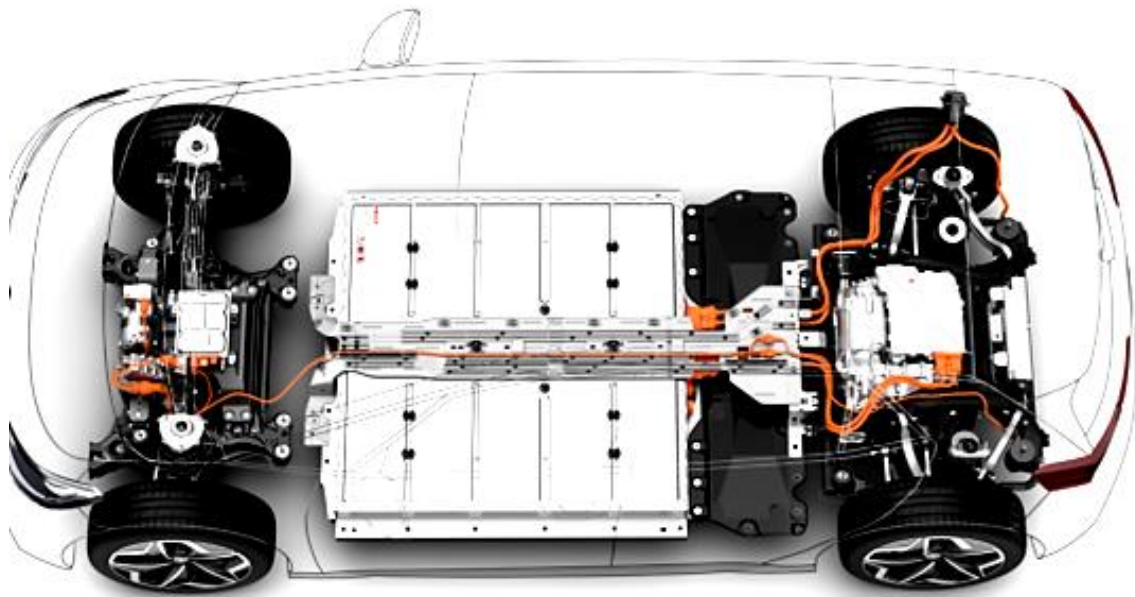




ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ & ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Διπλωματική Εργασία

Αναγεννητική Πέδηση σε Εφαρμογές Ηλεκτρικής Κίνησης



Φοιτητής: Καγιούλης Γρηγόριος
Αριθμός Μητρώου: 212017005

Επιβλέπων Καθηγητής: Ιωαννίδης Γεώργιος
Καθηγητής

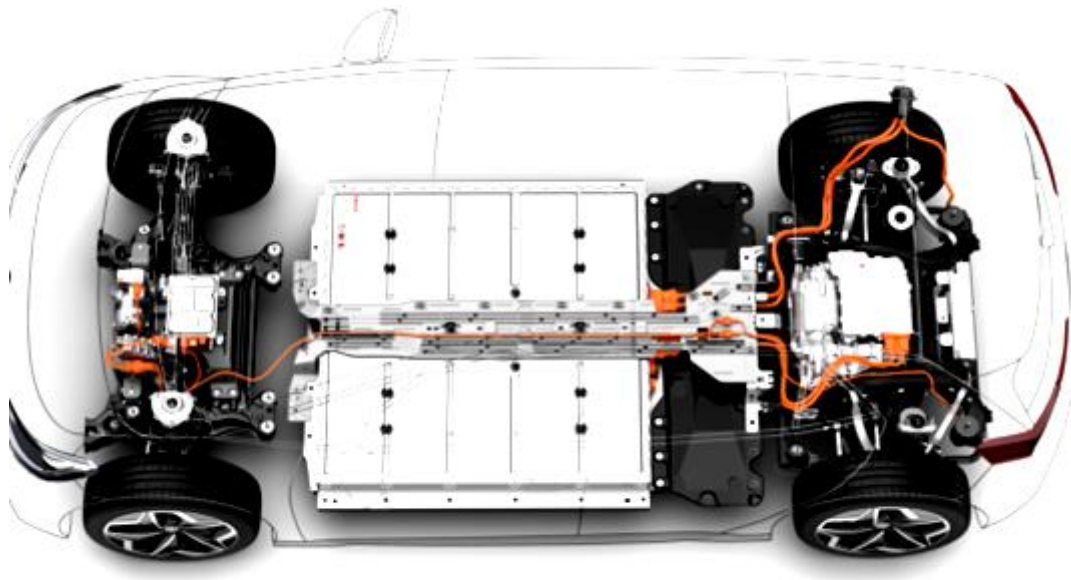
ΑΙΓΑΛΕΩ, ΜΑΡΤΙΟΣ 2023



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

Diploma Thesis

Regenerative Braking in Electric Motion Applications



**Student: Kagioulis Grigorios
Registration Number: 212017005**

Supervisor

**Ioannidis Georgios
Professor**

EGALEO, March 2023

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

Ιωαννίδης Γεώργιος, Καθηγητής	Βόκας Γεώργιος, Καθηγητής	Καραϊσάς Πέτρος, Καθηγητής
(Υπογραφή)	(Υπογραφή)	(Υπογραφή)

Copyright © Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ και Καγιούλης Γρηγόριος
Μάρτιος, 2023

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

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

ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ο κάτωθι υπογεγραμμένος Καγιούλης Γρηγόριος του Παναγιώτη, με αριθμό μητρώου 212017005 φοιτητής του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής της Σχολής ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ του Τμήματος ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ,

δηλώνω υπεύθυνα ότι:

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

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

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

Ο Δηλών
Καγιούλης Γρηγόριος



Ευχαριστίες

Αρχικά, οφείλω να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή του Τμήματος Ηλεκτρολόγων και Ηλεκτρονικών Μηχανικών του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής κ. Ιωαννίδη Γεώργιο για την ευκαιρία που μου έδωσε να αναλάβω την παρούσα διπλωματική εργασία, αναθέτοντάς μου ένα τόσο ενδιαφέρον θέμα.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου για την αμέριστη στήριξη και συμπαράστασή της καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου καθώς και τους φίλους μου και συμφοιτητές για τη στήριξη και τις πολύτιμες συμβουλές τους κατά τη διάρκεια φοίτησής μου.

Περίληψη

Στην κάτωθι διπλωματική εργασία μελετάται η Αναγεννητική Πέδηση (Regenerative Braking) σε εφαρμογές ηλεκτρικής κίνησης, οι οποίες εξελίσσονται με ραγδαίους ρυθμούς. Πρόκειται για μια διαδικασία ωφέλιμης μετατροπής της κινητικής ενέργειας των ηλεκτρικών κινητήρων σε ηλεκτρική μέσω της επιβράδυνσης των κινούμενων μερών τους. Με την αναγεννητική πέδηση προωθούνται ηλεκτρικά κινητήρια συστήματα πράσινης τεχνολογίας, συμβάλλοντας στην προστασία του περιβάλλοντος. Με σκοπό την αποδοτικότερη χρήση των πόρων, η πλειοψηφία των αυτοβιομηχανιών κατασκευάζει πλέον ηλεκτρικά οχήματα υψηλής ενεργειακής απόδοσης με μεγαλύτερη αυτονομία. Εφαρμόζοντας την αναγεννητική τεχνική σε λειτουργικές περιοχές επιβράδυνσης ή πέδησης του οχήματος, μέρος της κινητικής ενέργειας μετατρέπεται σε ηλεκτρική. Με αυτόν τον τρόπο εξασφαλίζεται η φόρτιση των μπαταριών, αυξάνοντας την αυτονομία και την απόδοση του οχήματος. Ακόμη, αναλύονται οι διατάξεις ηλεκτρονικών ισχύος αναγεννητικής πέδησης για τις περισσότερες κατηγορίες ηλεκτρικών μηχανών, ενώ περιγράφονται οι τεχνικές ελέγχου κάθε διάταξης αντίστοιχα. Συγκεκριμένα, μελετώνται οι μηχανές συνεχούς ρεύματος, οι ασύγχρονες και σύγχρονες μηχανές εναλλασσόμενου ρεύματος και οι κινητήρες μόνιμων μαγνητών, οι οποίοι αποτελούν ειδική κατηγορία των σύγχρονων κινητήρων. Επίσης, παρουσιάζονται οι μαθηματικές εξισώσεις που διέπουν κάθε κατηγορία ηλεκτρικών μηχανών και αναλύονται τα κυκλώματα αναγεννητικής πέδησης, αντίστοιχα. Περιγράφονται ανά κεφάλαιο τα συστήματα ηλεκτρικής κίνησης, παρουσιάζοντας τη θεωρητική τους ανάλυση και τον τρόπο λειτουργίας τους, ενώ μελετώνται οι διατάξεις ηλεκτρονικών ισχύος. Ακόμη, παρουσιάζονται οι τεχνικές ελέγχου αναγεννητικής πέδησης που αφορούν τον DC, τον BLDC και τον PMSM κινητήρα. Η λειτουργία αυτών των συστημάτων επιβεβαιώνεται μέσω προσομοίωσης σε περιβάλλον Simulink (του Matlab). Η παρουσίαση εκτείνεται σε δύο βασικούς άξονες, αναδεικνύοντας την αναγεννητική πέδηση στους συμβατικούς DC και στους σύγχρονους PM κινητήρες. Στην περίπτωση του DC κινητήρα παρακολουθείται η συμπεριφορά δύο κινητήριων συστημάτων, τροφοδοτούμενα από μετατροπείς DC-DC δύο και τεσσάρων τεταρτημορίων, αντίστοιχα. Έπειτα, εξετάζονται οι διατάξεις ελέγχου αναγεννητικής πέδησης για δύο κατηγορίες σύγχρονων PM κινητήρων, τους BLDC τραπεζοειδούς ροής και τους PMSM ημιτονοειδούς ροής. Τέλος, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που αφορούν τη λειτουργία των κινητήριων συστημάτων με την εμφάνιση των βασικών κυματομορφών τους, ενώ καταγράφονται τα συμπεράσματα και οι παρατηρήσεις.

Λέξεις – κλειδιά

Αναγεννητική πέδηση, ηλεκτρικές μηχανές, σύγχρονος κινητήρας μόνιμων μαγνητών PMSM, σύγχρονος BLDC κινητήρας, ηλεκτρικό αυτοκίνητο, τριφασικός αντιστροφείας, PWM έλεγχος, τραπεζοειδής ροή, μετατροπείς DC-DC, ηλεκτρομαγνητική ροπή, αναγεννητική PWM ανορθωτική διάταξη, ηλεκτρονικά

ισχύος, βιομηχανικά ισχύος, MOSFETs, IGBTs, δίοδοι, αισθητήρες Hall, βαθμωτός έλεγχος, άμεσος έλεγχος ροπής

Abstract

In the following thesis, Regenerative Braking is studied in electric drive applications, which are developing at a rapid pace. It is a process of beneficially converting the kinetic energy of electric motors into electricity by slowing down their moving parts. Regenerative braking promotes green technology electric drive systems, contributing to the protection of the environment. In order to use resources more efficiently, the majority of car manufacturers are now building high-energy-efficient electric vehicles with longer range. By applying the regenerative technique to functional deceleration or braking areas of the vehicle, part of the kinetic energy is converted into electricity. In this way, the charging of the batteries is ensured, increasing the autonomy and performance of the vehicle. Also, the electronic devices of regenerative braking power are analyzed for most categories of electric motors, while the control techniques of each device are described respectively. Specifically, direct current machines, asynchronous and synchronous alternating current machines and permanent magnet motors are studied, which are a special category of modern motors. Also, the mathematical equations that govern each category of electric machines are presented and regenerative braking circuits are analyzed, respectively. The electric drive systems are described by chapter, presenting their theoretical analysis and their mode of operation, while the electronic power devices are studied. Also, regenerative braking control techniques for DC, BLDC and PMSM motors are presented. The operation of these systems is confirmed through simulation in a Simulink environment (of Matlab). The presentation spans two main axes, highlighting regenerative braking in conventional DC and modern PM motors. In the case of the DC motor, the behaviour of two motor systems is monitored, powered by two- and four-quadrant DC-DC converters, respectively. Then, regenerative braking control devices for two classes of modern PM motors, trapezoidal flux BLDCs and sinusoidal flux PMSMs, are considered. Finally, the results concerning the operation of the motor systems are presented with the appearance of their basic waveforms, while the conclusions and observations are recorded.

Keywords

Regenerative braking, electric machines, synchronous PMSM permanent magnet motor, synchronous BLDC motor, electric car, three-phase inverter, PWM control, trapezoidal flux, DC-DC converters, electromagnetic torque, regenerative PWM rectifier, power electronics, power, MOSFETs, IGBTs, diodes, Hall sensors, scalar control, direct torque control

Περιεχόμενα

Κατάλογος Πινάκων	11
Κατάλογος Εικόνων	11
Κατάλογος Σχημάτων.....	12
Αλφαβητικό Ευρετήριο	19
ΕΙΣΑΓΩΓΗ	20
Αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας	20
Σκοπός και στόχοι.....	20
Μεθοδολογία	21
Καινοτομία	21
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο Αναγεννητική Πέδηση σε Μηχανές Συνεχούς Ρεύματος.....	24
1.1 Εισαγωγή	24
1.2 Θεωρητική Ανάλυση.....	24
1.2.1 Μηχανή Συνεχούς Ρεύματος Ξένης Διέγερσης.....	24
1.3 Έλεγχος Στροφών DC Κινητήρα Ξένης Διέγερσης.....	28
1.4 Αναγεννητικές PWM Ανορθωτικές Διατάξεις.....	31
1.5 Μετατροπείς DC-DC	39
1.5.1 Μετατροπέας DC-DC κλάσης ‘B’	39
1.5.2 Μετατροπέας DC-DC κλάσης ‘C’	43
1.5.3 Μετατροπέας DC-DC κλάσης ‘E’	46
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο Αναγεννητική Πέδηση σε Ασύγχρονες Μηχανές.....	48
2.1 Εισαγωγή	48
2.2 Θεωρητική ανάλυση	48
2.2.1 Ασύγχρονοι τριφασικοί κινητήρες	48
2.2.2 Περιοχές λειτουργίας ασύγχρονης μηχανής	54
2.3 Έλεγχος επαγωγικών μηχανών	57
2.3.1 Βαθμωτός Έλεγχος (Scalar control).....	58
2.4 Εφαρμογή σε Ηλεκτρικό Αυτοκίνητο	61
2.4.1 Τριφασικός Αντιστροφέας με Πηγή Συνεχούς Τάσης (VSI)	62
2.4.2 Λειτουργία Τριφασικού Αντιστροφέα με την τεχνική ελέγχου SPWM	65
2.4.3 Διάγραμμα κινητήριου συστήματος επαγωγικού κινητήρα	67
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο Αναγεννητική Πέδηση σε Σύγχρονες Μηχανές	69
3.1 Εισαγωγή	69
3.2 Θεωρητική ανάλυση	69
3.2.1 Σύγχρονη Τριφασική Μηχανή	69
3.2.2 Λειτουργική κατάσταση σύγχρονης μηχανής.....	78
3.2.3 Λειτουργία Σύγχρονης Γεννήτριας	79
3.2.4 Λειτουργία Σύγχρονου Κινητήρα	81
3.3 Ανάλυση ροπής και ισχύος	82
3.4 Έλεγχος σύγχρονων μηχανών.....	87
3.4.1 Έλεγχος Κλειστού Βρόχου Σύγχρονων Μηχανών.....	87
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο Σύγχρονοι Κινητήρες Μονίμων Μαγνητών (SPMM).....	89
4.1 Εισαγωγή	89
4.2 Θεωρητική Ανάλυση.....	89
4.2.1 Μοντέλο φασικών συνιστωσών PMSM	91
4.2.2 Μοντέλο d-q PMSM	94
4.3 Έλεγχος κινητήρων μονίμων μαγνητών.....	97

4.3.1	Βαθμωτός V/f έλεγχος ανοιχτού βρόχου	98
4.3.2	Περιοχές λειτουργίας συστήματος οδήγησης PMSM.....	99
4.3.3	Τεχνική Έλεγχου Προσανατολισμένου Πεδίου (FOC)	102
4.3.4	Άμεσος Έλεγχος Ροπής με διαμόρφωση χωρικού διανύσματος (DTC-SVM)	102
4.3.5	Άμεσος Έλεγχος Ροπής με διαμόρφωση του διανύσματος ροής (DTC-FVM).....	103
	ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο Αναγεννητική Πέδηση σε EVs μέσω Προσομοίωσης.....	105
5.1	Εισαγωγή	105
5.2	Αναγεννητική Πέδηση σε Συμβατικούς DC Κινητήρες	106
5.2.1	Με Χρήση Μετατροπέα Δύο Τεταρτημορίων	106
5.2.2	Με Χρήση Μετατροπέα Τεσσάρων Τεταρτημορίων.....	120
5.3	Αναγεννητική Πέδηση για PM Κινητήρες.....	136
5.3.1	Αναγεννητική Πέδηση σε BLDC κινητήρα.....	137
5.3.2	Αναγεννητική Πέδηση σε PMSM κινητήρα.....	161
	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	182
	Βιβλιογραφία – Αναφορές - Διαδικτυακές Πηγές.....	184

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1: Συνδυασμός ταυτόχρονης παλμοδότησης ημιαγωγικών διακοπών αντιστροφέα για διάρκεια παλμών έναυσης εύρους 120°	63
Πίνακας 2: Ονομαστικά μεγέθη DC κινητήρα.....	108
Πίνακας 3: Ονομαστικά μεγέθη Μπαταρίας.....	108
Πίνακας 4: Ονομαστικά μεγέθη DC κινητήρα.....	122
Πίνακας 5: Ονομαστικά μεγέθη Μπαταρίας.....	122
Πίνακας 6: Ονομαστικά μεγέθη BLDC κινητήρα.....	141
Πίνακας 7: Ονομαστικά μεγέθη Μπαταρίας.....	141
Πίνακας 8: Πίνακας αληθείας για τα διαστήματα λειτουργίας MOSFETs	143
Πίνακας 9: Συνδυασμοί δοκιμών για διαφορετικές τιμές ταχύτητας περιστροφής.....	145
Πίνακας 10 : Ονομαστικά μεγέθη BLDC κινητήρα.....	164
Πίνακας 11 : Ονομαστικά μεγέθη Μπαταρίας.....	164
Πίνακας 12 : Πίνακας αληθείας για τα διαστήματα λειτουργίας MOSFETs	166
Πίνακας 13 : Δοκιμές προσομοίωσης του συστήματος.....	168

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1-1 : Αναγεννητική πέδηση σε ηλεκτρικό αυτοκίνητο (mg.com, 2016).....	42
Εικόνα 2-1 : Απώλειες και ροή ισχύος ασύγχρονου τριφασικού κινητήρα (Technology, 2018). 51	
Εικόνα 2-2 : Βασική Δομή Ηλεκτρικού Αυτοκινήτου (Jost, 2021)	61
Εικόνα 3-1 : Διάταξη Σύγχρονης Μηχανής (javapoint.com, 2019).....	69
Εικόνα 3-2 : Μέρη Σύγχρονης Μηχανής (Linqip.com, 2021)	70
Εικόνα 5-1 : Διάταξη στοιχείων ενός ηλεκτρικού αυτοκινήτου (hyundai.com, 2022).....	105
Εικόνα 5-2: Σχεδιάγραμμα ροπής μέσω Signal Builder.....	110
Εικόνα 5-3 : Σύστημα διαμόρφωσης εύρους παλμών.....	123
Εικόνα 5-4 : Διάταξη PWM του κυκλώματος.....	124
Εικόνα 5-5: Σχεδιάγραμμα ροπής μέσω Signal Builder.....	126
Εικόνα 5-6 : Το σχεδιάγραμμα ροπής μέσω του πεδίου Signal Builder	145

Εικόνα 5-7 : Σύστημα ελέγχου του κυκλώματος.....	165
Εικόνα 5-8 : Αποκωδικοποίηση των σημάτων των αισθητήρων Hall σε τάσεις A, B, C.....	166
Εικόνα 5-9 : Δημιουργία παλμών έναυσης βασιζόμενοι στους αισθητήρες Hall με περιοριστή ρεύματος	167
Εικόνα 5-10 : Ροπή φορτίου κινητήρα.....	169

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 1.1: Ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα κινητήρα συνεχούς ρεύματος ζένης διέγερσης (Μανιάς, 2020)	24
Σχήμα 1.2: Χαρακτηριστική γωνιακής ταχύτητας – ροπής	28
Σχήμα 1.3: Χαρακτηριστικές ροπής και ισχύος ενός κινητήρα συνεχούς ρεύματος (Μανιάς, 2020).....	29
Σχήμα 1.4: Λειτουργία μηχανής συνεχούς ρεύματος στα τέσσερα τεταρτημόρια (Μανιάς, 2020)	30
Σχήμα 1.5: Κύκλωμα ισχύος μονοφασικής PWM ανόρθωσης	31
Σχήμα 1.6: Κύκλωμα ισχύος μονοφασικής PWM ανόρθωσης	32
Σχήμα 1.7: Παλμοί οδήγησης ημιαγωγικών διακοπών ανορθωτικής διάταξης με την χρήση της τεχνικής SPWM (Μανιάς, 2020)	33
Σχήμα 1.8: Λειτουργία του μετατροπέα ως ανόρθωση με μοναδιαίο συντελεστή ισχύος	35
Σχήμα 1.9 : Λειτουργία του μετατροπέα ως αντιστροφέα με μοναδιαίο συντελεστή ισχύος	35
Σχήμα 1.10: Κύκλωμα ελέγχου ανορθωτικής διάταξης αμφίπλευρης μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας (Μανιάς, 2020).....	36
Σχήμα 1.11: Κύκλωμα ισχύος τριφασικής PWM ανόρθωσης.....	37
Σχήμα 1.12: Κύκλωμα ελέγχου τριφασικής PWM ανόρθωσης (Μανιάς, 2020)	38
Σχήμα 1.13 : Δημιουργία ζυγού συνεχούς ρεύματος σε βιομηχανικό περιβάλλον (Μανιάς, 2020)	39
Σχήμα 1.14: Μετατροπέας δεύτερου τεταρτημορίου.....	40
Σχήμα 1.15: Ψαλιδιστής δύο τεταρτημορίων.....	43
Σχήμα 1.16: Λειτουργία κινητήρα (Μανιάς, 2020).....	43
Σχήμα 1.17: Κυματομορφές διάταξης για λειτουργία στο πρώτο τεταρτημόριο με συνεχές ρεύμα εξόδου (Μανιάς, 2020)	44

Σχήμα 1.18: Αναγεννητική πέδηση (Μανιάς, 2020)	45
Σχήμα 1.19: Κυματομορφές διάταξης για λειτουργία στο 2 ^ο τεταρτημόριο με συνεχές ρεύμα εξόδου (Μανιάς, 2020)	45
Σχήμα 1.20: Μετατροπέας τεσσάρων τεταρτημορίων	46
Σχήμα 2.1: Ισοδύναμο κύκλωμα ανά φάση τριφασικής επαγωγικής μηχανής με τα μεγέθη του δρομέα ανηγμένα στο τύλιγμα του στάτη (Μανιάς, 2020)	51
Σχήμα 2.2: Απλοποιημένο ισοδύναμο κύκλωμα (Μανιάς, 2020)	53
Σχήμα 2.3: Απλοποιημένο ισοδύναμο μονοφασικό κύκλωμα με μεταφορά της αντίδρασης X_m στο στάτη (Μανιάς, 2020)	53
Σχήμα 2.4: Χαρακτηριστική εσωτερικής ροπής συναρτήσει της ολίσθησης της μηχανής επαγωγής για διάφορες καταστάσεις λειτουργίας με σταθερή τάση και συχνότητα (Rashid, 2010).....	55
Σχήμα 2.5: Γραφική παράσταση της επαγόμενης ροπής και της μετατρεπόμενης ισχύος συναρτήσει της ταχύτητας ενός τετραπολικού επαγωγικού κινητήρα (Charman, 2020)	56
Σχήμα 2.6: Περιοχές ευσταθούς και ασταθούς λειτουργίας της χαρακτηριστικής ροπής-ολίσθησης (Μαλατέστας, 2019).....	57
Σχήμα 2.7: Διάταξη ηλεκτρονικών ισχύος διπλής ροής ισχύος και PWM αναγεννητική ανόρθωση με μονάδα συντελεστή ισχύος εισόδου (Μανιάς, 2020).....	58
Σχήμα 2.8 : Χαρακτηριστική ροπής – στροφών με σταθερό λόγο V/f (Μανιάς, 2020).....	58
Σχήμα 2.9 : Δομικό διάγραμμα ελεγκτή κλειστού βρόχου με περιοριστή ρεύματος. (Μανιάς, 2020).....	59
Σχήμα 2.10 : Δομικό διάγραμμα ελεγκτή κλειστού βρόχου με έλεγχο της συχνότητας ολίσθησης (Μανιάς, 2020)	60
Σχήμα 2.11 : Σύστημα ηλεκτρικής κίνησης επαγωγικού κινητήρα τριφασικού αντιστροφέα.....	62
Σχήμα 2.12 : Κύκλωμα ισχύος τριφασικού αντιστροφέα με IGBTs ημιαγωγικούς διακόπτες (Μανιάς, 2020)	63
Σχήμα 2.13 : Κυματομορφές τριφασικού αντιστροφέα και συμμετρικού φορτίου για παλμούς οδήγησης εύρους 120° συνδεσμολογίας αστέρα (Μανιάς, 2020)	64
Σχήμα 2.14 : Λειτουργικό διάγραμμα της τεχνικής βαθμωτού ελέγχου με προδιαγεγραμμένο λόγο τάσης προς συχνότητα τροφοδοσίας με χρήση τριφασικού αντιστροφέα πηγής τάσης (Μανιάς, 2020)	65
Σχήμα 2.15 : Κυματομορφές τριφασικού αντιστροφέα με την τεχνική SPWM (Μανιάς, 2020)	66
Σχήμα 2.16 : Φάσμα συχνοτήτων της πολικής τάσης εξόδου V_{ab} (Μανιάς, 2020)	67

Σχήμα 2.17 : Δομικό διάγραμμα συστήματος ηλεκτρικής κίνησης επαγωγικού κινητήρα. (Μανιάς, 2020)	68
Σχήμα 3.1 : Στοιχειώδης Σύγχρονη Μηχανή (Μαλατέστας, 2021)	70
Σχήμα 3.2 : Θεμελιώδης συνιστώσα της μαγνητεγερτικής δύναμης (Μ.Ε.Δ.) του τυλίγματος του δρομέα (Μαλατέστας, 2019).....	71
Σχήμα 3.3 : Θεμελιώδεις συνιστώσες κυμάτων χώρου της πυκνότητας μαγνητικής ροής και της Μ.Ε.Δ. του τυλίγματος διέγερσης (Μαλατέστας, 2019).....	72
Σχήμα 3.4 : Στρεφόμενα διανύσματα χώρου της πυκνότητας μαγνητικής ροής και της Μ.Ε.Δ. του τυλίγματος διέγερσης (Μαλατέστας, 2019).....	73
Σχήμα 3.5 : Κύμα χώρου συνισταμένης θεμελιώδους συνιστώσας των Μ.Ε.Δ. στο διάκενο της μηχανής (Μαλατέστας, 2021).....	74
Σχήμα 3.6 : Χωρικοί παραστατικοί μιγάδες χώρου των Μ.Ε.Δ (Μαλατέστας, 2021)	74
Σχήμα 3.7 : Παραστατικά μιγαδικά διανύσματα (Μαλατέστας, 2021).....	76
Σχήμα 3.8 : Παραστατικά διανύσματα χώρου (Μαλατέστας, 2021)	76
Σχήμα 3.9 : Στοιχειώδης 4-πολική σύγχρονη μηχανή.....	77
Σχήμα 3.10 : Διανομή χώρου πυκνότητας ροής σε 4-πολική σύγχρονη γεννήτρια	77
Σχήμα 3.11 : Χαρακτηριστική ροπής-στροφών	78
Σχήμα 3.12: Παραστατικά διανύσματα χώρου και χρόνου.....	79
Σχήμα 3.13: Παραστατικά διανύσματα χώρου και χρόνου.....	80
Σχήμα 3.14: Παραστατικά διανύσματα χώρου και χρόνου.....	80
Σχήμα 3.15: Παραστατικά διανύσματα χώρου και χρόνου.....	81
Σχήμα 3.16: Παραστατικά διανύσματα χώρου και χρόνου.....	81
Σχήμα 3.17: Παραστατικά διανύσματα χώρου και χρόνου.....	82
Σχήμα 3.18 : Το ανά φάση ισοδύναμο κύκλωμα σύγχρονης τριφασικής γεννήτριας κυλινδρικού δρομέα	83
Σχήμα 3.19 : Διανυσματικό διάγραμμα τάσεων-ρευμάτων σύγχρονης γεννήτριας	83
Σχήμα 3.20 : Το ανά φάση ισοδύναμο κύκλωμα σύγχρονου τριφασικού κινητήρα κυλινδρικού δρομέα	84
Σχήμα 3.21 : Διανυσματικό διάγραμμα τάσεων-ρευμάτων σύγχρονου τριφασικού κινητήρα ...	84
Σχήμα 3.22 : Διάγραμμα ισχύος σύγχρονης γεννήτριας.....	85
Σχήμα 3.23 : Χαρακτηριστική εσωτερικής ισχύος - γωνίας φορτίου	86

Σχήμα 3.24 : Χαρακτηριστική της εσωτερικής ροπής συναρτήσει της γωνίας φορτίου.....	87
Σχήμα 3.25 : Μεταβολή ροπής συναρτήσει της γωνιακής ταχύτητας (Rashid, 2010)	88
Σχήμα 3.26 : Περιοχές ελέγχου σύγχρονου κινητήρα (Μαλατέστας, 2021)	88
Σχήμα 4.1 : Τομή PPM επιφανειακών μαγνητών ημιτονοειδούς ροής (Researchgate.net, 2020)	89
Σχήμα 4.2 : Εγκάρσια τομή κινητήρα PM επιφανειακών μαγνητών τραπεζοειδούς ροής (Umans, 2017)	90
Σχήμα 4.3: Κυματομορφές Ημιτονοειδούς και Τραπεζοειδούς Ροής (bemf/blog.com, 2019) ..	91
Σχήμα 4.4 : Ισοδύναμο κύκλωμα σύγχρονου PMM κινητήρα με φασικές συνιστώσες a-b-c (Μανιάς, 2020)	92
Σχήμα 4.5 : Ηλεκτρική γωνία σύγχρονου κινητήρα μονίμων μαγνητών (Charman, 2020).....	93
Σχήμα 4.6 : Μετασχηματισμός Clarke διανύσματος ρεύματος PMSM κινητήρα (Μανιάς, 2020).....	95
Σχήμα 4.7 : Μετασχηματισμός διανύσματος ρεύματος σε d-q περιστρεφόμενο πλαίσιο PMSM κινητήρα (Μανιάς, 2020).....	96
Σχήμα 4.8 : Περιστρεφόμενο q μοντέλο PMSM κινητήρα (Μανιάς, 2020)	97
Σχήμα 4.9 : Περιστρεφόμενο d μοντέλο PMSM κινητήρα (Μανιάς, 2020)	97
Σχήμα 4.10 : Δομικό διάγραμμα ελέγχου μαγνητικής ροής και ροπής κινητήρα PMSM με δύο βρόχους ελέγχου (Μανιάς, 2020)	98
Σχήμα 4.11 : Δομικό διάγραμμα βαθμωτός V/f ελέγχου ενός συστήματος ανοιχτού βρόχου (Μανιάς, 2020)	98
Σχήμα 4.12 : Περιοχές Λειτουργίας Μηχανής PMSM σταθερής ροπής (Μανιάς, 2020)	99
Σχήμα 4.13 : Σύστημα Ηλεκτρικής Κίνησης αμφίπλευρης ροής ρεύματος με τριφασικό αντιστροφέα (www.infineon.com, 2020)	101
Σχήμα 4.14 : Δομικό διάγραμμα τεχνικής ελέγχου FOC (Μανιάς, 2020).....	102
Σχήμα 4.15 : Δομικό διάγραμμα τεχνικής ελέγχου DTC-SVM (Μανιάς, 2020)	103
Σχήμα 4.16 : Δομικό διάγραμμα τεχνικής ελέγχου DTC-FVM (Μανιάς, 2020)	104
Σχήμα 5.1: Σχεδιάγραμμα κινητήριου συστήματος dc-dc ηλεκτρικού αυτοκινήτου	106
Σχήμα 5.2 : Μετατροπέας dc-dc δύο τεταρτημορίων	107
Σχήμα 5.3 : Κύκλωμα Simulink μετατροπέα DC-DC δύο τεταρτημορίων για έλεγχο DC κινητήρα.....	109

Σχήμα 5.4 : Κυματομορφές ρεύματος τυμπάνου (I_a), ηλεκτρικής ροπής (T_e) και ρεύματος διέγερσης (I_f) κινητήρα για σταθερή θετική ροπή 20 Nm	112
Σχήμα 5.5 : Κυματομορφές ροπής φορτίου, ταχύτητας περιστροφής κινητήρα, κατάστασης φόρτισης μπαταρίας (SOC) για σταθερή θετική ροπή 20 Nm	113
Σχήμα 5.6 : Κυματομορφές ρεύματος τυμπάνου κινητήρα, ηλεκτρικής ροπής κινητήρα και ρεύματος διέγερσης κινητήρα για σταθερή αρνητική ροπή -20 Nm.....	114
Σχήμα 5.7 : Κυματομορφές ροπής φορτίου, ταχύτητας περιστροφής κινητήρα, κατάστασης φόρτισης μπαταρίας (SOC) για σταθερή αρνητική ροπή -20 Nm στο 100% της ονομαστικής τιμής.....	115
Σχήμα 5.8 : Κυματομορφές ρεύματος τυμπάνου κινητήρα, ηλεκτρικής ροπής κινητήρα και ρεύματος διέγερσης κινητήρα για προφίλ ροπής 1	116
Σχήμα 5.9 : Κυματομορφές ροπής φορτίου, ταχύτητας περιστροφής κινητήρα, κατάστασης φόρτισης μπαταρίας (SOC) για προφίλ ροπής 1	117
Σχήμα 5.10 : Κυματομορφές ρεύματος τυμπάνου κινητήρα, ηλεκτρικής ροπής κινητήρα και ρεύματος διέγερσης κινητήρα για προφίλ ροπής 2	118
Σχήμα 5.11 : Κυματομορφές ροπής φορτίου, ταχύτητας περιστροφής κινητήρα και κατάστασης φόρτισης μπαταρίας (SOC) για προφίλ ροπής 2	119
Σχήμα 5.13 : Κύκλωμα προσομοίωσης μετατροπέα DC-DC τεσσάρων τεταρτημορίων.....	121
Σχήμα 5.14 : Παλμοτροφοδότηση διακοπτικών στοιχείων του μετατροπέα προσομοίωσης συναρτήσει του χρόνου time (sec)	125
Σχήμα 5.15 : Κυματομορφές ρεύματος τυμπάνου, ηλεκτρικής ροπής και ρεύματος διέγερσης κινητήρα για σταθερή θετική ροπή 20 Nm (100% της ονομαστικής τιμής φορτίου) για $t=6s$.	128
Σχήμα 5.16 : Κυματομορφές ροπής φορτίου, ταχύτητας περιστροφής κινητήρα, κατάστασης φόρτισης μπαταρίας (SOC) για σταθερή θετική ροπή 20 Nm (100% της ονομαστικής τιμής φορτίου)	129
Σχήμα 5.17 : Κυματομορφές ρεύματος τυμπάνου, ηλεκτρικής ροπής και ρεύματος διέγερσης κινητήρα για σταθερή αρνητική ροπή -20 Nm (100% της ονομαστικής τιμής φορτίου)	130
Σχήμα 5.18 : Κυματομορφές ροπής φορτίου, ταχύτητας περιστροφής κινητήρα, κατάστασης φόρτισης μπαταρίας (SOC) για σταθερή αρνητική ροπή -20 Nm (100% της ονομαστικής τιμής φορτίου)	131
Σχήμα 5.19 : Κυματομορφές ρεύματος τυμπάνου κινητήρα, ηλεκτρικής ροπής κινητήρα και ρεύματος διέγερσης κινητήρα για προφίλ ροπής 1 [-10 Nm, +10 Nm].....	132
Σχήμα 5.20 : Κυματομορφές ροπής φορτίου, ταχύτητας περιστροφής κινητήρα, κατάστασης φόρτισης μπαταρίας (SOC) για προφίλ ροπής 1 [-10 Nm, +10 Nm]	133
Σχήμα 5.21 : Κυματομορφές ρεύματος τυμπάνου κινητήρα, ηλεκτρικής ροπής κινητήρα και ρεύματος διέγερσης κινητήρα για προφίλ ροπής 2 [-20 Nm, +20 Nm].....	134

Σχήμα 5.22 : Κυματομορφές ροπής φορτίου, ταχύτητας περιστροφής κινητήρα και κατάσταση φόρτισης μπαταρίας (SOC) για προφίλ ροπής 2 [-20 Nm, +20 Nm].....	135
Σχήμα 5.23 : Διαφορές μεταξύ κυματομορφών	136
Σχήμα 5.24: Τριφασικός αμφίπλευρος αντιστροφέας με πηγή τάσης.....	137
Σχήμα 5.25 : Κυματομορφές αισθητήρων Hall με τις αντιηλεκτρεγερτικές δυνάμεις και τα ρεύματα κάθε φάσης ενός BLDC κινητήρα	139
Σχήμα 5.26 : Κύκλωμα προσομοίωσης Simulink αναγεννητικής πέδησης BLDC κινητήρα ...	140
Σχήμα 5.27 : Αποκωδικοποίηση των σημάτων των αισθητήρων Hall σε τάσεις A, B, C	142
Σχήμα 5.28 : Δημιουργία παλμών έναυσης βασιζόμενοι στους αισθητήρες Hall.....	143
Σχήμα 5.29 : Κυματομορφές ρευμάτων στάτη του κινητήρα με σταθερό φορτίο στο 100% του ονομαστικού (20Nm) για χρονικό διάστημα $t=0.4s$ με στροφές 3000 rpm.....	147
Σχήμα 5.30 : Κυματομορφές αντιηλεκτρεγερτικής δύναμης του κινητήρα με σταθερό φορτίο 20Nm (100% του ονομαστικού) για χρονικό διάστημα $t=0.4s$ με στροφές 3000 rpm	148
Σχήμα 5.31 : Κυματομορφές ροπής φορτίου κινητήρα, ταχύτητας περιστροφής κινητήρα και κατάσταση φόρτισης για σταθερή θετική ροπή 20 Nm (100% της ονομαστικής τιμής) για χρονικό διάστημα $t=5s$ με στροφές 3000 rpm.....	149
Σχήμα 5.32 : Κυματομορφές ρευμάτων στάτη του κινητήρα με σταθερό αρνητικό φορτίο στο 100% του ονομαστικού (-20Nm) για χρονικό διάστημα $t=0.4s$ με στροφές 3000 rpm	150
Σχήμα 5.33 : Κυματομορφές αντιηλεκτρεγερτικής δύναμης του κινητήρα με σταθερό αρνητικό φορτίο στο 100% του ονομαστικού (-20Nm) για χρονικό διάστημα $t=0.2s$ με στροφές 3000 rpm	151
Σχήμα 5.34 : Κυματομορφές ροπής φορτίου κινητήρα, ταχύτητας περιστροφής κινητήρα και κατάσταση φόρτισης για σταθερή αρνητική ροπή -20 Nm (100% της ονομαστικής τιμής) για χρονικό διάστημα $t=5s$ με στροφές 3000 rpm.....	152
Σχήμα 5.35 : Ρεύματα στάτη του κινητήρα με μεταβολή φορτίου από 10 Nm (για $0 < t < 0.2s$) σε -10 Nm στο χρονικό διάστημα $t=0.2s$ έως $t=0.4s$ με στροφές 1500 rpm.....	153
Σχήμα 5.36 : Κυματομορφές ροπής φορτίου κινητήρα, ταχύτητας περιστροφής κινητήρα και κατάσταση φόρτισης μπαταρίας με προφίλ ροπής 1 για χρονικό διάστημα $t=6s$	154
Σχήμα 5.37 : Ρεύματα στάτη του κινητήρα με μεταβολή φορτίου από 10 Nm για $0 < t < 0.2s$ σε -10Nm στο χρονικό διάστημα $t=0.2s$ έως $t=0.4s$ με στροφές 3000 rpm	155
Σχήμα 5.38 : Κυματομορφές ροπής φορτίου κινητήρα, ταχύτητας περιστροφής κινητήρα και κατάσταση φόρτισης μπαταρίας με προφίλ ροπής 2 για χρονικό διάστημα $t=6s$	156
Σχήμα 5.39 : Ρεύματα στάτη του κινητήρα με μεταβολή φορτίου από 20 Nm (για $0 < t < 0.2s$) σε -20 Nm στο χρονικό διάστημα $t=0.2s$ έως $t=0.4s$ με στροφές 1500 rpm.....	157

Σχήμα 5.40 : Κυματομορφές ροπής φορτίου κινητήρα, ταχύτητας περιστροφής κινητήρα και κατάστασης φόρτισης μπαταρίας με προφίλ ροπής 3 για χρονικό διάστημα $t=6s$	158
Σχήμα 5.41 : Ρεύματα στάτη του κινητήρα με μεταβολή φορτίου από 20 Nm (για $0 < t < 0.2s$) σε -20 Nm στο χρονικό διάστημα $t=0.2s$ έως $t=0.4s$ με στροφές 3000 rpm	159
Σχήμα 5.42 : Κυματομορφές ροπής φορτίου κινητήρα, ταχύτητας περιστροφής κινητήρα και κατάστασης φόρτισης μπαταρίας με προφίλ ροπής 4 για χρονικό διάστημα $t=6s$	160
Σχήμα 5.43 : Τριφασικός αμφίπλευρος αντιστροφέας με πηγή τάσης	161
Σχήμα 5.44 : Κύκλωμα προσομοίωσης Simulink αναγεννητικής πέδησης κινητήρα PMSM ..	163
Σχήμα 5.45 : Κυματομορφές ρευμάτων στάτη του κινητήρα με σταθερό φορτίο στο 100% του ονομαστικού (20Nm) για χρονικό διάστημα $t=0.2s$ με στροφές 1100 rpm	170
Σχήμα 5.46 : Κυματομορφές ροπής φορτίου κινητήρα, ταχύτητας περιστροφής κινητήρα και κατάστασης φόρτισης για σταθερή θετική ροπή 20 Nm στο 50% της ονομαστικής τιμής για χρονικό διάστημα $t=5s$ με στροφές 1100 rpm	171
Σχήμα 5.47 : Κυματομορφές ρευμάτων στάτη του κινητήρα με σταθερό αρνητικό φορτίο στο 100% του ονομαστικού (-20Nm) για χρονικό διάστημα $t=0.2s$ με στροφές 1100 rpm	172
Σχήμα 5.48 : Κυματομορφές ροπής φορτίου κινητήρα, ταχύτητας περιστροφής κινητήρα και κατάστασης φόρτισης για σταθερή αρνητική ροπή -20 Nm στο 50% της ονομαστικής τιμής για χρονικό διάστημα $t=5s$ με στροφές 1100 rpm	173
Σχήμα 5.49 : Ρεύματα στάτη του κινητήρα με μεταβολή φορτίου από 10 Nm για $0 < t < 0.2s$ σε -10Nm στο χρονικό διάστημα $t=0.2s$ έως $t=0.4s$ με στροφές 1100 rpm	174
Σχήμα 5.50 : Κυματομορφές ροπής φορτίου κινητήρα, ταχύτητας περιστροφής κινητήρα και κατάστασης φόρτισης μπαταρίας για προφίλ ροπής 1 στο χρονικό διάστημα $t=6s$	175
Σχήμα 5.51 : Ρεύματα στάτη του κινητήρα με μεταβολή φορτίου από 10 Nm (για $0 < t < 0.2s$) σε -10 Nm στο χρονικό διάστημα $t=0.2s$ έως $t=0.4s$ με στροφές 2200 rpm	176
Σχήμα 5.52 : Κυματομορφές ροπής φορτίου κινητήρα, ταχύτητας περιστροφής κινητήρα και κατάστασης φόρτισης μπαταρίας για προφίλ ροπής 2 στο χρονικό διάστημα $t=6s$	177
Σχήμα 5.53 : Ρεύματα στάτη του κινητήρα με μεταβολή φορτίου από 20 Nm (για $0 < t < 0.2s$) σε -20 Nm στο χρονικό διάστημα $t=0.2s$ έως $t=0.4s$ με στροφές 1100 rpm	178
Σχήμα 5.54 : Κυματομορφές ροπής φορτίου κινητήρα, ταχύτητας περιστροφής κινητήρα και κατάστασης φόρτισης μπαταρίας για προφίλ ροπής 3 στο χρονικό διάστημα $t=6s$	179
Σχήμα 5.55 : Ρεύματα στάτη του κινητήρα με μεταβολή φορτίου από 20 Nm (για $0 < t < 0.2s$) σε -20 Nm στο χρονικό διάστημα $t=0.2s$ έως $t=0.4s$ με στροφές 2200 rpm	180
Σχήμα 5.56 : Κυματομορφές ροπής φορτίου κινητήρα, ταχύτητας περιστροφής κινητήρα και κατάστασης φόρτισης μπαταρίας για προφίλ ροπής 4 στο χρονικό διάστημα $t=6s$	181

Αλφαβητικό Ευρετήριο

AC: Alternative Current = Εναλλασσόμενο ρεύμα

Back - EMF: Back Electromotive Force = Αντιηλεκτρεγερτική δύναμη

BLDC: Brushless DC Motor = Κινητήρας συνεχούς ρεύματος χωρίς ψήκτρες

CSI: Current Source Inverter = Μετατροπέας Πηγής Ρεύματος

DC: Direct Current = Συνεχές ρεύμα

DFOC: Direct Field Oriented Control = Έλεγχος άμεσου πεδίου

DSP: Digital Signal Processor = Επεξεργαστής Ψηφιακού Σήματος

DTC: Direct Torque and Flux Control = Άμεσος έλεγχος ροπής και ροής

EMF: Electromotive Force = Ηλεκτροπαραγωγός δύναμη

FOC: Field Oriented Control = Έλεγχος πεδίου

IGBT: Insulated Gate Bipolar Transistors = Μονωμένα διπολικά τρανζίστορ

PM: Permanent Magnet = Μόνιμοι μαγνήτες

PMSM: Permanent Magnet Synchronous Motor = Σύγχρονος κινητήρας μόνιμου μαγνήτη

PWM: Pulse Width Modulation = Διαμόρφωση εύρους πλάτους παλμών

RPM: Revolutions Per Minute = Στροφές ανά λεπτό

Regenerative braking = Αναγεννητική Πέδηση

SPWM: Sinusoidal Pulse Width Modulation = Διαμόρφωση ημιτονοειδούς πλάτους παλμού

THD: Total Harmonic Distortion = Συνολική Αρμονική Παραγωγή

VSI: Voltage Source Inverter = Μετατροπέας πηγής τάσης

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η ραγδαία ανάπτυξη της τεχνολογίας σε συνδυασμό με τον συνεχόμενο περιορισμό των ορυκτών καυσίμων έχει οδηγήσει στην τροποποίηση των συστημάτων ηλεκτρικής κίνησης. Στις προσπάθειες μείωσης της κατανάλωσης ενέργειας εντάσσεται η χρήση της αναγεννητικής πέδησης, η οποία αποτελεί μια βέλτιστη λύση των κινητήριων συστημάτων στον βιομηχανικό και οικιακό τομέα. Μέσω της τεχνικής αυτής ελαχιστοποιούνται φθορές και φαινόμενα αύξησης της θερμοκρασίας του κινητήρα, μειώνοντας σημαντικά τα κόστη συντήρησης αυτού. Η αναγεννητική πέδηση ή αναγεννητικό φρενάρισμα συμβάλλει στην ανάκτηση μέρους της κινητικής ενέργειας που έχει ήδη αποκτηθεί από τον κινητήρα που περιστρέφεται με μια ορισμένη ταχύτητα. Κατά τη διαδικασία της πέδησης, η ανακτηθείσα ενέργεια είτε επιστρέφει στο δίκτυο μέσω διατάξεων ηλεκτρονικών ισχύος είτε αποθηκεύεται με διάφορους τρόπους προκειμένου να χρησιμοποιηθεί σύμφωνα με τις ανάγκες κάθε συστήματος. Στην περίπτωση των ηλεκτρικών αυτοκινήτων, μέσω της αναγεννητικής πέδησης ένα μέρος της κινητικής ενέργειας μετατρέπεται σε ηλεκτρική. Αυτή η ενέργεια φορτίζει μία συστοιχία μπαταριών, που στρατηγικά ξαναχρησιμοποιείται για την ηλεκτρική προώθηση του κινητήρα (Bose, 2002). Το φαινόμενο αυτό αναλύεται στη συγκεκριμένη εργασία για τις περισσότερες κατηγορίες ηλεκτρικών μηχανών που συναντώνται στη βιομηχανία και περιγράφεται το σύστημα ελέγχου για κάθε περίπτωση.

Αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας

Το αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας αφορά την εφαρμογή και ανάλυση της αναγεννητικής πέδησης στα συστήματα ηλεκτρικής κίνησης κινητήρων συνεχούς και εναλλασσόμενου ρεύματος αντίστοιχα. Παρουσιάζονται οι διατάξεις ισχύος, ενώ περιγράφεται το κύκλωμα ελέγχου κάθε συστήματος ξεχωριστά. Εν συνεχεία, εξετάζεται ο έλεγχος αναγεννητικής πέδησης που αφορά τον DC, τον BLDC και τον PMSM κινητήρα. Η λειτουργία αυτών των συστημάτων επιβεβαιώνεται μέσω προσομοίωσης σε περιβάλλον Simulink (του Matlab). Η παρουσίαση εκτείνεται σε δύο βασικούς άξονες, αναδεικνύοντας την αναγεννητική πέδηση στους συμβατικούς DC και στους σύγχρονους PM κινητήρες.

Σκοπός και στόχοι

Σκοπός της διπλωματικής εργασίας είναι η θεωρητική παρουσίαση των συστημάτων αναγεννητικής πέδησης στις εφαρμογές ηλεκτρικής κίνησης καθώς και η επιβεβαίωση της λειτουργίας τους μέσω Simulink - Matlab. Τα συστήματα ηλεκτρικής κίνησης που εξετάζονται αφορούν συμβατικούς κινητήρες συνεχούς ρεύματος και σύγχρονους κινητήρες μόνιμων μαγνητών τραπεζοειδούς και ημιτονοειδούς μαγνητικής ροής, αντίστοιχα. Αναλυτικότερα, παρουσιάζονται τα κυκλώματα μέσω Simulink με σκοπό την καταγραφή δεδομένων, επιβεβαιώνοντας τη λειτουργία της αναγεννητικής πέδησης. Με την εκτέλεση των προσομοιώσεων για συγκεκριμένα προφίλ ροπής

φορτίου και ταχύτητας καταγράφονται σημαντικές πληροφορίες και πορίσματα σχετικά με την αναγεννητική πέδηση.

Μεθοδολογία

Στην παρουσίαση του μετατροπέα DC-DC δύο τεταρτημορίων πραγματοποιείται έλεγχος μέσω των παλμών έναυσης των ημιαγωγικών διακοπών MOSFETs. Οι γεννήτριες παλμών (pulse) ρυθμίζονται και για τους δύο διακόπτες με περίοδο 1/25000 secs με τιμή πλάτους 10. Το πρώτο MOSFET ελέγχου ισχύος λαμβάνει βαθμό χρησιμοποίησης 30% στο πεδίο Pulse-Width. Το δεύτερο MOSFET αναγεννητικής πέδησης ρυθμίζεται με βαθμό χρησιμοποίησης 70%, αποσκοπώντας στη διατήρηση του αναγεννώμενου ρεύματος πέδησης στο μέγιστο επιτρεπτό επίπεδο με ευστάθεια στις χαμηλές ταχύτητες.

Το κινητήριο σύστημα, το οποίο τροφοδοτείται από μετατροπέα DC-DC τεσσάρων τεταρτημορίων, ελέγχεται με τη βοήθεια της διάταξης PWM. Συγκεκριμένα, εφαρμόζεται η τεχνική διαμόρφωσης εύρους παλμών, όπου δημιουργούνται οι παλμοί έναυσης των ημιαγωγικών διακοπών MOSFETs. Τα σήματα πύλης παράγονται συγκρίνοντας την τριγωνική κυματομορφή με το σήμα συνεχούς τάσης, εξαλείφοντας τις ανώτερες αρμονικές που δυσχεραίνουν το σύστημα. Η συχνότητα των παλμών οδήγησης εξαρτάται από τη συχνότητα της τριγωνικής κυματομορφής, η οποία ρυθμίζεται στο 1kHz.

Στην περίπτωση του BLDC κινητήρα ελέγχονται οι στροφές και το φορτίο στα επιθυμητά επίπεδα μέσω κατάλληλης οδήγησης των ημιαγωγικών στοιχείων. Η εφαρμογή του τραπεζοειδή ελέγχου υλοποιείται στο περιβάλλον Simulink / Matlab με τη χρήση αισθητήρων Hall, προσδιορίζοντας τη θέση του δρομέα. Με αυτόν τον τρόπο, η καταγραφή της θέσης του δρομέα συμβάλλει στην κατάλληλη παλμοτροφοδότηση των ημιαγωγικών διακοπών του αντιστροφέα, ελέγχοντας τον κινητήρα.

Στην περίπτωση του PMSM παρουσιάζεται το κύκλωμα ισχύος και ελέγχου μέσω Simulink, όπου αναπτύσσεται η μονάδα ημιτονοειδούς ελέγχου μέσω PI ελεγκτή. Στο περιβάλλον αυτό ολοκληρώθηκαν οι δοκιμές προσεγγίζοντας τις βέλτιστες πραγματικές συνθήκες φορτίου και ταχύτητας. Η εφαρμογή ημιτονοειδούς ελέγχου αφορά τον συνδυασμό των ρευμάτων περιέλιξης, παράγοντας ένα ομαλά περιστρεφόμενο διάνυσμα συνεχούς τιμής μέσω της ανάπτυξης κατάλληλων σημάτων από τους αισθητήρες Hall.

Καινοτομία

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετάται το φαινόμενο της αναγεννητικής πέδησης, το οποίο είναι αρκετά σημαντικό στις εφαρμογές ηλεκτρικής κίνησης. Στην αναγεννητική πέδηση, η μηχανική ενέργεια του δρομέα της μηχανής μετατρέπεται σε ηλεκτρική και τροφοδοτείται πίσω στην πηγή τροφοδοσίας μέσω των διατάξεων ισχύος. Ιδιαίτερα στα συστήματα ηλεκτρικής κίνησης οχημάτων, η αναγεννητική

πέδηση κατέχει σημαντικό ρόλο. Αυτό συμβαίνει καθώς η ενέργεια αξιοποιείται επιτυχώς και διαχειρίζεται με τον βέλτιστο τρόπο. Έτσι, η ηλεκτρική ενέργεια ανακτάται μέσω των συστημάτων αποθήκευσης, αυξάνοντας την αυτονομία των ηλεκτρικών οχημάτων. Η αναγεννητική πέδηση συμβάλλει στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μέσω των φρεναρισμάτων ή επιβραδύνσεων του οχήματος, όπου η ηλεκτρική μηχανή δρώντας ως γεννήτρια επιστρέφει ηλεκτρική ισχύ στις μπαταρίες. Στην διπλωματική αυτή δοκιμάζονται οι τεχνικές ελέγχου αναγεννητικής πέδησης που αφορούν έναν DC, έναν BLDC και έναν PMSM κινητήρα σε ηλεκτρικά αυτοκίνητα. Η λειτουργία των συστημάτων επιβεβαιώνεται μέσω προσομοίωσης σε περιβάλλον Simulink (του Matlab), αποδεικνύοντας την φόρτιση των μπαταριών του οχήματος.

Δομή

Η ακόλουθη διπλωματική εργασία οργανώνεται σε πέντε (5) κεφάλαια. Η θεωρητική ανάλυση των διατάξεων ηλεκτρονικών ισχύος και η μαθηματική περιγραφή των κινητήρων παρουσιάζονται στα πρώτα τέσσερα κεφάλαια. Συγκεκριμένα, στα πρώτα κεφάλαια παρουσιάζονται οι απαραίτητες πληροφορίες και μαθηματικές εξισώσεις για κάθε περίπτωση με την παρουσίαση των κυκλωμάτων και εξισώσεων. Το πέμπτο (5^ο) και τελευταίο κεφάλαιο πραγματεύεται την εξέταση των διατάξεων ισχύος που αναλύθηκαν μέσω προσομοίωσης σε ειδικό περιβάλλον καταγραφής αποτελεσμάτων.

Στο πρώτο κεφάλαιο παρουσιάζονται οι κινητήρες συνεχούς ρεύματος με τις διατάξεις ελέγχου αυτών με εφαρμογή αναγεννητικής πέδησης. Αρχικά, μελετάται ο κινητήρας ξένης διέγερσης με το ισοδύναμο κύκλωμα και τις χαρακτηριστικές ροπής και ισχύος. Αναλύονται οι τεχνικές ελέγχου για διαφορετικές τάσεις εισόδου και ανάλογα την εφαρμογή μελετώνται οι διακοπτικές PWM ανορθωτικές διατάξεις και οι DC-DC μετατροπείς ή ψαλιδιστές συνεχούς τάσης.

Το δεύτερο κεφάλαιο εισάγει την αναγεννητική πέδηση στα συστήματα ηλεκτρικής κίνησης εναλλασσόμενου ρεύματος με την ανάλυση των ασύγχρονων μηχανών ή μηχανών επαγωγής. Αρχικά, παρουσιάζεται η θεωρητική ανάλυση των ασύγχρονων τριφασικών κινητήρων και οι περιοχές λειτουργίας τους. Εν συνεχεία, μελετάται ο έλεγχος των επαγωγικών μηχανών με ιδιαίτερη έμφαση στον βαθμωτό έλεγχο (Scalar control). Ακόμη, παρουσιάζεται μια εφαρμογή σε ηλεκτρικό αυτοκίνητο με την ανάλυση του τριφασικού αντιστροφέα που τροφοδοτείται από πηγή συνεχούς τάσης (VSI), εφαρμόζοντας την τεχνική ελέγχου SPWM.

Στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζονται οι σύγχρονοι κινητήρες εναλλασσόμενου ρεύματος. Πραγματοποιείται, λοιπόν, η θεωρητική ανάλυση της λειτουργικής κατάστασης μιας σύγχρονης μηχανής περιγράφοντας μια σύγχρονη γεννήτρια και έναν σύγχρονο κινητήρα. Έπειτα, πραγματοποιείται ανάλυση ροπής και ισχύος των μηχανών εισάγοντας το κομμάτι του ελέγχου. Τέλος, περιγράφεται ο έλεγχος κλειστού βρόχου των σύγχρονων μηχανών.

Το τέταρτο κεφάλαιο εισάγει μια ειδική κατηγορία των σύγχρονων μηχανών, τους σύγχρονους κινητήρες μόνιμου μαγνήτη, οι οποίοι παρουσιάζουν υψηλή απόδοση και

υψηλή αξιοπιστία. Αρχικά, πραγματοποιείται η θεωρητική ανάλυση με την περιγραφή του μοντέλου φασικών συνιστωσών PMSM και το μοντέλο d-q PMSM. Ακόμη, μελετάται ο έλεγχος των κινητήρων μόνιμων μαγνητών, αναλύοντας τον βαθμωτό V/f έλεγχο ανοιχτού βρόχου και τις περιοχές λειτουργίας του συστήματος οδήγησης PMSM. Τέλος, παρουσιάζεται η τεχνική ελέγχου προσανατολισμένου πεδίου (FOC), ο άμεσος έλεγχος ροπής με διαμόρφωση χωρικού διανύσματος (DTC-SVM) και ο άμεσος έλεγχος ροπής με διαμόρφωση του διανύσματος ροής (DTC-FVM).

Το πέμπτο κεφάλαιο πραγματεύεται τον έλεγχο των συστημάτων κίνησης μέσω Simulink, επιβεβαιώνοντας τη λειτουργία της αναγεννητικής πέδησης. Τα συστήματα ηλεκτρικής κίνησης που εξετάζονται αφορούν συμβατικούς κινητήρες συνεχούς ρεύματος και σύγχρονους κινητήρες μόνιμων μαγνητών τραπεζοειδούς και ημιτονοειδούς μαγνητικής ροής, αντίστοιχα. Αναλυτικότερα, υποβάλλονται σε έλεγχο αναγεννητικής πέδησης οι συμβατικοί DC κινητήρες, οι οποίοι τροφοδοτούνται από μετατροπείς DC-DC δύο και τεσσάρων τεταρτημορίων, αντίστοιχα. Εν συνεχεία, εξετάζονται οι διατάξεις ελέγχου αναγεννητικής πέδησης για δύο κατηγορίες σύγχρονων PM κινητήρων, τους BLDC τραπεζοειδούς ροής και τους PMSM ημιτονοειδούς ροής. Αρχικά, μελετάται το κινητήριο σύστημα του σύγχρονου κινητήρα μόνιμων μαγνητών τραπεζοειδούς ροής χωρίς ψύκτρες (BLDC), το οποίο τροφοδοτείται από τριφασικό αντιστροφέα πηγής συνεχούς τάσης (VSI). Τέλος, παρουσιάζεται το κινητήριο σύστημα του σύγχρονου κινητήρα μόνιμων μαγνητών ημιτονοειδούς ροής (PMSM), τροφοδοτούμενο από τριφασικό αντιστροφέα πηγής συνεχούς τάσης (VSI).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο

Αναγεννητική Πέδηση σε Μηχανές Συνεχούς Ρεύματος

1.1 Εισαγωγή

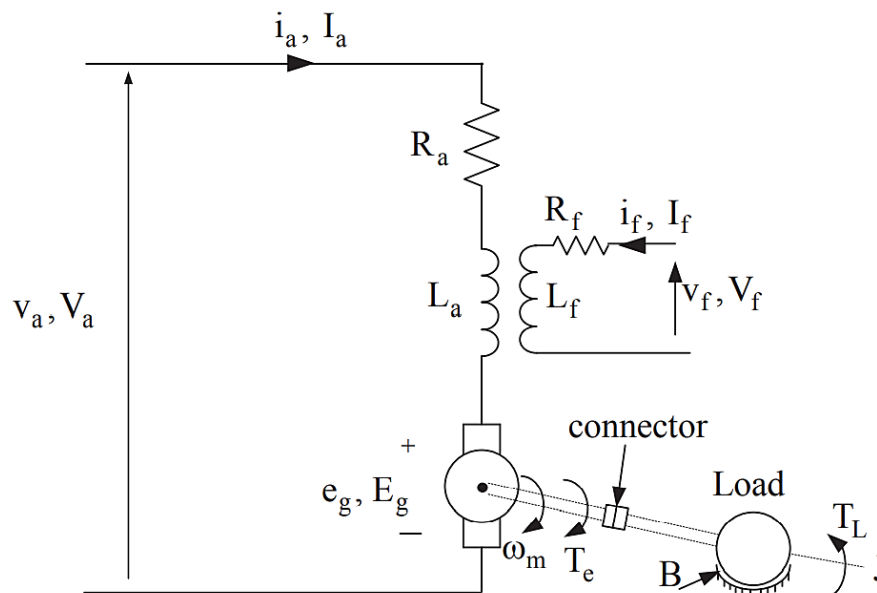
Οι ηλεκτρικές μηχανές συνεχούς ρεύματος ιστορικά προηγούνται των μηχανών εναλλασσόμενου ρεύματος, ενώ παρέχουν μια υψηλή ροπή εκκίνησης ελέγχοντας την ταχύτητα σε μια ευρεία περιοχή. Οι μέθοδοι ελέγχου ταχύτητας είναι απλούστεροι και λιγότερο δαπανηροί από αυτές των κινητήριων συστημάτων εναλλασσόμενου ρεύματος. Η ευκολία του ελέγχου έγκειται στο ότι γενικά σε μια μηχανή συνεχούς ρεύματος η ταχύτητα περιστροφής είναι ανάλογη της εφαρμοζόμενης τάσης τυμπάνου και η αναπτυσσόμενη ροπή μεταβάλλεται ανάλογα με το ρεύμα τυμπάνου.

1.2 Θεωρητική Ανάλυση

Η λειτουργία του κλασικού ηλεκτρικού κινητήρα συνεχούς ρεύματος βασίζεται στην αλληλεπίδραση δύο μαγνητικών πεδίων. Το πρώτο πεδίο δημιουργείται από μόνιμους μαγνήτες που βρίσκονται σταθερά προσαρμοσμένοι στο στάτη της μηχανής. Το δεύτερο πεδίο δημιουργείται στο δρομέα της μηχανής από το περιστρεφόμενο τύλιγμα τυμπάνου, που συνιστά και αυτό έναν ηλεκτρομαγνήτη. Βασικό ρόλο στη λειτουργία της μηχανής παίζει ο συλλέκτης, ο οποίος αντιστρέφει τη φορά του ηλεκτρικού ρεύματος με σκοπό την αντιστροφή πολικότητας του τυμπάνου.

1.2.1 Μηχανή Συνεχούς Ρεύματος Ξένης Διέγερσης

Το ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα ενός κινητήρα συνεχούς ρεύματος ξένης διέγερσης διακρίνεται παρακάτω στο σχήμα 1.1 (Μανιάς, 2020):



Σχήμα 1.1: Ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα κινητήρα συνεχούς ρεύματος ξένης διέγερσης (Μανιάς, 2020)

όπου,

V_a = η τάση τυμπάνου της μηχανής,

i_a = το ρεύμα τυμπάνου,

i_f = το ρεύμα διέγερσης,

v_f = η τάση διέγερσης,

R_a = η ωμική αντίσταση τυμπάνου,

R_f = η ωμική αντίσταση διέγερσης,

L_a = η αυτεπαγωγή τυμπάνου

L_f = η αυτεπαγωγή διέγερσης

Οι εξισώσεις που χαρακτηρίζουν ένα κινητήρα συνεχούς ρεύματος ξένης διέγερσης προκύπτουν από το σχήμα 1.1 και είναι οι ακόλουθες:

Στιγμιαία τιμή τάσης τυμπάνου:

$$V_a = R_a I_a + L \frac{di_a}{dt} + e_g \quad (1.1)$$

όπου

R_a = η εσωτερική αντίσταση τυμπάνου,

L_a = η αυτεπαγωγή τυμπάνου,

e_g = η αντιηλεκτρεγερτική δύναμη.

Στιγμιαία τιμή τάσης διέγερσης:

$$V_f = R_f i_f + L_f \frac{di_f}{dt} \quad (1.2)$$

όπου

R_f = η εσωτερική αντίσταση διέγερσης,

L_f = η αυτεπαγωγή τυμπάνου.

Ηλεκτρομαγνητική ροπή:

$$T_e = J \frac{d\omega_m}{dt} + B\omega_m + T_L \quad (1.3)$$

όπου

J = η ροπή αδράνειας φορτίου,

B = η σταθερά τριβών,

T_L = η ροπή φορτίου.

Με βάση το παραπάνω σχήμα για σταθερή τάση τροφοδοσίας τιμής V_a και συνεπώς για σταθερή τάση στο τύλιγμα διέγερσης προκύπτει η ακόλουθη βασική εξίσωση για τον κινητήρα ξένης διέγερσης στη μόνιμη κατάσταση:

$$V = V_a = E_g + R_a I_a \quad (1.4)$$

όπου E_g η επαγόμενη αντιηλεκτρεγερτική δύναμη στο τύλιγμα τυμπάνου

$$E_g = K_m \Phi \omega_m \quad (1.5)$$

K_m = σταθερά τάσης του κινητήρα

ω_m = γωνιακή ταχύτητα κινητήρα

Φ = μαγνητική ροή διέγερσης.

Ακόμη, παρατηρείται αναλογία μεταξύ της ηλεκτρομαγνητικής ροπής T_e του κινητήρα και του ρεύματος του τυλίγματος τυμπάνου I_a , σύμφωνα με τη σχέση:

$$T_e = K_a \Phi I_a \text{ (Nm)} \quad (1.6)$$

όπου K_a η σταθερά κατασκευής τυμπάνου.

Η παραπάνω σχέση της ηλεκτρομαγνητικής ροπής ορίζεται επίσης ως:

$$T_e = \frac{E_g I_a}{\omega_m} \quad (1.7)$$

Σύμφωνα με τις σχέσεις (1.4) και (1.5) ισχύει:

$$\omega_m = \frac{E_g}{K_m \Phi} = \frac{V - I_a R_a}{K_m \Phi} \quad (1.8)$$

Επίσης για την παραγόμενη ροπή και για σταθερό ρεύμα διέγερσης ισχύει η ακόλουθη έκφραση:

$$T = K_m \Phi I_a \text{ (Nm)} \quad (1.9)$$

Συνδυάζοντας τις παραπάνω σχέσεις (1.8) και (1.9) προκύπτει η κάτωθι σχέση που εκφράζει τη μηχανική ταχύτητα του κινητήρα συναρτήσει της παραγόμενης ροπής:

$$\omega_m = \frac{V}{K_m \Phi} - \frac{I_a R_a}{K_m \Phi} \quad (1.10)$$

Ενώ με τη βοήθεια της ακόλουθης σχέσης:

$$I_a = \frac{T}{K_m \Phi} \quad (1.11)$$

Προκύπτει η τελική σχέση της μηχανικής ταχύτητας:

$$\omega_m = \frac{V}{K_m \Phi} - \frac{R_a}{(K_m \Phi)^2} T \quad (1.12)$$

Με αυτόν τον τρόπο για σταθερή μαγνητική ροή και σταθερή τάση στους ακροδέκτες του τυλίγματος τυμπάνου η εξίσωση (1.10) αποκτά τη μορφή $\omega_m = A - BT$ όπου A, B σταθερές.

Διακρίνεται, λοιπόν, η εξάρτηση της γωνιακής ταχύτητας περιστροφής από την τάση του τυλίγματος τυμπάνου, από την ωμική αντίσταση του τυλίγματος τυμπάνου, από τη μαγνητική ροή και από το εκάστοτε φορτίο στον άξονα του κινητήρα.

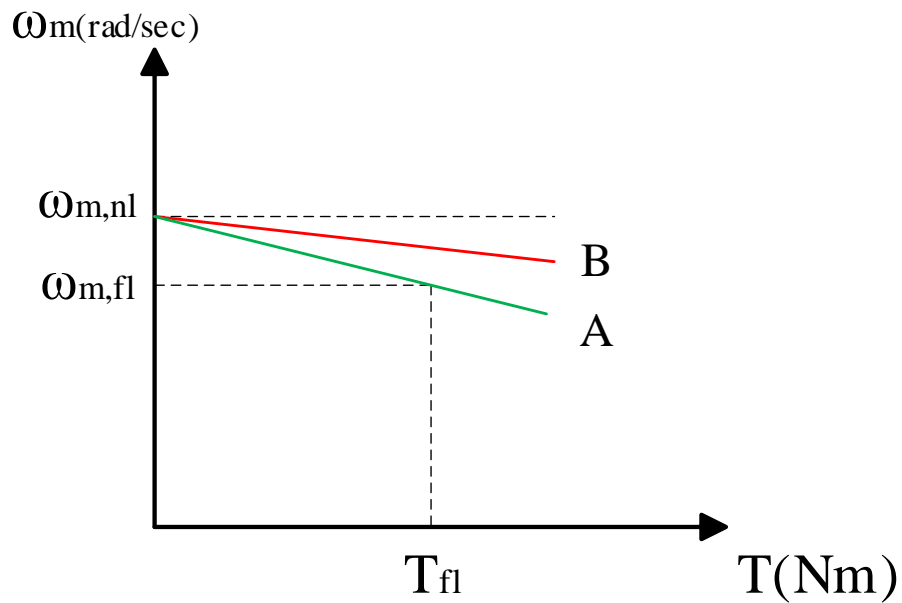
Σχετικά με τη γραφική αναπαράσταση της εξίσωσης (1.10) σε άξονες ω_m, T διαπιστώνεται πως αποτελεί μια ευθεία γραμμή σύμφωνα με το σχήμα 1.2. Συγκεκριμένα, για μηδενική ροπή $[T=0]$ δηλαδή σε συνθήκες κενού φορτίου η σταθερά A αποτελεί τη γωνιακή ταχύτητα περιστροφής.

$$\omega_{m,nl} = A = \frac{V}{K_m \Phi} \quad (1.13)$$

Η σταθερά B αποτελεί την κλίση της ευθείας $\omega_m = A - BT$, η οποία είναι αρνητική:

$$B = -\frac{R_a}{(K_m \Phi)^2} \quad (1.14)$$

Σύμφωνα με τα παραπάνω στοιχεία αναδεικνύεται η γραμμική εξάρτηση της γωνιακής ταχύτητας $[\omega_m = f(T)]$ συναρτήσει της ροπής φορτίου όπως παρουσιάζεται στην καμπύλη A του σχήματος 1.2. Αναλυτικότερα, η χαρακτηριστική γωνιακής ταχύτητας - ροπής περιγράφει τον τρόπο λειτουργίας και συμπεριφοράς του κινητήρα, καθώς μία στιγμιαία αύξηση της ροπής επιφέρει την ελάττωση των στροφών και κατ' επέκταση της επαγόμενης αντιηλεκτρεγερτικής δύναμης.



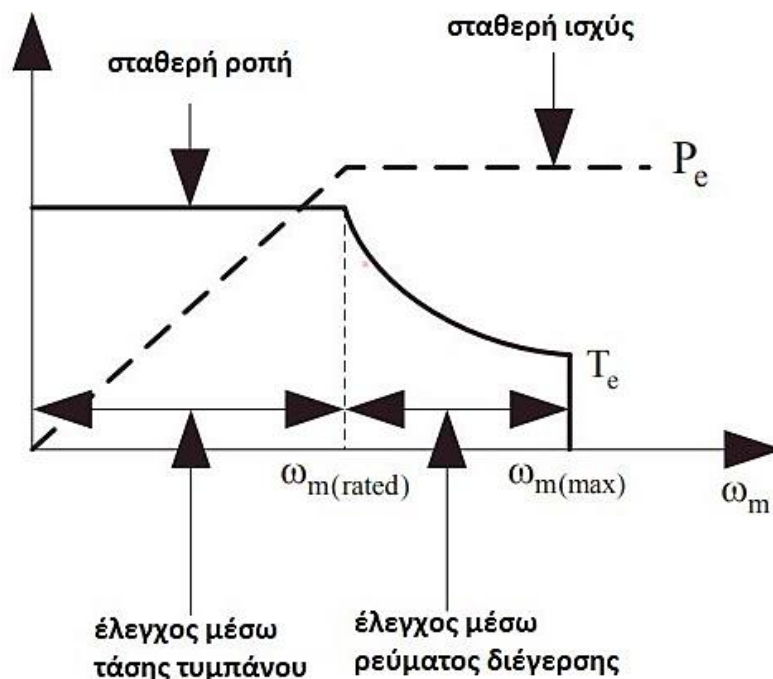
Σχήμα 1.2: Χαρακτηριστική γωνιακής ταχύτητας – ροπής

Επομένως, εάν ο κινητήρας στρέφεται με συγκεκριμένο αριθμό στροφών μία απότομη αύξηση του φορτίου προκαλεί μείωση των στροφών, με αποτέλεσμα την αύξηση του ρεύματος τυμπάνου στην τιμή που απαιτείται από την αύξηση της ροπής.

1.3 Έλεγχος Στροφών DC Κινητήρα Ξένης Διέγερσης

Ο έλεγχος στροφών σε έναν κινητήρα συνεχούς ρεύματος ξένης διέγερσης επιτυγχάνεται με μεταβολή της τάσης ακροδεκτών του τυλίγματος τυμπάνου, με μεταβολή του ρεύματος διέγερσης και τέλος με παρεμβολή ωμικής αντίστασης στο τύλιγμα τυμπάνου.

Για τον βέλτιστο έλεγχο ενός κινητήρα συνεχούς ρεύματος με υψηλή λειτουργική απόδοση, ελέγχεται η ταχύτητά του έως και την ονομαστική τιμή μέσω της τάσης τυμπάνου και για τιμές πάνω από την ονομαστική του τιμή ελέγχεται μέσω του ρεύματος διέγερσης.



Σχήμα 1.3: Χαρακτηριστικές ροπής και ισχύος ενός κινητήρα συνεχούς ρεύματος (Μανιάς, 2020)

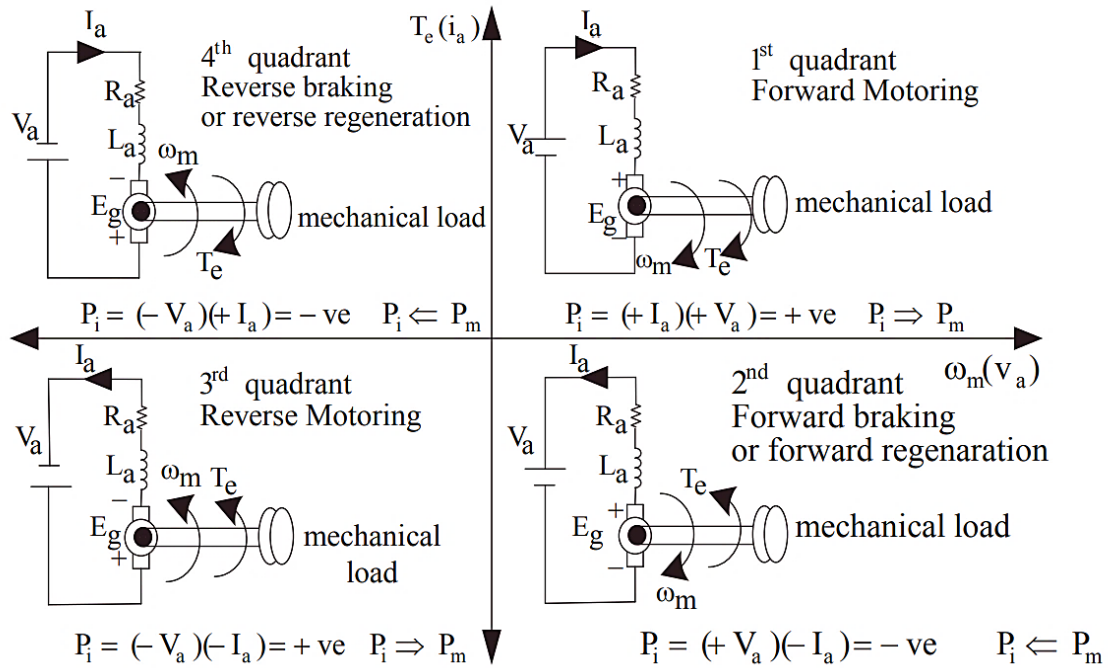
Όπως διακρίνεται στο σχήμα 1.3, ο έλεγχος στροφών με μεταβολή της τάσης στο τύλιγμα τυμπάνου αφορά την περιοχή μεταβολής των στροφών από μηδενική ταχύτητα έως και την ονομαστική ταχύτητα λειτουργίας. Στην περίπτωση αυτή η παραγόμενη ροπή είναι ανάλογη του ρεύματος τυμπάνου και ως εκ τούτου οποιαδήποτε μεταβολή στο φορτίο αντισταθμίζεται από αντίστοιχη μεταβολή του ρεύματος τυμπάνου.

Το είδος της λειτουργίας αυτής είναι γνωστό ως λειτουργία σταθερής ροπής, καθώς η παραγόμενη εσωτερική ροπή διατηρείται σταθερή στις αντίστοιχες ονομαστικές τιμές παρέχοντας τη δυνατότητα λειτουργίας με ονομαστική ροπή σε όλο το εύρος των ταχυτήτων.

Αντίστοιχα, στην περιοχή λειτουργίας άνω των ονομαστικών στροφών ο κινητήρας λειτουργεί με σταθερή ισχύ. Μ' αυτόν τον τρόπο ενεργοποιείται το τύλιγμα διέγερσης, ελαττώνοντας τη ροή διακένου κατά τέτοιο τρόπο, ώστε η ισχύς στον άξονα να παραμένει σταθερή και ίση με την ονομαστική. Με τη συγκεκριμένη μέθοδο ελέγχου αποφεύγονται προβλήματα υπερφόρτισης του κινητήρα.

Μια ηλεκτρική μηχανή συνεχούς ρεύματος μπορεί να λειτουργήσει σε ένα από τα ακόλουθα τέσσερα τεταρτημόρια της χαρακτηριστικής ροπής στροφών. Έτσι, παρέχεται η δυνατότητα λειτουργίας ως κινητήρας ή ως γεννήτρια, αποσκοπώντας στον πλήρη έλεγχο όλων των τύπων φορτίων.

Όπως διακρίνεται και στο παρακάτω σχήμα, στο 1^ο και στο 3^ο τεταρτημόριο η παραγόμενη ροπή και η ταχύτητα περιστροφής έχουν την ίδια φορά, με αποτέλεσμα η μηχανή να λειτουργεί ως κινητήρας. Στο 2^ο και στο 4^ο τεταρτημόριο, η παραγόμενη ροπή και η ταχύτητα περιστροφής έχουν αντίθετη φορά, με αποτέλεσμα η μηχανή να λειτουργεί ως γεννήτρια ή πέδη (Μανιάς, 2020).



Σχήμα 1.4: Λειτουργία μηχανής συνεχούς ρεύματος στα τέσσερα τεταρτημόρια (Μανιάς, 2020)

Αναλυτικότερα, στο 1^ο τεταρτημόριο η ροπή και η ταχύτητα περιστροφής είναι συμφασικά, οδηγώντας το μηχανικό φορτίο με θετική ισχύ στην έξοδο της μηχανής, η οποία λειτουργεί ως κινητήρας.

Στο 2^ο τεταρτημόριο η ροπή είναι αρνητική και η μηχανή στρέφεται με θετική ταχύτητα παράγοντας αρνητική ισχύ, όπου τροφοδοτείται με ροπή με αποτέλεσμα να λειτουργεί ως γεννήτρια. Έτσι, μεταφέρεται ηλεκτρική ενέργεια στην πηγή εισόδου ηλεκτρικής ενέργειας μέσω του τυλίγματος τυμπάνου. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται αναγεννητική πέδηση και εφαρμόζεται κατά τη φάση της πέδης, καθώς η γεννήτρια μέσω των διατάξεων ηλεκτρονικών ισχύος αντιλαμβάνεται ως φορτίο την πηγή τροφοδοσίας.

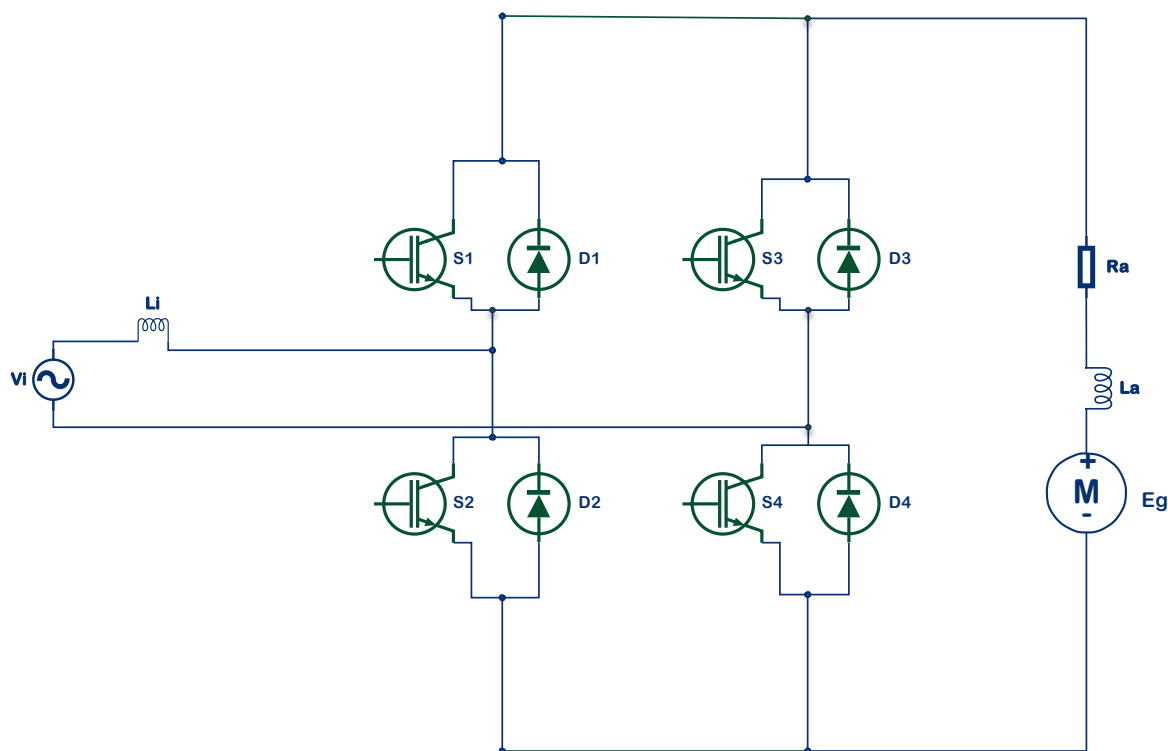
Στο 3^ο τεταρτημόριο λειτουργίας η μηχανή παράγει αρνητική ροπή ενώ περιστρέφεται με αρνητική ταχύτητα. Μ' αυτόν τον τρόπο παράγεται θετική ισχύς συμβάλλοντας στη λειτουργία της μηχανής ως κινητήρας, οδηγώντας το μηχανικό φορτίο με αρνητική ταχύτητα.

Τέλος, στο λειτουργικό τμήμα του 4^{ου} τεταρτημόριου η μηχανή παράγει θετική ροπή, ενώ περιστρέφεται με αρνητική ταχύτητα. Μ' αυτόν τον τρόπο παράγεται αρνητική

ισχύς συμβάλλοντας στη λειτουργία της μηχανής ως γεννήτρια, καθώς τροφοδοτείται με ροπή ο άξονας κίνησης. Έτσι, επιτυγχάνεται αναγεννητική πέδηση μεταφέροντας ηλεκτρική ενέργεια μέσω του τυλίγματος τυμπάνου στην πηγή τροφοδοσίας.

1.4 Αναγεννητικές PWM Ανορθωτικές Διατάξεις

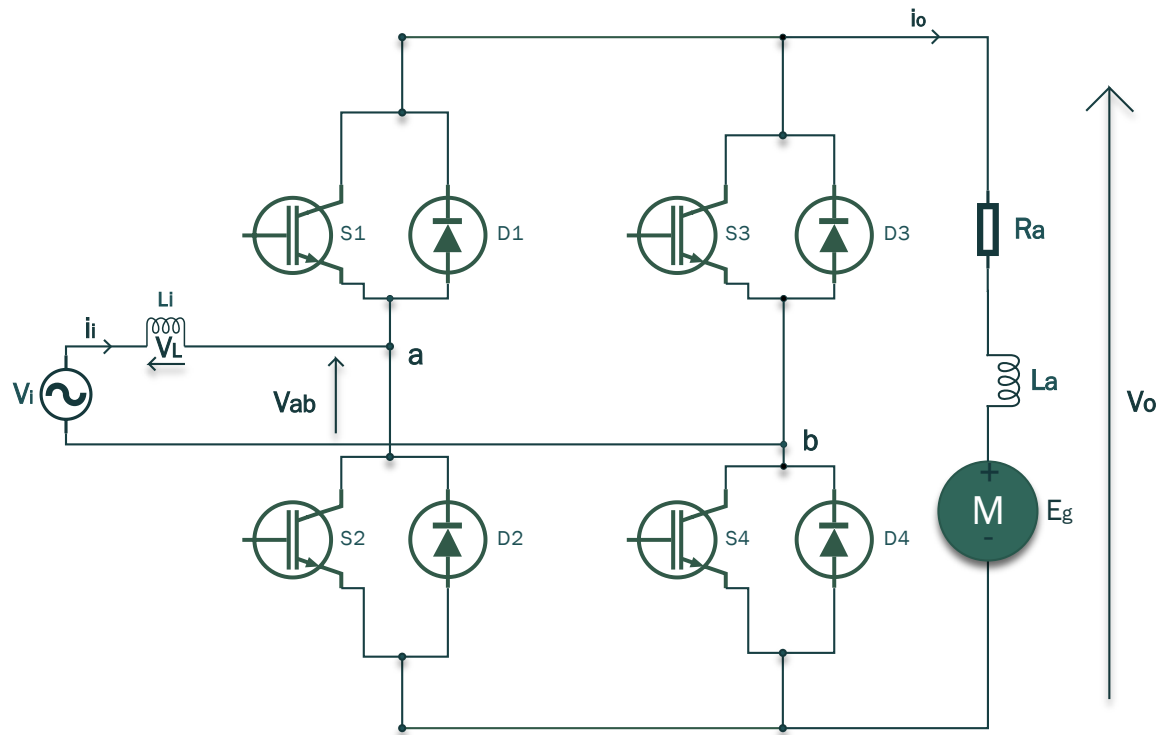
Λαμβάνοντας υπόψιν τις περιοχές λειτουργίας μιας μηχανής συνεχούς ρεύματος, σύμφωνα με τις παραπάνω φάσεις, διαπιστώνεται πως η ομαλή μετάβαση από τη μία περιοχή λειτουργίας στην άλλη αποτελεί σημαντικό παράγοντα για τη βέλτιστη απόκριση του συστήματος. Στην περίπτωση αυτή για εφαρμογές που υλοποιούνται στα συστήματα ηλεκτρικής κίνησης με αναγεννητική πέδηση, είναι απαραίτητη μια ανορθωτική διάταξη μέσω της οποίας επιτυγχάνεται η μεταφορά ενέργειας από την πηγή τροφοδοσίας προς τη μηχανή και από τη μηχανή προς την πηγή τροφοδοσίας.



Σχήμα 1.5: Κύκλωμα ισχύος μονοφασικής PWM ανόρθωσης

Οι διακοπτικές ανορθωτικές αυτές διατάξεις υλοποιούνται μέσω ειδικών ημιαγωγικών διακοπών σύμφωνα με την εφαρμογή και αναλόγως της ζήτησης ισχύος του φορτίου. Συνήθως χρησιμοποιούνται MOSFETs, IGBTs, MCTs ή GTOs. Αναλυτικότερα, παρουσιάζονται δύο τυπικά κυκλώματα ισχύος, τα οποία τροφοδοτούνται από μια πηγή εναλλασσόμενης τάσης συνοδευόμενα από μια μηχανή συνεχούς ρεύματος ξένης διέγερσης. Στα συγκεκριμένα συστήματα ηλεκτρικής κίνησης, η μηχανή λειτουργεί είτε ως κινητήρας είτε ως γεννήτρια με αποτέλεσμα η διάταξη ισχύος να εναλλάσσει τη λειτουργία της μεταξύ διακοπτικής ανόρθωσης και αντιστροφέα, αντίστοιχα (Μανιάς, 2020).

Αρχικά, αναλύεται το κύκλωμα ισχύος της μονοφασικής διακοπτικής ανόρθωσης που εμφανίζεται παρακάτω, σύμφωνα με το οποίο επιτυγχάνεται η αμφίπλευρη ροή ισχύος. Η διάταξη ισχύος οδηγεί μία μηχανή συνεχούς ρεύματος στην αναγεννητική πέδηση, η οποία λειτουργεί ως κινητήρας με φορά ρεύματος από την πηγή τάσης προς τη μηχανή, ενώ λειτουργεί ως γεννήτρια με αντίθετη φορά ρεύματος. Σημειώνεται επίσης, ότι στην πρώτη περίπτωση λειτουργίας κινητήρα ενεργοποιείται η ανορθωτική διάταξη ισχύος, ενώ στη δεύτερη περίπτωση γεννήτριας ενεργοποιείται η διάταξη του αντιστροφέα.



Σχήμα 1.6: Κύκλωμα ισχύος μονοφασικής PWM ανόρθωσης

Συγκεκριμένα, η ανόρθωση της τάσης επιτυγχάνεται με την αγωγή των διόδων D1 και D4, με τη ροή ισχύος να μεταφέρεται από την πηγή προς το φορτίο, δηλαδή τη μηχανή. Ο μετατροπέας, λοιπόν, λειτουργεί ως ανόρθωση με την τάση V_{ab} να ισούται με την τάση εξόδου V_o με ρεύμα εξόδου $i_o > 0$. Στην περίπτωση αγωγής των διόδων D2 και D3 επιτυγχάνεται ροή ισχύος, επίσης, από την πηγή προς το φορτίο με τη διαφορά ότι το ρεύμα εισόδου είναι αρνητικό $i_o < 0$, ενώ ισχύει η σχέση $V_{ab} = -V_o$.

Στην περίπτωση της αναγεννητικής – αμφίπλευρης ροής ισχύος, επιτυγχάνεται η λειτουργία της διάταξης του αντιστροφέα, μεταφέροντας ηλεκτρική ενέργεια από τη μηχανή προς την πηγή τροφοδοσίας. Η διαδοχική αγωγή των ημιαγωγών S1 - S4 και S2 - S3, αντίστοιχα, δημιουργούν μια εναλλασσόμενη ανακλώμενη τάση V_{ab} με την προϋπόθεση σταθερής τάσης εξόδου της μηχανής που λειτουργεί ως γεννήτρια.

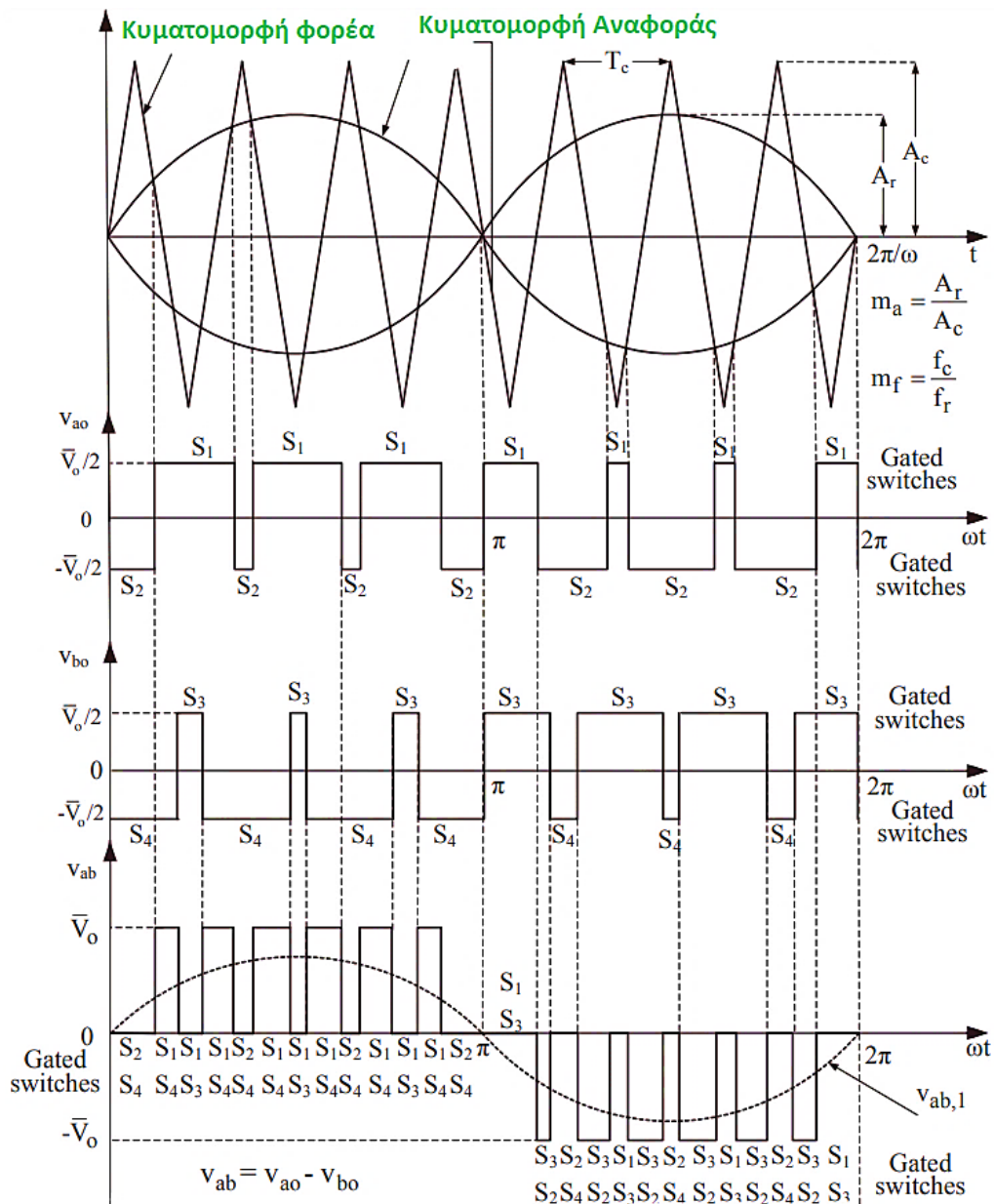
Για το ισοδύναμο κύκλωμα ισχύει :

$$V_i = V_{ab} + V_L \quad (1.15)$$

όπου

$$V_L = Li \frac{di_i}{dt} \quad (1.16)$$

Παρακάτω παρουσιάζονται οι παλμοί έναυσης και η ανακλώμενη τάση ανόρθωσης της τεχνικής SPWM του αντιστροφέα. Με αυτόν τον τρόπο οι παλμοί οδήγησης των ημιαγωγών συμβάλουν στην εφαρμογή της αναγεννητικής πέδησης μεταφέροντας ηλεκτρική ενέργεια από τη μηχανή προς το δίκτυο τροφοδοσίας.



Σχήμα 1.7: Παλμοί οδήγησης ημιαγωγικών διακοπών ανορθωτικής διάταξης με την χρήση της τεχνικής SPWM (Μανιάς, 2020)

Θεωρώντας την τάση εισόδου ημιτονοειδούς μορφής ισχύει :

$$\vec{V}_i = \vec{V}_{ab,1} + \vec{V}_{L,1} \quad (1.17)$$

και

$$\vec{V}_{L,1} = j\omega L i \vec{I}_{L,1} \quad (1.18)$$

όπου

\vec{V}_i = τάση τροφοδοσίας διανυσματική μορφή

$\vec{V}_{ab,1}$ = βασική ή θεμελιώδης αρμονική συνιστώσα τάσης εισόδου του μετατροπέα διανυσματικής μορφής

$\vec{V}_{L,1}$ = βασική ή θεμελιώδης αρμονική συνιστώσα της τάσης πηνίου διανυσματικής μορφής

$\vec{I}_{L,1}$ = βασική ή θεμελιώδης αρμονική συνιστώσα του ρεύματος τροφοδοσίας διανυσματικής μορφής

Επίσης, υποθέτοντας ότι η ανακλώμενη τάση του μετατροπέα V_{ab} παρουσιάζει ημιτονοειδή μορφή εξάγεται η ανά φάση φαινόμενη ισχύς από την παρακάτω σχέση:

$$\vec{S}_i = \vec{V}_i \vec{I}_{i,1}^* = -\frac{\tilde{V}_i \tilde{V}_{ab,1} \sin \delta}{X_{L,1}} + j \frac{\tilde{V}_i \tilde{V}_{ab,1} \cos \delta - \tilde{V}_i^2}{X_{L,1}} = P_i + jQ_i \quad (1.19)$$

Μ' αυτόν τον τρόπο, προκύπτουν οι ακόλουθες σχέσεις πραγματικής και άεργου ισχύος αντίστοιχα.

Ανά φάση ενεργός ή πραγματική ισχύς εισόδου:

$$P_i = -\frac{\tilde{V}_i \tilde{V}_{ab,1} \sin \delta}{X_{L,1}} \quad (1.20)$$

Ανά φάση άεργος ισχύς εισόδου:

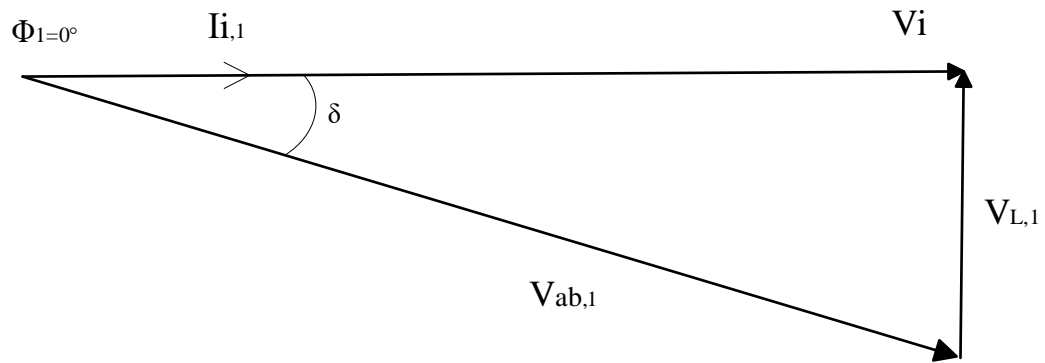
$$Q_i = \frac{\tilde{V}_i \tilde{V}_{ab,1} \cos \delta - \tilde{V}_i^2}{X_{L,1}} \quad (1.21)$$

όπου

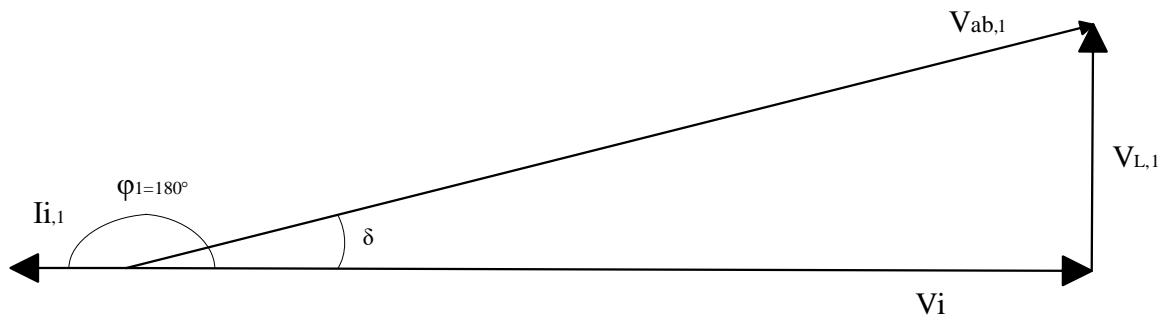
\tilde{V}_i = rms τιμή της τάσης δικτύου

δ = διαφορά φάσης μεταξύ της τάσης δικτύου και της βασικής αρμονικής συνιστώσας της τάσης εισόδου του μετατροπέα $V_{ab,1}$

Οι σχέσεις ισχύος που δόθηκαν για διάφορες τιμές τάσης δικτύου και με δεδομένες τιμές αυτεπαγωγής πηνίου αναδεικνύουν τη δυνατότητα του μετατροπέα να ελέγχεται από το μέγεθος της ανακλώμενης τάσης \tilde{V}_{ab} και τη γωνία δ αντίστοιχα. Επιπλέον, σχεδιάζονται τα φασικά διαγράμματα του μετατροπέα αναγεννητικής ροής ισχύος για τις δύο λειτουργικές φάσεις. Συγκεκριμένα, στο πρώτο φασικό διάγραμμα ο μετατροπέας λειτουργεί ως ανορθωτική διάταξη, ενώ στο δεύτερο λειτουργεί ως αντιστροφέας.



Σχήμα 1.8: Λειτουργία του μετατροπέα ως ανόρθωση με μοναδιαίο συντελεστή ισχύος



Σχήμα 1.9 : Λειτουργία του μετατροπέα ως αντιστροφέα με μοναδιαίο συντελεστή ισχύος

Από τα συγκεκριμένα φασικά διαγράμματα προκύπτουν οι εξής σχέσεις:

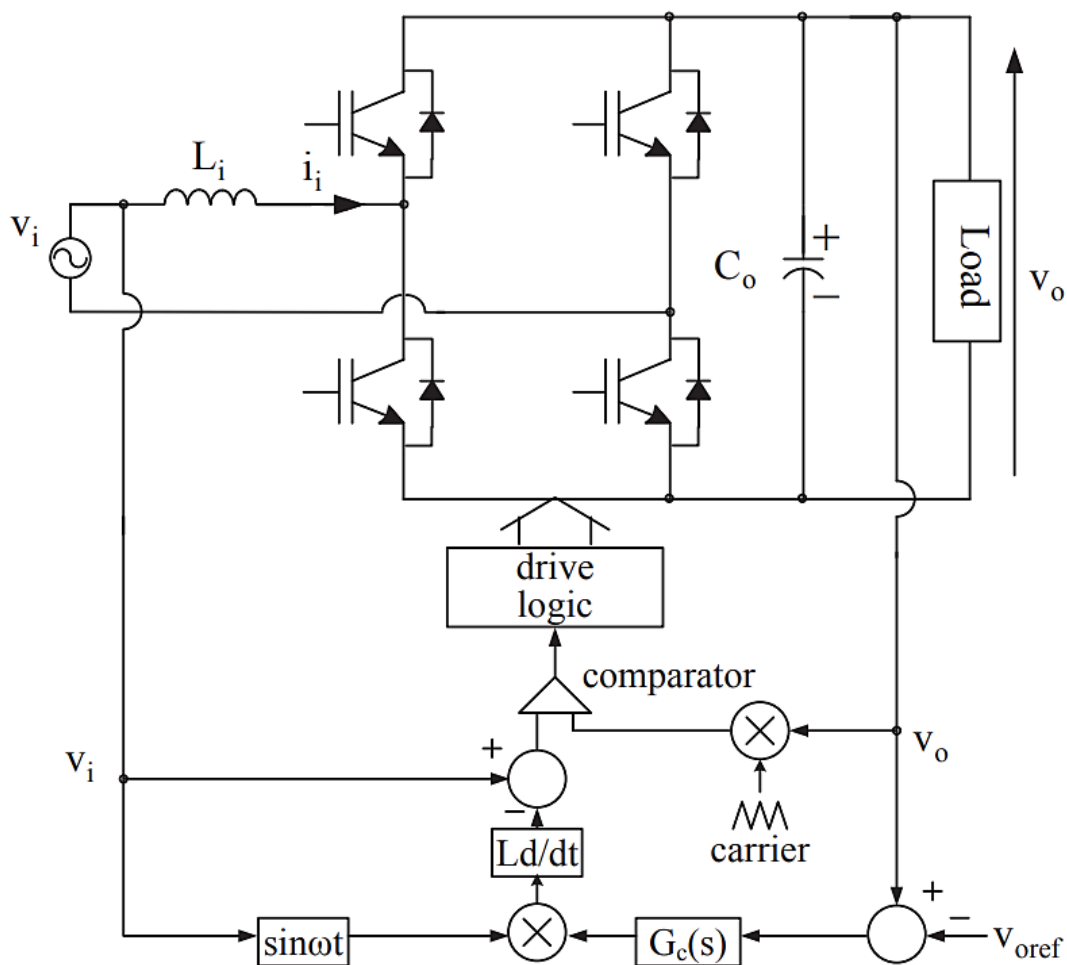
$$\tilde{V}_{ab,1} = \sqrt{\tilde{V}_i^2 + (\omega L_i \tilde{I}_{i,1})^2} = \sqrt{\tilde{V}_i^2 + \tilde{V}_{L,1}^2} \quad (1.22)$$

Εξάγεται, επιπλέον, η σχέση της γωνίας δ μέσω της οποίας πραγματοποιείται ο έλεγχος της άεργου και ενεργού ισχύος. Για να δημιουργηθεί ημιτονοειδές ρεύμα εισόδου πρέπει η τάση εισόδου του αντιστροφέα να μην περιέχει ανώτερες αρμονικές συνιστώσες. Αυτό εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη σταθερότητα της τάσης εξόδου.

$$\delta = \tan^{-1} \left(\frac{\tilde{V}_{L,1}}{\tilde{V}_i} \right) \quad (1.23)$$

Ο μετατροπέας παράγει μέσω του προγραμματισμού των παλμών των ημιαγωγικών διακοπών την εναλλασσόμενη τάση V_{ab} , η οποία περιέχει ανώτερες αρμονικές συνιστώσες. Αναλυτικότερα, επειδή οι παρασιτικές αρμονικές επηρεάζουν παρασιτικά και το ρεύμα εισόδου, χρησιμοποιείται μικρής τιμής αυτεπαγωγή L_i , επιτυγχάνοντας ημιτονοειδές ρεύμα εισόδου τροφοδοσίας.

Ο προγραμματισμός των παλμών οδήγησης του μετατροπέα επιτυγχάνεται μέσω της τεχνικής της ημιτονοειδούς διαμόρφωσης εύρους παλμών, ελέγχοντας τη βασική αρμονική συνιστώσα της τάσης V_{ab} μέσω του συντελεστή διαμόρφωσης εύρους παλμών m_f . Ακόμη, η γωνία δ μπορεί να ελέγχεται μέσω της κυματομορφής V_{ab} για λίγες αρμονικές.



Σχήμα 1.10: Κύκλωμα ελέγχου ανορθωτικής διάταξης αμφίπλευρης μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας (Μανιάς, 2020)

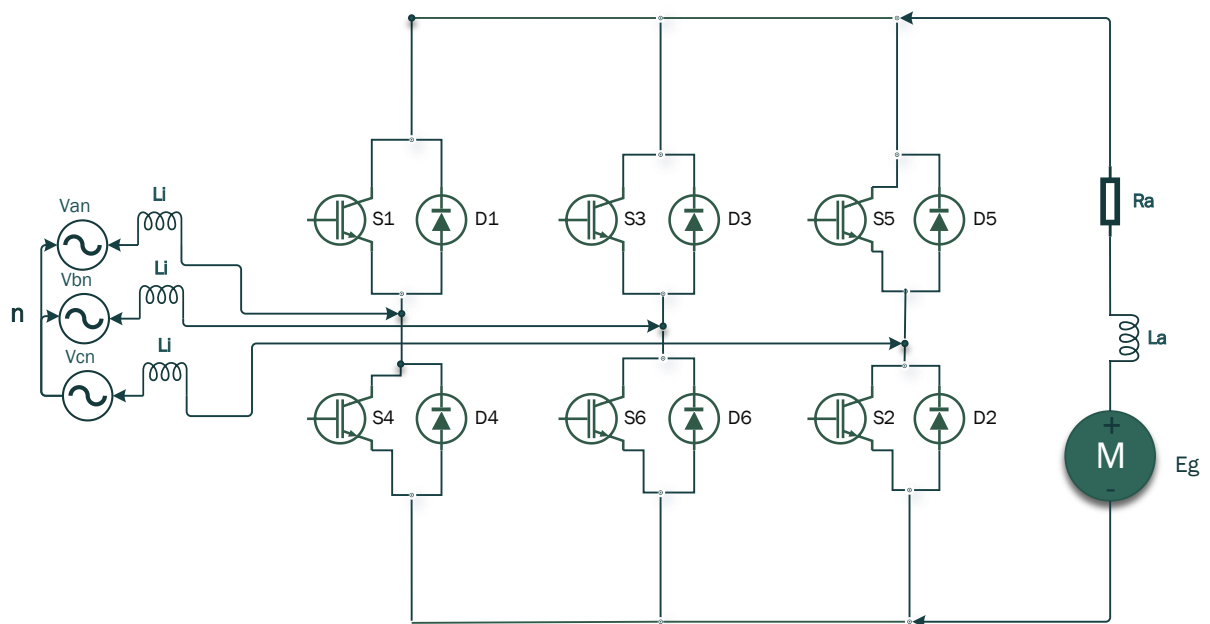
Τέλος, στην περίπτωση που η γωνία δ λαμβάνει αρνητικές τιμές, ενώ η $V_{ab,1}$ έπεται της τάσης τροφοδοσίας με το μετατροπέα να λειτουργεί ως ανορθωτική διάταξη, μεταφέροντας ηλεκτρική ενέργεια από το δίκτυο προς το φορτίο. Αντίθετα, η γωνία δ λαμβάνει θετικές τιμές και η $V_{ab,1}$ προηγείται σε σχέση με την τάση τροφοδοσίας με

το μετατροπέα να λειτουργεί ως αντιστροφέας μεταφέροντας ηλεκτρική ενέργεια από το φορτίο προς το δίκτυο.

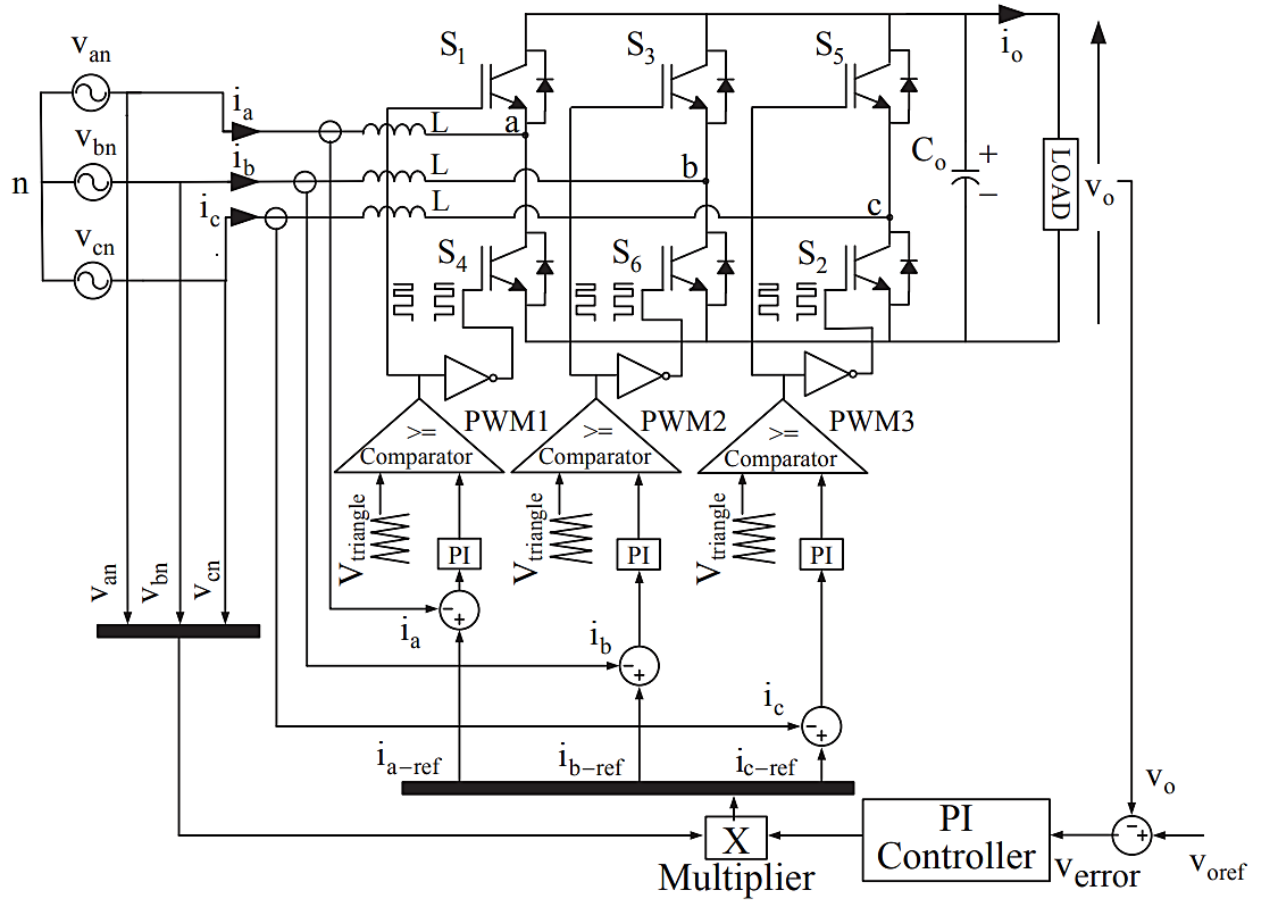
Η θεμελιώδης αρμονική συνιστώσα του ρεύματος δικτύου περιγράφεται από την κάτωθι εξίσωση:

$$\tilde{I}_{l,1} = \frac{\tilde{V}_l - \tilde{V}_{ab,1}}{\omega L_l} \quad (1.24)$$

Εν συνεχεία, στο ακόλουθο σχήμα παρουσιάζεται η τριφασική παραλλαγή της αναγεννητικής PWM ανόρθωσης, η οποία εξυπηρετεί εφαρμογές μεγαλύτερης ισχύος τροφοδοτώντας τριφασικά συστήματα.

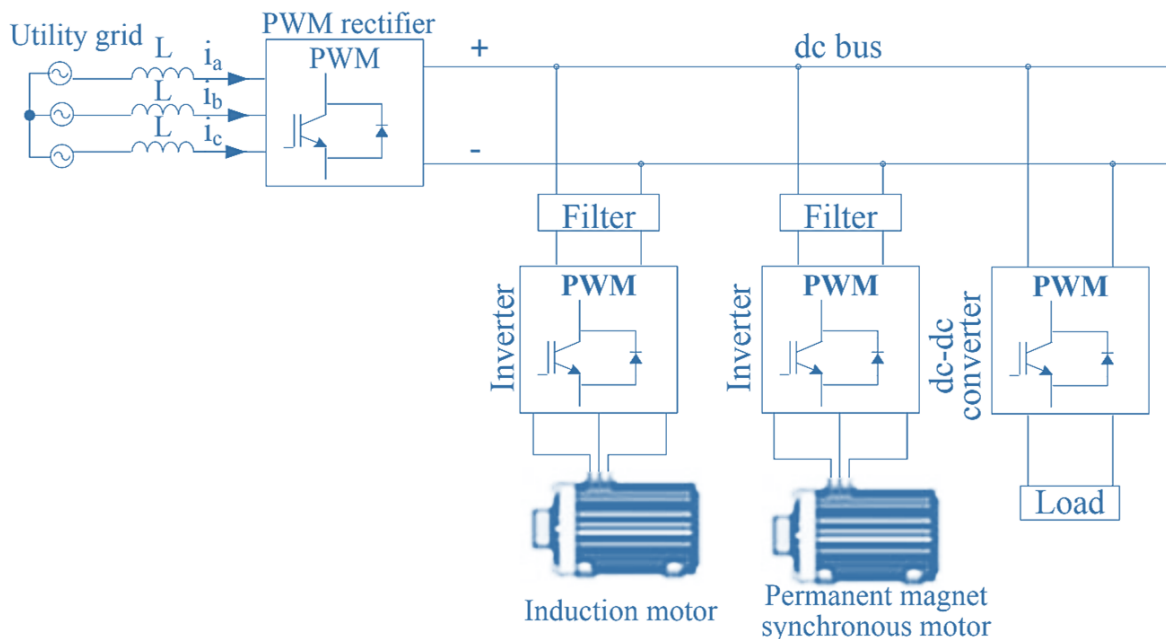


Σχήμα 1.11: Κύκλωμα ισχύος τριφασικής PWM ανόρθωσης



Σχήμα 1.12: Κύκλωμα ελέγχου τριφασικής PWM ανόρθωσης (Μανιάς, 2020)

Συνοψίζοντας, διακρίνεται το παρακάτω κύκλωμα ηλεκτρονικών ισχύος, το οποίο αποτελείται από έναν τριφασικό PWM ανορθωτή επιτρέποντας την αναγεννητική πέδηση. Ουσιαστικά, μετά τη διάταξη του ανορθωτή έχει σχεδιαστεί ένας ζυγός συνεχούς τάσης, ο οποίος στη συνέχεια τροφοδοτεί δύο αντιστροφείς αμφίπλευρης ροής και έναν dc-dc μετατροπέα. Το συγκεκριμένο κύκλωμα αποτελεί μια διάταξη βιομηχανικών ηλεκτρονικών ισχύος τροφοδοτώντας οποιοδήποτε είδος φορτίου. Συγκεκριμένα, για τα συστήματα ηλεκτρικής κίνησης χρησιμοποιούνται τριφασικοί ac κινητήρες μεγάλης ισχύος ή dc κινητήρες.



Σχήμα 1.13 : Δημιουργία ζυγού συνεχούς ρεύματος σε βιομηχανικό περιβάλλον (Μανιάς, 2020)

1.5 Μετατροπείς DC-DC

Λαμβάνοντας υπόψιν τις περιοχές λειτουργίας μιας μηχανής συνεχούς ρεύματος και για ορισμένες εφαρμογές ηλεκτρικής κίνησης χρησιμοποιούνται μετατροπείς DC-DC, σύμφωνα με τους οποίους μια πηγή συνεχούς τάσης μετατρέπεται σε πηγή συνεχούς τάσης άλλης τιμής.

Μ' αυτόν τον τρόπο ένας μετατροπέας DC-DC συνδέεται μεταξύ της πηγής τροφοδοσίας συνεχούς τάσης και μιας μηχανής συνεχούς ρεύματος, μεταβάλλοντας την τάση τυμπάνου. Επιπλέον, οι συγκεκριμένοι μετατροπείς συμβάλουν και στην εφαρμογή της αναγεννητικής πέδησης με την αναδιάταξη του διακοπτικού στοιχείου, όπως αναλύεται παρακάτω.

Η συμβολή της αναγεννητικής πέδησης σε ένα σύστημα ηλεκτρικής κίνησης είναι αρκετά σημαντική, καθώς επιστρέφεται ηλεκτρική ενέργεια στην πηγή της τροφοδοσίας με τρόπο τέτοιο ώστε να επιτυγχάνεται εξοικονόμηση ενέργειας.

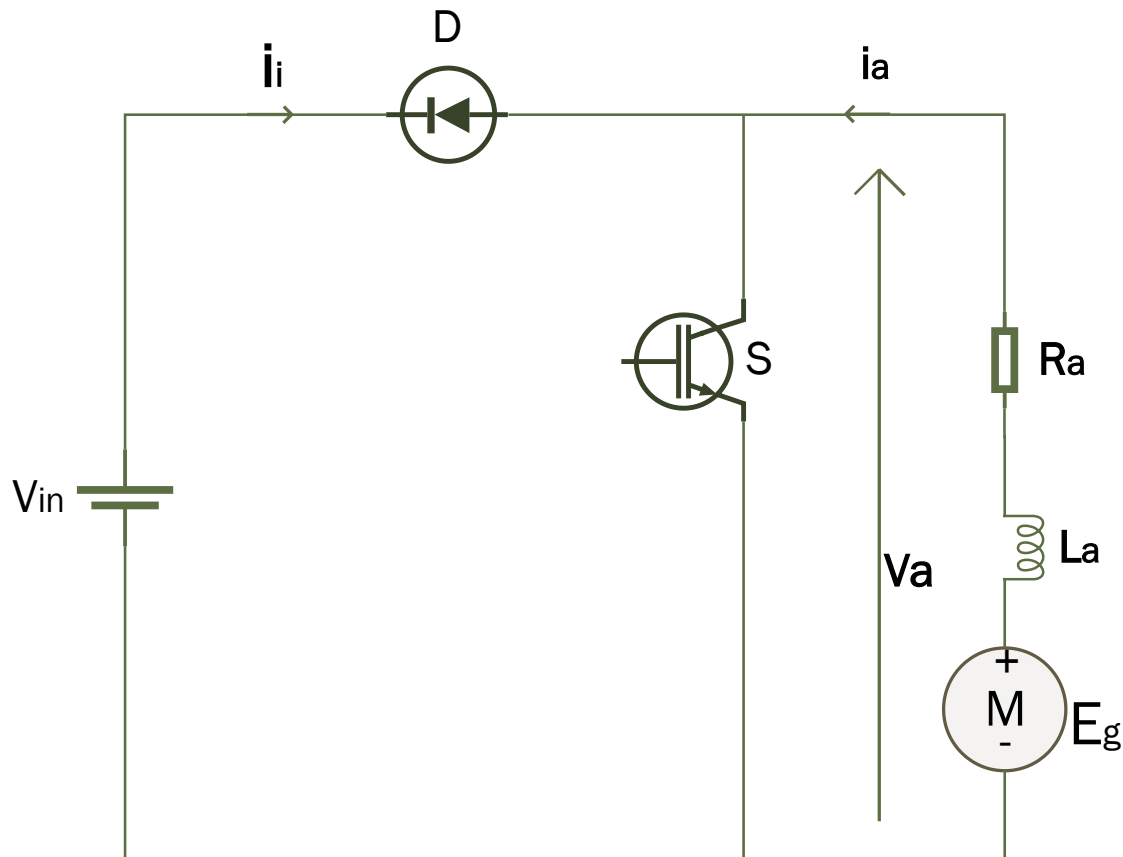
Χαρακτηριστικό παράδειγμα των διατάξεων αυτών αποτελεί η επαναφόρτιση των συσσωρευτών-μπαταριών σε ηλεκτρικά οχήματα. Συγκεκριμένα, στην περιοχή-τεταρτημόριο όπου η ηλεκτρική μηχανή λειτουργεί ως γεννήτρια και εφόσον παράγεται ροπή στον άξονα κίνησης, επιστρέφεται ηλεκτρική ενέργεια στις μπαταρίες.

1.5.1 Μετατροπέας DC-DC κλάσης 'B'

Μία εφαρμογή ελέγχου αναγεννητικής πέδησης, σε κινητήρια συστήματα συνεχούς ρεύματος, αποτελεί ο μετατροπέας dc-dc δεύτερου τεταρτημορίου ή μετατροπέας κλάσης 'B'. Λαμβάνοντας τη διάταξη του παρακάτω μετατροπέα [σχήμα 1.14] για συνεχή τάση τροφοδοσίας, επιτυγχάνεται ανύψωση της τάσης στο τύλιγμα τυμπάνου

ενός κινητήρα ξένης διέγερσης, καθώς άγει το διακοπτικό στοιχείο S αποθηκεύοντας ηλεκτρική ενέργεια στην αυτεπαγωγή L_a . Με αυτόν τον τρόπο αυξάνεται το ρεύμα τυμπάνου λόγω της επιθυμητής βραχυκύκλωσης των ακροδεκτών του κινητήρα.

Στη θέση S της διάταξης του μετατροπέα χρησιμοποιούνται ημιαγωγικά διακοπτικά στοιχεία όπως IGBTs, GTOs, MOSFETs ή MCTs ανάλογα με τη ζήτηση ισχύος.



Σχήμα 1.14: Μετατροπέας δεύτερου τεταρτημορίου

Στο αμέσως επόμενο χρονικό διάστημα αντιστρέφεται το ρεύμα τυμπάνου, καθώς άγει η διόδος D και η αποθηκευμένη ενέργεια στην αυτεπαγωγή του τυλίγματος τυμπάνου μεταφέρεται στην πηγή τροφοδοσίας με αποτέλεσμα τη λειτουργία αναγεννητικής πέδησης (Rashid, 2010).

Ο μετατροπέας, λοιπόν, μεταβαίνει σε μη αγωγίμη κατάσταση, αυξάνοντας την τάση τυμπάνου με αποτέλεσμα την ορθή πόλωση της διόδου και τη μεταφορά ενέργειας από τη μηχανή προς την είσοδο.

Θεωρώντας το ρεύμα τυμπάνου συνεχούς αγωγής προκύπτει η μέση τάση στα άκρα του μετατροπέα dc-dc ως:

$$V_a = (1-D) V_{in} \quad (1.25)$$

όπου

D = βαθμός χρησιμοποίησης του διακόπτη,

V_{in} = η τάση εισόδου,

V_a = η τάση τυμπάνου.

Η αναπαραγόμενη ισχύς βρίσκεται από τη σχέση:

$$P_g = V_{in} I_a (1-D) \quad (1.26)$$

Η επαγόμενη αντιηλεκτρεγερτική δύναμη στο τύλιγμα τυμπάνου στη λειτουργία γεννήτριας:

$$E_g = V_a + R_a I_a = (1-D) V_{in} + R_a I_a \quad (1.27)$$

Για την επαγόμενη αντιηλεκτρεγερτική δύναμη ισχύει επίσης :

$$E_g = K I_f \omega \quad (1.28)$$

όπου

K η σταθερά της μηχανής,

ω η γωνιακή ταχύτητα μηχανής,

I_f το ρεύμα διέγερσης.

Για την ισοδύναμη αντίσταση φορτίου της γεννήτριας ισχύει :

$$R_{eq} = \frac{E_g}{I_a} = \frac{V_{in}}{I_a} (1 - D) + R_a \quad (1.29)$$

Μ' αυτόν τον τρόπο η μεταβολή του βαθμού χρησιμοποίησης επιφέρει τη μεταβολή της ισοδύναμης αντίστασης R_{eq} από R_a έως $(V_{in}/I_a + R_a)$, καθώς για $D=1$ η ισοδύναμη αντίσταση φορτίου γίνεται R_a , ενώ για $D=0$ προκύπτει η σχέση $(V_{in}/I_a + R_a)$.

Ακόμη, με τη μεταβολή του βαθμού χρησιμοποίησης D επιτυγχάνεται ο έλεγχος της αναπαραγόμενης ισχύος P_g . Για ελεγχόμενη μεταφορά ισχύος πρέπει να ικανοποιείται η ακόλουθη συνθήκη:

$$0 < V_a < V_{in}$$

Αποδεικνύεται, λοιπόν, πως η τάση V_a πρέπει να είναι μικρότερη από την τάση V_{in} για επιτρεπτά δυναμικά και επιτρεπτή πολικότητα των δύο τάσεων. Αντικαθιστώντας το V_a ισχύει:

$$0 < (E_g - R_a I_a) < V_{in} \quad (1.30)$$

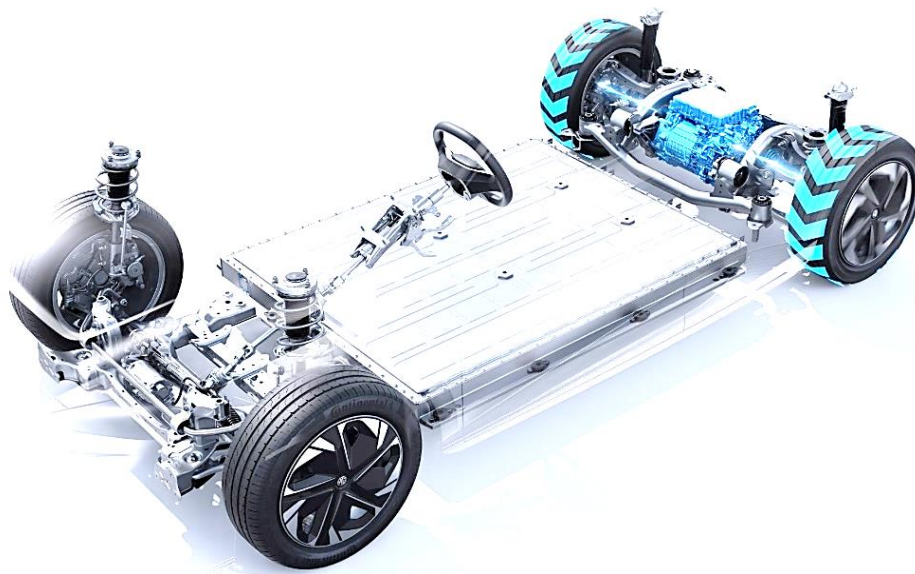
Προκύπτει έτσι η ελάχιστη ταχύτητα πέδησης του κινητήρα ως:

$$E_g = K I_f \omega_{min} = R_a I_a \quad (1.31)$$

όπου

$$\omega_{min} = \frac{R_a I_a}{K I_f} \quad (1.32)$$

Με αυτά τα δεδομένα, δίνεται το παράδειγμα ενός ηλεκτρικού οχήματος, το οποίο εξοπλίζεται με έναν κινητήρα ξένης διέγερσης συνεχούς ρεύματος.



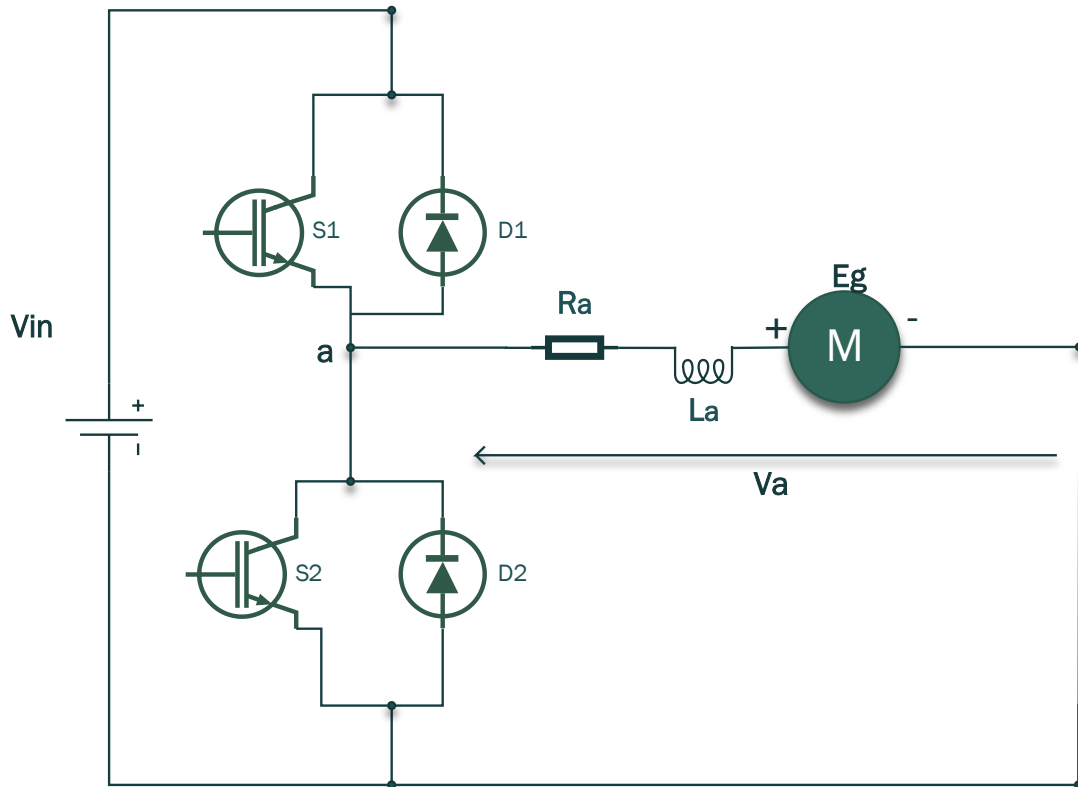
Εικόνα 1-1 : Αναγεννητική πέδηση σε ηλεκτρικό αυτοκίνητο (mg.com, 2016)

Στη λειτουργική φάση της αναγεννητικής πέδησης, υποθέτοντας ότι το ηλεκτρικό όχημα κατεβαίνει μια κατηφόρα, επιστρέφεται κινητική ενέργεια μέσω του συστήματος μετάδοσης στον κινητήρα.

Συνεπώς, το μηχανικό αυτό φορτίο τροφοδοτεί με ροπή τον άξονα του τυμπάνου με αποτέλεσμα ο κινητήρας να δρα σαν γεννήτρια επιστρέφοντας ενέργεια στις μπαταρίες. Όπως, έχει ήδη αναλυθεί προηγουμένως, η περιοχή λειτουργίας του συγκεκριμένου κινητήριου συστήματος είναι το δεύτερο τεταρτημόριο.

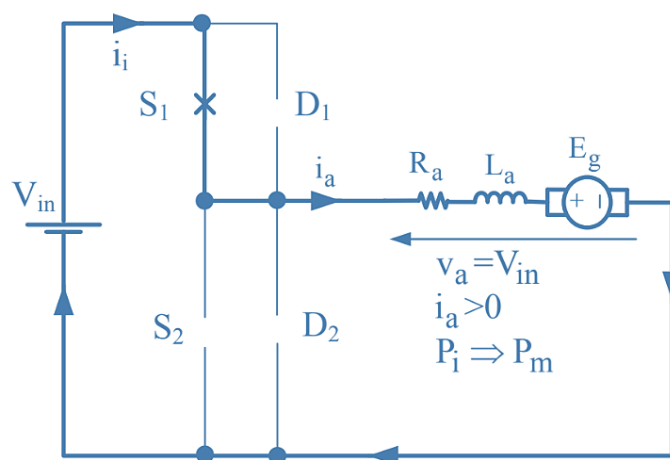
1.5.2 Μετατροπέας DC-DC κλάσης ‘C’

Παρακάτω εμφανίζεται η διάταξη του συστήματος μετατροπέα DC-DC κλάσης ‘C’, ο οποίος λειτουργεί στο πρώτο και στο δεύτερο τεταρτημόριο.



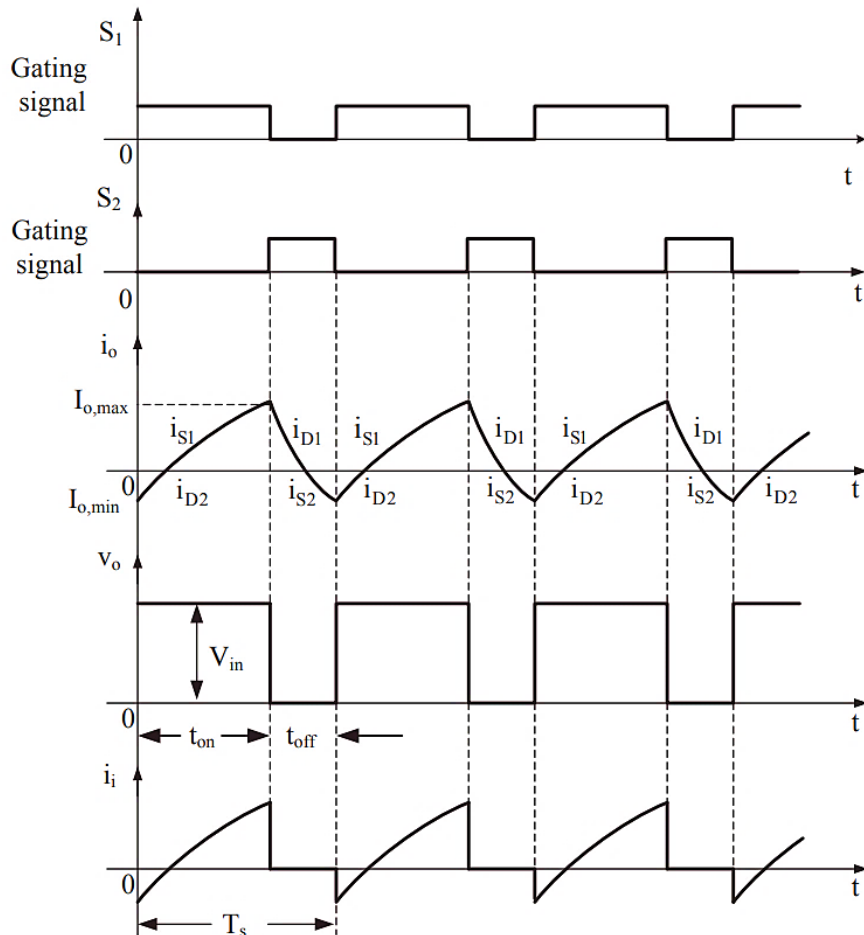
Σχήμα 1.15: Ψαλιδιστής δύο τεταρτημορίων

Συγκεκριμένα, μέσω του μετατροπέα επιτυγχάνονται ο έλεγχος ισχύος και ο έλεγχος αναγεννητικής πέδησης. Στο 1^ο τεταρτημόριο η τάση και το ρεύμα τυμπάνου έχουν θετική τιμή, ενώ στην αναγεννητική πέδηση, στο 2^ο τεταρτημόριο, η τάση του τυλίγματος τυμπάνου έχει θετική τιμή και το ρεύμα τυμπάνου αρνητική.



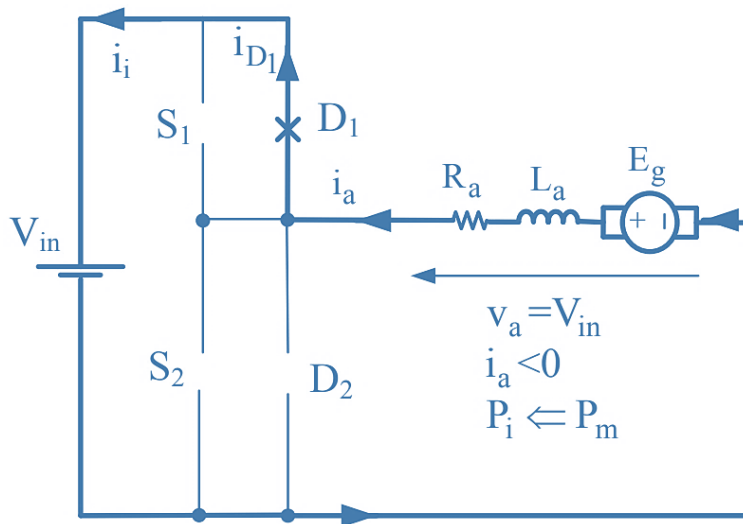
Σχήμα 1.16: Λειτουργία κινητήρα (Μανιάς, 2020)

Αναλυτικότερα, στα διαστήματα αγωγής του ημιαγωγού S_1 και της διόδου D_2 το κινητήριο σύστημα λειτουργεί στο 1^ο τεταρτημόριο. Όταν ενεργοποιηθεί ο διακόπτης S_1 , η τάση V_{in} τροφοδοτεί τον κινητήρα όπως διακρίνεται η ροή ισχύος στο σχήμα 1.16. Στην περίπτωση μη αγωγής του S_1 το ρεύμα τυμπάνου φθίνει, καθώς άγει η διάδος D_2 με λειτουργία του κινητήρα σε φάση ελεύθερης ροής.

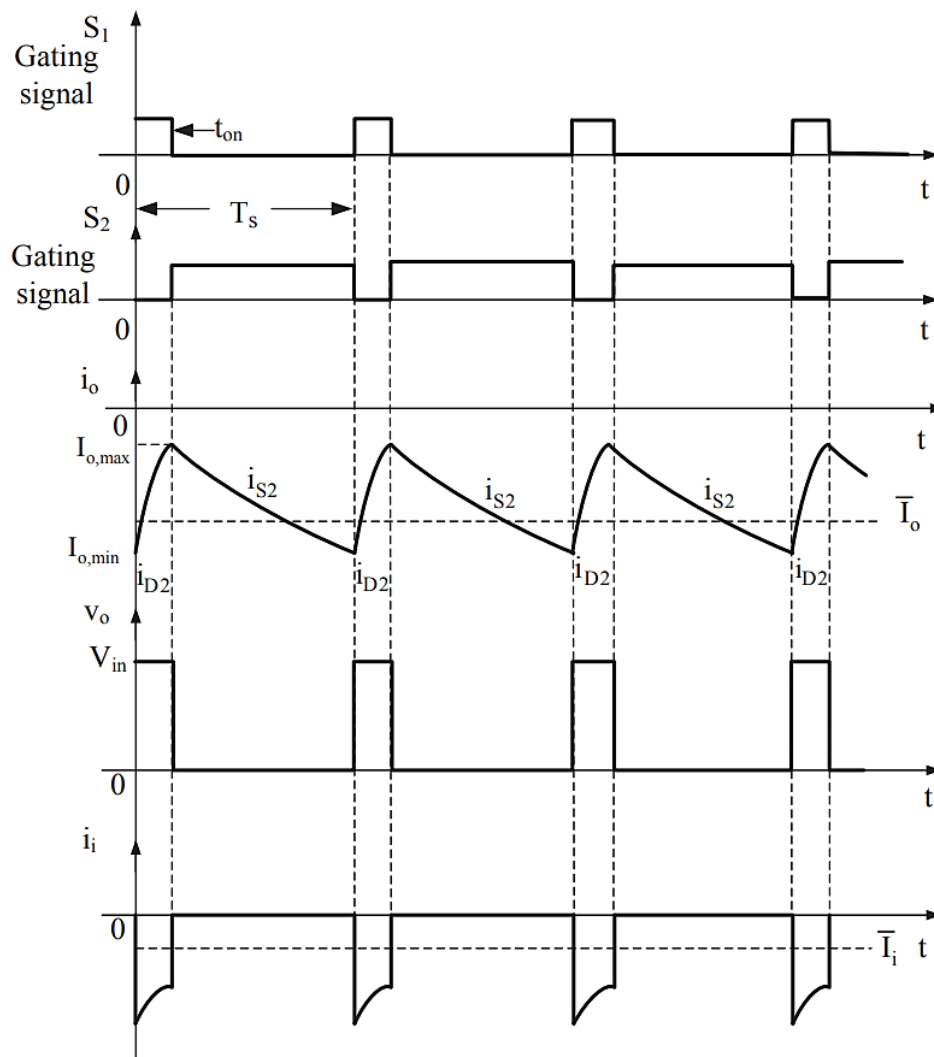


Σχήμα 1.17: Κυματομορφές διάταξης για λειτουργία στο πρώτο τεταρτημόριο με συνεχές ρεύμα εξόδου (Μανιάς, 2020)

Στην περίπτωση του αναγεννητικού ελέγχου, ενεργοποιούνται το διακοπτικό στοιχείο S_2 και η διάδος D_1 , αποσκοπώντας στη λειτουργία του 2^{ου} τεταρτημόριου. Τη χρονική στιγμή παλμοδότησης του διακόπτη S_2 επιτυγχάνεται δυναμική πέδηση, καθώς αυξάνεται το ρεύμα τυμπάνου με τη λειτουργία γεννήτριας (Μανιάς, 2020).



Σχήμα 1.18: Αναγεννητική πέδηση (Μανιάς, 2020)



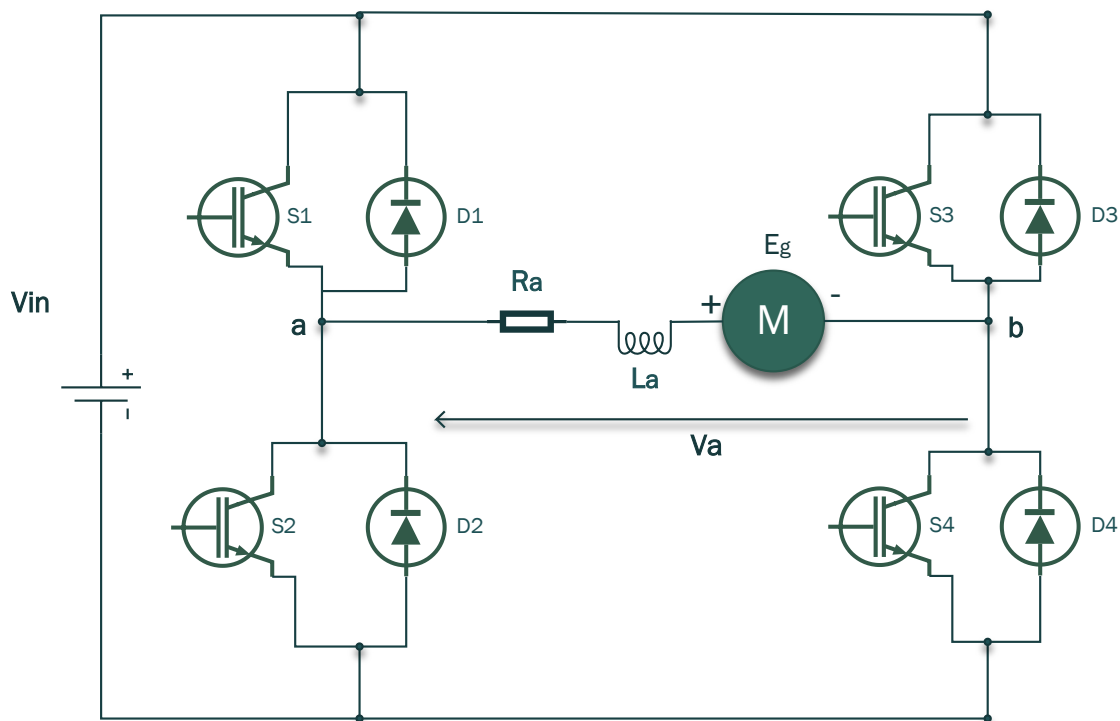
Σχήμα 1.19: Κυματομορφές διάταξης για λειτουργία στο 2^ο τεταρτημόριο με συνεχές ρεύμα εξόδου (Μανιάς, 2020)

Εν συνεχεία, απενεργοποιώντας το στοιχείο S_2 , το ρεύμα τυμπάνου οδηγείται στην πηγή τάσης με την αγωγή της διόδου αναγεννητικής πέδησης D_1 . Μ' αυτόν τον τρόπο, ο κινητήρας δρώντας ως γεννήτρια μεταφέρει ηλεκτρική ενέργεια στην είσοδο του συστήματος. Διακρίνοντας τις παραπάνω κυματομορφές για $I_{o,min} > 0$, ο μετατροπέας λειτουργεί μόνο στο πρώτο τεταρτημόριο με αποτέλεσμα να μην άγουν τα ημιαγωγικά στοιχεία S_2 και D_2 . Αντίστοιχα, τη χρονική στιγμή για την οποία ισχύει $I_{o,max} < 0$, ο μετατροπέας λειτουργεί μόνο στο δεύτερο τεταρτημόριο, με αποτέλεσμα να μην άγουν τα ημιαγωγικά στοιχεία S_1 και D_1 .

Στο χρονικό διάστημα για το οποίο ισχύει $I_{o,max} > 0$ και $I_{o,min} < 0$, ο μετατροπέας λειτουργεί εν μέρει στο πρώτο και στο δεύτερο τεταρτημόριο αντίστοιχα, επιτυγχάνοντας τη λειτουργία του μετατροπέα με τη συμμετοχή όλων των διακοπτικών στοιχείων.

1.5.3 Μετατροπέας DC-DC κλάσης 'E'

Ακόμη, παρουσιάζεται ο μετατροπέας τεσσάρων τεταρτημορίων για ένα κινητήριο σύστημα συνεχούς ρεύματος επιτυγχάνοντας έλεγχο ισχύος καθώς και αναγεννητικό έλεγχο. Συγκεκριμένα, η μηχανή λειτουργεί ως αριστερόστροφος κινητήρας διατηρώντας σε αγωγή τον S_1 και τον S_4 . Εφαρμόζεται με αυτόν τον τρόπο η τεχνική PWM, επιτυγχάνοντας τον έλεγχο της ταχύτητας του κινητήρα με ροή ρεύματος ελεύθερης διέλευσης μέσω των διακοπτικών στοιχείων S_1 και D_3 .



Σχήμα 1.20: Μετατροπέας τεσσάρων τεταρτημορίων

Στο χρονικό διάστημα για το οποίο ενεργοποιείται ο διακόπτης S2, το ρεύμα τυμπάνου αυξάνει με ροή ελεύθερης διέλευσης μέσω της διόδου D4. Έτσι, όταν ο διακόπτης S2 απενεργοποιείται η μηχανή λειτουργεί ως αριστερόστροφη γεννήτρια και δημιουργείται αναγεννητική πέδηση. Ο κινητήρας δρώντας ως γεννήτρια επιστρέφει ηλεκτρική ενέργεια στην πηγή μέσω των διόδων D1 και D4.

Ακόμη, η μηχανή λειτουργεί ως δεξιόστροφος κινητήρας με την ενεργοποίηση των ημιαγωγικών διακοπών S3 και S2 αυξάνοντας το ρεύμα τυμπάνου. Όταν ενεργοποιείται ο διακόπτης S2 το ρεύμα τυμπάνου μειώνεται με ροή ελεύθερης διέλευσης μέσω της διόδου D4.

Τέλος, η λειτουργία στο 4^ο τεταρτημόριο δημιουργεί αναγεννητική πέδηση ανάστροφης φοράς με την μηχανή να λειτουργεί ως δεξιόστροφη γεννήτρια. Μ' αυτόν τον τρόπο, το ρεύμα τυμπάνου αυξάνει με την αγωγή του διακόπτη S4 και της διόδου D2. Όταν ο διακόπτης S4 απενεργοποιείται επιστρέφεται ηλεκτρική ενέργεια στην τροφοδοσία μέσω των διόδων D2 και D3.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο

Αναγεννητική Πέδηση σε Ασύγχρονες Μηχανές

Στο ακόλουθο κεφάλαιο αναφέρεται ο τρόπος λειτουργίας και το κύκλωμα ισχύος της αναγεννητικής πέδησης στην περίπτωση μίας ασύγχρονης μηχανής εναλλασσόμενου ρεύματος.

2.1 Εισαγωγή

Οι ασύγχρονες τριφασικές μηχανές αποτελούνται από δύο τυλίγματα εναλλασσόμενου ρεύματος, που βρίσκονται στον στάτη και στον δρομέα. Ο στάτης διαθέτει σταθερά τριφασικά τυλίγματα δημιουργώντας ένα ομοιόμορφο περιστρεφόμενο μαγνητικό πεδίο. Αντίστοιχα, ο δρομέας δημιουργεί το πεδίο διέγερσης, καθώς παράγει ηλεκτρομαγνητικές δυνάμεις από επαγωγή στα τυλίγματά του. Για τον λόγο αυτό οι μηχανές αυτές ονομάζονται και μηχανές επαγωγής.

2.2 Θεωρητική ανάλυση

Οι ασύγχρονες μηχανές στρέφονται με ταχύτητα διαφορετική από τη σύγχρονη στην ονομαστική τους λειτουργία. Η λειτουργία των ασύγχρονων τριφασικών κινητήρων βασίζεται στο φαινόμενο της δημιουργίας ηλεκτρομαγνητικών δυνάμεων (EMF) από επαγωγή στα τυλίγματα του δρομέα από το περιστρεφόμενο μαγνητικό πεδίο των τυλιγμάτων του στάτη. Γι' αυτόν τον λόγο οι κινητήρες αυτοί ονομάζονται και επαγωγικοί κινητήρες (Μανιάς, 2020).

2.2.1 Ασύγχρονοι τριφασικοί κινητήρες

Οι ασύγχρονοι τριφασικοί κινητήρες βάσει της κατασκευής του τυλίγματος του δρομέα διακρίνονται σε δυο τύπους:

- Κινητήρες βραχυκυκλωμένου δρομέα ή τύπου κλωβού
- Κινητήρες τυλιγμένου δρομέα ή δακτυλιοφόροι

Ο δρομέας βραχυκυκλωμένου κλωβού αποτελείται από χάλκινες ή αλουμινένιες μπάρες τοποθετημένες σε αυλάκια βραχυκυκλώνοντας περιμετρικά τα άκρα τους μέσω δακτυλίων. Ο δακτυλιοφόρος δρομέας διαθέτει τριφασικό κύκλωμα κατανεμημένο με τρόπο ώστε οι τρεις φάσεις να συνδέονται σε αστέρα με τα άκρα των αγωγών να συνδέονται σε δακτύλιους (Μαλατέστας, 2019).

Στην περίπτωση του επαγωγικού κινητήρα εφαρμόζεται τριφασική συμμετρική τάση στο στάτη με αποτέλεσμα τη ροή μαγνητικού πεδίου στο διάκενο. Έτσι, παράγεται το πεδίο στο τυλίγμα του στάτη που προκαλεί την ανάπτυξη της ταχύτητας περιστροφής που περιγράφεται από την παρακάτω σχέση:

$$n_s = 120 \frac{f_1}{P} \quad (2.1)$$

όπου

f_1 = η συχνότητα του στάτη της μηχανής,

P = ο αριθμός των πόλων της μηχανής

Η σύγχρονη ταχύτητα του περιστρεφόμενου πεδίου δίνεται από τη σχέση:

$$\omega_s = \frac{2\omega_1}{P} \quad (2.2)$$

όπου $\omega_1 = 2\pi f_1$ η κυκλική συχνότητα του στάτη της μηχανής.

Στη λειτουργική φάση της μηχανής κατά την οποία ο δρομέας είναι ακίνητος, οι τάσεις που επάγονται σε αυτόν παρουσιάζουν την ίδια συχνότητα με την τάση των τυλιγμάτων του στάτη. Μ' αυτόν τον τρόπο τα επαγόμενα ρεύματα του δρομέα, με συχνότητα ίδια με αυτή του στάτη, παράγουν στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο, αναπτύσσοντας ροπή στο εσωτερικό της μηχανής. Οι επαγόμενες τάσεις ενεργούς τιμής για τα τυλίγματα του στάτη και του δρομέα αντίστοιχα περιγράφονται από τις ακόλουθες σχέσεις:

$$V_s = \frac{2\pi f_1 K_s N_s \Phi}{\sqrt{2}} = 4,44 f_1 K_s N_s \Phi \quad (2.3)$$

$$V_r = \frac{2\pi f_1 K_r N_r \Phi}{\sqrt{2}} = 4,44 f_1 K_r N_r \Phi \quad (2.4)$$

όπου

K_s και K_r είναι οι κατασκευαστικοί συντελεστές των τυλιγμάτων στάτη και δρομέα αντίστοιχα

N_s και N_r είναι οι συνολικοί αριθμοί σπειρών ανά φάση στάτη και δρομέα αντίστοιχα

Φ είναι η συνισταμένη μαγνητική ροή διακένου.

Εν συνεχεία, μελετάται η λειτουργική φάση της μηχανής κατά την οποία ο δρομέας στρέφεται με συγκεκριμένο αριθμό στροφών $n_r < n_s$ στη μόνιμη κατάσταση. Συγκεκριμένα, η επαγόμενη τάση του δρομέα εξαρτάται από τη σχετική ταχύτητα $n_s - n_r$ του συνιστάμενου μαγνητικού πεδίου. Για την καλύτερη περιγραφή αυτής της συμπεριφοράς ορίζεται η ολίσθηση ως ο λόγος της διαφοράς της ταχύτητας του δρομέα από το πεδίο προς τη σύγχρονη ταχύτητα:

$$s = \frac{n_s - n_r}{n_s} \quad (2.5)$$

ή

$$s = \frac{n_s - n_r}{n_s} (x100\%) \quad (2.6)$$

Επίσης, η ολίσθηση περιγράφεται και μέσω της γωνιακής ταχύτητας ως:

$$s = \frac{\omega_s - \omega_r}{\omega_s} (x100\%) \quad (2.7)$$

Στην περίπτωση κανονικής λειτουργίας της μηχανής, η συχνότητα στον δρομέα είναι ανάλογη της σχετικής ταχύτητας των πεδίων στάτη και δρομέα. Η συχνότητα στο δρομέα f_r ορίζεται ως συχνότητα ολίσθησης και εκφράζεται συναρτήσει της συχνότητας του δικτύου f_s :

$$f_r = s f_s \quad (2.8)$$

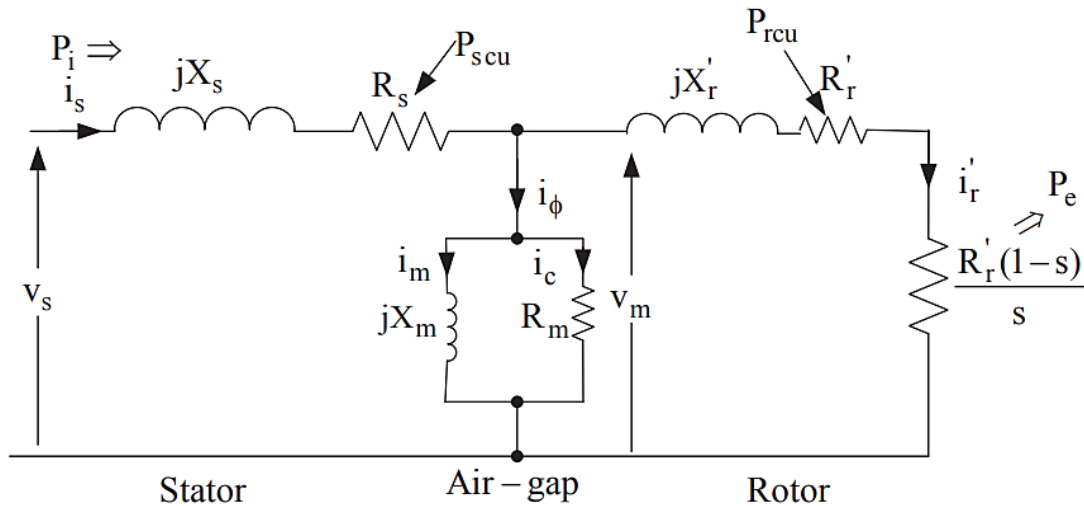
όπου

$$f_r = \frac{n_s - n_r}{n_s} f_s \quad (2.9)$$

Η παραπάνω σχέση μέσω της εξίσωσης (2.1) γίνεται :

$$f_r = (n_s - n_r) \frac{P}{120 f_s} f_s = (n_s - n_r) \frac{P}{120} \quad (2.10)$$

Στο παρακάτω σχήμα υλοποιείται το ισοδύναμο μονοφασικό κύκλωμα τριφασικής επαγωγικής μηχανής. Έστω, V_s η φασική τάση του στάτη, V_m η τάση μαγνήτισης, X_m η αντίδραση αυτεπαγωγής και R_m η αντίστοιχη αντίσταση μαγνήτισης (Μανιάς, 2020).



Σχήμα 2.1: Ισοδύναμο κύκλωμα ανά φάση τριφασικής επαγωγικής μηχανής με τα μεγέθη του δρομέα ανηγμένα στο τύλιγμα του στάτη (Μανιάς, 2020)

Σύμφωνα με την εφαρμογή του νόμου τάσεων του Kirchhoff στο πρώτο βρόγχο για το τύλιγμα του στάτη προκύπτει η σχέση :

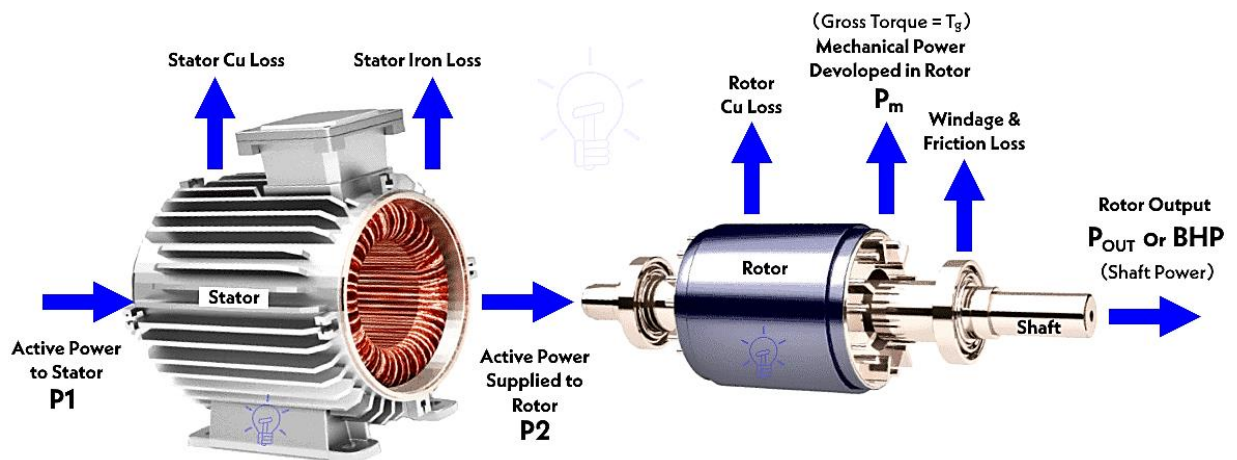
$$V_s = (R_s + jX_s) I_s + V_m \quad (2.11)$$

όπου

R_s = η αντίσταση στο τύλιγμα του στάτη

X_s = η αντίδραση αυτεπαγωγής του στάτη

Επιπλέον, αναλύονται οι σχέσεις ροής ισχύος και ροπής των επαγωγικών μηχανών σύμφωνα με το ισοδύναμο κύκλωμα του σχήματος 1.9 . Συγκεκριμένα η ηλεκτρική ισχύς P_i αποτελεί την είσοδο η οποία τροφοδοτείται από τριφασικό σύστημα τάσης.



Εικόνα 2-1 : Απώλειες και ροή ισχύος ασύγχρονου τριφασικού κινητήρα (Technology, 2018)

Στα τυλίγματα του στάτη εμφανίζονται οι απώλειες χαλκού :

$$P_{s,cu} = 3 I_s^2 R_s \quad (2.12)$$

Οι απώλειες χαλκού στο δρομέα:

$$P_{r,cu} = 3 I_r^2 R_r' \quad (2.13)$$

Οι απώλειες πυρήνα:

$$P_c = 3 \frac{V_m^2}{R_m} \approx 3 I_s^2 \frac{V_s^2}{R_m} \quad (2.14)$$

Η ισχύς διακένου στον δρομέα:

$$P_g = 3 I_r^2 \frac{R_r'}{s} \quad (2.15)$$

Η ηλεκτρομαγνητική ισχύς:

$$P_e = P_g - P_{r,cu} = 3 I_r^2 \frac{R_r'}{s} (1 - s) = P_g (1 - s) \quad (2.16)$$

Η αναπτυσσόμενη ηλεκτρομαγνητική ροπή:

$$T_e = \frac{P_e}{\omega_m} = \frac{P_g (1 - s)}{\omega_e (1 - s)} = \frac{P_g}{\omega_e} \quad (2.17)$$

Η ηλεκτρική ισχύς P_i αποτελεί την είσοδο και κατά συνέπεια την τροφοδοσία της μηχανής και δίνεται από την κάτωθι σχέση:

$$P_i = 3 V_s I_s \cos\Phi = P_c + P_{s,cu} + P_g \quad (2.18)$$

Η μηχανική ισχύς P_m αποτελεί την ισχύ εξόδου στον άξονα της μηχανής. Προκύπτει αφαιρώντας από την ηλεκτρομαγνητική ισχύ τις απώλειες περιστροφής. Οι απώλειες περιστροφής αποτελούν το άθροισμα των μηχανικών απωλειών τριβών και ανεμισμού.

$$P_m = P_e - P_{rotational} \quad (2.19)$$

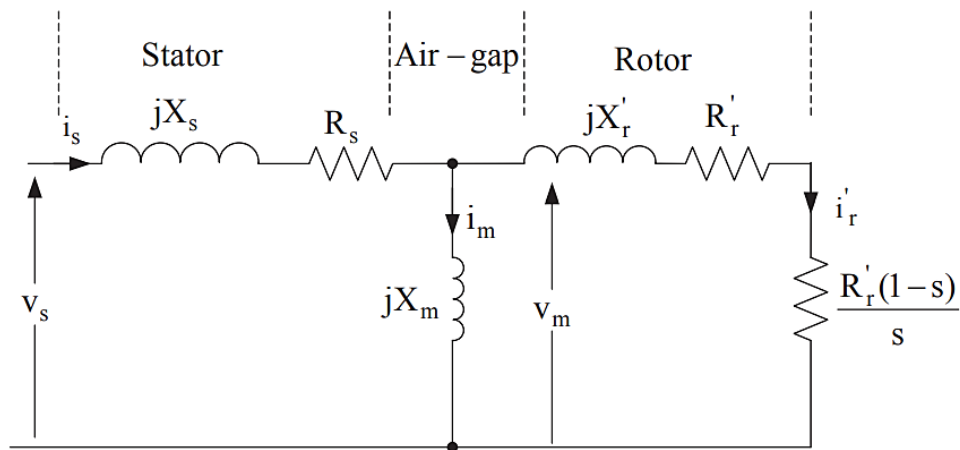
Η μηχανική ροπή εξόδου της μηχανής προκύπτει ως εξής:

$$T_m = T_e - \frac{P_{rotational}}{\omega_m} \quad (2.20)$$

Με την απόδοση της μηχανής να υπολογίζεται ως εξής:

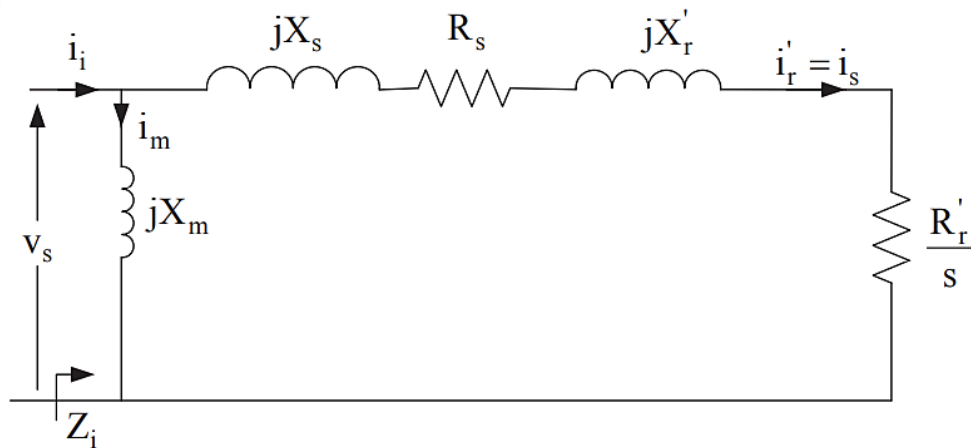
$$n(\%) = \frac{P_m}{P_i} (x100) \quad (2.21)$$

Ακόμη για τη διερεύνηση των σχέσεων ροπής και ισχύος απλοποιείται το ισοδύναμο κύκλωμα της μηχανής παραλείποντας την παράλληλη αντίσταση R_m .



Σχήμα 2.2: Απλοποιημένο ισοδύναμο κύκλωμα (Μανιάς, 2020)

Για λόγους ευκολίας υπολογισμών το ισοδύναμο κύκλωμα απλοποιείται περισσότερο θεωρώντας $X_m^2 \gg (R_s^2 + X_s^2)$ με $v_s \approx v_m$, επιτυγχάνοντας την τοποθέτηση της αντίδρασης X_m στο τύλιγμα του στάτη, όπως διακρίνεται παρακάτω.



Σχήμα 2.3: Απλοποιημένο ισοδύναμο μονοφασικό κύκλωμα με μεταφορά της αντίδρασης X_m στο στάτη (Μανιάς, 2020)

Λαμβάνοντας υπόψιν το απλοποιημένο ισοδύναμο κύκλωμα, εξάγονται οι ακόλουθες σχέσεις :

$$Z_i = \frac{-X_m(X_s + X_r) + jX_m(R_s + \frac{R_r}{s})}{(R_s + \frac{R_r}{s}) + j(X_m + X_s + X_r)} \quad (2.22)$$

Με την εξίσωση ροπής συναρτήσει της γωνιακής ταχύτητας πεδίου:

$$T_e = \frac{3V_s^2 R_r}{s\omega_e [(R_s + \frac{R_r}{s})^2 + (X_s + X_r)^2]} \quad (2.23)$$

Η ροπή εκκίνησης δίνεται από την κάτωθι σχέση:

$$T_{st} = \frac{3V_s^2 R_r}{\omega_e [(R_s + \frac{R_r}{s})^2 + (X_s + X_r)^2]} \quad (2.24)$$

Η μέγιστη ροπή μηχανής δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

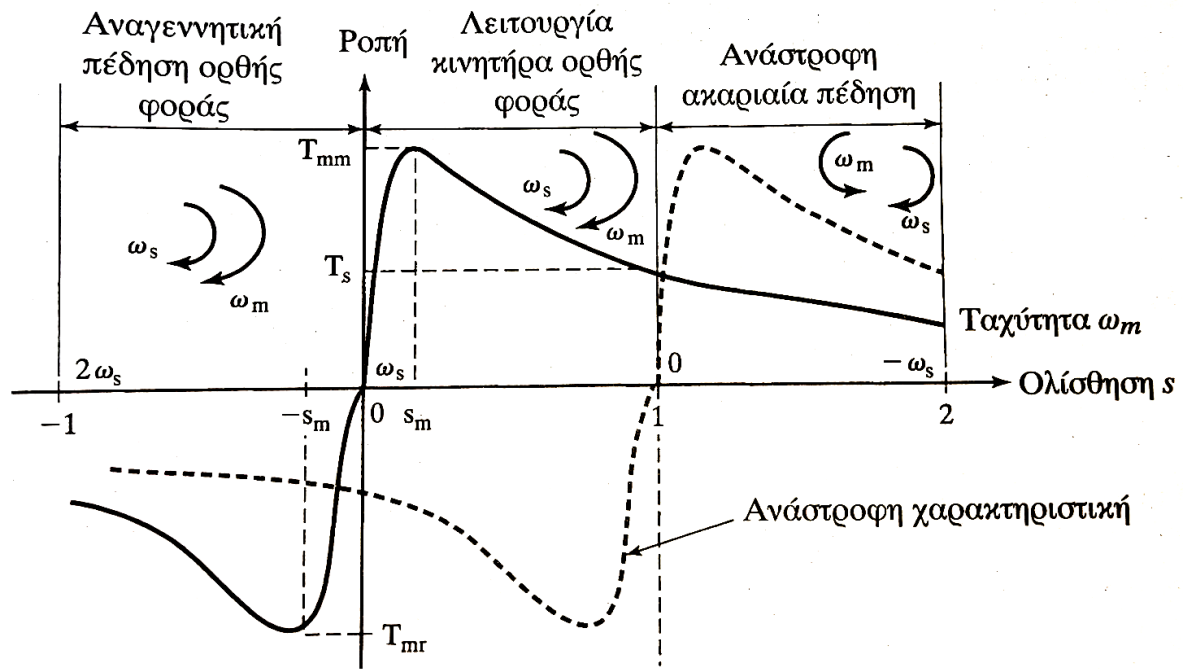
$$T_{max}(motor) = \frac{3V_s^2}{2\omega_e [R_s \sqrt{R_s^2 + (X_s + X_r)^2}]} \quad (2.25)$$

Η μέγιστη αναγεννητική ροπή της μηχανής δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$T_{max}(regen) = \frac{3V_s^2}{2\omega_e [-R_s \sqrt{R_s^2 + (X_s + X_r)^2}]} \quad (2.26)$$

2.2.2 Περιοχές λειτουργίας ασύγχρονης μηχανής

Η παρακάτω χαρακτηριστική παρέχει σημαντικές πληροφορίες σχετικά με τη λειτουργία και την αναγεννητική πέδηση της ασύγχρονης τριφασικής μηχανής. Συγκεκριμένα, εμφανίζονται οι περιοχές λειτουργίας της ασύγχρονης μηχανής που διακρίνονται σε τρεις καταστάσεις. Λειτουργία της μηχανής ως κινητήρα για $0 \leq s \leq 1$, λειτουργία αναγεννητικής πέδησης θετικής φοράς για $s < 1$ και λειτουργία αναγεννητικής ακαριαίας πέδησης αρνητικής φοράς για $1 \leq s \leq 2$ (Chapman, 2020).



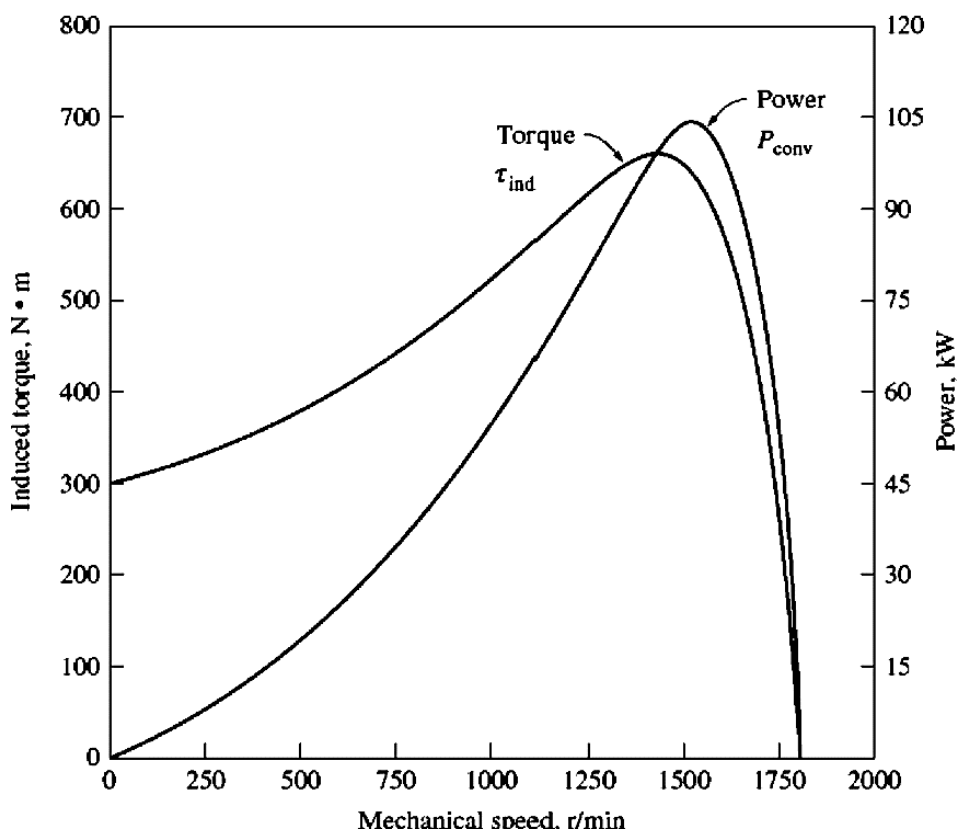
Σχήμα 2.4: Χαρακτηριστική εσωτερικής ροπής συναρτήσει της ολίσθησης της μηχανής επαγωγής για διάφορες καταστάσεις λειτουργίας με σταθερή τάση και συχνότητα (Rashid, 2010).

Αναλυτικότερα, στη λειτουργία κινητήρα τα τυλίγματα του στάτη τροφοδοτούνται από σταθερή τάση σταθερής συχνότητας, αναπτύσσοντας ροπή ανάλογη του τετραγώνου της τάσης τροφοδοσίας που περιγράφεται από την παραπάνω εξίσωση ροπής συναρτήσει της γωνιακής ταχύτητας. Με αυτά τα δεδομένα ο δρομέας του κινητήρα περιστρέφεται με την ίδια φορά του μαγνητικού πεδίου του στάτη, ενώ με την αύξηση της ολίσθησης για $0 \leq s \leq 1$ αυξάνεται γραμμικά η ροπή μέχρι τη μέγιστη τιμή της T_{mm} που χαρακτηρίζεται ως ροπή κατάρρευσης ή ροπή ανατροπής. Η τιμή της ροπής T_{mm} του κινητήρα για ολίσθηση s_m είναι τρεις φορές μεγαλύτερη από την αντίστοιχη ονομαστική τιμή. Για περισσότερη αύξηση της ολίσθησης παρατηρείται ότι η ροπή ελαττώνεται εξαιτίας της μείωσης της ροής διακένου αέρα.

Παράλληλα, στην περιοχή λειτουργίας ακαριαίας πέδησης για ολίσθηση $1 \leq s \leq 2$ ο κινητήρας περιστρέφεται με αντίθετη φορά μαγνητικού πεδίου αποσκοπώντας στην απότομη μείωση της ηλεκτρομηχανικής ροπής. Για τη βέλτιστη εκμετάλλευση του φαινομένου αυτού με σκοπό την πέδηση του κινητήρα αντιστρέφεται η ακολουθία των φάσεων επιτυγχάνοντας την αντιστροφή της φοράς του μαγνητικού πεδίου. Στη λειτουργική αυτή φάση η ροπή που αναπτύσσεται ονομάζεται ροπή πέδησης καθώς σταματά απότομα τον κινητήρα προκαλώντας υψηλές τιμές ρεύματος.

Τέλος, στην περίπτωση της ωφέλιμης αναγεννητικής πέδησης για ολίσθηση $s < 1$ η ταχύτητα περιστροφής του δρομέα θα ξεπεράσει τη σύγχρονη ταχύτητα με αποτέλεσμα τη λειτουργία γεννήτριας. Η εσωτερική ισχύς καθώς και η ροπή αποκτούν αρνητικές τιμές συμβάλλοντας στη μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας στην πηγή τροφοδοσίας. Έτσι, η μηχανική ενέργεια μετατρέπεται σε ηλεκτρική παρέχοντας στο σύστημα

τροφοδοσίας την άεργο ισχύ που χρειάζεται για τη διέγερση του μαγνητικού πεδίου. Χαρακτηριστική εφαρμογή της ωφέλιμης αναγεννητικής πέδησης σε ασύγχρονες μηχανές αποτελεί πλέον η οδήγηση του κινητήριου συστήματος μιας ανεμογεννήτριας.



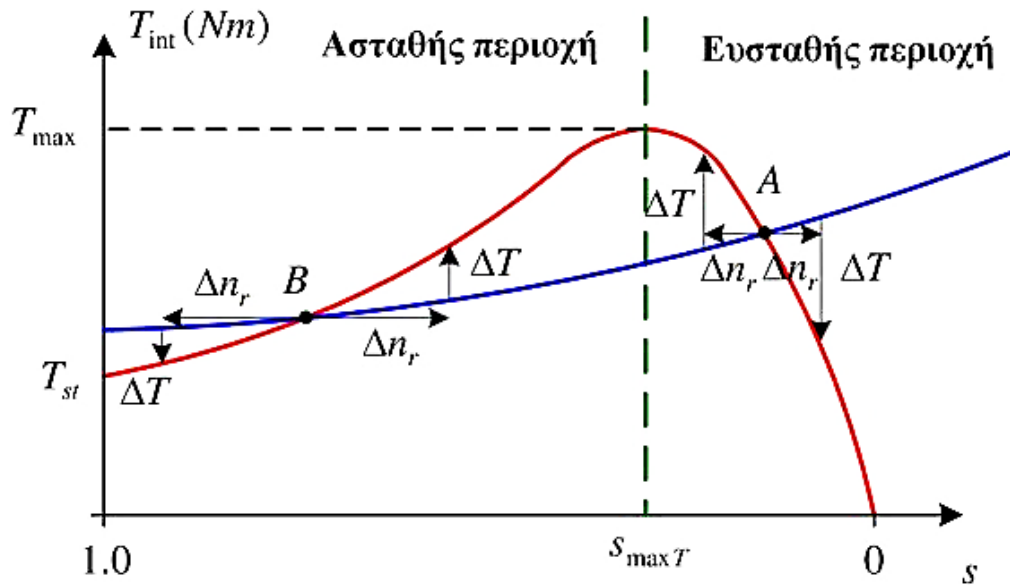
Σχήμα 2.5: Γραφική παράσταση της επαγόμενης ροπής και της μετατρεπόμενης ισχύος συναρτήσει της ταχύτητας ενός τετραπολικού επαγωγικού κινητήρα (Charman, 2020)

Στον ασύγχρονο κινητήρα το μέρος της ισχύος που μετατρέπεται σε μηχανική δίνεται από την ακόλουθη σχέση συναρτήσει της επαγόμενης ροπής:

$$P_{conv} = \tau_{ind} \omega_m \quad (2.27)$$

Στην ανωτέρω γραφική παράσταση διακρίνεται ότι η μέγιστη τιμή της μετατρεπόμενης ισχύος που παράγει ένας ασύγχρονος κινητήρας βρίσκεται σε διαφορετική τιμή ταχύτητας περιστροφής σε σχέση με την αντίστοιχη τιμή της μέγιστης ροπής. Έτσι, η μέγιστη τιμή της μετατρεπόμενης ισχύος εμφανίζεται σε μεγαλύτερη τιμή ταχύτητας περιστροφής σε σχέση με την ταχύτητα στη μέγιστη επαγόμενη ροπή.

Από την ανάλυση των καμπυλών ροπής-ισχύος διαπιστώνεται πως ο κινητήρας επαγωγής λειτουργεί μεταξύ της ευσταθούς και ασταθούς περιοχής όπως απεικονίζεται στο παρακάτω σχήμα.

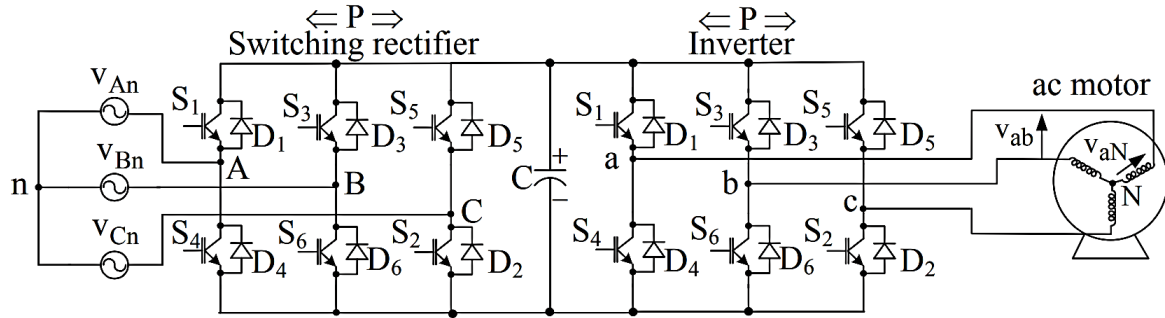


Σχήμα 2.6: Περιοχές ευσταθούς και ασταθούς λειτουργίας της χαρακτηριστικής ροπής-ολίσθησης (Μαλατέστας, 2019)

Ευσταθής περιοχή ορίζεται το τμήμα λειτουργίας για τιμές ολίσθησης $0 < s < s_{\max T}$. Λαμβάνοντας υπόψιν το σημείο A, το οποίο αποτελεί σημείο ευσταθούς λειτουργίας, διακρίνεται πως οποιαδήποτε αύξηση στο φορτίο επιφέρει μείωση των στροφών με ταυτόχρονη αύξηση της ροπής. Ωστόσο για την περιοχή ασταθούς λειτουργίας $1 < s < s_{\max T}$ και το σημείο B διαπιστώνεται ότι οποιαδήποτε αύξηση στο φορτίο επιφέρει μείωση των στροφών με αύξηση της ροπής μέχρι την ακινητοποίηση του κινητήρα, οδηγώντας το σύστημα εκτός σημείου ισορροπίας.

2.3 Έλεγχος επαγωγικών μηχανών

Για τον βέλτιστο έλεγχο μιας ασύγχρονης μηχανής εντός των ορίων των περιοχών λειτουργίας της, όπως αναλύθηκε προηγουμένως, απαιτούνται ορισμένες διατάξεις ηλεκτρονικών ισχύος που εξυπηρετούν τις ανάγκες κάθε εφαρμογής. Συγκεκριμένα, σε διατάξεις διπλής ροής ισχύος, στις οποίες επιτρέπεται η αναγεννητική πέδηση, είναι αναγκαία η μεταβολή της συχνότητας και της ενεργούς τιμής της τάσης τροφοδοσίας ικανοποιώντας τις απαιτήσεις του φορτίου. Η παρακάτω διάταξη διπλής ροής ισχύος παρέχει τη δυνατότητα πέδησης με ανάκτηση ισχύος, καθώς επιτυγχάνεται PWM αναγεννητική ανόρθωση. Ο έλεγχος της διάταξης αυτής αναλύεται παρακάτω.

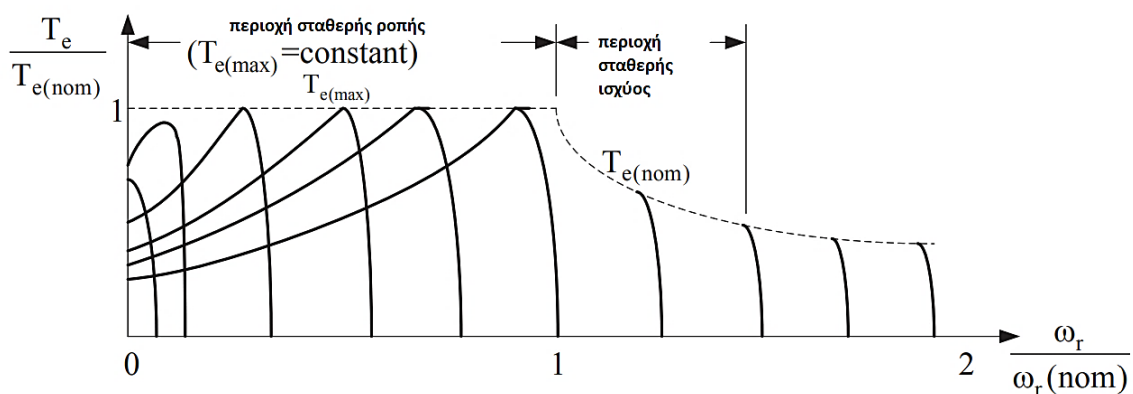


Σχήμα 2.7: Διάταξη ηλεκτρονικών ισχύος διπλής ροής ισχύος και PWM αναγεννητική ανόρθωση με μονάδα συντελεστή ισχύος εισόδου (Μανιάς, 2020)

2.3.1 Βαθμωτός Έλεγχος (Scalar control)

Η συγκεκριμένη στρατηγική ελέγχου συμβάλει στην αποδοτική οδήγηση συστημάτων ηλεκτρικής κίνησης επαγωγικών μηχανών. Οι μεταβλητές ελέγχου αφορούν τη μόνιμη κατάσταση της επαγωγικής μηχανής ρυθμίζοντας τη συχνότητα και την ενεργό τιμή της τάσης του στάτη με σκοπό τη διατήρηση σταθερού λόγου V/f . Το γεγονός αυτό συμβάλει στη διατήρηση σταθερής μαγνητικής ροής στο διάκενο της μηχανής για συχνότητες λειτουργίας κοντά στη συχνότητα του δικτύου (Μανιάς, 2020).

Στην περιοχή σταθερής ροπής όπως διακρίνεται στο κάτωθι σχήμα η ροπή του κινητήρα παραμένει σταθερή με ένα μεγάλο εύρος τιμών ταχυτήτων. Για ορισμένες απαιτήσεις ροπής που προκύπτουν η ταχύτητα ελέγχεται μεταβάλλοντας τη συχνότητα. Παρ' όλα αυτά, παρατηρείται πως σε μικρές ταχύτητες ο κινητήρας δεν ανταποκρίνεται στη ζήτηση ροπής εξαιτίας της μείωση της ροής διακένου.



Σχήμα 2.8 : Χαρακτηριστική ροπής – στροφών με σταθερό λόγο V/f (Μανιάς, 2020)

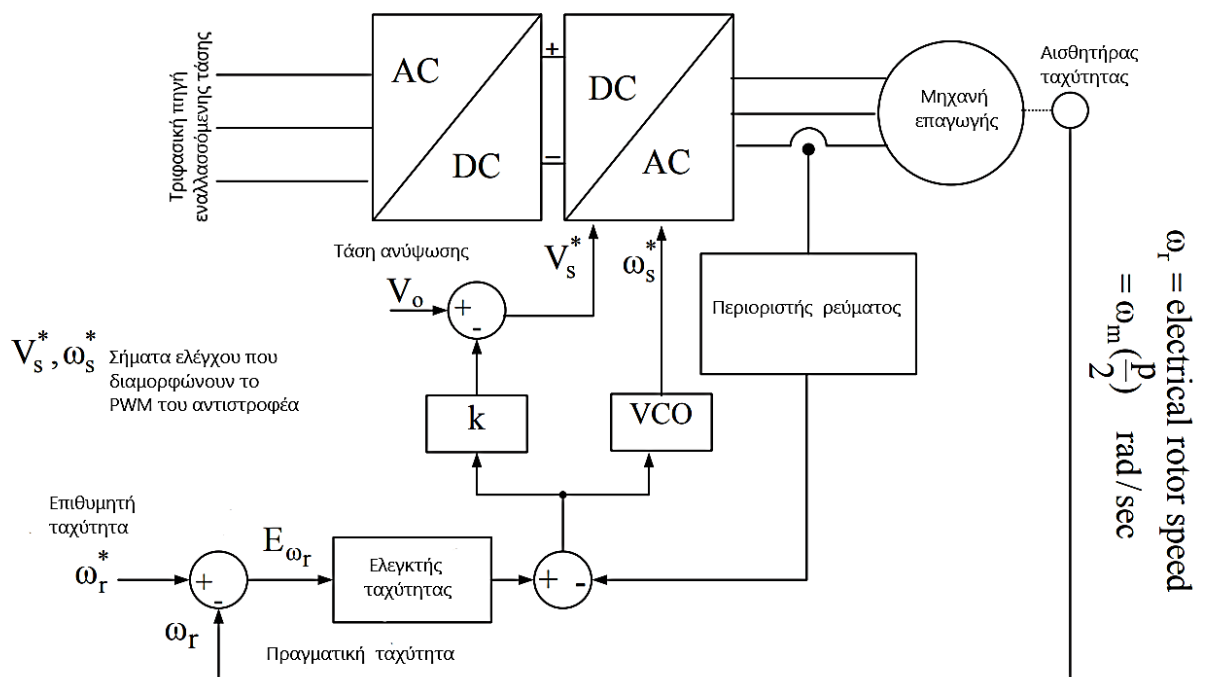
Η αποδοτική οδήγηση των συστημάτων ηλεκτρικής κίνησης επαγωγικών μηχανών, υλοποιώντας την τεχνική ελέγχου V/f , αποβλέπει στην τήρηση των προδιαγραφών λειτουργίας τους. Τα συγκεκριμένα κινητήρια συστήματα αυτομάτου ελέγχου

διακρίνονται σε δύο κατηγορίες, τα συστήματα ανοιχτού βρόχου και τα συστήματα κλειστού βρόχου (Μανιάς, 2020).

Στα συστήματα ανοιχτού βρόχου η είσοδος δεν λαμβάνει υπόψη τις μεταβλητές εξόδου με αποτέλεσμα τη μειωμένη δυναμική απόκριση. Έτσι, αν και χαρακτηρίζονται από την απλή κατασκευή τους και το χαμηλό κόστος εμφανίζουν σφάλματα στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας επιφέροντας διαταραχές στη λειτουργία του κινητήρα.

Ωστόσο, στα συστήματα κλειστού βρόχου οι μεταβλητές εξόδου αλληλοεπιδρούν άμεσα με τις αντίστοιχες μεταβλητές εισόδου επιτυγχάνοντας τη βέλτιστη ρύθμιση της ταχύτητας σε όλο το εύρος των συχνοτήτων προσφέροντας τη μέγιστη ακρίβεια. Μ' αυτόν τον τρόπο, βελτιώνεται η δυναμική απόκριση του συστήματος αποβλέποντας στη μείωση των διαταραχών μέσω της βαθμίδας της ανατροφοδότησης.

Παρακάτω αναλύονται δύο διαφορετικά συστήματα ελέγχου τριφασικού ασύγχρονου κινητήρα με ρύθμιση V/f κλειστού βρόχου. Το πρώτο σύστημα υλοποιείται με περιοριστή ρεύματος και το άλλο με έλεγχο της συχνότητας ολίσθησης.

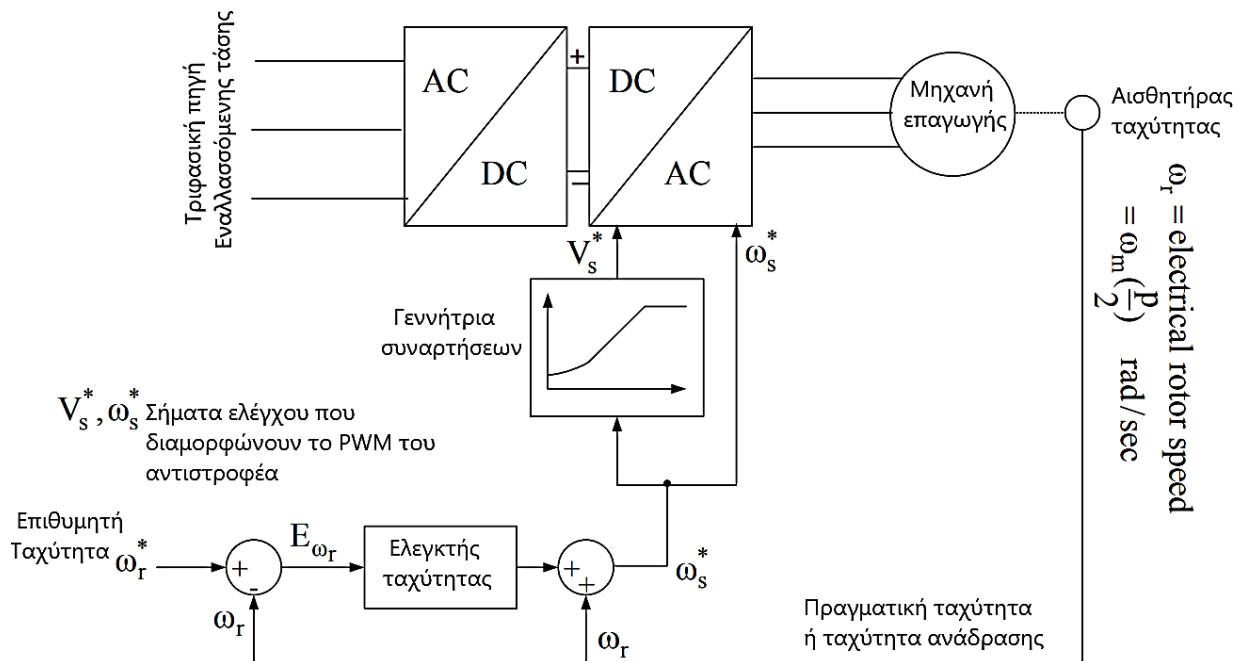


Σχήμα 2.9 : Δομικό διάγραμμα ελεγκτή κλειστού βρόχου με περιοριστή ρεύματος. (Μανιάς, 2020)

Στο παραπάνω σχήμα παρουσιάζεται η διάταξη ελέγχου κλειστού βρόχου με ρύθμιση του λόγου V/f. Συγκεκριμένα, η επιθυμητή ταχύτητα ω_r^* συγκρίνεται κάθε φορά με την πραγματική ταχύτητα ω_r . Εν συνεχεία ο ελεγκτής ταχύτητας επεξεργάζεται το σφάλμα των στροφών στην είσοδό του μεταφέροντας το σήμα ελέγχου στην έξοδο, όπου γίνεται σύγκριση με το αντίστοιχο σήμα του περιοριστή ρεύματος. Το σήμα του περιοριστή ρεύματος ενεργοποιείται σε περίπτωση βλάβης επιτυγχάνοντας την ανατροφοδότηση του εκτός ορίων ρεύματος του στάτη. Ουσιαστικά το σήμα αυτό ελέγχει τη μεταβολή της συχνότητας και της τάσης του αντιστροφέα.

Σύμφωνα με τα παραπάνω στοιχεία μια απότομη αύξηση του ω_r^* επιφέρει την αύξηση του ρεύματος των τυλιγμάτων του στάτη με σκοπό την αύξηση της ολίσθησης. Ωστόσο, το ρεύμα αυξάνεται μέχρι ένα όριο εξαιτίας του περιοριστή ρεύματος μειώνοντας τον ρυθμό αύξησης της τάσης και της συχνότητας. Μ' αυτόν τον τρόπο ο κινητήρας οδηγείται σύμφωνα με την ταχύτητα αναφοράς στην περιοχή σταθερής ροπής καθώς η συχνότητα του δρομέα παραμένει σταθερή. Όταν η ταχύτητα ξεπεράσει τις ονομαστικές τιμές για λειτουργία σταθερής ισχύος αυξάνεται μόνο η συχνότητα καθώς η τάση διατηρείται σταθερή στις ονομαστικές τιμές.

Τέλος, μια απότομη μείωση της επιθυμητής ταχύτητας ω_r^* αποτελεί την περίπτωση αναγεννητικής πέδησης για ολίσθηση $s < 1$ όπου η ταχύτητα περιστροφής του δρομέα θα ξεπεράσει τη σύγχρονη ταχύτητα με αποτέλεσμα τη λειτουργία γεννήτριας. Έτσι, η μηχανική ενέργεια των στρεφόμενων μαζών μετατρέπεται σε ηλεκτρική, ενώ η ροπή αποκτάει αρνητικές τιμές συμβάλλοντας στη μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας στο δίκτυο.



Σχήμα 2.10 : Δομικό διάγραμμα ελεγκτή κλειστού βρόχου με έλεγχο της συχνότητας ολίσθησης (Μανιάς, 2020)

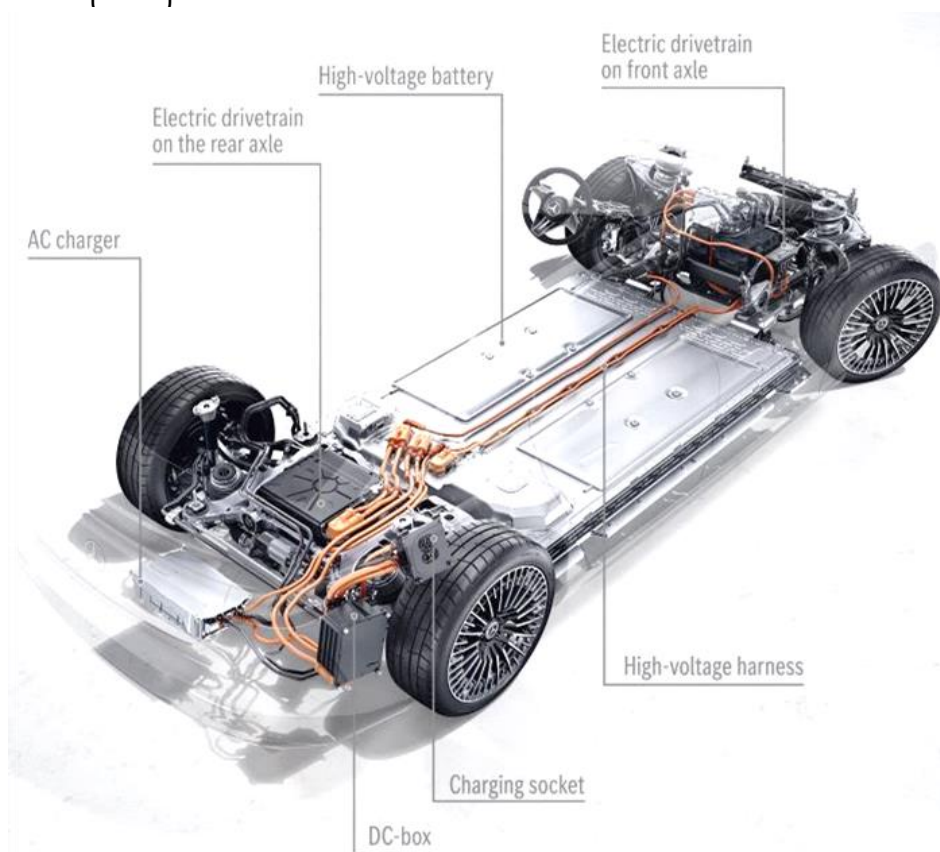
Στο σχήμα 2.10 παρουσιάζεται η άλλη διάταξη ελέγχου κλειστού βρόχου με ρύθμιση του λόγου V/f. Συγκεκριμένα, η συχνότητα ολίσθησης είναι ανάλογη της ροπής των ασύγχρονων κινητήρων, ώστε αντί του περιοριστή ρεύματος να ελέγχεται η συχνότητα ολίσθησης (Μανιάς, 2020). Η επιθυμητή ταχύτητα ω_r^* συγκρίνεται κάθε φορά με την πραγματική ταχύτητα ω_r ώστε ο ελεγκτής ταχύτητας λαμβάνει στην είσοδό του το σφάλμα των στροφών, παράγοντας στην έξοδό του την εντολή της συχνότητας ολίσθησης. Ακόμη στο σήμα αυτό προστίθεται το σήμα της πραγματικής γωνιακής ταχύτητας του δρομέα ω_r , δημιουργώντας την τελική εντολή ω_s^* που αποτελεί τη

συχνότητα του αντιστροφέα. Η γεννήτρια συναρτήσεων παράγει το σήμα εντολής για τον προσδιορισμό της τάση εξόδου της ανορθωτικής διάταξης μεταβάλλοντας την απόκριση της τάσης του κινητήρα.

Σύμφωνα με τα παραπάνω στοιχεία μια απότομη αύξηση του ω_r^* επιφέρει τη μείωση της συχνότητας ολίσθησης με σκοπό τη λειτουργία του κινητήρα ακριβώς κάτω από την ταχύτητα ανατροπής. Ο κινητήρας, λοιπόν, οδηγείται με τη μέγιστη τιμή ροπής σύμφωνα με την ταχύτητα αναφοράς στην περιοχή σταθερής ροπής. Αντίστοιχα, μια απότομη μείωση της επιθυμητής ταχύτητας ω_r^* επιφέρει τη λήψη αρνητικής εντολής της συχνότητας ολίσθησης, επιτυγχάνοντας αναγεννητική πέδηση. Η μηχανή λειτουργεί ως γεννήτρια για ολίσθηση $s < 1$ με αποτέλεσμα η μηχανική ενέργεια των στρεφόμενων μαζών να μετατρέπεται σε ηλεκτρική μεταφέροντας ενέργεια στο δίκτυο.

2.4 Εφαρμογή σε Ηλεκτρικό Αυτοκίνητο

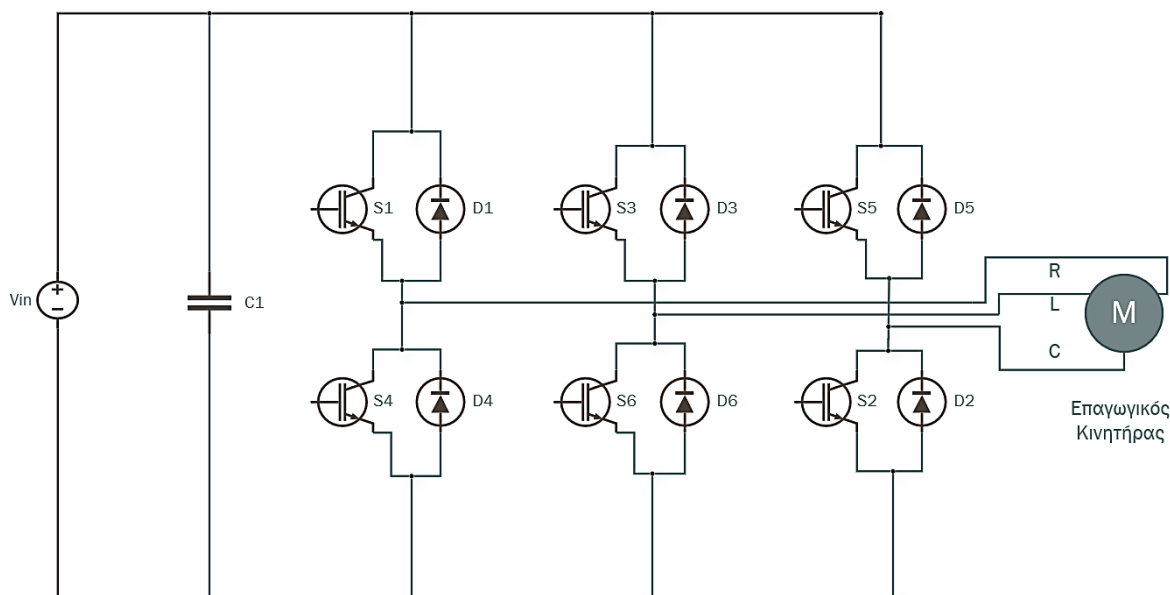
Αναλύεται η διάταξη ηλεκτρονικών ισχύος αναγεννητικής πέδησης ενός ηλεκτρικού οχήματος, το οποίο εξοπλίζεται με έναν ασύγχρονο τριφασικό κινητήρα εναλλασσόμενου ρεύματος σύμφωνα με την τεχνική βαθμωτού ελέγχου που παρουσιάστηκε παραπάνω.



Εικόνα 2-2 : Βασική Δομή Ηλεκτρικού Αυτοκινήτου (Jost, 2021)

2.4.1 Τριφασικός Αντιστροφέας με Πηγή Συνεχούς Τάσης (VSI)

Η διάταξη ισχύος αποτελείται από τον τριφασικό αντιστροφέα με πηγή συνεχούς τάσης (VSI), ο οποίος τροφοδοτείται από τη συστοιχία μπαταριών του αυτοκινήτου και οδηγεί τον ασύγχρονο τριφασικό κινητήρα. Επιπλέον, ο αντιστροφέας παρέχει τη δυνατότητα αμφίπλευρης ροής ισχύος καθώς ηλεκτρική ενέργεια μεταφέρεται από τις μπαταρίες στον κινητήρα και από τον κινητήρα που λειτουργεί ως γεννήτρια στις μπαταρίες αντίστοιχα.

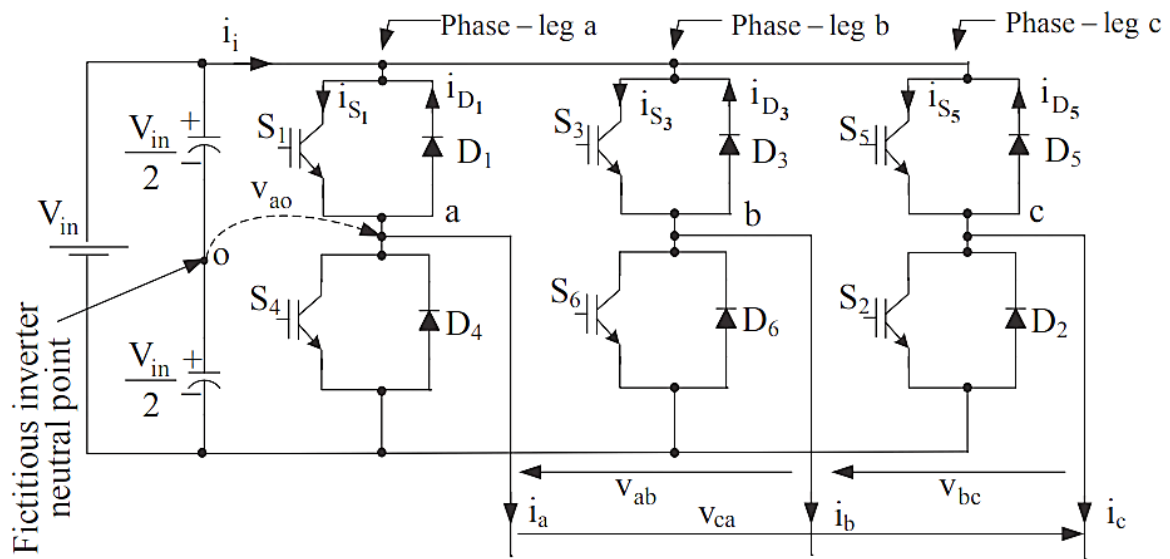


Σχήμα 2.11 : Σύστημα ηλεκτρικής κίνησης επαγωγικού κινητήρα τριφασικού αντιστροφέα

Στην περίπτωση που η επαγωγική μηχανή λειτουργεί ως κινητήρας μεταφέρεται ηλεκτρική ενέργεια από την πηγή τροφοδοσίας (συσσωρευτές) μέσω του αντιστροφέα στα τυλίγματα τυμπάνου. Στη λειτουργική φάση της αναγεννητικής πέδησης, όταν το ηλεκτρικό αυτοκίνητο κατεβαίνει μια κατηφόρα ή φρενάρι ηλεκτρικά, επιστρέφεται κινητική ενέργεια μέσω του συστήματος μετάδοσης στον κινητήρα.

Με αυτόν τον τρόπο η επαγωγική μηχανή λειτουργεί ως γεννήτρια παράγοντας ηλεκτρική ενέργεια. Στο χρονικό αυτό διάστημα η ηλεκτρική ισχύς κατευθύνεται μέσω του τριφασικού αντιστροφέα, ο οποίος λειτουργεί ως ανόρθωση, στους συσσωρευτές που αποτελούν την πηγή τροφοδοσίας.

Παρακάτω, παρουσιάζεται το κύκλωμα ισχύος του αμφίπλευρου τριφασικού αντιστροφέα το οποίο τροφοδοτείται με συνεχή τάση, ενώ έχει σχεδιαστεί με τα διακοπικά στοιχεία ισχύος IGBTs. Αποτελείται από τρεις μονοφασικούς αντιστροφέας με την τάση εξόδου του καθενός μετατοπισμένη 120° για συμμετρική τροφοδοσία.



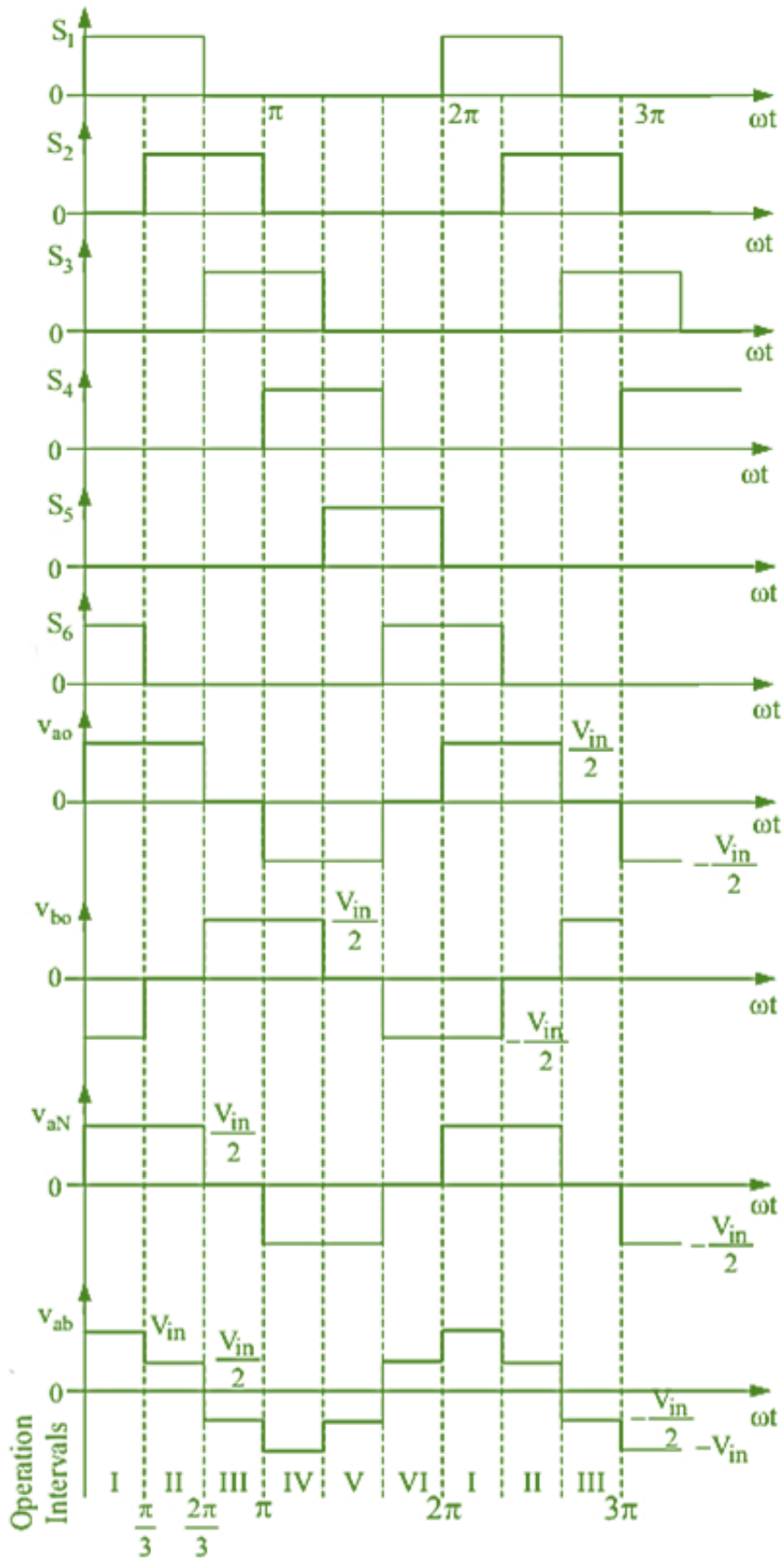
Σχήμα 2.12 : Κύκλωμα ισχύος τριφασικού αντιστροφέα με IGBTs ημιαγωγικούς διακόπτες (Μανιάς, 2020)

Σύμφωνα με τους περιορισμούς ορθής λειτουργίας του αντιστροφέα για διάρκεια παλμών έναυσης εύρους 120° , επιτυγχάνεται ταυτόχρονη αγωγή δύο ημιαγωγικών διακοπών σύμφωνα με τον παρακάτω πίνακα (Μανιάς, 2020).

Πίνακας 1 : Συνδυασμός ταυτόχρονης παλμοδότησης ημιαγωγικών διακοπών αντιστροφέα για διάρκεια παλμών έναυσης εύρους 120°

ΔΙΑΣΤΗΜΑ	ΔΙΑΡΚΕΙΑ	ΑΓΩΓΗ ΔΙΑΚΟΠΤΩΝ	ΕΠΙΠΕΔΟ ΤΑΣΗΣ V_{ao}	ΕΠΙΠΕΔΟ ΤΑΣΗΣ V_{aN}	ΕΠΙΠΕΔΟ ΤΑΣΗΣ V_{ab}
1	$[0, \pi/3]$	S1, S6	$+V_{in}/2$	$+V_{in}/2$	$+V_{in}$
2	$[\pi/3, 2\pi/3]$	S1, S2	$+V_{in}/2$	$+V_{in}/2$	$+V_{in}/2$
3	$[2\pi/3, \pi]$	S3, S2	0	0	$-V_{in}/2$
4	$[\pi, 4\pi/3]$	S3, S4	$-V_{in}/2$	$-V_{in}/2$	$-V_{in}/2$
5	$[4\pi/3, 5\pi/3]$	S5, S4	$-V_{in}/2$	$-V_{in}/2$	$-V_{in}/2$
6	$[5\pi/3, 2\pi]$	S5, S6	0	0	$+V_{in}/2$

Οι κυματομορφές που διακρίνονται περιγράφουν τη λειτουργία και τη συμπεριφορά του εν λόγω τριφασικού αντιστροφέα για ωμικό συμμετρικό φορτίο. Ακόμη, εμφανίζονται οι κυματομορφές των παλμών έναυσης των ημιαγωγικών στοιχείων με διάρκεια εύρους 120° , ώστε σε μία περίοδο της τάσης εξόδου διακρίνονται έξι διαστήματα λειτουργίας.

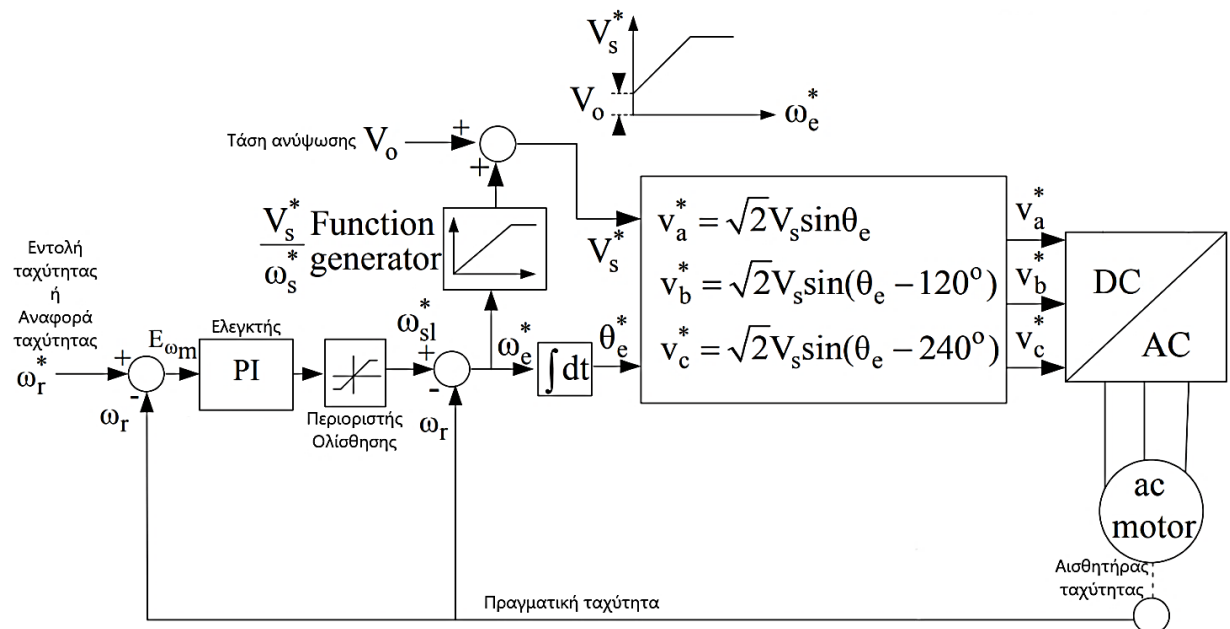


Σχήμα 2.13 : Κυματομορφές τριφασικού αντιστροφέα και συμμετρικού φορτίου για παλμούς οδήγησης εύρους 120° συνδεσμολογίας αστέρα (Μανιάς, 2020)

2.4.2 Λειτουργία Τριφασικού Αντιστροφέα με την τεχνική ελέγχου SPWM

Σύμφωνα με τη λειτουργία του τριφασικού αντιστροφέα για παλμούς οδήγησης εύρους 120°, διακρίνονται οι κυματομορφές της τάσης εξόδου με τη μορφή τετραγωνικού κύματος. Το γεγονός αυτό συμβάλει στην έγχυση ανώτερων αρμονικών στο σύστημα οδήγησης του κινητήρα σύμφωνα με τις αναλύσεις των σειρών Fourier. Για τη μείωση και την εξάλειψη της παρουσίας των ανώτερων αρμονικών εφαρμόζεται η τεχνική της Ημιτονοειδούς Διαμόρφωσης Εύρους Παλμών (SPWM).

Σύμφωνα με τη συγκεκριμένη τεχνική μείωσης ανώτερων αρμονικών επιτυγχάνεται η ελάττωση της αρμονικής παραμόρφωσης των ρευμάτων του κινητήρα, καθώς βελτιώνεται σημαντικά ο συντελεστής συνολικής αρμονικής παραμόρφωσης (T.H.D.).



Σχήμα 2.14: Λειτουργικό διάγραμμα της τεχνικής βαθμωτού ελέγχου με προδιαγεγραμμένο λόγο τάσης προς συχνότητα τροφοδοσίας με χρήση τριφασικού αντιστροφέα πηγής τάσης (Μανιάς, 2020)

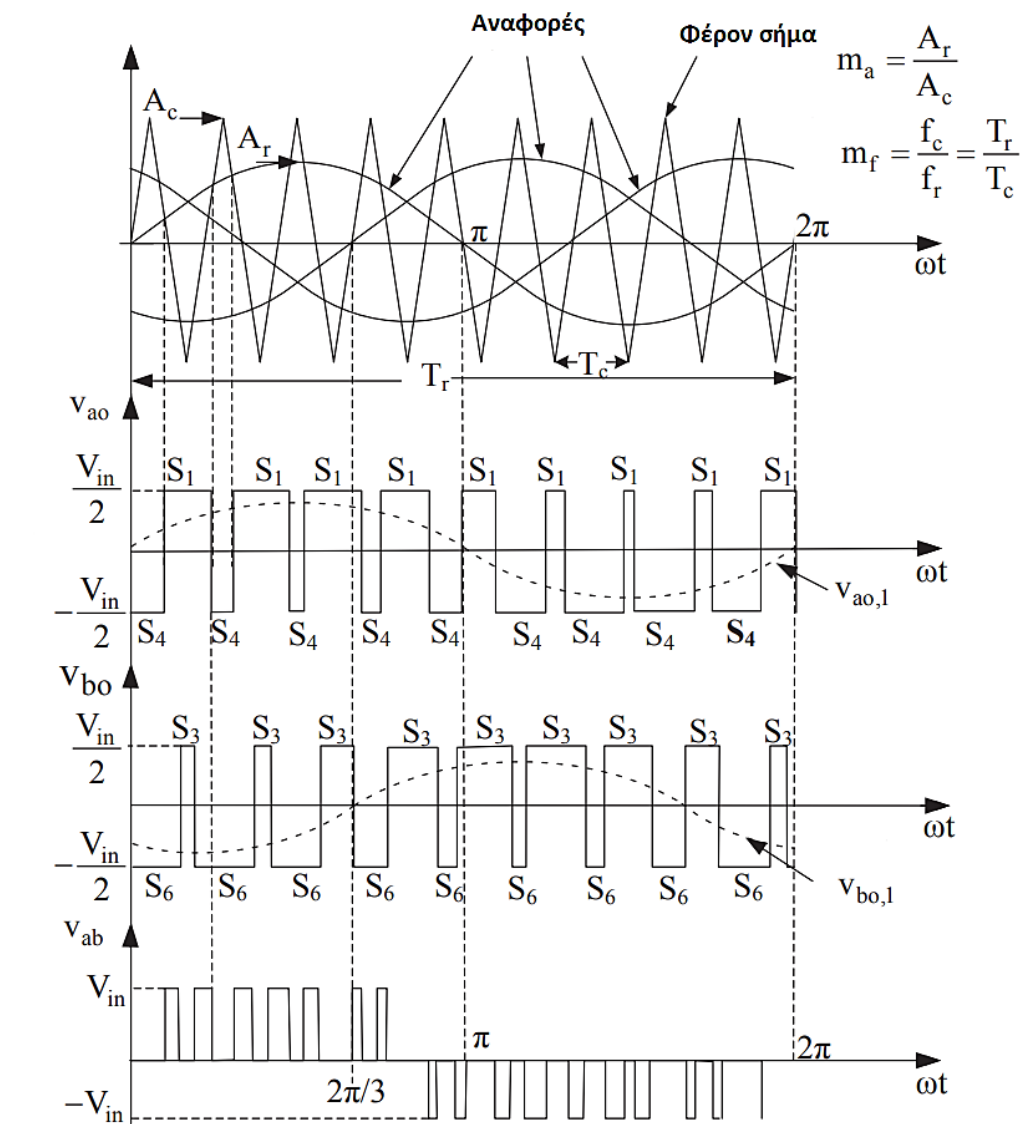
Αναλυτικότερα, χρησιμοποιούνται τρία ημιτονοειδή κύματα αναφοράς με διαφορά φάσης 120°, εφαρμόζοντας ένα για κάθε φάση και ένα τριγωνικό κύμα φέροντος σήματος. Η τριγωνική κυματομορφή φέροντος σήματος συγκρίνεται με μια ημιτονοειδή κυματομορφή αναφοράς, παράγοντας τα τελικά σήματα παλμοδότησης των ημιαγωγικών διακοπών του αντιστροφέα για την αντίστοιχη φάση. Η έναυση των ημιαγωγικών διακοπών πραγματοποιείται στα χρονικά διαστήματα για τα οποία τέμνονται οι κυματομορφές αναφοράς με την κυματομορφή του φέροντος σήματος.

Ακολουθώς, το πλάτος του ημιτονοειδούς κύματος αναφοράς A_r μεταβάλλεται σε σύγκριση με το πλάτος του σταθερού τριγωνικού σήματος A_c . Προκύπτουν, λοιπόν, οι κανονικοποιημένες τιμές πλάτους και συχνότητας, ορίζοντας τον συντελεστή

διαμόρφωσης πλάτους m_a και τον συντελεστή διαμόρφωσης συχνότητας m_f , αντίστοιχα.

$$m_a = \frac{A_r}{A_c} \quad (2.28)$$

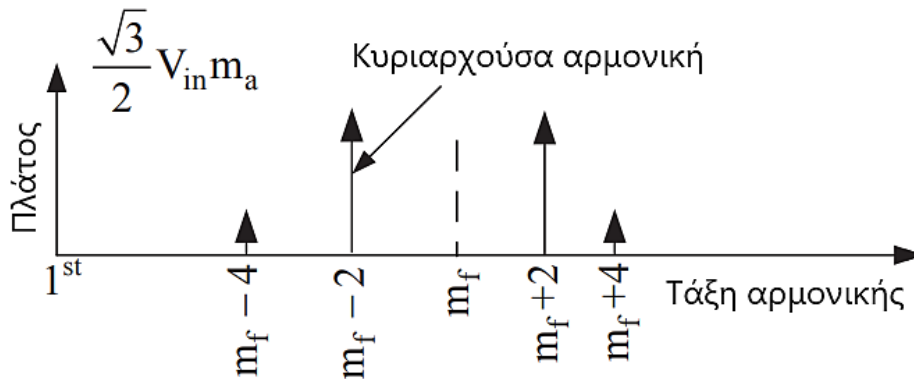
$$m_f = \frac{f_c}{f_r} = \frac{T_r}{T_c} \quad (2.29)$$



Σχήμα 2.15 : Κυματομορφές τριφασικού αντιστροφέα με την τεχνική SPWM (Μανιάς, 2020)

Παραπάνω αναπαριστούνται αρχικά οι κυματομορφές αναφορών και φέροντος, καθώς και οι φασικές τάσεις εξόδου των τριών ημιγεφυρών σε σχέση με τον ουδέτερο V_{ao} και V_{bo} αντίστοιχα. Οι κυματομορφές V_{ao} , V_{bo} και V_{co} παρουσιάζουν διαφορά

φάσης 120 μοιρών μεταξύ τους, καθώς μέσω αυτών βρίσκονται οι πολικές τάσεις εξόδου του αντιστροφέα. Στην τελευταία γραφική παράσταση, επίσης, διακρίνεται η τελική κυματομορφή της πολικής τάσης εξόδου V_{ab} σύμφωνα με τον ορισμό της τεχνικής SPWM.



Σχήμα 2.16 : Φάσμα συχνотήτων της πολικής τάσης εξόδου V_{ab} (Μανιάς, 2020)

Σύμφωνα με τα κανονικοποιημένα πλάτη αρμονικών συνιστωσών καταγράφεται το πλάτος της βασικής ή θεμελιώδους αρμονικής συνιστώσας που αφορά την πολική τάση εξόδου του τριφασικού αντιστροφέα:

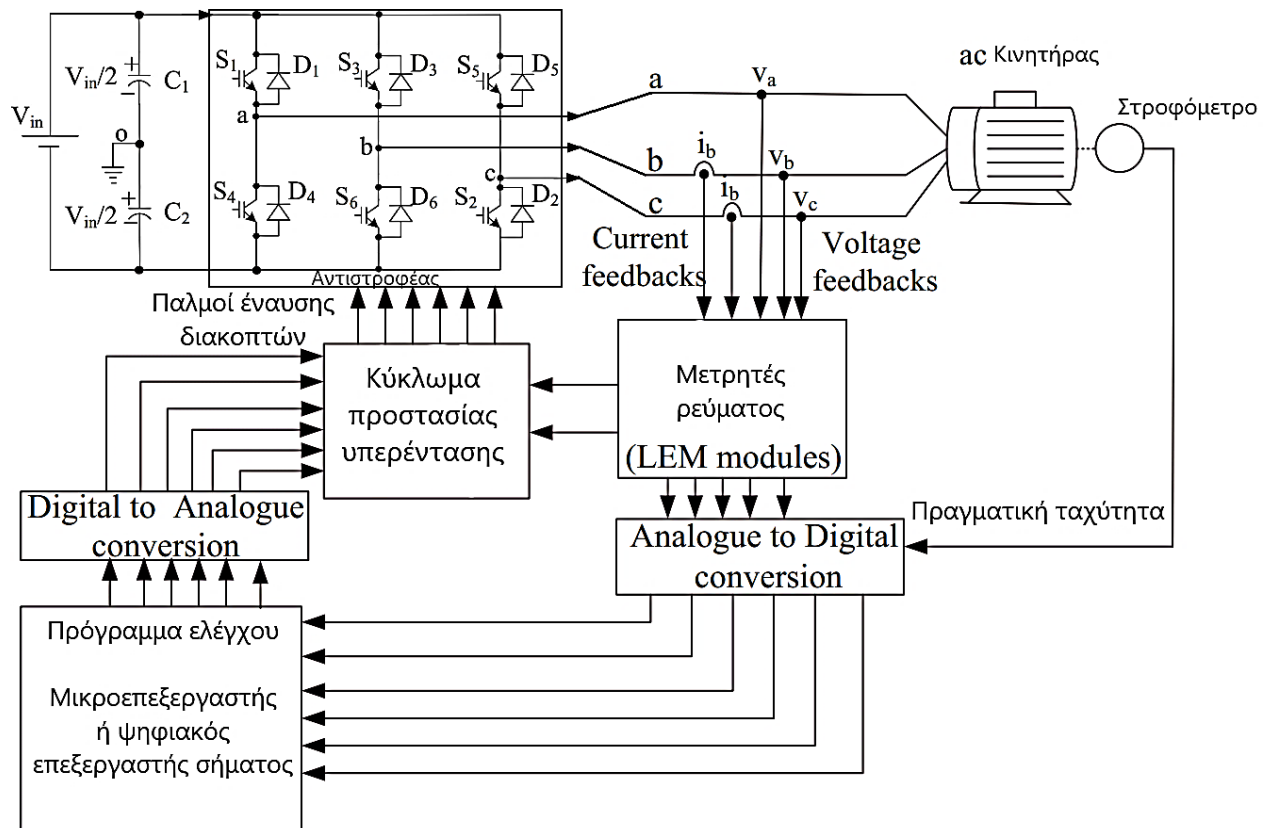
$$V_{ab,1} = \frac{\sqrt{3}}{2} V_{in} m_a \quad (2.30)$$

όπου V_{in} η συνεχής τάση εισόδου του τριφασικού αντιστροφέα

Από τη συγκεκριμένη σχέση διαπιστώνεται πως το πλάτος της βασικής αρμονικής συνιστώσας της πολικής τάσης εξόδου εξαρτάται από τον συντελεστή διαμόρφωσης πλάτους m_a , επιτυγχάνοντας τον έλεγχο της τάσης εξόδου του αντιστροφέα.

2.4.3 Διάγραμμα κινητήριου συστήματος επαγωγικού κινητήρα

Τελικά, απεικονίζεται το δομικό διάγραμμα του κινητήριου συστήματος οδήγησης ασύγχρονου τριφασικού κινητήρα μέσω ενός αμφίπλευρου τριφασικού αντιστροφέα παρέχοντας τη δυνατότητα αμφίπλευρης ροής ισχύος. Όπως έχει, ήδη, αναλυθεί μέσω ορισμένων τεχνικών ελέγχου που εφαρμόζονται στον εν λόγω αντιστροφέα επιτυγχάνεται ο έλεγχος της ενεργούς τιμής της τάσης και της συχνότητας του ασύγχρονου κινητήρα. Για τον βέλτιστο έλεγχο του αντιστροφέα με την ελάχιστη αρμονική παραμόρφωση του συστήματος και τη βέλτιστη διακοπτική λειτουργία των ημιαγωγικών διακοπών όπως IGBTs, MOSFETs, θυρίστορ ή GTOs εφαρμόζεται η τεχνική SPWM.



Σχήμα 2.17 : Δομικό διάγραμμα συστήματος ηλεκτρικής κίνησης επαγωγικού κινητήρα.
(Μανιάς, 2020)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο

Αναγεννητική Πέδηση σε Σύγχρονες Μηχανές

3.1 Εισαγωγή

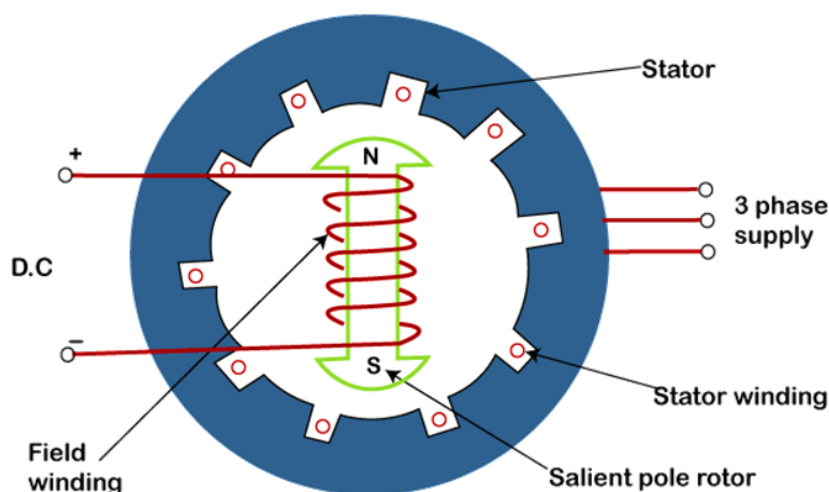
Οι σύγχρονοι κινητήρες έχουν συγκεντρώσει μεγάλο επιστημονικό ενδιαφέρον, ενώ ήδη χρησιμοποιούνται σε πρακτικές εφαρμογές με πολύ καλά αποτελέσματα. Χαρακτηρίζονται για την απλότητά τους και την αξιοπιστία τους, ενώ παρουσιάζουν μεγάλη απόδοση.

3.2 Θεωρητική ανάλυση

Οι σύγχρονες μηχανές περιστρέφονται με τη σύγχρονη ταχύτητα της ονομαστικής τους λειτουργίας. Η λειτουργία τους στηρίζεται στην αλληλεπίδραση δύο πεδίων, του πεδίου διέγερσης και του πεδίου τυμπάνου. Ένας σύγχρονος κινητήρας αποτελεί μια μηχανή σταθερής ταχύτητας και περιστρέφεται πάντα με μηδενική ολίσθηση στη σύγχρονη ταχύτητα, η οποία εξαρτάται από τη συχνότητα και τον αριθμό των πόλων. Ο σύγχρονος κινητήρας εργάζεται είτε ως κινητήρας είτε ως γεννήτρια επιτυγχάνοντας αναγεννητική πέδηση.

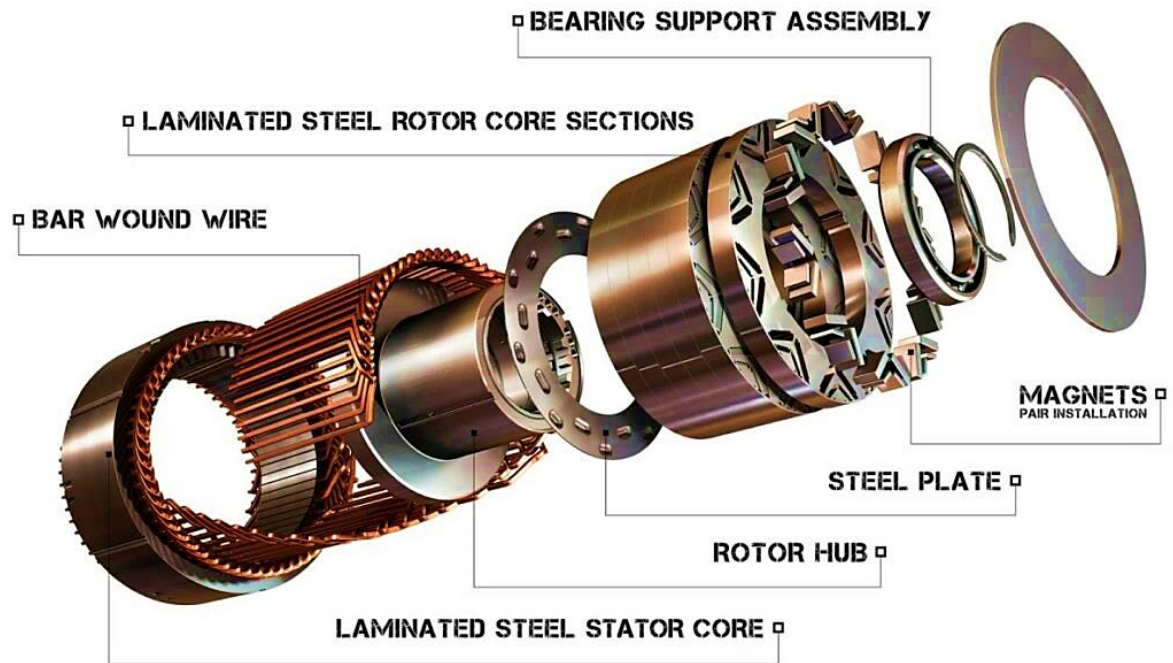
3.2.1 Σύγχρονη Τριφασική Μηχανή

Οι σύγχρονες μηχανές, αποτελούν μηχανές εναλλασσόμενου ρεύματος διπλής τροφοδότησης, η ταχύτητα των οποίων στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας εξαρτάται από τη συχνότητα του ρεύματος τυμπάνου. Με αυτόν τον τρόπο, ανεξάρτητα από το είδος της λειτουργίας της μηχανής ως κινητήρα ή ως γεννήτρια, ο δρομέας στρέφεται πάντα με σταθερό (σύγχρονο) αριθμό στροφών ή βρίσκεται σε συγχρονισμό με το στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο των τυλιγμάτων του τυμπάνου. Έτσι, το στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο στο διάκενο της μηχανής και ο δρομέας, στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας, στρέφονται με την ίδια ταχύτητα.



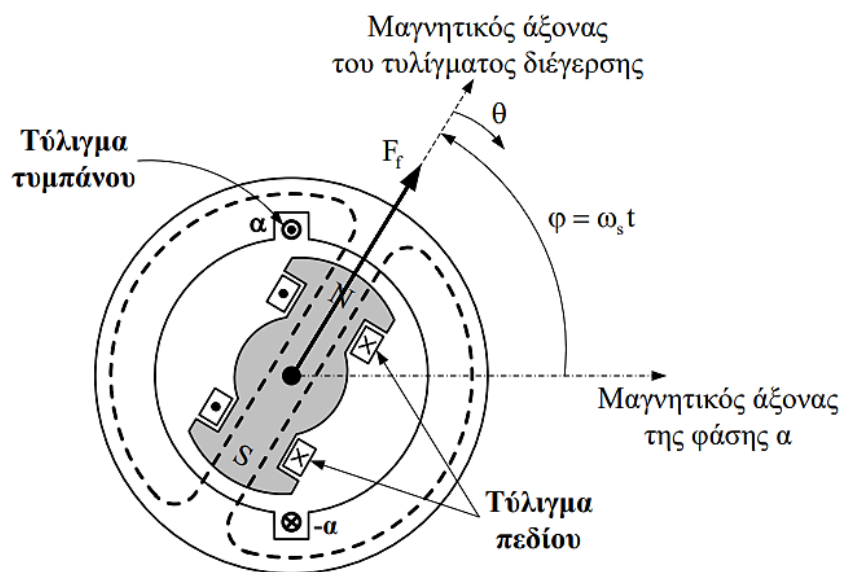
Εικόνα 3-1 : Διάταξη Σύγχρονης Μηχανής (javapoint.com, 2019)

Η ηλεκτρομηχανική μετατροπή της ενέργειας στις σύγχρονες μηχανές, επιτυγχάνεται μέσω μιας συγκεκριμένης ταχύτητας περιστροφής, τη σύγχρονη ταχύτητα. Η σύγχρονη ταχύτητα επηρεάζεται από τον αριθμό των μαγνητικών πόλων των τυλίγματος και από τη συχνότητα των ρευμάτων του τυλίγματος τυμπάνου.



Εικόνα 3-2 : Μέρη Σύγχρονης Μηχανής (Linqiip.com, 2021)

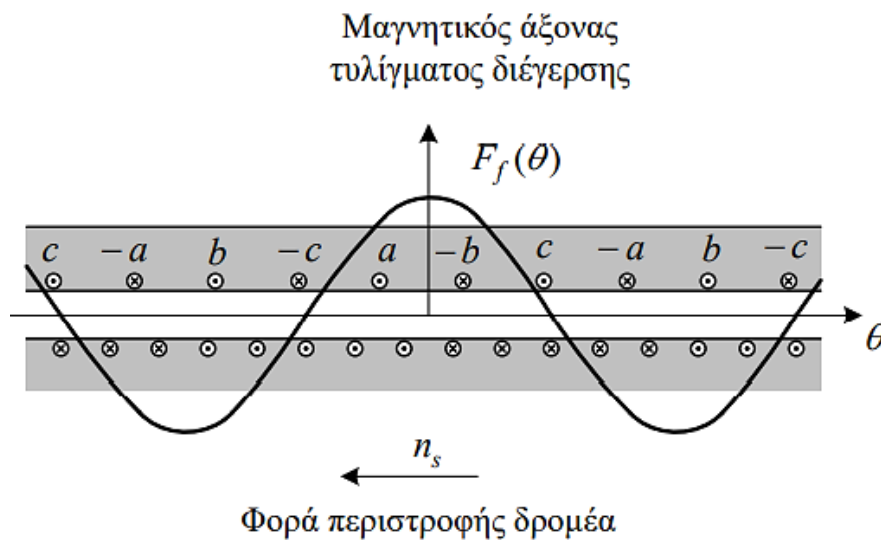
Από κατασκευαστική σκοπιά, οι σύγχρονες μηχανές εναλλασσόμενου ρεύματος αποτελούνται από δύο τυλίγματα, το τύλιγμα τυμπάνου το οποίο είναι απόλυτα όμοιο με εκείνο των ασύγχρονων μηχανών και το τύλιγμα του δρομέα.



Σχήμα 3.1 : Στοιχειώδης Σύγχρονη Μηχανή (Μαλατέστας, 2021)

Το τυλίγμα τυμπάνου βρίσκεται σχεδόν πάντα στον στάτη, ενώ διανέμεται τριφασικά για κάθε φάση με τους μαγνητικούς άξονες μετατιθέμενους ηλεκτρικά κατά 120° . Το τυλίγμα του δρομέα, αναφέρεται και ως τυλίγμα διέγερσης ή τυλίγμα πεδίου, καθώς διεγείρεται από συνεχές ρεύμα πεδίου (ρεύμα διέγερσης) το οποίο άγεται προς το τυλίγμα μέσω ψυκτρών. Οι ψύκτρες βρίσκονται στον δρομέα και ολισθαίνουν επί δακτυλίων συλλέκτη παράγοντας το μαγνητικό πεδίο του ρεύματος διέγερσης (Μαλατέστας, 2019).

Η παρακάτω θεμελιώδης συνιστώσα παριστάνει την κατανομή στον χώρο της μαγνητεγερτικής δύναμης του τυλίγματος χαμηλής ισχύος του δρομέα συναρτήσει της γωνίας θ της περιφέρειας του διακένου.



Σχήμα 3.2 : Θεμελιώδης συνιστώσα της μαγνητεγερτικής δύναμης (Μ.Ε.Δ.) του τυλίγματος του δρομέα (Μαλατέστας, 2019)

Η αναλυτική έκφραση της θεμελιώδους συνιστώσας χώρου της μαγνητεγερτικής δύναμης Μ.Ε.Δ. του δρομέα, ο οποίος κινείται με σταθερή ταχύτητα, εκφράζεται μέσω της σχέσης:

$$F_f(\theta) = \frac{4}{\pi} K_{wf} \frac{N_f}{P} I_f \cos\theta = F_fm \cos\theta \quad (3.1)$$

όπου:

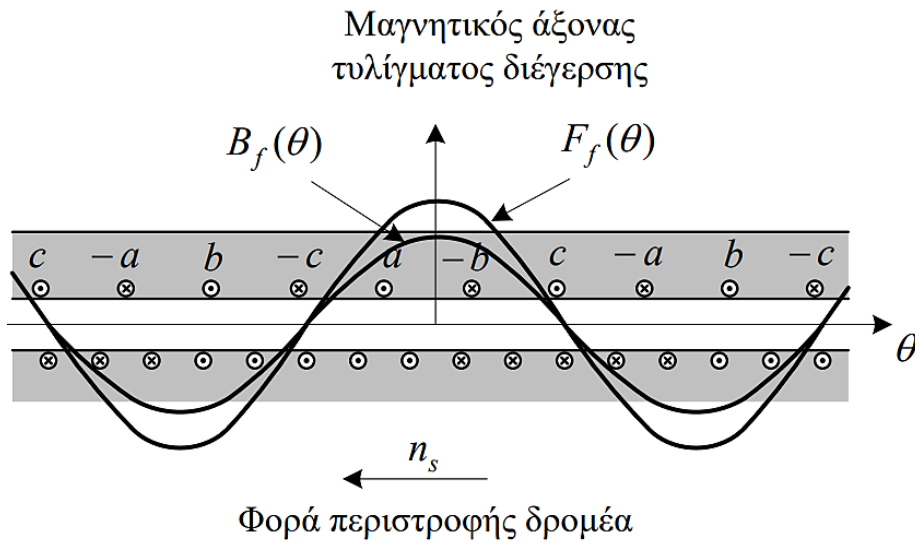
K_{wf} = ο συντελεστής του τυλίγματος διέγερσης

N_f = ο συνολικός αριθμός των σε σειρά ελιγμάτων του τυλίγματος

P = ο αριθμός των πόλων

I_f = το ρεύμα τυλίγματος διέγερσης (Α)

Θεωρείται πως ο δρομέας, περιστρέφεται με τη σύγχρονη ταχύτητα, μέσω μηχανικής ενέργειας που μεταφέρεται στον άξονα της μηχανής. Ακόμη, αγνοούνται φαινόμενα κορεσμού των σιδηρομαγνητικών υλικών στην περιφέρεια του διακένου. Η κυματομορφή ακτινικής διανομής της πυκνότητας της μαγνητικής ροής συναρτήσει της γωνίας θ διακρίνεται παρακάτω σε σχέση με την αντίστοιχη κυματομορφή της μαγνητεγερτικής δύναμης (Μαλατέστας, 2019).

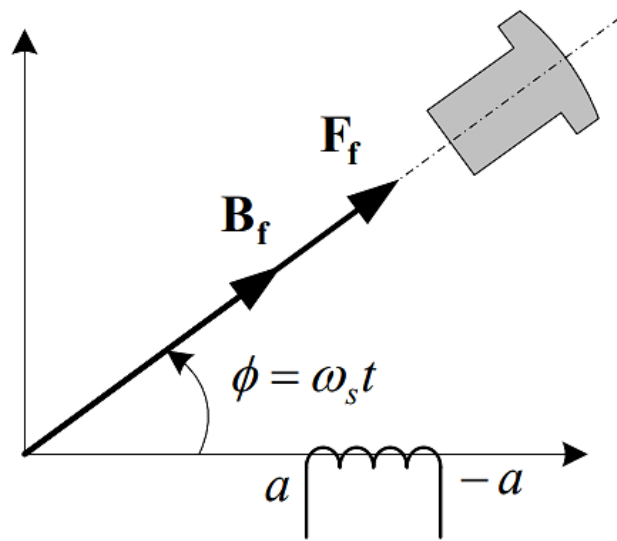


Σχήμα 3.3 : Θεμελιώδεις συνιστώσες κυμάτων χώρου της πυκνότητας μαγνητικής ροής και της Μ.Ε.Δ. του τυλίγματος διέγερσης (Μαλατέστας, 2019)

Μέσω κατάλληλης διαμόρφωσης των πόλων επιτυγχάνεται η προσέγγιση της ημιτονοειδούς κυματομορφής πυκνότητας μαγνητικής ροής. Αναλυτικότερα, η έκφραση της θεμελιώδους συνιστώσας της χωρικής κατανομής της πυκνότητας της μαγνητικής ροής στο διάκενο της μηχανής διακρίνεται στην κάτωθι σχέση:

$$B_f(\theta) = B_{fm} \cos \theta \quad (3.2)$$

Πραγματοποιείται η γραφική αναπαράσταση των στρεφόμενων χωρικών διανυσμάτων μέσω διανυσματικών μεθόδων. Οι ημιτονοειδείς κυματομορφές προστίθενται με τρόπο ώστε οι γωνιακές θέσεις αναλογούν στις θέσεις των θετικών κορυφών αυτών. Έτσι, μέσω των φασητετών καταγράφονται οι αντίστοιχες μέγιστες τιμές των κυματομορφών που μελετώνται.



Σχήμα 3.4 : Στρεφόμενα διανύσματα χώρου της πυκνότητας μαγνητικής ροής και της Μ.Ε.Δ. του τυλίγματος διέγερσης (Μαλατέστας, 2019)

Θεωρώντας το μαγνητικό πεδίο που παράγεται από τα ρεύματα τυμπάνου, καθώς και το συνισταμένο μαγνητικό πεδίο στο διάκενο, μελετάται η αντίδραση τυμπάνου για τριφασική τροφοδοσία. Το τριφασικό τύλιγμα της μηχανής σε λειτουργία φορτίου παράγει σταθερό μαγνητικό πεδίο, το οποίο περιστρέφεται στη σύγχρονη ταχύτητα.

Προκύπτει η σχέση της μέγιστης τιμής της συνισταμένης μαγνητεγερτικής δύναμης:

$$F_m = \frac{3}{2} \left(\frac{4}{\pi} K_{wa} \frac{N_p h}{P} \right) I_m \quad (3.3)$$

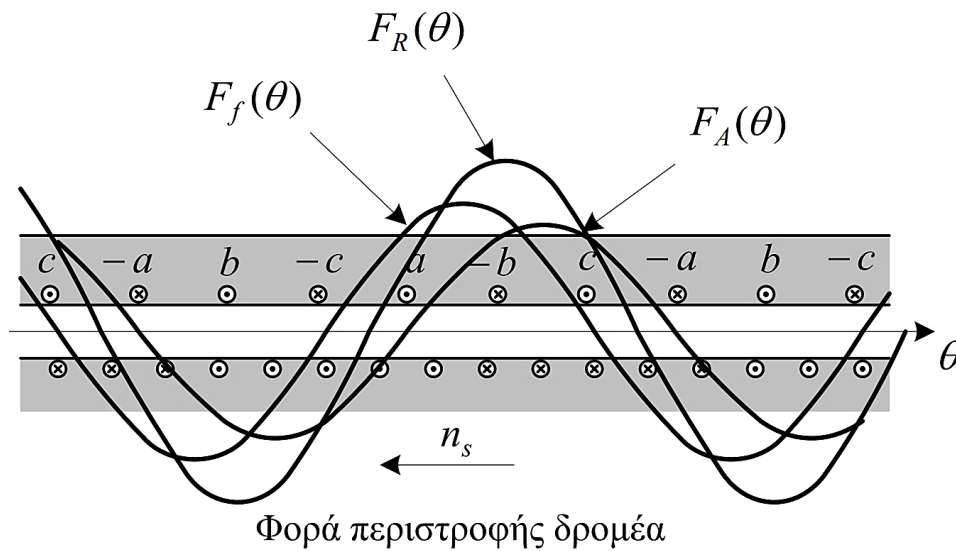
όπου

K_{wa} = ο συντελεστής του τυλίγματος τυμπάνου

$N_p h$ = ο συνολικός αριθμός των σε σειρά ελιγμάτων του τυλίγματος τυμπάνου ανά φάση

P = ο αριθμός των πόλων

I_m = η μέγιστη τιμή του ρεύματος τυμπάνου (A)

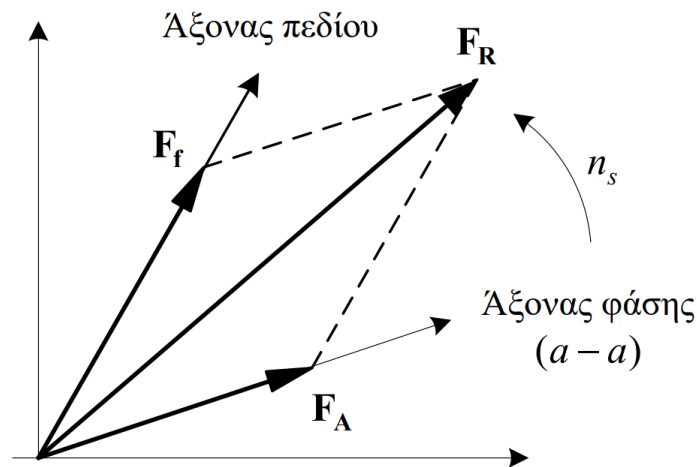


Σχήμα 3.5 : Κύμα χώρου συνισταμένης θεμελιώδους συνιστώσας των Μ.Ε.Δ. στο διάκενο της μηχανής (Μαλατέστας, 2021)

Προκύπτει το διανυσματικό άθροισμα των θεμελιωδών συνιστωσών μαγνητεγερτικών δυνάμεων των τυλιγμάτων τυμπάνου \mathbf{F}_A και διέγερσης \mathbf{F}_f αντίστοιχα στο διάκενο της μηχανής, δημιουργώντας το συνιστάμενο θεμελιώδες κύμα Μ.Ε.Δ. στο διάκενο της μηχανής που περιγράφεται παρακάτω.

$$\mathbf{F}_R = \mathbf{F}_f + \mathbf{F}_A \quad (3.4)$$

Με το αντίστοιχο διανυσματικό διάγραμμα των γραφικών μιγάδων χώρου να παρουσιάζεται στο κάτωθι σχήμα.



Σχήμα 3.6 : Χωρικοί παραστατικοί μιγάδες χώρου των Μ.Ε.Δ (Μαλατέστας, 2021)

Στην περίπτωση μιας ηλεκτρικής μηχανής με P πόλους, η ηλεκτρική κυκλική συχνότητα της τάσης και του ρεύματος του τυλίγματος τυμπάνου δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$\omega = \frac{P}{2} \omega_s \quad (3.5)$$

όπου ω_s η μηχανική ταχύτητα σε ακτίνια ανά δευτερόλεπτο (rad/sec)

Ακόμη, η ηλεκτρική κυκλική συχνότητα των τυλιγμάτων του τυμπάνου δίνεται από τη σχέση:

$$\omega = 2\pi f \quad (3.6)$$

όπου f η συχνότητα δικτύου (Hz)

Τέλος, η σύγχρονη μηχανική γωνιακή ταχύτητα του δρομέα σε στροφές ανά λεπτό, περιγράφεται ως εξής:

$$n_s = \frac{120f}{P} \quad (3.7)$$

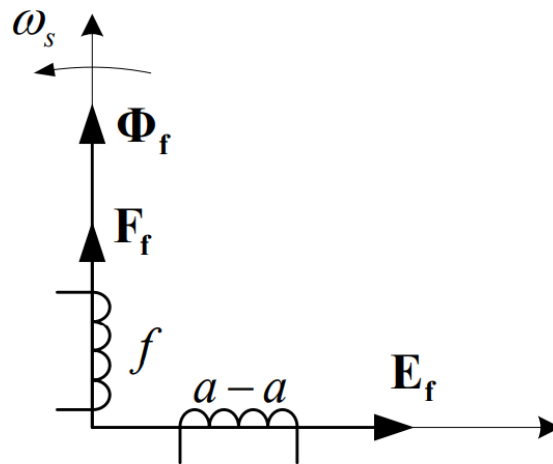
Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω η κυματομορφή πυκνότητας της μαγνητικής ροής του δρομέα περιστρέφεται στο σύγχρονο αριθμό στροφών με αναφορά μιας φάσης του στάτη. Με αυτόν τον τρόπο θεωρείται ότι το ρεύμα των τυλιγμάτων του δρομέα είναι ιδανικά συνεχές, επιτυγχάνοντας την αμετάβλητη τιμή της μαγνητικής ροής. Σύμφωνα με τον νόμο του Faraday με την εύρεση των ελιγμάτων των τυλιγμάτων του στάτη και τη μέγιστη τιμή μαγνητικής ροής του τυλίγματος διέγερσης υπολογίζεται η τάση διέγερσης σύμφωνα με την εξίσωση:

$$e_f = E_m \cos\omega t \quad (3.8)$$

Με ενεργό τιμή:

$$E_f = \frac{E_m}{\sqrt{2}} = \frac{\omega N_{ph} \Phi f}{\sqrt{2}} = 4.44 f N_{ph} \Phi f \quad (3.9)$$

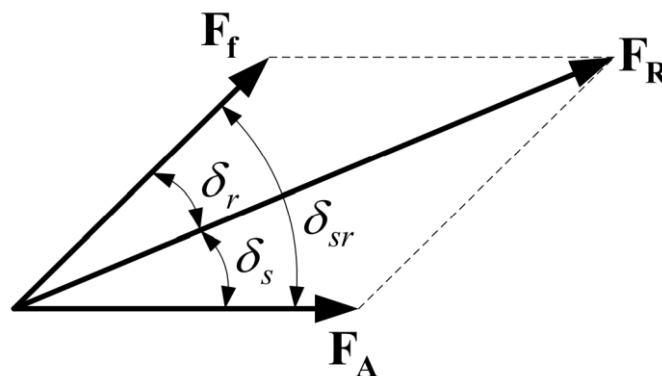
Η φορά της επαγόμενης τάσης είναι τέτοια, ώστε το ρεύμα που παράγεται να αντιτίθεται στη μεταβολή της εμπλεκόμενης μαγνητικής ροής που δημιουργεί το τύλιγμα διέγερσης του δρομέα. Ο φασιθέτης χρόνος της μαγνητικής ροής του πεδίου, προηγείται του αντίστοιχου φασιθέτη χρόνου της επαγόμενης τάσης του στάτη κατά 90° . Επομένως, παρουσιάζονται τα μιγαδικά διανύσματα που αφορούν τη μαγνητική ροή του πεδίου των τυλιγμάτων διέγερσης F_f σε σχέση με την επαγόμενη τάση στο τύλιγμα της φάσης του στάτη E_f .



Σχήμα 3.7 : Παραστατικά μιγαδικά διανύσματα (Μαλατέστας, 2021)

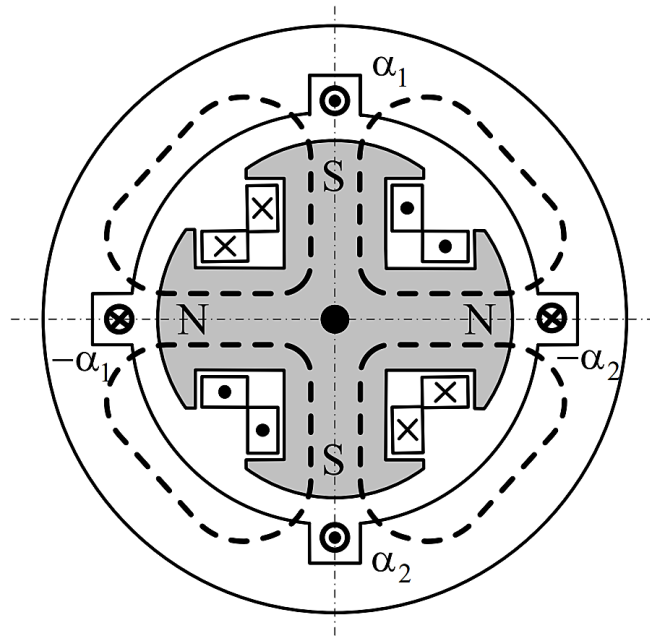
Σε λειτουργία μόνιμης κατάστασης της σύγχρονης μηχανής υπό φορτίο αποδεικνύεται πως τα μαγνητικά πεδία των τυλιγμάτων τυμπάνου και διέγερσης που παράγονται στρέφονται καθένα από τα δύο στη σύγχρονη ταχύτητα. Με αυτόν τον τρόπο, σχηματίζεται μια σταθερή γωνία μεταξύ τους είτε σε λειτουργία της μηχανής ως κινητήρα είτε ως γεννήτρια. Συγκεκριμένα, η γωνία αυτή καθορίζεται από το συντελεστή ισχύος σύμφωνα με τον οποίο συμπεριφέρεται η μηχανή.

Με αυτά τα δεδομένα η ροπή αναπτύσσεται στη διαδικασία των πεδίων του στάτη και του δρομέα να ευθυγραμμίσουν τους μαγνητικούς τους άξονες. Στην περίπτωση λειτουργίας της σύγχρονης μηχανής ως κινητήρα αποτελεί κινούσα ροπή και στην περίπτωση λειτουργίας ως γεννήτρια αποτελεί αντιδρώσα ροπή. Διακρίνονται παρακάτω γραφικά τα αντίστοιχα διανύσματα χώρου.



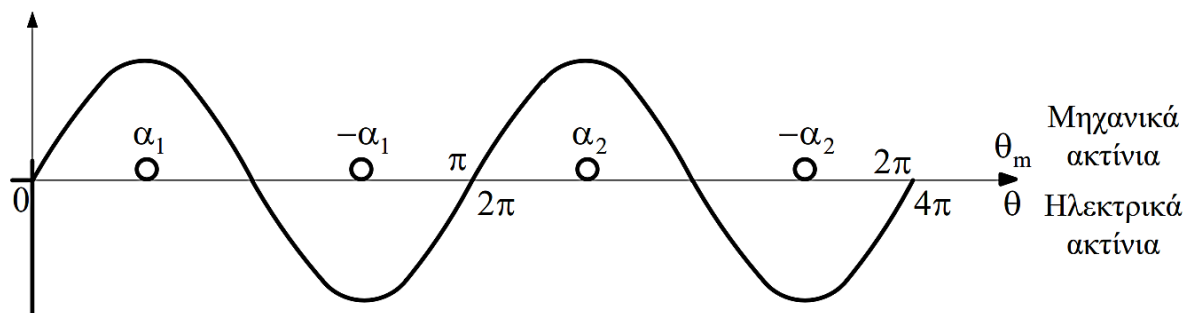
Σχήμα 3.8 : Παραστατικά διανύσματα χώρου (Μαλατέστας, 2021)

Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται μια στοιχειώδης τετραπολική σύγχρονη μηχανή. Τα πηνία του πεδίου είναι συνδεδεμένα κατάλληλα επιτυγχάνοντας τη διαδοχική εναλλαγή των πόλων. Τα τυλίγματα τύμπανου, αποτελούνται από δύο πηνία σε εν σειρά σύνδεση, α_1 , $-\alpha_1$ και α_2 , $-\alpha_2$ αντίστοιχα. Η τάση, λοιπόν, που παράγεται πραγματοποιεί δύο ολικούς κύκλους ανά περιστροφή του δρομέα με τη συχνότητα f (Hz) να έχει διπλάσια τιμή από την αντίστοιχη της ταχύτητας του δρομέα (rpm).



Σχήμα 3.9 : Στοιχειώδης 4-πολική σύγχρονη μηχανή

Ακόλουθα, διακρίνεται το ζεύγος πόλων μιας τετραπολικής μηχανής, με την έκφραση των αντίστοιχων γωνιών σε ηλεκτρικές μοίρες ή σε ηλεκτρικά ακτίνια.



Σχήμα 3.10 : Διανομή χώρου πυκνότητας ροής σε 4-πολική σύγχρονη γεννήτρια

Ένα ζεύγος πόλων μίας P-πολικής μηχανής θεωρείται πως συμπληρώνει 2π ηλεκτρικά ακτίνια (360°). Προκύπτει, λοιπόν, η γωνία σε ηλεκτρικές μοίρες για $P/2$ κύκλους μιας περιστροφής:

$$\theta_e = \frac{P}{2} \theta_m \quad (3.10)$$

όπου

θ_e η γωνία σε ηλεκτρικές μονάδες,

θ_m η μηχανική γωνία.

Τέλος, η τάση του τυλίγματος τύμπανου μιας ηλεκτρικής μηχανής P πόλων που ολοκληρώνει έναν πλήρη κύκλο, καλύπτοντας ένα ζεύγος πόλων, συμπληρώνει έναν πλήρη κύκλο $P/2$ κύκλους ανά περιστροφή. Έτσι, η συχνότητα της κυματομορφής της τάσης εισόδου περιγράφεται ως εξής:

$$f = \frac{P}{2} \frac{n}{60} \quad (3.11)$$

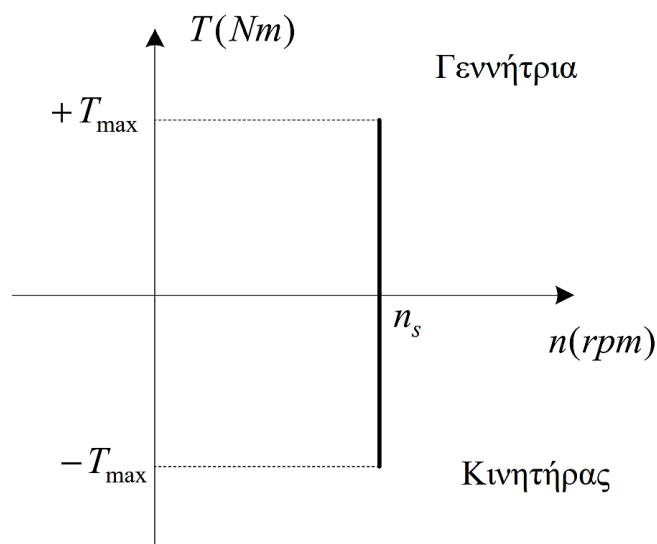
όπου:

n = η μηχανική ταχύτητα σε στροφές ανά λεπτό (rpm),

$n/60$ = η ταχύτητα σε στροφές ανά δευτερόλεπτο (rps).

3.2.2 Λειτουργική κατάσταση σύγχρονης μηχανής

Μια σύγχρονη μηχανή στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας της έχει τη δυνατότητα να λειτουργεί είτε ως γεννήτρια είτε ως κινητήρας. Με αυτόν τον τρόπο, στη λειτουργία σύγχρονης γεννήτριας η ροπή παράγεται προς την κατεύθυνση του δρομέα, επιφέροντας την προώθηση του κύματος ΜΕΔ του δρομέα σε σχέση με τη ροή διακένου. Ωστόσο, στην περίπτωση του σύγχρονου κινητήρα η ηλεκτρομηχανική ροπή ακολουθεί την κατεύθυνση περιστροφής με αντίθετη ροπή επιβράδυνσης του φορτίου, επιτυγχάνοντας την καθυστέρηση του πεδίου της διέγερσης σε σχέση με το πεδίο της αντίδρασης τυμπάνου.

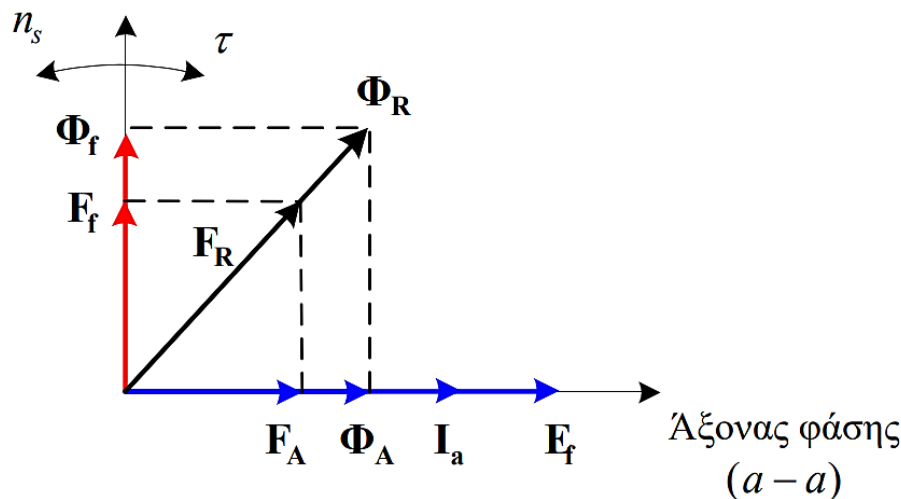


Σχήμα 3.11 : Χαρακτηριστική ροπής-στροφών

Τα μαγνητικά πεδία των τυλιγμάτων πεδίου και τυμπάνου, περιστρέφονται στην ίδια σύγχρονη ταχύτητα διατηρώντας τη συχνότητα σταθερή. Έτσι, διακρίνεται η χαρακτηριστική ροπής-στροφών, για σταθερή ταχύτητα περιστροφής, η οποία αποτελεί μια ευθεία παράλληλη στον κατακόρυφο άξονα.

3.2.3 Λειτουργία Σύγχρονης Γεννήτριας

Αρχικά, αναλύεται η περίπτωση μιας διπολικής τριφασικής σύγχρονης γεννήτριας, η οποία παρουσιάζει ωμικό χαρακτήρα. Συγκεκριμένα, το διάνυσμα διέπεται από μηδενική φασική απόκλιση μεταξύ της τάσης τυλίγματος διέγερσης και του ρεύματος τυμπάνου, ενώ οι άξονες των θεμελιωδών συνιστωσών των Μ.Ε.Δ. του πεδίου και της αντίδρασης του τυλίγματος τυμπάνου αποκλίνουν κατά 90° . Παρακάτω, διακρίνονται τα παραστατικά τους διανύσματα κάθετα στον χώρο (Μαλατέστας, 2021).

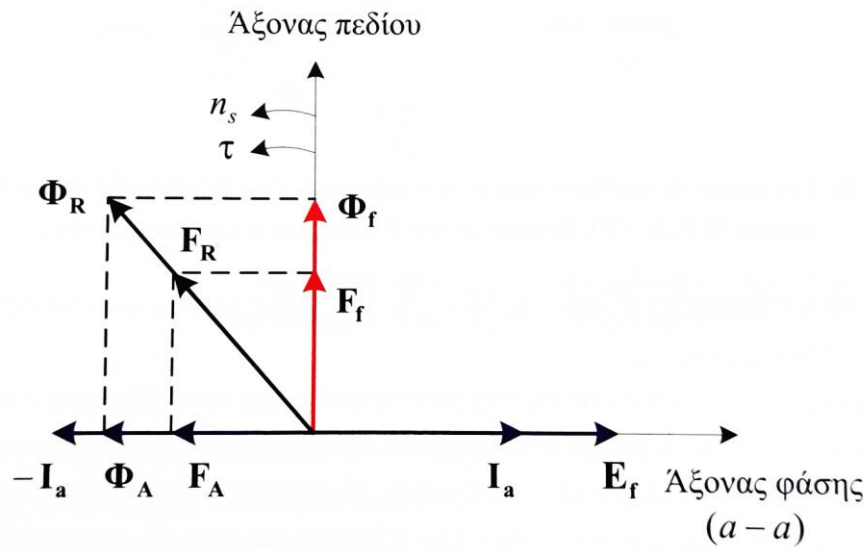


Σχήμα 3.12: Παραστατικά διανύσματα χώρου και χρόνου

Για επαγωγικό συντελεστή ισχύος η διαφορά φάσης μεταξύ των θεμελιωδών συνιστωσών των κυματομορφών χώρου των μαγνητεγερτικών δυνάμεων διέγερσης και τυμπάνου είναι μεγαλύτερη των 90° , ενώ η σύγχρονη μηχανή στις περιπτώσεις αυτές, λειτουργεί σε υπερδιέγερση, αποσκοπώντας στην αντιστάθμιση της απομαγνητίζουσας αντίδρασης του τυλίγματος τυμπάνου. Ακόμη, στην περίπτωση αυτή η τάση διέγερσης προηγείται από το ρεύμα τυμπάνου κατά το μέτρο της γωνίας ϕ που προβάλλεται στο κάτωθι σχήμα.

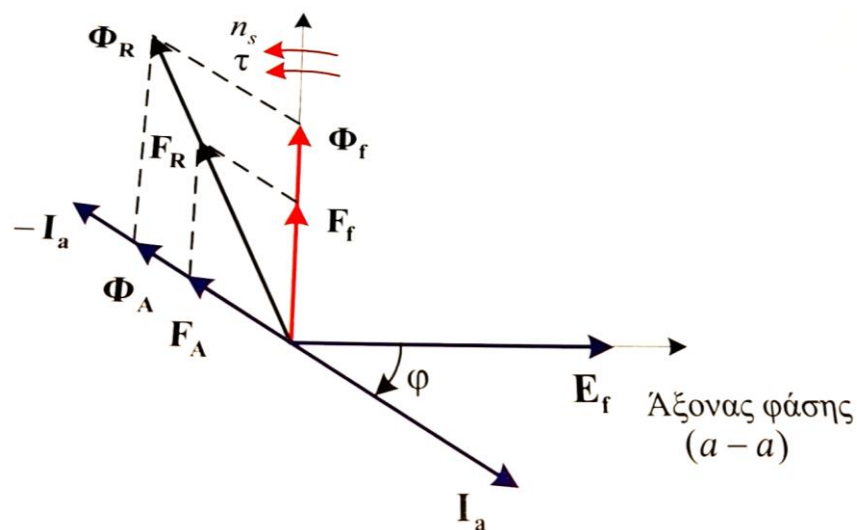
3.2.4 Λειτουργία Σύγχρονου Κινητήρα

Ακόλουθα, αναλύεται η περίπτωση τριφασικού σύγχρονου κινητήρα, ο οποίος παρουσιάζει ωμικό χαρακτήρα. Συγκεκριμένα, η επαγόμενη τάση διέγερσης παρουσιάζει αντίθετη κατεύθυνση από το ρεύμα τυμπάνου, ενώ οι άξονες των θεμελιωδών συνιστωσών των Μ.Ε.Δ. του πεδίου διέγερσης και της αντίδρασης του τυλίγματος τυμπάνου αποκλίνουν κατά 90° . Παρακάτω, διακρίνονται τα παραστατικά τους διανύσματα κάθετα στο χώρο.

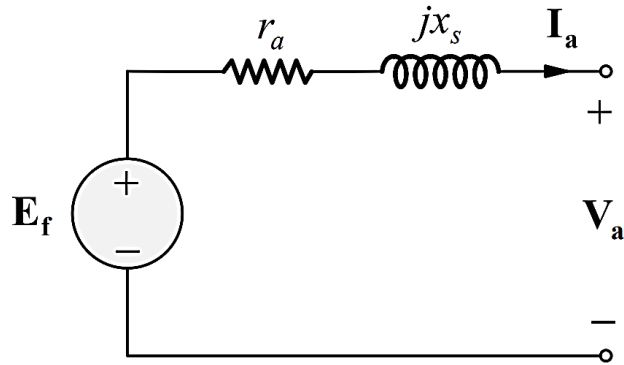


Σχήμα 3.15: Παραστατικά διανύσματα χώρου και χρόνου

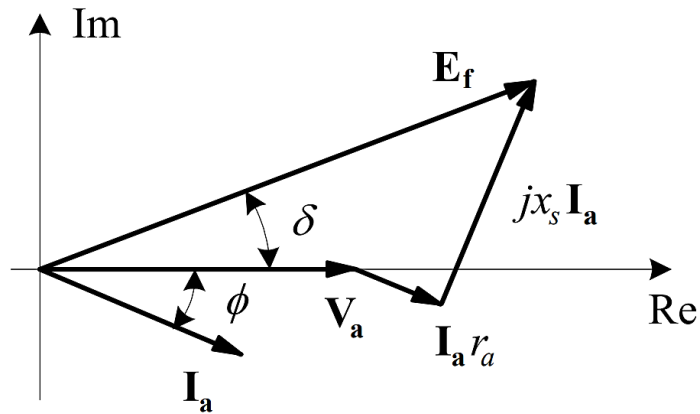
Στην περίπτωση επαγωγικού συντελεστή ισχύος η διαφορά φάσης μεταξύ των θεμελιωδών συνιστωσών των κυματομορφών χώρου των μαγνητεγερτικών δυνάμεων διέγερσης και τυμπάνου είναι μεγαλύτερη των 90° , καθώς η τάση διέγερσης προηγείται από το ρεύμα τυμπάνου κατά μία γωνία φ όπως προβάλλεται στο κάτωθι σχήμα.



Σχήμα 3.16: Παραστατικά διανύσματα χώρου και χρόνου



Σχήμα 3.18 : Το ανά φάση ισοδύναμο κύκλωμα σύγχρονης τριφασικής γεννήτριας κυλινδρικού δρομέα



Σχήμα 3.19 : Διανυσματικό διάγραμμα τάσεων-ρευμάτων σύγχρονης γεννήτριας

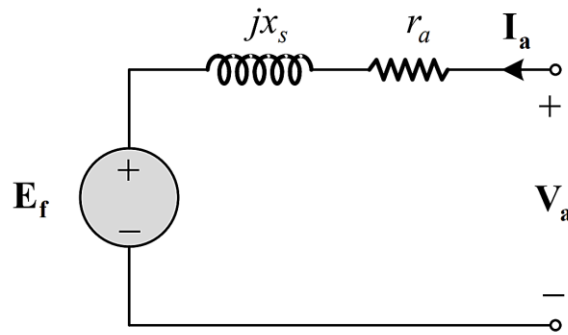
Ισχύει η εξίσωση της σύγχρονης γεννήτριας, στο πεδίο της μιγαδικής συχνότητας, για την επαγόμενη τάση διέγερσης:

$$E_f = V_a + jI_a(r_a + jx_s) \quad (3.12)$$

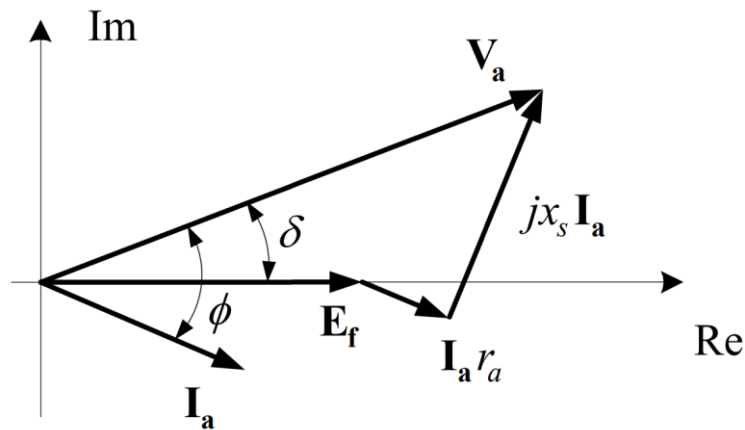
όπου $x_s = x_a + x_{al}$ η σύγχρονη αντίδραση του τυλίγματος τυμπάνου, στο πεδίο της μιγαδικής συχνότητας.

Αντίστοιχα, για λειτουργία σύγχρονου τριφασικού κινητήρα ισχύει η ακόλουθη εξίσωση, στο πεδίο της μιγαδικής συχνότητας, για την επαγόμενη τάση διέγερσης:

$$E_f = V_a - jI_a(r_a + jx_s) \quad (3.13)$$



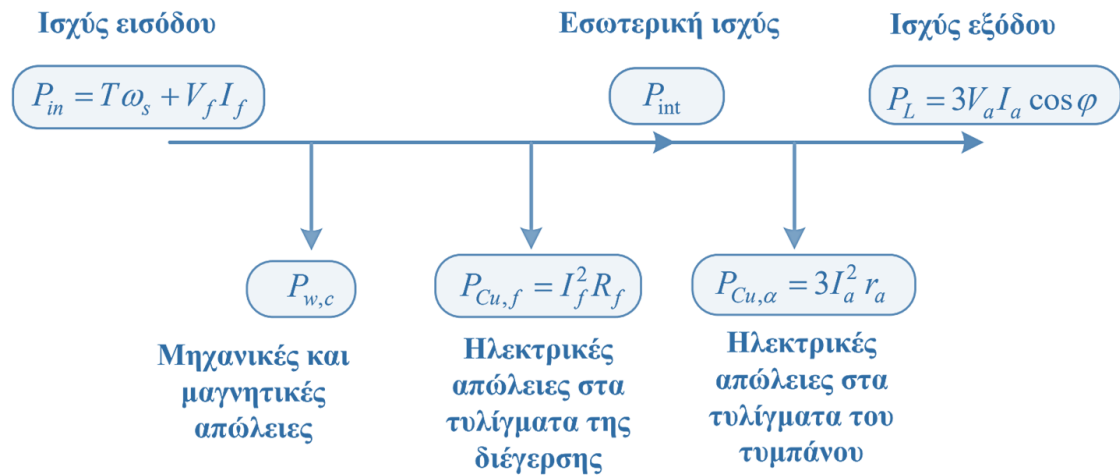
Σχήμα 3.20 : Το ανά φάση ισοδύναμο κύκλωμα σύγχρονου τριφασικού κινητήρα κυλινδρικού δρομέα



Σχήμα 3.21 : Διανυσματικό διάγραμμα τάσεων-ρευμάτων σύγχρονου τριφασικού κινητήρα

Υποθέτοντας πως η τάση και η συχνότητα διατηρούνται σταθερά, εξασφαλίζεται η σταθερή ταχύτητα περιστροφής στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας της σύγχρονης μηχανής. Είτε λειτουργεί ως γεννήτρια είτε ως κινητήρας λαμβάνεται υπόψη το όριο μέγιστης ισχύος που δύναται να αποδώσει η σύγχρονη μηχανή στο φορτίο, αποφεύγοντας τον κίνδυνο της απώλειας του συγχρονισμού της.

Παρακάτω, διακρίνονται οι μηχανικές και ηλεκτρικές απώλειες που διέπουν τη λειτουργία μιας σύγχρονης γεννήτριας. Συγκεκριμένα, οι ηλεκτρικές απώλειες αφορούν στις απώλειες χαλκού στα τυλίγματα διέγερσης και τυμπάνου και οι μηχανικές απώλειες στις απώλειες τριβών, απώλειες πυρήνα και ανεμισμού.



Σχήμα 3.22 : Διάγραμμα ισχύος σύγχρονης γεννήτριας

Αρχικά, η σχέση για την εσωτερική ή ηλεκτρομαγνητική ισχύ είναι:

$$P_{int} = 3 \operatorname{Re}\{E f I_a\}$$

Θεωρώντας πως η τάση τροφοδοσίας και η τάση διέγερσης παραμένουν σταθερά, η εσωτερική ισχύς εκφράζεται συναρτήσει της γωνίας ροπής ή γωνίας φορτίου. Λαμβάνοντας την τάση τυμπάνου σαν αναφορά και παραλείποντας την ωμική αντίσταση στο τύλιγμα τυμπάνου, προκύπτει η ακόλουθη σχέση:

$$P_{int} = PL = 3 \frac{V_a E f}{x_s} \sin \delta = P_{max} \sin \delta \quad (3.14)$$

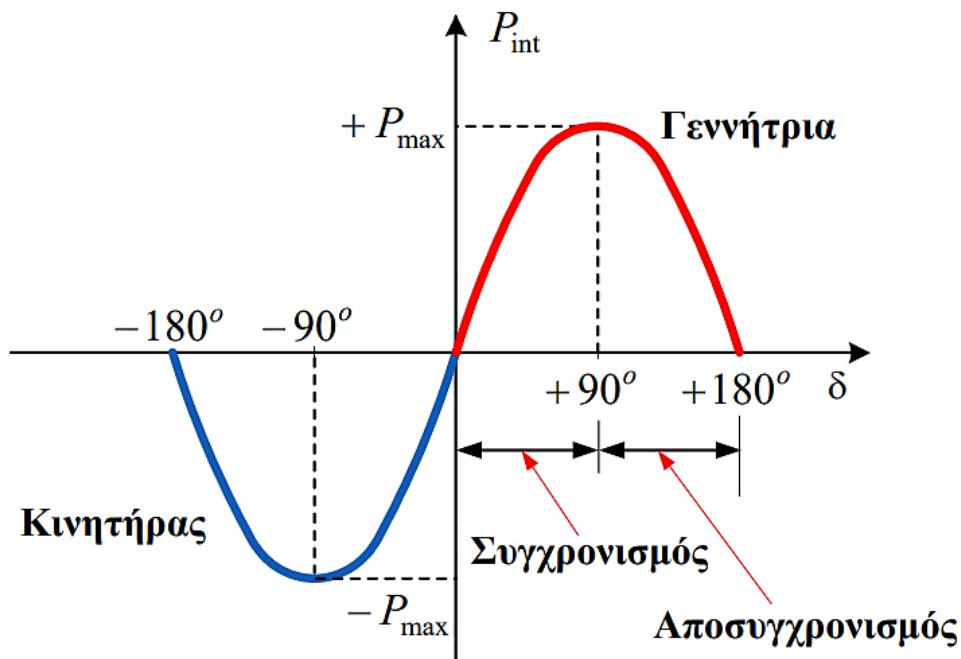
Παρακάτω διακρίνεται η ισχύς αποσυγχρονισμού, η οποία αντιπροσωπεύει τη μέγιστη εσωτερική ισχύ που δύναται να αποδώσει η σύγχρονη μηχανή είτε λειτουργεί ως γεννήτρια είτε ως κινητήρας. Σε περίπτωση ζήτησης μεγαλύτερης ισχύος, η μηχανή οδηγείται σε αποσυγχρονισμό, καθώς το στατικό όριο ευστάθειας αποτελεί η σχέση:

$$P_{max} = 3 \frac{V_a E f}{x_s} \quad (3.15)$$

Ακόλουθα, οι στροφές μιας σύγχρονης μηχανής στη μόνιμη κατάσταση ισορροπίας είναι πάντα σταθερές, από το σημείο της εν κενώ λειτουργίας έως το σημείο της μέγιστης ροπής. Λαμβάνεται λοιπόν η σχέση της εσωτερικής ή ηλεκτρομαγνητικής ροπής ως εξής:

$$T = \frac{P_{int}}{\omega_s} = \frac{3 V_a E f}{\omega_s x_s} \sin \delta = T_{max} \sin \delta \quad (3.16)$$

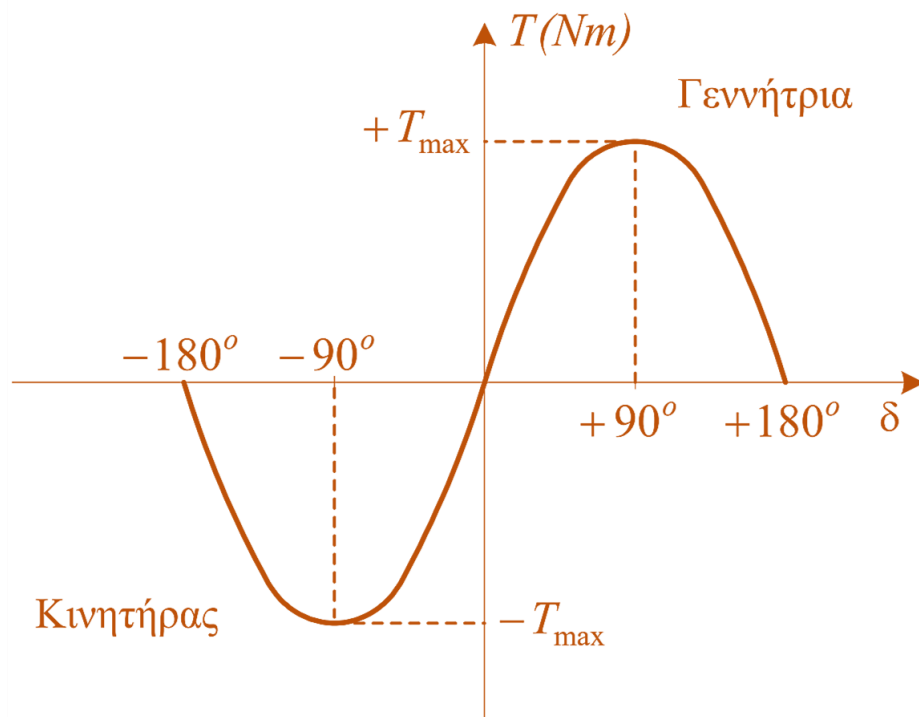
Παρακάτω, απεικονίζονται οι γραφικές παραστάσεις της εσωτερικής ισχύος και της εσωτερικής ροπής αντίστοιχα, συναρτήσει της γωνίας φορτίου, οι οποίες ακολουθούν ημιτονοειδή κυματομορφή (Μαλατέστας, 2021).



Σχήμα 3.23 : Χαρακτηριστική εσωτερικής ισχύος - γωνίας φορτίου

Για σταθερή τάση τροφοδοσίας του τυλίγματος τυμπάνου και για σταθερό ρεύμα στο τυλίγμα διέγερσης οι μεταβολές ζήτησης στην ηλεκτρομηχανική ροπή οδηγούνται εξ' ολοκλήρου από την αντίστοιχη μεταβολή της γωνίας φορτίου ή γωνίας ροπής δ , όπως παρουσιάζεται στην χαρακτηριστική ροπής-γωνίας. Συγκεκριμένα, για θετικές τιμές της γωνίας ροπής η σύγχρονη μηχανή λειτουργεί ως γεννήτρια με θετική ροπή, ενώ για αρνητικές τιμές της γωνίας ροπής η σύγχρονη μηχανή λειτουργεί ως κινητήρας με αρνητική ροπή.

Το βέλτιστο εύρος τιμών της γωνίας ροπής περιορίζεται στο διάστημα $-90^\circ \leq \delta \leq 90^\circ$, καθώς αποτελεί την περιοχή ευστάθειας της μηχανής. Η ηλεκτρομηχανική ροπή γίνεται μέγιστη για τιμή γωνίας $\delta=90^\circ$, η οποία καλείται ροπή ανατροπής ή αποσυγχρονισμού. Έτσι, η αύξηση ροπής συντελεί στην αύξηση της γωνίας φορτίου εντός των στατικών ορίων ευστάθειας -εσωτερικής ισχύος και εσωτερικής ροπής- που υπογραμμίστηκαν, καθώς τυχόν παραβίαση αυτών οδηγεί στον αποσυγχρονισμό της μηχανής προκαλώντας υπερβολική ταχύτητα επικίνδυνης περιστροφής του δρομέα.



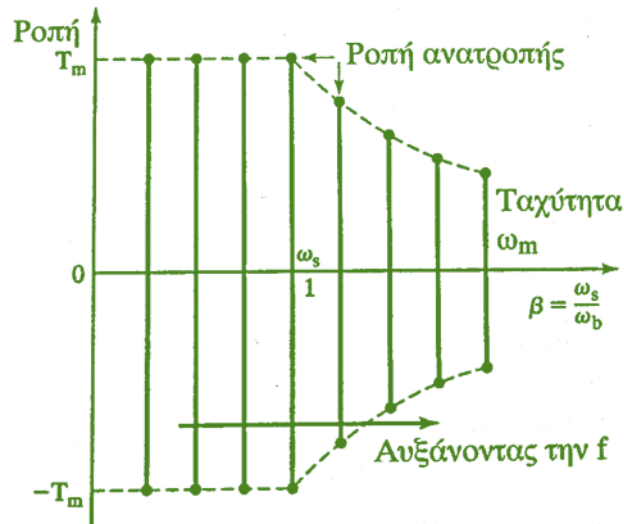
Σχήμα 3.24 : Χαρακτηριστική της εσωτερικής ροπής συναρτήσει της γωνίας φορτίου

3.4 Έλεγχος σύγχρονων μηχανών

Οι σύγχρονες μηχανές ελέγχονται μέσω διατάξεων ηλεκτρονικών ισχύος, όπως και στις επαγωγικές μηχανές, ικανοποιώντας τις ανάγκες κάθε εφαρμογής ηλεκτρικής κίνησης εντός των ορίων των περιοχών λειτουργίας. Συγκεκριμένα, όπως και στις μηχανές επαγωγής υλοποιούνται διατάξεις διπλής ροής ισχύος, στις οποίες επιτρέπεται η αναγεννητική πέδηση, ενώ με τη μεταβολή της συχνότητας και της ενεργούς τιμής της τάσης τροφοδοσίας εξυπηρετούνται οι απαιτήσεις του φορτίου.

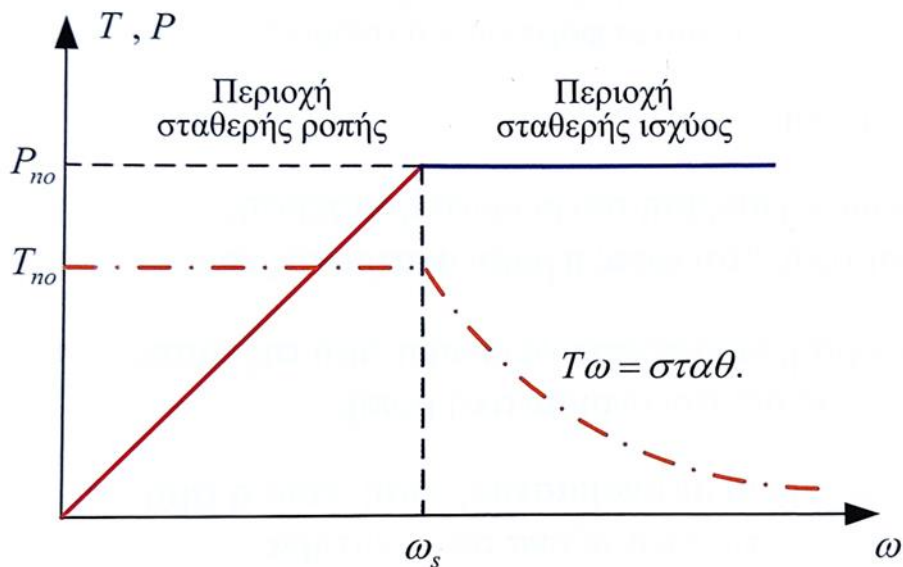
3.4.1 Έλεγχος Κλειστού Βρόχου Σύγχρονων Μηχανών

Ομοίως με τους επαγωγικούς κινητήρες, η ταχύτητα των σύγχρονων κινητήρων ελέγχεται, ρυθμίζοντας τη συχνότητα και την ενεργό τιμή της τάσης του στάτη με σκοπό τη διατήρηση σταθερού λόγου V/f . Το γεγονός αυτό συμβάλει στη διατήρηση σταθερής μαγνητικής ροής.



Σχήμα 3.25 : Μεταβολή ροπής συναρτήσει της γωνιακής ταχύτητας (Rashid, 2010)

Παράλληλα, διακρίνονται δύο λειτουργικές περιοχές, η περιοχή σταθερής ροπής και η περιοχή σταθερής ισχύος. Στην περιοχή σταθερής ροπής, όπως διακρίνεται στο κάτωθι σχήμα, η ροπή του κινητήρα παραμένει σταθερή, καθώς επιτυγχάνεται ο έλεγχος του λόγου V/f .



Σχήμα 3.26 : Περιοχές ελέγχου σύγχρονου κινητήρα (Μαλατέστας, 2021)

Στην περιοχή σταθερής ροπής, όπως παρουσιάζεται, εφαρμόζεται ο έλεγχος ταχύτητας των σύγχρονων κινητήρων εντός των ορίων βέλτιστης λειτουργίας. Συγκεκριμένα, η περιοχή που εκτείνεται μέχρι την ονομαστική ταχύτητα χαρακτηρίζεται ως περιοχή σταθερής ροπής, ενώ η υπόλοιπη ως περιοχή σταθερής ισχύος. Μ' αυτόν τον τρόπο αποφεύγεται η υπέρβαση της ονομαστικής ταχύτητας μειώνοντας τη ροπή σε σημείο που σταθεροποιείται η μηχανική ισχύς.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο

Σύγχρονοι Κινητήρες Μόνιμων Μαγνητών (SPMM)

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο παρουσιάζεται η λειτουργία της ειδικής κατηγορίας σύγχρονων κινητήρων μόνιμων μαγνητών καθώς και τα βασικά χαρακτηριστικά τους. Πρόκειται για σύγχρονους κινητήρες εναλλασσόμενου ρεύματος, όπως έχουν αναλυθεί, με τη διαφορά πως τα τυλίγματα πεδίου αντικαθίστανται από μόνιμους μαγνήτες.

4.1 Εισαγωγή

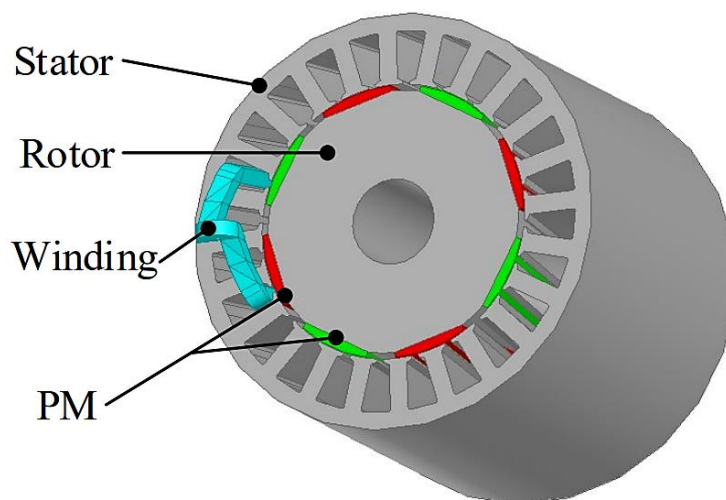
Στους σύγχρονους κινητήρες το πεδίο παρέχεται και αναπτύσσεται από μόνιμους μαγνήτες στερεωμένους επί του δρομέα. Με αυτόν τον τρόπο απουσιάζουν το τύλιγμα του πεδίου και οι δακτύλιοι ολίσθησης, συντελώντας στη μείωση των απωλειών του κινητήρα και κατά συνέπεια στην αύξηση της απόδοσής του.

4.2 Θεωρητική Ανάλυση

Οι σύγχρονοι κινητήρες μόνιμων μαγνητών βάσει του τρόπου κατασκευής του δρομέα τους διακρίνονται στις εξής κατηγορίες:

- Κινητήρας μόνιμων μαγνητών με επιφανειακούς μαγνήτες ημιτονοειδούς ροής (Surface mounted PM motors with sinusoidal flux)

Στον συγκεκριμένο τύπο κινητήρα, όπως είναι γνωστό, ο στάτης αποτελείται από ένα τριφασικό ημιτονοειδές τύλιγμα, ενώ ο δρομέας από στερεωμένους μόνιμους μαγνήτες στην επιφάνειά του με εποξική κόλλα. Στην περίπτωση αυτή η μηχανή δεν εμφανίζει εκτυπότητα, καθώς η σχετική μαγνητική διαπερατότητα του μόνιμου μαγνήτη είναι κοντά στο εύρος τιμών της μονάδας ($\mu_r \approx 1$).



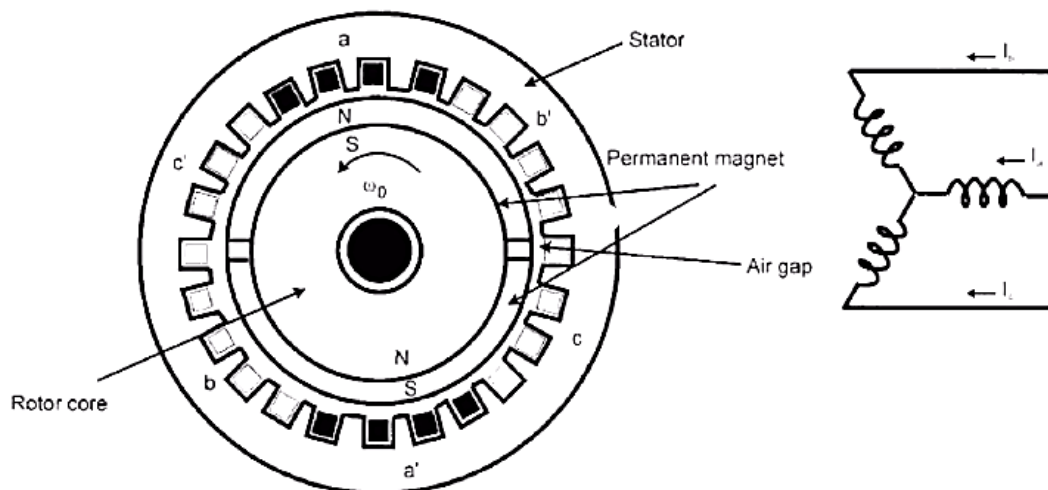
Σχήμα 4.1 : Τομή PPM επιφανειακών μαγνητών ημιτονοειδούς ροής (Researchgate.net, 2020)

- Κινητήρας μόνιμων μαγνητών με εμφυτευμένους μαγνήτες ημιτονοειδούς ροής

Εν αντιθέσει της μηχανής επιφανειακών μαγνητών ο τύπος μηχανής εσωτερικών ή εμφυτευμένων μαγνητών αποτελείται από δρομέα ο οποίος κατασκευαστικά έχει στερεωμένους τους μόνιμους μαγνήτες στο εσωτερικό του. Με αυτόν τον τρόπο, η μηχανή είναι πιο συμπαγής παρέχοντας υψηλότερες ταχύτητες λειτουργίας, ωστόσο εμφανίζει εκτυπότητα, ενώ λαμβάνει μέρος το φαινόμενο της αντίδρασης τυμπάνου λόγω του μικρού εύρους διακένου.

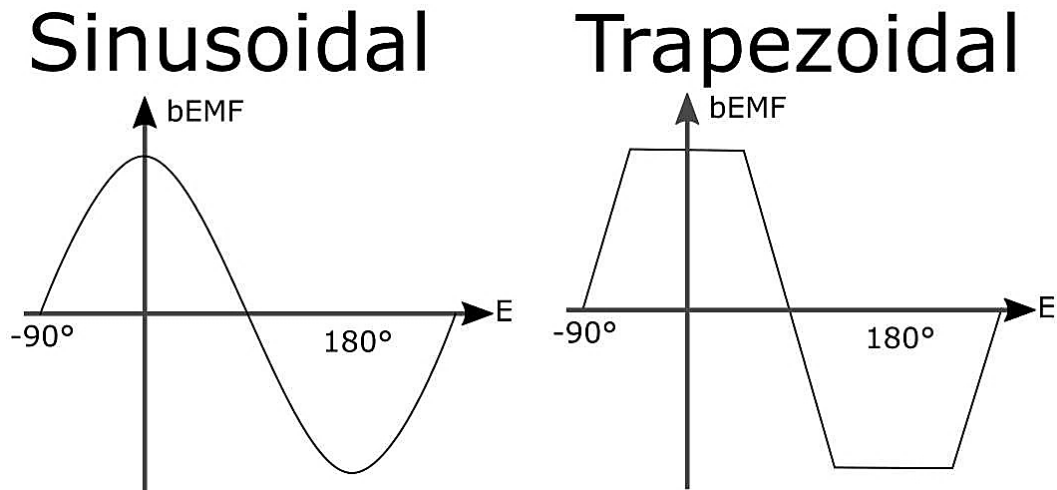
- Κινητήρας μόνιμων επιφανειακών μαγνητών τραπεζοειδούς ροής (Surface mounted PM motors with trapezoidal flux)

Οι κινητήρες μόνιμου μαγνήτη συχνά αναφέρονται και ως κινητήρες χωρίς ψήκτρες (brushless motors) ή dc κινητήρες χωρίς ψήκτρες (brushless dc motors), ενώ χρησιμοποιούνται σε αρκετές εφαρμογές ρομποτικής, διαμόρφωσης μετάλλων και σε συστήματα οδήγησης. Παρακάτω, διακρίνεται η μορφή ενός κινητήρα τραπεζοειδούς ροής με το τριφασικό τυλίγμα του στάτη συνδεδεμένο κατά αστέρα.



Σχήμα 4.2 : Εγκάρσια τομή κινητήρα PM επιφανειακών μαγνητών τραπεζοειδούς ροής (Umans, 2017)

Ακόμη, οι κινητήρες μόνιμου μαγνήτη τροφοδοτούνται είτε από ημιτονοειδές ρεύμα όπως διακρίνεται στις παραπάνω κατηγορίες είτε από ορθογωνικό ρεύμα. Στην περίπτωση που μελετάται, οι κινητήρες ορθογωνικού ρεύματος παρουσιάζουν συγκεντρωμένα τυλίγματα πλήρους βήματος στο στάτη που επάγουν μία τετραγωνική ή τραπεζοειδή τάση.



Σχήμα 4.3: Κυματομορφές Ημιτονοειδούς και Τραπεζοειδούς Ροής (bemf/blog.com, 2019)

4.2.1 Μοντέλο φασικών συνιστωσών PMSM

Αναλύεται το ισοδύναμο κύκλωμα μιας σύγχρονης μηχανής μόνιμου μαγνήτη σύμφωνα με το μοντέλο ανάλυσης σε φασικές συνιστώσες a-b-c αποσκοπώντας στη μελέτη των αρμονικών συνιστωσών. Αρχικά, παρουσιάζονται οι εξισώσεις που αφορούν τα μεγέθη της τάσης των τυλιγμάτων του στάτη για τον σύγχρονο PMSM κινητήρα (Μανιάς, 2020).

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_a & 0 & 0 \\ 0 & R_b & 0 \\ 0 & 0 & R_c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \psi_a \\ \psi_b \\ \psi_c \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

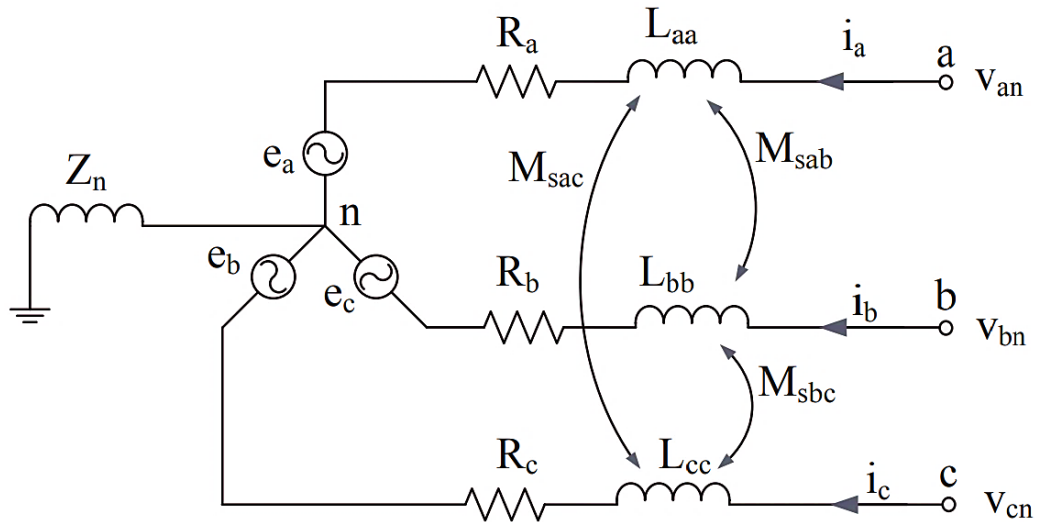
Όπου τα αντίστοιχα μεγέθη της φάσης -a επεξηγούνται ως εξής:

R_a = η αντίσταση φάσης,

i_a = το Ρεύμα φάσης,

ψ_a = η Μαγνητική ροή φάσης.

Σύμφωνα με το ακόλουθο σχήμα του κινητήρα μόνιμου μαγνήτη θα γίνει ανάλυση των αυτεπαγωγών και των αμοιβαίων επαγωγών συναρτήσει της ηλεκτρικής γωνίας του δρομέα θ_e .



Σχήμα 4.4 : Ισοδύναμο κύκλωμα σύγχρονου PMM κινητήρα με φασικές συνιστώσες a-b-c (Μανιάς, 2020)

Αναφέρεται ότι τα μεγέθη αναλύονται ως εξής:

L_{aa}, L_{bb}, L_{cc} είναι οι φασικές αυτεπαγωγές

M_{ab}, M_{ac}, M_{bc} είναι οι αμοιβαίες επαγωγές μεταξύ των φάσεων

Για $\theta_e = 0^\circ$ θεωρείται ότι η διεύθυνση ροής ακολουθεί την αντίστοιχη της φάσης a, περιγράφοντας σε πίνακα τις παρακάτω εξισώσεις των μαγνητικών ροών.

$$\begin{bmatrix} \psi_a \\ \psi_b \\ \psi_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{aa}(\theta_e) & M_{ab}(\theta_e) & M_{ac}(\theta_e) \\ L_{bb}(\theta_e) & L_{bb}(\theta_e) & M_{bc}(\theta_e) \\ L_{cc}(\theta_e) & M_{bc}(\theta_e) & L_{cc}(\theta_e) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \psi_{ma}(\theta_e) \\ \psi_{mb}(\theta_e) \\ \psi_{mc}(\theta_e) \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

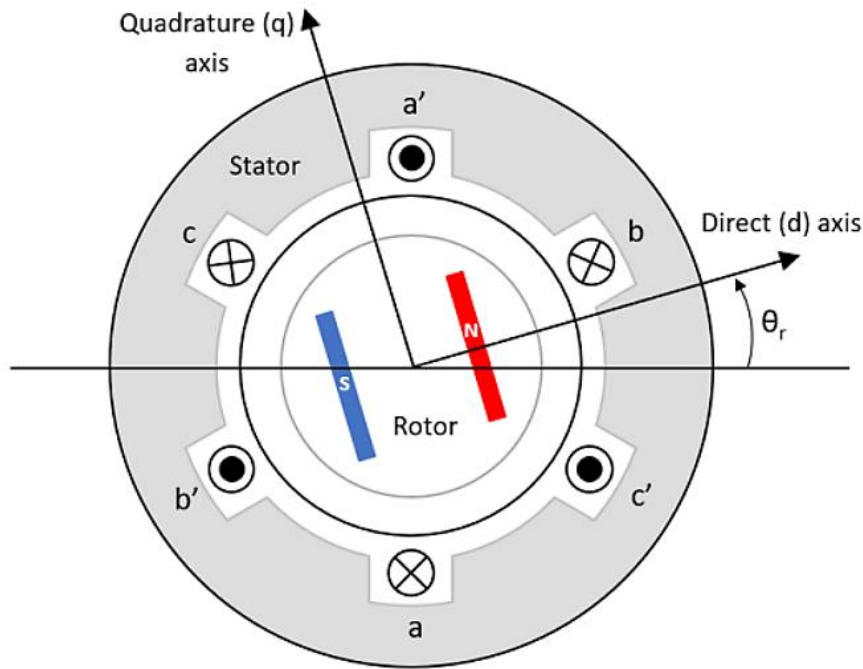
όπου

ψ_a, ψ_b, ψ_c αποτελούν τις μαγνητικές ροές των φάσεων

$\psi_{ma}, \psi_{mb}, \psi_{mc}$ αποτελούν τις μαγνητικές ροές των φάσεων a,b,c που παράγονται από τον μόνιμο μαγνήτη του δρομέα

θ_e η ηλεκτρική γωνία θέσης του δρομέα

θ_m η μηχανική γωνία του δρομέα



Σχήμα 4.5 : Ηλεκτρική γωνία σύγχρονου κινητήρα μόνιμων μαγνητών (Charman, 2020)

Στο συγκεκριμένο σχεδιάγραμμα ορίζεται η ηλεκτρική γωνία θέσης του δρομέα ενός σύγχρονου κινητήρα μόνιμων μαγνητών. Η γωνία θ_r αποτελεί την ηλεκτρική γωνία του δρομέα, η οποία επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό τις επαγωγές του σύγχρονου κινητήρα μόνιμων μαγνητών.

$$\theta_e = \theta_r = \frac{P \theta_m}{2} \quad (4.3)$$

όπου

θ_m η μηχανική γωνία του δρομέα,

P ο αριθμός των πόλων του κινητήρα.

$$\omega_e = \omega_r = \frac{P \omega_m}{2} \quad (4.4)$$

όπου

ω_m είναι η μηχανική γωνιακή ταχύτητα.

Η παραγόμενη ηλεκτρομαγνητική ροπή του κινητήρα περιγράφεται από την ακόλουθη σχέση:

$$T_e = \frac{e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c}{\omega_m} \quad (4.5)$$

4.2.2 Μοντέλο d-q PMSM

Στο κάτωθι σημείο αναλύεται το δυναμικό μοντέλο d-q για μία μηχανή PMSM σύμφωνα με το μοντέλο μετασχηματισμού Park. Συγκεκριμένα, ορίζονται νέες μεταβλητές τάσεων, ρευμάτων και μαγνητικών ροών των τυλιγμάτων του στάτη μέσω υποθετικών τυλιγμάτων στους άξονες του δρομέα. Με αυτό τρόπο η συνισταμένη μαγνητική ροή στο διάκενο της μηχανής συμπίπτει κάθε χρονική στιγμή με την αντίστοιχη συνισταμένη μαγνητική ροή του τυλίγματος τυμπάνου.

Με τη χρήση του μετασχηματισμού Park, η σύγχρονη μηχανή θεωρητικά ισοδυναμεί με μια ‘υποθετική μηχανή’, στην οποία οι μαγνητικοί άξονες των τυλιγμάτων στάτη και δρομέα αντίστοιχα παρουσιάζουν μηδενική σχετική ταχύτητα μεταξύ τους. Έτσι, οποιοδήποτε τριφασικό μέγεθος x παρίσταται σε έναν μιγαδικό φασιθέτη με σταθερά μεγέθη αυτεπαγωγών και αλληλεπαγωγών ανεξαρτήτως της γωνίας περιστροφής του δρομέα (Μανιάς, 2020).

Παρακάτω περιγράφεται σε πίνακα, με την βοήθεια των μητρώων μετασχηματισμού των εξισώσεων Park, το τριφασικό μέγεθος x που μπορεί να παριστάνει μεγέθη τάσης, ρεύματος ή μαγνητικής ροής.

$$\begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_0 \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta + 2\pi/3) \\ \sin(\theta) & \sin(\theta - 2\pi/3) & \sin(\theta + 2\pi/3) \\ 1/2 & 1/2 & 1/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} \quad (4.6)$$

όπου

x = μεταβλητή μετασχηματισμού

θ = η χρονομεταβλητή συνάρτηση της θέσης δρομέα

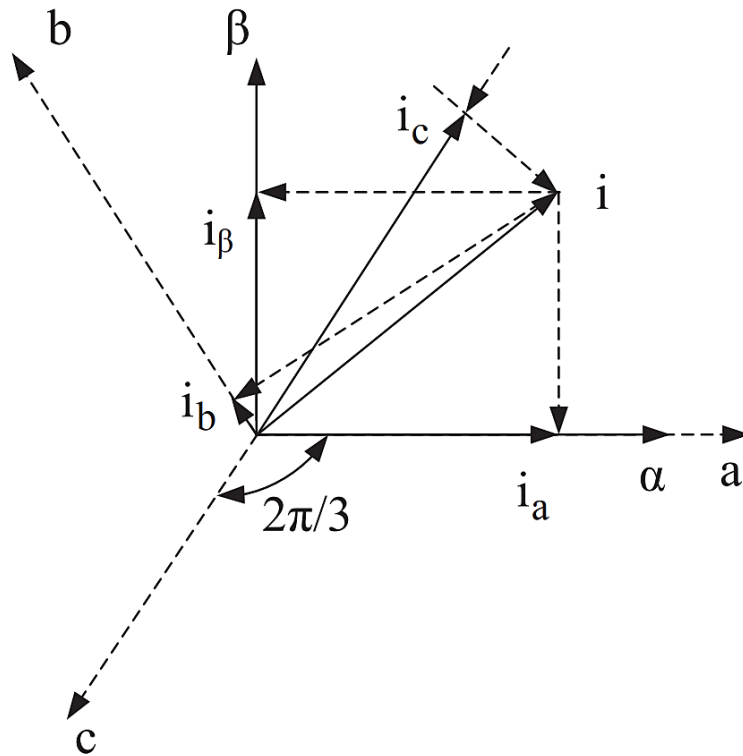
Με τον αντίστροφο πίνακα να παρουσιάζεται παρακάτω για τον αντίστροφο μετασχηματισμό:

$$\begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} = \frac{3}{2} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) & 1 \\ \cos(\theta - 2\pi/3) & \sin(\theta - 2\pi/3) & 1 \\ \cos(\theta + 2\pi/3) & \sin(\theta + 2\pi/3) & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} \quad (4.7)$$

Η γωνία θ αφορά την γωνία μεταξύ του πραγματικού άξονα του μιγαδικού πλαισίου και της διεύθυνσης της φάσης a . Με αυτόν τον τρόπο θεωρείται πως οι μαγνητεγερτικές δυνάμεις F_d και F_q προέρχονται από μια ειδικά διεγερμένη διφασική περιέλιξη με τη γωνία θ να παραπέμπει στην ηλεκτρική γωνία $\theta_r = \theta_e$ του δρομέα.

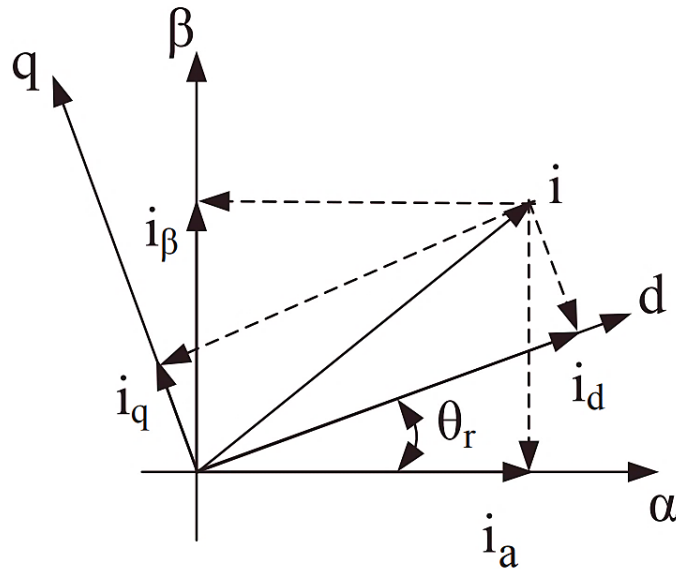
Το διάστημα, στο οποίο η γωνία θ είναι μηδενική, ο μετασχηματισμός μεταφέρει τα μεγέθη στο πλαίσιο αναφοράς του στάτη της διεύθυνσης του πραγματικού άξονα της φάσης a . Επειδή η γωνία διατηρείται μηδενική το πλαίσιο αναφοράς από στατό a-b-c μετατρέπεται μέσω του μετασχηματισμού Clarke στο α - β σύστημα.

Ο αναφερόμενος μετασχηματισμός Clarke αναπαρίσταται στο κάτωθι σχεδιάγραμμα αξόνων για τα διανύσματα του ρεύματος του κινητήρα PMSM.



Σχήμα 4.6 : Μετασχηματισμός Clarke διανύσματος ρεύματος PMSM κινητήρα (Μανιάς, 2020)

Παρακάτω διακρίνεται η αντίστοιχη μεταφορά των υπό μελέτη μεγεθών στο περιστρεφόμενο πλαίσιο αναφοράς με μετασχηματισμό από το σύστημα α-β στο d-q πλαίσιο. Η συγκεκριμένη μετατροπή επιτυγχάνεται μέσω των μεγεθών των ρευμάτων του στάτη του κινητήρα με γωνία του πλαισίου αναφοράς την θ_e του δρομέα.



Σχήμα 4.7 : Μετασχηματισμός διανύσματος ρεύματος σε d-q περιστρεφόμενο πλαίσιο PMSM κινητήρα (Μανιάς, 2020)

Με τη βοήθεια του μετασχηματισμού Park, προκύπτουν οι ακόλουθες απλοποιημένες σχέσεις του κινητήρα μόνιμων μαγνητών στο d-q περιστρεφόμενο πλαίσιο αναφοράς. Οι παρακάτω σχέσεις ανάγονται στα τυλίγματα του στάτη για PMSM κινητήρα:

$$V_{(ds)} = R_s i_{(ds)} + \frac{d\psi_{(ds)}}{dt} - \omega_e \psi_{(qs)} \quad (4.8)$$

$$V_{(qs)} = R_s i_{(qs)} + \frac{d\psi_{(qs)}}{dt} - \omega_e \psi_{(ds)} \quad (4.9)$$

όπου

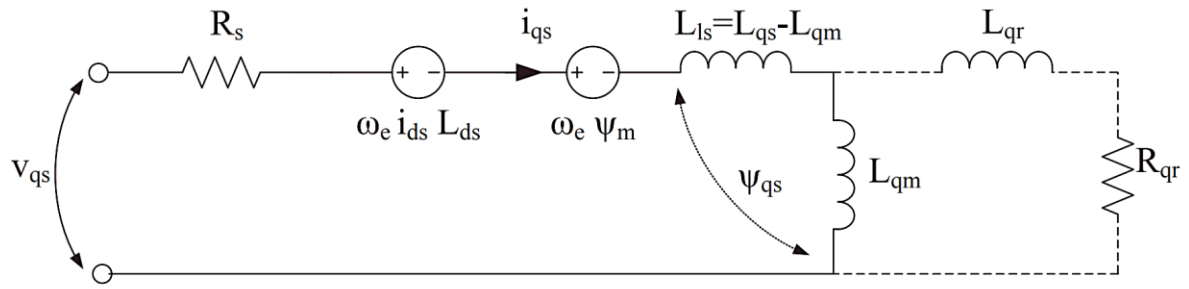
$\psi_{(ds)}$ = η μαγνητική ροή του άξονα d ανηγμένη στον στάτη

$\psi_{(qs)}$ = η μαγνητική ροή του άξονα q ανηγμένη στο στάτη

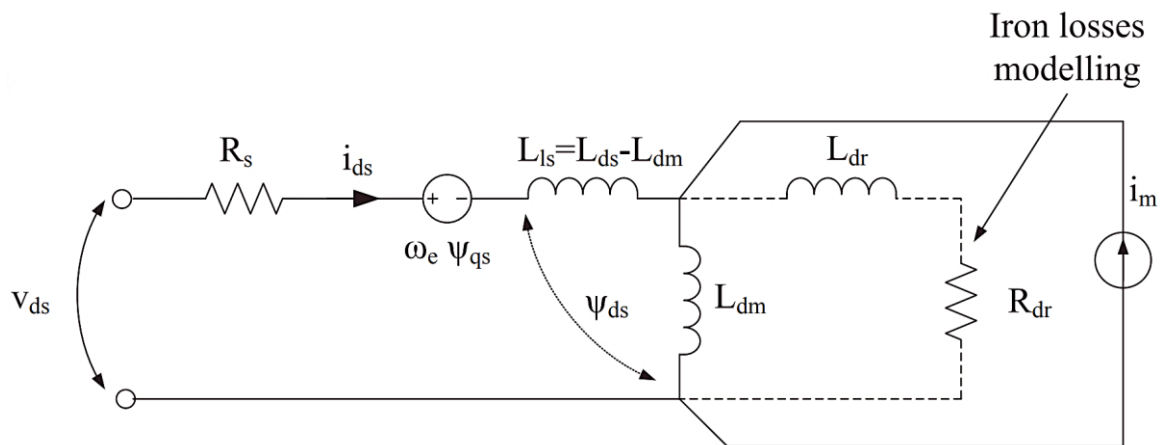
ω_e = η ηλεκτρική σύγχρονη ταχύτητα στρεφόμενου πεδίου

R_s = η αντίσταση στάτη

Παρακάτω διακρίνονται τα ισοδύναμα κυκλώματα d και q μοντέλων. Όπως έχει αναφερθεί, αφορούν την ανάλυση του περιστρεφόμενου πλαισίου αναφοράς PMSM κινητήρα, θεωρώντας πως το πεδίο των μαγνητών του δρομέα διέπεται από σταθερή ροή διέγερσης. Γίνεται ακόμη η παραδοχή σταθερού ισοδύναμου ρεύματος i_m .



Σχήμα 4.8 : Περιστρεφόμενο q μοντέλο PMSM κινητήρα (Μανιάς, 2020)



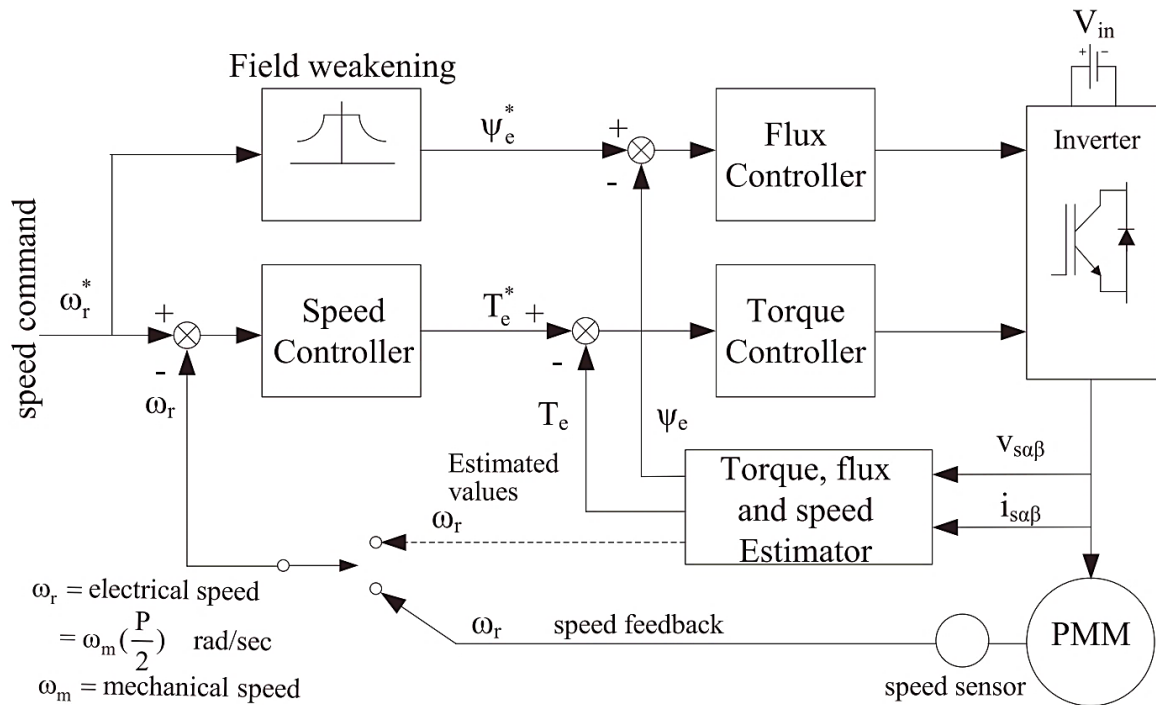
Σχήμα 4.9 : Περιστρεφόμενο d μοντέλο PMSM κινητήρα (Μανιάς, 2020)

4.3 Έλεγχος κινητήρων μόνιμων μαγνητών

Το κάτωθι κεφάλαιο πραγματεύεται τις τεχνικές ελέγχου των κινητήρων PMSM. Ο έλεγχος επιτυγχάνεται μέσω κατάλληλων τεχνικών οδήγησης όπως έχουν αναλυθεί και σε προηγούμενους τύπους ηλεκτρικών μηχανών με ορισμένες διαφοροποιήσεις.

Οι σύγχρονοι κινητήρες μόνιμου μαγνήτη συνήθως λειτουργούν με οδήγηση κινητήρα μεταβλητής συχνότητας. Υπό συνθήκες σταθερής συχνότητας και ημιτονοειδούς πολυφασικής διέγερσης, ο κινητήρας μόνιμων μαγνητών τείνει να συμπεριφέρεται ως μια συμβατική σύγχρονη μηχανή με σταθερή διέγερση πεδίου.

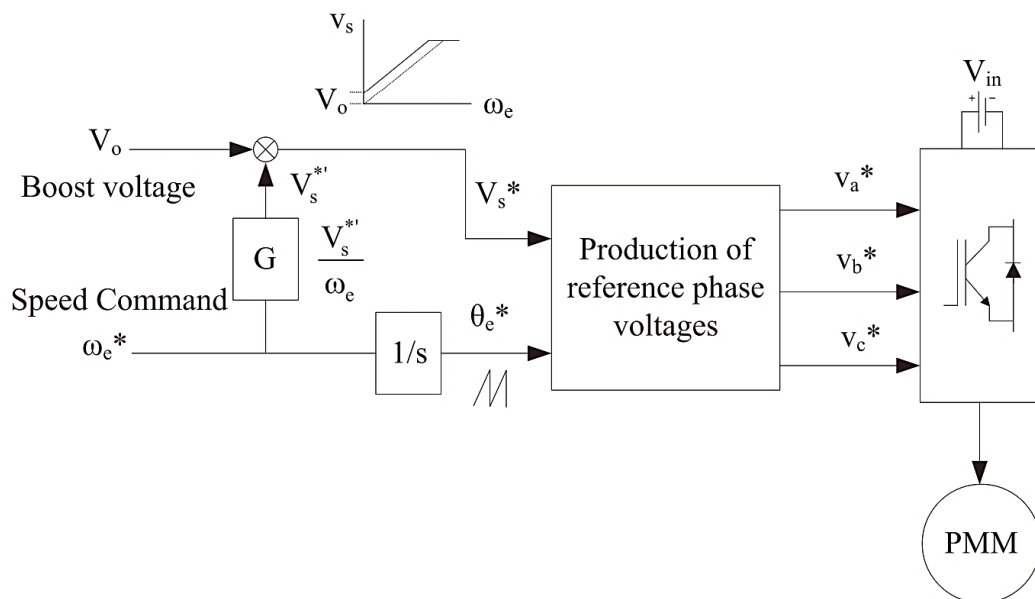
Παρακάτω, παρουσιάζεται το γενικό διάγραμμα ελέγχου των κινητήρων PMSM, αποτελούμενο από εσωτερικούς βρόχους ελέγχου ροπής (torque control) και πεδίου (flux control). Ο εκτιμητής (estimator) υλοποιείται με αρκετούς τρόπους παρέχοντας πληροφορίες – εντολές ροπής και πεδίου. Εν συνεχεία ο εξωτερικός βρόχος της ταχύτητας παρέχει το σήμα ανάδρασης μετρούμενο από αισθητήρα μηχανικής κίνησης, ενώ παρέχεται η δυνατότητα εκτίμησης χωρίς αισθητήρα ταχύτητας.



Σχήμα 4.10 : Δομικό διάγραμμα ελέγχου μαγνητικής ροής και ροπής κινητήρα PMSM με δύο βρόχους ελέγχου (Μανιάς, 2020)

4.3.1 Βαθμωτός V/f έλεγχος ανοιχτού βρόχου

Η τεχνική του βαθμωτού ελέγχου αποσκοπεί στην μεταβολή των μεγεθών της ροής και της μαγνητικής ροπής, ενώ αποτελεί τον έλεγχο εφαρμογών χαμηλής ισχύος με μικρό κόστος κατασκευής. Το ακόλουθο δομικό διάγραμμα περιγράφει την τεχνική ελέγχου ταχύτητας V/f ενός συστήματος ανοιχτού βρόχου ενός κινητήρα PMSM.



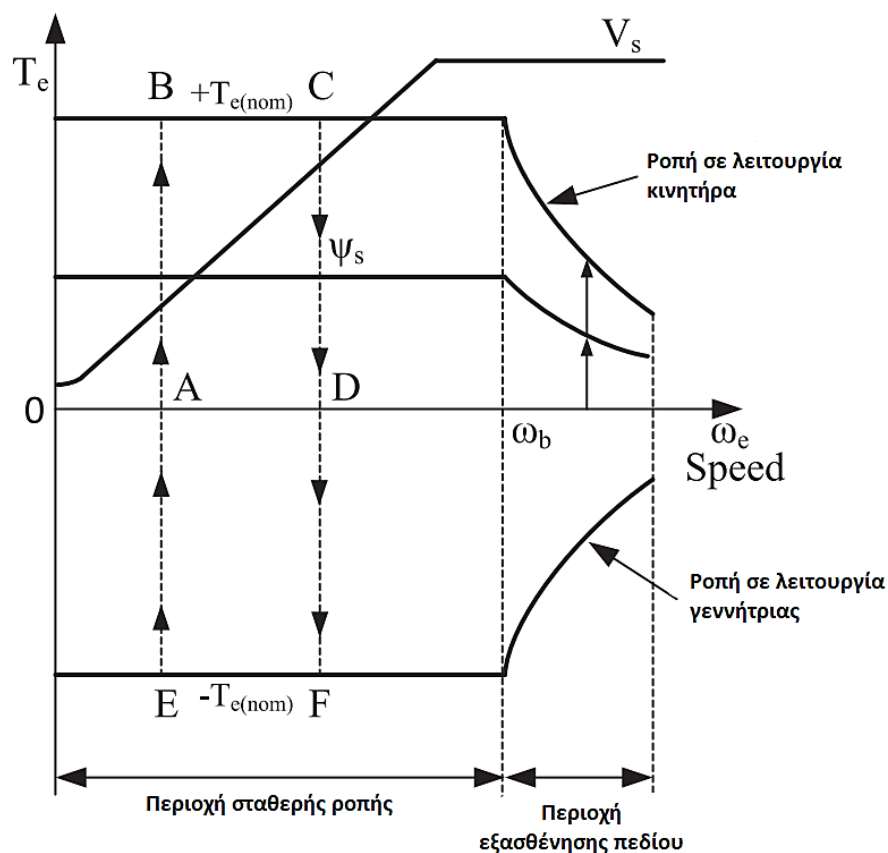
Σχήμα 4.11 : Δομικό διάγραμμα βαθμωτός V/f έλεγχου ενός συστήματος ανοιχτού βρόχου (Μανιάς, 2020)

Σκοπός της ανωτέρω τεχνικής είναι η διατήρηση της ροής του στάτη σε σταθερά επίπεδα επιτυγχάνοντας την μέγιστη ηλεκτρομαγνητική ροπή. Ακολούθως, ο λόγος V/f του συστήματος οφείλει να παραμένει μόνιμα σταθερός.

Μ' αυτόν τον τρόπο, η εντολή του πλάτους της φασικής τάσης V_s^* παράγεται από την εντολή ελέγχου συχνότητας μέσω της μονάδας του κέρδους G . Ακόμη, η τάση ανύψωσης V_o προστίθεται με σκοπό τη διατήρηση της ροής στις επιθυμητές τιμές, ενώ η εντολή ω_e^* διαμορφώνει το σήμα θ_e^* παράγοντας τις φασικές τάσεις αναφοράς v_a^* , v_b^* , v_c^* . Οι ημιτονοειδείς τάσεις αυτές αποτελούν τα τρία σήματα αναφοράς του αντιστροφέα του συστήματος οδήγησης.

4.3.2 Περιοχές λειτουργίας συστήματος οδήγησης PMSM

Η μηχανή PMSM λειτουργεί ως κινητήρας όσο και ως γεννήτρια στην περίπτωση της αναγεννητικής πέδησης. Οι περιοχές λειτουργίας διακρίνονται στο παρακάτω σχήμα, στο οποίο η μηχανή ξεκινά από το σημείο O από την ακινησία με σταθερό ρυθμό μέχρι το σημείο A αυξάνοντας τη ροπή του φορτίου T_L . Στην μόνιμη κατάσταση λειτουργία θεωρείται $T_L = T_e$ όπου για μέγιστο ρεύμα στάτη και για οριακή τιμή της γωνίας δ προκύπτει η ονομαστική τιμή της ροπής στο σημείο B .



Σχήμα 4.12 : Περιοχές Λειτουργίας Μηχανής PMSM σταθερής ροπής (Μανιάς, 2020)

Το σημείο λειτουργίας δύναται να μεταβάλλει την τιμή του από το σημείο B στο σημείο C αυξάνοντας ομαλά το σήμα της συχνότητας, ενώ μειώνοντας σταδιακά τη ροπή φορτίου T_L επανέρχεται στο σημείο D. Μετά το σημείο της ονομαστικής ταχύτητας ω_b η μηχανή εισέρχεται στην περιοχή εξασθένισης πεδίου με την τάση του στάτη να οδηγείται σε κορεσμό μειώνοντας τη διαθέσιμη ροπή και ροή. Η εντολή της ταχύτητας ω_e^* οφείλει να συμβαδίζει με την εντολή συχνότητας για τη βέλτιστη λειτουργία του συστήματος εντός των ορίων ευστάθειας χωρίς να χάνεται ο συγχρονισμός. Με αυτόν τον τρόπο περιγράφεται ο ρυθμός μεταβολής της ταχύτητας ω_e^* ως η μέγιστη ικανότητα επιτάχυνσης και επιβράδυνσης αντίστοιχα.

Αναλυτικότερα, η μέγιστη ικανότητα επιτάχυνσης δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$\frac{d\omega_e^*}{dt} = + \frac{P}{2J} (Te - TL) \quad (4.10)$$

Αντίστοιχα, η μέγιστη ικανότητα επιβράδυνσης δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$\frac{d\omega_e^*}{dt} = - \frac{P}{2J} (Te + TL) \quad (4.11)$$

όπου

J η ροπή αδράνειας

P ο αριθμός των πόλων της μηχανής

Te η ονομαστική τιμή ηλεκτρομαγνητικής ροπής

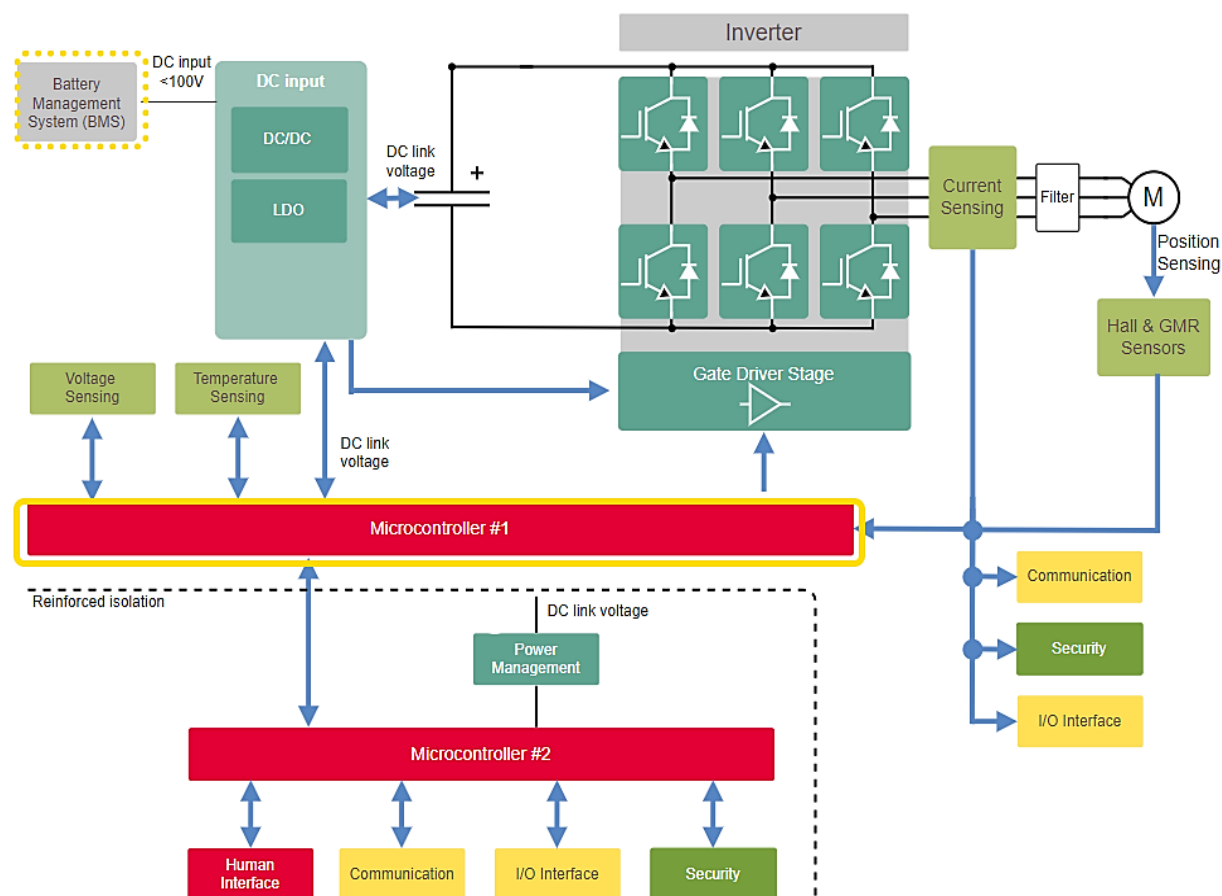
TL η ροπή φορτίου

Για λειτουργία κινητήρα με αφετηρία το σημείο A, με την αύξηση της εντολής ταχύτητας ω_e^* δύναται να μεταβληθεί η τιμή Te στο σημείο BC. Αυξάνοντας ομαλά το σήμα της συχνότητας σταθεροποιείται η ταχύτητα στο σημείο D.

Για λειτουργία γεννήτριας επιτυγχάνεται η επιβράδυνση του συστήματος οδήγησης με αποτέλεσμα τα σημεία λειτουργίας να είναι D,E,F,A διαδοχικά. Έτσι, με κατάλληλη διάταξη αναγεννητικής πέδησης η ηλεκτρική ενέργεια ανακτάται κατά τη διαδικασία επιβράδυνσης. Στην περίπτωση που το σύστημα εξοπλίζεται με μπαταρίες όπως στην ακόλουθη διάταξη, η φόρτιση επιτυγχάνεται στο διάστημα για το οποίο το ρεύμα επιστρέφει στην πηγή τροφοδοσίας.

Αναλυτικότερα, ο σύγχρονος κινητήρας μόνιμου μαγνήτη υψηλής απόδοσης με είσοδο DC ελέγχεται για το πλήρες εύρος στροφών του κινητήρα και τον πλήρη έλεγχο ροπής. Ο τριφασικός αντιστροφείας που χρησιμοποιείται εξασφαλίζει την σταθερότητα στη διακύμανση της διαταραχής του φορτίου, ενώ επιτυγχάνεται η μείωση της κατανάλωσης ενέργειας σε σημαντικό βαθμό. Αντίστοιχα συστήματα κίνησης ελέγχου

κινητήρα σε εφαρμογές που τροφοδοτούνται με μπαταρία έχουν αναλυθεί και στους ασύγχρονους κινητήρες.



Σχήμα 4.13 : Σύστημα Ηλεκτρικής Κίνησης αμφίπλευρης ροής ρεύματος με τριφασικό αντιστροφέα (www.infineon.com, 2020)

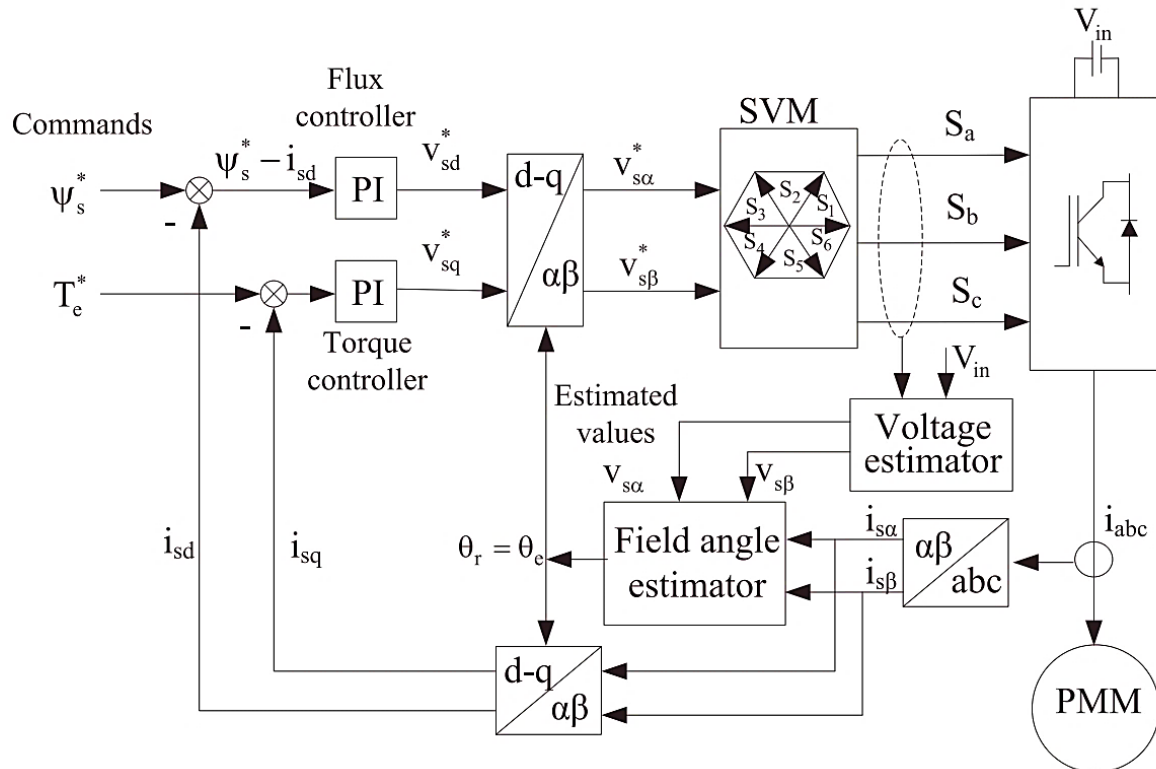
Με τη βοήθεια του αντιστροφέα διπλής ροής ελέγχεται ο κινητήρας μόνιμων μαγνητών με αμφίπλευρη ροή ρεύματος απ' το φορτίο στην πηγή τροφοδοσίας και αντίστροφα. Επίσης, το σύστημα διαχείρισης μπαταριών (BMS) αποσκοπεί στην παρακολούθηση και τη ρύθμιση της φόρτισης και της εκφόρτισης των μπαταριών.

Πραγματοποιείται, λοιπόν, επιτήρηση των χαρακτηριστικών της μπαταρίας όπως ανίχνευση τάσης, θερμοκρασίας, χωρητικότητας, κατάσταση φόρτισης, κατανάλωση ενέργειας, υπολειπόμενος χρόνος λειτουργίας καθώς και οι συνολικοί κύκλοι φόρτισης. Τέτοιου είδους συστήματα ηλεκτρικής κίνησης σύγχρονων κινητήρων με είσοδο συνεχούς τάσης χρησιμοποιούνται σε οικιακές συσκευές, βιομηχανικούς αυτοματισμούς και επίσης σε ηλεκτρικά οχήματα ή ανυψωτικά που λειτουργούν με μπαταρίες.

4.3.3 Τεχνική Ελέγχου Προσανατολισμένου Πεδίου (FOC)

Πρόκειται για μια τεχνική γραμμικού ελέγχου ροπής κλειστού βρόχου. Σκοπός της συγκεκριμένης τεχνικής είναι ο έλεγχος του ρεύματος πεδίου και του ρεύματος ροπής μέσω της ανάλυσης των d-q συντεταγμένων (Μανιάς, 2020).

Ο έλεγχος υλοποιείται μέσω διατάξεων γραμμικών PI ελεγκτών σε PWM αντιστροφέα με την τεχνική διαμόρφωσης SVM, καθώς η ροπή και το πεδίο ελέγχονται έμμεσα από τα διανύσματα ρεύματος προσανατολισμένα στο πεδίο.



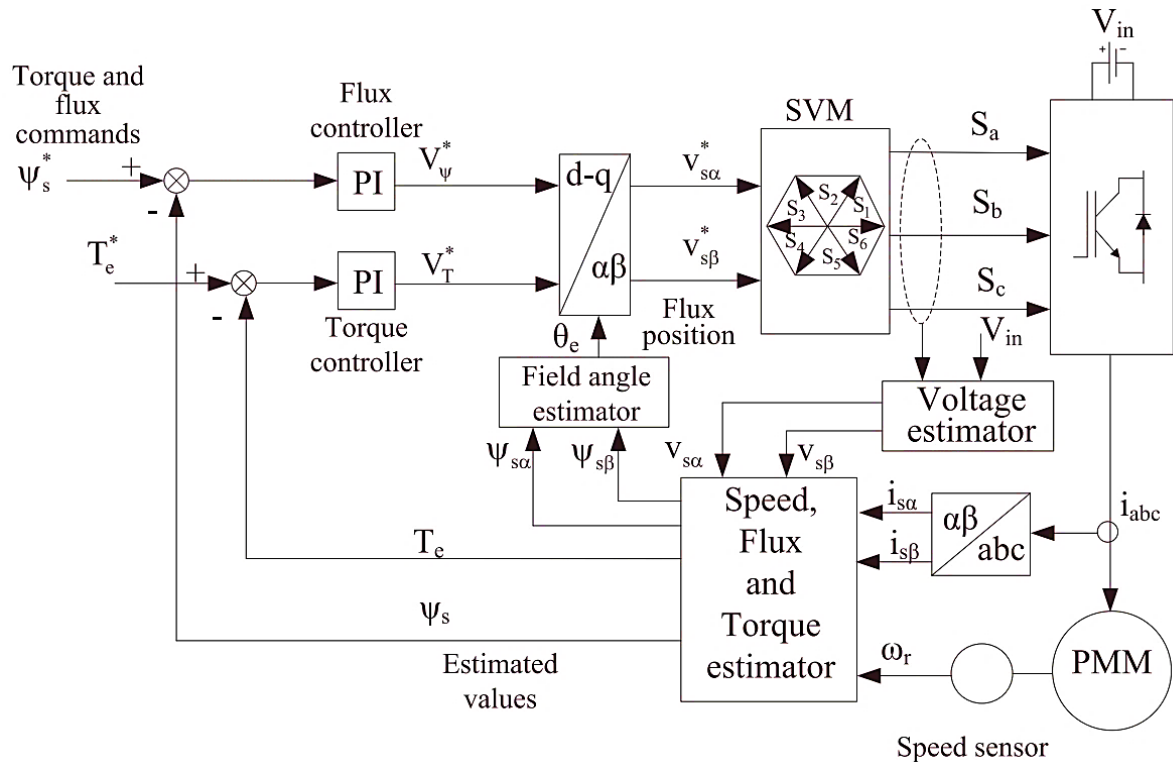
Σχήμα 4.14 : Δομικό διάγραμμα τεχνικής ελέγχου FOC (Μανιάς, 2020)

4.3.4 Άμεσος Έλεγχος Ροπής με διαμόρφωση χωρικού διανύσματος (DTC-SVM)

Ο άμεσος έλεγχος ροπής υλοποιείται με βάση την ηλεκτρομαγνητική ροπή του κινητήρα. Συγκεκριμένα, η παραγόμενη ροπή είναι ανάλογη της ροής του μόνιμου μαγνήτη και της ροής των τυλιγμάτων του στάτη. Μ' αυτόν τον τρόπο η ροπή ελέγχεται από τη γωνία των δύο πεδίων με την προϋπόθεση πως διατηρείται σταθερή η ροή των τυλιγμάτων του στάτη. Ακόμη, η ροή του στάτη είναι ανάλογη με την τάση που δέχεται ο κινητήρας.

Παρακάτω, το δομικό διάγραμμα του ελέγχου DTC-SVM παρουσιάζει σε κλειστό βρόχο τον έλεγχο ροπής και πεδίου σε καρτεσιανές συντεταγμένες. Ο έλεγχος υλοποιείται μέσω ειδικών διατάξεων γραμμικών PI ελεγκτών σε αντιστροφέα με την τεχνική διαμόρφωσης SVM, παράγοντας τα κατάλληλα κάθε φορά στιγμιαία διακοπτικά σήματα για τους ημιαγωγικούς διακόπτες. Οι τάσεις αναφοράς $v_{s\alpha}^*$ και $v_{s\beta}^*$

οδηγούνται στο σύστημα SVM, ενώ στο αβ πλαίσιο αναφοράς του στάτη εισάγονται πληροφορίες για την ροή και το ρεύμα του στάτη καθώς και της γωνίας θ_e .



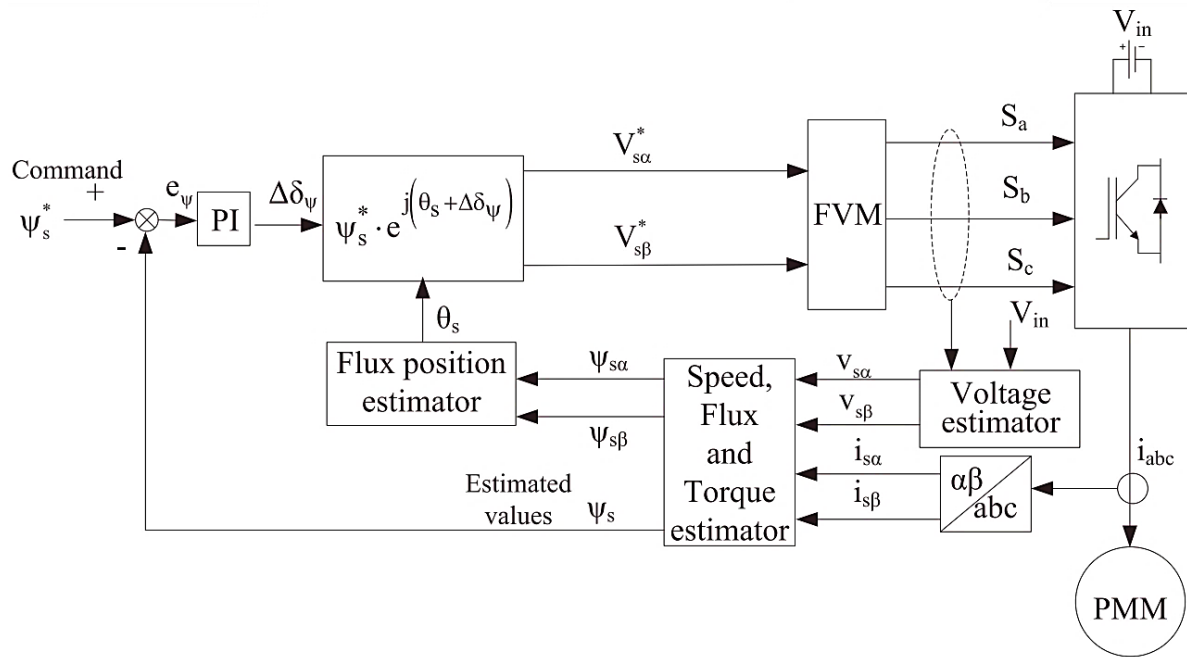
Σχήμα 4.15 : Δομικό διάγραμμα τεχνικής ελέγχου DTC-SVM (Μανιάς, 2020)

4.3.5 Άμεσος Έλεγχος Ροπής με διαμόρφωση του διανύσματος ροής (DTC-FVM)

Ακόμη ένα είδος άμεσου ελέγχου ροπής αποτελεί ο έλεγχος DTC μέσω διαμόρφωσης του διανύσματος της ροής FVM, όπως διακρίνεται στο κάτωθι δομικό διάγραμμα. Με παρόμοιο τρόπο η ροπή ελέγχεται και ρυθμίζεται μέσω ειδικών διατάξεων γραμμικών PI ελεγκτών σε αντιστροφέα παράγοντας μια αύξηση της γωνίας ροπής $\Delta\delta\psi$.

Μ' αυτόν τον τρόπο η ροπή ελέγχεται μεταβάλλοντας την γωνία ροπής $\delta\psi$, η οποία ισοδυναμεί με την μεταβολή της ροής των τυλιγμάτων του στάτη $\Delta\psi_s$ με την προϋπόθεση πως διατηρείται σταθερή η ροή των τυλιγμάτων του δρομέα.

Το διάνυσμα ροής του στάτη δέχεται εντολές αθροίζοντας την εκτιμώμενη θέση του πεδίου θ_e από τον εκτιμητή 'flux position estimator' και την μεταβολή της γωνίας ροπής $\Delta\delta\psi$. Παράγονται, λοιπόν, οι τάσεις αναφοράς $v_{s\alpha}^*$ και $v_{s\beta}^*$, οι οποίες οδηγούνται στο σύστημα FVM επιτυγχάνοντας τον υπολογισμό των διακοπτικών καταστάσεων του μετατροπέα πηγής τάσης.



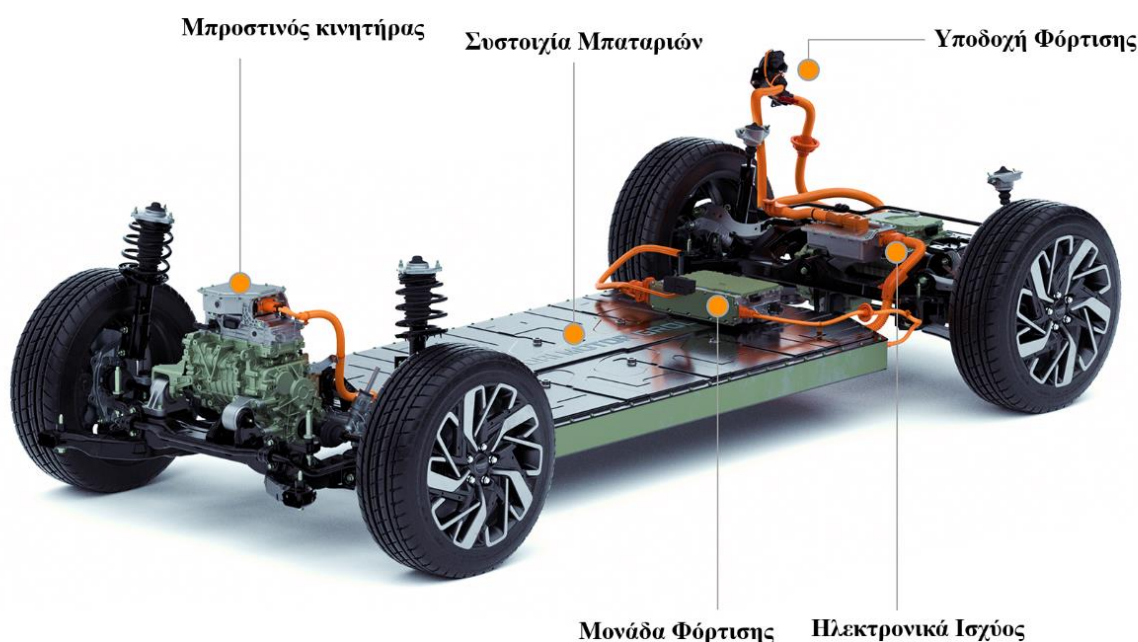
Σχήμα 4.16 : Δομικό διάγραμμα τεχνικής ελέγχου DTC-FVM (Μανιάς, 2020)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο

Αναγεννητική Πέδηση σε EVs μέσω Προσομοίωσης

5.1 Εισαγωγή

Σε αυτήν την ενότητα, γίνεται παρουσίαση της τεχνικής ελέγχου αναγεννητικής πέδησης που αφορά τον DC, τον BLDC και τον PMSM κινητήρα. Η λειτουργία αυτών των συστημάτων επιβεβαιώνεται μέσω προσομοίωσης σε περιβάλλον Simulink (του Matlab). Η παρουσίαση εκτείνεται σε δύο βασικούς άξονες, αναδεικνύοντας την αναγεννητική πέδηση στους συμβατικούς DC και στους σύγχρονους PM κινητήρες.



Εικόνα 5-1 : Διάταξη στοιχείων ενός ηλεκτρικού αυτοκινήτου (hyundai.com, 2022)

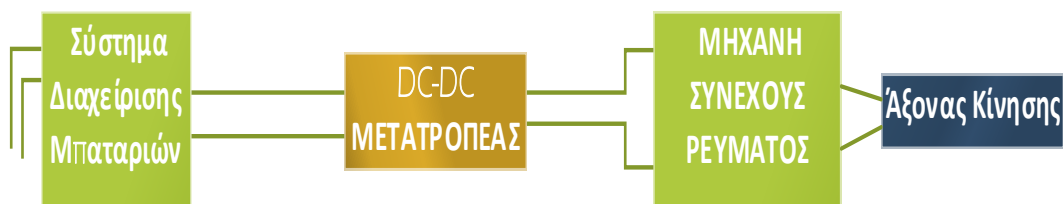
Το πρώτο τμήμα που αφορά τους συμβατικούς DC κινητήρες εξετάζει την εφαρμογή του μετατροπέα DC-DC δύο τεταρτημορίων, ενώ το δεύτερο τμήμα εξετάζει την εφαρμογή του μετατροπέα DC-DC τεσσάρων τεταρτημορίων στην αναγεννητική πέδηση. Αρχικά, παρουσιάζεται η διάταξη ηλεκτρονικών ισχύος DC-DC μετατροπέα δύο τεταρτημορίων, ελέγχοντας έναν κινητήρα συνεχούς ρεύματος ξένης διέγερσης τροφοδοτούμενο από πηγή συνεχούς τάσης. Στη δεύτερη περίπτωση, αναδεικνύεται η λειτουργία του μετατροπέα DC-DC τεσσάρων τεταρτημορίων, ελέγχοντας έναν κινητήρα συνεχούς ρεύματος ξένης διέγερσης με την τεχνική διαμόρφωσης εύρους πλάτους παλμών PWM. Το σύστημα είναι ανοιχτού βρόχου και τροφοδοτείται από πηγή συνεχούς τάσης (μπαταρία).

Μ' αυτόν τον τρόπο λαμβάνονται σημαντικές πληροφορίες σχετικά με τη συμπεριφορά των δύο αυτών κινητήριων συστημάτων συνεχούς ρεύματος μέσω της προσομοίωσης.

Έπειτα, εξετάζονται οι διατάξεις ελέγχου αναγεννητικής πέδησης για δύο κατηγορίες σύγχρονων PM κινητήρων, τους BLDC τραπεζοειδούς ροής και τους PMSM ημιτονοειδούς ροής. Αρχικά, μελετάται το κινητήριο σύστημα του σύγχρονου κινητήρα μόνιμων μαγνητών τραπεζοειδούς ροής χωρίς ψύκτρες (BLDC), το οποίο τροφοδοτείται από τριφασικό αντιστροφέα πηγής συνεχούς τάσης (VSI). Ο αντιστροφέας παρέχει την δυνατότητα αμφίπλευρης ροής ισχύος, καθώς ηλεκτρική ενέργεια μεταφέρεται από τις μπαταρίες στον κινητήρα και από τον κινητήρα που λειτουργεί ως γεννήτρια στις μπαταρίες. Η τεχνική ελέγχου, που οδηγεί το σύστημα ηλεκτρικής κίνησης, είναι αυτή του τραπεζοειδούς ελέγχου μέσω PI ελεγκτή. Συγκεκριμένα, το σύστημα είναι κλειστού βρόχου και ρυθμίζεται μέσω των παραμέτρων ελέγχου PI. Έτσι, ορίζοντας τις επιθυμητές τιμές στο κύκλωμα προσομοίωσης, λαμβάνονται σημαντικές πληροφορίες μέσω κυματομορφών, οι οποίες αφορούν την ταχύτητα, το ρεύμα και τη ροπή του BLDC κινητήρα. Εν συνεχεία, μελετάται το κινητήριο σύστημα του σύγχρονου κινητήρα μόνιμων μαγνητών ημιτονοειδούς ροής (PMSM), τροφοδοτούμενο από τριφασικό αντιστροφέα πηγής συνεχούς τάσης (VSI). Στην περίπτωση που η μηχανή λειτουργεί ως κινητήρας μεταφέρεται ηλεκτρική ενέργεια από την πηγή τροφοδοσίας (συσσωρευτές) μέσω του αντιστροφέα στα τυλίγματα τυμπάνου. Στην λειτουργική φάση της αναγεννητικής πέδησης, όταν το ηλεκτρικό αυτοκίνητο κατεβαίνει μια κατηφόρα ή φρενάρει ηλεκτρικά, παρέχεται αρνητική ροπή φορτίου στον κινητήρα με τον μετατροπέα να λειτουργεί ως ανόρθωση, επιστρέφοντας ενέργεια στους συσσωρευτές που αποτελούν την πηγή τροφοδοσίας

5.2 Αναγεννητική Πέδηση σε Συμβατικούς DC Κινητήρες

Παρακάτω, εμφανίζεται το σχεδιάγραμμα του συστήματος ηλεκτρικής κίνησης των μετατροπέων DC-DC. Η διάταξη ισχύος τροφοδοτείται από τη συστοιχία μπαταριών του αυτοκινήτου με την συνεχή τάση να ελέγχεται από το σύστημα διαχείρισης μπαταριών. Ο μετατροπέας ρυθμίζει την τιμή της τάσης εξόδου με αποτέλεσμα τον έλεγχο του κινητήρα συνεχούς ρεύματος ξένης διέγερσης. Τελικά, η κινητική ενέργεια που παράγεται από την ηλεκτρική μηχανή, προκαλεί την κίνηση των αξόνων του αυτοκινήτου.

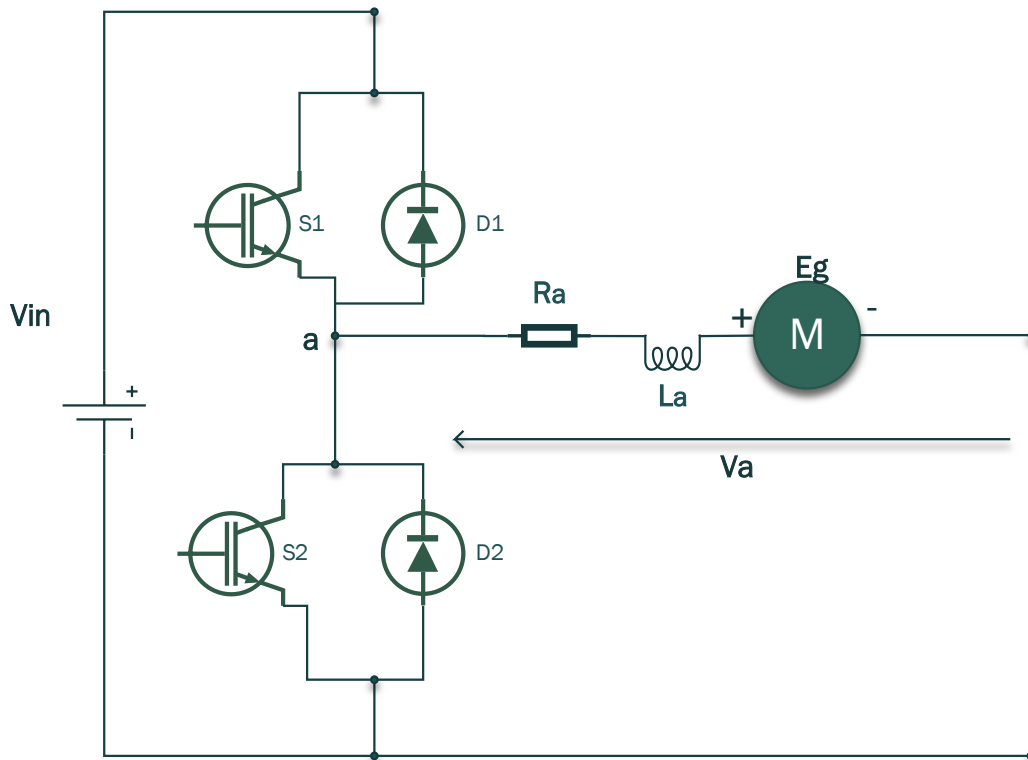


Σχήμα 5.1: Σχεδιάγραμμα κινητήριου συστήματος dc-dc ηλεκτρικού αυτοκινήτου

5.2.1 Με Χρήση Μετατροπέα Δύο Τεταρτημορίων

Παρακάτω σχεδιάζεται ο μετατροπέας ελέγχου ισχύος και αναγεννητικής πέδησης όπου στο 1^ο τεταρτημόριο η τάση και το ρεύμα τυμπάνου έχουν θετική τιμή, ενώ στην

αναγεννητική πέδηση, στο 2^ο τεταρτημόριο, η τάση του τυλίγματος τυμπάνου έχει θετική τιμή και το ρεύμα τυμπάνου αρνητική.



Σχήμα 5.2 : Μετατροπέας dc-dc δύο τεταρτημορίων

Αναλυτικότερα, στα διαστήματα αγωγής του ημιαγωγού S_1 και της διόδου D_2 το κινητήριο σύστημα λειτουργεί στο 1^ο τεταρτημόριο, ενώ στα διαστήματα μη αγωγής του S_1 , το ρεύμα τυμπάνου φθίνει και άγει η διάδος D_2 με λειτουργία του κινητήρα σε φάση ελεύθερης ροής.

Στην περίπτωση του αναγεννητικού ελέγχου, ενεργοποιούνται το διακοπτικό στοιχείο S_2 και η διάδος D_1 , αποσκοπώντας στη λειτουργία του 2^{ου} τεταρτημορίου. Εν συνεχεία, απενεργοποιώντας το στοιχείο S_2 , το ρεύμα τυμπάνου οδηγείται στην πηγή τάσης με την αγωγή της διόδου αναγεννητικής πέδησης D_1 . Μ' αυτόν τον τρόπο, ο κινητήρας δρώντας ως γεννήτρια μεταφέρει ηλεκτρική ενέργεια στη συστοιχία μπαταριών.

Το κύκλωμα ελέγχου αναγεννητικής πέδησης του κινητήρα συνεχούς ρεύματος που εξετάζεται μέσω του περιβάλλοντος Simulink του matlab, αποτελείται από μια μπαταρία συνεχούς τάσης, έναν μετατροπέα DC-DC δύο τεταρτημορίων και έναν κινητήρα συνεχούς ρεύματος ξένης διέγερσης. Για την καλύτερη παρουσίαση των αποτελεσμάτων του κυκλώματος έχουν τοποθετηθεί κατάλληλα στοιχεία scope για την αναπαράσταση των βασικών κυματομορφών. Στο παρακάτω σχήμα 5.3 διακρίνεται το κύκλωμα ελέγχου αναγεννητικής πέδησης του κινητήριου συστήματος.

Ο μετατροπέας DC-DC δύο τεταρτημορίων περιλαμβάνει δύο ημιαγωγικά στοιχεία MOSFETs συνδεδεμένα με αντιπαράλληλες διόδους. Η παλμοδότηση

πραγματοποιείται με τη βοήθεια δύο γεννητριών (pulses), οι οποίες συνδέονται στην πύλη του διακοπτικού στοιχείου. Οι παλμοί έναυσης ρυθμίζονται μέσω των γεννητριών με περίοδο 1/25000 secs και τιμή πλάτους 10. Επιπλέον, το πρώτο MOSFET στο πεδίο Pulse-Width ρυθμίζεται με βαθμό χρησιμοποίησης 30%, ενώ το δεύτερο MOSFET αναγεννητικής πέδησης με βαθμό χρησιμοποίησης 70%. Οι επιλογές αυτές των τιμών duty cycle, αποσκοπούν στη διατήρηση του αναγεννώμενου ρεύματος πέδησης στο μέγιστο επιτρεπτό επίπεδο με ευστάθεια στις χαμηλές ταχύτητες. Τέλος, επιλέγονται οι παράμετροι της προσομοίωσης, ορίζοντας το powergui σε discrete με sample time 5e-05 s.

Ο κινητήρας που επιλέγεται έχει τα παρακάτω χαρακτηριστικά:

Πίνακας 2: Ονομαστικά μεγέθη DC κινητήρα

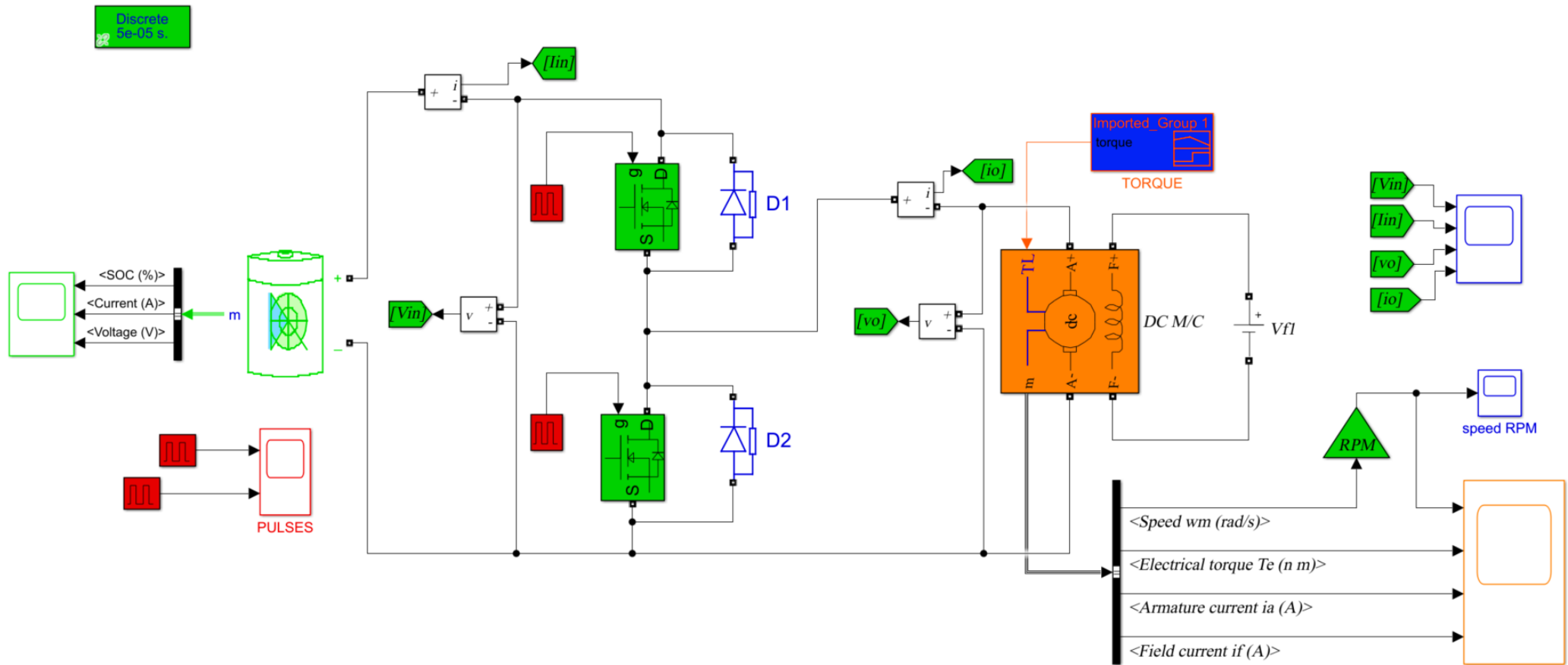
Ονομαστικά μεγέθη DC κινητήρα	
Ονομαστική τάση	240V
Ονομαστική ισχύς	5 HP
Ονομαστική ταχύτητα περιστροφής	1750 RPM
Ονομαστική ροπή	20 Nm
Ονομαστική τάση διέγερσης	150V

Η μπαταρία που επιλέγεται έχει τις ακόλουθες παραμέτρους:

Πίνακας 3: Ονομαστικά μεγέθη Μπαταρίας

Ονομαστικά μεγέθη Μπαταρίας	
Ονομαστική τάση	240 V
Ονομαστική χωρητικότητα	100 Ah
Αρχική Κατάσταση Φόρτισης	80 (%)
Χρόνος Απόκρισης Μπαταρίας	30 sec

Κύκλωμα Simulink μετατροπέα DC-DC δύο τεταρτημορίων

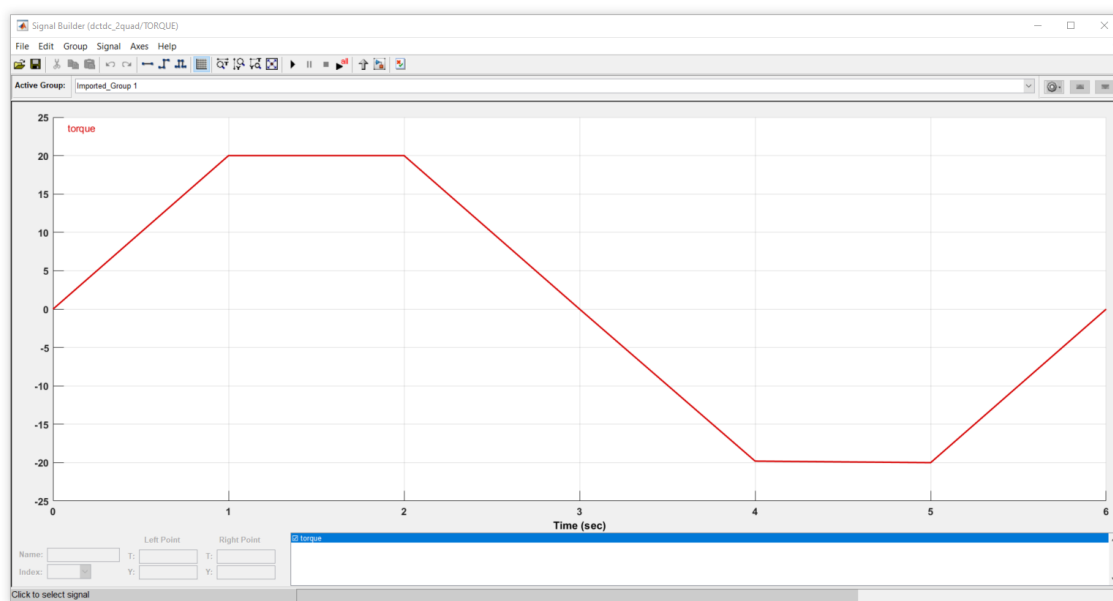


Σχήμα 5.3 : Κύκλωμα Simulink μετατροπέα DC-DC δύο τεταρτημορίων για έλεγχο DC κινητήρα

Εν συνεχεία, περιγράφονται οι διαφορετικές δοκιμές, στις οποίες υποβάλλεται το κινητήριο σύστημα αναγεννητικής πέδησης, προκειμένου να εξαχθούν τα συμπεράσματα σχετικά με την λειτουργία του. Αναλυτικότερα, σε κάθε δοκιμή μεταβάλλεται η ροπή φορτίου του κινητήρα με σκοπό τη διαφορετική συμπεριφορά και απόκριση του συστήματος. Μ' αυτόν τον τρόπο, οι δοκιμές στο σύστημα ηλεκτρικής κίνησης πραγματοποιούνται με την εξής σειρά:

- Με σταθερή θετική ροπή 20 Nm, η οποία αντιστοιχεί στο 100% της ονομαστικής τιμής του φορτίου του κινητήρα (20 Nm).
- Με σταθερή αρνητική ροπή -20 Nm
- Με το προφίλ ροπής 1. Το συγκεκριμένο προφίλ ροπής φορτίου αφορά συγκεκριμένα επίπεδα επιτάχυνσης και επιβράδυνσης, αποσκοπώντας στην βέλτιστη προσέγγιση πραγματικών συνθηκών. Παρουσιάζει μέγιστη θετική ροπή +10 Nm και μέγιστη αρνητική -10 Nm.
- Με το προφίλ ροπής 2. Το συγκεκριμένο προφίλ ροπής φορτίου αφορά συγκεκριμένα επίπεδα επιτάχυνσης και επιβράδυνσης, αποσκοπώντας στην βέλτιστη προσέγγιση πραγματικών συνθηκών. Παρουσιάζει μέγιστη θετική ροπή +20 Nm και μέγιστη αρνητική -20 Nm.

Τα προφίλ ροπής αφορούν συγκεκριμένα επίπεδα επιτάχυνσης – επιβράδυνσης. Παρακάτω, απεικονίζεται το σχεδιάγραμμα προφίλ ροπής 1, το οποίο υλοποιείται μέσω του πεδίου Signal Builder με μέγιστη ροπή 20 Nm και ελάχιστη -20 Nm. Με τον ίδιο ακριβώς τρόπο, σχεδιάζεται το διάγραμμα ροπής 2, με μέγιστη ροπή 10 Nm και ελάχιστη -10 Nm.



Εικόνα 5-2: Σχεδιάγραμμα ροπής μέσω Signal Builder

Αποτελέσματα Προσομοίωσης

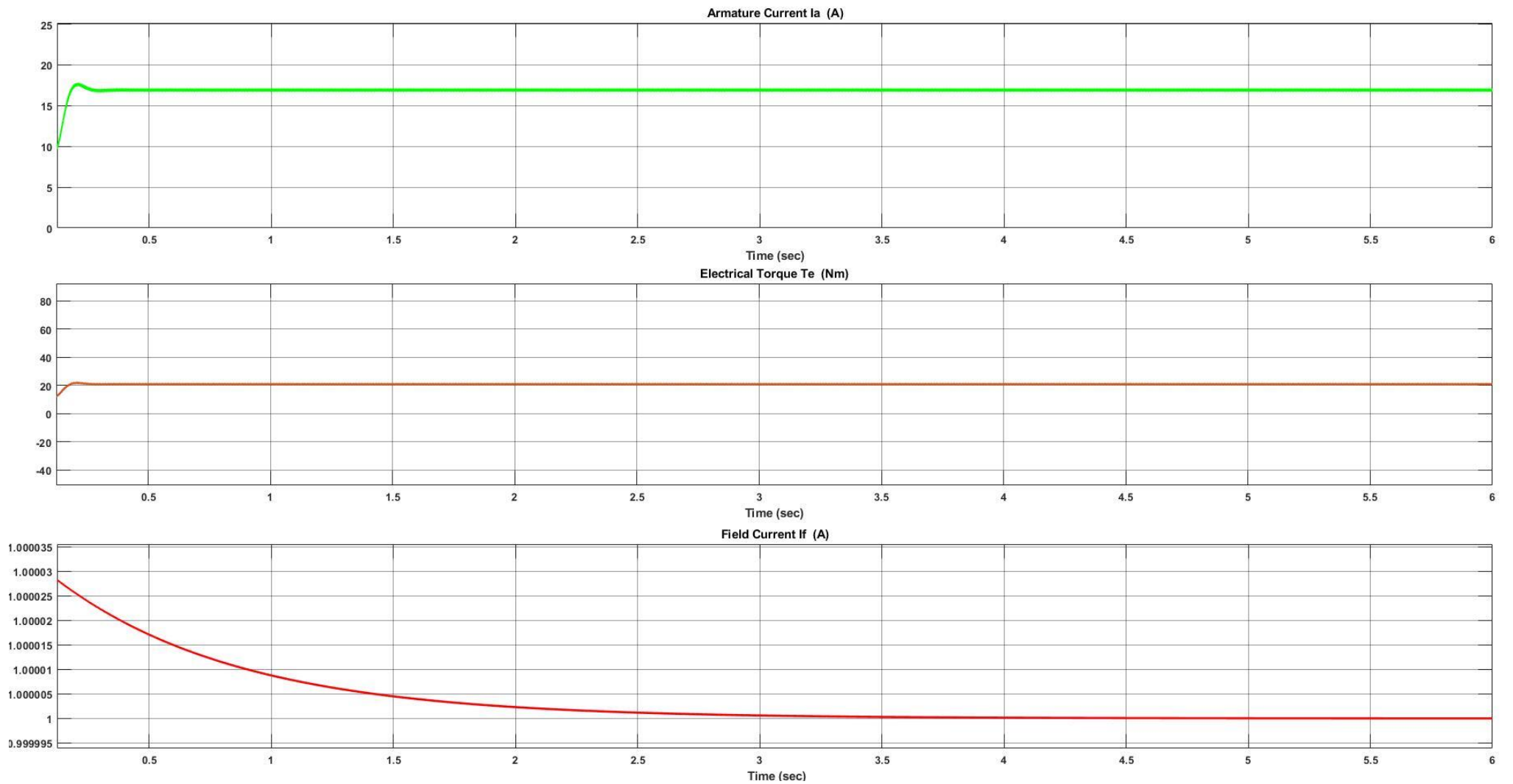
Παρακάτω εμφανίζονται οι βασικές κυματομορφές του κινητήριου συστήματος συνεχούς ρεύματος αναγεννητικής πέδησης με τη βοήθεια του προγράμματος προσομοίωσης Simulink. Έτσι, λαμβάνονται σημαντικές πληροφορίες για τη συμπεριφορά και την απόκριση του συστήματος μέσω των δοκιμών που προαναφέρθηκαν παραπάνω.

Παρουσιάζονται, λοιπόν, με τη βοήθεια των scopes οι κυματομορφές που αφορούν τη λειτουργία του κινητήριου συστήματος. Για κάθε δοκιμή που πραγματοποιείται, εμφανίζονται οι ακόλουθες κυματομορφές με την εξής σειρά:

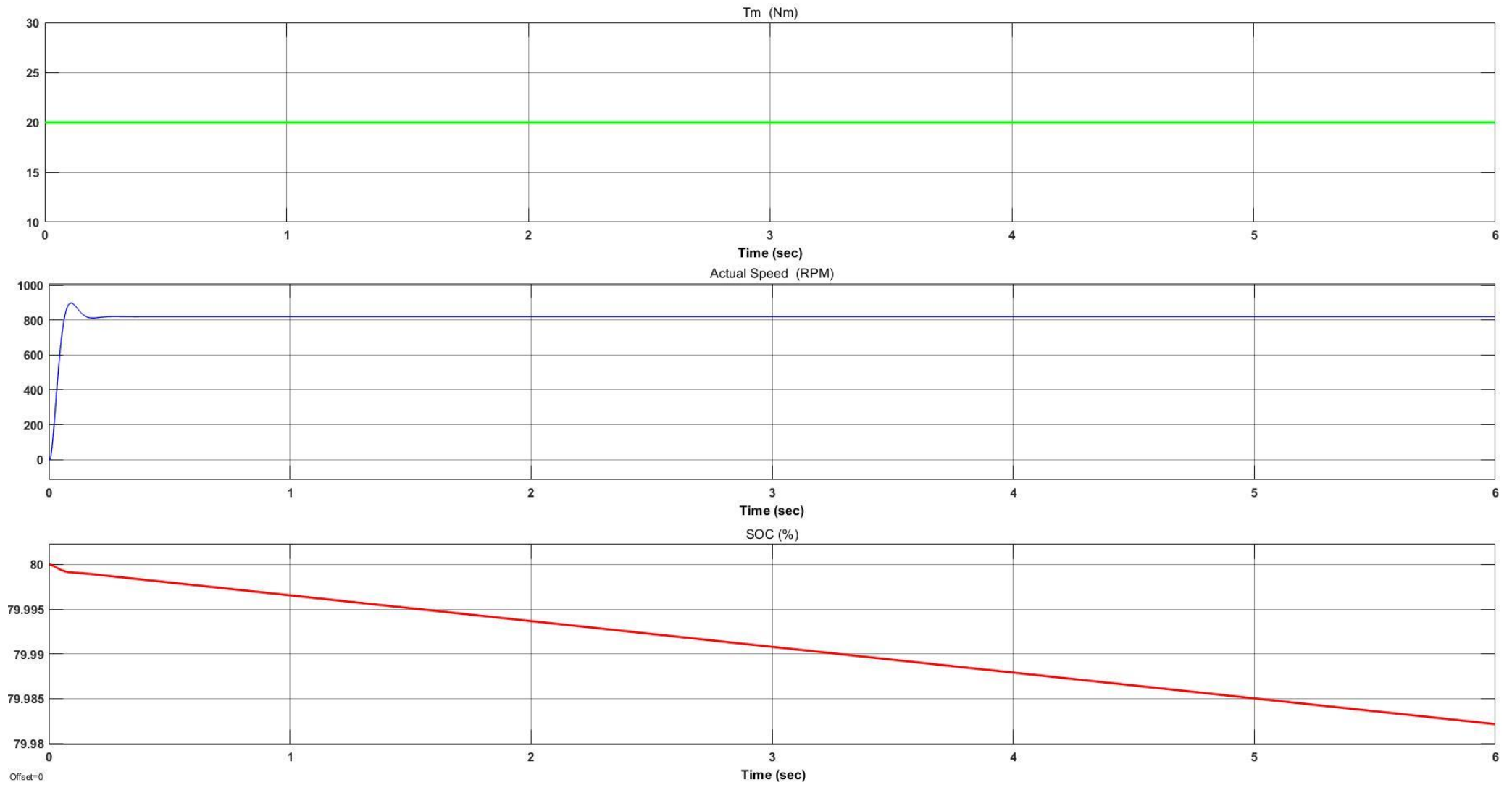
- Το ρεύμα τυλίγματος του στάτη του κινητήρα
- Η ηλεκτρομαγνητική ροπή του κινητήρα
- Το ρεύμα διέγερσης του κινητήρα

- Η ροπή φορτίου του κινητήρα
- Η πραγματική ταχύτητα του δρομέα
- Η κατάσταση φόρτισης της μπαταρίας (SOC)

Βασικές κυματομορφές συστήματος για σταθερή θετική ροπή +20 Nm

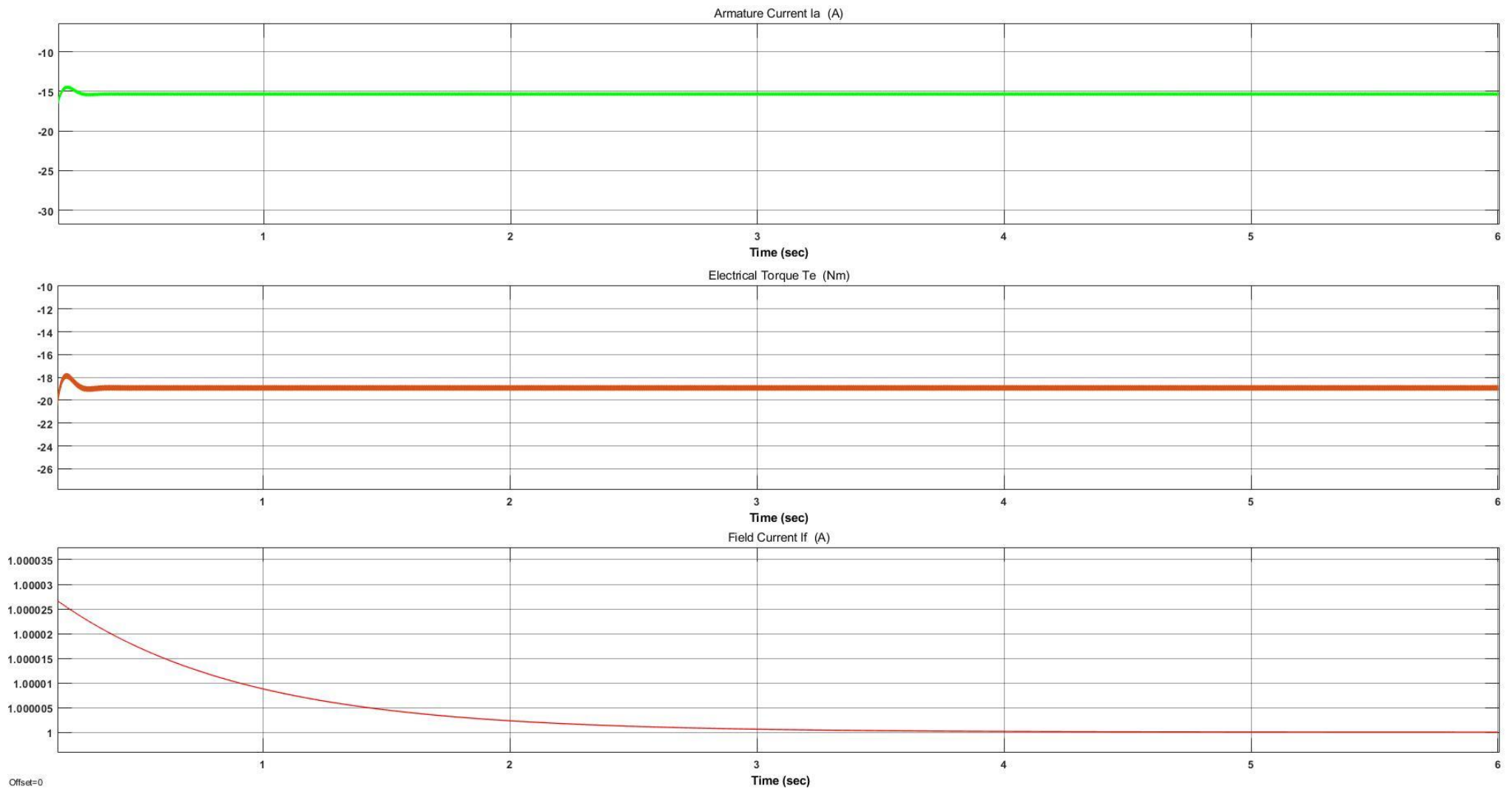


Σχήμα 5.4 : Κυματομορφές ρεύματος τυμπάνου (I_a), ηλεκτρικής ροπής (T_e) και ρεύματος διέγερσης (I_f) κινητήρα για σταθερή θετική ροπή 20 Nm

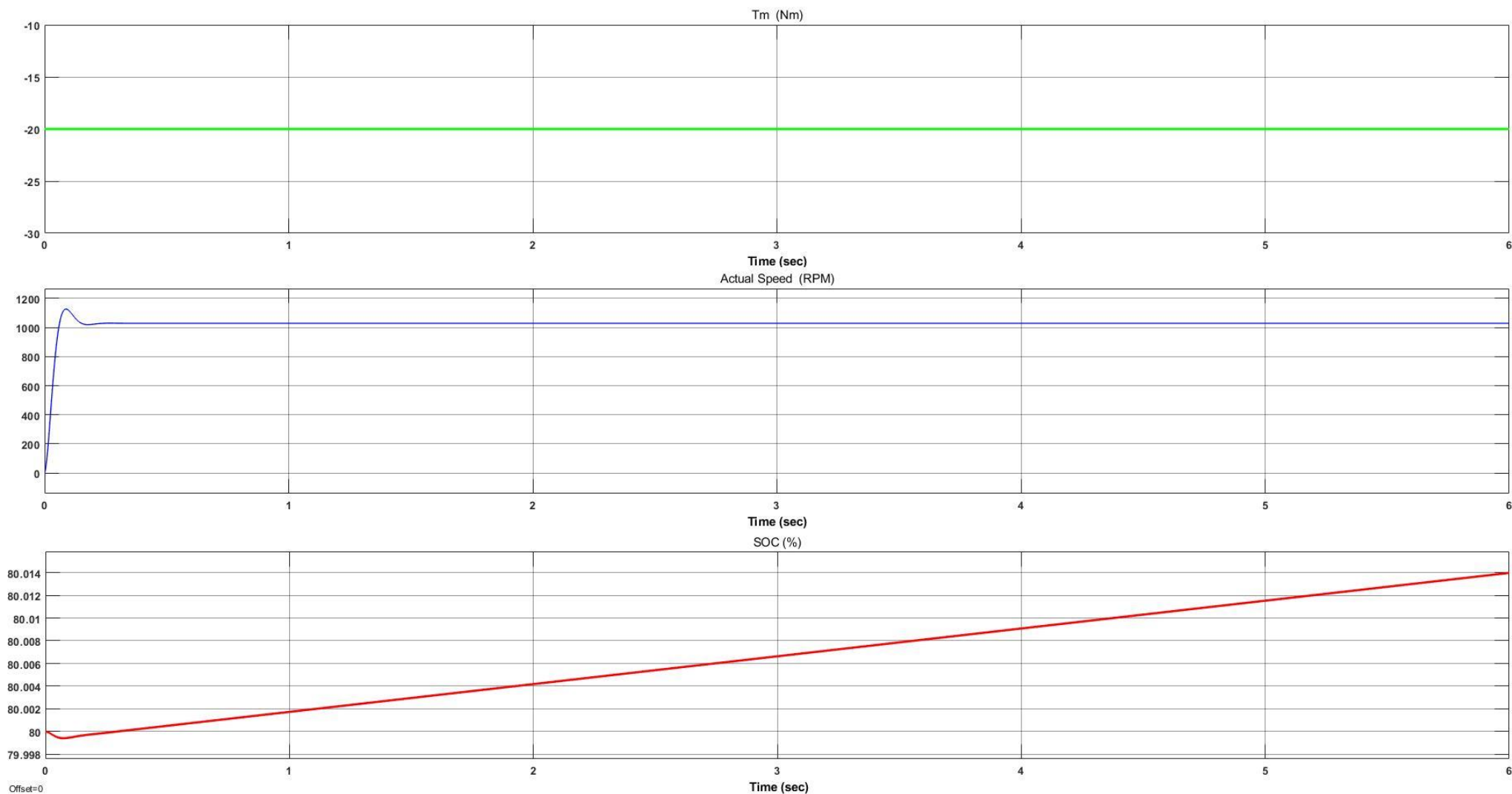


Σχήμα 5.5 : Κυματομορφές ροπής φορτίου, ταχύτητας περιστροφής κινητήρα, κατάστασης φόρτισης μπαταρίας (SOC) για σταθερή θετική ροπή 20 Nm

Βασικές κυματομορφές συστήματος για σταθερή αρνητική ροπή -20 Nm

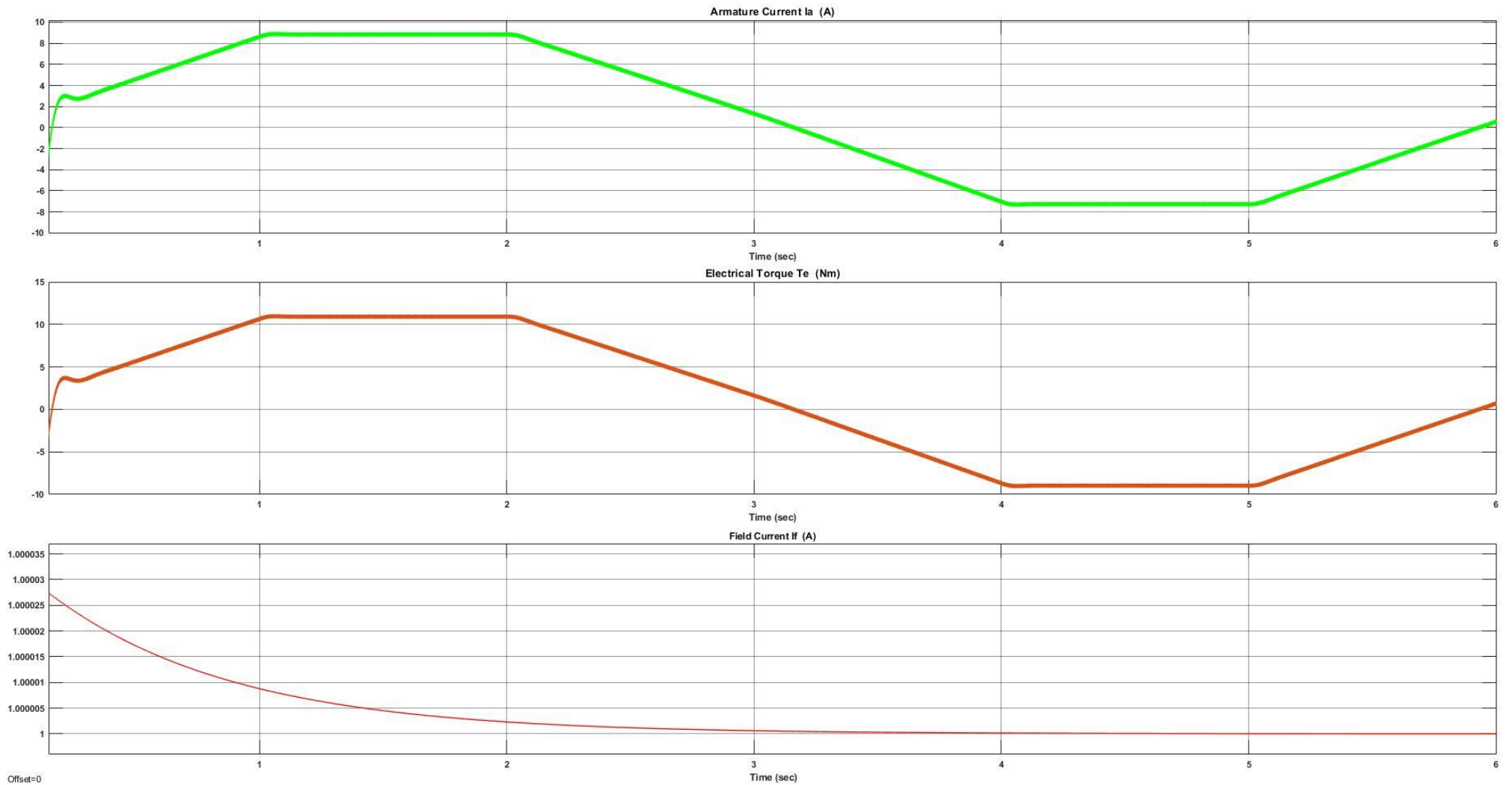


Σχήμα 5.6 : Κυματομορφές ρεύματος τυμπάνου κινητήρα, ηλεκτρικής ροπής κινητήρα και ρεύματος διέγερσης κινητήρα για σταθερή αρνητική ροπή -20 Nm

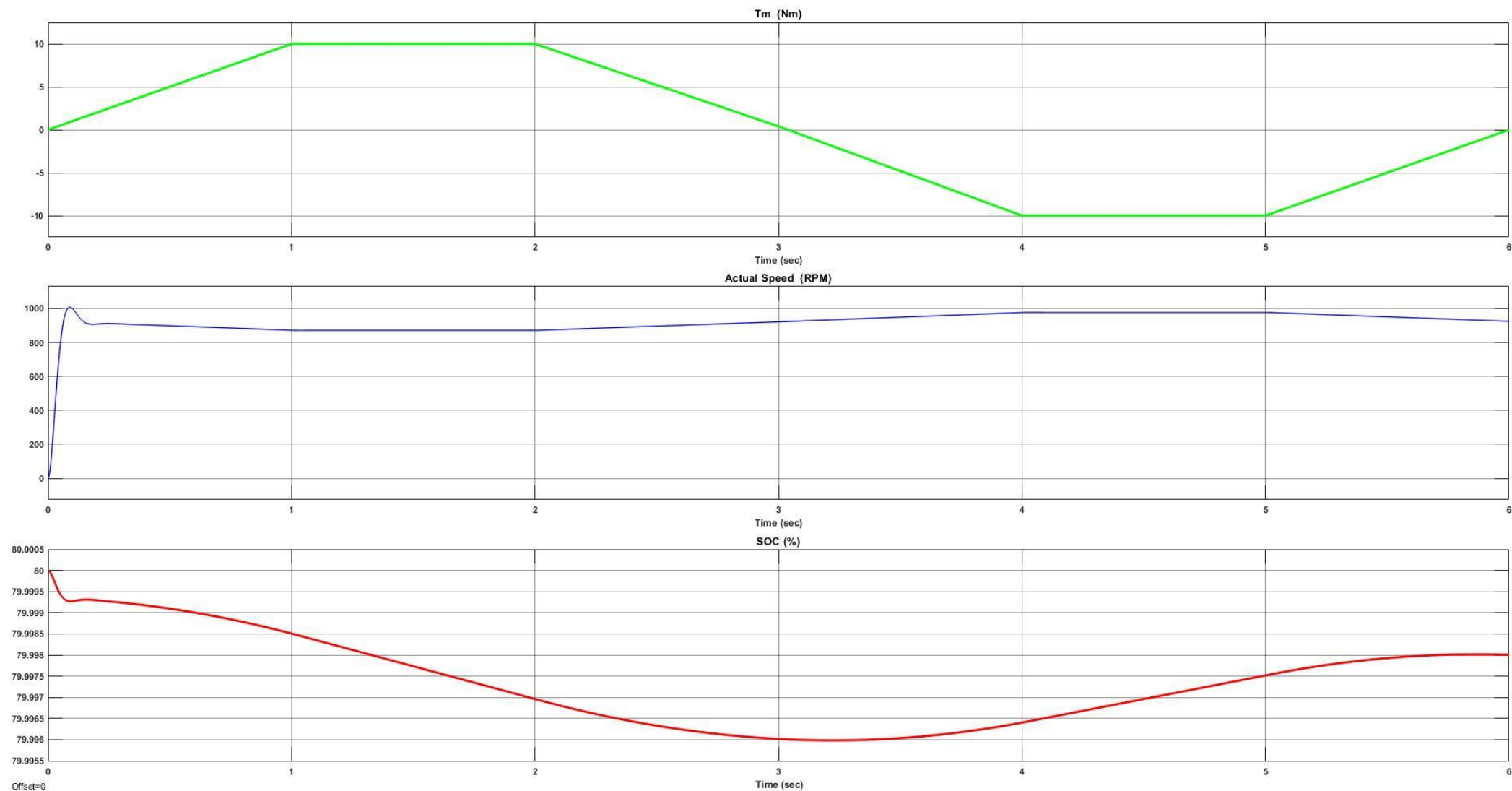


Σχήμα 5.7 : Κυματομορφές ροπής φορτίου, ταχύτητας περιστροφής κινητήρα, κατάστασης φόρτισης μπαταρίας (SOC) για σταθερή αρνητική ροπή -20 Nm στο 100% της ονομαστικής τιμής

Βασικές κυματομορφές συστήματος για προφίλ ροπής 1

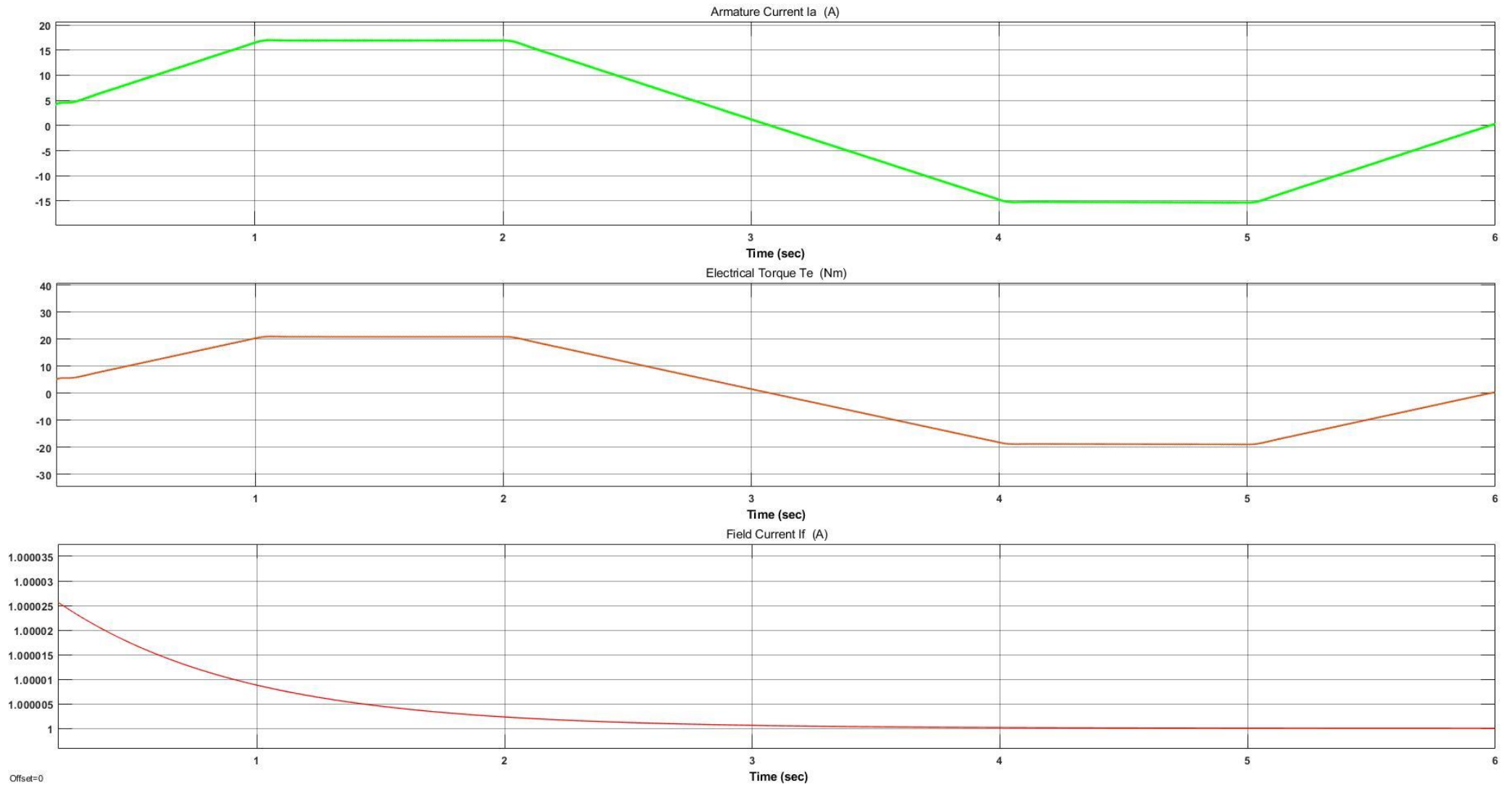


Σχήμα 5.8 : Κυματομορφές ρεύματος τυμπάνου κινητήρα, ηλεκτρικής ροπής κινητήρα και ρεύματος διέγερσης κινητήρα για προφίλ ροπής 1

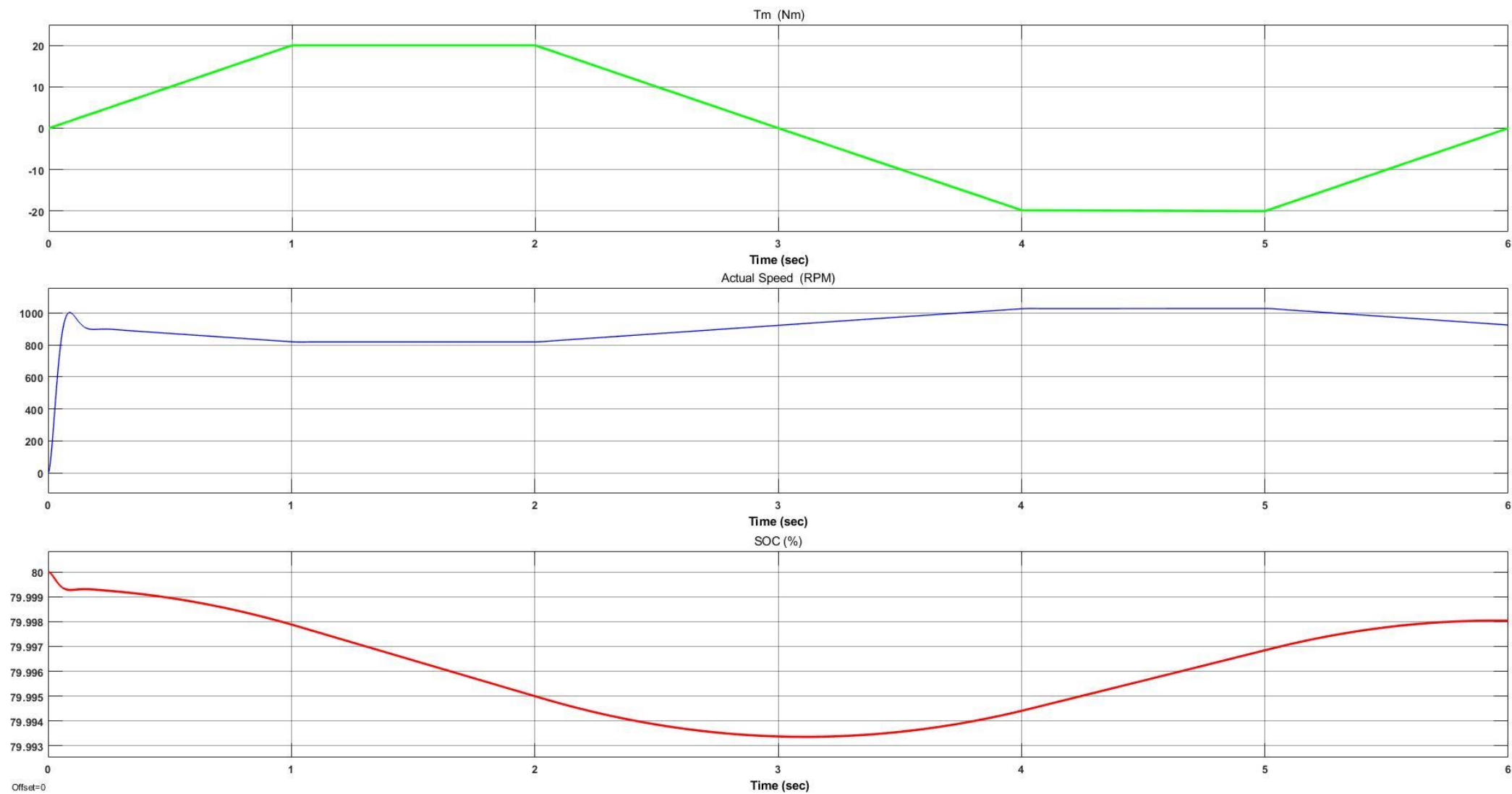


Σχήμα 5.9 : Κυματομορφές ροπής φορτίου, ταχύτητας περιστροφής κινητήρα, κατάστασης φόρτισης μπαταρίας (SOC) για προφίλ ροπής 1

Βασικές κυματομορφές συστήματος για προφίλ ροπής 2



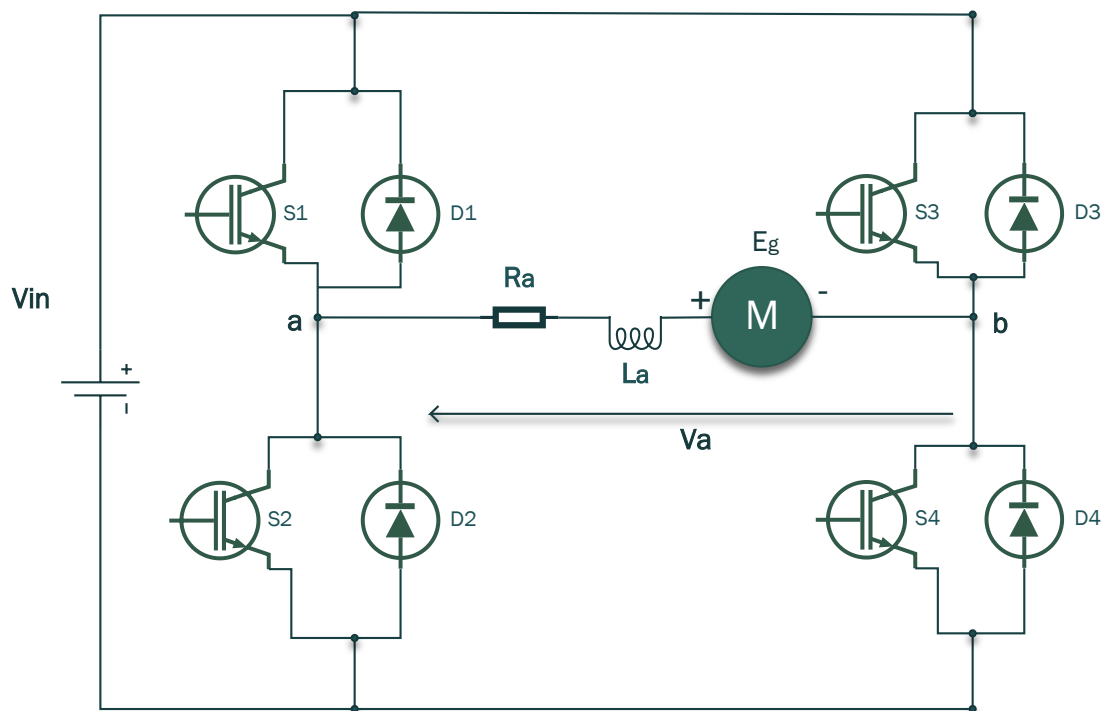
Σχήμα 5.10 : Κυματομορφές ρεύματος τυμπάνου κινητήρα, ηλεκτρικής ροπής κινητήρα και ρεύματος διέγερσης κινητήρα για προφίλ ροπής 2



Σχήμα 5.11 : Κυματομορφές ροπής φορτίου, ταχύτητας περιστροφής κινητήρα και κατάστασης φόρτισης μπαταρίας (SOC) για προφίλ ροπής 2

5.2.2 Με Χρήση Μετατροπέα Τεσσάρων Τεταρτημορίων

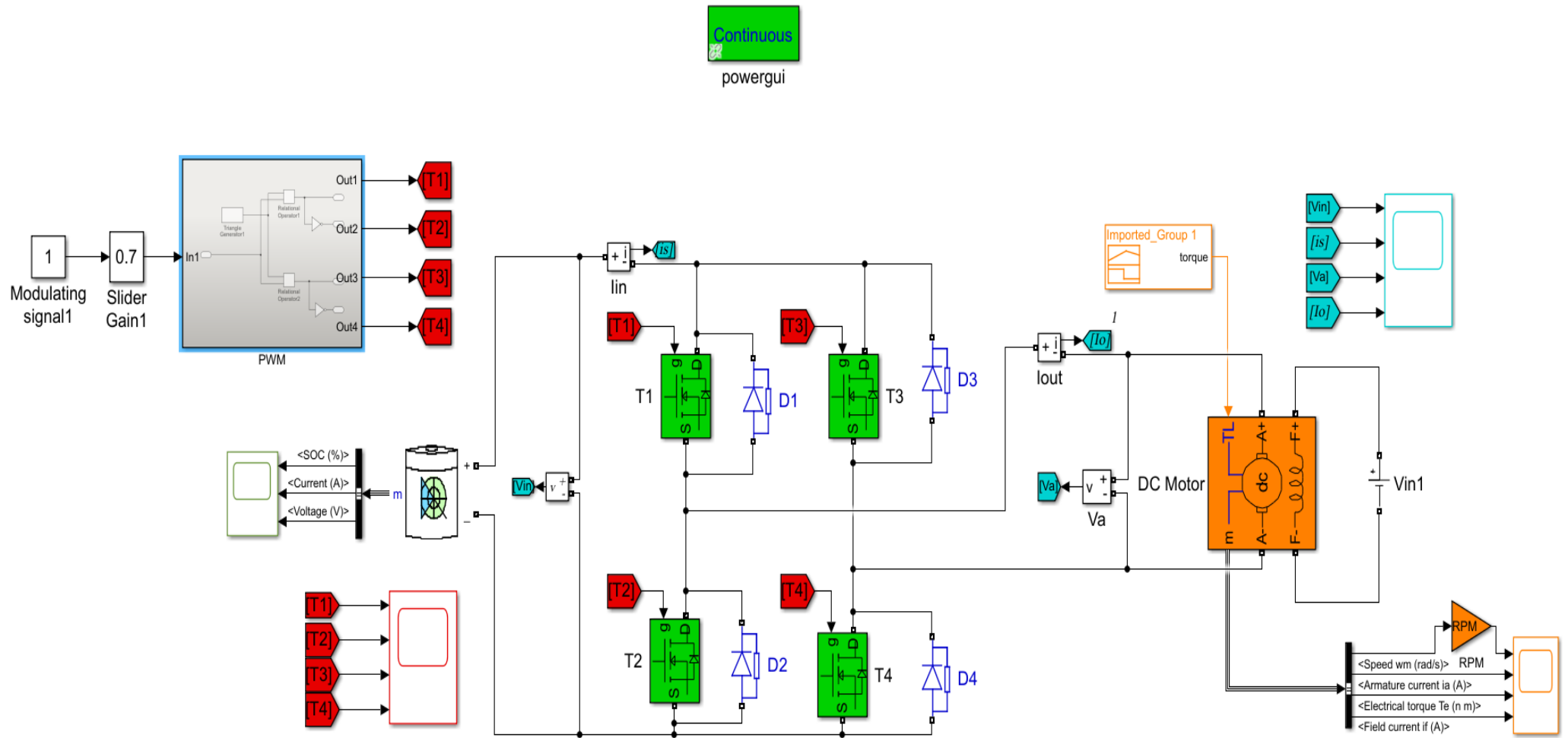
Το κινητήριο σύστημα τροφοδοτείται από τη συστοιχία μπαταριών του αυτοκινήτου, ενώ ο κινητήρας συνεχούς ρεύματος ξένης διέγερσης ελέγχεται από τον dc-dc μετατροπέα τεσσάρων τεταρτημορίων. Παρακάτω παρουσιάζεται ο μετατροπέας ελέγχου ισχύος και αναγεννητικής πέδησης, όπου στο 1^ο τεταρτημόριο η ηλεκτρική μηχανή λειτουργεί ως αριστερόστροφος κινητήρας, ενώ στο 2^ο τεταρτημόριο εκτελείται αριστερόστροφη αναγεννητική πέδηση. Αντίστοιχα, στο 3^ο τεταρτημόριο επιτυγχάνεται λειτουργία δεξιόστροφου κινητήρα και στο 4^ο δημιουργείται δεξιόστροφη αναγεννητική πέδηση.



Σχήμα 5.12 : Μετατροπέας dc-dc τεσσάρων τεταρτημορίων

Στο χρονικό διάστημα για το οποίο ενεργοποιείται ο διακόπτης Q2, το ρεύμα τυμπάνου αυξάνει με ροή ελεύθερης διέλευσης μέσω της διόδου D4. Έτσι, όταν ο διακόπτης Q2 απενεργοποιείται η μηχανή λειτουργεί ως αριστερόστροφη γεννήτρια και δημιουργείται αναγεννητική πέδηση. Ο κινητήρας δρώντας ως γεννήτρια επιστρέφει ηλεκτρική ενέργεια στην πηγή μέσω των διόδων D1 και D4. Ακόμη, η μηχανή λειτουργεί ως δεξιόστροφος κινητήρας με την ενεργοποίηση των ημιαγωγικών διακοπών S3 και S2 αυξάνοντας το ρεύμα τυμπάνου. Όταν ενεργοποιείται ο διακόπτης S2 το ρεύμα τυμπάνου μειώνεται με ροή ελεύθερης διέλευσης μέσω της διόδου D4. Τέλος, η λειτουργία στο 4^ο τεταρτημόριο δημιουργεί αναγεννητική πέδηση ανάστροφης φοράς με την μηχανή να λειτουργεί ως δεξιόστροφη γεννήτρια. Μ' αυτόν τον τρόπο, το ρεύμα τυμπάνου αυξάνει με την αγωγή του διακόπτη Q4 και της διόδου D2. Όταν ο διακόπτης Q4 απενεργοποιείται επιστρέφεται ηλεκτρική ενέργεια στην τροφοδοσία μέσω των διόδων D2 και D3.

Κύκλωμα προσομοίωσης μετατροπέα DC-DC τεσσάρων τεταρτημορίων



Σχήμα 5.13 : Κύκλωμα προσομοίωσης μετατροπέα DC-DC τεσσάρων τεταρτημορίων

Το κύκλωμα ελέγχου αναγεννητικής πέδησης του κινητήρα συνεχούς ρεύματος που εξετάζεται μέσω του περιβάλλοντος Simulink του matlab, αποτελείται από μια μπαταρία συνεχούς τάσης, έναν μετατροπέα DC-DC τεσσάρων τεταρτημορίων και έναν κινητήρα συνεχούς ρεύματος ξένης διέγερσης. Για την καλύτερη παρουσίαση των αποτελεσμάτων του κυκλώματος έχουν τοποθετηθεί κατάλληλα στοιχεία scope για την αναπαράσταση των βασικών κυματομορφών. Στο παραπάνω σχήμα 5.14 διακρίνεται το κύκλωμα ελέγχου αναγεννητικής πέδησης του κινητήριου συστήματος.

Ο κινητήρας που επιλέγεται έχει τα παρακάτω χαρακτηριστικά:

Πίνακας 4: Ονομαστικά μεγέθη DC κινητήρα

Ονομαστικά μεγέθη DC κινητήρα	
Ονομαστική τάση	240V
Ονομαστική ισχύς	5 HP
Ονομαστική ταχύτητα περιστροφής	1750 RPM
Ονομαστική ροπή	20 Nm
Ονομαστική τάση διέγερσης	150V

Η μπαταρία που επιλέγεται έχει τις ακόλουθες παραμέτρους:

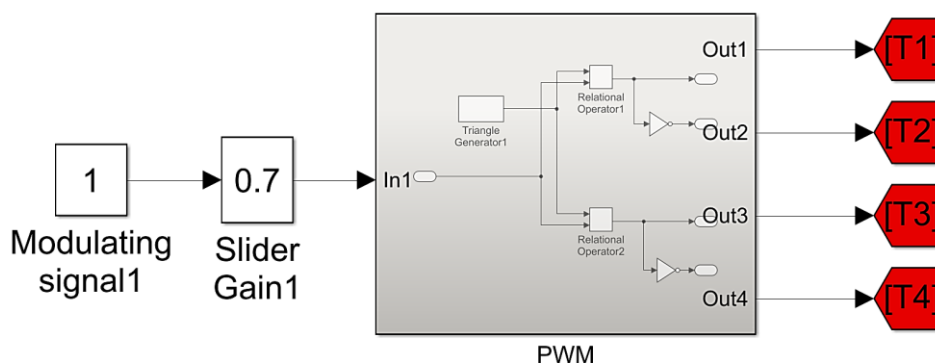
Πίνακας 5: Ονομαστικά μεγέθη Μπαταρίας

Ονομαστικά μεγέθη Μπαταρίας	
Ονομαστική τάση	240 V
Ονομαστική χωρητικότητα	100 Ah
Αρχική Κατάσταση Φόρτισης	80 (%)
Χρόνος Απόκρισης Μπαταρίας	30 sec

Διαμόρφωση εύρους παλμών (PWM)

Ο μετατροπέας DC-DC τεσσάρων τεταρτημορίων περιλαμβάνει τέσσερα ημιαγωγικά στοιχεία MOSFETs συνδεδεμένα με αντιπαράλληλες διόδους. Η παλμοδότηση πραγματοποιείται με τη βοήθεια τεσσάρων γεννητριών (pulses), οι οποίες συνδέονται στην πύλη του διακοπτικού στοιχείου. Στη συγκεκριμένη διάταξη ο έλεγχος της μέσης τιμής της τάσης εξόδου ενός μετατροπέα dc-dc επιτυγχάνεται με την αυξομείωση του εύρους παλμών της τάσης εξόδου.

Παρακάτω, παρουσιάζεται το σύστημα ανοιχτού βρόχου που έχει υλοποιηθεί στο Simulink, εφαρμόζοντας την τεχνική διαμόρφωσης εύρους παλμών των mosfets. Έτσι, πραγματοποιείται ο έλεγχος της τάσης εξόδου στις διάφορες απαιτήσεις και διακυμάνσεις φορτίου του κινητήρα.

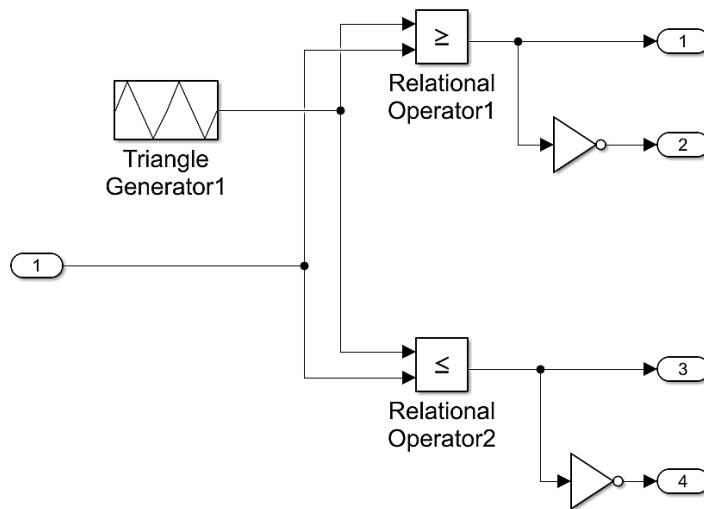


Εικόνα 5-3 : Σύστημα διαμόρφωσης εύρους παλμών

Το πεδίο slider gain1 μεταβάλλει το βαθμό χρησιμοποίησης των διακοπτικών στοιχείων ουσιαστικά από την τιμή 0.1 έως 0.9, επιτυγχάνοντας την ταυτόχρονη αγωγή των mosfets T_1 , T_4 και T_2 , T_3 . Επιλέγεται η τιμή 0.7 του πεδίου slider gain, αποσκοπώντας στη διατήρηση του αναγεννώμενου ρεύματος πέδησης στο μέγιστο επιτρεπτό επίπεδο με ευστάθεια στις χαμηλές ταχύτητες.

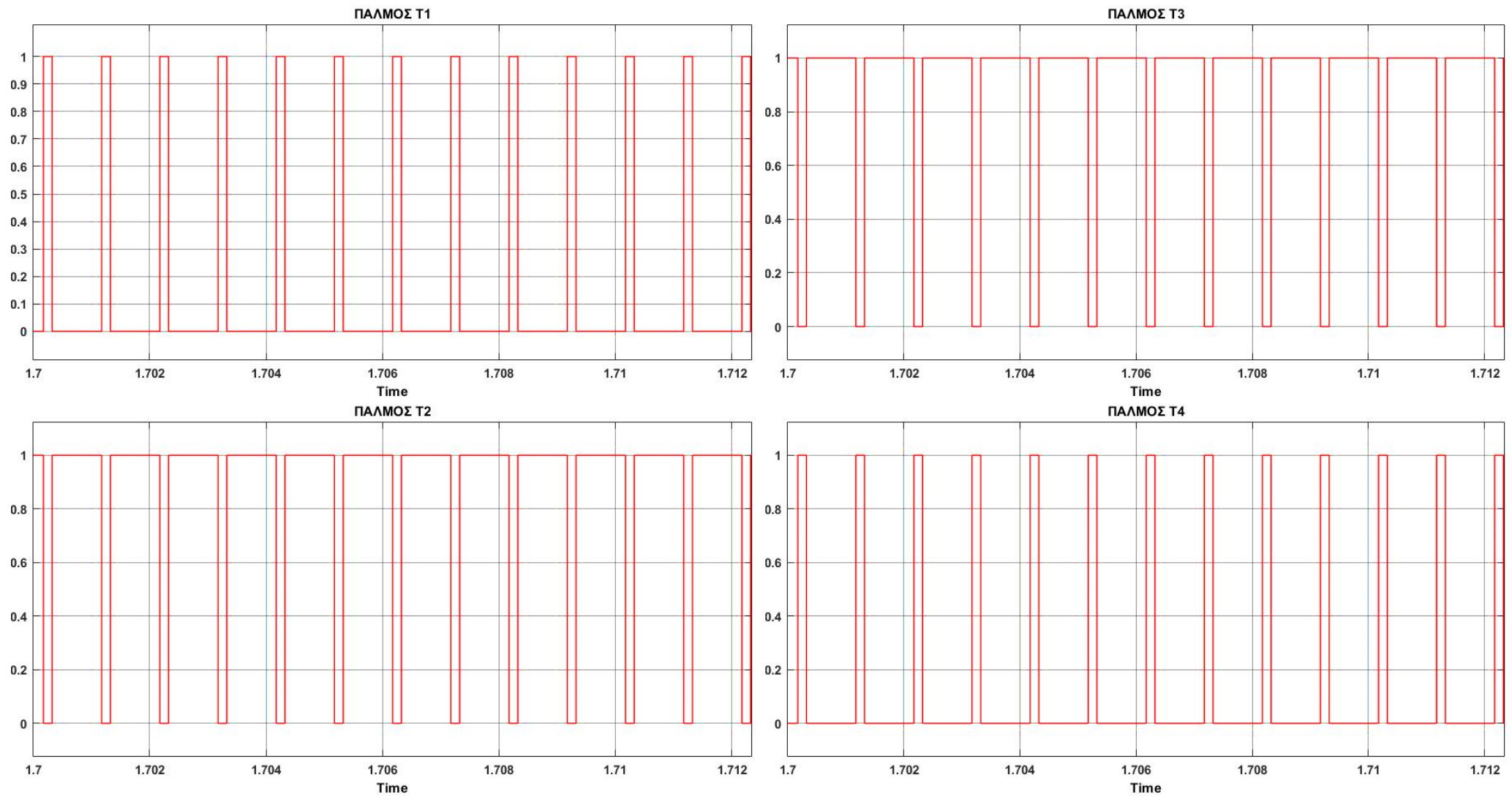
Παρακάτω, διακρίνεται η κυματομορφή παλμοδότησης των mosfets του κυκλώματος για τιμή 0.7 του πεδίου slider gain. Συγκεκριμένα, οι διακόπτες ενεργοποιούνται και απενεργοποιούνται αρκετές φορές κατά τη διάρκεια μιας ημιπεριόδου, ώστε η τάση εξόδου να ελέγχεται με την αλλαγή του εύρους παλμών.

Αναλύεται, επίσης, η διάταξη PWM του πεδίου Subsystem του κυκλώματος, το οποίο υλοποιεί την τεχνική διαμόρφωσης εύρους παλμών. Απεικονίζεται η γεννήτρια τριγωνικής κυματομορφής και τα σήματα παλμοδότησης. Τα σήματα πύλης παράγονται, συγκρίνοντας την τριγωνική κυματομορφή με το σήμα συνεχούς τάσης slider gain. Με τη διαδικασία αυτή, εξαλείφονται οι ανώτερες αρμονικές που δυσχεραίνουν το σύστημα.



Εικόνα 5-4 : Διάταξη PWM του κυκλώματος

Η συχνότητα των παλμών οδήγησης εξαρτάται από τη συχνότητα της τριγωνικής κυματομορφής, η οποία ρυθμίζεται στο 1kHz. Η επιλογή της συχνότητας λειτουργίας του μετατροπέα γίνεται λαμβάνοντας υπόψιν την πυκνότητα ισχύος σε συνδυασμό με το μέγεθος και την απόδοση του συστήματος. Ακόμη, η διακοπτική συχνότητα πρέπει να ρυθμίζεται με τέτοιο τρόπο, ώστε να μην αυξάνεται η ηλεκτρομαγνητική παρεμβολή (EMI) της διάταξης.

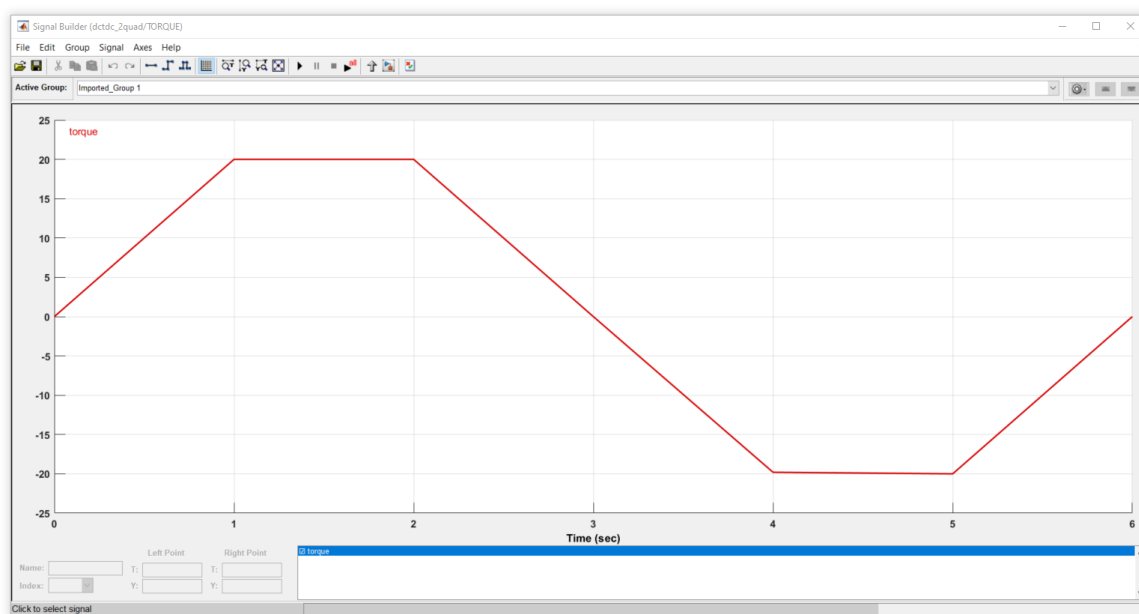


Σχήμα 5.14: Παλμοτροφοδότηση διακοπτικών στοιχείων του μετατροπέα προσομοίωσης συναρτήσει του χρόνου $time$ (sec)

Εν συνεχεία, περιγράφονται οι διαφορετικές δοκιμές, στις οποίες υποβάλλεται το κινητήριο σύστημα αναγεννητικής πέδησης, προκειμένου να εξαχθούν τα κατάλληλα συμπεράσματα. Αναλυτικότερα, σε κάθε δοκιμή μεταβάλλεται η ροπή φορτίου του κινητήρα με σκοπό τη διαφορετική συμπεριφορά και απόκριση του συστήματος. Μ' αυτόν τον τρόπο, οι δοκιμές στο σύστημα ηλεκτρικής κίνησης πραγματοποιούνται με την εξής σειρά:

- Με σταθερή θετική ροπή 20 Nm, η οποία αντιστοιχεί στο 100% της ονομαστικής τιμής του φορτίου του κινητήρα (20 Nm).
- Με σταθερή αρνητική ροπή -20 Nm
- Με το προφίλ ροπής 1. Το συγκεκριμένο προφίλ ροπής φορτίου αφορά συγκεκριμένα επίπεδα επιτάχυνσης και επιβράδυνσης, αποσκοπώντας στην βέλτιστη προσέγγιση πραγματικών συνθηκών. Παρουσιάζει μέγιστη θετική ροπή +10 Nm και μέγιστη αρνητική -10 Nm.
- Με το προφίλ ροπής 2. Το συγκεκριμένο προφίλ ροπής φορτίου αφορά συγκεκριμένα επίπεδα επιτάχυνσης και επιβράδυνσης, αποσκοπώντας στην βέλτιστη προσέγγιση πραγματικών συνθηκών. Παρουσιάζει μέγιστη θετική ροπή +20 Nm και μέγιστη αρνητική -20 Nm.

Τα προφίλ ροπής αφορούν συγκεκριμένα επίπεδα επιτάχυνσης – επιβράδυνσης. Παρακάτω, απεικονίζεται το προφίλ ροπής 1, το οποίο υλοποιείται μέσω του πεδίου Signal Builder με μέγιστη ροπή 20 Nm και ελάχιστη -20 Nm. Με τον ίδιο ακριβώς τρόπο, σχεδιάζεται το διάγραμμα ροπής 2, με μέγιστη ροπή 10 Nm και ελάχιστη -10 Nm.



Εικόνα 5-5: Σχεδιάγραμμα ροπής μέσω Signal Builder

Αποτελέσματα Προσομοίωσης

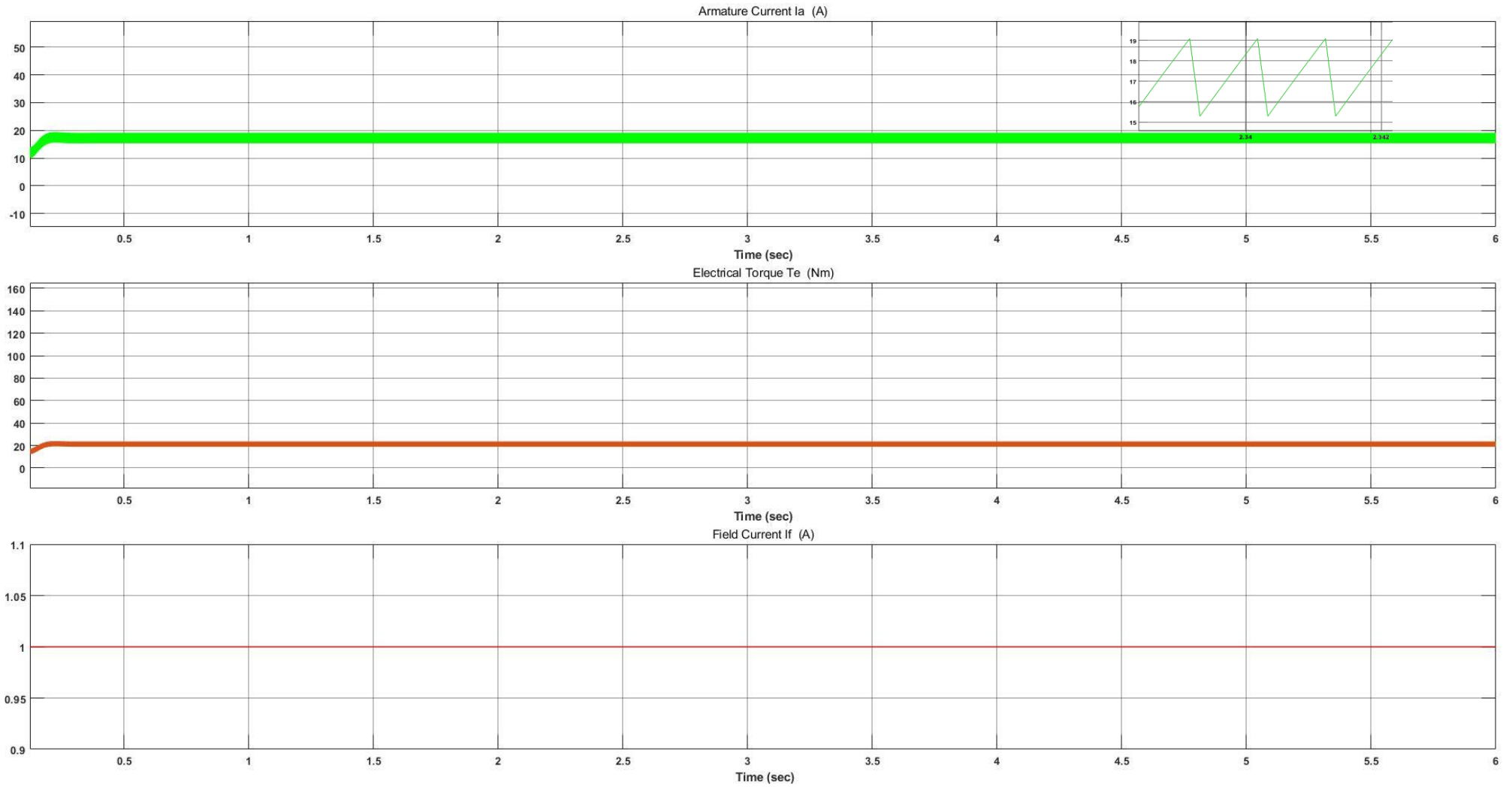
Παρακάτω εμφανίζονται οι βασικές κυματομορφές του κινητήριου συστήματος συνεχούς ρεύματος αναγεννητικής πέδησης με τη βοήθεια του προγράμματος προσομοίωσης Simulink. Έτσι, λαμβάνονται σημαντικές πληροφορίες για τη συμπεριφορά και την απόκριση του συστήματος μέσω των δοκιμών που προαναφέρθηκαν παραπάνω.

Παρουσιάζονται, λοιπόν, με τη βοήθεια των scopes οι κυματομορφές που αφορούν τη λειτουργία του κινητήριου συστήματος. Για κάθε δοκιμή που πραγματοποιείται, εμφανίζονται οι ακόλουθες κυματομορφές με την εξής σειρά:

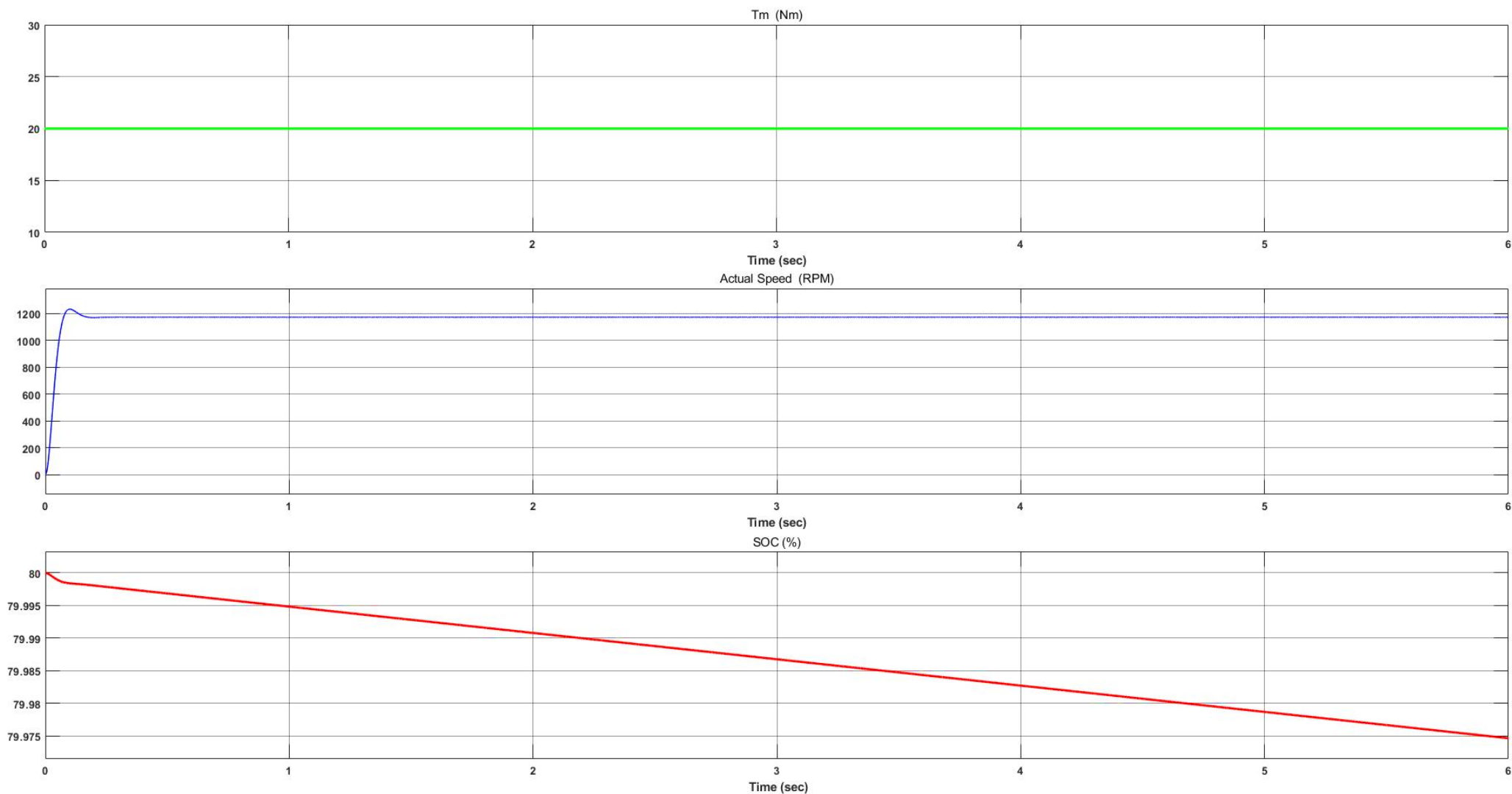
- Το ρεύμα τυλίγματος του στάτη του κινητήρα
- Η ηλεκτρομαγνητική ροπή του κινητήρα
- Το ρεύμα διέγερσης του κινητήρα

- Η ροπή φορτίου του κινητήρα
- Η πραγματική ταχύτητα του δρομέα
- Η κατάσταση φόρτισης της μπαταρίας (SOC)

Κυματομορφές σταθερής θετικής ροπής +20 Nm

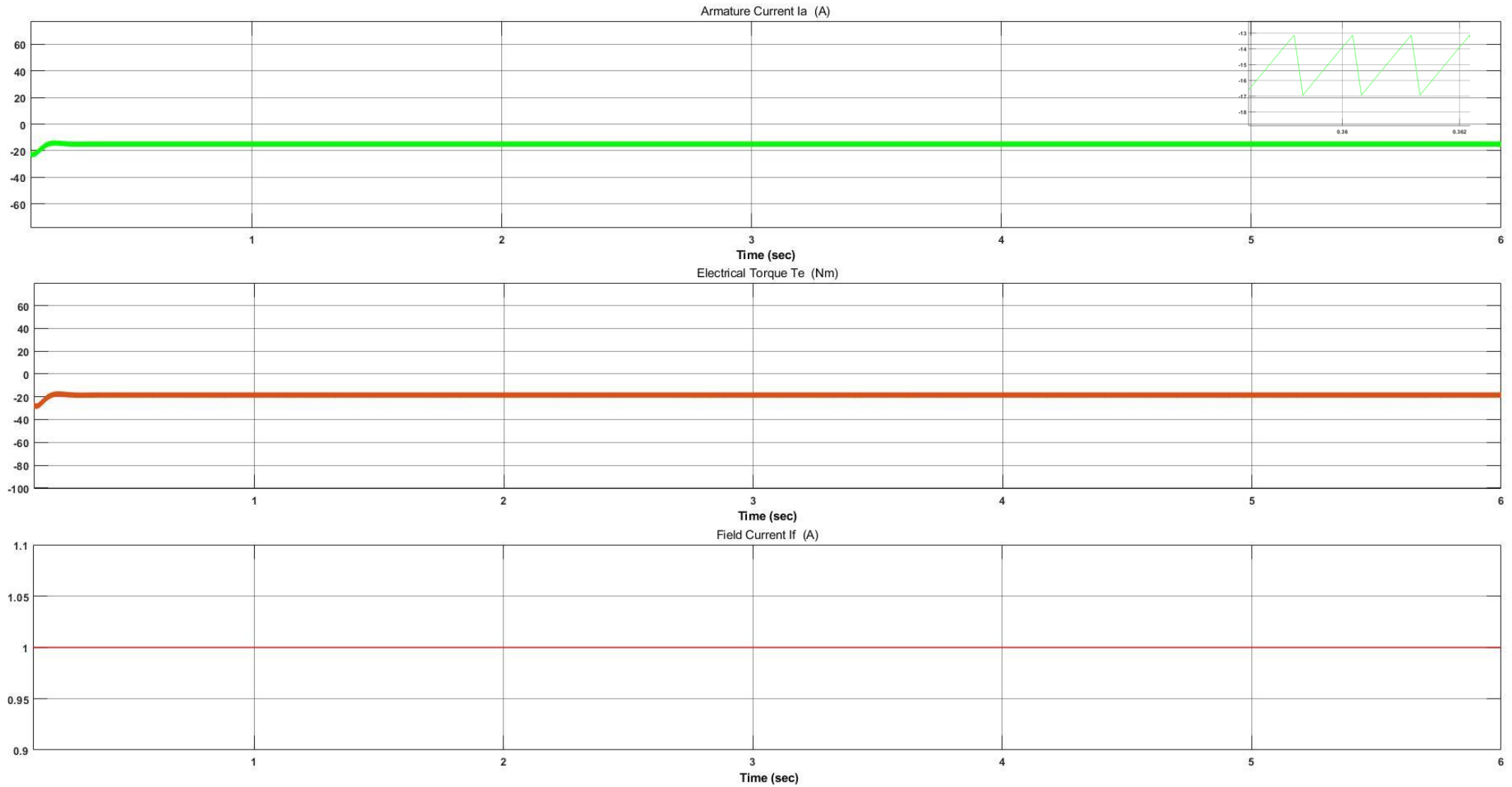


Σχήμα 5.15 : Κυματομορφές ρεύματος τυμπάνου, ηλεκτρικής ροπής και ρεύματος διέγερσης κινητήρα για σταθερή θετική ροπή 20 Nm (100% της ονομαστικής τιμής φορτίου) για $t=6s$

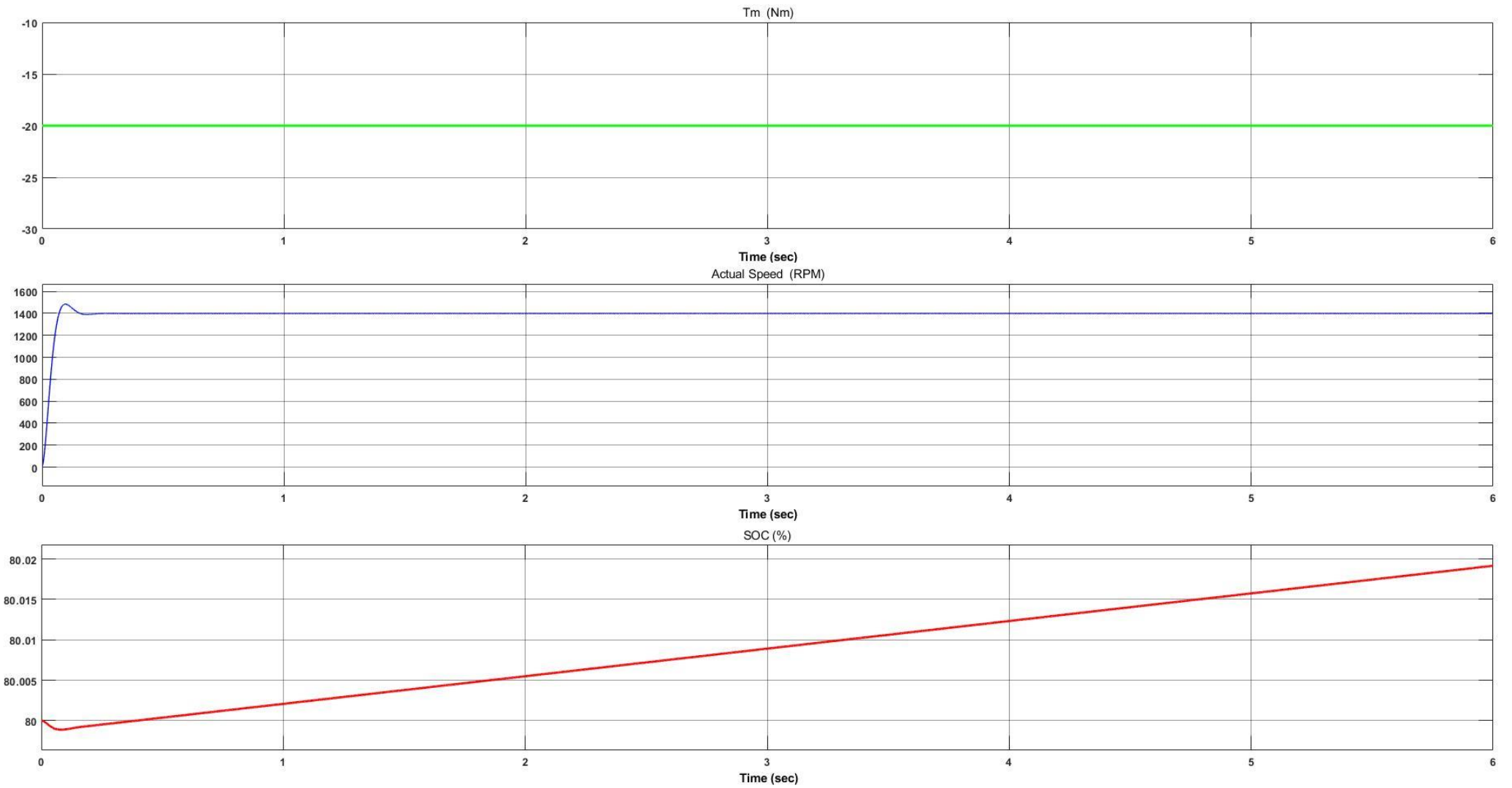


Σχήμα 5.16 : Κυματομορφές ροπής φορτίου, ταχύτητας περιστροφής κινητήρα, κατάστασης φόρτισης μπαταρίας (SOC) για σταθερή θετική ροπή 20 Nm (100% της ονομαστικής τιμής φορτίου)

Κυματομορφές σταθερής αρνητικής ροπής -20 Nm

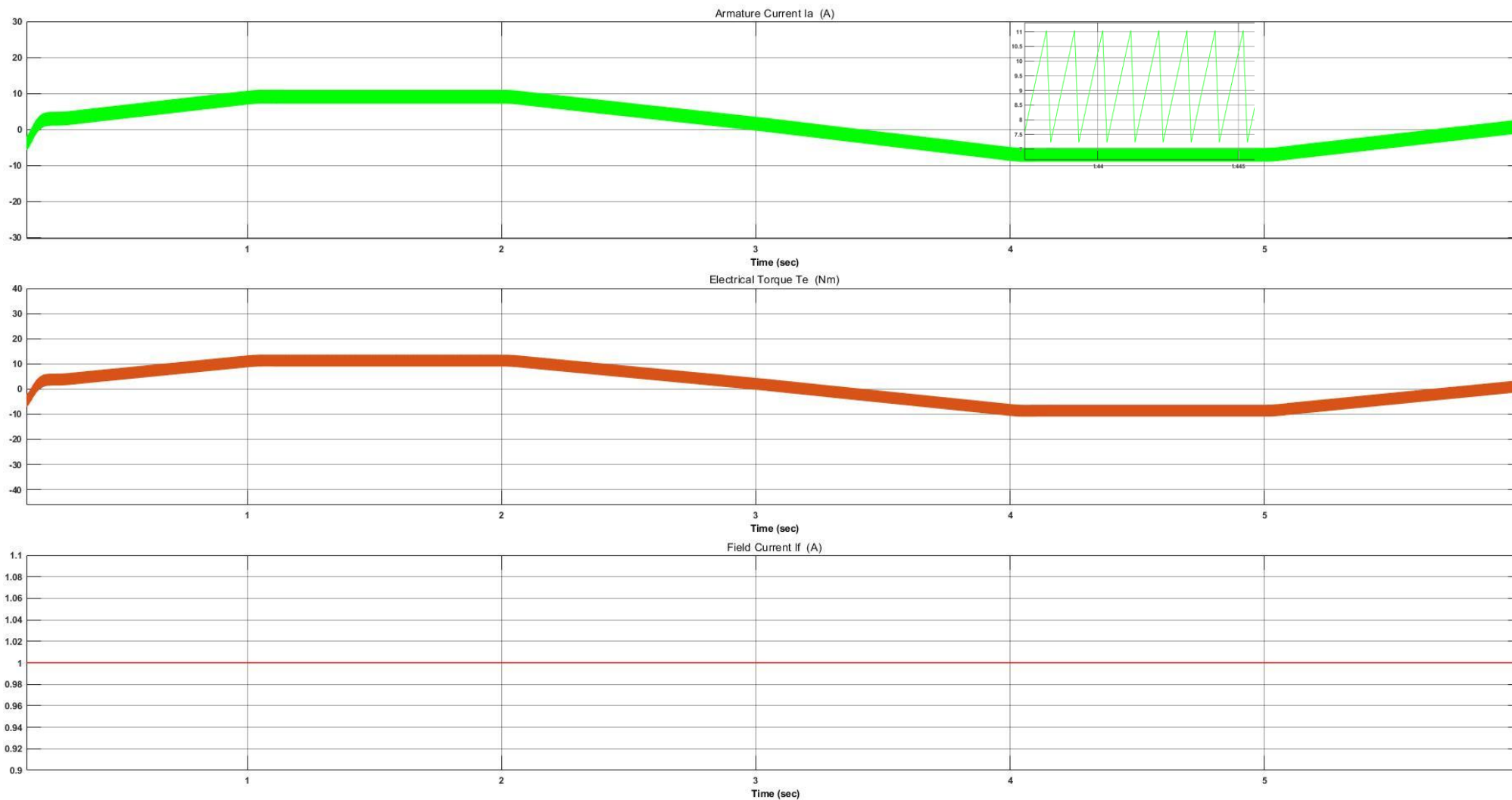


Σχήμα 5.17 : Κυματομορφές ρεύματος τυμπάνου, ηλεκτρικής ροπής και ρεύματος διέγερσης κινητήρα για σταθερή αρνητική ροπή -20 Nm (100% της ονομαστικής τιμής φορτίου)

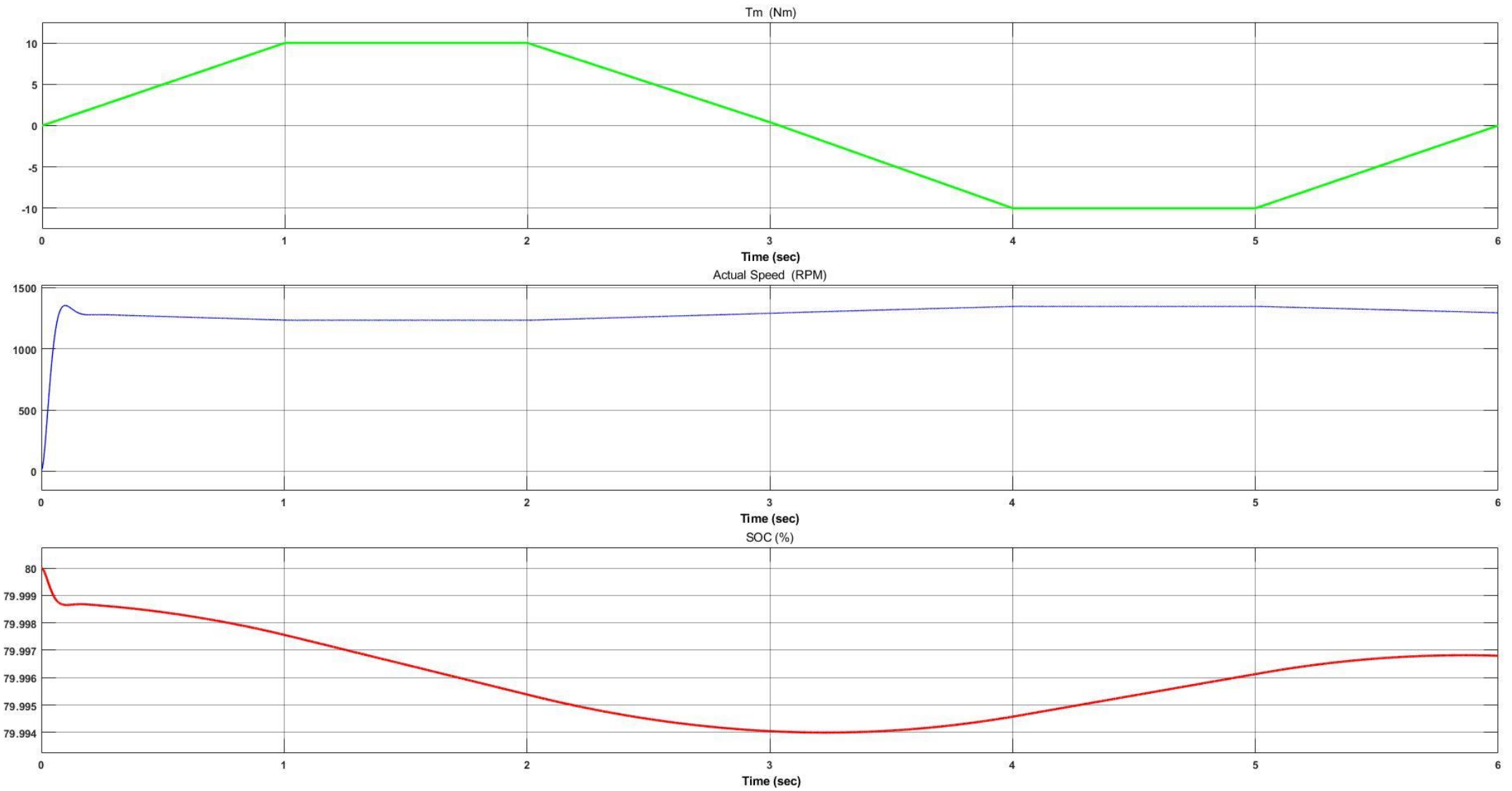


Σχήμα 5.18 : Κυματομορφές ροπής φορτίου, ταχύτητας περιστροφής κινητήρα, κατάστασης φόρτισης μπαταρίας (SOC) για σταθερή αρνητική ροπή -20 Nm (100% της ονομαστικής τιμής φορτίου)

Κυματομορφές προφίλ ροπής 1

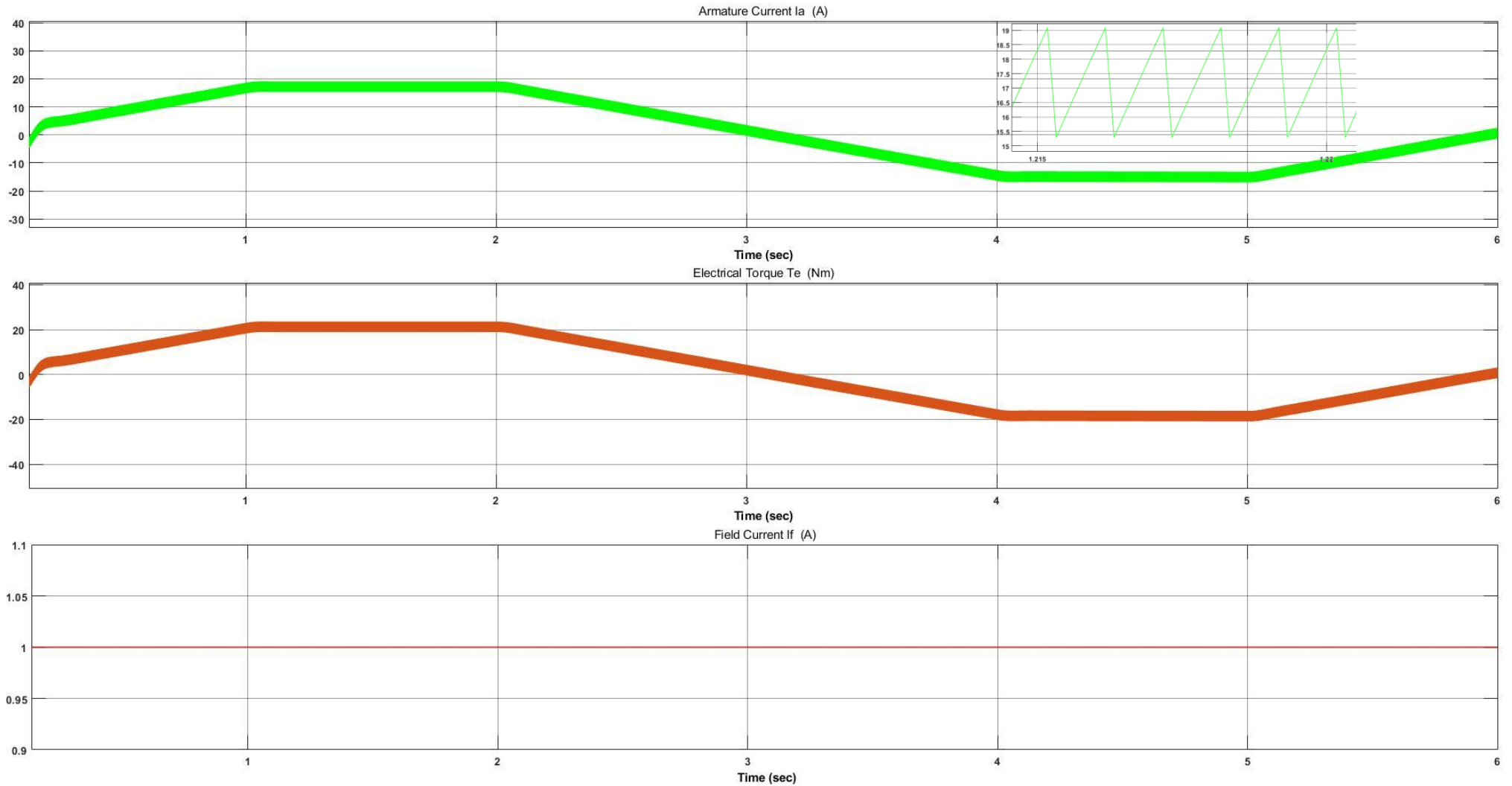


Σχήμα 5.19 : Κυματομορφές ρεύματος τυμπάνου κινητήρα, ηλεκτρικής ροπής κινητήρα και ρεύματος διέγερσης κινητήρα για προφίλ ροπής 1 [-10 Nm, +10 Nm]

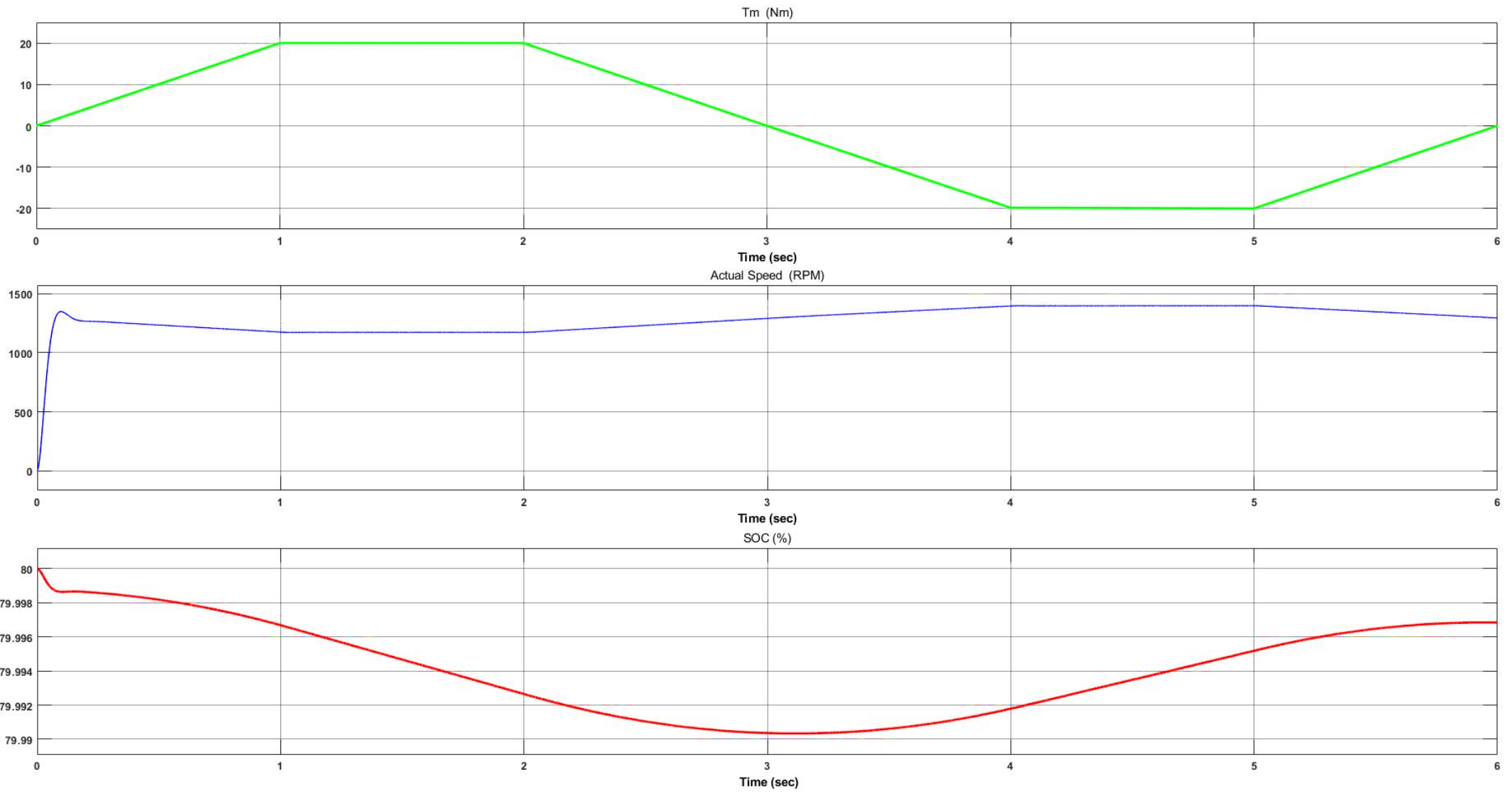


Σχήμα 5.20 : Κυματομορφές ροπής φορτίου, ταχύτητας περιστροφής κινητήρα, κατάστασης φόρτισης μπαταρίας (SOC) για προφίλ ροπής 1 [-10 Nm, +10 Nm]

Κυματομορφές προφίλ ροπής 2



Σχήμα 5.21 : Κυματομορφές ρεύματος τυμπάνου κινητήρα, ηλεκτρικής ροπής κινητήρα και ρεύματος διέγερσης κινητήρα για προφίλ ροπής 2 [-20 Nm, +20 Nm]

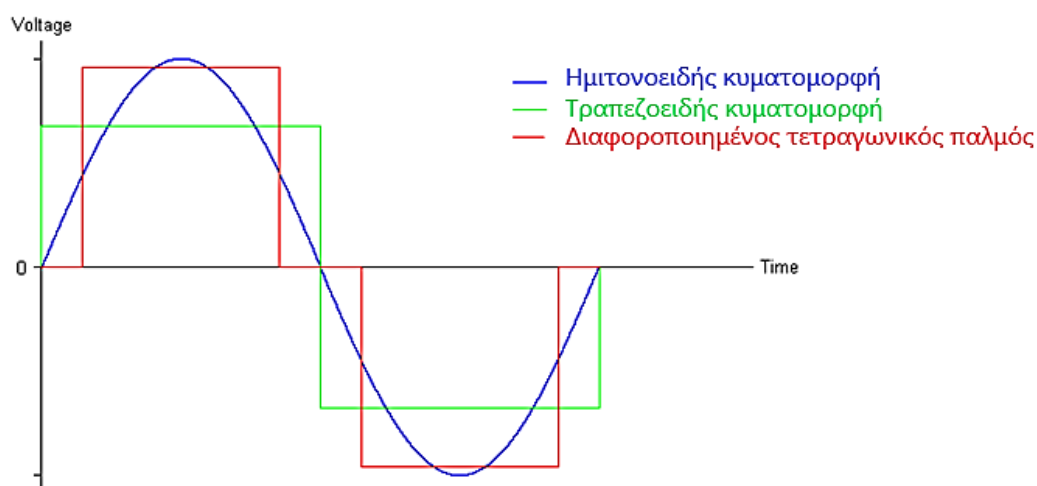


Σχήμα 5.22 : Κυματομορφές ροπής φορτίου, ταχύτητας περιστροφής κινητήρα και κατάστασης φόρτισης μπαταρίας (SOC) για προφίλ ροπής 2 [-20 Nm, +20 Nm]

5.3 Αναγεννητική Πέδηση για PM Κινητήρες

Οι κινητήρες μόνιμων μαγνητών (PM) κινητήρες αποτελούνται από δρομέα, ο οποίος κατασκευαστικά έχει στερεωμένους τους μόνιμους μαγνήτες στο εσωτερικό του. Με αυτόν τον τρόπο απουσιάζουν το τύλιγμα του πεδίου και οι δακτύλιοι ολίσθησης, συντελώντας στη μείωση των απωλειών του κινητήρα και κατά συνέπεια στην αύξηση της απόδοσής του. Συνεπώς, η μηχανή είναι πιο συμπαγής, παρέχοντας υψηλότερες ταχύτητες λειτουργίας.

Ένας κινητήρας μόνιμου μαγνήτη μπορεί να τροφοδοτείται είτε από ορθογωνικό (BLDC) είτε από ημιτονοειδές ρεύμα (PMSM). Η κύρια διάκριση μεταξύ των κινητήρων BLDC χωρίς ψήκτρες και των σύγχρονων κινητήρων PMSM έγκειται στην κυματομορφή της αντιηλεκτρεγερτικής δύναμης, καθώς οι κινητήρες BLDC παρουσιάζουν μια τραπεζοειδή αντιηλεκτρεγερτική δύναμη, ενώ οι σύγχρονοι κινητήρες μόνιμου μαγνήτη PMSM παρουσιάζουν μια ημιτονοειδή αντιηλεκτρεγερτική δύναμη.

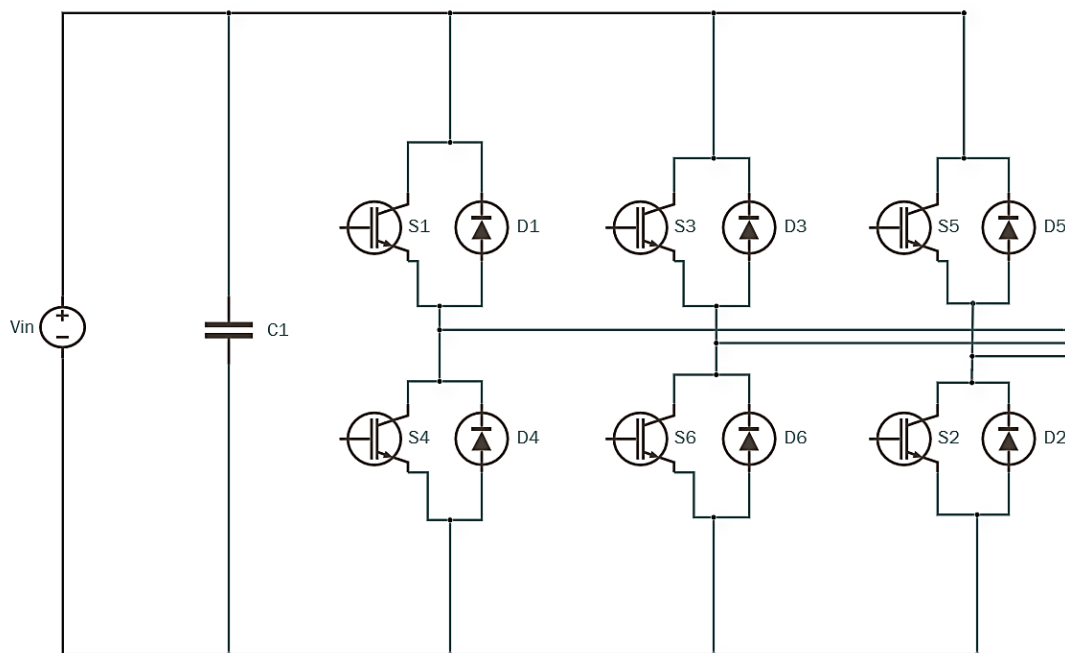


Σχήμα 5.23 : Διαφορές μεταξύ κυματομορφών

Οι τροφοδοτούμενοι με ορθογωνικό ρεύμα κινητήρες έχουν συγκεντρωμένα τυλίγματα πάνω στο στάτη, τα οποία επάγουν μία τετραγωνική ή τραπεζοειδή τάση. Οι τροφοδοτούμενοι με ημιτονοειδές ρεύμα κινητήρες έχουν κατανομημένα τυλίγματα πάνω στο στάτη, τα οποία επάγουν μία ημιτονοειδή τάση με ομαλότερη ροπή (Rashid, 2010).

5.3.1 Αναγεννητική Πέδηση σε BLDC κινητήρα

Σχεδιάζεται η διάταξη ισχύος του τριφασικού αντιστροφέα με πηγή συνεχούς τάσης (VSI), καθώς τροφοδοτείται από τη συστοιχία μπαταριών του αυτοκινήτου και οδηγεί το σύγχρονο κινητήρα μόνιμων μαγνητών τραπεζοειδούς ροής. Οι κινητήρες χωρίς ψήκτρες BLDC παρουσιάζουν μια τραπεζοειδή κυματομορφή αντιηλεκτρεγερτικής δύναμης (Back-EMF), διαμορφώνοντας ρεύματα τετραγωνικής κυματομορφής εξόδου. Επιπλέον, ο αντιστροφέας παρέχει τη δυνατότητα αμφίπλευρης ροής ισχύος, καθώς ηλεκτρική ενέργεια μεταφέρεται από τις μπαταρίες στον κινητήρα και από τον κινητήρα που λειτουργεί ως γεννήτρια στις μπαταρίες αντίστοιχα.



Σχήμα 5.24: Τριφασικός αμφίπλευρος αντιστροφέας με πηγή τάσης

Στην περίπτωση που η σύγχρονη μηχανή λειτουργεί ως κινητήρας μεταφέρεται ηλεκτρική ενέργεια από την πηγή τροφοδοσίας (συσσωρευτές) μέσω του αντιστροφέα στα τυλίγματα τυμπάνου. Στη λειτουργική φάση της αναγεννητικής πέδησης, όταν το ηλεκτρικό αυτοκίνητο κατεβαίνει μια κατηφόρα ή φρενάρει ηλεκτρικά, επιστρέφεται κινητική ενέργεια μέσω του συστήματος μετάδοσης στον κινητήρα. Με αυτόν τον τρόπο η μηχανή λειτουργεί ως γεννήτρια παράγοντας ηλεκτρική ενέργεια με την ηλεκτρική ισχύ να κατευθύνεται μέσω του τριφασικού αντιστροφέα, ο οποίος λειτουργεί ως ανόρθωση, στους συσσωρευτές που αποτελούν την πηγή τροφοδοσίας.

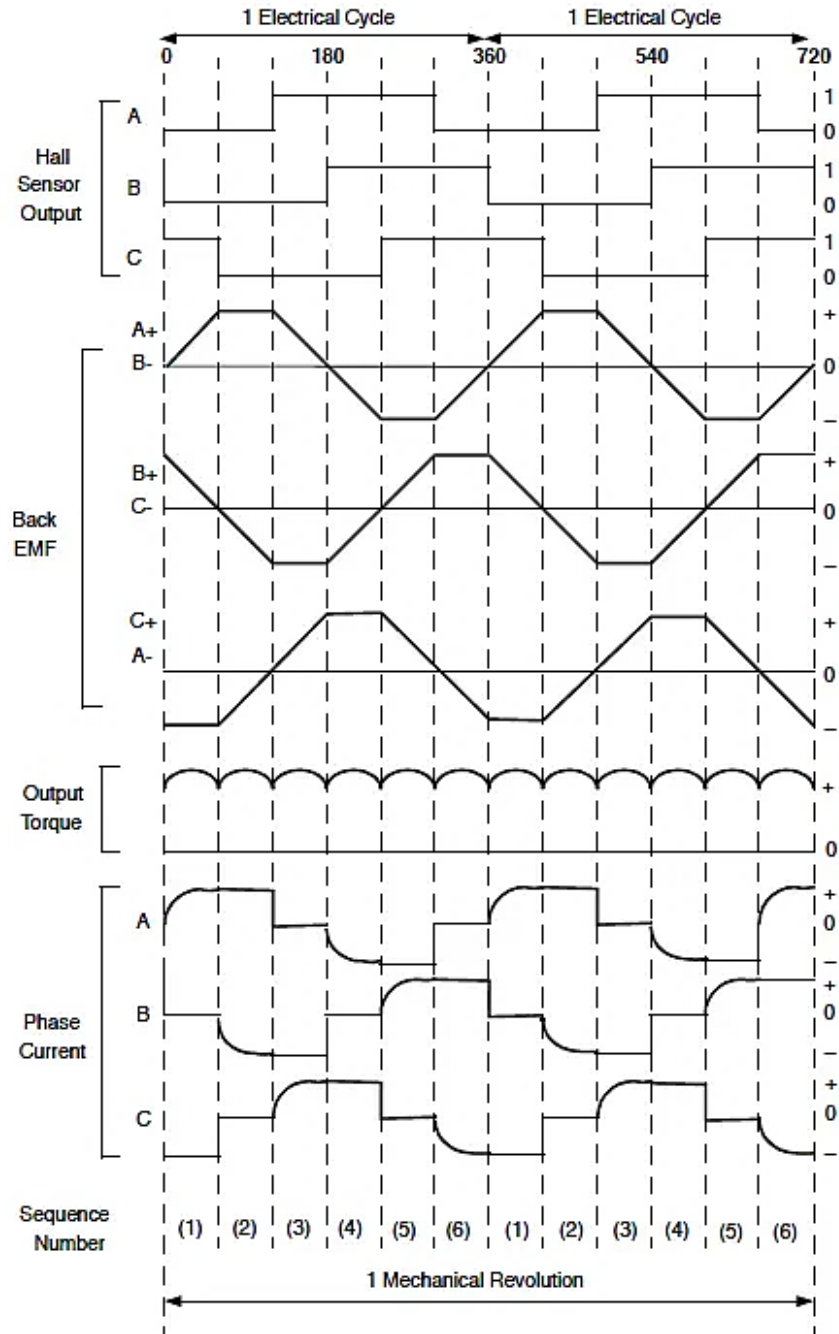
Τραπεζοειδής έλεγχος

Ο τραπεζοειδής έλεγχος πραγματοποιείται σύμφωνα με την αντιηλεκτρεγερτική δύναμη που αναπτύσσεται στο διάκενο του κινητήρα (back EMF). Σε έναν τριφασικό κινητήρα BLDC που διαρρέεται από τραπεζοειδές ρεύμα και αποτελείται από τρία τύλιγματα που καταλήγουν σε ακροδέκτες, ένα τύλιγμα παρουσιάζει θετική τιμή ρεύματος, ένα αρνητική και ένα μηδενική (ανοιχτοκυκλωμένο). Η συγκεκριμένη περιέλιξη μηδενικού ρεύματος επιτυγχάνει την ανίχνευση του σημείου μηδενικής διέλευσης αντιηλεκτρεγερτικής δύναμης, μεταβάλλοντας το σήμα του αισθητήρα Hall. Ωστόσο, η αντιηλεκτρεγερτική δύναμη μεταβάλλεται ανάλογα με την ταχύτητα του κινητήρα, γεγονός που αποδεικνύει την αποτελεσματικότητα των συγκεκριμένων αισθητήρων στον έλεγχο ταχύτητας και θέσης ενός κινητήριου συστήματος.

Αναλυτικότερα, οι αισθητήρες Hall εγκαθίστανται πάνω στο μηχανικό στέλεχος του δρομέα του κινητήρα, αποσκοπώντας στον έλεγχο της ταχύτητας με το βέλτιστο τρόπο. Με τον τρόπο αυτό, το ρεύμα ελέγχεται κάθε φορά μέσω των φάσεων, όπως αναλύθηκε, επιτυγχάνοντας τον έλεγχο θέσης του δρομέα. Οι αισθητήρες Hall τοποθετούνται σε απόσταση 120° με τα σήματα εξόδου να μεταβάλλονται με τις αλλαγές στα μαγνητικά πεδία του μόνιμου μαγνήτη.

Στη διάρκεια περιστροφής του κινητήρα, το ρεύμα στους ακροδέκτες αλλάζει τις κατευθύνσεις των ρευμάτων που εφαρμόζονται στις περιελίξεις του πηνίου, ανάλογα με τη θέση του δρομέα κάθε 60° περιστροφής με αποτέλεσμα κάθε διάνυσμα να τοποθετείται σε μία από τις έξι διαφορετικές πιθανές κατευθύνσεις. Οι κατευθύνσεις 'μεταφράζονται' σε σήματα, δημιουργώντας 6 διαφορετικές καταστάσεις, όπου σε συνδυασμό με την επιθυμητή ταχύτητα περιστροφής και τη ροπή του κινητήρα, επιτυγχάνεται ο τελικός έλεγχος των ημιαγωγικών διακοπών του συστήματος.

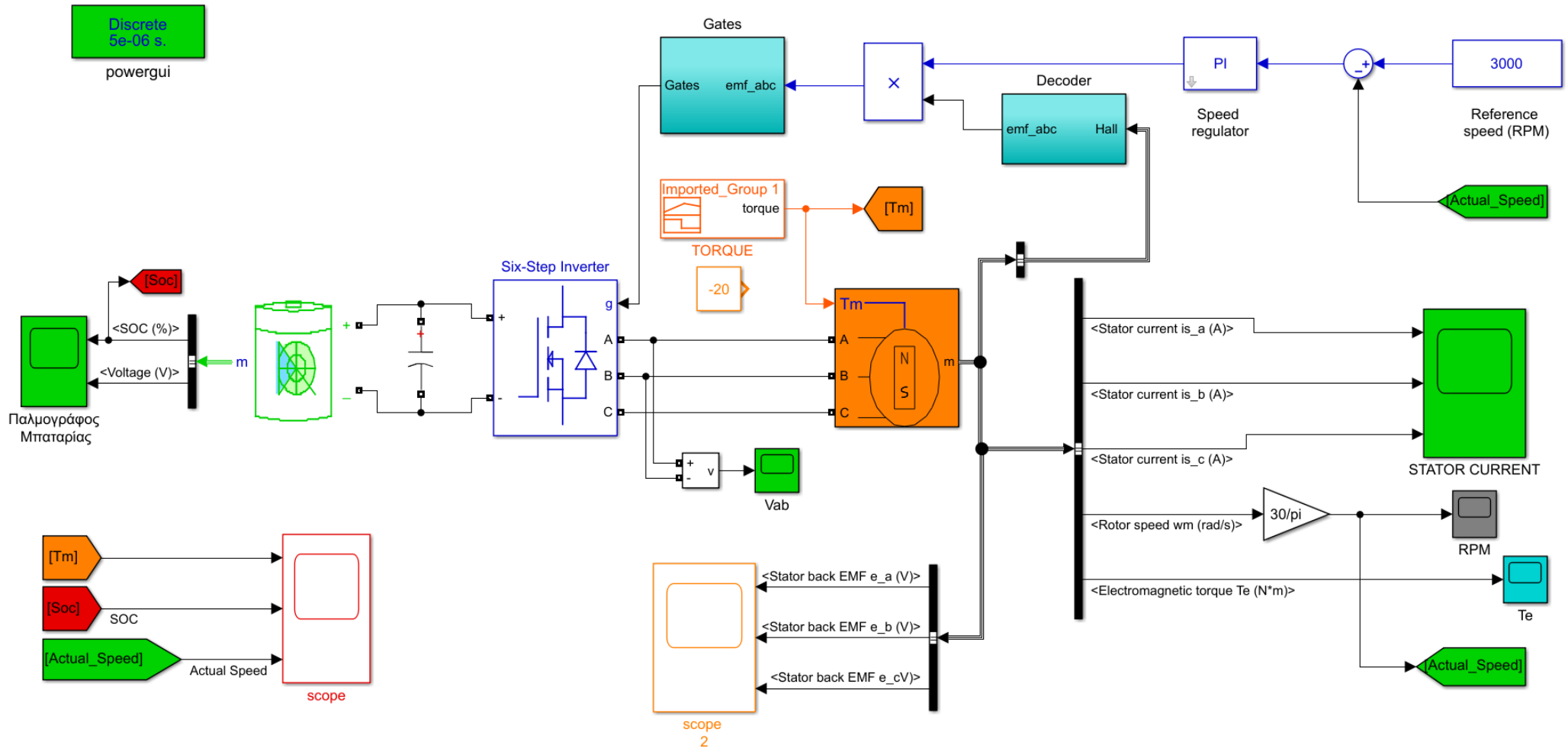
Στο παρακάτω διάγραμμα εμφανίζονται οι κυματομορφές για κάθε τύλιγμα του κινητήρα με έλεγχο έξι σταδίων ή 6-step control, όπου διακρίνονται έξι διαφορετικές καταστάσεις, καθώς περιστρέφεται ο δρομέας. Σε αυτά τα στάδια επιτυγχάνεται η μετατροπή των τετραγωνικών κυμάτων της αντιηλεκτρεγερτικής δύναμης μέσω των σημάτων Hall, καθώς μεταβάλλονται οι κατευθύνσεις των ρευμάτων που εφαρμόζονται στο εσωτερικό του κινητήρα, ανάλογα με τη θέση του δρομέα.



Σχήμα 5.25 : Κυματομορφές αισθητήρων Hall με τις αντιηλεκτρεγερτικές δυνάμεις και τα ρεύματα κάθε φάσης ενός BLDC κινητήρα

Η λειτουργία αναγεννητικής πέδησης στον BLDC κινητήρα, εξετάζεται μέσω προσομοίωσης στο Simulink. Στο περιβάλλον αυτό εμφανίζεται το κύκλωμα τραπεζοειδούς ελέγχου μέσω PI ελεγκτή, παρουσιάζοντας τη συμπεριφορά του κινητήριου συστήματος.

Κύκλωμα προσομοίωσης αναγεννητικής πέδησης BLDC κινητήρα



Σχήμα 5.26 : Κύκλωμα προσομοίωσης Simulink αναγεννητικής πέδησης BLDC κινητήρα

Το κύκλωμα ελέγχου αναγεννητικής πέδησης του κινητήρα BLDC μέσω αισθητήρων Hall, υλοποιείται στο περιβάλλον Simulink με τραπεζοειδή έλεγχο. Το σύστημα ηλεκτρικής κίνησης αποτελείται μία μπαταρία, έναν τριφασικό αντιστροφέα και έναν τριφασικό σύγχρονο κινητήρα τραπεζοειδούς ροής (BLDC). Ακόμη, το κύκλωμα ελέγχου περιλαμβάνει έναν PI ελεγκτή, έναν αποκωδικοποιητή αισθητήρων Hall και μια μονάδα ελέγχου παλμών πύλης.

Ο κινητήρας (Permanent Magnet Synchronous Machine) που επιλέγεται έχει τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

Πίνακας 6 : Ονομαστικά μεγέθη BLDC κινητήρα

Ονομαστικά μεγέθη BLDC κινητήρα	
Ονομαστική τάση	500 V
Ονομαστική ισχύς	1 KW
Ονομαστική ταχύτητα περιστροφής	3000 RPM
Ονομαστική ροπή	20 Nm
Αυτεπαγωγή τυλιγμάτων	0.001523 H
Αντίσταση τυλιγμάτων	2.8750 Ω
Μαγνητική ροή	0.175 Wb

Η μπαταρία που επιλέγεται έχει τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

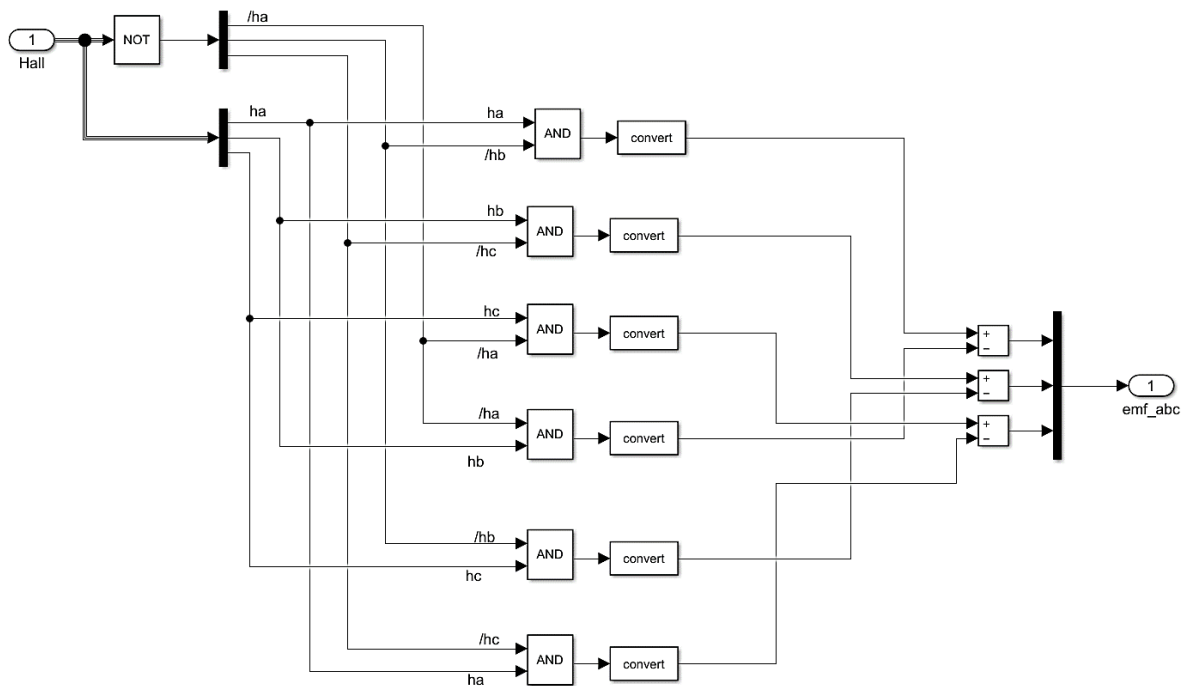
Πίνακας 7 : Ονομαστικά μεγέθη Μπαταρίας

Ονομαστικά μεγέθη Μπαταρίας	
Ονομαστική τάση	500 V
Ονομαστική χωρητικότητα	80 Ah
Αρχική Κατάσταση Φόρτισης	80 (%)
Χρόνος Απόκρισης Μπαταρίας	30 sec

Ο τριφασικός αντιστροφέας αμφίπλευρης ροής ισχύος αποτελείται από τρεις αντιστροφείς ημιγέφυρας, οι οποίοι είναι συνδεδεμένοι παράλληλα με έξι διακοπτικά στοιχεία MOSFETs και αντιπαράλληλες διόδους παλμοδότησης τύπου six-step.

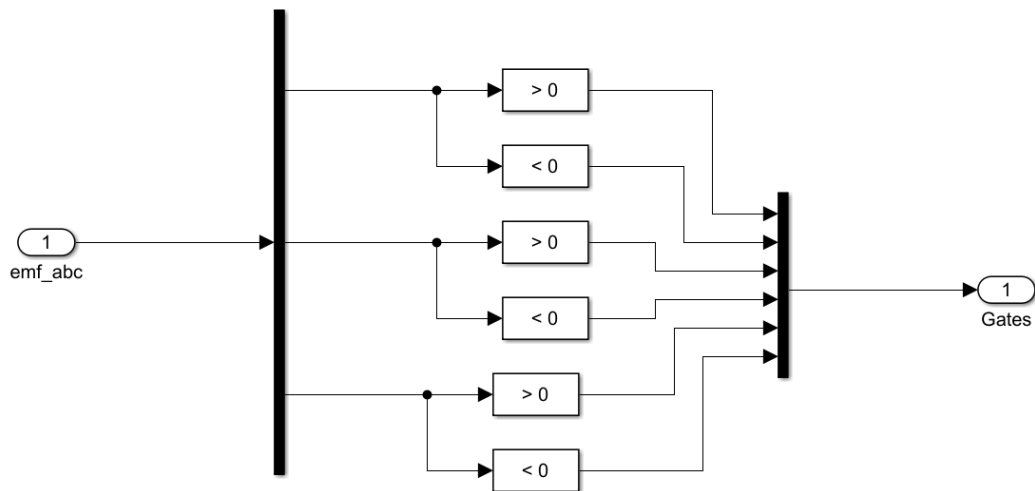
Τραπεζοειδής Έλεγχος

Όπως έχει αναλυθεί, η εφαρμογή τραπεζοειδούς ελέγχου αφορά τη μετατροπή τετραγωνικών κυμάτων μέσω της ανάπτυξης κατάλληλων σημάτων από τους αισθητήρες Hall. Στην προσομοίωση του τραπεζοειδούς ελέγχου υπάρχει η δυνατότητα αξιοποίησης των συγκεκριμένων αισθητήρων μέσω των μετρητικών στοιχείων του κινητήρα (bus Selector). Με αυτόν τον τρόπο, προσδιορίζεται η θέση του δρομέα, δημιουργώντας κατάλληλα σήματα Hall, τα οποία κατά αντιστοιχία αποκωδικοποιούνται σε εντολές τάσης μέσω της ακόλουθης διάταξης του πεδίου decoder του κυκλώματος.



Σχήμα 5.27 : Αποκωδικοποίηση των σημάτων των αισθητήρων Hall σε τάσεις A, B, C

Εν συνεχεία, τα σήματα του αισθητήρα που μετατρέπονται σε τάσεις μέσω αποκωδικοποίησης, τελικά ρυθμίζουν τους παλμούς έναυσης των MOSFETs με αποτέλεσμα την τραπεζοειδή μεταγωγή στον BLDC κινητήρα. Η λογική αλληλουχία αγωγής των διακοπών συμβάλει στην κίνηση του κινητήρα επιτυγχάνοντας τον έλεγχο της ταχύτητα και της ροπής. Η ταχύτητα, λοιπόν, σε έναν κινητήρα BLDC μεταβάλλεται ανάλογα με την τάση που εφαρμόζεται στα τυλίγματα του στάτη.



Σχήμα 5.28 : Δημιουργία παλμών έναυσης βασισμένοι στους αισθητήρες Hall

Η αποκωδικοποίηση των σημάτων επιτυγχάνεται μέσω του ακόλουθου πίνακα αληθείας σύμφωνα με τον οποίο ορίζεται η κατάλληλη παλμοτροφοδότηση των ημιαγωγικών στοιχείων του τριφασικού αντιστροφέα που ελέγχουν τον κινητήρα BLDC. Οι αισθητήρες τοποθετούνται στον BLDC κινητήρα ανά 120°, γεγονός που επιφέρει 8 διαφορετικούς συνδυασμούς οδήγησης των mosfets, απορρίπτοντας τον πρώτο και τελευταίο συνδυασμό.

Πίνακας 8 : Πίνακας αληθείας για τα διαστήματα λειτουργίας MOSFETs

emf_a	emf_b	emf_c	Q1	Q2	Q3	Q4	Q5	Q6
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	-1	+1	0	0	0	+1	+1	0
-1	+1	0	0	+1	+1	0	0	0
-1	0	+1	0	+1	0	0	+1	0
+1	0	-1	+1	0	0	0	0	1
+1	-1	0	+1	0	0	+1	0	0
0	+1	-1	0	0	+1	0	0	1
0	0	0	0	0	0	0	0	0

Τελικά, τα σήματα από τους αισθητήρες Hall, διαμορφώνονται σε έξι διαφορετικά διαστήματα αγωγής των διακοπών, δηλώνοντας την κατάσταση των ημιαγωγικών διακοπών σε θέσεις (1), (0), (-1). Η θετική θέση (+1) σημαίνει ενεργοποίηση του διακόπτη θετικής ημιπεριόδου και απενεργοποίηση του αντίστοιχου αρνητικής ημιπεριόδου, ενώ η αρνητική θέση (-1) σημαίνει απενεργοποίηση του διακόπτη θετικής ημιπεριόδου και ενεργοποίηση του αντίστοιχου αρνητικής ημιπεριόδου. Η ουδέτερη θέση (0) παραπέμπει στην απενεργοποίηση και των δύο ημιαγωγικών διακοπών.

PI Ελεγκτής

Ο έλεγχος της ταχύτητας μέσω κλειστού βρόγχου επιτυγχάνεται μέσω ενός PI ελεγκτή, αποσκοπώντας στην αντιστάθμιση και την ευστάθεια του συστήματος ηλεκτρικής κίνησης. Η επεξεργασία του κέρδους του PI ελεγκτή πραγματοποιείται βάσει της συνολικής συμπεριφοράς του συστήματος, λαμβάνοντας υπόψη τον χρόνο ανόδου, τον χρόνο αποκατάστασης και την υπερύψωση.

Μ' αυτόν τον τρόπο, ο PI ελεγκτής συγκρίνει την πραγματική ταχύτητα του κινητήρα με την επιθυμητή ταχύτητα και μέσω των κερδών ορίζει την τάση του αντιστροφέα μειώνοντας το σφάλμα. Τα κέρδη του ελεγκτή προκύπτουν δειγματοληπτικά (Trial and Error) με $P = 90$ και $I = 7$. Η ρύθμιση των κερδών έγινε χειροκίνητα, καθώς η λειτουργία Autotuner του Simulink δεν απέφερε τα επιθυμητά αποτελέσματα λόγω μη γραμμικότητας των ψηφιακών στοιχείων του κυκλώματος.

Η τάση που εφαρμόζεται στα τυλίγματα του στάτη ρυθμίζεται με αποτέλεσμα τον συνολικό έλεγχο της ταχύτητας του κινητήρα. Σε κάθε χρονικό διάστημα λειτουργίας, καταγράφεται η μέτρηση της ταχύτητας περιστροφής του κινητήρα και συγκρίνεται με την επιθυμητή τιμή. Η τιμή σφάλματος που προκύπτει, τροφοδοτεί έναν PI ελεγκτή, ο οποίος με τη σειρά του μεταβάλλει την τάση στα τυλίγματα του στάτη, μειώνοντας το σφάλμα.

Δοκιμές Προσομοίωσης

Παρακάτω, περιγράφεται η διαδικασία των δοκιμών, στις οποίες υποβάλλεται το κινητήριο σύστημα αναγεννητικής πέδησης, προκειμένου να εξαχθούν τα επιθυμητά συμπεράσματα. Αναλυτικότερα, σε κάθε δοκιμή μεταβάλλονται η ροπή και η ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα με σκοπό την εξέταση της συμπεριφοράς του συστήματος. Μ' αυτόν τον τρόπο, οι δοκιμές στο κινητήριο σύστημα πραγματοποιούνται με την εξής σειρά:

- Με σταθερή θετική ροπή στο 100% της ονομαστικής τιμής του φορτίου του κινητήρα (20 Nm) και σταθερή ταχύτητα περιστροφής στο 100% της ονομαστικής του τιμής (3000 rpm). Εισάγεται σταθερή τιμή ροπής φορτίου 20 Nm και σταθερή ταχύτητα 3000 rpm μέσω του πεδίου constant.
- Με σταθερή αρνητική ροπή στο 100% της ονομαστικής τιμής του φορτίου του κινητήρα και σταθερή ταχύτητα περιστροφής στο 100% της ονομαστικής τιμής.

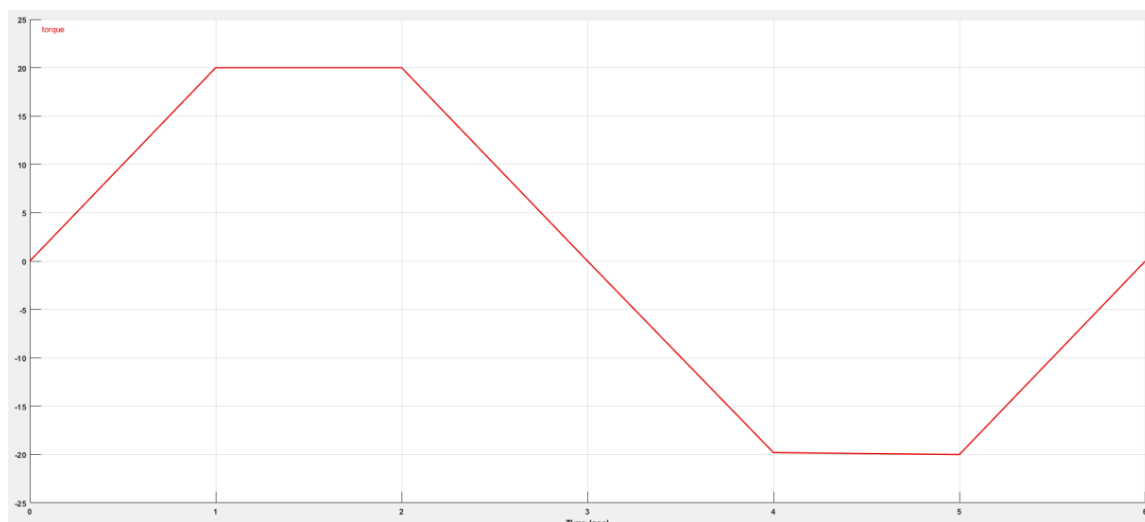
Εισάγεται σταθερή τιμή ροπής φορτίου -20 Nm και σταθερή ταχύτητα περιστροφής 3000 rpm μέσω του πεδίου constant.

- Με συγκεκριμένο προφίλ ροπής φορτίου με επιτάχυνση και επιβράδυνση, προσεγγίζοντας πραγματικές συνθήκες φορτίου. Το διάγραμμα ροπής υλοποιείται μέσω του πεδίου Signal Builder μεταξύ ορισμένων τιμών ροπής φορτίου του κινητήρα. Έτσι, προκύπτουν τέσσερις διαφορετικοί συνδυασμοί δοκιμών για τις τιμές ταχύτητας περιστροφής που εμφανίζονται στον κάτωθι πίνακα :

Πίνακας 9 : Συνδυασμοί δοκιμών για διαφορετικές τιμές ταχύτητας περιστροφής

ΤΙΜΕΣ ΡΟΠΗΣ ΚΙΝΗΤΗΡΑ		ΕΠΙΘΥΜΗΤΗ ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΚΙΝΗΤΗΡΑ	ΑΡΙΘΜΗΣΗ ΠΡΟΦΙΛ ΡΟΠΗΣ
ΜΕΓΙΣΤΗ ΘΕΤΙΚΗ 10 Nm	ΜΕΓΙΣΤΗ ΑΡΝΗΤΙΚΗ -10 Nm	1500 rpm	1
		3000 rpm	2
ΜΕΓΙΣΤΗ ΘΕΤΙΚΗ 20 Nm	ΜΕΓΙΣΤΗ ΑΡΝΗΤΙΚΗ -20 Nm	1500 rpm	3
		3000 rpm	4

Το σχεδιάγραμμα ροπής διακρίνεται παρακάτω και υλοποιείται μέσω του πεδίου Signal Builder με μέγιστη ροπή 20 Nm και ελάχιστη -20 Nm. Με τον ίδιο τρόπο σχεδιάζεται το αντίστοιχο διάγραμμα ροπής για μέγιστη ροπή 10 Nm και για ελάχιστη -10 Nm.



Εικόνα 5-6 : Το σχεδιάγραμμα ροπής μέσω του πεδίου Signal Builder

Σύμφωνα με το σχεδιάγραμμα ροπής η ηλεκτρική μηχανή λειτουργεί ως κινητήρας από 0-3 s και ως γεννήτρια από 3-6 s. Ο κινητήρας επιταχύνει με την ορθή φορά

περιστροφής στο χρονικό διάστημα 0-1s με σταθερή ροπή από 1-2s. Η αναγεννητική πέδηση ορθής φοράς πραγματοποιείται στο χρονικό διάστημα 2-3 s με την μηχανή να λειτουργεί ως γεννήτρια στο διάστημα 3-6s. Αντίστοιχα, παρατηρείται λειτουργία γεννήτριας σταθερής ροπής στο χρονικό διάστημα 4-5 s. Τέλος, η αναγεννητική πέδηση ανάστροφης φοράς περιστροφής επιτυγχάνεται από 5-6 s.

Αποτελέσματα Προσομοίωσης

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των δοκιμών προσομοίωσης, στις οποίες υποβάλλεται το σύστημα ηλεκτρικής κίνησης. Εξάγονται, λοιπόν, οι κυματομορφές που περιγράφουν τη συμπεριφορά και την απόκριση του BLDC κινητήρα στις διάφορες μεταβατικές συνθήκες, εφαρμόζοντας τραπεζοειδή έλεγχο.

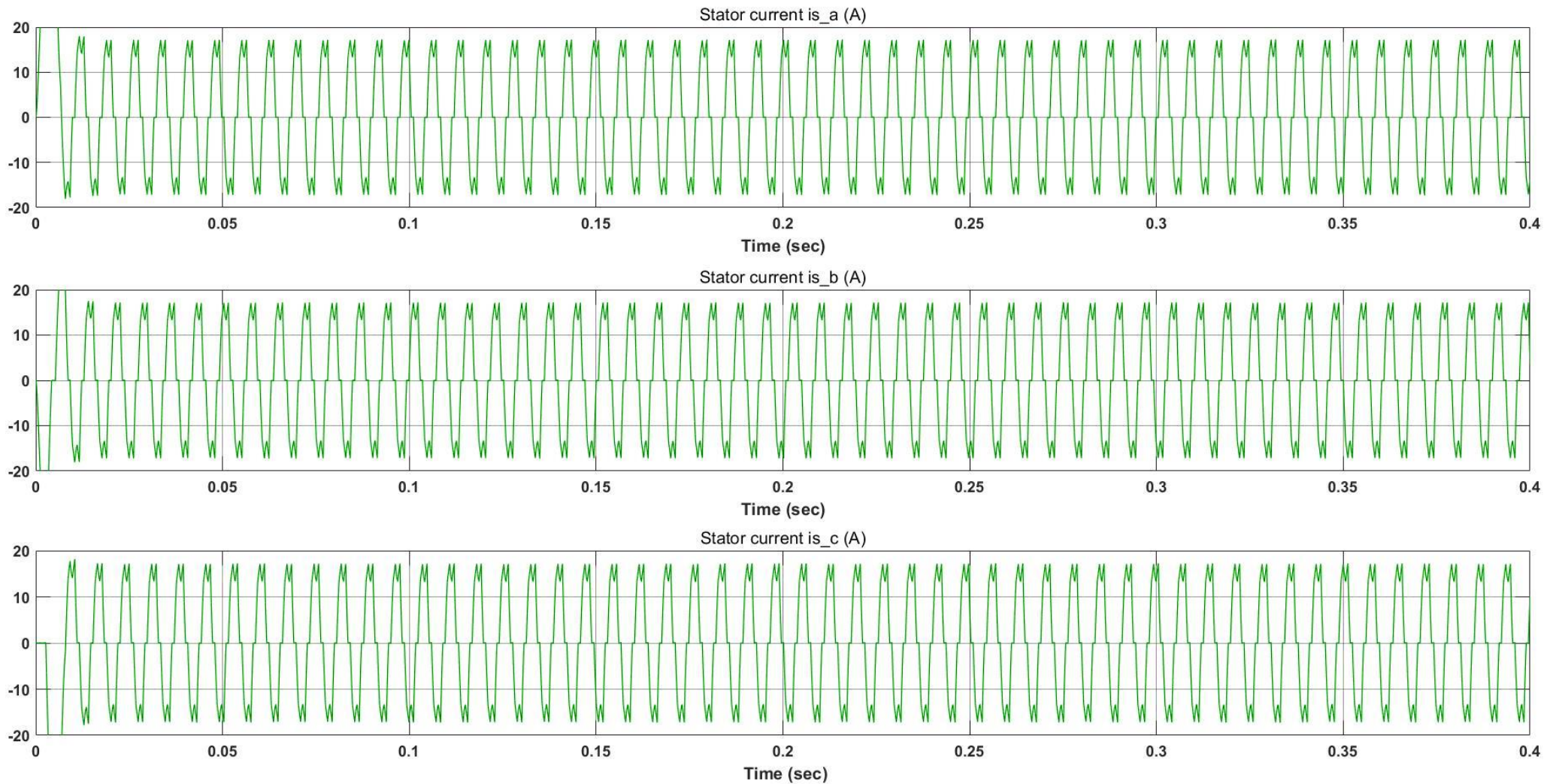
Παρακάτω εμφανίζονται οι βασικές κυματομορφές του κινητήριου συστήματος αναγεννητικής πέδησης με τη βοήθεια του προγράμματος προσομοίωσης Simulink. Έτσι, λαμβάνονται σημαντικές πληροφορίες για τη συμπεριφορά και την απόκριση του συστήματος μέσω των δοκιμών που προαναφέρθηκαν παραπάνω. Για κάθε δοκιμή σταθερή ροπής φορτίου που πραγματοποιείται, εμφανίζονται οι ακόλουθες κυματομορφές με την εξής σειρά:

- Τα ρεύματα κάθε φάσης στα τυλίγματα του στάτη του BLDC κινητήρα
- Η αντιηλεκτρεγερτική δύναμη κάθε φάσης των τυλιγμάτων του στάτη (back EMF)
- Η ροπή φορτίου του κινητήρα
- Η πραγματική ταχύτητα του δρομέα.
- Η κατάσταση φόρτισης της μπαταρίας (SOC)

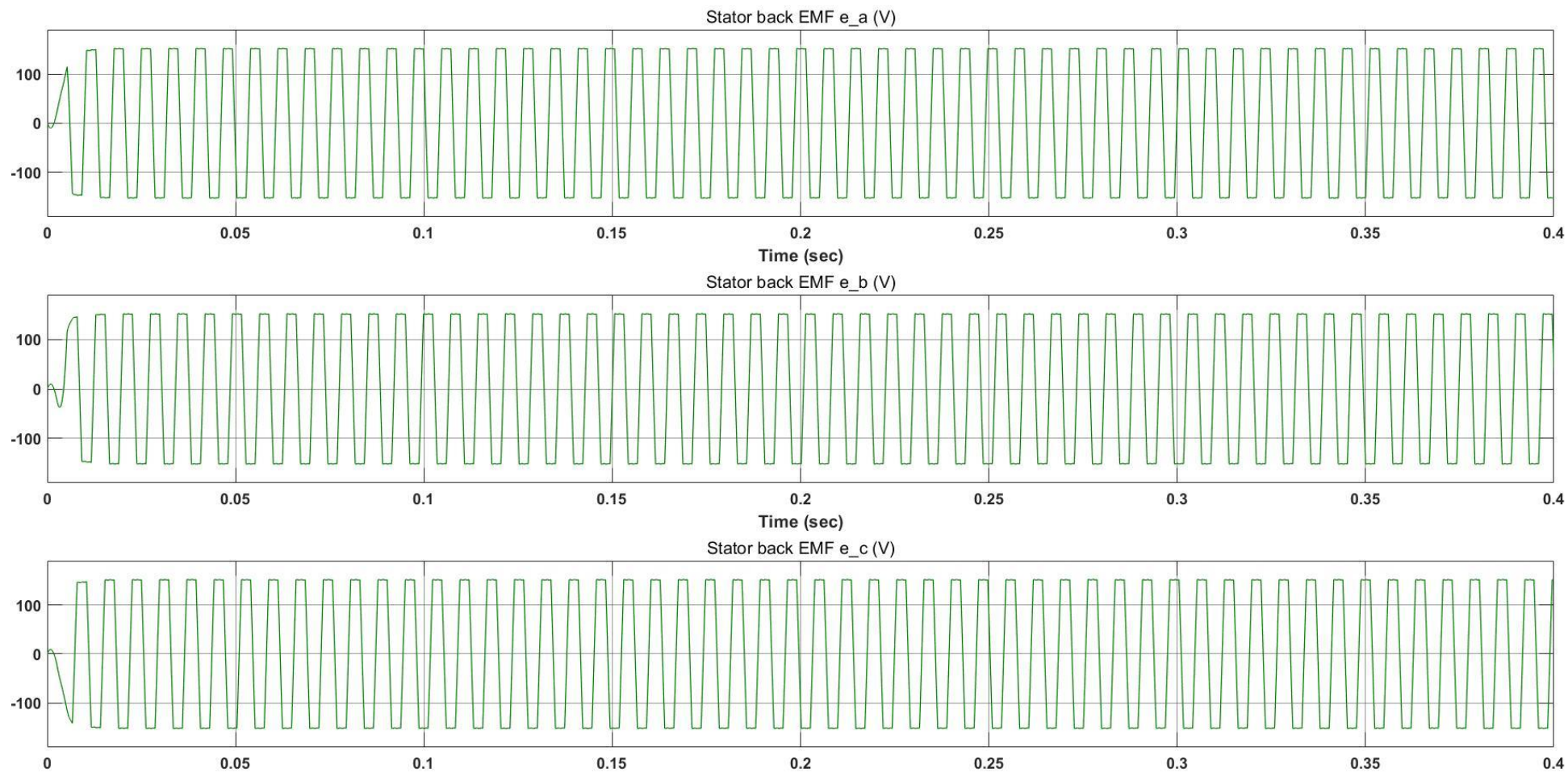
Παρουσιάζονται, επίσης, με τη βοήθεια των scopes οι κυματομορφές για κάθε προφίλ ροπής-ταχύτητας (1-4) με την ακόλουθη σειρά:

- Τα ρεύματα κάθε φάσης στα τυλίγματα του στάτη του BLDC κινητήρα
- Η ροπή φορτίου του κινητήρα
- Η πραγματική ταχύτητα του δρομέα.
- Η κατάσταση φόρτισης της μπαταρίας (SOC)

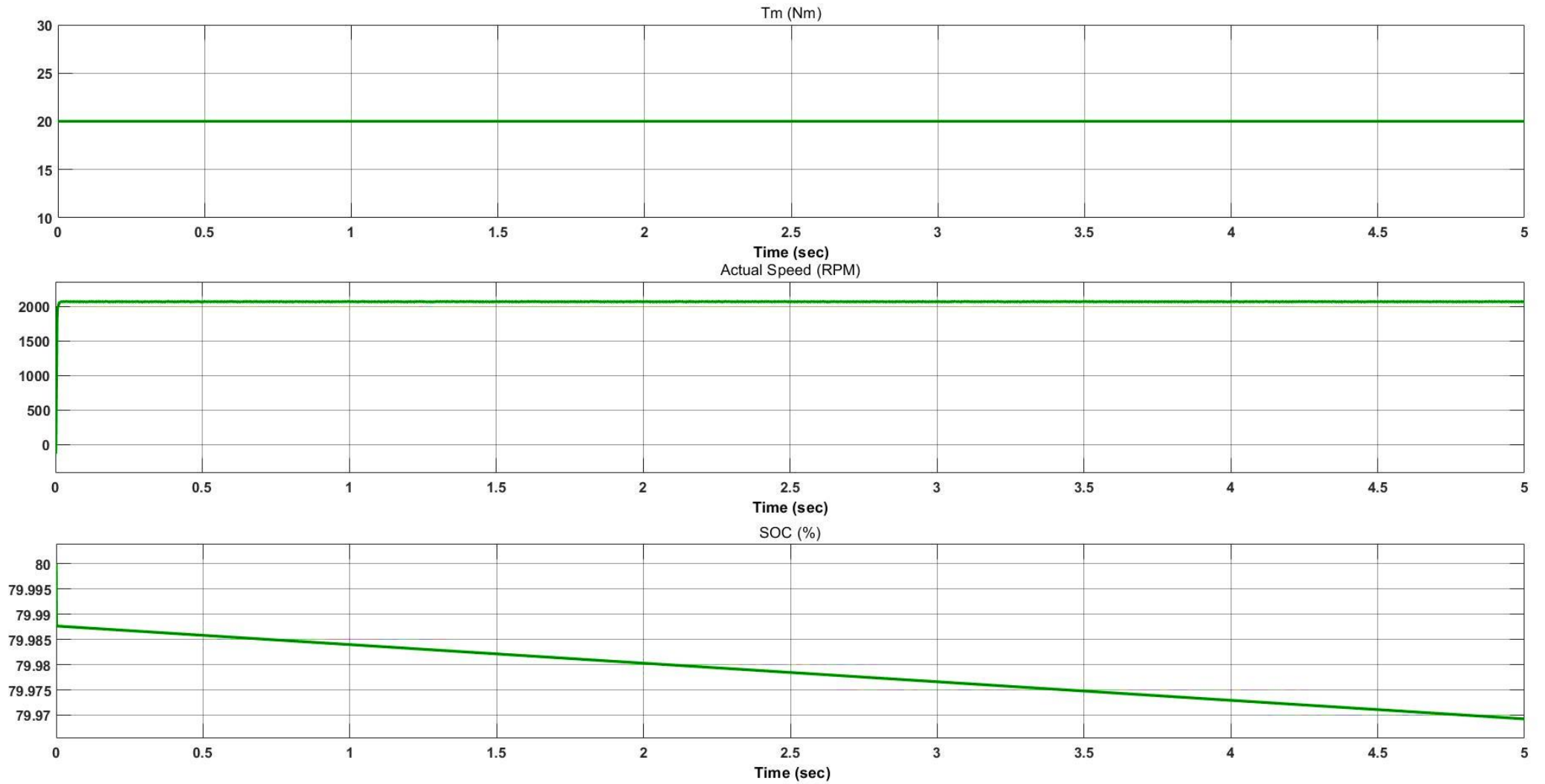
Κυματομορφές σταθερής ροπής +20 Nm για επιθυμητή ταχύτητα 3000 rpm



Σχήμα 5.29 : Κυματομορφές ρευμάτων στάτη του κινητήρα με σταθερό φορτίο στο 100% του ονομαστικού (20Nm) για χρονικό διάστημα $t=0.4s$ με στροφές 3000 rpm

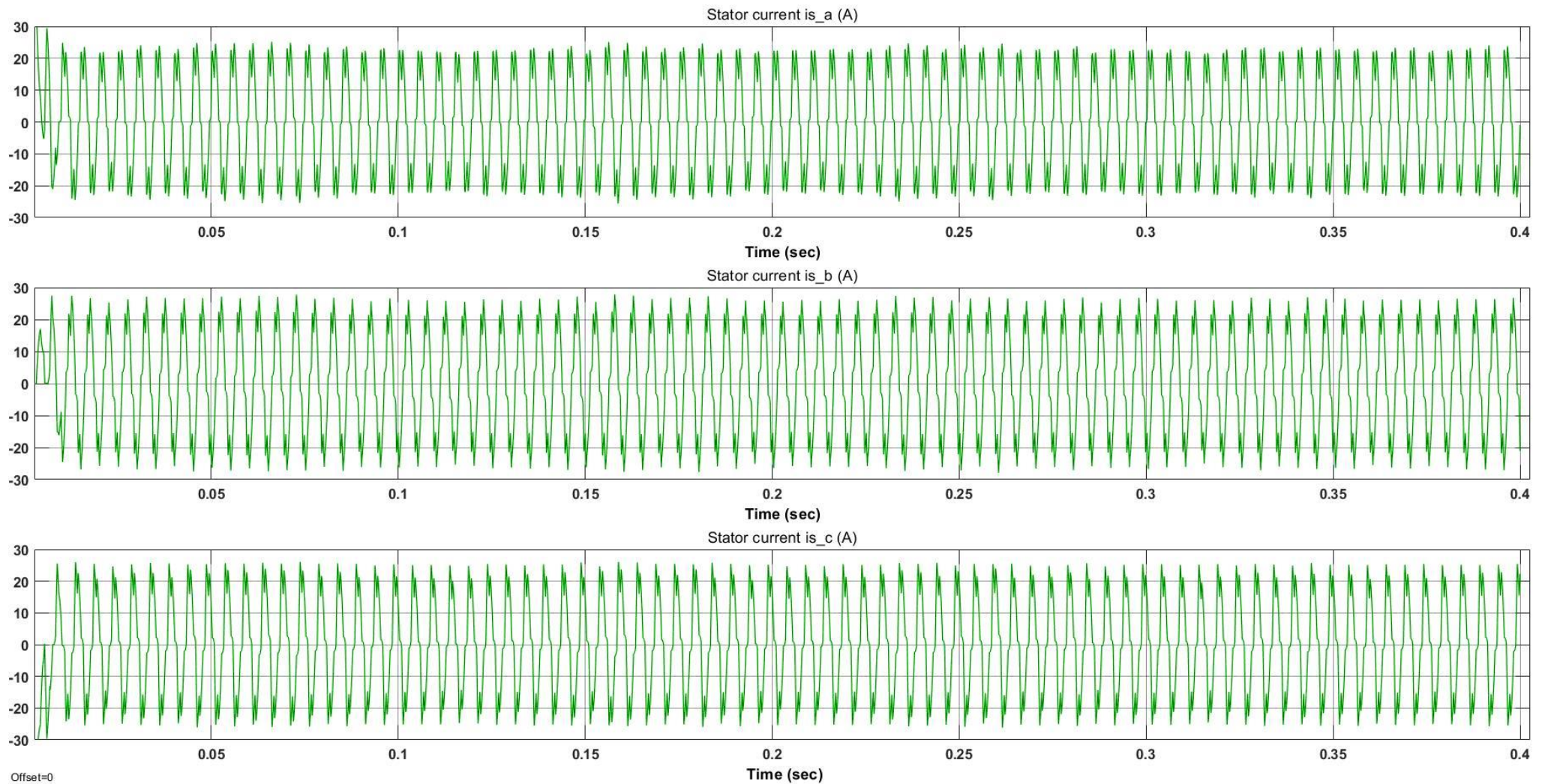


Σχήμα 5.30 : Κυματομορφές αντιηλεκτρεγερτικής δύναμης του κινητήρα με σταθερό φορτίο 20Nm (100% του ονομαστικού) για χρονικό διάστημα $t=0.4s$ με στροφές 3000 rpm

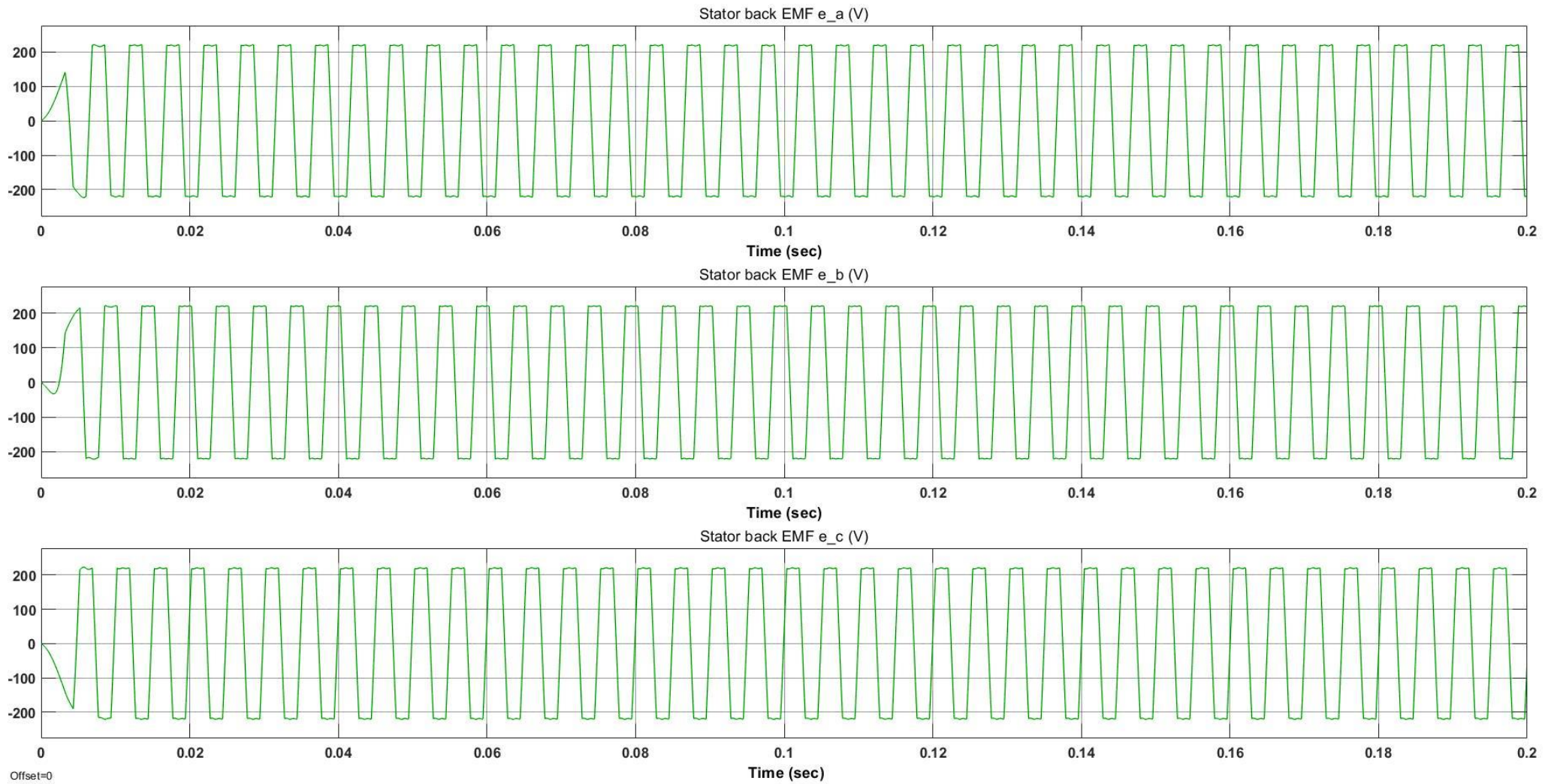


Σχήμα 5.31 : Κυματομορφές ροπής φορτίου κινητήρα, ταχύτητας περιστροφής κινητήρα και κατάστασης φόρτισης για σταθερή θετική ροπή 20 Nm (100% της ονομαστικής τιμής) για χρονικό διάστημα $t=5s$ με στροφές 3000 rpm

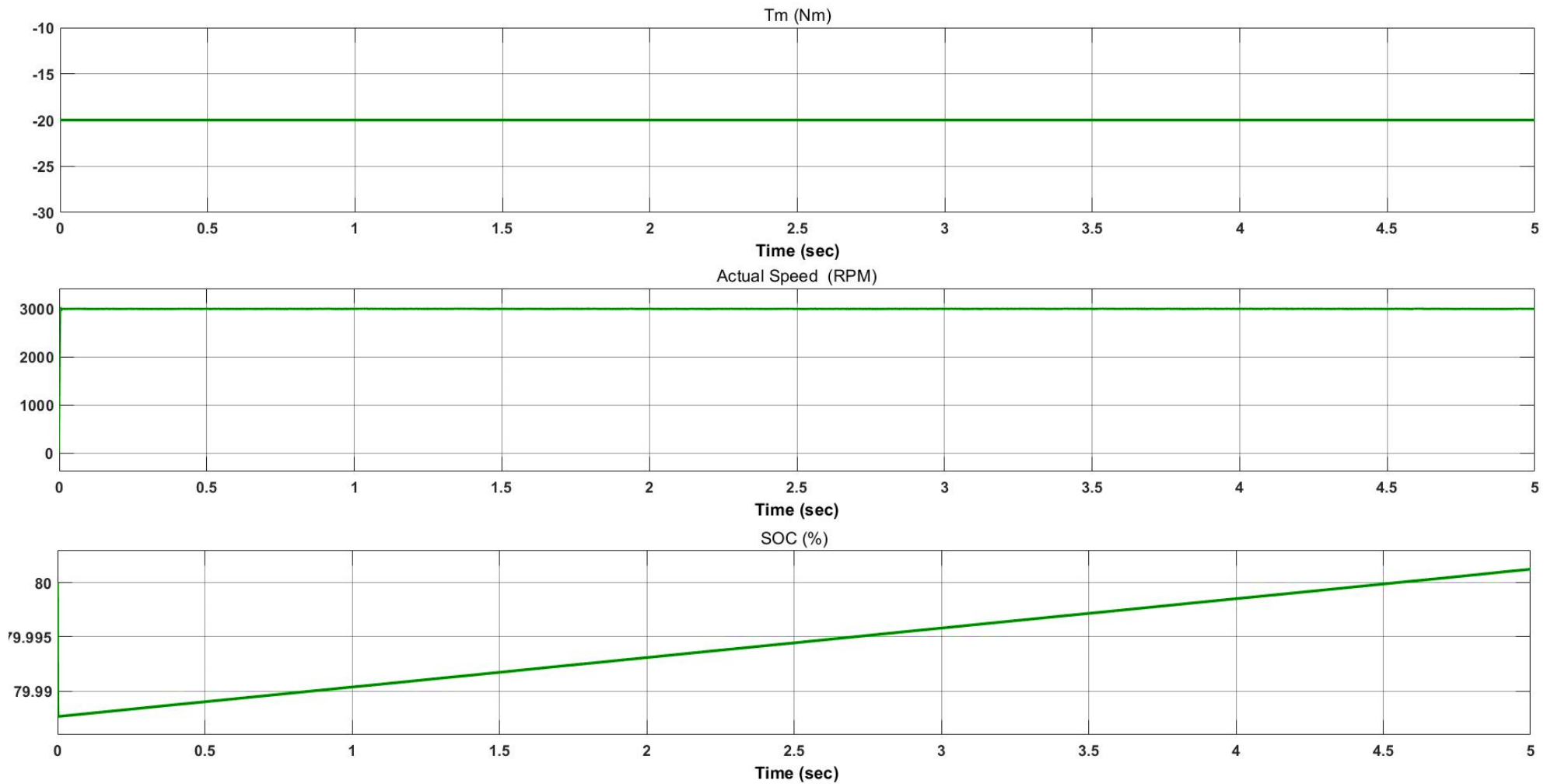
Κυματομορφές σταθερής ροπής -20 Nm για επιθυμητή ταχύτητα 3000 rpm



Σχήμα 5.32 : Κυματομορφές ρευμάτων στάτη του κινητήρα με σταθερό αρνητικό φορτίο στο 100% του ονομαστικού (-20Nm) για χρονικό διάστημα $t=0.4s$ με στροφές 3000 rpm

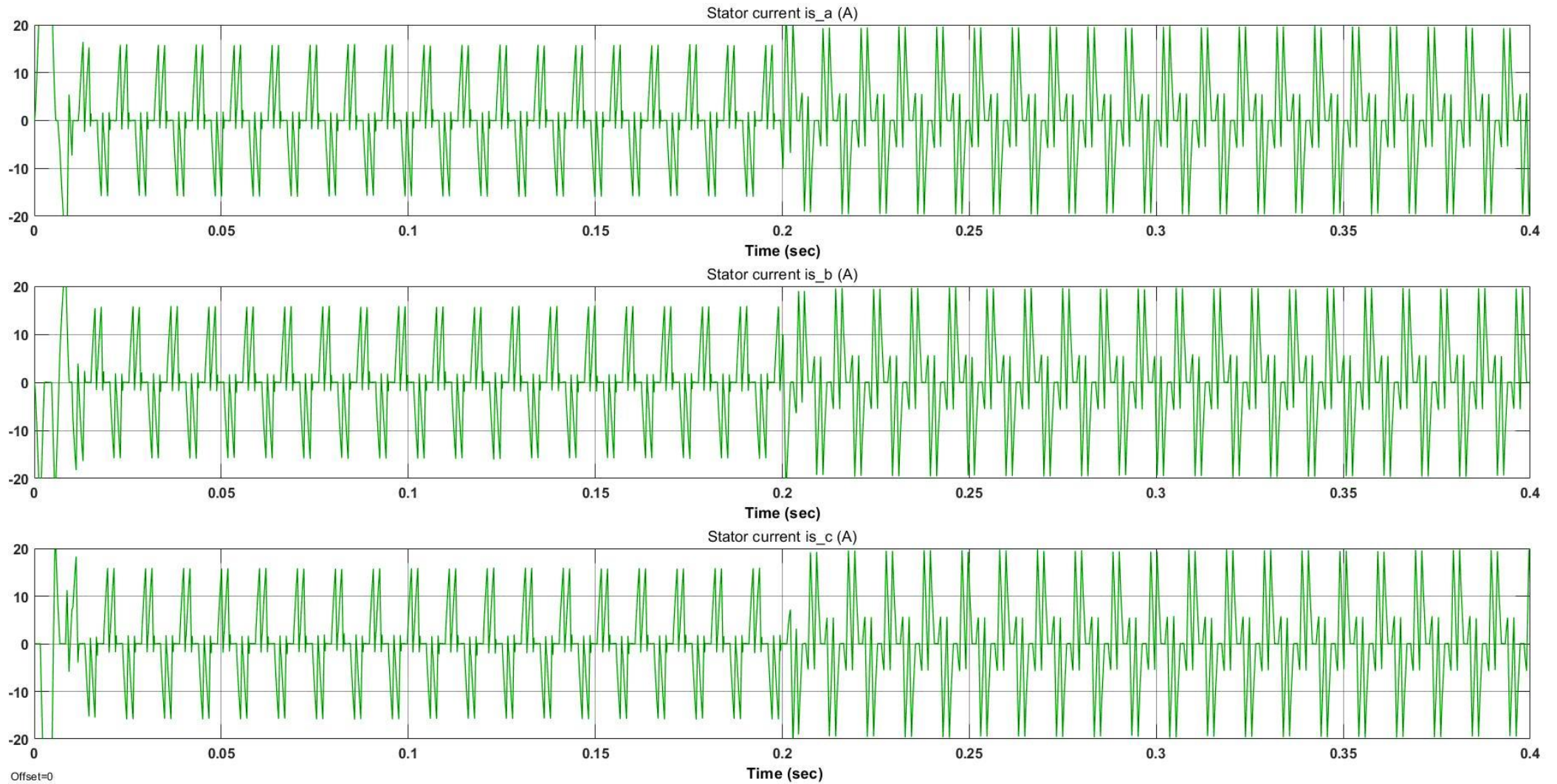


Σχήμα 5.33 : Κυματομορφές αντιηλεκτρεγερτικής δύναμης του κινητήρα με σταθερό αρνητικό φορτίο στο 100% του ονομαστικού (-20Nm) για χρονικό διάστημα $t=0.2$ s με στροφές 3000 rpm

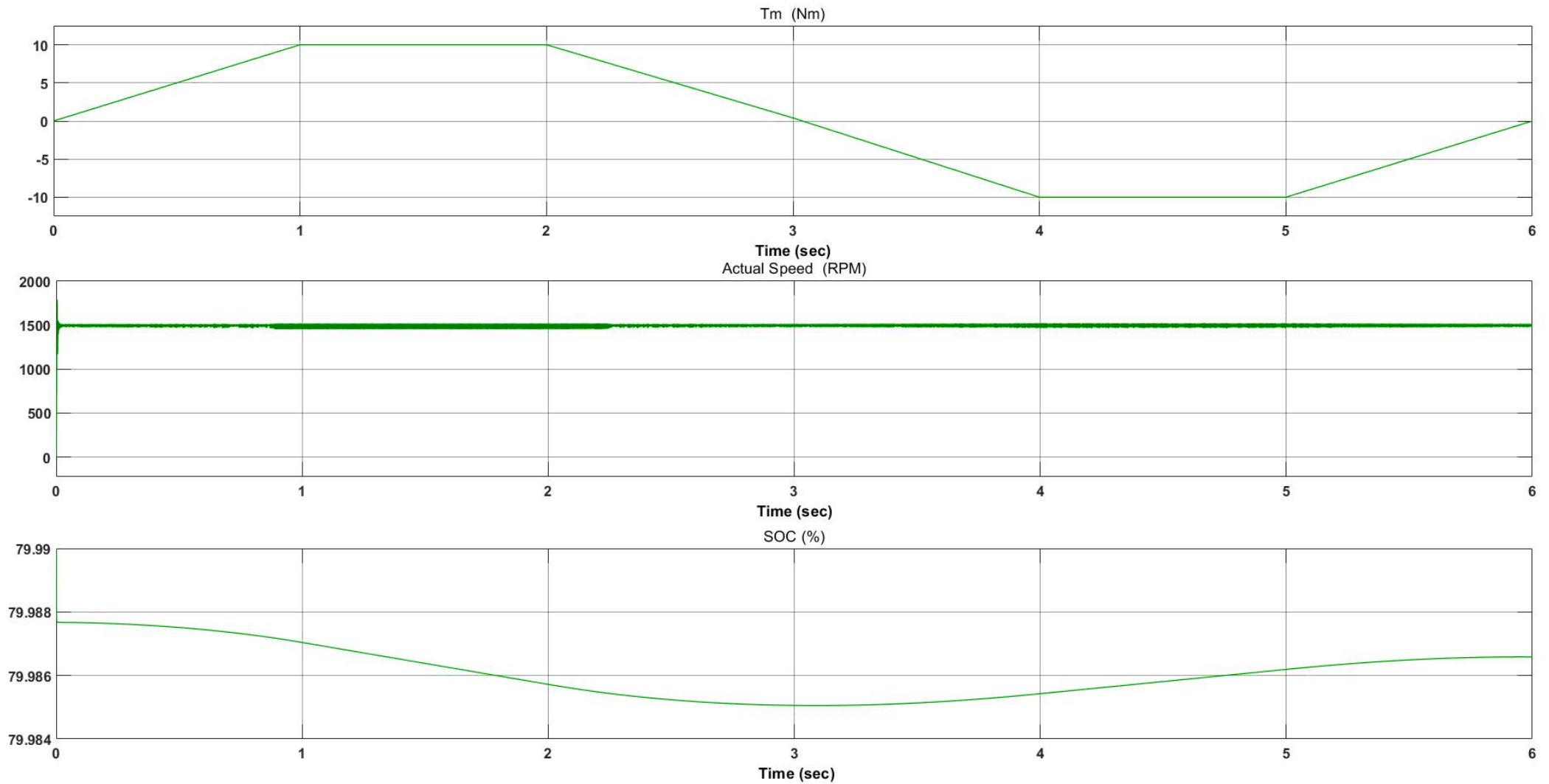


Σχήμα 5.34 : Κυματομορφές ροπής φορτίου κινητήρα, ταχύτητας περιστροφής κινητήρα και κατάστασης φόρτισης για σταθερή αρνητική ροπή -20 Nm (100% της ονομαστικής τιμής) για χρονικό διάστημα $t=5s$ με στροφές 3000 rpm

Κυματομορφές προφίλ ροπής 1

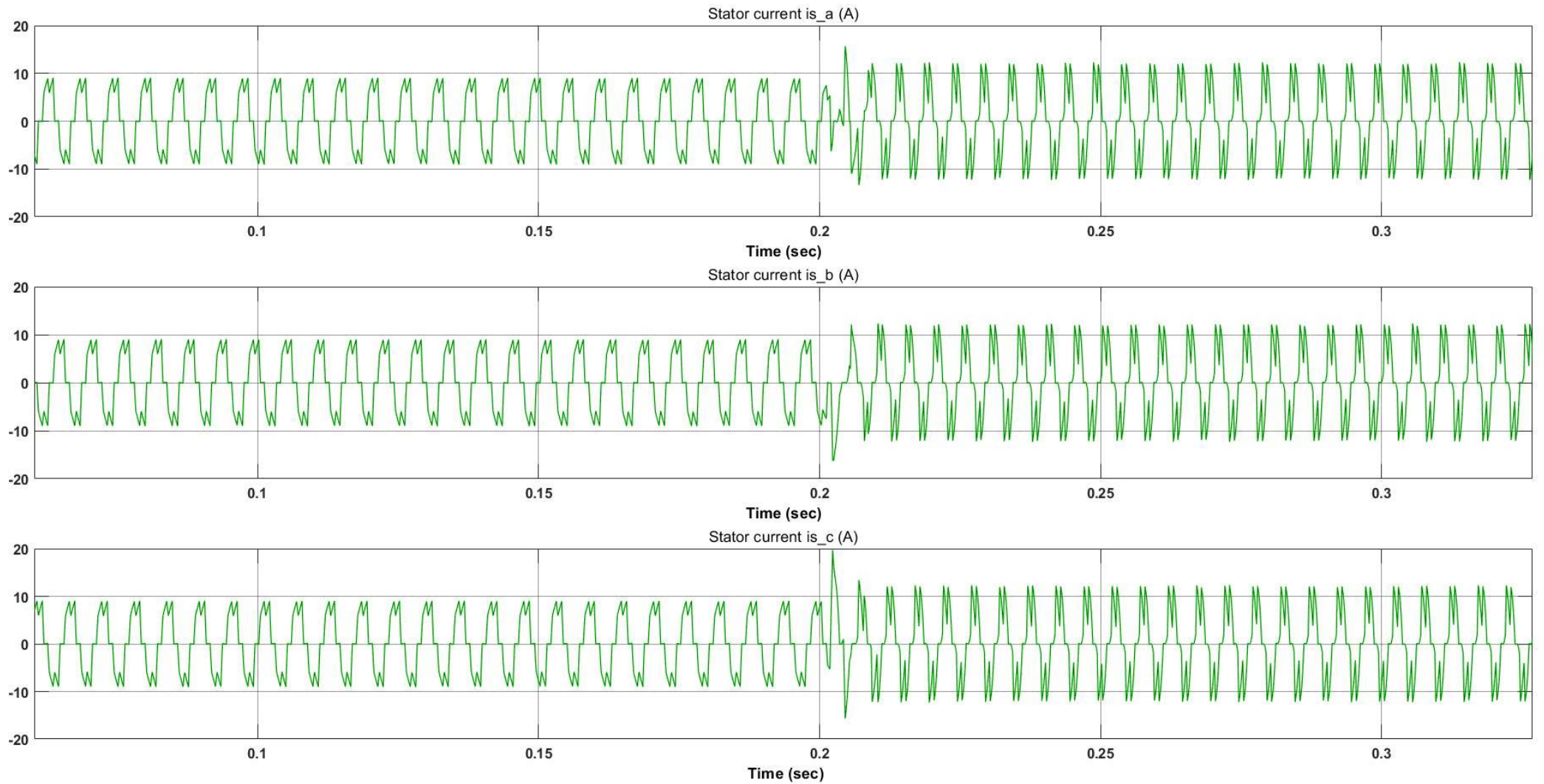


Σχήμα 5.35 : Ρεύματα στάτη του κινητήρα με μεταβολή φορτίου από 10 Nm (για $0 < t < 0.2s$) σε -10 Nm στο χρονικό διάστημα $t=0.2s$ έως $t=0.4s$ με στροφές 1500 rpm

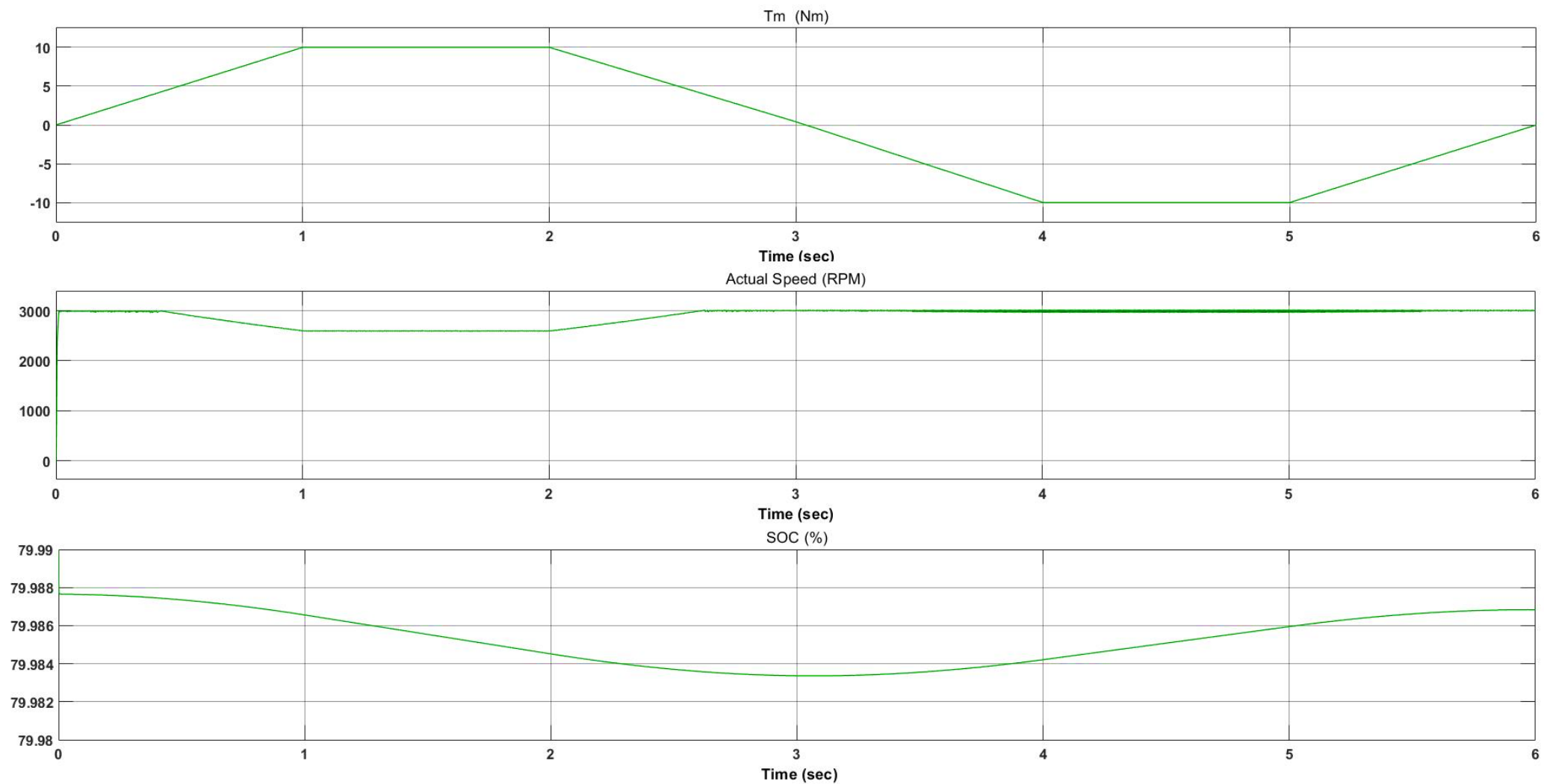


Σχήμα 5.36 : Κυματομορφές ροπής φορτίου κινητήρα, ταχύτητας περιστροφής κινητήρα και κατάστασης φόρτισης μπαταρίας με προφίλ ροπής 1 για χρονικό διάστημα $t=6s$

Κυματομορφές προφίλ ροπής 2

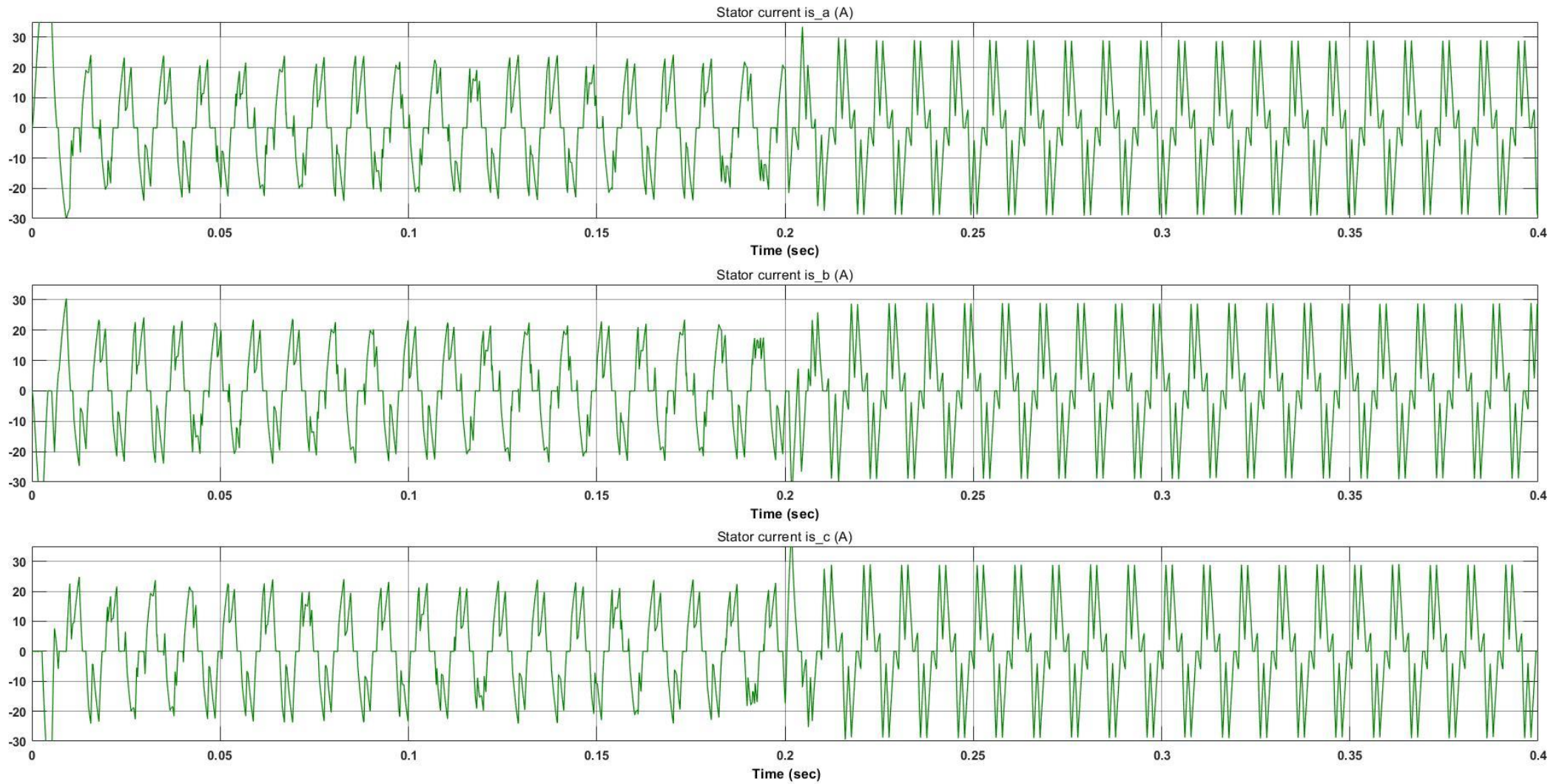


Σχήμα 5.37 : Ρεύματα στάτη του κινητήρα με μεταβολή φορτίου από 10 Nm για $0 < t < 0.2s$ σε -10Nm στο χρονικό διάστημα $t=0.2s$ έως $t=0.4s$ με στροφές 3000 rpm

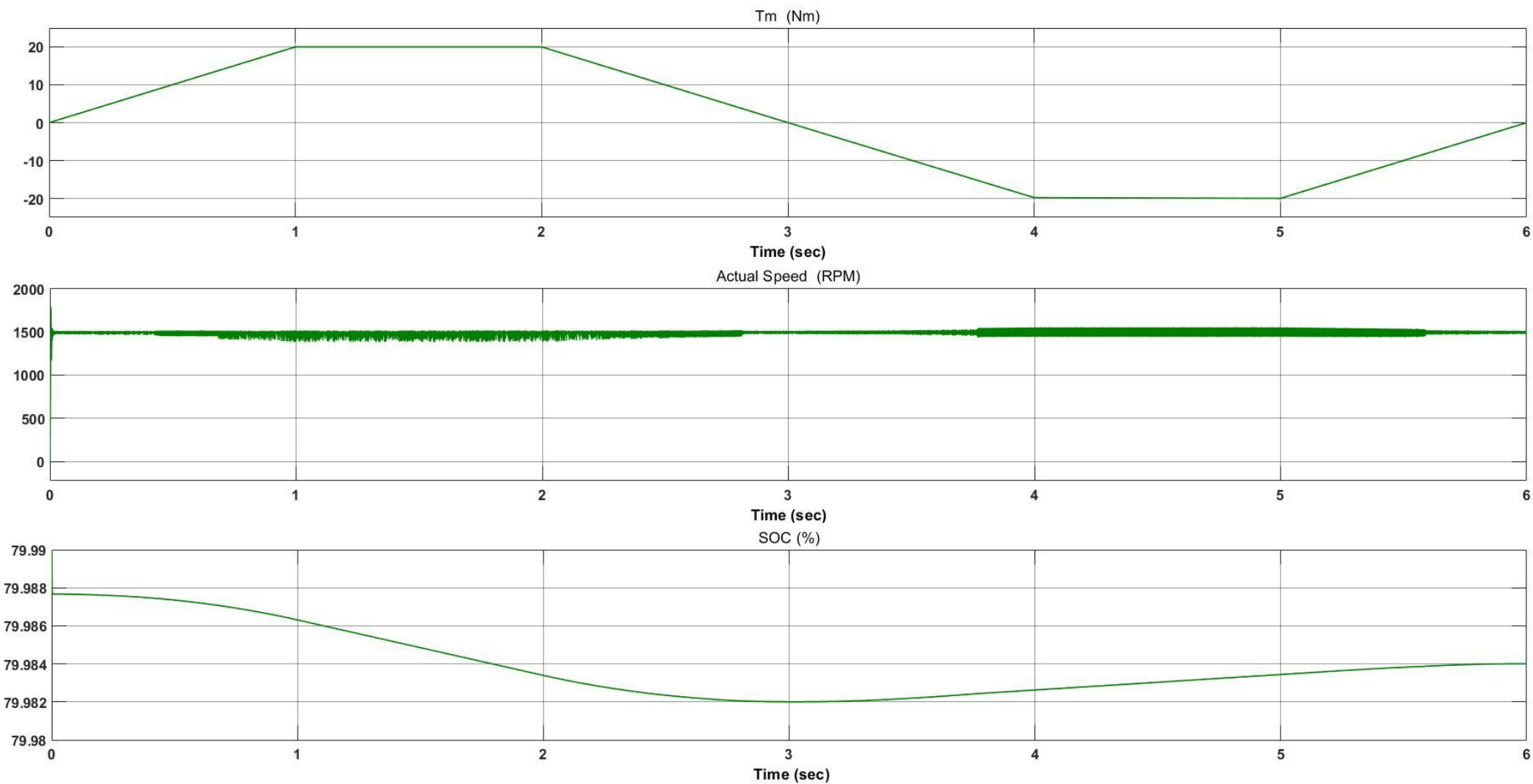


Σχήμα 5.38 : Κυματομορφές ροπής φορτίου κινητήρα, ταχύτητας περιστροφής κινητήρα και κατάστασης φόρτισης μπαταρίας με προφίλ ροπής 2 για χρονικό διάστημα $t=6s$

Κυματομορφές προφίλ ροπής 3

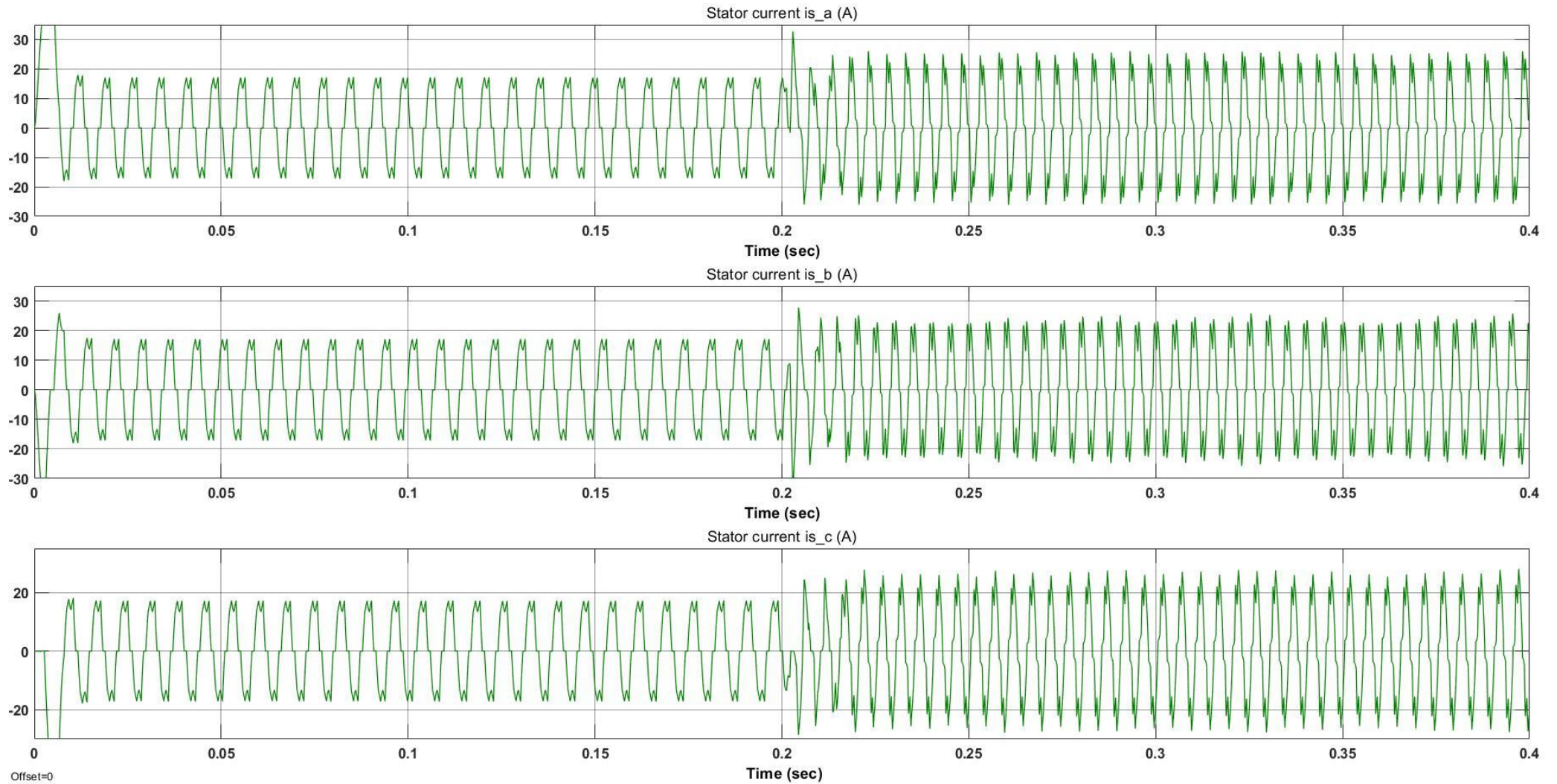


Σχήμα 5.39 : Ρεύματα στάτη του κινητήρα με μεταβολή φορτίου από 20 Nm (για $0 < t < 0.2s$) σε -20 Nm στο χρονικό διάστημα $t=0.2s$ έως $t=0.4s$ με στροφές 1500 rpm

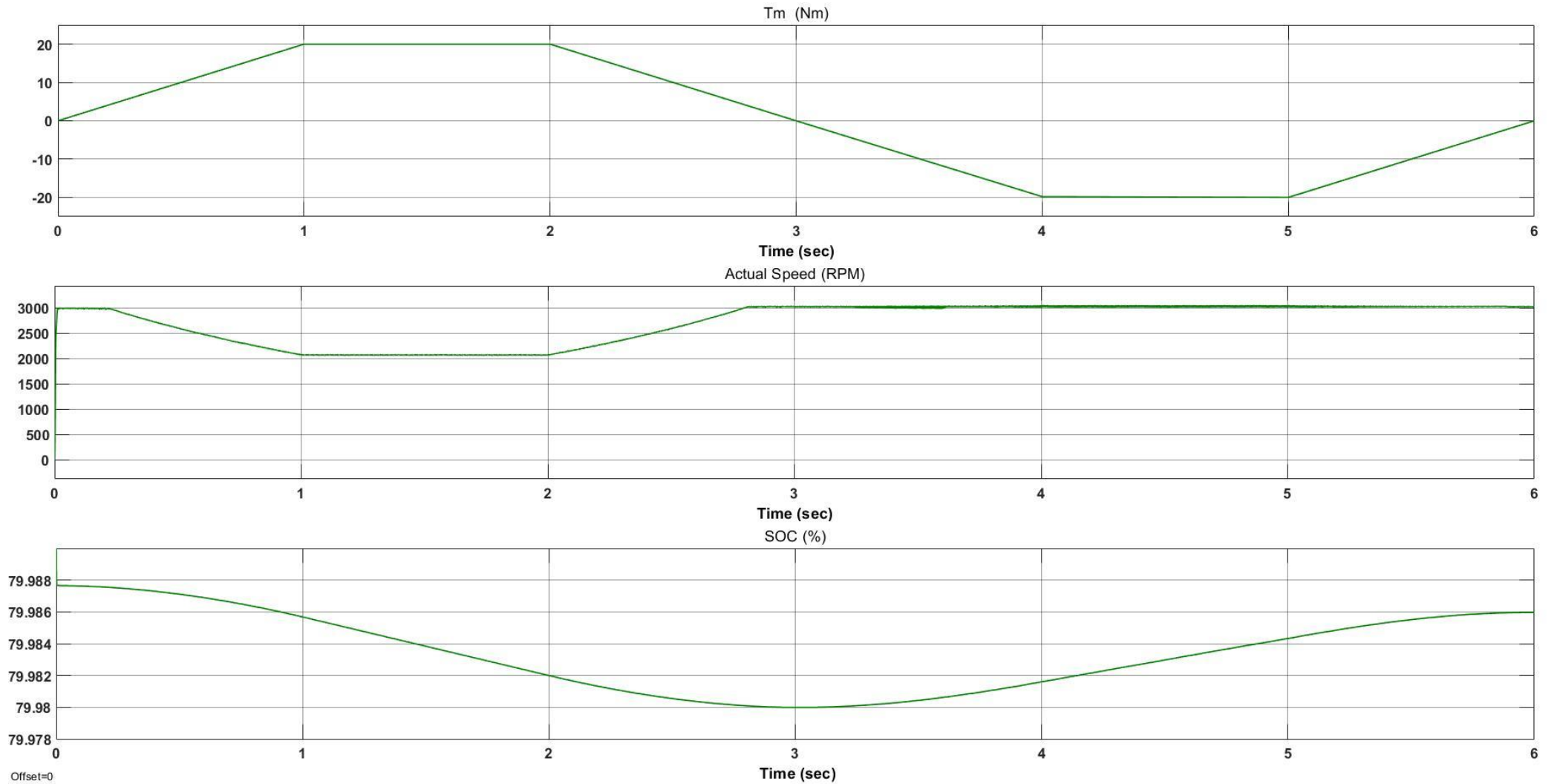


Σχήμα 5.40 : Κυματομορφές ροπής φορτίου κινητήρα, ταχύτητας περιστροφής κινητήρα και κατάστασης φόρτισης μπαταρίας με προφίλ ροπής 3 για χρονικό διάστημα $t=6s$

Κυματομορφές προφίλ ροπής 4



Σχήμα 5.41 : Ρεύματα στάτη του κινητήρα με μεταβολή φορτίου από 20 Nm (για $0 < t < 0.2s$) σε -20 Nm στο χρονικό διάστημα $t=0.2s$ έως $t=0.4s$ με στροφές 3000 rpm

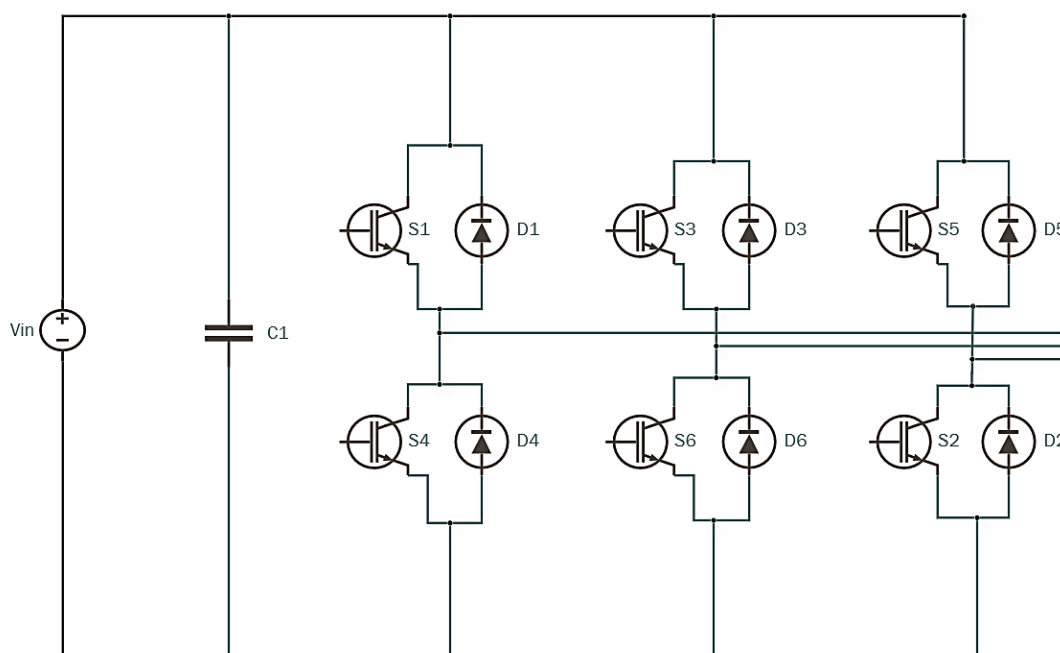


Σχήμα 5.42 : Κυματομορφές ροπής φορτίου κινητήρα, ταχύτητας περιστροφής κινητήρα και κατάστασης φόρτισης μπαταρίας με προφίλ ροπής 4 για χρονικό διάστημα $t=6s$

5.3.2 Αναγεννητική Πέδηση σε PMSM κινητήρα

Σχεδιάζεται η ίδια διάταξη ισχύος με τον BLDC κινητήρα του τριφασικού αντιστροφέα με πηγή συνεχούς τάσης (VSI). Οι σύγχρονοι κινητήρες μόνιμων μαγνητών PMSM εμφανίζουν μια ημιτονοειδής κυματομορφή αντιηλεκτρεγερτικής δύναμης (Back-EMF), διαμορφώνοντας ρεύματα ημιτονικής κυματομορφής εξόδου.

Επιπλέον, ο αντιστροφέας παρέχει τη δυνατότητα αμφίπλευρης ροής ισχύος, καθώς ηλεκτρική ενέργεια μεταφέρεται από τις μπαταρίες στον κινητήρα και από τον κινητήρα που λειτουργεί ως γεννήτρια στις μπαταρίες αντίστοιχα.



Σχήμα 5.43 : Τριφασικός αμφίπλευρος αντιστροφέας με πηγή τάσης

Ημιτονοειδής έλεγχος

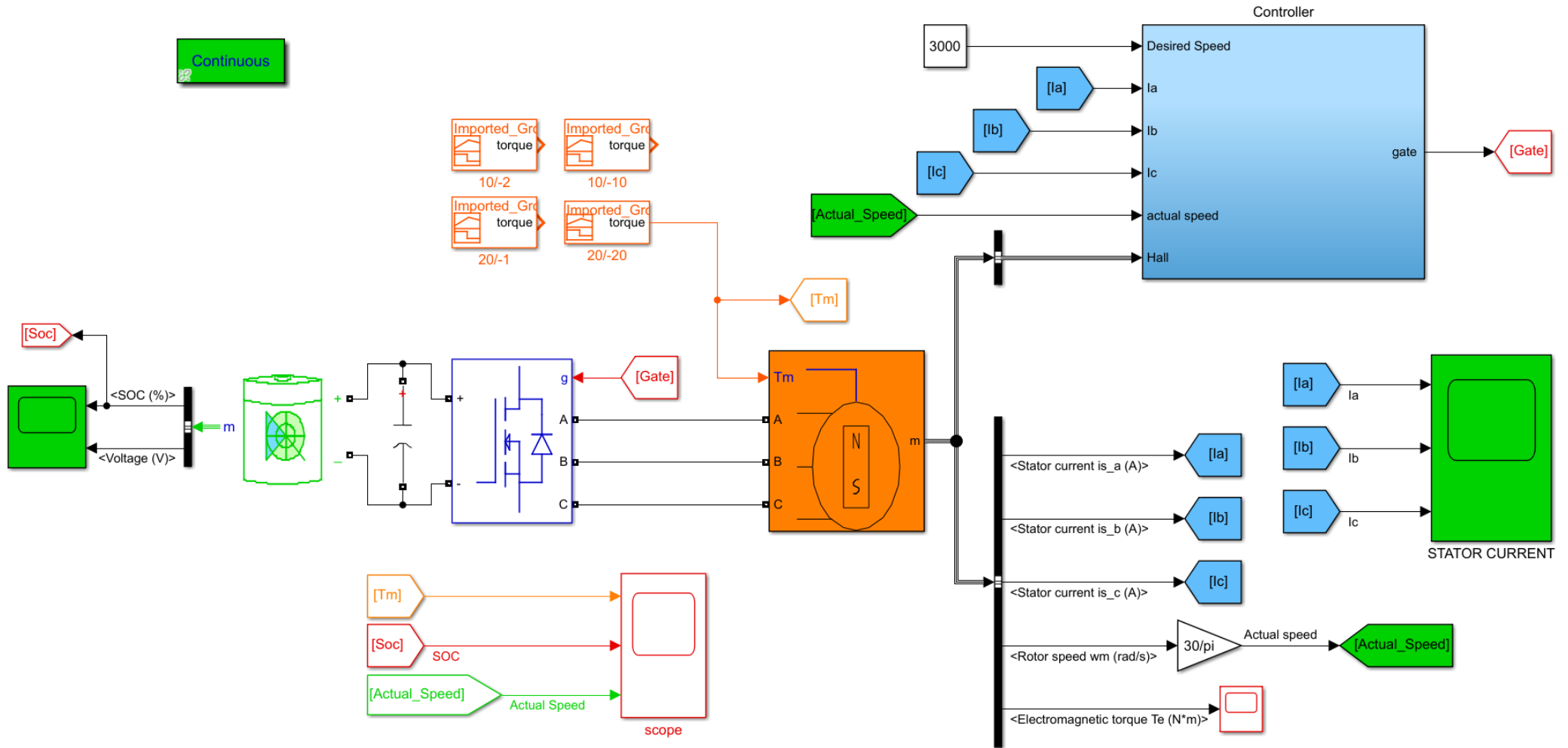
Ο ημιτονοειδής έλεγχος πραγματοποιείται σύμφωνα με την αντιηλεκτρεγερτική δύναμη που αναπτύσσεται στο διάκενο του κινητήρα (back EMF). Ο τριφασικός σύγχρονος PMSM κινητήρα διαρρέεται από ημιτονοειδές ρεύμα και περιστρέφεται με μηδενική ολίσθηση στη σύγχρονη ταχύτητα. Αποτελείται από τρία τυλίγματα που καταλήγουν σε ακροδέκτες παρουσιάζοντας τρία ρεύματα ημιτονοειδούς μορφής, καθώς περιστρέφεται ο δρομέας. Η ροπή παράγεται από το ρεύμα του τυμπάνου στο τύλιγμα του στάτη και το ρεύμα διέγερσης στο τύλιγμα του δρομέα.

Ο ημιτονοειδής έλεγχος επιτυγχάνει τον έλεγχο του ρεύματος του κινητήρα βάσει συγκεκριμένων διατάξεων PI ελεγκτών ή γεννητριών PWM. Σύμφωνα με την αρχή λειτουργίας του ημιτονοειδούς ελέγχου τα τυλίγματα του στάτη του κινητήρα διαρρέονται από ένα ημιτονοειδές συμμετρικό σύστημα τάσεων 120° , ώστε παράγεται ομαλή ημιτονοειδής ροή με μηδενική κυμάτωση ροπής. Για αυτόν τον λόγο απαιτείται η ακριβής γνώση της θέσης του δρομέα, μέσω αισθητήρων Hall, οι οποίοι

εγκαθίστανται πάνω στο μηχανικό στέλεχος του δρομέα του κινητήρα, αποσκοπώντας στον έλεγχο της ταχύτητας με τον βέλτιστο τρόπο. Με τον τρόπο αυτό, το ρεύμα ελέγχεται κάθε φορά μέσω των φάσεων, όπως αναλύθηκε, επιτυγχάνοντας τον έλεγχο θέσης του δρομέα. Τα σήματα θέσης ανατροφοδότησης των κωδικοποιητών πολλαπλασιάζονται με μία τιμή, αποσκοπώντας στην αναλογία του πλάτους των ημιτονοειδών κυμάτων με την επιθυμητή ροπή. Έτσι, λαμβάνονται οι απαραίτητες εντολές οι οποίες μέσω των γραμμικών ελεγκτών παράγουν την απαραίτητη τάση στα τυλίγματα με σταθερή ροπή για όλες τις ταχύτητες.

Για την υλοποίηση του κυκλώματος ισχύος και ελέγχου χρησιμοποιήθηκε το Simulink της Matlab, μέσω του οποίου αναπτύχθηκε η μονάδα ημιτονοειδούς ελέγχου μέσω PI ελεγκτή. Στο περιβάλλον αυτό ολοκληρώθηκαν οι δοκιμές προσεγγίζοντας τις βέλτιστες πραγματικές συνθήκες φορτίου και ταχύτητας. Η ανάλυση του μοντέλου PMSM κινητήρα, επιβεβαιώνει την λειτουργία του συστήματος, καθώς και τις αδυναμίες ή τα προβλήματά του. Παρακάτω διακρίνεται το γενικό διάγραμμα του ημιτονοειδή ελέγχου με τα blocks οδήγησης του κινητήρα και τα στοιχεία λήψης εντολών ροπής και ταχύτητας.

Κύκλωμα προσομοίωσης αναγεννητικής πέδησης PMSM κινητήρα



Σχήμα 5.44 : Κύκλωμα προσομοίωσης Simulink αναγεννητικής πέδησης κινητήρα PMSM

Το κύκλωμα ελέγχου αναγεννητικής πέδησης του κινητήρα PMSM μέσω αισθητήρων Hall, υλοποιείται στο περιβάλλον Simulink του matlab με ημιτονοειδή έλεγχο. Το σύστημα ηλεκτρικής κίνησης αποτελείται μία μπαταρία, έναν τριφασικό αντιστροφέα και έναν τριφασικό σύγχρονο κινητήρα ημιτονοειδούς ροής (PMSM). Ακόμη, το κύκλωμα ελέγχου περιλαμβάνει έναν PI ελεγκτή, έναν αποκωδικοποιητή αισθητήρων Hall και μια μονάδα ελέγχου παλμών πύλης.

Ο κινητήρας (Permanent Magnet Synchronous Machine) που επιλέγεται έχει τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

Πίνακας 10 : Ονομαστικά μεγέθη PMSM κινητήρα

Ονομαστικά μεγέθη PMSM κινητήρα	
Ονομαστική τάση	300 V
Ονομαστική ταχύτητα περιστροφής	2200 RPM
Ονομαστική ροπή	20 Nm
Αυτεπαγωγή τυλιγμάτων	0.001523 H
Αντίσταση τυλιγμάτων	0.129 Ω
Μαγνητική ροή	0.182 Wb

Η μπαταρία που επιλέγεται έχει τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

Πίνακας 11 : Ονομαστικά μεγέθη Μπαταρίας

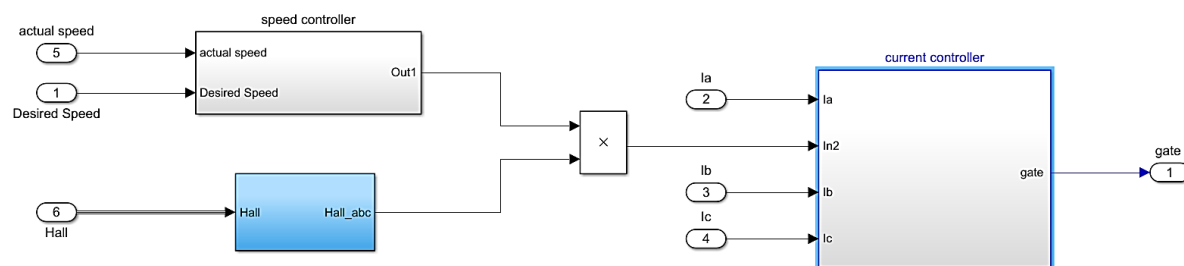
Ονομαστικά μεγέθη Μπαταρίας	
Ονομαστική τάση	300 V
Ονομαστική χωρητικότητα	100 Ah
Αρχική Κατάσταση Φόρτισης	80 (%)
Χρόνος Απόκρισης Μπαταρίας	30 sec

Ο τριφασικός αντιστροφέας αμφίπλευρης ροής ισχύος αποτελείται από τρεις αντιστροφείς ημιγέφυρας, οι οποίοι είναι συνδεδεμένοι παράλληλα με έξι διακοπτικά στοιχεία MOSFETs και αντιπαράλληλες διόδους παλμοδότησης τύπου six-step.

Ημιτονοειδής Έλεγχος

Όπως έχει αναλυθεί, η εφαρμογή ημιτονοειδούς ελέγχου αφορά τον συνδυασμό των ρευμάτων περιέλιξης παράγοντας ένα ομαλά περιστρεφόμενο διάνυσμα συνεχούς τιμής. Τα ρεύματα αυτά ακολουθούν μια ημιτονοειδή μορφή και είναι μετατοπισμένα μεταξύ τους κατά 120° , λόγω των κατασκευαστικών χαρακτηριστικών του στάτη. Η μετατροπή ημιτονοειδών κυμάτων ολοκληρώνεται μέσω της ανάπτυξης κατάλληλων σημάτων από τους αισθητήρες Hall.

Παρακάτω διακρίνεται το συνολικό σύστημα ελέγχου του κυκλώματος που περιέχεται στο τμήμα controller της διάταξης. Αποτελείται από βρόχους εκτέλεσης εντολών με ελεγκτή ταχύτητας που επεξεργάζεται το σφάλμα ταχύτητας και παράγει το ρεύμα αναφοράς και επίσης από ελεγκτή ρεύματος. Ο έλεγχος της ταχύτητας μέσω κλειστού βρόχου επιτυγχάνεται μέσω ενός PI ελεγκτή, αποσκοπώντας στην αντιστάθμιση και την ευστάθεια του συστήματος ηλεκτρικής κίνησης. Η επεξεργασία του κέρδους του PI ελεγκτή πραγματοποιείται βάσει της συνολικής συμπεριφοράς του συστήματος, λαμβάνοντας υπόψη τον χρόνο ανόδου, τον χρόνο αποκατάστασης και την υπερύψωση.

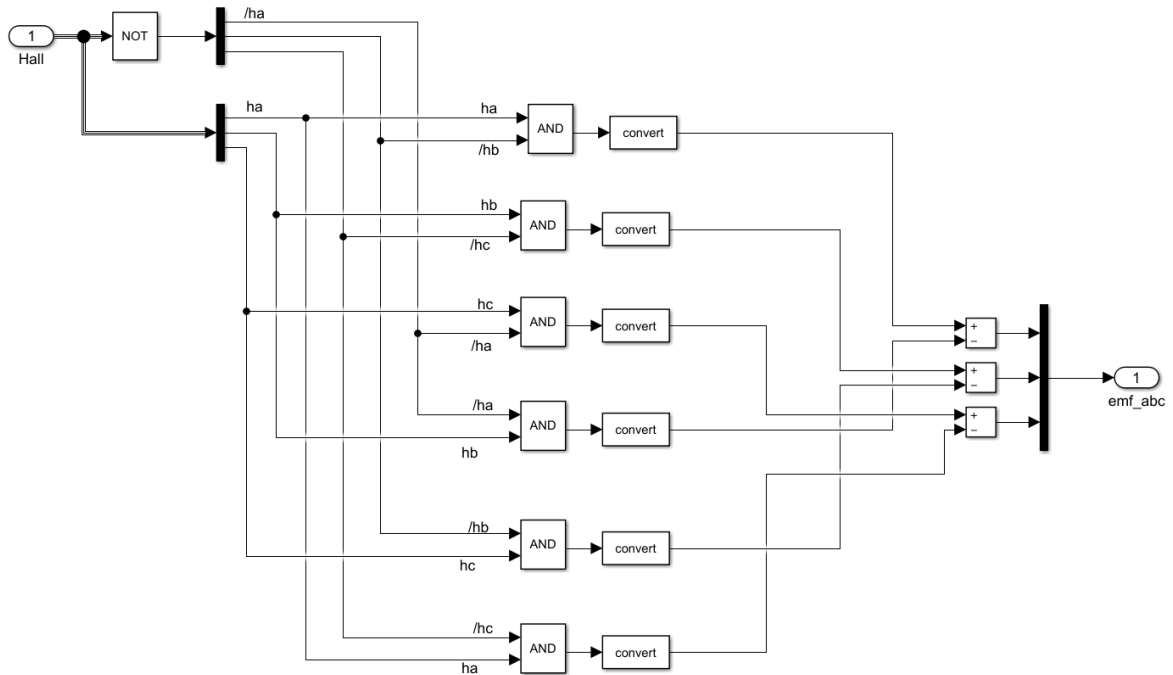


Εικόνα 5-7 : Σύστημα ελέγχου του κυκλώματος

PI Ελεγκτής

Ο PI ελεγκτής συγκρίνει την πραγματική ταχύτητα του κινητήρα με την επιθυμητή ταχύτητα στο στοιχείο speed controller και μέσω των κερδών ορίζει το σήμα που οδηγείται στο στοιχείο current controller μειώνοντας το σφάλμα. Η ρύθμιση των κερδών πραγματοποιείται χειροκίνητα με $P = 5$ και $I = 2.8$. Η τάση που εφαρμόζεται στα τυλίγματα του στάτη ρυθμίζεται με αποτέλεσμα τον συνολικό έλεγχο της ταχύτητας του κινητήρα. Σε κάθε χρονικό διάστημα λειτουργίας, καταγράφεται η μέτρηση της ταχύτητας περιστροφής του κινητήρα και συγκρίνεται με την επιθυμητή τιμή. Η τιμή σφάλματος που προκύπτει, τροφοδοτεί τον PI ελεγκτή, ο οποίος με τη σειρά του μεταβάλλει την τάση στα τυλίγματα του στάτη, μειώνοντας το σφάλμα.

Στην προσομοίωση υπάρχει η δυνατότητα αξιοποίησης των συγκεκριμένων αισθητήρων μέσω των μετρητικών στοιχείων του κινητήρα (bus Selector). Με αυτόν τον τρόπο, προσδιορίζεται η θέση του δρομέα, δημιουργώντας κατάλληλα σήματα Hall, τα οποία κατά αντιστοιχία αποκωδικοποιούνται σε εντολές τάσης μέσω της ακόλουθης διάταξης του πεδίου Hall του κυκλώματος.



Εικόνα 5-8 : Αποκωδικοποίηση των σημάτων των αισθητήρων Hall σε τάσεις A, B, C

Η αποκωδικοποίηση των σημάτων επιτυγχάνεται μέσω του ακόλουθου πίνακα αληθείας σύμφωνα με τον οποίο ορίζεται η κατάλληλη παλμοδότηση των ημιαγωγικών στοιχείων του τριφασικού αντιστροφέα που ελέγχουν τον κινητήρα.

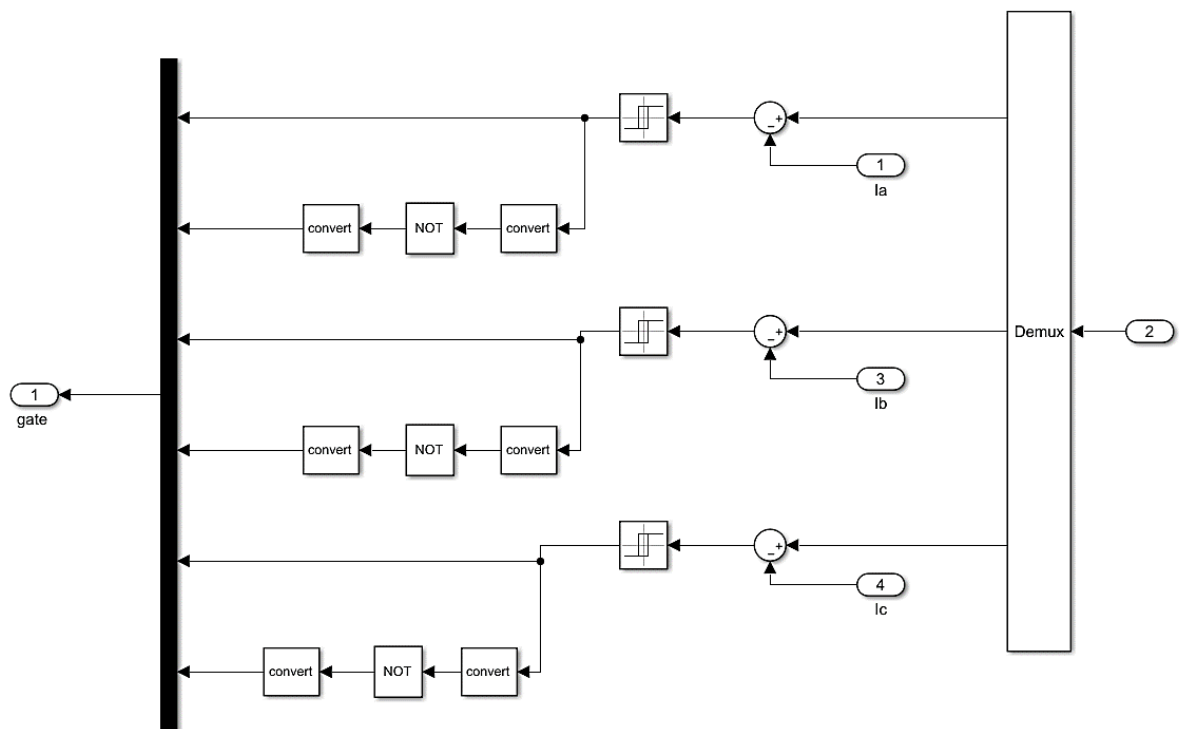
Πίνακας 12 : Πίνακας αληθείας για τα διαστήματα λειτουργίας MOSFETs

emf_a	emf_b	emf_c	Q1	Q2	Q3	Q4	Q5	Q6
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	-1	+1	0	0	0	+1	+1	0
-1	+1	0	0	+1	+1	0	0	0
-1	0	+1	0	+1	0	0	+1	0
+1	0	-1	+1	0	0	0	0	1
+1	-1	0	+1	0	0	+1	0	0
0	+1	-1	0	0	+1	0	0	1
0	0	0	0	0	0	0	0	0

Οι αισθητήρες τοποθετούνται στον PMSM κινητήρα ανά 120°, γεγονός που επιφέρει 8 διαφορετικούς συνδυασμούς οδήγησης των mosfets, απορρίπτοντας τον πρώτο και τελευταίο συνδυασμό. Τελικά, τα σήματα από τους αισθητήρες Hall, διαμορφώνονται

σε έξι διαφορετικά διαστήματα αγωγής των διακοπών, δηλώνοντας την κατάσταση των ημιαγωγικών διακοπών σε θέσεις (1), (0), (-1). Η θετική θέση (+1) σημαίνει ενεργοποίηση του διακόπτη θετικής ημιπεριόδου και απενεργοποίηση του αντίστοιχου αρνητικής ημιπεριόδου, ενώ η αρνητική θέση (-1) σημαίνει απενεργοποίηση του διακόπτη θετικής ημιπεριόδου και ενεργοποίηση του αντίστοιχου αρνητικής ημιπεριόδου. Η ουδέτερη θέση (0) παραπέμπει στην απενεργοποίηση και των δύο ημιαγωγικών διακοπών.

Εν συνεχεία, τα σήματα του αισθητήρα που μετατρέπονται σε τάσεις μέσω αποκωδικοποίησης, τελικά ρυθμίζουν τους παλμούς έναυσης των MOSFETs με αποτέλεσμα την ημιτονοειδή μεταγωγή στον PMSM κινητήρα. Η λογική αλληλουχία αγωγής των διακοπών συμβάλει στην κίνηση του κινητήρα επιτυγχάνοντας τον έλεγχο της ταχύτητα και της ροπής. Μέσω των πεδίων Relay επιτυγχάνεται ο έλεγχος ρεύματος, λαμβάνοντας μετρήσεις από τον στάτη με ανατροφοδότηση του ρεύματος βραχυκύκλωσης σε περίπτωση βλάβης.



Εικόνα 5-9 : Δημιουργία παλμών έναυσης βασίζόμενοι στους αισθητήρες Hall με περιοριστή ρεύματος

Δοκιμές Προσομοίωσης

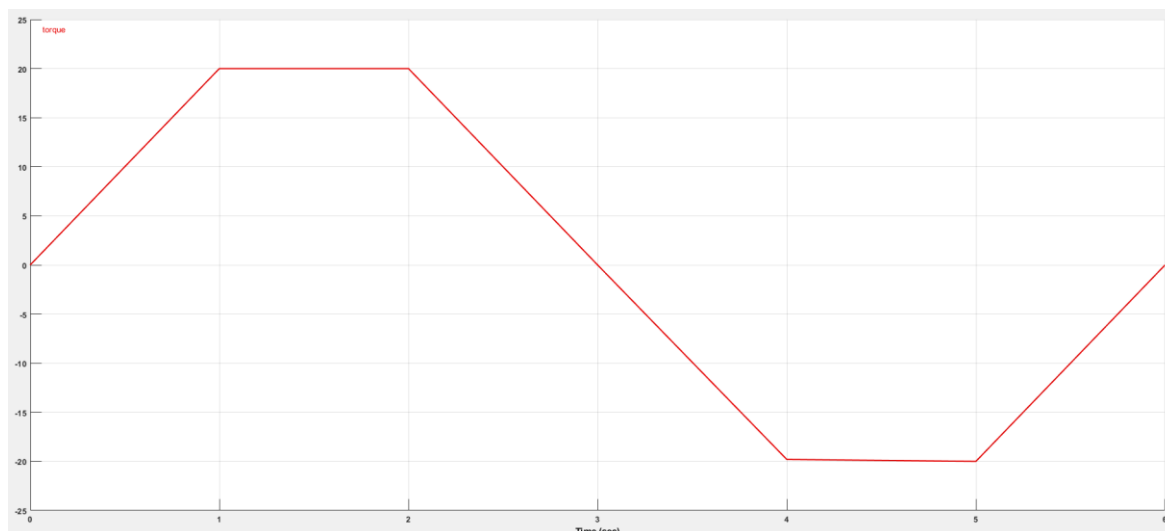
Παρακάτω, περιγράφεται η διαδικασία των δοκιμών, στις οποίες υποβάλλεται το κινητήριο σύστημα PMSM αναγεννητικής πέδησης, προκειμένου να εξαχθούν τα επιθυμητά συμπεράσματα. Αναλυτικότερα, σε κάθε δοκιμή μεταβάλλονται η ροπή και η ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα με σκοπό την εξέταση της συμπεριφοράς του συστήματος. Μ' αυτόν τον τρόπο, οι δοκιμές στο κινητήριο σύστημα πραγματοποιούνται με την εξής σειρά:

- Με σταθερή θετική ροπή στο 100% της ονομαστικής τιμής του φορτίου του κινητήρα (20 Nm) και σταθερή ταχύτητα περιστροφής στο 50% της ονομαστικής του τιμής (1100 rpm). Εισάγεται σταθερή τιμή ροπής φορτίου 20 Nm και σταθερή ταχύτητα 1100 rpm μέσω του πεδίου constant.
- Με σταθερή αρνητική ροπή στο 100% της ονομαστικής τιμής του φορτίου του κινητήρα και σταθερή ταχύτητα περιστροφής στο 50% της ονομαστικής τιμής. Εισάγεται σταθερή τιμή ροπής φορτίου -20 Nm και σταθερή ταχύτητα περιστροφής 1100 rpm μέσω του πεδίου constant.
- Με συγκεκριμένο προφίλ ροπής φορτίου με επιτάχυνση και επιβράδυνση, προσεγγίζοντας πραγματικές συνθήκες φορτίου. Το διάγραμμα ροπής υλοποιείται μέσω του πεδίου Signal Builder μεταξύ ορισμένων τιμών ροπής φορτίου του κινητήρα. Έτσι, προκύπτουν τέσσερεις διαφορετικοί συνδυασμοί δοκιμών για τις τιμές ταχύτητας περιστροφής που εμφανίζονται στον κάτωθι πίνακα :

Πίνακας 13 : Δοκιμές προσομοίωσης του συστήματος

ΤΙΜΕΣ ΡΟΠΗΣ ΚΙΝΗΤΗΡΑ		ΕΠΙΘΥΜΗΤΗ ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΚΙΝΗΤΗΡΑ	ΑΡΙΘΜΗΣΗ ΠΡΟΦΙΛ ΡΟΠΗΣ
ΜΕΓΙΣΤΗ ΘΕΤΙΚΗ 10 Nm	ΜΕΓΙΣΤΗ ΑΡΝΗΤΙΚΗ -10 Nm	1100 rpm	1
		2200 rpm	2
ΜΕΓΙΣΤΗ ΘΕΤΙΚΗ 20 Nm	ΜΕΓΙΣΤΗ ΑΡΝΗΤΙΚΗ -20 Nm	1100 rpm	3
		2200 rpm	4

Το σχεδιάγραμμα ροπής διακρίνεται παρακάτω και υλοποιείται μέσω του πεδίου Signal Builder με μέγιστη ροπή 20 Nm και ελάχιστη -20 Nm. Με τον ίδιο τρόπο σχεδιάζεται το αντίστοιχο διάγραμμα ροπής για μέγιστη ροπή 10 Nm και για ελάχιστη -10 Nm.



Εικόνα 5-10 : Ροπή φορτίου κινητήρα

Σύμφωνα με το σχεδιάγραμμα ροπής η ηλεκτρική μηχανή λειτουργεί ως κινητήρας από 0-3 s και ως γεννήτρια από 3-6 s. Ο κινητήρας επιταχύνει με την ορθή φορά περιστροφής στο χρονικό διάστημα 0-1s με σταθερή ροπή από 1-2s. Η αναγεννητική πέδηση ορθής φοράς πραγματοποιείται στο χρονικό διάστημα 2-3 s με την μηχανή να λειτουργεί ως γεννήτρια στο διάστημα 3-6s. Αντίστοιχα, παρατηρείται λειτουργία γεννήτριας σταθερής ροπής στο χρονικό διάστημα 4-5 s. Τέλος, η αναγεννητική πέδηση αναστροφής φοράς περιστροφής επιτυγχάνεται από 5-6 s.

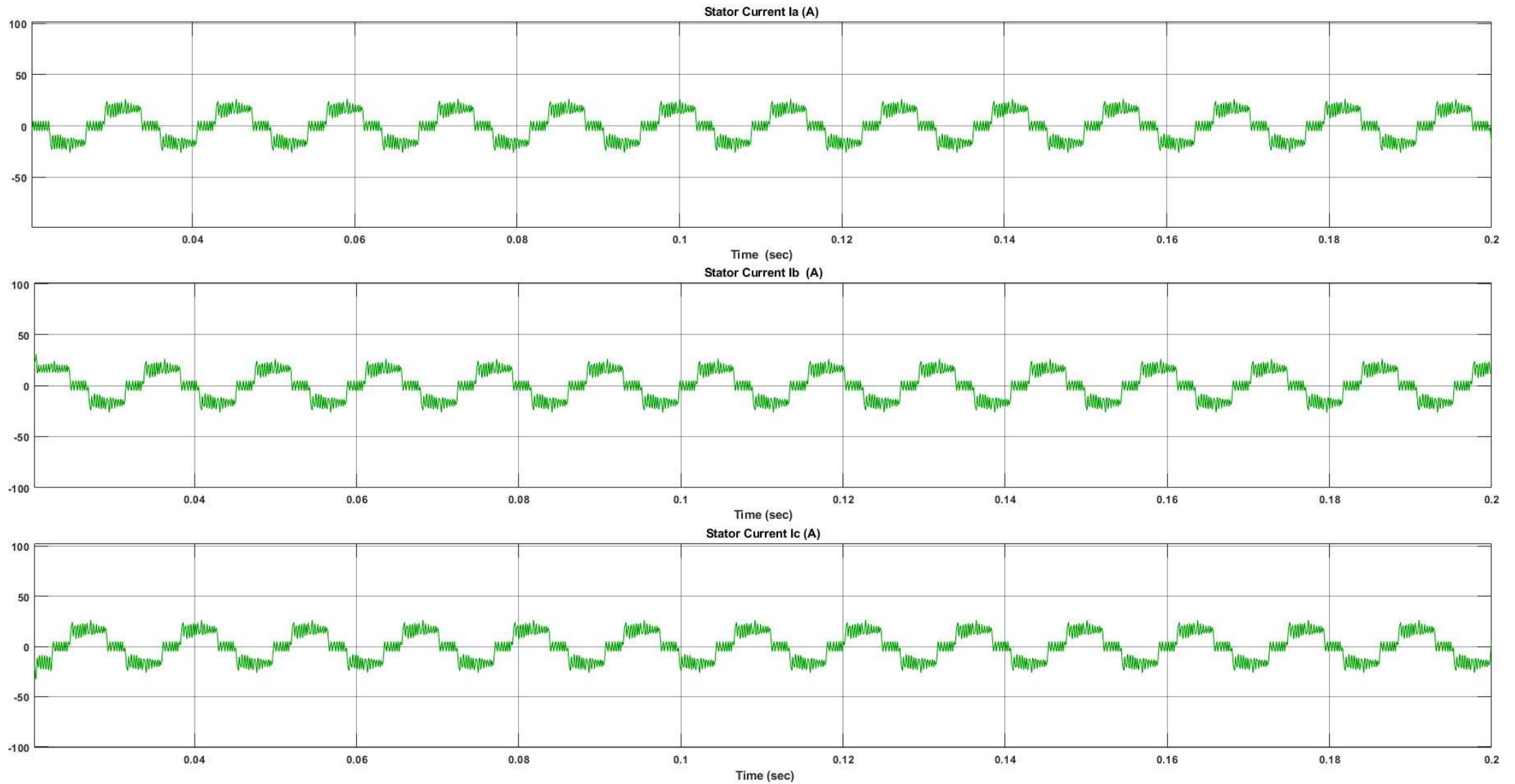
Αποτελέσματα Προσομοίωσης

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των δοκιμών προσομοίωσης, στις οποίες υποβάλλεται το σύστημα ηλεκτρικής κίνησης. Εξάγονται, λοιπόν, οι κυματομορφές που περιγράφουν τη συμπεριφορά και την απόκριση του κινητήρα στις διάφορες μεταβατικές συνθήκες, εφαρμόζοντας ημιτονοειδή έλεγχο.

Παρακάτω εμφανίζονται οι βασικές κυματομορφές του κινητήριου συστήματος αναγεννητικής πέδησης με τη βοήθεια του προγράμματος προσομοίωσης Simulink. Έτσι, λαμβάνονται σημαντικές πληροφορίες για τη συμπεριφορά και την απόκριση του συστήματος μέσω των δοκιμών που προαναφέρθηκαν παραπάνω. Για κάθε δοκιμή που πραγματοποιείται, εμφανίζονται οι ακόλουθες κυματομορφές με την εξής σειρά:

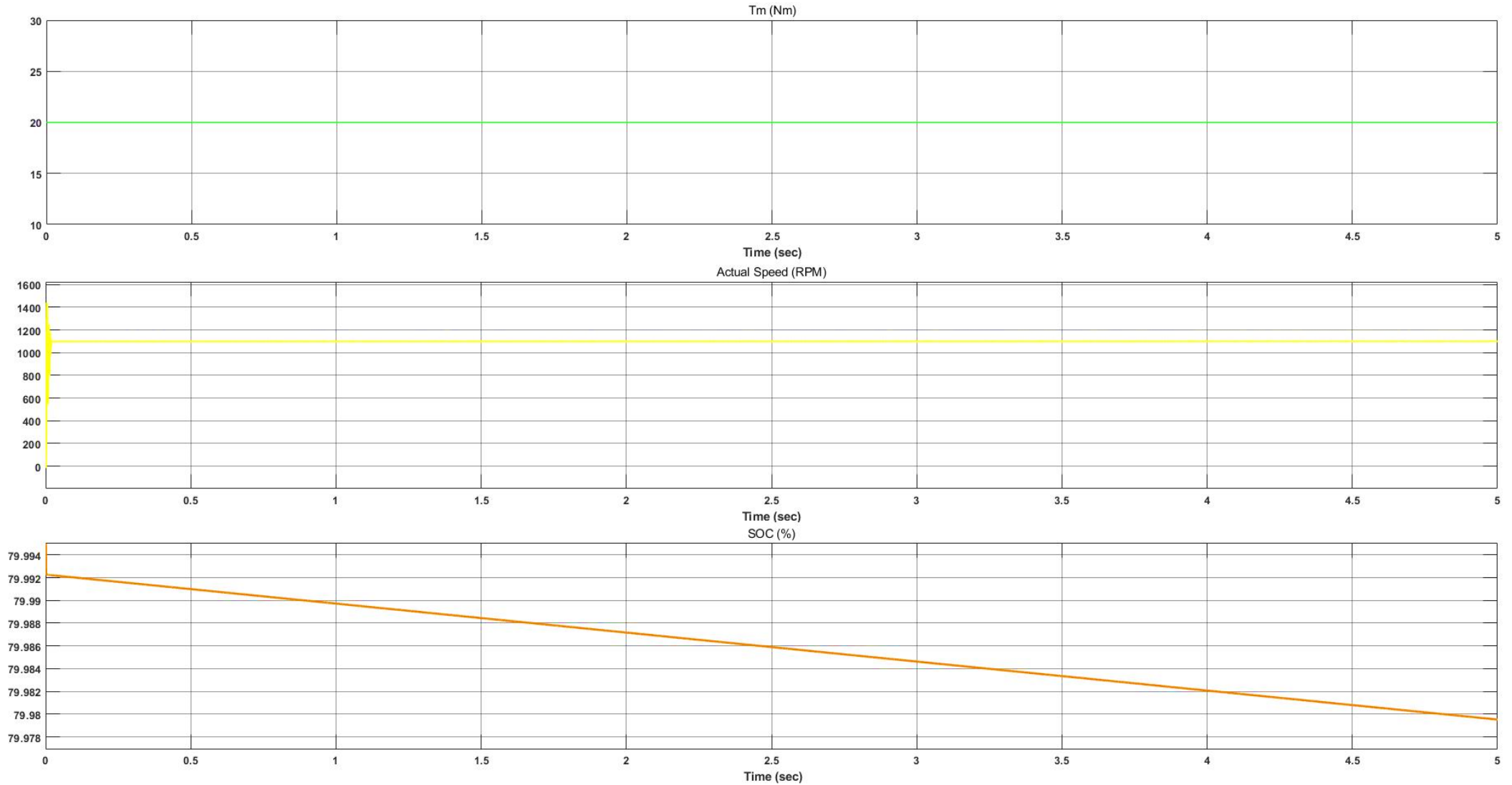
- Τα ρεύματα κάθε φάσης στα τυλίγματα του στάτη του SPM κινητήρα
- Η ροπή φορτίου του κινητήρα
- Η πραγματική ταχύτητα του δρομέα.
- Η κατάσταση φόρτισης της μπαταρίας (SOC)

Κυματομορφές σταθερής ροπής +20 Nm για επιθυμητή ταχύτητα 1100 rpm



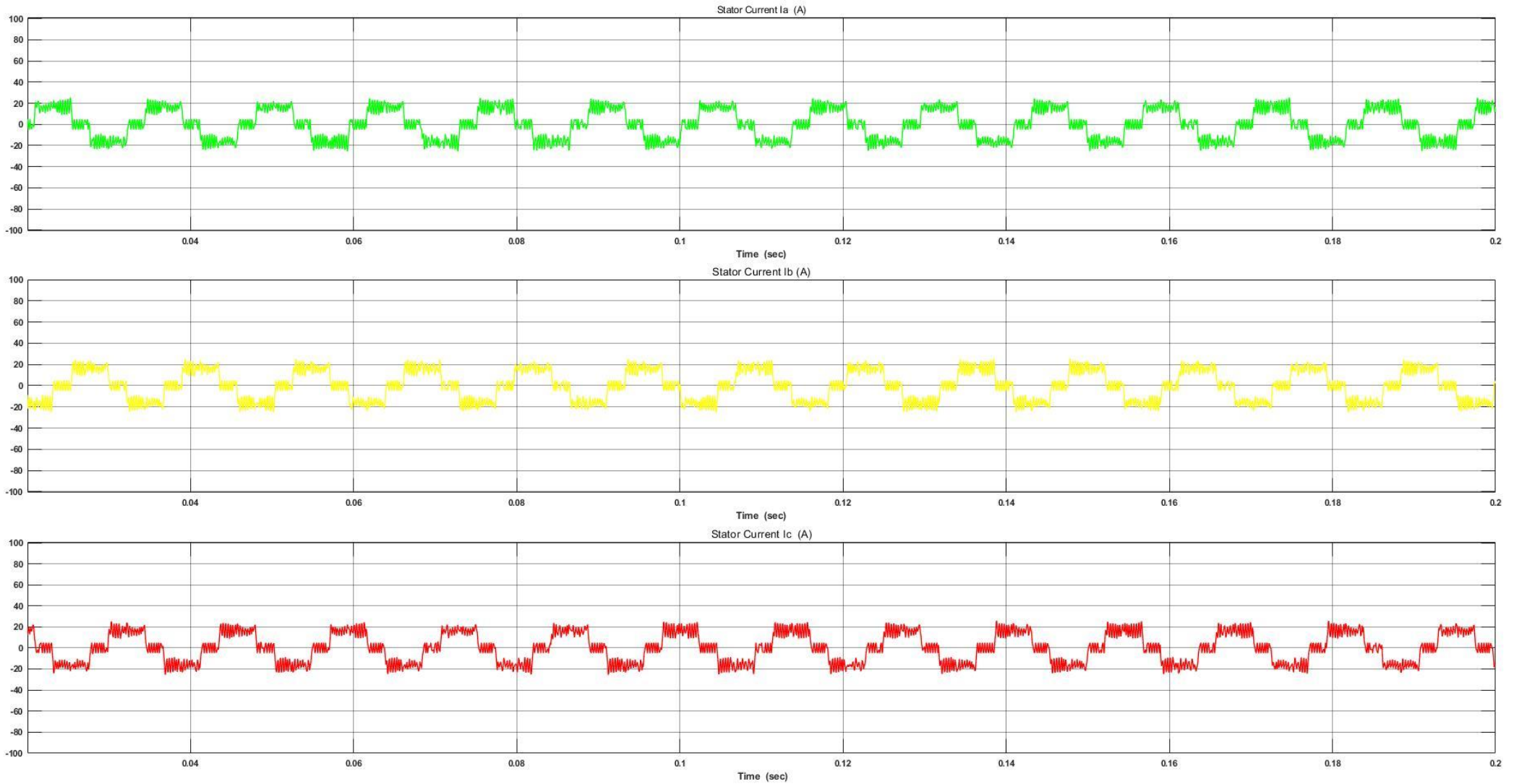
Σχήμα 5.45 : Κυματομορφές ρευμάτων στάτη του κινητήρα με σταθερό φορτίο στο 100% του ονομαστικού (20Nm) για χρονικό διάστημα $t=0.2s$ με στροφές 1100 rpm

Αναγεννητική Πέδηση σε Εφαρμογές Ηλεκτρικής Κίνησης

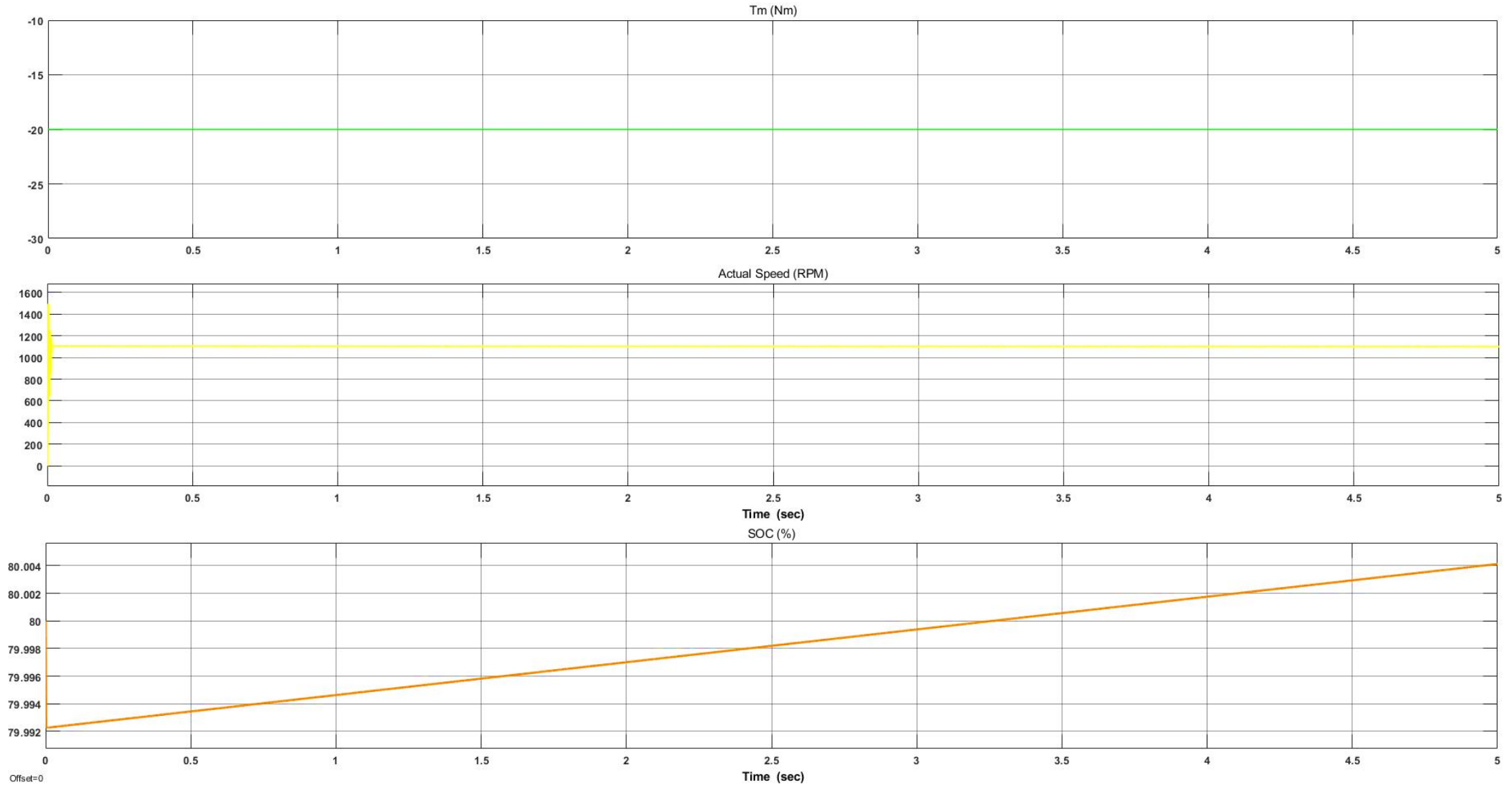


Σχήμα 5.46 : Κυματομορφές ροπής φορτίου κινητήρα, ταχύτητας περιστροφής κινητήρα και κατάστασης φόρτισης για σταθερή θετική ροπή 20 Nm στο 50% της ονομαστικής τιμής για χρονικό διάστημα $t=5s$ με στροφές 1100 rpm

Κυματομορφές σταθερής ροπής -20 Nm για επιθυμητή ταχύτητα 1100 rpm

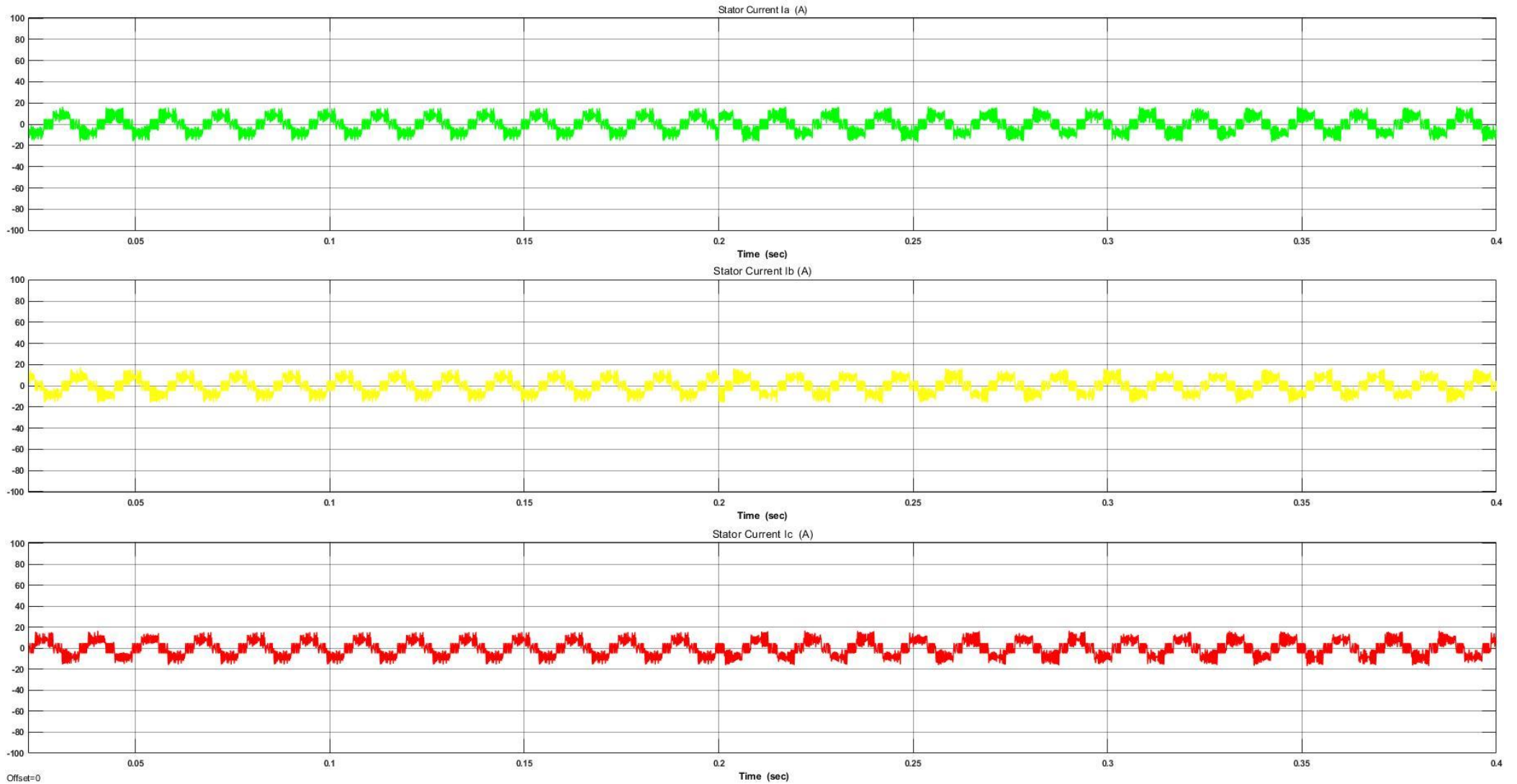


Σχήμα 5.47 : Κυματομορφές ρευμάτων στάτη του κινητήρα με σταθερό αρνητικό φορτίο στο 100% του ονομαστικού (-20Nm) για χρονικό διάστημα $t=0.2s$ με στροφές 1100 rpm

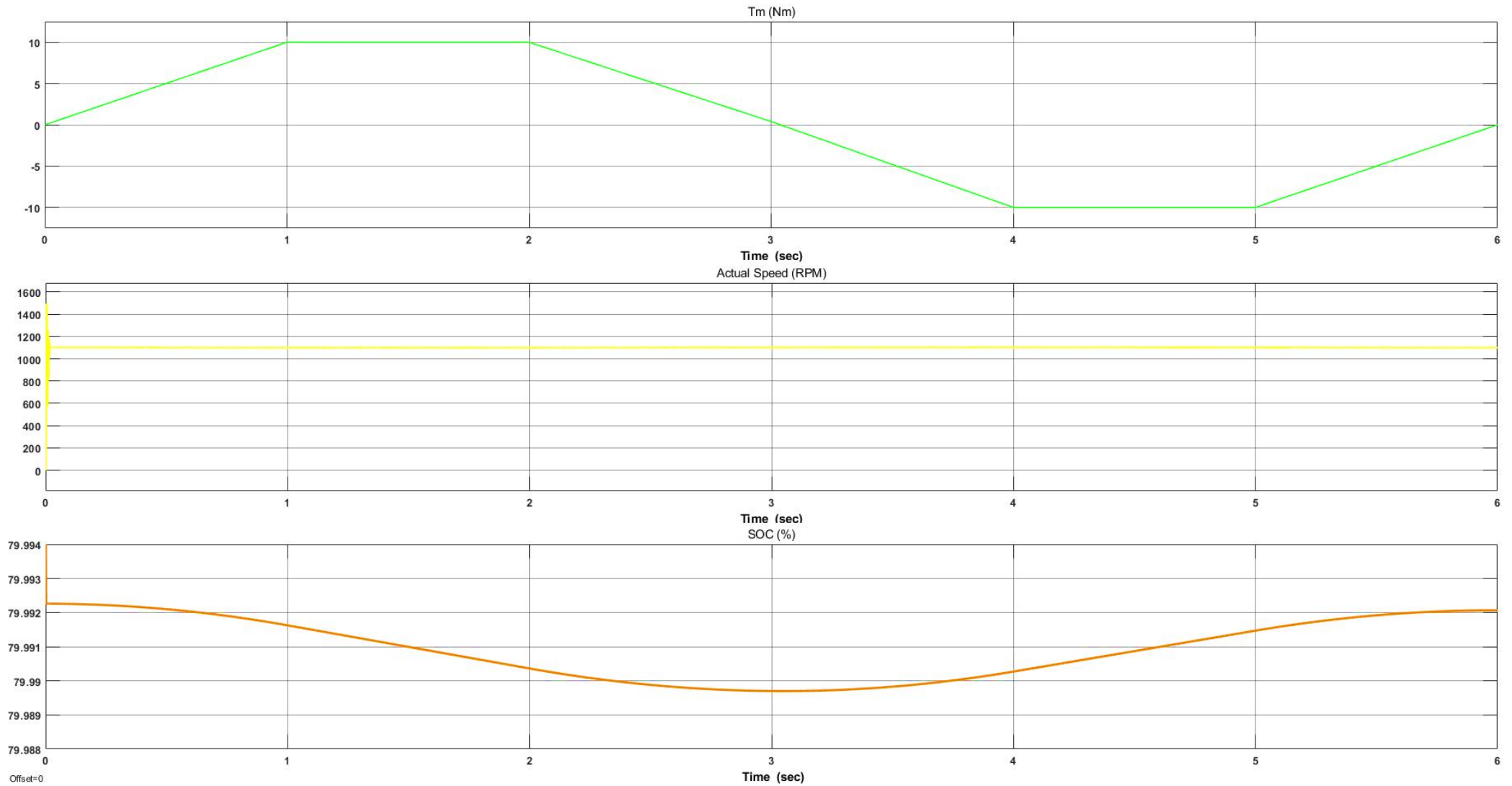


Σχήμα 5.48 : Κυματομορφές ροπής φορτίου κινητήρα, ταχύτητας περιστροφής κινητήρα και κατάστασης φόρτισης για σταθερή αρνητική ροπή -20 Nm στο 50% της ονομαστικής τιμής για χρονικό διάστημα $t=5\text{s}$ με στροφές 1100 rpm

Κοματομορφές προφίλ ροπής 1

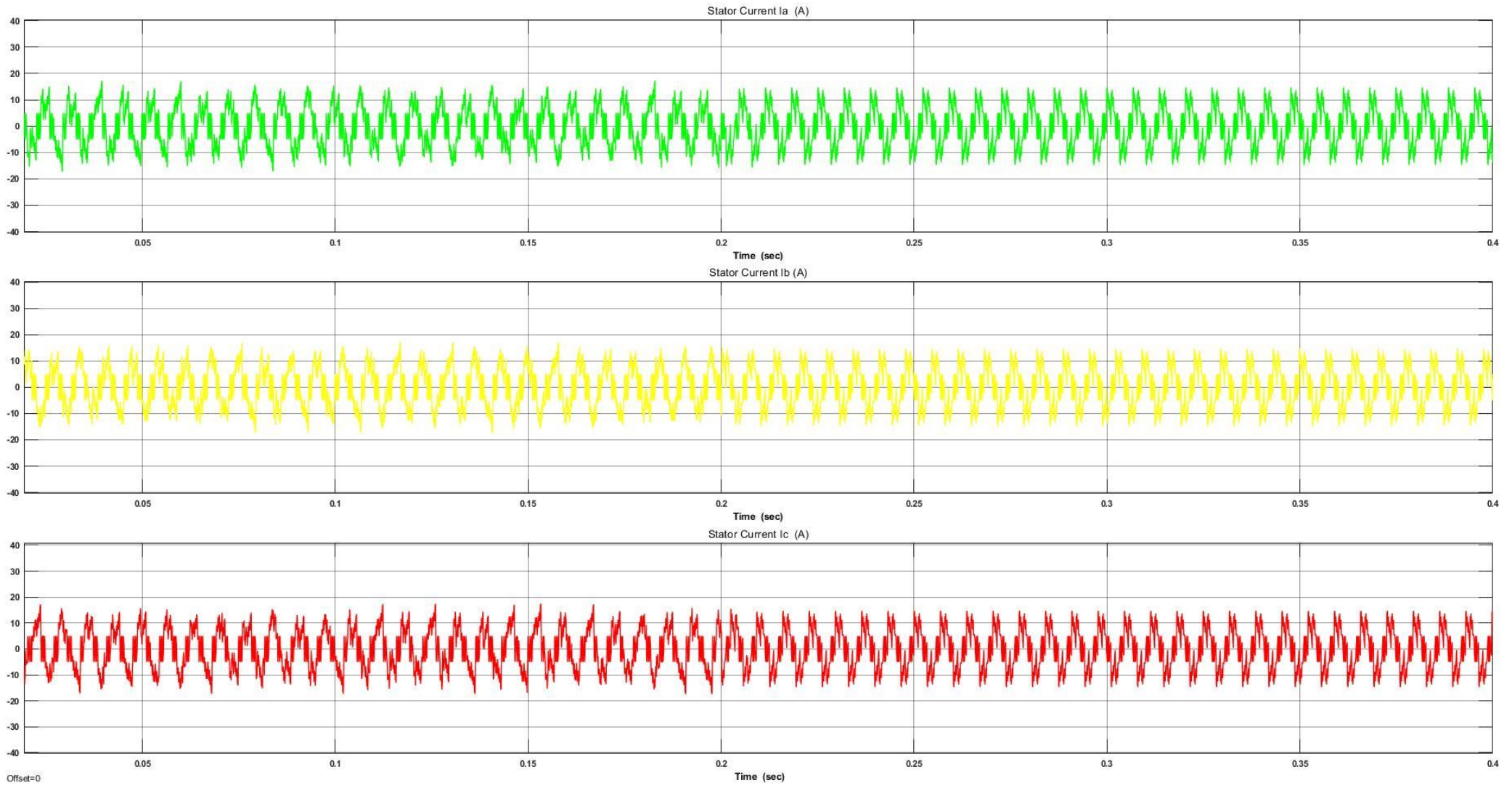


Σχήμα 5.49 : Ρεύματα στάτη του κινητήρα με μεταβολή φορτίου από 10 Nm για $0 < t < 0.2s$ σε -10Nm στο χρονικό διάστημα $t=0.2s$ έως $t=0.4s$ με στροφές 1100 rpm

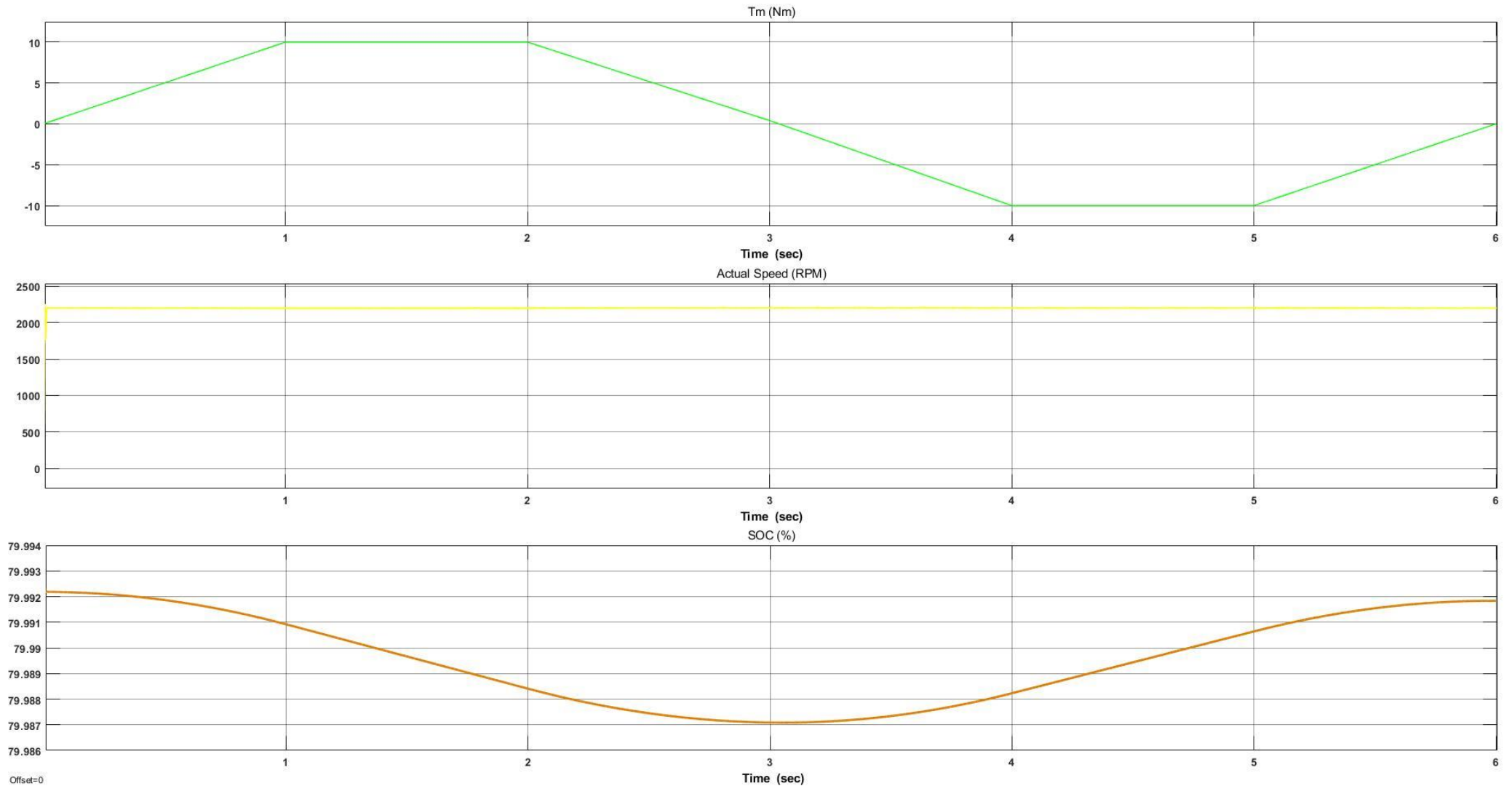


Σχήμα 5.50 : Κυματομορφές ροπής φορτίου κινητήρα, ταχύτητας περιστροφής κινητήρα και κατάστασης φόρτισης μπαταρίας για προφίλ ροπής 1 στο χρονικό διάστημα $t=6s$

Κυματομορφές προφίλ ροπής 2

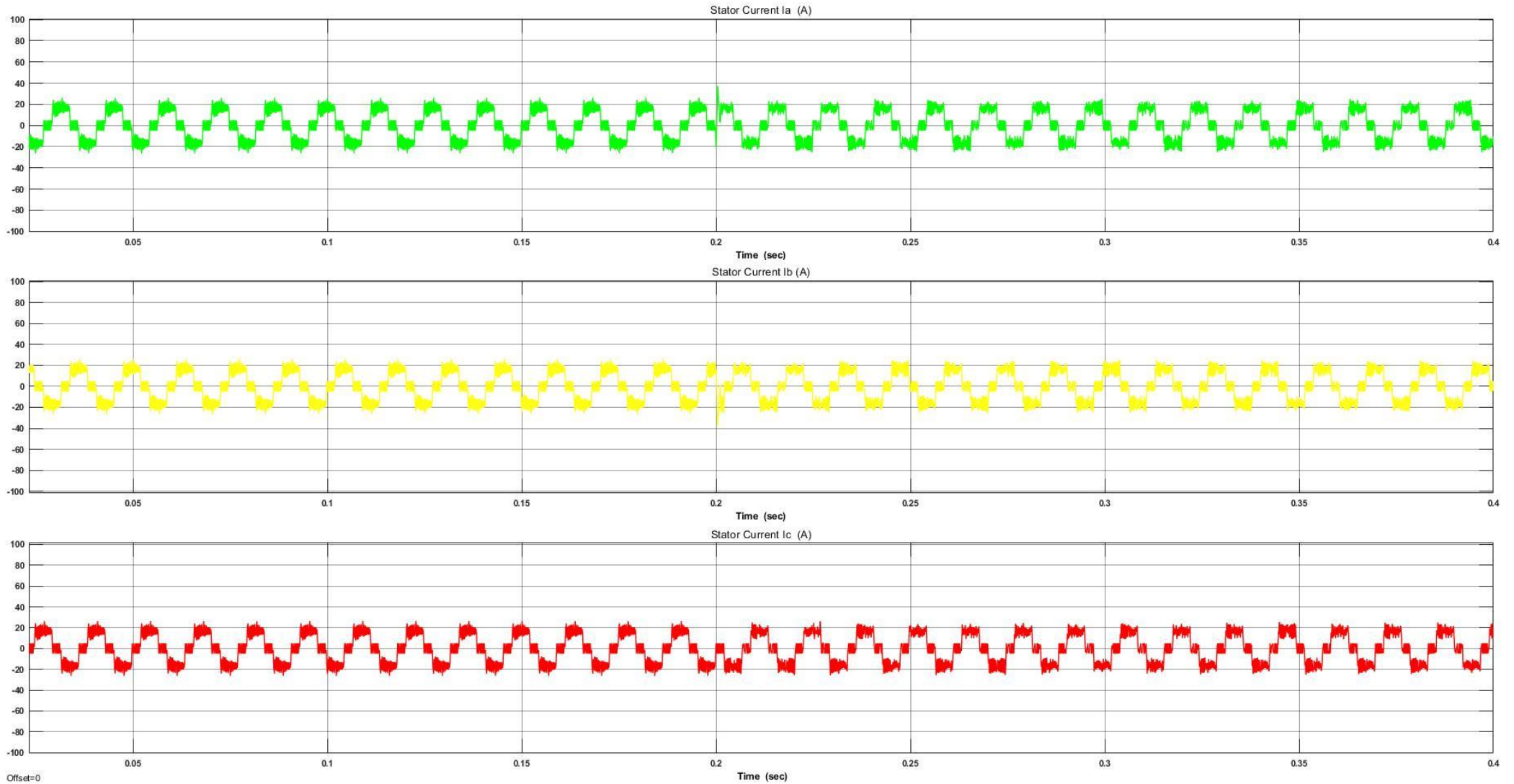


Σχήμα 5.51 : Ρεύματα στάτη του κινητήρα με μεταβολή φορτίου από 10 Nm (για $0 < t < 0.2s$) σε -10 Nm στο χρονικό διάστημα $t=0.2s$ έως $t=0.4s$ με στροφές 2200 rpm

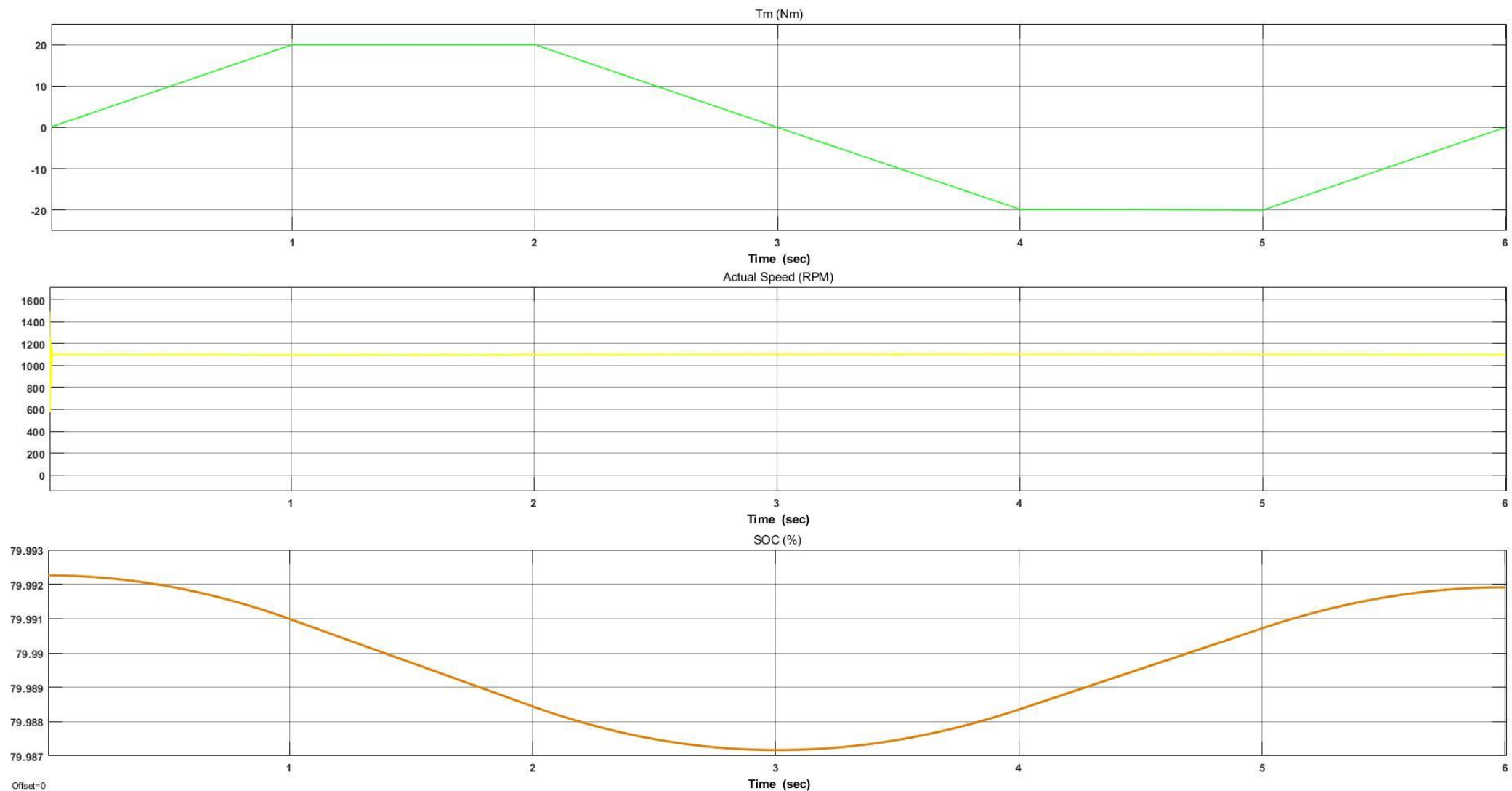


Σχήμα 5.52 : Κυματομορφές ροπής φορτίου κινητήρα, ταχύτητας περιστροφής κινητήρα και κατάστασης φόρτισης μπαταρίας για προφίλ ροπής 2 στο χρονικό διάστημα $t=6s$

Κοματομορφές προφίλ ροπής 3

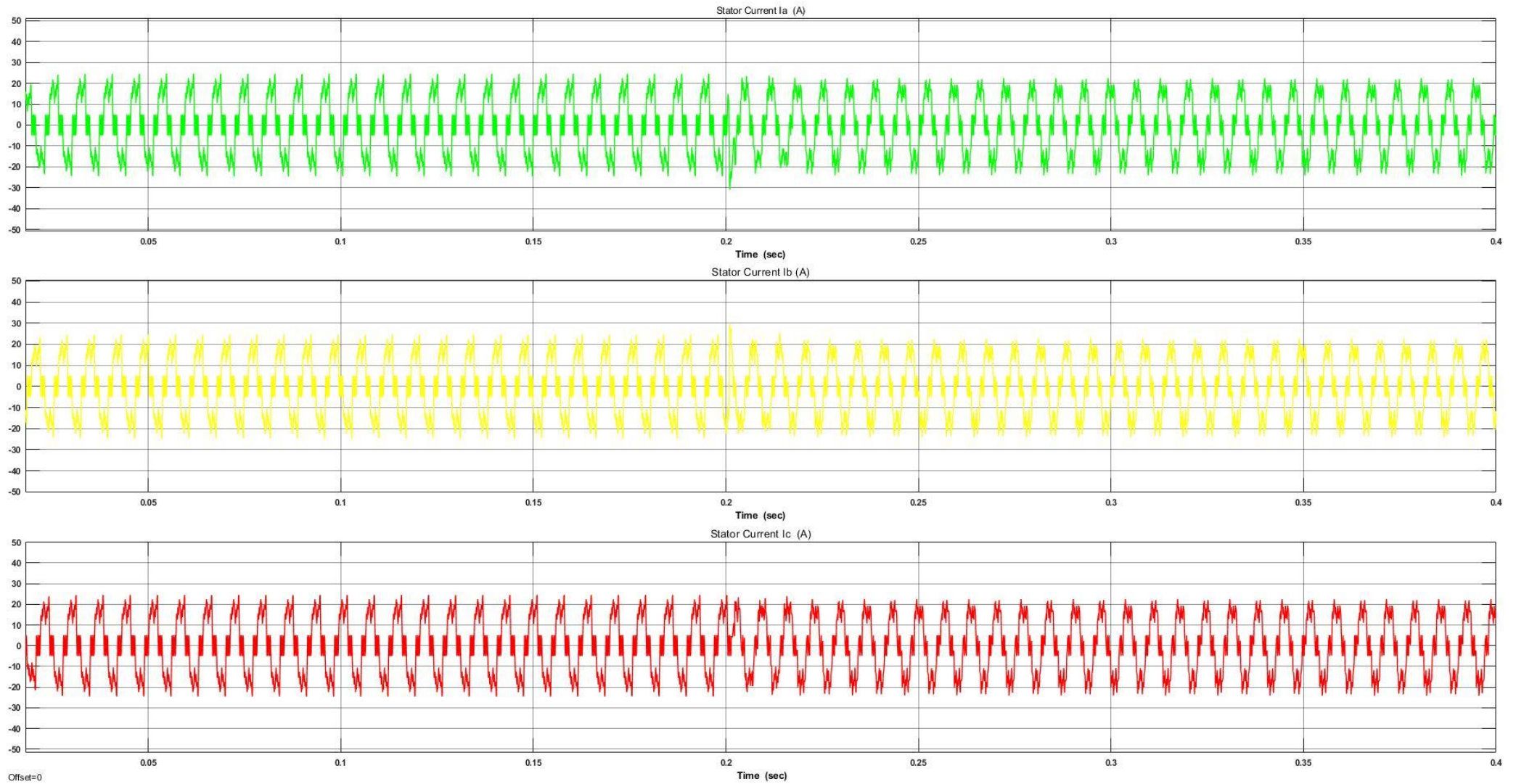


Σχήμα 5.53 : Ρεύματα στάτη του κινητήρα με μεταβολή φορτίου από 20 Nm (για $0 < t < 0.2s$) σε -20 Nm στο χρονικό διάστημα $t=0.2s$ έως $t=0.4s$ με στροφές 1100 rpm

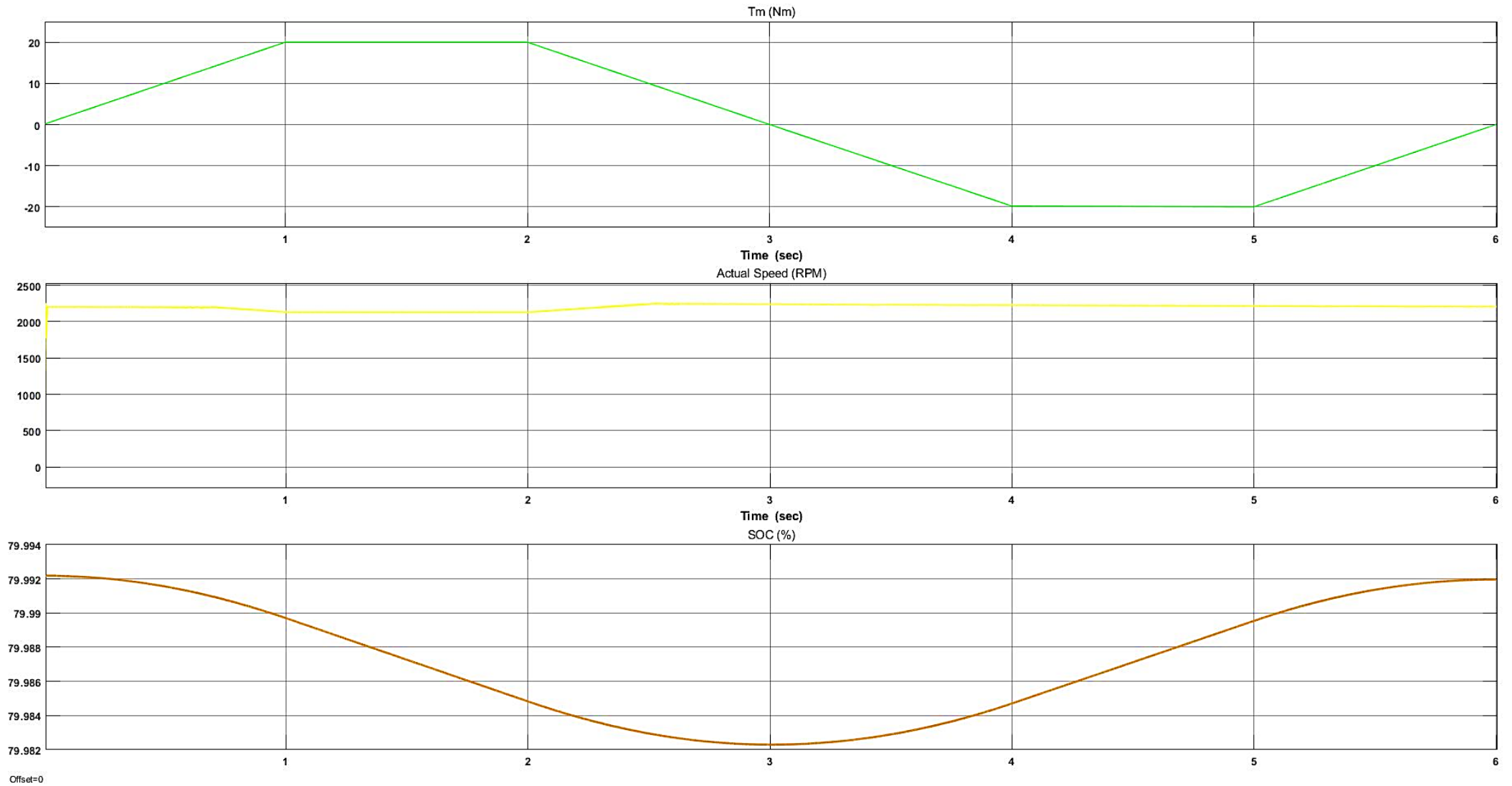


Σχήμα 5.54 : Κυματομορφές ροπής φορτίου κινητήρα, ταχύτητας περιστροφής κινητήρα και κατάστασης φόρτισης μπαταρίας για προφίλ ροπής 3 στο χρονικό διάστημα $t=6s$

Κυματομορφές προφίλ ροπής 4



Σχήμα 5.55 : Ρεύματα στάτη του κινητήρα με μεταβολή φορτίου από 20 Nm (για $0 < t < 0.2s$) σε -20 Nm στο χρονικό διάστημα $t=0.2s$ έως $t=0.4s$ με στροφές 2200 rpm



Σχήμα 5.56 : Κυματομορφές ροπής φορτίου κινητήρα, ταχύτητας περιστροφής κινητήρα και κατάστασης φόρτισης μπαταρίας για προφίλ ροπής 4 στο χρονικό διάστημα $t=6s$

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Οι απαιτήσεις της παγκόσμιας αγοράς καθώς και οι περιβαλλοντικοί περιορισμοί που επιβάλλονται οδηγούν σε έρευνες τεχνολογιών εξοικονόμησης ενέργειας και μείωσης της κατανάλωσης καυσίμου. Στον τομέα των συστημάτων ηλεκτρικής κίνησης, σημαντικό ρόλο στην προσπάθεια αυτή διαδραματίζει η αναγεννητική πέδηση, η οποία μελετάται και παρουσιάζεται στην παρούσα διπλωματική εργασία. Η αναγεννητική πέδηση εφαρμόζεται σε πληθώρα βιομηχανικών διεργασιών, όπως εφαρμογές μεταφοράς, περιστροφής και ανύψωσης καθώς και εφαρμογές που περιλαμβάνουν ηλεκτρικά αυτοκίνητα, λεωφορεία, τρένα και πλοία. Ιδιαίτερα, στον τομέα των αυτοκινητοβιομηχανιών με την εξέλιξη των ηλεκτρικών οχημάτων, αυξάνοντας την απόδοση και την αξιοπιστία τους, η αναγεννητική πέδηση καθίσταται απαραίτητη. Συνεπώς με τη διαρκή ανάπτυξη των μπαταριών και την εφαρμογή αναγεννητικής πέδησης των αμιγώς ηλεκτροκίνητων οχημάτων βελτιώνεται σημαντικά η αυτονομία τους, η οποία αποτελεί το βασικό μειονέκτημά τους έναντι των συμβατικών οχημάτων.

Στη συγκεκριμένη διπλωματική αναλύονται οι διατάξεις ηλεκτρονικών ισχύος αναγεννητικής πέδησης για τις περισσότερες κατηγορίες ηλεκτρικών μηχανών, ενώ περιγράφονται οι τεχνικές ελέγχου της κάθε διάταξης αντίστοιχα. Αρχικά, υλοποιούνται μέσω του προγράμματος Simulink του MATLAB τα κυκλώματα δύο συστημάτων ηλεκτρικής κίνησης για κινητήρα συνεχούς ρεύματος με μετατροπείς dc-dc δύο και τεσσάρων τεταρτημορίων, αντίστοιχα. Αποσκοπώντας στη μελέτη της αναγεννητικής πέδησης αυτών των συστημάτων, πραγματοποιούνται προσομοιώσεις μέσω του προγράμματος MATLAB/Simulink. Έτσι, καταγράφονται τα τεταρτημόρια πέδησης στο επίπεδο ροπής-ταχύτητας της ηλεκτρικής μηχανής μέσω των κυματομορφών, αναλύοντας τις περιοχές αναγεννητικής και μη-αναγεννητικής πέδησης.

Συγκεκριμένα, για τη μηχανή συνεχούς ρεύματος ξένης διέγερσης που είναι ίδια και στις δύο περιπτώσεις, λαμβάνονται μετρήσεις για θετική και αρνητική ροπή στο 100% της ονομαστικής τιμής της ροπής φορτίου. Στην περιοχή αναγεννητικής πέδησης εισάγεται αρνητική ροπή στη μηχανή λαμβάνοντας τις απαραίτητες γραφικές παραστάσεις. Καταγράφεται η αρνητική τιμή ρεύματος του τυλίγματος του στάτη, καθώς η μηχανή λειτουργεί ως γεννήτρια με αρνητική ηλεκτρική ροπή και σταθερό ρεύμα διέγερσης. Ακόμη, λαμβάνονται μετρήσεις μέσω scope που αφορούν τη ροπή φορτίου, την πραγματική ταχύτητα της μηχανής και την κατάσταση φόρτισης της μπαταρίας.

Εν συνεχεία, καταγράφεται η λειτουργία του συστήματος μέσω ειδικού προφίλ ροπής φορτίου, προσεγγίζοντας συνθήκες φόρτισης κοντά στις πραγματικές. Επιβεβαιώνεται η λειτουργία αναγεννητικής πέδησης με τη φόρτιση της μπαταρίας (αύξηση SOC) στην διάρκεια αρνητικής ροπής για $t > 3s$ καθώς και η λειτουργία κινητήρα με την εκφόρτιση της μπαταρίας (μείωση SOC) στην διάρκεια αρνητικής ροπής για $t < 3s$. Το μέγιστο ρεύμα που απορροφάται από την μπαταρία κατά τη διάρκεια της αναγεννητικής πέδησης για 100% της ονομαστικής ροπής είναι 15A. Η αναπαράσταση του μέγιστου ρεύματος αναγεννητικής πέδησης διακρίνεται στη γραφική του ρεύματος στάτη που αποτελεί τα όρια της αναγεννητικής πέδησης. Στον μετατροπέα τεσσάρων τεταρτημορίων το ρεύμα του στάτη παρουσιάζει μια μικρή κυμάτωση της τάξης των 4A που οφείλεται στη διακοπτική συχνότητα της γεννήτριας PWM των mosfets. Επίσης, στη διάρκεια λειτουργίας κινητήρα με την αύξηση της ροπής του φορτίου παρατηρείται η μείωση των στροφών, ενώ με τη μείωση της ροπής σε αρνητικές τιμές διακρίνεται η αύξηση των στροφών.

Έπειτα, πραγματοποιείται η εξέταση του κυκλώματος που αφορά τον BLDC κινητήρα τραπεζοειδούς ροής μέσω Simulink. Ο έλεγχος επιτυγχάνεται μέσω της διαμόρφωσης τραπεζοειδούς τάσης, λαμβάνοντας πληροφορίες σχετικά με τη γωνία του κινητήρα μέσω αισθητήρων Hall. Στην περιοχή αναγεννητικής πέδησης εισάγεται αρνητική ροπή στη μηχανή λαμβάνοντας τις απαραίτητες κυματομορφές μέσω των στοιχείων scopes. Καταγράφονται οι κυματομορφές των ρευμάτων των τυλιγμάτων του στάτη για κάθε φάση με αρνητική ηλεκτρική ροπή στο 100% (-20Nm) και σταθερή ταχύτητα περιστροφής 3000 rpm για $t=0.4s$. Επίσης, εμφανίζονται οι κυματομορφές της αντιηλεκτρεγερτικής δύναμης κάθε φάσης για διάστημα $t=0.2s$. Σε όλες τις περιπτώσεις του πειραματικού προφίλ ροπής φορτίου διακρίνεται η αύξηση των ρευμάτων του στάτη του κινητήρα μετά το χρονικό διάστημα 0.2s όπου η ροπή γίνεται αρνητική. Οι δοκιμές μεταβολής φορτίου πραγματοποιούνται από 20 Nm σε -20 Nm και από 10 Nm σε -10 Nm για επιθυμητή ταχύτητα 1500 rpm και 3000 rpm.

Εν συνεχεία, καταγράφονται μετρήσεις που αφορούν τη ροπή φορτίου, την πραγματική ταχύτητα της μηχανής και την κατάσταση φόρτισης της μπαταρίας μέσω διακυμαινόμενης ροπής φορτίου, προσεγγίζοντας πραγματικές συνθήκες φόρτισης. Επιβεβαιώνεται η λειτουργία αναγεννητικής πέδησης με την φόρτιση της μπαταρίας (αύξηση SOC) στην διάρκεια αρνητικής ροπής για $t > 3s$ καθώς και η λειτουργία κινητήρα με την εκφόρτιση της μπαταρίας (μείωση SOC) στη διάρκεια αρνητικής ροπής για $t < 3s$ με αναμενόμενα αποτελέσματα. Στη διάρκεια λειτουργίας του κινητήρα με την αύξηση της ροπής του φορτίου παρατηρείται η μείωση των στροφών, ενώ με τη μείωση της ροπής σε αρνητικές τιμές διακρίνεται η αύξηση των στροφών. Επιπλέον, εξαιτίας των ανώτερων αρμονικών των διακοπτικών στοιχείων δημιουργείται μία μικρή κυμάτωση στις κυματομορφές των ρευμάτων του στάτη, ενώ στην εκκίνηση του κινητήρα απαιτείται ο ελάχιστος χρόνος απόκρισης για την σταθεροποίηση του συστήματος. Διακρίνεται, επίσης, μια ελάχιστη κυμάτωση στην ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα στις μικρές ταχύτητες, καθώς ο τραπεζοειδής έλεγχος πραγματοποιείται ανά 60° .

Τέλος, παρουσιάζονται οι διατάξεις που αφορούν την αναγεννητική πέδηση στον κινητήρα μόνιμων μαγνητών PMSM ημιτονοειδούς ροής, μέσω ελέγχου με αισθητήρες Hall, όπως και στην περίπτωση του BLDC κινητήρα. Στην περιοχή αναγεννητικής πέδησης εισάγεται αρνητική ροπή στη μηχανή λαμβάνοντας τις απαραίτητες γραφικές παραστάσεις με τις κυματομορφές των ρευμάτων των τυλιγμάτων του στάτη για κάθε φάση με αρνητική ηλεκτρική ροπή στο 100% (-20Nm) και σταθερή ταχύτητα περιστροφής στο 50% με 1100 rpm για $t=0.2s$. Οι κυματομορφές των ρευμάτων είναι αναμενόμενες με μία μικρή κυμάτωση, εξαιτίας των ανώτερων αρμονικών των διακοπτικών στοιχείων με την καλύτερη συμπεριφορά του κινητήρα σε χαμηλότερες τιμές ταχύτητας περιστροφής. Σε όλες τις περιπτώσεις κυμαινόμενης ροπής φορτίου διακρίνεται η αύξηση των ρευμάτων του στάτη του κινητήρα μετά το χρονικό διάστημα 0.2s όπου γίνεται αρνητική η ροπή. Οι δοκιμές μεταβολής φορτίου αποτελούν τέσσερις (4) συνδυασμούς από 20 Nm σε -20 Nm και από 10 Nm σε -10 Nm για επιθυμητή ταχύτητα 1500 rpm και 3000 rpm. Εν συνεχεία, καταγράφονται μετρήσεις που αφορούν τη ροπή φορτίου, την πραγματική ταχύτητα της μηχανής και την κατάσταση φόρτισης της μπαταρίας μέσω μεταβαλλόμενης ροπής φορτίου προσεγγίζοντας πραγματικές συνθήκες φόρτισης για $t=6s$. Επιβεβαιώνεται η λειτουργία αναγεννητικής πέδησης με τη φόρτιση της μπαταρίας (αύξηση SOC) στη διάρκεια αρνητικής ροπής για $t > 3s$ καθώς και η λειτουργία κινητήρα με την εκφόρτιση της μπαταρίας (μείωση SOC) στη διάρκεια αρνητικής ροπής για $t < 3s$ με αναμενόμενα αποτελέσματα.

Στη διάρκεια λειτουργίας του κινητήρα με την αύξηση της ροπής του φορτίου παρατηρείται η μείωση των στροφών, ενώ με τη μείωση της ροπής σε αρνητικές τιμές διακρίνεται η αύξηση των στροφών.

Οι δοκιμές, στις οποίες υποβλήθηκαν τα κινητήρια συστήματα, χαρακτηρίζονται ως ιδανικές, αφηφώντας προβλήματα απωλειών που προκύπτουν στα πραγματικά συστήματα ελέγχου. Τα κυκλώματα ελέγχου αναπτύχθηκαν με σκοπό την παρακολούθηση και τον έλεγχο της αναγεννητικής πέδησης στα διάφορα συστήματα, λαμβάνοντας μετρήσεις μέσω κατάλληλης παλμοδότησης των ημιαγωγικών διακοπών ισχύος. Η κάθε βαθμίδα απαιτείται να λειτουργεί με τη μέγιστη δυνατή απόδοση και την καλύτερη συνεργασία ώστε το συνολικό σύστημα να λειτουργεί βέλτιστα. Οι διατάξεις ελέγχου αναγεννητικής πέδησης που παρουσιάστηκαν λαμβάνουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον μελλοντικής διερεύνησης. Υπάρχει δυνατότητα σχεδίασης και εφαρμογής στην πράξη μέσω πραγματικής πειραματικής διάταξης, επιτυγχάνοντας την παρακολούθηση και την εκτίμηση των χαρακτηριστικών του συστήματος με όποιες αδυναμίες προκύπτουν. Το κύκλωμα ελέγχου περιλαμβάνει στοιχεία παρακολούθησης και ελέγχου του κινητήριου συστήματος, εκτιμώντας κρίσιμα μεγέθη για την επιθυμητή απόκριση.

Βιβλιογραφία – Αναφορές - Διαδικτυακές Πηγές

1. bemf/blog.com, 2019. [Ηλεκτρονικό].
2. Bose, B. K., 2002. *Modern Power Electronics and AC Drives*. s.l.:Prentice Hall.
3. Chapman, S. J., 2020. *ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ AC-DC*. ΤΖΙΟΛΑ επιμ. AUSTRALIA: s.n.
4. Chiasson, J., 2005. *Modeling and High Performance Control of Electric Machines*. s.l.:IEEE Press-Wiley.
5. control, m., 2022. <https://www.motioncontroltips.com/>. [Ηλεκτρονικό]
Available at: <https://www.motioncontroltips.com/>
6. hyundai.com, 2022. [Ηλεκτρονικό].
7. javapoint.com, 2019. *synchronous-motor*. [Ηλεκτρονικό]
Available at: javapoint.com
8. Jost, K., 2021. *Futurride*. [Ηλεκτρονικό]
Available at: futurride.com
9. Krause, P. C., 1987. *Analysis of Electric Machinery*. s.l.:McGraw-Hill.
10. Krishnan, R., 2001. *Electric Motor Drives: Modeling, Analysis and control*. New York: Prentice-Hall.

11. Linqip.com, 2021. [Ηλεκτρονικό]
Available at: linquip.com
12. Manias, S. N., χ.χ. *Power Electronics and Motor Drive systems*. 2017: Elsevier.
13. mercedes_benz, g. m., 2021. *group media mercedes-benz.com*. [Ηλεκτρονικό].
14. mg.com, 2016. *MG4 rear wheel drive system*. [Ηλεκτρονικό].
15. Rashid, M. H., 2010. *ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΑ ΙΣΧΥΟΣ*. ΙΩΝ επιμ. FLORIDA: s.n.
16. Researchgate.net, 2020. [Ηλεκτρονικό].
17. Technology, E., 2018. *electrical technology.org*. [Ηλεκτρονικό].
18. Umans, F. K., 2017. *Ηλεκτρικές Μηχανές*. 6η επιμ. Cambridge: FOUNTAS.
19. Valentine, R., 1998. *Motor Control Electronics Handbook*. New York: McGraw-Hill.
20. www.infineon.com, 2020. [Ηλεκτρονικό].
21. Μαδεμλής, X. A., 2010. *Σερβοκινητήρια Συστήματα*. s.l.:Εκδόσεις Τζιόλα .
22. Μαλατέστας, 2021. *Ηλεκτρική Κίνηση*. Αθήνα: Τζιόλα.
23. Μαλατέστας, Π., 2019. *Ηλεκτρικές Μηχανές*. 3η επιμ. Αθήνα: ΤΖΙΟΛΑ.
24. Μανιάς, Σ. Ν., 2020. *Ηλεκτρονικά Ισχύος*. ΣΥΜΕΩΝ επιμ. Αθήνα: s.n.
25. Μηχανών, Ε. Η., 2019. Εργαστηριακές σημειώσεις ηλεκτρικών μηχανών. Στο: Αθήνα: s.n.
26. Π. Β. Μαλατέστας, Σ. Ν. Μ., 2002. *Συστήματα Οδήγησης Ηλεκτρικών Κινητήρων*. s.l.:Εκδόσεις Τζιόλα.