



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ**

**ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

**ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ & ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

**Διπλωματική Εργασία**

**Συστήματα Ελέγχου Σύγχρονων Κινητήρων Μόνιμων Μαγνητών  
Τραπεζοειδούς Μαγνητικής Ροής**

**Φοιτητής: Αντωνιάδης Νικόλαος**

**Αριθμός Μητρώου: 47388**

**Επιβλέπων Καθηγητής: Ιωαννίδης Γεώργιος**

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός

Δρ. Μηχανικού Ε.Μ.Π.

Καθηγητής Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής

Αθήνα-Αιγάλεω, Ιανουάριος 2022



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

**Diploma Thesis**

**Control Systems for Trapezoidal Magnetic Flux Permanent Magnet  
Synchronous Motors (Brushless DC Motors, BLDC)**

**Student: Antoniadis Nikolaos**  
**Registration Number: 47388**

**Supervisor: Ioannidis George**

Certified Electrical Engineer

PhD Engineer NTUA

Professor at the University of West Attica

Athens-Egaleo, January 2022





**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ**

**ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

**ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ & ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

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

**Ιωαννίδης Γεώργιος,  
Καθηγητής, Κοσμήτορας  
Σχολής Μηχανικών**

**Βόκας Γεώργιος,  
Καθηγητής, Διευθυντής  
Τομέα II**

**Καραϊσάς Πέτρος,  
Αναπληρωτής  
Καθηγητής**

(Υπογραφή)

(Υπογραφή)

(Υπογραφή)

Αθήνα-Αιγάλεω, Ιανουάριος 2022

Copyright © Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

**Αντωνιάδης Νικόλαος, Ιανουάριος, 2022**

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

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

### **ΔΗΛΩΣΗ ΠΕΡΙ ΠΝΕΥΜΑΤΙΚΩΝ ΔΙΚΑΙΩΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΛΟΓΟΚΛΟΠΗΣ**

Ο κάτωθι υπογεγραμμένος Αντωνιάδης Νικόλαος του Παναγιώτη, με αριθμό μητρώου 47388, 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**

Αντωνιάδης Νικόλαος

#### **Υπογραφή**





## Ευχαριστίες

Μια διπλωματική εργασία δεν είναι έργο ενός μόνο ανθρώπου. Η παρούσα διπλωματική εργασία δεν θα είχε ολοκληρωθεί αν δεν είχαν συμβάλλει μια σειρά ανθρώπων που θα ήθελα να ευχαριστήσω.

Με την ολοκλήρωση της εκπόνησης της διπλωματικής μου εργασίας θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου αρχικά στον καθηγητή του Τμήματος Ηλεκτρολόγων και Ηλεκτρονικών Μηχανικών του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής, κ. Ιωαννίδη Γεώργιο για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε αναθέτοντάς μου το συγκεκριμένο θέμα.

Στη συνέχεια, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον Αλέξιο Κοσμίδη για την υπομονή και συνεχή καθοδήγηση που μου παρείχε για την ολοκλήρωση των κυκλωμάτων κατά την εκπόνησή της διπλωματικής εργασίας, καθώς και την υπόδειξη της ορθής και μεθοδικής σκέψης και επίλυσης των προβλημάτων.

Τέλος, θα ήθελα να εκφράσω και σε πιο προσωπικό επίπεδο την ευγνωμοσύνη μου σε πολλούς φίλους αλλά και συναδέλφους/συμφοιτητές για την στήριξη και τη βοήθεια τους αλλά πάνω από όλα στην οικογένειά μου που από την αρχή έως και το τέλος ήταν και είναι εκεί, δείχνοντας μου απόλυτη στήριξη, συμπαράσταση και κατανόηση καθ' όλη τη διάρκεια των φοιτητικών σπουδών μου και όχι μόνο.

## Περίληψη

Πολλά ηλεκτρονικά συστήματα από οικιακές συσκευές έως την ηλεκτροκίνηση που χρησιμοποιούν κινητήρες μόνιμου μαγνήτη συγκεντρώνουν σε παγκόσμιο επίπεδο αρκετά μεγάλο ενδιαφέρον. Τα χαρακτηριστικά τους σε υψηλή αποδοτικότητα και μεγάλου λόγου ισχύος προς όγκο, αθόρυβης λειτουργίας και χαμηλής συντήρησης τους κάνουν κατάλληλους για εφαρμογές με υψηλές απαιτήσεις.

Το αντικείμενο της διπλωματικής αυτής εργασίας αφορά την παρουσίαση, ανάλυση και προσομοίωση συστημάτων ελέγχου κινητήρων μόνιμων μαγνητών τραπεζοειδούς μαγνητικής ροής ή αλλιώς κινητήρων συνεχούς ρεύματος χωρίς ψήκτρες με εφαρμογή δύο τεχνικών ελέγχου. Έτσι λοιπόν, αφού παρουσιαστούν τα κυκλώματα που θα σχεδιαστούν στο πρόγραμμα προσομοίωσης Matlab/Simulink, θα γίνει σύγκριση μεταξύ των συγκεκριμένων τεχνικών ελέγχων που έχουν επιλεγεί και είναι ο τραπεζοειδής έλεγχος και ο έλεγχος με τεχνικής προσανατολισμένου πεδίου (Field Oriented Control, FOC). Επίσης, ο κινητήρας για τις εκάστοτε τεχνικές ελέγχου θα δοκιμαστεί σε διάφορες συνθήκες. Ο λόγος που θα γίνει η παραπάνω σύγκριση είναι να εξάγουμε συμπεράσματα για την ανταπόκριση των δύο μεθόδων σε διαφορετικές συνθήκες. Για την όσο το δυνατόν καλύτερη επεξήγηση των εννοιών που χρειάζονται για την κάλυψη των κυκλωμάτων και όχι μόνο (DC κινητήρας, ελεγκτής PI, τεχνική FOC, μετασχηματισμοί Clarke and Park κ.τ.λ.), η εργασία περιλαμβάνει πέντε εισαγωγικά κεφάλαια.

Έτσι λοιπόν, τα κεφάλαια χωρίζονται ως εξής: στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται μια γενική ανασκόπηση των σύγχρονων κινητήρων που υπάρχουν στην βιομηχανία. Στο δεύτερο κεφάλαιο παρατίθενται χρήσιμες γνώσεις στα ηλεκτρονικά ισχύος. Στο τρίτο κεφάλαιο γίνεται μια εμβάθυνση στους BLDC κινητήρες και τα χαρακτηριστικά τους. Στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζονται κάποιοι μέθοδοι προσδιορισμού της θέσης του κινητήρα και στο κεφάλαιο πέντε παρουσιάζονται οι πιο διαδεδομένες τεχνικές ελέγχου που εφαρμόζονται στους κινητήρες συνεχούς ρεύματος χωρίς ψήκτρες.

Στόχος των παραπάνω είναι η πλήρης εξοικείωση με το θέμα και να γίνουν κατανοητές πολλές από τις έννοιες που χρησιμοποιούνται σε αυτούς του κινητήρες, η δομή, η υλοποίηση τους, η λειτουργία αλλά και το πώς και γιατί χρησιμοποιούνται σε πολλές εφαρμογές στην βιομηχανία. Η κλασσική μέθοδος οδήγησης κινητήρων BLDC πραγματοποιείται σε μεταγωγή έξι βημάτων με ηλεκτρονικό μεταγωγέα που ελεγχόταν από αισθητήρες θέσης. Για την μείωση του κόστους και της πολυπλοκότητας του συστήματος οδήγησης προτιμάται πλέον η οδήγηση χωρίς αισθητήρες. Τα κυκλώματα που θα παρουσιαστούν θα χρησιμοποιούν ξεχωριστά μια από τις δυο αυτές διαφορετικές μεθόδους προσδιορισμού θέσης του κινητήρα.

**Λέξεις – Κλειδιά:** κινητήρας συνεχούς ρεύματος χωρίς ψήκτρες, BLDC κινητήρες, αισθητήρες Hall, Sensorless, Matlab/Simulink, PI ελεγκτές, τεχνική FOC, back EMF.



## Abstract

Many electronic systems, from home appliances to electric motors that use permanent magnet motors, are attracting a great deal of worldwide interest. Their features in high efficiency and high power to volume ratio, quiet operation and low maintenance make them suitable for applications with high requirements.

The object of this diploma thesis is the presentation, analysis and simulation of control systems for permanent magnet motors of trapezoidal magnetic flux or otherwise DC motors without brushes by application of control techniques. So, after presenting the circuits that will be designed in the Matlab / Simulink simulation program, a comparison will be made between the specific technical controls that have been selected and are the trapezoidal control and the field-oriented control (Field Oriented Control, FOC). Also, the engine for the respective control techniques will be tested in different conditions. The reason for the above comparison is to draw conclusions about the response of the two methods to different conditions. For the best possible explanation of the concepts needed to cover the circuits and beyond (DC motor, PI controller, FOC technique, Clarke and Park transformations, etc.), the paper includes five introductory chapters.

Thus, the chapters are divided as follows: in the first chapter a general overview of the modern machines that exist in the industry is made. The second chapter presents useful knowledge in power electronics. In the third chapter, an overview of BLDC engines and their characteristics is made. Chapter four presents some methods of determining the position of the motor and chapter five presents the most common control techniques that are practiced in brushless DC motors.

The aim of the above is to become fully acquainted with the subject and to understand many of the concepts used in these engines, their structure, implementation, operation and how and why they are used in many applications in industry. The classic BLDC motor drive method is performed in a six-step switch with an electronic switch controlled by position sensors. To reduce the cost and complexity of the driving system, driving without sensors is now preferred. The circuits to be presented will use separately one of these two different motor positioning methods.

**Keywords:** brushless DC motor, BLDC motors, Hall sensors, Sensorless, Matlab / Simulink, PI controllers, FOC technique, back EMF.

## Περιεχόμενα

Ευχαριστίες .....	7
Περίληψη .....	8
Abstract .....	9
Εισαγωγή .....	23
Αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας .....	25
Σκοπός και στόχοι.....	25
Μεθοδολογία.....	26
Καινοτομία.....	26
Δομή.....	27
Κεφάλαιο 1 <sup>ο</sup> : Συνοπτική Παρουσίαση Ηλεκτρικών Κινητήρων .....	29
1.1 Ιστορική αναδρομή κινητήρων .....	29
1.2 Τύποι ηλεκτρικών κινητήρων .....	31
1.2.1 Σύγχρονος κινητήρας.....	31
1.2.2 Ασύγχρονος κινητήρας.....	31
1.2.3 Νόμος του Lenz .....	32
1.2.4 Διαφορές ασύγχρονου και σύγχρονου κινητήρα.....	33
1.3 Δομή ηλεκτρικών κινητήρων.....	35
1.3.1 Πλαίσιο (Frame) .....	37
1.3.2 Στάτης (Stator).....	37
1.3.3 Δρομέας (Rotor) .....	37
1.3.4 Διεγέρτης (Exciter).....	37
1.3.5 Τυλίγματα απόσβεσης (Amortisseur Windings) .....	37
1.4 Τύποι ηλεκτρικών κινητήρων .....	38
1.4.1 Κινητήρες DC με ψήκτρες (Brushed DC Motors) .....	39
1.4.2 Κινητήρες DC χωρίς ψήκτρες (Brushless DC Motors).....	39
1.4.3 Κινητήρες AC επαγωγής .....	39
1.4.4 Σύγχρονοι Κινητήρες Μόνιμων Μαγνητών (PMSM).....	40
1.4.5 Βηματικοί κινητήρες και κινητήρες Μεταβλητής Μαγνητικής Αντίστασης .....	40
1.5 Κριτήρια επιλογής ηλεκτρικού κινητήρα .....	41
Κεφάλαιο 2 <sup>ο</sup> : Μετατροπείς Ισχύος .....	43
2.1 Ημιαγωγικά στοιχεία ισχύος.....	43

2.2	Κατηγορίες μετατροπέων ισχύος.....	46
2.2.1	Μετατροπείς συνεχούς τάσης σε συνεχή (DC - DC) .....	47
2.2.2	Μετατροπείς εναλλασσόμενης τάσης σε συνεχή (AC - DC) .....	47
2.2.3	Μετατροπείς εναλλασσόμενης τάσης σε εναλλασσόμενη (AC - AC) .....	48
2.2.4	Μετατροπείς συνεχούς τάσης σε εναλλασσόμενη (DC – AC).....	49
2.3	Παράμετροι επίδοσης των αντιστροφών.....	51
2.4	Τοπολογία ανορθωτών και αντιστροφή .....	52
2.5	Φίλτρα.....	53
2.5.1	Απλό Φιλτράρισμα .....	53
2.5.2	Ψηφιακό Φιλτράρισμα.....	53
2.6	PID Ελεγκτής.....	55
2.6.1	Αναλογικός «P» ελεγκτής .....	56
2.6.2	Ολοκληρωτικός «I» ελεγκτής.....	56
2.6.3	Διαφορικός «D» ελεγκτής .....	57
2.6.4	Μέθοδος Ziegler – Nichols.....	58
	Κεφάλαιο 3 <sup>ο</sup> : DC Κινητήρες (BLDC Motors).....	59
3.1	Εισαγωγή .....	59
3.2	Σύγκριση κινητήρων BLDC και PMSM.....	61
3.3	Δομή - Τύποι του BLDC κινητήρα.....	62
3.3.1	Inrunner Κινητήρες.....	63
3.3.2	Outrunner Κινητήρες .....	63
3.4	Αρχή λειτουργίας των BLDC κινητήρων .....	65
3.5	Έλεγχος σύγχρονου κινητήρα μόνιμων μαγνητών .....	68
3.5.1	Έλεγχος με τετραγωνικούς παλμούς .....	70
3.5.2	Έλεγχος με διαμόρφωση του εύρους των παλμών .....	70
3.6	Πλεονεκτήματα – Μειονεκτήματα των BLDC κινητήρων.....	71
3.7	Εφαρμογές των BLDC κινητήρων.....	74
3.7.1	Οικιακές Εφαρμογές.....	75
3.7.2	Ιατρικές Εφαρμογές.....	75
3.7.3	Εφαρμογές Οχημάτων .....	76
3.7.4	Εφαρμογές Πλοίων.....	77
3.7.5	Ρομποτικές Εφαρμογές.....	77
3.7.6	Αεροδιαστημικές Εφαρμογές .....	77

Κεφάλαιο 4 <sup>ο</sup> : Μέθοδοι Προσδιορισμού Θέσης του Κινητήρα .....	78
4.1 Μέθοδοι με την χρήση αισθητήρα .....	79
4.1.1 Ανιχνευτές Επίλυσης (Resolvers) .....	79
4.1.2 Αισθητήρες Οπτικών Κωδικοποιητών (Optical Encoder).....	80
4.1.3 Αισθητήρες Hall .....	81
4.2 Μέθοδοι χωρίς τη χρήση αισθητήρα .....	82
4.2.1 Μέθοδος Ανίχνευσης Μηδενικής Διέλευσης αντί-ηλεκτρεγερτικής δύναμης...85	
4.2.2 Ανίχνευση μέσω της 3 <sup>ης</sup> αρμονικής τάσης .....	86
4.2.3 Μέθοδος ανίχνευσης αγωγιμότητας διόδου ελεύθερης ροής ή διέλευσης.....88	
4.2.4 Μέθοδος ενοποίησης αντί-ηλεκτρεγερτικής δύναμης.....89	
Κεφάλαιο 5 <sup>ο</sup> : Τεχνικές Ελέγχου Σύγχρονων Κινητήρων .....	90
5.1 Τραπεζοειδής Έλεγχος (Trapezoidal Control).....	91
5.2 Ημιτονοειδής Έλεγχος (Sinusoidal Control) .....	95
5.2.1 Έλεγχος ανοιχτού βρόχου Vf (Open Loop Control V/f) .....	97
5.2.2 Τεχνική Αυτοελέγχου (Self – Controlled) .....	98
5.3 Άμεσος έλεγχος ροπής και ροής (Direct Torque and Flux Control, DTC ή DTFC) ...99	
5.4 Διανυσματικός έλεγχος (Vector Control) .....	100
5.4.1 Διανυσματικός έλεγχος προσανατολισμένου πεδίου (Field Oriented Control, FOC).....	101
5.4.2 Μετασχηματισμός Clarke – Park .....	103
5.4.3 Διαμόρφωση Διανύσματος χώρου (Space Vector Modulation, SVM) .....	106
5.5 Σύνοψη τεχνικών ελέγχου.....	107
Κεφάλαιο 6 <sup>ο</sup> : Εφαρμογή Τραπεζοειδούς Ελέγχου για Οδήγηση BLDC κινητήρα .....	108
6.1 Μαθηματική μοντελοποίηση .....	109
6.2 Κύκλωμα ελέγχου με Τραπεζοειδή Έλεγχο.....	110
6.3 Τρόπος λειτουργίας του κυκλώματος .....	112
6.4 Αποτελέσματα προσομοίωσης.....	114
6.4.1 Απόκριση εκκίνησης κινητήρα.....	114
6.4.2 Απόκριση κινητήρα σε μεταβατικές συνθήκες .....	122
6.4.2.1 Σταθερές στροφές και μεταβολή φορτίου.....	123
6.4.2.2 Σταθερό φορτίο και μεταβολή των στροφών.....	135
6.5 Συμπεράσματα .....	147
Κεφάλαιο 7 <sup>ο</sup> : Εφαρμογή Τεχνικής Προσανατολισμένου Πεδίου (FOC) για Οδήγηση BLDC Κινητήρα.....	148

7.1	Κύκλωμα ελέγχου τεχνικής προσανατολισμένου πεδίου .....	149
7.2	Τρόπος λειτουργίας του κυκλώματος .....	151
7.3	Αποτελέσματα προσομοίωσης.....	152
7.3.1	Απόκριση εκκίνησης κινητήρα.....	152
7.3.2	Απόκριση κινητήρα σε μεταβατικές συνθήκες .....	158
7.3.2.1	Σταθερές στροφές και μεταβολή φορτίου.....	159
7.3.2.2	Σταθερό φορτίο και μεταβολή των στροφών.....	171
7.4	Συμπεράσματα .....	183
	Κεφάλαιο 8 <sup>ο</sup> : Επίλογος .....	184
8.1	Σύνοψη και Συμπεράσματα .....	184
8.2	Περιβαντολογική συνεισφορά .....	185
8.3	Θέματα για μελλοντική διερεύνηση .....	186
	Βιβλιογραφία – Αναφορές – Διαδικτυακές Πηγές .....	187

## Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1: Διαφορές σύγχρονου κινητήρα με ασύγχρονο κινητήρα .....	34
Πίνακας 2: Πλεονεκτήματα - Μειονεκτήματα κινητήρων μόνιμου μαγνήτη .....	42
Πίνακας 3: Σύγκριση BLDC – PMSM .....	61
Πίνακας 4: Χαρακτηριστικά Inrunner και Outrunner BLDC κινητήρων.....	64
Πίνακας 5: Πλεονεκτήματα - Μειονεκτήματα BLDC κινητήρων.....	74
Πίνακας 6: Διαμόρφωση διανυσμάτων μέσω SVM .....	107
Πίνακας 7: Χαρακτηριστικά BLDC .....	114
Πίνακας 8: Χαρακτηριστικά PI .....	114
Πίνακας 9: Τιμές Φορτίου - Στροφών .....	122
Πίνακας 10: Χαρακτηριστικά BLDC .....	152
Πίνακας 11: Χαρακτηριστικά PI .....	152
Πίνακας 12: Τιμές Φορτίου - Στροφών .....	158

## Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1: Δομή ενός Brushless DC κινητήρα (Πηγή: Stephen J. Chapman (2005)) .....	24
Εικόνα 2: Διαδικασία επιλογής ηλεκτρικού κινητήρα (Πηγή: Stephen J. Chapman (2005)) .....	24
Εικόνα 3: Νόμος του Lenz (Πηγή: (Britannica, 2021)).....	33
Εικόνα 4: Στάτης και Δρομέας (Πηγή: (Bimal K. Bose, 2002) ) .....	36
Εικόνα 5: Σύγχρονος ηλεκτρικός κινητήρας (Πηγή: ( E M WEG Group, -/-)).....	37
Εικόνα 6: Ταξινόμηση κινητήρων (Πηγή: (Jian Zhao & Yangwei Yu, 2011)).....	38
Εικόνα 7: Δομή διαφορετικών τύπων κινητήρα (Πηγή: (Jian Zhao & Yangwei Yu, 2011)) .....	41
Εικόνα 8: Χαρακτηριστικά διαφόρων ημιαγωγών ισχύος (Πηγή: (Στέφανος Ν. Μανιάς, 2017)).....	45
Εικόνα 9: Σύμβολο διόδου και χαρακτηριστική V-I (Πηγή: (Bimal K. Bose, 2002)) .....	45
Εικόνα 10: Μονάδα BLDC κινητήρα με μετατροπέα πηγής τάσης (Πηγή: (Paul C. Krause, Oleg Wasynczuk, & Scott D. Sudhoff, 2002)) .....	46
Εικόνα 11: Σχηματική απεικόνιση κατηγοριών μετατροπέων (Πηγή: ( <i>Εργαστηριακές Σημειώσεις, Ηλεκτρονικά Ισχύος, 2020-2021</i> )) .....	48
Εικόνα 12: Τριφασικό ισοδύναμο κύκλωμα κινητήρα BLDC τροφοδοσίας με αντιστροφέα τάσης. (Πηγή: ResearchGate, 2016) .....	49
Εικόνα 13: Πραγματική και Ιδανική αντι-ηλεκτρεγερτική δύναμη (Πηγή: (Condit, 2007))	54
Εικόνα 14: Ιδανικό σήμα με καθυστέρηση φάσης μετά από φιλτράρισμα (Πηγή: (Condit, 2007)).....	54
Εικόνα 15: Σύστημα ελέγχου PID (Πηγή: (Παντελής Β. Μαλατέστας, 2017)) .....	55
Εικόνα 16: Βασικές κυματομορφές BLDC και PMSM κινητήρων (Πηγή: (Yadu Kiran, 2014)).....	59
Εικόνα 17: Σχηματικό διάγραμμα ενός κινητήρα BLDC δύο πόλων (Πηγή: (Alireza Tashakori Abkenar, May 2014)).....	60
Εικόνα 18: Κάτοψη ενός BLDC κινητήρα (Πηγή: (I. Aris, H. Wakiwaka, & M. Nirei, December 2010)) .....	62
Εικόνα 19: Κατόψεις των Inrunner και Outrunner κινητήρων (Πηγή: (Emrik Joner, 2020)) .....	63
Εικόνα 20: Επαγόμενος Ηλεκτρομαγνήτης και Μαγνήτης (Πηγή: (Emrik Joner, 2020)) ...	65
Εικόνα 21: Βρόγχος υστέρησης μαλακού και σκληρού μαγνητικού υλικού (Πηγή: (William D. Callister & David G. Rethwisch, 2017) .....	66
Εικόνα 22: Κάτοψη ενός κινητήρα Outrunner (Πηγή: (Emrik Joner, 2020)).....	67
Εικόνα 23: Απλοποιημένο διάγραμμα BLDC κινητήρα (Πηγή: (I. Janpan, R. Chaisricharoen, & P. Boonyanant, 2012)) .....	67
Εικόνα 24: Κύκλωμα οδήγησης BLDC κινητήρα (Πηγή: (Παπασταύρου Χρήστου Χρήστου , Πάτρα, Μάρτιος 2018)) .....	68
Εικόνα 25: Παλμοί ελέγχου συναρτήσει των σημάτων Hall και φασικές τάσεις (Πηγή: (Παπασταύρου Χρήστου Χρήστου , Πάτρα, Μάρτιος 2018)).....	69

Εικόνα 26: Brushless DC κινητήρας (Πηγή: (Στάμου Κωνσταντίνος , Αθήνα, Σεπτέμβριος 2016)).....	71
Εικόνα 27:Χαρακτηριστική καμπύλη οικιακών εφαρμογών (Πηγή: (Shirania, Aghajani, Shabani, & Jalil, 2014)) .....	75
Εικόνα 28: BLDC ηλεκτρικός κινητήρας 85kW (Πηγή: (Shirania, Aghajani, Shabani, & Jalil, 2014)) .....	76
Εικόνα 29: Κυματομορφές εξόδου διαφόρων τύπων αισθητήρων (Πηγή: (Yadu Kiran, 2014)).....	79
Εικόνα 30: Αρχή λειτουργίας αισθητήρων Hall (Πηγή: Electronic Specifier (2015)).....	81
Εικόνα 31: Χαρακτηριστικά μεγέθη ενός BLDC (Πηγή: (Gamazo-Real, Vasquez-Sanchez, & Gomez-Gil, 2010)).....	82
Εικόνα 32: Μηδενικά σημεία διέλευσης της την αντί-ηλεκτρεγερτική δύναμη και σημεία μεταγωγής της φάσης ρεύματος (Πηγή: (Gamazo-Real, Vasquez-Sanchez, & Gomez-Gil, 2010)).....	85
Εικόνα 33: Αντί-ηλεκτρεγερτική δύναμη, 3 <sup>ης</sup> τάξης αρμονική συνιστώσα τάση, βασικά στοιχεία ροής δρομέα και ρεύματα φάσης του κινητήρα (Πηγή: J.C Gamazo-Real/E. Vasquez-Sanchez/J. Gomez-Gil, 2010) .....	87
Εικόνα 34: Ολοκληρωμένες περιοχές της αντί-ηλεκτρεγερτικής δύναμης (Πηγή: (Gamazo-Real, Vasquez-Sanchez, & Gomez-Gil, 2010)) .....	89
Εικόνα 35: Περιοχές σταθερής ροπής και σταθερής ισχύος (Πηγή: (Liu Qinghua, 2005)) ..	90
Εικόνα 36: Πιθανές κατευθύνσεις του τρέχοντος διανύσματος στον τραπεζοειδή έλεγχο (Πηγή: (Yadu Kiran, 2014)) .....	91
Εικόνα 37: Κυματομορφές Τραπεζοειδούς ελέγχου (Πηγή: (Yadu Kiran, 2014)).....	92
Εικόνα 38: Σχετική θέση Hall αισθητήρων (Πηγή: (TOSHIBA, 2018)).....	92
Εικόνα 39: Τάση τερματικής φάσης, τάση αντι-ηλεκτρεγερτικής δύναμης και τάση με αισθητήρες Hall σε κάθε φάση (Πηγή: (TOSHIBA, 2018)).....	93
Εικόνα 40: Σημεία μηδενικής διέλευσης για ανίχνευση θέσης του δρομέα (Πηγή: (TOSHIBA, 2018)) .....	94
Εικόνα 41: Κύκλωμα τραπεζοειδούς ελέγχου (Πηγή: (Bimal K. Bose, 2002)) .....	94
Εικόνα 42: Άμεσος άξονας και του άξονας τετραγωνισμού (Πηγή: (Yadu Kiran, 2014)) ..	95
Εικόνα 43: Block διάγραμμα ημιτονοειδούς ελέγχου (Πηγή: (Yadu Kiran, 2014)) .....	95
Εικόνα 44: Έλεγχος ανοιχτού βρόγχου V/f (Πηγή: (Bimal K. Bose, 2002)) .....	97
Εικόνα 45: Σύγχρονος αυτοελεγχόμενος κινητήρας (Πηγή: (Bimal K. Bose, 2002)).....	98
Εικόνα 46: Εφαρμογή DTC ελέγχου σε BLDC (Πηγή: (Bimal K. Bose, 2002)).....	99
Εικόνα 47: Παράδειγμα διανυσματικού ελέγχου (Πηγή: Semantic Scholars, 2014) .....	100
Εικόνα 48: Μετασχηματισμός Clarke και Park (Πηγή: (Jani, 2011)) .....	102
Εικόνα 49: Block διάγραμμα διανυσματικού ελέγχου προσανατολισμένου πεδίου (Πηγή: (Yadu Kiran, 2014)).....	102
Εικόνα 50: Συνδυασμένες σταθερές και περιστρεφόμενα πλαίσια για τριφασικό σύστημα (Πηγή: (Ali Abdul Razzaq Altahir, April 2020)).....	103
Εικόνα 51: Άξονες d-q στον χώρο (Πηγή: Research Gate) .....	104
Εικόνα 52: Σήματα των μετασχηματισμών Clarke και Park, συναρτήσει του χρόνου (Πηγή: (Bimal K. Bose, 2002)).....	105



Εικόνα 53: Διαμόρφωση διανυσμάτων μέσω SVM (Πηγή: (Ali Abdul Razzaq Altahir, April 2020)) .....	106
Εικόνα 54: Χονδρικό διάγραμμα κυκλώματος BLDC κινητήρα με Τραπεζοειδή Έλεγχο	110
Εικόνα 55: Υλοποίηση ελέγχου BLDC κινητήρα με Τραπεζοειδή Έλεγχο σε περιβάλλον Matlab/Simulink .....	111
Εικόνα 56: Έξι βήματα της πλήρους περιστροφής (Πηγή: (Yadu Kiran, 2014)) .....	113
Εικόνα 57: Τα ρεύματα στον στάτη του BLDC κινητήρα (με ονομαστικές στροφές μέχρι τις 3000 rpm σε εν κενώ λειτουργία, για $t = 0s - 0.2s$ ) .....	116
Εικόνα 58: Η αντι-ηλεκτρεγερτική δύναμη του κινητήρα (με ονομαστικές στροφές μέχρι τις 3000 rpm σε εν κενώ λειτουργία, για $t = 0s - 0.2s$ ) .....	117
Εικόνα 59: Η ταχύτητα του δρομέα – στροφές (με ονομαστικές στροφές μέχρι τις 3000 rpm σε εν κενώ λειτουργία, για $t = 0s - 0.2s$ ) .....	118
Εικόνα 60: Ηλεκτρομαγνητική ροπή (με ονομαστικές στροφές μέχρι τις 3000 rpm σε εν κενώ λειτουργία, για $t = 0s - 0.2s$ ) .....	119
Εικόνα 61: Τάση συνεχούς ρεύματος (με ονομαστικές στροφές μέχρι τις 3000 rpm σε εν κενώ λειτουργία, για $t = 0s - 0.2s$ ) .....	120
Εικόνα 62: Οι πολικές τάσεις ab, bc και ac (με ονομαστικές στροφές μέχρι τις 3000 rpm σε εν κενώ λειτουργία, για $t = 0s - 0.2s$ ) .....	121
Εικόνα 63: Ταχύτητα του δρομέα – στροφές, με φορτίο από 25% στο 50% (στο χρονικό διάστημα $t=0.3s$ έως $t=0.4s$ ), ονομαστικές στροφές στο 50% .....	123
Εικόνα 64: Ρεύματα στον στάτη του κινητήρα, με φορτίο από 25% στο 50% (στο χρονικό διάστημα $t=0.3s$ έως $t=0.4s$ ), ονομαστικές στροφές στο 50% .....	124
Εικόνα 65: Ταχύτητα του δρομέα – στροφές, με φορτίο από 25% στο 50% (στο χρονικό διάστημα $t=0.3s$ έως $t=0.4s$ ), ονομαστικές στροφές στο 100% .....	125
Εικόνα 66: Ρεύματα στον στάτη του κινητήρα, με φορτίο από 25% στο 50% (στο χρονικό διάστημα $t=0.3s$ έως $t=0.4s$ ), ονομαστικές στροφές στο 100% .....	126
Εικόνα 67: Ταχύτητα του δρομέα – στροφές, με φορτίο από 50% στο 75% (στο χρονικό διάστημα $t=0.3s$ έως $t=0.4s$ ), ονομαστικές στροφές στο 50% .....	127
Εικόνα 68: Ρεύματα στον στάτη του κινητήρα, με φορτίο από 50% στο 75% (στο χρονικό διάστημα $t=0.3s$ έως $t=0.4s$ ), ονομαστικές στροφές στο 50% .....	128
Εικόνα 69: Ταχύτητα του δρομέα – στροφές, με φορτίο από 50% στο 75% (στο χρονικό διάστημα $t=0.3s$ έως $t=0.4s$ ), ονομαστικές στροφές στο 100% .....	129
Εικόνα 70: Ρεύματα στον στάτη του κινητήρα, με φορτίο από 50% στο 75% (στο χρονικό διάστημα $t=0.3s$ έως $t=0.4s$ ), ονομαστικές στροφές στο 100% .....	130
Εικόνα 71: Ταχύτητα του δρομέα – στροφές, με φορτίο από 75% στο 100% (στο χρονικό διάστημα $t=0.3s$ έως $t=0.4s$ ), ονομαστικές στροφές στο 50% .....	131
Εικόνα 72: Ρεύματα στον στάτη του κινητήρα, με φορτίο από 75% στο 100% (στο χρονικό διάστημα $t=0.3s$ έως $t=0.4s$ ), ονομαστικές στροφές στο 50% .....	132
Εικόνα 73: Ταχύτητα του δρομέα – στροφές, με φορτίο από 75% στο 100% (στο χρονικό διάστημα $t=0.3s$ έως $t=0.4s$ ), ονομαστικές στροφές στο 100% .....	133
Εικόνα 74: Ρεύματα στον στάτη του κινητήρα, με φορτίο από 75% στο 100% (στο χρονικό διάστημα $t=0.3s$ έως $t=0.4s$ ), ονομαστικές στροφές στο 100% .....	134

Εικόνα 75: Ταχύτητα του δρομέα – στροφές, με τις στροφές από 25% στο 50% (στο χρονικό διάστημα $t=0.3s$ έως $t=0.4s$ ) και φορτίο 50% .....	135
Εικόνα 76: Ρεύματα στον στάτη του κινητήρα, με τις στροφές από 25% στο 50% (στο χρονικό διάστημα $t=0.3s$ έως $t=0.4s$ ) και φορτίο 50% .....	136
Εικόνα 77: Ταχύτητα του δρομέα – στροφές, με τις στροφές από 25% στο 50% (στο χρονικό διάστημα $t=0.3s$ έως $t=0.4s$ ) και φορτίο 100% .....	137
Εικόνα 78: Ρεύματα στον στάτη του κινητήρα, με τις στροφές από 25% στο 50% (στο χρονικό διάστημα $t=0.3s$ έως $t=0.4s$ ) και φορτίο 100% .....	138
Εικόνα 79: Ταχύτητα του δρομέα – στροφές, με τις στροφές από 50% στο 75% (στο χρονικό διάστημα $t=0.3s$ έως $t=0.4s$ ) και φορτίο 50% .....	139
Εικόνα 80: Ρεύματα στον στάτη του κινητήρα, με τις στροφές από 50% στο 75% (στο χρονικό διάστημα $t=0.3s$ έως $t=0.4s$ ) και φορτίο 50% .....	140
Εικόνα 81: Ταχύτητα του δρομέα – στροφές, με τις στροφές από 50% στο 75% (στο χρονικό διάστημα $t=0.3s$ έως $t=0.4s$ ) και φορτίο 100% .....	141
Εικόνα 82: Ρεύματα στον στάτη του κινητήρα, με τις στροφές από 50% στο 75% (στο χρονικό διάστημα $t=0.3s$ έως $t=0.4s$ ) και φορτίο 100% .....	142
Εικόνα 83: Ταχύτητα του δρομέα – στροφές, με τις στροφές από 75% στο 100% (στο χρονικό διάστημα $t=0.3s$ έως $t=0.4s$ ) και φορτίο 50% .....	143
Εικόνα 84: Ρεύματα στον στάτη του κινητήρα, με τις στροφές από 75% στο 100% (στο χρονικό διάστημα $t=0.3s$ έως $t=0.4s$ ) και φορτίο 50% .....	144
Εικόνα 85: Ταχύτητα του δρομέα – στροφές, με τις στροφές από 75% στο 100% (στο χρονικό διάστημα $t=0.3s$ έως $t=0.4s$ ) και φορτίο 100% .....	145
Εικόνα 86: Ρεύματα στον στάτη του κινητήρα, με τις στροφές από 75% στο 100% (στο χρονικό διάστημα $t=0.3s$ έως $t=0.4s$ ) και φορτίο 100% .....	146
Εικόνα 87: Χονδρικό διάγραμμα κυκλώματος ελέγχου BLDC κινητήρα εφαρμογή της τεχνικής FOC .....	149
Εικόνα 88: Υλοποίηση ελέγχου BLDC κινητήρα με εφαρμογή τεχνικής FOC σε περιβάλλον Matlab/Simulink .....	150
Εικόνα 89: Οι πολικές τάσεις (ab, bc, ca) στην είσοδο του BLDC κινητήρα (με ονομαστικές στροφές μέχρι τις 3000 rpm σε εν κενώ λειτουργία, για $t = 0s - 0.2s$ ) .....	154
Εικόνα 90: Τα ρεύματα στον στάτη του BLDC κινητήρα (με ονομαστικές στροφές μέχρι τις 3000 rpm σε εν κενώ λειτουργία, για $t = 0s - 0.2s$ ) .....	155
Εικόνα 91: Ταχύτητα του δρομέα – στροφές (με ονομαστικές στροφές μέχρι τις 3000 rpm σε εν κενώ λειτουργία, για $t = 0s - 0.2s$ ) .....	156
Εικόνα 92: Ηλεκτρομαγνητική ροπή (με ονομαστικές στροφές μέχρι τις 3000 rpm σε εν κενώ λειτουργία, για $t = 0s - 0.2s$ ) .....	157
Εικόνα 93: Ταχύτητα του δρομέα – στροφές, με φορτίο από 25% στο 50% (στο χρονικό διάστημα $t=0.3s$ έως $t=0.4s$ ), ονομαστικές στροφές στο 50%.....	159
Εικόνα 94: Ρεύματα στον στάτη του κινητήρα, με φορτίο από 25% στο 50% (στο χρονικό διάστημα $t=0.3s$ έως $t=0.4s$ ), ονομαστικές στροφές στο 50%.....	160
Εικόνα 95: Ταχύτητα του δρομέα – στροφές, με φορτίο από 25% στο 50% (στο χρονικό διάστημα $t=0.3s$ έως $t=0.4s$ ), ονομαστικές στροφές στο 100%.....	161

Εικόνα 96: Ρεύματα στον στάτη του κινητήρα, με φορτίο από 25% στο 50% (στο χρονικό διάστημα $t=0.3s$ έως $t=0.4s$ ), ονομαστικές στροφές στο 100%.....	162
Εικόνα 97: Ταχύτητα του δρομέα – στροφές, με φορτίο από 50% στο 75% (στο χρονικό διάστημα $t=0.3s$ έως $t=0.4s$ ), ονομαστικές στροφές στο 50%.....	163
Εικόνα 98: Ρεύματα στον στάτη του κινητήρα, με φορτίο από 50% στο 75% (στο χρονικό διάστημα $t=0.3s$ έως $t=0.4s$ ), ονομαστικές στροφές στο 50%.....	164
Εικόνα 99: Ταχύτητα του δρομέα – στροφές, με φορτίο από 50% στο 75% (στο χρονικό διάστημα $t=0.3s$ έως $t=0.4s$ ), ονομαστικές στροφές στο 100%.....	165
Εικόνα 100: Ρεύματα στον στάτη του κινητήρα, με φορτίο από 50% στο 75% (στο χρονικό διάστημα $t=0.3s$ έως $t=0.4s$ ), ονομαστικές στροφές στο 100%.....	166
Εικόνα 101: Ταχύτητα του δρομέα – στροφές, με φορτίο από 75% στο 100% (στο χρονικό διάστημα $t=0.3s$ έως $t=0.4s$ ), ονομαστικές στροφές στο 50%.....	167
Εικόνα 102: Ρεύματα στον στάτη του κινητήρα, με φορτίο από 75% στο 100% (στο χρονικό διάστημα $t=0.3s$ έως $t=0.4s$ ), ονομαστικές στροφές στο 50%.....	168
Εικόνα 103: Ταχύτητα του δρομέα – στροφές, με φορτίο από 75% στο 100% (στο χρονικό διάστημα $t=0.3s$ έως $t=0.4s$ ), ονομαστικές στροφές στο 100%.....	169
Εικόνα 104: Ρεύματα στον στάτη του κινητήρα, με φορτίο από 75% στο 100% (στο χρονικό διάστημα $t=0.3s$ έως $t=0.4s$ ), ονομαστικές στροφές στο 100%.....	170
Εικόνα 105: Ταχύτητα του δρομέα – στροφές, με τις στροφές από 25% στο 50% (στο χρονικό διάστημα $t=0.3s$ έως $t=0.4s$ ) και φορτίο 50% .....	171
Εικόνα 106: Ρεύματα στον στάτη του κινητήρα, με τις στροφές από 25% στο 50% (στο χρονικό διάστημα $t=0.3s$ έως $t=0.4s$ ) και φορτίο 50% .....	172
Εικόνα 107: Ταχύτητα του δρομέα – στροφές, με τις στροφές από 25% στο 50% (στο χρονικό διάστημα $t=0.3s$ έως $t=0.4s$ ) και φορτίο 100% .....	173
Εικόνα 108: Ρεύματα στον στάτη του κινητήρα, με τις στροφές από 25% στο 50% (στο χρονικό διάστημα $t=0.3s$ έως $t=0.4s$ ) και φορτίο 100% .....	174
Εικόνα 109: Ταχύτητα του δρομέα – στροφές, με τις στροφές από 50% στο 75% (στο χρονικό διάστημα $t=0.3s$ έως $t=0.4s$ ) και φορτίο 50% .....	175
Εικόνα 110: Ρεύματα στον στάτη του κινητήρα, με τις στροφές από 50% στο 75% (στο χρονικό διάστημα $t=0.3s$ έως $t=0.4s$ ) και φορτίο 50% .....	176
Εικόνα 111: Ταχύτητα του δρομέα – στροφές, με τις στροφές από 50% στο 75% (στο χρονικό διάστημα $t=0.3s$ έως $t=0.4s$ ) και φορτίο 100% .....	177
Εικόνα 112: Ρεύματα στον στάτη του κινητήρα, με τις στροφές από 50% στο 75% (στο χρονικό διάστημα $t=0.3s$ έως $t=0.4s$ ) και φορτίο 100% .....	178
Εικόνα 113: Ταχύτητα του δρομέα – στροφές, με τις στροφές από 75% στο 100% (στο χρονικό διάστημα $t=0.3s$ έως $t=0.4s$ ) και φορτίο 50% .....	179
Εικόνα 114: Ρεύματα στον στάτη του κινητήρα, με τις στροφές από 75% στο 100% (στο χρονικό διάστημα $t=0.3s$ έως $t=0.4s$ ) και φορτίο 50% .....	180
Εικόνα 115: Ταχύτητα του δρομέα – στροφές, με τις στροφές από 75% στο 100% (στο χρονικό διάστημα $t=0.3s$ έως $t=0.4s$ ) και φορτίο 100% .....	181
Εικόνα 116: Ρεύματα στον στάτη του κινητήρα, με τις στροφές από 75% στο 100% (στο χρονικό διάστημα $t=0.3s$ έως $t=0.4s$ ) και φορτίο 100% .....	182



## Αλφαβητικό Ευρετήριο

- AC:** Alternative Current = Εναλλασσόμενο ρεύμα  
**Back – EMF:** Back Electromotive Force = Αντί-ηλεκτρεγερτική δύναμη  
**BLDC:** Brushless DC Motor = Κινητήρας συνεχούς ρεύματος χωρίς ψήκτρες  
**CSI:** Current Source Inverter = Μετατροπέας Πηγής Ρεύματος  
**DC:** Direct Current = Συνεχές ρεύμα  
**DF:** Distortion Factor = Συντελεστής Παραμόρφωσης  
**DFOC:** Direct Field Oriented Control = Έλεγχος άμεσου πεδίου  
**DSP:** Digital Signal Processor = Επεξεργαστής Ψηφιακού Σήματος  
**DTFC:** Direct Torque and Flux Control = Άμεσος έλεγχος ροπής και ροής  
**DTC:** Direct Torque and Flux Control = Άμεσος έλεγχος ροπής και ροής  
**EMF:** Electromotive Force = Ηλεκτροπαραγωγός δύναμη  
**FOC:** Field Oriented Control = Έλεγχος πεδίου  
**HF:** Harmonic Factor = Αρμονικός Παράγοντας  
**IFOC:** Indirect Field Oriented Control = Έλεγχος έμμεσου πεδίου  
**IGBT:** Insulated Gate Bipolar Transistors = Μονωμένα διπολικά τρανζίστορ  
**IPM:** Interior Permanent Magnet = Εσωτερικός μόνιμος μαγνήτης  
**LOH:** Lowest Order Harmonic = Χαμηλότερη Αρμονική Τάξη  
**MOSFETS:** Metal-Oxide Semiconductor Field Effect Transistor = Τρανζίστορ ημιαγωγικού πεδίου μετάλλου - οξειδίου  
**MPU:** Memory Protection Unit = Μονάδα προστασίας μνήμης  
**PM:** Permanent Magnet = Μόνιμοι μαγνήτες  
**PMAC:** Permanent Magnet Alternative Current = Μόνιμοι μαγνήτες εναλλασσόμενου ρεύματος  
**PMSM:** Permanent Magnet Synchronous Motor = Σύγχρονος κινητήρας μόνιμου μαγνήτη  
**PWM:** Pulse Width Modulation = Διαμόρφωση πλάτους παλμού  
**RPM:** Revolutions Per Minute = Στροφές ανά λεπτό  
**RMF:** Rotating Magnetic Field = Περιστρεφόμενο Μαγνητικό Πεδίο  
**RMS:** Root Mean Square = Τετραγωνική Μέση Τιμή  
**SCR:** Silicon Control Rectifier= Θυρίστορ  
**SPWM:** Sinusoidal Pulse Width Modulation = Διαμόρφωση ημιτονοειδούς πλάτους παλμού  
**SMPM:** Surface Mounted Permanent Magnet = Μόνιμος μαγνήτης τοποθετημένος στην επιφάνεια  
**SPM:** Surface Mounted Permanent Magnet = Μόνιμος μαγνήτης τοποθετημένος στην επιφάνεια  
**THD:** Total Harmonic Distortion = Συνολική Αρμονική Παραγωγή  
**VFD:** Variable Frequency Drive = Μονάδα Μεταβλητής Συχνότητας  
**VSI:** Voltage Source Inverter = Μετατροπέας πηγής τάσης  
**ZCP:** Zero Crossing Point = Μηδενικό Σημείο Διέλευσης



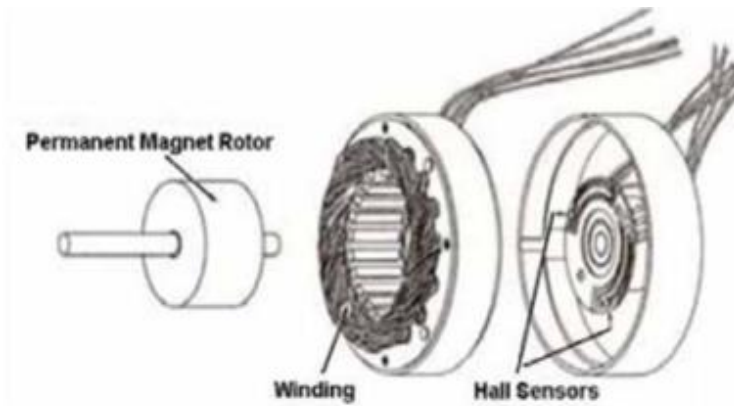
## Εισαγωγή

Τις τελευταίες δεκαετίες, έχει παρατηρηθεί το φαινόμενο ότι αρκετές χώρες δέχονται έντονες πιέσεις λόγω των υψηλών ποσοστών καταναλισκόμενης ενέργειας από διάφορες εφαρμογές κινητήρων, με αποτέλεσμα να καταλήξουν να χρησιμοποιούν κινητήρες μόνιμων μαγνητών (Permanent Magnet) μεταβλητής ταχύτητας για εξοικονόμηση ενέργειας, με μερικά χαρακτηριστικά παραδείγματα αυτών να είναι τα κλιματιστικά ή ψυγεία (συσκευές καθημερινής χρήσης). Επίσης, ο πρόσφατος ταχύς πολλαπλασιασμός των κινητήρων αυτοκινήτων στην αυτοκινητοβιομηχανία, με βάση τις υβριδικές μονάδες κίνησης, δημιούργησε σοβαρή ζήτηση για υψηλής απόδοσης κινητήρες μόνιμων μαγνητών και αυτή ήταν η αρχή ενδιαφέροντος για τους κινητήρες συνεχούς ρεύματος χωρίς ψήκτρες (Brushless DC Motors, BLDC).

Οι κινητήρες συνεχούς ρεύματος χωρίς ψήκτρες, που ονομάζονται επίσης και σύγχρονοι κινητήρες μόνιμων μαγνητών συνεχούς ρεύματος, είναι ένας από τους τύπους κινητήρων που έχουν κερδίσει τη δημοτικότητα, κυρίως, λόγω των καλύτερων χαρακτηριστικών και της απόδοσής τους. Αυτοί οι κινητήρες χρησιμοποιούνται σε μεγάλο αριθμό βιομηχανικών τομέων επειδή η αρχιτεκτονική τους είναι κατάλληλη για χρήση σε πλήθος εφαρμογών. Σημαντική σύγχυση έχει δημιουργηθεί μεταξύ των μηχανικών σχεδιασμού και των καταναλωτών, ότι οι διάφοροι κατασκευαστές έχουν εκχωρήσει διαφορετικά ονόματα στους κινητήρες αυτούς όπως οι εξής: DCBLM (Brushless Linear DC Motor), BLDC (Brushless DC Motor), BLM (Brushless Linear Motor). Όλα αυτά τα αρκτικόλεξα και τα ονόματα έχουν ουσιαστικά την ίδια σημασία, ωστόσο η ονομασία που έχει επικρατήσει περισσότερο στην πλειοψηφία των μηχανικών συστημάτων είναι το BLDC (Brushless DC Motor)

Ο κινητήρας συνεχούς ρεύματος χωρίς ψήκτρες είναι ένας σύγχρονος ηλεκτρικός κινητήρας που από την άποψη της μοντελοποίησης μοιάζει ακριβώς με έναν απλό DC κινητήρα, έχοντας γραμμική σχέση μεταξύ ρεύματος, ροπής, τάσης και στροφών ανά λεπτό (RPM). Πρόκειται για ένα ηλεκτρονικά ελεγχόμενο σύστημα μετατροπής που δεν έχει μηχανική μετακίνηση, η οποία είναι χαρακτηριστική των κινητήρων συνεχούς ρεύματος με ψήκτρες (Brush ή Brushed Motor). Επιπλέον, οι ηλεκτρομαγνήτες δεν κινούνται, οι μόνιμοι μαγνήτες περιστρέφονται και ο οπλισμός παραμένει στατικός. Αυτό, επιλύει το πρόβλημα του τρόπου μεταφοράς ρεύματος σε κινούμενο οπλισμό.

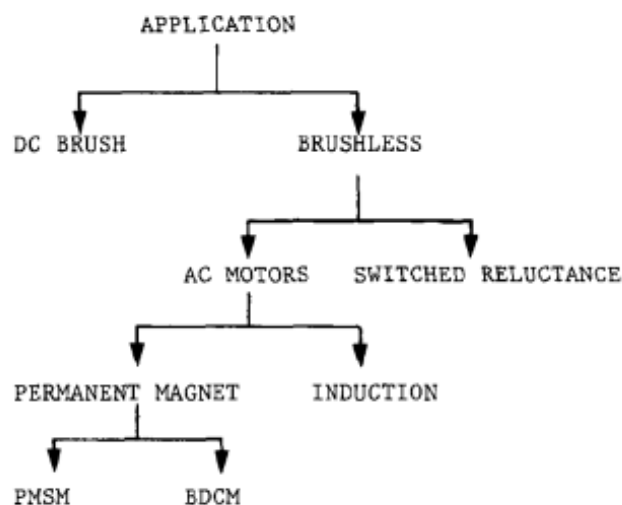
Για να επιτευχθεί, το συγκρότημα του συστήματος με τις ψήκτρες/μετατροπέας ηλεκτρικού ρεύματος, αντικαθίσταται από έναν ευφυή ηλεκτρονικό ελεγκτή, ο οποίος εκτελεί την ίδια κατανομή ισχύος με έναν κινητήρα συνεχούς ρεύματος με ψήκτρες. Οι Brushless DC κινητήρες έχουν αρκετά πλεονεκτήματα σε σύγκριση πάντα τους Brush DC κινητήρες και τους κινητήρες επαγωγής, όπως είναι η καλύτερη ταχύτητα έναντι των χαρακτηριστικών ροπής, υψηλή δυναμική απόκριση, υψηλή απόδοση και αξιοπιστία, μεγάλη διάρκεια λειτουργίας, αθόρυβη λειτουργία και μείωση ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών. Επιπλέον, ο λόγος της παραδοτέας ροπής προς το μέγεθος του κινητήρα είναι υψηλότερος, καθιστώντας το χρήσιμο σε εφαρμογές όπου ο χώρος και το βάρος είναι κρίσιμοι παράγοντες, ειδικά σε αεροδιαστημικές εφαρμογές.



Εικόνα 1: Δομή ενός Brushless DC κινητήρα (Πηγή: *Stephen J. Chapman (2005)*)

Ο έλεγχος των BLDC κινητήρων μπορεί να γίνει με τη χρήση αισθητήρων (Sensored) ή χωρίς αισθητήρες (Sensorless), αλλά για να μειωθεί το συνολικό κόστος των κατασκευής, χρησιμοποιούνται συνήθως τεχνικές ελέγχου χωρίς αισθητήρες.

Όλοι οι ηλεκτρικοί κινητήρες που δεν απαιτούν ηλεκτρική σύνδεση μεταξύ σταθερών και περιστρεφόμενων μερών μπορούν να θεωρηθούν ως μηχανές μόνιμου μαγνήτη χωρίς ψήκτρες (PM), οι οποίες μπορούν να κατηγοριοποιηθούν με βάση την τοποθέτηση των μόνιμων μαγνητών και με βάση το σχήμα της αντί-ηλεκτρεγερτικής δύναμης. Οι μόνιμοι μαγνήτες χωρίς ψήκτρες μπορούν να τοποθετηθούν στον στροφέα (Surface Mounted Permanent Magnet, SMPM) ή να εγκατασταθούν στο εσωτερικό του δρομέα (Interior Permanent Magnet, IPM), και το σχήμα της αντί-ηλεκτρεγερτικής δύναμης (back EMF) μπορεί είτε να είναι ημιτονοειδές είτε τραπεζοειδές. Σύμφωνα με τη μορφή της αντί-ηλεκτρεγερτικής δύναμης, οι σύγχρονοι μηχανές εναλλασσόμενου ρεύματος (Permanent Magnet Alternative Current, PMAC ή PMSM) έχουν ημιτονοειδή αντί-ηλεκτρεγερτική δύναμη και οι BLDC κινητήρες έχουν τραπεζοειδή αντί-ηλεκτρεγερτική δύναμη. Ένας κινητήρας PMSM συνήθως διεγείρεται από ένα τριφασικό ημιτονοειδές ρεύμα και ένας κινητήρας BLDC τροφοδοτείται συνήθως από ένα σύνολο ρευμάτων που έχουν κυματομορφή τετραγώνου.



Εικόνα 2: Διαδικασία επιλογής ηλεκτρικού κινητήρα (Πηγή: *Stephen J. Chapman (2005)*)



## **Αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας**

Το αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας αφορά την παρουσίαση, ανάλυση και προσομοίωση συστημάτων ελέγχου κινητήρων μόνιμων μαγνητών τραπεζοειδούς μαγνητικής ροής ή αλλιώς κινητήρων συνεχούς ρεύματος χωρίς ψήκτρες με εφαρμογή δύο τεχνικών ελέγχου. Έτσι λοιπόν, θα γίνει σύγκριση μεταξύ των δύο τεχνικών ελέγχου που είναι ο κλασσικός τραπεζοειδής έλεγχος με PI ελεγκτές και ο έλεγχος με τεχνική διανυσματικού ελέγχου προσανατολισμένου πεδίου (Field Oriented Control, FOC). Επίσης, ο κινητήρας με τις εκάστοτε τεχνικές ελέγχου θα δοκιμαστεί σε διάφορες συνθήκες. Πιο συγκεκριμένα, αφού παρουσιαστούν οι προσομοιώσεις για την απόκριση εκκίνησης του κινητήρα σε μόνιμη κατάσταση, θα παρουσιαστούν και οι προσομοιώσεις απόκρισης του κινητήρα σε μεταβατικές συνθήκες. Οι μεταβατικές συνθήκες αυτές είναι οι εξής:

Θα δοκιμαστεί στο 50% και 100% των ονομαστικών στροφών και θα μεταβληθεί το φορτίο (η ροπή) του κινητήρα από

- Το 25% στο 50% της ονομαστικής τιμής του
- Το 50% στο 75%
- Το 75% στο 100%

Όπου, θα παρουσιαστούν οι στροφές και τα ρεύματα του στάτη στον κινητήρα.

Επίσης, θα δοκιμαστεί στο 50% και στο 100% του ονομαστικού φορτίου (ροπής) και θα μεταβληθούν οι στροφές του κινητήρα από:

- Το 25% στο 50% της ονομαστικής τιμής τους
- Το 50% στο 75%
- Το 75% στο 100%

Και θα παρουσιαστούν οι στροφές και τα ρεύματα του στάτη στον κινητήρα.

Όλες αυτές οι δοκιμές θα γίνουν μέσω προσομοίωσης στο Simulink, του προγράμματος MATLAB.

## **Σκοπός και στόχοι**

Σκοπός της διπλωματικής εργασίας είναι η παρουσίαση, ανάλυση και προσομοίωση συστημάτων ελέγχου κινητήρων μόνιμων μαγνητών τραπεζοειδούς μαγνητικής ροής ή αλλιώς κινητήρων συνεχούς ρεύματος χωρίς ψήκτρες με εφαρμογή δύο τεχνικών ελέγχου. Παρουσιάζοντας τα κυκλώματα που έχουν σχεδιαστεί στο πρόγραμμα προσομοίωσης Matlab/Simulink, θα γίνει σύγκριση μεταξύ των συγκεκριμένων τεχνικών ελέγχων που έχουν επιλεγεί και είναι ο τραπεζοειδής έλεγχος και ο έλεγχος με τεχνικής προσανατολισμένου πεδίου (Field Oriented Control, FOC). Στόχος είναι, να γίνει και μια συγκριτική μελέτη των μεταβατικών φαινομένων των δύο τεχνικών ελέγχου, ώστε να αποδοθεί η απόκριση του κινητήρα.

## Μεθοδολογία

Προκειμένου να υλοποιηθεί η διάταξη ελέγχου ενός BLDC κινητήρα, προϋπόθεση αποτελεί η επιλογή και η κατάλληλη οδήγηση των απαραίτητων ημιαγωγικών στοιχείων με τη χρήση των οποίων θα ελέγξουμε τις στροφές και το φορτίο του κινητήρα. Η εφαρμογή των παραπάνω θα πραγματοποιηθεί στο περιβάλλον Simulink της Matlab.

Για τον απλό έλεγχο, θα γίνει χρήση αισθητήρων Hall ώστε να προσδιοριστεί η θέση του δρομέα, η ένδειξη των οποίων θα οδηγήσει μέσω ενός πίνακα αληθείας στην κατάλληλη παλμοτροφοδότηση των ημιαγωγικών στοιχείων (Inverter) που θα ελέγξουν τον κινητήρα. Ο έλεγχος της ταχύτητας μέσω κλειστού βρόγχου θα επιτευχθεί με τη χρήση ενός PI ελεγκτή.

Όσον αφορά την οδήγηση με την τεχνική διανυσματικού ελέγχου προσανατολισμένου πεδίου, θα γίνει χρήση οπτικού κωδικοποιητή (Optical Encoder) για τον προσδιορισμό της θέσης και της ταχύτητας του δρομέα, επίσης, θα λαμβάνει μετρήσεις από τις τρεις φάσεις του κινητήρα και στη συνέχεια θα ακολουθούν οι μετασχηματισμοί Clarke και Park, ώστε να πραγματοποιηθεί μετατροπή του τριφασικού συστήματος σε διφασικό και κατόπιν σε συνεχούς ρεύματος (DC). Στη συνέχεια, γίνεται σύγκριση με την επιθυμητή είσοδο και μέσω της κατάλληλης ενίσχυσης του ελεγκτή PI, το σήμα μετατρέπεται πάλι με τη χρήση αντίστροφου Park και Clarke σε τριφασικό, ώστε να οδηγήσει εν τέλει τον κινητήρα.

Τέλος, θα πραγματοποιηθεί σύγκριση των δύο παραπάνω μεθόδων ελέγχου BLDC κινητήρα.

## Καινοτομία

Οι BLDC κινητήρες, αν και υπάρχουν αρκετά χρόνια, μόνο την τελευταία δεκαετία φαίνεται να έχουν αξιοποιηθεί στη βιομηχανία και τα πλεονεκτήματα που έχει αυτό το είδος του κινητήρα είναι πραγματικά αρκετά πολλά ώστε να μην προτιμηθεί τελικά σε διάφορες εφαρμογές. Η καινοτομία της διπλωματικής αυτής εργασίας είναι ουσιαστικά η δυνατότητα να δοκιμασθεί ο κινητήρας αυτός με δυο διαφορετικές τεχνικές ελέγχου, από τις οποίες μέσω σύγκρισης θα μπορέσουμε να δούμε ποια συμφέρει παραπάνω λειτουργικά, οικονομικά αλλά ποια μπορεί να θεωρηθεί πιο αξιόπιστη. Οι προσομοιώσεις θα πραγματοποιηθούν μέσω του ευρέως γνωστού λογισμικού MATLAB/ Simulink και μόνο, καθώς, λόγω της COVID-19 εποχή δεν ήταν εφικτό τα κυκλώματα αυτά να πάρουν «σάρκα και οστά» σε κάποιο εργαστήριο, οπότε τα αποτελέσματα που θα εξαχθούν από την διπλωματική αυτήν είναι μόνο μέσω της προσομοίωσης, κρατώντας πάντοτε εις γνώση μας, ότι σε ρεαλιστικές συνθήκες τα αποτελέσματα ενδεχομένως να ήταν και ελαφρώς διαφορετικά.

## Δομή

Η διπλωματική εργασία αποτελείται από οκτώ κεφάλαια. Τα πρώτα πέντε κεφάλαια έχουν ως στόχο να δώσουν όσο το δυνατόν περισσότερες πληροφορίες σχετικά για το θέμα, ενώ στα επόμενα κεφάλαια γίνεται μια παρουσίαση βασικών κυκλωμάτων καθώς και ένα τελευταίο κεφάλαιο που έχει ως στόχο την σύγκριση των δυο κυκλωμάτων και τα συμπεράσματα. Πιο αναλυτικά η δομή την συγκεκριμένης εργασίας είναι ως εξής:

Στο πρώτο κεφάλαιο θα γίνει μια παρουσίαση των κινητήρων στην βιομηχανία. Από το πως ξεκίνησε η υλοποίηση τους μέχρι το από τι απαρτίζεται ένας σύγχρονος κινητήρας. Θα παρουσιαστούν όλοι οι τύποι σύγχρονων κινητήρων, αλλά θα συγκριθούν και με τους επαγωγικούς κινητήρες, με τους οποίους εμφανίζουν και αρκετές ομοιότητες.

Το δεύτερο κεφάλαιο αναφέρεται σε πιο βασικές γνώσεις που έχουν διδαχθεί στον τομέα της Ηλεκτρολογίας και Ηλεκτρονικής που είναι τα ηλεκτρονικά ισχύος. Όλα αυτά τα ηλεκτρονικά στοιχεία, αλλά και οι μετατροπείς, αντιστροφείς κτλ. είναι απαραίτητοι για κάθε κύκλωμα. Μέσω αυτού του κεφαλαίου, δίνεται η δυνατότητα να καλυφθεί ένα μεγάλο φάσμα και να γίνουν κατανοητές πολλές έννοιες οι οποίες θα χρησιμοποιηθούν στην πορεία της διπλωματικής, ειδικότερα στην υλοποίηση των κυκλωμάτων.

Το τρίτο κεφάλαιο ξεκινάει να ειδικεύεται περισσότερο στο θέμα της διπλωματικής και πιο συγκεκριμένα γίνεται η παρουσίαση του κινητήρα συνεχούς ρεύματος χωρίς ψήκτρες ή πιο απλά BLDC κινητήρες. Στην αρχή γίνεται μια παρουσίαση και σύγκριση με τους προκατόχους τους, PMSM κινητήρες, αποδεικνύοντας την ανωτερότητά τους στη βιομηχανία και έπειτα δίνονται χρήσιμες πληροφορίες για την αρχή λειτουργίας του, τη δομή του, τα πλεονεκτήματα που εμφανίζει αλλά και τα λίγα μειονεκτήματα και τέλος τις εφαρμογές που μπορεί να έχει αυτός ο κινητήρας.

Το τέταρτο κεφάλαιο και το πέμπτο κεφάλαιο εξειδικεύονται ακόμα περισσότερο στο θέμα των BLDC κινητήρων, καθώς στο πρώτο εκ των δύο γίνεται αναφορά και επεξήγηση των μεθόδων προσδιορισμού της θέσης του κινητήρα με αλλά και χωρίς τη χρήση αισθητήρα (Sensored και Sensorless). Αυτό το κεφάλαιο είναι αρκετά σημαντικό, καθώς δείχνει τις διαδικασίες αλλά και τα αποτελέσματα που περιμένουμε να δούμε ύστερα από την επιλογή της καταλληλότερης μεθόδου, αλλά και ποια είναι τα κριτήρια ώστε να επιλεγθεί κάποια εξ αυτών των μεθόδων. Επίσης, το κεφάλαιο αυτό λειτουργεί προπαρασκευαστικά για το πέμπτο κεφάλαιο το οποίο αναφέρεται στις τεχνικές ελέγχου που είναι πιο διαδεδομένες στους BLDC κινητήρες. Οι μέθοδοι προσδιορισμού της θέσης του κινητήρα είναι και το κριτήριο που λαμβάνουμε υπόψιν μας για το ποια τεχνική ελέγχου θα χρησιμοποιήσουμε. Κάθε τεχνική έχει τα δικά της θετικά και αρνητικά για τη λειτουργία ενός κυκλώματος.

Το έκτο κεφάλαιο περνάει από την θεωρία στην πράξη και γίνεται η παρουσίαση του πρώτου κυκλώματος που υλοποιήθηκε στο Matlab και πιο συγκεκριμένα στο Simulink, το οποίο είναι πρόγραμμα προσομοίωσης. Το κύκλωμα βασίζεται στην τεχνική

κλασσικού ελέγχου, όπου η μέθοδος προσδιορισμού του κινητήρα είναι Sensored καθώς υπάρχουν Hall αισθητήρες και μέσα από αυτό το κεφάλαιο γίνεται η παρουσίαση του κυκλώματος, τα αποτελέσματα που παίρνουμε από τις προσομοιώσεις τόσο για την απόκριση εκκίνησης του κινητήρα όσο και για τις μεταβατικές συνθήκες που θα δοκιμαστούν σε διάφορες καταστάσεις.

Στο έβδομο κεφάλαιο γίνεται η παρουσίαση του ελέγχου του BLDC κινητήρα εφαρμόζοντας την τεχνική προσανατολισμένου πεδίου. Η διαδικασία που ακολουθείται είναι ακριβώς ίδια, δηλαδή παρουσίαση του κυκλώματος, παρουσίαση αποτελεσμάτων, προσομοιώσεις στην μεταβατική απόκριση αλλά και συμπεράσματα.

Το τελευταίο κεφάλαιο έχει σκοπό ως να γίνει σύγκριση των 2 κυκλωμάτων μεταξύ τους και να επιλεγεί ένα εκ των δυο ως καλύτερη λύση, μελλοντικές ιδέες και διάφορα συμπεράσματα.

## Κεφάλαιο 1<sup>ο</sup>: Συνοπτική Παρουσίαση Ηλεκτρικών Κινητήρων

### 1.1 Ιστορική αναδρομή κινητήρων

Από την ημέρα που «γεννήθηκε» η τεχνολογία (Donald Cardwell, 2000) ο ρυθμός της καινοτομίας συνέχισε να επιταχύνεται και πολλές νέες εφευρέσεις αλλά και τεχνολογικά ευρήματα ξεκίνησαν να κάνουν τη ζωή απλούστερη. Η ιστορία της τεχνολογίας των ηλεκτροκινητήρων δεν αποτελεί εξαίρεση, μετά από μια τάση για καινοτομία τα τελευταία 200 χρόνια. Οι ηλεκτρικοί κινητήρες αναπτύχθηκαν για πρώτη φορά τη δεκαετία του 1830, 30 χρόνια μετά την πρώτη μπαταρία. Ο πρώτος ο οποίος ασχολήθηκε ήταν ο Άγγλος φυσικός, William Sturgeon, που θεωρείται υπεύθυνος για την εφεύρεση του πρώτου ηλεκτρικού κινητήρα DC το 1832. Ο σχεδιασμός του ήταν ο πρώτος ηλεκτρικός κινητήρας (ECM PCB Stator Technology, 2021), ο οποίος ήταν ικανός να μετακινεί μηχανήματα, όμως είχε ως μεγάλο μειονέκτημα ότι περιοριζόταν σε μεγάλο βαθμό από τη χαμηλή ισχύ εξόδου του. Λίγα χρόνια αργότερα, ο Thomas Davenport μαζί με την σύζυγο του Emily Davenport, παρουσίασαν έναν σχεδιασμό με μερικές προσαρμογές, από τον πρώτο κινητήρα του Sturgeon. Τα προβλήματα όμως παρέμεναν ίδια για αρκετά χρόνια, καθώς η ισχύς και η απόδοση δεν ήταν η απαιτούμενη δυνατή. Την λύση όμως ήρθε να βρει ο Moritz Von Jacobi, του οποίου ο ηλεκτροκινητήρας έθεσε παγκόσμιο ρεκόρ για μηχανική παραγωγή ισχύος το 1834, συμπεριλαμβανομένου του κινητήρα του Davenport. Ο Jacobi δεν έχασε καθόλου χρόνο όταν έκανε τις βελτιώσεις του και σχεδόν ένα χρόνο αργότερα, το 1835, επέδειξε την αυξημένη ισχύ του νέου του σχεδιασμού.

Μετά τις πρώτες επιδείξεις της ικανότητας του ηλεκτροκινητήρα, το ενδιαφέρον για αυτήν την τεχνολογία έγινε όλο και περισσότερο, εμπνέοντας εκατοντάδες νέες εφευρέσεις και ανακαλύψεις. Ωστόσο, η πρώτη γενιά κινητήρων είχαν πολλά προβλήματα όπως το ότι ήταν αρκετά ασύμφοροι, είχαν απώλεια τάσης σε περιελίξεις, ασταθές ρεύμα τροφοδοσίας και σπινθηρισμούς. Από το 1835 – 1886 έγιναν πολλές απόπειρες βελτίωσης και επανασχεδιασμού των θεμελιωδών εξαρτημάτων του ηλεκτροκινητήρα. Το 1886, έγινε πράξη ο πρώτος «πρακτικός» κινητήρας από τον Frank Julian Sprague. Αυτός ο κινητήρας σήμανε και την ανάπτυξη των πρώτων ηλεκτρικών τρόλεϊ το 1887 στη Βιρτζίνια. Μέσα στην ίδια δεκαετία του 1880 και πιο συγκεκριμένα το 1888, έχουμε και την εφεύρεση του πρώτου κινητήρα που τροφοδοτείται από εναλλασσόμενο ρεύμα (AC), ο οποίος κινητήρας λειτουργούσε χωρίς μετατροπέα, καθιστώντας τον αρκετά αποδοτικό. Η αρχή των κινητήρων όμως είχε και ως αποτέλεσμα να δοθεί υλικό για νέες εφευρέσεις. Όπως και έγινε, καθώς ύστερα από πολλά πειράματα ανακαλύφθηκε ότι με την αναστρεψιμότητα του ηλεκτρικού DC κινητήρα μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως γεννήτριες, μετατρέποντας την μηχανική ενέργεια σε ηλεκτρική. Μέχρι και το 1920, τα έθνη σε όλο τον κόσμο είχαν αρχίσει να αναπτύσσουν δίκτυα ηλεκτρικών γραμμών και η ηλεκτρική ενέργεια γινόταν όλο και πιο σημαντική στην καθημερινή ζωή.

Το 1921, μια επαναστατική νέα σχεδιαστική ιδέα εισήχθη στους ηλεκτρικούς κινητήρες αυξάνοντας περαιτέρω την αξιοπιστία και την αποδοτικότητά τους. Ύστερα από έρευνες, βρέθηκε ένα μικρό κενό μεταξύ του δρομέα και του στάτη που διευκόλυνε την ηλεκτρομαγνητική ροής σε DC μηχανές, αυξάνοντας περαιτέρω την αποδοτικότητά τους. Ωστόσο, η φθορά του κινητήρα συνέχιζε να αποτελεί πρόβλημα. Σε αυτού του τύπου τους κινητήρες, οι ψήκτρες έπρεπε να έρχονται σε επαφή με τους μεταγωγείς για να στέλνουν ηλεκτρικά σήματα. Η συνεχής τριβή που υπήρχε προκαλούσε υπερθέρμανση σε υψηλά φορτία. Τα ζητήματα αξιοπιστίας και διαχείρισης της θερμοκρασίας τους εμπόδισαν τη χρήση DC κινητήρων με ψήκτρες σε εφαρμογές υψηλής ισχύος, όπως για παράδειγμα τα ηλεκτρικά οχήματα.

Όλα άλλαξαν με την εφεύρεση του κινητήρα χωρίς ψήκτρες. Αν και ανακαλύφθηκε το 1962, οι κινητήρες μόνιμου μαγνήτη χωρίς ψήκτρες χρησιμοποιήθηκαν ευρέως γύρω στο 1982, όταν τα σπάνια μέταλλα που προερχόντουσαν από την γη έγιναν άμεσα διαθέσιμα. Με τη βοήθεια μόνιμων μαγνητών, οι DC κινητήρες χωρίς ψήκτρες (Brushless Motors) θα μπορούσαν να σχεδιαστούν για να είναι πιο ισχυροί και αποδοτικοί από οποιονδήποτε Brushed Motor, παρέχοντας παράλληλα κίνηση ανώτερης ποιότητας. Η λογική των κινητήρων αυτών, ωστόσο, ξεκίνησε πολλά χρόνια πίσω και από τον νόμο του Faraday το 1831 (ECM PCB Stator Technology, 2021), ο οποίος ανακάλυψε το φαινόμενο της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής. Από τότε, για να φτάσουμε στο επιθυμητό αποτέλεσμα της δημιουργίας των κινητήρων αυτών, χρειάστηκαν και άλλες πολλές εφευρέσεις όπως αυτή του Irving Langmuir, που το 1915 εφήυρε τον ανορθωτή υδραργύρου για τον έλεγχο των ηλεκτροδίων του πλέγματος και κατασκεύασε μετατροπέα DC/AC. Μια άλλη πολύ κομβική εφεύρεση ήταν το κύκλωμα μεταγωγής με θυρίστορ. Προήλθε από τους Harrison και Rye το 1955, οι οποίοι παρόλη την αδυναμία των ηλεκτρονικών ισχύος της τότε εποχής, κατάφεραν να δημιουργήσουν αυτό το πολύ σημαντικό κύκλωμα και να αντικαταστήσουν τον μηχανικό συλλέκτη. Αυτό άλλωστε είναι και το κύριο στοιχείο του κινητήρα DC χωρίς ψήκτρες και λειτουργεί με τον εξής τρόπο: καθώς ο δρομέας περιστρέφεται, περιοδικές ηλεκτρεγερτικές δυνάμεις ή αλλιώς EMF (Electromotive Force), επάγονται στις ειδικές για αυτό το σκοπό περιελίξεις του κινητήρα, οι οποίες οδηγούν σε αγωγή το κατάλληλο θυρίστορ. Υπήρξαν πολλά προβλήματα όμως, όπως ότι με το που σταματάει η περιστροφή, η επαγόμενη ηλεκτρεγερτική δύναμη δεν μπορεί να παραχθεί στις περιελίξεις και να μπορέσει εν τέλη να πολωθεί το σωστό θυρίστορ. Επιπλέον δεν μπορούσε να έχει ροπή εκκίνησης και η κατανάλωση ισχύος ήταν μεγάλη. Η λύση στα προβλήματα αυτά ήρθε με την εισαγωγή ενός μόνιμου μαγνήτη για την εξασφάλιση της εκκίνησης του κινητήρα με αξιοπιστία, όμως χρειαζόταν ένα πρόσθετο παλμό εκκίνησης. Κάπως έτσι και με την έλευση των στοιχείων Hall φτάνουμε στο 1962, όπου εγκαινιάστηκε μια νέα εποχή για τους BLDC κινητήρες. Με το πέρασμα των χρόνων η ανάπτυξη αυτών των κινητήρων δεν σταμάτησε, αντιθέτως προχώρησε σε βαθμό που ύστερα από πολλές έρευνες αναπτύχθηκαν διαχρονικά κινητήρες τραπεζοειδούς κυματομορφής/ τετραγωνικής κυματομορφής και ημιτονοειδούς κυματομορφής ή αλλιώς Permanent Magnet Synchronous Motor (PMSM).

## 1.2 Τύποι ηλεκτρικών κινητήρων

### 1.2.1 Σύγχρονος κινητήρας

Όπως υποδηλώνει το όνομα του, ο σύγχρονος κινητήρας (Electrical Technology, 2021) έχει έναν δρομέα που έχει σχεδιαστεί για να περιστρέφεται με την ίδια ταχύτητα με το μαγνητικό πεδίο του στάτη, που ονομάζεται σύγχρονη ταχύτητα. Ο στάτης παράγει ένα περιστροφικό μαγνητικό πεδίο κατά την παροχή εναλλασσόμενου ρεύματος. Ο δρομέας έχει σχεδιαστεί για να παράγει το δικό του μαγνητικό πεδίο χρησιμοποιώντας εξωτερική τροφοδοσία συνεχούς ρεύματος, μέσω δακτυλίων ολίσθησης ή χρησιμοποιώντας μόνιμο μαγνήτη. Επίσης, έχει σχεδιαστεί για να παράγει μαγνητικούς πόλους που είναι ίσοι ή αναπόσπαστοι πολλαπλοί των πόλων του στάτη. Όταν ο στάτης και ο δρομέας ενεργοποιούνται, το μαγνητικό πεδίο του δρομέα κλειδώνεται με το περιστροφικό μαγνητικό πεδίο του στάτη και περιστρέφεται με την ακριβή ταχύτητα του πεδίου του στάτη.

Λόγω αδράνειας, ο σύγχρονος κινητήρας δεν ξεκινά αμέσως με τη σύγχρονη ταχύτητα (περιστροφικό μαγνητικό πεδίο). Ως εκ τούτου, μια πρόσθετη περιέλιξη, που ονομάζεται "τύλιγμα αποσβεστήρα", χρησιμοποιείται για να παρέχει ροπή εκκίνησης. Λειτουργεί ως επαγωγικός κινητήρας κατά την εκκίνηση. Αυτό υποδηλώνει ότι οι σύγχρονοι κινητήρες δεν είναι αυτόματης εκκίνησης, χρειάζονται, δηλαδή, έναν επιπλέον μηχανισμό εκκίνησης. Μπορεί να είναι είτε ξένης διέγερσης είτε μη διεγερμένος κινητήρας, δηλαδή ο πρώτος απαιτεί ξεχωριστή πηγή συνεχούς ρεύματος που ενεργοποιεί τις περιελίξεις του δρομέα και δημιουργεί μαγνητικό πεδίο ενώ ο δεύτερος περιγράφει έναν σύγχρονο κινητήρα του οποίου ο δρομέας έχει σχεδιαστεί για να μαγνητίζεται από το μαγνητικό πεδίο περιστροφικού στάτη και περιστρέφεται με αυτό. Ο δρομέας του σύγχρονου κινητήρα περιστρέφεται με σύγχρονη ταχύτητα που εξαρτάται από τη συχνότητα τροφοδοσίας και τους πόλους των περιελίξεων του στάτη. Επομένως, η ταχύτητα του κινητήρα δεν μεταβάλλεται με το φορτίο. Για να μεταβληθεί η ταχύτητα ενός σύγχρονου κινητήρα, η συχνότητα τροφοδοσίας πρέπει να μεταβάλλεται και αυτό επιτυγχάνεται με τη χρήση μιας μονάδας μεταβλητής συχνότητας (Variable Frequency Drive, VFD).

### 1.2.2 Ασύγχρονος κινητήρας

Το όνομα του ασύγχρονου κινητήρα υποδηλώνει ότι η ταχύτητα του δρομέα είναι ασύγχρονη με την ταχύτητα περιστροφής του μαγνητικού πεδίου του στάτη (Electrical Technology, 2021). Για την ακρίβεια, ο δρομέας του ασύγχρονου κινητήρα περιστρέφεται με σχετικά μικρότερη ταχύτητα από το περιστρεφόμενο μαγνητικό πεδίο (Rotating Magnetic Field, RMF) του στάτη. Οφείλεται στην παρουσία ολίσθησης μεταξύ του στάτη και της ταχύτητας του δρομέα. Ο στροφέας τύπου κλωβού είναι κατασκευασμένος χρησιμοποιώντας ράβδους χαλκού που συνδέονται με έναν αγώγιμο δακτύλιο που τους βραχυκυκλώνει ηλεκτρικά. Ο δρομέας τύπου

“wound” είναι κατασκευασμένος από πολλαπλές περιελίξεις πάνω από ένα χαλύβδινο πλαστικοποιημένο πυρήνα. Το μαγνητικό πεδίο περιστροφής του στάτη προκαλεί επαγόμενο ρεύμα στον δρομέα. Αυτό το επαγόμενο ρεύμα ρέει μέσα στον στάτη δημιουργώντας το δικό του μαγνητικό πεδίο.

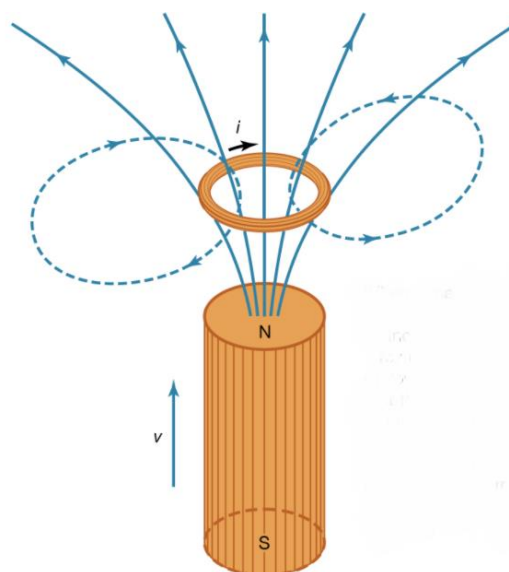
Σύμφωνα με τον νόμο του Lenz, αυτό το πεδίο δρομέα αντιτίθεται στην αιτία που το δημιουργεί και προσπαθεί να το εξαλείψει φτάνοντας στην ταχύτητα του περιστρεφόμενου μαγνητικού πεδίου του στάτη (η σύγχρονη ταχύτητα). Με αυτόν τον τρόπο, ο δρομέας περιστρέφεται προς την κατεύθυνση του περιστρεφόμενου μαγνητικού πεδίου του στάτη. Επομένως, επειδή λειτουργεί με την κύρια επαγωγή, ο ασύγχρονος κινητήρας είναι γνωστός και ως επαγωγικός κινητήρας. Ο επαγωγικός κινητήρας δεν μπορεί ποτέ να λειτουργήσει με τη σύγχρονη ταχύτητα, αλλά είναι πάντα πιο αργός από τη σύγχρονη ταχύτητα και εξαρτάται από την ολίσθηση του κινητήρα. Ο λόγος είναι επειδή το επαγόμενο ρεύμα στο δρομέα δημιουργείται λόγω της διαφοράς μεταξύ του πεδίου στάτη και δρομέα. Εάν, σε περίπτωση που τρέχει με σύγχρονη ταχύτητα, σημαίνει ότι ο δρομέας είναι μαγνητικά «κλειδωμένος» και δεν υπάρχει διαφορά μεταξύ του στάτη και του πεδίου του δρομέα. Επομένως, δεν θα υπήρχε μαγνητική ροή για να προκαλέσει ρεύμα στο δρομέα. Η μαγνητική ροή είναι απαραίτητη για τον επαγωγικό κινητήρα, γι' αυτό πρέπει να λειτουργεί με μικρότερη ταχύτητα από τη σύγχρονη ταχύτητά του. Ο στροφέας τύπου κλωβού έχει απλούστερο σχεδιασμό και επιτρέπει στο επαγόμενο ρεύμα να ρέει μέσα από τις ράβδους χαλκού. Ενώ ο περιστροφικός δρομέας επιτρέπει στον χρήστη να μεταβάλλει το ρεύμα του δρομέα κατά την εκκίνησή του. Το θέμα είναι να ξεκινήσει με ασφάλεια ο κινητήρας μειώνοντας το τεράστιο ρεύμα εκκίνησης που έχει ένας κινητήρας επαγωγής. Γενικά γίνεται με τη σύνδεση μιας μεταβλητής αντίστασης σε σειρά με τις περιελίξεις του δρομέα μέσω των δακτυλίων ολίσθησης. Η ταχύτητα ασύγχρονου κινητήρα εξαρτάται από την ολίσθηση του κινητήρα που ποικίλλει ανάλογα με το φορτίο και την αντίσταση του δρομέα. Με άλλα λόγια, η ταχύτητα επαγωγής του κινητήρα μπορεί να ποικίλει ανάλογα με το φορτίο ή χρησιμοποιώντας μεταβαλλόμενη αντίσταση δρομέα.

### 1.2.3 Νόμος του Lenz

Ο νόμος του Lenz στον ηλεκτρομαγνητισμό (Britannica, 2021), δηλώνει ότι ένα επαγόμενο ηλεκτρικό ρεύμα ρέει προς μια κατεύθυνση τέτοια ώστε το ρεύμα να αντιτίθεται στην αλλαγή που το προκάλεσε. Το ρεύμα με τη σειρά του δημιουργεί ένα μαγνητικό πεδίο γύρω από το πηνίο, καθιστώντας το μαγνήτη. Ο νόμος του Lenz υποδεικνύει την κατεύθυνση του επαγόμενου ρεύματος (η κατεύθυνση του επαγόμενου ρεύματος από το νόμο του Lenz συμβάλλει στο σύμβολο μείον στον νόμο της επαγωγής του Faraday). Επειδή, οι μαγνητικοί πόλοι απωθούνται μεταξύ τους, από τον νόμο του Lenz παρατηρούμε ότι ισχύει το εξής: όταν ο βόρειος πόλος του μαγνήτη της ράβδου πλησιάζει το πηνίο, το επαγόμενο ρεύμα ρέει με τέτοιο τρόπο ώστε να κάνει την πλευρά του πηνίου να πλησιάσει τον πόλο του μαγνήτη της ράβδου. Κατά την απόσυρση του μαγνήτη ράβδου από το πηνίο, το επαγόμενο ρεύμα αντιστρέφεται



και η κοντινή πλευρά του πηνίου γίνεται νότιος πόλος για να παράγει μια ελκτική δύναμη στον μαγνήτη ράβδου που υποχωρεί.



Εικόνα 3: Νόμος του Lenz (Πηγή: (Britannica, 2021))

Η μικρή ποσότητα ενέργειας που αντιπροσωπεύει αυτό το έργο που δημιουργήθηκε από το παραπάνω φαινόμενο, εκδηλώνεται ως ένα μικρό αποτέλεσμα θέρμανσης και είναι το αποτέλεσμα του επαγόμενου ρεύματος που συναντά αντίσταση στο υλικό του πηνίου. Ο νόμος του Lenz υποστηρίζει τη γενική αρχή της διατήρησης της ενέργειας. Εάν το ρεύμα προκληθεί προς την αντίθετη κατεύθυνση, η δράση του θα τραβήξει αυθόρμητα τον μαγνήτη της ράβδου στο πηνίο εκτός από το φαινόμενο θέρμανσης, το οποίο θα παραβίαζε την αρχή διατήρησης της ενέργειας.

#### 1.2.4 Διαφορές ασύγχρονου και σύγχρονου κινητήρα

Η διαφορά μεταξύ ασύγχρονου και σύγχρονου κινητήρα (Electrical Technology, 2021) εξηγείται με τη βοήθεια διαφόρων παραγόντων, όπως ο τύπος διέγερσης που χρησιμοποιείται, η ταχύτητα του κινητήρα, η εκκίνηση και η λειτουργία, η αποτελεσματικότητα και των δύο κινητήρων, το κόστος, η χρήση, οι εφαρμογές και η συχνότητα. Μια μηχανή επαγωγής είναι επίσης γνωστή ως ασύγχρονη μηχανή. Ονομάζεται έτσι επειδή ποτέ δεν τρέχει με σύγχρονη ταχύτητα, δηλαδή με  $N_s = 120 \frac{f}{p}$ , αλλά η ταχύτητα του κινητήρα εξαρτάται από το φορτίο, την αντίσταση του δρομέα και της ολίσθησης  $s$ , που είναι πάντα μικρότερη από την σύγχρονη ταχύτητα. Ισχύει δηλαδή  $N = N_s \cdot (1 - s)$  όπου  $N < N_s$ . Η μηχανή επαγωγής χρησιμοποιείται ευρύτατα. Η ταχύτητα του δρομέα διατηρείται ή συγχρονίζεται με το ρεύμα τροφοδοσίας. Παρακάτω θα γίνει μια ανάλυση των δυο διαφορετικών τύπων κινητήρα.

Πίνακας 1: Διαφορές σύγχρονου κινητήρα με ασύγχρονο κινητήρα

Βάση Διαφορών	Σύγχρονος κινητήρας	Ασύγχρονος κινητήρας
➤ <b>Τύπος διέγερσης</b>	Ένας σύγχρονος κινητήρας είναι μια διπλά διεγερμένη μηχανή.	Ένας επαγωγικός κινητήρας έχει μια μονή διεγερμένη μηχανή.
➤ <b>Σύστημα εφοδιασμού</b>	Η περιέλιξη του σπλισμού του ενεργοποιείται από μια πηγή AC και το πεδίο του τυλίγματος από μια πηγή DC.	Η περιέλιξη του στάτη ενεργοποιείται από μια πηγή AC.
➤ <b>Ταχύτητα</b>	Λειτουργεί πάντα με σύγχρονη ταχύτητα. Η ταχύτητα είναι ανεξάρτητη από το φορτίο.  Λειτουργεί καλύτερα σε χαμηλότερη ταχύτητα συνήθως κάτω από 300 rpm.	Εάν το φορτίο αυξηθεί, η ταχύτητα του επαγωγικού κινητήρα μειώνεται. Είναι πάντα μικρότερη από τη σύγχρονη ταχύτητα.  Είναι ιδανικό για λειτουργία σε ταχύτητες άνω των 600 rpm.
➤ <b>Ξεκίνημα</b>	Δεν ξεκινάει από μόνο του. Πρέπει να φτάσει μέχρι τη σύγχρονη ταχύτητα και να συγχρονιστεί με την πηγή AC.	Η μηχανή επαγωγής έχει την αυτόματη αρχική ροπή.
➤ <b>Λειτουργία</b>	Ένας σύγχρονος κινητήρας μπορεί να λειτουργήσει με υστέρηση και κινητήρια δύναμη αλλάζοντας την διέγερσή του.  Η ταχύτητα του κινητήρα ελέγχεται μόνο μεταβάλλοντας τη συχνότητα τροφοδοσίας μέσω VFD.  Λόγω σταθερής ταχύτητας, η ξαφνική διακύμανση του φορτίου θα προκαλέσει διακυμάνσεις στο εφελκυσμένο ρεύμα/	Ένας επαγωγικός κινητήρας λειτουργεί μόνο με χαμηλό συντελεστή ισχύος. Δεν λειτουργεί αποτελεσματικά με υψηλό συντελεστή ισχύος.  Η ταχύτητα του κινητήρα μπορεί να ελεγχθεί χρησιμοποιώντας μεταβλητή αντίσταση δρομέα καθώς και συσκευές VFD.  Δεν υπάρχει τέτοιο φαινόμενο.
➤ <b>Χρήση</b>	Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη διόρθωση του συντελεστή δύναμης εκτός από την παροχή της ροπής για να οδηγήσει τα μηχανικά φορτία.	Ένας επαγωγικός κινητήρας χρησιμοποιείται μόνο για την οδήγηση μηχανικών φορτίων.
➤ <b>Αποδοτικότητα</b>	Είναι αποδοτικότερο από έναν κινητήρα επαγωγής της ίδιας παραγωγής και τάσης.	Η αποτελεσματικότητά του είναι μικρότερη από αυτή του κινητήρα της ίδιας εξόδου και ονομαστικής τάσης.
➤ <b>Κόστος</b>	Είναι ακριβότερος.	Είναι φθηνότερος.

### 1.3 Δομή ηλεκτρικών κινητήρων

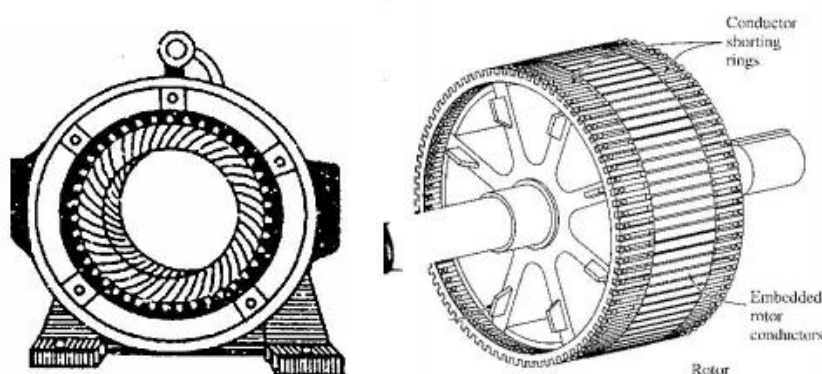
Σε οποιαδήποτε στρεφόμενη ηλεκτρική μηχανή ( Εργαστηριακές Σημειώσεις, Ηλεκτρικές Μηχανές ΙΙ, 2020-2021), υφίστανται ταυτόχρονα δύο μηχανισμοί: ο μηχανισμός παραγωγής ροπής και ο μηχανισμός παραγωγής τάσης, όπου χάρη στη δράση και στην αλληλεπίδραση τους, βασίζεται όλο το φαινόμενο της ηλεκτρομηχανικής μετατροπής της ενέργειας. Ο μηχανισμός παραγωγής της ροπής, βασίζεται στην προσπάθεια ευθυγράμμισης των δύο μαγνητικών πεδίων που δημιουργούνται από τα τυλίγματα του στάτη και του δρομέα. Τα μαγνητικά πεδία δημιουργούνται μέσα από κατάλληλα διαμορφωμένα τυλίγματα, στον στάτη και στον δρομέα της στρεφόμενης ηλεκτρικής μηχανής. Η παραγωγή της τάσης σε ένα τύλιγμα, σχετίζεται άμεσα με τη χρονική μεταβολή της πεπλεγμένης μαγνητικής ροής που δέχεται το τύλιγμα. Ανεξάρτητα από το είδος λειτουργίας της ηλεκτρικής μηχανής (κινητήρας ή γεννήτρια), οι μηχανισμοί παραγωγής τάσης και ροπής, οι οποίοι συνυπάρχουν και χάρη στη συνύπαρξη αυτή καθίσταται δυνατή η ηλεκτρομηχανική μετατροπή της ενέργειας, απαιτούν τη χρήση τουλάχιστον δύο βασικών τυλιγμάτων, από τα οποία, το ένα είναι τοποθετημένο στον στάτη και το άλλο στον δρομέα. Το ένα από τα δύο βασικά τυλίγματα, έχει ως σκοπό την παραγωγή του μαγνητικού πεδίου στο εσωτερικό (διάκενο) της μηχανής και χαρακτηρίζεται ως τύλιγμα διέγερσης.

Έτσι λοιπόν, αυτό που είναι πολύ σημαντικό να απομονώσουμε σαν πληροφορία είναι ότι αποτελούνται από δύο βασικά μέρη: το ένα είναι το σταθερό κομμάτι και ονομάζεται στάτης (stator), ενώ το δεύτερο βρίσκεται πάνω στον άξονα και ονομάζεται δρομέας (rotor) και είναι το μέρος που έχει τη δυνατότητα να στρέφεται. Πολλές φορές, ο στάτης ή ο δρομέας αναφέρονται σε βιβλιογραφίες ως τύμπανο της μηχανής, όπου με αυτόν τον όρο εννοούμε το μέρος εκείνο που αναπτύσσεται η τάση εξ' επαγωγής, εφ' όσον όμως η μηχανή λειτουργεί ως μια γεννήτρια. Στον στάτη είναι τοποθετημένα τυλίγματα των οποίων ο αριθμός ποικίλει ανάλογα με τον αριθμό των φάσεων και τροφοδοτούνται με εναλλασσόμενη τάση είτε από το δίκτυο είτε μέσω αντιστροφέα ενώ, επίσης, είναι υπεύθυνα για τη δημιουργία του κύριου μαγνητικού πεδίου της μηχανής. Ο στάτης κατασκευάζεται από ελάσματα με σκοπό τη μείωση των απωλειών ισχύος λόγω ανάπτυξης δινορρευμάτων (eddy currents).

Εκτός από τον στάτη και ο δρομέας, συνήθως, κατασκευάζεται από δυναμοελάσματα για τη μείωση των απωλειών ενέργειας λόγω δινορρευμάτων (eddy currents) , αλλά σε αντίθεση με τον στάτη και ανάλογα με το είδος του κινητήρα, ο δρομέας δεν έχει πάντα τυλίγματα στην επιφάνειά του. Για παράδειγμα, οι ασύγχρονοι κινητήρες δακτυλιοφόρου δρομέα έχουν ένα ολοκληρωμένο τύλιγμα επί του δρομέα, αντιθέτως οι ασύγχρονοι κινητήρες βραχυκυκλωμένου κλωβού δεν έχουν τύλιγμα επί του δρομέα, αλλά μια σειρά αγώγιμων ράβδων που βραχυκυκλώνονται στα άκρα τους μέσω μεγάλων δακτυλίων βραχυκύκλωσης.

Οι σύγχρονοι κινητήρες έχουν στην επιφάνεια του δρομέα τύλιγμα διέγερσης το οποίο τροφοδοτείται με συνεχές ρεύμα (DC) ενώ οι βηματικοί κινητήρες (stepper motors), οι κινητήρες υστέρησης (hysteresis motors) και οι κινητήρες μαγνητικής αντίδρασης (reluctance motors) δεν έχουν τυλίγματα στον δρομέα τους.

Ένα ακόμα χαρακτηριστικό που συναντάται στους δρομείς των κινητήρων εναλλασσόμενου ρεύματος είναι η πολυμορφία ως προς την κατασκευή τους. Μπορεί να συναντήσει κανείς απόλυτα λείους κυλινδρικούς δρομείς χωρίς οδοντώσεις και προεξοχές σε κινητήρες υστέρησης (hysteresis motors), κυλινδρικούς δρομείς με αυλακώσεις στην επιφάνειά τους σε σύγχρονους και ασύγχρονους κινητήρες, δρομείς έκτυπων πόλων σε σύγχρονους κινητήρες και κινητήρες μαγνητικής αντίδρασης τύπου Switched Reluctance, καθώς και ειδικής κατασκευής δρομείς όπως είναι για παράδειγμα οι δρομείς με «οδηγούς ροής» στην επιφάνειά τους για βελτίωση των χαρακτηριστικών τους σε σύγχρονους κινητήρες μαγνητικής αντίδρασης ή οι δρομείς με μόνιμους μαγνήτες στην επιφάνειά τους σε κινητήρες μόνιμου μαγνήτη ή βηματικούς κινητήρες (stepper motors). Πέρα από τον στάτη και το δρομέα μπορεί να υπάρχουν ψήκτρες, ανορθωτικά κυκλώματα, πυκνωτές για την εκκίνηση και βοηθητικοί πόλοι.



Εικόνα 4: Στάτης και Δρομέας (Πηγή: (Bimal K. Bose, 2002) )

Στους σύγχρονους κινητήρες ( E M WEG Group, -/-) η ταχύτητα περιστροφής του δρομέα είναι ίση με την ταχύτητα περιστροφής του μαγνητικού πεδίου του στάτη. Αντίθετα στους ασύγχρονους κινητήρες, η ταχύτητα του δρομέα είναι πάντα μικρότερη από την σύγχρονη ταχύτητα και εξαρτάται από το μέγεθος του φορτίου που είναι συνδεδεμένο στον άξονα της μηχανής. Παρακάτω θα αναλυθούν συνοπτικά τα κυριότερα δομικά στοιχεία που συναντάμε σε έναν κινητήρα.

### 1.3.1 Πλαίσιο (Frame)

Υποστηρίζει και προστατεύει τον κινητήρα. Είναι χτισμένο σε οριζόντιους και κατακόρυφους τύπους και σε διαφορετικές προστατευτικές κατασκευές για εσωτερική ή εξωτερική υπηρεσία

### 1.3.2 Στάτης (Stator)

Αποτελείται από τα σταθερά μαγνητικά μέρη, συμπεριλαμβανομένου του πυρήνα και της περιέλιξης που λειτουργούν εκτός από εναλλασσόμενο ρεύμα για να παρέχει περιστρεφόμενο μαγνητικό πεδίο

### 1.3.3 Δρομέας (Rotor)

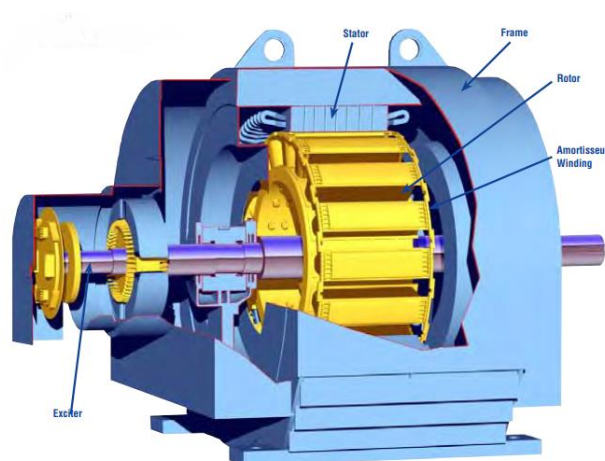
Αποτελείται από τα περιστρεφόμενα ενεργά μέρη, δηλαδή την περιέλιξη του πόλου και το τυλίγμα απόσβεσης. Οι πόλοι του πεδίου μαγνητίζονται από συνεχές ρεύμα είτε από διέγερση είτε απευθείας μέσω δακτυλίων, δηλαδή αλληλοσυνδέεται μαγνητικά μέσω του κενού αέρα και περιστρέφονται σε συγχρονισμό με τους περιστρεφόμενους μαγνητικούς πόλους του στάτη.

### 1.3.4 Διεγέρτης (Exciter)

Ο διεγέρτης παρέχει τη δύναμη στους ηλεκτρομαγνήτες που σχηματίζουν τους πόλους του δρομέα που με τη σειρά τους ακολουθούν το περιστρεφόμενο μαγνητικό πεδίο από το σύστημα. Ο συντελεστής ισχύος ενός συστήματος είναι ένα μέτρο της ισορροπίας μεταξύ της ισχύος των ηλεκτρομαγνητών στο δρομέα και των απαιτήσεων των περιστρεφόμενων πεδίων στα φορτία.

### 1.3.5 Τυλίγματα απόσβεσης (Amortisseur Windings)

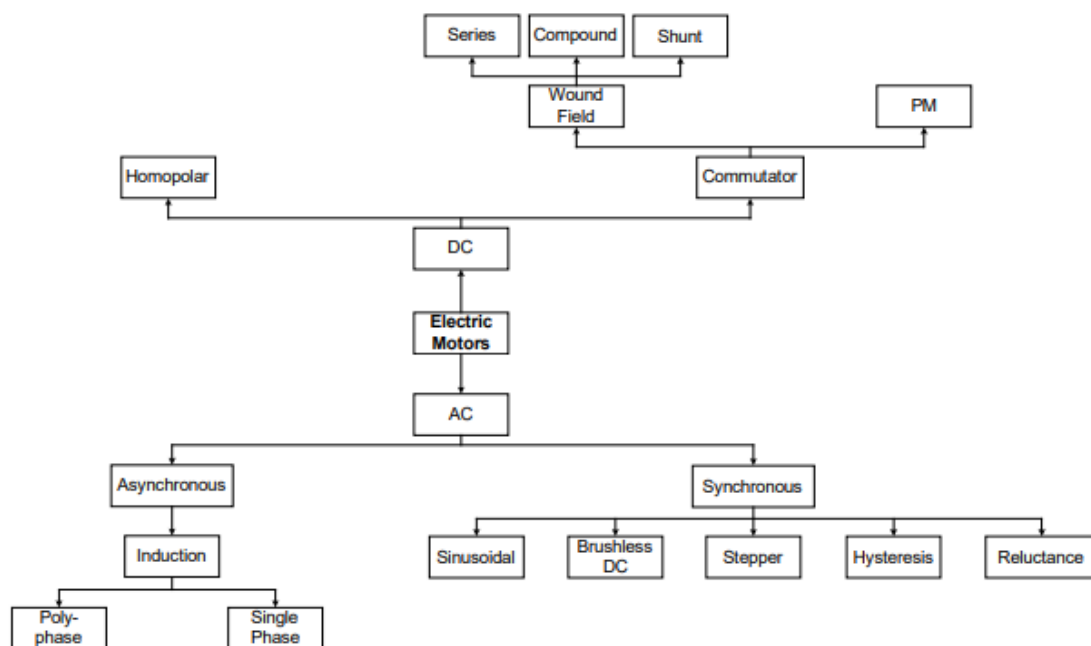
Σε σύγχρονο κινητήρα δημιουργεί αυτόματη εκκίνηση σαν να είναι κινητήρας επαγωγής. Σε συνάρτηση σχετικά με τον τύπο φορτίων και τη ροπή που απαιτείται, ένα σύνολο υλικών με ραβδώσεις μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παροχή επαρκούς ροπής εκκίνησης.



Εικόνα 5: Σύγχρονος ηλεκτρικός κινητήρας (Πηγή: ( E M WEG Group, -/-))

## 1.4 Τύποι ηλεκτρικών κινητήρων

Σε αυτήν την ενότητα θα αναλυθούν τα μοντέλα ηλεκτρικών κινητήρων. Αρχικά, το πιο σημαντικό στοιχείο των ηλεκτρικών κινητήρων είναι ότι μετατρέπουν την ηλεκτρική ενέργεια σε μηχανική, κάτι που έχει παίξει κομβικό ρόλο στην ζωή των ανθρώπων, όπου συχνά χρησιμοποιούνται σε συστήματα δημόσιας συγκοινωνίας, οχήματα, γεννήτριες, πλοία και αμέτρητα πολλά άλλα παραδείγματα. Οι ηλεκτρικοί κινητήρες μπορούν να τροφοδοτηθούν με εναλλασσόμενο ρεύμα (AC) ή με συνεχές ρεύμα (DC) (Jian Zhao & Yangwei Yu, 2011). Πρώτα αναπτύχθηκαν οι DC κινητήρες, όπου υπάρχουν διαφορετικοί τύποι κινητήρα, όμως παρόλο που κάθε τύπος λειτουργεί διαφορετικά, όλοι χρησιμοποιούν τη δύναμη του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου. Στη συνέχεια, αναπτύχθηκαν και AC κινητήρες, οι οποίοι χρησιμοποιούν δυο περιελίξεις, όπου η πρωτεύων περιέλιξη συνδέεται με την ισχύ δικτύου AC ή απευθείας σε μια γεννήτρια και ενεργοποιείται. Η δευτερεύων λαμβάνει ενέργεια από την πρωτεύων χωρίς να το «αγγίζει» άμεσα. Αυτό γίνεται χρησιμοποιώντας τα περίπλοκα φαινόμενα που είναι γνωστά ως επαγωγή. Και οι κινητήρες που τροφοδοτούνται με DC και αυτοί με AC, έχουν κοινή δομή. Κάθε κινητήρας έχει έναν στάτη (stator), ο οποίος μπορεί να είναι μόνιμος μαγνήτης ή πολλά μικρά καλώδια ενωμένα μεταξύ τους. Ο δρομέας (rotor) κάθετα στη μέση (τις περισσότερες φορές) και υπόκειται το μαγνητικό πεδίο που δημιουργείται από τον στάτη. Ο δρομέας περιστρέφεται καθώς οι πόλοι έλκονται από απωθούνται από τους πόλους στον στάτη. Αυτά, καλύπτονται από ένα λείο περίβλημα που ονομάζεται οπλισμός (armature) και προστατεύει τα πηνία από ζημιές. Η κύρια διαφορά μεταξύ των κινητήρων εναλλασσόμενου ρεύματος (AC) και συνεχούς ρεύματος (DC) είναι ο τύπος ισχύος που εφαρμόζεται στο οπλισμό. Σύμφωνα με αυτό, ένας BLDC κινητήρας είναι στην πραγματικότητα ένας AC κινητήρας. Κάθε κινητήρας ευνοεί συγκεκριμένες εφαρμογές.



Εικόνα 6: Ταξινόμηση κινητήρων (Πηγή: (Jian Zhao & Yangwei Yu, 2011))

#### **1.4.1 Κινητήρες DC με ψήκτρες (Brushed DC Motors)**

Ένας DC κινητήρας με ψήκτρες (Brushed DC) (Jian Zhao & Yangwei Yu, 2011) αποτελείται εκτός από ψήκτρες και από έναν μετατροπέα που μετατρέπει ένα συνεχές ρεύμα στο οπλισμένο πηνίο σε εναλλασσόμενο. Καθώς το ρεύμα ρέει μέσω του μετατροπέα στις περιελίξεις του οπλισμού, το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο απωθεί τους κοντινούς μαγνήτες με την ίδια πολικότητα και αναγκάζει κάποιους άλλους μαγνήτες που έλκουν της αντίθετης πολικότητας, να ενεργήσουν. Καθώς ο οπλισμός γυρίζει, ο μετατροπέας του ηλεκτρικού ρεύματος αντιστρέφει το ρεύμα στο πηνίο οπλισμού για να απωθεί τους κοντινούς μαγνήτες, προκαλώντας έτσι στον κινητήρα τη συνεχή περιστροφή του. Το γεγονός ότι αυτός ο κινητήρας μπορεί να οδηγείται από τάσεις DC τον κάνει πολύ ελκυστικό για εφαρμογές χαμηλού κόστους. Ωστόσο, το τόξο που παράγεται από τα πηνία οπλισμού στην επιφάνεια των ψηκτρών-μετατροπέα δημιουργεί θερμότητα, φθορά και θόρυβο, δημιουργώντας έτσι σημαντικά μειονεκτήματα.

#### **1.4.2 Κινητήρες DC χωρίς ψήκτρες (Brushless DC Motors)**

Ένας κινητήρας συνεχούς ρεύματος χωρίς ψήκτρες (Brushless DC) πραγματοποιεί μετατροπή με ηλεκτρονικό τρόπο, χρησιμοποιώντας μια μέθοδο ανατροφοδότησης της θέσης του δρομέα για τον προσδιορισμό για το πότε να αλλάξει το ρεύμα. Συνήθως περιλαμβάνει έναν συνδεδεμένο αισθητήρα Hall ή έναν περιστροφικό κωδικοποιητή. Οι περιελίξεις του στάτη λειτουργούν σε συνδυασμό με μόνιμους μαγνήτες στον δρομέα για να δημιουργήσουν σχεδόν ομοιόμορφη πυκνότητα ροής στο διάκενο αέρα. Αυτό επιτρέπει στα πηνία του στάτη να οδηγούνται από μια σταθερή DC τάση, η οποία απλά αλλάζει από το ένα πηνίο του στάτη στο άλλο, ώστε να δημιουργήσει μια κυματομορφή AC τάσης με τραπεζοειδές σχήμα.

#### **1.4.3 Κινητήρες AC επαγωγής**

Ο AC κινητήρας επαγωγής ή γνωστός και ως AC Induction Motor (ACIM) (Jian Zhao & Yangwei Yu, 2011) είναι ένας κινητήρας όπου ένα ημιτονοειδές ρεύμα διατρέχει τον στάτη για να δημιουργήσει ένα περιστρεφόμενο μεταβλητό μαγνητικό πεδίο που προκαλεί ρεύμα στον δρομέα (συνήθως κατασκευασμένο από μη σιδηρούχα υλικά). Αυτό το επαγόμενο ρεύμα κυκλοφορεί στις ράβδους του δρομέα για τη δημιουργία μαγνητικού πεδίου. Αυτά τα δύο μαγνητικά πεδία λειτουργούν σε διαφορετικές συχνότητες για τη δημιουργία ροπής.

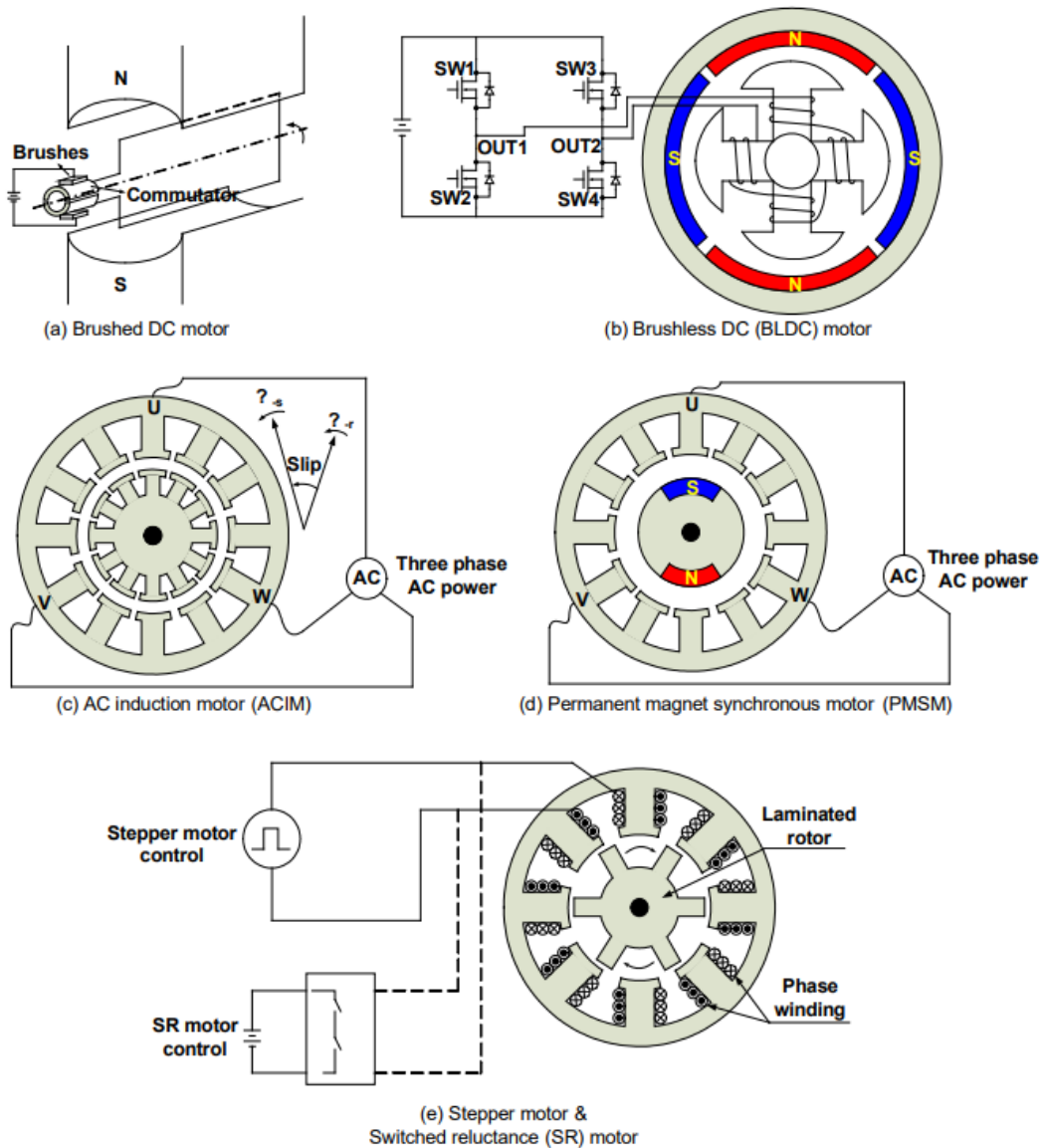
#### 1.4.4 Σύγχρονοι Κινητήρες Μόνιμων Μαγνητών (PMSM)

Οι σύγχρονοι κινητήρες μόνιμων μαγνητών ή αλλιώς Permanent Magnet Synchronous Motor (PMSM) έχουν κάποιες ομοιότητες με τον BLDC κινητήρα (Jian Zhao & Yangwei Yu, 2011). Η ημιτονοειδής κατανομή των πολυφασικών περιελίξεων του στάτη δημιουργεί μια πυκνότητα ημιτονοειδούς ροής στο διάκενο αέρα που διαφέρει από την πυκνότητα τραπεζοειδούς ροής του BLDC κινητήρα. Ωστόσο, σε νεότερες σχεδιάσεις μπορούν να επιτύχουν αυτήν την ημιτονοειδή πυκνότητα ροής με συμπακνωμένες περιελίξεις στον στάτη και μια τροποποιημένη δομή του δρομέα. Η θέση του μαγνήτη δρομέα μπορεί να αλλάξει σημαντικά τις ηλεκτρικές ιδιότητες του PMSM. Η τοποθέτηση των μαγνητών δρομέα στην επιφάνεια οδηγεί σε χαμηλότερη ροπή, ενώ «θάβονται» οι μαγνήτες μέσα στο σώμα του δρομέα και αυξάνεται η ελαστικότητα, η οποία αυξάνει τη ροπή του κινητήρα.

#### 1.4.5 Βηματικοί κινητήρες και κινητήρες Μεταβλητής Μαγνητικής Αντίστασης

Τέλος, οι βηματικοί κινητήρες (Stepper Motors) και οι κινητήρες μεταβλητής μαγνητικής αντίστασης (Switched Reluctance, SR) έχουν παρόμοιες φυσικές δομές. Ο στάτης αποτελείται από αρκετά πηνία περιέλιξης ενώ ο δρομέας είναι κατασκευασμένος από μαλακό σίδηρο ελασμάτων χωρίς πηνία (Jian Zhao & Yangwei Yu, 2011). Όταν το ρεύμα αλλάζει από ένα σετ πηνίων στον στάτη, προκαλείται η μαγνητική έλξη μεταξύ του δρομέα και του στάτη και έτσι υπάρχει αρκετή ροπή για περιστροφή του δρομέα στην επόμενη κίνηση του. Η ταχύτητα περιστροφής καθορίζεται από τη συχνότητα του τρέχοντος παλμού και η απόσταση περιστροφής καθορίζεται από τον αριθμό των παλμών. Δεδομένου ότι κάθε βήμα οδηγεί σε μια μικρή μετατόπιση, ένας βηματικός κινητήρας περιορίζεται συνήθως σε χαμηλή ταχύτητα με εφαρμογές ελέγχου θέσης. Δεν υπάρχει ροπή αντίδρασης σε κινητήρα μεταβλητής μαγνητικής αντίστασης επειδή ο δρομέας δεν μπορεί να δημιουργήσει δικό μαγνητικό πεδίο. Αντίθετα, και οι δύο πόλοι του δρομέα και του στάτη, έχουν προεξοχές έτσι ώστε το μήκος ροής να είναι συνάρτηση της γωνιακής θέσης, η οποία προκαλεί ροπή. Αυτός είναι ο μόνος μηχανισμός παραγωγή ροπής σε έναν κινητήρα μεταβλητής μαγνητικής αντίστασης, ο οποίος τείνει να προκαλεί κυματισμό υψηλής ροπής. Οι βηματικοί κινητήρες έχουν σχεδιαστεί για να αντικαθιστούν ακριβότερους σερβοκινητήρες





Εικόνα 7: Δομή διαφορετικών τύπων κινητήρα (Πηγή: (Jian Zhao & Yangwei Yu, 2011))

## 1.5 Κριτήρια επιλογής ηλεκτρικού κινητήρα

Η πρώτη επιλογή που καλούμαστε να κάνουμε είναι ανάμεσα στους κινητήρες συνεχούς ρεύματος με ψήκτρες και με αυτούς που δεν διαθέτουν ψήκτρες. Οι δεύτεροι χαρακτηρίζονται από μεγαλύτερο εύρος ροπής και ταχύτητας, ενώ το κόστος συντήρησης είναι σημαντικά μικρότερο, σε σχέση με τους πρώτους, των οποίων τα μηχανικά μέρη και οι ψήκτρες περιορίζουν τις δυνατότητές τους σε ταχύτητα και αγωγή ρεύματος. Μετέπειτα, η επιλογή μας αφορά στους AC κινητήρες ή στους βηματικούς κινητήρες και κινητήρες μεταβλητής μαγνητικής αντίστασης. Οι δεύτεροι παρουσιάζουν αρκετά μεγάλο κυματισμό στη ροπή, σε αντίθεση με τους AC.

Αν χρειαζόμαστε μια πιο ομαλή κυματομορφή ροπής, πρέπει να επιλέξουμε ανάμεσα στους επαγωγικούς κινητήρες και στους κινητήρες μόνιμου μαγνήτη. Τα πλεονεκτήματα των κινητήρων μόνιμου μαγνήτη σε σχέση με τους επαγωγικούς κινητήρες είναι ο λόγος ροπής προς την αδράνεια. Οι κινητήρες μόνιμου μαγνήτη έχουν μικρότερη αδράνεια σε σχέση με τους επαγωγικούς κινητήρες, λόγω της αντικατάστασης των τυλιγμάτων του δρομέα με μαγνήτες. Έτσι, επιτυγχάνεται ταχύτερη απόκριση στον κινητήρα για συγκεκριμένη τιμή ηλεκτρικής ροπής. Επόμενο είναι η απόδοση. Οι κινητήρες μόνιμου μαγνήτη έχουν καλύτερη απόδοση σε σχέση με τους επαγωγικούς κινητήρες, κυρίως επειδή οι πρώτοι έχουν μηδαμινές απώλειες στο δρομέα, σε αντίθεση με τους δεύτερους.

Η διέγερση παίζει επίσης πολύ σημαντικό ρόλο καθώς οι επαγωγικοί κινητήρες χρειάζονται ρεύμα μαγνήτισης, σε αντίθεση με τους κινητήρες μόνιμου μαγνήτη. Το γεγονός ότι οι κινητήρες μόνιμου μαγνήτη δεν χρειάζονται ρεύμα μαγνήτισης και έχουν καλύτερη απόδοση, έχει σαν αποτέλεσμα την επιλογή κατάλληλων ημιαγωγικών στοιχείων. Τέλος είναι η παραγωγή ισχύς, όπου οι κινητήρες μόνιμου μαγνήτη έχουν μικρότερο μέγεθος σε σχέση με τους επαγωγικούς, για τα ίδια χαρακτηριστικά εξόδου. Έτσι η χρήση των πρώτων είναι απαραίτητη όπου ο χώρος εγκατάστασης είναι αρκετά περιορισμένος. Επιπλέον, το βάρος των πρώτων είναι μικρότερο, για την ίδια ισχύ εξόδου.

Ωστόσο, υπάρχουν και τα μειονεκτήματα των κινητήρων μόνιμου μαγνήτη σε σχέση με τους επαγωγικούς κινητήρες είναι. Αρχικά, είναι η αδυναμία δημιουργίας ηλεκτρομαγνητικού πεδίου. Άλλο μειονέκτημα είναι η επονομαζόμενη «οδοντωτή» ή αλλιώς γνωστή στα αγγλικά ως «cogging» ροπή, όπου αυτό συμβαίνει καθώς οι επαγωγικοί κινητήρες παρουσιάζουν μικρότερες τιμές «οδοντωτής» ροπής. Το κόστος των κινητήρων μόνιμου μαγνήτη είναι μεγαλύτερο σε σχέση με αυτό των επαγωγικών. Επίσης, η θερμοκρασία λειτουργίας του δρομέα των κινητήρων μόνιμου μαγνήτη είναι αρκετά χαμηλότερη σε σχέση με τους επαγωγικούς, λόγω των μαγνητών. Τέλος, ο έλεγχος των κινητήρων μόνιμου μαγνήτη είναι δυσκολότερος, τόσο υπολογιστικά, όσο και σε απαιτήσεις ταχύτητας και ακρίβειας μετρητικών.

Πίνακας 2: Πλεονεκτήματα - Μειονεκτήματα κινητήρων μόνιμου μαγνήτη

<b>Πλεονεκτήματα</b>	<b>Μειονεκτήματα</b>
✓ Λόγος ροπής προς αδράνεια	☒ Αδυναμία ηλεκτρομαγνητικού πεδίου
✓ Αποδοτικότητα	☒ Οδοντωτή ροπή
✓ Διέγερση	☒ Κόστος
✓ Οδήγηση	☒ Θερμοκρασία
✓ Πυκνότητα ισχύος	☒ Έλεγχος

## Κεφάλαιο 2<sup>ο</sup>: Μετατροπείς Ισχύος

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο θα γίνει ανάλυση των ηλεκτρονικών ισχύος που χρειάζονται για την δομή και λειτουργία των σύγχρονων κινητήρων μόνιμων μαγνητών. Μερικές έννοιες όπως είναι ο τριφασικός αντιστροφέας τάσης, υπάγεται στην ευρύτερη κατηγορία των μετατροπέων, όπου και θα χρησιμοποιηθούν στην ανάλυση των επομένων κεφαλαίων.

### 2.1 Ημιαγωγικά στοιχεία ισχύος

Οι ημιαγωγοί ισχύος αποτελούν τον πυρήνα των σύγχρονων ηλεκτρονικών ισχύος και ελέγχου των κινητήρων. Η παροχή ηλεκτρικής ισχύος διακοπτικού τύπου παρέχει υψηλή απόδοση και παράγει αρμονικές τόσο στην τροφοδοσία όσο και στην πλευρά του φορτίου λόγω της μη γραμμικότητας των διακοπτικών στοιχείων που διαθέτει. Οι τρεις τύποι ημιαγωγικών ισχύος που χρησιμοποιούνται κυρίως σε συστήματα οδήγησης κινητήρων είναι: τα διπολικά τρανζίστορ επαφής (BJT), τα MOSFETs και τα μονωμένης πύλης διπολικά τρανζίστορ επαφής (IGBT).

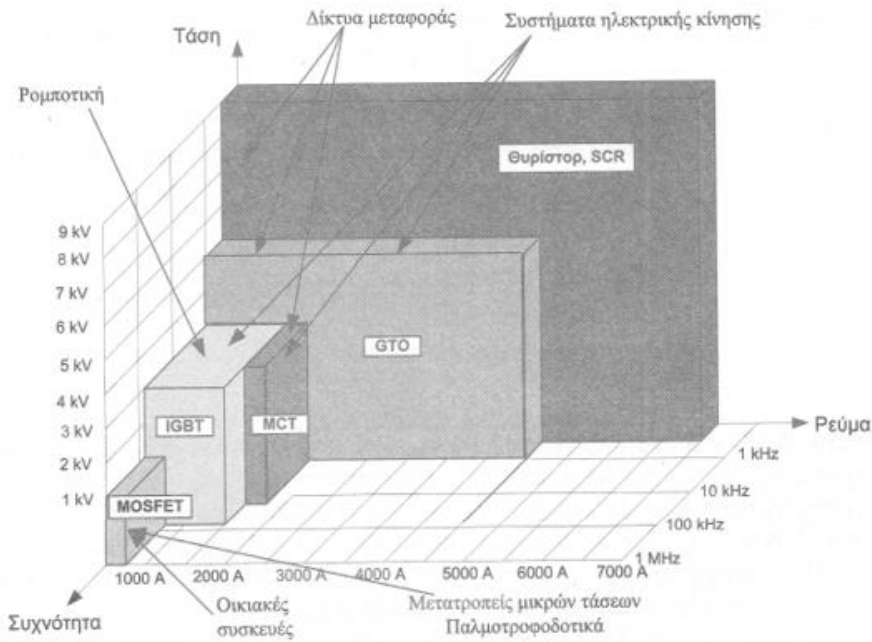
Αρχικά τα BJT είναι τα φτηνότερα από τα τρία. Το όνομα διπολικό (Στέφανος Ν. Μανιάς, 2017) οφείλεται στο ότι το ρεύμα του δημιουργείται από δύο είδη φορέων φορτίου με διαφορετικές πολικότητες δηλαδή ηλεκτρόνια και οπές. Το τρανζίστορ έχει τρεις ακροδέκτες που ονομάζονται εκπομπός ή (Emitter - E), βάση ή (Base - B) και συλλέκτης ή (Collector - C). Το τρανζίστορ BJT είναι ελεγχόμενος διακόπτης που για να λειτουργήσει απαιτεί την αποθήκευση φορτίου μέσα στο εξάρτημα (Device). Αυτό το αποθηκευμένο φορτίο μπορεί να προκαλέσει πρόβλημα και να επιβραδύνει την ταχύτητα μεταγωγής κατά την σβέση και έχει σαν αποτέλεσμα τα BJT να μην είναι ευρέως χρησιμοποιούμενα σε εφαρμογές διακοπτικής λειτουργίας.

Τα MOSFET ισχύος είναι ελεγχόμενοι διακόπτες διαγωγιμότητας φορέων πλειονότητας. Όπως και το BJT τρανζίστορ (Στέφανος Ν. Μανιάς, 2017), είναι ημιαγωγός τριών ακροδεκτών, στο οποίο η πύλη (Gate - G) ελέγχει τη ροή του ρεύματος μεταξύ των ακροδεκτών εξόδου που είναι η πηγή (Source- S) και η υποδοχή (Drain - D). Γενικότερα τα MOSFET έχουν δυο πολύ σημαντικά πλεονεκτήματα όπως είναι η γρήγορη εναλλαγή και το χαμηλό μέσο ρεύμα οδήγησης. Το πλεονέκτημα όπως η υψηλή αντίσταση εισόδου και η μεγαλύτερη ταχύτητα μεταγωγής των MOSFET ισχύος, οδήγησε σε αντικατάσταση των BJTs σε όλο και περισσότερες εφαρμογές. Ωστόσο, η ταχεία μείωση της δυνατότητας χειρισμού ρεύματος των MOSFET ισχύος όταν αυτά υποστηρίζουν υψηλές τάσεις, περιορίζει την εφαρμογή τους σε περιπτώσεις υψηλών τάσεων. Αυτά τα χαρακτηριστικά τα καθιστούν μια καλή επιλογή σε εφαρμογές υψηλής ταχύτητας και χαμηλής έως μεσαίας τάσης. Τα MOSFETs είναι εξαιρετικά δημοφιλή όπως διακοπτικές εφαρμογές χαμηλής τάσης, χαμηλής ισχύος και υψηλής συχνότητας. Τέλος, τα MOSFETs χρησιμοποιούνται σε μονάδες οδήγησης κινητήρων με ονομαστική τάση μικρότερη από τα 200V.

Προκειμένου να ξεπεραστεί η περιορισμένη δυνατότητα των MOSFETs ισχύος για χειρισμό ρευμάτων σε υψηλές τάσεις, δημιουργήθηκε ο ημιαγωγικός διακόπτης IGBT (Στέφανος Ν. Μανιάς, 2017), ο οποίος προέκυψε σαν συμβιβασμός μεταξύ των χαρακτηριστικών του MOSFET ισχύος και του τρανζίστορ ισχύος. Έτσι μπορεί να λειτουργήσει σε υψηλότερες διακοπτικές συχνότητες από το τρανζίστορ, ενώ ταυτόχρονα μπορεί να επεξεργαστεί υψηλότερες τάσεις και ρεύματα από ένα MOSFET. Έτσι λοιπόν, έχει απόδοση παρόμοια με ένα BJT και οδηγείται όπως ένα MOSFET ισχύος το οποίο επιτρέπει τον αποτελεσματικό έλεγχο πολύ υψηλών ρευμάτων και τάσης σε συνδυασμό με υψηλή αντίσταση εισόδου. Ωστόσο τα IGBT έχουν περιορισμό στην διακοπτική συχνότητα, η οποία είναι της τάξης των περίπου 40kHz.

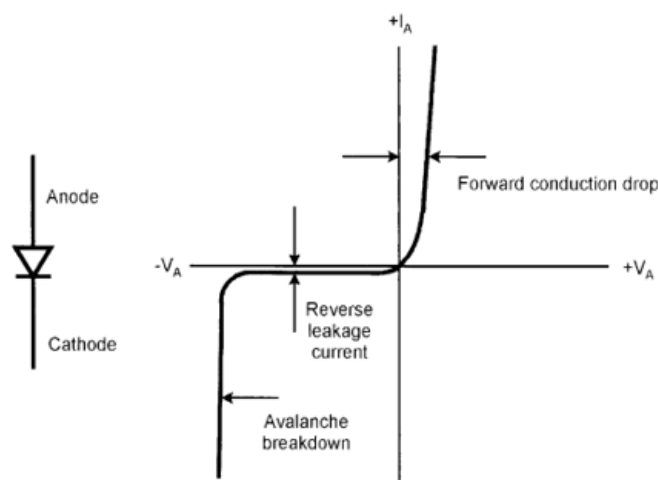
Αξίζει να αναφερθεί ότι διακοπτικά στοιχεία είναι και τα θυρίστορ. Τα θυρίστορ έχουν τρεις ακροδέκτες: την άνοδο, την κάθοδο και την πύλη. Η ελεγχόμενη έναυση όπως επιτυγχάνεται όταν πληρούνται δύο προϋποθέσεις: η διαφορά δυναμικού μεταξύ ανόδου και καθόδου να είναι θετική και ταυτόχρονα να υπάρχει ροή ρεύματος από την πύλη όπως την κάθοδο. Μόλις τεθεί σε αγωγή το στοιχείο, παρουσιάζεται μικρή αντίσταση αγωγής ευνοώντας τη χρήση του σε εφαρμογές με μεγάλα ρεύματα. Ωστόσο, άπαξ και επιτευχθεί η έναυση, η πύλη παύει να ασκεί τον παραμικρό έλεγχο στη σβέση του στοιχείου. Προκειμένου να σβήσει, πρέπει το ρεύμα διαμέσου αυτού να είναι μικρότερο από μια κρίσιμη τιμή που ονομάζεται ρεύμα συγκράτησης και ταυτόχρονα η διαφορά δυναμικού μεταξύ όπως ανόδου και όπως καθόδου να είναι αρνητική. Καθίσταται, έτσι, απαραίτητη η ύπαρξη εξωτερικού κυκλώματος σβέσης. Το μεγαλύτερο μειονέκτημα του εν λόγω στοιχείου είναι οι μεγάλοι χρόνοι έναυσης και σβέσης που παρουσιάζει κάνοντας το ακατάλληλο για εφαρμογές διακοπτικής συχνότητας που ξεπερνά τις μερικές δεκάδες Hz.

Επιπροσθέτως, υπάρχουν και τα GTO θυρίστορ που παρουσιάζουν αρκετές δομικές και λειτουργικές ομοιότητες με τα συμβατικά θυρίστορ. Κύρια διαφορά όπως είναι ότι το GTO θυρίστορ μπορεί να ελεγχθεί πλήρως από την πύλη του, τόσο όσον αφορά την έναυση, αλλά και όσον αφορά τη σβέση του, η οποία μπορεί να επιτευχθεί εφαρμόζοντας αρνητικό παλμό τάσης μεταξύ της πύλης και της καθόδου. Η έναυση επιτυγχάνεται όπως και στο θυρίστορ, με τη διαφορά ότι για να εξασφαλιστεί η έναυσή του, ο παλμός ρεύματος εφαρμόζεται για μεγαλύτερη χρονική διάρκεια.



Εικόνα 8: Χαρακτηριστικά διαφόρων ημιαγωγών ισχύος (Πηγή: (Στέφανος Ν. Μανιάς, 2017))

Τέλος, οι δίοδοι ισχύος παρέχουν ένα μεγάλο ποσοστό διόρθωσης ισχύος και χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές όπως ηλεκτρολυτική επικάλυψη, ανodίωση, φόρτιση μπαταρίας, συγκόλληση, τροφοδοτικά (DC και AC) και μονάδες μεταβλητής συχνότητας (Bimal K. Bose, 2002). Χρησιμοποιούνται επίσης στην ανατροφοδότηση και την ελεύθερη περιστροφή και στη λειτουργία μετατροπέων. Μια τυπική δίοδος ισχύος έχει δομή P-I-N, δηλαδή, είναι μια διασταύρωση P-N με ένα νέο ενδογενές στρώμα ημιαγωγού (στρώμα I) στη μέση για τη διατήρηση της αντίστροφης τάσης. Το σύμβολο της δίοδου δείχνει και τα χαρακτηριστικά V-I. Στην κατάσταση που κατευθύνεται προς τα εμπρός, η δίοδος μπορεί να αντιπροσωπευτεί από μια πτώση της μετατόπισης διασταύρωσης και μια σειρά-ισοδύναμης αντίστασης που δίνει θετική κλίση στη χαρακτηριστική V-I.

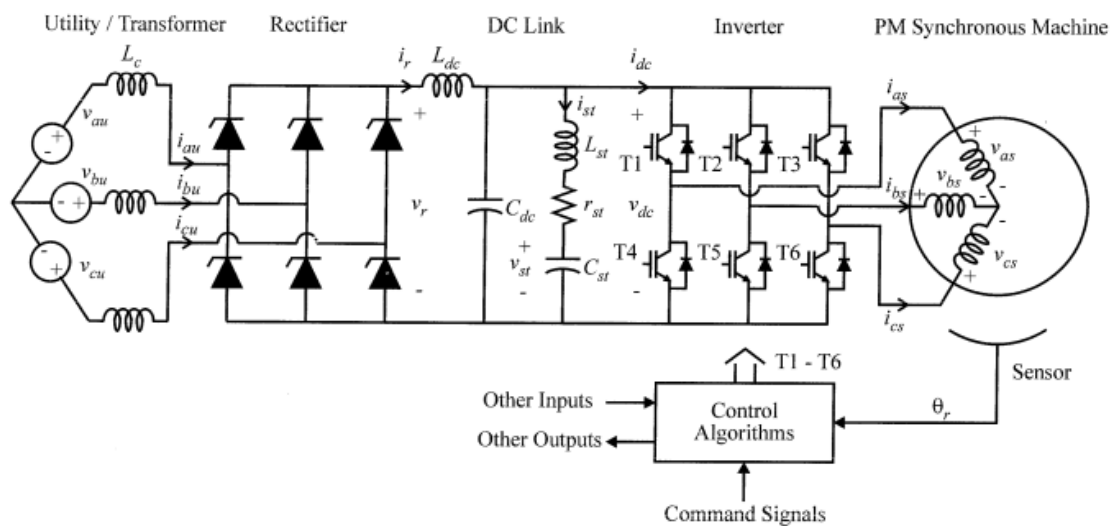


Εικόνα 9: Σύμβολο δίοδου και χαρακτηριστική V-I (Πηγή: (Bimal K. Bose, 2002))

## 2.2 Κατηγορίες μετατροπέων ισχύος

Ο μετατροπέας (converter) στον τομέα των ηλεκτρονικών ισχύος είναι μια ηλεκτρική συσκευή που μετατρέπει μία μορφή ενέργειας (όπως για παράδειγμα ηλεκτρική ισχύ) σε μια άλλη από ένα ηλεκτρικό σήμα ή από μια πηγή ενέργειας.

Οι εν λόγω μετατροπείς αποτελούνται από ελεγχόμενους ημιαγωγίμους διακόπτες, οι οποίοι ελέγχονται από συμβατικά ηλεκτρονικά χαμηλής ισχύος. Με βάση τη μορφή της ισχύος που δέχονται στην είσοδο τους και με αυτή στην οποία τη μετατρέπουν, διακρίνονται σε τέσσερις κατηγορίες που είναι: ανορθωτές (rectifier), αντιστροφείς (inverter), ψαλιδιστές (chopper) και μετατροπείς εναλλασσόμενης τάσης (cycloconverter) και μπορούν κάποιοι εξ' αυτών να χρησιμοποιηθούν μαζί στο ίδιο κύκλωμα όπως φαίνεται και στην Εικόνα 10.



Εικόνα 10: Μονάδα BLDC κινητήρα με μετατροπέα πηγής τάσης (Πηγή: (Paul C. Krause, Oleg Wasynczuk, & Scott D. Sudhoff, 2002))

Παρακάτω θα γίνει ανάλυση των τεσσάρων διαφορετικών κατηγοριών μετατροπέων που αναφέρθηκαν. Συνοπτικά οι μετατροπείς που θα αναλυθούν είναι:

- Μετατροπείς συνεχούς τάσης σε συνεχή (DC – DC) ή ψαλιδιστές
- Μετατροπείς εναλλασσόμενης τάσης σε συνεχή (AC – DC) ή ανορθωτές
- Μετατροπείς εναλλασσόμενης τάσης σε εναλλασσόμενη (AC – AC) ή κυκλομετατροπέας
- Μετατροπείς συνεχούς τάσης σε εναλλασσόμενη (DC – AC) ή αντιστροφείς

### 2.2.1 Μετατροπείς συνεχούς τάσης σε συνεχή (DC - DC)

Οι μετατροπείς συνεχούς τάσης σε συνεχή (DC – DC) ή ψαλιδιστές συνεχούς τάσης (DC Choppers) (Στέφανος Ν. Μανιάς, 2017), είναι τα κυκλώματα εκείνα που μετατρέπουν μια πηγή συνεχούς τάσης σε πηγή συνεχούς τάσης άλλης τιμής και σε ορισμένες φορές άλλης πολικότητας. Παράδειγμα τέτοιων μετατροπέων χωρίς μετασχηματιστή είναι ο μετατροπέας υποβιβασμού (buck), μετατροπέας ανύψωσης (boost), μετατροπέας ανύψωσης – υποβιβασμού (buck-boost), ενώ μετατροπείς που χρησιμοποιούν μετασχηματιστή είναι αυτοί με ώθηση προς τα εμπρός (forward) και ώθηση προς τα πίσω (flyback).

Με βάση αυτά που αναφέρθηκαν, ένας μετατροπέας συνεχούς μπορεί να λειτουργήσει με τρεις διαφορετικούς τρόπους ανάλογα με την τοπολογία των ηλεκτρονικών διακοπών που τον απαρτίζουν. Έχουμε λοιπόν:

- Μετατροπέας υποβιβασμού συνεχούς τάσης (Step down Converter ή Buck Converter)
- Μετατροπέας ανύψωσης συνεχούς τάσης (Step up Converter ή Boost Converter)
- Μετατροπέας ανύψωσης - υποβιβασμού τάσης (Buck-Boost Converter) ανάλογα με το βαθμό χρησιμοποίησης D.

Στην ουσία είναι μια ηλεκτρονική διάταξη, η οποία μετασχηματίζει το συνεχές ρεύμα σε συνεχές αλλά διαφορετικού πλάτους. Μπορεί δηλαδή, να λειτουργήσει με παρόμοιο τρόπο με τον μετασχηματιστή εναλλασσόμενου ρεύματος, με τη διαφορά όμως ότι:

- Μετασχηματίζει μια συνεχή τάση σε συνεχή και όχι εναλλασσόμενη σε εναλλασσόμενη όπως ο μετασχηματιστής
- Η λειτουργία του δεν βασίζεται στο φαινόμενο της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής αλλά στους νόμους που διέπουν τη λειτουργία των ημιαγωγών.

### 2.2.2 Μετατροπείς εναλλασσόμενης τάσης σε συνεχή (AC - DC)

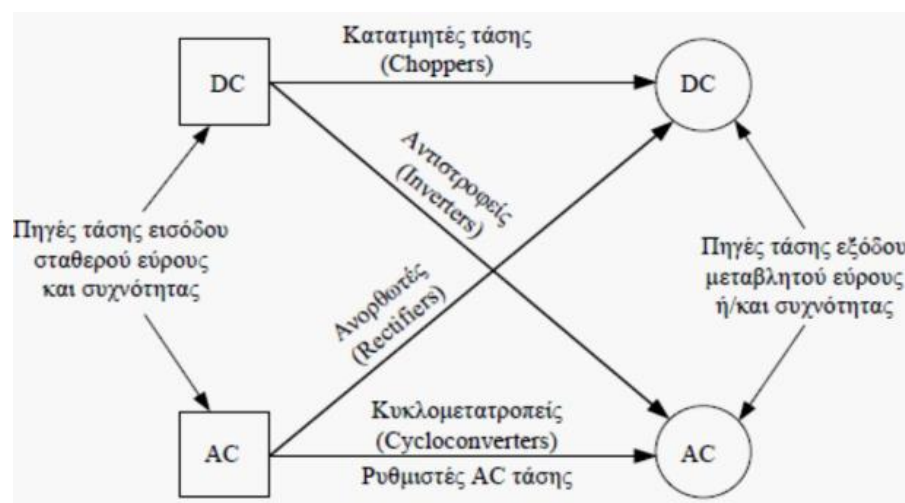
Είναι γνωστοί ως ανορθωτές (rectifier) και μετατρέπουν την εναλλασσόμενη τάση (μονοφασική ή τριφασική) στην είσοδο τους σε συνεχή τάση (AC – DC) ρυθμιζόμενου πλάτους. Στην μη ελεγχόμενη ανόρθωση χρησιμοποιούνται δίοδοι ισχύος και είναι δύο ειδών: Μονοφασικοί εάν η πηγή παρέχει μονοφασικό ρεύμα ή τριφασικοί εάν το ρεύμα που παρέχει η πηγή είναι τριφασικό. Στην κάθε μία από τις περιπτώσεις αυτές μπορεί να έχουμε ημιανόρθωση ή πλήρη ανόρθωση. Επιπροσθέτως, μπορεί να έχουμε φορτίο (δηλαδή καταναλωτή) το οποίο να είναι απλά ωμικό ή να περιέχει και αυτεπαγωγή (δηλαδή πηνίο), οπότε σε αυτές τις περιπτώσεις ισχύουν διαφορετικοί τύποι για την τάση και το ρεύμα που λαμβάνουμε στην έξοδο του συστήματος ισχύος.

### 2.2.3 Μετατροπές εναλλασσόμενης τάσης σε εναλλασσόμενη (AC - AC)

Είναι μετατροπές οι οποίοι ουσιαστικά μετατρέπουν την εναλλασσόμενη τάση στην είσοδο τους σε εναλλασσόμενη τάση διαφορετικού πλάτους ή/και συχνότητας, ενδεχομένως και διαφορετικού αριθμού φάσεων (cycloconverter). Συνήθως για την υλοποίηση τους περιλαμβάνουν έναν ανορθωτή και έναν αντιστροφέα τάσης ή ρεύματος. Ο ρυθμιστής τάσης είναι ένας μετατροπέας ο οποίος ελέγχει την τάση, το ρεύμα και την μέση ισχύ, η οποία αποδίδεται σε ένα εναλλασσόμενο φορτίο από μια πηγή εναλλασσόμενου ρεύματος. Οι ηλεκτρονικοί διακόπτες συνδέουν και αποσυνδέουν την πηγή και το φορτίο σε κανονικά διαστήματα, απομακρύνοντας κατά αυτόν τον τρόπο ένα κομμάτι από την κυματομορφή της πηγής προτού να φτάσει στο φορτίο.

Οι ρυθμιστές εναλλασσόμενου χρησιμοποιούν θυρίστρος, συνδεδεμένα αντιπαράλληλα ώστε να διέρχεται το ρεύμα και στις δύο ημιπεριόδους και έτσι παίρνουμε ένα τμήμα μιας εναλλασσόμενης ημιτονοειδούς κυματομορφής, με ενεργές τιμές τάσης και ρεύματος οι οποίες εξαρτώνται από τη γωνία έναυσης και σβέσης του ρυθμιστή. Σχετικά με τη λειτουργία του ρυθμιστή ισχύουν τα εξής:

- Τα θυρίστρος (thyristors) δεν μπορούν να άγουν ταυτόχρονα.
- Η μέση τιμή του ρεύματος στην πηγή και το φορτίο είναι μηδέν όταν τα SCR άγουν για ίσα χρονικά διαστήματα. Η μέση τιμή του ρεύματος σε κάθε SCR είναι διάφορη του μηδενός.
- Η τάση του φορτίου είναι ίδια με την τάση της πηγής όταν άγει οποιοδήποτε από τα SCR (Ένας ανορθωτής ελεγχόμενος από πυρίτιο ή ανορθωτής ελεγχόμενος από ημιαγωγούς, τεσσάρων στρωμάτων p-n-p-n).
- Η τάση του διακόπτη είναι μηδέν όταν άγει οποιοδήποτε από τα θυρίστρος και είναι ίση με την τάση της πηγής όταν κανένα δεν άγει.
- Η ενεργός τιμή του ρεύματος σε κάθε SCR είναι ίση με την ενεργό τιμή του ρεύματος του φορτίου διαιρεμένη με  $\sqrt{2}$  όταν τα SCR άγουν για ίσα χρονικά διαστήματα.



Εικόνα 11: Σχηματική απεικόνιση κατηγοριών μετατροπέων (Πηγή: (Εργαστηριακές Σημειώσεις, Ηλεκτρονικά Ισχύος, 2020-2021))

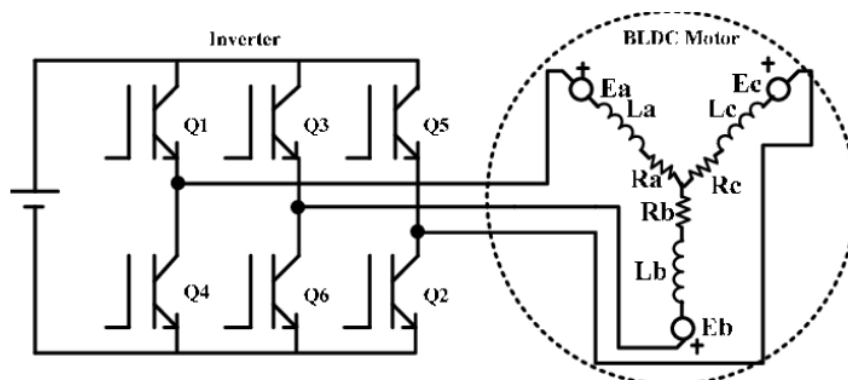


## 2.2.4 Μετατροπείς συνεχούς τάσης σε εναλλασσόμενη (DC – AC)

Οι μετατροπείς συνεχούς τάσης σε εναλλασσόμενη είναι ευρέως γνωστοί και ως αντιστροφείς (inverters) και μετατρέπουν τη συνεχή τάση στην είσοδο τους σε εναλλασσόμενη (DC – AC), ενεργούς τιμές και ρυθμιζόμενης συχνότητας. Σε αυτήν την ηλεκτρονική διάταξη μπορούμε να ρυθμίσουμε το πλάτος και την συχνότητα της τάσης εξόδου. Υπάρχουν αντιστροφείς τετραγωνικού παλμού οι οποίοι δίνουν στην έξοδό τους μια τετραγωνική κυματομορφή, και αντιστροφείς ημιτονοειδούς διαμόρφωσης εύρους παλμού (SPWM) οι οποίοι μπορούν να δώσουν μια κυματομορφή που να πλησιάζει αρκετά την ημιτονοειδή.

Οι αντιστροφείς (inverters) (Στέφανος Ν. Μανιάς, 2017) είναι ένα είδος μετατροπέων όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, οι οποίοι έχουν την ιδιότητα να μετατρέπουν μια πηγή συνεχούς τάσης ή ρεύματος σε εναλλασσόμενη μεταβλητής συχνότητας και μεταβλητής τετραγωνικής μέσης τιμής (Root Mean Square, RMS). Στην περίπτωση που υπάρχει τριφασικός αντιστροφέας, αλλάζει η DC τάση εισόδου σε μια συμμετρική τάση εξόδου AC επιθυμητού πλάτους και συχνότητας. Η τάση εξόδου μπορεί να είναι σταθερή ή μεταβλητή με σταθερή ή μεταβλητή συχνότητα. Μεταβάλλοντας την DC τάση εισόδου και κρατώντας το κέρδος του αντιστροφέα σταθερό, επιτυγχάνεται η μεταβλητή τάση εξόδου. Επιπροσθέτως, εάν η τάση εισόδου DC είναι σταθερή, τότε η μεταβλητή τάση εξόδου μπορεί να επιτευχθεί με μεταβολή της συχνότητας του αντιστροφέα, η οποία γίνεται με την εφαρμογή διαμόρφωσης του πλάτους παλμού (Pulse Width Modulation, PWM) ελέγχου εντός του αντιστροφέα.

Η τάση εξόδου ενός αντιστροφέα έχει μια περιοδική κυματομορφή η οποία δεν είναι καθαρά ημιτονοειδής, αλλά με έναν αριθμό από τεχνικές μπορεί να σχεδιαστεί ώστε να προσεγγίσει την επιθυμητή κυματομορφή. Αντιστροφείς μπορούν να κατασκευαστούν με οποιαδήποτε αριθμό φάσεων. Στην πράξη, οι μονοφασικοί και οι τριφασικοί αντιστροφείς είναι οι πιο κοινά χρησιμοποιημένοι όμως στις περισσότερες περιπτώσεις, οι τριφασικοί αντιστροφείς προσφέρουν καλύτερη απόδοση σε σύγκριση με τους μονοφασικούς.



Εικόνα 12: Τριφασικό ισοδύναμο κύκλωμα κινητήρα BLDC τροφοδοσίας με αντιστροφέα τάσης. (Πηγή: *ResearchGate*, 2016)

Οι αντιστροφείς μπορούν να διαιρεθούν κυρίως σε δύο κατηγορίες:

- Στους αντιστροφείς οι οποίοι τροφοδοτούνται από πηγή συνεχούς τάσης (Voltage Source Inverter, VSI). Σε αυτήν την περίπτωση η κυματομορφή τάσης είναι η ανεξαρτήτως ελεγχόμενη AC έξοδος.
- Στους αντιστροφείς οι οποίοι τροφοδοτούνται από πηγή συνεχούς ρεύματος (Current Source Inverter, CSI). Σε αυτήν την περίπτωση η κυματομορφή ρεύματος είναι η ανεξαρτήτως ελεγχόμενη AC έξοδος.

Επίσης οι δύο παραπάνω κατηγορίες μπορούν να υποδιαιρεθούν:

- Στους μονοφασικούς αντιστροφείς σε συνδεσμολογία ημιγέφυρας, οι οποίοι χρησιμοποιούν δύο ελεγχόμενα διακοπτικά στοιχεία.
- Στους μονοφασικούς αντιστροφείς σε συνδεσμολογία γέφυρας, οι οποίοι χρησιμοποιούν τέσσερα ελεγχόμενα διακοπτικά στοιχεία.
- Στους τριφασικούς αντιστροφείς σε συνδεσμολογία γέφυρας, οι οποίοι χρησιμοποιούν έξι ελεγχόμενα διακοπτικά στοιχεία.

Μεταξύ των δυο αντιστροφέων πάνω, η δομή με την πηγή συνεχούς ρεύματος χρησιμοποιείται ευρύτερα στις βιομηχανικές εφαρμογές λόγω της απαίτησης για πηγή τάσης.

Οι μονοφασικοί αντιστροφείς καλύπτουν το φάσμα των εφαρμογών χαμηλής ισχύος, ενώ οι τριφασικοί αντιστροφείς χρησιμοποιούνται συνήθως για εφαρμογές υψηλής ισχύος. Ένας τριφασικός αντιστροφέας αποτελείται από τρεις κλάδους συνδεδεμένους παράλληλα προς την πηγή συνεχούς τάσης στην είσοδο του, ενώ κάθε κλάδος περιέχει δύο ελεγχόμενα ημιαγωγικά στοιχεία του ίδιου του κλάδου, διότι σε αυτήν την περίπτωση θα υπήρχε βραχυκύκλωμα της πηγής εισόδου με πολύ πιθανή συνέπεια την καταστροφή των εν λόγω στοιχείων. Οι τριφασικοί αντιστροφείς γενικά χρησιμοποιούνται για την τροφοδοσία τριφασικών φορτίων και ειδικά drivers για AC μοτέρ και συστήματα αδιάλειπτης παροχής εναλλασσόμενης τάσης που ανάλογα με την κυματομορφή της τάσης στην έξοδο τους διακρίνονται σε δύο κατηγορίες:

- Αντιστροφείς τετραγωνικών παλμών, όπου σε αυτήν την κατηγορία το πλάτος της τάσης εξόδου εξαρτάται αποκλειστικά από το πλάτος της τάσης στην είσοδο, καθώς δεν υπάρχει δυνατότητα ρύθμισης του πλάτους από τον αντιστροφέα.
- Αντιστροφείς με ρύθμιση του εύρους των παλμών (PWM), όπου οι εν λόγω αντιστροφείς ρυθμίζουν τόσο την ενεργό τιμή της τάσης στην έξοδο του αντιστροφέα, όσο και τη συχνότητά της. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω του ελέγχου της έναυσης και της σβέσης των διακοπτικών στοιχείων. Να σημειωθεί ότι υπάρχουν διάφοροι μέθοδοι ελέγχου PWM, που πετυχαίνουν διαφορετικές μορφές τάσεων στην έξοδο.

## 2.3 Παράμετροι επίδοσης των αντιστροφών

Ύστερα από την ανάλυση για το τι είναι ένας αντιστροφέας τάσης, αξίζει να αναλυθεί πως γίνεται η μέτρηση της ποιότητας της εξόδου του, η οποία επιτυγχάνεται με κάποιες συγκεκριμένες παραμέτρους (Στάμου Κωνσταντίνος, Αθήνα, Σεπτέμβριος 2016).

- Αρμονικός παράγοντας (Harmonic factor, HF): Είναι μέτρο ατομικής συνεισφοράς των αρμονικών. Ο παράγοντας αρμονικών της νιοστής αρμονικής ρίζας είναι:

$$HF_n = \frac{V_n}{V_1} \quad (1.1)$$

Με το  $V_n$  να είναι η rms τιμή της νιοστής αρμονικής συνιστώσας και το  $V_1$  να είναι η τιμή rms της θεμελιώδους συνιστώσας.

- Απόδοση ισχύος (Power efficiency,  $\eta$ ): Λαμβάνοντας ότι οι  $P_i$  και  $P_o$  υποδηλώνουν την ισχύ εισόδου και την ισχύ εξόδου του μετατροπέα, ο τύπος είναι ο εξής:

$$\eta = \frac{P_o}{P_i} \quad (1.2)$$

- Συντελεστής Παραμόρφωσης (Distortion factor, DF): Είναι ένα μέτρο της αποτελεσματικότητας όσο αναφορά τη μείωση των ανεπιθύμητων αρμονικών. Δίνει πληροφορία για τις ποσότητες αρμονικής παραμόρφωσης που παραμένουν σε μια συγκεκριμένη κυματομορφή μετά την εξασθένηση δεύτερης τάξης των αρμονικών της κυματομορφής.

$$DF = \frac{1}{V_1} \sqrt{\sum_n^{\infty} \left(\frac{V_n}{n^2}\right)^2} \quad (1.3)$$

Και η DF μιας ατομικής (ή νιοστής) αρμονικής συνιστώσας ορίζεται ως:

$$DF_n = \frac{V_n}{V_1 \cdot n^2} \quad (1.4)$$

- Συνολική Αρμονική Παραμόρφωση (Total harmonic distortion, THD): Είναι ένα μέτρο της εγγύτητας στη μορφή μεταξύ μιας κυματομορφής και της θεμελιώδους συνιστώσας της:

$$THD = \frac{1}{V_1} \sqrt{\sum_n^{\infty} V_n^2} \quad (1.5)$$

- Χαμηλότερη Αρμονική Τάξη (Lowest order harmonic, LOH): Είναι η αρμονική της οποίας η συχνότητα είναι πλησιέστερα προς τη θεμελιώδη και το πλάτος της είναι μεγαλύτερο ή ίσο με το 3% της θεμελιώδους συνιστώσας

## 2.4 Τοπολογία ανορθωτών και αντιστροφέα

Σε έναν αντιστροφέα έξι διακοπών (VSI), χρησιμοποιείται ένας μεγάλος πυκνωτής σύνδεσης DC για τη συγκράτηση του διαύλου DC σε συγκεκριμένη τάση. Αυτός ο πυκνωτής παράγει αρκετές αρμονικές και οι υψηλές αρμονικές συχνότητες επηρεάζουν δυσμενώς τη ζωή του. Το ρεύμα εισόδου είναι ασυνεχές και έχει ένα στοιχείο υψηλής συχνότητας που επηρεάζει αρνητικά την χρησιμότητα του. Κατά συνέπεια, ο παράγοντας μετατόπισης και η παραμόρφωση ο παράγοντας είναι εξαιρετικά δυσμενής. Μπορεί να χρειαστεί μια ενεργή διάταξη φίλτρου για τη βελτίωση του συντελεστή ισχύος.

Τα φίλτρα χρησιμοποιούνται ευρέως σε ηλεκτρονικά ισχύος για τη μείωση των αρμονικών συνιστωσών στην κυματομορφή εξόδου. Επίσης χρησιμοποιούνται για την εξομάλυνση της τάσης κυμάτωσης του φορτίου που τροφοδοτείται από έναν ανορθωτή, μειώνοντας το αρμονικό περιεχόμενο της εξόδου του αντιστροφέα, προλαμβάνοντας ανεπιθύμητα αρμονικά στοιχεία που αντανακλώνται στο σύστημα εναλλασσόμενου ρεύματος και εξαλείφοντας τις ραδιοσυχνότητες. Η έξοδος του αντιστροφέα είναι μια «ψαλιδισμένη» DC τάση με μηδενικές DC συνιστώσες. Για τον σκοπό αυτό τοποθετείται συνήθως ένα LC βαθυπερατό φίλτρο στην έξοδο του αντιστροφέα για τη μείωση των αρμονικών υψηλής συχνότητας. Παρόλα αυτά, σε μερικές εφαρμογές όπως οι κινητήρες εναλλασσόμενου ρεύματος, το φιλτράρισμα δεν είναι υποχρεωτικό. Εκτός αυτού, με τον αλγόριθμο μεταγωγής ενός αντιστροφέα PWM, η κατάργηση ορισμένων αρμονικών μπορεί να γίνει χωρίς τη χρήση εξωτερικού φίλτρου στο σύστημα του μετατροπέα.

Από την άλλη, εάν μια σύγχρονη μηχανή λειτουργεί με υψηλό συντελεστή ισχύος, τότε χρησιμοποιεί έναν μετατροπέα πηγής ρεύματος (Current Source Inverter, CSI). Χρησιμοποιείται σε μεγάλους δίσκους και στην εκκίνηση αεριοστρόβιλων/ κινητήρων συνδεδεμένων με μηχανήματα που λειτουργούν ως κινητήρες κατά την εκκίνηση και στη συνέχεια ως γεννήτριες. Η τοπολογία CSI χρησιμοποιεί θυρίστορ ως διακόπτες αντί για IGBT για οδήγηση κινητήρων. Η τοπολογία CSI οδηγεί τον BLDC κινητήρα παρέχοντάς του μια ορθογώνια τριφασική κυματομορφή. Το μέγεθος του επαγωγέα σύνδεσης DC καθορίζεται από τη διαφορά τάσης κατά μήκος του επαγωγέα, δηλαδή η μέγιστη διαφορά μεταξύ του κινητήρα της αντι-ηλεκτρεγερτικής δύναμης και της τάσης τροφοδοσίας εισόδου. Ο ελεγχόμενος ανορθωτής θα μπορούσε να είναι είτε ένας τριφασικός ανορθωτής είτε μονοφασικός ανορθωτής. Δεδομένου ότι η τάση παίρνει την μορφή σε τριφασική διάταξη ανορθωτή και δεδομένου επίσης ότι είναι χαμηλότερο από αυτό μιας μονοφασικής ανορθωτικής διάταξης, για έναν BLDC κινητήρα και το φορτίο του, η τιμή του τριφασικού επαγωγέα σύνδεσης DC είναι μικρότερη από την τιμή ενός μονοφασικού DC πηνίου σύνδεσης. Εάν το ρεύμα φάσης οδηγεί στη φάση της αντι-ηλεκτρεγερτικής δύναμης, μπορεί να γίνει φυσική μετατροπή μέσω των θυρίστορ. Επειδή δεν απαιτείται ψήκτρες, το κόστος και το βάρος του μετατροπέα μειώνεται σημαντικά. Το κύριο πλεονέκτημα αυτής της τοπολογίας είναι ότι οι απώλειες μεταγωγής περιορίζονται στο ελάχιστο.

## 2.5 Φίλτρα

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο θα γίνει ανάλυση των φίλτρων που χρησιμοποιούνται αρκετά συχνά στα ηλεκτρονικά ισχύος και θα εξηγηθεί τόσο η έννοια του απλού φιλτραρίσματος όσο και του ψηφιακού, μια κατηγορία που συναντάμε πολύ στις σύγχρονους κινητήρες που βασίζονται από λογισμικό.

### 2.5.1 Απλό Φιλτράρισμα

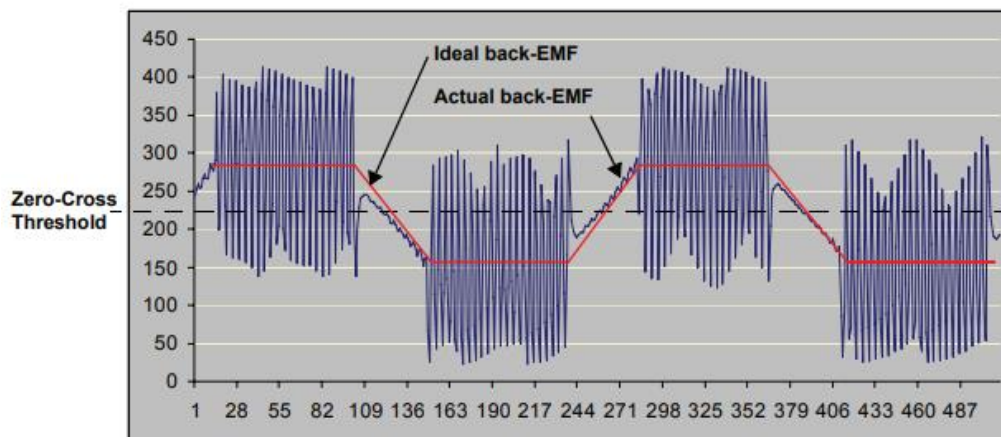
Τα φίλτρα εφαρμόζονται στην είσοδο και στην έξοδο ενός μετατροπέα για τη μείωση των ανεπιθύμητων αρμονικών ρεύματος ή τάσης (Στέφανος Ν. Μανιάς, 2017). Εάν οι ανεπιθύμητες αρμονικές εφαρμόζονται στην έξοδο του μετατροπέα, μπορεί να έχουν αρνητική επίδραση στο φορτίο. Εάν οι ανεπιθύμητες αρμονικές εμφανίζονται στην είσοδο του μετατροπέα, μπορεί να δημιουργήσουν προβλήματα σε άλλες ηλεκτρικές συσκευές, οι οποίες είναι συνδεδεμένες στην ίδια τροφοδοσία. Τα φίλτρα χωρίζονται στα παθητικά φίλτρα και τα ενεργητικά φίλτρα. Με τον όρο «παθητικά φίλτρα» περιγράφονται κυκλωματικές διατάξεις (πηνία και πυκνωτές) με συγκεκριμένη συνδεσμολογία ώστε να προκύπτει μεγάλη αντίσταση σε ορισμένες συχνότητες και συνεπώς η αποκοπή τους, ενώ με τον όρο «ενεργητικά φίλτρα» περιγράφονται οι διατάξεις που έχουν την ιδιότητα να μηδενίζουν τις «διαταραχές» που δημιουργούνται από την λειτουργία των μετατροπέων ισχύος, συνεισφέροντας κάθε στιγμή άλλες ίσες και αντίθετες από τις υπάρχουσες.

### 2.5.2 Ψηφιακό Φιλτράρισμα

Μια ειδική κατηγορία φιλτραρίσματος που αντιμετωπίζουμε στα ηλεκτρονικά ισχύος, είναι αυτή του ψηφιακού φιλτραρίσματος που βασίζεται πάνω σε λογισμικό (Hardware). Όπως αναφέρθηκε, τα φίλτρα χρησιμοποιούνται σε πολλές εφαρμογές, όπως τους BLDC κινητήρες, αυτό όμως το φιλτράρισμα του σήματος κατορθώνεται με διαφορετικό τρόπο. Στην διπλωματική αυτήν εργασία δεν χρησιμοποιείται κάτι τέτοιο, παρόλα αυτά το συναντάμε κατά κόρον στους κινητήρες αυτής της κατηγορίας, οπότε θα δοθεί για επεξήγηση του σε πιο γενικά πλαίσιο.

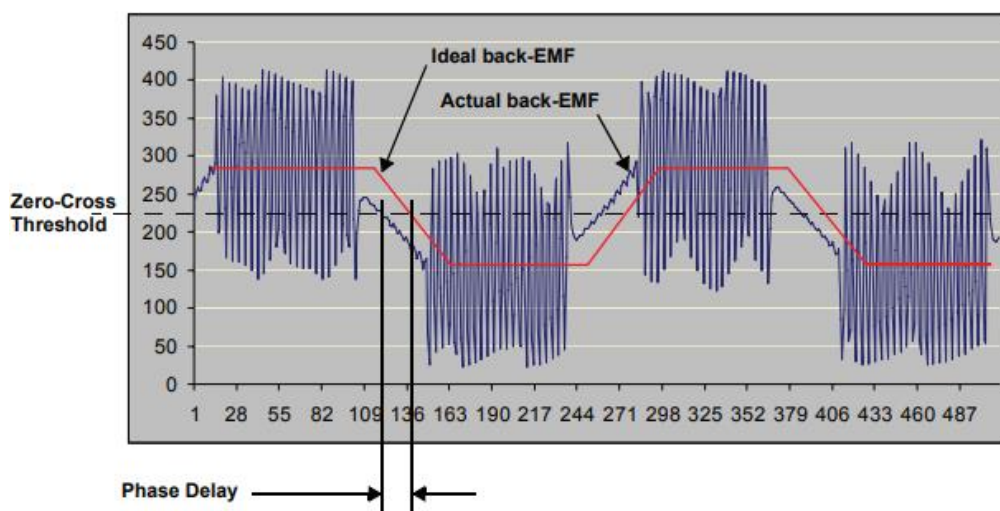
Πιο αναλυτικά, το σήμα αντι-ηλεκτρεργετικής δύναμης (back EMF) (Condit, 2007) δεν είναι καθαρό σήμα και αυτό προκύπτει από το ότι ο θόρυβος που είναι αποτέλεσμα του σήματος PWM που εφαρμόζεται στις άλλες φάσεις κάνει δύσκολο τον εντοπισμό με ακρίβεια του μηδενικού σημείου διέλευσης (zero crossing). Η Εικόνα 13 παρουσιάζει ένα πραγματικό σήμα αντι-ηλεκτρεργετικής δύναμης το οποίο είναι άθροισμα ενός ιδανικού σήματος αντι-ηλεκτρεργετικής δύναμης και θορύβου. Το φιλτράρισμα της αντι-ηλεκτρεργετικής δύναμης έχει ως προϋπόθεση, για τη σωστή εφαρμογή των τεχνικών ελέγχου χωρίς αισθητήρα, ο επεξεργαστής να μπορεί να θέσει ένα χρονικό που θα μετρά αντίστροφα μέχρι την στιγμή που πρέπει να πραγματοποιηθεί η μεταγωγή στις περιελίξεις του κινητήρα. Παρόλα αυτά, το

φιλτράρισμα ενός σήματος έχει ένα μειονέκτημα είτε αυτό γίνεται ψηφιακά είτε υλοποιείται σε επίπεδο υλικού, το οποίο είναι ότι το σήμα παρουσιάζει καθυστέρηση φάσης σε σύγκριση με το πραγματικό σήμα.



Εικόνα 13: Πραγματική και Ιδανική αντι-ηλεκτρεγερτική δύναμη (Πηγή: (Condit, 2007))

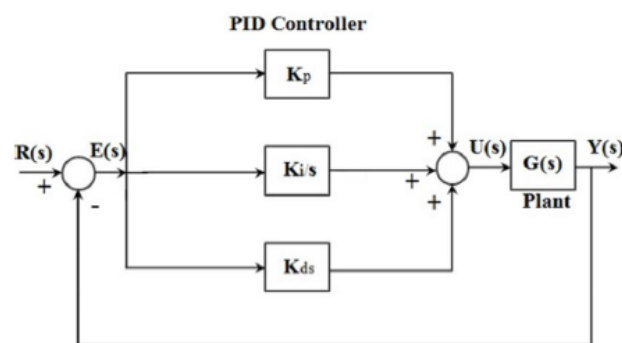
Χρησιμοποιώντας σύγχρονους μικροεπεξεργαστές, για την υλοποίηση ενός ψηφιακού φίλτρου, μπορεί να δημιουργηθεί ένα μεταβαλλόμενο σήμα αντι-ηλεκτρεγερτικής δύναμης που μοιάζει περισσότερο με το ιδανικό σήμα. Αυτή είναι η προϋπόθεση για τον αλγόριθμο που περιγράφεται, δεδομένου ενός φιλτραρισμένου σήματος αντι-ηλεκτρεγερτικής δύναμης, είναι ευκολότερο να εντοπιστεί ένα πραγματικό σημείο μηδενικής διασταύρωσης με μεγαλύτερη ακρίβεια. Όταν ανιχνεύεται ένα σημείο μηδενικής διασταύρωσης, ο επεξεργαστής μπορεί στη συνέχεια να ρυθμίσει ένα χρονοδιακόπτη για αντίστροφη μέτρηση έως ότου έρθει η ώρα να αντικατασταθούν οι περιελίξεις του κινητήρα. Η καθυστέρηση φάσης απεικονίζεται στην Εικόνα 14.



Εικόνα 14: Ιδανικό σήμα με καθυστέρηση φάσης μετά από φιλτράρισμα (Πηγή: (Condit, 2007))

## 2.6 PID Ελεγκτής

Οι PID ελεγκτές (Proportion- Integral- Derivative) είναι κομμάτι των ηλεκτρονικών ισχύος, χρησιμοποιούνται ευρέως στην βιομηχανία για τον έλεγχο διεργασιών και σε συστήματα όπως διατάξεις ηλεκτροκινητήρων κυρίως λόγω της αποδοτικότητας και της απλότητας στην δομή τους (Παντελής Β. Μαλατέστας, 2017). Η τεχνική αυτή είναι μεν παλιά αλλά εμφανίζεται σε πολλές σύγχρονες τεχνικές και καταλαμβάνει μεγάλο μερίδιο των εφαρμογών ελέγχου γιατί στην ουσία λειτουργούν για αντιστάθμιση και στις περισσότερες περιπτώσεις έχουν ενσωματωμένο και το στοιχείο της σύγκρισης. Ποια όμως είναι η λειτουργικότητα αυτών των ελεγκτών; Στην πραγματικότητα έχουν την ευθύνη να υπολογίζουν την τιμή λάθους ως την διαφορά μεταξύ μετρούμενης και επιθυμητής τιμής.



Εικόνα 15: Σύστημα ελέγχου PID (Πηγή: (Παντελής Β. Μαλατέστας, 2017))

Υπάρχουν δύο είδη συστημάτων: αυτά που είναι απλά και αυτά που έχουν μια σειρά από συνδυασμένα υποσυστήματα με σκοπό την επίτευξη της επιθυμητής εξόδου. Οι παράγοντες που βοηθούν στην ανάλυση της επίδοσης του συστήματος είναι και εδώ δύο και είναι η μεταβατική απόκριση και η απόκριση μόνιμης κατάστασης.

Οι PID ελεγκτές είναι ένας αναλογικός, ολοκληρωτικός και διαφορικός ελεγκτής που διευκολύνει στην επίτευξη παραμέτρων υψηλής απόδοσης. Κάθε ένας από αυτούς τους ελεγκτές έχει το δικό του έργο ανάλογα με τις απαιτήσεις της εκάστοτε εφαρμογής, οπότε αυτοί μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε διαφορετικούς συνδυασμούς ζευγαριών ανάλογα με την επιθυμητή έξοδο. Οι αντισταθμιστές ή ελεγκτές, ανάλογα με τη δράση ελέγχου που παρέχουν, κατατάσσονται στις εξής βασικές κατηγορίες:

- Ελεγκτές δύο θέσεων (ON – OFF controller)
- Αναλογικός ελεγκτής (P - controller)
- Ολοκληρωτικός ελεγκτής (I – controller)
- Διαφορικός ελεγκτής (D – controller)
- Αναλογικό – ολοκληρωτικός ελεγκτής (PI – controller)
- Αναλογικό – διαφορικός ελεγκτής (PD – controller)
- Αναλογικό – ολοκληρω – διαφορικός ελεγκτής (PID – controller)
- Αντισταθμιστής καθυστέρησης φάσης (Lag – compensator)
- Αντισταθμιστής προήγησης φάσης (Lead – compensator)
- Αντισταθμιστής καθυστέρησης – προήγησης φάσης (Lag – Lead compensator)
- Αντισταθμιστής γεφυρωμένου T

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, το χαρακτηριστικό που διακρίνει έναν PID ελεγκτή είναι η δυνατότητα χρήσης των τριών όρων ελέγχου της αναλογικής, ολοκληρωμένης και διαφορικής επίδρασης στην έξοδο του ελεγκτή για την εφαρμογή ακριβούς και βέλτιστου ελέγχου. Ο ελεγκτής PID υπολογίζει συνεχώς μια τιμή σφάλματος  $e(t)$  ως τη διαφορά μεταξύ ενός επιθυμητού σημείου ρύθμισης (set point)  $SP = r(t)$  και μια μετρούμενη μεταβλητή (process variable)  $PV = y(t)$ :  $e(t) = r(t) - y(t)$  και εφαρμόζει μια διόρθωση με βάση τους P, I και D όρους. Ο ελεγκτής προσπαθεί να ελαχιστοποιήσει το σφάλμα με την πάροδο του χρόνου προσαρμόζοντας μια μεταβλητή ελέγχου  $u(t)$ , όπως το άνοιγμα μιας βαλβίδας ελέγχου, σε μια νέα τιμή που καθορίζεται από ένα σταθμισμένο άθροισμα των όρων ελέγχου. Παρακάτω παρουσιάζονται συνοπτικά τα χαρακτηριστικά των αναλογικών (P), ολοκληρωτικών (I) και διαφορικών (D) ελεγκτών ώστε να γίνει κατανοητός ο συνδυασμός διαφορετικών ελεγκτών.

### 2.6.1 Αναλογικός «P» ελεγκτής

Ο όρος «P» είναι ανάλογος με την τρέχουσα τιμή του σφάλματος  $e(t)$  με την σχέση  $SP - PV$ . Για παράδειγμα, εάν το σφάλμα είναι μεγάλο και θετικό, η έξοδος ελέγχου θα είναι αναλογικά μεγάλη και θετική, λαμβάνοντας υπόψη τον συντελεστή κέρδους "K". Η χρήση μόνο του αναλογικού ελέγχου θα οδηγήσει σε σφάλμα μεταξύ του σημείου ρύθμισης και της πραγματικής τιμής διεργασίας, επειδή απαιτεί σφάλμα για τη δημιουργία της αναλογικής απόκρισης. Εάν δεν υπάρχει σφάλμα, δεν υπάρχει διορθωτική απάντηση. Με λίγα λόγια, η συνεισφορά του αναλογικού ελεγκτή «Kp» εξαρτάται από την στιγμιαία τιμή του σφάλματος ελέγχου  $e(t)$ . Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον έλεγχο σταθερών συστημάτων, όμως προσφέρει περιορισμένη επίδοση. Με τη βοήθεια του μειώνεται ο χρόνος ανόδου (rise time) της ελεγχόμενης μεταβλητής (π.χ. ο χρόνος για τη μεταβολή της ταχύτητας ενός κινητήρα), όμως δεν καταφέρνει να εξαλείψει το σφάλμα μόνιμης κατάστασης. Αυτό συμβαίνει γιατί η απόκριση του σε διαταραχές διαφορετικών συχνοτήτων είναι ίδια για όλες τις συχνότητες.

### 2.6.2 Ολοκληρωτικός «I» ελεγκτής

Ο όρος «I» αντιπροσωπεύει τις προηγούμενες τιμές του σφάλματος  $SP - PV$  και τις ενσωματώνει με την πάροδο του χρόνου για την παραγωγή του όρου I. Για παράδειγμα, εάν υπάρχει εναπομένον σφάλμα  $SP - PV$  μετά την εφαρμογή του αναλογικού ελέγχου, ο ακέραιος όρος επιδιώκει να εξαλείψει το υπολειπόμενο σφάλμα προσθέτοντας ένα αποτέλεσμα ελέγχου λόγω της προηγούμενης σωρευτικής τιμής του σφάλματος. Όταν το σφάλμα εξαλειφθεί, ο ακέραιος όρος θα σταματήσει να αυξάνεται. Αυτό θα έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση του αναλογικού αποτελέσματος καθώς μειώνεται το σφάλμα, αλλά αυτό αντισταθμίζεται από το αυξανόμενο ολοκληρωμένο αποτέλεσμα. Πιο συγκεκριμένα, ένας ελεγκτής που κάνει χρήση μόνο του ολοκληρωτικού όρου «Ki», η έξοδος του είναι ανάλογη του υπολογιζόμενου σφάλματος. Αυτό σημαίνει πως είναι μία μέθοδος ελέγχου αργής αντίδρασης. Με τη βοήθειά του επιτυγχάνεται να μειωθεί το τελικό σφάλμα. Αθροίζοντας τα σφάλματα (ανάλογα με τη συχνότητα λειτουργίας),



παράγεται ένα σήμα ελέγχου τέτοιο ώστε να οδηγήσει την έξοδο του συστήματος κοντά στην επιθυμητή τιμή (set point). Με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται γρήγορα η επιθυμητή τιμή (set point), λαμβάνοντας υπόψη τα προηγούμενα σφάλματα. Η χρήση αυτού του όρου μπορεί να οδηγήσει στον μηδενισμό του σφάλματος μόνιμης κατάστασης (steady state error) όταν εφαρμοστούν βηματική είσοδο και διαταραχές στο υπό έλεγχο σύστημα.

### 2.6.3 Διαφορικός «D» ελεγκτής

Ο όρος «D» είναι μια καλύτερη εκτίμηση της μελλοντικής τάσης του σφάλματος SP-PV, με βάση τον τρέχοντα ρυθμό αλλαγής του. Ορισμένες φορές ονομάζεται «προληπτικός έλεγχος», καθώς επιδιώκει αποτελεσματικά τη μείωση της επίδρασης του σφάλματος SP-PV, ασκώντας μια επιρροή ελέγχου που δημιουργείται από τον ρυθμό αλλαγής σφάλματος. Όσο πιο γρήγορη είναι η αλλαγή, τόσο μεγαλύτερο είναι το αποτέλεσμα ελέγχου ή απόσβεσης. Ένας ελεγκτής που χρησιμοποιεί μόνο τον όρο παραγωγίσης «Kd» έχει επίδραση στο ρυθμό μεταβολής του σφάλματος ελέγχου. Αποτελεί ένα γρήγορο τρόπο ελέγχου όταν η έξοδος αλλάζει γρήγορα, αλλά μηδενίζεται για μικρά σφάλματα ( $e(k) - e(k-1) = 0$ ). Αυτός ο ελεγκτής αυξάνει τη σταθερότητα του συστήματος, μειώνει τις υπερψώσεις (overshoots) της ελεγχόμενης μεταβλητής του συστήματος, αλλά δεν επιδρά στο τελικό σφάλμα.

Ο συντονισμός του PID ελεγκτή είναι από τα πιο σημαντικά βήματα για την σωστή λειτουργία του. Πιο συγκεκριμένα, η ισορροπία αυτών των όρων επιτυγχάνεται με συντονισμό βρόχου για την παραγωγή της βέλτιστης λειτουργίας ελέγχου. Οι σταθερές συντονισμού εμφανίζονται ως "K" και πρέπει να προέρχονται για κάθε εφαρμογή ελέγχου, καθώς εξαρτώνται από τα χαρακτηριστικά απόκρισης του πλήρους βρόχου εξωτερικά του ελεγκτή. Αυτά εξαρτώνται από τη συμπεριφορά του αισθητήρα μέτρησης, το τελικό στοιχείο ελέγχου, τυχόν καθυστερήσεις σήματος ελέγχου και την ίδια τη διαδικασία. Οι κατά προσέγγιση τιμές των σταθερών μπορούν συνήθως να εισαχθούν γνωρίζοντας τον τύπο της εφαρμογής, αλλά κανονικά είναι βελτιωμένες ή συντονισμένες, που στη πράξη η διαδικασία είναι εισάγοντας μια αλλαγή σημείου και παρατηρώντας την απόκριση του συστήματος.

## 2.6.4 Μέθοδος Ziegler – Nichols

Η μέθοδος ρύθμισης Ziegler-Nichols, όπως εισήχθη στη δεκαετία του 1940, είχε μεγάλο αντίκτυπο στο να κάνει τους ελέγχους ανάδρασης PID αποδεκτούς από τους μηχανικούς ελέγχου (Παντελής Β. Μαλατέστας, 2017). Με τον κανόνα Ziegler-Nichols, οι μηχανικοί είχαν τελικά έναν πρακτικό και συστηματικό τρόπο συντονισμού των βρόχων PID για βελτιωμένη απόδοση. Οι κανόνες συντονισμού απλοποιούν ή ίσως υπερ-απλοποιούν το πρόβλημα ρύθμισης βρόχου PID. Ίσως αυτή να μην είναι η καλύτερη επιλογή, αλλά μια συγκριτικά «αδύναμη» εναλλακτική λύση μπορεί να φαίνεται πολύ καλύτερη από μια καλή εναλλακτική λύση που τελικά να μην είναι να προκαλέσει προβλήματα στο κύκλωμα. Για αυτό ο κανόνας Ziegler-Nichols συνεχίζει να ισχύει σήμερα.

Ο κανόνας Ziegler-Nichols είναι ένας ευρετικός κανόνας συντονισμού PID που επιχειρεί να παράγει καλές τιμές για τις τρεις παραμέτρους κέρδους PID:

- «Kp» - το κέρδος διαδρομής ελεγκτή
- «Ti» - σταθερά χρόνου ολοκληρωτή του ελεγκτή
- «Td» - η σταθερά χρόνου παραγών του ελεγκτή

Δίδονται δύο μετρημένες παράμετροι βρόχου ανάδρασης που προέρχονται από μετρήσεις:

- η περίοδος  $T_u$  της συχνότητας ταλάντωσης στο όριο σταθερότητας
- το περιθώριο κέρδους «Ku» για σταθερότητα βρόχου

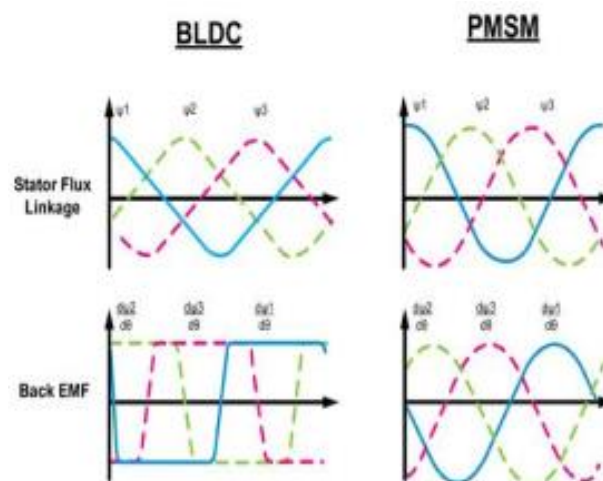
Με στόχο την επίτευξη καλής ρύθμισης (απόρριψη διαταραχών), οι κανόνες συντονισμού λειτουργούν αρκετά καλά όταν έχουμε έναν αναλογικό ελεγκτή, ένα σύστημα γραμμικό και αργό και μια απόκριση που κυριαρχείται από ένα μονοπολικό εκθετικό σημείο καθυστέρησης (lag) ή κάτι που ενεργεί πολύ σαν ένα.

Σε πραγματικές συνθήκες είναι απίθανο να έχουν αυτό το χαρακτηριστικό καθυστέρησης (lag), αλλά αυτή η προσέγγιση είναι ικανή για να περιγράψει την απόκριση συχνότητας σε πολλές περιπτώσεις. Ωστόσο, υπάρχουν κάποιοι πόλοι σε μερικούς κινητήρες που μπορούν να εισάγουν μια επιπλέον αλλαγή φάσης. Τι σημαίνει αυτό; Ότι ακόμα κι αν δεν επηρεάζουν πολύ το σχήμα του κέρδους, η μετατόπιση φάσης έχει μεγάλη σημασία για τη σταθερότητα του βρόχου. Έτσι, το μοντέλο Ziegler-Nichols προϋποθέτει μια επιπλέον προσαρμογή της φάσης. Στο κομμάτι της σταθερότητας, υπάρχει μια μετατόπιση φάσης  $180^\circ$  γύρω από τον βρόχο ανατροφοδότησης (κριτήριο σταθερότητας του Nyquist σε συστήματα αυτομάτου ελέγχου). Η πρώτη καθυστέρηση μπορεί να συνεισφέρει μέχρι  $90^\circ$  αυτής της αλλαγής φάσης. Το υπόλοιπο της παρατηρούμενης μετατοπισμένης φάσης πρέπει να καλύπτεται από την προσαρμογή μιας τεχνητής φάσης. Η προσαρμογή μιας φάσης θεωρείται πως είναι μια ευθεία γραμμή μεταξύ μηδέν και της κρίσιμης συχνότητας της φάσης.

## Κεφάλαιο 3<sup>ο</sup>: DC Κινητήρες (BLDC Motors)

### 3.1 Εισαγωγή

Οι σύγχρονοι κινητήρες μόνιμου μαγνήτη έχουν λάβει μεγάλη προσοχή στις βιομηχανικές εφαρμογές από τη δεκαετία του 1970. Σήμερα χρησιμοποιούνται σε διάφορες εφαρμογές όπως αυτοκινητοβιομηχανία, αεροδιαστημικές εφαρμογές, ιατρικός εξοπλισμός και βιομηχανικός αυτοματισμός. Οι σύγχρονοι κινητήρες μόνιμου μαγνήτη χωρίζονται σε δύο διαφορετικούς τύπους με βάση την κυματομορφή της αντί-ηλεκτρερρετικής δύναμης: στο πρώτο η αντιηλεκτρερρετική δύναμη είναι ημιτονοειδούς μορφής και ονομάζεται Σύγχρονος Κινητήρας Μόνιμου Μαγνήτη (Permanent Magnet Synchronous Motor, PMSM) και στον δεύτερο η αντιηλεκτρερρετική δύναμη είναι τραπεζοειδούς μορφής και ονομάζεται Κινητήρας Μόνιμου Μαγνήτη Χωρίς Ψήκτρες (Brushless DC, BLDC). Ένας BLDC παράγει μεγαλύτερη ροπή σε σύγκριση με έναν PMSM.

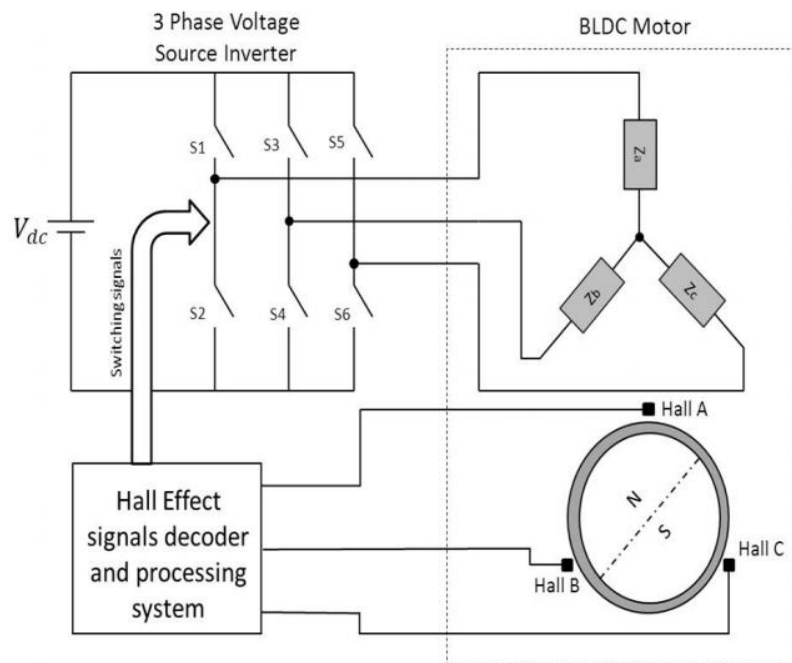


Εικόνα 16: Βασικές κυματομορφές BLDC και PMSM κινητήρων (Πηγή: (Yadu Kiran, 2014))

Οι BLDC κινητήρες είναι ένας τύπος DC κινητήρων όπου η μεταγωγή γίνεται ηλεκτρονικά και όχι με ψήκτρες (Alireza Tashakori Abkenar, May 2014). Το μαγνητικό υλικό επιλέγεται σε σχέση με την απαιτούμενη πυκνότητα μαγνητικού πεδίου στο δρομέα. Οι μαγνήτες φερρίτη χρησιμοποιούνται συνήθως για τη δημιουργία του μόνιμου μαγνήτη δρομέα του BLDC κινητήρα, ωστόσο έχουν το μειονέκτημα της χαμηλής παραγωγής πυκνότητας ροής.

Αντίθετα, κράματα υλικών όπως το Νεοδύμιο (Nd), το μαγνήτης Σαμαρίου – Κοβαλτίου (SmCo), μαγνήτης Νεοδυμίου (NdFeB) έχουν υψηλότερη μαγνητική πυκνότητα. Εξ' αυτού και οι μαγνήτες κράματος παράγουν περισσότερη ροπή για τον ίδιο όγκο σε σύγκριση με τους μαγνήτες φερρίτη. Επομένως βελτιώνουν την αναλογία ισχύος προς το μέγεθος του BLDC κινητήρα που είναι πιο κατάλληλο για τους κινητήρες στους τροχούς.

Ο BLDC κινητήρας χρειάζεται έναν πολύπλοκο αλγόριθμο ελέγχου λόγω της ηλεκτρονικής μεταγωγής που γίνεται σύμφωνα με την ακριβή θέση του μόνιμου μαγνήτη του δρομέα. Η ανίχνευση του δρομέα χωρίζεται σε δύο κατηγορίες, όπου η μια χρησιμοποιεί αισθητήρες (Sensored) και η δεύτερη που δεν χρησιμοποιεί αισθητήρες (Sensorless).



Εικόνα 17: Σχηματικό διάγραμμα ενός κινητήρα BLDC δύο πόλων (Πηγή: (Alireza Tashakori Abkenar, May 2014))

Οι BLDC κινητήρες χρησιμοποιούνται ευρέως στις μέρες μας λόγω της βελτιωμένης απόδοσης και της χαμηλότερης συντήρησής τους. Η θέση του δρομέα ανιχνεύεται είτε εσωτερικά είτε εξωτερικά χρησιμοποιώντας αισθητήρες Hall ή μέσω της μεθόδου χωρίς αισθητήρα και συνεπώς οι περιελίξεις στον στάτη διεγείρονται μέσω του μετατροπέα πηγής τάσης, δηλαδή όποτε πλησιάζουν οι μαγνητικοί πόλοι του δρομέα οι αισθητήρες Hall δίνουν ένα υψηλό ή χαμηλό σήμα, υποδεικνύοντας ότι ο πόλος N ή S περνά κοντά στους αισθητήρες. Με βάση τον συνδυασμό αυτών των σημάτων από τους αισθητήρες Hall, εντοπίζεται η ακριβής ακολουθία διέγερσης της περιελίξης του στάτη. Ο μετατροπέας DC-DC παίζει σημαντικό ρόλο στον καθορισμό της απόδοσης του κινητήρα. Για έναν κινητήρα BLDC, η εναλλαγή λειτουργίας παρέχεται από τον μετατροπέα DC-DC που τροφοδοτεί την πηγή τάσης αντιστροφείας.

### 3.2 Σύγκριση κινητήρων BLDC και PMSM

Στη συγκεκριμένη ενότητα παρουσιάζεται η σχέση μεταξύ αυτών των δύο κατηγοριών κινητήρα. Ένας σύγχρονος κινητήρας με μόνιμους μαγνήτες στον δρομέα κινείται σε λειτουργία αυτοελέγχου χρησιμοποιώντας έναν αισθητήρα θέσης του δρομέα και έναν αντιστροφέα για να ελέγχει το ρεύμα στα τυλίγματα του στάτη, γνωστός και ως κινητήρας DC χωρίς ψήκτρες. Εκτός από αυτό, ένας κινητήρας DC χωρίς ψήκτρες (BLDC) έχει έναν δρομέα μόνιμου μαγνήτη και τα τυλίγματα του στάτη είναι έτσι κατασκευασμένα ώστε η αντί-ηλεκτρεγερτική δύναμη (back EMF) να είναι τραπεζοειδής (Akin & Bhardwaj, 2015). Παρομοίως ένας σύγχρονος κινητήρας μόνιμου μαγνήτη (PMSM) είναι ένας κινητήρας που χρησιμοποιεί μόνιμους μαγνήτες για να παράγει το μαγνητικό πεδίο στο διάκενο αέρα αντί να χρησιμοποιεί ηλεκτρομαγνήτες.

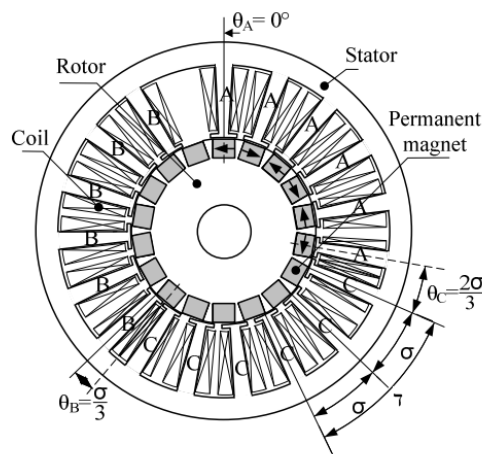
Οπότε από τα παραπάνω μπορεί να εξαχθεί το συμπέρασμα ότι ο κινητήρας DC χωρίς ψήκτρες είναι ένας τύπος σύγχρονου κινητήρα μόνιμου μαγνήτη με αντί-ηλεκτρεγερτική δύναμη τραπεζοειδούς κυματομορφής. Αυτό περιλαμβάνει την εσωτερική δομή των κινητήρων όπου και οι δυο τύποι έχουν μόνιμους μαγνήτες στον δρομέα και η λειτουργία και των δυο απαιτεί εναλλασσόμενα ρεύματα στον στάτη για να παράξουν σταθερή ροπή. Η διαφορά τους όμως είναι η χαρακτηριστική κυματομορφή της αντι-ηλεκτρεγερτικής δύναμης όπου στον σύγχρονο κινητήρα μόνιμου μαγνήτη είναι ημιτονοειδής ενώ στον DC κινητήρα χωρίς ψήκτρες η αντι-ηλεκτρεγερτικής δύναμης έχει τραπεζοειδή μορφή.

Πίνακας 3: Σύγκριση BLDC – PMSM

BLDC	PMSM
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Τροφοδοτείται με ρεύματα τραπεζοειδούς μορφής</li> <li>• Απαιτείται συνεχές ρεύμα</li> <li>• Τραπεζοειδής back EMF</li> <li>• Κυμάτωση ροπής</li> <li>• Χαμηλές τάσεις αρμονικών στην ακουστική περιοχή</li> <li>• Μεγαλύτερες απώλειες πυρήνα λόγω αρμονικού περιεχομένου</li> <li>• Λιγότερες απώλειες μεταγωγής</li> <li>• Οι αλγόριθμοι ελέγχου είναι σχετικά απλοί</li> <li>• Αποδοτικότητα 85% έως 90%</li> <li>• Χαμηλό κόστος</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Τροφοδοτείται με ημιτονοειδή ρεύματα</li> <li>• Απαιτείται εναλλασσόμενο ρεύμα</li> <li>• Ημιτονοειδής back EMF</li> <li>• Μικρή κυμάτωση ροπής</li> <li>• Λιγότερες αρμονικές στην ακουστική περιοχή λόγω ημιτονοειδούς διέγερσης</li> <li>• Χαμηλότερη απώλεια πυρήνα</li> <li>• Υψηλότερες απώλειες με την ίδια συχνότητα μεταγωγής</li> <li>• Οι αλγόριθμοι ελέγχου περιλαμβάνουν σχετικά σύνθετα μαθηματικά</li> <li>• Αποδοτικότητα 92% έως 97%</li> <li>• Υψηλό κόστος</li> </ul>

### 3.3 Δομή - Τύποι του BLDC κινητήρα

Ο DC κινητήρας χωρίς ψήκτρες αποτελείται από τρία κύρια μέρη: το σώμα του κινητήρα (ο οπλισμός στο πλάι του στάτη, ο μόνιμος μαγνήτης στο πλάι του δρομέα), τους αισθητήρες θέσης και το ηλεκτρονικό κύκλωμα. Ο στάτης δεν κινείται και κρατά τους ηλεκτρομαγνήτες. Ο στρόφεας είναι το περιστρεφόμενο συστατικό που συγκρατεί τους μόνιμους μαγνήτες. Η κατασκευαστική δομή του BLDC κινητήρα φαίνεται στην Εικόνα 18.



Εικόνα 18: Κάτοψη ενός BLDC κινητήρα (Πηγή: (I. Aris, H. Wakiwaka, & M. Nirei, December 2010))

Ο στάτης αποτελείται από πηνία και ο δρομέας αποτελείται από μόνιμους πόλους μαγνήτη. Οι μόνιμοι μαγνήτες που είναι ενσωματωμένοι στο δρομέα, διατάσσονται πλάτη με πλάτη, έτσι ώστε η ροή να ρέει προς την υποδοχή του πηνίου στο στάτη. Τα πηνία είναι τυλιγμένα σε κάθε υποδοχή του στάτη σε σειρά και αυτά τα πηνία ομαδοποιούνται σύμφωνα με τη φάση τους. Κάθε φάση μετατοπίζεται από  $120^\circ$  μεταξύ τους. Ο δρομέας και ο στάτης είναι κατασκευασμένοι από μαγνητικό υλικό όπως είναι το ελασματοποιημένο σίδηρο, ωστόσο, ο άξονας είναι κατασκευασμένος από μη σιδηρομαγνητικό υλικό. Οι μαγνήτες τοποθετούνται μεταξύ σφηνών μαγνητικού υλικού στους πόλους του δρομέα. Τα ηλεκτρονικά κυκλώματα που υπάρχουν ενεργοποιούν τους διακόπτες στις κατάλληλες περιελίξεις. Έτσι, δημιουργείται μια εσωτερική ανάδραση που δίνει τα εξής χαρακτηριστικά: γραμμικά χαρακτηριστικά ροπής – ταχύτητας και υψηλή ροπή εκκίνησης. Τέλος, η τροφοδοσία που παρέχεται σε έναν BLDC κινητήρα μπορεί να είναι συνεχές ρεύμα, αλλά μπορεί επίσης να είναι και εναλλασσόμενο εάν η ηλεκτρονική μονάδα έχει τα αναγκαία κυκλώματα για τη μετατροπή του εναλλασσόμενου ρεύματος σε συνεχές.

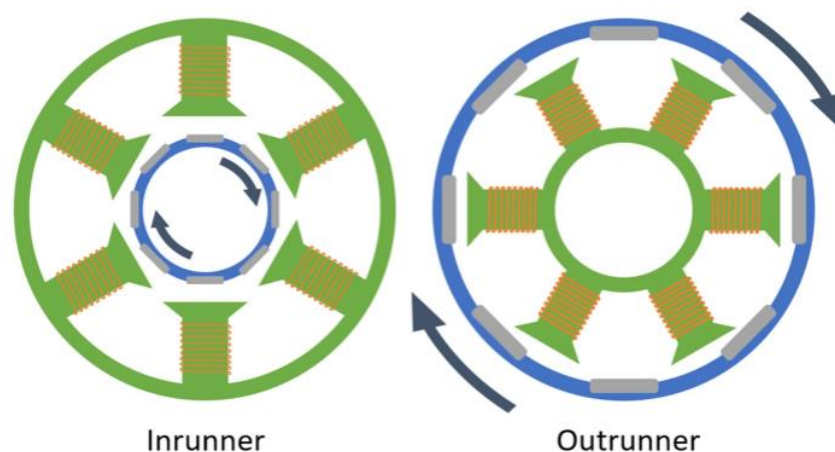
Εφόσον σε αυτήν την ενότητα γίνεται αναφορά στην δομή των κινητήρων αυτών, είναι σημαντικό να αναφερθούν και οι τύποι στους οποίους χωρίζεται (Emrik Joner, 2020). Υπάρχουν δύο τύποι κινητήρων DC χωρίς ψήκτρες: οι τύποι Inrunner και Outrunner.

### 3.3.1 Inrunner Κινητήρες

Στους Inrunner κινητήρες ή αλλιώς κινητήρες "εσωτερικού δρομέα", ο δρομέας περιστρέφεται «μέσα» στο στάτη σε σχέση με το περίβλημα του κινητήρα. Στους περισσότερους BLDC κινητήρες, ο δρομέας περιστρέφεται από κάποιους μόνιμους μαγνήτες που είναι τοποθετημένοι σε έναν άξονα του στάτη με πηνία. Όσο γρηγορότερα περιστρέφεται ένας κινητήρας, τόσο πιο αποτελεσματικός είναι.

### 3.3.2 Outrunner Κινητήρες

Οι Outrunner κινητήρες έχουν μια ανάποδη ρύθμιση από τους Inrunner κινητήρες, καθώς ο δρομέας περιστρέφεται «έξω» από τον στάτη. Με κινητήρες "εξωτερικούς δρομέα" ή αλλιώς Outrunner, ο στάτης βρίσκεται στο εσωτερικό και ο δρομέας αποτελείται από ένα εξωτερικά περιστρεφόμενο περίβλημα σε σχήμα καμπάνας στο οποίο τοποθετούνται οι μαγνήτες. Οι Outrunner κινητήρες περιστρέφονται πολύ πιο αργά και παράγουν μεγαλύτερη ροπή από τους Inrunner κινητήρες. Το μεγαλύτερο πλεονέκτημα ενός Outrunner κινητήρα είναι το γεγονός ότι δεν απαιτείται κιβώτιο ταχυτήτων και επίσης είναι πολύ πιο εύκολο να τοποθετηθούν, αλλά είναι ελαφρώς λιγότερο αποδοτικοί από τους Inrunner κινητήρες. Επίσης, είναι λιγότερο δαπανηροί στην παραγωγή. Μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν σε μικρότερες εφαρμογές και συνήθως έχουν σχετικά μεγάλη ροπή, χάρις στη μεγαλύτερη διάμετρο του δρομέα, με την ίδια μαγνητική δύναμη.



Εικόνα 19: Κατόψεις των Inrunner και Outrunner κινητήρων (Πηγή: (Emrik Joner, 2020))

Και τα δύο σχέδια κινητήρων παράγονται γενικά με τρεις φάσεις. Ωστόσο, υπάρχουν και σχεδιασμοί με μία ή δύο φάσεις.

Και τα δύο μοντέλα παρουσιάζουν πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα αναλόγως της εφαρμογής τους. Κατά τη σύγκριση ενός Inrunner και ενός Outrunner BLDC κινητήρα του ίδιου μεγέθους, είναι εύκολο να δούμε ότι η διάμετρος στην οποία εφαρμόζονται οι δυνάμεις είναι διαφορετικές. Αυτό συμβαίνει επειδή οι ηλεκτρομαγνήτες παίρνουν πολύ περισσότερο χώρο από τον δρομέα που μεταφέρει τους μόνιμους μαγνήτες. Εάν οι ηλεκτρομαγνήτες βρίσκονται μέσα, η διάμετρος είναι μεγαλύτερη σε σύγκριση με το αν βρίσκονται στο εξωτερικό. Εκτός από το μέγεθος, οι συνέπειες για τις επιδόσεις του κινητήρα είναι επίσης σημαντικές. Μια μεγαλύτερη διάμετρος σημαίνει περισσότερη ροπή επειδή η δύναμη εφαρμόζεται πέρα από το κέντρο της περιστροφής, ενώ μια μικρότερη διάμετρος θα ήταν καλύτερη υψηλής στροφές. Έτσι, οι Inrunners «τρέχουν» καλύτερα με μεγάλη ταχύτητα, αλλά παράγουν λιγότερη ροπή, ενώ οι Outrunners λειτουργούν καλύτερα με μεγαλύτερες έλικες επειδή μπορούν να παράγουν περισσότερη ροπή, αλλά να περιστρέφονται με βραδύτερη ταχύτητα.

Τόσο και οι δύο τύποι κινητήρων κατασκευάζονται με περιελιγμένες στροφές στο εσωτερικό τους. Εδώ το τυλιγμένο καλώδιο ή αγωγός (έστω μονωμένος αγωγός, πηνιόσυρμα) τυλίγεται γύρω από θήκες των πόλων του στάτη (πυρήνας σιδήρου), το οποίο επιτρέπει στις γραμμές μαγνητικού πεδίου της περιέλιξης για να ρεύσει έξω και να συγκεντρωθεί σε μια καθορισμένη μορφή. Ο στάτης αποτελείται από λεπτές, αμοιβαία αντισταθμισμένους μονωμένες μεταλλικές πλάκες, προκειμένου να διατηρηθούν στο ελάχιστο οι απώλειες του δινορρευμάτων.

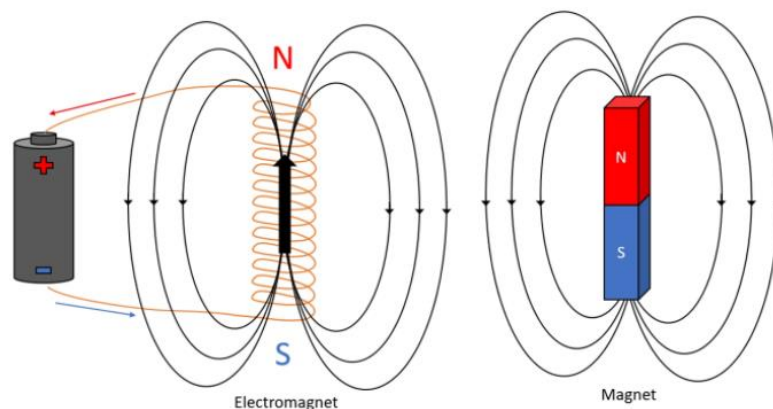
Πίνακας 4: Χαρακτηριστικά Inrunner και Outrunner BLDC κινητήρων

<b>Inrunner</b>	<b>Outrunner</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Μεγαλύτερη απόδοση</li> <li>• Υψηλές στροφές</li> <li>• Μικρή ροπή</li> <li>• Πιο θορυβώδης στη λειτουργία του</li> <li>• Χρειάζεται μειωτήρα</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Λιγότερο αποδοτικοί</li> <li>• Χαμηλές στροφές</li> <li>• Μεγάλη ροπή</li> <li>• Λιγότερο θορυβώδεις στην λειτουργία τους</li> </ul>



### 3.4 Αρχή λειτουργίας των BLDC κινητήρων

Η αρχή λειτουργίας ενός επαγόμενου ηλεκτρομαγνήτη έχει ως εξής: υπάρχει ένα αγώγιμο καλώδιο που περικλείεται γύρω από μια μεταλλική βάση (Εικόνα 20), το οποίο δεν θα λειτουργήσει σαν μαγνήτης, αλλά μόνο όταν ένα ρεύμα ρέει μέσα από το σύρμα, θα το προκαλέσει να συμπεριφέρεται όπως θα έκανε ένας μαγνήτης και αυτό αναφέρεται ως ηλεκτρομαγνήτης. Αν ένα αρνητικό ρεύμα ρέει μέσα από το ίδιο σύρμα, ο μαγνήτης έχει τώρα το αντίθετο αποτέλεσμα, θα προσελκύσει έναν άλλο μαγνήτη αντί να τον απομακρύνει.



Εικόνα 20: Επαγόμενος Ηλεκτρομαγνήτης και Μαγνήτης (Πηγή: (Emrik Joner, 2020))

Οι μόνιμοι μαγνήτες (William D. Callister, David G. Rethwisch (2017)) είναι υλικά που δημιουργούν μόνιμα γύρω τους ένα μαγνητικό πεδίο το οποίο επιδρά πάνω σε μέταλλα που εμπεριέχουν σίδηρο. Για να κατασκευαστούν, αφού διαμορφωθούν μηχανικά ως προς το σχήμα τους, απαιτείται να θερμανθούν σε θερμοκρασία μεγαλύτερη της θερμοκρασίας Curie. Η θερμοκρασία Curie υποδηλώνει την τιμή της θερμοκρασίας πάνω από την οποία το εκάστοτε μαγνητικό υλικό απομαγνητίζεται πλήρως και απαιτεί να μαγνητιστεί εκ νέου. Ωστόσο, καθώς η απώλεια των μαγνητικών ιδιοτήτων αρχίζει να συμβαίνει σε αρκετά χαμηλότερη θερμοκρασία, συχνά δίνονται πιο αυστηρά όρια λειτουργίας των μαγνητών. Σε αυτήν την κατάσταση, τα άτομα του υλικού περιστρέφονται ελεύθερα και μπορούν να μαγνητιστούν αν εισαχθούν σε ένα ισχυρό εξωτερικό μαγνητικό πεδίο. Αφού το υλικό μαγνητιστεί, στην πραγματικότητα μαγνητίζονται όλα τα άτομα του προς μια συγκεκριμένη κατεύθυνση, το υλικό ψύχεται «κλειδώνοντας» ουσιαστικά το μαγνητικό πεδίο στη συγκεκριμένη κατεύθυνση, με αποτέλεσμα ο μαγνητισμός να διατηρηθεί.

Ως μαγνητικό πεδίο ορίζεται ο χώρος μέσα στον οποίο δρουν μαγνητικές δυνάμεις τόσο σε σιδηρούχα μεταλλικά υλικά, όσο και σε κινούμενα ηλεκτρικά φορτία. Ένα μαγνητικό πεδίο μπορεί να δημιουργηθεί είτε από ένα μόνιμο μαγνήτη, είτε από ένα κυκλικό αγωγό (πχ πηνίο) το οποίο διαρρέεται από ηλεκτρικό ρεύμα. Τα μαγνητικά πεδία είναι πάντα δίπολα, έχοντας ένα βόρειο και ένα νότιο μαγνητικό πόλο. Κάθε μαγνητικό πεδίο περιγράφεται από την μαγνητική επαγωγή ( $B$ ) με μονάδες μέτρηση το Tesla (T) και τη μαγνητική πεδιακή ένταση ( $H$ ) με μονάδα μέτρησης τα (A/m).

Η μαθηματική εξίσωση που τα συνδέει είναι η εξής:

$$B = \mu \cdot H \quad (1.6)$$

Ακόμα, κάθε μαγνητικό υλικό χαρακτηρίζεται από την απόλυτη μαγνητική διαπερατότητα ( $\mu$ ), η οποία δίνεται συναρτήσει της μαγνητικής διαπερατότητας του κενού. Ισχύει ότι:

$$\mu = \mu_0 \cdot \mu_r \quad (1.7)$$

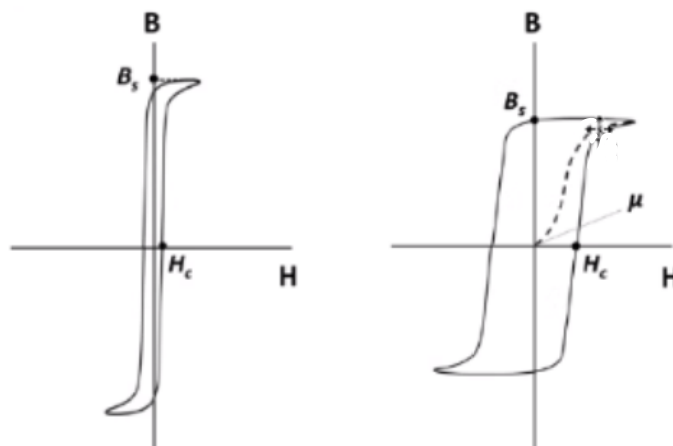
Όπου:

$\mu_0$  = μαγνητική διαπερατότητα του κενού και είναι ίση με  $4\pi \cdot 10^{-7}$  H/m

$\mu_r$  = σχετική μαγνητική διαπερατότητα του υλικού

Η σχετική μαγνητική διαπερατότητα είναι καθαρός αριθμός, χωρίς μονάδες.

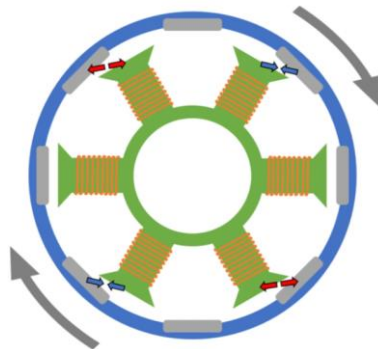
Ο κύριος διαχωρισμός των μαγνητικών υλικών γίνεται με βάση την τιμή του απομαγνητίζοντος πεδίου τους, η οποία εξαρτάται από τον παραμένον μαγνητισμό των υλικών. Έτσι, αν παρατηρήσουμε το βρόγχο υστέρησης διαφόρων μαγνητικών υλικών, διαπιστώνουμε πως μπορούν να διαχωριστούν σε δυο μεγάλες κατηγορίες. Τα υλικά που εμφανίζουν κορεσμό σε χαμηλή τιμή μαγνητικού πεδίου (στενός βρόγχος υστέρησης) ονομάζονται μαλακά και ως χαρακτηριστικό έχουν ότι μαγνητίζονται και απομαγνητίζονται εύκολα. Αντίθετα, τα υλικά που για να φτάσουν σε κορεσμό απαιτούν μεγάλες τιμές μαγνητικού πεδίου (φαρδύς βρόγχος υστέρησης) ονομάζονται σκληρά.



Εικόνα 21: Βρόγχος υστέρησης μαλακού και σκληρού μαγνητικού υλικού (Πηγή: (William D. Callister & David G. Rethwisch, 2017)

Τα μέρη που φαίνονται στον εσωτερικό κύκλο είναι οι ηλεκτρομαγνήτες, ενώ στον εξωτερικό κύκλο έχουμε τους μόνιμους μαγνήτες. Για να ενεργοποιηθεί ο κινητήρας, πρέπει να ενεργοποιηθεί ένας από τους ηλεκτρομαγνήτες, παρέχοντας του ένα ηλεκτρικό ρεύμα στα πηνία του. Αυτό θα κάνει τον δρομέα να αρχίσει να περιστρέφεται καθώς ξεκινάει να αισθάνεται μια απώθηση από τον ομώνυμο ηλεκτρομαγνήτη και προσπαθεί να ευθυγραμμιστεί με έναν αντίθετο μόνιμο μαγνήτη

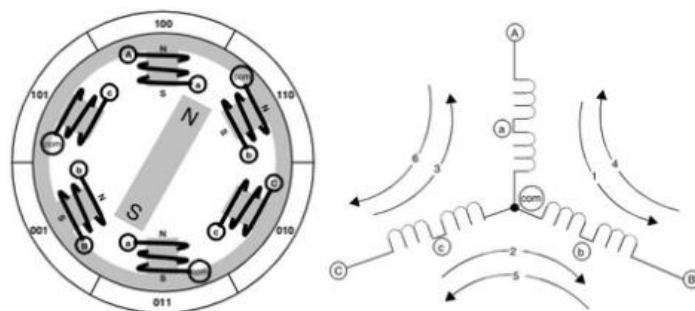
στον στάτη. Αυτό θα τον κάνει να περιστρέφεται μόνο για μικρό χρονικό διάστημα καθώς ο ηλεκτρομαγνήτης και ο αντίθετος μόνιμος μαγνήτης ευθυγραμμίζονται. Το επόμενο βήμα είναι να τροφοδοτήσουν έναν άλλο ηλεκτρομαγνήτη για να μην σταματήσει η περιστροφή, ακολουθούμενος από τον επόμενο ηλεκτρομαγνήτη, και τον επόμενο, και ούτω καθεξής.



Εικόνα 22: Κάτοψη ενός κινητήρα Outrunner (Πηγή: (Emrik Joner, 2020))

Κατά αυτόν τον τρόπο δημιουργείται η ακολουθία της μεταγωγής, που έχει μια από τις περιελίξεις ενεργοποιημένη με θετικό δυναμικό (το ρεύμα που εισέρχεται στο τύλιγμα), η δεύτερη περιέλιξη έχει αρνητικό δυναμικό (το ρεύμα που εξέρχεται από το τύλιγμα) και τέλος η τρίτη περιέλιξη που είναι σε ανενεργή κατάσταση. Η αλληλεπίδραση μεταξύ του μαγνητικού πεδίου που δημιουργείται από τα πηνία στάτη και των μόνιμων μαγνητών, δημιουργεί τελικά την απαιτούμενη ροπή. Όταν τα δύο αυτά πεδία έχουν διαφορά  $90^\circ$  μεταξύ τους, μπορούν να εμφανίσουν την μέγιστη ροπή. Επίσης, για να μπορέσει να διατηρηθεί ο κινητήρας σε λειτουργία, πρέπει η θέση του μαγνητικού πεδίου που παράγεται από τις περιελίξεις, να μετακινηθεί όπως ο δρομέας που κινείται για να καλύψει τη διαφορά με το πεδίο του στάτη.

Η κατασκευή του κινητήρα με σύνδεση αστέρα αποτελείται από τρία ηλεκτρομαγνητικά κυκλώματα που συνδέονται σε ένα κοινό σημείο που αναφέρεται επίσης ως «ουδέτερος». Κάθε ηλεκτρομαγνητικό κύκλωμα χωρίζεται στο κέντρο επιτρέποντας έτσι στον δρομέα μόνιμου μαγνήτη να μετακινηθεί στην μέση του επαγόμενου μαγνητικού πεδίου. Το πιο σημαντικό για να επιτευχθεί ηλεκτρονική μεταγωγή είναι να ανιχνευτεί η θέση του δρομέα και στη συνέχεια να γίνει ενεργοποίηση των σωστών φάσεων της περιέλιξης για να συνεχίσει ο δρομέας να περιστρέφεται.



Εικόνα 23: Απλοποιημένο διάγραμμα BLDC κινητήρα (Πηγή: (I. Janpan, R. Chaisricharoen, & P. Boonyanant, 2012))

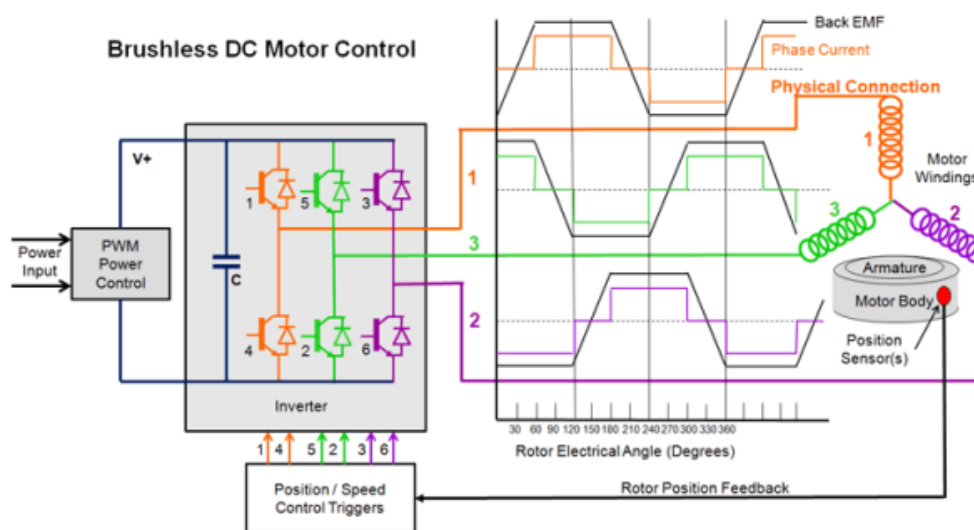
### 3.5 Έλεγχος σύγχρονου κινητήρα μόνιμων μαγνητών

Ανεξαρτήτως αν ο κινητήρας κάνει τραπεζοειδή ή ημιτονοειδή μεταγωγή, οι σύγχρονοι κινητήρες με μόνιμους μαγνήτες μπορούν να οδηγηθούν από τριφασικό αντιστροφέα τάσης. Ο εφαρμοζόμενος έλεγχος διαμορφώνεται αναλόγως τον εκάστοτε τύπο του κινητήρα. Ένας τυπικός τρόπος ρύθμισης της τάσης είναι με διαμόρφωση πλάτους παλμού (PWM). Σε αυτή την προσέγγιση, μεταβάλλεται η τάση επιμηκύνοντας ή μειώνοντας τον χρόνο παλμού ON (αναφέρεται επίσης ως "κύκλος λειτουργίας ή duty cycle": ο χρόνος ON εκφρασμένος ως λόγος του διαστήματος μεταγωγής ON + OFF).

$$\text{Duty cycle, } D = \frac{t_{\text{on}}}{t_{\text{on}} + t_{\text{off}}} \quad (1.8)$$

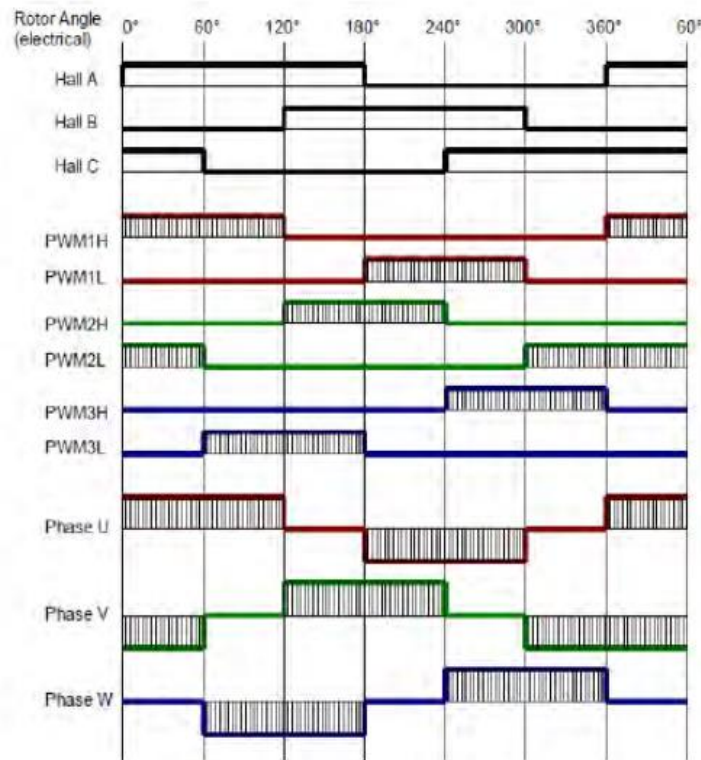
Η αύξηση του κύκλου λειτουργίας έχει το ίδιο αποτέλεσμα με την αύξηση της τάσης ενώ η μείωση του κύκλου λειτουργίας έχει το ίδιο αποτέλεσμα με τη μείωση του ρεύματος. Το duty cycle μπορεί να οριστεί ως εξής: Ο έλεγχος αγωγιμότητας 120° απαιτεί μόνο διφασικό έλεγχο τάσης και εφαρμόζεται σχετικά εύκολα, ενώ ο ημιτονοειδής έλεγχος χρησιμοποιεί τριφασικό έλεγχο τάσης και είναι πολύ περίπλοκος. Κατά συνέπεια, ένα κατάλληλο κύκλωμα μετατροπέα είναι απαραίτητο για την οδήγηση BLDC κινητήρων.

Για την οδήγηση του σύγχρονου κινητήρα αξιοποιούνται τα σήματα των τριών αισθητήρων Hall, οι οποίοι είναι τοποθετημένοι με απόσταση 120° μεταξύ τους, προκειμένου να προσδιοριστεί η θέση του δρομέα και κατ' επέκταση οι παλμοί που θα ελέγξουν τα έξι διακοπτικά στοιχεία του αντιστροφέα.



Εικόνα 24: Κύκλωμα οδήγησης BLDC κινητήρα (Πηγή: (Παπασταύρου Χρήστου Χρήστου , Πάτρα, Μάρτιος 2018))

Η αρχή λειτουργίας του είναι η εξής: κάθε  $120^\circ$  ενεργοποιείται ένας αισθητήρας Hall, ο οποίος με την σειρά του παραμένει ενεργοποιημένος για  $180^\circ$ . Στην εικόνα 14, φαίνονται τα έξι διαστήματα, όπου το καθένα διάστημα χαρακτηρίζεται από ένα μοναδικό συνδυασμό των σημάτων των αισθητήρων Hall. Ταυτόχρονα, απεικονίζεται το διάστημα αγωγής των ημιαγωγικών διακοπτικών στοιχείων ως συνάρτηση των σημάτων από τους αισθητήρες.



Εικόνα 25: Παλμοί ελέγχου συναρτήσεων των σημάτων Hall και φασικές τάσεις (Πηγή: (Παπασταύρου Χρήστου Χρήστου , Πάτρα, Μάρτιος 2018))

Όπως φαίνεται στην εικόνα τα ημιαγωγικά στοιχεία ελέγχονται από τα σήματα  $PWMxH$  και  $PWMxL$  (όπου  $x=1,2,3$ ) (Παπασταύρου Χρήστου Χρήστου , Πάτρα, Μάρτιος 2018), τα οποία σήματα παράγονται μέσω της τεχνικής διαμόρφωσης του εύρους των παλμών. Έτσι, δίνεται η δυνατότητα της ρύθμισης ενεργού τιμής της τάσης εξόδου του αντιστροφέα και τελικά της ταχύτητας του BLDC κινητήρα. Όπως ήταν αναμενόμενο, υπάρχει το φαινόμενο του τεμαχισμού (chopping) των σημάτων ελέγχου και ανάλογα με τον λόγο κατάτμησης που προκύπτει από τον εν λόγω τεμαχισμό, προκύπτει και η ταχύτητα περιστροφής του δρομέα. Τέλος, αρκεί το ένα από τα δύο ημιαγωγικά στοιχεία να ελέγχονται με αυτή τη μέθοδο, καθώς κάθε χρονική στιγμή άγουν δύο στοιχεία (ένα πάνω κι ένα κάτω, σε διαφορετικούς κλάδους). Επομένως, το δεύτερο στοιχείο του κλάδου μπορεί να ελέγχεται μέσω τετραγωνικών παλμών κι έτσι να μειώνονται οι διακοπτικές απώλειες. Συνηθίζεται τα πάνω στοιχεία των κλάδων να ελέγχονται μέσω τετραγωνικών παλμών, ενώ τα κάτω μέσω της τεχνικής διαμόρφωσης του εύρους των παλμών.

### 3.5.1 Έλεγχος με τετραγωνικούς παλμούς

Η πιο απλή μορφή ελέγχου είναι εκείνη των τετραγωνικών παλμών (TOSHIBA, 2018), κατά την οποία κάθε ημιαγωγικό στοιχείο άγει για  $180^\circ$  και για τις υπόλοιπες  $180^\circ$  παραμένει σβηστό. Κάθε χρονική στιγμή άγουν ταυτόχρονα τρία ημιαγωγικά διακοπτικά στοιχεία και οι τρεις φάσεις συνδέονται εναλλάξ στον αρνητικό ή το θετικό πόλο της συνεχούς τροφοδοσίας για διάρκεια μισής περιόδου. Η τριφασική τάση εξόδου επιτυγχάνεται παλμοδοτώντας με διαφορά φάσης  $120^\circ$  τα στοιχεία του κάθε κλάδου.

Το μεγαλύτερο πλεονέκτημα της εν λόγω παλμοδότησης είναι ότι η τρίτη αρμονική, καθώς και τα περιττά πολλαπλάσια αυτής, δεν εμφανίζονται στις πολικές τάσεις. Αυτό συμβαίνει επειδή η πολική τάση προκύπτει ως η διαφορά μεταξύ δύο φασικών τάσεων, με συνέπεια η τρίτη αρμονική της κάθε τάσης να αλληλοαναιρείται με την τρίτη αρμονική της άλλης φασικής τάσης. Αυτό συμβαίνει πάντα, αρκεί ο αστέρας να μην είναι γειωμένος ή το φορτίο να είναι συνδεδεμένο σε τρίγωνο. Ωστόσο, η συγκεκριμένη παλμοδότηση περιορίζεται στον έλεγχο της συχνότητας των κυματομορφών και όχι της ενεργού τιμής τους.

### 3.5.2 Έλεγχος με διαμόρφωση του εύρους των παλμών

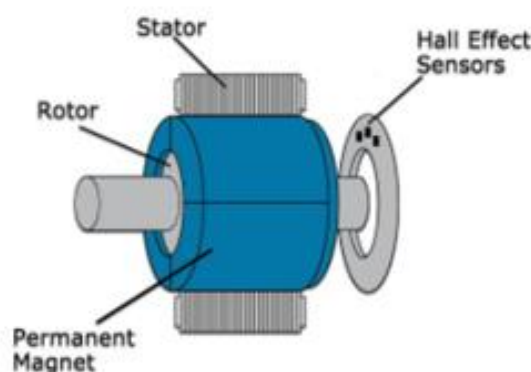
Η συγκεκριμένη περίπτωση είναι πιο σύνθετη αλλά παράλληλα είναι και η πιο διαδεδομένη μορφή ελέγχου που βασίζεται στη ρύθμιση της χρονικής διάρκειας κατά την οποία τα διακοπτικά στοιχεία άγουν και παραμένουν σβηστά. Με αυτόν τον τρόπο παρέχεται η δυνατότητα ρύθμισης της ενεργού τιμής της βασικής αρμονικής της τάσης εξόδου παράλληλα προς τη ρύθμιση της συχνότητας της. Το έργο της δημιουργίας των σημάτων που ελέγχουν τα ημιαγωγικά στοιχεία αναλαμβάνει ο μικροελεγκτής του αντιστροφέα και σχηματίζει μια γεννήτρια PWM. Υπάρχουν διάφορες μέθοδοι για τη δημιουργία PWM σημάτων, εκ των οποίων οι πιο συχνά χρησιμοποιούμενες είναι η δημιουργία PWM μέσω τριγώνου και ράμπας.

Ωστόσο υπάρχει και μια υποπερίπτωση στην οποία οι κυματομορφές στην έξοδο του αντιστροφέα προκειμένου να προσεγγίζουν κατά το δυνατόν περισσότερο το ημίτονο, χρησιμοποιείται η τεχνική SPWM. Στην ημιτονοειδή διαμόρφωση (Sinusoidal Pulse Width Modulation, SPWM), οι τάσεις στην έξοδο είναι μία σειρά παλμών, κυμαινόμενης διάρκειας (πλάτους) και συχνότητας, την οποία ορίζουμε εμείς. Μέσω της τεχνικής αυτής, ένα ημίτονο συγκρίνεται μ' ένα τριγωνικό σήμα και το αποτέλεσμα της σύγκρισης αυτής είναι 1 όταν το ημίτονο είναι μεγαλύτερο του τριγώνου και 0 στην αντίθετη περίπτωση. Αλλάζοντας το πηλίκο του πλάτους του τριγώνου προς το πλάτος του ημιτόνου (συντελεστής διαμόρφωσης πλάτους), μεταβάλλεται το εύρος των παλμών του σήματος εξόδου. Με αυτή την διαδικασία παράγεται ένα σήμα ελέγχου το οποίο τροφοδοτείται στο πάνω ημιαγωγικό στοιχείο ενός κλάδου, ενώ το συμπληρωματικό του σήματος τροφοδοτείται στο κάτω ημιαγωγικό στοιχείο του κλάδου.



### 3.6 Πλεονεκτήματα – Μειονεκτήματα των BLDC κινητήρων

Όλο και περισσότερο τα τελευταία χρόνια οι BLDC κινητήρες έχουν ολοένα και παραπάνω εφαρμογές στην βιομηχανία (Advantages and Disadvantages, 2020). Σήμερα, οι DC κινητήρες χωρίς ψήκτρες μπορούν να εφαρμοστούν σε συσκευές προηγμένης τεχνολογίας όπως σκληρούς δίσκους υπολογιστών, ανεμιστήρες, κλιματιστικά μέχρι και σε ηλεκτρικά οχήματα. Προτιμώνται ιδιαίτερα για συσκευές με μπαταρία, όπως ασύρματα εργαλεία, λόγω της αυξημένης απόδοσής τους, με αποτέλεσμα μεγαλύτερους κύκλους μπαταρίας. Η επιλογή αυτού του τύπου κινητήρα οφείλεται και στο γεγονός ότι προσφέρουν υψηλότερη απόδοση, μεγαλύτερη διάρκεια ζωής και παράλληλα έχουν και χαμηλότερη συντήρηση, κάνοντας τους την ίδια στιγμή καλύτερη επιλογή τόσο λειτουργικά όσο και οικονομικά σε βάθος χρόνου.



Εικόνα 26: Brushless DC κινητήρας (Πηγή: (Στάμου Κωνσταντίνος, Αθήνα, Σεπτέμβριος 2016))

Επιπροσθέτως, σε αντίθεση με τους κλασικούς κινητήρες συνεχούς ρεύματος, οι ψήκτρες δεν χρησιμοποιούνται για την αντιστροφή της κατεύθυνσης του ρεύματος για πλήρη περιστροφή 360°, αλλά το ρεύμα ελέγχεται μέσω κάποιου ηλεκτρονικού ελεγκτή. Αυτό, όχι μόνο παρέχει μια λύση για το ζήτημα της συχνής συντήρησης λόγω της βλάβης των ψηκτρών που απαιτούν αντικατάσταση, αλλά παρέχει επίσης έλεγχο ταχύτητας και ακρίβεια υψηλής ανάλυσης. Στις περιπτώσεις που χρησιμοποιούνται κλασικοί DC κινητήρες οι οποίοι χρησιμοποιούν ψήκτρες, παρατηρείται το εξής σημαντικό μειονέκτημα: από τις ψήκτρες συσσωρεύονται κατάλοιπα μέσα στον κινητήρα τα οποία μπορούν να επηρεάσουν τη λειτουργία του, για παράδειγμα μπαίνοντας μέσα στο ρουλεμάν ή δημιουργώντας θέμα με τις αγωγίμο δρόμο που δεν συναντάται καθόλου στους κινητήρες συνεχούς ρεύματος που δεν έχουν ψήκτρες. Ακόμα ένα θέμα με τις ψήκτρες είναι η δημιουργία σπινθηρισμών που μπορεί να προκαλέσει πρόβλημα σε εύφλεκτα περιβάλλοντα ή να δημιουργείται ηλεκτρομαγνητικός θόρυβος κατά την λειτουργίας τους. Τέλος, εμφανίζεται πτώση τάσης, άρα και μειωμένη απόδοση του κινητήρα. Είναι πολύ σημαντικό σε τέτοιους κινητήρες να γίνει μια κατάλληλη επιλογή του τύπου της ψήκτρας που πρόκειται να χρησιμοποιηθεί, αφού η αξιοπιστία τους επηρεάζεται από τις συνθήκες του περιβάλλοντος όπως είναι η θερμοκρασία και η υγρασία.

Όλα αυτά δεν εμφανίζονται στους κινητήρες συνεχούς ρεύματος χωρίς ψήκτρες και μάλιστα πάνω σε αυτές τις αδυναμίες, οι BLDC κινητήρες καταφέρνουν να προσδώσουν διαφορετικά στοιχεία, που είναι ανώτερα και μπορούν να διευκολύνουν πολλές εφαρμογές. Ωστόσο, για την σωστή επιλογή τους για τις εκάστοτε εφαρμογές που πρόκειται να χρησιμοποιηθούν, είναι σημαντική η επίγνωση τόσο των πλεονεκτημάτων που εμφανίζουν, όσο και των μειονεκτημάτων τους. Παρακάτω εμφανίζονται αναλυτικά αυτές οι δύο κατηγορίες.

Αρχικά θα παρουσιαστούν τα πλεονεκτήματα που είναι και το πιο σημαντικό κομμάτι αυτής της υποενότητας, αποδεικνύοντας τα στοιχεία αυτά που τους κάνουν να είναι καλύτερη και πιο αποδοτική επιλογή. Αρχικά, η αποδοτικότητα των κινητήρων αυτών είναι ένα μεγάλο πλεονέκτημα καθώς μπορούν να ελέγχουν συνεχώς τη μέγιστη δύναμη περιστροφής (ροπή). Ωστόσο, υπάρχει κάποια απώλεια ενέργειας λόγω τριβής αέρα, καθώς ο δρομέας περιστρέφεται γρήγορα, αλλά αυτό είναι ελάχιστο. Αξίζει να σημειωθεί ότι έχουν απόδοση έως 90%. Παρέχουν επίσης χαμηλή κατανάλωση ισχύος και μεγάλη διάρκεια ζωής της μπαταρίας στην περίπτωση που ο κινητήρας λειτουργεί χρησιμοποιώντας μερικές μπαταρίες. Η δυνατότητα ελέγχου είναι ένας ακόμα πολύ σημαντικός παράγοντας.

Οι BLDC κινητήρες μπορούν να ελεγχθούν, χρησιμοποιώντας μηχανισμούς ανάδρασης, για την παροχή ακριβώς της επιθυμητής ροπής και ταχύτητας περιστροφής, αυξάνοντας κατά αυτόν τον τρόπο την αξιοπιστία τους. Με τον έλεγχο ακρίβειας κατορθώνεται η μείωση της κατανάλωσης ενέργειας και της παραγωγής θερμότητας. Οι κινητήρες αυτοί δεν διαθέτουν ηλεκτρομαγνήτη στο κέντρο τους μειώνοντας το ζήτημα της θέρμανσης. Οι BLDC κινητήρες προσφέρουν επίσης υψηλή αντοχή, χαμηλή παραγωγή ηλεκτρικού θορύβου και το πιο σημαντικό είναι πιο οικολογικοί, καθώς παράγουν μηδαμινές ποσότητες διοξειδίου του άνθρακα (CO<sub>2</sub>). Η ταχεία περιστροφή του δρομέα εξακολουθεί να δημιουργεί έναν χαρακτηριστικό ήχο «στροβιλισμού» όμως είναι μια αισθητά μεγάλη βελτίωση σε σύγκριση με άλλους κινητήρες και είναι ο θόρυβος αυτός μπορεί να θεωρηθεί ελάχιστος. Καθώς δεν έχουμε ψήκτρες, δεν θα έχουμε ούτε τον συλλέκτη με αποτέλεσμα αυτό να οδηγεί σε μικρότερο όγκο.

Οι κινητήρες αυτοί έχουν μικρότερο αριθμό κινούμενων μερών, δίνοντας τους το πλεονέκτημα για πιο σύνθετους σχεδιασμούς. Επίσης, επειδή έχουμε μειωμένο μέγεθος, έχουμε και μειωμένη αναλογία μήκους προς διάμετρο, οπότε βελτιώνεται η απόκριση του κινητήρα σε επιταχύνσεις και επιβραδύνσεις. Χωρίς την χρήση ψηκτρών έχουμε απουσία των τριβών που οφείλονται σε αυτές καθώς και την μείωση της αδράνειας του δρομέα λόγω της μείωσης του βάρους του κινητήρα, αφού πλέον δεν φέρει τον συλλέκτη. Έχουν χαμηλότερο ρεύμα χωρίς φορτίο, καθιστώντας τους κατάλληλους για λειτουργία σε χαμηλό ή καθόλου φορτίο. Τέλος, έχουν μικρές απαιτήσεις σε συντήρηση αφού ουσιαστικά δεν υπάρχει επαφή μεταξύ του δρομέα και του στάτη ενός κινητήρα χωρίς ψήκτρες, έτσι η φθορά μειώνεται σημαντικά.



Όπως όλοι οι κινητήρες έτσι και αυτοί, έχουν και τις δικές τους αδυναμίες. Αρχικά, ένας σημαντικός λόγος που οι κινητήρες αυτοί δεν έχουν αγκαλιαστεί τόσο ευρέως όσο θα περίμενε κάποιος, είναι το γεγονός ότι είναι ακριβοί. Μπορεί να έχουν μικρές απαιτήσεις ως προς την συντήρηση και σε βάθος χρόνου να κάνουν κάποια καλή απόσβεση χρημάτων, όμως το αρχικό κόστος είναι υψηλό. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι οι κινητήρες χωρίς ψήκτρες διαθέτουν ένα πιο εξελιγμένο σύνολο ηλεκτρομαγνητών. Οι περισσότεροι ηλεκτρομαγνήτες σημαίνουν παράλληλα και πιο αγωγίμο υλικό πηνίου, που αυτά τα εξαρτήματα είναι και τα πιο ακριβά σε έναν κινητήρα. Επίσης και ο ηλεκτρονικός ελεγκτής αυξάνει το κόστος της συνολικής ρύθμισης.

Όταν ο κινητήρας συνεχούς ρεύματος χωρίς ψήκτρες λειτουργεί σε χαμηλή ταχύτητα, εμφανίζονται ελαφρές δονήσεις κατά της περιστροφή χαμηλής ταχύτητας. Οι δονήσεις αυτές όμως μειώνονται με υψηλή ταχύτητα. Ένα άλλο μειονέκτημα είναι ότι λόγω της έμφυτης φυσικής συχνότητας δόνησης του DC κινητήρα χωρίς ψήκτρες, μερικές φορές αυτή η φυσική συχνότητα μπορεί να ταιριάζει ή να πλησιάσει τη συχνότητα δόνησης του σώματος ή των πλαστικών τμημάτων με αποτέλεσμα την εμφάνιση φαινομένου συντονισμού. Παρόλα αυτά, αυτός ο συντονισμός μπορεί να ελαχιστοποιηθεί με ρύθμιση και είναι σύνηθες να παρατηρείται φαινόμενο συντονισμού σε πολλές συσκευές με DC κινητήρα χωρίς ψήκτρες. Επίσης, υπάρχει αδυναμία άμεσου ελέγχου πεδίου διέγερσης δημιουργώντας μια πιο σύνθετη καλωδίωση για την αντιμετώπιση του. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η ρύθμιση σε κάθε ηλεκτρικό πηνίο γίνεται μέσω ενός πηνίου ηλεκτρονικού ελεγκτή ταχύτητας. Αυτό ελέγχει τη ροή του ρεύματος σε κάθε ηλεκτρομαγνήτη. Έτσι οδηγείται σε ένα πιο αυξημένο κόστος λόγω της ύπαρξης αισθητήρων αλλά και ειδικού ηλεκτρονικού συστήματος ελέγχου.

Εν κατακλείδι, οι κινητήρες αυτοί έχουν πολλά πλεονεκτήματα, όπως χαμηλό κόστος συντήρησης και λιγότερες απαιτήσεις συντήρηση. Είναι επίσης συμπαγείς σε μέγεθος, παρέχουν υψηλή ροπή με καλύτερο έλεγχο ταχύτητας και απόδοσης. Από την άλλη πλευρά όμως, τα μειονεκτήματα δεν είναι πολλά αλλά είναι αρκετά σημαντικά ώστε να οδηγήσουν στην μη επιλογή τους. Το πιο βασικό από όλα είναι το αρχικό κόστος και στη συνέχεια κάποια άλλα ζητήματα όπως ο συντονισμός και η σύνθετη ρύθμιση καλωδίωσης λόγω της επιπλοκής του ηλεκτρονικού ελέγχου.

Πίνακας 5: Πλεονεκτήματα - Μειονεκτήματα BLDC κινητήρων

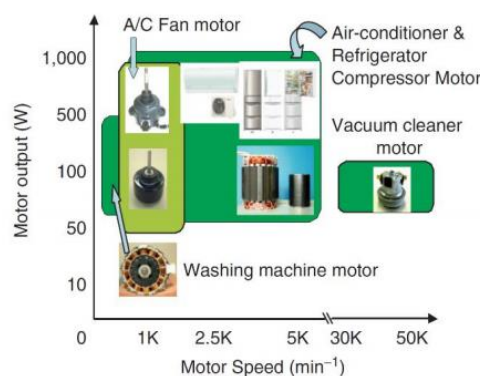
Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Αποδοτικότητα</li> <li>✓ Χαμηλή κατανάλωση ισχύος</li> <li>✓ Δυνατότητα ελέγχου</li> <li>✓ Μειωμένη κατανάλωση ενέργειας</li> <li>✓ Μειωμένη παραγωγή θερμότητας</li> <li>✓ Χαμηλή παραγωγή ηλεκτρικού θορύβου</li> <li>✓ Υψηλή αντοχή</li> <li>✓ Μικρότερος όγκος</li> <li>✓ Μειωμένη αδράνεια δρομέα</li> <li>✓ Μικρές απαιτήσεις σε συντήρηση</li> <li>✓ Μηδαμινές ποσότητες διοξειδίου του άνθρακα (<math>CO_2</math>)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>☒ Αρχικό υψηλό κόστος</li> <li>☒ Εμφάνιση δονήσεων σε χαμηλές ταχύτητες</li> <li>☒ Φαινόμενο συντονισμού</li> <li>☒ Αδυναμία άμεσου ελέγχου πεδίου διέγερσης</li> <li>☒ Σύνθετη καλωδίωση</li> </ul>

### 3.7 Εφαρμογές των BLDC κινητήρων

Στην προηγούμενη ενότητα αναφέρθηκαν αναλυτικά τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα που εμφανίζουν οι κινητήρες αυτοί. Έχοντας πλέον μια πολύ καλή εικόνα τους, σε αυτήν την ενότητα θα παρουσιαστούν οι εφαρμογές των σύγχρονων αυτών κινητήρων. Οι εφαρμογές είναι πάρα πολλές. Από απλές ηλεκτρονικές συσκευές που συναντάμε στις καθημερινή μας ζωή έως ηλεκτροκίνητα ποδήλατα, ηλεκτρικά σκούτερ, τρένα ή ηλεκτρικά οχήματα και σε ακόμα μεγαλύτερη κλίμακα όπως είναι τα πλοία και τα υποβρύχια. Παρακάτω, θα παρουσιαστούν μερικές εφαρμογές των BLDC κινητήρων, δείχνοντας πόσο πολύ έχουν αξιοποιηθεί από την βιομηχανία, λόγω των σημαντικών πλεονεκτημάτων που παρουσιάζουν.

### 3.7.1 Οικιακές Εφαρμογές

Αρχικά, λόγω της αποτελεσματικότητας της μακροζωίας τους, χρησιμοποιούνται ευρέως σε συσκευές που λειτουργούν συνεχώς (Shirania, Aghajani, Shabani, & Jalil, 2014). Πολλές ηλεκτρονικές συσκευές ευρείας κατανάλωσης όπως πλυντήρια, κλιματιστικά και ανεμιστήρες λειτουργούν με την βοήθεια αυτών των κινητήρων, όπου η υψηλή απόδοση συνέβαλε σε σημαντική μείωση της κατανάλωσης ενέργειας. Οι κινητήρες BLDC χρησιμοποιούνται επίσης για την περιστροφή σκληρών δίσκων, όπου η ανθεκτικότητά τους διατηρεί σε λειτουργία αξιόπιστα τις μονάδες αυτές μακροπρόθεσμα, ενώ η απόδοση ισχύος τους συμβάλλει στη μείωση της καταναλισκόμενης ενέργειας. Αξίζει να σημειωθεί ότι με την ανάπτυξη της τεχνολογίας και των ηλεκτρονικών συσκευών, οι BLDC κινητήρες, βρίσκουν πολύ πιο εύκολα εφαρμογές με όλα τα πλεονεκτήματα που εμφανίζουν και παρότι το αρχικό υψηλό κόστος τους, είναι ένας πλέον αρκετά διαδεδομένος τύπος κινητήρα.



Εικόνα 27: Χαρακτηριστική καμπύλη οικιακών εφαρμογών (Πηγή: (Shirania, Aghajani, Shabani, & Jalil, 2014))

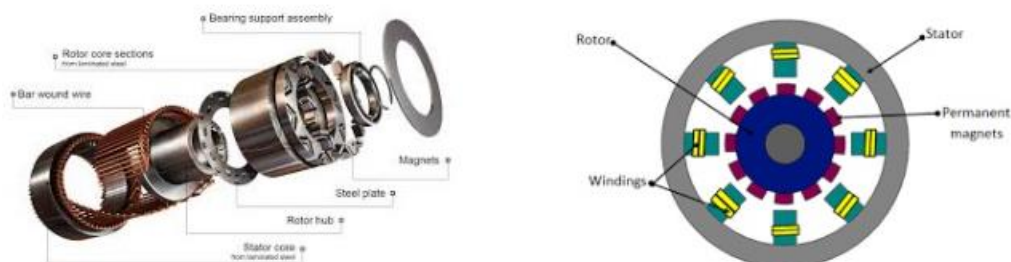
### 3.7.2 Ιατρικές Εφαρμογές

Οι DC κινητήρες χωρίς ψήκτρες (BLDC) χρησιμοποιούνται ευρέως σε ιατρικές συσκευές λόγω της υψηλής αξιοπιστίας, της υψηλής απόδοσης, της χαμηλής συντήρησης και πολλών άλλων πλεονεκτημάτων (Irvine Sloan, 2009). Μία από τις πιο δημοφιλείς εφαρμογές είναι η μηχανή πίεσης των αεραγωγών ή πιο γνωστή ως Positive Airway Pressure (PAP). Για άτομα που πάσχουν από προβλήματα ύπνου, η πιο συνηθισμένη θεραπεία είναι η χρήση συσκευής συνεχούς θετικής πίεσης των αεραγωγών (CPAP). Οι περισσότερες συσκευές CPAP χρησιμοποιούν έναν κινητήρα BLDC για την κίνηση του ανεμιστήρα. Σε αυτήν την εφαρμογή, ο ανεμιστήρας θα αυξήσει ή θα μειώσει την πίεση των αεραγωγών του ασθενούς συναρτήσει του αναπνευστικού του τρόπου. Ανοίγει τον αεραγωγό του ασθενούς κατά τη διάρκεια του ύπνου μέσω μιας ροής πεπιεσμένου αέρα στο λαιμό. Οι μονάδες BLDC Sensorless είναι ιδανικές στον εξοπλισμό επειδή ο κινητήρας δεν απαιτείται ποτέ να λειτουργεί κάτω από την ελάχιστη ταχύτητα. Επίσης, επειδή ο κινητήρας λειτουργεί σχετικά αθόρυβα, το καθιστά κατάλληλο για νοσοκομειακό περιβάλλον. Επιπλέον, δεν υπάρχει κίνδυνος ξαφνικής αλλαγής φορτίου.

Ένα ακόμα χαρακτηριστικό παράδειγμα ιατρικών εφαρμογών είναι οι ιατρικοί αναλυτές (medical analyzers). Οι ιατρικοί αναλυτές είναι πολυλειτουργικές μηχανές που ελέγχουν τα ανθρώπινα σωματικά υγρά όπως το αίμα και τα ούρα. Τα δείγματα υγρών εντός των αναλυτών μετακινούνται από σταθμό σε σταθμό για διάφορες δοκιμές. Γενικά, οι ιατρικοί αναλυτές είναι εντελώς κλειστοί και αυτό έχει ως αποτέλεσμα η θερμοκρασία εντός αυτών να αυξάνεται πολύ πάνω από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος κατά τις περιόδους λειτουργίας αιχμής. Ένας κινητήρας BLDC έχει έναν τυπικό αριθμό έξι πόλων. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι οι βηματοδότες, οι οποίοι σπάνια υπερβαίνουν τις 1.000 rpm, λόγω του υψηλού αριθμού πόλων. Ωστόσο, οι κινητήρες BLDC μπορούν εύκολα να φτάσουν σε ταχύτητες 5.000 rpm ή και περισσότερες. Τα μηχανήματα με υψηλή απόδοση χρειάζονται κινητήρες που περιστρέφονται με ταχύτητες πάνω από την ικανότητα των βηματικών κινητήρων. Οι κινητήρες BLDC καλύπτουν αυτήν την ανάγκη για medical analyzers, επειδή συνδυάζουν λειτουργία υψηλής ταχύτητας, υψηλή απόδοση μεταφοράς θερμότητας και μεγάλη διάρκεια ζωής. Επιπλέον, η υπάρχουσα τάση για συμπίεση όλο και περισσότερων λειτουργιών εξοπλισμού με μικρότερο όγκο, προωθεί τη χρήση μικρότερων κινητήρων ικανών να διαχειριστούν αποτελεσματικά τη θερμότητα σε μικρούς χώρους. Οι κινητήρες BLDC μπορούν να ικανοποιήσουν αυτές τις απαιτήσεις.

### 3.7.3 Εφαρμογές Οχημάτων

Μια άλλη ευρέως διαδεδομένη εφαρμογή των κινητήρων DC χωρίς ψήκτρες είναι τα ηλεκτρικά και τα υβριδικά οχήματα (Shirania, Aghajani, Shabani, & Jalil, 2014). Πολλά οχήματα ήδη χρησιμοποιούν κινητήρες BLDC για τα παρμπρίζ, τους υαλοκαθαριστήρες, τις συσκευές αναπαραγωγής CD και τα ηλεκτρικά παράθυρα. Οι κατασκευαστές ηλεκτρικών αυτοκινήτων προτιμούν συχνά κινητήρες DC χωρίς ψήκτρες έναντι άλλων εναλλακτικών επειδή η απόδοση είναι υψηλότερη, η ψύξη του δρομέα είναι απλούστερη και ανταποκρίνονται πιο γρήγορα. Οι μαγνητικοί δρομείς μικρής διαμέτρου και υψηλής απόδοσης, μειώνουν την αδράνεια του σπλισμού και επιτρέπουν υψηλά ποσοστά επιτάχυνσης και μείωση των περιστροφικών απωλειών. Αυτή η βέλτιστη απόκριση του κινητήρα επιτρέπει επίσης πιο σταθερές ταχύτητες, στιγμιαία ρύθμιση ταχύτητας και πιο αθόρυβη κίνηση κατά την οδήγηση.



Εικόνα 28: BLDC ηλεκτρικός κινητήρας 85kW (Πηγή: (Shirania, Aghajani, Shabani, & Jalil, 2014))

Αξίζει να αναφερθεί ότι υπάρχουν και άλλες εφαρμογές στην περίπτωση της αυτοκινητοβιομηχανίας όπως είναι τα συστήματα ABS (που αφορούν τα φρένα) αλλά και στην ηλεκτρική υποβοήθηση του τιμονιού. Τέλος, στην κατηγορία των οχημάτων ανήκουν και τα ηλεκτρικά ποδήλατα, τα οποία χρησιμοποιούν σχεδόν αποκλειστικά αυτού του τύπου κινητήρες.

### **3.7.4 Εφαρμογές Πλοίων**

Οι μεταφορές παράγουν περίπου το 20% της συνολικής ποσότητας καυσαερίων (Shirania, Aghajani, Shabani, & Jalil, 2014). Η ανάγκη για μια νέα και εξυπνότερη προσέγγιση προώθησης γίνεται όλο και πιο επιτακτική καθώς υπάρχουν πολλές πιέσεις από τους περιβαλλοντολογικούς κανονισμούς που γίνονται δικαίως όλο και πιο αυστηροί. Χρησιμοποιώντας DC κινητήρες χωρίς ψήκτρες και γεννήτριες ως βασικά στοιχεία επιτρέπει στους πλοιοκτήτες να έχουν πλεονέκτημα ενός πιο ευέλικτου, αποτελεσματικού και πιο ελαφρού συστήματος προώθησης. Η τεχνολογία επιτρέπει στα πλοία να μειώσουν τα δικά τους λειτουργικά κόστη, βελτιστοποιώντας τα καύσιμα κατανάλωση μέσω ανώτερης απόδοσης, αξιοπιστίας και ευελιξία σχεδιασμού. Σημαντικό να αναφερθεί είναι ότι εφαρμογές των κινητήρων DC χωρίς ψήκτρες βρίσκουν και τα υποβρύχια.

### **3.7.5 Ρομποτικές Εφαρμογές**

Σε αυτού του είδους εφαρμογές επιτρέπει στους κινητήρες να χειρίζονται περισσότερο ρεύμα και να περιστρέφονται πιο γρήγορα, με αποτέλεσμα να υπάρχει μεγαλύτερη συνολική ταχύτητα. Ο μειωμένος θόρυβος παίζει καθοριστικό ρόλο στην επιλογή των κινητήρων αυτών. Επίσης, ο μειωμένος κίνδυνος σπινθηρισμών σε συνδυασμό με την ταχύτητα τους και στα πρότυπα της σημερινής εποχής του αυτοματισμού, βοηθάει τους επιστήμονες να δημιουργήσουν καλύτερα μηχανήματα για το μέλλον. Οι BLDC χρησιμοποιούνται σήμερα για προσθετικά άκρα, ρομπότ σέρβις και ακόμη και Battle Bots.

### **3.7.6 Αεροδιαστημικές Εφαρμογές**

Οι BLDC μπορούν να επιβιώσουν σε ακραίες περιβαλλοντικές συνθήκες και να ανταποκριθούν καλύτερα σε κρίσιμες απαιτήσεις απόδοσης. Χάρη στη λειτουργία χωρίς συντήρηση, οι κινητήρες DC χωρίς ψήκτρες είναι ιδανικοί για εξερεύνηση διαστήματος, πτήσεις δορυφόρου και άλλα.

## Κεφάλαιο 4<sup>ο</sup>: Μέθοδοι Προσδιορισμού Θέσης του Κινητήρα

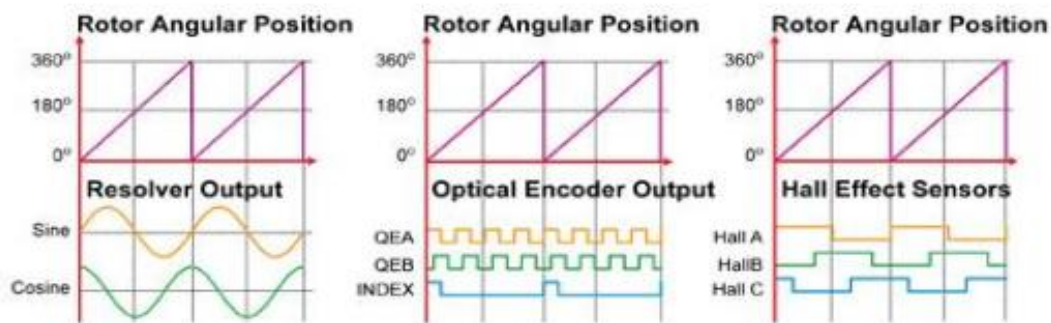
Όλες οι τεχνικές ελέγχου που θα αναφερθούν στο επόμενο κεφάλαιο, απαιτούν σε πραγματικό χρόνο τις πληροφορίες θέσης του κινητήρα για να λειτουργήσουν αποτελεσματικά. Υπάρχουν πολλοί τρόποι για τη λήψη πληροφοριών θέσης του δρομέα, που εννοείται ότι παίζουν μεγάλο ρόλο στην εκάστοτε τεχνική και αυτοί οι τρόποι είναι είτε χρησιμοποιώντας αισθητήρες είτε παίρνοντας τις πληροφορίες με κάποια άλλα μέσα.

Με τον έλεγχο της μεταγωγής ο Brushless DC κινητήρας πρέπει να περιλαμβάνει ορισμένα μέσα για την ανίχνευση της θέσης των πόλων του δρομέα έτσι ώστε τα ρεύματα του στάτη να μετάγονται κατάλληλα για να παραχθεί μια μαγνητεγερτική δύναμη που να είναι συγχρονισμένη με τη αντι-ηλεκτρεγερτική δύναμη του δρομέα. Ο ηλεκτρονικός αντιστροφέας ισχύος τροφοδοτεί τις περιελίξεις του στάτη με τάσεις και ρεύματα σε συχνότητα η οποία συνδέεται με την ταχύτητα περιστροφής. Καθώς ο κινητήρας ξεκινάει από κατάσταση ηρεμίας, λόγω της αύξησης της ταχύτητας του δρομέα, αυξάνεται η συχνότητα τροφοδοσίας του και η μηχανή μέχρι να φτάσει την απαιτούμενη ταχύτητα, συνεχίζει να επιταχύνει. Για έναν BLDC κινητήρα με τραπεζοειδή αντι-ηλεκτρεγερτική δύναμη (back EMF), η ανάδραση θέσης δεν είναι συνεχής, αλλά λαμβάνεται σε σταθερές θέσεις του δρομέα συνήθως κάθε 60° σε τριφασική μηχανή και 180° σε μονοφασική μηχανή. Για αυτόν τον λόγο μάλιστα, ένας αισθητήρας χαμηλής ανάλυσης, είναι επαρκής για να παραχθεί το σήμα μεταγωγής.

Ένας PMSM μετάγεται από ένα ημιτονοειδές ρεύμα και αυτό έχει ως συνέπεια η ανάδραση της θέσης να πρέπει να είναι συνεχής. Το αποτέλεσμα της κακής ανάλυσης των πληροφοριών θέσης που διατίθενται στον ελεγκτή έχει ως αποτέλεσμα η κυματομορφή του ρεύματος να αλλάζει σε διακριτά βήματα και αυτό θα προκαλέσει μια συνιστώσα υψηλής συχνότητας κυμάτωσης ροπής στην έξοδο της μηχανής. Οι πληροφορίες θέσης συλλέγονται από έναν κωδικοποιητή, ο οποίος εγκαθίσταται συνήθως στον κινητήρα και το σήμα εξόδου παρέχεται στο κύκλωμα οδήγησης. Ωστόσο, υπάρχουν διάφοροι τύποι αισθητήρων θέσης που διατίθενται για ανίχνευση θέσης. Σε αυτό το κεφάλαιο, λοιπόν, θα αναλυθούν διάφοροι μέθοδοι προσδιορισμού θέσης του κινητήρα τόσο σε περιπτώσεις που υπάρχει αισθητήρας, όσο και σε εκείνες που δεν υπάρχει.

## 4.1 Μέθοδοι με την χρήση αισθητήρα

Οι τεχνικές που βασίζονται σε αισθητήρες χρησιμοποιούν ηλεκτρομηχανικούς αισθητήρες συνδεδεμένους με τον δρομέα για να παρέχουν την ταχύτητα και τη θέση του δρομέα (Yadu Kiran, 2014). Οι πιο διαδεδομένοι που χρησιμοποιούνται σήμερα είναι οι αισθητήρες οπτικών κωδικοποιητών (Optical Encoders), ανιχνευτών επίλυσης (Resolvers) και οι αισθητήρες Hall ή Hall Effect. Οι Resolvers και οι Optical Encoders τοποθετούνται εξωτερικά στον κινητήρα, ενώ οι αισθητήρες Hall είναι τοποθετημένοι στο δρομέα. Οι κυματομορφές εξόδου διαφόρων τύπων αισθητήρων παρουσιάζονται στην Εικόνα 29.



Εικόνα 29: Κυματομορφές εξόδου διαφόρων τύπων αισθητήρων (Πηγή: (Yadu Kiran, 2014))

### 4.1.1 Ανιχνευτές Επίλυσης (Resolvers)

Οι Ανιχνευτές Επίλυσης (Resolvers) (Yadu Kiran, 2014) είναι AC συσκευές που δίνουν ημιτονοειδή έξοδο ως συνάρτηση της θέσης του δρομέα, οι οποίες συσκευές αποκωδικοποιούν τις πληροφορίες που λαμβάνουν στο κύκλωμα, έτσι ώστε να φτάσει στο αποτέλεσμα να ληφθούν πληροφορίες ταχύτητας.

Πιο συγκεκριμένα είναι ηλεκτρομηχανικές συσκευές που μετατρέπουν τη μηχανική κίνηση σε ηλεκτρονικό σήμα. Είναι αρκετά ακριβής και πιο συγκεκριμένα είναι οι πιο ακριβής αισθητήρες θέσης μεταξύ όλων των διαθέσιμων αισθητήρων. Είναι ουσιαστικά ένας περιστροφικός μετασχηματιστής με ένα πρωτεύον τύλιγμα και δύο δευτερεύουσες περιελίξεις που έχουν φάση μετατοπισμένες στο χώρο κατά  $90^\circ$ . Η έξοδος του αναλυτή απαιτεί εισόδους ελέγχου, με την λογική του ουσιαστικά να μπορεί να ερμηνεύσει αναλογικά σήματα που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον προσδιορισμό της απόλυτης θέσης ή να μετατραπούν σε ψηφιακά σήματα με την χρήση εμπορικά διαθέσιμων Resolver to Digital ολοκληρωμένων κυκλωμάτων μετατροπής. Μία από τις προδιαγραφές ενός αναλυτή είναι ο αριθμός των ταχυτήτων του. Επίσης, τα ημιτονοειδή σήματα εξόδου κάνουν την συσκευή πιο κατάλληλη για εφαρμογές ελέγχου ανάδρασης ταχύτητας με ημιτονοειδούς αντι-ηλεκτρεργετικής δύναμης κινητήρες μόνιμου μαγνήτη. Οι Ανιχνευτές Επίλυσης (Resolvers) χρησιμοποιούνται αρκετά λόγω της απλής ομοιότητάς τους με το ηλεκτρικό κινητήρα (περιελίξεις, ελασματοποιήσεις, ρουλεμάν και φορέα).

Οι λύσεις που προσφέρει έχουν δοκιμαστεί και αποδειχθεί αποτελεσματικές αλλά η αναλογική έξοδος του περιορίζει τις διαθέσιμες επιλογές. Αυτό το είδος αισθητήρα ελέγχου θέσης του δρομέα είναι γενικότερα αρκετά ακριβό και αυτό έχει ως συνέπεια να είναι ασύμφορο για σχεδιασμούς κινητήρων μόνιμων μαγνητών BLDC χαμηλού κόστους, ωστόσο η δημοφιλής χρήση των αναλυτών είναι σε σερβοκινητήρες μόνιμου μαγνήτη χωρίς ψήκτρες, στρατιωτικές και αεροδιαστημικές εφαρμογές.

#### **4.1.2 Αισθητήρες Οπτικών Κωδικοποιητών (Optical Encoder)**

Αν και δεν είναι τόσο ακριβής όσο η προηγούμενη κατηγορία, οι Αισθητήρες Οπτικών Κωδικοποιητών (Optical Encoders) (Yadu Kiran, 2014) προσφέρουν εξίσου υψηλή ανάλυση. Παρέχουν μια άμεση γνώση της ακριβούς γωνίας της περιστροφής σε σχέση με μια σταθερή συσκευή. Ένας τέτοιος κωδικοποιητής χρησιμοποιεί ένα μοναδικό δυαδικό μοτίβο που δεν επαναλαμβάνεται εντός της διαδικασίας και επίσης η ανατροφοδότηση θα αλλάξει όταν αλλάζει η θέση περιστροφής και αφαιρείται η ισχύς από αυτήν την συσκευή. Αποτελείται από έναν στοιχειώδη περιστρεφόμενο δίσκο με μοτίβο υποδοχής στην περιφέρειά του. Ένα LED είναι τοποθετημένο στη μία πλευρά του δίσκου και ένα φωτοτρανζίστορ είναι τοποθετημένο στην άλλη πλευρά, απέναντι από το LED. Έτσι επιτρέπεται να περάσει σε πολλούς αισθητήρες φως ή να μπλοκαριστεί. Αυτό, τελικά, είναι που παρέχει το "on-off" για κάθε bit στο ψηφιακό σήμα από τον κωδικοποιητή. Η διάταξη παράγει έναν καθορισμένο αριθμό παλμών για κάθε 360° περιστροφής. Η απόδοση των περισσότερων οπτικών κωδικοποιητών περιορίζεται από τη θερμοκρασία και για αυτόν τον λόγο απαιτεί προσεκτική επιλογή της θέσης του αισθητήρα. Τέλος, είναι σημαντικό το πλεονέκτημα ότι το σήμα εξόδου ανέρχεται και κατέρχεται αρκετά απότομα, πράγμα που οδηγεί σε καλά καθορισμένα σημεία μεταγωγής.

Αξίζει να σημειωθεί ότι πέρα από τους Αισθητήρες Οπτικών Κωδικοποιητών (Optical Encoder), υπάρχουν και άλλοι τύποι στην βιομηχανία όπως είναι οι Αυξητικοί κωδικοποιητές (Incremental Encoders) που βασίζονται σε ηλεκτρονικά εκτός του κυκλώματος για να ερμηνεύσουν τη θέση με βάση τον αριθμό των συμβάντων που συνέβησαν στη συσκευή και οι Απόλυτοι Κωδικοποιητές (Absolute Encoders) που παρέχουν ένα μέσο γνώσης της ακριβούς γωνίας περιστροφής σε σχέση με μια σταθερή συσκευή. Επίσης, ο τελευταίος, εμφανίζει πολλά κοινά στοιχεία λειτουργίας με τον Αισθητήρες Οπτικών Κωδικοποιητών (Optical Encoder).

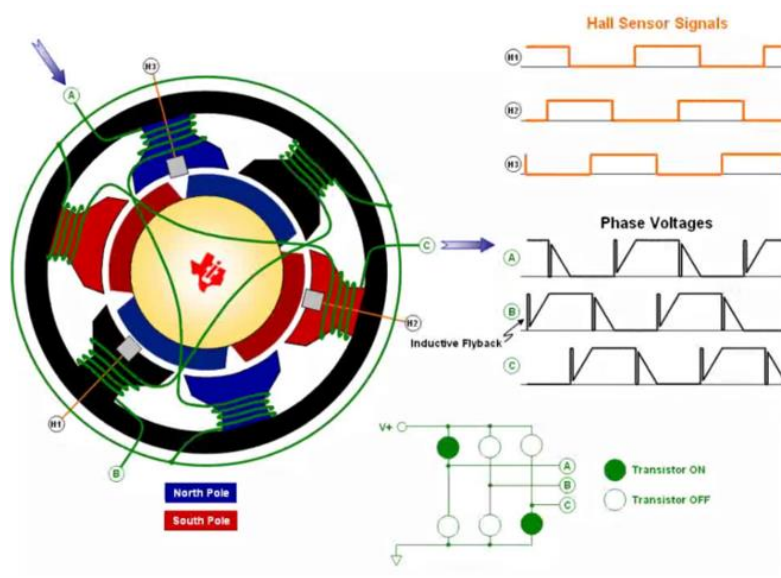


### 4.1.3 Αισθητήρες Hall

Η τελευταία κατηγορία βασίζεται στους αισθητήρες Hall (Yadu Kiran, 2014), ο οποίοι είναι οι πιο συνηθισμένοι αισθητήρες που χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές χαμηλού κόστους. Τοποθετούνται τρεις αισθητήρες Hall γύρω από τον δρομέα μόνιμου μαγνήτη και ανιχνεύουν είτε την κύρια μαγνητική ροή ή τη ροή διαρροής στα άκρα, ο οποίοι παρέχουν ψηφιακά σήματα για κάθε 60° περιστροφής του δρομέα. Οι αισθητήρες Hall Effect επίσης πρέπει να τοποθετηθούν με ακρίβεια σε καθορισμένες θέσεις για την σωστή μεταγωγή. Τέλος, οι Schmitt Triggers (είναι ένα κύκλωμα σύγκρισης που εφαρμόζεται όταν έχουμε θετική ανάδραση ενός συγκριτικού ή διαφορικού ενισχυτή) χρησιμοποιούνται πολύ συχνά και αυτό διότι έχουν ως αποτέλεσμα γρήγορους χρόνους ανόδου και καθόδου επιτρέποντας έτσι το χαμηλό σφάλμα στο σημείο μεταγωγής.

Πιο συγκεκριμένα, οι εν λόγω αισθητήρες που στηρίζονται στο φαινόμενο Hall, το οποίο παρατηρείται όταν ένας αγωγός ή ημιαγωγός που διαρρέεται από ένα ρεύμα πυκνότητας  $J$ , δέχεται την επίδραση ενός μαγνητικού πεδίου  $B$ . Λόγω της ανωτέρω αλληλεπίδρασης, εμφανίζεται ένα ηλεκτρικό πεδίο  $E$ , το οποίο είναι το εξωτερικό γινόμενο  $J \times B$ , με αντίστοιχη φορά και κατ' επέκταση εμφανίζεται διαφορά δυναμικού με φορά αυτή του διανύσματος  $E$ . Συγκεκριμένα, κάθε φορά που ένας μαγνητικός πόλος του δρομέα περνάει κοντά από έναν αισθητήρα, αυτός ενεργοποιείται και μας δίνει ένα υψηλό ή χαμηλό σήμα (Τάση - Volt). Ο συνδυασμός των τριών σημάτων που προέρχονται από τους τρεις αισθητήρες Hall, μας δίνει όλη την πληροφορία που χρειαζόμαστε για τη θέση του δρομέα. Ο κάθε αισθητήρας Hall παραμένει ενεργοποιημένος για 180 ηλεκτρικές μοίρες.

Όσον αφορά την τοποθέτησή τους, αυτή γίνεται συνήθως ανά 120° του στάτη (σπανιότερα ανά 60°) και είναι μια δύσκολη διαδικασία, που απαιτεί ακρίβεια γιατί σε διαφορετική περίπτωση η παραμικρή απόκλιση μπορεί να οδηγήσει σε εσφαλμένη πληροφορία για τη θέση του δρομέα.



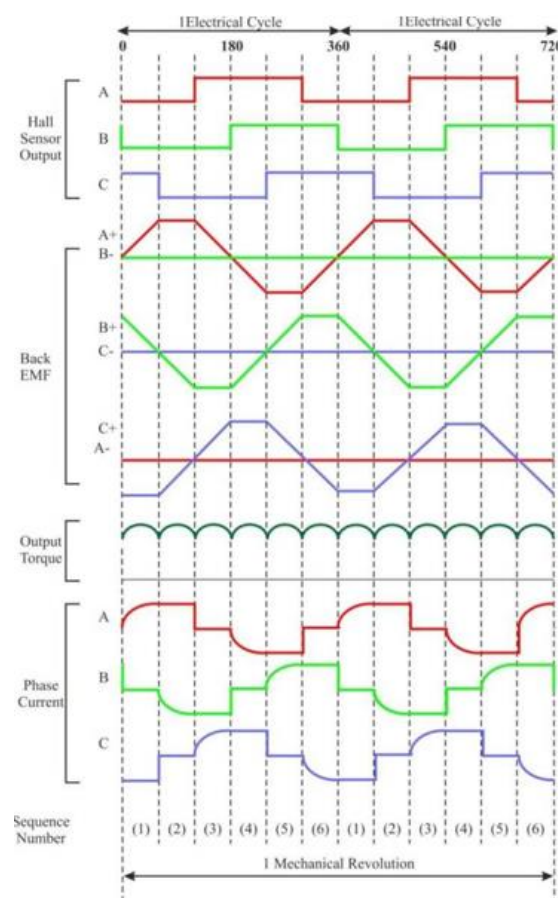
Εικόνα 30: Αρχή λειτουργίας αισθητήρων Hall (Πηγή: *Electronic Specifier* (2015))

## 4.2 Μέθοδοι χωρίς τη χρήση αισθητήρα

Οι BLDC κινητήρες μπορούν να λειτουργήσουν και χωρίς την χρήση αισθητήρων (Sensorless), που μερικές φορές ονομάζεται τραπεζοειδής έλεγχος χωρίς αισθητήρες των BLDC κινητήρων, χρησιμοποιεί την αντί-ηλεκτρεγερτική δύναμη (back EMF) για τον προσδιορισμό της θέσης του δρομέα του κινητήρα (περιστρεφόμενο τμήμα του κινητήρα) σε σχέση με το στάτη του κινητήρα (το στάσιμο τμήμα).

Μια τάση που εφαρμόζεται κατά μήκος της περιέλιξης ενός κινητήρα αναγκάζει τον δρομέα του κινητήρα να γυρίσει. Η κίνηση του δρομέα μέσω του μαγνητικού πεδίου του κινητήρα είναι ανάλογη με τη συμπεριφορά μιας γεννήτριας και κατά συνέπεια ο κινητήρας όχι μόνο λαμβάνει μια εφαρμοσμένη τάση αλλά παράγει και τη δική του τάση. Αυτή η αντί-ηλεκτρεγερτική δύναμη (back EMF) είναι ανάλογη με την ταχύτητα περιστροφής της μηχανής. Έτσι λοιπόν, η αντί-ηλεκτρεγερτική δύναμη (back EMF) μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον προσδιορισμό της ταχύτητας και της θέσης του δρομέα ενός κινητήρα, χωρίς να απαιτούνται αισθητήρες. Οι περισσότεροι BLDC κινητήρες χωρίς αισθητήρες ελέγχονται χρησιμοποιώντας έναν μικροελεγκτή, έναν επεξεργαστή ψηφιακού σήματος ή ένα ειδικό IC οδηγό.

Παρακάτω παρουσιάζεται μια εικόνα με βάση τις κυματομορφές που δημιουργούνται με και χωρίς αισθητήρες.



Εικόνα 31: Χαρακτηριστικά μεγέθη ενός BLDC (Πηγή: (Gamazo-Real, Vasquez-Sanchez, & Gomez-Gil, 2010))

Η λήψη πληροφοριών θέσης του δρομέα χωρίς τη χρήση αισθητήρων θέσης εξακολουθεί να είναι δυνατή με άλλες μεθόδους. Έτσι, όχι μόνο μειώνει τη συνολική πολυπλοκότητα και το κόστος εγκατάστασης. Ένας τρόπος για να αποκτηθεί πληροφορία για την ταχύτητα και τη θέση του κινητήρα είναι με τη μέτρηση της αντί-ηλεκτρεγερτικής δύναμης (back EMF). Η αντί-ηλεκτρεγερτική δύναμη (back EMF) βασίζεται στον νόμο της επαγωγής του Faraday, δηλαδή να προκαλέσει την επαγωγή μιας τάσης στην περιέλιξη του στάτη. Όλο αυτό ξεκινάει από την περιστροφή του δρομέα μόνιμου μαγνήτη που προκαλεί μια αλλαγή στο μαγνητικό πεδίου που εφαρμόζεται στην περιέλιξη του στάτη του BLDC κινητήρα και καθώς περιστρέφεται βρίσκεται στην αντίθετη κατεύθυνση της τάσης ενεργοποίησης σύμφωνα με το νόμο του Lenz. Η αντί-ηλεκτρεγερτική δύναμη (back EMF) εξαρτάται κυρίως από τρεις παραμέτρους του κινητήρα:

- Αριθμός στροφών στις περιελίξεις του στάτη.
- Γωνιακή ταχύτητα του δρομέα.
- Μαγνητικό πεδίο που παράγεται από μαγνήτες δρομέα.

Η αντί-ηλεκτρεγερτική δύναμη (back EMF) μπορεί να υπολογιστεί με βάση τις παραμέτρους αυτές και τη γωνιακή ταχύτητα χρησιμοποιώντας την παρακάτω εξίσωση:

$$\text{back EMF} = N \cdot I \cdot r \cdot B \cdot \omega \quad (1.9)$$

Όπου:

$N$  = Αριθμός περιελίξεων ανά φάση.

$I$  = Μήκος του δρομέα.

$r$  = Εσωτερική ακτίνα του δρομέα.

$B$  = Μαγνητικό πεδίο του δρομέα.

$\omega$  = Γωνιακή ταχύτητα.

Εάν αποφευχθεί ο μαγνητικός κορεσμός του στάτη ή αγνοηθεί η εξάρτηση του μαγνητικού πεδίου από τη θερμοκρασία (δηλαδή το  $B$  είναι σταθερό), ο μόνος μεταβλητός όρος είναι η γωνιακή ταχύτητα του δρομέα. Επομένως, η αντί-ηλεκτρεγερτική δύναμη (back EMF) είναι ανάλογη στην ταχύτητα του δρομέα. Καθώς η ταχύτητα αυξάνεται, η αντί-ηλεκτρεγερτική δύναμη (back EMF) αυξάνεται.

Η συχνότητα με την οποία ακολουθούνται οι τομείς καθορίζει την ταχύτητα του κινητήρα: όσο γρηγορότερα οι τομείς ανταλλάσσονται, τόσο υψηλότερα η μηχανική ταχύτητα επιταχύνεται. Η τάση της αντί-ηλεκτρεγερτικής δύναμης (back EMF) είναι ανάλογη με αυτήν την ταχύτητα του δρομέα. Εξαιτίας αυτού, η ανίχνευση θέσης με την χρήση της αντι-ηλεκτρεγερτικής δύναμης (back EMF) στο μηδέν και οι πολύ χαμηλές ταχύτητες, δεν είναι δυνατόν να συμβεί. Ωστόσο, υπάρχουν πολλές εφαρμογές (π.χ. ανεμιστήρες και αντλίες) που δεν απαιτούν ανίχνευση θέσης ή λειτουργία κλειστού βρόχου σε χαμηλές ταχύτητες. Για αυτές τις εφαρμογές, μια μέθοδος ανίχνευσης της αντι-ηλεκτρεγερτικής δύναμης (back EMF) είναι πολύ κατάλληλη.

Η μεταβαλλόμενη τάση που εφαρμόζεται στον στάτη έχει επίσης άμεση επίδραση στη σωστή λειτουργία του κινητήρα. Για αποτελεσματικό έλεγχο, η εφαρμοζόμενη τάση πρέπει να είναι τουλάχιστον αρκετή ώστε να ταιριάζει με την αντί-ηλεκτρεγερτική δύναμη (back EMF) που δημιουργήθηκε, συν τη πτώση τάσης στις περιελίξεις του κινητήρα λόγω της παραγωγής ροπής. Αυτή η πτώση τάσης, με τη σειρά της, είναι ίση με τη σύνθετη αντίσταση των περιελίξεων επί το ρεύμα.

Σε γενικές γραμμές, εάν η μεταβαλλόμενη τάση έχει οριστεί στο μέγιστο, ανεξάρτητα από την ταχύτητα ή τη παραγωγή ροπής του κινητήρα, ο κινητήρας θα οδηγείται αναποτελεσματικά με σπατάλη ενέργειας που θερμαίνει τις περιελίξεις του κινητήρα. Για τον απαραίτητο έλεγχο, η Διαμόρφωση Παλμού-Πλάτους (Pulse Width Modulation, PWM) χρησιμοποιείται για την επίτευξη του σωστού επιπέδου τάσης. Η Διαμόρφωση Παλμού-Πλάτους (PWM) είναι μια αποτελεσματική μέθοδος οδήγησης του κινητήρα, αλλά εισάγει ορισμένα προβλήματα θορύβου κατά την προσπάθεια απόκτησης τα σήματα ανάδρασης ελέγχου (δηλαδή τάσεις back EMF)

Η κυματομορφή της αντι-ηλεκτρεγερτικής δύναμης (back EMF) ποικίλλει τόσο ως συνάρτηση της θέσης όσο και της ταχύτητας του δρομέα. Το σύστημα διαβάζει τα σήματα της αντι-ηλεκτρεγερτικής δύναμης (back EMF) και αναζητά τα μηδενικά σημεία διέλευσης (zero crossing) που συμβαίνουν όταν η τάση της αντι-ηλεκτρεγερτικής δύναμης (back EMF) είναι ίση με την ουδέτερη τάση του κινητήρα. Αυτά τα μηδενικά σημεία καθορίζουν πότε πρέπει να ενεργοποιηθούν οι περιελίξεις. Αυτή η τεχνική μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε ένα ευρύ φάσμα κινητήρων και μπορεί να λειτουργήσει είτε για έλεγχο ταχύτητας είτε για έλεγχο ροπής. Η αντι-ηλεκτρεγερτική δύναμη (back EMF) μπορεί επίσης να εκτιμηθεί μετρώντας τα ρεύματα που ρέουν μέσω των περιελίξεων του κινητήρα. Ωστόσο, η ανίχνευση θέσης χρησιμοποιώντας αντι-ηλεκτρεγερτική δύναμη (back EMF) δεν είναι δυνατή σε μηδενικές ή χαμηλές ταχύτητες. Με άλλα λόγια, ο κινητήρας ξεκινά σε ανοιχτό βρόχο. Επομένως, αυτή η μέθοδος είναι κατάλληλη μόνο για εφαρμογές που δεν απαιτούν ακρίβεια λειτουργία κλειστού βρόχου σε χαμηλές ταχύτητες.

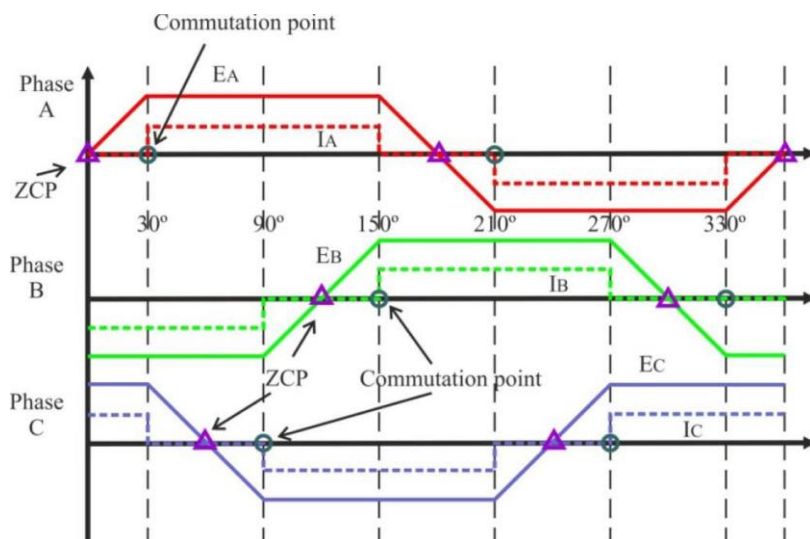
Για λειτουργία χωρίς αισθητήρα χαμηλής ταχύτητας, χρησιμοποιείται και η τεχνική μέτρησης επαγωγής. Αυτή η μέθοδος βασίζεται στο γεγονός ότι η θέση του δρομέα ενός κινητήρα χωρίς ψήκτρες έχει μικρή επίδραση στα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά των τυλιγμάτων (πηνία), ακόμη και όταν δεν κινείται. Αυτή η μικρή επίδραση μπορεί να μετρηθεί, ειδικά για κινητήρες που έχουν μεγαλύτερη προεξοχή και η θέση του δρομέα μπορεί να εξαχθεί από αυτήν τη μέτρηση. Συνοψίζοντας έχουμε:

- Το μέγεθος του σήματος της αντι-ηλεκτρεγερτικής δύναμης (back EMF) είναι ανάλογο της ταχύτητας
- Η συχνότητα του σήματος αντι-ηλεκτρεγερτική δύναμη (back EMF) είναι ίση με την (μηχανική) ταχύτητα περιστροφής επί τον αριθμό των ζευγών πόλων
- Η ροπή του κινητήρα είναι ανάλογη με το ρεύμα (υποθέτοντας ότι η θερμοκρασία του κινητήρα είναι σταθερή)

#### 4.2.1 Μέθοδος Ανίχνευσης Μηδενικής Διέλευσης αντί-ηλεκτρεγερτικής δύναμης

Η τεχνική ανίχνευση μηδενικής διέλευσης (zero crossing detection) είναι μία από τις απλούστερες μεθόδους τεχνικής ανίχνευσης της αντι-ηλεκτρεγερτικής δύναμης (back EMF) και έχει ως βασική αρχή την ανίχνευση της στιγμής κατά την οποία η αντι-ηλεκτρεγερτική δύναμη (back EMF) στη μη διεγερμένη φάση διασχίζει το μηδέν (Gamazo-Real, Vasquez-Sanchez, & Gomez-Gil, 2010). Αυτό το μηδενικό πέρασμα ενεργοποιεί ένα χρονόμετρο, το οποίο μπορεί να είναι τόσο απλό όσο μια χρονική σταθερά RC.

Για την τυπική λειτουργία ενός BLDC κινητήρα, το ρεύμα φάσης και η αντι-ηλεκτρεγερτική δύναμη (back EMF) θα πρέπει να ευθυγραμμίζονται ώστε να δημιουργηθεί μια σταθερή ροπή. Το τρέχον σημείο αλλαγής μπορεί να εκτιμηθεί από το Μηδενικό Σημείο Διέλευσης (Zero Crossing Point, ZCP) των αντι-ηλεκτρεγερτικών δυνάμεων (back EMFs) με μια μετατόπιση φάσης  $30^\circ$  χρησιμοποιώντας ένα σχήμα μετατροπής έξι βημάτων μέσω ενός τριφασικού μετατροπέα για την οδήγηση του BLDC κινητήρα. Το διάστημα αγωγής για κάθε φάση είναι  $120^\circ$ . Ως εκ τούτου, μόνο δύο φάσεις άγουν ρεύμα ανά πάσα στιγμή, αφήνοντας την τρίτη φάση να «αιωρείται». Για την παραγωγή μέγιστης ροπής, ο μετατροπέας πρέπει να μετατοπίζεται κάθε  $60^\circ$  ανιχνεύοντας το Μηδενικό Σημείο Διέλευσης (Zero Crossing Point, ZCP) της αντι-ηλεκτρεγερτικής δύναμης (back EMF) στο πηνίο του κινητήρα έτσι ώστε το ρεύμα να βρίσκεται σε φάση με τη αντι-ηλεκτρεγερτική δύναμη (back EMF).



Εικόνα 32: Μηδενικά σημεία διέλευσης της αντι-ηλεκτρεγερτικής δύναμης και σημεία μεταγωγής της φάσης ρεύματος (Πηγή: (Gamazo-Real, Vasquez-Sanchez, & Gomez-Gil, 2010))

Αυτή η τεχνική καθυστέρησης  $30^\circ$  από τη στιγμή του μηδενικού σημείου διέλευσης της αντι-ηλεκτρεγερτικής δύναμης δεν επηρεάζεται πολύ από τις αλλαγές ταχύτητες. Για την ανίχνευση των μηδενικών σημείων διέλευσης, η φάση της αντι-ηλεκτρεγερτικής δύναμης θα πρέπει να παρακολουθείται κατά τη διάρκεια της αθόρυβης φάσης (όταν το συγκεκριμένο ρεύμα φάσης είναι μηδέν) και οι τερματικές τάσεις πρέπει να φιλτράρονται χαμηλά. Χρησιμοποιούνται τρία Φίλτρα Χαμηλής Διέλευσης (Low Pass Filter, LPF) για την εξάλειψη των υψηλότερων αρμονικών στις τάσεις των ακροδεκτών φάσης που προκαλούνται από την εναλλαγή του μετατροπέα. Η χρονική καθυστέρηση των φίλτρα χαμηλής διέλευσης θα περιορίσει την ικανότητα λειτουργίας υψηλής ταχύτητας της BLDC μηχανής. Είναι απαραίτητο να επισημανθεί η σημασία των φίλτρων είναι σημαντική καθώς χρησιμοποιούνται για την εξάλειψη των φαινομένων υψηλής συχνότητας στους ακροδέκτες των τάσεων και για την εξαγωγή της αντι-ηλεκτρεγερτικής δύναμης του κινητήρα.

#### 4.2.2 Ανίχνευση μέσω της $3^{15}$ αρμονικής τάσης

Μια βελτίωση της μεθόδου ανίχνευσης της αντί-ηλεκτρεγερτικής δύναμης με ανίχνευση από την αρμονική τάση (zero crossing), είναι αυτή της ανίχνευσης της  $3^{15}$  αρμονικής τάσης (Gamazo-Real, Vasquez-Sanchez, & Gomez-Gil, 2010).

Αυτή η μέθοδος χρησιμοποιεί την τρίτη αρμονική τάση της αντι-ηλεκτρεγερτικής δύναμης για να προσδιορίσει τις στιγμές μετακίνησης του BLDC κινητήρα. Βασίζεται στο γεγονός ότι σε έναν συμμετρικό τριφασικό κινητήρα σε συνδεσμολογία αστέρα με τραπεζοειδές διανομή ροής διακένου αέρα, η άθροιση των τριών φασικών τάσεων του στάτη έχει ως αποτέλεσμα την εξάλειψη όλων των υπολοίπων φάσεων. Το άθροισμα που προκύπτει κυριαρχείται από την  $3^{15}$  τάξης αρμονική, η οποία διατηρεί μια σταθερή μετατόπιση φάσης με τη θεμελιώδη συνιστώσα τάσης για οποιοδήποτε φορτίο και ταχύτητα. Η κατάλληλη επεξεργασία του τρίτου αρμονικού σήματος επιτρέπει την εκτίμηση της θέσης ροής του δρομέα και ενός κατάλληλου ελέγχου ρεύματος μετατροπέα. Σε αντίθεση με τις μεθόδους έμμεσης ανίχνευσης που βασίζονται στο σήμα της αντι-ηλεκτρεγερτικής δύναμης, η  $3^{15}$  αρμονική τάση απαιτεί μόνο μια μικρή ποσότητα φιλτραρίσματος. Ως αποτέλεσμα, αυτή η μέθοδος δεν είναι ευαίσθητη στις καθυστερήσεις φιλτραρίσματος, επιτυγχάνοντας υψηλή απόδοση για ένα ευρύ φάσμα ταχύτητας. Επίσης επιτυγχάνεται υψηλή απόδοση στην εκκίνηση του κινητήρα επειδή η  $3^{15}$  αρμονική μπορεί να ανιχνευθεί σε χαμηλές ταχύτητες. Για έναν μαγνήτη πλήρους βήματος και μια περιέλιξη φάσης στάτη πλήρους βήματος, οι εσωτερικές τάσεις μπορούν να αναπαρασταθούν χρησιμοποιώντας τον μετασχηματισμό Fourier, λαμβάνοντας πολλές αρμονικές της τάσης. Εάν κάθε επαγωγική φάση είναι σταθερή σε οποιαδήποτε θέση του δρομέα από το άθροισμα των τριών ακροδεκτών έως των ουδετέρων φάσεων, τότε η  $3^{15}$  αρμονική της αντι-ηλεκτρεγερτικής δύναμης μπορεί να μετρηθεί με τον εξής εξίσωση:

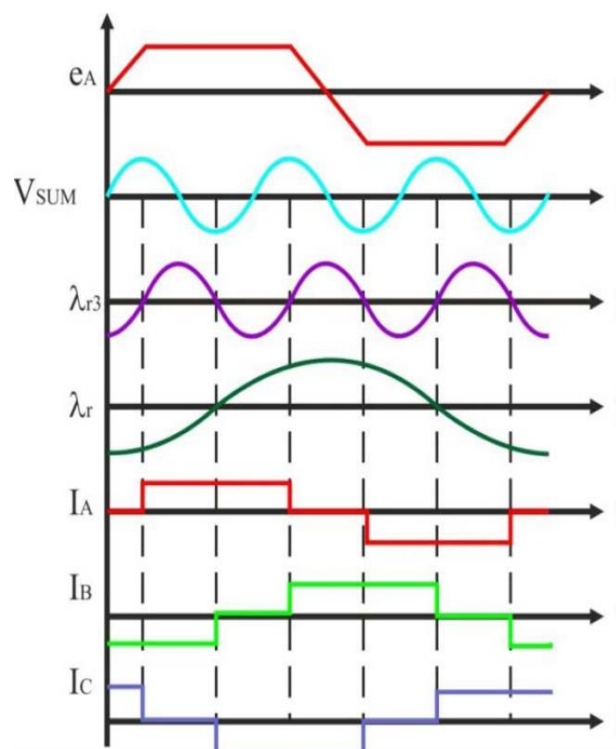
$$V_{SUM} = V_{AN} + V_{BN} + V_{CN} \approx (e_A + e_B + e_C) \approx 3 \cdot E_3 \cdot \sin(3 \cdot \omega_e \cdot t) \quad (1.10)$$

Το άθροισμα των τάσεων στους ακροδέκτες τυλίγματος περιέχει μόνο το τρίτο και τα πολλαπλάσια της 3<sup>ης</sup> αρμονικής λόγω του γεγονότος ότι μόνο τα μηδενικά εξαρτήματα ρεύματος μπορούν να ρέουν μέσω του κινητήρα.

Για τη λήψη κάποιων στιγμιαίων μεταγωγών ( $\lambda_{r3}$ ), αυτό που χρειάζεται είναι να παραγωγιστεί το φιλτραρισμένο σήμα της τάσης, το οποίο βρίσκεται από την ανίχνευση της 3<sup>ης</sup> αρμονικής τάσης σε συνάρτηση με τον χρόνο. Όπως φαίνεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$\lambda_{r3} = \int V_{SUM} \cdot dt \quad (1.11)$$

Η Εικόνα 33 απεικονίζει την εσωτερική τάση του κινητήρα που αντιστοιχεί στη φάση A ( $e_A$ ) την 3<sup>ης</sup> τάξης αρμονική συνιστώσα ( $V_{SUM}$ ) που λαμβάνεται από το άθροισμα των τάσεων φάσης στάτη, την 3<sup>ης</sup> τάξης αρμονική συνιστώσας του δρομέα ( $\lambda_{r3}$ ), τη ροή του δρομέα ( $\lambda_r$ ) και τα ρεύματα φάσης στάτη. Προκειμένου να επιτευχθεί η μέγιστη ροπή ανά αμπέρ, το ρεύμα του στάτη διατηρείται σε 90° σε σχέση με τη ροή του δρομέα. Επιπλέον, οι μηδενικές διασταυρώσεις της 3<sup>ης</sup> τάξης αρμονικής συνιστώσας της ροής δρομέα συμβαίνουν σε 60°, ακριβώς σε κάθε επιθυμητή στιγμή μετατροπής ρεύματος.



Εικόνα 33: Αντί-ηλεκτρεγερτική δύναμη, 3<sup>ης</sup> τάξης αρμονική συνιστώσα τάση, βασικά στοιχεία ροής δρομέα και ρεύματα φάσης του κινητήρα (Πηγή: J.C Gamazo-Real/E. Vasquez-Sanchez/J. Gomez-Gil, 2010)



### 4.2.3 Μέθοδος ανίχνευσης αγωγιμότητας διόδου ελεύθερης ροής ή διέλευσης

Η μέθοδος αυτή μπορεί να μπει στην ίδια κατηγορία μαζί με τις μεθόδους που χρησιμοποιούν την αντί-ηλεκτρεγερτική δύναμη για ανίχνευση της θέσης του δρομέα (Gamazo-Real, Vasquez-Sanchez, & Gomez-Gil, 2010). Μέχρι τώρα, οι αλγόριθμοι έμμεσης ανίχνευσης μπορούν να εφαρμοστούν μόνο στους κινητήρες που ο μόνιμος μαγνήτης είναι τοποθετημένος στην επιφάνεια (Surface Mounted Permanent Magnet, SMPM) των οποίων οι επαγωγές περιέλιξης είναι σχεδόν οι ίδιες και δεν διαφέρουν ανάλογα με τη θέση του δρομέα. Αυτοί οι αλγόριθμοι, εκτός από τη μέθοδο ανίχνευσης αγωγιμότητας διόδου ελεύθερης ροής, χρησιμοποιούν φίλτρα χαμηλής διέλευσης ή κυκλώματα ολοκλήρωσης για την εξάλειψη του θορύβου συχνότητας PWM και για την παροχή καθυστέρησης φάσης για σωστή αλλαγή του ρεύματος στάτη. Όμως, στην περίπτωση κινητήρων που έχει έναν εσωτερικό μόνιμο μαγνήτη (Interior Permanent Magnet, IPM), η αυτεπαγωγή της περιέλιξης του στάτη ποικίλλει ανάλογα με τη θέση του δρομέα. Αυτό το χαρακτηριστικό εισάγει ανισοροπία των αντιστάσεων φάσης και διακύμανση του δυναμικού του ουδέτερου σημείου και είναι αδύνατο να εφαρμοστεί ο αλγόριθμος ανίχνευσης τερματικού ρεύματος. Οι κινητήρες IPM είναι πιο πρακτικοί από τους κινητήρες SMPM λόγω της ανθεκτικότητας της δομής του δρομέα και της χαμηλής αδράνειάς τους.

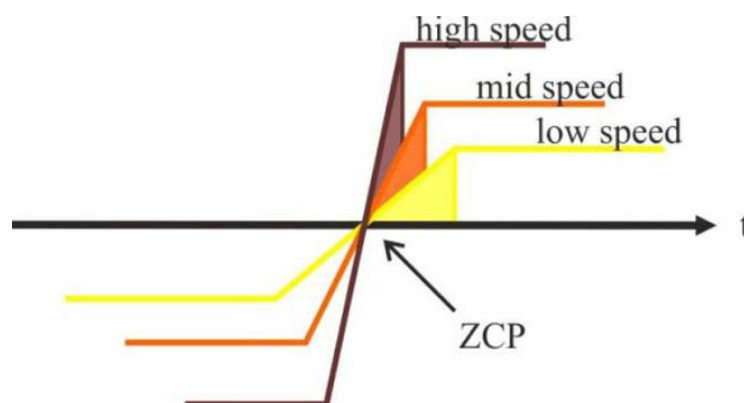
Σε αυτήν την τεχνική, οι πληροφορίες θέσης μπορούν να ανιχνευθούν με βάση την κατάσταση αγωγής των διόδων ελεύθερης διέλευσης (ή ροής) που συνδέονται σε αντιπαράλληλα με τρανζίστορ ισχύος επειδή ένα ρεύμα ρέει σε μια φάση. Σε αυτήν τη φάση λοιπόν, κάθε ενεργό σήμα κίνησης δίνεται στα θετικά και αρνητικά πλευρικά τρανζίστορ και τα τρέχοντα αποτελέσματα από την αντι-ηλεκτρεγερτική δύναμη που παράγονται στις περιελίξεις του κινητήρα, όπως μπορούμε να δούμε να συμβαίνει στις κυματομορφές της Εικόνας 32. Για την παραγωγή της μέγιστης ροπής, η μετατροπή πρέπει να πραγματοποιείται κάθε  $60^\circ$  έτσι ώστε το ρεύμα γραμμής του κινητήρα να είναι σε φάση με την αντί-ηλεκτρεγερτική δύναμη. Τέλος, ένα κύκλωμα εκκίνησης είναι απαραίτητο για να δώσει ένα σήμα μετατροπής για την εκκίνηση του κινητήρα. Αυτή η προσέγγιση καθιστά δυνατή την ανίχνευση της θέσης του δρομέα σε μεγάλο εύρος ταχύτητας, ειδικά σε χαμηλότερη ταχύτητα, και την απλοποίηση της διαδικασίας εκκίνησης.



#### 4.2.4 Μέθοδος ενοποίησης αντί-ηλεκτρεγερτικής δύναμης

Σε αυτήν την τεχνική, η μετατροπή καθορίζεται από την ενσωμάτωση της φάσης της αντι-ηλεκτρεγερτικής δύναμης (δηλαδή της μη-διεγερμένης φάσης της αντί-ηλεκτρεγερτικής δύναμης) (Gamazo-Real, Vasquez-Sanchez, & Gomez-Gil, 2010). Το κύριο χαρακτηριστικό είναι ότι η ενσωματωμένη περιοχή των αντι-ηλεκτρεγερτικών δυνάμεων που φαίνεται στην εικόνα 34, είναι περίπου η ίδια σε όλες τις ταχύτητες.

Η ενοποίηση ξεκινά όταν η φάση της αντί-ηλεκτρεγερτικής δύναμης ξεπεράσει το μηδέν. Όταν η ενσωματωμένη τιμή φτάσει σε μια προκαθορισμένη τιμή, η οποία αντιστοιχεί σε ένα σημείο αλλαγής, τότε το φασικό ρεύμα μεταβάλλεται. Εάν απαιτηθεί μείωση της ροής, μπορεί να επιτευχθεί αλλάζοντας την τάση εισόδου. Καθώς η αντί-ηλεκτρεγερτική δύναμη θεωρητικά μεταβάλλεται γραμμικά από θετικό σε αρνητικό (υποτίθεται τραπεζοειδής αντι-ηλεκτρεγερτικής δύναμης) και αυτή η γραμμική κλίση θεωρείται στην ταχύτητα, η τάση εισόδου διατηρείται σταθερή σε όλο το εύρος ταχύτητας

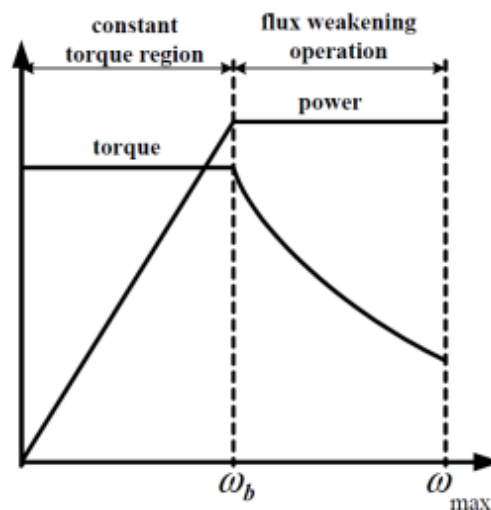


Εικόνα 34: Ολοκληρωμένες περιοχές της αντί-ηλεκτρεγερτικής δύναμης (Πηγή: (Gamazo-Real, Vasquez-Sanchez, & Gomez-Gil, 2010))

Μόλις η ενοποιημένη τιμή φτάσει στην τάση εισόδου, ένα σήμα επαναφοράς επιβεβαιώνεται ότι μηδενίζει την έξοδο του ολοκληρωτή. Για να αποφευχθεί η εκ νέου ενοποίηση του ολοκληρωτή, το σήμα επαναφοράς διατηρείται αρκετή ώρα για να διασφαλιστεί ότι ο ολοκληρωτής δεν ξεκινά έως ότου το εναπομένον ρεύμα στην ανοιχτή φάση περάσει την μηδενική διέλευση. Η χρήση αισθητήρων διακριτού ρεύματος για κάθε φάση του κινητήρα θα παρέχει πλήρη ανατροφοδότηση ρεύματος, αλλά το κόστος που σχετίζεται με μεμονωμένους αισθητήρες ρεύματος (π.χ. μετασχηματιστές ρεύματος ή αισθητήρες Hall) είναι συχνά υψηλό. Μια ελκυστική εναλλακτική λύση είναι η χρήση αισθητήρων ρεύματος που είναι ενσωματωμένοι στους διακόπτες ισχύος, όπως οι power MOSFET'S και IGBT, οι οποίοι διατίθενται από διάφορους κατασκευαστές στοιχείων. Ωστόσο, οι ενσωματωμένοι αισθητήρες ρεύματος επιβάλλουν τους δικούς τους περιορισμούς.

## Κεφάλαιο 5<sup>ο</sup>: Τεχνικές Ελέγχου Σύγχρονων Κινητήρων

Η σωστή επιλογή μιας τεχνικής ελέγχου για τον κάθε κινητήρα μόνιμου μαγνήτη είναι σημαντική, καθώς, επηρεάζει τη δυνατότητα του κινητήρα να αποδώσει την ισχύ του σε όλο το εύρος της ταχύτητάς του. Είναι πολύ σημαντικό, επίσης, να μπορέσει να επιτευχθεί ο καλύτερος δυνατός βαθμός απόδοσης κατά τον έλεγχο του κινητήρα και για να κατορθωθεί αυτό, είναι απαραίτητο να ελέγχεται ο κινητήρας με τέτοιο τρόπο ώστε η φάση του ρεύματος να είναι ευθυγραμμισμένη με την αντί-ηλεκτρεγερτική δύναμη του κινητήρα. Η σωστή επιλογή ελέγχου παίζει μεγάλο ρόλο για την απόδοση εξόδου του κινητήρα. Οι σύγχρονοι κινητήρες μόνιμου μαγνήτη έχουν δύο περιοχές, την περιοχή σταθερής ροπής και την περιοχή σταθερής ισχύος, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 35.



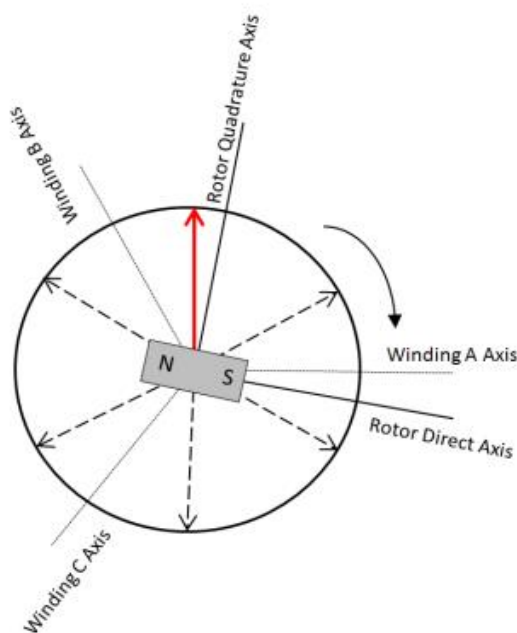
Εικόνα 35: Περιοχές σταθερής ροπής και σταθερής ισχύος (Πηγή: (Liu Qinghua, 2005))

Όπως υποδηλώνουν και τα ονόματά τους, από τη μηδενική μέχρι την ονομαστική ταχύτητα ο κινητήρας παρουσιάζει μια σταθερή ροπή, ενώ μετά από αυτή έχει σταθερή ισχύ μέχρι τη μέγιστη ταχύτητα και ενώ μειώνεται η ροπή.

Σε αυτό το κεφάλαιο, λοιπόν, θα αναλυθούν μερικές τεχνικές ελέγχου των σύγχρονων κινητήρων μόνιμων μαγνητών που κάνουν χρήση μετατροπέων τροφοδοσίας τάσης και μετατροπέων τροφοδοσίας ρεύματος. Θα αναλυθούν κάποιες τεχνικές ελέγχου στον κλιμακωτό ή βαθμωτό έλεγχο (Scalar Control) αλλά και στον διανυσματικό έλεγχο (Vector Control). Επίσης, θα αναλυθούν οι ημιτονοειδής και οι τραπεζοειδής έλεγχοι σε κινητήρες με μόνιμο μαγνήτη επιφάνειας (SPM) ή εσωτερικοί (θαμμένοι) μόνιμοι μαγνήτες (IPM).

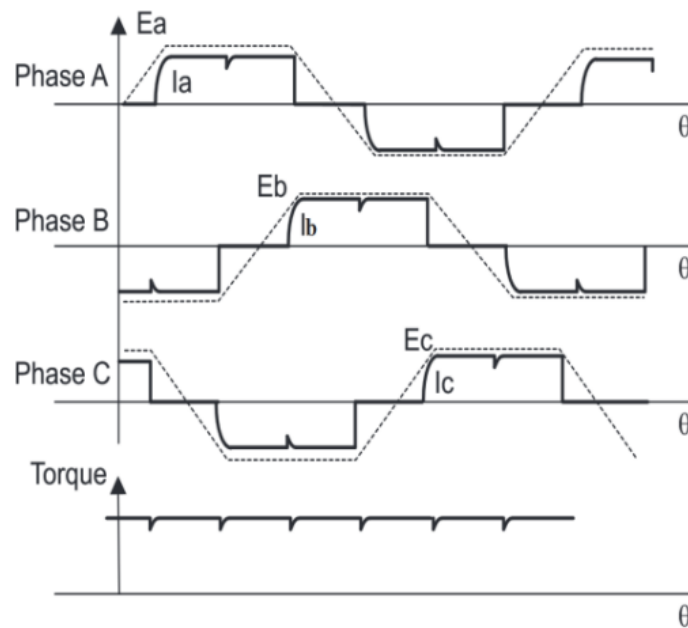
## 5.1 Τραπεζοειδής Έλεγχος (Trapezoidal Control)

Μία από τις απλούστερες και κοινές μεθόδους για τον έλεγχο των κινητήρων DC χωρίς ψήκτρες (BLDC) είναι ο τραπεζοειδής έλεγχος (Yadu Kiran, 2014). Ο στάτης αποτελείται από τρεις περιελίξεις που καταλήγουν σε ακροδέκτες. Σε αυτήν τη μέθοδο, το ρεύμα ελέγχεται κάθε φορά μέσω δύο φάσεων, κατά τη διάρκεια του οποίου η 3<sup>η</sup> φάση αποσυνδέεται από την πηγή. Για τη μέτρηση της θέσης του δρομέα, οι αισθητήρες Hall είναι συνήθως ενσωματωμένοι στον κινητήρα. Ανά πάσα στιγμή, ρεύμα ίσου μεγέθους ρέει σε δύο περιελίξεις, ενώ στη 3<sup>η</sup> περιέλιξη το ρεύμα είναι μηδενικό. Λόγω αυτού του γεγονότος, ο διανυσματικός φορέας μπορεί να βρίσκεται σε μία από της έξι διαφορετικές πιθανές κατευθύνσεις, όπως φαίνεται στην Εικόνα 36.



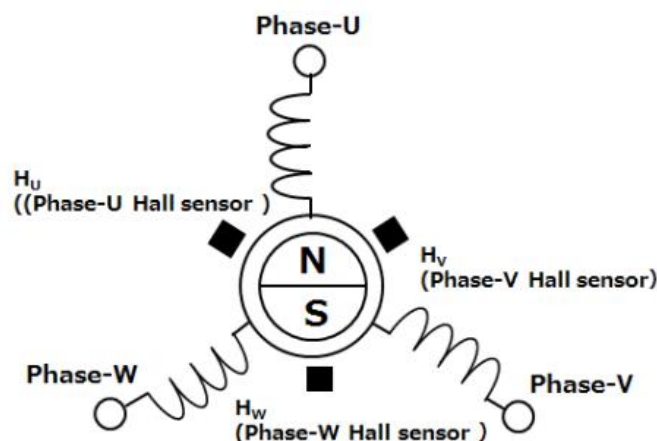
Εικόνα 36: Πιθανές κατευθύνσεις του τρέχοντος διανύσματος στον τραπεζοειδή έλεγχο (Πηγή: (Yadu Kiran, 2014))

Καθώς ο κινητήρας περιστρέφεται, το ρεύμα στους ακροδέκτες του κινητήρα διακόπτεται ή μετατίθεται για κάθε 60° περιστροφής έτσι ώστε το κάθε διάνυσμα να βρίσκεται πάντα πλησιέστερα τις 30° της κατεύθυνσης τετραγωνισμού της κυματομορφής, δηλαδή με πιο απλά λόγια οι κυματομορφές να έχουν την μορφή της Εικόνα 37. Επομένως, η τρέχουσα κυματομορφή για κάθε τύλιγμα είναι μια σκάλα που χωρίζεται στο μηδέν, θετικό, μηδέν και μετά αρνητικό ρεύμα. Αυτό παράγει ένα τρέχον διάνυσμα που κινείται ανάμεσα σε έξι διαφορετικές κατευθύνσεις καθώς περιστρέφεται ο δρομέας. Ως εκ τούτου, αναφέρεται και ως έλεγχος «έξι βημάτων» ή γνωστό και στην βιομηχανία ως 6-Step Control. Γενικότερα, ο τραπεζοειδής έλεγχος είναι κατάλληλος για κινητήρες με ημιτονοειδής αντι-ηλεκτρεγερτική δύναμη καθώς η ροπή που παράγεται δεν είναι σταθερή αλλά αποτελείται από τμήματα ημιτονοειδούς κυματομορφής. Αυτό οφείλεται στην εφαρμογή του τραπεζοειδούς ελέγχου για κινητήρα με ημιτονοειδές αντι-ηλεκτρεγερτική δύναμη.



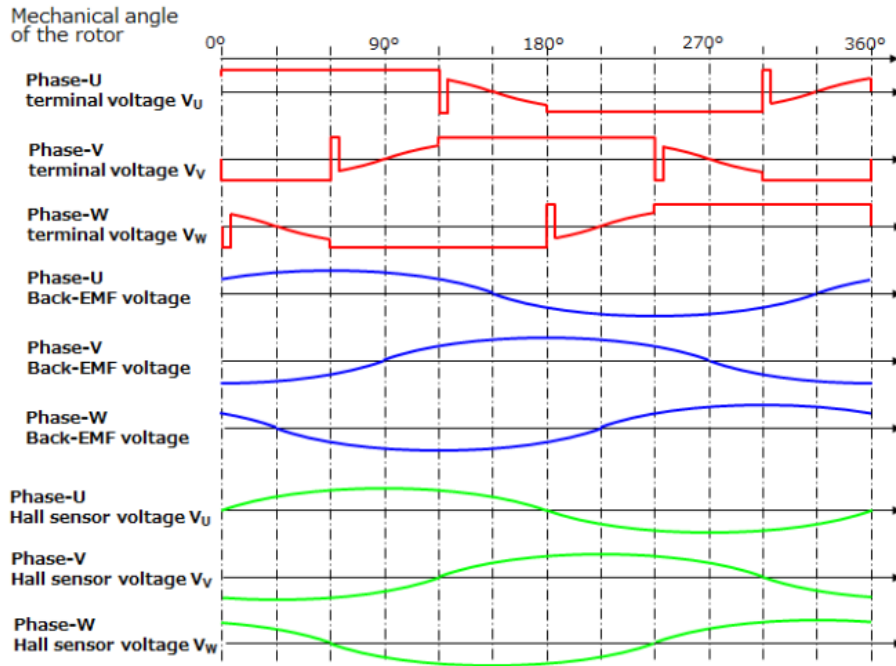
Εικόνα 37: Κυματομορφές Τραπεζοειδούς ελέγχου (Πηγή: (Yadu Kiran, 2014))

Πιο αναλυτικά, υπάρχουν δύο μεγάλες τεχνικές μετατροπής: η μια είναι η γνωστή ως 6-Step Control ή 120° Square-Wave μετατροπή και η άλλη είναι η 180° Sine-Wave μετατροπή (TOSHIBA, 2018). Η μετατροπή ημιτονοειδούς κύματος είναι ανώτερη από την μετατροπή τετραγωνικών κυμάτων όσον αφορά την ακρίβεια ελέγχου, την αποδοτικότητα και τον ακουστικό θόρυβο. Ωστόσο, η μετατροπή ημιτονοειδών κυμάτων αυξάνει την πολυπλοκότητα του συστήματος και συνεπώς επιβαρύνεται με επιπλέον κόστος. Αντίθετα, ένα σύστημα κινητήρα που κινείται χρησιμοποιώντας μετατροπή τετραγωνικών κυμάτων είναι λιγότερο περίπλοκο και δαπανηρό. Η βασική πληροφορία στην μετατροπή τετραγωνικών κυμάτων, η οποία είναι απαραίτητη για την πραγματοποίηση του ελέγχου, είναι τα σήματα από τους αισθητήρες Hall, οι οποίοι είναι τοποθετημένοι ανά 120° στον κινητήρα.



Εικόνα 38: Σχετική θέση Hall αισθητήρων (Πηγή: (TOSHIBA, 2018))

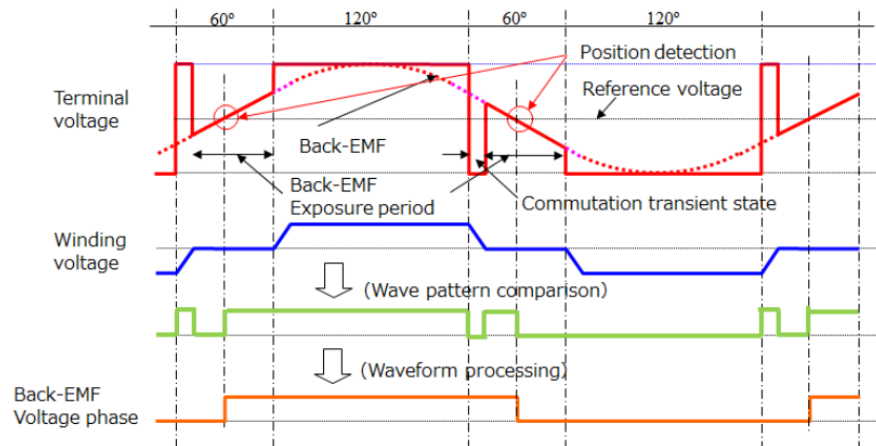
Ο κινητήρας μπορεί να περιστραφεί αλλάζοντας τις κατευθύνσεις των ρευμάτων που εφαρμόζονται στις περιελίξεις του πηνίου στο εσωτερικό του κινητήρα, ανάλογα με τη θέση του δρομέα. Οι αισθητήρες Hall χρησιμοποιούνται για την ανίχνευση θέσης του δρομέα και τοποθετούνται σε απόσταση  $120^\circ$ . Τα σήματα εξόδου αλλάζουν με τις αλλαγές στα μαγνητικά πεδία από τον μόνιμο μαγνήτη. Κάποια επαναλαμβανόμενα μοτίβα μεταγωγής για κάθε φάση του κυκλώματος δημιουργούνται κάθε  $60^\circ$  συνδυάζοντας τα σήματα από τρεις αισθητήρες Hall. Αυτό σημαίνει ότι η ακολουθία αλλαγής αποτελείται από έξι βήματα (εξ' ου και η ονομασία 6-Step Control).



Εικόνα 39: Τάση τερματικής φάσης, τάση αντι-ηλεκτρεγερτικής δύναμης και τάση με αισθητήρες Hall σε κάθε φάση (Πηγή: (TOSHIBA, 2018))

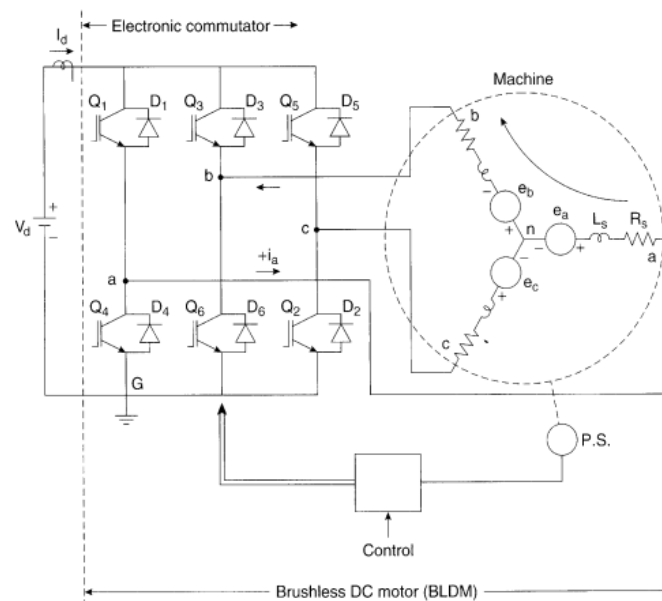
Από την άλλη στον έλεγχο των κινητήρων χωρίς αισθητήρες, για την ανίχνευση της θέσης του δρομέα, βασιζόμαστε σε μια άλλη τεχνική που προέρχεται από τις τάσεις της αντι-ηλεκτρεγερτικής δύναμης στις περιελίξεις του κινητήρα, οι οποίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την ανίχνευση της θέσης του δρομέα. Τα σημεία μηδενικής διέλευσης της αντι-ηλεκτρεγερτικής δύναμης, ανιχνεύονται σε κάθε μια φάση και υπάρχουν δυο διαφορετικοί μέθοδοι με σκοπό την ανίχνευση της μηδενικής διέλευσης: οι αναλογικές και οι ψηφιακές μέθοδοι. Η τάση της αντι-ηλεκτρεγερτικής δύναμης προκαλείται σε ένα πηνίο που αντιτίθεται στη μεταβολή της μαγνητικής ροής που την προκάλεσε. Ωστόσο, η αντι-ηλεκτρεγερτική δύναμη που προκαλείται στο τύλιγμα του στάση στον κινητήρα, κάθε φάσης, δεν μπορεί πάντα να ανιχνευθεί ενώ ο κινητήρας περιστρέφεται. Με εναλλαγή  $120^\circ$ , δύο από τις τρεις φάσεις παρέχουν ρεύμα οποιαδήποτε στιγμή ενώ η άλλη όχι (αφού δεν είναι σε λειτουργία). Η αντι-ηλεκτρεγερτική δύναμη εμφανίζεται στο τέλος της μη αγωγίμης φάσης, που μετριέται για ανίχνευση της θέσης του δρομέα.

Ένας τριφασικός κινητήρας έχει δύο σημεία μηδενικής διέλευσης για κάθε φάση (έξι σημεία για τρεις φάσεις) ανά περιστροφή της κινητήρα (δηλαδή 360°). Αυτό σημαίνει ότι η θέση του δρομέα μπορεί να ανιχνευθεί κάθε 60°. Τα σήματα αλλαγής 120° είναι απαραίτητα για ενεργοποίηση και απενεργοποίηση του μετατροπέα και δημιουργούνται με βάση τα σήματα της μηδενικής διασταύρωσης.



Εικόνα 40: Σημεία μηδενικής διέλευσης για ανίχνευση θέσης του δρομέα (Πηγή: (TOSHIBA, 2018))

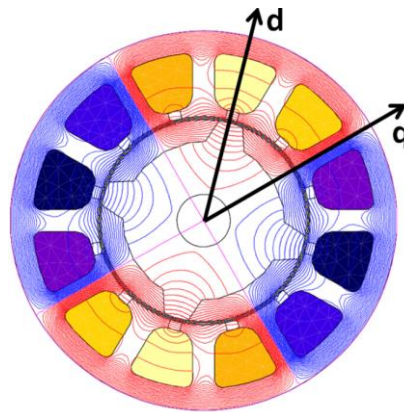
Για την οδήγηση των πηνίων στον BLDC κινητήρα, χρησιμοποιείται μια γέφυρα τριφασικού μετατροπέα που αποτελείται από έξι ημιαγωγικά στοιχεία: στη μια φάση, ο ημιαγωγός της υψηλής πλευράς είναι ενεργοποιημένος, στην άλλη φάση, ο ημιαγωγός χαμηλής πλευράς είναι ενεργοποιημένος και στην 3<sup>η</sup> φάση, όλοι οι ημιαγωγοί είναι απενεργοποιημένοι. Ένα ενδεικτικό κύκλωμα είναι αυτό στην Εικόνα 41.



Εικόνα 41: Κύκλωμα τραπεζοειδούς ελέγχου (Πηγή: (Bimal K. Bose, 2002))

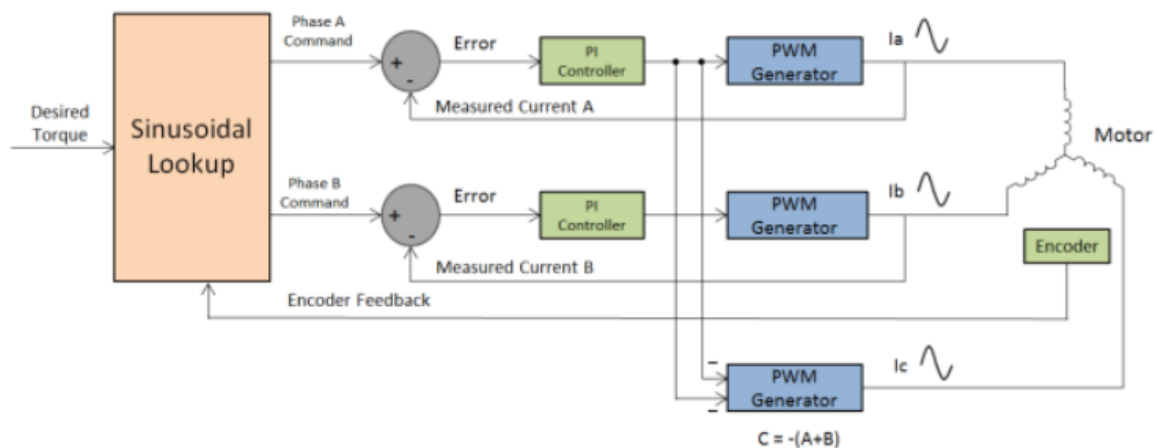
## 5.2 Ημιτονοειδής Έλεγχος (Sinusoidal Control)

Μια ακόμα πολύ σημαντική τεχνική έλεγχου είναι ο ημιτονοειδής έλεγχος (*Yadu Kiran (2014)*). Η αρχή του ημιτονοειδούς ελέγχου είναι η οδήγηση και των τριών περιελίξεων του κινητήρα με τρία ρεύματα ημιτονοειδούς μορφής, καθώς περιστρέφεται ο κινητήρας. Αυτό απαιτεί διαμόρφωση των τριών ρευμάτων περιέλιξης έτσι ώστε ο προκύπτον διανυσματικός φορέας να είναι πάντα κάθετος στο μαγνητικό πεδίο του δρομέα.



Εικόνα 42: Άμεσος άξονας και του άξονας τετραγωνισμού (Πηγή: (*Yadu Kiran, 2014*))

Για να επιτευχθεί αυτό, απαιτείται ακριβής μέτρηση της θέσης του δρομέα που μπορεί να παρέχεται από τον αναλογικό αναλυτή ή τον κωδικοποιητή τετραγωνικού παλμού. Δεδομένου ότι οι περιελίξεις είναι συνδεδεμένες με συνδεσμολογία αστέρα, το ρεύμα σε μία από τις περιελίξεις είναι το αρνητικό άθροισμα των ρευμάτων από τις άλλες δύο περιελίξεις, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 43, όπου το  $I_c$  είναι αρνητικό. Επομένως, αυτό το σχήμα απαιτεί έναν τρέχοντα βρόχο ελέγχου για τις δύο πρώτες περιελίξεις.



Εικόνα 43: Block διάγραμμα ημιτονοειδούς ελέγχου (Πηγή: (*Yadu Kiran, 2014*))



Τα ρεύματα περιέλιξης πρέπει να συνδυάζονται για να παράγουν ένα ομαλά περιστρεφόμενο διάνυσμα συνεχούς τιμής και επειδή οι περιελίξεις του στάτη είναι προσανατολισμένες μηχανικά, κατά  $120^\circ$  μεταξύ τους, τα ρεύματα σε κάθε περιέλιξη πρέπει να είναι ημιτονοειδής μορφής και η μετατόπιση φάσης τους κατά  $120^\circ$ . Οι πληροφορίες της θέσης από τον κωδικοποιητή μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη σύνθεση δύο ημιτονοειδών φασικών τάσεων που μετατοπίζονται  $120^\circ$ . Αυτά τα σήματα πολλαπλασιάζονται στη συνέχεια με μια τιμή έτσι ώστε τα πλάτη των ημιτονοειδών κυμάτων να είναι ανάλογα με την επιθυμητή ροπή. Αυτά τα σήματα στη συνέχεια παρέχονται σε ένα ζευγάρι ελεγκτών PI των οποίων η έξοδος οδηγείται σε γεννήτριες PWM. Αυτές οι γεννήτριες PWM παράγουν παλμούς στα κυκλώματα γεφυρών, για τον έλεγχο της τάσης που εφαρμόζεται στις περιελίξεις, οι οποίες με τη σειρά τους ελέγχουν τα ρεύματα περιέλιξης.

Ο ημιτονοειδής έλεγχος ξεπερνά ορισμένα από τα μειονεκτήματα του τραπεζοειδούς ελέγχου, εξαλείφοντας τον κυματισμό της ροπής και προσφέροντας ομαλή περιστροφή με υψηλότερη απόδοση σε χαμηλές ταχύτητες. Ωστόσο, οι ελεγκτές PI έχουν περιορισμένο κέρδος και απόκριση συχνότητας. Καθώς αυξάνεται η ταχύτητα, αυξάνεται η συχνότητα των ημιτονοειδών σημάτων. Το σφάλμα καθυστέρησης και κέρδους στους τρέχοντες βρόχους, το οποίο είναι ασήμαντο σε χαμηλές ταχύτητες, προκαλεί το τρέχον διάνυσμα να μετατοπιστεί μακριά από την επιθυμητή κατεύθυνση τετραγώνου (q-axis), παράγοντας ανεπιθύμητη ροπή προς την κατεύθυνση του άμεσου άξονα (d-axis). Αυτό οδηγεί σε μείωση της ωφέλιμης ροπής κατά δεδομένη ποσότητα ρεύμα. Η απόδοση εξασθενεί καθώς απαιτείται περισσότερο ρεύμα για να διατηρηθεί η ροπή στην επιθυμητή τιμή. Η ταχύτητα μπορεί επίσης να αυξηθεί μόνο σε ένα ορισμένο σημείο, μετά το οποίο η μετατόπιση φάσης στον τρέχοντα διαστημικό φορέα υπερβαίνει τις  $90^\circ$  οδηγώντας σε αρνητική ροπή.

Ωστόσο, έπειτα από την γενικότερη ανάλυση της τεχνικής ημιτονοειδούς ελέγχου, είναι πολύ σημαντικό να γίνει μια περαιτέρω ανάλυση στις δύο υποκατηγορίες που χωρίζεται αυτός ο έλεγχος.

Υπάρχουν ουσιαστικά δύο τρόποι ελέγχου για σύγχρονους κινητήρες:

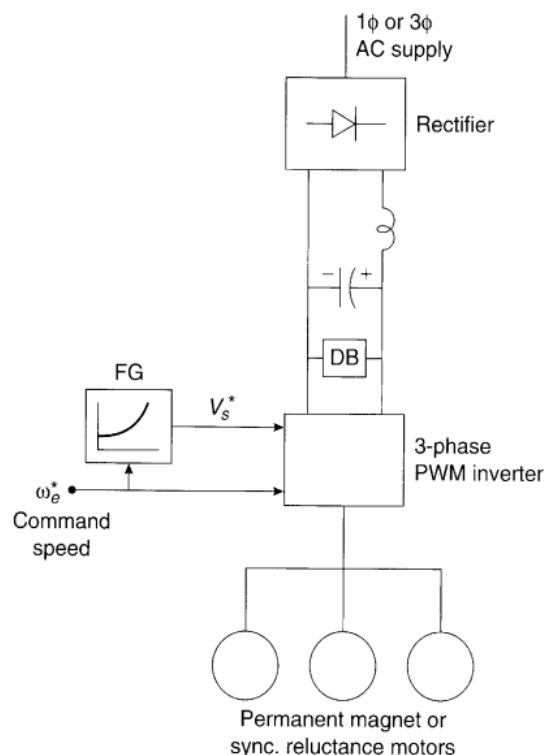
- Ο ένας τρόπος είναι ο ανοικτός βρόχος όπου η ταχύτητα του κινητήρα ελέγχεται από τον ανεξάρτητο έλεγχο συχνότητας του μετατροπέα.
- Ο άλλος είναι ο τρόπος αυτοελέγχου, όπου η μεταβλητή συχνότητα και οι παλμοί ελέγχου του μετατροπέα προέρχονται από έναν κωδικοποιητή θέσης του δρομέα που είναι τοποθετημένος στον άξονα του κινητήρα.



### 5.2.1 Έλεγχος ανοιχτού βρόχου V/f (Open Loop Control V/f)

Είναι η απλούστερη μέθοδος κλιμακωτού ή βαθμωτού ελέγχου (Scalar Control), ο οποίος βασίζεται στις σχέσεις που ισχύουν στην μόνιμη κατάσταση. Αυτή η μέθοδος ελέγχου ταχύτητας είναι ιδιαίτερα δημοφιλής σε πολλούς κινητήρες μόνιμου μαγνήτη που είναι μαζί, όπου η παρακολούθηση ταχύτητας τους είναι απαραίτητη. Εδώ, όλοι οι κινητήρες συνδέονται παράλληλα με τον ίδιο αντιστροφέα έτσι ώστε να κινούνται συγχρονισμένα. Η φασική τάση δημιουργείται από μια γεννήτρια, όπου ουσιαστικά η τάση διατηρείται ανάλογη της συχνότητας, έτσι ώστε η ροή του στάτη να παραμένει σταθερή. Παρόμοια με τους επαγωγικούς κινητήρες, προστίθεται τάση ενίσχυσης κοντά σε μηδενική συχνότητα για να αντισταθμιστεί η πτώση της αντίστασης του στάτη. Η διατήρηση σταθερής και ονομαστικής ροής στον στάτη επιτρέπει σχεδόν τη μέγιστη διαθέσιμη ροπή ανά αμπέρ ρεύματος στάτορα και γρήγορη παροδική απόκριση. Ο PWM που τροφοδοτείται με τάση παρέχεται από μια βοηθητική γραμμή μέσω ανορθωτή διόδου και φίλτρου LC.

Ο έλεγχος επειδή γίνεται μέσω ανοιχτού βρόχου, δεν χρησιμοποιεί βρόγχο ανατροφοδότησης. Αυτό κάνει τη μέθοδο εύκολη στην υλοποίηση και με μικρές απαιτήσεις σε υπολογιστική ισχύ, αλλά αυτή η απλότητα έρχεται μαζί με κάποια μειονεκτήματα όπως είναι η αστάθεια του συστήματος οδήγησης που μόλις υπερβεί κάποια συχνότητα, απαιτείται μια ειδική σχεδίαση του κινητήρα, περιορίζοντας έτσι τις διαθέσιμες επιλογές. Ένα άλλο μειονέκτημα είναι λόγω της έλλειψης ανατροφοδότησης δημιουργείται χαμηλή δυναμική απόκριση.

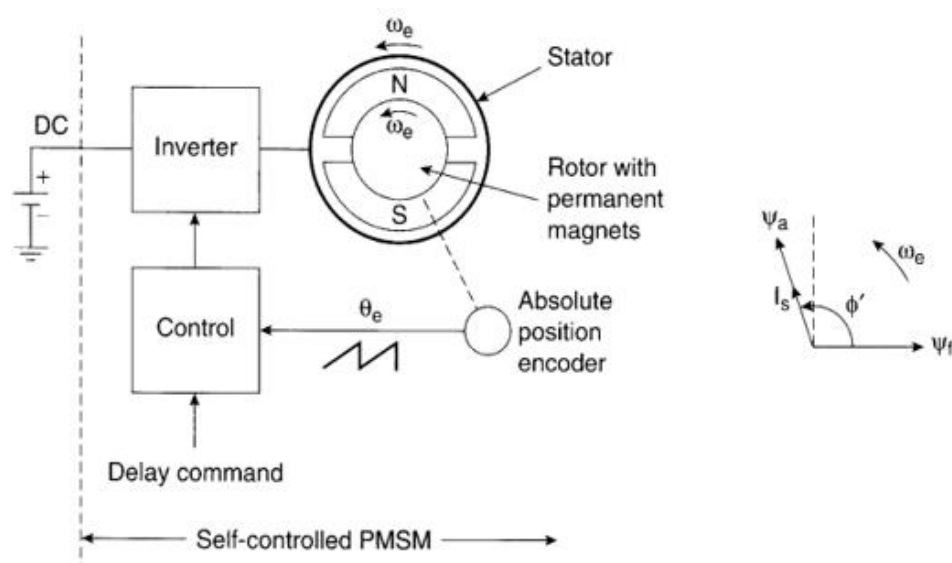


Εικόνα 44: Έλεγχος ανοιχτού βρόχου V/f (Πηγή: (Bimal K. Bose, 2002))

### 5.2.2 Τεχνική Αυτοελέγχου (Self – Controlled)

Ένας αυτοελεγχόμενος (Self-Controlled) (Στέφανος Ν. Μανιάς, 2017) σύγχρονος κινητήρας έχει αρκετά κοινά στοιχεία με έναν κινητήρα DC εκτός από τις ακόλουθες διαφορές: Σε αντίθεση με μια μηχανή DC, το πεδίο περιστρέφεται και ο σπλισμός είναι στατικός. Η περιέλιξη του στάτη του κινητήρα τροφοδοτείται από έναν ηλεκτρονικό μετατροπέα που παράγει μια ημιτονοειδής παροχή μεταβλητής τάσης και μεταβλητής συχνότητας, αλλά σε αυτήν την περίπτωση, αντί να ελέγχεται ανεξάρτητα η συχνότητα του μετατροπέα, η συχνότητα και η φάση του κύματος εξόδου ελέγχονται από έναν αισθητήρα απόλυτης θέσης τοποθετημένο στον άξονα του κινητήρα, δίνοντάς του χαρακτηριστικά να ελέγχεται από τον εαυτό του. Σε αντίθεση με τις στάσιμες ροές, το διάγραμμα ροής και φάσης περιστρέφεται με σύγχρονη ταχύτητα και τέλος ο αισθητήρας απόλυτης θέσης δίνει τη θέση της ροής πεδίου που είναι στερεωμένη στον δρομέα.

Φυσικά, η παλμική διαδρομή από τον αισθητήρα θέσης μπορεί να καθυστερήσει με μια εξωτερική εντολή. Οι σύγχρονοι αυτοί κινητήρες έχουν μια απόλυτη θέση μαγνητικών πόλων στο δρομέα, κάτι διαφορετικό από τη θέση ολίσθησης πόλων από έναν κινητήρα επαγωγής. Επομένως, σε έναν αυτοελεγχόμενο σύγχρονο κινητήρα, ο κωδικοποιητής απόλυτης θέσης είναι υποχρεωτικός. Οι κινητήρες ημιτονοειδών μόνιμων μαγνητών απαιτούν συνεχείς πληροφορίες για τη θέση του δρομέα με υψηλή ακρίβεια. Αυτό είναι πολύ πιο απαιτητικό από εκείνο των τραπεζοειδών κινητήρων που απαιτούν πληροφορίες θέσης μόνο σε διακριτές ενδείξεις. Οι κωδικοποιητές θέσης μπορούν γενικά να ταξινομηθούν σε δύο τύπους: οπτικός τύπος (optical encoder) και αναλογικός αναλυτής (analog resolver). Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται ένας ημιτονοειδής κινητήρας SPM με αυτοέλεγχο.

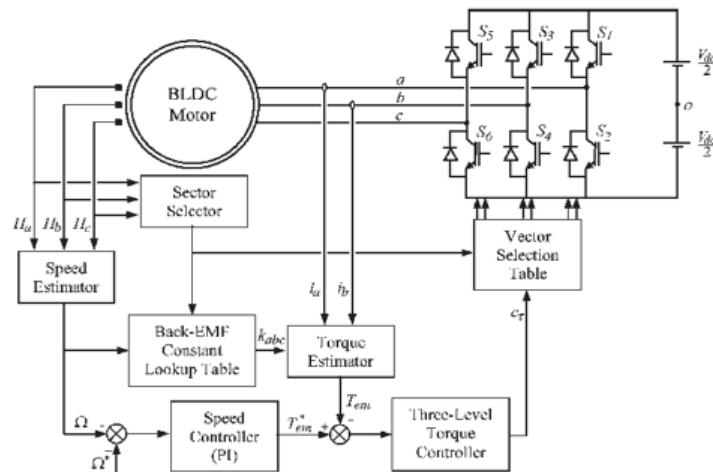


Εικόνα 45: Σύγχρονος αυτοελεγχόμενος κινητήρας (Πηγή: (Bimal K. Bose, 2002))

### 5.3 Άμεσος έλεγχος ροπής και ροής (Direct Torque and Flux Control, DTC ή DTFC)

Ο άμεσος έλεγχος ροπής και ροής (Direct Torque and Flux Control) (Στέφανος Ν. Μανιάς, 2017) είναι γνωστός ότι είναι της αξιόπιστος και αποδοτικός διανυσματικός έλεγχος και έχει ως βασικό χαρακτηριστικό να υπολογίζεται άμεσα η γωνία της μαγνητικής ροής του δρομέα από εκτίμηση ή από μέτρηση. Η τεχνική DTC, που ανακαλύφθηκε αρχικά για ασύγχρονους κινητήρες το 1986, χρειάζεται μόνο τη γνώση της αντίστασης του στάτη και κατά συνέπεια μειώνει την ευαισθησία που συνδέεται με την αλλαγή των παραμέτρων και της δεν χρησιμοποιεί ανάδραση ταχύτητας. Στον άμεσο διανυσματικό έλεγχο ροπής και ροής, η μέτρηση της γίνεται με τοποθέτηση αισθητήρων Hall στο διάκενο ή με τη τοποθέτηση αισθητήριων πηνίων στο στάτη ή με χρήση τυλιγμάτων του στάτη ως αισθητήρια πηνία. Η αρχή του άμεσου ελέγχου ροπής είναι να επιλέγει άμεσα τα διανύσματα της τάσης σύμφωνα με την διαφορά μεταξύ τιμής αναφοράς και πραγματικής τιμής της ροπής και της μαγνητικής ροής σύνδεσης. Ανάλογα με την σύγκριση, ένα διάνυσμα τάσης επιλέγεται από έναν πίνακα, της φαίνεται στην Εικόνα 46.

Η τεχνική DTC, η οποία χρησιμοποιεί αλγορίθμους που βασίζονται σε έλεγχο με υστέρηση έχει το μειονέκτημα της μεταβλητής διακοπτικής συχνότητας του αντιστροφέα ισχύος και κατά συνέπεια να χρειάζεται μεγάλη συχνότητα δειγματοληψίας. Ωστόσο, για κάθε διπλασιασμό της συχνότητας δειγματοληψίας, προσεγγιστικά, η κυμάτωση περιορίζεται στο μισό της, για ένα σύγχρονο κινητήρα, η θέση του δρομέα πρέπει να είναι γνωστή κατά την εκκίνηση και παρόλο ότι το σύστημα παρουσιάζει καλή δυναμική απόκριση, εμφανίζει φτωγή επίδοση στην μόνιμη κατάσταση αφού εμφανίζονται υψηλά επίπεδα κυμάτωσης στο ρεύμα του στάτη στη ροή διασύνδεσης και στην ροπή. Από την άλλη πλευρά της, έχει και μερικά πλεονεκτήματα της είναι η χαμηλή πολυπλοκότητα και ότι χρειάζεται η χρήση μόνο μιας παραμέτρου του κινητήρα της αντίστασης του στάτη. Δεν χρειάζεται διαμόρφωση εύρους παλμών (PWM), αντιθέτως ένα από τα διανύσματα τάσης (VSI) εφαρμόζεται κατά την διάρκεια ολόκληρης της περιόδου του δείγματος.

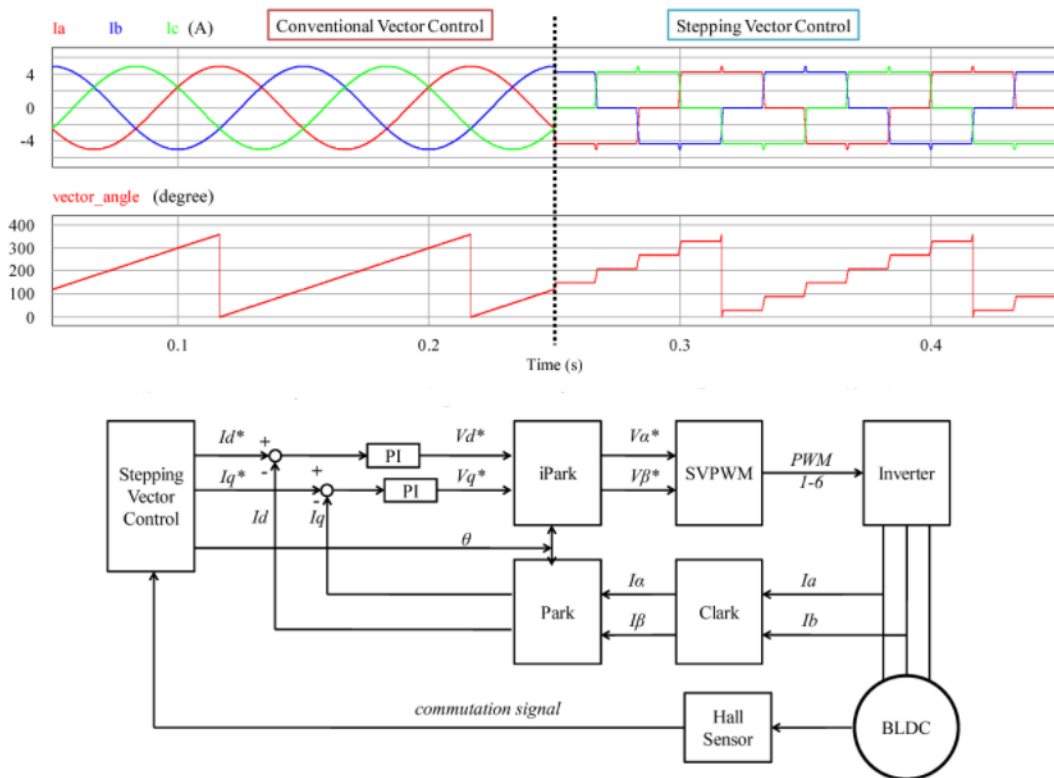


Εικόνα 46: Εφαρμογή DTC ελέγχου σε BLDC (Πηγή: (Bimal K. Bose, 2002))

### 5.4 Διανυσματικός έλεγχος (Vector Control)

Στον βαθμωτό ή κλιμακωτό έλεγχο συναντάμε το πρόβλημα ότι τόσο η ροή όσο και η ροπή είναι συζευγμένα μεγέθη, επηρεάζοντας την απόκριση και κάνοντας το σύστημα πιο επιρρεπές σε αστάθεια, αν φυσικά δεν ληφθεί σωστά στον έλεγχο. Μόνο το πλάτος και η συχνότητα της τάσης ή του ρεύματος ελέγχονται και επίσης αυτός ο έλεγχος χρησιμοποιείται όταν πολλοί κινητήρες οδηγούνται παράλληλα από τον ίδιο αντιστροφέα (inverter). Από την άλλη πλευρά, στο διανυσματικό έλεγχο, που εμφανίζεται αρκετά στους παραπάνω ελέγχους, το πλάτος της ροής του στάτη και του δρομέα λαμβάνονται υπόψιν αλλά και η μεταξύ τους γωνία. Έτσι, είναι εύκολο με τον έλεγχο των χαρακτηριστικών που αναφέρθηκαν να επιτευχθεί μεγαλύτερη δυναμική απόκριση από το σύστημα οδήγησης σε σχέση με αυτή που μπορεί να προσφέρει ο βαθμωτός ή κλιμακωτός έλεγχος.

Στην παρακάτω εικόνα, δίνεται ένα παράδειγμα κυκλώματος όπου ο προτεινόμενος έλεγχος του διανύσματος (SVC) συνδυάζει τα πλεονεκτήματα του ελέγχου του ημιτονοειδούς ρεύματος και του τραπεζοειδούς ρεύματος ελέγχου για τη βελτίωση της απόδοσης του κινητήρα χωρίς ψήκτρες DC (BLDC). Με τον προτεινόμενο αλγόριθμο, ο κυματισμός ροπής ελαχιστοποιείται από τα αντίστοιχα εισερχόμενα και εξερχόμενα ρεύματα.



Εικόνα 47: Παράδειγμα διανυσματικού ελέγχου (Πηγή: *Semantic Scholars*, 2014)

### 5.4.1 Διανυσματικός έλεγχος προσανατολισμένου πεδίου (Field Oriented Control, FOC)

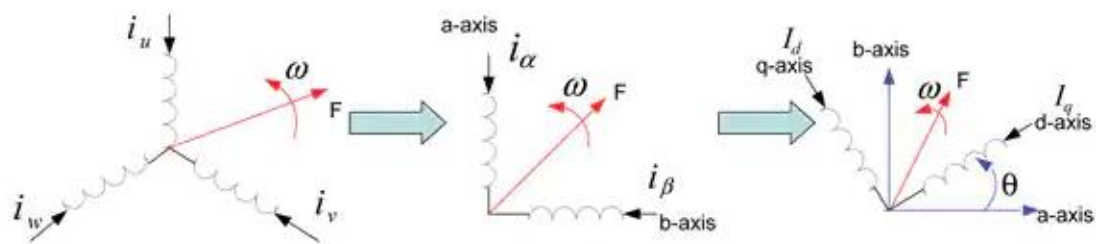
Αντιθέτως από τον βαθμωτό έλεγχο και την DTC τεχνική, ο διανυσματικός έλεγχος προσανατολισμένου πεδίου (Field Oriented Control) (Στέφανος Ν. Μανιάς, 2017) χρησιμοποιεί σχέσεις και μοντέλα δυναμικής κατάστασης, έχει τη δυνατότητα ελέγχου του μέτρου, της συχνότητας και της θέσης των χωρικών διανυσμάτων της τάσης, του ρεύματος και της μαγνητικής ροής. Υπάρχουν δυο τεχνικές ελέγχου επίτευξης του ελέγχου προσανατολισμένου πεδίου:

- Άμεσος διανυσματικός έλεγχος (Direct Field Oriented Control, DFOC) στον οποίο το διάνυσμα της ροής (μέτρο και θέση) του δρομέα υπολογίζεται άμεσα από τις ποσοτικές μετρήσεις του κινητήρα.
- Έμμεσος διανυσματικός έλεγχος (Indirect Field Oriented Control, IFOC) στον οποίο το διάνυσμα της μαγνητικής ροής (μέτρο και θέση) του δρομέα υπολογίζεται έμμεσα από τις υπάρχουσες εκτιμήσεις ταχύτητας και ολίσθησης.

Η τεχνική FOC βασίζεται στην αναλογία του κινητήρα εναλλασσόμενου ρεύματος με τον κινητήρα συνεχούς ρεύματος όπου η μετάβαση του ρεύματος γίνεται με μηχανικό τρόπο. Σε έναν DC κινητήρα, η ροή πεδίου που σε αυτή την περίπτωση είναι η ροή του στάτη και η ροή του δρομέα κρατούνται σε ορθογώνια διάταξη μηχανικά από τον εναλλάκτη. Όταν τα πεδία είναι ορθογωνικά, η ροή του οπλισμού δεν επηρεάζει την ροή του πεδίου και η ροή του κινητήρα αποκρίνεται άμεσα σε οποιαδήποτε μεταβολή της ροής του οπλισμού ή ισοδύναμα σε μεταβολή του ρεύματος οπλισμού. Σε έναν AC κινητήρα, η ροή του πεδίου που είναι τώρα στον δρομέα περιστρέφεται αλλά στην περίπτωση του ελέγχου προσανατολισμένου πεδίου, ο ελεγκτής περιστρέφει την ροή του οπλισμού του στάτη ώστε η ροή του οπλισμού και η ροή του πεδίου να διατηρούνται ορθογώνιες και συνεπώς ο AC κινητήρας συμπεριφέρεται ως DC κινητήρας. Οι απαιτήσεις είναι να υπάρχει ανεξάρτητος έλεγχος ρεύματος στον οπλισμό, να είναι ανεξάρτητα ελεγχόμενη η σταθερή ροή του πεδίου και να είναι ανεξάρτητα ελεγχόμενη η ορθογωνική γωνία μεταξύ ροής στάτη και δρομέα. Ο έλεγχος προσανατολισμού πεδίου συνήθως αναφέρεται σε ελεγκτές που διατηρούν γωνία  $90^\circ$  μεταξύ των συνιστωσών των πεδίων στάτη και δρομέα. Τα συστήματα που απομακρύνονται από τον προσανατολισμό των  $90^\circ$  αναφέρονται ως έλεγχος γωνίας πεδίου ή έλεγχος γωνίας.

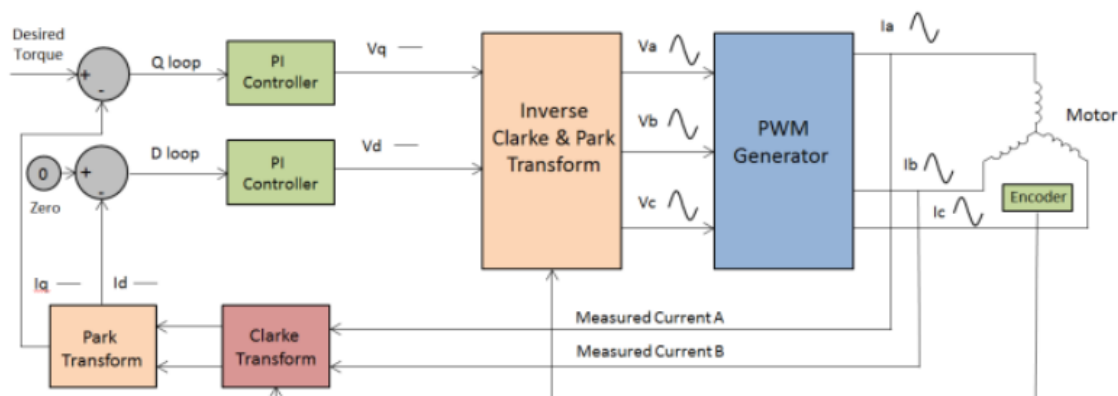
Ο αλγόριθμος μιας τεχνικής FOC, μοιράζεται πολλά κοινά σημεία με τον ημιτονοειδή έλεγχο. Ωστόσο, έχουν ορισμένες θεμελιώδεις διαφορές, καθώς επιτυγχάνεται καλύτερη απόδοση σε υψηλές ταχύτητες. Το κύριο μειονέκτημα του ημιτονοειδούς ελέγχου προκύπτει από το γεγονός ότι το σχήμα ελέγχου προσπαθεί να ελέγξει τα ρεύματα του κινητήρα των οποίων το μέγεθος και η κατεύθυνση ποικίλλει. Καθώς αυξάνεται η ταχύτητα και η συχνότητα, οι ελεγκτές PI είναι ανίκανοι να χειριστούν τη λειτουργία λόγω αυτών των περιορισμών του εύρους ζώνης. Ωστόσο, αυτό το πρόβλημα μπορεί να ξεπεραστεί με την αναπαράσταση και τον έλεγχο του

τρέχοντος διανύσματος, δηλαδή δύο αξόνων d-q. Αυτό το σχήμα ελέγχου περιστρέφεται γύρω από τους μετασχηματισμούς Clarke και Park και το αντίστροφο.



Εικόνα 48: Μετασχηματισμός Clarke και Park (Πηγή: (Jani, 2011))

Το στοιχείο στον ευθύ άξονα (direct axis, d-axis) παράγει άεργο ροπή ενώ στον εγκάρσιο άξονα (quadrature axis, q-axis) παράγεται ροπή που είναι υπεύθυνη για την περιστροφή. Σε μια ιδανική περίπτωση, το τρέχων διάνυσμα στο πλαίσιο d-q είναι σταθερό σε μέγεθος και κατεύθυνση σε σχέση με τον δρομέα, ανεξάρτητα από την περιστροφή. Δεδομένου ότι το τρέχων διάνυσμα στο πλαίσιο αναφοράς d-q είναι στατικό, οι ελεγκτές PI πρέπει τώρα να λειτουργούν σε ποσότητες DC αντί για ημιτονοειδή σήματα, απλοποιώντας τη δομή ελέγχου. Αυτό απομονώνει τους ελεγκτές από το ρεύμα και τις τάσεις στις περιελίξεις για κάποια χρονική στιγμή και συνεπώς εξαλείφει τον περιορισμό απόκρισης συχνότητας του ελεγκτή και της μετατόπισης φάσης με ροπή και ταχύτητα του κινητήρα.



Εικόνα 49: Block διάγραμμα διανυσματικού ελέγχου προσανατολισμένου πεδίου (Πηγή: (Yadu Kiran, 2014))

Τα ρεύματα του κινητήρα μετατρέπονται πρώτα σε ένα τριφασικό στατικό πλαίσιο αναφοράς των περιελίξεων του στάτη στο περιστρεφόμενο πλαίσιο αναφοράς d-q, πριν από την επεξεργασία από τους ελεγκτές PI. Οι τάσεις που θα εφαρμοστούν στη συνέχεια μεταφέρονται πίσω στο 3Φ πλαίσιο αναφοράς και στη συνέχεια αποστέλλονται στη γεννήτρια PWM. Η γεννήτρια PWM παράγει παλμούς στη πύλη του κυκλώματος, για να παράγει την απαιτούμενη τάση που θα εφαρμόζεται στις περιελίξεις.

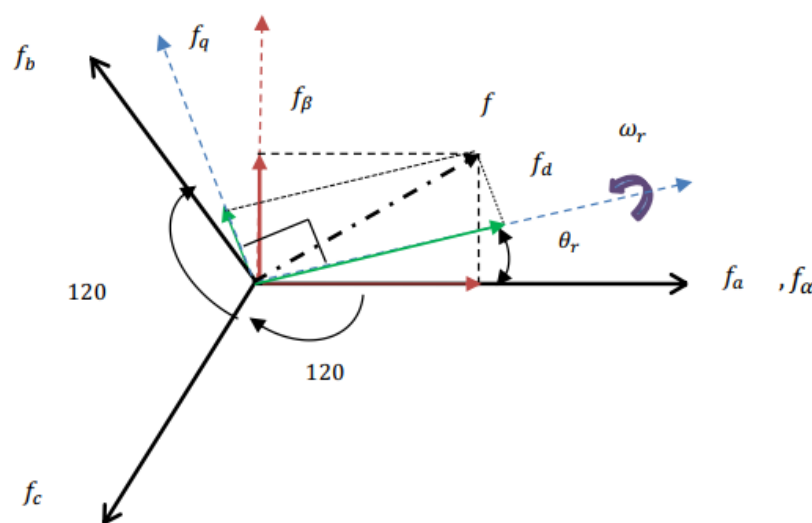
Στον ημιτονοειδή έλεγχο, η μετατροπή πραγματοποιείται πρώτη και ακολουθείται από έλεγχο PI του προκύπτοντος ημιτονοειδούς σήματος. Στο FOC, ο έλεγχος PI του ρεύματος εκτελείται πρώτα και ακολουθείται από τις διαδικασίες μετατροπής. Με την απομόνωση των ελεγκτών PI από το χρόνο που ποικίλει σε ρεύματα και τάσεις, ο αλγόριθμος FOC είναι σε θέση να προσφέρει πολλά πλεονεκτήματα, όπως:

- Υψηλή απόδοση
- Ομαλή λειτουργία σε χαμηλές και υψηλές ταχύτητες με αποτέλεσμα ένα ευρύ φάσμα ταχύτητας
- Μετατροπή ενός σύνθετου και συνδεδεμένου μοντέλου AC σε ένα απλό γραμμικό σύστημα
- Γρήγορη δυναμική απόκριση και καλή απόδοση παροδικής και σταθερής κατάστασης

#### 5.4.2 Μετασχηματισμός Clarke – Park

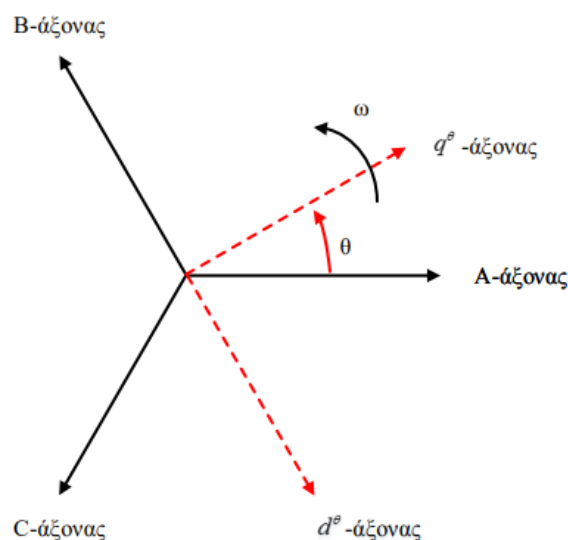
Οι μετασχηματισμοί Clarke και Park είναι απαραίτητοι για τον έλεγχο των διανυσμάτων (Ali Abdul Razzaq Altahir, April 2020), όμως, μπορούν και να μετατραπούν τα 3Φ ρεύματα του στάτη στο περιστρεφόμενο πλαίσιο του δρομέα.

Για να απλοποιηθεί η μοντελοποίηση του συστήματος κίνησης ελέγχου προσανατολισμένο στο πεδίο, είναι συνήθης πρακτική να μετατρέπονται οι μεταβλητές κατάστασης συστήματος από το τριφασικό σύστημα (abc) σε ορθογώνια αναπαράσταση (a - b) ή περιστρεφόμενο πλαίσιο αναφοράς (d - q) με έναν άμεσο άξονα (d) και εγκάρσιο άξονα (q), με την βοήθεια των μετασχηματισμών. Στην Εικόνα 50, φαίνονται τα διανύσματα που προκύπτουν από τους μετασχηματισμούς Clarke και Park, όπου το προκύπτον  $f$  δηλώνει είτε την τάση στάτη, το ρεύμα είτε τη μαγνητική σύνδεση ροής και  $\theta_r$  είναι η γωνία θέσης του δρομέα του περιστρεφόμενου (d - q) πλαισίου αναφοράς.



Εικόνα 50: Συνδυασμένες σταθερές και περιστρεφόμενα πλαίσια για τριφασικό σύστημα (Πηγή: (Ali Abdul Razzaq Altahir, April 2020))

Στην ουσία αυτό που γίνεται είναι το εξής: ο μετασχηματισμός Clarke λαμβάνει τα τρία περιστρεφόμενα σήματα (τα φασικά ρεύματα) τα οποία περιστρέφονται με διαφορά φάσης  $120^\circ$ , τα μετασχηματίζει σ' ένα νέο, επίσης περιστρεφόμενο, διφασικό σύστημα (d, q) με διαφορά φάσης  $90^\circ$ . Στη συνέχεια ο μετασχηματισμός Park ανάγει τα νέα μεγέθη ως προς ένα διφασικό, σταθερό πλέον, σύστημα αναφοράς (d, q) με αποτέλεσμα τα μεγέθη πλέον να θεωρούνται σταθερά ως προς την εκάστοτε μεταβλητή, η οποία στην περίπτωση των ηλεκτρικών κινητήρων είναι η γωνία θέσης του δρομέα. Στην πραγματικότητα υπάρχει και μία τρίτη μεταβλητή, η ( $\theta_e = 0$ ), όμως επειδή ισούται με 0 παραλείπεται.



Εικόνα 51: Άξονες d-q στον χώρο (Πηγή: Research Gate)

Χάρης στη μετάβαση αυτή, όλα τα μεγέθη που υπολογίζονται τόσο συναρτήσει της γωνίας  $\theta_e$ , όσο και συναρτήσει του χρόνου (ημιτονοειδής μεταβολή), μετατρέπονται σε συνεχή, ενώ οι επαγωγές που εξαρτώνται άμεσα από τη γωνία  $\theta_e$ , εξαλείφονται απλουστεύοντας σημαντικά τη μαθηματική ανάλυση.

Σημειώνεται πως για να ισχύουν οι μετασχηματισμοί Clarke και Park, ο ευθύς άξονας d (που παράγει την άεργο ροπή) είναι ευθυγραμμισμένος με τη φάση a, ενώ οι άξονες d και q περιστρέφονται στον χώρο με τη σύγχρονη ηλεκτρική ταχύτητα του δρομέα στον εγκάρσιο άξονα (q-axis), όπου παράγεται ροπή, υπεύθυνη για την περιστροφή, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 51. Τέλος, σε μια ιδανική περίπτωση, το τρέχων διάνυσμα στο πλαίσιο d-q είναι σταθερό σε μέγεθος και κατεύθυνση σε σχέση με τον δρομέα, ανεξάρτητα από την περιστροφή.



### Μετασχηματισμός Clarke:

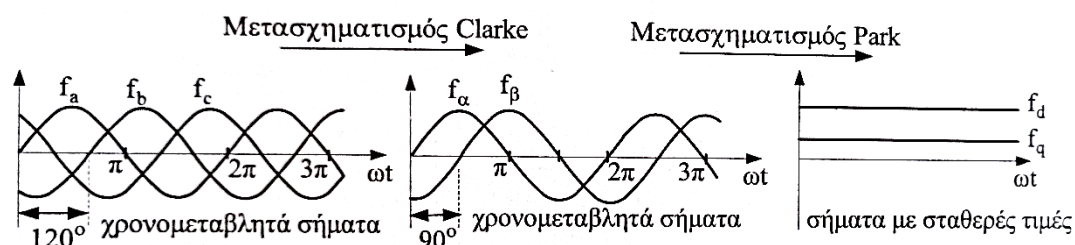
Ο μετασχηματισμός Clarke, που ονομάστηκε έτσι από την ηλεκτρολόγο μηχανικό Edith Clarke, είναι μετασχηματισμός διανυσμάτων χώρου σημάτων (όπως τάση, ρεύμα, ροή κτλ) στο πεδίο του χρόνου, από το φυσικό τριφασικό σύστημα συντεταγμένων abc σε στατικό διφασικό πλαίσιο αναφοράς (a -b). Χρησιμοποιείται για την απλοποίηση της ανάλυσης τριφασικών κυκλωμάτων. Στο φυσικό σύστημα, οι άξονες των τάσεων, για παράδειγμα, έχουν διαφορά φάσης 120° μεταξύ τους. Στο πλαίσιο (a -b) τα διανύσματα είναι κάθετα, με διαφορά φάσης 90°. Η παρακάτω σχέση δείχνει τον μετασχηματισμό Clarke:

$$\begin{bmatrix} f_a \\ f_b \end{bmatrix} \triangleq \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_a \\ f_b \\ f_c \end{bmatrix} \quad (1.12)$$

### Μετασχηματισμός Parke:

Για τη μείωση της πολυπλοκότητας της ανάλυσης διαφόρων συστημάτων χρησιμοποιείται συχνά αυτός ο μετασχηματισμός, που δίνει τη δυνατότητα τα μεγέθη να αναπαρίστανται ως χρονικά αμετάβλητα. Πρόκειται για το μετασχηματισμό των ποσοτήτων που αναφέρονται σε συμμετρικό τριφασικό σύστημα ακίνητο στο χώρο (abc) σε σύστημα αναφοράς δύο κάθετων αξόνων κινούμενων με αυθαίρετη ταχύτητα (d - q). Ο μετασχηματισμός αυτός προτάθηκε το 1929 από τον Robert H. Park, από τον οποίο πήρε και το όνομά τους. Η καινοτομία της δουλειάς του Park περιλαμβάνει την ικανότητά του να μεταμορφώνει οποιοδήποτε σύνολο εξισώσεων σχετικών μηχανών από συντελεστές που ποικίλλουν από χρόνο σε άλλο με συντελεστές αμετάβλητου χρόνου.

$$\begin{bmatrix} f_\alpha \\ f_\beta \end{bmatrix} \triangleq \begin{bmatrix} \cos(\theta_r) & -\sin(\theta_r) \\ \sin(\theta_r) & \cos(\theta_r) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_d \\ f_q \end{bmatrix} \quad (1.13)$$



Εικόνα 52: Σήματα των μετασχηματισμών Clarke και Park, συναρτήσει του χρόνου (Πηγή: (Bimal K. Bose, 2002))

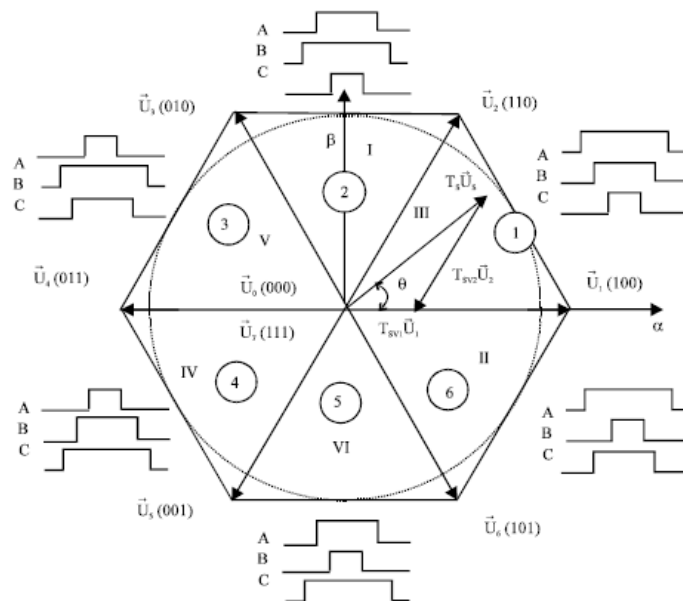
Ο συνδυασμός των σχέσεων (1.12) και (1.13), δίνει το γενικό τύπο του μετασχηματισμού Clarke και Parke:

$$\begin{bmatrix} f_d \\ f_q \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\theta_r) & \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin(\theta_r) & -\sin(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_a \\ f_b \\ f_c \end{bmatrix} \quad (1.14)$$

### 5.4.3 Διαμόρφωση Διανύσματος χώρου (Space Vector Modulation, SVM)

Η διανυσματική διαμόρφωση διαστήματος (Space Vector Modulation, SVM) είναι ένας αλγόριθμος για τον έλεγχο του πλάτους παλμού (PWM). Χρησιμοποιείται για τη δημιουργία των AC ρευμάτων σε κυματομορφές, συνήθως για να οδηγήσει τους 3Φ εναλλασσόμενους κινητήρες, εναλλασσόμενου ρεύματος, σε ποικίλες ταχύτητες συνεχούς ρεύματος χρησιμοποιώντας ενισχυτές. Υπάρχουν παραλλαγές του SVM που οδηγούν σε διαφορετικές απαιτήσεις ποιότητας και υπολογισμού. Ένας ενεργός τομέας ανάπτυξης είναι με την μείωση της ολικής αρμονικής παραμόρφωσης (Total Harmonic Distortion, THD) που δημιουργείται από την ταχεία εναλλαγή που είναι ένα συνηθισμένο φαινόμενο σε αυτούς τους αλγόριθμους.

Ένας τριφασικός μετατροπέας μετατρέπει μια παροχή DC, μέσω μιας σειράς διακοπών, σε τρεις εξόδους που θα μπορούσαν να συνδεθούν με έναν τριφασικό κινητήρα. Οι διακόπτες πρέπει να ελέγχονται έτσι ώστε σε καμία στιγμή να μην ενεργοποιούνται και οι δύο διακόπτες στο ίδιο σημείο, διαφορετικά η παροχή DC θα βραχυκυκλωνόταν. Έτσι λοιπόν, οδηγούνται σε οκτώ πιθανά διανύσματα μεταγωγής για τον μετατροπέα,  $V_0$  έως  $V_7$  με έξι ενεργούς φορείς μεταγωγής και δύο μηδενικά διανύσματα.



Εικόνα 53: Διαμόρφωση διανυσμάτων μέσω SVM (Πηγή: (Ali Abdul Razzaq Altahir, April 2020))

Πίνακας 6: Διαμόρφωση διανυσμάτων μέσω SVM

Διανύσματα	$V_{ab}$	$V_{bc}$	$V_{ca}$
$V_0$ (000)	0	0	0
$V_1$ (100)	$+V_{DC}$	0	$-V_{DC}$
$V_2$ (110)	0	$+V_{DC}$	$-V_{DC}$
$V_3$ (010)	$-V_{DC}$	$+V_{DC}$	0
$V_4$ (011)	$-V_{DC}$	0	$+V_{DC}$
$V_5$ (001)	0	$-V_{DC}$	$+V_{DC}$
$V_6$ (101)	$+V_{DC}$	$-V_{DC}$	0
$V_7$ (000)	0	0	0

### 5.5 Σύνοψη τεχνικών ελέγχου

Οι τεχνικές ελέγχου που αναφέρονται αναλυτικά σε αυτήν την διπλωματική εργασία έχουν κάθε μια από αυτές τα δικά τους πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα. Ο τραπεζοειδής έλεγχος (Trapezoidal Control) είναι σχετικά απλός και προσφέρει ομαλή λειτουργία σε υψηλή ταχύτητα, αλλά προκαλεί κυματισμό ροπής σε χαμηλές ταχύτητες. Ο ημιτονοειδής έλεγχος (Sinusoidal Control) εξαλείφει τον κυματισμό ροπής και παρέχει αποτελεσματική λειτουργία σε χαμηλές ταχύτητες, αλλά οι περιορισμοί ενός ελεγκτή PI το κάνουν ακατάλληλο για εφαρμογές υψηλής ταχύτητας. Ο διανυσματικός έλεγχος προσανατολισμένου πεδίου (Field Oriented Control) συνδυάζει τις καλύτερες πτυχές των δύο προηγούμενων μεθόδων, προσφέροντας ομαλή και αποτελεσματική λειτουργία με γρήγορη δυναμική απόκριση τόσο σε χαμηλές όσο και σε υψηλές ταχύτητες. Ο άμεσος έλεγχος ροπής και ροής (DTC), έχει τα πλεονεκτήματα όπως χαμηλή πολυπλοκότητα και ότι χρειάζεται η χρήση μόνο μιας παραμέτρου του κινητήρα της αντίστασης του στάτη, όμως, έχει το μειονέκτημα της μεταβλητής διακοπτικής συχνότητας του αντιστροφέα ισχύος και κατά συνέπεια να χρειάζεται μεγάλη συχνότητα δειγματοληψίας. Η απόφαση για την εφαρμογή αισθητήρων εξαρτάται επίσης από διάφορους παράγοντες. Ωστόσο, η εξαίρεση των αισθητήρων θα μειώσει το κόστος και το μέγεθος του συστήματος αλλά αυξάνει την πολυπλοκότητα, καθώς οι πληροφορίες του δρομέα πρέπει να εξαχθούν με άλλα μέσα.

## **Κεφάλαιο 6<sup>ο</sup>: Εφαρμογή Τραπεζοειδούς Ελέγχου για Οδήγηση BLDC κινητήρα**

Σε αυτό το κεφάλαιο, θα γίνει παρουσίαση της πρώτης τεχνικής ελέγχου που χρησιμοποιήθηκε σε έναν κινητήρα BLDC ώστε να εξάγουμε την τραπεζοειδή μαγνητική ροή. Το πρόγραμμα της προσομοίωσης είναι το Matlab/Simulink. Σε συνέχεια από το προηγούμενο κεφάλαιο που παρουσιάστηκαν αρκετές τεχνικές ελέγχου για BLDC κινητήρες, η τεχνική που έχει επιλεγεί να παρουσιαστεί ως πρώτη είναι αυτή του τραπεζοειδούς ελέγχου που χρησιμοποιεί επίσης και PI ελεγκτή.

Αυτός ο έλεγχος στηρίζεται στο γεγονός ότι το κύκλωμα μας είναι ένας κλειστός βρόγχος για έλεγχο ταχύτητας (closed loop speed controller) ενός BLDC κινητήρα και αυτό εξηγείται από το γεγονός ότι εμείς του ορίζουμε τις τιμές που θέλουμε να τροποποιήσουμε στο κύκλωμα, ώστε να μας δώσει τα επιθυμητά αποτελέσματα. Στην πράξη, ο σχεδιασμός του BLDC κινητήρα περιλαμβάνει μια πολύπλοκη διαδικασία, όπως μοντελοποίηση, επιλογή σχήματος ελέγχου, προσομοίωση και ρύθμιση παραμέτρων κ.λπ. Ο τραπεζοειδής έλεγχος με την βοήθεια του ελεγκτής PI προσφέρει την απλούστερη δομή και στιβαρή απόδοση σε ένα ευρύ φάσμα συνθηκών λειτουργίας. Με τη βοήθεια παραμέτρων ελέγχου PI η ταχύτητα και το ρεύμα οπλισμού του BLDC κινητήρα ελέγχεται και ρυθμίζεται.

## 6.1 Μαθηματική μοντελοποίηση

Οι δυναμικές εξισώσεις του κινητήρα BLDC παριστάνονται ως εξής:

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L - M & 0 & 0 \\ 0 & L - M & 0 \\ 0 & 0 & L - M \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} \quad (1.15)$$

Όπου  $v_a$ ,  $v_b$  και  $v_c$  είναι οι φασικές τάσεις,

τα  $i_a$ ,  $i_b$  και  $i_c$  είναι τα φασικά ρεύματα,

τα  $e_a$ ,  $e_b$  και  $e_c$  είναι οι φάσεις της αντι-ηλεκτρεγερτικής δύναμης (back EMF)

το  $R$  είναι η αντίσταση στην φάση,

το  $L$  είναι η αυτεπαγωγή της κάθε φάσης,

το  $M$  είναι η αμοιβαία αυτεπαγωγή μεταξύ δυο φάσεων.

Η ηλεκτρομαγνητική ροπή μπορεί να υπολογιστεί από τον τύπο:

$$T_e = \frac{1}{\omega_r} (e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c) \quad (1.16)$$

Όπου το  $\omega_r$  είναι η μηχανική ταχύτητα του δρομέα. Επίσης η εξίσωση της κίνησης είναι:

$$\frac{d}{dt} \omega_r = \frac{(T_e - T_L - B\omega_r)}{J} \quad (1.17)$$

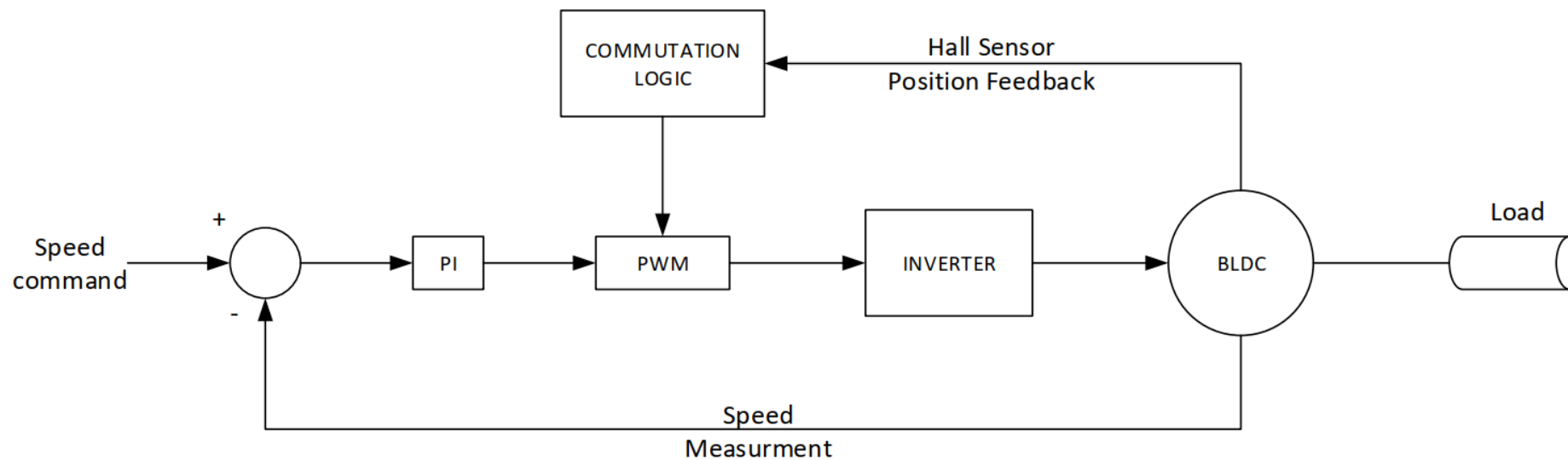
Η ηλεκτρική ταχύτητα  $\omega_e$  είναι συνυφασμένη με την μηχανική ταχύτητα του κινητήρα με το  $P$  να είναι οι πόλοι και να έχει ως εξής:

$$\omega_e = \left(\frac{P}{2}\right) \omega_r \quad (1.18)$$

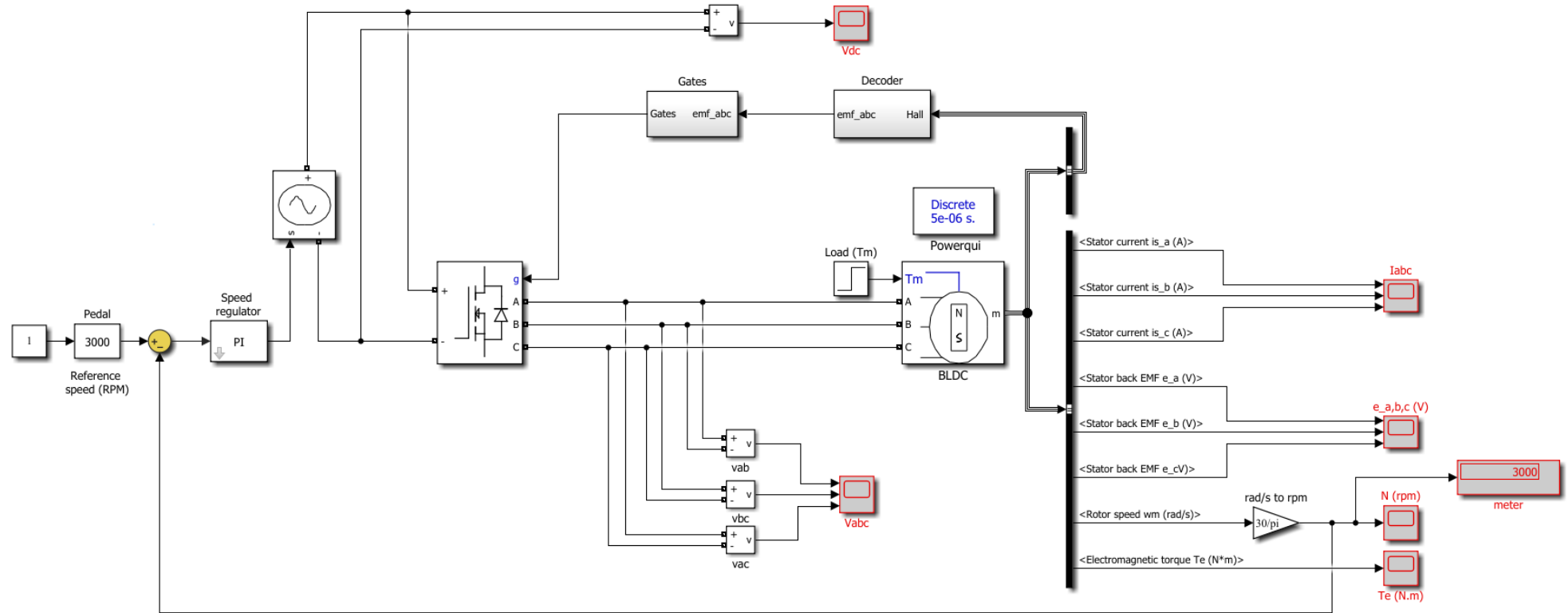
Όπου  $P$  είναι ο αριθμός των πόλων

Και  $\omega_r$  είναι η ταχύτητα του δρομέα σε rad/sec

## 6.2 Κύκλωμα ελέγχου με Τραπεζοειδή Έλεγχο



Εικόνα 54: Χονδρικό διάγραμμα κυκλώματος BLDC κινητήρα με Τραπεζοειδή Έλεγχο



Εικόνα 55: Υλοποίηση ελέγχου BLDC κινητήρα με Τραπεζοειδή Έλεγχο σε περιβάλλον Matlab/Simulink

### 6.3 Τρόπος λειτουργίας του κυκλώματος

Ένας τριφασικός BLDC κινητήρας με ισχύ 1 kW, 500 Vdc και ονομαστικές στροφές 3000 rpm, τροφοδοτείται από έναν μετατροπέα τάσης έξι βημάτων (6-Step Inverter). Για την εφαρμογή του τραπεζοειδούς ελέγχου, γίνεται χρήση αισθητήρων Hall ώστε να προσδιοριστεί η θέση του δρομέα, η ένδειξη των οποίων θα οδηγήσει μέσω ενός πίνακα αληθείας στην κατάλληλη παλμοτροφοδότηση των ημιαγωγικών στοιχείων του αντιστροφέα που θα ελέγξουν τον κινητήρα (το κύκλωμα ισχύος του μετατροπέα υλοποιείται με τη βοήθεια μιας τριφασικής γέφυρας, υλοποιημένη με ημιαγωγίμους διακόπτες ισχύος τύπου MOSFET. Συνολικά η γέφυρα έχει 6 MOSFETs με αντιπαράλληλες διόδους και άγουν σύμφωνα με τα σήματα που λαμβάνουν). Ο έλεγχος της ταχύτητας μέσω κλειστού βρόγχου θα επιτευχθεί με τη χρήση ενός PI ελεγκτή.

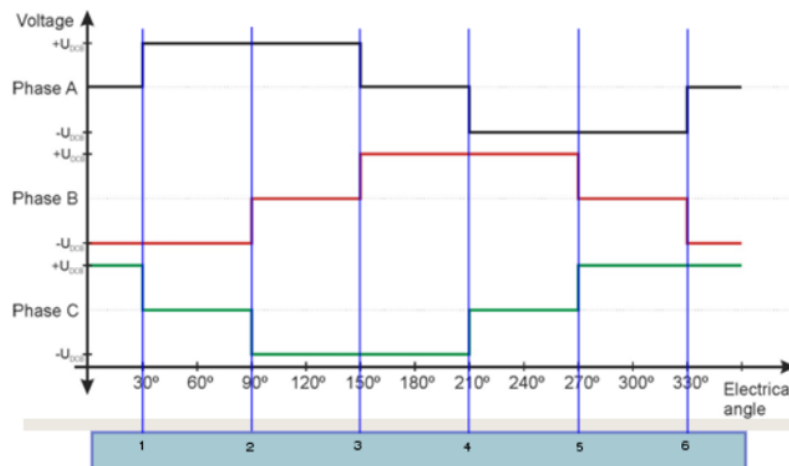
Γενικότερα, ο ελεγκτής PI εξασφαλίζει την αντιστάθμιση που χρειάζεται το κύκλωμα για να δουλέψει. Με τον όρο αντιστάθμιση, εννοούμε την επεξεργασία του κέρδους ή των θέσεων των πόλων ή των μηδενικών ώστε να βελτιωθεί το περιθώριο της φάσης. Ο PI έλεγχος απαιτείται για μη ολοκληρωμένες διαδικασίες, που σημαίνει οποιαδήποτε διαδικασία που τελικά επιστρέφει στην ίδια έξοδο, δεδομένου του ίδιου συνόλου εισόδων και διαταραχών. Ένας μόνο P ελεγκτής είναι καταλληλότερος για την ολοκλήρωση διαδικασιών. Ο ελεγκτής I χρησιμοποιείται για την αφαίρεση της μετατόπισης και μπορεί να θεωρηθεί ρυθμιζόμενος.

Πιο αναλυτικά, το κύκλωμα της Εικόνας 54, χρησιμοποιεί ηλεκτρονικά ισχύος ώστε να κάνει την τραπεζοειδή μεταγωγή στον BLDC κινητήρα. Ο αντιστροφέας (inverter) χρησιμοποιεί ένα διακόπτη (MOSFETs /TRANSISTORS/ IGBT) στην υψηλή και χαμηλή πλευρά για κάθε μία από τις φάσεις, οι οποίοι του επιτρέπουν να ελέγχει την κατεύθυνση του ρεύματος που διαρρέει την περιέλιξη του κινητήρα. Αυτό, δημιουργεί θετικές και αρνητικές μαγνητικές ροές οι οποίες με την κατάλληλη αλληλουχία προκαλούν την κίνηση.

Η λογική αλληλουχία (commutation logic) είναι η διαδικασία κατά την οποία εφαρμόζεται τάση στις φάσεις του κινητήρα με τέτοιο τρόπο ώστε να διατηρεί τον κινητήρα σε περιστροφή (μαγνητικό περιστρεφόμενο διάνυσμα ροής). Για κινητήρες BLDC είναι μια διαδικασία έξι βημάτων. Και οι έξι πλευρές της 3-φασικής γέφυρας (inverter) ενεργοποιούν και απενεργοποιούν τα διακοπτικά τους στοιχεία έτσι ώστε να δημιουργηθούν τα έξι διανύσματα ροής. Αυτά τα διανύσματα κάνουν τον κινητήρα BLDC να δείχνει  $60^\circ$  στην επόμενη θέση. Τα έξι βήματα, λοιπόν, προκαλούν μια πλήρη περιστροφή ( $6 \text{ βήματα} \times 60^\circ = 360^\circ$ ). Για κάθε βήμα:

- Η θετική θέση (+U) σημαίνει ενεργοποίηση του διακόπτη στην υψηλή πλευρά και απενεργοποίηση του διακόπτη στην χαμηλή πλευρά,
- Η αρνητική θέση (-U) σημαίνει απενεργοποίηση του διακόπτη στην υψηλή πλευρά και ενεργοποίηση του στη χαμηλή πλευρά,
- Η ουδέτερη θέση σημαίνει ότι και οι δύο διακόπτες είναι απενεργοποιημένοι.





Εικόνα 56: Έξι βήματα της πλήρους περιστροφής (Πηγή: (Yadu Kiran, 2014))

Πρέπει να υπάρχει ένας αισθητήρας που να δίνει ανάδραση στο σύστημα ώστε να δείχνει πότε ο δρομέας έχει φτάσει στην επιθυμητή θέση για να γίνει η επόμενη μεταγωγή. Αν, η μεταγωγή γίνεται πιο γρήγορα από αυτό, οι μαγνήτες του δρομέα, δεν συγχρονίζονται με το μαγνητικό πεδίο του στάτη και έτσι ο δρομέα δονείται αντί να περιστρέφεται. Για αυτόν τον λόγο, πρέπει να υπάρχει μια μέθοδος ανίχνευσης για να προσδιοριστεί εάν η θέση του δρομέα είναι σε συγχρονισμό με τον στάτη, έτσι ώστε η επόμενη μεταγωγή να μπορεί να γίνει. Υπάρχουν πολλοί τύποι αισθητήρων που χρησιμοποιούνται στους κινητήρες: κωδικοποιητές, ποτενσιόμετρα, διακόπτες κ.α. Ο πιο κοινός τύπος αισθητήρα που χρησιμοποιείται στους κινητήρες BLDC είναι ο αισθητήρας Hall. Ο αισθητήρας Hall είναι ένας αισθητήρας - διακόπτης που εξάγει ένα λογικό επίπεδο που βασίζεται στην ανίχνευση ενός μαγνητικού πεδίου. Επίσης, οι αισθητήρες αυτοί, είναι οικονομικοί και τοποθετούνται εύκολα μέσα στον BLDC κινητήρα. Το μόνο πράγμα που πρέπει να γνωρίζουμε είναι εάν ο δρομέας προχώρησε  $60^\circ$ . Αυτό μπορεί να γίνει γνωστό με τρεις αισθητήρες Hall (ένας για κάθε φάση) και τους συνδυασμούς εξόδου που δημιουργούν.

Η λογική αλληλουχία (commutation logic) επιτρέπει την κίνηση του κινητήρα και κάνει τον κινητήρα να περιστρέφεται. Σκοπός της κίνησης ενός κινητήρα είναι ο έλεγχος της ταχύτητα και της ροπής. Η ταχύτητα σε έναν κινητήρα BLDC είναι ευθέως ανάλογη με την τάση που εφαρμόζεται στον στάτη. Ενώ συνεχίζεται η λογική αλληλουχία (commutation logic) το διάνυσμα της μαγνητικής ροής περιστρέφεται, η ταχύτητα με την οποία ο ρότορας αναγκάζεται να μεταβεί στην επόμενη θέση καθορίζεται από την ισχύ αυτής της μαγνητικής δύναμης, και αυτή καθορίζεται από την τάση που εφαρμόζεται στις περιελίξεις του στάτη.

Χρησιμοποιώντας PWM σε υψηλότερη συχνότητα στη λογική αλληλουχία (commutation logic), η ποσότητα της τάσης που εφαρμόζεται στον στάτη μπορεί να ελεγχθεί εύκολα, επομένως μπορεί να ελεγχθεί και η ταχύτητα του κινητήρα.

Σε έναν έλεγχο ταχύτητας κλειστού βρόγχου, σε κάθε χρονική στιγμή μετρείται η ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα και συγκρίνεται με την επιθυμητή είσοδο. Το σφάλμα (διαφορά) που προκύπτει τροφοδοτεί έναν PI ελεγκτή, ο οποίος με τη σειρά του εξάγει κατάλληλης συχνότητας PWM (δηλαδή μεταβάλλει την τάση στα τυλίγματα του στάτη), ώστε να μειώσει το σφάλμα αυτό.

## 6.4 Αποτελέσματα προσομοίωσης

Σε αυτήν την υπό-ενότητα, θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα προσομοίωσης για την απόκριση εκκίνησης του BLDC κινητήρα εν κενώ και για την απόκριση του ίδιου κινητήρα σε μεταβατικές συνθήκες με εφαρμογή του τραπεζοειδούς ελέγχου.

### 6.4.1 Απόκριση εκκίνησης κινητήρα

Οι προσομοιώσεις έχουν γίνει για  $t=0s - 0.2s$ , χωρίς την εμφάνιση φορτίου σε εκείνο το διάστημα (εν κενώ λειτουργία) και για ονομαστικές στροφές μέχρι τις 3000 rpm.

Τα χαρακτηριστικά του κινητήρα που έχει επιλεγθεί ώστε να γίνει η υλοποίηση του κυκλώματος, παρουσιάζονται στον Πίνακα 7.

Πίνακας 7: Χαρακτηριστικά BLDC

<b>Φάσεις</b>	3
<b>Πόλοι</b>	8
<b>Αντίσταση στη φάση του στάτη</b>	0.36 Ohm
<b>Επαγωγή στη φάση του στάτη</b>	1.67 mH
<b>Ονομαστική Ισχύς</b>	1kW
<b>Συνεχή Τάση</b>	500V
<b>Εύρος Στροφών</b>	0-3000 rpm

Ενώ οι τιμές που έχουν δοθεί στον PI ελεγκτή είναι αυτές του Πίνακα 8:

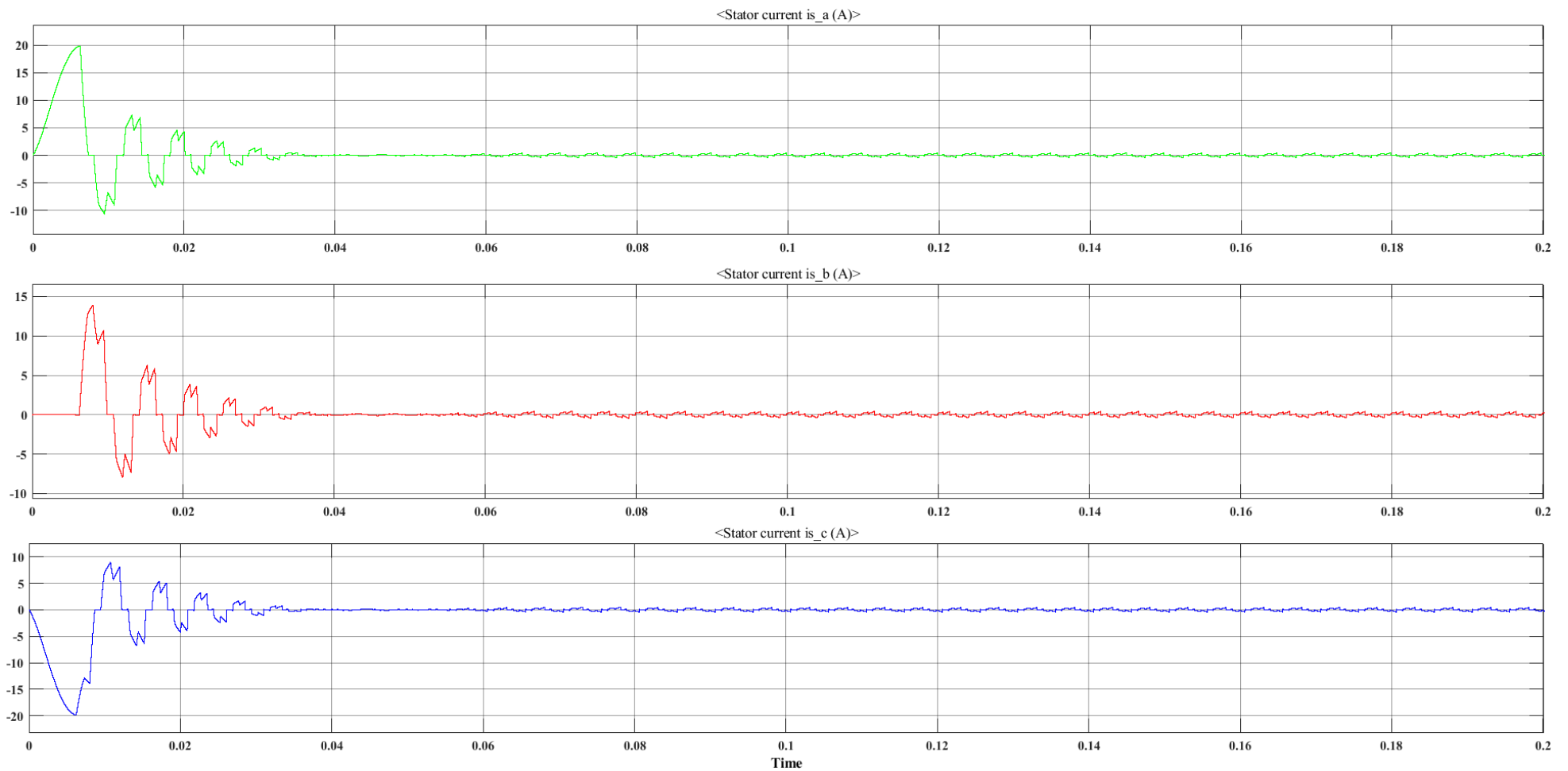
Πίνακας 8: Χαρακτηριστικά PI

<b>P</b>	0.013
<b>I</b>	16.61

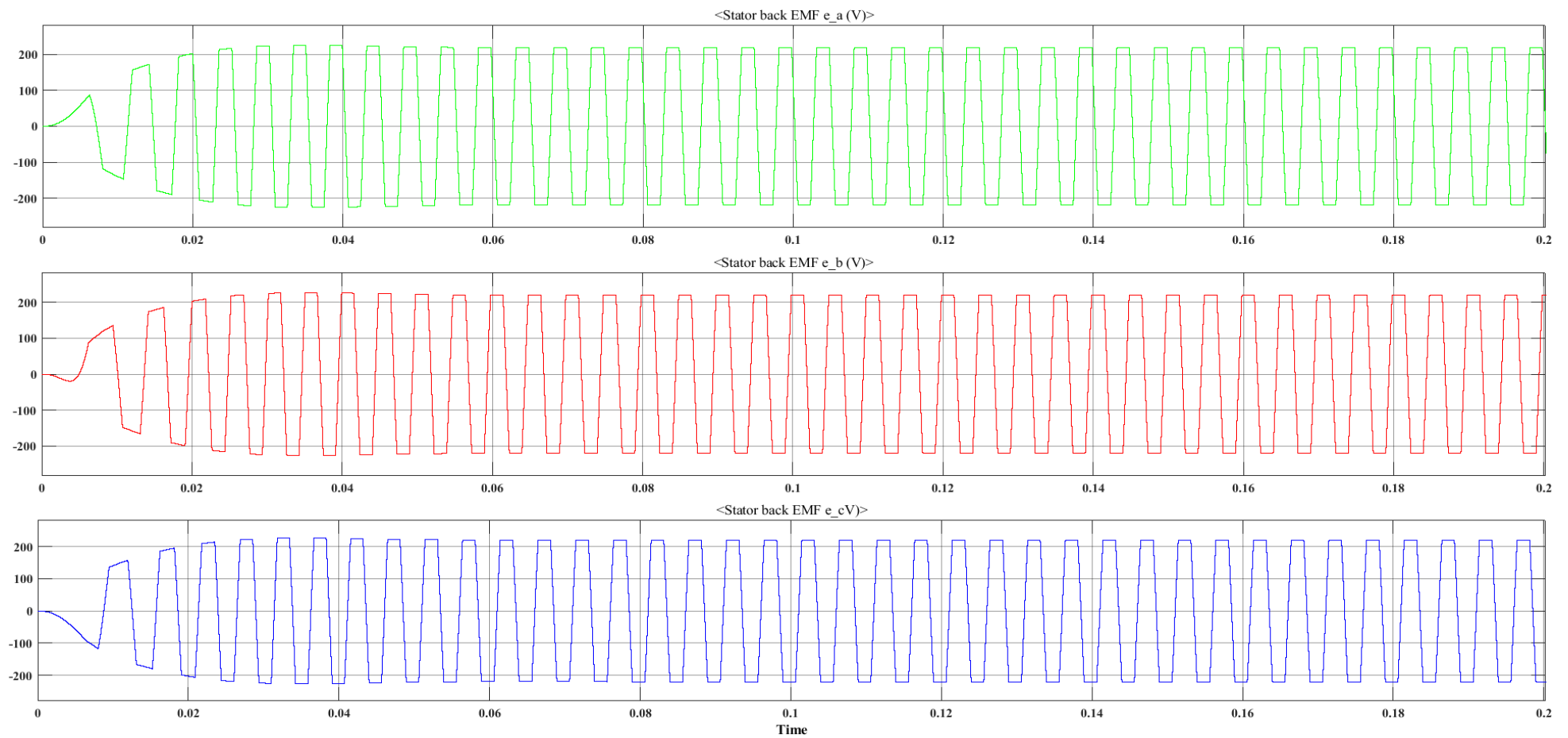
Οι τιμές στον PI ελεγκτή, προέκυψαν δειγματοληπτικά (με την μέθοδο δοκιμής και λάθους (Trial and Error)), γιατί δεν μπορούσε να χρησιμοποιηθεί το autotuning στο Simulink, λόγω μη γραμμικοποίησης από τα ψηφιακά του κυκλώματος.

Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων στην απόκριση εκκίνησης του κινητήρα που θα παρουσιαστούν είναι:

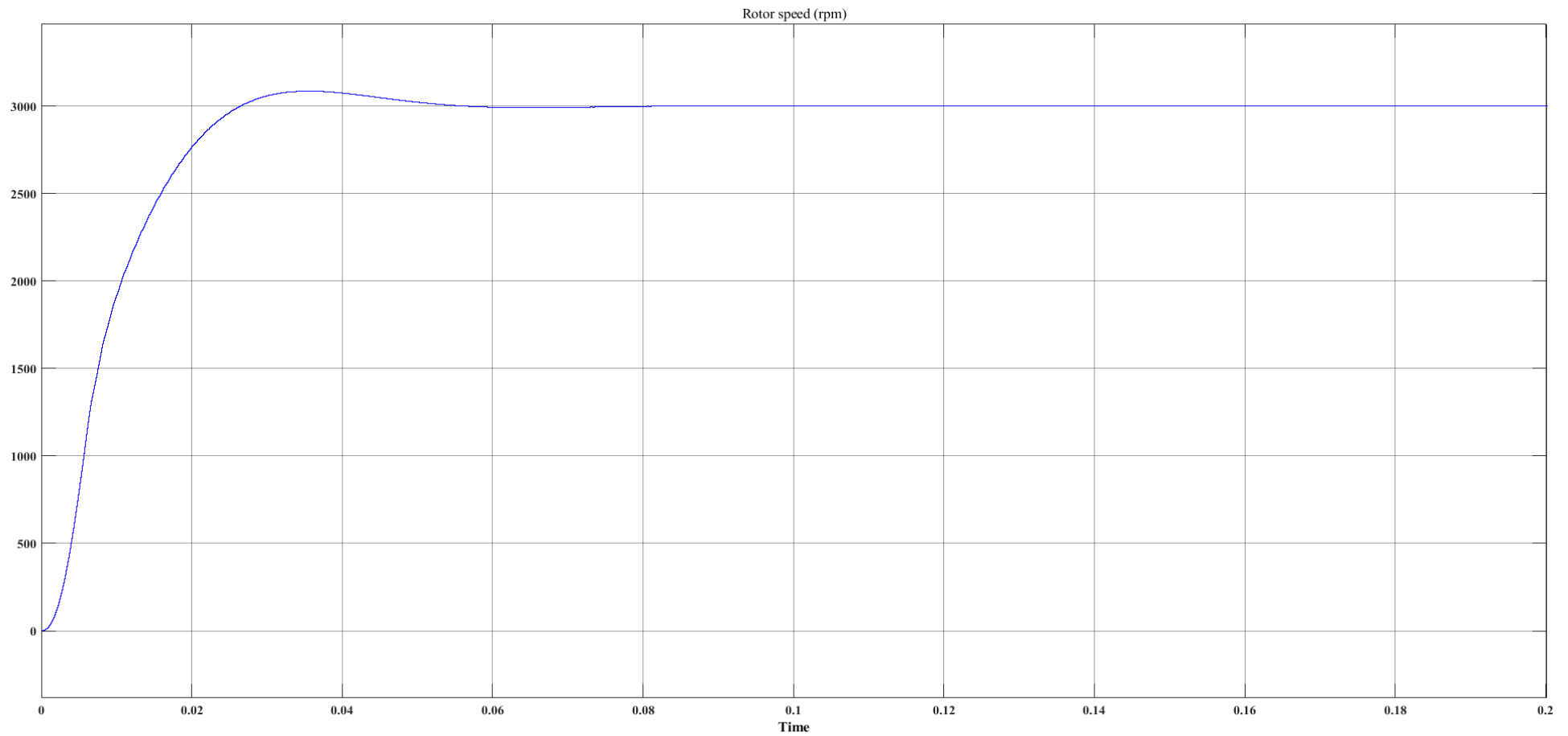
- Τα ρεύματα στον στάτη του BLDC κινητήρα.
- Η αντι-ηλεκτρεγερτική δύναμη του κινητήρα.
- Η ταχύτητα του δρομέα.
- Η ηλεκτρομαγνητική ροπή.
- Η τάση συνεχούς ρεύματος.
- Οι πολικές τάσεις (ab, bc, ca) στην είσοδο του BLDC κινητήρα.



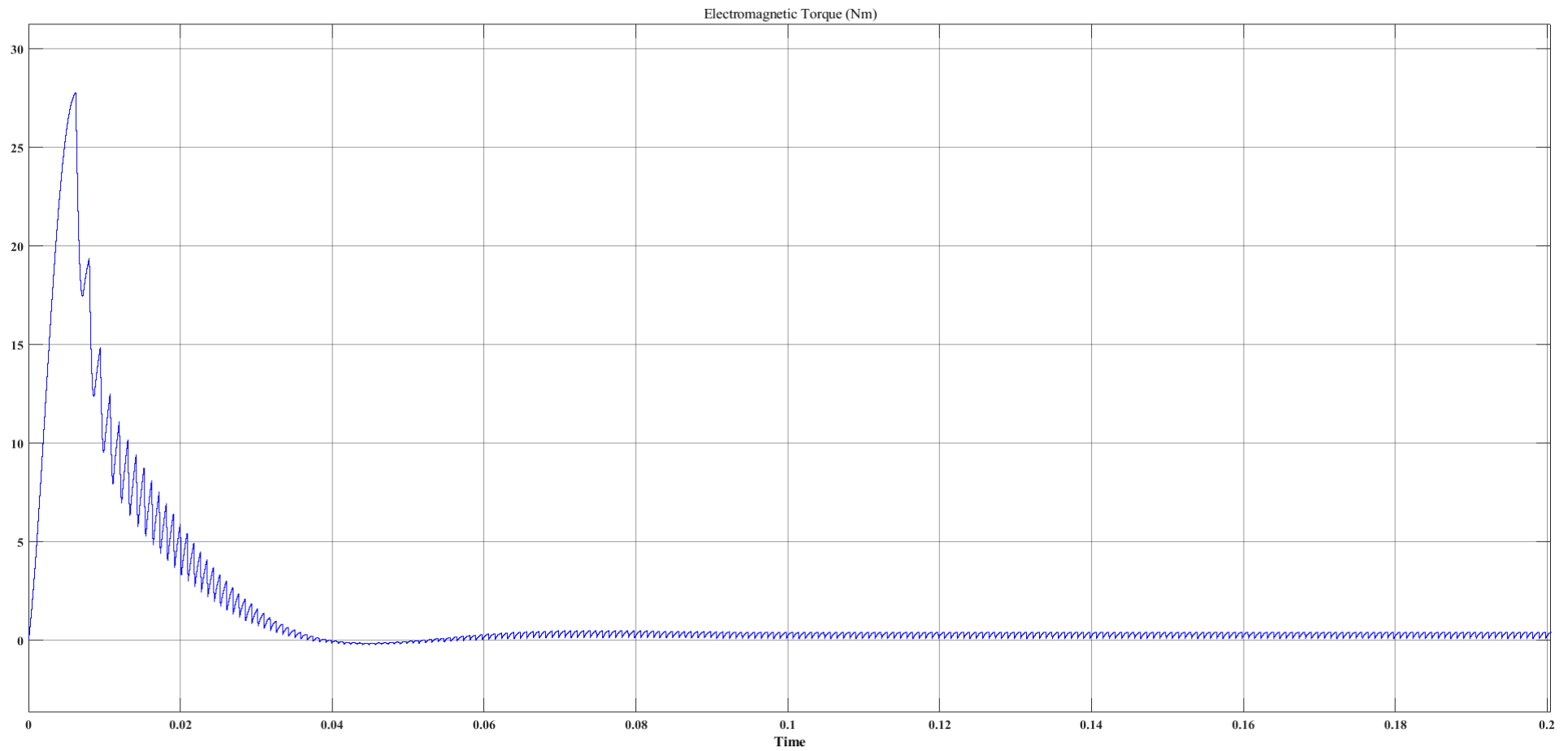
Εικόνα 57: Τα ρεύματα στον στάτη του BLDC κινητήρα (με ονομαστικές στροφές μέχρι τις 3000 rpm σε εν κενώ λειτουργία, για  $t = 0\text{s} - 0.2\text{s}$ )



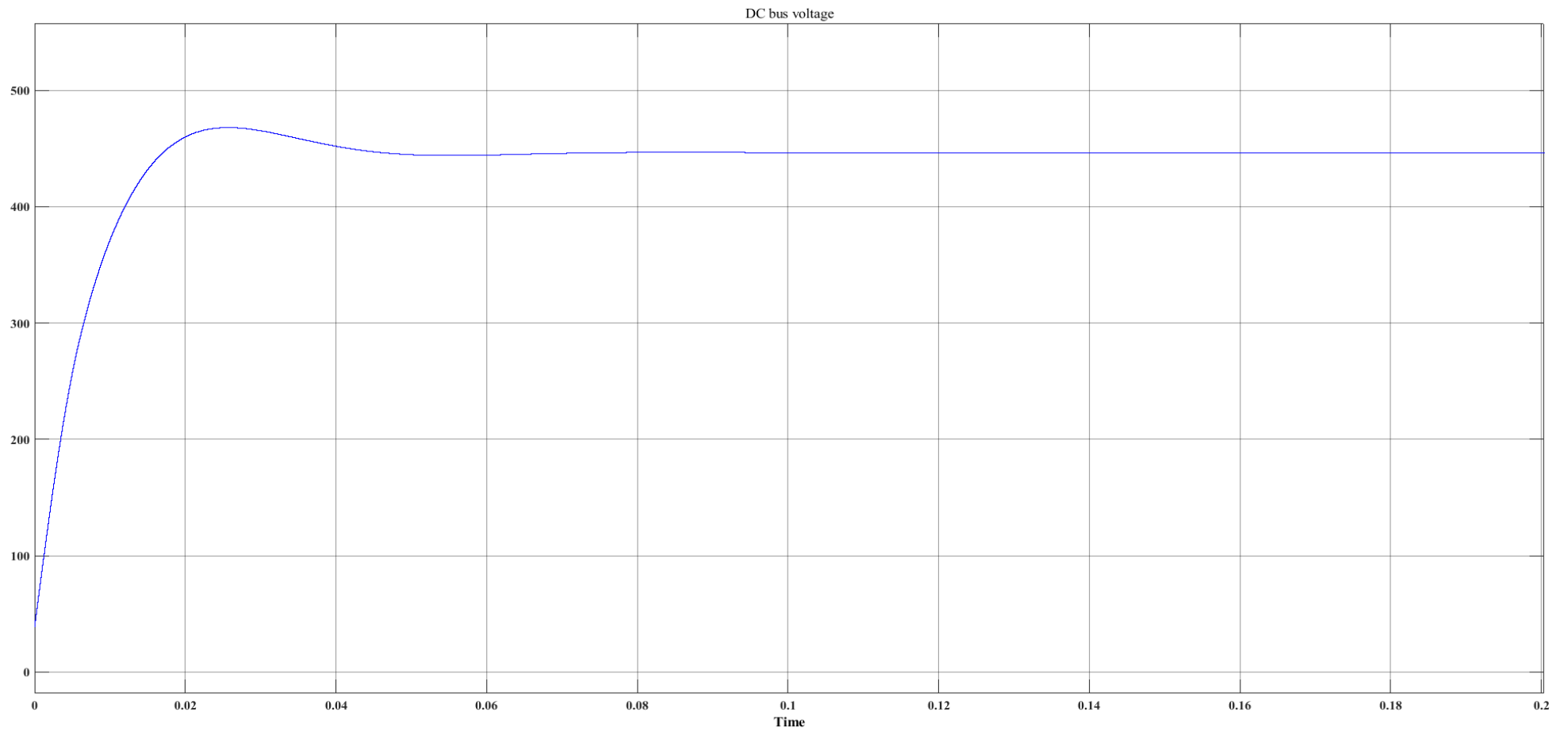
Εικόνα 58: Η αντι-ηλεκτρεγερτική δύναμη του κινητήρα (με ονομαστικές στροφές μέχρι τις 3000 rpm σε εν κενώ λειτουργία, για  $t = 0s - 0.2s$ )



Εικόνα 59: Η ταχύτητα του δρομέα – στροφές (με ονομαστικές στροφές μέχρι τις 3000 rpm σε εν κενώ λειτουργία, για  $t = 0s - 0.2s$ )

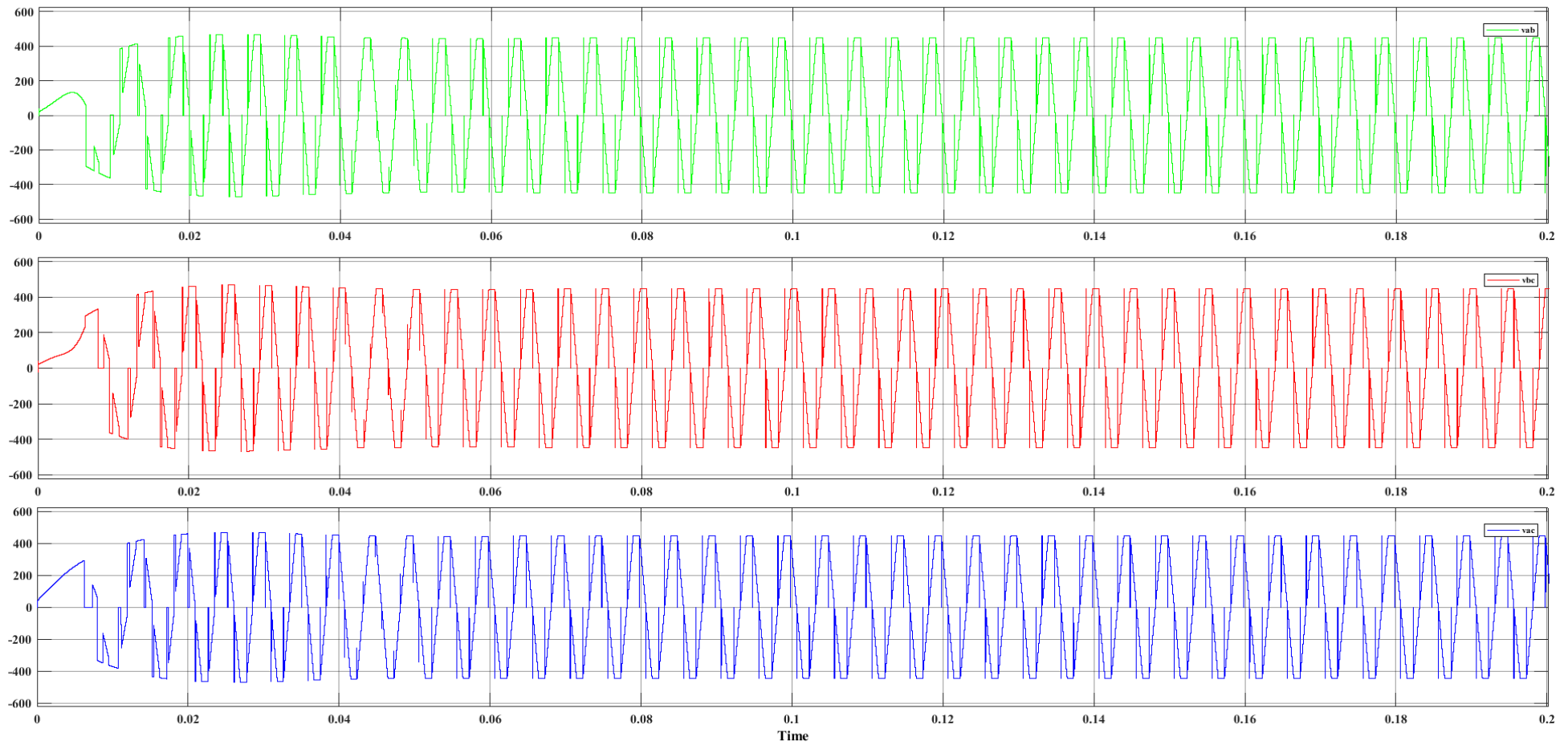


Εικόνα 60: Ηλεκτρομαγνητική ροπή (με ονομαστικές στροφές μέχρι τις 3000 rpm σε εν κενώ λειτουργία, για  $t = 0s - 0.2s$ )



Εικόνα 61: Τάση συνεχούς ρεύματος (με ονομαστικές στροφές μέχρι τις 3000 rpm σε εν κενώ λειτουργία, για  $t = 0s - 0.2s$ )





Εικόνα 62: Οι πολικές τάσεις  $ab$ ,  $bc$  και  $ac$  (με ονομαστικές στροφές μέχρι τις 3000 rpm σε εν κενώ λειτουργία, για  $t = 0s - 0.2s$ )

### 6.4.2 Απόκριση κινητήρα σε μεταβατικές συνθήκες

Σε αυτήν την υπό-ενότητα θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα από την προσομοίωση της απόκρισης του κινητήρα σε μεταβατικές συνθήκες με εφαρμογή του συγκεκριμένου ελέγχου. Αναλυτικότερα:

Στο 50% και στο 100% των ονομαστικών στροφών μεταβάλουμε το φορτίο του κινητήρα από:

- Το 25% στο 50% της ονομαστικής τιμής
- Το 50% στο 75% της ονομαστικής τιμής
- Το 75% στο 100% της ονομαστικής τιμής

και θα παρουσιαστούν οι στροφές και τα ρεύματα του στάτη στον κινητήρα.

Δεύτερον, στο 50% και στο 100% του ονομαστικού φορτίου (ροπής) μεταβάλουμε τις στροφές του κινητήρα από:

- Το 25% στο 50% της ονομαστικής τιμής
- Το 50% στο 75% της ονομαστικής τιμής
- Το 75% στο 100% της ονομαστικής τιμής

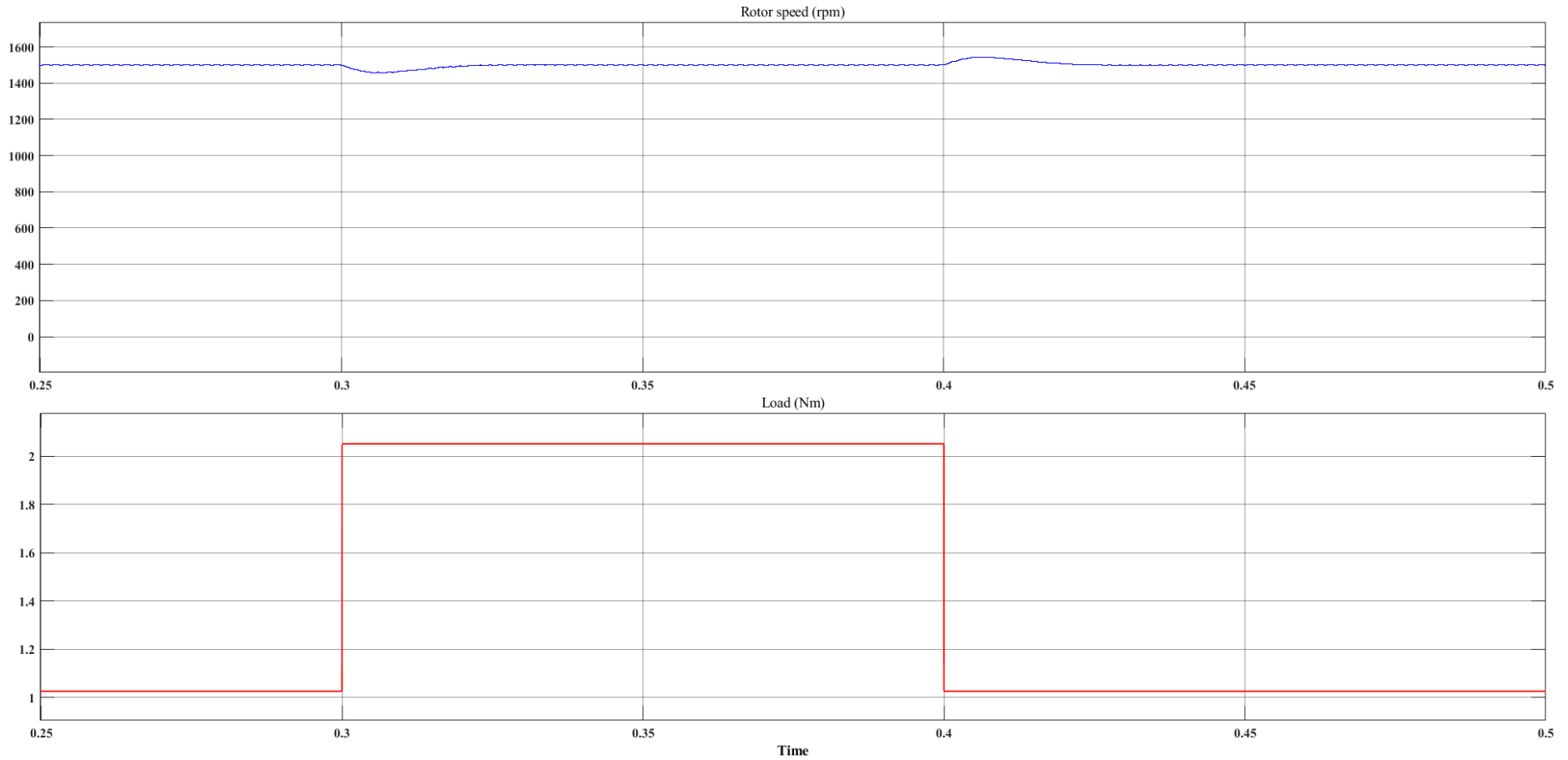
Και θα παρουσιαστούν οι στροφές και τα ρεύματα του στάτη στον κινητήρα.

Πίνακας 9: Τιμές Φορτίου - Στροφών

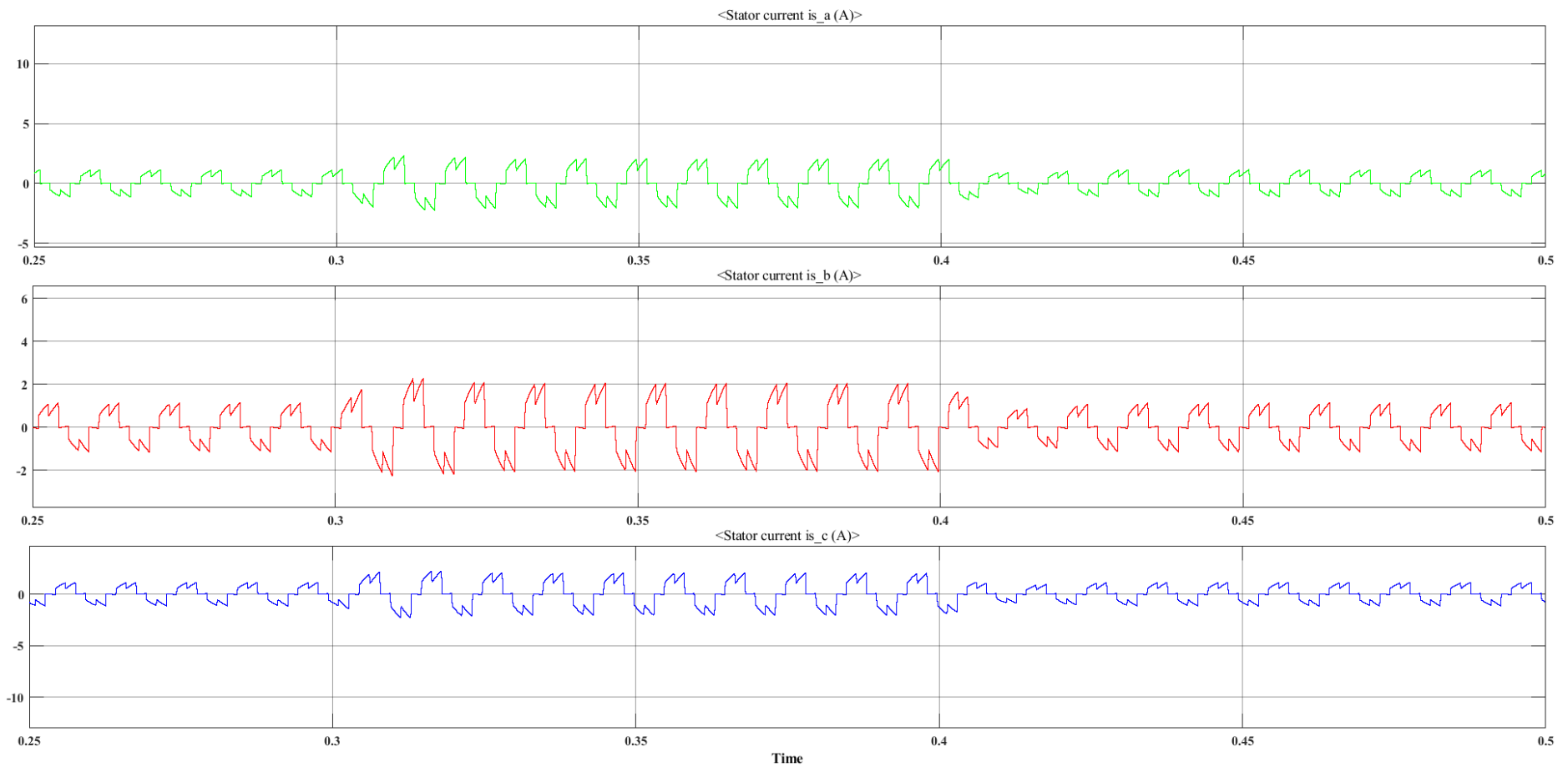
	<b>25%</b>	<b>50%</b>	<b>75%</b>	<b>100%</b>
<b>Φορτίο (Nm)</b>	1.025	2.05	3.075	4.1
<b>Στροφές (RPM)</b>	750	1500	2250	3000

Τα χαρακτηριστικά του BLDC κινητήρα και του PI ελεγκτή παραμένουν ίδια (Πίνακας 7 και Πίνακας 8).

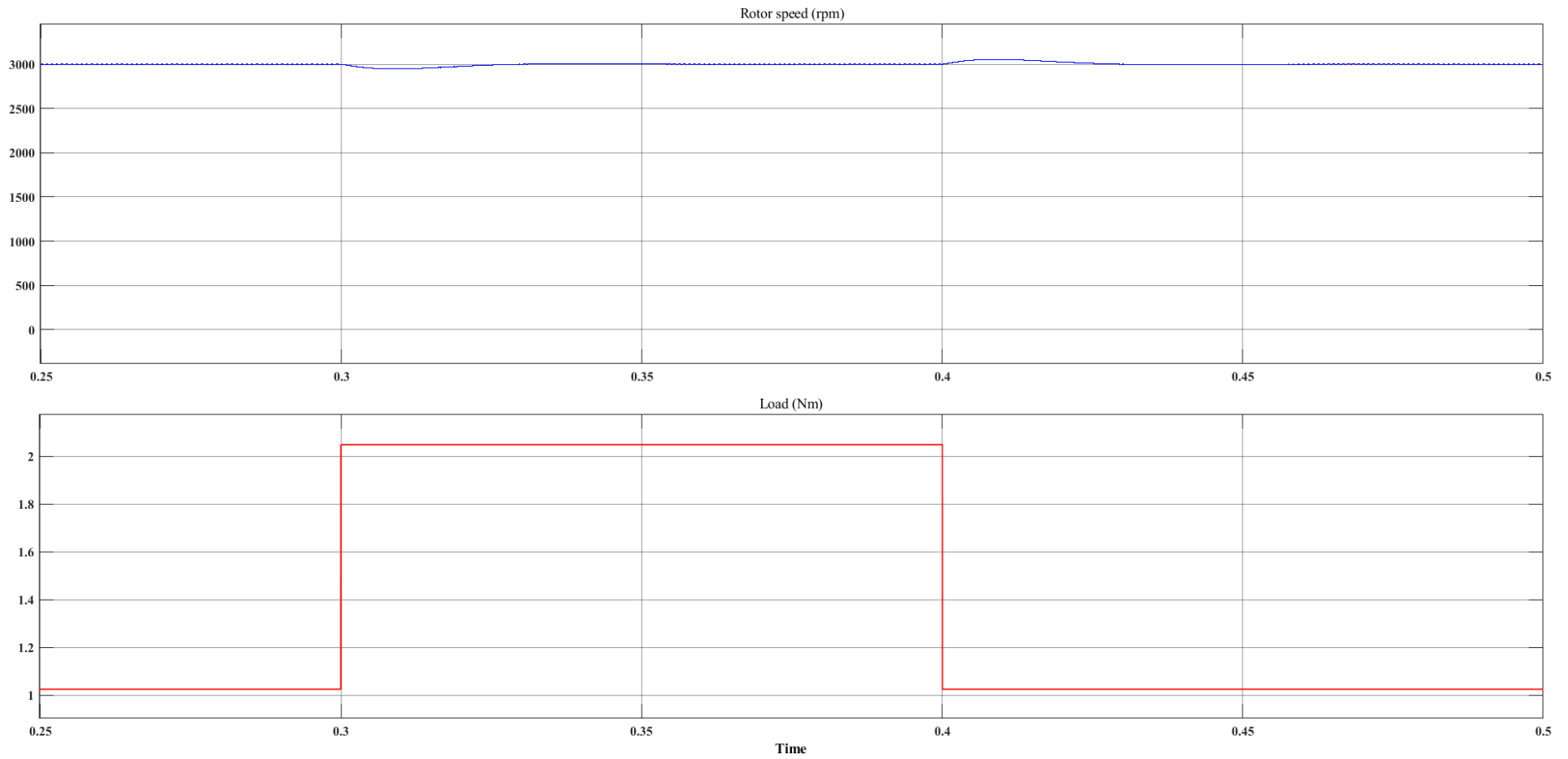
### 6.4.2.1 Σταθερές στροφές και μεταβολή φορτίου



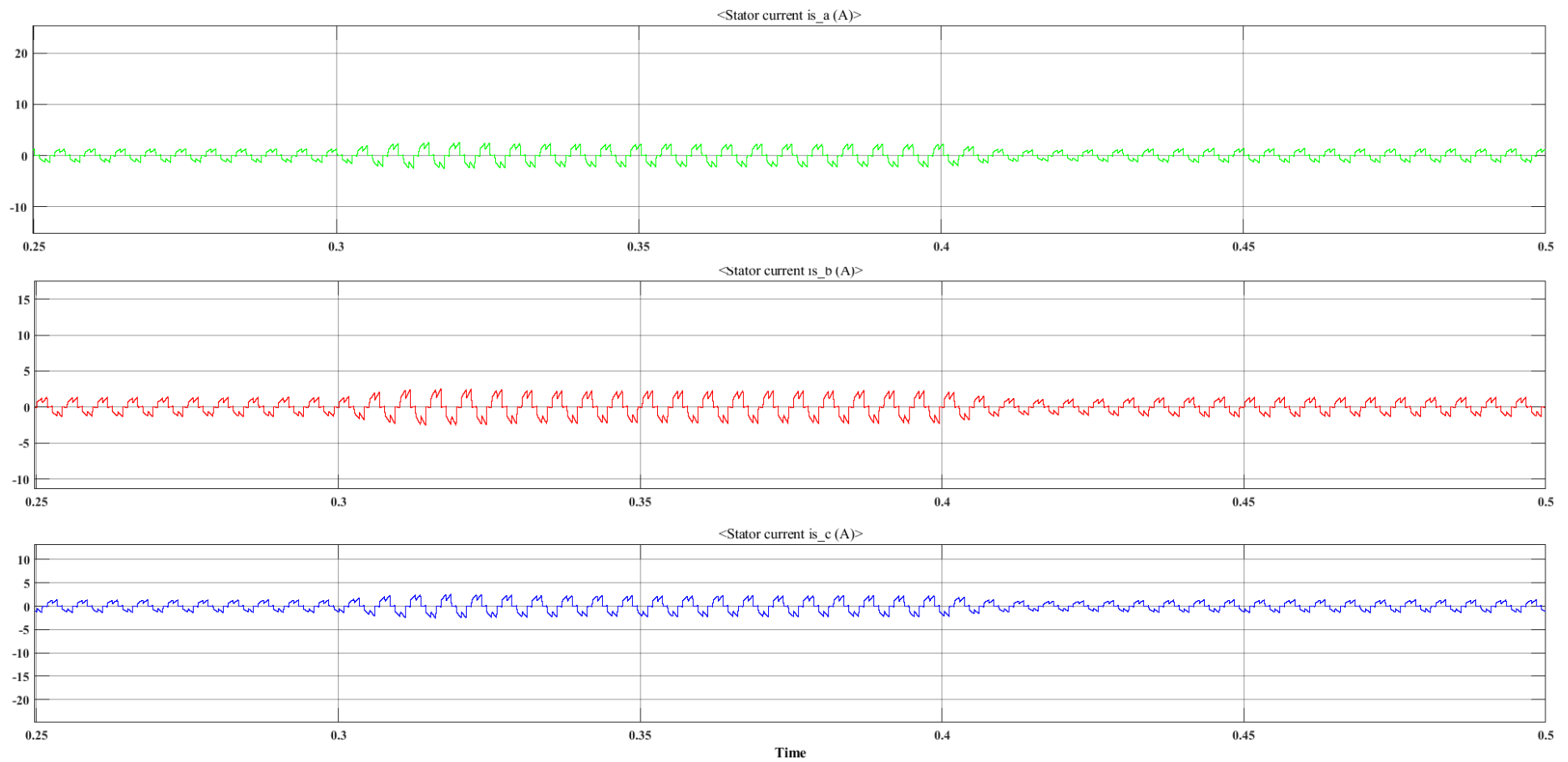
Εικόνα 63: Ταχύτητα του δρομέα – στροφές, με φορτίο από 25% στο 50% (στο χρονικό διάστημα  $t=0.3$ s έως  $t=0.4$ s), ονομαστικές στροφές στο 50%



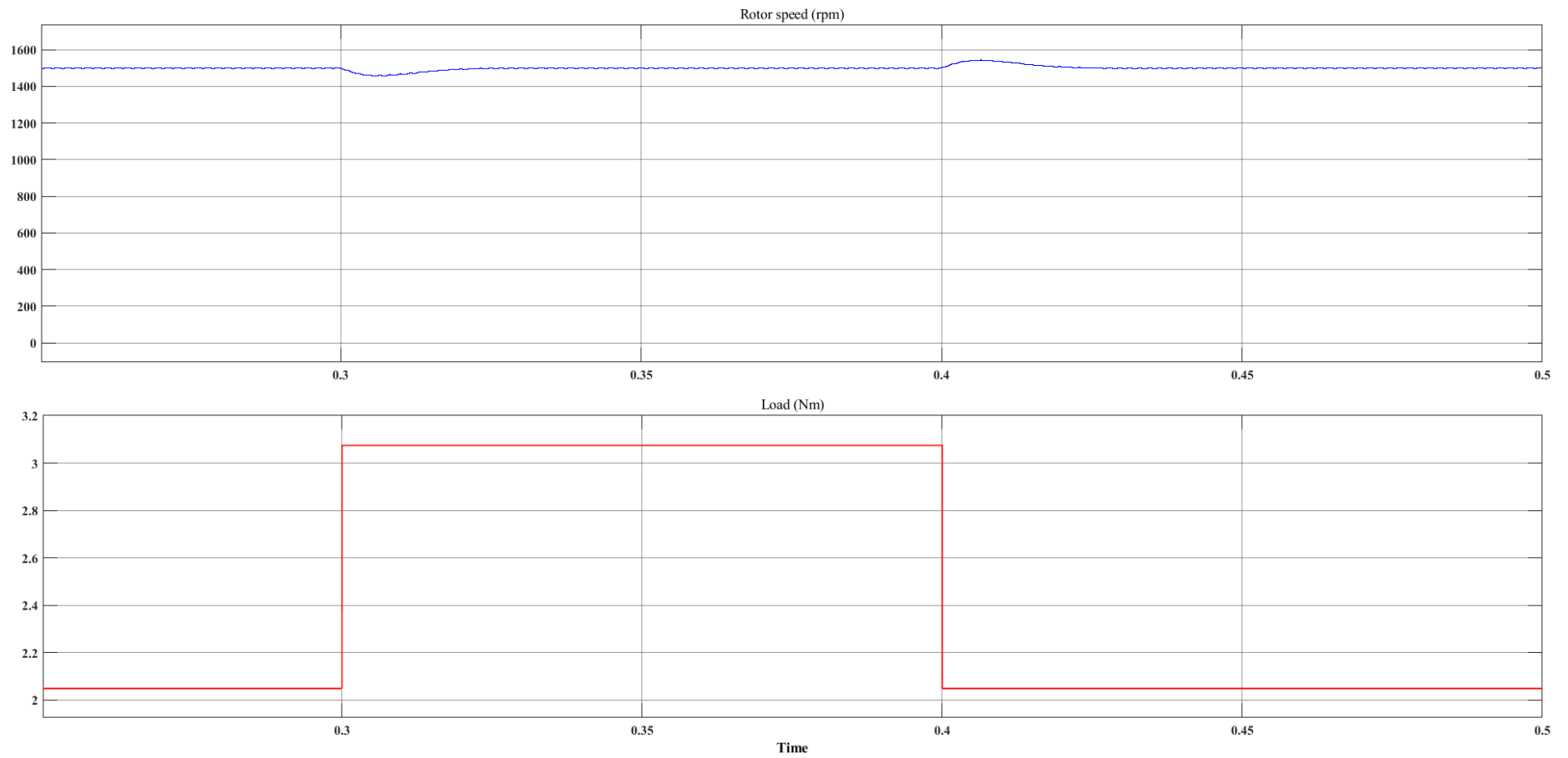
Εικόνα 64: Ρεύματα στον στάτη του κινητήρα, με φορτίο από 25% στο 50% (στο χρονικό διάστημα  $t=0.3$ s έως  $t=0.4$ s), ονομαστικές στροφές στο 50%



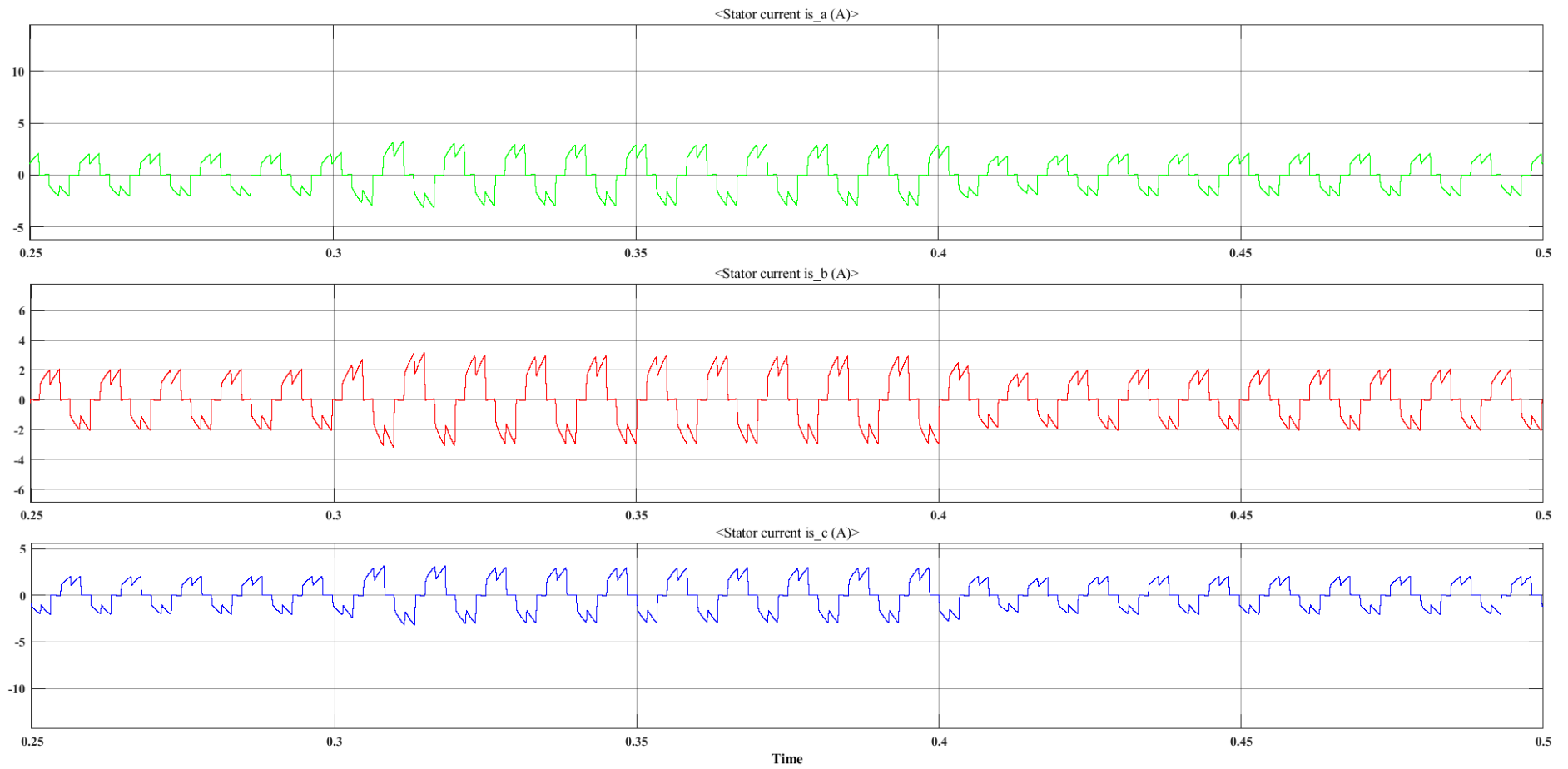
Εικόνα 65: Ταχύτητα του δρομέα – στροφές, με φορτίο από 25% στο 50% (στο χρονικό διάστημα  $t=0.3s$  έως  $t=0.4s$ ), ονομαστικές στροφές στο 100%



Εικόνα 66: Ρεύματα στον στάτη του κινητήρα, με φορτίο από 25% στο 50% (στο χρονικό διάστημα  $t=0.3$ s έως  $t=0.4$ s), ονομαστικές στροφές στο 100%

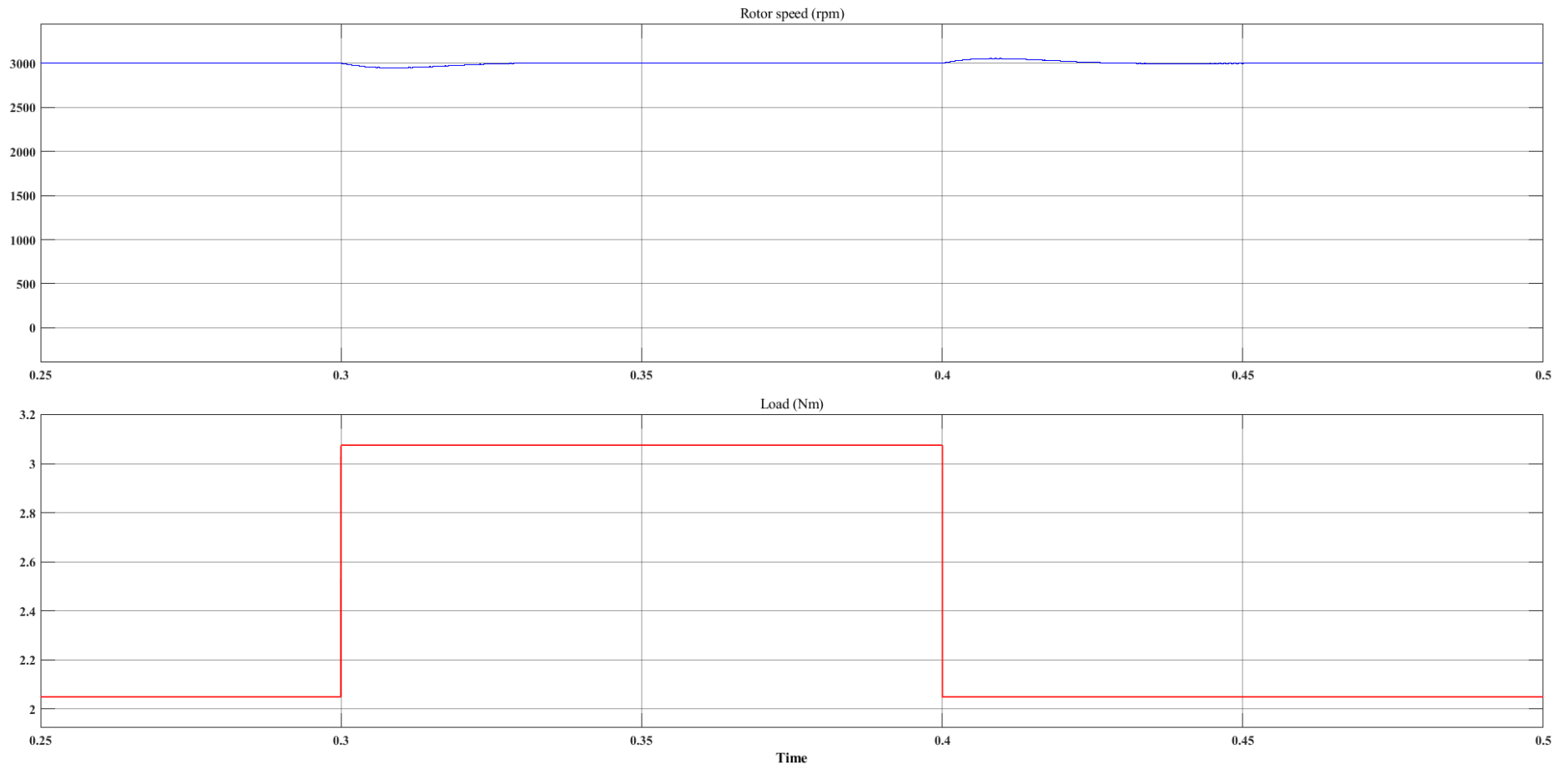


Εικόνα 67: Ταχύτητα του δρομέα – στροφές, με φορτίο από 50% στο 75% (στο χρονικό διάστημα  $t=0.3s$  έως  $t=0.4s$ ), ονομαστικές στροφές στο 50%

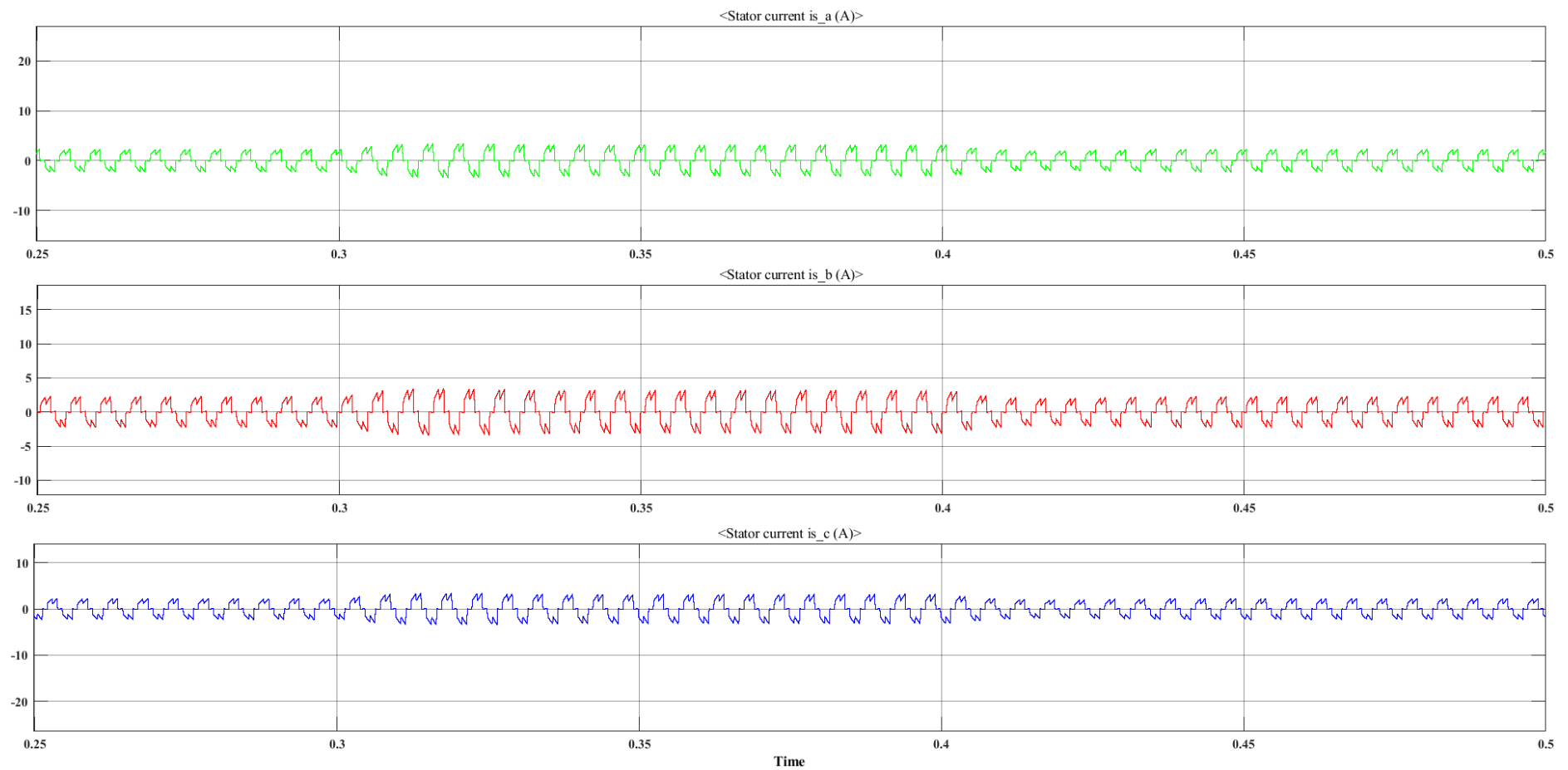


Εικόνα 68: Ρεύματα στον στάτη του κινητήρα, με φορτίο από 50% στο 75% (στο χρονικό διάστημα  $t=0.3s$  έως  $t=0.4s$ ), ονομαστικές στροφές στο 50%

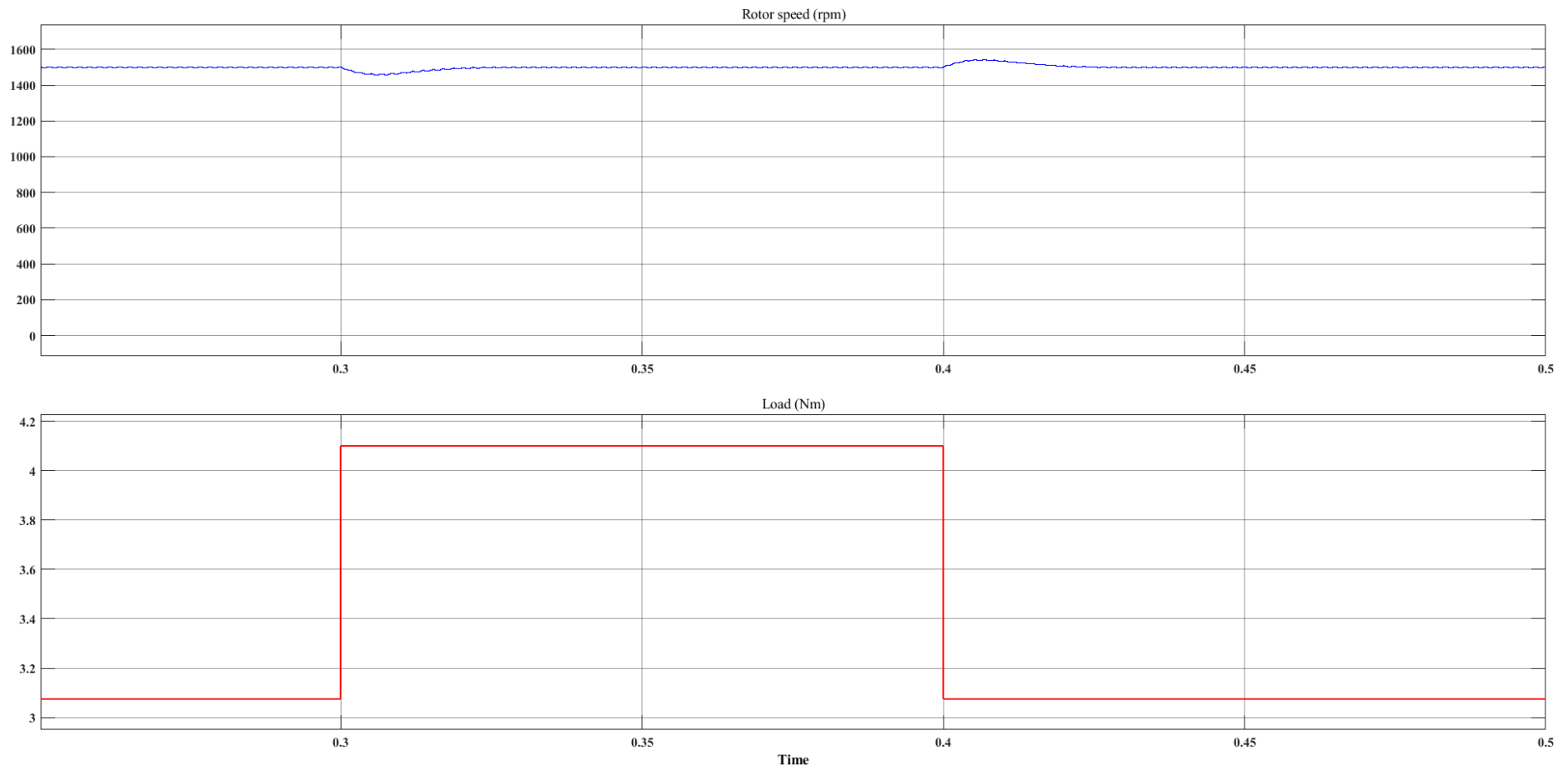




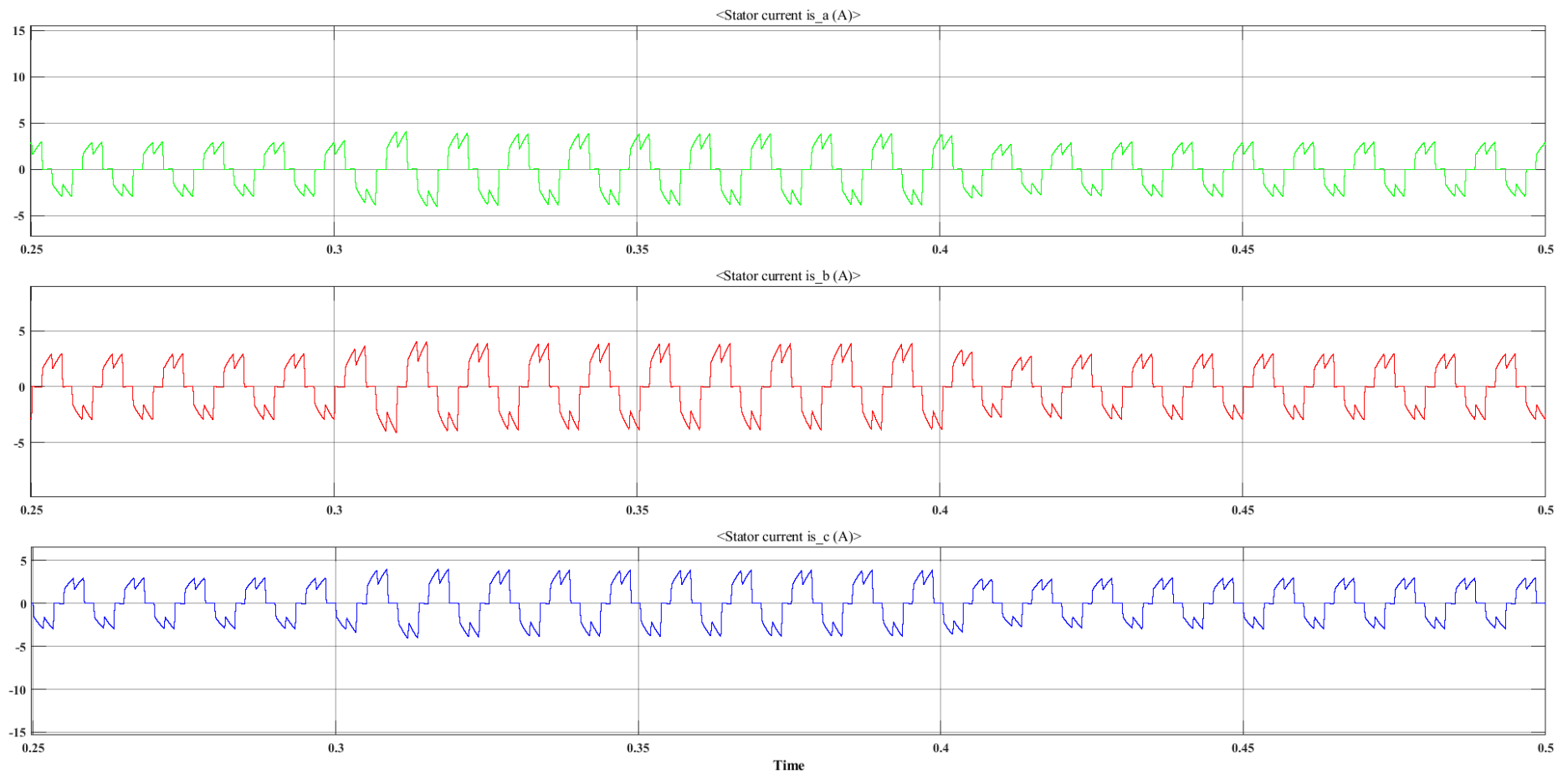
Εικόνα 69: Ταχύτητα του δρομέα – στροφές, με φορτίο από 50% στο 75% (στο χρονικό διάστημα  $t=0.3$ s έως  $t=0.4$ s), ονομαστικές στροφές στο 100%



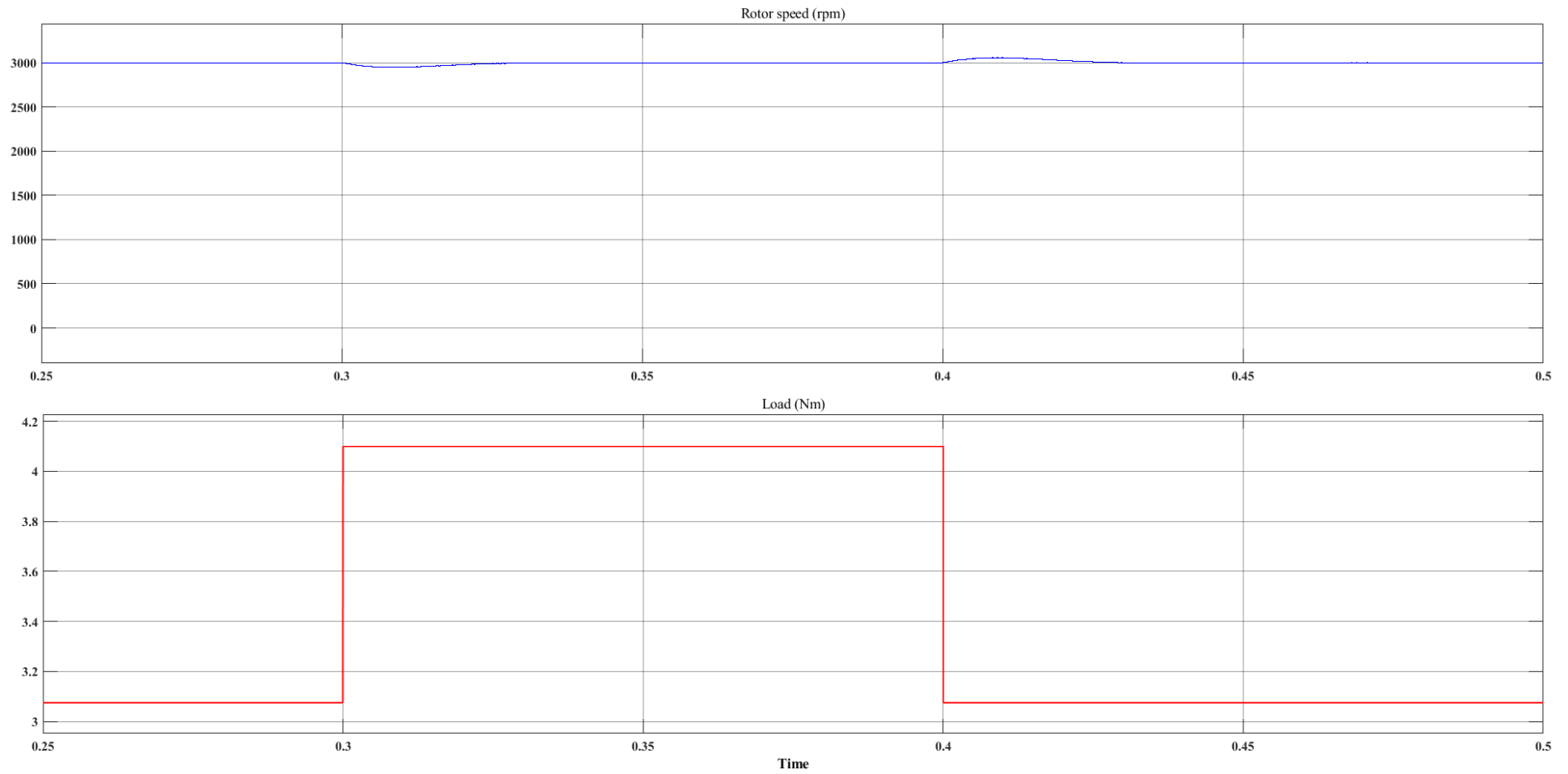
Εικόνα 70: Ρεύματα στον στάτη του κινητήρα, με φορτίο από 50% στο 75% (στο χρονικό διάστημα  $t=0.3$ s έως  $t=0.4$ s), ονομαστικές στροφές στο 100%



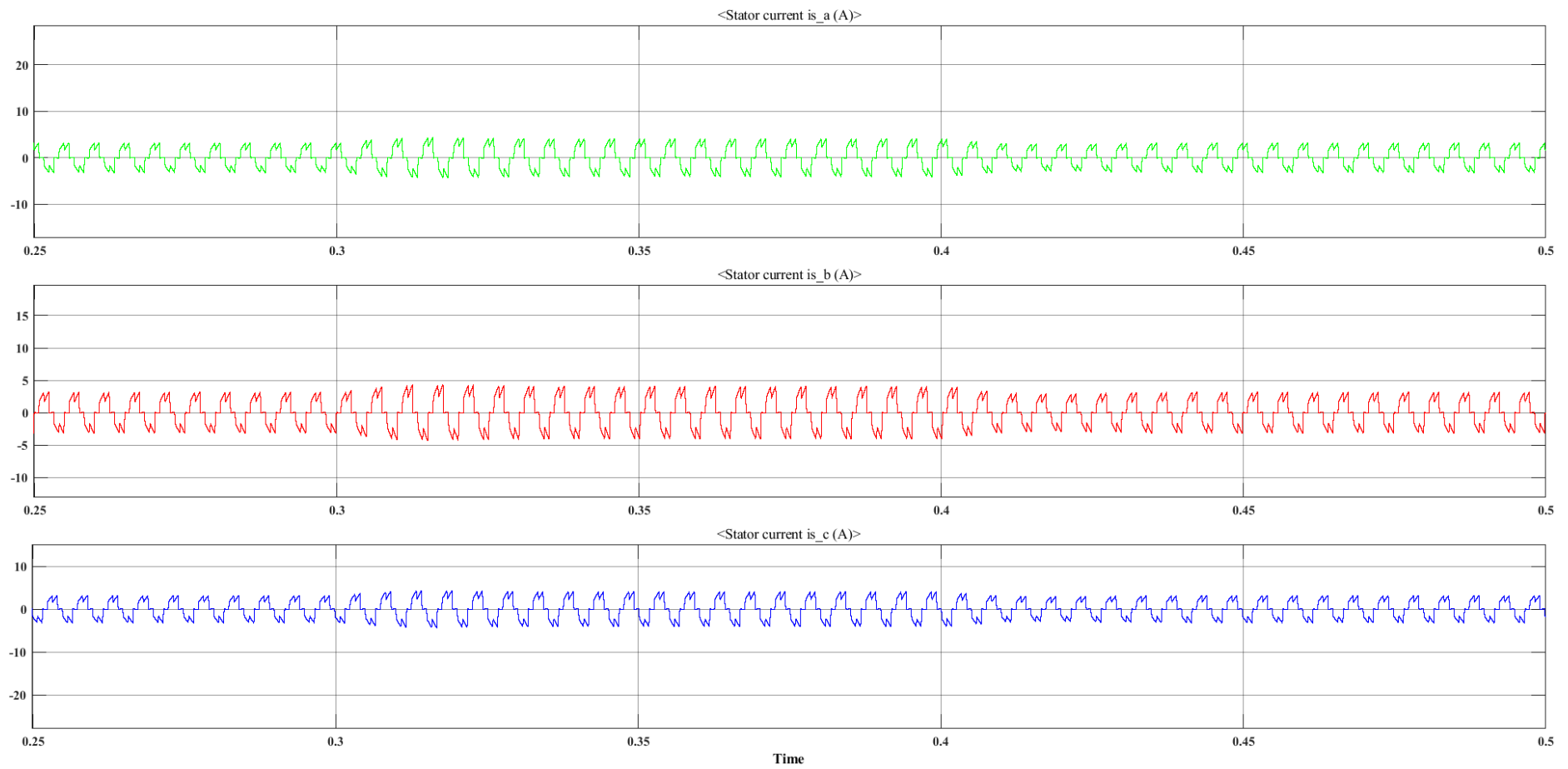
Εικόνα 71: Ταχύτητα του δρομέα – στροφές, με φορτίο από 75% στο 100% (στο χρονικό διάστημα  $t=0.3s$  έως  $t=0.4s$ ), ονομαστικές στροφές στο 50%



Εικόνα 72: Ρεύματα στον στάτη του κινητήρα, με φορτίο από 75% στο 100% (στο χρονικό διάστημα  $t=0.3s$  έως  $t=0.4s$ ), ονομαστικές στροφές στο 50%

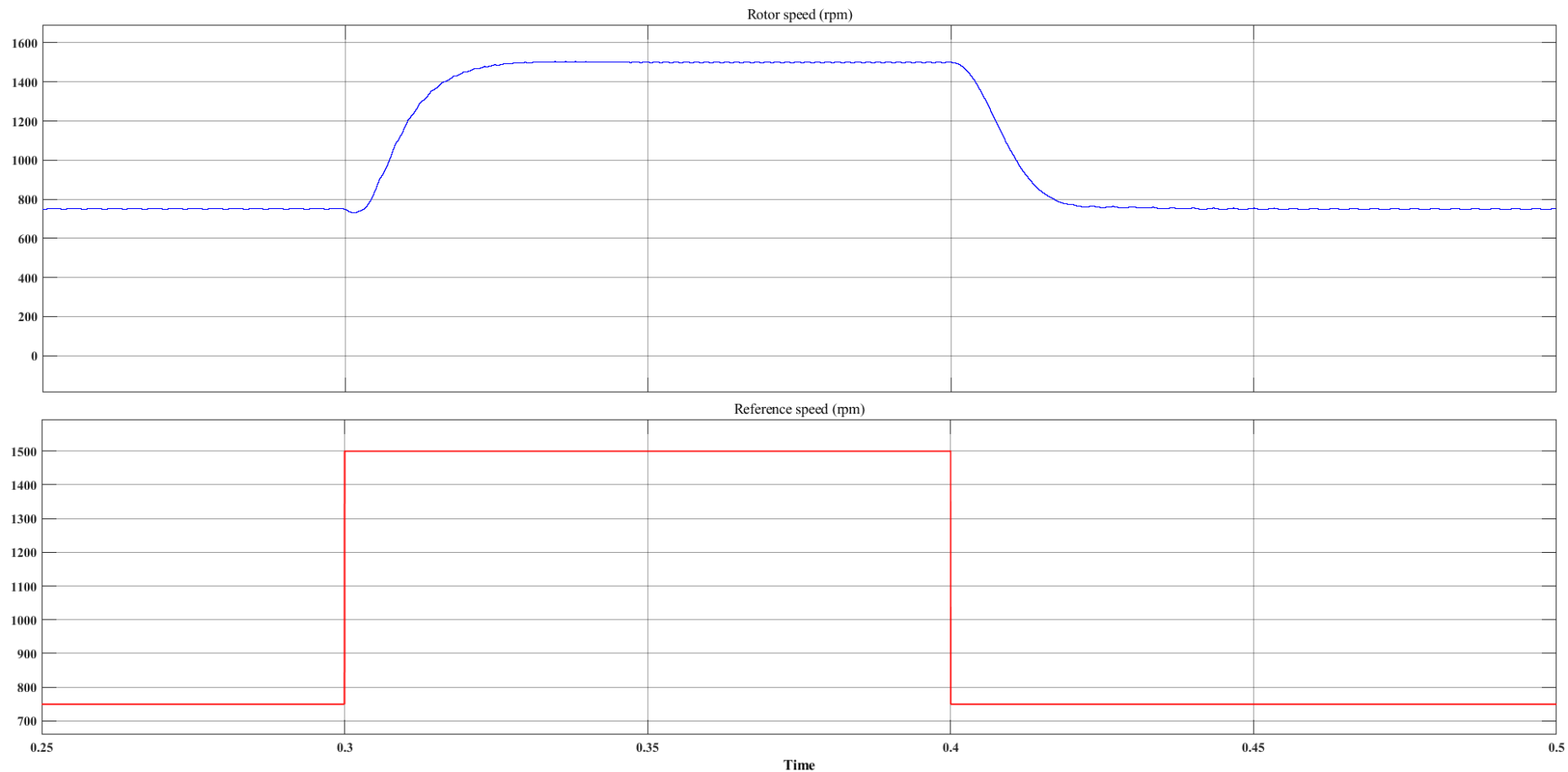


Εικόνα 73: Ταχύτητα του δρομέα – στροφές, με φορτίο από 75% στο 100% (στο χρονικό διάστημα  $t=0.3s$  έως  $t=0.4s$ ), ονομαστικές στροφές στο 100%

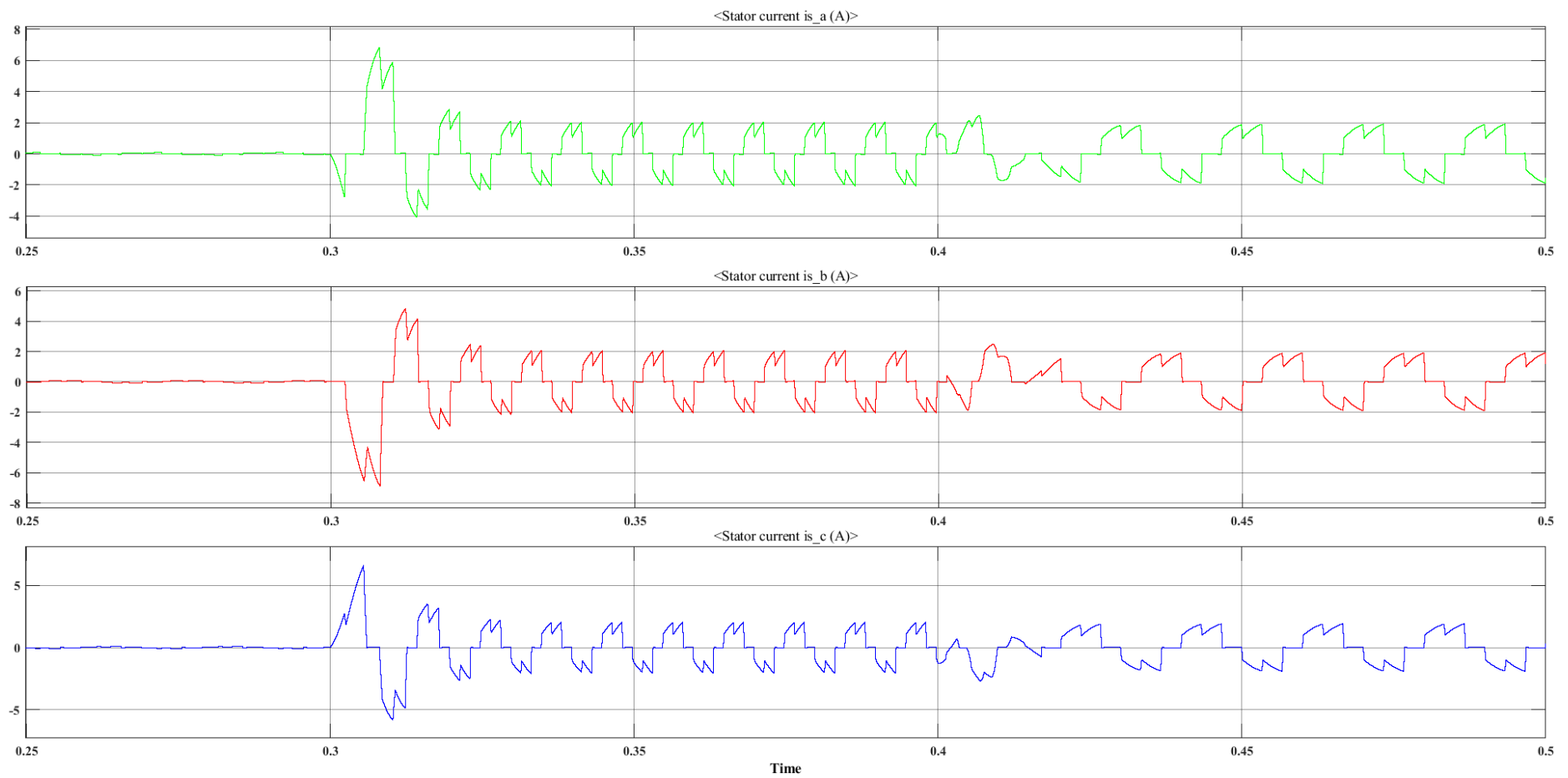


Εικόνα 74: Ρεύματα στον στάτη του κινητήρα, με φορτίο από 75% στο 100% (στο χρονικό διάστημα  $t=0.3$ s έως  $t=0.4$ s), ονομαστικές στροφές στο 100%

### 6.4.2.2 Σταθερό φορτίο και μεταβολή των στροφών

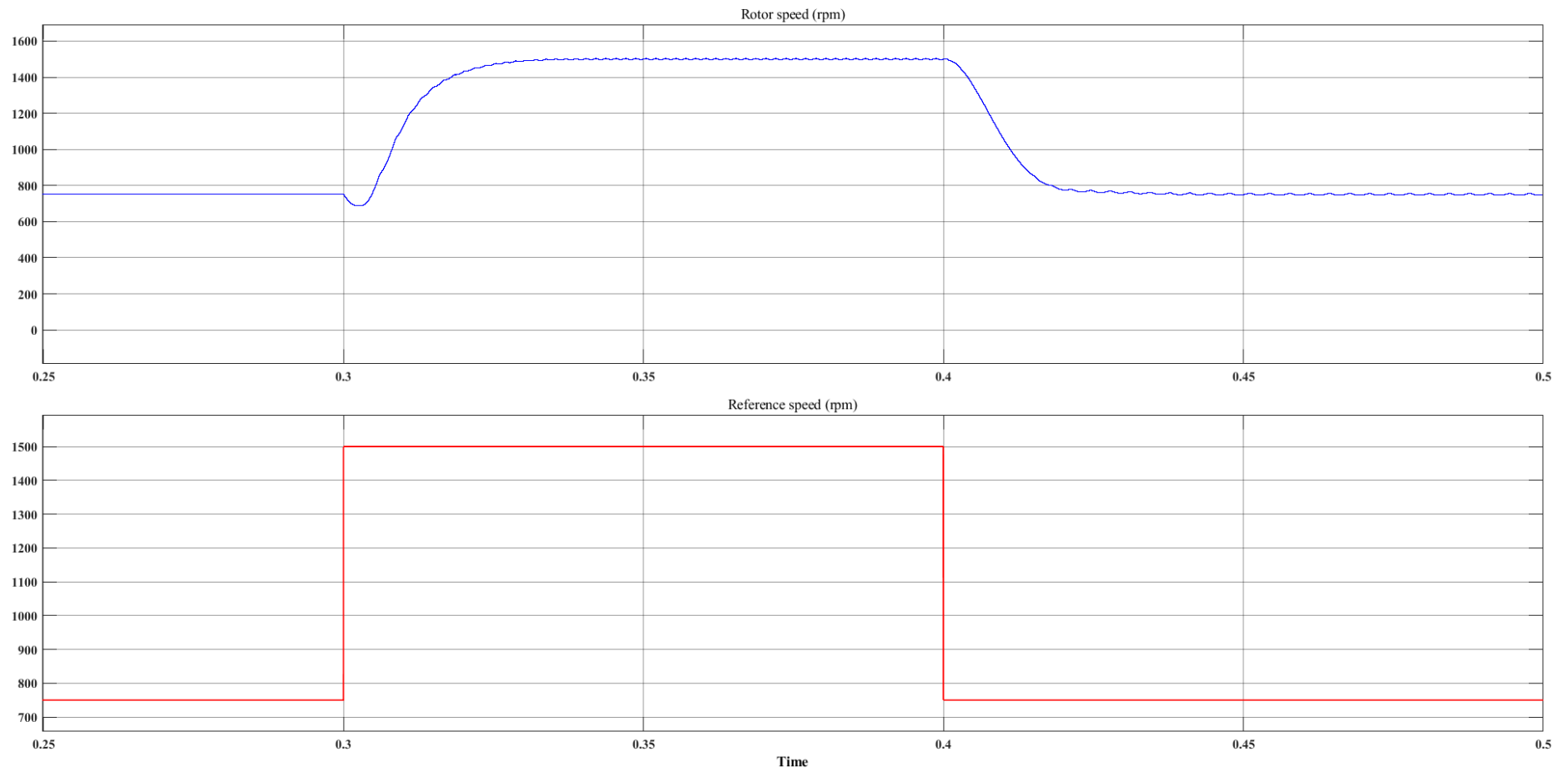


Εικόνα 75: Ταχύτητα του δρομέα – στροφές, με τις στροφές από 25% στο 50% (στο χρονικό διάστημα  $t=0.3s$  έως  $t=0.4s$ ) και φορτίο 50%

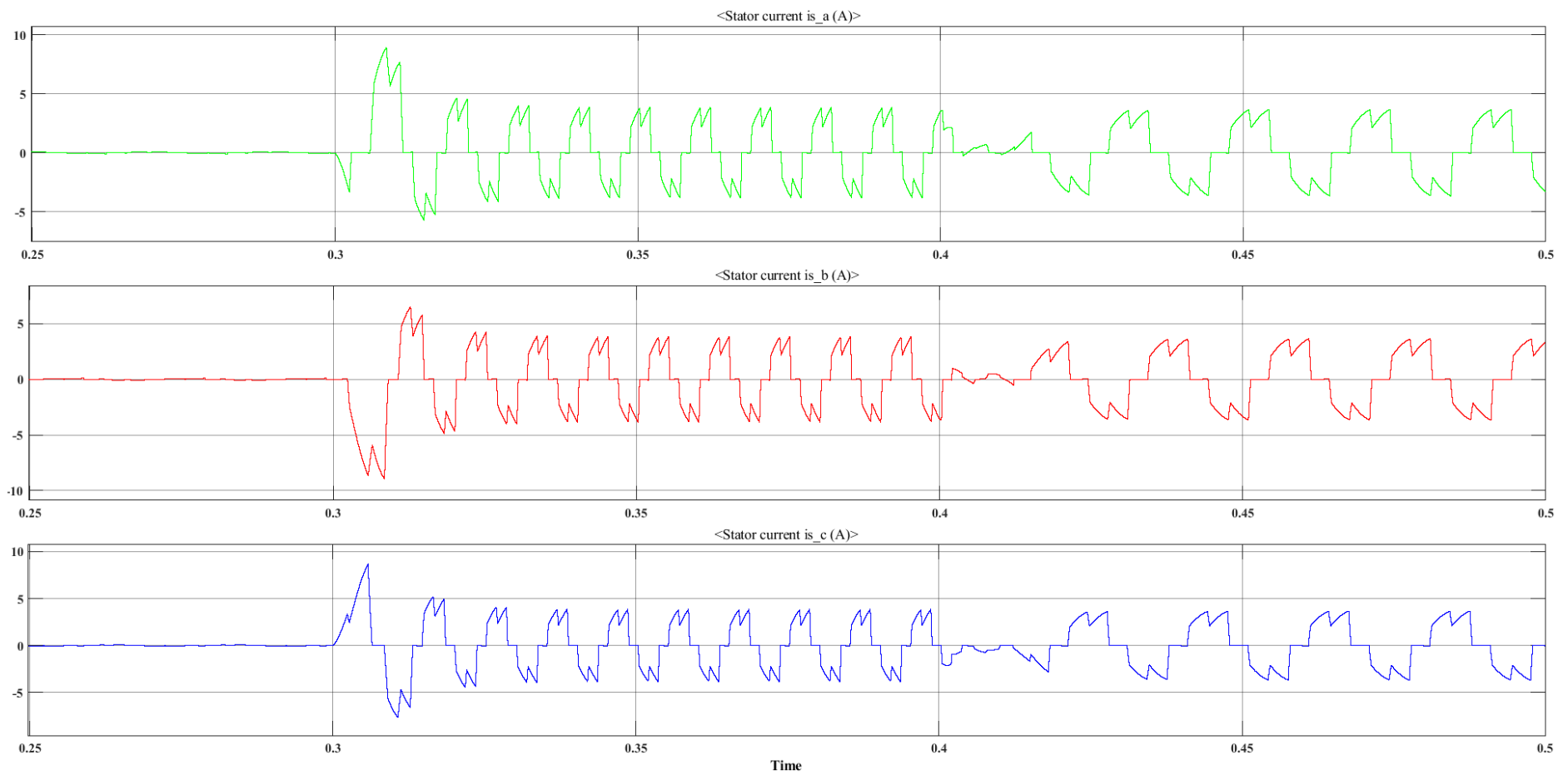


Εικόνα 76: Ρεύματα στον στάτη του κινητήρα, με τις στροφές από 25% στο 50% (στο χρονικό διάστημα  $t=0.3s$  έως  $t=0.4s$ ) και φορτίο 50%

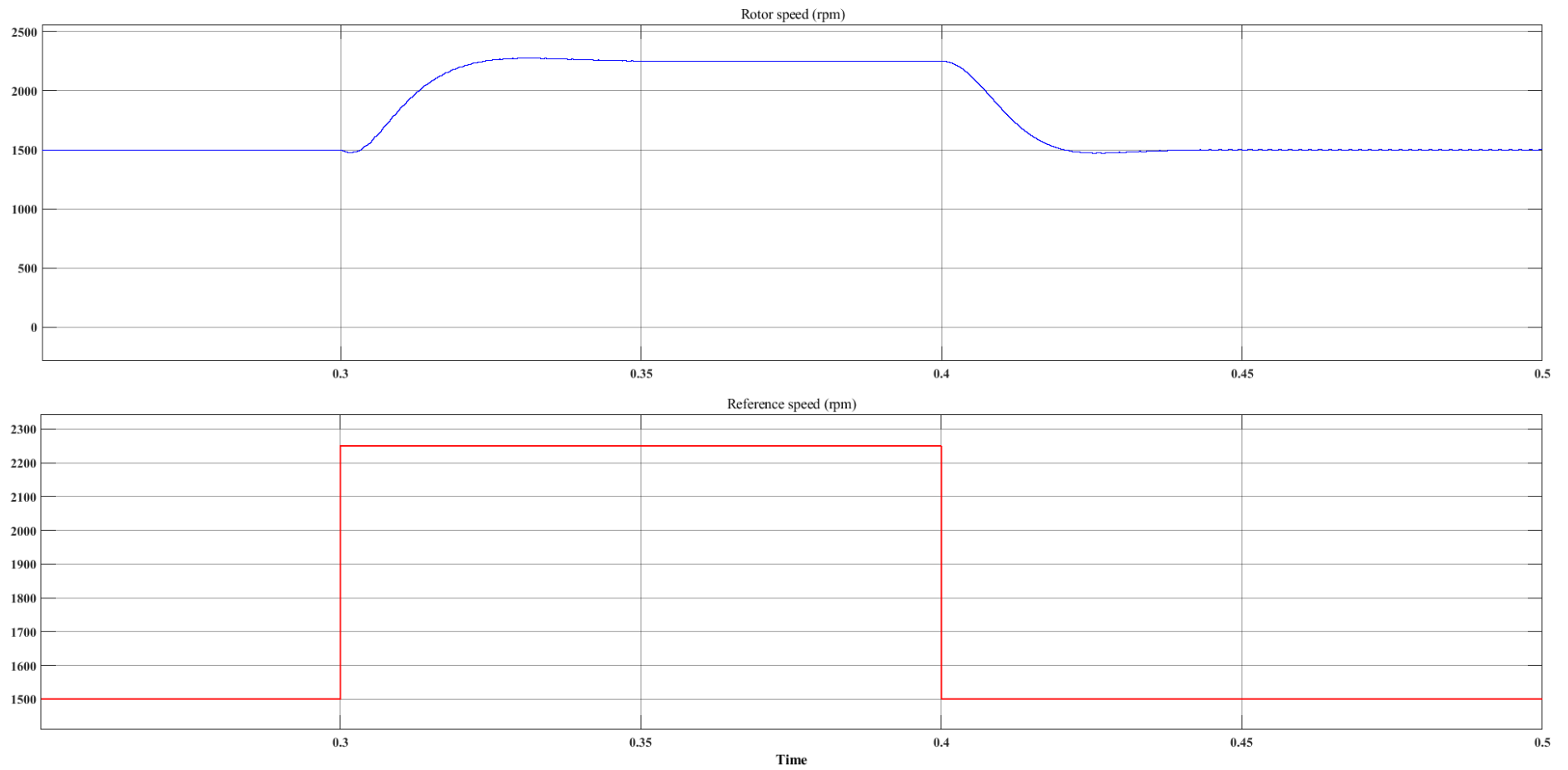




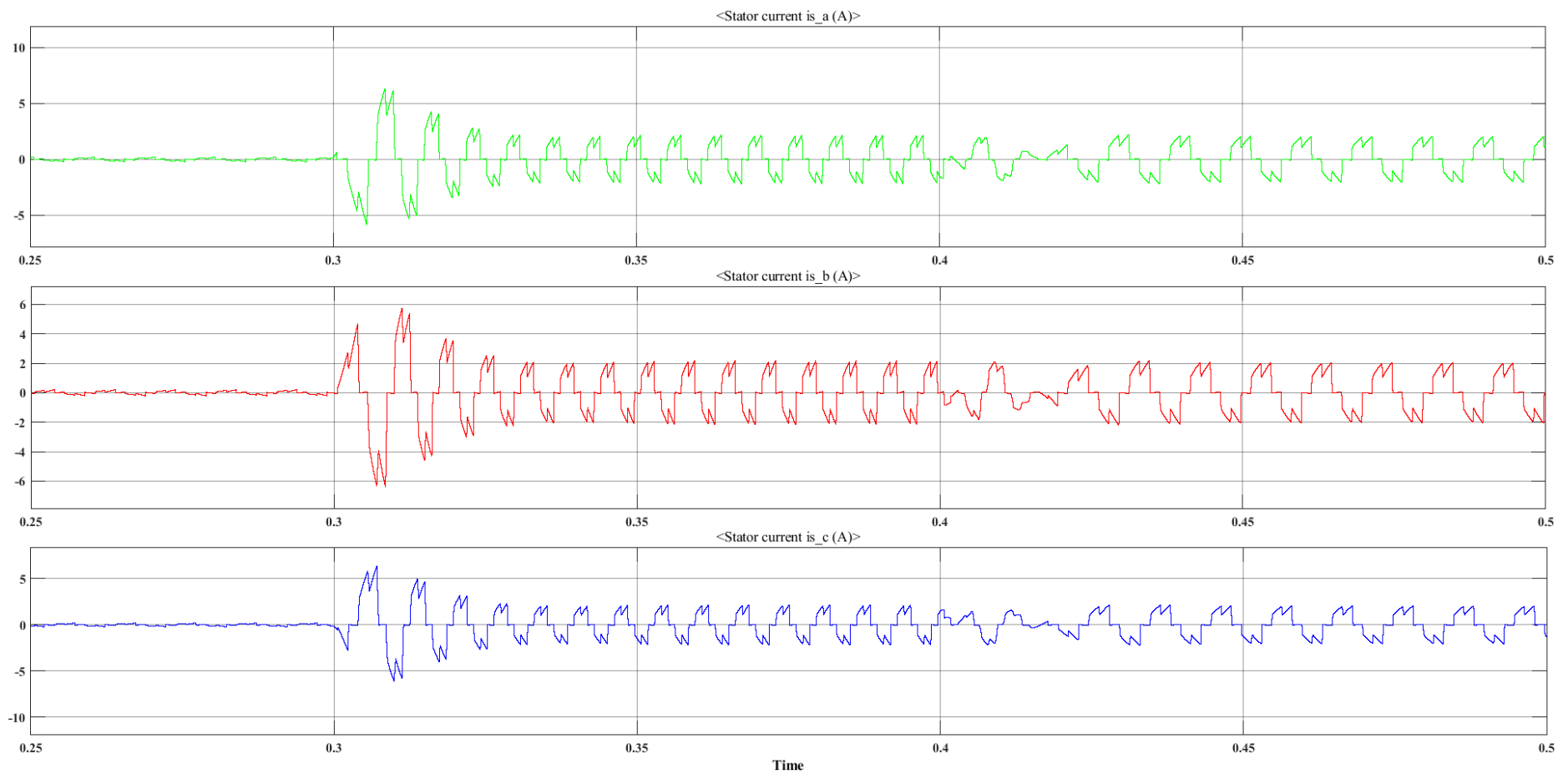
Εικόνα 77: Ταχύτητα του δρομέα – στροφές, με τις στροφές από 25% στο 50% (στο χρονικό διάστημα  $t=0.3s$  έως  $t=0.4s$ ) και φορτίο 100%



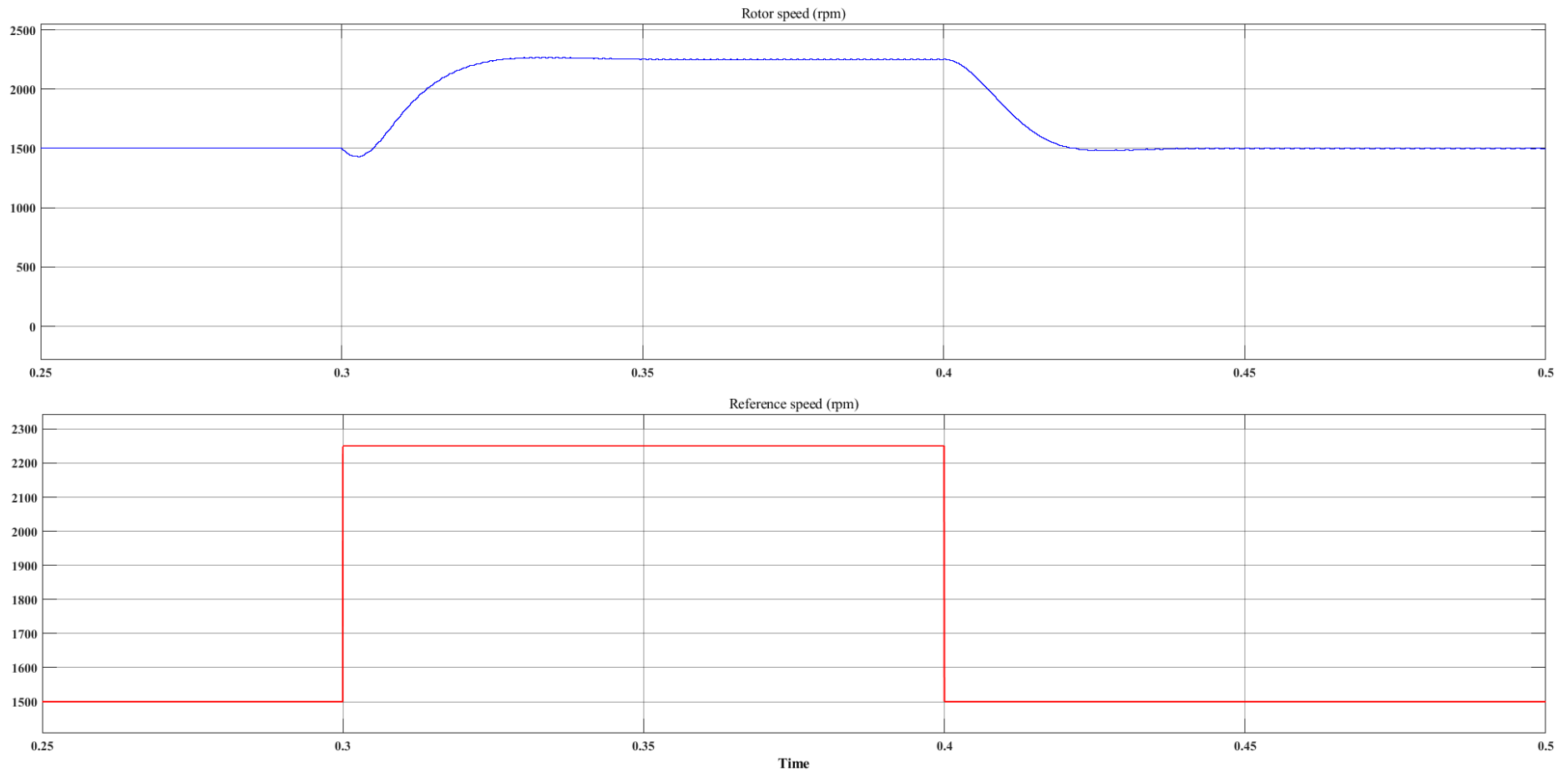
Εικόνα 78: Ρεύματα στον στάτη του κινητήρα, με τις στροφές από 25% στο 50% (στο χρονικό διάστημα  $t=0.3$ s έως  $t=0.4$ s) και φορτίο 100%



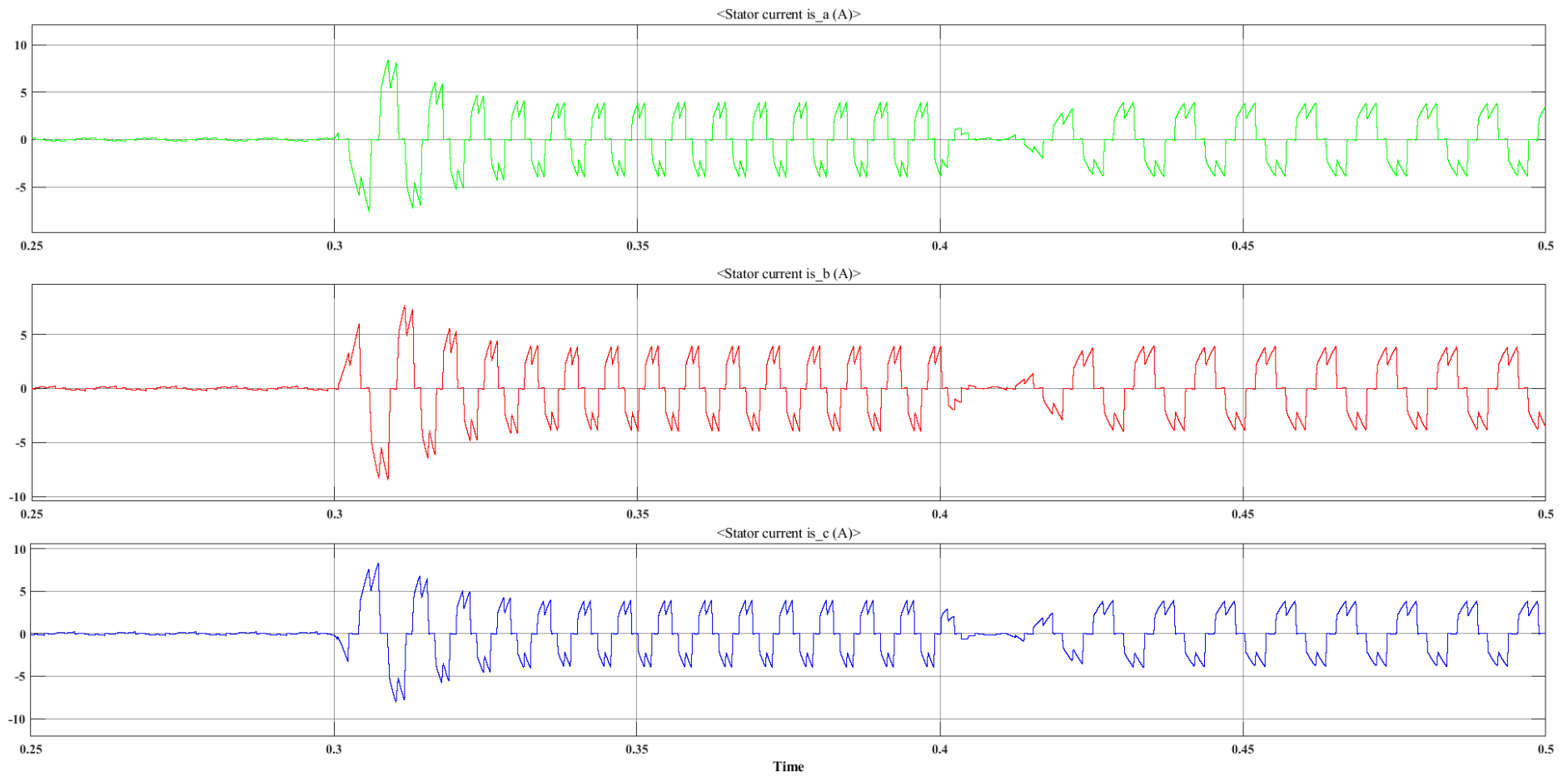
Εικόνα 79: Ταχύτητα του δρομέα – στροφές, με τις στροφές από 50% στο 75% (στο χρονικό διάστημα  $t=0.3s$  έως  $t=0.4s$ ) και φορτίο 50%



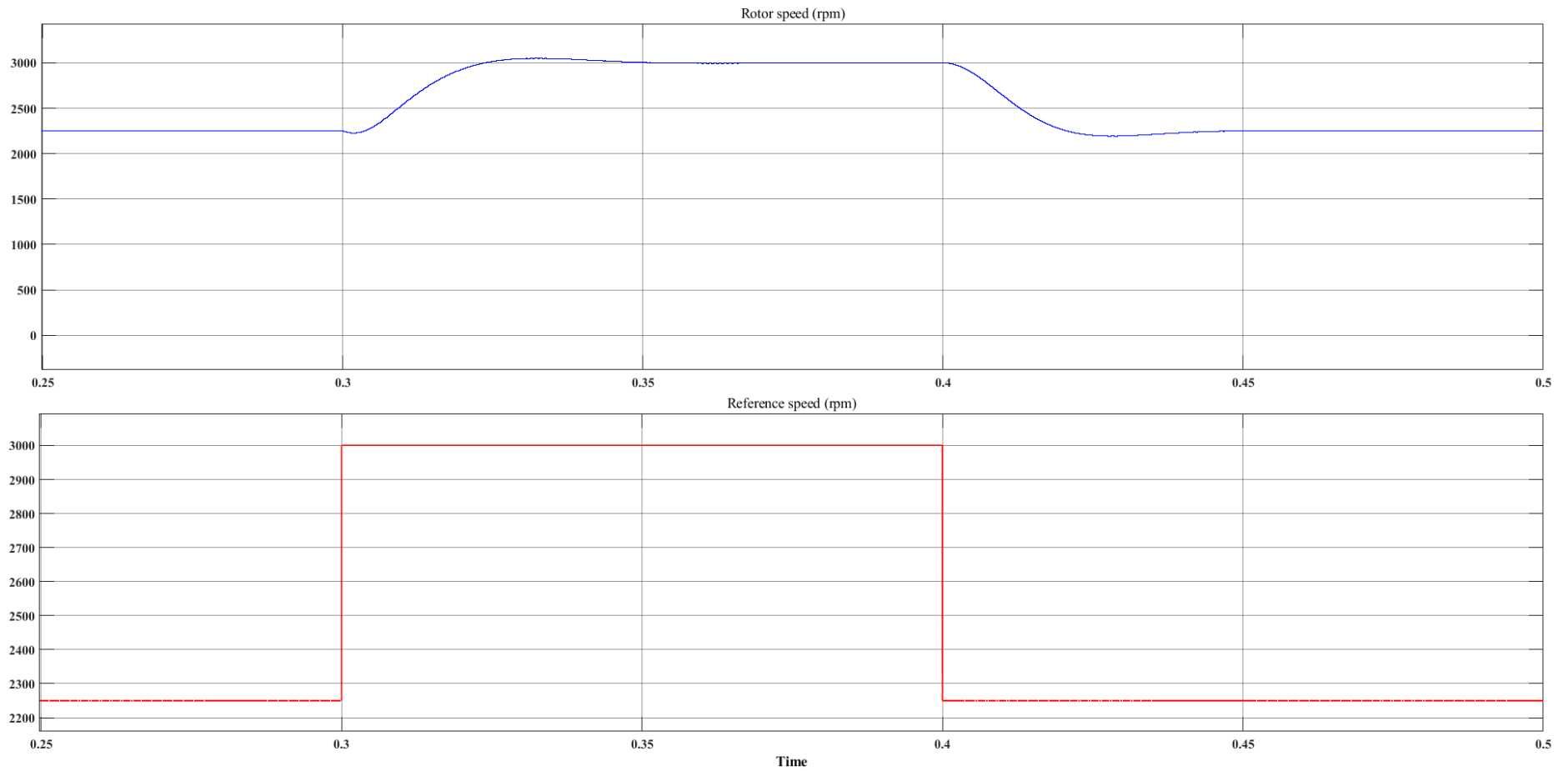
Εικόνα 80: Ρεύματα στον στάτη του κινητήρα, με τις στροφές από 50% στο 75% (στο χρονικό διάστημα  $t=0.3s$  έως  $t=0.4s$ ) και φορτίο 50%



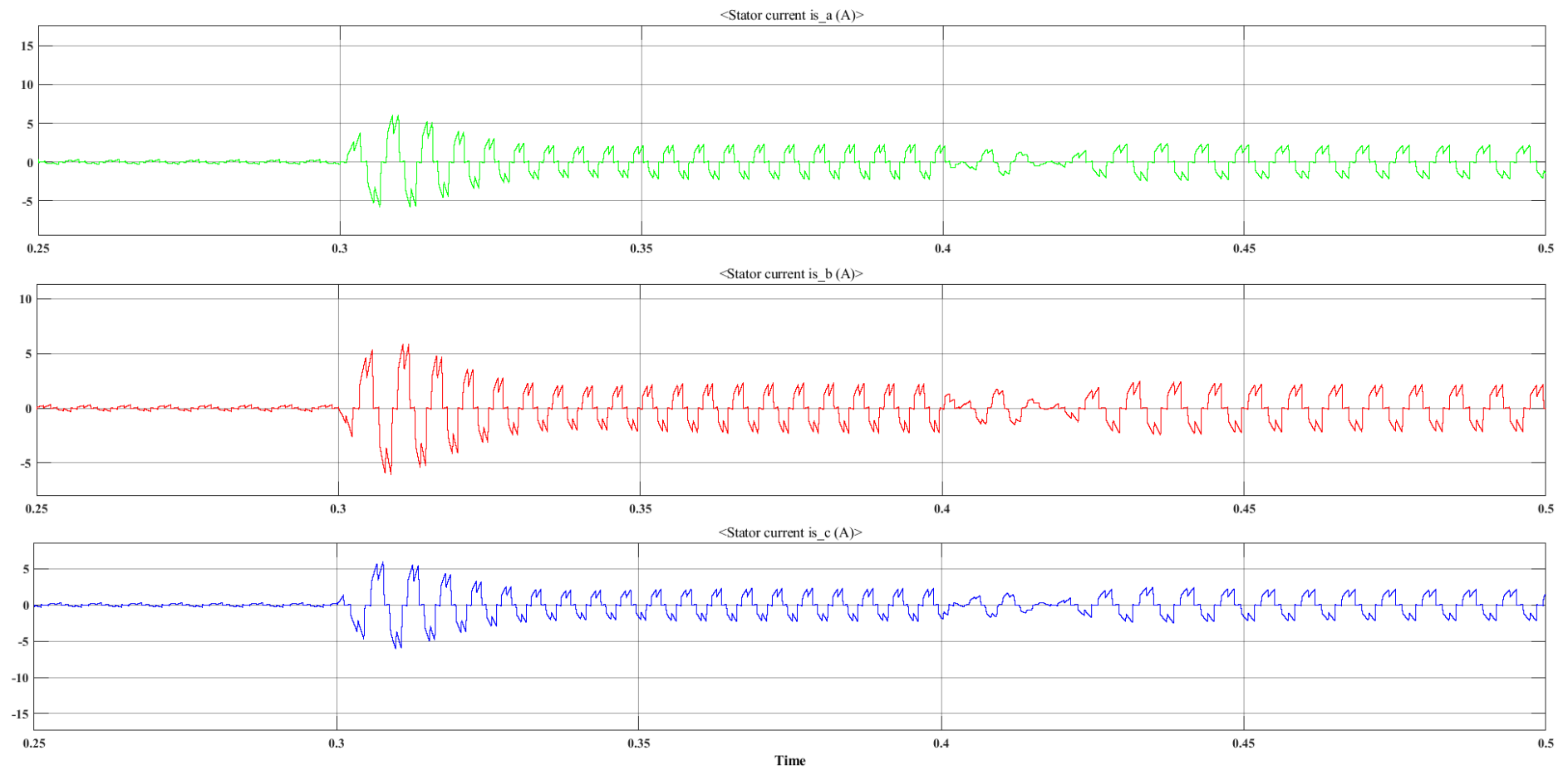
Εικόνα 81: Ταχύτητα του δρομέα – στροφές, με τις στροφές από 50% στο 75% (στο χρονικό διάστημα  $t=0.3s$  έως  $t=0.4s$ ) και φορτίο 100%



Εικόνα 82: Ρεύματα στον στάτη του κινητήρα, με τις στροφές από 50% στο 75% (στο χρονικό διάστημα  $t=0.3$ s έως  $t=0.4$ s) και φορτίο 100%

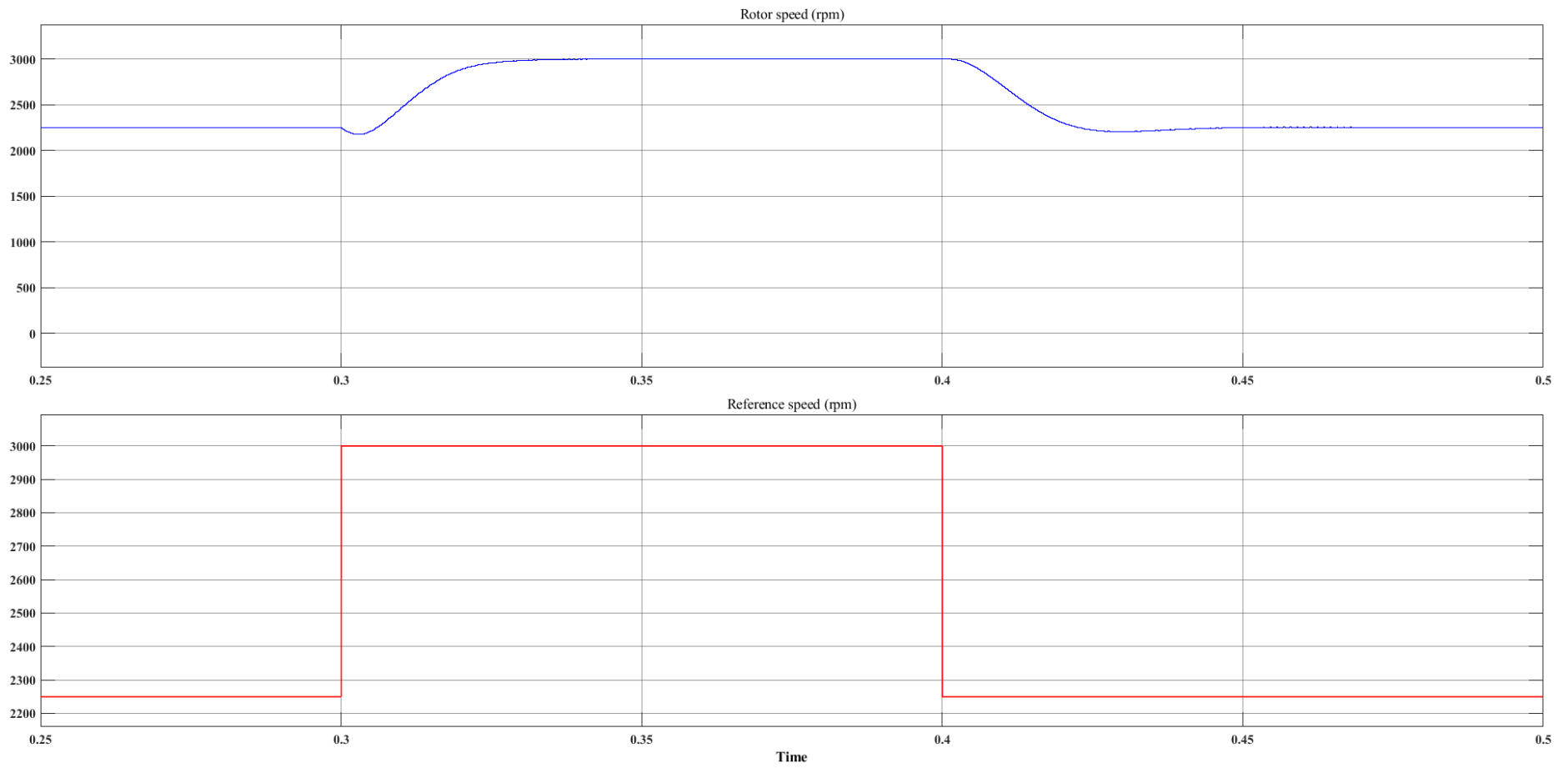


Εικόνα 83: Ταχύτητα του δρομέα – στροφές, με τις στροφές από 75% στο 100% (στο χρονικό διάστημα  $t=0.3s$  έως  $t=0.4s$ ) και φορτίο 50%

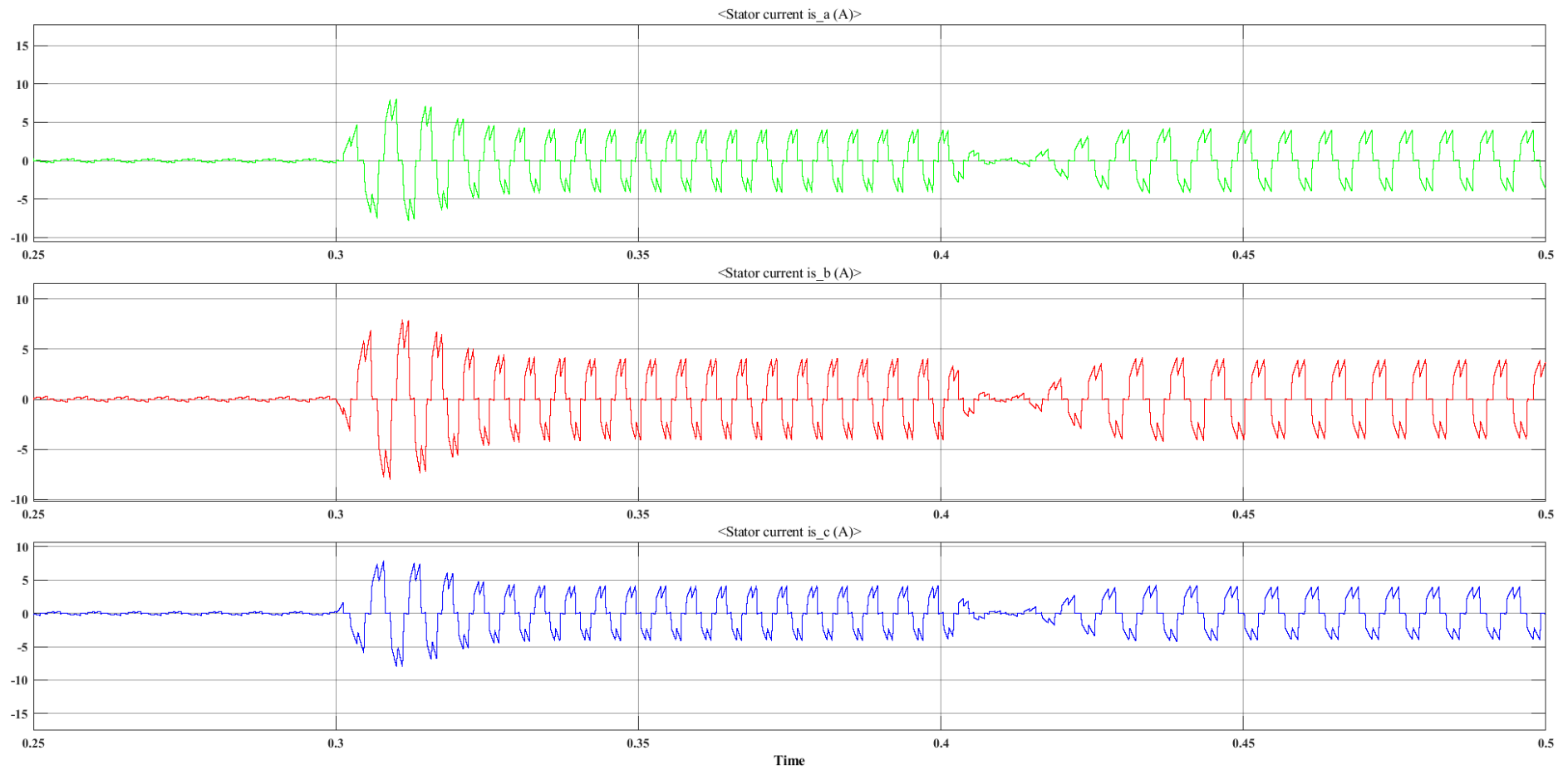


Εικόνα 84: Ρεύματα στον στάτη του κινητήρα, με τις στροφές από 75% στο 100% (στο χρονικό διάστημα  $t=0.3$ s έως  $t=0.4$ s) και φορτίο 50%





Εικόνα 85: Ταχύτητα του δρομέα – στροφές, με τις στροφές από 75% στο 100% (στο χρονικό διάστημα  $t=0.3s$  έως  $t=0.4s$ ) και φορτίο 100%



Εικόνα 86: Ρεύματα στον στάτη του κινητήρα, με τις στροφές από 75% στο 100% (στο χρονικό διάστημα  $t=0.3$ s έως  $t=0.4$ s) και φορτίο 100%

## 6.5 Συμπεράσματα

Είναι ένα απλό κύκλωμα κλειστού βρόγχου, χωρίς υψηλές απαιτήσεις, χαμηλό κόστος, απλή κατασκευή και αρκετά αξιόπιστο όπως προκύπτει από τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων. Συνδυάζει τον ελεγκτή PI αλλά και τους αισθητήρες Hall, για καλύτερες αποκρίσεις του κινητήρα. Ωστόσο, από τους αισθητήρες υπάρχει το αποτέλεσμα της ύπαρξης αρμονικών συνιστωσών στο ρεύμα του κινητήρα λόγω της ψηφιακής φύσης των σημάτων που δίνουν.

Μπορούμε να παρατηρήσουμε επίσης, την κυμάτωση του ρεύματος του κινητήρα αλλά και μια μικρή κυμάτωση στην παραγόμενη ηλεκτρομαγνητική ροπή. Αυτό οφείλεται στο ότι ο έλεγχος γίνεται ανά  $60^\circ$  και όχι συνεχόμενα.

Το αρχικό ρεύμα είναι υψηλό και μειώνεται κατά την επιτάχυνση στην ονομαστική ταχύτητα. Όταν εφαρμόζεται η ονομαστική ροπή, το ρεύμα του στάτη αυξάνεται για να διατηρηθεί η ονομαστική ταχύτητα. Ωστόσο, η αδράνεια του κινητήρα εμποδίζει να εμφανιστεί αυτός ο «θόρυβος» στην κυματομορφή ταχύτητας του κινητήρα.

Στο κομμάτι των προσομοιώσεων της απόκρισης εκκίνησης του κινητήρα παρατηρούμε, ότι οι στροφές του κινητήρα, σε πολύ μικρό χρονικό διάστημα φτάνουν τις 3000 rpm (ονομαστικές στροφές), όμως σε χρόνο  $t=0.06s$  σταθεροποιείται και δεν εμφανίζει καμία άλλη μεταβολή. Βάση αυτού, μπορεί να εξαχθεί και το συμπέρασμα ότι το κύκλωμα αυτό μας δίνει σε ένα πολύ μικρό χρονικό διάστημα και για ένα πολύ ικανοποιητικό όριο στροφών, μια πολύ καλή και σταθερή απόκριση.

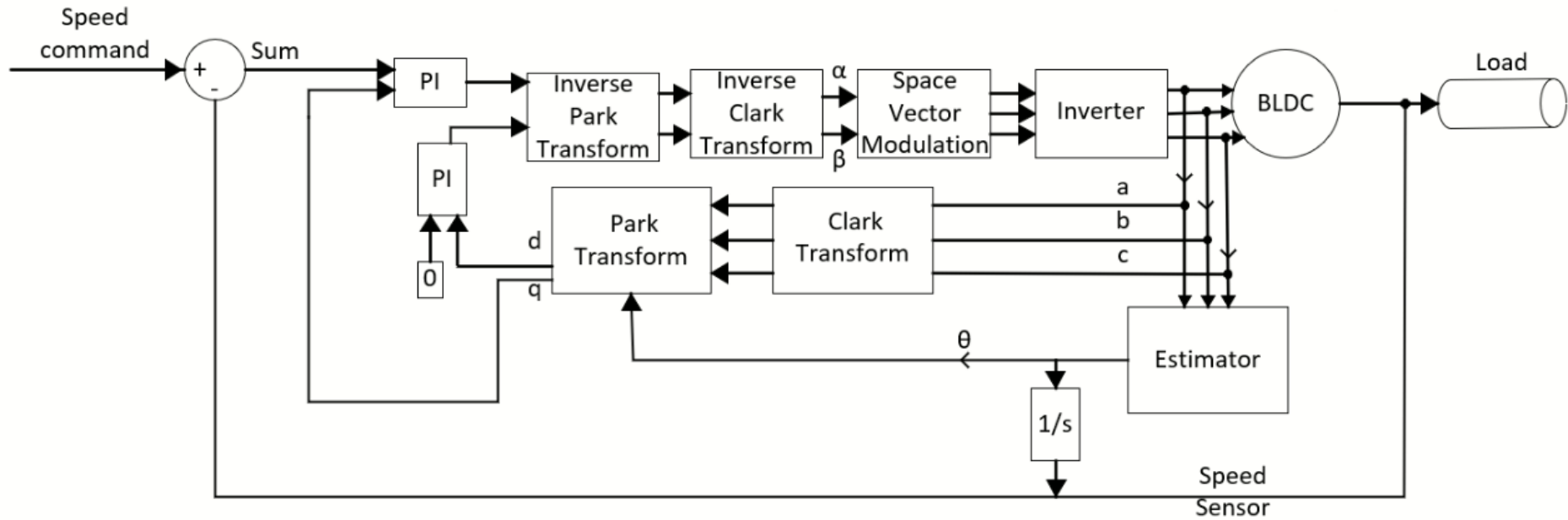
Όσο αναφορά τις προσομοιώσεις, για την απόκριση εκκίνησης του κινητήρα σε μεταβατικές συνθήκες, τα αποτελέσματα για τις δοκιμές που έγιναν είναι λογικά και αναμενόμενα, καθώς στις περιπτώσεις από 25%-50%, 50%-75% και 75%-100%, όπου και εφαρμόζεται το μηχανικό φορτίο στα 0.3s, παρατηρείται μια μικρή μείωση (ένα βύθισμα) όταν ανεβαίνουν οι στροφές ή το φορτίο αλλά άμεσα σταθεροποιούνται τόσο οι στροφές όσο και τα ρεύματα. Όταν όμως έχουν την μείωση των στροφών ή του φορτίου πίσω στην αρχική του τιμή, παρατηρείται επίσης μια μικρή μεταβολή για μερικά δευτερόλεπτα (αύξηση στροφών), αλλά σταθεροποιείται άμεσα και πολύ σύντομα.

## **Κεφάλαιο 7<sup>ο</sup>: Εφαρμογή Τεχνικής Προσανατολισμένου Πεδίου (FOC) για Οδήγηση BLDC Κινητήρα**

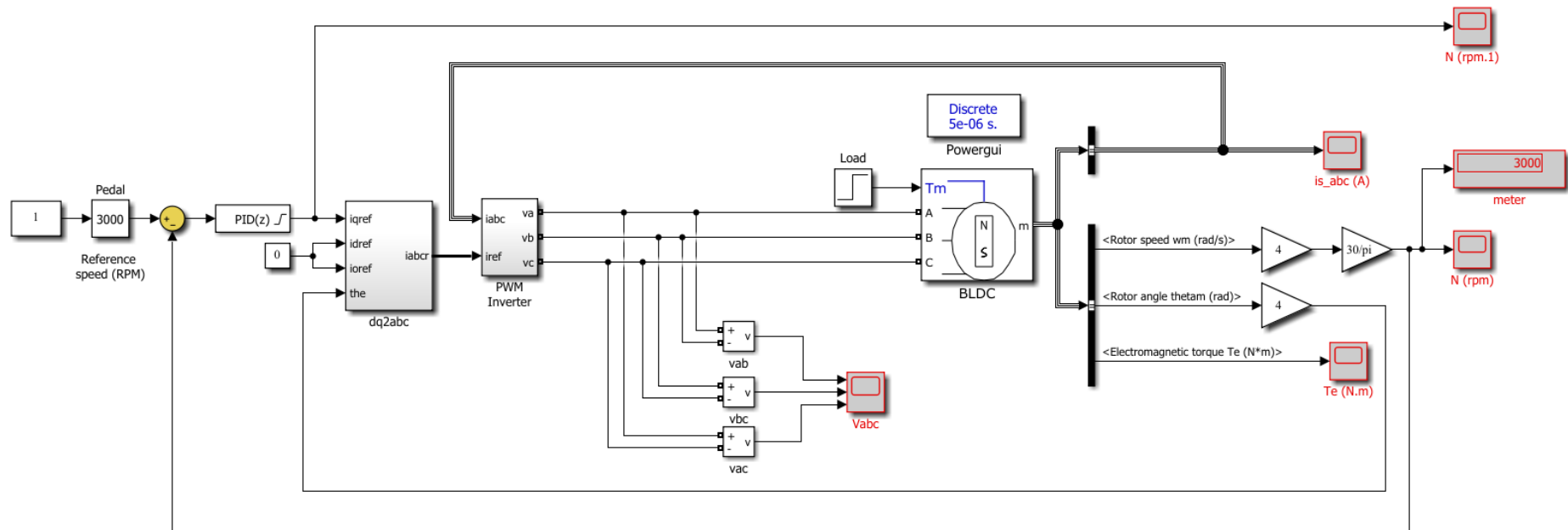
Σε αυτό το κεφάλαιο θα γίνει παρουσίαση της δεύτερης τεχνικής ελέγχου που χρησιμοποιήθηκε ώστε να εξάγουμε την τραπεζοειδή μαγνητική ροή. Βασιζόμενοι λοιπόν, από στο κεφάλαιο 5 που παρουσιάστηκαν αρκετές τεχνικές ελέγχου για BLDC κινητήρες, η τεχνική που έχει επιλεγεί να παρουσιαστεί είναι αυτή της τεχνικής ελέγχου FOC (Field Oriented Control)

Πρόκειται για ένα κλειστό βρόγχο ελέγχου ταχύτητας (closed loop speed controller) ενός BLDC κινητήρα. Η τεχνική ελέγχου FOC (ξεκίνησε να υλοποιείται από το 1970), ως μια ευρέως διαδεδομένη τεχνική που βρίσκει χώρο σε πολλούς κινητήρες (π.χ. τους PMSM), προσφέρει μια πιο απλή δομή και παρουσιάζει βελτιωμένα χαρακτηριστικά σε σχέση με τον τραπεζοειδή έλεγχο. Στην πραγματικότητα, η χρήση κατάλληλων μαθηματικών μετασχηματισμών δίνουν τη δυνατότητα στους PI ελεγκτές να διαχειρίζονται ποσότητες συνεχούς ρεύματος με αποτέλεσμα την αυξημένη ποιότητα ελέγχου σε υψηλές ταχύτητες περιστροφής, ανεξάρτητα της συχνότητας.

### 7.1 Κύκλωμα ελέγχου τεχνικής προσανατολισμένου πεδίου



Εικόνα 87: Χονδρικό διάγραμμα κυκλώματος ελέγχου BLDC κινητήρα εφαρμογή της τεχνικής FOC



Εικόνα 88: Υλοποίηση ελέγχου BLDC κινητήρα με εφαρμογή τεχνικής FOC σε περιβάλλον Matlab/Simulink

## 7.2 Τρόπος λειτουργίας του κυκλώματος

Ένας τριφασικός κινητήρας ονομαστικής ισχύος 1 kW, 500 Vdc και 3000 rpm τροφοδοτείται από έναν PWM μετατροπέα. Όσον αφορά την οδήγηση με την τεχνική διανυσματικού ελέγχου προσανατολισμένου πεδίου, θα γίνει χρήση οπτικού κωδικοποιητή (Optical Encoder) για τον προσδιορισμό της θέσης και της ταχύτητας του δρομέα, αλλά επίσης, θα λαμβάνει μετρήσεις από τις τρεις φάσεις του κινητήρα όπου στη συνέχεια θα ακολουθούν οι μετασχηματισμοί Clarke και Park, ώστε να πραγματοποιηθεί μετατροπή του τριφασικού συστήματος σε διφασικό και κατόπιν σε συνεχούς ρεύματος (DC). Στη συνέχεια γίνεται σύγκριση με την επιθυμητή είσοδο, και μέσω της κατάλληλης ενίσχυσης του ελεγκτή PI, το σήμα μετατρέπεται πάλι με τη χρήση αντίστροφου Park και Clarke σε τριφασικό, ώστε να οδηγήσει εν τέλη τον κινητήρα.

Ο χρόνος απόκρισης και η ποιότητα ελέγχου (ελαχιστοποίηση σφάλματος εισόδου) βασίζονται στον ελεγκτή PI. Αύξηση του P οδηγεί σε αύξηση των αρμονικών του ρεύματος, ενώ αύξηση της τιμής του I οδηγεί σε ταχύτερη απόκριση κι αντιστρόφως. Ωστόσο, είναι προφανές ότι αυτές οι τιμές δεν μπορούν να γίνουν άπειρες κι έτσι μετά από αρκετές δοκιμές (μέθοδος δοκιμής και λάθους, Trial and Error) οι βέλτιστες τιμές που προκύπτουν είναι αυτές του Πίνακα 12.

Πιο αναλυτικά αυτό που ισχύει σε αυτό το κύκλωμα είναι το εξής: Καθώς αυξάνεται η ταχύτητα και η συχνότητα, οι ελεγκτές PI που έχουν χρησιμοποιηθεί δεν είναι ικανοί από μόνοι τους να χειριστούν τη λειτουργία λόγω των περιορισμών του εύρους ζώνης που υπάρχουν. Ωστόσο, αυτό το πρόβλημα μπορεί να ξεπεραστεί με την αναπαράσταση και τον έλεγχο του τρέχοντος διανύσματος, δηλαδή δύο αξόνων d-q. Αυτό το σχήμα ελέγχου περιστρέφεται γύρω από τους μετασχηματισμούς Clarke και Park και το αντίστροφο. Ουσιαστικά, οι μετασχηματισμοί Clarke και Park (Κεφάλαιο 5) κατορθώνουν μετατροπή της μεταβλητής κατάστασης συστήματος από το τριφασικό σύστημα (abc) σε ορθογώνια (a - b) αναπαράσταση ή (d - q) περιστρεφόμενο πλαίσιο αναφοράς. Βάση και των παλμών εξόδου της γεννήτριας PWM, διαμορφώνονται οι καταστάσεις των διακοπτικών στοιχείων του αντιστροφέα μέσω της διαμόρφωσης διανύσματος χώρου (Space Vector Modulation, SVM). Ουσιαστικά, αυτό που συμβαίνει είναι να «ανοιγοκλείνουν» σε διάφορους συνδυασμούς και να σχηματίζουν όλες τις ενδιάμεσες τιμές μέσα στον «κύκλο» των διανυσμάτων. Όμως, δεν έχουμε την τραπεζοειδή μορφή στον BLDC κινητήρα, αλλά μια ημιτονοειδή μορφή, η οποία αναμενόμενα δεν θα είναι τέλεια. Επίσης και το κύκλωμα αυτό ξεκινάει σε εν κενώ λειτουργία και σε χρόνο  $t=0.3s$  τοποθετείται ένα μηχανικό φορτίο στον BLDC κινητήρα, όπου η ονομαστική του τιμή είναι  $T=4.1Nm$ .

### 7.3 Αποτελέσματα προσομοίωσης

Σε αυτήν την υπό-ενότητα, θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα προσομοίωσης για την απόκριση εκκίνησης του BLDC κινητήρα και για την απόκριση του ίδιου κινητήρα σε μεταβατικές συνθήκες με εφαρμογή της τεχνικής προσανατολισμένου πεδίου (FOC)

#### 7.3.1 Απόκριση εκκίνησης κινητήρα

Οι προσομοιώσεις έχουν γίνει για  $t=0s - 0.2s$ , χωρίς την εμφάνιση φορτίου σε εκείνο το διάστημα (εν κενώ λειτουργία) και για ονομαστικές στροφές μέχρι τις 3000 rpm.

Τα χαρακτηριστικά του κινητήρα που έχει επιλεγθεί ώστε να γίνει η υλοποίηση του κυκλώματος, παρουσιάζονται στον Πίνακα 10.

Πίνακας 10: Χαρακτηριστικά BLDC

<b>Φάσεις</b>	3
<b>Πόλοι</b>	8
<b>Αντίσταση στη φάση του στάτη</b>	0.36 Ohm
<b>Επαγωγή στη φάση του στάτη</b>	1.67 mH
<b>Ονομαστική Ισχύς</b>	1kW
<b>Συνεχή Τάση</b>	500V
<b>Εύρος Στροφών</b>	0-3000 rpm

Ενώ οι τιμές που έχουν δοθεί στον PI ελεγκτή είναι αυτές του Πίνακα 8:

Πίνακας 11: Χαρακτηριστικά PI

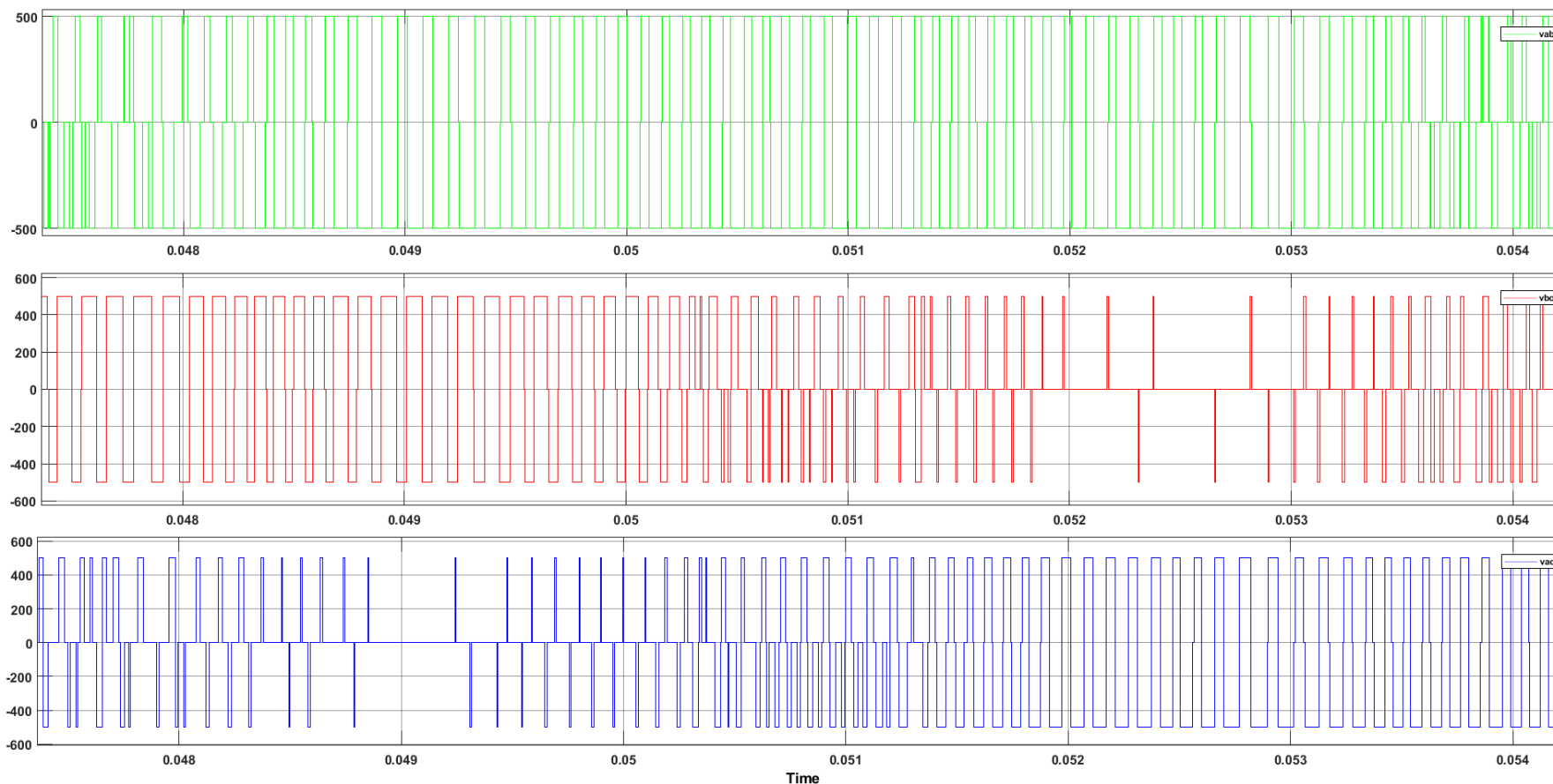
<b>P</b>	2
<b>I</b>	0.49

Τα χαρακτηριστικά του BLDC κινητήρα είναι καταγεγραμμένα στον Πίνακα 10, τα χαρακτηριστικά του PID είναι καταγεγραμμένα στον Πίνακα 11 (σημαντικό να αναφερθεί ότι τα χαρακτηριστικά αυτά προέκυψαν ύστερα από αρκετές δοκιμές στις



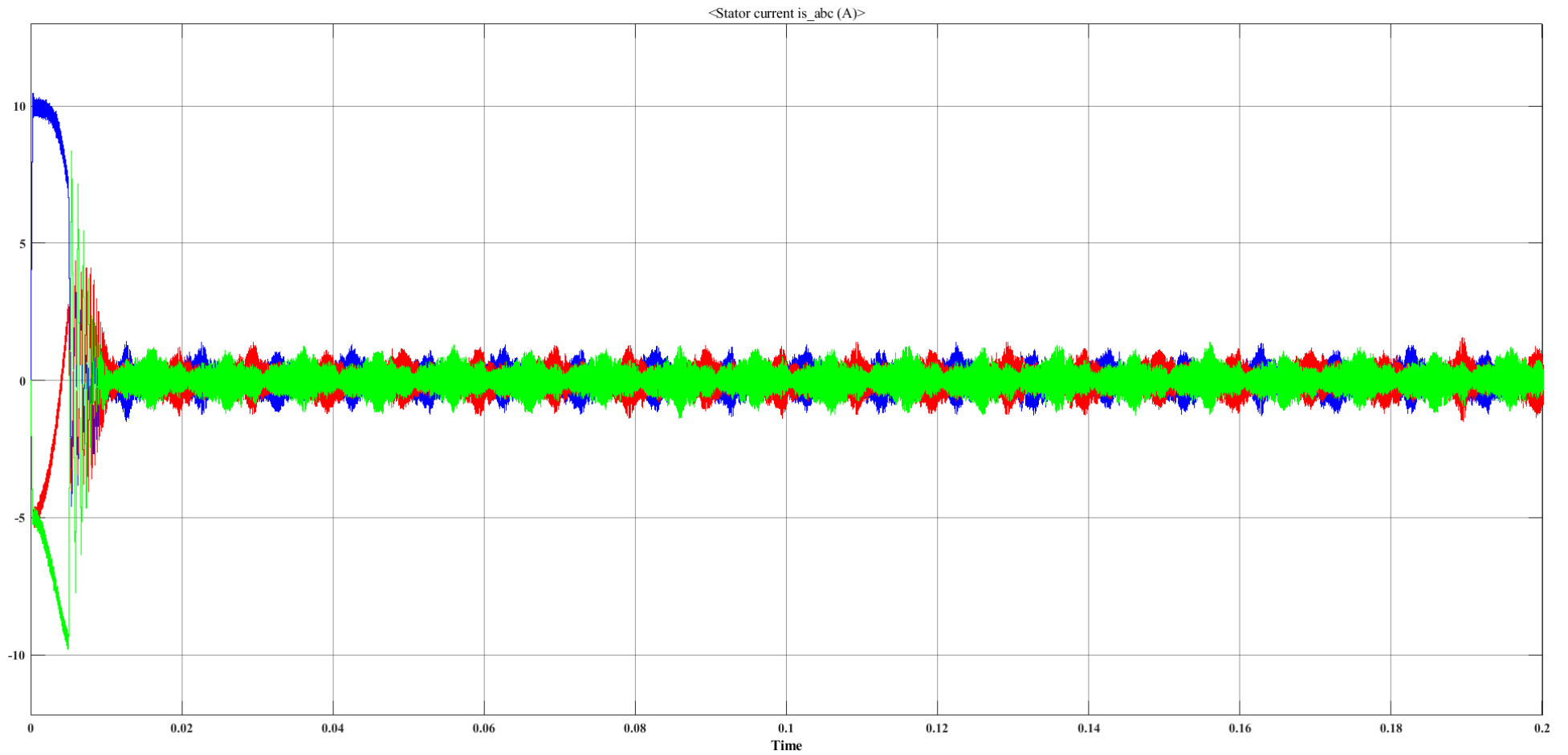
προσομοιώσεις). Τέλος, τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων στην απόκριση εκκίνησης του κινητήρα που θα παρουσιαστούν παρακάτω είναι τα εξής:

- Οι πολικές τάσεις (ab, bc, ca) στην είσοδο του BLDC κινητήρα.
- Τα ρεύματα στον στάτη του BLDC κινητήρα.
- Η ταχύτητα του δρομέα – στροφές.
- Η ηλεκτρομαγνητική ροπή.

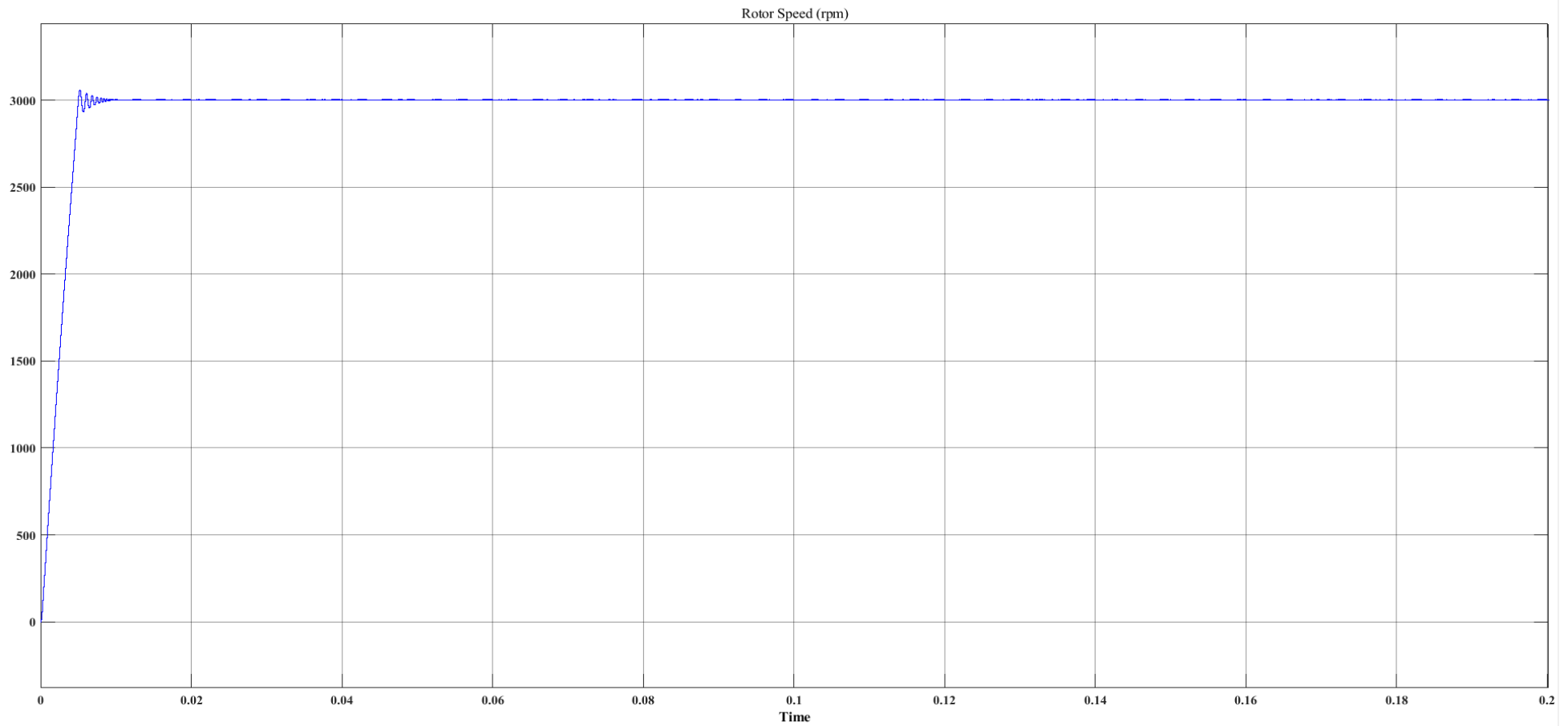


Εικόνα 89: Οι πολικές τάσεις (ab, bc, ca) στην είσοδο του BLDC κινητήρα (με ονομαστικές στροφές μέχρι τις 3000 rpm σε εν κενώ λειτουργία, για  $t = 0s - 0.2s$ )

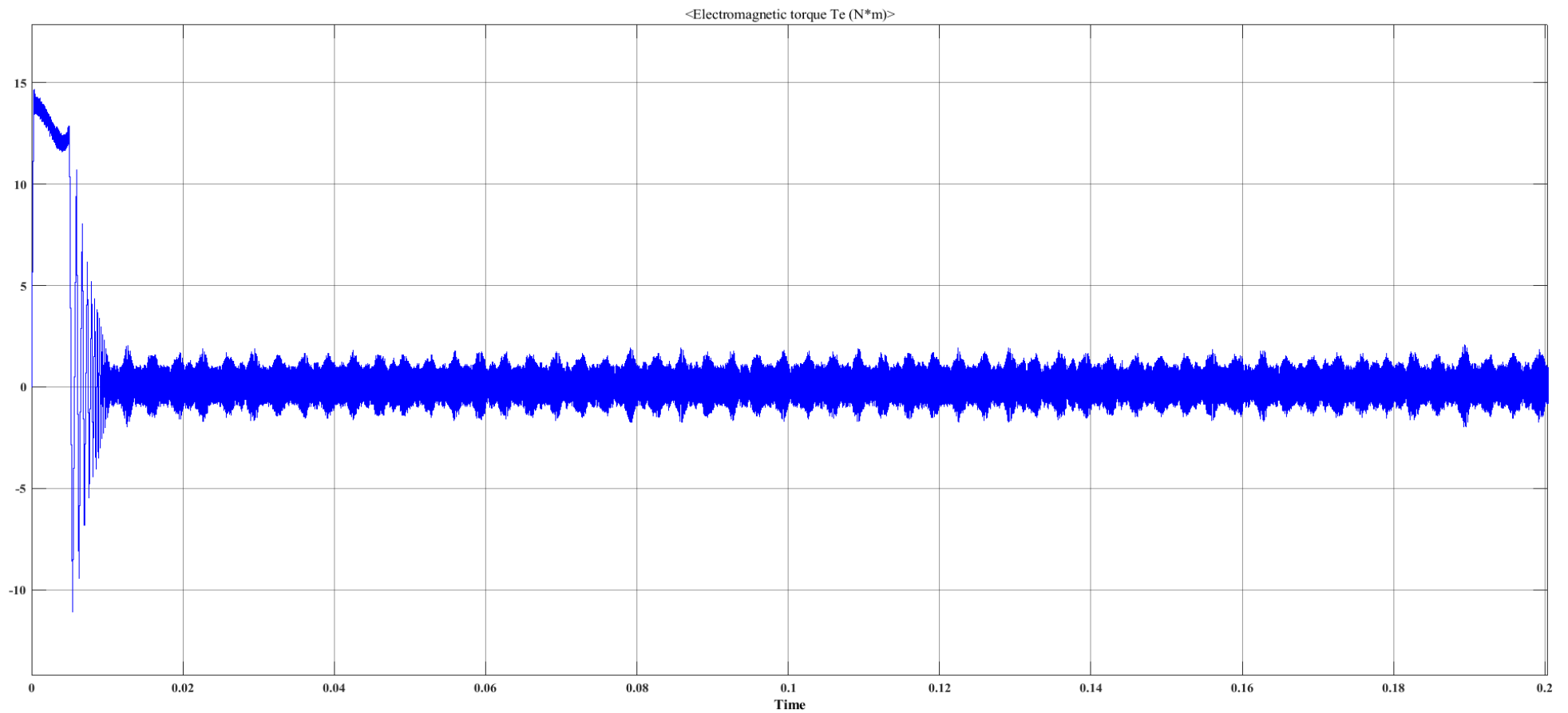
Σημείωση: Λόγω της υψίσυχνης τραπεζοειδούς μεταγωγής, έγινε μεγαλύτερη μεγέθυνση σε μικρότερη διάρκεια χρόνου για πιο ευδιάκριτο αποτέλεσμα.



Εικόνα 90: Τα ρεύματα στον στάτη του BLDC κινητήρα (με ονομαστικές στροφές μέχρι τις 3000 rpm σε εν κενώ λειτουργία, για  $t = 0s - 0.2s$ )



Εικόνα 91: Ταχύτητα του δρομέα – στροφές (με ονομαστικές στροφές μέχρι τις 3000 rpm σε εν κενώ λειτουργία, για  $t = 0s - 0.2s$ )



Εικόνα 92: Ηλεκτρομαγνητική ροπή (με ονομαστικές στροφές μέχρι τις 3000 rpm σε εν κενώ λειτουργία, για  $t = 0\text{s} - 0.2\text{s}$ )

### 7.3.2 Απόκριση κινητήρα σε μεταβατικές συνθήκες

Σε αυτήν την υπό-ενότητα θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα από την προσομοίωση της απόκρισης του κινητήρα σε μεταβατικές συνθήκες για  $t=0.25s$  έως  $t=0.5s$  με εφαρμογή του συγκεκριμένου ελέγχου, δηλαδή:

Στο 50% και στο 100% των ονομαστικών στροφών μεταβάλουμε το φορτίο (την ροπή) του κινητήρα από:

- Το 25% στο 50% της ονομαστικής τιμής του
- Το 50% στο 75% της ονομαστικής τιμής του
- Το 75% στο 100% της ονομαστικής τιμής του

Και θα παρουσιαστούν οι στροφές και τα ρεύματα του στάτη στον κινητήρα.

Στη συνέχεια, στο 50% και στο 100% του ονομαστικού φορτίου (ροπής) μεταβάλουμε τις στροφές του κινητήρα από:

- Το 25% στο 50% της ονομαστικής τιμής τους
- Το 50% στο 75% της ονομαστικής τιμής του
- Το 75% στο 100% της ονομαστικής τιμής του

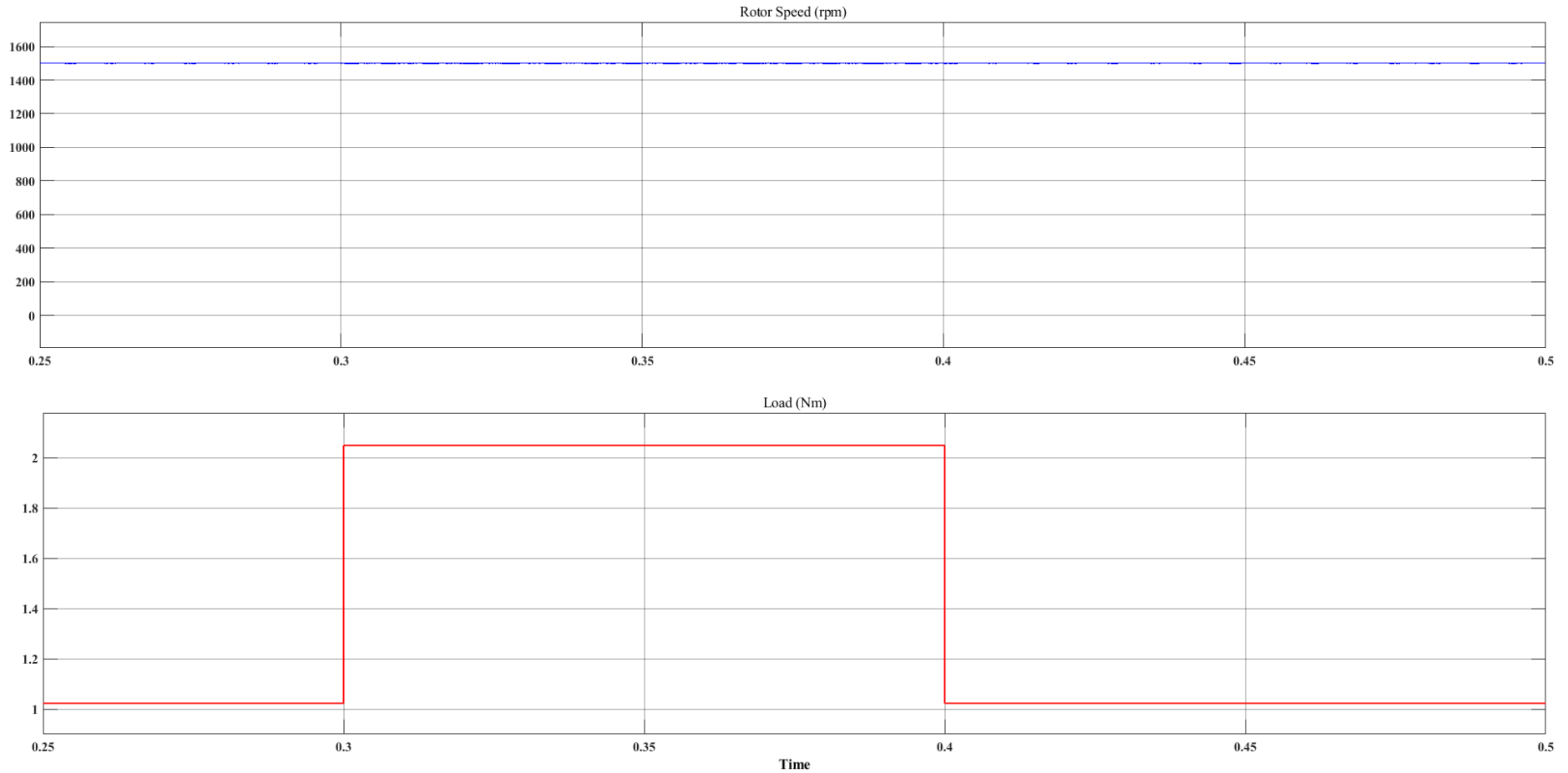
Και θα παρουσιαστούν οι στροφές και τα ρεύματα του στάτη στον κινητήρα.

Τα χαρακτηριστικά του BLDC κινητήρα και του PI ελεγκτή παραμένουν ίδια (Πίνακας 10 και Πίνακας 11) και το φορτίο του κινητήρα είναι:

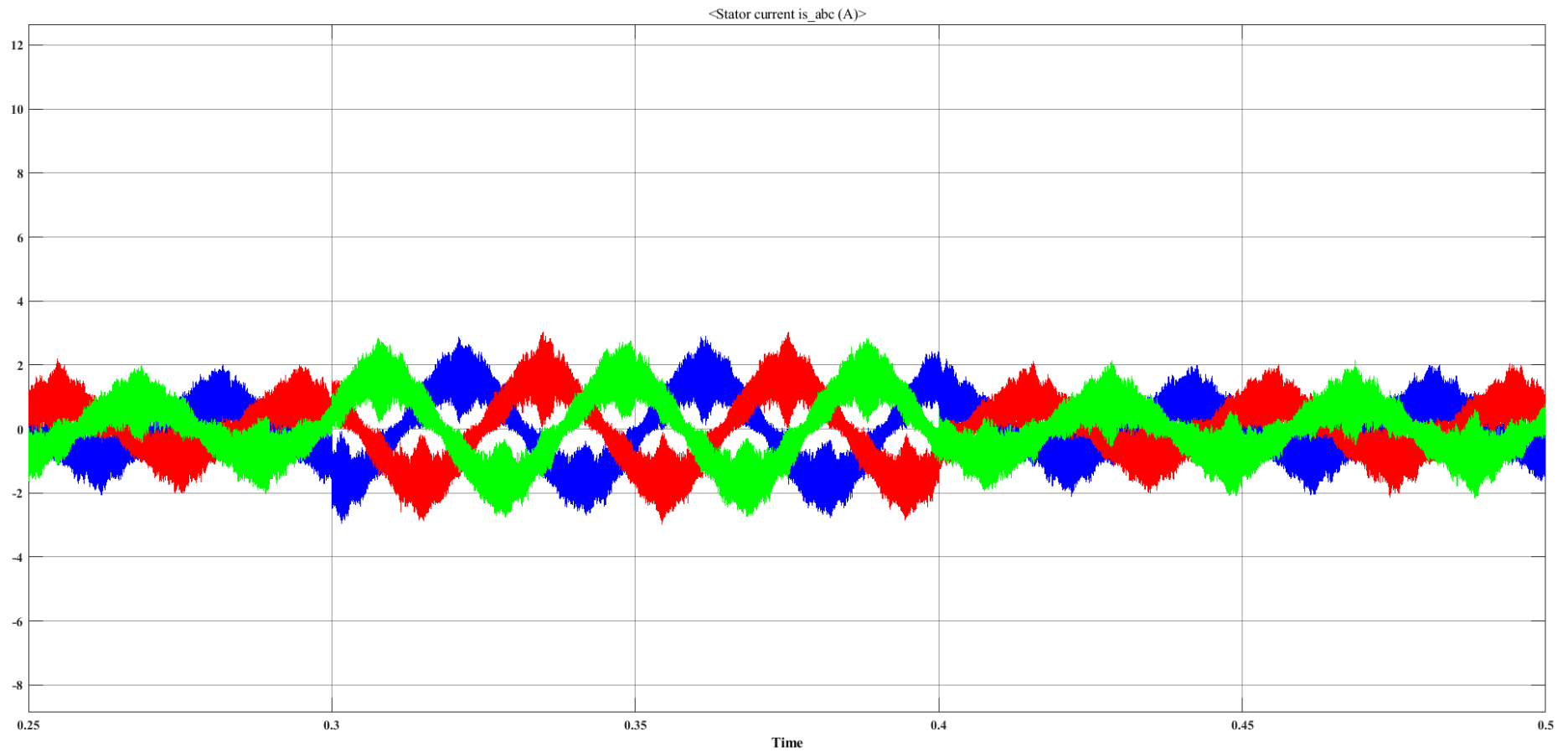
Πίνακας 12: Τιμές Φορτίου - Στροφών

	<b>25%</b>	<b>50%</b>	<b>75%</b>	<b>100%</b>
<b>Φορτίο (Nm)</b>	1.025	2.05	3.075	4.1
<b>Στροφές (RPM)</b>	750	1500	2250	3000

### 7.3.2.1 Σταθερές στροφές και μεταβολή φορτίου

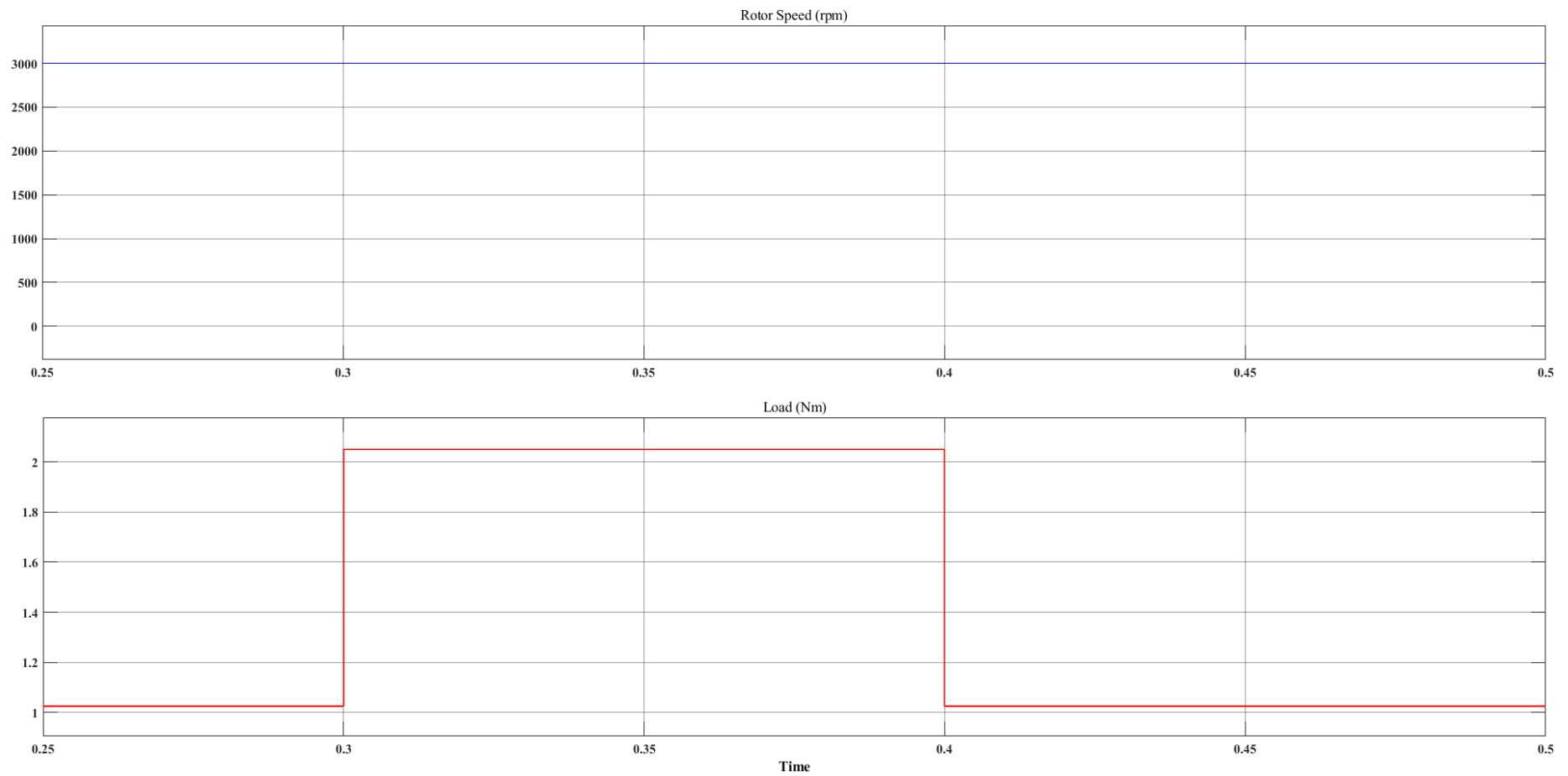


Εικόνα 93: Ταχύτητα του δρομέα – στροφές, με φορτίο από 25% στο 50% (στο χρονικό διάστημα  $t=0.3s$  έως  $t=0.4s$ ), ονομαστικές στροφές στο 50%

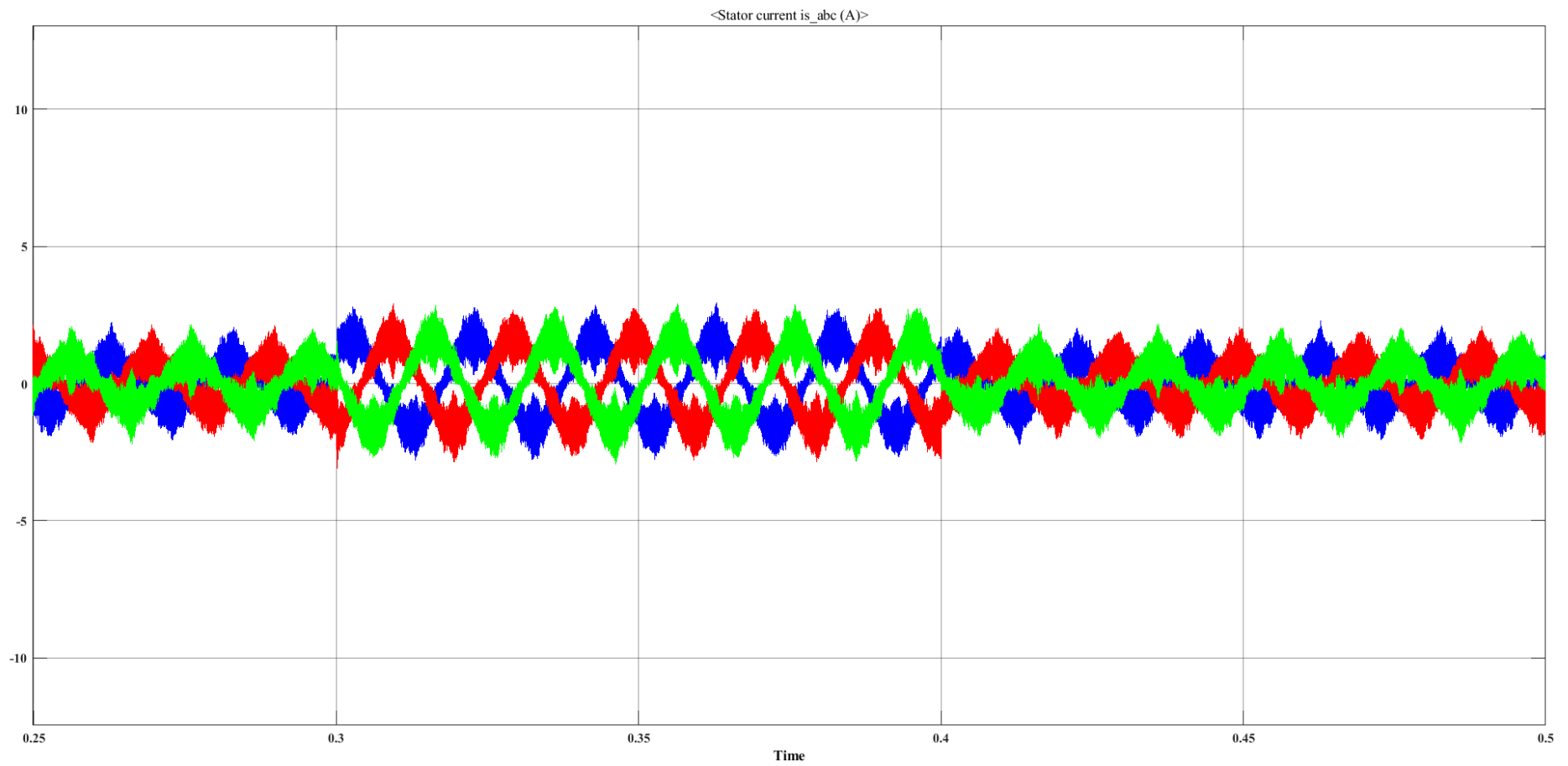


Εικόνα 94: Ρεύματα στον στάτη του κινητήρα, με φορτίο από 25% στο 50% (στο χρονικό διάστημα  $t=0.3s$  έως  $t=0.4s$ ), ονομαστικές στροφές στο 50%

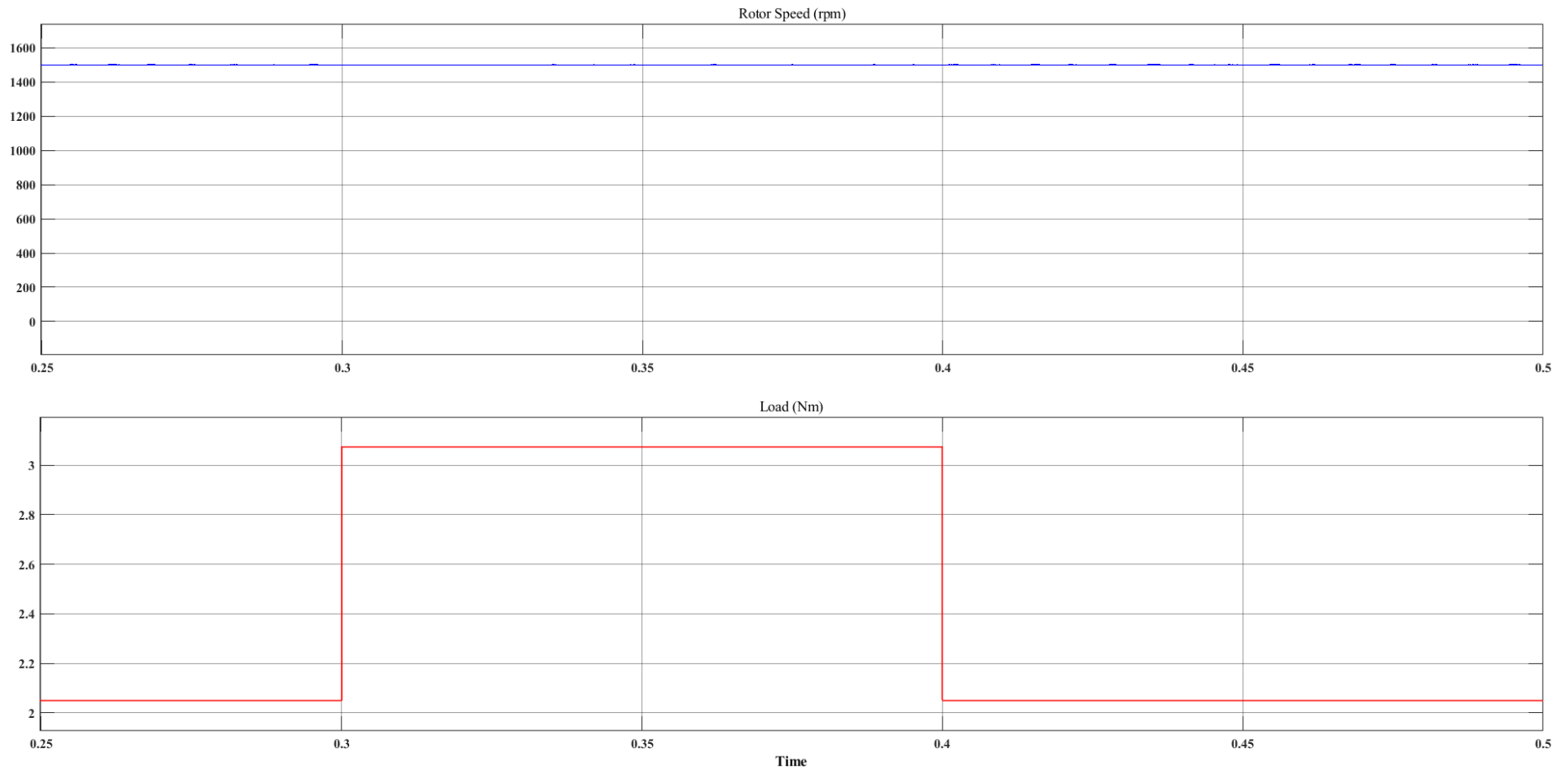




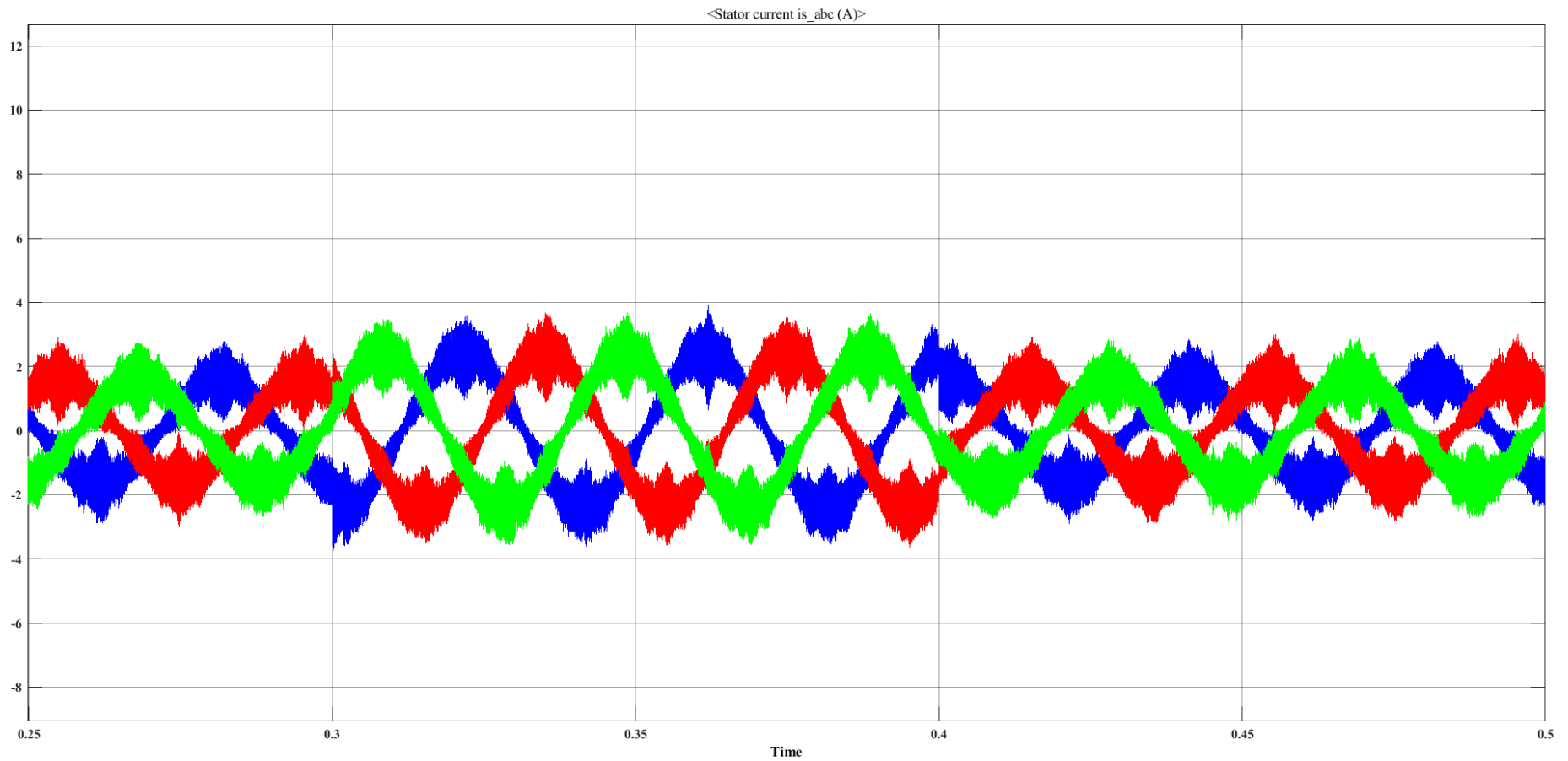
Εικόνα 95: Ταχύτητα του δρομέα – στροφές, με φορτίο από 25% στο 50% (στο χρονικό διάστημα  $t=0.3s$  έως  $t=0.4s$ ), ονομαστικές στροφές στο 100%



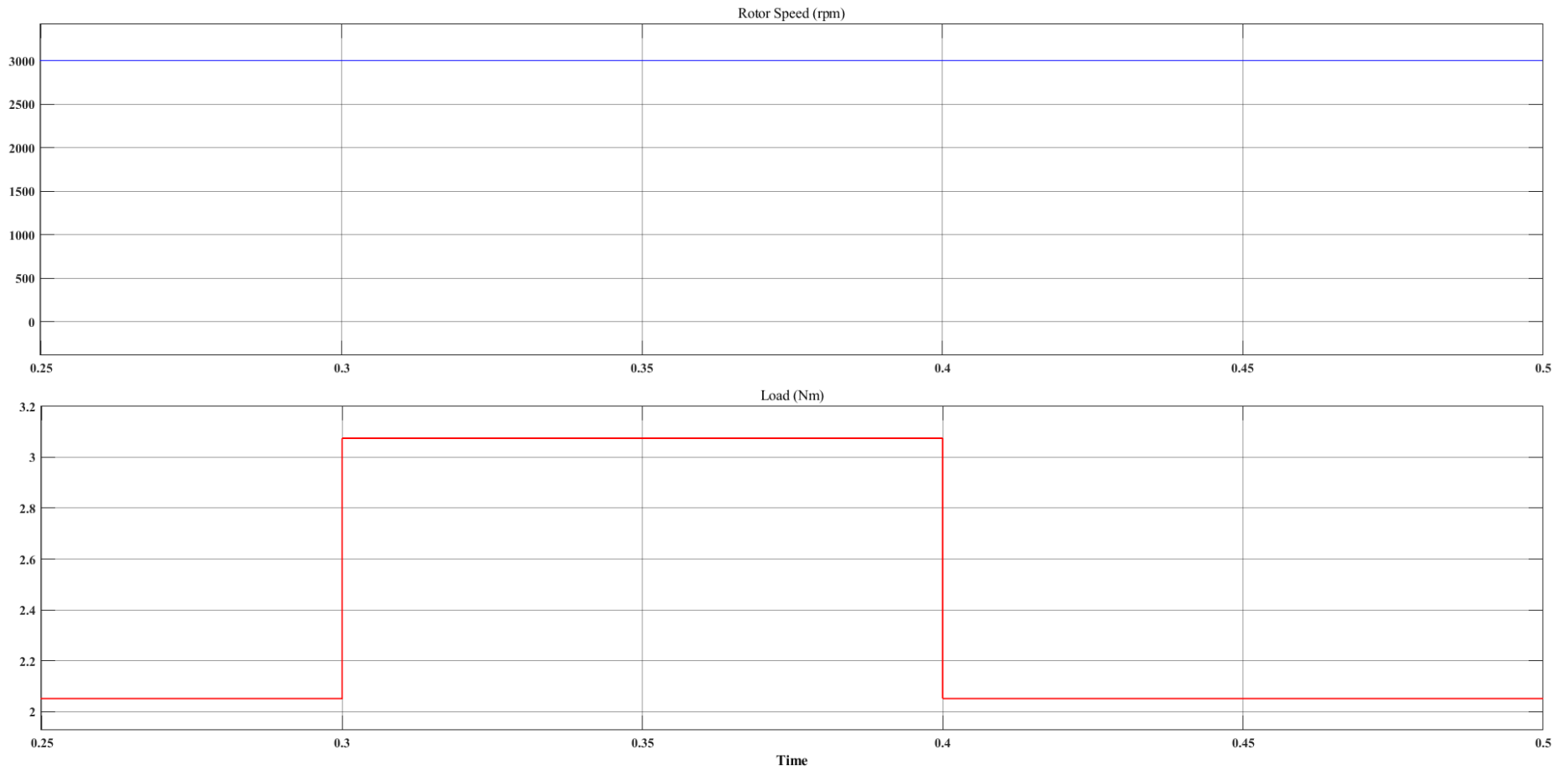
Εικόνα 96: Ρεύματα στον στάτη του κινητήρα, με φορτίο από 25% στο 50% (στο χρονικό διάστημα  $t=0.3s$  έως  $t=0.4s$ ), ονομαστικές στροφές στο 100%



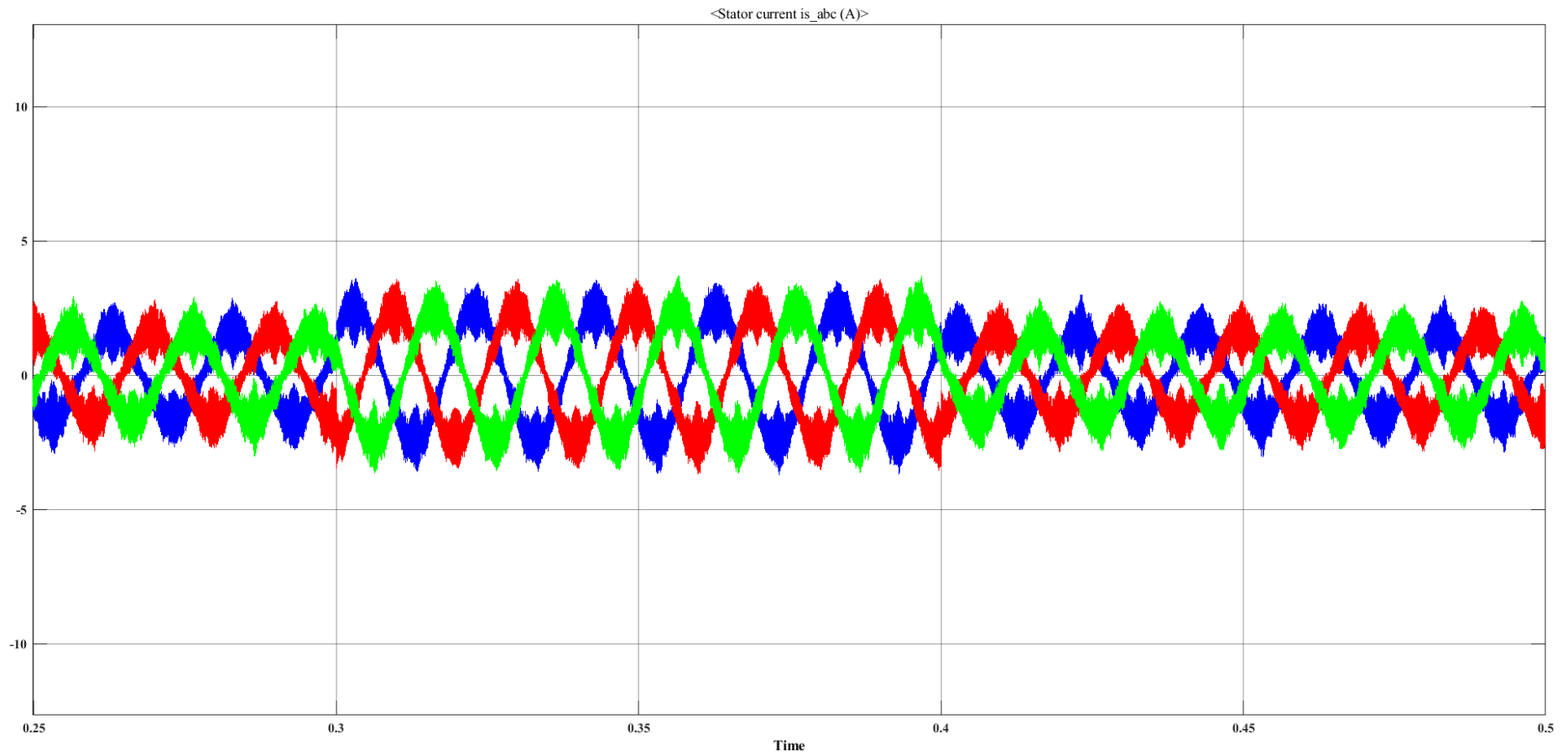
Εικόνα 97: Ταχύτητα του δρομέα – στροφές, με φορτίο από 50% στο 75% (στο χρονικό διάστημα  $t=0.3s$  έως  $t=0.4s$ ), ονομαστικές στροφές στο 50%



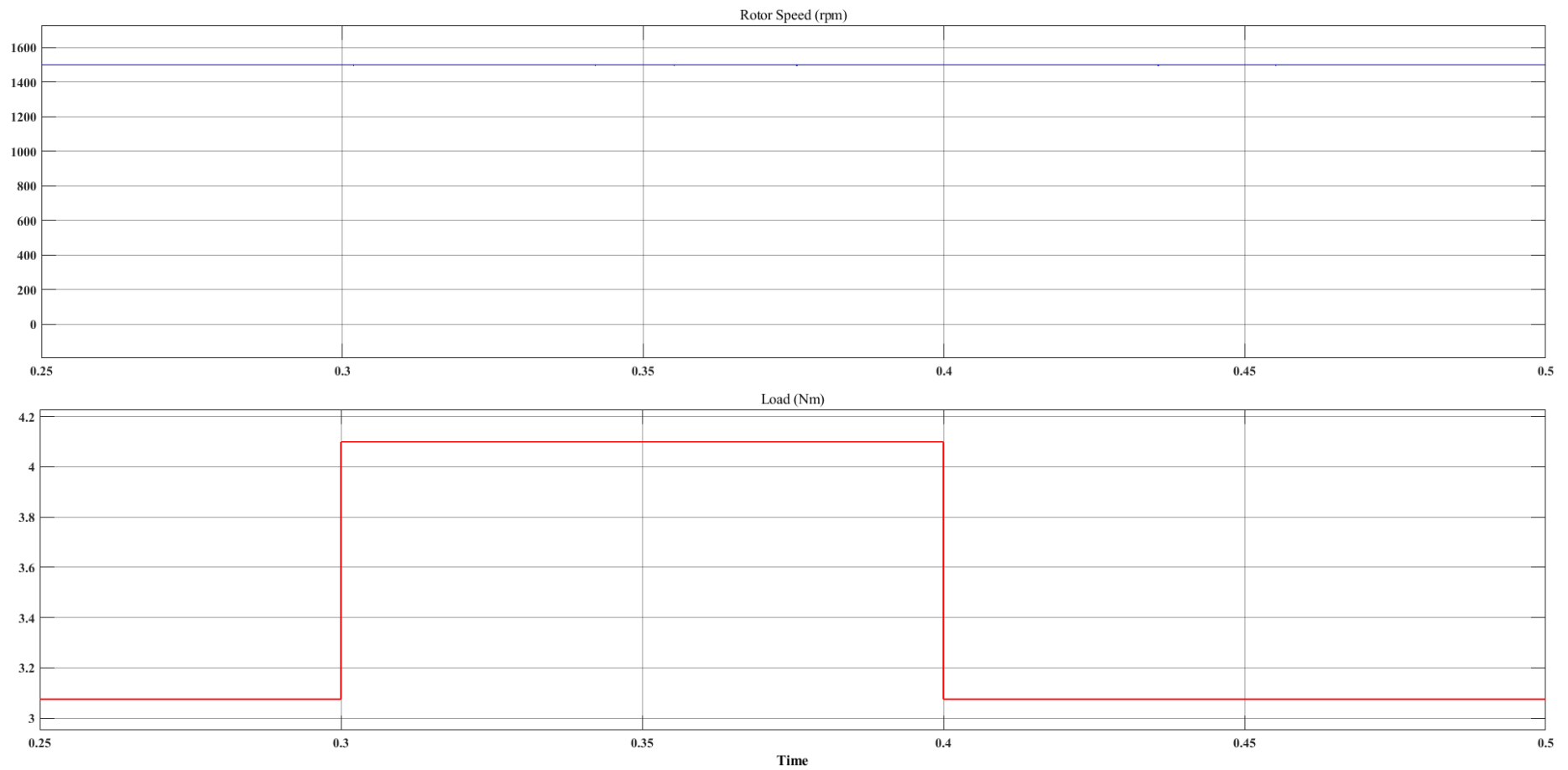
Εικόνα 98: Ρεύματα στον στάτη του κινητήρα, με φορτίο από 50% στο 75% (στο χρονικό διάστημα  $t=0.3s$  έως  $t=0.4s$ ), ονομαστικές στροφές στο 50%



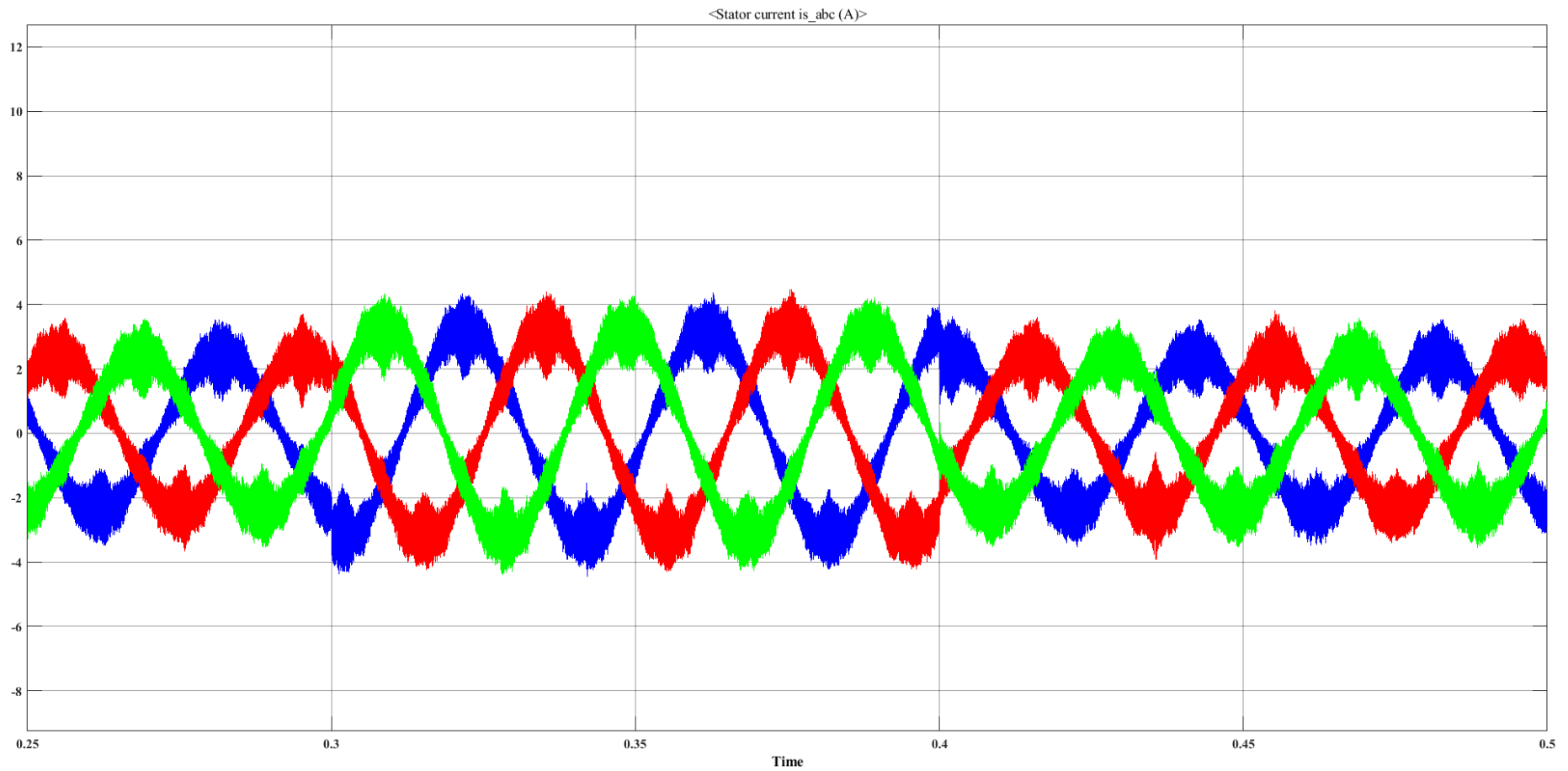
Εικόνα 99: Ταχύτητα του δρομέα – στροφές, με φορτίο από 50% στο 75% (στο χρονικό διάστημα  $t=0.3s$  έως  $t=0.4s$ ), ονομαστικές στροφές στο 100%



Εικόνα 100: Ρεύματα στον στάτη του κινητήρα, με φορτίο από 50% στο 75% (στο χρονικό διάστημα  $t=0.3s$  έως  $t=0.4s$ ), ονομαστικές στροφές στο 100%

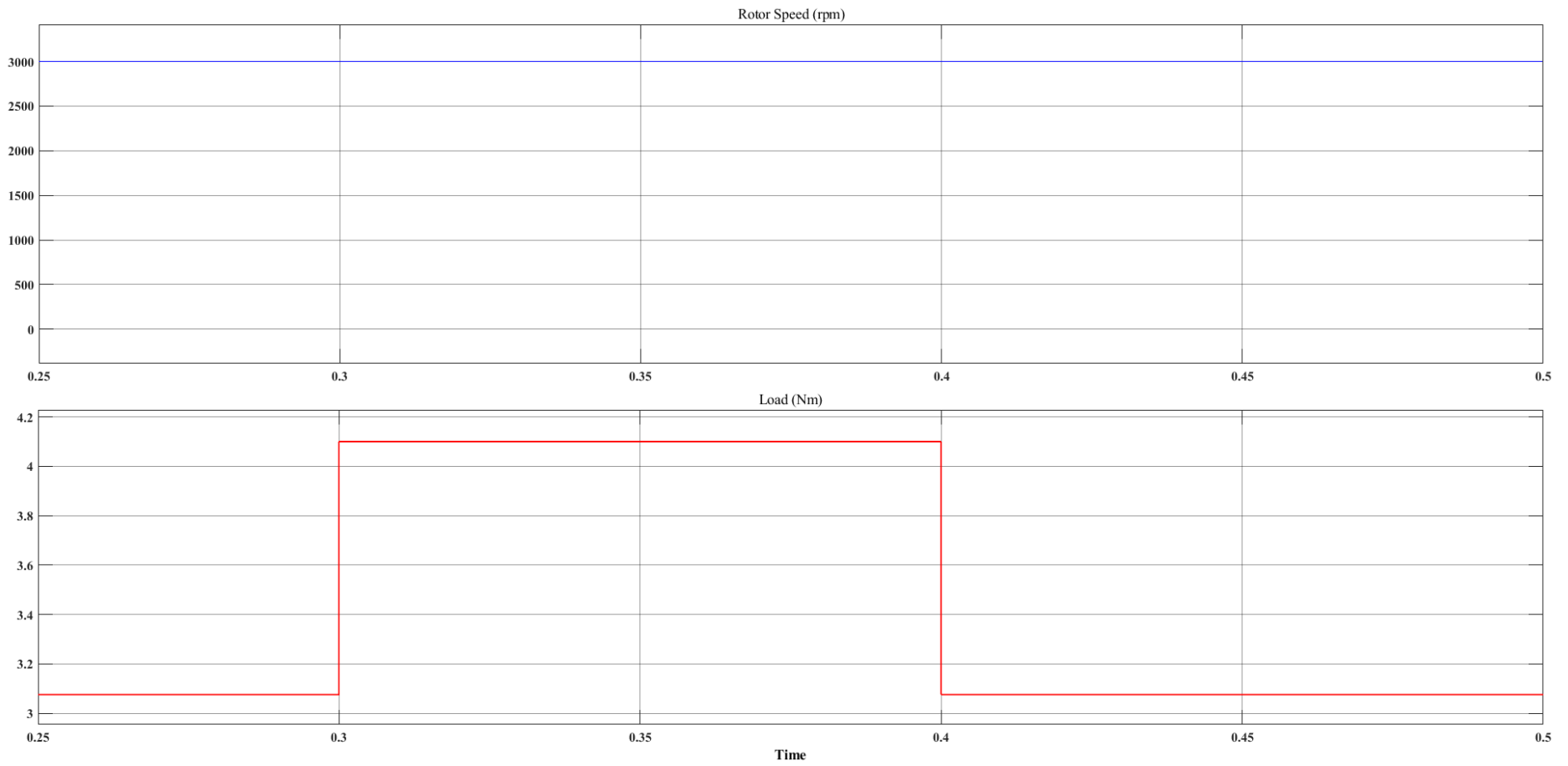


Εικόνα 101: Ταχύτητα του δρομέα – στροφές, με φορτίο από 75% στο 100% (στο χρονικό διάστημα  $t=0.3s$  έως  $t=0.4s$ ), ονομαστικές στροφές στο 50%

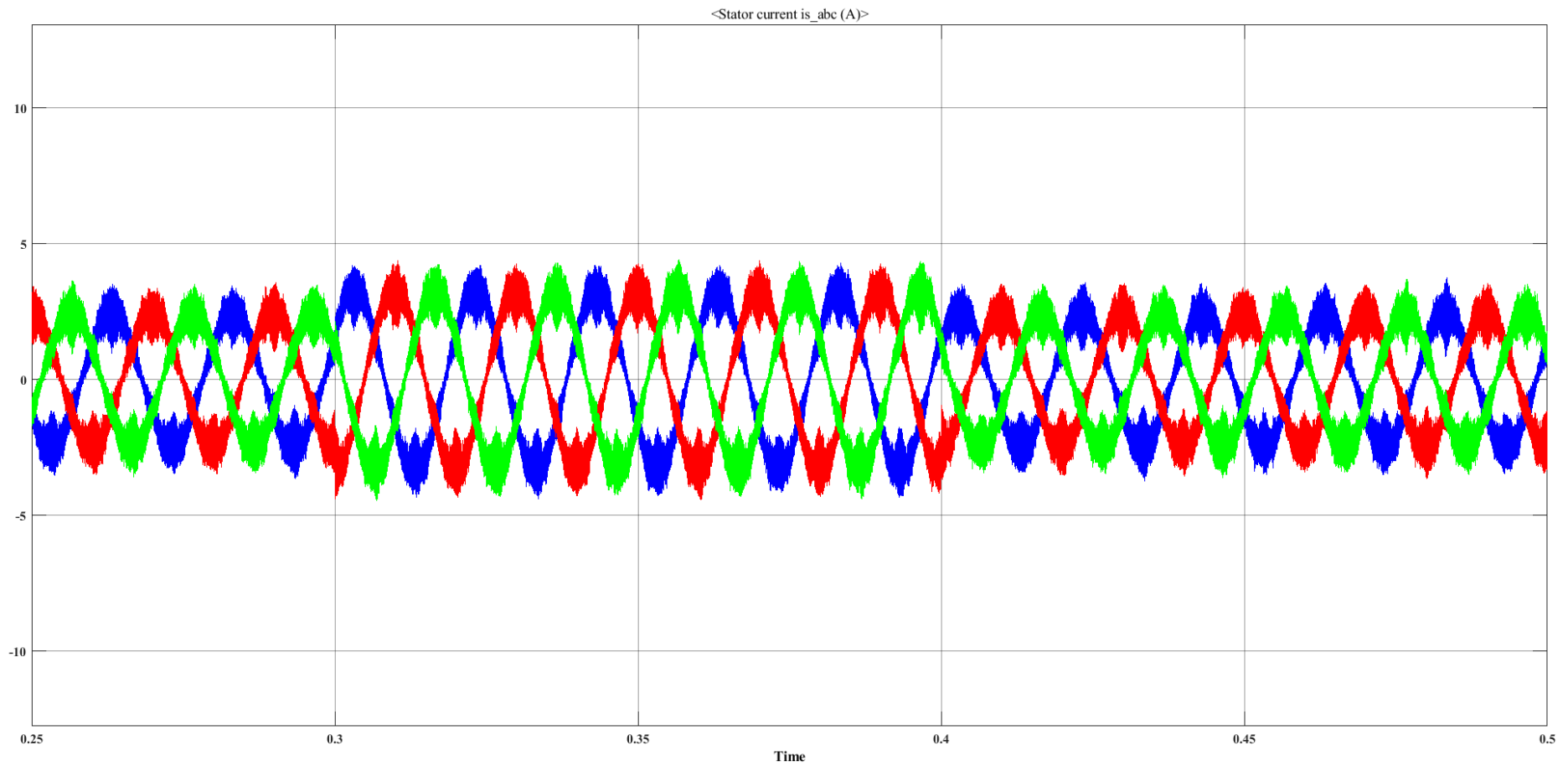


Εικόνα 102: Ρεύματα στον στάτη του κινητήρα, με φορτίο από 75% στο 100% (στο χρονικό διάστημα  $t=0.3s$  έως  $t=0.4s$ ), ονομαστικές στροφές στο 50%



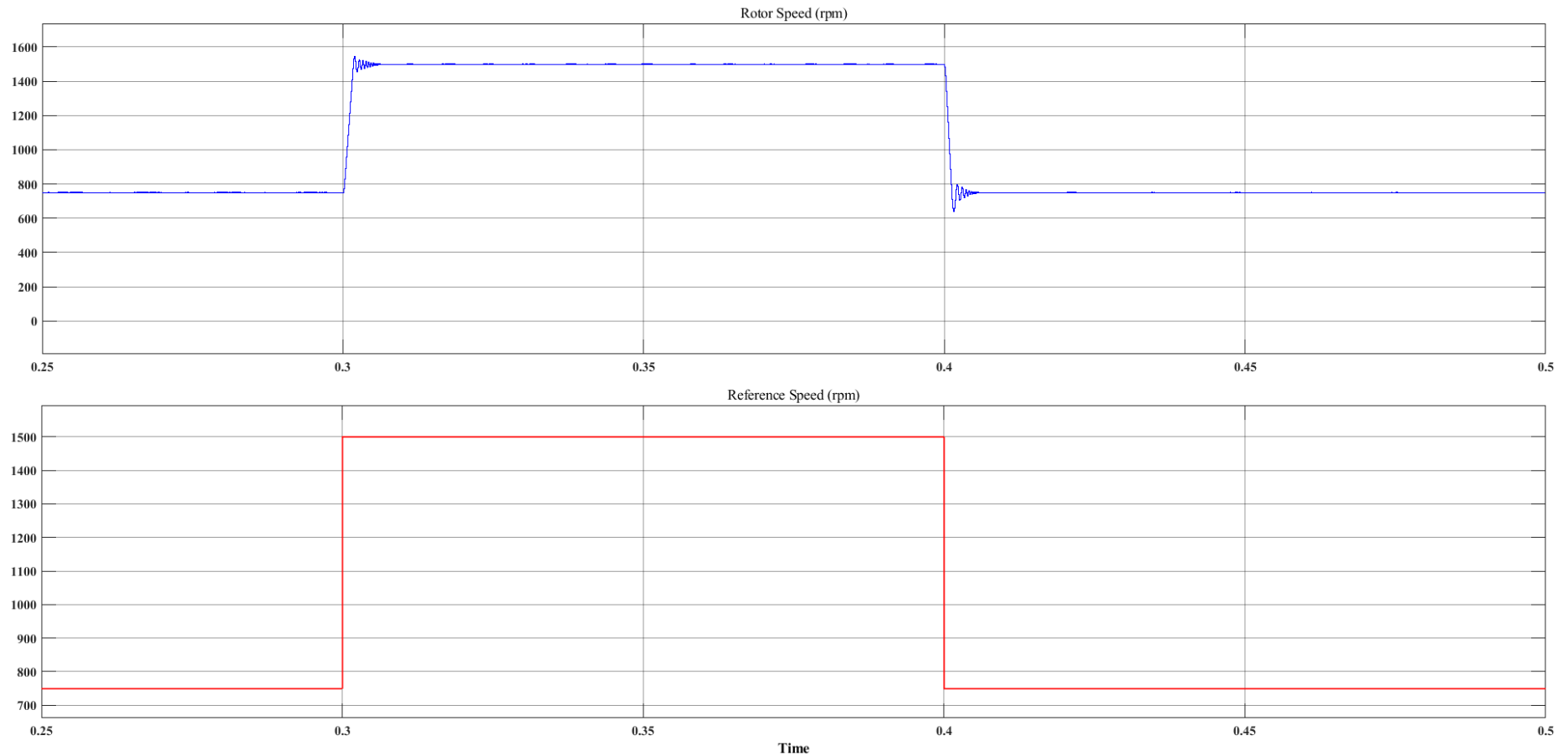


Εικόνα 103: Ταχύτητα του δρομέα – στροφές, με φορτίο από 75% στο 100% (στο χρονικό διάστημα  $t=0.3s$  έως  $t=0.4s$ ), ονομαστικές στροφές στο 100%

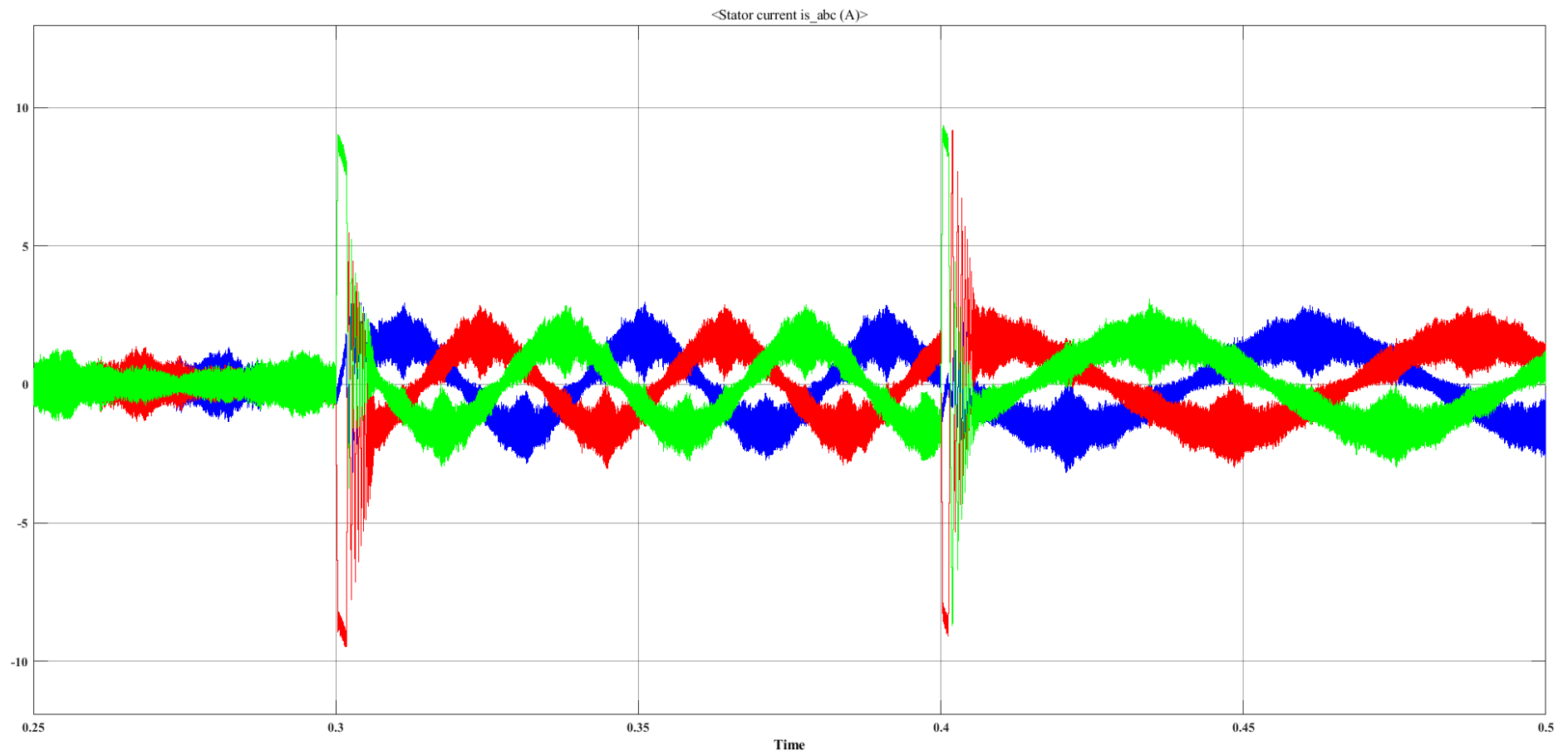


Εικόνα 104: Ρεύματα στον στάτη του κινητήρα, με φορτίο από 75% στο 100% (στο χρονικό διάστημα  $t=0.3s$  έως  $t=0.4s$ ), ονομαστικές στροφές στο 100%

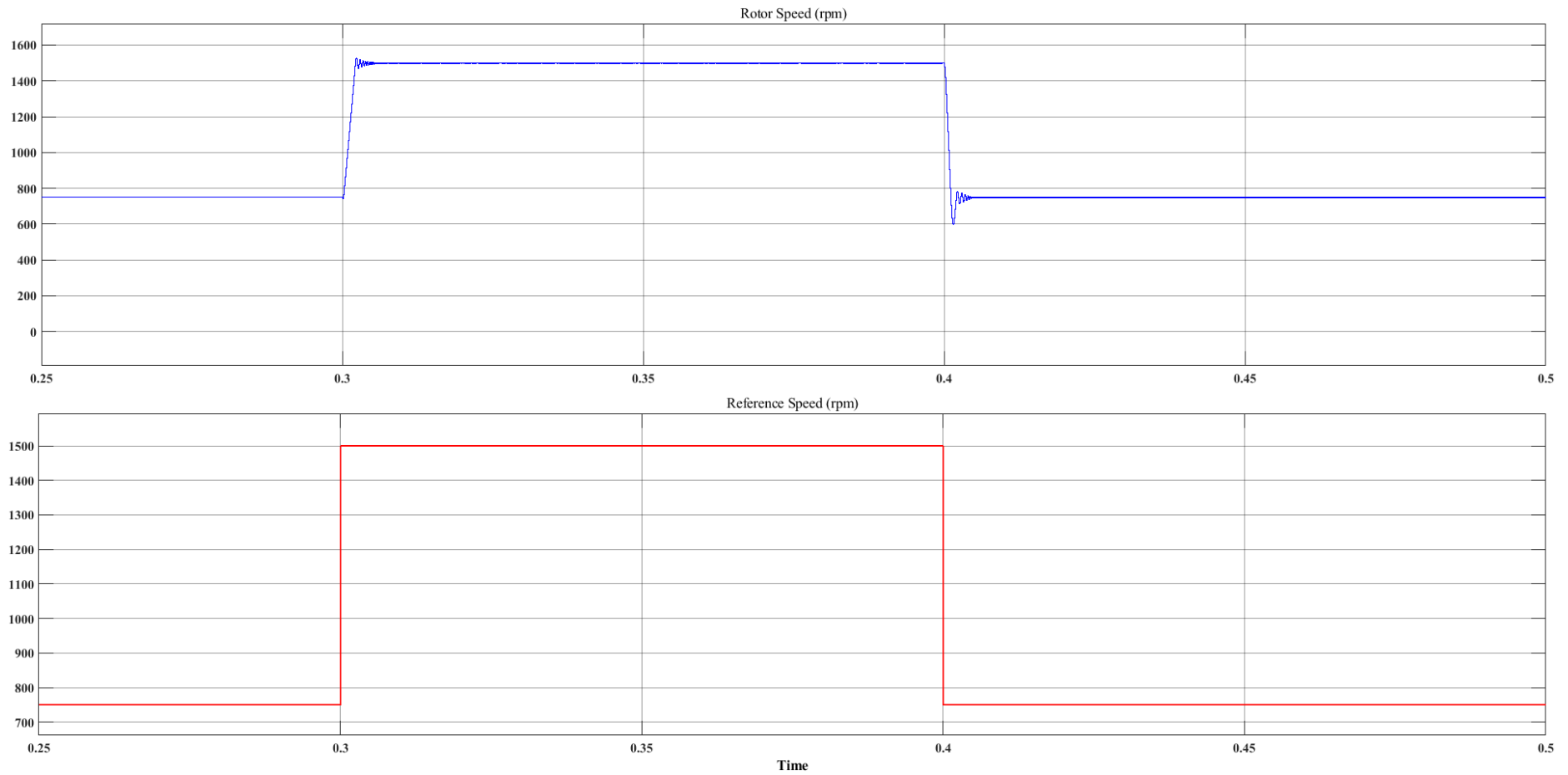
### 7.3.2.2 Σταθερό φορτίο και μεταβολή των στροφών



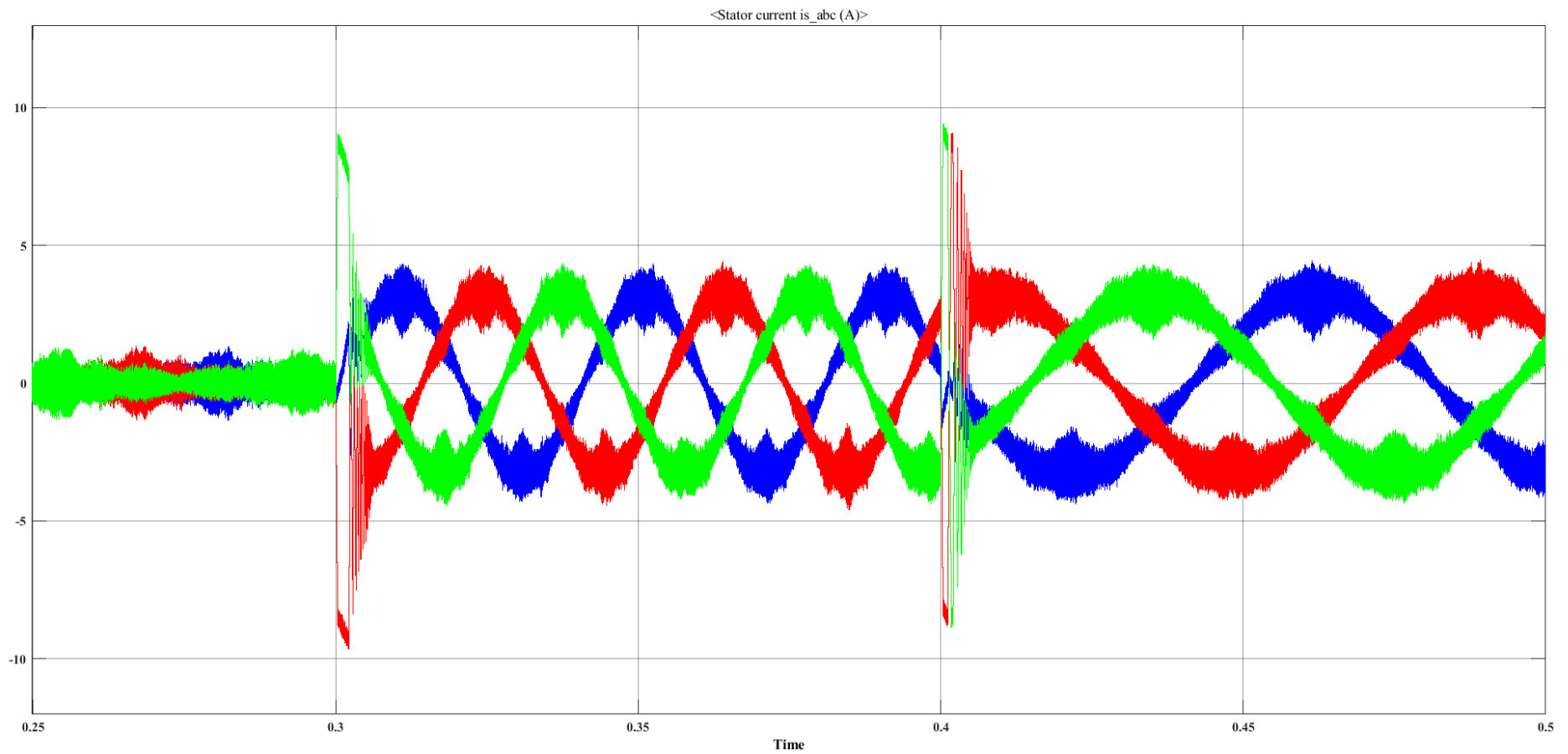
Εικόνα 105: Ταχύτητα του δρομέα – στροφές, με τις στροφές από 25% στο 50% (στο χρονικό διάστημα  $t=0.3s$  έως  $t=0.4s$ ) και φορτίο 50%



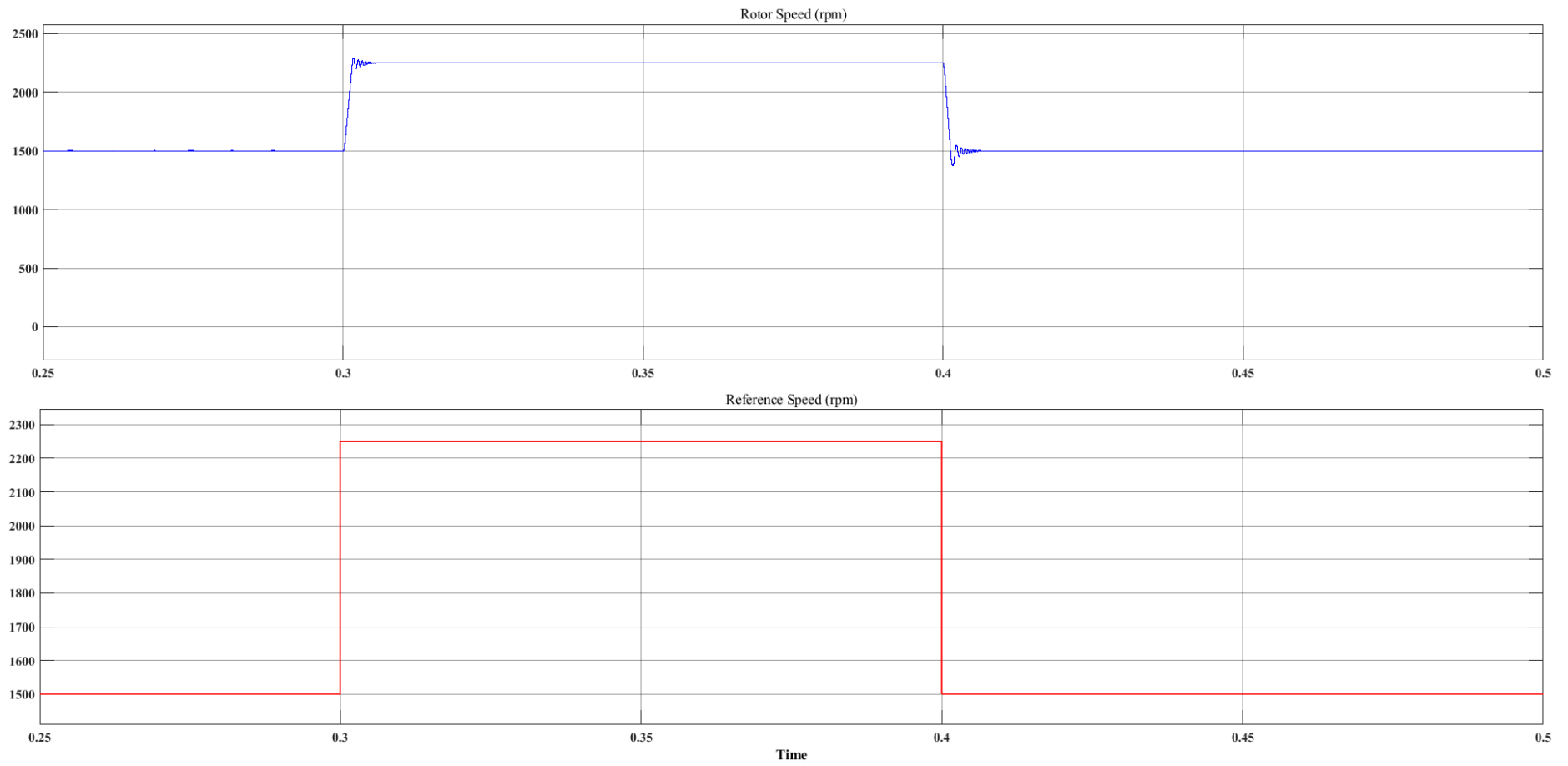
Εικόνα 106: Ρεύματα στον στάτη του κινητήρα, με τις στροφές από 25% στο 50% (στο χρονικό διάστημα  $t=0.3s$  έως  $t=0.4s$ ) και φορτίο 50%



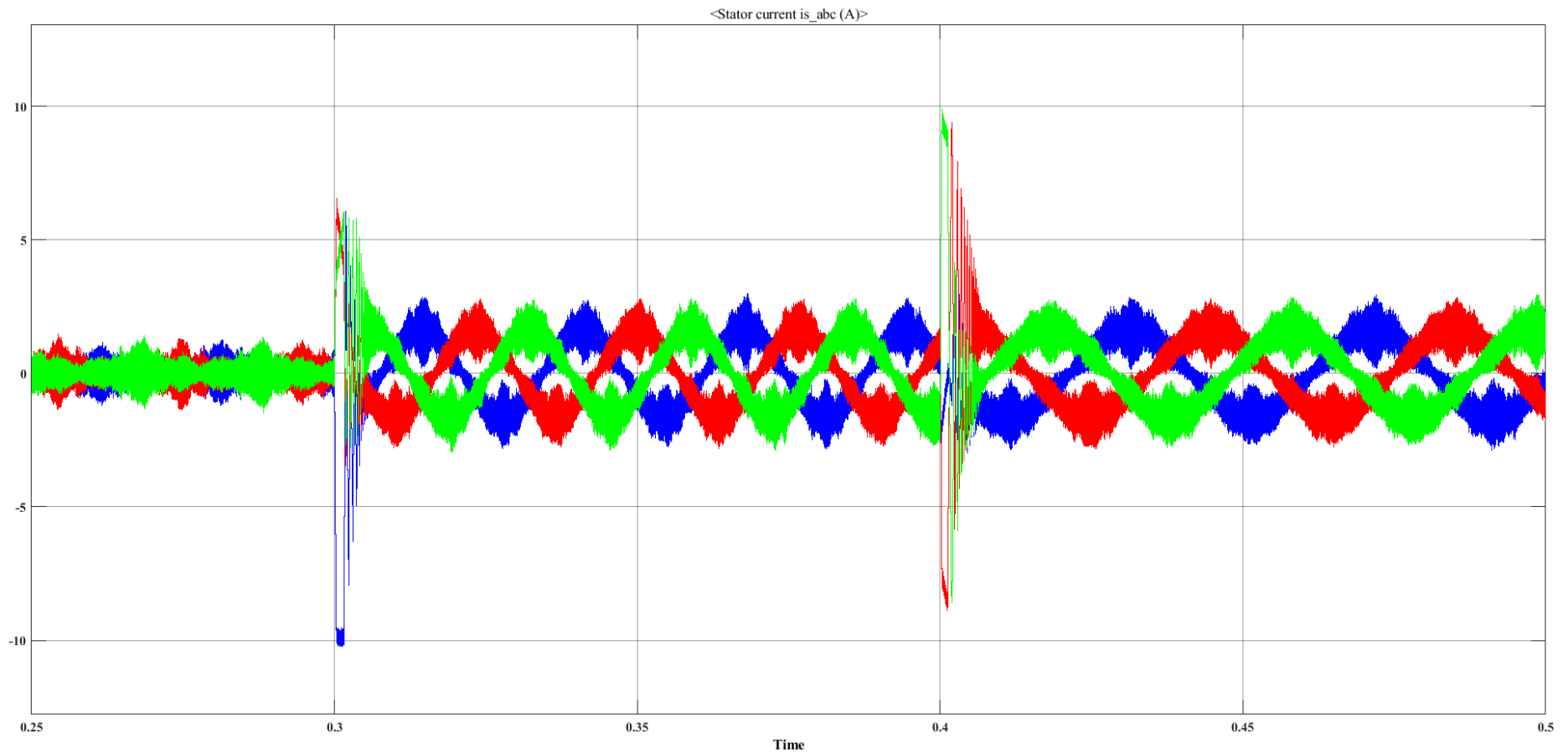
Εικόνα 107: Ταχύτητα του δρομέα – στροφές, με τις στροφές από 25% στο 50% (στο χρονικό διάστημα  $t=0.3s$  έως  $t=0.4s$ ) και φορτίο 100%



Εικόνα 108: Ρεύματα στον στάτη του κινητήρα, με τις στροφές από 25% στο 50% (στο χρονικό διάστημα  $t=0.3s$  έως  $t=0.4s$ ) και φορτίο 100%

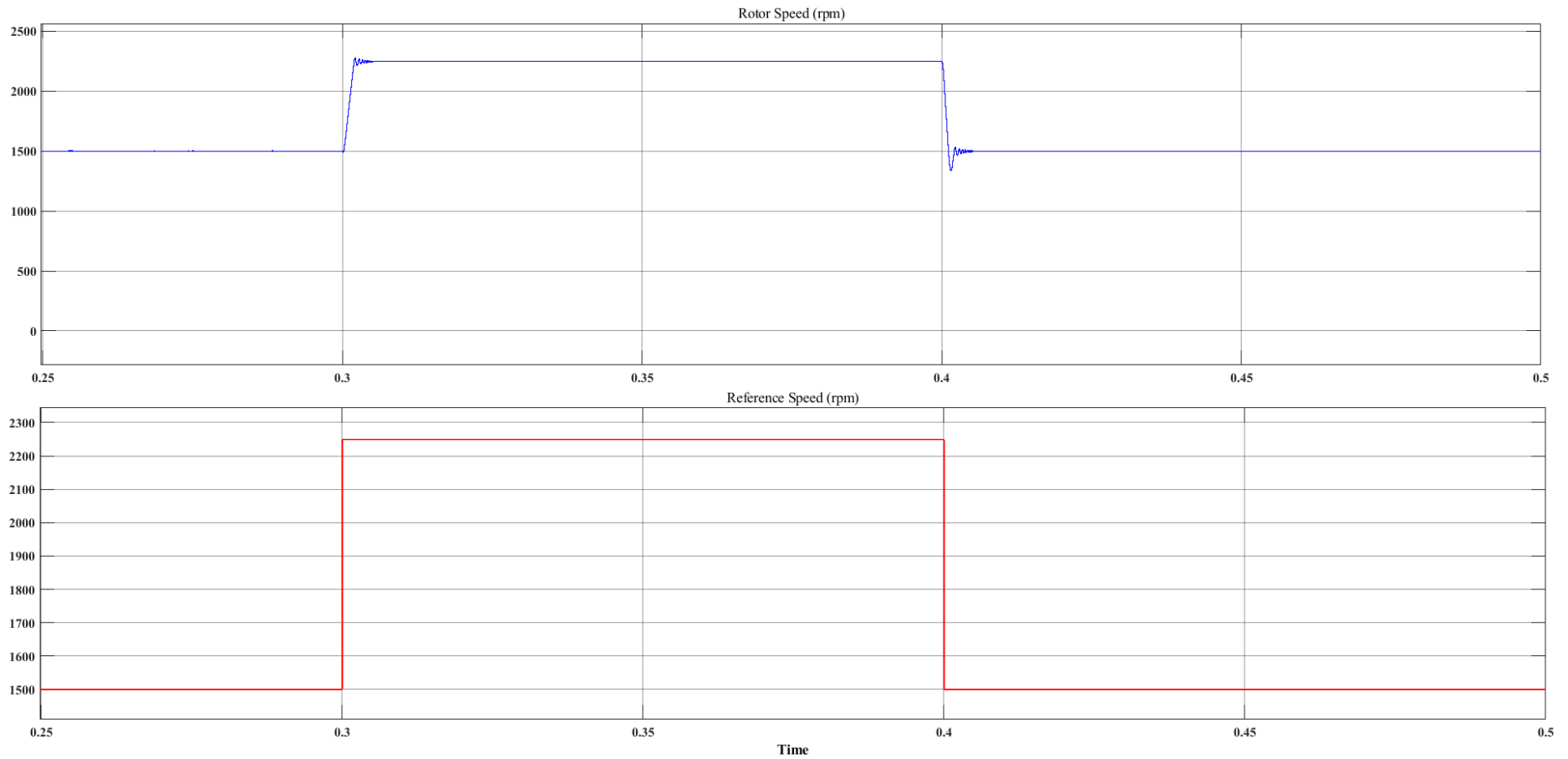


Εικόνα 109: Ταχύτητα του δρομέα – στροφές, με τις στροφές από 50% στο 75% (στο χρονικό διάστημα  $t=0.3s$  έως  $t=0.4s$ ) και φορτίο 50%

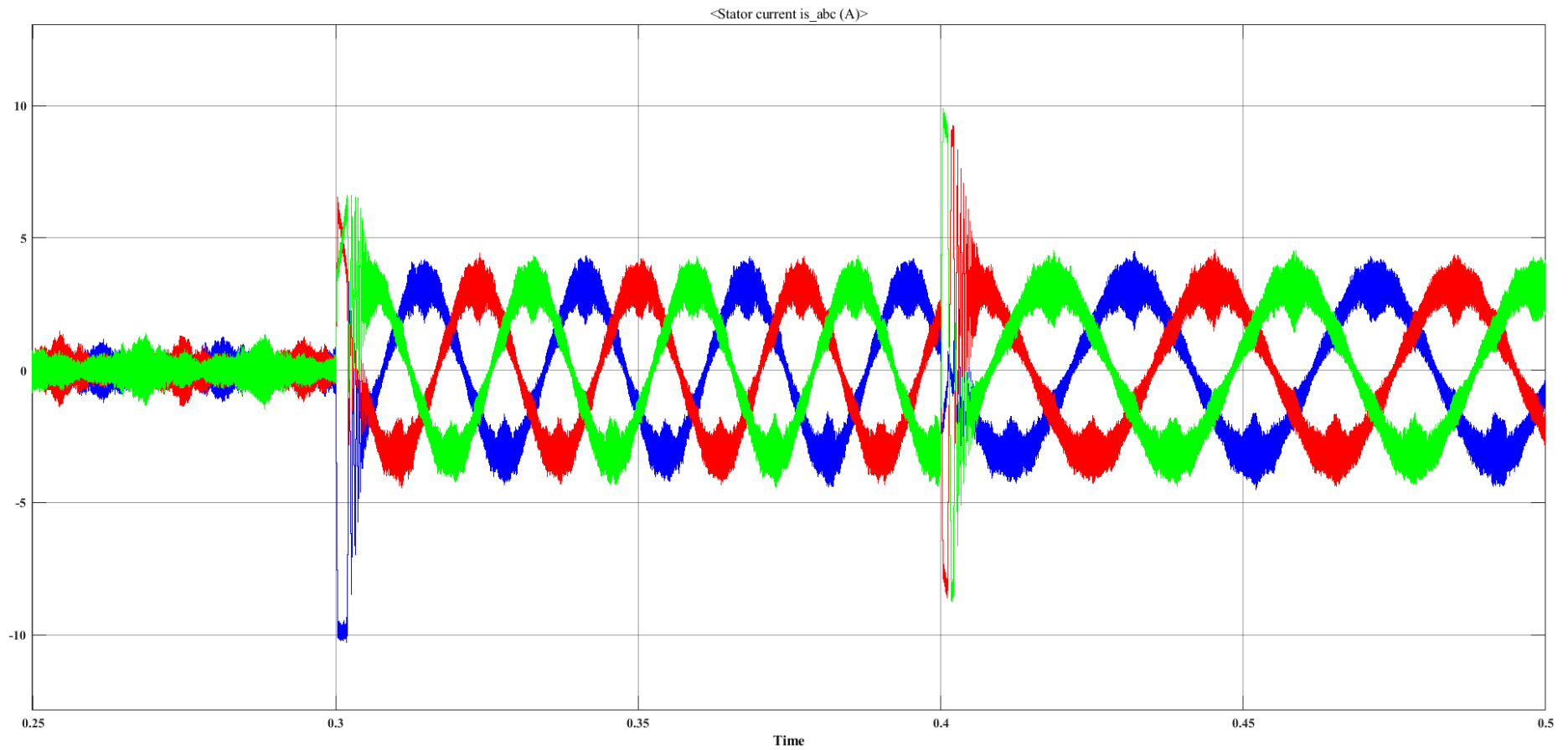


Εικόνα 110: Ρεύματα στον στάτη του κινητήρα, με τις στροφές από 50% στο 75% (στο χρονικό διάστημα  $t=0.3s$  έως  $t=0.4s$ ) και φορτίο 50%

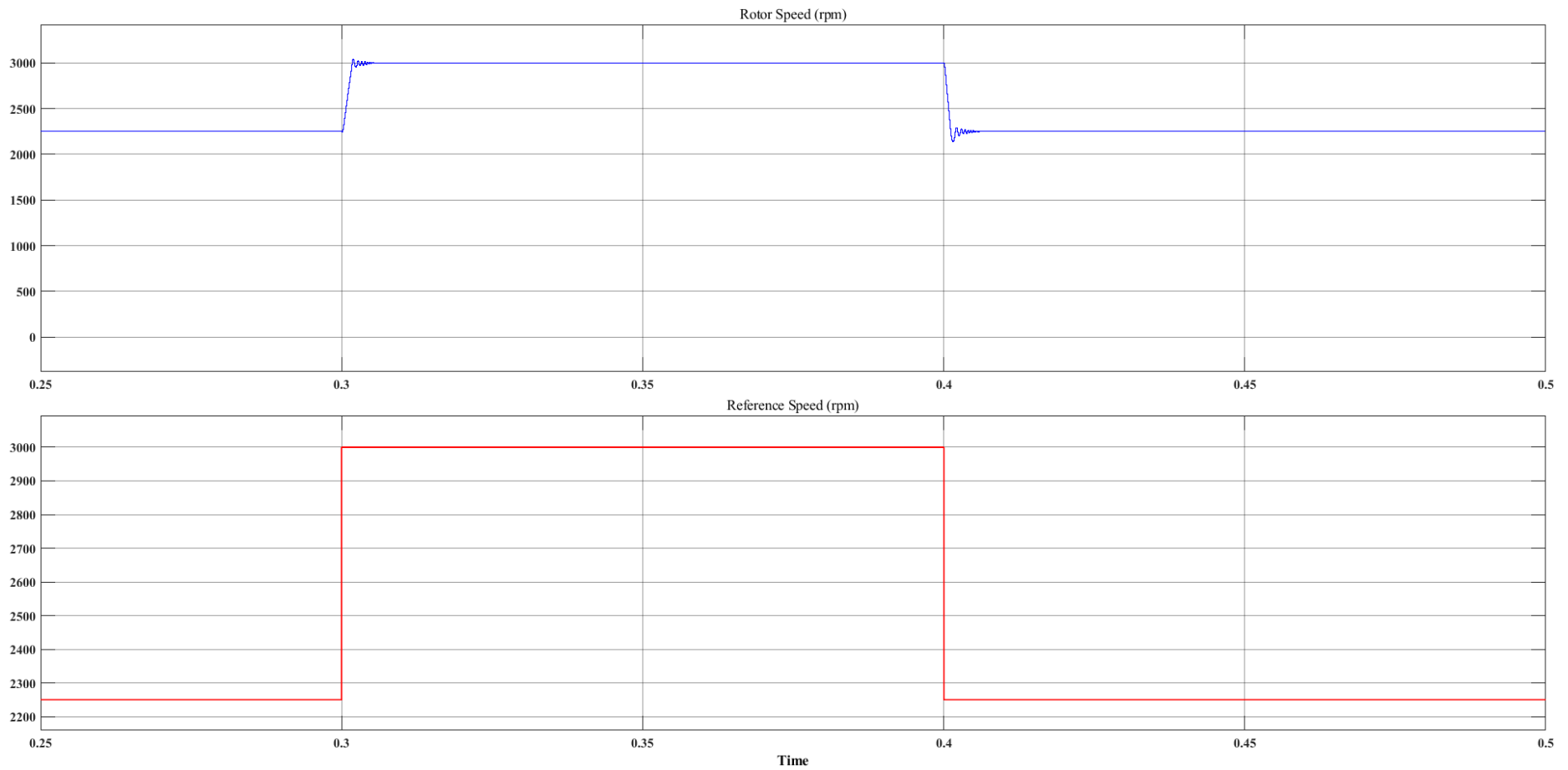




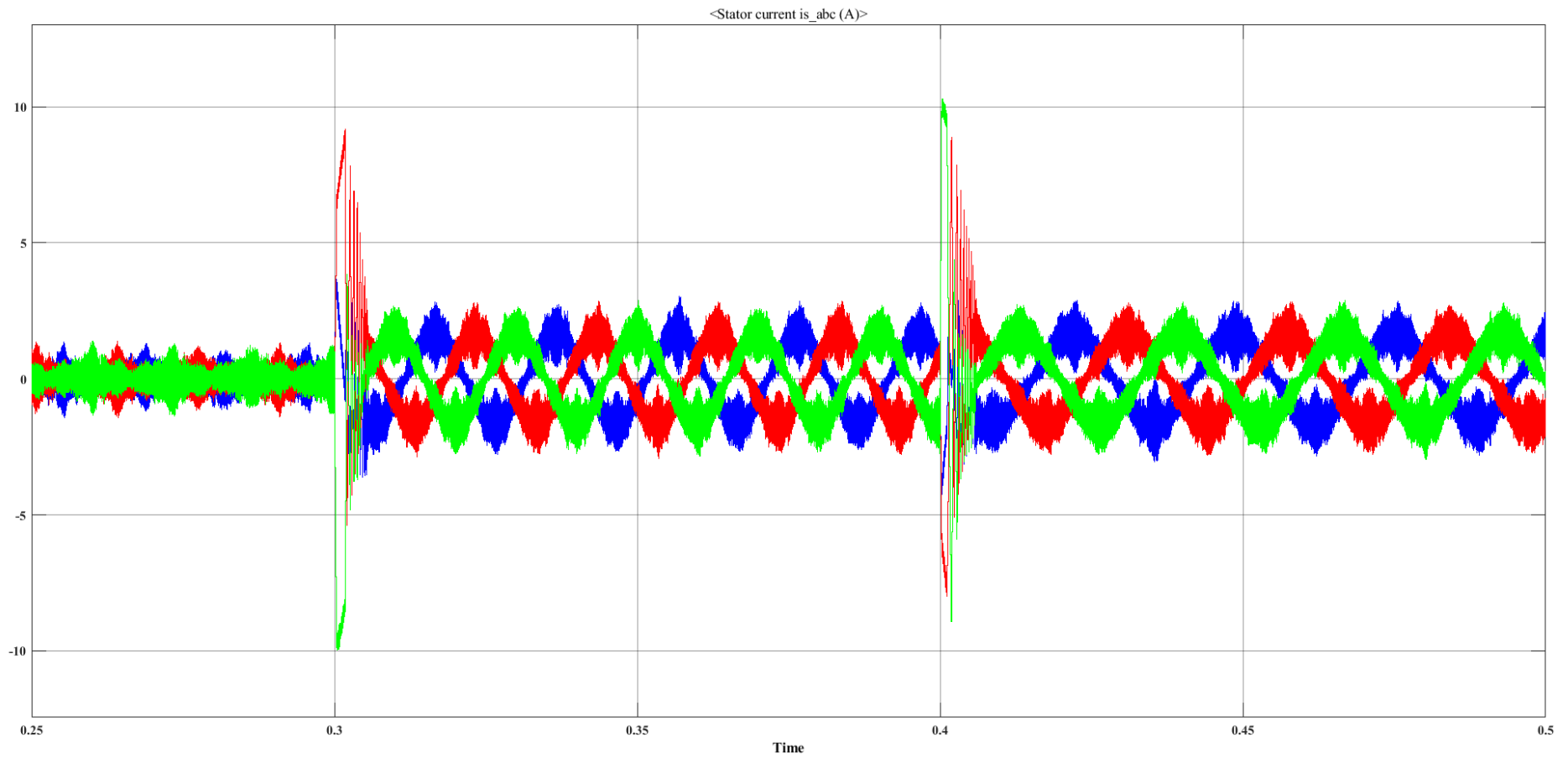
Εικόνα 111: Ταχύτητα του δρομέα – στροφές, με τις στροφές από 50% στο 75% (στο χρονικό διάστημα  $t=0.3s$  έως  $t=0.4s$ ) και φορτίο 100%



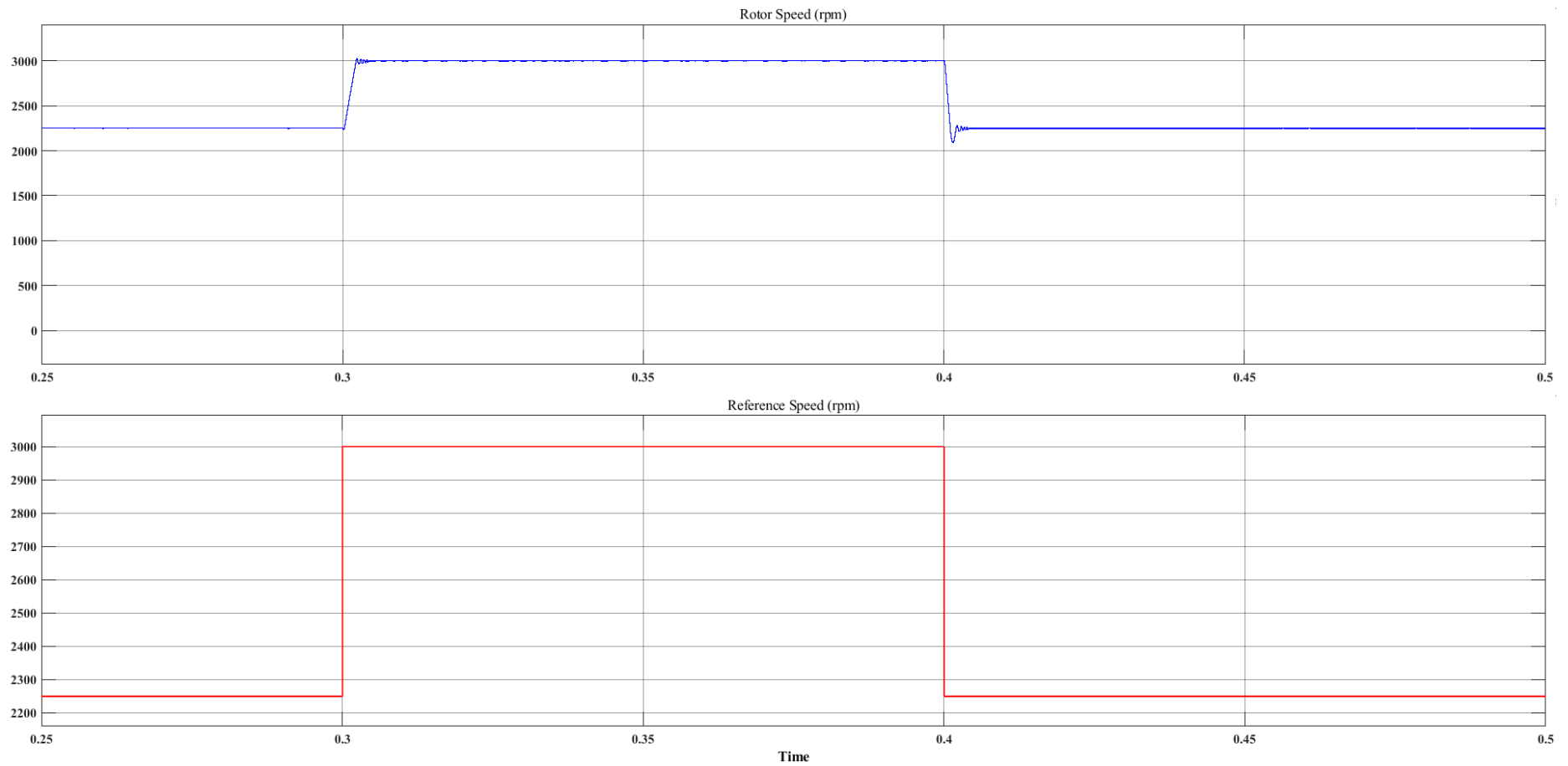
Εικόνα 112: Ρεύματα στον στάτη του κινητήρα, με τις στροφές από 50% στο 75% (στο χρονικό διάστημα  $t=0.3s$  έως  $t=0.4s$ ) και φορτίο 100%



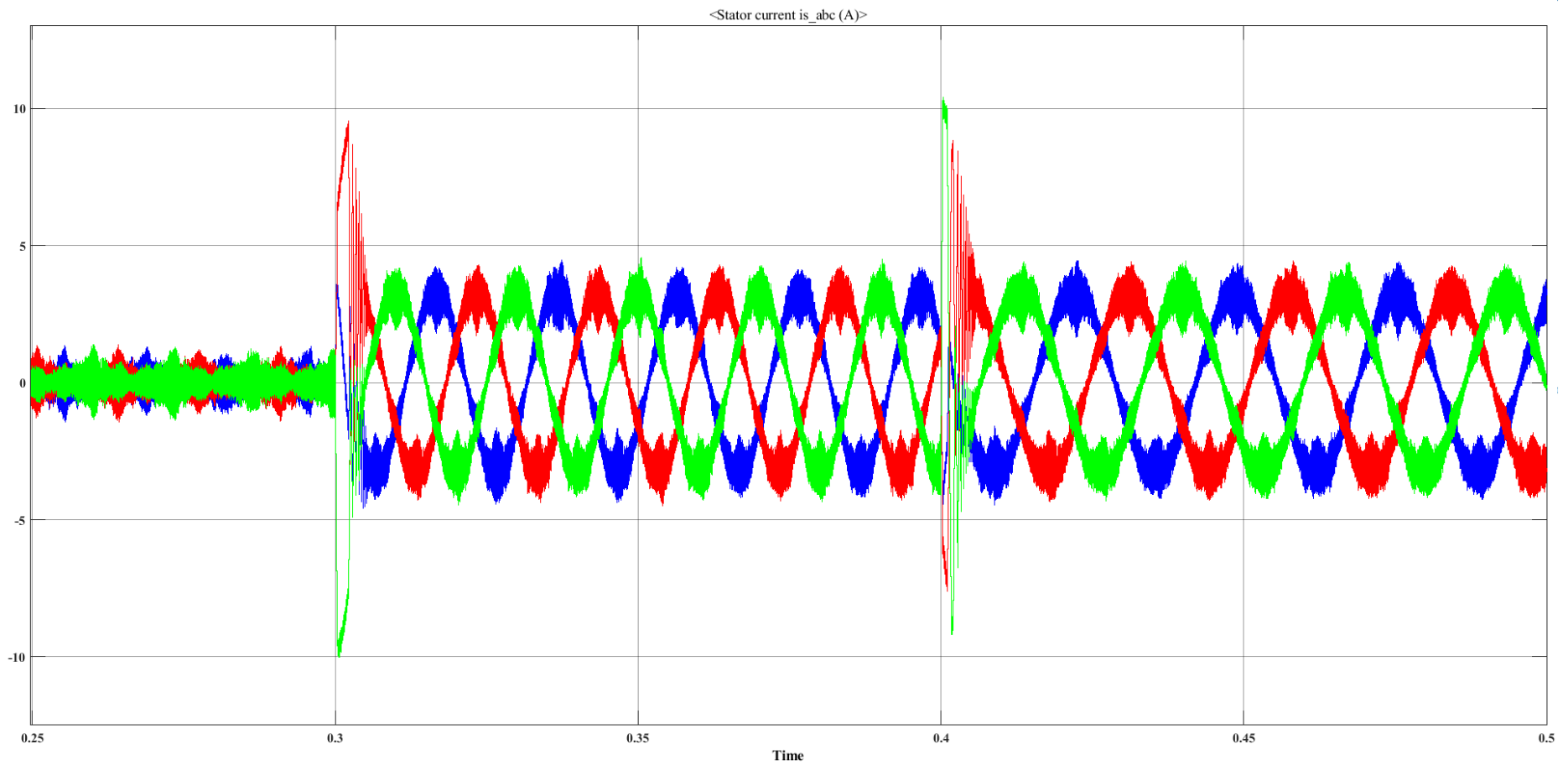
Εικόνα 113: Ταχύτητα του δρομέα – στροφές, με τις στροφές από 75% στο 100% (στο χρονικό διάστημα  $t=0.3s$  έως  $t=0.4s$ ) και φορτίο 50%



Εικόνα 114: Ρεύματα στον στάτη του κινητήρα, με τις στροφές από 75% στο 100% (στο χρονικό διάστημα  $t=0.3s$  έως  $t=0.4s$ ) και φορτίο 50%



Εικόνα 115: Ταχύτητα του δρομέα – στροφές, με τις στροφές από 75% στο 100% (στο χρονικό διάστημα  $t=0.3s$  έως  $t=0.4s$ ) και φορτίο 100%



Εικόνα 116: Ρεύματα στον στάτη του κινητήρα, με τις στροφές από 75% στο 100% (στο χρονικό διάστημα  $t=0.3s$  έως  $t=0.4s$ ) και φορτίο 100%

## 7.4 Συμπεράσματα

Είναι ένα κύκλωμα κλειστού βρόγχου με τεχνική διανυσματικού προσανατολισμένου πεδίου (FOC), όπου βάση αποτελεσμάτων φαίνεται αρκετά αξιόπιστο, αλλά με πιο σύνθετο έλεγχο. Συνδυάζει τους μετασχηματισμούς Clarke και Parke που απλουστεύουν το κύκλωμα, δίνοντας καλύτερες αποκρίσεις. Γενικά, είναι μια πολύπλοκη τεχνική έλεγχου που χρησιμοποιεί όχι μόνο τη γωνία του κινητήρα, αλλά και τα ρεύματα που το διαρρέουν ανά πάσα χρονική στιγμή.

Το κύκλωμα αυτό λαμβάνει πληροφορίες σχετικά με τη γωνία του κινητήρα μέσω encoders. Αποτέλεσμα αυτών είναι η συνεχής παρακολούθηση της γωνίας του κινητήρα με μεγάλη ακρίβεια που οδηγεί σε κυματομορφές των ρευμάτων του κινητήρα οι οποίες είναι ημιτονοειδής, όχι τέλειες όμως και αυτό εξηγείται από το γεγονός ότι έχουμε τραπεζοειδή μεταγωγή.

Στο κομμάτι των προσομοιώσεων της απόκρισης εκκίνησης του κινητήρα παρατηρούμε, ότι οι στροφές του κινητήρα, σε πολύ μικρό χρονικό διάστημα φτάνουν τις 3000 rpm (ονομαστικές στροφές), παρατηρείται δηλαδή ότι ο χρόνος απόκρισης είναι σημαντικά μικρότερος, περίπου στα 0.02s. Για μερικά κλάσματα του δευτερολέπτου κάνει μια μικρή αυξομείωση στις στροφές αλλά σταθεροποιείται άμεσα. Μπορεί οι επιπλέον υπολογισμοί που απαιτούνται εδώ να είναι πιο χρονοβόροι (μετασχηματισμοί ρεύματος), όμως η ακρίβεια της τεχνικής αντισταθμίζει τον χρόνο αυτό.

Όσο αναφορά τις προσομοιώσεις για την απόκριση εκκίνησης του κινητήρα σε μεταβατικές συνθήκες, τα αποτελέσματα για τις δοκιμές που έγιναν είναι λογικά και αναμενόμενα (όπως και στο κύκλωμα με την τεχνική τραπεζοειδούς ελέγχου), καθώς στις περιπτώσεις από 25%-50%, 50%-75% και 75%-100%, όπου και εμφανίζεται το μηχανικό φορτίο στα 0.3s. Ωστόσο, σε αυτή την τεχνική το αξιοσημείωτο είναι ότι σε αυτές τις προσομοιώσεις που γίνονται οι δοκιμές, φαίνεται το φορτίο να μην επηρεάζει.

Από αυτό, μπορεί να εξαχθεί το συμπέρασμα ότι η μέθοδος ελέγχου αυτή, ενδείκνυται για έλεγχο κινητήρων που παρουσιάζουν κυμαινόμενες μεταβολές του φορτίου.

## Κεφάλαιο 8<sup>ο</sup>: Επίλογος

### 8.1 Σύνοψη και Συμπεράσματα

Στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας, ήταν η ανάπτυξη δυο κυκλωμάτων με κινητήρα συνεχούς ρεύματος χωρίς ψήκτρες, με κοινά χαρακτηριστικά του κινητήρα και με εφαρμογή δύο διαφορετικών τεχνικών ελέγχου. Στα πρώτα πέντε κεφάλαια, παρουσιάστηκαν αρκετές θεωρητικές πληροφορίες, στο έκτο κεφάλαιο έγινε η παρουσίαση ενός κυκλώματος με αισθητήρες Hall και PI ελεγκτή για την επίτευξη του τραπεζοειδούς ελέγχου και στο έβδομο κεφάλαιο η παρουσίαση ενός κυκλώματος με Οπτικό Κωδικοποιητή, PI ελεγκτή αλλά και των μετασχηματισμών Clarke και Park για την επίτευξη της τεχνικής προσανατολισμένου πεδίου (FOC). Και τα δυο κυκλώματα, πραγματοποιούν προσδιορισμό της θέσης του κινητήρα με αισθητήρες (Sensored).

Το πρώτο κύκλωμα με την εφαρμογή του τραπεζοειδούς ελέγχου είναι ένα απλό κύκλωμα, αρκετά αξιόπιστο και χωρίς να έχει περίπλοκη συνδεσμολογία. Όσο αναφορά τα αποτελέσματα, το κύκλωμα αυτό δεν αργεί να προσεγγίσει και να σταθεροποιηθεί στις ονομαστικές στροφές καθώς κάνει μια μικρή αύξηση στην αρχή, αλλά πολύ σύντομα λειτουργεί στις επιθυμητές στροφές. Η απόκριση εκκίνησης του, λοιπόν, είναι αρκετά καλή, καθώς μέσα σε κλάσματα του δευτερολέπτου σταθεροποιείται και στις μεταβατικές αποκρίσεις, δηλαδή στην μεταβολή του φορτίου με σταθερές στροφές και στην μεταβολή των στροφών με σταθερό φορτίο, παρατηρούμε ένα μικρό βύθισμα για μερικά δευτερόλεπτα, αλλά συμβαίνει για πολύ μικρό χρονικό διάστημα και σύντομα επανέρχεται στις ονομαστικές στροφές.

Σημαντικό μειονέκτημα του κυκλώματος αυτού, είναι ότι λόγω της απλότητας του, δυσκολεύεται να λειτουργήσει με μεγαλύτερες τιμές φορτίου (δοκιμασμένο ύστερα από αρκετές προσομοιώσεις). Στην πραγματικότητα ένα τέτοιο κύκλωμα θα ήταν πολύ καλό και βολικό για πολλές απλές εφαρμογές (π.χ. οικιακές εφαρμογές) και το κυριότερο είναι το γεγονός πως ένα τέτοιο κύκλωμα (λόγω της λιτής σχεδίασης του και του απλού τρόπου λειτουργίας, βασιζόμενο σε βασικά ηλεκτρονικά ισχύος) δεν είναι ακριβό.

Το δεύτερο κύκλωμα με την τεχνική ελέγχου προσανατολισμένου πεδίου (FOC), έχει μια πιο σύνθετη συνδεσμολογία (λόγω των μετασχηματισμών), αλλά είναι πιο αξιόπιστο, καθώς έχουμε υψηλότερη απόδοση, ομαλή λειτουργία σε χαμηλές και υψηλές ταχύτητες με αποτέλεσμα ένα ευρύ φάσμα ταχύτητας, γρήγορη δυναμική απόκριση και καλή απόδοση παροδικής και σταθερής κατάστασης. Μπορεί οι επιπλέον υπολογισμοί που απαιτούνται εδώ να είναι πιο πολύπλοκοι (μετασχηματισμοί ρεύματος), όμως η ακρίβεια της τεχνικής αντισταθμίζει και με το παραπάνω τον χρόνο αυτό.



Οι προσομοιώσεις του συγκεκριμένου κυκλώματος, επιβεβαιώνουν την θεωρία, δίνοντας πολύ καλά αποτελέσματα. Η εκκίνηση του είναι καλύτερη, καθώς σταθεροποιείται στον μισό χρόνο από το πρώτο κύκλωμα και στις μεταβατικές συνθήκες, φαίνεται ότι μπορεί να υποστηρίξει μεγάλες διακυμάνσεις φορτίου. Επειδή έχουμε τραπεζοειδή μεταγωγή, είναι λογικό να μην έχουμε τέλεια απεικόνιση του ημιτόνου.

Τέλος, στη σύγκριση των δύο τεχνικών ελέγχου, το δεύτερο μπορεί να θεωρηθεί καλύτερο, για τους λόγους που αναλύθηκαν παραπάνω, όπως για παράδειγμα είναι η καλύτερη δυναμική απόκριση και η αντοχή στο μηχανικό φορτίο, δίνοντας καλύτερα αποτελέσματα στις μεταβατικές συνθήκες. Έτσι, προτιμάται σε περίπλοκες και δύσκολες εφαρμογές (π.χ. ιατρικές εφαρμογές, εφαρμογές στην ηλεκτροκίνηση κ.α.), ενώ ο απλός κλασσικός τραπεζοειδής έλεγχος λόγω της απλότητας του χρησιμοποιείται σε εφαρμογές με μικρότερες απαιτήσεις.

## 8.2 Περιβαντολογική συνεισφορά

Λέγεται ότι περισσότερο από το 50% της παγκόσμιας κατανάλωσης ενέργειας οφείλεται σε κινητήρες. Αντικαθιστώντας τους υπάρχοντες κινητήρες που χρησιμοποιούνται με κινητήρες DC χωρίς ψήκτες υψηλής ενεργειακής απόδοσης, μειώνεται η ισχύς που καταναλώνουν οι κινητήρες, γεγονός που κατά συνέπεια μειώνει και το περιβαλλοντικό φορτίο

Οι μηχανικοί κινητήρες είναι ένα σημαντικό στοιχείο στην κίνηση. Ωστόσο, ταυτόχρονα αποτελούν πηγή θορύβου λειτουργίας. Οι Brushless DC κινητήρες διακρίνονται σε αθόρυβη λειτουργία, μειώνουν τον θόρυβο λειτουργίας και συμβάλλουν στη δημιουργία ενός ευχάριστου περιβάλλοντος εργασίας.

Λόγω των δομικών χαρακτηριστικών τους, οι DC κινητήρες χωρίς ψήκτες παρουσιάζουν χαμηλότερο ποσοστό φθοράς και είναι πιο ανθεκτικοί. Η εξαιρετική αντοχή τους ως βασικό συστατικό βοηθά στην παράταση της διάρκειας ζωής των προϊόντων και στην αύξηση του αντίκτυπου της χαμηλότερης χρήσης ενέργειας.

Τέλος, οι BLDC κινητήρες είναι μικρότεροι, ελαφρύτεροι και προσφέρουν καλύτερη απόδοση σε σύγκριση με τους κλασσικούς ηλεκτρικούς κινητήρες. Αυτή η ποιότητα τους προωθεί να είναι προϊόντα υψηλής απόδοσης.

### 8.3 Θέματα για μελλοντική διερεύνηση

Τα συστήματα με BLDC κινητήρες αποτελούν έναν κλάδο έρευνας, ο οποίος σχετίζεται με πολλά αντικείμενα, ενώ ειδικά τα τελευταία χρόνια παρουσιάζει αρκετά μεγάλο ενδιαφέρον και ανάπτυξη. Έτσι στην παρούσα διπλωματική εργασία, υπάρχουν αρκετές πτυχές που παρουσιάζουν ενδιαφέρον για μελλοντική διερεύνηση. Ειδικότερα, ο σχεδιασμός και η υλοποίηση κινητήρων με δυνατότητα οδήγησης μεγαλύτερης ισχύος παρουσιάζει αρκετά μεγάλο ενδιαφέρον, καθώς η επιλογή και η οδήγηση των ημιαγωγικών στοιχείων, αλλά και η γενική συμπεριφορά του συστήματος γίνονται αρκετά πιο απαιτητικά ζητήματα. Παράλληλα, το μεγάλο πλήθος των μεθόδων ελέγχου κινητήρων μόνιμου μαγνήτη παρέχει υλικό για περαιτέρω έρευνα.

Ίσως το μεγαλύτερο μειονέκτημα αυτής της διπλωματικής εργασίας είναι το γεγονός ότι όλες οι προσομοιώσεις έγιναν αποκλειστικά και στο λογισμικό Matlab/Simulink. Λόγω της COVID-19 εποχής ήταν δύσκολο να υλοποιηθεί ένα τέτοιο κύκλωμα στην πράξη και να παρθούν μετρήσεις σε πραγματικές συνθήκες, με κανονικό εξοπλισμό. Λόγω ότι υπάρχουν πολλοί διαφορετικοί BLDC κινητήρες με πολλά διαφορετικά χαρακτηριστικά, είναι λογικό πως με την χρήση τουλάχιστον δυο διαφορετικών κινητήρων της ίδιας κατηγορίας, τα αποτελέσματα θα ήταν διαφορετικά. Σε ρεαλιστικές συνθήκες θα ήταν εύκολο να ληφθούν υπόψιν και άλλοι παράμετροι όπως θα ήταν οι κραδασμοί και η θερμική απόκριση του κινητήρα. Από την άλλη όμως, οι συνθήκες προσομοίωσης είναι αρκετά αξιόπιστες.

## Βιβλιογραφία – Αναφορές – Διαδικτυακές Πηγές

1. E M WEG Group. (-/-). *The ABC's of Synchronous Motors*. Ανάκτηση από E M WEG Group: <https://static.weg.net/medias/downloadcenter/hfe/hf4/WEG-the-abcs-of-synchronous-motors-usaem200syn42-brochure-english.pdf>
2. Εργαστηριακές Σημειώσεις. (2020-2021). Ηλεκτρικές Μηχανές ΙΙ. Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής.
3. *Advantages and Disadvantages*. (2020, January 17). Ανάκτηση από Electricity Shock : <https://electricityshock.com/advantages-and-disadvantages-of-brushless-dc-motor/>
4. Akin, B., & Bhardwaj, M. (2015, September). *Sensorless Trapezoidal Control of BLDC Motors (Rev. A) (ti.com)*. Ανάκτηση από Texas Instruments: [https://www.ti.com/lit/an/sprabq7a/sprabq7a.pdf?ts=1615791280265&ref\\_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F](https://www.ti.com/lit/an/sprabq7a/sprabq7a.pdf?ts=1615791280265&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F)
5. Ali Abdul Razzaq Altahir. (April 2020). Park and Clarke Transformations Park and Clarke Transformations: A Short Review. Research Gate.
6. Alireza Tashakori Abkenar. (May 2014). BLDC Motor Drive Controller for Electric Vehicle (Diploma thesis). Swinburne University.
7. Bimal K. Bose. (2002). *Modern Power Electronics and AC Drives*. Prentice Hall.
8. Britannica. (2021). *Lenz's law*. Ανάκτηση από Britannica: <https://www.britannica.com/science/Lenzs-law>
9. Condit, R. (2007). *Sensorless BLDC Control With Back-EMF Filtering*. Ανάκτηση από Microchip Technology Inc.: <https://ww1.microchip.com/downloads/en/AppNotes/01083a.pdf>
10. Donald Cardwell. (2000). *Ιστορία της Τεχνολογίας*. Εκδόσεις Μεταίχμιο .
11. ECM PCB Stator Technology. (2021, July 7). *The History of Electric Motor Technology: A Journey Through Time*. Ανάκτηση από <https://pcbstator.com/news/history-electric-motor-technology-journey-through-time>
12. Electrical Technology. (2021). *Difference between Synchronous and Asynchronous Motor*. Ανάκτηση από Electrical Technology: <https://www.electricaltechnology.org/2020/09/difference-synchronous-asynchronous-motor.html>

13. Emrik Joner. (2020, October 23). *How Brushless Motors Work and How to Test Them*. Ανάκτηση από RCbenchmark.com: <https://www.rcbenchmark.com/blogs/articles/how-brushless-motors-work>
14. Gamazo-Real, J. C., Vasquez-Sanchez, E., & Gomez-Gil, J. (2010, July 19). *Position and Speed Control of Brushless DC Motors Using Sensorless Techniques and Application Trends*. Ανάκτηση από MDPI: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3231115/>
15. I. Aris, H. Wakiwaka, & M. Nirei. (December 2010). Effect of Magnet Size on Torque Characteristic of Three Phase Permanent Magnet Brushless DC Motor. Research Gate.
16. I. Janpan, R. Chaisricharoen, & P. Boonyanant. (2012). Control of the Brushless DC Motor in Combine Mode. ELSEVIER.
17. Irvine Sloan. (2009, June 2). *Brushless DC Motors in Medical Applcations*. Ανάκτηση από Machine Design: <https://www.machinedesign.com/mechanical-motion-systems/article/21829410/brushless-dc-motors-in-medical-applications>
18. Jani, Y. D. (2011, October 26). *3-Phase Motor Control: Renesas' Floating Point RX MCU Series Advantage Over Fixed Point*. Ανάκτηση από Digi-Key: <https://www.digikey.be/nl/articles/3phase-motor-control-renesas-floating-point-rx-mcu-series-advantage-over-fixed-point>
19. Jaszczolt, C. (2017, January 31). *Understanding permanent magnet motors*. Ανάκτηση από Control Engineering: <https://www.controleng.com/articles/understanding-permanent-magnet-motors/>
20. Jian Zhao, & Yangwei Yu. (2011, July). *Brushless DC Motor Fundamentals Application Note*. Ανάκτηση από MPS: [https://www.monolithicpower.com/pub/media/document/Brushless\\_DC\\_Motor\\_Fundamentals.pdf](https://www.monolithicpower.com/pub/media/document/Brushless_DC_Motor_Fundamentals.pdf)
21. Liu Qinghua. (2005). ANALYSIS, DESIGN AND CONTROL OF PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MOTORS FOR WIDE-SPEED OPERATION (Diploma thesis). National University of Singapore.
22. Ned Mohan, Tore M. Undeland, & William P. Robbins. (1995). *Power Electronics: Converters, Applications and Design* (second edition). John Willey & Sons Inc.
23. Patrick Utz, & Conor Green. (2017). BLDC and Induction Electric Motor: Increasing Torque and Efficiency Through the Use of Variable Magnetic Fields.

24. Paul C. Krause, Oleq Wasynczuk, & Scott D. Sudhoff. (2002). Analysis of Electric Machinery and Drive Systems (second edition). IEEE Series on Power Engineering.
25. R. Krishnan. (2001). Electric Motor Drives (Modeling, Analysis, and Control). Prentice Hall.
26. Shirania, M., Aghajani, A., Shabani, S., & Jalil, J. (2014, December 12). *A review on recent applications of brushless DC electric machines and their potential in energy saving*. Ανάκτηση από energyequipsys: [http://www.energyequipsys.com/article\\_13911\\_eb5e635c76c82576764629c729417837.pdf](http://www.energyequipsys.com/article_13911_eb5e635c76c82576764629c729417837.pdf)
27. Stephen J. Chapman. (2005). Electric Machinery Fundamentals (fifth edition). Mc Graw-Hill.
28. Team, D. E. (χ.χ.). *Encoders and Resolvers: How to Choose the Right Feedback Option*. Ανάκτηση από Dynapar: <https://kamanautomation.com/wp-content/uploads/dynapar-encoders-and-resolvers-how-to-choose-the-right-feedback-options.pdf>
29. *TOP 6 INDUSTRY APPLICATIONS OF BRUSHLESS MOTORS*. (7, February 2018). Ανάκτηση από KDE Direct: <https://www.kdedirect.com/blogs/news/6-industry-applications-brushless-motors>
30. TOSHIBA. (2018). 120 Square - Wave Commutation for Brushless DC Motors. Toshiba Electronic Device & Storage Corporation.
31. William D. Callister, & David G. Rethwisch. (2017). *Επιστήμη και Τεχνολογία των υλικών (ένατη έκδοση)*. Εκδόσεις Τζιόλα.
32. Yadu Kiran. (2014, August). *A Review of Brushless Motor Control*. Ανάκτηση από IJAREEIE: [https://www.ijareeie.com/upload/2014/august/9\\_AReview.pdf](https://www.ijareeie.com/upload/2014/august/9_AReview.pdf)
33. Yedamale, P. (2003). *Brushless DC (BLDC) Motor Fundamentals*. Ανάκτηση από Microchip Technology Inc.: <https://ww1.microchip.com/downloads/en/appnotes/00885a.pdf>
34. Εργαστηριακές Σημειώσεις. (2020-2021). Ηλεκτρονικά Ισχύος. Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής.
35. Θεοφάνης Κωνσταντίνος . (Θεσσαλονίκη, Ιούνιος 2020). Ανάπτυξη Συστήματος Οδήγησης Κινητήρων Μόνιμου Μαγνήτη & Συγκριτική Εφαρμογή Διαφόρων Μεθόδων Ελέγχου (Διπλωματική εργασία). Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης .

36. Νικόλαος Δ. Αποστολόπουλος. (Αθήνα, Νοέμβριος 2012). Έλεγχος κινητήρα μόνιμων μαγνητών για εφαρμογές ηλεκτρικών οχημάτων (Διπλωματική εργασία). Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο .
37. Παντελής Β. Μαλατέστας. (2017). Ηλεκτρικές Μηχανές . Εκδόσεις Τζιόλα.
38. Παπασταύρου Χρήστου Χρήστου . (Πάτρα, Μάρτιος 2018). Μελέτη και Κατασκευή του Κινητήριου Συστήματος ενός Ηλεκτροκίνητου Δικύκλου (Διπλωματική εργασία). Πανεπιστήμιο Πατρών .
39. Στάμου Κωνσταντίνος . (Αθήνα, Σεπτέμβριος 2016). Ανάπτυξη Υλικού και Λογισμικού για Sensorless έλεγχο Brushless DC κινητήρα με χρήση DSP processor (Διπλωματική εργασία). Εθνικό Μετσόβιο Πολύτεχνείο .
40. Στέφανος Ν. Μανιάς. (2017). Ηλεκτρονικά Ισχύος (δεύτερη έκδοση). Εκδόσεις Συμεών .