



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ & ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

**Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών
«Διαχείριση και Βελτιστοποίηση Ενεργειακών Συστημάτων»**

Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία

*«Ενεργειακή προσέγγιση, μοντελοποίηση και αποτίμηση εφαρμογών κίνησης με
ασύγχρονους κινητήρες»*

**Φοιτητής: Μαράντος Σωτήριος
ΑΜ: energy_1809**

**Επιβλέπων Καθηγητής
Μορώνης Αντώνιος, Καθηγητής**



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

“Postgraduate Program”
“Management and Optimization of Energy Systems”

Postgraduate Diploma Thesis
**“Energy oriented approach, modeling and evaluation of motor driven systems
with asynchronous motors”**

Student: Marantos Sotirios
Registration Number: energy_1809

Supervisor
Moronis Antonios, Professor

ATHENS, JANUARY 2022

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

Μορώνης Αντώνιος Καθηγητής	Ιωαννίδης Γεώργιος Καθηγητής	Τσεκούρας Γεώργιος Επικ. Καθηγητής
(Υπογραφή)	(Υπογραφή)	(Υπογραφή)

Copyright © Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής, Σχολή Μηχανικών, Τμήμα Ηλεκτρολόγων και Ηλεκτρονικών Μηχανικών

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

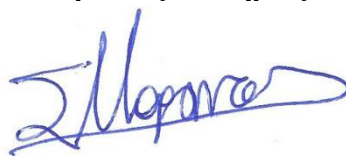
Ο κάτωθι υπογεγραμμένος Μαράντος Σωτήριος του Σπυρίδωνος, με αριθμό μητρώου energy_1809 μεταπτυχιακός φοιτητής του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής της Σχολής Μηχανικών του Τμήματος Ηλεκτρολόγων και Ηλεκτρονικών Μηχανικών, του μεταπτυχιακού προγράμματος «Διαχείριση και Βελτιστοποίηση Ενεργειακών Συστημάτων»

δηλώνω υπεύθυνα ότι:

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

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

Ο Δηλών
Μαράντος Σωτήριος



Ευχαριστίες

Η παρούσα μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία αποτελεί το τέλος των μεταπτυχιακών σπουδών μου, στο πρόγραμμα Διαχείριση και Βελτιστοποίηση Ενεργειακών Συστημάτων του τμήματος Ηλεκτρολόγων και Ηλεκτρονικών Μηχανικών του ΠΑ.Δ.Α. Στο σημείο αυτό, εκφράζω τις ευχαριστίες μου προς τους καθηγητές του μεταπτυχιακού και ιδιαιτέρως στον καθηγητή κ. Μορώνη Αντώνιο, ο οποίος είχε την επίβλεψη της εργασίας αυτής και μου έδωσε το κίνητρο να ασχοληθώ με ένα σημαντικό θέμα.

Περίληψη

Στην παρούσα μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία γίνεται προσπάθεια προσέγγισης των κινητήριων συστημάτων που περιλαμβάνουν ασύγχρονους κινητήρες από την οπτική της ενεργειακής τους συμπεριφοράς. Τα κινητήρια συστήματα με ασύγχρονους κινητήρες ως σήμερα, αποτελούν την πλειονότητα των εφαρμογών και καταναλώνουν σημαντική ποσότητα ηλεκτρικής ενέργειας παγκοσμίως, ώστε να αποδίδουν χρήσιμο έργο σε πληθώρα εφαρμογών.

Αρχικά χρειάζεται να ληφθεί υπ' όψιν και να κατανοηθεί το πρότυπο το οποίο ορίζει και κατηγοριοποιεί ενεργειακά ένα κινητήριο σύστημα ως σύνολο, βάσει της απόδοσής του. Αυτό το πρότυπο μέσω των κανονισμών που ορίζει δίνει το κίνητρο για την ενεργειακή προσέγγιση και αναβάθμιση του εξοπλισμού. Οι κατασκευαστές εξοπλισμού τροφοδοτούν την αγορά με καινοτόμα προϊόντα ενεργειακά αναβαθμισμένα.

Η ενεργειακή προσέγγιση απαιτεί συνεχείς βελτιστοποιήσεις του εξοπλισμού και συνεχή έρευνα σχετικά με τα μειονεκτήματα και τα πλεονεκτήματα της κάθε αναβάθμισης που γίνεται. Οι σύγχρονες απαιτήσεις ολοένα αυξάνονται αφού για λόγους ποιότητας και αξιοπιστίας της λειτουργίας, γίνεται συνήθης ο έλεγχος και η οδήγηση των φορτίων. Προτεραιότητα αποτελεί η ενεργειακή προσέγγιση βάσει των προτύπων και κατ' επέκταση ο περιορισμός του κόστους λειτουργίας. Βάσει αυτής της προτεραιότητας και με την χρήση καινοτόμων έξυπνων λύσεων το κάθε κινητήριο σύστημα βελτιώνει επίσης την αξιοπιστία του και την ποιότητα λειτουργίας του. Ο σύγχρονος εξοπλισμός μπορεί μέσω της ανάδρασής του να ενημερώνει με συνεχείς πληροφορίες τον χρήστη. Ο χρήστης είναι αυτός ο οποίος θα αξιολογήσει το σύστημα στους παραπάνω αναφερθέντες τομείς και θα καθορίσει νέους στόχους λειτουργίας, για το μέλλον.

Στην παρούσα εργασία αρχικά παρουσιάζεται μια βιβλιογραφική ανασκόπηση στο θέμα των κινητήριων συστημάτων με ασύγχρονους κινητήρες. Ακολουθεί η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε με αναφορά στον σχεδιασμό, στους υπολογισμούς και στην παραμετροποίηση των κυκλωμάτων που παρουσιάζονται. Παρακάτω ακολουθεί το κομμάτι της προσομοίωσης των διαφορετικών σεναρίων χρησιμοποιώντας τέσσερα χαρακτηριστικά είδη φορτίου, τα οποία συναντώνται περισσότερο στις εφαρμογές κίνησης.

Τα κυκλώματα τα οποία χρησιμοποιήθηκαν στην προσομοίωση, σχεδιάστηκαν και παραμετροποιήθηκαν με τη χρήση του λογισμικού Matlab-Simulink.

Στόχος της εργασίας αποτελεί η διατύπωση συμπερασμάτων για την κάθε εφαρμογή σε σχέση με την ενεργειακή της συμπεριφορά, την αξιοπιστία της, τους τρόπους ελέγχου του φορτίου και την ποιότητα ισχύος του συστήματος.

Για τον σκοπό αυτό γίνεται αποτίμηση των θεωρητικών τιμών και των βιβλιογραφικών αναφορών μέσω των προσομοιώσεων, ώστε να βγουν σχετικά συμπεράσματα. Ακολούθως παρουσιάζεται η οικονομική προσέγγιση σχετικά με το κόστος λειτουργίας σε δεδομένα σενάρια εφαρμογών που ανταποκρίνονται στην πραγματικότητα.

Λέξεις – κλειδιά

Κινητήριο σύστημα, ασύγχρονος κινητήρας, προσομοίωση, Simulink, έλεγχος κινητήρα, ποιότητα ισχύος, κόστος λειτουργίας

Abstract

In this postgraduate thesis, an attempt is made to approach the asynchronous motors driven systems under the perspective of their energy consumption profile. Motor driven systems using asynchronous motors to date make up the majority of applications and constitute a significant consumption of electrical energy worldwide, in order to provide useful work in a variety of applications.

First of all, it is necessary to consider and understand the standard that defines and categorizes a motor driven system as a whole, according to energy consumption based on its performance. This standard through the regulations it defines, gives the incentive to an energy approach and upgrade of equipment.

The energy approach requires continuous optimizations of the equipment and continuous evaluation on the disadvantages and advantages of each upgrade made. Nowadays requirements are increasing, both for reasons of quality and for reasons of reliability, especially since driving and controlling loads becomes essential part of each process. The energy approach nowadays is a priority in accordance to the current regulations and so is the limitation of operating costs. In view of this priority, as well as the use of innovative and smart solutions, each system improves its reliability and the quality of its operation.

Through its feedback the operating equipment can inform the user with all useful data. The user is the one who in turn will evaluate the system and may set new operating goals for the future.

In this postgraduate thesis the first chapter presents a bibliographic reference review in asynchronous motor driven systems and then follows the part of the methodology describing the design and the parameterization of circuits and blocks for the simulation of different scenarios using four characteristic types of loads that are mostly found in motor driven applications.

For the design and simulation, the Matlab-Simulink program was used with all the tools it provides for generating graphs and values.

The aim of each of the simulations is to draw conclusions regarding the energy approach of each of the applications, their reliability, the load control method and the power quality issues of the system.

The theoretical values and bibliographic references are also evaluated through the simulations and final conclusions are drawn. Also, there is an economic approach to the operating costs for each of the scenarios, which is later presented.

Keywords

Motor driven system, asynchronous motor, Simulink, motor control, , power quality, operation costs

Περιεχόμενα

Κατάλογος Πινάκων	11
1 Εισαγωγή	12
1.1 Ο σκοπός της εργασίας	12
2 Βιβλιογραφική ανασκόπηση	14
2.1 Πρότυπα που χαρακτηρίζουν τα συστήματα κίνησης	14
2.1.1 Εισαγωγή.....	14
2.1.2 Έννοια του κινητήριου συστήματος με ασύγχρονο κινητήρα	14
2.1.3 Διεθνή πρότυπα ταξινόμησης των ηλεκτρικών κινητήρων εναλλασσόμενου ρεύματος.....	15
2.1.3.1 Κινητήρες που εμπίπτουν στο IEC / EN 60034-30-1	17
2.1.3.2 Κινητήρες που εξαιρούνται από το IEC / EN 60034-30-1	17
2.1.4 Διεθνή πρότυπα ταξινόμησης συστημάτων κίνησης με ηλεκτρικούς κινητήρες εναλλασσόμενου ρεύματος	18
2.1.5 Η προσέγγιση του εκτεταμένου ηλεκτρομηχανικού συνόλου κίνησης.....	21
2.2 Ασύγχρονοι κινητήρες - ενεργειακή προσέγγιση στην κατασκευή και την λειτουργία τους	22
2.2.1 Εισαγωγή.....	22
2.2.2 Χαρακτηριστικά της απόδοσης του ασύγχρονου κινητήρα.....	23
2.2.3 Τα είδη και η σημασία των απωλειών στους ασύγχρονους κινητήρες.....	23
2.2.4 Ανά φάση ισοδύναμο κύκλωμα και εξισώσεις μόνιμης κατάστασης.....	29
2.2.5 Η εξάρτηση του συντελεστή ισχύος από την ποιότητα της παρεχόμενης ισχύος και το φορτίο του ασύγχρονου κινητήρα.....	32
2.2.5.1 Ο συντελεστής ισχύος.....	32
2.2.5.2 Η ποιότητα ισχύος.....	33
2.2.6 Δυναμική ανάλυση του ασύγχρονου κινητήρα.....	35
2.2.6.1 Μετασχηματισμός Clarke και αντίστροφος (a, b, c σε α,β)	36
2.2.6.2 Μετασχηματισμός Park και αντίστροφος (α, β σε d, q)	38
2.2.7 Η σημασία του κύκλου λειτουργίας στους ασύγχρονους κινητήρες	39
2.2.8 Σχεδιασμός βελτίωσης της απόδοσης στους ασύγχρονους κινητήρες	40
2.2.8.1 Κατασκευή του στάτη και του δρομέα	41
2.2.8.2 Υλικό του πυρήνα	42
2.2.8.3 Κατασκευή του διακένου.....	43
2.2.8.4 Ανεμιστήρας ψύξης	43
2.2.8.5 Έδρανα κύλισης.....	43
2.3 Οδήγηση και έλεγχος σε εφαρμογές με ασύγχρονους κινητήρες.....	44
2.3.1 Εισαγωγή.....	44
2.3.2 Τα πλεονεκτήματα των μονάδων ελέγχου στροφών	45
2.3.3 Οι διακόπτες ισχύος που χρησιμοποιούνται στα κυκλώματα των μονάδων ελέγχου στροφών.....	46
2.3.4 Οι λειτουργίες μιας μονάδας ελέγχου στροφών	47
2.3.4.1 Κίνηση τεσσάρων τεταρτημόριων.....	47
2.3.4.2 Τρόποι πέδησης με μονάδα ελέγχου στροφών	48
2.3.5 Κατηγοριοποίηση των μονάδων ελέγχου στροφών.....	50
2.3.5.1 EP/ΣP/EP (DC Linked Inverter)	50
2.3.6 Απόδοση και απώλειες των έμμεσων μετατροπέων	53
2.3.6.1 Θερμότητα και απώλειες ισχύος	53
2.3.6.2 Απώλειες αγωγιμότητας.....	53
2.3.6.3 Απώλειες μεταγωγής.....	54
2.3.6.4 Απώλειες διαύλου DC.....	54
2.3.6.5 Αρμονικές	55

2.3.7	Μέθοδοι αυτομάτου ελέγχου του συστήματος	56
2.3.7.1	Έλεγχος ανοιχτού βρόχου	56
2.3.7.2	Έλεγχος κλειστού βρόχου	57
2.3.7.3	Έλεγχος διαδοχικός κλειστού βρόχου (Cascaded)	57
2.3.8	Τεχνικές διαμόρφωσης για μετατροπείς ισχύος.....	58
2.3.8.1	Έλεγχος ρεύματος με ζώνη υστέρησης (HBCC).....	59
2.3.8.2	Έλεγχος με διαμόρφωση διανυσμάτων χώρου PWM (SV-PWM).....	61
2.3.9	Μέθοδοι ελέγχου οδήγησης των κινητήρων.....	64
2.3.9.1	Κλιμακωτός Έλεγχος (Scalar Control)	64
2.3.9.2	Διανυσματικός Έλεγχος (Field Oriented Control).....	68
2.3.9.3	Άμεσος Έλεγχος Ροπής (Direct Torque Control)	72
3	Μεθοδολογία, ανάλυση σεναρίων, παρουσίαση διαγραμμάτων, υπολογισμοί και παραμετροποίηση σε περιβάλλον Matlab-Simulink.....	75
3.1	Χαρακτηριστικά και βασικές καμπύλες φορτίου	75
3.2	Κυκλώματα, σενάρια ελέγχου και τα είδη των φορτίων τα οποία θα χρησιμοποιηθούν στην προσομοίωση σε περιβάλλον Simulink/Matlab.....	78
3.3	Αναφορά των κύριων σχηματικών διαγραμμάτων που σχεδιάστηκαν για την προσομοίωση	82
3.4	Αναφορά στο σενάριο σύγκρισης όμοιας ισχύος κινητήρων 4kW διαφορετικής ενεργειακής κατηγορίας	85
3.4.1	Παρουσίαση του κυκλώματος της προσομοίωσης	85
3.5	Αναφορά στο σενάριο με τη σύγκριση συστήματος μονάδας ελέγχου Scalar Control SV- PWM –κινητήρα, με όμοιο κινητήρα 4kW με απ’ ευθείας τροφοδοσία από το δίκτυο ...	87
3.5.1	Αναφορά, υπολογισμοί και παραμετροποίηση του κυκλώματος προσομοίωσης του συστήματος μονάδας ελέγχου - κινητήρα.....	88
3.5.2	Παρουσίαση του κυκλώματος προσομοίωσης.....	91
3.6	Αναφορά στο σενάριο με τη σύγκριση συστήματος μονάδας ελέγχου Field Oriented Control–κινητήρα, με όμοιο κινητήρα 4kW με απ’ ευθείας τροφοδοσία από το δίκτυο .	93
3.6.1	Αναφορά, υπολογισμοί και παραμετροποίηση του κυκλώματος προσομοίωσης του συστήματος μονάδας ελέγχου-κινητήρα.....	94
3.6.2	Παρουσίαση του κυκλώματος προσομοίωσης.....	96
3.7	Αναφορά στο σενάριο με τη σύγκριση συστήματος μονάδας ελέγχου Direct Torque Control–κινητήρα, με όμοιο κινητήρα 4kW με απ’ ευθείας τροφοδοσία από το δίκτυο .	98
3.7.1	Αναφορά, υπολογισμοί και παραμετροποίηση του κυκλώματος προσομοίωσης του συστήματος μονάδας ελέγχου-κινητήρα.....	99
3.7.2	Παρουσίαση του κυκλώματος προσομοίωσης.....	101
4	Αποτελέσματα προσομοιώσεων, παρατηρήσεις και συμπεράσματα.....	104
4.1	Η προσομοίωση για την επαλήθευση της θεωρητικής με την πραγματική συμπεριφορά των κινητήρων μετά την παραμετροποίηση τους	104
4.2	Προσομοίωση εφαρμογών κίνησης , διαφορετικά σενάρια με σύγκριση κινητήρων ίδιας ισχύος 4kW και διαφορετικής ενεργειακής κλάσης	112
4.2.1	1 ^η Εφαρμογή αύξηση της ροπής αναλόγως με το τετράγωνο των στροφών (φυγοκεντρικός ανεμιστήρας).....	112
4.2.2	2 ^η Εφαρμογή γραμμική αύξηση της ροπής (αντλία παραγωγής πολτού).....	115
4.2.3	3 ^η Εφαρμογή σταθερή ροπή ανεξαρτήτως από την ταχύτητα (κοχλιωτός συμπιεστής).....	117
4.2.4	4 ^η Εφαρμογή, μείωση της ροπής συναρτήσει των στροφών (περιστροφικός μηχανισμός κοπής)	120
4.2.5	Παρατηρήσεις και συμπεράσματα σε σχέση με την σύγκριση διαφορετικής ενεργειακής κλάσης κινητήρων για διαφορετικούς τύπους φορτίων.....	122
4.2.6	Μελέτη εξοικονόμησης ενέργειας και κόστους στην περίπτωση χρήσης των επαγωγικών κινητήρων	123

4.3	Σύγκριση συστήματος μονάδας ελέγχου Scalar Control SV-PWM -κινητήρα με όμοιο κινητήρα 4kW με απ' ευθείας τροφοδοσία από το δίκτυο	125
4.3.1	1 ^η Εφαρμογή, φυγοκεντρικός ανεμιστήρας για ανακύκλωση αέρα σε χώρο αποθήκης.	125
4.3.1.1	Μελέτη εξοικονόμησης ενέργειας και κόστους στην περίπτωση χρήσης μονάδας ελέγχου στροφών Scalar Control SV-PWM για τον φυγοκεντρικό ανεμιστήρα.	134
4.3.2	2 ^η Εφαρμογή, αντλία παραγωγής πολτού σε παραγωγική μονάδα.....	134
4.3.2.1	Εξοικονόμηση ενέργειας και κόστους στην περίπτωση χρήσης μονάδας ελέγχου στροφών Scalar Control SV-PWM για την αντλία.....	144
4.3.3	3 ^η Εφαρμογή, συμπιεστής κοχλιωτός μικρής ισχύος σε μονάδα παραγωγής.....	145
4.3.3.1	Εξοικονόμηση ενέργειας και κόστους στην περίπτωση χρήσης μονάδας ελέγχου στροφών Scalar Control SV-PWM για τον κοχλιωτό συμπιεστή.....	152
4.4	Σύγκριση συστήματος μονάδας ελέγχου Field-Oriented Control -κινητήρα με όμοιο κινητήρα 4kW με απ' ευθείας τροφοδοσία από το δίκτυο	153
4.4.1	1 ^η Εφαρμογή, φυγοκεντρικός ανεμιστήρας για ανακύκλωση αέρα σε χώρο αποθήκης.	153
4.4.1.1	Εξοικονόμηση ενέργειας και κόστους στην περίπτωση χρήσης μονάδας ελέγχου στροφών Field-Oriented Control για τον φυγοκεντρικό ανεμιστήρα.	162
4.4.2	2 ^η Εφαρμογή, αντλία παραγωγής πολτού σε παραγωγική μονάδα.....	163
4.4.2.1	Εξοικονόμηση ενέργειας και κόστους στην περίπτωση χρήσης μονάδας ελέγχου στροφών Field-Oriented Control για την αντλία.	172
4.4.3	3 ^η Εφαρμογή, συμπιεστής κοχλιωτός μικρής ισχύος σε μονάδα παραγωγής.....	173
4.4.3.1	Εξοικονόμηση ενέργειας και κόστους στην περίπτωση χρήσης μονάδας ελέγχου στροφών Field-Oriented Control για τον κοχλιωτό συμπιεστή.	182
4.5	Σύγκριση συστήματος μονάδας ελέγχου Direct torque control -κινητήρα, με όμοιο κινητήρα 4kW με απ' ευθείας τροφοδοσία από το δίκτυο	184
4.5.1	1 ^η Εφαρμογή, φυγοκεντρικός ανεμιστήρας για ανακύκλωση αέρα σε χώρο αποθήκης.	184
4.5.1.1	Εξοικονόμηση ενέργειας και κόστους στην περίπτωση χρήσης μονάδας ελέγχου στροφών Direct Torque Control για τον φυγοκεντρικό ανεμιστήρα.	193
4.5.2	2 ^η Εφαρμογή, αντλία παραγωγής πολτού σε παραγωγική μονάδα.....	194
4.5.2.1	Εξοικονόμηση ενέργειας και κόστους στην περίπτωση χρήσης μονάδας ελέγχου στροφών Direct Torque Control για την αντλία.	204
4.5.3	3 ^η Εφαρμογή, συμπιεστής κοχλιωτός μικρής ισχύος σε μονάδα παραγωγής.....	204
4.5.3.1	Εξοικονόμηση ενέργειας και κόστους στην περίπτωση χρήσης μονάδας ελέγχου στροφών Direct Torque Control για τον κοχλιωτό συμπιεστή.	214
5	Παρατηρήσεις και τελικά συμπεράσματα	216
5.1	Προτάσεις για περαιτέρω διερεύνηση	220
6	Βιβλιογραφία	220

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1 Οι δέκα χαρακτηριστικοί τύποι λειτουργίας ενός ηλεκτρικού κινητήρα.....	[40]
Πίνακας 2 Τα σενάρια προσομοίωσης, Δείχνονται τα κυκλώματα της προσομοίωσης και οι τύποι των διαφορετικών φορτίων που θα χρησιμοποιηθούν.....	[79]
Πίνακας 3 Οι απαιτήσεις της εφαρμογής για τον φυγοκεντρικό ανεμιστήρα και τα θεωρητικά οφέλη της χρήσης μονάδας ελέγχου-κινητήρα.....	[80]
Πίνακας 4 Οι απαιτήσεις της εφαρμογής για την αντλία πολτού και τα θεωρητικά οφέλη της χρήσης μονάδας ελέγχου-κινητήρα.....	[81]
Πίνακας 5 Οι απαιτήσεις της εφαρμογής για τον κοχλιωτό συμπιεστή και τα θεωρητικά οφέλη της χρήσης μονάδας ελέγχου-κινητήρα.....	[81]
Πίνακας 6 Αποτελέσματα προσομοίωσης για τον κινητήρα 4kW με ενεργειακή Κλάση IE1	[111]
Πίνακας 7 Αποτελέσματα προσομοίωσης για τον κινητήρα 4kW με ενεργειακή Κλάση IE4.....	[111]
Πίνακας 8 Ονομαστικά χαρακτηριστικά των κινητήρων της προσομοίωσης και τα πραγματικά χαρακτηριστικά τα οποία παρατίθενται από κατάλογο μεγάλου κατασκευαστή μηχανών.....	[112]
Πίνακας 9 Απαιτήσεις της εφαρμογής βάσει του πίνακα 3 και οι τιμές που προκύπτουν από την προσομοίωση της χρήσης μονάδας ελέγχου Scalar Control SV-PWM –κινητήρα.....	[133]
Πίνακας 10 Απαιτήσεις της εφαρμογής βάσει του πίνακα 4 και οι τιμές που προκύπτουν από την προσομοίωση της χρήσης μονάδας ελέγχου Scalar Control SV-PWM –κινητήρα.....	[144]
Πίνακας 11 Απαιτήσεις της εφαρμογής βάσει του πίνακα 5 και οι τιμές που προκύπτουν από την προσομοίωση της χρήσης μονάδας ελέγχου Scalar Control SV-PWM –κινητήρα.....	[151]
Πίνακας 12 Απαιτήσεις της εφαρμογής βάσει του πίνακα 3 και οι τιμές που προκύπτουν από την προσομοίωση της χρήσης μονάδας ελέγχου F.O.C –κινητήρα.....	[162]
Πίνακας 13 Απαιτήσεις της εφαρμογής βάσει του πίνακα 4 και οι τιμές που προκύπτουν από την προσομοίωση της χρήσης μονάδας ελέγχου F.O.C –κινητήρα.....	[172]
Πίνακας 14 Απαιτήσεις της εφαρμογής βάσει του πίνακα 5 και οι τιμές που προκύπτουν από την προσομοίωση της χρήσης μονάδας ελέγχου F.O.C –κινητήρα.....	[182]
Πίνακας 15 Απαιτήσεις της εφαρμογής βάσει του πίνακα 3 και οι τιμές που προκύπτουν από την προσομοίωση της χρήσης μονάδας ελέγχου D.T.C –κινητήρα.....	[193]
Πίνακας 16 Απαιτήσεις της εφαρμογής βάσει του πίνακα 4 και οι τιμές που προκύπτουν από την προσομοίωση της χρήσης μονάδας ελέγχου D.T.C –κινητήρα.....	[203]
Πίνακας 17 Απαιτήσεις της εφαρμογής βάσει του πίνακα 5 και οι τιμές που προκύπτουν από την προσομοίωση της χρήσης μονάδας ελέγχου D.T.C –κινητήρα.....	[214]
Πίνακας 18 Η εξοικονόμηση της ενέργειας επί τις % για κάθε τύπο μονάδας ελέγχου και κάθε τύπο φορτίου.....	[217]
Πίνακας 19 Η εξοικονόμηση του κόστους λειτουργίας σε € για κάθε τύπο μονάδας ελέγχου και κάθε τύπο φορτίου.....	[218]
Πίνακας 20 Η αρμονική παραμόρφωση της έντασης επί τις % στον στάτη του κινητήρα για κάθε τύπο μονάδας ελέγχου και κάθε τύπο φορτίου.....	[218]
Πίνακας 21 Η αρμονική παραμόρφωση της έντασης επί τις % στην τροφοδοσία, επηρεάζοντας την ποιότητα ισχύος για κάθε τύπο μονάδας ελέγχου και κάθε τύπο φορτίου.....	[218]

1 Εισαγωγή

Η παρούσα μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία αποτελεί μια προσπάθεια προσέγγισης με σύγχρονο τρόπο των κινητήριων συστημάτων με ασύγχρονους κινητήρες. Ένα κινητήριο σύστημα είναι ένα ηλεκτρομηχανικό σύνολο το οποίο παράγει έργο. Τα κινητήρια συστήματα εναλλασσόμενου ρεύματος ακολουθούν κανονισμούς που ορίζουν οι θεσμοί ενεργειακής πολιτικής και ως εκ τούτου κατατάσσονται σε κάποιες κατηγορίες. Η προσπάθεια για τον περιορισμό του αποτυπώματος άνθρακα και η εξέλιξη της τεχνολογίας έχουν βελτιστοποιήσει τις εφαρμογές κίνησης ως προς την απόδοση, το κόστος λειτουργίας και της αξιοπιστίας τους. Οι εφαρμογές κίνησης πλέον θεωρούνται ένα σύνολο το οποίο απαρτίζεται από ηλεκτρονικά ισχύος, συστήματα αυτομάτου ελέγχου και τον απαραίτητο ηλεκτρομηχανικό εξοπλισμό.

Το πρώτο κεφάλαιο αποτελεί μια εισαγωγή με αναφορά στην εργασία και τα επιμέρους κεφάλαιά της.

Το δεύτερο κεφάλαιο αποτελεί τη βιβλιογραφική ανασκόπηση της εργασίας. Στην πρώτη υποενότητα παρουσιάζονται τα πρότυπα τα οποία χαρακτηρίζουν τα κινητήρια συστήματα. Αναφέρεται στην αξιολόγηση του εξοπλισμού, πώς αυτό γίνεται και για ποιόν λόγο. Παρουσιάζεται και η προσέγγιση του κινητήριου συστήματος ως ένα εκτεταμένο ηλεκτρομηχανικό σύνολο, το οποίο αποτελεί την μεγάλη εικόνα ενός πολύπλοκου συνόλου. Στη δεύτερη υποενότητα παρουσιάζονται κατασκευαστικά και λειτουργικά στοιχεία για τους ασύγχρονους κινητήρες. Ακόμη γίνεται θεωρητική ανάλυση όπου παρουσιάζονται ισοδύναμα κυκλώματα και χαρακτηριστικές σχέσεις ώστε να κατανοηθούν έννοιες σχετικές με την κατασκευαστική βελτίωση και τη βέλτιστη χρήση τους. Στην τρίτη υποενότητα γίνεται αναφορά στον εξοπλισμό οδήγησης των ασύγχρονων κινητήρων. Παρουσιάζονται συνοπτικά στοιχεία σχετικά με τα ηλεκτρονικά ισχύος, οι κυκλωματικές τοπολογίες, ο τρόπος αυτομάτου ελέγχου και η λογική της οδήγησης τους. Ακόμη παρουσιάζονται τα μειονεκτήματα και τα πλεονεκτήματα που μπορούν να έχουν αυτές οι συσκευές.

Το τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζει την μεθοδολογία της εργασίας όπου παρουσιάζονται τα σενάρια τα οποία μελετήθηκαν μέσω της προσομοίωσής τους. Παρουσιάζονται τα κυκλώματα που σχεδιάστηκαν για την προσομοίωση με το λογισμικό Simulink/Matlab. Παρουσιάζονται οι υπολογισμοί και η παραμετροποίηση των διαγραμμάτων που χρησιμοποιήθηκαν και ποιος ο λόγος για τον οποίο βρίσκονται στο κάθε κύκλωμα. Σε κάθε σενάριο γίνεται χρήση διαφορετικού εξοπλισμού με διαφορετικά χαρακτηριστικά φορτίου και αυτό παρουσιάζεται δίνοντας τα απαραίτητα στοιχεία για το κάθε κύκλωμα το οποίο θα χρησιμοποιηθεί στην προσομοίωση.

Το τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζει τα αποτελέσματα των σεναρίων προσομοίωσης, παρουσιάζονται τα γραφήματα των μεγεθών που εξετάζονται, γίνεται σύγκριση όπου χρειάζεται με στοιχεία της θεωρίας και βγαίνουν σχετικά συμπεράσματα. Ακόμη γίνεται υπολογισμός κόστους της κάθε εφαρμογής και γίνεται οικονομική αξιολόγηση σε σχέση με το εκάστοτε σύστημα αναφοράς.

Το πέμπτο κεφάλαιο είναι το κεφάλαιο των τελικών συμπερασμάτων όπου παρουσιάζονται συνοπτικά συγκριτικοί πίνακες και τελικά συμπεράσματα, καθώς και σκέψεις σε σχέση με τα αποτελέσματα της εργασίας.

1.1 Ο σκοπός της εργασίας

Ο σκοπός της εργασίας είναι να γίνει ενεργειακή προσέγγιση και οικονομική αξιολόγηση των εφαρμογών κίνησης οι οποίες εξετάζονται και να βρεθεί για την κάθε περίπτωση η βέλτιστη τεχνική για την κάθε εφαρμογή. Αυτό είναι ένα ζητούμενο το οποίο τίθεται στην καθημερινότητα,

σε εγκατεστημένες εφαρμογές κίνησης στην βιομηχανία και στον τριτογενή τομέα κτιρίων. Οι περιπτώσεις των φορτίων που επιλέχθηκαν στην εργασία είναι χαρακτηριστικές και απαντώνται στην πλειονότητα των εφαρμογών.

Τα ερωτήματα που τίθενται στην εργασία, είναι σχετικά τον τρόπο προσέγγισης και αντιμετώπισης για διαφορετικές περιπτώσεις εφαρμογών κίνησης. Μπορούν να αντιμετωπιστούν όλες οι περιπτώσεις των εφαρμογών κίνησης με τον ίδιο τρόπο; Υπάρχει μια καθολική λύση στο ζήτημα της βελτιστοποίησης των συστημάτων κίνησης; Αν όχι τότε ποια είναι η προσέγγιση που χρειάζεται να ακολουθείται σε κάθε περίπτωση και από τί εξαρτάται; Κάθε τεχνολογική εξέλιξη του εξοπλισμού, η οποία είναι εμπορικά διαθέσιμη, προσφέρεται χωρίς μειονεκτήματα; Ποιά είναι αυτά τα μειονεκτήματα και ποιος ο τρόπος αντιμετώπισής τους; Ποια είναι τα λάθη που συμβαίνουν κατά την λειτουργία των συστημάτων κίνησης και πώς τα επηρεάζουν;

Στα παραπάνω ερωτήματα γίνεται προσπάθεια να δοθούν επαρκής απαντήσεις με βάση το θεωρητικό τμήμα και το τμήμα των υπολογισμών και της προσομοίωσης της εργασίας.

2 Βιβλιογραφική ανασκόπηση

2.1 Πρότυπα που χαρακτηρίζουν τα συστήματα κίνησης

2.1.1 Εισαγωγή

Σε παγκόσμια κλίμακα, εκτιμάται ότι 300 εκατομμύρια βιομηχανικοί κινητήρες λειτουργούν σε πλήρες φορτίο για μεγάλες χρονικές περιόδους .

Οι ηλεκτρικοί κινητήρες θεωρούνται δεδομένη τεχνολογία όμως παραμένουν μεταξύ των λιγότερο καλά διαχειριζόμενων στοιχείων εξοπλισμού. Οι εφαρμογές κίνησης αντιστοιχούν περίπου στο 70% της ηλεκτρικής ενέργειας που καταναλώνεται από τις βιομηχανικές διεργασίες και αυτή η ζήτηση τείνει να αυξάνει ετησίως.

Ο IEA (International Energy Agency) εκτιμά ότι το 53% της παγκόσμιας ηλεκτρικής ενέργειας, δηλαδή 10.700 TWh, ετησίως, καταναλώνεται από συστήματα ηλεκτρικής κίνησης, προκαλώντας 6.960 Mt εκπομπών CO₂. Εάν η παγκόσμια αγορά ευθυγραμμιστεί με τα ενεργειακά πρότυπα χρήσης, υπάρχει δυνατότητα να μειωθεί η παγκόσμια ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας κατά 20%-30% για τα συστήματα κίνησης ως το 2030.

Οι ασύγχρονοι κινητήρες αποτελούν περίπου το 95% των εγκατεστημένων κινητήρων σε παγκόσμια βάση. Άρα ο έλεγχος αυτών των κινητήρων έχει μεγάλη σημασία. Παρακάτω θα αναλυθεί ο ορισμός της έννοιας του κινητήριου συστήματος και θα γίνει αναφορά στα διεθνή πρότυπα ενεργειακής απόδοσης από τα οποία χαρακτηρίζεται [1,2].

2.1.2 Έννοια του κινητήριου συστήματος με ασύγχρονο κινητήρα

Ένας κινητήρας μπορεί να αποτελεί κομμάτι ενός μεγαλύτερου συνόλου ενός ηλεκτρομηχανικού συστήματος. Αυτό ονομάζεται κινητήριο σύστημα και απαρτίζεται από συγκεκριμένες βαθμίδες εξοπλισμού.

Παρακάτω αναφέρονται συνοπτικά οι βαθμίδες εξοπλισμού για τις οποίες θα γίνει λεπτομερής προσέγγισή στην πορεία της εργασίας:

- Εκκίνηση και έλεγχος με μονάδα ελέγχου στροφών

Εάν απαιτείται η εκκίνηση ενός κινητήρα μεγάλης ισχύος και κατά την λειτουργία του, η ταχύτητα του πρέπει να αυξομειώνεται σύμφωνα με τις ανάγκες του φορτίου, μπορεί να ενσωματωθεί στο σύστημα μια μονάδα ελέγχου στροφών αντί άλλων συμβατικών μεθόδων ελέγχου.

- Ασύγχρονος κινητήρας

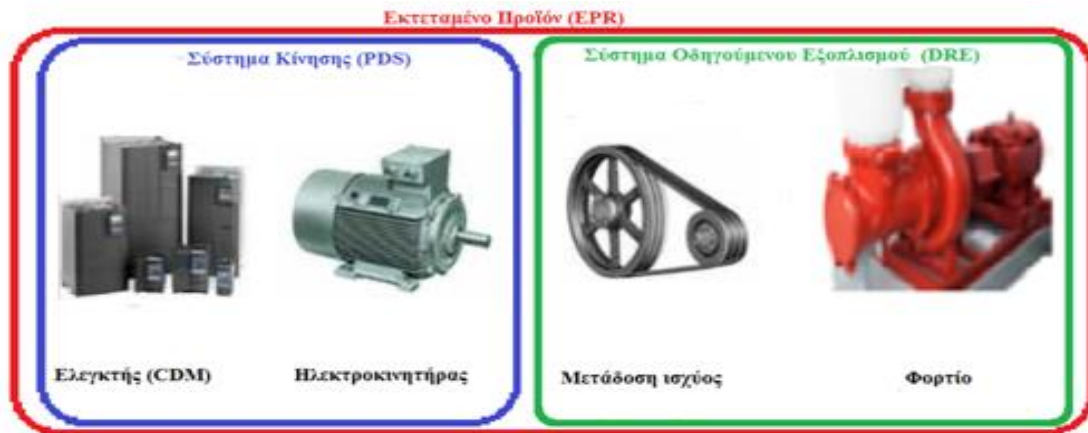
Η μηχανή η οποία εξυπηρετεί το φορτίο ασκώντας ορισμένη ροπή σε ορισμένη γωνιακή ταχύτητα. Τα χαρακτηριστικά του σε κάθε εφαρμογή εξαρτώνται από τις απαιτήσεις του φορτίου και του χώρου στον οποίο θα εγκατασταθεί και θα λειτουργήσει.

- Μετάδοση ισχύος

Ο άξονας του κινητήρα μπορεί να συνδεθεί στο φορτίο με κάποιου είδους μηχανική ζεύξη, με κιβώτιο ταχυτήτων, με ιμάντα και τροχαλία ή με αλυσίδα και γρανάζια. Ακόμη μπορεί να χρησιμοποιείται ένας ηλεκτρομαγνητικός συμπλέκτης για αποσύνδεση του φορτίου και ηλεκτρικό φρένο για άμεση πέδηση του κινητήρα.

- Φορτίο

Με βάση τις απαιτήσεις του φορτίου προσδιορίζονται, ο έλεγχος, ο ηλεκτροκινητήρας και η μηχανική μετάδοση ισχύος. Το φορτίο μπορεί να είναι μια αντλία, ένας ανεμιστήρας, ένας συμπιεστής αερίου, ένας μεταφορέας για την κίνηση υλικών σε μια γραμμή παραγωγής



Σχήμα 2.1 Οι ορισμοί για κάθε σύνολο εξοπλισμού όπως προκύπτουν από τα διεθνή πρότυπα. Το σύστημα ελεγκτή-κινητήρα (PDS: Power Drive System), το σύστημα του οδηγούμενου φορτίου (DRE: Driven Equipment) και το εκτεταμένο ηλεκτρομηχανικό σύνολο του κινητήριου συστήματος (EPR: extended product), ($EPR = PDS + DRE$)

Αναγνωρίζοντας την σημασία της εξοικονόμησης ενέργειας αντιμετωπίζεται η ενεργειακή απόδοση ενός κινητήριου συστήματος ως ένα εκτεταμένο ηλεκτρομηχανικό σύνολο. Αυτό έχει οδηγήσει στη σύνταξη προτύπων που αντιμετωπίζουν αυτό το θέμα, με συγκεκριμένη μεθοδολογία για τον υπολογισμό και την ταξινόμηση της ενεργειακής απόδοσης του κάθε συστήματος.

2.1.3 Διεθνή πρότυπα ταξινόμησης των ηλεκτρικών κινητήρων εναλλασσόμενου ρεύματος

Η Διεθνής Ηλεκτροτεχνική Επιτροπή (IEC) είναι διεθνής οργάνωση προτύπων που προετοιμάζει και δημοσιεύει πρότυπα για ηλεκτρικό εξοπλισμό. Το EU MEPS (Ευρωπαϊκό Πρότυπο Ελάχιστης Ενεργειακής Απόδοσης) θεσπίστηκε με τον Κανονισμό ΕΚ 640/2009. Ο κανονισμός αυτός άλλαξε την ευρωπαϊκή αγορά κινητήρων το 2011, καθιστώντας την κατηγορία απόδοσης IE2 ως την υποχρεωτικά ελάχιστη κατηγορία απόδοσης για τους νέους κινητήρες που διατίθενται στην αγορά. Ενημερώθηκε το 2014 με τον κανονισμό ΕΕ 4/2014 της Επιτροπής, ο οποίος εξάλειψε προβλήματα που υπήρχαν στον αρχικό κανονισμό. Αυτοί οι κανονισμοί από κοινού καθορίζουν τα ελάχιστα επίπεδα απόδοσης για τους ηλεκτροκινητήρες που εισάγονται στην ευρωπαϊκή αγορά. Την 1η Ιανουαρίου 2015 η Ευρώπη έκανε το επόμενο βήμα, όταν η κατηγορία απόδοσης IE3 έγινε η ελάχιστη υποχρεωτική για τους τριφασικούς επαγωγικούς κινητήρες μιας ταχύτητας, με ισχύ από 7,5 έως 375 kW οι οποίοι πρόκειται να λειτουργούν απ' ευθείας από το δίκτυο (DOL). Οι κινητήρες IE2 άνω των 7,5 kW εξακολουθούν να διατίθενται στην αγορά, αλλά υποχρεωτικά για λειτουργία με χρήση μονάδας ελέγχου στροφών (VFD).

Για την ταξινόμηση της απόδοσης των κινητήρων που κατασκευάζονται και πωλούνται στην παγκόσμια αγορά, η Διεθνής Ηλεκτροτεχνική Επιτροπή (IEC) εισήγαγε το πρότυπο IEC 60034-30: 2008, το οποίο ενημερώθηκε το 2014 και αναφέρεται τώρα ως IEC 60034-30-1: 2014,

«Στρεφόμενες ηλεκτρικές μηχανές - 30-1: Κατηγορίες απόδοσης κινητήρων εναλλασσόμενου ρεύματος». Το πρότυπο καθορίζει τις ελάχιστες απαιτήσεις χρήσης για τις κατηγορίες απόδοσης και στοχεύει στη δημιουργία κανονισμών και την διεθνή ευθυγράμμιση με αυτούς.

Εκτός από τον καθορισμό των κατηγοριών απόδοσης για ηλεκτρικούς κινητήρες, το IEC έχει αναπτύξει ένα πρότυπο που καθορίζει τον τρόπο προσδιορισμού της απόδοσης του κινητήρα και των απωλειών με δεδομένες μεθόδους δοκιμών. Αυτό είναι το πρότυπο, IEC 60034-2-1: 2014 και παρέχει τη βάση για τον ορισμό των κατηγοριών απόδοσης στο IEC 60034-30-1.

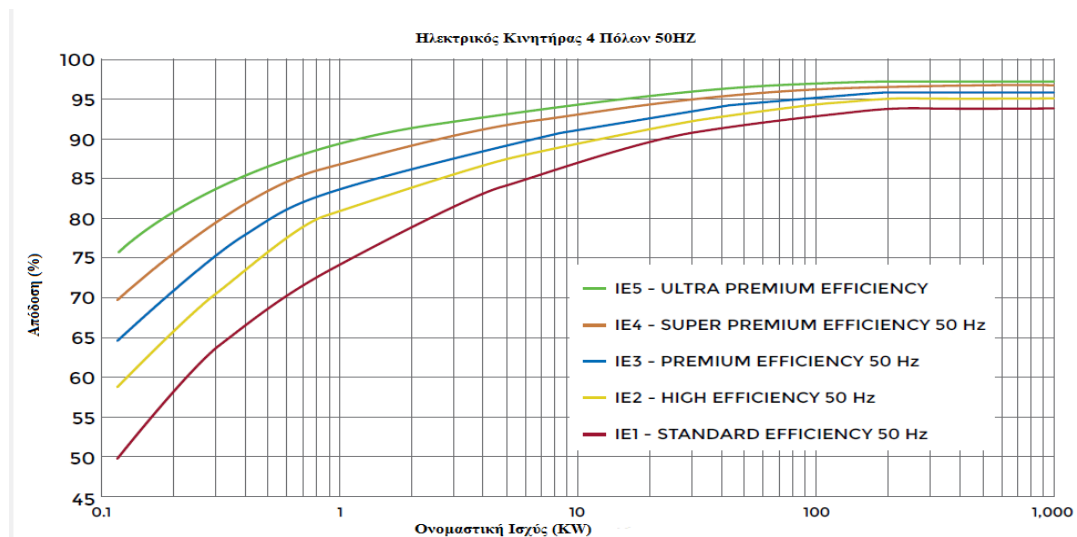
Και τα δύο πρότυπα αναπτύχθηκαν σε συνδυασμό με την Αμερικάνικη Εθνική Ένωση Κατασκευαστών (NEMA), την Ιαπωνική Ένωση Κατασκευαστών (JEMA) και την Ευρωπαϊκή Επιτροπή Κατασκευαστών Ηλεκτρικών Μηχανών και Ηλεκτρονικών Συστημάτων Ισχύος (CEMEP).

Οι κλάσεις IE1 έως IE4, όπως ορίζονται στο διεθνές πρότυπο IEC 60034-30-1, παρέχουν πληροφορίες σχετικά με την απόδοση του κινητήρα στο ονομαστικό σημείο λειτουργίας του. Αυτό επιτρέπει την ταξινόμηση της ενεργειακής απόδοσης του κινητήρα, αλλά δεν παρέχει πληροφορίες σχετικά με τις ιδιότητές του στο εύρος λειτουργίας του και κυρίως υπό μερικό φορτίο.

Οι ηλεκτρικοί κινητήρες κατηγοριοποιούνται με βάση την ενεργειακή τους απόδοση, ως:

- IE1 (χαμηλή απόδοση)
- IE2 (στάνταρ απόδοση)
- IE3 ή IE4 (υψηλότερη απόδοση)

Οι φορείς χάραξης της ενεργειακής πολιτικής υιοθετούν ένα από αυτά τα επίπεδα απόδοσης ως την ελάχιστη απαίτηση σε μια χώρα. Σε αυτό το πρότυπο, προτείνεται και μια πρόσθετη κατηγορία IE5 (Ultra-Premium), αλλά ακόμη δεν έχει οριστεί. Ο στόχος είναι η περαιτέρω μείωση των απωλειών των κινητήρων κλάσης IE5 έως και 20% σε σχέση με την κατηγορία IE4. Στο σχήμα 2.2 δίνεται διάγραμμα με κινητήρες διαφορετικής ενεργειακής απόδοσης.



Σχήμα 2.2 Η απόδοση των κινητήρων σε σχέση με την ονομαστική ισχύ εξόδου τους. Η σύγκριση της απόδοσης γίνεται για τις πέντε κατηγορίες απόδοσης (IE1, IE2, IE3, IE4 και IE5) παρουσιάζονται για ηλεκτρικούς κινητήρες με 4 πόλους που λειτουργούν στα 50 Hz Πηγή: “Energy-Efficient Electric Motors And Motor Systems-Un Environment”

2.1.3.1 Κινητήρες που εμπίπτουν στο IEC / EN 60034-30-1

Το εύρος ισχύος καλύπτει κινητήρες από 120 W έως 1000 kW. Όλοι οι τύποι κατασκευής των ηλεκτρικών κινητήρων καλύπτονται και αξιολογούνται στην λειτουργία. απ' ευθείας από το δίκτυο. Το σύνολο του νέου προτύπου περιλαμβάνει:

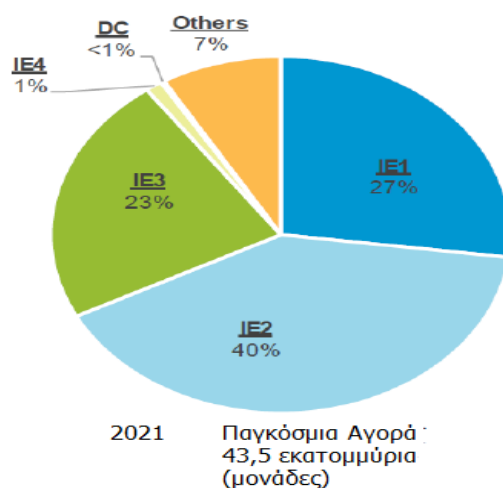
- Ηλεκτροκινητήρες μιας ταχύτητας (μονοφασικοί και τριφασικοί), 50 και 60 Hz
- Ηλεκτροκινητήρες με 2, 4, 6 ή 8 πόλους
- Ηλεκτροκινητήρες με ονομαστική έξοδο ισχύος από 0,12 kW έως 1000 kW
- Ηλεκτροκινητήρες με ονομαστική τάση άνω των 50 V έως 1 kV
- Ηλεκτροκινητήρες, με δυνατότητα συνεχούς λειτουργίας στην ονομαστική τους ισχύ με αύξηση της θερμοκρασίας εντός της καθορισμένης τάξης θερμοκρασίας μόνωσης τους
- Κινητήρες, πιστοποιημένοι για θερμοκρασία περιβάλλοντος από -20 ° C έως +60 ° C

2.1.3.2 Κινητήρες που εξαιρούνται από το IEC / EN 60034-30-1

- Ηλεκτροκινητήρες με 10 ή περισσότερους πόλους ή πολλαπλών ταχυτήτων
- Ηλεκτροκινητήρες πλήρως ενσωματωμένοι σε μηχανήμα ή συσκευή που δεν μπορούν να δοκιμαστούν ξεχωριστά από αυτό
- Ηλεκτροκινητήρες με φρένο, όταν το φρένο δεν μπορεί να αποσυναρμολογηθεί από αυτούς

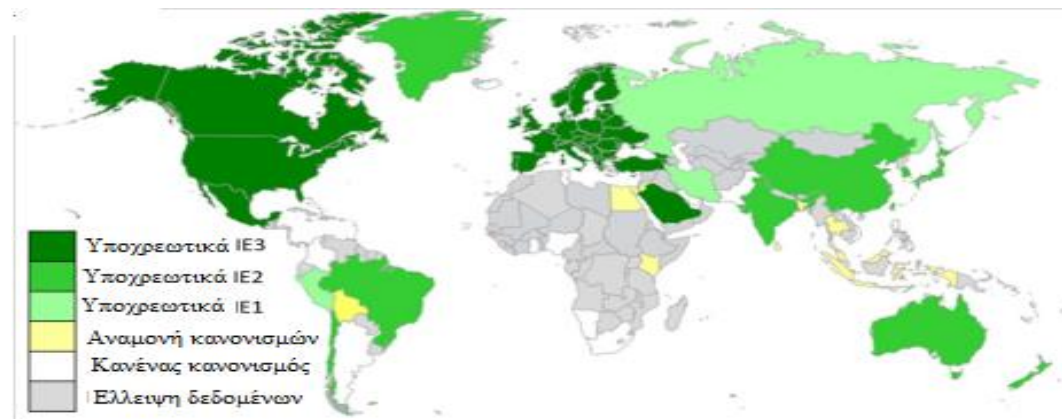
Τα πρότυπα επιτρέπουν στους κατασκευαστές και την αγορά ηλεκτρικών κινητήρων να ποσοτικοποιήσουν την ενεργειακή απόδοση. Επιτρέπει επίσης στους χρήστες των ηλεκτρικών κινητήρων να πληρούν τα απαιτούμενα MEPS στη χώρα τους, ανεξάρτητα από την προέλευση του κινητήρα [7].

Το ήδη υπάρχον απόθεμα των κινητήρων προς το παρόν εξακολουθεί να υπόκειται σε κατώτερες κατηγορίες απόδοσης σε σχέση με τους κανόνες του προτύπου, όπως φαίνεται από το σχήμα 2.3 [4].



Σχήμα 2.3 Απεικόνιση σχετικά με την παγκόσμια αγορά για τους κινητήρες χαμηλής τάσης. Η κατηγορία βασικής απόδοσης IE2, όπως φαίνεται σχήμα κυριαρχεί στην αγορά του προϊόντος με ποσοστό 40% με σύνολο 43,5 μονάδων. Πηγή "Overview of Retrofitting Options in Induction Motors", July 2018

Μεγάλος αριθμός κινητήρων σε όλον τον κόσμο δεν πληροί καν το επίπεδο IE1, όμως οι χώρες που καταναλώνουν το 76% της παγκόσμιας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας έχουν ορίσει πρότυπα όπως το MEPS (European Minimum Energy Performance Standard) για κατώτερη απόδοση ηλεκτρικών κινητήρων είτε σε επίπεδο IE2, είτε σε επίπεδο IE3. Αυτό δείχνει την διεθνή εναρμόνιση σε σχέση με ένα προϊόν που αφορά το παγκόσμιο εμπόριο. Τα πρότυπα μπορεί να διαφέρουν αναλόγως με την κατάσταση της αγοράς των διαφορετικών χωρών όπως φαίνεται στο σχήμα 2.4 [2].



Σχήμα 2.4 Η εφαρμογή του κανονισμού σχετικά με την ελάχιστη κατηγορία ενεργειακής απόδοσης κινητήρα σε παγκόσμιο επίπεδο για το έτος 2018. Πηγή "Overview of Retrofitting Options in Induction Motors", July 2018

2.1.4 Διεθνή πρότυπα ταξινόμησης συστημάτων κίνησης με ηλεκτρικούς κινητήρες εναλλασσόμενου ρεύματος

Στον τομέα της βιομηχανίας, η βελτίωση της απόδοσης των συστημάτων κίνησης θα συμβάλλει στην αποφυγή σχεδόν 3100 TWh κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας έως το 2040, μειώνοντας την αύξηση της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας σε αυτόν τον τομέα σχεδόν στο ήμισυ σε σύγκριση με το συμβατικό σενάριο ζήτησης.

Οι εφαρμογές κίνησης περιλαμβάνουν συχνότερα μονάδες ελέγχου στροφών, επιτρέποντας τον έλεγχο της ταχύτητας και της ροπής των κινητήρων που οδηγούν. Οι κινητήρες που ελέγχονται από μονάδες ελέγχου στροφών αναμένεται να ξεπεράσουν το 50% του συνόλου των κινητήρων που διατίθενται στην αγορά. Ωστόσο, οι μονάδες ελέγχου στροφών ως συσκευές έχουν απώλειες ή μπορεί να δημιουργούν πρόσθετες απώλειες στον κινητήρα. Οι απώλειες αυτές μετρούμενες ή υπολογιζόμενες στα διάφορα σημεία ταχύτητας-ροπής λειτουργίας πρέπει να προστίθενται με τις απώλειες του οδηγούμενου κινητήρα, ως ενιαίο σύστημα.

Για την αξιολόγηση της ενεργειακής απόδοσης σε επίπεδο συστήματος, η Διεθνής Ηλεκτροτεχνική Επιτροπή ανέπτυξε το πρότυπο IEC61800-9. Το νέο πρότυπο IEC αποτελείται από δύο μέρη και καθορίζει τις απαιτήσεις οικολογικού σχεδιασμού για τα συστήματα κίνησης, τους εκκινητές κινητήρων, τα ηλεκτρονικά ισχύος και τις οδηγούμενες συσκευές τους. Υπάρχουν τρία βασικά σημεία που αξίζει να αναφερθούν:

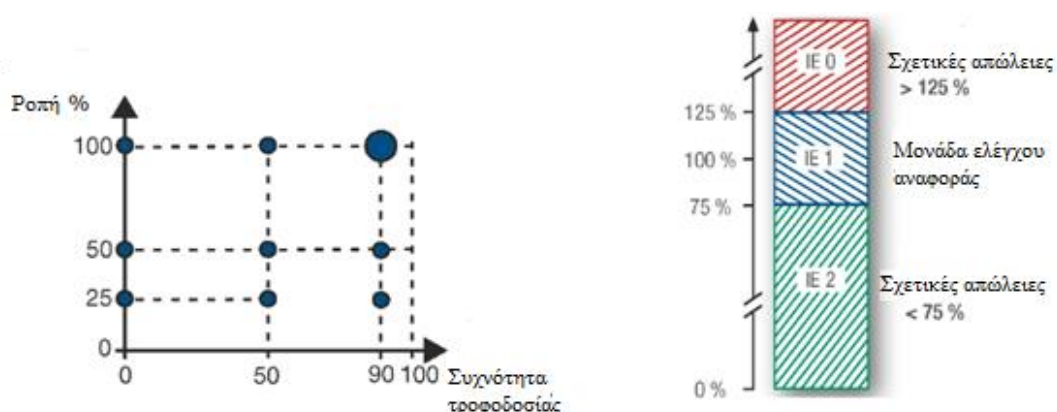
- Η προσέγγιση του εκτεταμένου ηλεκτρομηχανικού συνόλου του συστήματος.
- Η ταξινόμηση των ρυθμιστών στροφών και του κινητήριου συστήματος.
- Η απόδοση υπό μερικό φορτίο των ρυθμιστών στροφών και του κινητήριου συστήματος.

Το πρότυπο IEC61800-9. αποτελείται από δύο μέρη:

- Το 1^ο μέρος του προτύπου IEC 61800-9 καθορίζει την μεθοδολογία για το συνδυασμό των χαρακτηριστικών του κινητήρα με τα χαρακτηριστικά του οδηγούμενου εξοπλισμού, ώστε να υπολογιστεί η ενεργειακή απόδοση του συστήματος για ολόκληρη την εφαρμογή (εκτεταμένο ηλεκτρομηχανικό σύνολο κίνησης). Η απόδοση του συστήματος εκφράζεται με τον δείκτη ενεργειακής απόδοσης (EEI) για ένα καθορισμένο σενάριο με φορτίο. Επιτρέπει την σύγκριση των διαφόρων συστημάτων κινητήριου εξοπλισμού και την πραγματοποίηση βελτιστοποίησης σε επίπεδο συστήματος, επιλέγοντας τον πιο αποδοτικό συνδυασμό μονάδας ελέγχου, κινητήρα και οδηγούμενου εξοπλισμού.
- Το 2^ο μέρος του προτύπου IEC 61800-9 καθορίζει τις τάξεις απόδοσης για τις μονάδες ελέγχου στροφών (CDM: Complete Drive Module) και το σύστημα μονάδας ελέγχου - κινητήρα (PDS: Power Drive System) σε εύρος ισχύος από 0,12 έως 1.000 kW.

Για τη διαδικασία του προσδιορισμού των απωλειών του συστήματος μονάδας ελέγχου - κινητήρα (PDS) και των μονάδων ελέγχου στροφών (CDM) ορίζονται οκτώ σημεία λειτουργίας με διαφορετική ταχύτητα και ροπή φορτίου ώστε να αξιολογηθεί η ενεργειακή απόδοση κατά την λειτουργία τους, σε προκαθορισμένα σενάρια με μερικό φορτίο. Ο προσδιορισμός των απωλειών ενός CDM στα σημεία λειτουργίας του, επιτρέπει να συνυπολογιστούν αυτές με τις απώλειες του κινητήρα για τον προσδιορισμό των συνολικών απωλειών του συστήματος.

Οι κλάσεις απόδοσης (IE) για τις μονάδες ελέγχου στροφών (CDM) και σε εύρος ισχύος από 0,12 έως 1.000 kW καθορίζονται με βάση τις απώλειες της μονάδας ελέγχου στροφών (επί της % σε watt) και αξιολογούνται στο 90% της ονομαστικής συχνότητας και στο 100% του ονομαστικού ρεύματος. Το πρότυπο ορίζει το CDM αναφοράς, όπου η τιμή αναφοράς προκύπτει από τις απώλειες που αντιστοιχούν στην κλάση IE1. Άρα για ένα CDM η ενεργειακή του κλάση θα προκύψει από την σύγκριση του, σε σχέση με τις απώλειες του CDM αναφοράς. Εάν το CDM έχει 25% περισσότερες απώλειες από την τιμή αναφοράς, θα ταξινομηθεί ως IE0, εάν έχει τουλάχιστον 25% χαμηλότερες απώλειες από την αναφορά, θα ταξινομηθεί ως IE2. Έτσι καθορίζονται οι κλάσεις απόδοσης IE και συγκεκριμένα οι IE0, IE1 και IE2, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.5.

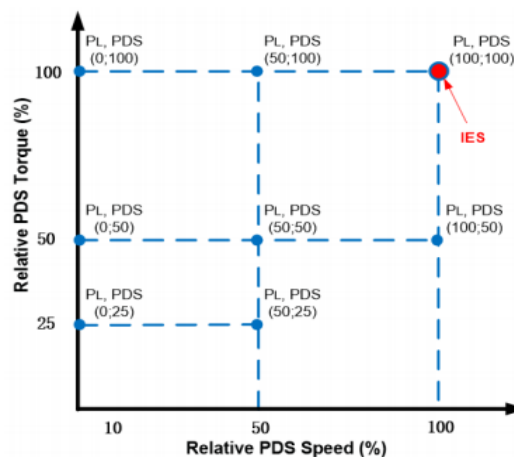


Σχήμα 2.5 Τα οκτώ σημεία λειτουργίας μιας μονάδας ελέγχου στροφών και οι κατηγορίες ενεργειακής απόδοσης που τις χαρακτηρίζουν.

Οι κατηγορίες ενεργειακής απόδοσης IE1 έως IE4 που ορίζονται στο διεθνές πρότυπο IEC 60034-30-1 προσδιορίζουν την απόδοση του κινητήρα στο ονομαστικό σημείο λειτουργίας του. Το πρότυπο IEC 61800-9-2 περιλαμβάνει δεδομένα σημεία δοκιμών για τους κινητήρες για

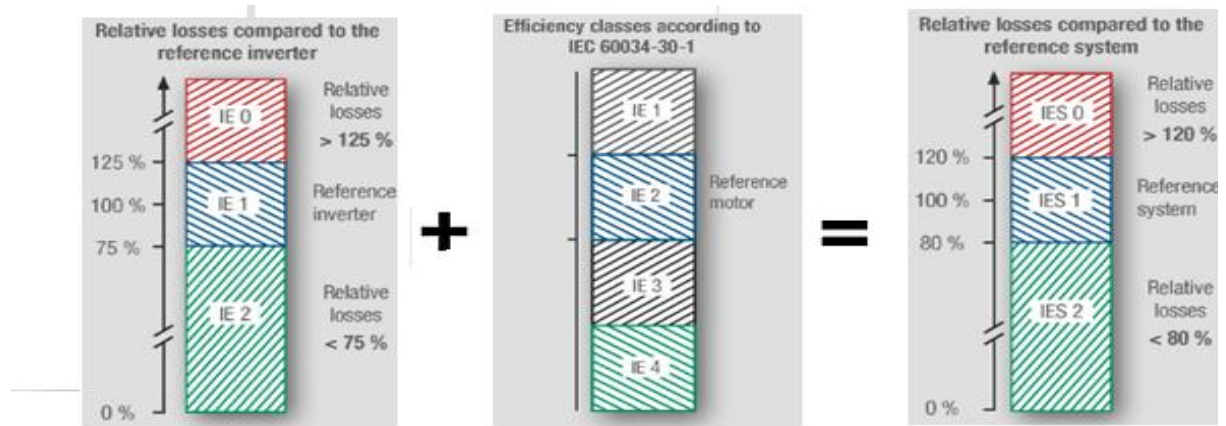
προσδιορισμό των απωλειών τους υπό μερικό φορτίο χωρίς αυτό να επηρεάζει την κλάση ΙΕ που ήδη κατατάσσεται ο κινητήρας. Το πρότυπο ορίζει τον κινητήρα αναφοράς (Reference Motor) για τον προσδιορισμό απωλειών ενός συστήματος. Οι απώλειες του κινητήρα αναφοράς προέρχονται από ασύγχρονο κινητήρα 4 πόλων, ενεργειακής απόδοσης ΙΕ2 στα 50Hz (ισχύει και για 60Hz) σύμφωνα με το EN 60034-30-1.

Ακολούθως το σύστημα μονάδας ελέγχου-κινητήρα (PDS) έχει σημείο αναφοράς το οποίο αποτελείται από τον κινητήρα αναφοράς (RM) 4 πόλων ενεργειακής κλάσης ΙΕ2 και μια μονάδα ελέγχου στροφών (CDM) αναφοράς ΙΕ1. Το PDS αναφοράς ορίζεται ως σύστημα με ενεργειακή κατάταξη ΙΕS1. Ορίζονται τα οκτώ σημεία λειτουργίας με μέγιστη συχνότητα το 100% της ονομαστικής τιμής, σχήμα 2.6. Οι κλάσεις απόδοσης ΙΕS0 έως ΙΕS2 καθορίζονται από τις απώλειες στο ονομαστικό σημείο της ταχύτητας και της ροπής. Για να αξιολογηθεί ένα σύστημα μονάδας ελέγχου-κινητήρα προστίθενται οι απώλειες του κινητήρα και του ρυθμιστή στροφών στο ονομαστικό σημείο λειτουργίας τους και το αποτέλεσμα είναι οι απώλειες που χαρακτηρίζουν το σύστημα. Κατόπιν οι απώλειες συγκρίνονται με αυτές του συστήματος μονάδας ελέγχου-κινητήρα αναφοράς. Εάν οι σχετικές απώλειες των συστημάτων μονάδας ελέγχου-κινητήρα που δοκιμάστηκαν είναι τουλάχιστον 20% χαμηλότερες από εκείνες του συστήματος μονάδας ελέγχου-κινητήρα αναφοράς, ορίζονται ως κλάσης ΙΕS2. Εάν είναι παραπάνω από 20% από αυτό, το σύστημα μονάδας ελέγχου-κινητήρα λαμβάνει την ταξινόμηση ΙΕS0, σύμφωνα με το σχήμα 2.7.



Σχήμα 2.6 Τα οκτώ σημεία που ελέγχεται ένα σύστημα ελεγκτή-κινητήρα, όπου στο σημείο 100-100 χαρακτηρίζεται η ενεργειακή του κλάση απόδοσης. Πηγή “Optimal Energy Efficiency Evaluation in Induction Machines Driven by Adjustable Speed Drives”

Η ενεργειακή αξιολόγηση ενός συστήματος μονάδας ελέγχου-κινητήρα πρέπει να παρέχεται στα εγχειρίδια εγκατάστασης και συντήρησης κάθε συστήματος.



Σχήμα 2.7 Η τελική αξιολόγηση ενός συστήματος μονάδας ελέγχου-κινητήρα εξαρτάται από την επιμέρους αξιολόγηση της μονάδας ελέγχου και του κινητήρα που χρησιμοποιείται.

Το πρότυπο IEC 61800-9 θέτει τις βάσεις για την τυποποιημένη σύγκριση μεταξύ διαφορετικών τεχνολογιών PDS για μια δεδομένη εφαρμογή κίνησης. Μπορεί να παρέχει τις απαραίτητες πληροφορίες για την ορθή επιλογή στον εξοπλισμό ενός PDS αξιολογώντας την ενεργειακή του απόδοση και προσδιορίζοντας το συνολικό κόστος χρήσης [3,5].

2.1.5 Η προσέγγιση του εκτεταμένου ηλεκτρομηχανικού συνόλου κίνησης

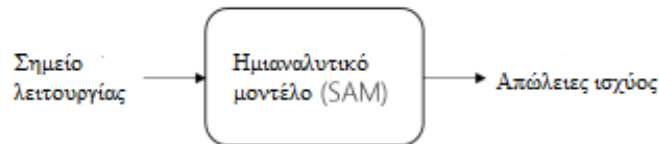
Η ορθή προσέγγιση ώστε να προσδιοριστεί και να ταξινομηθεί η αποδοτικότητα του εκτεταμένου ηλεκτρομηχανικού συνόλου κίνησης (EPR: extended product), είναι να ληφθεί υπ'όψιν η αλληλεπίδραση του συστήματος μονάδας ελέγχου-κινητήρα (PDS), με την μηχανική μετάδοση ισχύος (π.χ. γρανάζια, μάντες, άμεση σύζευξη) και τον τύπο του φορτίου (π.χ. αντλία, ανεμιστήρας, συμπιεστής).

Ένα μοντέλο για τον προσδιορισμό των απωλειών του εκτεταμένου ηλεκτρομηχανικού συνόλου κίνησης καθορίζεται στο IEC 61800-9, και ονομάζεται ημι-αναλυτικό μοντέλο (SAM: semi-analytical model). Το πρότυπο IEC καλύπτει μόνο τα ηλεκτρικά / ηλεκτρομηχανικά εξαρτήματα, αγνοώντας τον μηχανολογικό εξοπλισμό του συστήματος, ο οποίος μόνο πιστοποιείται από το Διεθνή Οργανισμό (ISO). Οι απώλειες των μηχανικών εξαρτημάτων επίσης λαμβάνονται από τα σχετικά πρότυπα ISO ή από τους κατασκευαστές των προϊόντων.

Ένα ημιαναλυτικό μοντέλο είναι ένα μαθηματικό μοντέλο που χρησιμοποιεί ένα συνδυασμό μετρήσεων και υπολογισμών για τον προσδιορισμό των απωλειών του συνόλου των εξαρτημάτων ηλεκτρομηχανολογικού συνόλου ενός κινητήριου συστήματος, σε δεδομένα σημεία λειτουργίας και με τυποποιημένο τρόπο.

Ένα ημι-αναλυτικό μοντέλο, σύμφωνα με το σχήμα 2.8 μπορεί να χρησιμοποιήσει:

- Μετρήσεις σε τυποποιημένα σημεία λειτουργίας ως αναφορά
- Τυποποιημένα μαθηματικά μοντέλα για τον εξοπλισμό
- Τυπολόγιο για την παρεμβολή των απωλειών ισχύος μεταξύ γνωστών σημείων λειτουργίας



Σχήμα 2.8 Ένα ημιαναλυτικό μοντέλο έχει ως είσοδο τις πληροφορίες σε ένα δεδομένο σημείο λειτουργίας και ως έξοδο τις απώλειες στο σημείο αυτό.

Η μέθοδος χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της ενεργειακής απόδοσης του συστήματος, λαμβάνοντας υπ' όψιν σε κάθε δεδομένο σημείο λειτουργίας, τις απαιτήσεις της ταχύτητας-ροπής κατά την διάρκεια του χρόνου. Για αυτόν τον λόγο, πρέπει να είναι γνωστές οι κρίσιμες παράμετροι του συστήματος:

- Τα χαρακτηριστικά του φορτίου της εφαρμογής, δηλαδή η ροπή του ή η ισχύς του ως συνάρτηση της ταχύτητας περιστροφής του άξονα του κινητήρα, ο κύκλος λειτουργίας της εφαρμογής συμπεριλαμβανομένου και του χρόνου αναμονής.
- Οι απώλειες ισχύος των εξαρτημάτων (κινητήρας, μονάδα ελέγχου στροφών, εξοπλισμός τελικής χρήσης) στα δεδομένα σημεία λειτουργίας.

Οι απώλειες ισχύος χρησιμοποιούνται αντί του δείκτη απόδοσης επειδή πλησιάζουν περισσότερο τις ιδιαίτερες συνθήκες κάθε εφαρμογής όπως για παράδειγμα η κατανάλωση ενέργειας σε κατάσταση αναμονής [3,6].

2.2 Ασύγχρονοι κινητήρες - ενεργειακή προσέγγιση στην κατασκευή και την λειτουργία τους

2.2.1 Εισαγωγή

Οι ασύγχρονοι κινητήρες έχουν μια ενδεικτική διάρκεια ζωής 15-20 χρόνια. Η έλλειψη ενεργειακής προσέγγισης στα συστήματα που χρησιμοποιούνται έχει ως αποτέλεσμα την κατανάλωση περιττής ενέργειας ή την μη αποδοτική λειτουργία συνολικά του εξοπλισμού ίσως και για δεκαετίες.

Ως σήμερα, ο ασύγχρονος επαγωγικός κινητήρας, ο οποίος αρχικά κατασκευάστηκε από την AEG το 1889, είναι ο κυρίαρχος τύπος κινητήρα της βιομηχανίας. Είναι εξαιρετικά ανθεκτικός και αξιόπιστος. Η ευθυγράμμιση με τους διεθνείς κανονισμούς για τα συστήματα ηλεκτρικής κίνησης έχει βοηθήσει στην περαιτέρω βελτίωση της σχεδίασής του. Όμως παραμένει το ερώτημα αν η ενεργειακή αναβάθμιση του ασύγχρονου κινητήρα από μόνη της, μπορεί να αποτελέσει λύση σε κάθε πρόβλημα διαχείρισης ενέργειας και αξιοπιστίας σε ένα σύστημα κίνησης.

Για να αξιολογηθούν τα οφέλη των ηλεκτρικών κινητήρων υψηλής απόδοσης σε μια εφαρμογή πρέπει να οριστεί η έννοια της απόδοσης ισχύος και πώς μπορεί να βελτιωθεί, καθώς και την έννοια του συντελεστή ισχύος και από τι εξαρτάται. Ακόμη θα αναφερθούν τα είδη των απωλειών και πώς μπορούν να ελαχιστοποιηθούν όπως και οι παράγοντες που μπορούν να επηρεάσουν την απόδοση κατά την λειτουργία ενός κινητήρα [2].

2.2.2 Χαρακτηριστικά της απόδοσης του ασύγχρονου κινητήρα

Η απόδοση ενός κινητήρα εξαρτάται από τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά και από τον τρόπο λειτουργίας του. Τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά του υποβαθμίζονται λόγω της γήρανσης των επιμέρους υλικών κατά τη διάρκεια του κύκλου ζωής του. Η λειτουργία του σχετίζεται με την σωστή επιλογή του, ώστε να έχει το σωστό μέγεθος ισχύος σε σχέση με το φορτίο του και να είναι σωστά «ενσωματωμένος» στο κινητήριο σύστημα.

Θα πρέπει να ληφθούν υπ' όψιν οι συνθήκες λειτουργίας σε μια εφαρμογή, όσον αφορά κάθε τι το οποίο μπορεί να επηρεάσει την θερμοκρασία λειτουργίας ενός κινητήρα. Σύμφωνα με την εξίσωση Arrhenius, το ποσοστό αστοχίας μιας ηλεκτρικής ή ηλεκτρονικής συσκευής σχετίζεται εκθετικά με την εξάρτησή του από την θερμοκρασία λειτουργίας. Προσεγγιστικά όταν η θερμοκρασία λειτουργίας υπερβαίνει το θερμικό όριο κατά 10°C μειώνει τη διάρκεια ζωής της συσκευής έως και 50%.

Δύο σημαντικά χαρακτηριστικά που σχετίζονται με την απόδοση της χρήσης ηλεκτρικής ενέργειας από τους ηλεκτρικούς κινητήρες είναι ο συντελεστής απόδοσης (η) και ο συντελεστής ισχύος (PF). Ο συντελεστής απόδοσης (η) ορίζεται ως ο λόγος της μηχανικής ενέργειας που αποδίδεται από τον στρεφόμενο άξονα στην έξοδο του κινητήρα, προς την ηλεκτρική ισχύ στην είσοδο του, ενώ ο κινητήρας τροφοδοτείται από την ονομαστική τάση λειτουργίας του [8, 18].

Η απόδοση μιας μηχανής ορίζεται από τον παρακάτω τύπο:

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\% = \frac{P_{in} - P_{loss}}{P_{in}} \times 100\% = \frac{P_{out}}{P_{out} + P_{loss}} \times 100\% \quad (2-1)$$

όπου: P_{in} : Ισχύς εισόδου, σε Watt

P_{loss} : Ισχύς συνόλου των απωλειών, σε Watt

P_{out} : Ισχύς αποδιδόμενη, σε Watt / Hp

Ο συντελεστής ισχύος μιας μηχανής ορίζεται γενικά ως ο λόγος της ενεργής ισχύος προς την φαινόμενη ισχύ. Οι κινητήρες όπως και άλλα επαγωγικά φορτία, χαρακτηρίζονται από συντελεστή ισχύος <1.

$$PF = \frac{P(W)}{S(VA)} \quad (2-2)$$

2.2.3 Τα είδη και η σημασία των απωλειών στους ασύγχρονους κινητήρες

Κατά την διαδικασία μετατροπής της ηλεκτρικής ενέργειας σε μηχανική που αποδίδει ο άξονας του κινητήρα προκαλούνται απώλειες. Ως κριτήριο για τον χαρακτηρισμό της απόδοσης μιας μηχανής είναι ο υπολογισμός των απωλειών. Οι εγγενείς αυτές απώλειες διακρίνονται σε:

- Σταθερές απώλειες, οι οποίες είναι ανεξάρτητες από το φορτίο
- Μεταβλητές απώλειες, οι οποίες εξαρτώνται από το φορτίο.
- Κατανεμημένες απώλειες, που δεν ανήκουν σε κάποια κατηγορία.
- Απώλειες λόγω ανώτερων αρμονικών [8, 9, 18].

Οι σταθερές απώλειες

Οι σταθερές απώλειες εξαρτώνται από τον σχεδιασμό και τα κατασκευαστικά στοιχεία ενός κινητήρα και είναι ανεξάρτητες από το φορτίο. Διακρίνονται στις απώλειες πυρήνα και τις μηχανικές απώλειες. Συχνά συνδυάζονται και αποκαλούνται απώλειες περιστροφής εν κενώ της μηχανής. Έτσι όταν δεν υπάρχει φορτίο, χρησιμοποιείται όλη η παρεχόμενη ισχύς του κινητήρα για να ξεπεραστούν αυτές οι απώλειες [8, 9, 18].

Οι απώλειες πυρήνα

Οι απώλειες πυρήνα ή απώλειες σιδήρου δημιουργούνται από το εναλλασσόμενο μαγνητικό πεδίο και εμφανίζονται στα σιδηρομαγνητικά τμήματα της μηχανής δηλαδή στον πυρήνα του στάτη, στα πέλατα των πόλων τόσο του στάτη όσο και του δρομέα και στα μη ενεργά τμήματα της μηχανής, όπως το κέλυφος.

Οι απώλειες πυρήνα εξαρτώνται από το μέγεθος της μαγνητικής επαγωγής, την συχνότητα της μαγνητικής επαγωγής, τον όγκο και τον τύπο του μαγνητικού υλικού και το πάχος των ελασμάτων του. Πρακτικά αναλύονται σε δύο διαφορετικές κατηγορίες, τις απώλειες υστέρησης και δινορευμάτων [8, 9, 15, 18].

Οι απώλειες υστέρησης

Απώλειες υστέρησης εξαρτώνται από τη συχνότητα, την μαγνητική ροή και την μικροδομή των σιδηρομαγνητικών τμημάτων του πυρήνα. Εκφράζουν την ενέργεια που χρησιμοποιείται για τον αναπροσανατολισμό του συνόλου των μορίων του μετάλλου του πυρήνα, ανά μία περίοδο του εναλλασσόμενου ρεύματος.

Οι απώλειες υστέρησης σε Watt/kg προσδιορίζονται από τον παρακάτω τύπο [15, 18]:

$$P_{Fe,h} = K_h f_e B^2 \quad (2-3)$$

όπου, K_h : ο συντελεστής απωλειών υστέρησης, εξαρτάται από την μάζα και το μαγνητικό υλικό του πυρήνα.

f_e : η συχνότητα της μαγνητικής επαγωγής.

B : το πλάτος της μαγνητικής επαγωγής στον πυρήνα.

Οι απώλειες δινορευμάτων

Το εναλλασσόμενο μαγνητικό πεδίο που εφαρμόζεται στον σιδηρομαγνητικό πυρήνα, σύμφωνα με το νόμο της επαγωγής, προκαλεί ένα ηλεκτρικό πεδίο. Το πεδίο αυτό ασκεί δυνάμεις στα ελεύθερα ηλεκτρόνια του σιδηρομαγνητικού πυρήνα και τα θέτει σε κίνηση με αποτέλεσμα να δημιουργούνται ρεύματα (eddy currents), τα οποία έχουν κλειστή διαδρομή. Αυτά τα ρεύματα τείνουν να αντιτίθενται στο πεδίο που τα προκάλεσε και έχουν ως αποτέλεσμα την παραγωγή θερμικών απωλειών έχουν δηλαδή ωμικό χαρακτήρα.

Οι απώλειες δινορευμάτων σε Watt/kg, προσδιορίζονται από τον παρακάτω τύπο [15, 18]:

$$P_{Fe,e} = K_e f_e^2 B^2 \quad (2-4)$$

όπου, K_e : Ο συντελεστής απωλειών που εξαρτάται από τη μάζα και το μαγνητικό υλικό του πυρήνα.

f_e : η συχνότητα της μαγνητικής επαγωγής.

B : το πλάτος της μαγνητικής επαγωγής στον πυρήνα.

Οι συνολικές απώλειες πυρήνα υπολογίζονται ως το άθροισμα των απωλειών υστέρησης και των δινορευμάτων [15, 18] :

$$P_{\text{core}} = P_{\text{Fe,h}} + P_{\text{Fe,e}} \quad (2-5)$$

Οι μηχανικές απώλειες

Οι μηχανικές απώλειες διακρίνονται σε δυο βασικά είδη, σε απώλειες τριβής και σε απώλειες αερισμού. Οι απώλειες τριβής προκαλούνται κατά την περιστροφή του κινητήρα από την τριβή στα έδρανα κύλισης και οι απώλειες αερισμού σχετίζονται με την τριβή του αέρα σε σχέση με τα κινούμενα μέρη του κινητήρα [17,18].

Οι απώλειες τριβής σε κάθε έδρανο κύλισης σε Watt ορίζονται από τον παρακάτω τύπο:

$$P_{\text{τριβής}} = 1,5F \frac{v}{d_{be}} 10^{-5} \quad (2-6)$$

όπου, F : η ακτινική δύναμη στα έδρανα κύλισης σε N

v : η ταχύτητα περιμέτρου στην επιφάνεια του εδράνου κύλισης σε m / s,

d_{be} : μέση διάμετρος του εδράνου κύλισης σε m.

Οι απώλειες εξαερισμού σε Watt ορίζονται από τον παρακάτω τύπο:

$$P_{\text{εξαερισμού}} = \frac{Z_m Q^3}{N_e} \quad (2-7)$$

όπου, Z_m : η αεροδυναμική αντίσταση εξωτερικά του ανεμιστήρα σε $\frac{\text{Pa} \cdot \text{s}}{\text{m}^6}$

N_e : η απόδοση του ανεμιστήρα, η οποία ορίζεται ως Q / Q_{max}

Q : το έργο του όγκου του αέρα ψύξης σε m^3/s .

Οι μεταβλητές απώλειες

Οι μεταβλητές απώλειες είναι οι ηλεκτρικές απώλειες ή απώλειες χαλκού οι οποίες είναι ωμικές απώλειες που εμφανίζονται στα τυλίγματα του στάτη και του δρομέα. Οι απώλειες αυτές εξαρτώνται από τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά, τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά και την θερμοκρασία λειτουργίας των τυλιγμάτων του στάτη και του δρομέα. Η αντίσταση R που χρησιμοποιείται στους παρακάτω υπολογισμούς είναι η αντίσταση του τυλίγματος του στάτη ή του δρομέα σε κανονική θερμοκρασία λειτουργίας.

Οι εξισώσεις των απωλειών χαλκού σε Watt στον στάτη και στον δρομέα ανά φάση δίνονται παρακάτω:

$$P_{\text{SCL}} = I_A^2 R_A \quad (2-8)$$

όπου, I_A^2 : το ρεύμα που ρέει σε κάθε φάση του τυλίγματος του στάτη

R_A : η αντίσταση κάθε φάσης του οπλισμού

$$P_{\text{RCL}} = I_F^2 R_F \quad (2-9)$$

όπου, I_F^2 : το ρεύμα που ρέει σε κάθε φάση του πεδίου του δρομέα

R_F : η αντίσταση κάθε φάσης του πεδίου του δρομέα [8,18].

Η αντίσταση ενός αγωγού εξαρτάται από το υλικό του αγωγού, το μήκος και την διατομή του. Οι απώλειες χαλκού εξαρτώνται επίσης άμεσα και από την θερμοκρασία λειτουργίας ενός κινητήρα εφόσον επηρεάζεται από αυτήν η τιμή της αντίστασης των υλικών των τυλιγμάτων. Ο συντελεστής θερμοκρασίας ειδικής αντίστασης εκφράζει την μεταβολή της τιμής της αντίστασης ανά βαθμό αύξησης της θερμοκρασίας και εξαρτάται από το υλικό του αντιστάτη και ισχύει:

$$R_\theta = R_0(1 + a\theta) \quad (2-10)$$

όπου, a : ο θερμικός συντελεστής αντίστασης, σταθερά εξαρτάται από το είδος του αγωγού

θ : η θερμοκρασία

R_0 : η τιμή της αντίστασης για $\theta = 20^\circ\text{C}$

Οι κατανεμημένες απώλειες

Οι κατανεμημένες απώλειες είναι δύσκολο είτε να μετρηθούν άμεσα, είτε να υπολογιστούν. Περιλαμβάνουν τις απώλειες στα διάφορα ενεργά και μη μέρη της μηχανής. Οι κατανεμημένες απώλειες είναι δύσκολο να μετρηθούν. Μπορούν να ληφθούν περίπου ίσες με το 1% -1,8% όταν ο κινητήρας λειτουργεί με πλήρες φορτίο [18].

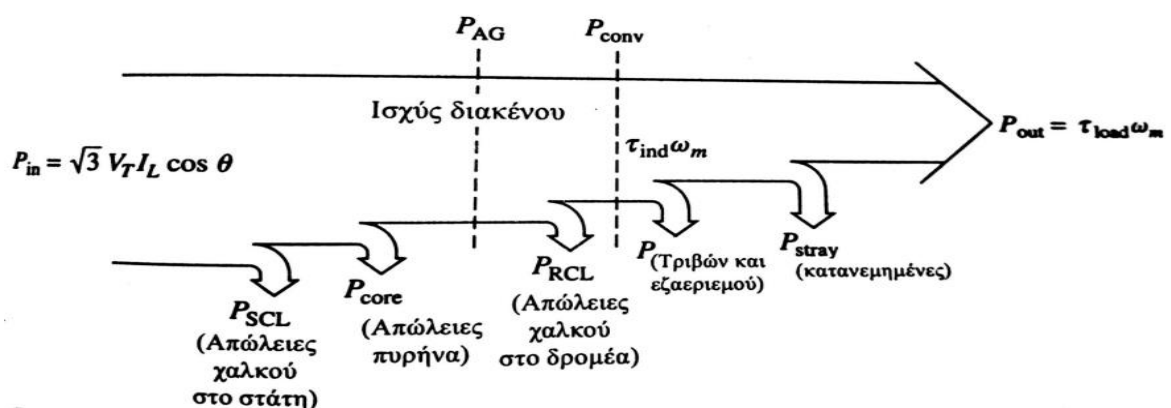
Οι κατανεμημένες απώλειες δίνονται προσεγγιστικά από τη σχέση:

$$P_{str} = C_{str} I^2 \omega_e^2 \quad (2-11)$$

όπου C_{str} : ο συντελεστής κατανεμημένων απωλειών που εξαρτάται από τα γεωμετρικά και κατασκευαστικά χαρακτηριστικά του πυρήνα

I : το ρεύμα του στάτη.

ω_e : η κυκλική συχνότητα ρεύματος



Σχήμα 2.9 Το διάγραμμα ροής ισχύος επαγωγικού κινητήρα. Πηγή: *Electric Machinery Fundamentals 3rd Edition, S. J. Chapman*

Απώλειες λόγω αρμονικών

Η συνήθης αιτία δημιουργίας αρμονικών στα ηλεκτρικά δίκτυα είναι η ύπαρξη μη γραμμικών φορτίων και η τροφοδοσία γραμμικών μεν φορτίων με διατάξεις με ημιαγωγικά στοιχεία. Οι αρμονικές τάσεις και ρεύματα έχουν ημιτονοειδή μορφή και η συχνότητα τους είναι

ακέραιο πολλαπλάσιο της θεμελιώδους συχνότητας, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.10. Η ονομαστική συχνότητα καλείται θεμελιώδης και είναι η συχνότητα στην οποία λειτουργεί ένα σύστημα. Οι αρμονικές αναλύονται σε σειρές Fourier και γίνεται να υπολογιστούν οι απώλειες που προκαλούν. Σύμφωνα με τον Fourier, κάθε συνάρτηση μπορεί να εκφραστεί ως άθροισμα άπειρου πλήθους ημιτονοειδών συναρτήσεων με συχνότητα ίση με την ονομαστική και με ακεραία πολλαπλάσια της συχνότητας αυτής. Εκτός των αρμονικών, οι οποίες είναι ακέραια πολλαπλάσια της θεμελιώδους, υπάρχουν και ενδιάμεσες αρμονικές (interharmonics), των οποίων οι συχνότητες δεν είναι ακέραια πολλαπλάσια της θεμελιώδους συχνότητας. Η εκτίμησή τους συνήθως είναι πειραματική [9, 10, 21].

Η τάση κάθε ημιτονοειδούς συνάρτησης κατά Fourier είναι:

$$U(t) = V_0 + \sqrt{2} \sum_{n=1}^{\infty} V_n \sin(n\omega_s t + \varphi_n) \quad (2-12)$$

όπου, V_0 : τάση της συνεχούς συνιστώσας του δικτύου
 ω_s : η θεμελιώδης συχνότητα
 V_n : η τάση της συχνότητας που εξετάζεται
 φ_n : η γωνία κάθε αρμονικού όρου

Το ρεύμα κάθε ημιτονοειδούς συνάρτησης κατά Fourier είναι:

$$I(t) = I_0 + \sqrt{2} \sum_{n=1}^{\infty} I_n \sin(n\omega_s t + \varphi_n) \quad (2-13)$$

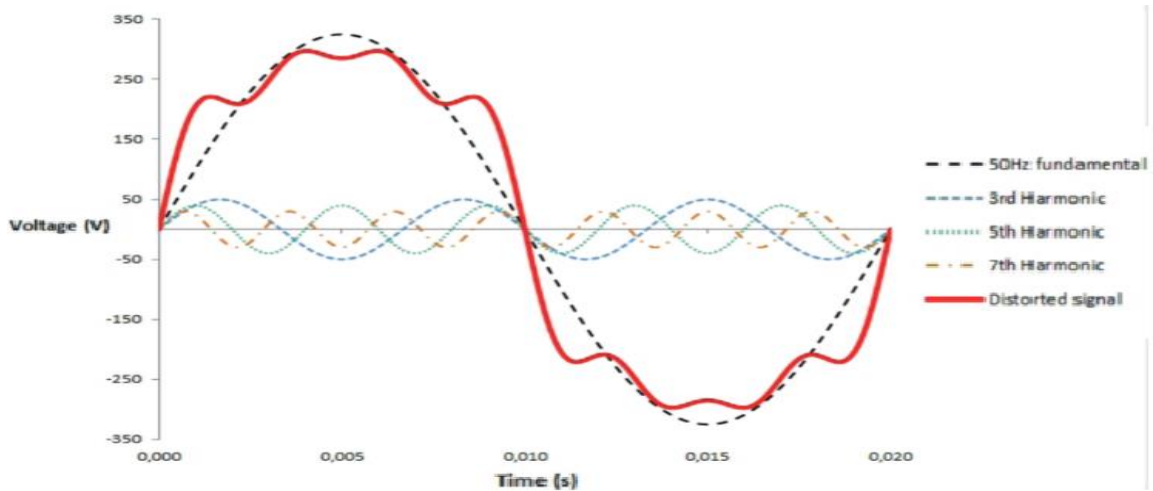
όπου, I_0 : το ρεύμα της συνεχούς συνιστώσας του δικτύου
 ω_s : η θεμελιώδης συχνότητα
 I_n : το ρεύμα της συχνότητας που εξετάζεται
 φ_n : η γωνία κάθε αρμονικού όρου

Τα αρμονικά ρεύματα παρέχουν ισχύ η οποία δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί για παραγωγή χρήσιμου έργου, αντιθέτως μπορεί να δημιουργήσει ανεπιθύμητες καταστάσεις στο ηλεκτρικό φορτίο.

Αρμονικές που προκύπτουν από τα κατασκευαστικά στοιχεία και τη γεωμετρία του κινητήρα, εξαιτίας της ύπαρξης των αυλακώσεων και των δοντιών του στάτη, δηλαδή από ανομοιογένεια της επιφάνειας του διακένου, ονομάζονται αρμονικές αυλάκωσης. Επάγονται κατά την λειτουργία του κινητήρα προκαλώντας αρμονικά ρεύματα στις περιελίξεις του δρομέα. Η αλληλεπίδραση των αρμονικών ρευμάτων που παράγονται στον δρομέα έχει ως αποτέλεσμα δημιουργία αρμονικών ροπών, δονήσεων και ηλεκτρικού θορύβου.

Οι επιπτώσεις της ύπαρξης αρμονικών επηρεάζουν την απόδοση του κινητήρα:

- Αυξάνουν τις θερμικές απώλειες χαλκού
- Αυξάνουν τις απώλειες σιδήρου και τις κατανεμημένες απώλειες της μηχανής
- Επηρεάζουν την ροπή του κινητήρα υποβαθμίζοντας την ισχύ του και προκαλώντας δόνηση
- Καταστρέφουν μακροπρόθεσμα τις μονώσεις στα τυλίγματα
- Προκαλούν ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές-θόρυβο



Σχήμα 2.10 Παράδειγμα με τα γραφήματα αρμονικών σε σχέση με την θεμελιώδη συνάρτηση και την θεμελιώδη περίοδο

Απώλειες χαλκού

Κατά την λειτουργία με μερικό φορτίο υπάρχει μεγαλύτερο ποσοστό αρμονικών σε σχέση με τη θεμελιώδη συνιστώσα σε σύγκριση με την λειτουργία του κινητήρα κοντά στο ονομαστικό του φορτίο. Οι αρμονικές συνιστώσες του ρεύματος μπορούν να επηρεάσουν τον βαθμό απόδοσης του κινητήρα λόγω της αύξησης των απωλειών χαλκού στον στάτη αν ο κινητήρας λειτουργεί σε σύνδεση αστέρα. Συγκεκριμένα οι αρμονικές τρίτης τάξεως όπου $k=3n$ ($n=1,2,3\dots$) δεν έχουν διαφορά φάσης μεταξύ τους, άρα δεν παράγουν στρεφόμενα πεδία, αλλά παρουσιάζονται παρασιτικά στον ουδέτερο κόμβο με αποτέλεσμα την ανύψωση της τάσης του και την δημιουργία έντονης ασυμμετρίας μεταξύ φάσεων. Οι απώλειες χαλκού είναι απώλειες joule δηλαδή θερμικές. Σε ακραίες περιπτώσεις, όπου υπάρχει υψηλό αρμονικό περιεχόμενο στην τροφοδοσία μπορεί να οδηγήσει στην μεταφορά αρμονικών ρευμάτων κατά μήκος του άξονα, προς τα έδρανα κύλισης υποβαθμίζοντας την λίπανση των εδράνων και επιταχύνοντας τη φθορά τους.

Απώλειες σιδήρου

Οι απώλειες υστέρησης και δινορευμάτων είναι μέρος των απωλειών σιδήρου που παράγονται στον πυρήνα λόγω του εναλλασσόμενου μαγνητικού πεδίου. Οι απώλειες υστέρησης είναι ανάλογες με τη συχνότητα και οι απώλειες δινορευμάτων είναι ανάλογες με το τετράγωνο της συχνότητας. Τα εξαρτήματα υψηλής συχνότητας που βρίσκονται σε ηλεκτρονικές διατάξεις ισχύος παράγουν αρμονικές όπου η συχνότητα τους θα είναι υψηλότερη και πολλαπλάσιας τάξης της θεμελιώδους δημιουργώντας πρόσθετες απώλειες στον πυρήνα και αυξάνοντας τη θερμοκρασία λειτουργίας στα τυλίγματα και μειώνοντας έτσι συνολικά την απόδοση.

Ηλεκτρομαγνητική παρεμβολή

Οι αρμονικές αυξάνουν την ηλεκτρομαγνητική παρεμβολή (EMI). Η ηλεκτρομαγνητική παρεμβολή δεν επηρεάζει τον κινητήρα άμεσα, αλλά δημιουργεί ηλεκτρομαγνητική παρενόχληση σε γειτονικές συσκευές ηλεκτρονικών κυκλωμάτων, ελέγχου και επικοινωνίας, στην περίπτωση που δεν υπάρχει κατάλληλη μαγνητική θωράκιση, επηρεάζοντας έτσι έμμεσα το κινητήριο σύστημα.

Επιρροή στην ροπή κινητήρα

Η θεμελιώδης συχνότητα του επαγωγικού κινητήρα παράγει ροπή λειτουργίας προς συγκεκριμένη κατεύθυνση. Η επίδραση των αρμονικών καθορίζεται από τη διαδοχή που παρουσιάζουν σε σχέση με τη θεμελιώδη συνιστώσα. Αναλόγως της τάξης των αρμονικών τα ρεύματά τους δυνητικά παράγουν ροπές τόσο προς την επιθυμητή κατεύθυνση όσο και προς την αντίστροφη κατεύθυνση.

Συγκεκριμένα οι αρμονικές τάξεως $k=3n+1$ (όπου $n \in \mathbb{Z}$) παράγουν ροπή με αντίστοιχη φορά περιστροφής της θεμελιώδους συνιστώσας. Οι αρμονικές τάξεως $k=3n-1$ (όπου $n \in \mathbb{Z}$) παράγουν ροπή αντίθετης κατεύθυνσης από τη θεμελιώδη συνιστώσα.

Το αποτέλεσμα είναι ότι αθροιστικά οι ροπές των αρμονικών μπορούν να επηρεάσουν την ομαλή λειτουργία του κινητήρα [9, 21, 10].

2.2.4 Ανά φάση ισοδύναμο κύκλωμα και εξισώσεις μόνιμης κατάστασης

Οι κινητήρες εναλλασσόμενου ρεύματος, έχουν την ίδια αρχή λειτουργίας, στηρίζεται στη δυνατότητα παραγωγής ενός στρεφόμενου μαγνητικού πεδίου στο τύλιγμα του στάτη. Ο δρομέας του κινητήρα στρέφεται από τη ροπή η οποία παράγεται από την αλληλεπίδραση των μαγνητικών πεδίων που αναπτύσσουν τα τυλίγματα του στάτη και του δρομέα.

Ισχύει ότι η ταχύτητα περιστροφής του πεδίου του στάτη που παράγεται όταν τροφοδοτείται από εναλλασσόμενη τριφασική τάση είναι ανάλογη της συχνότητας της τάσης τροφοδοσίας. Η ταχύτητα ονομάζεται σύγχρονη [18].

$$\text{Σύγχρονη ταχύτητα σε rpm, } n_{\text{sync}} = 120 \frac{f}{p} \quad (2-14)$$

όπου, f : συχνότητα σε Hz
 p : αριθμός των πόλων

Ισχύει ότι στην περίπτωση του ασύγχρονου κινητήρα η πραγματική ταχύτητα, με την οποία λειτουργεί ο κινητήρας, είναι μικρότερη από τη σύγχρονη ταχύτητα. Η διαφορά μεταξύ της σύγχρονης n_{sync} και της πλήρους ταχύτητας φορτίου n_{motor} ονομάζεται ολίσθηση (s) και μετράται ως ποσοστό. [18]

$$s \% = \frac{n_{\text{sync}} - n_{\text{motor}}}{n_{\text{sync}}} 100\% \quad (2-15)$$

Η εξίσωση της ολίσθησης μετασχηματίζεται όπως κάτωθι:

$$\begin{aligned} n_{\text{motor}} &= (1-s) n_{\text{sync}} \\ \omega_{\text{motor}} &= (1-s) \omega_{\text{sync}} \end{aligned} \quad (2-16)$$

Για την συχνότητα των ρευμάτων στον δρομέα ισχύει:

$$f_r = \frac{n_{\text{sync}} - n_{\text{motor}}}{n_{\text{sync}}} f_s \quad (2-17)$$

όπου, f_s : η συχνότητα στο στάτη

Η ονομαστική ισχύς και η ονομαστική ταχύτητα ενός κινητήρα καθορίζουν μαζί την ονομαστική ροπή

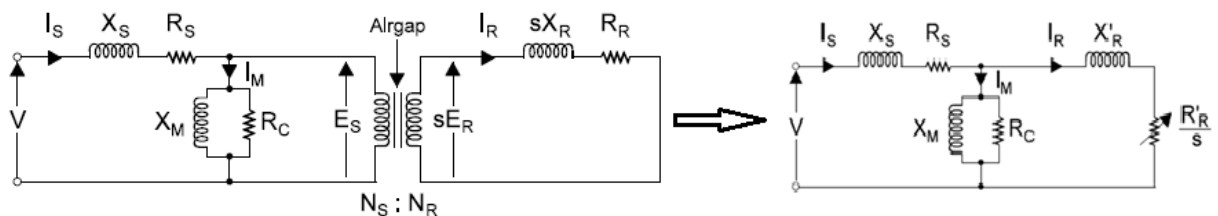
$$\tau_{Load} = \frac{9,550 \times P_{out}}{n_{motor}} \quad (2-18)$$

όπου, τ_{Load} : ονομαστική ροπή σε Nm
 n_{motor} : σε rpm

$$P_{out} = \tau_{Load} \omega_m = (1-s) \omega_{sync} \tau_{Load} \quad (2-19)$$

Από την παραπάνω σχέση προκύπτει ότι μειώνοντας την τιμή της ολίσθησης σε έναν ασύγχρονο κινητήρα η αποδιδόμενη ισχύς είναι μεγαλύτερη.

Η απόδοση μπορεί να μελετηθεί μέσω του ανά-φάση ισοδύναμου κύκλωματος για τον τριφασικό επαγωγικό κινητήρα, σχήμα 2.11. Το ισοδύναμο κύκλωμα είναι μια μέθοδος για την εξήγησή των λειτουργικών χαρακτηριστικών του σε σταθερή κατάσταση. Το ισοδύναμο το κύκλωμα είναι ανάλογο με τη λειτουργία ενός μετασχηματιστή. [16]



Σχήμα 2.11 Το αναλυτικό ισοδύναμο ανά φάση κύκλωμα επαγωγικού κινητήρα από το οποίο προέρχεται το απλοποιημένο. Πηγή: *Practical Variable Speed Drives and Power Electronics, M. Barnes*

Το ρεύμα στάτη αντιπροσωπεύει κατά ένα μεγάλο μέρος το διανυσματικό άθροισμα του ρεύματος μαγνήτισης I_m και του ενεργού ρεύματος I_R και ισχύει:

$$I_s = \frac{V}{Z_{eq}} \quad (2-20)$$

Το ρεύμα μαγνήτισης I_m , το οποίο είναι σχετικά ανεξάρτητο από το φορτίο παράγει το στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο και ισχύει:

$$I_m = \frac{E_s}{j\omega L_m} \quad (2-21)$$

όπου X_m : η ποσότητα που αντιστοιχεί στην επαγωγική αντίδραση μαγνήτισης του διακένου
 $X_m = j\omega L_m$

Το ενεργό ρεύμα I_R , παράγει την ροπή στον δρομέα και εξαρτάται από την φόρτιση του κινητήρα και αυξάνεται γραμμικά με την ολίσθηση [16, 18].

Στο ισοδύναμο κύκλωμα, η αντίσταση του δρομέα αντιπροσωπεύεται από ένα στοιχείο που εξαρτάται από την ολίσθηση s . Αυτό σημαίνει ότι η επαγόμενη τάση του δρομέα και κατά συνέπεια το ρεύμα εξαρτάται από την ολίσθηση. Επομένως, όταν ο επαγωγικός κινητήρας τροφοδοτείται από

πηγή ισχύος σταθερής τάσης και συχνότητας, το ρεύμα I_s που καταναλώνεται από τον κινητήρα εξαρτάται κυρίως από την ολίσθηση.

Παρακάτω δίνεται η ισχύς διακένου P_{AG} η οποία προκύπτει αν αφαιρεθούν από την ισχύ εισόδου P_{IN} οι ωμικές απώλειες P_{SCL} και οι απώλειες πυρήνα P_{CORE} .

$$P_{SCL} = 3 I_s^2 \cdot R_s \quad (2-22)$$

$$P_{AG} = P_{IN} - P_{SCL} - P_{CORE} \quad (2-23)$$

Το μοναδικό στοιχείο του κυκλώματος το οποίο μπορεί να καταναλώνει από την ισχύ του διακένου είναι η αντίσταση $\frac{R'_R}{s}$. Έτσι ισχύει:

$$P_{AG} = 3 I^2 \frac{R'_R}{s} \quad (2-24)$$

Όπου R'_R : η αντίσταση του δρομέα ανηγμένη στον στάτη

Παρακάτω δίνεται η σχέση της ισχύος που μετατρέπεται από ηλεκτρική σε μηχανική. Η ισχύς P_{conv} είναι η αναπτυσσόμενη μηχανική ισχύς και προκύπτει αφού αφαιρέσουμε τις ωμικές απώλειες του δρομέα P_{RSCL} από την ισχύ διακένου P_{AG} :

$$\begin{aligned} P_{conv} &= P_{AG} - P_{RSCL} \\ &= 3 I^2 \cdot \frac{R'_R}{s} - 3 I^2 R'_R \\ &= 3 I^2 R'_R \left(\frac{1}{s} - 1 \right) \\ &= 3 I^2 R'_R \left(\frac{1-s}{s} \right) \end{aligned} \quad (2-25)$$

Για την ισχύ που μετατρέπεται από ηλεκτρική σε μηχανική ισχύει:

$$P_{conv} = (1-s) P_{AG} \quad (2-26)$$

Η επαγόμενη ροπή που παράγεται στο εσωτερικό του κινητήρα, η οποία και διαφέρει από την ροπή στην έξοδο του κινητήρα κατά την ροπή τριβών και εξαερισμού, μπορεί να γραφεί συναρτήσει της ολίσθησης και της ισχύος διακένου ως [18]:

$$\begin{aligned} \tau_{ind} &= \frac{P_{conv}}{\omega_m} \\ \tau_{ind} &= \frac{(1-s) P_{AG}}{(1-s) \omega_{sync}} = \frac{P_{AG}}{\omega_{sync}} \end{aligned} \quad (2-27)$$

Στην περίπτωση όπου ο κινητήρας εκκινεί εμφανίζεται ένα υψηλό ρεύμα αιχμής, για την αντίδραση του κινητήρα την στιγμή της εκκίνησης ισχύει:

$$Z_{εκκ} = \left(R_s + \frac{R'_R}{s} \right) + j(X_s + X_r) \quad (2-28)$$

Για το ρεύμα του κινητήρα την στιγμή της εκκίνησης ισχύει:

$$I_{\text{ΕΚΚ}} = \frac{V_{\text{φασική}}}{[Z_{\text{ΕΚΚ}}]} \quad (2-29)$$

Από την παραπάνω σχέση συμπεραίνεται, πώς για κινητήρες με χαμηλότερες απώλειες λειτουργίας το ρεύμα εκκίνησης θα είναι μεγαλύτερο, εφόσον εξαρτάται από τις ωμικές απώλειες του κινητήρα. Αυτό αποτελεί μειονέκτημα για έναν υψηλής ενεργειακής κλάσης κινητήρα, ειδικά στην περίπτωση όπου η εφαρμογή που χρησιμοποιείται έχει συχνές εκκινήσεις.

Αναλογία ρεύματος εκκίνησης προς το ονομαστικό ρεύμα : $\frac{I_{\text{ΕΚΚ}}}{I_{\text{nom}}} \quad (2-30)$

Η τιμή της μέγιστης ροπής που μπορεί να επιτευχθεί στον κινητήρα και εμφανίζεται κατά την εκκίνηση όταν η ισχύς του διακένου είναι μέγιστη και καταναλώνεται σχεδόν εξ' ολοκλήρου στο κύκλωμα του δρομέα, ισχύει:

$$\tau_{\text{max}} = \frac{3 s V^2 R'_R}{[(R_S R'_R)^2 + S (X_S + X'_R)^2] \omega_{\text{sync}}} \quad (2-31)$$

Συμπερασματικά αυτό που φαίνεται από τις σχέσεις είναι ότι η ροή της ισχύος, καθώς και τα χαρακτηριστικά του κινητήρα, όπως η ροπή και η ταχύτητα του, σε όλο το εύρος της λειτουργίας του κινητήρα εξαρτώνται από την τιμή της ολίσθησης και τις απώλειες του.

Αυτές τις απώλειες στοχεύουν να μειώσουν οι κατασκευαστές κινητήρων για να βελτιώσουν τις δυνατότητες και την απόδοση της μηχανής κατά την κανονική τους λειτουργία. Το μειονέκτημα των κινητήρων υψηλότερης ενεργειακής κλάσης είναι ότι κινητήρες έχουν υψηλότερα ρεύματα αιχμής και εκκίνησης.

2.2.5 Η εξάρτηση του συντελεστή ισχύος από την ποιότητα της παρεχόμενης ισχύος και το φορτίο του ασύγχρονου κινητήρα

2.2.5.1 Ο συντελεστής ισχύος

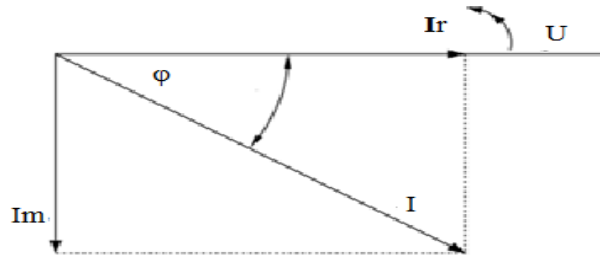
Ο συντελεστής ισχύος αποτελεί σημείο αναφοράς και δείχνει πόσο αποτελεσματικά χρησιμοποιείται η ηλεκτρική ισχύς. Όταν ένας ασύγχρονος κινητήρας λειτουργεί χωρίς φορτίο ή με μειωμένο φορτίο, μειώνεται και η τιμή του μέτρου του διανύσματος της έντασης του ενεργού ρεύματος, ωστόσο, δεν υπάρχει αντίστοιχη μείωση στο μέτρο του διανύσματος του ρεύματος μαγνήτισης, το οποίο είναι σχετικά σταθερό και εξαρτάται από την τάση τροφοδοσίας.

Το συνολικό ρεύμα σε κάθε περιέλιξη ενός κινητήρα είναι το διανυσματικό άθροισμα του ενεργού ρεύματος I_r και του ρεύματος μαγνητισμού I_m , όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα 2.12. Το ρεύμα μαγνήτισης I_m δεν συμμετέχει στην παραγωγή μηχανικού έργου στον κινητήρα, ο ρόλος του είναι να δημιουργεί το μαγνητικό πεδίο που απαιτείται. Το I_m είναι σταθερό και ανεξάρτητο από τις συνθήκες φόρτισης της μηχανής ενώ έχει διαφορά φάσης με την τάση τροφοδοσίας κατά 90° . Σε έναν κινητήρα το μέτρο του ρεύματος μαγνήτισης μπορεί να είναι το 40%-50% του ονομαστικού ρεύματος.

Το ενεργό ρεύμα I_r είναι ανάλογο με το φορτίο του κινητήρα και συμφασικό με την τάση τροφοδοσίας. Άρα σε κατάσταση λειτουργίας μερικού ή καθόλου φορτίου, λόγω της παρουσίας του

σταθερού ρεύματος μαγνήτισης στις περιελίξεις του στάτη, λειτουργεί ο κινητήρας με χαμηλό συντελεστή ισχύος.

Συμπερασματικά όπως μειώνεται το φορτίο, η γωνία ϕ αυξάνεται προς τις 90° και ο συντελεστής ισχύος $\cos\phi$ μειώνεται.



Σχήμα 2.12 Το ανά φάση ρεύμα ενός κινητήρα, είναι το διανυσματικό άθροισμα του ενεργού ρεύματος I_r και του ρεύματος μαγνήτισης I_m

Η ισχύς που παρέχεται στον στάτη λόγω του I_r αναφέρεται ως «πραγματική» επειδή παράγει ροπή και έργο. Η ισχύς που χρησιμοποιείται λόγω του I_m για την διατήρηση του μαγνητικού πεδίου αναφέρεται ως «άεργος» ισχύς, επειδή δεν παράγει έργο.

Το ποσό της πραγματικής ισχύος που απαιτείται από έναν επαγωγικό κινητήρα αυξομειώνεται ανάλογα με το φορτίο, αλλά η ποσότητα της άεργης ισχύος είναι σχεδόν σταθερή. Έτσι, όταν ένας επαγωγικός κινητήρας λειτουργεί με χαμηλό φορτίο, η αναλογία πραγματικής ισχύος προς την φαινόμενη ισχύ μειώνεται, με αποτέλεσμα τον χαμηλότερο συντελεστή ισχύος [8, 18, 21].

2.2.5.2 Η ποιότητα ισχύος

Σε ημιτονοειδείς συνθήκες, όπου ϕ είναι η γωνία διαφοράς φάσης της τάσης και του ρεύματος ισχύουν οι σχέσεις:

$$I = \sqrt{I_r^2 + I_m^2} \quad (2-32)$$

$$P_{active} = \sqrt{3} V_{rms} I_r \quad (2-33)$$

$$P_{reactive} = \sqrt{3} V_{rms} I_m \quad (2-34)$$

Ο πραγματικός συντελεστής ισχύος (True Power Factor) ισούται με:

$$PF_{true} = PF_{disp} \cdot PF_{dist} \quad (2-35)$$

$$\text{όπου, } PF_{disp} = \cos\phi \quad (2-36)$$

$$PF_{dist} = \frac{1}{\sqrt{1+THD^2}} \quad (2-37)$$

Σε ημιτονοειδείς συνθήκες τότε $PF_{dist}=1$ και άρα ισχύει ότι $PF_{true}=\cos\phi$

Ο δείκτης THDi είναι ο συντελεστής παραμόρφωσης του ρεύματος. Είναι ένας στιγμιαίος δείκτης ο οποίος μεταβάλλεται στην διάρκεια του χρόνου με κάθε μεταβολή του φορτίου, αναφέρεται στη θεμελιώδη συνιστώσα του ρεύματος. Ο δείκτης αυτός είναι σχετικός ως προς το

κύκλωμα μπορεί ένα μικρό ρεύμα σε μια γραμμή του κυκλώματος να δίνει μεγάλη τιμή THDi, αλλά αυτό να μην αποτελεί πρόβλημα για το σύστημα λόγω της χαμηλής ενεργής τιμής του ρεύματος. Ισχύει:

$$THD_i = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_1} \quad (2-38)$$

όπου, I_1 : η θεμελιώδης συνιστώσα του ρεύματος του φορτίου

Ακόμη ένας σημαντικός δείκτης παραμόρφωσης του ρεύματος είναι ο TDDi (Total Demand Distortion) υπολογίζει την αρμονική παραμόρφωση ως προς το ονομαστικό ρεύμα λειτουργίας μιας μηχανής. Ο TDD προκύπτει από υπολογισμό, χρησιμοποιώντας τις αρμονικές του ρεύματος, ενώ η μηχανή λειτουργεί στο ονομαστικό της φορτίο I_{1max} . Ισχύει:

$$TDD_i = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_{1max}} \quad (2-39)$$

Ο δείκτης συντελεστή παραμόρφωσης τάσης THDv είναι ένας στιγμιαίος δείκτης ο οποίος μεταβάλλεται στην διάρκεια του χρόνου με κάθε μεταβολή του φορτίου, αναφέρεται στην θεμελιώδη συνιστώσα της τάσης, η οποία είναι η ονομαστική τάση του δικτύου V_1 . Ισχύει:

$$THD_v = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} V_h^2}}{V_1} \quad (2-40)$$

Έτσι ο συντελεστής ισχύος από την ολική αρμονική παραμόρφωση ο οποίος επηρεάζει τον πραγματικό συντελεστή ισχύος, υπολογίζεται ως:

$$PF_{dist} = \frac{1}{\sqrt{1+THD^2}} = \frac{1}{\sqrt{1+THD_v^2}} * \frac{1}{\sqrt{1+THD_i^2}} \quad (2-41)$$

Άρα στην περίπτωση που υπάρχει αρμονικό περιεχόμενο, ο συντελεστής ισχύος επηρεάζεται από τα μεγέθη της αρμονικής παραμόρφωσης. Οι αρμονικές επηρεάζουν την άεργο ισχύ του συστήματος προσθέτοντας σε αυτήν, την ισχύ παραμόρφωσης.

Η άεργος ισχύς για μια n τάξης αρμονική υπολογίζεται ως:

$$Q(n) = V_n I_n \sin \phi_n \quad (2-42)$$

Η ισχύς παραμόρφωσης υπολογίζεται ως:

$$D = \sqrt{S^2 - P^2 - Q_{(1)}^2} \quad \text{ή} \quad D = V_1 * \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2} \quad (2-43)$$

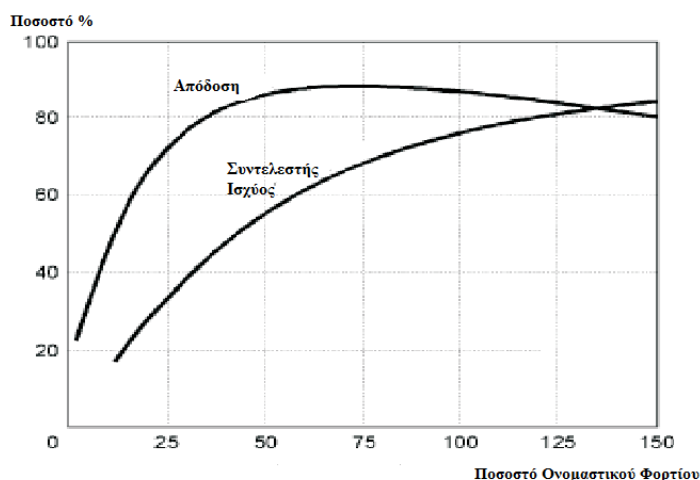
Εναλλακτικά ο πραγματικός συντελεστής ισχύος ορίζεται ως:

$$PF_{true} = \frac{P(W)}{S(VA)} = \frac{P(W)}{\sqrt{P^2 + Q^2 + D^2}} \quad (2-44)$$

όπου, P : Πραγματική ισχύς σε Watt
 Q : Άεργος ισχύς σε Var
 D : Ισχύς παραμόρφωσης σε Var_h

Η αύξηση της αρμονικής παραμόρφωσης στο ρεύμα μειώνει τον πραγματικό συντελεστή ισχύος. Αυτό σημαίνει πως για την ίδια ενεργό ισχύ υπάρχει υψηλότερη ζήτηση σε άεργο ισχύ, άρα υψηλότερη ζήτηση σε φαινόμενη ισχύ και τελικά μεγαλύτερη ζήτηση παροχής ρεύματος.

Συμπερασματικά παρατηρείται ότι ο συντελεστής ισχύος σε έναν ασύγχρονο κινητήρα εξαρτάται από το επίπεδο φόρτισης του κινητήρα, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.13 και από την επίδραση του αρμονικού περιεχομένου που υπάρχει [18, 21, 10].



Σχήμα 2.13 Η επίδραση του φορτίου στον συντελεστή ισχύος και στην απόδοση

Ο υψηλότερος συντελεστής ισχύος μειώνει το συνολικό ρεύμα στα καλώδια τροφοδοσίας του κινητήρα και αυτό κατ' επέκταση μειώνει την απώλεια γραμμής, βελτιώνοντας την απόδοση του συστήματος ακόμη και κατά 2% [1].

Η επιλογή του μεγέθους ενός κινητήρα σε μια εφαρμογή κίνησης πρέπει να γίνεται όσο πιο κοντά σε σχέση με το μέγιστο φορτίο που θα αντιμετωπίσει στις δυσμενέστερες συνθήκες, φόρτισης και εκκίνησης. Πρακτικά η φόρτιση ενός κινητήρα δεν είναι αποδοτικό να είναι μικρότερη του 75% της ονομαστικής του ισχύος.

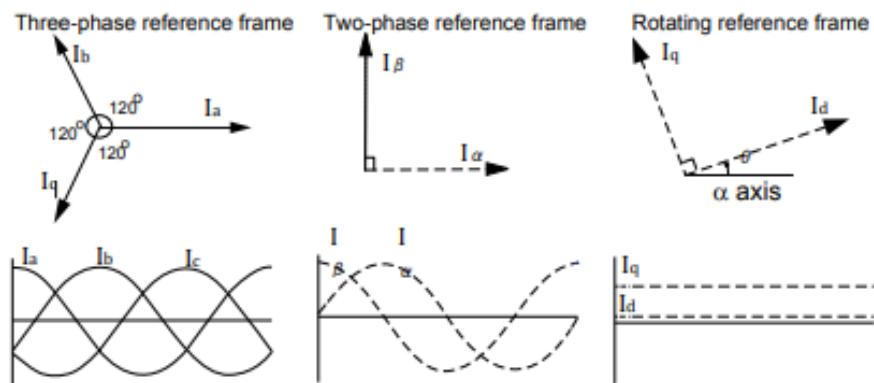
2.2.6 Δυναμική ανάλυση του ασύγχρονου κινητήρα

Η συμπεριφορά των τριφασικών μηχανών περιγράφεται συνήθως από τις εξισώσεις τάσης και ρεύματος. Οι συντελεστές των εξισώσεων που περιγράφουν τη συμπεριφορά τους είναι χρονικά μεταβαλλόμενοι. Η μαθηματική μοντελοποίηση ενός τριφασικού τέτοιου συστήματος είναι πολύπλοκη καθώς η μαγνητική ροή, η επαγόμενη τάση και το ρεύμα αλλάζουν συνεχώς στον χρόνο καθώς τα στοιχεία του ηλεκτρικού κυκλώματος βρίσκονται σε σχετική κίνηση. Για μια τέτοια πολύπλοκη ανάλυση ηλεκτρικών μηχανών, υπάρχουν μαθηματικοί μετασχηματισμοί που χρησιμοποιούνται για την αποσύνδεση μεταβλητών και την επίλυση εξισώσεων που περιλαμβάνουν χρονικά μεταβαλλόμενους συντελεστές, μεταφέροντας όλες τις μεταβλητές σε ένα

κοινό πλαίσιο αναφοράς. Η εισαγωγή πλαισίων αναφοράς στην ανάλυση των ηλεκτρικών μηχανών είναι χρήσιμη αφού παρέχει ένα ισχυρό εργαλείο για την εφαρμογή εξελιγμένων τεχνικών ελέγχου.

Υπάρχουν δύο είδη μετασχηματισμών που χρησιμοποιούνται στην δυναμική ανάλυση ενός κινητήρα. Η εφαρμογή αυτών των δύο μετασχηματισμών με διαδοχικό τρόπο απλοποιεί τους υπολογισμούς μετατρέποντας την κυματομορφή εναλλασσόμενου ρεύματος και τάσης σε σήματα συνεχούς ρεύματος και τάσης.

Ο μετασχηματισμός Clarke μετατρέπει ένα τριφασικό μέγεθος (a-b-c) σε ένα διφασικό μέγεθος (α - β) σε σταθερό πλαίσιο αναφοράς δύο αξόνων. Ο μετασχηματισμός του Park μεταφέρει τις δύο συνιστώσες του μεγέθους α - β του σταθερού πλαισίου σε ένα ορθογώνιο στρεφόμενο πλαίσιο αναφοράς (d-q) δύο αξόνων, με συνιστώσες I_d και I_q . Στο παρακάτω σχήμα 2.14 απεικονίζονται οι μετασχηματισμοί αυτοί.



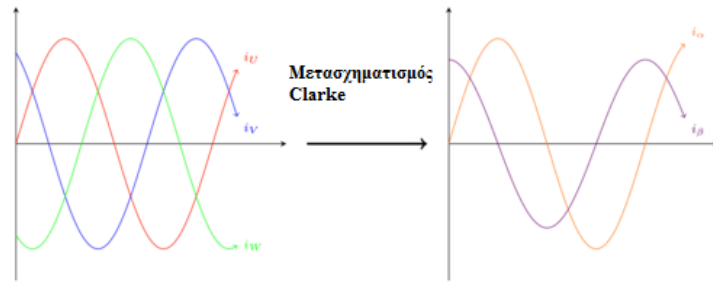
Σχήμα 2.14 Τα πλαίσια αναφοράς και το αντίστοιχο γράφημα που χαρακτηρίζει το καθένα

Στην περίπτωση όπου το μέγεθος που μετασχηματίζεται είναι το ρεύμα, τα διανύσματα I_d , I_q και η στιγμιαία γωνία της μαγνητικής ροής, χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της ροπής ενός ασύγχρονου κινητήρα. Επίσης σε δεύτερο χρόνο χρησιμοποιούνται για να πραγματοποιηθεί ξεχωριστός έλεγχος της μαγνητικής ροής και της ροπής [22, 23].

2.2.6.1 Μετασχηματισμός Clarke και αντίστροφος (a, b, c σε α, β)

Στα τυλίγματα ενός τριφασικού κινητήρα αν και ρέουν τρία ρεύματα, είναι δυνατόν να αποδοθούν ως δύο ρεύματα, με τον ίδιο τρόπο όπως η φαινόμενη ισχύς χωρίζεται σε δύο συνιστώσες, την ενεργή και την άεργη σε ένα σύστημα δύο αξόνων.

Ο μετασχηματισμός μετατρέπει το σύστημα τριών φάσεων a,b,c σε ένα σύστημα δύο αξόνων συντεταγμένων, δύο φάσεων α - β . Προκειμένου ο μετασχηματισμός να είναι αναστρέψιμος, προστίθεται και μια τρίτη μεταβλητή, ονομάζεται συνιστώσα μηδενικής ακολουθίας. Οι δύο νέες συνιστώσες είναι ημιτονοειδείς κυματομορφές, η συνιστώσα του ρεύματος η οποία παράγει την ροπή και η συνιστώσα του ρεύματος η οποία παράγει την μαγνητική ροή. Έτσι οι μηχανές διαμορφώνουν δύο τιμές ως αναφορά εισόδου, το διάνυσμα της ροπής, και το διάνυσμα της μαγνητικής ροής [22, 23].



Σχήμα 2.15 Γραφήματα που δείχνουν τον μετασχηματισμό Clarke

Τα διανυσματικά μεγέθη της τάσης, του ρεύματος και της μαγνητικής ροής μπαίνουν στην μήτρα μετασχηματισμού T ώστε να αναλυθούν στο καρτεσιανό σταθερό πλαίσιο:

$$T_{\alpha\beta 0} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix}$$

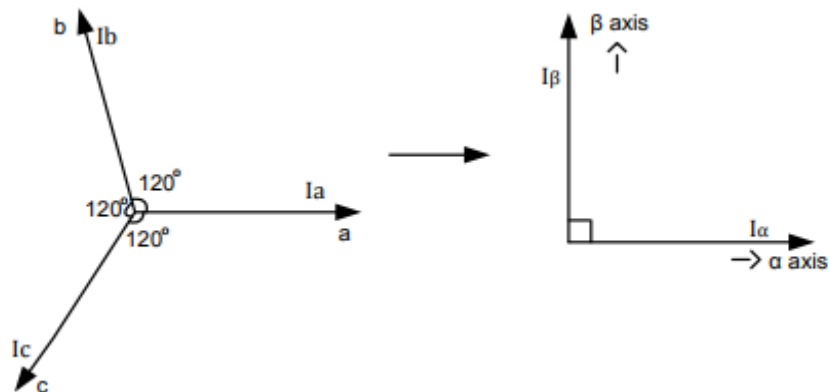
όπου, I_a και I_β τα διανύσματα στο καρτεσιανό σύστημα
 I_0 το ομοπολικό σημείο του συστήματος. Ισχύει ότι:

$$I_a = \frac{2}{3} I_a - \frac{1}{3} (I_b - I_c) \tag{2-45}$$

$$I_\beta = \frac{2}{\sqrt{3}} (I_b - I_c) \tag{2-46}$$

$$I_0 = \frac{2}{3} (I_a + I_b + I_c) \tag{2-47}$$

$$I_a + I_b + I_c = 0 \tag{2-48}$$



Σχήμα 2.16 Ο μετασχηματισμός Clarke από πλαίσιο τριών διανυσμάτων με διαφορά φάσης μεταξύ τους 120° σε πλαίσιο δύο διανυσμάτων με διαφορά φάσης μεταξύ τους 90° όπου αναπαριστούν το διάνυσμα της ροπής και της μαγνητικής ροής.

Ο αντίστροφος μετασχηματισμός μετατρέπει το σύστημα των δύο διανυσμάτων (α,β) σε ένα σύστημα τριών φάσεων I_a, I_b, I_c , δίνεται από τις ακόλουθες εξισώσεις:

$$I_a = I_a \quad (2-49)$$

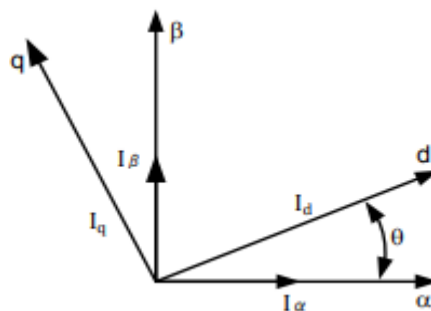
$$I_b = -\frac{1}{2} I_a + \frac{\sqrt{3}}{2} I_\beta \quad (2-50)$$

$$I_c = -\frac{1}{2} I_a - \frac{\sqrt{3}}{2} I_\beta \quad (2-51)$$

2.2.6.2 Μετασχηματισμός Park και αντίστροφος (α, β σε d, q)

Τα διανύσματα I_α και I_β , που υπολογίζονται με τον μετασχηματισμό Clarke, βρίσκονται στο πλαίσιο αναφοράς στάτη α-β. Τα διανύσματα I_α και I_β εξαρτώνται από το χρόνο και την γωνιακή ταχύτητα. Τα διανύσματα στρέφονται με ταχύτητα ίση με την σύγχρονη γωνιακή συχνότητα των ρευμάτων σε σταθερό πλαίσιο αναφοράς δύο αξόνων. Μπορούν να μετατραπούν αυτά τα διανύσματα από το σταθερό πλαίσιο αναφοράς α-β, στο πλαίσιο αναφοράς d-q το οποίο περιστρέφεται με ταχύτητα ίση με τη γωνιακή συχνότητα των ρευμάτων. Κατ' επέκταση τα δύο στρεφόμενα διανύσματα τα οποία αναπαρίστανται στο στρεφόμενο πλαίσιο με κοινή συχνότητα d-q είναι σταθερά. Ο d-q μετασχηματισμός έχει οριστεί έτσι ώστε ο ο άξονας q να καθυστερεί σταθερά του άξονα d κατά 90° ($\pi/2$). Τα στοιχεία I_d και I_q δεν εξαρτώνται από το χρόνο και την ταχύτητα και η γωνιακή μετατόπιση θ είναι συνεχής όπως φαίνεται στο σχήμα 2.17.

Το πλαίσιο αναφοράς μπορεί να περιστρέφεται σε οποιαδήποτε σταθερή ή μεταβαλλόμενη γωνιακή ταχύτητα ή μπορεί να παραμένει ακίνητο. Η γωνιακή ταχύτητα του μετασχηματισμού μπορεί να επιλεγεί κατάλληλα, ώστε να ταιριάζει στην λύση της εξίσωσης του συστήματος ή ώστε να ικανοποιεί τους περιορισμούς του συστήματος [22, 23] .



Σχήμα 2.17 Τα διανύσματα ροπής I_q και της μαγνητικής ροής I_d τα οποία έχουν διαφορά φάσης 90° στο στρεφόμενο πλαίσιο αναφοράς d-q

Ο άξονας d είναι ευθυγραμμισμένος με την μαγνητική ροή του δρομέα, όπου θ είναι η στιγμιαία γωνία της ροής του δρομέα. Τα στοιχεία της ροής και της ροπής του διανύσματος ρεύματος καθορίζονται από τις ακόλουθες εξισώσεις:

$$I_d = I_\alpha \cos(\theta) + I_\beta \sin(\theta) \quad (2-52)$$

$$I_q = I_\beta \cos(\theta) - I_a \sin(\theta) \quad (2-53)$$

Ο αντίστροφος μετασχηματισμός του Park από το σύστημα συντεταγμένων d-q σε α-β δίνεται από τις ακόλουθες εξισώσεις:

$$I_a = I_d \cos(\theta) - I_q \sin(\theta) \quad (2-54)$$

$$I_\beta = I_d \sin(\theta) + I_q \cos(\theta) \quad (2-55)$$

2.2.7 Η σημασία του κύκλου λειτουργίας στους ασύγχρονους κινητήρες

Ο κύκλος λειτουργίας για τους ηλεκτρικούς κινητήρες ορίζεται ως το πηλίκο του χρόνου όπου ο κινητήρας λειτουργεί στην ονομαστική του ισχύ συνεχώς ως προς τον συνολικό χρόνο που εξετάζεται και βρίσκεται σε λειτουργία ή αναμονή. Ο κύκλος λειτουργίας είναι ένα μέτρο του κλάσματος του χρόνου που μια συσκευή ισχύος είναι σε ενεργή κατάσταση και ορίζεται ως:

$$t_{mon} = \frac{t_{on}}{(t_{on} + t_{off})} \quad (2-56)$$

Ο κύκλος λειτουργίας χαρακτηρίζεται από εναλλαγή του φορτίου για δεδομένη χρονική περίοδο. Η διακύμανση φορτίου μπορεί να έχει σταθερό μοτίβο λειτουργίας ή ένα βραχυχρόνιο ή και ένα περιοδικό μοτίβο.

Ο κύκλος λειτουργίας είναι χρήσιμος για τον προσδιορισμό του αποδεκτού χρόνου λειτουργίας για τον κινητήρα ώστε να μην υπερβαίνει η θερμοκρασία λειτουργίας του κινητήρα κάποιο ανώτατο όριο.

Όταν ο κύκλος λειτουργίας είναι τέτοιος ώστε ένας κινητήρας να βρίσκεται σε αδράνεια ή με μειωμένο φορτίο για περισσότερο από 25% του συνολικού χρόνου λειτουργίας, τότε λαμβάνεται ως παράγοντας διαστασιολόγησης του κινητήρα. Σημαντικός επίσης παράγοντας είναι η περιοδική λειτουργία με επίδραση της εκκίνησης και της πέδησης σε σχέση με το φορτίο, όπου μπορεί να υπάρχει υπερθέρμανση του κινητήρα. Κατά τη διαστασιολόγηση του κινητήρα, καθορίζεται μια τιμή rms για την πραγματική ισχύ P_{rms} και την ονομαστική ισχύ P_{nom} του κινητήρα. Ισχύει:

$$P_{nom} > P_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T_{cef}} \int_0^{T_{on}} P^2(t) dt} \quad (2-57)$$

όπου, $P(t)$: είναι η ισχύς λειτουργίας του κινητήρα ως συνάρτηση του χρόνου,

T_{on} : είναι η περίοδος λειτουργίας του κινητήρα

T_{cef} : είναι η αποτελεσματική περίοδος ψύξης αναλόγως τον κινητήρα.

Από το συνολικό χρόνο που ο κινητήρας βρίσκεται σε αναμονή, μόνο το 20% μπορεί να θεωρηθεί ως χρόνος ψύξης.

Το ονομαστικό ρεύμα I_{nom} του κινητήρα που αντιστοιχεί αποτελεσματικά στο ρεύμα πλήρους φορτίου I_{rms} πρέπει να είναι:

$$I_{nom} \geq I_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T_{cef}} \int_0^{T_{on}} I^2(t) dt} \quad (2-58)$$

Κατά την επιτάχυνση και την επιβράδυνση, η ροπή αδράνειας του φορτίου του κινητήρα επιφέρει πρόσθετη καταπόνηση στον κινητήρα. Η δυναμική ροπή επιτάχυνσης είναι η επιπλέον ροπή που απαιτείται για την αλλαγή της κινητικής κατάστασης του φορτίου καθώς επιταχύνει ή επιβραδύνει. Η δυναμική ροπή επιτάχυνσης T_{acc} υπολογίζεται ως:

$$T_{acc} = J \frac{2\pi(n_2-n_1)}{60 t} \quad (2-59)$$

όπου, n_2-n_1 : η μεταβολή της ταχύτητας κατά την επιτάχυνση σε rpm
 J : η ροπή αδράνειας του συστήματος κίνησης σε kgm^2
 t : ο χρόνος που διαρκεί η επιτάχυνση

Η Διεθνής Ηλεκτροτεχνική Επιτροπή (IEC) ορίζει δέκα χαρακτηριστικούς τύπους κύκλου λειτουργίας που υποδηλώνονται ως S1 – S10, όπως φαίνεται στον Πίνακα 1 [12, 14, 16, 19].

Πίνακας 1 Οι δέκα χαρακτηριστικοί τύποι λειτουργίας ενός ηλεκτρικού κινητήρα.

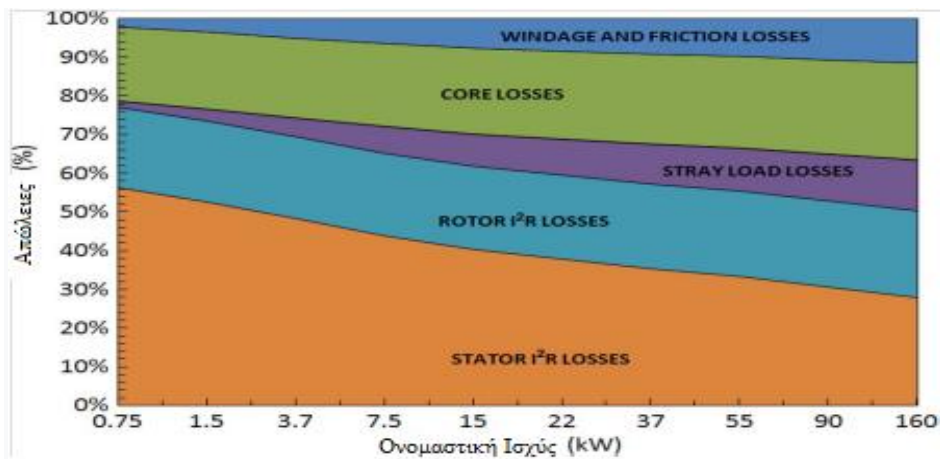
Τυποποίηση λειτουργίας	Κύκλος Λειτουργίας
S1	Συνεχής Λειτουργία.
S2	Βραχυχρόνια Λειτουργία.
S3	Περιοδική Λειτουργία.
S4	Περιοδική Λειτουργία με επίδραση εκκίνησης.
S5	Περιοδική Λειτουργία με επίδραση εκκίνησης και πέδησης
S6	Περιοδική Λειτουργία με σταθερό φορτίο και περιόδους μηδενικού φόρτου.
S7	Περιοδική Λειτουργία με εκκίνηση που διαρκεί, σταθερής ισχύς λειτουργίας και τέλος ισχυρή πέδηση χωρίς περιόδους ηρεμίας.
S8	Περιοδική Λειτουργία με ακολουθία από χρόνους σταθερής ισχύος και στροφών.
S9	Μή περιοδική λειτουργία με το φορτίο και την ταχύτητα να διαφοροποιούνται εντός του επιτρεπόμενου εύρους λειτουργίας, συχνές υπερφορτώσεις οι οποίες μπορεί να υπερβαίνουν κατά πολύ το ονομαστικό φορτίο
S10	Λειτουργία με δεδομένες διακριτές τιμές φορτίου που διατηρούνται για επαρκή χρόνο ώστε ο κινητήρας να φτάνει σε θερμική ισορροπία. Το ελάχιστο φορτίο κατά τη διάρκεια ενός κύκλου λειτουργίας μπορεί να έχει μηδενική τιμή.

2.2.8 Σχεδιασμός βελτίωσης της απόδοσης στους ασύγχρονους κινητήρες

Η απόδοση ενός κινητήρα καθορίζεται από τις εγγενείς απώλειες που αναφέρθηκαν και οι οποίες μπορούν να μειωθούν με την αλλαγή του σχεδιασμού κατασκευής του κινητήρα. Οι ενεργειακά αποδοτικοί κινητήρες έχουν καινοτόμο σχεδιασμό, παράγονται με βελτιωμένες τεχνικές κατασκευής και ανώτερες πρώτες ύλες.

Ένας ενεργειακά αποδοτικός κινητήρας χαρακτηρίζεται από υψηλότερους συντελεστές λειτουργίας, διαθέτει μόνωση μεγαλύτερης διάρκειας ζωής και πιο αποδοτικά και αξιόπιστα έδρανα κύλισης, λειτουργεί με μικρότερη έκλυση θερμότητας, έχει χαμηλότερη στάθμη θορύβου και λιγότερους κραδασμούς.

Η βελτίωση της απόδοσης ενός κινητήρα, προϋποθέτει από τους κατασκευαστές την μείωση όλων των ειδών απωλειών που προκύπτουν κατά την λειτουργία του στο πλήρες φορτίο. Παρακάτω αναφέρονται τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά τα οποία αναβαθμίζονται στους ασύγχρονους κινητήρες [1, 13].



Σχήμα 2.18 Το ποσοστό κάθε είδους απώλειας επαγωγικού κινητήρα σε σχέση με την ονομαστική ισχύ Πηγή "Overview of Retrofitting Options in Induction Motors", July 2018

2.2.8.1 Κατασκευή του στάτη και του δρομέα

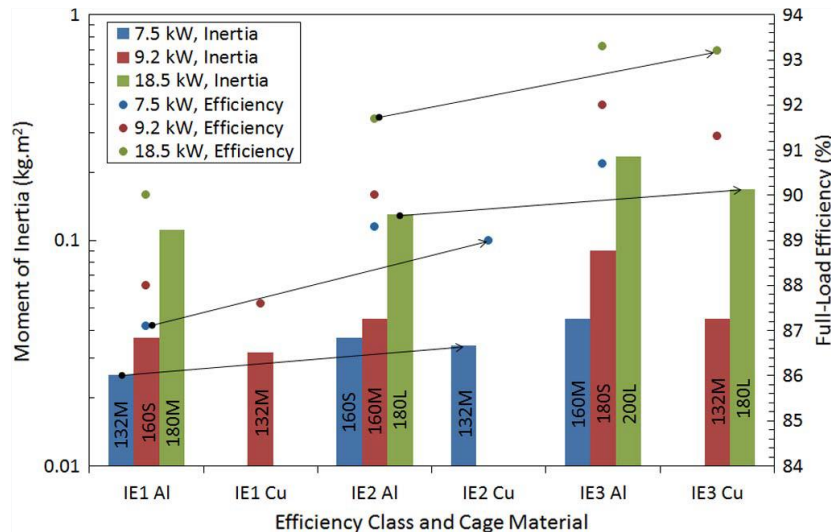
Η κατασκευή του κλωβού του δρομέα σε έναν επαγωγικό κινητήρα βελτιώνεται με την χρήση χαλκού αντί του αλουμινίου καθώς και με μεγαλύτερης διατομής αγωγούς στις περιελίξεις. Η χρήση του χαλκού αντί του αλουμινίου γίνεται για να μειωθεί η ροπή αδράνειας του δρομέα και σε κάποιες περιπτώσεις το μέγεθος του πλαισίου του κινητήρα. Ο σχεδιασμός περιλαμβάνει μεγαλύτερης διατομής χάλκινους αγωγούς που μειώνουν την αντίσταση στα τυλίγματα του στάτη και τις απώλειες χαλκού.

Για κινητήρες με το ίδιο μέγεθος πλαισίου, χρησιμοποιώντας δρομέα από χαλκό μειώνονται κατά 15% έως 18% οι συνολικές απώλειες του κινητήρα, σε σύγκριση με το δρομέα από αλουμίνιο, και αυτό αντιπροσωπεύει μία αύξηση απόδοσης από 2 έως 4%. Για την ίδια απόδοση κινητήρων, αυτός ο σχεδιασμός επιτρέπει την μείωση της ροπής αδράνειας του δρομέα και του μεγέθους του πλαισίου του κινητήρα.

Ο βελτιστοποιημένος σχεδιασμός μπορεί να οδηγήσει στη βελτίωση της καμπύλης ροπής - ταχύτητας και την μείωση των απωλειών χαλκού και των κατανεμημένων απωλειών στον δρομέα και τον στάτη.

Οι αρμονικές που παράγονται από την αλληλεπίδραση του πεδίου του στάτη με του δρομέα μπορούν να μειωθούν με διάφορες επεμβάσεις στα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της μηχανής με αύξηση του αριθμού των αυλακώσεων, και την μείωση του λόγου της επιφάνειας προς το διάκενο των αυλακώσεων.

Συμπερασματικά οι κινητήρες με δρομέα από χαλκό έχουν συχνά υψηλότερο ρεύμα εκκίνησης λόγω των χαμηλών ωμικών απωλειών. Ακόμη η ολίσθηση του κινητήρα είναι μικρότερη λόγω των χαμηλότερων απωλειών και άρα η ονομαστική τους ταχύτητα μεγαλύτερη για δεδομένο φορτίο [13,4].



Σχήμα 2.19 Η διακύμανση της αδράνειας του δρομέα σε σχέση με την κλάση απόδοσης ασύγχρονου επαγωγικού κινητήρα βραχυκυκλωμένου κλωβού, για διαφορετικές κατηγορίες απόδοσης και υλικά κατασκευής του δρομέα Πηγή: *Beyond induction motors — Technology trends to move up efficiency, April 2013*

2.2.8.2 Υλικό του πυρήνα

Κατά μέσο όρο, σε έναν επαγωγικό κινητήρα, η απώλειες σιδήρου αντιπροσωπεύουν κατά προσέγγιση το 20% των συνολικών απωλειών σύμφωνα με το σχήμα 2.18. Για τον περιορισμό των απωλειών των δινορευμάτων και των απωλειών υστέρησης ενδείκνυται η χρήση κατάλληλων συνδυασμών υλικών στην κατασκευή των πυρήνων.

Τόσο ο στάτης, όσο και ο δρομέας της μηχανής περιλαμβάνουν τμήματα αποτελούμενα από σίδηρο. Ο σίδηρος χρησιμοποιείται διότι λόγω της υψηλής μαγνητικής του διαπερατότητας, επιτυγχάνονται υψηλές τιμές μαγνητικής επαγωγής και κατά συνέπεια υπάρχει η βέλτιστη μαγνητική ζεύξη στάτη δρομέα. Αντί για καθαρό σίδηρο, όμως, είναι προτιμότερη η χρήση κραμάτων σιδήρου και πυριτίου (iron-silicon alloys), που περιορίζουν όχι μόνο τις απώλειες δινορευμάτων, αλλά και τις απώλειες υστέρησης. Συγκεκριμένα οι βελτιώσεις στον σχεδιασμό περιλαμβάνουν την κατασκευή μακρύτερου μήκους πυρήνα από χάλυβα πυριτίου χαμηλότερης απώλειας, με λεπτότερες ελασματοποιήσεις με σκοπό την αύξηση του ενεργού υλικού. Η παρουσία του πυριτίου αυξάνει την μαγνητική διαπερατότητα σε σχέση με την κρίσιμη ένταση του μαγνητικού πεδίου ενώ μειώνει την περιοχή του βρόχου υστέρησης. Ακόμη αυξάνει την αντοχή των φύλλων και περιορίζει τη γήρανση.

Οι απώλειες πυρήνα μπορούν να μειωθούν σημαντικά αντικαθιστώντας τους τυποποιημένους χάλυβες από άμορφα μαγνητικά κράματα, αφού χαρακτηρίζονται από υψηλής πυκνότητας κορεσμού μαγνητική ροή, λόγω του πολύ μικρού τους πάχους. Ως αποτέλεσμα, οι απώλειες τους συγκριτικά είναι πολύ χαμηλότερες για μια δεδομένη συχνότητα και στο μέγιστο επίπεδο μαγνήτισης. Χρησιμοποιώντας τα άμορφα μαγνητικά κράματα, οι απώλειες πυρήνα μπορεί να μειωθούν έως 70% [13].

2.2.8.3 Κατασκευή του διακένου

Το μειωμένο και ομοιόμορφο διάκενο αέρα μειώνει την μαγνητική αντίσταση και τις απώλειες μαγνητικής ροής για μια δεδομένη μαγνητεγερτική δύναμη, ελαχιστοποιεί το ρεύμα μαγνήτισης, και βελτιώνει την ηλεκτρομαγνητική συμμετρία της μηχανής. Ο σχεδιασμός στους ενεργειακά αποδοτικούς κινητήρες διατηρεί το ελάχιστο μήκος διακένου αέρα για τη βελτίωση του συντελεστή ισχύος και για τη μείωση των απωλειών φορτίου που ανήκουν στις κατανεμημένες απώλειες του κινητήρα. Για την κατασκευή ενός κινητήρα με μειωμένο διάκενο απαιτείται υψηλή ακρίβεια στην κατασκευή και τη συναρμογή των εξαρτημάτων που περιλαμβάνει [8, 13].

2.2.8.4 Ανεμιστήρας ψύξης

Η βελτίωση του εξωτερικού ανεμιστήρα ψύξης του κινητήρα συμβάλλει στον περιορισμό των ωμικών απωλειών. Η αποτελεσματική ψύξη των περιελίξεων του στάτη και του δρομέα συμβάλλει στην μείωση της ειδικής αντίστασης, στη βελτίωση της ισχύος εξόδου, στην αξιοπιστία και την μεγαλύτερη διάρκεια ζωής των ηλεκτρικών κινητήρων.

Για μεγαλύτερους κινητήρες, η απόδοση σε λειτουργία μερικού φορτίου βελτιώνεται με την χρήση ανεμιστήρα μονής κατεύθυνσης αντί του γενικού αμφίδρομης κατεύθυνσης ανεμιστήρα και ειδικά σε περίπτωση που η λειτουργία γίνεται προς μία κατεύθυνση. Ο καινοτόμος σχεδιασμός περιλαμβάνει, την γεωμετρία του αντίστοιχου καλύμματος και τα εσωτερικά πτερύγια του δρομέα για την βέλτιστη προσαγωγή αέρα. Η βελτίωση του ανεμιστήρα ψύξης οδηγεί επίσης σε μείωση του ακουστικού θορύβου.

Στην περίπτωση κινητήρων που λειτουργούν με μεταβλητή ταχύτητα, χρησιμοποιείται ανεμιστήρας ψύξης εύκαμπτων πτερυγίων, μειώνοντας τις απώλειες στην υψηλή ταχύτητα και αυξάνοντας την ικανότητα ψύξης σε χαμηλή ταχύτητα [13, 4].

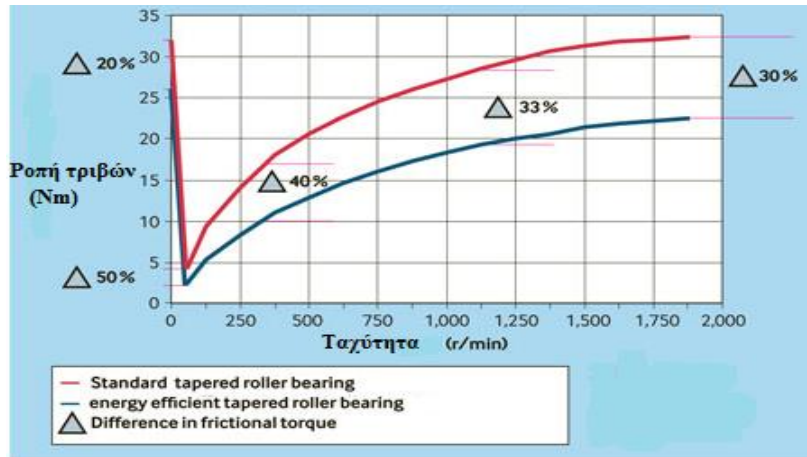
2.2.8.5 Έδρανα κύλισης

Πρόοδος στην τεχνολογία των εδράνων κύλισης αποτελεί η κατασκευή των κεραμικών εδράνων, χαμηλής τριβής. Ένα κεραμικό έδρανο κύλισης αποτελείται από μεταλλικούς εσωτερικούς και εξωτερικούς δακτυλίους και διαθέτει κεραμικές σφαίρες νιτριδίου του πυριτίου, Si_3N_4 .

Μειώνουν έως 50% τις απώλειες τριβής στην ονομαστική ταχύτητα σε σχέση με τα συμβατικά έδρανα, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.20. Η μείωση της τριβής οδηγεί σε χαμηλότερη θερμοκρασία λειτουργίας και στην μεγαλύτερη διάρκεια ζωής. Η μείωση τριβής επιτυγχάνεται με τα βελτιωμένα χαρακτηριστικά τους όπως η εσωτερική γεωμετρία και το πολυμερές υλικό των οδηγών, το οποίο διαθέτει χαμηλότερο συντελεστή τριβής σε σχέση με τον συμβατικό ατσάλινο οδηγό.

Τα κεραμικά υβριδικά έδρανα κύλισης είναι μη αγώγιμα ηλεκτρικά. Οι μη αγώγιμες κεραμικές σφαίρες στα έδρανα εξαλείφουν το ηλεκτρικό τόξο. Αυτό είναι σημαντικό σε εφαρμογές όπου ένας ηλεκτρικός κινητήρας ελέγχεται από μια μονάδα ελέγχου στροφών (VFD).

Τα κεραμικά υβριδικά έδρανα κύλισης έχουν έως και δέκα φορές μεγαλύτερη διάρκεια ζωής από ένα συμβατικό. Η χρήση τους συνεπάγεται υψηλότερη απόδοση και αξιοπιστία για τον κινητήρα [4, 13].



Σχήμα 2.20 Διάγραμμα της ροπής τριβών σε σχέση με την ταχύτητα, συγκρίνοντας συμβατικού τύπου έδρανα κύλισης με νέου τύπου κεραμικά. Πηγή: evolution.skf.com

Συμπερασματικά, μια μικρή βελτίωση στην ενεργειακή απόδοση ισοδυναμεί με σημαντική μείωση των απωλειών ενέργειας όπως φαίνεται και με το παράδειγμα στο σχήμα 2.21. [2].

Η απόδοση ενός κινητήρα υψηλότερης ενεργειακής κλάσης πρέπει να λαμβάνεται υπ' όψιν στις ακόλουθες περιπτώσεις:

- Για όλες τις νέες εγκαταστάσεις εφαρμογών κίνησης.
- Όταν γίνονται σημαντικές αναβαθμίσεις σε υπάρχουσες εγκαταστάσεις ή διαδικασίες.
- Σε όλες τις περιπτώσεις εξοπλισμού που περιέχουν παλαιού τύπου ηλεκτρικούς κινητήρες.

EFFICIENCY CLASS	LOSSES (WATTS)	LOSS REDUCTION (%)	ENERGY EFFICIENCY (%)
IE1	4,073		91.7
IE2	3,335	-18	93.1
IE3	2,771	-32	94.2
IE4	2,170	-47	95.4

Σχήμα 2.21 Παράδειγμα με κινητήρα, 45 kW, 4 πόλων, 50 Hz. Η διαφορά στην απόδοση των κινητήρων IE4 και IE1 είναι 3,7%, αλλά αυτό ισοδυναμεί με μείωση 47% στις απώλειες ενέργειας.

Πηγή: "Energy-Efficient Electric Motors and Motor Systems-Un Environment"

2.3 Οδήγηση και έλεγχος σε εφαρμογές με ασύγχρονους κινητήρες

2.3.1 Εισαγωγή

Μια μονάδα ελέγχου στροφών ή μονάδα μεταβλητής συχνότητας (Variable Frequency Drive) είναι ένας ελεγκτής που οδηγεί έναν A.C. ηλεκτρικό κινητήρα μεταβάλλοντας τη συχνότητα και την τάση της τροφοδοσίας του. Αυτή η μονάδα επίσης αποκαλείται με τον όρο «inverter». Υπάρχουν διαφορετικοί τύποι μονάδων ελέγχου στροφών, όλοι όμως χρησιμοποιούνται ώστε να

μετατρέπουν τη σταθερή τάση και συχνότητα εισόδου σε μεταβλητή τάση και συχνότητα εξόδου όπως απαιτείται. Μία μονάδα ελέγχου στροφών σε ένα κινητήριο σύστημα οδηγεί τον κινητήρα σύμφωνα με τις απαιτήσεις της εφαρμογής, βελτιώνει την συμπεριφορά του ως προς τον επιμέρους εξοπλισμό και προσφέρει αξιοπιστία στο σύστημα.

Παρακάτω θα αναλυθούν τα χαρακτηριστικά των μονάδων ελέγχου στροφών και θα αναφερθούν τα πλεονεκτήματά τους και τα μειονεκτήματά τους τα οποία επηρεάζουν το σύστημα στο οποίο είναι ενσωματωμένες.

2.3.2 Τα πλεονεκτήματα των μονάδων ελέγχου στροφών

Μια μονάδα ελέγχου στροφών αποτελεί σημαντικό κομμάτι του αυτοματισμού. Διαδικασίες που εκτελούνται μέσω των εφαρμογών κίνησης, επωφελούνται από την χρήση των μονάδων αυτών οι οποίες επιτυγχάνουν μέσω του ελέγχου των κινητήρων βελτιστοποίηση των διαδικασιών, μείωση του κόστους λειτουργίας, εξοικονόμηση ενέργειας και αξιόπιστη λειτουργία με μικρότερης κλίμακας συντήρηση. Η εξοικονόμηση της ενέργειας και η βελτίωση της απόδοσης του κινητήριου συστήματος γίνεται με την αντιστοίχιση της ταχύτητας ή με την αντιστοίχιση της ροπής και της ισχύος, με τις απαιτήσεις μιας εφαρμογής.

Η ομαλή λειτουργία σε όλο το εύρος ροπής και ισχύος των κινητήρων έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της διάρκειας ζωής του κινητήρα και την μείωση των κραδασμών και των καταπονήσεων στο φορτίο βελτιώνοντας την διάρκεια ζωής των μηχανολογικών εξαρτημάτων μιας μηχανής.

Επιγραμματικά τα πλεονεκτήματα των μονάδων ελέγχου στροφών είναι τα ακόλουθα:

- Ευέλικτα χαρακτηριστικά ελέγχου.
- Ελεγχόμενη εκκίνηση και πέδηση .
- Παρέχει ένα ευρύ φάσμα ροπών σε ένα ευρύ φάσμα ταχυτήτων
- Διαθεσιμότητα σε ευρύ φάσμα ηλεκτρικής ισχύος.
- Λειτουργία σχεδόν σε κάθε είδους περιβαλλοντικές συνθήκες.
- Δυνατότητα λειτουργίας και στα τέσσερα τεταρτημόρια του επιπέδου ροπής.

Οι μονάδες ελέγχου στροφών ενσωματώνουν δυνατότητες συνδεσιμότητας ώστε να επικοινωνούν με προγραμματιζόμενους λογικούς ελεγκτές, με αισθητήρια ελέγχου και διατάξεις προστασίας ενώ έχουν την δυνατότητα αυτοδιάγνωσης για να διασφαλίζουν πρόσθετα την ομαλή λειτουργία του συστήματος.

Μία μονάδα ελέγχου στροφών αποτελείται από τα παρακάτω τμήματα:

- Σύστημα ελέγχου του μετατροπέα
- Σύστημα ανάδρασης και ελέγχου της ταχύτητας
- σύστημα ανατροφοδότησης και ελέγχου του ρεύματος
- Εξωτερικό σύστημα παραμετροποίησης, το οποίο μπορεί να περιλαμβάνει τα εξής:
 - Ρυθμίσεις παραμέτρων από τον χρήστη
 - Πληροφορίες χειριστή και διαγνωστικά σφαλμάτων
 - Ψηφιακές και αναλογικές εισόδους για την λήψη σημάτων ελέγχου
 - Ψηφιακές και αναλογικές εξόδους για την αποστολή πληροφοριών κατάστασης (λειτουργία, βλάβη, κλπ.)

Τα σύγχρονα συστήματα των μονάδων ελέγχου στροφών βασίζονται στην τεχνολογία των μικροεπεξεργαστών και έχουν ως στόχο τα παρακάτω:

- Υψηλό επίπεδο αξιοπιστίας
- Υψηλή απόδοση του αντιστροφέα για να διασφαλιστεί ότι η κυματομορφή του ρεύματος εξόδου παρέχει επαρκή ροπή στον κινητήρα, στο εύρος των τιμών της ταχύτητας, με τις ελάχιστες απώλειες
- Δυνατότητα ενσωμάτωσης του συστήματος ελέγχου της μονάδας στο συνολικό σύστημα ελέγχου των εγκαταστάσεων και των διαδικασιών παρέχοντας ευχέρεια εξωτερικού ελέγχου και επικοινωνίας
- Υψηλή ανοχή στις διακυμάνσεις της τροφοδοσίας και την ηλεκτρομαγνητική παρεμβολή [11, 16].

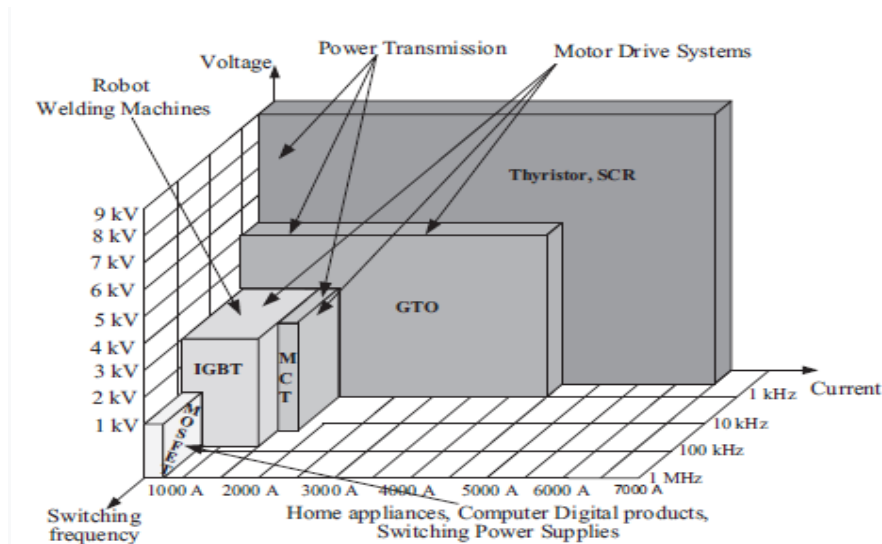
2.3.3 Οι διακόπτες ισχύος που χρησιμοποιούνται στα κυκλώματα των μονάδων ελέγχου στροφών

Το SCR (Silicon Controlled Rectifier), γνωστό ως Thyristor, είναι η πιο διαδεδομένη συσκευή στα κυκλώματα ελέγχου εναλλασσόμενης τάσης έως 11 kV. Μπορούν να διαχειριστούν την μεγαλύτερη ισχύ σε τάσεις και ρεύματα, αλλά η μέγιστη συχνότητα λειτουργίας είναι περιορισμένη και φθάνει ως τα 10kHz. Η έναυση του στοιχείου επιτυγχάνεται με έναν θετικό παλμό, χαμηλής ισχύος, στην πύλη του. Η σβέση του στοιχείου γίνεται με μείωση του ρεύματος που το διαρρέει κάτω από μια ορισμένη τιμή, που καλείται ρεύμα συγκράτησης.

Το Gate Turn-Off Thyristor (GTO) έχει το πλεονέκτημα ότι έχει την δυνατότητα για έλεγχο της σβέσης του με έναν αρνητικό παλμό στην πύλη του. Τα GTOs έχουν μεγαλύτερη πτώση τάσης και απώλειες ισχύος σε κατάσταση αγωγής, σε σχέση με τα SCR. Τα GTO χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές ισχύος έως και 10 MVA. Οι συχνότητες λειτουργίας φθάνουν μέχρι τα 10kHz, αυτό το χαρακτηριστικό σε συνδυασμό με την αναγκαία χρήση κυκλώματος snubber για την λειτουργία τους ειδικά σε περίπτωση επαγωγικών φορτίων, περιορίζει τις δυνατότητες χρήσης τους.

Τα τρανζίστορ ισχύος, σήμερα έχουν αντικατασταθεί πλήρως από τα MOSFETs ισχύος και τα IGBT. Τα διπολικά τρανζίστορ τύπου MOSFET έχουν ως πλεονέκτημα την υψηλή συχνότητα λειτουργίας πάνω από 100kHz. Μπορούν να διαχειριστούν τάσεις έως 1000 V, με ρεύμα έως 100A, η ισχύς που μπορούν να διαχειριστούν είναι ως 0,1 MVA. Χαρακτηρίζονται από μικρούς χρόνους έναυσης και σβέσης και έχουν χαμηλές απώλειες μετάβασης.

Τα IGBT έχουν χρησιμοποιηθεί ευρέως στους ηλεκτρονικούς μετατροπείς ισχύος. Τα πλεονεκτήματα του IGBT είναι οι μικρές απώλειες σε κατάσταση αγωγιμότητας και οι μικροί χρόνοι έναυσης και σβέσης. Η συχνότητα λειτουργίας τους φτάνει τα 50kHz και μπορούν να διαχειριστούν τάσεις μέχρι 3300 V και τιμές ρεύματος μέχρι 2400 A [24, 26]. Παρακάτω δίνεται το σχήμα 2,22 όπου παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά όσο αναφορά την τάση, το ρεύμα και την συχνότητα μεταγωγής διαφορετικών τύπων διακοπών ισχύος.

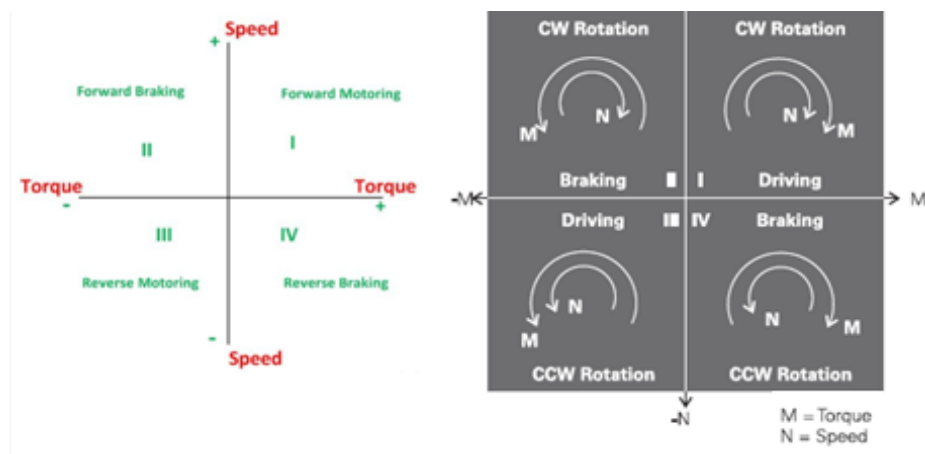


Σχήμα 2.22 Οι σύνηθεις χρησιμοποιούμενοι διακόπτες ισχύος και τα χαρακτηριστικά τους.
Πηγή: Power Electronics and Motor Drive Systems Stefanos N. Manias

2.3.4 Οι λειτουργίες μιας μονάδας ελέγχου στροφών

2.3.4.1 Κίνηση τεσσάρων τεταρτημώριων

Η έννοια της λειτουργίας σε τέσσερα τεταρτημόρια παίζει σημαντικό ρόλο στην λειτουργία και τις επιλογές που παρέχουν οι μονάδες ελέγχου στροφών. Τόσο η ροπή, T_M , που αναπτύχθηκε στον κινητήρα όσο και η ταχύτητα n , του δρομέα μπορεί να θεωρηθεί ότι έχουν δύο κατευθύνσεις.



Σχήμα 2.23 Δείχνονται σε καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων οι άξονες της ταχύτητας και της ροπής καθώς και τις λειτουργίες ενός κινητήρα σε κάθε τεταρτημόριο. Πηγή: Basics of AC Drives A quickSTEP Online Course, Siemens

1^ο Τεταρτημόριο - Η ροπή και η ταχύτητα είναι θετικές, το οποίο υποδηλώνει την λειτουργία κινητήρα και περιστροφή κατά την ωρολογιακή φορά, αφού η ροπή του κινητήρα είναι στην κατεύθυνση της κίνησης.

2^ο Τεταρτημόριο - Η ροπή είναι αρνητική και η ταχύτητα θετική, το οποίο σημαίνει πέδηση του κινητήρα ο οποίος λειτουργεί ως γεννήτρια, εφόσον η ροπή του κινητήρα είναι αντίθετη της κατεύθυνσης της κίνησης.

3^ο Τεταρτημόριο - Η ροπή και η ταχύτητα είναι αρνητικές, που σημαίνει περιστροφή του κινητήρα κατά την ανθωρολογιακή φορά

4^ο Τεταρτημόριο - Η ταχύτητα είναι αρνητική και η ροπή θετική, που σημαίνει πέδηση του κινητήρα ο οποίος λειτουργεί ως γεννήτρια στρεφόμενη κατά την ανθωρολογιακή φορά και επιβραδύνει την κίνησή του.

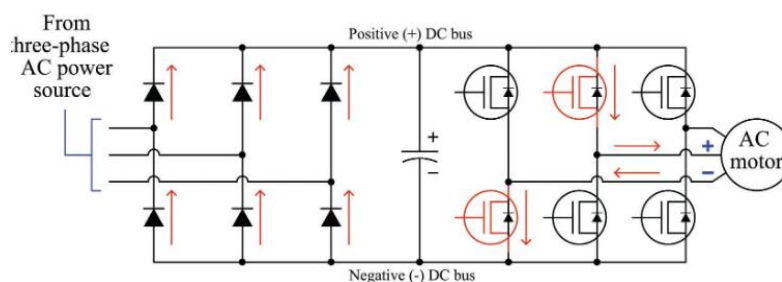
2.3.4.2 Τρόποι πέδησης με μονάδα ελέγχου στροφών

Η πέδηση αποτελεί στοιχείο ελέγχου ενός κινητήρα. Υπάρχουν τρεις βασικοί τύποι ηλεκτρικής πέδησης για κινητήρες. Ο τρόπος πέδησης επιλέγεται αναλόγως των απαιτήσεων κάθε εφαρμογής και βάσει των δυνατοτήτων που προσφέρει η μονάδα ελέγχου. Συγκεκριμένα ηλεκτρική πέδηση μπορεί να υπάρξει με τους παρακάτω τρόπους:

- Με παροχή στιγμιαίας συνεχούς τάσης
- Με δυναμική πέδηση
- Με αναγεννητική πέδηση

2.3.4.2.1 Πέδηση με παροχή στιγμιαίας συνεχούς τάσης

Η πέδηση με παροχή συνεχούς τάσης χρησιμοποιεί την τεχνική ενεργοποίησης των τυλιγμάτων του στάτη με ένα μικρό συνεχές ρεύμα αντί του εναλλασσόμενου ρεύματος που χρειάζεται ο κινητήρας. Αυτή η μέθοδος πέδησης είναι αρκετά αποτελεσματική, αφού με μικρή τιμή συνεχούς ρεύματος στα τυλίγματα του στάτη, μπορεί να προκληθεί μεγάλη ροπή πέδησης. Η ροπή πέδησης που παράγεται εξαρτάται από την τιμή του συνεχούς ρεύματος που διοχετεύεται και την ταχύτητα του δρομέα. Κατά τη διάρκεια της πέδησης, η αποθηκευμένη ενέργεια του κινητήρα διασκορπίζεται στον ίδιο τον δρομέα. Ωστόσο, επειδή κατά την πέδηση δεν γίνεται έλεγχος της ταχύτητας του κινητήρα δεν είναι δυνατόν να προβλεφθεί ο χρόνος πέδησης του κινητήρα [16, 31].



Σχήμα 2.24 Το σχηματικό διάγραμμα πέδησης με παροχή στιγμιαίας τάσης σε έναν ασύγχρονο κινητήρα

2.3.4.2.2 Δυναμική πέδηση

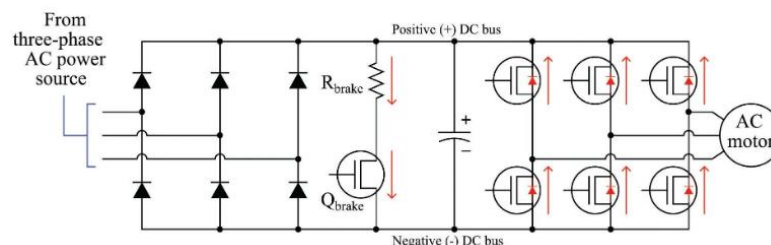
Η ροή ισχύος έχει κατεύθυνση από τον κινητήρα στο δίαυλο DC της μονάδας. Η ενέργεια δεν μπορεί να επιστραφεί στην πηγή επειδή αν ο ανορθωτής στην είσοδο μεταφέρει ισχύ μόνο προς μία

κατεύθυνση. Έτσι η ενέργεια απορροφάται από τον πυκνωτή του διαύλου, του οποίου η τάση αυξάνεται. Για να αποφευχθεί η αύξηση της τάσης του διαύλου DC σε επικίνδυνα υψηλό επίπεδο, ο πυκνωτής πρέπει να εκφορτίζεται περιοδικά. Αυτό γίνεται μέσω μιας μονάδας δυναμικής πέδησης όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα 2.25, που αποτελείται από έναν ηλεκτρονικό διακόπτη ισχύος, συνήθως ένα IGBT ή ένα BJT, και μια αντίσταση εκφόρτισης συνδεδεμένη στον πυκνωτή του διαύλου DC.

Όταν η ταχύτητα του κινητήρα είναι πολύ χαμηλή, ο μετατροπέας μπορεί να διατηρήσει την απαραίτητη ολίσθηση για την απαραίτητη ροπή πέδησης, επιτρέποντας στον κινητήρα να φρενάρει ηλεκτρικά μέχρι τη μηδενική ταχύτητα. Η τιμή της αντίστασης που επιλέγεται στο δίαυλο DC, αντιστοιχεί στην ονομαστική ισχύ και το 100% της ροπής στη μέγιστη ταχύτητα του κινητήρα. Το IGBT πέδησης καθορίζεται από την τιμή της αντίστασης πέδησης και τη μέγιστη τάση του διαύλου DC και είναι συνήθως του ίδιου τύπου με αυτά του αντιστροφέα. Η αντίσταση R_{brake} τοποθετείται σε σημείο όπου η θερμότητα που απορρίπτεται, να μην επηρεάζει τις απαιτήσεις απαγωγής θερμότητας του ρυθμιστή στροφών. Η μέγιστη ισχύς πέδησης του συστήματος εμφανίζεται όταν η αντίσταση είναι κρύα, κατά τη διάρκεια των πρώτων δευτερολέπτων της διαδικασίας. Όταν η αντίσταση θερμανθεί, η τιμή της ροπής πέδησης μειώνεται..

Ο κύκλος λειτουργίας, είναι ο αριθμός ανά λεπτό που χρησιμοποιείται η αντίσταση R_{brake} . Πολλά κυκλώματα είναι σχεδιασμένα με μέγιστο κύκλο λειτουργίας 10% (6sec on, 54sec off-time) ώστε να ψύχεται επαρκώς). Η αντίσταση πέδησης ακολούθως υπολογίζεται από τον τύπο [16, 25, 31]:

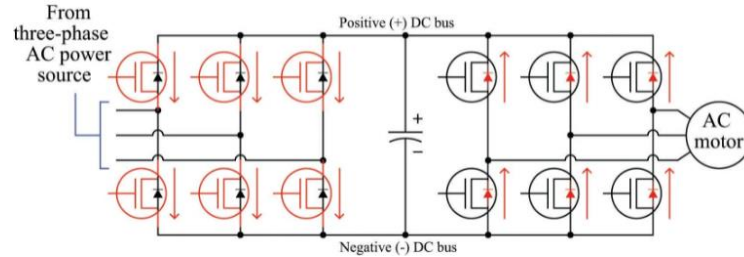
$$R_{brake} = \frac{(V_{DC,ON})^2}{P_{motor}(Watt)} \quad (2-60)$$



Σχήμα 2.25 Το σχηματικό διάγραμμα της δυναμικής πέδησης σε έναν ασύγχρονο κινητήρα

2.3.4.2.3 Αναγεννητική πέδηση

Η αναγεννητική πέδηση λειτουργεί τον κινητήρα ως γεννήτρια, αλλά αντί να διοχετεύει την ενέργεια σε μια ωμική αντίσταση, την διοχετεύει πίσω στο δίκτυο τροφοδοσίας. Κατά την πέδηση, η συχνότητα εξόδου του μετατροπέα μειώνεται σε επίπεδο κάτω από την πραγματική ταχύτητα του δρομέα. Η διαδρομή για την ισχύ πέδησης είναι, από τον κινητήρα μέσω των ανάστροφα συνδεδεμένων διόδων ισχύος του αντιστροφέα, προς τον πυκνωτή του διαύλου DC, ο οποίος φορτίζεται και διοχετεύει προς τους διακόπτες ισχύος του ανορθωτή συνεχή τάση. Οι διακόπτες ισχύος του ανορθωτή με τον κατάλληλο έλεγχο μετατρέπουν τη συνεχή σε εναλλασσόμενη τάση σύγχρονη με την πηγή ισχύος και διοχετεύουν την ισχύ προς την πηγή.



Σχήμα 2.26 Το σχηματικό διάγραμμα της αναγεννητικής πέδησης σε έναν ασύγχρονο κινητήρα

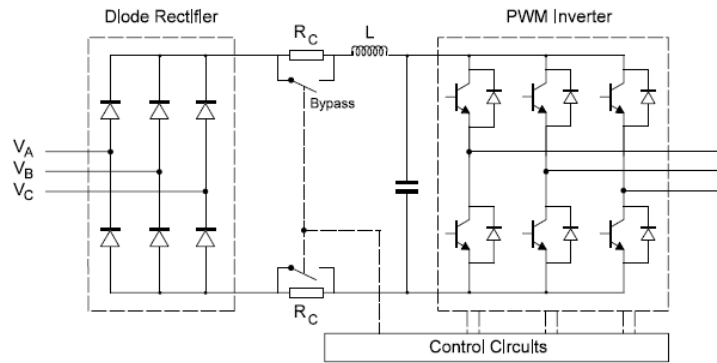
Η αναγεννητική πέδηση έχει ως πλεονέκτημα την επαναφορά της κινητικής ενέργειας που χάθηκε μέσω της πέδησης σε παραγωγική χρήση. Καμία άλλη μέθοδος πέδησης δεν το κάνει αυτό. Μειονεκτήματα αποτελούν, το κόστος για τον αυξημένο αριθμό εξαρτημάτων και η πολυπλοκότητα, οδηγώντας σε ένα πιο ακριβό και πιθανώς πιο επιρρεπές σε σφάλματα σύνολο εξοπλισμού. Ωστόσο, σε εφαρμογές όπου η ανακτώμενη ενέργεια είναι σημαντική, η εξοικονόμηση του κόστους λειτουργίας της αναγεννητικής πέδησης θα αντισταθμίσει γρήγορα το επιπλέον κόστος της αγοράς της [16, 31].

2.3.5 Κατηγοριοποίηση των μονάδων ελέγχου στροφών

Η κατηγοριοποίηση των μονάδων ελέγχου στροφών γίνεται βάσει της σχεδίασης των ηλεκτρονικών τους κυκλωμάτων, των ξεχωριστών κατασκευαστικών χαρακτηριστικών και βάσει των μεθόδων ελέγχου που χρησιμοποιούν, για να οδηγούν τους κινητήρες. Οι μετατροπείς AC / AC μπορούν να διακριθούν σε δύο επιμέρους τύπους, στους έμμεσους μετατροπείς, EP/ΣP/EP (DC linked Inverter) και τους άμεσους μετατροπείς, κυκλομετατροπείς (Cycloconverter) E.P./E.P. Η παρούσα εργασία θα ασχοληθεί με τους έμμεσους μετατροπείς αφού αυτοί αποτελούν την πλειονότητα των συσκευών που χρησιμοποιούνται σήμερα [20].

2.3.5.1 EP/ΣP/EP (DC Linked Inverter)

Μία μονάδα ελέγχου στροφών τύπου EP/ΣP/EP αποτελείται από τρία τμήματα, τον μετατροπέα εισόδου, τον δίαυλο DC και τον μετατροπέα εξόδου όπως φαίνεται στο σχήμα 2.27. Ο μετατροπέας εισόδου μπορεί να είναι ελεγχόμενος ή μη ελεγχόμενος, τριφασικός ή μονοφασικός και ονομάζεται ανορθωτής. Ο δίαυλος DC αποτελείται από πηνία ή πυκνωτές. Ο μετατροπέας εξόδου αποτελείται από ταχύτατους ηλεκτρονικούς διακόπτες ισχύος και ονομάζεται αντιστροφέας. Από την έξοδο του αντιστροφέα τροφοδοτείται ο κινητήρας.



Σχήμα 2.27 Διάγραμμα μιας μονάδας ελέγχου στροφών όπου φαίνονται τα τρία στάδια λειτουργίας της μονάδα, ο ανορθωτής, ο δίαυλος DC και ο αντιστροφέας

Η λειτουργία τριών σταδίων μιας μονάδας ελέγχου στροφών έχει ως εξής:

Ο Ανορθωτής:

Στο πρώτο στάδιο μιας μονάδας ελέγχου βρίσκεται ένας μετατροπέας - ανορθωτής. Η τριφασική τάση παρέχεται απευθείας στην κλέμα ισχύος της μονάδας. Ο μετατροπέας μπορεί να είναι ελεγχόμενος ή μη και αποτελείται από έξι διακοπτικά στοιχεία (Power Diodes, MOSFET, GTO, IGBT κ.λπ.). Ο μετατροπέας αν αποτελείται από διόδους ισχύος επιτρέπει στο ρεύμα να ρέει μόνο προς μία κατεύθυνση, εάν η διαφορά δυναμικού κάποιας εκ των φάσεων L1, L2, L3 είναι υψηλότερη τότε στην συνέχεια η διόδος που συνδέεται με αυτήν την φάση ενεργοποιείται και άγει. Η ίδια αρχή ισχύει για την αρνητική πλευρά των διόδων, κάθε φορά ενεργοποιείται η διόδος της φάσης που η τάση της έχει την μεγαλύτερη απόλυτη αρνητική τιμή. Στην έξοδο εμφανίζονται έξι παλμοί, οπότε ονομάζεται επίσης εξαπαλμικός ανορθωτής. Στις περισσότερες περιπτώσεις κυκλωμάτων ένας εξαπαλμικός ανορθωτής είναι πλήρως ελεγχόμενος από τον μικροεπεξεργαστή του μετατροπέα.

Ο δίαυλος DC:

Το δεύτερο στάδιο της μονάδας ελέγχου αποτελεί ο δίαυλος DC. Η λειτουργία του διαύλου DC είναι η εξομάλυνση της τάσης. Ο δίαυλος DC είναι ο σύνδεσμος μεταξύ του ανορθωτή και του αντιστροφέα. Μετά τη διαδικασία ανόρθωσης μικρή ποσότητα αρμονικών παραμορφώσεων παράγεται με τη DC τάση και αυτό δεν είναι επιθυμητό. Ο δίαυλος DC αφαιρεί την παραμόρφωση φιλτράροντας την τάση μέσω πυκνωτών παρέχοντας σταθερή τάση και προστατεύοντας την μονάδα ελέγχου. Στον δίαυλο DC χρησιμοποιούνται συνήθως ηλεκτρολυτικοί πυκνωτές, λόγω της υψηλής ογκομετρικής τους απόδοσης (χωρητικότητα / μονάδα όγκου). Η βελτιστοποίηση και η ελαχιστοποίηση του όγκου του πυκνωτή του διαύλου είναι πολύ σημαντική για το κόστος, την ισχύ και την αξιοπιστία του προϊόντος. Εκτός από τα κριτήρια σχεδιασμού του πυκνωτή, η ελάχιστη τιμή χωρητικότητας έχει σχεδιαστεί για να περιορίζει την τάση κυμάτωσης σε ένα προκαθορισμένο επίπεδο, συνήθως το ΔV_{DC} είναι 1% έως 2% του V_{DC} [11, 12, 30, 34].

Ισχύει ότι:

$$V_{DC} = \frac{1}{\pi} \int_{-\frac{\pi}{6}}^{\frac{\pi}{6}} \sqrt{2} V_{\text{πολ}} \cos \omega t d(\omega t) = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} V_{\text{πολ}} \quad (2-61)$$

Ο υπολογισμός του πυκνωτή του διαύλου DC βρίσκεται ως:

$$C_{bus} = \frac{P_{motor} \text{ (watt)}}{12 f \Delta V V_{DC}} \quad (2-62)$$

ή

$$C_{bus_min} = P_{motor} \text{ (watt)} \frac{\sqrt{2} + \left(\frac{\sqrt{3} V_{\text{πολ}}}{V_{DC}}\right)}{2 \sqrt{3} \Delta V f_{rec} V_{\text{πολ}}} \quad (2-63)$$

όπου, f : η συχνότητα της πηγής AC (Hz).

ΔV : η μέγιστη επιθυμητή τάση κυμάτωσης (V).

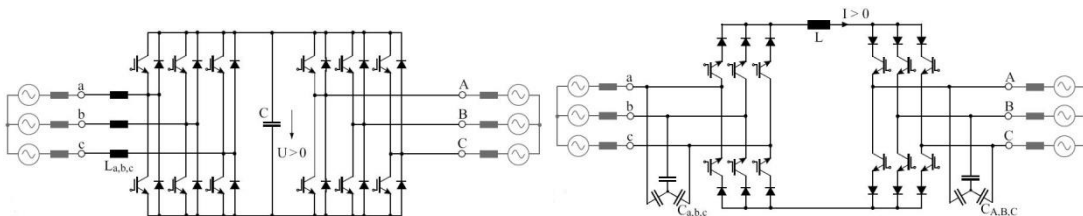
f_{rect} : η συχνότητα του αντιστροφέα (Hz)

Ο Αντιστροφέας:

Το τελευταίο στάδιο μιας μονάδας ελέγχου είναι ο αντιστροφέας. Ο αντιστροφέας αποτελείται από τρία ζεύγη ταχύτατων διακοπτικών στοιχείων (MOSFET, GTO, IGBT κ.λπ.) συνδεδεμένα παράλληλα με τις αντίστοιχες διόδους. Κάθε ζεύγος διακοπών τροφοδοτεί ένα τύλιγμα του κινητήρα. Με την κατάλληλη παλμοδότηση και υπερδιαμόρφωση, η DC τάση εισόδου στον αντιστροφέα μετατρέπεται σε εναλλασσόμενη τριφασική ημιτονοειδή τάση.

Μια μονάδα μεταβλητής συχνότητας EP/ΣP/EP (DC linked Inverter), όπως φαίνεται στο σχήμα 2.28, μπορεί να ανήκει σε κάποιον από τους παρακάτω τύπους [11, 12, 30, 34]:

- αντιστροφέας με πηγή τάσης (VSI)
- αντιστροφέας με πηγή έντασης (CSI)



Σχήμα 2.28 Διαγράμματα για α) VSI και β) CSI τύπου μονάδα ελέγχου στροφών

Η διαφορά τους είναι το ηλεκτρικό μέγεθος που μένει σταθερό στον διάυλο DC. Στους αντιστροφείς τύπου VSI χρησιμοποιείται πυκνωτής για να διατηρηθεί σταθερή η τάση ενώ στους αντιστροφείς CSI χρησιμοποιείται πηνίο για να διατηρηθεί σταθερό το ρεύμα. Κατά συνέπεια, η έξοδος μιας μονάδας ελέγχου CSI είναι μεταβλητό τριφασικό εναλλασσόμενο ρεύμα, ενώ μια μονάδα ελέγχου VSI παράγει μεταβλητή τριφασική εναλλασσόμενη τάση και συχνότητα.

Χαρακτηριστικά του τύπου VSI EP/ΣP/EP είναι:

- Καλός συντελεστής ισχύος
- Ανοχή σε διακυμάνσεις τάσης
- Υψηλή ροπή στο εύρος της ταχύτητας
- Υψηλή δυναμική απόκριση
- Ισχύς από 0,5 έως 2MW ακρίβεια $\pm 0,01\%$ μέγιστη ταχύτητα σε στροφές 10000 rpm

Χαρακτηριστικά του τύπου CSI EP/ΣP/EP είναι:

- Χαμηλή απόδοση

- Χαμηλή ροπή εκκίνησης
- Ισχύς από 1 έως 10MW ακρίβεια $\pm 1\%$ μέγιστη ταχύτητα σε στροφές 6000 rpm

Στις σύγχρονες βιομηχανικές εφαρμογές, ο τύπος VSI έχει αποδειχθεί ότι είναι πιο αποδοτικός, έχει μεγαλύτερη αξιοπιστία και δυναμική απόκριση. Ο τύπος CSI χρησιμοποιείται κυρίως σε εφαρμογές μέσης τάσης, όπου απαιτούνται υψηλής ποιότητας κυματομορφές τάσης [24].

2.3.6 Απόδοση και απώλειες των έμμεσων μετατροπέων

2.3.6.1 Θερμότητα και απώλειες ισχύος

Οι μονάδες ελέγχου στροφών είναι πολύ αποδοτικές συσκευές. Κατά την λειτουργία τους μέρος των απωλειών τους εμφανίζονται με έκλυση θερμότητας. Αυτό αποτελεί πρόβλημα ειδικά σε περίπτωση που υπάρχουν αρκετές μονάδες συγκεντρωμένες σε ένα ερμάριο οι οποίες λειτουργούν ταυτόχρονα. Η θερμότητα που εκλύεται από την μονάδα βρίσκεται με την ακόλουθη εξίσωση [27]:

$$H_{\text{loss}} = P_t (1 - \eta) \quad (2-64)$$

όπου, H_{loss} : η ισχύς (W) που εκλύεται,

P_t : η ισχύς της μονάδας ελέγχου στροφών (W),

η : η απόδοση της μονάδας.

Συνήθως, οι μονάδες ελέγχου στροφών έχουν συντελεστή απόδοσης μεταξύ 95% και 98%.

Η ανάγκη προσθήκης ψύξης για την μονάδα ελέγχου είναι συνήθως επιτακτική και προστίθεται στο κόστος μιας εφαρμογής. Η ποσότητα της ροής αέρα που χρειάζεται υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$U_m = \frac{H_{\text{loss}}}{(C_p \Delta T)} = \frac{P_t (1 - \eta)}{(C_p \Delta T)} \quad (2-65)$$

όπου U_m : είναι η ροής μάζας αέρα (kg / s)

C_p : η ειδική θερμότητα του αέρα [$\text{kJ} \div (\text{kg} \times \text{K})$]

ΔT : η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ του εισερχόμενου αέρα και του εξερχόμενου αέρα (K)

2.3.6.2 Απώλειες αγωγιμότητας

Οι απώλειες ημιαγωγών ισχύος είναι συνάρτηση της τάσης κορεσμού της συσκευής (V_{Sat}) και του στιγμιαίου ρεύματος που διέρχεται από αυτό, $i(t)$. Η τάση κορεσμού της συσκευής βρίσκεται χρησιμοποιώντας μια γραμμική συνάρτηση που αποτελείται από την τάση κατωφλίου (V_{T0}) και μια αντίσταση σε σειρά (R_T) ως εξής:

$$V_{\text{Sat}}(t) = V_{\text{T0}} + R_T i(t) \quad (2-66)$$

Οι μέσες απώλειες αγωγιμότητας της συσκευής (P_{cond}) για μια θεμελιώδη συχνότητα μπορεί να υπολογιστούν πολλαπλασιάζοντας την $V_{\text{sat}}(t)$ με τιμές του $i(t)$. Ισχύει:

$$P_{\text{cond}} = V_{T0} I_{\text{Avg}} + R_T I_{\text{RMS}}^2 \quad (2-67)$$

όπου, I_{avg} : το ρεύμα που αντιστοιχεί στο μέσο ρεύμα που ρέει στη συσκευή

I_{rms} : η τιμή rms του ρεύματος.

Συγκεκριμένα, χρησιμοποιώντας την εξίσωση για το P_{cond} υπολογίζονται συνεχώς οι απώλειες αγωγιμότητας για κάθε μετατροπέα ισχύος [28].

2.3.6.3 Απώλειες μεταγωγής

Οι απώλειες μεταγωγής των ημιαγωγών ισχύος καθορίζονται από τον συνολικό χρόνο μεταγωγής όταν το ηλεκτρονικό στοιχείο είναι ενεργοποιημένο ή απενεργοποιημένο, από την τάση (V) και το ρεύμα (I) στα άκρα του ηλεκτρονικού στοιχείου κατά τη διάρκεια της διαδικασίας. Η ενέργεια που διαχέεται κατά τη διάρκεια της μεταγωγής είναι η E_{on} και η E_{off} για ενεργοποίηση και σβέση αντίστοιχα. Βρίσκεται στις προδιαγραφές κατασκευής τους και αντιστοιχεί στην στιγμιαία ισχύ στα άκρα του διακόπτη ισχύος κατά τη διάρκεια της λειτουργίας του. Αυτή η τιμή δίνεται σε καθορισμένη τάση και ρεύμα. Ισχύει ότι:

$$E_{\text{on/off}}(t) = E_{\text{on/off-specs}} \frac{V(t) I(t)}{V_{\text{specs}} I_{\text{specs}}} \quad (2-68)$$

Η μέση απώλεια ισχύος μεταγωγής (P_{sw}) σε έναν κύκλο λειτουργίας στην θεμελιώδη συχνότητα προσδιορίζεται χρησιμοποιώντας το ακόλουθο άθροισμα, όπου το f_{sw} είναι η συχνότητα μεταγωγής, το T αναφέρεται στην θεμελιώδη περίοδο λειτουργίας και το k σε καθεμία από τις διακριτές στιγμές μεταγωγής ($T_{\text{fsw}} / \text{cycle}$)

$$P_{\text{sw}} = \frac{1}{T} \sum_{k=0}^{T_{\text{fsw}}} (E_{\text{on}(k)} + E_{\text{off}(k)}) \quad (2-69)$$

Ο υπολογισμός των συνολικών απωλειών μεταγωγής κάθε μετατροπέα εξετάζεται ανά διακόπτη ισχύος που εμπεριέχει. Για μονάδες τύπου VSI και CSI υψηλής ισχύος, η χρήση ημιαγωγών σε σειρά απαιτεί κυκλώματα snubbers ως προστασία ώστε να περιορίζονται οι απότομες μεταβολές της τάσης στα άκρα τους. Οι απώλειες αυτές υπολογίζονται και προστίθενται ως απώλειες μεταγωγής [28].

2.3.6.4 Απώλειες διαύλου DC

Οι απώλειες του διαύλου DC για μετατροπείς CSI προκαλούνται από την ισοδύναμη αντίσταση σε σειρά του πηνίου του κυκλώματος. Συνήθως οι απώλειες είναι 2% –4% της ονομαστικής ισχύος του πηνίου. Μειονέκτημα αυτού του τύπου μετατροπέα είναι ότι όταν ο αντιστροφέας λειτουργεί στο ονομαστικό του ρεύμα, οι απώλειες είναι μέγιστες ανεξάρτητα από τη ζήτηση του φορτίου.

Τα VSI παρουσιάζουν χαμηλότερες απώλειες σε σύγκριση με τους μετατροπείς CSI, δεδομένου ότι οι πυκνωτές είναι αποδοτικές διατάξεις. Στην πραγματικότητα, η συνολική απώλεια μιας συστοιχίας πυκνωτών στον δίαυλο DC σπάνια υπερβαίνει το 0,5% της ονομαστικής του ισχύος [28].

2.3.6.5 Αρμονικές

Άλλες απώλειες έγκεινται στην αρμονική παραμόρφωση του συστήματος. Οι κυματομορφές της τάσης και του ρεύματος εξόδου μιας μονάδας ελέγχου παρουσιάζουν σημαντική αρμονική παραμόρφωση, η οποία αυξάνει τον ακουστικό θόρυβο, τις απώλειες χαλκού και πυρήνα των κινητήρων. Επίσης επηρεάζει την ποιότητα ισχύος της πηγής αφού μέσω του εναλλασσόμενου ρεύματος οι αρμονικές διοχετεύονται στο δίκτυο.

Μία μέθοδος αντιμετώπισης των αρμονικών ρεύματος είναι η τοποθέτηση παθητικών φίλτρων. Ένα παθητικό φίλτρο κατασκευάζεται με κατάλληλο συνδυασμό πυκνωτών, πηνίων και αντιστάσεων. Τα φίλτρα παρέχουν μια κυκλωματική διαδρομή χαμηλής αντίδρασης στα αρμονικά ρεύματα, περιορίζοντας τα σε επιθυμητές χαμηλές τιμές. Τα παθητικά φίλτρα διαχωρίζονται με βάση τον τρόπο που θα συνδεθούν σε σειρά ή παράλληλα. Όταν τοποθετούνται σε σειρά με το φορτίο αποτελούν ουσιαστικά μια διάταξη που εμποδίζει τη διέλευση του ρεύματος συγκεκριμένης αρμονικής. Όταν τοποθετούνται παράλληλα με το φορτίο αποτελούν μια διάταξη απορρόφησης του ρεύματος συγκεκριμένης αρμονικής το οποίο οδηγούν στην γη.

Τα παθητικά φίλτρα που συνδέονται σε σειρά σύμφωνα με την αρχή λειτουργίας του διακρίνονται σε:

- Ζωνοπερατά φίλτρα (band-pass filters), τα οποία επιτρέπουν τη διέλευση μιας ζώνης συχνοτήτων στο εύρος δύο δοθέντων συχνοτήτων και και περιορίζουν ή αποκόπτουν τις άλλες συχνότητες έξω από αυτή τη ζώνη.
- Βαθυπερατά φίλτρα (low-pass filters), τα οποία περιορίζουν ή αποκόπτουν τις υψηλές συχνότητες και αφήνουν να περάσουν συχνότητες ως την δοθείσα συχνότητας αποκοπής,
- Υψιπερατά φίλτρα (high-pass filters), τα οποία περιορίζουν ή αποκόπτουν τις χαμηλές συχνότητες και αφήνουν να περάσουν συχνότητες μεγαλύτερες της δοθείσας συχνότητας αποκοπής
- Ζωνοφρακτικά φίλτρα (band-reject filters), τα οποία περιορίζουν ή αποκόπτουν συχνότητες στο εύρος μεταξύ δύο συχνοτήτων και αφήνουν συχνότητες έξω από αυτό το εύρος των συχνοτήτων

Τα παθητικά φίλτρα που συνδέονται παράλληλα σύμφωνα με την αρχή λειτουργίας του διακρίνονται σε:

- Μονοσυντονιζόμενα φίλτρα (single tuned filters)
- Διπλοσυντονιζόμενα φίλτρα (double tuned filters)
- Τριπλοσυντονιζόμενα φίλτρα (triple tuned filters)
- Αποσβεννούμενα φίλτρα πρώτης, δευτέρας τάξης (υψιπερατά) (damped filters)

Η διαστασιολόγηση των σε σειρά παθητικών φίλτρων γίνεται στην ονομαστική ισχύ του συστήματος. Η διαστασιολόγηση των παράλληλων συνδεδεμένων παθητικών φίλτρων γίνεται με βάση την ισχύ των αρμονικών που καλούνται να αντιμετωπίσουν

Μία μέθοδος αντιμετώπισης των αρμονικών ρεύματος είναι η χρήση επαγωγικών αντιδράσεων γραμμής (Line Reactors). Η σύνδεσή τους είναι σε σειρά με ένα μη γραμμικό φορτίο

και είναι διατάξεις επαγωγικής αντίδρασης με τιμή συνήθως 1,5% έως 5,0% της συνολικής αντίστασης γραμμής για το ονομαστικό φορτίο του συστήματος. Η υψηλότερη σύνθετη αντίσταση συμπεριφέρεται ως ένα φίλτρο που μειώνει τις αρμονικές και εξασθενεί τις αιχμές του ρεύματος, αλλά σε περίπτωση που ξεπερνάει το 5%, μπορεί να περιορίζει την ισχύ που δέχεται η μονάδα ελέγχου. Ισχύει:

$$Z\% = \frac{L \cdot I \cdot 2\pi f \cdot \sqrt{3}}{V_{\text{rms πολ}}} * 100\% \quad (2-70)$$

όπου, f : η ονομαστική συχνότητα

I : το ac ρεύμα γραμμής

V_{rms} : η τάση εναλλασσόμενου ρεύματος

L : η αυτεπαγωγή, σε H

$Z\%$: η αντίδραση της αυτεπαγωγής

Επόμενη μέθοδος που χρησιμοποιείται είναι η τοποθέτηση πυκνωτών ως χωρητικό φίλτρο στον δίαυλο DC της μονάδας ελέγχου στροφών. Η αντίδραση ενός πυκνωτή είναι αντιστρόφως ανάλογη με τη συχνότητα ενός σήματος, οι αρμονικές αντιμετωπίζουν τον πυκνωτή ως διαδρομή χαμηλής αντίστασης και διοχετεύονται μέσω αυτού προς τη γείωση [10].

2.3.7 Μέθοδοι αυτομάτου ελέγχου του συστήματος

Οι μέθοδοι ελέγχου που χρησιμοποιούν οι μονάδες ελέγχου στροφών ακολουθούν μια προσέγγιση όμοια με αυτήν που χρησιμοποιείται σε ένα σύστημα αυτομάτου ελέγχου ανοιχτού ή κλειστού βρόχου. Το επίπεδο ελέγχου μπορεί να είναι:

- Έλεγχος ανοιχτού βρόχου, χωρίς ανατροφοδότηση
- Έλεγχος κλειστού βρόχου, με ανατροφοδότηση μιας μεταβλητής
- Έλεγχος διαδοχικός κλειστού βρόχου (Cascaded), με ανατροφοδότηση με περισσότερες από μία μεταβλητή [16, 20].

2.3.7.1 Έλεγχος ανοιχτού βρόχου

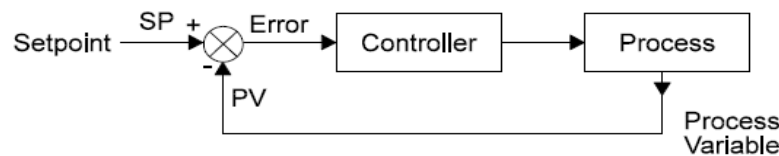
Αυτή η μέθοδος ελέγχου χαρακτηρίζεται ως μη αποδοτική και με χαμηλή δυναμική απόκριση. Είναι κατάλληλη για τον έλεγχο απλών εφαρμογών σταθερής κατάστασης, όπως για παράδειγμα σε μεταφορικές ταινίες ή σε φυγοκεντρικούς ανεμιστήρες. Η συνάρτηση μεταφοράς του συστήματος είναι σταθερή και η έλλειψη ανατροφοδότησης εμποδίζει να γίνουν διορθώσεις σύμφωνα με τις απαιτήσεις. Για παράδειγμα η έξοδος μιας εφαρμογής ανοιχτού βρόχου είναι μια σταθερή συχνότητα ανάλογη της αναφοράς ταχύτητας και έτσι η συχνότητα που εφαρμόζεται στον κινητήρα παραμένει πάντα σταθερή. Σε περίπτωση που το φορτίο αυξηθεί, η ταχύτητα του κινητήρα θα μειωθεί λόγω του χαρακτηριστικού ολίσθησης του κινητήρα και έτσι η ταχύτητα δεν παραμένει στο απαιτούμενο επίπεδο [16, 20].

2.3.7.2 Έλεγχος κλειστού βρόχου

Για τις εφαρμογές οδήγησης που απαιτούν ακρίβεια και δυναμικό έλεγχο με ρύθμιση της ταχύτητας σε όλο το φάσμα των συχνοτήτων, απαιτείται έλεγχος κλειστού βρόχου. Η ταχύτητα του άξονα μετριέται και συγκρίνεται με την αναφορά ταχύτητας για να δώσει ένα σφάλμα ταχύτητας. Το σφάλμα χρησιμοποιείται από μια συνάρτηση μεταφοράς G στον ελεγκτή για να δώσει μια τρέχουσα αναφορά, SP (SetPoint) - PV(Process Value), στην είσοδο της συνάρτησης, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.29.

Η τυπική διαμόρφωση ενός συστήματος με ελεγκτή στροφών κλειστού βρόχου αποτελείται από τα ακόλουθα κύρια τμήματα:

- Ο ηλεκτρικός κινητήρας ο οποίος αποδίδει την μηχανική ενέργεια που απαιτείται.
- Η συσκευή ελέγχου για την αναφορά συγκεκριμένων μεταβλητών του φορτίου. Αυτό χρησιμοποιείται ως σύστημα ανάδρασης στο σύστημα ελέγχου.
- Ο μετατροπέας ισχύος ο οποίος οδηγεί τον κινητήρα υπό τον συνεχή έλεγχο ενός ψηφιακού κυκλώματος ελέγχου λειτουργίας.
- Ένας ξεχωριστός συγκριτής, ο οποίος συγκρίνει την επιθυμητή τιμή ταχύτητας ή θέσης, δηλαδή το σημείο ρύθμισης SP, με την μετρούμενη τιμή σε κάθε χρονική στιγμή PV και στη συνέχεια το σήμα αυτό τροφοδοτεί το ψηφιακό κύκλωμα λειτουργίας το οποίο προσαρμόζει την έξοδο του μετατροπέα ισχύος ρυθμίζοντας την ταχύτητα και την ροπή μειώνοντας το σφάλμα (SP – PV) στο μηδέν. Οι ελεγκτές χρησιμοποιούν μικροεπεξεργαστές και ψηφιακά κυκλώματα ελέγχου.



Σχήμα 2.29 Το σχηματικό διάγραμμα έλεγχου κλειστού βρόχου

Στην περίπτωση που πρέπει να ελέγχεται με ακρίβεια η θέση του άξονα ενός κινητήρα, χρειάζεται μια συσκευή ελέγχου αναλογική ή ψηφιακή. Η αναλογική συσκευή μέτρησης (Resolver) και ο ψηφιακός κωδικοποιητής (Encoder), μετρούν την θέση περιστροφής ενός άξονα μετατρέποντας την μηχανική κίνηση του, σε ηλεκτρικό σήμα [16, 20].

2.3.7.3 Έλεγχος διαδοχικός κλειστού βρόχου (Cascaded)

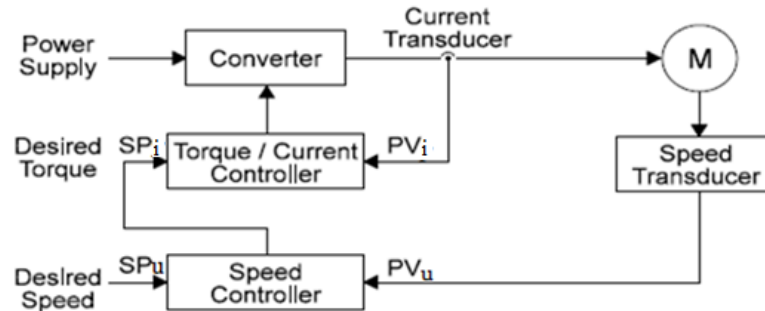
Για τις εφαρμογές, οι οποίες απαιτούν ακρίβεια στον έλεγχο της ταχύτητας και της ροπής με γρήγορη απόκριση, η βελτιωμένη απόδοση του συστήματος μπορεί να επιτευχθεί με τη χρήση πολλαπλών συστημάτων ελέγχου κλειστού βρόχου (Cascaded Control).

Συγκεκριμένα ένας εξωτερικός βρόχος ελέγχου ταχύτητας χρησιμοποιεί το σφάλμα ταχύτητας για να υπολογίσει το επιθυμητό σημείο ρύθμισης της ροπής είτε για την αύξηση, είτε για την μείωση της ταχύτητας. Ο εσωτερικός βρόχος ελέγχου ροπής συγκρίνει αυτή την τιμή ροπής, στην έξοδο του ρυθμιστή στροφών, με την πραγματική μετρούμενη τιμή και υπολογίζει την επιθυμητή συχνότητα εξόδου. Η μετρούμενη μεταβλητή της διαδικασίας που σε αυτήν την

περίπτωση είναι το μετρούμενο ρεύμα του κινητήρα και το οποίο είναι ανάλογο της ροπή του. Αυτός ο βρόχος ελέγχου ονομάζεται συχνά και βρόχος εσωτερικού ρεύματος.

Το διάγραμμα του ελεγκτή κλειστού βρόχου Cascaded περιλαμβάνει:

- Εξωτερικό (κύριο) βρόχο ελέγχου ταχύτητας
- Εσωτερικό (δευτερεύων) βρόχο ελέγχου ροπής



Σχήμα 2.30 Το σχηματικό διάγραμμα του ελεγκτή κλειστού βρόχου τύπου Cascaded

Στην παραπάνω περίπτωση, στο σχήμα 2.30, η λειτουργία μπορεί να είναι ένα κέρδος, όπου η αναφορά ροπής/ρεύματος βρίσκεται ως:

$$SP_i = K_P (SP_u - PV_u) \quad (2-71)$$

Αυτό δίνει κάποιο βαθμό ελέγχου της ταχύτητας εξόδου, όμως το σφάλμα ταχύτητας PV πρέπει να έχει τιμή $\neq 0$, εάν απαιτείται συγκεκριμένη ροπή για την συγκράτηση της ταχύτητας του κινητήρα. Εάν το σφάλμα ταχύτητας $PV \neq 0$, τότε η ταχύτητα δεν θα βρίσκεται στο επίπεδο αναφοράς και θα μεταβάλλεται ανάλογα με το φορτίο. Με την προσθήκη ενός ολοκληρωμένου όρου, η αναφορά ροπής γίνεται:

$$SP_i = K_P (SP_u - PV_u) + K_I \int (SP_u - PV_u) dt \quad (2-72)$$

Κατά αυτόν τον τρόπο, δεν είναι απαραίτητο να υπάρχει σφάλμα ταχύτητας ακόμη και όταν απαιτείται ροπή για την οδήγηση του φορτίου στην ταχύτητα αναφοράς. Ο ολοκληρωμένος όρος εξαλείφει οποιοδήποτε σφάλμα ταχύτητας με την πάροδο του χρόνου και δημιουργεί μια αναφορά ροπής.

Ένα σύστημα ελέγχου κλειστού βρόχου με αναλογικούς και ολοκληρωμένους όρους ονομάζεται ελεγκτής PI (Proportional-Integral). Ο ελεγκτής PI είναι απλός στην εφαρμογή και σχετικά εύκολος στον υπολογισμό [16, 20, 34].

2.3.8 Τεχνικές διαμόρφωσης για μετατροπείς ισχύος

Ο θεμελιώδης στόχος μιας τεχνικής διαμόρφωσης είναι να ληφθούν οι καλύτερες κυματομορφές (ημιτονοειδείς τάσεις και ρεύματα) με τις ελάχιστες απώλειες. Ακόμη βασικό είναι η εξομάλυνση της DC τάσης, η ελαχιστοποίηση των αρμονικών ρεύματος και η χαμηλές αιχμές

τάσης dV/dt . Οι τεχνικές διαμόρφωσης εύρους παλμών (PWM) με διαμόρφωση διανυσμάτων χώρου (SVM) και η τεχνική διαμόρφωσης με έλεγχο ρεύματος σε ζώνη υστέρησης, αποτελούν ώριμες τεχνολογίες και εφαρμόζονται στους μετατροπείς ισχύος με τους οποίους θα ασχοληθεί η συγκεκριμένη εργασία.

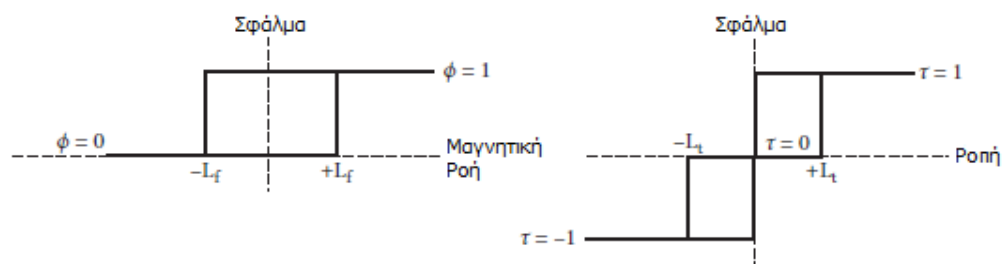
2.3.8.1 Έλεγχος ρεύματος με ζώνη υστέρησης (HBCC)

Η τεχνική HBCC (Hysteresis Band Current Control), είναι ένας κλειστός βρόχος ελέγχου με άμεση ανάδραση. Ο μικροεπεξεργαστής του ελεγκτή παράγει την κυματομορφή του ρεύματος αναφοράς κατά την διάρκεια του χρόνου, σε κάθε περίπτωση με το κατάλληλο πλάτος και συχνότητα. Το ρεύμα του φορτίου ακολουθεί την κυματομορφή του ρεύματος αναφοράς εντός του προκαθορισμένου εύρους της ζώνης υστέρησης.

Υπάρχουν δύο βρόχοι που ελέγχουν στον στάτη την μαγνητική ροή και την ροπή. Οι τιμές αναφοράς της μαγνητικής ροής και της ροπής συγκρίνονται με τις εκτιμώμενες τιμές. Οι βρόχοι ελέγχουν συνεχώς το σφάλμα ροπής και μαγνητικής ροής εάν βρίσκεται σε συγκεκριμένα όρια της ζώνης υστέρησης. Οι συγκριτές υστέρησης πρέπει να έχουν συγκεκριμένα όρια για να εξασφαλιστεί μια καλή απόδοση. Οι μικρού εύρους ζώνες υστέρησης παράγουν ομαλές κυματομορφές ημιτονοειδούς ρεύματος και ροπής, όμως λειτουργούν με υψηλές συχνότητες μεταγωγής που οδηγούν σε μεγαλύτερες απώλειες.

Ο ελεγκτής της μαγνητικής ροής είναι ένας συγκριτής δύο επιπέδων. Η έξοδος του ελεγκτή της μαγνητικής ροής (Φ) έχει δύο πιθανές τιμές, 0 ή 1, ανάλογα με το αν το σφάλμα ροής (Ψ_{er}) βρίσκεται κάτω από το κατώτερο όριο ή πάνω από το ανώτερο όριο, του εύρους της ζώνης υστέρησης.

Ο ελεγκτής της ροπής είναι ένας συγκριτής τριών επιπέδων. Η έξοδος του ελεγκτή της ροπής (T) έχει τρεις πιθανές τιμές, -1 , 1 ή 0 , ανάλογα με το αν το σφάλμα ροπής (T_{er}) είναι είτε κάτω από το κατώτερο όριο, πάνω από το ανώτερο όριο, ή μεταξύ των δύο, στο εύρος της ζώνης υστέρησης.



Σχήμα 2.31 Οι δύο βρόχοι ελέγχου του στάτη, για τα μεγέθη της μαγνητικής ροής και της ροπής

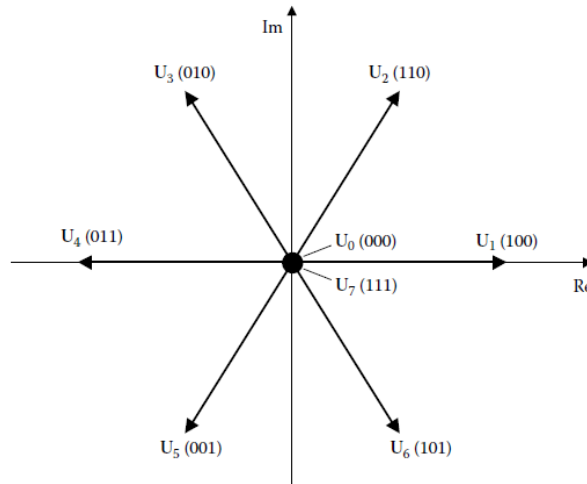
Ο πίνακας μετατροπής

Οι τιμές εξόδου των ελεγκτών έχουν ως αποτέλεσμα να επιλεγεί το κατάλληλο διάνυσμα τάσης από τον πίνακα διακοπικών καταστάσεων, ώστε να επιτευχθεί ο άμεσος έλεγχος της μαγνητικής ροής και της ροπής και καθιστώντας τον ορισμένο σε συγκεκριμένο εύρος σφάλματος.

Ο γεωμετρικός τόπος των διανυσμάτων ροής, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.32, χωρίζεται σε έξι τομείς (1-6) οι έξι τομείς έχουν ενεργά διανύσματα (U_1 έως U_6) και υπάρχουν και δύο μηδενικά διανύσματα (U_0) και (U_7). Το διάνυσμα ροής του στάτη μπορεί να εκφραστεί ως:

$$\Psi_s = \int_0^t U_\nu dt \quad (2-73)$$

Προκειμένου να αυξηθεί το μέτρο του διανύσματος ροής του στάτη, επιλέγονται τα διανύσματα τάσης U_1 , U_2 και U_6 . Αντιστρόφως, μπορεί να επιτευχθεί μείωση, επιλέγοντας U_3 , U_4 και U_5 . Με την ενεργοποίηση ενός από τα μηδενικά διανύσματα, U_0 ή U_7 , η μαγνητική ροή του στάτη γίνεται μηδενική. Για να αυξηθεί η ροπή του κινητήρα, επιλέγονται τα διανύσματα τάσης U_2 , U_3 , και U_4 , και αντίστοιχα για να μειωθεί επιλέγονται τα U_1 , U_5 , και U_6 .



Σχήμα 2.32 Ο γεωμετρικός τόπος όπου επιλέγονται τα βέλτιστα διανύσματα της τάσης στους έξι τομείς μαγνητικής ροής ενός τριφακού αντιστροφέα

Η παρακάτω εξίσωση δείχνει τα μέτρα, των οκτώ διανυσμάτων τάσης. Υπάρχουν έξι ενεργά διανύσματα, U_1 - U_6 , και δύο μηδενικά διανύσματα, U_0 και U_7 .

$$U_\nu = \begin{cases} \frac{2}{3} U_{DC} e^{j(\nu-1)\pi/3}, & \nu = 1..6 \\ 0, & \nu = 0,7 \end{cases} \quad (2-74)$$

Η ροπή και η μαγνητική ροή ελέγχονται άμεσα με την επιλογή του κατάλληλου ενεργού διανύσματος τάσης ενώ συγχρόνως τα ίδια τα μεγέθη ελέγχονται ώστε να βρίσκονται εντός των ορίων υστέρησής τους. Στο σχήμα 2.33 δίνεται ο πίνακας των βέλτιστων διανυσμάτων όπου φαίνεται συνοπτικά η λογική του ελέγχου. Η ενεργοποίηση ενός μηδενικού διανύσματος στον αντιστροφέα, χρησιμεύει ως ομαλή μετάβαση των διακοπών ισχύος του αντιστροφέα από την μία κατάσταση μεταγωγής στην επόμενη. Ακόμη κατά αυτόν τον τρόπο αποτρέπεται βραχυκύκλωμα στο δίαυλο DC λόγω ενδεχόμενης χρονικής καθυστέρησης απενεργοποίησης των διακοπών ισχύος του αντιστροφέα [30, 36, 37].

Ψ_{er}	T_{er}	Τομέας1	Τομέας2	Τομέας3	Τομέας4	Τομέας5	Τομέας6
1	1	U_2	U_3	U_4	U_5	U_6	U_1
	0	U_7	U_0	U_7	U_0	U_7	U_0
	-1	U_6	U_1	U_2	U_3	U_4	U_5
0	1	U_3	U_4	U_5	U_6	U_1	U_2
	0	U_0	U_7	U_0	U_7	U_0	U_7
	-1	U_5	U_6	U_1	U_2	U_3	U_4

Σχήμα 2.33 Πίνακας διακοπτικών καταστάσεων των βέλτιστων διανυσμάτων για τον αντιστροφέα, παρατηρούνται οι τομείς (1-6), το σφάλμα ροπής (T_{er}) και το σφάλμα ροής (Ψ_{er}). Βάση των τιμών σφαλμάτων των ελεγκτών επιλέγονται σε κάθε χρονική στιγμή τα κατάλληλα διάνυσματά τάσης.

2.3.8.2 Έλεγχος με διαμόρφωση διανυσμάτων χώρου PWM (SV-PWM).

Η τεχνική διαμόρφωσης με διανύσματα χώρου χρησιμοποιεί το διάνυσμα αναφοράς της τάσης U_{ref} μαζί με τα διανύσματα κατάστασης του αντιστροφέα ώστε να διαμορφώσει το κατάλληλο εύρος των παλμών που θα οδηγήσουν τους διακόπτες του αντιστροφέα και να διαμορφώσει την εναλλασσόμενη τάση εξόδου. Η μέθοδος διαμόρφωσης διανυσμάτων PWM-SV είναι μια προηγμένη μέθοδος PWM και είναι ίσως η καλύτερη μέθοδος μεταξύ όλων των τεχνικών PWM που χρησιμοποιούνται στους ελεγκτές ταχύτητας. Το κύριο πλεονέκτημα αυτής της τεχνικής είναι η μείωση της ολικής αρμονικής παραμόρφωσης (THD) που δημιουργείται από την ταχεία μεταγωγή των διακοπών στην συχνότητα που διαμορφώνει η PWM καθώς και η βέλτιστη χρήση της V_{DC} τροφοδοσίας εισόδου από τον δίαυλο DC. Μειονέκτημα αυτής της τεχνικής είναι η υψηλή υπολογιστική απαίτηση για την εφαρμογή της από έναν μικροεπεξεργαστή.

Με αυτή την τεχνική, τα διανύσματα της τριφασικής τάσης τροφοδοσίας ενός επαγωγικού κινητήρα μετατρέπονται σε ένα διακριτό περιστρεφόμενο διάνυσμα στο πλαίσιο αναφοράς d-q. Ο αντιστροφέας της μονάδας ελέγχου μπορεί να οδηγηθεί σε οκτώ μοναδικές καταστάσεις. Η τάση PWM στο φορτίο επιτυγχάνεται επιλέγοντας τις καταστάσεις διακόπτη του μετατροπέα και υπολογίζοντας την κατάλληλη χρονική περίοδο για κάθε κατάσταση.

Με τη χρήση κατάλληλου μετασχηματισμού για τα διανύσματα χώρου, παράγονται τριφασικές ημιτονοειδής κυματομορφές τάσης για την κάθε κατάσταση, οι οποίες στη συνέχεια τροφοδοτούνται στον κινητήρα.

Λειτουργία SVM

Σε τριφασικούς αντιστροφείς, η διαμόρφωση διανυσμάτων χώρου, με τεχνική PWM με σύγκριση με φέρον min/max σήμα λειτουργίας, θεωρείται ως η βέλτιστη διαμόρφωση για το ρεύμα εξόδου, όσον αφορά την αρμονική παραμόρφωση THD. Στην περίπτωση ημιτονοειδών τάσεων αναφοράς και χρησιμοποιώντας τον ορισμό του συντελεστή διαμόρφωσης, το διάνυσμα χώρου τάσης αναφοράς μπορεί να οριστεί ως εξής:

$$U_0 = mU e^{j\theta} \quad (2-75)$$

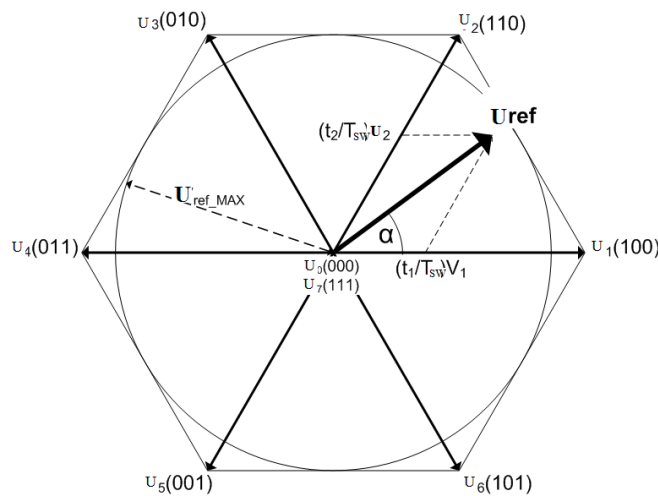
όπου, m : ο συντελεστής διαμόρφωσης πλάτους που ορίζεται ως το πλάτος της τάσης αναφοράς προς το πλάτος φέροντος σήματος, $m = U_{SP}/U_{TR}$, $0 < m < 1$ (2-76)

Υπάρχουν οκτώ συνδυασμοί μεταγωγής για έναν τριφασικό VSI αντιστροφέα που αντιστοιχούν σε έξι ενεργούς φορείς διανυσμάτων τάσης και δύο μηδενικούς φορείς διανυσμάτων τάσης όπως φαίνεται στο σχήμα 2.34. Ο φορέας τάσης αναφοράς παράγεται με τη σύνθεση δύο ενεργών και δύο μηδενικών διανυσμάτων τάσης σε κάθε περίοδο μεταγωγής T_{sw} και η ισορροπία volt/second διατηρείται επιλέγοντας τον κατάλληλο χρόνο ενεργοποίησης των φορέων. Στην περίπτωση συμμετρικού SV-PWM, αρκεί να προσδιοριστεί η ακολουθία στο μισό της περιόδου μεταγωγής ($T_{sw}/2$) αφού επαναλαμβάνεται συμμετρικά στο επόμενο μισό της περιόδου μεταγωγής. Οι χρόνοι ενεργοποίησης κάθε ενεργού διανύσματος τάσης t_1 και t_2 και των μηδενικών t_0 ορίζονται ως εξής:

$$t_1 = m \sqrt{3} \frac{T_{sw}}{2} \sin\left(\frac{\pi}{3} - \theta\right) \quad (2-77)$$

$$t_2 = m \sqrt{3} \frac{T_{sw}}{2} \sin(\theta) \quad (2-78)$$

$$t_0 = \frac{T_{sw}}{2} - (t_1 + t_2) \quad (2-79)$$



Σχήμα 2.34 Ο γεωμετρικός τόπος όπου δημιουργούνται τα διανύσματα χώρου ενός τριφασικού αντιστροφέα. Οκατάλληλος φορέας τάσης αναφοράς U_{ref} παράγεται με την σύνθεση δύο ενεργών διανυσμάτων χώρου και δύο μηδενικών.

Τα διανύσματα τάσης που παράγονται από τον τριφασικό αντιστροφέα δύο επιπέδων είναι $2^3=8$ συνδυασμοί θέσεων των διακοπών ($S_u S_v S_w$). Τα μέτρα των διανυσμάτων της τάσης του σχήματος 2.34 υπολογίζονται χρησιμοποιώντας την παρακάτω εξίσωση:

$$U = \frac{2}{3}(a^0 u_U + a^1 u_V + a^2 u_W) \quad (2-80)$$

όπου η διεύθυνση των διανυσμάτων της εναλλαγής των φάσεων είναι:

$$\alpha = e^{\frac{j2\pi}{3}} \quad (2-81)$$

Για να δημιουργηθούν οι τάσεις (u_U , u_V και u_W), οι διακόπτες στον αντιστροφέα τροφοδοτούνται από τον δίαυλο DC. Τα μέτρα των ενεργών και των μηδενικών διανυσμάτων τάσης που παράγονται από τον αντιστροφέα υπολογίζονται από τις παρακάτω εξισώσεις:

$$U_0 = 0 \quad (2-82)$$

$$U_1 = \frac{2}{3} U_{DC} a^0 \quad (2-83)$$

$$U_2 = -\frac{2}{3} U_{DC} a^2 \quad (2-84)$$

$$U_3 = \frac{2}{3} U_{DC} a^1 \quad (2-85)$$

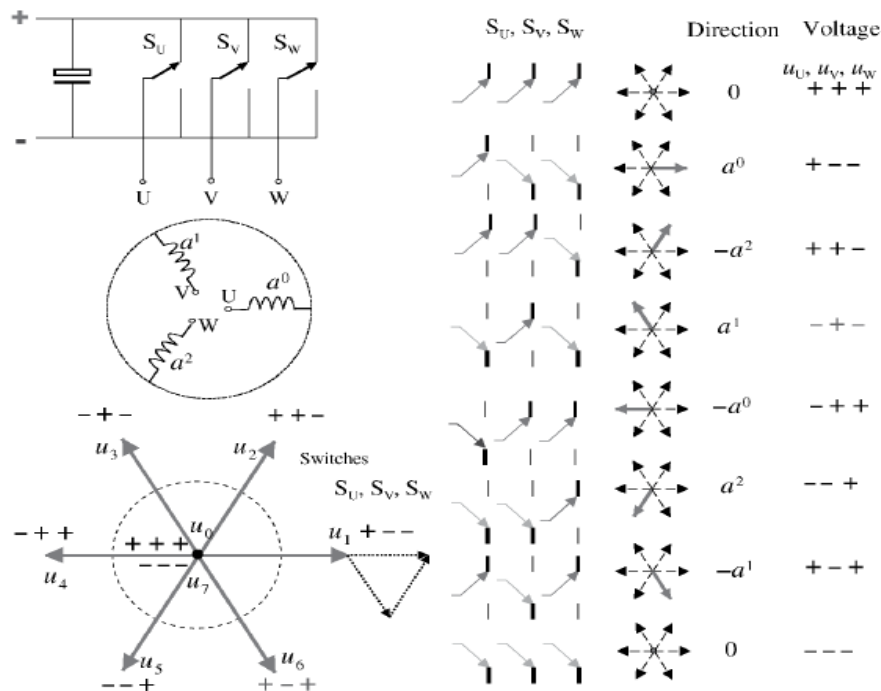
$$U_4 = -\frac{2}{3} U_{DC} a^0 \quad (2-86)$$

$$U_5 = \frac{2}{3} U_{DC} a^2 \quad (2-87)$$

$$U_6 = -\frac{2}{3} U_{DC} a^1 \quad (2-88)$$

$$U_7 = 0 \quad (2-89)$$

Το σχήμα 2.35 δείχνει τις καταστάσεις της μεταβολής των διακοπών των αντιστροφέων και των αντίστοιχων διανυσμάτων τάσης τα οποία δημιουργούν την φορά στο μαγνητικό πεδίο στο κύλιγμα του στάτη ενός επαγωγικού κινητήρα [12, 33].

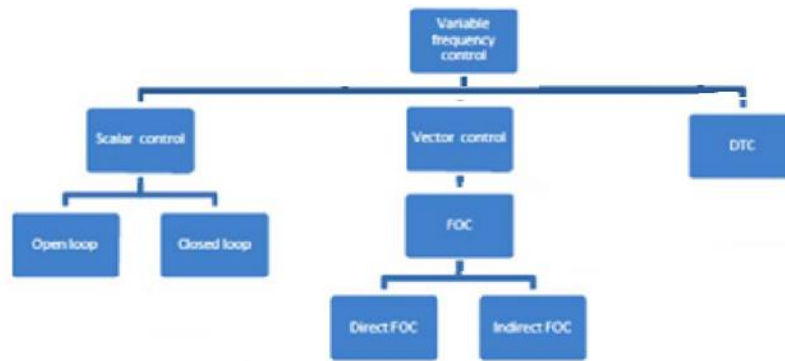


Σχήμα 2.35 Απεικόνιση των καταστάσεων των διακοπών σε έναν αντιστροφέα και των διανυσμάτων τάσης που μπορούν να ενεργοποιηθούν οδηγώντας έναν κινητήρα. Πηγή: *Electrical Machine Drives Control An Introduction J.Pyrhönen, V. Hrabovcová, R.S. Semken*

2.3.9 Μέθοδοι ελέγχου οδήγησης των κινητήρων

Η σωστή επιλογή μιας μονάδας ελέγχου γίνεται σύμφωνα με τις ανάγκες μια εφαρμογής και είναι σημαντική αφού καθορίζει την αποτελεσματικότητα και την αξιοπιστία της.

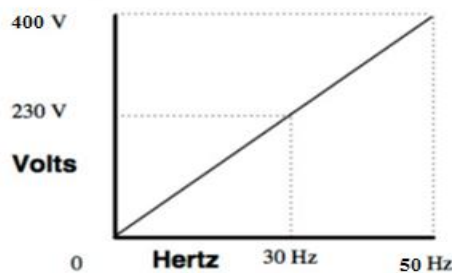
Υπάρχουν τρεις κύριοι τύποι μεθόδων ελέγχου κινητήρα για επαγωγικούς κινητήρες που οδηγούνται από μονάδες ελέγχου στροφών, οι οποίοι παρατίθενται στην συνέχεια :



Σχήμα 2.36 Κύβοδιάγραμμα με τις τρεις βασικές μεθόδους οδήγησης

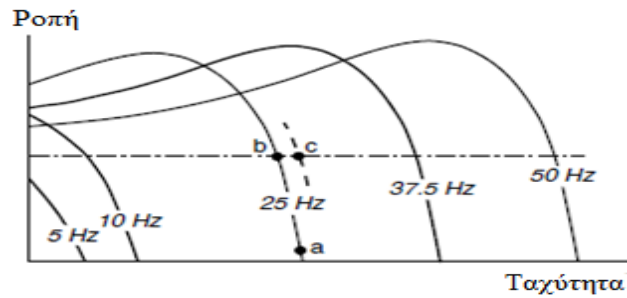
2.3.9.1 Κλιμακωτός Έλεγχος (Scalar Control)

Ο κλιμακωτός έλεγχος εστιάζει μόνο στην δυναμική των χαρακτηριστικών της σταθερής κατάστασης του κινητήρα. Συχνά αναφέρεται ως έλεγχος V/f. Αυτή η μέθοδος θεωρείται «plug-n-play» δεδομένου ότι απαιτούνται λίγα δεδομένα του κινητήρα από την μονάδα ελέγχου. Ο κλιμακωτός έλεγχος ελέγχει την μαγνητική ροή του κινητήρα διατηρώντας σταθερή την ισχύ του μαγνητικού πεδίου, η οποία δημιουργεί σταθερή ροπή. Η διαβάθμιση της τάσης (V) και της συχνότητας (f) είναι σε σταθερή αναλογία, ανεξάρτητα από την ταχύτητα του κινητήρα.



Σχήμα 2.37 Γράφημα V/f βάση του οποίου γίνεται η ρύθμιση της ταχύτητας ενός κινητήρα.

Ένα σύστημα ελέγχου V/f πάσχει στην απόδοση της ροπής σε χαμηλή ταχύτητα, όπως φαίνεται από το σχήμα 2.38.



Σχήμα 2.38 Γράφημα ροπής-ταχύτητας στην κανονική περιοχή λειτουργίας κινητήρα. Παρατηρείται ότι στις χαμηλές συχνότητες η καμπύλη της ροπής μειώνεται δραματικά.

Η απόδοση σε χαμηλή ταχύτητα μπορεί να βελτιωθεί με την αύξηση του λόγου V/f σε χαμηλές συχνότητες προκειμένου να υπάρχει η πλήρης μαγνητική ροή. Η τεχνική αυτή αναφέρεται ως «Vboost».

Οι μονάδες ελέγχου V/f περιλαμβάνουν έναν ψηφιακό ελεγκτή PI για τον έλεγχο της ταχύτητας. Ο ελεγκτής PI διατηρεί σταθερή μαγνήτιση σε διαφορετικές συχνότητες αναφοράς όπως φαίνεται στην παρακάτω εξίσωση:

$$V_s = \begin{cases} P_1 \omega_e + \sqrt{2} V_{\text{boost}}, & P_1 = \frac{\sqrt{2p}}{2\pi} \left(\frac{V_{s_{\text{rated}}}}{f_{\text{rated}}} - \frac{V_{\text{boost}}}{f_c} \right) \text{ για } f_{\text{min}} < f < f_c \\ P_2 \omega_e, & P_2 = \frac{\sqrt{2p}}{2\pi} \left(\frac{V_{s_{\text{rated}}}}{f_{\text{rated}}} \right) \text{ για } f_c < f < f_{\text{rated}} \end{cases} \quad (2-90)$$

όπου, V_s : το απαιτούμενο εύρος της τάσης που πρέπει να εφαρμοστεί στον στάτη προκειμένου να επιτευχθεί η απαιτούμενη ηλεκτρική συχνότητα ω_e .

Η ω_e , ηλεκτρική κυκλική συχνότητα θεωρείται ότι είναι ίση με την απαιτούμενη γωνιακή ταχύτητα του δρομέα πολλαπλασιασμένη με το ζεύγος πόλων

$V_{s_{\text{rated}}}$: η ονομαστική τάση

p : αριθμός ζευγών πόλων

f_{rated} : είναι η ονομαστική συχνότητα σε Hz

V_{boost} : η τιμή που δίνεται στον ελεγκτή ώστε να αντισταθμιστεί η πτώση τάσης του στάτη και να αυξηθεί η ροπής εκκίνησης.

Η V_{boost} μπορεί να έχει τιμή έως 25% της $V_{s_{\text{rated}}}$ και εφαρμόζεται από την ελάχιστη συχνότητα f_{min} (με τιμή έως 6% της f_{rated}) ως την συχνότητα f_c (με τιμή έως 40% της f_{rated}).

Η ροπή του κινητήρα μπορεί να εκφραστεί από το ρεύμα του δρομέα και της μαγνητικής ροής του διακένου, ως

$$T_e = \left| \frac{3}{2} p \Psi_m I_r \right| = \frac{V_s^2}{\omega_e^2} f_{\text{slip}} \quad (2-91)$$

όπου, p : αριθμός ζευγών πόλων

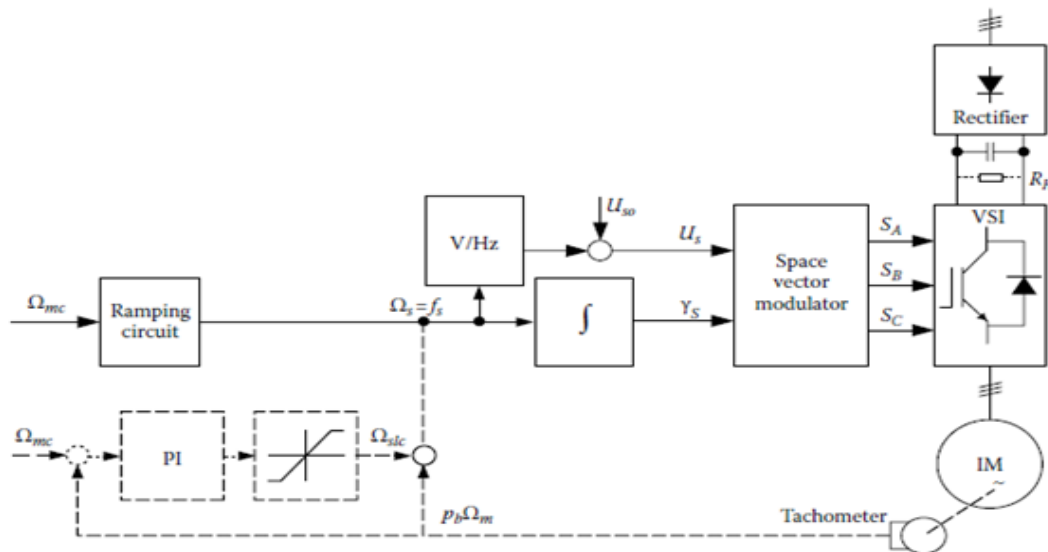
Ψ_m : μαγνητική ροή του διακένου

I_r : ρεύμα του δρομέα

f_{slip} : συχνότητα ολίσθησης στον δρομέα

Στην περίπτωση που η ταχύτητα αναφοράς αυξάνεται κρατώντας σταθερή την τάση, στο ονομαστικό της σημείο, παρατηρείται εξασθένιση του μαγνητικού πεδίου και ο κινητήρας αποδίδει χαμηλότερη ροπή από την ονομαστική. Η ροπή μειώνεται περαιτέρω για να αυξηθεί η ταχύτητα στο εύρος των πολύ υψηλών στροφών. Σε αυτό το εύρος, η συχνότητα ολίσθησης του δρομέα δεν μπορεί να αυξηθεί. Η μέγιστη ροπή είναι αντιστρόφως ανάλογη με το τετράγωνο της συχνότητας τροφοδοσίας. Ισχύει:

$$T_e = \frac{1}{f^2} \quad (2-92)$$



Σχήμα 2.39 Σχηματικό διάγραμμα ενός ελεγκτή V/f ανοικτού βρόχου ο οποίος ελέγχει έναν επαγωγικό κινητήρα. Ο αλγόριθμος ελέγχου υπολογίζει το πλάτος της τάσης και την γωνία γ_s αναλόγως της ταχύτητας. Το διάνυσμα της τάσης αποτελεί αναφορά για τον διαμορφωτή διανυσμάτων χώρου (SVM), ο οποίος παρέχει τα σήματα διαμόρφωσης στον μετατροπέα SV-PWM. Το σήμα ταχύτητας, Ω_{mech} , καθορίζει την συχνότητα του μετατροπέα, $f_s = \Omega_s$, επίσης καθορίζει την τάση στον στάτη σύμφωνα με τη σταθερά V/f. Πηγή: *Power Electronics and Motor Drives B. M. Wilamowski*

Η απλούστερη μέθοδος ελέγχου ταχύτητας V/f δεν περιλαμβάνει συσκευή ανατροφοδότησης. Η ταχύτητα, Ω_{mech} του κινητήρα και η γωνιακή ταχύτητα ολίσθησης, $\Omega_{slip} = \Omega_s - p_b \Omega_{mech}$, δεν ελέγχονται με ακρίβεια και αυτό μπορεί να οδηγήσει σε ασταθή λειτουργία του κινητήρα, με αποτέλεσμα προβλήματα υπερέντασης.

Η ανατροφοδότηση ενός συστήματος κίνησης με κλιμακωτό έλεγχο είναι συνήθως η συχνότητα, ή η ταχύτητα. Η ανατροφοδότηση της συχνότητας γίνεται απευθείας μέσω του μπλοκ της ανατροφοδότησης τάσης. Ο εξωτερικός έλεγχος της ταχύτητας μπορεί να εφαρμοστεί με την ρύθμιση της ολίσθησης, όπως φαίνεται στο σχηματικό διάγραμμα 2.39, με την ευθεία με την διακεκομμένη γραμμή. Η εντολή της γωνιακής ταχύτητας ολίσθησης, Ω_{slip} , παράγεται από τον ελεγκτή αναλογικού/ολοκληρωτικού σφάλματος (PI) της ταχύτητας. Αυτό το σήμα προστίθεται στο σήμα του ταχομέτρου καθορίζοντας την εντολή κυκλικής συχνότητας του μετατροπέα $\Omega_s = 2\pi f_s$. Η ταχεία αυξομείωση της ταχύτητας μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα μια αρνητική εντολή ολίσθησης και ο κινητήρας τότε λειτουργεί ως γεννήτρια. Η αναγεννητική αυτή ηλεκτρική ενέργεια μπορεί

είτε να διοχετευθεί από τον μετατροπέα στην γραμμή τροφοδοσίας είτε μέσω της λειτουργίας δυναμικής πέδησης στην αντίσταση πέδησης συνεχούς ρεύματος, R_{brake} .

Στον ελεγκτή της ταχύτητας γίνεται ανατροφοδότηση του ρεύματος του στάτη αποκλειστικά ως προστασία. Ο έλεγχος του ρεύματος του στάτη του κινητήρα γίνεται χωρίς η μονάδα να διακρίνει το ρεύμα μαγνήτισης I_m και το ενεργό ρεύμα I_r και στοχεύει στις ακόλουθες λειτουργίες:

- προστασία υπερφόρτωσης I^2t της μηχανής
- προστασία των ηλεκτρονικών διατάξεων και ημιαγωγών

Το σύστημα ελέγχου μειώνει το σήμα της εντολής συχνότητας όταν το ρεύμα υπερβαίνει την προκαθορισμένη τιμή. Συνήθως, το όριο τίθεται στο 110% έως 150% του ονομαστικού ρεύματος του κινητήρα για μικρό χρονικό διάστημα συνήθως 60".

Σύμφωνα με μεγάλο κατασκευαστή η μέθοδος ελέγχου V/f χρησιμοποιείται συχνά όταν απαιτείται λειτουργία υψηλής συχνότητας ενδεχομένως και >400Hz. Οι περισσότερες εφαρμογές εργαλειομηχανών χρησιμοποιούν αυτήν την μέθοδο ελέγχου, λόγω αυτού του πλεονεκτήματος.

Ακόμη είναι η μόνη μέθοδος ελέγχου που επιτρέπει την οδήγηση περισσότερων του ενός κινητήρων από μία μονάδα ελέγχου. Όλοι οι κινητήρες που λειτουργούν παράλληλα θα λειτουργούν συγχρόνως και θα έχουν την ίδια αναφορά ταχύτητας.

Μειονέκτημα αποτελεί ότι η ροπή εκκίνησης του κινητήρα περιορίζεται με μέγιστη απόδοση ως 150% στα 5 Hz. Η ρύθμιση ταχύτητας έχει ακρίβεια $\pm 5\%$ στη σταθερή κατάσταση λειτουργίας, ενώ παρουσιάζει ταλαντώσεις και μη γραμμική συμπεριφορά κατά τις μεταβατικές καταστάσεις εναλλαγής της ταχύτητας.

Η απόκριση ταχύτητας σε μια αλλαγή στην συχνότητα αναφοράς αξιολογείται στα 5 Hz. Η μεγαλύτερη απόκριση της ταχύτητας έχει ως αποτέλεσμα ταχύτερη απόκριση του κινητήρα όταν αλλάζει η συχνότητα αναφοράς.

Κάθε μέθοδος ελέγχου έχει επίσης ένα εύρος ελέγχου ταχύτητας που εκφράζεται ως λόγος. Το εύρος ελέγχου ταχύτητας του κλιμακωτού ελέγχου είναι από 1:10 ως 1:40. Αυτό σημαίνει ότι αν πολλαπλασιαστεί αυτή η αναλογία με την μέγιστη συχνότητα μπορεί να καθοριστεί η ελάχιστη ταχύτητα που μπορεί η μονάδα ελέγχου να οδηγήσει τον κινητήρα. Με ονομαστική συχνότητα 50 Hz και εύρος ελέγχου 1:40, μια μονάδα με τη μέθοδο ελέγχου V/f μπορεί να ελέγξει έναν κινητήρα από τα 1,25 Hz.

Όταν αυξάνεται η συχνότητα, μπορεί να ξεπεραστεί η ονομαστική τάση ενός κινητήρα. Ένας κινητήρας που οδηγείται από ρυθμιστή στροφών μπορεί να λειτουργήσει σε τιμές πάνω από την ονομαστική τάση και την ταχύτητα χωρίς να υποστεί εξασθένιση μαγνητικού πεδίου. Για παράδειγμα κινητήρας με ονομαστική τάση λειτουργίας 230/400V, για Δ/Y, στα 50Hz, μπορεί να λειτουργήσει με σύνδεση τριγώνου σε συχνότητα 86,6 Hz και τάση 400V με την ονομαστική μαγνητική ροή στο διάκενό του. Η ονομαστική του ισχύς θα αυξηθεί, με αναλογία $\sqrt{3}:1$.

Ο έλεγχος V/Hz συμπερασματικά είναι απλός και χαμηλού κόστους. Η εφαρμογή του με κλειστό βρόχο ελέγχου δεν απαιτείται, αλλά μπορεί να βελτιώσει την απόδοση του συστήματος με μειονεκτήματα την αύξηση του κόστους και της πολυπλοκότητας.

Αυτή η μέθοδος ελέγχου ταχύτητας δεν είναι κατάλληλη στις εφαρμογές όπου οι κινητήρες λειτουργούν σε χαμηλές ταχύτητες (κάτω από 5 Hz). Η ροπή σε χαμηλή ταχύτητα είναι ανεπαρκής λόγω της πτώση τάσης του στάτη η οποία επηρεάζει το μέγεθος του ρεύματος που παράγει την μαγνητική ροή. Οι σύγχρονες μονάδες με έλεγχο V/f περιλαμβάνουν ρύθμιση «V_{boost}» με αυτόματη αύξηση του λόγου V/f κατά την εκκίνηση ή όταν χρειάζεται με στόχο την βελτίωση της επαγωγής της μαγνητικής ροής και κατά συνέπεια της ροπής εκκίνησης [12, 16, 29, 30, 35].

2.3.9.2 Διανυσματικός Έλεγχος (Field Oriented Control)

Ο έλεγχος αυτός χρησιμοποιεί το δυναμικό μοντέλο του κινητήρα αντί το μοντέλου σταθερής κατάστασης. Επιτυγχάνει την αποσύζευξη του ελέγχου της ροπής από την μαγνητική ροή και μπορεί να μεταβάλλει τη θέση των διανυσμάτων της τάσης, του ρεύματος και της μαγνητικής ροής κατά μέτρο και συχνότητα.

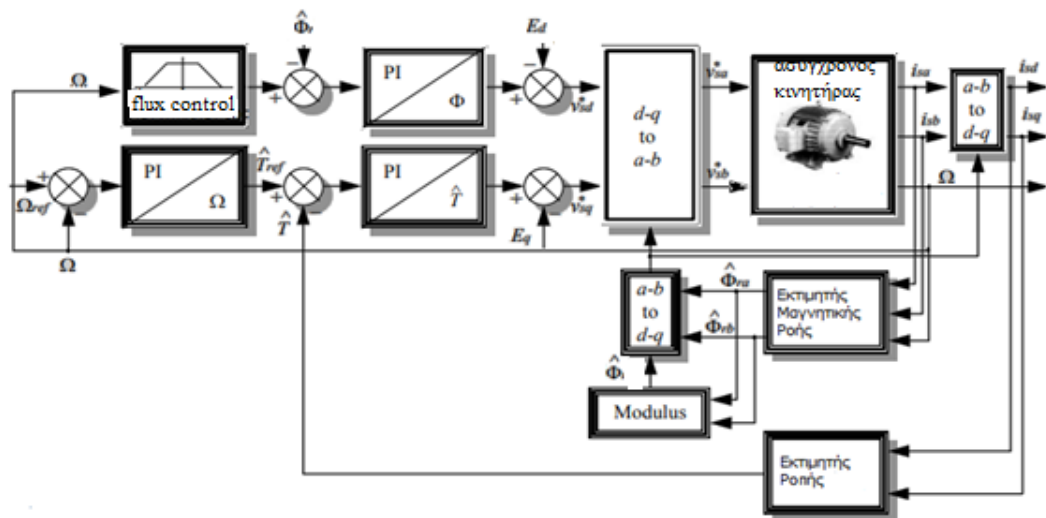
Με τον διανυσματικό έλεγχο (F.O.C.), ένα τριφασικό σύστημα που εξαρτάται από τον χρόνο και την ταχύτητα μετασχηματίζεται σε ένα σύστημα χρονικά ανεξάρτητο δύο συντεταγμένων (d-q). Τα τρία διανύσματα του ρεύματος μετατρέπονται από ένα σταθερό πλαίσιο αναφοράς, σε ένα στρεφόμενο σύστημα δύο αξόνων συντεταγμένων αναφοράς (d-q) χρησιμοποιώντας τους μετασχηματισμούς Clarke και Park. Συγκεκριμένα, το ρεύμα του άξονα d, που λειτουργεί ως ρεύμα του μαγνητικού πεδίου, ρυθμίζεται κατάλληλα ώστε να διατηρείται το επιθυμητό επίπεδο μαγνήτισης στον δρομέα. Το ρεύμα του q-άξονα, ως ενεργό ρεύμα του φορτίου, ρυθμίζεται σύμφωνα με την αναφορά της ροπής. Το ρεύμα του στάτη έχει δύο διανυσματικές συνιστώσες, το διάνυσμα του ρεύματος μαγνήτισης (d) και το διάνυσμα του ρεύματος απόδοσης ροπής (q). Το ρεύμα μαγνήτισης καθυστερεί της φάσης της τάσης κατά 90° και το ρεύμα παραγωγής ροπής είναι σε φάση με την τάση. Κατά αυτόν τον τρόπο σε μια μονάδα ελέγχου τα δύο διανύσματα του ρεύματος ελέγχονται ανεξάρτητα από ξεχωριστό ελεγκτή PI και έπειτα οι έξοδοι των ελεγκτών PI μετασχηματίζονται πίσω στο τριφασικό σταθερό πλαίσιο αναφοράς χρησιμοποιώντας το αντίστροφο του μετασχηματισμού Clarke και Park.

Στον διανυσματικό έλεγχο ελέγχεται στιγμιαία η θέση των διανυσμάτων τάσης, ρεύματος και ροής, δίνοντας τον ιδανικό προσανατολισμό τόσο σε σταθερή κατάσταση όσο και κατά τη διάρκεια των μεταβατικών περιόδων της κίνησης. Ακόμη ελέγχεται ιδανικά η λειτουργία του αντιστροφέα συνήθως μέσω της διαμόρφωσης διανυσμάτων χώρου (SV-PWM). Έτσι η μαγνητική ροή διατηρείται σταθερή, ενώ η ροπή είναι ανεξάρτητα ελεγχόμενη έχοντας δυναμική απόκριση στις εναλλαγές του φορτίου κατά την διάρκεια του χρόνου. Για να λειτουργεί βέλτιστα ο διανυσματικός έλεγχος πρέπει να καθορίζεται σε κάθε χρονική στιγμή η κατεύθυνση και το μέτρο του διανύσματος της μαγνητικής ροής του δρομέα. Ο έλεγχος αυτός, είναι πολύ ευαίσθητος στην εκτίμηση της μαγνητικής ροής (μέτρο και κατεύθυνση), η οποία επηρεάζεται κυρίως από τις διακυμάνσεις των παραμέτρων του κινητήρα, όπως η αντίσταση του δρομέα. Αυτές οι παράμετροι μεταβάλλονται κατά την λειτουργία του κινητήρα επηρεαζόμενοι από την θερμοκρασία, και τον μαγνητικό κορεσμό του πυρήνα. Επομένως, οποιαδήποτε αναντιστοιχία παραμέτρων στην εκτίμηση της ροής θα επηρεάσει δυσμενώς την απόκριση της ροπής και την απόδοση της μονάδας ελέγχου.

Παρακάτω δίνεται το σχήμα 2.40 με το σχηματικό διάγραμμα του διανυσματικού ελέγχου. Η μαγνητική ροή υπολογίζεται, στο πλαίσιο αναφοράς του δρομέα, χρησιμοποιώντας τα διανύσματα του ρεύματος του στάτη i_{sa} και i_{sb} και την ταχύτητα του δρομέα. Στο πλαίσιο αναφοράς των συντεταγμένων d-q, το οποίο περιστρέφεται συγχρόνως με την γωνιακή ταχύτητα της μηχανής, η μαγνητική ροή και η ροπή μπορούν να ελεγχθούν ανεξάρτητα, με την μεταβολή των αντίστοιχων διανυσμάτων του ρεύματος. Αυτές οι τιμές τροφοδοτούν την μονάδα μετασχηματισμού Clarke. Οι έξοδοι της μονάδας μετασχηματισμού ορίζονται i_{sa} και i_{sb} . Αυτά τα δύο διανύσματα ρεύματος είναι οι είσοδοι του μετασχηματισμού Park στο περιστρεφόμενο πλαίσιο αναφοράς d-q. Τα στοιχεία i_{sd} και i_{sq} συγκρίνονται με τις τιμές της ανάδρασης i_{dref} (ανάδραση ροής) και i_{qref} (ανάδραση ροπής). Αυτή η ακολουθία ελέγχου μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον έλεγχο των επαγωγικών κινητήρων απλά αλλάζοντας την τιμή της μαγνητικής ροής και ελέγχοντας την κατεύθυνσή της. Οι έξοδοι των

ρυθμιστών ρεύματος είναι U_d και U_q εφαρμόζονται στον αντίστροφο μετασχηματισμό Park. Οι έξοδοι αυτού του μπλοκ μετασχηματισμού είναι οι U_{sa} και U_{sb} που είναι τα διανύσματα της τάσης στο πλαίσιο αναφοράς του στάτη α, β . Αυτές είναι οι εισοδοί στον διαμορφωτή SV-PWM. Οι έξοδοι αυτού του μπλοκ είναι τα σήματα που οδηγούν τον αντιστροφέα.

Ο διανυσματικός έλεγχος είναι υψηλής απόδοσης και εφαρμόζεται ευρέως στα συστήματα κίνησης, όμως ορισμένα χαρακτηριστικά του τον καθιστούν πολύπλοκο. Η αρχιτεκτονική που περιλαμβάνει τα μπλοκ μετασχηματισμού συντεταγμένων, οι ελεγκτές αναλογικού και ολοκληρωμένου κέρδους (PI) οι οποίοι εμπεριέχουν πολλές παραμέτρους που πρέπει να συντονιστούν, οι ρυθμιστές ρεύματος και οι γεννήτριες σημάτων διαμόρφωσης παλμών (PWM), αυξάνουν την πολυπλοκότητα και τον χρόνο εκτέλεσης των υπολογισμών του συστήματος.



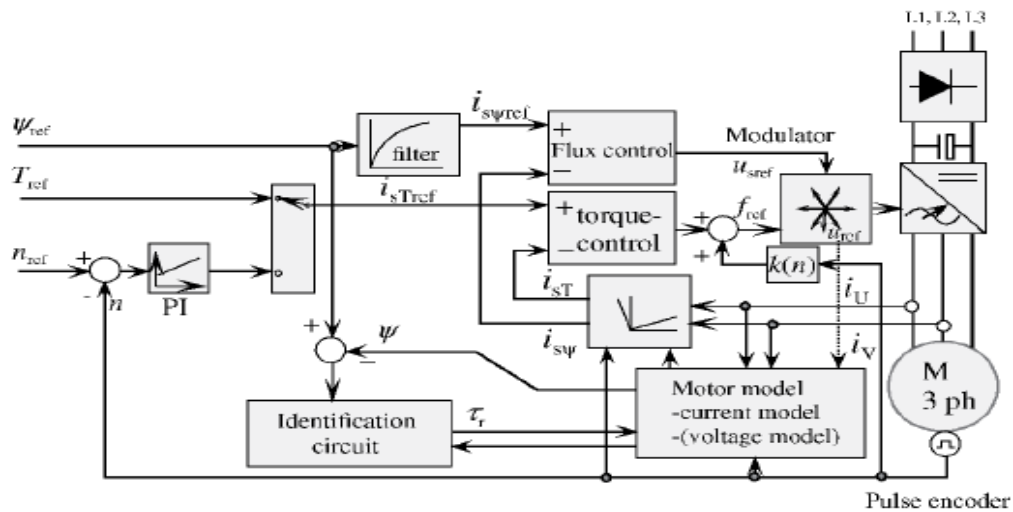
Σχήμα 2.40 Το σχηματικό διάγραμμα του διανυσματικού ελέγχου

Δύο υποκατηγορίες του διανυσματικού ελέγχου αποτελούν ο άμεσος διανυσματικός έλεγχος (Direct Field Oriented Control-DFOC) και ο έμμεσος (Indirect Field Oriented Control-IFOC).

Στον άμεσο έλεγχο, σχήμα 2.41, η στιγμιαία θέση του δρομέα βρίσκεται είτε από αισθητήρες, είτε από εκτιμητές, είτε από συνδυασμό των παραπάνω. Σύμφωνα με μεγάλο κατασκευαστή η ανατροφοδότηση του κωδικοποιητή σε συνδυασμό με τον διανυσματικό έλεγχο, επιτρέπει τιμή ροπής εκκίνησης ως 200% από τις 0 rpm για τον κινητήρα. Αυτό είναι βασικό πλεονέκτημα για εφαρμογές που απαιτούν συγκράτηση φορτίου, όπως γερανοί, και ανελκυστήρες. Η ανατροφοδότηση του κωδικοποιητή επιτρέπει την υψηλότερη απόκριση ταχύτητας, πάνω από 50 Hz, όπως και το μεγαλύτερο εύρος ελέγχου ταχύτητας 1:1500.

Στον έμμεσο έλεγχο επαγωγικού κινητήρα γίνεται ένας υπολογισμός της ολίσθησης της ταχύτητας του δρομέα κατά την λειτουργία του κινητήρα. Ο υπολογισμός ολίσθησης περιλαμβάνει την χρονική σταθερά του δρομέα η οποία μπορεί να διαφοροποιείται λόγω των μεταβολών της ωμικής αντίστασης του δρομέα από τη θερμοκρασία. Η μεταβολή αυτή έχει ως αποτέλεσμα ο προσανατολισμός με το πεδίο του δρομέα να μην είναι πάντοτε σωστός και ακριβής, και αυτό υποβαθμίζει την ποιότητα του ελέγχου. Σύμφωνα με μεγάλο κατασκευαστή, με αυτή την μέθοδο, ο κινητήρας μπορεί να παράγει ως 200% της ονομαστικής του ροπής από 0,3 Hz. Η μέθοδος ελέγχου χωρίς ανατροφοδότηση έχει υψηλή απόκριση ταχύτητας από 10 Hz. Με τη χρήση αξιόπιστων δεδομένων από τις παραμέτρους του κινητήρα, η μονάδα ελέγχου μπορεί να υπολογίσει τα μέτρα των διανυσμάτων του ρεύματος μαγνητισής (I_d) και του ρεύματος που παράγει την ροπή (I_q). Η

ρύθμιση ταχύτητας έχει ακρίβεια $\pm 0,2\%$ στην μέγιστη συχνότητα. Το εύρος ελέγχου της ταχύτητας κυμαίνεται στο 1:200, επιτρέποντας την παραγωγή ροπής από πολύ χαμηλές στροφές.



Σχήμα 2.41 Σχηματικό διάγραμμα όπου δείχνεται η χρήση στον άξονα του κινητήρα αισθητηρίου που επικοινωνεί με τον ελεγκτή του VFD. Πηγή: *Electrical Machine Drives Control An Introduction J. Pyrhönen V. Hrabovcová R.S. Semken*

Το σχηματικό διάγραμμα στο σχήμα 2.41 δείχνει τον άμεσο διανυσματικό έλεγχο. Οι παράμετροι ελέγχου υπολογίζονται χρησιμοποιώντας στον κινητήρα συσκευή ανατροφοδότησης. Στο μπλοκ αναγνώρισης, υπολογίζεται συνεχώς η χρονική σταθερά του δρομέα t_r η οποία είναι σημαντική για τον δυναμικό έλεγχο του κινητήρα.

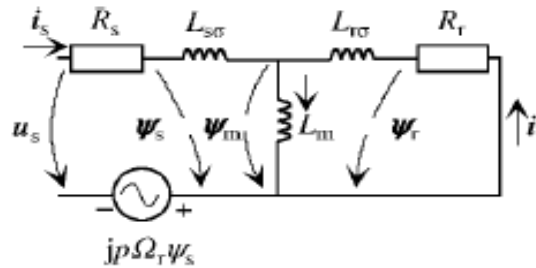
Το πλαίσιο αναφοράς του διανυσματικού ελέγχου μιας ασύγχρονης μηχανής μπορεί να είναι το πλαίσιο αναφοράς του στάτη ή το πλαίσιο αναφοράς του δρομέα. Στο σχήμα 2.43 παρουσιάζεται το ισοδύναμο κύκλωμα με πλαίσιο αναφοράς αυτό του δρομέα. Οι εξισώσεις της μαγνητικής ροής που βασίζονται στα διανύσματα χώρου είναι:

$$\Psi_s = L_s i_s + L_m i_r \quad (2-93)$$

$$\Psi_r = L_r i_r + L_m i_s \quad (2-94)$$

$$\Psi_m = L_m (i_s + i_r) \quad (2-95)$$

Οι σχέσεις της μαγνητικής ροής όπως φαίνεται εξαρτώνται από το ρεύμα του στάτη και του δρομέα. Σε ένα κινητήρα βραχυκυκλωμένου κλωβού, η μέτρηση του ρεύματος του δρομέα είναι όμως αδύνατη. Οι σχέσεις της μαγνητικής ροής πρέπει να εκτιμηθούν με μετρήσεις κάποιων παραμέτρων.



Σχήμα 2.42 Το ισοδύναμο κύκλωμα ενός επαγωγικού κινητήρα με τα διανύσματα χώρου στο πλαίσιο αναφοράς του δρομέα. Στον διανυσματικό έλεγχο είναι σύνηθες να χρησιμοποιείται ως πλαίσιο αναφοράς αυτό του δρομέα ελέγχοντας την θέση του με ακρίβεια. Πηγή: Electrical Machine Drives Control An Introduction J. Pyrhönen V. Hrabovcová R.S. Semken

Η τάση του δρομέα στο πλαίσιο αναφοράς του εκφράζεται ως:

$$V_r = R_r i_r = -\frac{d\Psi_r}{dt} \quad (2-96)$$

Το ρεύμα του δρομέα στο πλαίσιο αναφοράς του εκφράζεται ως:

$$i_r = \frac{\Psi_r - L_m i_s}{L_r} \quad (2-97)$$

Η χρονική σταθερά άνευ φορτίου του δρομέα εκφράζεται ως:

$$t_r = \frac{L_r}{R_r} \quad (2-98)$$

Η μαγνητική ροή του δρομέα χρησιμοποιώντας την σταθερά άνευ φορτίου εκφράζεται ως:

$$\Psi_r(s) = \frac{L_m i_s}{1 + t_r s} \quad (2-99)$$

Η παραπάνω σχέση αντιστοιχεί σε ένα βαθυπερατό φίλτρο 1^{ης} τάξης και επομένως η μαγνητική ροή του δρομέα μπορεί να βρεθεί φιλτράροντας το ρεύμα του στάτη πολλαπλασιασμένο με την αυτεπαγωγή του διακένου. Πρακτικά, αυτό σημαίνει την μεταφορά του διανύσματος του ρεύματος του στάτη στο πλαίσιο αναφοράς του δρομέα και πολλαπλασιάζοντας το με την αυτεπαγωγή του διακένου και φιλτράροντας το αποτέλεσμα με ένα βαθυπερατό φίλτρο το οποίο εμπεριέχει τη σταθερά χρόνου του δρομέα.

Η ροπή ακολούθως μπορεί να εκφραστεί στο πλαίσιο αναφοράς του δρομέα ως:

$$T_e = \frac{3}{2} p \frac{L_m}{L_r} (\Psi_{rd} i_{sq} - \Psi_{rq} i_{sd}) \quad (2-100)$$

Η παραπάνω σχέση ισχύει ιδιαίτερα στο πλαίσιο αναφοράς του δρομέα με τις συνιστώσες d-q. Όταν οι παράμετροι του κινητήρα είναι γνωστές, οι πραγματικές τιμές έλεγχου μπορούν να εκτιμηθούν. Τα διανύσματα του ρεύματος στον άξονα d και στον q επηρεάζουν την ροπή που υπολογίζεται σε αυτό το πλαίσιο αναφοράς d-q.

Είναι καταλληλότερο να χρησιμοποιείται ένα πλαίσιο αναφοράς σχετικό με την μαγνητική ροή του δρομέα, αυτό γίνεται επειδή το ρεύμα του δρομέα εμπεριέχει μόνο το διάνυσμα που παράγει την ροπή.

Σε ένα σύστημα βασισμένο στην μαγνητική ροή του δρομέα, οι εξισώσεις των μηχανών μπορούν να μετασχηματιστούν σε ένα πλαίσιο αναφοράς της μαγνητικής ροής του δρομέα. Κατά τη μετατροπή από το πλαίσιο αναφοράς του δρομέα (d-q) στο πλαίσιο αναφοράς της μαγνητικής ροής του δρομέα ($\Psi_r T$) ισχύει [29, 12, 32]:

$$\Psi_r = \Psi_{rd} + \Psi_{rq} \quad (2-101)$$

Η ροπή μπορεί να εκφραστεί στο πλαίσιο αναφοράς της μαγνητικής ροής του δρομέα $\Psi_r T$ ως:

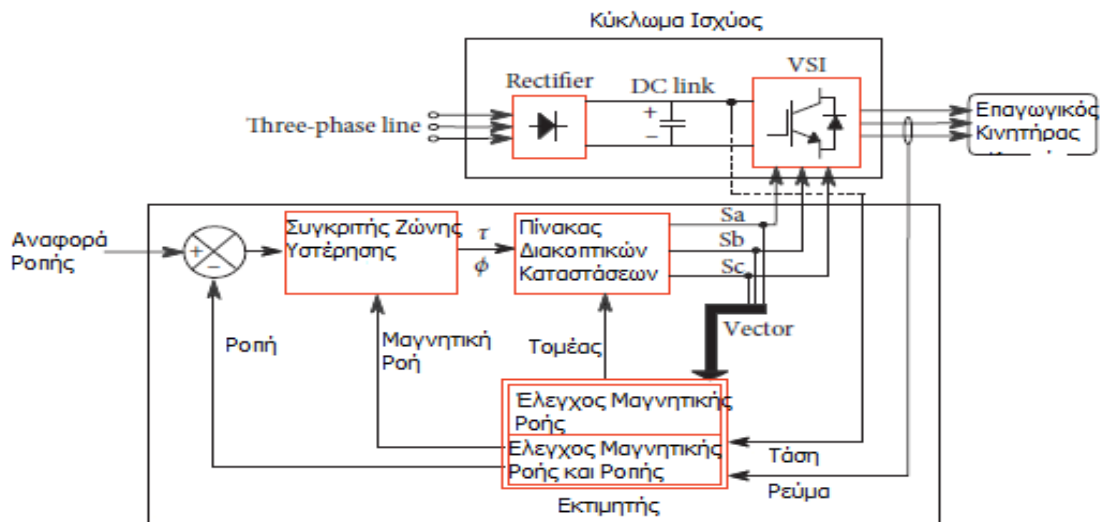
$$T_e = \frac{3}{2} p \frac{L_m}{L_r} (\Psi_r i_s) \quad (2-102)$$

2.3.9.3 Άμεσος Έλεγχος Ροπής (*Direct Torque Control*)

Ο άμεσος έλεγχος ροπής είναι μέθοδος οδήγησης η οποία είχε εφαρμογή αρχικά στους ασύγχρονους κινητήρες. Με τον άμεσο έλεγχο ροπής ελέγχονται δυναμικά, σε πραγματικό χρόνο τα μεγέθη της ροπής και της μαγνητικής ροής, εντός ορίων σφάλματος, ενεργοποιώντας το κατάλληλο διάνυσμα τάσης στον στάτη του κινητήρα. Η εκτίμηση των διανυσμάτων χώρου της μαγνητικής ροής και ηλεκτρομαγνητικής ροπής του στάτη και ο έλεγχος του μέτρου τους γίνεται ανεξάρτητα, με τη χρήση ελεγκτών υστέρησης ζώνης. Οι έξοδοι των ελεγκτών υστέρησης ζώνης χρησιμοποιούνται ώστε να επιλεγεί το βέλτιστο διάνυσμα τάσης από έναν προκαθορισμένο πίνακα για τον αντιστροφέα της μονάδας ελέγχου. Κατά αυτόν τον τρόπο, οι τιμές ροπής και ροής ελέγχονται άμεσα και διατηρούνται στο εύρος αναφοράς των ζωνών υστέρησης.

Σε αντίθεση με τον διανυσματικό έλεγχο έχει απλούστερη δομή και χαμηλή υπολογιστική πολυπλοκότητα. Στο πλαίσιο αναφοράς του στάτη όπου γίνεται ο έλεγχος, δεν εφαρμόζεται μετασχηματισμός συντεταγμένων και δεν χρειάζεται διαμορφωτής PWM, κατά αυτόν τον τρόπο ο χρόνος επεξεργασίας είναι χαμηλότερος και η δυναμική απόκριση της ροπής είναι υψηλότερη. Οι πληροφορίες του ρεύματος και της τάσης καθώς και οι πληροφορίες της θέσης των διακοπτικών στοιχείων S_a , S_b , και S_c δημιουργούν το πρότυπο ενός κινητήρα και με βάση αυτό γίνεται εκτίμηση της ροπής, της μαγνητικής ροής και της ταχύτητας περιστροφής. Η λογική ελέγχου της μεταγωγής των διακοπών είναι η βέλτιστη ενεργοποιώντας κατάλληλα τους διακόπτες και υπολογίζοντας την ροπή και την μαγνητική ροή στην διάρκεια του χρόνου. Στο σχήμα 2.43 δίνεται το σχηματικό διάγραμμα του άμεσου ελέγχου ροπής [12].

Για τον άμεσο έλεγχο ροπής, χρησιμοποιείται σύγχρονης γενιάς μικροεπεξεργαστής (DSP) ο οποίος να μπορεί να επεξεργάζεται τις καταστάσεις των διακοπών σε διαστήματα κάτω από 12,5μs, σύμφωνα με μεγάλο κατασκευαστή, ενισχύοντας περαιτέρω την απόδοση του ελέγχου. Σε αυτή την χρονική περίοδο των 12,5μs αντιστοιχεί το ελάχιστο πλάτος παλμού.



Σχήμα 2.43 Σχηματικό διάγραμμα του άμεσου ελέγχου ροπής. Τα σφάλματα ροής και ροπής και η γωνιακή θέση των διανυσμάτων χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό των καταστάσεων της μαγνητικής ροής και της ροπής στους ελεγκτές υστέρησης. Στη συνέχεια, αυτές οι τιμές κατάστασης γίνονται είσοδοι στον επιλογέα παλμών, όπου επιλέγεται το βέλτιστο διάνυσμα τάσης από τον πίνακα των διακοπτικών καταστάσεων

Το διάνυσμα της μαγνητικής ροής του στάτη ενός επαγωγικού κινητήρα προκύπτει από την ολοκλήρωση των τάσεων του στάτη και των διανυσμάτων του ρεύματος σύμφωνα με την εξίσωση:

$$\Psi_s(t) = \int (V_s(t) - R_s I_s(t)) dt \quad (2-104)$$

όπου : $\Psi_s(t)$: το διάνυσμα ροής στατη
 $V_s(t)$: διάνυσμα τάσης στατη
 $I_s(t)$: το διάνυσμα ρεύματος στάτη
 R_s : η αντίσταση στατη του κινητήρα

Η ωμική αντίσταση του στάτη προκαλεί πτώση τάσης και είναι η μοναδική μετρήσιμη παράμετρος που απαιτείται για την εκτίμηση της μαγνητικής ροής του κινητήρα. Η ωμική αντίσταση του στάτη είναι η κύρια πηγή σφάλματος του εκτιμητή, όμως η επιρροή του σφάλματος μειώνεται με την αύξηση της ταχύτητας και της τάσης στον κινητήρα.

Η ροπή του κινητήρα μπορεί στην συνέχεια να υπολογιστεί ως το κάθετο διάνυσμα της εκτιμώμενης μαγνητικής ροής του στάτη

Η εκτίμηση της μαγνητικής ροής του στάτη μπορεί να χωριστεί στην εκτίμηση της συνιστώσας του άξονα d και της συνιστώσας του άξονα q της ροής, ως εξής.

$$\Psi_{sd}(t) = \int (V_{sd}(t) - R_s I_{sd}(t)) dt \quad (2-105)$$

$$\Psi_{sq}(t) = \int (V_{sq}(t) - R_s I_{sq}(t)) dt \quad (2-106)$$

όπου οι συνιστώσες των διανυσμάτων του ρεύματος και της τάσης στάτη στο πλαίσιο αναφοράς του στάτη dq υπολογίζονται από τις παρακάτω εξισώσεις:

$$I_{sd} = I_a \quad (2-107)$$

$$I_{sq} = \frac{I_a - 2I_b}{\sqrt{3}} \quad (2-108)$$

$$V_{sd} = \frac{1}{3} V_{DC} (2V_a - V_b - V_c) \quad (2-109)$$

$$V_{sq} = \frac{1}{\sqrt{3}} V_{DC} (V_b - V_c) \quad (2-110)$$

όπου, I_a , I_b , V_a , V_b και V_c είναι ρεύματα φάσης και τάσεις αντίστοιχα και V_{DC} είναι η τάση διαύλου DC η οποία αποτελεί και είσοδος στον αντιστροφέα.

Όπως φαίνεται οι μεταβολές του διανύσματος τάσης του στάτη επηρεάζουν άμεσα το διάνυσμα ροής του στάτη.

Η ροπή μπορεί να εκφραστεί σύμφωνα με τους διανύσματα της ροής του δρομέα και της μαγνητικής ροής του στάτη ως εξής:

$$T_e = \frac{3}{2} p \frac{L_m}{L_r L_s - L_m^2} L_r L_s - \Psi_s \Psi_r \sin(\delta\Psi) \quad (2-111)$$

όπου, T_e : η ροπή

p : ο αριθμός ζευγών πόλων

Ψ_s : το διάνυσμα ροής του στάτη

$(\delta\Psi)$: η γωνία μεταξύ των διανυσμάτων ροής του στάτη και του δρομέα.

L_s , L_r και L_m η αυτεπαγωγή του στάτη, του δρομέα και η αυτεπαγωγή διακένου.

Λαμβάνοντας υπ' όψιν το μέτρο της μαγνητικής ροής του δρομέα και του στάτη, η ροπή μπορεί να ελεγχθεί αλλάζοντας την σχετική γωνία μεταξύ των δύο αυτών διανυσμάτων. Η μαγνητική ροή μπορεί να ρυθμιστεί από την τάση.

Σύμφωνα με μεγάλο κατασκευαστή, ο άμεσος έλεγχος ροπής είναι μια μέθοδος ελέγχου ανοιχτού βρόχου για τις περισσότερες περιπτώσεις εφαρμογών, σε ποσοστό έως 95%. Ανάλογα με την ισχύ του κινητήρα, η ρύθμιση ταχύτητας γίνεται με ακρίβεια $\pm 0,1\%$ στην ονομαστική συχνότητα λειτουργίας. Σε εφαρμογές, με έλεγχο κλειστού βρόχου, μια μονάδα άμεσου ελέγχου ροπής εξοπλισμένη με έναν κωδικοποιητή επιτυγχάνει ακρίβεια ταχύτητας $\pm 0,01\%$. Η ακρίβεια της ταχύτητας στο ονομαστικό της σημείο είναι 0,3–0,4%. Με την χρήση κωδικοποιητή, η ακρίβεια ταχύτητας βελτιώνεται και το σύστημα συμπεριφέρεται με ακρίβεια όμοια της κίνησης σερβομηχανισμού. Ο χρόνος απόκρισης της ροπής με βήμα ροπής αναφοράς στο 100% είναι 1-5 ms, το οποίο προσεγγίζει το φυσικό όριο της ικανότητας απόκρισης ενός κινητήρα. Όσον αφορά τον έλεγχο σε χαμηλές ταχύτητες κινητήρα, το εύρος του ελέγχου της ταχύτητας είναι 1:200 ενώ ο άμεσος έλεγχος ροπής παρέχει 100% της ροπής στρέψης από 0 rpm σε ένα σύστημα με ασύγχρονο κινητήρα.

Ορισμένα μειονεκτήματα είναι οι ανεπιθύμητες ταλαντώσεις κατά τον έλεγχο της μαγνητικής ροής και ροπής του στάτη, η υψηλότερη αρμονική παραμόρφωση των κυματομορφών της τάσης και του ρεύματος στον στάτη σε σύγκριση με άλλες μεθόδους καθώς και ο ακουστικός θόρυβος που παράγεται λόγω της μεταβλητής συχνότητας μεταγωγής [12, 32, 36, 37, 38].

3 Μεθοδολογία, ανάλυση σεναρίων, παρουσίαση διαγραμμάτων, υπολογισμοί και παραμετροποίηση σε περιβάλλον Matlab-Simulink

3.1 Χαρακτηριστικά και βασικές καμπύλες φορτίου

Κάθε κινητήριο σύστημα αποτελείται από μονάδα ελέγχου στροφών και ηλεκτροκινητήρα, για να ενσωματωθεί σωστά σε μια εφαρμογή, πρέπει πρώτα να διαστασιολογηθεί σωστά. Για να γίνει αυτό χρειάζεται να είναι γνωστά τα χαρακτηριστικά και το μέγεθος του φορτίου του. Χρειάζονται πληροφορίες σχετικά με το φορτίο, ώστε να διασφαλιστεί ότι το κινητήριο σύστημα μπορεί να ανταποκριθεί στις απαιτήσεις του. Ακόμη δεν πρέπει να παραβλέπεται ότι τα μηχανικά συστήματα υπόκεινται στον νόμο της αδράνειας. Αυτή η ιδιότητα της αντίστασης στην μεταβολή της κινητικής κατάστασης μιας μάζας, αναφέρεται ως ροπή αδράνειας.

Υπάρχουν διαφορετικές περιπτώσεις φορτίων που μπορεί να οδηγηθούν από ένα κινητήριο σύστημα, το καθένα έχει συγκεκριμένα χαρακτηριστικά ροπής, ταχύτητας και απαιτήσεις ισχύος. Παραδείγματα ιδιαίτερων φορτίων, τα οποία μπορεί να είναι μεταβαλλόμενα σε σχέση με τον χρόνο, αποτελούν οι φυγοκεντρικές αντλίες, οι ανεμιστήρες, οι εμβολοφόροι συμπιεστές, οι αναδευτήρες κ.λπ.

Αυτά που απαιτείται να είναι γνωστά σχετικά με το φορτίο κάθε εφαρμογής κίνησης είναι τα ακόλουθα:

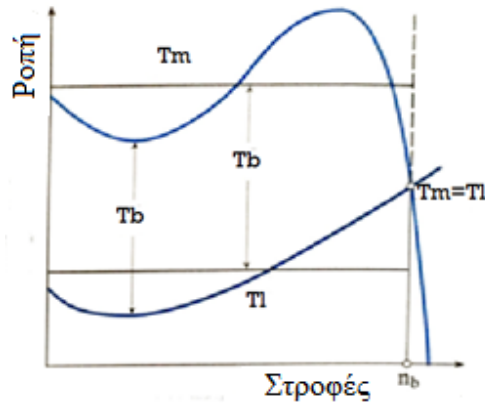
- Η ροπή αδράνειας του μηχανολογικού εξοπλισμού.
- Τα χαρακτηριστικά της ροπής βάσει του τύπου του μηχανικού φορτίου, το οποίο θα συζευχθεί με τον άξονα του κινητήρα.
- Το εύρος της μεταβολής της ταχύτητας καθώς και η ελάχιστη και η μέγιστη τιμή της.

Η ροπή που απαιτείται από το μηχανικό φορτίο καθορίζει το μέγεθος του κινητήρα. Η ονομαστική ροπή του κινητήρα πρέπει να είναι μεγαλύτερη από την ροπή που απαιτείται από το μηχανικό φορτίο, συνήθως με μεγάλο περιθώριο. Οι δυνάμεις που δρουν κατά την εκκίνηση είναι αντίθετες, η ροπή που αποδίδει ο κινητήρας είναι αντίθετη με την ροπή αδράνειας της μάζας του φορτίου.

Η παρακάτω κυρίως εμπειρική σχέση αποτελεί προϋπόθεση για επιτυχή εκκίνηση:

Ροπή κινητήρα $T_m > 1,5 \times$ Ροπή φορτίου T_L

Η διαφορά των δύο ορίζει την ροπή επιτάχυνσης που δίνεται από τη σχέση: $T_b = T_m - T_L$



Σχήμα 3.1 Το γράφημα ροπής ταχύτητας όπου M : η ροπή και n : η ταχύτητα. Κατά την λειτουργία, παρατηρείται ότι ο κινητήρας επιταχύνει ως τη στιγμή όπου ισχύει: $T_m = T_L$

Το ίδιο ισχύει για την κατάλληλη διαστασιολόγηση μιας μονάδας ελέγχου στροφών. Είναι απαραίτητο να είναι γνωστά, η ισχύς, η ροπή και τα χαρακτηριστικά ταχύτητας του οδηγούμενου εξοπλισμού. Η μονάδα ελέγχου στροφών πρέπει να έχει στα χαρακτηριστικά κατασκευής της, ανώτερη ισχύ από τον οδηγούμενο εξοπλισμό. Το ρεύμα του φορτίου πρέπει να ελέγχεται και να μπορεί να διακοπεί με ασφάλεια όταν απαιτείται, από την μονάδα ελέγχου [11, 19].

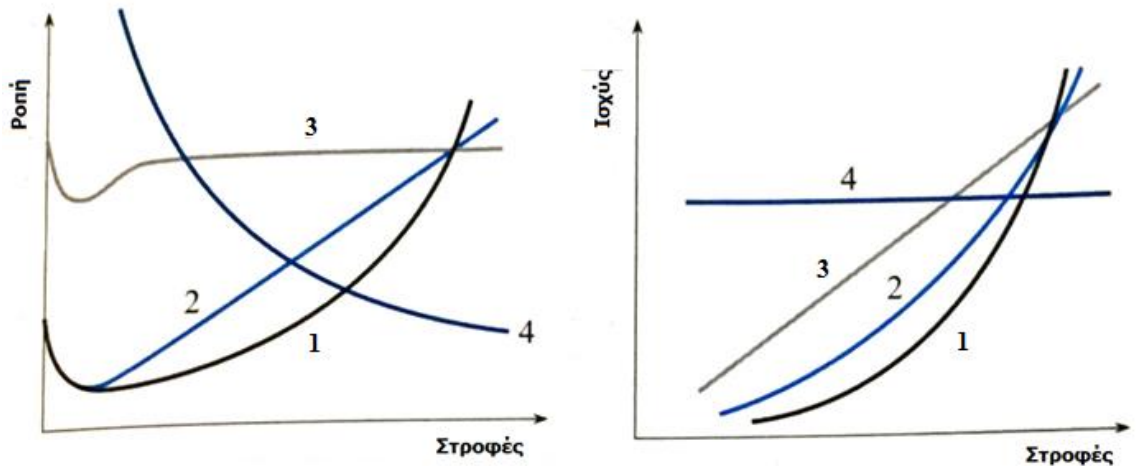
Συγκεκριμένα η μηχανική ισχύς που παρέχει ένα κινητήριο σύστημα θεωρείται επαρκής όταν:

- Η αποδιδόμενη ροπή υπερβαίνει με ασφάλεια την ροπή ανατροπής του φορτίου της εφαρμογής
- Μπορεί να επιταχύνει το φορτίο από τη στιγμή της αδράνειας έως την προκαθορισμένη ταχύτητα εντός του χρόνου επιτάχυνσης που απαιτείται από τη διαδικασία
- Υπερβαίνει τη ροπή φορτίου με ασφάλεια κατά τη συνεχή λειτουργία και σε οποιαδήποτε ταχύτητα απαιτείται στο εύρος της επιτάχυνσης της εφαρμογής και υπό όλες τις συνθήκες.

Υπάρχουν αρκετοί τύποι φορτίων στις εφαρμογές κίνησης και ο κάθε τύπος έχει μοναδικά χαρακτηριστικά που επηρεάζουν διαφορετικά τον έλεγχο του καθώς και την αναμενόμενη εξοικονόμηση ενέργειας.

Παρακάτω δίνονται τέσσερις χαρακτηριστικοί τύποι φορτίου, όπως φαίνονται στο σχήμα 3.2 καθώς και οι σχέσεις που τους περιγράφουν.

Οι τύποι αυτοί είναι από τα πιο διαδεδομένα και χαρακτηριστικά είδη φορτίου σε εφαρμογές κίνησης. Για αυτόν τον λόγο επιλέχθηκαν να χρησιμοποιηθούν στην προσομοίωση ώστε να κατανοηθεί η διαδικασία της αξιολόγησης και της αναβάθμισης ενός κινητήριου συστήματος.



Σχήμα 3.2 Παρουσιάζονται οι καμπύλες ροπής-στροφών και ισχύος-στροφών κατά την επιτάχυνση για τα πιο σημαντικά παραδείγματα ροπής φορτίου.

- **Τύπος 1:** Η ροπή αυξάνεται ανάλογα με το τετράγωνο των στροφών και η ισχύς είναι ανάλογη του κύβου των στροφών σε εφαρμογές όπως οι φυγοκεντρικές αντλίες και οι φυγοκεντρικοί ανεμιστήρες και οι φυγοκεντρικοί συμπιεστές. Στην περίπτωση αυτή ισχύει ότι:

$$T_L = f(n^2)$$

$$P_L = f(n^3)$$

- **Τύπος 2:** Η ροπή αυξάνεται γραμμικά σε σχέση με την ταχύτητα και η ισχύς είναι ανάλογη του τετραγώνου των στροφών σε εφαρμογές όπως μηχανές παραγωγής χάρτου, πλαστικού (extruder), κάποιες αντλίες αναλόγως με την κατασκευή τους, αναδευτήρες. Στην περίπτωση αυτή ισχύει ότι:

$$T_L = f(n)$$

$$P_L = f(n^2)$$

- **Τύπος 3:** Η ροπή είναι σταθερή ανεξαρτήτως από την ταχύτητα και η ισχύς είναι ευθέως ανάλογη της ταχύτητας σε εφαρμογές όπως οι ταινίες μεταφοράς, οι ανυψωτικοί μηχανισμοί, οι αντλίες και οι συμπιεστές θετικής μετατόπισης. Στην περίπτωση αυτή ισχύει ότι:

$$T_L = \text{σταθερό}$$

$$P_L = f(n)$$

- **Τύπος 4:** Η ροπή μειώνεται ανάλογα με την αύξηση των στροφών και η ισχύς είναι σταθερή, σε εφαρμογές όπως οι μηχανές περιέλιξης (όπου αυξάνεται σταδιακά η διάμετρος του υλικού), οι περιστροφικοί μηχανισμοί κοπής. Στην περίπτωση αυτή ισχύει ότι:

$$T_L = f\left(\frac{1}{n}\right)$$

$$P_L = \text{σταθερό}$$

Έστω κινητήριο σύστημα με ένα εκ των ανωτέρω χαρακτηριστικών τύπων φορτίου όπου λειτουργεί τριφασικός ασύγχρονος κινητήρας χαμηλής ενεργειακής κλάσης, αρκεί η αντικατάστασή του κινητήρα με έναν υψηλότερης ενεργειακής απόδοσης ως ενεργειακή αναβάθμιση; Πότε χρειάζεται η προσθήκη μιας μονάδας ελέγχου στροφών; Με την προσθήκη

μονάδας ελέγχου στροφών αναβαθμίζεται ο έλεγχός του φορτίου, όμως επωφελείται το ίδιο πάντα η λειτουργικότητα του συστήματος, αξίζει το κόστος αγοράς και λειτουργίας μιας τέτοιας αναβάθμισης; Αυτά τα ερωτήματα θα γίνει προσπάθεια να απαντηθούν στην συνέχεια.

Αναφέροντας την λειτουργία μιας μονάδας ελέγχου στροφών, δεν πρέπει να συγχέεται ποτέ με την λειτουργία μονάδας ομαλής εκκίνησης, η οποία μετά την εκκίνηση του κινητήρα μπαίνει σε λειτουργία παράκαμψης (by-pass) τροφοδοτώντας τον κινητήρα με την ονομαστική του τάση λειτουργίας και την ονομαστική του συχνότητα [11, 19].

3.2 Κυκλώματα, σενάρια ελέγχου και τα είδη των φορτίων τα οποία θα χρησιμοποιηθούν στην προσομοίωση σε περιβάλλον Simulink/Matlab.

Χρησιμοποιώντας το λογισμικό Simulink/Matlab σχεδιάστηκαν τέσσερα κυκλώματα τα οποία θα χρησιμοποιηθούν για την προσομοίωση. Στα κυκλώματα συμπεριλαμβάνονται οι τύποι φορτίων, μεταβλητής και σταθερής ροπής και σταθερής ισχύος. Ο σκοπός είναι οι περιπτώσεις των φορτίων να εξυπηρετηθούν, με τον βέλτιστο τρόπο.

Τα σενάρια εφαρμογών με βάση τον τύπο του φορτίου που θα εξετασθούν, είναι τα ακόλουθα τέσσερα τα οποία αποτελούν χαρακτηριστικές περιπτώσεις:

- Εφαρμογή με αύξηση της ροπής αναλόγως με το τετράγωνο των στροφών
- Εφαρμογή με γραμμική αύξηση της ροπής
- Εφαρμογή με σταθερή ροπή
- Εφαρμογή με μείωση της ροπής αναλόγως με τις στροφές

Στο πρώτο κύκλωμα συγκρίνονται δύο τριφασικοί ασύγχρονοι κινητήρες με ισχύ 4kW, η σύνδεσή τους είναι απ' ευθείας από το δίκτυο χωρίς οδήγηση. Οι κινητήρες έχουν διαφορετική ενεργειακή κλάση, ο 1^{ος} είναι χαμηλής ενεργειακής απόδοσης IE1 ο 2^{ος} είναι υψηλής ενεργειακής απόδοσης IE4.

Τα επόμενα τρία κυκλώματα εμπεριέχουν συστήματα που αποτελούνται από μονάδα ελέγχου στροφών και ασύγχρονο κινητήρα υψηλής ενεργειακής απόδοσης IE4 4kW. Στις εφαρμογές με διαφορετικού τύπου φορτίο γίνεται χρήση μονάδας ελέγχου στροφών με διαφορετικό έλεγχο και αξιολογείται το κάθε σύστημα ξεχωριστά. Οι μονάδες οδηγούν επαγωγικό κινητήρα με τους παρακάτω τρόπους ελέγχου:

- Scalar Control SV-PWM Induction Motor Drive
- Field-Oriented Control Induction Motor Drive
- Direct Torque Control Induction Motor Drive

Σε κάθε περίπτωση το σύστημα μονάδας ελέγχου στροφών και επαγωγικού κινητήρα συγκρίνεται με κινητήρα ενεργειακής κλάσης IE4 όπου λειτουργεί απ' ευθείας από το δίκτυο χωρίς οδήγηση.

Οι πιο συνηθισμένες χρήσεις μονάδων ελέγχου στροφών είναι σε εφαρμογές με φορτία μεταβλητής ροπής καθώς και σε συστήματα σταθερής ροπής τα οποία μπορεί να λειτουργούν ακόμη και για 24 ώρες/7 ημέρες, για 365 ημέρες τον χρόνο. Το κίνητρο τοποθέτησης μονάδας

ελέγχου στροφών σε κάθε εφαρμογή μπορεί να είναι διαφορετικό όμως τα οφέλη μπορεί να είναι πολλαπλά.

Πίνακας 2 Τα σενάρια προσομοίωσης, δείχνονται τα κυκλώματα της προσομοίωσης και οι τύποι των διαφορετικών φορτίων που θα χρησιμοποιηθούν.

Τύποι φορτίων	Κυκλώματα προσομοιώσεων			
	Κύκλωμα 1 ^ο	Κύκλωμα 2 ^ο	Κύκλωμα 3 ^ο	Κύκλωμα 4 ^ο
Αύξηση της ροπής αναλόγως με το τετράγωνο των στροφών, φυγοκεντρικός ανεμιστήρας	Σύγκριση κινητήρων 4kW, διαφορετικής ενεργειακής κατηγορίας,	Σύγκριση του κινητήρα 4kW υψηλής ενεργειακής απόδοσης του 1 ^{ου} κυκλώματος	Σύγκριση του κινητήρα 4kW υψηλής ενεργειακής απόδοσης του 1 ^{ου} κυκλώματος	Σύγκριση του κινητήρα 4kW υψηλής ενεργειακής απόδοσης του 1 ^{ου} κυκλώματος
Γραμμική αύξηση της ροπής, αντλία πολτού	με απ'ευθείας τροφοδοσία	με απ'ευθείας τροφοδοσία	με απ'ευθείας τροφοδοσία	με απ'ευθείας τροφοδοσία
Εφαρμογή με σταθερή ροπή, κοχλιωτός συμπιεστής	από το δίκτυο	από το δίκτυο με τον ίδιο κινητήρα οδηγούμενο με έλεγχο	από το δίκτυο με τον ίδιο κινητήρα οδηγούμενο με έλεγχο	από το δίκτυο με τον ίδιο κινητήρα οδηγούμενο με έλεγχο
Εφαρμογή με μείωση της ροπής αναλόγως με τις στρόφες, περιστροφικός μηχανισμός κοπής		Scalar Control SV-PWM	Field Oriented Control	Direct Torque Control

Ο σκοπός της προσομοίωσης είναι να βγουν συμπεράσματα για την κάθε περίπτωση φορτίου της εφαρμογής κίνησης ως προς τα θέματα της εξοικονόμησης ενέργειας, της ποιότητας ισχύος του κυκλώματος, της σταθερότητας και της αξιοπιστίας του συστήματος και του κόστους λειτουργίας.

Στην προσομοίωση σε κάθε περίπτωση ο κινητήρας θα κληθεί να εξυπηρετήσει το 100% του ονομαστικού του φορτίου με την πρόσθετη επιβάρυνση της ροπής επιτάχυνσης. Αυτό δεν ενδείκνυται, να γίνεται στην πράξη, αλλά εκτός του ότι μπορεί να αντιμετωπιστούν τέτοιες περιπτώσεις στην πραγματικότητα, θα αποτελέσει παραδοχή για το κομμάτι της προσομοίωσης της εργασίας για να εξαχθούν χρήσιμα συμπεράσματα.

Στην προσομοίωση μεταβάλλονται οι ροπές αδρανείας λόγω του φορτίου στον άξονα του κινητήρα 4kW όπως φαίνεται παρακάτω:

- Ο φυγοκεντρικός ανεμιστήρας ως φορτίο αυξάνει την ροπή αδράνειας στον άξονα του κινητήρα αφού προστίθεται εξοπλισμός μετάδοσης μηχανικής ισχύος. Η τιμή αλλάζει από 0,015kgm² σε 0.029 kgm².
- Η αντλία ως φορτίο αυξάνει την ροπή αδράνειας στον άξονα του κινητήρα αφού προστίθεται εξοπλισμός μετάδοσης μηχανικής ισχύος. Η τιμή αλλάζει από 0,015kgm² σε 0.017 kgm².

- Ο συμπιεστής ως φορτίο αυξάνει την ροπή αδράνειας στον άξονα του κινητήρα αφού προστίθεται εξοπλισμός μετάδοσης μηχανικής ισχύος. Η τιμή αλλάζει από 0,015kgm² σε 0.030 kgm².

Η τιμές προήλθαν από καταλόγους κατασκευαστών.

Για τις ανάγκες της προσομοίωσης συμπληρώθηκαν πίνακες παραμέτρων οι οποίες χαρακτηρίζουν τις ανάγκες της κάθε εφαρμογής για τις τρεις περιπτώσεις φορτίων που θα υπάρχει οδήγηση κινητήρα από μονάδα ελέγχου. Η περίπτωση του περιστροφικού μηχανισμού κοπής είναι ιδιαίτερη και θα γίνει αναφορά σε αυτόν παρακάτω. Οι παράμετροι αυτές είναι:

- Η ροή αέρα σε σχέση με την ονομαστική ικανότητα του φυγοκεντρικού ανεμιστήρα και σε σχέση με τα διαστήματα του χρόνου λειτουργίας του.
- Η ταχύτητα της αντλίας σε σχέση με την ονομαστική της ικανότητα και σε σχέση με τα διαστήματα του χρόνου λειτουργίας της.
- Η ροή του πεπιεσμένου αερίου σε σχέση με την ονομαστική ικανότητα του κοχλιωτού αεροσυμπιεστή και σε σχέση με τα διαστήματα του χρόνου λειτουργίας του.

Πίνακας 3 Οι απαιτήσεις της εφαρμογής για τον φυγοκεντρικό ανεμιστήρα και τα θεωρητικά οφέλη της χρήσης μονάδας ελέγχου-κινητήρα

Απαιτήσεις της εφαρμογής, ροή αέρα σε σχέση με τον χρόνο		Απαιτήσεις συστήματος μονάδας ελέγχου με κινητήρα IE4 Θεωρητικές τιμές			
Ροή %	Πραγματικός χρόνος %	Ταχύτητα (rpm)	Χρόνος προσομοίωσης %	Ισχύς στην έξοδο %	Ροπή στον άξονα %
100	10	1455	10	100	100
90	20	1309,5	20	72,9	81
80	25	1164	25	51,2	64
70	25	1018,5	25	34,3	49
60	10	873	10	21,6	36
50	10	727,5	10	12,5	25

Πίνακας 4 Οι απαιτήσεις της εφαρμογής για την αντλία πολτού και τα θεωρητικά οφέλη της χρήσης μονάδας ελέγχου-κινητήρα

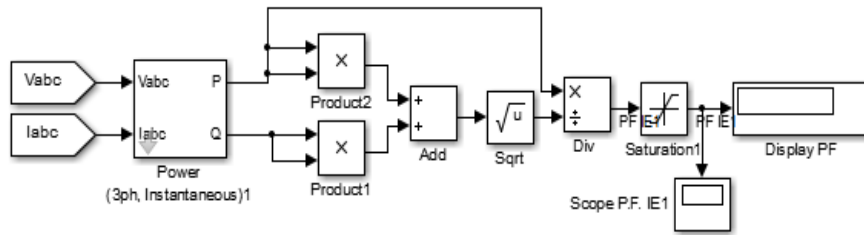
Απαιτήσεις της εφαρμογής, όγκος σε σχέση με τον χρόνο		Απαιτήσεις συστήματος μονάδας ελέγχου με κινητήρα IE4 Θεωρητικές τιμές			
Ροή %	Πραγματικός χρόνος %	Ταχύτητα (rpm)	Χρόνος προσομοίωσης %	Ισχύς στην έξοδο %	Ροπή στον άξονα %
100	10	1455	10	100	100
90	20	1309,5	20	81	90
80	25	1164	25	64	80
70	25	1018,5	25	49	70
60	10	873	10	36	60
50	10	727,5	10	25	50

Πίνακας 5 Οι απαιτήσεις της εφαρμογής για τον κοχλιωτό συμπιεστή και τα θεωρητικά οφέλη της χρήσης μονάδας ελέγχου-κινητήρα

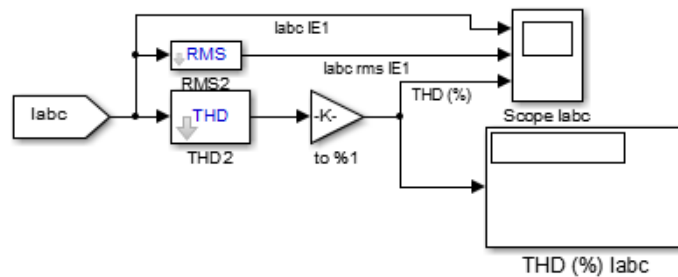
Απαιτήσεις της εφαρμογής, πεπιεσμένος αέρας σε σχέση με τον χρόνο		Απαιτήσεις συστήματος μονάδας ελέγχου με κινητήρα IE4 Θεωρητικές τιμές			
Ροή %	Πραγματικός χρόνος %	Ταχύτητα (rpm)	Χρόνος προσομοίωσης %	Ισχύς στην έξοδο %	Ροπή στον άξονα %
100	10	1455	10	100	100
90	20	1309,5	20	90	100
80	25	1164	25	80	100
70	25	1018,5	25	70	100
60	10	873	10	60	100
50	10	727,5	10	50	100

3.3 Αναφορά των κύριων σχηματικών διαγραμμάτων που σχεδιάστηκαν για την προσομοίωση

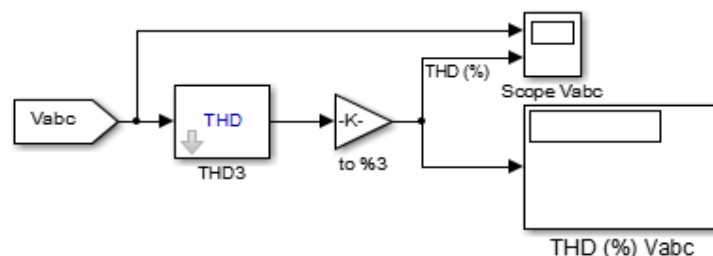
Παρακάτω γίνεται αναφορά στα σχηματικά διαγράμματα τα οποία σχεδιάστηκαν στο περιβάλλον Matlab-Simulink για να χρησιμοποιηθούν σε κάθε προσομοίωση και είναι κοινά σε κάθε κύκλωμα.



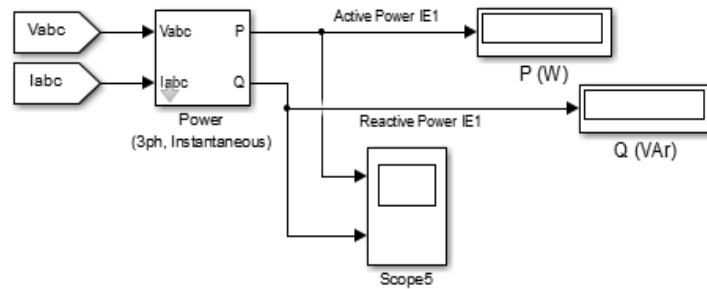
Σχήμα 3.3 Διάγραμμα του υπολογισμού του συντελεστή της ισχύος κατά την διάρκεια του χρόνου της προσομοίωσης. Ακόμη από αυτό το διάγραμμα λαμβάνουμε την τιμή της φαινόμενης ισχύος.



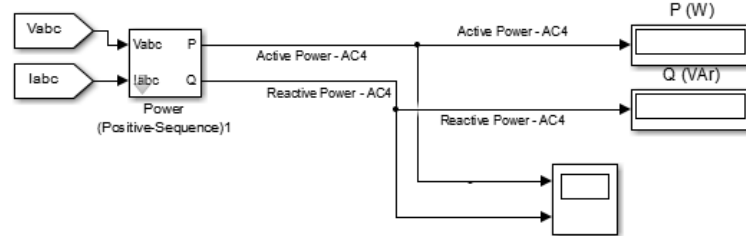
Σχήμα 3.4 Διάγραμμα του υπολογισμού του ρεύματος της γραμμής από κορυφή σε κορυφή, του rms ρεύματος γραμμής και της αρμονικής παραμόρφωσης που εμπεριέχει σε ποσοστό επι τις % κατά την διάρκεια του χρόνου της προσομοίωσης.



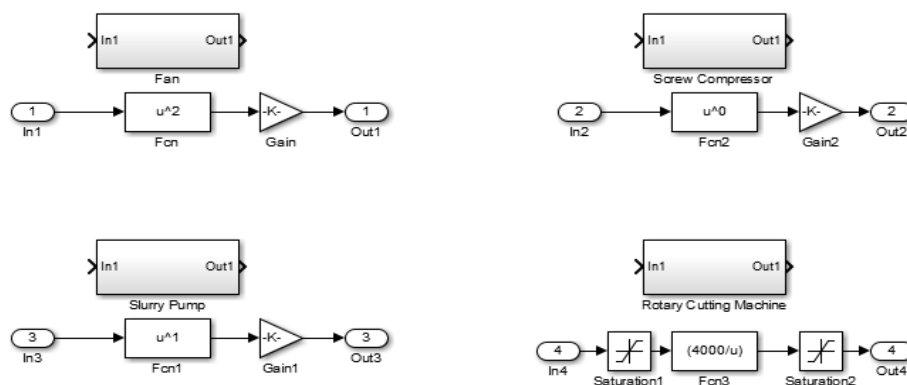
Σχήμα 3.5 Διάγραμμα του υπολογισμού της πολικής τάσης της γραμμής από κορυφή σε κορυφή, και της αρμονικής παραμόρφωσης που εμπεριέχει σε ποσοστό επι τις % κατά την διάρκεια του χρόνου της προσομοίωσης



Σχήμα 3.6 Διάγραμμα του υπολογισμού της πραγματικής και της αέργου ισχύος με ακρίβεια, σε περιπτώσεις που υπάρχει ισοκατανομή τριφασικού φορτίου χωρίς αρμονικές κατά την διάρκεια του χρόνου της προσομοίωσης.



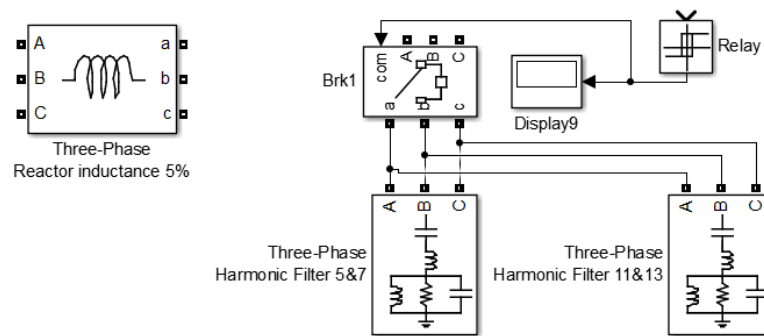
Σχήμα 3.7 Διάγραμμα του υπολογισμού της πραγματικής και της αέργου ισχύος. Ο υπολογισμός των τιμών γίνεται με ακρίβεια σε κάθε περίπτωση φορτίου ακόμη και με αρμονικό περιεχόμενο κατά την διάρκεια του χρόνου της προσομοίωσης.



Σχήμα 3.8 Υποσυστήματα τα οποία αποτελούν τα διαφορετικά φορτία της προσομοίωσης και έχουν υπολογισθεί βάσει των ονομαστικών στοιχείων ροπής, ταχύτητας και ισχύος του κινητήρα με τον οποίο είναι σε σύζευξη.

Στο σχήμα 3.8 στην είσοδό In_1 το κάθε μπλοκ φορτίου δέχεται την ταχύτητα εξόδου του συστήματος και βάσει του χαρακτήρα του φορτίου, όπως έχει αναφερθεί στην παράγραφο 3.1,

υπολογίζεται η ροπή σε κάθε περίπτωση. Από την έξοδο Out₁ τροφοδοτείται η τιμή της στον κινητήρα ή στην μονάδα ελέγχου, κατά την διάρκεια του χρόνου της προσομοίωσης.



Σχήμα 3.9 Οι διατάξεις που χρησιμοποιούνται στην προσομοίωση για τον περιορισμό των αρμονικών. Είναι τα σχηματικά διαγράμματα αυτεπαγωγής γραμμής καθώς και τριφασικών παθητικών φίλτρων οποία έχουν παραμέτρους που υπολογίζονται.

Η αντίδραση της αυτεπαγωγής (Line Reactor Inductance) υπολογίστηκε με τιμή προσεγγιστικά στο 5% του ποσοστού της αντίδρασης του κυκλώματος με την μονάδα ελέγχου στροφών και έχει υπολογιστεί από την εξίσωση 2-70 της θεωρίας:

$$Z\% = \frac{L \cdot I \cdot 2\pi f \cdot \sqrt{3}}{V_{\text{rms}} \text{ πολ}} * 100.$$

Χρησιμοποιήθηκε μεγάλη τιμή αυτεπαγωγή γραμμής στο 5% για τον περιορισμό των αρμονικών έντασης καθώς και τον περιορισμό των αιχμών τάσης και έντασης ως πρώτη προσπάθεια για τον περιορισμό των αρμονικών. Δευτερευόντως τοποθετήθηκαν παράλληλης σύνδεσης τριφασικά παθητικά φίλτρα για τις αρμονικές που είχαν μεγάλο πλάτος και έπρεπε να περιοριστούν κυρίως δηλαδή η 5^η η 7^η η 11^η και η 13^η αρμονική.

Τα φίλτρα προσφέρουν άεργο ισχύ και συντονίζονται στις παραπάνω αναφερόμενες αρμονικές.

Οι τιμές της άεργου ισχύος προκύπτουν από τα παρακάτω βήματα:

- Υπολογίζεται το ρεύμα της αρμονικής ως:

$$I_h = I_{\text{rms}} * I_h\%$$

όπου, I_{rms} : το rms ρεύμα της γραμμής

$I_h\%$, το ποσοστό της αρμονικής παραμόρφωσης στο ρεύμα της κάθε τάξης αρμονικής, το οποίο βρίσκεται από την προσομοίωση (FFT tool).

- Ακολούθως υπολογίζεται η τάση της αρμονικής ως:

$$V_h = \sqrt{3} * h * X_{\text{supply}} * I_h$$

όπου, X_{supply} : η επαγωγική αντίδραση στην γραμμή της τροφοδοσίας

h : η τάξη της αρμονικής

- Τέλος υπολογίζεται η άεργος ισχύς της αρμονικής όπως η σχέση (2-42) στην παράγραφο 2.2.5.2 ως:

$$Q_h = V_h * I_h * \sin\varphi_h$$

3.4 Αναφορά στο σενάριο σύγκρισης όμοιας ισχύος κινητήρων 4kW διαφορετικής ενεργειακής κατηγορίας

Στο κύκλωμα συγκρίνονται δύο κινητήρες με ισχύ 4kW, η σύνδεσή τους είναι απ' ευθείας από το δίκτυο. Οι κινητήρες έχουν διαφορετική ενεργειακή κλάση, ο 1^{ος} είναι χαμηλής ενεργειακής απόδοσης IE1, ο 2^{ος} είναι υψηλής ενεργειακής απόδοσης IE4 και με καινοτόμα σχεδίαση ενώ στην αρμολόγησή του έχουν χρησιμοποιηθεί έδρανα κύλισης υψηλής απόδοσης.

Στην προσομοίωση τους, εφαρμόζονται διαφορετικά φορτία και γίνεται σύγκριση της συμπεριφοράς τους.

Ο σκοπός της προσομοίωσης είναι να βγουν συμπεράσματα ως προς τα θέματα της εξοικονόμησης ενέργειας, της αξιοπιστίας και του κόστους.

Οι κινητήρες λειτουργούν σε συνδεσμολογία αστέρα. Η πηγή ισχύος είναι ιδανική και παρέχει τριφασική τάση 400V πολική.

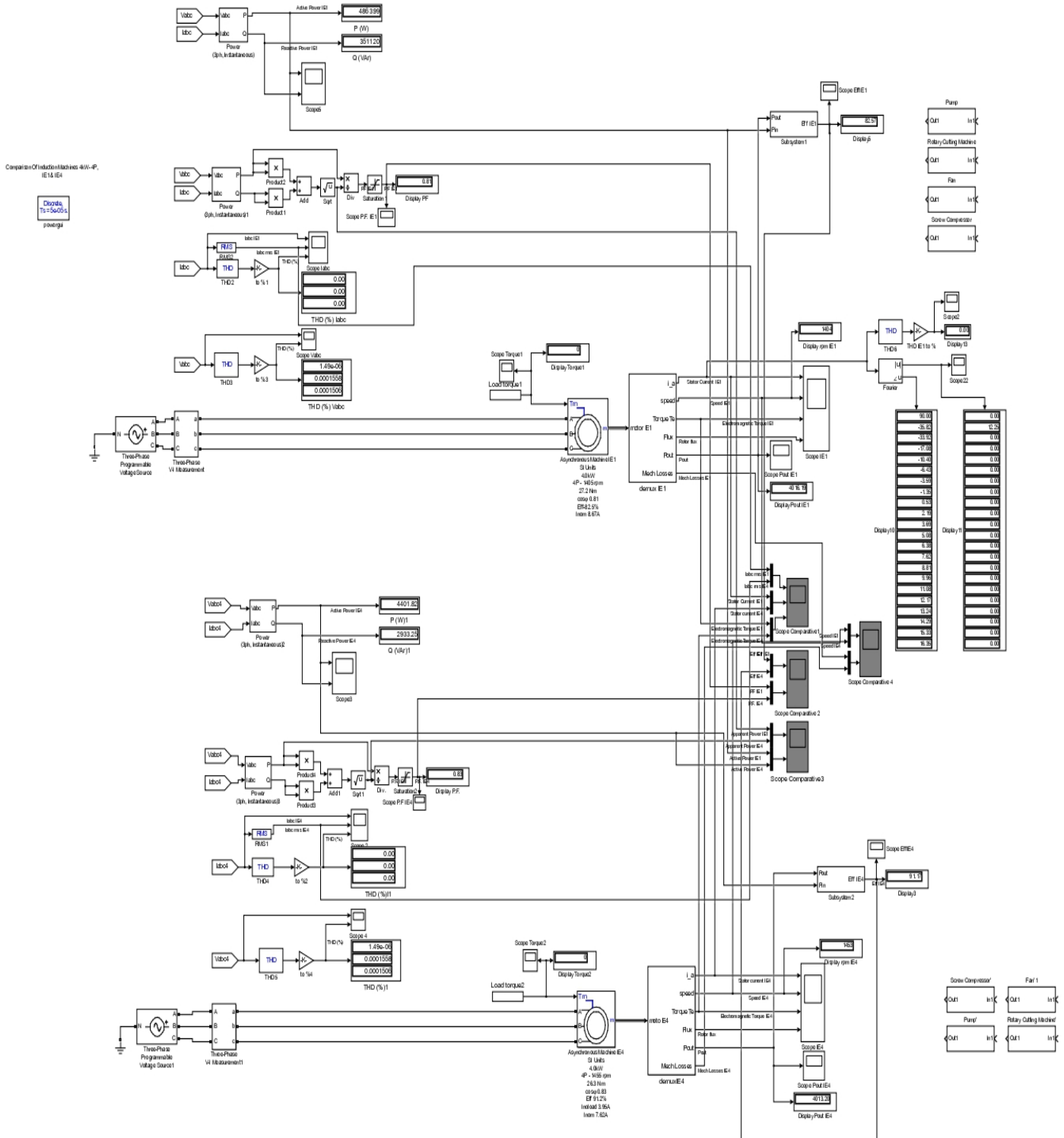
Στο πρώτο σκέλος της προσομοίωσης, εφαρμόζονται τιμές διαφορετικών ροπών φορτίου με ποσοστό 25%, 50%, 75% και 100% του ονομαστικού τους φορτίου. Γίνεται σύγκριση των τιμών του συντελεστή ισχύος, της απόδοσής τους, του ρεύματος rms γραμμής, της ροπής που αποδίδουν καθώς και της φαινόμενης ηλεκτρικής ισχύος που καταναλώνει ο κάθε κινητήρας κατά την λειτουργία του. Δημιουργείται έτσι ο πίνακας των χαρακτηριστικών των μοντέλων κινητήρων που σχεδιάστηκαν. Ο πίνακας οφείλει να είναι όμοιος, με πίνακα χαρακτηριστικών με την πραγματική συμπεριφορά από αντίστοιχους κινητήρες του εμπορίου. Ο πίνακας χαρακτηριστικών των κινητήρων του εμπορίου, παρέχεται από τους κατασκευαστές. Αυτό το κομμάτι της προσομοίωσης αποτελεί την επαλήθευση των μοντέλων των κινητήρων που σχεδιάστηκαν.

Στο δεύτερο σκέλος της προσομοίωσης, γίνεται σύζευξη με τους τέσσερις χαρακτηριστικούς τύπους φορτίων οι οποίοι εξετάζονται και γίνεται η προσομοίωση. Τα φορτία είναι υπολογισμένα ώστε να χρησιμοποιούν το 100% της ονομαστικής ροπής και ισχύος των κινητήρων.

Στο κύκλωμα γίνονται συνεχείς μετρήσεις της τάσης και της έντασης της γραμμής, της πραγματικής και της άεργου ισχύος, του συντελεστή ισχύος, του βαθμού απόδοσης καθώς επίσης εξάγεται και η συμπεριφορά του κινητήρα με γραφήματα για το ρεύμα στάτη ανά φάση, της ροπής, της ταχύτητας, το διάνυσμα μαγνητικής ροής d-q στο δρομέα και τις μηχανικές απώλειες. Υπάρχουν παλμογράφοι για την καταγραφή των γραφημάτων και οθόνες καταγραφής τιμών, κατά την διάρκεια του χρόνου της προσομοίωσης, σε κάθε κύκλωμα. Αυτό γίνεται ώστε να καταγράφονται τα δεδομένα και κατόπιν με βάση αυτά, να γίνει σύγκριση αποτελεσμάτων και εξαγωγή συμπερασμάτων.

3.4.1 Παρουσίαση του κυκλώματος της προσομοίωσης

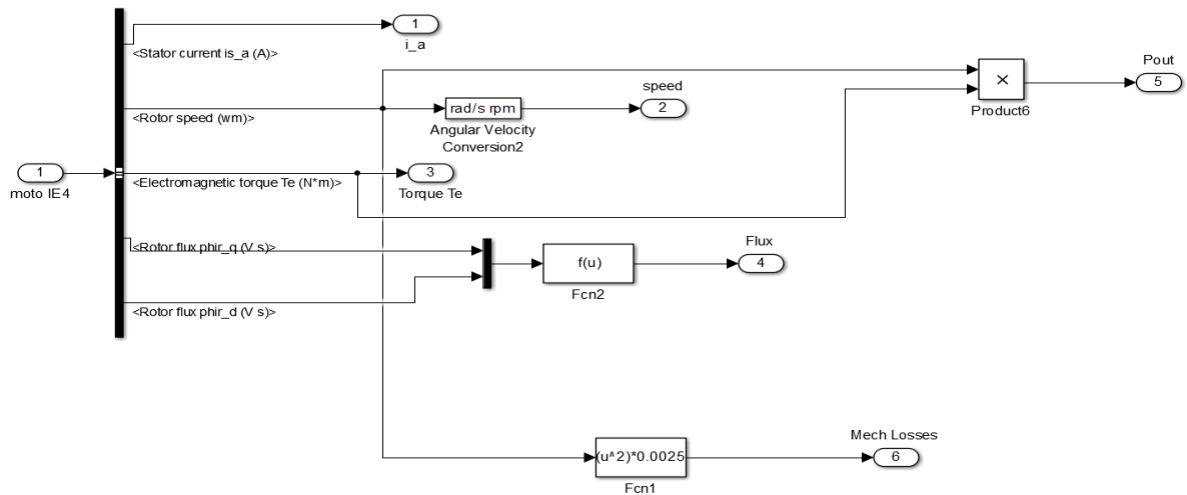
Στο σχήμα 3.10 το οποίο ακολουθεί, δίνεται το κύκλωμα που σχεδιάστηκε για την προσομοίωση με την σύγκριση των κινητήρων με διαφορετική κλάση ενεργειακής απόδοσης.



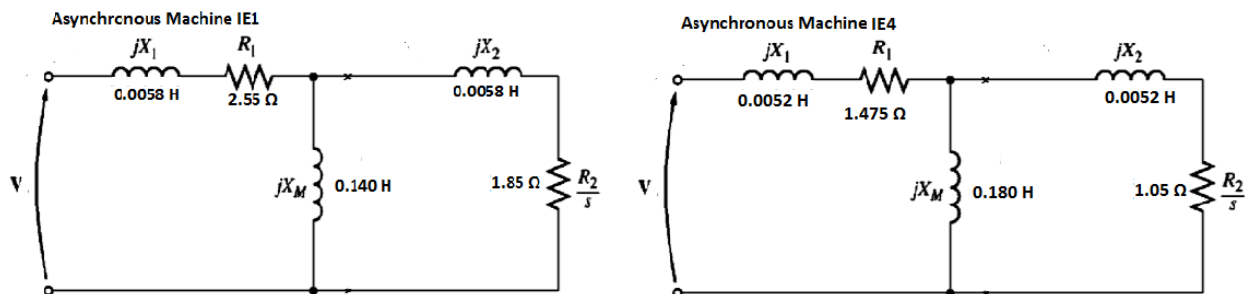
Σχήμα 3.10 Κύκλωμα με τους δύο κινητήρες ενεργειακής κατηγορίας IE1 και IE4, οι οποίοι λειτουργούν παράλληλα, έχοντας ταυτόχρονη μέτρηση κατά την διάρκεια της προσομοίωσης. Το πλαίσιο αναφοράς που χρησιμοποιείται στην προσομοίωση, είναι αυτό του δρομέα.

Στο σχήμα 3.11 το οποίο ακολουθεί παρακάτω, δίνεται το σχηματικό διάγραμμα του μπλοκ Demux IE4, ενώ όμοιό του είναι και το Demux IE1 για τον αντίστοιχο κινητήρα, με τις εξόδους τις οποίες χρειάζεται να παρακολουθούνται και να καταγράφονται κατά την διάρκεια του χρόνου.

Στο σχήμα 3.12 το οποίο ακολουθεί παρουσιάζονται τα κυκλωματικά ισοδύναμα των κινητήρων IE1 και IE4 με τις τιμές των παραμέτρων για τα ηλεκτρικά μεγέθη των μηχανών.



Σχήμα 3.11 Σχηματικό διάγραμμα με τις εξόδους που ελέγχονται για τον κάθε κινητήρα, κατά τη διάρκεια του χρόνου της προσομοίωσης.



Σχήμα 3.12 Ανά φάση κυκλωματικό ισοδύναμο κάθε κινητήρα με τις τιμές των αντιδράσεων του, οι τιμές αυτές καταχωρούνται στην παραμετροποίηση του κάθε μπλοκ ασύγχρονης μηχανής.

3.5 Αναφορά στο σενάριο με τη σύγκριση συστήματος μονάδας ελέγχου Scalar Control SV-PWM –κινητήρα, με όμοιο κινητήρα 4kW με απ' ευθείας τροφοδοσία από το δίκτυο

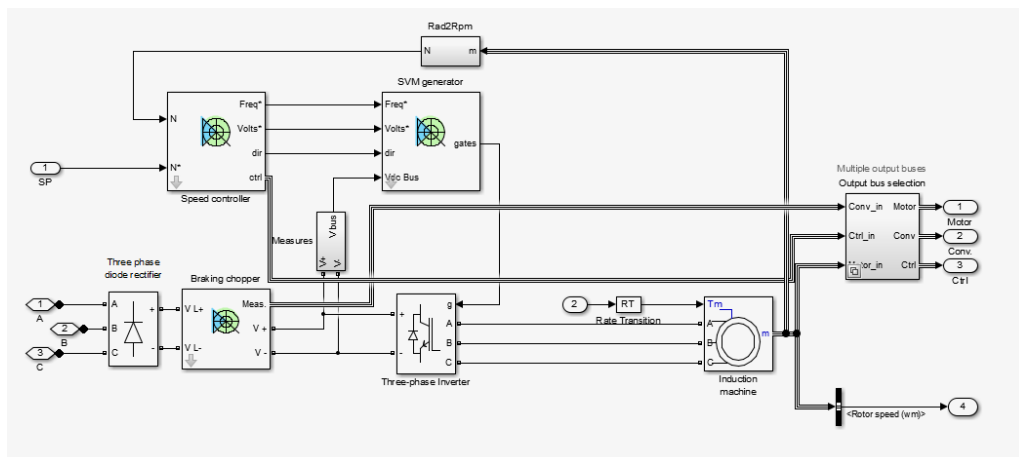
Στην προσομοίωση χρησιμοποιούνται περιπτώσεις φορτίων μεταβλητής και σταθερής ροπής. Στις διαφορετικές εφαρμογές γίνεται χρήση μονάδας ελέγχου με οδήγηση Scalar Control SV-PWM και κινητήρα ενεργειακής κλάσης IE4, όπου θα συγκριθεί με την περίπτωση χρήσης ενός κινητήρα ενεργειακής κλάσης IE4 ο οποίος λειτουργεί απ' ευθείας από το δίκτυο. Θα κριθεί η συμπεριφορά του συστήματος της μονάδας ελέγχου στροφών σε σχέση για τα πλεονεκτήματα που προσφέρει και

τα μειονεκτήματά που ενδεχομένως έχει. Ο σκοπός της προσομοίωσης είναι να βγουν συμπεράσματα για την κάθε περίπτωση φορτίου της εφαρμογής κίνησης ως προς τα θέματα της εξοικονόμησης ενέργειας, της ποιότητας ισχύος του κυκλώματος, της σταθερότητας και της αξιοπιστίας του συστήματος και του κόστους λειτουργίας.

3.5.1 Αναφορά, υπολογισμοί και παραμετροποίηση του κυκλώματος προσομοίωσης του συστήματος μονάδας ελέγχου - κινητήρα

Παρακάτω στο σχήμα 3.13 φαίνεται το σχηματικό διάγραμμα του συστήματος με μονάδα ελέγχου στροφών κλιμακωτού ελέγχου και τον επαγωγικό κινητήρα. Το σύστημα με την μονάδα ελέγχου στροφών, με έλεγχο Scalar Control SV-PWM και τον επαγωγικό κινητήρα αποτελείται από τα ακόλουθα μπλοκ:

- Ανορθωτής τριφασικός με διόδους ισχύος
- Ελεγκτής ταχύτητας κλιμακωτού ελέγχου (Scalar Control)
- Διαμορφωτής διανυσμάτων (SVM Generator)
- Δίαυλος DC
- Αντιστροφέας τριφασικός
- Ασύγχρονος τριφασικός κινητήρας



Σχήμα 3.13 Σχηματικό διάγραμμα του συστήματος μονάδας ελέγχου τύπου Scalar Control SV-PWM και κινητήρα

Το διάγραμμα περιέχει έναν ελεγκτή ταχύτητας κλειστού βρόχου με έλεγχο της ολίσθησης. Ο βρόχος ελέγχου ταχύτητας ανατροφοδοτεί στον ελεγκτή την ολίσθηση του κινητήρα, η οποία προστίθεται στη μετρούμενη ταχύτητα του δρομέα, για να ληφθεί έτσι η συχνότητα αναφοράς της ροής του στάτη.

Η τάση στον στάτη του επαγωγικού κινητήρα προέρχεται από τον έλεγχο Volts / Hz έχοντας σταθερή μαγνητική ροή, από τις τιμές τάσης και συχνότητας, από αυτές καθορίζεται η ταχύτητα και εμμέσως η ροπή του κινητήρα. Ο κινητήρας τροφοδοτείται με μεταβλητή τάση και συχνότητα που παράγονται από τον έλεγχο με PWM από έναν μετατροπέα. Ο μετατροπέας ελέγχεται από μικροεπεξεργαστή. Το πλαίσιο αναφοράς που χρησιμοποιεί το σύστημα ελέγχου επαγωγικού κινητήρα με κλιμακωτό έλεγχο, είναι το πλαίσιο αναφοράς αυτό του στάτη.

Κάθε μπλοκ παραμετροποιείται κατάλληλα για την περίπτωση. Σε κάποιες περιπτώσεις χρειάζεται να γίνουν υπολογισμοί. Συγκεκριμένα :

Παράμετροι στον ελεγκτή ταχύτητας κλιμακωτού ελέγχου (Scalar Control)

Base speed (rpm): 1500 η ονομαστική ταχύτητα του κινητήρα

Speed reference ramp (rpm/sec): -1350,1350 η μέγιστη τιμή μεταβολής της ταχύτητας αναφοράς, η τιμή της κατά την επιτάχυνση ή την επιβράδυνση πρέπει να είναι τέτοια ώστε το ρεύμα να μην ξεπερνάει την ονομαστική τιμή του φορτίου πάνω από 110%.

Proportional gain: 0,975 το αναλογικό κέρδος του σφάλματος PID ελεγκτή, δείχνει την ευαισθησία που μπορεί να έχει ο ελεγκτής στις διακυμάνσεις ταχύτητας.

Integral Gain: 1 το κέρδος ολοκλήρωσης του σφάλματος του ελεγκτή, δείχνει την συμπεριφορά που θα έχει στην μόνιμη κατάσταση του συστήματος, στην διόρθωση της ταχύτητας αναφοράς.

Derivative gain: 0,05 το διαφορικό κέρδος του σφάλματος του ελεγκτή το οποίο αυξάνει συνολικά την απόκριση σε μεταβατικές καταστάσεις

Speed measurement - low-pass filter cutoff frequency (Hz): συχνότητα αποκοπής βαθυπερατού φίλτρου. Ρυθμίζεται η ζώνη αποκοπής, ώστε από κάποια τιμή συχνότητας και άνω να εξασθενούν και να αποκόπτονται ανεπιθύμητα σήματα. Ρύθμιση στα 100Hz

Output limit frequency (Hz) [minimum, maximum]: 0,05, 100 η ελάχιστη και η μέγιστη τιμή συχνότητας εξόδου του ελεγκτή.

Controller output voltage limits (V) [minimum, maximum]: 20, 400 η ελάχιστη και η μέγιστη τιμές της τάσης εξόδου του ελεγκτή

Motor pairs of poles: 2 ζεύγη πόλων του κινητήρα

Volts/Hertz ratio (Volts/Hz): 8 η αναλογία της τάσης προς την συχνότητα της εξόδου, έχει υπολογιστεί με τα ονομαστικά μεγέθη

Παράμετροι στον διαμορφωτή διανυσμάτων (space vector modulator)

DC bus voltage measurement - low-pass filter cutoff frequency (Hz): συχνότητα αποκοπής βαθυπερατού φίλτρου. Ρυθμίζεται η ζώνη αποκοπής, ώστε από κάποια τιμή συχνότητας και άνω να εξασθενούν και να αποκόπτονται ανεπιθύμητα σήματα. Ρύθμιση στα 50Hz.

Carrier frequency (Hz): η συχνότητα του φέροντος σήματος, για τον έλεγχο της μεταγωγής των διακοπών του inverter ρυθμίζεται από 3kHz-6kHz. Ιδανικά η μέγιστη διακοπτική συχνότητα μπορεί να μειώσει τις αρμονικές και να δημιουργεί πιο ημιτονοειδές ρεύμα στον αντιστροφέα με χαμηλότερες διακυμάνσεις τάσης, αλλά με την υψηλότερη διακοπτική συχνότητα, αυξάνονται οι απώλειες μεταγωγής στον αντιστροφέα.

Παράμετροι στον Δίαυλο DC (DC Bus)

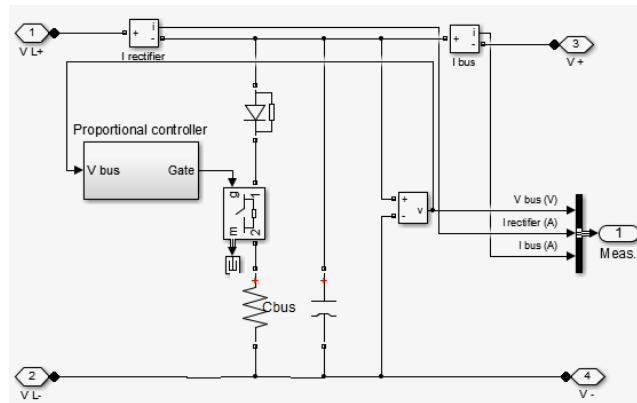
Chopper activation voltage (V): η τάση ενεργοποίησης του κατατημητή πέδησης.

Chopper shutdown voltage (V): η τάση σβέσης του κυκλώματος του κατατημητή πρέπει να είναι μικρότερη της τάσης ενεργοποίησης.

Braking chopper frequency (Hz): η συχνότητα ενεργοποίησης και απενεργοποίησης της αντίστασης πέδησης, σε Hz. η συχνότητα δηλαδή λειτουργίας του κατατημητή, 4kHz .

DC bus capacitance (F): η χωρητικότητα του πυκνωτή του διαύλου DC

Braking resistance (ohms): η τιμή της αντίστασης πέδησης



Σχήμα 3.14 Σχηματικό διάγραμμα του διαύλου DC με το διάγραμμα της δυναμικής πέδησης του συστήματος.

Απαιτείται ο υπολογισμός της V_{DC} του διαύλου

$$V_{DC} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} V_{\text{πολ}}$$

Για την περίπτωση, $\frac{3\sqrt{2}}{\pi} 400 = 540,46 \text{ V}$

Απαιτείται ο υπολογισμός του πυκνωτή εξομάλυνσης του διαύλου

$$C_{\text{bus}} = \frac{P_{\text{motor}} (\text{watt})}{12 f \Delta V V_{DC}}$$

όπου, P_{motor} : ονομαστική ισχύς του κινητήρα (W).

f : η συχνότητα της πηγής AC (Hz).

ΔV : είναι η επιθυμητή τάση κυμάτωσης (V).

V_{DC} : η τάση DC Bus (V)

Η επιθυμητή τάση κυμάτωσης όπως αναφέρθηκε στην παράγραφο 2.3.5.1 θα πρέπει να είναι 1% έως 2% του V_{DC} . Σίγουρα να μην ξεπερνάει το 2-5% του V_{DC} , άρα:

$$\Delta V = 540,46 * 0,02 = 10,80 \text{ V}$$

Για την περίπτωση, με την 1^η μέθοδο, $C_{\text{bus}} = \frac{P_{\text{motor}} (\text{watt})}{12 f \Delta V V_{DC}} = \frac{4000 \text{ Watt}}{12 * 50 * 10,8 * 540,46} = 1142,14 \times 10^{-6}$,
1142 μF

Ο καταμητής του κλάδου της αντίστασης πέδησης ενεργοποιείται συνήθως στο σημείο 125% της V_{DC} . Επομένως, η τάση ενεργοποίησης του κυκλώματος πέδησης θα είναι:

$$V_{DC_on} = V_{DC} * 1,25 = 540,46 * 1,25 = 675,575 \text{ V}$$

Η αντίσταση πέδησης ακολούθως υπολογίζεται από τον τύπο, $R_{\text{break}} = \frac{(V_{DC_on})^2}{P_{\text{motor}} (\text{Watt})}$

Για την περίπτωση, $R_{\text{break}} = \frac{(V_{DC_on})^2}{P_{\text{motor}} (\text{Watt})} = \frac{675,575^2}{4000 (\text{Watt})} = 114,1 \Omega$

Παράμετροι στον τριφασικό αντιστροφέα (Inverter)

Power Electronic device: Ο τύπος των διακοπών π.χ. IGBT με αντιπαράλληλη δίοδο

R_{on} (Ohms): 0,001Ω Η εσωτερική αντίσταση των διακοπών βρίσκεται από έντυπο εταιρίας. στην προκειμένη περίπτωση είναι

Forward voltages [Device Vf(V) , Diode Vfd(V)]: 1,1V και 0,8 V αντίστοιχα. Οι τάσεις έναυσης και αποκοπής των διακοπών, βρίσκονται από σχετικό έντυπο εταιρίας.

3.5.2 Παρουσίαση του κυκλώματος προσομοίωσης

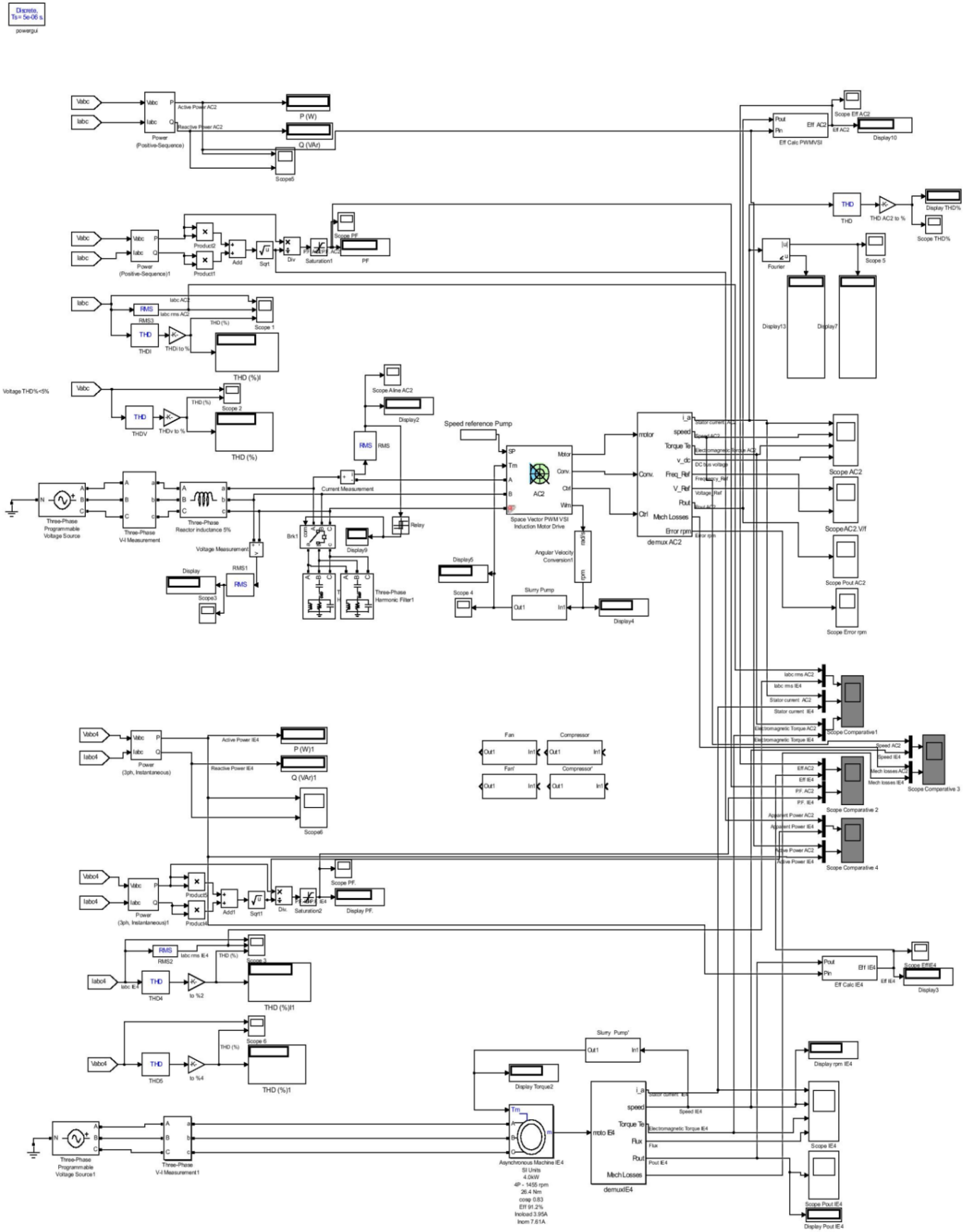
Στο σχήμα 3.15 το οποίο ακολουθεί, παρουσιάζεται το κύκλωμα όπου συγκρίνονται δύο περιπτώσεις, η πρώτη περίπτωση είναι το σύστημα μονάδας ελέγχου - κινητήρα με ισχύ 4kW, με οδήγηση Scalar Control SV-PWM και η δεύτερη περίπτωση είναι, κινητήρας όμοιας ισχύος, ενεργειακής κλάσης IE4 με τροφοδοσία απ' ευθείας από το δίκτυο.

Ό,τι αφορά το επιμέρους κύκλωμα του κινητήρα 4kW ο οποίος είναι ενεργειακής κατηγορίας IE4, έχει παρουσιαστεί προηγουμένως στο πρώτο σενάριο με την σύγκριση των κινητήρων και ομοίως ισχύει και σε αυτήν την περίπτωση.

Στο κύκλωμα, κάθε περίπτωση εκ των αναφερθέντων τροφοδοτείται από ανεξάρτητες ιδανικές πηγές ισχύος εναλλασσόμενης τριφασικής τάσης. Σε κάθε μια από τις δύο περιπτώσεις γίνονται μετρήσεις, της τάσης, της έντασης, του συντελεστή ισχύος, της απόδοσης, των αρμονικών τάσης και ρεύματος και στην περίπτωση του συστήματος μονάδας ελέγχου-κινητήρα γίνεται ανάλυση του ρεύματος στάτη σε επιμέρους αρμονικές κυματομορφές Fourier παρατηρώντας το μέτρο και την γωνία της κάθε αρμονικής. Τα αποτελέσματα και τα γραφήματα του κάθε επιμέρους κυκλώματος δίνονται από παλμογράφους καταγραφής και οθόνες τιμών, οπτικοποιώντας τα αποτελέσματα της κάθε περίπτωσης. Στο κύκλωμα του του συστήματος μονάδας ελέγχου-κινητήρα έχει προστεθεί αυτεπαγωγή γραμμής (Line Reactor) 5% με σκοπό την εξομάλυνση ρεύματος του δικτύου, τον περιορισμό αιχμών ενώ ταυτόχρονα περιορίζει και τις αρμονικές.

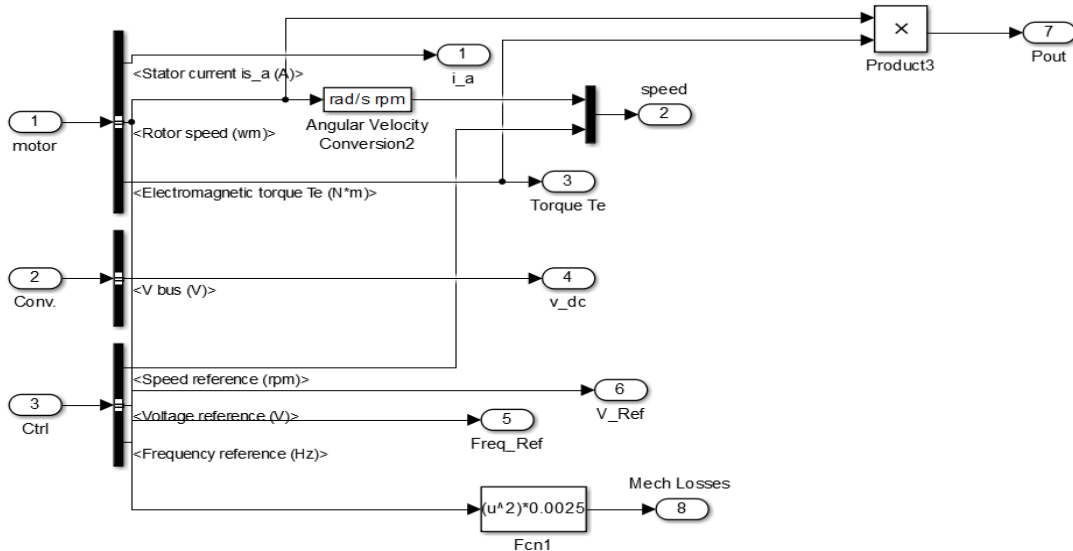
Ακόμη στην γραμμή έχουν προστεθεί δύο τριφασικά παθητικά διπλοσυντονιζόμενα φίλτρα, παράλληλα συνδεδεμένα στην γραμμή τροφοδοσίας του δικτύου, ώστε να απορροφούν τις αρμονικές στις οποίες συντονίστηκαν. Το πρώτο συντονίστηκε για τις αρμονικές 5^η και 7^η και το δεύτερο για την 11^η και 13^η. Τα φίλτρα συνδέονται στο κύκλωμα από έναν ηλεκτρονόμο ο οποίος παίρνει εντολή από μετρητή έντασης της γραμμής τροφοδοσίας λειτουργώντας από το 10% της ονομαστικής έντασης.

Space Vector PWM VSI Motor Drive For Induction Machine 4W-4P IE4



Σχήμα 3.15 Διάταξη προσομοίωσης κυκλώματος κινητήρα κατηγορίας IE4 με απ'ευθείας εκκίνηση και κυκλώματος κινητήρα κατηγορίας IE4 με μονάδα ελέγχου τύπου Scalar Control SV-PWM.

Στο σχήμα 3.16 το οποίο ακολουθεί παρακάτω είναι το σχηματικό διάγραμμα του μπλοκ Demux AC2 για το σύστημα μονάδας ελέγχου-κινητήρα, με τις εξόδους τις οποίες χρειάζεται να παρακολουθούνται και να καταγράφονται κατά την διάρκεια του χρόνου.



Σχήμα 3.16 Σχηματικό διάγραμμα με τις εξόδους του συστήματος της μονάδας ελέγχου στροφών τύπου *Scalar Control SV-PWM* και ηλεκτρικού κινητήρα που ελέγχει κατά τη διάρκεια του χρόνου της προσομοίωσης.

3.6 Αναφορά στο σενάριο με τη σύγκριση συστήματος μονάδας ελέγχου **Field Oriented Control**–κινητήρα, με όμοιο κινητήρα 4kW με απ’ ευθείας τροφοδοσία από το δίκτυο

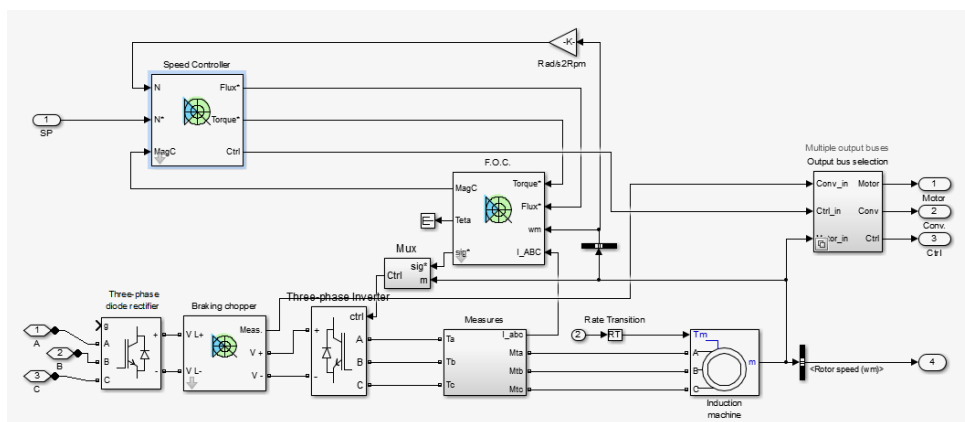
Με τις δυνατότητες επεξεργασίας που προσφέρονται από τους μικροελεγκτές και τους επεξεργαστές ψηφιακού σήματος μπορούν να εφαρμοστούν προηγμένες στρατηγικές ελέγχου για την απόδοση της ροπής ανεξάρτητα από τον έλεγχο της μαγνητικής ροής σε έναν επαγωγικό κινητήρα. Μια τέτοια περίπτωση θα εξεταστεί στο κύκλωμα της προσομοίωσης

Στην προσομοίωση χρησιμοποιούνται περιπτώσεις φορτίων μεταβλητής και σταθερής ροπής. Στις διαφορετικές εφαρμογές γίνεται χρήση μονάδας ελέγχου με οδήγηση **Field Oriented Control** και κινητήρα ενεργειακής κλάσης IE4 όπου θα συγκριθεί με την περίπτωση χρήσης ενός κινητήρα ενεργειακής κλάσης IE4 ο οποίος λειτουργεί απ’ ευθείας από το δίκτυο. Ακόμη θα κριθεί η συμπεριφορά του συστήματος της μονάδας ελέγχου στροφών σε σχέση για τα πλεονεκτήματα που προσφέρει και τα μειονεκτήματά που ενδεχομένως έχει. Ο σκοπός της προσομοίωσης είναι να βγουν συμπεράσματα για την κάθε περίπτωση φορτίου της εφαρμογής κίνησης ως προς τα θέματα της εξοικονόμησης ενέργειας, της ποιότητας ισχύος του κυκλώματος, της σταθερότητας και της αξιοπιστίας του συστήματος και του κόστους λειτουργίας.

3.6.1 Αναφορά, υπολογισμοί και παραμετροποίηση του κυκλώματος προσομοίωσης του συστήματος μονάδας ελέγχου-κινητήρα

Παρακάτω στο σχήμα 3.17 φαίνεται το σχηματικό διάγραμμα του συστήματος με μονάδα ελέγχου στροφών F.O.C. και τον επαγωγικό κινητήρα. Το μπλοκ AC Drive Field Oriented Control χρησιμοποιούνται τα ακόλουθα μπλοκ:

- Ανορθωτής τριφασικός με διόδους ισχύος
- Ελεγκτής ταχύτητας (Speed Controller)
- Ελεγκτής για ανεξάρτητο έλεγχο της ροπής και της μαγνητικής ροής (F.O.C. controller)
- Διάλυος DC
- Αντιστροφέας τριφασικός
- Ασύγχρονος τριφασικός κινητήρας



Σχήμα 3.17 Σχηματικό διάγραμμα του συστήματος μονάδας ελέγχου τύπου Field Oriented Control και κινητήρα.

Ο έλεγχος με F.O.C. είναι η πρώτη τεχνολογία που ελέγχει δυναμικά τις «πραγματικές» μεταβλητές ελέγχου του κινητήρα της ροπής και της μαγνητικής ροής. Με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται ο ανεξάρτητος έλεγχος της συνιστώσας του ρεύματος της μαγνητικής ροής και της συνιστώσας του ρεύματος της ροπής, παρέχοντας δυναμική απόκριση στο σύστημα. Το σχηματικό διάγραμμα δείχνει ότι ο έλεγχος είναι κλειστού βρόχου. Η ταχύτητα του άξονα του δρομέα ανατροφοδοτείται στον ελεγκτή της ταχύτητας και μαζί με την ταχύτητα αναφοράς που έχει ο ελεγκτής, εξάγει τις τιμές αναφοράς της ροπής και της μαγνητικής ροής στον ελεγκτή F.O.C. ο οποίος τροφοδοτεί με παλμούς σε ορισμένη συχνότητα τα διακοπτικά στοιχεία του αντιστροφέα. Το πλαίσιο αναφοράς που χρησιμοποιεί το σύστημα ελέγχου επαγωγικού κινητήρα με διανυσματικό έλεγχο, είναι το πλαίσιο αναφοράς του δρομέα.

Κάθε μπλοκ παραμετροποιείται κατάλληλα για την περίπτωση.

Παράμετροι στον ελεγκτή ταχύτητας (Speed Controller)

Τύπος ελέγχου: Υπάρχει η επιλογή δύο τύπων ελέγχου με αναφορά ροπής και με αναφορά ταχύτητας. Η επιλογή είναι με αναφορά ταχύτητας.

Machine nominal Frequency (Hz): 50 η ονομαστική συχνότητα του κινητήρα

Speed reference ramp (rpm/sec): -1350,1350 η μέγιστη τιμή μεταβολής της ταχύτητας αναφοράς, η τιμή της κατά την επιτάχυνση ή την επιβράδυνση πρέπει να είναι τέτοια ώστε το ρεύμα να μην ξεπερνάει τις ονομαστικές τιμές του φορτίου πάνω από 110%.

Proportional gain: 3, το αναλογικό κέρδος του σφάλματος του PI ελεγκτή, δείχνει την ευαισθησία που μπορεί να έχει ο ελεγκτής στις διακυμάνσεις ταχύτητας.

Integral Gain: 5, το κέρδος ολοκλήρωσης του σφάλματος του PI ελεγκτή δείχνει την συμπεριφορά που θα έχει στην μόνιμη κατάσταση του συστήματος στην διόρθωση της ταχύτητας αναφοράς.

Speed measurement - low-pass filter cutoff frequency (Hz): συχνότητα αποκοπής βαθυπερατού φίλτρου. Ρυθμίζεται η ζώνη αποκοπής, ώστε από κάποια τιμή συχνότητας και άνω να εξασθενούν και να αποκόπτονται ανεπιθύμητα σήματα. Ρύθμιση στα 100Hz

Output limit torque saturation (Nm) [negative, positive]: ελάχιστη και μέγιστη τιμή ροπής του κινητήρα. Θεωρείται η ονομαστική ροπή * 1,5 έως 2 δηλαδή $\pm 26.4\text{Nm} * 1,5$ ως 2 Προκύπτει ως το μέγιστο της ροπής που μπορεί να αποδώσει το σύστημα για περιορισμένο χρονικό διάστημα. Εξαρτάται από τις ανοχές του κατασκευαστή και τον τύπο του ελέγχου. Στην περίπτωση της προσομοίωσης χρησιμοποιείται η τιμή 1,8.

Motor pairs of poles: 2 ζεύγη πόλων του κινητήρα

Machine nominal flux: η ονομαστική μαγνητική ροή του κινητήρα. Υπολογίζεται ως το γινόμενο της rms τιμής του ρεύματος του επαγωγικού κινητήρα σε συνθήκες μηδενικού φορτίου με την αυτεπαγωγή L_m (H) του διακένου. 0.9 Wb είναι η τιμή της προσομοίωσης που προκύπτει ως το μέτρο της στο πλαίσιο d-q της ροής.

Παράμετροι στον ελεγκτή διανυσματικών μεγεθών F.O.C. controller

Maximum machine frequency (Hz): η μέγιστη συχνότητα σημάτων διαμόρφωσης που θα αποστέλλονται προς τον αντιστροφέα για τον έλεγχο του κινητήρα. Το εύρος της συχνότητας διαμόρφωσης αναλόγως και τον κατασκευαστή συνήθως είναι 4kHz ως 16kHz. Επιλογή για την μέγιστη συχνότητα της μονάδας του κυκλώματος τα 16kHz

Initial machine flux (Wb): η μαγνητική ροή του κινητήρα 0,9Wb

Motor mutual inductance (H): 0.180

Motor rotor resistance (ohms): 1.05

Motor rotor leakage inductance (H): 0.0052

Motor pairs of poles: 2

Flux controller - proportional gain: το αναλογικό κέρδος του ελεγκτή της μαγνητικής ροής.

Flux controller - integral gain: το κέρδος ολοκλήρωσης του ελεγκτή της μαγνητικής ροής.

Flux controller - flux estimation low-pass filter cutoff frequency (Hz): η συχνότητα αποκοπής βαθυπερατού φίλτρου. ρυθμίζεται η ζώνη αποκοπής, ώστε από κάποια τιμή συχνότητας και άνω να εξασθενούν και να αποκόπτονται ανεπιθύμητα σήματα. Ρύθμιση στα 50Hz.

Παράμετροι στον Δίαυλο DC (DC Bus)

Έχει παραμετροποιηθεί με τον ίδιο τρόπο όπως προηγουμένως, στην περίπτωση του σεναρίου με έλεγχο Scalar Control SV-PWM, χρησιμοποιούνται οι ίδιες τιμές .

Παράμετροι στον τριφασικό αντιστροφέα (Inverter)

Power Electronic device: Ο τύπος των διακοπών π.χ. IGBT με αντιπαράλληλη δίοδο

R_{on} (Ohms): Η εσωτερική αντίσταση των διακοπών βρίσκεται από έντυπο εταιρίας. στην προκειμένη περίπτωση είναι 0,001Ω

Forward voltages [Device Vf(V) , Diode Vfd(V)]: Οι τάσεις έναυσης και αποκοπής των διακοπών, βρίσκονται από σχετικό έντυπο εταιρίας, στην προκειμένη περίπτωση είναι 1,1V και 0,8V αντίστοιχα

3.6.2 Παρουσίαση του κυκλώματος προσομοίωσης

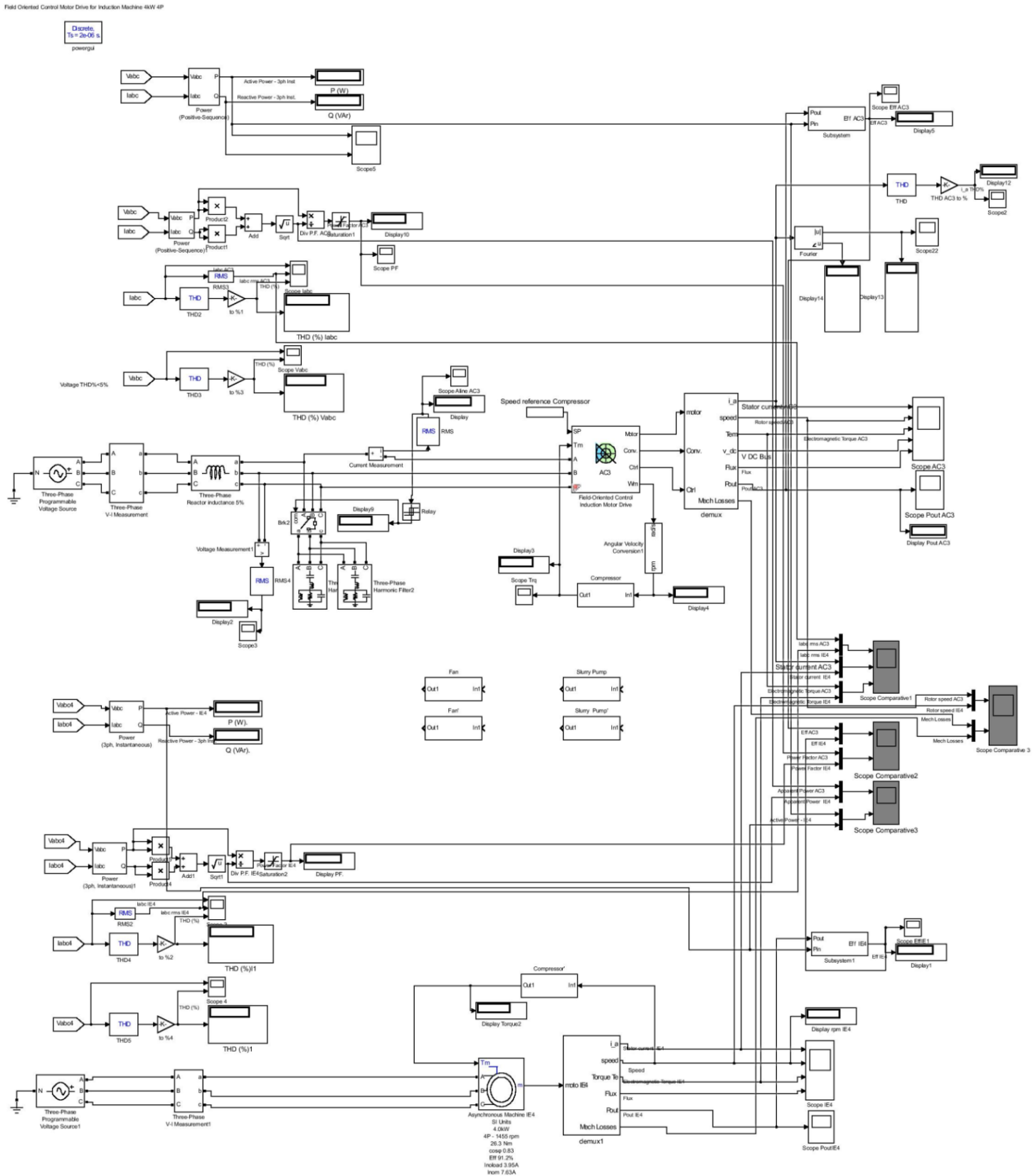
Στο σχήμα 3.18 το οποίο ακολουθεί παρουσιάζεται το κύκλωμα όπου συγκρίνονται δύο περιπτώσεις, η πρώτη περίπτωση είναι το σύστημα μονάδας ελέγχου - κινητήρα με ισχύ 4kW με οδήγηση Field-Oriented Control και η δεύτερη περίπτωση, κινητήρας όμοιας ισχύος, ενεργειακής κλάσης IE4 με τροφοδοσία απ' ευθείας από το δίκτυο.

Ό,τι αφορά το επιμέρους κύκλωμα του κινητήρα 4kW ο οποίος είναι ενεργειακής κατηγορίας IE4, έχει παρουσιαστεί προηγουμένως στο πρώτο σενάριο με την σύγκριση των κινητήρων και ομοίως ισχύει και σε αυτήν την περίπτωση.

Στο κύκλωμα, κάθε περίπτωση εκ των αναφερθέντων, τροφοδοτείται από ανεξάρτητες ιδανικές πηγές ισχύος εναλλασσόμενης τριφασικής τάσης. Σε κάθε μια από τις δύο περιπτώσεις γίνονται μετρήσεις, τάσης, έντασης, συντελεστή ισχύος, απόδοσης, αρμονικών τάσης και ρεύματος και στην περίπτωση του συστήματος μονάδας ελέγχου-κινητήρα γίνεται ανάλυση του ρεύματος στάτη σε επιμέρους αρμονικές κυματομορφές Fourier παρατηρώντας το μέτρο και την γωνία της κάθε αρμονικής. Τα αποτελέσματα και τα γραφήματα του κάθε επιμέρους κυκλώματος δίνονται από παλμογράφους και οθόνες τιμών οπτικοποιώντας τα αποτελέσματα της κάθε περίπτωσης.

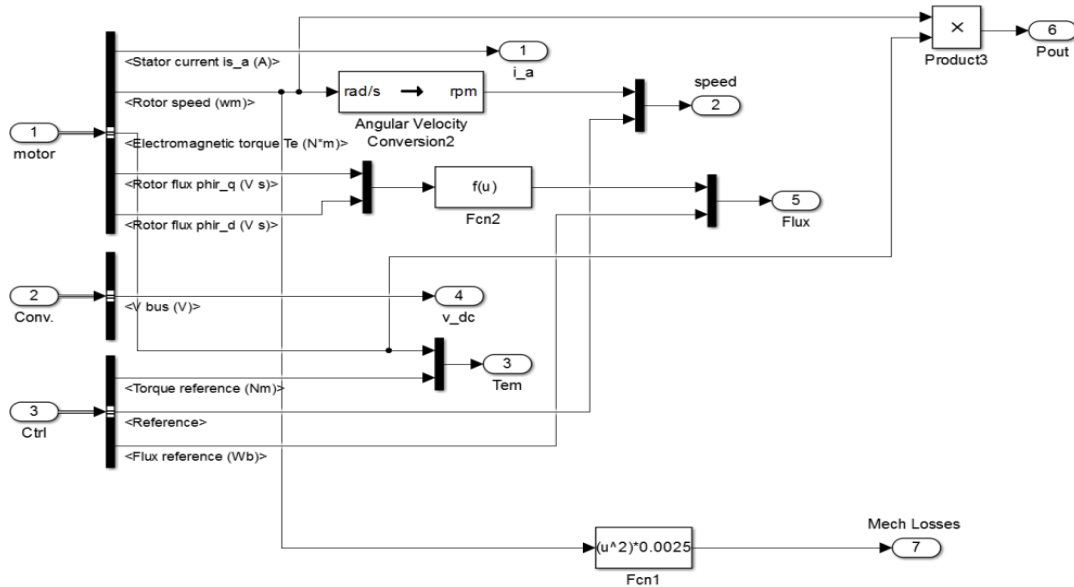
Στο κύκλωμα του συστήματος μονάδας ελέγχου-κινητήρα έχει προστεθεί αυτεπαγωγή γραμμής (Line Reactor) 5% με σκοπό την εξομάλυνση ρεύματος του δικτύου, τον περιορισμό αιχμών ενώ ταυτόχρονα περιορίζει και τις αρμονικές.

Ακόμη στην γραμμή έχουν προστεθεί δύο τριφασικά παθητικά διπλοσυντονιζόμενα φίλτρα, παράλληλα συνδεδεμένα στην γραμμή τροφοδοσίας του δικτύου, ώστε να απορροφούν τις αρμονικές στις οποίες συντονίστηκαν. Το πρώτο συντονίστηκε για τις αρμονικές 5^η και 7^η και το δεύτερο για την 11^η και 13^η. Τα φίλτρα συνδέονται στο κύκλωμα από έναν ηλεκτρονόμο οποίος παίρνει εντολή από μετρητή έντασης της γραμμής τροφοδοσίας, λειτουργώντας από το 10% της ονομαστικής έντασης της γραμμής



Σχήμα 3.18 Διάταξη προσομοίωσης κυκλώματος κινητήρα κατηγορίας IE4 με απ'ευθείας εκκίνηση και κυκλώματος κινητήρα κατηγορίας IE4 με μονάδα ελέγχου τύπου Field Oriented Control.

Στο σχήμα 3.19 το οποίο ακολουθεί παρακάτω είναι το σχηματικό διάγραμμα του μπλοκ Demux AC3 για το σύστημα μονάδας ελέγχου-κινητήρα, με τις εξόδους τις οποίες χρειάζεται να παρακολουθούνται και να καταγράφονται κατά την διάρκεια του χρόνου.



Σχήμα 3.19 Σχηματικό διάγραμμα με τις εξόδους του συστήματος της μονάδας ελέγχου στροφών τύπου Field Oriented Control και του ηλεκτρικού κινητήρα που ελέγχει, κατά τη διάρκεια του χρόνου της προσομοίωσης.

3.7 Αναφορά στο σενάριο με τη σύγκριση συστήματος μονάδας ελέγχου Direct Torque Control–κινητήρα, με όμοιο κινητήρα 4kW με απ’ ευθείας τροφοδοσία από το δίκτυο

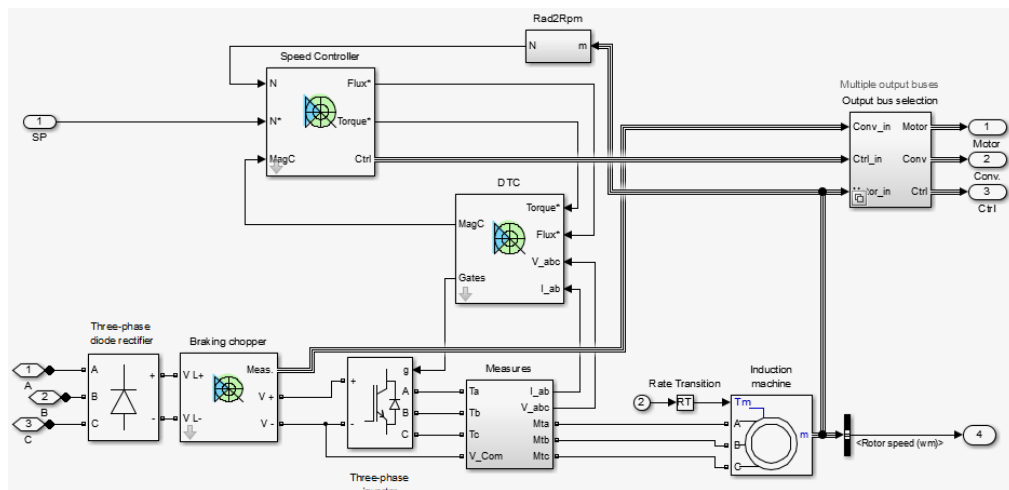
Το πλεονέκτημα της μονάδας ελέγχου στροφών με Direct Torque Control, είναι η βελτιωμένη δυναμική απόκριση που παρέχει. Ο άμεσος έλεγχος ροπής και μαγνητικής ροής γίνεται με την κατάλληλη επεξεργασία μέσω ενός βέλτιστου πίνακα μεταγωγής. Ωστόσο, αυτός ο έλεγχος παρουσιάζει υπολογιστική πολυπλοκότητα, όμως θεωρητικά μπορεί να έχει ταχύτερη απόκριση στις μεταβατικές καταστάσεις του φορτίου από την περίπτωση του διανυσματικού ελέγχου.

Στην προσομοίωση χρησιμοποιούνται περιπτώσεις φορτίων μεταβλητής και σταθερής ροπής. Στις διαφορετικές εφαρμογές γίνεται χρήση μονάδας ελέγχου στροφών με έλεγχο D.T.C. και κινητήρα ενεργειακής κλάσης IE4 όπου θα συγκριθεί με την περίπτωση χρήσης ενός κινητήρα ενεργειακής κλάσης IE4 ο οποίος λειτουργεί απ’ ευθείας από το δίκτυο. Ακόμη θα κριθεί η συμπεριφορά του συστήματος της μονάδας ελέγχου στροφών σε σχέση για τα πλεονεκτήματα που προσφέρει και τα μειονεκτήματά που τυχόν έχει. Ο σκοπός της προσομοίωσης είναι να βγουν συμπεράσματα για την κάθε περίπτωση φορτίου της εφαρμογής κίνησης ως προς τα θέματα της εξοικονόμησης ενέργειας, της ποιότητας ισχύος του κυκλώματος, της σταθερότητας και της αξιοπιστίας του συστήματος και του κόστους λειτουργίας.

3.7.1 Αναφορά, υπολογισμοί και παραμετροποίηση του κυκλώματος προσομοίωσης του συστήματος μονάδας ελέγχου-κινητήρα

Παρακάτω στο σχήμα 3.20, φαίνεται το σχηματικό διάγραμμα του συστήματος με μονάδα ελέγχου στροφών D.T.C. και τον επαγωγικό κινητήρα. Το μπλοκ AC Drive Direct Torque Control χρησιμοποιούνται τα ακόλουθα μπλοκ:

- Ανορθωτής τριφασικός με διόδους ισχύος
- Ελεγκτής ταχύτητας (Speed Controller)
- Ελεγκτής άμεσου ελέγχου ροπής και μαγνητικής ροής (D.T.C. controller)
- Δίαυλος DC
- Αντιστροφέας τριφασικός
- Ασύγχρονος τριφασικός κινητήρας



Σχήμα 3.20 Σχηματικό διάγραμμα του συστήματος μονάδας ελέγχου στροφών τύπου Direct Torque Control και κινητήρα

Ο βρόχος ελέγχου της ταχύτητας ανατροφοδοτεί την τιμή της ταχύτητας η οποία συγκρίνεται με την ταχύτητα αναφοράς και τροφοδοτεί στον ελεγκτή της ροπής και της μαγνητικής ροής, την τιμή αναφοράς για την ροπή και την μαγνητική ροή του επαγωγικού κινητήρα. Οι ροπές αναφοράς και μαγνητικής ροής συγκρίνονται με τις εκτιμώμενες τιμές τους αντίστοιχα, και τα σφάλματα τροφοδοτούνται στους ελεγκτές υστέρησης-ζώνης. Οι έξοδοι των ελεγκτών υστέρησης-ζώνης, είναι τα σήματα τα οποία χρησιμοποιούνται στη συνέχεια, για να ενεργοποιήσουν κατάλληλα τα ημιαγωγικά στοιχεία του αντιστροφέα μέσω ενός βέλτιστου πίνακα μεταγωγών. Το πλαίσιο αναφοράς που χρησιμοποιεί το σύστημα ελέγχου επαγωγικού κινητήρα με άμεσο έλεγχο ροπής, είναι το πλαίσιο αναφοράς του στάτη.

Κάθε μπλοκ παραμετροποιείται κατάλληλα για την περίπτωση.

Παράμετροι στον ελεγκτή ταχύτητας (Speed Controller)

Τύπος ελέγχου: Υπάρχει η επιλογή δύο τύπων ελέγχου με αναφορά ροπής και με αναφορά ταχύτητας. Η επιλογή είναι με αναφορά ταχύτητας.

Machine nominal Frequency (Hz): 50, η ονομαστική συχνότητα του κινητήρα

Speed reference ramp(rpm/sec): -1350,1350 η μέγιστη τιμή μεταβολής της ταχύτητας αναφοράς, η τιμή της κατά την επιτάχυνση ή την επιβράδυνση πρέπει να είναι τέτοια ώστε το ρεύμα να μην ξεπερνάει τις ονομαστικές του τιμές του φορτίου πάνω από 110%.

Proportional gain: 4 το αναλογικό κέρδος του σφάλματος του PI ελεγκτή, δείχνει την ευαισθησία που μπορεί να έχει ο ελεγκτής στις διακυμάνσεις ταχύτητας.

Integral Gain: 7 το κέρδος ολοκλήρωσης του σφάλματος του PI ελεγκτή δείχνει την συμπεριφορά που θα έχει στην μόνιμη κατάσταση του συστήματος στην διόρθωση της ταχύτητας αναφοράς.

Speed measurement - low-pass filter cutoff frequency (Hz): συχνότητα αποκοπής βαθυπερατού φίλτρου. Ρυθμίζεται η ζώνη αποκοπής, ώστε από κάποια τιμή συχνότητας και άνω να εξασθενούν και να αποκόπτονται ανεπιθύμητα σήματα. Ρύθμιση στα 100Hz

Output torque saturation (Nm) [negative, positive]: ελάχιστη και μέγιστη τιμή ροπής του κινητήρα. Θεωρείται η ονομαστική ροπή * 1,5 έως 2 δηλαδή $\pm 26.4\text{Nm} * 1,5$ ως 2 Προκύπτει ως το μέγιστο της ροπής που μπορεί να αποδώσει το σύστημα για περιορισμένο χρονικό διάστημα. Εξαρτάται από τις ανοχές του κατασκευαστή και τον τύπο του ελέγχου. Στην περίπτωση της προσομοίωσης χρησιμοποιείται η τιμή 1,8.

Motor pairs of poles: 2 ζεύγη πόλων του κινητήρα

Machine nominal flux (Wb) : η ονομαστική μαγνητική ροή του κινητήρα. Μπορεί να υπολογιστεί ως το γινόμενο της rms τιμής του ρεύματος του επαγωγικού κινητήρα σε συνθήκες μηδενικού φορτίου με την αυτεπαγωγή $L_m(H)$ του διακένου. 0.9Wb είναι η τιμή που προκύπτει από την προσομοίωση ως το μέτρο της στο πλαίσιο d-q της ροής.

Παράμετροι στον ελεγκτή άμεσου ελέγχου ροπής και μαγνητικής ροής D.T.C. controller

Maximum machine frequency (Hz): Η μέγιστη συχνότητα των σημάτων διαμόρφωσης που αποστέλλονται προς τον αντιστροφέα για τον έλεγχο του κινητήρα. Επιλογή για την μέγιστη συχνότητα τα 16.000Hz

Stator phase resistance (ohms): 1.475

Torque hysteresis bandwidth (Nm): 0.5

Flux hysteresis bandwidth (Wb): 0.01

Initial machine flux (Wb): μπήκε η τιμή της προσομοίωσης που προκύπτει ως μέτρο από το πλαίσιο d-q της ροής, 0.9 Wb

Motor pairs of poles: 2

Παράμετροι στον Δίαυλο DC (DC Bus)

Έχει παραμετροποιηθεί με τον ίδιο τρόπο όπως προηγουμένως, στην περίπτωση του σεναρίου με έλεγχο Scalar Control SV-PWM χρησιμοποιούνται οι ίδιες τιμές .

Παράμετροι στον τριφασικό αντιστροφέα (Inverter)

Power Electronic device: Ο τύπος των διακοπών π.χ. IGBT με αντιπαράλληλη δίοδο

Ron (Ohms): Η εσωτερική αντίσταση των διακοπών βρίσκεται από έντυπο εταιρίας. στην προκειμένη περίπτωση είναι 0,001Ω

Forward voltages [Device Vf(V) , Diode Vfd(V)]: Οι τάσεις έναυσης και αποκοπής των διακοπών, βρίσκονται από σχετικό έντυπο εταιρίας, στην προκειμένη περίπτωση είναι 1,1V και 0,8 V αντίστοιχα

3.7.2 Παρουσίαση του κύκλωματος προσομοίωσης

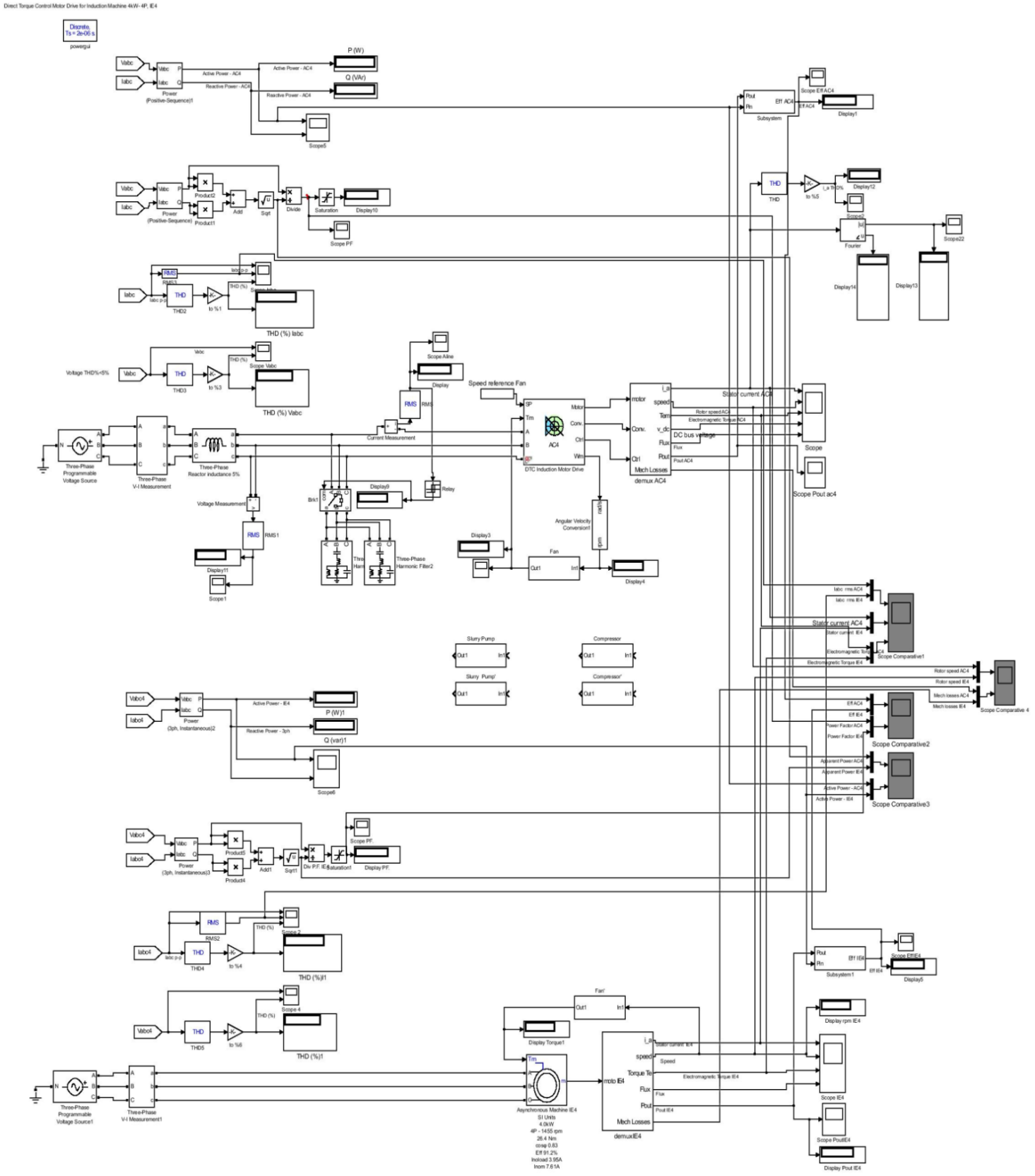
Στο σχήμα 3.21 το οποίο ακολουθεί παρουσιάζεται το κύκλωμα όπου συγκρίνονται δύο περιπτώσεις, η πρώτη περίπτωση είναι το σύστημα μονάδας ελέγχου - κινητήρα με ισχύ 4kW και με οδήγηση Direct Torque Control και η δεύτερη περίπτωση, κινητήρας όμοιας ισχύος, ενεργειακής κλάσης IE4 με τροφοδοσία απ' ευθείας από το δίκτυο.

Ό,τι αφορά το επιμέρους κύκλωμα του κινητήρα 4kW ο οποίος είναι ενεργειακής κατηγορίας IE4, έχει παρουσιαστεί προηγουμένως στο πρώτο σενάριο με την σύγκριση των κινητήρων και ομοίως ισχύει και σε αυτήν την περίπτωση.

Στο κύκλωμα κάθε εφαρμογή τροφοδοτείται από ανεξάρτητες ιδανικές πηγές ισχύος, εναλλασσόμενης τριφασικής τάσης. Σε κάθε μια από τις δύο περιπτώσεις γίνονται μετρήσεις, της τάσης, της έντασης, του συντελεστή ισχύος, της απόδοσης, των αρμονικών τάσης και ρεύματος και στην περίπτωση του συστήματος μονάδας ελέγχου -κινητήρα γίνεται ανάλυση του ρεύματος στάτη σε επιμέρους αρμονικές κυματομορφές Fourier παρατηρώντας το μέτρο και την γωνία της κάθε αρμονικής. Τα αποτελέσματα και τα γραφήματα του κάθε επιμέρους κύκλωματος δίνονται από παλμογράφους και οθόνες τιμών, οπτικοποιώντας τα αποτελέσματα της σύγκρισης της κάθε περίπτωσης.

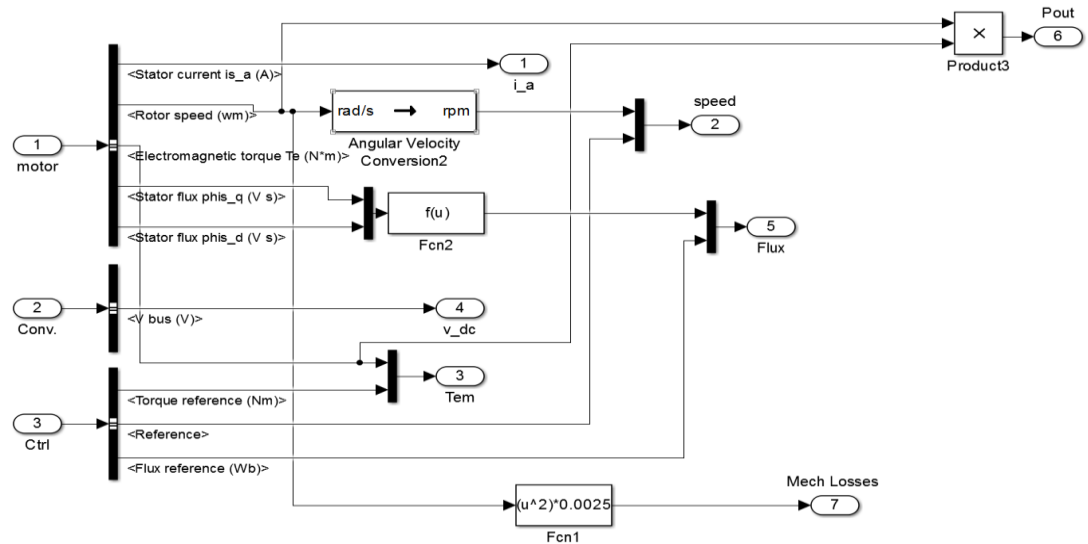
Στο κύκλωμα του συστήματος μονάδας ελέγχου -κινητήρα έχει προστεθεί αυτεπαγωγή γραμμής (Line Reactor) 5% με σκοπό την εξομάλυνση ρεύματος του δικτύου, τον περιορισμό αιχμών ενώ ταυτόχρονα περιορίζει και τις αρμονικές.

Ακόμη στην γραμμή έχουν προστεθεί δύο τριφασικά παθητικά διπλοσυντονιζόμενα φίλτρα, παράλληλα συνδεδεμένα στην γραμμή τροφοδοσίας του δικτύου, ώστε να απορροφούν τις αρμονικές στις οποίες συντονίστηκαν. Το πρώτο συντονίστηκε για τις αρμονικές 5^η και 7^η και το δεύτερο για την 11^η και 13^η. Τα φίλτρα συνδέονται στο κύκλωμα από έναν ηλεκτρονόμο ο οποίος παίρνει εντολή από μετρητή έντασης της γραμμής από το 10% της ονομαστικής έντασης της γραμμής.



Σχημα 3.21 Διάταξη προσομοίωσης κυκλώματος κινητήρα κατηγορίας IE4 με απ'ευθείας εκκίνηση και κυκλώματος κινητήρα κατηγορίας IE4 με μονάδα ελέγχου τύπου Direct Torque Control.

Στο σχήμα 3.22 το οποίο ακολουθεί παρακάτω είναι το σχηματικό διάγραμμα του μπλοκ Demux AC4 για το σύστημα μονάδας ελέγχου-κινητήρα, με τις εξόδους τις οποίες χρειάζεται να παρακολουθούνται και να καταγράφονται κατά την διάρκεια του χρόνου



Σχήμα 3.22 Σχηματικό διάγραμμα με τις εξόδους του συστήματος της μονάδας ελέγχου στροφών τύπου Direct Torque Control και του ηλεκτρικού κινητήρα που ελέγχει κατά τη διάρκεια του χρόνου της προσομοίωσης.

4 Αποτελέσματα προσομοιώσεων, παρατηρήσεις και συμπεράσματα

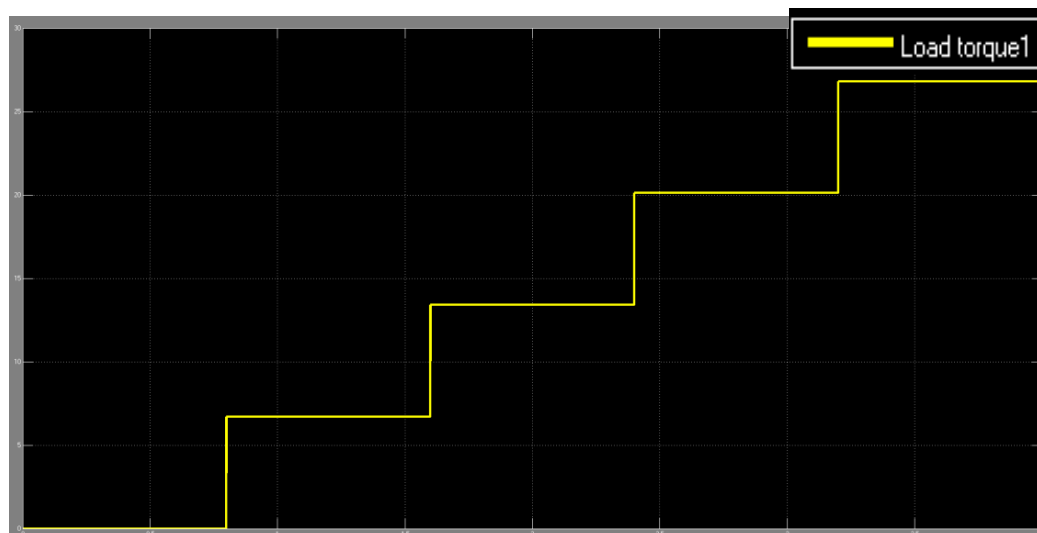
Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης των κυκλωμάτων τα οποία αναφέρονται από την παράγραφο 3.2 της εργασίας και έπειτα.

Στις προσομοιώσεις των παραγράφων 4.1 και 4.2 για λόγους εξοικονόμησης υπολογιστικών πόρων τα χρονικά διαστήματα λειτουργίας που χρησιμοποιούνται για την κάθε μεταβολή του φορτίου ή για την εκκίνηση και λειτουργία, είναι τα επαρκώς απαραίτητα ώστε η μηχανή να βρεθεί σε κατάσταση ισοροπίας για χρονικό διάστημα και τότε να βγουν ασφαλή συμπεράσματα σε σχέση με τα γραφήματα που καταγράφονται.

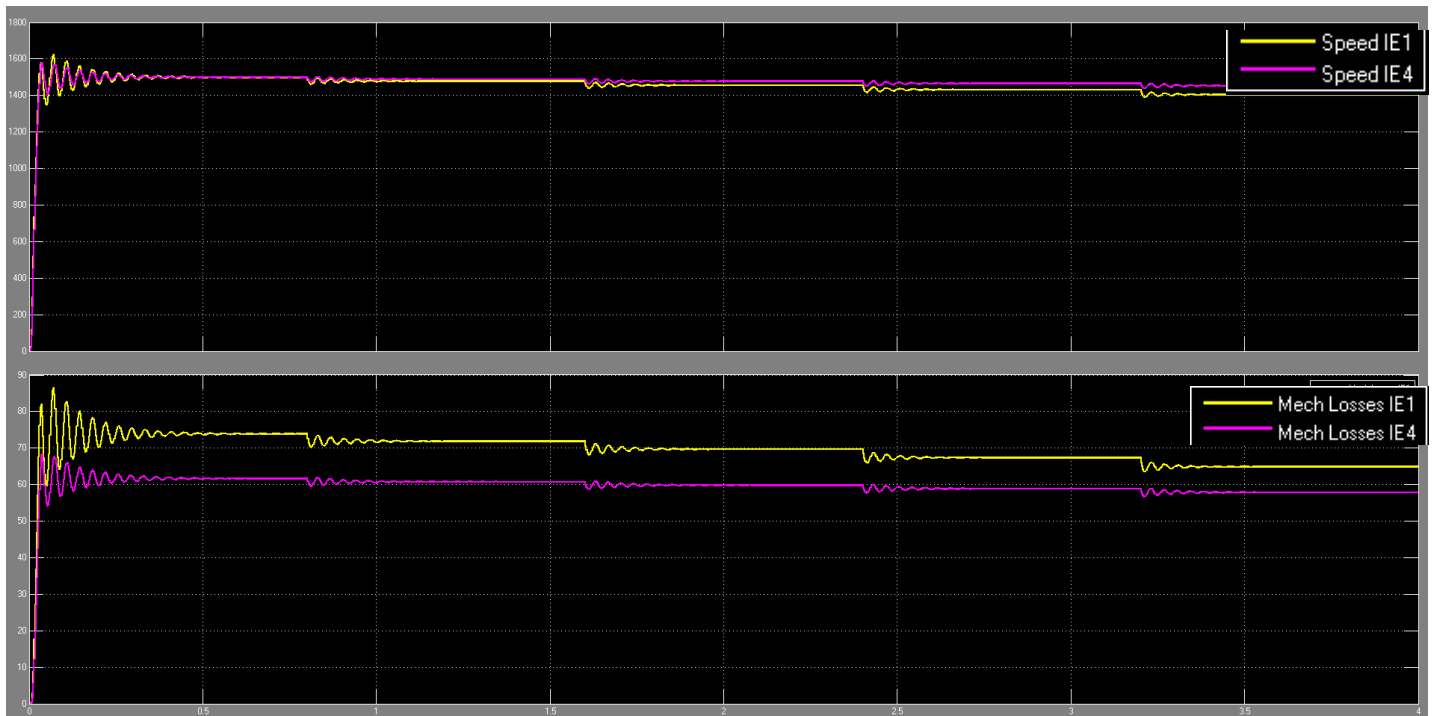
4.1 Η προσομοίωση για την επαλήθευση της θεωρητικής με την πραγματική συμπεριφορά των κινητήρων μετά την παραμετροποίηση τους

Αρχικά εξετάστηκε η συμπεριφορά των κινητήρων φορτίζοντας τους κλιμακωτά σε όμοιες χρονικές στιγμές με το 25%, 50%, 75% και το 100% του ονομαστικού τους φορτίου. Αυτό έγινε για να δειχθεί ότι οι κινητήρες παρουσιάζουν συμπεριφορά που να ταυτίζεται με την πραγματική, αντίστοιχη των φυλλαδίων δοκιμής των κατασκευαστών κινητήρων. Αυτό αποτελεί σημαντική επιβεβαίωση αφού σε όλα τα κυκλώματα των προσομοιώσεων, χρησιμοποιούνται οι συγκεκριμένοι κινητήρες.

Ο συνολικός χρόνος της προσομοίωσης ο οποίος βρίσκεται σε όλα τα παρακάτω γραφήματα στον οριζόντιο άξονα είναι 4s.



Σχήμα 4.1 Γράφημα των φορτίων ροπής που εφαρμόζονται και βάσει αυτών εξετάζεται η συμπεριφορά των κινητήρων. Τα φορτία ροπής είναι στο 25%, 50%, 75% και 100% του ονομαστικού φορτίου του κινητήρα.



Σχήμα 4.2 Σύγκριση των γραφημάτων της ταχύτητας και των μηχανικών απωλειών των δύο κινητήρων IE1 και IE4 κατά την διάρκεια του χρόνου της προσομοίωσης.

Σχήμα 4.2 παρατηρήσεις:

Στο σχήμα 4.2 δίνονται τα συγκριτικά γραφήματα της ταχύτητας και των μηχανικών απωλειών. Η ταχύτητα του κάθε κινητήρα, στο άνω γράφημα, μεταβάλλεται κάθε φορά που εφαρμόζεται διαφορετικό φορτίο από 0%, 25%, 50%, 75% και 100% του ονομαστικού.

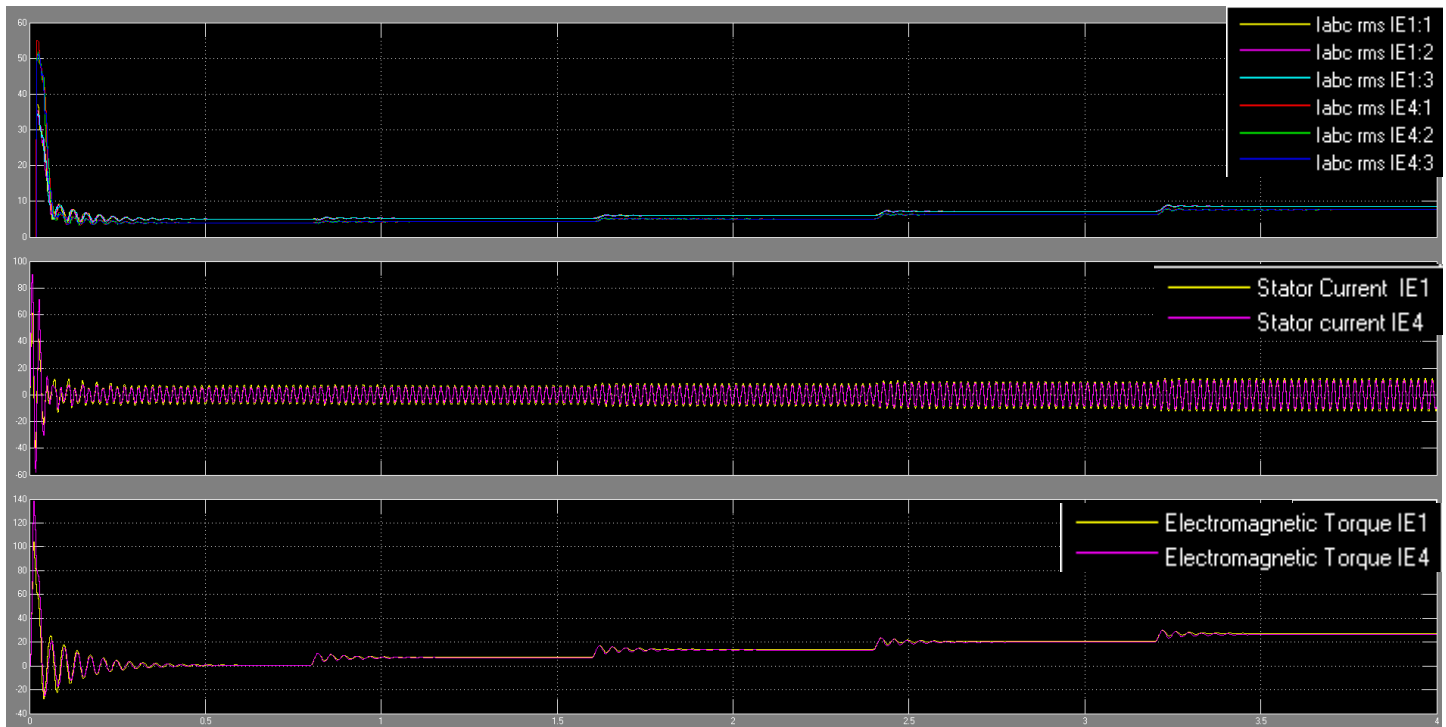
Οι μηχανικές απώλειες οι οποίες φαίνονται στο επόμενο γράφημα εξαρτώνται από την ταχύτητα και έχουν υπολογιστεί ως:

$$P_{\text{mechlosses}} = F * \omega^2, \text{ σε Watt}$$

Είναι σαφές ότι οι απώλειες είναι ανάλογες της γωνιακής ταχύτητας του κινητήρα. Στην μέγιστη ταχύτητα οι απώλειες γίνονται μέγιστες. Συγκριτικά παρατηρείται ότι ο κινητήρας ενεργειακής κλάσης IE4 έχει χαμηλότερες απώλειες σε όλο το εύρος της ταχύτητας που λειτουργεί αν και σε ελαφρώς υψηλότερη ταχύτητα περιστροφής.

Σχήμα 4.2 εξηγήσεις και συμπεράσματα:

Οι μηχανικές απώλειες είναι οι απώλειες λόγω περιστροφής δηλαδή αερισμού και τριβής των εδράνων, υπολογίστηκαν ως το γινόμενο $F(\text{Nm}) * \omega^2(\text{rad/sec})$. **Οι απώλειες είναι από 6% έως 18% μικρότερες στον κινητήρα IE4.** Οι απώλειες περιστροφής είναι σημαντικές όσον αφορά τον χρόνο ζωής των εδράνων του κινητήρα, την δόνηση και ενδεχομένως τον ακουστικό θόρυβο του κινητήρα δεδομένα που έχουν να κάνουν την ποιότητα λειτουργίας της μηχανής.



Σχήμα 4.3 Σύγκριση γραφημάτων για τους δύο κινητήρες IE1 και IE4, κατά την διάρκεια του χρόνου της προσομοίωσης, για το ρεύμα rms ανα φάση, το ρεύμα από κορυφή σε κορυφή στον στάτη και για την αποδιδόμενη ροπή τους.

Σχήμα 4.3 παρατηρήσεις:

Στο σχήμα 4.3 το πρώτο γράφημα που παρατηρείται είναι το ρεύμα rms των τριών φάσεων για κάθε κινητήρα. Οι επαγωγικοί κινητήρες συνδέονται άμεσα με τη γραμμή και χρειάζονται υψηλό ρεύμα εκκίνησης που είναι κυρίως άεργο. Το σχήμα δείχνει την καμπύλη ρεύματος εκκίνησης για τους δύο κινητήρες σε απευθείας σύνδεση με την πηγή. Παρατηρούνται τρία στάδια:

Κατά τη διάρκεια των πρώτων ms, μετά την εκκίνηση, παρατηρείται υψηλή αιχμή ρεύματος εισόδου (I_{peak}) στο χρονικό διάστημα 0 έως 65 ms, κατόπιν εμφανίζεται ένα υψηλό ρεύμα σταθερής κατάστασης εκκίνησης (locked rotor current) στο χρονικό διάστημα 65 ms έως 0,25 s. Αυτό το ρεύμα παραμένει σχετικά υψηλό όσο διαρκεί η εκκίνηση. Η διάρκεια του υψηλού ρεύματος εκκίνησης εξαρτάται από το φορτίο, αν υπάρχει και την ροπή αδράνειας του δρομέα του κινητήρα καθώς και από χαρακτηριστικά σχεδιασμού του στάτη και του δρομέα του κινητήρα.

Μετά από 0,25s, ο δρομέας αρχίζει να σταθεροποιείται στην τελική του ταχύτητα και το ρεύμα επίσης σταθεροποιείται, για να φτάσει στην ονομαστική του τιμή σε αυτό το χρονικό σημείο αναλόγως του φορτίου του κινητήρα.

Στο παρακάτω γράφημα, παρατηρείται το ρεύμα κορυφής ανά φάση του στάτη για κάθε κινητήρα σε σχέση με τον χρόνο και αμέσως παρακάτω το τελευταίο γράφημα είναι η αποδιδόμενη ροπή σε σχέση με τον χρόνο. Τα γραφήματα του ρεύματος και της ροπής έχουν όμοια συμπεριφορά σε σχέση με τον χρόνο από την εκκίνηση ως τη στιγμή που οι κινητήρες φτάνουν στο ονομαστικό σημείο λειτουργίας.

Σχήμα 4.3 εξηγήσεις και συμπεράσματα:

Οι κινητήρες ενεργειακής κλάσης IE4 είναι ενεργειακά πιο αποδοτικοί από τους κινητήρες IE1 χαμηλής απόδοσης. Οι κινητήρες IE4 έχουν υψηλότερα ρεύματα κορυφής και εκκίνησης αλλά, στην κανονική λειτουργία, έχουν χαμηλότερη κατανάλωση ρεύματος όπως φαίνεται και στο γράφημα του σχήματος 4.3.

Το ρεύμα κορυφής εκκίνησης είναι φυσιολογικό, εφόσον την στιγμή πριν την εκκίνηση η ολίσθηση είναι $s=1$ και στον δρομέα η συνολική αντίδραση είναι: $\frac{R'_R}{s} + jx'R$, άρα η τιμή της αντίδρασης είναι η μέγιστη και άρα και απώλειες ισχύος στον δρομέα είναι μέγιστες αφού η ισχύς του διακένου καταναλώνεται εξ 'ολοκλήρου στο κύκλωμα του δρομέα και η σχέση $P_{conv} = 3I^2 R'_R \left(\frac{1-s}{s}\right) = (1-s) P_{AG}$ παίρνει την μέγιστη τιμή της.

Ακόμη ισχύουν οι παρακάτω σχέσεις, βάσει των τιμών των ανα φάση ισοδύναμων κυκλωμάτων όπως παρουσιάστηκαν στην παράγραφο 3.4.1 στο σχήμα 3.12:

Για τον κινητήρα IE1:

$$Z_{\text{ΕΚΚ}} = \left(R_s + \frac{R'_R}{s} \right) + j(x_s + X_R) = 5,79 \Omega, \text{ Άρα } I_{\text{ΕΚΚ}} = \frac{V_{\text{φασική}}}{[Z_{\text{ΕΚΚ}}]} = \frac{230,94V}{5,79\Omega} = 39,88 \text{ A}$$

Για τον κινητήρα IE4:

$$Z_{\text{ΕΚΚ}} = \left(R_s + \frac{R'_R}{s} \right) + j(x_s + X_R) = 4,05 \Omega, \text{ Άρα } I_{\text{ΕΚΚ}} = \frac{V_{\text{φασική}}}{[Z_{\text{ΕΚΚ}}]} = \frac{230,94V}{4,08\Omega} = 56,60 \text{ A}$$

Στις παραπάνω σχέσεις, το ρεύμα μαγνήτισης του εγκάρσιου κλάδου του ανά φάση ισοδύναμου κυκλώματος αγνοείται, δεδομένου ότι το ρεύμα του δρομέα γίνεται μέγιστο.

Αυτές οι τιμές παρατηρούνται και στα γραφήματα της προσομοίωσης με ελάχιστη απόκλιση. Στην περίπτωση του μεγαλύτερου ρεύματος εκκίνησης του κινητήρα κλάσης IE4 αυτό συμβαίνει διότι η αντίσταση του στάτη και του δρομέα παρουσιάζει χαμηλότερη σύνθετη αντίδραση και κατ' επέκταση έχουν χαμηλότερες απώλειες ισχύος.

Το ρεύμα από κορυφή σε κορυφή ανά φάση του στάτη, το οποίο απεικονίζεται παρακάτω, ακολουθεί την ίδια λογική με το ρεύμα rms της γραμμής.

Όσον αφορά την ροπή, στο τρίτο γράφημα, παρατηρείται η ροπή εξόδου των δύο κινητήρων. Την στιγμή της εκκίνησης η ροπή και των δύο κινητήρων παίρνει την μέγιστη τιμή, αυτό είναι λογικό καθώς την στιγμή εκείνη η επαγόμενη ροπή χρησιμοποιείται για να ξεπεράσει την ροπή της αδράνειας του δρομέα και επίσης ισχύει ότι $T_{\text{ind}} = \frac{P_{\text{conv}}}{\omega_n}$, η ροπή είναι ανάλογη του ρεύματος και ακολουθεί κατά την εκκίνηση την συμπεριφορά του ρεύματος, αφού επίσης είναι αντιστρόφως ανάλογη των αντιδράσεων του στάτη και του δρομέα του κινητήρα.

Η ροπή του κινητήρα ενεργειακής κλάσης IE1 είναι μεγαλύτερη του κινητήρα ενεργειακής κλάσης IE4 κατά την λειτουργία τους και όσο αυξάνει το φορτίο ως την ονομαστική του τιμή.

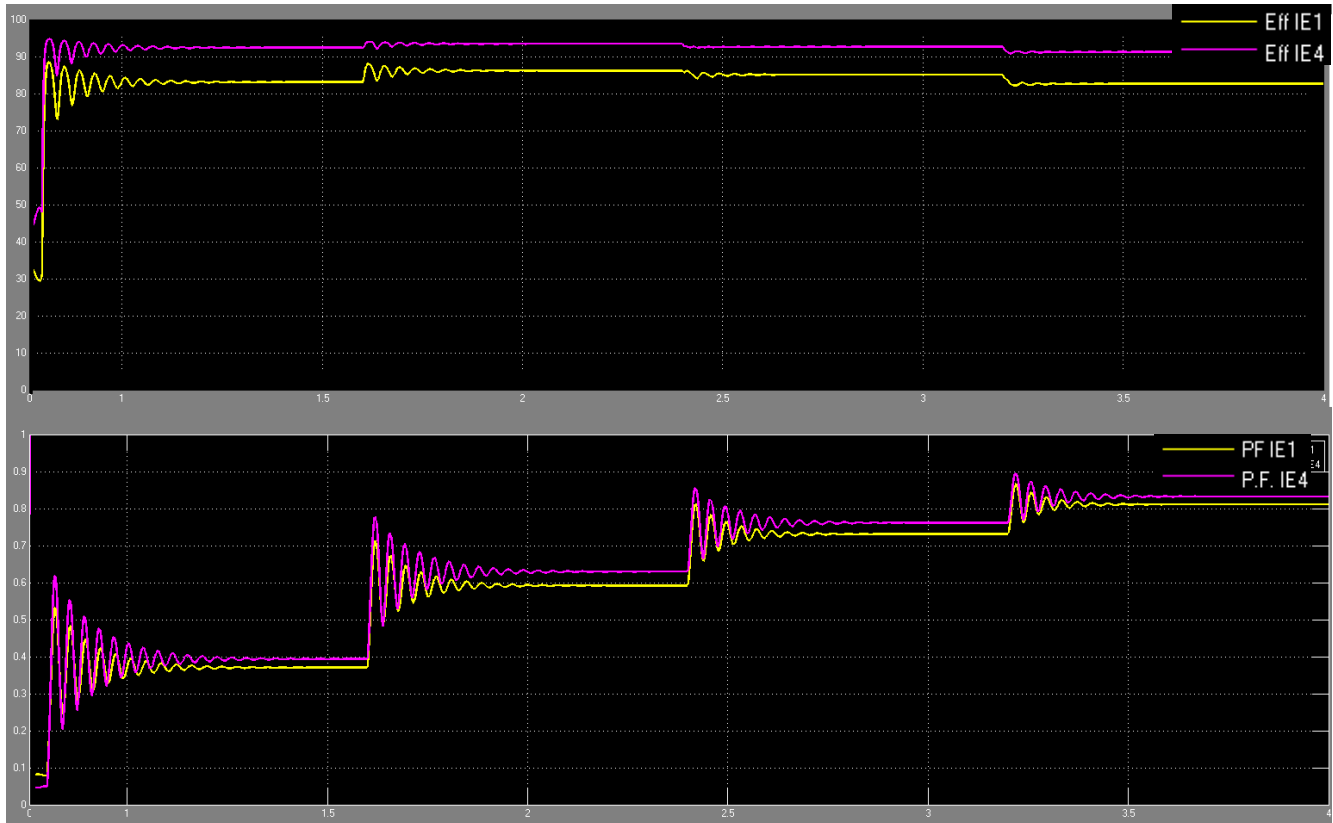
Η ταχύτητα του κινητήρα κλάσης IE4 είναι πιο κοντά στην ονομαστική $T_{\text{LOAD}} = \frac{P_{\text{out}}}{\omega_m}$

$$\text{Άρα στην περίπτωση του κινητήρα IE1, } T_{\text{LOAD}} = \frac{4000 \text{ watt}}{147,131 \text{ rad/sec}} = 27,18 \text{ Nm}$$

$$\text{και στην περίπτωση του κινητήρα IE4, } T_{\text{LOAD}} = \frac{4000 \text{ watt}}{152,367 \text{ rad/sec}} = 26,25 \text{ Nm}$$

Οι χαμηλότερες τιμές αντίδρασης του στάτη και του δρομέα μειώνουν τις ωμικές απώλειες αλλά επίσης συνεπάγονται μικρότερη ολίσθηση. Η ολίσθηση σχετίζεται άμεσα με την ροπή που μπορεί να αποδώσει ένας κινητήρας ενός δεδομένου σχεδιασμού. Η μέγιστη ροπή όμως που μπορεί να επιτευχθεί, είναι ανάλογη του τετραγώνου της τάσης τροφοδοσίας και αντιστρόφως

ανάλογη της σύνθετης αντίστασης του στάτη και του δρομέα. Συνεπώς για τον κινητήρα κλάσης IE4 αν και στην κανονική λειτουργία η ροπή είναι μικρότερη, σε δυσμενείς συνθήκες η ροπή που μπορεί να αποδώσει είναι φυσιολογικά μεγαλύτερη.



Σχήμα 4.4 Σύγκριση γραφημάτων για τους δύο κινητήρες IE1 και IE4, κατά την διάρκεια του χρόνου της προσομοίωσης, για τον συντελεστή απόδοσης επί τις %, και τον συντελεστή ισχύος.

Σχήμα 4.4 παρατηρήσεις:

Στο σχήμα 4.4 στο πρώτο γράφημα παρατηρείται η απόδοση των δύο κινητήρων συγκριτικά. Η απόδοση του κινητήρα κλάσης IE4 φυσιολογικά είναι ανώτερη σε όλο το φάσμα των φορτίων που ελέγχεται.

Στο δεύτερο γράφημα παρατηρείται αντίστοιχα, ο συντελεστή ισχύος. Παρατηρείται ότι ο συντελεστής ισχύος του κινητήρα IE4 είναι μεγαλύτερος.

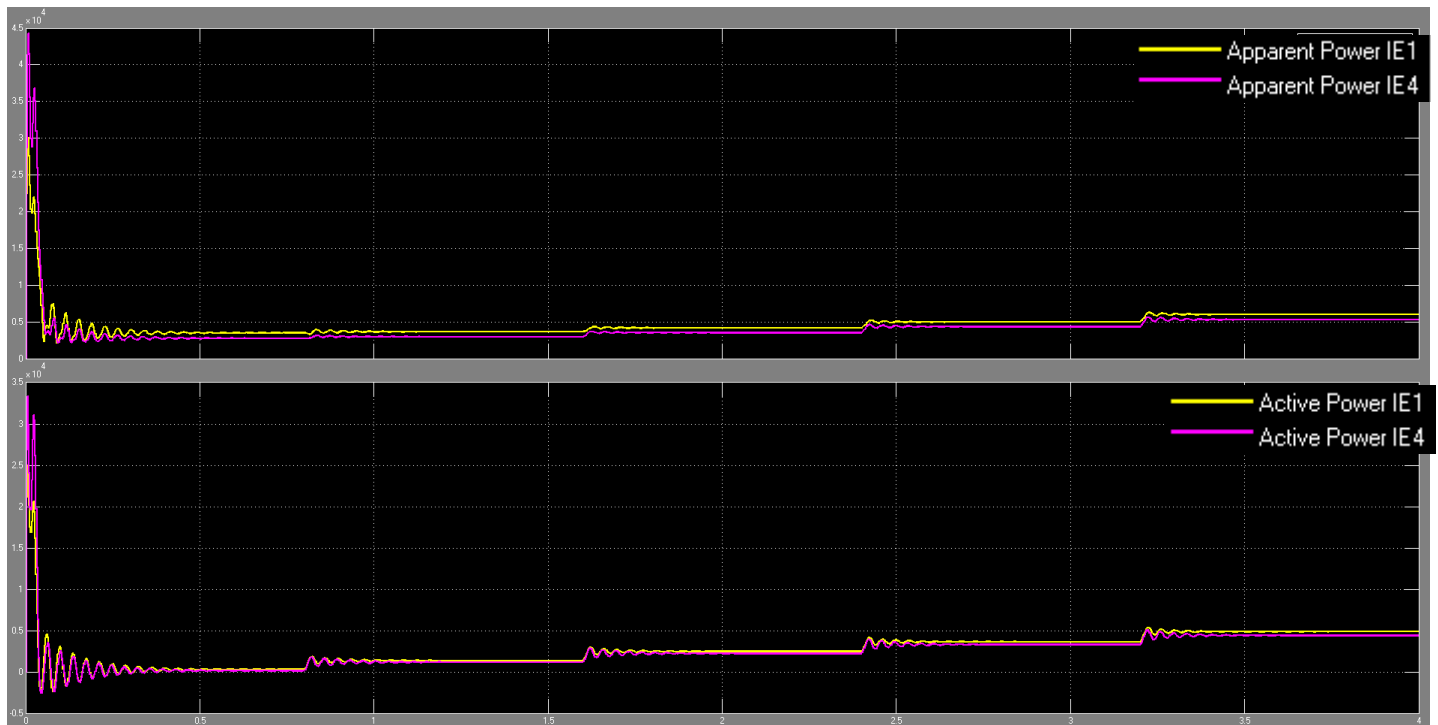
Τα γραφήματα καταγράφουν τιμές από 78ms έως 4s μετά τον χρόνο εκκίνησης των δύο κινητήρων, όπου υπάρχει η αστάθεια των εκκινήσεων και οι τιμές αυτές δεν έχουν σημασία. Οριακά παρατηρούμε την χρονικές στιγμές όπου οι κινητήρες λειτουργούν εν κενώ από 0,78s ως 0,79s κατόπιν φορτίζονται στο 25% του ονομαστικού τους φορτίου.

Σχήμα 4.4 εξηγήσεις και συμπεράσματα:

Η καινοτόμα τεχνολογία στους επαγωγικούς κινητήρες περιλαμβάνει μια σειρά σχεδιαστικών και κατασκευαστικών αναβαθμίσεων που έχουν ως στόχο τον περιορισμό των απωλειών συνολικά σε όλο το εύρος της λειτουργίας τους.

Τα επαγωγικά φορτία καταναλώνουν περισσότερη άεργη ισχύ. Ο επαγωγικός κινητήρας έχει σύνθετη αντίδραση με ωμικό και επαγωγικό χαρακτήρα. Οι χαμηλότερες ωμικές και επαγωγικές απώλειες καθώς και το βελτιωμένο διάκενο του κινητήρα κλάσης IE4 περιορίζουν το ρεύμα

μαγνήτισης το οποίο είναι επαγωγικό και βελτιώνουν το συντελεστή ισχύος σε όλο το εύρος της φόρτισης του κινητήρα.



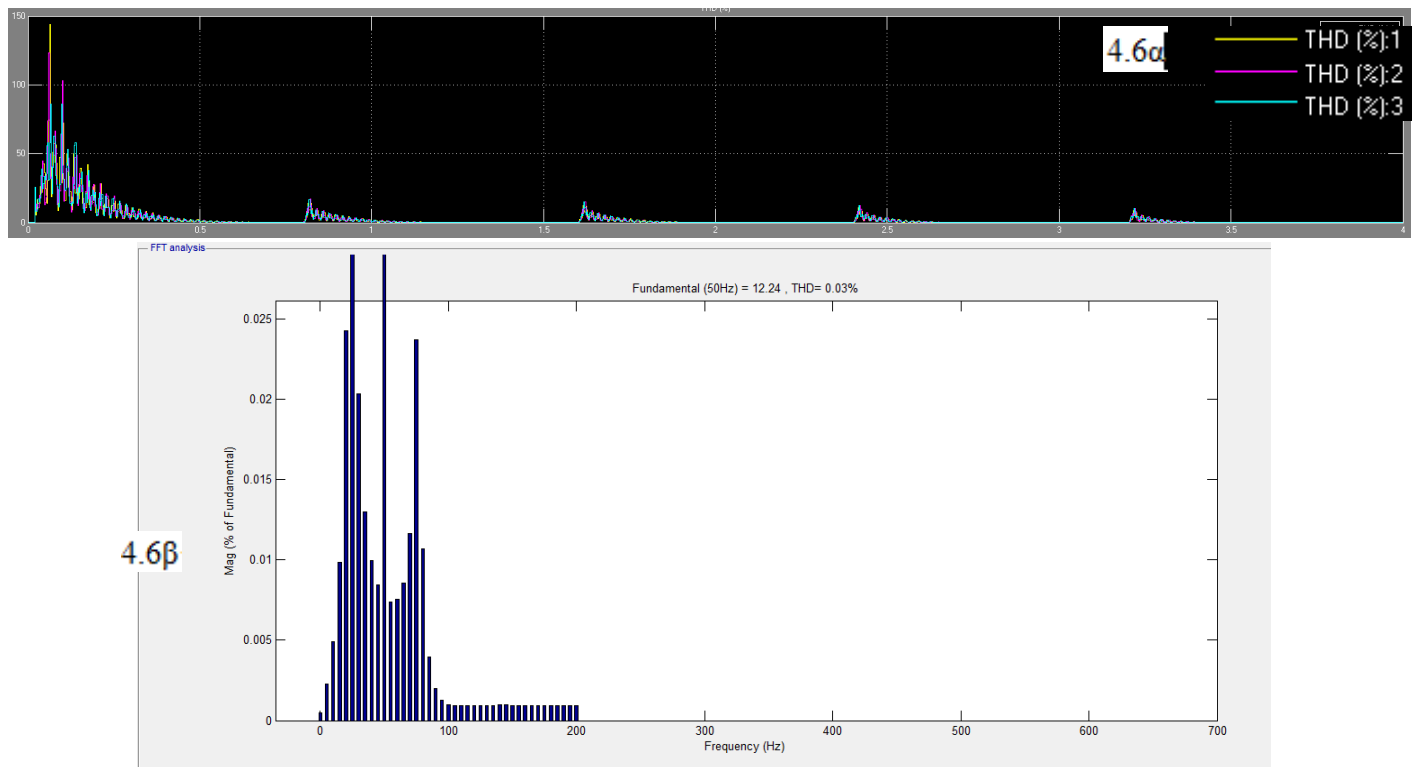
Σχήμα 4.5 Σύγκριση γραφημάτων για τους δύο κινητήρες IE1 και IE4, κατά την διάρκεια του χρόνου της προσομοίωσης, για την πραγματική ισχύ και την φαινομένη που καταναλώνουν.

Σχήμα 4.5 παρατηρήσεις:

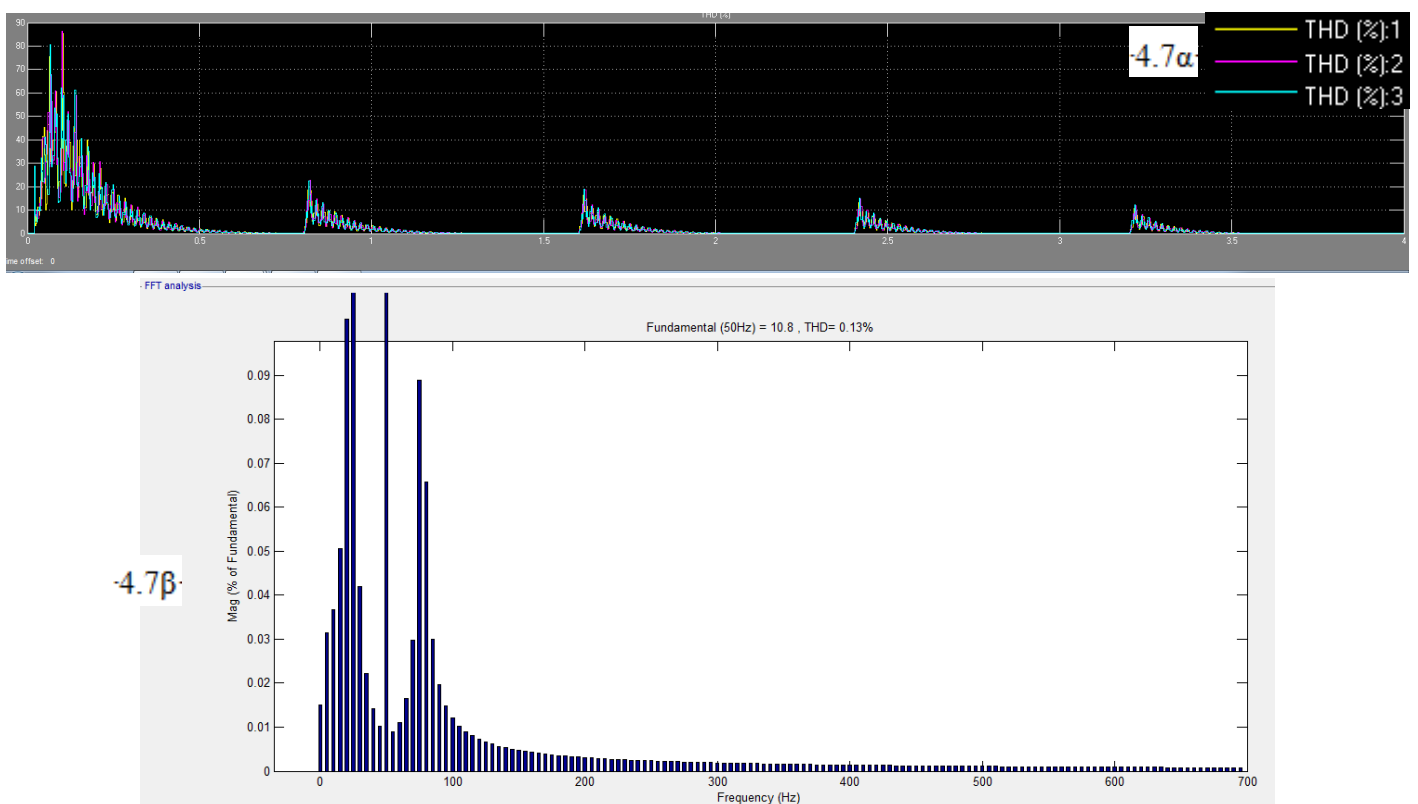
Στο σχήμα 4.5, στο πρώτο γράφημα, παρατηρείται η φαινομένη ισχύς που καταναλώνει ο κάθε κινητήρας στην διάρκεια του χρόνου. Όπως παρατηρείται, η συνολική ισχύς που καταναλώνει ο κινητήρας IE4 είναι χαμηλότερη και αυτό είναι φυσιολογικό εφόσον αυτός ο κινητήρας έχει καλύτερο συντελεστή ισχύος και καλύτερη απόδοση ισχύος. Όμοια εικόνα παρουσιάζει και η ενεργός ισχύς.

Σχήμα 4.5 εξηγήσεις και συμπεράσματα:

Είναι σαφές, ότι σε μια εφαρμογή κίνησης και όσον αφορά την διαστασιολόγηση της εφαρμογής, η συνολικά χαμηλότερη ισχύς κατανάλωσης και η μικρότερη άεργος ισχύς σημαίνει οικονομικότερη διαστασιολόγηση και λειτουργία.



Σχήμα 4.6 Γραφήματα που αφορούν 4.6α) τις αρμονικές έντασης που παράγονται από την λειτουργία του IE1 στην διάρκεια του χρόνου της προσομοίωσης και στο επόμενο γράφημα 4.6β) οι αρμονικές που παρουσιάζονται κατά την λειτουργία του στο ονομαστικό φορτίο.



Σχήμα 4.7 Γραφήματα που αφορούν 4.7α) τις αρμονικές έντασης που παράγονται από την λειτουργία του IE4 στην διάρκεια του χρόνου της προσομοίωσης και στο επόμενο γράφημα 4.7β) οι αρμονικές που παρουσιάζονται κατά την λειτουργία στο ονομαστικό φορτίο.

Σχήμα 4.6 και 4.7 παρατηρήσεις:

Οι αρμονικές που παράγονται εγγενώς από τους κινητήρες, εμφανίζονται περισσότερο κατά την μεταβατική κατάσταση της εκκίνησης και της εφαρμογής των διαφορετικών τιμών του φορτίου. Οι αρμονικές που εμφανίζονται κυρίως είναι ενδιάμεσες, κοντά στη θεμελιώδη συχνότητα.

Σχήμα 4.6 και 4.7 εξηγήσεις και συμπεράσματα:

Οι ασύγχρονες μηχανές παρουσιάζουν φαινόμενα αρμονικών, όμως σε χαμηλό ποσοστό όπως φαίνεται και κυρίως κάτω από ορισμένες συνθήκες λειτουργίας. Οι τιμές των αρμονικών που εμφανίστηκαν στην προσομοίωση είναι ελάχιστες, λόγω της ημιτονοειδούς τροφοδοσίας στον κάθε κινητήρα.

Πίνακες χαρακτηριστικών και μετρήσεων της προσομοίωσης

Τα χαρακτηριστικά των κινητήρων ενεργειακής απόδοσης IE1 και IE4 της προσομοίωσης, παρατίθενται παρακάτω, στον πίνακα 6 και στον πίνακα 7. Καταγράφονται οι τιμές που βρέθηκαν από την προσομοίωση της λειτουργίας των κινητήρων, σε συνάρτηση με την φόρτιση (σε ποσοστό επί του ονομαστικού φορτίου).

Πίνακας 6 Αποτελέσματα προσομοίωσης για τον κινητήρα 4kW με ενεργειακή Κλάση IE1

Κινητήρας 4kW με ενεργειακή Κλάση IE1							
Φορτίο %	Ισχύς Εξόδου (W)	Συντελεστής Ισχύος	Απόδοση %	THD %	Ροπή (Nm)	Ταχύτητα (rpm)	I_{in} (A _{rms})
25	1120	0,368	83	0,03	7,24	1478	5,25
50	2123	0,591	86	0,05	13,95	1455	6,015
75	3090	0,73	85	0,02	20,6	1431	7,18
100	4015	0,81	82,5	0,03	27,3	1405	8,66

Πίνακας 7 Αποτελέσματα προσομοίωσης για τον κινητήρα 4kW με ενεργειακή Κλάση IE4

Κινητήρας 4kW με ενεργειακή Κλάση IE4							
Φορτίο %	Ισχύς Εξόδου (W)	Συντελεστής Ισχύος	Απόδοση %	THD %	Ροπή (Nm)	Ταχύτητα (rpm)	I_{in} (A _{rms})
25	1075	0,395	92,2	0,07	6,9	1489	4,277
50	2072	0,629	93,3	0,09	13,4	1477	5,088
75	3055	0,79	92,5	0,01	19,9	1466	6,248
100	4015	0,83	91,2	0,13	26,39	1455	7,626

Οι κινητήρες που χρησιμοποιήθηκαν στην προσομοίωση παρουσιάζουν συμπεριφορά παρόμοια με κινητήρες αντίστοιχων χαρακτηριστικών μεγάλου κατασκευαστή, επιβεβαιώνοντας τον σχεδιασμό που έγινε στο πρόγραμμα Matlab. Οι τιμές που προκύπτουν και συμπληρώνονται παρακάτω στον πίνακα 8 είναι οι ονομαστικές που εμφανίστηκαν στην προσομοίωση, καθώς επίσης αναφέρονται και τα αντίστοιχα στοιχεία για όμοιους κινητήρες, που βρίσκονται από κατάλογο μεγάλου κατασκευαστή ηλεκτρικών μηχανών .

Πίνακας 8 Ονομαστικά χαρακτηριστικά των κινητήρων της προσομοίωσης και τα πραγματικά χαρακτηριστικά τα οποία παρατίθενται από κατάλογο μεγάλου κατασκευαστή μηχανών

	Κινητήρας IE1		Κινητήρας IE4	
	Μπλοκ Simulink	Αρχείο Κατασκευστή	Μπλοκ Simulink	Αρχείο Κατασκευστή
Ισχύς (KW/Hp)	4 / 5,5	4 / 5,5	4 / 5,5	4 / 5,5
Ταχύτητα (rpm)	1405	1405	1455	1470
Ολίσθηση %	6,33	6,33	3,0	2,0
Ονομαστική ροπή (Nm)	27,24	27,2	26,39	26,0
Ονομαστικό ρεύμα (A)	8,66	8,58	7,62	7,73
Ρεύμα χωρίς φορτίο (A)	5,0	4,80	3,98	3,75
Ροπή αδράνειας (kg.m ²)	0,011	0,0105	0,015	--- (IE4>IE1)
Συντελεστής Ισχύος (cosφ)	0,81	0,81	0,83	0,82
Απόδοση %	82,5	83,1	91,2	91,1

Μετά την προσομοίωση επαλήθευσης, ακολουθεί το δεύτερο σκέλος της προσομοίωσης όπου θα κριθούν οι συμπεριφορές των κινητήρων, συζευγμένοι με τους τέσσερις χαρακτηριστικούς τύπους φορτίων, οι οποίοι αναφέρθηκαν στην παράγραφο 3.2 Το κάθε φορτίο έχει διαφορετική χαρακτηριστική καμπύλη ροπής.

4.2 Προσομοίωση εφαρμογών κίνησης , διαφορετικά σενάρια με σύγκριση κινητήρων ίδιας ισχύος 4kW και διαφορετικής ενεργειακής κλάσης

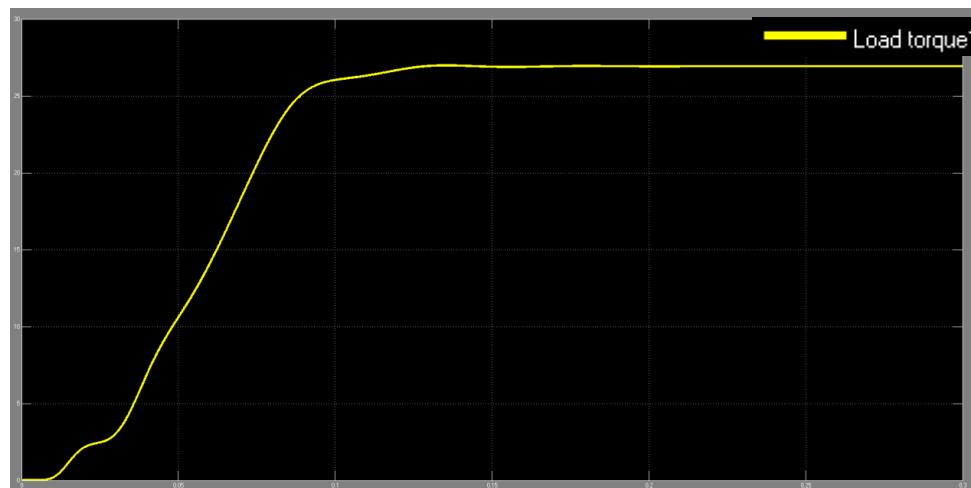
Η αναφορά σχετικά με την μεθοδολογία της σύγκρισης έχει γίνει στην παράγραφο 3.4. Σε συνέχεια της αναφοράς βρίσκονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης.

4.2.1 1^η Εφαρμογή αύξηση της ροπής αναλόγως με το τετράγωνο των στροφών (φυγοκεντρικός ανεμιστήρας)

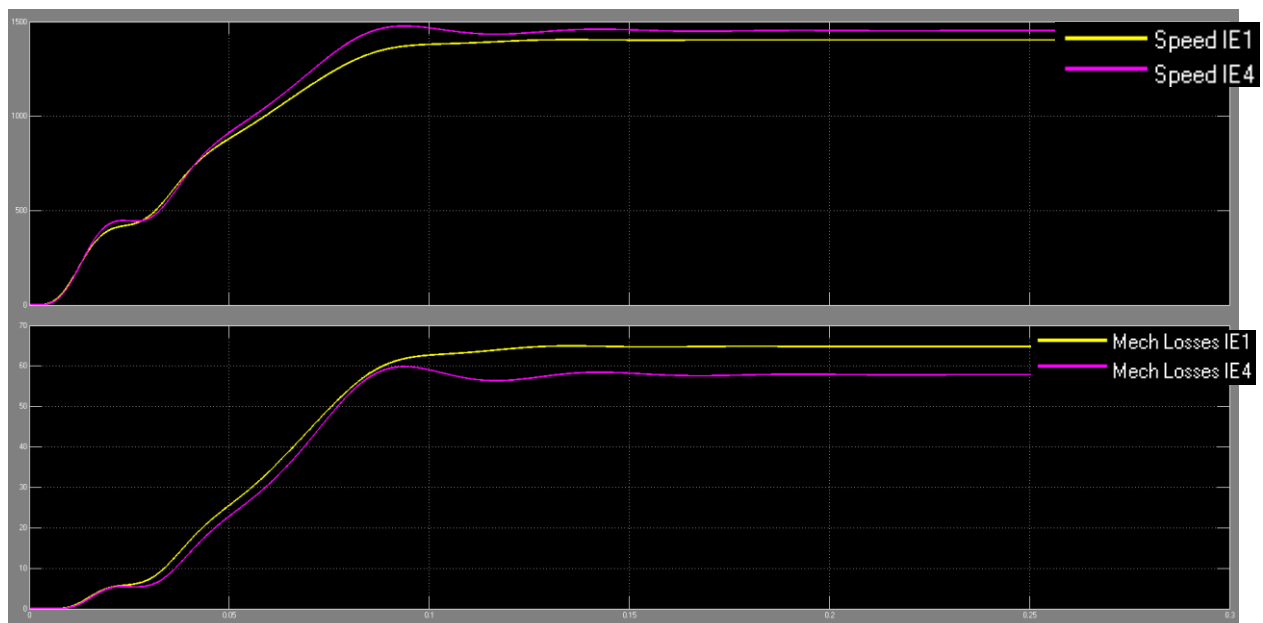
Παρακάτω δίνονται σχήματα με τα γραφήματα που προκύπτουν για φορτίο με αύξηση της ροπής αναλόγως με το τετράγωνο των στροφών, στην περίπτωση φορτίων όπως ο φυγοκεντρικός ανεμιστήρας.

Η ροπή είναι ανάλογη του τετραγώνου των στροφών, $T_L = f(n^2)$ και η ισχύς είναι ανάλογη του κύβου των στροφών $P_L = f(n^3)$

Ο συνολικός χρόνος της προσομοίωσης ο οποίος βρίσκεται σε όλα τα παρακάτω γραφήματα στον οριζόντιο άξονα είναι 0,3s.



Σχήμα 4.8 Γράφημα της καμπύλης της ροπής φορτίου για τον φυγοκεντρικό ανεμιστήρα. Το φορτίο έχει την μέγιστη ροπή του στις ονομαστικές στροφές του κάθε κινητήρα.



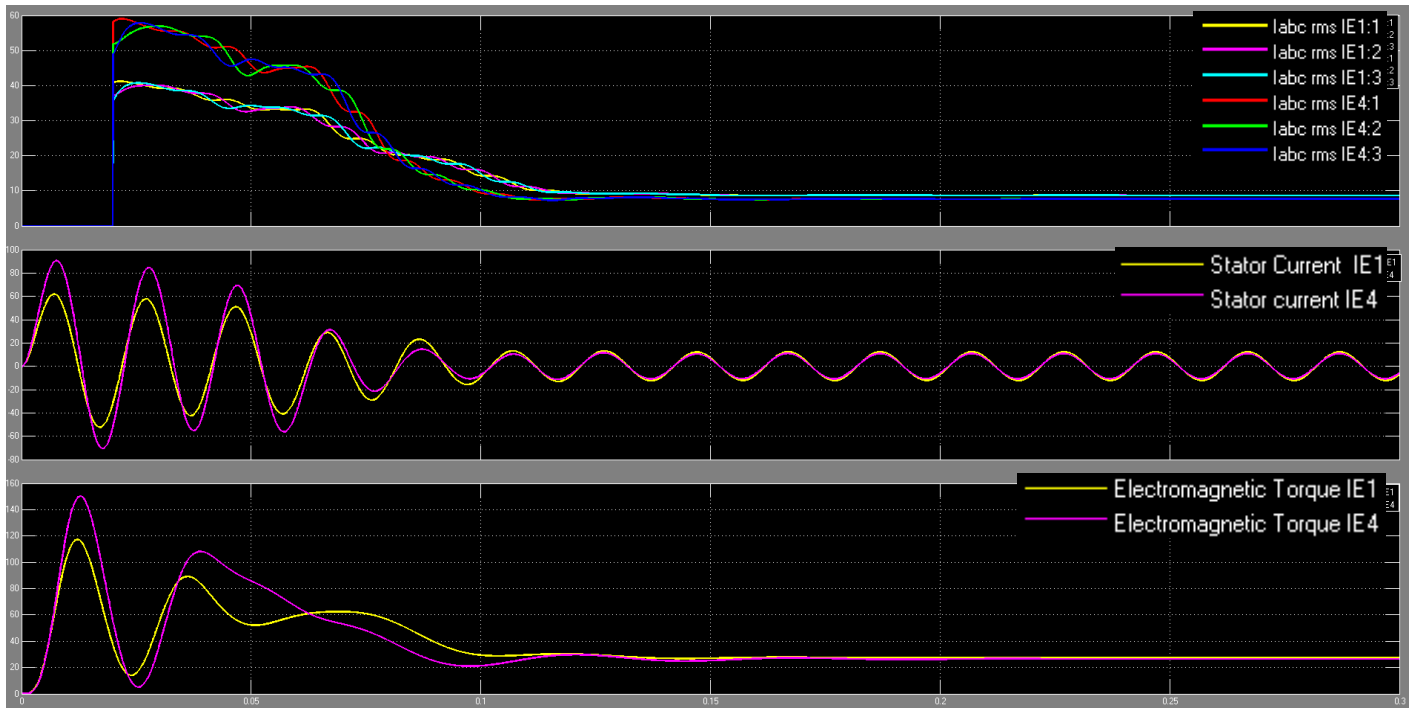
Σχήμα 4.9 Συγκριτικό γράφημα της καμπύλης της ταχύτητας για κάθε κινητήρα και το συγκριτικό γράφημα των μηχανικών απωλειών.

Σχήμα 4.9 παρατηρήσεις:

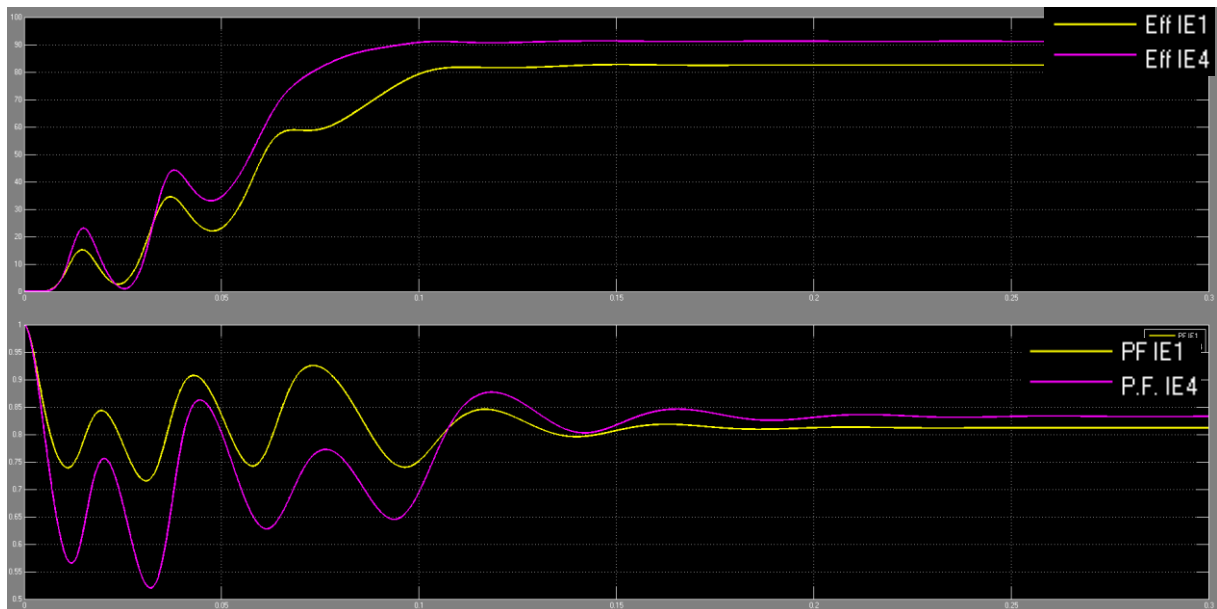
Ο κινητήρας ενεργειακής κλάσης IE4 φτάνει την ονομαστική του ταχύτητα συντομότερα σε σχέση με τον IE1.

Σχήμα 4.9 εξηγήσεις και συμπεράσματα:

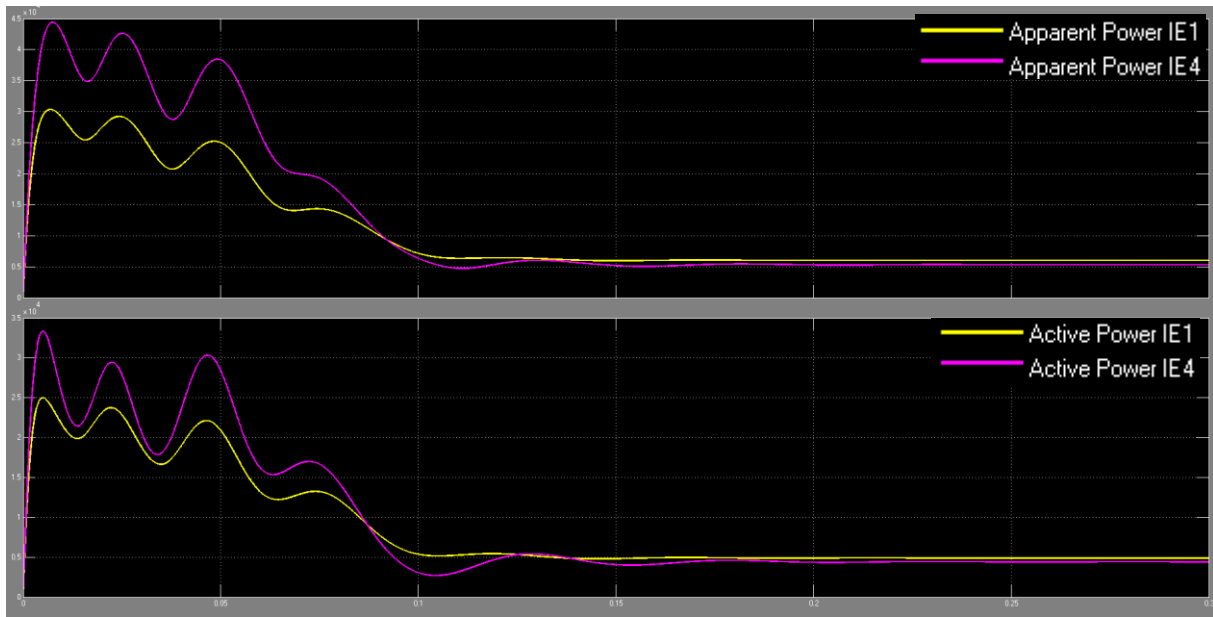
Είναι λογικό λόγω των χαμηλότερων απωλειών που έχει, γνωρίζοντας ότι όσο χαμηλότερες αντιδράσεις έχει μια μηχανή τόσο μεγαλύτερη είναι η μέγιστη ροπή που μπορεί να επιτευχθεί. Συγκεκριμένα, βάσει των τιμών των ανά φάση ισοδύναμων κυκλωμάτων όπως παρουσιάστηκαν στην παράγραφο 3.4.1 στο σχήμα 3.12, η χαμηλότερη τιμή της ωμικής αντίστασης του δρομέα του κινητήρα IE4 συνεπάγεται μεγαλύτερη μέγιστη ροπή και μεγαλύτερη ονομαστική ταχύτητα.



Σχήμα 4.10 Συγκριτικά γραφήματα της καμπύλης του ρεύματος I_{rms} γραμμής, του ρεύματος από κορυφή σε κορυφή του στάτη και της αποδιδόμενης ροπής για κάθε κινητήρα σε σχέση με τον χρόνο.



Σχήμα 4.11 Συγκριτικά γραφήματα της καμπύλης απόδοσης και τον συντελεστή ισχύος για κάθε κινητήρα σε σχέση με τον χρόνο.

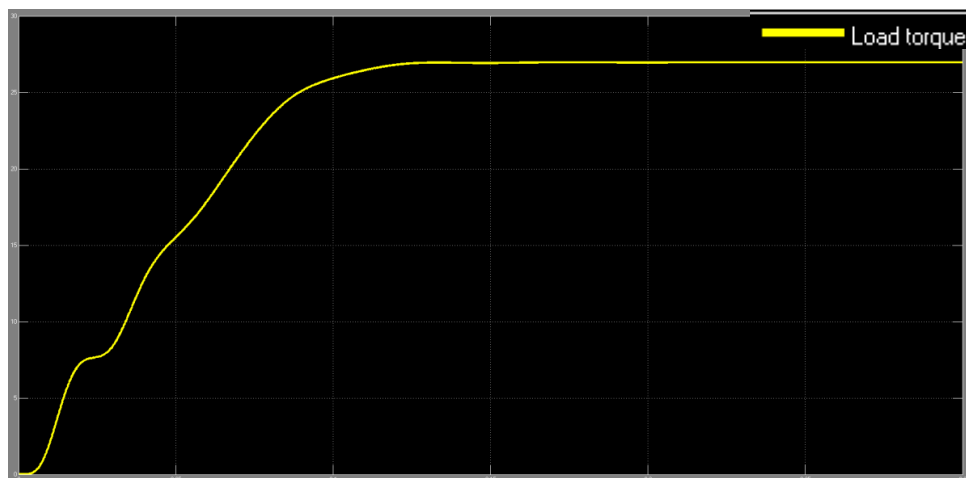


Σχήμα 4.12 Συγκριτικά γραφήματα της καμπύλης για την φαινόμενη ισχύ και την πραγματική που καταναλώνει ο κάθε κινητήρας σε σχέση με τον χρόνο.

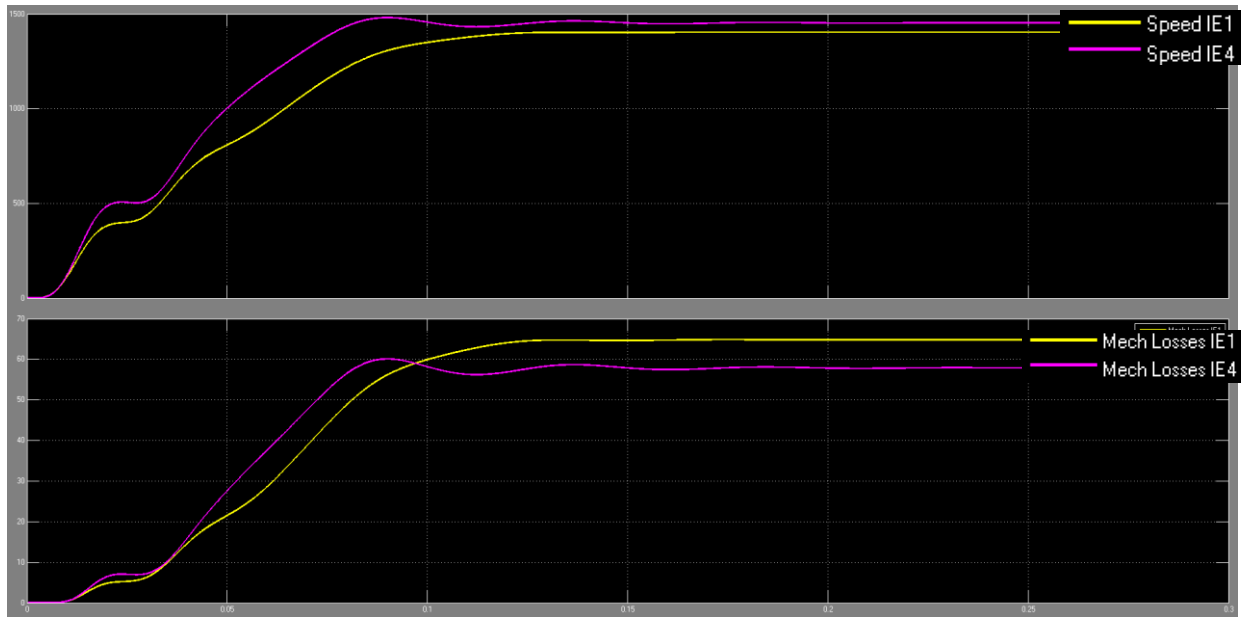
4.2.2 2^η Εφαρμογή γραμμική αύξηση της ροπής (αντλία παραγωγής πολτού)

Παρακάτω δίνονται σχήματα με τα γραφήματα που προκύπτουν για για φορτίο με γραμμική αύξηση της ροπής, στην περίπτωση φορτίων όπως μια αντλία παραγωγής πολτού. Η ροπή είναι ανάλογη των στροφών $T_L = f(n)$ και η ισχύς του φορτίου είναι ανάλογη του τετραγώνου των στροφών $P_L = f(n^2)$.

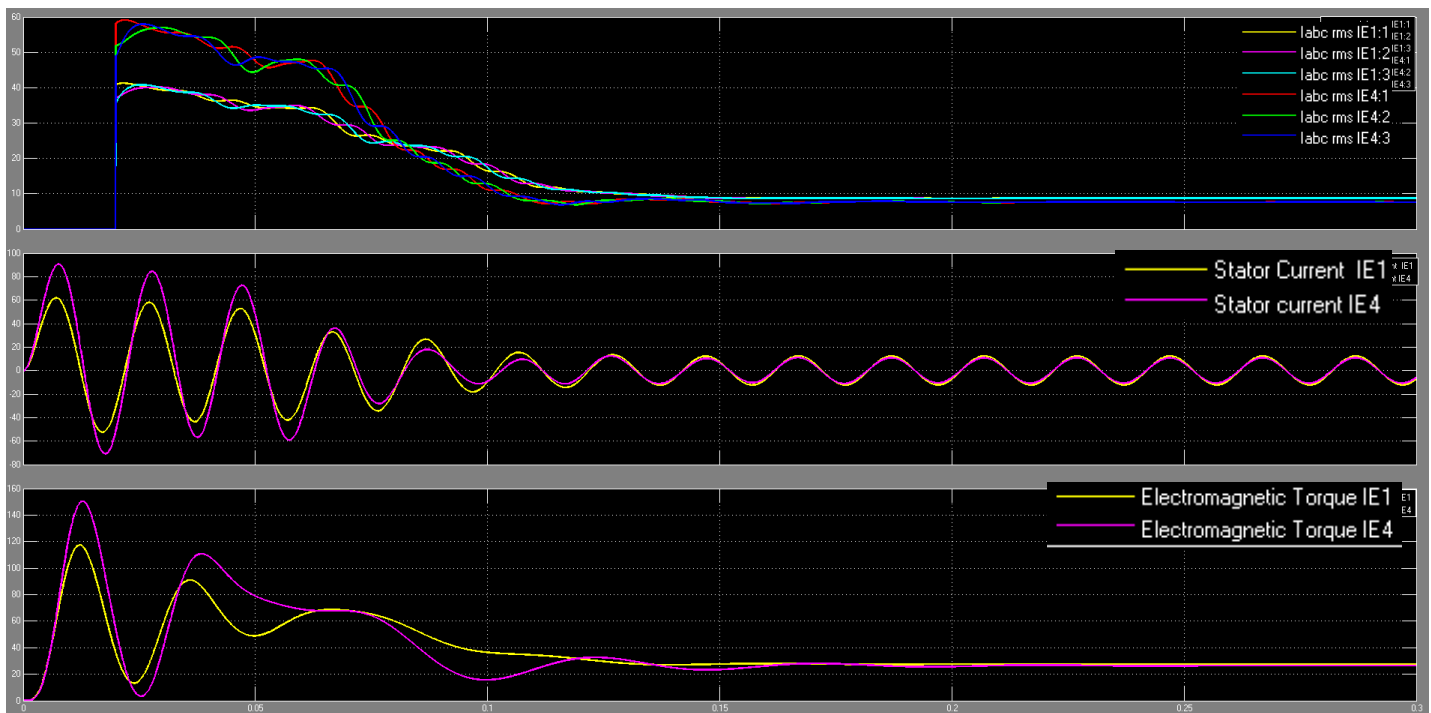
Ο συνολικός χρόνος της προσομοίωσης ο οποίος βρίσκεται σε όλα τα παρακάτω γραφήματα στον οριζόντιο άξονα είναι 0,3s.



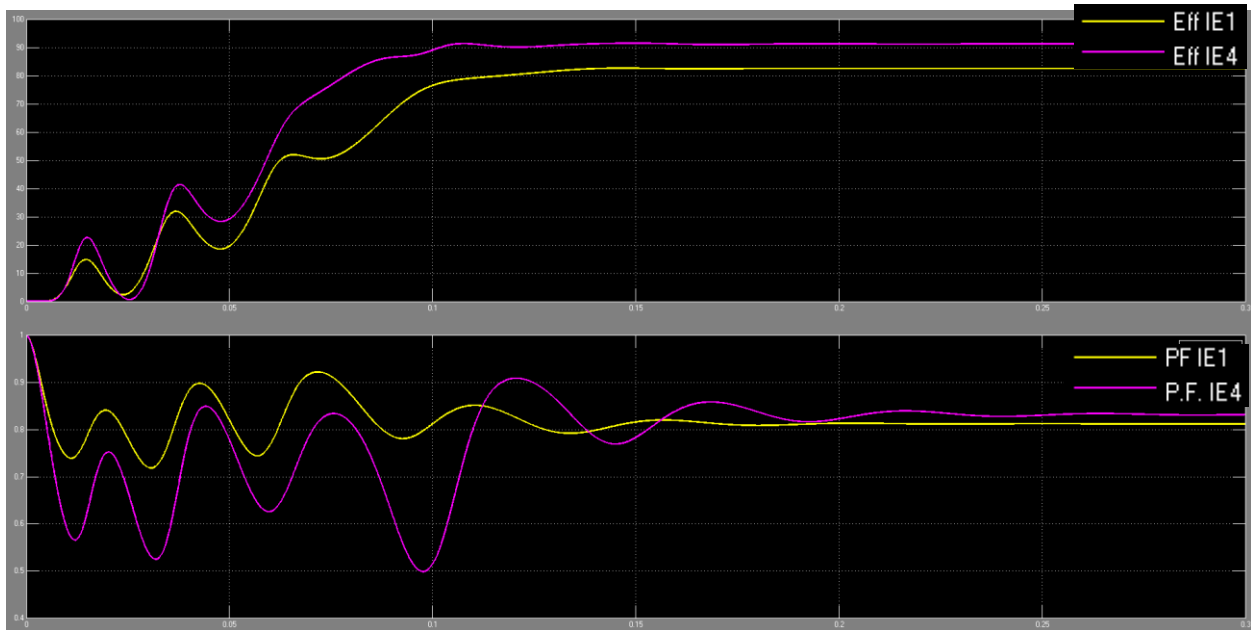
Σχήμα 4.13 Γράφημα της καμπύλης ροπής φορτίου για την αντλία πολτού σε σχέση με τον χρόνο. Το φορτίο έχει την μέγιστη ροπή του στις ονομαστικές στροφές του κάθε κινητήρα.



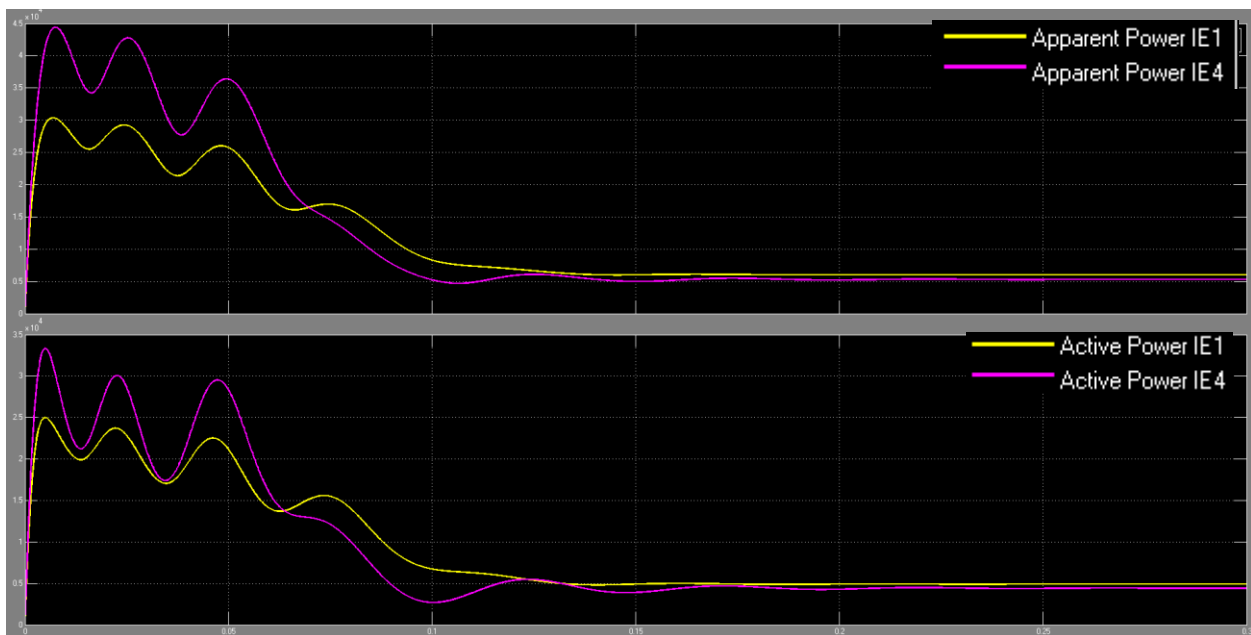
Σχήμα 4.14 Συγκριτικό γράφημα της καμπύλης της ταχύτητας για κάθε κινητήρα και το συγκριτικό γράφημα των μηχανικών απωλειών σε σχέση με τον χρόνο.



Σχήμα 4.15 Συγκριτικά γραφήματα της καμπύλης του ρεύματος I_{rms} γραμμής, του ρεύματος από κορυφή σε κορυφή του στάτη και της αποδιδόμενης ροπής για κάθε κινητήρα σε σχέση με τον χρόνο



Σχήμα 4.16 Συγκριτικά γραφήματα της καμπύλης του συντελεστή απόδοσης και του συντελεστή ισχύος για κάθε κινητήρα σε σχέση με τον χρόνο



Σχήμα 4.17 Συγκριτικά γραφήματα της καμπύλης για την φαινόμενη ισχύ και την πραγματική που καταναλώνει ο κάθε κινητήρας σε σχέση με τον χρόνο

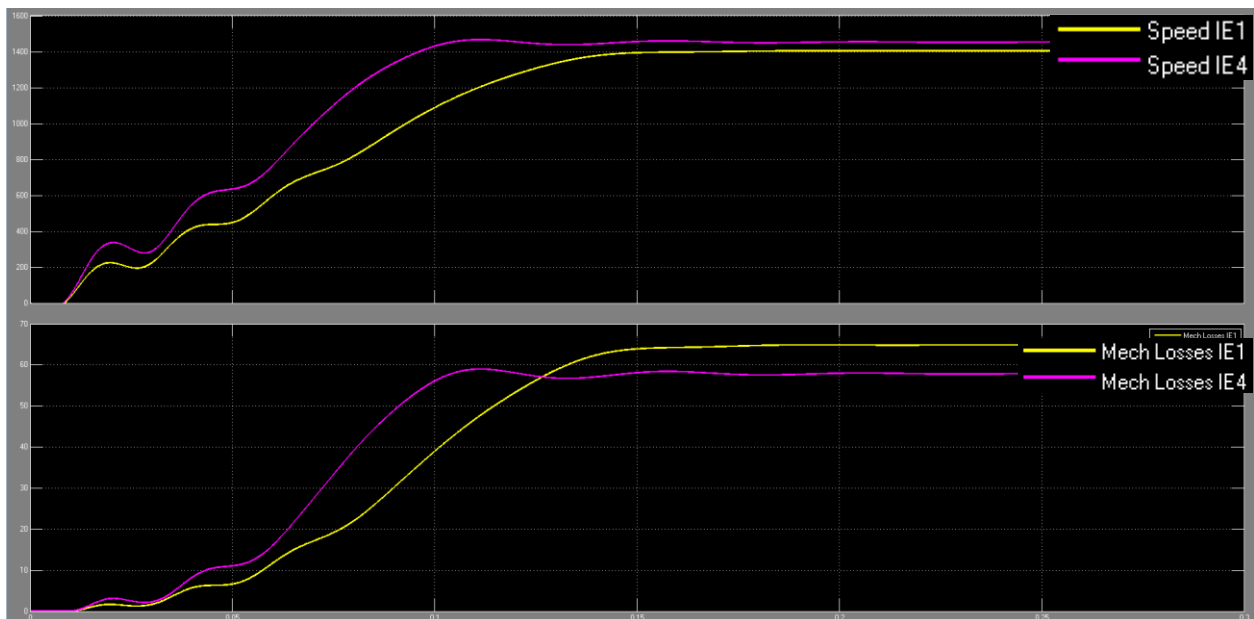
4.2.3 3^η Εφαρμογή σταθερή ροπή ανεξαρτήτως από την ταχύτητα (κοχλιωτός συμπιεστής)

Παρακάτω δίνονται σχήματα με τα γραφήματα που προκύπτουν για φορτίο με σταθερή ροπή, στην περίπτωση φορτίων όπως ο κοχλιωτός συμπιεστής. Η ροπή είναι σταθερή και ανεξάρτητη των στροφών $T_L = \text{σταθερό}$ και η ισχύς είναι ανάλογη της ταχύτητας $P_L = f(n)$.

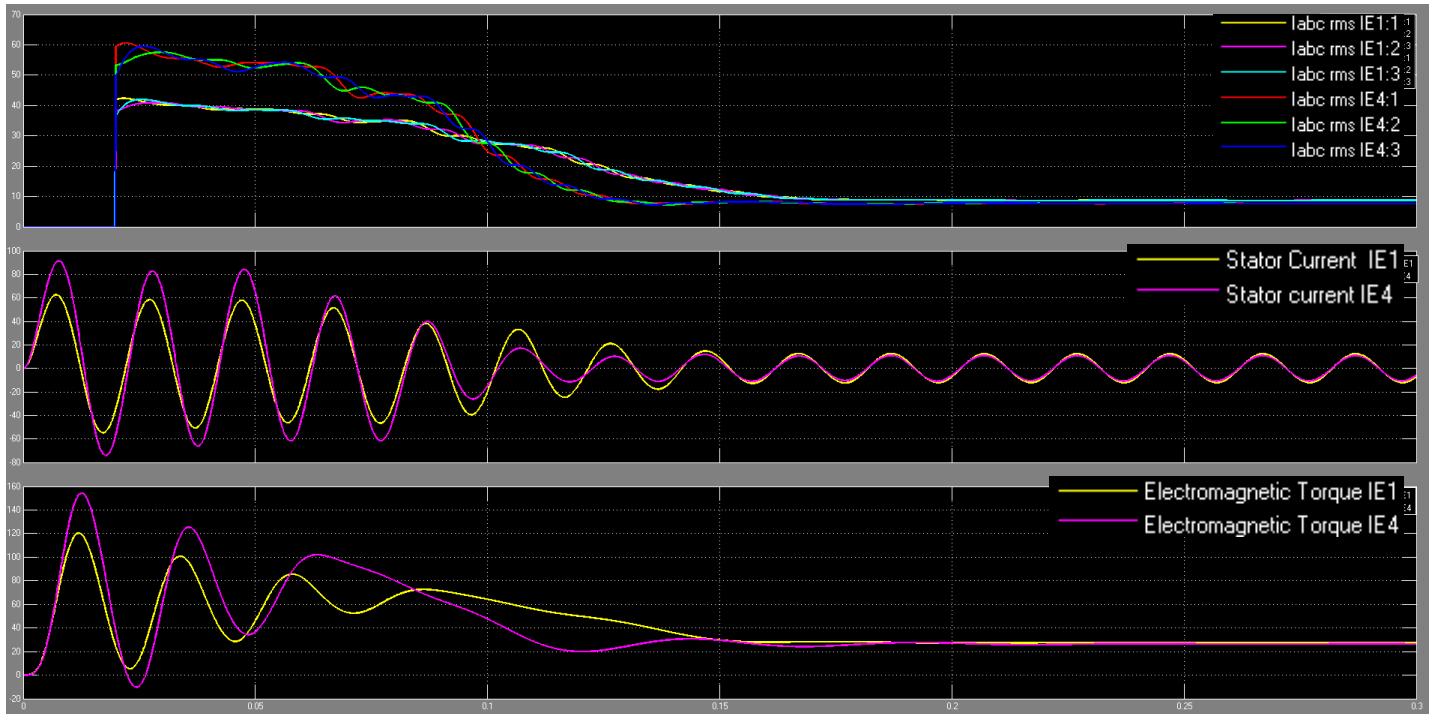
Ο συνολικός χρόνος της προσομοίωσης ο οποίος βρίσκεται σε όλα τα παρακάτω γραφήματα στον οριζόντιο άξονα είναι 0,3s.



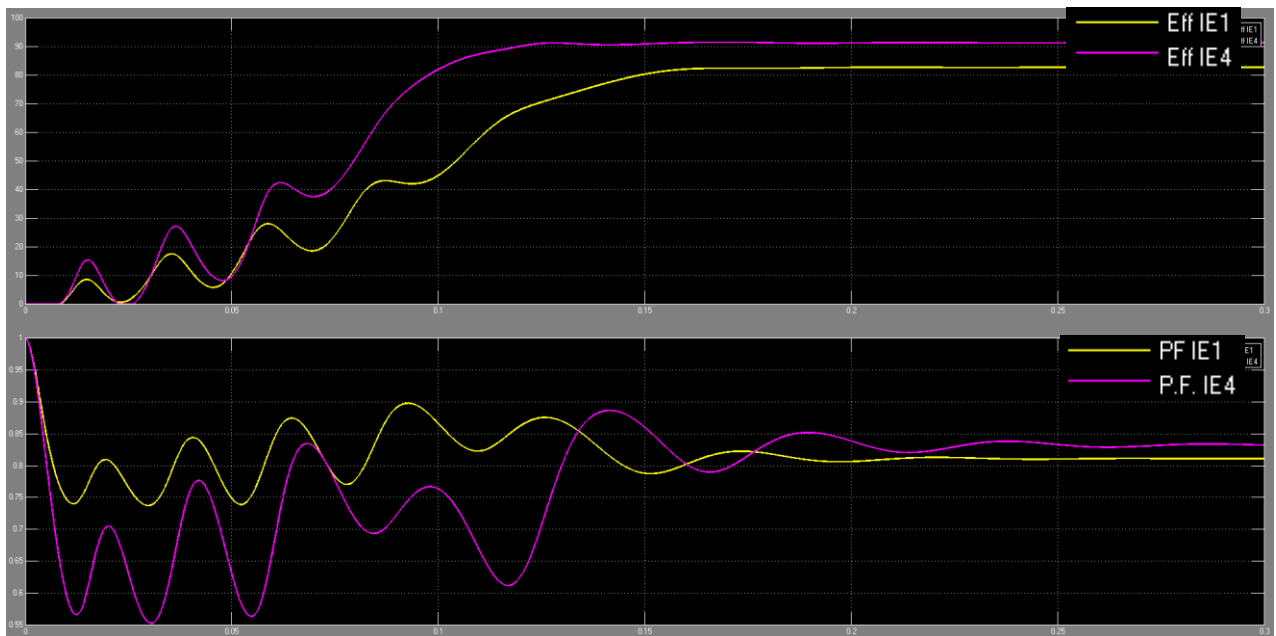
Σχήμα 4.18 Δίνεται το γράφημα της καμπύλης ροπής φορτίου σε σχέση με τον χρόνο για τον συμπιεστή.



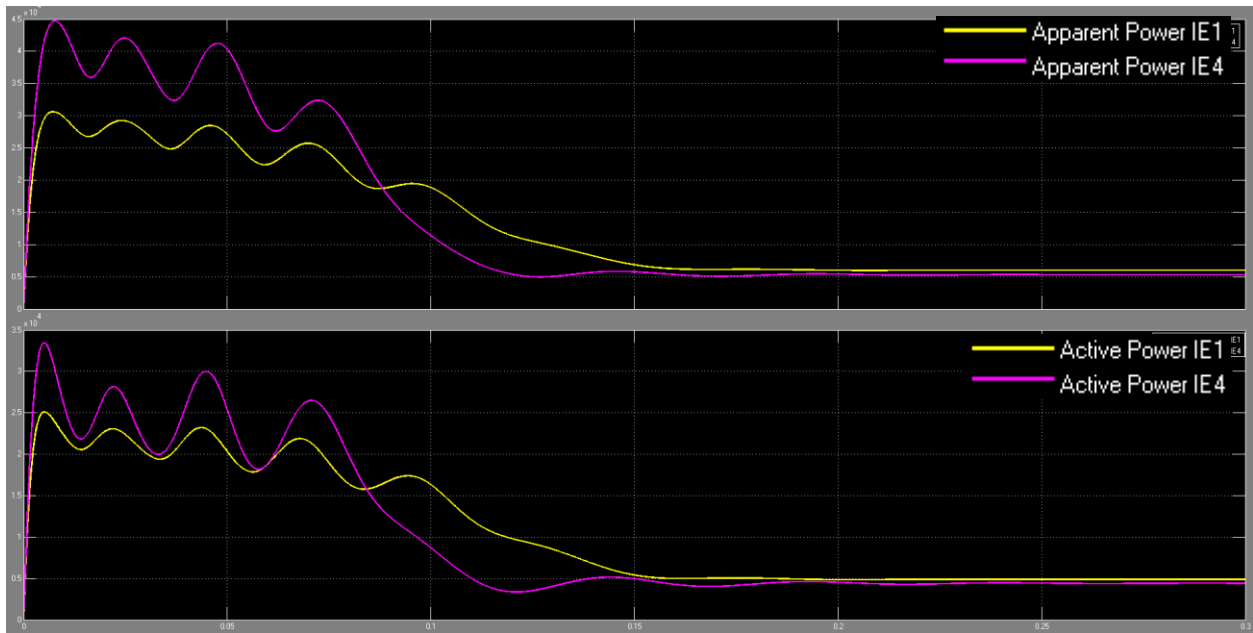
Σχήμα 4.19 Συγκριτικό γράφημα της καμπύλης της ταχύτητας για κάθε κινητήρα και το συγκριτικό γράφημα των μηχανικών απωλειών σε σχέση με τον χρόνο.



Σχήμα 4.20 Συγκριτικά γραφήματα της καμπύλης του ρεύματος I_{rms} γραμμής, του ρεύματος από κορυφή σε κορυφή του στάτη και της αποδιδόμενης ροπής για κάθε κινητήρα σε σχέση με τον χρόνο



Σχήμα 4.21 Συγκριτικά γραφήματα της καμπύλης απόδοσης και τον συντελεστή ισχύος για κάθε κινητήρα σε σχέση με τον χρόνο

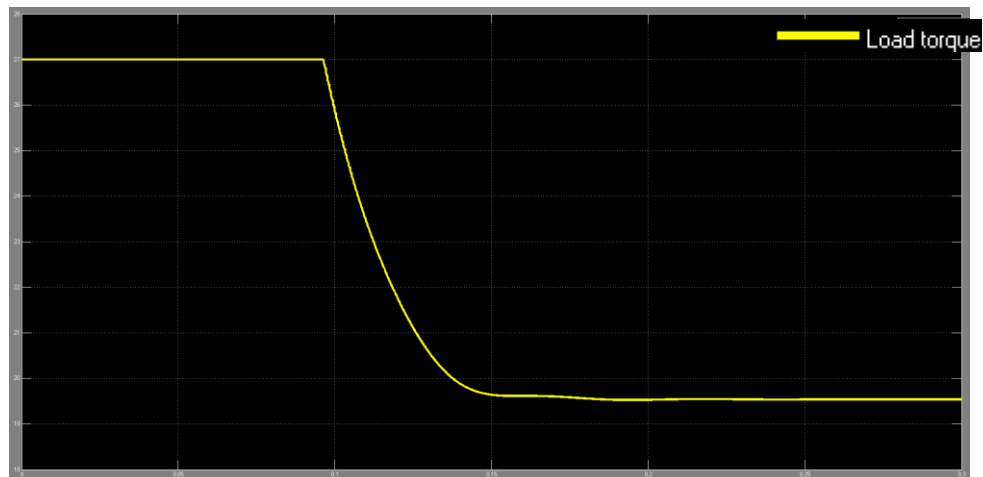


Σχήμα 4.22 Συγκριτικά γραφήματα της καμπύλης για την φαινόμενη ισχύ και την πραγματική που καταναλώνει ο κάθε κινητήρας σε σχέση με τον χρόνο

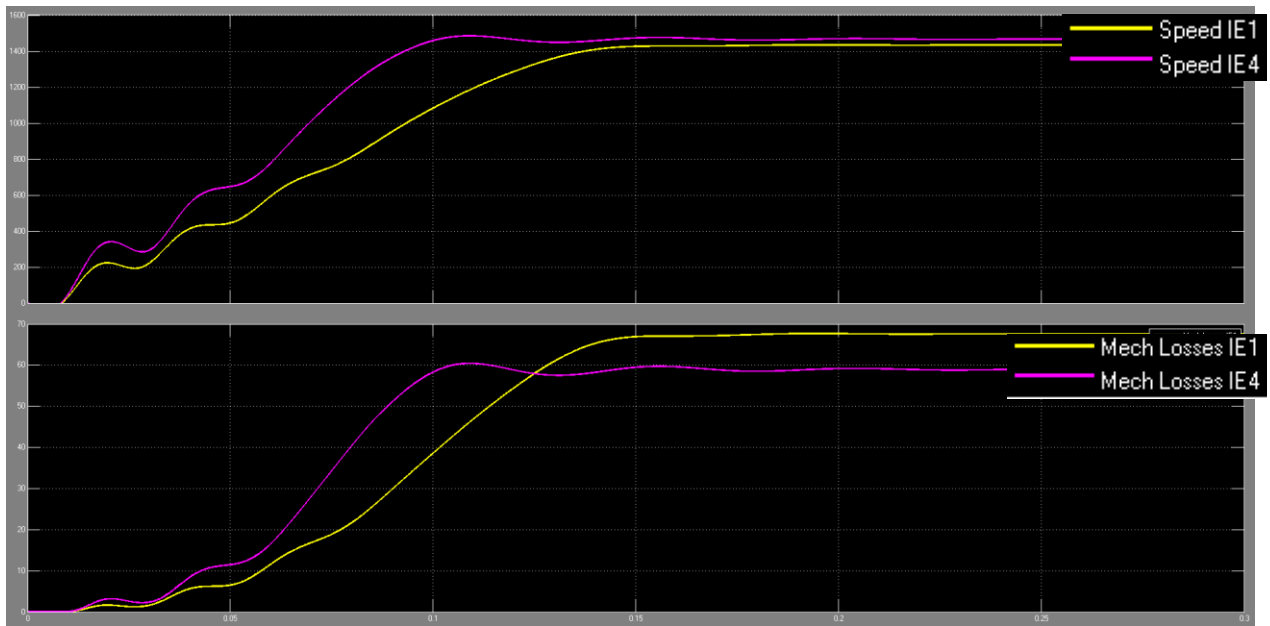
4.2.4 4^η Εφαρμογή, μείωση της ροπής συναρτήσει των στροφών (περιστροφικός μηχανισμός κοπής)

Παρακάτω δίνονται σχήματα με τα γραφήματα που προκύπτουν για φορτίο με μείωση της ροπής συναρτήσει των στροφών, στην περίπτωση φορτίων όπως ο περιστροφικός μηχανισμός κοπής. Η ροπή είναι αντιστρόφως ανάλογη των στροφών. $T_L = f\left(\frac{1}{n}\right)$ και η ισχύς είναι σταθερή $P_L = \text{σταθερό}$

Ο συνολικός χρόνος της προσομοίωσης ο οποίος βρίσκεται σε όλα τα παρακάτω γραφήματα στον οριζόντιο άξονα είναι 0,3s.

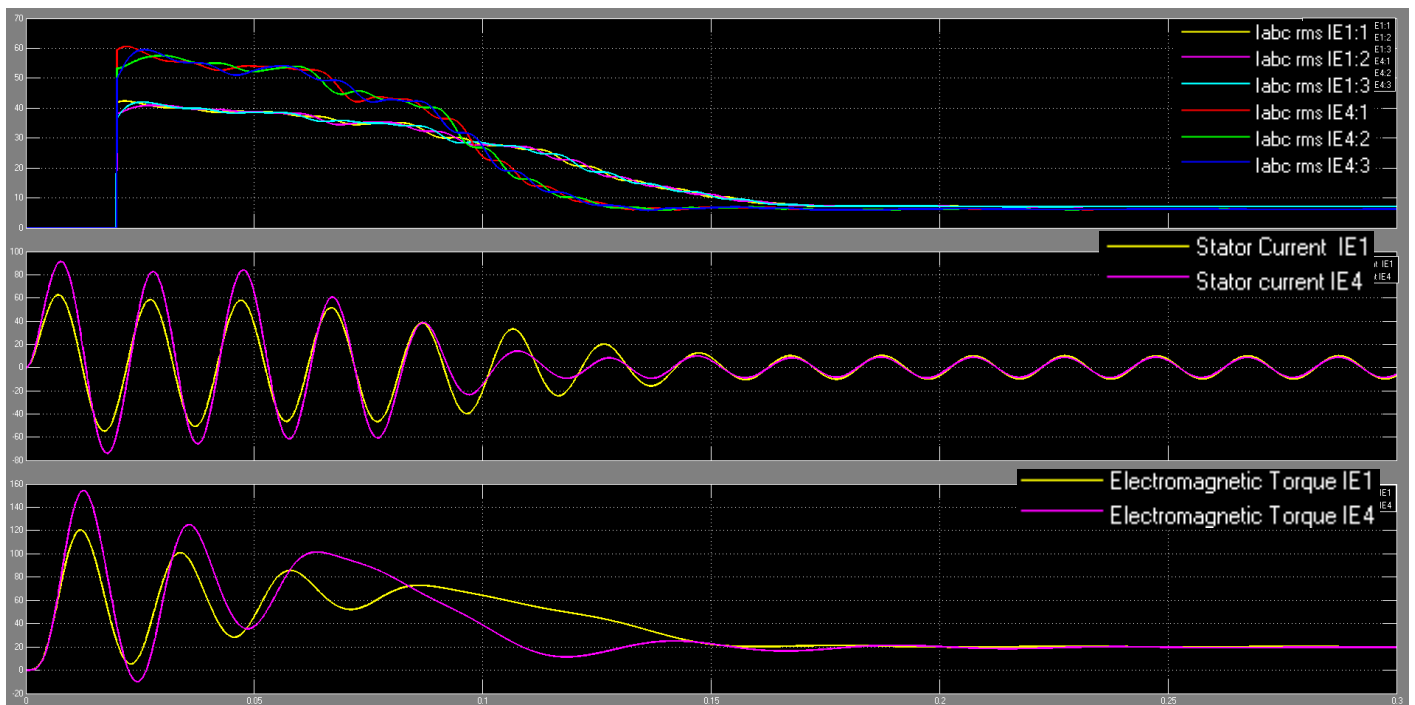


Σχήμα 4.23 Γράφημα της καμπύλης ροπής φορτίου σε σχέση με τον χρόνο για τον περιστροφικό μηχανισμό κοπής.

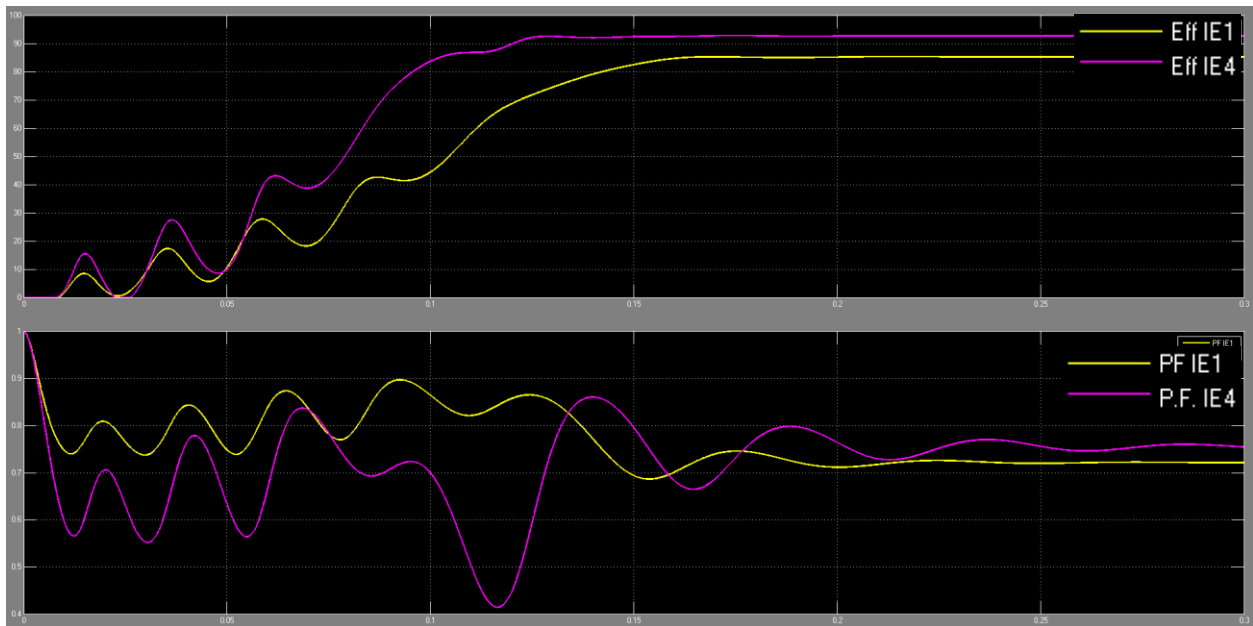


Σχήμα 4.24 Συγκριτικό γράφημα της καμπύλης της ταχύτητας για κάθε κινητήρα και το συγκριτικό γράφημα των μηχανικών απωλειών σε σχέση με τον χρόνο.

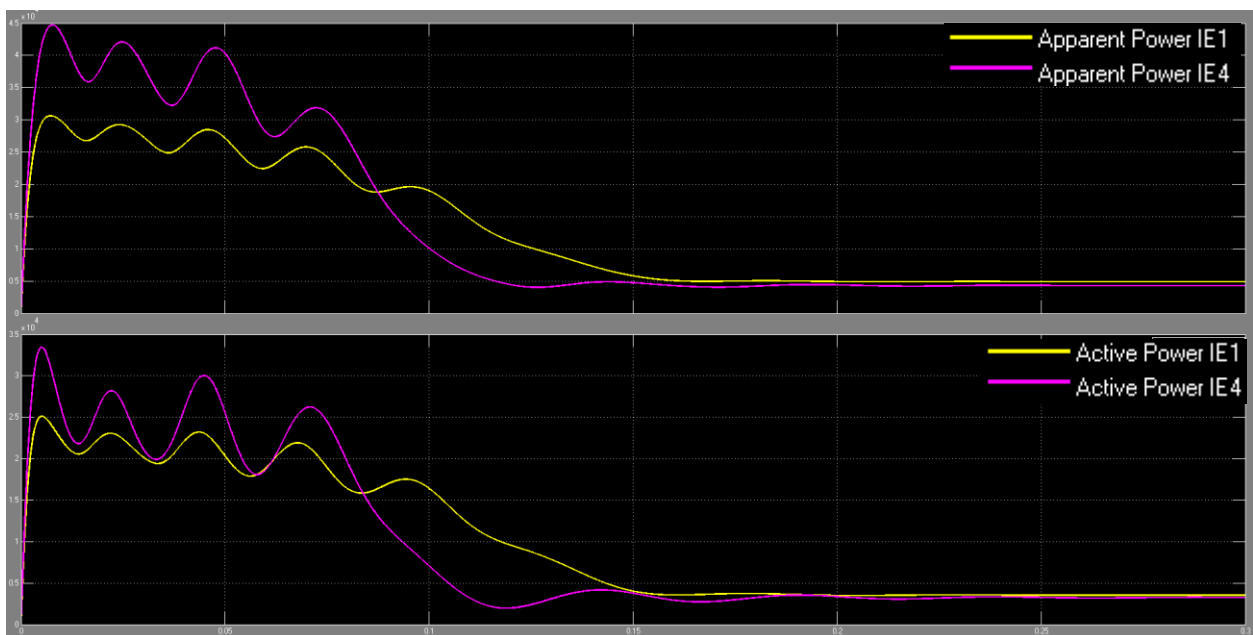
Ο κινητήρας ενεργειακής κλάσης IE4 φτάνει την ονομαστική του ταχύτητα συντομότερα σε σχέση με τον IE1 ο οποίος έχει μεγαλύτερη ταλάντωση ώπου να επιτευχθεί η ονομαστική του τιμή.



Σχήμα 4.25 Συγκριτικά γραφήματα της καμπύλης του ρεύματος I_{rms} γραμμής, του ρεύματος από κορυφή σε κορυφή του στάτη και της αποδιδόμενης ροπής για κάθε κινητήρα σε σχέση με τον χρόνο



Σχήμα 4.26 Συγκριτικά γραφήματα της καμπύλης απόδοσης και τον συντελεστή ισχύος για κάθε κινητήρα σε σχέση με τον χρόνο



Σχήμα 4.27 Συγκριτικά γραφήματα της καμπύλης για την φαινόμενη ισχύ και την πραγματική που καταναλώνει ο κάθε κινητήρας σε σχέση με τον χρόνο

4.2.5 Παρατηρήσεις και συμπεράσματα σε σχέση με την σύγκριση διαφορετικής ενεργειακής κλάσης κινητήρων για διαφορετικούς τύπους φορτίων

Σε κάθε περίπτωση φαίνεται η ανωτερότητα του κινητήρα ενεργειακής κλάσης IE4 ο οποίος λειτουργεί με ανώτερο συντελεστή ισχύος, χαμηλότερη κατανάλωση πραγματικής και άεργου ισχύος και έχοντας λιγότερες απώλειες σε όλο το εύρος λειτουργίας του. Από τις λιγότερες μηχανικές απώλειες, συμπεραίνεται η καλύτερη μηχανολογική του κατασκευή αφού αυτές οι

απώλειες συνδέονται με τριβές. Είναι ξεκάθαρο ότι αποτελεί αναβάθμιση για τον εξοπλισμό μιας μηχανής η αντικατάσταση ενός χαμηλής απόδοσης κινητήρα IE1 με κάποιον ανώτερης απόδοσης IE4, στους τομείς της ενεργειακής αναβάθμισης, του κόστους λειτουργίας και της αξιοπιστίας.

Εξαίρεση στην ανωτερότητα του κινητήρα ενεργειακής κλάσης IE4 αποτελεί το υψηλότερο ρεύμα αιχμής και εκκίνησης. Αυτό είναι ένα αρνητικό σημείο αναφοράς για τους ανώτερης ενεργειακής κλάσης κινητήρες που όπως εξηγήθηκε παραπάνω φυσιολογικά προκύπτει ως αποτέλεσμα των χαμηλότερων αντιστάσεων και αντιδράσεων του στάτη και του δρομέα. Αυτό το «μειονέκτημα» αποτελεί τεχνικό χαρακτηριστικό τους και μπορεί να διορθωθεί με κατάλληλη διάταξη εκκίνησης και ελέγχου, όταν ο έλεγχος κρίνεται σκόπιμος. Αυτή η διάταξη είναι μια μονάδα ελέγχου στροφών η οποία αναδεικνύει την λειτουργία ενός κινητήρα υψηλής απόδοσης.

Παρατηρώντας τον χαρακτήρα των φορτίων και τις εξισώσεις ροπής και ισχύος που τα χαρακτηρίζουν, τα φορτία με σταθερή ή μεταβλητή ροπή έχουν περιθώριο βελτίωσης του ελέγχου και της απόδοσής τους σε ένα σύστημα εξοικονομώντας ενέργεια και κόστος. Αντίθετα, στην περίπτωση του φορτίου με τα χαρακτηριστικά του περιστροφικού μηχανισμού κοπής, δεδομένου ότι η ισχύς που απαιτείται από ένα φορτίο σταθερής ισχύος παραμένει ίδια ανεξάρτητα από τις απαιτήσεις ροπής ή την ταχύτητα της λειτουργίας, δεν υπάρχει περιθώριο άλλης αναβάθμισης, εκτός της αντικατάστασής του κινητήρα χαμηλής ενεργειακής απόδοσης, με άλλον κατάλληλης διαστασιολόγησης και ανώτερης ενεργειακής απόδοσης. Ο έλεγχος της ταχύτητας στην συγκεκριμένη περίπτωση ενδεχομένως να επηρέαζε αρνητικά την αποτελεσματικότητα της λειτουργίας του. Οι μηχανισμοί αυτοί δουλεύουν σταθερά σε συγκεκριμένες υψηλές στροφές κοντά στις ονομαστικές του κινητήρα, αυξομειώνοντας αυτές μόνο λόγω του φορτίου κατά ελάχιστο και με αντίστοιχη αυξομείωση της ροπής ώστε πάντα η συνολική ισχύς απόδοσης να διατηρείται σταθερή.

4.2.6 Μελέτη εξοικονόμησης ενέργειας και κόστους στην περίπτωση χρήσης των επαγωγικών κινητήρων

Ακολούθως εξετάζεται η εφαρμογή με κινητήρα 4kW ο οποίος λειτουργεί υπό πλήρες φορτίο με τυποποιημένη λειτουργία S1 και εναλλακτικά με τυποποιημένη λειτουργία S3 ετησίως.

Στην περίπτωση της συνεχούς λειτουργίας S1, λειτουργεί, 24 ώρες/ημέρα, με υπολογισμό ημερών 5 ημέρες/εβδομάδα, για τις 52 εβδομάδες του έτους άρα το σύνολο 6240 ώρες/έτος.

Στην περίπτωση της περιοδικής λειτουργίας S3, λειτουργεί, 24 ώρες/ημέρα, για υπολογισμό 5 ημέρες/εβδομάδα, για τις 52 εβδομάδες του έτους, με χρόνο φόρτισης 25% /h άρα το σύνολο 6240 ώρες/έτος.

Στην εφαρμογή θα συγκριθεί η απόδοση του συστήματος για περίπτωση χρήσης κινητήρα ενεργειακής κλάσης IE1 με αντίστοιχο κλάσης IE4.

- **Οι κινητήρες θα συγκριθούν για συνεχή λειτουργία S1, κατά το χρονικό διάστημα ενός έτους βρίσκοντας την πραγματική ενέργεια που καταναλώνουν:**

Η περίπτωση χρήσης κινητήρα ενεργειακής κλάσης IE1

$$P_L = 4.000W * \left(\frac{1}{0,825}\right) = 4848,48 W \quad (0,825 \text{ ο συντελεστής απόδοσης})$$

Ετήσιο W_L για την περίπτωση του κινητήρα ενεργειακής κλάσης IE4,

$$W_L / \text{έτος} = 4848,48 \text{ W} * 6240 \text{ h} / \text{έτος} = 30254,515 \text{ KWh} / \text{έτος}$$

Η περίπτωση χρήσης κινητήρα ενεργειακής κλάσης IE4:

$$P_L = 4.000\text{W} * \left(\frac{1}{0,912}\right) = 4385,96 \text{ W} \quad (0,912 \text{ ο συντελεστής απόδοσης})$$

Ετήσιο W_L για την περίπτωση του κινητήρα ενεργειακής κλάσης IE4,

$$W_L / \text{έτος} = 4357,298 \text{ W} * 6240 \text{ h} / \text{έτος} = 27189,53 \text{ KWh} / \text{έτος}$$

Η εξοικονόμηση ενέργειας ετησίως θα είναι:

$$\frac{27189,53 \text{ KWh}}{30254,515 \text{ KWh}} = 0,8987 \quad \text{της ετήσιας κατανάλωσης σημαίνει 10,13\% εξοικονόμηση ενέργειας}$$

Η ετήσια εξοικονόμηση για το κόστος λειτουργίας του κινητήρα με τιμή ενέργειας 0,10€/KWh θα είναι:

$$(30254,515 \text{ KWh} - 27189,53 \text{ KWh}) * 0,10\text{€/KWh} = 306,5\text{€}$$

➤ **Οι κινητήρες θα συγκριθούν για περιοδική λειτουργία S3, κατά το χρονικό διάστημα ενός έτους βρίσκοντας την πραγματική ενέργεια που καταναλώνουν:**

Η περίπτωση χρήσης κινητήρα ενεργειακής κλάσης IE1

$$P_L = 4.000\text{W} * \left(\frac{1}{0,825}\right) = 4848,48 \text{ W} \quad (0,825 \text{ ο συντελεστής απόδοσης})$$

Ετήσιο W_L για την περίπτωση του κινητήρα ενεργειακής κλάσης IE4,

$$W_L / \text{έτος} = 4848,48 \text{ W} * 1560 \text{ h} / \text{έτος} = 7563,63 \text{ KWh} / \text{έτος}$$

Η περίπτωση χρήσης κινητήρα ενεργειακής κλάσης IE4:

$$P_L = 4.000\text{W} * \left(\frac{1}{0,912}\right) = 4385,96 \text{ W} \quad (0,912 \text{ ο συντελεστής απόδοσης})$$

Ετήσιο W_L για την περίπτωση του κινητήρα ενεργειακής κλάσης IE4,

$$W_L / \text{έτος} = 4357,298 \text{ W} * 1560 \text{ h} / \text{έτος} = 6797,38 \text{ KWh} / \text{έτος}$$

Η εξοικονόμηση ενέργειας ετησίως θα είναι:

$$\frac{6797,38 \text{ KWh}}{7563,63 \text{ KWh}} = 0,8987 \quad \text{της ετήσιας κατανάλωσης σημαίνει 10,13\% εξοικονόμηση ενέργειας}$$

Η ετήσια εξοικονόμηση για το κόστος λειτουργίας του κινητήρα με τιμή ενέργειας 0,10€/ KWh θα είναι:

$$(7563,63 \text{ KWh} - 6797,38 \text{ KWh}) * 0,10\text{€/KWh} = 76,63\text{€}$$

4.3 Σύγκριση συστήματος μονάδας ελέγχου Scalar Control SV-PWM -κινητήρα με όμοιο κινητήρα 4kW με απ' ευθείας τροφοδοσία από το δίκτυο

4.3.1 1^η Εφαρμογή, φυγοκεντρικός ανεμιστήρας για ανακύκλωση αέρα σε χώρο αποθήκης.

Στην εφαρμογή θα συγκριθεί η απόδοση στην περίπτωση χρήσης κινητήρα ενεργειακής κλάσης IE4 χωρίς οδήγηση, με την περίπτωση της χρήσης του ίδιου κινητήρα με σύστημα οδήγησης με έλεγχο Scalar Control SV-PWM. Ο φυγοκεντρικός ανεμιστήρας λειτουργεί στην δυσμενέστερη περίπτωση που μπορεί να αντιμετωπιστεί, για 24h/ημέρα, 365 ημέρες/έτος, άρα το σύνολο 8760h/έτος.

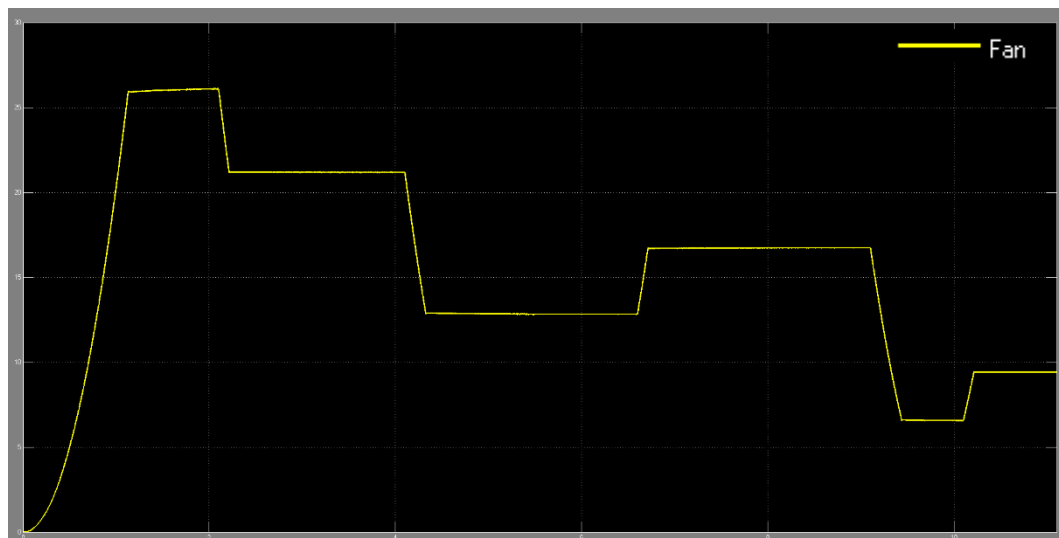
Οι απαιτήσεις τροφοδοτήθηκαν στο σύστημα μονάδας ελέγχου-κινητήρα, σύμφωνα με τον πίνακα 3 της παραγράφου 3.2 με το υπόδειγμα των αναγκών της εφαρμογής. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης χρησιμοποιήθηκαν κατόπιν, για την συμπλήρωση πίνακα με τις τιμές της απόδοσης του συστήματος. Βάσει αυτών των αποτελεσμάτων, γίνεται σχετική ανάλυση και η οικονομική προσέγγιση.

Ο συνολικός χρόνος της προσομοίωσης, ο οποίος βρίσκεται σε όλα τα παρακάτω γραφήματα στον οριζόντιο άξονα είναι 11s.

Από τον χαρακτήρα του φορτίου του φυγοκεντρικού ανεμιστήρα υπενθυμίζεται ότι ισχύει:

$$P_L = f(n^3), P_L = P_{\text{outnom}} * \left(\frac{U_{\text{Load}}}{U_{\text{nom}}}\right)^3$$

$$T_L = f(n^2)$$

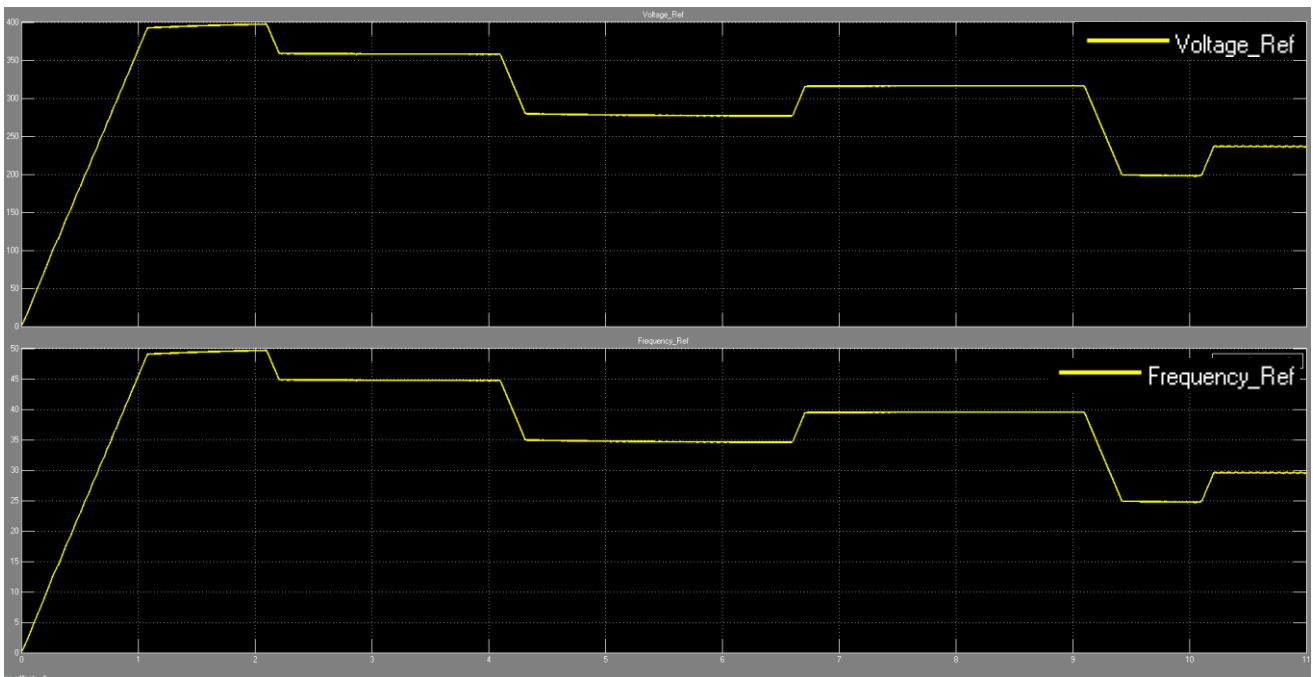


Σχήμα 4.28 Γράφημα φορτίου που εφαρμόζεται βάσει των απαιτήσεων του πίνακα 3, σε σχέση με τον χρόνο. Με βάση αυτόν εξετάζεται η συμπεριφορά του συστήματος μονάδας ελέγχου Scalar Control SV-PWM -κινητήρα

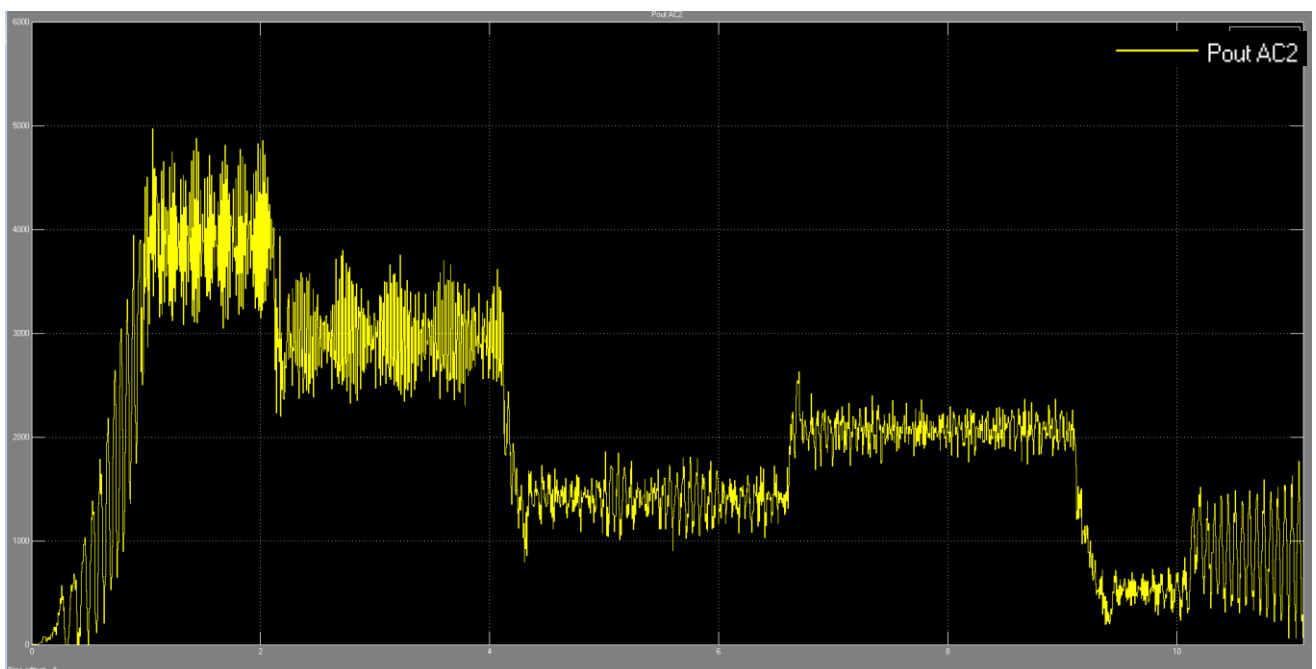
Σχήμα 4.28 παρατηρήσεις:

Το γράφημα της καμπύλης του φορτίου έχει επιλεγεί να εξαχθεί από την ανατροφοδότηση του συστήματος της μονάδας ελέγχου-κινητήρα. Επιλέχθηκε για λόγους επαλήθευσης της φόρτισης αναφοράς, αφού το σύστημα ανατροφοδοτείται μέσω του κατάλληλου μπλοκ όπου γίνονται

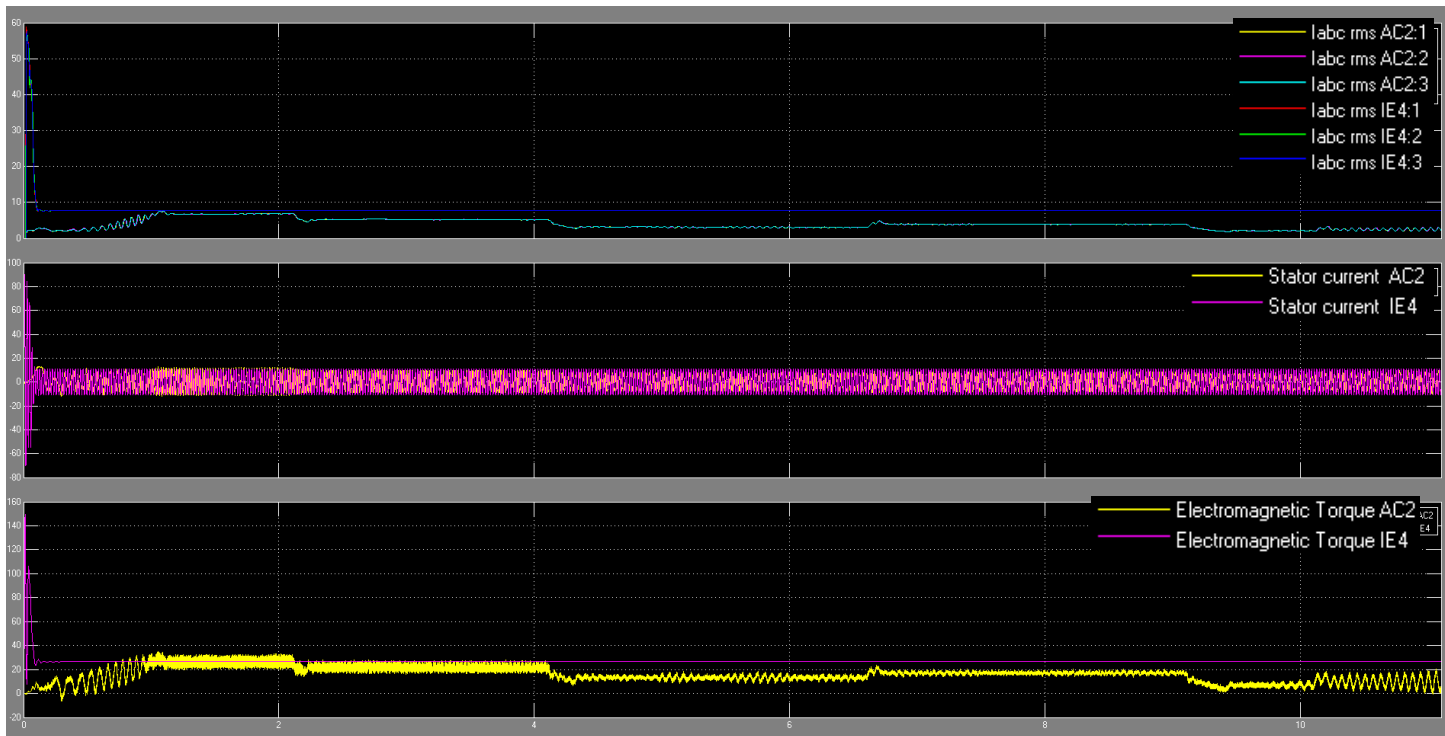
υπολογισμοί για τον κάθε τύπο φορτίου και ώστε να παρουσιαστεί η οπτική του φορτίου από το σύστημα και να φανεί η ευστάθεια που παρουσιάζει υπό το συγκεκριμένο φορτίο.



Σχήμα 4.29 Γράφημα της της τάσης αναφοράς και της συχνότητας αναφοράς που εφαρμόζει η μονάδα ελέγχου στροφών στον κινητήρα σε σχέση με τον χρόνο, σύμφωνα με την απαίτηση της ταχύτητας αναφοράς που προκύπτει από τον πίνακα 3. Το γράφημα δείχνει την αντιστοιχία V/f που χρησιμοποιεί ο ελεγκτής της ταχύτητας ο οποίος είναι κλιμακωτός.



Σχήμα 4.30 Γράφημα της μηχανικής ισχύος εξόδου του συστήματος μονάδας ελέγχου *Scalar Control SV-PWM* -κινητήρα σε σχέση με τον χρόνο και σύμφωνα με τις απαιτήσεις φόρτισης της εφαρμογής βάσει του πίνακα 3.



Σχήμα 4.31 Σύγκριση γραφημάτων για το σύστημα μονάδας ελέγχου *Scalar Control SV-PWM* - κινητήρα σε σχέση με τον κινητήρα κλάσης *IE4* ο οποίος λειτουργεί χωρίς οδήγηση. Λειτουργούν παράλληλα καταγράφοντας το ρεύμα rms ανα φάση, ρεύμα από κορυφή σε κορυφή στον στάτη και την αποδιδόμενη ροπή τους, σε σχέση με τον χρόνο

Σχήμα 4.31 παρατηρήσεις:

Στο σχήμα 4.31 στο πρώτο γράφημα παρατηρείται η σύγκριση του ρεύματος I_{abc} rms της γραμμής, ακολουθεί το γράφημα με το ρεύμα από κορυφή σε κορυφή για τον στάτη και το γράφημα της ροπής των κινητήρων. Στο γράφημα του ρεύματος rms παρατηρείται μεγάλη διαφορά από 0 ως 0,1s όπου το μεγάλο ρεύμα αιχμής εκκίνησης απουσιάζει από την περίπτωση του συστήματος μονάδας ελέγχου-κινητήρα.

Το rms ρεύμα γραμμής κατά την εκκίνηση δεν ξεπερνάει τα 8,28A για το σύστημα της μονάδας ελέγχου-κινητήρα και το συζευγμένο φορτίο. Αντιθέτως ο ίδιος κινητήρας με απ' ευθείας τροφοδοσία από το δίκτυο, εκκινεί με το ίδιο συζευγμένο φορτίο και καταναλώνει ρεύμα αιχμής κατά την εκκίνηση 58,8A .

Το rms ρεύμα γραμμής του συστήματος μονάδας ελέγχου και κινητήρα στην πλήρη φόρτιση είναι 6,75A ανά φάση, την ίδια χρονική στιγμή που το rms ρεύμα γραμμής πλήρους φόρτισης του κινητήρα είναι: 7,65 A.

Στο γράφημα της ροπής ο κινητήρας χωρίς οδήγηση λειτουργεί αποδίδοντας συνεχώς την ονομαστική του ροπή λειτουργώντας σε πλήρη φόρτιση. Με την χρήση της μονάδας ελέγχου αποδίδεται η ροπή για την κάθε αναφορά ταχύτητας που λαμβάνει η μονάδα ελέγχου με έμμεσο τρόπο, αφού ο κλιμακωτός έλεγχος δεν μπορεί να ελέγξει το ρεύμα ροπής και μαγνήτισης του κινητήρα, αλλά η ροπή του κινητήρα προκύπτει από τον έλεγχο της σταθεράς V/f

Σχήμα 4.31 εξηγήσεις και συμπεράσματα:

Το ρεύμα εισόδου στην μονάδα ελέγχου δεν θα πρέπει ποτέ να υπερβαίνει το 110% του ονομαστικού ρεύματος. Η μαγνητική ροή του κινητήρα θα είναι ευθέως ανάλογη με την τάση και

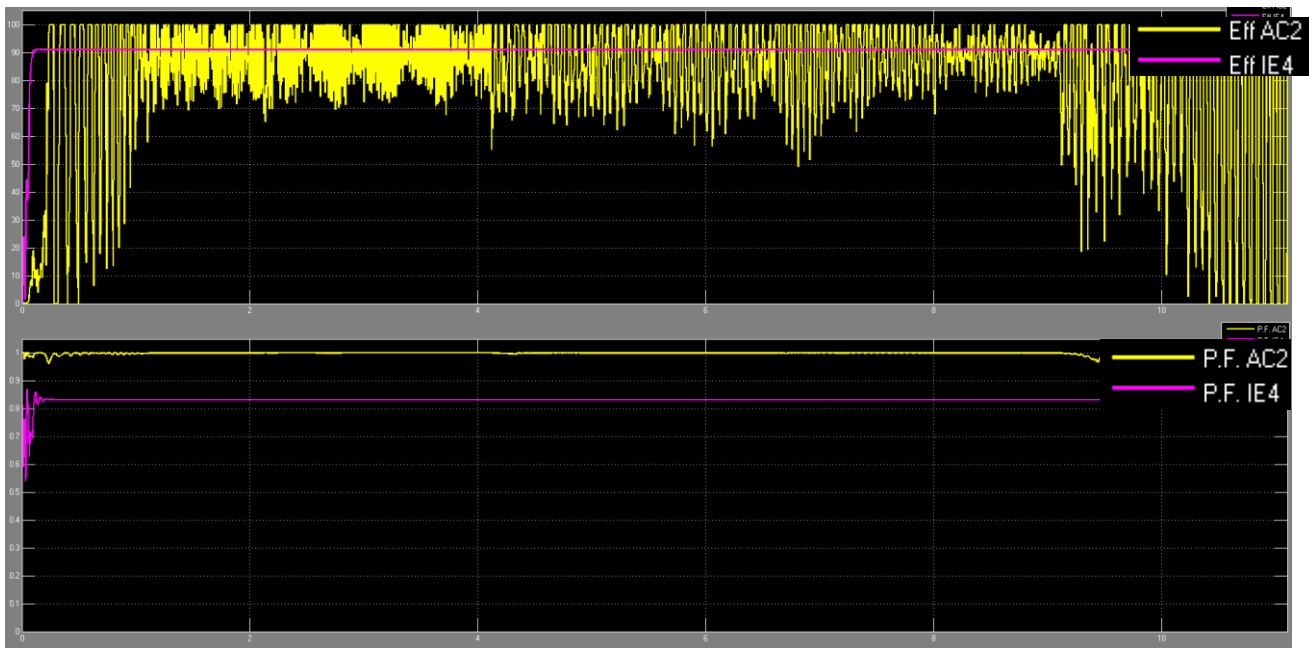
αντιστρόφως ανάλογη με την συχνότητα. Η ροή διατηρείται σταθερή με τον λόγο V/f και το ρεύμα περιορίζεται, ενώ αποδίδεται πλήρης ροπή εκκίνησης όπως φαίνεται στο σχήμα στο τελευταίο γράφημα και όπως αναφέρθηκε στην παράγραφο 2.2.7 από τον τύπο 2.59 ισχύει ότι:

$$T_{acc} = J * \frac{\Delta \text{Urpm/sec}}{\Delta t_{30}} * \pi = 0,029 * \frac{1350 \text{rpm/sec}}{1 \text{s } 30} * 3,14 = 4.098 \text{Nm}, \text{ θα είναι η πρόσθετη ροπή κατά την εκκίνηση με το φορτίο του η οποία γίνεται σε 1s.}$$

Επειδή ο στάτης του κινητήρα τροφοδοτείται από έναν μετατροπέα SV-PWM, παρατηρείται θορυβώδης ροπή σε όλο της το εύρος απόδοσης. Ακόμη ο ίδιος θόρυβος μπορεί να παρατηρηθεί στο ρεύμα τροφοδοσίας του στάτη.

Το ρεύμα περιορίζεται από τον σχεδιασμό του κυκλώματος προφόρτισης της μονάδας. Οι πυκνωτές του διαύλου DC φορτίζονται ομαλά, σε μια σταθερά χρόνου $t=RC$ και αποδίδουν το ρεύμα που χρειάζεται, έτσι ώστε το ρεύμα κατά την εκκίνηση να διατηρείται κάτω από το ονομαστικό του κινητήρα. Αυτός ο περιορισμός του ρεύματος είναι παραμετροποιήσιμο μέγεθος από τον χρήστη μέσω του λογισμικού λειτουργίας της μονάδας ελέγχου.

Η μονάδα ελέγχου βελτιώνει τον συντελεστή ισχύος του συστήματος επειδή το άεργο ρεύμα που χρειάζεται ο κινητήρας τροφοδοτείται από τους πυκνωτές του δίαυλου DC, όχι από το σύστημα τροφοδοσίας.



Σχήμα 4.32 Σύγκριση γραφημάτων για το σύστημα μονάδας ελέγχου *Scalar Control SV-PWM* - κινητήρα με τον κινητήρα κλάσης *IE4* όπου λειτουργούν παράλληλα καταγράφοντας τον συντελεστή απόδοσης %, και τον συντελεστή ισχύος, σε σχέση με τον χρόνο

Σχήμα 4.32 παρατηρήσεις:

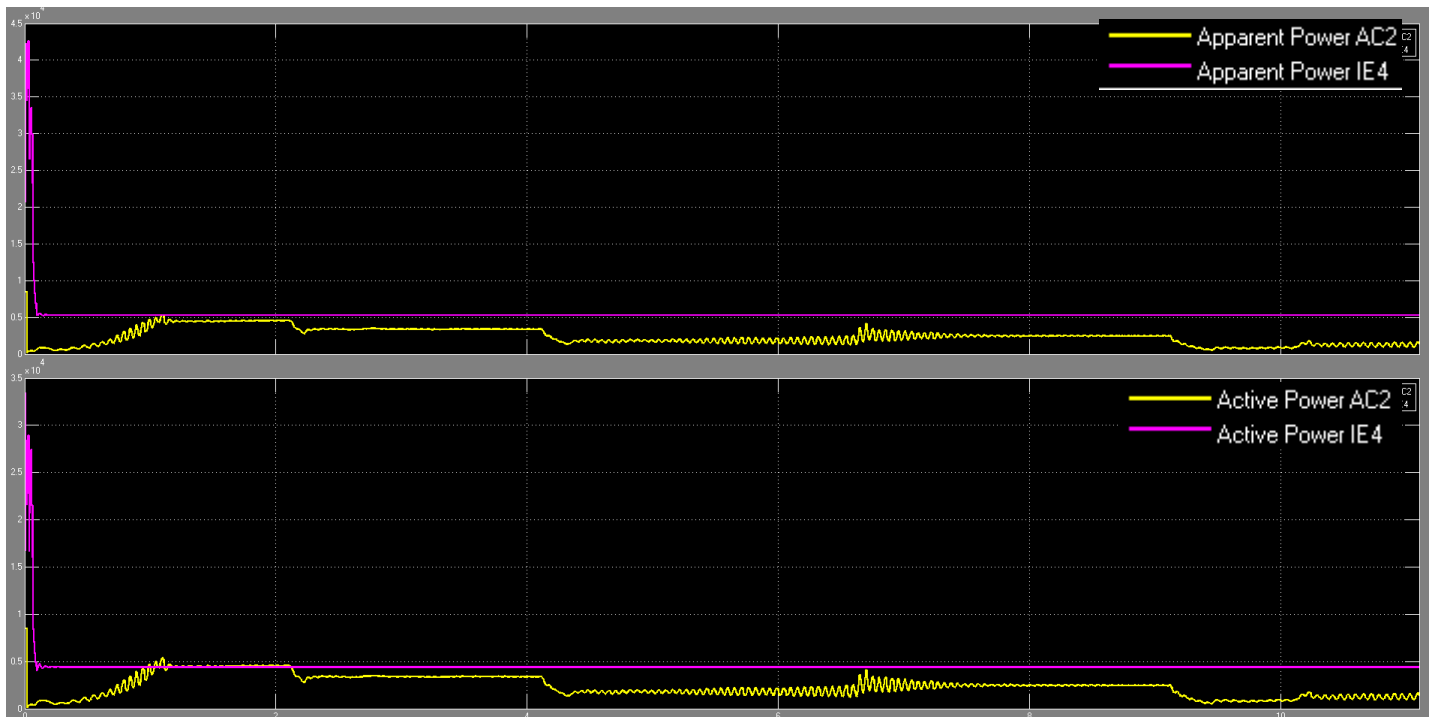
Στο σχήμα 4.32 παρατηρείται η σύγκριση του συντελεστή ισχύος και του βαθμού απόδοσης κατά την διάρκεια του χρόνου, όπου υπάρχουν διαφοροποιήσεις στο σύστημα μονάδας ελέγχου-κινητήρα. Ο συντελεστής ισχύος είναι ανώτερος σε όλη την διάρκεια της προσομοίωσης, ενώ στον

αντίποδα η απόδοση του κινητήρα είναι σχεδόν πάντα ανώτερη καθ' όλη την διάρκεια της προσομοίωσης.

Σχήμα 4.32 εξηγήσεις και συμπεράσματα:

Στην περίπτωση του συντελεστή ισχύος, για το σύστημα μονάδας ελέγχου-κινητήρα ακόμη και με τις διαφοροποιήσεις του φορτίου ο συντελεστής ισχύος είναι $>0,99$ και αυτό είναι λογικό εφόσον είναι γνωστή η λειτουργία των πυκνωτών του διαύλου DC.

Στην περίπτωση του βαθμού απόδοσης, το σύστημα μονάδας ελέγχου-κινητήρα υπολείπεται της τιμής του κινητήρα με απ' ευθείας τροφοδοσία. Λογικό αφού ο βαθμός απόδοσης του συστήματος σε κάθε περίπτωση είναι: $\eta_{PDS} = \eta_{VFD} * \eta_{MOTOR}$



Σχήμα 4.33 Σύγκριση γραφημάτων της πραγματικής και της φαινόμενης ισχύος που καταναλώνονται, από το σύστημα μονάδας ελέγχου *Scalar Control SV-PWM* -κινητήρα και από τον κινητήρα κλάσης *IE4*, σε σχέση με τον χρόνο.

Σχήμα 4.33 παρατηρήσεις:

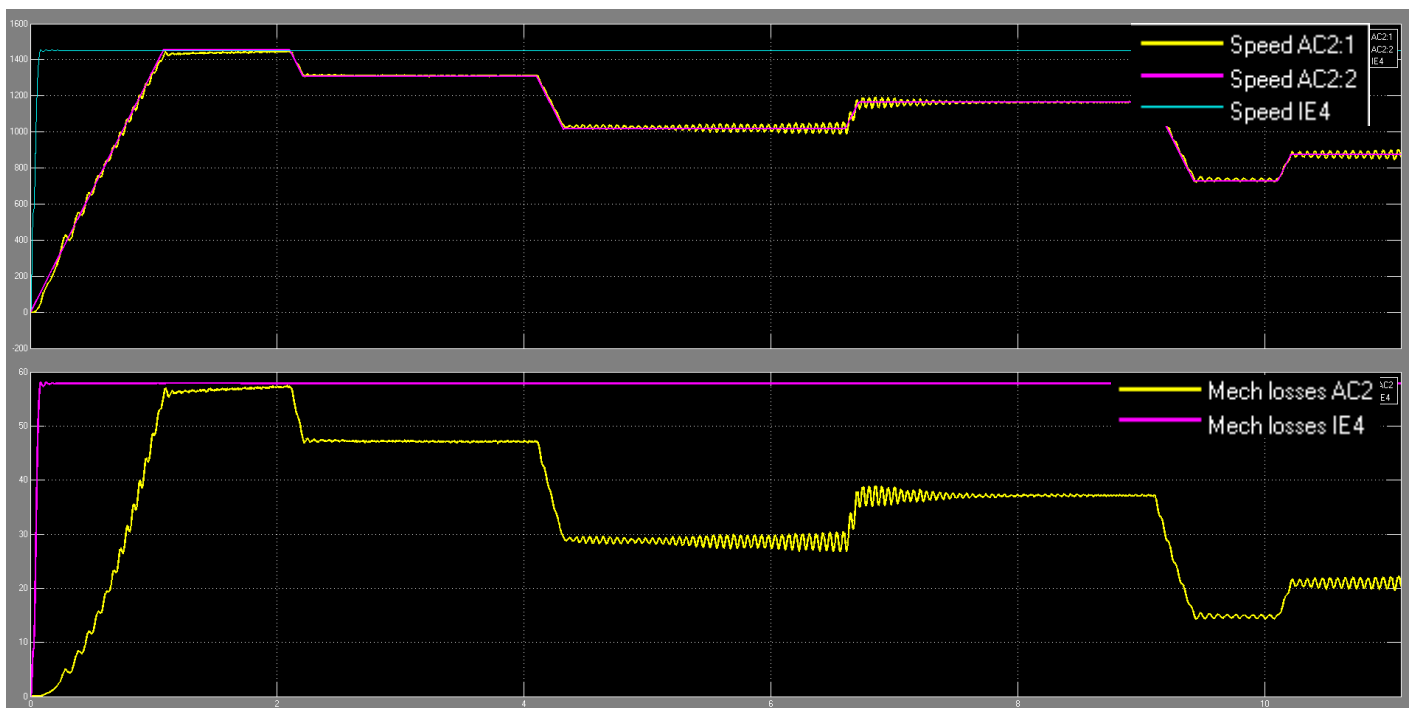
Στο σχήμα 4.33 παρατηρούνται τα γραφήματα της πραγματικής και της φαινόμενης ηλεκτρικής ισχύος σε σχέση με τον χρόνο. Παρατηρείται ότι η πραγματική ισχύς που καταναλώνεται από το σύστημα μονάδας ελέγχου-κινητήρα ρυθμίζεται από τις απαιτήσεις του φορτίου σε κάθε χρονική στιγμή εν αντιθέσει με τον κινητήρα που λειτουργεί με την απ' ευθείας τροφοδοσία. Στην ονομαστική τιμή ροπής φορτίου στροφών το σύστημα μονάδας ελέγχου -κινητήρα καταναλώνει μεγαλύτερη πραγματική ισχύ 4655 Watt σε σχέση με τον κινητήρα που λειτουργεί με απ' ευθείας τροφοδοσία 4410 Watt

Ως προς το θέμα της φαινόμενης ισχύος εν αντιθέσει με τον κινητήρα που λειτουργεί με απ' ευθείας τροφοδοσία, για το σύστημα μονάδας ελέγχου-κινητήρα, δείχνει να ταυτίζεται ως μέγεθος η πραγματική με την φαινόμενη ισχύ.

Σχήμα 4.33 εξηγήσεις και συμπεράσματα:

Στο σημείο της ονομαστικής τιμής του φορτίου, της ροπής και των στροφών το σύστημα μονάδας ελέγχου-κινητήρα καταναλώνει μεγαλύτερη πραγματική ισχύ σε σχέση με τον κινητήρα που λειτουργεί με απ' ευθείας τροφοδοσία. Αυτό είναι λογικό λόγω των πρόσθετων απωλειών της μονάδας ελέγχου, δηλαδή υπάρχουν οι απώλειες αγωγιμότητας, οι απώλειες μεταγωγής και οι απώλειες στον δίαυλο DC. Αυτό δείχνει ότι τα οφέλη της χρήσης του συστήματος μονάδας ελέγχου-κινητήρα υπάρχουν σε περιπτώσεις εφαρμογών όπου οι κινητήρες δεν πρέπει να λειτουργούν συνεχώς στην ονομαστική τους ισχύ.

Η φαινόμενη ισχύς ταυτίζεται με την πραγματική για το σύστημα μονάδας ελέγχου-κινητήρα όπως έχει αναφερθεί παραπάνω λόγω του συντελεστή ισχύος ο οποίος είναι $>0,99$.



Σχήμα 4.34 Σύγκριση γραφημάτων της ταχύτητας και των μηχανικών απωλειών για το σύστημα μονάδας ελέγχου *Scalar Control SV-PWM* -κινητήρα και τον κινητήρα κλάσης *IE4*, σε σχέση με τον χρόνο.

Σχήμα 4.34 παρατηρήσεις:

Στο σχήμα 4.34 παρατηρούμε τα γραφήματα της ταχύτητας και των μηχανικών απωλειών παρατηρούμε ότι το σύστημα μονάδας ελέγχου-κινητήρα έχει ταλαντώσεις στην ταχύτητα μικρότερες όμως σε σχέση με το γράφημα της ροπής.

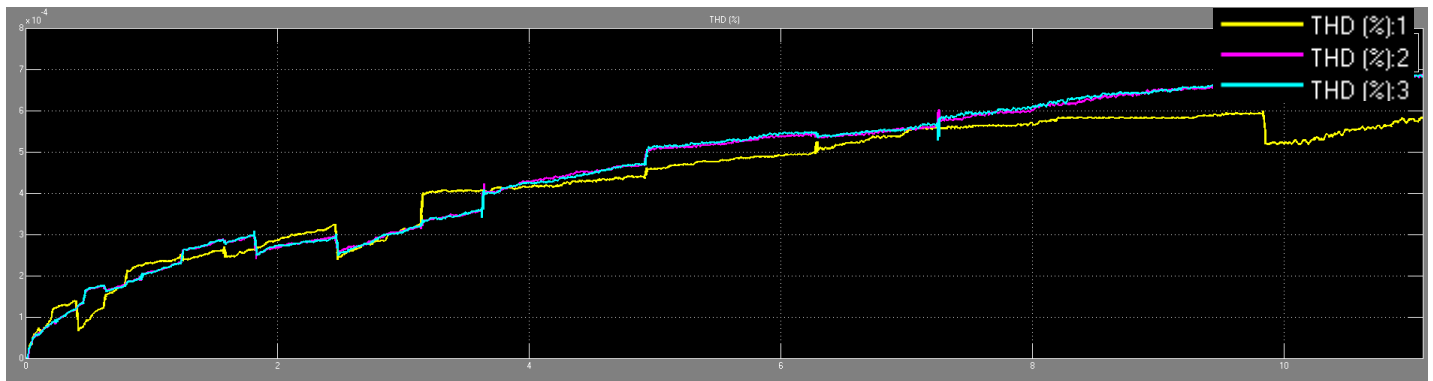
Σχήμα 4.34 εξηγήσεις και συμπεράσματα:

Φυσιολογικά φαίνεται πιο γραμμικό το γράφημα της ταχύτητας σε σχέση με αυτό της ροπής αφού φιλτράρεται από την ίδια την αδράνεια του συστήματος.

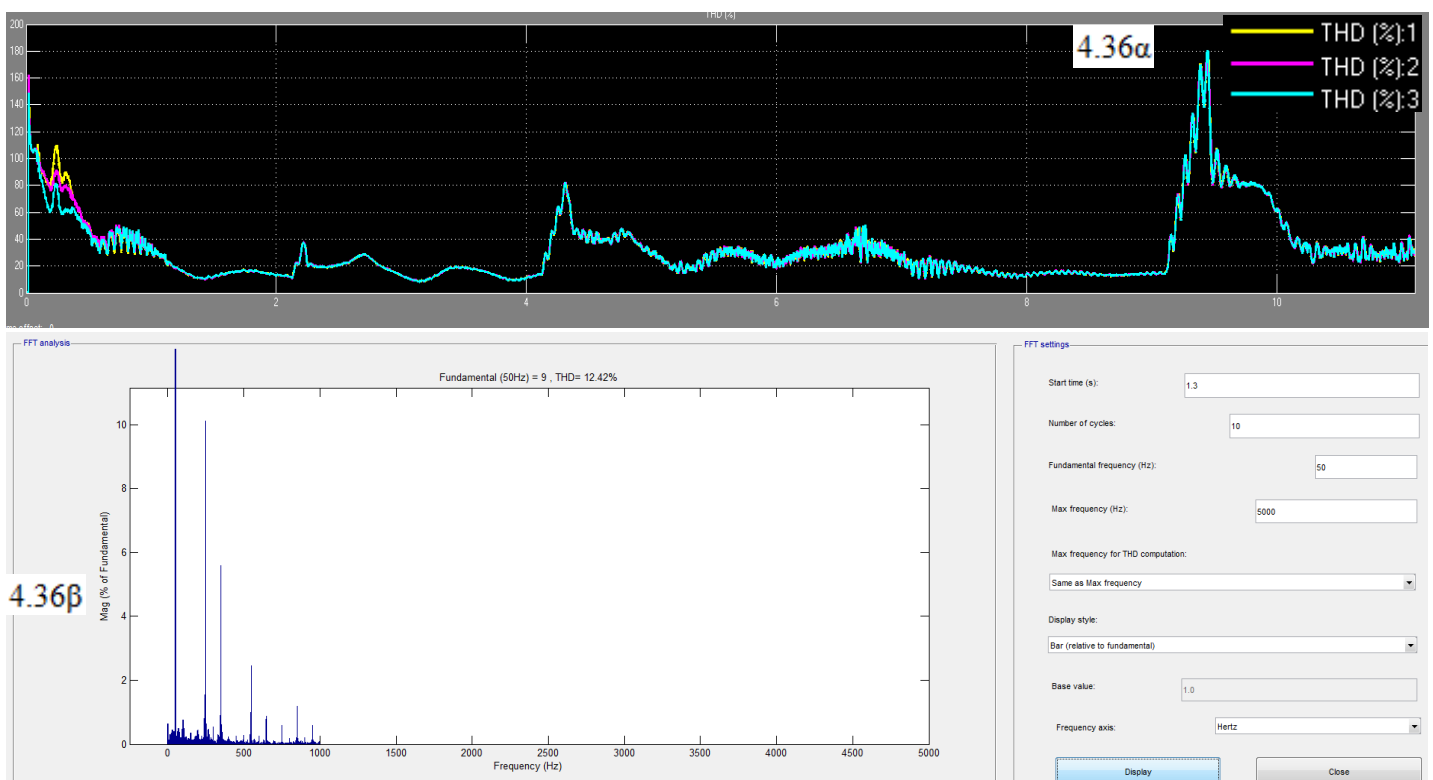
Αρνητικό σημείο αναφοράς είναι ότι, στο χρονικό διάστημα από 1,1s ως 2,1s που θα έπρεπε να λειτουργεί με ταχύτητα αναφοράς 1455rpm το σύστημα δεν καταφέρνει να αποδώσει πάνω από 1443rpm. Λειτουργεί δηλαδή, με σφάλμα ταχύτητας 0,82%. Αυτό δεν αποτελεί πρόβλημα για την συγκεκριμένη εφαρμογή, όμως καθιστά την μονάδα ελέγχου στροφών ικανή μόνο για περιπτώσεις οδήγησης φορτίων όπου υπάρχουν χαμηλές απαιτήσεις ελέγχου ταχύτητας και θέσης του δρομέα.

Οι μηχανικές απώλειες οι οποίες είναι ανάλογες των στροφών του κινητήρα είναι χαμηλότερες για το σύστημα μονάδας ελέγχου - κινητήρα, αφού ακολουθούν την ταχύτητα

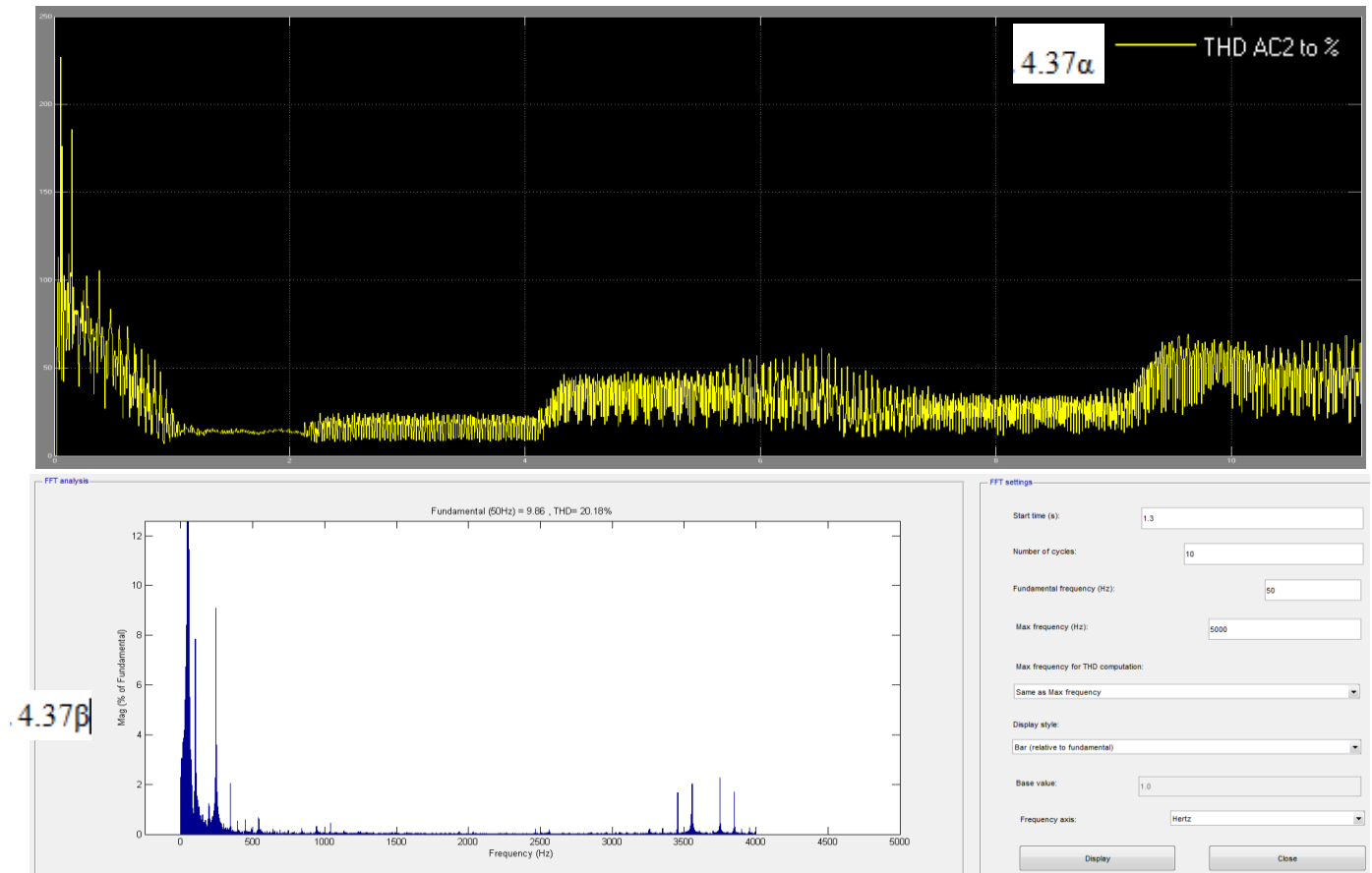
αναφοράς. Σίγουρα οι ταλαντώσεις της ταχύτητας, είναι αρνητικό σημείο αναφοράς εφόσον καταπονούν τον μηχανικό εξοπλισμό, μειώνοντας τον χρόνο ζωής του.



Σχήμα 4.35 Γράφημα με τις αρμονικές τάσης που παρουσιάζονται σε σχέση με τον χρόνο, ενώ λειτουργεί το σύστημα μονάδας ελέγχου *Scalar Control SV-PWM* –κινητήρα.



Σχήμα 4.36 Γραφήματα που αφορούν 4.36α) τις αρμονικές ρεύματος που παρουσιάζονται στην πηγή της τροφοδοσίας σε σχέση με τον χρόνο και 4.36β) η FFT ανάλυση στο πεδίο της συχνότητας για το ρεύμα, ενώ λειτουργεί το σύστημα μονάδας ελέγχου *Scalar Control SV-PWM* –κινητήρα.



Σχήμα 4.37 Γραφήματα που αφορούν 4.37α) τις αρμονικές ρεύματος που παρουσιάζονται στο τριφασικό τυλίγμα του στάτη σε σχέση με τον χρόνο και 4.37β) η FFT ανάλυση στο πεδίο της συχνότητας για το ρεύμα, ενώ λειτουργεί το σύστημα μονάδας ελέγχου *Scalar Control SV-PWM* - κινητήρα

Σχήμα 4.35, 4.36, 4.37 παρατηρήσεις:

Το σύστημα μονάδας ελέγχου-κινητήρα δημιουργεί φαινόμενα αρμονικών και αυτό είναι λογικό λόγω των ημιαγωγών της μονάδας ελέγχου, οι οποίοι άγουν διακοπτόμενα διαμορφώνοντας συνεχώς την επιθυμητή ισχύ τροφοδοτώντας τον κινητήρα. Στο σχήμα 4.35 δίνεται το γράφημα με τις αρμονικές τάσης σε σχέση με τον χρόνο, στην τροφοδοσία. Στο σχήμα 4.36α δίνεται το γράφημα με τις αρμονικές έντασης σε σχέση με τον χρόνο, στην τροφοδοσία του συστήματος. Στο σχήμα 4.36β δίνεται η ανάλυση FFT, με το ποσοστό της παραμόρφωσης κοντά στο ονομαστικό σημείο λειτουργίας, για την τροφοδοσία του συστήματος. Στο σχήμα 4.37α δίνεται το γράφημα με τις αρμονικές έντασης σε σχέση με τον χρόνο, στα τυλίγματα του στάτη, στο σχήμα 4.37β δίνεται η ανάλυση FFT με το ποσοστό της παραμόρφωσης στα τυλίγματα του στάτη, στο ίδιο χρονικό σημείο που μετρήθηκε και η παραμόρφωση για την τροφοδοσία του συστήματος .

Σχήμα 4.35, 4.36 εξηγήσεις και συμπεράσματα:

Οι αρμονικές αυτές περιορίζονται με τα παθητικά φίλτρα και τις αυτεπαγωγές γραμμής έτσι ώστε να είναι κάτω των επιτρεπτών ορίων παραμόρφωσης της τάσης $THD_{max} = 5\%$ ενώ περιορίζουν και το αρμονικό ρεύμα εξομαλύνοντας και τις αιχμές τάσης και έντασης.

Το δείγμα της κυματομορφής που αναλύεται με το FFT tool είναι 10 κύκλοι.

Παρατηρώντας την κυματομορφή, η παραμόρφωση της τάσης είναι $<5\%$. Άρα βρίσκεται εντός των ορίων που θέτονται σχετικά.

Η παραμόρφωση της έντασης στην γραμμή τροφοδοσίας εισόδου στο σύστημα είναι μεγαλύτερη με ελάχιστη τιμή 8% και μέγιστη 180%. Η παραμόρφωση γίνεται μεγαλύτερη στις εναλλαγές του φορτίου και κυρίως όταν ο κινητήρας δουλεύει σε χαμηλότερη φόρτιση. Όμως ενώ σε χαμηλότερη φόρτιση του κινητήρα, η αρμονική παραμόρφωση είναι μεγαλύτερη, το ενεργό ρεύμα των αρμονικών μικραίνει αφού ισχύει:

$$THDi = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I^2_{hrms}}}{I_{1rms}}$$

Το THD% ς είναι 10,07% στα 250Hz, 4,62% στα 350Hz, 2,15% στα 550Hz, 0,74% στα 650Hz ενώ οι επόμενες αρμονικές είναι πολύ χαμηλού πλάτους. Οι αρμονικές περιορίστηκαν από την αυτεπαγωγή γραμμής και τα δύο παθητικά διπλοσυντονιζόμενα φίλτρα σε αυτές τις τιμές.

Σχήμα 4.37 εξηγήσεις και συμπεράσματα:

Η κυματομορφή της τάσης και της έντασης σε μια μονάδα ελέγχου, εξαρτάται από τα κατασκευαστικά στοιχεία της και από την συχνότητα στην οποία διαμορφώνει την επιθυμητή τάση και ένταση εξόδου.

Η παραμόρφωση της έντασης στο τύλιγμα του στάτη είναι μεγαλύτερη αφού δεν υπάρχει ο περιορισμός των φίλτρων και των αυτεπαγωγών γραμμής, αλλά μόνο ότι φιλτράρισμα μπορεί να κάνει η μονάδα ελέγχου. Στο FFT Analysis παρατηρούνται ενδιάμεσες αρμονικές κοντά στην ονομαστική συχνότητα και αρμονικές με συχνότητες 3,5kHz έως 4,5kHz. Αυτό είναι φυσιολογικό αφού ο ελεγκτής SV-PWM ο οποίος ελέγχει τον αντιστροφέα και ο οποίος διαμορφώνει τις κυματομορφές εξόδου, λειτουργεί σε αυτές τις συχνότητες. Η αρμονική παραμόρφωση του ρεύματος που παρουσιάζεται στον στάτη στην ονομαστική φόρτιση του επαγωγικού κινητήρα έχει τιμή 20,18% για την χρονική στιγμή όπου το μέτρο του ρεύματος κορυφής είναι 9,86A. Το FFT Analysis tool δείχνει αρμονικό περιεχόμενο ως τα 5kHz όπου μας ενδιαφέρει το δείγμα. Το THD% είναι 10,51% στα 55Hz, 5,52% στα 60Hz, 2,88% στα 65Hz, 2,94% στα 70Hz ενώ οι επόμενες ενδιάμεσες αρμονικές είναι πολύ χαμηλού πλάτους. Το THD% στα 3455Hz είναι 1,67%, στα 3555Hz είναι 2,25%, στα 3750Hz είναι 2,75% και στα 3850 Hz είναι 1,68%.

Πίνακας 9 Απαιτήσεις της εφαρμογής βάσει του πίνακα 3 και οι τιμές που προκύπτουν από την προσομοίωση της χρήσης μονάδας ελέγχου Scalar Control SV-PWM –κινητήρα.

Επιδόσεις συστήματος μονάδας ελέγχου με κινητήρα IE4							
Τιμές από την προσομοίωση							
Ταχύτητα (rpm)	Ταχύτητα (rad/sec)	Ισχύς στην έξοδο (W)	Ισχύς στην έξοδο %	Ροπή στον άξονα (Nm)	Ροπή στον άξονα %	Συντελεστής ισχύος	Απόδοση %
1443	151,11	4004,4	100	26,5	100,004	0,99	86
1309,5	137,13	3016	75,4	22	83,3	0,99	84
1164	121,89	2194	54,85	18	68,18	0,99	83
1018,5	106,657	1439,78	35,99	13,5	51,13	0,99	78,5
874	91,42	915,2	22,88	10	37,87	0,99	74
733,5	76,18	518,47	12,96	6,75	25,56	0,99	64,75

4.3.1.1 *Μελέτη εξοικονόμησης ενέργειας και κόστους στην περίπτωση χρήσης μονάδας ελέγχου στροφών Scalar Control SV-PWM για τον φυγοκεντρικό ανεμιστήρα.*

Για την εύρεση της εξοικονόμησης ενέργειας και κόστους χρησιμοποιήθηκαν τα στοιχεία του πίνακα 9, ώστε να υπολογιστεί για κάθε ισχύ εξόδου η ετήσια κατανάλωση του συστήματος μονάδας ελέγχου-κινητήρα. Στον υπολογισμό το σύστημα μονάδας ελέγχου-κινητήρα αποδίδει μηχανική ισχύ ως 4kW. Στους υπολογισμούς μόνο στην γραμμή για P_L:100% χρησιμοποιείται η ισχύς οριακά μεγαλύτερη που όμως προκύπτει από την προσομοίωση.

$$P_L 100\%, W_L = 1 * \frac{4004,4 \text{ W}}{0,86} * 8760\text{h} * 0,10 = 4078,49 \text{ KWh}$$

$$P_L 75,4\%, W_L = 0,754 * \frac{4000 \text{ W}}{0,84} * 8760\text{h} * 0,2 = 6290,51 \text{ KWh}$$

$$P_L 54,85\%, W_L = 0,5485 * \frac{4000 \text{ W}}{0,83} * 8760\text{h} * 0,25 = 5788,98 \text{ KWh}$$

$$P_L 35,99\%, W_L = 0,3599 * \frac{4000 \text{ W}}{0,785} * 8760\text{h} * 0,25 = 4016,20 \text{ KWh}$$

$$P_L 22,88\%, W_L = 0,2288 * \frac{4000 \text{ W}}{0,74} * 8760\text{h} * 0,10 = 1083,39 \text{ KWh}$$

$$P_L 12,96\%, W_L = 0,1296 * \frac{4000 \text{ W}}{0,6475} * 8760\text{h} * 0,10 = 701,34 \text{ KWh}$$

$$\text{Ετήσιο } W_L = 4078,49 + 6290,51 + 5788,98 + 4016,20 + 1083,39 + 701,34 = 21958,91 \text{ KWh}$$

Ετήσιο W_L για την περίπτωση του κινητήρα ενεργειακής κλάσης IE4,

$$W_L = 1 * \frac{4000 \text{ W}}{0,912} * 8760\text{h} * 1 = 38421,05 \text{ KWh}$$

$$\frac{21958,91 \text{ KWh}}{38421,05 \text{ KWh}} = 0,5715 \text{ της ετήσιας κατανάλωσης σημαίνει } 42,85\% \text{ εξοικονόμηση ενέργειας}$$

Η ετήσια εξοικονόμηση για κόστος ενέργειας 0,10€/KWh θα είναι:

$$(38421,05 \text{ KWh} - 21958,91 \text{ KWh}) * 0,10\text{€/kWh} = 1646,21\text{€}$$

4.3.2 *2^η Εφαρμογή, αντλία παραγωγής πολτού σε παραγωγική μονάδα.*

Στην εφαρμογή θα συγκριθεί η απόδοση, για την περίπτωση της χρήσης κινητήρα ενεργειακής κλάσης IE4 χωρίς οδήγηση και για την περίπτωση χρήσης μονάδας ελέγχου στροφών και κινητήρα κλάσης IE4 με έλεγχο Scalar Control SV-PWM. Η μηχανή παραγωγής λειτουργεί

στην δυσμενέστερη περίπτωση που μπορεί να αντιμετωπιστεί, για 24h/ημέρα, 365 ημέρες/έτος, άρα το σύνολο 8760h/έτος.

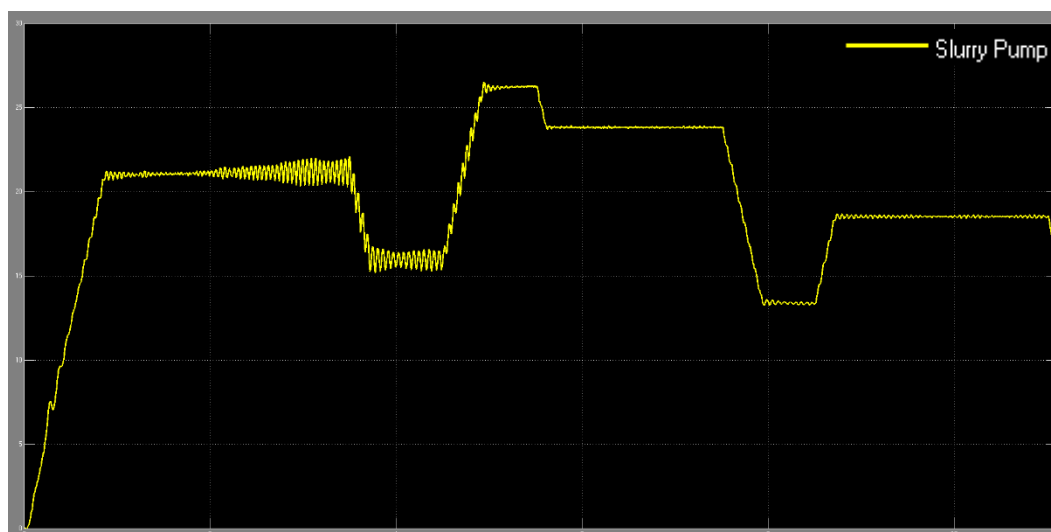
Οι απαιτήσεις τροφοδοτήθηκαν στο σύστημα μονάδας ελέγχου-κινητήρα σύμφωνα με βάση τον πίνακα 4 της παραγράφου 3.2 με το υπόδειγμα των αναγκών της εφαρμογής. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης χρησιμοποιήθηκαν κατόπιν για την συμπλήρωση πίνακα με τις τιμές της απόδοσης του συστήματος. Βάσει αυτών των αποτελεσμάτων, γίνεται σχετική ανάλυση και η οικονομική προσέγγιση.

Ο συνολικός χρόνος της προσομοίωσης ο οποίος βρίσκεται σε όλα τα παρακάτω γραφήματα στον οριζόντιο άξονα είναι 11s.

Από τον χαρακτήρα του φορτίου της αντλίας υπενθυμίζεται ότι ισχύει:

$$P_L = f(n^2), P_L = P_{outnom} * \left(\frac{U_{Load}}{U_{nom}}\right)^2$$

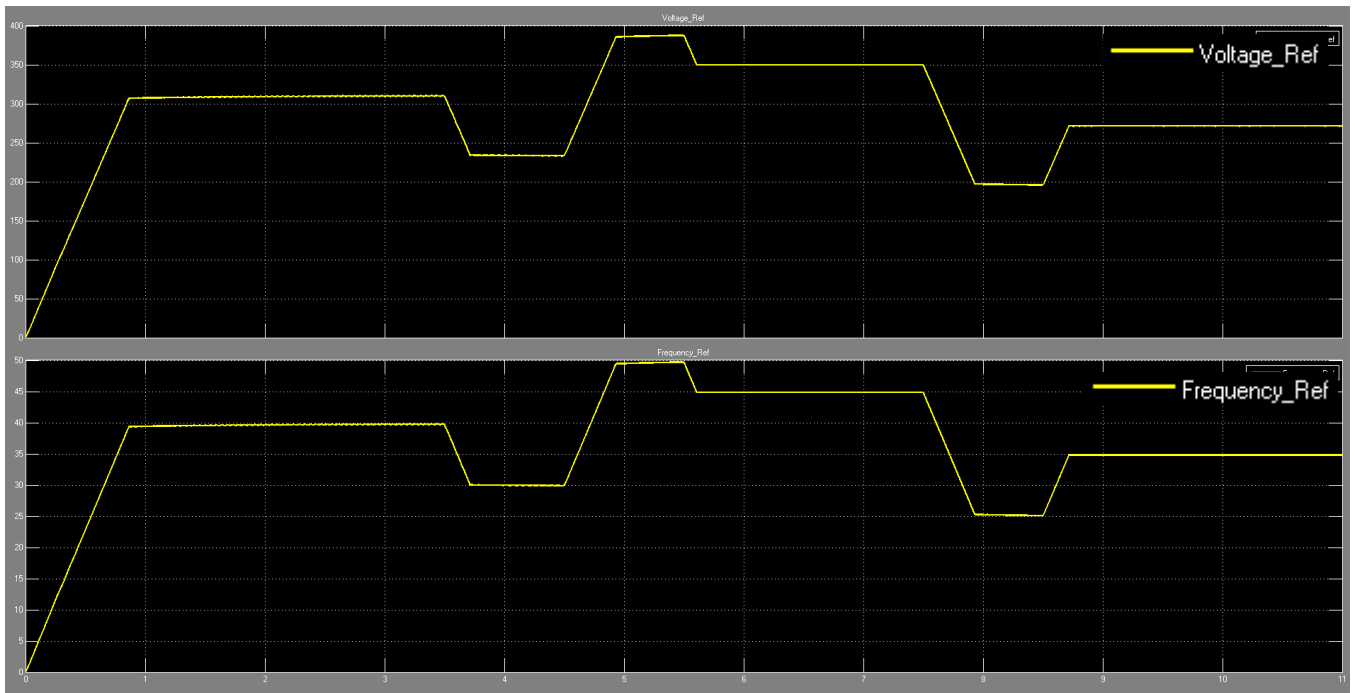
$$T_L = f(n)$$



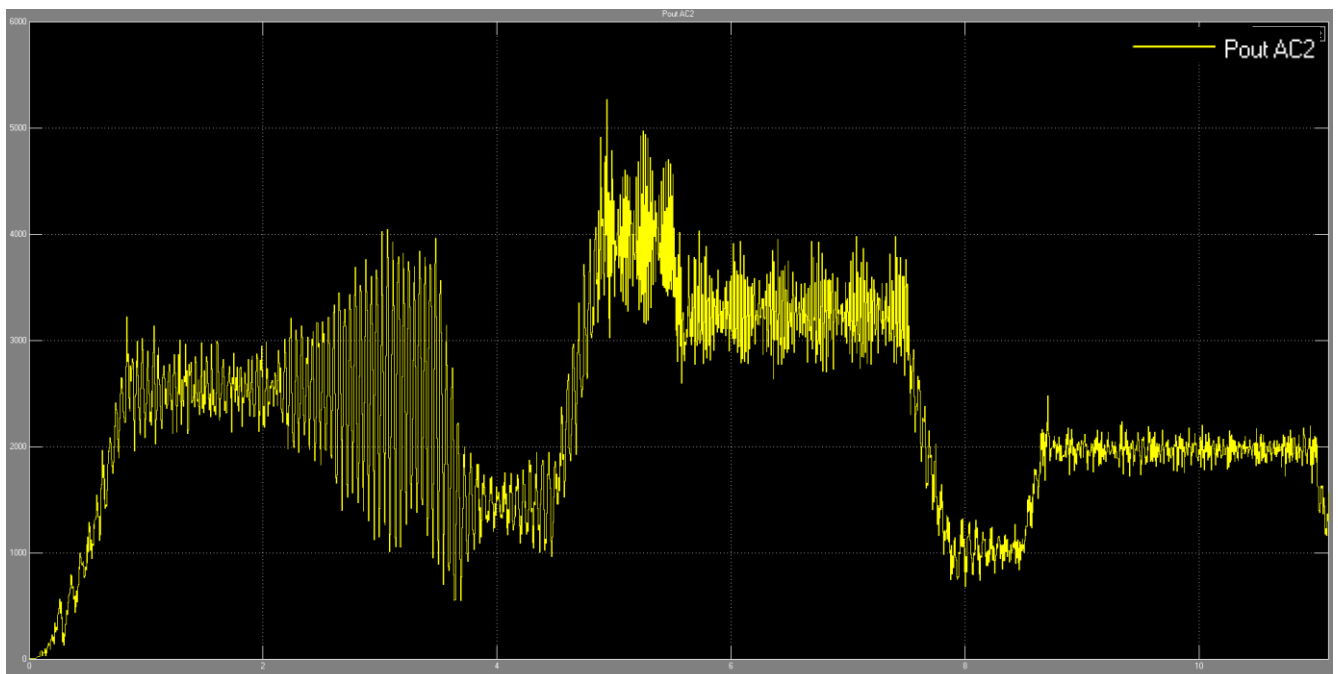
Σχήμα 4.38 Γράφημα φορτίου που εφαρμόζεται βάσει των απαιτήσεων του πίνακα 4, σε σχέση με τον χρόνο. Με βάση αυτόν εξετάζεται η συμπεριφορά του συστήματος μονάδας ελέγχου *Scalar Control SV-PWM* - κινητήρα.

Σχήμα 4.38 παρατηρήσεις:

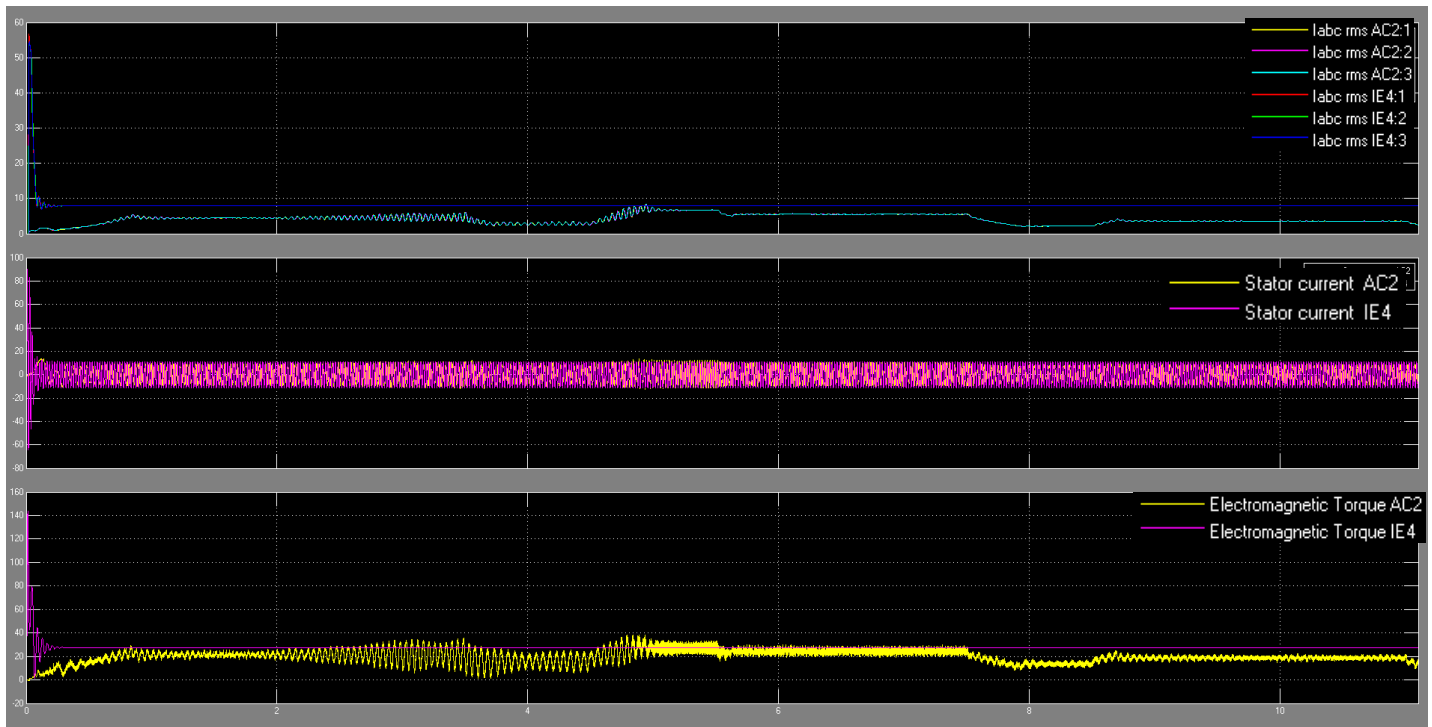
Το γράφημα της καμπύλης του φορτίου έχει επιλεγεί να εξαχθεί από την ανατροφοδότηση του συστήματος της μονάδας ελέγχου-κινητήρα. Επιλέχθηκε για λόγους επαλήθευσης της φόρτισης αναφοράς, αφού το σύστημα ανατροφοδοτείται μέσω του κατάλληλου μπλοκ, όπου γίνονται υπολογισμοί για τον κάθε τύπο φορτίου και ώστε να παρουσιαστεί η οπτική του φορτίου από το σύστημα και να φανεί η ευστάθεια που παρουσιάζει υπό το συγκεκριμένο φορτίο. Παρατηρούνται ταλαντώσεις σε όλη την διάρκεια του χρόνου της προσομοίωσης.



Σχήμα 4.39 Γράφημα της τάσης αναφοράς και της συχνότητας αναφοράς που εφαρμόζει η μονάδα ελέγχου στροφών στον κινητήρα σε σχέση με τον χρόνο, σύμφωνα με την απαίτηση της ταχύτητας αναφοράς που προκύπτει από τον πίνακα 4. Το γράφημα δείχνει την αντιστοιχία V/f που χρησιμοποιεί ο ελεγκτής της ταχύτητας ο οποίος είναι κλιμακωτός



Σχήμα 4.40 Γράφημα της μηχανικής ισχύος εξόδου του συστήματος μονάδας ελέγχου *Scalar Control SV-PWM* -κινητήρα σε σχέση με τον χρόνο και σύμφωνα με τις απαιτήσεις φόρτισης της εφαρμογής, βάσει του πίνακα 4.



Σχήμα 4.41 Σύγκριση γραφημάτων για το σύστημα μονάδας ελέγχου *Scalar Control SV-PWM* - κινητήρα με τον κινητήρα κλάσης *IE4* ο οποίος λειτουργεί χωρίς οδήγηση. Λειτουργούν παράλληλα καταγράφοντας το ρεύμα rms ανα φάση, ρεύμα από κορυφή σε κορυφή στον στάτη και την αποδιδόμενη ροπή τους, σε σχέση με τον χρόνο.

Σχήμα 4.41 παρατηρήσεις:

Στο σχήμα 4.41 στο πρώτο γράφημα παρατηρείται σύγκριση του ρεύματος I_{abc} rms της γραμμής, ακολουθεί το ρεύμα από κορυφή σε κορυφή για τον στάτη και το γράφημα της ροπής των κινητήρων. Στο γράφημα του ρεύματος rms παρατηρείται μεγάλη διαφορά από 0 ως 0,1s όπου το μεγάλο ρεύμα αιχμής εκκίνησης απουσιάζει από την περίπτωση του συστήματος μονάδας ελέγχου-κινητήρα.

Το rms ρεύμα γραμμής κατά την εκκίνηση και τις μεταβατικές καταστάσεις με τις εναλλαγές φορτίου δεν ξεπερνάει τα 7,9 A για το σύστημα της μονάδας ελέγχου-κινητήρα. Αντιθέτως ο ίδιος κινητήρας με απ' ευθείας τροφοδοσία από το δίκτυο εκκινεί με το ίδιο συζευγμένο φορτίο καταναλώνει ρεύμα αιχμής κατά την εκκίνηση 56,45A .

Το rms ρεύμα γραμμής του συστήματος μονάδας ελέγχου και κινητήρα στην πλήρη φόρτιση είναι 6,75A ανά φάση την ίδια χρονική στιγμή που το rms ρεύμα γραμμής πλήρους φόρτισης του κινητήρα είναι 7,63A.

Στο γράφημα της ροπής, ο κινητήρας χωρίς οδήγηση φαίνεται ότι λειτουργεί αποδίδοντας συνεχώς την ονομαστική του ροπή λειτουργώντας σε πλήρη φόρτιση. Με την χρήση της μονάδας ελέγχου στροφών, αποδίδεται η ροπή για την κάθε ταχύτητα αναφοράς, που λαμβάνει η μονάδα ελέγχου με έμμεσο τρόπο, αφού ο κλιμακωτός έλεγχος δεν μπορεί να ελέγξει το ρεύμα ροπής και μαγνήτισης του κινητήρα αλλά η ροπή του κινητήρα προκύπτει από τον έλεγχο της σταθεράς V/f.

Σχήμα 4.41 εξηγήσεις και συμπεράσματα:

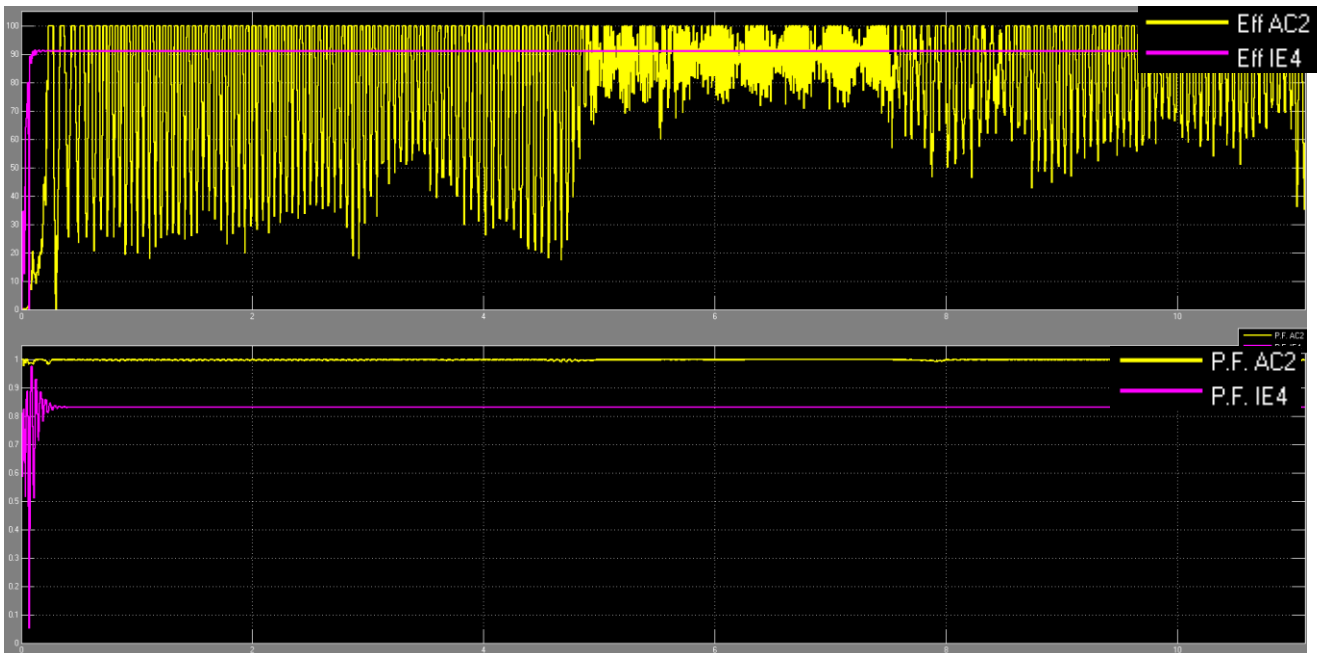
Το ρεύμα εισόδου στην μονάδα ελέγχου δεν πρέπει να υπερβαίνει το 110% του ονομαστικού ρεύματος. Η ροή διατηρείται σταθερή με τον λόγο V/f και το ρεύμα περιορίζεται, ενώ αποδίδεται πλήρης ροπή εκκίνησης όπως φαίνεται στο ίδιο σχήμα και και όπως αναφέρθηκε στην παράγραφο 2.2.7 από τον τύπο 2.59 ισχύει ότι:

$T_{acc} = J * \frac{\Delta U_{rpm/sec}}{\Delta t_{30}} * \pi = 0,017 * \frac{1350rpm/sec}{1s_{30}} * 3,14 = 2,402Nm$, θα είναι η πρόσθετη ροπή κατά την εκκίνηση με το φορτίο του, η οποία γίνεται σε 1s.

Ο στάτης του κινητήρα τροφοδοτείται από αντιστροφέα με έλεγχο SV-PWM, παρατηρείται θορυβώδης ροπή σε όλο της το εύρος της απόδοσης. Ακόμη ο ίδιος θόρυβος μπορεί να παρατηρηθεί στο ρεύμα τροφοδοσίας του στάτη.

Το ρεύμα περιορίζεται από τον σχεδιασμό του κυκλώματος προφόρτισης της μονάδας, όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως στην παράγραφο 4.2.1.

Η μονάδα ελέγχου βελτιώνει τον συντελεστή ισχύος του συστήματος όπως έχει προαναφερθεί στην παράγραφο 4.2.1. επειδή το άεργο ρεύμα που χρειάζεται ο κινητήρας τροφοδοτείται από τους πυκνωτές του διαύλου DC και όχι από το σύστημα τροφοδοσίας.



Σχήμα 4.42 Σύγκριση γραφημάτων για το σύστημα μονάδας ελέγχου Scalar Control SV-PWM - κινητήρα και τον κινητήρα κλάσης IE4. Λειτουργούν παράλληλα και καταγράφεται η απόδοση %, και ο συντελεστής ισχύος τους σε σχέση με τον χρόνο.

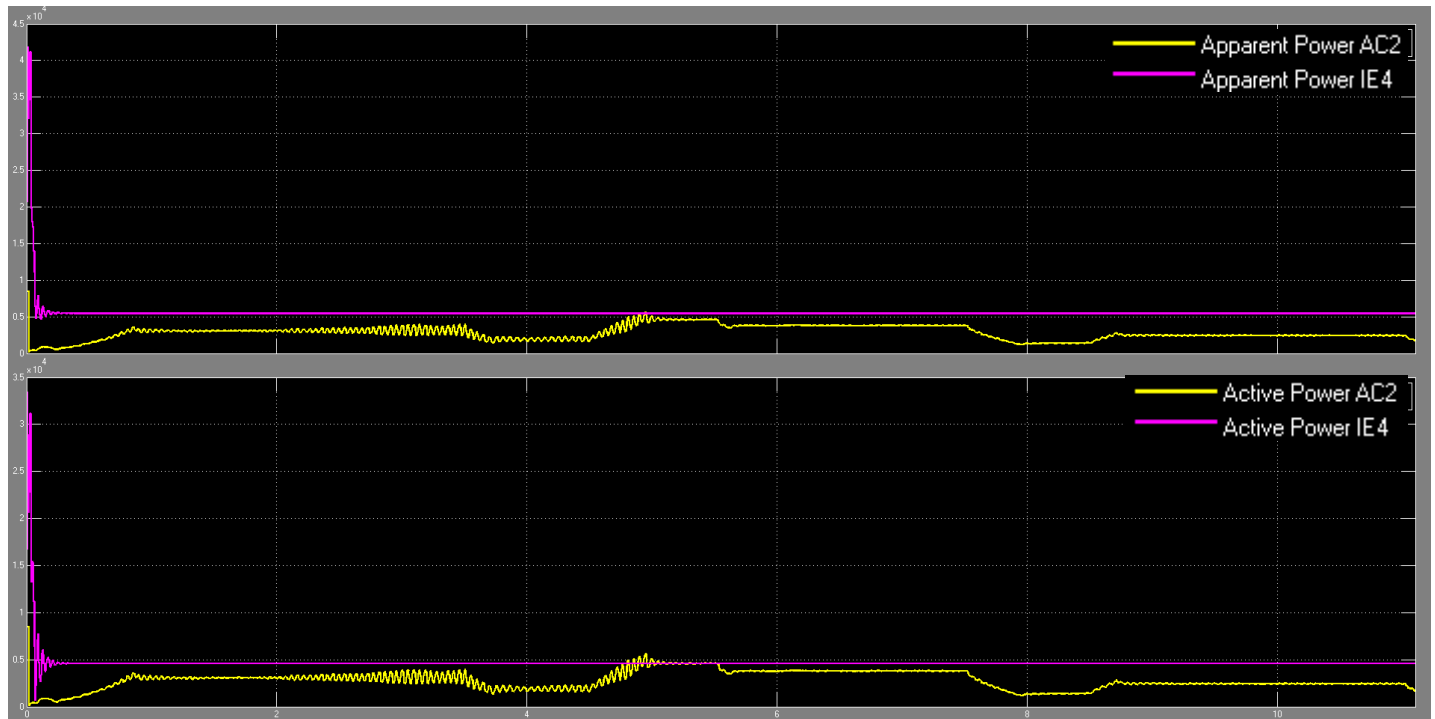
Σχήμα 4.42 παρατηρήσεις:

Στο σχήμα 4.42 παρατηρείται η σύγκριση του συντελεστή ισχύος και του βαθμού απόδοσης κατά την διάρκεια του χρόνου όπου υπάρχουν διαφοροποιήσεις στο σύστημα της μονάδας ελέγχου-κινητήρα. Ο συντελεστής ισχύος είναι ανώτερος σε όλη την διάρκεια της προσομοίωσης, ενώ στον αντίποδα η απόδοση του κινητήρα είναι σχεδόν πάντα ανώτερη καθ' όλη την διάρκεια της προσομοίωσης.

Σχήμα 4.42 εξηγήσεις και συμπεράσματα:

Στην περίπτωση του συντελεστή ισχύος, στο σύστημα μονάδας ελέγχου-κινητήρα ακόμη και με τις διαφοροποιήσεις του φορτίου ο συντελεστής ισχύος είναι $>0,99$ και αυτό είναι λογικό εφόσον είναι γνωστή η λειτουργία των πυκνωτών του διαύλου DC.

Στην περίπτωση του βαθμού απόδοσης, το σύστημα μονάδας ελέγχου-κινητήρα υπολείπεται της τιμής του κινητήρα με απ' ευθείας τροφοδοσία. Αυτό είναι λογικό αφού ο βαθμός απόδοσης του συστήματος σε κάθε περίπτωση είναι: $\eta_{PDS} = \eta_{VFD} * \eta_{MOTOR}$



Σχήμα 4.43 Σύγκριση γραφημάτων της πραγματικής και της φαινόμενης ισχύος που καταναλώνονται, από το σύστημα μονάδας ελέγχου *Scalar Control SV-PWM* -κινητήρα και από τον κινητήρα κλάσης *IE4*, σε σχέση με τον χρόνο.

Σχήμα 4.43 παρατηρήσεις:

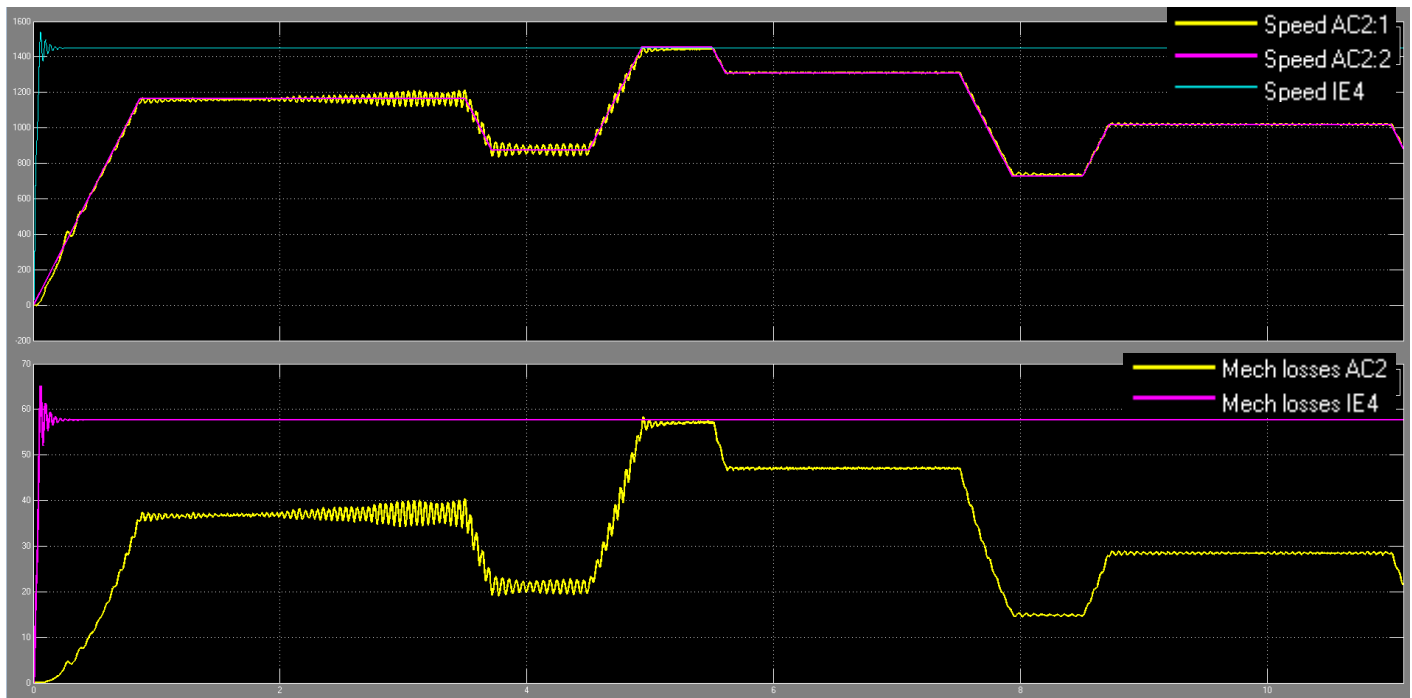
Στο σχήμα 4.43 δίνονται τα γραφήματα της πραγματικής και της φαινόμενης ηλεκτρικής ισχύος σε σχέση με τον χρόνο, παρατηρείται ότι η πραγματική ισχύς που καταναλώνεται από το σύστημα μονάδας ελέγχου-κινητήρα ρυθμίζεται από τις απαιτήσεις του φορτίου σε κάθε χρονική στιγμή εν αντιθέσει με τον κινητήρα που λειτουργεί με απ' ευθείας τροφοδοσία. Στην ονομαστική τιμή της ροπής φορτίου στροφών, το σύστημα μονάδας ελέγχου -κινητήρα καταναλώνει μεγαλύτερη πραγματική ισχύ 4655 Watt σε σχέση με τον κινητήρα που λειτουργεί με απ' ευθείας τροφοδοσία 4400 Watt

Ως προς το θέμα της φαινόμενης ισχύος εν αντιθέσει με τον κινητήρα που λειτουργεί με απ' ευθείας τροφοδοσία, για το σύστημα μονάδας ελέγχου-κινητήρα δείχνει να ταυτίζεται ως μέγεθος η πραγματική με την φαινόμενη ισχύ.

Σχήμα 4.43 εξηγήσεις και συμπεράσματα:

Στο σημείο της ονομαστικής τιμής του φορτίου, της ροπής και των στροφών το σύστημα μονάδας ελέγχου-κινητήρα καταναλώνει μεγαλύτερη πραγματική ισχύ σε σχέση με τον κινητήρα που λειτουργεί με απ' ευθείας τροφοδοσία. Αυτό είναι λογικό λόγω των πρόσθετων απωλειών της μονάδας ελέγχου, δηλαδή απώλειες αγωγιμότητας, απώλειες μεταγωγής, απώλειες στον διάλο DC. Αυτό δείχνει, όπως και προηγουμένως, ότι τα οφέλη της χρήσης του συστήματος μονάδας ελέγχου-κινητήρα υπάρχουν σε περιπτώσεις εφαρμογών όπου οι κινητήρες δεν λειτουργούν συνεχώς στην ονομαστική τους ισχύ.

Η φαινόμενη ισχύς ταυτίζεται με την πραγματική για το σύστημα μονάδας ελέγχου-κινητήρα όπως έχει αναφερθεί παραπάνω λόγω του συντελεστή ισχύος ο οποίος είναι $>0,99$.



Σχήμα 4.44 Σύγκριση γραφημάτων της ταχύτητας και των μηχανικών απωλειών για το σύστημα μονάδας ελέγχου Scalar Control SV-PWM -κινητήρα και τον κινητήρα κλάσης IE4, σε σχέση με τον χρόνο.

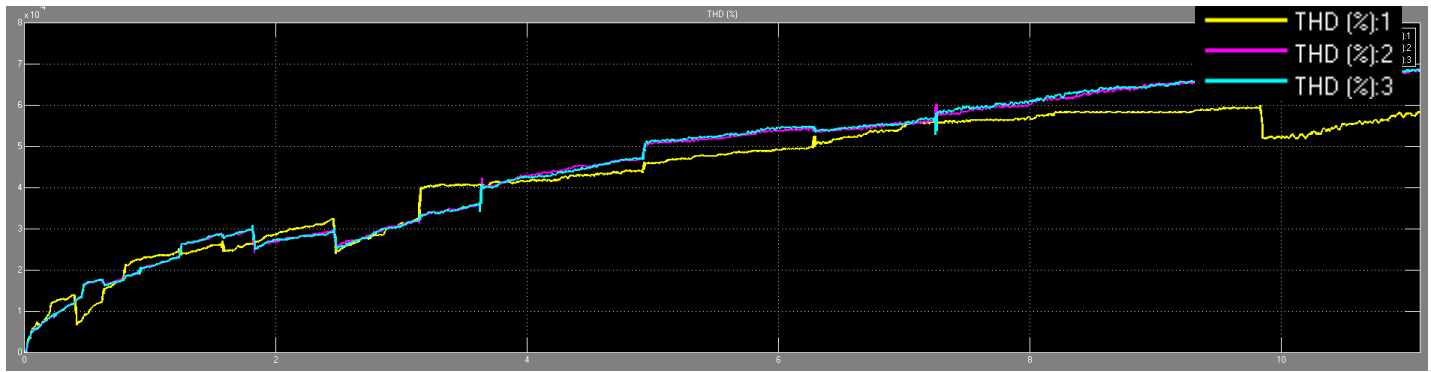
Σχήμα 4.44 παρατηρήσεις:

Στο σχήμα 4.44 δίνονται τα γραφήματα της ταχύτητας και των μηχανικών απωλειών παρατηρείται ότι το σύστημα μονάδας ελέγχου-κινητήρα έχει ταλαντώσεις στην ταχύτητά μικρότερες όμως σε σχέση με το γράφημα της ροπής.

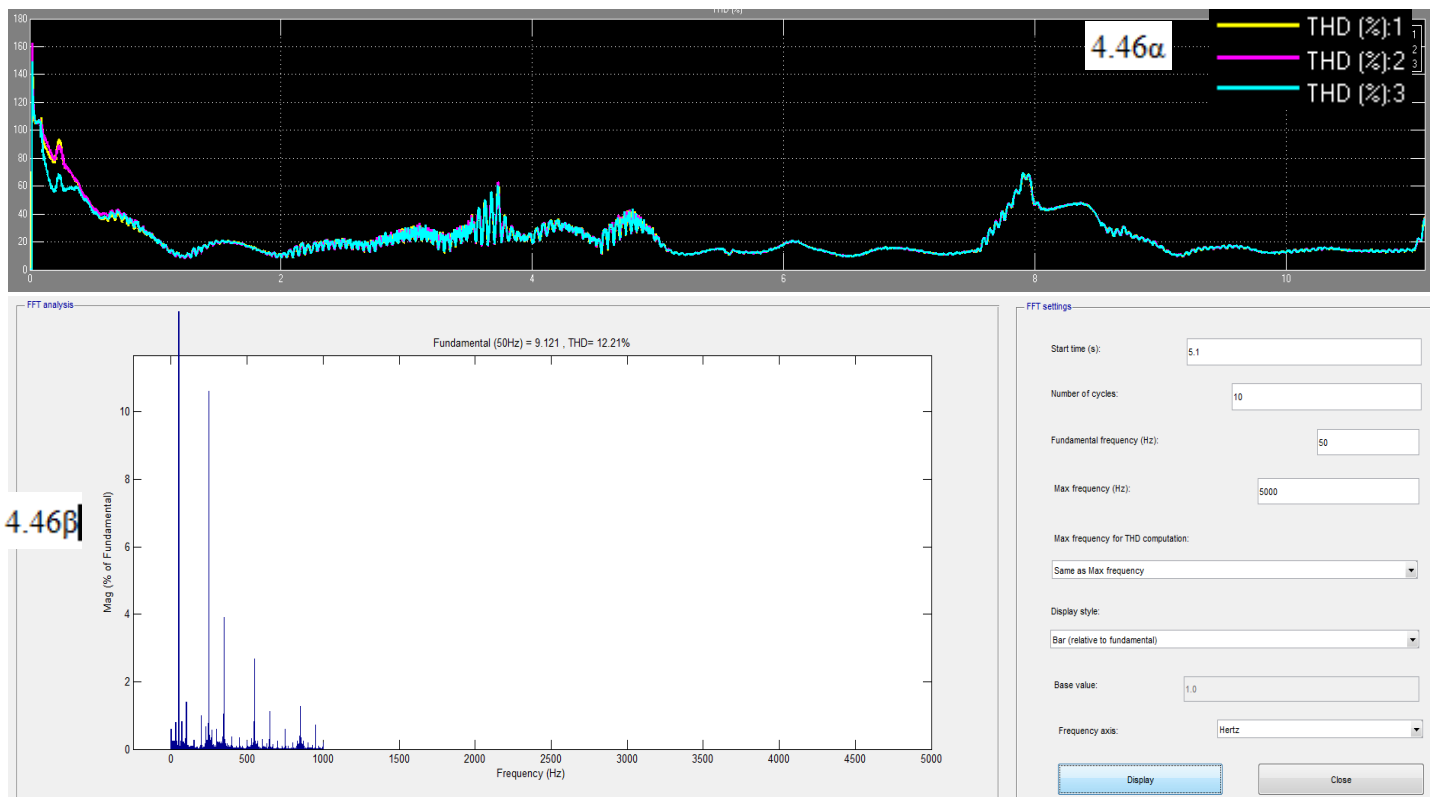
Σχήμα 4.44 εξηγήσεις και συμπεράσματα:

Φυσιολογικά φαίνεται πιο γραμμικό το γράφημα της ταχύτητας σε σχέση με αυτό της ροπής αφού φιλτράρεται από την ίδια την αδράνεια του συστήματος. Αρνητικό σημείο αναφοράς είναι ότι στο χρονικό διάστημα που θα έπρεπε να λειτουργεί με ταχύτητα αναφοράς 1455rpm το σύστημα δεν καταφέρνει να αποδώσει πάνω από 1443 rpm. Λειτουργεί με σφάλμα ταχύτητας 0,82%

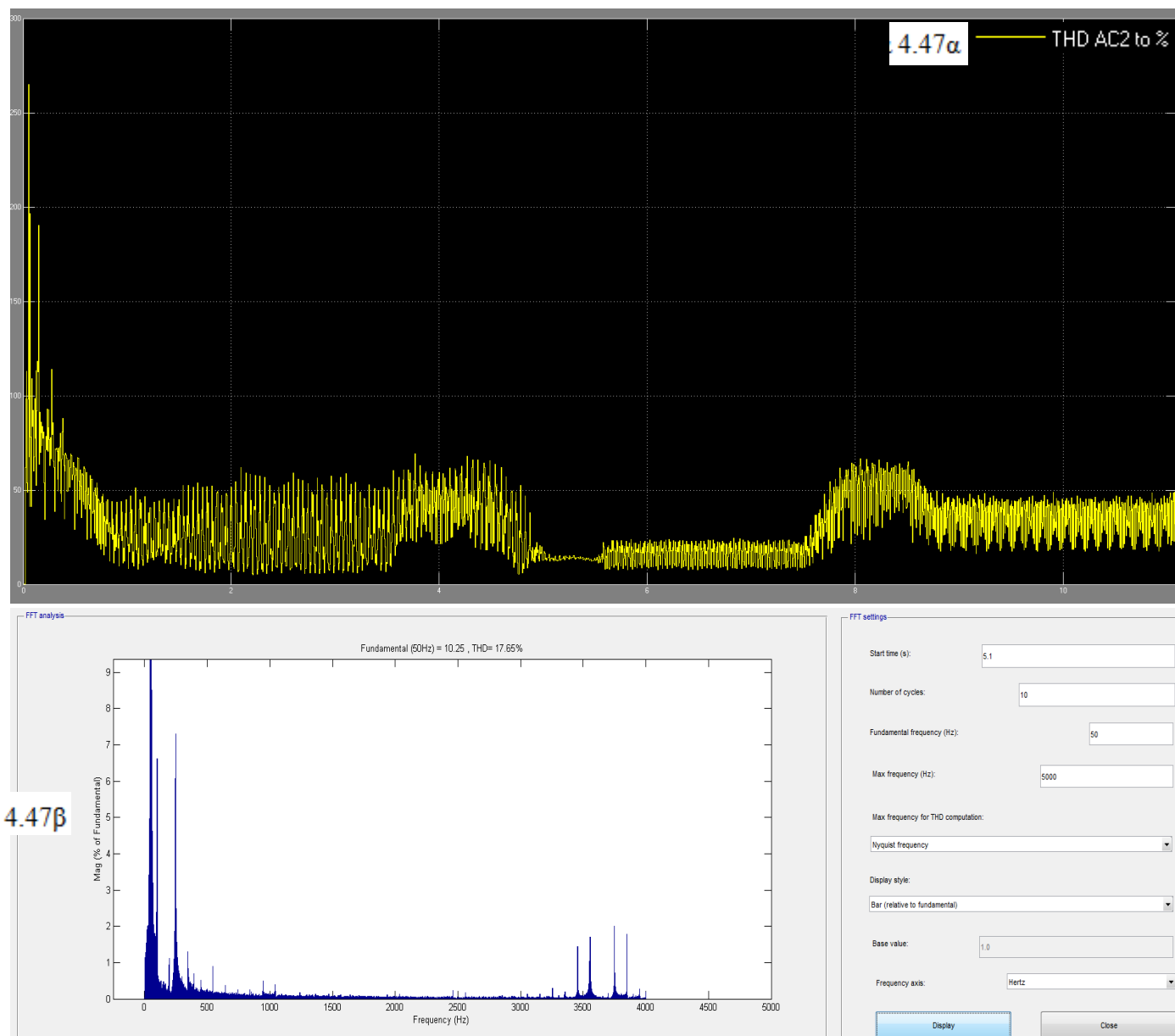
Οι μηχανικές απώλειες οι οποίες είναι ανάλογες των στροφών του κινητήρα είναι χαμηλότερες στο σύστημα αφού ακολουθούν την ταχύτητα αναφοράς. Σίγουρα οι ταλαντώσεις της ταχύτητας είναι αρνητικό σημείο αναφοράς, εφόσον καταπονούν τον μηχανικό εξοπλισμό, μειώνοντας τον χρόνο ζωής του.



Σχήμα 4.45 Γράφημα με τις αρμονικές τάσης που παρουσιάζονται ενώ λειτουργεί το σύστημα μονάδας ελέγχου Scalar Control SV-PWM -κινητήρα, σε σχέση με τον χρόνο.



Σχήμα 4.46 Γραφήματα που αφορούν 4.46α) τις αρμονικές ρεύματος οποίες παρουσιάζονται σε σχέση με τον χρόνο και 4.46β) η FFT ανάλυση στο πεδίο της συχνότητας για το ρεύμα, ενώ λειτουργεί το σύστημα μονάδας ελέγχου Scalar Control SV-PWM -κινητήρα.



Σχήμα 4.47 Γραφήματα που αφορούν 4.47α) τις αρμονικές ρεύματος που παρουσιάζονται σε σχέση με τον χρόνο, στο τριφασικό τύλιγμα του στάτη και 4.47β) η FFT ανάλυση στο πεδίο της συχνότητας για το ρεύμα, ενώ λειτουργεί το σύστημα μονάδας ελέγχου *Scalar Control SV-PWM* - κινητήρα.

Σχήμα 4.45, 4.46, 4.47 παρατηρήσεις:

Το σύστημα μονάδας ελέγχου-κινητήρα δημιουργεί φαινόμενα αρμονικών, λόγω των ημιαγωγών της μονάδας ελέγχου οι οποίοι άγουν διακοπτόμενα διαμορφώνοντας συνεχώς την επιθυμητή ισχύ τροφοδοτώντας τον κινητήρα. Στο σχήμα 4.45 δίνεται το γράφημα με τις αρμονικές τάσης σε σχέση με τον χρόνο, στην τροφοδοσία. Στο σχήμα 4.46α δίνεται το γράφημα με τις αρμονικές έντασης σε σχέση με τον χρόνο, στην τροφοδοσία του συστήματος, στο σχήμα 4.46β δίνεται η ανάλυση FFT, με το ποσοστό της παραμόρφωσης κοντά στο ονομαστικό σημείο λειτουργίας για την τροφοδοσία του συστήματος. Στο σχήμα 4.47α δίνεται το γράφημα με τις αρμονικές έντασης σε σχέση με τον χρόνο, στα τυλίγματα του στάτη, στο σχήμα 4.47β δίνεται η

ανάλυση FFT με το ποσοστό της παραμόρφωσης στα τυλίγματα του στάτη, στο ίδιο χρονικό σημείο που μετρήθηκε και η παραμόρφωση για την τροφοδοσία του συστήματος .

Σχήμα 4.45, 4.46 εξηγήσεις και συμπεράσματα:

Οι αρμονικές, περιορίζονται με τα παθητικά φίλτρα και τις αυτεπαγωγές γραμμής έτσι ώστε να είναι κάτω των επιτρεπτών ορίων παραμόρφωσης τάσης $THD_{max}\% = 5\%$.

Το δείγμα της κυματομορφής το οποίο αναλύεται με το FFT tool είναι 10 κύκλοι.

Παρατηρώντας την κυματομορφή η παραμόρφωση της τάσης είναι $<5\%$. Άρα βρίσκεται εντός των ορίων που θέτονται σχετικά.

Η παραμόρφωση της έντασης στην γραμμή εισόδου στο σύστημα, είναι μεγαλύτερη με ελάχιστη τιμή 9% και μέγιστη 160%. Η παραμόρφωση γίνεται μεγαλύτερη στις εναλλαγές του φορτίου και κυρίως όταν ο κινητήρας δουλεύει σε χαμηλότερη φόρτιση. Όμως ενώ σε χαμηλότερη φόρτιση του κινητήρα η αρμονική παραμόρφωση είναι μεγαλύτερη, το ενεργό ρεύμα των αρμονικών μικραίνει αφού ισχύει:

$$THDi = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I^2_{hrms}}}{I_{1rms}}$$

Το THD% ς είναι 6,56% στα 250Hz, 5,89% στα 350Hz, 2,79% στα 550Hz, 1,03% στα 650Hz ενώ οι επόμενες αρμονικές είναι πολύ χαμηλού πλάτους. Οι αρμονικές περιορίστηκαν από την αυτεπαγωγή γραμμής και τα δύο παθητικά διπλοσυντονιζόμενα φίλτρα σε αυτές τις τιμές.

Σχήμα 4.47 εξηγήσεις και συμπεράσματα:

Στο FFT Analysis παρατηρούνται ενδιάμεσες αρμονικές κοντά στην ονομαστική συχνότητα και αρμονικές με συχνότητες 3,5kHz έως 4,5kHz. Αυτό είναι φυσιολογικό αφού η SV-PWM που ελέγχει τον αντιστροφέα ο οποίος διαμορφώνει τις κυματομορφές εξόδου, λειτουργεί σε αυτές τις συχνότητες. Η αρμονική παραμόρφωση του ρεύματος που παρουσιάζεται στον στάτη στην ονομαστική φόρτιση του επαγωγικού κινητήρα έχει τιμή 17,65% την χρονική στιγμή όπου το μέτρο του ρεύματος κορυφής είναι 10,25A. Το FFT Analysis tool δείχνει αρμονικό περιεχόμενο ως τα 5kHz όπου μας ενδιαφέρει το δείγμα. Το THD% δείχνει ενδιάμεσες αρμονικές με παραμόρφωση 13,20% στα 45Hz, 10,03 % στα 55Hz, 5,36% στα 60Hz, 3,19% στα 65Hz, ενώ οι επόμενες ενδιάμεσες αρμονικές κοντά στην θεμελιώδη συχνότητα είναι πολύ χαμηλού πλάτους Το THD% είναι 7,1 στα 100Hz, στα 245Hz είναι 9,03%, στα , στα 3750Hz είναι 2,17% και στα 3850 Hz είναι 1,69%

Πίνακας 10 Απαιτήσεις της εφαρμογής βάσει του πίνακα 4 και οι τιμές που προκύπτουν από την προσομοίωση της χρήσης μονάδας ελέγχου *Scalar Control SV-PWM* –κινητήρα

Επιδόσεις συστήματος μονάδας ελέγχου με κινητήρα IE4							
Τιμές προσομοίωσης							
Ταχύτητα (rpm)	Ταχύτητα (rad/sec)	Ισχύς στην έξοδο (W)	Ισχύς στην έξοδο %	Ροπή στον άξονα (Nm)	Ροπή στον άξονα %	Συντελεστής ισχύος	Απόδοση %
1440	150,90	4013	100	26,6	100,75	0,99	86,20
1309,5	137,13	3450	86,25	25,15	95,26	0,99	84,14
1164	121,89	2700	67,5	22,15	83,90	0,99	81,35
1018,5	106,657	2050	51,25	19,22	72,80	0,99	79,54
873	91,42	1500	37,5	16,40	62,12	0,99	77
727,5	76,18	1050	26,25	13,78	52,19	0,99	75

4.3.2.1 Εξοικονόμηση ενέργειας και κόστους στην περίπτωση χρήσης μονάδας ελέγχου στροφών *Scalar Control SV-PWM* για την αντλία

Για την εύρεση της εξοικονόμησης ενέργειας και κόστους χρησιμοποιήθηκαν τα στοιχεία του πίνακα 10 για να υπολογιστεί για κάθε ισχύ εξόδου η ετήσια κατανάλωση του συστήματος μονάδας ελέγχου - κινητήρα. Στους υπολογισμούς μόνο στην γραμμή για $P_L:100\%$ χρησιμοποιείται η ισχύς οριακά μεγαλύτερη που όμως προκύπτει από την προσομοίωση.

$$P_L 100\%, W_L = 1 * \frac{4013 \text{ W}}{0,862} * 8760\text{h} * 0,1 = 4078,17 \text{ KWh}$$

$$P_L 86,25\%, W_L = 0,8625 * \frac{4000 \text{ W}}{0,8414} * 8760\text{h} * 0,2 = 7183,74 \text{ KWh}$$

$$P_L 67,5\%, W_L = 0,675 * \frac{4000 \text{ W}}{0,8135} * 8760\text{h} * 0,25 = 7268,59 \text{ KWh}$$

$$P_L 51,25\%, W_L = 0,5125 * \frac{4000 \text{ W}}{0,7954} * 8760\text{h} * 0,25 = 5644,33 \text{ KWh}$$

$$P_L 37,5\%, W_L = 0,375 * \frac{4000 \text{ W}}{0,77} * 8760\text{h} * 0,10 = 1706,49 \text{ KWh}$$

$$P_L 26,25\%, W_L = 0,2625 * \frac{4000 \text{ W}}{0,75} * 8760\text{h} * 0,10 = 1226,4 \text{ KWh}$$

$$\text{Ετήσιο } W_L = 4078,17 + 7183,74 + 7268,59 + 5644,33 + 1706,49 + 1226,4 = 27107,72 \text{ KWh}$$

Ετήσιο W_L για την περίπτωση του κινητήρα ενεργειακής κλάσης IE4,

$$W_L = 1 * \frac{4000 \text{ W}}{0,912} * 8760\text{h} * 1 = 38421,05 \text{ KWh}$$

$$\frac{27107,72 \text{ KWh}}{38421,05 \text{ KWh}} = 0,7055 \text{ της ετήσιας κατανάλωσης σημαίνει } 29,45\% \text{ εξοικονόμηση ενέργειας}$$

Η ετήσια εξοικονόμηση για κόστος ενέργειας 0,10€/KWh θα είναι:
 $(38421,05 \text{ KWh} - 27107,72 \text{ KWh}) * 0,10\text{€/KWh} = 1131,33 \text{ €}$

4.3.3 3^η Εφαρμογή, συμπίεστης κοχλιωτός μικρής ισχύος σε μονάδα παραγωγής

Στην εφαρμογή, θα συγκριθεί η απόδοση για την περίπτωση της χρήσης κινητήρα ενεργειακής κλάσης IE4 χωρίς οδήγηση και την περίπτωση της χρήσης μονάδας ελέγχου στροφών με έλεγχο Scalar Control SV-PWM και κινητήρα κλάσης IE4. Ο κοχλιωτός συμπίεστης λειτουργεί στη δυσμενέστερη περίπτωση που μπορεί να αντιμετωπιστεί, για 24h/day, 365days/year, άρα το σύνολο 8760h/year.

Οι απαιτήσεις τροφοδοτήθηκαν στο σύστημα με μονάδα ελέγχου-κινητήρα σύμφωνα με τον πίνακα 5 της παραγράφου 3.2 με το υπόδειγμα των αναγκών της εφαρμογής. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης χρησιμοποιήθηκαν κατόπιν για την συμπλήρωση πίνακα με τις τιμές της απόδοσης του συστήματος. Βάσει αυτών των αποτελεσμάτων γίνεται σχετική ανάλυση και η οικονομική προσέγγιση.

Ο συνολικός χρόνος της προσομοίωσης ο οποίος βρίσκεται σε όλα τα παρακάτω γραφήματα στον οριζόντιο άξονα είναι 11s.

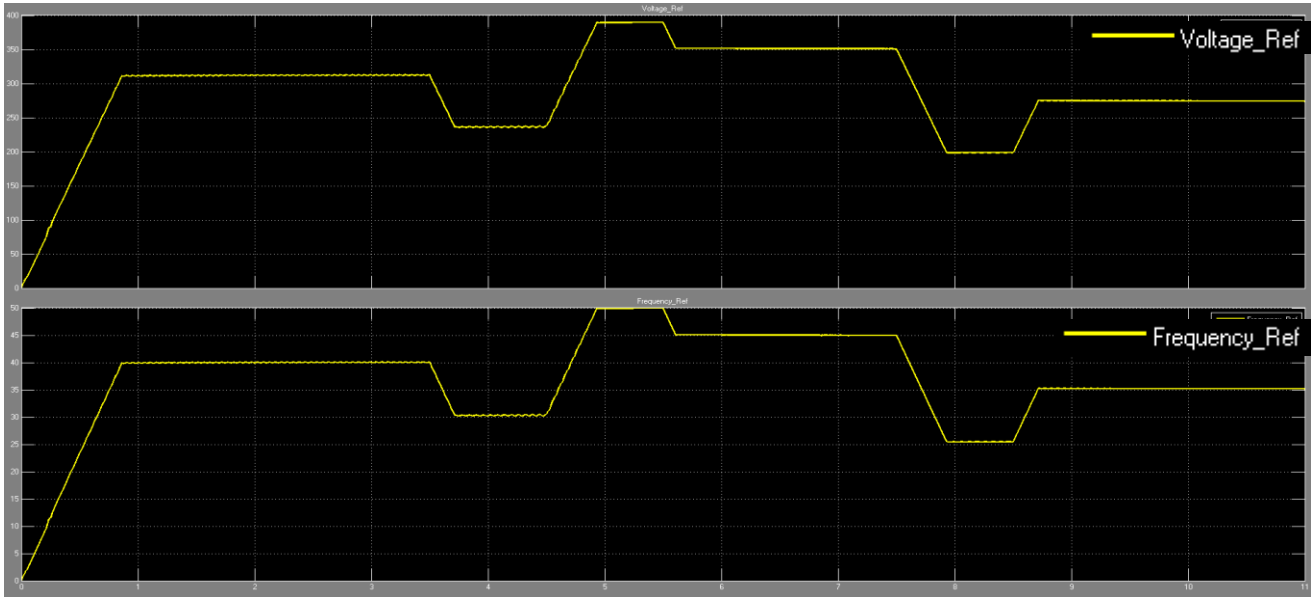
Από τον χαρακτήρα του φορτίου του αεροσυμπιεστή θετικής μετατόπισης ισχύει:

$$P_L = f(n), P_L = P_{\text{outnom}} * \left(\frac{U_{\text{Load}}}{U_{\text{nom}}} \right)$$

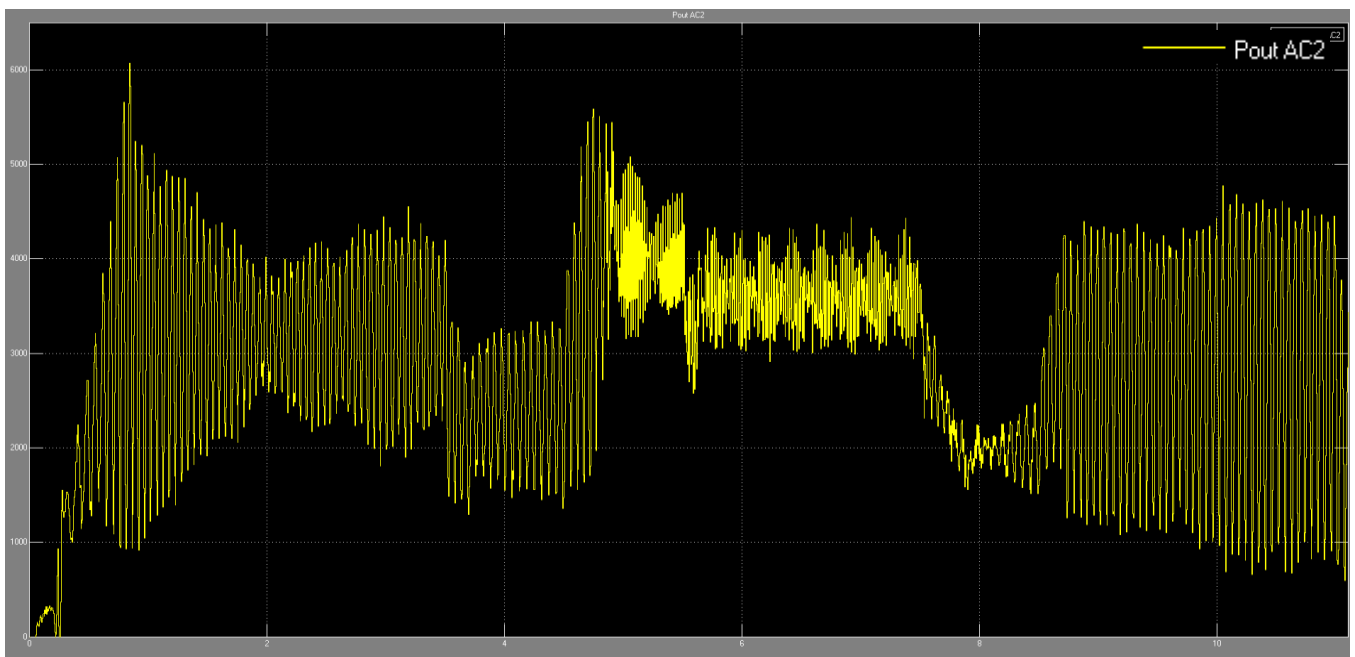
$$T_L = \text{σταθερό}$$



Σχήμα 4.48 Γράφημα φορτίου που εφαρμόζεται βάσει των απαιτήσεων του πίνακα 5, σε σχέση με τον χρόνο. Με βάση αυτόν εξετάζεται η συμπεριφορά του συστήματος μονάδας ελέγχου Scalar Control SV-PWM –κινητήρα



Σχήμα 4.49 Γράφημα της της τάσης αναφοράς και της συχνότητας αναφοράς που εφαρμόζει η μονάδα ελέγχου στροφών στον κινητήρα σε σχέση με τον χρόνο, σύμφωνα με την απαίτηση της ταχύτητας αναφοράς που προκύπτει από τον πίνακα 5. Το γράφημα δείχνει την αντιστοιχία V/f που χρησιμοποιεί ο ελεγκτής της ταχύτητας ο οποίος είναι κλιμακωτός.



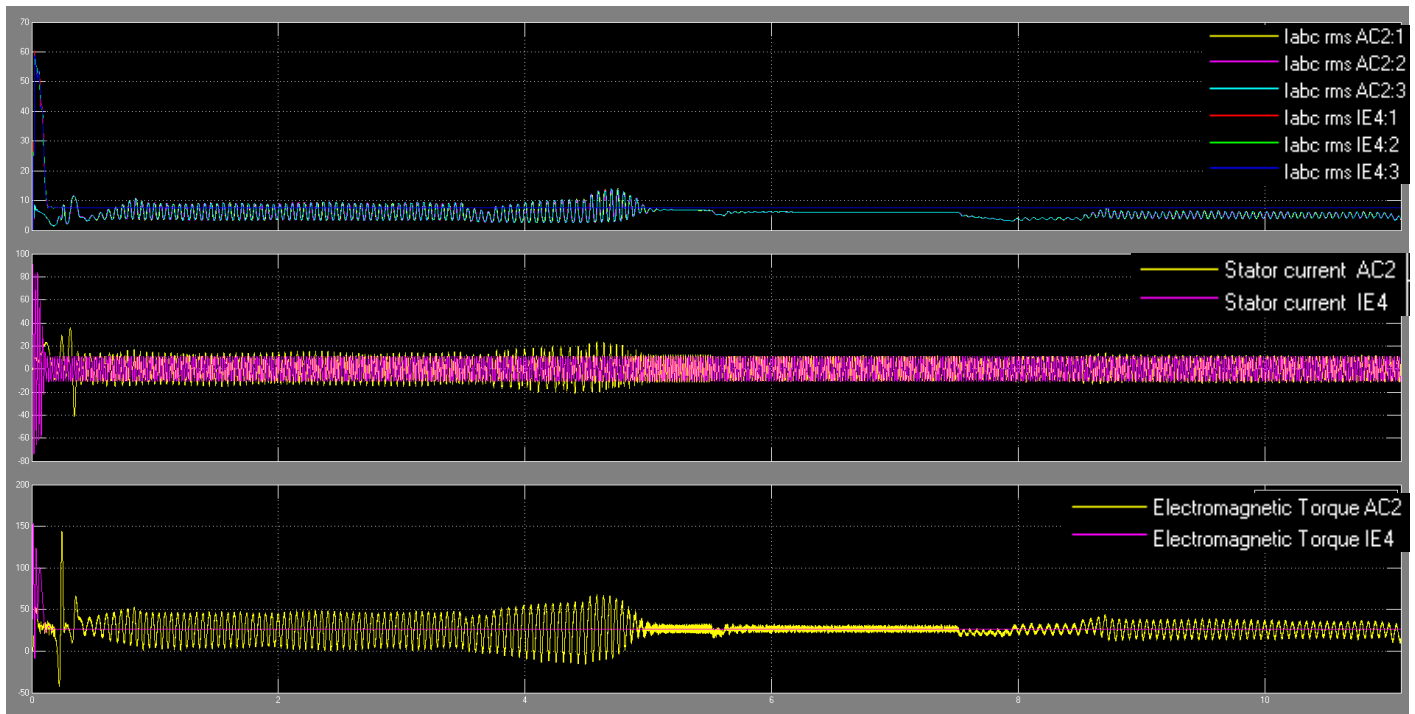
Σχήμα 4.50 Γράφημα της μηχανικής ισχύος εξόδου του συστήματος μονάδας ελέγχου *Scalar Control SV-PWM* - κινητήρα σε σχέση με τον χρόνο και σύμφωνα με τις απαιτήσεις φόρτισης της εφαρμογής, βάσει του πίνακα 5

Σχήμα 4.50 παρατηρήσεις:

Στο σχήμα 4.50 παρατηρείται το γράφημα της αποδιδόμενης ισχύος. Οι ταλαντώσεις του γραφήματος της αποδιδόμενης ισχύος, αποτελεί αρνητικό σημείο αναφοράς για το σύστημα μονάδας ελέγχου-κινητήρα, και δείχνει αστάθεια συμπεριφοράς σε αυτή την εφαρμογή.

Σχήμα 4.50 εξηγήσεις και συμπεράσματα:

Οι ταλαντώσεις της αποδιδόμενης μηχανικής ισχύος του συστήματος, οδηγεί στο συμπέρασμα ότι δεν υπάρχει επιτυχία στην οδήγηση αυτού του φορτίου σύμφωνα με τις απαιτήσεις. Οι ταλαντώσεις προκύπτουν από την αστάθεια στην απόδοση της ροπής και της ταχύτητας. Με εξαίρεση το ονομαστικό σημείο της απόδοσης, όπου υπάρχει μεγαλύτερη ισορροπία.



Σχήμα 4.51 Σύγκριση γραφημάτων για το σύστημα μονάδας ελέγχου *Scalar Control SV-PWM* - κινητήρα σε σχέση με τον κινητήρα κλάσης *IE4* ο οποίος λειτουργεί χωρίς οδήγηση. Λειτουργούν παράλληλα καταγράφοντας το ρεύμα rms ανα φάση, ρεύμα από κορυφή σε κορυφή στον στάτη και την αποδιδόμενη ροπή τους, σε σχέση με τον χρόνο

Σχήμα 4.51 παρατηρήσεις

Στο σχήμα 4.51 παρατηρούνται τα συγκριτικά γραφήματα του ρεύματος rms για τις τρεις φάσεις, του ρεύματος από κορυφή σε κορυφή για το τύλιγμα του στάτη και της ροπής. Το σύστημα με μονάδα ελέγχου-κινητήρα παρουσιάζει ταλαντώσεις στο ρεύμα και την ροπή του, με εξαίρεση το σημείο που δουλεύει με φόρτιση μεγαλύτερη του 80%, όπου εκεί παρουσιάζει γραμμική συμπεριφορά

Σχήμα 4.51 εξηγήσεις και συμπεράσματα:

Αυτό είναι αναμενόμενο αφού ο κλιμακωτός έλεγχος δεν διαχωρίζει τις συνιστώσες του ρεύματος και δεν ελέγχει αποτελεσματικά την ροπή όταν οι απαιτήσεις είναι υψηλές. Ο κινητήρας εκκινεί με πλήρες φορτίο από 0 rpm και η ροπή που απαιτείται είναι το άθροισμα της ροπής εκκίνησης και της ροπής φορτίου, ισχύει:

$$T_{acc} = J * \frac{\Delta \omega_{rpm/sec}}{\Delta t_{30}} * \pi = 0,030 * \frac{1350rpm/sec}{1.s\ 30} * 3,14 = 4.239Nm$$

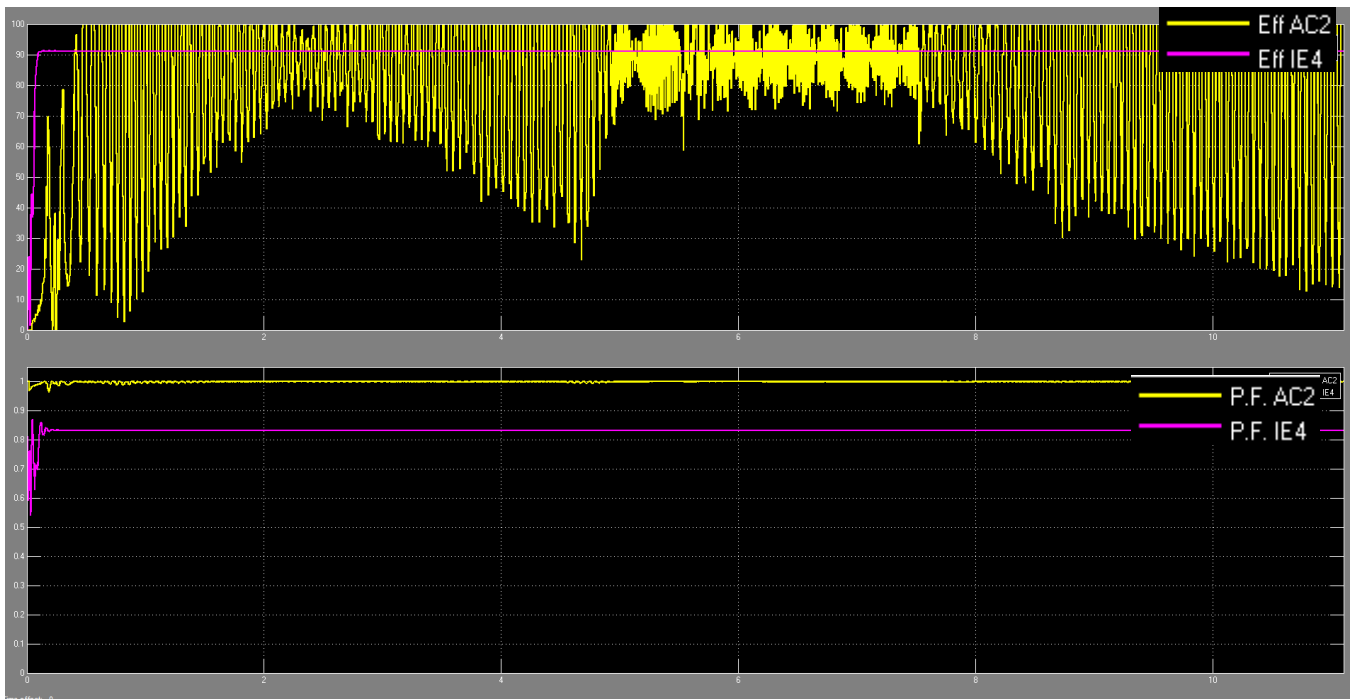
$$T_{acc} + T_L = 26,4 + 4,239 = 30,64 Nm$$

Η εκκίνησή του από στάση, γίνεται με φορτίο 1,16 φορές την ονομαστική ροπή του. Κατά την εκκίνηση το ρεύμα γραμμής φτάνει τα 12,2A οριακή τιμή για τις δυνατότητες μιας μονάδας οδήγησης για επαγωγικό κινητήρα 4kW, ακόμη ο στάτης του οδηγούμενου κινητήρα ζητάει ρεύμα κορυφής περίπου 21,5A δηλαδή 15,2 A rms κάποιες χρονικές στιγμές από 3,7s ως 4,4, σίγουρα το όριο θερμικής προστασίας I^2t του ελεγκτή θα σταματούσε την διαδικασία.

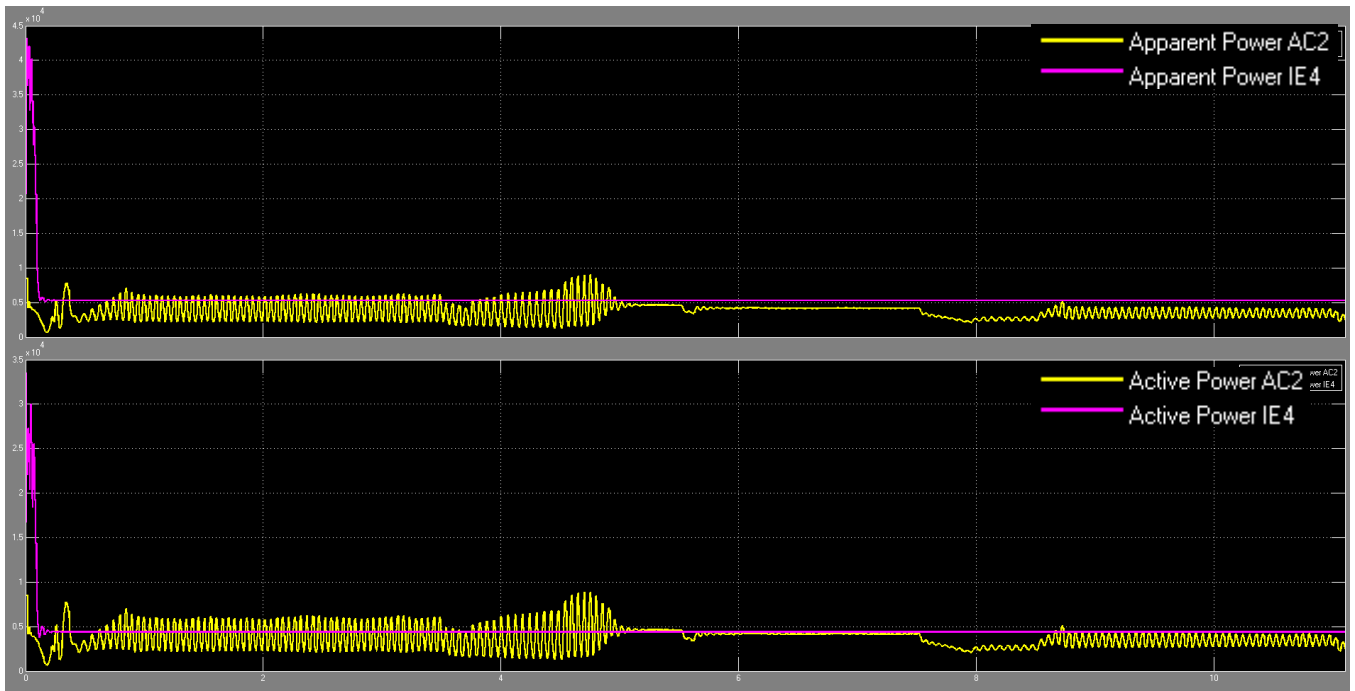
Η μεταβατική φάση της εκκίνησης στο χρονικό διάστημα από 0 ως 0,5s χαρακτηρίζεται από έντονες ταλαντώσεις των μεγεθών του σχήματος.

Με κατάλληλη παραμετροποίηση του $V_{\text{boost}} - \text{Torque}_{\text{boost}}$ ρυθμίζοντας την παράμετρο που ελέγχει την μαγνητική ροή, δηλαδή το V/f, το σύστημα μπορεί να λειτουργήσει πιο γραμμικά και αποδοτικά στις χαμηλότερες τιμές της ταχύτητας αναφοράς.

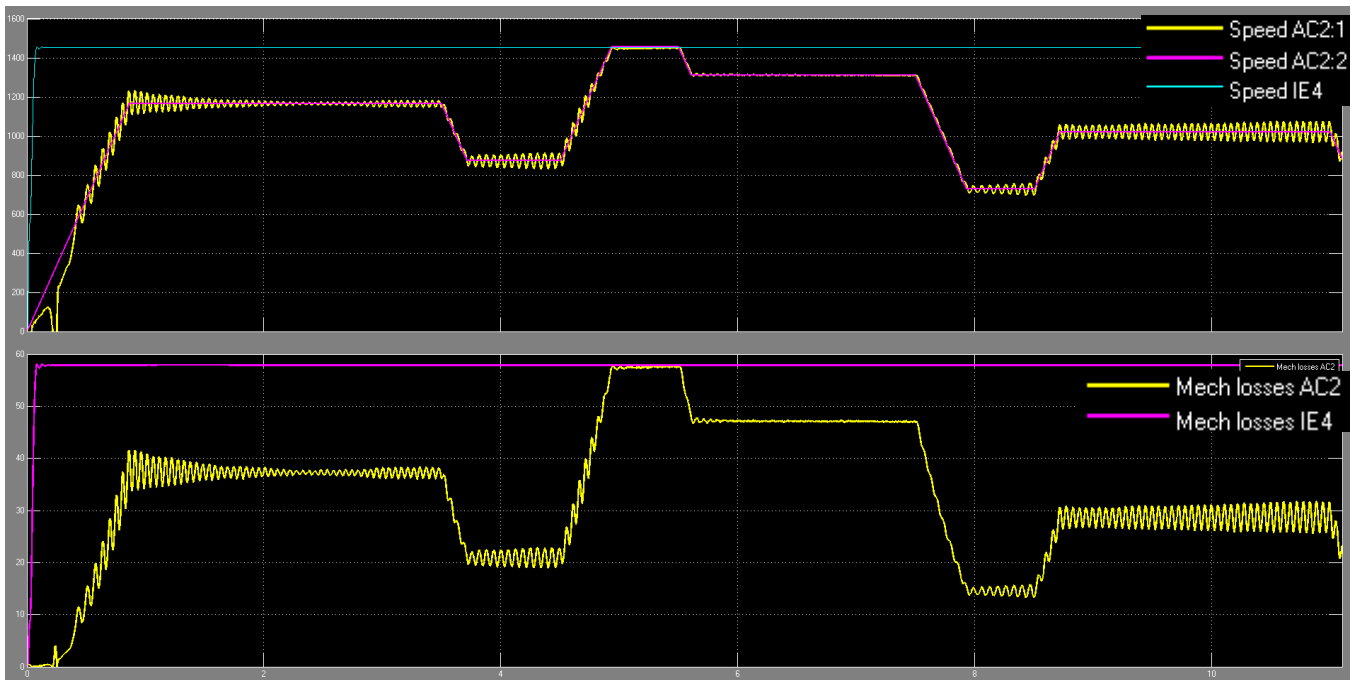
Αυτό δεν θα γίνει στην παρούσα εργασία όπου τα συστήματα θα συγκριθούν με ίδιες, τις βασικές παραμέτρους ελέγχου.



Σχήμα 4.52 Σύγκριση γραφημάτων για το σύστημα μονάδας ελέγχου Scalar Control SV-PWM - κινητήρα σε σχέση με τον κινητήρα κλάσης IE4 όπου λειτουργούν παράλληλα. Καταγράφονται η απόδοση %, ο συντελεστής ισχύος, σε σχέση με τον χρόνο.



Σχήμα 4.53 Σύγκριση γραφημάτων της πραγματικής και της φαινόμενης ισχύος που καταναλώνονται, από το σύστημα μονάδας ελέγχου *Scalar Control SV-PWM* -κινητήρα και από τον κινητήρα κλάσης *IE4*, σε σχέση με τον χρόνο.



Σχήμα 4.54 Σύγκριση γραφημάτων της ταχύτητας και των μηχανικών απώλειών για το σύστημα μονάδας ελέγχου *Scalar Control SV-PWM* -κινητήρα και τον κινητήρα κλάσης *IE4*, σε σχέση με τον χρόνο.

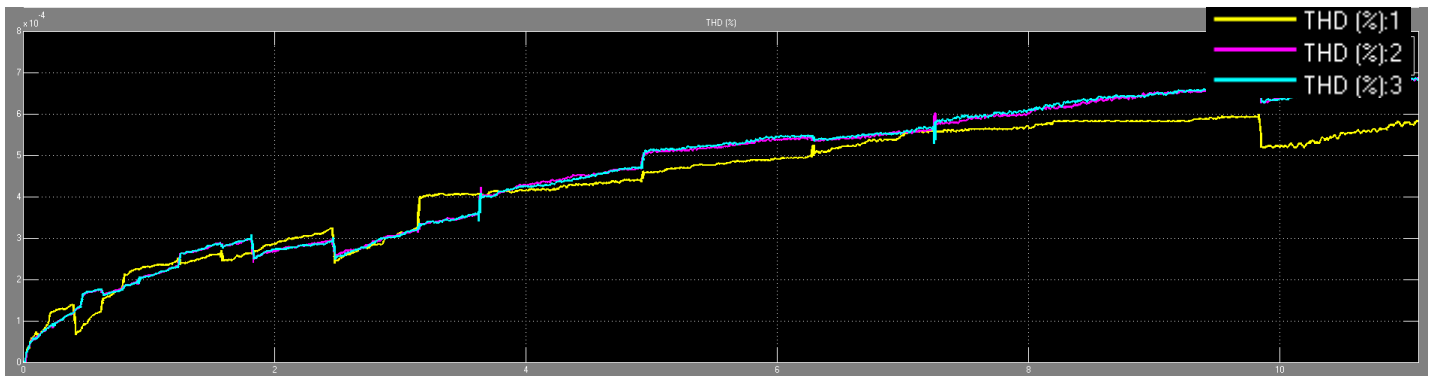
Σχήμα 4.54 παρατηρήσεις:

Στο σχήμα 4.54 δίνονται τα συγκριτικά γραφήματα της ταχύτητας και των μηχανικών απωλειών. Για το σύστημα μονάδας ελέγχου-κινητήρα, σε όλο το φάσμα των απαιτήσεων που

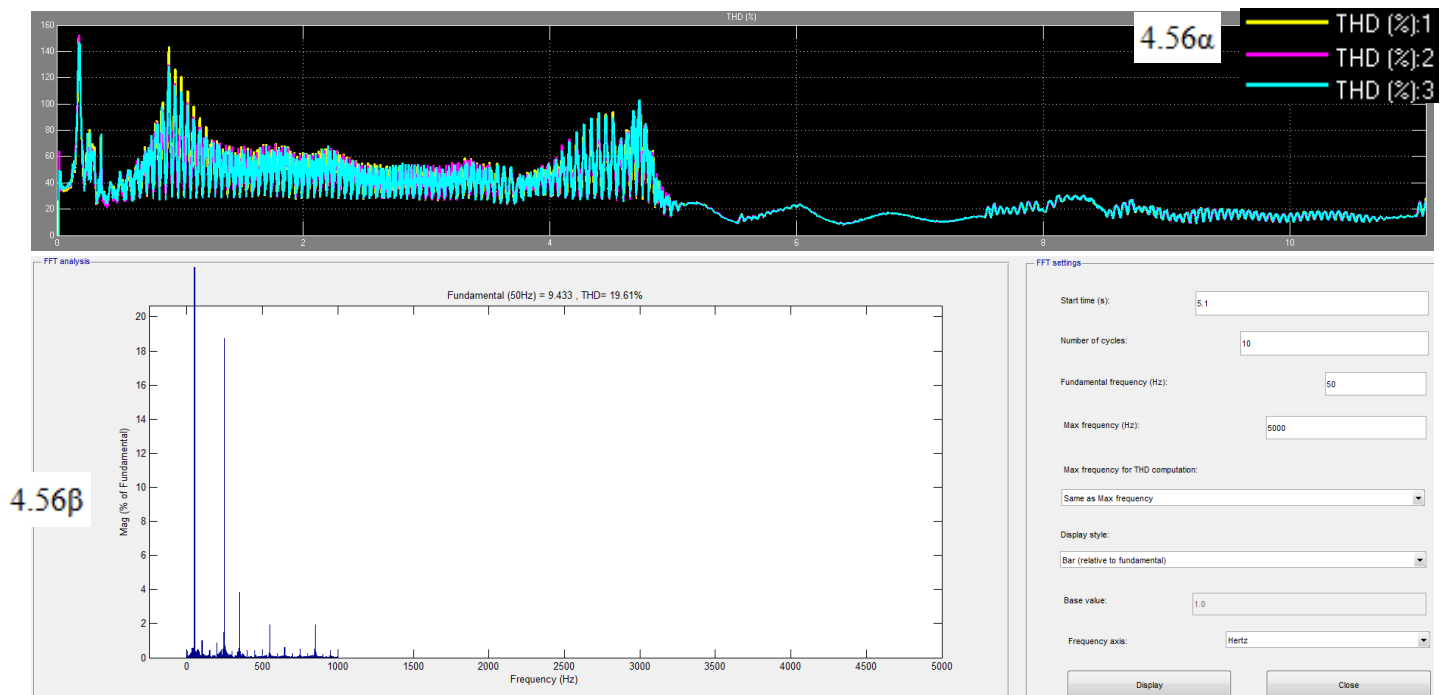
προκύπτουν από κάθε ταχύτητα αναφοράς, παρατηρείται πολύ σοβαρή ταλάντωση του συστήματος. Ακόμη, κατά την εκκίνηση ως τις 600 rpm με το φορτίο υπάρχει σοβαρή ταλάντωση και μεγάλη αυξομείωση των στροφών. Αυτό δείχνει ότι το σύστημα, δεν μπορεί να ανταπεξέλθει στο συγκεκριμένο φορτίο, με εξαίρεση όταν η ταχύτητα αναφοράς είναι στο ονομαστικό της σημείο και από το 80% επί της ονομαστικής ταχύτητας δηλαδή 1170 rpm.

Σχήμα 4.54 εξηγήσεις και συμπεράσματα:

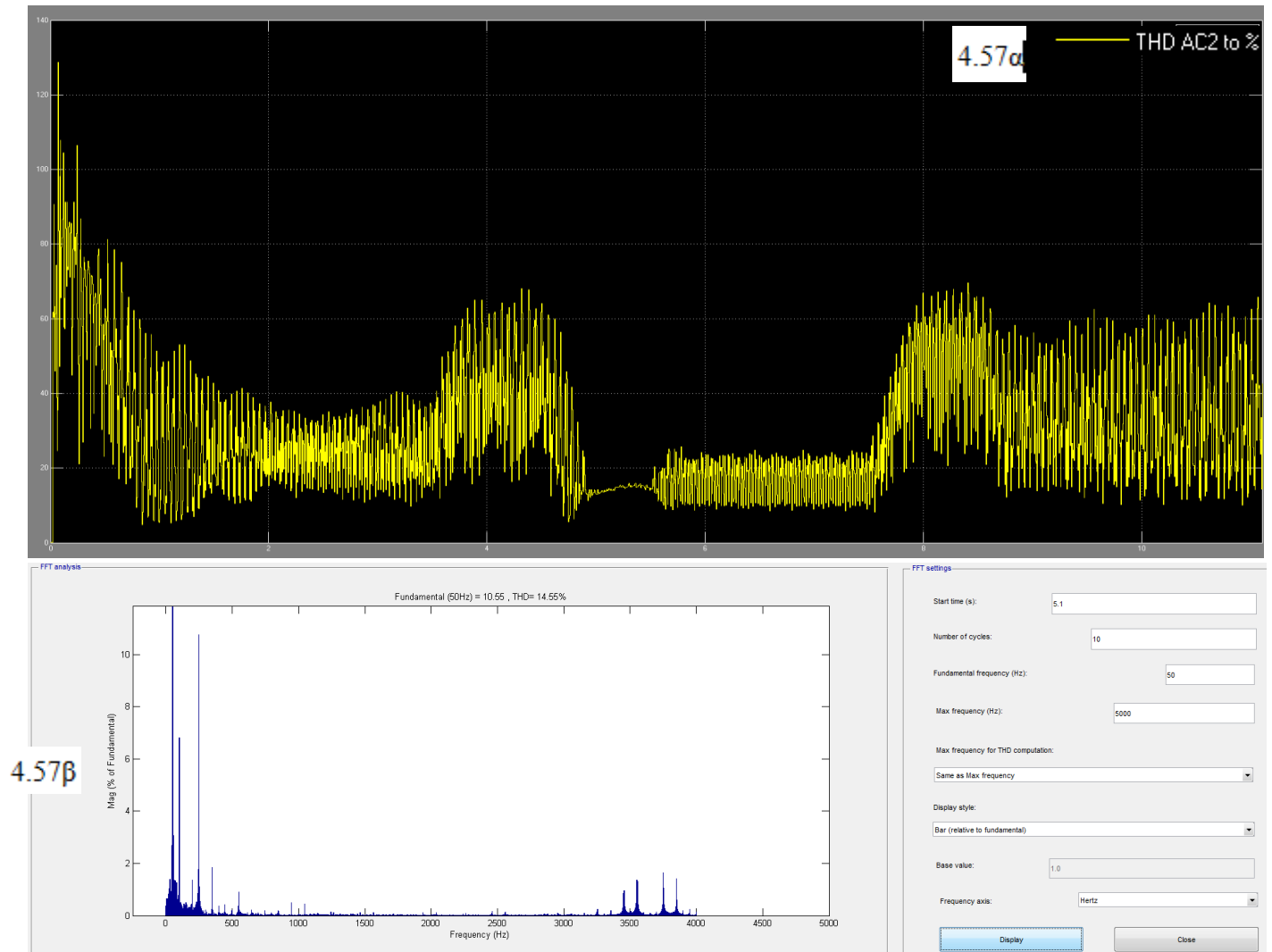
Η ταχύτητα παρουσιάζει μεγαλύτερη γραμμικότητα από την ροπή, αφού όπως και με τους προηγούμενους τύπους φορτίων, φιλτράρεται από την ροπή αδράνειας του εξοπλισμού. Όμως το σύστημα δεν φαίνεται να λειτουργεί σταθερά και αξιόπιστα.



Σχήμα 4.55 Γράφημα με τις αρμονικές τάσης, σε σχέση με τον χρόνο, που παρουσιάζονται ενώ λειτουργεί το σύστημα μονάδας ελέγχου *Scalar Control SV-PWM* –κινητήρα.



Σχήμα 4.56 Γραφήματα που αφορούν 4.56α) τις αρμονικές ρεύματος, σε σχέση με τον χρόνο, που παρουσιάζονται και 4.56β) η FFT ανάλυση στο πεδίο της συχνότητας για το ρεύμα, ενώ λειτουργεί το σύστημα μονάδας ελέγχου *Scalar Control SV-PWM* –κινητήρα.



Σχήμα 4.57 Γραφήματα που αφορούν 4.57α) τις αρμονικές ρεύματος, σε σχέση με τον χρόνο, που παρουσιάζονται στο τριφασικό τύλιγμα του στάτη και 4.57β) η FFT ανάλυση στο πεδίο της συχνότητας για το ρεύμα, ενώ λειτουργεί το σύστημα μονάδας ελέγχου-κινητήρα.

Πίνακας 11 Απαιτήσεις της εφαρμογής βάσει του πίνακα 5 και οι τιμές που προκύπτουν από την προσομοίωση της χρήσης μονάδας ελέγχου Scalar Control SV-PWM –κινητήρα

Επιδόσεις συστήματος μονάδας ελέγχου με κινητήρα IE4							
Τιμές προσομοίωσης							
Ταχύτητα (rpm)	Ταχύτητα (rad/sec)	Ισχύς στην έξοδο (W)	Ισχύς στην έξοδο %	Ροπή στον άξονα (Nm)	Ροπή στον άξονα %	Συντελεστής ισχύος	Απόδοση %
1452	152,03	-	-	26.5	100,37	0,99	-
1309,5	137.13	-	-	26.5	100,37	0,99	-
1170	121.89	-	-	26.5	100,37	0,99	-
1028	106.657	-	-	26.5	100,37	0,99	-
870	91.42	-	-	26.5	100,37	0,99	-
720	76.18	-	-	26.5	100,37	0,99	-

4.3.3.1 Εξοικονόμηση ενέργειας και κόστους στην περίπτωση χρήσης μονάδας ελέγχου στροφών *Scalar Control SV-PWM* για τον κοχλιωτό συμπιεστή

Δεν υπάρχει νόημα να αναλυθεί η εξοικονόμηση ενέργειας και το κόστος στην περίπτωση του κοχλιωτού συμπιεστή. Το αποτέλεσμα της προσομοίωσης, μας οδηγεί στο συμπέρασμα ότι το σύστημα οδήγησης είναι ακατάλληλο για την περίπτωση, λόγω της περιορισμένης ευστάθειας που έχει για αυτό το φορτίο, άρα δεν θα μπορούσε να έχει σωστή λειτουργία στην εφαρμογή.

4.4 Σύγκριση συστήματος μονάδας ελέγχου Field Oriented Control -κινητήρα με όμοιο κινητήρα 4kW με απ' ευθείας τροφοδοσία από το δίκτυο

4.4.1 1^η Εφαρμογή, φυγοκεντρικός ανεμιστήρας για ανακύκλωση αέρα σε χώρο αποθήκης.

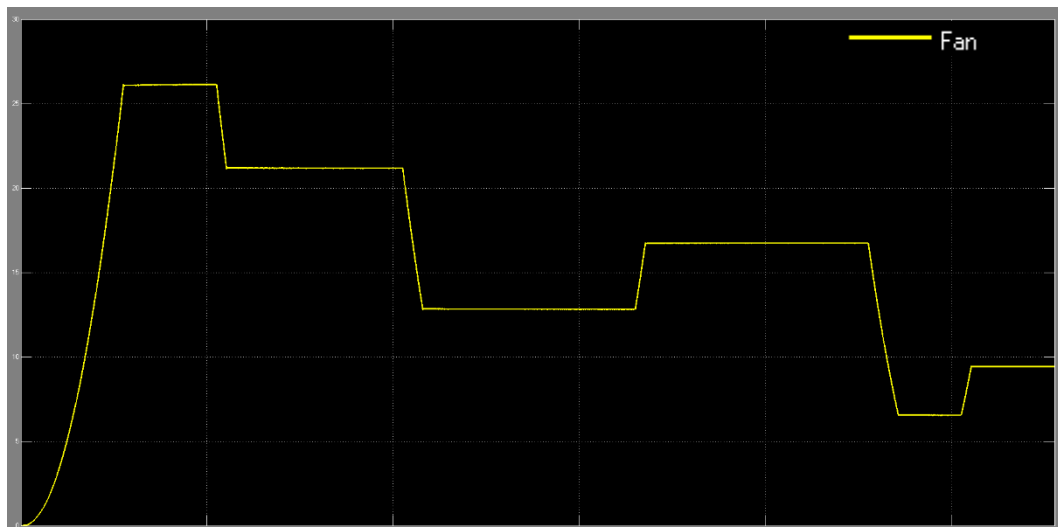
Στην εφαρμογή, θα συγκριθεί η απόδοση για την περίπτωση της χρήσης κινητήρα ενεργειακής κλάσης IE4 χωρίς οδήγηση και την περίπτωση της χρήσης κινητήρα κλάσης IE4, με έλεγχο Field-Oriented Control. Ο φυγοκεντρικός ανεμιστήρας λειτουργεί στην δυσμενέστερη περίπτωση που μπορεί να αντιμετωπιστεί, για 24h/ημέρα, 365 ημέρες/έτος, άρα το σύνολο 8760h/έτος.

Οι απαιτήσεις τροφοδοτήθηκαν στο σύστημα μονάδας ελέγχου-κινητήρα σύμφωνα με τον πίνακα 3 της παραγράφου 3.2 με το υπόδειγμα των αναγκών της εφαρμογής. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης χρησιμοποιήθηκαν κατόπιν για την συμπλήρωση πίνακα με τις τιμές της απόδοσης του συστήματος. Βάσει αυτών των αποτελεσμάτων, γίνεται σχετική ανάλυση και η οικονομική προσέγγιση.

Ο συνολικός χρόνος της προσομοίωσης ο οποίος βρίσκεται σε όλα τα παρακάτω γραφήματα στον οριζόντιο άξονα είναι 11s.

Από τον χαρακτήρα του φορτίου του φυγοκεντρικού ανεμιστήρα υπενθυμίζεται ότι ισχύει:

$$P_L = f(n^3), P_L = P_{\text{outnom}} * \left(\frac{U_{\text{Load}}}{U_{\text{nom}}}\right)^3$$
$$T_L = f(n^2)$$

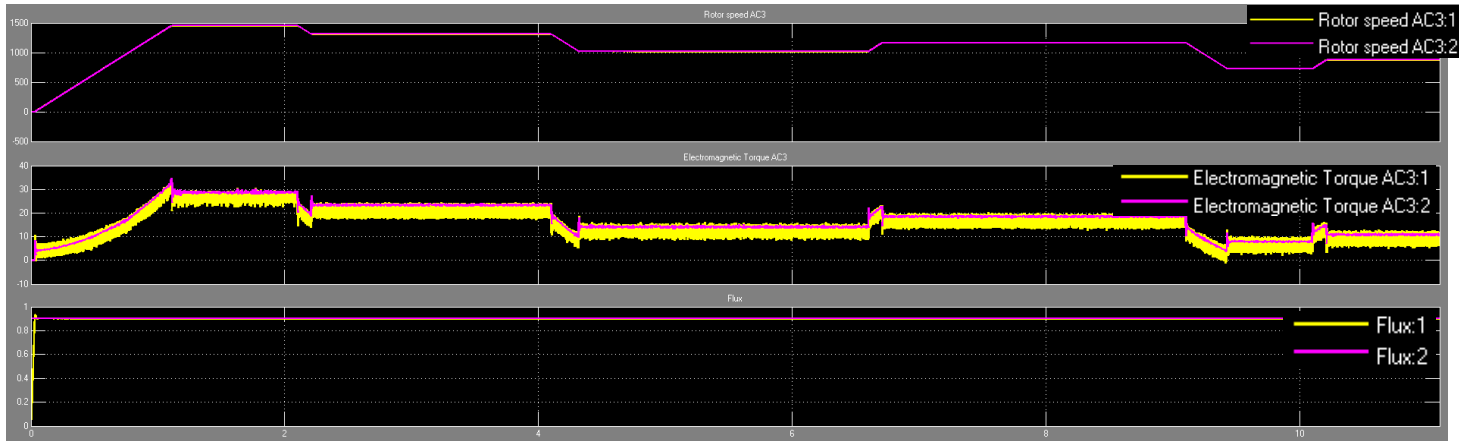


Σχήμα 4.58 Γράφημα του φορτίου που εφαρμόζεται βάσει των απαιτήσεων του πίνακα 3, σε σχέση με τον χρόνο. Με βάση αυτό εξετάζεται η συμπεριφορά του συστήματος μονάδας ελέγχου Field Oriented Control –κινητήρα

Σχήμα 4.58 παρατηρήσεις:

Το γράφημα της καμπύλης του φορτίου έχει επιλεγεί να εξαχθεί από την ανατροφοδότηση του συστήματος της μονάδας ελέγχου-κινητήρα. Επιλέχθηκε για λόγους επαλήθευσης της φόρτισης αναφοράς, αφού το σύστημα ανατροφοδοτείται μέσω του κατάλληλου μπλοκ, όπου γίνονται

υπολογισμοί για τον κάθε τύπο φορτίου και ώστε να παρουσιαστεί η οπτική του φορτίου από το σύστημα και να φανεί η ευστάθεια που παρουσιάζει υπό το συγκεκριμένο φορτίο. Παρατηρείται γραμμική αξιόπιστη συμπεριφορά της καμπύλης σε όλη την διάρκεια του χρόνου της προσομοίωσης



Σχήμα 4.59 Γράφημα για το σύστημα μονάδας ελέγχου *Field Oriented Control* -κινητήρα της ταχύτητας με την ανατροφοδότησή της, της ροπής με την ανατροφοδότησή της και της μαγνητικής ροής στο πλαίσιο *d-q* με την ανατροφοδότησή της, σε σχέση με τον χρόνο.

Σχήμα 4.59 παρατηρήσεις:

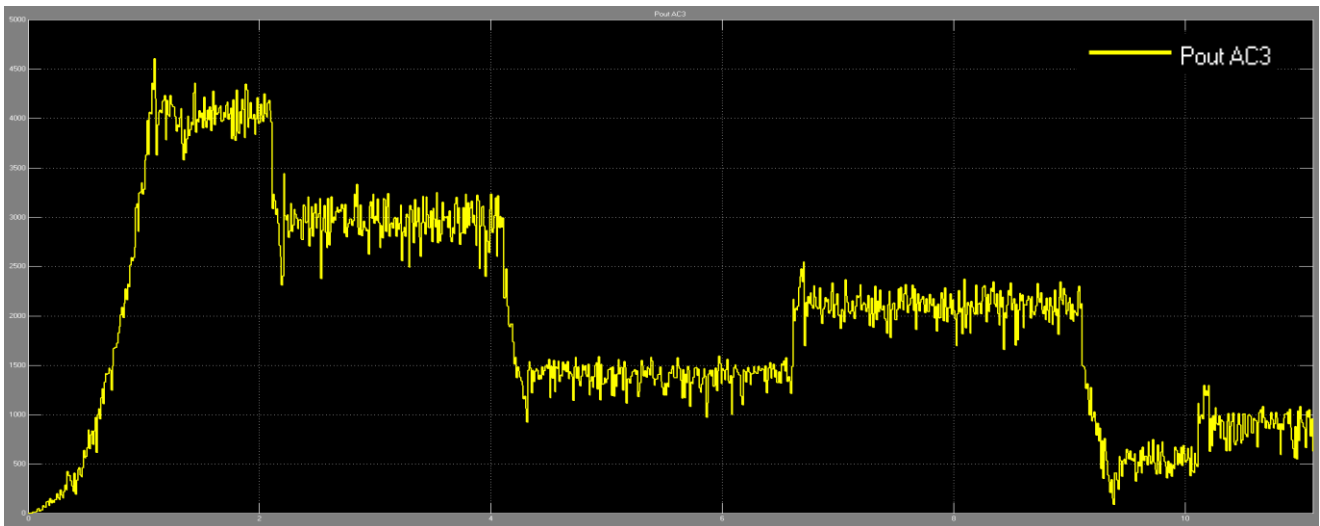
Στο σχήμα 4.59 δίνεται η παράσταση με την ταχύτητα του δρομέα με το κίτρινο χρώμα σε σχέση με την ταχύτητα αναφοράς με το μωβ χρώμα. Στο επόμενο γράφημα, παρουσιάζεται η παράσταση της ροπής με το κίτρινο χρώμα σε σχέση με την ροπή αναφοράς με το μωβ χρώμα και τέλος στο τελευταίο γράφημα δίνεται η μαγνητική ροή στο πλαίσιο αναφοράς *d-q* του δρομέα με το κίτρινο χρώμα, σε σχέση με την αναφορά της με το μωβ χρώμα. Σε κάθε μέγεθος παρατηρείται σχεδόν ταύτιση της τιμής αναφοράς με την πραγματική τιμή, που αποδίδει ο οδηγούμενος κινητήρας.

Σχήμα 4.59 εξηγήσεις και συμπεράσματα:

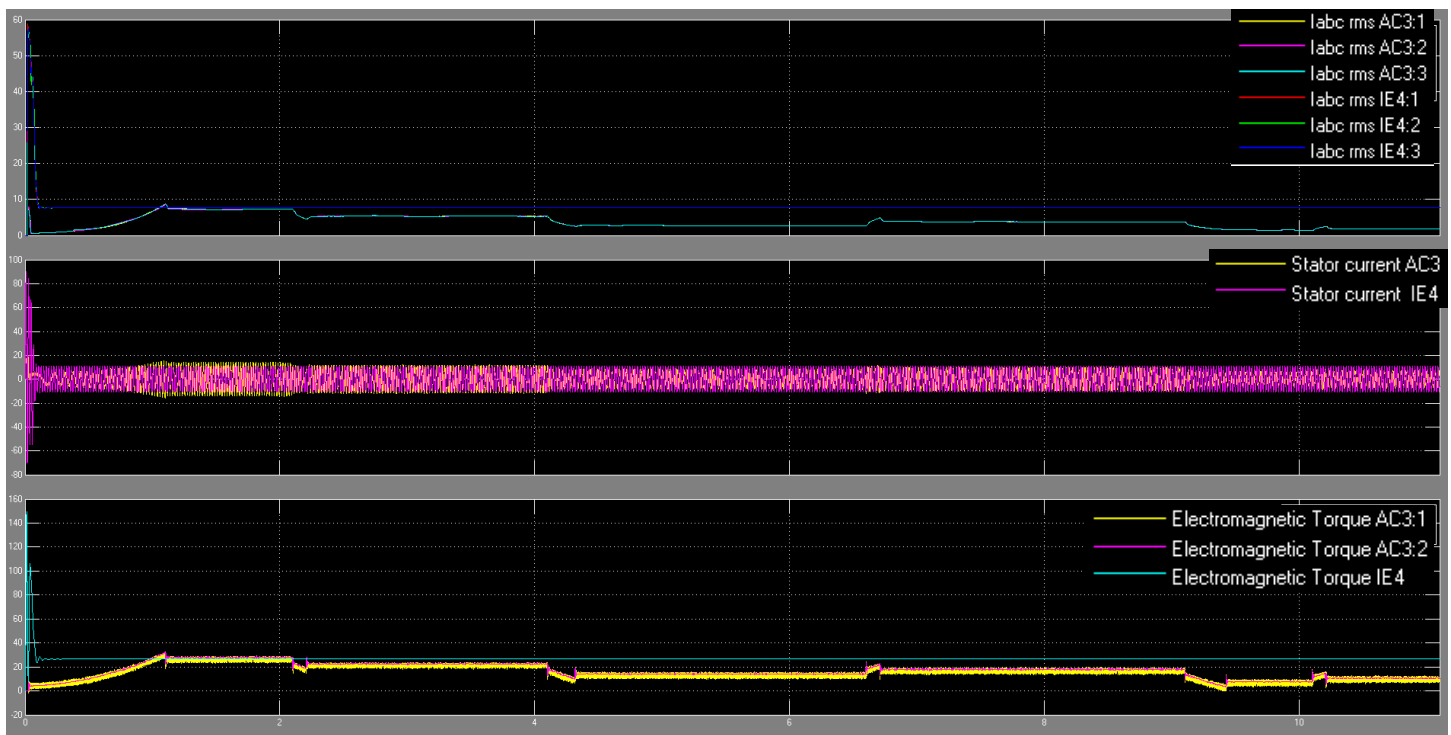
Όπως αναφέρεται στην παράγραφο της θεωρίας 2.3.9.2, Το ρεύμα του στάτη στον επαγωγικό κινητήρα με τον έλεγχο *F.O.C.* διαχωρίζεται σε δύο διανυσματικές συνιστώσες σε ένα στρεφόμενο πλαίσιο αναφοράς. Το ρεύμα μαγνήτισης καθυστερεί της φάσης της τάσης κατά 90° και το ρεύμα παραγωγής της ροπής είναι σε φάση με την τάση.

Στην μονάδα ελέγχου τα δύο διανύσματα του ρεύματος ελέγχονται ανεξάρτητα από ξεχωριστούς ελεγκτές *PI*. Το ρεύμα του άξονα *d*, που λειτουργεί ως ρεύμα του μαγνητικού πεδίου, ρυθμίζεται ώστε να διατηρείται το επιθυμητό επίπεδο μαγνήτισης στον δρομέα. Το ρεύμα του *q*-άξονα, ως ενεργό ρεύμα του φορτίου, πρέπει να ρυθμιστεί σύμφωνα με την ροπή αναφοράς.

Αυτό που παρατηρείται στο σχήμα 4.59 είναι η φιλοσοφία του ελέγχου. Η μαγνητική ροή διατηρείται πάντα σταθερή σε σχέση με την μαγνητική ροή αναφοράς ενώ σε κάθε διαφοροποίηση της τιμής του φορτίου η ροπή αυξομειώνεται ελεγχόμενα και ανεξάρτητα αποδίδοντας την τιμή αναφοράς που χρειάζεται. Σε κάθε περίπτωση οι παραστάσεις δείχνουν γραμμικές και με αξιόπιστη συμπεριφορά ως προς τις τιμές αναφοράς, με μικρή ύπαρξη θορύβου.



Σχήμα 4.60 Γράφημα της μηχανικής ισχύος εξόδου του συστήματος μονάδας ελέγχου F.O.C.-κινητήρα σε σχέση με τον χρόνο και σύμφωνα με τις απαιτήσεις φόρτισης της εφαρμογής, βάσει του πίνακα 3.



Σχήμα 4.61 Σύγκριση γραφημάτων για το σύστημα μονάδας ελέγχου F.O.C.-κινητήρα σε σχέση με τον κινητήρα κλάσης IE4 ο οποίος λειτουργεί χωρίς οδήγηση. Λειτουργούν παράλληλα καταγράφοντας το ρεύμα rms ανα φάση, ρεύμα από κορυφή σε κορυφή στον στάτη και την αποδιδόμενη ροπή τους, σε σχέση με τον χρόνο.

Σχήμα 4.61 παρατηρήσεις:

Στο σχήμα 4.61 στο πρώτο γράφημα γίνεται η σύγκριση του ρεύματος I_{abc} rms της γραμμής ακολουθεί το γράφημα για το ρεύμα από κορυφή σε κορυφή για τον στάτη και το γράφημα της ροπής των κινητήρων.

Στα γραφήματα με την σύγκριση του ρεύματος rms της γραμμής και I_{abc} κορυφής, παρατηρείται μεγάλη διαφορά από 0 ως 0,1sec όπου το μεγάλο ρεύμα αιχμής της εκκίνησης απουσιάζει από την περίπτωση του συστήματος μονάδας ελέγχου-κινητήρα.

Στο πρώτο γράφημα το rms ρεύμα ανά φάση κατά την εκκίνηση δεν ξεπερνάει το μέγιστο ρεύμα του συστήματος της μονάδας ελέγχου με τον κινητήρα και το συζευγμένο φορτίο με την μέγιστη τιμή του να φτάνει τα 8,2A την ίδια χρονική στιγμή ο ίδιος κινητήρας ο οποίος εκκινεί με το ίδιο συζευγμένο φορτίο καταναλώνει 58,8A. Το rms ρεύμα γραμμής του συστήματος μονάδας ελέγχου και κινητήρα στην πλήρη φόρτιση είναι 7,05 A ανά φάση την ίδια χρονική στιγμή που το rms ρεύμα γραμμής πλήρους φόρτισης του κινητήρα είναι, 7,65A.

Στο τρίτο γράφημα παρατηρούμε την ροπή για κάθε τιμή φορτίου. Με μωβ χρώμα είναι η ροπή αναφοράς που χρειάζεται να αποδοθεί σε κάθε αλλαγή του φορτίου. Ο κινητήρας χωρίς οδήγηση λειτουργεί αποδίδοντας συνεχώς την ονομαστική του ροπή ενώ με την χρήση της μονάδας ελέγχου αποδίδεται πάντοτε η ροπή που υπολογίζεται ότι χρειάζεται μέσω της ανατροφοδότησης του συστήματος. Στην καμπύλη της ροπής του ελεγχόμενου κινητήρα παρατηρούνται αιχμές ροπής κατά τη διάρκεια των μεταβατικών καταστάσεων, όπου υπάρχουν εναλλαγές στο φορτίο και η ταχύτητα αυξάνεται σταθερά γραμμικά ως την κατάσταση της σταθερότητας όπου διατηρείται χωρίς ταλαντώσεις.

Σχήμα 4.61 εξηγήσεις και συμπεράσματα:

Το ρεύμα εισόδου στην μονάδα ελέγχου δεν πρέπει να υπερβαίνει το 110% του ονομαστικού ρεύματος. Η μαγνητική ροή διατηρείται σταθερή και το ρεύμα περιορίζεται, ενώ αποδίδεται πλήρης ελεγχόμενη ροπή εκκίνησης όπως φαίνεται στο ίδιο σχήμα και υπενθυμίζεται ότι όπως αναφέρθηκε στην παράγραφο 2.2.7 από τον τύπο 2.59 ισχύει ότι:

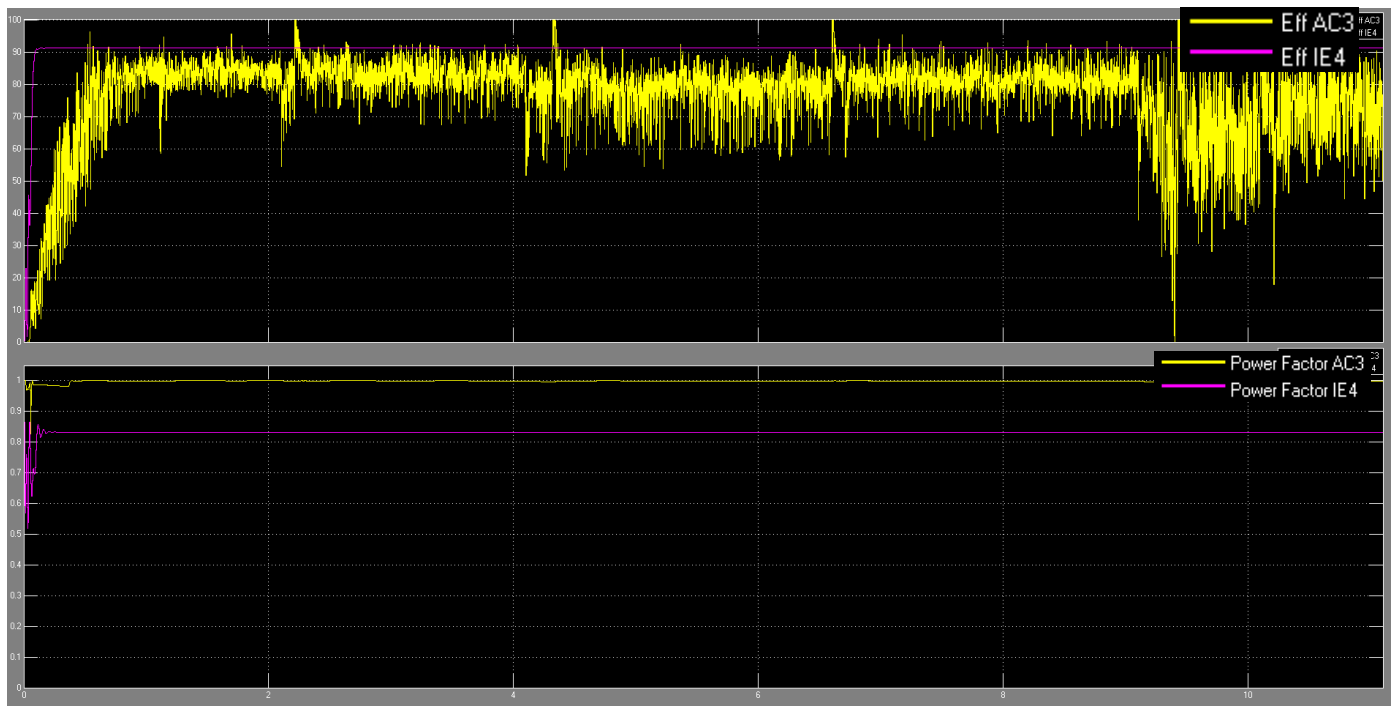
$$T_{acc} = J * \frac{\Delta \text{Urpm/sec}}{\Delta t \text{ 30}} * \pi = 0,029 * \frac{1350\text{rpm/sec}}{1\text{s 30}} * 3,14 = 4.098\text{Nm}$$
, θα είναι η πρόσθετη ροπή κατά την εκκίνηση με το φορτίο η οποία γίνεται σε 1s.

Το ρεύμα περιορίζεται από τον σχεδιασμό του κυκλώματος προφόρτισης της μονάδας. Οι πυκνωτές του διαύλου DC φορτίζονται ομαλά σε μια σταθερά χρόνου $t=RC$ και αποδίδουν το ρεύμα που χρειάζεται, έτσι ώστε το ρεύμα κατά την εκκίνηση να διατηρείται κάτω από το ονομαστικό του κινητήρα.

Αυτός ο περιορισμός του ρεύματος είναι παραμετροποιήσιμο μέγεθος από τον χρήστη.

Το rms ρεύμα γραμμής του συστήματος μονάδας ελέγχου και κινητήρα στην πλήρη φόρτιση είναι 7,05 A ανά φάση ενώ του κινητήρα είναι κοντά στο ονομαστικό του 7,65A. Αυτό είναι λογικό, αφού η μονάδα ελέγχου θα απορροφήσει από το δίκτυο μόνο το μέτρο της ενεργής τιμής του διανύσματος του ρεύματος, αυτό το οποίο απαιτεί η ροπή σε κάθε χρονική στιγμή. Το ρεύμα μαγνήτισης το παρέχουν οι πυκνωτές του διαύλου DC στον κινητήρα.

Η μονάδα ελέγχου F.O.C. χρησιμοποιεί για τον έλεγχο του ρεύματος έλεγχο με ζώνη υστέρησης, όπου η απλότητα και η ακρίβεια του, παρουσιάζει σχεδόν μηδενικό σφάλμα στην μόνιμη κατάσταση ενώ στις δυναμικές αλλαγές του συστήματος όπως πχ από 1,05s ως 1,11s, από 2,15s ως 2,21s έχει μικρή μεταβατική φάση με αιχμές ροπής, οι οποίες όμως δεν αλλάζουν τον γραμμικό χαρακτήρα του συστήματος.



Σχήμα 4.62 Σύγκριση γραφημάτων για το σύστημα μονάδας ελέγχου F.O.C.-κινητήρα σε και τον κινητήρα κλάσης IE4 όπου λειτουργούν παράλληλα. Καταγράφεται η απόδοση %, και ο συντελεστής ισχύος, σε σχέση με τον χρόνο.

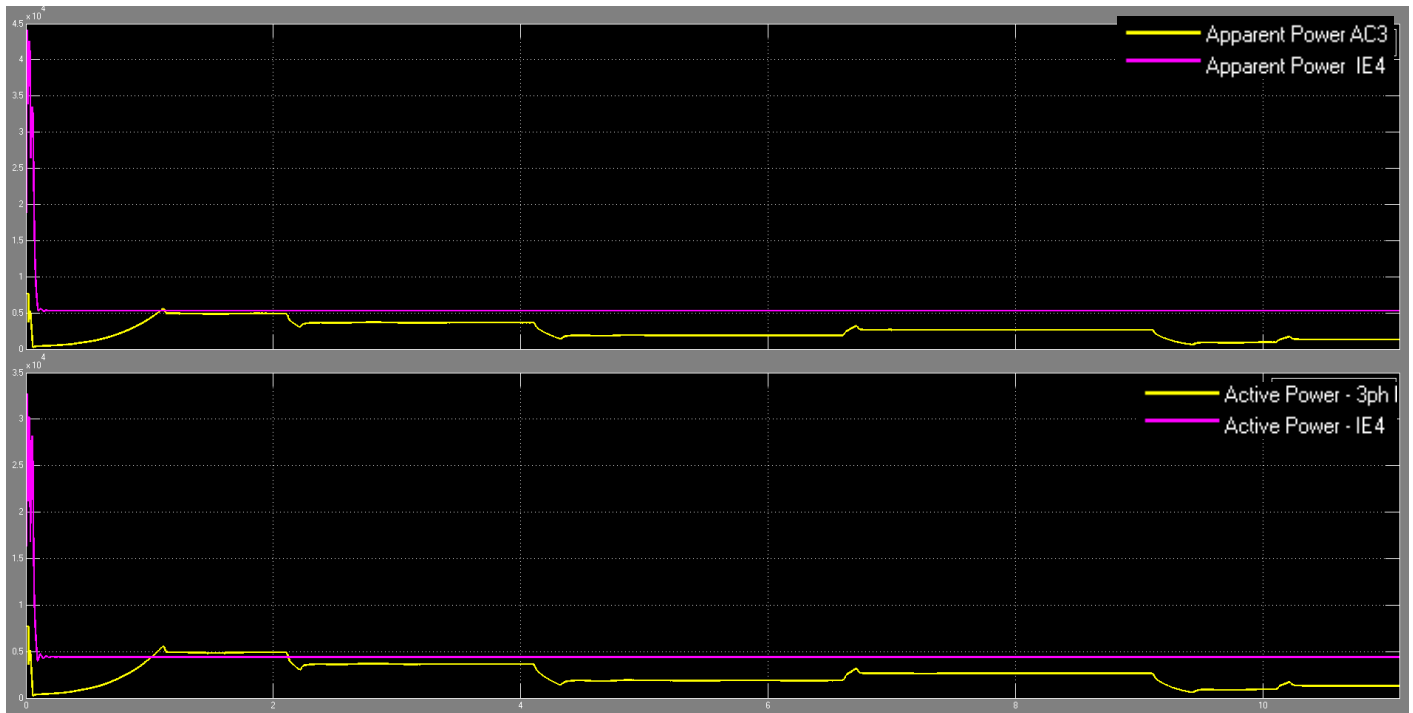
Σχήμα 4.62 παρατηρήσεις:

Στο σχήμα 4.62 δίνονται γραφήματα με την σύγκριση του συντελεστή ισχύος και του βαθμού απόδοσης κατά την διάρκεια του χρόνου. Παρατηρείται ότι υπάρχουν διαφοροποιήσεις στο σύστημα μονάδας ελέγχου-κινητήρα. Ο συντελεστής ισχύος είναι ανώτερος σε όλη την διάρκεια του πειράματος ενώ στον αντίποδα η απόδοση του κινητήρα είναι σχεδόν πάντα ανώτερη στο χρόνο της προσομοίωσης.

Σχήμα 4.62 εξηγήσεις και συμπεράσματα:

Στην περίπτωση του συντελεστή ισχύος, στο σύστημα μονάδας ελέγχου-κινητήρα ακόμη και με τις διαφοροποιήσεις του φορτίου ο συντελεστής ισχύος είναι $>0,99$, εφόσον λειτουργούν οι πυκνωτές του διαύλου DC. Η μονάδα ελέγχου βελτιώνει τον συντελεστή ισχύος του συστήματος, επειδή το άεργο ρεύμα που χρειάζεται ο κινητήρας τροφοδοτείται από τους πυκνωτές του διαύλου DC.

Στην περίπτωση του βαθμού απόδοσης, το σύστημα μονάδας ελέγχου -κινητήρα υπολείπεται της τιμής του κινητήρα με απ' ευθείας τροφοδοσία. Ο βαθμός απόδοσης του συστήματος σε κάθε περίπτωση είναι: $\eta_{PDS} = \eta_{VFD} * \eta_{MOTOR}$



Σχήμα 4.63 Σύγκριση γραφημάτων της πραγματικής και της φαινόμενης ηλεκτρικής ισχύος που καταναλώνονται σε σχέση με τον χρόνο και σύμφωνα με τις απαιτήσεις της εφαρμογής, για το σύστημα μονάδας ελέγχου F.O.C. - κινητήρα και τον κινητήρα κλάσης IE4.

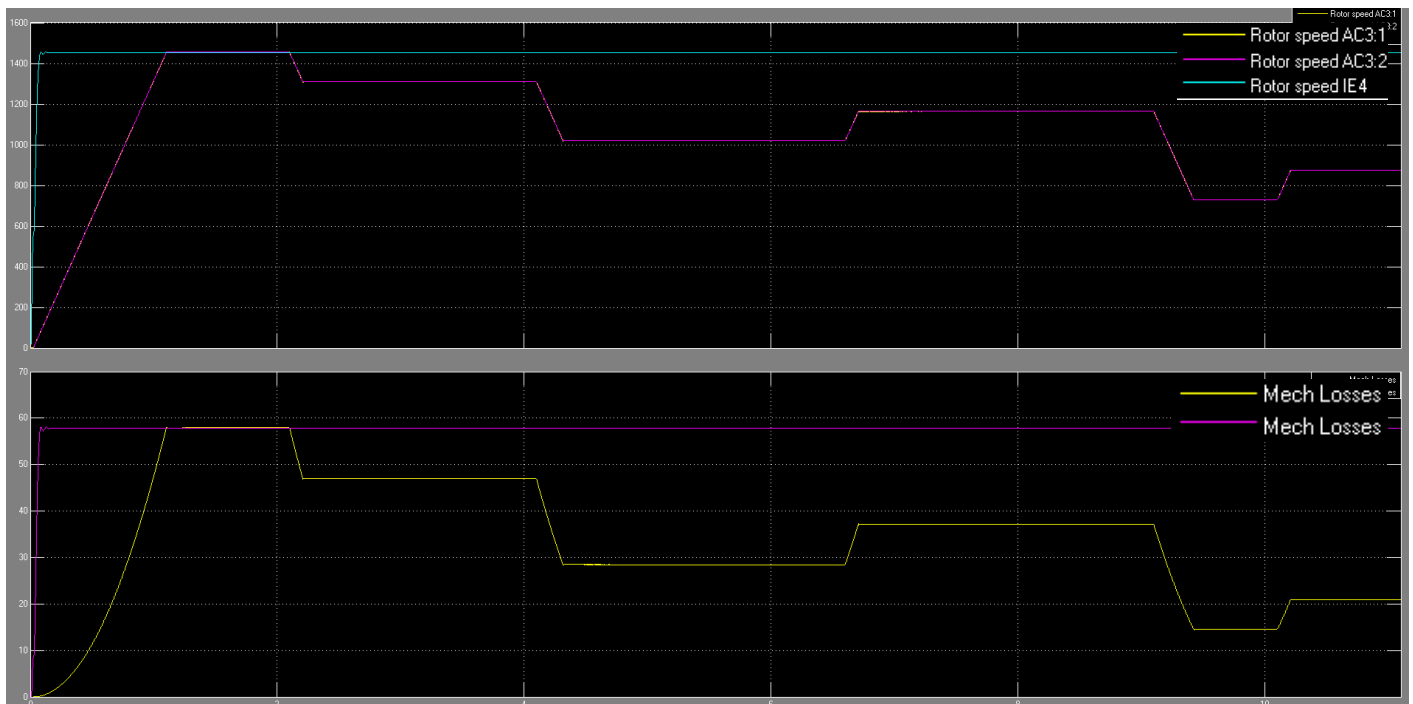
Σχήμα 4.63 παρατηρήσεις:

Στο σχήμα 4.63 δίνονται τα γραφήματα της πραγματικής και της φαινόμενης ηλεκτρικής ισχύος που καταναλώνονται σε σχέση με τον χρόνο. Παρατηρείται ότι η πραγματική ισχύς που καταναλώνεται από το σύστημα μονάδας ελέγχου-κινητήρα ρυθμίζεται από τις απαιτήσεις του φορτίου σε κάθε χρονική στιγμή εν αντιθέσει με τον κινητήρα που λειτουργεί με απ' ευθείας τροφοδοσία. Ακόμη στην ονομαστική τιμή ροπής φορτίου στροφών το σύστημα μονάδας ελέγχου - κινητήρα καταναλώνει μεγαλύτερη πραγματική ισχύ 4835 Watt σε σχέση με τον κινητήρα που λειτουργεί με απ' ευθείας τροφοδοσία 4410 Watt

Ως προς το θέμα της φαινόμενης ισχύος εν αντιθέσει με τον κινητήρα που λειτουργεί με απ' ευθείας τροφοδοσία, στο σύστημα μονάδας ελέγχου -κινητήρα δείχνει να ταυτίζεται η πραγματική με την φαινόμενη ισχύ.

Σχήμα 4.63 εξηγήσεις και συμπεράσματα:

Στο σημείο της ονομαστικής τιμής του φορτίου, της ροπής και των στροφών το σύστημα μονάδας ελέγχου - κινητήρα καταναλώνει μεγαλύτερη πραγματική ισχύ σε σχέση με τον κινητήρα που λειτουργεί με απ' ευθείας τροφοδοσία. Αυτό είναι λογικό λόγω των πρόσθετων απωλειών του μονάδας ελέγχου, δηλαδή τις απώλειες αγωγιμότητας, τις απώλειες μεταγωγής και τις απώλειες στον δίαυλο DC. Αυτό δείχνει ότι τα οφέλη της χρήσης του συστήματος της μονάδας ελέγχου-κινητήρα υπάρχουν σε περιπτώσεις εφαρμογών όπου οι κινητήρες δεν πρέπει να λειτουργούν συνεχώς στην ονομαστική τους ισχύ. Η φαινόμενη ισχύς ταυτίζεται με την πραγματική όπως έχει αναφερθεί παραπάνω λόγω του συντελεστή ισχύος ο οποίος είναι $>0,99$.



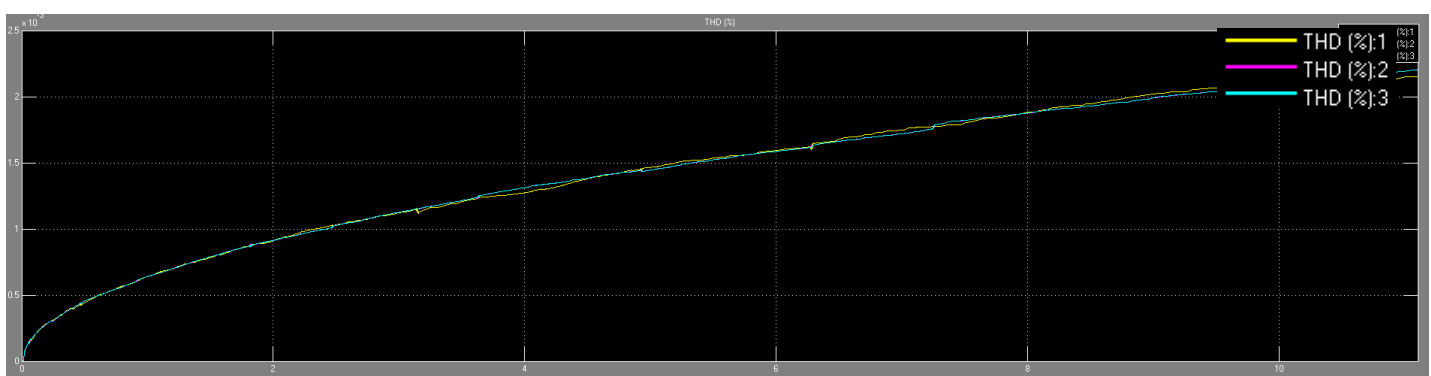
Σχήμα 4.64 Σύγκριση γραφημάτων της ταχύτητας και των μηχανικών απωλειών σε σχέση με τον χρόνο για το σύστημα μονάδας ελέγχου F.O.C. - κινητήρα και τον κινητήρα κλάσης IE4.

Σχήμα 4.64 παρατηρήσεις:

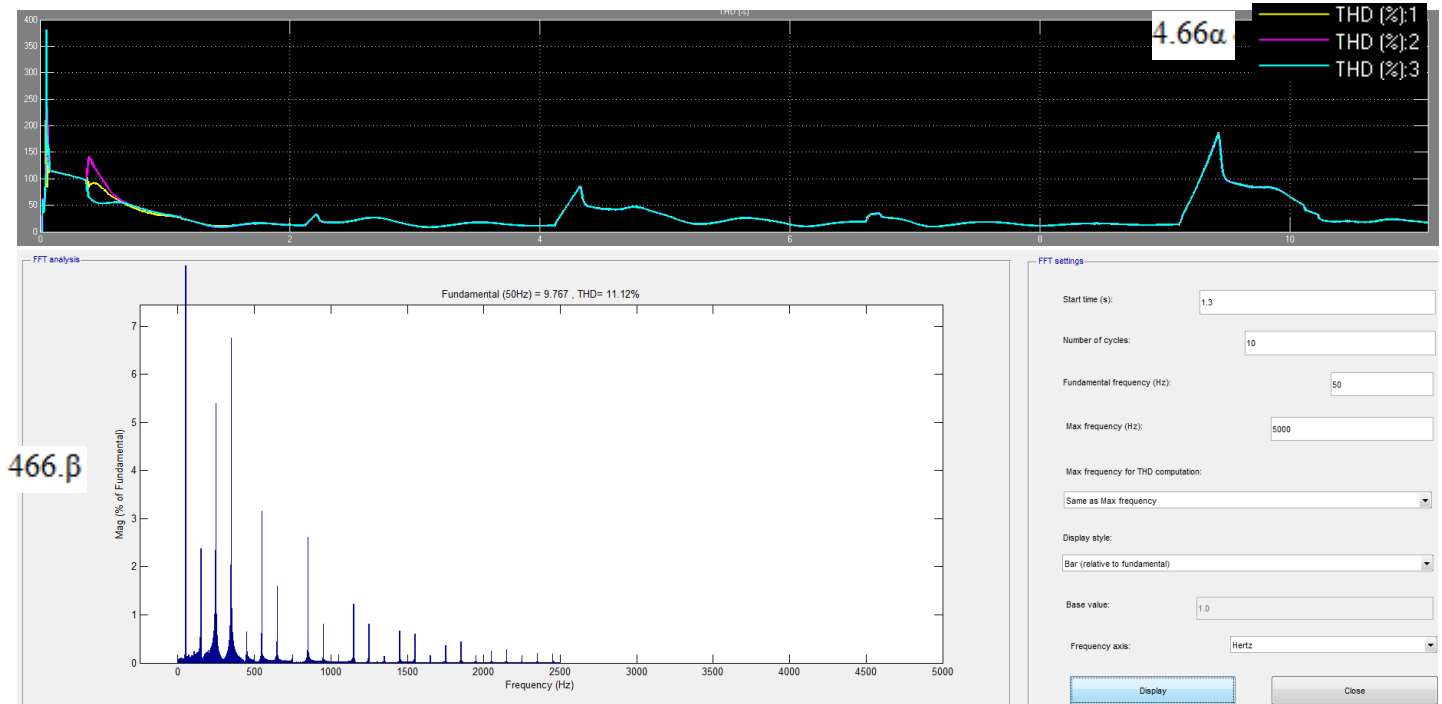
Στο σχήμα 4.64 δίνονται τα γραφήματα ταχύτητας και των μηχανικών απωλειών και παρατηρούμε ότι το σύστημα μονάδας ελέγχου -κινητήρα έχει χαμηλότερες μηχανικές απώλειες οι οποίες είναι ανάλογες των στροφών του κινητήρα..

Σχήμα 4.64 παρατηρήσεις εξηγήσεις και συμπεράσματα:

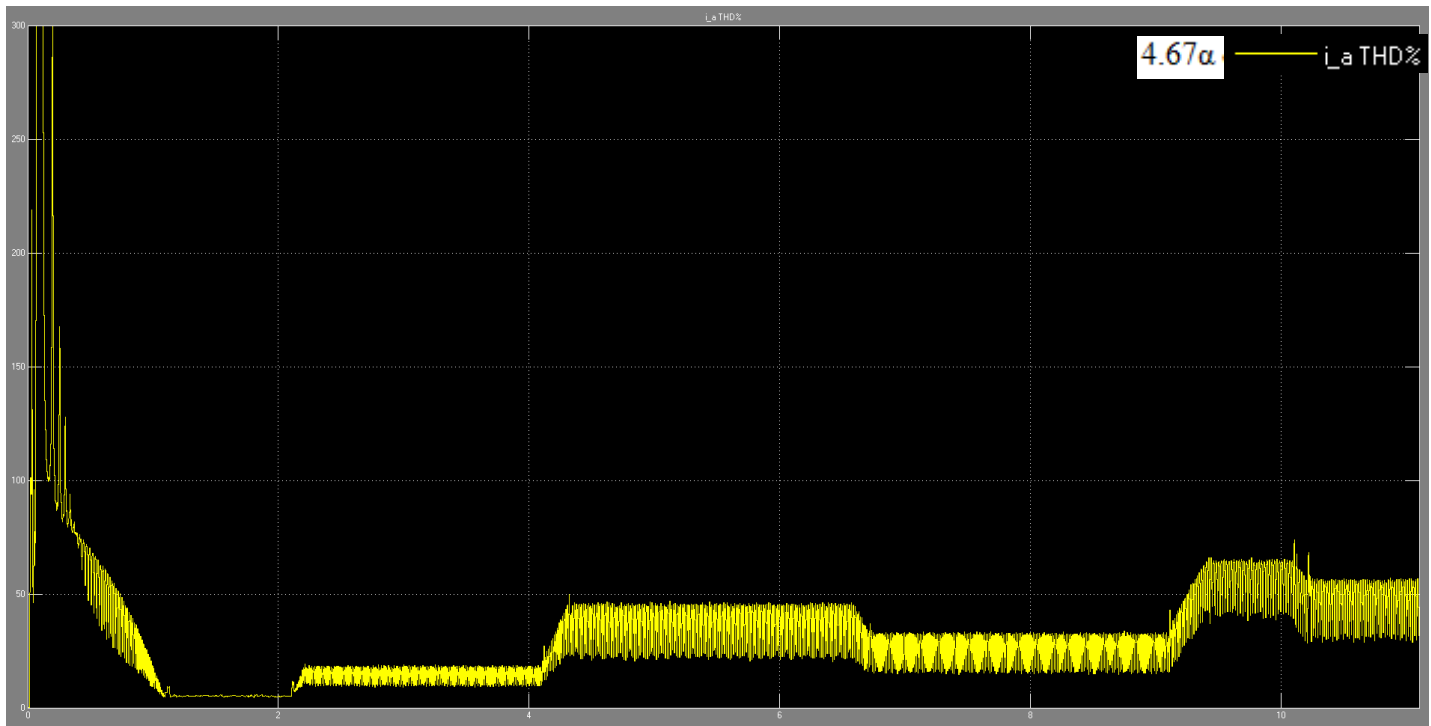
Η ταχύτητα του κινητήρα που οδηγείται είναι γραμμική με ελάχιστο θόρυβο, αυτό είναι δείγμα του ότι ο PI ελεγκτής της ταχύτητας παρέχει με αρκετή ακρίβεια έλεγχο χωρίς ανεπιθύμητες ταλαντώσεις και συνεχείς διορθώσεις. Οι μηχανικές απώλειες σχετίζονται με την τριβή των εξαρτημάτων κατά την εφαρμογή ροπής στον άξονα και της γωνιακής ταχύτητας περιστροφής. Η ακριβής ρύθμιση της ταχύτητας επέτρεψε να μειωθούν οι απώλειες τριβής και αυτό οδηγεί σε βελτιωμένη διάρκεια ζωής στον μηχανολογικό εξοπλισμό, για τον ίδιο τύπο κινητήρα.

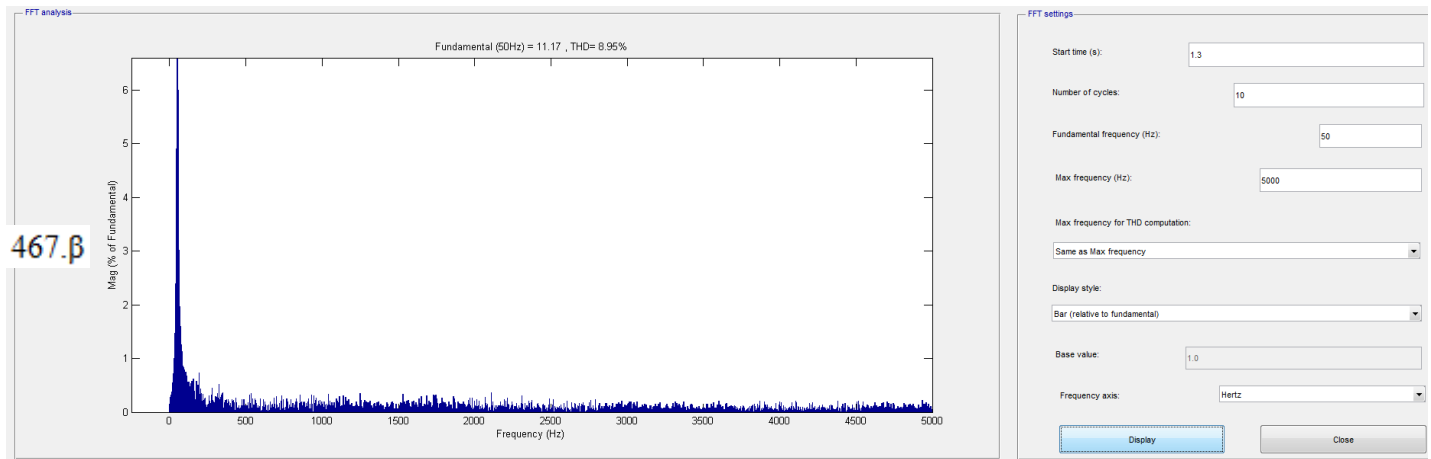


Σχήμα 4.65 Γράφημα με τις αρμονικές τάσης σε σχέση με τον χρόνο, που παρουσιάζονται ενώ λειτουργεί το σύστημα μονάδας ελέγχου F.O.C.-κινητήρα



Σχήμα 4.66 Γραφήματα που αφορούν 4.66α) τις αρμονικές ρεύματος σε σχέση με τον χρόνο, που παρουσιάζονται και 4.66β) η FFT ανάλυση στο πεδίο της συχνότητας για το ρεύμα, στην γραμμή τροφοδοσίας, ενώ λειτουργεί το σύστημα μονάδας ελέγχου F.O.C - κινητήρα





Σχήμα 4.67 Γραφήματα που αφορούν 4.67α) τις αρμονικές ρεύματος σε σχέση με τον χρόνο που παρουσιάζονται στο τριφασικό τύλιγμα του στάτη και 4.67β) η FFT ανάλυση στο πεδίο της συχνότητας για το ρεύμα, ενώ λειτουργεί το σύστημα μονάδας ελέγχου F.O.C - κινητήρα.

Σχήμα 4.65, 4.66. 4.67 παρατηρήσεις:

Το σύστημα μονάδας ελέγχου - κινητήρα δημιουργεί φαινόμενα αρμονικών και αυτό είναι λογικό λόγω των ημιαγωγών της μονάδας ελέγχου. Στο σχήμα 4.65 δίνεται το γράφημα με τις αρμονικές τάσης σε σχέση με τον χρόνο, στην τροφοδοσία. Στο σχήμα 4.66α δίνεται το γράφημα με τις αρμονικές έντασης σε σχέση με τον χρόνο, στην τροφοδοσία του συστήματος, ενώ στο σχήμα 4.66β δίνεται η ανάλυση FFT με το ποσοστό της παραμόρφωσης κοντά στο ονομαστικό σημείο λειτουργίας για την τροφοδοσία του συστήματος. Στο σχήμα 4.67α δίνεται το γράφημα με τις αρμονικές έντασης σε σχέση με τον χρόνο, στα τυλίγματα του στάτη, στο σχήμα 4.67β δίνεται η ανάλυση FFT, με το ποσοστό της παραμόρφωσης στα τυλίγματα του στάτη, στο ίδιο χρονικό σημείο που μετρήθηκε και η παραμόρφωση για την τροφοδοσία του συστήματος.

Σχήμα 4.65, 4.66 εξηγήσεις και συμπεράσματα:

Η τάση εξόδου έχει προσεγγιστικά ημιτονοειδή μορφή τάσης και εξαρτάται από τα κατασκευαστικά στοιχεία της μονάδας ελέγχου και την συχνότητα διαμόρφωσης των διακοπτικών στοιχείων. Οι αρμονικές αυτές περιορίζονται με τα παθητικά φίλτρα και τις αυτεπαγωγές γραμμής έτσι ώστε να είναι κάτω των ορίων παραμόρφωσης τάσης $THD_{\max}\% = 5\%$.

Το δείγμα της κυματομορφής που αναλύεται με το FFT tool είναι 10 κύκλοι.

Παρατηρώντας την κυματομορφή η παραμόρφωση της τάσης είναι $<5\%$. Άρα βρίσκεται εντός των ορίων που θέτονται σχετικά.

Η παραμόρφωση της έντασης είναι μεγαλύτερη με ελάχιστη τιμή 9,1% και μέγιστη 380%. Η παραμόρφωση γίνεται μεγαλύτερη κατά την εκκίνηση και κατά τις μεταβατικές περιόδους αλλαγής του φορτίου και όταν ο κινητήρας λειτουργεί με χαμηλότερη φόρτιση. Η ελάχιστη τιμή της παραμόρφωσης, παρουσιάζεται στο χρονικό διάστημα όπου το σύστημα ισορροπεί. Όμως ενώ σε χαμηλότερη φόρτιση του κινητήρα η αρμονική παραμόρφωση είναι μεγαλύτερη, το ενεργό ρεύμα των αρμονικών μικραίνει αφού ισχύει:

$$THDi = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I^2_{hrms}}}{I_{1rms}}$$

Το THD% ς είναι 6,97% στα 250Hz, 5,12% στα 350Hz, 2,95% στα 550Hz, 1,04% στα 650Hz ενώ οι επόμενες αρμονικές είναι πολύ χαμηλού πλάτους. Οι αρμονικές περιορίστηκαν από την αυτεπαγωγή γραμμής και τα δύο παθητικά διπλοσυντονιζόμενα φίλτρα σε αυτές τις τιμές.

Σχήμα 4.67 εξηγήσεις και συμπεράσματα:

Η αρμονική παραμόρφωση του ρεύματος που παρουσιάζεται στον στάτη κατά την ονομαστική φόρτιση του επαγωγικού κινητήρα έχει τιμή 8,95% την χρονική στιγμή όπου το μέτρο του ρεύματος κορυφής είναι 11,17A. Το FFT Analysis tool δείχνει αρμονικό θόρυβο πολύ μικρής όμως ενεργής τιμής ως τα 5kHz όπου μας ενδιαφέρει το δείγμα. Το THD% ς είναι 5,53% στα 55Hz, 2,82% στα 60Hz, 1,85% στα 65Hz, 1,44% στα 70Hz ενώ οι επόμενες αρμονικές είναι πολύ χαμηλού πλάτους.

Πίνακας 12 Απαιτήσεις της εφαρμογής βάσει του πίνακα 3 και οι τιμές που προκύπτουν από την προσομοίωση της χρήσης μονάδας ελέγχου F.O.C –κινητήρα.

Επιδόσεις συστήματος μονάδας ελέγχου με κινητήρα IE4							
Τιμές προσομοίωσης							
Ταχύτητα (rpm)	Ταχύτητα (rad/sec)	Ισχύς στην έξοδο (W)	Ισχύς στην έξοδο %	Ροπή στον άξονα (Nm)	Ροπή στον άξονα %	Συντελεστής ισχύος	Απόδοση %
1455	152,36	4037,54	100	26,5	100,37	0,99	83,5
1309,5	137,13	3016	75,42	22	83,3	0,99	83,5
1164	121,89	2133,075	53,32	17,5	66,28	0,99	83
1018,5	106,657	1439,86	35,99	13,5	51,13	0,99	79
873	91,42	959,91	23,99	10,5	39,77	0,99	76
727,5	76,18	533,26	13,33	7	26,51	0,99	69

4.4.1.1 Εξοικονόμηση ενέργειας και κόστους στην περίπτωση χρήσης μονάδας ελέγχου στροφών Field Oriented Control για τον φυγοκεντρικό ανεμιστήρα.

Για την εύρεση της εξοικονόμησης ενέργειας και κόστους χρησιμοποιήθηκαν τα στοιχεία του πίνακα 12, για να υπολογιστεί για κάθε ισχύ εξόδου, η ετήσια κατανάλωση του συστήματος μονάδας ελέγχου-κινητήρα. Στους υπολογισμούς μόνο στην γραμμή για P_L:100% χρησιμοποιείται η ισχύς οριακά μεγαλύτερη, που όμως προκύπτει από την προσομοίωση.

$$P_L 100\%, W_L = 1 * \frac{4037,54 W}{0,835} * 8760h * 0,10 = 4235,8 KWh$$

$$P_L 75,42\%, W_L = 0,7542 * \frac{4000 W}{0,835} * 8760h * 0,2 = 6329,9 KWh$$

$$P_L 53,32\%, W_L = 0,5332 * \frac{4000 W}{0,83} * 8760h * 0,25 = 5627,51 KWh$$

$$P_L 35,99\%, W_L = 0,3599 * \frac{4000 W}{0,79} * 8760h * 0,25 = 3990,78 KWh$$

$$P_L 23,99\%, W_L = 0,2399 * \frac{4000 W}{0,76} * 8760h * 0,10 = 1106,06 KWh$$

$$P_L 13,33\%, W_L = 0,1333 * \frac{4000 W}{0,69} * 8760h * 0,10 = 676,93 KWh$$

$$\text{Ετήσιο } W_L = 4235,8 + 6329,9 + 5627,51 + 3990,78 + 1106,06 + 676,93 = 21966,9 KWh$$

Ετήσιο W_L για την περίπτωση του κινητήρα ενεργειακής κλάσης IE4,

$$W_L = 1 * \frac{4000 W}{0,912} * 8760h * 1 = 38421,05 KWh$$

$$\frac{21904,03 KWh}{38421,05 KWh} = 0,5717 \text{ της ετήσιας κατανάλωσης σημαίνει } 42,83\% \text{ εξοικονόμηση ενέργειας}$$

Η ετήσια εξοικονόμηση για κόστος ενέργειας 0,10€/KWh θα είναι:

$$(38421,05 KWh - 21966,9 KWh) * 0,10€/kWh = 1645,4€$$

4.4.2 2^η Εφαρμογή, αντλία παραγωγής πολτού σε παραγωγική μονάδα.

Στην εφαρμογή θα συγκριθεί η απόδοση για την περίπτωση χρήσης κινητήρα ενεργειακής κλάσης IE4 χωρίς οδήγηση και την περίπτωση της χρήσης μονάδας ελέγχου στροφών με έλεγχο Field Oriented Control και κινητήρα κλάσης IE4. Η μηχανή παραγωγής λειτουργεί στην δυσμενέστερη περίπτωση που μπορεί να αντιμετωπιστεί, για 24h/ημέρα, 365 ημέρες/έτος, άρα το σύνολο 8760h/έτος.

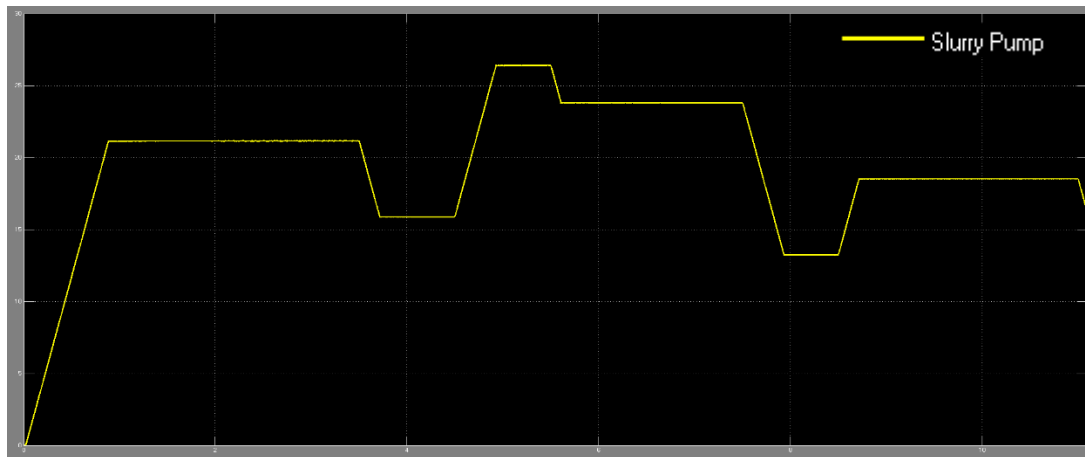
Οι απαιτήσεις τροφοδοτήθηκαν στο σύστημα μονάδας ελέγχου-κινητήρα σύμφωνα με τον πίνακα 4 της παραγράφου 3.2 με το υπόδειγμα των αναγκών της εφαρμογής. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης χρησιμοποιήθηκαν για την συμπλήρωση του πίνακα με τις τιμές της προσομοίωσης για την απόδοση του συστήματος. Βάσει αυτών των αποτελεσμάτων γίνεται σχετική ανάλυση και η οικονομική προσέγγιση.

Ο συνολικός χρόνος της προσομοίωσης ο οποίος βρίσκεται σε όλα τα παρακάτω γραφήματα στον οριζόντιο άξονα είναι 11s.

Από τον χαρακτήρα του φορτίου της αντλίας υπενθυμίζεται ότι ισχύει:

$$P_L = f(n^2), P_L = P_{outnom} * \left(\frac{U_{Load}}{U_{nom}}\right)^2$$

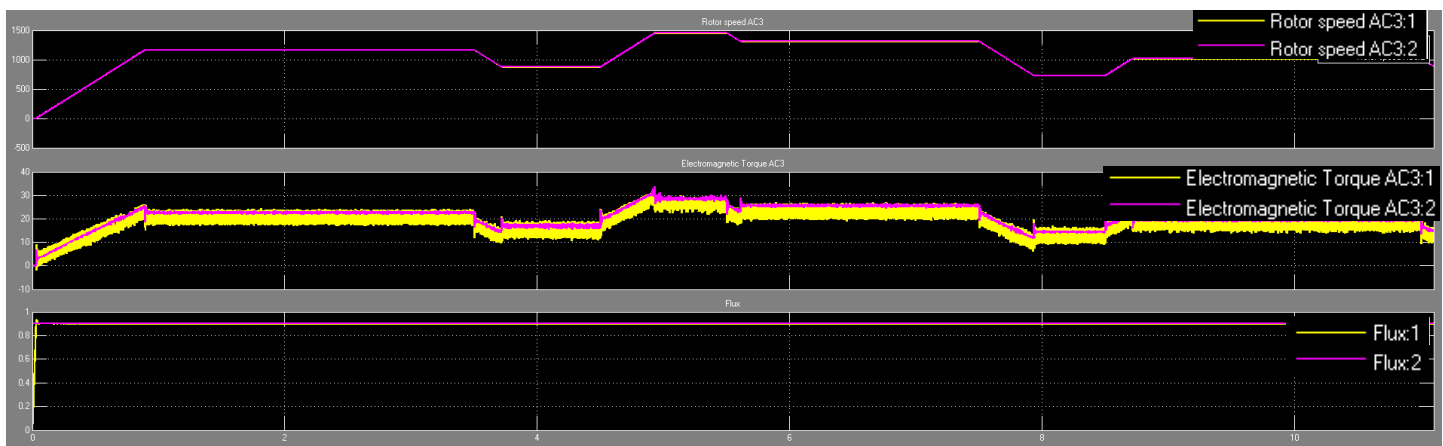
$$T_L = f(n)$$



Σχήμα 4.68 Γράφημα του φορτίου που εφαρμόζεται βάσει της απαίτησης του πίνακα 4, σε σχέση με τον χρόνο. Με βάση αυτόν εξετάζεται η συμπεριφορά του συστήματος μονάδας ελέγχου Field Oriented Control – κινητήρα

Σχήμα 4.68 παρατηρήσεις:

Το γράφημα της καμπύλης του φορτίου έχει επιλεγεί να εξαχθεί από την ανατροφοδότηση του συστήματος της μονάδας ελέγχου-κινητήρα. Παρατηρείται γραμμική αξιόπιστη συμπεριφορά της καμπύλης σε όλη την διάρκεια του χρόνου της προσομοίωσης



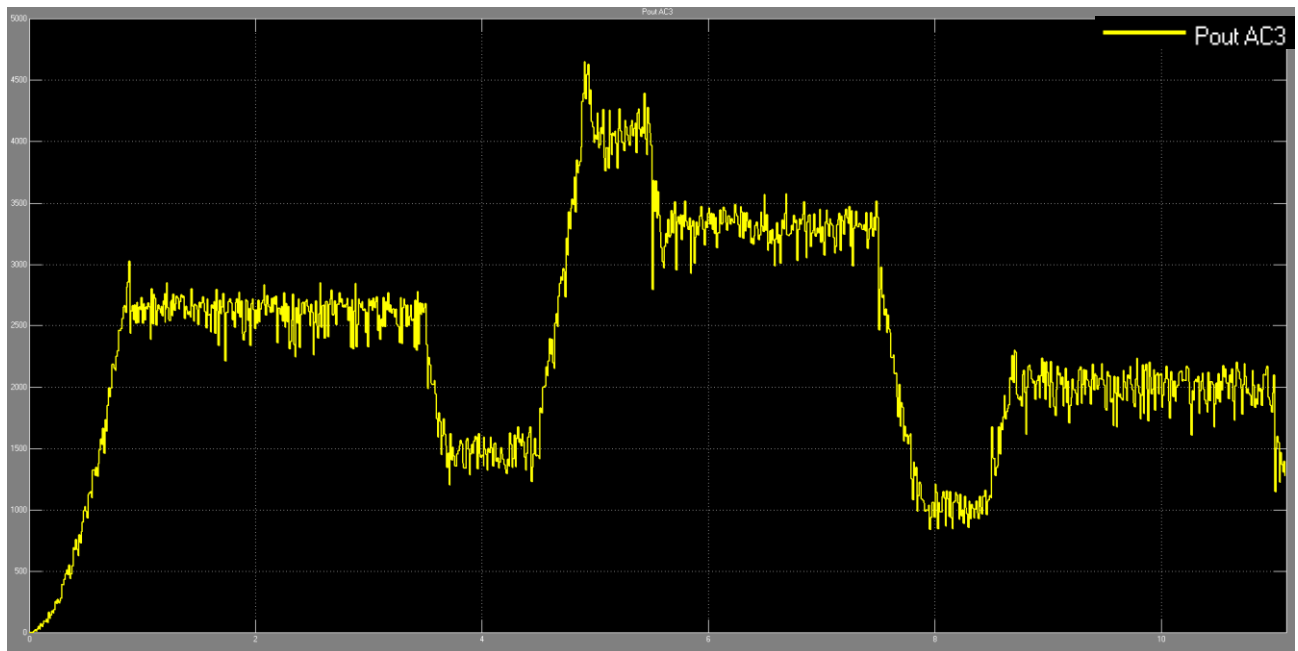
Σχήμα 4.69 Γράφημα για το σύστημα μονάδας ελέγχου Field Oriented Control -κινητήρα της ταχύτητας με την ανατροφοδότησή της, της ροπής με την ανατροφοδότησή της και της μαγνητικής ροής στο πλαίσιο d-q με την ανατροφοδότησή της, σε σχέση με τον χρόνο.

Σχήμα 4.69 παρατηρήσεις:

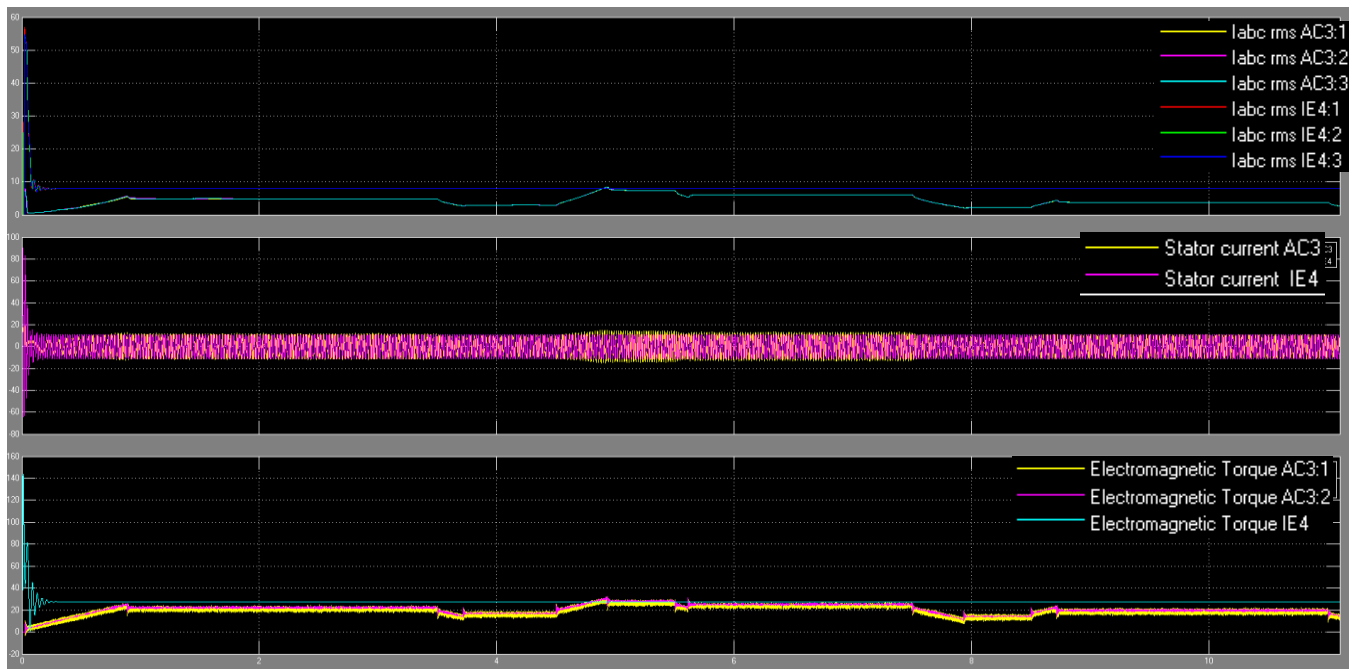
Στο σχήμα 4.69 στο πρώτο γράφημα, δίνεται η παράσταση με την ταχύτητα του δρομέα με το κίτρινο χρώμα, σε σχέση με την ταχύτητα αναφοράς με το μωβ χρώμα. Στο παρακάτω γράφημα δίνεται η παράσταση της ροπής με το κίτρινο χρώμα, σε σχέση με την ροπή αναφοράς με το μωβ χρώμα και τέλος στο τελευταίο γράφημα δίνεται η μαγνητική ροή στο πλαίσιο αναφοράς του δρομέα με το κίτρινο χρώμα, σε σχέση με την αναφορά της με το μωβ χρώμα. Σε κάθε μέγεθος παρατηρείται σχεδόν ταύτιση της τιμής αναφοράς με την πραγματική τιμή που αποδίδει ο οδηγούμενος κινητήρας.

Σχήμα 4.69 εξηγήσεις και συμπεράσματα:

Σε κάθε περίπτωση τα γραφήματα δείχνουν γραμμικά και με αξιόπιστη συμπεριφορά προς τις τιμές αναφοράς, με μικρή ύπαρξη θορύβου.



Σχήμα 4.70 Γράφημα της μηχανικής ισχύος εξόδου του συστήματος μονάδας ελέγχου F.O.C.-κινητήρα σε σχέση με τον χρόνο και σύμφωνα με τις απαιτήσεις φόρτισης της εφαρμογής βάσει του πίνακα 4



Σχήμα 4.71 Σύγκριση γραφημάτων για το σύστημα μονάδας ελέγχου F.O.C.-κινητήρα σε σχέση με τον κινητήρα κλάσης IE4 ο οποίος λειτουργεί χωρίς οδήγηση. Λειτουργούν παράλληλα καταγράφοντας το ρεύμα rms ανά φάση, ρεύμα από κορυφή σε κορυφή στον στάτη και την αποδιδόμενη ροπή τους, σε σχέση με τον χρόνο

Σχήμα 4.71 παρατηρήσεις:

Στο σχήμα 4.71, στο πρώτο γράφημα παρατηρείται σύγκριση του ρεύματος I_{abc} rms της γραμμής, ακολουθεί το ρεύμα από κορυφή σε κορυφή για τον στάτη και το γράφημα της ροπής των κινητήρων

Στο πρώτο γράφημα με την σύγκριση του ρεύματος I_{abc} κορυφής και rms της γραμμής και της ροπής του κινητήρα, παρατηρείται μεγάλη διαφορά από 0 ως 0,1sec όπου το μεγάλο ρεύμα αιχμής εκκίνησης απουσιάζει από την περίπτωση του συστήματος μονάδος ελέγχου-κινητήρα.

Στο δεύτερο γράφημα το rms ρεύμα ανά φάση κατά την εκκίνηση δεν ξεπερνάει το μέγιστο ρεύμα του συστήματος της μονάδας ελέγχου με τον κινητήρα και το συζευγμένο φορτίο με την μέγιστη τιμή του να φτάνει τα 8,08A την ίδια χρονική στιγμή ο ίδιος κινητήρας ο οποίος εκκινεί με το ίδιο συζευγμένο φορτίο καταναλώνει 56,4A. Το rms ρεύμα γραμμής του συστήματος μονάδας ελέγχου και κινητήρα στην πλήρη φόρτιση είναι 6,9A ανά φάση την ίδια χρονική στιγμή που το rms ρεύμα γραμμής πλήρους φόρτισης του κινητήρα είναι:7,63A.

Στο τρίτο γράφημα παρατηρείται η ροπή για κάθε τιμή φορτίου. Με μωβ χρώμα είναι η ροπή αναφοράς που χρειάζεται να αποδοθεί σε κάθε αλλαγή του φορτίου. Ο κινητήρας χωρίς οδήγηση λειτουργεί αποδίδοντας συνεχώς την ονομαστική του ροπή ενώ με την χρήση της μονάδας ελέγχου αποδίδεται πάντοτε η ροπή που υπολογίζεται ότι χρειάζεται μέσω της ανατροφοδότησης του συστήματος. Στην καμπύλη της ροπής του ελεγχόμενου κινητήρα παρατηρούνται αιχμές ροπής κατά τη διάρκεια των μεταβατικών καταστάσεων, όπου υπάρχουν εναλλαγές στο φορτίο και η ταχύτητα αυξομειώνεται γραμμικά ως την κατάσταση της σταθερότητας όπου διατηρείται χωρίς ταλαντώσεις.

Σχήμα 4.71 εξηγήσεις και συμπεράσματα:

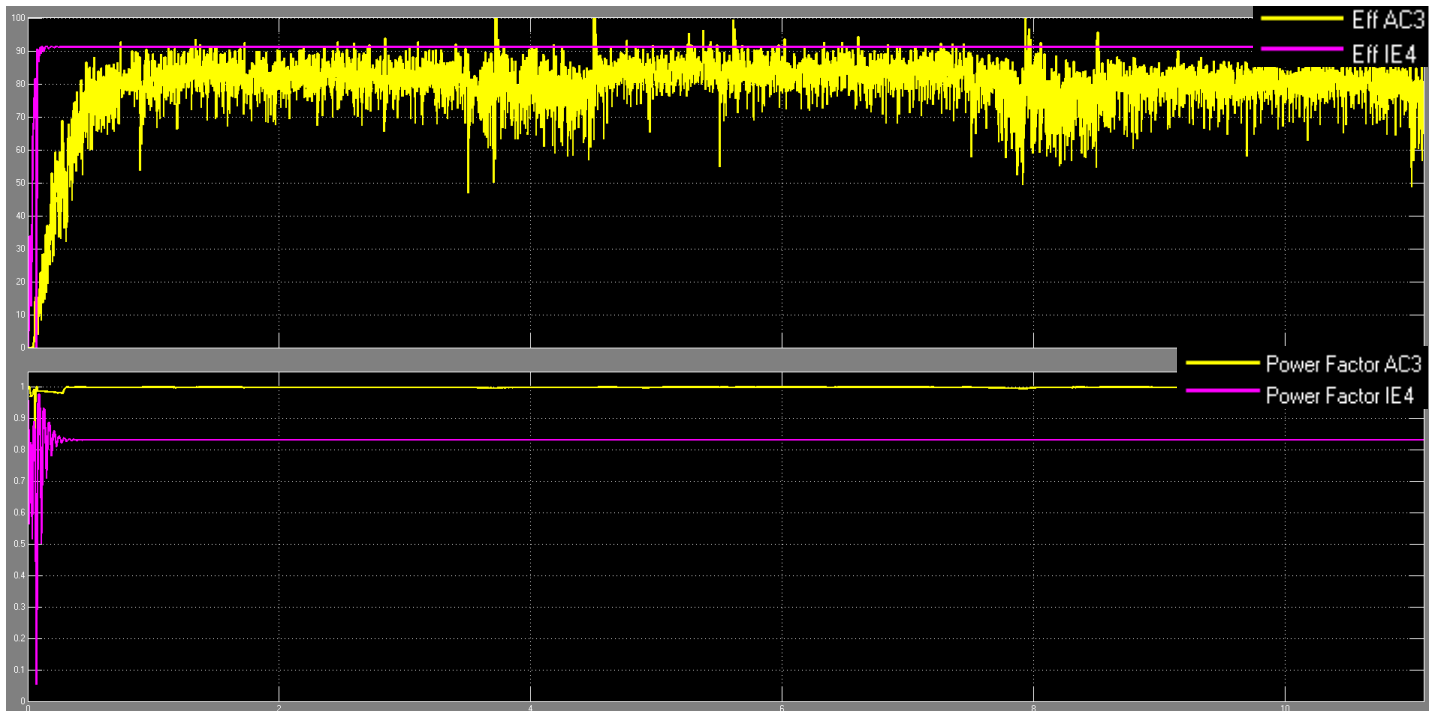
Το ρεύμα εισόδου στην μονάδα ελέγχου δεν πρέπει να υπερβαίνει το 110% του ονομαστικού ρεύματος. Η μαγνητική ροή διατηρείται σταθερή και το ρεύμα περιορίζεται, ενώ αποδίδεται πλήρης ελεγχόμενη ροπή εκκίνησης όπως φαίνεται στο ίδιο σχήμα και υπενθυμίζεται ότι όπως αναφέρθηκε στην παράγραφο 2.2.7 από τον τύπο 2.59 ισχύει ότι:

$$T_{acc} = J * \frac{\Delta \text{Urpm/sec}}{\Delta t_{30}} * \pi = 0,017 * \frac{1350 \text{rpm/sec}}{1 \text{ } 30} * 3,14 = 2,402 \text{Nm}, \text{ θα είναι η πρόσθετη ροπή κατά την εκκίνηση με το φορτίο, η οποία γίνεται σε } 1\text{s}.$$

Το ρεύμα περιορίζεται από τον σχεδιασμό του κυκλώματος προφόρτισης της μονάδας

Το rms ρεύμα γραμμής του συστήματος μονάδας ελέγχου και κινητήρα στην πλήρη φόρτιση, είναι 6,9 A ανά φάση, την ίδια χρονική στιγμή που το rms ρεύμα γραμμής πλήρους φόρτισης του κινητήρα είναι,7,63A. Αυτό είναι λογικό αφού η μονάδα ελέγχου θα απορροφήσει από το δίκτυο μόνο το μέτρο της ενεργής τιμής του διανύσματος του ρεύματος, το οποίο απαιτεί η ροπή σε κάθε χρονική στιγμή. Το ρεύμα μαγνήτισης το παρέχουν οι πυκνωτές του διαύλου DC στον κινητήρα.

Η μονάδα ελέγχου χρησιμοποιεί για τον έλεγχο του ρεύματος στον F.O.C.controller έλεγχο με ζώνη υστέρησης, η απλότητα και η καλή ακρίβεια του παρουσιάζει σχεδόν μηδενικό σφάλμα στην μόνιμη κατάσταση ενώ στις δυναμικές αλλαγές του συστήματος όπως από 3,7s ως 3,75s και από 4,92s, από 4,95s όπου υπάρχει μικρή μεταβατική φάση με αιχμές ροπής που όμως δεν αλλάζουν τον γραμμικό χαρακτήρα του συστήματος.



Σχήμα 4.72 Σύγκριση γραφημάτων για το σύστημα μονάδας ελέγχου F.O.C. - κινητήρα και τον κινητήρα κλάσης IE4 όπου λειτουργούν παράλληλα. Καταγράφεται η απόδοση %, και ο συντελεστής ισχύος, σε σχέση με τον χρόνο.

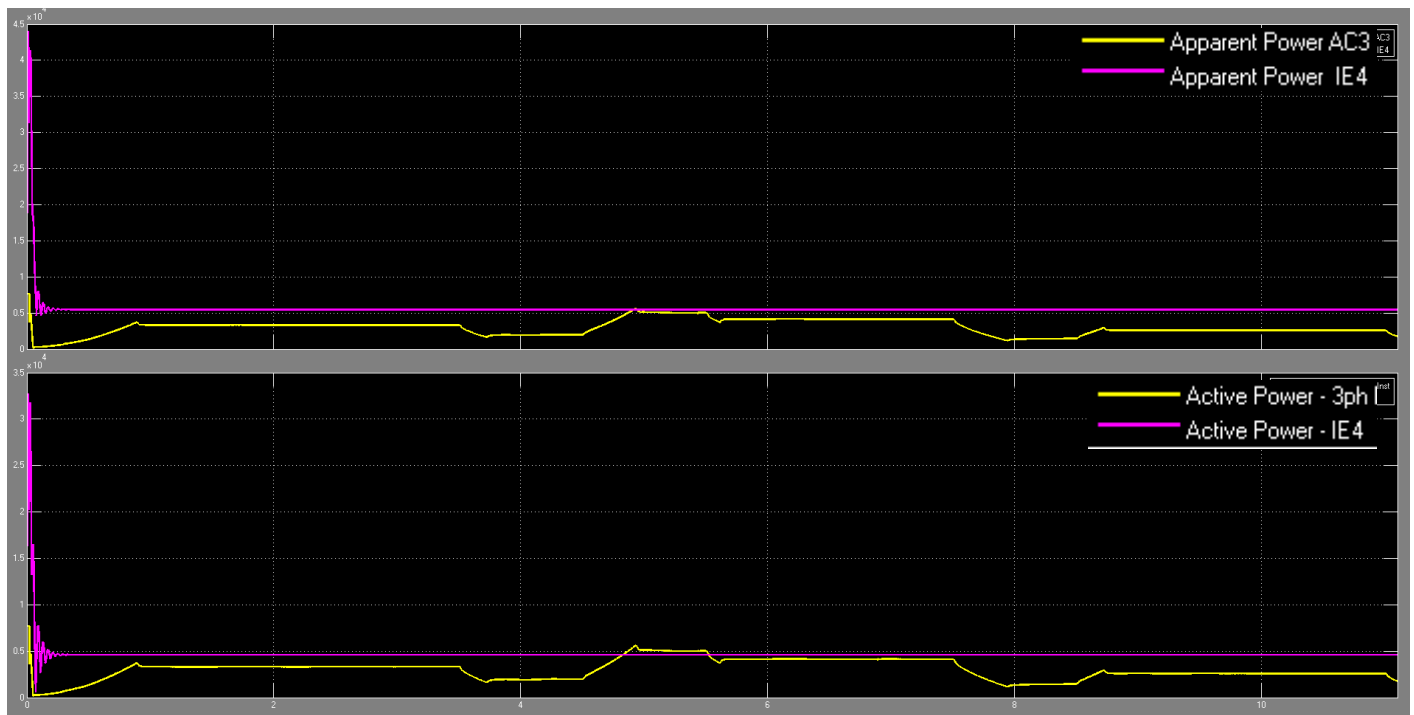
Σχήμα 4.72 παρατηρήσεις:

Στο σχήμα 4.72 δίνονται τα γραφήματα με την σύγκριση του συντελεστή ισχύος και του βαθμού απόδοσης κατά την διάρκεια του χρόνου. Ο συντελεστής ισχύος είναι ανώτερος σε όλη την διάρκεια του πειράματος ενώ στον αντίποδα η απόδοση του κινητήρα σχεδόν πάντα ανώτερη στο χρόνο του πειράματος.

Σχήμα 4.72 εξηγήσεις και συμπεράσματα:

Στην περίπτωση του συντελεστή ισχύος, στο σύστημα μονάδας ελέγχου-κινητήρα ακόμη και με τις διαφοροποιήσεις του φορτίου ο συντελεστής ισχύος είναι >0,99 και αυτό είναι λογικό εφόσον γνωρίζουμε την λειτουργία των πυκνωτών του διαύλου DC.

Στην περίπτωση του βαθμού απόδοσης, το σύστημα μονάδας ελέγχου -κινητήρα υπολείπεται της τιμής του κινητήρα με απ' ευθείας τροφοδοσία το οποίο είναι λογικό αφού ο βαθμός απόδοσης του συστήματος σε κάθε περίπτωση, όπως έχει ήδη αναφερθεί είναι: $\eta_{PDS} = \eta_{VFD} * \eta_{MOTOR}$



Σχήμα 4.73 Σύγκριση γραφημάτων της πραγματικής και της φαινόμενης ηλεκτρικής ισχύος που καταναλώνονται σε σχέση με τον χρόνο και σύμφωνα με τις απαιτήσεις της εφαρμογής, για το σύστημα μονάδας ελέγχου F.O.C. - κινητήρα και τον κινητήρα κλάσης IE4.

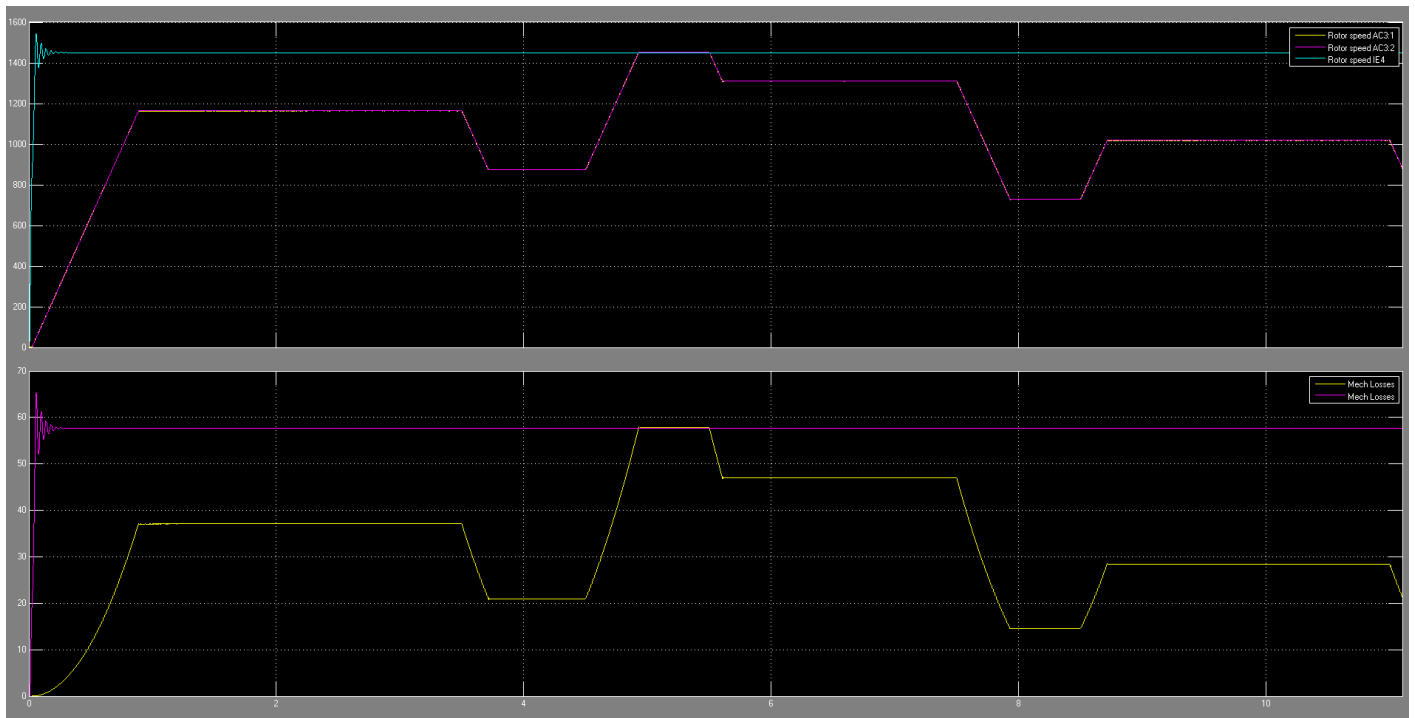
Σχήμα 4.73 παρατηρήσεις:

Στο σχήμα 4.73 δίνονται τα γραφήματα της πραγματικής και της φαινόμενης ηλεκτρικής ισχύος που καταναλώνονται σε σχέση με τον χρόνο. Παρατηρείται ότι η πραγματική ισχύς που καταναλώνεται από το σύστημα μονάδας ελέγχου-κινητήρα ρυθμίζεται από τις απαιτήσεις του φορτίου σε κάθε χρονική στιγμή εν αντιθέσει με τον κινητήρα που λειτουργεί με απ' ευθείας τροφοδοσία. Ακόμη στην ονομαστική τιμή ροπής φορτίου στροφών το σύστημα μονάδας ελέγχου - κινητήρα καταναλώνει μεγαλύτερη πραγματική ισχύ 4750 Watt σε σχέση με τον κινητήρα που λειτουργεί με απ' ευθείας τροφοδοσία 4400 Watt.

Ως προς το θέμα της φαινόμενης ισχύος εν αντιθέσει με τον κινητήρα που λειτουργεί με απ' ευθείας τροφοδοσία, στο σύστημα μονάδας ελέγχου -κινητήρα δείχνει να ταυτίζεται η πραγματική με την φαινόμενη ισχύ.

Σχήμα 4.73 εξηγήσεις και συμπεράσματα:

Στο σημείο της ονομαστικής τιμής του φορτίου, της ροπής και των στροφών το σύστημα μονάδας ελέγχου - κινητήρα καταναλώνει μεγαλύτερη πραγματική ισχύ σε σχέση με τον κινητήρα που λειτουργεί με απ' ευθείας τροφοδοσία. Αυτό είναι λογικό λόγω των πρόσθετων απωλειών του μονάδας ελέγχου, δηλαδή τις απώλειες αγωγιμότητας, τις απώλειες μεταγωγής και τις απώλειες στον δίαυλο DC. Τα οφέλη της χρήσης του συστήματος μονάδας ελέγχου - κινητήρα υπάρχουν σε περιπτώσεις εφαρμογών όπου οι κινητήρες δεν λειτουργούν συνεχώς στην ονομαστική τους ισχύ. Η φαινόμενη ισχύς ταυτίζεται με την πραγματική όπως έχει αναφερθεί παραπάνω, λόγω του συντελεστή ισχύος ο οποίος είναι $>0,99$.



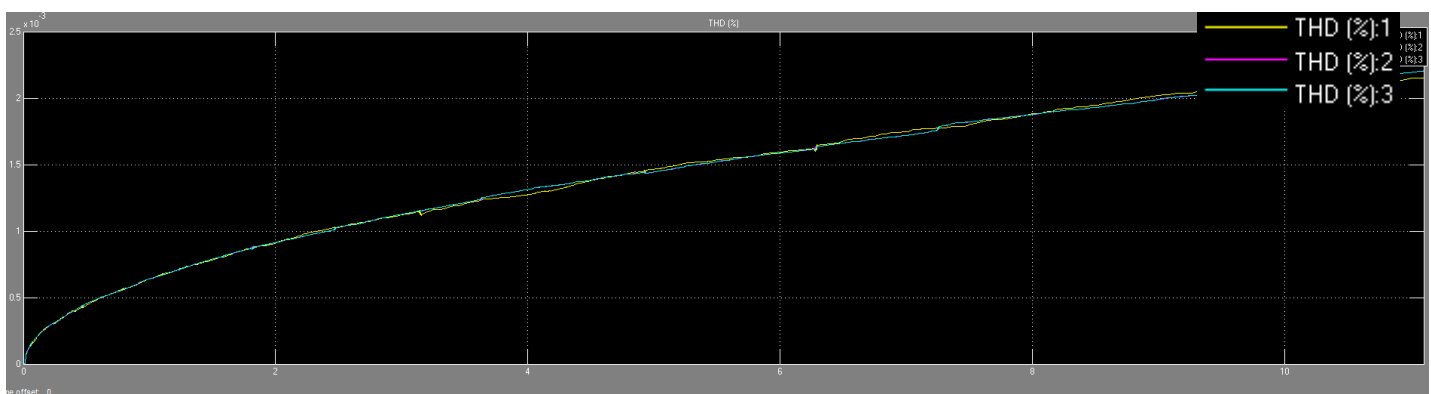
Σχήμα 4.74 Σύγκριση γραφημάτων της ταχύτητας και των μηχανικών απωλειών σε σχέση με τον χρόνο για το σύστημα μονάδας ελέγχου F.O.C. - κινητήρα και τον κινητήρα κλάσης IE4.

Σχήμα 4.74 παρατηρήσεις:

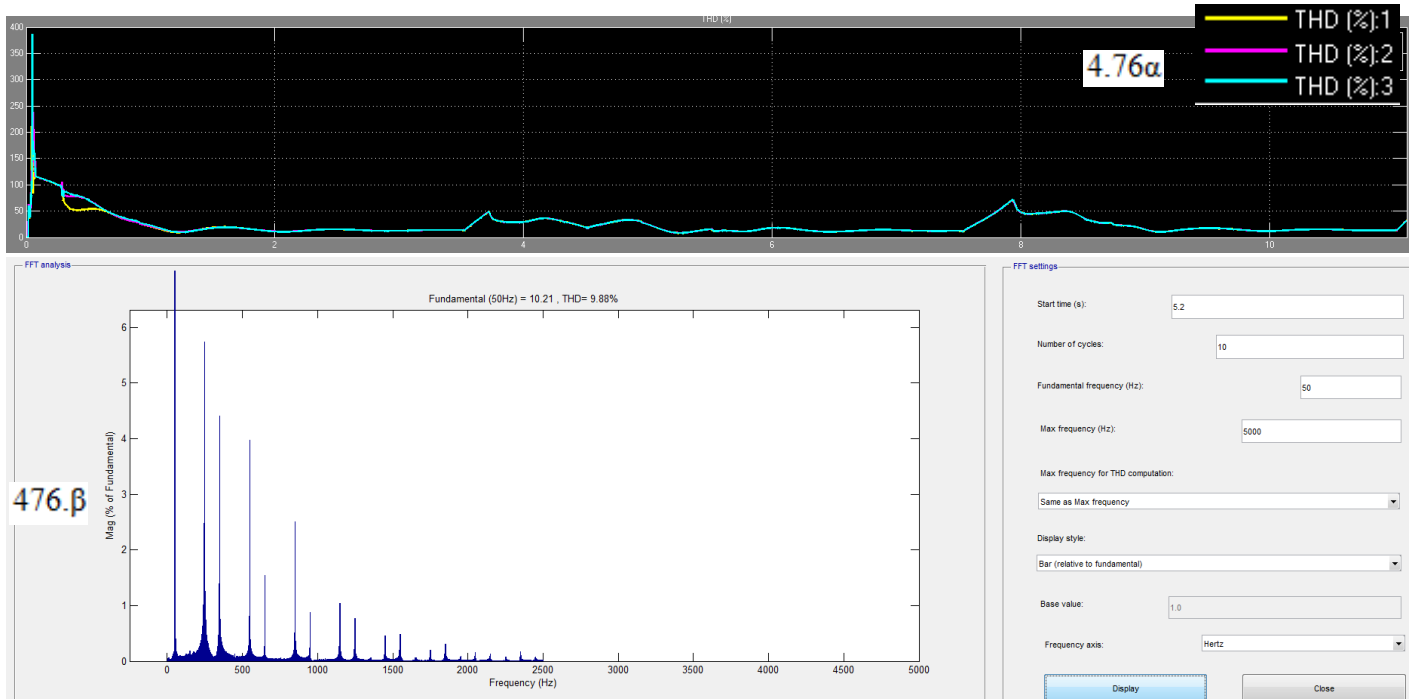
Στο σχήμα 4.74 δίνονται τα γραφήματα ταχύτητας και των μηχανικών απωλειών και παρατηρείται ότι το σύστημα μονάδας ελέγχου -κινητήρα έχει χαμηλότερες μηχανικές απώλειες οι οποίες είναι ανάλογες των στροφών του κινητήρα..

Σχήμα 4.74 παρατηρήσεις εξηγήσεις και συμπεράσματα:

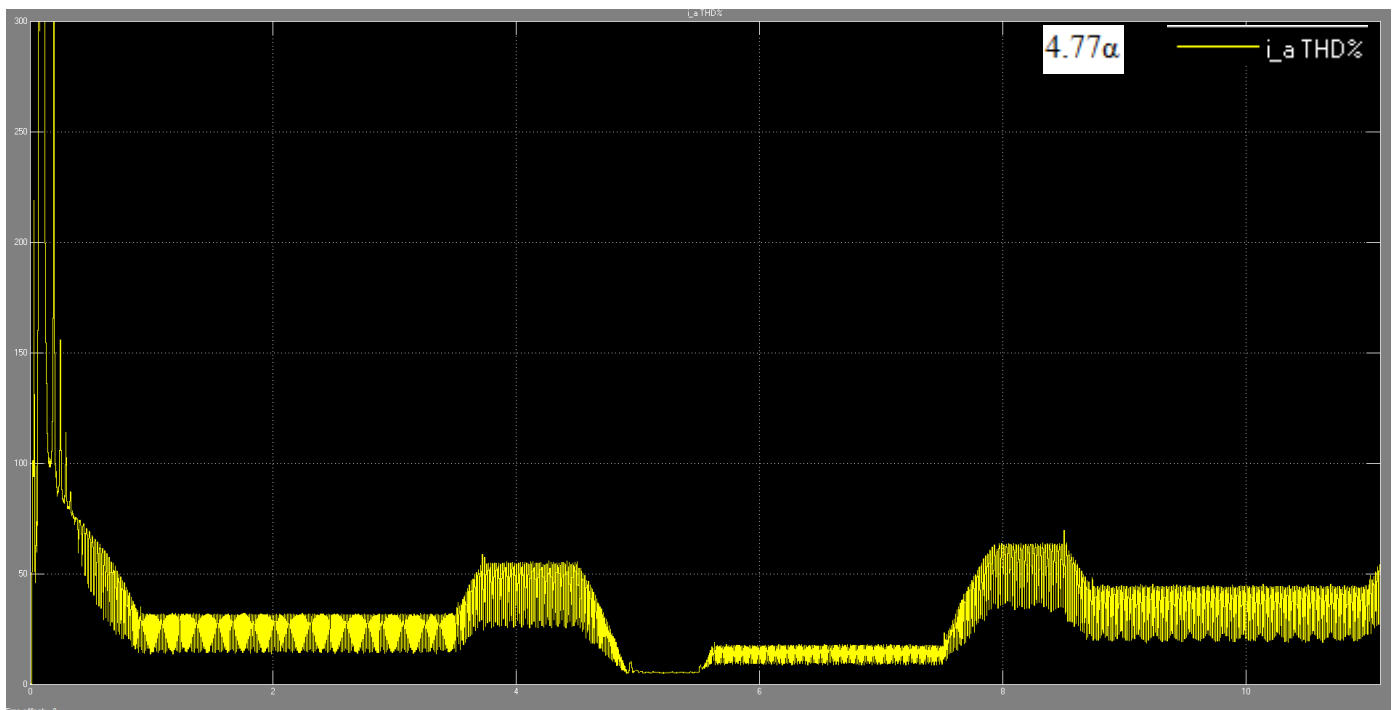
Η ταχύτητα του κινητήρα που οδηγείται είναι γραμμική με ελάχιστο θόρυβο, αυτό είναι δείγμα του ότι ο PI ελεγκτής της ταχύτητας παρέχει με αρκετή ακρίβεια έλεγχο χωρίς ανεπιθύμητες ταλαντώσεις και συνεχείς διορθώσεις. Οι μηχανικές απώλειες σχετίζονται με την τριβή των εξαρτημάτων κατά την εφαρμογή ροπής στον άξονα και της γωνιακής ταχύτητας περιστροφής. Η ακριβής ρύθμιση της ταχύτητας επέτρεψε να μειωθούν οι απώλειες τριβής και να οδηγήσουν σε βελτιωμένη διάρκεια ζωής στον μηχανολογικό εξοπλισμό, στον ίδιο τύπο κινητήρα.

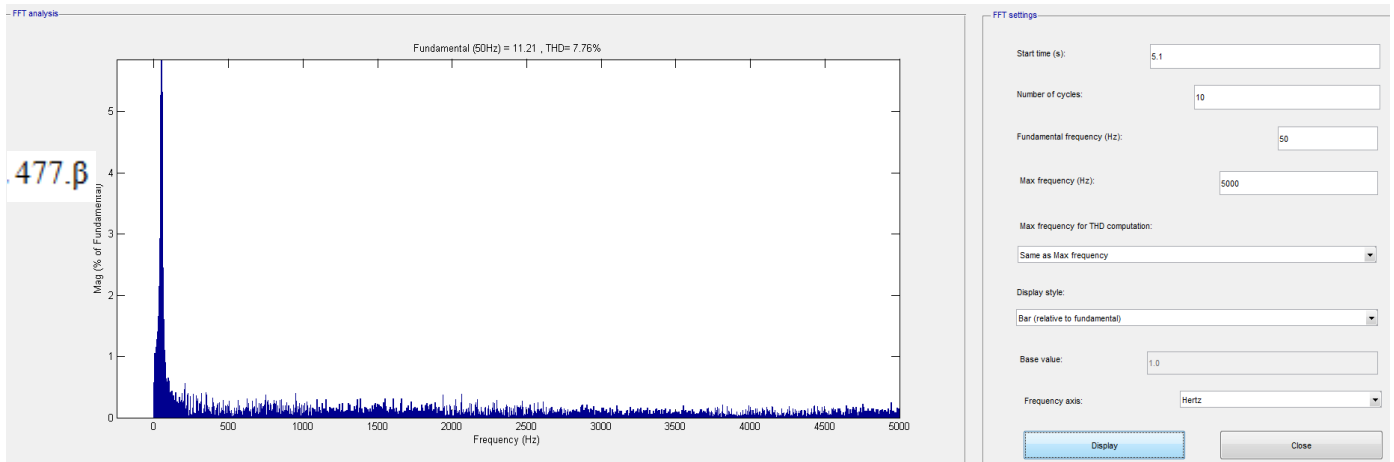


Σχήμα 4.75 Γράφημα με τις αρμονικές τάσης που παρουσιάζονται, σε σχέση με τον χρόνο ενώ λειτουργεί το σύστημα μονάδας ελέγχου F.O.C.- κινητήρα.



Σχήμα 4.76 Γραφήματα που αφορούν 4.76α) τις αρμονικές ρεύματος που παρουσιάζονται σε σχέση με τον χρόνο και 4.76β) η FFT ανάλυση στο πεδίο της συχνότητας για το ρεύμα, στην γραμμή τροφοδοσίας, ενώ λειτουργεί το σύστημα μονάδας ελέγχου F.O.C.- κινητήρα.





Σχήμα 4.77 Γραφήματα που αφορούν 4.77α) τις αρμονικές ρεύματος που παρουσιάζονται στο τριφασικό τύλιγμα του στάτη σε σχέση με τον χρόνο και 4.77β) η FFT ανάλυση στο πεδίο της συχνότητας για το ρεύμα, ενώ λειτουργεί το σύστημα μονάδας ελέγχου F.O.C.- κινητήρα.

Σχήμα 4.75, 4.76. 4.77 παρατηρήσεις:

Το σύστημα μονάδας ελέγχου - κινητήρα δημιουργεί φαινόμενα αρμονικών και αυτό είναι λογικό, λόγω των ημιαγωγών της μονάδας ελέγχου οι οποίοι άγουν διακοπτόμενα διαμορφώνοντας συνεχώς την επιθυμητή ισχύ τροφοδοτώντας τον κινητήρα.. Στο σχήμα 4.75 δίνεται το γράφημα με τις αρμονικές τάσης σε σχέση με τον χρόνο, στην τροφοδοσία. Στο σχήμα 4.76α δίνεται το γράφημα με τις αρμονικές έντασης σε σχέση με τον χρόνο, στην τροφοδοσία του συστήματος, ενώ στο σχήμα 4.76β δίνεται η ανάλυση FFT με το ποσοστό της παραμόρφωσης κοντά στο ονομαστικό σημείο λειτουργίας για την τροφοδοσία του συστήματος. Στο σχήμα 4.77α δίνεται το γράφημα με τις αρμονικές έντασης σε σχέση με τον χρόνο, στα τυλίγματα του στάτη, ενώ στο σχήμα 4.77β δίνεται η ανάλυση FFT με το ποσοστό της παραμόρφωσης στα τυλίγματα του στάτη στο ίδιο χρονικό σημείο που μετρήθηκε και η παραμόρφωση για την τροφοδοσία του συστήματος.

Σχήμα 4.75, 4.76 εξηγήσεις και συμπεράσματα:

Η τάση εξόδου έχει προσεγγιστικά ημιτονοειδή μορφή και εξαρτάται από τα κατασκευαστικά στοιχεία της μονάδας ελέγχου και της συχνότητας διαμόρφωσης των διακοπτικών στοιχείων. Οι αρμονικές αυτές περιορίζονται με τα παθητικά φίλτρα και τις αυτεπαγωγές γραμμής έτσι ώστε να είναι κάτω των ορίων παραμόρφωσης τάσης $THD_{max} = 5\%$. Άρα βρίσκεται εντός των ορίων που θέτονται σχετικά.

Η παραμόρφωση της έντασης είναι μεγαλύτερη με ελάχιστη τιμή 8% και μέγιστη 380%. Η παραμόρφωση γίνεται μεγαλύτερη κατά την εκκίνηση και στις μεταβατικές καταστάσεις του φορτίου και όταν ο κινητήρας λειτουργεί με χαμηλότερη φόρτιση. Την ελάχιστη τιμή της παραμόρφωσης παρουσιάζεται τό χρονικό διάστημα όπου το σύστημα ισορροπεί. Όμως ενώ σε χαμηλότερη φόρτιση του κινητήρα η αρμονική παραμόρφωση είναι μεγαλύτερη το ενεργό ρεύμα των αρμονικών μικραίνει αφού ισχύει:

$$THDi = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I^2_{hrms}}}{I_{1rms}}$$

Το THD% ς είναι 4,35% στα 250Hz, 6,03% στα 350Hz, 3,15% στα 550Hz, 1,24% στα 650Hz ενώ οι επόμενες αρμονικές είναι πολύ χαμηλού πλάτους. Οι αρμονικές περιορίστηκαν από την αυτεπαγωγή γραμμής και τα δύο παθητικά διπλοσυντονιζόμενα φίλτρα σε αυτές τις τιμές.

Σχήμα 4.77 εξηγήσεις και συμπεράσματα

Η αρμονική παραμόρφωση του ρεύματος που παρουσιάζεται στον στάτη κατά την ονομαστική φόρτιση του επαγωγικού κινητήρα έχει τιμή 7,76% για την χρονική στιγμή όπου το μέτρο του ρεύματος κορυφής είναι 11,21A. Το FFT Analysis tool δείχνει αρμονικό θόρυβο πολύ μικρής όμως ενεργής τιμής ως τα 5kHz όπου μας ενδιαφέρει το δείγμα. Το THD% είναι 5,16% στα 55Hz, 2,63% στα 60Hz, 1,17% στα 65Hz, 1,04% στα 70Hz ενώ οι επόμενες αρμονικές είναι πολύ χαμηλού πλάτους.

Πίνακας 13 Απαιτήσεις της εφαρμογής βάσει του πίνακα 4 και οι τιμές που προκύπτουν από την προσομοίωση της χρήσης μονάδας ελέγχου F.O.C. – κινητήρα.

Επιδόσεις συστήματος μονάδας ελέγχου με κινητήρα IE4							
Τιμές προσομοίωσης							
Ταχύτητα (rpm)	Ταχύτητα (rad/sec)	Ισχύς στην έξοδο (W)	Ισχύς στην έξοδο %	Ροπή στον άξονα (Nm)	Ροπή στον άξονα %	Συντελεστής ισχύος	Απόδοση %
1455	152,36	4037,54	100	26,5	100,37	0,99	85
1309,5	137,13	3291	82,27	24	90,90	0,99	83,74
1164	121,89	2620,7	65,51	21,5	81,43	0,99	82,9
1018,5	106,657	2026,48	50,66	19	71,96	0,99	81,7
873	91,42	1462,72	36,56	16	60,60	0,99	76,8
727,5	76,18	1028,43	25,71	13,5	51,13	0,99	73,45

4.4.2.1 Εξοικονόμηση ενέργειας και κόστους στην περίπτωση χρήσης μονάδας ελέγχου στροφών Field Oriented Control για την αντλία.

Για την εύρεση της εξοικονόμησης ενέργειας και κόστους χρησιμοποιήθηκαν τα στοιχεία του πίνακα 13 για να υπολογιστεί για κάθε ισχύ εξόδου η ετήσια κατανάλωση του συστήματος μονάδας ελέγχου-κινητήρα. Στους υπολογισμούς μόνο στην γραμμή για P_L:100% χρησιμοποιείται η ισχύς οριακά μεγαλύτερη που όμως προκύπτει από την προσομοίωση.

$$P_L 100\%, W_L = 1 * \frac{4037,54 W}{0,85} * 8760h * 0,1 = 4160,5 KWh$$

$$P_L 82,27\%, W_L = 0,8227 * \frac{4000 W}{0,8374} * 8760h * 0,2 = 6884,98 KWh$$

$$P_L 65,51\%, W_L = 0,6551 * \frac{4000 W}{0,829} * 8760h * 0,25 = 6922,4 KWh$$

$$P_L 50,66\%, W_L = 0,5066 * \frac{4000 W}{0,817} * 8760h * 0,25 = 5431,84 KWh$$

$$P_L 36,56\%, W_L = 0,3656 * \frac{4000 W}{0,768} * 8760h * 0,10 = 1668,1 KWh$$

$$P_L 25,71\%, W_L = 0,2571 * \frac{4000 W}{0,7345} * 8760h * 0,10 = 1226,52 KWh$$

$$\text{Ετήσιο } W_L = 4160,5 + 6884,98 + 6922,4 + 5431,84 + 1668,1 + 1226,52 = 26291,73 KWh$$

Ετήσιο W_L για την περίπτωση του κινητήρα ενεργειακής κλάσης IE4,

$$P_L = 1 * \frac{4000 W}{0,912} * 8760h * 1 = 38421,05 KWh$$

$$\frac{26291,73 KWh}{38421,05 KWh} = 0,6843 \text{ της ετήσιας κατανάλωσης σημαίνει } 31,57\% \text{ εξοικονόμηση ενέργειας}$$

Η ετήσια εξοικονόμηση για κόστος ενέργειας 0,10€/KWh θα είναι:

$$(38421,05 KWh - 26291,73 KWh) * 0,10€/KWh = 1212,93 €$$

4.4.3 3^η Εφαρμογή, συμπίεστης κοχλιωτός μικρής ισχύος σε μονάδα παραγωγής

Στην εφαρμογή θα συγκριθεί η απόδοση για την περίπτωση της χρήσης κινητήρα ενεργειακής κλάσης IE4 χωρίς οδήγηση και την περίπτωση της χρήσης μονάδας ελέγχου στροφών με έλεγχο Field Oriented Control και κινητήρα κλάσης IE4. Ο κοχλιωτός συμπίεστης λειτουργεί στην δυσμενέστερη περίπτωση που μπορεί να αντιμετωπιστεί, για 24h/ημέρα, 365 ημέρες/έτος, άρα το σύνολο 8760h/έτος.

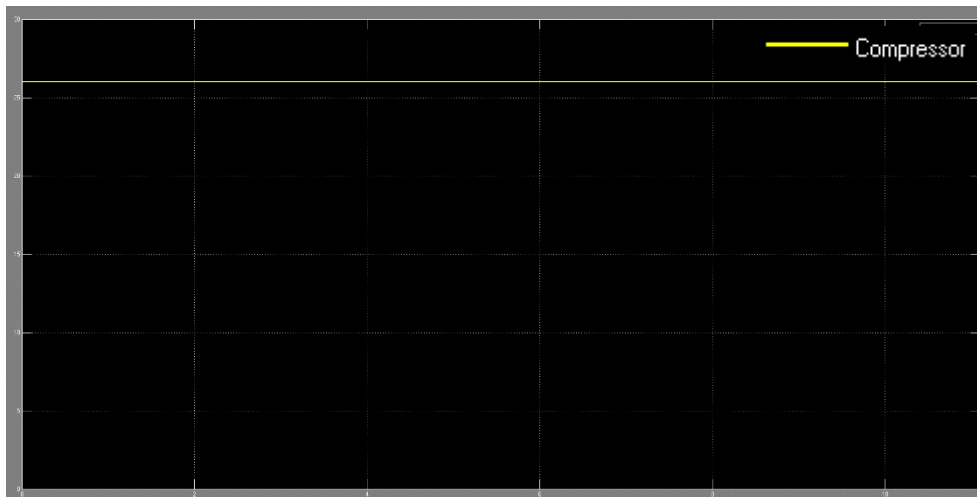
Οι απαιτήσεις τροφοδοτήθηκαν στο σύστημα μονάδας ελέγχου-κινητήρα σύμφωνα με τον πίνακα 5 της παραγράφου 3.2 με το υπόδειγμα των αναγκών της εφαρμογής. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης χρησιμοποιήθηκαν για την συμπλήρωση του πίνακα με τις τιμές της απόδοσης του συστήματος. Βάσει αυτών των αποτελεσμάτων, γίνεται σχετική ανάλυση και η οικονομική προσέγγιση.

Ο συνολικός χρόνος της προσομοίωσης ο οποίος βρίσκεται σε όλα τα παρακάτω γραφήματα στον οριζόντιο άξονα είναι 11s.

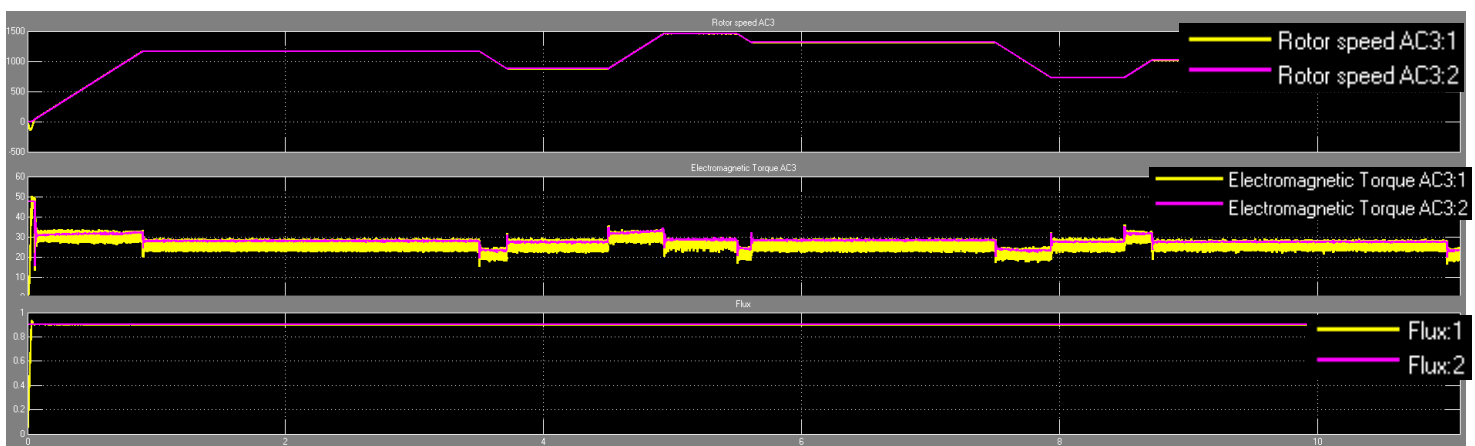
Από τον χαρακτήρα του φορτίου του αεροσυμπιεστή θετικής μετατόπισης ισχύει:

$$P_L = f(n), P_L = P_{outnom} * \left(\frac{U_{Load}}{U_{nom}} \right)$$

$$T_L = \text{σταθερό}$$



Σχήμα 4.78 Γράφημα του φορτίου που εφαρμόζεται βάσει των απαιτήσεων του πίνακα 5, σε σχέση με τον χρόνο. Με βάση αυτόν εξετάζεται η συμπεριφορά του συστήματος μονάδας ελέγχου *Field Oriented Control* –κινητήρα



Σχήμα 4.79 Γράφημα για το σύστημα μονάδας ελέγχου *Field Oriented Control* -κινητήρα της ταχύτητας με την ανατροφοδότησή της, της ροπής με την ανατροφοδότησή της και της μαγνητικής ροής στο πλαίσιο $d-q$ με την ανατροφοδότησή της, σε σχέση με τον χρόνο.

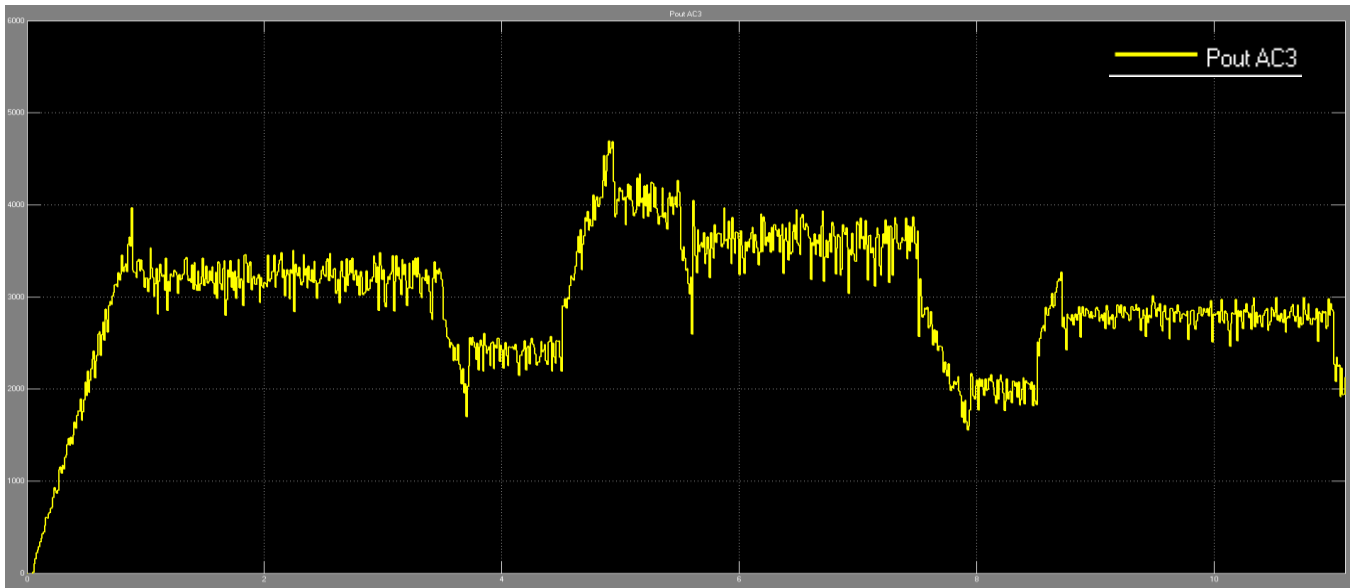
Σχήμα 4.79 παρατηρήσεις:

Στο σχήμα 4.79, στο πρώτο γράφημα δίνεται το γράφημα με την ταχύτητα του δρομέα με το κίτρινο χρώμα σε σχέση με την ταχύτητα αναφοράς με το μωβ χρώμα. Στο παρακάτω γράφημα δίνεται το γράφημα της ροπής με το κίτρινο χρώμα σε σχέση με την ροπή αναφοράς με το μωβ χρώμα και τέλος στο τελευταίο γράφημα δίνεται η μαγνητική ροή στο πλαίσιο αναφοράς του δρομέα με το κίτρινο χρώμα σε σχέση με την αναφορά της με το μωβ χρώμα. Σε κάθε μέγεθος παρατηρείται σχεδόν ταύτιση της τιμής αναφοράς με την πραγματική τιμή που αποδίδει ο οδηγούμενος κινητήρας.

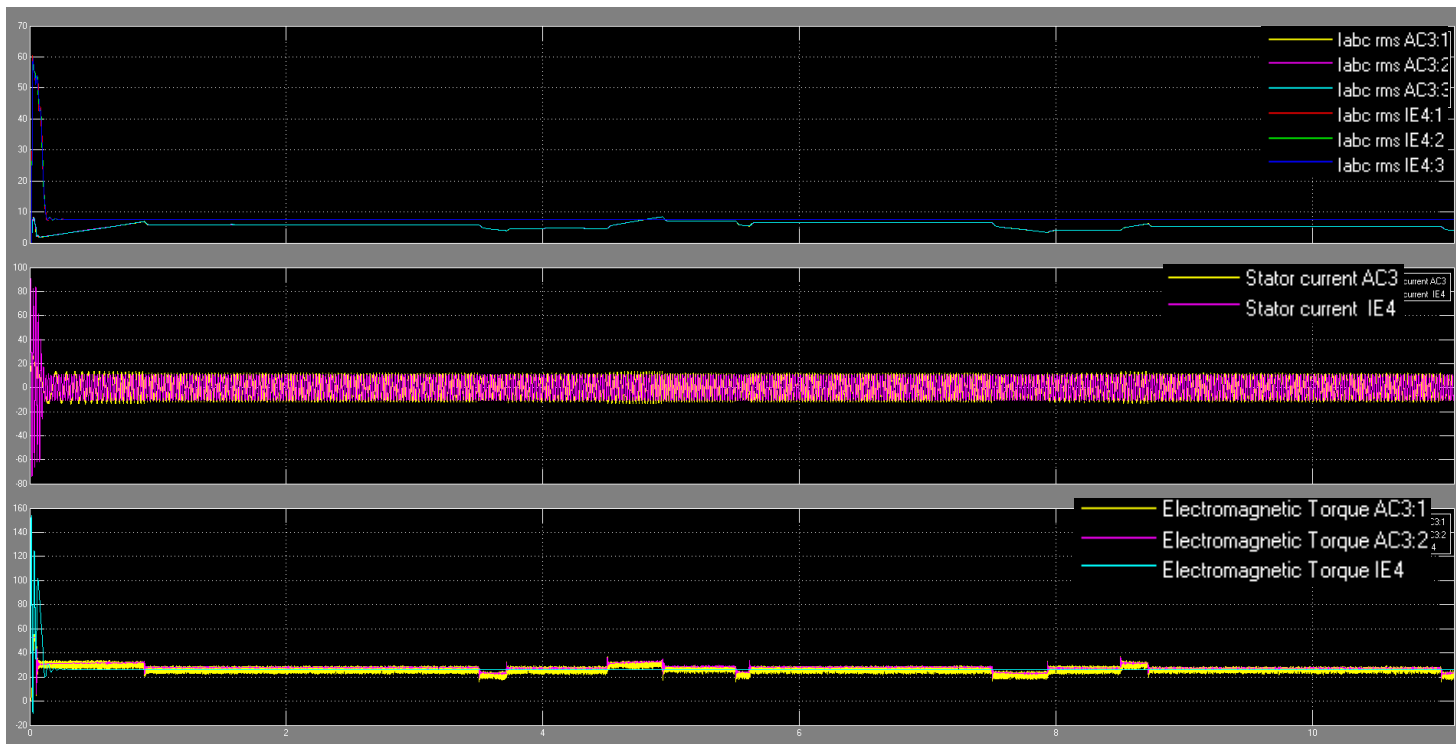
Σχήμα 4.79 εξηγήσεις και συμπεράσματα:

Αυτό που παρατηρείται στο σχήμα 4.79 είναι η φιλοσοφία του ελέγχου. Η μαγνητική ροή διατηρείται πάντα σταθερή σε σχέση με την μαγνητική ροή αναφοράς, ενώ σε κάθε διαφοροποίηση της τιμής του φορτίου η ροπή αυξομειώνεται ελεγχόμενα και ανεξάρτητα αποδίδοντας την τιμή

αναφοράς που χρειάζεται. Σε κάθε περίπτωση τα γραφήματα δείχνουν γραμμικά και με αξιόπιστη συμπεριφορά προς τις τιμές αναφοράς, με μικρή ύπαρξη θορύβου.



Σχήμα 4.80, Γράφημα της μηχανικής ισχύος εξόδου του συστήματος μονάδας ελέγχου F.O.C.-κινητήρα σε σχέση με τον χρόνο, σύμφωνα με τις απαιτήσεις φόρτισης της εφαρμογής, βάσει του πίνακα 5.



Σχήμα 4.81 Σύγκριση γραφημάτων για το σύστημα μονάδας ελέγχου F.O.C. - κινητήρα σε σχέση με τον κινητήρα κλάσης IE4 ο οποίος λειτουργεί χωρίς οδήγηση. Λειτουργούν παράλληλα καταγράφοντας το ρεύμα rms ανα φάση, ρεύμα από κορυφή σε κορυφή στον στάτη και την αποδιδόμενη ροπή τους, σε σχέση με τον χρόνο.

Σχήμα 4.81 παρατηρήσεις:

Στο σχήμα 4.81 στο πρώτο γράφημα παρατηρείται σύγκριση του ρεύματος I_{abc} rms της γραμμής ακολουθεί το ρεύμα από κορυφή σε κορυφή για τον στάτη και το γράφημα της ροπής των κινητήρων.

Στο πρώτο γράφημα το rms ρεύμα ανά φάση κατά την εκκίνηση, δεν ξεπερνάει το μέγιστο ρεύμα του συστήματος της μονάδας ελέγχου με τον κινητήρα και το συζευγμένο φορτίο με την μέγιστη τιμή του να φτάνει τα 8,3A την ίδια χρονική στιγμή ο ίδιος κινητήρας ο οποίος εκκινεί με το ίδιο συζευγμένο φορτίο καταναλώνει 60,5A. Το rms ρεύμα γραμμής του συστήματος μονάδας ελέγχου και κινητήρα στην πλήρη φόρτιση είναι 7 A ανά φάση την ίδια χρονική στιγμή που το rms ρεύμα γραμμής πλήρους φόρτισης του κινητήρα είναι 7,65A.

Στο δεύτερο γράφημα με την σύγκριση του ρεύματος I_{abc} κορυφής και rms της γραμμής και της ροπής του κινητήρα, παρατηρείται μεγάλη διαφορά από 0 ως 0,1sec όπου το μεγάλο ρεύμα αιχμής εκκίνησης απουσιάζει από την περίπτωση του συστήματος μονάδος ελέγχου-κινητήρα.

Στο τρίτο γράφημα παρατηρείται η ροπή για κάθε τιμή φορτίου. Με μωβ χρώμα είναι η ροπή αναφοράς που χρειάζεται να αποδοθεί σε κάθε αλλαγή του φορτίου. Ο κινητήρας χωρίς οδήγηση λειτουργεί αποδίδοντας συνεχώς την ονομαστική του ροπή ενώ με την χρήση της μονάδας ελέγχου αποδίδεται πάντοτε η ροπή που υπολογίζεται ότι χρειάζεται μέσω της ανατροφοδότησης του συστήματος. Στην καμπύλη της ροπής του ελεγχόμενου κινητήρα παρατηρούνται αιχμές ροπής κατά τη διάρκεια των μεταβατικών καταστάσεων, όπου υπάρχουν εναλλαγές στο φορτίο και η ταχύτητα αυξάνεται σταθερά γραμμικά ως την κατάσταση της σταθερότητας όπου διατηρείται χωρίς ταλαντώσεις.

Σχήμα 4.81 εξηγήσεις και συμπεράσματα:

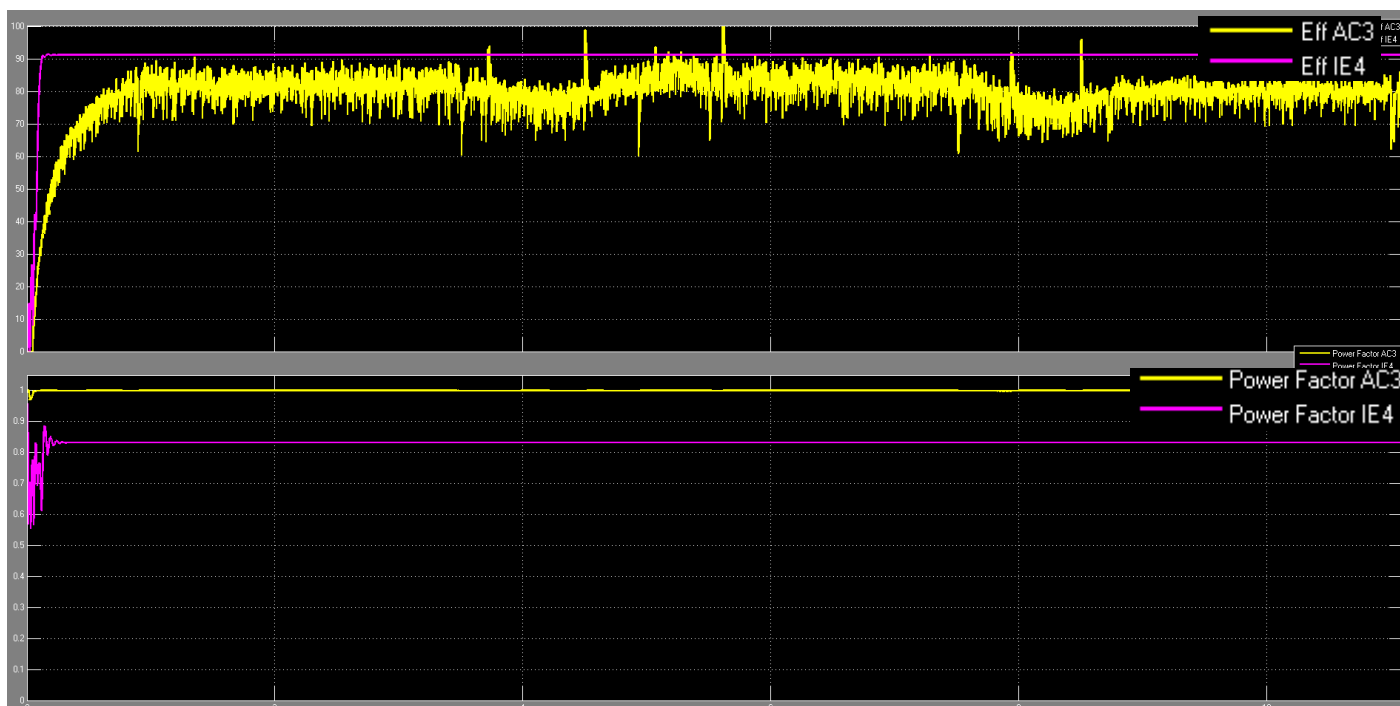
Το ρεύμα εισόδου στην μονάδα ελέγχου δεν υπερβαίνει το 110% του ονομαστικού ρεύματος. Η μαγνητική ροή διατηρείται σταθερή και το ρεύμα περιορίζεται, ενώ αποδίδεται πλήρης ελεγχόμενη ροπή εκκίνησης όπως φαίνεται στο ίδιο σχήμα και υπενθυμίζεται ότι όπως αναφέρθηκε στην παράγραφο 2.2.7 από τον τύπο 2.59 ισχύει ότι:

$$T_{acc} = J * \frac{\Delta \text{Urpm/sec}}{\Delta t 30} * \pi = 0,030 * \frac{1350rpm/sec}{1 30} * 3,14 = 4,24Nm, \quad \text{θα είναι η πρόσθετη ροπή κατά την εκκίνηση με το φορτίο, η οποία γίνεται σε 1s.}$$

Οι πυκνωτές του διαύλου DC φορτίζονται ομαλά, σε μια σταθερά χρόνου $t=RC$ και αποδίδουν το ρεύμα που χρειάζεται έτσι ώστε το ρεύμα κατά την εκκίνηση να διατηρείται κάτω από το ονομαστικό του κινητήρα.

Το rms ρεύμα γραμμής του συστήματος μονάδας ελέγχου και κινητήρα στην πλήρη φόρτιση είναι 7 A ανά φάση την ίδια χρονική στιγμή που το rms ρεύμα γραμμής πλήρους φόρτισης του κινητήρα είναι, 7,65A. Αυτό είναι λογικό αφού η μονάδα ελέγχου θα απορροφήσει από το δίκτυο μόνο το μέτρο της ενεργής τιμής του διανύσματος του ρεύματος, αυτό το οποίο απαιτεί η ροπή σε κάθε χρονική στιγμή. Το ρεύμα μαγνήτισης το παρέχουν οι πυκνωτές του διαύλου DC στον κινητήρα.

Η μονάδα ελέγχου χρησιμοποιεί για τον έλεγχο του ρεύματος ζώνη υστέρησης, η απλότητα και η καλή ακρίβεια του παρουσιάζει σχεδόν μηδενικό σφάλμα στην μόνιμη κατάσταση ενώ στις δυναμικές αλλαγές του συστήματος όπως πχ από 0,89s ως 0,91s, από 0,37s ως 0,372s έχει μικρή μεταβατική φάση με αιχμές ροπής που όμως δεν αλλάζουν τον γραμμικό χαρακτήρα του συστήματος.



Σχήμα 4.82 Σύγκριση γραφημάτων για το σύστημα μονάδας ελέγχου F.O.C. - κινητήρα σε και τον κινητήρα κλάσης IE4 όπου λειτουργούν παράλληλα. Καταγράφεται η απόδοση %, και ο συντελεστής ισχύος, σε σχέση με τον χρόνο.

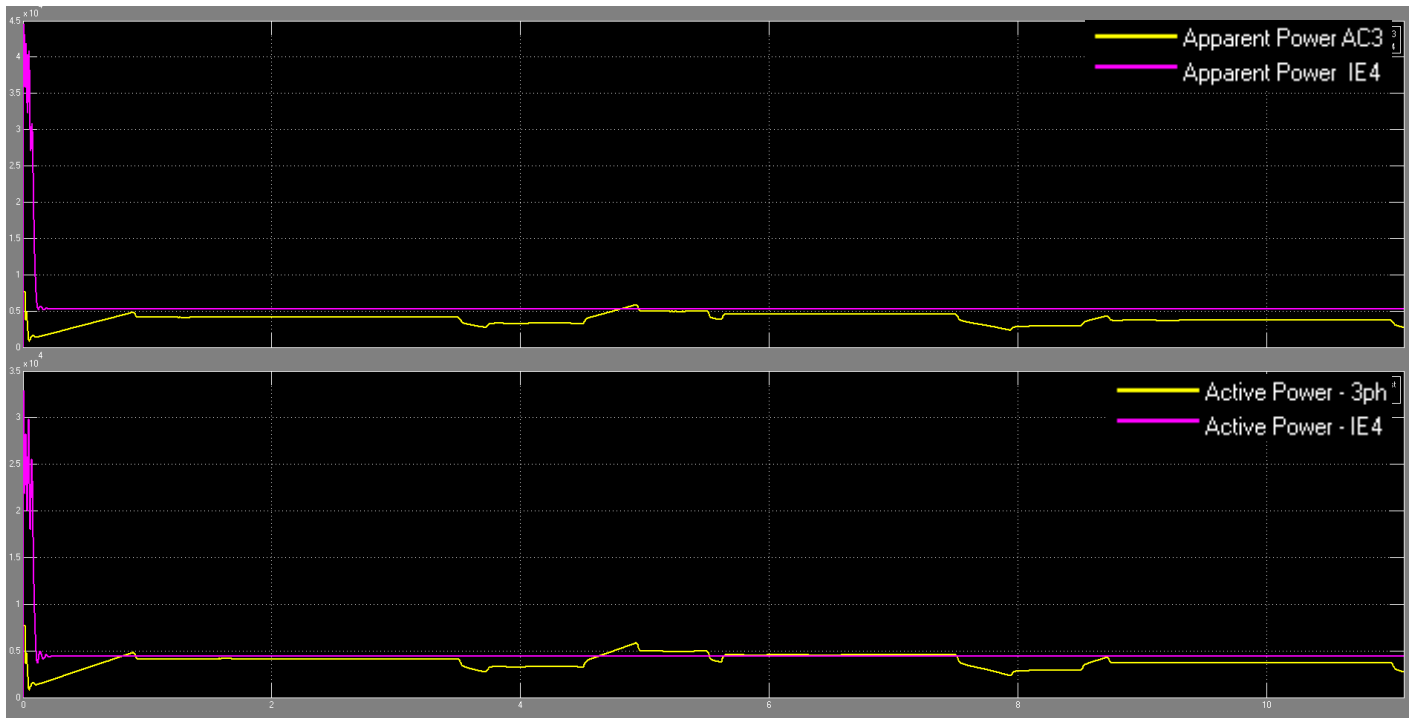
Σχήμα 4.82 παρατηρήσεις:

Στο σχήμα 4.62 δίνονται γραφήματα με την σύγκριση του συντελεστή ισχύος και του βαθμού απόδοσης κατά την διάρκεια του χρόνου. Ο συντελεστής ισχύος είναι ανώτερος σε όλη την διάρκεια του πειράματος ενώ στον αντίποδα η απόδοση του κινητήρα σχεδόν πάντα ανώτερη στο χρόνο του πειράματος.

Σχήμα 4.82 εξηγήσεις και συμπεράσματα:

Στην περίπτωση του συντελεστή ισχύος, στο σύστημα μονάδας ελέγχου-κινητήρα ακόμη και με τις διαφοροποιήσεις του φορτίου ο συντελεστής ισχύος είναι $>0,99$. Η μονάδα ελέγχου βελτιώνει τον συντελεστή ισχύος του συστήματος επειδή το άεργο ρεύμα που χρειάζεται ο κινητήρας τροφοδοτείται από τους πυκνωτές του διαύλου DC.

Στην περίπτωση του βαθμού απόδοσης, το σύστημα μονάδας ελέγχου -κινητήρα υπολείπεται της τιμής του κινητήρα με απ' ευθείας τροφοδοσία, αυτό είναι λογικό αφού ο βαθμός απόδοσης του συστήματος σε κάθε περίπτωση, όπως έχει αναφερθεί, είναι: $\eta_{PDS} = \eta_{VFD} * \eta_{MOTOR}$



Σχήμα 4.83 Σύγκριση γραφημάτων της πραγματικής και της φαινόμενης ηλεκτρικής ισχύος που καταναλώνονται σε σχέση με τον χρόνο και σύμφωνα με τις απαιτήσεις της εφαρμογής, για το σύστημα μονάδας ελέγχου F.O.C. - κινητήρα και τον κινητήρα κλάσης IE4.

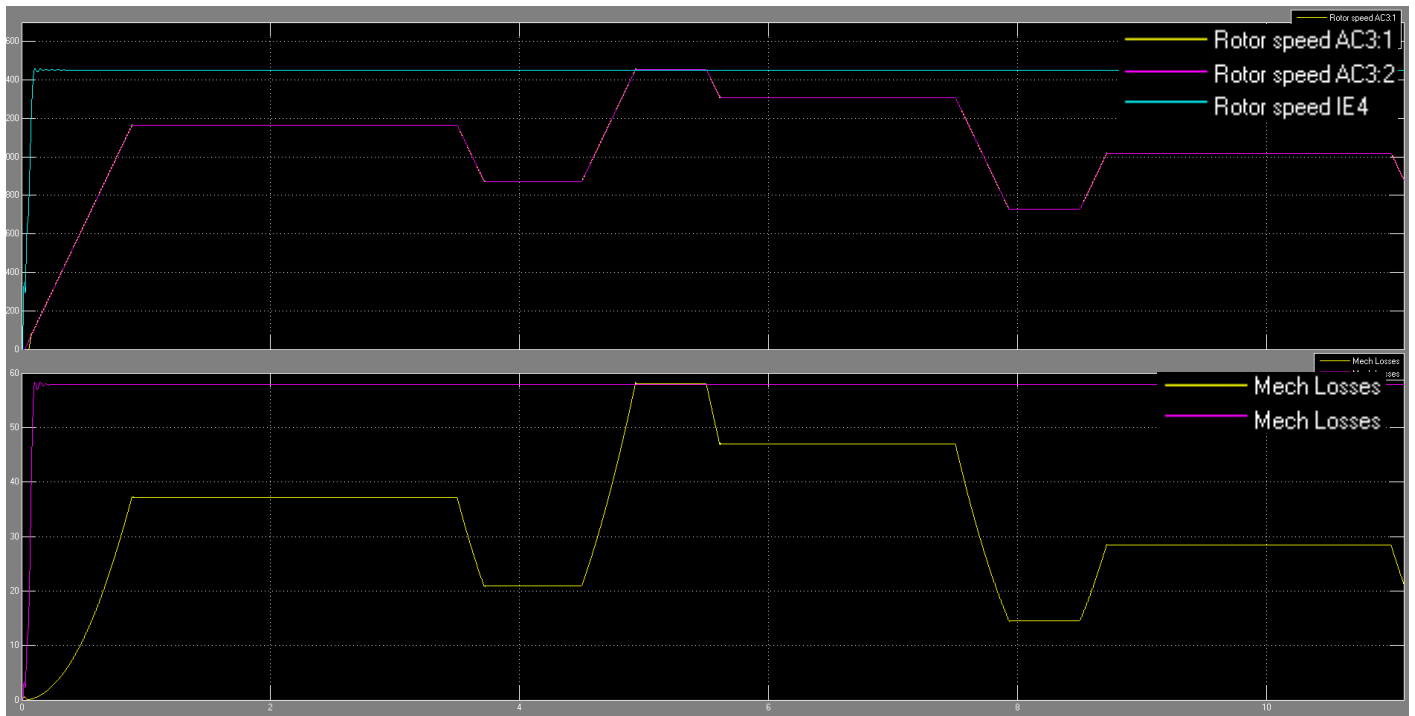
Σχήμα 4.83 παρατηρήσεις:

Στο σχήμα 4.83 δίνονται τα γραφήματα της πραγματικής και της φαινόμενης ηλεκτρικής ισχύος που καταναλώνονται σε σχέση με τον χρόνο. Παρατηρείται ότι η πραγματική ισχύς που καταναλώνεται από το σύστημα μονάδας ελέγχου-κινητήρα, ρυθμίζεται από τις απαιτήσεις του φορτίου σε κάθε χρονική στιγμή, εν αντιθέσει με τον κινητήρα που λειτουργεί με απ' ευθείας τροφοδοσία. Ακόμη στην ονομαστική τιμή ροπής φορτίου στροφών το σύστημα μονάδας ελέγχου - κινητήρα καταναλώνει μεγαλύτερη πραγματική ισχύ 4830 Watt σε σχέση με τον κινητήρα που λειτουργεί με απ' ευθείας τροφοδοσία 4410 Watt.

Ως προς το θέμα της φαινόμενης ισχύος εν αντιθέσει με τον κινητήρα που λειτουργεί με απ' ευθείας τροφοδοσία, στο σύστημα μονάδας ελέγχου -κινητήρα δείχνει να ταυτίζεται η πραγματική με την φαινόμενη ισχύ.

Σχήμα 4.83 εξηγήσεις και συμπεράσματα:

Στο σημείο της ονομαστικής τιμής του φορτίου, της ροπής και των στροφών το σύστημα μονάδας ελέγχου -κινητήρα καταναλώνει μεγαλύτερη πραγματική ισχύ σε σχέση με τον κινητήρα που λειτουργεί με απ' ευθείας τροφοδοσία. Αυτό είναι λογικό λόγω των πρόσθετων απωλειών της μονάδας ελέγχου, δηλαδή τις απώλειες αγωγιμότητας, τις απώλειες μεταγωγής και τις απώλειες στον δίαυλο DC. Αυτό δείχνει ότι τα οφέλη της χρήσης του συστήματος μονάδας ελέγχου - κινητήρα υπάρχουν σε περιπτώσεις εφαρμογών όπου οι κινητήρες δεν λειτουργούν συνεχώς στην ονομαστική τους ισχύ. Η φαινόμενη ισχύς ταυτίζεται με την πραγματική όπως έχει αναφερθεί παραπάνω λόγω του συντελεστή ισχύος ο οποίος είναι $>0,99$.



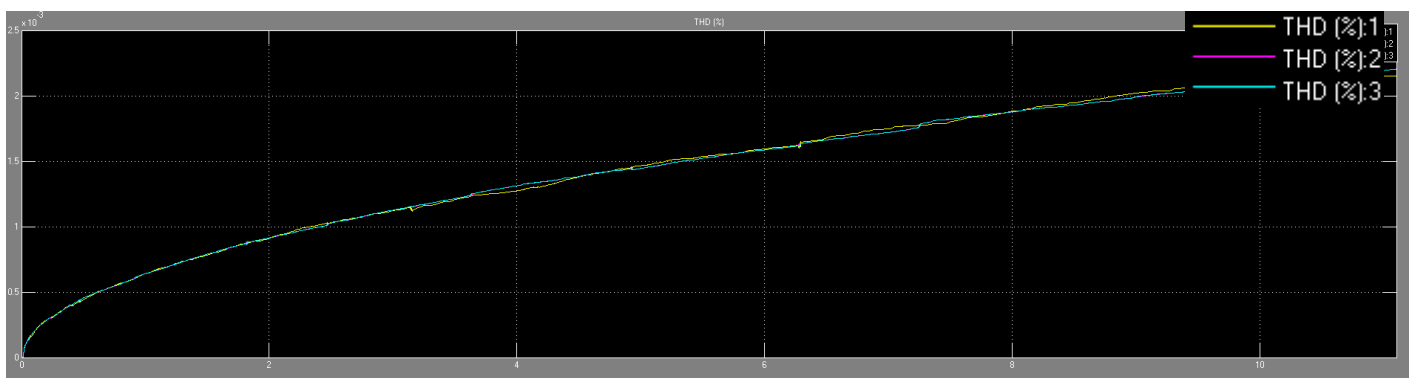
Σχήμα 4.84 Σύγκριση γραφημάτων της ταχύτητας και των μηχανικών απωλειών σε σχέση με τον χρόνο για το σύστημα μονάδας ελέγχου F.O.C. - κινητήρα και τον κινητήρα κλάσης IE4

Σχήμα 4.84 παρατηρήσεις:

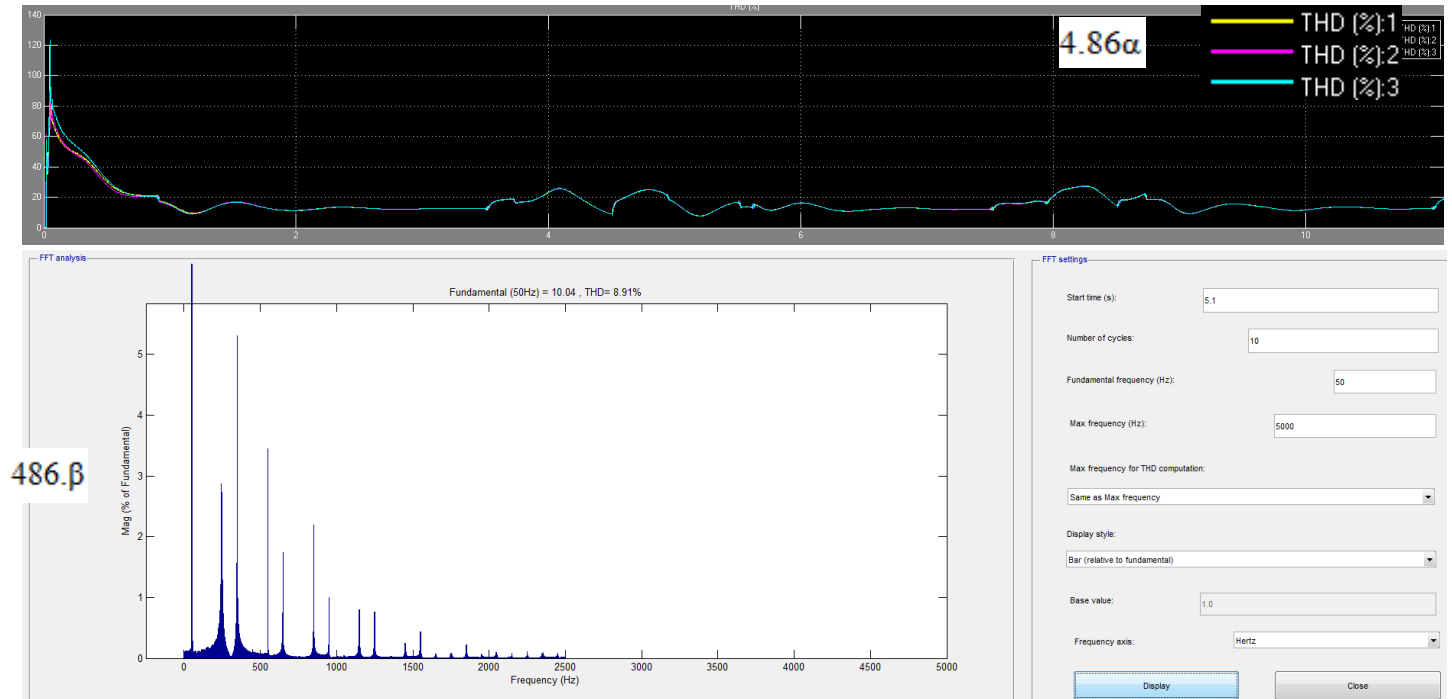
Στο σχήμα 4.84 δίνονται τα γραφήματα ταχύτητας και των μηχανικών απωλειών και παρατηρούμε ότι το σύστημα μονάδας ελέγχου -κινητήρα έχει χαμηλότερες μηχανικές απώλειες οι οποίες είναι ανάλογες των στροφών του κινητήρα..

Σχήμα 4.84 παρατηρήσεις εξηγήσεις και συμπεράσματα:

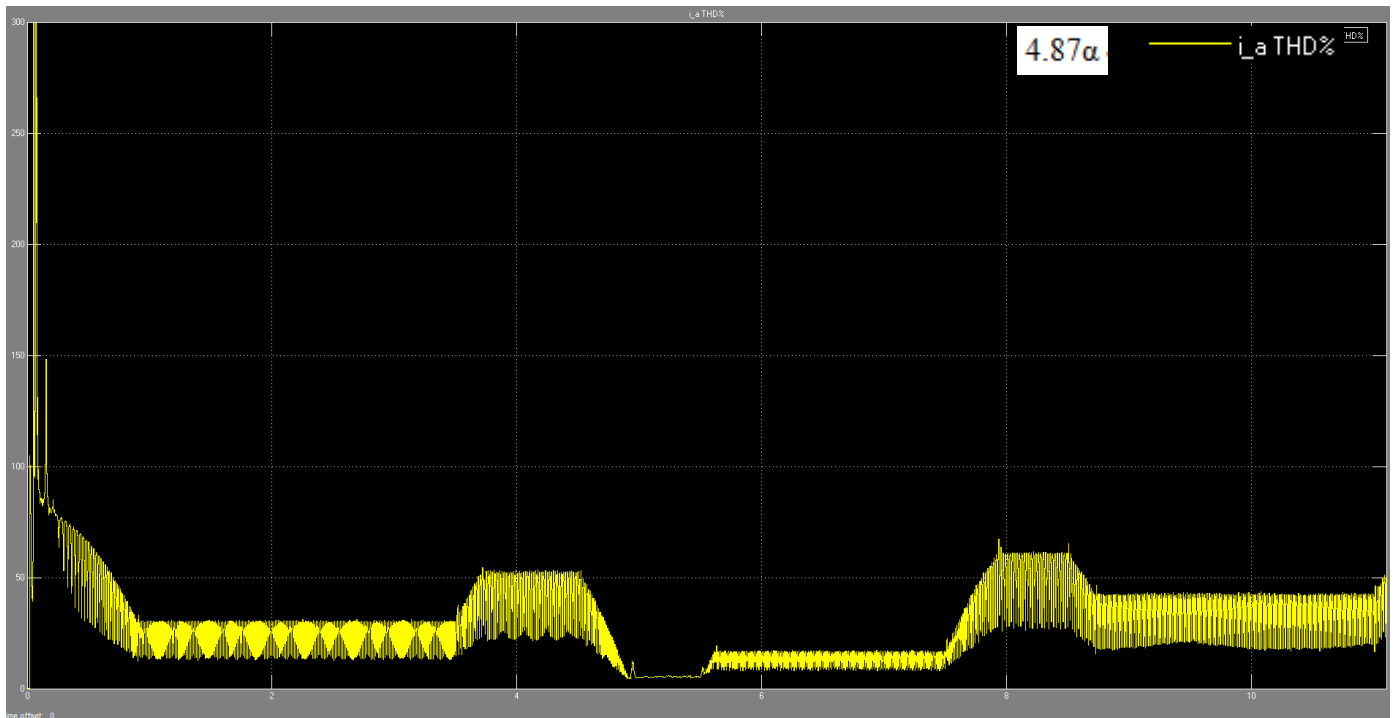
Η ταχύτητα του κινητήρα που οδηγείται είναι γραμμική με ελάχιστο θόρυβο, αυτό είναι δείγμα του ότι ο PI ελεγκτής της ταχύτητας παρέχει με αρκετή ακρίβεια έλεγχο χωρίς ανεπιθύμητες ταλαντώσεις και συνεχείς διορθώσεις. Οι μηχανικές απώλειες σχετίζονται με την τριβή των εξαρτημάτων κατά την εφαρμογή ροπής στον άξονα και της γωνιακής ταχύτητας περιστροφής. Η ακριβής ρύθμιση της ταχύτητας επέτρεψε να μειωθούν οι απώλειες τριβής και να οδηγήσουν σε βελτιωμένη διάρκεια ζωής στον μηχανολογικό εξοπλισμό στον ίδιο τύπο κινητήρα.

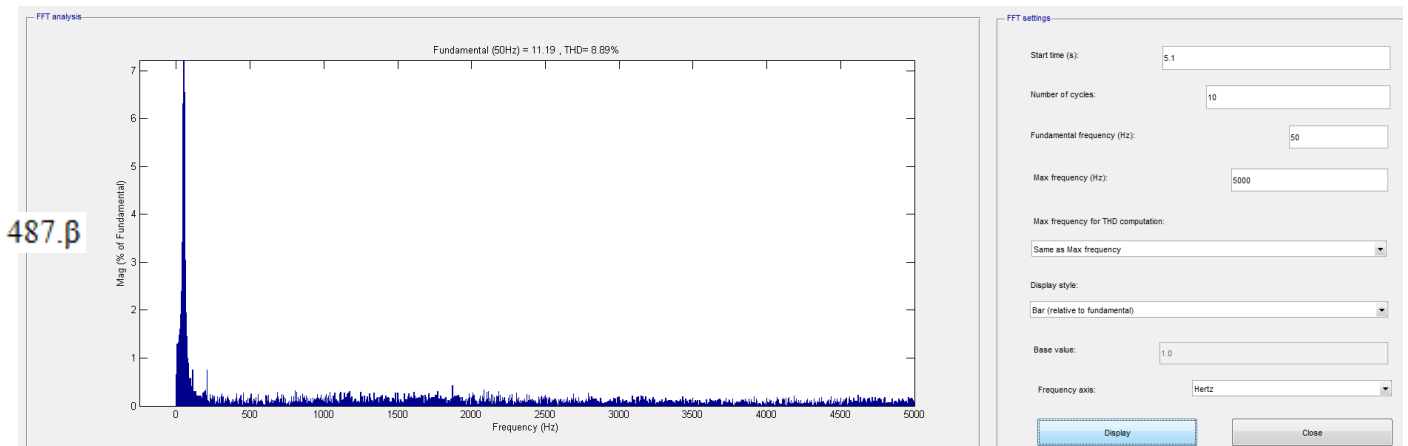


Σχήμα 4.85 Γράφημα για τις αρμονικές τάσης, σε σχέση με τον χρόνο, που παρουσιάζονται ενώ λειτουργεί το σύστημα μονάδας ελέγχου F.O.C. - κινητήρα



Σχήμα 4.86 Γραφήματα που αφορούν 4.86α) τις αρμονικές ρεύματος, σε σχέση με τον χρόνο, που παρουσιάζονται και 4.86β) η FFT ανάλυση στο πεδίο της συχνότητας για το ρεύμα, στην γραμμή τροφοδοσίας, ενώ λειτουργεί το σύστημα μονάδας ελέγχου F.O.C. - κινητήρα





Σχήμα 4.87 Γραφήματα που αφορούν 4.87α) τις αρμονικές ρεύματος που παρουσιάζονται στο τριφασικό τυλίγμα του στάτη, σε σχέση με τον χρόνο και 4.87β) η FFT ανάλυση στο πεδίο της συχνότητας για το ρεύμα, ενώ λειτουργεί το σύστημα μονάδας ελέγχου F.O.C. - κινητήρα.

Σχήμα 4.85, 4.86. 4.87 παρατηρήσεις:

Το σύστημα μονάδας ελέγχου - κινητήρα δημιουργεί φαινόμενα αρμονικών, όπως έχει αναφερθεί, λόγω των ημιαγωγών της μονάδας ελέγχου οι οποίοι άγουν διακοπτόμενα διαμορφώνοντας συνεχώς την επιθυμητή ισχύ τροφοδοτώντας τον κινητήρα.. Στο σχήμα 4.85 δίνεται το γράφημα με τις αρμονικές τάσης σε σχέση με τον χρόνο, στην τροφοδοσία. Στο σχήμα 4.86α δίνεται το γράφημα με τις αρμονικές έντασης σε σχέση με τον χρόνο, στην τροφοδοσία του συστήματος, ενώ στο σχήμα 4.86β δίνεται η ανάλυση FFT με το ποσοστό της παραμόρφωσης κοντά στο ονομαστικό σημείο λειτουργίας για την τροφοδοσία του συστήματος. Στο σχήμα 4.87α δίνεται το γράφημα με τις αρμονικές έντασης σε σχέση με τον χρόνο, στα τυλίγματα του στάτη, ενώ στο σχήμα 4.87β δίνεται η ανάλυση FFT με το ποσοστό της παραμόρφωσης στα τυλίγματα του στάτη, στο ίδιο χρονικό σημείο που μετρήθηκε και η παραμόρφωση για την τροφοδοσία του συστήματος.

Σχήμα 4.85, 4.86 εξηγήσεις και συμπεράσματα:

Η τάση εξόδου έχει προσεγγιστικά ημιτονοειδή μορφή και εξαρτάται από τα κατασκευαστικά στοιχεία της μονάδας ελέγχου και της συχνότητας διαμόρφωσης των διακοπτικών στοιχείων. Οι αρμονικές αυτές περιορίζονται από τα παθητικά φίλτρα και τις αυτεπαγωγές γραμμής έτσι ώστε να είναι κάτω των ορίων παραμόρφωσης τάσης $THD_{max}\% = 5\%$.

Παρατηρώντας την κυματομορφή η παραμόρφωση της τάσης είναι $<5\%$. Άρα βρίσκεται εντός των ορίων που θέτονται σχετικά.

Η παραμόρφωση της έντασης είναι μεγαλύτερη με ελάχιστη τιμή 7,71% και μέγιστη 125%. Η παραμόρφωση γίνεται μεγαλύτερη κατά την εκκίνηση και τις μεταβατικές καταστάσεις της τιμής του φορτίου και όταν ο κινητήρας λειτουργεί με χαμηλότερη φόρτιση. Την ελάχιστη τιμή της παραμόρφωσης την έχει στην χρονική διάρκεια όπου το σύστημα ισορροπεί. Όμως ενώ σε χαμηλότερη φόρτιση του κινητήρα η αρμονική παραμόρφωση είναι μεγαλύτερη το ενεργό ρεύμα των αρμονικών μικραίνει , όπως έχει αναφερθεί, αφού ισχύει:

$$THDi = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I^2 h_{rms}}}{I_{1rms}}$$

Το THD% είναι 2,35% στα 250Hz, 5,1% στα 350Hz, 3,55% στα 550Hz, 1,74% στα 650Hz ενώ οι επόμενες αρμονικές είναι πολύ χαμηλού πλάτους. Οι αρμονικές περιορίστηκαν από την αυτεπαγωγή γραμμής και τα δύο παθητικά διπλοσυντονιζόμενα φίλτρα σε αυτές τις τιμές.

Σχήμα 4.87 εξηγήσεις και συμπεράσματα

Η αρμονική παραμόρφωση του ρεύματος που παρουσιάζεται στον στάτη κατά την ονομαστική φόρτιση του επαγωγικού κινητήρα έχει τιμή 8,89%. για την χρονική στιγμή όπου το μέτρο του ρεύματος κορυφής είναι 11,19A. Το FFT Analysis tool δείχνει αρμονικό θόρυβο πολύ μικρής όμως ενεργής τιμής ως τα 5kHz όπου μας ενδιαφέρει το δείγμα. Το THD% ς είναι 6,38% στα 55Hz, 3,11% στα 60Hz, 1,90% στα 65Hz, 1,45% στα 70Hz ενώ οι επόμενες αρμονικές είναι πολύ χαμηλού πλάτους.

Πίνακας 14 Απαιτήσεις της εφαρμογής βάσει του πίνακα 5 και οι τιμές που προκύπτουν από την προσομοίωση της χρήσης μονάδας ελέγχου F.O.C. – κινητήρα.

Επιδόσεις συστήματος μονάδας ελέγχου με κινητήρα IE4							
Τιμές προσομοίωσης							
Ταχύτητα (rpm)	Ταχύτητα (rad/sec)	Ισχύς στην έξοδο (W)	Ισχύς στην έξοδο %	Ροπή στον άξονα (Nm)	Ροπή στον άξονα %	Συντελεστής ισχύος	Απόδοση %
1455	152,36	4037,54	100	26.5	100,37	0.99	83,6
1309,5	137,13	3633	90,82	26,5	100,37	0,99	83,2
1164	121,89	3230,09	80,75	26,5	100,37	0,99	81,7
1018,5	106,657	2826,4	71,61	26,5	100,37	0,99	80,07
873	91,42	2422,63	60,56	26,5	100,37	0,99	78
727,5	76,18	2018,77	50,47	26,5	100,37	0,99	74,7

4.4.3.1 Εξοικονόμηση ενέργειας και κόστους στην περίπτωση χρήσης μονάδας ελέγχου στροφών Field Oriented Control για τον κοχλιωτό συμπιεστή.

Για την εύρεση της εξοικονόμησης ενέργειας και κόστους χρησιμοποιήθηκαν τα στοιχεία του πίνακα 14 για να υπολογιστεί για κάθε ισχύ εξόδου η ετήσια κατανάλωση του συστήματος μονάδας ελέγχου-κινητήρα. Στους υπολογισμούς μόνο στην γραμμή για P_L:100% χρησιμοποιείται η ισχύς οριακά μεγαλύτερη που όμως προκύπτει από την προσομοίωση.

$$P_L 100\%, W_L = 1 * \frac{4037,54 W}{0,836} * 8760h * 0,1 = 4230,7 \text{ kWh}$$

$$P_L 90,82\%, W_L = 0,9082 * \frac{4000 W}{0,832} * 8760h * 0,2 = 7649,84 \text{ kWh}$$

$$P_L 80,75\%, W_L = 0,8075 * \frac{4000 W}{0,817} * 8760h * 0,25 = 8658,14 \text{ kWh}$$

$$P_L 70,61\%, W_L = 0,7061 * \frac{4000 W}{0,8007} * 8760h * 0,25 = 7725,04 KWh$$

$$P_L 60,56\%, W_L = 0,6056 * \frac{4000 W}{0,78} * 8760h * 0,10 = 2720,54 KWh$$

$$P_L 50,46\%, W_L = 0,5046 * \frac{4000 W}{0,747} * 8760h * 0,10 = 2366,96 KWh$$

$$\text{Ετήσιο } W_L = 4230,7 + 7649,84 + 8658,14 + 7725,04 + 2720,54 + 2366,96 = 33351,24 KWh$$

Ετήσιο W_L για την περίπτωση του κινητήρα ενεργειακής κλάσης IE4,

$$W_L = 1 * \frac{4000 W}{0,912} * 8760h * 1 = 38421,05 KWh$$

$$\frac{33351,24 KWh}{38421,05 KWh} = 0,8680 \text{ της ετήσιας κατανάλωσης σημαίνει } 13,20\% \text{ εξοικονόμηση ενέργειας}$$

Η ετήσια εξοικονόμηση για κόστος 0,10€/KWh θα είναι:

$$(38421,05 KWh - 33351,24 KWh) * 0,10€/KWh = 506,99€$$

4.5 Σύγκριση συστήματος μονάδας ελέγχου Direct torque control -κινητήρα, με όμοιο κινητήρα 4kW με απ' ευθείας τροφοδοσία από το δίκτυο

4.5.1 1^η Εφαρμογή, φυγοκεντρικός ανεμιστήρας για ανακύκλωση αέρα σε χώρο αποθήκης.

Στην εφαρμογή θα συγκριθεί η απόδοση για την περίπτωση της χρήσης κινητήρα ενεργειακής κλάσης IE4 χωρίς οδήγηση και την περίπτωση της χρήσης μονάδας ελέγχου στροφών με έλεγχο D.T.C. και κινητήρα κλάσης IE4. Ο φυγοκεντρικός ανεμιστήρας λειτουργεί στην δυσμενέστερη περίπτωση που μπορεί να αντιμετωπιστεί, για 24h/ημέρα, 365 ημέρες/έτος, άρα το σύνολο 8760h/έτος.

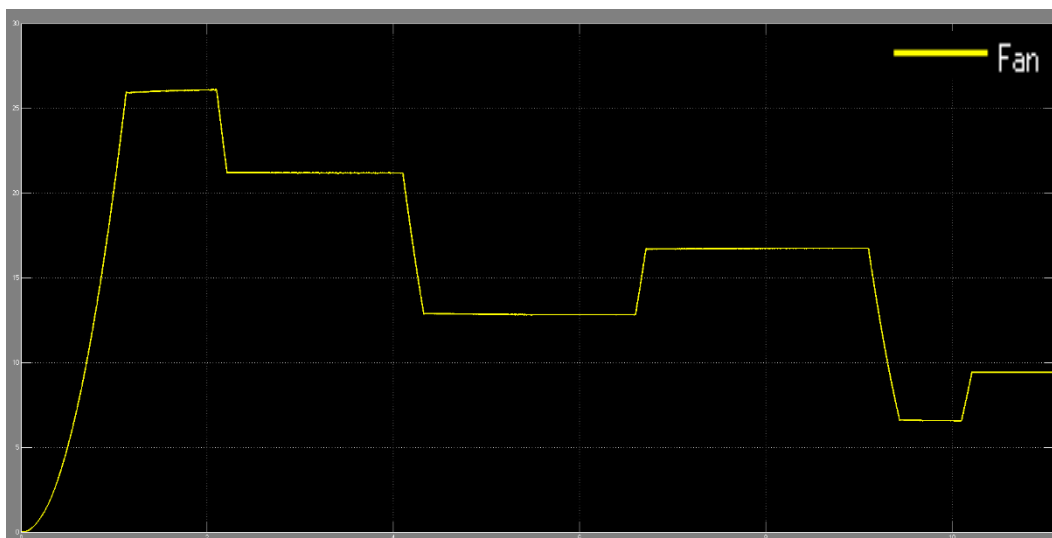
Οι απαιτήσεις τροφοδοτήθηκαν στο σύστημα μονάδας ελέγχου-κινητήρα, σύμφωνα με τον πίνακα 3 της παραγράφου 3.2 με το υπόδειγμα των αναγκών της εφαρμογής. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης χρησιμοποιήθηκαν κατόπιν για την συμπλήρωση πίνακα με τις τιμές της προσομοίωσης για την απόδοση του συστήματος. Βάσει αυτών των αποτελεσμάτων γίνεται σχετική ανάλυση και η οικονομική προσέγγιση.

Ο συνολικός χρόνος της προσομοίωσης ο οποίος βρίσκεται σε όλα τα παρακάτω γραφήματα στον οριζόντιο άξονα είναι 11s.

Από τον χαρακτήρα του φορτίου του φυγοκεντρικού ανεμιστήρα υπενθυμίζεται ότι ισχύει:

$$P_L = f(n^3), P_L = P_{outnom} * \left(\frac{U_{Load}}{U_{nom}}\right)^3$$

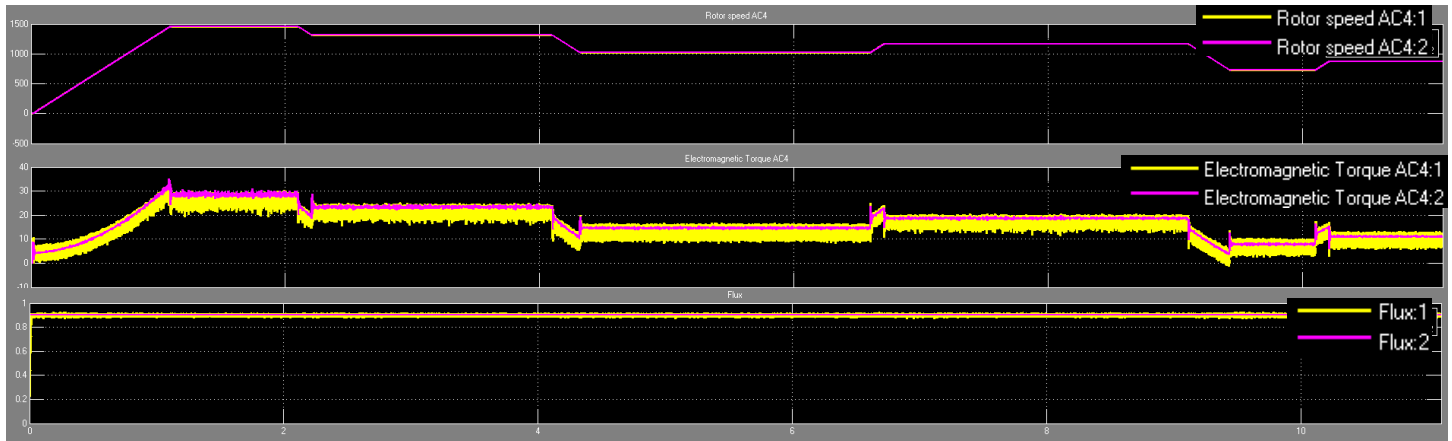
$$T_L = f(n^2)$$



Σχήμα 4.88 Γράφημα του φορτίου που εφαρμόζεται βάσει των απαιτήσεων του πίνακα 3, σε σχέση με τον χρόνο. Με βάση αυτόν εξετάζεται η συμπεριφορά του συστήματος μονάδας ελέγχου D.T.C. – κινητήρα.

Σχήμα 4.88 παρατηρήσεις:

Το γράφημα της καμπύλης του φορτίου έχει επιλεγεί να εξαχθεί από την ανατροφοδότηση του συστήματος της μονάδας ελέγχου-κινητήρα. Παρατηρείται γραμμική αξιόπιστη συμπεριφορά της καμπύλης σε όλη την διάρκεια του χρόνου της προσομοίωσης



Σχήμα 4.89 Γράφημα για το σύστημα μονάδας ελέγχου D.T.C. -κινητήρα της ταχύτητας με την ανατροφοδότησή της, της ροπής με την ανατροφοδότησή της και της μαγνητικής ροής στο πλαίσιο d-q με την ανατροφοδότησή της, σε σχέση με τον χρόνο.

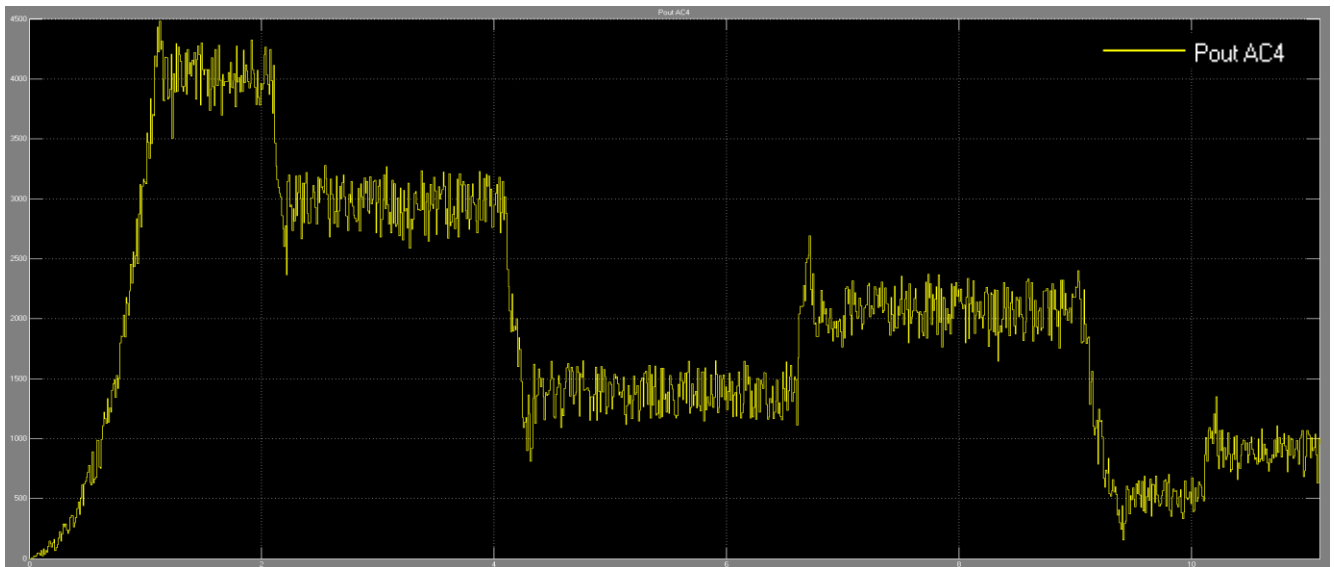
Σχήμα 4.89 παρατηρήσεις:

Στο σχήμα 4.89 στο πρώτο γράφημα δίνεται το γράφημα με την ταχύτητα του δρομέα με το κίτρινο χρώμα σε σχέση με την ταχύτητα αναφοράς με το μωβ χρώμα. Στο επόμενο γράφημα παρουσιάζεται το γράφημα της ροπής με το κίτρινο χρώμα σε σχέση με την ροπή αναφοράς με το μωβ χρώμα και τέλος στο τελευταίο γράφημα δίνεται η μαγνητική ροή στο πλαίσιο αναφοράς του στάτη με το κίτρινο χρώμα σε σχέση με την αναφορά της με το μωβ χρώμα. Σε κάθε μέγεθος βλέπουμε σχεδόν ταύτιση της τιμής αναφοράς με την πραγματική τιμή που αποδίδει ο οδηγούμενος κινητήρας.

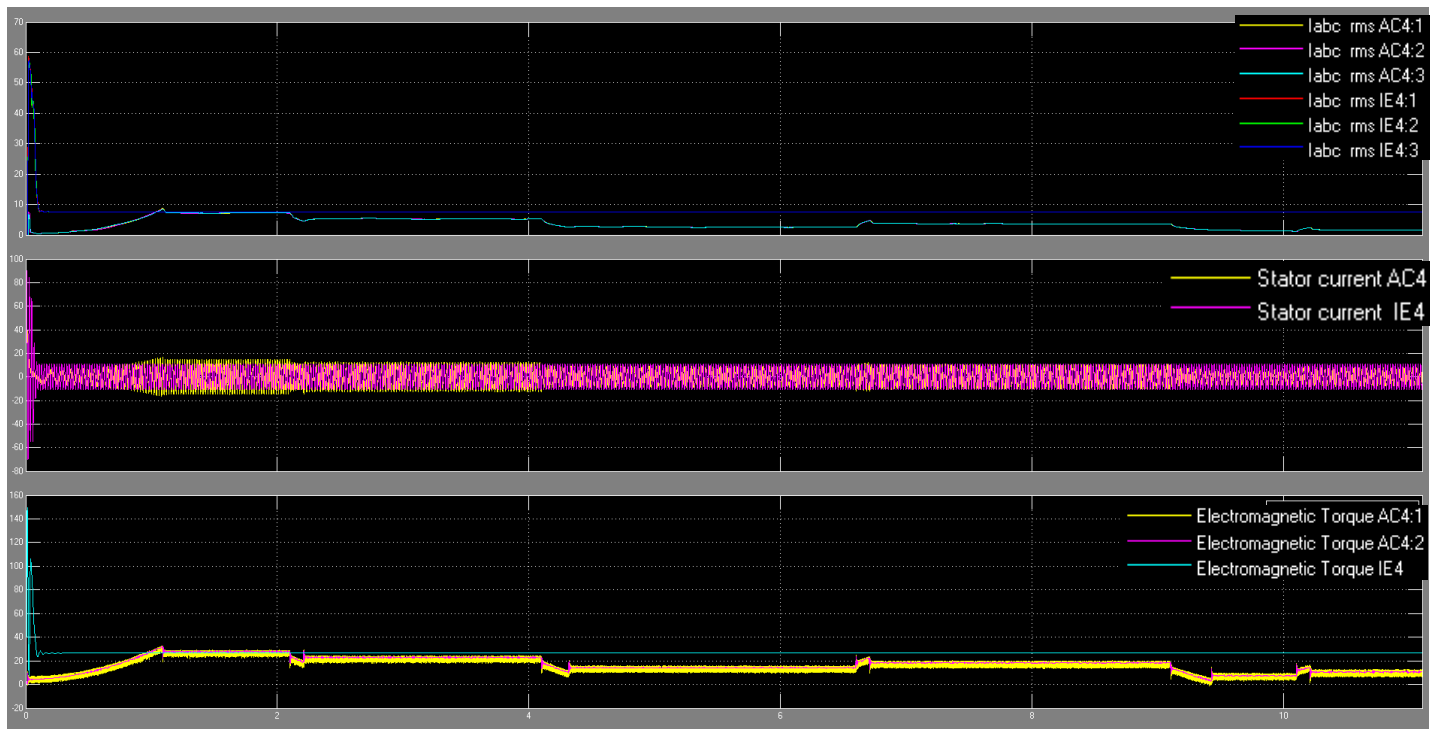
Σχήμα 4.89 εξηγήσεις και συμπεράσματα:

Όπως αναφέρεται στη παράγραφο της θεωρίας 2.3.9.3, με τον άμεσο έλεγχο ροπής ελέγχονται σε πραγματικό χρόνο τα μεγέθη της ροπής και της μαγνητικής ροής εντός των ορίων σφάλματος ενεργοποιώντας το κατάλληλο διάνυσμα τάσης στον στάτη. Ακόμη στο πλαίσιο αναφοράς του στάτη όπου γίνεται ο έλεγχος, δεν εφαρμόζεται μετασχηματισμός συντεταγμένων και δεν χρειάζεται διαμορφωτής PWM, κατά αυτόν τον τρόπο ο χρόνος επεξεργασίας είναι χαμηλότερος και η δυναμική απόκριση της ροπής είναι υψηλή. Στον άμεσο έλεγχο ροπής η ροπή και η μαγνητική ροή ρυθμίζονται από ελεγκτές ζώνης υστέρησης.

Αυτό που παρατηρείται στο σχήμα 4.89 είναι η φιλοσοφία του ελέγχου. Η μαγνητική ροή διατηρείται πάντα σταθερή σε σχέση με την μαγνητική ροή αναφοράς, ενώ σε κάθε διαφοροποίηση της τιμής του φορτίου, η ροπή αυξομειώνεται ελεγχόμενα και ανεξάρτητα αποδίδοντας την τιμή αναφοράς που χρειάζεται. Σε κάθε περίπτωση, τα γραφήματα δείχνουν γραμμική και αξιόπιστη συμπεριφορά προς τις τιμές αναφοράς, με μικρή ύπαρξη θορύβου.



Σχήμα 4.90 Γράφημα της μηχανικής ισχύος εξόδου του συστήματος μονάδας ελέγχου D.T.C. - κινητήρα σε σχέση με τον χρόνο και σύμφωνα με τις απαιτήσεις φόρτισης της εφαρμογής, βάσει του πίνακα 3.



Σχήμα 4.91 Σύγκριση γραφημάτων για το σύστημα μονάδας ελέγχου D.T.C. - κινητήρα σε σχέση με τον κινητήρα κλάσης IE4 ο οποίος λειτουργεί χωρίς οδήγηση. Λειτουργούν παράλληλα καταγράφοντας το ρεύμα rms ανα φάση, ρεύμα από κορυφή σε κορυφή στον στάτη και την αποδιδόμενη ροπή τους, σε σχέση με τον χρόνο.

Σχήμα 4.91 παρατηρήσεις:

Στο σχήμα 4.91 στο πρώτο γράφημα παρατηρείται η σύγκριση του ρεύματος I_{abc} rms της γραμμής ακολουθεί το ρεύμα από κορυφή σε κορυφή για τον στάτη και το γράφημα της ροπής των κινητήρων

Στο πρώτο γράφημα με την σύγκριση του ρεύματος $I_{abc\ rms}$ της γραμμής, παρατηρείται μεγάλη διαφορά από 0 ως 0,1sec όπου το μεγάλο ρεύμα αιχμής εκκίνησης απουσιάζει από την περίπτωση του συστήματος μονάδας ελέγχου-κινητήρα.

Το rms ρεύμα ανά φάση κατά την εκκίνηση, δεν ξεπερνάει το μέγιστο ρεύμα του συστήματος της μονάδα ελέγχου- κινητήρα και το συζευγμένο φορτίο, με την μέγιστη τιμή του να φτάνει τα 8,61A. Την ίδια χρονική στιγμή, ο ίδιος κινητήρας ο οποίος εκκινεί απ' ευθείας από το δίκτυο με το ίδιο συζευγμένο φορτίο καταναλώνει 58,8A. Το rms ρεύμα γραμμής του συστήματος μονάδας ελέγχου και κινητήρα στην πλήρη φόρτιση είναι 6,9A ανά φάση την ίδια χρονική στιγμή που το rms ρεύμα γραμμής πλήρους φόρτισης του κινητήρα είναι: 7,65 A.

Στο τρίτο γράφημα παρατηρείται η ροπή για κάθε τιμή φορτίου. Με μωβ χρώμα είναι η ροπή αναφοράς που χρειάζεται να αποδοθεί σε κάθε αλλαγή του φορτίου. Ο κινητήρας χωρίς οδήγηση λειτουργεί αποδίδοντας συνεχώς την ονομαστική του ροπή ενώ με την χρήση της μονάδας ελέγχου αποδίδεται η ροπή που υπολογίζεται ότι χρειάζεται μέσω της ανατροφοδότησης του συστήματος. Στην καμπύλη της ροπής του ελεγχόμενου κινητήρα παρατηρούνται αιχμές ροπής κατά τη διάρκεια των μεταβατικών καταστάσεων, όπου υπάρχουν εναλλαγές στο φορτίο. Η ροπή του συστήματος μονάδας ελέγχου -κινητήρα δείχνει καλή απόκριση και αν και η κυματομορφή είναι θορυβώδης.

Σχήμα 4.91 εξηγήσεις και συμπεράσματα:

Το ρεύμα εισόδου στο μονάδας ελέγχου δεν υπερβαίνει το 110% του ονομαστικού ρεύματος. Η μαγνητική ροή του κινητήρα θα είναι ευθέως ανάλογη με την τάση και αντιστρόφως ανάλογη με την συχνότητα. Η ροή διατηρείται σταθερή και το ρεύμα περιορίζεται, ενώ αποδίδεται πλήρης ελεγχόμενη ροπή εκκίνησης, όπως φαίνεται στο ίδιο σχήμα και υπενθυμίζεται ότι όπως αναφέρθηκε στην παράγραφο 2.2.7 από τον τύπο 2.59 ισχύει ότι:

$$T_{acc} = J * \frac{\Delta U_{rpm}/sec}{\Delta t_{30}} * \pi = 0,029 * \frac{1350rpm/sec}{1\ 30} * 3,14 = 4,098Nm, \quad \text{θα είναι η πρόσθετη ροπή κατά την εκκίνηση με το φορτίο η οποία γίνεται σε 1s.}$$

Το ρεύμα περιορίζεται από τον σχεδιασμό του κυκλώματος προφόρτισης της μονάδας, όπως έχει ήδη αναφερθεί. Οι πυκνωτές του διαύλου DC φορτίζονται ομαλά σε μια σταθερά χρόνου $t=RC$ και αποδίδουν το ρεύμα που χρειάζεται έτσι ώστε το ρεύμα κατά την εκκίνηση να διατηρείται κάτω από το ονομαστικό του κινητήρα.

Το rms ρεύμα γραμμής του συστήματος μονάδας ελέγχου-κινητήρα στην πλήρη φόρτιση είναι 6,9 A ανά φάση την ίδια χρονική στιγμή που το rms ρεύμα γραμμής πλήρους φόρτισης του κινητήρα είναι, 7,65A. Αυτό είναι λογικό, αφού η μονάδα ελέγχου θα απορροφήσει από το δίκτυο μόνο το μέτρο της ενεργής τιμής του διανύσματος του ρεύματος, αυτό το οποίο απαιτεί η ροπή σε κάθε χρονική στιγμή. Το ρεύμα μαγνήτισης το παρέχουν οι πυκνωτές του διαύλου DC στον κινητήρα.

Υπάρχει θόρυβος και μια σχετική υποβάθμιση της απόδοσης της ροπής με αιχμές και διορθώσεις των ελεγκτών υστέρησης κατά την διάρκεια του χρόνου. Ο ελεγκτής ζώνης υστέρησης της ροπής έχει όρια ζώνης τα $\pm 0,5Nm$ και ο ελεγκτής ζώνης υστέρησης της μαγνητικής ροής $\pm 0,01\ Wb$. Η επιλογή του πλάτους της ζώνης υστέρησης έχει επίδραση στην συχνότητα μετατροπής και έτσι επηρεάζει τις απώλειες μετατροπής εάν η ζώνη είναι πάρα πολύ μικρή, η υπέρβαση ροπής προκαλεί σφάλμα ροπής και υπέρβαση ζώνης υστέρησης. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την επιλογή ενός διανύσματος αντίστροφης τάσης για τη μείωση της ροπής. Ένα αντίθετο διάνυσμα τάσης θα μειώσει τη ροπή γρήγορα, όμως θα προκαλέσει μια υποδεέστερη της αναφοράς ροπή. Άρα, η κυμάτωση ροπής μπορεί να γίνει υψηλή εάν η ζώνη υστέρησης ροπής είναι πολύ μικρή αφού θα

γίνονται συνεχείς διορθώσεις. Ο ελεγκτής ζώνης της ροπής έχει πλάτος τέτοιο ώστε να του επιτρέπεται να διορθώνει ελάχιστες φορές και ουσιαστικά να αποφεύγονται οι συνεχείς υπερβάσεις και διορθώσεις της ροπής αναφοράς. Η ζώνη υστέρησης της μαγνητικής ροής επηρεάζει την παραμόρφωση του ρεύματος του στάτη. Ο ελεγκτής ζώνης υστέρησης της μαγνητικής ροής έχει όρια ζώνης το ελάχιστο δυνατό δηλαδή $\pm 0,01\text{Wb}$ ώστε η κυματομορφή του ρεύματος του στάτη είναι όσο πιο ημιτονοειδής θα μπορούσε.



Σχήμα 4.92 Σύγκριση γραφημάτων για το σύστημα μονάδας ελέγχου D.T.C. - κινητήρα και τον κινητήρα κλάσης IE4 όπου λειτουργούν παράλληλα. Καταγράφεται η απόδοση %, και ο συντελεστής ισχύος, σε σχέση με τον χρόνο.

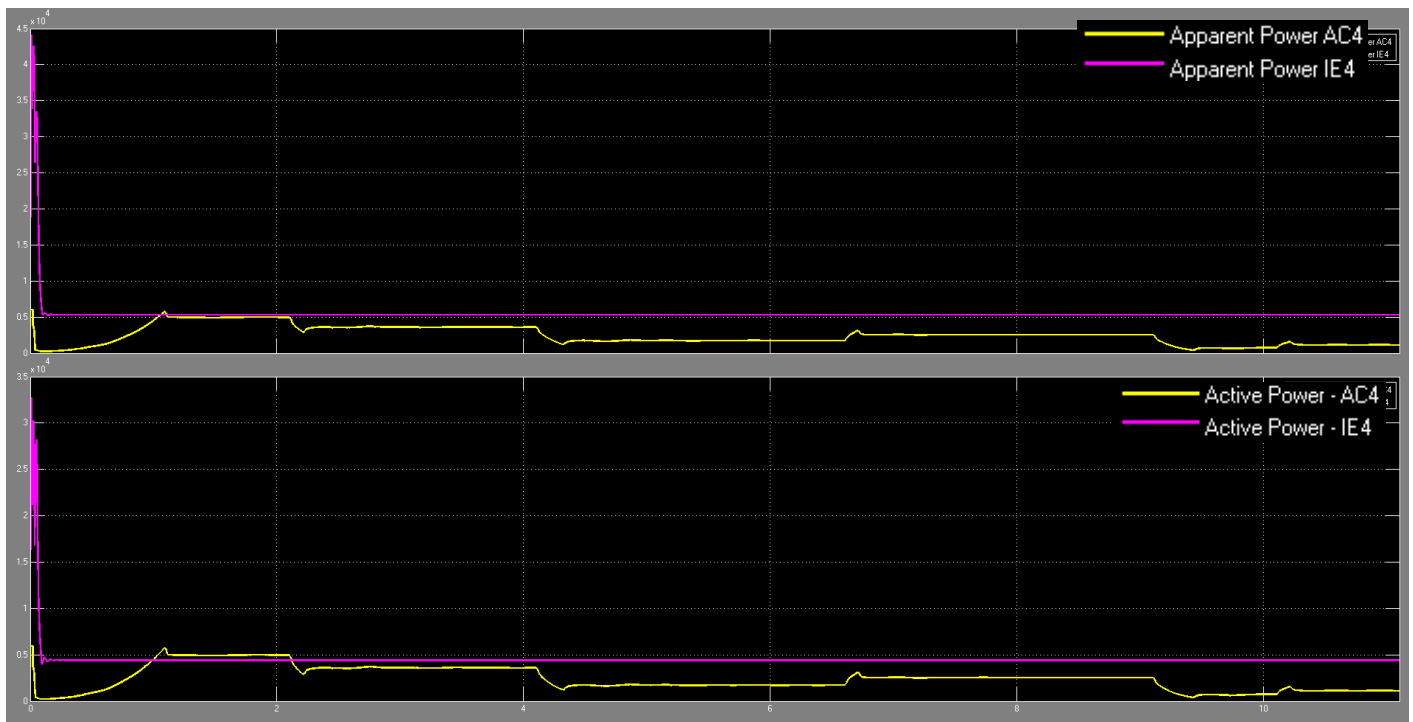
Σχήμα 4.92 παρατηρήσεις:

Στο σχήμα 4.92 με την σύγκριση του συντελεστή ισχύος και τον βαθμό απόδοσης κατά την διάρκεια του χρόνου παρατηρείται ότι υπάρχουν διαφοροποιήσεις στο σύστημα μονάδας ελέγχου-κινητήρα. Ο συντελεστής ισχύος είναι ανώτερος σε όλη την διάρκεια του πειράματος ενώ στον αντίποδα η απόδοση του κινητήρα σχεδόν πάντα ανώτερη στο χρόνο του πειράματος.

Σχήμα 4.92 εξηγήσεις και συμπεράσματα:

Στην περίπτωση του συντελεστή ισχύος, στο σύστημα μονάδας ελέγχου-κινητήρα ακόμη και με τις διαφοροποιήσεις του φορτίου ο συντελεστής ισχύος είναι $>0,99$ και αυτό είναι λογικό εφόσον λειτουργούν οι πυκνωτές του διαύλου DC. Η μονάδα ελέγχου βελτιώνει τον συντελεστή ισχύος του συστήματος επειδή το άεργο ρεύμα που χρειάζεται ο κινητήρας τροφοδοτείται από τους πυκνωτές του διαύλου DC, όχι από το σύστημα τροφοδοσίας.

Στην περίπτωση του βαθμού απόδοσης, το σύστημα μονάδας ελέγχου-κινητήρα υπολείπεται της τιμής του κινητήρα με απ' ευθείας τροφοδοσία. Λογικό αφού ο βαθμός απόδοσης του συστήματος σε κάθε περίπτωση, όπως έχει αναφερθεί είναι $\eta_{PDS} = \eta_{VFD} * \eta_{MOTOR}$.



Σχήμα 4.93 Σύγκριση γραφημάτων της πραγματικής και της φαινόμενης ηλεκτρικής ισχύος που καταναλώνονται σε σχέση με τον χρόνο και σύμφωνα με τις απαιτήσεις της εφαρμογής, για το σύστημα μονάδας ελέγχου D.T.C. - κινητήρα και τον κινητήρα κλάσης IE4.

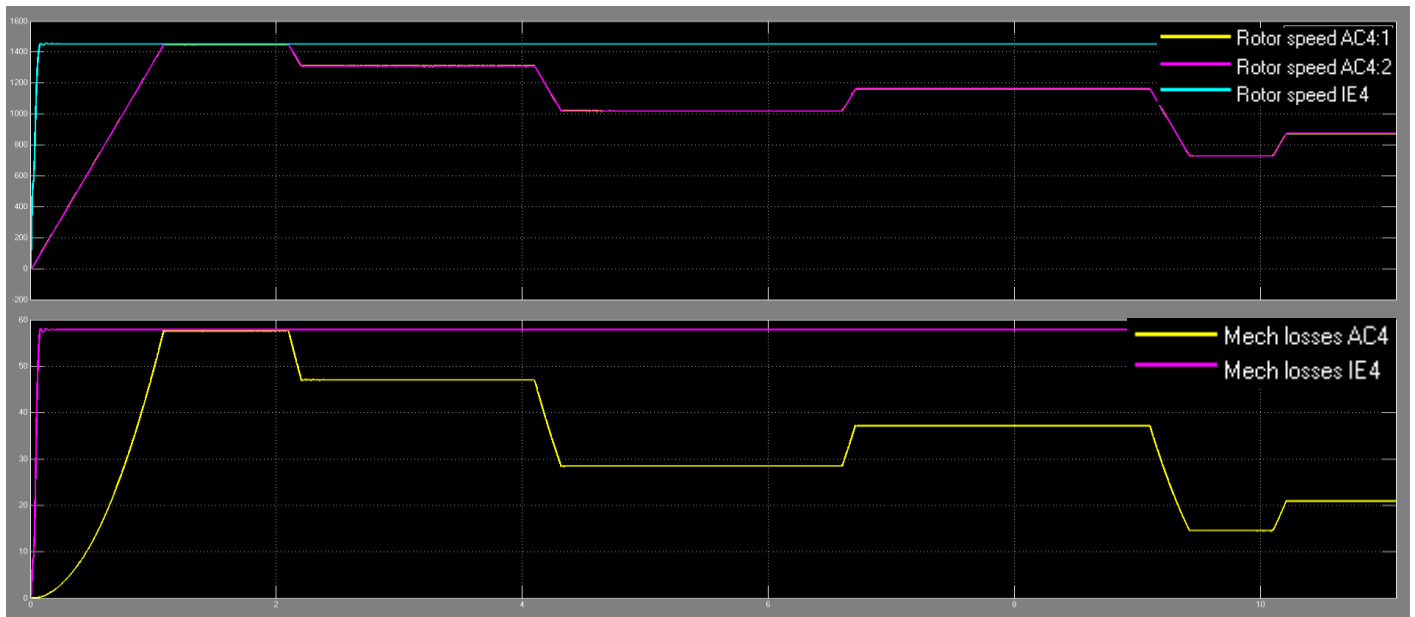
Σχήμα 4.93 παρατηρήσεις:

Στο σχήμα 4.93 δίνονται τα γραφήματα της πραγματικής και της φαινόμενης ηλεκτρικής ισχύος που καταναλώνονται σε σχέση με τον χρόνο. Παρατηρείται ότι η πραγματική ισχύς που καταναλώνεται από το σύστημα μονάδας ελέγχου-κινητήρα ρυθμίζεται από τις απαιτήσεις του φορτίου σε κάθε χρονική στιγμή εν αντιθέσει με τον κινητήρα που λειτουργεί με απ' ευθείας τροφοδοσία. Ακόμη στην ονομαστική τιμή ροπής φορτίου στροφών το σύστημα μονάδας ελέγχου - κινητήρα καταναλώνει μεγαλύτερη πραγματική ισχύ 4730 Watt σε σχέση με τον κινητήρα που λειτουργεί με απ' ευθείας τροφοδοσία 4410 Watt.

Ως προς το θέμα της φαινόμενης ισχύος εν αντιθέσει με τον κινητήρα που λειτουργεί με απ' ευθείας τροφοδοσία, στο σύστημα μονάδας ελέγχου -κινητήρα δείχνει να ταυτίζεται η πραγματική με την φαινόμενη ισχύ.

Σχήμα 4.93 εξηγήσεις και συμπεράσματα:

Στο σημείο της ονομαστικής τιμής του φορτίου, της ροπής και των στροφών το σύστημα μονάδας ελέγχου - κινητήρα καταναλώνει μεγαλύτερη πραγματική ισχύ σε σχέση με τον κινητήρα που λειτουργεί με απ' ευθείας τροφοδοσία. Αυτό είναι λογικό λόγω των πρόσθετων απωλειών της μονάδας ελέγχου, δηλαδή τις απώλειες αγωγιμότητας, τις απώλειες μεταγωγής και τις απώλειες στον δίαυλο DC. Αυτό δείχνει ότι τα οφέλη της χρήσης του συστήματος μονάδας ελέγχου - κινητήρα υπάρχουν σε περιπτώσεις εφαρμογών όπου οι κινητήρες δεν λειτουργούν συνεχώς στην ονομαστική τους ισχύ. Η φαινόμενη ισχύς ταυτίζεται με την πραγματική όπως έχει αναφερθεί παραπάνω λόγω του συντελεστή ισχύος ο οποίος είναι $>0,99$.



Σχήμα 4.94 Σύγκριση γραφημάτων της ταχύτητας και των μηχανικών απωλειών σε σχέση με τον χρόνο για το σύστημα μονάδας ελέγχου D.T.C. - κινητήρα και τον κινητήρα κλάσης IE4.

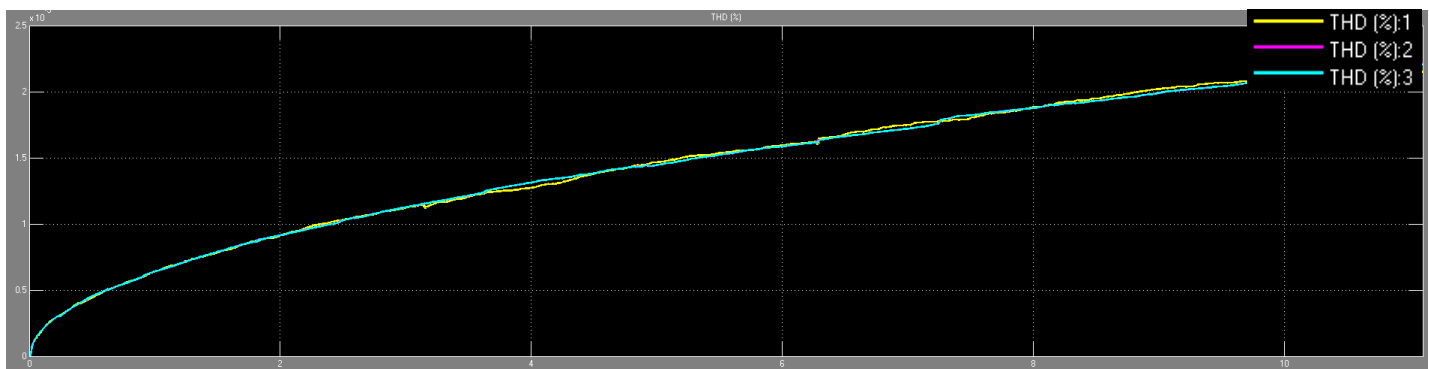
Σχήμα 4.94 παρατηρήσεις:

Στο σχήμα 4.94 δίνονται τα γραφήματα ταχύτητας και των μηχανικών απωλειών και παρατηρείται ότι το σύστημα μονάδας ελέγχου - κινητήρα έχει χαμηλότερες μηχανικές απώλειες οι οποίες είναι ανάλογες των στροφών του κινητήρα.

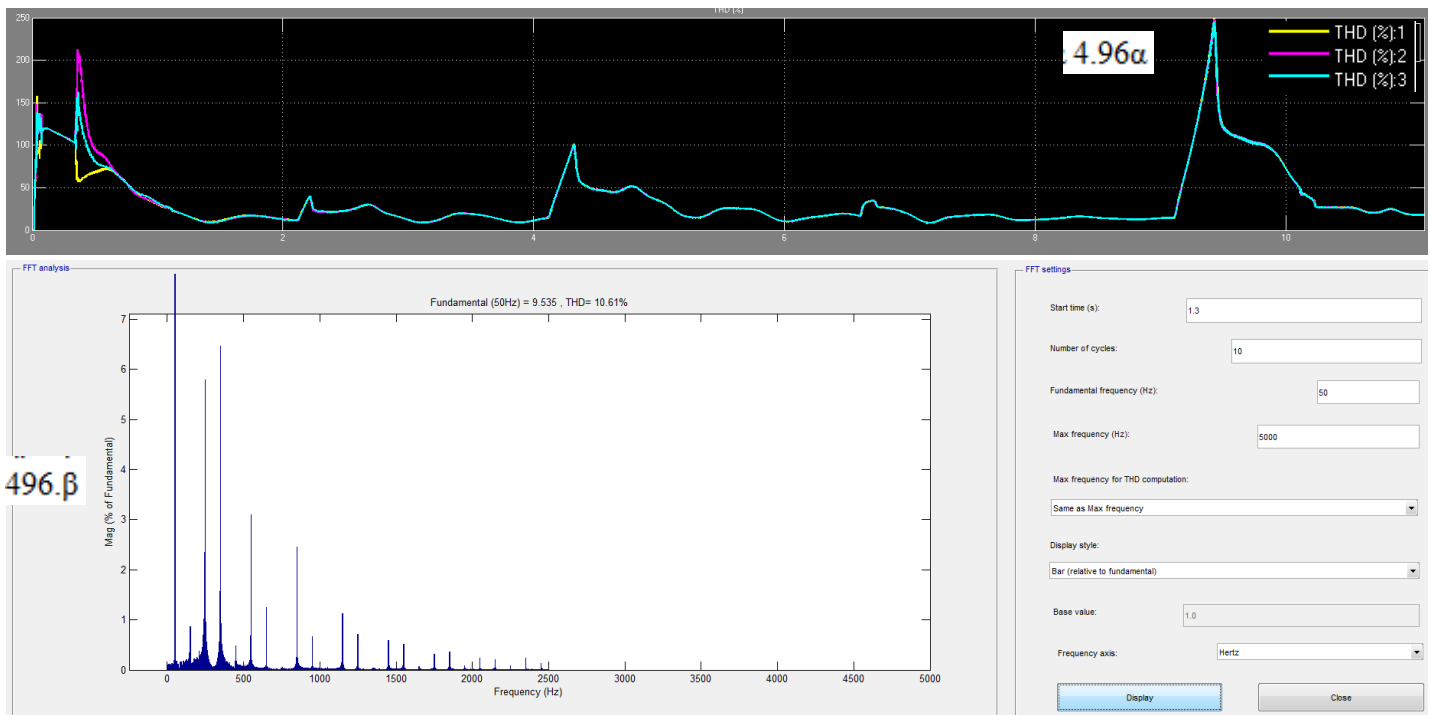
Σχήμα 4.94 εξηγήσεις και συμπεράσματα:

Η ταχύτητα που αποδίδεται από το σύστημα της μονάδας ελέγχου-κινητήρα έχει απόλυτη ταύτιση με την ταχύτητα αναφοράς με ελάχιστο θόρυβο. Η ταχύτητα αυξομειώνεται σταθερά γραμμικά ως την μόνιμη κατάσταση όπου διατηρείται χωρίς ταλαντώσεις.

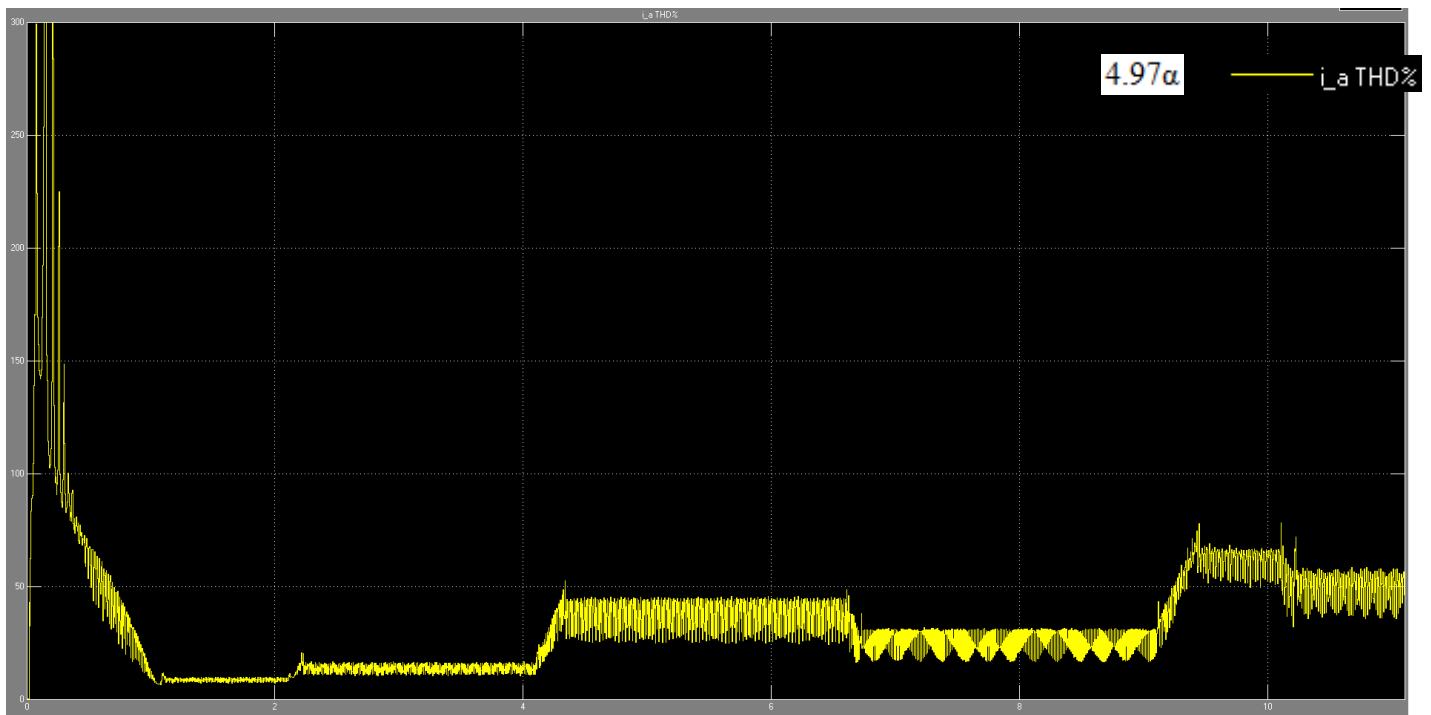
Η ρύθμιση της ταχύτητας επέτρεψε να μειωθούν οι απώλειες τριβής, αναλόγως με την ταχύτητα και να οδηγήσουν σε βελτιωμένη διάρκεια ζωής στον μηχανολογικό εξοπλισμό στον ίδιο τύπο κινητήρα. Ο θόρυβος δείχνει την ύπαρξη αρμονικών και ελάχιστου πλάτους ταλαντώσεων συγκριτικά όμως με την περίπτωση του κλιμακωτού ελέγχου είναι ανύπαρκτος.

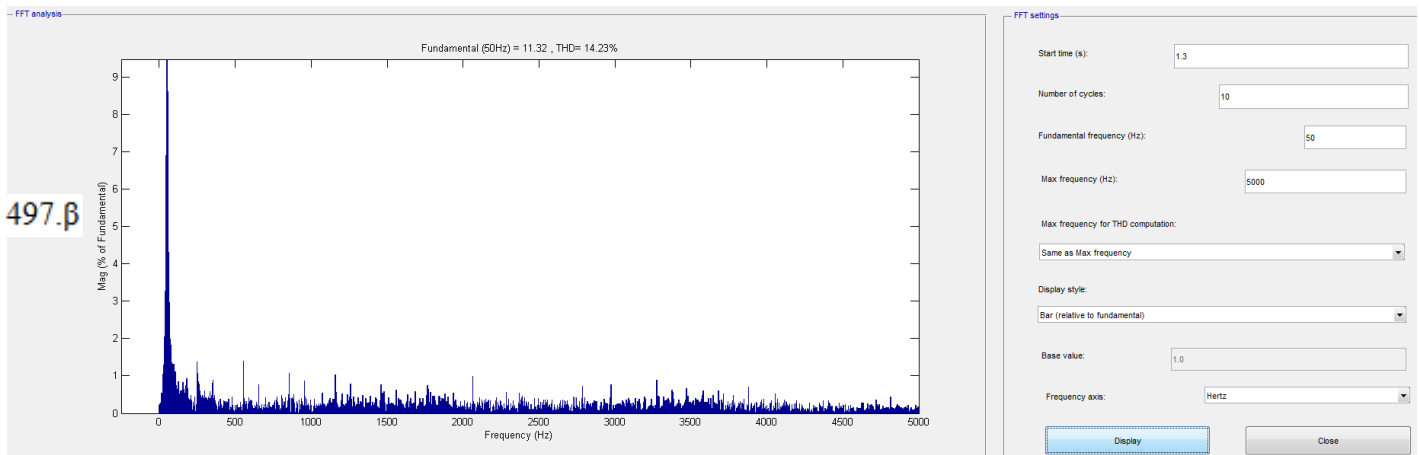


Σχήμα 4.95 Γράφημα για τις αρμονικές τάσης, σε σχέση με τον χρόνο, που παρουσιάζονται ενώ λειτουργεί το σύστημα μονάδας ελέγχου D.T.C. - κινητήρα.



Σχήμα 4.96 Γραφήματα που αφορούν 4.96α) τις αρμονικές ρεύματος, σε σχέση με τον χρόνο, που παρουσιάζονται και 4.96β) η FFT ανάλυση στο πεδίο της συχνότητας για το ρεύμα, ενώ λειτουργεί το σύστημα μονάδας ελέγχου D.T.C. - κινητήρα.





Σχήμα 4.97 Γραφήματα που αφορούν 4.97α) τις αρμονικές ρεύματος που παρουσιάζονται στο τριφασικό τύλιγμα του στάτη, σε σχέση με τον χρόνο και 4.97β) η FFT ανάλυση στο πεδίο της συχνότητας για το ρεύμα, ενώ λειτουργεί το σύστημα μονάδας ελέγχου D.T.C. - κινητήρα.

Σχήμα 4.95, 4.96, 4.97 παρατηρήσεις:

Το σύστημα μονάδας ελέγχου-κινητήρα δημιουργεί φαινόμενα αρμονικών και αυτό είναι λογικό, λόγω των ημιαγωγών της μονάδας ελέγχου, οι οποίοι άγουν διακοπτόμενα διαμορφώνοντας συνεχώς την επιθυμητή ισχύ τροφοδοτώντας τον κινητήρα. Στο σχήμα 4.95 δίνεται το γράφημα με τις αρμονικές τάσης σε σχέση με τον χρόνο, στην τροφοδοσία. Στο σχήμα 4.96α δίνεται το γράφημα με τις αρμονικές έντασης σε σχέση με τον χρόνο, στην τροφοδοσία του συστήματος, στο σχήμα 4.96β δίνεται η ανάλυση FFT με το ποσοστό της παραμόρφωσης κοντά στο ονομαστικό σημείο λειτουργίας για την τροφοδοσία του συστήματος. Στο σχήμα 4.97α δίνεται το γράφημα με τις αρμονικές έντασης σε σχέση με τον χρόνο, στα τυλίγματα του στάτη, στο σχήμα 4.97β δίνεται η ανάλυση FFT με το ποσοστό της παραμόρφωσης στα τυλίγματα του στάτη στο ίδιο χρονικό σημείο που μετρήθηκε και η παραμόρφωση για την τροφοδοσία του συστήματος .

Σχήμα 4.95, 4.96 εξηγήσεις και συμπεράσματα:

Η τάση εξόδου έχει προσεγγιστικά ημιτονοειδή μορφή και εξαρτάται από τα κατασκευαστικά στοιχεία της μονάδας ελέγχου και την συχνότητα διαμόρφωσης των διακοπτικών στοιχείων. Οι αρμονικές αυτές περιορίζονται με τα παθητικά φίλτρα και τις αυτεπαγωγές γραμμής έτσι ώστε να είναι κάτω των επιτρεπτών ορίων παραμόρφωσης τάσης $THD_{max}\% = 5\%$.

Το δείγμα της κυματομορφής που αναλύεται με το FFT tool είναι 10 κύκλοι.

Παρατηρώντας την κυματομορφή η παραμόρφωση της τάσης είναι $<5\%$. Άρα βρίσκεται εντός των ορίων που θέτονται σχετικά.

Η παραμόρφωση της έντασης είναι μεγαλύτερη με ελάχιστη τιμή 8,1% και μέγιστη 250%. Η παραμόρφωση γίνεται μεγαλύτερη κατά την εκκίνηση και τις μεταβατικές αλλαγές της τιμής του φορτίου και όταν ο κινητήρας λειτουργεί με χαμηλότερη φόρτιση. Την ελάχιστη τιμή της παραμόρφωσης την έχει στην χρονική διάρκεια όπου το σύστημα ισορροπεί. Όμως ενώ σε χαμηλότερη φόρτιση του κινητήρα η αρμονική παραμόρφωση είναι μεγαλύτερη το ενεργό ρεύμα των αρμονικών μικραίνει, όπως έχει αναφερθεί, αφού ισχύει:

$$THDi = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I^2_{hrms}}}{I_{1rms}}$$

Το THD% είναι 10,61% στο ονομαστικό σημείο και οι κυριότερες αρμονικές που εμφανίζονται με ποσοστό παραμόρφωσης είναι: 5,77% στα 250Hz, 6,42% στα 350Hz, 3,05% στα 550Hz, 1,09% στα 650Hz ενώ οι επόμενες αρμονικές είναι πολύ χαμηλού πλάτους. Οι αρμονικές

περιορίστηκαν από την αυτεπαγωγή γραμμής και τα δύο παθητικά διπλοσυντονιζόμενα φίλτρα σε αυτές τις τιμές.

Σχήμα 4.97 εξηγήσεις και συμπεράσματα

Η αρμονική παραμόρφωση του ρεύματος που παρουσιάζεται στον στάτη στην ονομαστική φόρτιση του επαγωγικού κινητήρα έχει τιμή 14,23%. για την χρονική στιγμή όπου το μέτρο του ρεύματος κορυφής είναι 11,32A. Το FFT Analysis tool δείχνει αρμονικό θόρυβο πολύ μικρής όμως ενεργής τιμής ως τα 5kHz όπου μας ενδιαφέρει το δείγμα. Το THD% ς είναι 7,53% στα 55Hz, 4,82% στα 60Hz, 1,85% στα 65Hz, 1,44% στα 70Hz ενώ οι επόμενες αρμονικές είναι πολύ χαμηλού πλάτους.

Πίνακας 15 Απαιτήσεις της εφαρμογής βάσει του πίνακα 3 και οι τιμές που προκύπτουν από την προσομοίωση της χρήσης μονάδας ελέγχου D.T.C –κινητήρα.

Επιδόσεις συστήματος μονάδας ελέγχου με κινητήρα IE4							
Τιμές προσομοίωσης							
Ταχύτητα (rpm)	Ταχύτητα (rad/sec)	Ισχύς στην έξοδο (W)	Ισχύς στην έξοδο %	Ροπή στον άξονα (Nm)	Ροπή στον άξονα %	Συντελεστής ισχύος	Απόδοση %
1455	152,36	4037,5	100	26,5	100,37	0,99	85,3
1309,5	137,13	3003	75,07	21,9	82,95	0,99	85
1164	121,89	2096,5	52,41	17,2	65,15	0,99	84
1018,5	106,657	1450,5	36,25	13,6	51,51	0,99	83
873	91,42	900,5	22,5	9,85	37,31	0,99	76
727,5	76,18	514,2	12,85	6,75	25,56	0,99	70

4.5.1.1 Εξοικονόμηση ενέργειας και κόστους στην περίπτωση χρήσης μονάδας ελέγχου στροφών Direct Torque Control για τον φυγοκεντρικό ανεμιστήρα.

Για την εύρεση της εξοικονόμησης ενέργειας και κόστους χρησιμοποιήθηκαν τα στοιχεία του πίνακα 15 για να υπολογιστεί για κάθε ισχύ εξόδου η ετήσια κατανάλωση του συστήματος μονάδας ελέγχου-κινητήρα. Στους υπολογισμούς μόνο στην γραμμή για P_L:100% χρησιμοποιείται η ισχύς οριακά μεγαλύτερη που όμως προκύπτει από την προσομοίωση.

$$P_L 100\%, W_L = 1 * \frac{4037,5 W}{0,853} * 8760h * 0,10 = 4146,37 \text{ KWh}$$

$$P_L 75,07\%, W_L = 0,7507 * \frac{4000 W}{0,85} * 8760h * 0,2 = 6189,3 \text{ KWh}$$

$$P_L 52,41\%, W_L = 0,5241 * \frac{4000 W}{0,84} * 8760h * 0,25 = 5465,6 \text{ KWh}$$

$$P_L 36,25\%, W_L = 0,3625 * \frac{4000 W}{0,83} * 8760h * 0,25 = 3825,90 \text{ KWh}$$

$$P_L 22,5\%, W_L = 0,225 * \frac{4000 W}{0,76} * 8760h * 0,10 = 1037,36 KWh$$

$$P_L 12,85\%, W_L = 0,1285 * \frac{4000 W}{0,70} * 8760h * 0,10 = 643,23 KWh$$

$$\text{Ετήσιο } W_L = 4146,37 + 6189,3 + 5465,6 + 3825,90 + 1037,36 + 643,23 = 21310,77 KWh$$

Ετήσιο W_L για την περίπτωση του κινητήρα ενεργειακής κλάσης IE4,

$$W_L = 1 * \frac{4000 W}{0,912} * 8760h * 1 = 38421,05 KWh$$

$$\frac{21310,77 KWh}{38421,05 KWh} = 0,5546 \text{ της ετήσιας κατανάλωσης σημαίνει } 44,54\% \text{ εξοικονόμηση ενέργειας}$$

Η ετήσια εξοικονόμηση για κόστος ενέργειας, 10€/KWh θα είναι:

$$(38421,05 KWh - 21310,77 KWh) * 0,10€/KWh = 1711,03€$$

4.5.2 2^η Εφαρμογή, αντλία παραγωγής πολτού σε παραγωγική μονάδα.

Στην εφαρμογή θα συγκριθεί η απόδοση για την περίπτωση της χρήσης κινητήρα ενεργειακής κλάσης IE4 χωρίς οδήγηση και την περίπτωση της χρήσης μονάδας ελέγχου στροφών με έλεγχο D.T.C. και κινητήρα κλάσης IE4. Η μηχανή παραγωγής λειτουργεί στην δυσμενέστερη περίπτωση που μπορεί να αντιμετωπιστεί, για 24h/ημέρα, 365 ημέρες/έτος, άρα το σύνολο 8760h/έτος.

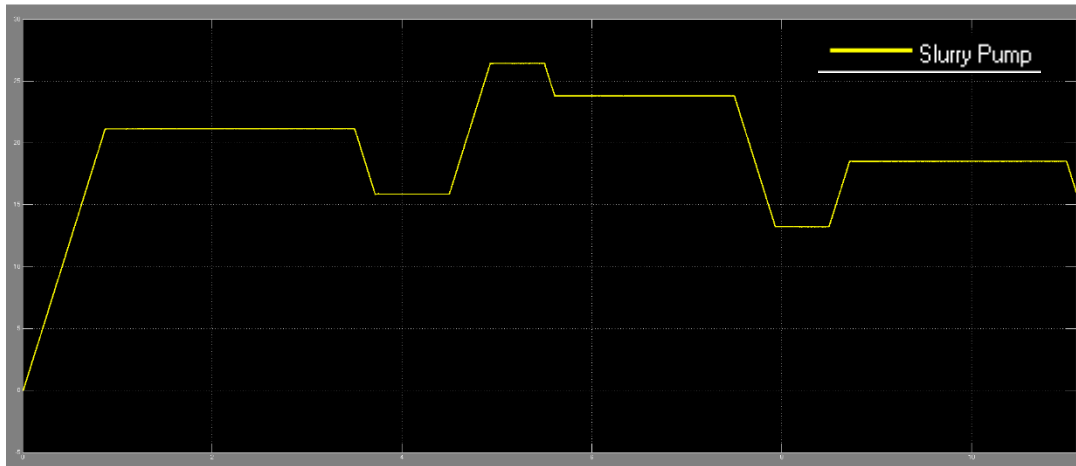
Οι απαιτήσεις τροφοδοτήθηκαν στο σύστημα μονάδας ελέγχου-κινητήρα σύμφωνα με τον πίνακα 4 της παραγράφου 3.2 με το υπόδειγμα των αναγκών της εφαρμογής. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης χρησιμοποιήθηκαν κατόπιν για την συμπλήρωση πίνακα με τις τιμές της απόδοσης του συστήματος. Βάσει αυτών των αποτελεσμάτων, γίνεται σχετική ανάλυση και η οικονομική προσέγγιση.

Ο συνολικός χρόνος της προσομοίωσης ο οποίος βρίσκεται σε όλα τα παρακάτω γραφήματα στον οριζόντιο άξονα είναι 11s.

Από τον χαρακτήρα του φορτίου της αντλίας υπενθυμίζεται ότι ισχύει:

$$P_L = f(n^2), P_L = P_{outnom} * \left(\frac{U_{Load}}{U_{nom}}\right)^2$$

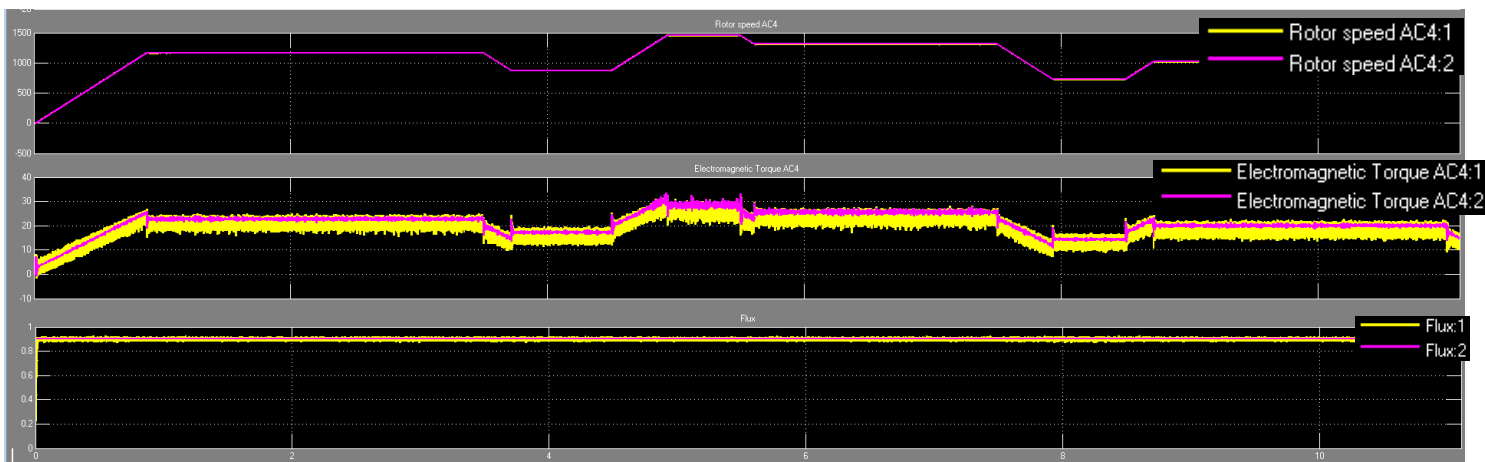
$$T_L = f(n)$$



Σχήμα 4.98 Γράφημα του φορτίου που εφαρμόζεται βάσει των απαιτήσεων του πίνακα 4, σε σχέση με τον χρόνο. Με βάση αυτόν εξετάζεται η συμπεριφορά του συστήματος μονάδας ελέγχου D.T.C. – κινητήρα.

Σχήμα 4.98 παρατηρήσεις:

Το γράφημα της καμπύλης του φορτίου έχει επιλεγεί να εξαχθεί από την ανατροφοδότηση του συστήματος της μονάδας ελέγχου-κινητήρα. Παρατηρείται γραμμική αξιόπιστη συμπεριφορά της καμπύλης σε όλη την διάρκεια του χρόνου της προσομοίωσης



Σχήμα 4.99 Γράφημα για το σύστημα μονάδας ελέγχου D.T.C. - κινητήρα της ταχύτητας με την ανατροφοδότησή της, της ροπής με την ανατροφοδότησή της και της μαγνητικής ροής στο πλαίσιο d-q με την ανατροφοδότησή της, σε σχέση με τον χρόνο.

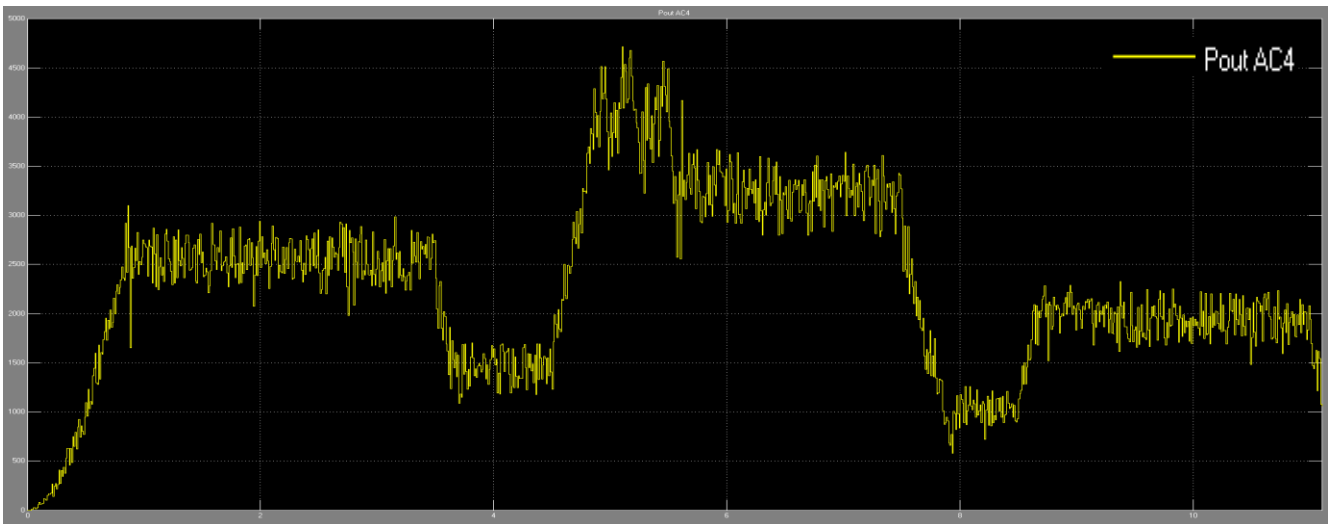
Σχήμα 4.99 παρατηρήσεις:

Στο σχήμα 4.99, στο πρώτο γράφημα δίνεται το γράφημα με την ταχύτητα του δρομέα με το κίτρινο χρώμα σε σχέση με την ταχύτητα αναφοράς με το μωβ χρώμα. Στο επόμενο γράφημα δίνεται το γράφημα της ροπής με το κίτρινο χρώμα σε σχέση με την ροπή αναφοράς με το μωβ χρώμα και τέλος στο τελευταίο γράφημα δίνεται η μαγνητική ροή στο πλαίσιο αναφοράς του στάτη με το κίτρινο χρώμα σε σχέση με την αναφορά της με το μωβ χρώμα. Σε κάθε μέγεθος βλέπουμε σχεδόν ταύτιση της τιμής αναφοράς με την πραγματική τιμή που αποδίδει ο οδηγούμενος κινητήρας.

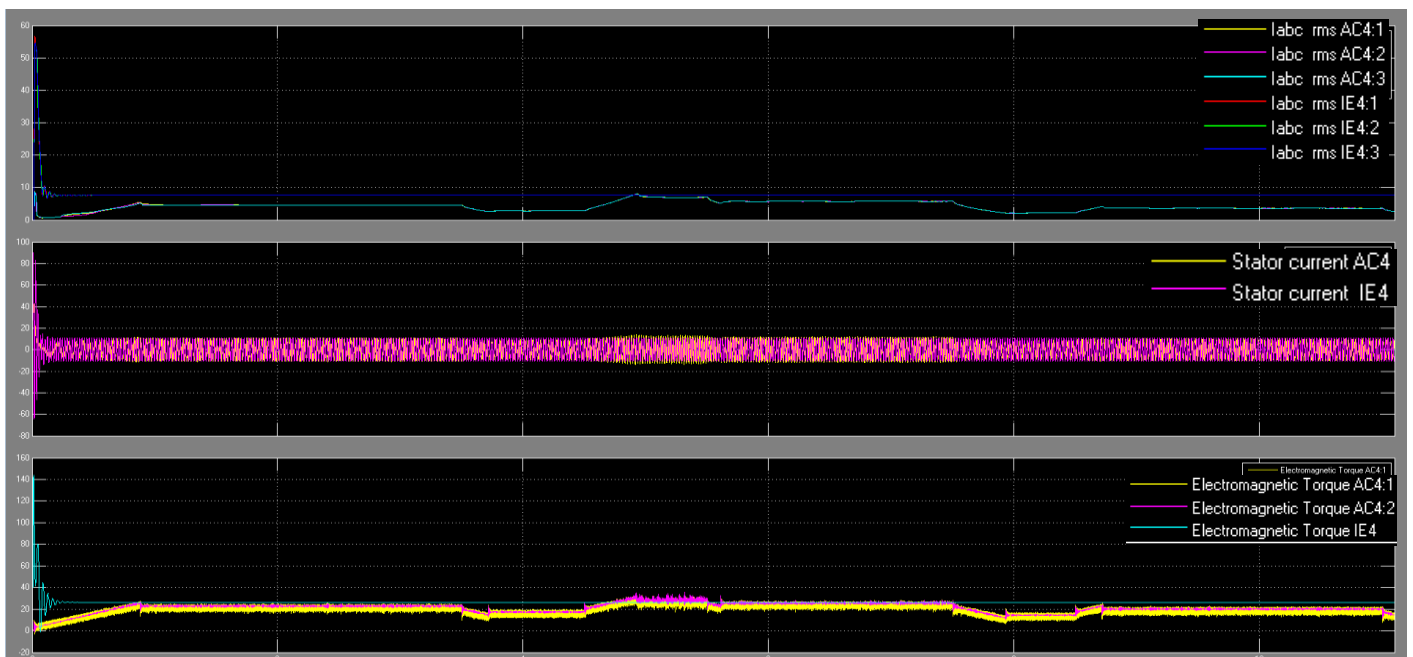
Σχήμα 4.99 εξηγήσεις και συμπεράσματα:

Στον άμεσο έλεγχο ροπής, η ροπή και η μαγνητική ροή ρυθμίζονται από ελεγκτές ζώνης υστέρησης.

Η μαγνητική ροή διατηρείται πάντα σταθερή σε σχέση με την μαγνητική ροή αναφοράς ενώ σε κάθε διαφοροποίηση της τιμής του φορτίου η ροπή αυξομειώνεται ελεγχόμενα και ανεξάρτητα αποδίδοντας την τιμή αναφοράς που χρειάζεται. Σε κάθε περίπτωση τα γραφήματα δείχνουν γραμμικά και με αξιόπιστη συμπεριφορά προς τις τιμές αναφοράς, με μικρή ύπαρξη θορύβου.



Σχήμα 4.100 Γράφημα της μηχανικής ισχύος εξόδου του συστήματος μονάδας ελέγχου D.T.C. - κινητήρα σε σχέση με τον χρόνο, σύμφωνα με τις απαιτήσεις φόρτισης της εφαρμογής, βάσει του πίνακα 4.



Σχήμα 4.101 Σύγκριση γραφημάτων για το σύστημα μονάδας ελέγχου D.T.C. - κινητήρα σε σχέση με τον κινητήρα κλάσης IE4 ο οποίος λειτουργεί χωρίς οδήγηση. Λειτουργούν παράλληλα καταγράφοντας το ρεύμα rms ανα φάση, ρεύμα από κορυφή σε κορυφή στον στάτη και την αποδιδόμενη ροπή τους, σε σχέση με τον χρόνο.

Σχήμα 4.101 παρατηρήσεις:

Στο σχήμα 4.101 στο πρώτο γράφημα παρατηρείται σύγκριση του ρεύματος $I_{abc} \text{ rms}$ της γραμμής, ακολουθεί το ρεύμα από κορυφή σε κορυφή για τον στάτη και το γράφημα της ροπής των κινητήρων

Στο πρώτο γράφημα με την σύγκριση του ρεύματος $I_{abc} \text{ rms}$ της γραμμής, παρατηρείται μεγάλη διαφορά από 0 ως 0,1sec όπου το μεγάλο ρεύμα αιχμής εκκίνησης απουσιάζει από την περίπτωση του συστήματος μονάδας ελέγχου-κινητήρα.

Το rms ρεύμα ανά φάση κατά την εκκίνηση δεν ξεπερνάει το μέγιστο ρεύμα του συστήματος της μονάδας ελέγχου-κινητήρα και το συζευγμένο φορτίο με την μέγιστη τιμή του να φτάνει τα 8,63A. Την ίδια χρονική στιγμή ο ίδιος κινητήρας ο οποίος εκκινεί απ' ευθείας από το δίκτυο με το ίδιο συζευγμένο φορτίο καταναλώνει 56,5A. Το rms ρεύμα γραμμής του συστήματος μονάδας ελέγχου και κινητήρα στην πλήρη φόρτιση είναι 6,85A ανά φάση την ίδια χρονική στιγμή που το rms ρεύμα γραμμής πλήρους φόρτισης του κινητήρα είναι 7,63 A.

Στο τρίτο γράφημα παρατηρείται η ροπή για κάθε τιμή φορτίου. Με μωβ χρώμα είναι η ροπή αναφοράς που χρειάζεται να αποδοθεί σε κάθε αλλαγή του φορτίου. Ο κινητήρας χωρίς οδήγηση λειτουργεί αποδίδοντας συνεχώς την ονομαστική του ροπή ενώ με την χρήση της μονάδας ελέγχου αποδίδεται πάντοτε η ροπή που υπολογίζεται ότι χρειάζεται μέσω της ανατροφοδότησης του συστήματος. Στην καμπύλη της ροπής του ελεγχόμενου κινητήρα παρατηρούνται αιχμές ροπής κατά τη διάρκεια των μεταβατικών καταστάσεων, όπου υπάρχουν εναλλαγές στο φορτίο. Η ροπή του συστήματος μονάδας ελέγχου -κινητήρα δείχνει καλή απόκριση και αν και η κυματομορφή είναι θορυβώδης.

Σχήμα 4.101 εξηγήσεις και συμπεράσματα:

Το ρεύμα εισόδου στην μονάδα ελέγχου δεν υπερβαίνει το 110% του ονομαστικού ρεύματος. Η μαγνητική ροή του κινητήρα θα είναι ευθέως ανάλογη με την τάση και αντιστρόφως ανάλογη με την συχνότητα. Η ροή διατηρείται σταθερή και το ρεύμα περιορίζεται, ενώ αποδίδεται πλήρης ελεγχόμενη ροπή εκκίνησης όπως φαίνεται στο ίδιο σχήμα και υπενθυμίζεται ότι όπως αναφέρθηκε στην παράγραφο 2.2.7 από τον τύπο 2.59 ισχύει ότι:

$$T_{acc} = J * \frac{\Delta \text{Urpm/sec}}{\Delta t \text{ 30}} * \pi = 0,017 * \frac{1350 \text{rpm/sec}}{1 \text{ 30}} * 3,14 = 2.402 \text{Nm}, \text{ θα είναι η πρόσθετη ροπή κατά την εκκίνηση με το φορτίο η οποία γίνεται σε 1s.}$$

Το ρεύμα περιορίζεται από τον σχεδιασμό του κυκλώματος προφόρτισης της μονάδας. Οι πυκνωτές του διαύλου DC φορτίζονται ομαλά σε μια σταθερά χρόνου $t=RC$ και αποδίδουν το ρεύμα που χρειάζεται έτσι ώστε το ρεύμα κατά την εκκίνηση να διατηρείται κάτω από το ονομαστικό του κινητήρα.

Το rms ρεύμα γραμμής του συστήματος μονάδας ελέγχου-κινητήρα στην πλήρη φόρτιση είναι 6,85 A ανά φάση την ίδια χρονική στιγμή που το rms ρεύμα γραμμής πλήρους φόρτισης του κινητήρα είναι, 7,63A. Αυτό είναι λογικό αφού η μονάδα ελέγχου θα απορροφήσει από το δίκτυο μόνο το μέτρο της ενεργής τιμής του διανύσματος του ρεύματος, αυτό το οποίο απαιτεί η ροπή σε κάθε χρονική στιγμή. Το ρεύμα μαγνήτισης το παρέχουν οι πυκνωτές του διαύλου DC στον κινητήρα.

Υπάρχει θόρυβος και μια σχετική υποβάθμιση της απόδοσης της ροπής με αιχμές και διορθώσεις των ελεγκτών υστέρησης κατά την διάρκεια του χρόνου. Ο ελεγκτής ζώνης υστέρησης της ροπής έχει όρια ζώνης τα $\pm 0,5 \text{Nm}$ και ο ελεγκτής ζώνης υστέρησης της μαγνητικής ροής

$\pm 0,01 \text{Wb}$. Η επιλογή του πλάτους της ζώνης υστέρησης έχει επίδραση στην συχνότητα μετατροπής και έτσι επηρεάζει τις απώλειες μετατροπής εάν η ζώνη είναι πάρα πολύ μικρή, η υπέρβαση ροπής προκαλεί σφάλμα ροπής και υπέρβαση ζώνης υστέρησης. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την επιλογή ενός διάνυσματος αντίστροφης τάσης για τη μείωση της ροπής. Ένα αντίστροφο διάνυσμα τάσης θα μειώσει τη ροπή γρήγορα όμως θα προκαλέσει μια υποδεέστερη ροπή από αυτήν της αναφοράς. Άρα, η κυμάτωση ροπής μπορεί να γίνει υψηλή εάν η ζώνη υστέρησης ροπής είναι πολύ μικρή αφού θα γίνονται συνεχής διορθώσεις. Ο ελεγκτής ζώνης της ροπής έχει πλάτος τέτοιο ώστε να του επιτρέπεται να διορθώνει ελάχιστες φορές και ουσιαστικά να αποφεύγονται οι συνεχής υπερβάσεις και διορθώσεις της ροπής αναφοράς. Η ζώνη υστέρησης της μαγνητικής ροής επηρεάζει την παραμόρφωση του ρεύματος του στάτη. Ο ελεγκτής ζώνης υστέρησης της μαγνητικής ροής έχει όρια ζώνης το ελάχιστο δυνατό δηλαδή $\pm 0,01 \text{Wb}$ ώστε η κυματομορφή του ρεύματος του στάτη είναι όσο πιο ημιτονοειδής θα μπορούσε.



Σχήμα 4.102 Σύγκριση γραφημάτων για το σύστημα μονάδας ελέγχου D.T.C. - κινητήρα σε και τον κινητήρα κλάσης IE4 όπου λειτουργούν παράλληλα. Καταγράφεται η απόδοση %, και ο συντελεστής ισχύος, σε σχέση με τον χρόνο.

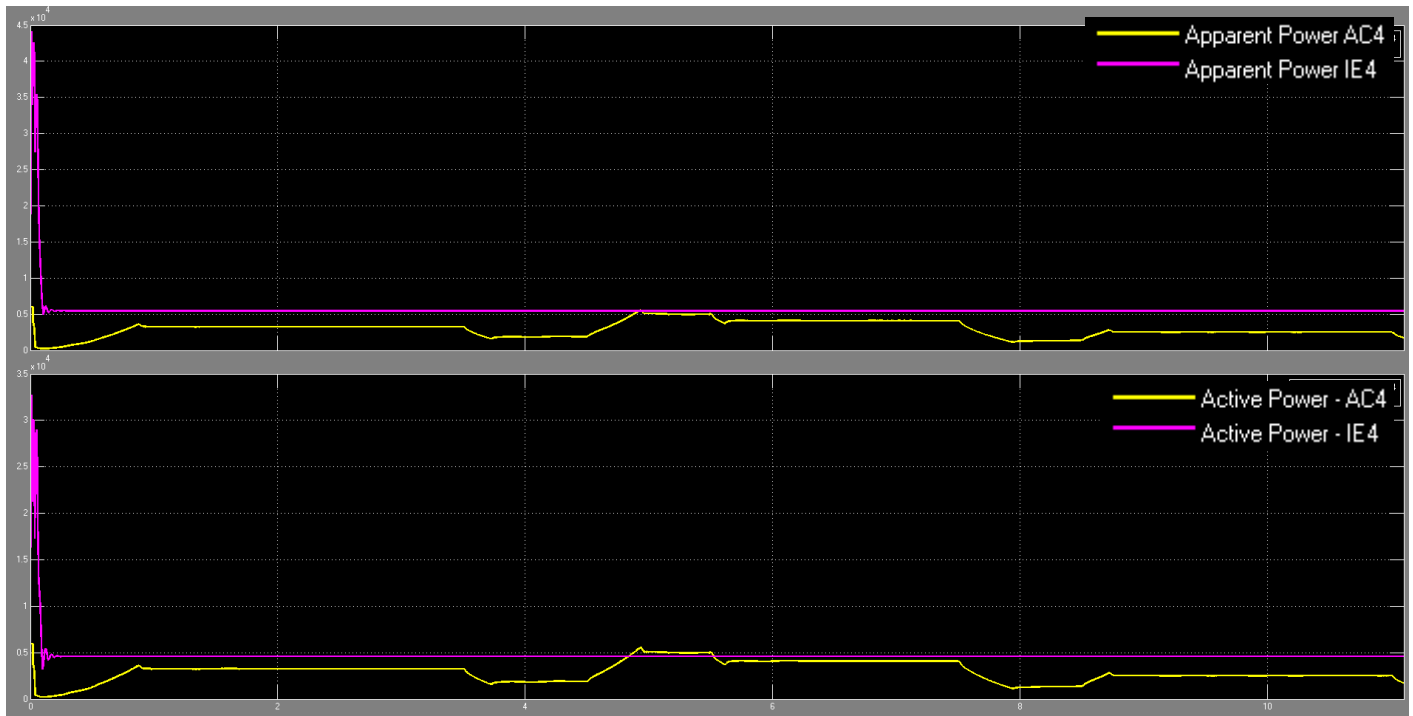
Σχήμα 4.102 παρατηρήσεις:

Στο σχήμα 4.102 με την σύγκριση του συντελεστή ισχύος και τον βαθμό απόδοσης κατά την διάρκεια του χρόνου παρατηρείται ότι υπάρχουν διαφοροποιήσεις στο σύστημα μονάδας ελέγχου-κινητήρα. Ο συντελεστής ισχύος είναι ανώτερος σε όλη την διάρκεια του πειράματος ενώ στον αντίποδα η απόδοση του κινητήρα σχεδόν πάντα ανώτερη στο χρόνο του πειράματος.

Σχήμα 4.102 εξηγήσεις και συμπεράσματα:

Στην περίπτωση του συντελεστή ισχύος, στο σύστημα μονάδας ελέγχου-κινητήρα ακόμη και με τις διαφοροποιήσεις του φορτίου ο συντελεστής ισχύος είναι $>0,99$ και αυτό είναι λογικό εφόσον γνωρίζουμε την λειτουργία των πυκνωτών του διαύλου DC. Η μονάδα ελέγχου βελτιώνει τον συντελεστή ισχύος του συστήματος επειδή το άεργο ρεύμα που χρειάζεται ο κινητήρας τροφοδοτείται από τους πυκνωτές του διαύλου DC, όχι από το σύστημα τροφοδοσίας.

Στην περίπτωση του βαθμού απόδοσης, το σύστημα μονάδας ελέγχου-κινητήρα υπολείπεται της τιμής του κινητήρα με απ' ευθείας τροφοδοσία. Λογικό αφού ο βαθμός απόδοσης του συστήματος σε κάθε περίπτωση είναι $\eta_{PDS} = \eta_{VFD} * \eta_{MOTOR}$.



Σχήμα 4.103 Σύγκριση γραφημάτων της πραγματικής και της φαινόμενης ηλεκτρικής ισχύος που καταναλώνονται σε σχέση με τον χρόνο και σύμφωνα με τις απαιτήσεις της εφαρμογής, για το σύστημα μονάδας ελέγχου D.T.C. - κινητήρα και τον κινητήρα κλάσης IE4.

Σχήμα 4.103 παρατηρήσεις:

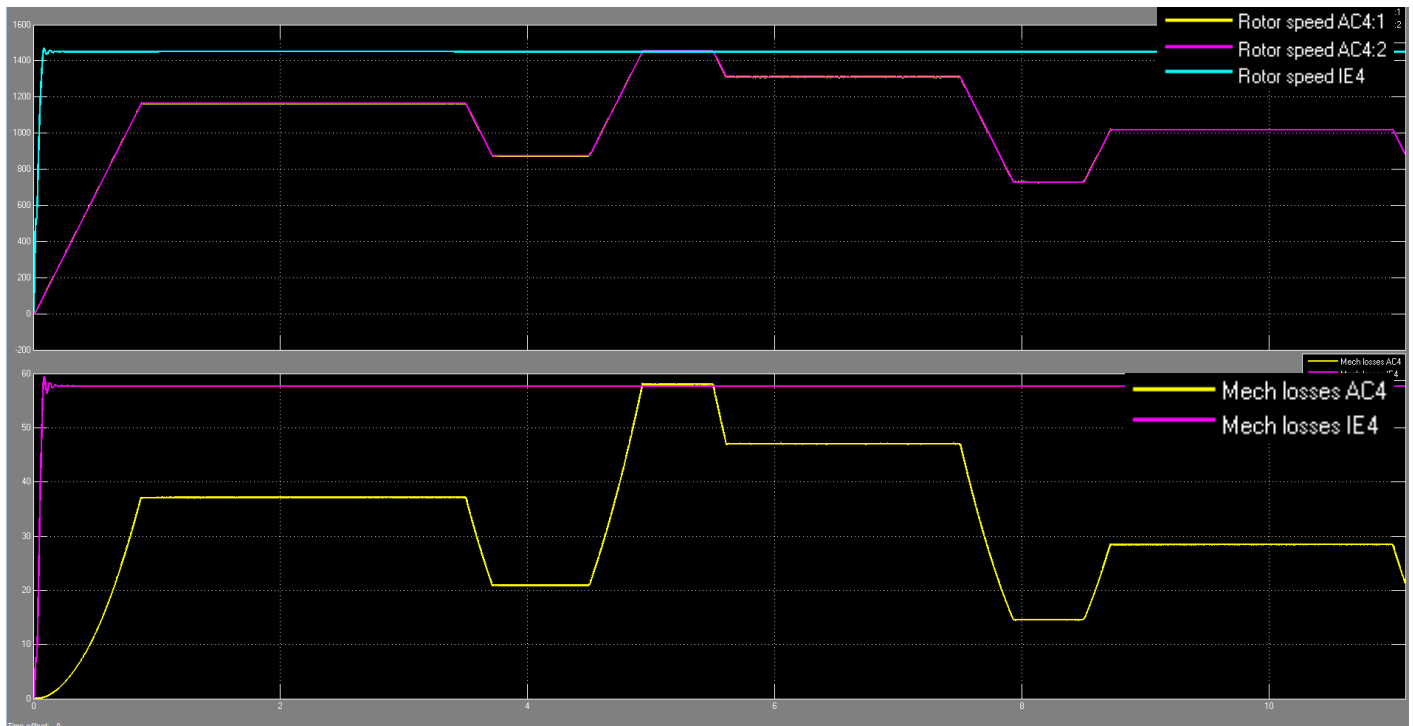
Στο σχήμα 4.103 δίνονται τα γραφήματα της πραγματικής και της φαινόμενης ηλεκτρικής ισχύος που καταναλώνονται σε σχέση με τον χρόνο. Παρατηρούμε ότι η πραγματική ισχύς που καταναλώνεται από το σύστημα μονάδας ελέγχου-κινητήρα ρυθμίζεται από τις απαιτήσεις του φορτίου σε κάθε χρονική στιγμή εν αντιθέσει με τον κινητήρα που λειτουργεί με απ' ευθείας τροφοδοσία. Ακόμη στην ονομαστική τιμή ροπής φορτίου στροφών το σύστημα μονάδας ελέγχου - κινητήρα καταναλώνει μεγαλύτερη πραγματική ισχύ 4720 Watt σε σχέση με τον κινητήρα που λειτουργεί με απ' ευθείας τροφοδοσία 4400 Watt.

Ως προς το θέμα της φαινόμενης ισχύος εν αντιθέσει με τον κινητήρα που λειτουργεί με απ' ευθείας τροφοδοσία, στο σύστημα μονάδας ελέγχου -κινητήρα δείχνει να ταυτίζεται η πραγματική με την φαινόμενη ισχύ.

Σχήμα 4.103 εξηγήσεις και συμπεράσματα:

Στο σημείο της ονομαστικής τιμής του φορτίου, της ροπής και των στροφών το σύστημα μονάδας ελέγχου - κινητήρα καταναλώνει μεγαλύτερη πραγματική ισχύ σε σχέση με τον κινητήρα που λειτουργεί με απ' ευθείας τροφοδοσία. Αυτό είναι λογικό λόγω των πρόσθετων απωλειών του μονάδας ελέγχου, δηλαδή απώλειες αγωγιμότητας, απώλειες μεταγωγής, απώλειες στον διάυλο DC. Αυτό δείχνει ότι τα οφέλη της χρήσης του συστήματος μονάδας ελέγχου -κινητήρα υπάρχουν σε περιπτώσεις εφαρμογών όπου οι κινητήρες δεν πρέπει να λειτουργούν συνεχώς στην ονομαστική

τους ισχύ. Η φαινόμενη ισχύς ταυτίζεται με την πραγματική όπως έχει αναφερθεί παραπάνω λόγω του συντελεστή ισχύος ο οποίος είναι $>0,99$.



Σχήμα 4.104 Σύγκριση γραφημάτων της ταχύτητας και των μηχανικών απωλειών σε σχέση με τον χρόνο για το σύστημα μονάδας ελέγχου D.T.C. - κινητήρα και τον κινητήρα κλάσης IE4.

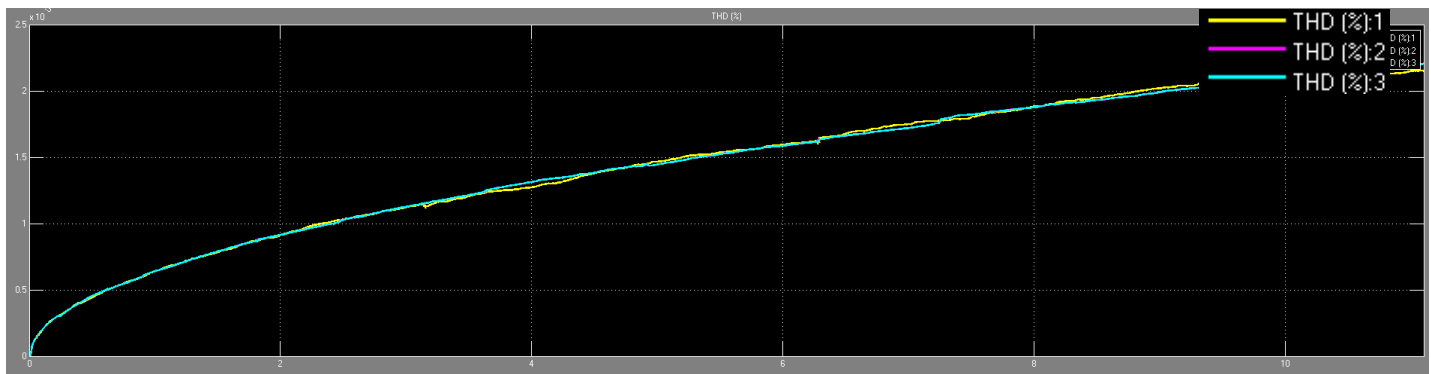
Σχήμα 4.104 παρατηρήσεις:

Στο σχήμα 4.104 δίνονται τα γραφήματα ταχύτητας και των μηχανικών απωλειών και παρατηρούμε ότι το σύστημα μονάδας ελέγχου -κινητήρα έχει χαμηλότερες μηχανικές απώλειες οι οποίες είναι ανάλογες των στροφών του κινητήρα

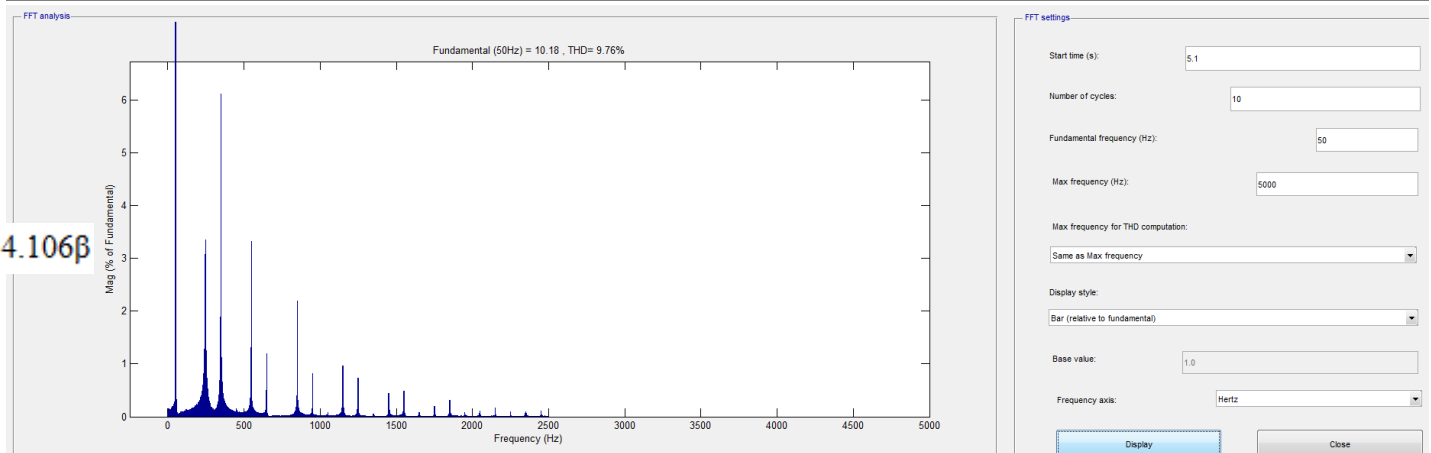
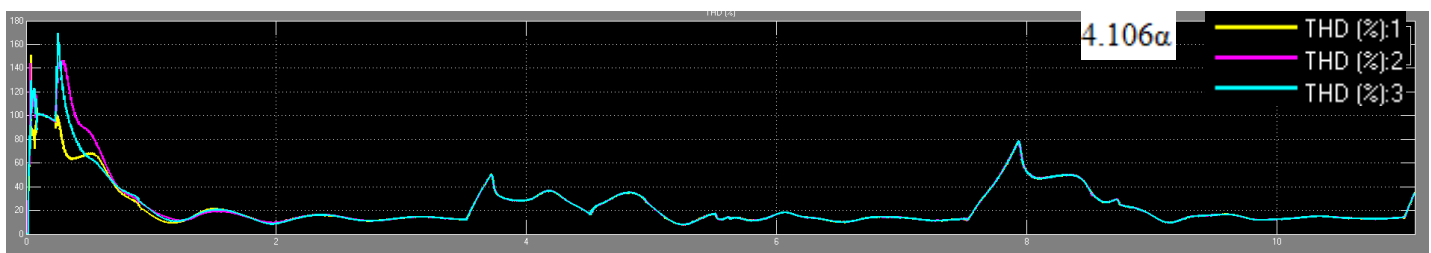
Σχήμα 4.104 εξηγήσεις και συμπεράσματα:

Η ταχύτητα που αποδίδεται από το σύστημα του μονάδας ελέγχου-κινητήρα έχει απόλυτη ταύτιση με την ταχύτητα αναφοράς με ελάχιστο θόρυβο. Η ταχύτητα αυξομειώνεται σταθερά γραμμικά ως την μόνιμη κατάσταση όπου διατηρείται χωρίς ταλαντώσεις.

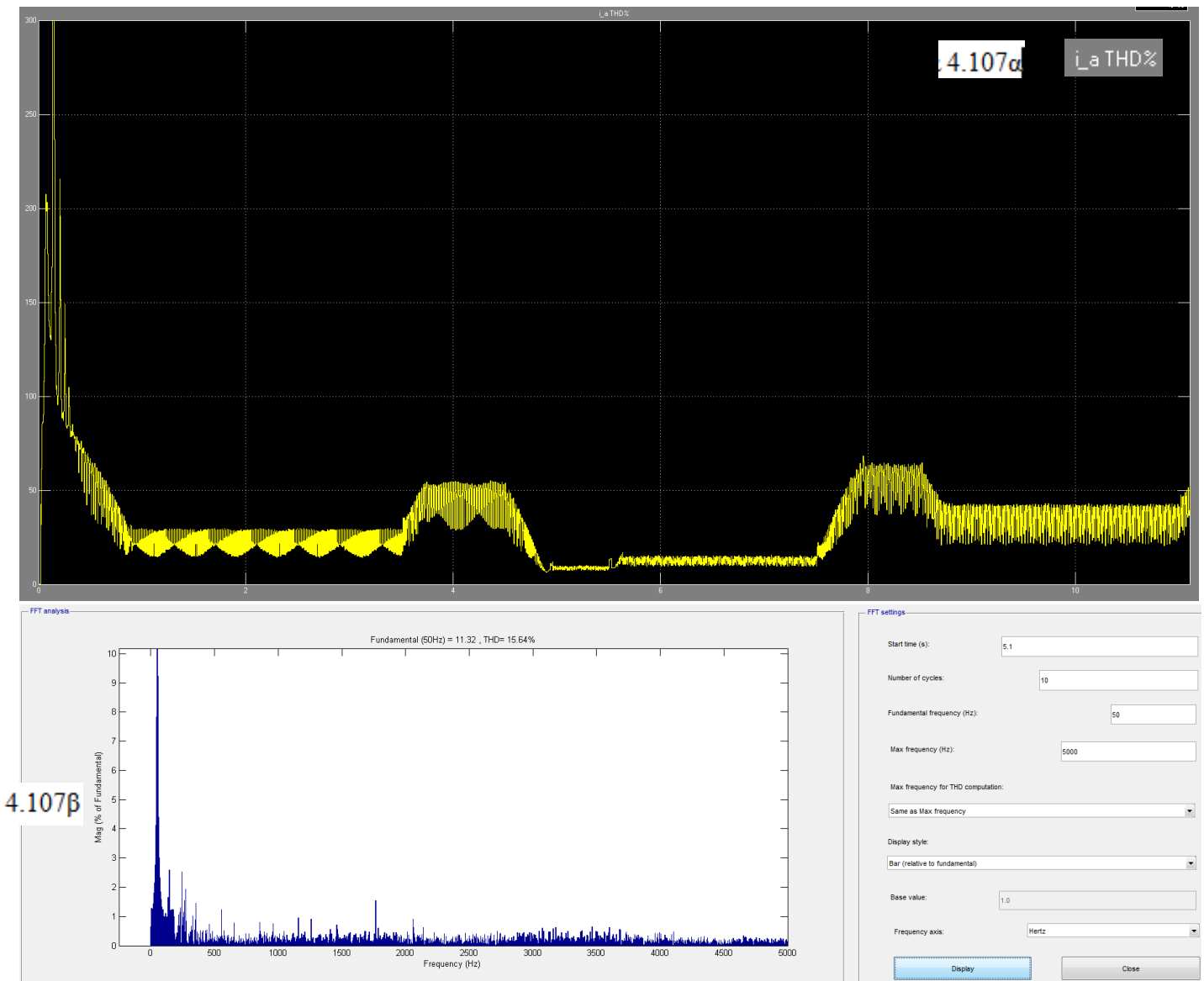
Η ρύθμιση της ταχύτητας επέτρεψε να μειωθούν οι απώλειες τριβής αναλόγως με την ταχύτητα και να οδηγήσουν σε βελτιωμένη διάρκεια ζωής στον μηχανολογικό εξοπλισμό στον ίδιο τύπο κινητήρα. Ο θόρυβος δείχνει την ύπαρξη αρμονικών και ελάχιστου πλάτους ταλαντώσεων συγκριτικά όμως με την περίπτωση του κλιμακωτού ελέγχου είναι ανύπαρκτος.



Σχήμα 4.105 Γράφημα για τις αρμονικές τάσης, σε σχέση με τον χρόνο, που παρουσιάζονται ενώ λειτουργεί το σύστημα μονάδας ελέγχου D.T.C. - κινητήρα.



Σχήμα 4.106 Γραφήματα που αφορούν 4.106α) τις αρμονικές ρεύματος, σε σχέση με τον χρόνο, που παρουσιάζονται και 4.106β) η FFT ανάλυση στο πεδίο της συχνότητας για το ρεύμα, στην γραμμή τροφοδοσίας, ενώ λειτουργεί το σύστημα μονάδας ελέγχου D.T.C. - κινητήρα.



Σχήμα 4.107 Γραφήματα που αφορούν 4.107α) τις αρμονικές ρεύματος που παρουσιάζονται στο τριφασικό τύλιγμα του στάτη, σε σχέση με τον χρόνο και 4.107β) η FFT ανάλυση στο πεδίο της συχνότητας για το ρεύμα, ενώ λειτουργεί το σύστημα μονάδας ελέγχου D.T.C. - κινητήρα.

Σχήμα 4.105, 4.106, 4.107 παρατηρήσεις:

Το σύστημα μονάδας ελέγχου-κινητήρα δημιουργεί φαινόμενα αρμονικών, όπως έχει αναφερθεί, λόγω των ημιαγωγών της μονάδας ελέγχου οι οποίοι άγουν διακοπτόμενα διαμορφώνοντας συνεχώς την επιθυμητή ισχύ τροφοδοτώντας τον κινητήρα. Στο σχήμα 4.105 δίνεται το γράφημα με τις αρμονικές τάσης σε σχέση με τον χρόνο, στην τροφοδοσία. Στο σχήμα 4.106α δίνεται το γράφημα με τις αρμονικές έντασης σε σχέση με τον χρόνο, στην τροφοδοσία του συστήματος, ενώ στο σχήμα 4.106β δίνεται η ανάλυση FFT με το ποσοστό της παραμόρφωσης κοντά στο ονομαστικό σημείο λειτουργίας για την τροφοδοσία του συστήματος. Στο σχήμα 4.107α δίνεται το γράφημα με τις αρμονικές έντασης σε σχέση με τον χρόνο, στα τυλίγματα του στάτη, ενώ στο σχήμα 4.107β δίνεται η ανάλυση FFT με το ποσοστό της παραμόρφωσης στα τυλίγματα του στάτη στο ίδιο χρονικό σημείο που μετρήθηκε και η παραμόρφωση για την τροφοδοσία του συστήματος.

Σχήμα 4.105, 4.106 εξηγήσεις και συμπεράσματα:

Η τάση εξόδου έχει προσεγγιστικά ημιτονοειδή μορφή και εξαρτάται από τα κατασκευαστικά στοιχεία της μονάδας ελέγχου και της συχνότητας διαμόρφωσης των διακοπτικών στοιχείων. Οι αρμονικές αυτές περιορίζονται με τα παθητικά φίλτρα και τις αυτεπαγωγές γραμμής έτσι ώστε να είναι κάτω των επιτρεπτών ορίων παραμόρφωσης τάσης $THD_{max}\% = 5\%$.

Το δείγμα της κυματομορφής που αναλύεται με το FFT tool είναι 10 κύκλοι.

Παρατηρώντας την κυματομορφή η παραμόρφωση της τάσης είναι $<5\%$. Άρα βρίσκεται εντός των ορίων που θέτονται σχετικά.

Η παραμόρφωση της έντασης είναι μεγαλύτερη με ελάχιστη τιμή 8,2% και μέγιστη 160%. Η παραμόρφωση γίνεται μεγαλύτερη κατά την εκκίνηση και τις μεταβατικές καταστάσεις της τιμής του φορτίου και όταν ο κινητήρας λειτουργεί με χαμηλότερη φόρτιση. Την ελάχιστη τιμή της παραμόρφωσης παρουσιάζεται στο χρονικό διάστημα όπου το σύστημα ισορροπεί. Όμως ενώ σε χαμηλότερη φόρτιση του κινητήρα η αρμονική παραμόρφωση είναι μεγαλύτερη, το ενεργό ρεύμα των αρμονικών μικραίνει, όπως έχει αναφερθεί, αφού ισχύει:

$$THDi = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I^2_{hrms}}}{I_{rms}}$$

Το THD% είναι 9,76% στο ονομαστικό σημείο και οι κυριότερες αρμονικές που εμφανίζονται με ποσοστό παραμόρφωσης είναι: 1,47% στα 250Hz, 6,15% στα 350Hz, 3,73% στα 550Hz, 1,25% στα 650Hz ενώ οι επόμενες αρμονικές είναι πολύ χαμηλού πλάτους. Οι αρμονικές περιορίστηκαν από την αυτεπαγωγή γραμμής και τα δύο παθητικά διπλοσυντονιζόμενα φίλτρα σε αυτές τις τιμές.

Σχήμα 4.107 εξηγήσεις και συμπεράσματα

Η αρμονική παραμόρφωση του ρεύματος που παρουσιάζεται στον στάτη κατά την ονομαστική φόρτιση του επαγωγικού κινητήρα έχει τιμή 15,64%. την χρονική στιγμή όπου το μέτρο του ρεύματος κορυφής είναι 11,32A. Το FFT Analysis tool δείχνει αρμονικό θόρυβο πολύ μικρής όμως ενεργής τιμής ως τα 5kHz όπου μας ενδιαφέρει το δείγμα. Το THD% ς είναι 8,13% στα 55Hz, 4,62% στα 60Hz, 2,15% στα 65Hz, 1,04% στα 70Hz ενώ οι επόμενες αρμονικές είναι πολύ χαμηλού πλάτους.

Πίνακας 16 Απαιτήσεις της εφαρμογής βάσει του πίνακα 4 και οι τιμές που προκύπτουν από την προσομοίωση της χρήσης μονάδας ελέγχου D.T.C –κινητήρα.

Επιδόσεις συστήματος μονάδας ελέγχου με κινητήρα IE4							
Τιμές προσομοίωσης							
Ταχύτητα (rpm)	Ταχύτητα (rad/sec)	Ισχύς στην έξοδο (W)	Ισχύς στην έξοδο %	Ροπή στον άξονα (Nm)	Ροπή στον άξονα %	Συντελεστής ισχύος	Απόδοση %
1455	152,36	4037,54	100	26,5	100,37	0,99	85,5
1309,5	137,13	3291,12	82,27	24	90,90	0,99	85
1164	121,89	2681	67,03	22	83,33	0,99	85
1018,5	106,657	2026,5	50,66	19	71,96	0,99	82
873	91,42	1462,7	36,56	16	60,6	0,99	79
727,5	76,18	1028,34	25,71	13,5	51,13	0,99	77

4.5.2.1 Εξοικονόμηση ενέργειας και κόστους στην περίπτωση χρήσης μονάδας ελέγχου στροφών *Direct Torque Control* για την αντλία.

Για την εύρεση της εξοικονόμησης ενέργειας και κόστους χρησιμοποιήθηκαν τα στοιχεία του πίνακα 16 για να υπολογιστεί για κάθε ισχύ εξόδου η ετήσια κατανάλωση του συστήματος μονάδας ελέγχου-κινητήρα. Στους υπολογισμούς μόνο στην γραμμή για $P_L:100\%$ χρησιμοποιείται η ισχύς οριακά μεγαλύτερη που όμως προκύπτει από την προσομοίωση.

$$P_L 100\%, W_L = 1 \frac{4037,54 \text{ W}}{0,855} 8760 \cdot 0,1 = 4136,7 \text{ KWh}$$

$$P_L 82,27\%, W_L = 0,8227 \frac{4000 \text{ W}}{0,85} 8760 \cdot 0,2 = 6782,91 \text{ KWh}$$

$$P_L 67,03\%, W_L = 0,6703 \frac{4000 \text{ W}}{0,85} 8760 \cdot 0,25 = 6908,03 \text{ KWh}$$

$$P_L 50,66\%, W_L = 0,5066 \frac{4000 \text{ W}}{0,82} 8760 \cdot 0,25 = 5411,97 \text{ KWh}$$

$$P_L 36,56\%, W_L = 0,3656 \frac{4000 \text{ W}}{0,79} 8760 \cdot 0,10 = 1621,6 \text{ KWh}$$

$$P_L 25,71\%, W_L = 0,2571 \frac{4000 \text{ W}}{0,77} 8760 \cdot 0,10 = 1169,97 \text{ KWh}$$

$$\text{Ετήσιο } W_L = 4136,7 + 6782,91 + 6908,03 + 5411,97 + 1621,6 + 1169,97 = 26031,18 \text{ KWh}$$

Ετήσιο W_L για την περίπτωση του κινητήρα ενεργειακής κλάσης IE4,

$$W_L = 1 * \frac{4000 \text{ W}}{0,912} * 8760 \cdot 1 = 38421,05 \text{ KWh}$$

$$\frac{26031,18 \text{ KWh}}{38421,05 \text{ KWh}} = 0,6775 \text{ της ετήσιας κατανάλωσης σημαίνει } 32,25\% \text{ εξοικονόμηση ενέργειας}$$

Η ετήσια εξοικονόμηση για κόστος ενέργειας 0,10€/KWh θα είναι:
 $(38421,05 \text{ KWh} - 26031,18 \text{ KWh}) * 0,10\text{€/KWh} = 1238,98\text{€}$

4.5.3 3^η Εφαρμογή, συμπίεστος κοχλιωτός μικρής ισχύος σε μονάδα παραγωγής

Στην εφαρμογή θα συγκριθεί η απόδοση για την περίπτωση της χρήσης κινητήρα ενεργειακής κλάσης IE4 χωρίς οδήγηση και την χρήση μονάδας ελέγχου στροφών με έλεγχο D.T.C. και κινητήρα κλάσης IE4. Ο κοχλιωτός συμπίεστος λειτουργεί στην δυσμενέστερη περίπτωση που μπορεί να αντιμετωπιστεί, για 24h/ημέρα, 365ημέρες/χρόνο, άρα το σύνολο 8760h/χρόνο

Οι απαιτήσεις τροφοδοτήθηκαν στο σύστημα μονάδας ελέγχου-κινητήρα σύμφωνα με τον πίνακα 5 της παραγράφου 3.2 με το υπόδειγμα των αναγκών της εφαρμογής. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης χρησιμοποιήθηκαν για την συμπλήρωση του πίνακα με τις τιμές της απόδοσης του συστήματος. Βάσει αυτών των αποτελεσμάτων γίνεται σχετική ανάλυση και η οικονομική προσέγγιση.

Ο συνολικός χρόνος της προσομοίωσης ο οποίος βρίσκεται σε όλα τα παρακάτω γραφήματα στον οριζόντιο άξονα είναι 11s.

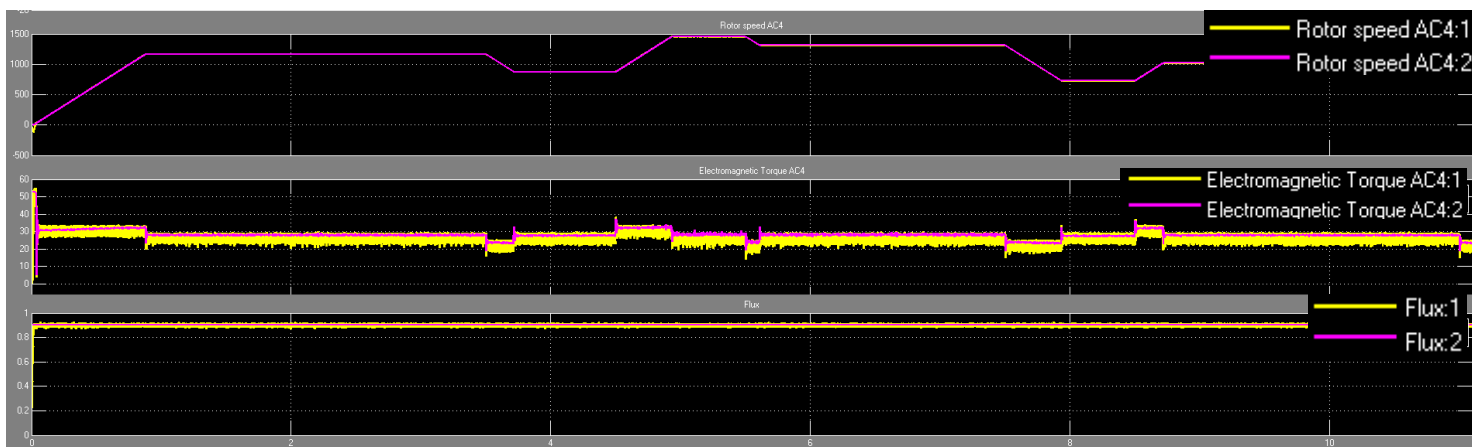
Από τον χαρακτήρα του φορτίου του αεροσυμπιεστή θετικής μετατόπισης υπενθυμίζεται ότι ισχύει:

$$P_L = f(n), P_L = P_{outnom} * \left(\frac{U_{Load}}{U_{nom}} \right)$$

$$T_L = \text{σταθερό}$$



Σχήμα 4.108 Γράφημα του φορτίου που εφαρμόζεται βάσει των απαιτήσεων του πίνακα 5, σε σχέση με τον χρόνο. Με βάση αυτόν εξετάζεται η συμπεριφορά του συστήματος μονάδας ελέγχου D.T.C. – κινητήρα.



Σχήμα 4.109 Γράφημα για το σύστημα μονάδας ελέγχου D.T.C. - κινητήρα της ταχύτητας με την ανατροφοδότησή της, της ροπής με την ανατροφοδότησή της και της μαγνητικής ροής στο πλαίσιο d-q με την ανατροφοδότησή της, σε σχέση με τον χρόνο.

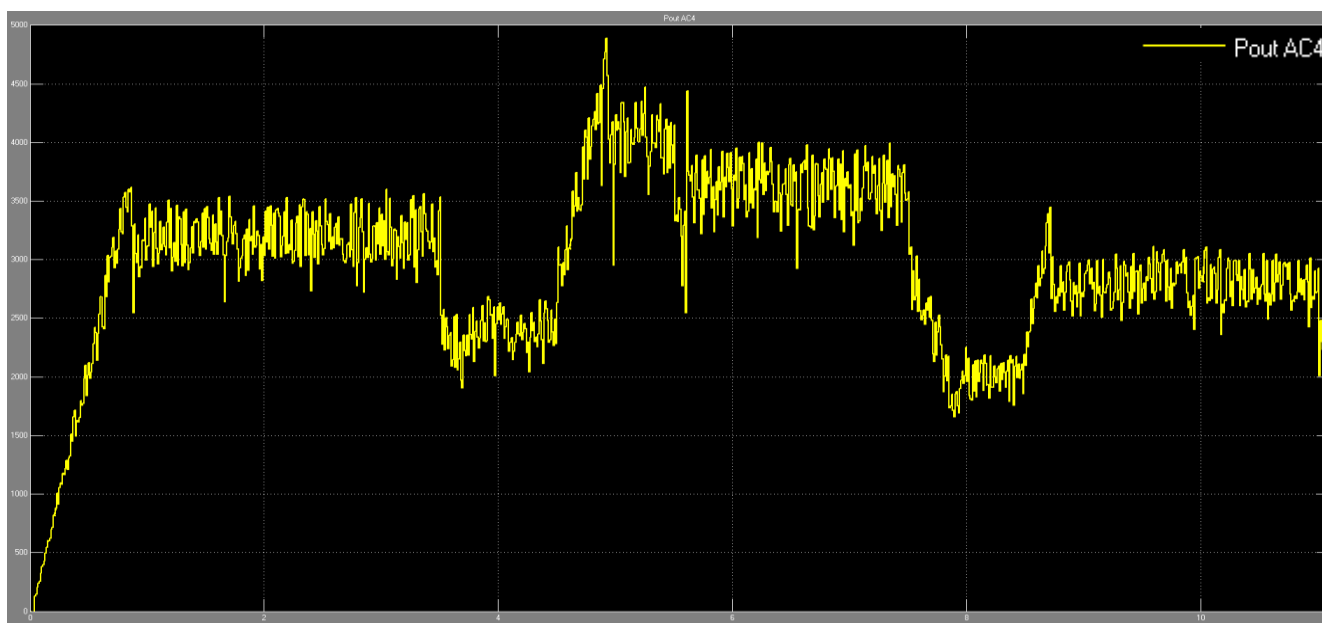
Σχήμα 4.109 παρατηρήσεις:

Στο σχήμα 4.109 στο πρώτο γράφημα δίνεται το γράφημα με την ταχύτητα του δρομέα με το κίτρινο χρώμα σε σχέση με την ταχύτητα αναφοράς με το μωβ χρώμα. Στο παρακάτω γράφημα δίνεται το γράφημα της ροπής με το κίτρινο χρώμα σε σχέση με την ροπή αναφοράς με το μωβ χρώμα και στο τελευταίο γράφημα δίνεται η μαγνητική ροή στο πλαίσιο αναφοράς του στάτη με το κίτρινο χρώμα σε σχέση με την αναφορά της με το μωβ χρώμα. Σε κάθε μέγεθος παρατηρείται σχεδόν ταύτιση της τιμής αναφοράς με την πραγματική τιμή που αποδίδει ο οδηγούμενος κινητήρας.

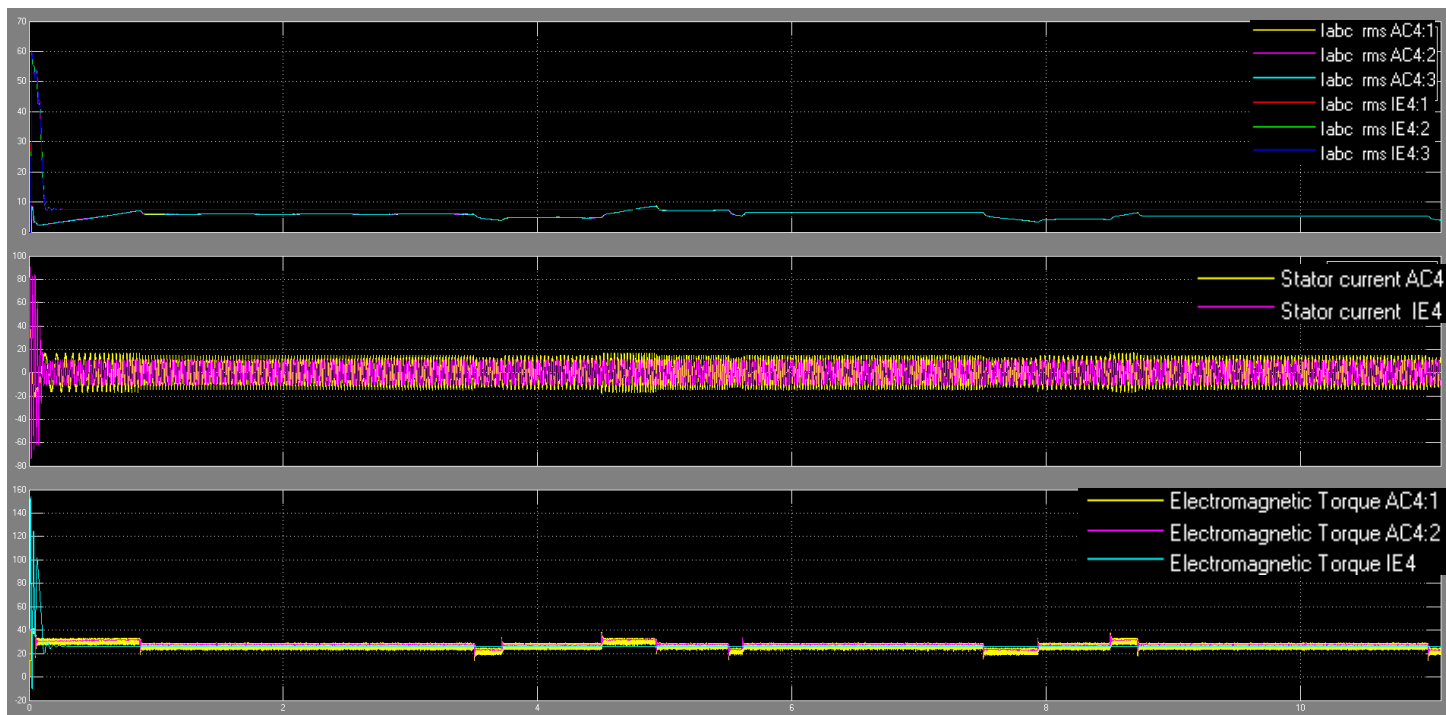
Σχήμα 4.109 εξηγήσεις και συμπεράσματα:

Στον άμεσο έλεγχο ροπής, η ροπή και η μαγνητική ροή ρυθμίζονται από ελεγκτές ζώνης υστέρησης.

Η μαγνητική ροή διατηρείται πάντα σταθερή σε σχέση με την μαγνητική ροή αναφοράς ενώ σε κάθε διαφοροποίηση της τιμής του φορτίου η ροπή αυξομειώνεται ελεγχόμενα και ανεξάρτητα αποδίδοντας την τιμή αναφοράς που χρειάζεται. Σε κάθε περίπτωση τα γραφήματα δείχνουν γραμμικότητα και αξιόπιστη συμπεριφορά προς τις τιμές αναφοράς, με μικρή ύπαρξη θορύβου.



Σχήμα 4.110 Γράφημα της μηχανικής ισχύος εξόδου του συστήματος μονάδας ελέγχου D.T.C. - κινητήρα σε σχέση με τον χρόνο και σύμφωνα με τις απαιτήσεις φόρτισης της εφαρμογής, βάσει του πίνακα 5.



Σχήμα 4.111 Σύγκριση γραφημάτων για το σύστημα μονάδας ελέγχου D.T.C.-κινητήρα σε σχέση με τον κινητήρα κλάσης IE4 ο οποίος λειτουργεί χωρίς οδήγηση. Λειτουργούν παράλληλα καταγράφοντας το ρεύμα rms ανα φάση, ρεύμα από κορυφή σε κορυφή στον στάτη και την αποδιδόμενη ροπή τους, σε σχέση με τον χρόνο

Σχήμα 4.111 παρατηρήσεις:

Στο σχήμα 4.111 στο πρώτο γράφημα παρατηρούμε σύγκριση του ρεύματος I_{abc} rms της γραμμής, ακολουθεί το ρεύμα από κορυφή σε κορυφή για τον στάτη και το γράφημα της ροπής των κινητήρων.

Στο πρώτο γράφημα το rms ρεύμα ανά φάση κατά την εκκίνηση δεν ξεπερνάει το μέγιστο ρεύμα του συστήματος της μονάδας ελέγχου με τον κινητήρα και το συζευγμένο φορτίο με την μέγιστη τιμή του να φτάνει τα 9,4A την ίδια χρονική στιγμή ο ίδιος κινητήρας ο οποίος εκκινεί με το ίδιο συζευγμένο φορτίο καταναλώνει 60,5A. Το rms ρεύμα γραμμής του συστήματος μονάδας ελέγχου και κινητήρα στην πλήρη φόρτιση είναι 7 A ανά φάση την ίδια χρονική στιγμή που το rms ρεύμα γραμμής πλήρους φόρτισης του κινητήρα είναι: 7,65 A.

Στο δεύτερο γράφημα με την σύγκριση του ρεύματος I_{abc} κορυφής και rms της γραμμής και της ροπής του κινητήρα, παρατηρείται μεγάλη διαφορά από 0 ως 0,1sec όπου το μεγάλο ρεύμα αιχμής εκκίνησης απουσιάζει από την περίπτωση του συστήματος μονάδος ελέγχου-κινητήρα.

Στο τρίτο γράφημα παρατηρούμε την ροπή για κάθε τιμή φορτίου. Με μωβ χρώμα είναι η ροπή αναφοράς που χρειάζεται να αποδοθεί σε κάθε αλλαγή του φορτίου. Ο κινητήρας χωρίς οδήγηση λειτουργεί αποδίδοντας συνεχώς την ονομαστική του ροπή ενώ με την χρήση της μονάδας ελέγχου αποδίδεται πάντοτε η ροπή που υπολογίζεται ότι χρειάζεται μέσω της ανατροφοδότησης του συστήματος. Στην καμπύλη της ροπής του ελεγχόμενου κινητήρα παρατηρούνται αιχμές ροπής κατά τη διάρκεια των μεταβατικών καταστάσεων, όπου υπάρχουν εναλλαγές στο φορτίο. Η ροπή του συστήματος μονάδας ελέγχου -κινητήρα δείχνει καλή απόκριση και αν και η κυματομορφή είναι θορυβώδης. Η ταχύτητα αυξομειώνεται σταθερά γραμμικά ως την εκάστοτε μόνιμη κατάσταση όπου διατηρείται χωρίς ταλαντώσεις.

Σχήμα 4.111 εξηγήσεις και συμπεράσματα:

Το ρεύμα εισόδου στην μονάδα ελέγχου δεν υπερβαίνει το 110% του ονομαστικού ρεύματος. Η μαγνητική ροή του κινητήρα θα είναι ευθέως ανάλογη με την τάση και αντιστρόφως ανάλογη με την συχνότητα. Η ροή διατηρείται σταθερή και το ρεύμα περιορίζεται, ενώ αποδίδεται πλήρης ελεγχόμενη ροπή εκκίνησης όπως φαίνεται στο ίδιο σχήμα και υπενθυμίζεται ότι όπως αναφέρθηκε στην παράγραφο 2.2.7 από τον τύπο 2.59 ισχύει ότι:

$$T_{acc} = J * \frac{\Delta U_{rpm/sec}}{\Delta t_{30}} * \pi = 0,030 * \frac{1350rpm/sec}{1\ 30} * 3,14 = 4.24Nm, \text{ θα είναι η πρόσθετη ροπή κατά την εκκίνηση με το φορτίο, η οποία γίνεται σε } 1s.$$

Το ρεύμα περιορίζεται όπως έχει αναφερθεί, από τον σχεδιασμό του κυκλώματος προφόρτισης της μονάδας. Οι πυκνωτές του διαύλου DC φορτίζονται ομαλά σε μια σταθερά χρόνου $t=RC$ και αποδίδουν το ρεύμα που χρειάζεται έτσι ώστε το ρεύμα κατά την εκκίνηση να διατηρείται κάτω από το ονομαστικό του κινητήρα.

Το rms ρεύμα γραμμής του συστήματος μονάδος ελέγχου και κινητήρα στην πλήρη φόρτιση είναι 7 A ανά φάση την ίδια χρονική στιγμή που το rms ρεύμα γραμμής πλήρους φόρτισης του κινητήρα είναι, 7,65A. Αυτό είναι λογικό αφού η μονάδα ελέγχου θα απορροφήσει από το δίκτυο μόνο το μέτρο της ενεργής τιμής του διανύσματος του ρεύματος, αυτό το οποίο απαιτεί η ροπή σε κάθε χρονική στιγμή. Το ρεύμα μαγνήτισης το παρέχουν οι πυκνωτές του διαύλου DC στον κινητήρα.

Υπάρχει θόρυβος και μια σχετική υποβάθμιση της απόδοσης της ροπής με αιχμές και διορθώσεις των ελεγκτών υστέρησης κατά την διάρκεια του χρόνου πιο έντονες σε σχέση με τα προηγούμενα φορτία. Ο ελεγκτής ζώνης υστέρησης της ροπής έχει όρια ζώνης τα $\pm 0,5Nm$ και ο ελεγκτής ζώνης υστέρησης της μαγνητικής ροής $\pm 0,01\ Wb$. Η επιλογή του πλάτους της ζώνης υστέρησης έχει επίδραση στην συχνότητα μετατροπής και έτσι επηρεάζει τις απώλειες μετατροπής εάν η ζώνη είναι πάρα πολύ μικρή, η υπέρβαση ροπής προκαλεί σφάλμα ροπής και υπέρβαση ζώνης υστέρησης. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την επιλογή ενός αντίθετου διανύσματος τάσης για τη μείωση της ροπής. Ένα αντίθετο διάνυσμα τάσης θα μειώσει τη ροπή γρήγορα όμως θα προκαλέσει μια υποδεέστερη ροπή σε σχέση με αυτήν της αναφοράς. Άρα, η κυμάτωση ροπής μπορεί να γίνει υψηλή εάν η ζώνη υστέρησης ροπής είναι πολύ μικρή αφού θα γίνονται συνεχείς διορθώσεις. Ο ελεγκτής ζώνης της ροπής έχει πλάτος τέτοιο ώστε να του επιτρέπεται να διορθώνει τις ελάχιστες φορές και ουσιαστικά να αποφεύγονται οι συνεχείς υπερβάσεις και διορθώσεις της ροπής αναφοράς.

Η ζώνη υστέρησης της μαγνητικής ροής επηρεάζει την παραμόρφωση του ρεύματος του στάτη. Ο ελεγκτής ζώνης υστέρησης της μαγνητικής ροής έχει όρια ζώνης το ελάχιστο δυνατό δηλαδή $\pm 0,01Wb$ ώστε η κυματομορφή του ρεύματος του στάτη είναι όσο πιο ημιτονοειδής θα μπορούσε.



Σχήμα 4.112 Σύγκριση γραφημάτων για το σύστημα μονάδας ελέγχου D.T.C. - κινητήρα και τον κινητήρα κλάσης IE4 όπου λειτουργούν παράλληλα. Καταγράφεται η απόδοση %, και ο συντελεστής ισχύος, σε σχέση με τον χρόνο.

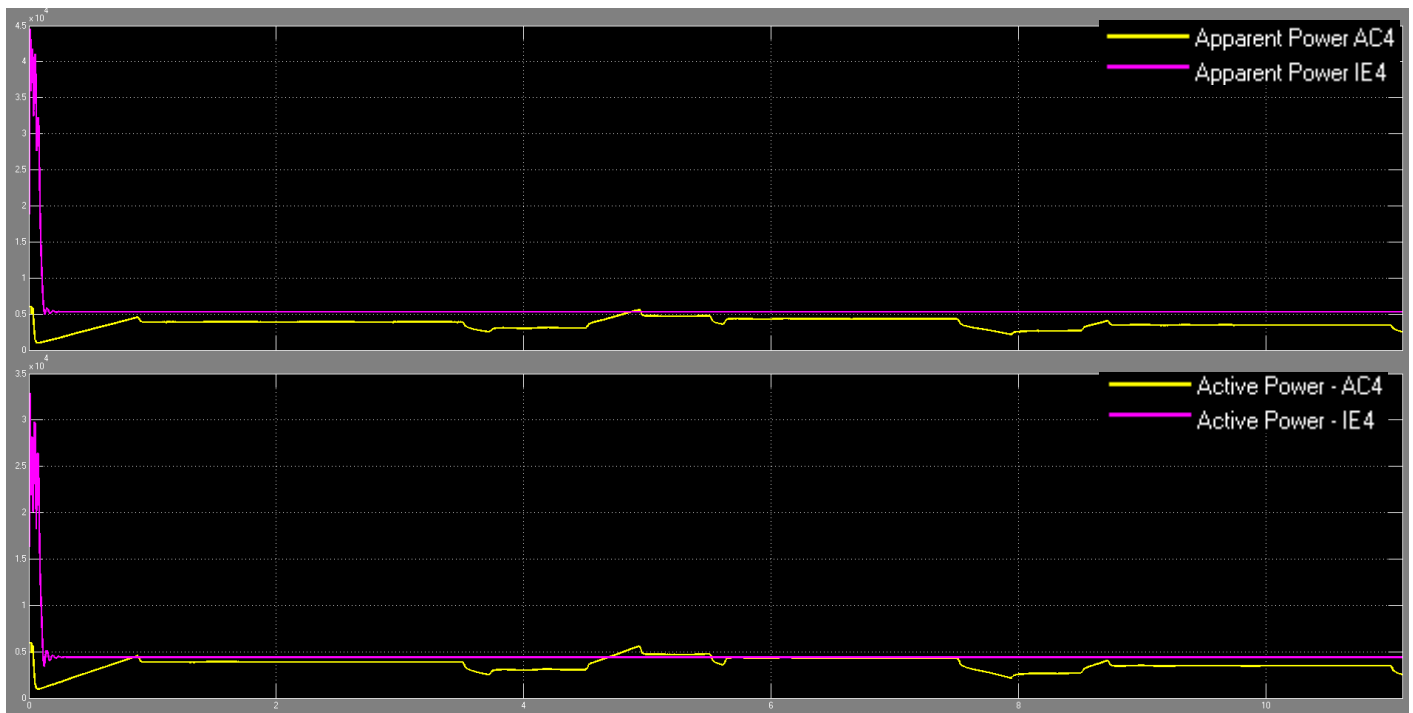
Σχήμα 4.112 παρατηρήσεις:

Στο σχήμα 4.112 με την σύγκριση του συντελεστή ισχύος και τον βαθμό απόδοσης κατά την διάρκεια του χρόνου παρατηρείται ότι υπάρχουν διαφοροποιήσεις στο σύστημα μονάδας ελέγχου-κινητήρα. Ο συντελεστής ισχύος είναι ανώτερος σε όλη την διάρκεια του πειράματος ενώ στον αντίποδα η απόδοση του κινητήρα σχεδόν πάντα ανώτερη στο χρόνο του πειράματος.

Σχήμα 4.112 εξηγήσεις και συμπεράσματα:

Στην περίπτωση του συντελεστή ισχύος, στο σύστημα μονάδας ελέγχου-κινητήρα ακόμη και με τις διαφοροποιήσεις του φορτίου ο συντελεστής ισχύος είναι $>0,99$, εφόσον λειτουργούν οι πυκνωτές του διαύλου DC. Η μονάδα ελέγχου βελτιώνει τον συντελεστή ισχύος του συστήματος επειδή το άεργο ρεύμα που χρειάζεται ο κινητήρας τροφοδοτείται από τους πυκνωτές του διαύλου DC, όχι από το σύστημα τροφοδοσίας.

Στην περίπτωση του βαθμού απόδοσης, το σύστημα μονάδα ελέγχου-κινητήρα υπολείπεται της τιμής του κινητήρα με απ' ευθείας τροφοδοσία. Ο βαθμός απόδοσης του συστήματος σε κάθε περίπτωση είναι $\eta_{PDS} = \eta_{VFD} * \eta_{MOTOR}$.



Σχήμα 4.113 Σύγκριση γραφημάτων της πραγματικής και της φαινόμενης ηλεκτρικής ισχύος που καταναλώνονται σε σχέση με τον χρόνο και σύμφωνα με τις απαιτήσεις της εφαρμογής, για το σύστημα μονάδας ελέγχου D.T.C. - κινητήρα και τον κινητήρα κλάσης IE4..

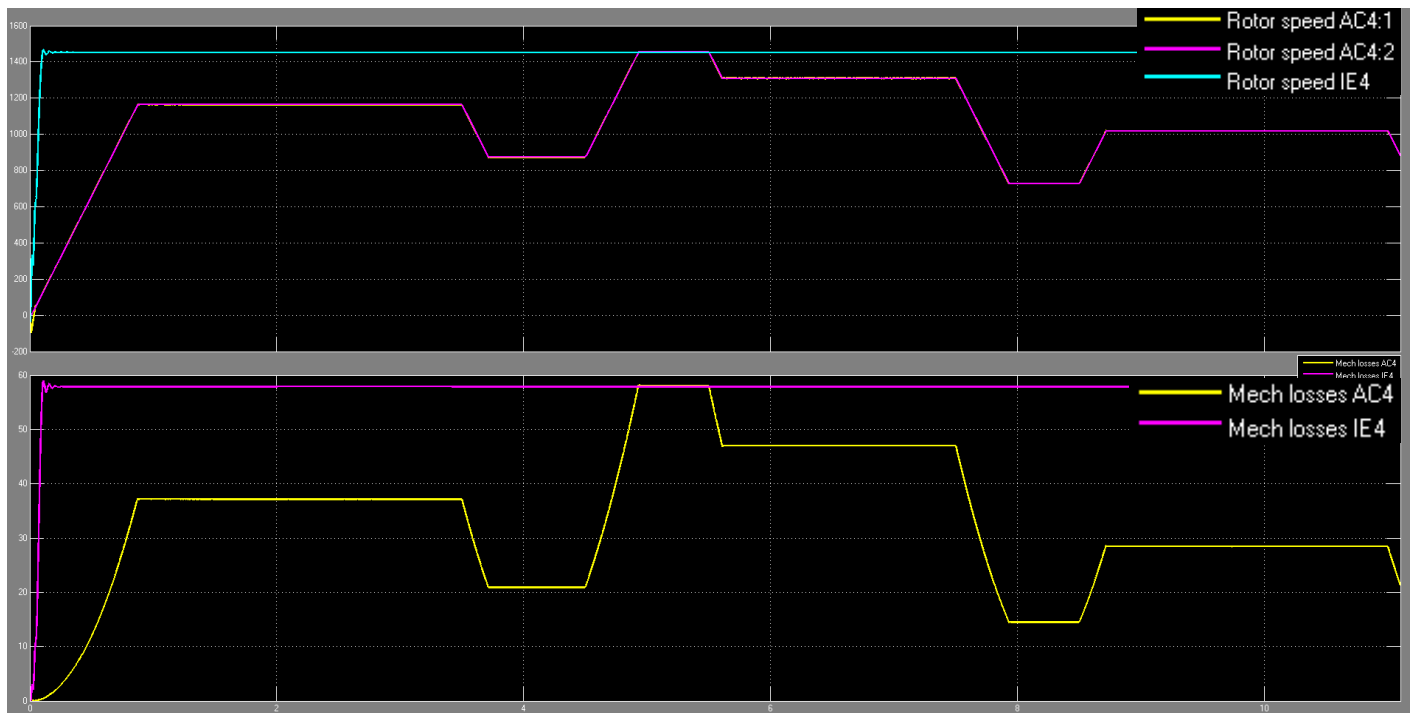
Σχήμα 4.113 παρατηρήσεις:

Στο σχήμα 4.113 δίνονται τα γραφήματα της πραγματικής και της φαινόμενης ηλεκτρικής ισχύος που καταναλώνονται σε σχέση με τον χρόνο. Παρατηρείται ότι η πραγματική ισχύς που καταναλώνεται από το σύστημα μονάδας ελέγχου-κινητήρα ρυθμίζεται από τις απαιτήσεις του φορτίου σε κάθε χρονική στιγμή εν αντιθέσει με τον κινητήρα που λειτουργεί με απ' ευθείας τροφοδοσία. Ακόμη στην ονομαστική τιμή ροπής φορτίου στροφών το σύστημα μονάδας ελέγχου - κινητήρα καταναλώνει μεγαλύτερη πραγματική ισχύ 4800 Watt σε σχέση με τον κινητήρα που λειτουργεί με απ' ευθείας τροφοδοσία 4410 Watt.

Ως προς το θέμα της φαινόμενης ισχύος εν αντιθέσει με τον κινητήρα που λειτουργεί με απ' ευθείας τροφοδοσία, στο σύστημα μονάδας ελέγχου -κινητήρα δείχνει να ταυτίζεται η πραγματική με την φαινόμενη ισχύ.

Σχήμα 4.113 εξηγήσεις και συμπεράσματα:

Στο σημείο της ονομαστικής τιμής του φορτίου, της ροπής και των στροφών το σύστημα μονάδας ελέγχου -κινητήρα καταναλώνει μεγαλύτερη πραγματική ισχύ σε σχέση με τον κινητήρα που λειτουργεί με απ' ευθείας τροφοδοσία. Αυτό είναι λογικό λόγω των πρόσθετων απωλειών του μονάδας ελέγχου, δηλαδή τις απώλειες αγωγιμότητας, τις απώλειες μεταγωγής και τις απώλειες στον δίαυλο DC. Αυτό δείχνει ότι τα οφέλη της χρήσης του συστήματος μονάδας ελέγχου - κινητήρα υπάρχουν σε περιπτώσεις εφαρμογών όπου οι κινητήρες δεν πρέπει να λειτουργούν συνεχώς στην ονομαστική τους ισχύ. Η φαινόμενη ισχύς ταυτίζεται με την πραγματική όπως έχει αναφερθεί παραπάνω λόγω του συντελεστή ισχύος ο οποίος είναι $>0,99$.



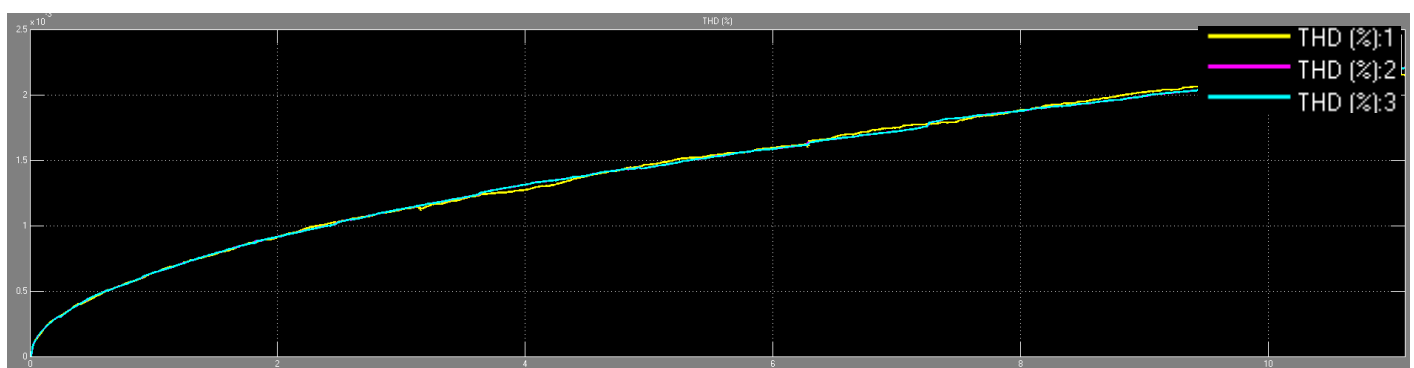
Σχήμα 4.114 Σύγκριση γραφημάτων της ταχύτητας και των μηχανικών απωλειών σε σχέση με τον χρόνο για το σύστημα μονάδας ελέγχου D.T.C. - κινητήρα και τον κινητήρα κλάσης IE4

Σχήμα 4.114 παρατηρήσεις:

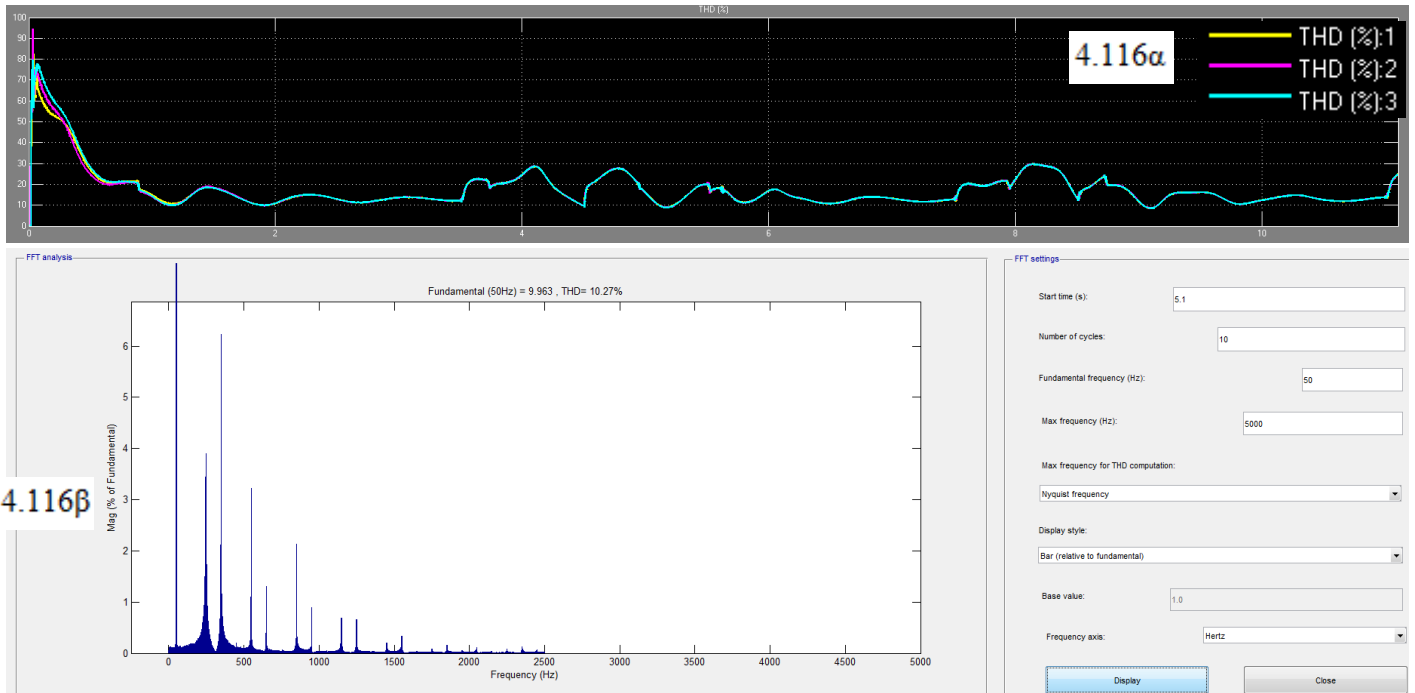
Στο σχήμα 4.114 δίνονται τα γραφήματα ταχύτητας και των μηχανικών απωλειών και παρατηρούμε ότι το σύστημα μονάδας ελέγχου - κινητήρα έχει χαμηλότερες μηχανικές απώλειες οι οποίες είναι ανάλογες των στροφών του κινητήρα

Σχήμα 4.114 εξηγήσεις και συμπεράσματα:

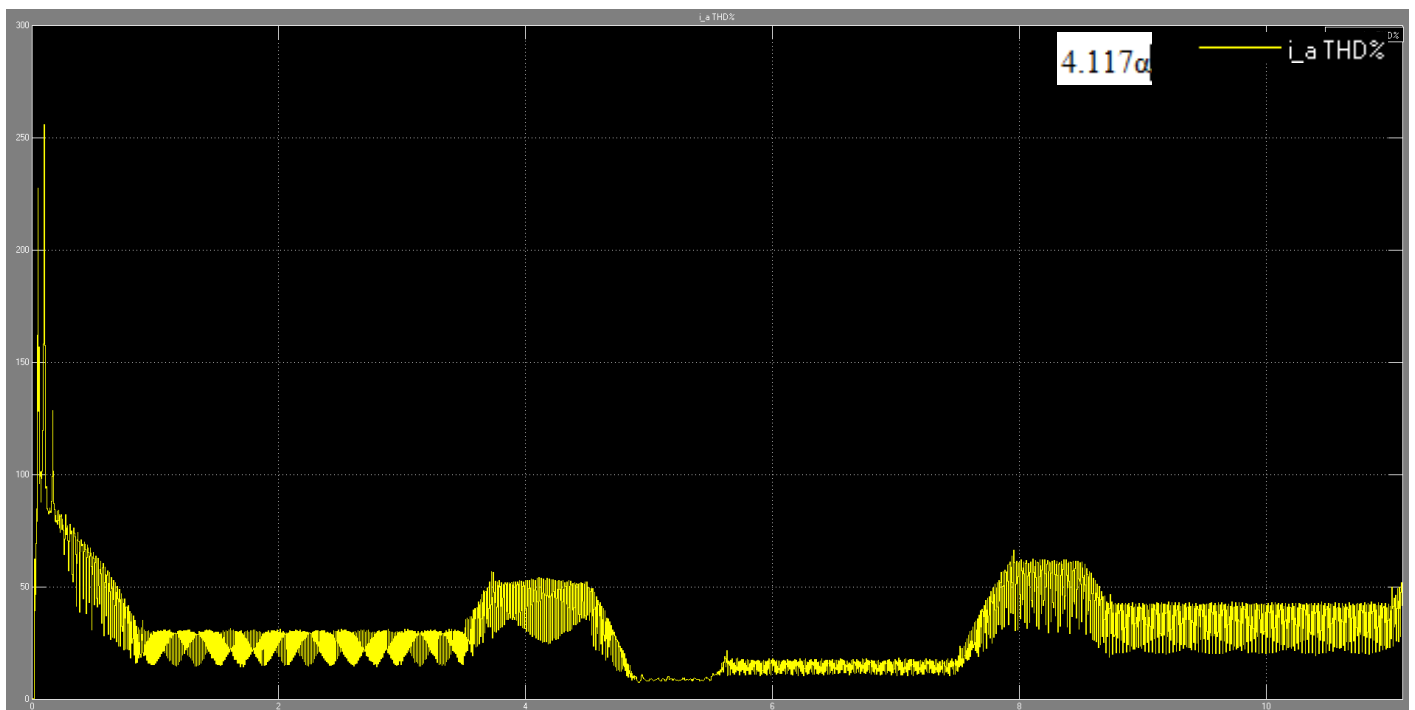
Η ταχύτητα που αποδίδεται από το σύστημα του μονάδας ελέγχου-κινητήρα έχει απόλυτη ταύτιση με την ταχύτητα αναφοράς με ελάχιστο θόρυβο. Η ρύθμιση της ταχύτητας επέτρεψε να μειωθούν οι απώλειες τριβής αναλόγως με την ταχύτητα και να οδηγήσουν σε βελτιωμένη διάρκεια ζωής στον μηχανολογικό εξοπλισμό στον ίδιο τύπο κινητήρα. Ο θόρυβος δείχνει την ύπαρξη αρμονικών και ελάχιστου πλάτους ταλαντώσεων. Συγκριτικά όμως με την περίπτωση του κλιμακωτού ελέγχου ο θόρυβος είναι ανύπαρκτος.

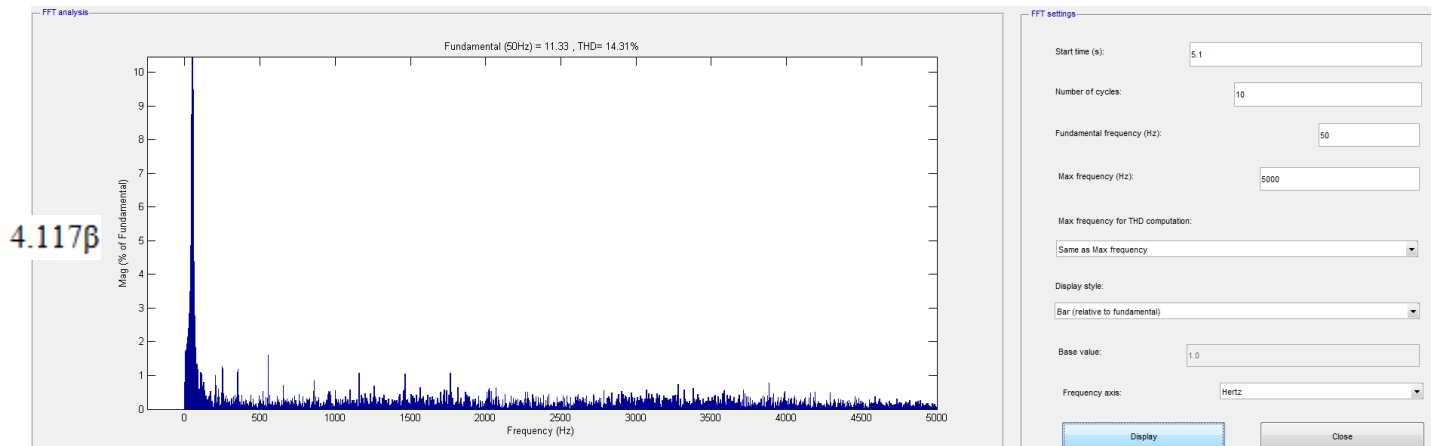


Σχήμα 4.115 Γράφημα για τις αρμονικές τάσης, σε σχέση με τον χρόνο, που παρουσιάζονται ενώ λειτουργεί το σύστημα μονάδας ελέγχου D.T.C.- κινητήρα.



Σχήμα 4.116 Γραφήματα που αφορούν 4.116α) τις αρμονικές ρεύματος, σε σχέση με τον χρόνο, που παρουσιάζονται και 4.116β) η FFT ανάλυση στο πεδίο της συχνότητας για το ρεύμα, στην γραμμή τροφοδοσίας, ενώ λειτουργεί το σύστημα μονάδας ελέγχου D.T.C.- κινητήρα.





Σχήμα 4.117 Γραφήματα που αφορούν 4.116α) τις αρμονικές ρεύματος που παρουσιάζονται στο τριφασικό τυλίγμα του στάτη, σε σχέση με τον χρόνο και 4.116β) η FFT ανάλυση στο πεδίο της συχνότητας για το ρεύμα, ενώ λειτουργεί το σύστημα μονάδας ελέγχου D.T.C. - κινητήρα.

Σχήμα 4.115, 4.116, 4.117 παρατηρήσεις:

Το σύστημα μονάδας ελέγχου-κινητήρα δημιουργεί φαινόμενα αρμονικών, λόγω των ημιαγωγών της μονάδας ελέγχου οι οποίοι άγουν διακοπτόμενα διαμορφώνοντας συνεχώς την επιθυμητή ισχύ τροφοδοτώντας τον κινητήρα. Στο σχήμα 4.115 δίνεται το γράφημα με τις αρμονικές τάσης σε σχέση με τον χρόνο, στην τροφοδοσία. Στο σχήμα 4.116α δίνεται το γράφημα με τις αρμονικές έντασης σε σχέση με τον χρόνο, στην τροφοδοσία του συστήματος, στο σχήμα 4.116.β δίνεται η ανάλυση FFT με το ποσοστό της παραμόρφωσης κοντά στο ονομαστικό σημείο λειτουργίας για την τροφοδοσία του συστήματος. Στο σχήμα 4.117α δίνεται το γράφημα με τις αρμονικές έντασης σε σχέση με τον χρόνο, στα τυλίγματα του στάτη, στο σχήμα 4.117.β δίνεται η ανάλυση FFT με το ποσοστό της παραμόρφωσης στα τυλίγματα του στάτη στο ίδιο χρονικό σημείο που μετρήθηκε και η παραμόρφωση για την τροφοδοσία του συστήματος .

Σχήμα 4.115, 4.116 εξηγήσεις και συμπεράσματα:

Η τάση εξόδου έχει προσεγγιστικά ημιτονοειδή μορφή και εξαρτάται από τα κατασκευαστικά στοιχεία της μονάδας ελέγχου και της συχνότητας στην οποία διαμορφώνουν τα διακοπτικά στοιχεία. Οι αρμονικές αυτές περιορίζονται με τα παθητικά φίλτρα και τις αυτεπαγωγές γραμμής έτσι ώστε να είναι κάτω των επιτρεπτών ορίων παραμόρφωσης τάσης $THD_{max}\% = 5\%$.

Το δείγμα της κυματομορφής που αναλύεται με το FFT tool είναι 10 κύκλοι.

Παρατηρώντας την κυματομορφή η παραμόρφωση της τάσης είναι $<5\%$. Άρα βρίσκεται εντός των ορίων που θέτονται σχετικά.

Η παραμόρφωση της έντασης είναι μεγαλύτερη με ελάχιστη τιμή 8,5% και μέγιστη 95%. Η παραμόρφωση γίνεται μεγαλύτερη κατά την εκκίνηση και στις μεταβατικές αλλαγές της τιμής του φορτίου και όταν ο κινητήρας λειτουργεί με χαμηλότερη φόρτιση. Την ελάχιστη τιμή της παραμόρφωσης την έχει στην χρονική διάρκεια όπου το σύστημα ισορροπεί. Όμως ενώ σε χαμηλότερη φόρτιση του κινητήρα η αρμονική παραμόρφωση είναι μεγαλύτερη το ενεργό ρεύμα των αρμονικών μικραίνει, όπως έχει αναφερθεί, αφού ισχύει:

$$THDi = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I^2 h r_{ms}}}{I_{rms}}$$

Το THD% είναι 10,27% στο ονομαστικό σημείο και οι κυριότερες αρμονικές που εμφανίζονται με ποσοστό παραμόρφωσης είναι: 3,17% στα 250Hz, 6,25% στα 350Hz, 3,3% στα 550Hz, 1,35% στα 650Hz ενώ οι επόμενες αρμονικές είναι πολύ χαμηλού πλάτους. Οι αρμονικές

περιορίστηκαν από την αυτεπαγωγή γραμμής και τα δύο παθητικά διπλοσυντονιζόμενα φίλτρα σε αυτές τις τιμές.

Σχήμα 4.117 εξηγήσεις και συμπεράσματα

Η αρμονική παραμόρφωση του ρεύματος που παρουσιάζεται στον στάτη στην ονομαστική φόρτιση του επαγωγικού κινητήρα έχει τιμή 14,31%. για την χρονική στιγμή όπου το μέτρο του ρεύματος κορυφής είναι 11,33A. Το FFT Analysis tool δείχνει αρμονικό θόρυβο πολύ μικρής όμως ενεργής τιμής ως τα 5kHz όπου μας ενδιαφέρει το δείγμα. Το THD% ς είναι 9,13% στα 55Hz, 4,62% στα 60Hz, 2,15% στα 65Hz, 1,04% στα 70Hz ενώ οι επόμενες αρμονικές είναι πολύ χαμηλού πλάτους.

Πίνακας 17 Απαιτήσεις της εφαρμογής βάσει του πίνακα 5 και οι τιμές που προκύπτουν από την προσομοίωση της χρήσης μονάδας ελέγχου D.T.C – κινητήρα

Επιδόσεις συστήματος μονάδας ελέγχου με κινητήρα IE4							
Τιμές προσομοίωσης							
Ταχύτητα (rpm)	Ταχύτητα (rad/sec)	Ισχύς στην έξοδο (W)	Ισχύς στην έξοδο %	Ροπή στον άξονα (Nm)	Ροπή στον άξονα %	Συντελεστής ισχύος	Απόδοση %
1455	152,36	4037,54	100	26.5	100,37	0.99	84,1
1309,5	137,13	3633,95	90,84	26,5	100,37	0,99	84,1
1164	121,89	3230	80,75	26,5	100,37	0,99	83,2
1018,5	106,657	2826,4	70,66	26,5	100,37	0,99	81,4
873	91,42	2422,6	60,56	26,5	100,37	0,99	78
727,5	76,18	2018,7	50.46	26,5	100,37	0,99	75

4.5.3.1 Εξοικονόμηση ενέργειας και κόστους στην περίπτωση χρήσης μονάδας ελέγχου στροφών Direct Torque Control για τον κοχλιωτό συμπιεστή.

Για την εύρεση της εξοικονόμησης ενέργειας και κόστους χρησιμοποιήθηκαν τα στοιχεία του πίνακα 17 για να υπολογιστεί για κάθε ισχύ εξόδου η ετήσια κατανάλωση του συστήματος μονάδας ελέγχου-κινητήρα. Στους υπολογισμούς μόνο στην γραμμή για P_L:100% χρησιμοποιείται η ισχύς οριακά μεγαλύτερη που όμως προκύπτει από την προσομοίωση.

$$P_L 100\%, W_L = 1 * \frac{4037,54 W}{0,841} * 8760h * 0,1 = 4205,57 KWh$$

$$P_L 90,84\%, W_L = 0,9084 * \frac{4000 W}{0,841} * 8760h * 0,2 = 7569,64 KWh$$

$$P_L 80,75\%, W_L = 0,8075 * \frac{4000 W}{0,832} * 8760h * 0,25 = 8502,04 KWh$$

$$P_L 70,66\%, W_L = 0,7066 * \frac{4000 W}{0,814} * 8760h * 0,25 = 7604,2 KWh$$

$$P_L 60,56\%, \quad W_L = 0,6056 * \frac{4000 \text{ W}}{0,78} * 8760\text{h} * 0,10 = 2720,54 \text{ KWh}$$

$$P_L 50,46\%, \quad W_L = 0,5046 * \frac{4000 \text{ W}}{0,75} * 8760\text{h} * 0,10 = 2357,5 \text{ KWh}$$

$$\text{Ετήσιο } W_L = 4205,57 + 7569,64 + 8502,04 + 7604,2 + 2720,54 + 2357,5 = 32959,49 \text{ KWh}$$

Ετήσιο W_L για την περίπτωση του κινητήρα ενεργειακής κλάσης IE4,

$$W_L = 1 * \frac{4000 \text{ W}}{0,912} * 8760\text{h} * 1 = 38421,05 \text{ KWh}$$

$$\frac{32959,49 \text{ KWh}}{38421,05 \text{ KWh}} = 0,8578 \text{ της ετήσιας κατανάλωσης σημαίνει } 14,22\% \text{ εξοικονόμηση ενέργειας}$$

Η ετήσια εξοικονόμηση για κόστος ενέργειας 0,10€/KWh, θα είναι:

$$(38421,05 \text{ KWh} - 32959,49 \text{ KWh}) * 0,10\text{€/KWh} = 546,15\text{€}$$

5 Παρατηρήσεις και τελικά συμπεράσματα

Στην παρούσα εργασία αρχικά έγινε βιβλιογραφική αναφορά στα συστήματα κίνησης, για τα οποία έγινε προσπάθεια να διαμορφωθεί μια επαρκής περιγραφή τους. Έγινε αναφορά τόσο σε κατασκευαστικά στοιχεία, όσο και σε θέματα λειτουργίας όσον αφορά τους ασύγχρονους κινητήρες. Αναφέρθηκαν μέθοδοι αναβάθμισης του ασύγχρονου κινητήρα ως προϊόν και σε δεύτερο χρόνο ποιες είναι οι παράμετροι κατά την λειτουργία του που τον επηρεάζουν καθώς και ποιες από αυτές αποτελούν κριτήριο αρχικής του επιλογής ή αναβάθμισης σε μια εφαρμογή. Η δυναμική ανάλυση ξεκαθάρισε τον τρόπο που μπορεί να ελεγχθεί ένας κινητήρας, με βάση τα ηλεκτρονικά ισχύος και τον αυτόματο έλεγχο, σχηματίζοντας το ενιαίο σύνολο των εφαρμογών κίνησης. Ακόμη παρουσιάστηκαν μέθοδοι οδήγησης και κυκλώματα τα οποία θα μπορούσαν να αναβαθμίσουν την λειτουργική του συμπεριφορά.

Κατόπιν χρησιμοποιώντας τα σενάρια με τους τέσσερις χαρακτηριστικούς τύπους φορτίου, εξετάστηκαν μέσω προσομοιώσεων οι δυνατότητες αναβάθμισης εξοπλισμού με παλιό κινητήρα χαμηλής ενεργειακής κατηγορίας IE1, με άλλον ανώτερης κατηγορίας IE4 ως το πρώτο βασικό βήμα αναβάθμισης.

Η αναβάθμιση κρίθηκε κατάλληλη σε κάθε περίπτωση φορτίου προσφέροντας 10,13% εξοικονόμηση ενέργειας, στο σενάριο για περιοδική λειτουργία S1, για το χρονικό διάστημα ενός έτους, εξοικονομώντας κόστος λειτουργίας 306,5€. Κατόπιν εξετάστηκε το σενάριο για περιοδική λειτουργία S3, για το χρονικό διάστημα ενός έτους, προσφέροντας το ίδιο ποσοστό εξοικονόμησης ενέργειας, εξοικονομώντας κόστος λειτουργίας 76,6€.

Ακόμη μέσα από τα συγκριτικά γραφήματα για τις μηχανικές απώλειες, φάνηκε η ανωτερότητα και η αξιοπιστία στο μηχανολογικό σύνολο που μπορεί να παρουσιάσει ένας ασύγχρονος κινητήρας οποίος μπορεί να διαθέτει έδρανα κύλισης και ανεμιστήρα ψύξης σύγχρονου σχεδιασμού. Η ανώτερη μηχανολογική σχεδίαση, δεν προσφέρει πολλά στην εξοικονόμηση ενέργειας και στο κόστος λειτουργίας άμεσα, αλλά εγγυάται την καλή λειτουργία του εξοπλισμού, για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα, βελτιώνοντας τον κύκλο ζωής του προϊόντος. Άρα υποστηρίζει με αυτό το πλεονέκτημα την επένδυση της αγοράς του.

Ασύγχρονος κινητήρας ενεργειακής απόδοσης IE1 δεν διατίθεται στην Ευρωπαϊκή αγορά πλέον ως προϊόν και κατ' επέκταση δεν υπάρχει τιμή κόστους αγοράς για αυτόν. Η μοναδική επιλογή συνεχούς χρήσης του είναι η επισκευή του. Η τιμή κόστους επισκευής ενδεικτικά στην Ε.Ε. είναι κατά μέσο όρο στο 33% της τιμής κόστους αγοράς ενός κινητήρα IE4 [4]. Η ενδεικτική τιμή κόστους αγοράς ενός ασύγχρονου κινητήρα 4KW ενεργειακής απόδοσης IE4 ως προϊόν είναι τα 800€.

Ως ενδεικτικό οικονομικό κριτήριο χρησιμοποιούμε την μέθοδο της απλής αποπληρωμής (Simple Payback Period), όπου ο χρόνος αποπληρωμής για την κάθε περίπτωση της χρήσης του με βάση την λειτουργία του, όπως αναλύθηκαν στην παράγραφο 4.2.6 είναι:

- $SPP = [800€ - (800 \cdot 0,33)] / 306,5€ = 1,75$ έτη (<2 έτη), περιοδική λειτουργία S1
- $SPP = [800€ - (800 \cdot 0,33)] / 76,6€ = 7$ έτη (>2 έτη), περιοδική λειτουργία S3

Συμπερασματικά οι παλαιού τύπου κινητήρες με περισσότερο εντατική χρήση είναι και οι πιο συμφέρουσες περιπτώσεις αντικατάστασης.

Το δεύτερο βήμα προς εξέταση ήταν να αντισταθμιστεί αφ' ενός το μειονέκτημα του μεγαλύτερου ρεύματος αιχμής και εκκίνησης που παρουσίαζε ο κινητήρας IE4 και αφετέρου να

κριθεί, αν θα μπορούσε να εξυπηρετήσει τον κάθε τύπο φορτίου της κάθε εφαρμογής, καλύτερα με έλεγχο εκκίνησης και έλεγχο των απαιτήσεων της ταχύτητας.

Για την αξιολόγηση της χρήσης μονάδας ελέγχου στροφών, σημαντικό ήταν να κριθούν οι ανάγκες του φορτίου που εξυπηρετεί ο συζευγμένος με αυτό κινητήρας. Κρίθηκε ότι δεν θα ήταν χρήσιμο αφού δεν θα υπήρχε εξοικονόμηση ενέργειας και κόστους λειτουργίας, να χρησιμοποιηθεί μονάδα ελέγχου στροφών στις παρακάτω περιπτώσεις:

- Όταν η ισχύς του φορτίου του κινητήρα είναι σταθερή και αμετάβλητη
- Όταν ο κινητήρας πρέπει να λειτουργεί συνεχώς σε υψηλή ταχύτητα λόγω των αναγκών της διαδικασίας που εκτελεί

Για τους παραπάνω λόγους κρίθηκε ακατάλληλη η χρήση μονάδας ελέγχου για την περίπτωση του φορτίου σταθερής ισχύος όπου η ροπή είναι αντιστρόφως ανάλογη της ταχύτητας, όπως χαρακτηριστικά είναι ο μηχανισμός περιστροφικής κοπής. Δεν υπάρχει κέρδος σε ενέργεια και κόστος λειτουργίας όταν η ισχύς του φορτίου είναι αμετάβλητη στο ονομαστικό της σημείο στο 100% του χρόνου.

Στις περιπτώσεις μεταβλητής και σταθερής ροπής, στην προσομοίωση δοκιμάστηκαν τρεις διαφορετικές μονάδες ελέγχου στροφών, σε σχέση τον τρόπο ελέγχου της οδήγησης της ταχύτητας και της ροπής. Σε κάθε περίπτωση αξιολογήθηκε εκτός από την εξοικονόμηση ενέργειας και το κόστος λειτουργίας, η ποιότητα ισχύος και η καλή δυναμική απόκριση στον έλεγχο του φορτίου. Ακόμη αξιολογήθηκε η απόκλιση από τις τιμές αναφοράς για το κάθε σύστημα και οι παραγόμενες ταλαντώσεις και ο θόρυβος τα οποία σαφώς επηρεάζουν αρνητικά ένα κινητήριο σύστημα.

Τα διαφορετικά σενάρια με την χρήση των φορτίων ήταν εφαρμογές που έχουν πραγματική βάση και επιλέχθηκε η δυσμενέστερη περίπτωση συνεχής λειτουργίας που μπορεί να αντιμετωπιστεί, με διάρκεια έτους. Τα συμπεράσματα βγήκαν λαμβάνοντας υπ'όψιν τα χαρακτηριστικά λειτουργίας της κάθε εφαρμογής ελέγχου για κάθε περίπτωση φορτίου.

Παρακάτω δίνονται αντιπροσωπευτικοί πίνακες, σε μια συνοπτική παράθεση των βασικών αποτελεσμάτων, των σεναρίων προσομοίωσης και των υπολογισμών της ενέργειας και του κόστους λειτουργίας οι οποίοι έγιναν.

Πίνακας 18 Η εξοικονόμηση της ενέργειας επί τις % για κάθε τύπο μονάδας ελέγχου και κάθε τύπο φορτίου

Μονάδα ελέγχου	Τύπος εφαρμογής		
	Φυγοκεντρικός ανεμιστήρας	Αντλία πολτού	Συμπιεστής κοχλιωτός
Scalar Control SV-PWM	42,85%	29,45%	-----
Field-Oriented Control	42,83%	31,57%	13,20%
Direct Torque Control	44,54%	32,25%	14,22%

Πίνακας 19 Η εξοικονόμηση του κόστους λειτουργίας σε € για κάθε τύπο μονάδας ελέγχου και κάθε τύπο φορτίου

Μονάδα ελέγχου	Τύπος εφαρμογής		
	Φυγοκεντρικός ανεμιστήρας	Αντλία πολτού	Συμπιεστής κοχλιωτός
Scalar Control SV-PWM	1646,2€	1131,33€	-----
Field Oriented Control	1645,4€	1212,9€	507€
Direct Torque Control	1711€	1238,9€	546,15€

Πίνακας 20 Η αρμονική παραμόρφωση της έντασης επί τις % στον στάτη του κινητήρα για κάθε τύπο μονάδας ελέγχου και κάθε τύπο φορτίου

Μονάδα ελέγχου	Τύπος εφαρμογής		
	Φυγοκεντρικός ανεμιστήρας	Αντλία πολτού	Συμπιεστής κοχλιωτός
Scalar Control SV-PWM	20,08%	17,65%	-----
Field Oriented Control	8,95%	7,76%	8,89%
Direct Torque Control	14,23%	15,64%	14,31%

Πίνακας 21 Η αρμονική παραμόρφωση της έντασης επί τις % στην τροφοδοσία, επηρεάζοντας την ποιότητα ισχύος για κάθε τύπο μονάδας ελέγχου και κάθε τύπο φορτίου

Μονάδα ελέγχου	Τύπος εφαρμογής		
	Φυγοκεντρικός ανεμιστήρας	Αντλία πολτού	Συμπιεστής κοχλιωτός
Scalar Control SV-PWM	12,42%	12,21%	-----
Field Oriented Control	11,12%	9,88%	8,91%
Direct Torque Control	10,61%	9,76%	10,27%

Η μονάδα ελέγχου με οδήγηση F.O.C. και η μονάδα ελέγχου με οδήγηση D.T.C. είναι συνολικά ανώτερες, στον τομέα της εξοικονόμησης ενέργειας και του κόστους λειτουργίας όπως φάνηκε. Όχι όμως σε τέτοιο βαθμό, ώστε τα παραπάνω να αποτελούν βασικό κριτήριο για την επιλογή τους έναντι του κλιμακωτού ελέγχου. Στις γραφικές παραστάσεις του προηγούμενου κεφαλαίου φάνηκε ότι οι δύο τύποι ελέγχου, F.O.C. και D.T.C. είναι ακριβείς ως προς την ταχύτητα αναφοράς που πετυχαίνουν, τροφοδοτούν με υψηλή ροπή όταν χρειαστεί τον ασύγχρονο κινητήρα από μηδενική ταχύτητα, ενώ αν και προσφέρουν μια θορυβώδη ροπή παρουσιάζουν περιορισμένη ταλάντωση στον έλεγχο της ταχύτητας. Είναι μονάδες ελέγχου υψηλών δυνατοτήτων, οι οποίες εν αντιθέσει με τον κλιμακωτό έλεγχο ο οποίος δείχθηκε στην περίπτωση της μονάδας

Scalar Control SV-PWM, έχουν την δυνατότητα να οδηγήσουν έναν ασύγχρονο κινητήρα και με αναφορά της ροπής ως είσοδο, εκτός από την κλασική χρήση με αναφορά της ταχύτητας. Η σταθερότητα που προσφέρουν οι μονάδες με οδήγηση F.O.C. και D.T.C δείχνουν πολύ αξιόπιστη συμπεριφορά και θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν σε απαιτητικές εφαρμογές.

Η μονάδα Scalar Control SV-PWM με τον κλιμακωτό έλεγχο στερείται των δυνατοτήτων των άλλων μονάδων, αλλά παραμένει μια αξιοπρεπής χαμηλού κόστους μονάδα η οποία με την κατάλληλη παραμετροποίηση και διαστασιολόγηση μπορεί να προσφέρει ουσιαστικά αποτελέσματα. Σε περιπτώσεις όπου ο ακριβής έλεγχος και η λειτουργία σε πολύ χαμηλές στροφές δεν αποτελούν προϋπόθεση και σε περιπτώσεις φορτίων όπου δεν υπάρχει απαίτηση υψηλής ροπής εκκίνησης, όπως σε φυγοκεντρικούς ανεμιστήρες και φυγοκεντρικές αντλίες, τότε μια μονάδα με κλιμακωτό έλεγχο αποτελεί λύση. Ακόμη προσφέρει μια μοναδική δυνατότητα λόγω του ελέγχου V/f που καμία άλλη μονάδα ελέγχου δεν μπορεί να προσφέρει. Αυτή η δυνατότητα είναι ο ταυτόχρονος έλεγχος παραπάνω του ενός κινητήρα που σε κάποιες εφαρμογές μπορεί να φανεί χρήσιμο. Στον τομέα της κατανάλωσης ενέργειας, λόγω του απλού ελέγχου V/f, το σύστημα πέτυχε την χαμηλότερη κατανάλωση ισχύος και με καλό βαθμό απόδοσης του συστήματος σε ταχύτητες αναφοράς κοντά στην ονομαστική τιμή του ασύγχρονου κινητήρα.

Ο άμεσος έλεγχος D.T.C. πέτυχε την μέγιστη εξοικονόμηση ενέργειας και κόστους λειτουργίας συνολικά, έστω κατά ελάχιστο, έχει όμως μειονέκτημα το αρμονικό περιεχόμενο που διοχετεύει προς το δίκτυο και προς τον κινητήρα. Ο πολυπλοκότερος έλεγχος F.O.C δείχνει πιο ολοκληρωμένο σύνολο, σε σχέση με τα ζητούμενα της εργασίας, όπως αποδείχτηκε μέσω των προσομοιώσεων, όμως η μονάδα με αυτόν τον έλεγχο ήταν ελάχιστα πιο ενεργοβόρα σε σύγκριση με τον άμεσο έλεγχο.

Η επιλογή της μονάδας ελέγχου στροφών με τον κατάλληλο τύπο οδήγησης άρα εξαρτάται από τις ανάγκες της εφαρμογής. Ορισμένες εφαρμογές είναι απλές, ενώ άλλες χρειάζονται ακριβή και δυναμικό έλεγχο του κινητήρα, με συνεχή αλλαγές στην ταχύτητα αναφοράς από χαμηλές στροφές. Ακόμη σε απαιτητικές εφαρμογές οφείλουν να υπάρχουν οι ελάχιστες δυνατές ταλαντώσεις.

Ως προς την ποιότητα της ισχύος, είναι σημαντικό η μονάδα ελέγχου στροφών να παράγει την ελάχιστη και εντός των επιτρεπτών ορίων αρμονική παραμόρφωση στην τάση και στο ρεύμα. Είναι δεδομένο ότι η χρήση μονάδων ελέγχου στροφών, σημαίνει κατάλληλη διαστασιολόγηση αυτεπαγωγών γραμμής τροφοδοσίας και φίλτρων για τον περιορισμό των αρμονικών. Αυτό σημαίνει πρόσθετο κόστος για το σύστημα κίνησης όμως είναι απαραίτητο όχι μόνο λόγω των κανονισμών αλλά ώστε να διασφαλιστεί η σωστή λειτουργία του, οπουδήποτε εγκαθίσταται χωρίς να επιβαρύνει την ποιότητα ισχύος της εγκατάστασης.

Η ελάχιστη τιμή κόστους αγοράς, μιας μονάδας ελέγχου στροφών ώστε να οδηγήσει με ασφάλεια έναν ασύγχρονο κινητήρα 4Kw είναι από 600€ και μπορεί να φτάσει πολύ υψηλότερα. Η τιμή εξαρτάται από τις δυνατότητες συνδεσιμότητας που παρέχει με τον υπόλοιπο εξοπλισμό μέσω συγκεκριμένων πρωτόκολλων επικοινωνίας, την δυνατότητα συνδεσιμότητας αναλογικών και ψηφιακών εισόδων/εξόδων καθώς και δυνατότητα ελέγχου μέσω αισθητήρων την ασφαλή λειτουργία του κινητήρα. Σε κάθε περίπτωση όπως φαίνεται και από τους παραπάνω πίνακες, το κόστος της επένδυσης αγοράς καλύπτεται σε σύντομο χρονικό διάστημα από τις δυνατότητες εξοικονόμησης των λειτουργικών εξόδων.

Για κάθε μία εφαρμογή που προσομοιώθηκε, όπως αποδείχτηκε, υπάρχουν λύσεις που ενδείκνυνται, όμως δεν υπάρχει μοναδική συνταγή που θα μπορούσε να εφαρμοστεί σε όλες τις περιπτώσεις. Όστε να βρεθεί η κατάλληλη λύση χρειάζεται να είναι να είναι γνωστές στον χρήστη οι σημαντικές παράμετροι του συστήματος, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, βλέποντας κάθε

εφαρμογή ως ένα εκτεταμένο ηλεκτρομηχανολογικό σύστημα, το οποίο έχει επιμέρους εξαρτήματα εξοπλισμού τα οποία αλληλοεπιδρούν δυναμικά, για κάθε μια συγκεκριμένη λειτουργία και χρονική διάρκεια.

5.1 Προτάσεις για περαιτέρω διερεύνηση

Σε συνέχεια αυτής της εργασίας θα μπορούσαν να διερευνηθούν πιο σχολαστικά τα παρακάτω ζητήματα.

- Χρήση των ασύγχρονων κινητήρων με οδήγηση, σε πεδία όπου ως τώρα οι περισσότερες εφαρμογές χρησιμοποιούν άλλου τύπου κινητήρες π.χ. κινητήρες συνεχούς ρεύματος. Εύρεση προϋποθέσεων, ώστε να υπάρχει αυτή η επιλογή.
- Διερεύνηση σε περισσότερους τύπους φορτίων, ή σε υποκατηγορίες των ήδη αναφερθέντων που όμως χρήζουν προσοχής.
- Προϋποθέσεις, αν υπάρχουν, ώστε μια μονάδα ελέγχου στροφών να μπορεί να αντικαταστήσει μηχανολογικό εξοπλισμό και σε ποιες περιπτώσεις δεν ενδείκνυται.

6 Βιβλιογραφία

- [1] B. R. Tandel και S. D. Chinmay, «Energy Conservation by Energy Efficient Motor,» *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, Feb 2019.
- [2] U. E. – G. E. F. |. U. f. E. (U4E), *Energy-Efficient Electric Motors And Motor Systems*, Paris, France, 2017.
- [3] J. Fong, F. J. T. E. Ferreira, A. M. Silva και A. T. de Almeida, «IEC61800-9 System Standards as a Tool to Boost the Efficiency of Electric Motor Driven Systems Worldwide» *MDPI - Publisher of Open Access Journals*, 20 May 2020.
- [4] F. J. T. E. Ferreira, V. P. B. Aguiar, A. M. Silva και R. S. T. Pontes, «Overview of Retrofitting Options in Induction Motors to Improve their Efficiency and Reliability,» *IEEE, Institute of Electrical and Electronics Engineers*, 2018 .
- [5] K. Lee, P. Zhai, T. Ruchti, B. Haberkorn και J. Zhou, «Optimal Energy Efficiency Evaluation in Induction Machines Driven by Adjustable Speed Drives under EN 50598-2 and IEC 61800-9-1 Standards,» *Institute of Electrical and Electronics Engineers*, 2018 .
- [6] B. Leprettre, K. Anderson, N. Bidstrup, N. Hanigovszki, P. Holm, M. Koenen, M. Patra, T. Schumann και B. Weis, «Increasing the Energy Savings of Motor Applications The Extended Product Approach,» January 2019.
- [7] International Standard, «Rotating Electrical Machines –Part 30-1: Efficiency Classes Of Line Operated AC Motors (IE code),» σε *International Electrotechnical Commission*, 2014.
- [8] beeindia.gov.in, «Electric Motors,» Bureau of Energy Efficiency.
- [9] G. SINGH, N. K. SHARMA, P. TIWARI, P. MISHRA και S. KUMAR, «Energy Efficient Industrial Motors,» *International Journal of Engineering Science and Technology*, 2010.
- [10] American Bureau of Shipping, «Control Of Harmonics In Electrical Power Systems,» Houston, USA, MAY 2006.
- [11] «Basics of AC Drives A quick-STEP Online Course,» Siemens Industry, Inc., 2016.
- [12] J. Pyrhönen, V. Hrabovcová και S. R. Semken, *Electrical Machine Drives Control An Introduction*, Chichester: John Wiley & Sons Ltd, 2016.
- [13] A. T. de Almeida και F. J. T. E. Ferreira, «Beyond Induction Motors—Technology Trends to Move Up Efficiency,» *Institute of Electrical and Electronics Engineers*, 2014.
- [14] W. Tong, *Mechanical Design of Electric Motors*, New York: Taylor & Francis Group, LLC, 2014.
- [15] K. Yamazaki, M. Tanida και S. Hitoshi, «Calculation of Iron Loss in Rotating Machines by Direct Consideration of Eddy Currents in Electrical Steel Sheets,» *Electrical Engineering in Japan, Wiley*

Periodicals, Inc., 2011.

- [16] M. Barnes, *Practical Variable Speed Drives and Power Electronics*, Oxford: IDC Technologies, 2003.
- [17] K. Dabala, «Analysis of Mechanical Losses in Three-Phase Squirrel-Cage Induction Motors,» *IEEE Xplore*, 2001.
- [18] S. J. Charman, *Ηλεκτρικές Μηχανές AC-DC 3η Έκδοση*, Θεσσαλονίκη: Εκδοσεις Τζιολα, 2003.
- [19] Π. Ντοκοπουλος, *Ηλεκτρικές Εγκαταστάσεις Καταναλωτών*, Θεσσαλονίκη: Εκδόσεις Ζήτη, 2005.
- [20] Π. Β. Μαλατέστας, *Ηλεκτρική Κίνηση*, Θεσσαλονίκη: Εκδοσεις Τζιολα, 2015.
- [21] Α. Μορώνης, «*Ηλεκτρονικά Ισχύος - Επίδραση Αρμονικών*», 2016.
- [22] D. SUN, «*Clarke's and Park's Transformations*,» College of Electrical Engineering, Zhe Jiang University, 2008.
- [23] «*Clarke & Park Transforms on the TMS320C2xx*,» Texas Instruments Incorporated, 1997.
- [24] M. H. Rashid, *Power Electronics Handbook Devices, Circuits, And Applications*, Burlington: Elsevier Inc., 2011.
- [25] «*A Guide to Braking Resistor Calculation*,» Control Panel Products Ltd, 2016. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.controlpanelproducts.co.uk>
- [26] S. N. Manias, «*Power Electronics and Motor Drive Systems*,» Elsevier Inc, 2016.
- [27] P. Novak, «*EC&M The Basics of Variable-Frequency Drives*,» MAY 2009. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.ecmweb.com>.
- [28] E. P. Wiechmann και R. Burgos, «*On the Efficiency of Voltage Source and Current Source Inverters for High-Power Drives*,» *IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS*, 2008.
- [29] S. Petersen, «*Variable Frequency Drive Control Methods Setting VFDs for the Correct Control Method Can Make or Break an Application*,» Yaskawa America, Inc., 2014.
- [30] B. M. Wilamowski και d. J. Irwin, *Power Electronics And Motor Drives*, New York: Taylor and Francis Group, LLC, 2011.
- [31] T. R. Kuphaldt, «*Control Automation_Lessons In Industrial Instrumentation_AC Motor Braking*,» 2008-2019. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://control.com/textbook/variable-speed-motor-controls/ac-motor-braking/>
- [32] J. W. Finch και D. Giaouris, «*Controlled AC Electrical Drives*,» *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2008.
- [33] M. Vujacic, M. Hammami, M. Srndovic και G. Grandi, «*Analysis of dc-Link Voltage Switching Ripple in Three-Phase PWM Inverters*,» *MPDI Journal Energies*, 2018.

- [34] B. Drury, *The Control Techniques Drives and Controls Handbook*, London: The Institution of Engineering and Technology, 2009.
- [35] J. C. Travieso-Torres, M. Vilaragut-Llanes, Á. Costa-Montiel, M. A. Duarte-Mermoud, N. Aguila-Camacho, C. Contreras-Jara και A. Álvarez-Gracia, «New Adaptive High Starting Torque Scalar Control Scheme for Induction Motors Based on Passivity,» *MPDI Journal Energies*, 2020.
- [36] R. Rodriguez-Ponce και F. G. Mota-Muñoz, «Microcontroller-Based Direct Torque Control Servodrive,» *Hindawi Journal of Robotics*, 2020.
- [37] A. A. Kadum, «New Adaptive Hysteresis Band Width Control For Direct Torque Control Of Induction Machine Drives,» *International Journal of Power Electronics and Drive System (IJPEDS)*, 2020.
- [38] «ABB DTC A Motor Control Technique For All Seasons,» [Ηλεκτρονικό]. Available: library.e.abb.com.

Στην εργασία έγινε χρήση του λογισμικού MATLAB.