
Αριθμός Ελιγμάτων Ανά Φάση	14
Τόξο Πόλου Στάτη	17.5°
Μήκος διακένου	5 mm

Πίνακας 3.1: Ορίσματα κώδικα σχεδίασης SRM

Για λόγους ελαχιστοποίησης υπολογιστικού φόρτου και βελτιστοποίησης της διαδικασίας ανάλυσης σχεδιάστηκε το ελάχιστο κλάσμα γεωμετρίας της μηχανής. Στην περίπτωση της 8/6 SRM το ελάχιστο κλάσμα γεωμετρίας είναι το 1/2, γι' αυτό στο Σχ.3.5 φαίνεται το σχέδιο της μισής μηχανής.



Σχήμα 3.5: Γεωμετρία της 4-φασικής 8/6 SRM που θα μελετηθεί

Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται αναλυτικότερα οι διαστάσεις της εν λόγω μηχανής. Η γεωμετρία αυτή θα αποτελέσει την βάση της μελέτης της παρούσας εργασίας. Στα επόμενα κεφάλαια θα αναλυθεί το ηλεκτρομαγνητικό της πεδίο και θα ληφθούν οι απαραίτητες μετρήσεις. Το σύνολο των δεδομένων που θα προκύψουν από τις μετρήσεις, θα βοηθήσει στη μοντελοποίηση της μηχανής στο περιβάλλον Simulink.

Χαρακτηριστικό	Τιμή
Πόλοι Στάτη	8
Πόλοι Δρομέα	6
Ενεργό Μήκος	210 mm
Εξωτερική Διάμετρος Στάτη	140 mm
Τόξο Πόλου Στάτη	17.5°
Πάχος Σώματος Στάτη	12.57 mm
Πάχος Πόλου Στάτη	12.57 mm
Ύψος Πόλου Στάτη	16.13 mm
Αριθμός Ελιγμάτων Ανά Φάση	14
Τόξο Πόλου Δρομέα	18.375°
Πάχος Σώματος Δρομέα	12.57 mm
Εξωτερική Διάμετρος Δρομέα	81.6 mm
Πάχος Πόλου Δρομέα	13.03 mm
Ύψος Πόλου Δρομέα	9.46 mm
Μήκος διακένου	5 mm

Πίνακας 3.2: Χαρακτηριστικά της υπό μελέτη SRM

Κεφάλαιο 4

Ανάλυση ηλεκτρομαγνητικού πεδίου 8/6 SRM

4.1 Εισαγωγή

Σε αυτό το κεφάλαιο θα αναλυθεί το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο μιας 4-φασικής 8/6 SRM, της οποίας η γεωμετρία αναπτύχθηκε στο Κεφ.3. Αρχικά, θα γίνει μία εισαγωγή στη διαδικασία της ανάλυσης του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου με τη βοήθεια του λογισμικού πεπερασμένων στοιχείων FEMM. Έπειτα, θα αναλυθεί ο τρόπος με τον οποίον το FEMM υπολογίζει ηλεκτρομαγνητική ροπή στο διάκενο και μαγνητική ροή σε οποιοδήποτε σημείο της γεωμετρίας. Τέλος, για κάθε πιθανή γωνία δρομέα και για διάφορες τιμές ρεύματος θα μετρηθούν η ροπή διακένου και η μαγνητική ροή που διαρρέει τα τυλίγματα. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων θα αναπαρασταθούν σε διαγράμματα με τη βοήθεια του MATLAB.

4.2 Η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων

Η ανάγκη για περισσότερη ακρίβεια κατά τη διαδικασία σχεδίασης και ανάλυσης των ηλεκτρικών μηχανών προκάλεσε την ανάπτυξη αριθμητικών μοντέλων, κατάλληλων για τον υπολογισμό ηλεκτρικών και μαγνητικών πεδίων. Αυτές οι αριθμητικές μέθοδοι βασίζονται στην περιγραφή της κατανομής ηλεκτρικών και μαγνητικών πεδίων μέσω των εξισώσεων του Maxwell. Η αναλυτική λύση δεν είναι πάντα εφικτή, λόγω της πολύπλοκης γεωμετρίας και των μη γραμμικών χαρακτηριστικών των υλικών. Έτσι, στις περισσότερες περιπτώσεις μόνο η αριθμητική λύση είναι εφικτή.

Η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων είναι μία τεχνική που ταιριάζει απόλυτα σε αυτού του είδους τις εφαρμογές. Δίνει αποτελέσματα ακόμα και για πεδία με χρονομεταβλητά, ανισοτροπικά ή μη γραμμικά υλικά. Χρησιμοποιώντας τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων, όλο το πρόβλημα διαιρείται σε επιμέρους υπο-προβλήματα. Η λύση των υπο-προβλημάτων είναι σημαντικά ευκολότερη και το σύνολο αυτών συντίθεται, ώστε να βρεθεί η συνολική λύση του προβλήματος.

4.2.1 Μαγνητοστατικά προβλήματα

Μαγνητοστατικά αποκαλούνται τα προβλήματα αυτά, των οποίων το μαγνητικό πεδίο είναι χρονικά αμετάβλητο. Σε αυτή τη περίπτωση, η ένταση του μαγνητικού πεδίου H και η πυκνότητα της μαγνητικής ροής B θα πρέπει να ικανοποιούν την παρακάτω μορφή των εξισώσεων Maxwell:

$$\nabla \times H = J \quad (4.1)$$

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (4.2)$$

όπου τα μεγέθη H και B συνδέονται με την σχέση:

$$B = \mu \cdot H \quad (4.3)$$

και μ η μαγνητική διαπερατότητα του υλικού. Αν το υλικό είναι μη γραμμικό, τότε η μαγνητική διαπερατότητα υπολογίζεται ως συνάρτηση της μαγνητικής επαγωγής:

$$\mu = \frac{B}{H(B)} \quad (4.4)$$

Χρησιμοποιώντας την έννοια του διανυσματικού δυναμικού A , μπορούμε να εκφράσουμε την πυκνότητα της μαγνητικής ροής και ως:

$$B = \nabla \times A \quad (4.5)$$

Συνδυάζοντας τις εξισώσεις 4.1, 4.4 και 4.5 προκύπτει:

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu(B)} \cdot \nabla \times A \right) = J \quad (4.6)$$

Στη περίπτωση ενός γραμμικού ιστροπικού μέσου και κάνοντας χρήση της συνθήκης του Coulomb $\nabla \cdot A = 0$ η παραπάνω εξίσωση γράφεται:

$$-\frac{1}{\mu} \cdot \nabla^2 \cdot A = J \quad (4.7)$$

Για την εύρεση του μαγνητικού πεδίου σε όλο το χώρο του προβλήματος, το λογισμικό FEMM χρησιμοποιεί το διανυσματικό δυναμικό A . Ο λόγος είναι ότι μέσω του A όλες οι συνθήκες που πληροί το πρόβλημα συγκεντρώνονται σε μία εξίσωση. Με άλλα λόγια, αν βρεθεί το A , τότε τα H και B υπολογίζονται με μία απλή παραγωγή.

4.2.2 Οριακές συνθήκες προβλήματος

Για να είναι σαφώς ορισμένο ένα μαγνητοστατικό πρόβλημα, θα πρέπει να οριστούν κάποιες οριακές συνθήκες. Με αυτόν τον τρόπο εξασφαλίζεται και ύπαρξη μοναδικής λύσης. Οι οριακές συνθήκες είναι οι εξής:

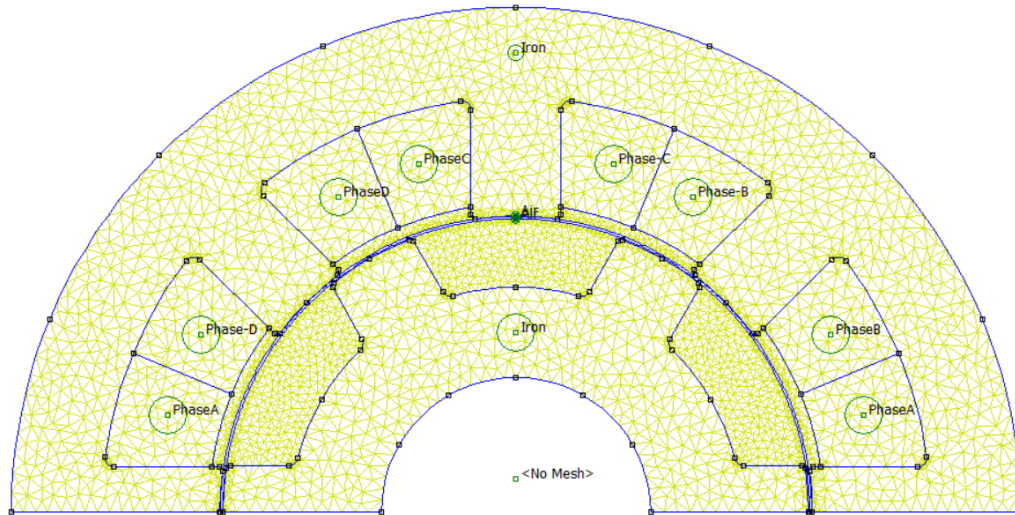
- Συνθήκες Dirichlet: Με αυτές τις οριακές συνθήκες επιβάλλεται το μέτρο του διανυσματικού δυναμικού A σε ένα σύνορο. Σε προβλήματα που αφορούν στο εσωτερικό πεδίο των ηλεκτρικών μηχανών, εφαρμόζεται η ομογενής συνθήκη Dirichlet $A = 0$ στην

εξωτερική επιφάνεια του στάτη, αλλά και στην εσωτερική επιφάνεια επαφής του δρομέα με τον άξονα της μηχανής. Με αυτό το τρόπο εξασφαλίζεται ότι η μαγνητική ροή παραμένει εντός κυκλώματος και δεν υπάρχουν διαρροές προς το εξωτερικό περιβάλλον ή τον άξονα.

- Συνθήκες Neumann: Με αυτές τις οριακές συνθήκες επιβάλλεται το μέτρο της κάθετης παραγώγου του δυναμικού A σε ένα σύνορο. Για παράδειγμα, η ομογενής συνθήκη $\frac{\partial A}{\partial n} = 0$ εφαρμόζεται στην επιφάνεια επαφής με ένα εξαιρετικά διαπερατό μέταλλο, εξαναγκάζοντας τη ροή να διασχίσει την επιφάνεια υπό γωνία 90° .
- Συνθήκες Robin: Πρόκειται για μία μίξη των συνθηκών Dirichlet και Neumann.
- Περιοδική συνθήκη: Η περιοδική οριακή συνθήκη συνδέει δύο όρια μεταξύ τους. Συγκεκριμένα, θέτει τα σημεία των δύο ορίων να έχουν ίσες πεδιακές τιμές.
- Αντιπεριοδική συνθήκη: Η αντιπεριοδική οριακή συνθήκη συνδέει δύο όρια μεταξύ τους. Συγκεκριμένα, θέτει τα σημεία των δύο ορίων να έχουν αντίθετες πεδιακές τιμές, δηλαδή ίδιο μέτρο και αντίθετο πρόσημο.

4.2.3 Δημιουργία πλέγματος κατά την προεπεξεργασία

Στο FEMM η συνολική γεωμετρία του προβλήματος διαιρείται σε μικρότερα κομμάτια τα οποία ονομάζονται πεπερασμένα στοιχεία. Για παράδειγμα, σε μία διδιάστατη εφαρμογή, η δομή μπορεί να διαιρεθεί σε ομάδες πεπερασμένων εμβαδών τριγωνικού σχήματος. Τα σημεία που ορίζουν αυτά τα εμβαδά λέγονται κόμβοι (nodes) ή βαθμοί ελευθερίας (degrees of freedom), ενώ το τρίγωνο είναι το στοιχείο (element). Το σύνολο των στοιχείων αποτελούν το πλέγμα (mesh). Στην υπό μελέτη γεωμετρία, δημιουργήθηκαν 5097 κόμβοι και το πλέγμα απεικονίζεται στο Σχ.4.1. Συνηθίζεται στις περιοχές ενδιαφέροντος να τοποθετείτε πιο πυκνό πλέγμα. Συγκεκριμένα, όπως φαίνεται και στο Σχ.4.1 τοποθετήθηκε πυκνό πλέγμα κοντά στο διάκενο, καθώς εκεί λαμβάνει χώρα η ηλεκτρομηχανική μετατροπή. Έτσι, εκεί θα μετρηθεί η ηλεκτρομαγνητική ροπή, για την οποία θέλουμε όσο το δυνατόν μεγαλύτερη ακρίβεια στη μέτρηση.



Σχήμα 4.1: Δημιουργία πλέγματος κατά την προεπεξεργασία

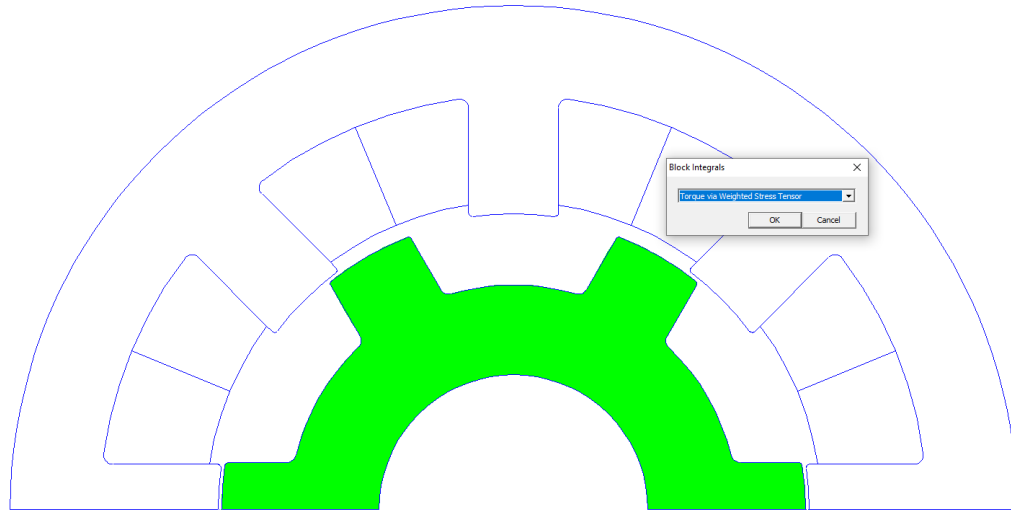
4.3 Επεξεργασία δεδομένων

4.3.1 Υπολογισμός ροπής μέσω σταθμικού τανυστή τάσης

Ο σταθμικός τανυστής τάσης (Weighted Stress Tensor) είναι μια ολοκληρωτική έκφραση του τανυστή τάσεως του Maxwell. Χρησιμοποιείται, συνήθως, για τον υπολογισμό της ροπής με δεδομένα τα αποτελέσματα της ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων. Η εν λόγω μέθοδος υπολογίζει την ροπή δισδιάστατων προβλημάτων μέσω επικαμπύλιου ολοκληρώματος, και όχι γραμμικού ολοκληρώματος. Αντίστοιχα, σε τρισδιάστατα προβλήματα χρησιμοποιείται ολοκλήρωμα σε όγκο.

Σε αντίθεση με την μέθοδο που χρησιμοποιεί τον τανυστή τάσεως του Maxwell, επιλέγεται αυτόματα η επιφάνεια ολοκλήρωσης, που περικλείει την υπο μελέτη επιφάνεια. Έτσι, αποφεύγονται εσφαλμένες διακυμάνσεις στην μετρούμενη ροπή. Πρακτικά, ο χρήστης οφείλει να επιλέξει το χωρίο block επί του οποίου επιθυμεί να μετρήσει την αναπτυσσόμενη ροπή. Έπειτα, στο πρόγραμμα FEMM πρέπει να επιλέξει "Force via Weighted Stress Tensor" από το μενού ολοκλήρωσης. Για επίτευξη ακριβέστερων αποτελεσμάτων, συνιστάται η τοποθέτηση πυκνού πλέγματος γύρω από την επιφάνεια ενδιαφέροντος. Ο μοναδικός περιορισμός αυτής της μεθόδου είναι ότι η επιφάνεια, επί της οποίας μετράται η ροπή, πρέπει να περικλείεται αποκλειστικά από αέρα.

Στην εφαρμογή, που μελετάται στην παρούσα εργασία, η επιφάνεια ενδιαφέροντος είναι ο δρομέας. Στο διάκενο λαμβάνει χώρα η ηλεκτρομηχανική μετατροπή, ενώ η ροπή ασκείται στον δρομέα. Οπότε, σύμφωνα με τα παραπάνω, ο χρήστης επιλέγει το χωρίο του δρομέα και επιλέγει "Force via Weighted Stress Tensor" από το μενού ολοκλήρωσης, όπως φαίνεται στο Σχ.4.2.

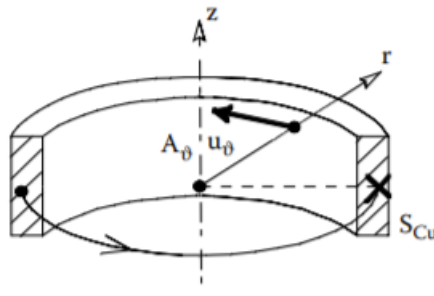


Σχήμα 4.2: Επιλογή χωρίου δρομέα για υπολογισμό ροπής

4.3.2 Υπολογισμός πεπλεγμένης μαγνητικής ροής μέσω διανυσματικού δυναμικού

Ο υπολογισμός της πεπλεγμένης μαγνητικής ροής γίνεται πολύ απλός με τη βοήθεια του διανυσματικού δυναμικού. Για παράδειγμα, ο υπολογισμός της πεπλεγμένης ροής στη γεωμετρία του Σχ.4.3 δίνεται από την σχέση:

$$\lambda = \frac{1}{S_{Cu}} \int_{S_{Cu}} 2\pi r A_{\theta} dS \quad (4.8)$$



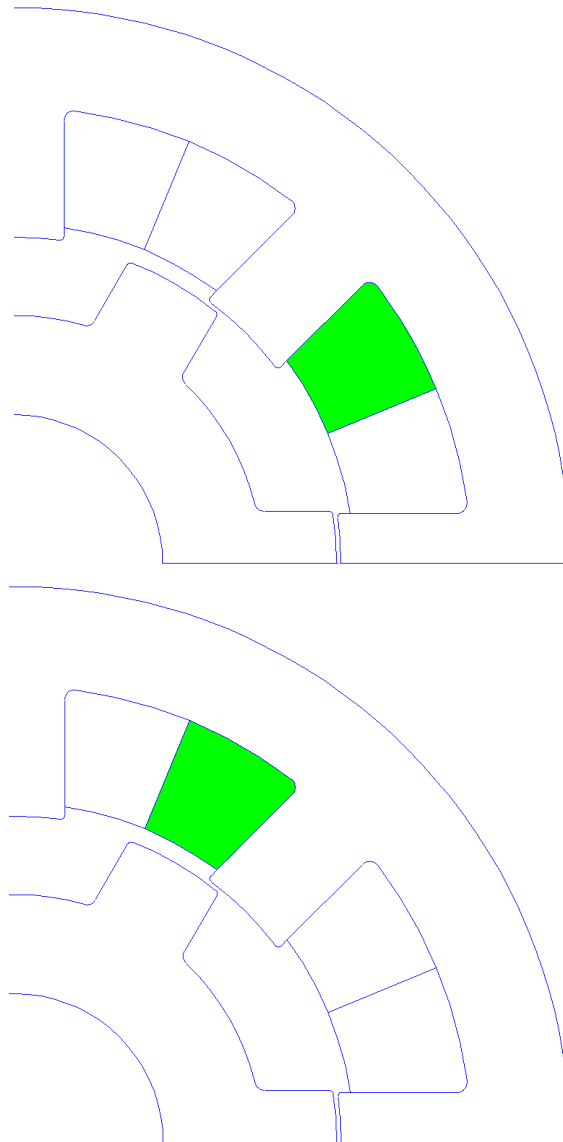
Σχήμα 4.3: Παράδειγμα υπολογισμού πεπλεγμένης ροής (Πηγή: [3])

Στην περίπτωση των ηλεκτρικών μηχανών, που υπάρχουν πολλά ελίκματα N_t , η παραπάνω σχέση μετατρέπεται ως εξής:

$$\lambda = \frac{N_t}{S_{Cu}} \int_{S_{Cu}} 2\pi r A_{\theta} dS \quad (4.9)$$

Στο πρόγραμμα FEMM ο χρήστης πρέπει να επιλέξει τις επιφάνειες, μέσα από τις οποίες διέρχεται η μαγνητική ροή ενδιαφέροντος. Έπειτα, πρέπει να επιλέξει την επιλογή 'A' από το μενού ολοκλήρωσης. Στην εφαρμογή που μελετάται στην παρούσα εργασία, ο χρήστης

επιλέγει διαδοχικά τα δύο χωρία μιας εκ των τεσσάρων φάσεων (Σχ.4.4), υπολογίζει το ολοκλήρωμα και αφαιρεί τα αποτελέσματα. Εφόσον οι δύο αντιδιαμετρικοί πόλοι είναι συνδεδεμένοι εν σειρά, θα πρέπει το αποτέλεσμα να διπλασιαστεί, υπολογίζοντας έτσι την ελάχιστη πεπλεγμένη μαγνητική ροή που διαρρέει την φάση (ένα έλιγμα ανά φάση). Τέλος, ο χρήστης πολλαπλασιάζει με τον αριθμό ελιγμάτων ανά φάση.



Σχήμα 4.4: Επιλογή χωρίων ίδιας φάσης

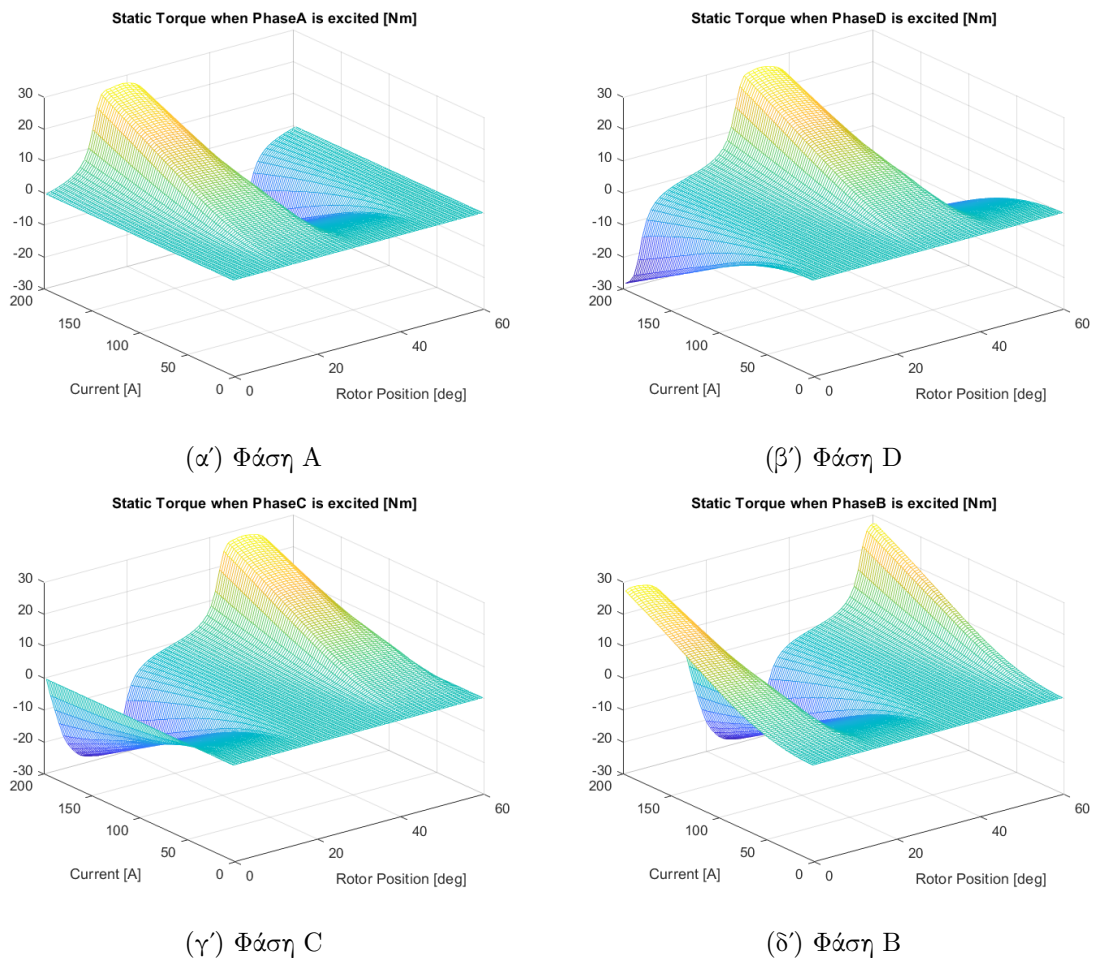
4.3.3 Διαδικασία και αποτελέσματα

Αφού σχεδιαστεί η επιθυμητή γεωμετρία, ακολουθεί ο καθορισμός αρχικής θέσης του δρομέα. Η αρχική θέση $\theta = 0^\circ$ επιλέγεται αυθαίρετα από τον χρήστη. Στην εφαρμογή μας επιλέξαμε ως αρχική θέση δρομέα την θέση αυτή, όπου ο δρομέας βρίσκεται σε αντίθεση με την φάση A. Για να γίνουν οι απαραίτητες μετρήσεις προσομοιώσαμε την λειτουργία της

μηχανής περιστρέφοντας τον δρομέα με σταθερό βήμα 1° από την θέση $\theta = 0^\circ$ έως την θέση $\theta = 360/P_r = 60^\circ$. Επαναλάβαμε τη διαδικασία για διάφορες τιμές ρευμάτων διέγερσης. Με αυτόν τον τρόπο, αποκτήσαμε μία εποπτική εικόνα για το πως συμπεριφέρεται η μηχανή σε ένα αντιπροσωπευτικό εύρος λειτουργικών καταστάσεων, αλλά και εντοπίσαμε σε ποια τιμή ρεύματος αναπτύσσεται ονομαστική ροπή.

Αποτελέσματα ροπής

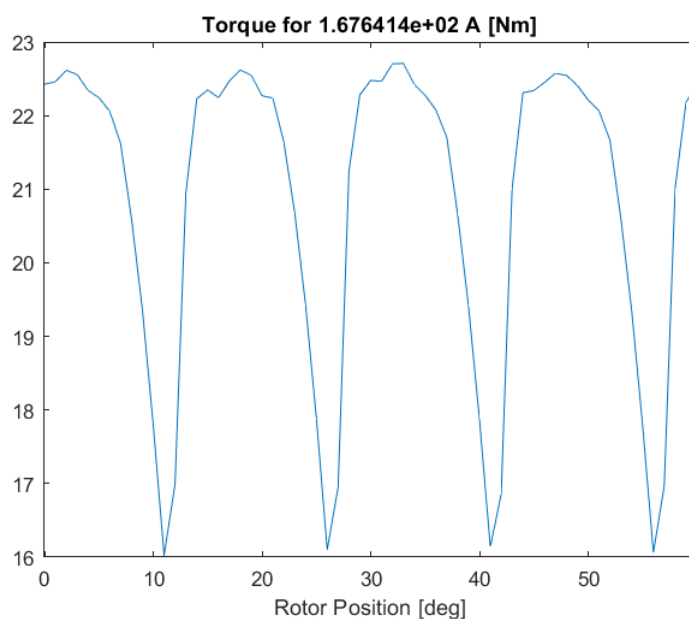
Αρχικά μετρήθηκε η ηλεκτρομαγνητική ροπή, που αναπτύσσεται στον δρομέα. Στις αύλακες του στάτη εισήχθησαν πυκνότητες ρεύματος 0.1, 0.5, 1, 1.5, 2, 2.5, 3, 3.5, 4, 4.5, 5, 5.5, 6, 6.5, 7, 7.5, 8, 8.5, 9, 9.5 και 10 A/mm^2 . Το ρεύμα διέγερσης υπολόγιστηκε λαμβάνοντας υπόψιν τα ελίγματα ανά πόλο ($N_{ph}/2 = 7$) και τον συντελεστή πληρότητας αύλακας, ο οποίος τέθηκε ίσος με 0.7. Παρακάτω παρατίθεντε τα διαγράμματα που προέκυψαν και για τις τέσσερις φάσεις:



Σχήμα 4.5: Αναπτυσσόμενη στατική ροπή ανά φάση, θέση δρομέα και ρεύμα διέγερσης

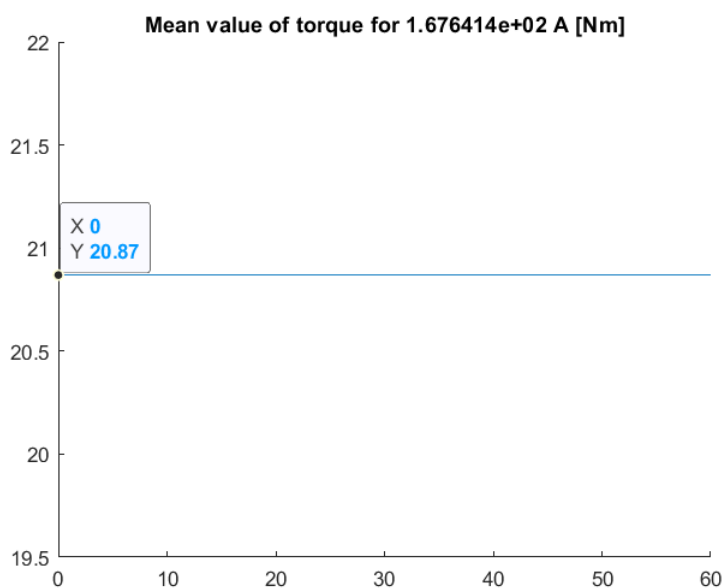
Στα Σχ.4.5 παρατηρείται ότι η σωστή διαδοχή των φάσεων πρέπει να είναι ADCB, ή αντίστροφα ABCD. Αν για κάθε θέση δρομέα ήγε μόνο η κυρίαρχη φάση, δηλαδή η φάση που

προκαλεί την μέγιστη ροπή κάθε στιγμή, θα προέκυπτε μία συνολική ροπή στον δρομέα όπως απεικονίζεται στο Σχ.4.6. Το συγκεκριμένο διάγραμμα προέκυψε για ρεύμα διέγερσης 167.64 A.



Σχήμα 4.6: Συνολική αναπτυσσόμενη ροπή

Υπολογίζοντας την μέση τιμή της ροπής, φαίνεται (Σχ.4.7) ότι φτάνει τα 20.87 Nm, δηλαδή με ρεύμα διέγερσης ίσο με 167.64 A αναπτύσσεται περίπου η ονοματική ροπή 20 Nm, που έχει τεθεί ως στόχος για την εφαρμογή μας.

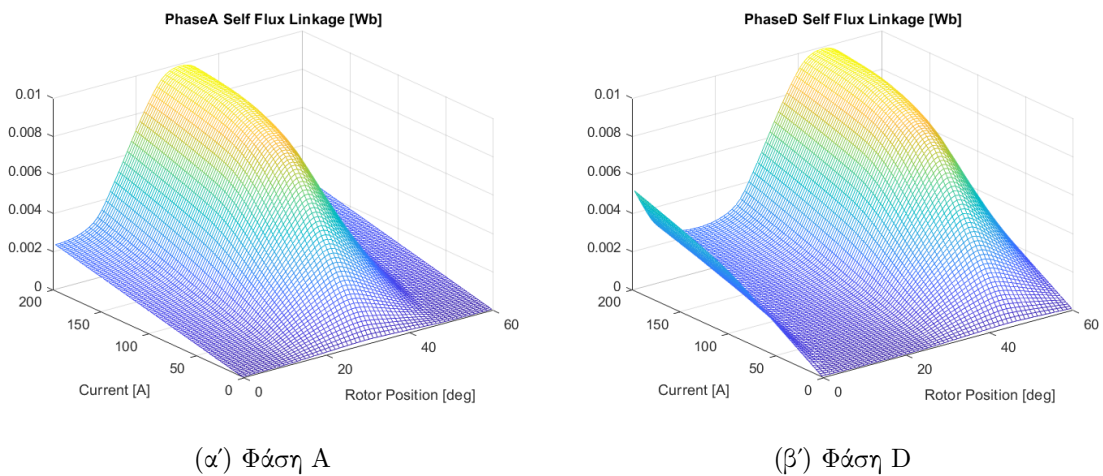


Σχήμα 4.7: Μέση συνολική αναπτυσσόμενη ροπή

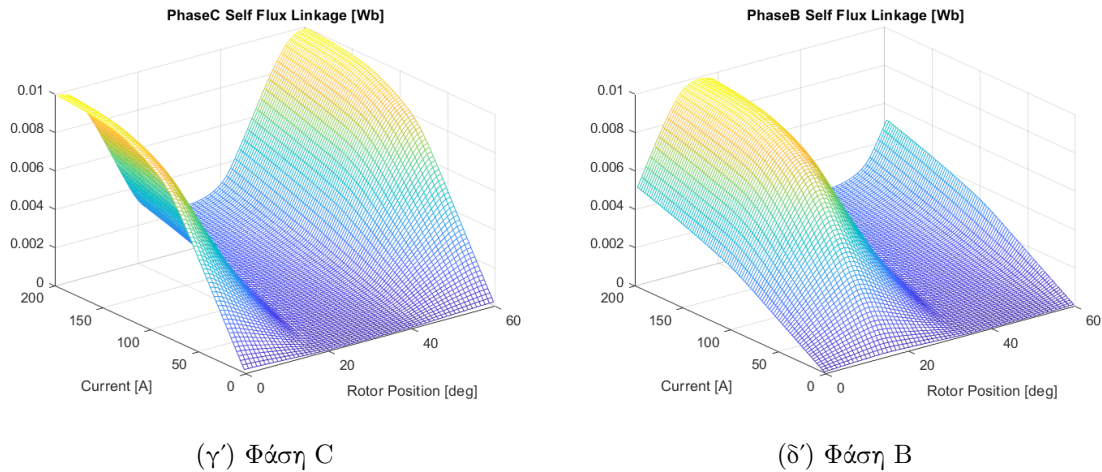
Σε αυτό το σημείο πρέπει να σημειωθεί ότι αυτή η προσέγγιση είναι πολύ απλουστευμένη και σε καμία περίπτωση δεν μοντελοποιεί τη πραγματική λειτουργία μιας SRM. Από την μία, δεν έχει ληφθεί υπόψιν η ταυτόχρονη αγωγή δύο φάσεων, που είναι πολύ συχνό φαινόμενο λόγω της μη ακαριαίας ανάπτυξης και σβέσης των ρευμάτων. Αυτό ακυρώνει την παραδοχή κατά την οποία πάντα άγει μία φάση και αλλάζει σημαντικά την πραγματική συνολική αναπτυσσόμενη ροπή. Από την άλλη, δεν έχει ληφθεί υπόψιν η αμοιβαία μαγνητική ροή μεταξύ δύο ενεργών φάσεων. Ο συνυπολογισμός τους θα έκανε τα αποτελέσματα ακόμα πιο ακριβή. Ωστόσο, η προσέγγιση αυτή είναι μία πολύ καλή ευκαιρία να αντιληφθούμε σε τί επίπεδα ρεύματος περίπου να αναμένουμε την επιθυμητή ροπή. Με άλλα λόγια, είναι ένας τρόπος να επιβεβαιώσουμε ότι η σχεδίαση πληροί τις προδιαγραφές και μπορούμε να προχωρήσουμε στην μοντελοποίησή της στο SIMULINK, ώστε να αντιμετωπιστεί με μεγαλύτερη ακρίβεια η συμπεριφορά της. Τέλος, στο Σχ.4.6 παρατηρείται σημαντική διακύμανση ροπής. Έτσι, επιβεβαιώνεται ότι πράγματι η διακύμανση ροπής είναι ένα από τα σημαντικότερα μειωνεκτήματα των μηχανών μεταβλητής μαγνητικής αντίστασης.

Αποτελέσματα πεπλεγμένης ροής λ

Μετά την μέτρηση της ροπής σε κάθε θέση του στάτη, μετρήθηκε και η πεπλεγμένη ροή που διαπερνά τα τυλίγματα. Θεωρήθηκε ότι υπάρχει ένα ελίγμα ανά πόλο στάτη, δηλαδή 2 ελίγματα ανά φάση. Συνεπώς, στα διαγράμματα του Σχ.4.8 απεικονίζονται οι ελάχιστες πεπλεγμένες ροές. Για να υπολογισθεί η πραγματική πεπλεγμένη ροή, αρκεί να πολλαπλασιαστούν τα αποτελέσματα με τα ελίγματα ανά πόλο στάτη $N_{ph}/2$.

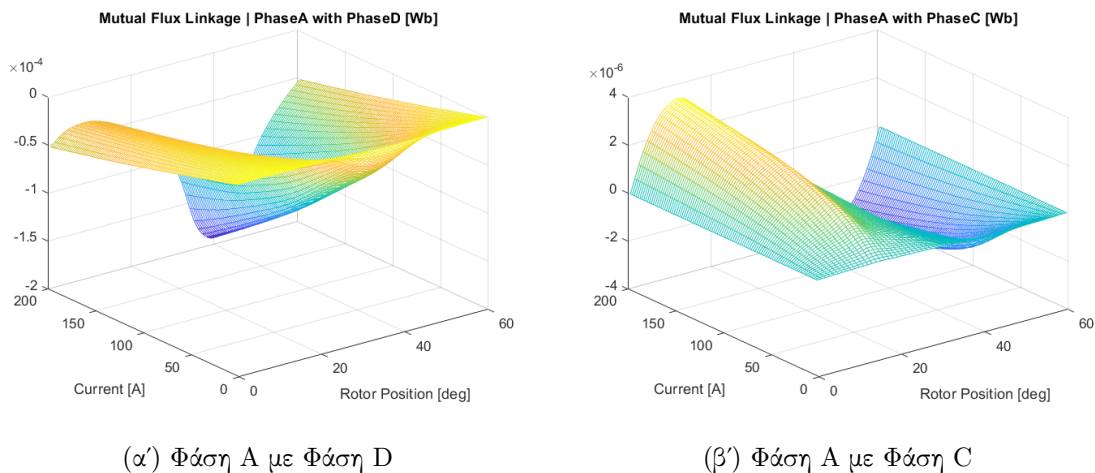


Σχήμα 4.8: Πεπλεγμένη ροή ανά φάση, θέση δρομέα και ρεύμα διέγερσης



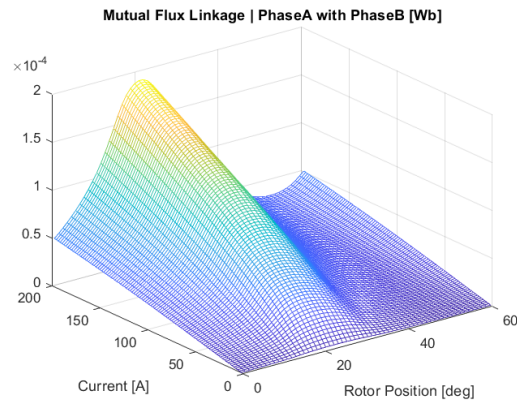
Σχήμα 4.8: Πεπλεγμένη ροή ανά φάση, θέση δρομέα και ρεύμα διέγερσης

Παρόλο που στην εφαρμογή μας δεν θα ληφθούν υπόψη τα αμοιβαία φαινόμενα μεταξύ των φάσεων, λήφθηκαν μετρήσεις των αμοιβαίων ροών. Η αμοιβαία μαγνητική ροή είναι αυτή, που εμπλέκει δύο φάσεις στη διαδρομή της. Ενδεικτικά, στο Σχ.4.9 απεικονίζεται η αμοιβαία πεπλεγμένη ροή της διεγερόμενης φάσης A με όλες τις υπόλοιπες φάσεις.



Σχήμα 4.9: Αμοιβαία πεπλεγμένη ροή φάσης A με τις υπόλοιπες φάσεις ανά θέση δρομέα και ρεύμα διέγερσης

Παρατηρούμε ότι η αμοιβαία πεπλεγμένη ροή ανάμεσα στις φάσεις A, D και αυτή ανάμεσα στις φάσεις A, B είναι αντίθετες. Επίσης, η αμοιβαία πεπλεγμένη ροή ανάμεσα στις φάσεις A και C, η οποία είναι δεύτερη σε διαδοχική σειρά μετά την A, διατηρείται σε χαμηλές τιμές και με μέσο όρο κοντά στο μηδέν.



(γ') Φάση A με Φάση B

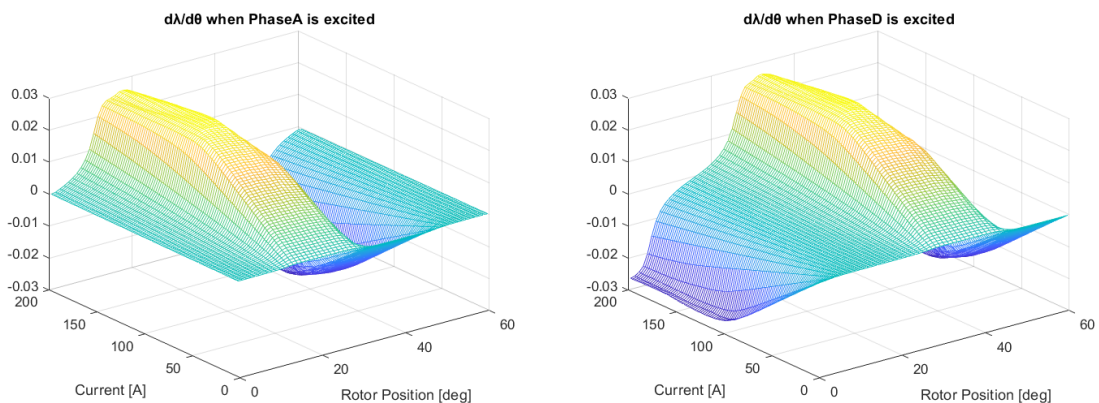
Σχήμα 4.9: Αμοιβαία πεπλεγμένη ροή φάσης A με τις υπόλοιπες φάσεις ανά θέση δρομέα και ρεύμα διέγερσης

Υπολογισμός $d\lambda/d\theta$

Όπως αναλύθηκε και στο Κεφ.2 η εξίσωση ισοδύναμου κυκλώματος της μηχανής είναι:

$$V = R_s i + L(\theta, i) \frac{di}{dt} + \omega_m \frac{d\lambda(\theta, i)}{d\theta} \quad (4.10)$$

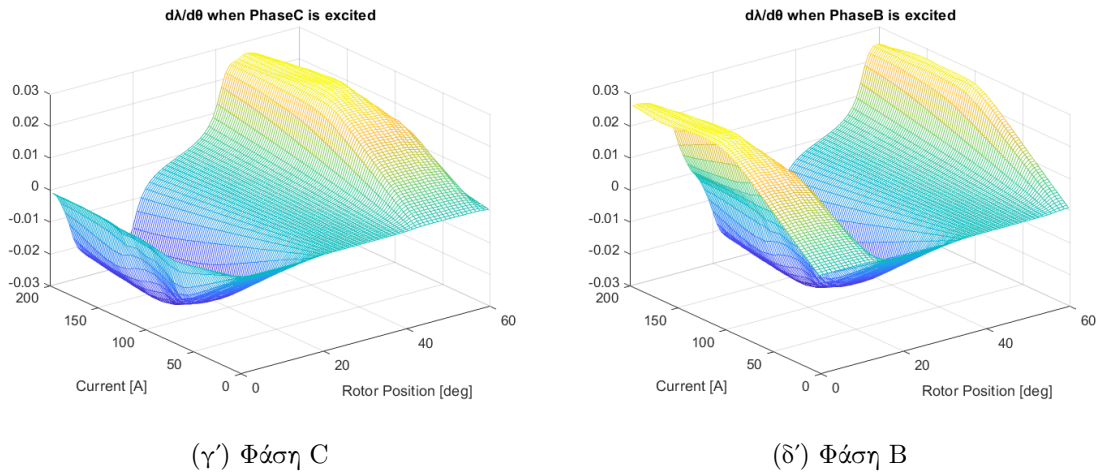
Συνεπώς, είναι κομβικής σημασίας ο υπολογισμός της μεταβλητής $\frac{d\lambda(\theta, i)}{d\theta}$ για διάφορες θέσεις δρομέα αλλά και ρεύματα διέγερσης. Έχοντας ήδη υπολογίσει την πεπλεγμένη ροή, μπορούμε να υπολογίσουμε την εν λόγω μεταβλητή με μία απλή παραγωγή ως προς την θέση δρομέα με βήμα 1° . Παρατίθεντε τα αποτελέσματα στο Σχ.4.10:



(α') Φάση A

(β') Φάση D

Σχήμα 4.10: $d\lambda/d\theta$ ανά φάση, θέση δρομέα και ρεύμα διέγερσης



Σχήμα 4.10: $d\lambda/d\theta$ ανά φάση, θέση δρομέα και ρεύμα διέγερσης

Από τα παραπάνω διαγράμματα προέκυψε το $d\lambda/d\theta|_{max}$, η τιμή του οποίου συνέβαλε στον προσδιορισμό των ελιγμάτων ανά φάση στο Κεφ3.

Υπολογισμός συντελεστή αυτεπαγωγής L

Από την εξίσωση 4.10 εξίσου σημαντικός είναι και ο όρος $L(\theta, i) \frac{di}{dt}$, που αντιπροσωπεύει ένα πηνίο με συντελεστή αυτεπαγωγής L . Ισχύει ότι

$$\lambda(\theta, i) = L(\theta, i) \cdot i \Rightarrow L(\theta, i) = \frac{\lambda(\theta, i)}{i}$$

Έχοντας, λοιπόν, μετρήσει την πεπλεγμένη ροή ανά φάση, θέση δρομέα και ρεύμα διέγερσης, μπορεί να προκύψει ο συντελεστής αυτεπαγωγής του πηνίου του ανά φάση ισοδύναμου κυκλώματος με μία διαίρεση.

Υπολογισμός ωμικής αντίστασης τυλίγματος R_s

Η αντίσταση ενός καλωδίου είναι ανάλογη του μήκους του και αντιστρόφως ανάλογη της διατομής του:

$$R_s = \rho \frac{l}{A} \quad (4.11)$$

όπου η σταθερά ρ είναι η ειδική αντίσταση και εξαρτάται από το υλικό κατασκευής. Στα τυλίγματα των ηλεκτρικών μηχανών χρησιμοποιείται συνήθως χαλκός με ειδική αντίσταση περίπου $\rho_{Cu} = 1.7 \cdot 10^{-5} \Omega \cdot m$. Με την παραδοχή ότι όλα τα ελίγματα διέρχονται από το κέντρο της αύλακας, υπολογίζεται ότι το μήκος των καλωδίων ανά φάση είναι 7.2 m. Επίσης, από το FEMM υπολογίστηκε το εμβαδόν της μισής αύλακας ίσο με $197.225 mm^2$. Οπότε, με συντελεστή πληρότητας αύλακας 0.7 και $N = 7$ ελίγματα έχουμε

$$A = \frac{0.7 \cdot 197.225}{7} = 19.7225 mm^2$$

Με τα παραπάνω δεδομένα η ωμική αντίσταση τυλίγματος προκύπτει:

$$R_s = 1.7 \cdot 10^{-5} \frac{7200}{19.7225} = 6.2m\Omega \quad (4.12)$$

Πλέον, έχουν υπολογιστεί όλες οι μεταβλητές που μας επιτρέπουν να μοντελοποιήσουμε σωστά την υπό μελέτη μηχανή μεταβλητής μαγνητικής αντίστασης.

4.4 Αποθήκευση δεδομένων

Όλα τα δεδομένα που συλλέχθηκαν αποθηκεύτηκαν σε πολυδιάστατους πίνακες με τέτοιο τρόπο, ώστε να είναι εύκολη η επεξεργασία τους, αλλά και να βοηθούν το επόμενο βήμα αυτής της εργασίας, δηλαδή τη μοντελοποίηση της μηχανής στο SIMULINK. Οι πίνακες αυτοί θα χρησιμοποιηθούν ως πίνακες αναζήτησης (Lookup Tables). Για παράδειγμα, ένας πίνακας N διαστάσεων που περιέχει την πληροφορία ενός φυσικού μεγέθους σε συνάρτηση με N μεταβλητές, θα λάβει ως είσοδο N τιμές και θα βγάλει ως έξοδο την τιμή του φυσικού μεγέθους αυτού. Παρακάτω θα αναλυθεί η μορφή με την οποία αποθηκεύτηκαν τα δεδομένα που συλλέχθηκαν κατά τις παραπάνω δοκιμές.

- Τρισδιάστατος πίνακας 3D της ροπής ως συνάρτηση της θέσης δρομέα, του ρεύματος διέγερσης και της διεγερόμενης φάσης.
- Τετραδιάστατος πίνακας 4D της πεπλεγμένης μαγνητικής ροής ως συνάρτηση της θέσης δρομέα, του ρεύματος διέγερσης, της διεγερόμενης φάσης και της φάσης στην οποία γίνεται η μέτρηση.
- Τρισδιάστατος πίνακας 3D του όρου $d\lambda/d\theta$ ως συνάρτηση της θέσης δρομέα, του ρεύματος διέγερσης και της διεγερόμενης φάσης.
- Τρισδιάστατος πίνακας 3D του συντελεστή αυτεπαγωγής ως συνάρτηση της θέσης δρομέα, του ρεύματος διέγερσης και της διεγερόμενης φάσης.

Κεφάλαιο 5

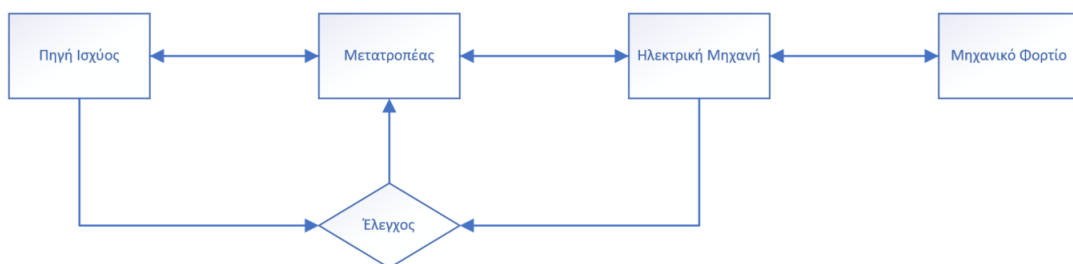
Μοντελοποίηση συστήματος ηλεκτρικής κίνησης με SRM

5.1 Εισαγωγή

Σε αυτό το κεφάλαιο θα αναλυθεί η λειτουργία ενός συστήματος ηλεκτρικής κίνησης με SRM. Στη συνέχεια, θα μοντελοποιηθεί ένα τέτοιο σύστημα με τη βοήθεια του λογισμικού SIMULINK, αλλά και των δεδομένων που συλλέχθηκαν κατά το Κεφ.4.

5.2 Σύστημα ηλεκτρικής κίνησης

Ένα τυπικό σύστημα ηλεκτρικής κίνησης απεικονίζεται στο Σχ.5.1. Εύκολα παρατηρείται ότι για να λειτουργήσει ένα τέτοιο σύστημα εκτός από την μηχανή χρειάζονται κι άλλα στοιχεία, όπως είναι η πηγή ηλεκτρικής ισχύος, ο μετατροπέας ηλεκτρικής ισχύος και ο τομέας του ελέγχου. Βέβαια, η παρακάτω δομή μπορεί να διαφέρει ελαφρώς από εφαρμογή σε εφαρμογή. Ωστόσο, καθίσταται σαφές ότι μια ηλεκτρική μηχανή αποτελεί μέρος ενός συστήματος. Δηλαδή, όσο καλά και αν είναι μελετημένη, δεν μπορεί να λειτουργήσει μεμονωμένα. Γι' αυτό τον λόγο η μελέτη των υπόλοιπων μερών του συστήματος είναι εξίσου κομβικής σημασίας.



Σχήμα 5.1: Δομή τυπικού συστήματος ηλεκτρικής κίνησης

Ειδικότερα, στα συστήματα με μηχανές μεταβλητής μαγνητικής αντίστασης το βάρος πέφτει στον τομέα του ελέγχου, ο οποίος είναι απαιτητικός λόγω της έντονα μη γραμμι-

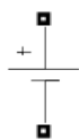
κής συμπεριφοράς της εν λόγω μηχανής. Ο μετατροπέας και η πηγή ισχύος υλοποιούνται εύκολα και έχουν απλή δομή. Σημειώνεται ότι στην εφαρμογή της παρούσας εργασίας δεν θα προστεθεί μηχανικό φορτίο.

5.3 Πηγή ηλεκτρικής ισχύος

Η πηγή ηλεκτρικής ισχύος είναι η είσοδος του συστήματος ηλεκτρικής κίνησης. Είναι αυτή που με τις ανάλογες μετατροπές μετατρέπεται εν τέλει σε μηχανική. Μιας και οι μηχανές μεταβλητής μαγνητικής αντίστασης απαιτούν συνεχή τάση DC ως είσοδο, η παροχή ηλεκτρικής ισχύος μπορεί να είναι συνεχής ή εναλλασσόμενη AC. Στην δεύτερη περίπτωση, ο μετατροπέας έχει ακόμα έναν ρόλο, ο οποίος είναι να μετατρέπει την εναλλασσόμενη τάση στα επιθυμητά επίπεδα συνεχούς.

5.3.1 Πηγή ηλεκτρικής ισχύος της 8/6 SRM

Η πηγή ηλεκτρικής ισχύος που χρησιμοποιήθηκε στην εφαρμογή της παρούσας εργασίας είναι 200 V συνεχούς τάσης. Αυτή η τιμή προέκυψε από τις έως τώρα δυνατότητες του εργαστηρίου ηλεκτρικών μηχανών και ηλεκτρονικών ισχύος του ΕΜΠ. Στο SIMULINK υλοποιήθηκε με το στοιχείο DC Voltage Source, το οποίο αντιπροσωπεύει μία ιδανική πηγή συνεχούς τάσης με προκαθορισμένη τιμή (Σχ.5.2).



Σχήμα 5.2: DC Voltage Source στο SIMULINK

5.4 Μετατροπέας ηλεκτρικής ισχύος

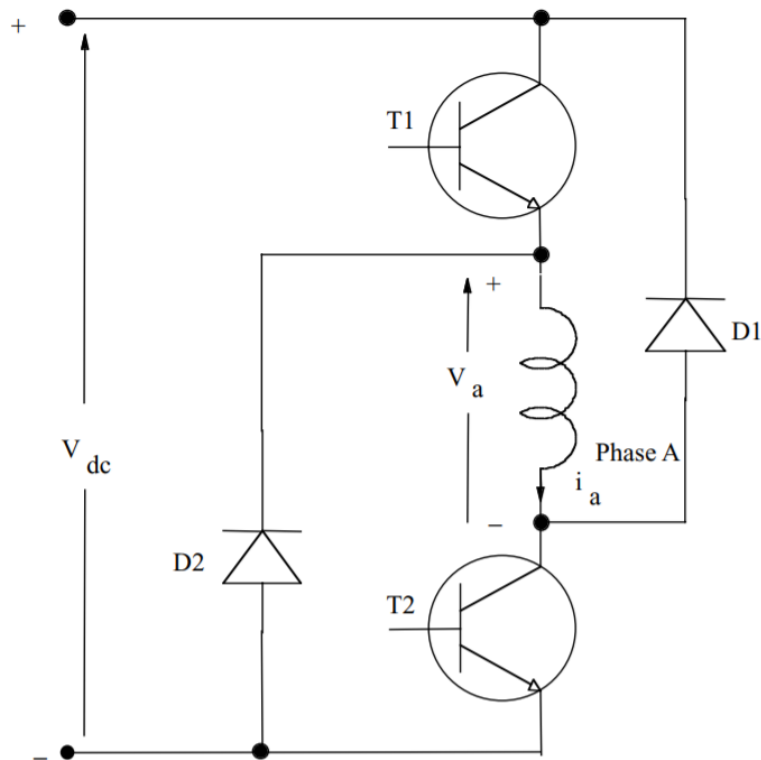
Από τη στιγμή που η ροπή που αποδίδει μία SRM είναι ανεξάρτητη της πολικότητας του ρεύματος, ο μετατροπέας μπορεί να λειτουργήσει ακόμα και με ένα διακοπτικό στοιχείο ανά φάση. Επιπρόσθετα, σε αντίθεση με τις μηχανές εναλλασσόμενου ρεύματος, τα τυλίγματα συνδέονται σε σειρά με τους διακόπτες. Έτσι, σε περίπτωση διακοπτικού σφάλματος η επαγωγή των τυλιγμάτων περιορίζει την αύξηση του ρεύματος, προσφέροντας πολύτιμο χρόνο μέχρι να απομονωθεί το σφάλμα. Ακόμα, οι φάσεις είναι ανεξάρτητες μεταξύ τους και σε περίπτωση σφάλματος της μίας εξ αυτών η μηχανή δεν παύει να λειτουργεί.

Η αμοιβαία αλληλεπίδραση μεταξύ των φάσεων είναι αμεληταία στις μηχανές μεταβλητής μαγνητικής αντίστασης. Το γεγονός αυτό δίνει τη δυνατότητα ανεξάρτητου ελέγχου των φάσεων, δηλαδή τη δυνατότητα ανεξάρτητης παραγωγής ροπής. Παρόλο που η ανεξαρτησία αυτή των φάσεων αποτελεί πλεονέκτημα για τα συστήματα ηλεκτρικής κίνησης με SRM, πρέπει

να δίνεται μεγάλη προσοχή στην διαχείριση της ενέργειας του μαγνητικού πεδίου. Είναι απαραίτητο να δίνεται σωστή διαδρομή στην μαγνητική ροή κατά την αγωγή μιας φάσης, ειδικά μπορεί να αναπτυχθεί υψηλή τάση στα άκρα των τυλιγμάτων και ως αποτέλεσμα οι ημιαγωγοί να οδηγηθούν σε σφάλμα. Ο τρόπος που διαχειρίζεται η ενέργεια στο κύκλωμα εξαρτάται από την τοπολογία που χρησιμοποιείται στον μετατροπέα. Υπάρχουν πολλοί διαφορετικοί τύποι μετατροπέων, ωστόσο στην παρούσα εργασία θα αναλυθεί ο ασύμμετρος μονοφασικός αντιστροφέας πηγής τάσεως Asymmetric Bridge Converter.

5.4.1 Ασύμμετρος μονοφασικός αντιστροφέας πηγής τάσεως

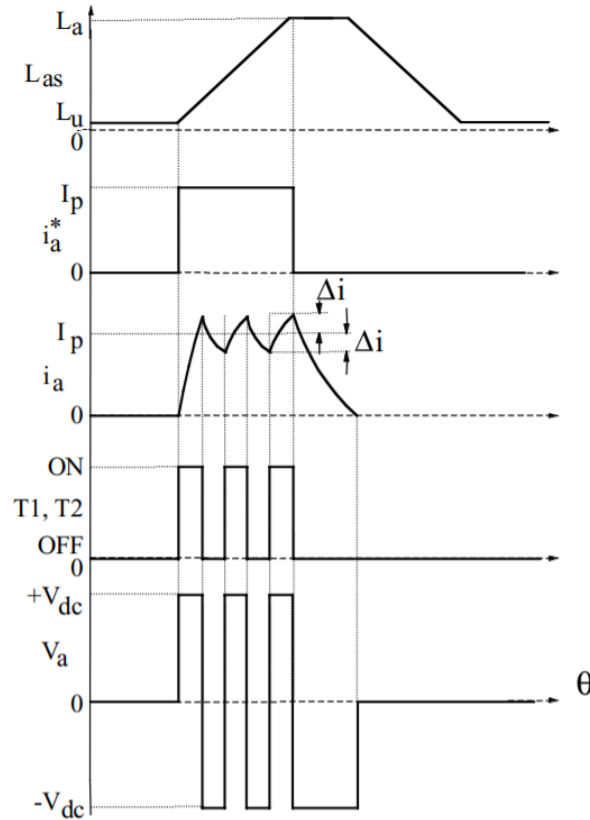
Στο Σχ.5.3 φαίνεται ένας ασύμμετρος μονοφασικός αντιστροφέας πηγής τάσεως. Οι υπόλοιπες φάσεις της μηχανής συνδέονται κατά τον ίδιο τρόπο. Κλείνοντας τους διακόπτες T_1 και T_2 , η φάση A διαρρέεται από ρεύμα. Αν το ρεύμα υπερβεί μια προκαθορισμένη τιμή τότε οι διακόπτες ανοίγουν. Η ενέργεια που είναι αποθηκευμένη στα τυλίγματα της φάσης A θα κρατήσει το ρεύμα προς την ίδια κατεύθυνση μέχρι να εκμηδενιστεί. Κατά την αγωγή της φάσης A με ανοιχτούς διακόπτες T_1 και T_2 είναι ενεργές οι διόδους D_1 και D_2 . Σε αυτή τα κατάσταση του αντιστροφέα επαναφορτίζεται η πηγή συνεχούς τάσεως, δηλαδή έχουμε ροή ισχύος από την μηχανή προς την πηγή. Το ρεύμα μειώνεται μέχρι να φτάσει την ελάχιστη του τιμή, οπότε και κλείνουν πάλι οι διακόπτες.



Σχήμα 5.3: Ασύμμετρος μονοφασικός αντιστροφέας πηγής τάσεως

Συνδυάζοντας τις δύο παραπάνω καταστάσεις του συστήματος μπορεί να σχεδιαστεί η

πρώτη στρατηγική ελέγχου μιας SRM. Στο Σχ.5.4 περιγράφεται ο έλεγχος της φάσης A μιας μηχανής, που χρειάζεται ρεύμα I_p κατά τη περιοχή θετικής κλίσης της επαγωγής για να λειτουργήσει. Το ρεύμα i_a^* είναι το ρεύμα αναφοράς του ελέγχου, ενώ Δi η αποδεκτή απόκλιση από το ρεύμα αναφοράς.



Σχήμα 5.4: Στρατηγική 1: Λειτουργικές καταστάσεις

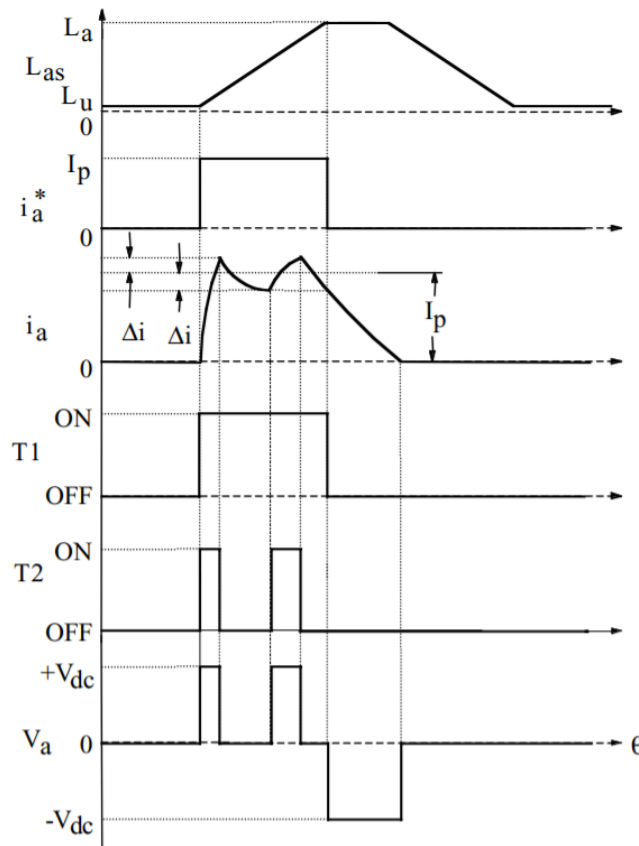
Αξίζει να σημειωθεί ότι σε αυτή τη στρατηγική η τάση της φάσης αλλάζει από V_{dc} σε $-V_{dc}$ πολλαπλές φορές κατά τη διάρκεια ενός κύκλου. Αυτό σημαίνει ότι τα τυλίγματα υφίστανται εναλλαγές τάσης διπλάσιας τιμής από αυτήν της πηγής συνεχούς τάσης, γεγονός το οποίο οδηγεί σε επιδείνωση της μόνωσης τους. Επίσης, η συχνή εναλλαγή ενέργειας μεταξύ μηχανής και πηγής μπορεί να βλάψει τον πυκνωτή της πηγής και να προκαλέσει διακοπτικές απώλειες. Οι καταστάσεις του μετατροπέα μπορούν να περιγραφούν με την παρακάτω μαθηματική σχέση:

$$V_a = \begin{cases} V_{dc}, T_1, T_2 = ON \\ -V_{dc}, T_1, T_2 = OFF \end{cases} \quad (5.1)$$

Η δεύτερη στρατηγική διαχείρισης των διακοπών επιτρέπει στην αποθηκευμένη ενέργεια να ρέει μέσα στην φάση, ανοίγοντας μόνο έναν διακόπτη, έστω τον T_2 . Σε αυτή τη περίπτωση το ρεύμα θα συνεχίσει να διαρρέει τον T_1 , την φάση A και την διόδο D_1 . Ως αποτέλεσμα, η τάση στα άκρα της φάσης είναι μηδενική. Προφανώς ο χρόνος που απαιτείται ώστε να μικρύνει η τιμή του ρεύματος είναι μεγαλύτερος από το να επιβαλλόταν αρνητική τάση στα άκρα του

τυλίγματος. Το γεγονός αυτό μειώνει τη διακοπτική συχνότητα και τις διακοπτικές απώλειες. Οι λειτουργικές καταστάσεις του αντιστροφέα κατά την δεύτερη στρατηγική (Σχ.5.5) μπορούν να περιγραφούν με την παρακάτω μαθηματική σχέση:

$$V_a = \begin{cases} V_{dc}, T_1, T_2 = ON \\ 0, T_1 = ON, T_2 = OFF \rightarrow (Freewheeling1) \\ 0, T_1 = OFF, T_2 = ON \rightarrow (Freewheeling2) \\ -V_{dc}, T_1, T_2 = OFF \end{cases} \quad (5.2)$$

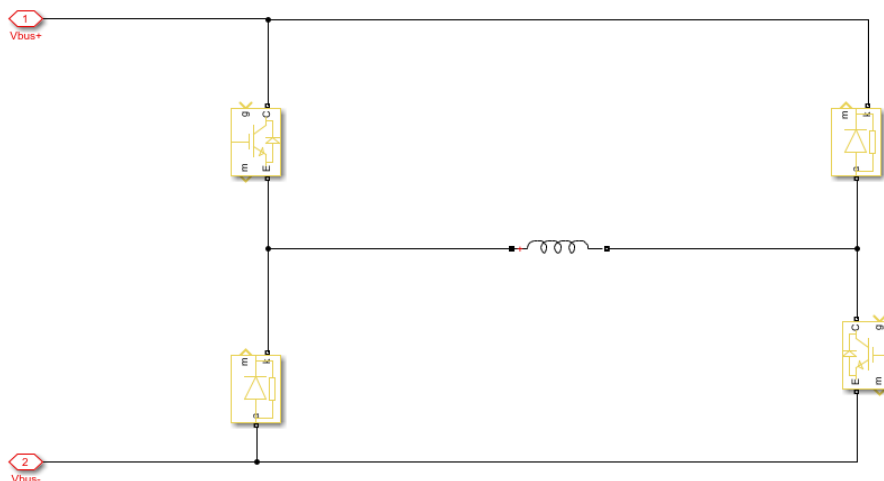


Σχήμα 5.5: Στρατηγική 2: Λειτουργικές καταστάσεις

Παρόλο που αυτή η τεχνική ελέγχου έχει αρκετά πλεονεκτήματα για το κυκλώμα, η επαναφόρτιση της πηγής είναι πολύ χρήσιμη σε περιπτώσεις, που χρειάζεται άμεσότητα στην μείωση του ρεύματος. Τέτοιες αναγκαιότητες προκύπτουν όταν η κλίση της επαγωγής είναι μηδενική ή ακόμα και αρνητική. Σε αυτές τις περιοχές, οποιαδήποτε ροή ρεύματος, ακόμα και μικρή, οδηγεί σε απώλειες ενέργειας και σε ανάπτυξη αρνητικής ροπής.

5.4.2 Μετατροπέας της 8/6 SRM

Στο Σχ.5.6 απεικονίζεται η υλοποίηση του αντιστροφέα στο περιβάλλον SIMULINK. Χρησιμοποιήθηκαν τα στοιχεία (blocks) IGBT και Diode. Σημειώνεται ότι τα στοιχεία αυτά ρυθμίστηκαν έτσι, ώστε να λειτουργούν σαν ιδανικά στοιχεία. Συνεπώς, στην παρούσα εργασία δεν θα ληφθούν υπόψιν πτώσεις τάσεων στα ημιαγωγικά στοιχεία και διακοπτικές απώλειες.



Σχήμα 5.6: Υλοποίηση του αντιστροφέα στο SIMULINK

5.5 Μηχανή μεταβλητής μαγνητικής αντίστασης

Η μηχανή μεταβλητής μαγνητικής αντίστασης αναλύθηκε εκτενώς στο Κεφ.2 και προέκυψε η εξίσωση ισοδύναμου κυκλώματος:

$$V = R_s i + L(\theta, i) \frac{di}{dt} + i \omega_m \frac{dL(\theta, i)}{d\theta} \quad (5.3)$$

Από την παραπάνω εξίσωση προκύπτει ότι μπορούμε να μοντελοποιήσουμε το ανά φάση ισοδύναμο κύκλωμα μιας SRM με τα εξής στοιχεία:

- Μία ωμική αντίσταση, η οποία θα αντιπροσωπεύει την ωμική πτώση τάσης του τυλίγματος.
- Ένα πηνίο μεταβλητού συντελεστή αυτεπαγωγής, το οποίο θα αντιπροσωπεύει την επαγωγική πτώση τάσης.
- Μία πηγή τάσης μεταβλητής τιμής, η οποία θα αντιπροσωπεύει την αντι-HEΔ.

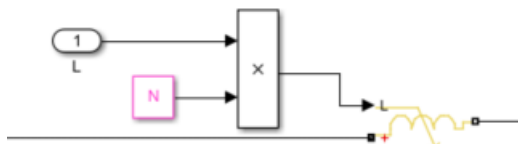
5.5.1 8/6 SRM

Σαν πρώτο βήμα, ήταν πολύ εύκολο να βρούμε μία ωμική αντίσταση στην βιβλιοθήκη του SIMULINK. Οπότε, επιλέξαμε το στοιχείο Series RLC Branch με Branch Type R:



Σχήμα 5.7: Ωμική αντίσταση στο SIMULINK

Το πιο απαιτητικό στοιχείο του ισοδύναμου κυκλώματος ήταν το πηνίο μεταβλητού συντελεστή αυτεπαγωγής. Για αυτόν τον σκοπό χρησιμοποιήθηκε το στοιχείο Variable Inductor:



Σχήμα 5.8: Πηνίο μεταβλητού συντελεστή αυτεπαγωγής στο SIMULINK

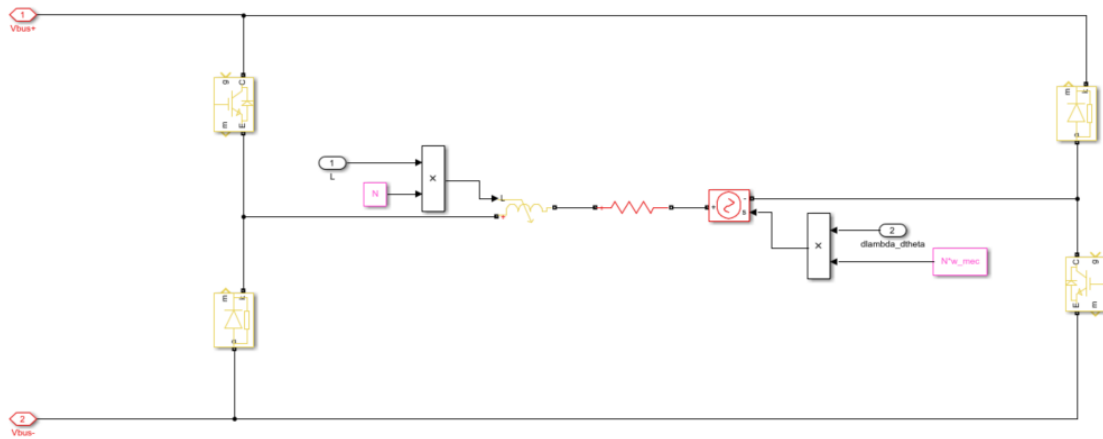
Το στοιχείο αυτό προστέθηκε πρόσφατα στη βιβλιοθήκη του εν λόγω λογισμικού και αποτέλεσε κομβικό ρόλο στην μοντελοποίηση της μηχανής. Η τιμή της αυτεπαγωγής λαμβάνεται απευθείας από σήμα του μοντέλου. Στο Σχ.5.8 βλέπουμε ότι η τιμή που λαμβάνει το πηνίο είναι η αυτεπαγωγή της φάσης για ένα έλιγμα ανά πόλο (όπως υπολογίστηκε στο κεφάλαιο 4) πολλαπλασιασμένη επί τον αριθμό ελιγμάτων ανά πόλο (στην παρούσα εργασία $N = 7$ ελίγματα). Ο μόνος περιορισμός που πρόσθεσε αυτό το στοιχείο στο μοντέλο ήταν ότι η προσομοίωση έπρεπε να γίνει με διακριτό τρόπο.

Τέλος, με πολύ παρόμοιο τρόπο επιλέχθηκε το στοιχείο Controlled Voltage Source για να μοντελοποιηθεί η αντι-HEΔ. Το στοιχείο αυτό επίσης λαμβάνει τιμή τάσης απευθείας από σήμα που δημιουργείται μέσα στο μοντέλο. Όπως φαίνεται στο Σχ.5.9, η τιμή που λαμβάνει η ελεγχόμενη πηγή τάσης είναι η μεταβολή της πεπλεγμένης ροής ως προς τη γωνία δρομέα για ένα έλιγμα ανά πόλο (όπως υπολογίστηκε στο κεφάλαιο 4) πολλαπλασιασμένη επί τον αριθμό ελιγμάτων ανά πόλο και την γωνιακή ταχύτητα δρομέα.



Σχήμα 5.9: Ελεγχόμενη πηγή τάσης στο SIMULINK

Συνολικά, το ανά φάση ισοδύναμο κύκλωμα μαζί με τον αντιστροφέα απεικονίζονται στο Σχ.5.10:



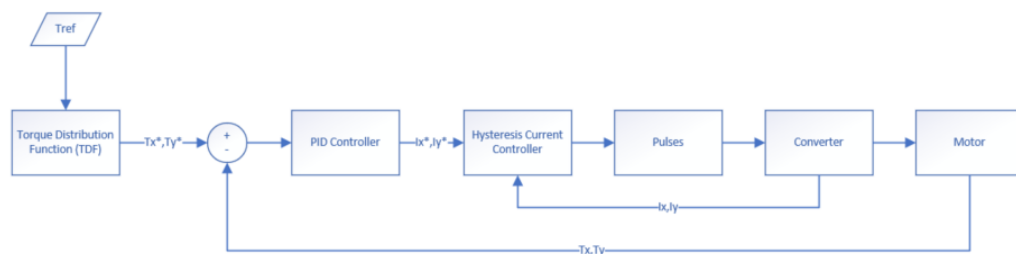
Σχήμα 5.10: Ανά φάση κύκλωμα της 8/6 SRM στο SIMULINK

Κεφάλαιο 6

Έλεγχος και οδήγηση της 8/6 SRM

6.1 Εισαγωγή

Στο Κεφ.4 συλλέχθηκαν οι απαραίτητες πληροφορίες, ώστε να μπορούν να προσδιοριστούν οι μεταβλητές της 8/6 SRM για κάθε λειτουργική της κατάσταση. Στο Κεφ.5 προσδιορίστηκε ο τρόπος με τον οποίο η εν λόγω μηχανή αναπαραστήθηκε στο λογισμικό SIMULINK. Σε αυτό το κεφάλαιο, τα Κεφ.4 και Κεφ.5 θα συνδυαστούν με τέτοιο τρόπο, ώστε να επιτευχθεί έλεγχος της ροπής της μηχανής σε σταθερή ταχύτητα. Στο παρακάτω σχήμα απεικονίζεται η δομή του ελέγχου που θα ακολουθηθεί:



Σχήμα 6.1: Δομή ελέγχου ροπής της μηχανής

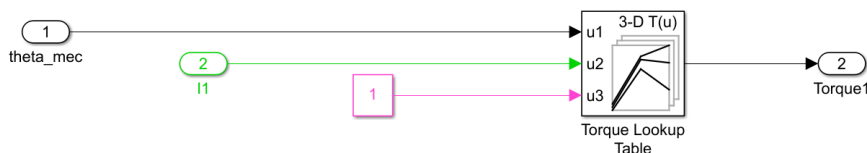
Ουσιαστικά στο μοντέλο δίνεται ως είσοδος μία ροπή αναφοράς, η οποία κατανέμεται κατάλληλα σε μία ή παραπάνω φάσεις. Η αναφορά συγκρίνεται με την μετρούμενη τιμή ροπής, που αναπτύσσουν κάθε στιγμή οι φάσεις αυτές, και το σφάλμα μετατρέπεται με έναν ΠΙ ελεγκτή σε ρεύμα αναφοράς. Με τη σειρά του, αυτό το ρεύμα αναφοράς συγκρίνεται με το μετρούμενο ρεύμα των φάσεων, που εμπλέκονται στην ανάπτυξη ροπής στον δρομέα. Ανάλογα με το πρόσημο και τη τιμή του σφάλματος, καθορίζεται και ο έλεγχος των διακοπών του αντιστροφέα. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται συνεχώς μέχρι να επιτευχθεί η καλύτερη δυνατή ροπή, με μέσο όρο κοντά στην τιμή της αναφοράς. Η ανάδραση του ρεύματος λαμβάνεται απευθείας από τη φάση της μηχανής, ενώ η ανάδραση της ροπής λαμβάνεται από τον πίνακα

αναζήτησης (Lookup Table) ροπής. Η διαδικασία αυτή θα αναλυθεί εκτενώς στη συνέχεια του κεφαλαίου.

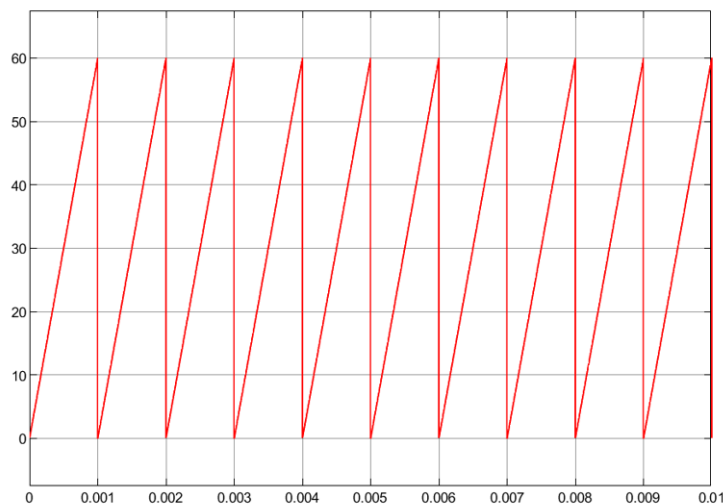
6.2 Πίνακες Αναζήτησης (Lookup Tables)

Στο Κεφ.4 μετρήθηκαν κάποιες μεταβλητές τις μηχανής, και αποθηκεύτηκαν οι τιμές τους για διάφορες λειτουργικές καταστάσεις σε μορφή πινάκων. Οι πίνακες αυτοί χρησιμοποιήθηκαν στο μοντέλο του SIMULINK ως Lookup Tables με σκοπό να προσδιορίζεται η λειτουργική κατάσταση της μηχανής σε κάθε βήμα της προσομοίωσης:

- Τρισδιάστατος πίνακας 3D της ροπής ως συνάρτηση της θέσης δρομέα, του ρεύματος διέγερσης και της διεγερόμενης φάσης (Σχ.6.2). Για οποιαδήποτε φάση, το ρεύμα διέγερσης μετράται απευθείας από το ισοδύναμο κύκλωμα με ένα αμπερόμετρο. Η θέση του δρομέα, εφόσον η ταχύτητα περιστροφής είναι σταθερή, μπορεί να μοντελοποιηθεί με την βοήθεια ενός πριονωτού σήματος όπως φαίνεται στο Σχ.6.3.



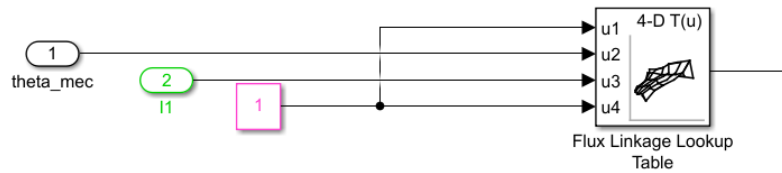
Σχήμα 6.2: Πίνακας αναζήτησης ροπής της φάσης A για ρεύμα διέγερσης I1 και θέση δρομέα theta mec



Σχήμα 6.3: Μοντελοποίηση θέσης δρομέα περιστρεφόμενου με σταθερή ταχύτητα 10000 ΣΑΛ

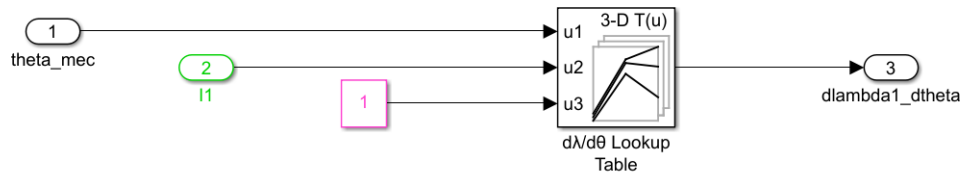
- Τετραδιάστατος πίνακας 4D της πεπλεγμένης μαγνητικής ροής ως συνάρτηση της θέσης δρομέα, του ρεύματος διέγερσης, της διεγερόμενης φάσης και της φάσης στην οποία

γίνεται η μέτρηση. Στο Σχ.6.4 παρατηρούμε ότι η διεγερόμενη και η μετρούμενη φάση είναι ίδιες, καθώς στην παρούσα εργασία τα αμοιβαία φαινόμενα θεωρούνται αμελητέα.



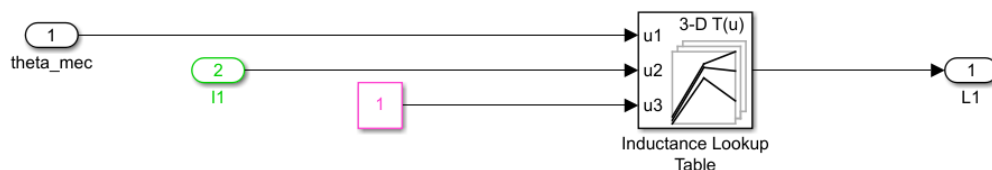
Σχήμα 6.4: Πίνακας αναζήτησης πεπλεγμένης μαγνητικής ροής λ της φάσης A για ρεύμα διέγερσης I_1 και θέση δρομέα θ_{mec}

- Τρισδιάστατος πίνακας 3D του όρου $d\lambda/d\theta$ ως συνάρτηση της θέσης δρομέα, του ρεύματος διέγερσης και της διεγερόμενης φάσης.



Σχήμα 6.5: Πίνακας αναζήτησης $d\lambda/d\theta$ της φάσης A για ρεύμα διέγερσης I_1 και θέση δρομέα θ_{mec}

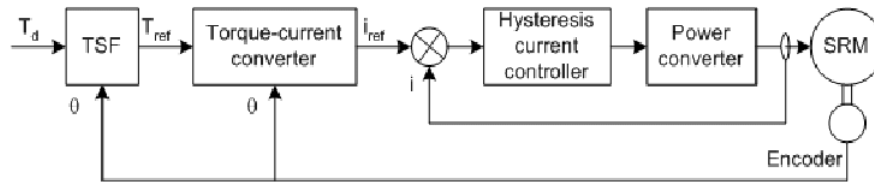
- Τρισδιάστατος πίνακας 3D του συντελεστή αυτεπαγωγής ως συνάρτηση της θέσης δρομέα, του ρεύματος διέγερσης και της διεγερόμενης φάσης.



Σχήμα 6.6: Πίνακας αναζήτησης συντελεστή αυτεπαγωγής της φάσης A για ρεύμα διέγερσης I_1 και θέση δρομέα θ_{mec}

6.3 Έλεγχος στιγμιαίας ροπής

Η δομή του ελέγχου στιγμιαίας ροπής που αναπτύχθηκε στην παρούσα εργασία απεικονίζεται στο Σχ.6.7. Η ροπή ελέγχεται μετατρέποντας την αναφορά της στο αντίστοιχο ρεύμα αναφοράς. Έτσι, ελέγχοντας το ρεύμα διέγερσης, ελέγχεται εμμέσως και η ροπή. Η συνολική



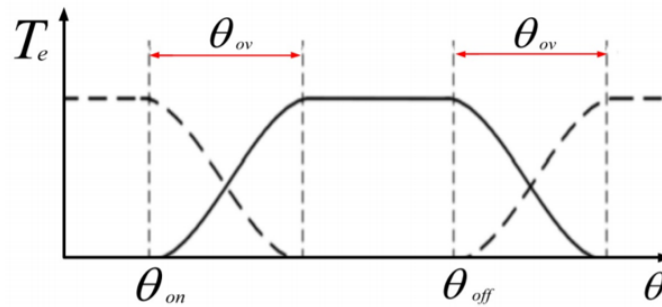
Σχήμα 6.7: Δομή ελέγχου στιγμιαίας ροπής

ροπή αναφοράς T_d κατανέμεται στις φάσεις της μηχανής μέσω μιας συνάρτησης κατανομής ροπής (Torque Distribution Function-TSF). Δημιουργούνται, δηλαδή τέσσερις ροπές αναφοράς, μία για κάθε φάση της μηχανής.

6.3.1 Συνάρτησης κατανομής ροπής (Torque Distribution Function-TSF)

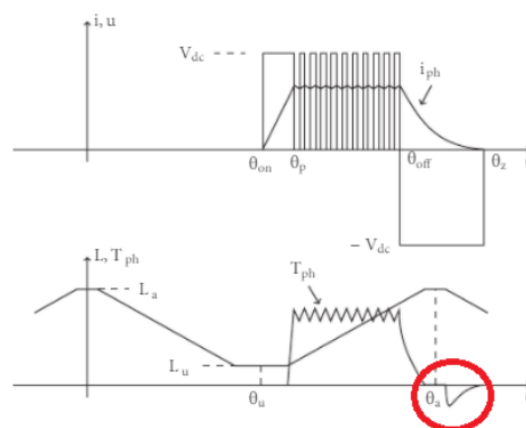
Όπως έχει ήδη αναλυθεί, ένα από τα σημαντικότερα μειωνεκτήματα των SRMs είναι η σημαντική διακύμανση ροπής που παρουσιάζουν στην έξοδο. Η κατανομή της συνολικής ροπής αναφοράς στις επιμέρους φάσεις, είναι ένας τρόπος να μειωθεί αυτό το φαινόμενο, ακόμα και χωρίς να υπάρχει πληροφόρηση για τα χαρακτηριστικά της ροής της μηχανής. Οι TSFs επιλέγονται με τέτοιο τρόπο, ώστε πάντα να εξασφαλίζεται ότι το άθροισμα των επιμέρους ροπών αναφοράς ισούται με την συνολική. Προφανώς, η επιλογή δεν είναι μοναδική και πολλές διαφορετικές συναρτήσεις μπορούν να ικανοποιούν τις ανάγκες μιας εφαρμογής. Μεταξύ πολλών συναρτήσεων, στην παρούσα εργασία επιλέχθηκε η τροποποιημένη ημιτονοειδής συνάρτηση κατανομής ροπής (Modified Sinusoidal TSF), καθώς αποτελεί βέλτιστη λύση για την επίτευξη ελαχιστοποίησης διακύμανσης ροπής. Στο Σχ.6.8 φαίνεται η μαθηματική αναπαράσταση της εν λόγω συνάρτησης κατανομής συναρτήσεως της γωνίας έναρξης αγωγής της φάσης (θ_{on}), της γωνίας έναρξης φθηνουσών απαιτήσεων ροπής από την φάση (θ_{off}) και της γωνίας αλληλεπικάλυψης μεταξύ των διαδοχικών φάσεων (θ_{ov}).

$$TSF(\theta) = \begin{cases} 0, & (0 \leq \theta \leq \theta_{on}) \\ \frac{T_e}{2} - \frac{T_e}{2} \cos \frac{\pi}{\theta_{ov}} (\theta - \theta_{on}), & (\theta_{on} \leq \theta \leq \theta_{on} + \theta_{ov}) \\ T_e, & (\theta_{on} + \theta_{ov} \leq \theta \leq \theta_{off}) \\ \frac{T_e}{2} + \frac{T_e}{2} \cos \frac{\pi}{\theta_{ov}} (\theta - \theta_{off}), & (\theta_{off} \leq \theta \leq \theta_{off} + \theta_{ov}) \\ 0, & (\theta_{off} + \theta_{ov} \leq \theta \leq \theta_p) \end{cases}$$



Σχήμα 6.8: Τροποποιημένη ημιτονοειδής συνάρτηση κατανομής ροπής (Πηγή: [9])

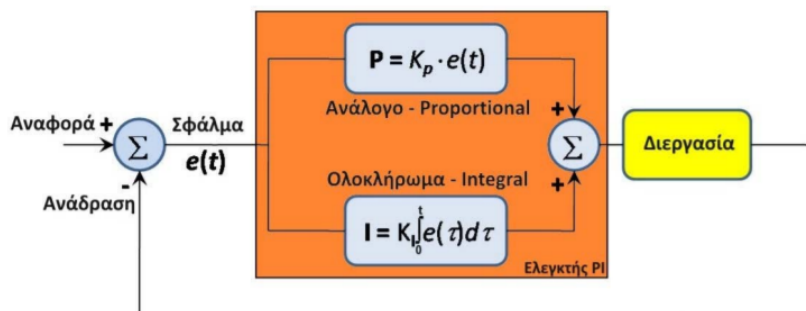
Η επιλογή των γωνιών θ_{on} , θ_{off} και θ_{ov} αποτελεί ένα μεγάλο κεφάλαιο για την οδήγηση των SRM και την ελαχιστοποίηση της διακύμανσης της ροπής. Από τη μία, η σωστή επιλογή της γωνίας θ_{on} επιτρέπει στην μηχανή να αναπτύξει το κατάλληλο ρεύμα διέγερσης, ώστε, όταν η τιμή του συντελεστή αυτεπαγωγής αρχίσει να αυξάνεται, αυτό να μετατραπεί στην αναγκαία ηλεκτρομαγνητική ροπή. Από την άλλη, η σωστή επιλογή της γωνίας θ_{off} εξασφαλίζει ότι το ρεύμα θα διαθέτει τον απαραίτητο χρόνο ώστε να μηδενιστεί πριν τη περιοχή παραγωγής αρνητικής ροπής. Στο Σχ.6.9 φαίνεται πως με λανθασμένη επιλογή της γωνίας θ_{off} το ρεύμα καθυστερεί να μηδενιστεί και αναπτύσσεται αρνητική ροπή για ένα μικρό χρονικό διάστημα.



Σχήμα 6.9: Παραγωγή αρνητικής ροπής

6.3.2 Έλεγχος ροπής με αναλογικό-ολοκληρωτικό ελεγκτή (PI)

Έχοντας, λοιπόν, καταναίμει την συνολική ροπή αναφοράς στις επιμέρους φάσεις, το επόμενο βήμα είναι να συγκρίνουμε τις αναφορές με τις μετρούμενες τιμές. Για κάθε φάση, η μετρούμενη τιμή ροπής λαμβάνεται από τον πίνακα αναζήτησης ροπής. Το σφάλμα μεταξύ της ροπής αναφοράς και της μετρούμενης εισάγεται σε έναν αναλογικό-ολοκληρωτικό ελεγκτή (PI), ώστε να προκύψει το φασικό ρεύμα αναφοράς (Σχ.6.10)



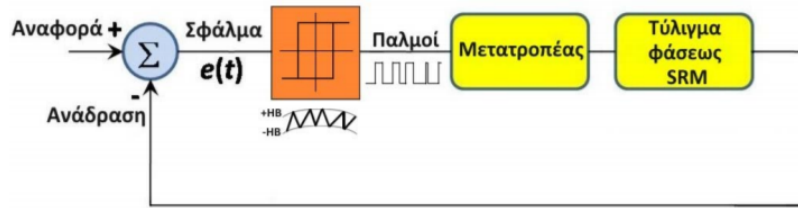
Σχήμα 6.10: Αναλογικός-ολοκληρωτικός ελεγκτής (PI) (Πηγή: [4])

Ο έλεγχος αναλόγου-ολοκληρώματος είναι μία τεχνική ελέγχου, η οποία έχει αναπτυχθεί και θεμελιωθεί μαθηματικά για γραμμικά μη χρονομεταβλητά συστήματα. Σύμφωνα με αυτή τη τεχνική, η δράση του ελέγχου πρέπει να συνδέεται με κάποιο τρόπο με το σφάλμα, δηλαδή την απόκλιση από τον στόχο. Όπως φαίνεται στο σχήμα, ο έλεγχος δρα ως υπέρθεση δύο συνιστωσών, μίας ανάλογης του σφάλματος (P) και μίας που προκύπτει από την ολοκλήρωση του σφάλματος στο χρόνο. Η σύγκλιση της εν λόγω τεχνικής για γραμμικά μη χρονομεταβλητά συστήματα έχει τεκμηριωθεί μαθηματικά, ενώ υπάρχει συστηματικός τρόπος προσδιορισμού των κερδών K_p και K_i , έτσι ώστε να επιτυγχάνονται συγκεκριμένες προδιαγραφές απόκρισης και να διατηρείται ταυτόχρονα η ευστάθεια του συστήματος. Στην περίπτωση των SRM, αναφερόμαστε σε μη γραμμικά συστήματα, οπότε ο εν λόγω έλεγχος πρέπει να εφαρμόζεται με προσοχή.

6.3.3 Έλεγχος ρεύματος με ζώνη υστέρησης (Hysteresis Control)

Το φασικό ρεύμα αναφοράς που λαμβάνεται από την έξοδο του PI ελεγκτή συγκρίνεται με το μετρούμενο φασικό ρεύμα και το σφάλμα εισάγεται σε έναν ελεγκτή με ζώνη υστέρησης. Με αυτόν τον τρόπο ελέγχονται οι διακόπτες του αντιστροφέα (Σχ.6.11).

Ο έλεγχος με ζώνη υστέρησης είναι ένας μη γραμμικός τρόπος ελέγχου. Στην τεχνική αυτή η δράση ελέγχου είναι διακριτή και λαμβάνει δύο καταστάσεις, αναλόγως εάν το παρατηρούμενο σφάλμα έχει ξεπεράσει ή όχι κάποια προσδιορισμένα όρια. Τα όρια αυτά συνιστούν την ζώνη υστέρησης, η οποία δεν είναι μοναδική και είναι στην ευχέρεια του σχεδιαστή να την επιλέξει. Κατά την επιλογή της ζώνης πρέπει να λαμβάνονται υπόψιν δύο αντιφατικά χαρακτηριστικά. Από την μία, η ζώνη πρέπει να είναι αρκετά στενή, ώστε το σφάλμα να είναι εντός επιτρεπτών τιμών. Από την άλλη, η ζώνη πρέπει να μην είναι υπερβολικά στενή, καθώς



Σχήμα 6.11: Έλεγχος με ζώνη υστέρησης (Hysteresis Control) (Πηγή: [4])

αυτό σημαίνει σημαντική αύξηση της διακοπτικής συχνότητας. Με άλλα λόγια, πριν τη ρύθμιση της ζώνης υστέρησης πρέπει να γνωρίζουμε τη μέγιστη επιτρεπόμενη απόκλιση από την τιμή αναφοράς, αλλά και την μέγιστη διακοπτική συχνότητα, που οι διακόπτες μπορούν να αντέξουν.

Η ζώνη υστέρησης διαθέτει ένα μέγιστο και ένα ελάχιστο αποδεκτό όριο για το σφάλμα του ρεύματος. Αν το σφάλμα του ρεύματος υπερβεί το άνω όριο, που σημαίνει ότι το φασικό ρεύμα θα πρέπει να αυξηθεί, ο ελεγκτής φροντίζει να εφαρμοστεί θετική συνεχής τάση στα άκρα του τυλίγματος της ενεργούς φάσης. Αν το σφάλμα λάβει τιμή χαμηλότερη από αυτή του ελάχιστου ορίου, σημαίνει ότι το φασικό ρεύμα θα πρέπει να μειωθεί. Η απαιτούμενη μείωση μπορεί να γίνει με δύο τρόπους. Ο ένας τρόπος είναι με τεχνική *soft-switching*, κατά την οποία εφαρμόζεται μηδενική τάση στα άκρα του τυλίγματος της ενεργούς φάσης. Ο άλλος τρόπος είναι με τεχνική *hard-switching*, κατά την οποία εφαρμόζεται μέγιστη αρνητική τάση στα άκρα του τυλίγματος της ενεργούς φάσης. Στην εφαρμογή της παρούσας εργασίας εφαρμόσαμε και τις δύο τεχνικές. Από τη γωνία θ_{on} μέχρι τη γωνία θ_{off} εφαρμόζεται η τεχνική *soft-switching*. Ενώ μετά τη γωνία θ_{off} που χρειάζεται πιο απότομος έλεγχος, ώστε να εξασφαλίσουμε την έγκαιρη σβέση του ρεύματος, εφαρμόζεται η τεχνική *hard-switching*.

6.4 Αποτελέσματα ελέγχου

Ο αρχικός στόχος που είχε τεθεί στην παρούσα εργασία ήταν η 8/6 SRM να μπορεί να αναπτύξει ροπή 20 Nm σε ταχύτητα 10000 ΣΑΛ. Ωστόσο, έγιναν δοκιμές ακόμα και στις 1000 και 5000 ΣΑΛ. Επίσης, για κάθε ταχύτητα έγιναν δοκιμές με ροπή αναφοράς 10, 15 και 20 Nm. Ο λόγος που έγιναν πολλές δοκιμές, ήταν για να αναδειχθεί η αλλαγή της συμπεριφοράς της μηχανής στις υψηλές ταχύτητες σε σχέση με τις χαμηλές. Στην ενότητα αυτή θα παρουσιαστούν και θα σχολιαστούν τα αποτελέσματα των εν λόγω δοκιμών. Σημειώνεται ότι για όλες τις δοκιμές τα κέρδη του ελεγκτή ροπής PI προσδιορίστηκαν εμπειρικά με τιμές $K_p = 2$ και $K_i = 10^6$.

6.4.1 Έλεγχος ροπής στις 1000 ΣΑΛ

Όπως αναλύθηκε και παραπάνω, οι κρίσιμες γωνίες θ_{on} , θ_{off} και θ_{ov} έχουν δυναμικό χαρακτήρα και πρέπει να αλλάζουν συνεχώς ανάλογα με την λειτουργική κατάσταση της μηχανής.

Σε αυτήν την εφαρμογή, λόγω της χρήσης της συνάρτησης κατανομής ροπής, ισχύει:

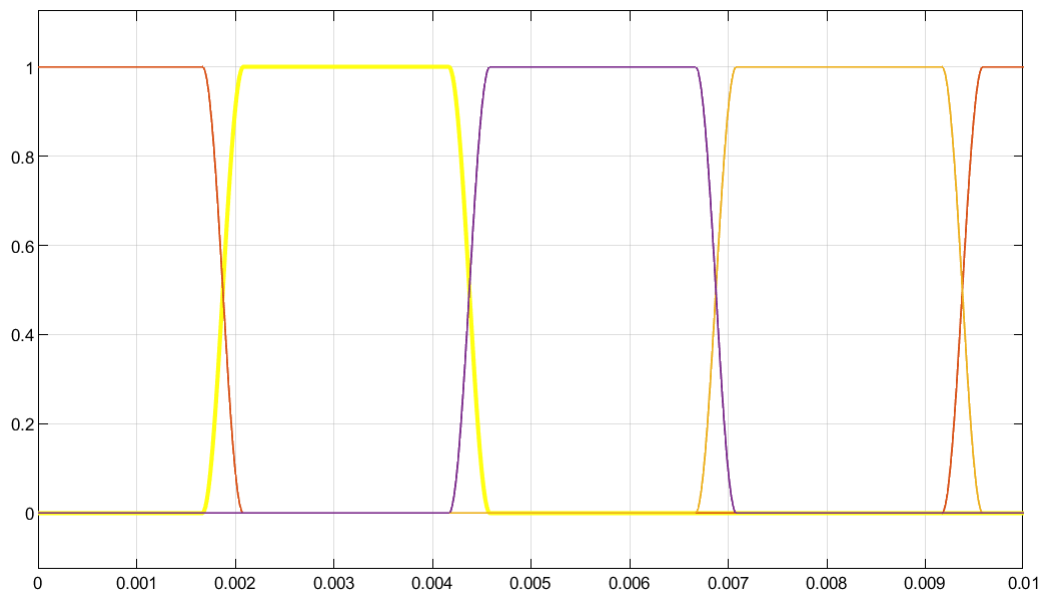
$$\theta_{off} = \theta_{on} + 15^\circ \quad (6.1)$$

Έτσι, για ταχύτητα περιστροφής ίση με 1000 ΣΑΛ, καταλήξαμε στις παρακάτω τιμές γωνιών:

θ_{on}	θ_{off}	θ_{ov}
10°	25°	2.5°

Πίνακας 6.1: Κρίσιμες γωνίες προσομοίωσης

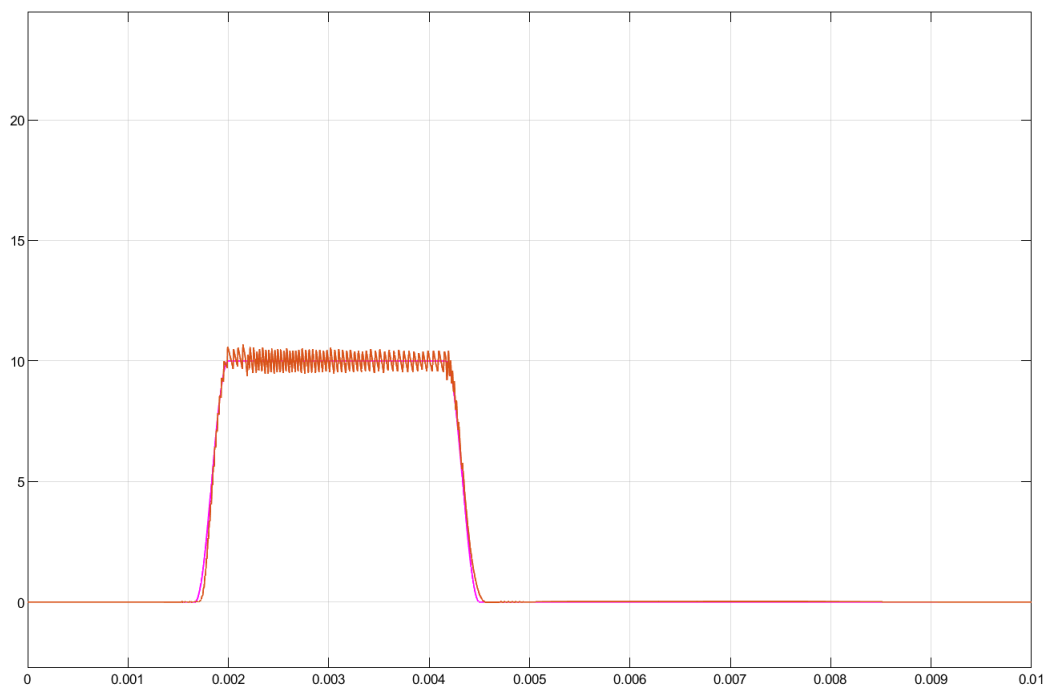
Η κατανομή της συνολικής ροπής αναφοράς απεικονίζεται στο Σχ.6.12



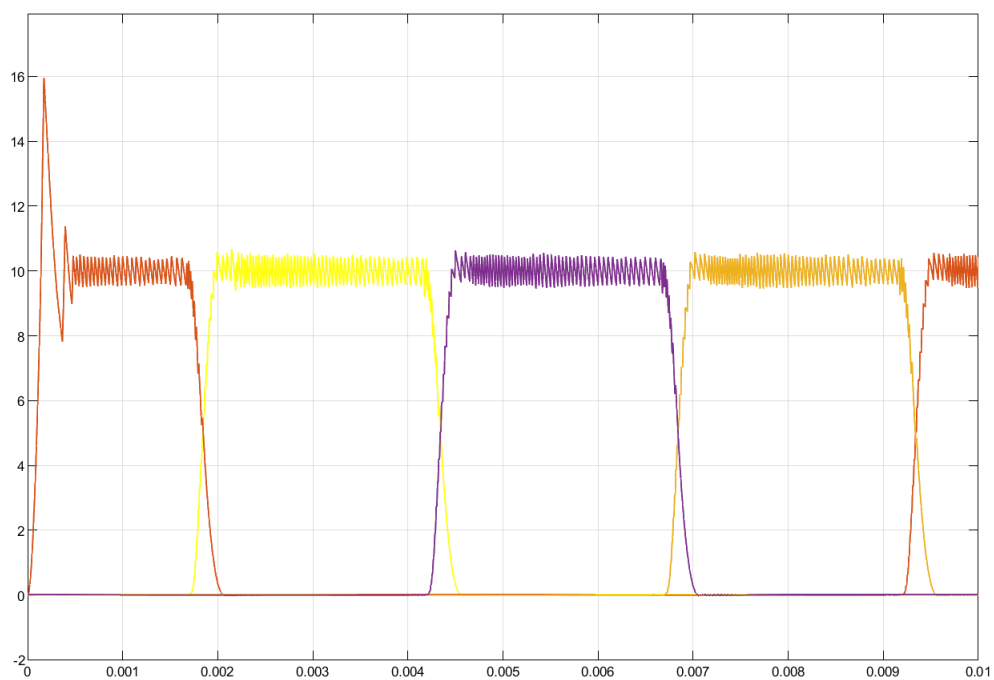
Σχήμα 6.12: Συνάρτηση κατανομής ροπής όλων των φάσεων για ταχύτητα περιστροφής 1000 ΣΑΛ

Ροπή αναφοράς 10 Nm

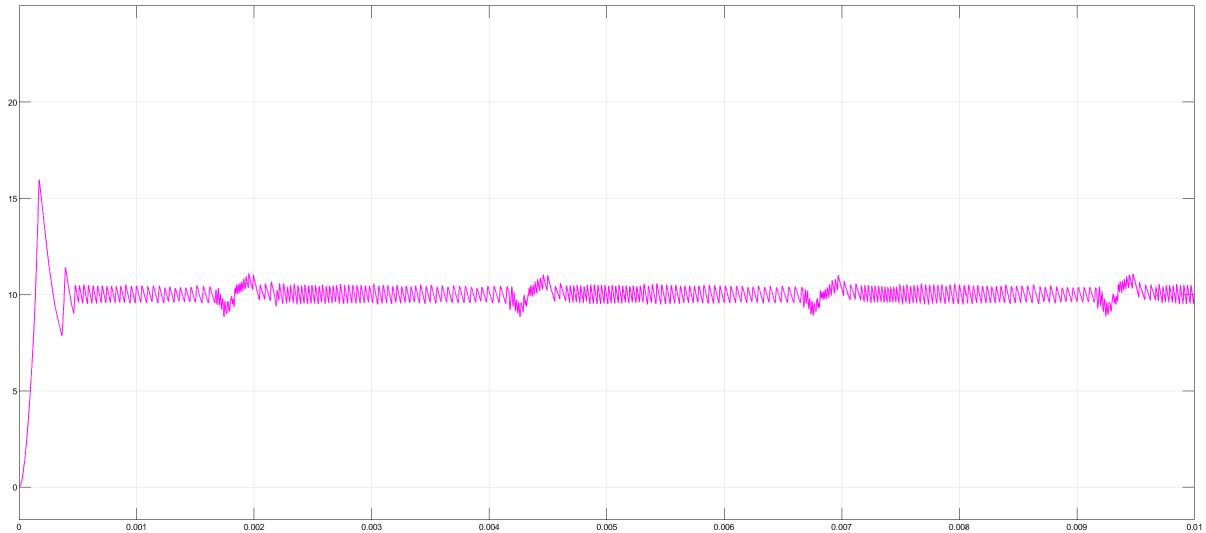
Με ροπή αναφοράς 10 Nm λάβαμε τα παρακάτω αποτελέσματα:



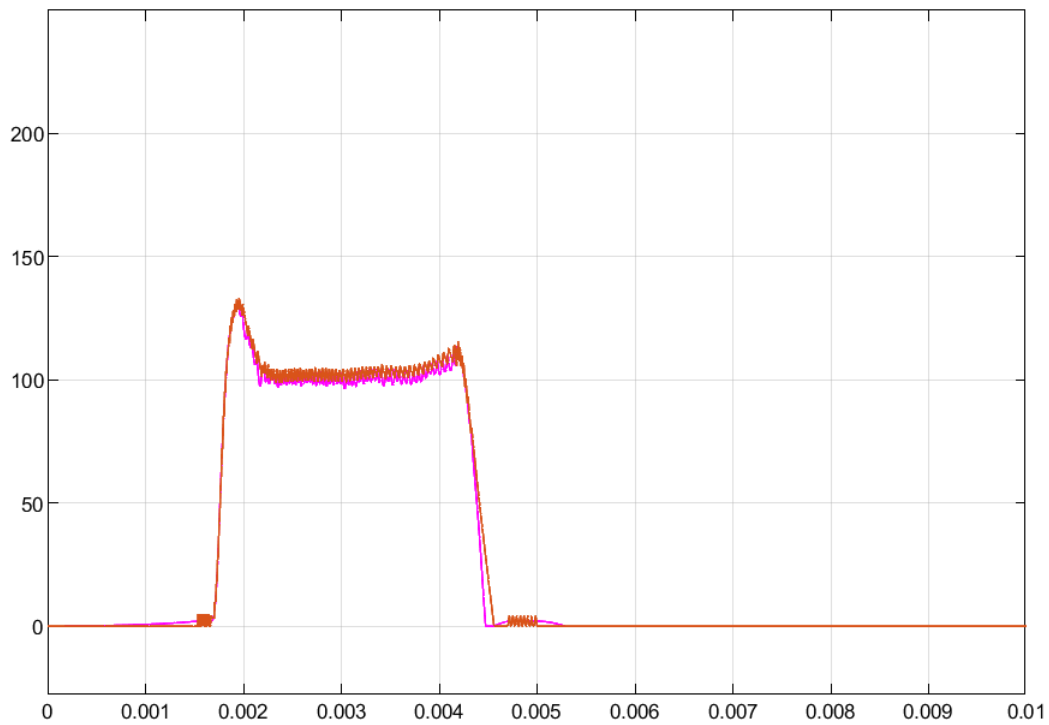
Σχήμα 6.13: Ανά φάση ροπή (Κόκκινο) σε σχέση με την ανά φάση ροπή αναφοράς (Ροζ) σε Nm



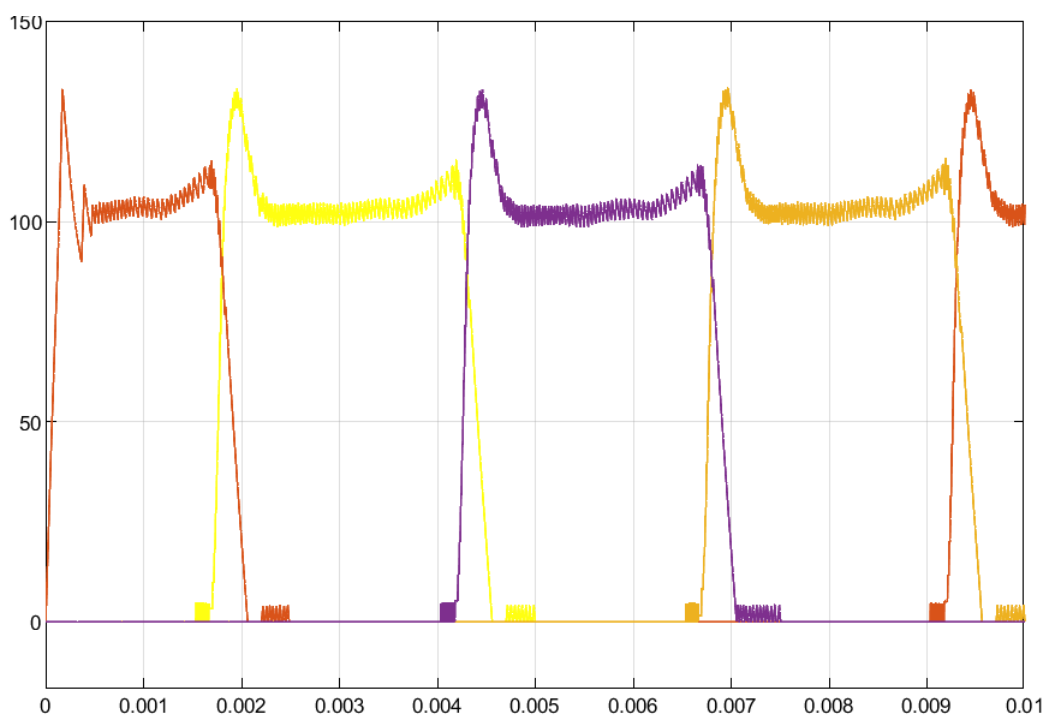
Σχήμα 6.14: Αναπτυσσόμενη ροπή κάθε φάσης σε Nm



Σχήμα 6.15: Συνολική αναπτυσσόμενη ροπή σε Nm



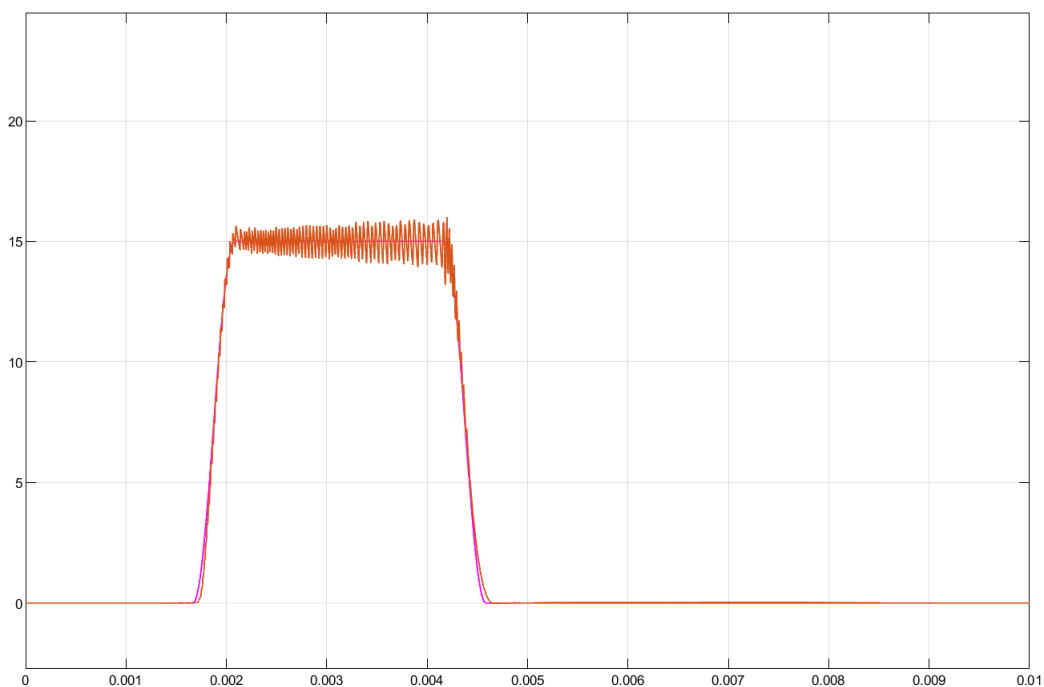
Σχήμα 6.16: Ανά φάση ρεύμα διέγερσης (Κόκκινο) σε σχέση με το ανά φάση ρεύμα αναφοράς (Ροζ) σε A



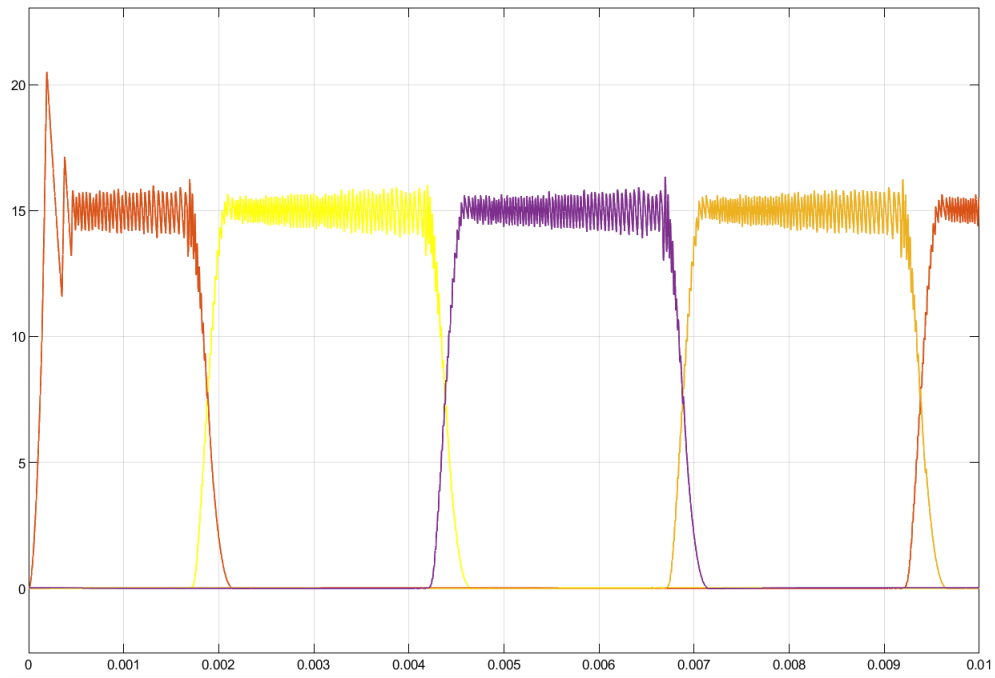
Σχήμα 6.17: Αναπτυσσόμενα ρεύματα διέγερσης κάθε φάσης σε A

Ροπή αναφοράς 15 Nm

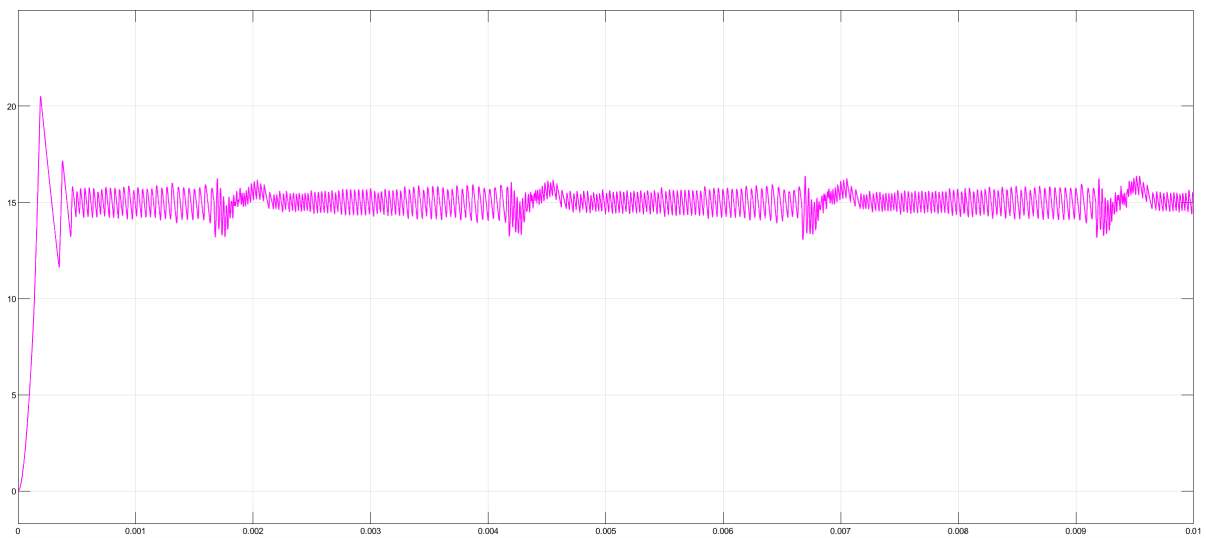
Με ροπή αναφοράς 15 Nm λάβαμε τα παρακάτω αποτελέσματα:



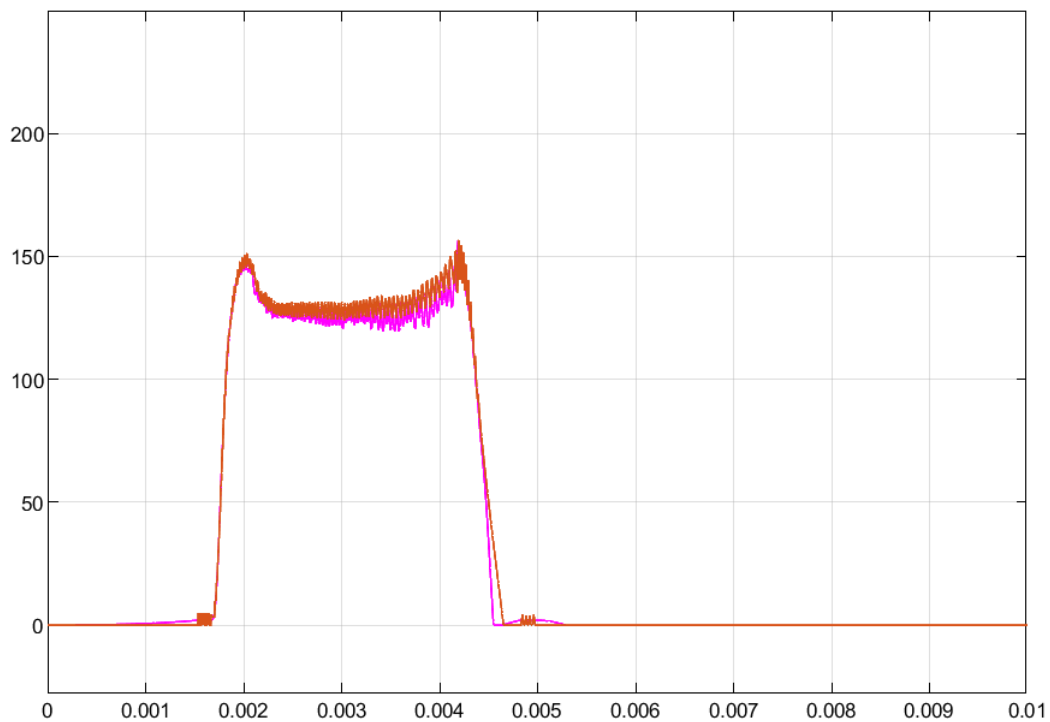
Σχήμα 6.18: Ανά φάση ροπή (Κόκκινο) σε σχέση με την ανά φάση ροπή αναφοράς (Ροζ) σε Nm



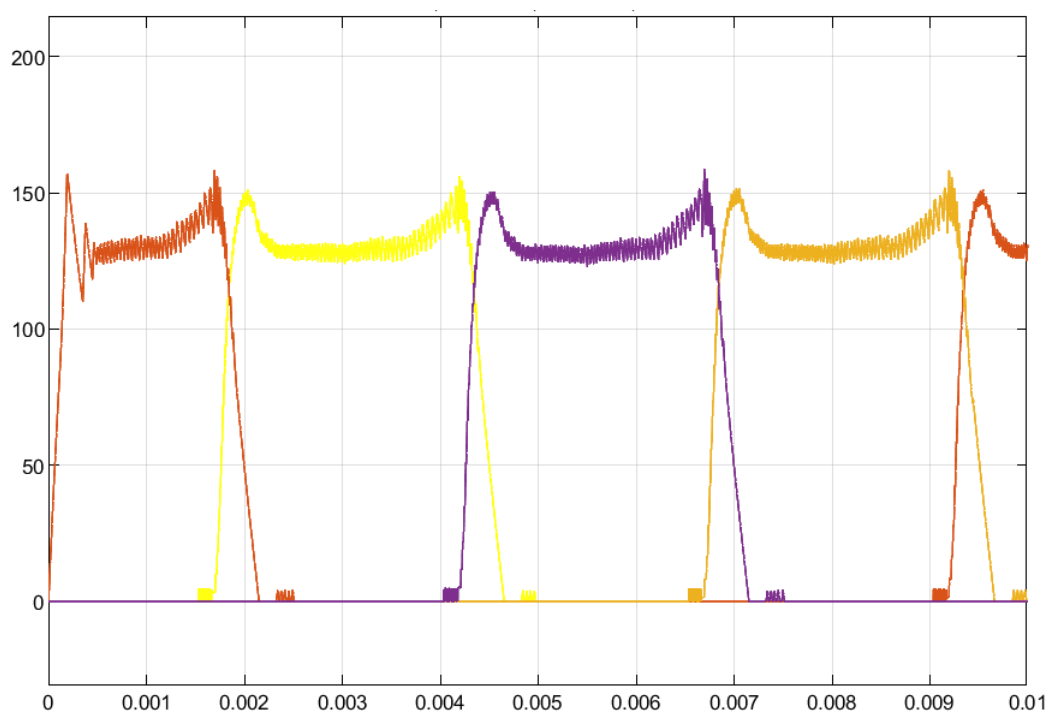
Σχήμα 6.19: Αναπτυσσόμενη ροπή κάθε φάσης σε Nm



Σχήμα 6.20: Συνολική αναπτυσσόμενη ροπή σε Nm



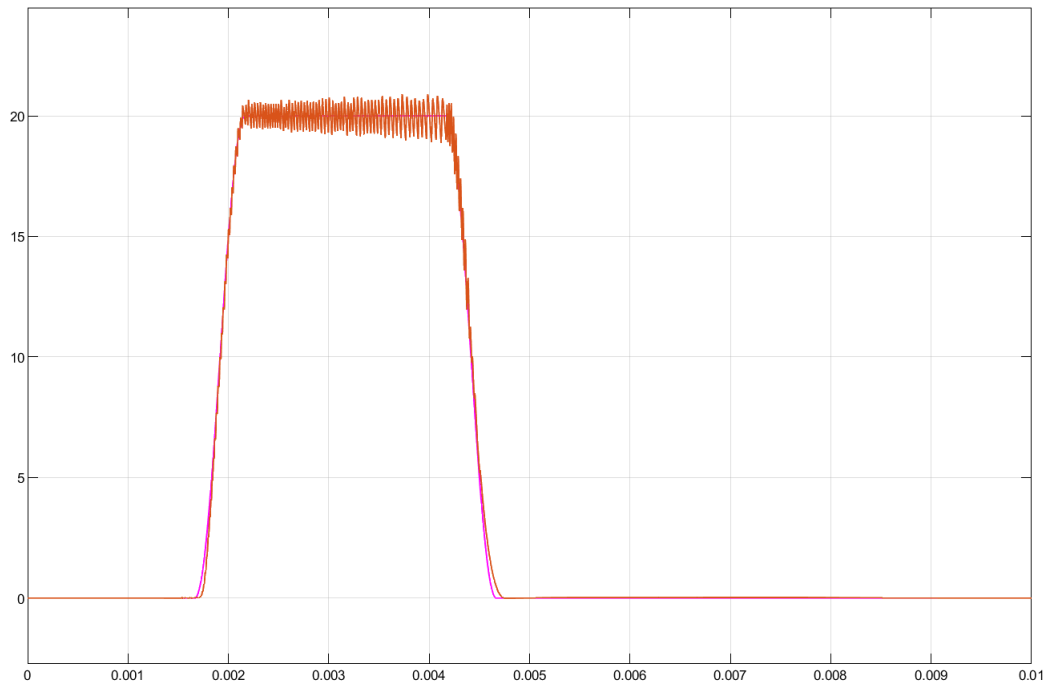
Σχήμα 6.21: Ανά φάση ρεύμα διέγερσης (Κόκκινο) σε σχέση με το ανά φάση ρεύμα αναφοράς (Ροζ) σε A



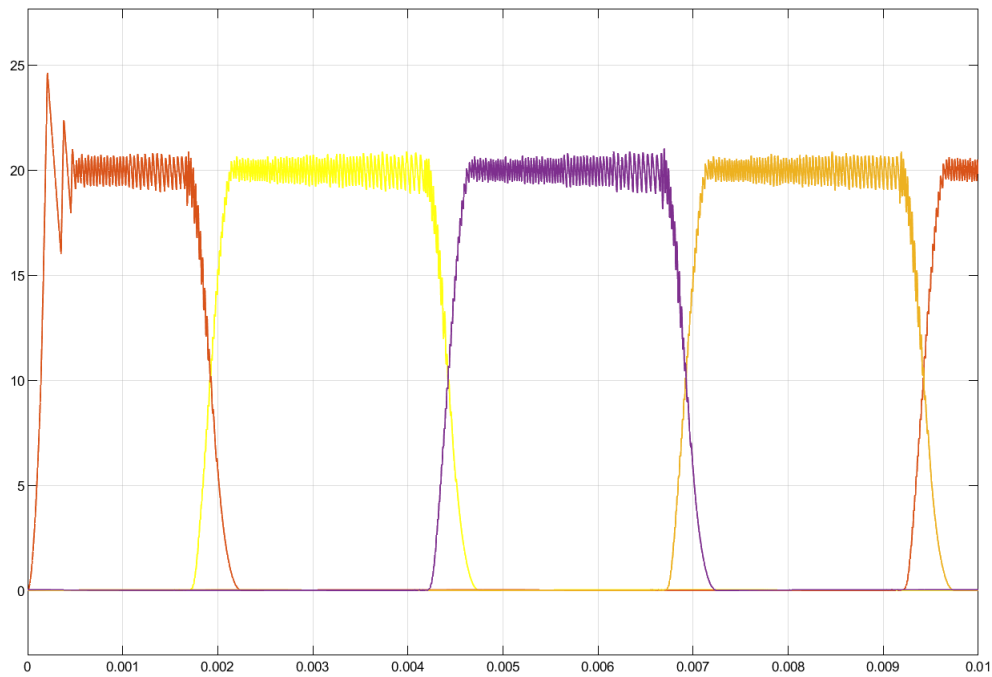
Σχήμα 6.22: Αναπτυσσόμενα ρεύματα διέγερσης κάθε φάσης σε A

Ροπή αναφοράς 20 Nm

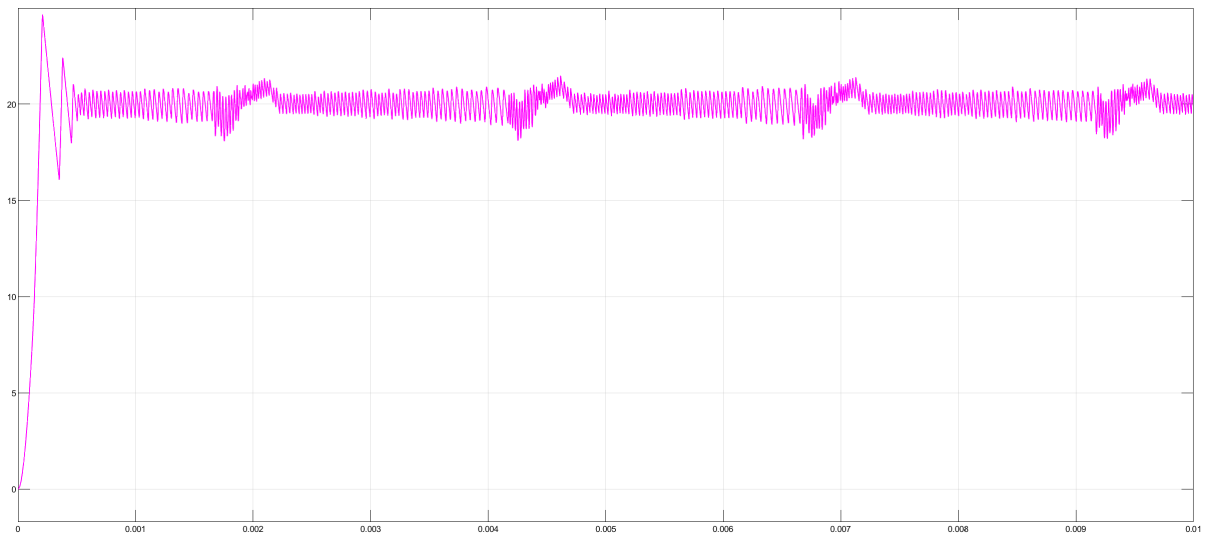
Με ροπή αναφοράς 20 Nm λάβαμε τα παρακάτω αποτελέσματα:



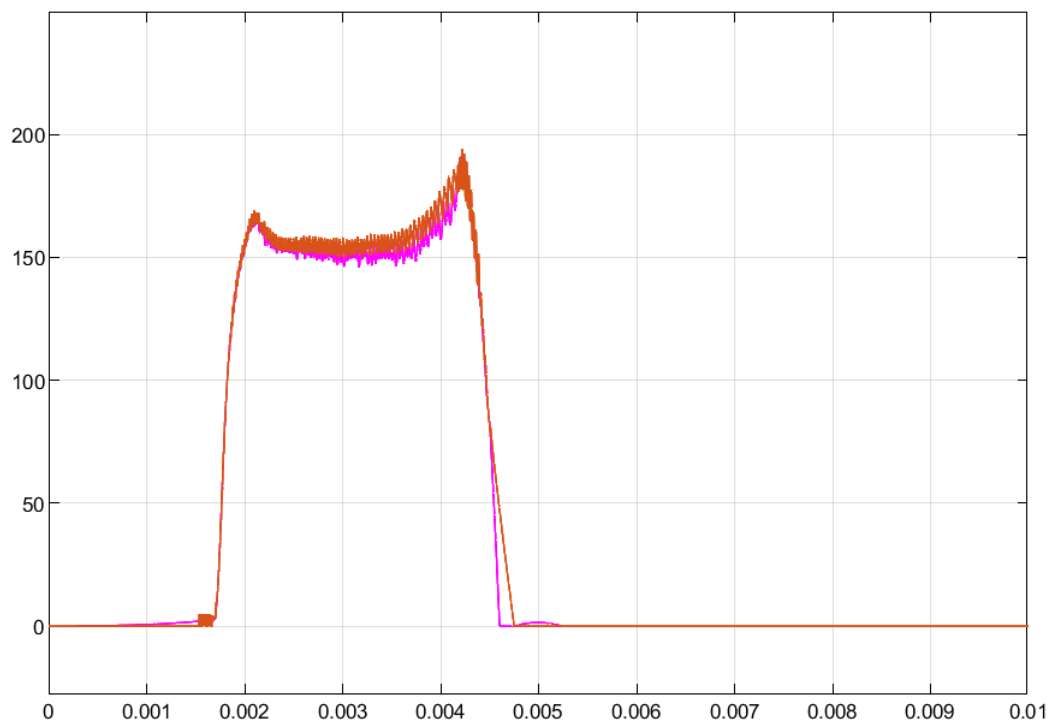
Σχήμα 6.23: Ανά φάση ροπή (Κόκκινο) σε σχέση με την ανά φάση ροπή αναφοράς (Ροζ) σε Nm



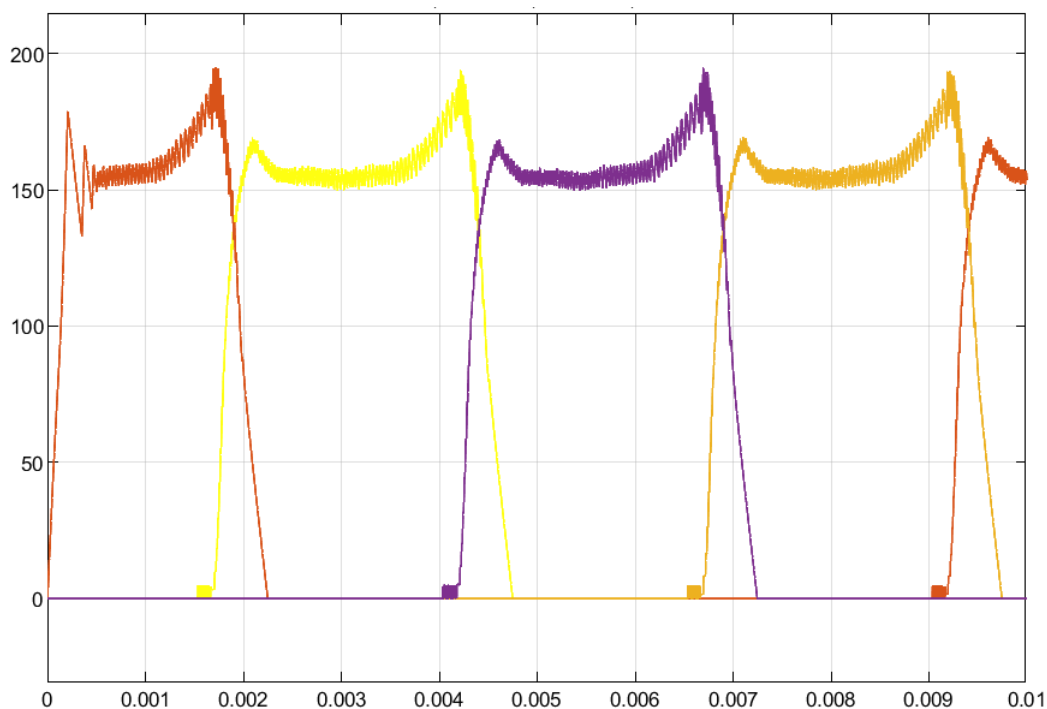
Σχήμα 6.24: Αναπτυσσόμενη ροπή κάθε φάσης σε Nm



Σχήμα 6.25: Συνολική αναπτυσσόμενη ροπή σε Nm



Σχήμα 6.26: Ανά φάση ρεύμα διέγερσης (Κόκκινο) σε σχέση με το ανά φάση ρεύμα αναφοράς (Ροζ) σε A



Σχήμα 6.27: Αναπτυσσόμενα ρεύματα διέγερσης κάθε φάσης σε A

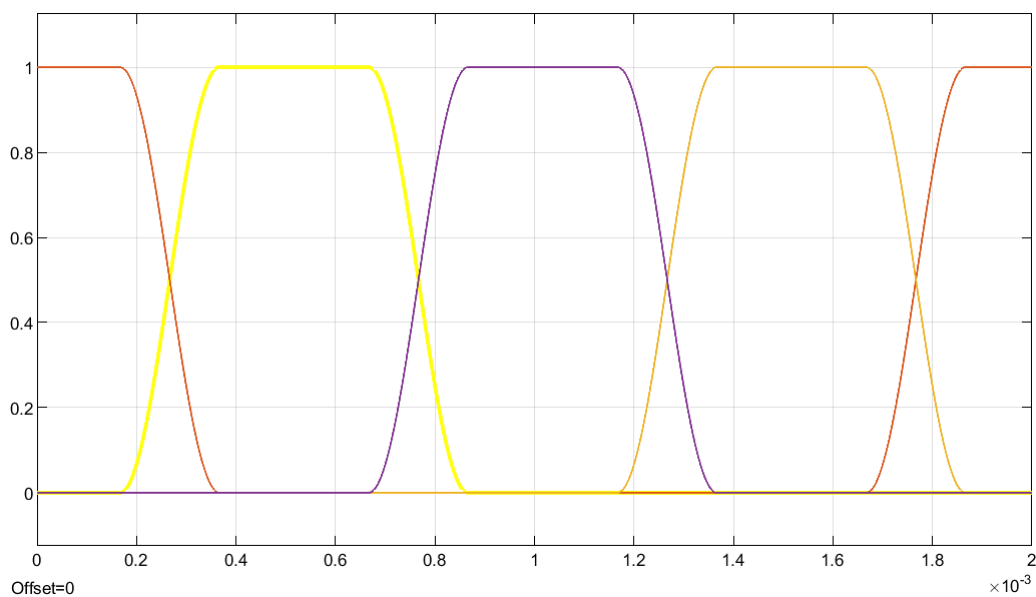
6.4.2 Έλεγχος ροπής στις 5000 ΣΑΛ

Για ταχύτητα περιστροφής ίση με 5000 ΣΑΛ, καταλήξαμε στις παρακάτω τιμές γωνιών:

θ_{on}	θ_{off}	θ_{ov}
5°	20°	6°

Πίνακας 6.2: Κρίσιμες γωνίες προσομοίωσης

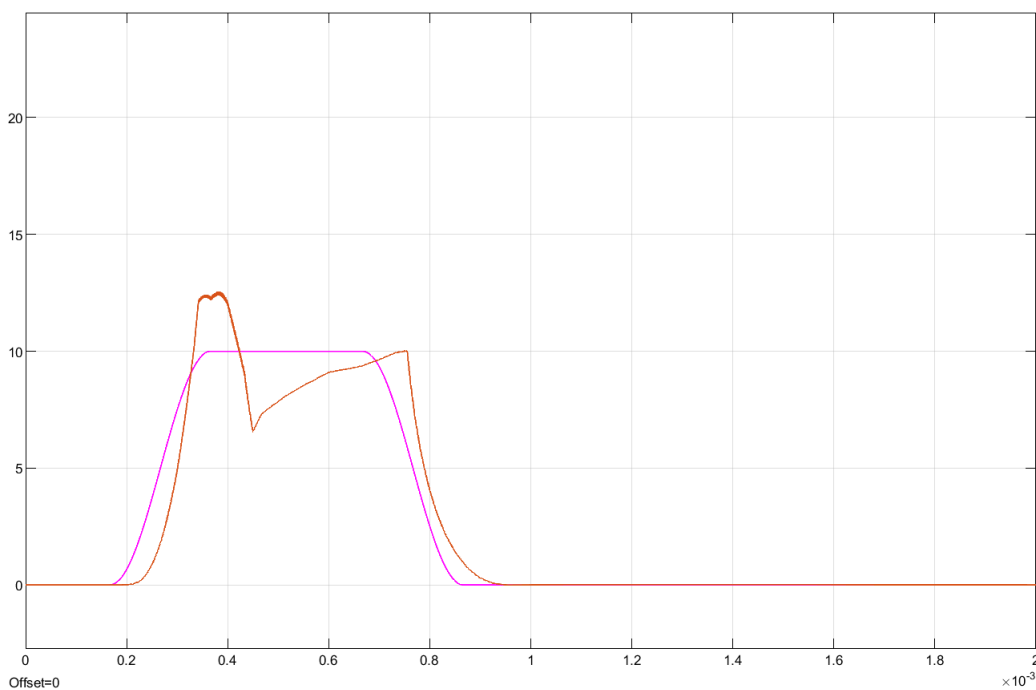
Η κατανομή της συνολικής ροπής αναφοράς απεικονίζεται στο Σχ.6.28



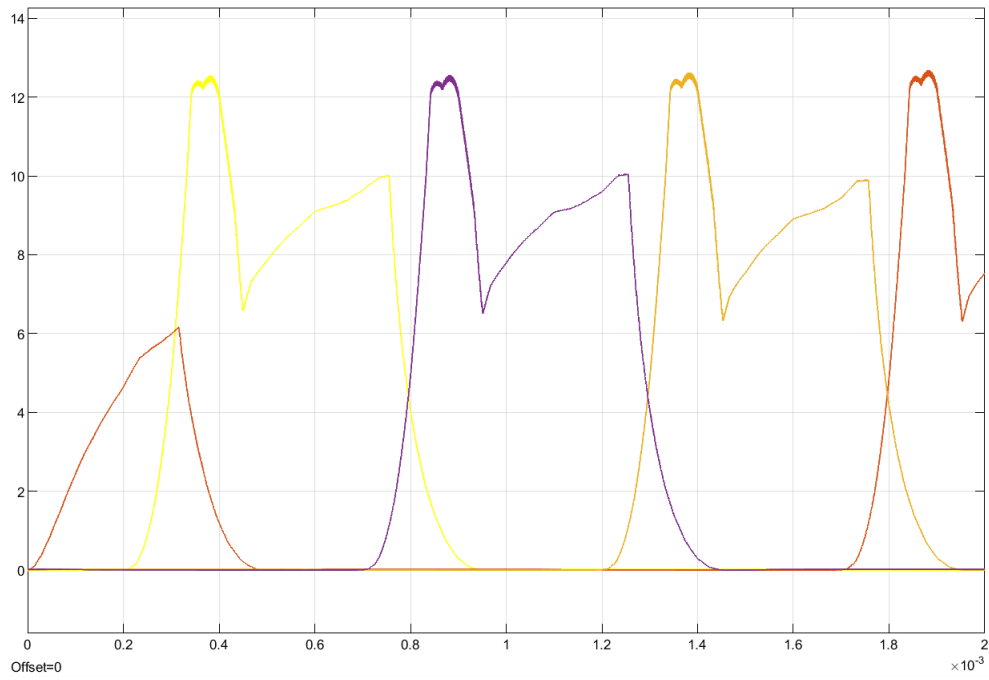
Σχήμα 6.28: Συνάρτηση κατανομής ροπής όλων των φάσεων για ταχύτητα περιστροφής 1000 ΣΑΛ

Ροπή αναφοράς 10 Nm

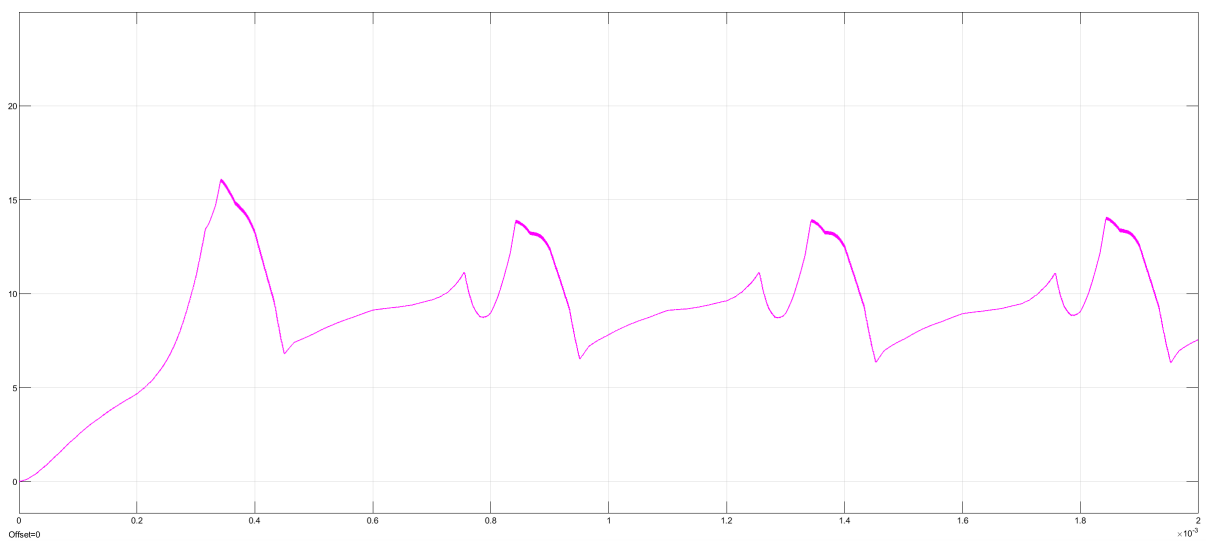
Με ροπή αναφοράς 10 Nm λάβαμε τα παρακάτω αποτελέσματα:



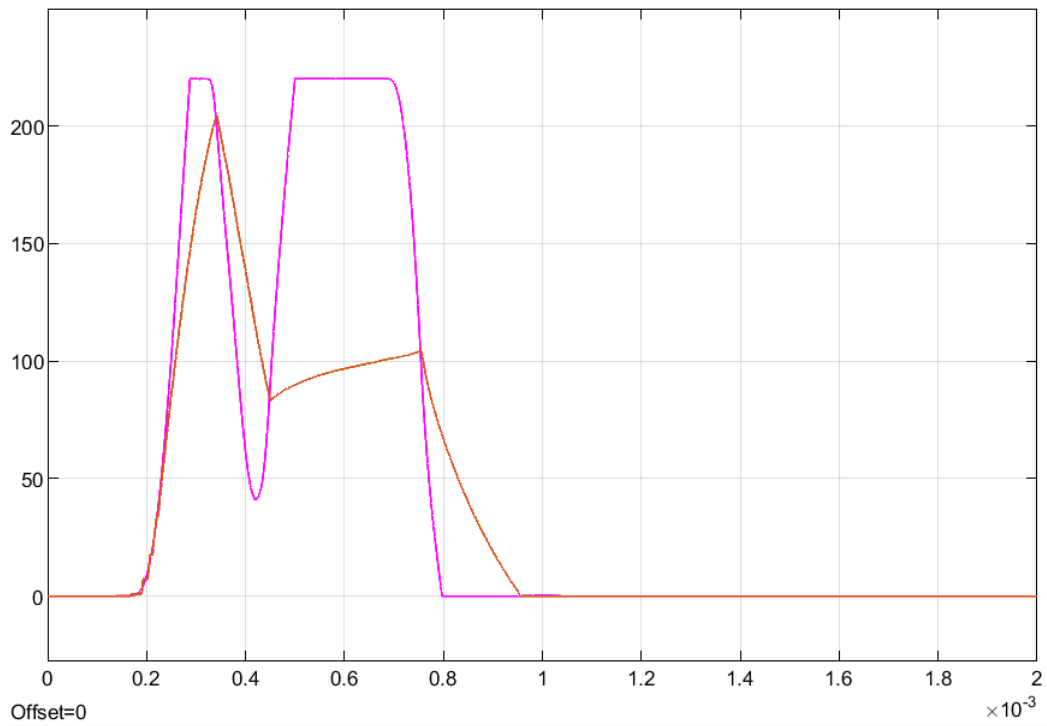
Σχήμα 6.29: Ανά φάση ροπή (Κόκκινο) σε σχέση με την ανά φάση ροπή αναφοράς (Ροζ) σε Nm



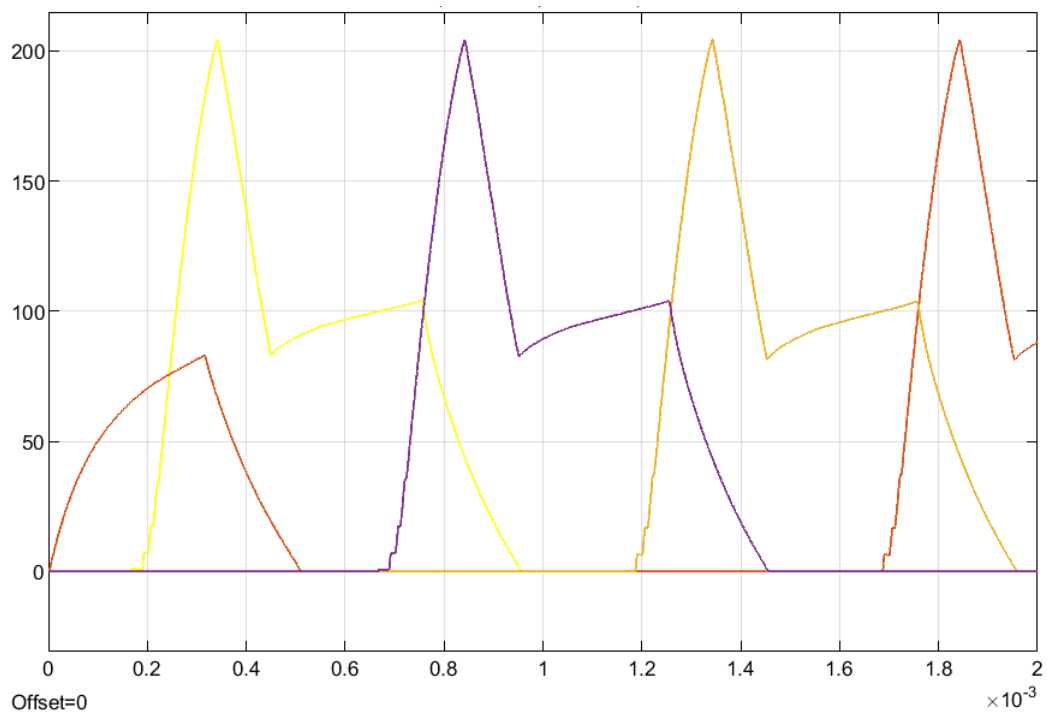
Σχήμα 6.30: Αναπτυσσόμενη ροπή κάθε φάσης σε Nm



Σχήμα 6.31: Συνολική αναπτυσσόμενη ροπή σε Nm



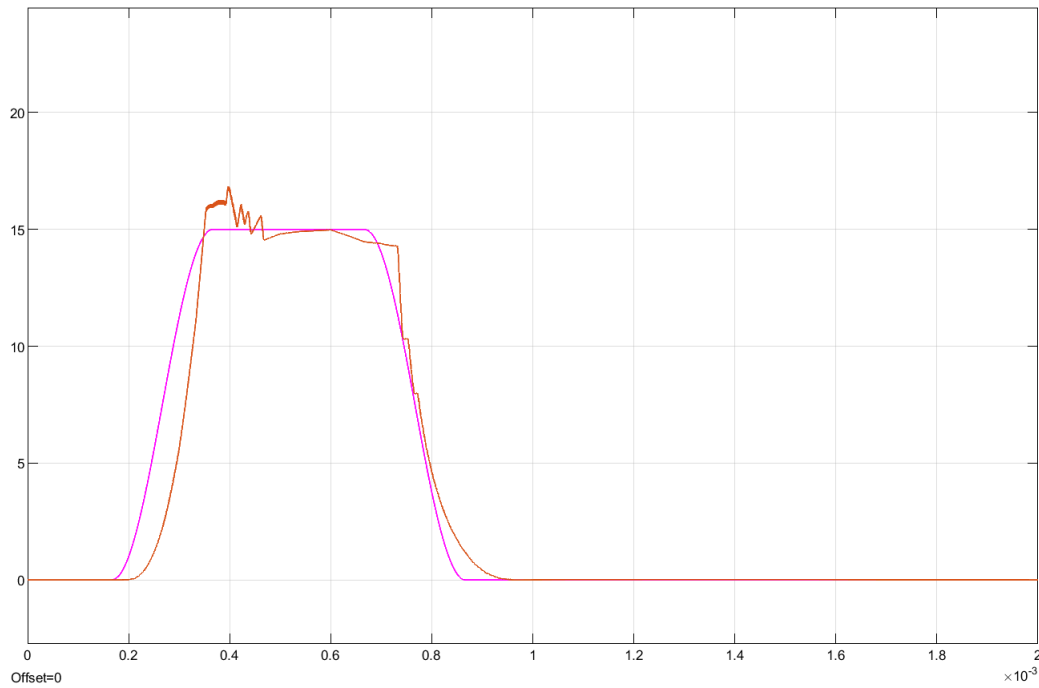
Σχήμα 6.32: Ανά φάση ρεύμα διέγερσης (Κόκκινο) σε σχέση με το ανά φάση ρεύμα αναφοράς (Ροζ) σε A



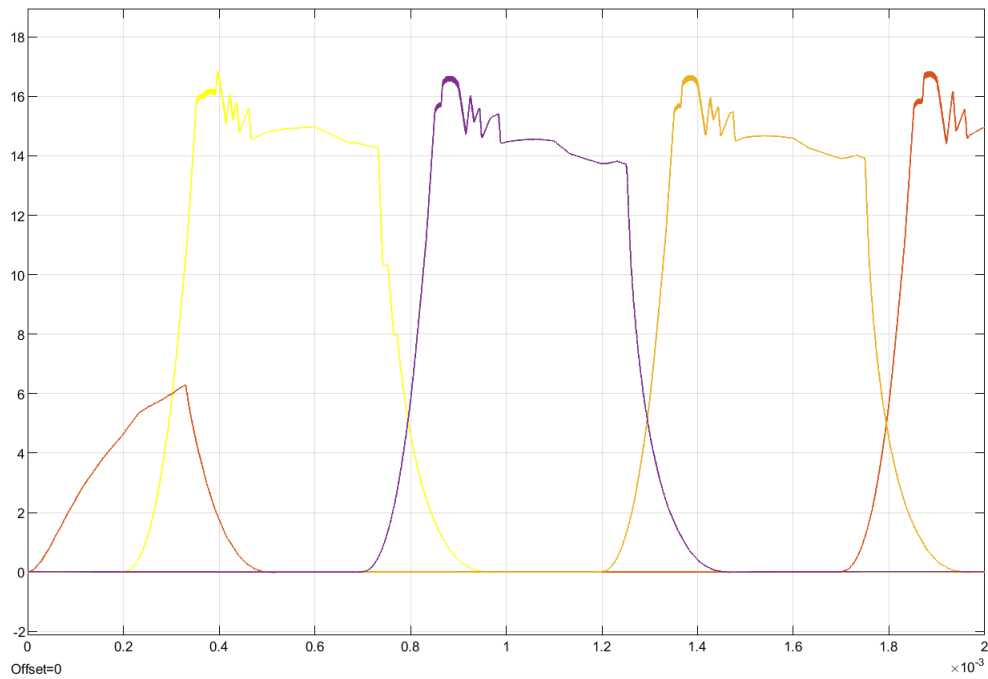
Σχήμα 6.33: Αναπτυσσόμενα ρεύματα διέγερσης κάθε φάσης σε A

Ροπή αναφοράς 15 Nm

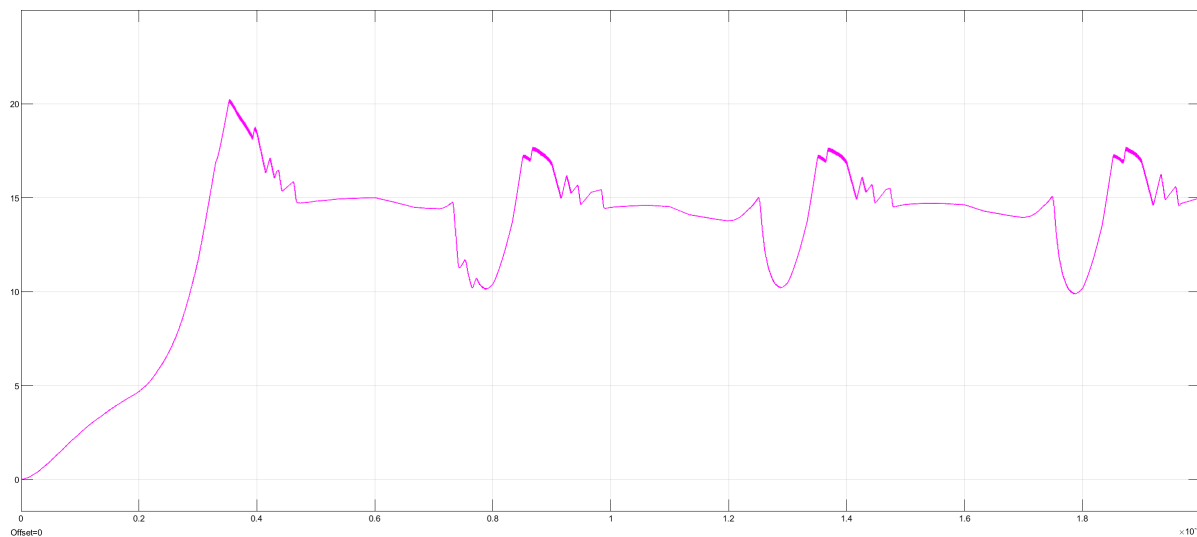
Με ροπή αναφοράς 15 Nm λάβαμε τα παρακάτω αποτελέσματα:



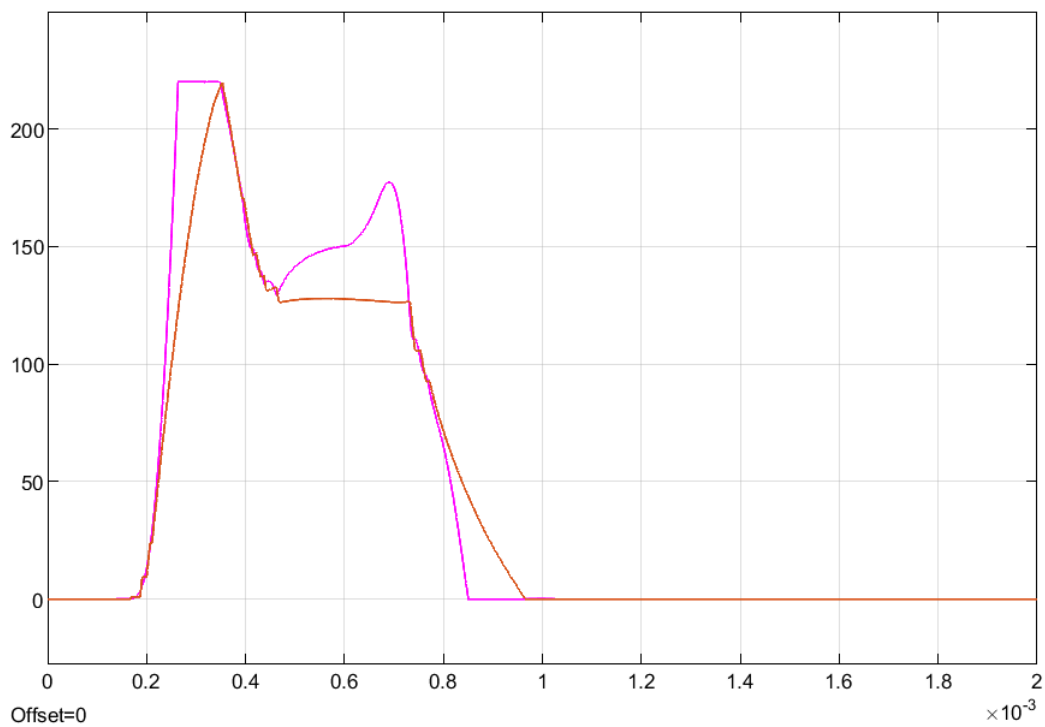
Σχήμα 6.34: Ανά φάση ροπή (Κόκκινο) σε σχέση με την ανά φάση ροπή αναφοράς (Ροζ) σε Nm



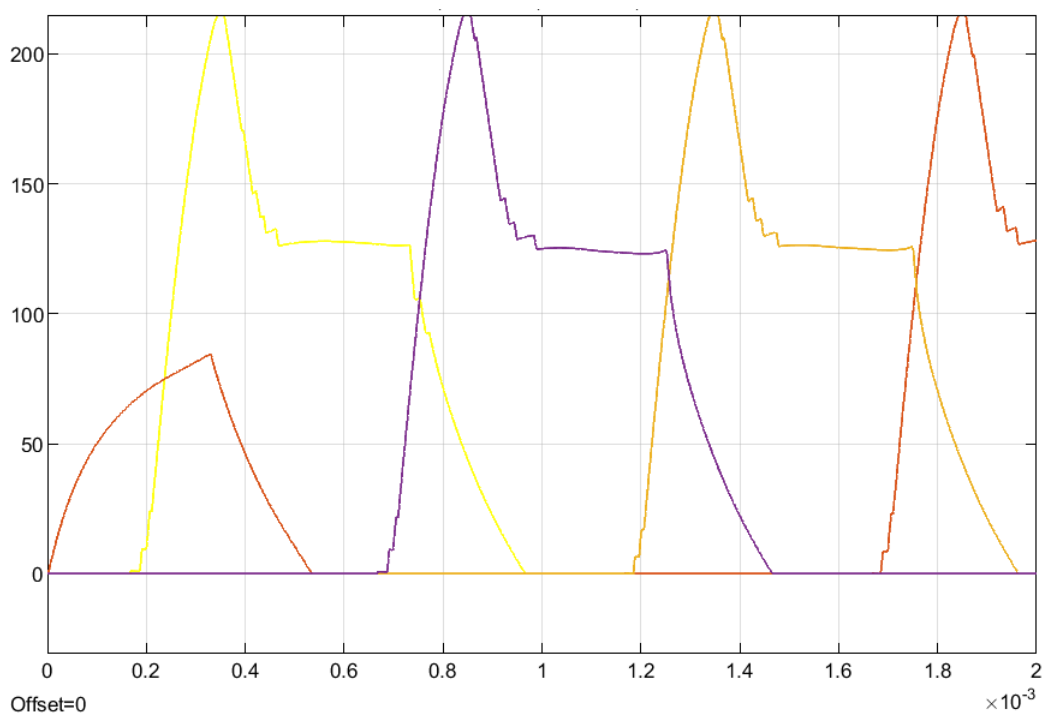
Σχήμα 6.35: Αναπτυσσόμενη ροπή κάθε φάσης σε Nm



Σχήμα 6.36: Συνολική αναπτυσσόμενη ροπή σε Nm



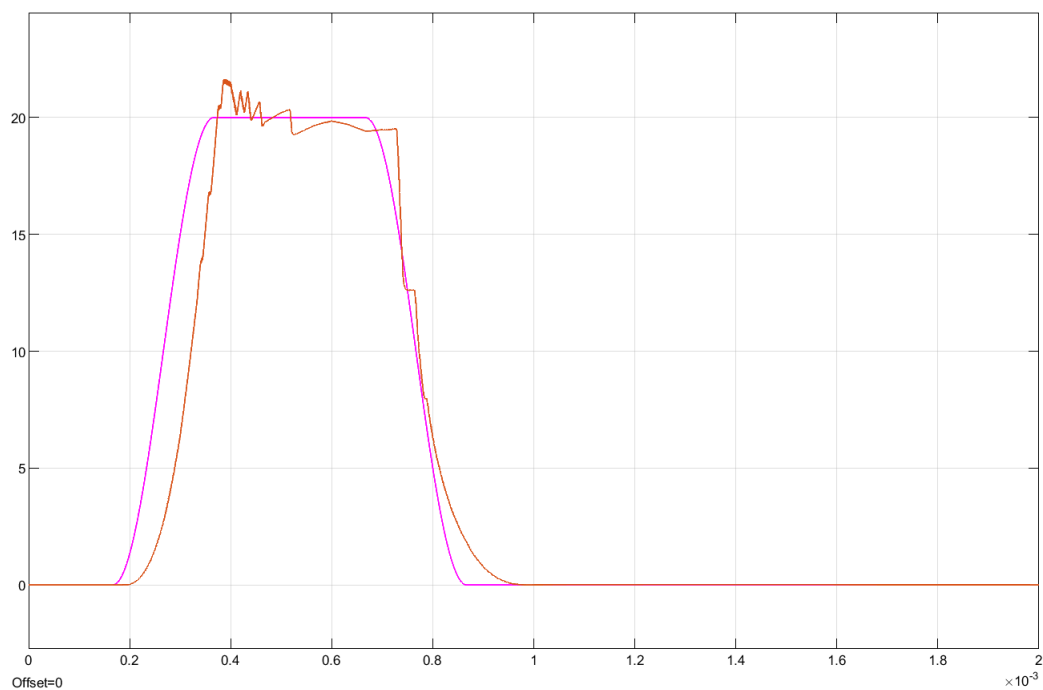
Σχήμα 6.37: Ανά φάση ρεύμα διέγερσης (Κόκκινο) σε σχέση με το ανά φάση ρεύμα αναφοράς (Ροζ) σε A



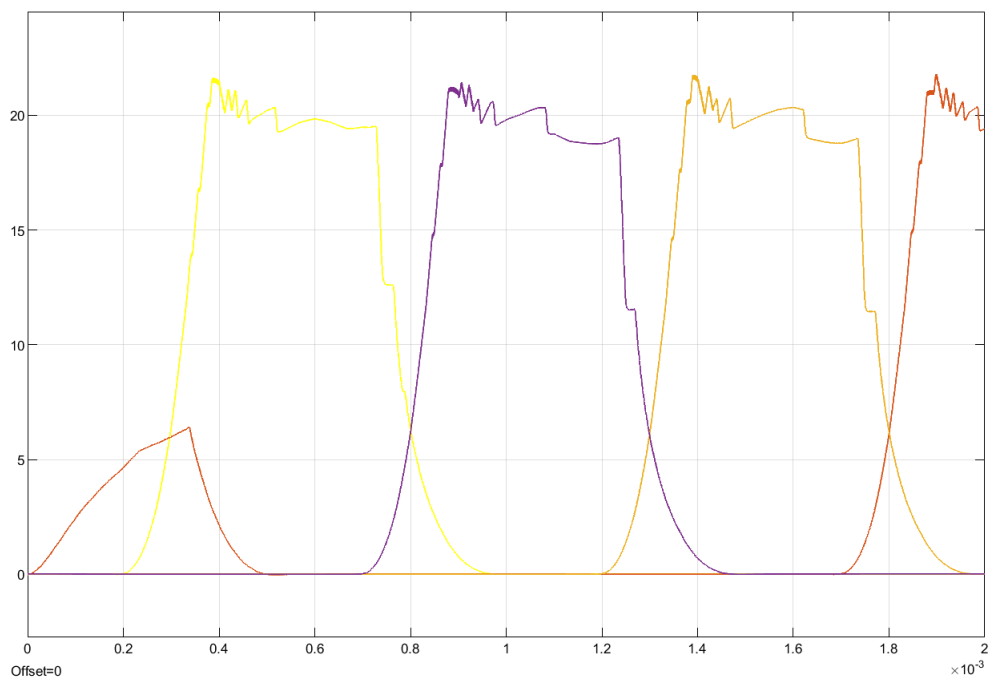
Σχήμα 6.38: Αναπτυσσόμενα ρεύματα διέγερσης κάθε φάσης σε A

Ροπή αναφοράς 20 Nm

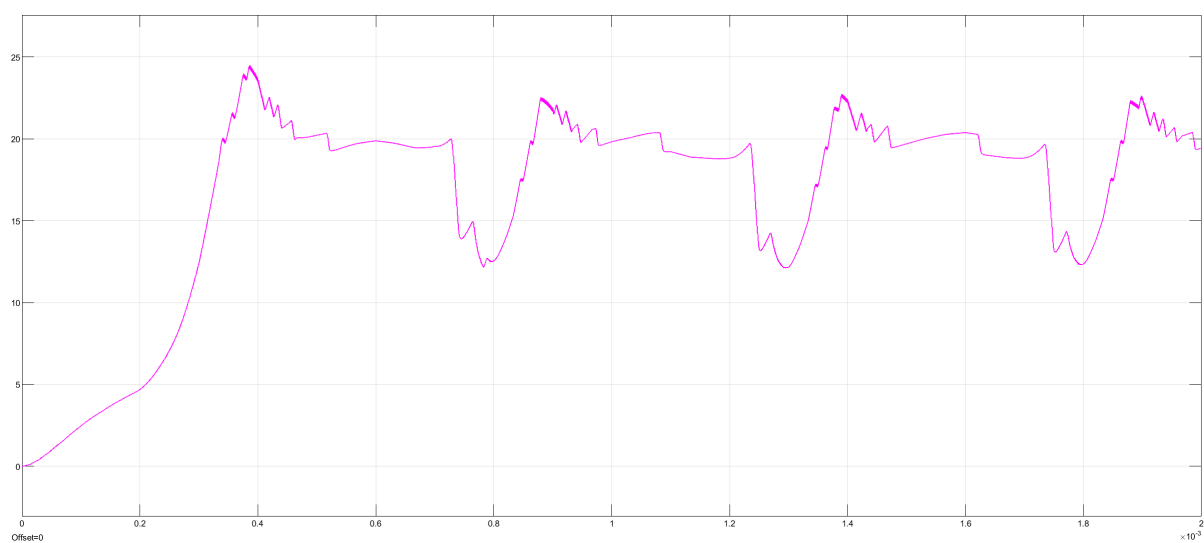
Με ροπή αναφοράς 20 Nm λάβαμε τα παρακάτω αποτελέσματα:



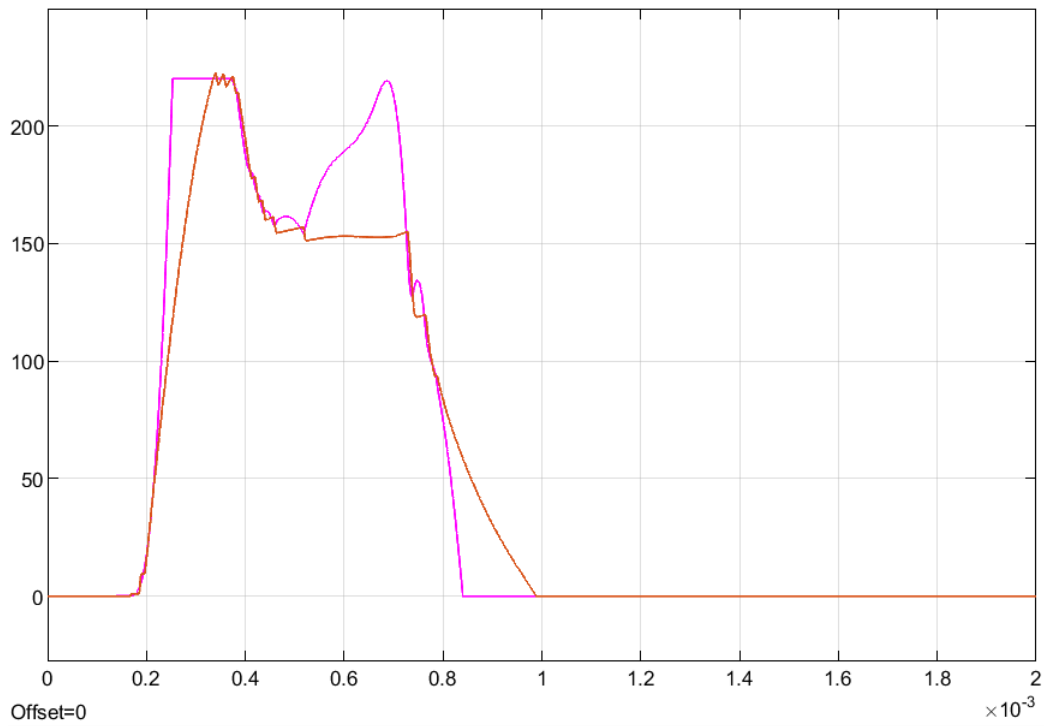
Σχήμα 6.39: Ανά φάση ροπή (Κόκκινο) σε σχέση με την ανά φάση ροπή αναφοράς (Ροζ) σε Nm



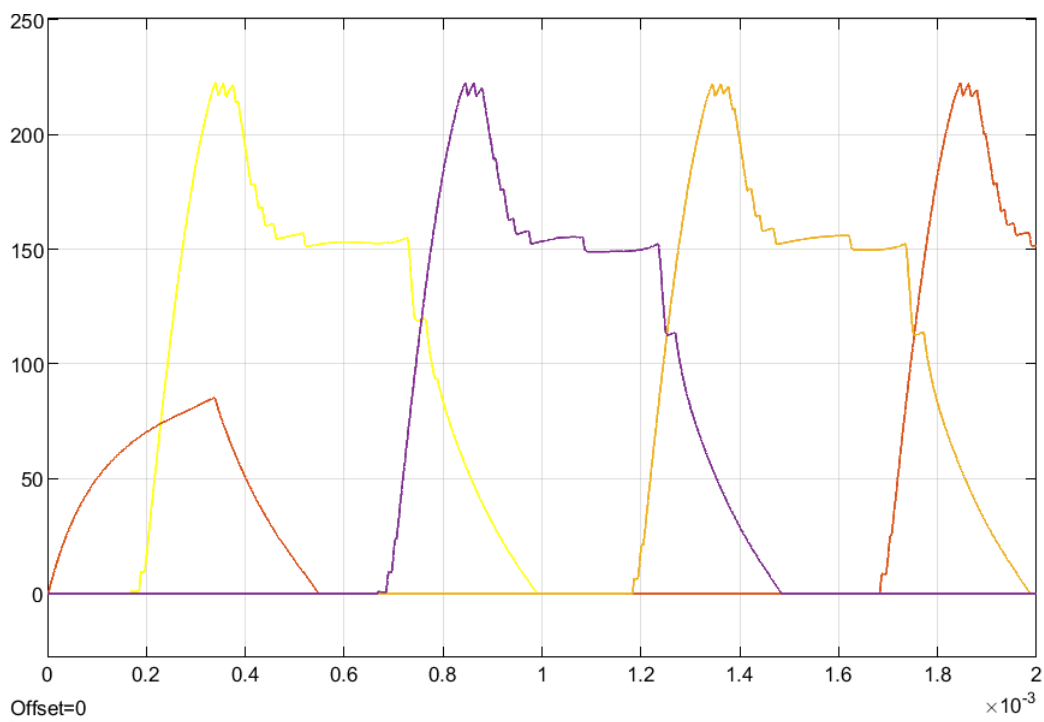
Σχήμα 6.40: Αναπτυσσόμενη ροπή κάθε φάσης σε Nm



Σχήμα 6.41: Συνολική αναπτυσσόμενη ροπή σε Nm



Σχήμα 6.42: Ανά φάση ρεύμα διέγερσης (Κόκκινο) σε σχέση με το ανά φάση ρεύμα αναφοράς (Ποζ) σε A



Σχήμα 6.43: Αναπτυσσόμενα ρεύματα διέγερσης κάθε φάσης σε A

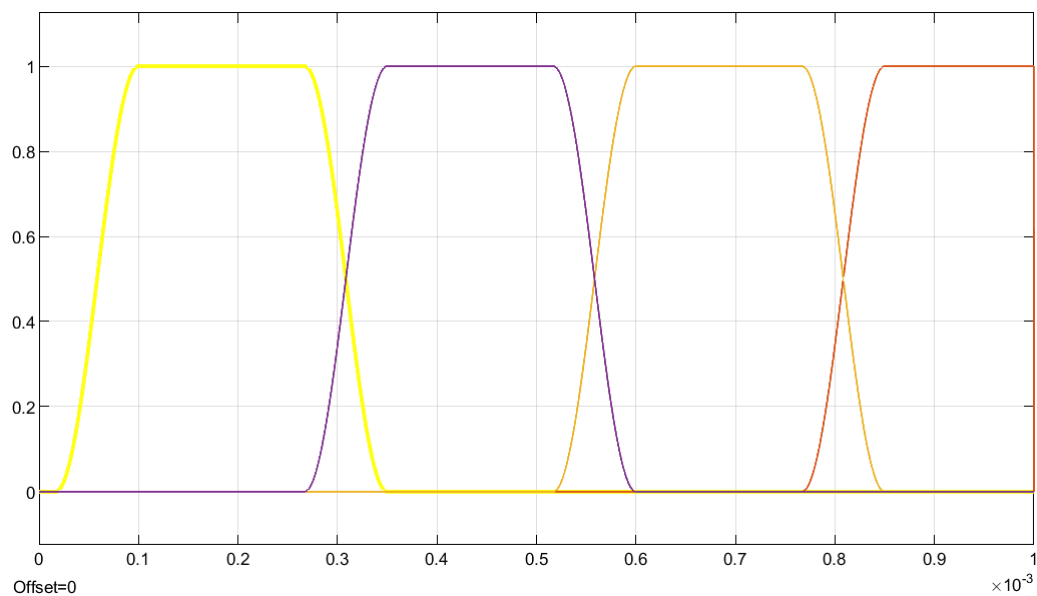
6.4.3 Έλεγχος ροπής στις 1000 ΣΑΛ

Για ταχύτητα περιστροφής ίση με 10000 ΣΑΛ, καταλήξαμε στις παρακάτω τιμές γωνιών:

θ_{on}	θ_{off}	θ_{ov}
1°	16°	5°

Πίνακας 6.3: Κρίσιμες γωνίες προσομοίωσης

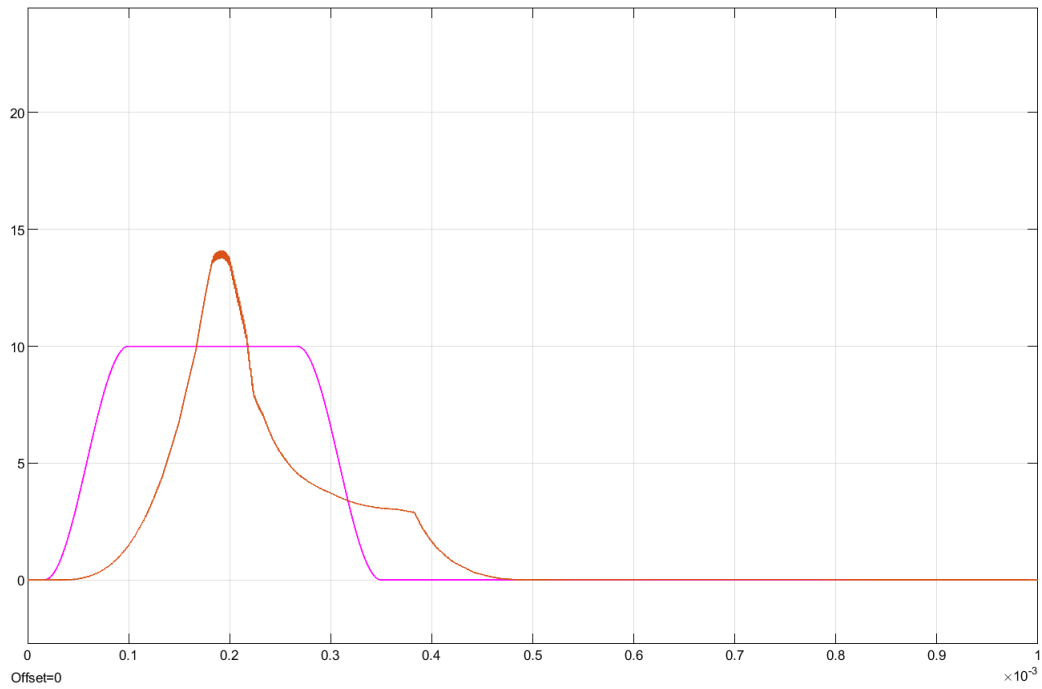
Η κατανομή της συνολικής ροπής αναφοράς απεικονίζεται στο Σχ.6.44



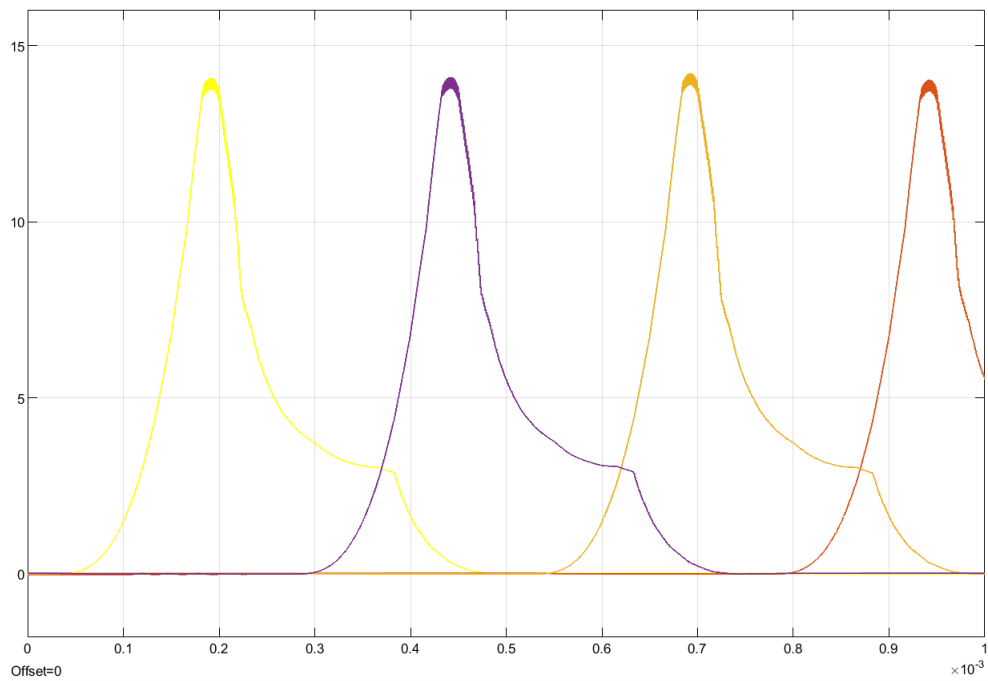
Σχήμα 6.44: Συνάρτηση κατανομής ροπής όλων των φάσεων για ταχύτητα περιστροφής 10000 ΣΑΛ

Ροπή αναφοράς 10 Nm

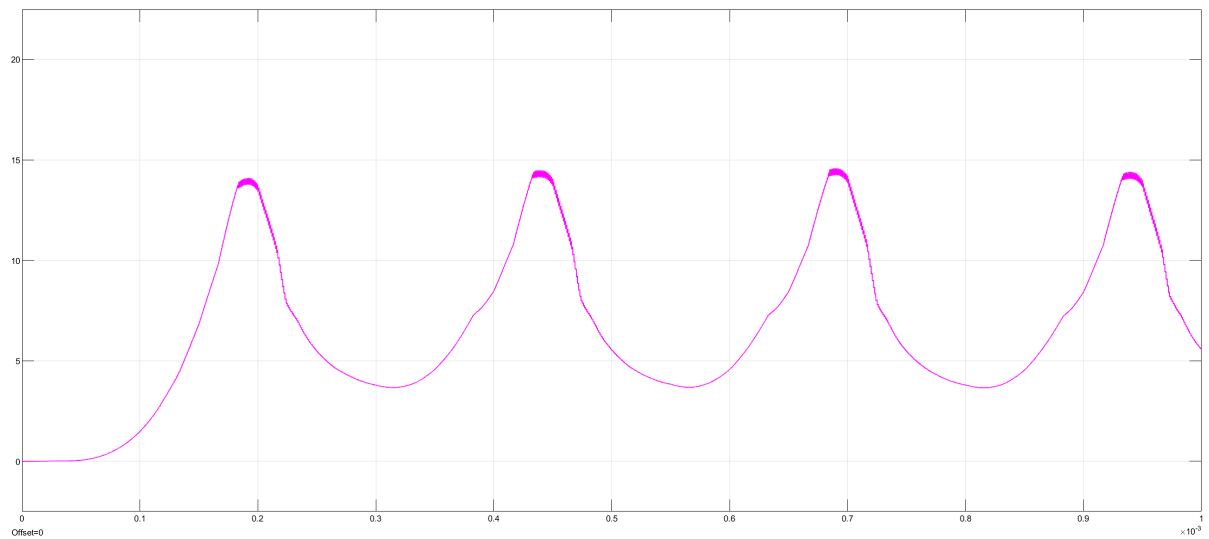
Με ροπή αναφοράς 10 Nm λάβαμε τα παρακάτω αποτελέσματα:



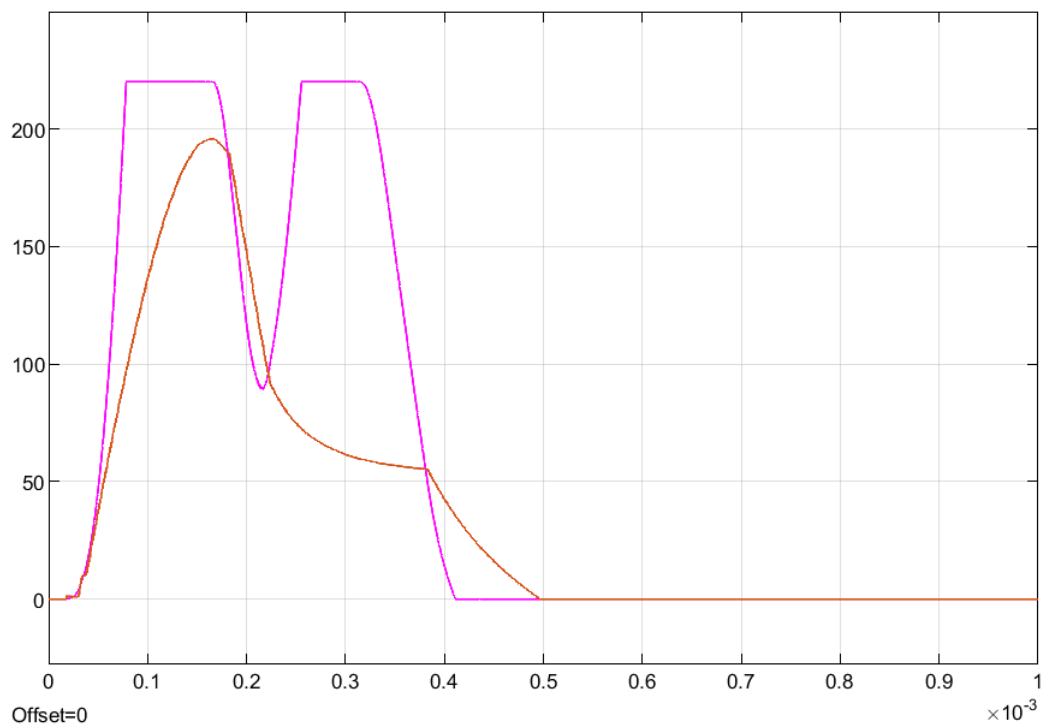
Σχήμα 6.45: Ανά φάση ροπή (Κόκκινο) σε σχέση με την ανά φάση ροπή αναφοράς (Ροζ) σε Nm



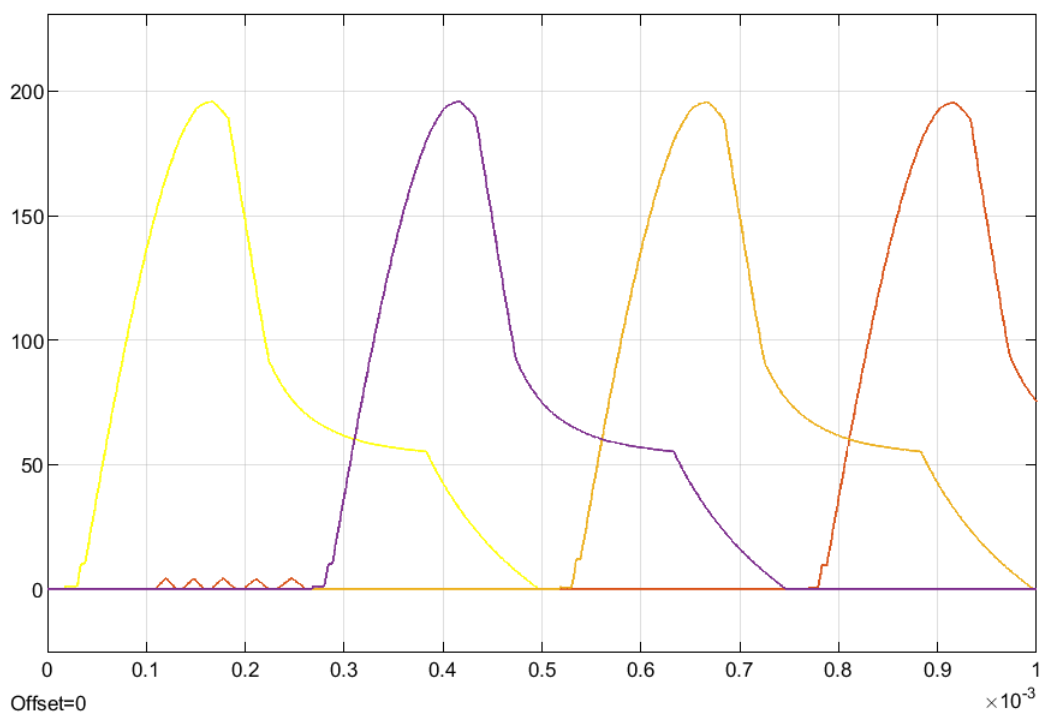
Σχήμα 6.46: Αναπτυσσόμενη ροπή κάθε φάσης σε Nm



Σχήμα 6.47: Συνολική αναπτυσσόμενη ροπή σε Nm



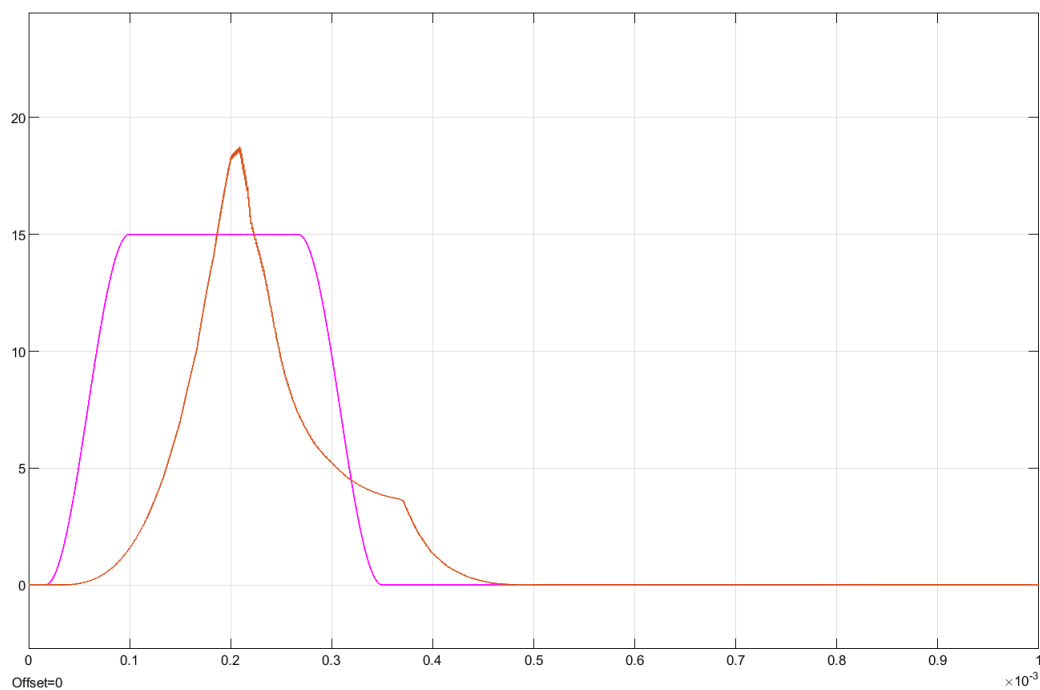
Σχήμα 6.48: Ανά φάση ρεύμα διέγερσης (Κόκκινο) σε σχέση με το ανά φάση ρεύμα αναφοράς (Ποζ) σε A



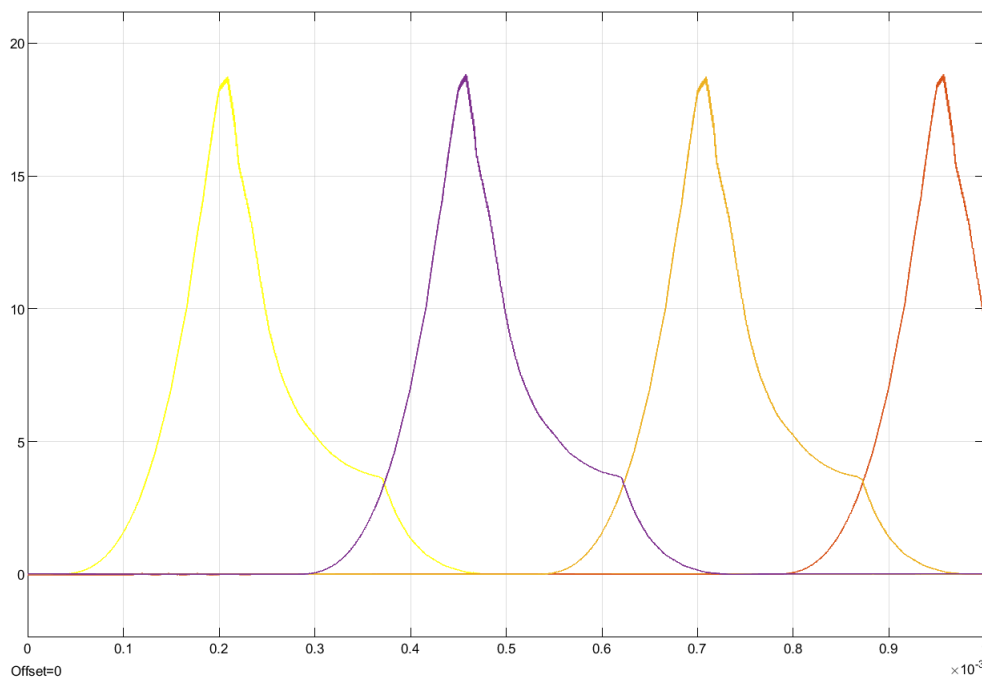
Σχήμα 6.49: Αναπτυσσόμενα ρεύματα διέγερσης κάθε φάσης σε A

Ροπή αναφοράς 15 Nm

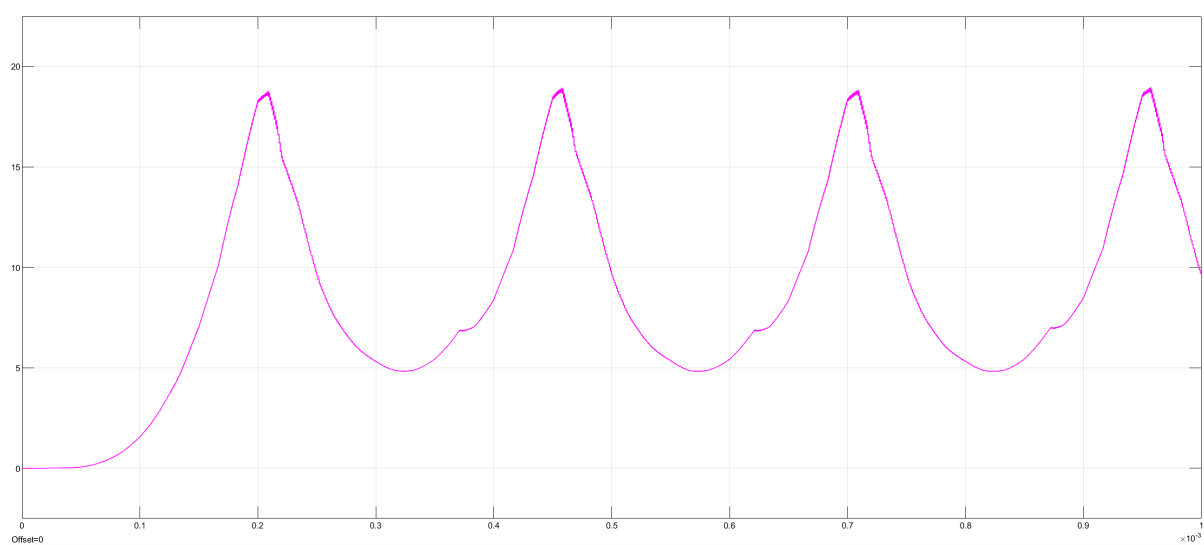
Με ροπή αναφοράς 15 Nm λάβαμε τα παρακάτω αποτελέσματα:



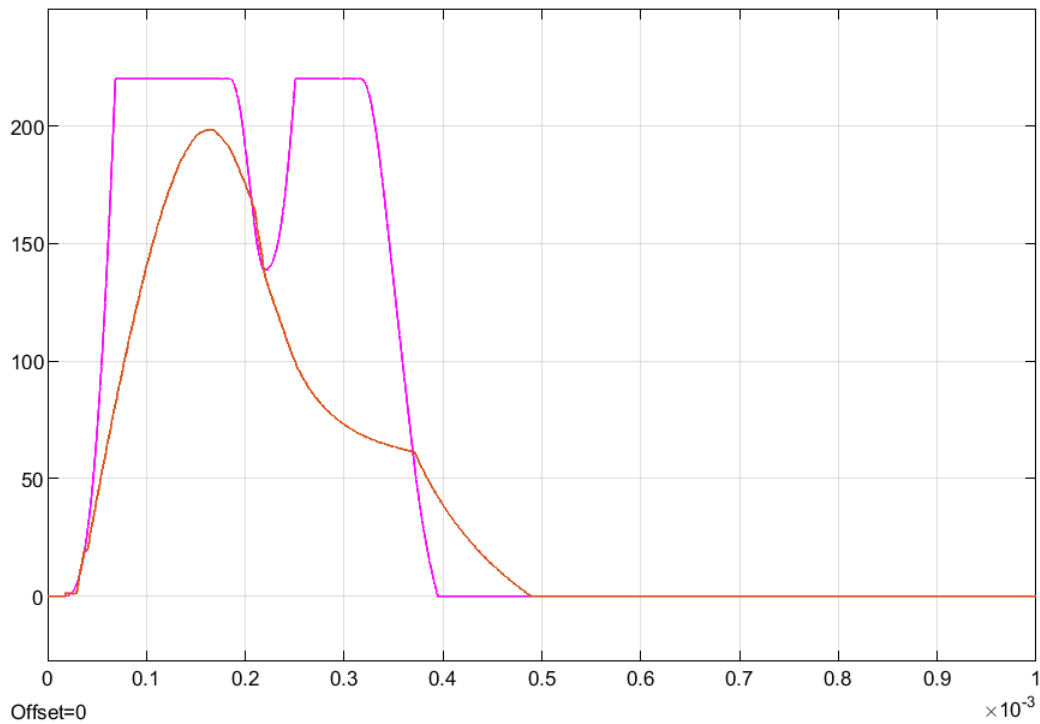
Σχήμα 6.50: Ανά φάση ροπή (Κόκκινο) σε σχέση με την ανά φάση ροπή αναφοράς (Ροζ) σε Nm



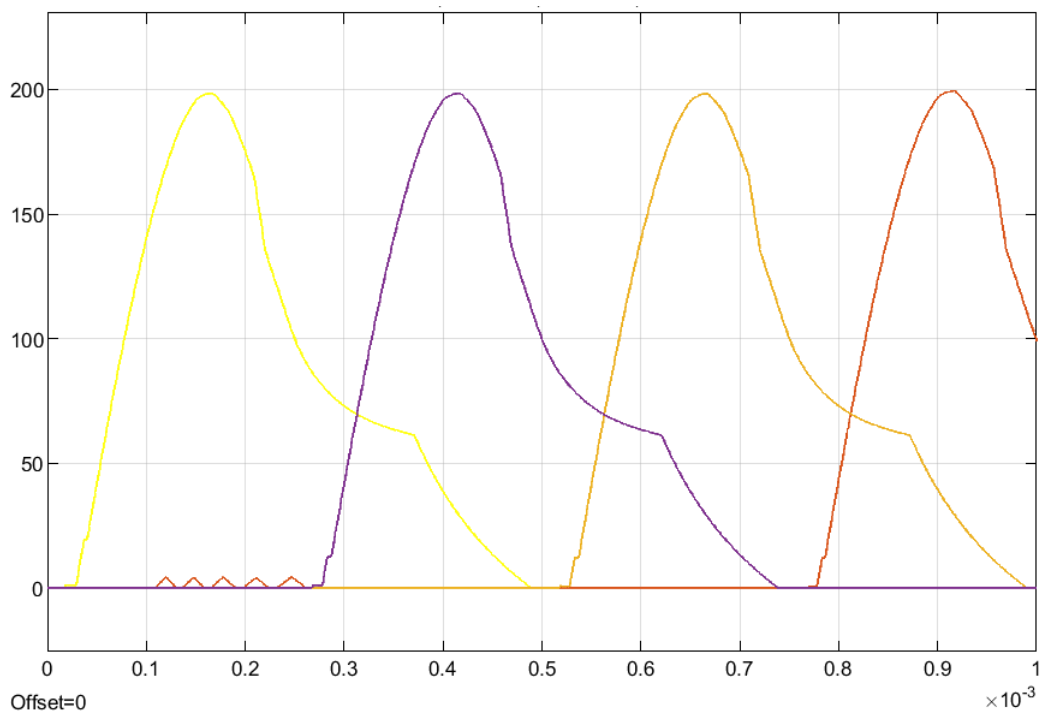
Σχήμα 6.51: Αναπτυσσόμενη ροπή κάθε φάσης σε Nm



Σχήμα 6.52: Συνολική αναπτυσσόμενη ροπή σε Nm



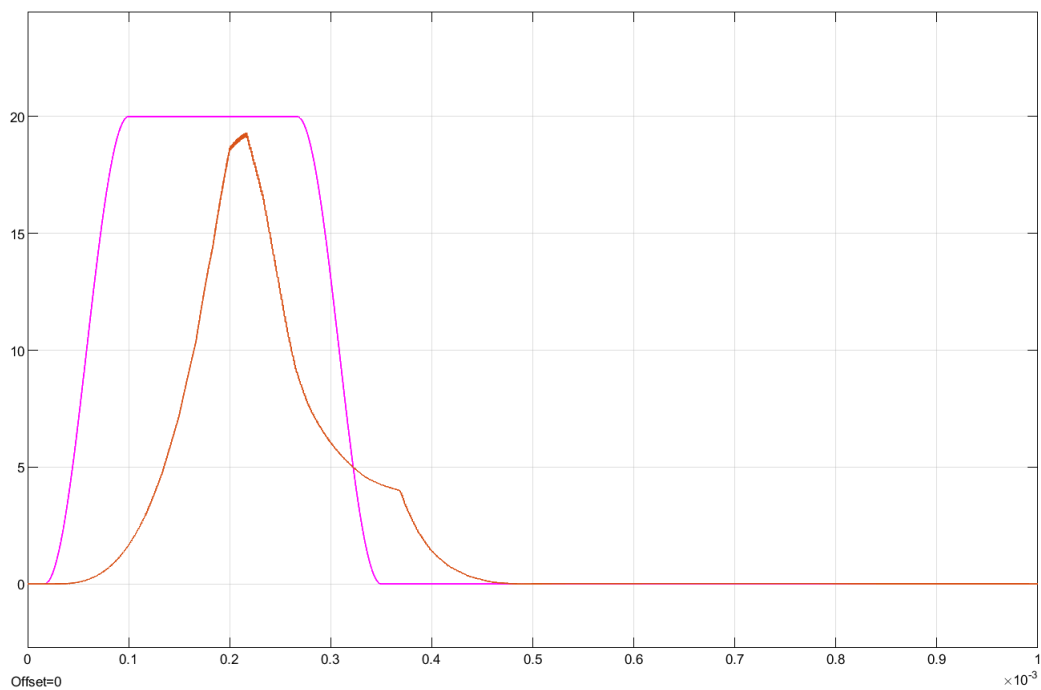
Σχήμα 6.53: Ανά φάση ρεύμα διέγερσης (Κόκκινο) σε σχέση με το ανά φάση ρεύμα αναφοράς (Ροζ) σε A



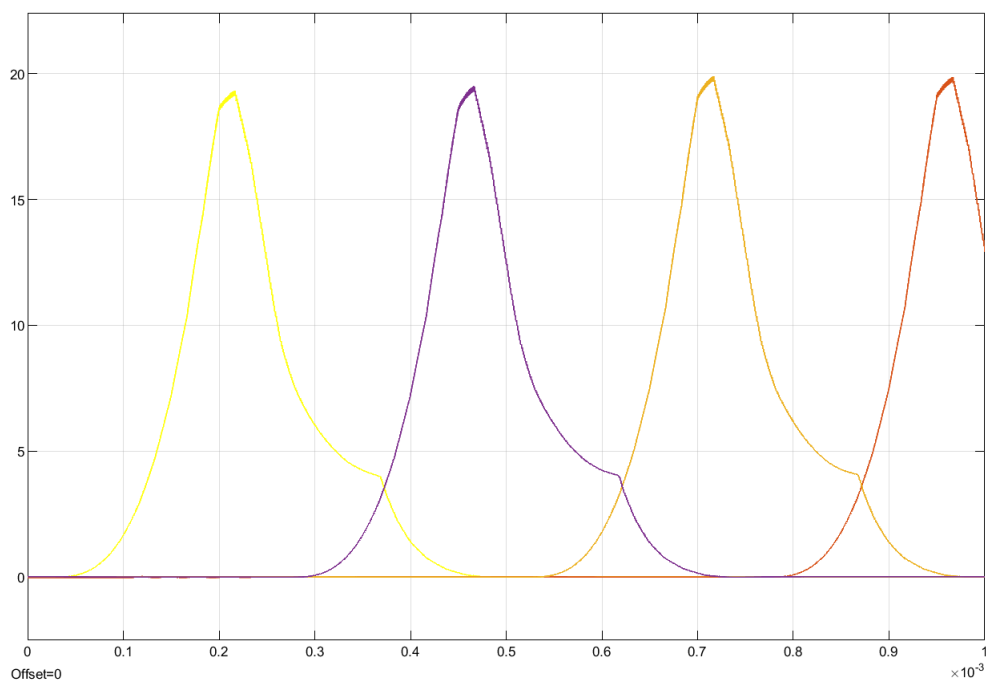
Σχήμα 6.54: Αναπτυσσόμενα ρεύματα διέγερσης κάθε φάσης σε A

Ροπή αναφοράς 20 Nm

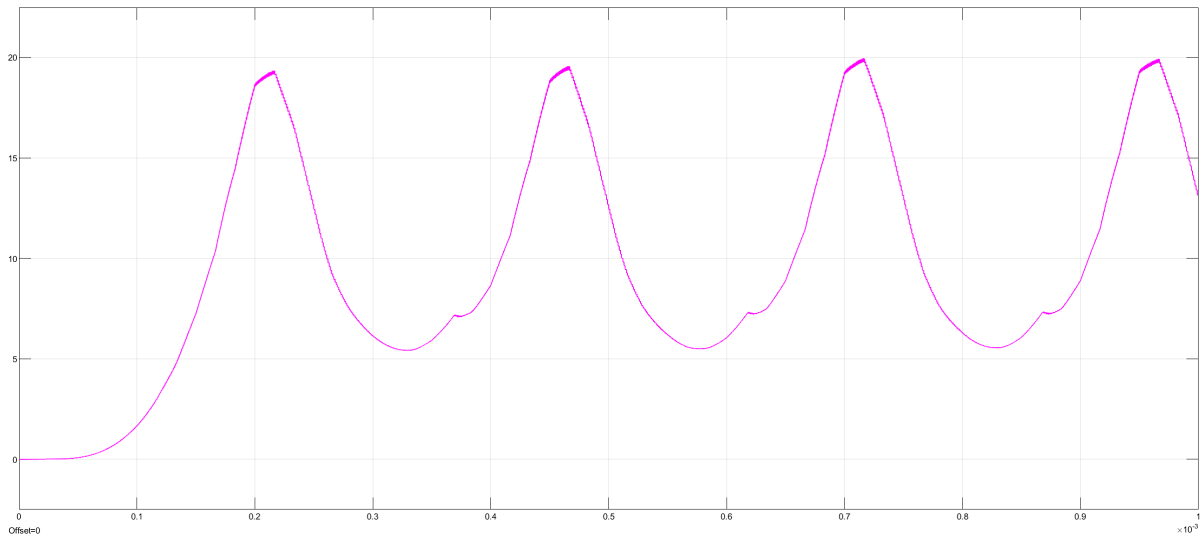
Με ροπή αναφοράς 20 Nm λάβαμε τα παρακάτω αποτελέσματα:



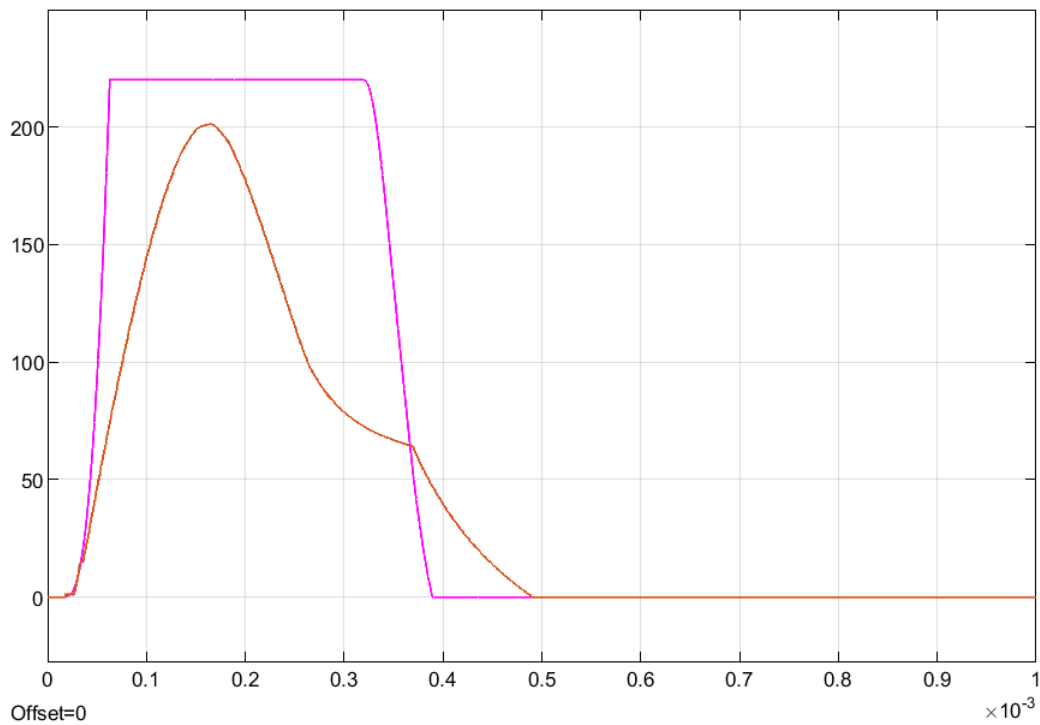
Σχήμα 6.55: Ανά φάση ροπή (Κόκκινο) σε σχέση με την ανά φάση ροπή αναφοράς (Ροζ) σε Nm



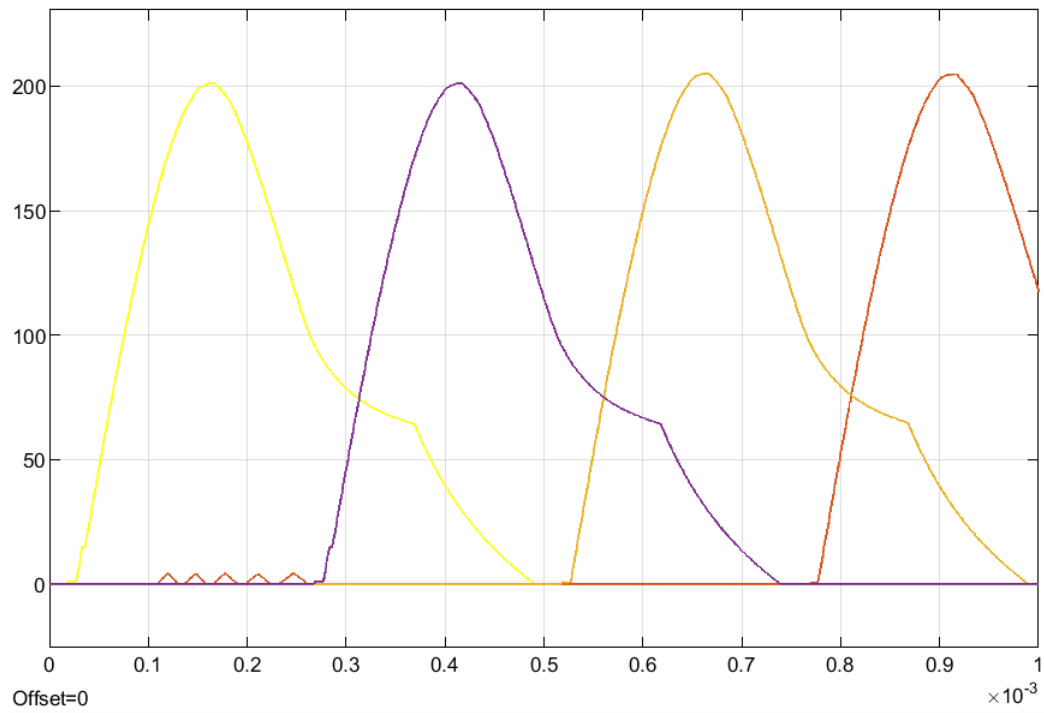
Σχήμα 6.56: Αναπτυσσόμενη ροπή κάθε φάσης σε Nm



Σχήμα 6.57: Συνολική αναπτυσσόμενη ροπή σε Nm



Σχήμα 6.58: Ανά φάση ρεύμα διέγερσης (Κόκκινο) σε σχέση με το ανά φάση ρεύμα αναφοράς (Ροζ) σε A



Σχήμα 6.59: Αναπτυσσόμενα ρεύματα διέγερσης κάθε φάσης σε A

Κεφάλαιο 7

Επίλογος

Ολοκληρώνοντας την παρούσα διπλωματική εργασία, στην ενότητα αυτή θα συνοψιστούν όλες οι διαδικασίες που ακολουθήθηκαν, τα εργαλεία που χρησιμοποιήθηκαν αλλά και τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την ενασχόληση με το αντικείμενο των μηχανών μεταβλητής μαγνητικής αντίστασης. Ακόμα, θα αναφερθούν -πλέον τεκμηριωμένα- τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα των εν λόγω συστημάτων ηλεκτρικής κίνησης. Στο τέλος, θα προταθούν κάποιες μελλοντικές επεκτάσεις της διπλωματικής εργασίας, οι οποίες καθοδηγούν τον ενδιαφερόμενο ερευνητή να την αναπτύξει και να την προαγάγει σε ένα επόμενο στάδιο.

7.1 Σύνοψη και συμπεράσματα

Συνοψίζοντας, η εργασία αυτή ξεκίνησε θέτοντας τις θεωρητικές βάσεις για το αντικείμενο των Μηχανών Μεταβλητής Μαγνητικής Αντίστασης. Έπειτα, αναλύθηκαν κάποιοι κανόνες σχεδίασης των εν λόγω μηχανών, σύμφωνα με τους οποίους υλοποιήθηκε ένα παραμετροποιημένο εργαλείο σχεδίασης SRM σε κώδικα MATLAB. Έχοντας υλοποιήσει τη γεωμετρία της μηχανής σε περιβάλλον FEMM, ήταν εφικτή η ανάλυση της ηλεκτρομαγνητικής της συμπεριφοράς μέσω της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων. Μετρήθηκαν μεταβλητές, όπως ροπή και πεπλεγμένη ροή για διάφορες τιμές ρεύματος διέγερσης και διάφορες θέσεις δρομέα, οι οποίες αποθηκεύτηκαν σε μορφή πολυδιάστατων πινάκων. Οι πίνακες αυτοί αποτέλεσαν την βάση της μοντελοποίησης της μηχανής στο περιβάλλον SIMULINK. Σε εκείνο το σημείο, δημιουργήθηκε ένα μοντέλο ηλεκτρικής κίνησης με SRM, χρησιμοποιώντας μεμονωμένα στοιχεία και όχι έτοιμα blocks της βιβλιοθήκης. Όσον αφορά την οδήγηση της μηχανής, πραγματοποιήθηκε στιγμιαίος έλεγχος ροπής, που αποτελούνταν από δύο ελεγκτές. Ο ένας ελεγκτής ήταν αναλογικός - ολοκληρωτικός (PI Controller) και ο άλλος ήταν ελεγκτής υστέρησης (Hysteresis Controller). Επίσης, αξίζει να σημειωθεί ότι χρησιμοποιήθηκε συνάρτηση κατανομής ροπής αναφοράς σε παραπάνω από μία φάσεις, με σκοπό την επίτευξη βέλτιστου ελέγχου. Τέλος, το μοντέλο δοκιμάστηκε για διάφορες τιμές ταχυτήτων αλλά και ροπών αναφοράς. Παρακάτω, λοιπόν, θα αναφερθούν τα κύρια συμπεράσματα που προέκυψαν για κάθε ένα από τα στοιχεία του συστήματος ηλεκτρικής κίνησης με SRM

7.1.1 Κινητήρας SRM

Η απλότητα της γεωμετρίας των μηχανών μεταβλητής μαγνητικής αντίστασης αποτελούσε εξαρχής ελκυστικό πλεονέκτημα για την εκπόνηση μιας διπλωματικής εργασίας σχετικά με αυτές. Πράγματι, έχοντας πραγματοποιήσει τη διαδικασία της σχεδίασης, επιβεβαιώνεται ότι οι SRM αποτελούν μία από τις πιο λιτές μορφές ηλεκτρικών μηχανών.

Ωστόσο, επιβεβαιώθηκε και ένα σημαντικό μειονέκτημα τους, η διακύμανση ροπής κατά την μεταγωγή των φάσεων. Αξίζει να τονισθεί ότι όσο αυξάνεται η ταχύτητα, τόσο αυξάνεται και η διακύμανση που εμφανίζει η αποδιδόμενη ροπή. Το πρόβλημα αυτό περιορίστηκε σε μεγάλο βαθμό ελέγχοντας την αλληλοεπικάλυψη των ρευμάτων στις διαδοχικές φάσεις. Παρόλα αυτά, οι SRM δεν παύουν να χάνουν έδαφος έναντι άλλων πιο διαδεδομένων μηχανών, αφού μερικές φορές παρουσιάζουν καλύτερη επίδοση και απόδοση από αυτές.

Επιπρόσθετα, παρατηρήθηκε ακόμα ένα σημαντικό πλεονέκτημα των SRM, αυτό της αμελητέας μαγνητικής σύζευξης μεταξύ των φάσεων. Αυτό σημαίνει ότι ένα σφάλμα στη μία φάση δεν επηρεάζει τη λειτουργία των υπόλοιπων φάσεων. Έτσι, το πρόβλημα απομονώνεται και δεν διακόπτεται η περιστροφή της μηχανής.

7.1.2 Μετατροπέας

Παρόλο που η ανεξαρτησία αυτή των φάσεων αποτελεί πλεονέκτημα για τα συστήματα ηλεκτρικής κίνησης με SRM, πρέπει να δίνεται μεγάλη προσοχή στην διαχείριση της ενέργειας του μαγνητικού πεδίου. Είναι απαραίτητο να δίνεται σωστή διαδρομή στην μαγνητική ροή κατά την αγωγή μιας φάσης, ειδικά μπορεί να αναπτυχθεί υψηλή τάση στα άκρα των τυλιγμάτων και ως αποτέλεσμα οι ημιαγωγοί να οδηγηθούν σε σφάλμα. Ο τρόπος που διαχειρίζεται η ενέργεια στο κύκλωμα εξαρτάται από την τοπολογία που χρησιμοποιείται στον μετατροπέα. Υπάρχουν πολλοί διαφορετικοί τύποι μετατροπέων, ωστόσο στην παρούσα εργασία αναλύθηκε ο ασύμμετρος μονοφασικός αντιστροφέας πηγής τάσεως *Asymmetric Bridge Converter*.

Το γεγονός ότι η ροπή που αποδίδει μία SRM είναι ανεξάρτητη της πολικότητας του ρεύματος, επιτρέπει τη χρήση μετατροπέων ακόμα και με ένα διακοπτικό στοιχείο ανά φάση. Ακόμα, σε αντίθεση με τις μηχανές εναλλασσόμενου ρεύματος, τα τυλίγματα συνδέονται σε σειρά με τους διακόπτες. Έτσι, σε περίπτωση διακοπτικού σφάλματος η επαγωγή των τυλιγμάτων περιορίζει την αύξηση του ρεύματος, προσφέροντας πολύτιμο χρόνο μέχρι να απομονωθεί το σφάλμα.

7.1.3 Έλεγχος και οδήγηση

Από την αρχή της παρούσας διπλωματικής εργασίας ήταν γνωστό ότι ο έλεγχος και η οδήγηση των SRM είναι απαιτητικές διαδικασίες. Υλοποιήθηκε στιγμιαίος έλεγχος ροπής για διάφορες τιμές ροπής αναφοράς, αλλά και για διάφορες ταχύτητες περιστροφής. Παρατηρήθηκε ότι οι χαρακτηριστικές ροπής εξαρτώνται από τη γωνιακή θέση του δορμέα και το ρεύμα φάσης. Γι' αυτό το λόγο, αποθηκεύτηκαν σε μορφή πολυδιάστατων πινάκων. Με τον ίδιο τρόπο επεξεργάστηκαν και οι χαρακτηριστικές των μαγνητικών ροών. Έγινε, δηλαδή, ευκολότερη η επεξεργασία της πληροφορίας κατά τη διάρκεια του ελέγχου.

Ωστόσο, δεν έπαψαν οι δυσκολίες στη διαδικασία. Πρόκειται για ένα μη γραμμικό σύστημα με χρονομεταβλητές παραμέτρους, συνεπώς είναι αναγκαία η υιοθέτηση κατάλληλων μη γραμμικών τεχνικών ελέγχου. Με τις τεχνικές αυτές η διεργασία γίνεται με ακρίβεια και ταχύτητα.

Ένα ακόμα απαιτητικό σημείο του ελέγχου είναι επιλογή γωνιών έναυσης και σβέσης των IGBT's του μετατροπέα. Στην εφαρμογή των μηχανών μεταβλητής μαγνητικής αντίστασης, αναλόγως την ταχύτητα περιστροφής, πρέπει να προσαρμόζεται κατάλληλα το πότε ξεκινούν και παύουν να διεγείρονται τα τυλίγματα των φάσεων. Στην εφαρμογή της παρούσας εργασίας, βέβαια, αφού οι δοκιμές έγιναν για σταθερές ταχύτητες, δεν χρειάστηκε να αλλάζουν δυναμικά οι γωνίες έναυσης και σβέσης κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης.

7.2 Σημεία προαγωγής της επιστήμης

Εκτός από την εμφάνιση στο αντικείμενο των μηχανών μεταβλητής μαγνητικής αντίστασης, σκοπός αυτής της διπλωματικής εργασίας ήταν και να προαγάγει την επιστήμη, έστω και σε μικρό βαθμό. Αυτό επιτεύχθηκε, αρχικά, με το μοναδικό της εφαρμογής. Με άλλα λόγια, η συγκεκριμένη μηχανή, που σχεδιάστηκε στην εφαρμογή της εργασίας, δεν υπάρχει κάπου αλλού στην βιβλιογραφία. Τέθηκαν εξ αρχής οι προδιαγραφές της και όλη η σχεδίαση βασίστηκε σε αυτές. Οι προδιαγραφές που τέθηκαν ήταν η μηχανή να αποδίδει ροπή 20 Nm στις 10.000 ΣΑΑ, δηλαδή ισχύος περίπου 21 kW. Ωστόσο, υλοποιήθηκε ένα παραμετροποιημένο εργαλείο σχεδίασης και ανάλυσης ηλεκτρομαγνητικού πεδίου SRM, το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί και σε άλλες εφαρμογές, με άλλες τεχνικές προδιαγραφές.

Με το συγκεκριμένο εργαλείο εξάγονται οι απαραίτητες πληροφορίες, που επιτρέπουν τη μοντελοποίηση της μηχανής στο περιβάλλον του SIMULINK. Οφείλει να τονιστεί ότι η μοντελοποίηση δεν έγινε με έτοιμα blocks των διαθέσιμων βιβλιοθηκών, αλλά βασίστηκε σε απλά στοιχεία, όπως ωμικές αντιστάσεις, πηνία και πηγές τάσης. Κι αυτό, γιατί τα έτοιμα blocks μοντελοποιούν την αυτεπαγωγή των τυλιγμάτων προσεγγιστικά ως γραμμικά μεταβαλλόμενη σε σχέση με τη γωνιακή θέση δρομέα. Αντίθετα, με τα δεδομένα, που αντλήθηκαν από την ηλεκτρομαγνητική ανάλυση της μηχανής, αποθηκευμένα σε πίνακες αναφοράς επιτεύχθηκε η προσομοίωση της μηχανής μεταβλητής μαγνητικής αντίστασης σε πιο ρεαλιστικά πλαίσια.

7.3 Μελλοντικές επεκτάσεις

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, η μηχανή δοκιμάστηκε σε διακριτές ταχύτητες περιστροφής. Θα ήταν, λοιπόν, πολύ ενδιαφέρον να δοκιμαστεί και σε μεταβαλλόμενη γωνιακή ταχύτητα και να παρατηρηθεί η απόκρισή της. Για να γίνει αυτό, θα πρέπει να υλοποιηθεί ένα σύστημα δυναμικής αλλαγής γωνιών έναυσης και σβέσης των φάσεων. Το σύστημα αυτό, θα πρέπει να επιλέγει τις κατάλληλες τιμές γωνιών, ώστε να επιτυγχάνεται η ελάχιστη δυνατή διακύμανση ροπής ανάλογα με τη ταχύτητα περιστροφής του δρομέα.

Αν επιτευχθεί η δυναμική επιλογή κρίσιμων γωνιών, τότε το μόνο που απομένει έτσι ώστε να γίνει το σύστημα ηλεκτρικής κίνησης πιο ολοκληρωμένο είναι να προστεθεί ένας ελεγκτής

ταχύτητας. Με άλλα λόγια, η είσοδος στο σύστημα θα είναι πλέον η ταχύτητα και όχι η ροπή, όπως γίνεται και στα πραγματικά συστήματα κίνησης.

Βιβλιογραφία

- [1] R. Krishnan. *Switched Reluctance Motor Drives: Modeling, Simulation, Analysis, Design, and Applications*. 2001.
- [2] T. Miller. *Electronic Control of Switched Reluctance Machines*. 2001.
- [3] N. Bianchi. *Electrical Machine Analysis Using Finite Elements*. 2005.
- [4] I. Manolas. *Design and Control of Switched Reluctance Machines*. PhD thesis, National Technical University of Athens, 2010.
- [5] Oj l 272. *Official Journal of the European Union*, 2019.
- [6] R. Cepoi, L. Szabo, and J. Florina. Current trends in energy efficient electrical machines. *Journal of Electrical and Electronics Engineering*, 10:13–18, 12 2017.
- [7] J. Dong, B. Howey, B. Danen, J. Lin, J. W. Jiang, B. Bilgin, and A. Emadi. Advanced dynamic modeling of three-phase mutually coupled switched reluctance machine. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 33(1):146–154, 2018.
- [8] C. Gan, J. Wu, Q. Sun, W. Kong, H. Li, and Y. Hu. A review on machine topologies and control techniques for low-noise switched reluctance motors in electric vehicle applications. *IEEE Access*, 6:31430–31443, 2018.
- [9] M. Hamouda and L. Szamel. Torque control of switched reluctance motor drives for electric vehicles. 01 2017.
- [10] Han-Kyung Bae and R. Krishnan. A novel approach to control of switched reluctance motors considering mutual inductance. In *2000 26th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. IECON 2000. 2000 IEEE International Conference on Industrial Electronics, Control and Instrumentation. 21st Century Technologies*, volume 1, pages 369–374 vol.1, 2000.
- [11] B. H. Jeong, K. Y. Lee, J. D. Na, G. B. Cho, and H. L. Baek. Direct torque control for the 4-phase switched reluctance motor drives. In *2005 International Conference on Electrical Machines and Systems*, volume 1, pages 524–528 Vol. 1, 2005.

-
- [12] R. Mikail, I. Husain, and M. Islam. Finite element based analytical model for controller development of switched reluctance machines. In *2013 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*, pages 920–925, 2013.
- [13] H.-S. Ro, H.-G. Jeong, and K.-B. Lee. Torque ripple minimization of switched reluctance motor using direct torque control based on sliding mode control. pages 1–6, 05 2013.
- [14] S. K. Sahoo, S. K. Panda, J.-X. Xu, and V. D. Yurkevich. Direct torque tracking pi-controller design for switched reluctance motor drive using singular perturbation method. *IFAC Proceedings Volumes*, 41(2):3322–3327, 2008. 17th IFAC World Congress.
- [15] F. Soares and P. J. Costa Branco. Simulation of a 6/4 switched reluctance motor based on matlab/simulink environment. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 37(3):989–1009, 2001.
- [16] Y. Sozer, I. Husain, and D. A. Torrey. Guidance in selecting advanced control techniques for switched reluctance machine drives in emerging applications. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 51(6):4505–4514, 2015.
- [17] K. F. Wong, K. W. E. Cheng, and S. L. Ho. Simulation of switched reluctance motor based on a combination of circuit-oriented and signal-oriented approaches using matlab/simpowersystems. *Electric Power Components and Systems*, 35(2):205–219, 2007.
- [18] J. Ye, B. Bilgin, and A. Emadi. An extended-speed low-ripple torque control of switched reluctance motor drives. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 30(3):1457–1470, 2015.
- [19] N. Zabihi and R. Gouws. A review on switched reluctance machines for electric vehicles. In *2016 IEEE 25th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE)*, pages 799–804, 2016.

