



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ
ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ

**ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΙ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ BLDC ΚΙΝΗΤΗΡΑ ΣΕ
ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΜΑΤΛΑΒ/SIMULINK**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΤΟΥ

Αριστοτέλη Χ. Κωστούλα

Επιβλέπων: Μαρία Γ. Ιωαννίδου
Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Οκτώβριος 2014



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ
ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ

ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΙ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ BLDC ΚΙΝΗΤΗΡΑ ΣΕ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ MATLAB/SIMULINK

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΤΟΥ

Αριστοτέλη Χ. Κωστούλα

Επιβλέπων: Μαρία Γ. Ιωαννίδου

Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την ... Οκτωβρίου 2014.

.....
Ιωαννίδου Μαρία
Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

.....
Θεοδώρου Νικόλαος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Τσαραμπάρης Παναγιώτης
Λέκτορας Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Οκτώβριος 2014.

.....
Αριστοτέλης Χ. Κωστούλας

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π

© Αριστοτέλης Χ. Κωστούλας, 2014.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

“Στους γονείς μου οφείλω το ζην και στον δάσκαλό μου το εύ ζην.”

Μέγας Αλέξανδρος

Περίληψη

Στην παρούσα εργασία γίνεται μελέτη, ανάλυση, μοντελοποίηση και προσομοίωση του κινητήρα συνεχούς ρεύματος χωρίς ψήκτρες (κινητήρας BLDC). Αρχικά γίνεται ανάλυση της δομής του και παράλληλα μελετώνται τα λειτουργικά χαρακτηριστικά του που τον καθιστούν την αποδοτικότερη ή την πιο αξιόπιστη λύση σε ολοένα και περισσότερες εφαρμογές. Σημαντικό ρόλο στην εξέλιξη του κινητήρα BLDC κατέχει η ανάπτυξη υπολογιστικών μοντέλων για την προσομοίωση νέων τεχνικών ελέγχου και οδήγησης. Με αφετηρία το ισοδύναμο κύκλωμα και το μηχανικό μέρος του κινητήρα εξάγεται το μαθηματικό μοντέλο που περιγράφει τη λειτουργία του. Στη συνέχεια υλοποιείται και προσομοιώνεται το μοντέλο για τον έλεγχο ταχύτητας του κινητήρα BLDC στο περιβάλλον MATLAB/Simulink. Επιπλέον υιοθετείται μια τεχνική για έλεγχο του κινητήρα χωρίς αισθητήρες. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων επιβεβαιώνουν την επιθυμητή λειτουργία και αποδοτικότητα του συστήματος ελέγχου του κινητήρα BLDC.

Λέξεις κλειδιά: Κινητήρας Συνεχούς Ρεύματος χωρίς ψήκτρες, Σύγχρονοι Κινητήρες Μόνιμου Μαγνήτη, Έλεγχος ταχύτητας, ηλεκτρονική μεταγωγή, ΗΕΔ-αντίδρασης, αισθητήρες Hall, MATLAB/Simulink, μοντελοποίηση, προσομοίωση, έλεγχος χωρίς αισθητήρες

Abstract

In this thesis, the analysis, modeling and simulation of the brushless DC motors (BLDC motors) are investigated. Initially, their structural analysis and operational features are studied. These unique features render them the most efficient or reliable solutions in an continuously increasing number of applications. Computational model development holds an important role in simulation of new control and motor driving techniques. The mathematical model that describes the operation is derived utilizing the equivalent circuit and the mechanical part of the motor. It is then implemented and simulated in the MATLAB\Simulink environment. Simulation results demonstrate desired control system operation and performance.

Keywords: Brushless DC Motor, BLDC, Permanent Magnet Synchronous Motor, PMSM, Speed PI Control, electronic commutation, Back-EMF, Hall Sensors, MATLAB/Simulink, Modeling, Simulation, Sensorless Control

Ευχαριστίες

Η παρούσα εργασία εκπονήθηκε το ακαδημαϊκό έτος 2013-2014 στο εργαστήριο Ηλεκτρικών Κινητήρων του Τομέα Ηλεκτρικών Βιομηχανικών Διατάξεων και Συστημάτων Αποφάσεων στη Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου.

Κατ' αρχήν θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά την επιβλέπουσα καθηγήτρια μου κ. Μαρία-Παρασκευή Ιωαννίδου, τόσο για τη συνεισφορά της στην επαφή μου με το συγκεκριμένο πεδίο ενδιαφέροντος των Ηλεκτρικών Μηχανών μέσω του μαθήματος “Συστήματα Ειδικών Ηλεκτρικών Κινητήρων”, όσο και για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε με την ανάθεση της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Επιπλέον την ευχαριστώ για την καθοδήγηση και τη συμπαράστασή της που κατέστησαν δυνατή τη διεκπεραίωση αυτής της εργασίας.

Στη συνέχεια θα ήθελα να ευχαριστήσω τον υποψήφιο διδάκτορα Ευθύμιο Καραλή για τις σημαντικές κατευθύνσεις έρευνας που μου παρείχε καθώς και την καθοδήγηση σε όλα τα στάδια της εκπόνησης της εργασίας.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω την οικογένεια μου για τη δύναμη που μου έδωσε και τη συνεχή υποστήριξη κατά τη διάρκεια των σπουδών μου · τη Βασιλική για την έμπνευση και την υπομονή της · τον εξάδελφο μου Βασίλη για την ιδιαίτερα σημαντική συμπόρευση.

Κλείνοντας, θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα το φίλο και συνάδελφό μου Αλέξανδρο Νίκου, για την επιμονή και την αμέριστη συμπαράστασή του, την τεράστια και διαρκή προσφορά του στην επιτυχή ολοκλήρωση αυτής της διαδρομής, και την έμπρακτη απόδειξη ότι το ακαδημαϊκό πνεύμα μπορεί να μένει συνεχώς ανήσυχο - κι ανθρώπινο συνάμα.

Περιεχόμενα

1. Εισαγωγή	1
1.1 Πρόλογος	1
1.2 Στόχοι	2
1.3 Βιβλιογραφική ανασκόπηση	2
1.4 Οργάνωση της εργασίας	4
2. Κινητήρας BLDC	5
2.1 Ηλεκτρικές μηχανές	5
2.1.1 Κατηγορίες και είδη κινητήρων	5
2.1.2 Κινητήρες συνεχούς ρεύματος	6
2.2 BLDC κινητήρες	6
2.2.1 Πλεονεκτήματα	7
2.2.2 Το ηλεκτρονικό ανάλογο της μηχανικής μεταγωγής	7
2.2.3 Δομή και τύποι κινητήρων BLDC	8
2.2.4 Στάτης	10
2.2.5 Δρομέας	11
2.2.6 Αισθητήρες Hall	11
2.2.7 Τριφασικός αντιστροφέας	12
2.3 Αρχή λειτουργίας - Λειτουργικά χαρακτηριστικά	14
2.3.1 Το στρεφόμενο πεδίο	14
2.3.2 ΗΕΔ-Αντίδρασης	15
2.3.3 Ηλεκτρονική μεταγωγή - Οδήγηση του κινητήρα BLDC	17
2.4 Έλεγχος ταχύτητας/θέσης	18
2.4.1 Τεχνική Ελέγχου PID	20

2.5	Μέθοδοι ελέγχου χωρίς αισθητήρα	24
2.5.1	Η ανάγκη για συστήματα χωρίς αισθητήρες	24
2.5.2	Ανίχνευση της ΗΕΔ-αντίδρασης για sensorless μεθόδους	25
2.5.3	Ανίχνευση ZCP	26
2.5.4	Η μέθοδος των διαφορών των ΗΕΔ-Αντίδρασης	27
2.5.5	Άλλες τεχνικές έμμεσης ανίχνευσης της ΗΕΔ-αντίδρασης	29
3.	Μοντελοποίηση	31
3.1	Διαφορικές εξισώσεις	31
3.1.1	Ηλεκτρικά μεγέθη	31
3.1.2	Μηχανικά μεγέθη	34
3.2	Ανάπτυξη μοντέλου στο Matlab/Simulink	35
3.2.1	Το ηλεκτρομηχανικό υποσύστημα του BLDC κινητήρα	37
3.2.2	Το υποσύστημα για τον έλεγχο θέσης	43
3.2.3	Το υποσύστημα του τριφασικού αντιστροφέα	43
3.2.4	Το υποσύστημα για τον έλεγχο της ταχύτητας	44
3.2.5	Το υποσύστημα για την τεχνική sensorless	46
4.	Προσομοιώσεις	49
5.	Επίλογος	59
5.1	Συμπεράσματα	59
5.2	Μελλοντική εργασία	59

Κατάλογος σχημάτων

2.1	Τομή κινητήρα BLDC εσωτερικού δρομέα [1]	10
2.2	Εγκάρσια τομή κινητήρα BLDC [1]	12
2.3	Τριφασικός αντιστροφέας για οδήγηση κινητήρα BLDC [2]	13
2.4	Τραπεζοειδής ΗΕΔ-αντίδρασης κινητήρα BLDC [1]	17
2.5	Έξι βήματα διαδοχής μεταγωγής και αντίστοιχες κυματομορφές	19
2.6	Σύστημα PID ελέγχου [2]	21
2.7	Σύστημα PID ελέγχου ηλεκτρικού κινητήρα [2]	22
2.8	Κύκλωμα για την ανίχνευση των ZCP [13]	28
3.1	Ισοδύναμο κύκλωμα κινητήρα BLDC	32
3.2	Μοντέλο προσομοίωσης κινητήρα BLDC στο Matlab/Simulink	36
3.3	Το υποσύστημα του κινητήρα BLDC	38
3.4	Το υποσύστημα για τη δημιουργία της ΗΕΔ-αντίδρασης	39
3.5	Το υποσύστημα για την τραπεζοειδή μορφοποίηση της ΗΕΔ-αντίδρασης	39
3.6	Το υποσύστημα για τη δημιουργία των ρευμάτων των τριών φάσεων	40
3.7	Το υποσύστημα για τον υπολογισμό του i_a	40
3.8	Το υποσύστημα για τον υπολογισμό της Η/Μ ροπής T_e	41
3.9	Το υποσύστημα για τον υπολογισμό των γωνιακών μεγεθών	41
3.10	Το υποσύστημα για τον υπολογισμό της μηχανικής ταχύτητας w_m	41
3.11	Το υποσύστημα για τη δημιουργία των σημάτων των αισθητήρων θέσης	42
3.12	Το υποσύστημα για τον έλεγχο θέσης του κινητήρα	43
3.13	Το υποσύστημα για την αποκωδικοποίηση των σημάτων Hall	43
3.14	Το Υ/Σ για την οδήγηση των διακοπτικών στοιχείων του αντιστροφέα	44
3.15	Το υποσύστημα του τριφασικού αντιστροφέα	45
3.16	Το υποσύστημα για τον έλεγχο της ταχύτητας	45

3.17	Ανίχνευση ZCP και μετατροπή σε εικονικά σήματα Hall	47
3.18	Υποβοηθητικό Υ/Σ για υπολογισμούς και συγκρίσεις	48
3.19	Μοντέλο διακρίβωσης sensorless τεχνικής στο Matlab/Simulink	48
4.1	Διάγραμμα Ταχύτητας	50
4.2	Διάγραμμα Ηλεκτρομαγνητικής ροπής	51
4.3	HEΔ-αντίδρασης και ρεύμα στις τρεις φάσεις	52
4.4	Η κυματομορφή της πολικής τάσης V_{ab}	52
4.5	HEΔ-αντίδρασης και σήματα αισθητήρων Hall	53
4.6	Αποκωδικοποίηση σημάτων Hall και αλληλουχία μεταγωγής	54
4.7	Διακοπτική λειτουργία - αλλαγή ταχύτητας αναφοράς	55
4.8	Μεταβλητό Φορτίο - Διάγραμμα ταχύτητας	55
4.9	Μεταβλητό Φορτίο - Ταχύτητα - Η/Μ Ροπή - Ρεύμα φάσης A	56
4.10	ZCP e_{ac}, V_{ac} , εικονικά και πραγματικά σήματα Hall - Φάση A	57
4.11	ZCP e_{ba}, V_{ba} , ZCP e_b , εικονικά και πραγματικά σήματα Hall - Φάση B	58

Κατάλογος πινάκων

2.1	Σύγκριση κινητήρα BLDC - κινητήρα DC με ψήκτρες [1]	8
2.2	Σύγκριση κινητήρα BLDC - κινητήρα DC με ψήκτρες [1] - συνέχεια	9
2.3	Ενδεικτικός πίνακας σημάτων Hall σε σχέση με την ηλεκτρική γωνία	18
2.4	Σχέση στοιχείων αντιστροφέα και σημάτων Hall	20
4.1	Τιμές των παραμέτρων του κινητήρα για τις προσομοιώσεις	49

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

1.1 Πρόλογος

Ο κινητήρας συνεχούς ρεύματος χωρίς ψήκτρες (BLDC) είναι ένας τύπος ηλεκτρικού κινητήρα με αρκετά λειτουργικά πλεονεκτήματα, τα οποία τον καθιστούν την αποδοτικότερη ή την πιο αξιόπιστη λύση σε ολοένα και περισσότερες εφαρμογές. Αυτό σε μεγάλο βαθμό οφείλεται στη διαδικασία της ηλεκτρονικής μεταγωγής, που αποτελεί μία από τις βασικές αρχές λειτουργίας του. Ωστόσο, η διαδικασία αυτή οδηγεί σε μια πιο σύνθετη δομή, σε σχεδιαστικό και κατασκευαστικό επίπεδο, καθώς για τη λειτουργία του απαιτούνται ειδικά συστήματα ελέγχου και ισχύος.

Έτσι, σταδιακά θεμελιώθηκε ένα σχετικά ευρύ πεδίο έρευνας για την ανάπτυξη νέων τεχνολογιών, με στόχο τη βελτίωση της συμπεριφοράς του και της ικανότητας του να ανταποκριθεί σε ειδικές εφαρμογές με υψηλότερες απαιτήσεις. Στο πεδίο αυτό συμπεριλαμβάνονται τεχνικές ελέγχου ποικίλης πολυπλοκότητας, ειδικά συστήματα ισχύος για αποδοτικότερη ή αρτιότερη λειτουργική συμπεριφορά, αλλά και ολοκληρωμένα συστήματα οδήγησης και ελέγχου που στοχεύουν σε εξειδικευμένες εφαρμογές.

Αυτές οι τεχνολογικές εξελίξεις έχουν αναδείξει τον κινητήρα BLDC σε μια πλεονεκτική θέση έναντι των συμβατικών κινητήρων εναλλασσόμενου και συνεχούς ρεύματος, συνδυάζοντας την αξιοπιστία με την υψηλή απόδοση. Έτσι κερδίζει συνεχώς έδαφος σε μια σειρά από τομείς και εφαρμογές, οι βασικότεροι από τους οποίους είναι οι εξής [3]:

- Βιομηχανία Αυτοκινήτου: Αντλίες καυσίμου, ενεργά συστήματα οδήγησης, διάφορα

συστήματα ελέγχου κινούμενων μερών, όπως καθίσματα, οροφές, υαλοκαθαριστήρες κ.α., συστήματα κλιματισμού.

- Βιομηχανικές εφαρμογές και οικιακές συσκευές: Ανεμιστήρες, αντλίες, συστήματα εξαερισμού και κλιματισμού, μίξερ, ηλεκτρικά εργαλεία, πλυντήρια, στεγνωτήρια.

1.2 Στόχοι

Ο σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η μελέτη και η ανάλυση των χαρακτηριστικών και φαινομένων που καθορίζουν τη λειτουργία ενός BLDC κινητήρα με κίνητρο την ανάπτυξη ενός πλήρως λειτουργικού μοντέλου στο περιβάλλον MATLAB/Simulink. Η ανάπτυξη γίνεται με γνώμονα τη διαισθητική σχεδίαση με δομή υποσυστημάτων, εκμεταλλευόμενη την καταλληλότητα του περιβάλλοντος στον τομέα του. Το μοντέλο πρέπει

- να είναι πλήρως λειτουργικό και κατά την προσομοίωση του να αναπαράγει τη λειτουργία ενός κινητήρα BLDC
- να είναι παραμετροποιήσιμο ώστε να είναι δυνατή η χρήση του για προσομοίωση bldc κινητήρων διαφόρων ονομαστικών μεγεθών και εφαρμογών
- να διατηρεί σαφή διαχωρισμό ως προς τα υποσυστήματα που το απαρτίζουν, σύμφωνα με τον ορισμό του κινητήρα BLDC, ώστε να υπάρχει η δυνατότητα αντικατάστασης κάποιου υποσυστήματος με διαφορετική μοντελοποίηση
- να λειτουργεί ως μοντέλο αναφοράς ώστε να επιτρέπει την ανάπτυξη και διακρίβωση διαφορετικών τεχνικών ελέγχου και οδήγησης

1.3 Βιβλιογραφική ανασκόπηση

Οι κινητήρες συνεχούς ρεύματος χωρίς ψήκτρες (Brushless DC Motors - BLDC) αποτελούν μια κατηγορία ειδικών ηλεκτρικών κινητήρων. Για το διαχωρισμό του συγκεκριμένου είδους ανάμεσα σε άλλες περιπτώσεις κινητήρων DC χωρίς ψήκτρες δίνεται ο ακόλουθος ορισμός [4]: Πρόκειται για έναν κινητήρα με τυλίγματα στάτη (οπλισμού)

και δρομέα μόνιμου μαγνήτη ή μαλακού σιδήρου έκτυπων πόλων. Τα τυλίγματα του στάτη τροφοδοτούνται από μια βασική DC τροφοδοσία μέσω μιας μήτρας διακοπών στερεάς κατάστασης, οι οποίες ελέγχονται με αισθητήρες για την ανίχνευση της θέσης του δρομέα και χρήση λογικής. Ελλείπει ρυθμιστή/ελεγκτή ταχύτητας, η ταχύτητα του κινητήρα είναι σχεδόν ανάλογη της συνεχούς τάσης τροφοδοσίας .

Όπως φαίνεται από τον παραπάνω ορισμό, η περιγραφή του κινητήρα BLDC και η ανάπτυξη οποιουδήποτε μοντέλου περιλαμβάνει τόσο τον κινητήρα, όσο και τα συστήματα οδήγησης/τροφοδοσίας, ανίχνευσης θέσης και ελέγχου ταχύτητας. Αυτό υπαγορεύεται από την αρχή λειτουργίας της συγκεκριμένης μηχανής, η οποία κυριαρχείται από την έννοια της ηλεκτρονικής μεταγωγής. Έτσι η σχεδιαστική φιλοσοφία βασίζεται στην εκμετάλλευση επιθυμητών χαρακτηριστικών του κάθε υποσυστήματος καθώς και στην αλληλεπίδραση τους. Η βελτίωση των χαρακτηριστικών αυτών με στόχο την ανάπτυξη κινητήρων BLDC κατάλληλων για ακόμα περισσότερες εφαρμογές οδήγησε στην ανάπτυξη, ανάλυση και σχεδίαση μοντέλων τόσο σε συνολικό όσο και σε επίπεδο υποσυστήματος [5–7].

Ένας από τους πιο ενεργούς τομείς στην τεχνολογική εξέλιξη των κινητήρων BLDC, περιστρέφεται γύρω από την οδήγηση των κινητήρων χωρίς αισθητήρα θέσης (sensorless). Στο [8] παρουσιάζεται μια ολοκληρωμένη μέθοδος sensorless ελέγχου με τη βοήθεια μικροεπεξεργαστή, η οποία βασίζεται στην ανίχνευση της ΗΕΔ-αντίδρασης μέσω των φασικών τάσεων τροφοδοσίας και ειδικότερα στα σημεία διέλευσης της από το μηδέν (Zero Crossing Point (ZCP) Detection). Αν και στη συνέχεια αναπτύχθηκαν αρκετές διαφορετικές τεχνικές για έλεγχο χωρίς αισθητήρες, η συγκεκριμένη καθιερώθηκε ως η πιο δημοφιλής [9]. Η εξάλειψη των αναλογικών χαμηλοπερατών φίλτρων τα οποία απαιτεί η συγκεκριμένη μέθοδος και τα οποία περιορίζουν το εύρος λειτουργίας του κινητήρα, αντιμετωπίζεται με διάφορες τεχνικές. Οι σημαντικότερες από αυτές εμπεριέχουν τεχνικές PWM [10], ψηφιακών φίλτρων [11], ή την εναλλακτική ανίχνευση των τάσεων τροφοδοσίας [12]. Ωστόσο, τα ZCP της ΗΕΔ-αντίδρασης προηγούνται κατά 30 ηλεκτρικές μοίρες από τα χρονικά σημεία μεταγωγής. Για τη σωστή οδήγηση του κινητήρα, αυτή η διαφορά πρέπει να αντιμετωπίζεται από το σύστημα ελέγχου. Στο [13] προτάθηκε η ανίχνευση των ZCP των διαφορών των ΗΕΔ-αντίδρασης μεταξύ φάσεων,

τα οποία συμπίπτουν ακριβώς με τα χρονικά σημεία μεταγωγής. Πειραματικά αποτελέσματα επιβεβαιώνουν την αποτελεσματικότητα αυτής της μεθόδου, η οποία μειώνει την πολυπλοκότητα του συστήματος sensorless ελέγχου και επιπλέον καθιστά περιττή την ενσωμάτωση ξεχωριστής στρατηγικής έναρξης του κινητήρα [14].

Οι συγγραφείς στο [15] έθεσαν για πρώτη φορά την προσομοίωση κινητήρα BLDC σε υπολογιστή με μοντέλο βασισμένο σε φασικές μεταβλητές κατάστασης. Στο [16] παρουσιάζεται ένα ολοκληρωμένο και αναλυτικό μοντέλο προσομοίωσης σε περιβάλλον Simulink. Αν και πραγματοποιείται λεπτομερής σχεδίαση του ηλεκτρομηχανικού μοντέλου, των βρόγχων θέσης, ταχύτητας και ρεύματος και του αντιστροφέα, διατηρείται η απλότητα στο σχεδιασμό. Ένα απλοποιημένο πλήρες μοντέλο στο Simulink αναπτύσσεται στο [17] για τη σύγκριση διαφορετικών τεχνικών ελέγχου. Μια ακόμα υλοποίηση προτείνεται στο [18], όπου ο ελεγκτής για την οδήγηση του αντιστροφέα με τα σήματα των αισθητήρων Hall, αναπτύσσεται σε γλώσσα περιγραφής υλικού VHDL, με την ενσωμάτωση υποσυστήματος Modelsim στο Simulink.

1.4 Οργάνωση της εργασίας

Στο Κεφάλαιο 2, αναλύονται τα θεωρητικά στοιχεία που περιγράφουν και εξηγούν τη λειτουργία του κινητήρα BLDC.

Στο Κεφάλαιο 3 υλοποιείται η μαθηματική προσέγγιση και μοντελοποίηση του κινητήρα BLDC καθώς και η ανάπτυξη του μοντέλου στο περιβάλλον Matlab/Simulink.

Στο Κεφάλαιο 4 παρουσιάζονται οι προσομοιώσεις του μοντέλου που αναπτύχθηκε, για την επιβεβαίωση της λειτουργικότητας του.

Στο Κεφάλαιο 5 γίνεται η μελέτη των αποτελεσμάτων από την προσομοίωση και εξάγονται τα σχετικά συμπεράσματα. Τέλος, κατατίθενται ορισμένες προτάσεις για τη βελτίωση της αποτελεσματικότητας του μοντέλου ως προς τις λειτουργίες που καλείται να επιτελέσει.

Κεφάλαιο 2

Κινητήρας BLDC

2.1 Ηλεκτρικές μηχανές

Οι ηλεκτρικές μηχανές είναι διατάξεις οι οποίες μετατρέπουν τη μηχανική ενέργεια σε ηλεκτρική και αντίστροφα. Όταν μια ηλεκτρική μηχανή χρησιμοποιείται για τη μετατροπή μηχανικής ενέργειας σε ηλεκτρική βρίσκεται σε λειτουργία γεννήτριας. Όταν επιτελεί την αντίστροφη διαδικασία, βρίσκεται σε λειτουργία κινητήρα. Μια τέτοια μηχανή με κατάλληλη διέγερση μπορεί να κάνει τη μετατροπή είτε προς τη μία είτε προς την άλλη κατεύθυνση, οπότε είναι δυνατή η χρήση της είτε ως γεννήτρια είτε ως κινητήρας. Ωστόσο, η παρούσα εργασία επικεντρώνεται στη λειτουργία κινητήρα, και πιο συγκεκριμένα του κινητήρα συνεχούς ρεύματος χωρίς ψήκτρες (Brushless DC Motor - BLDC).

Η θεωρητική ανάλυση που παρουσιάζεται στο παρόν Κεφάλαιο βασίζεται κυρίως στις αναφορές [1, 2, 9, 19–21]

2.1.1 Κατηγορίες και είδη κινητήρων

Λόγω της πληθώρας τύπων κινητήρων, που χαρακτηρίζονται από την διαφορετική αρχή λειτουργίας τους ή τις εφαρμογές για τις οποίες αναπτύχθηκαν, ακολουθεί μια κοινή βιβλιογραφικά κατάταξη των ηλεκτρικών κινητήρων, με στόχο τη κατηγοριοποίηση του BLDC κινητήρα που μελετάται στα επόμενα. Μια αρκετά βασική ως προς τη λειτουργία κατηγοριοποίηση κατατάσσει τους ηλεκτρικούς κινητήρες σε δύο τύπους:

Εναλλασσόμενου (EP - AC) και Συνεχούς (ΣΡ - DC) Ρεύματος. Οι δύο κύριοι τύποι κινητήρων AC είναι οι κινητήρες επαγωγής και οι σύγχρονοι κινητήρες. Από αυτούς τους δύο τύπους, στις επόμενες ενότητες γίνεται αναφορά στους σύγχρονους κινητήρες, στα πλαίσια των κοινών στοιχείων στην αρχή λειτουργίας τους με τους κινητήρες BLDC.

2.1.2 Κινητήρες συνεχούς ρεύματος

Ο κινητήρας συνεχούς ρεύματος (DC) έχει το τύλιγμα του στο δρομέα. Ο στάτης διαθέτει έκτυπους πόλους τους οποίους αποτελούν είτε μόνιμοι μαγνήτες ή ειδικά τυλίγματα. Το ρεύμα τροφοδοτείται στα τυλίγματα του δρομέα μέσω ψηκτρών που βρίσκονται σε επαφή με χάλκινες λωρίδες που βρίσκονται στο άκρο του άξονα. Αυτά τα κομμάτια χαλκού αποτελούν το συλλέκτη. Ο συλλέκτης είναι συνδεδεμένος με τα τυλίγματα του δρομέα. Κατά την περιστροφή του κινητήρα, οι ψήκτρες έρχονται σε επαφή με διαφορετικό κομμάτι του συλλέκτη. Με αυτόν τον τρόπο γίνεται η μεταγωγή του ρεύματος ώστε το ρεύμα να έχει πάντα την ίδια διεύθυνση.

2.2 BLDC κινητήρες

Ο κινητήρας συνεχούς ρεύματος χωρίς ψήκτρες (BLDC), (Σύγχρονος κινητήρας ΣΡ μόνιμου μαγνήτη - DC PMSM) είναι ένας τύπος κινητήρα ο οποίος έχει γίνει αρκετά γρήγορα δημοφιλής, κυρίως λόγω των καλύτερων χαρακτηριστικών και επιδόσεων του σε σχέση με τις συμβατικές DC μηχανές. Χρησιμοποιούνται σε μεγάλο πλήθος βιομηχανικών και άλλων εφαρμογών λόγω της κατάλληλης για ειδικές εφαρμογές, αρχιτεκτονικής τους.

Ο BLDC κινητήρας είναι ένας σύγχρονος ηλεκτρικός κινητήρας ο οποίος, κατασκευαστικά, μοιάζει με ένα DC κινητήρα, καθώς παρουσιάζει μια γραμμική σχέση μεταξύ ρεύματος και ροπής, τάσης και ταχύτητας. Η μεταγωγή του ρεύματος γίνεται ηλεκτρονικά και όχι μηχανικά όπως στη συμβατική DC μηχανή. Αυτό το στοιχείο διαχωρίζει κατ' ουσίαν τους δύο αυτούς τύπους κινητήρων, και έχει κεντρικό ρόλο σε οτιδήποτε σχετίζεται με τη λειτουργία του κινητήρα BLDC: Από την περιγραφή και τη μοντελοποίηση, μέχρι το σχεδιασμό του κινητήρα, του συστήματος παροχής ισχύος, των οποιωνδήποτε

συστημάτων ελέγχου εφαρμόζονται, την κατασκευή και λειτουργία του, τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα του σε σχέση με άλλους τύπους κινητήρων ΣΡ στους οποίους η μεταγωγή γίνεται μηχανικά, με τη βοήθεια του συλλέκτη και των ψηκτρών.

2.2.1 Πλεονεκτήματα

Οι κινητήρες BLDC παρουσιάζουν μια σειρά από πλεονεκτήματα σε σχέση με τους κινητήρες DC με ψήκτρες και τους κινητήρες επαγωγής: Καλύτερη χαρακτηριστική ταχύτητας-ροπής, μεγάλη δυναμική απόκριση, υψηλή απόδοση και αξιοπιστία, μεγαλύτερη διάρκεια ζωής λόγω της απουσίας ψηκτρών, αθόρυβη λειτουργία, ευρύτερες περιοχές λειτουργίας ως προς την ταχύτητα, και μειωμένες ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές. Επιπλέον, η αναλογία της ισχύος στον άξονα προς το μέγεθος του κινητήρα είναι μεγαλύτερη, κάτι το οποίο τους καθιστά κατάλληλους σε εφαρμογές όπου το μέγεθος και το βάρος αποτελούν σημαντικούς παράγοντες. Μια συνοπτική καταγραφή των χαρακτηριστικών του κινητήρα BLDC σε σχέση με τον κινητήρα DC με ψήκτρες παρουσιάζεται στους πίνακες 2.1-2.2.

2.2.2 Το ηλεκτρονικό ανάλογο της μηχανικής μεταγωγής

Στον κινητήρα BLDC το στρεφόμενο μέρος της μηχανής (δρομέας) αποτελούν οι μόνιμοι μαγνήτες, ενώ οι ηλεκτρομαγνήτες είναι σταθεροί (στάτης). Με αυτόν τον τρόπο αντιμετωπίζεται το πρόβλημα της μεταφοράς ρεύματος σε κινούμενο τυλίγμα, το οποίο αντίθετα περιγράφει τη δομή ενός απλού κινητήρα DC, στον οποίο η συγκεκριμένη λειτουργία επιφορτίζεται στο σύστημα συλλέκτη-ψηκτρών. Ωστόσο, για την ορθή μεταγωγή του ρεύματος στο στάτη που αποσκοπεί στη δημιουργία του στρεφόμενου πεδίου και στη συνέχεια στην ανάπτυξη ροπής στο δρομέα, στους BLDC κινητήρες χρησιμοποιείται ένα ηλεκτρονικό κύκλωμα ελέγχου οδήγησης, το οποίο αναλαμβάνει τη κατάλληλη διανομή της ισχύος στα τυλίγματα του στάτη. Έτσι, το σύστημα αυτό αποτελεί το ηλεκτρονικό ανάλογο του μηχανικού συστήματος συλλέκτη-ψηκτρών.

Χαρ/κό	Κινητήρας BLDC	Κινητήρας DC με ψήκτρες
Μεταγωγή	Ηλεκτρονική μεταγωγή με τη βοήθεια αισθητήρων θέσης	Μηχανική μεταγωγή με το σύστημα συλλέκτη/ψηκτρών
Συντήρηση	Απαιτείται λιγότερη λόγω απουσίας ψηκτρών	Απαιτείται περιοδική συντήρηση
Διάρκεια ζωής	Μεγαλύτερη	Μικρότερη
Χαρ/κή ροπής-ταχύτητας	Λειτουργία ονομαστικού φορτίου σε κάθε ταχύτητα	Σε υψηλές ταχύτητες, η ροπή εξόδου μειώνεται λόγω αυξημένων μηχανικών απωλειών
Απόδοση	Υψηλή - Χωρίς πτώση τάσης λόγω ψηκτρών	Χαμηλότερη
Αναλογία ισχύος εξ.-μεγέθους	Υψηλή - Μειωμένο μέγεθος λόγω καλύτερων θερμικών χαρ/κών. Τα τυλίγματα βρίσκονται στο στάτη που είναι συνδεδεμένος με τη θήκη, οπότε καλύτερη απαγωγή θερμότητας	Μέτρια - Η θερμότητα που εκλύεται από τον οπλισμό ανεβάζει τη θερμοκρασία στο διάκενο

Πίνακας 2.1: Σύγκριση κινητήρα BLDC - κινητήρα DC με ψήκτρες [1]

2.2.3 Δομή και τύποι κινητήρων BLDC

Ανάλογα με την σχετική τοποθέτηση του δρομέα ως προς το στάτη, διακρίνονται τρεις βασικοί τύποι κινητήρων BLDC: Ο κινητήρας BLDC εξωτερικού δρομέα, στον οποίο ο μόνιμος μαγνήτης βρίσκεται στο εξωτερικό μέρος της μηχανής, τοποθετημένος στο πλαίσιο που περιστρέφεται μαζί με το δρομέα κατά τη λειτουργία. Λόγω της μεγαλύτερης ροπής αδράνειας του δρομέα, αυτή η μορφή κινητήρα συναντάται συνήθως, σε εφαρμογές που απαιτούν υψηλή ροπή σε χαμηλή ταχύτητα, όπως τα ηλεκτρικά ποδήλατα. Η αντίθετη φιλοσοφία εφαρμόζεται στους κινητήρες BLDC εσωτερικού δρομέα (Σχ. 2.1, τον πιο κοινό τύπο ιδιαίτερα σε εφαρμογές υψηλών στροφών. Σε ειδικές πε-

Χαρ/χό	Κινητήρας BLDC	Κινητήρας DC με ψήκτρες
Ροπή αδράνειας δρομέα	Χαμηλή, λόγω μόνιμων μαγνητών. Άρα καλύτερη δυναμική απόκριση	Μεγαλύτερη - Περιορισμένα δυναμικά χαρακτηριστικά
Εύρος ταχυτήτων	Υψηλότερο - Χωρίς περιορισμό λόγω μηχανικής μεταγωγής	Χαμηλότερο λόγω μηχανικών περιορισμών
Παραγωγή Ηλ. Θορύβου	Χαμηλός	Ηλεκτρικά τόξα στις ψήκτρες μπορεί να προκαλέσουν Η/Μ παρεμβολή σε παρακείμενο εξοπλισμό
Κόστος κατασκευής	Υψηλότερο - Λόγω μόνιμων μαγνητών	Χαμηλότερο
Έλεγχος	Πιο σύνθετος	Απλούστερος
Απαιτήσεις για τον έλεγχο	Απαιτείται σύστημα ελέγχου για τη συνεχή λειτουργία του κινητήρα. Το ίδιο σύστημα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για έλεγχο ταχύτητας	Μόνο για έλεγχο ταχύτητας

Πίνακας 2.2: Σύγκριση κινητήρα BLDC - κινητήρα DC με ψήκτρες [1] - συνέχεια

ριπτώσεις περιορισμένου χώρου, συναντάται ο BLDC κινητήρας αξονικής ροής, στον οποίο δρομέας και στάτης είναι επίπεδοι δίσκοι τοποθετημένοι ο ένας απέναντι στον άλλο.

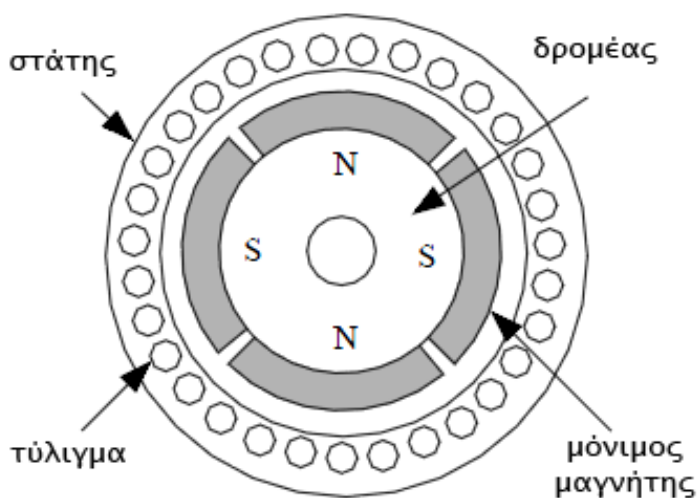
Ως προς τη συνδεσμολογία των τυλιγμάτων του στάτη, ο πιο κοινός τύπος είναι συνδεσμολογίας αστέρα, λόγω τόσο των μειωμένων απωλειών που οδηγούν σε καλύτερη απόδοση, όσο και της βελτίωσης της συμπεριφοράς του κινητήρα ως προς τη ροπή σε χαμηλότερες ταχύτητες.

2.2.4 Στάτης

Ο στάτης ενός κινητήρα BLDC αποτελείται από στοιβαγμένα χαλύβδινα ελάσματα με τυλίγματα τοποθετημένα σε αξονικές τομές στην εσωτερική περιφέρεια. Συνήθως ο στάτης μοιάζει με εκείνον του κινητήρα επαγωγής, όμως τα τυλίγματα του διανέμονται με διαφορετικό τρόπο. Οι περισσότεροι κινητήρες BLDC διαθέτουν τρία τυλίγματα στον στάτη, σε συνδεσμολογία αστέρα. Κάθε ένα από αυτά τα κατασκευάζονται με τη διασύνδεση μεγάλου αριθμού ελιγμάτων χαλκού. Στη συνέχεια κάθε τύλιγμα διανέμεται στην περιφέρεια του στάτη ώστε να σχηματιστεί άρτιος αριθμός πόλων.

Ανάλογα με τον τρόπο διασύνδεσης των τυλιγμάτων του στάτη και κατ' επέκταση τη μορφή της αναπτυσσόμενης ΗΕΔ-αντίδρασης κατά τη λειτουργία, οι κινητήρες διακρίνονται σε ημιτονοειδείς και τραπεζοειδείς, όταν η αναπτυσσόμενη ΗΕΔ-αντίδρασης έχει ημιτονοειδή ή τραπεζοειδή μορφή, αντίστοιχα. Επιπλέον, ανάλογη συμπεριφορά εμφανίζουν και τα ρεύματα φάσης σε κάθε μια από τις δύο περιπτώσεις, με συνέπεια η ροπή στην έξοδο ενός ημιτονοειδούς κινητήρα να εμφανίζει μικρότερη διακύμανση απ' ό,τι στον τραπεζοειδή. Από την άλλη, για την ημιτονοειδή λειτουργία απαιτούνται περισσότερες διασυνδέσεις στα τυλίγματα και άρα αύξηση των απωλειών χαλκού στο στάτη.

Η κατάλληλη επιλογή της ονομαστικής τάσης του στάτη εξαρτάται από την δυνα-



Σχήμα 2.1: Τομή κινητήρα BLDC εσωτερικού δρομέα [1]

τότητα παροχής ισχύος σε κάθε εφαρμογή: Σε εφαρμογές ρομποτικής, στα αυτοκίνητα, επιλέγονται συνήθως ονομαστικές τάσεις έως 48V, ενώ κινητήρες μεγαλύτεροι των 100V απαντώνται σε συσκευές, στον αυτοματισμό και σε βιομηχανικές εφαρμογές.

2.2.5 Δρομέας

Ο δρομέας αποτελείται από ζεύγη πόλων μόνιμου μαγνήτη. Ο αριθμός τους συνήθως κυμαίνεται από ένα έως τέσσερα ζεύγη πόλων βορρά νότου.

Με βάση την απαιτούμενη πυκνότητα μαγνητικού πεδίου στον δρομέα, γίνεται η επιλογή του κατάλληλου μαγνητικού υλικού για την κατασκευή του. Το πιο συνηθισμένο υλικό για την κατασκευή μόνιμων μαγνητών είναι οι φερρομαγνήτες. Με την πρόοδο της τεχνολογίας έχει προχωρήσει η κατασκευή με βάση κράματα σπάνιας γαίας (Nd, SmCo, NdFeB). Αυτά εμφανίζουν πλεονεκτήματα όπως η μεγαλύτερη πυκνότητα μαγνητικής ροής και η καλύτερη αναλογία μεγέθους προς βάρος και οδηγούν σε υλοποιήσεις με αυξημένη ικανότητα ανάπτυξης ροπής στο ίδιο μέγεθος κινητήρα.

2.2.6 Αισθητήρες Hall

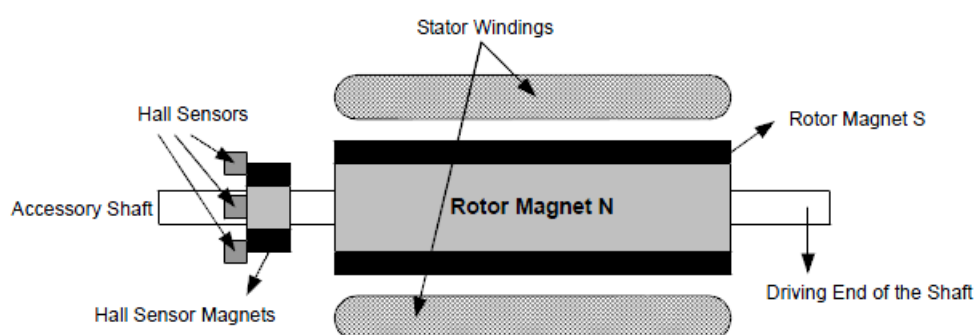
Σε αντίθεση με τον κινητήρα DC, η μεταγωγή σε έναν κινητήρα BLDC γίνεται ηλεκτρονικά. Για την περιστροφή του δρομέα, τα τυλίγματα του στάτη πρέπει να ενεργοποιηθούν με συγκεκριμένη ακολουθία. Για το σκοπό αυτό, πρέπει πάντα να είναι γνωστή η θέση του δρομέα, καθώς με αυτόν τον τρόπο αποφασίζεται ποιο τύλιγμα απενεργοποιείται ή ενεργοποιείται στη συνέχεια για τη διατήρηση του στρεφόμενου μαγνητικού πεδίου, ακριβώς στη ροή της ενδεδειγμένης ακολουθίας. Η ανίχνευση της θέσης του δρομέα γίνεται συνήθως με αισθητήρες θέσης, γνωστούς ως αισθητήρες Hall, οι οποίοι βρίσκονται ενσωματωμένοι στο στάτη.

Οι περισσότεροι κινητήρες BLDC διαθέτουν τρεις τέτοιους αισθητήρες στη μη οδηγούμενη πλευρά του στάτη.

Η λειτουργία τους βασίζεται στο φαινόμενο Hall, το οποίο περιγράφει την ανάπτυξη δύναμης στους φορείς του ηλεκτρικού φορτίου ενός ρευματοφόρου αγωγού που βρίσκεται μέσα σε μαγνητικό πεδίο. Αυτή η δύναμη ωθεί τους φορείς στη μία άκρη του αγωγού, οδηγώντας στη δημιουργία ενός ηλεκτρικού πεδίου προς αντιστάθμιση της μαγνητικής

δύναμης. Έτσι έχουμε τη δημιουργία μετρήσιμης διαφοράς δυναμικού μεταξύ των δύο άκρων του αγωγού.

Κάθε φορά που γίνεται διέλευση των μαγνητικών πόλων του δρομέα κοντά στις περιοχές που είναι τοποθετημένοι οι αισθητήρες Hall, οι τελευταίοι δίνουν ένα σήμα ενδεικτικό του αν έχουμε διέλευση βόρειου ή νότιου μαγνητικού πόλου. Με την ανάγνωση και την αποκωδικοποίηση του συνδυασμού των τριών σημάτων των αισθητήρων Hall, καθίσταται δυνατή η ορθή ακολουθία για την ηλεκτρονική μεταγωγή.



Σχήμα 2.2: Εγκάρσια τομή κινητήρα BLDC [1]

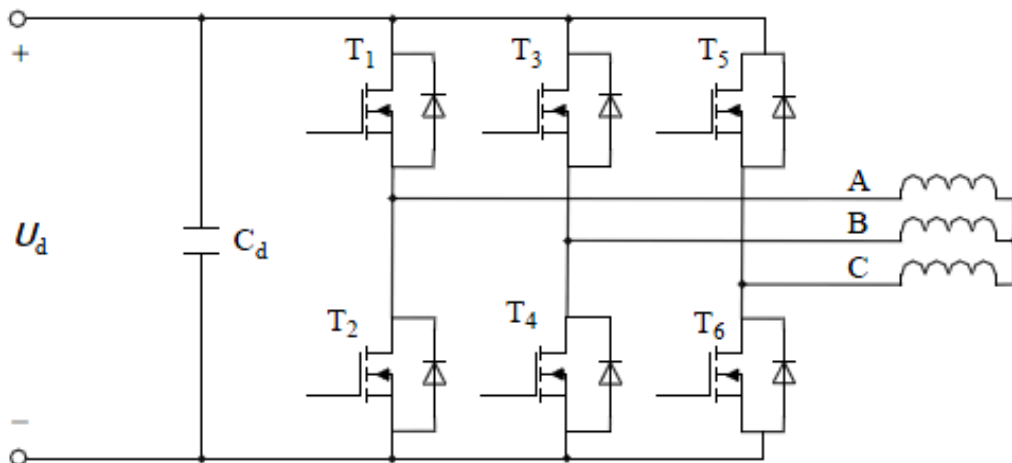
Στο Σχ. 2.2 παρουσιάζεται μια εγκάρσια τομή ενός κινητήρα BLDC με δρομέα στον οποίο εναλλάσσονται οι βόρειοι και οι νότιοι μαγνητικοί πόλοι μόνιμου μαγνήτη. Οι αισθητήρες Hall τοποθετούνται στο σταθερό τμήμα της μηχανής. Η τοποθέτησή τους είναι μια λεπτομερής διαδικασία στην οποία η παραμικρή απόκλιση θα οδηγήσει σε λανθασμένη ανάγνωση της θέσης του δρομέα. Ορισμένοι κινητήρες κατασκευάζονται με επιπρόσθετους ειδικούς μαγνήτες μικρότερης κλίμακας στο δρομέα, για την καλύτερη συνεργασία με τους αισθητήρες Hall.

2.2.7 Τριφασικός αντιστροφέας

Η πιο κοινή μορφή τριφασικού συστήματος ισχύος που χρησιμοποιείται για την οδήγηση BLDC κινητήρα είναι η γέφυρα έξι στοιχείων (Full-Bridge - Σχ. 2.3) σε λειτουργία αγωγής 120° (δύο φάσεων). Αυτή η λειτουργία επιτυγχάνεται με την ταυτόχρονη αγωγή δύο φάσεων ενώ η τρίτη βρίσκεται σε αποκοπή. Η σειρά και ο χρόνος έναυσης της αγωγής καθορίζεται από τη θέση του δρομέα η οποία λαμβάνεται από τους αισθητήρες

θέσης. Υπό αυτές τις συνθήκες, το δημιουργούμενο στο στάτη στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο είναι στην πραγματικότητα βηματικό και όχι συνεχές. Ο αντιστροφέας περνάει στο επόμενο στάδιο της μεταγωγής κάθε φορά που ο δρομέας στρέφεται κατά 60 ηλεκτρικές μοίρες, οπότε και αλλάζει το αναπτυσσόμενο πεδίο στο στάτη. Σε μια πλήρη ηλεκτρική περιστροφή, υπάρχουν έξι καταστάσεις διαδοχής που αντιστοιχούν σε έξι μαγνητικές καταστάσεις στο πεδίο του στάτη, ενώ σε κάθε κατάσταση τα τυλίγματα δύο μόνο φάσεων βρίσκονται σε κατάσταση αγωγής, οπότε κάθε τυλίγμα διαρρέεται από ρεύμα για 120 ηλεκτρικές μοίρες σε κάθε περιστροφή του πεδίου του στάτη.

Στη λειτουργία αγωγής δύο φάσεων, μόνο ένα από τα πάνω και ένα από τα κάτω διακοπτικά στοιχεία της γέφυρας βρίσκεται σε κατάσταση αγωγής. Έτσι, το ρεύμα διαρρέει το ενεργό στοιχείο της άνω ήμι-γέφυρας προς την κατεύθυνση του τυλίγματος της μίας φάσης, με αποτέλεσμα τη ανάπτυξη ροπής. Στο υπόλοιπο ήμι-κύκλωμα, έχουμε την ανάπτυξη μιας ακόμα συνιστώσας ροπής, από το ρεύμα που ρέει στην κατεύθυνση από την αρνητικά ενεργή φάση διαμέσου του ενεργού στοιχείου της κάτω ήμι-γέφυρας. Το άθροισμα αυτών των συνιστωσών είναι η επαγόμενη ροπή στο διάκενο που περιστρέφεται κατά 60 ηλεκτρικές μοίρες σε κάθε στάδιο της μεταγωγής.



Σχήμα 2.3: Τριφασικός αντιστροφέας για οδήγηση κινητήρα BLDC [2]

2.3 Αρχή λειτουργίας - Λειτουργικά χαρακτηριστικά

Η λειτουργία των κινητήρων BLDC εμφανίζει σε μεγάλο βαθμό ομοιότητες με εκείνη των σύγχρονων μηχανών. Πρόκειται περίπου για την ίδια αρχή λειτουργίας η οποία στηρίζεται στη δημιουργία στρεφόμενου μαγνητικού πεδίου. Στην περίπτωση του κινητήρα BLDC τη διατήρηση αυτής της συνθήκης αναλαμβάνει, η διαδικασία της ηλεκτρονικής μεταγωγής, η οποία επιτυγχάνεται με τη βοήθεια του αντιστροφέα.

2.3.1 Το στρεφόμενο πεδίο

Το αποτέλεσμα της ύπαρξης δύο μαγνητικών πεδίων σε μία μηχανή είναι η ανάπτυξη ροπής η οποία θα τείνει να ευθυγραμμίσει τα δύο μαγνητικά πεδία. Πιο συγκεκριμένα, στην περίπτωση του συστήματος στάτη-δρομέα, η επαγόμενη ροπή θα οδηγήσει σε περιστροφή το δρομέα, ώστε το μαγνητικό του πεδίο να ευθυγραμμιστεί με εκείνο του στάτη.

Το επόμενο λογικό βήμα είναι προς την κατεύθυνση της διατήρησης αυτής της κατάστασης με σκοπό τη συνεχή περιστροφή του δρομέα και άρα τη λειτουργία του κινητήρα. Αυτό μπορεί να γίνει με την ανάπτυξη συνεχώς στρεφόμενου πεδίου στο στάτη, ώστε παρότι ο δρομέας να τείνει να ευθυγραμμιστεί, ο στάτης να βρίσκεται ένα βήμα μπροστά από άποψη μαγνητικής κατάστασης και έτσι να μη σταματά ο δρομέας.

Το στρεφόμενο πεδίο στον οπλισμό της μηχανής αναπτύσσεται με την τροφοδοσία των τυλιγμάτων με ένα τριφασικό σύστημα ρευμάτων ίδιου πλάτους και διαφοράς φάσης 120° . Σε αυτήν την κοινή αρχή οφείλεται η συγγένεια των κινητήρων BLDC με τους σύγχρονους κινητήρες. Για την ακρίβεια, πολύ συχνά στη βιβλιογραφία, ο κινητήρας BLDC εναλλακτικά απαντάται ως το ένα από τα δύο είδη σε μία κατηγορία σύγχρονων μηχανών, τους σύγχρονους κινητήρες μόνιμου μαγνήτη (Permanent Magnet Synchronous Motor - PMSM). Ο διαχωρισμός των δύο τύπων γίνεται με βάση την αναπτυσσόμενη ΗΕΔ-αντίδρασης: Στην περίπτωση ΗΕΔ-αντίδρασης ημιτονοειδούς μορφής ο κινητήρας πολλές φορές καλείται Σύγχρονος κινητήρας μόνιμου μαγνήτη εναλλασσόμενου ρεύματος (PMACSM). Στην περίπτωση, της τραπεζοειδούς κυματομορφής ο εναλλακτικός όρος είναι PMDCSM, που ανταναχλά και τη συνεχή τροφοδοσία του τυλίγματος σε κάθε

περίοδο αγωγής του. Αν και η σχεδίασή των δύο αυτών τύπων κινητήρων είχε διαφορετική αφετηρία, τελικά η βασική κατασκευαστική δομή είναι ίδια και στους δύο. Βέβαια υπάρχουν διαφορές οι οποίες καθορίζουν τη διαφορετική συμπεριφορά κάθε τύπου.

Ο κινητήρας PMACSM προέκυψε από την προσπάθεια κατασκευής μιας σύγχρονης μηχανής χωρίς τύλιγμα πεδίου. Αυτό επετεύχθη αντικαθιστώντας την ημιτονοειδή κατανομή του πεδίου διακένου του δρομέα των σύγχρονων μηχανών με μαγνήτες με επίσης ημιτονοειδή χωρική κατανομή μαγνητικού πεδίου. Ο στάτης της μηχανής PMACSM είναι ανάλογος του στάτη της σύγχρονης μηχανής, δηλαδή αποτελείται από τριφασικό τύλιγμα ημιτονοειδούς κατανομής. Πρέπει να τροφοδοτείται από ημιτονοειδή τριφασικά ρεύματα για να παράγεται σταθερή ροπή. Όσον αφορά τη συχνότητα μπορεί να μεταβάλλεται ώστε να ελέγχεται η ταχύτητα. Ο κινητήρας BLDC προέκυψε από την προσπάθεια να εξαλειφθεί ο συλλέκτης από τη μηχανή συνεχούς ρεύματος. Τοποθετώντας μαγνήτες στο δρομέα με τραπεζοειδή κατανομή μαγνητικής έντασης (όπως και το πεδίο του στάτη του κινητήρα DC) και ένα τριφασικό τύλιγμα με τριγωνική κατανομή μαγνητικής έντασης διακένου στο στάτη (όπως και το τύλιγμα του δρομέα του κινητήρα DC) προέκυψε η αντιστροφή του κινητήρα DC. Από τα παραπάνω είναι φανερό ότι οι κινητήρες PMACSM και BLDC μπορούν να θεωρηθούν σαν σύγχρονες μηχανές με μη μεταβαλλόμενο πεδίο διέγερσης (μαγνήτες) στο δρομέα, αλλά με διαφορετική χρονική κατανομή ρευμάτων τροφοδοσίας και χωρική κατανομή των τυλιγμάτων του στάτη και του πεδίου του δρομέα. Επίσης προκύπτει ότι και η χωρική κατανομή του πεδίου αλλά και η χρονική κατανομή της ΗΕΔ αντίδρασης του στάτη θα είναι διαφορετικές. Ημιτονοειδείς κατανομές για τον PMACSM και τραπεζοειδείς για τον BLDC.

2.3.2 ΗΕΔ-Αντίδρασης

Κατά την περιστροφή του δρομέα ενός κινητήρα BLDC, στα άκρα του τυλιγματος αναπτύσσεται ένα είδος επαγόμενης τάσης που αντιτίθεται στην τάση τροφοδοσίας, γνωστής ως ΗΕΔ-αντίδρασης (Back-EMF)(Σχ. 2.4). Η εμφάνιση της βασίζεται στο φαινόμενο της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής, δηλαδή της εμφάνισης τάσης εξ επαγωγής στα άκρα αγωγού που καθώς κινείται εντός σταθερού μαγνητικού πεδίου τέμνει τις δυναμικές γραμμές του. Αν και στον κινητήρα BLDC τα αγωγή τυλίγματα βρί-

σκονται στο στάτη, και άρα δεν κινούνται, αλληλεπιδρούν με το μαγνητικό πεδίο του δρομέα, οπότε είναι ακριβώς η σχετική κίνηση του μαγνητικού πεδίου του δρομέα και των αγώγιμων τυλιγμάτων του στάτη που προκαλεί την εμφάνιση αυτού του φαινομένου. Η αντίθετη πολικότητα σε σχέση με την τάση διέγερσης οφείλεται στο νόμο του Lenz.

Με βάση τον νόμο του Faraday που περιγράφει μαθηματικά το φαινόμενο της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής, η ΗΕΔ-αντίδρασης, ως μια μορφή ηλεκτρεγερτικής δύναμης εξαρτάται από την ένταση και την ταχύτητα περιστροφής του μαγνητικού πεδίου (δρομέα), καθώς και τον αριθμό των ελιγμάτων του πηνίου. Στην περίπτωση μιας πραγματικής μηχανής BLDC, μετά την κατασκευή της, η μεταβολή του μαγνητικού πεδίου του δρομέα σε σχέση με τη γωνία περιστροφής και ο αριθμός των ελιγμάτων είναι κατασκευαστικά δεδομένα και αμετάβλητα. Επομένως το πλάτος της ΗΕΔ-αντίδρασης εξαρτάται μόνο από την ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα. Έτσι, όταν ο κινητήρας είναι ακίνητος, δεν έχουμε εμφάνιση ΗΕΔ-αντίδρασης, αλλά με την επιτάχυνση του κινητήρα, αυξάνεται και η ΗΕΔ-αντίδρασης.

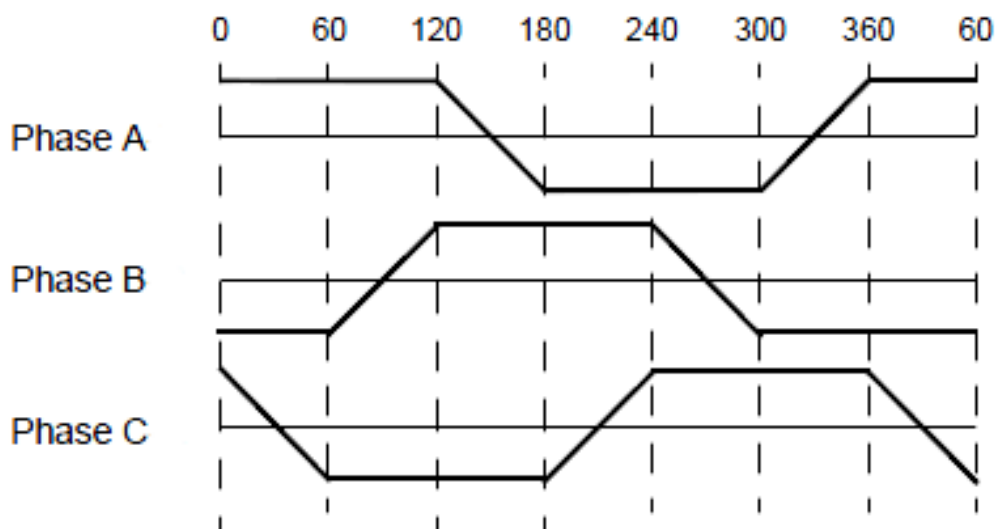
Επιπλέον, λόγω αυτής της σχέσης και της διαφοράς στην πολικότητα μεταξύ τάσης τροφοδοσίας και ΗΕΔ-αντίδρασης, είναι εμφανές ότι η μεταβολή της παραγόμενης διαφοράς δυναμικού επηρεάζει από κυκλωματικής άποψης το ρεύμα φάσης. Σε μία κατασκευασμένη μηχανή BLDC η σχετική σταθερά περιγράφει τη σχέση μεταξύ ΗΕΔ-αντίδρασης και ταχύτητας, και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον σχετικό υπολογισμό.

Αναφορικά με τη σχέση της σταθεράς αυτής και των λοιπών ονομαστικών στοιχείων λειτουργίας ενός πραγματικού κινητήρα BLDC, ο κινητήρας BLDC σχεδιάζεται με τέτοια σταθερά, ώστε ως την ονομαστική ταχύτητα, η προκύπτουσα διαφορά δυναμικού στα τυλίγματα να είναι τέτοια που να επιτρέπει τη φόρτιση με ονομαστικό ρεύμα και άρα ονομαστική ροπή. Ο κινητήρας BLDC μπορεί να οδηγηθεί με μεγαλύτερη τάση τροφοδοσίας σε πολύ υψηλότερες ταχύτητες από την ονομαστική, όμως σε αυτές τις περιοχές λειτουργίας η αύξηση της ΗΕΔ-αντίδρασης είναι τέτοιου βαθμού, που περιορίζει το ρεύμα και άρα τη ροπή στην έξοδο.

2.3.3 Ηλεκτρονική μεταγωγή - Οδήγηση του κινητήρα BLDC

Στο Σχ. 2.5 παρουσιάζεται ένα ολοκληρωμένο παράδειγμα λειτουργίας των αισθητήρων Hall και των σημάτων που παράγουν σε σχέση με τις κυματομορφές των πολικών ΗΕΔ-αντίδρασης, του ρεύματος κάθε φάσης και της ροπής. Όπως φαίνεται από το διάγραμμα, τα σήματα των αισθητήρων Hall δημιουργούν έξι διαφορετικούς συνδυασμούς που αντιστοιχούν στην ορθή χρονικά και σειριακά αγωγή των φάσεων, που είναι απαραίτητη για τη λειτουργία της μηχανής. Αλλαγές στην κατάσταση ενός από τους αισθητήρες Hall συμβαίνουν κάθε 60 ηλεκτρικές μοίρες, χάριν τόσο της αρχής λειτουργίας τους αναλύθηκε στα προηγούμενα όσο και της ακριβώς συμμετρικής τοποθέτησης τους. Όσο αφορά την μηχανική περιστροφή του δρομέα, ο αριθμός των ζευγών πόλων του κινητήρα καθορίζει πόσες φορές μεγαλύτερη είναι η ηλεκτρική γωνία/ταχύτητα από τη μηχανική.

Η ακριβής σχέση μεταξύ ηλεκτρικής γωνίας και σημάτων Hall του προηγούμενου παραδείγματος αποτυπώνεται στα στοιχεία του Πιν. 2.3. Σε κάθε διάστημα η αλλαγή τιμής ενός εκ των σημάτων Hall πρέπει να μεταφράζεται σε αλλαγή των φάσεων αγωγής από τον τριφασικό αντιστροφέα, με τρόπο που να διατηρείται η ορθή διαδοχή διέγερσης. Η αποκωδικοποίηση μπορεί να γίνει με χρήση λογικής για την παραγωγή των σημάτων έναυσης/διακοπής των πυλών των διακοπτικών στοιχείων του αντιστροφέα. Η λογική για κίνηση με ωρολογιακή φορά που αντιστοιχεί στο παράδειγμα που εξετάζεται εδώ,



Σχήμα 2.4: Τραπεζοειδής ΗΕΔ-αντίδρασης κινητήρα BLDC [1]

παρουσιάζεται στον Πιν. 2.4.

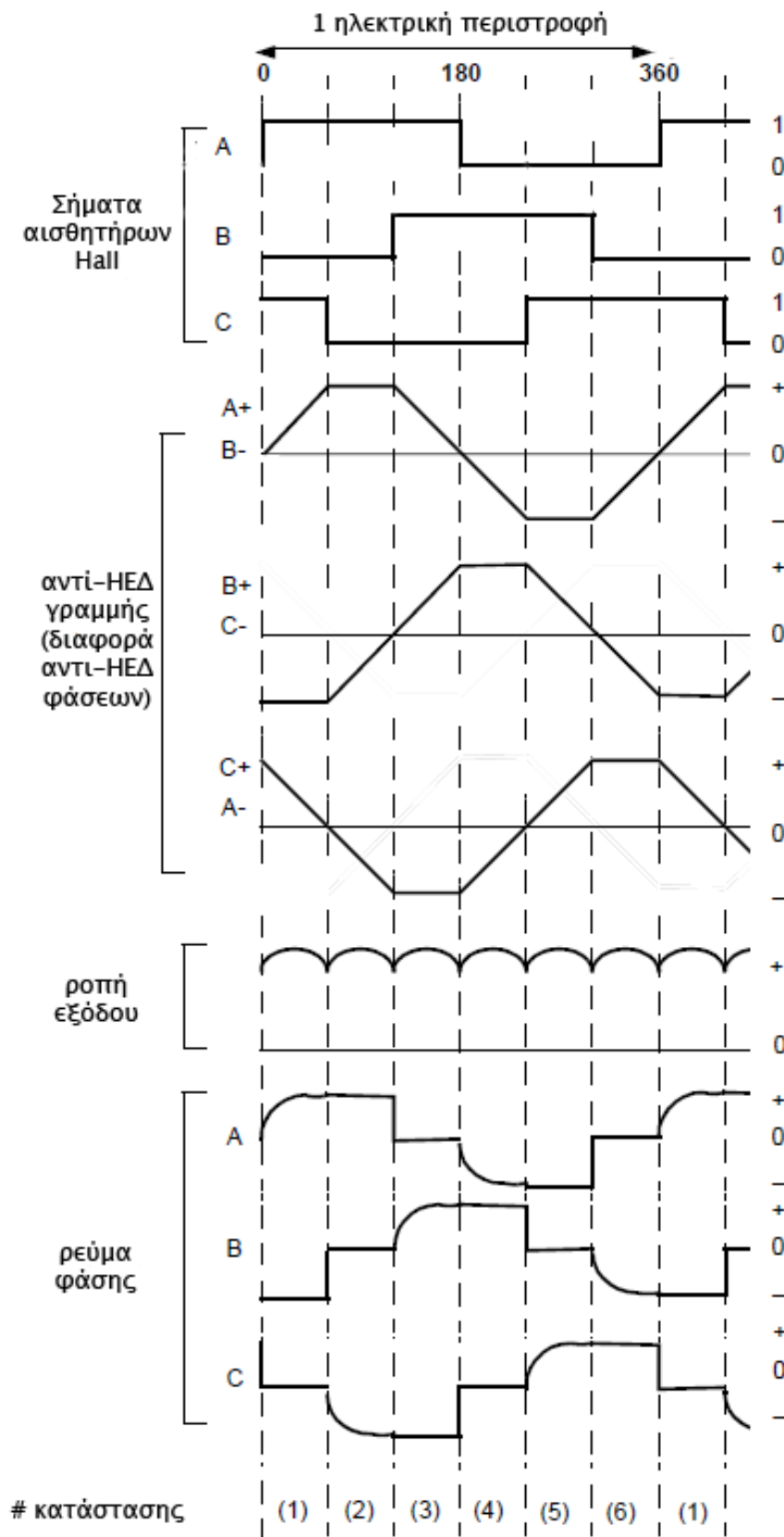
Ο έλεγχος των σημάτων οδήγησης των στοιχείων του τριφασικού αντιστροφέα προσφέρει επίσης τη δυνατότητα ελέγχου της ταχύτητας με την εφαρμογή της διαμόρφωσης εύρους παλμών (PWM control) σε αυτά ακριβώς τα σήματα, που προορίζονται για την PWM οδήγηση του κινητήρα. Έτσι, όταν ένας κλάδος της ήμι-γέφυρας είναι σε κατάσταση αγωγής, το διακοπτικό στοιχείο δεν παραμένει ενεργό σε όλη την περίοδο αγωγής, αλλά διαμορφώνεται σε παλμούς πολύ υψηλότερης συχνότητας. Έτσι η ενεργός τροφοδοσία κατά την περίοδο αγωγής μειώνεται, και ανάλογα μειώνεται η ταχύτητα. Με αυτόν τον τρόπο μπορούμε να ελέγξουμε την ταχύτητα του κινητήρα υπό ονομαστική τάση DC τροφοδοσίας. Αυτή η τεχνική μπορεί να φανεί χρήσιμη ειδικά σε περιπτώσεις όπου δεν είναι διαθέσιμος ο εξωτερικός έλεγχος της τάσης τροφοδοσίας. Ένα ακόμα πλεονέκτημα αυτής της τεχνικής, είναι η δυνατότητα σύνδεσης κινητήρα με DC τάση τροφοδοσίας μεγαλύτερη από την ονομαστική τάση λειτουργίας του. Με τη ρύθμιση του Duty Cycle έτσι ώστε η ενεργός τάση να ταιριάζει με την ονομαστική του κινητήρα, είναι δυνατή η λειτουργία σε ονομαστικά μεγέθη.

θ_e	h_a	h_b	h_c	# Κατάστασης
$0^\circ - 60^\circ$	1	0	1	1
$60^\circ - 120^\circ$	1	0	0	2
$120^\circ - 180^\circ$	1	1	0	3
$180^\circ - 240^\circ$	0	1	0	4
$240^\circ - 300^\circ$	0	1	1	5
$300^\circ - 360^\circ$	0	0	1	6

Πίνακας 2.3: Ενδεικτικός πίνακας σημάτων Hall σε σχέση με την ηλεκτρική γωνία

2.4 Έλεγχος ταχύτητας/θέσης

Ο έλεγχος ταχύτητας σε κινητήρες BLDC κατέχει σημαντικό ρόλο στη σύγχρονη θεωρία ελέγχου κινητήρων. Οι μέθοδοι ελέγχου συνήθως χωρίζονται σε 2 κύριες κατηγορίες: στο έλεγχο ανοιχτού βρόγχου και στον έλεγχο κλειστού βρόγχου. Συχνά



Σχήμα 2.5: Έξι βήματα διαδοχής μεταγωγής και αντίστοιχες κυματομορφές

T_1	T_2	T_3	T_4	T_5	T_6	h_a	h_b	h_c	Κατάσταση
on	off	off	on	off	off	1	0	1	1
on	off	off	off	off	on	1	0	0	2
off	off	on	off	off	on	1	1	0	3
off	on	on	off	off	off	0	1	0	4
off	on	off	off	on	off	0	1	1	5
off	off	off	on	on	off	0	0	1	6

Πίνακας 2.4: Σχέση στοιχείων αντιστροφεία και σημάτων Hall

συναντώνται συστήματα που εφαρμόζουν ταυτόχρονα και τις δύο αυτές τεχνικές. Ο εσωτερικός βρόγχος ελέγχου είναι ο βρόγχος ρεύματος ή ροπής, ενώ ο εξωτερικός βρόγχος είναι ο αντίστοιχος βρόγχος ταχύτητας και τάσης. Όταν ο κινητήρας βρίσκεται σε κανονική λειτουργία ή τρέχει κάτω από ονομαστική ταχύτητα, τότε η τάση εισόδου του οπλισμού αλλάζει μέσω της στρατηγικής διαμόρφωσης PWM. Όταν ο κινητήρας λειτουργεί με ταχύτητα μεγαλύτερη της ονομαστικής, συνήθως μειώνουμε τη ροή δηλαδή μειώνουμε το προχωρημένο ρεύμα ή την βοηθητική ροή έτσι ώστε να πετύχουμε το στόχο. Ένα σύστημα ελέγχου ταχύτητας σε BLDC κινητήρα γενικά περιλαμβάνει αρκετές τεχνικές. Σε αυτό την ενότητα, κυρίως εστιάζουμε στην πραγματοποίηση του διπλού συστήματος ανοιχτού και κλειστού συστήματος ελέγχου ταχύτητας, δηλαδή μια ευφυή στρατηγική ελέγχου ταχύτητας, και την επίδραση των χρονικά μεταβαλλόμενων παραμέτρων του κινητήρα (αντιστάσεις, επαγωγές και τη ροπή αδράνειας) στον νόμο ελέγχου ταχύτητας του κινητήρα.

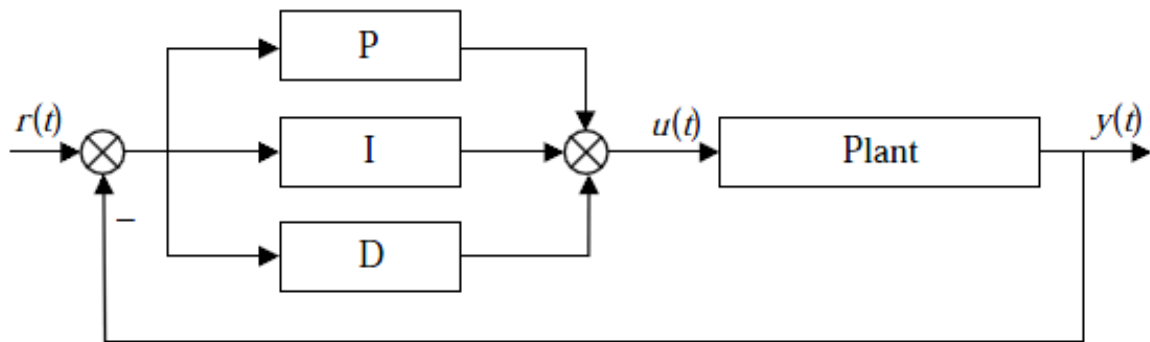
2.4.1 Τεχνική Ελέγχου PID

Η παραδοσιακή στρατηγική ελέγχου PID έχει αναγνωριστεί ως η πιο πολυχρησιμοποιημένη στρατηγική ελέγχου σε γραμμικά συστήματα ελέγχου για πάνω από 70 χρόνια. Η συνήθης χρήση της είναι κυρίως σε βιομηχανικά συστήματα ελέγχου. Ο ελεγκτής PID έχει χρησιμοποιηθεί ευρέως σε βιομηχανικές εφαρμογές εξαιτίας της απλότητας του, της ευρωστίας, αξιοπιστίας και εύκολης ρύθμισης παραμέτρων. Η τυπική δομή του PID ελέγχου φαίνεται στο Σχ. 2.6. Ο κοινός PID ελεγκτής υπολογίζει το σφάλμα $e(t)$ μεταξύ

της τιμής αναφοράς και της πραγματικής τιμής. Στη συνέχεια, το σύστημα ελέγχεται από τη μεταβλητή ελέγχου $u(t)$ μέσω ενός γραμμικού συνδυασμού ενός αναλογικού-ολοκληρωτικού-διαφορικού όρου. Ο αντίστοιχος PID ελεγκτής σε αναλογική μορφή γράφεται ως

$$u(t) = K_p \left(e(t) + \frac{1}{T_I} \int_0^t e(t) dt + T_D \frac{de(t)}{dt} \right) \quad (2.1)$$

όπου K_p είναι το αναλογικό κέρδος, T_I είναι η ολοκληρωτική σταθερά χρόνου και T_D είναι η σταθερά χρόνου διαφορίσης.



Σχήμα 2.6: Σύστημα PID ελέγχου [2]

Στα συστήματα ελέγχου που χρησιμοποιούνται στην πράξη, δεν έχουν όλοι οι ελεγκτές PID και τους τρεις όρους που αναφέρθηκαν προηγουμένως. Οι ελεγκτές PID περιέχουν διάφορες δομές, όπως για παράδειγμα ο ελεγκτής με μόνο ο αναλογικό όρο, ο ελεγκτής με αναλογικό και ολοκληρωτικό όρο και ο ελεγκτής με αναλογικό και διαφορικό όρο κ.ο.κ.. Μεταξύ αυτών, ο ελεγκτής με αναλογικό - ολοκληρωτικό όρο είναι ο πιο ευρέως διαδεδομένος στα συστήματα ελέγχου BLDC κινητήρων. Ο διαφορικός όρος μπορεί να μειώσει αποδοτικά την υπερπήδηση και τη μέγιστη δυναμική απόκλιση, αλλά θα κάνει προς έλεγχο σύστημα πιο ευάλωτο από διαταραχές υψηλών συχνοτήτων.

Προκειμένου να βελτιώσουμε την αξιοπιστία του συστήματος, ένας διακριτός ελεγκτής PID χρησιμοποιείται συχνά στα σύγχρονα συστήματα αυτομάτου ελέγχου. Σε αυτή την περίπτωση, ο αλγόριθμος του αναλογικού ελεγκτή PID δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί απευθείας καθώς η εξίσωση (2.1) δεν μπορεί να διακριτοποιηθεί. Η εξίσωση διαφορών ενός διακριτού νόμο ελέγχου PID, η οποία είναι επίσης γνωστή ως αλγόριθμος

PID ελεγκτή θέσης, μπορεί να διεξαχθεί ως

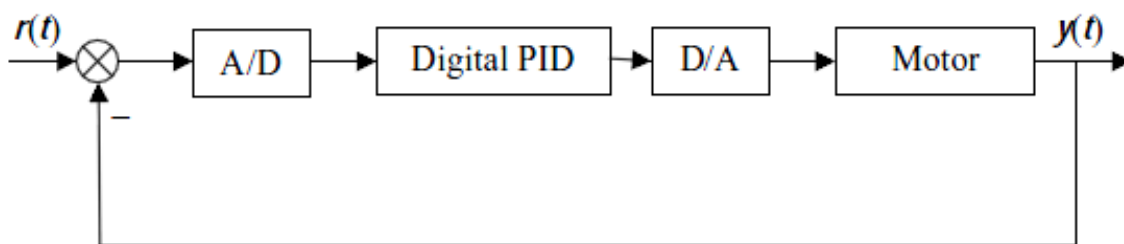
$$\begin{aligned}
 u(k) &= K_P \left[e(k) + \frac{T}{T_I} \sum_{j=0}^k e(j) + \frac{T_D}{T} (e(k) - e(k-1)) \right] \\
 &= K_P e(k) + \sum_{j=0}^k e(j) + K_D (e(k) - e(k-1)) \quad (2.2)
 \end{aligned}$$

όπου ο όρος υποδηλώνει τη σταθερά ολοκληρωτικού όρου, ο όρος K_D τη σταθερά διαφορικού όρου, T είναι η περίοδος δειγματοληψίας, $e(k), e(k-1)$ είναι τα σφάλματα των εισόδων στο σύστημα τη χρονική στιγμή και στη χρονική στιγμή $k-1$ αντίστοιχα. Ένας τυπικός διακριτός ελεγκτής PID απεικονίζεται στο Σχ. 2.7.

Στα διακριτά συστήματα ελέγχου κινητήρων, ο νόμος ελέγχου PID εκφράζεται από την εξίσωση (2.2). Ωστόσο ο νόμος αυτός μπορεί να επάγει μεγάλο σφάλμα στην είσοδο και δεν έχει επιθυμητή επίδοση στην έξοδο. Επομένως, ο οριακός νόμος ελέγχου PID βασίζεται στην αναδρομική αρχή που μπορεί να υιοθετηθεί ως

$$\begin{aligned}
 \Delta u(k) &= u(k) - u(k-1) \\
 &= K_P (e(k) - e(k-1)) + K_I e(k) + K_D (e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)) \quad (2.3)
 \end{aligned}$$

Συγκρίνοντας τις εξισώσεις (2.2),(2.3) μπορούμε να βρούμε ότι η υπολογιστική πολυπλοκότητα ενός οριακού βρόγχου ελέγχου PID είναι πολύ μικρότερη. Επιπλέον, ο PID ελεγκτής θέσης που φαίνεται στην εικόνα 2.7 μπορεί να εξαχθεί από την εξίσωση (2.3).



Σχήμα 2.7: Σύστημα PID ελέγχου ηλεκτρικού κινητήρα [2]

Όταν η δομή του ελεγκτή PID προσδιοριστεί, οι παράμετροί του πρέπει να ρυθμιστούν. Οι μέθοδοι ρύθμισης των παραμέτρων του PID ελεγκτή μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον προσδιορισμό των παραμέτρων ενός ψηφιακού ελεγκτή PID. Σε επίπεδο

εφαρμογής, πρώτα ρυθμίζεται ο αναλογικός όρος, στη συνέχεια ο ολοκληρωτικός όρος και τελικά ο όρος του διαφοριστή. Για έναν ελεγκτή PI, μια μέθοδος ρύθμισης των παραμέτρων είναι να θέσουμε αρχικά τον ολοκληρωτικό όρο ίσο με μηδέν, στη συνέχεια να αυξήσουμε τον αναλογικό όρο μέχρι η απόκριση του συστήματος να είναι σε επιθυμητή και ευσταθής κατάσταση και στη συνέχεια να αυξήσουμε τον ολοκληρωτικό όρο μέχρι να βελτιώσουμε την δυναμική απόκριση του συστήματος καθώς και στην στατική ευστάθεια. Αξίζει να σημειωθεί ότι η επιλογή αυτών των τριών παραμέτρων δεν είναι απομονωμένη. Προκειμένου να εξασφαλίσουμε τη βέλτιστη επίδοση του ελέγχου, πρέπει οι τρεις αυτοί παράμετροι να αξιοποιηθούν συνολικά κατά τη διαδικασία της ρύθμισης. Η επίδοση του συστήματος εξαρτάται επίσης από την επιλογή του χρόνου δειγματοληψίας T , έτσι ώστε ο σχεδιαστής να μπορεί να την επιλέξει σωστά. Σύμφωνα με το θεώρημα δειγματοληψίας του Shannon, η συχνότητα δειγματοληψίας πρέπει να είναι μεγαλύτερη ή ίση από το διπλάσιο της μέγιστης συχνότητας του δειγματοληπτημένου σήματος έτσι ώστε να ανακτηθεί το διακριτό σήμα από το αρχικό του αναλογικό σήμα. Με βάση αυτή τη συνθήκη, όσο μικρότερη είναι η περίοδος δειγματοληψίας, τόσο καλύτερη είναι η επίδοση του δειγματοληπτημένου αναλογικού συστήματος ελέγχου. Για τα συστήματα ελέγχου κλειστού βρόγχου, και ειδικότερα για τα συστήματα ελέγχου ταχύτητας κινητήρα, ο ελεγκτής συνήθως σχεδιάζεται έτσι ώστε να ανιχνεύει γρήγορα τη μεταβολή της ταχύτητας του κινητήρα. Επομένως, η περίοδος δειγματοληψίας πρέπει να είναι όσο το δυνατόν μικρότερη, ενώ η συχνότητα δειγματοληψίας να είναι αρκετά μεγάλη. Σε πρακτικές εφαρμογές, λαμβάνοντας τη συχνότητα λειτουργίας του μικροεπεξεργαστή, τη συχνότητα έναυσης των ηλεκτρονικών ισχύος, τη χρονική καθυστέρηση των αισθητήρων και τον περιορισμό της μετατροπής του Αναλογικού σε Ψηφιακού και του Ψηφιακού σε Αναλογικό, η περίοδος δειγματοληψίας δεν μπορεί να είναι αρκετά μικρή. Ως εκ τούτου, ο σχεδιαστής του συστήματος πρέπει να επιλέξει την περίοδο δειγματοληψίας σύμφωνα με τις συγκεκριμένες περιστάσεις. Ας συμβολίσουμε το χρόνο ανόδου της απόκρισης του συστήματος με T_r και τη συχνότητα δειγματοληψίας με N_r . Μια απλή εμπειρική σχέση για την εκτίμηση της περιόδου δειγματοληψίας T είναι η

$$N_r = \frac{T_r}{T} \quad (2.4)$$

Συγκρίνοντας τα συστήματα ελέγχου διακριτού χρόνου με τα αντίστοιχα συστήματα

συνεχούς χρόνου τα τελευταία έχουν τα εξής πλεονεκτήματα

- (1) Οι ψηφιακές συσκευές έχουν μεγαλύτερη αξιοπιστία, είναι πιο ευέλικτες και πιο ευσταθής συγκριτικά με τις αναλογικές συσκευές
- (2) Ένα σύστημα ελέγχου διακριτού χρόνου έχει πιο αποτελεσματικό στην αντιμετώπιση των διαταραχών
- (3) Ένα σύστημα ελέγχου διακριτού χρόνου είναι πιο ευέλικτο, το οποίο έχει μεγαλύτερη ακρίβεια κατά τον έλεγχο και μπορεί να εφαρμόσει σύνθετους αλγορίθμους ελέγχου εύκολα
- (4) Ένα σύστημα ελέγχου διακριτού χρόνου είναι πιο κατάλληλο στην επικοινωνία σε εφαρμογές υψηλού επιπέδου και στον απομακρυσμένο έλεγχο έτσι ώστε να μπορεί να κατασκευαστεί ένα καταναμημένο δίκτυο ελέγχου

2.5 Μέθοδοι ελέγχου χωρίς αισθητήρα

2.5.1 Η ανάγκη για συστήματα χωρίς αισθητήρες

Η οδήγηση του BLDC κινητήρα απαιτεί την χρήση αισθητήρων θέσης και ρεύματος. Ταυτόχρονα όμως η εξάλειψη τους από το σύστημα και η μετάβαση σε λειτουργικές υλοποιήσεις χωρίς χρήση αισθητήρων (sensorless) είναι επιθυμητή σε πολλές εφαρμογές, κυρίως για λόγους κόστους, πρακτικής/κατασκευαστικής απλότητας αλλά και λειτουργίας σε συνθήκες ακατάλληλες για την ορθή λειτουργία των αισθητήρων. Επιπλέον, για τους λόγους που αναλύονται στα επόμενα, η έρευνα για την ανάπτυξη των εν λόγω συστημάτων επικεντρώνεται κυρίως στην απαλοιφή του αισθητήρα θέσης.

Σε αντίθεση με τα κυκλώματα ανίχνευσης ρεύματος τα οποία αποτελούν μέρος του ηλεκτρονικού κυκλώματος οδήγησης του κινητήρα (συστήματα ελέγχου και τροφοδοσίας ισχύος), οι αισθητήρες θέσης βρίσκονται μέσα στον κινητήρα και γι αυτό απαιτούν πολυπλοκότερο κατασκευαστικό σχεδιασμό. Η ορθή λειτουργία του συνολικού συστήματος εξαρτάται από την ακριβή τοποθέτηση τους στον κινητήρα, μια αξιοσημείωτα λεπτομερής διαδικασία.

Τα όρια της περιοχής λειτουργίας του αισθητήρων θέσης, περιορίζουν τη χρήση της

μηχανής. Αν για παράδειγμα υποθέσουμε λειτουργία σε συνθήκες αυξημένης θερμοκρασίας, έξω από τα όρια ακριβής λειτουργίας του αισθητήρα, δε θα γίνει στη συνέχεια ορθά η ανάγνωση της θέσης από το κύκλωμα ελέγχου και συνεπακόλουθα ούτε η προβλεπόμενη οδήγηση, με ανεπιθύμητα αποτελέσματα στη λειτουργία του κινητήρα.

Στα παραπάνω πρέπει να συνυπολογιστεί το όφελος από τη μείωση του κόστους στις sensorless υλοποιήσεις, παράγοντας ο οποίος έχει ακόμη μεγαλύτερο βάρος τόσο σε περιπτώσεις παραγωγών μεγάλης κλίμακας, όσο και σε περιπτώσεις όπου η απαίτηση για υλοποιήσεις χαμηλού κόστους είναι βασικός στόχος και απαίτηση από το στάδιο του σχεδιασμού της εφαρμογής.

2.5.2 Ανίχνευση της ΗΕΔ-αντίδρασης για sensorless μεθόδους

Η χρήση των αισθητήρων θέσης μπορεί να αποφευχθεί τελείως σε εφαρμογές μη ιδιαίτερα απαιτητικές ως προς τον ακριβή έλεγχο θέσης ή τη δυναμική απόκριση σε απρόβλεπτα κυμαινόμενα φορτία. Παραδείγματα εφαρμογών όπως ανεμιστήρες, αντλίες, βοηθητικά συστήματα στην ηλεκτροκίνηση, απαιτούν επαρκή έλεγχο της ταχύτητας, ο οποίος μπορεί να επιτευχθεί με διαδοσόμενες sensorless μεθόδους βασιζόμενες στην ΗΕΔ-αντίδραση (back-EMF sensing) ή στην ανίχνευση του ρεύματος. Αυτές οι μέθοδοι παρέχουν τις κατάλληλες πληροφορίες για τον έλεγχο του κινητήρα μέσω της εκτίμησης της θέσης με επαρκή ακρίβεια. Ένας κινητήρας συνεχούς ρεύματος μόνιμου μαγνήτη χωρίς ψήκτες (BLDCM) που δεν βασίζεται λειτουργικά σε αισθητήρες θέσης αλλά μόνο σε ηλεκτρικές μετρήσεις καλείται κινητήρας BLDC χωρίς αισθητήρες (Sensorless BLDCM).

Από λειτουργική άποψη, ένα αρκετά ενδιαφέρον στοιχείο είναι ότι ο κινητήρας BLDC προσφέρεται για την εφαρμογή sensorless μεθόδων ακριβώς λόγω του τρόπου διέγερσης του: Κατά τη διέγερση του κινητήρα, εκτός από τους χρόνους μεταγωγής, μόνο δύο από τα τρία τυλίγματα του κινητήρα άγουν ταυτόχρονα, ενώ η τρίτη, μη-διεγερμένη φάση πολώνεται με την ΗΕΔ-αντίδραση. Έτσι, ανάμεσα σε διάφορες sensorless μεθόδους, η πιο δημοφιλής, ιδιαίτερα σε εφαρμογές χαμηλού κόστους, βασίζεται στην ανίχνευση της ΗΕΔ-αντίδρασης από τον ακροδέκτη της φάσης κατά την περίοδο που αυτή δε διεγείρεται. Πρόκειται για την αποδοτικότερη μέθοδο για κινητήρες συνδεσμολογίας

αστέρα.

Το βασικότερο μειονέκτημα των μεθόδων που βασίζονται στην ανίχνευση της ΗΕΔ-αντίδρασης, εντοπίζεται στις λειτουργίες χαμηλών στροφών και κορυφώνεται στην εκκίνηση. Η ΗΕΔ-αντίδρασης είναι ανάλογη της ταχύτητας του κινητήρα και μηδενική όσο η μηχανή δεν περιστρέφεται. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα σε χαμηλές ταχύτητες να γίνεται δυσχερέστερη η ορθή ανίχνευση της ΗΕΔ-αντίδρασης λόγω θορύβου, ενώ ιδιαίτερα για την έναρξη χρειάζεται κάποιο σύστημα εκκίνησης ανοιχτού βρόχου για την οδήγηση της μηχανής σε κατάλληλη ταχύτητα, τέτοια ώστε η ανίχνευση της ΗΕΔ-αντίδρασης να παρέχει στο σύστημα ελέγχου τα ορθά σήματα για την σωστή οδήγηση του κινητήρα.

2.5.3 Ανίχνευση ZCP

Η τεχνική της ανίχνευσης των σημείων διέλευσης από το μηδέν (Zero Crossing Point - ZCP) είναι μία από τις βασικότερες και πιο απλές τεχνικές ανίχνευσης της ΗΕΔ-αντίδρασης. Βασίζεται στο χρονικό εντοπισμό του σημείου όπου η ΗΕΔ-αντίδρασης της μη-διεγερμένης φάσης γίνεται μηδενική. Καθώς η ΗΕΔ-αντίδρασης δεν είναι διαθέσιμη προς μέτρηση, η ανίχνευσή της στην πραγματικότητα γίνεται μέσω μέτρησης της τάσης τροφοδοσίας, η οποία όπως φαίνεται στα παραπάνω ταυτίζεται με την ΗΕΔ-αντίδρασης κατά την ανενεργή περίοδο. Ο εντοπισμός ενός ZCP ενεργοποιεί έναν χρονομετρητή, ο οποίος μπορεί να υλοποιηθεί με ένα απλο κύκλωμα RC, έτσι ώστε κατόπιν ενός προκαθορισμένου χρονικού διαστήματος να οδηγείται ο αντιστροφέας στην επόμενη φάση μεταγωγής.

Από το Σχ. 2.4 είναι εμφανές ότι με τον εντοπισμό ενός ZCP και μια μετατόπιση φάσης κατά 30 ηλεκτρικές μοίρες, είναι δυνατή η ορθή χρονικά εκτίμηση της έναρξης του επόμενου βήματος μεταγωγής και κατ' επέκταση η σωστή οδήγηση του κινητήρα.

Λόγω των αρμονικών που εισάγουν τα στοιχεία ισχύος της γέφυρας στις μετρούμενες τάσεις τροφοδοσίας, είναι απαραίτητη η χρήση χαμηλοπερατών φίλτρων, πριν την ανίχνευση. Σε διαφορετική περίπτωση, είναι πιθανή η ανίχνευση ψευδών ZCP, τα οποία θα οδηγήσουν σε λάθη στη μεταγωγή και στην προβληματική ή και μη λειτουργία του κινητήρα. Η χρήση των φίλτρων, όμως περιορίζει σημαντικά το εύρος λειτουργίας των κινητήρων σε υψηλές ταχύτητες.

Ακόμα έναν αρνητικό παράγοντα σε αυτή τη μέθοδο της μέτρησης των φασικών τάσεων αποτελεί το γεγονός ότι αυτή αναγκαστικά πραγματοποιείται συγκριτικά με έναν θορυβώδη ουδέτερο κόμβο με αποτέλεσμα την υψηλή ενίσχυση κοινού σήματος.

Η επιτυχής ανίχνευση των ZCP χωρίς χρήση αναλογικών φίλτρων είναι δυνατή με τον κατάλληλο συνδυασμό τεχνικών PWM και ανίχνευσης [10]. Στην περίπτωση αυτή ο έλεγχος γίνεται με την περαιτέρω PWM διαμόρφωση των σημάτων έναυσης της πάνω ή της κάτω ημι-γέφυρας, ενώ κατά την περίοδο διακοπής πραγματοποιείται η ανίχνευση του ZCP. Με αυτόν τον τρόπο, δεν επηρεάζουν τη μέτρηση παράγοντες όπως ο διακοπτικός θόρυβος, δεν απαιτείται χρήση φίλτρων και έτσι εξασφαλίζεται η καλή απόδοση του κινητήρα σε μεγαλύτερο εύρος ταχυτήτων.

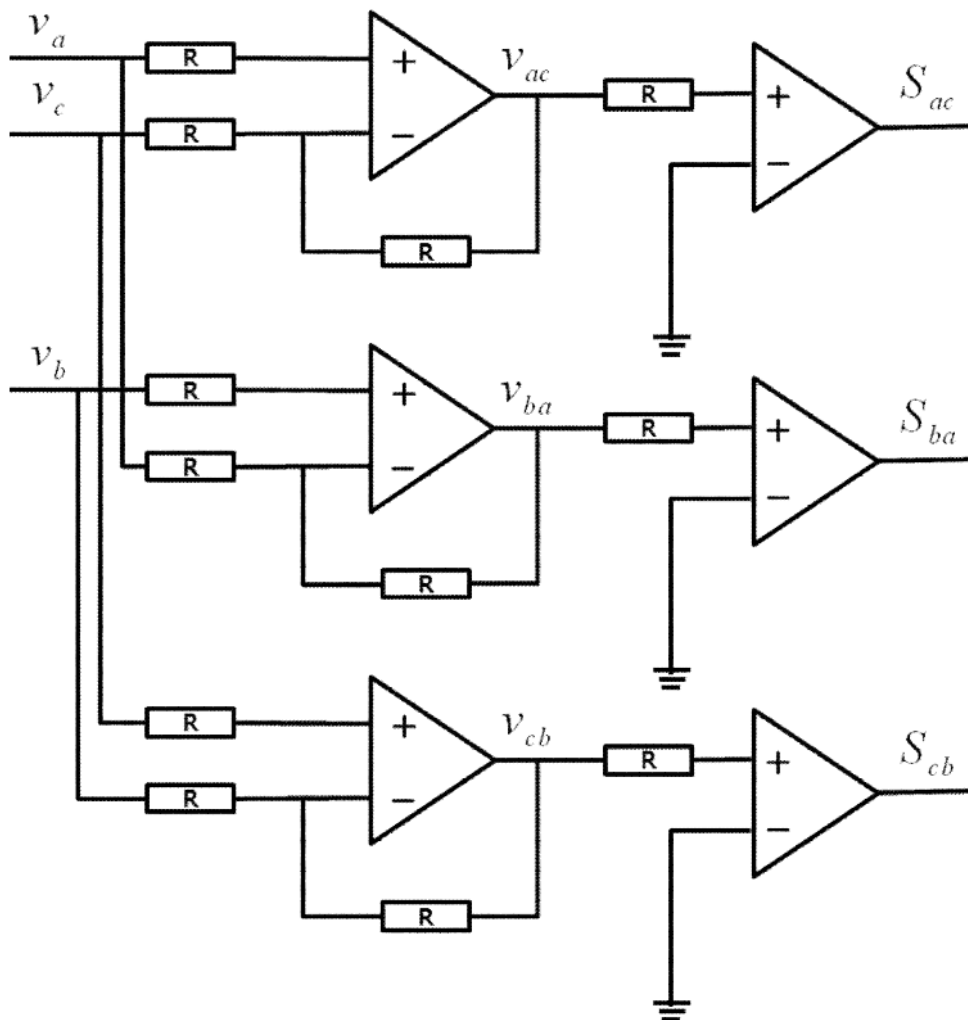
2.5.4 Η μέθοδος των διαφορών των ΗΕΔ-Αντίδρασης

Αυτή η μέθοδος βασίζεται στην ανίχνευση των ZCP των διαφορών των ΗΕΔ-αντίδρασης. Όπως είναι εμφανές από το Σχ. 2.5, τα ZCP των εν λόγω κυματομορφών συμπίπτουν με τα χρονικά σημεία στα οποία αλλάζει το στάδιο της μεταγωγής.

Από τη μαθηματική ανάλυση του ισοδύναμου κυκλώματος του κινητήρα, εξάγεται ότι οι μεταβολές της κυματομορφής της διαφοράς e_{ac} αντανακλώνται πλήρως στις μεταβολές της τάσης V_{ca} . Επειδή η περίοδος κατά την οποία η φάση a είναι ανενεργή, ακολουθείται από την αντίστοιχη ανενεργή περίοδο για τη φάση c , προκύπτει ότι για το ενδιάμεσο χρονικό σημείο αυτών των δύο διαδοχικών περιόδων ισχύει $V_a = V_c$. Επομένως αυτό είναι ZCP της V_{ca} και συμπίπτει με το αντίστοιχο ZCP της e_{ac} και άρα με το χρονικό σημείο μεταγωγής. Έτσι, τα ZCP αυτής της κυματομορφής μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη δημιουργία του εικονικού hall σήματος για τη μεταγωγή της φάσης a . Το σήμα αυτό θα είναι ταυτόχρονο και ταυτόσημο με το πραγματικό σήμα h_a που θα προερχόταν από τον πραγματικό αισθητήρα Hall. Έτσι, η ανίχνευση των σημείων μεταγωγής γίνεται στιγμιαία και δεν χρειάζεται ειδική μέριμνα για ολίσθηση φάσης, όπως στις άλλες μεθόδους. Κατ' αντιστοιχία τα ZCP της V_{ba} χρησιμοποιούνται για τη μεταγωγή της φάσης b και τα ZCP της V_{cb} για τη φάση c [13].

Επιπλέον, με τη συγκεκριμένη μέθοδο, δεν απαιτούνται οι συμβατικές στρατηγικές έναρξης, αφού τα ZCP μπορούν να ανιχνευτούν με την πρώτη στροφή του κινητήρα κατά

60 ηλεκτρικές μοίρες. Μετά το πρώτο ZCP, το σύστημα μπορεί θεωρητικά να μεταβεί σε sensorless λειτουργία.



Σχήμα 2.8: Κύκλωμα για την ανίχνευση των ZCP [13]

Στο Σχ. 2.8 παρουσιάζεται το κύκλωμα που προτείνεται στο [13] για την ανίχνευση των ZCP. Αποτελείται από δύο στάδια ενίσχυσης. Το πρώτο στάδιο είναι υπεύθυνο για τη δημιουργία των διαφορών των μετρούμενων φασικών τάσεων, ενώ το δεύτερο είναι ένας συγκριτής με τη γη, για την ανίχνευση των ZCP. Πειραματικά αποτελέσματα επιβεβαιώνουν ότι η έξοδος του κυκλώματος είναι ανάλογη με τα σήματα των αισθητήρων Hall, οπότε μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη σωστή μεταγωγή και την sensorless οδήγηση του κινητήρα BLDC, χωρίς αντιστάθμιση φάσης και ειδική διαδικασία έναρξης [14].

2.5.5 Άλλες τεχνικές έμμεσης ανίχνευσης της ΗΕΔ-αντίδρασης

Τα ζητήματα που εγείρει η χρήση φίλτρων και που έχουν ως αποτέλεσμα τη λειτουργία σε περιορισμένο εύρος ταχυτήτων, έχουν αντιμετωπιστεί επιτυχώς και από άλλες τεχνικές έμμεσης ανίχνευσης. Οι κυριότερες από αυτές εξετάζονται στα επόμενα [7].

2.5.5.1 Τεχνική ολοκλήρωσης της ΗΕΔ-αντίδρασης

Στη μέθοδο αυτή η εκτίμηση για την θέση του δρομέα εξάγεται μέσω ολοκλήρωσης της αιωρούμενης φάσης. Η διαδικασία ολοκλήρωσης της ΗΕΔ-αντίδρασης ξεκινά κατά τη μηδενική διέλευση της και σταματά όταν λάβει μια προκαθορισμένη τιμή κατωφλίου, η οποία αντιστοιχεί στο χρονικό σημείο αλλαγής σταδίου της μεταγωγής. Λόγω της τραπεζοειδούς μορφής της ΗΕΔ-αντίδρασης, η οποία συνεπάγεται τη γραμμική μεταβολή της από κορυφή σε κορυφή ανεξαρτήτως ταχύτητας, η τιμή της τάσης κατωφλίου διατηρείται σταθερή σε όλο το εύρος ταχυτήτων. Όταν η έξοδος του ολοκληρωτή λάβει την προκαθορισμένη τιμή, μηδενίζεται από ένα σήμα επαναφοράς. Η έξοδος του διατηρείται μηδενική έως ότου το εναπομείναν ρεύμα στην αιωρούμενη περίοδο μηδενιστεί, ώστε να αποφευχθεί λανθασμένη συνιστώσα στην επόμενη ολοκλήρωση. Στα πλεονεκτήματα αυτής της μεθόδου συγκαταλέγονται η μικρότερη ευαισθησία ως προς τον θόρυβο και η αυτόματη προσαρμογή σε αλλαγές ταχύτητας. Ωστόσο, παρουσιάζει φτωχές επιδόσεις στις χαμηλές ταχύτητες.

2.5.5.2 Ανίχνευση ρεύματος διόδου ελεύθερης διέλευσης

Η μέθοδος αυτή βασίζεται στην ανίχνευση του ρεύματος που διαρρέει τη δίοδο στον κλάδο της γέφυρας για ένα σύντομο χρονικό διάστημα αφού το συμπληρωματικό στοιχείο ισχύος σταματά να άγει και η αντίστοιχη φάση προσέρχεται στην ανενεργή περίοδο. Το ρεύμα αυτό της αιωρούμενης φάσης γίνεται μηδενικό στο μέσον του διαστήματος μεταγωγής, δηλαδή ακριβώς όταν και η αντίστοιχη ΗΕΔ-αντίδρασης διέρχεται από το μηδέν. Το μεγαλύτερο μειονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι το γεγονός ότι απαιτεί έξι ξεχωριστές τροφοδοσίες, μία για το κύκλωμα σύγκρισης κάθε διόδου. Από την άλλη, αυτή η τεχνική εμφανίζει ιδιαίτερα καλές επιδόσεις σε sensorless λειτουργία χαμηλών ταχυτήτων.

2.5.5.3 Ανίχνευση της τρίτης αρμονικής της ΗΕΔ-Αντίδρασης

Η συγκεκριμένη μέθοδος αξιοποιεί την τρίτη αρμονική της ΗΕΔ-αντίδρασης για τον καθορισμό των σημείων μεταγωγής. Βασίζεται στο γεγονός ότι σε ένα τριφασικό κινητήρα συνδεσμολογίας αστέρα με τραπεζοειδούς μορφής κατανομή μαγνητικής ροής στο διάκενο, με το άθροισμα των τριών φασικών τάσεων απαλείφονται η θεμελιώδης και οι υψηλότερες αρμονικές (5η, 7η κ.ο.κ.). Το αποτέλεσμα κυριαρχείται από την τρίτη αρμονική συνιστώσα, η οποία βρίσκεται σε σταθερή διαφορά φάσης με την τάση διακένου για κάθε φορτίο ή ταχύτητα. Η επεξεργασία της τρίτης αρμονικής απαιτεί μεν χρήση φίλτρων, ωστόσο αρκετά περιορισμένη σε σχέση με άλλες μεθόδους. Η μέθοδος χαρακτηρίζεται από καλές επιδόσεις και στις χαμηλές στροφές κοντά στη εκκίνηση, αφού η τρίτη αρμονική είναι ανιχνεύσιμη και σε αυτό το εύρος ταχυτήτων.

Κεφάλαιο 3

Μοντελοποίηση

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζεται η ανάλυση για την εξαγωγή του μαθηματικού μοντέλου του κινητήρα BLDC. Στο δεύτερο μέρος του κεφαλαίου, προχωρούμε στη σύνθεση του στο Simulink.

Για τη μοντελοποίηση γίνονται οι εξής παραδοχές:

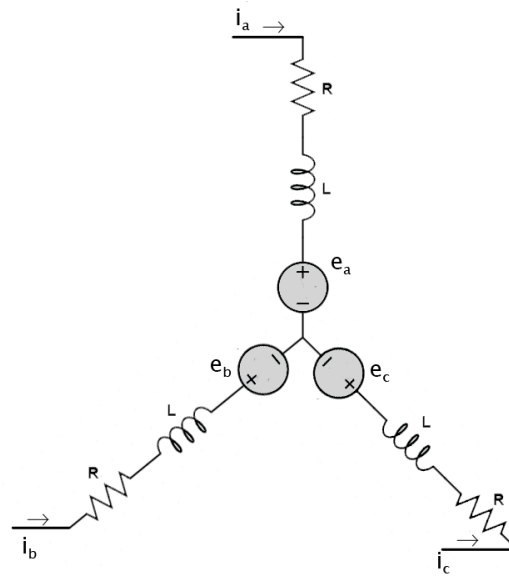
- Οι απώλειες πυρήνα, δινορευμάτων και υστέρησης αγνοούνται.
- Η κατανομή του μαγνητικού πεδίου στο διάκενο ακολουθεί ιδανική τραπεζοειδή μορφή.
- Η κατανομή των τυλιγμάτων είναι συνεχής και ομοιόμορφη χωρίς διαφορές από φάση σε φάση.
- Τα διακοπτικά στοιχεία και οι δίοδοι προστασίας του αντιστροφέα εμφανίζουν ιδανική συμπεριφορά.

3.1 Διαφορικές εξισώσεις

3.1.1 Ηλεκτρικά μεγέθη

Από το ισοδύναμο κύκλωμα του BLDC κινητήρα (Σχ.3.1), εξασφαλίζεται ότι για κάθε μια από τις τρεις φάσεις ισχύει:

$$U_x = i_x(R + j\omega L) + e_x \quad (3.1)$$



Σχήμα 3.1: Ισοδύναμο κύκλωμα κινητήρα BLDC

όπου:

U_x : η τάση κάθε φάσης

i_x : το ρεύμα κάθε φάσης

R : η ανά φάση αντίσταση

L : η ανά φάση επαγωγή, αγνοώντας την επίδραση των αμοιβαίων επαγωγών M . Σε κάθε περίπτωση, η ενσωμάτωση της αμοιβαίας επαγωγής στο μοντέλο είναι δυνατή με αντικατάσταση του παράγοντα L ως εξής:

$$L' = L - M$$

e_x : η ΗΕΔ-αντίδρασης σε κάθε φάση x , η οποία μπορεί να εκφραστεί ως:

$$e_x = k_e \omega_e f_x(\theta_e) \quad (3.2)$$

όπου k_e είναι η σταθερά ΗΕΔ-αντίδρασης, ω_e η ηλεκτρική γωνιακή ταχύτητα και $f_x(\theta)$ μια συνάρτηση κατάλληλης μορφής για τον καθορισμό της τραπεζοειδούς κυματομορφής της αντι-ΗΕΔ. Κατ' αντιστοιχία με την θεώρηση μαγνητικού πεδίου τραπεζοειδούς μορφής στο διάκενο, με διάρκεια μεγίστης ροής 120° σε κάθε περίοδο αγωγής, η f για τη φάση a δίνεται ως εξής:

$$f_a(\theta_e) = \begin{cases} 1 & 0 \leq \theta_e < \frac{2\pi}{3} \\ 1 - \frac{6}{\pi}(\theta_e - \frac{2\pi}{3}) & \frac{2\pi}{3} \leq \theta_e < \pi \\ -1 & 0 \leq \theta_e < \frac{2\pi}{3} \\ \frac{6}{\pi}(\theta_e - \frac{5\pi}{3}) - 1 & \frac{5\pi}{3} \leq \theta_e < 2\pi \end{cases} \quad (3.3)$$

Για τις φάσεις b και c λόγω τριφασικής συμμετρίας θα έχουμε αντίστοιχα:

$$f_b(\theta_e) = f_a(\theta_e - \frac{2\pi}{3}) \quad (3.4)$$

$$f_c(\theta_e) = f_a(\theta_e + \frac{2\pi}{3}) \quad (3.5)$$

Αναλύοντας την 3.1 για τις τρεις φάσεις οδηγούμαστε στο ακόλουθο σύστημα εξισώσεων:

$$\begin{pmatrix} U_a \\ U_b \\ U_c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} L & 0 & 0 \\ 0 & L & 0 \\ 0 & 0 & L \end{pmatrix} \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{pmatrix} \quad (3.6)$$

Λόγω της συχνότερης χρήσης συνδεσμολογίας αστέρα, στις περισσότερες εφαρμογές, η απουσία ουδέτερου κόμβου περιορίζει τη δυνατότητα ανίχνευσης της φασικής τάσης. Το ζήτημα αυτό μπορεί να αντιμετωπιστεί βέβαια με τη δημιουργία εξωτερικού, εικονικού ουδέτερου κόμβου. Η στρατηγική αυτή μάλιστα ακολουθείται σε μία από τις πιο δημοφιλείς μεθόδους ανίχνευσης της ΗΕΔ-αντίδρασης για έλεγχο χωρίς αισθητήρα θέσης. Σε επίπεδο μοντελοποίησης, τα παραπάνω μπορούν να αντιμετωπιστούν ως επιλογές κατά τη σχεδίαση του αντιστροφέα και του συστήματος ελέγχου. Επομένως, με στόχο την ορθολογική προσέγγιση, οι τάσεις τροφοδοσίας του κινητήρα εκφράζονται με όρους πολικής τάσης και το σύστημα 3.6, μέσω γραμμικών συνδυασμών μετατρέπεται στο εξής ισοδύναμο:

$$\begin{pmatrix} U_{ab} \\ U_{bc} \\ U_{ca} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R & -R & 0 \\ 0 & R & -R \\ -R & 0 & R \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} L & -L & 0 \\ 0 & L & -L \\ -L & 0 & L \end{pmatrix} \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} e_{ab} \\ e_{bc} \\ e_{ca} \end{pmatrix} \quad (3.7)$$

Όμως το συνολικό εισερχόμενο στον κοινό κόμβο ρεύμα ικανοποιεί την ακόλουθη σχέση:

$$i_a + i_b + i_c = 0 \quad (3.8)$$

Οπότε, με σκοπό την αναπαράσταση του συστήματος 3.7 σε μορφή εξισώσεων κατάστασης, και επειδή λόγω της 3.8 έχουμε τα ρεύματα των δύο φάσεων μόνο ως μεταβλητές κατάστασης, η 3.7 γίνεται:

$$\begin{cases} U_{ab} = R(i_a - i_b) + L\frac{d}{dt}(i_a - i_b) + e_{ab} \\ U_{bc} = R(i_a + 2i_b) + L\frac{d}{dt}(i_a + 2i_b) + e_{bc} \end{cases}$$

και λύνοντας ως προς $\frac{d}{dt}i_a, \frac{d}{dt}i_b$, παίρνουμε το μοντέλο για το ηλεκτρικό μέρος του κινητήρα:

$$\frac{d}{dt} \begin{pmatrix} i_a \\ i_b \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\frac{R}{L} & 0 \\ 0 & -\frac{R}{L} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_a \\ i_b \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \frac{2}{3L} & \frac{1}{3L} \\ -\frac{1}{3L} & \frac{1}{3L} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} U_{ab} - e_{ab} \\ U_{bc} - e_{bc} \end{pmatrix} \quad (3.9)$$

3.1.2 Μηχανικά μεγέθη

Για την ανάλυση του μηχανικού μέρους (ταχύτητα - ροπή στον άξονα) του κινητήρα, λειτουργούμε με αφετηρία τη ροή ισχύος στη μηχανή. Η ηλεκτρική ισχύς εισόδου που παρέχεται από την τροφοδοσία στον κινητήρα, μετατρέπεται, με εξαίρεση ένα μικρό ποσοστό απωλειών πυρήνα σε ηλεκτρομαγνητική ισχύ στο διάκενο. Για τη συνολική ηλεκτρομαγνητική ισχύ P_e υπολογίζονται όλες οι φάσεις, επομένως:

$$P_e = e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c \quad (3.10)$$

Αγνοώντας τις μηχανικές απώλειες, οπότε η ηλεκτρομαγνητική ροπή μπορεί να θεωρηθεί ως η ροπή στον άξονα, αν T_e η ηλεκτρομαγνητική ροπή και ω_m η μηχανική ταχύτητα περιστροφής, τότε από τη σχέση ροπής ισχύος έχουμε:

$$P_e = T_e \omega_m \quad (3.11)$$

Οι άνω σχέσεις μας δίνουν τον υπολογισμό της ηλεκτρομαγνητικής ροπής:

$$T_e = \frac{e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c}{\omega_m} \quad (3.12)$$

Για τη γωνία περιστροφής του άξονα θ_m έχουμε:

$$\frac{d}{dt}\theta_m = \omega_m \quad (3.13)$$

ενώ για τη σχέση των αντίστοιχων ηλεκτρικών-μηχανικών γωνιακών μεγεθών, αν P ο αριθμός των μαγνητικών πόλων του δρομέα, έχουμε:

$$(\theta_e, \omega_e) = \frac{P}{2}(\theta_m, \omega_m) \quad (3.14)$$

Τέλος, για τη γωνιακή ταχύτητα $\omega_m = \frac{d}{dt}\theta_m$, όπου θ_m η γωνία περιστροφής του άξονα, από την εξίσωση κίνησης έχουμε:

$$T_e - T_L = J \frac{d}{dt}\omega_m + b_v \omega_m \quad (3.15)$$

όπου T_L η ροπή του φορτίου, J η ροπή αδράνειας του δρομέα και b_v η σταθερά τριβής.

Η 3.15 σε μορφή εξίσωσης κατάστασης μπορεί να γραφεί ως εξής:

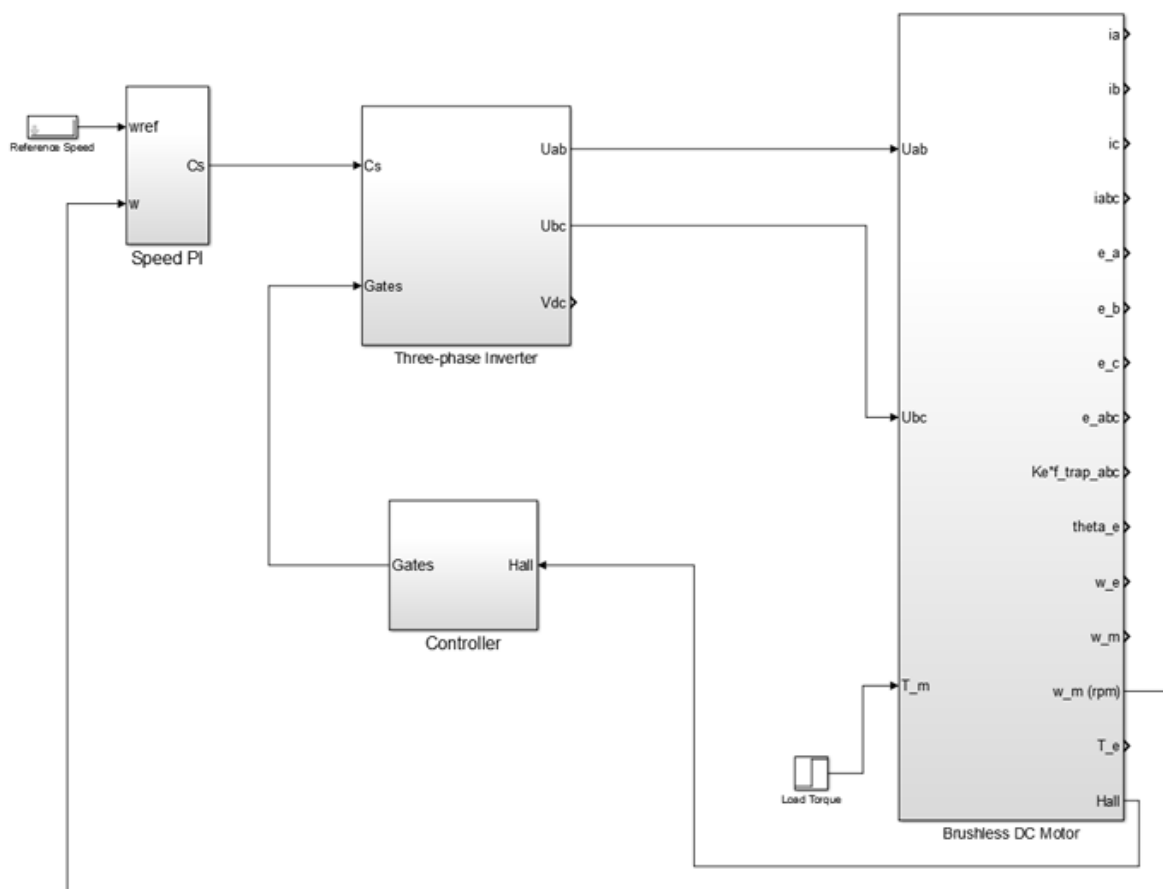
$$\frac{d}{dt}\omega_m = -\frac{b_v}{J}\omega_m + \frac{1}{J}(T_e - T_L) \quad (3.16)$$

3.2 Ανάπτυξη μοντέλου στο Matlab/Simulink

Για την ανάπτυξη του μοντέλου που προσομοιώνει τη λειτουργία ενός BLDC κινητήρα, ακολουθείται μια σχεδιαστική φιλοσοφία που συναντάται ως επί το πλείστον στη βιβλιογραφία. Πρόκειται για δομημένο σχεδιασμένο με εκτεταμένη χρήση της έννοιας του υποσυστήματος (Simulink block), ο οποίος επιτρέπει τη διαισθητική απεικόνιση ενός συνολικού συστήματος με αρκετές παραμέτρους, με τρόπο ώστε η εικονική περιγραφή να βρίσκεται όσο το δυνατόν πιο κοντά στη λογική δομή του φυσικού συστήματος που προσομοιώνεται. Κάθε υποσύστημα ακολουθεί επίσης την ίδια λογική. Η ομαδοποίηση των ανεξάρτητων υποσυστημάτων ολοκληρώνεται με την κατάλληλη σύνδεση των εισόδων-εξόδων των διάφορων υποσυστημάτων, καθιστώντας τελικά λειτουργικό το συνολικό σύστημα.

Εκτός από το όφελος της ορθότερης απεικόνισης και ευκολότερης αναγνώρισης του μοντέλου, ο συγκεκριμένος τρόπος σχεδιασμού επιτρέπει την αντικατάσταση ή επέκταση κάποιου υποσυστήματος του μοντέλου, για εναλλακτικές προσομοιώσεις, όπως για παράδειγμα διαφορετική στρατηγική ελέγχου, προσομοίωση αντιστροφέα, ή προσομοίωση sensorless τεχνικής.

Στο Σχ. 3.2 παρουσιάζεται το συνολικό λειτουργικό μοντέλο με τα υποσυστήματα που το απαρτίζουν και τη βασική σύνδεση μεταξύ αυτών. Τα τέσσερα βασικά επί μέρους υποσυστήματα είναι το ηλεκτρικό/μηχανικό μοντέλο του κινητήρα, ο αντιστροφέας για την οδήγησή του, το σύστημα ελέγχου για την επεξεργασία των σημάτων των αισθητήρων θέσης και την αποκωδικοποίηση του σε σήματα έναυσης/παύσης των στοιχείων του αντιστροφέα και το σύστημα ελέγχου ταχύτητας. Στα επόμενα γίνεται παρουσίαση αυτών των υποσυστημάτων.



Σχήμα 3.2: Μοντέλο προσομοίωσης κινητήρα BLDC στο Matlab/Simulink

3.2.1 Το ηλεκτρομηχανικό υποσύστημα του BLDC κινητήρα

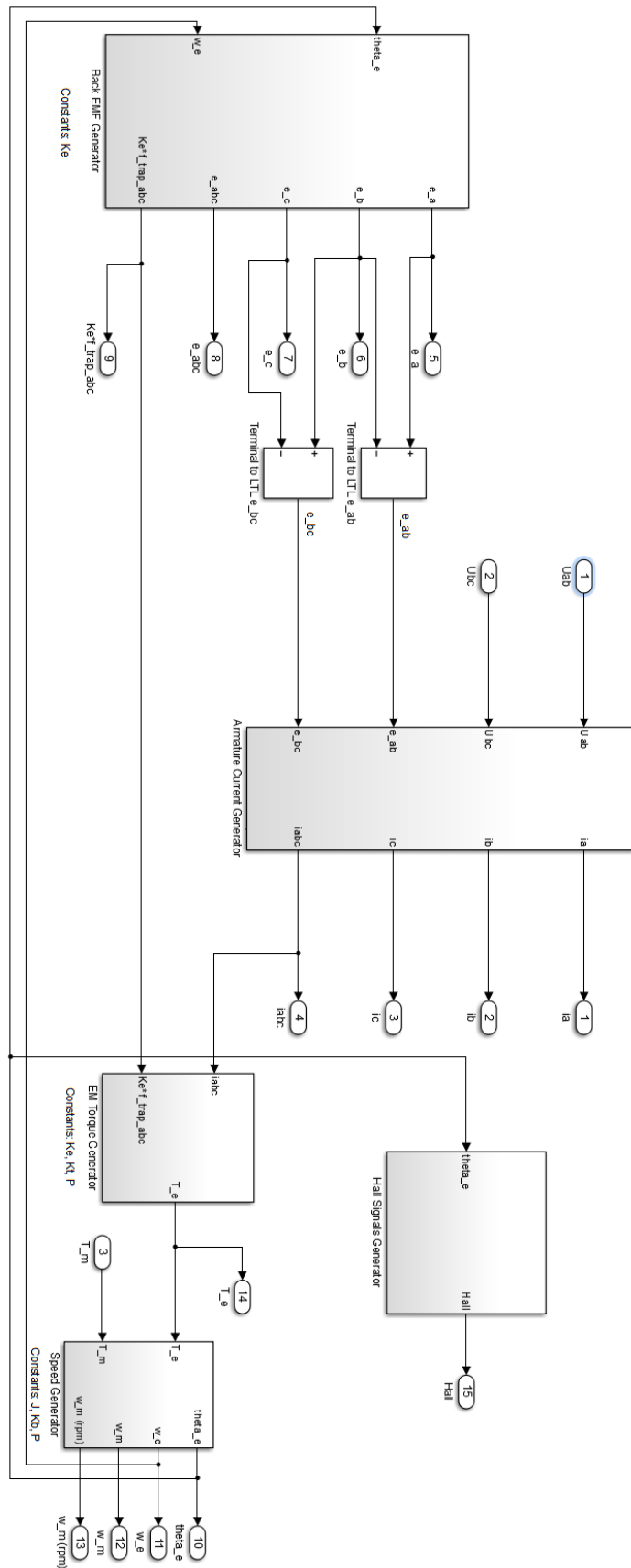
Το βασικό υποσύστημα είναι υπεύθυνο για τον υπολογισμό των ηλεκτρικών και μηχανικών μεγεθών που περιγράφουν τη λειτουργία της διέγερσης/κίνησης του κινητήρα (Σχ. 3.3). Είναι δομημένο σε πέντε υποσυστήματα: Το σύστημα υπολογισμού της ΗΕΔ-Αντίδρασης (Σχ. 3.4), το σύστημα υπολογισμού των ρευμάτων των τριών φάσεων (Σχ. 3.7), το σύστημα υπολογισμού της ηλεκτρομαγνητικής ροπής (Σχ. 3.8), το σύστημα περιστροφικής κίνησης για τον υπολογισμό των ηλεκτρικών και μηχανικών μεγεθών γωνίας και ταχύτητας (Σχ. 3.9), και το σύστημα που προσομοιώνει τη λειτουργία των αισθητήρων Hall (Σχ. 3.11).

Η ιδανική τραπεζοειδής μορφή της ΗΕΔ-αντίδρασης είναι δυνατή με τη δημιουργία της αντίστοιχης συνάρτησης (Εξ. 3.3) στο Matlab και την ενσωμάτωση της στο Simulink με το κατάλληλο function block. Παρ' όλ' αυτά, για λόγους ταχύτερης προσομοίωσης δίνεται προτεραιότητα σε μια ισοδύναμη υλοποίηση με προκαθορισμένα block συναρτήσεων του Simulink. Έτσι η τραπεζοειδής κυματομορφή για την ΗΕΔ-αντίδρασης κάθε φάσης πραγματοποιείται με την χρήση ημιτονοειδούς συνάρτησης, κατάλληλου offset, περιοριστή και γραμμική ενίσχυσης, με τον τρόπο που φαίνεται στο Σχ. 3.5.

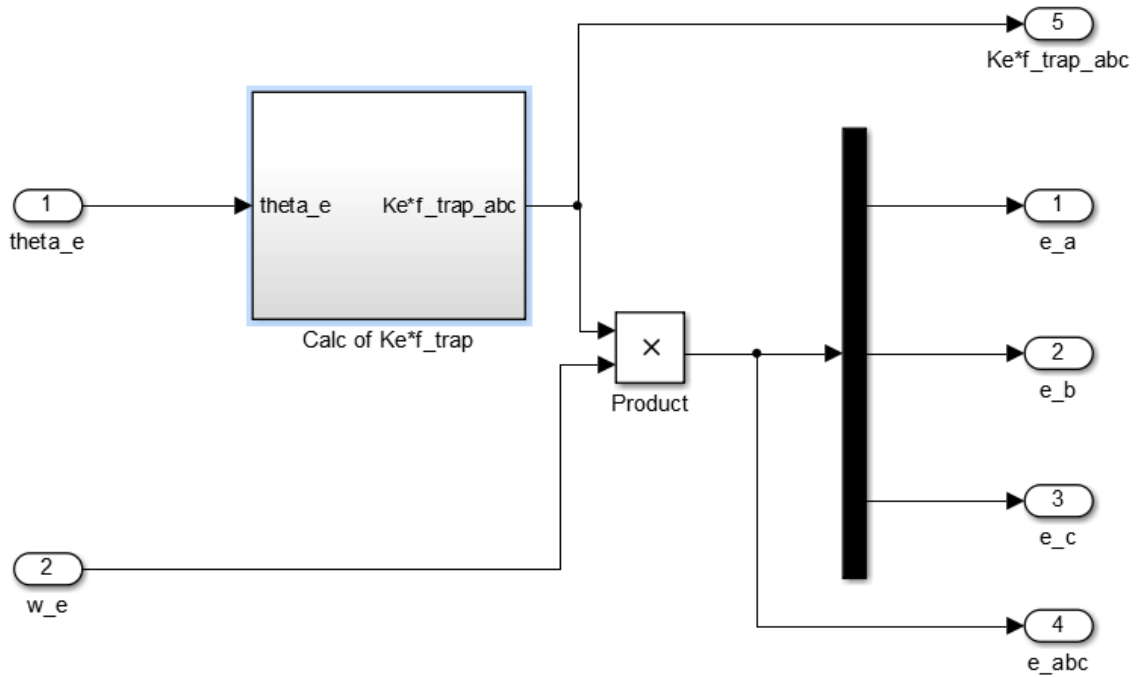
Με βάση τις Εξ. 3.8-3.9 χτίζεται το υποσύστημα για τον υπολογισμό των ρευμάτων κάθε φάσης. Όπως αντανακλάται και στα Σχ. 3.6-3.9, γίνεται ο υπολογισμός των ρευμάτων των φάσεων a και b από τις αντίστοιχες ΔE , και μέσω αυτών το ρεύμα της φάσης c.

Ο υπολογισμός της ηλεκτρομαγνητικής ροπής με βάση την Εξ. 3.12 υλοποιείται με το υποσύστημα του Σχ. 3.8, ενώ με χρήση των Εξ. 3.14-3.16 κατασκευάζεται το σύστημα υπολογισμού των γωνιακών μεγεθών θέσης και ταχύτητας των Σχ. 3.9-3.10.

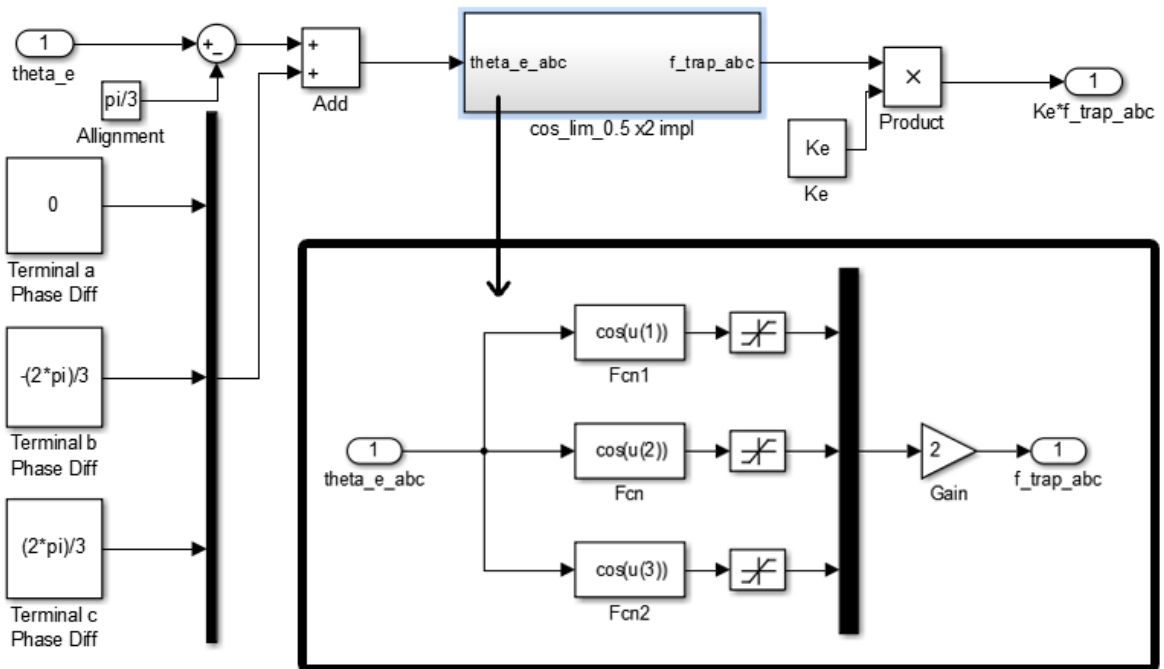
Με χρήση του Simulink block "Interval Test Dynamic" υλοποιείται η προσομοίωση της λειτουργίας των αισθητήρων θέσης του αισθητήρα. Η μοντελοποίηση ακολουθεί τη λειτουργία που αναλύθηκε στα προηγούμενα και η αποτίμηση των σημάτων Hall με βάση την ηλεκτρική γωνία του κινητήρα ακολουθεί το σύστημα τιμών του Πιν. 2.3. Το συγκεκριμένο υποσύστημα παρουσιάζεται στο Σχ. 3.11.



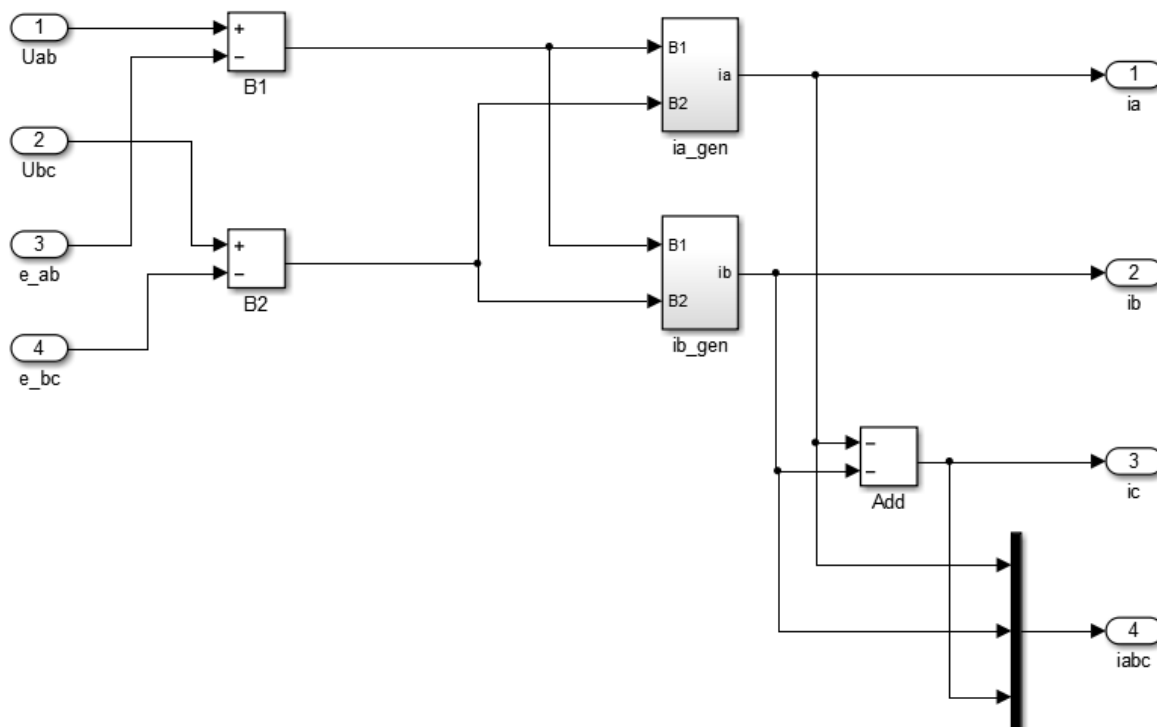
Σχήμα 3.3: Το υποσύστημα του κινητήρα BLDC



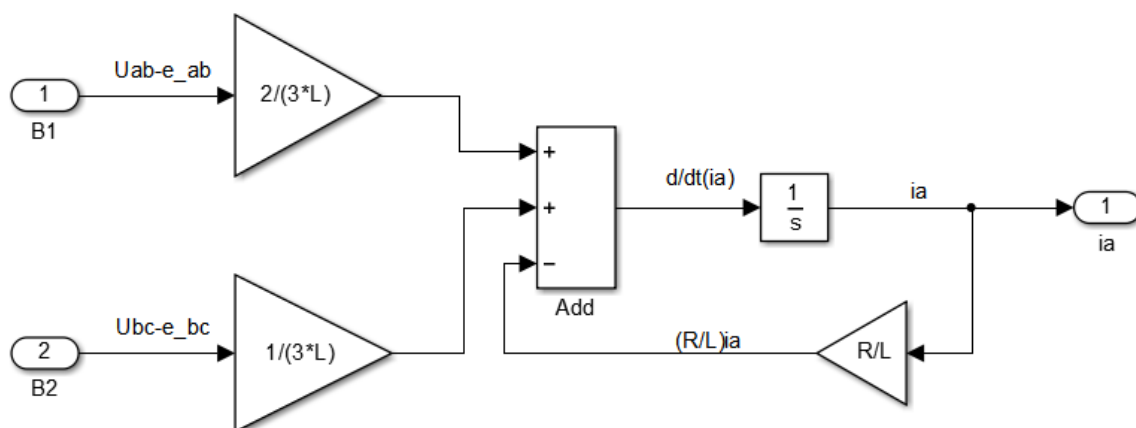
Σχήμα 3.4: Το υποσύστημα για τη δημιουργία της ΗΕΔ-αντίδρασης



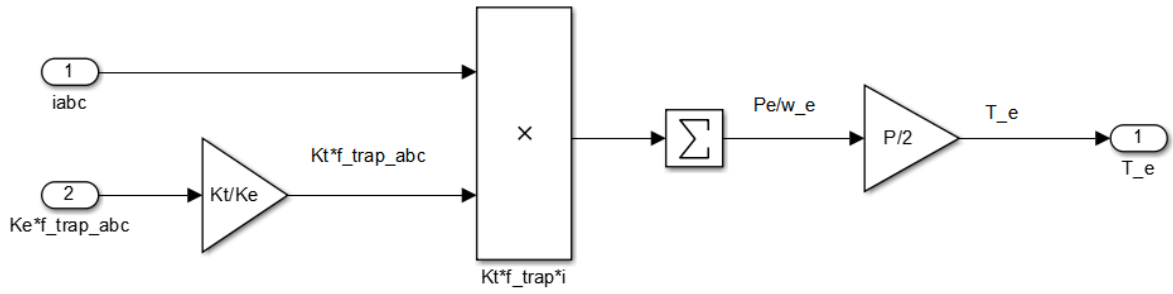
Σχήμα 3.5: Το υποσύστημα για την τραπεζοειδή μορφοποίηση της ΗΕΔ-αντίδρασης



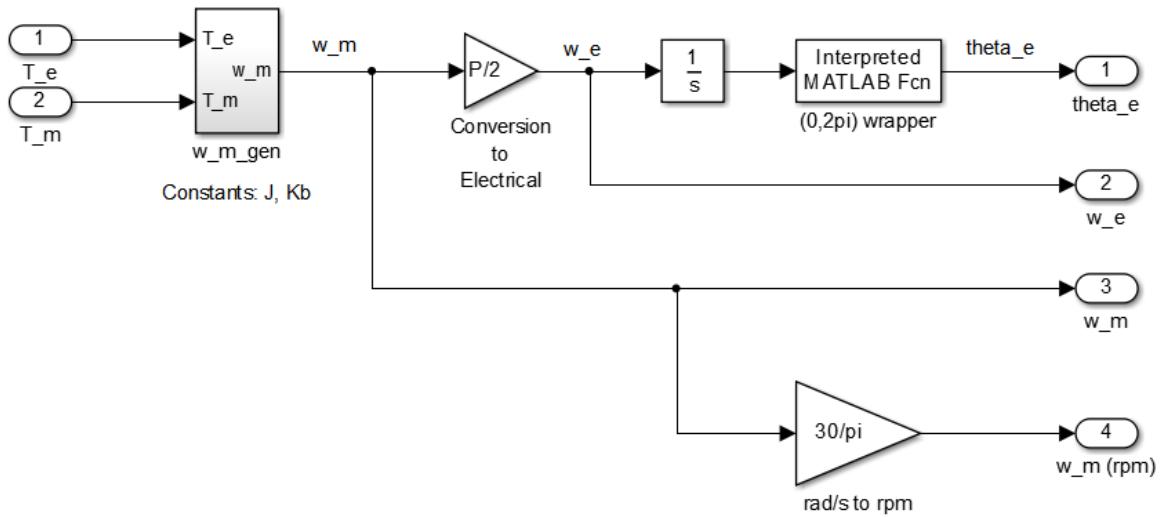
Σχήμα 3.6: Το υποσύστημα για τη δημιουργία των ρευμάτων των τριών φάσεων



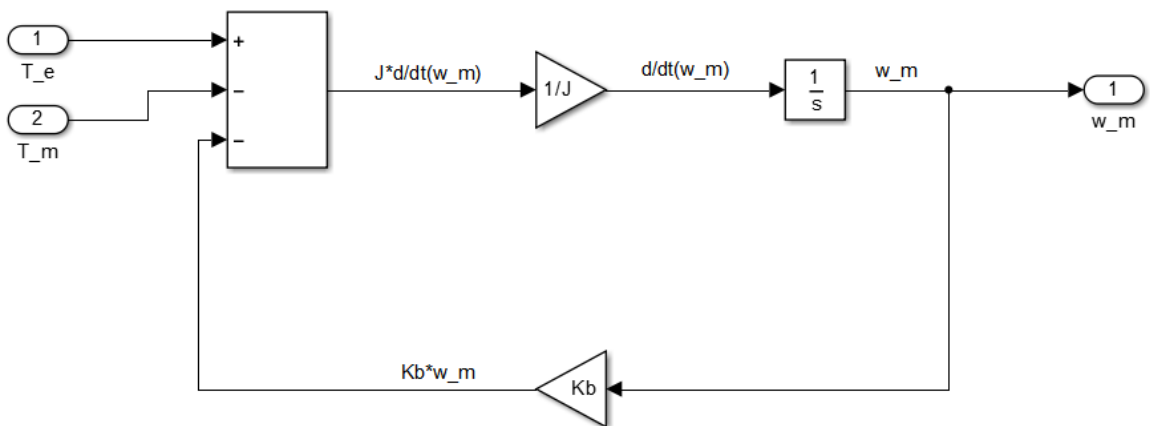
Σχήμα 3.7: Το υποσύστημα για τον υπολογισμό του i_a



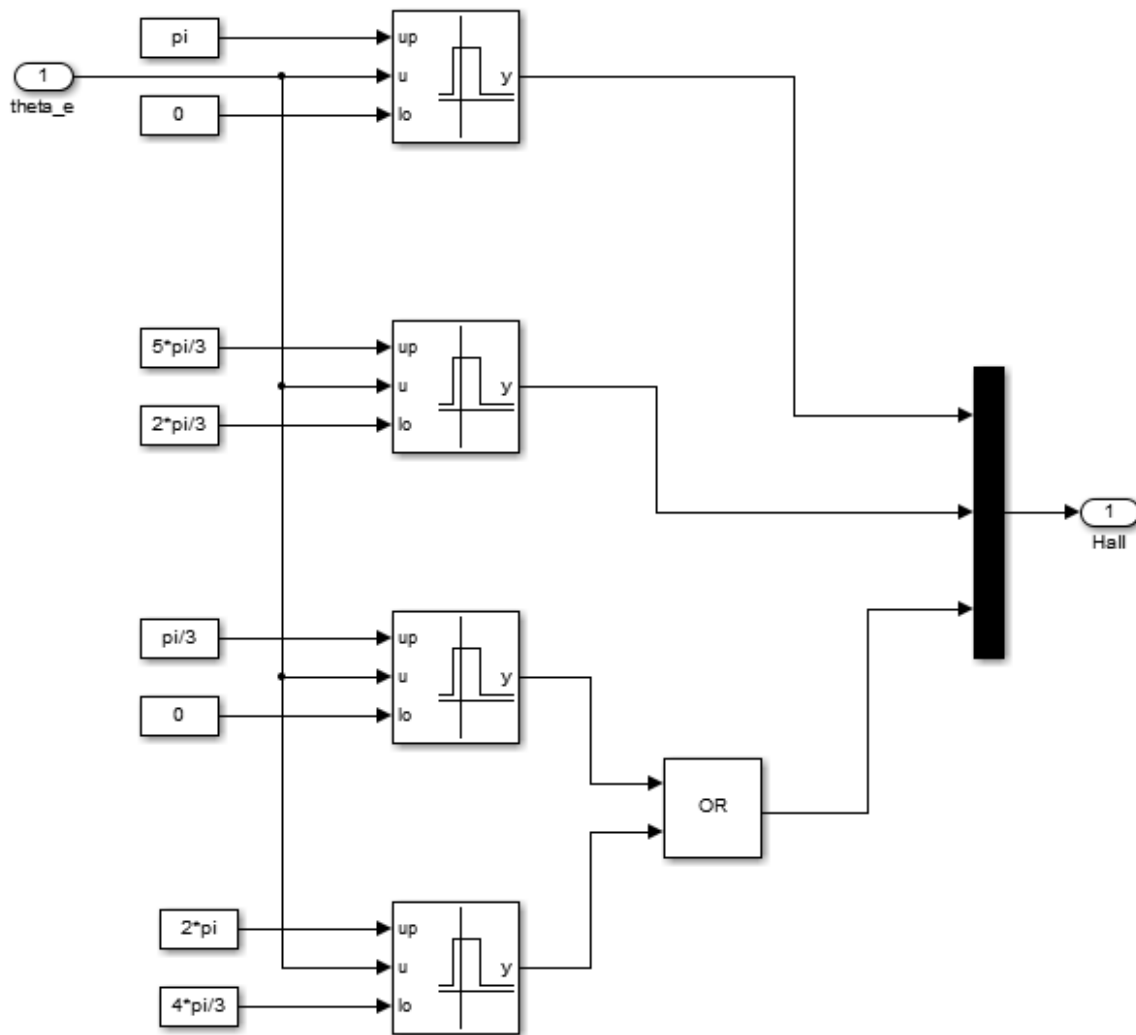
Σχήμα 3.8: Το υποσύστημα για τον υπολογισμό της Η/Μ ροπής T_e



Σχήμα 3.9: Το υποσύστημα για τον υπολογισμό των γωνιακών μεγεθών



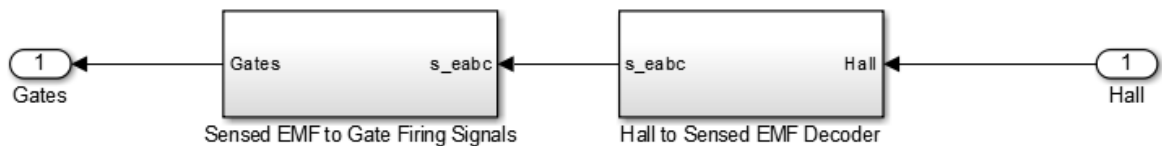
Σχήμα 3.10: Το υποσύστημα για τον υπολογισμό της μηχανικής ταχύτητας w_m



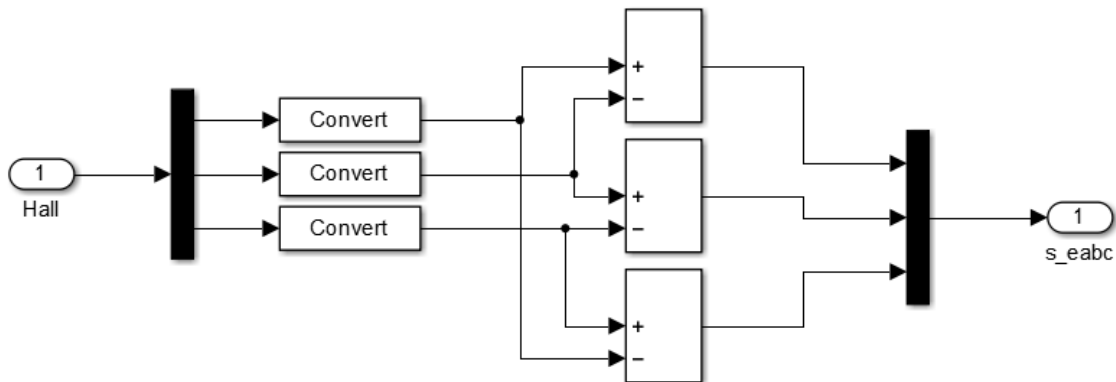
Σχήμα 3.11: Το υποσύστημα για τη δημιουργία των σημάτων των αισθητήρων θέσης

3.2.2 Το υποσύστημα για τον έλεγχο θέσης

Ακολουθεί το υποσύστημα που δέχεται ως είσοδο τα σήματα των αισθητήρων Hall και εξάγει τα σήματα για την ενεργοποίηση/απενεργοποίηση των κλάδων της γέφυρας του αντιστροφέα για τη διατήρηση της ορθής αλληλουχίας και την μεταγωγή κάθε 60 ηλεκτρικές μοίρες (Σχ. 3.12). Αποτελείται από δύο επί μέρους υποσυστήματα: Το πρώτο είναι η μετατροπή των σημάτων Hall σε μια εκτίμηση/ψηφιακή απεικόνιση της ΗΕΔ-Αντίδρασης (Σχ. 3.13), με βάση την οποία και κάνοντας χρήση συγκριτών αποφασίζονται τα σήματα έναυσης/διακοπής των στοιχείων της γέφυρας στο δεύτερο υποσύστημα (Σχ. 3.14),



Σχήμα 3.12: Το υποσύστημα για τον έλεγχο θέσης του κινητήρα



Σχήμα 3.13: Το υποσύστημα για την αποκωδικοποίηση των σημάτων Hall

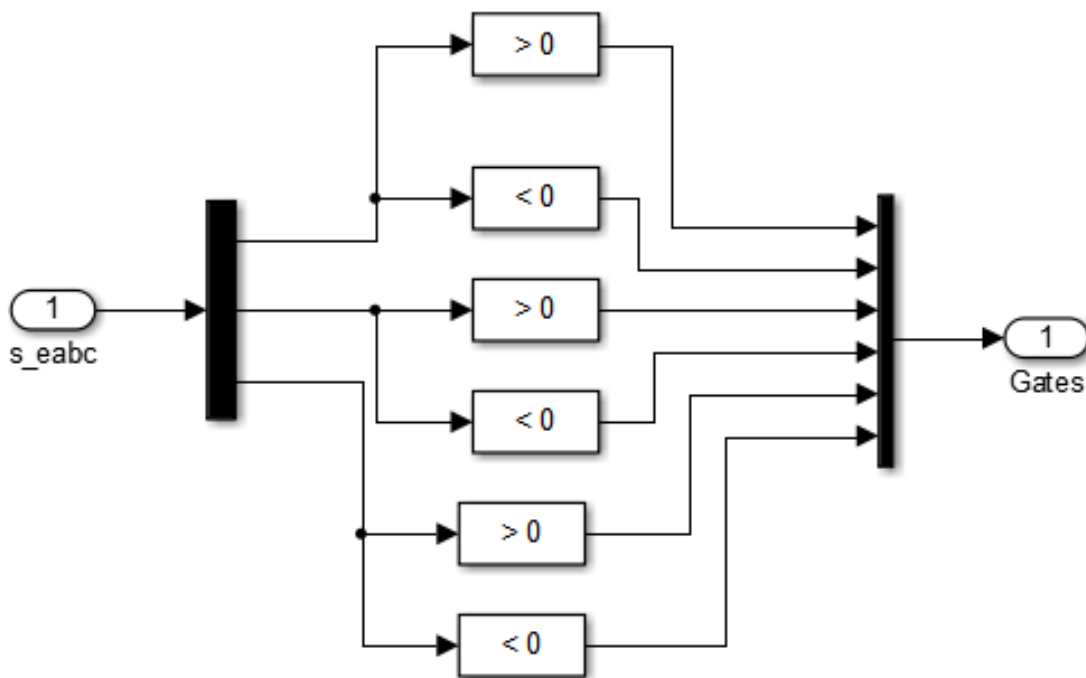
3.2.3 Το υποσύστημα του τριφασικού αντιστροφέα

Για το σύστημα του τριφασικού αντιστροφέα, επιλέγεται το ευέλικτο μοντέλο "Universal Bridge" της βιβλιοθήκης "SimPowerSystems" του Simulink, με έξι στοιχεία ισχύος

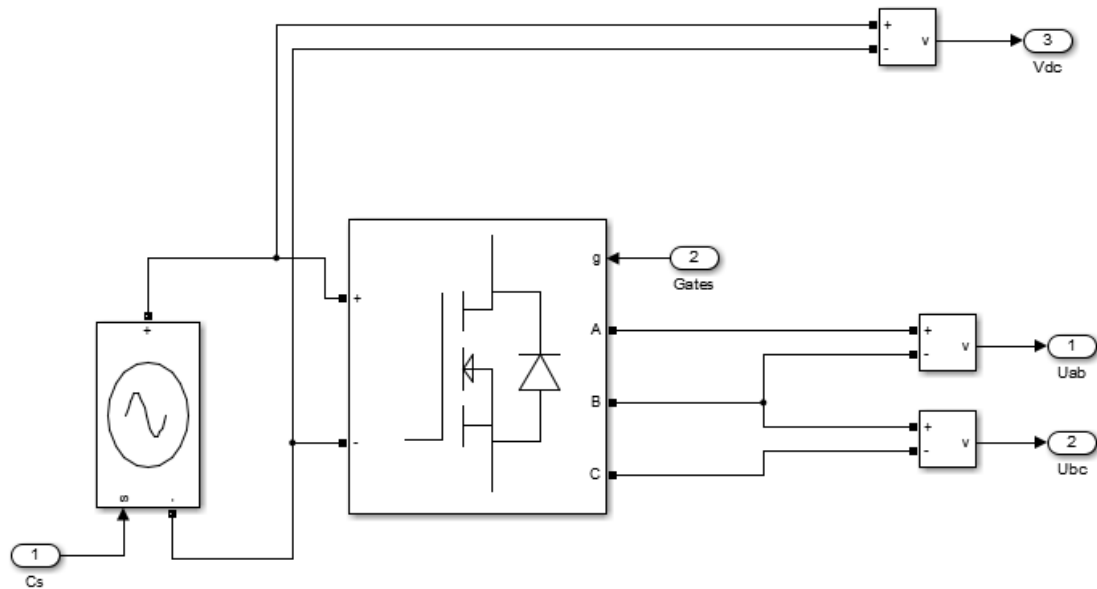
MOS/διόδων προστασίας (Σχ. 3.15). Η αρίθμηση των στοιχείων των κλάδων ακολουθεί αυτή του Σχ. 2.3. Η τροφοδοσία της γέφυρας είναι εξαρτημένη dc τάση για τον έλεγχο της ταχύτητας, οι πύλες των τρανζίστορ οδηγούνται από τα αποκωδικοποιημένα σήματα Hall για τη σωστή μεταγωγή, ενώ χρησιμοποιήθηκαν τα κατάλληλα εικονικά όργανα μετρήσεως για τη μετατροπή του ηλεκτρονικού σήματος του περιβάλλοντος "SimPowerSystems" σε φυσικό σήμα για τη συνεργασία με το ηλεκτρομηχανικό μοντέλο που τροφοδοτεί ο αντιστροφέας.

3.2.4 Το υποσύστημα για τον έλεγχο της ταχύτητας

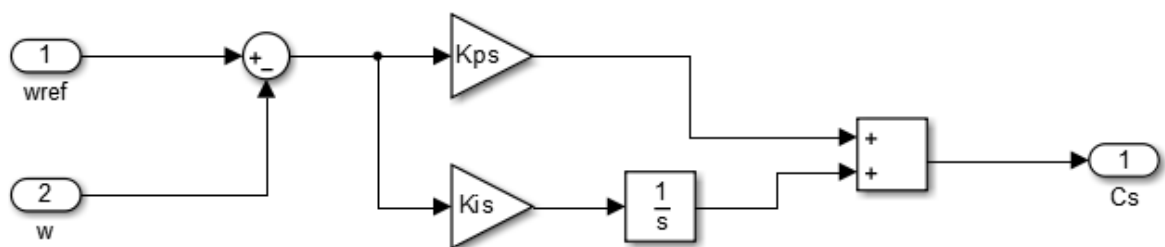
Ο έλεγχος της ταχύτητας γίνεται με τον απλό PI ελεγκτή του Σχ. 3.16. Η ρύθμιση του ελεγκτή γίνεται με κατάλληλη επιλογή των κερδών K_p , K_i .



Σχήμα 3.14: Το Υ/Σ για την οδήγηση των διακοπτικών στοιχείων του αντιστροφέα



Σχήμα 3.15: Το υποσύστημα του τριφασικού αντιστροφέα



Σχήμα 3.16: Το υποσύστημα για τον έλεγχο της ταχύτητας

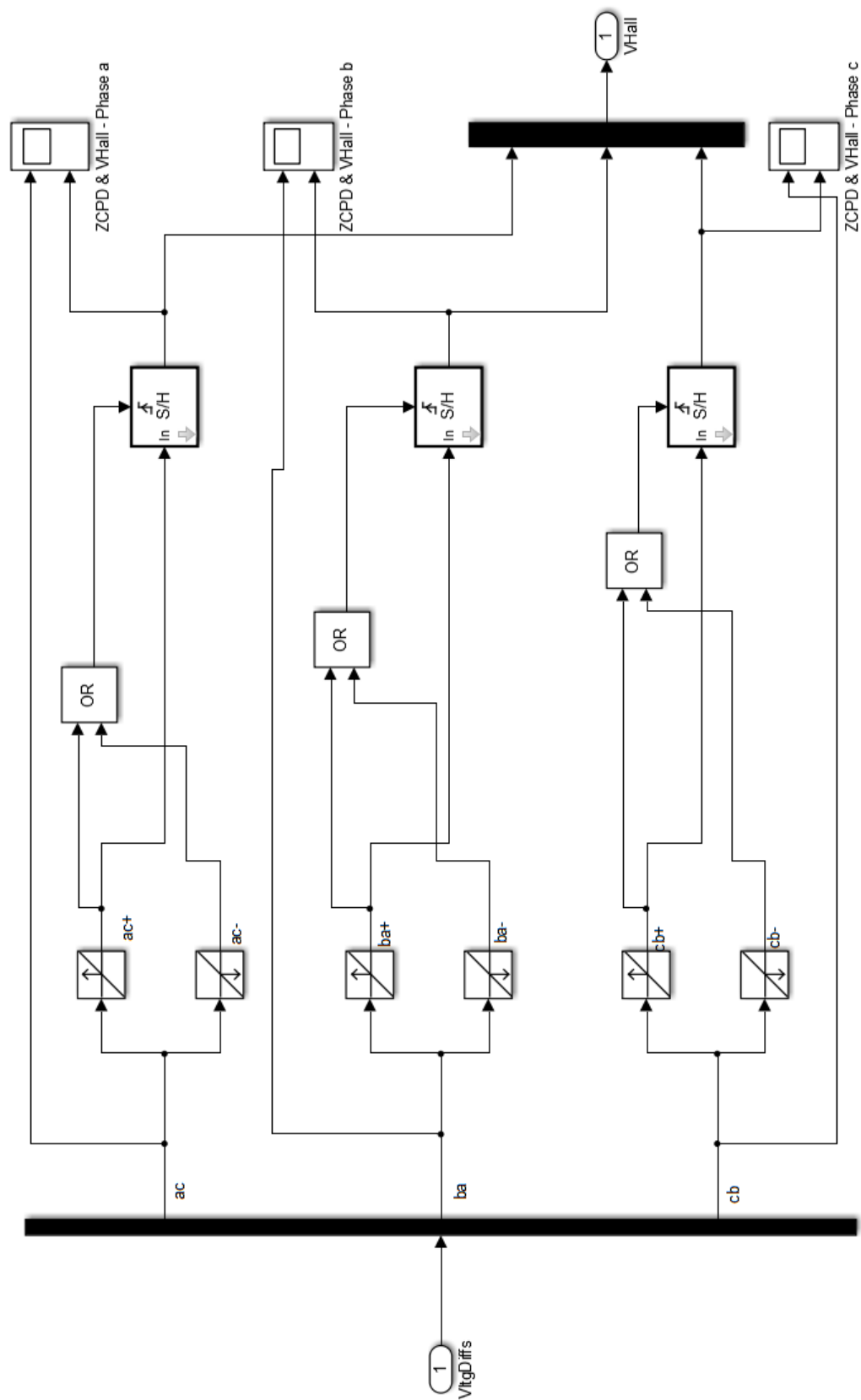
3.2.5 Το υποσύστημα για την τεχνική sensorless

Η τεχνική για έλεγχο του κινητήρα BLDC χωρίς αισθητήρες Hall που αναλύθηκε στην ενότητα 2.5.4, υιοθετείται στα επόμενα και υλοποιείται για την προσομοίωση και τη διακριβίωση της, αλλά και για την προσομοίωση του συνολικού συστήματος σε λειτουργία sensorless.

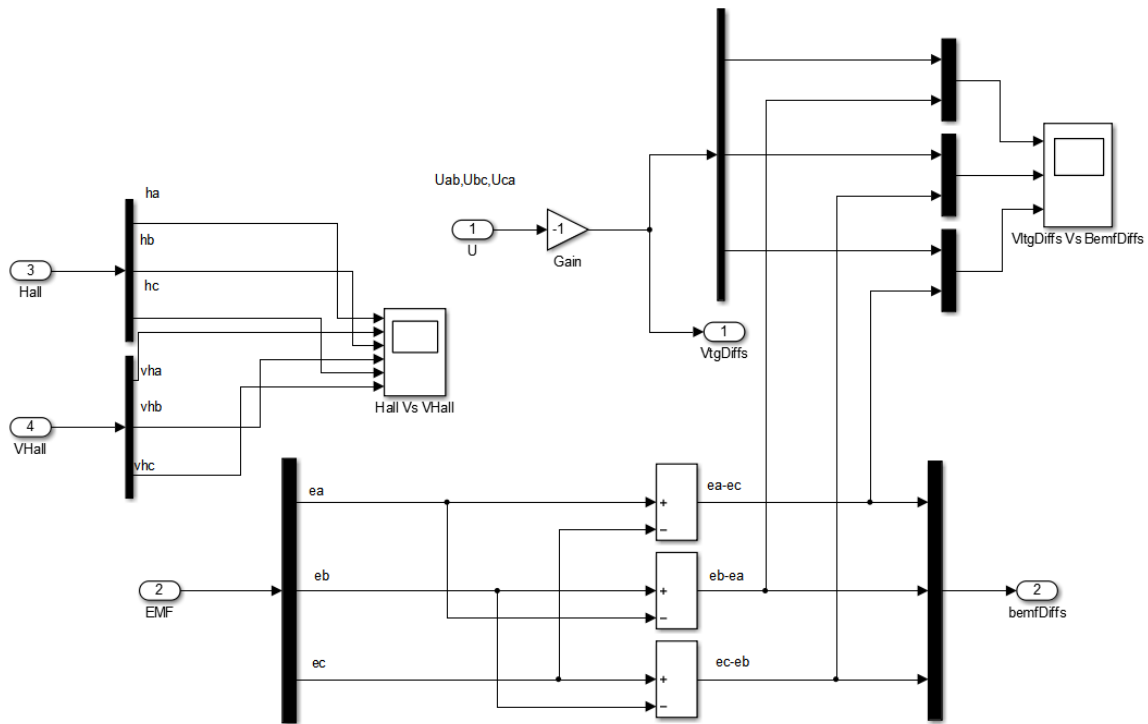
Το βασικό υποσύστημα που αποτελεί τον πυρήνα αυτής της τεχνικής παρουσιάζεται στο Σχ. 3.17. Δέχεται ως εισόδους τις κυματομορφές των διαφορών e_{ac}, e_{ba}, e_{cb} ή V_{ac}, V_{ba}, V_{cb} -που έχουν κοινά ZCP- και στην έξοδο του αποδίδει σήματα ανάλογα των αισθητήρων Hall. Τα μπλοκ ανίχνευσης ZCP παράγουν σήματα κρουστικής μορφής, στις διελεύσεις από το μηδέν προς τα θετικά και προς τα αρνητικά, τα οποία ενεργοποιούν και απενεργοποιούν (triggering) το κύκλωμα δειγματοληψίας και συγκράτησης (Sample and Hold - S/H) που ακολουθεί. Δρομολογώντας, επιπλέον, τα σήματα των διελεύσεων προς τα θετικά, στην είσοδο του κυκλώματος S/H, στην έξοδο του λαμβάνεται το εικονικό σήμα Hall.

Το υποβοηθητικό υποσύστημα του Σχ. 3.18 κατασκευάζεται για τον υπολογισμό των απαραίτητων διαφορών τάσεων που τροφοδοτούν το σύστημα ανίχνευσης ZCP, εμπεριέχει ωστόσο για λόγους απλούστερης σχεδίασης, και ένα ανεξάρτητο επικουρικό μετρητικό σύστημα για την κοινή απεικόνιση των διαφορών e_{xy}, V_{xy} και τη σύγκριση πραγματικών-εικονικών σημάτων Hall.

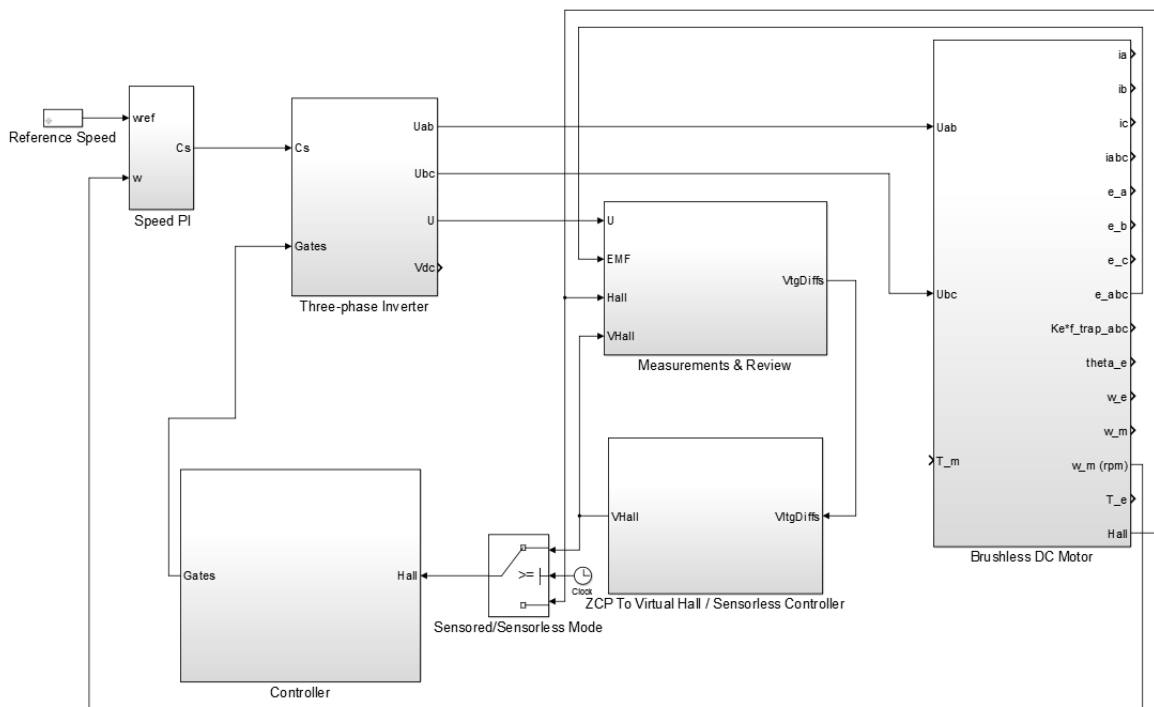
Με την ενσωμάτωση του υποσυστήματος στο μοντέλο του BLDC κινητήρα που συνετέθη στα προηγούμενα, προκύπτει το ολοκληρωμένο μοντέλο BLDC κινητήρα χωρίς αισθητήρες του Σχ. 3.19).



Σχήμα 3.17: Ανίχνευση ZCP και μετατροπή σε εικονικά σήματα Hall



Σχήμα 3.18: Υποβοηθητικό Υ/Σ για υπολογισμούς και συγκρίσεις



Σχήμα 3.19: Μοντέλο διακρίβωσης sensorless τεχνικής στο Matlab/Simulink

Κεφάλαιο 4

Προσομοιώσεις

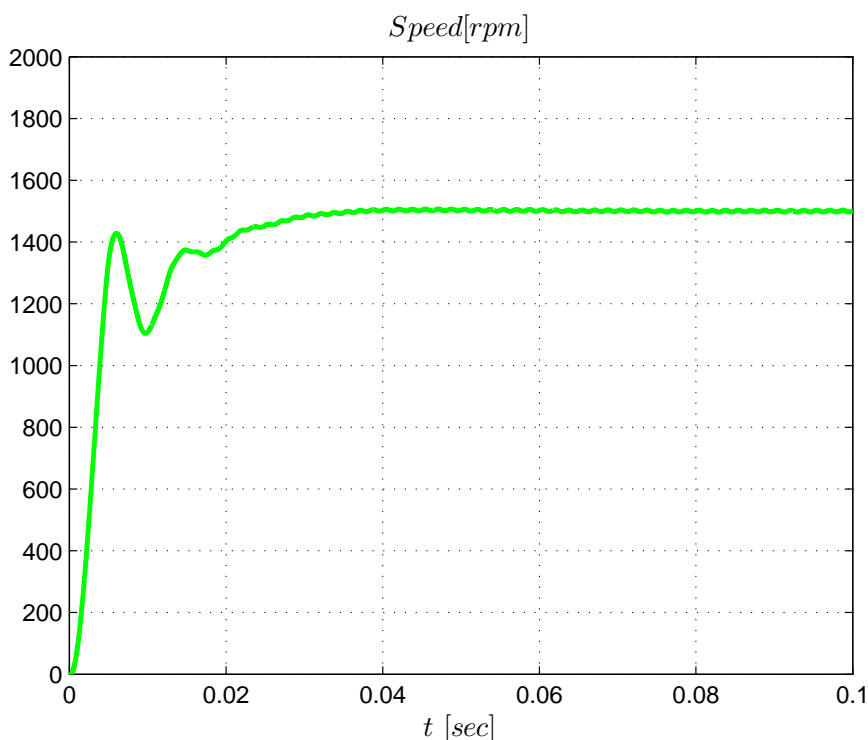
Οι χαρακτηριστικές παράμετροι του κινητήρα για τις προσομοιώσεις παρουσιάζονται στον Πιν.4.1. Η εισαγωγή τους καθώς και οι ρυθμίσεις της προσομοίωσης βρίσκονται στο αρχείο “BLDC_Motor_Parameters.m”. Ακολουθούν τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων που πραγματοποιήθηκαν.

Χαρ/κή παράμετρος	Σύμβολο	Τιμή	Μονάδα Μέτρησης
Ροπή Αδράνειας δρομέα	J	$0.8 \cdot 10^{-3}$	$Kg.m^2$
Σταθερά ΗΕΔ-αντίδρασης	K_e	0.175	$V.(rad/s)^{-1}$
Σταθερά ροπής	K_t	0.175	$N.m/A$
Αντίσταση φάσης	R	2.875	Ω
Επαγωγή	L	0.0085	H
Αριθμός πόλων	P	8	
Σταθερά ιξ. Τριβής	b_v	10^{-3}	$N.m.s$

Πίνακας 4.1: Τιμές των παραμέτρων του κινητήρα για τις προσομοιώσεις

Τα αποτελέσματα της πρώτης προσομοίωσης παρουσιάζονται στα Σχ. 4.1-4.5. Γίνεται έναρξη του κινητήρα ενώ ο η ταχύτητα αναφοράς είναι $1500rpm$. Όπως φαίνεται στο διάγραμμα της ταχύτητας του Σχ. 4.1, ο χρόνος αποκατάστασης είναι $0.04s$ και το σφάλμα μόνιμης κατάστασης είναι $0,4\%$. Στο Σχ. 4.3 εμφανίζονται οι κυματομορφές της παραγόμενης τραπεζοειδούς ΗΕΔ-Αντίδρασης και των ρευμάτων κάθε φάσης, ενώ στο Σχ. 4.4 απεικονίζεται η πολική τάση V_{ab} .

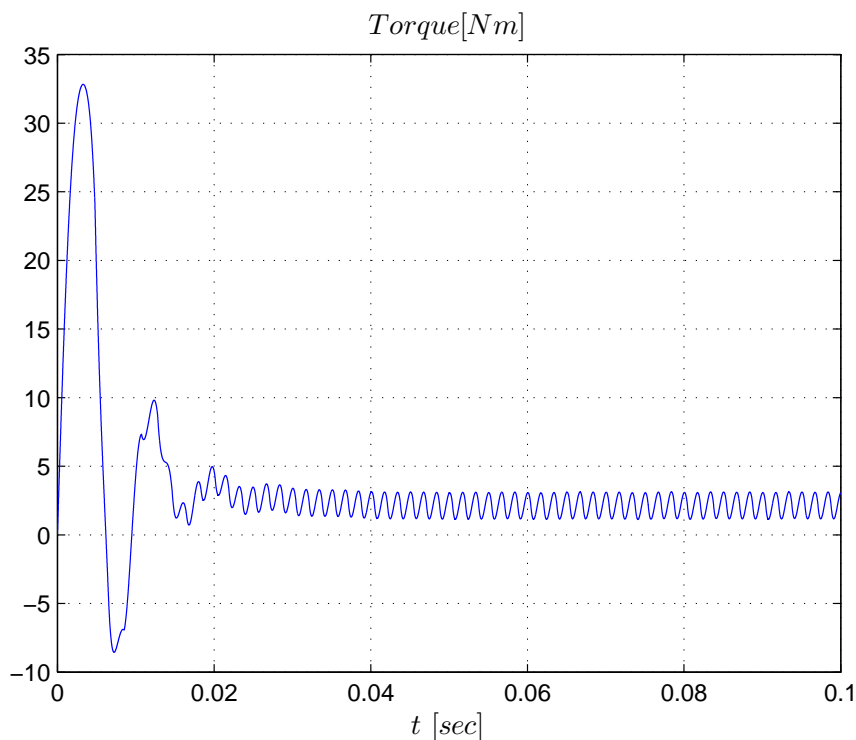
Η απότομη αύξηση και ύστερα βύθιση υπό το μηδέν της κυματομορφής της ροπής κατά την έναρξη της προσομοίωσης οφείλεται στο μη περιορισμό του ρεύματος. Η απότομη αύξηση του ρεύματος συνοδεύεται από αντίστοιχη αύξηση της ταχύτητας (Σχ. 4.1), η οποία με τη σειρά της οδηγεί σε τέτοια αύξηση την συνολική ΗΕΔ-αντίδρασης των ενεργών φάσεων σε σχέση με τις τάσεις τροφοδοσίας, που το ρεύμα αποκτά αντίθετη κατεύθυνση: από τον κινητήρα προς την πηγή ισχύος. Αυτή η υπερδιέγερση οδηγεί στην εμφάνιση της αρνητικής ηλεκτρομαγνητικής ροπής για ένα μικρό διάστημα 3ms στο Σχ. 4.2, κατά το οποίο ο κινητήρας ουσιαστικά βρίσκεται σε λειτουργία πέδησης. Μόλις η ταχύτητα μειωθεί τόσο ώστε η ΗΕΔ-αντίδρασης να αποκτήσει χαμηλότερη τιμή από την τάση τροφοδοσίας, το ρεύμα ρέει προς την ορθή κατεύθυνση, η μηχανή λειτουργεί κανονικά ως κινητήρας.



Σχήμα 4.1: Διάγραμμα Ταχύτητας

Στο Σχ. 4.5 παρατίθεται η ΗΕΔ-αντίδρασης των τριών φάσεων σε σχέση με τα παραγόμενα σήματα των αισθητήρων Hall και στο Σχ. 4.6 η αποκωδικοποίησή τους, σε ένα στιγμιότυπο της προσομοίωσης στο οποίο φαίνονται τα έξι στάδια της μεταγωγής.

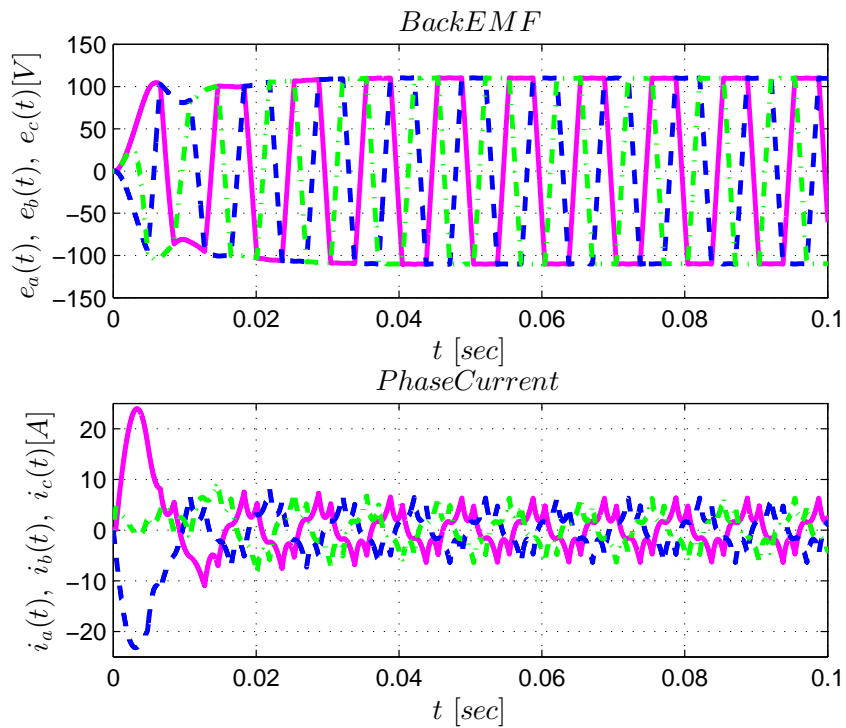
Η επόμενη προσομοίωση εξετάζει τη διακοπτική λειτουργία του ελεγκτή και την



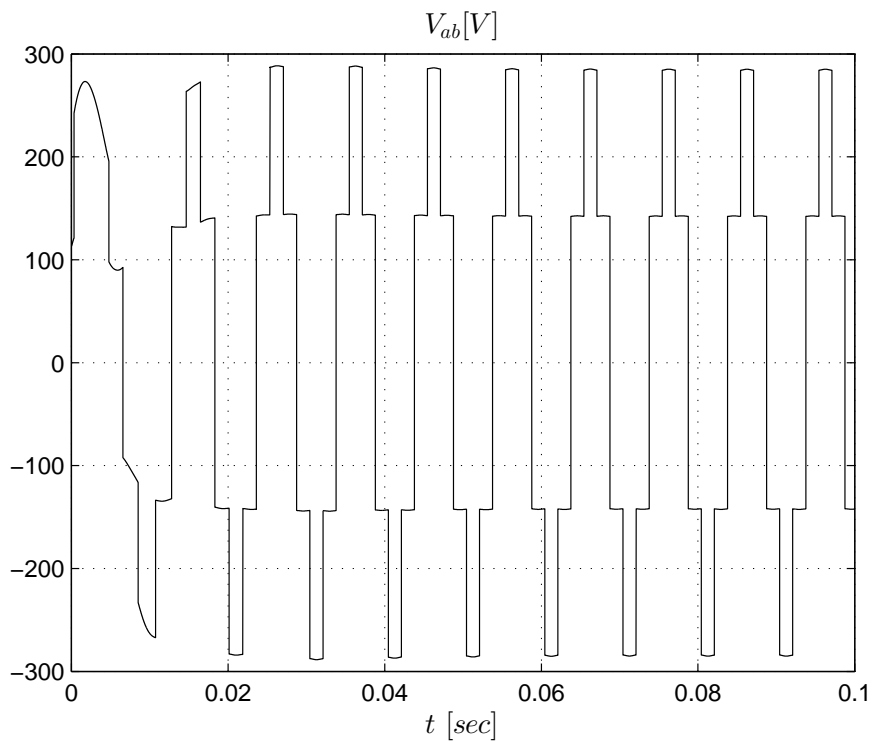
Σχήμα 4.2: Διάγραμμα Ηλεκτρομαγνητικής ροπής

απόκριση του συστήματος στις αλλαγές της ταχύτητας αναφοράς. Ο κινητήρας αρχικά είναι ακίνητος με ταχύτητα αναφοράς $1500rpm$ για $t = 0s$. Η ταχύτητα αναφοράς γίνεται $2500rpm$ για $t = 0.2s$ και $2000rpm$ για $t = 0.3s$. Η απόκριση ταχύτητας του κινητήρα φαίνεται στο Σχ. 4.7. Κατά την πρώτη και μεγαλύτερη αλλαγή στις $2500rpm$, η υπερπήδηση είναι της τάξης του 2% και ο χρόνος αποκατάστασης αυξάνεται σε $0,075s$. Η επιστροφή σε χαμηλότερη ταχύτητα στα $0.3s$ συνοδεύεται με επιστροφή του χρόνου αποκατάστασης στα αρχικά επίπεδα των $0,05s$.

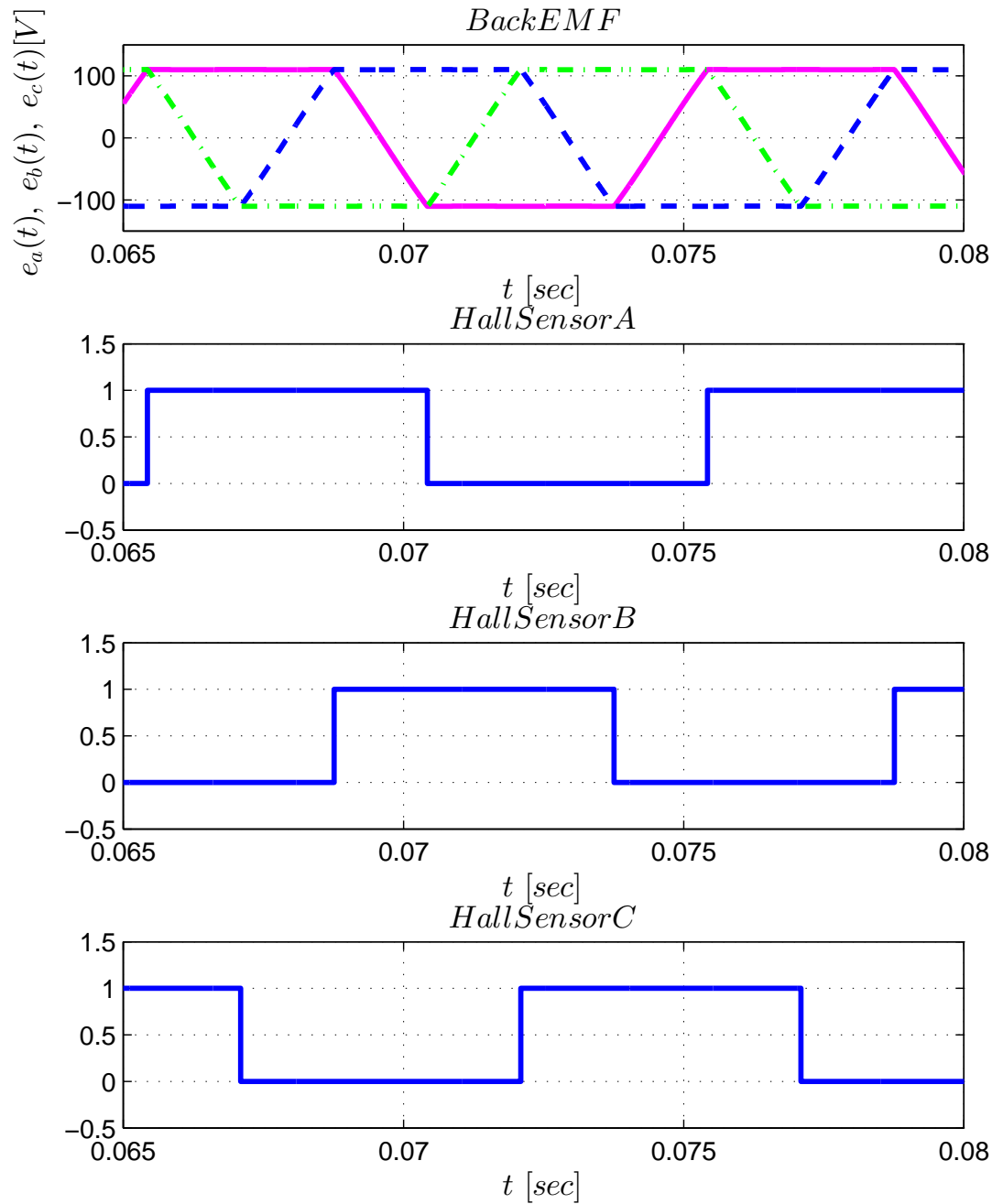
Η αποκατάσταση κυμαίνεται στα ίδια επίπεδα και στην τρίτη προσομοίωση για την απόκριση σε συνθήκες μεταβλητού φορτίου. Το φορτίο διπλασιάζεται σε $4N \cdot m$ όταν $t = 0.15s$. Στο Σχ. 4.8 παρατηρείται η χαρακτηριστική βύθιση της ταχύτητας και η επαναφορά της στις $1500rpm$ σε αναμενόμενο χρόνο, σε σχέση πάντα με τις προηγούμενες προσομοιώσεις. Στο Σχ. 4.9 παρουσιάζεται η επίπτωση της μεταβολής του φορτίου στις κυματομορφές της παραγόμενης Η/Μ ροπής και του ρεύματος της φάσης a . Παρατηρείται η κατάλληλη αύξηση του ρεύματος ώστε ο κινητήρας να διατηρεί την ταχύτητα του με την αύξηση του φορτίου, διατηρώντας τη συνολική ροπή $T_e - T_L$ σταθερή.



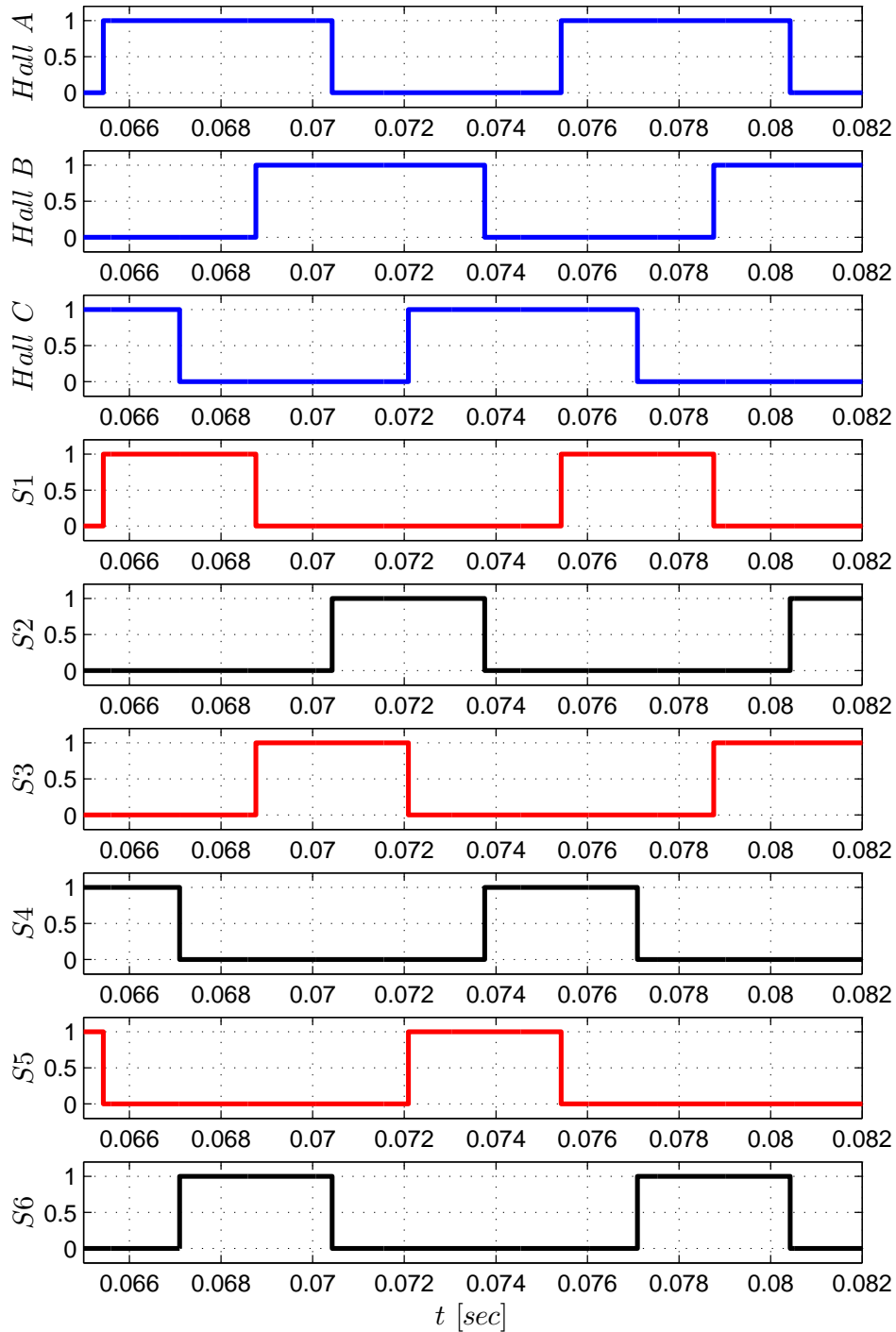
Σχήμα 4.3: ΗΕΔ-αντίδρασης και ρεύμα στις τρεις φάσεις



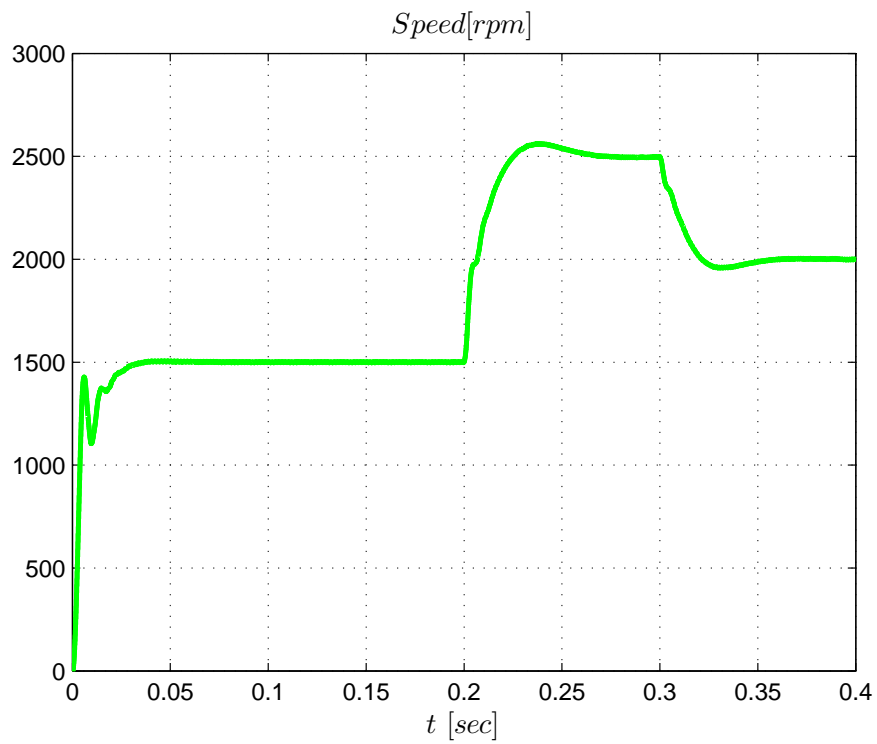
Σχήμα 4.4: Η κυματομορφή της πολικής τάσης V_{ab}



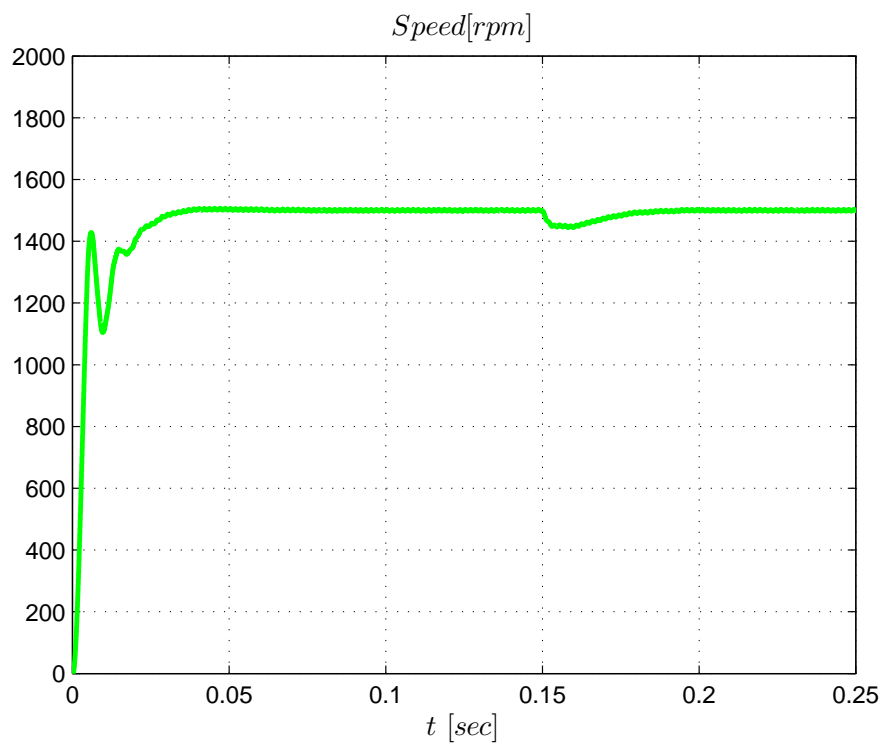
Σχήμα 4.5: ΗΕΔ-αντίδρασης και σήματα αισθητήρων Hall



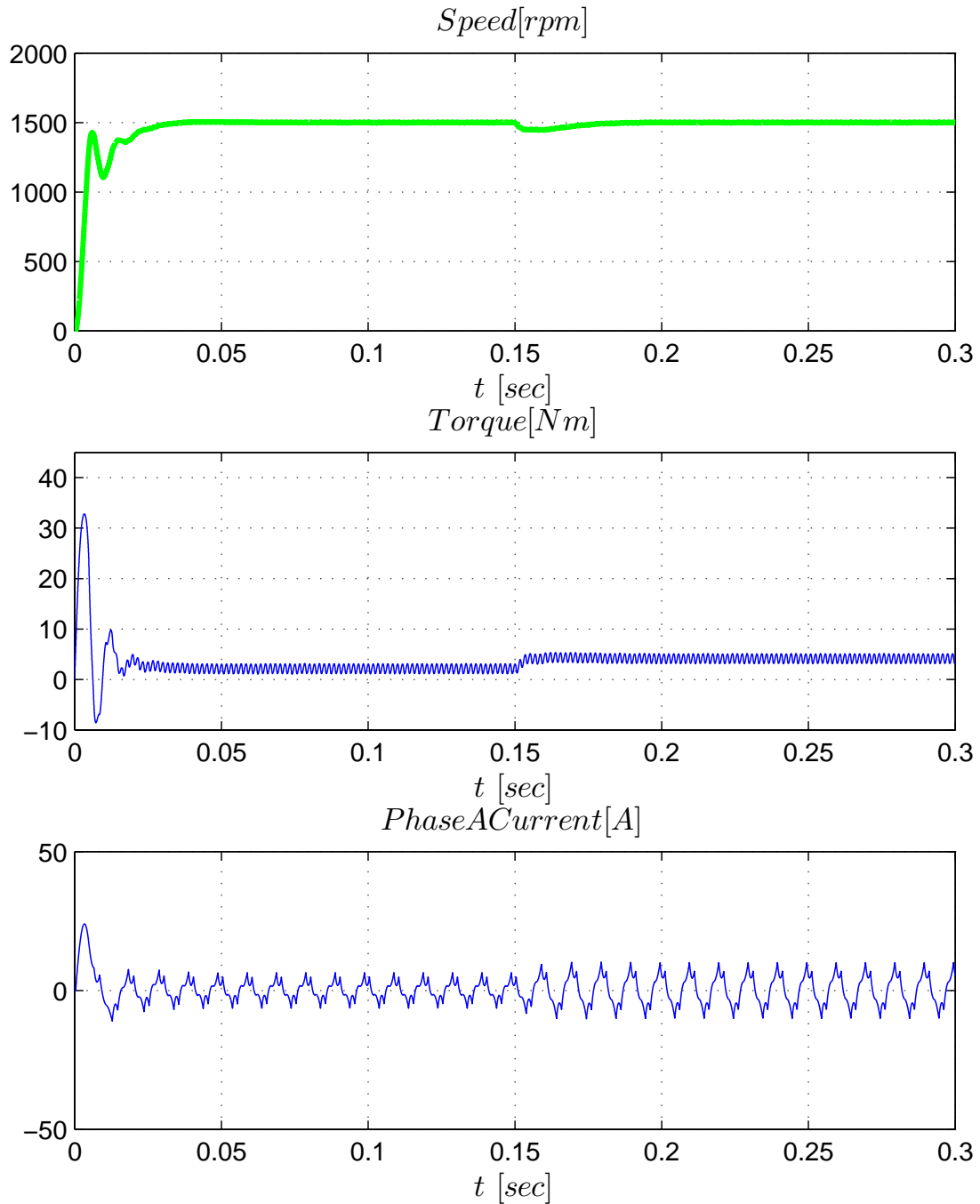
Σχήμα 4.6: Αποκωδικοποίηση σημάτων Hall και αλληλουχία μεταγωγής



Σχήμα 4.7: Διακοπτική λειτουργία - αλλαγή ταχύτητας αναφοράς

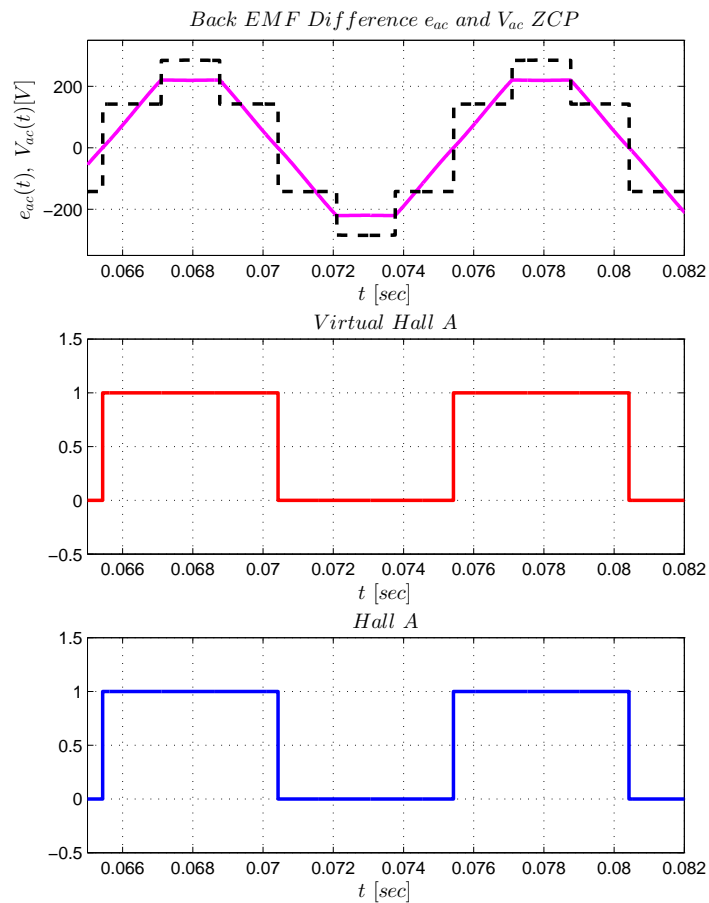


Σχήμα 4.8: Μεταβλητό Φορτίο - Διάγραμμα ταχύτητας

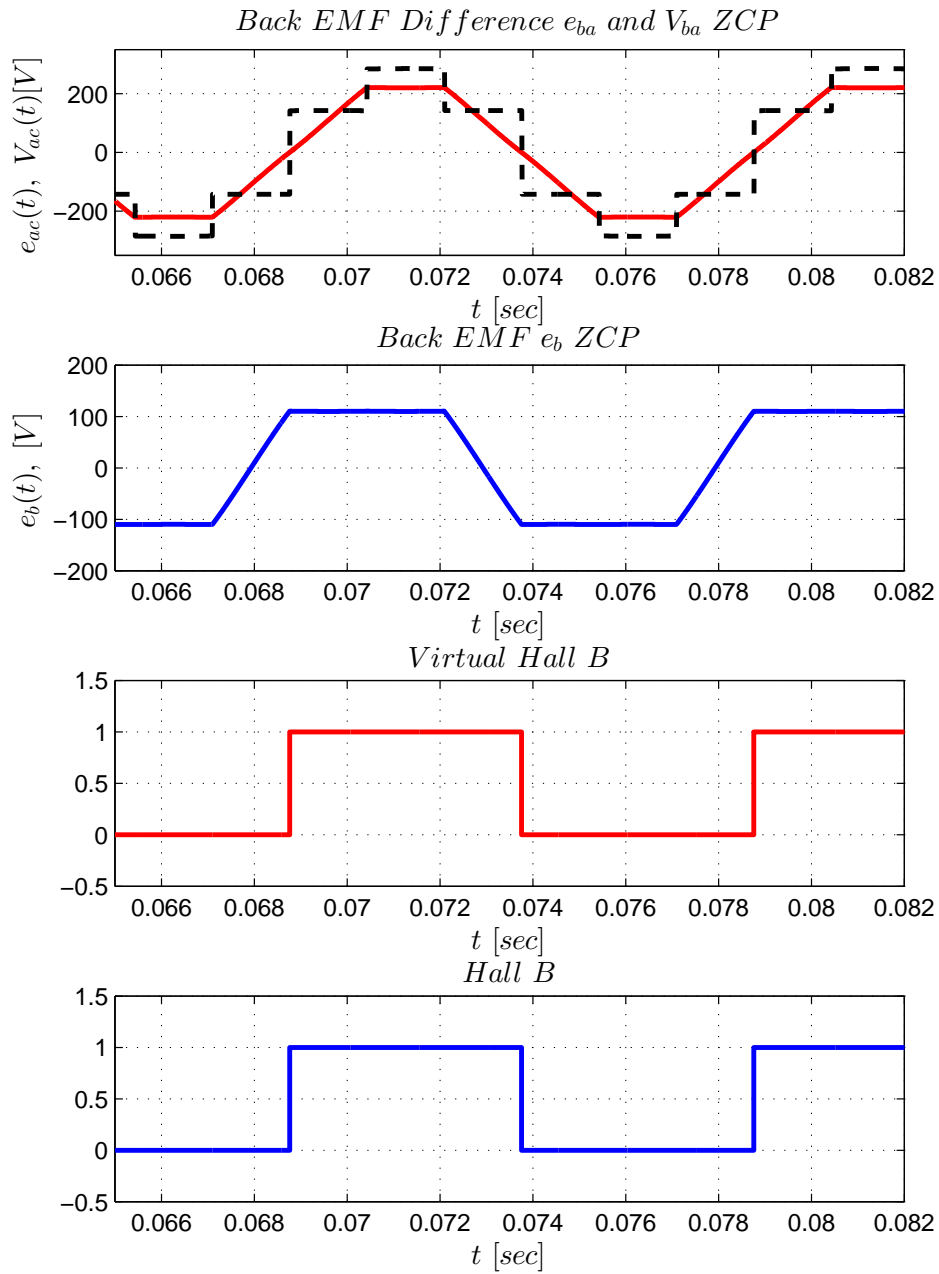


Σχήμα 4.9: Μεταβλητό Φορτίο - Ταχύτητα - Η/Μ Ροπή - Ρεύμα φάσης A

Στη συνέχεια πραγματοποιείται η προσομοίωση της sensorless τεχνικής με την ανίχνευση των ZCP των διαφορών των ΗΕΔ-αντίδρασης μεταξύ φάσεων. Το μοντέλο ανταποκρίνεται με τον ίδιο τρόπο στα σενάρια που εξετάστηκαν στα προηγούμενα, καθώς τα παραγόμενα μέσω ανίχνευσης των ZCP, εικονικά σήματα Hall ταυτίζονται με τα πραγματικά. Αυτό αντικατοπτρίζεται πλήρως στα Σχ. 4.10 και 4.11. Επιπλέον, επιβεβαιώνεται ότι τα ZCP των πολικών τάσεων τροφοδοσίας και των διαφορών των ΗΕΔ-αντίδρασης ταυτίζονται μεταξύ τους, αλλά και με τα κρίσιμα σημεία μεταγωγής. Στο Σχ. 4.11 γίνεται εμφανής ο λόγος που οι συμβατικές μέθοδοι ανίχνευσης των ZCP της ΗΕΔ-αντίδρασης εμφανίζουν την ανάγκη για αντιστάθμιση φάσης: Τα ZCP στην περίπτωση αυτή, προηγούνται κατά 30 ηλεκτρικές μοίρες των χρονικών σημείων μεταγωγής, όπως μπορεί να γίνει διακριτό, στο συγκεκριμένο διάγραμμα, από τα ZCP της e_b .



Σχήμα 4.10: ZCP e_{ac} , V_{ac} , εικονικά και πραγματικά σήματα Hall - Φάση A



Σχήμα 4.11: ZCP e_{ba}, V_{ba} , ZCP e_b , εικονικά και πραγματικά σήματα Hall - Φάση B

Κεφάλαιο 5

Επίλογος

5.1 Συμπεράσματα

Στην παρούσα εργασία πραγματοποιήθηκε ανάλυση των βασικών αρχών που διέπουν τη λειτουργία των κινητήρων BLDC. Με βάση αυτές, έγινε η μαθηματική μοντελοποίηση του κινητήρα, και κατασκευάστηκε ένα πλήρως λειτουργικό μοντέλο με όλα τα απαραίτητα υποσυστήματα για την οδήγηση και τον έλεγχο της ταχύτητας του κινητήρα BLDC. Επιπλέον, το μοντέλο χρησιμοποιήθηκε ως βάση για την προσομοίωση μιας τεχνικής ελέγχου χωρίς αισθητήρες. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων επιβεβαιώνουν την ορθή και αναμενόμενη λειτουργία του μοντέλου σε σχέση με τον σχεδιασμό του, ενώ η ιδανική συμπεριφορά που εμφανίζει σε αρκετά σημεία των προσομοιώσεων αντανακλά τις αντίστοιχες παραδοχές που έγιναν κατά την μοντελοποίηση.

5.2 Μελλοντική εργασία

Στην κατεύθυνση της αναβάθμισης της λειτουργίας του μοντέλου, προτείνεται η ενσωμάτωση επιπλέον τεχνικών οδήγησης ή ελέγχου για τη δυνατότητα συγκριτικών προσομοιώσεων. Με ορισμένες αλλαγές το μοντέλο θα μπορούσε να φιλοξενήσει έναν ακόμα εσωτερικό βρόγχο για τον έλεγχο του ρεύματος, καθώς και τεχνικές για τη μείωση της κυμάτωσης της ροπής, ώστε να μπορεί να ανταποκριθεί καλύτερα σε προσομοιώσεις κινητήρων για εφαρμογές μεταβλητού φορτίου. Ορισμένες από τις προαναφερθείσες εφαρμογές είναι:

- Ηλεκτρικοί κινητήρες σε οικιακές συσκευές
- Ηλεκτρικά Εργαλεία
- Ηλεκτρικοί κινητήρες που χρησιμοποιούνται στη ρομποτική και στον μοντελισμό
- Πληθώρα εφαρμογών στην αυτοκίνηση (automotive)

Μια ακόμα δυνατή κατεύθυνση αποτελεί η ανάπτυξη γραφικού περιβάλλοντος (Graphical User Interface - GUI) για την ευκολότερη ρύθμιση των παραμέτρων και απεικόνιση των αποτελεσμάτων, ιδιαίτερα σε περίπτωση χρήσης του μοντέλου για εκπαιδευτικούς σκοπούς, στα πλαίσια της εξοικείωσης με τη μοντελοποίηση ειδικών ηλεκτρικών κινητήρων στο Simulink. Τέλος, τα πειραματικά αποτελέσματα μέσω δοκιμών των συγκεκριμένων τεχνικών ελέγχου σε πραγματικούς κινητήρες, θα έδιναν τη δυνατότητα για μια πιο λεπτομερή παραμετροποίηση του μοντέλου, ώστε αυτό να προσομοιώνεται ακόμα καλύτερα η πραγματική συμπεριφορά του BLDC κινητήρα.

Παράρτημα

Για εκπαιδευτικούς σκοπούς κρίθηκε απαραίτητο να παρατεθούν οι κώδικες που χρησιμοποιήθηκαν για τις αριθμητικές προσομοιώσεις της παρούσας εργασίας. Τα μοντέλα προσομοίωσης που χρησιμοποιήθηκαν στο λογισμικό SIMULINK μπορούν να ευρεθούν στον οπτικό δίσκο που συνοδεύει την εργασία.

```
1 %% Thesis Matlab Code
2
3 clc ;
4 clear all ;
5 close all ;
6 format short ;
7
8 %% BLDC_Motor Parameters
9
10 % (J)      Moment of Inertia of The Rotor (kg.m2)
11 J =0.8e -3;
12
13 % (Kb)     Motor viscous friction constant (Nms)
14 Kb =1e -3;
15
16 % (Ke)     electromotive force constant (V/rad/sec)
17 Ke=0.175 ;
18
19 % (Kt)     motor torque constant (Nm/Amp)
20 Kt=0.175 ;
21
```

```

22 % (R)      electric resistance      (ohm)
23 R = 2.875;
24
25 % (L)      electric inductance     (H)
26 L = 0.0085;
27
28 % (Vin) Input Voltage (Volt)
29 %Vin=20;
30
31 % (P) Number Of Poles
32 P = 8;
33
34 % Speed PI (Manual) Gains
35 Kps = 0.15;
36 Kis = 35;
37
38 sim('ak05_blcdc_2110');
39 %set_param('ak05_blcdc_2110','StopTime','0.1'); % for normal test
40 %set_param('ak05_blcdc_2110','StopTime','0.4'); % for speed control test
41 set_param('ak05_blcdc_2110','StopTime','0.3'); % for variable load speed ...
      control test
42 set_param('ak05_blcdc_2110','Solver','ode113');
43 set_param('ak05_blcdc_2110','MaxStep','1e-5');
44 set_param('ak05_blcdc_2110','RelTol','1e-3');
45 set_param('ak05_blcdc_2110','AbsTol','auto');
46
47 %% Figure 1 Speed
48
49 fon = 12; % variable for text font size
50
51 fig1 = figure(1);
52 plot(omegam(:,1),omegam(:,2),'g','LineWidth',2);
53 hold on;
54 grid on;
55 axis([0 0.1 0 2000]);
56 title('$Speed \ [rpm]$', 'interpreter','latex','fontsize',fon);

```



```

57 xlabel('$t \ [sec]$', 'interpreter', 'latex', 'fontsize', fon);
58
59 %% Figure 2 EM Torque
60
61 fig2 = figure(2);
62 plot(torque(:,1), torque(:,2), 'b');
63 hold on;
64 grid on;
65 axis([0 0.1 -10 35]);
66 title('$Torque [Nm]$', 'interpreter', 'latex', 'fontsize', fon);
67 xlabel('$t \ [sec]$', 'interpreter', 'latex', 'fontsize', fon);
68
69 %% Figure 3 Vab
70
71 fig4 = figure(4);
72 plot(Vab(:,1), Vab(:,2), 'k');
73 hold on;
74 grid on;
75 axis([0 0.1 -300 300]);
76 title('$V_{ab} [V]$', 'interpreter', 'latex', 'fontsize', fon);
77 xlabel('$t \ [sec]$', 'interpreter', 'latex', 'fontsize', fon);
78
79 %% Subfigure 4.1 Back Emf
80
81 fig3 = figure(3);
82 subplot(2,1,1);
83
84 f1 = plot(ea(:,1), ea(:,2), 'm-', eb(:,1), eb(:,2), 'b--', ec(:,1), ...
           ec(:,2), 'g-.');
85
86 set(f1(1), 'LineWidth', 2);
87 set(f1(2), 'LineWidth', 2);
88 set(f1(3), 'LineWidth', 2);
89
90 ymin = -150;
91 ymax = 150;

```

```

92 axis([0 0.1 ymin ymax]);
93 title('$Back EMF$', 'interpreter', 'latex', 'fontsize', fon);
94 xlabel('$t \ [sec]$', 'interpreter', 'latex', 'fontsize', fon);
95 ylabel('$e_a(t), \ e_b(t), \ e_c(t) ...
          [V]$', 'interpreter', 'latex', 'fontsize', fon);
96 grid on;
97
98 %% Subfigure 4.2 Phase Current
99
100 subplot(2,1,2);
101
102 f2 = plot(ia(:,1), ia(:,2), 'm-', ib(:,1), ib(:,2), 'b--', ic(:,1), ...
          ic(:,2), 'g-.'');
103
104 set(f2(1), 'LineWidth', 2);
105 set(f2(2), 'LineWidth', 2);
106 set(f2(3), 'LineWidth', 2);
107
108 ymin = -25;
109 ymax = 25;
110 axis([0 0.1 ymin ymax]);
111 title('$Phase Current$', 'interpreter', 'latex', 'fontsize', fon);
112 xlabel('$t \ [sec]$', 'interpreter', 'latex', 'fontsize', fon);
113 ylabel('$i_a(t), \ i_b(t), \ i_c(t) ...
          [A]$', 'interpreter', 'latex', 'fontsize', fon);
114 grid on;
115
116 %% Figure 5 Hall Sensors
117
118 fig5 = figure(5);
119
120 subplot(4,1,1);
121
122 f1 = plot(ea(:,1), ea(:,2), 'm-', eb(:,1), eb(:,2), 'b--', ec(:,1), ...
          ec(:,2), 'g-.'');
123

```

```

124 set(f1(1), 'LineWidth', 2);
125 set(f1(2), 'LineWidth', 2);
126 set(f1(3), 'LineWidth', 2);
127
128 ymin = -150;
129 ymax = 150;
130 axis([0.065 0.08 ymin ymax]);
131 title('$Back EMF$', 'interpreter', 'latex', 'fontsize', fon);
132 xlabel('$t \ [sec]$', 'interpreter', 'latex', 'fontsize', fon);
133 ylabel('$e_a(t), \ e_b(t), \ e_c(t) ...
      [V]$', 'interpreter', 'latex', 'fontsize', fon);
134 grid on;
135
136 subplot(4,1,2);
137
138 plot(ha(:,1), ha(:,2), 'b', 'LineWidth', 2);
139 hold on;
140 grid on;
141 axis([0.065 0.08 -0.5 1.5]);
142 title('$Hall Sensor A$', 'interpreter', 'latex', 'fontsize', fon);
143 xlabel('$t \ [sec]$', 'interpreter', 'latex', 'fontsize', fon);
144
145 subplot(4,1,3);
146
147 plot(hb(:,1), hb(:,2), 'b', 'LineWidth', 2);
148 hold on;
149 grid on;
150 axis([0.065 0.08 -0.5 1.5]);
151 title('$Hall Sensor B$', 'interpreter', 'latex', 'fontsize', fon);
152 xlabel('$t \ [sec]$', 'interpreter', 'latex', 'fontsize', fon);
153
154 subplot(4,1,4);
155
156 plot(hc(:,1), hc(:,2), 'b', 'LineWidth', 2);
157 hold on;
158 grid on;

```

```

159 axis([0.065 0.08 -0.5 1.5]);
160 title('$Hall Sensor C$', 'interpreter', 'latex', 'fontsize', fon);
161 xlabel('$t \ [sec]$', 'interpreter', 'latex', 'fontsize', fon);
162
163 %% Figure 6 Speed Control
164
165 fig6 = figure(6);
166 plot(omegam(:,1), omegam(:,2), 'g', 'LineWidth', 2);
167 hold on;
168 grid on;
169 axis([0 0.4 0 3000]);
170 title('$Speed \ [rpm]$', 'interpreter', 'latex', 'fontsize', fon);
171 xlabel('$t \ [sec]$', 'interpreter', 'latex', 'fontsize', fon);
172
173 %% Figure 7 Speed Control At Variable Load
174
175 fig7 = figure(7);
176
177 subplot(3,1,1);
178
179 plot(omegam(:,1), omegam(:,2), 'g', 'LineWidth', 2);
180 hold on;
181 grid on;
182 axis([0 0.3 0 2000]);
183 title('$Speed \ [rpm]$', 'interpreter', 'latex', 'fontsize', fon);
184 xlabel('$t \ [sec]$', 'interpreter', 'latex', 'fontsize', fon);
185
186 subplot(2,1,1);
187 plot(torque(:,1), torque(:,2), 'b');
188 hold on;
189 grid on;
190 axis([0 0.3 -10 45]);
191 title('$Torque \ [Nm]$', 'interpreter', 'latex', 'fontsize', fon);
192 xlabel('$t \ [sec]$', 'interpreter', 'latex', 'fontsize', fon);
193
194 subplot(2,1,2);

```

```

195
196 plot(ia(:,1), ia(:,2), 'b');
197 hold on;
198 grid on;
199 axis([0 0.3 -50 50]);
200 title('$Phase A Current [A]$', 'interpreter', 'latex', 'fontsize', fon);
201 xlabel('$t \ [sec]$', 'interpreter', 'latex', 'fontsize', fon);
202
203 %% 7 Sensorless Operation Plots with Back-EMF Difference ZCP Detection ...
      Technique
204 fig8 = figure(8);
205
206 subplot(3,1,1);
207
208 f1 = plot(eac(:,1), eac(:,2), 'm-', vac(:,1), vac(:,2), 'k--');
209
210 set(f1(1), 'LineWidth', 2);
211 set(f1(2), 'LineWidth', 2);
212
213
214
215 axis([0.065 0.082 -350 350]);
216 title('$Back \ EMF \ Difference \ e_{ac} \ and \ V_{ac} \ ...
      ZCP$', 'interpreter', 'latex', 'fontsize', fon);
217 xlabel('$t \ [sec]$', 'interpreter', 'latex', 'fontsize', fon);
218 ylabel('$e_{ac}(t), \ V_{ac}(t) \ ...
      [V]$', 'interpreter', 'latex', 'fontsize', fon);
219 grid on;
220
221 subplot(3,1,2);
222
223 plot(vhalla(:,1), vhalla(:,2), 'r', 'LineWidth', 2);
224 hold on;
225 grid on;
226 axis([0.065 0.082 -0.5 1.5]);
227 title('$Virtual \ Hall \ AS$', 'interpreter', 'latex', 'fontsize', fon);

```

```

228 xlabel('$t \ [sec]$', 'interpreter', 'latex', 'fontsize', fon);
229
230 subplot(3,1,3);
231
232 plot(ha(:,1), ha(:,2), 'b', 'LineWidth', 2);
233 hold on;
234 grid on;
235 axis([0.065 0.082 -0.5 1.5]);
236 title('$Hall \ A$', 'interpreter', 'latex', 'fontsize', fon);
237 xlabel('$t \ [sec]$', 'interpreter', 'latex', 'fontsize', fon);
238
239 fig9 = figure(9);
240
241 subplot(4,1,1);
242
243 f1 = plot(eba(:,1), eba(:,2), 'r-', vba(:,1), vba(:,2), 'k--');
244
245 set(f1(1), 'LineWidth', 2);
246 set(f1(2), 'LineWidth', 2);
247
248
249
250 axis([0.065 0.082 -350 350]);
251 title('$Back \ EMF \ Difference \ e_{ba} \ and \ V_{ba} \ ...
      ZCP$', 'interpreter', 'latex', 'fontsize', fon);
252 xlabel('$t \ [sec]$', 'interpreter', 'latex', 'fontsize', fon);
253 ylabel('$e_{ac}(t), \ V_{ac}(t) \ ...
      [V]$', 'interpreter', 'latex', 'fontsize', fon);
254 grid on;
255
256 subplot(4,1,2);
257
258 f2 = plot(eb(:,1), eb(:,2), 'b-');
259 set(f2(1), 'LineWidth', 2);
260
261 axis([0.065 0.082 -200 200]);

```

```

262 title('$Back \ EMF \ e_{b} \ ZCP$', 'interpreter', 'latex', 'fontsize', fon);
263 xlabel('$t \ [sec]$', 'interpreter', 'latex', 'fontsize', fon);
264 ylabel('$e_{b}(t), \ [V]$', 'interpreter', 'latex', 'fontsize', fon);
265 grid on;
266
267 subplot(4,1,3);
268
269 plot(vhallb(:,1), vhallb(:,2), 'r', 'LineWidth', 2);
270 hold on;
271 grid on;
272 axis([0.065 0.082 -0.5 1.5]);
273 title('$Virtual \ Hall \ B$', 'interpreter', 'latex', 'fontsize', fon);
274 xlabel('$t \ [sec]$', 'interpreter', 'latex', 'fontsize', fon);
275
276 subplot(4,1,4);
277
278 plot(hb(:,1), hb(:,2), 'b', 'LineWidth', 2);
279 hold on;
280 grid on;
281 axis([0.065 0.082 -0.5 1.5]);
282 title('$Hall \ B$', 'interpreter', 'latex', 'fontsize', fon);
283 xlabel('$t \ [sec]$', 'interpreter', 'latex', 'fontsize', fon);

```


Βιβλιογραφία

- [1] P. Yedamale, “Brushless dc (bldc) motor fundamentals,” *Microchip Technology Inc*, p. 20, 2003.
- [2] C.-l. Xia, *Permanent magnet brushless DC motor drives and controls*. John Wiley & Sons, 2012.
- [3] J. T. Le, C. Ribeiro, and M. Mendoza, “Designing high-performance and power efficient 3-phase brushless dc motor control systems,” *Micrel Inc*, 2014.
- [4] A. Kusko and S. Peeran, “Definition of the brushless dc motor,” in *Industry Applications Society Annual Meeting, 1988., Conference Record of the 1988 IEEE*. IEEE, 1988, pp. 20–22.
- [5] T. A. Lipo and F. G. Turnbull, “Analysis and comparison of two types of square-wave inverter drives,” *Industry Applications, IEEE Transactions on*, no. 2, pp. 137–147, 1975.
- [6] T. M. Jahns and W. L. Soong, “Pulsating torque minimization techniques for permanent magnet ac motor drives—a review,” *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 43, no. 2, pp. 321–330, 1996.
- [7] J. P. Johnson, M. Ehsani, and Y. Guzelgunler, “Review of sensorless methods for brushless dc,” in *Industry Applications Conference, 1999. Thirty-Fourth IAS Annual Meeting. Conference Record of the 1999 IEEE*, vol. 1. IEEE, 1999, pp. 143–150.

- [8] K. Iizuka, H. Uzuhashi, M. Kano, T. Endo, and K. Mohri, “Microcomputer control for sensorless brushless motor,” *Industry Applications, IEEE Transactions on*, no. 3, pp. 595–601, 1985.
- [9] J. C. Gamazo-Real, E. Vázquez-Sánchez, and J. Gómez-Gil, “Position and speed control of brushless dc motors using sensorless techniques and application trends,” *Sensors*, vol. 10, no. 7, pp. 6901–6947, 2010.
- [10] J. Shao, D. Nolan, and T. Hopkins, “Improved direct back emf detection for sensorless brushless dc (bldc) motor drives,” in *Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2003. APEC’03. Eighteenth Annual IEEE*, vol. 1. IEEE, 2003, pp. 300–305.
- [11] Q. Jiang, C. Bi, and R. Huang, “A new phase-delay-free method to detect back emf zero-crossing points for sensorless control of spindle motors,” *Magnetics, IEEE Transactions on*, vol. 41, no. 7, pp. 2287–2294, 2005.
- [12] P. Damodharan and K. Vasudevan, “Sensorless brushless dc motor drive based on the zero-crossing detection of back electromotive force (emf) from the line voltage difference,” *Energy Conversion, IEEE Transactions on*, vol. 25, no. 3, pp. 661–668, 2010.
- [13] T. Kim, C. Kim, and J. Lyou, “A new sensorless drive scheme for a bldc motor based on the terminal voltage difference,” in *IECON 2011-37th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society*. IEEE, 2011, pp. 1710–1715.
- [14] M. John and V. Thomas, “Position sensorless control of bldc motor based on back emf difference estimation method,” in *Power and Energy Systems Conference: Towards Sustainable Energy, 2014*. IEEE, 2014, pp. 1–6.
- [15] P. Pillay and R. Krishnan, “Modeling, simulation, and analysis of permanent-magnet motor drives. ii. the brushless dc motor drive,” *Industry Applications, IEEE Transactions on*, vol. 25, no. 2, pp. 274–279, 1989.

- [16] B.-K. Lee and M. Ehsani, “Advanced simulation model for brushless dc motor drives,” *Electric power components and systems*, vol. 31, no. 9, pp. 841–868, 2003.
- [17] S. Baldursson, “Blcdc motor modelling and control-a matlab®/simulink® implementation,” 2005.
- [18] M.-F. Tsai, T. P. Quy, B.-F. Wu, and C.-S. Tseng, “Model construction and verification of a blcdc motor using matlab/simulink and fpga control,” in *Industrial Electronics and Applications (ICIEA), 2011 6th IEEE Conference on*. IEEE, 2011, pp. 1797–1802.
- [19] Μ. Ιωαννίδου, *Συστήματα Ειδικών Ηλεκτρικών Κινητήρων*. Πανεπιστημιακές Εκδόσεις ΕΜΠ, 2008.
- [20] S. Chapman, *Electric machinery fundamentals*. Tata McGraw-Hill Education, 2005.
- [21] R. Krishnan, *Permanent Magnet Synchronous and Brushless DC Motor Drives*. Taylor & Francis, 2009.