

Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών Τομέας Ηλεκτρικής Ισχύος

Σχεδιασμός και Υλοποίηση Εργαστηριακού Δυναμομέτρου για Συστήματα Ηλεκτρικής Κίνησης

Διπλωματική Εργασία Ευστάθιος Κόρακας

Επιβλέπων: Αντώνιος Αντωνόπουλος Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Μάρτιος 2025



Εθνιχό Μετσόβιο Πολυτεχνείο Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηγανικών Υπολογιστών Τομέας Ηλεκτρικής Ισχύος

Σχεδιασμός και Υλοποίηση Εργαστηριακού Δυναμομέτρου για Συστήματα Ηλεκτρικής Κίνησης

Διπλωματική Εργασία Ευστάθιος Κόραχας

Επιβλέπων: Αντώνιος Αντωνόπουλος Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή στις 15 Μαρτίου 2025

..... Αντώνιος Αντωνόπουλος Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

..... Αντώνιος Κλαδάς

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

Αθήνα, Μάρτιος 2025

.....

Ευστάθιος Α. Κόραχας Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

Copyright © Ευστάθιος Κόραχας, 2025 Με επιφύλαξη παντός διχαιώματος. 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.

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματεύεται τον σχεδιασμό και την υλοποίηση ενός εργαστηριακού δυναμομέτρου που προορίζεται για τη μέτρηση και την ανάλυση των χαρακτηριστικών συστημάτων ηλεκτρικής κίνησης. Το έργο περιλαμβάνει τη θεωρητική ανάλυση και τη πρακτική εφαρμογή των ηλεκτρονικών ισχύος και των ηλεκτρικών μηχανών κίνησης, καθώς και την ανάπτυξη και δοκιμή ελεγκτών για τη βελτιστοποίηση της λειτουργίας τους.

Αρχικά, αναλύονται οι βασικές αρχές των ηλεκτρονικών ισχύος, εστιάζοντας στους DC-DC μετατροπείς πλήρους γέφυρας και στους τριφασικούς αντιστροφείς. Παρουσιάζονται οι αρχές λειτουργίας τους, οι τεχνικές διαμόρφωσης PWM και οι εφαρμογές τους σε συστήματα ελέγχου ταχύτητας ηλεκτρικών κινητήρων.

Στην συνέχεια, εξετάζεται η αρχή λειτουργίας της μηχανής συνεχούς ρεύματος, το δυναμικό μοντέλο της και οι παράμετροι που την επηρεάζουν. Αναλύονται τα συστήματα ελέγχου, όπως οι ελεγκτές ρεύματος και ταχύτητας, και παρουσιάζεται η διαδικασία σχεδίασης και υλοποίησης των ελεγκτών.

Αχολουθεί η ανάλυση της λειτουργίας της επαγωγιχής μηχανής, μια λεπτομερής περιγραφή του δυναμιχού της μοντέλου και μια γενιχή αναφορά στα τριφασιχά συστήματα ισχύος. Παρουσιάζεται η διανυσματιχή μέθοδος ελέγχου, η οποία επιτρέπει την αχριβή ρύθμιση της λειτουργίας της μηχανής.

Με βάση όλα τα παραπάνω, επιτυγχάνεται ο σχεδιασμός του ηλεκτρικού δυναμομέτρου τόσο σε επίπεδο προσομοίωσης όσο και σε φυσικό σύστημα. Γίνεται περιγραφή της συνδεσμολογίας του συστήματος και οι απαιτήσεις για τη μέτρηση ροπής και ταχύτητας. Παρουσιάζονται οι ελεγκτές που χρησιμοποιούνται για τη ρύθμιση της ταχύτητας και της ροπής, καθώς και η διαδικασία εκκίνησης του συστήματος. Υπολογίζονται οι χάρτες λειτουργίας κάθε μηχανής, αλλά και του συνολικού συστήματος με βάση τον αλγόριθμο MTPV. Ακόμα, αναφέρεται το σύστημα επικοινωνίας CAN bus για τη λήψη της μέτρησης της ταχύτητας περιστροφής σε όλους τους ελεγκτές.

Τέλος, περιγράφονται οι μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν για την αξιολόγηση της απόδοσης του δυναμομέτρου. Αναλύονται οι μετρήσεις ταχύτητας και ρεύματος, καθώς και η δυναμική συμπεριφορά των μηχανών κατά τη διάρκεια των δοκιμών. Παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των πειραμάτων, οι παρατηρήσεις σχετικά με τη συμπεριφορά των ελεγκτών και οι επιπτώσεις των απωλειών στο πραγματικό σύστημα.

Οι προσομοιώσεις πραγματοποιήθηκαν στο περιβάλλον Plecs, ενώ οι κυματομορφές που παρουσιάζονται, πραγματοποιήθηκαν σε προγραμματιστικό περιβάλλον python.

Λέξεις Κλειδιά

Δυναμόμετρο, Ηλεκτρική Κίνηση, Ηλεκτρονικά Ισχύος, DC-DC Μετατροπέας, Τριφασικός Αντιστροφέας, Μηχανή Συνεχούς Ρεύματος (DC), Μηχανή Επαγωγής (AC), Ελεγκτής Ρεύματος, Ελεγκτής Ταχύτητας, Διανυσματικός Έλεγχος, Δυναμική Συμπεριφορά, CAN Bus, Χάρτης Λειτουργίας

Abstract

This thesis deals with the design and implementation of a laboratory dynamometer intended for the measurement and analysis of the characteristics of electric drive systems. The project includes the theoretical analysis and practical application of power electronics and electric drive motors, as well as the development and testing of controllers to optimize their operation.

Initially, the basic principles of power electronics are analyzed, focusing on DC-DC fullbridge converters and three-phase inverters. Their operating principles, PWM modulation techniques and their applications in electric motor speed control systems are presented.

Next, the operating principle of the DC machine, its dynamic model and the parameters that affect it are examined. Control systems, such as current and speed controllers, are analyzed, and the design and implementation process of the controllers is presented.

An analysis of the operation of the induction machine, a detailed description of its model potential and a general reference to three-phase power systems follows. The vector control method is presented, which allows for precise adjustment of the machine's operation.

Based on all of the above, the design of the electric dynamometer is achieved both at the simulation level and in a physical system. The system wiring and the requirements for torque and speed measurement are described. The controllers used to adjust the speed and torque are presented, as well as the system startup process. The operating maps of each machine, as well as the overall system, are calculated based on the MTPV algorithm. Furthermore, the CAN bus communication system is mentioned for receiving the rotation speed measurement in all controllers.

Finally, the measurements carried out to evaluate the performance of the dynamometer are described. The speed and current measurements are analyzed, as well as the dynamic behavior of the machines during the tests. The results of the experiments, observations on the behavior of the controllers and the effects of losses on the real system are presented.

The simulations were performed in the Plecs environment, while the waveforms presented were performed in the python programming environment.

Keywords

Dynamometer, Electric Drive, Power Electronics, DC-DC Converter, Three-Phase Inverter, Direct Current Machine (DC), Induction Machine (AC), Current Controller, Speed Controller, Vector Control, Dynamic Behavior, CAN Bus, Operation Map

Ευχαριστίες

Με αφορμή την ολοκλήρωση της διπλωματικής μου εργασίας και τον σπουδών μου στην Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου σε όσους με βοήθησαν κατα την διάρκεια της φοίτησης μου.

Αρχικά, θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες στον επιβλέποντα καθηγητή μου, κ. Αντώνιο Αντωνόπουλο, για την καθοδήγηση, την υποστήριξη και την πολύτιμη γνώση που μου προσέφερε κατά τη διάρκεια της εκπόνησης της διπλωματικής μου εργασίας. Η εμπειρία και οι συμβουλές του υπήρξαν καθοριστικές για την ολοκλήρωση αυτού του έργου.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τα μέλη του εργαστηρίου για τη συνεργασία και την υποστήριξή τους. Η βοήθειά τους κατά τη διάρκεια των πειραμάτων και των μετρήσεων ήταν ανεκτίμητη και συνέβαλε σημαντικά στην επιτυχία της εργασίας μου.

Επιπλέον, ευχαριστώ τους γονείς μου Θανάση και Ναταλία για την αμέριστη στήριξή τους και την πίστη τους σε μένα. Η αγάπη και η ενθάρρυνσή τους με ενέπνευσαν να επιδιώκω τους στόχους μου και να ξεπερνώ τις προκλήσεις.

Τέλος, θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στους συμφοιτητές και φίλους μου Αντώνη και Γιώργο για τις γνώσεις τους και τις ατελείωτες ώρες συζήτησης και επίλυσης προβλημάτων. Ακόμα, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους συμφοιτητές και φίλους μου Γιώργο, Δημήτρη, Θανάση και Τάσο. Η συνεργασία και η φιλία τους ήταν πολύτιμες και με βοήθησαν να εξελιχθώ τόσο ακαδημαϊκά όσο και προσωπικά.

Περιεχόμενα

1	Εισ 1.1	αγωγή Γενικά	για τα Συστήματα Ηλεκτοικής Κίνησης	$17 \\ 17$
	1.2	Βασικό	α Τμήματα Ηλεκτοικού Δυναμομέτρου	17
	1.3	Χρησιμ	ιότητα του Δυναμόμετρου	17
	1.4	Αναχύ	κλωση Ενέργειας	18
	1.5	Μέθοδ	οι Εργαστηριαχών Δοχιμών	18
2	Ηλε	εκτρον	ικά Ισχύος - Μετατροπείς	20
	2.1	DC-DO	C Μετατροπέας Πλήρους Γέφυρας	20
		2.1.1	Αρχή Λειτουργίας	20
		2.1.2	PWM Διαμόρφωση Διπολικής Τάσης Εξόδου	21
		2.1.3	PWM Διαμόρφωση Μονοπολιχής Τάσης Εξόδου	23
	2.2	Τριφασ	πκός Αντιστροφέας	26
		2.2.1	Αρχή Λειτουργίας	26
		2.2.2	Διαμόρφωση Τετραγωνικών Παλμών	27
		2.2.3	SPWM Διαμόρφωση	28
•	ъл			0.1
3	$M\eta$	χανή Σ	Δυνεχούς Ρεύματος (DC)	31
	3.1 2.0	ΑρχηΙ	Λειτουργιας	31 20
	3.2	Δυναμι	ιχο Μοντελο	32
	პ.პ ე_₄	Παραμε	ετροι Μηχανής	34
	3.4	Συστη	ματα Ελεγχου	35
		3.4.1	Ελεγχτης Ρευματος	35
		3.4.2	Ελεγκτής Ταχύτητας	38
4	Mη	νανή Ε	Επαγωγής (ΑC)	41
-	4.1	Αονή /		41
	4.2	Τοιωασ	πκά Συστήματα Ισνύος	42
	4.3	Δυναμ	ικά Δουτήματα 10χους τη	45
	1.0	431	Τ - Ισοδύναιο Μοντέλο	46
		432	Ανάστοριο Γ - Ισοδύναμο Μοντέλο	47
		433	Τέλειος Πορσανατολισμός Πεδίου	48
	44	Δυναμ	τελείος προσανατολισμός πεσίου	49
	1.1	<u> </u>	Παραγωνή Ροπής	40
		4.4.1	Mρυσυμκό Σύστημα	40
	15	παράμα	$\frac{1}{2} \frac{1}{2} \frac{1}$	50
	ч.5 4 б	Συστή	E = E = E = E = E = E = E = E = E = E =	50
	4.0	<u>461</u>	Exercities $\mathbf{P}_{\mathbf{X}}$	51
		4.0.1	Exercitly requires \mathbf{E}	54
		4.0.2	Encyrting $Ia\chi Utiliag$ \dots	54 55
		4.0.5	Εκιιμητης τοης	33

5	Σύστημα Δυναμομέτρου 57				
	5.1	Αρχή Λειτουργίας	57		
	5.2	Σχεδιασμός Δυναμομέτρου	57		
		5.2.1 Ελεγκτής Ροπής	59		
	5.3	Χάρτες Λειτούργιας	59		
		5.3.1 Χάρτης Λειτουργίας Μηχανής Συνεχούς Ρεύματος	60		
		5.3.2 Χάρτης Λειτουργίας Μηχανής Επαγωγής	61		
		5.3.3 Χάρτης Λειτουργίας Συστήματος Δυναμομέτρου	62		
	5.4	Διαδικασία Εκκίνησης Συστήματος	64		
	5.5 Αποτελέσματα Προσομοίωσης				
		5.5.1 Δυναμική Συμπεριφορά Εισαγωγής Μηχανής Επαγωγής	65		
		5.5.2 Δυναμική Συμπεριφορά Ελεγκτή Ταχύτητας	67		
		5.5.3 Δ υναμική Συμπεριφορά Ελεγκτή Ροπής Σε Ακινητοποιημένο Δ ρομέα .	69		
		5.5.4 Δυναμική Συμπεριφορά Ελεγκτή Ροπής Εν Κινήσει	71		
6	Εργ	γαστηριαχές Μετρήσεις	74		
	6.1	Υλοποίηση Εργαστηριαχού Δυναμομέτρου	74		
		6.1.1 Συνδεσμολογία Συστήματος	74		
		6.1.2 Επιχοινωνία CAN Bus	75		
	6.2	Όργανα Μετρήσεων	77		
		6.2.1 Μέτρηση Ταχύτητας Περιστροφής	77		
		6.2.2 Μετρήσεις Ρευμάτων	78		
	6.3	Μηχανή Συνεχούς Ρεύματος DC	79		
		6.3.1 Δυναμική Συμπεριφορά Ελεγκτή Ανοιχτού Βρόχου	79		
		6.3.2 Δυναμική Συμπεριφορά Ελεγκτή Κλειστού Βρόχου	81		
	6.4	4 Μηχανή Επαγωγής AC			
		6.4.1 Δυναμική Συμπεριφορά Ελεγκτή Ανοιχτού Βρόχου	81		
		6.4.2 Δυναμική Συμπεριφορά Ελεγκτή Κλειστού Βρόχου	82		
	6.5	Σύστημα Δυναμομέτρου DC-AC	83		
		6.5.1 Δυναμική Συμπεριφορά Εισαγωγής Μηχανής Συνεχούς Ρεύματος	84		
		6.5.2 Δυναμική Συμπεριφορά Εισαγωγής Μηχανής Επαγωγής	85		
		6.5.3 Δυναμική Συμπεριφορά Ελεγκτή Ταχύτητας	87		
		6.5.4 Δυναμική Συμπεριφορά Ελεγκτή Ροπής Σε Ακινητοποιημένο Δρομέα .	89		
		6.5.5 Δυναμική Συμπεριφορά Ελεγκτή Ροπής Εν Κινήσει	90		
7	Συ	ιπεράσματα - Προτάσεις Περαιτέρω Μελέτης	93		
	7.1	Συμπεράσματα	93		
	7.2	Προτάσεις Περαιτέρω Μελέτης	94		

Κατάλογος Σχημάτων

1.1	Κυχλιχή ροή ισχύος στο σύστημα δυναμομέτρου.	18
2.1	Κύχλωμα DC-DC μετατροπέα πλήρους γέφυρας	20
2.2	Τριγωνική κυματομοφή v _{tria} με την τάση ελέγγου v _{control}	21
2.3	Κατασχευή παλμών για PWM διαμόρφωση με διπολική τάση εξόδου	22
2.4	PWM διαμόρφωση με διπολική τάση εξόδου	23
2.5	Κατασχευή παλμών για PWM διαμόρφωση με μονοπολική τάση εξόδου.	24
2.6	PWM διαμόρφωση με μονοπολιχή τάση εξόδου.	25
2.7	Κυματομοφές χυμάτωσης τάσης με χρήση PWM διπολικής και μονοπολικής	
	τάσης εξόδου.	26
2.8	Κύχλωμα Τριφασικού Αντιστροφέα.	26
2.9	Κυματομορφές τάσεων και ρευμάτων εξόδου τριφασικού αντιστροφέα με διαμόρ-	
	φωση τετραγωνικών παλμών.	28
2.10	Κατασχευή παλμών για SPWM διαμόρφωση τριφασιχού αντιστροφέα.	29
2.11	Σύγκριση σημάτων ελέγχου με το φέρον κύμα και παραγωγή παλμών διακοπτι-	
	χών στοιχείων.	29
2.12	Κυματομορφές τάσεων και ρευμάτων εξόδου τριφασικού αντιστροφέα με SPWM	
	διαμόρφωση.	30
3.1	Μηγανή συνεγούς ρεύματος	31
3.2	Τομείς συλλέχτη και ψήκτρες σε μηγανή συνεγούς ρεύματος	32
3.3	Ισοδύναμο χύχλωμα μηγανής συνεχούς ρεύματος	33
3.4	Δυναμικό μοντέλο μηγανής συνεγούς ρεύματος στο περιβάλλον Plecs	34
3.5	Μπλοκ διάγραμμα ελεγκτή ρεύματος κλειστού βρόχου μηχανής συνεχούς ρεύματος.	35
3.6	Μπλοκ διάγραμμα ελεγκτή ρεύματος κλειστού βρόχου με ενεργό αντίσταση R_a	
	μηχανής συνεχούς ρεύματος.	36
3.7	Μπλοκ διάγραμμα ελεγκτή ρεύματος κλειστού βρόχου με κορεσμό τάσης εξόδου	
	και συσσώρευτή ολοκληρωτικού σφάλματος μηχανής συνεχούς ρεύματος.	37
3.8	Ελεγκτής ρεύματος DC μηχανής στο περιβάλλον Plecs.	37
3.9	Απόκριση ρεύματος DC μηχανής σε βηματική μεταβολή αναφοράς με PI ελεγκτή.	38
3.10	Ελεγκτής ταχύτητας DC μηχανής στο περιβάλλον Plecs.	39
3.11	Απόκριση ταχύτητας DC μηχανής σε βηματική μεταβολή αναφοράς με PI ελεγκτή.	40
4.1	Μηχανή επαγωγής.	42
4.2	Διάγραμμα φάσεων ενός τριφασιχού συστήματος	43
4.3	Διάγραμμα σταθερού πλαισίου δυο συνιστωσών (πλαίσιο αβ)	44
4.4	Διάγραμμα σύγχρονων συντεταγμένων (πλάσιο dq)	45
4.5	Δυναμικό μοντέλο αντίστροφου-Τ-ισοδύναμου κύκλωματος για μηχανή επαγωγής.	46
4.6	Δυναμικό μοντέλο αντίστροφου-Γ-ισοδύναμου κύκλωματος για μηχανή επαγωγής.	47
4.7	Ηλεκτρικό σύστημα μηχανής επαγωγής σε περιβάλλον Plecs.	48
4.8	Μηχανικό σύστημα μηχανής επαγωγής σε περιβάλλον Plecs	49
4.9	Μπλοκ διάγραμμα ελέγχου ρεύματος με εσωτερική απόζευξη και βρόχο ενεργούς	
	αντίστασης μηχανής επαγωγής	52
4.10	Μπλοκ διάγραμμα ελεγκτή ρεύματος μηχανής επαγωγής.	53
4.11	Ελεγκτής ρεύματος d συνιστώσας μηχανής επαγωγής σε περιβάλλον Plecs.	53
4.12	Ελεγκτής ρεύματος q συνιστώσας μηχανής επαγωγής σε περιβάλλον Plecs.	54
1 1 9		~ .

4.14	Κορεσμός τάσης V _q μηχανής επαγωγής σε περιβάλλον Plecs	54
4.15	Μπλοκ διάγραμμα ελεγκτή ταχύτητας μηχανής επαγωγής	55
4.16	Ελεγκτής ταχύτητας μηχανής επαγωγής σε περιβάλλον Plecs.	55
4.17	Κορεσμός ρεύματος i _a μηχανής επαγωγής σε περιβάλλον Plecs.	55
4.18	Εχτιμητής ροής δρομέα μηχανής επαγωγής σε περιβάλλον Plecs.	56
5.1	Διάταξη συστήματος δυναμομέτρου σε περιβάλλον Plecs	57
5.2	Ηλεκτρονικά ισγύος συστήματος δυναμομέτρου σε περιβάλλον Plecs	58
5.3	Ελεγχτές μηγανής συνεγούς ρεύματος σε περιβάλλον Plecs.	58
5.4	Ελεγκτές μηγανής επαγωγής σε περιβάλλον Plecs.	59
5.5	Ελεγκτής ροπής μηγανής επαγωγής σε περιβάλλον Plecs.	59
5.6	Χάρτης λειτουργίας μηγανής συνεγούς ρεύματος.	60
5.7	Διάγραμμα ροπής-ολίσθηση για διάφορες τιμές τάσης	61
5.8	Χάρτης λειτουργίας μηγανής επαγωγής.	62
5.9	Χάρτης λειτουργίας δυναμομέτρου για τάση DC Link $V_{DC} = 100V$.	63
5.10	Χάρτης λειτουργίας δυναμομέτρου για τάση DC Link $V_{DC} = 70V$	63
5.11	Χάρτης λειτουργίας δυναμομέτρου για τάση DC Link $V_{DC} = 50V$	64
5.12	Σημεία πειραμάτων και μετρήσεων στον γάρτη λειτουργίας δυναμομέτρου.	65
5.13	Δυναμική συμπεριφορά ταγύτητας, ροπής και ρευμάτων μηγανών σε εισαγωγή	
	μηγανής επαγωγής σε πεοιβάλλον Plecs.	66
5.14	Δυναμική συμπεριφορά τάσης DC link. ρευμάτων τροφοδοσίας μετατροπέων.	
	γωνίας μετασχηματισμού χαι ροών μηγανής επαγωγής σε εισαγωγή μηγανής	
	επαγωγής σε περιβάλλον Plecs.	67
5.15	Δυναμική συμπεριφορά ταγύτητας, ροπής και ρευμάτων μηγανών σε βηματική	
	μεταβολή τανύτητας σε περιβάλλον Plecs.	68
5.16	Δυναμική συμπεριφορά τάσης DC link, ρευμάτων τροφοδοσίας μετατροπέων.	
	γωνίας μετασχηματισμού χαι ροών μηγανής επαγωγής σε βηματική μεταβολή	
	ταγύτητας σε περιβάλλον Plecs	69
5.17	Δυναμική συμπεριφορά ταχύτητας, ροπής και ρευμάτων μηχανών σε βηματική	
	μεταβολή ροπής με αχινητοποιημένο δρομέα σε περιβάλλον Plecs.	70
5.18	Δυναμική συμπεριφορά τάσης DC link, ρευμάτων τροφοδοσίας μετατροπέων,	
	γωνίας μετασχηματισμού και ροών μηχανής επαγωγής σε βηματική μεταβολή	
	ροπής με αχινητοποιημένο δρομέα σε περιβάλλον Plecs.	71
5.19	Δυναμική συμπεριφορά ταχύτητας, ροπής και ρευμάτων μηχανών σε βηματική	
	μεταβολή ροπής εν χινήση σε περιβάλλον Plecs.	72
5.20	Δυναμική συμπεριφορά τάσης DC link, ρευμάτων τροφοδοσίας μετατροπέων,	
	γωνίας μετασχηματισμού και ροών μηχανής επαγωγής σε βηματική μεταβολή	
	ροπής εν χινήση σε περιβάλλον Plecs.	72
6.1	Διατάξεις εργαστηρίου για το σύστημα δυναμομέτρου	74
6.2	Διάγραμμα επιχοινωνίας CAN bus.	76
6.3	Μιχροελεγχτής C2000 ΤΙ.	76
6.4	Διάγραμμα επιχοινωνίας CAN bus εργαστηρίου.	77
6.5	Κωδιχοποιητής ταγύτητας Encoder.	78
6.6	Αισθητήρας ρεύματος.	79
6.7	Ταχύτητα χαι ρεύμα μηχανής συνεγούς ρεύματος με έλεγγο ανοιγτού βρόγου	-
-	σε βηματιχή μεταβολή ταγύτητας περιστροφής	80

6.8	Ταχύτητα και ρεύμα μηχανής συνεχούς ρεύματος με έλεγχο κλειστού βρόχου σε	
	βηματική μεταβολή ταχύτητας περιστροφής.	81
6.9	Ταχύτητα και ρεύματα μηχανής επαγωγής με έλεγχο ανοιχτού βρόχου σε βημα-	
	τική μεταβολή ταχύτητας περιστροφής	82
6.10	Ταχύτητα και ρεύματα μηχανής επαγωγής με έλεγχο κλειστού βρόχου σε βημα-	
	τική μεταβολή ταχύτητας περιστροφής	83
6.11	Σημεία λειτουργίας μετρήσεων στον χάρτη λειτουργίας δυναμομέτρου	84
6.12	Δυναμική συμπεριφορά μεγεθών δυναμομέτρου σε εκκίνηση μηχανής συνεχούς	
	ρεύματος	85
6.13	Δυναμική συμπεριφορά μεγεθών δυναμομέτρου σε εισαγωγή μηχανής επαγωγής.	86
6.14	Δυναμική συμπεριφορά μεγεθών δυναμομέτρου σε βηματική μεταβολή ταχύτητας.	88
6.15	Δυναμική συμπεριφορά μεγεθών δυναμομέτρου σε βηματική μεταβολή ροπής σε	
	μηδενική ταχύτητα.	89
6.16	Δυναμική συμπεριφορά μεγεθών δυναμομέτρου σε βηματική μεταβολής σε τα-	
	χύτητα	91

Κατάλογος Πινάκων

1	Παράμετροι μηχανής συνεχούς ρεύματος	34
2	Παράμετροι μηχανής επαγωγής	50

1 Εισαγωγή

1.1 Γενικά για τα Συστήματα Ηλεκτρικής Κίνησης

Τα συστήματα ηλεκτρικής κίνησης (drives) χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο της κίνησης σε μηχανές. Ο έλεγχος επιτυγχάνεται μέσω κατάλληλων μετατροπέων τάσεως και ρεύματος, οι οποίοι περιλαμβάνουν ελεγχόμενα διακοπτικά στοιχεία όπως MOSFET και IGBTs. Μέσω της ανάλυσης δυναμικών μοντέλων αναπτύσσονται ελεγκτές ρευμάτων, ταχύτητας και ροπής των μηχανών με σκοπό την δυνατότητα ευσταθής μετάβασης τους σε όλες τις πιθανές καταστάσεις λειτουργίας.

1.2 Βασικά Τμήματα Ηλεκτρικού Δυναμομέτρου

Ένα ηλεκτρικό δυναμόμετρο αποτελείται από δύο μηχανές συνδεδεμένες σε κοινό άξονα περιστροφής, η μια βρίσκεται υπό έλεγχο ταχύτητας, ενώ η άλλη υπό έλεγχο ροπής, η οποία είναι υπό δοκιμή και λειτουργεί ως κινητήρας. Μέσω αισθητήρων ταχύτητας και ρευμάτων επιτυγχάνονται οι ανατροφοδοτήσεις των αντίστοιχων ελεγκτών. Τα βασικά τμήματα του ηλεκτρικού δυναμομέτρου που υλοποιήθηκε παρουσιάζονται παρακάτω:

- DC-DC Μετατροπέας: Ο μετατροπέας χρησιμοποιείται για τη ρύθμιση της συνεχούς τάσης και του ρεύματος που τροφοδοτούν την μηχανή συνεχούς ρεύματος.
- Τριφασικός Αντιστροφέας: Ο αντιστροφέας χρησιμοποιείται για την μετατροπή συνεχούς τάσης και ρεύματος σε εναλλασσόμενα αντίστοιχα μεγέθη, αλλά και για τη κατάλληλη ρύθμιση τους για την τροφοδοσία της μηχανής επαγωγής.
- Μηχανή Συνεχούς Ρεύματος (DC): Ορίζεται ως η μηχανή οδήγησης με λειτουργία γεννήτριας ελέγχοντας την ταχύτητα περιστροφής του άξονα μέσω του DC-DC μετατροπέα.
- Μηχανή Επαγωγής (AC): Ορίζεται ως η μηχανή υπό δοκιμή με λειτουργία κινητήρα ελέγχοντας την ροπή του άξονα μέσω του DC-AC τριφασικού αντιστροφέα.

1.3 Χρησιμότητα του Δυναμόμετρου

Ένα ηλεκτρικό δυναμόμετρο χρησιμοποιείται για να χαρακτηρίσει την απόδοση ηλεκτρικών μηχανών και αυτό μπορεί να είναι χρήσιμο για πολλούς λόγους. Επιτρέπει την ανάλυση ορίων λειτουργίας μιας μηχανής, προσφέροντας την δυνατότητα επιλογής κινητήρα σωστού μεγέθους για ορισμένες εφαρμογές. Συμβάλει επίσης στην κατανόηση αν οι μέθοδοι ελέγχου που χρησιμοποιούνται εκμεταλλεύονται πλήρως τον συγκεκριμένο κινητήρα και του επιτρέπουν να αποδίδει στο μέγιστο των δυνατοτήτων του. Ακόμα, ένα δυναμόμετρο μπορεί να είναι μια εξαιρετική πλατφόρμα εντοπισμού σφαλμάτων εκτός από την ανάλυση της απόδοσης ενός κινητήρα.

Συγκεκριμένα, το δυναμόμετρο είναι ένα εργαλείο που χρησιμοποιείται για τη μέτρηση της ροπής και της ταχύτητας των κινητήρων, επιτρέποντας την αξιολόγηση της ισχύος που παράγεται ή απορροφάται από το μηχανικό σύστημα. Το δυναμόμετρο μας επιτρέπει να μετρήσουμε κυρίως τα ακόλουθα για έναν κινητήρα:

- Την χαμπύλη ροπής/ταχύτητας του χινητήρα για διάφορες τιμές τάσης τροφοδοσίας.
- Τον χάρτη ισχύος του κινητήρα, ουσιαστικά η ηλεκτρική ισχύς που απαιτείται σε κάθε ροπή και ταχύτητα.

• Τον χάρτη απόδοσης του κινητήρα.

1.4 Ανακύκλωση Ενέργειας

Οι ελεγχόμενοι μετατροπείς τάσεων και εντάσεων που τροφοδοτούν τις μηχανές του συστήματος δυναμομέτρου έχουν κοινή είσοδο τροφοδοσίας ενέργειας DC link μέσω του δικτύου. Η διάταξη αυτή, επιτρέπει την κυκλική ροή ενέργειας μέσω του DC link και του κοινού άξονα περιστροφής.

Σε λειτουργία μόνιμης κατάστασης η μηχανή επαγωγής ασκεί μια ροπή αναφοράς παράγοντας μηχανική ενέργεια στον άξονα, η οποία απορροφάται από την μηχανή συνεχούς ρεύματος, μετατρέποντας την πάλι σε ηλεκτρική ενέργεια. Αυτή η ενέργεια επιστρέφει μέσω του DC-DC μετατροπέα στο DC link και συμβάλει στην τροφοδοσία του τριφασικού αντιστροφέα. Το δίκτυο προσφέρει ενέργεια στο σύστημα, ώστε να καλύψει τις απώλειες του, αλλά και για οποιαδήποτε ζήτηση σε μεταβατικές καταστάσεις.



Σχήμα 1.1: Κυκλική ροή ισχύος στο σύστημα δυναμομέτρου.

1.5 Μέθοδοι Εργαστηριακών Δοκιμών

Οι εργαστηριαχές δοχιμές είναι σημαντιχές για την αξιολόγηση της ποιότητας των ελεγχτών που σχεδιάζονται για την λειτουργία των συστημάτων ηλεχτριχής χίνησης. Η εφαρμογή των ελεγχτών σε ένα πραγματιχό σύστημα επιβεβαιώνει τα αποτελέσματα της προσομοίωσης χαι την ορθή λειτουργία των ελεγχτών που υλοποιήθηχαν.

Για την λειτουργία του συστήματος, αρχικά τα μοντέλα των ελεγκτών που αναλύονται στα παρακάτω κεφάλαια μεταφέρονται σε αντίστοιχους μικροελεγκτές, οι οποίοι με την σειρά τους δίνουν τα κατάλληλα σήματα έναυσης στα διακοπτικά στοιχεία των μετατροπέων. Η εκκίνηση γίνεται δυνατή με την ρύθμιση της τάσης τροφοδοσίας του δικτύου σε μια επιθυμητή τιμή και την ρύθμιση των τιμών αναφοράς ταχύτητας και ροπής στους ελεγκτές.

Εφόσον, υπάρχει σταθερή και συνεχή παροχή τάσης από το δίκτυο, οι διακόπτες των μετατροπέων μπορούν να κλείσουν, ώστε να τροφοδοτήσουν τις μηχανές με τις κατάλληλες τιμές τάσης και ρεύματος που ορίζουν οι ελεγκτές ανάλογα με τις αναφορές ταχύτητας και ροπής. Με την βοήθεια υπολογιστή και επικοινωνία μεταξύ μικροελεγκτών γίνεται δυνατή η αλλαγή των τιμών αναφοράς της ταχύτητας περιστροφής και της ροπής στον κοινό άξονα σε πραγματικό χρόνο. Τα μεταβατικά αυτά μελετούνται και καταγράφονται μέσω ψηφιακού παλμογράφου. Η ανάλυση αυτή επιτρέπει την σύγκριση της πραγματικής συμπεριφοράς του συστήματος με την θεωρητική της προσομοίωσης.

2 Ηλεκτρονικά Ισχύος - Μετατροπείς

Η ενότητα αυτή καλύπτει βασικές αρχές των ηλεκτρονικών ισχύος, με έμφαση στους μετατροπείς κινητήριων συστημάτων. Ακολουθεί αναλυτική περιγραφή για τους DC-DC μετατροπείς πλήρους γέφυρας και τους τριφασικούς αντιστροφείς, οι οποίοι περιλαμβάνονται στον σχεδιασμό ενός δυναμομέτρου και είναι κρίσιμοι για την λειτουργία του συστήματος. Αναλύονται, επίσης, τεχνικές διαμόρφωσης PWM για τον έλεγχο της τάσης εξόδο.

2.1 DC-DC Μετατροπέας Πλήρους Γέφυρας

2.1.1 Αρχή Λειτουργίας

Μια περιοχή εφαρμογών των DC-DC μετατροπέων είναι τα συστήματα ελέγχου ταχύτητας ηλεκτρικών κινητήρων συνεχούς ρεύματος. Για την υλοποίηση τους χρησιμοποιούνται ελεγχόμενοι ημιαγωγοί, οι οποίοι λειτουργούν ως διακόπτες. Στο συγκεκριμένο πείραμα επιλέχθηκαν IGBTs, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα του μετατροπέα (Σχήμα 2.1).



Σχήμα 2.1: Κύκλωμα DC-DC μετατροπέα πλήρους γέφυρας.

Στο dc-dc μετατροπέα με πλήρη γέφυρα, η είσοδος είναι μία καθορισμένη DC τάση V_{DC} και η έξοδός του είναι επίσης μια DC τάση V_{out} , η οποία μπορεί να ελεγχθεί ως προς το πλάτος και την πολικότητα [1].

Σύμφωνα με την παραπάνω τοπολογία, ο μετατροπέας αποτελείται από δύο σκέλη, καθένα από τα οποία συνιστά μία ημιγέφυρα. Η πρώτη ημιγέφυρα (A) αποτελείται από το ζεύγος διακοπτών $(S_1 - S_2)$ και τις αντιπαράλληλες διόδους τους, ενώ αντίστοιχα η δεύτερη ημιγέφυρα (B) περιλαμβάνει το ζεύγος $(S_3 - S_4)$. Οι διακόπτες κάθε σκέλους αλλάζουν κατάσταση κατά τέτοιον τρόπο, ώστε, να μην είναι ποτέ ανοιχτοί ταυτόχρονα, δηλαδή όταν ο ένας είναι κλειστός "ON", ο δεύτερος είναι ανοικτός 'OFF'. Στην πράξη, βέβαια, και οι δύο διακόπτες είναι ανοικτός τους επί ένα σύντομο χρονικό διάστημα, γνωστό ως κενός χρόνος (blanking time), με σκοπό να αποφευχθεί η βραχυκλυκλωση της DC τάσης εισόδου. Για τις θεωρητικές προσομοιώσεις, ωστόσο, οι διακόπτες θεωρούνται ιδανικοί, ικανοί να άγουν ακαριαία, και παραλείπεται το διάστημα κενού χρόνου [1].

Αν θεωρήσουμε ως ουδέτερο κόμβο τον αρνητικό DC ακροδέκτη, όπου αναφέρεται ως Ν, τότε για την ημιγέφυρα Α ισχύει [1]:

- $V_{AN} = V_{DC}$ όταν ο διαχόπτης S_1 είναι χλειστός "ON", ενώ ο S_2 είναι ανοιχτός "OFF".
- $V_{AN} = 0$ όταν ο διαχόπτης S_1 είναι ανοιχτός "OFF", ενώ ο S_2 είναι χλειστός "ON".

Επομένως η μέση τάση εξόδου της ημιγέφυρας (A) V_{AN} στο διάστημα μιας περιόδου μετάβασης T_s , εξαρτάται μόνο από την τάση εισόδου V_{DC} και τον λόγο D_A του διακόπτη S_1 [1]:

$$V_{AN} = \frac{V_{DC} \cdot t_{ON,S_1} + 0 \cdot t_{OFF,S_1}}{T_s} = D_A \cdot V_{DC}$$
(2.1)

Ομοίως, για την μέση τάση εξόδου της ημιγέφυρας (B) V_{BN} [1]:

$$V_{BN} = \frac{V_{DC} \cdot t_{ON,S_2} + 0 \cdot t_{OFF,S_2}}{T_s} = D_B \cdot V_{DC}$$
(2.2)

Ο έλεγχος της τάσης εξόδου $V_{out} = V_{AN} - V_{BN}$ επιτυγχάνεται με τη ρύθμιση των λόγων D των διαχοπτών και είναι ανεξάρτητη του ρεύματος στην έξοδο. Η ρύθμιση αυτήν γίνεται μέσω της PWM διαμόρφωσης, όπου συγκρίνεται μια τριγωνική κυματομορφή v_{trig} με την τάση αναφοράς ελέγχου v_{ref} , παράγοντας τα κατάλληλα σήματα των διακοπτικών στοιχείων. Δύο από τις βασικές PWM διαμορφώσεις, που χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο DC-DC μετατροπέων, είναι οι εξής [1]:

• PWM διαμόρφωση με διπολική τάση εξόδου, όπου οι $S_1 \equiv S_4$, και $S_2 \equiv S_3$, αντιμετωπίζονται ως δύο ζεύγη διακοπτών. Οι διακόπτες σε κάθε ζεύγος κλείνουν και ανοίγουν ταυτόχρονα.

• PWM διαμόρφωση με μονοπολική τάση εξόδου, όπου οι διακόπτες σε κάθε ημιγέφυρα του μετατροπέα ελέγχονται ανεξάρτητα από την άλλη ημιγέφυρα.

2.1.2 PWM Διαμόρφωση Διπολικής Τάσης Εξόδου

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, στην περίπτωση αυτή, οι $S_1 \equiv S_4$ και $S_2 \equiv S_3$ αντιμετωπίζονται ως δύο ζεύγη διακοπτών. Ενα από τα δύο ζεύγη διακοπτών είναι πάντα κλειστό. Τα διακοπτικά σήματα παράγονται συγκρίνοντας μια τριγωνική κυματομοφή διακοπτικής συχνότητας v_{trig} με την τάση ελέγχου $v_{control}$ (Σχήμα 2.2). Συγκεκριμένα [1]:



Σχήμα 2.2: Τριγωνική κυματομοφή v_{trig} με την τάση ελέγχου $v_{control}$.

• όταν $v_{control} > v_{trig}$ άγουν οι διαχόπτες S_1 και S_4 , ενώ

• όταν $v_{control} < v_{trig}$ άγουν οι διαχόπτες S_2 και S_3 .

Οι λόγοι $D_{A,B}$ μπορούν να εκφραστούν συναρτήσει της τριγωνικής κυματομορφής v_{trig} και της τάσης ελέγχου $v_{control}$. Σύμφωνα με την κυματομορφές των σημάτων αυτών (Σχήμα 2.2), προκύπτει:

$$v_{trig} = \hat{v}_{trig} \cdot \frac{t}{T_s/4} , \quad 0 < t < \frac{T_s}{4}$$

$$(2.3)$$

Για την χρονική στιγμή $t = t_1$, όπου η v_{trig} ισούται με την $v_{control}$, ισχύει:

$$t_1 = \frac{v_{control}}{\hat{v}_{trig}} \cdot \frac{T_s}{4} \tag{2.4}$$

Μελετώντας τις κυματομορφές βρίσκεται ότι η διάρκει
α t_{ON,S_1} , κατα την οποία το ζεύγος διακοπτώ
ν S_1 και S_4 είναι κλειστό, είναι:

$$t_{ON,S_1} = 2t_1 + \frac{T_s}{2} \tag{2.5}$$

Επομένως, προχύπτει ο λόγος D_A:

$$D_A = \frac{t_{ON,S_1}}{T_s} = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{v_{control}}{\hat{v}_{trig}} \right)$$
(2.6)

Αν για την περίοδο έναυσης ισχύει $D_A = \frac{t_{ON,S_1}}{T_s}$ και $D_B = \frac{t_{ON,S_2}}{T_s}$, προκύπτει $D_B = 1 - D_A$. Τότε, η τάση εξόδου θα είναι [1]:

$$V_{out} = V_{AN} - V_{BN} = D_A \cdot V_{DC} - D_B \cdot V_{DC} = (2D_A - 1)V_{DC}$$
(2.7)

Αντικαθιστώντας το D_A η τάση εξόδου υπολογίζεται ως:

$$\bar{V}_{out} = \frac{v_{control}}{\hat{v}_{trig}} \cdot V_{DC} \tag{2.8}$$

Η κατασκευή των παλμών για τους διακόπτες του DC-DC μετατροπέα με διπολική τάση εξόδου, στο περιβάλλον Plecs, φαίνεται παρακάτω (Σχήμα 2.3):



Σχήμα 2.3: Κατασκευή παλμών για PWM διαμόρφωση με διπολική τάση εξόδου.

Να σημειωθεί πως το σήμα ελέγχου $v_{control}$ γίνεται $v'_{control} = 0.5 \cdot v_{control} + 0.5$, καθώς το φέρον σήμα (τρίγωνο) κυμαίνεται μεταξύ [0, 1], αντί για [-1, 1], επομένως εφαρμόζεται αναγωγή του σήματος στο διάστημα [0, 1].



Ένα παράδειγμα PWM διαμόρφωσης με διπολική τάση εξόδου φαίνεται παρακάτω (Σχήμα 2.4), όπου ορίζουμε $f_{trig} = 10 \ kHz, V_{DC} = 100V, \ \hat{v}_{trig} = 1$ και $v_{control} = 0.6$.

Σχήμα 2.4: PWM διαμόρφωση με διπολική τάση εξόδου.

Φαίνεται αρχικά πως $S_1 \equiv S_4$, και $S_2 \equiv S_3$. Η τάση εξόδου V_{out} αποκτά τιμές $+V_{DC}$ και $-V_{DC}$, γι' αυτό και η στρατηγική μετάβασης χαρακτηρίζεται ως διπολική [1]. Επιπλέον, η μέση τιμή της τάσης εξόδου είναι ίση με $\overline{V_{out}} = \frac{0.6}{1} \cdot 100V = 60V$, όπως και ήταν επιθυμητό.

2.1.3 ΡWΜ Διαμόρφωση Μονοπολικής Τάσης Εξόδου

Στην διπολική διαμόρφωση, οι παλμοί των διακοπτών S_1 και S_3 (αντίστοιχα οι S_2 και S_4) είναι πάντα συμπληρωματικοί, δηλαδή όταν ο ένας διακόπτης είναι "ON", ο άλλος θα είναι "OFF". Η συγκεκριμένη διαμόρφωση, εκμεταλλεύεται το γεγονός πως όταν οι διακόπτες S_1 και S_3 (αντίστοιχα οι S_2 και S_4) είναι κλειστοί ταυτόχρονα, τότε $V_{out} = 0$, βελτιώνοντας έτσι την κυματομορφή της τάσης εξόδου. Αντί ενός σήματος ελέγχου, τώρα υπάρχουν 2 σήματα ελέγχου, $v_{control}$ και $-v_{control}$ τα οποία συγκρίνονται με το σήμα αναφοράς (τριγωνική κυματομορφή) [1]. Συγκεκριμένα:

όταν $v_{control} > v_{trig},$ άγει ο διαχόπτη
 $S_1,$ δηλαδή το σήμα ελέγχου ελέγχει την ημιγέφυρα
 Α, ενώ

• όταν $-v_{control} > v_{trig}$, άγει ο διακόπτης S_3 , δηλαδή το σήμα ελέγχου ελέγχει την ημιγέφυρα B.

Για τον λόγο D_A συνεχίζει να ισχύει:

$$D_A = \frac{t_{ON,S_1}}{T_s} = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{v_{control}}{\hat{v}_{trig}} \right)$$
(2.9)

Όπως και στην προηγούμενη στρατηγική ελέγχου, η περίοδος έναυσης δίνεται $D_A = \frac{t_{ON,S_1}}{T_s}$ και $D_B = \frac{t_{ON,S_2}}{T_s}$, οπότε θα ισχύει $D_B = 1 - D_A$. Τότε, η τάση εξόδου θα είναι [1]:

$$V_{out} = V_{AN} - V_{BN} = D_A \cdot V_{DC} - D_B \cdot V_{DC} = (2D_A - 1)V_{DC}$$
(2.10)

Επομένως, η μέση τάση εξόδου V, σε αυτήν την διακοπτική μέθοδο είναι ίδια με την διαμόρφωση διπολικής τάσης και μεταβάλλεται γραμμικά με τη v_{control}.

$$\bar{V}_{out} = \frac{v_{control}}{\hat{v}_{trig}} \cdot V_{DC} \tag{2.11}$$

Η κατασκευή των παλμών για τους διακόπτες του DC-DC μετατροπέα με μονοπολική τάση εξόδου, στο περιβάλλον Plecs, φαίνεται παρακάτω (Σχήμα 2.5):



Σχήμα 2.5: Κατασκευή παλμών για PWM διαμόρφωση με μονοπολική τάση εξόδου.

Να σημειωθεί πως το σήμα ελέγχου $v_{control}$ γίνεται $v'_{control} = 0.5 \cdot v_{control} + 0.5$, καθώς το φέρον σήμα (τρίγωνο) κυμαίνεται μεταξύ [0, 1], αντί για [-1, 1], επομένως εφαρμόζεται αναγωγή του σήματος στο διάστημα [0, 1]. Αντίστοιχα, αλλάζει και το σήμα ελέγχου $-v_{control}$.

Ένα παράδειγμα PWM διαμόρφωσης με μονοπολική τάση εξόδου φαίνεται παρακάτω (Σχήμα 2.6), όπου ορίζουμε $f_{trig} = 10 \ kHz, V_{DC} = 100V, \ \hat{v}_{trig} = 1$ και $v_{control} = 0.6$.



Σχήμα 2.6: PWM διαμόρφωση με μονοπολική τάση εξόδου.

Αυτήν την φορά, η τάση εξόδου V_{out} αποκτά τιμές $+V_{DC}$ και 0, σε αντίθεση με την διπολική διαμόρφωση όπου η τάση εξόδου ήταν $\pm V_{DC}$. Βέβαια, η μέση τιμή της τάσης εξόδου είναι ίση με $\bar{V}_{out} = \frac{0.6}{1} \cdot 100V = 60V$ και μεταβάλλεται γραμμικά με τη $v_{control}$, όπως και στην προηγούμενη διαμόρφωση.

Συγκρίνοντας τις δύο στρατηγικές PWM με κοινές συχνότητες μετάβασης των διακοπτών, η μετάβαση με μονοπολική τάση οδηγεί σε καλύτερη κυματομορφή τάσης εξόδου και απόκριση συχνότητας, επειδή διπλασιάζεται η ¨ενεργός' συχνότητα μετάβασης της κυματομορφής της τάσης εξόδου και μειώνεται η κυμάτωση. Αναλυτικά [1]:

Στην περίπτωση διαμόρφωσης PWM διπολικής τάσης εξόδου, η κυμάτωση της τάσης εξόδου υπολογίζεται ως εξής:

$$V_{r,rms} = \sqrt{V_{out,rms}^2 - V_{out}^2} = 2V_d \sqrt{D_A - D_A^2}$$
(2.12)

• Αντίστοιχα, στην περίπτωση διαμόρφωσης PWM μονοπολικής τάσης εξόδου, για την κυμάτωση της τάσης εξόδου ισχύει:

$$V_{r,rms} = \sqrt{V_{out,rms}^2 - V_{out}^2} = 2V_d \sqrt{6D_A - 4D_A^2 - 2V_d}$$
(2.13)

Παραχάτω φαίνεται (Σχήμα 2.7) πως, με την ίδια συχνότητα μετάβασης, η διαμόρφωση PWM με μονοπολική τάση εξόδου έχει ως αποτέλεσμα η χυμάτωση της τάσης εξόδου να έχει μικρότερη rms τιμή [1]. Επομένως, σε εφαρμογές χινητήριων συστημάτων η μονοπολική διαμόρφωση προτιμάται από την διπολική [4].



Σχήμα 2.7: Κυματομοφές κυμάτωσης τάσης με χρήση PWM διπολικής και μονοπολικής τάσης εξόδου.

2.2 Τριφασικός Αντιστροφέας

2.2.1 Αρχή Λειτουργίας

Οι αντιστροφείς διαχοπτιχού τύπου, γενιχότερα, χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές αδιάλειπτων τροφοδοτιχών όπως για την οδήγηση χινητήριων συστημάτων εναλλασσομένου ρεύματος. Η βασιχή λειτουργία ενός τριφασιχού αντιστροφέα είναι η μετατροπή μιας συνεχούς τάσης εισόδου σε μια εναλλασσόμενη ημιτονοειδής τάση εξόδου, με ελεγχόμενο πλάτος χαι συχνότητα [1]. Για την υλοποίηση τους χρησιμοποιούνται ελεγχόμενα διαχοπτιχά στοιχεία, όπως τα IGBTs. Ένα συνηθισμένο χύχλωμα τριφασιχού αντιστροφέα φαίνεται στο παραχάτω (Σχήμα 2.8).



Σχήμα 2.8: Κύκλωμα Τριφασικού Αντιστροφέα.

Το κύκλωμα του τριφασικού αντιστροφέα αποτελείται από τρείς ημιγέφυρες, συνδεδεμένες παράλληλα στην DC τάση εισόδου για την παραγωγή της κάθε φάσης, οι οποίες ελέγχονται ανεξάρτητα, με διαφορά φάσης 120°. Η τάση εξόδου κάθε ημιγέφυρας εξαρτάται μόνο από την συνεχή τάση στην είσοδο και την κατάσταση των διακοπτών. Συνεπώς, είναι ανεξάρτητη του ρεύματος εξόδου, εφόσον σε κάθε χρονική στιγμή ένας από τους δύο διακόπτες σε κάθε ημιγέφυρα είναι πάντα κλειστός [1]. Είναι σημαντικό οι διακόπτες κάθε ημιγέφυρας να μην είναι κλειστοί ταυτόχρονα, καθώς αυτό θα προκαλέσει σοβαρό βραχυκύκλωμα στην είσοδο.

Λαμβάνεται ως σημείο αναφοράς η μεσαία λήψη δυναμικού της εισόδου (κόμβος Ο). Η κάθε ημιγέφυρα έχει την ίδια κυματομορφή τάσης εξόδου σε σχέση με τον υποθετικό ουδέτερο κόμβο, με μια μετατόπιση 120°. Επομένως, για τις τάσεις του αντιστροφέα, ισχύουν οι εξής

σχέσεις:

$$\begin{cases}
V_{AO}(\omega t) = V_{BO}(\omega t + 120^{\circ}) = V_{CO}(\omega t + 240^{\circ}) \\
V_{AB}(\omega t) = V_{AO}(\omega t) - V_{BO}(\omega t) \\
V_{BC}(\omega t) = V_{BO}(\omega t) - V_{CO}(\omega t) \\
V_{CA}(\omega t) = V_{CO}(\omega t) - V_{AO}(\omega t)
\end{cases}$$
(2.14)

Να σημειωθεί πως για να λειτουργεί ομαλά ο τριφασικός αντιστροφεάς, δεν θα πρέπει να άγουν ταυτόχρονα οι διακόπτες κάθε ζεύγους, καθώς θα προέκυπτε βραχυκύκλωμα στα άκρα της DC τάσης εισόδου, με αποτέλεσμα την καταστροφή των διακοπτών [1]. Για τους αντιστροφείς πηγής τάσης, διακρίνονται οι δύο εξής κατηγορίες λειτουργίας:

• Αντιστροφείς με λειτουργία τετραγωνικής κυματομορφής. Σε αυτή την περίπτωση, για τον έλεγχο του πλάτους της AC τάσης εξόδου, ελέγχεται το πλάτος της DC τάσης εισόδου, και ο αντιστροφέας ελέγχει τη συχνότητα μόνο της τάσης εξόδου [1].

• Αντιστροφείς με λειτουργία διαμόρφωσης εύρους παλμών (PWM). Σε αυτή την περίπτωση, η DC τάση εισόδου διατηρείται σταθερή, και ο αντιστροφέας ελέγχει το πλάτος και τη συχνότητα της τάσης εξόδου, γεγονός το οποίο επιτυγχάνεται με τη διαμόρφωση του εύρους παλμών των διακοπτών [1].

2.2.2 Διαμόρφωση Τετραγωνικών Παλμών

Σε αυτή την περίπτωση μετάβασης, κάθε διακόπτης είναι κλειστός για 180°, δηλαδή η σχετική διάρκεια παλμού του είναι μισή περίοδος. Επομένως, σε κάθε χρονική στιγμή είναι κλειστοί τρεις διακόπτες. Στη λειτουργία με τετραγωνική κυματομορφή ο αντιστροφέας δεν μπορεί να ελέγξει το πλάτος των εναλλασσομένων τάσεων εξόδου από μόνος του. Για αυτόν τον λόγο, η τάση εισόδου V_{DC} πρέπει να ελέγχεται διαφορετικά, ώστε να ελέγχεται και το πλάτος στην έξοδο.

Ένα παράδειγμα διαμόρφωσης τετραγωνικών παλμών φαίνεται παρακάτω, όπου ορίζεται $V_{DC} = 100 V$, με συχνότητα των παλμών f = 50 Hz, άρα η περίοδος των μεγεθών προκύπτει $T = 0.02 \ sec$. Ακολουθούν οι κυματομορφές των τάσεων και ρευμάτων εξόδου:



Σχήμα 2.9: Κυματομορφές τάσεων και ρευμάτων εξόδου τριφασικού αντιστροφέα με διαμόρφωση τετραγωνικών παλμών.

Φαίνεται πως οι τάσεις V_{AO} , V_{BO} , V_{CO} οι οποίες μετρούνται ως προς τη μεσαία λήψη (χόμβος O), αποκτούν τιμές πλάτους $+\frac{V_{DC}}{2}$ όταν είναι κλειστός ο διακόπτης της άνω ημιγέφυρας, ενώ $-\frac{V_{DC}}{2}$ όταν είναι κλειστός ο διακόπτης της κάτω ημιγέφυρας. Όι πολικές τάσεις, V_{AB} , V_{BC} , V_{CA} αποκτούν τιμές $\pm V_{DC}$, 0, ενώ οι φασικές τάσεις αποκτούν τιμές $\pm \frac{1}{3}V_{DC}$, $\pm \frac{2}{3}V_{DC}$. Τα ρεύματα στην έξοδο προσεγγίζουν περισσότερο κυματομορφή ημιτόνου, λόγω της ύπαρξης επαγωγικού φορτίου.

2.2.3 SPWM Διαμόρφωση

Ο αντιχειμενικός σχοπός στους τριφασιχούς αντιστροφείς με διαμόρφωση PWM είναι η μορφοποίηση χαι ο έλεγχος των τριφασιχών τάσεων εξόδου χατά πλάτος χαι συχνότητα, με μια ουσιαστιχά σταθερή τάση εισόδου V_{DC} . Σε αυτή τη διαμόρφωση, ο έλεγχος των διαχοπτών επιτυγχάνεται συγχρίνοντας τρία ημιτονοειδή σήματα ελέγχου, με διαφορά φάσης 120° μεταξύ τους, με μια τριγωνιχή χυματομορφή αναφοράς. Συγχεχριμένα:

- Όταν $v_{control} > v_{trig}$, άγει ο άνω διαχόπτης της αντίστοιχης ημιγέφυρας, ενώ
- Όταν $v_{control} < v_{trig}$, άγει ο χάτω διαχόπτης της αντίστοιχης ημιγέφυρας.

Η συχνότητα της τριγωνικής κυματομορφής, f_s καθορίζει τη διακοπτική συχνότητα του αντιστροφέα ή συχνότητα φέροντος. Αντίστοιχα, η κυματομορφή ελέγχου έχει συχνότητα f_1 , η οποία είναι η επιθυμητή θεμελιώδης συχνότητα της τάσης εξόδου του αντιστροφέα, και ονομάζεται συχνότητα διαμόρφωσης. Ορίζονται λοιπόν τα εξής μεγέθη [1]:

• Συντελεστής διαμόρφωσης πλάτους: $m_a = \frac{\hat{V}_{control}}{\hat{V}_{trig}}$, όπου \hat{V}_{trig} το πλάτος της τριγωνικής κυματομορφής, το οποίο διατηρείται σταθερό, και $\hat{V}_{control}$ το πλάτος των σημάτων ελέγχου.

• Συντελεστής διαμόρφωσης συχνότητας: $m_f = \frac{f_s}{f_1}$.

Η κατασκευή των παλμών για τους διακόπτες του DC-AC μετατροπέα με διαμόρφωση SPWM, στο περιβάλλον Plecs, φαίνεται παρακάτω:



Σχήμα 2.10: Κατασκευή παλμών για SPWM διαμόρφωση τριφασικού αντιστροφέα.

Να σημειωθεί πως το σήμα ελέγχου $v_{control}$ γίνεται $v'_{control} = 0.5 \cdot v_{control} + 0.5$, καθώς το φέρον σήμα (τρίγωνο) κυμαίνεται μεταξύ [0, 1], αντί για [-1, 1], επομένως εφαρμόζεται αναγωγή του σήματος στο διάστημα [0, 1].

Παρακάτω φαίνονται οι κυματομορφές των σημάτων ελέγχου, της τριγωνικής κυματομορφής και της κατάστασης των διακοπτών S_A , S_B , S_C , επιλέγοντας, $f_1 = 50Hz$, $f_s = 1kHz$, $\hat{V}_{trig} = 1$, και $m_a = 0.8$.



Σχήμα 2.11: Σύγκριση σημάτων ελέγχου με το φέρον κύμα και παραγωγή παλμών διακοπτικών στοιχείων.

Στο παραχάτω σχήμα φαίνονται οι κυματομορφές των τάσεων και του ρευμάτων εξόδου, επιλέγοντας $V_{DC} = 100V$, $f_1 = 50Hz$, $f_s = 1kHz$, $\hat{V}_{trig} = 1$, και $m_a = 0.8$.



Σχήμα 2.12: Κυματομορφές τάσεων και ρευμάτων εξόδου τριφασικού αντιστροφέα με SPWM διαμόρφωση.

Όπως και στην προηγούμενη τεχνική ελέγχου οι τάσεις V_{AO} , V_{BO} , V_{CO} οι οποίες μετρούνται ως προς τη μεσαία λήψη "O", αποκτούν τιμές πλάτους $+\frac{V_{DC}}{2}$ όταν είναι κλειστός ο διακόπτης της άνω ημιγέφυρας, ενώ $-\frac{V_{DC}}{2}$ όταν είναι κλειστός ο διακόπτης της κάτω ημιγέφυρας. Όι πολικές τάσεις, V_{AB} , V_{BC} , V_{CA} αποκτούν τιμές $\pm V_{DC}$, 0, ενώ οι φασικές τάσεις αποκτούν τιμές $\pm \frac{1}{3}V_{DC}$, $\pm \frac{2}{3}V_{DC}$.

3 Μηχανή Συνεχούς Ρεύματος (DC)

Η ενότητα αυτή εξετάζει τη μηχανή συνεχούς ρεύματος (DC) και καλύπτει τις βασικές αρχές λειτουργίας της, καθώς και το δυναμικό μοντέλο που περιγράφει τη συμπεριφορά της. Ειδική αναφορά γίνεται στα συστήματα ελέγχου, όπως ο ελεγκτής ρεύματος και ο ελεγκτής ταχύτητας, τα οποία επιτρέπουν την ακριβή ρύθμιση της λειτουργίας της μηχανής.

3.1 Αρχή Λειτουργίας

Η μηχανή συνεχούς ρεύματος αποτελείται, από τον δρομέα ο οποίος περιστρέφεται γύρω από τον σταθερό του άξονα, και τον στάτη ο οποίος είναι το ακίνητο μέρος της μηχανής. Στον δρομέα (ή τύμπανο) υπάρχουν αυλάκια, στα οποία τοποθετούνται τα τυλίγματα τυμπάνου. Η μαγνήτιση πραγματοποιείται στο κύκλωμα του στάτη, ο οποίος μπορεί να αποτελείται από μόνιμους μαγνήτες, είτε από τύλιγμα διέγερσης, το οποίο παράγει το κύριο μαγνητικό πεδίο της μηχανής. Επιπλέον, να αναφερθεί πως τόσο ο πυρήνας του στάτη, όσο και του δρομέα, αποτελείται από σιδηρομαγνητικό υλικό. Ακόμα, η μηχανή συνεχούς ρεύματος περιλαμβάνει τον συλλέκτη, έναν μηχανισμό που μετατρέπει τις εσωτερικές εναλλασσόμενες τάσεις σε συνεχείς [2].



Σχήμα 3.1: Μηχανή συνεχούς ρεύματος.

Ο δρομέας βρίσκεται μέσα σε μια κυκλική εγκοπή του σιδηρομαγνητικού πυρήνα. Το διάκενο που σχηματίζεται μεταξύ του αγώγιμου δρομέα και τον πόλων του στάτη έχει παντού το ίδιο πλάτος. Η μαγνητική ροή που δημιουργείται από το τύλιγμα διέγερσης του στάτη, πυκνότητας Β, σταθερού μέτρου σε όλη την έκταση του διακένου είναι παντού κάθετη στην επιφάνεια του δρομέα, έτσι ώστε να διαγράψει τη μικρότερη δυνατή διαδρομή στο διάκενο, ελαχιστοποιώντας με αυτόν τον τρόπο την μαγνητική αντίσταση [2].

Όταν ο δρομέας της μηχανής αρχίζει να περιστρέφεται, στα άχρα του εμφανίζεται μια τάση εξ επαγωγής $e_{ind} = (v \times B) \cdot l$ και εκφράζεται ως εξής [2]:

$$e_{ind} = \begin{cases} \frac{2}{\pi} \phi \omega & \text{ κάτω από τους πόλους} \\ 0 & \text{ έξω από την επιφάνεια των πόλων} \end{cases}$$
(3.1)

όπου $\phi=A_pB$ η μαγνητική ροή, $A_p=\pi rl$ εμφαδό επιφάνειας πόλου, Bπυκνότητα μαγνητικής ροής και ω ταχύτητα περιστροφής της μηχανής.

Αυτή η εξίσωση εκφράζει το ότι η τάση που αναπτύσσεται στο εσωτερικό της μηχανής εξαρτάται της ροή του μαγνητικού πεδίου της μηχανής, την ταχύτητα περιστροφής της και κάποιο παράγοντα που αφορά τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά της μηχανής [2].

Η κυματομορφή της τάσης στα άκρα του περιστρεφόμενου πλαισίου είναι εναλλασσόμενη. Για να παραχθεί πλήρως συνεχή τάση προστίθονται δύο ημικυκλικά αγώγιμα τμήματα, ενώ δύο σταθεροί ακροδέκτες σχηματίζουν μεταξύ τους γωνία, ώστε, όταν η τάση του πλαισίου είναι μηδενική, να ανταλλάσσουν μεταξύ τους τα αγώγιμα τμήματα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, κάθε φορά που η τάση αλλάζει πρόσημο, οι ακροδέκτες να μεταβάλουν τη σύνδεση τους, διατηρώντας σταθερό πρόσημο στην ταση των ακροδεκτών. Αυτή η συνεχής αλλαγή στις συνδέσεις των ακροδεκτών ονομάζεται μεταγωγή. Τα ημικυκλικά περιστρεφόμενα τμήματα ονομάζονται τομείς του συλλέκτη (commutator), ενώ οι σταθεροί ακροδέκτες λέγονται ψήκτρες (brushes) [2].



Σχήμα 3.2: Τομείς συλλέκτη και ψήκτρες σε μηχανή συνεχούς ρεύματος.

Συνδέοντας τώρα στα άχρα του τυμπάνου της μηχανής, μια πηγή σταθερής τάσης, επάγεται δύναμη στον αγωγό, που διαρρέεται με ρεύμα Ι, ίση με: $F = I(l \times B)$, όπου l το ενεργό μήχος του δρομέα. Η δύναμη αυτή, τείνει να στρέψει τον δρομέα με ωρολογιαχή φορά, και καθώς έχουμε υποθέσει πως έχουμε σταθερή μαγνητική επαγωγή B όσο ο ρευματοφόρος αγωγός του δρομέα βρίσχεται κάτω από πόλο στάτη, αντίστοιχα χαι η δύναμη που ασχείται είναι σταθερή, και μηδενίζεται όταν βρισχόμαστε έξω από τα άχρα των πόλων. Συνδέοντας, λοιπόν στα άχρα του τυμπάνου μια πηγή σταθερής τάσης, στον άξονα του δρομέα επάγεται ροπή η οποία εχφράζεται ως εξής [2]:

όπου ϕ η μαγνητική ροή και iτο ρεύμα του δρομέα.

Αυτή η εξίσωση εκφράζει το ότι η ροπή που επάγεται στο δρομέα της μηχανής εξαρτάται από την ροή του μαγνητικού πεδίου, του ρεύματος δρομέα και κάποιο παράγοντα που εκφράζει τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά της μηχανής [2].

3.2 Δυναμικό Μοντέλο

Το ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα του τυμπάνου μιας μηχανής συνεχούς ρεύματος αποτελείται από μια ωμική αντίσταση R, μια αυτεπαγωγή L. Αυτό συμβαίνει απλώς επειδή τα πηνία, τα οποία έχουν ωμικές απώλειες, τυλιγμένα γύρω από έναν πυρήνα σιδήρου, γίνονται επίσης επαγωγικά [3]. Στην περίπτωση του κινητήρα, η είσοδος είναι η ηλεκτρική ενέργεια, ενώ η έξοδος είναι η μηχανική ενέργεια με ροπή διακένου T_e και γωνιακή ταχύτητα ω_m.



Σχήμα 3.3: Ισοδύναμο κύκλωμα μηχανής συνεχούς ρεύματος.

Αν υποθέσουμε ότι μια τάση *v* εφαρμόζεται στους ακροδέκτες, η εξίσωση του ηλεκτρικού ισοδύναμου κυκλώματος της μηχανής συνεχούς ρεύματος εκφράζεται ως εξής [3]:

$$v - R \cdot i - L \cdot \frac{di}{dt} = E = \psi \cdot \omega_r \tag{3.3}$$

όπου V [V] η τάση τυμπάνου, i [A] το ρεύμα τυμπάνου, R $[\Omega]$ η ωμική αντίσταση, L [H] η αυτεπαγωγή τυλίγματος τυμπάνου και E [V] η αντί-HEΔ (back-EMF).

Στο ηλεκτρομηχανικό μοντέλο, αντίστοιχα η εξίσωση της ροπής επιτάχυνσης που οδηγεί το φορτίο εκφράζεται ως εξής [3]:

$$J \cdot \frac{d\omega_r}{dt} = \tau_e - \tau_l = \psi \cdot i - \tau_l \tag{3.4}$$

όπου $J \ [kg \cdot m^2/sec^2]$ η ροπή αδράνειας του δρομέα και του φορτίου που κινεί ο κινητήρας, $\psi \ [V \cdot s]$ η πεπλεγμένη μαγνητική ροή, $\omega_r \ [rad/s]$ η γωνιακή ταχύτητα δρομέα, $\tau_e \ [N \cdot m]$ η ηλεκτρομαγνητική ροπή στον άξονα της μηχανής και $\tau_l \ [N \cdot m]$ η ροπή φορτίου, η οποία μπορεί να θεωρηθεί με διάφορους τρόπους ανάλογα την εφαρμογή της μηχανής. Μερικές περιπτώσεις διακρίνονται σε [3]:

- σταθερή $\tau_l = c$, συνήθως σε εφαρμογές ανυψωτιχών.
- ανάλογη της ταχύτητας $\tau_l = b \cdot \omega_r$, συνήθως σε εφαρμογές μηχανημάτων πρέσας.
- ανάλογη του τετραγώνου της ταχύτητας $\tau_l = k \cdot \omega_r^2$, συνήθως σε εφαρμογές αντλιών.

Η υλοποίηση του δυναμικού μοντέλου της μηχανής συνεχούς ρεύματος στο περιβάλλον Plecs φαίνεται παρακάτω:



Σχήμα 3.4: Δυναμικό μοντέλο μηχανής συνεχούς ρεύματος στο περιβάλλον Plecs.

3.3 Παράμετροι Μηχανής

Μια μηχανή συνεχούς ρεύματος μεγαλύτερου μεγέθους θα είναι σε θέση να παράγει περισσότερη ισχύ από μια μικρότερη. Σε περίπτωση προσπάθειας λειτουργίας της μηχανής σε σημαντικά περισσότερη ισχύ από την προβλεπόμενη στο σχεδιασμό, η θέρμανση λόγω απωλειών στα τυλίγματα του στάτη θα ήταν υπερβολική, με αποτέλεσμα την καταστροφή της μηχανής. Οι ονομαστικές συνθήκες λειτουργίας καθορίζονται από τον κατασκευαστή στα φύλλα δεδομένων (data sheets) και στην λεγόμενη πινακίδα ονόματος (name plate) του μηχανήματος, η οποία είναι τοποθετημένη στο περίβλημα του μηχανήματος [3].

Η μηχανή ΣΡ η οποία χρησιμοποιήθηκε για την διεξαγωγή των πειραμάτων ήταν η Brusatori ML 80 S, η οποία είναι ανεξάρτητης διέγερσης. Οι παράμετροι της μηχανής συνολικά, παρουσιάζονται παρακάτω:

Παράμετρος	Σύμβολο	Τιμή
Ισχύς	P_m^N	2.75 kW
Ρεύμα	I_N^{RMS}	18.6 A
Τάση	V_N^{RMS}	170 V
Αντίσταση	R	$1.7 \ \Omega$
Αυτεπαγωγή	L	$0.015 \ \Omega$
Ροή Διέγερσης	ψ	$0.53 V \cdot s$
Αδράνεια Δρομέα	J	$0.01 \ kg \cdot m^2$
Ροπή	$ au_N$	$10.5 N \cdot m$
Ταχύτητα	n_N	$2500 \mathrm{rpm}$

Πίναχας 1: Παράμετροι μηχανής συνεχούς ρεύματος.

Επιπλέον, επειδή η τροφοδοσία της μηχανής παρέχεται από μετατροπέα ισχύος (DC-DC μετατροπέα), ο οποίος έχει ονομαστική τιμή ρεύματος χαμηλότερη από το μηχάνη, τότε οι ονομαστικές τιμές τάσης και ρεύματος καθορίζονται από τις μέγιστες του μετατροπέα.

3.4 Συστήματα Ελέγχου

3.4.1 Ελεγκτής Ρεύματος

Η συνάρτηση μεταφοράς του ηλεκτρικού συστήματος $v \to i$ είναι $G_e(s) = \frac{1}{sL+R}$. Καθώς η δυναμική συμπεριφορά του μηχανικού συστήματος είναι πολύ πιο αργή από του ηλεκτρικού συστήματος, η αντί-ΗΕΔ μπορεί να αντιμετωπιστεί στην συνάρτηση μεταφοράς του ηλεκτρικού συστήματος σαν διαταραχή, και εφαρμόζεται έλεγχος κλειστού βρόχου στο ηλεκτρικό σύστημα μέσω PI ελεγκτή [3].



Σχήμα 3.5: Μπλοκ διάγραμμα ελεγκτή ρεύματος κλειστού βρόχου μηχανής συνεχούς ρεύματος.

Το ρεύμα τυμπάνου μετράται και συγκρίνεται με την επιθυμητή τιμή αναφοράς, i_{ref} . Το σφάλμα $e = i_{ref} - i$ δίνεται ως είσοδος στον ελεγκτή ρεύματος. Η έξοδος του ελεγκτή ρεύματος είναι η τάση αναφοράς η οποία υλοποιείται με τη βοήθεια ενός μετατροπέα [3].

Καθώς το ηλεκτρικό σύστημα είναι πρώτης τάξης, ο PI ελεγκτής που θα χρησιμοποιηθεί, μπορεί να είναι επίσης πρώτης τάξης [3]:

$$F_c(s) = K_p + \frac{K_i}{s} \tag{3.5}$$

Η επιλογή των κατάλληλων κερδών του PI ελεγκτή γίνεται σύμφωνα με τις παραμέτρους τις μηχανής και τον επιθυμητό χρόνο ανόδου του συστήματος $t_{rc} = \frac{ln(9)}{a_c}$, όπου a_c το εύρος ζώνης του ηλεκτρικού συστήματος μαζί με τον ελεγκτή ρεύματος. Έστω G_{cc} η συνάρτηση μεταφοράς κλειστού βρόχου για $i_{ref} \rightarrow i$, όπου στην μόνιμη κατάσταση δεν υπάρχει σφάλμα ελέγχου, αφού $G_{ce}(0) = 1$ [3]:

$$G_{ce}(s) = \frac{a_c}{s+a_c} = \frac{\frac{a_c}{s}}{1+\frac{a_c}{s}} = \frac{F_c(s)G_e(s)}{s+F_c(s)G_e(s)}$$
(3.6)

Αν $F_c(s)G_e(s) = \frac{a_c}{s}$, προχύπτει το επιθυμητό σύστημα χλειστού βρόχου [3]:

$$F_c(s) = \frac{a_c}{s} G_e^{-1}(s) = \frac{a_c}{s} (sL + R)$$
(3.7)

Τα κέρδη του ελεγκτή ρεύματος λοιπόν, επιλέγονται ως εξής [3]:

$$\begin{cases} K_p = a_c \hat{L} \\ K_i = a_c \hat{R} \end{cases}$$
(3.8)

όπου R, L οι εκτιμήσεις των παραμέτρων, οι οποίες θα πρέπει να προσεγγίζουν όσο το δυνατόν καλύτερα τις πραγματικές παραμέτρους της μηχανής.

Ωστόσο, η απόχριση του παραπάνω συστήματος ελέγχου δεν είναι ικανοποιητική, λόγω της διαταραχής φορτίου που προκαλεί η αντί-HEΔ. Εφόσον υπάρχει μέτρηση της ταχύτητας περιστροφής, μια λύση είναι η προσθήκη του όρου $\hat{E} = \psi \omega_r$ στην έξοδο του ελεγκτή ρεύματος. Εναλλακτικά, η απόδοση μπορεί να βελτιωθεί αυξάνοντας το ολοκληρωτικό κέρδος. Αυτό, όμως, έχει ως αποτέλεσμα να εμφανίζονται υπερυψώσεις όταν αλλάζει η αναφορά του ρεύματος. Ακόμα, φαίνεται πως το σφάλμα ελέγχου μειώνεται σε περίπτωση που η αντίσταση Ρ αυξηθεί. Στην πραγματικότητα, η προσθήκη περισσότερης αντίστασης είναι εξαιρετικά ανεπιθύμητη, λόγω αυξημένων απωλειών. Αυτό αντιμετοπίζεται με την εισαγωγή ενός εσωτερικού βρόχου ανάδρασης προσθέτοντας τον όρο μιας ενεργούς αντίστασης R_a . Ο ελεγκτής, σε αυτό το στάδιο, γίνεται δύο βαθμών ελευθερίας.



Σχήμα 3.6: Μπλοκ διάγραμμα ελεγκτή ρεύματος κλειστού βρόχου με ενεργό αντίσταση R_a μηχανής συνεχούς ρεύματος.

Το σύστημα κλειστού βρόχου G'_{ce} για $v' \to i$ γίνεται [3]:

$$G'_{e}(s) = \frac{G_{e}(s)}{1 + R_{a}G_{e}(s)} = \frac{1}{sL + R + R_{a}}$$
(3.9)

Η αντίσταση έχει ουσιαστικά αυξηθεί από R σε $R + R_a$, αλλά επειδή αυτό γίνεται μόνο χρησιμοποιώντας σήματα, που δεν περιλαμβάνουν μεταφορά ενέργειας, δεν θα υπάρξει επιπλέον απώλεια ισχύος [3].

$$F_c(s) = \frac{a_c}{s} G'^{-1}_e(s) = \frac{a_c}{s} (sL + R + R_a)$$
(3.10)

Τα νέα κέρδη του ελεγκτή ρεύματος, επιλέγονται ως εξής [3]:

$$\begin{cases} K_p = a_c \hat{L} \\ K_i = a_c (\hat{R} + R_a) = a_c^2 \hat{L} \end{cases}$$
(3.11)

όπου $R_a = a_c \hat{L} - \hat{R}$ η ενεργός αντίσταση.

Μέχρι στιγμής, ο έλεγχος ρεύματος αντιμετωπίζεται ως ένα ιδανικό γραμμικό σύστημα. Στην πράξη, αυτό δεν είναι σωστό. Η τάση εισόδου v δεν μπορεί να γίνει αυθαίρετα μεγάλη, αλλά περιορίζεται από μια ανώτερη και μια κατώτερη τιμή. Τα όρια αυτά, καθορίζονται από την ονομαστική τιμή του DC-DC μετατροπέα, ο οποίος παρέχει την τάση. Η πραγματική τάση v είναι επομένως ένας κορεσμός της ιδανικής τάσης και στην περίπτωση μας περιορίζεται στην μέγιστη τιμή του DC Link, η οποία για πειραματικές δοκιμές είναι $V_{DC} = 100 V$. Με v_{ref} ως η ιδανική αναφορά τάσης, δηλαδή το σήμα εξόδου του ελεγκτή ρεύματος και \bar{v}_{ref} ως η κορεσμένη τάση αναφοράς, ισχύει:
$$\bar{v}_{ref} = sat(v_{ref}, V_{base}) = \begin{cases} -V_{base} &, \text{ av } v_{ref} < -V_{base} \\ v_{ref} &, \text{ av } -V_{base} \le v_{ref} \le V_{base} \\ V_{base} &, \text{ av } v_{ref} > V_{base} \end{cases}$$
(3.12)

Τέλος, να αναφερθεί πως κατά την διάρκεια όπου η έξοδος του ελεγκτή ρεύματος βρίσκεται σε κορεσμό, ο ολοκληρωτικός όρος του ελεγκτή συσσωρεύει σφάλμα. Σε μια βηματική μεταβολή της αναφοράς του ρεύματος, η συσσώρευση του ολοκληρωτικού όρου οδηγεί σε υπερακόντιση, και αργή απόκριση του συστήματος. Για τον λόγο αυτό, το σφάλμα που εισάγεται στον ολοκληρωτικό όρο του ελεγκτή τροποποιείται, ώστε να ισορροπεί στα όρια του κορεσμού:

$$\bar{e} = e + \frac{1}{K_p} (\bar{v}_{ref} - v_{ref})$$
(3.13)

Η τροποποίηση αυτή αναφέρεται ως σχήμα έναντι της συσσώρευσης ολοκληρωτικού σφάλματος (anti-windup).



Σχήμα 3.7: Μπλοκ διάγραμμα ελεγκτή ρεύματος κλειστού βρόχου με κορεσμό τάσης εξόδου και συσσώρευτή ολοκληρωτικού σφάλματος μηχανής συνεχούς ρεύματος.

Η υλοποίηση του συνολικού συστήματος ελέγχου ρεύματος της μηχανής συνεχούς ρεύματος στο περιβάλλον Plecs φαίνεται παρακάτω. Η τάση v_{ref} διαιρείται με V_{DC} ώστε να κανονικοποιηθεί εντός του διαστήματος [-1, 1], αφού χρησιμοποιείται ως σήμα ελέγχου, $v_{control}$, για την διαμόρφωση εύρους παλμών.



Σχήμα 3.8: Ελεγκτής ρεύματος DC μηχανής στο περιβάλλον Plecs.

Παραχάτω φαίνεται η απόχριση του ρεύματος τυμπάνου της μηχανής DC σε μια βηματιχή μεταβολή αναφοράς (0 \rightarrow 5 A), σύμφωνα με τον ελεγχτή που σχεδιάστηκε, επιλέγοντας χρόνο ανόδου $t_{rc} = 2msec$, τροφοδοσία εισόδου DC-DC μετατροπέα $V_{DC} = 100 V$ και διαμόρφωση εύρους παλμών με μονοπολική τάση εξόδου διακοπτικής συχνότητας $f_{sw} = 10 \ kHz$. Για τον

κορεσμό της τάσης στην έξοδο του ελεγκτή ρεύματος ορίστηκε όριο τάση
ς $V_{max}=100\ V,$ λόγω του μετατροπέα.



Σχήμα 3.9: Απόχριση ρεύματος DC μηχανής σε βηματική μεταβολή αναφοράς με PI ελεγκτή.

Ο ελεγκτής υλοποιήθηκε σωστά καθώς επιτυγχάνεται ο επιθυμητός χρόνος ανόδου, το ρεύμα τυμπάνου αποκτά την επιθυμητή τιμή αναφοράς i_{ref} και επιβεβαιώνεται η έλλειψη υπερυψώσεων, λόγω της προσθήκης της ενεργού αντίστασης R_a , αλλά και του σχήματος έναντι της συσσώρευσης ολοκληρωτικού σφάλματος (anti-windup).

3.4.2 Ελεγκτής Ταχύτητας

Εκτός από τον ελεγκτή ρεύματος, πολλά συστήματα ηλεκτρικής κίνησης χρησιμοποιούν επίσης έναν ελεγκτή ταχύτητας εξωτερικού βρόχου. Η ταχύτητα μετριέται ή εκτιμάται και ανατροφοδοτείται στον ελεγκτή ταχύτητας, του οποίου η έξοδος είναι η αναφορά ρεύματος τυμπάνου της μηχανής. Στην συγκεκριμένη δομή ελέγχου, το εύρος ζώνης του εξωτερικού βρόχου.

$$\alpha_s \le 0.1 \ \alpha_c \tag{3.14}$$

Μέχρι στιγμής έχει υποτεθεί ότι η ροπή του φορτίου είναι ανάλογη της ταχύτητας $\tau_l = b\omega_r$. Σε πολλές εφαρμογές, ωστόσο, αυτό δεν ισχυεί, επομένως ένα πιο αχριβές μοντέλο για τη ροπή φορτίου είναι:

$$\tau_l = b\omega_r + \tau_L \tag{3.15}$$

όπου ο όρος τ_L εξωτερικής ροπής φορτίου μπορεί να αντιμετωπιστεί σαν διαταραχή στην συνάρτηση μεταφοράς του μηχανικού συστήματος $(i - > \omega_r)$.

Αχολουθώντας την ίδια διαδιχασία σχεδιασμού με τον ελεγχτή ρεύματος, εισάγεται ένας εσωτεριχός βρόχος ανάδρασης προσθέτοντας τον όρο μιας ενεργούς απόσβεσης b_a , με αποτέλεσμα ο πόλος του μηχανιχού μοντέλου να μεταχινηθεί από $-\frac{b}{7}$ σε $-a_s$, όπου a_s είναι το

επιθυμητό εύρος ζώνης κλειστού βρόχου. Έτσι προκύπτει:

$$ba = \frac{a_s \hat{J} - \hat{b}}{\hat{\psi}} \tag{3.16}$$

όπου \hat{J} , \hat{b} , $\hat{\psi}$ οι εκτιμήσεις των παραμέτρων, οι οποίες θα πρέπει να προσεγγίζουν όσο το δυνατόν καλύτερα τις πραγματικές παραμέτρους της μηχανής.

Τα κέρδη του ελεγκτή ταχύτητας υπολογίζονται όπως και στον ελεγκτή ρεύματος, με βάση την συνάρτηση μεταφοράς $G_s(s) = \frac{\frac{\psi}{J}}{s+a_s}$.

$$F_s(s) = \frac{a_s}{s} G_s^{-1}(s) = K_{ps} + \frac{K_{is}}{s}$$
(3.17)

Τα κέρδη του ελεγκτή ταχύτητας λοιπόν, επιλέγονται ως εξής:

$$\begin{cases} K_{ps} = \frac{a_s \hat{J}}{\hat{\psi}} \\ K_{is} = \frac{a_s^2 \hat{J}}{\hat{\psi}} \end{cases}$$
(3.18)

Η έξοδος του ελεγκτή ταχύτητας είναι η αναφορά για τον ελεγκτή ρεύματος. Τα τελευταία δύο βήματα στο σχεδιασμό του ελεγκτή παραμένουν. Πρώτα, απαιτείται ο περιορισμός του i_{ref} , έτσι ώστε:

$$|i_{ref}| \le I_{max} \tag{3.19}$$

όπου $I_{max} = I_{base}$ στην μόνιμη κατάσταση, ενώ υπερένταση $I_{max} > I_{base}$, μπορεί να επιτραπεί σε ορισμένη μεταβατική κατάσταση μικρού χρονικού διαστήματος, κάτι που εξαρτάται από τα θερμικά χαρακτηριστικά της μηχανής που ελέγχουμε.

Επιπλέον, προστίθεται σχήμα έναντι της συσσώρευσης ολοκληρωτικού σφάλματος (antiwindup), όπως και στον ελεγκτή ρεύματος, ως εξής:

$$\bar{e} = e + \frac{1}{K_{ps}}(\bar{i}_{ref} - i_{ref})$$
(3.20)

Η υλοποίηση του συνολικού συστήματος ελέγχου ταχύτητας της μηχανής συνεχούς ρεύματος στο περιβάλλον Plecs φαίνεται παρακάτω.



Σχήμα 3.10: Ελεγκτής ταχύτητας DC μηχανής στο περιβάλλον Plecs.

Παραχάτω φαίνεται η απόχριση της ταχύτητας δρομέα της μηχανής DC σε μια βηματιχή μεταβολή αναφοράς (0 \rightarrow 500 rpm), σύμφωνα με τον ελεγχτή που σχεδιάστηχε, επιλέγοντας χρόνο ανόδου $t_{rs}=0.2sec=100t_{rc}$, τροφοδοσία εισόδου DC-DC μετατροπέα $V_{DC}=100V$ και διαμόρφωση εύρους παλμών με μονοπολιχή τάση εξόδου διαχοπτιχής συχνότητας $f_{sw}=10kHz$. Για τον χορεσμό του ρεύματος στην έξοδο του ελεγχτή ταχύτητας ορίστηχε όριο ρεύματος $I_{max}=10~A,$ λόγω του μετατροπέα.



Σχήμα 3.11: Απόχριση ταχύτητας DC μηχανής σε βηματική μεταβολή αναφοράς με PI ελεγκτή.

Ο ελεγκτής υλοποιήθηκε σωστά καθώς επιτυγχάνεται ο επιθυμητός χρόνος ανόδου, η ταχύτητα περιστροφής αποκτά την επιθυμητή τιμή αναφοράς ω_{ref} και επιβεβαιώνεται η έλλειψη υπερυψώσεων, λόγω της προσθήκης της ενεργού απόσβεσης b_a , αλλά και του σχήματος έναντι της συσσώρευσης ολοκληρωτικού σφάλματος (anti-windup).

4 Μηχανή Επαγωγής (AC)

Η ενότητα αυτή εξετάζει τη μηχανή επαγωγής (AC) και καλύπτει τις βασικές αρχές λειτουργίας της. Ακολουθεί ανάλυση των τριφασικών συστημάτων ισχύος και μια λεπτομερής περιγραφή του δυναμικού μοντέλου, το οποίο περιλαμβάνει το ηλεκτρικό και το μηχανικό σύστημα. Στη συνέχεια, υλοποιείται διανυσματικός έλεγχος, με βάση το μοντέλο ρεύματος στο dq πλαίσιο, με τον οποίο επιτυγχάνεται η ακριβής ρύθμιση της λειτουργίας της μηχανής.

4.1 Αρχή Λειτουργίας

Η αρχή λειτουργίας μιας επαγωγικής μηχανής βασίζεται στο φαινόμενο της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής και πιο συγκεκριμένα στο νόμο του Faraday. Όταν μια τριφασική τάση εφαρμόζεται στο στάτη της επαγωγικής μηχανής, δημιουργείται ένα περιστρεφόμενο μαγνητικό πεδίο στον στάτη B_s . Το πεδίο αυτό διαπερνά το κενό αέρα και επάγεται στα τυλίγματα του δρομέα, προκαλώντας την εμφάνιση επαγόμενων ρευμάτων στον δρομέα. Το ρεύμα αυτό παράγεται μόνο όταν υπάρχει διαφορά ταχύτητας (ολίσθηση s) μεταξύ του περιστρεφόμενου πεδίου και του δρομέα. Το πεδίο του στάτη περιστρέφεται με ανθωρολογιακή φορά και με ταχύτητα [2]:

$$n_{sync} = \frac{120f_e}{P} \tag{4.1}$$

όπου f_e είναι η συχνότητα του συστήματος σε Hz και P ο αριθμός πόλων της μηχανής. Το μανγητικό πεδίο καθώς διέρχεται πάνω από τους αγωγούς του δρομέα επάγει τάση στα άκρα τους, η οποία περιγράφεται από την εξίσωση:

$$e_{ind} = (v \times B_s) \cdot l \tag{4.2}$$

όπου v η σχετική ταχύτητα των αγωγών του δρομέα ως προς το μαγνητικό πεδίο, B_s η μαγνητική επαγωγή του πεδίου του στάτη και l το μήκος του αγωγού του δρομέα.

Τα επαγόμενα ρεύματα στον δρομέα παράγουν ένα δικό τους μαγνητικό πεδίο στον δρομέα *B_R*. Αυτό το πεδίο αλληλεπιδρά με το περιστρεφόμενο μαγνητικό πεδίο του στάτη, δημιουργώντας ροπή, η οποία τείνει να περιστρέψει τον δρομέα προς την κατεύθυνση του περιστρεφόμενου πεδίου και περιγράφεται από την σχέση [2]:

$$\tau_{ind} = kB_R \times B_s \tag{4.3}$$

Ο δρομέας δεν καταφέρνει να φτάσει την ταχύτητα του περιστρεφόμενου πεδίου, διατηρώντας μια μικρή διαφορά ταχύτητας, που ονομάζεται ολίσθηση. Η ολίσθηση είναι απαραίτητη για τη διατήρηση της επαγωγής ρεύματος στον δρομέα και συνεπώς της συνεχούς λειτουργίας της μηχανής.

$$s = \frac{\omega_{sync} - \omega_m}{\omega_{sync}} (\times 100\%) \tag{4.4}$$

Έτσι, η επαγωγική μηχανή λειτουργεί με τη συνεχή δημιουργία και αλληλεπίδραση μαγνητικών πεδίων στον στάτη και τον δρομέα, μετατρέποντας την ηλεκτρική ενέργεια σε μηχανική κίνηση στην περίπτωση λειτουργίας κινητήρα και το αντίστροφο για λειτουργία γεννήτριας [2].



Σχήμα 4.1: Μηχανή επαγωγής.

Οι επαγωγικές μηχανές διακρίνονται σε δύο βασικούς τύπους, ανάλογα με την κατασκευή του δρομέα τους:

• Επαγωγική Μηχανή με Βραχυκυκλωμένο Κλωβό (Squirrel Cage Rotor): Στον τύπο αυτό, ο δρομέας αποτελείται από αγώγιμες ράβδους τοποθετημένες παράλληλα στον άξονα, οι οποίες συνδέονται μεταξύ τους με δακτυλίους στις άκρες.Είναι ο πιο απλός και ανθεκτικός τύπος, καθώς δεν έχει κινούμενα ή ευαίσθητα μέρη. Χρησιμοποιείται ευρέως σε εφαρμογές που απαιτούν σταθερή και απλή λειτουργία, καθώς έχει χαμηλό κόστος κατασκευής και συντήρησης [2].

• Επαγωγική Μηχανή με Δακτυλιοφόρο Δρομέα (Wound Rotor): Σε αυτόν τον τύπο, ο δρομέας περιλαμβάνει περιελίξεις, παρόμοιες με αυτές του στάτη, που συνδέονται με εξωτερικούς δακτυλίους. Μέσω των δακτυλίων αυτών, είναι δυνατόν να συνδεθούν εξωτερικές αντιστάσεις, οι οποίες επιτρέπουν τον έλεγχο της εκκίνησης και της ταχύτητας. Προτιμάται σε εφαρμογές που απαιτούν ρύθμιση ταχύτητας και μεγαλύτερη ροπή εκκίνησης, όπως στους γερανούς και τα ανυψωτικά συστήματα [2].

4.2 Τριφασικά Συστήματα Ισχύος

Ένα τριφασικό σύστημα σχηματίζεται από τρία μεγέθη, που ταλαντώνονται με τη γωνιακή συχνότητα ω1 και διαχωρίζονται στη γωνία φάσης κατά (ιδανικά) 120° (2π/3 rad). Τα τριφασικά συστήματα είναι προτιμότερα από τα μονοφασικά συστήματα κυρίως για δύο λόγους.

- Το άθροισμα των στιγμιαίων τιμών είναι μηδέν.
- Η στιγμιαία τριφασική ισχύς είναι σταθερή.

Ένα ισορροποιμένο τριφασικό σύστημα τάσης με αναφορά την φάση α μπορεί να είναι αναλυθεί στις εξής τρεις συνιστώσες τάσεις:

$$\begin{cases} v_a(t) = \hat{V}cos(\omega_1 t) \\ v_b(t) = \hat{V}cos(\omega_1 t - \frac{2\pi}{3}) \\ v_c(t) = \hat{V}cos(\omega_1 t - \frac{4\pi}{3}) \end{cases}$$
(4.5)



Σχήμα 4.2: Διάγραμμα φάσεων ενός τριφασιχού συστήματος.

Το τριφασικό σύστημα είναι δυνατόν να περιγραφεί ως ένα ισοδύναμο διφασικό σύστημα που έχει δύο κάθετους άξονες, που συμβολίζονται με τους δείκτες α και β. Αυτοί οι άξονες μπορούν να θεωρηθούν ως οι πραγματικοί και φανταστικοί άξονες σε ένα μιγαδικό επίπεδο, επιτρέποντας μια σύνθετη αναπαράσταση. Ο μετασχηματισμός τριών φάσεων σε δύο φάσεις είναι γνωστός ως μετασχηματισμός Clarke, ο οποίος περιγράφεται από την σχέση:

$$v^{s}(t) = v_{\alpha}(t) + jv_{\beta}(t) = \frac{2}{3}K[v_{a}(t) + e^{j\frac{2\pi}{3}}v_{b}(t) + e^{j\frac{4\pi}{3}}v_{c}(t)]$$
(4.6)

όπου το K είναι μια γνωστή σταθερά κλιμάκωσης διανύσματος χώρου. Οι νέες συνιστώσες τάσεων α και β προκύπτουν από το πραγματικό και φανταστικό μέρος της προηγούμενης εξίσωσης αντίστοιχα.



Σχήμα 4.3: Διάγραμμα σταθερού πλαισίου δυο συνιστωσών (πλαίσιο αβ).

Η αναλυτική μορφή του μετασχηματισμού Clarke σε μορφή πινάχων, με δεδομένο ότι το άθροισμα των στιγμιαίων τιμών είναι μηδέν, φαίνεται παρακάτω.

$$v^{s}(t) = \begin{bmatrix} v_{\alpha}(t) \\ v_{\beta}(t) \end{bmatrix} = K \begin{bmatrix} \frac{2}{3} & -\frac{1}{3} & -\frac{1}{3} \\ 0 & -\frac{1}{\sqrt{3}} & -\frac{1}{\sqrt{3}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{a}(t) \\ v_{b}(t) \\ v_{c}(t) \end{bmatrix}$$
(4.7)

Ο μετασχηματισμός Clarke χαραχτηρίζεται ως ένα σταθερό πλαίσιο συντεταγμένων. Για να ελέγξουμε τις μεταβλητές καταστάσεις του κινητήρα μέσω κλασικών ελεγκτών ΠΙ, είναι απαραίτητο να μετατρέψουμε τα ημιτονοειδή μεταβαλλόμενα μεγέθη σε σταθερές χρονικά ποσότητες, ώστε να μπορούμε να τα συγκρίνουμε με τα αντίστοιχα σταθερά σήματα αναφοράς. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω ενός νέου μετασχηματισμού, όπου τα διάνυσματα του χώρου περιστρέφονται με τη γωνιακή θεμελιώδη συχνότητα ω₁. Ο μετασχηματισμός ενός σταθερού πλαισίου δύο συνιστωσών σε ένα περιστρεφόμενο πλαίσιο δύο πάλι συνιστωσών είναι γνωστός ως μετασχηματισμός Park και περιγράφεται από την σχέση:

$$v(t) = e^{-j\omega_1 t} v^s(t) \tag{4.8}$$

$$v(t) = \begin{bmatrix} v_d(t) \\ v_q(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta_1 & \sin\theta_1 \\ -\sin\theta_1 & \cos\theta_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_\alpha(t) \\ v_\beta(t) \end{bmatrix}$$
(4.9)

όπου $\theta_1 = \int \omega_1 dt$



Σχήμα 4.4: Διάγραμμα σύγχρονων συντεταγμένων (πλάσιο dq).

Η σταθερά κλιμάκωσης Κ μπορεί να επιλεγεί αυθαίρετα. Ανάλογα με την κατάσταση, μια επιλογή μπορεί να είναι πιο βολική από μια άλλη. Υπάρχουν τρεις τυπικές επιλογές για την διατήρηση συγκεκριμένων μεγεθών κατα τον μετασχηματισμό. Αναλυτικά, η σταθερά κλιμάκωσης διακρίνεται:

- K = 1 για διατήρηση σταθερού πλάτους.
- $K = \frac{1}{\sqrt{2}}$ για διατήρηση RMS τιμής.
- $K = \sqrt{\frac{3}{2}}$ για διατήρηση τιμής της ισχύος.

4.3 Δυναμικό Μοντέλο - Ηλεκτρικό Σύστημα

Ξεκινώντας από το κύκλωμα του στάτη, σύμφωνα με τον νόμο επαγωγής προκύπτει ότι το τμήμα της τάσης του στάτη που δεν διαχέεται στην αντίσταση του στάτη R_s θα δημιουργήσει μια ροή στα τυλίγματα του στάτη. Επομένως, με v_s^s ως διάνυσμα χώρου τάσης στάτη, πρέπει να ισχύει η ακόλουθη σχέση[3]:

$$v_s^s - R_s i_s^s - \frac{d\psi_s^s}{dt} = 0 \qquad (\Sigma \tau \acute{\alpha} \tau \eta \varsigma)$$
(4.10)

όπου i_s^s και ψ_s^s είναι τα διανύσματα χώρου για το ρεύμα και την ροή του στάτη, αντίστοιχα.

Το κύκλωμα του δρομέα, με αντίσταση τυλίγματος $R_r,$ εξετάζεται με παρόμοιο τρόπο και προκύπτει:

$$v_r^r - R_r i_r^r - \frac{d\psi_r^r}{dt} = 0 \quad (\Delta \text{pom}(\alpha \zeta)) \tag{4.11}$$

όπου v_r^r , i_r^r , και ψ_r^r είναι τα διανύσματα χώρου τάσης, ρεύματος και ροής του δρομέα, αντίστοιχα. Βέβαια, το τύλιγμα του δρομέα είναι βραχυκυκλωμένο, οπότε το $v_r^r = 0$.

4.3.1 Τ - Ισοδύναμο Μοντέλο

Στην συνέχεια, εφαρμόζεται μετασχηματισμός αβ των i_r^r , και ψ_r^r σε σταθερές συντεταγμένες, χρησιμοποιώντας τη θέση του δρομέα $\theta_r = \int \omega_r dt$.

$$i_r^s = e^{j\theta_r} i_r^r \qquad \qquad \psi_r^s = e^{j\theta_r} \psi_r^r \tag{4.12}$$

Οι εξισώσεις για το κύκλωμα στάτη και δρομέα, προκύπτουν:

$$\frac{d\psi_s^s}{dt} = v_s^s - R_s i_s^s \qquad (\Sigma \tau \acute{\alpha} \tau \eta \varsigma) \tag{4.13}$$

$$\frac{d\psi_r^s}{dt} = j\omega_r\psi_r^s - R_r i_r^s \quad (\Delta \rho o \mu \epsilon \alpha \varsigma) \tag{4.14}$$

Υποθέτοντας γραμμικές μαγνητικές συνθήκες, η ροή του διακένου ψ^s_{α} μπορεί να εκφραστεί ως:

$$\psi_{\alpha}^{s} = L_{m}i_{m}^{s} \qquad \quad i_{m}^{s} = i_{s}^{s} + i_{r}^{s} \tag{4.15}$$

όπου L_m η αυτεπαγωγή μαγνήτισης και i_m^s το ρεύμα μαγνήτισης.

Η ροή του στάτη είναι το άθροισμα της ροής διακένου και της ροής διαρροής στάτη, η οποία υπό γραμμικές μαγνητικές συνθήκες είναι ανάλογη μόνο με το ρεύμα του στάτη. Με παρόμοιο συλλογισμό για την ροή του δρομέα, προκύπτει:

$$\psi_s^s = L_m i_m^s + L_{sl} i_s^s \tag{4.16}$$

$$\psi_r^s = L_m i_m^s + L_{rl} i_r^s \tag{4.17}$$

όπου L_{sl} , L_{rl} οι αυτεπαγωγές σκέδασης στάτη και δρομέα αντίστοιχα.

Εναλλακτικά, με $L_s = L_m + L_{sl}$ και $L_r = L_m + L_{rl}$ ως οι αυτεπαγωγές στάτη και δρομέα, αντίστοιχα, οι σχέσεις μπορούν να εκφραστούν ως:

$$\psi_s^s = L_s i_s^s + L_m i_r^s \tag{4.18}$$

$$\psi_r^s = L_m i_s^s + L_r i_r^s \tag{4.19}$$

Συνεπώς, οι εξισώσεις περιγράφουν το δυναμικό Τ-ισοδύναμο κύκλωμα της μηχανής επαγωγής είναι [3]:

$$v_s^s - R_s i_s^s - L_{sl} \frac{di_s^s}{dt} - L_m \frac{di_m^s}{dt} = 0 \qquad (\Sigma \tau \acute{a} \tau \eta \varsigma)$$
(4.20)

$$j\omega_r\psi_r^s - R_r i_r^s - L_{rl}\frac{di_r^s}{dt} - L_m\frac{di_m^s}{dt} = 0 \quad (\Delta \text{pom}(\alpha \varsigma))$$

$$(4.21)$$



Σχήμα 4.5: Δυναμικό μοντέλο αντίστροφου-Τ-ισοδύναμου κύκλωματος για μηχανή επαγωγής.

4.3.2 Ανάστροφο Γ - Ισοδύναμο Μοντέλο

Από την ανάλυση του Τ-ισοδύναμου δυναμικού μοντέλου φαίνεται ότι είναι υπερβολικά παραμετροποιημένο, κάτι που το καθιστά μη αποτελεσματικό για δυναμική ανάλυση και σχεδιασμό ελεγκτή. Με τους κατάλληλους μετασχηματισμούς μεταβλητών εισάγεται το Ανάστροφο-Γ δυναμικό ορίζοντας [3]:

$$\psi_R^s = b\psi_r^s \qquad i_R^s = \frac{i_r^s}{b} \tag{4.22}$$

όπου $b = \frac{L_m}{L_r}$ ένας παράγοντας μετασχηματισμού έτσι ώστε τα ρεύματα του στάτη και δρομέα να έχουν ίσους συντελεστές.

Με τον νέο μετασχηματισμό, οι εξισώσεις ροής καταλήγουν:

$$\psi_s^s = L_\sigma i_s^s + L_M i_M^s \tag{4.23}$$

$$\psi_R^s = L_M i_M^s \tag{4.24}$$

όπου έχουν εισαχθεί νέες παράμετροι, $L_M = bL_m$ η μετασχηματισμένη αυτεπαγωγή μαγνήτισης και $L_\sigma = L_{sl} + L_{rl}$ η συνολική αυτεπαγωγή σκέδασης.

Επομένως, οι εξισώσεις που περιγράφουν το Ανάστροφο-Γ δυναμικό μοντέλο είναι οι εξής [3]:

$$L_{\sigma}\frac{di_s^s}{dt} = v_s^s - (R_s + R_R)i_s^s - (j\omega_r - \frac{R_R}{L_M})\psi_R^s \qquad (\Sigma\tau\acute{\alpha}\tau\eta\varsigma)$$
(4.25)

$$\frac{d\psi_R^s}{dt} = R_R i_s^s - \left(\frac{R_R}{L_M} - j\omega_r\right)\psi_R^s \quad (\Delta \rho o \mu \epsilon \alpha \varsigma) \tag{4.26}$$

$$E_b^s = \left(\frac{R_R}{L_M} - j\omega_r\right)\psi_R^s \tag{4.27}$$

όπου $R_R = b^2 R_r$ η νέα αντίσταση δρομέα και E_b^s η αντί-HEΔ (back-EMF), η οποία είναι περίπου ίση με $j\omega_r\psi_R^s$, καθώς υπερισχύει του όρου $\frac{R_R}{L_M}$, εκτός από την περιοχή χαμηλών ταχυτήτων. Όπως φαίνεται, οι μεταβλητές του συστήματος πλέον είναι το ρεύμα στάτη i_s^s και η ροή δρομέα ψ_R^s , ενώ έχει παραληφθεί το ρεύμα δρομέα, το οποίο δεν μπορεί να μετρηθεί [3].



Σχήμα 4.6: Δυναμικό μοντέλο αντίστροφου-Γ-ισοδύναμου κύκλωματος για μηχανή επαγωγής.

Καθώς ο έλεγχος του συστήματος υλοποιείται στο πλαίσιο dq, τροποποιούνται και οι εξισώσεις του Ανάστροφου-Γ δυναμικού μοντέλου στις σύγχρονες συντεταγμένες [3]:

$$L_{\sigma}\frac{di_s}{dt} = v_s - (R_s + R_R + j\omega_1 L_{\sigma})i_s - (j\omega_r - \frac{R_R}{L_M})\psi_R \qquad (\Sigma\tau\acute{a}\tau\eta\varsigma)$$
(4.28)

$$\frac{d\psi_R}{dt} = R_R i_s - \left(\frac{R_R}{L_M} + j\omega_2\right)\psi_R \quad (\Delta \rho o \mu \epsilon \alpha \varsigma) \tag{4.29}$$

όπου ω_1 η σύγχρονη ταχύτητα σε [rad/s], και $\omega_2 = \omega_1 - \omega_r$.

Η υλοποίηση του ηλεκτρικού συστήματος της μηχανής επαγωγής, μέσω του ανάστροφου-Γ δυναμικού μοντέλου στο αβ πλαίσιο στο περιβάλλον Plecs φαίνεται στο Σχήμα.



Σχήμα 4.7: Ηλεκτρικό σύστημα μηχανής επαγωγής σε περιβάλλον Plecs.

4.3.3 Τέλειος Προσανατολισμός Πεδίου

Έίναι ιδιαίτερα χρήσιμο η γωνία μετασχηματισμού του πλαισίου dq να ευθυγραμμιστεί με την ροή του δρομέα $\theta_1 = arg\psi_R^s$, ώστε η ροή να αποτελείται από μία μόνο συνιστώσα στον d άξονα, την ψ_d , απαλείφοντας τον όρο ψ_q . Στην περίπτωση αυτή, ισχύει [3]:

$$\frac{d\psi_R}{dt} = R_R(i_d + ji_q) - \left(\frac{R_R}{L_M} + j\omega_2\right)\psi_R \tag{4.30}$$

Αναλύοντας την εξίσωση σε πραγματικό και φανταστικό μέρος, προκύπτει:

$$Re: \frac{d\psi_R}{dt} = R_R i_d - \frac{R_R}{L_M} \psi_R \tag{4.31}$$

$$Im: \omega_2 = \frac{R_R i_q}{\psi_R} \tag{4.32}$$

Στη μόνιμη κατάσταση με τέλειο προσανατολισμό πεδίου η ροή του δρομέα γίνεται:

$$\psi_R = i_d L_M \tag{4.33}$$

Η συνιστώσα ρεύματος i_d καθορίζει το επίπεδο ροής και ελέγχεται έτσι ώστε:

$$i_d = \frac{\psi_{ref}}{\hat{L}_M} \tag{4.34}$$

όπου ψ_{ref} η επιθυμητή ροή στον δρομέα, και \hat{L}_M η εκτίμηση της αυτεπαγωγής μαγνήτισης.

4.4 Δυναμικό Μοντέλο - Μηχανικό Σύστημα

4.4.1 Παραγωγή Ροπής

Η ενεργός ισχύς αναπτύσσεται σε τρεις θέσεις στο ισοδύναμο κύκλωμα, στις αντιστάσεις του στάτη και δρομέα και στην αντί-ΗΕΔ του δρομέα. Στα δύο πρώτα σημεία γίνεται απώλειες χαλκού, ενώ στο τελευταίο σημείο μετατρέπεται σε μηχανική ισχύ και υπολογίζεται ως [3]:

$$P_e = -\frac{3}{2K^2} Re\{j\omega_r \psi_R i_R^*\} = \frac{3\omega_r}{2K^2} Im\{\psi_R^* i_s\}$$
(4.35)

Όσον αφορά την ηλεκτρομαγνητική ροπή, ισχύει:

$$\tau_e = \frac{P_e}{\omega_m} = \frac{n_p P_e}{\omega r} = \frac{3n_p}{2K^2} Im\{\psi_R^* i_s\} = \frac{3n_p}{2K^2} (\psi_d i_q - \psi_q i_d)$$
(4.36)

όπου $\omega_m = \frac{\omega_r}{n_n}$ η μηχανική ταχύτητα δρομέα και n_p το ζεύγος πόλων της μηχανής.

Στην περίπτωση τέλειου προσανατολισμού πεδίου, $\psi_q = 0$, η συνιστώσα ρεύματος i_q καθορίζει την παραγωγή ροπής, αφού η ηλεκτρομαγνητική ροπή γίνεται:

$$\tau_e = \frac{3n_p}{2K^2} \psi_d i_q \tag{4.37}$$

4.4.2 Μηχανικό Σύστημα

Η εξίσωση του δυναμικού μοντέλου του μηχανικού συστήματος και η υλοποίησή της στο αβ πλαίσιο στο περιβάλλον Plecs φαίνεται παρακάτω.

$$\frac{J}{np}\frac{d\omega_r}{dt} = \frac{3n_p}{2K^2}(\psi_R^{\alpha}i_s^{\beta} - \psi_R^{\beta}i_s^{\alpha}) - \tau_l \tag{4.38}$$

όπου $\tau_l = b_m \omega_m + \tau_L$ η ροπή φορτίου.



Σχήμα 4.8: Μηχανικό σύστημα μηχανής επαγωγής σε περιβάλλον Plecs.

4.5 Παράμετροι Μηχανής

Ένας κινητήρας χαμηλής ονομαστικής ισχύος τείνει να έχει μικρότερη μαγνητική επαγωγή ανά μονάδα και μεγαλύτερη αντίσταση στάτη ανά μονάδα από έναν κινητήρα υψηλότερης ισχύος. Ωστόσο, τα εύρη είναι αρκετά στενά, επομένως είναι αρκετά προφανές ότι παρόμοιοι ή ακόμη και πανομοιότυποι αλγόριθμοι ελέγχου μπορούν να εφαρμοστούν σε οποιονδήποτε επαγωγικό κινητήρα, ανεξαρτήτως βαθμολογίας. Επομένως, η θεωρία και οι μέθοδοι PWM, ο διανυσματικός έλεγχος και ο έλεγχος ρεύματος που αναλύονται είναι γενικά εφαρμόσιμες. Δεν είναι ασυνήθιστο ότι ένα σύστημα ελέγχου σχεδιασμένο για μονάδα 1 kW μπορεί να τροποποιηθεί για μονάδα 100 kW απλώς αλλάζοντας τις παραμέτρους του ελεγκτή και χρησιμοποιώντας έναν πιο ισχυρό μετατροπέα, συχνά με χαμηλότερη συχνότητα μεταγωγής.

Η μηχανή επαγωγής η οποία χρησιμοποιήθηκε για την διεξαγωγή των πειραμάτων είναι μικρής ισχύος, και σχεδιασμένη για σύνδεση στο δίκτυο. Οι παράμετροι της μηχανής συνολικά, παρουσιάζονται παρακάτω:

Παράμετρος	Σύμβολο	Τιμή
Ισχύς	Р	1.47 kW
Ρεύμα	I_N^{RMS}	3.6 A
Τάση	V_N^{RMS}	230 V
Συχνότητα	f	50 Hz
Αντίσταση Στάτη	R_s	$6.5746~\Omega$
Αντίσταση Δρομέα	R_R	$2.106 \ \Omega$
Αυτεπαγωγή Στάτη	L_{σ}	$0.0416 { m ~H}$
Αυτεπαγωγή Μαγνήτισης	L_M	$0.3354 { m ~H}$
Αδράνεια Δρομέα	J	$0.01 \ kg \cdot m^2$
Ζεύγη Πόλων	n_p	2
Ταχύτητα	n_N	$1410 \mathrm{rpm}$

Πίναχας 2: Παράμετροι μηχανής επαγωγής

Η ακριβής εκτίμηση των παραμέτρων της μηχανής για τον έλεγχο της λειτουργίας της είναι κρήσιμη. Επισημαίνεται ότι η θερμοκρασία, η συχνότητα και ο κορεσμός επηρεάζουν αυτές τις παραμέτρους. Η θερμοκρασία αυξάνει τις αντιστάσεις του δρομέα και του στάτη, ενώ η συχνότητα επηρεάζει τις αντιστάσεις λόγω του επιδερμικού φαινομένου, το οποίο διαχειρίζεται μέσω παράλληλων αγωγών στο τύλιγμα του στάτη.

Η τοπολογία του δρομέα, όπως ο διπλός κλωβός, επιτρέπει υψηλή αντίσταση εκκίνησης και χαμηλή αντίσταση στη μόνιμη κατάσταση. Κατά την εκκίνηση, το ρεύμα συγκεντρώνεται στην εξωτερική ράβδο λόγω του επιδερμικού φαινομένου, ενώ στη μόνιμη κατάσταση οι συχνότητες είναι χαμηλότερες.

Τέλος, ο κορεσμός επηρεάζει την αυτεπαγωγή μαγνήτισης, η οποία μειώνεται με την αύξηση της ροής. Οι αυτεπαγωγές σκέδασης παραμένουν σταθερές αλλά εξαρτώνται από τη σχεδίαση του δρομέα. Τυπικά, οι αυτεπαγωγές σκέδασης L_{sl} , L_{rl} είναι περίπου το 10% της αυτεπαγωγής μαγνήτισης, L_m . Η ροπή διακρίνεται σε τρεις περιπτώσεις, ανάλογα με την κατάσταση λειτουργίας της μηχανής. Η ροπή εκκίνησης όπου ανέρχεται στο 30% της μέγιστης ροπής και συνήθως είναι μικρότερη από την ονομαστική. Η μέγιστη ροπή, γνωστή και ως ροπή ανατροπής, είναι η τιμή πάνω από την οποία η μηχανή σταματά. Στην κατάσταση μόνιμης λειτουργίας και σε ονομαστικές συνθήκες, η μηχανή αποδίδει την ονομαστική ροπή. Η μέγιστη τιμή ολίσθησης κυμαίνεται συνήθως από 10% έως 20%, και αν $\frac{s}{s_p} = \frac{1}{5}$, η ονομαστική ροπή φτάνει το 40% της μέγιστης ροπής. Συνοπτικά:

$$\tau_e \approx \begin{cases} \tau_e^{max} = \frac{3n_p}{2K^2} \frac{|v_s^2|}{2\omega_1 X_\sigma} = 19.32 \ Nm, & \text{sthy metric therefore} \\ \frac{2s}{s_p} \tau_e^{max} = 10 \ Nm, & \text{sthy kanonical} \\ 2s_p \tau_e^{max} = 12.5 \ Nm, & \text{sthy excluded} \end{cases}$$
(4.39)

όπου $s_p=\frac{R_R}{X_\sigma}=16.11\%$ η μέγιστη τιμή ολίσθησης.

Στην περίπτωση δαχτυλιοφόρου δρομέα, μπορεί να αυξηθεί η αντίσταση κατά την εκκίνηση με εξωτερικές αντιστάσεις, οι οποίες αφαιρούνται αργότερα. Αυξάνοντας έτσι την ροπή εκκίνησης, η οποία είναι ανάλογη της αντίστασης δρομέα.

4.6 Συστήματα Ελέγχου

4.6.1 Ελεγκτής Ρεύματος

Για τον έλεγχο των ρευμάτων της μηχανής επαγωγής χρησιμοποιείται ο διανυσματικός έλεγχος, ο οποίος υλοποιείται στις σύγχρονες συντεταγμένες (πλαίσιο dq). Το πλαίσιο στρέφεται σύγχρονα με το διάνυσμα της ροής δρομέα, έτσι ώστε τα ρεύματα i_d και i_q να γίνουν σταθερές ποσότητες, με αποτέλεσμα ο έλεγχος να σχεδιάζεται παρόμοια με την μηχανή συνεχούς ρεύματος.

Η διαφορική εξίσωση του ρεύματος για την μηχανή επαγωγής, στο στρεφόμενο πλαίσιο (dq), αναλύεται σε πραγματικό και φανταστικό μέρος [3]:

$$L\frac{di_d}{dt} = v_d - Ri_d + \omega_1 Li_q - E_d \tag{4.40}$$

$$L\frac{di_q}{dt} = v_q - Ri_q - \omega_1 Li_d - E_q \tag{4.41}$$

όπου $R = R_s + R_R$, $L = L_\sigma$ και $E^s = \frac{d\psi_R^s}{dt}$.

Πρόχειται για δύο υποσυστήματα πρώτης τάξης διασταυρούμενης σύζευξης (cross-coupling). Η σύζευξη αυτή, ξεχινά από τους όρους $\omega_1 Li_d$ και $\omega_1 Li_q$, καθώς στην εξίσωση του i_d υπάρχει όρος με τη συνιστώσα ρεύματος i_q και αντίστροφα. Η συνάρτηση μεταφοράς του συστήματος που προχύπτει με τον μετασχηματισμό Laplace είναι:

$$G(s) = \frac{1}{(s+j\omega_1)L + R}$$
(4.42)

Το πρώτο βήμα στη σχεδίαση του ελεγκτή είναι η ακύρωση αυτής της διασταυρούμενης σύζευξης. Αυτό γίνεται εύκολα, υπό την προϋπόθεση ότι η αυτεπαγωγή είναι γνωστή με αρκετά καλή ακρίβεια, προσθέτοντας έναν αποζεύκτη $j\omega_1 \hat{L}i$ στον εσωτερικό βρόχο ανάδρασης της ενεργούς αντίστασης R_a . Ακόμα, προστίθεται ο φεεδ-φορωαρδ όρος $\hat{E} = j\omega_1\hat{\psi}R$ ως η εκτίμηση της αντι-HEΔ μέσω της εκτίμησης της ροής του δρομέα.

Η δυναμική απόκριση έχει επιταχυνθεί από $\frac{R}{L}$ σε $\frac{R+R_a}{L}$. Η νέα συνάρτηση μεταφοράς του συστήματος με την αφαίρεση της διασταυρούμενης σύζευξης προκύπτει:

$$G'(s) = \frac{1}{sL + R + R_a}$$
(4.43)

Καθώς πρόχειται για ένα σύνθετο σύστημα πρώτης τάξης, ο έλεγχος ΡΙ είναι κατάλληλος:

$$F(s) = k_p + \frac{k_i}{s} \tag{4.44}$$

όπου τα κέρδη k_p, k_i υπολογίζονται με παρόμοιο τρόπο όπως και στη μηχανή συνεχούς ρεύματος ως εξής:

$$\begin{cases} k_p = a_c \hat{L} = a_c \hat{L}_{\sigma} \\ k_i = a_c (\hat{R} + R_a) = a_c^2 \hat{L}_{\sigma} \end{cases}$$

$$(4.45)$$

όπου α_c είναι το εύρος ζώνης του συστήματος κλειστού βρόχου. Εάν ο εσωτερικός βρόχος ανάδρασης έχει τον ίδιο χρόνο απόκρισης με το σύστημα κλειστού βρόχου η ενεργός αντίσταση προκύπτει:

$$R_a = a_c \hat{L} - \hat{R} \tag{4.46}$$



Σχήμα 4.9: Μπλοκ διάγραμμα ελέγχου ρεύματος με εσωτερική απόζευξη και βρόχο ενεργούς αντίστασης μηχανής επαγωγής.

Όπως και στην ελεγκτή ρεύματος της μηχανής συνεχούς ρεύματος, ο ολοκληρωτικός όρος του ελεγκτή συσσωρεύει σφάλμα. Το σφάλμα που εισάγεται στον ολοκληρωτικό όρο του ελεγκτή τροποποιείται, ώστε να ισορροπεί στα όρια του κορεσμού. Οι συνιστώσες της τάσης αναφοράς v_d^{ref} και v_a^{ref} που παράγονται πρίν τον κορεσμό είναι οι εξής:

$$\begin{cases} v_d^{ref} = k_p e_d + k_i I_d - R_a i_d - \omega_1 \hat{L} i_q \\ v_q^{ref} = k_p e_q + k_i I_q - R_a i_q + \omega_1 \hat{L} i_d + \omega_1 \hat{\psi}_R \end{cases}$$
(4.47)

όπου I_d, I_q το ολοκλήρωματα του σφαλμάτων e_d και e_q , αντίστοιχα.

$$\begin{cases} I_d = \int (e_d + \frac{1}{k_p} (\bar{v}_d^{ref} - v_d^{ref}) \\ I_q = \int (e_q + \frac{1}{k_p} (\bar{v}_q^{ref} - v_q^{ref}) \end{cases} \begin{cases} e_d = i_d^{ref} - i_d \\ e_q = i_q^{ref} - i_q \end{cases}$$
(4.48)

όπου v_{dq}^{ref} η τάση αναφοράς στην έξοδο του ελεγκτή, πριν τον κορεσμό, και \bar{v}_{dq}^{ref} η τάση αναφοράς στην έξοδο του ελεγκτή, μετά τον κορεσμό.

Τέλος, οι συνιστώσες της τάσης αναφοράς στην έξοδο του ελεγχτή ορίζονται ως εξής:

$$\begin{cases} \bar{v}_{d}^{ref} = \frac{v_{d}^{ref}}{\max(\sqrt{(v_{d}^{ref})^{2} + (v_{q}^{ref})^{2}}, V_{max})} V_{max} \\ \bar{v}_{q}^{ref} = \frac{v_{q}^{ref}}{\max(\sqrt{(v_{d}^{ref})^{2} + (v_{q}^{ref})^{2}}, V_{max})} V_{max} \end{cases}$$
(4.49)

όπου $V_{max} = \frac{V_{DC}}{2}$, το μέγιστο πλάτος της θεμελιώδους συνιστώσας τάσης εξόδου του αντιστροφέα, με δεδομένη DC τάση εισόδου στον μετατροπέα V_{DC} .



Σχήμα 4.10: Μπλοκ διάγραμμα ελεγκτή ρεύματος μηχανής επαγωγής.

Η υλοποίηση του διανυσματικού ελέγχου ρεύματος με τους κορεσμούς τάσεις για κάθε συνιστώσα ρεύματος της μηχανής επαγωγής σε περιβάλλον Plecs φαίνεται παρακάτω.



Σχήμα 4.11: Ελεγκτής ρεύματος d συνιστώσας μηχανής επαγωγής σε περιβάλλον Plecs.



Σχήμα 4.12: Ελεγκτής ρεύματος q συνιστώσας μηχανής επαγωγής σε περιβάλλον Plecs.



Σχήμα 4.13: Κορεσμός τάσης V_d μηχανής επαγωγής σε περιβάλλον Plecs.



Σχήμα 4.14: Κορεσμός τάση
ς V_q μηχανής επαγωγής σε περιβάλλον Plecs.

4.6.2 Ελεγκτής Ταχύτητας

Το δυναμικό μηχανικό μοντέλο της μηχανής συνεχούς ρεύματος ισχύει επίσης για την μηχανή επαγωγής, υποθέτοντας τέλειο προσανατολισμό πεδίου [3]:

$$\frac{J}{np}\frac{d\omega_r}{dt} = \frac{3n_p}{2K^2}\psi_R i_q - \tau_l \tag{4.50}$$

όπου $\tau_l = b_m \omega_m + \tau_L$ η ροπή φορτίου και $\psi_R = \psi_d$.

Συνεπώς, ο ελεγκτής ταχύτητας σχεδιάζεται με τον ίδιο τρόπο που κατασκευάστηκε ο ελεγκτής ταχύτητας στη μηχανή ΣΡ, τροποποιώντας όμως τα κέρδη του ελεγκτή ως εξής [3]:

$$b_a = \frac{2K^2(a_s\hat{J} - \hat{b})}{3n_p^2\hat{\psi}_R} \qquad k_{ps} = \frac{2K^2a_s\hat{J}}{3n_p^2\hat{\psi}_R} \qquad k_{is} = \frac{2K^2a_s^2\hat{J}}{3n_p^2\hat{\psi}_R}$$
(4.51)

όπου $\hat{\psi_R}$ η εκτίμηση της ροής του δρομέα.

Επιπλέον, είναι απαραίτητο να εισαχθεί κορεσμός του ρεύματος, έτσι ώστε να πληρείται η σχέση $i_d^2 + i_q^2 \leq I_{max}^2$, όπου I_{max} το μέγιστο επιτρεπτό ρεύμα στάτη για μικρό χρονικό διάστημα, το οποίο θα πρέπει να μειωθεί σε I_{base} μετά τον μέγιστο χρόνο που επιτρέπεται η υπερένταση.



Σχήμα 4.15: Μπλοκ διάγραμμα ελεγκτή ταχύτητας μηχανής επαγωγής.

Η υλοποίηση ελεγκτή ταχύτητας με τον κορεσμό του ρεύματος της μηχανής επαγωγής σε περιβάλλον Plecs φαίνεται παρακάτω.



Σχήμα 4.16: Ελεγκτής ταχύτητας μηχανής επαγωγής σε περιβάλλον Plecs.



Σχήμα 4.17: Κορεσμός ρεύματος i_q μηχανής επαγωγής σε περιβάλλον Plecs.

4.6.3 Εκτίμητης Ροής

Στην μηχανή επαγωγής, λόγω ολίσθησης, η θέση του δρομέα δεν ταυτίζεται με τον προσανατολισμό του πεδίου. Ωστόσο, για την ορθή λειτουργία του διανυσματικού ελέγχου που

σχεδιάστηκε, είναι απαραίτητη η ευθυγράμμιση της γωνίας ροής του δρομέα με τον άξονα d σε σύγχρονες συντεταγμένες. Αυτό επιτυγχάνεται με τον σχεδιασμό ενός εκτιμητή ροής δρομέα [3].

Όπως αναφέρθηκε και δυναμικό μοντέλο της μηχανής επαγωγής, η εξίσωση του κυκλώματος δρομέα με εκτίμηση της ροής σε σύγχρονες συντεταγμένες, αναγράφεται:

$$\frac{d\hat{\psi}_R}{dt} = \hat{R}_R(i_d + ji_q) - (\frac{\hat{R}_R}{\hat{L}_M} + j\omega_2)\hat{\psi}_R \tag{4.52}$$

Αναλύοντας την εξίσωση σε πραγματικό και φανταστικό μέρος, προκύπτει:

$$Re: \frac{d\hat{\psi}_R}{dt} = \hat{R}_R i_d - \frac{\hat{R}_R}{\hat{L}_M} \hat{\psi}_R \tag{4.53}$$

$$Im: \omega_2 = \frac{R_R i_q}{\hat{\psi}_R} \tag{4.54}$$

Η γωνιακή συχνότητα στάτη υπολογίζεται χρησιμοποιώντας την παραπάνω σχέση ολίσθησης και στη συνέχεια ολοκληρώντοντας, προκύπτει η γωνία μετασχηματισμού θ_1 του πλαισίου dq.

$$\omega_1 = \omega_r + \frac{\hat{R}_R i_q^{ref}}{\hat{\psi}_R} \qquad \dot{\theta}_1 = \omega_1 \tag{4.55}$$

όπου στα ρεύματα χρησιμοποιείται η τιμές αναφοράς i_d^{ref} , i_q^{ref} αντί των μετρούμενων στοιχείων i_d , i_q για τη μείωση θορύβων Η αντικατάσταση αυτή δεν προκαλεί πρόβλημα, καθώς η απόκριση του ρεύματος είναι πολύ πιο γρήγορη από την απόκριση της ροής. Συνεπώς, η εξίσωση ροής τροποποιείται:

$$\frac{d\hat{\psi}_R}{dt} = \hat{R}_R i_d^{ref} - \frac{\hat{R}_R}{\hat{L}_M} \hat{\psi}_R \tag{4.56}$$

Η υλοποίησή του εκτιμητή ροής δρομέα της μηχανής επαγωγής στο περιβάλλον Plecs φαίνεται παρακάτω.



Σχήμα 4.18: Εκτιμητής ροής δρομέα μηχανής επαγωγής σε περιβάλλον Plecs.

5 Σύστημα Δυναμομέτρου

5.1 Αρχή Λειτουργίας

Η βασική λειτουργία ενός ηλεκτρικού δυναμόμετρου βασίζεται στη μέτρηση της ροπής και της ταχύτητας περιστροφής ενός άξονα, προκειμένου να υπολογιστεί η ισχύς που παράγεται ή απορροφάται από ένα μηχανικό σύστημα. Χρησιμοποιείται συνήθως στην αυτοκινητοβιομηχανία, καθώς και σε εργαστήρια έρευνας και δοκιμών για τον υπολογισμό απόδοσης, αλλά και για την χαρτογράφιση της περιοχής λειτουργίας μηχανών.

Το υλοποιημένο σύστημα αποτελείται από με μια μηχανή συνεχούς ρεύματος και μια μηχανή επαγωγής συνδεδεμένες σε κοινό άξονα. Η μηχανή συνεχούς ρεύματος ρυθμίζει και διατηρεί την ταχύτητα περιστροφής στον άξονα μέσω την μεταβολή της τάσης και του ρεύματος που παρέχει ο DC-DC μετατροπέας, ενώ η μηχανή επαγωγής ελέγχει την ροπή στον άξονα μέσω της μεταβολής της συχνότητας και της τάσης εναλλασσομένου ρεύματος που την τροφοδοτεί ο αντιστροφέας.

5.2 Σχεδιασμός Δυναμομέτρου

Αρχικά, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, το φυσικό σύστημα του ηλεκτρικού δυναμομέτρου αποτελείται από το ζεύγος μηχανών συνδεδεμένες σε κοινό άξονα και τα ηλεκτρονικά ισχύος που τροφοδοτούν τις μηχανές με τους κατάλληλη τάση και ρεύμα, ώστε να επιτυγχάνεται ο έλεγχος ταχύτητας και ροπής (Σχήμα 5.1).



Σχήμα 5.1: Διάταξη συστήματος δυναμομέτρου σε περιβάλλον Plecs.

Οι ελεγχόμενοι μετατροπείς του συστήματος είναι συνδεδεμένοι παράλληλα στις εισόδους τους (DC Link) και τροφοδοτούνται από το δίκτυο μέσω ενός μονοφασικού ανορθωτή ρυθμιζόμενης τάσης. Επιπλέον, στην έξοδο του ανορθωτή έχει τοποθετηθεί παράλληλα πυκνωτής για την εξομάλυνση της τάσης (Σχήμα 5.2).

Η μοντελοποίηση των μηχανών στην έξοδο του DC-DC μετατροπέα και του τριφασικού αντιστροφέα γίνεται με τη χρήση ενός μοντέλου σήματος, όπου η ηλεκτρική συμπεριφορά τους προσομοιώνεται μέσω ελεγχόμενων πηγών τάσης. Συγκεκριμένα, μέσω της ροής κάθε μηχανής υπολογίζεται η αντίστοιχη αντι-HEΔ (back-EMF), όπου λαμβάνεται ως είσοδος και μετατρέπεται σε αντίστοιχο ηλεκτρικό σήμα, το οποίο στη συνέχεια χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της τάσης στην έξοδο των μετατροπέων. Αυτή η προσέγγιση επιτρέπει την προσομοίωση να λειτουργεί με ένα δυναμικό μοντέλο μετατροπέα, αντί για απλή επιβολή μιας σταθερής τάσης αναφοράς, διασφαλίζοντας έτσι πιο ρεαλιστική αναπαράσταση της αλληλεπίδρασης μεταξύ του μετατροπέα και του ηλεκτρικού φορτίου (μηχανών) (Σχήμα 5.2).



Σχήμα 5.2: Ηλεκτρονικά ισχύος συστήματος δυναμομέτρου σε περιβάλλον Plecs.

Οι παλμοί ελέγχου των διαχοπτικών στοιχείων του DC-DC μετατροπέα, που οδηγούν την μηχανή συνεχούς ρεύματος, προκύπτουν ανάλογα την τιμή αναφοράς της ταχύτητας περιστροφής μέσω των μοντέλων ελέγχου ταχύτητας, ρεύματος και της διαμόρφωσης PWM μονοπολικής τάσης εξόδου. Η αρχιτεκτονική των συστημάτων ελέγχου της μηχανής συνεχούς ρεύματος φαίνεται παρακάτω (Σχήμα 5.3).



Σχήμα 5.3: Ελεγκτές μηχανής συνεχούς ρεύματος σε περιβάλλον Plecs.

Αντίστοιχα, οι παλμοί ελέγχου των διαχοπτικών στοιχείων του DC-AC αντιστροφέα, που οδηγούν την μηχανή επαγωγής, προχύπτουν ανάλογα με την τιμή αναφοράς της ροπής στον άξονα μέσω των μοντέλων ελέγχου ροπής, ρεύματων i_d και i_q και της διαμόρφωσης SPWM. Αχόμα, χρείαζεται και το μοντέλο εχτίμησης ροής για τον τέλειο προσανατολησμό πεδίου, ώστε ο έλεγχος να λειτουργεί στο dq πλαίσιο. Ο εχτιμητής ροής έχει υλοποιηθεί με βάση την στρατηγική διανυσματικού ελέγχου Vector Control σύμφωνα με το μοντέλο ρεύματος. Η αρχιτεχτονική των συστημάτων ελέγχου της μηχανής επαγωγής φαίνεται παραχάτω (Σχήμα 5.4).



Σχήμα 5.4: Ελεγκτές μηχανής επαγωγής σε περιβάλλον Plecs.

5.2.1 Ελεγκτής Ροπής

Ο ελεγκτής ροπής που εφαρμόζεται από την πλευρά της μηχανής επαγωγής υλοποιείται ως ανοιχτός βρόχος λόγω έλλειψης ροπόμετρου για ανατροφοδότηση στον ελεγκτή. Θεωρώντας τέλειο προσανατολισμό πεδίου $\psi_q = 0$, η ηλεκτρομαγνητική ροπή της μηχανής είναι ανάλογη μόνο του ρεύματος i_q και της μαγνητικής ροής ψ_d , η οποία διατηρείται σταθερή στην ονομαστική της τιμή $\psi_{ref} = 0.9072 \ Vs$. Η εξίσωση του ελεγκτή ροπής περιγράφεται ως εξής:

$$\tau_e^{ref} = \frac{3n_p}{2K^2} \psi_{ref} \cdot i_q^{ref} \tag{5.1}$$

Εφαρμόζεται, επίσης, κορεσμός του ρεύματος στην έξοδο του ελεγκτή με βάση το μέγιστο επιτρεπτό ρεύμα λειτουργίας της μηχανής.

$$i_q^{sat} = \sqrt{I_{max}^2 - i_d^2} = 4.31A \tag{5.2}$$

Η υλοποίησή του ελεγκτή ροπής της μηχανής επαγωγής στο περιβάλλον Plecs φαίνεται παρακάτω (Σχήμα 5.5).



Σχήμα 5.5: Ελεγκτής ροπής μηχανής επαγωγής σε περιβάλλον Plecs.

5.3 Χάρτες Λειτούργιας

Ένας σημαντικό μέρος σχεδιασμού ενός συστήματος δυναμομέτρου είναι η καταγραφή του χάρτη λειτουργίας. Η διαδικασία αυτή εξασφαλίζει την ορθή αναγνώριση των σημείων ευστάθειας και αστάθειας των μηχανών αλλά και του συνολικού συστήματος. Ο χάρτης λειτουγίας μιας μηχανής απεικονίζει όλες τις πιθανές καταστάσεις συνδυασμού ροπής και ταχύτητας περιστροφής άξονα μέσω μιας καμπύλης για κάθε τιμή τάσης τροφοδοσίας. Κάθε καμπύλη υπολογίζεται λαμβάνοντας υπόψη την μέγιστη ροπή ανάλογα την τάση τροφοδοσίας, ορίζοντας

έτσι το όριο μεταξύ εστάθειας και αστάθειας της μηχανής. Αυτή η μέθοδος ονομάζεται και MTPV, (Maximum Torque Per Voltage).

5.3.1 Χάρτης Λειτουργίας Μηχανής Συνεχούς Ρεύματος

Η μηχανή συνεχούς ρεύματος DC τροφοδοτείται μέσω του μετατροπέα πλήρους γέφυρας DC-DC, ο οποίος λαμβάνει σταθερή και συνεχή τάση $V_{DC} = 100V$ μέσω του DC Link στην είδοσο του. Συνεπώς, η μέγιστη τάση τυμπάνου της μηχανής συνεχούς ρεύματος είναι $u_a = 100V$ με duty cycle ημιαγωγών μετατροπέα ίσο με 1 (διαχόπτες S_1, S_4 μόνιμα κλεστοί).

Η διέγερση της μηχανής συνεχούς ρεύματος επιτυγχάνεται μέσω εξωτερικής ανεξάρτητης τροφοδοσίας παρέχοντας πεδίο σταθερής μανγητικής ροής $\psi = 0.53 Vs$. Παράλληλα, το ρέυμα τυμπάνου περιορίζεται από τον κορεσμό εξόδου του ελεγκτή ταχύτητας με μέγιστη τιμή $i_{max} = 10A$. Συνεπώς, η μέγιστη ροπή άξονα της μηχανής συνεχούς ρεύματος προκύπτει από την σχέση:

$$\tau_{max} = \psi \cdot i_{max} = 5.3 \ Nm \tag{5.3}$$

Ο αλγόριθμος υπολογισμού του χάρτη λειτουργίας περιγράφεται ως εξής: Για κάθε τάση τυμπάνου υπολογίζετεται η ισχύς της μηχανής λαμβάνοντας υπόψη μέγιστο ρεύμα.

$$P_j = v_j \cdot i_{max} \tag{5.4}$$

Στην συνέχεια, από την ισχύ υπολογίζεται η ροπή της μηχανής για κάθε ταχύτητα περιστροφής.

$$\tau_{j,k} = \frac{P_j}{\omega_k} \tag{5.5}$$

Για τις διάφορες τιμές τάσης τυμπάνου, το διάγραμμα ροπής - ταχύτητας φαίνεται παραχάτω (Σχήμα 5.6):



 $\Sigma \chi$ ήμα 5.6: Χάρτης λειτουργίας μηχανής συνεχούς ρεύματος.

5.3.2 Χάρτης Λειτουργίας Μηχανής Επαγωγής

Η μηχανή επαγωγής AC τροφοδοτείται μέσω του τριφασικού αντιστροφέα DC-AC, ο οποίος λαμβάνει σταθερή και συνεχή τάση $V_{DC} = 100V$ μέσω του DC Link στην είδοσο του. Συνεπώς, η μέγιστη φασική στιγμιαία τιμή τάσης στάτη της μηχανής επαγωγής είναι $\tilde{u}_a = 50V$.

Η διέγερση μιας μηχανής επαγωγής επιτυγχάνεται μέσω του μαγνητικού πεδίου που δημιουργείται από το ρεύμα στο δρομέα και τον στάτη. Στο πλαίσιο dq το ρεύμα i_d προκαλεί την διέγερση του περιστρεφόμενου μαγνητικού πεδίου και το ρεύμα i_q είναι υπέυθυνο για την παραγωγή ροπής στον άξονα. Το ρεύμα i_d διατηρείται σταθερό στην ονομαστική τιμή πλάτους του 2.71A ($\frac{\psi_N}{L_M}$), ενώ το ρεύμα i_q περιορίζεται μέσω του κορεσμού του ελεγκτή ροπής.

$$i_q^{max} = \sqrt{I_{max}^2 - i_d^2} = 4.31A \tag{5.6}$$

όπου $I_{max} = 3.6 \cdot \sqrt{2} = 5.09 A$ η μέγιστη στιγμιαία τιμή του ονομαστιχού ρεύματος.

Συνεπώς, για τέλειο προσανατολισμό πεδίου με ονομαστική τιμή $\psi_d = 0.9072 Vs$, η μέγιστη ροπή άξονα της μηχανής επαγωγής προκύπτει από την σχέση:

$$\tau_e^{max} = \frac{3n_p}{2K^2} \psi_d \cdot i_q^{max} = 11.73 \ Nm \tag{5.7}$$

Ο αλγόριθμος υπολογισμού του χάρτη λειτουργίας περιγράφεται ως εξής: Για όλες τις τιμές ολίσθησης, υπολογίζεται η ηλεκτρομαγνητική ροπή μέσω της σύγχρονης ταχύτητας περιστροφής (Σχήμα 5.7).

$$\omega_{1(i,k)} = \frac{\omega_k}{1 - s_i} \tag{5.8}$$

 Δ ιατηρείται η μέγιστη τιμή ροπής για χάθε τάση τροφοδοσίας στάτη $v_{s(j)}$.



Σχήμα 5.7: Διάγραμμα ροπής-ολίσθηση για διάφορες τιμές τάσης.

Στην συνέχεια, για κάθε ταχύτητα περιστροφής απεικονίζεται ο χάρτης λειτουργίας με τις

μέγιστες τιμές ροπής από τις χαμπύλες ροπής - ολίσθησης για τις διάφορες τιμές τάσης.

$$\tau_{e(j,k)} = \frac{3n_p}{2K^2} \frac{s_i}{\omega_{1(i,k)}R_R} \frac{|v_{s(j)}|^2}{(s_i X_\sigma R_R)^2 + 1}$$
(5.9)

Για τις διάφορες τιμές τάσης τροφοδοσίας στάτη, το διάγραμμα ροπής - ταχύτητας φαίνεται παρακάτω (Σχήμα 5.8):



Σχήμα 5.8: Χάρτης λειτουργίας μηχανής επαγωγής.

5.3.3 Χάρτης Λειτουργίας Συστήματος Δυναμομέτρου

Ο χάρτης λειτουργίας του συστήματος δυναμομέτρου απειχονίζεται από τα χοινά σημεία λειτουργίας των δυο επιμέρους μηχανών χαι περιορίζεται από την τάση τροφοδοσίας του συστήματος στο DC Link.

Παρακάτω φαίνονται μερικοί χάρτες λειτουργίας με όλα τα πιθανά σημεία ροπής και ταχύτητας περιστροφής του κοινού άξονα του συστήματος για διάφορες τιμές συνεχούς τάσης στο DC Link.



Σχήμα 5.9: Χάρτης λειτουργίας δυναμομέτρου για τάση DC Link $V_{DC}=100V.$



Σχήμα 5.10: Χάρτης λειτουργίας δυναμομέτρου για τάση DC Link $V_{DC}=70V.$



Σχήμα 5.11: Χάρτης λειτουργίας δυναμομέτρου για τάση DC Link $V_{DC} = 50V$.

Ο χάρτης λειτουργίας του συστήματος δυναμομέτρου επηρεάζεται άμεσα από την τάση Vdc του DC Link, η οποία καθορίζει το όριο λειτουργίας των μηχανών. Συγκεκριμένα, η τάση Vdc καθορίζει το "γόνατο' των χαρακτηριστικών καμπυλών ροπής-ταχύτητας, δηλαδή το σημείο όπου η μηχανή μεταβαίνει από τη λειτουργία σταθερής ροπής στη λειτουργία σταθερής ισχύος. Όταν η τάση τροφοδοσίας μειώνεται, η μέγιστη δυνατή ονομαστική ταχύτητα της μηχανής μειώνεται αντίστοιχα, περιορίζοντας το εύρος λειτουργίας της. Επιπλέον, για χαμηλότερες τιμές Vdc, η μετάβαση σε λειτουργία εξασθένησης πεδίου (field weakening) εμφανίζεται σε χαμηλότερες στροφές, καθώς η μηχανή δεν μπορεί να διατηρήσει το ονομαστικό της πεδίο διέγερσης. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της διαθέσιμης ροπής στις υψηλές ταχύτητες, γεγονός που πρέπει να λαμβάνεται υπόψη στον σχεδιασμό και στη λειτουργία του συστήματος δυναμομέτρου.

5.4 Διαδικασία Εκκίνησης Συστήματος

Σε αυτό το στάδιο περιγράφεται η διαδικασία εκκίνησης του ηλεκτρικού δυναμόμετρου με σκοπό την ομαλή λειτουργία του συστήματος και την αποφυγή καταστάσεων αστάθειας:

- Φόρτιση του DC Link: Η διαδικασία ξεκινά με τη φόρτιση της εξόδου του ανορθωτή (DC Link) στα 100 V. Αυτό γίνεται για να εξασφαλιστεί ότι υπάρχει επαρκής τάση στο σύστημα, ώστε να μπορέσουν να λειτουργήσουν σωστά οι μετατροπεις που οδηγούν τις μηχανές.
- Εκκίνηση της DC μηχανής ως κινητήρας: Αφού έχει φορτιστεί το DC Link, ενεργοποιούνται οι διακόπτες του DC-DC μετατροπέα, επιτρέποντας την παροχή τάσης στη DC μηχανή, η οποία τίθεται σε λειτουργία ως κινητήρας με έλεγχο ταχύτητας.
- 3. Λειτουργία της επαγωγικής μηχανής: Αφού σταθεροποιηθεί η ταχύτητα στον άξονα, ενεργοποιούνται οι διακόπτες του τριφασικού αντιστροφέα, ώστε να τεθεί σε λειτουργία η επαγωγική μηχανή. Η επαγωγική μηχανή λειτουργεί ως κινητήρας και ρυθμίζει την ροπή στον άξονα με έλεγχο ανοικτού βρόχου λόγω της έλλειψης αισθητήρα ροπής. Ταυτόχρονα, η DC μηχανή διατηρεί τον έλεγχο ταχύτητας του μηχανικού άξονα και αλλάζει λειτουργία

από κινητήρα σε γεννήτρια, επιστρέφοντας ηλεκτρική ενέργεια στο DC Link μέσω του DC-DC μετατροπέα.

Σε αυτό το σημείο είναι δυνατή η ρύθμιση της ροπής και της ταχύτητας περιστροφής στον άξονα για κάθε κατάσταση λειτουργίας που ορίζεται από τους χάρτες λειτουργίας των μηχανών, ώστε να παραμείνει το σύστημα σε ευστάθεια.

Είναι σημαντικό να αναφερθεί πως η εισαγωγή της μηχανής επαγωγής ως κινητήρα μπορεί να επιτευχθεί ενώ ο δρομέας διατηρείται ακινητοποιημένος με έλεγχο ταχύτητας σε μηδενικές στροφές (χωρίς αυτό να είναι απαραίτητο). Η συγκεκριμένη διαδικασία εμφανίζει ομαλότερο μεταβατικό και διαθέτει αρκέτο χρόνο για τον συγχρονισμό του συστήματος χωρίς κραδασμούς στον άξονα.

Αυτή η ακολουθία εξασφαλίζει την ασφαλή και σταθερή εκκίνηση του δυναμόμετρου, επιτρέποντας τον έλεγχο τόσο της ταχύτητας όσο και της ροπής, ενώ διατηρείται η ομαλή λειτουργία του συστήματος με τη συνδυασμένη δράση των δύο μηχανών.

5.5 Αποτελέσματα Προσομοίωσης

Οι καταστάσεις λειτουργίας για την προσομοίωση του ηλεκτρικού δυναμομέτρου φαίνονται στον παρακάτω χάρτη λειτουργίας. Στα σημεία αυτά, έγινε και καταγραφή των μεγεθών στο φυσικό σύστημα, ώστε να υπάρχει αντιστοίχιση της δυναμικής τους συμπεριφορά σε βηματικές μεταβολές των ελεγκτών ταχύτητας και ροπής.



Σχήμα 5.12: Σημεία πειραμάτων και μετρήσεων στον χάρτη λειτουργίας δυναμομέτρου.

5.5.1 Δυναμική Συμπεριφορά Εισαγωγής Μηχανής Επαγωγής

Αφού λειτουργεί η μηχανή συνεχούς ρεύματος με έλεγχο ταχυτήτας σε μηδενικές στροφές, εισάγεται η μηχανή επαγωγής με ροπή αναφοράς 1 Nm με θετική φορά σύμφωνα με την ορισμένη

κατεύθυνση περιστροφής της ταχύτητας.



Σχήμα 5.13: Δυναμική συμπεριφορά ταχύτητας, ροπής και ρευμάτων μηχανών σε εισαγωγή μηχανής επαγωγής σε περιβάλλον Plecs.

Όπως φαίνεται και παραπάνω η θετική ροπή δημιουργεί ένα μεταβατικό στην ταχύτητα, ενώ παράλληλα η μηχανή συνεχούς ρεύματος προσπαθεί να διατηρήσει τον άξονα ακινητοποιημένο μέσω του ελεγκτή της. Η μηχανική ενέργεια που προσφέρει η μηχανή επαγωγής στον άξονα μετατρέπεται σε ηλεκτρική μέσω την μηχανής συνεχούς ρεύματος, αλλάζοντας την λειτουργία της σε γεννήτρια. Αυτό επιβεβαιώνεται από το αρνητικό ρεύμα της DC μηχανής.

Ταυτόχρονα, εμφανίζεται εναλλασσόμενο ρεύμα χαμηλής συχνότητας (<1 Hz) στον στάτη της μηχανής επαγωγής, το οποίο οφείλεται στη δημιουργία της κατάλληλης ολίσθησης για την επίτευξη της ζητούμενης ροπής.



Σχήμα 5.14: Δυναμική συμπεριφορά τάσης DC link, ρευμάτων τροφοδοσίας μετατροπέων, γωνίας μετασχηματισμού και ροών μηχανής επαγωγής σε εισαγωγή μηχανής επαγωγής σε περιβάλλον Plecs.

Όταν εφαρμόζεται αναφορά ροπής (1 Nm), ο αντιστροφέας αυξάνει το ρεύμα του στάτη ώστε να δημιουργήσει την απαιτούμενη μαγνητική ροή και ροπή. Η απαίτηση για ροή (magnetizing current) και η απόκριση του ελεγκτή ροπής οδηγεί σε απότομη αύξηση του ρεύματος από το DC Link. Η παρουσία ρεύματος καταναλώνει ενέργεια, προκαλώντας κυμάτωση της τάσης.

Η ηλεκτρομαγνητική ροπή εμφανίζει αργό μεταβατικό στην εκκίνηση της μηχανής επαγωγής μέχρι να δημιουργηθεί το κατάλληλο μαγνητικό πεδίο και να συγχρονιστεί ο έλεγχος σε τέλειο προσανατολισμό πεδίου $\psi_q = 0$.

5.5.2 Δυναμική Συμπεριφορά Ελεγκτή Ταχύτητας

Όταν το σύστημα δυναμομέτρου έχει συγχρονιστεί με έλεγχο ταχυτήτας σε μηδενικές στροφές και ροπή αναφοράς 1 Nm, εφαρμόζεται έλεγχος ταχύτητας στα 200rpm διατηρώντας την ροπή αναφοράς στο 1 Nm.



Σχήμα 5.15: Δυναμική συμπεριφορά ταχύτητας, ροπής και ρευμάτων μηχανών σε βηματική μεταβολή ταχύτητας σε περιβάλλον Plecs.

Στην αρχική κατάσταση, η DC μηχανή, η οποία λειτουργεί ως γεννήτρια παρέχει αντίθετη ροπή για να διατηρεί το σύστημα σε μηδενική ταχύτητα. Αυτό σημαίνει ότι η DC μηχανή απαιτεί λιγότερο ρεύμα για να παράγει τη ροπή πέδησης, κάτι που οφείλεται στις αυξημένες τριβές λόγω της περιστροφής.

Ταυτόχρονα, αυξάνεται η συχνότητα στο εναλλασσόμενο ρεύμα του στάτη της μηχανής επαγωγής, ανάλογα με την ταχύτητα περιστροφής. Αυτό επιβεβαιώνεται μέσω της περιόδου του ρεύματος, η οποία μετριέται στα $\frac{10}{3}$ sec και αντιστοιχεί σε ταχύτητα $\omega = 2\pi f \frac{60}{2\pi} = 200$ rpm.



Σχήμα 5.16: Δυναμική συμπεριφορά τάσης DC link, ρευμάτων τροφοδοσίας μετατροπέων, γωνίας μετασχηματισμού και ροών μηχανής επαγωγής σε βηματική μεταβολή ταχύτητας σε περιβάλλον Plecs.

Όταν ξεκινά η περιστροφή, η γεννήτρια αρχίζει να παράγει περισσότερη ηλεκτρική ενέργεια λόγω της αύξησης της ταχύτητας, το οποίο οδηγεί σε αντίστροφη ροή ρεύματος μέσω του DC-DC μετατροπέα.

Η μηχανή επαγωγής λειτουργεί με ονομαστική μαγνητική ροή ψ_d , η οποία φαίνεται να παραμένει σταθερή στην ονομαστική της τιμή. Παράλληλα, ο εκτιμητής ροής διατηρεί τέλειο προσανατολισμό πεδίου με $\psi_q = 0$.

5.5.3 Δυναμική Συμπεριφορά Ελεγκτή Ροπής Σε Ακινητοποιημένο Δρομέα

Όταν το σύστημα δυναμομέτρου έχει συγχρονιστεί με έλεγχο ταχυτήτας σε μηδενικές στροφές και ροπή αναφοράς 1 Nm, εφαρμόζεται έλεγχος ροπής στα 3Nm διατηρώντας τον άξονα ακινητοποιημένο (0 rpm).



Σχήμα 5.17: Δυναμική συμπεριφορά ταχύτητας, ροπής και ρευμάτων μηχανών σε βηματική μεταβολή ροπής με ακινητοποιημένο δρομέα σε περιβάλλον Plecs.

Εφόσον η DC μηχανή είναι γεννήτρια και η AC μηχανή παράγει ροπή στον άξονα, η DC μηχανή πρέπει να παράγει περισσότερη ηλεκτρική ισχύ για να ισορροπήσει το σύστημα. Η αύξηση της παραγόμενης ισχύος σημαίνει ότι το ρεύμα της DC μηχανής (ως γεννήτρια) αυξάνεται κατα απόλυτη τιμή.

Παρατηρείται πως ο χρόνος απόκρισης του ρεύματος της DC μηχανής είναι σημαντικά μεγαλύτερος από τον ορισμένο (5 ms). Στην περίπτωση του απλού ελέγχου της DC μηχανής, η ροπή που χρειάζεται για την επιτάχυνση ρυθμίζεται αποκλειστικά από τον DC–DC μετατροπέα. Όταν όμως η AC μηχανή επιβάλλει ροπή, η DC μηχανή δεν είναι πλέον ελεύθερη να ακολουθήσει τη φυσική της δυναμική. Αν η AC μηχανή επιβάλλει έλεγχο ροπής, τότε η DC μηχανή πρέπει να προσαρμόσει το ρεύμα της ώστε να εξισορροπήσει την περιστροφή. Επειδή η ροπή σχετίζεται με την ταχύτητα, το ρεύμα της DC μηχανής γίνεται πλέον εξαρτημένο από τη μηχανική δυναμική του συστήματος και ακολουθεί τη χρονική συμπεριφορά της ταχύτητας (200 ms).

Από την άλλη, λόγω της έλλειψης ανατροφοδότησης ροπής, η αναφορά του ελεγχτή ροπής ανοιχτού βρόχου είναι ανάλογη του ρεύματος i_q . Συνεπώς, η ροπή θεωρείται ότι αχολουθεί παρόμοια μεταβατιχή συμπεριφορά με το ρεύμα της μηχανής επαγωγής (5 ms).



Σχήμα 5.18: Δυναμική συμπεριφορά τάσης DC link, ρευμάτων τροφοδοσίας μετατροπέων, γωνίας μετασχηματισμού και ροών μηχανής επαγωγής σε βηματική μεταβολή ροπής με ακινητοποιημένο δρομέα σε περιβάλλον Plecs.

Όταν εφαρμόζεται νέα αναφορά ροπής (3 Nm), η συνολική κατανάλωση ισχύος αυξάνεται, με αποτέλεσμα να εμφανίζεται μεγαλύτερη κυμάτωση στην τάση του DC link, καθώς το σύστημα προσπαθεί να ισορροπήσει την ενεργειακή ροή.

Ο αντιστροφέας και ο DC-DC μετατροπέας τραβούν περισσότερη ισχύ από το DC link, άρα το ρεύμα του DC link αυξάνεται. Το ρεύμα τροφοδοσίας του αντιστροφέα αυξάνεται, γιατί η AC μηχανή απαιτεί μεγαλύτερη ηλεκτρική ισχύ για να παράγει τη νέα ροπή. Το ρεύμα τροφοδοσίας του DC-DC μετατροπέα αυξάνεται, επειδή η DC μηχανή βρίσκεται σε μια κατάσταση "φρένου", όπου προσπαθεί να εξισορροπήσει την αυξημένη επιβαλλόμενη ροπή από την AC μηχανή.

5.5.4 Δυναμική Συμπεριφορά Ελεγκτή Ροπής Εν Κινήσει

Όταν το σύστημα δυναμομέτρου έχει συγχρονιστεί με έλεγχο ταχυτήτας στα 200 rpm και ροπή αναφοράς 1 Nm, εφαρμόζεται έλεγχος ροπής εν κινήση στα 3 Nm διατηρώντας την ταχύτητα στα 200 rpm.



Σχήμα 5.19: Δυναμική συμπεριφορά ταχύτητας, ροπής και ρευμάτων μηχανών σε βηματική μεταβολή ροπής εν κινήση σε περιβάλλον Plecs.

Με την αύξηση ροπής στον άξονα, η DC μηχανή πρέπει να παράγει περισσότερη ηλεκτρική ισχύ για να ισορροπήσει το σύστημα. Η αύξηση της παραγόμενης ισχύος σημαίνει ότι το ρεύμα της DC μηχανής (ως γεννήτρια) αυξάνεται κατα απόλυτη τιμή.



Σχήμα 5.20: Δυναμική συμπεριφορά τάσης DC link, ρευμάτων τροφοδοσίας μετατροπέων, γωνίας μετασχηματισμού και ροών μηχανής επαγωγής σε βηματική μεταβολή ροπής εν κινήση σε περιβάλλον Plecs.

Παρόμοια με την κατάσταση ακινητοποιημένου δρομέα, όταν εφαρμόζεται νέα αναφορά ροπής (3 Nm), η συνολική κατανάλωση ισχύος αυξάνεται, με αποτέλεσμα να εμφανίζεται μεγα-
λύτερη κυμάτωση στην τάση του DC link, καθώς το σύστημα προσπαθεί να ισορροπήσει την ενεργειακή ροή.

Το ρεύμα τροφοδοσίας του αντιστροφέα αυξάνεται, γιατί η AC μηχανή απαιτεί μεγαλύτερη ηλεκτρική ισχύ για να παράγει τη νέα ροπή. Στην περίπτωση ελέγχου ροπής σε ταχύτητα, το ρεύμα τροφοδοσίας του DC-DC μετατροπέα είναι αρνητικό και αυξάνεται κατά απόλυτη τιμή, επειδή η DC μηχανή ως γεννήτρια αποδίδει περισσότερη ισχύ στο DC link.

6 Εργαστηριαχές Μετρήσεις

6.1 Υλοποίηση Εργαστηριακού Δυναμομέτρου

6.1.1 Συνδεσμολογία Συστήματος

Η τροφοδοσία του συστήματος παρέχεται από το δίκτυο μέσω ενός μονοφασικού ανορθωτή, στην έξοδο του οποίου είναι συνδεδεμένος ένας πυκνωτής, ώστε να εξομαλύνει την έξοδο του συνεχούς ρεύματος, διασφαλίζοντας σταθερή τάση στην είσοδο των διατάξεων. Η έξοδος συνεχούς τάσης του ανορθωτή αποτελεί την τροφοδοσία του DC-DC μετατροπέα και του τριφασικού αντιστροφέα. Το σημείο αυτό ορίζεται ως ο σύνδεσμος συνεχούς τάσης μεταξύ των ηλεκτρονικών ισχύος (DC Link).

Η μηχανή επαγωγής (AC) είναι συνδεδεμένη με τον τριφασικό αντιστροφέα, ο οποίος ρυθμίζει την τάση και το ρεύμα τροφοδοσίας της μηχανής. Λειτουργεί ως κινητήρας στο σύστημα δυναμόμετρου, μετατρέποντας την ηλεκτρική ενέργεια σε μηχανική.

Αντίστοιχα, η μηχανή συνεχούς ρεύματος (DC) είναι συνδεδεμένη με τον DC-DC μετατροπέα, ο οποίος ρυθμίζει την τάση και το ρεύμα τροφοδοσίας της μηχανής. Η διέγερση της δημιουργείται με την βοήθεια ενός μετασχηματιστή και ενός ανορθωτή παροχής σταθερής και συνεχούς τάσης. Στο σύστημα δυναμομέτρου, η μηχανή συνεχούς ρεύματος λειτουργεί ως γεννήτρια μετατρέποντας την μηχανική ενέργεια σε ηλεκτρική.

Η πλήρης συνδεσμολογία των διατάξεων εργαστηρίου για το σύστημα δυναμομέτρου παρουσιάζεται παραχάτω (Σχήμα 6.1).



Σχήμα 6.1: Διατάξεις εργαστηρίου για το σύστημα δυναμομέτρου.

Αυτό το σύστημα επιτρέπει την ρύθμιση ταχύτητας και ροπής στον κοινό άξονα, προσομοιώνοντας κάθε πιθανή λειτουργία του συστήματος μέσα στα όρια ευστάθειας, διευκολύνοντας διάφορες δοκιμές και μετρήσεις. Σε κατάσταση μόνιμης λειτουργίας, η συγκεκριμένη διάταξη επιτρέπει κυκλική ροή ισχύος μέσω του DC Link, με το δίκτυο να τροφοδοτεί μόνο τις απώλειες του συστήματος.

6.1.2 Επιχοινωνία CAN Bus

Η συνδεσμολογία των μικροελεγκτών σε κοινό κόμβο επιτρέπει την αποστολή και λήψη πληροφορίων μεταξύ τους, ορίζοντας μια κοινή διεύθυνση επικοινωνίας. Αυτό επιτρέπει την μετάδοση της ανατροφοδότησης της ταχύτητας περιστροφής σε όλους τους μικροελεγκτές σε πραγματικό χρόνο. Η μέτρηση αυτή πραγματοποιείται μέσω ενός encoder τοποθετημένο στον άξονα περιστροφής του συστήματος. Η ανατροφοδότηση της ταχύτητας είναι απαραίτητη και για τους δύο ελεγκτές. Δεδομένου ότι υπάρχει μόνο ένας αισθητήρας, το σύστημα επικοινωνίας CAN Bus εξασφαλίζει την αξιόπιστη διανομή του σήματος πληροφορίας.

Το σύστημα επικοινωνίας CAN bus (Controller Area Network) είναι μια μέθοδος επικοινωνίας που χρησιμοποιείται ευρέως σε συστήματα αυτοκινήτων και βιομηχανικών εφαρμογών (Σχήμα 6.2). Το CAN bus επιτρέπει την επικοινωνία μεταξύ πολλών συσκευών (κόμβων) σε ένα δίκτυο χωρίς την ανάγκη για κεντρικό υπολογιστή. Μερικές βασικές αρχές του CAN bus είναι οι εξής:

- Διαφορική Επικοινωνία: Χρησιμοποιεί δύο γραμμές, CAN_H και CAN_L, για τη μετάδοση δεδομένων. Η διαφορική τάση μεταξύ αυτών των γραμμών καθορίζει την κατάσταση του σήματος (κύριαρχο ή υπολειπόμενο).
- 2. Πρωτόχολλο Μηνυμάτων: Τα δεδομένα μεταδίδονται σε μορφή μηνυμάτων που περιλαμβάνουν αναγνωριστικά, δεδομένα και έλεγχο σφαλμάτων.
- 3. Αντοχή σε Παρεμβολές: Η διαφορική φύση του CAN bus το καθιστά ανθεκτικό σε ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές.
- Αποφυγή Συγκρούσεων: Χρησιμοποιεί μηχανισμό προτεραιότητας για την αποφυγή συγκρούσεων, όπου τα μηνύματα με χαμηλότερο αναγνωριστικό έχουν υψηλότερη προτεραιότητα.

Σε εφαρμογές σημαντικής απόστασης μεταξύ των κόμβων, προστίθονται τερματικές αντιστάσεις των 120 Ω στις άκρες του διαδρόμου (bus), ώστε να εξασφαλίζουν την αποφυγή ανακλάσεων του σήματος.



Σχήμα 6.2: Διάγραμμα επικοινωνίας CAN bus.

Ο μικροελεγκτής ο οποίος χρησιμοποιήθηκε ως κόμβος του συστήματος επικοινωνίας είναι ο C2000 LAUNCHXL- F28379D της Texas Instruments (Σχήμα 6.3), καθώς μπορεί να προγραμματιστεί απευθείας από το περιβάλλον του Plecs και μέσω της λειτουργίας external mode επιτρέπει την αλλαγή παραμέτρων του ελέγχου σε πραγματικό χρόνο.



Σχήμα 6.3: Μικροελεγκτής C2000 ΤΙ.

Στην διάταξη του εργαστηριαχού δυναμομέτρου η επιχοινωνία CAN bus αποτελείται από τρεις μιχροελεγχτές (C2000 TI) (Σχήμα 6.4). Ο ένας μιχροελεγχτής είναι συνδεδεμένος σε υπολογιστή, όπου λαμβάνει σε πραγματικό χρόνο εντολές ελέγχου και λειτουργεί ως master, ενω οι υπόλοιποι δυο λαμβάνουν τις αντίστοιχες εντολές και μέσω των αλγορίθμων ελέγχου στέλνουν κατάλληλους παλμούς τάσης στα ημιαγωγικά στοιχεία των μετατροπέων. Η λειτουργία αυτή χαραχτηρίζεται ως slave.



Σχήμα 6.4: Διάγραμμα επικοινωνίας CAN bus εργαστηρίου.

6.2 Όργανα Μετρήσεων

Για την ορθή λειτουργία των ελέγκτών κλειστού βρόχου είναι απαραίτητη η ανατροφοδότηση του αντίστοιχου μεγέθους με το κατάλληλο όργανο μέτρησεις. Στην συγκεκριμένη διάταξη χρειάζεται μέτρηση της ταχύτητας περιστροφής του άξονα για τον ελεγκτή ταχύτητας της μηχανής συνεχούς ρεύματος και τον εκτιμητή ροής της μηχανής επαγωγής και μέτρηση ρεύματος κάθε μηχανής για τους αντίστοιχους ελεγκτές ρευμάτων τους.

Σε περίπτωση ελεγκτή ροπής κλειστού βρόχου, είναι απαραίτητος και μετρητής ροπής στον άξονα για ανατροφοδότητση στον ελεγκτή. Στην παρούσα διάταξη, δεν είναι διαθέσιμος αισθητήρας ροπής, με αποτέλεσμα να χρησιμοποιείται ελεγκτής ανοικτού βρόχου.

Για την καταγραφή των μετρήσεων των δοκιμών χρησιμοποιήθηκαν αμπεροτσιμπίδες (current probes) για τα ρεύματα, ανιχνευτές τάσης (voltage probes) για τις τάσεις και μια ταχογεννήτρια για την ταχύτητα περιστροφής. Συγκεκριμένα, η ταχογεννήτρια δίνει μια τάση ανάλογη με την ταχύτητα περιστροφής στον άξονα και μέσω ανιχνευτή τάσης γίνεται απεικόνιση και καταγραφή σε ψηφιακό παλμογράφο.

6.2.1 Μέτρηση Ταχύτητας Περιστροφής

Για τη μέτρηση της ταχύτητας, χρησιμοποιήθηκε ο Incremental Rotary Encoder "E50S880003N24-Autonics" (Σχήμα 6.5), ο οποίος λειτουργεί ως αισθητήρας θέσης και ταχύτητας, παρέχοντας παλμούς που σχετίζονται με τη γωνιακή θέση και την περιστροφή ενός άξονα.



Σχήμα 6.5: Κωδικοποιητής ταχύτητας Encoder.

Ο χωδιχοποιητής έχει έναν οπτικό δίσχο με εγχοπές και έναν οπτικό αισθητήρα που ανιχνεύει τις μεταβάσεις μεταξύ διαφανών και αδιαφανών περιοχών. Καθώς ο άξονας περιστρέφεται, ο δίσχος περνά μπροστά από τον αισθητήρα, δημιουργώντας παλμούς.

Ο συγκεκριμένος κωδικοποιητής παράγει 8000 παλμούς ανά περιστροφή του άξονα. Διαθέτει δύο βασικά κανάλια A και B, όπου παρέχουν τετραγωνισμένους παλμούς με διαφορά φάσης 90° για να καθορίζεται η φορά περιστροφής. Επιπλέον, υπάρχει το κανάλι Z (Zero Index), το οποίο παράγει έναν παλμό ανά πλήρη περιστροφή, βοηθώντας στην απόλυτη αναφορά θέσης. Η κατεύθυνση περιστροφής του άξονα επιτυγχάνεται ανάλογα με τη διαφορά φάσης των σημάτων A και B.

Η ταχύτητα περιστροφής προκύπτει από τον αριθμό των παλμών που ανιχνεύονται σε ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα με βάση τον εξής τύπο:

$$RPM = \frac{PPS \cdot 60}{PPR} \tag{6.1}$$

όπου PPS είναι οι παλμοί ανά δευτερόλεπτο και PPR οι παλμοί ανα περιστροφή που παράγει ο κωδικοποιητής (8000).

Η μέτρηση της ταχύτητας μέσω του χωδιχοποιητή αποτελεί χρίσιμη πληροφορία για τη λειτουργία του συστήματος και απαιτεί ταχεία και αξιόπιστη μετάδοση στους δύο ελεγκτές. Το σήμα του χωδιχοποιητή διαβάζεται αρχικά από τον μιχροελεγκτή που ελέγχει τη μηχανή επαγωγής, και στην συνέχεια το σήμα μεταδίδεται, μέσω του συστήματος επιχοινωνίας CAN Bus, στον μιχροελεγκτή που ελέγχει τη μηχανή συνεχούς ρεύματος, εξασφαλίζοντας συγχρονισμένη και αξιόπιστη ανταλλαγή δεδομένων. Επειδή η ταχύτητα είναι μια παράμετρος που επηρεάζει άμεσα τον έλεγχο των μηχανών, η διαχείριση του σήματος είναι time-critical, απαιτώντας ελάχιστες καθυστερήσεις στη μετάδοση, ώστε να εξασφαλιστεί σταθερή και δυναμικά ρυθμιζόμενη λειτουργία του συστήματος.

6.2.2 Μετρήσεις Ρευμάτων

Για τη μέτρηση ρεύματος, χρησιμοποιήθηκαν οι αισθητήρες ρεύματος LEM LA 55-P (Σχήμα 6.6), οι οποίοι διαθέτουν γαλβανική απομόνωση μεταξύ κυκλώματος πρωτεύοντοςδευτερεύοντος, και λειτουργούν με το φαινόμενο Hall. Είναι σχεδιασμένοι για τη μέτρηση συνεχούς (DC) και εναλλασσόμενου (AC) ρεύματος.



Σχήμα 6.6: Αισθητήρας ρεύματος.

Το ρεύμα που διέρχεται από τον πρωτεύοντα αγωγό δημιουργεί ένα μαγνητικό πεδίο, το οποίο ανιχνεύεται από έναν αισθητήρα Hall. Ένα σύστημα ανάδρασης ρυθμίζει το ρεύμα στη δευτερεύουσα περιέλιξη ώστε να μηδενίσει το μαγνητικό πεδίο, με αποτέλεσμα το δευτερεύον ρεύμα να είναι ανάλογο του πρωτεύοντος.

Τα τεχνικά χαρακτηριστικά του αισθητήρα είναι τα εξής:

- Εύρος μέτρησης ρεύματος πρωτεύοντος: ±55A, με περιορισμό στα 11A στις εργαστηριαχές διατάξεις.
- Αναλογία μετατροπής: 1:1000 (δηλαδή, για 50Α πρωτεύον, το δευτερεύον θα έχει 50mA)
- Τάση τροφοδοσίας: ±15V
- Γραμμικότητα: Καλύτερη από 0.5%
- Χρόνος απόκρισης: < 1 μs (ταχύτερος από αισθητήρες ανοιχτού βρόχου)
- Μέτρηση ΑC και DC ρεύματος

6.3 Μηχανή Συνεχούς Ρεύματος DC

Σε αυτό το σημείο εξετάζονται οι ελεγκτές που υλοποιήθηκαν για την μηχανή συνεχούς ρεύματος σε βηματικές μεταβολές ταχύτητας περιστροφής. Οι δοκιμές που φαίνονται παρακάτω ελέγχουν την δυναμική απόκριση της ταχύτητας και του ρεύματος σε μεταβατικό εκκίνησης και μεταβολή ταχύτητας εν κινήση.

Οι μετρήσεις έχουν φιλτραριστεί μέσω συναρτήσεων κινούμενου μέσου όρου σε προγραμματιστικό περιβάλλον python για την απαλοιφή του θορύβου υψηλής συχνότητας και την μείωση της διακύμανσης των μετρητικών οργάνων. Ακόμα, πιθανές αποκλήσεις μπορεί να οφείλονται σε αντισταθμίσεις (offsets) των οργάνων.

6.3.1 Δυναμική Συμπεριφορά Ελεγκτή Ανοιχτού Βρόχου

Αρχικά εξετάζεται η δυναμική συμπεριφορά της μηχανής με ελέγχο ταχύτητας ανοιχτού βρόχου, με αναφορά μια περίοδο έναυσης duty cycle των διακοπτικών στοιχείων του DC-DC μετατροπέα.



Σχήμα 6.7: Ταχύτητα και ρεύμα μηχανής συνεχούς ρεύματος με έλεγχο ανοιχτού βρόχου σε βηματική μεταβολή ταχύτητας περιστροφής.

Στο πραγματικό σύστημα παρατηρείται πιο αργή απόκριση ταχύτητας. Στην προσομοίωση, ο έλεγχος υποθέτει ιδανικές συνθήκες, χωρίς απώλειες, άρα το σύστημα μπορεί να ανταποκριθεί γρήγορα στην αναφορά. Στην πραγματικότητα, οι απώλειες στον DC-DC μετατροπέα κάνουν τον ελεγκτή να χρειάζεται μεγαλύτερη προσπάθεια για την ίδια απόκριση.

Στην προσομοίωση, το ρεύμα αυξάνεται γρήγορα και σταθεροποιείται χωρίς θόρυβο. Στην πραγματικότητα, εμφανίζονται μικρές αποκλίσεις στο πώς το ρεύμα εξελίσσεται, με την παρουσία κυμάτωσης (ripple) λόγω των διακοπτικών στοιχείων του μετατροπέα.

Η ταχύτητα στην μόνιμη κατάσταση έχει απόκλιση από τις επιθυμητές στροφές αναφοράς. Αυτό συμβαίνει επειδή η αναφορά της περιόδου έναυσης αντιστοιχεί σε μια μέση τιμή τάσης τροφοδοσίας τυμπάνου, με αποτέλεσμα η ταχύτητα περιστροφής να επηρεάζεται από την τάση στο DC link. Η αναφορά για ταχύτητα $\omega_{ref} = 500 rpm$ αντιστοιχεί σε περίοδο έναυσης 0.34 και τάση τροφοδοσίας του DC-DC μετατροπέα $V_{dc} = 100V$,

$$\omega_r = duty \ cycle \cdot \omega_r^{nom} \frac{V_{dc}}{V_{dc}^{nom}} = 500rpm \tag{6.2}$$

αφού από τα ονομαστικά στοιχεία της μηχανή
ς $\omega_r^{nom}=2500rpm$ και $V_{dc}^{nom}=170V.$

Με την αύξηση της ταχύτητας, η μηχανή συνεχούς ρεύματος ως κινητήρας αρχίζει και καταναλώνει ηλεκτρική ισχύ για την παραγωγή μηχανικής ισχύος στον άξονα, με αποτέλεσμα να εμφανίζεται μια μικρή πτώση στην τάση του DC link. Συνεπώς, η τελική ταχύτητα μόνιμης κατάστασης προκύπτει μικρότερη της θεωρητικής.

6.3.2 Δυναμική Συμπεριφορά Ελεγκτή Κλειστού Βρόχου

Σε συνέχεια, εξετάζεται η δυναμική συμπεριφορά της μηχανής με ελέγχο ταχύτητας κλειστού βρόχου, με ανατροφοδότηση της μέτρησης της ταχύτητας μέσω του κωδικοποιητή (encoder).



Σχήμα 6.8: Ταχύτητα και ρεύμα μηχανής συνεχούς ρεύματος με έλεγχο κλειστού βρόχου σε βηματική μεταβολή ταχύτητας περιστροφής.

Αυτή την φορά η απόκριση της ταχύτητας έχει βελτιωθεί προσεγγίζοντας τον ορισμένο χρόνο ανόδου στα 200ms. Ο ελεγκτής προσαρμόζει συνεχώς την τάση για να επιταχύνει τον κινητήρα όσο το δυνατόν πιο γρήγορα. Ο χρόνος ανόδου είναι πιο γρήγορος και ελεγχόμενος, καθώς ο ελεγκτής διορθώνει τυχόν αποκλίσεις.

Το ρεύμα στην περίπτωση ελέγχου κλειστού βρόχου εμφανίζει μεγαλύτερο χρονικό διάστημα μεταβατικού, επειδή ο χρόνος ανόδου έχει οριστεί στα 20 ms, με σκοπό την αποφυγή κατάστασης κορεσμού του ρεύματος στα 10 A, λόγω ασφάλειας των διακοπτικών διατάξεων.

6.4 Μηχανή Επαγωγής ΑC

Σε αυτό το σημείο εξετάζονται οι ελεγκτές που υλοποιήθηκαν για την μηχανή επαγωγής σε βηματικές μεταβολές ταχύτητας περιστροφής. Οι δοκιμές που φαίνονται παρακάτω ελέγχουν την δυναμική απόκριση της ταχύτητας και του ρεύματος σε μεταβατικό εκκίνησης και μεταβολή ταχύτητας εν κινήσει.

6.4.1 Δυναμική Συμπεριφορά Ελεγκτή Ανοιχτού Βρόχου

Αρχικά εξετάζεται η δυναμική συμπεριφορά της μηχανής με ελέγχο ταχύτητας ανοιχτού βρόχου, με την στρατηγική ελέγχου σταθερού λόγου τάσης-συχνότητας.



Σχήμα 6.9: Ταχύτητα και ρεύματα μηχανής επαγωγής με έλεγχο ανοιχτού βρόχου σε βηματική μεταβολή ταχύτητας περιστροφής.

Ο χρόνος ανόδου της ταχύτητας ταυτίζεται πλήρως μεταξύ προσομοίωσης και πραγματικού συστήματος, αυτό δείχνει ότι οι μηχανικές και ηλεκτρικές παράμετροι του πραγματικού συστήματος είναι αρκετά ακριβείς και χωρίς έντονες διαταραχές στην ταχύτητα και στα ρεύματα.

Εμφανίζονται διαχυμάνσεις στην ταχύτητα κατά την εκκίνηση λόγω της απουσίας ανατροφοδότησης για διορθώσεις.

Οι διαχυμάνσεις της ταχύτητας επηρεάζουν και το ρεύμα του στάτη, το οποίο φαίνεται να έχει αυξήμενη ενεργό τιμή στο μεταβατικό στάδιο και υπάρχουν μικρές αποκλίσεις μέχρι να σταθεροποιηθεί ο άξονας στην ταχύτητα αναφοράς.

6.4.2 Δυναμική Συμπεριφορά Ελεγκτή Κλειστού Βρόχου

Στην συνέχεια, εξετάζεται η δυναμική συμπεριφορά της μηχανής με ελέγχο ταχύτητας κλειστού βρόχου, με την στρατηγική διανυσματικού ελέγχου (Vector Control) με το μοντέλο ρεύματος και ανατροφοδότηση της μέτρησης της ταχύτητας μέσω του κωδικοποιητή (encoder).



Σχήμα 6.10: Ταχύτητα και ρεύματα μηχανής επαγωγής με έλεγχο κλειστού βρόχου σε βηματική μεταβολή ταχύτητας περιστροφής.

Ο χρόνος ανόδου της ταχύτητας ταυτίζεται πλήρως μεταξύ προσομοίωσης και πραγματικού συστήματος, αυτό δείχνει ότι οι μηχανικές και ηλεκτρικές παράμετροι του πραγματικού συστήματος είναι αρκετά ακριβείς και η ποιότητα του ελέγχου είναι υψηλή, χωρίς έντονες διαταραχές ή απώλειες.

Με έλεγχο κλειστού βρόχου, η σταθερότητα της ταχύτητας βελτιώνεται σημαντικά, καθώς ο έλεγχος επιτρέπει την ακριβή ρύθμιση της ταχύτητας, λαμβάνοντας υπόψη τις δυναμικές του κινητήρα και αντισταθμίζοντας τις πιθανές διακυμάνσεις που προκύπτουν από εξωτερικές ή εσωτερικές παραμέτρους.

Τα ρεύματα στο μεταβατικό της εκκίνησης δεν ταυτίζονται πλήρως μεταξύ της προσομοιώσης και του φυσικού συστήματος, πιθανώς λόγω μικρής απόκλισης της γωνίας προσανατολισμού του πεδίου στη κατάσταση μηδενικών στροφών. Ωστόσο, όταν συγχρονίζεται το σύστημα η σύχνοτητα ταυτίζεται και διατηρείται σταθερή αντιπροσοπέυοντας την ταχύτητα περιστροφής.

6.5 Σύστημα Δυναμομέτρου DC-AC

Οι καταστάσεις λειτουργίας του ηλεκτρικού δυναμομέτρου, στις οποίες έγινε καταγραφή των μεγεθών όσο και η δυναμική τους συμπεριφορά σε βηματικές μεταβολές των ελεγκτών ταχύτητας και ροπής, φαίνονται στον παρακάτω χάρτη λειτουργίας.



Σχήμα 6.11: Σημεία λειτουργίας μετρήσεων στον χάρτη λειτουργίας δυναμομέτρου.

Τα μεγέθη που μετρήθηκαν είναι η ταχύτητα περιστροφής ω του άξονα, τα ρεύματα των δύο μηχανών i_{dc} , i_a , η τάση του κοινού DC link V_{dc} και τα ρεύματα εισόδων του αντιστροφέα και DC-DC μετατροπέα i_{inv} , i_{conv} αντίστοιχα.

Λόγω περιορισμού τεσσαρων καναλιών του παλμογράφου καταγραφής μετρήσεων, τα πειράματα διεξήχθησαν δύο φορές, ώστε να ληφθούν όλες οι μετρήσεις. Η πρώτη ομάδα μετρήσεων συμπεριλαμβάνει την ταχύτητα ω, την τάση V_{dc} , τα ρεύματα i_{dc} , i_a , ενώ η δεύτερη ομάδα αποτελείται από όλα τα ρεύματα i_{dc} , i_a , i_{inv} , i_{conv} . Τα ρεύματα i_{dc} , i_a μετρήθηκαν δύο φορές, ώστε να υπάρχει ορθή αντιστοίχηση των μεγεθών σε μεταβατικά φαινόμενα.

6.5.1 Δυναμική Συμπεριφορά Εισαγωγής Μηχανής Συνεχούς Ρεύματος

Για την ομαλή εκκίνηση του συστήματος δυναμομέτρου, η εκκίνηση της μηχανής συνεχούς πραγματοποιείται πρώτη με έλεγχο ακινητοποιημένου δρομέα (Σχήμα 6.12). Η εκκίνηση της μηχανής επαγωγής ως πρώτη είναι δυνατή με αναφορά ροπής, δίχως όμως έλεγχο των στροφών του άξονα. Σε αυτήν την περίπτωση η ταχύτητα αυξάνεται μέχρι ένα σημείο ισορροπίας που περιορίζεται από το ρεύμα αναφοράς στην έξοδο του ελεγκτή ροπής και από την τάση τροφοδοσίας στο DC Link.



Σχήμα 6.12: Δυναμική συμπεριφορά μεγεθών δυναμομέτρου σε εκκίνηση μηχανής συνεχούς ρεύματος.

Όπως φαίνεται και από προηγούμενες μετρήσεις εκκίνησης της DC μηχανής παρατηρείται ένα μεταβατικό αύξησης του ρεύματος για την δημιουργία ροπής στον άξονα. Η αναφορά της ταχύτητας βρίσκεται σε μηδενικές στροφές, συνεπώς το ρεύμα και η ταχύτητα μηδενίζονται μετά το μεταβατικό.

Παρατηρείται επίσης ένα μεταβατικό επιστροφής ρεύματος μέσω του αντιστροφέα, το οποίο πιθανώς οφείλεται στην δημιουργία τάσης επαγωγής στα τυλίγματα της AC μηχανής από το μεταβατικό της ταχύτητας περιστροφής. Η ταχύτητα έχει χρόνο απόκρισης 40 φορές μεγαλύτερο από το ρεύμα, προκαλώντας μια μικρή προσπάθεια περιστροφής λόγω της απότομης αύξησης του ρεύματος.

6.5.2 Δυναμική Συμπεριφορά Εισαγωγής Μηχανής Επαγωγής

Αφού λειτουργεί η μηχανή συνεχούς ρεύματος με έλεγχο ταχυτήτας σε μηδενικές στροφές, εισάγεται η μηχανή επαγωγής με ροπή αναφοράς 1 Nm με θετική φορά σύμφωνα με την ορισμένη κατεύθυνση περιστροφής της ταχύτητας (Σχήμα 6.13).



Σχήμα 6.13: Δυναμική συμπεριφορά μεγεθών δυναμομέτρου σε εισαγωγή μηχανής επαγωγής.

Όπως φαίνεται και παραπάνω η θετική ροπή δημιουργεί ένα μεταβατικό στην ταχύτητα, ενώ παράλληλα η μηχανή συνεχούς ρεύματος προσπαθεί να διατηρήσει τον άξονα ακινητοποιημένο μέσω του ελεγκτή της. Η μηχανική ενέργεια που προσφέρει η μηχανή επαγωγής στον άξονα μετατρέπεται σε ηλεκτρική μέσω την μηχανής συνεχούς ρεύματος, αλλάζοντας την λειτουργία της σε γεννήτρια. Αυτό επιβεβαιώνεται από το αρνητικό ρεύμα της DC μηχανής.

Ταυτόχρονα, εμφανίζεται εναλλασσόμενο ρεύμα χαμηλής συχνότητας (<1 Hz) στον στάτη της μηχανής επαγωγής, το οποίο οφείλεται στην ολίσθηση που δημιουργείται όσο η μηχανή συνεχούς ρεύματος διατηρεί τον άξονα αχινητοποιημένο.

Όταν εφαρμόζεται αναφορά ροπής (1 Nm), ο αντιστροφέας αυξάνει το ρεύμα του στάτη ώστε να δημιουργήσει την απαιτούμενη μαγνητική ροή και ροπή. Η απαίτηση για ροή (magnetizing current) και η απόκριση του ελεγκτή ροπής οδηγεί σε απότομη αύξηση του ρεύματος από το DC Link. Ακόμα, εισάγονται οι απώλειες της μηχανής επαγωγής και των διακοπτικών στοιχείων του αντιστροφέα, αυξάνοντας την κατανάλωση ενέργειας και προκαλώντας πτώση στην τάση του DC Link. Παρατηρείται μεγαλύτερη πτώση τάσης στο DC link, η οποία δεν είναι ελεγχόμενη, καθώς η τροφοδοσία γίνεται μέσω ανορθωτή διόδων. Η πτώση αυτή οφείλεται στις απώλειες των μηχανών (ηλεκτρικές και μηχανικές) και στις διακοπτικές απώλειες των στοιχείων ισχύος. Στην προσομοίωση, τα διακοπτικά στοιχεία θεωρούνται ιδανικά και οι απώλειες τους αμελούνται. Τα IGBTs έχουν τάση αγωγής, οπότε ένα ποσοστό της ισχύος χάνεται. Υπάρχουν απώλειες μεταγωγής κάθε φορά που τα στοιχεία αλλάζουν κατάσταση (on/off). Ακόμα, τάση αγωγής έχουν και οι δίοδοι, η οποία δημιουργεί απώλειες στα στάδια ανόρθωσης/αντιστροφής.

Εφόσον η μηχανική ισχύς στον άξονα είναι μηδέν λόγω του ακινητοποιημένου δρομέα, η ισχύς που προσφέρει το δίκτυο είναι ίση με τις απώλειες του συστήματος και υπολογίζεται ως εξής:

• Στη προσομοίωση:

$$\begin{cases}
P_{inv} = V_{dc} \cdot i_{inv} = 100 \cdot 0.75 = 75W \\
P_{conv} = V_{dc} \cdot i_{conv} = 100 \cdot 0.08 = 8W \\
P_{loss} = P_{inv} + P_{conv} = 75 + 8 = 83W
\end{cases}$$
(6.3)

• Στο φυσικό σύστημα:

$$\begin{cases}
P_{inv} = V_{dc} \cdot i_{inv} = 95 \cdot 0.13 = 12.35W \\
P_{conv} = V_{dc} \cdot i_{conv} = 95 \cdot 0.08 = 7.6W \\
P_{loss} = P_{inv} + P_{conv} = 12.35 + 7.6 = 19.95W
\end{cases}$$
(6.4)

6.5.3 Δυναμική Συμπεριφορά Ελεγκτή Ταχύτητας

Όταν το σύστημα δυναμομέτρου έχει συγχρονιστεί με έλεγχο ταχυτήτας σε μηδενικές στροφές και ροπή αναφοράς 1 Nm, εφαρμόζεται έλεγχος ταχύτητας στα 200rpm διατηρώντας την ροπή αναφοράς στο 1 Nm (Σχήμα 6.14).



Σχήμα 6.14: Δυναμική συμπεριφορά μεγεθών δυναμομέτρου σε βηματική μεταβολή ταχύτητας.

Στην αρχική κατάσταση, η DC μηχανή, η οποία λειτουργεί ως γεννήτρια παρέχει αντίθετη ροπή για να διατηρεί τον άξονα σε μηδενική ταχύτητα. Η επαγωγική μηχανή, εφόσον έχει αναφορά ροπής, θα πρέπει πάντα να δίνει 1Nm. Όμως, όταν το σύστημα περιστρέφεται, μέρος αυτής της ροπής χρησιμοποιείται για να υπερνικήσει τριβές, άρα η DC μηχανή χρειάζεται λίγοτερη ροπή για να διατηρήσει την ταχύτητα σταθερή. Αυτό σημαίνει ότι η DC μηχανή απαιτεί λιγότερο ρεύμα για να παράγει τη ροπή πέδησης.

Ταυτόχρονα, αυξάνεται η συχνότητα στο εναλλασσόμενο ρεύμα του στάτη της μηχανής επαγωγής, ανάλογα με την ταχύτητα περιστροφής. Αυτό επιβεβαιώνεται μέσω της περιόδου του ρεύματος, η οποία μετριέται περίπου στα $\frac{10}{3}$ sec (μικρή διαφορά λόγω ολίσθησης) και αντιστοιχεί σε ταχύτητα $\omega = 2\pi f \frac{60}{2\pi} = 200$ rpm.

Όταν ξεκινά η περιστροφή, η γεννήτρια αρχίζει να παράγει, αντι να καταναλώνει, περισσότερη ηλεκτρική ενέργεια λόγω της αύξησης της ταχύτητας, το οποίο οδηγεί σε αντίστροφη ροή ρεύματος μέσω του DC-DC μετατροπέα.

6.5.4 Δυναμική Συμπεριφορά Ελεγκτή Ροπής Σε Ακινητοποιημένο Δρομέα

Όταν το σύστημα δυναμομέτρου έχει συγχρονιστεί με έλεγχο ταχυτήτας σε μηδενικές στροφές και ροπή αναφοράς 1 Nm, εφαρμόζεται έλεγχος ροπής στα 3Nm διατηρώντας τον άξονα ακινητοποιημένο (0 rpm) (Σχήμα 6.15).



Σχήμα 6.15: Δυναμική συμπεριφορά μεγεθών δυναμομέτρου σε βηματική μεταβολή ροπής σε μηδενική ταχύτητα.

Όταν εφαρμόζεται νέα αναφορά ροπής (3 Nm), ενώ η ισχύς στον άξονα παραμένει μηδενική, η συνολική ζήτηση ισχύος αυξάνεται. Για να διατηρήσει η μηχανή συνεχούς ρεύματος τον άξονα σταθερό, χρείαζεται περισσότερο ρεύμα για να δημιουργήσει ροπή αντίθετης κατέυθυνσης, αυξάνοντας το ρεύμα του DC-DC μετατροπέα αλλά και τις απώλειες του συστήματος οδήγησης της. Η νέα ζήτηση ισχύος εμφανίζει μια μικρή πτώση στην τάση του DC link, καθώς το σύστημα προσπαθεί να ισορροπήσει την ενεργειακή ροή.

Για την παραγωγή της νέες ροπής, αυξάνεται η ολίσθηση της μηχανής επαγωγής, ενώ η ενεργή τιμή του ρεύματος διατηρείται σταθερή. Η ισχύς τροφοδοσίας του συστήματος οδήγησης της μηχανής επαγωγής παραμένει περίπου σταθερή, με το ρεύμα του αντιστροφέα να αυξάνεται ελάχιστα, λόγω της πτώσης τάσης του DC link. Το ρεύμα τροφοδοσίας του DC-DC μετατροπέα αυξάνεται και παραμένει θετικό, επειδή η DC μηχανή βρίσκεται σε μια κατάσταση "φρένου", όπου προσπαθεί να εξισορροπήσει την αυξημένη επιβαλλόμενη ροπή από την AC μηχανή. Σε μηδενική ταχύτητα και οι δύο μηχανές συμπεριφέρονται ως κινητήρες, λόγω της έλλειψης μηχανικής περιστροφής σε σταθερό πεδίο για την λειτουργία γεννήτριας με βάση τον νόμο Faraday.

Εφόσον η μηχανική ισχύς στον άξονα είναι μηδέν λόγω του ακινητοποιημένου δρομέα, η ισχύς που προσφέρει το δίκτυο είναι ίση με τις απώλειες του συστήματος και υπολογίζεται ως εξής:

• Στη προσομοίωση:

$$\begin{cases}
P_{inv} = V_{dc} \cdot i_{inv} = 100 \cdot 0.9 = 90W \\
P_{conv} = V_{dc} \cdot i_{conv} = 100 \cdot 0.55 = 55W \\
P_{loss} = P_{inv} + P_{conv} = 90 + 55 = 145W
\end{cases}$$
(6.5)

• Στο φυσικό σύστημα:

$$\begin{cases}
P_{inv} = V_{dc} \cdot i_{inv} = 92 \cdot 0.16 = 14.72W \\
P_{conv} = V_{dc} \cdot i_{conv} = 92 \cdot 0.45 = 41.4W \\
P_{loss} = P_{inv} + P_{conv} = 14.72 + 41.4 = 56.12W
\end{cases}$$
(6.6)

Στην προσομοίωση, οι αρμονικές είναι ιδανικές και οι κυματομορφές είναι καθαρές. Στην πραγματικότητα υπάρχουν επιπλέον αρμονικές και ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές (EMI). Αυτό συμβαίνει επειδή οι μη ιδανικοί διακόπτες παράγουν υψηλής συχνότητας αρμονικές και οι πραγματικοί αγωγοί δημιουργούν επαγωγές και χωρητικότητες, που αλλάζουν τη συμπεριφορά των παλμών, με αποτέλεσμα να εμφανίζονται σημαντικές παραμορφώσεις στις κυματομορφές των ρευμάτων.

6.5.5 Δυναμική Συμπεριφορά Ελεγκτή Ροπής Εν Κινήσει

Όταν το σύστημα δυναμομέτρου έχει συγχρονιστεί με έλεγχο ταχυτήτας στα 200 rpm και ροπή αναφοράς 1 Nm, εφαρμόζεται έλεγχος ροπής εν κινήση στα 3 Nm διατηρώντας την ταχύτητα στα 200 rpm (Σχήμα 6.16).



Σχήμα 6.16: Δυναμική συμπεριφορά μεγεθών δυναμομέτρου σε βηματική μεταβολής σε ταχύτητα.

Όπως φαίνεται και παραπάνω η μεταβατική αύξηση της ροπής δημιουργεί ένα σύντομο μεταβατικό στην ταχύτητα, ενώ παράλληλα η μηχανή συνεχούς ρεύματος προσπαθεί να διατηρήσει τον άξονα στις 200 στροφές ανα λεπτό μέσω του ελεγκτή της.

Με την αύξηση ροπής στον άξονα, η DC μηχανή πρέπει να παράγει περισσότερη ηλεκτρική ισχύ για να ισορροπήσει το σύστημα. Η αύξηση της παραγόμενης ισχύος σημαίνει ότι το ρεύμα της DC μηχανής (ως γεννήτρια) αυξάνεται κατα απόλυτη τιμή. Ώστόσο, η DC μηχανή δεν χρειάζεται να παράγει την ίδια ροπή πέδησης για να διατηρήσει την ταχύτητα περιστροφής, καθώς ένα μέρος αυτής της ροπής χρησιμοποιείται για την αντιστάθμιση τριβών.

Όταν εφαρμόζεται νέα αναφορά ροπής (3 Nm), η συνολική κατανάλωση ισχύος αυξάνεται, με αποτέλεσμα να εμφανίζεται μια μικρή πτώση στην τάση του DC link, καθώς η ισχύς που χρειάζεται το σύστημα για να αντισταθμίσει τις απώλειες, είναι μεγαλύτερη.

Το ρεύμα τροφοδοσίας του αντιστροφέα αυξάνεται, γιατί η ΑC μηχανή απαιτεί μεγαλύτερη ηλεκτρική ισχύ για να παράγει τη νέα ροπή. Στην περίπτωση ελέγχου ροπής σε ταχύτητα, το

ρεύμα τροφοδοσίας του DC-DC μετατροπέα είναι αρνητικό και αυξάνεται κατά απόλυτη τιμή, επειδή η DC μηχανή ως γεννήτρια αποδίδει περισσότερη ισχύ στο DC link.

7 Συμπεράσματα - Προτάσεις Περαιτέρω Μελέτης

7.1 Συμπεράσματα

Ανακεφαλαιώνοντας, τα κύρια σημεία της παρούσας διπλωματικής εργασίας, στα οποία δόθηκε μεγαλύτερη έμφαση, και τα συμπεράσματα που προέκυψαν σχετικά με το θεωρητικό και το πειραματικό μέρος, είναι τα εξής:

- Ακρίβεια Μετρήσεων: Οι μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν στο πραγματικό σύστημα επιβεβαίωσαν την ακρίβεια των προσομοιώσεων. Οι τιμές που καταγράφηκαν για την ταχύτητα, την τάση και τα ρεύματα ήταν συμβατές με τις αναμενόμενες τιμές, υποδεικνύοντας ότι το μοντέλο προσομοίωσης είναι ένα πολύ χρήσιμο εργαλείο που αντιπροσωπεύει τη φυσική συμπεριφορά του συστήματος.
- Δυναμικοί Αντίκτυποι: Οι δυναμικές συμπεριφορές που παρατηρήθηκαν κατά την εκκίνηση και την αλλαγή φορτίου επιβεβαίωσαν ότι το σύστημα μπορεί να προσαρμοστεί γρήγορα σε μεταβαλλόμενες συνθήκες. Η ταχύτητα και η ροπή του άξονα παρουσίασαν γρήγορες αποκρίσεις, γεγονός που υποδηλώνει την αποτελεσματικότητα των ελεγκτών που αναπτύχθηκαν.
- Επικοινωνία και Σταθερότητα: Η χρήση του CAN bus για την επικοινωνία μεταξύ των μικροελεγκτών αποδείχθηκε αποτελεσματική, επιτρέποντας την ταχεία και αξιόπιστη ανταλλαγή δεδομένων. Αυτό συνέβαλε στην αποδοτικότητα και σταθερότητα του ελεγκτή ταχύτητας καθώς δεχόταν την ανατροφοδότηση της ταχύτητας, δίχως άμεση σύνδεση με τον κωδικοποιητή (encoder).
- Απόχριση σε Θόρυβο: Οι μετρήσεις αποχάλυψαν την παρουσία θορύβου, ο οποίος επηρεάζει την ποιότητα των σημάτων. Παρόλο που ο θόρυβος από τα διαχοπτιχά στοιχεία χαι οι υψηλής συχνότητας αρμονιχές που εισάγονται στο σύστημα είναι παρούσες, το σύστημα λειτουργεί ορθά, διατηρώντας την επιθυμητή απόχριση χαι σταθερότητα.
- Συμπεριφορά Ελεγκτών: Οι ελεγκτές ταχύτητας, ρευμάτων και ροπής παρουσίασαν ικανοποιητική απόδοση, ωστόσο, ο συγχρονισμός και η ευστάθεια του συνολικού συστήματος είναι περιορισμένη σε διάφορες τιμές χρόνων απόκρισης. Αυτό υποδεικνύει την ανάγκη για περαιτέρω βελτιώσεις στην αλγοριθμική στρατηγική ελέγχου.
- Συνολική Απόδοση Συστήματος: Η συνολική απόδοση του συστήματος δυναμομέτρου αποδείχθηκε ικανοποιητική, με την ικανότητα να διατηρεί σταθερές τις παραμέτρους λειτουργίας υπό διάφορες συνθήκες.

7.2 Προτάσεις Περαιτέρω Μελέτης

Με αφορμή τις δοκιμές, και τη δόμηση του ελέγχου που πραγματοποιήθηκε στην παρούσα διπλωματική εργασία, θα μπορούσαν να πραγματοποιηθούν οι εξής μελλοντικές δοκιμές:

- Λειτουργία του δυναμόμετρου με εκτίμηση ταχύτητας (sensorless control): Μελέτη αλγορίθμων εκτίμησης ταχύτητας, όπως Παρατηρητές Κατάστασης (State Observers) και PLL (Phase-Locked Loop), ώστε να αξιολογηθεί η απόδοση του συστήματος χωρίς αισθητήρες θέσης/ταχύτητας.
- Έλεγχος ροπής κλειστού βρόχου με ροπόμετρο: Ανάπτυξη και υλοποίηση ελεγκτή ροπής με ανατροφοδότηση από ροπόμετρο, ώστε να βελτιωθεί η ακρίβεια του ελέγχου και να μειωθούν οι αποκλίσεις λόγω μη γραμμικοτήτων των μηχανών.
- Ανάπτυξη αλγορίθμου αυτόματης ρουτίνας ελέγχου για χαρτογράφηση πολλαπλών σημείων λειτουργίας: Σχεδιασμός και υλοποίηση αυτοματοποιημένης διαδικασίας για τη συλλογή δεδομένων απόδοσης σε διάφορα σημεία λειτουργίας, με σκοπό τη βελτιστοποίηση του δυναμόμετρου και την καλύτερη μοντελοποίηση των μηχανών.

Αναφορές

- [1] Mohan, Undeland, Robbins "Εισαγωγή Στα Ηλεκτρονικά Ισχύος: Ανάλυση, Σχεδίαση και Εφαρμογές των Ηλεκτρονικών Μετατροπέων Ισχύος, 3ή Έκδοση"
- [2] Stephen J. Chapman "Ηλεκτρικές Μηχανές, 4ή Έκδοση"
- [3] Lennart Harnefors, Marko Hinkkanen, Oskar Wallmark, Alejandro Gomez Yepes "Control of Voltage-Source Converters and Variable-Speed Drives"
- [4] Κωνσταντίνα Δ. Καραΐνδρου, "Προχωρημένες Τεχνικές Ελέγχου σε Συστήματα Ηλεκτρικής Κίνησης", Διπλωματική Εργασία, ΕΜΠ, Αθήνα 2023.