



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΛΟΠΟΝΝΗΣΟΥ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΚΙΝΗΤΗΡΙΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ
ΑΠΟΤΕΛΟΥΜΕΝΟ ΑΠΟ ΑΣΥΓΧΡΟΝΟ ΚΙΝΗΤΗΡΑ ΚΑΙ
ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΕΑ ΣΤΗ ΜΕΓΙΣΤΗ ΑΠΟΔΟΣΗ ΜΕΣΩ ΑΥΤΟΜΑΤΟΥ
ΕΛΕΓΧΟΥ**

του φοιτητή:

Μπόλμπαση Ιωάννη

Αριθμός μητρώου: 7765

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: Κωνσταντίνος Γ. Γεωργάκας, Επίκουρος Καθηγητής Πανεπιστημίου
Πελοποννήσου

ΠΑΤΡΑ-2023

Υπεύθυνη Δήλωση Φοιτητή

Βεβαιώνω ότι είμαι συγγραφέας αυτής της εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης έχω αναφέρει τις όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδιών ή λέξεων, είτε αυτές αναφέρονται ακριβώς είτε παραφρασμένες. Επίσης βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία προετοιμάστηκε από εμένα προσωπικά ειδικά για τη συγκεκριμένη εργασία.

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας από το Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Πανεπιστημίου Πελοποννήσου δεν υποδηλώνει απαραίτητως και αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα εκ μέρους του Τμήματος.

Η παρούσα εργασία αποτελεί πνευματική ιδιοκτησία του φοιτητή **Μπόλμπαση Ιωάννη** που την εκπόνησε. Στο πλαίσιο της πολιτικής ανοικτής πρόσβασης ο συγγραφέας/δημιουργός εκχωρεί στο Πανεπιστήμιο Πελοποννήσου, μη αποκλειστική άδεια χρήσης του δικαιώματος αναπαραγωγής, προσαρμογής, δημόσιου δανεισμού, παρουσίασης στο κοινό και ψηφιακής διάχυσής τους διεθνώς, σε ηλεκτρονική μορφή και σε οποιοδήποτε μέσο, για διδακτικούς και ερευνητικούς σκοπούς, άνευ ανταλλάγματος και για όλο το χρόνο διάρκειας των δικαιωμάτων πνευματικής ιδιοκτησίας. Η ανοικτή πρόσβαση στο πλήρες κείμενο για μελέτη και ανάγνωση δεν σημαίνει καθ' οιονδήποτε τρόπο παραχώρηση δικαιωμάτων διανοητικής ιδιοκτησίας του συγγραφέα/δημιουργού ούτε επιτρέπει την αναπαραγωγή, αναδημοσίευση, αντιγραφή, αποθήκευση, πώληση, εμπορική χρήση, μετάδοση, διανομή, έκδοση, εκτέλεση, «μεταφόρτωση» (downloading), «ανάρτηση» (uploading), μετάφραση, τροποποίηση με οποιονδήποτε τρόπο, τμηματικά ή περιληπτικά της εργασίας, χωρίς τηρητή προηγούμενη έγγραφη συναίνεση του συγγραφέα/δημιουργού. Ο συγγραφέας/δημιουργός διατηρεί το σύνολο των ηθικών και περιουσιακών του δικαιωμάτων.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Στο σημείο αυτό θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή κ.Γεωργάκα Κωνσταντίνο για την αμέριστη βοήθειά του αλλά και την καθοδήγησή του, σε κάθε πρόβλημα που αντιμετώπισα για την υλοποίηση αυτής της εργασίας.

Επίσης τις θερμές ευχαριστίες μου οφείλω στην οικογένειά μου για τη συνεχή βοήθεια, ενθάρρυνση και υποστήριξη που μου προσέφεραν σε κάθε μου προσπάθεια.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία θα μελετηθεί ένα κινητήριο σύστημα αποτελούμενο από ανορθωτή, αντιστροφέα και τριφασικό ασύγχρονο κινητήρα βραχυκυκλωμένου δρομέα, με σκοπό την λειτουργία του συστήματος αυτού στη μέγιστη απόδοση μέσω αυτόματου ελέγχου. Η μελέτη αυτή θα υλοποιηθεί μέσω εξομοίωσης με την χρήση του προγράμματος Matlab/Simulink, αλλά και υπό κανονικές συνθήκες, στον χώρο του εργαστηρίου.

ABSTRACT

In this thesis, a drive system consisting of a rectifier, an inverter and a squirrel cage three phase induction motor will be studied, with the aim of operating this system at maximum efficiency through automatic control. This study will be implemented through simulation using the Mathlab/Simulink program, but also under normal conditions in the laboratory.

ΣΥΝΤΟΜΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Στις μέρες μας, με την ραγδαία εξέλιξη της τεχνολογίας, οι αντιστροφείς διαδραματίζουν κύριο ρόλο στην χρησιμοποίηση της ενέργειας. Πολλές και διάφορες εφαρμογές χρησιμοποιούν αντιστροφέα (inverter). Είναι πολύ σημαντικό όμως, να λειτουργούν όσο πιο αποδοτικά γίνεται, δηλαδή στο βέλτιστο σημείο απόδοσης, εξοικονομώντας ενέργεια και αποφεύγοντας κάθε είδους ανωμαλία στο εκάστοτε σύστημα. Αυτό είναι και το βασικό θέμα της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Δηλαδή, για διάφορες συχνότητες λειτουργίας, θα αναζητηθεί το βέλτιστο σημείο απόδοσης.

Πιο συγκεκριμένα, η διπλωματική εργασία αποτελείται από τέσσερα κεφάλαια.

Στο πρώτο κεφάλαιο, εξηγούνται κάποιες σημαντικές εισαγωγικές έννοιες στα ηλεκτρονικά ισχύος, τους μετατροπείς ηλεκτρικής ενέργειας, τα θυρίστορ, τα τρανζίστορ, το τριφασικό κύκλωμα, την παλμοδότηση sPWM, κ.α.

Στο δεύτερο κεφάλαιο, εξηγούνται οι βασικές διαφορές λειτουργίας μεταξύ απλών κλιματιστικών και όσων περιέχουν inverters, αλλά και βασικές έννοιες για το βαθμό απόδοσης.

Στο τρίτο κεφάλαιο, γίνεται μια εισαγωγή του συστήματος που εξετάζεται, αλλά και ανάλυση των θερμικών απωλειών στο συγκεκριμένο σύστημα.

Στο τέταρτο κεφάλαιο της εργασίας, καταδεικνύεται το βέλτιστο σημείο του συστήματος που μελετήθηκε, για διάφορες τιμές ροπής μέσω του προγράμματος simulink.

Στο πέμπτο και τελευταίο κεφάλαιο καταδεικνύεται το βέλτιστο σημείο του συστήματος που μελετήθηκε, για διάφορες τιμές ροπής υπό κανονικές συνθήκες, με μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν στον χώρο του εργαστηρίου.

Περιεχόμενα

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 ^ο	9
ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ.....	9
1. 1 Ηλεκτρονικά Ισχύος.....	9
1.2 Μετατροπείς ηλεκτρικής ενέργειας.....	9
1.2.1 Ανόρθωση ρεύματος	9
1.2.2 Αντιστροφή ρεύματος	10
1.3 Θυρίστορ και τρανζίστορ	12
1.4 Τριφασικό κύκλωμα εναλλασσόμενου ρεύματος	14
1.5 Παλμοδότηση SPWM	16
1.6 Αρχή λειτουργίας τριφασικών κινητήρων.....	16
1.7 Δομή κλιματιστικού και έλεγχος στροφών	17
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ^ο	18
ΑΠΟΔΟΣΗ ΚΛΙΜΑΤΙΣΤΙΚΩΝ-INVERTER	18
2.1 Εισαγωγή	18
2.2 Ενεργειακή απόδοση κλιματιστικού	18
2.3 Λειτουργία απλών κλιματιστικών και inverters.....	19
2.4 Βαθμός απόδοσης κλιματιστικών	21
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 ^ο	24
ΑΠΩΛΕΙΕΣ ΚΙΝΗΤΗΡΙΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ	24
3.1 Εισαγωγή – Μελετώμενο Σύστημα	24
3.2 Θερμικές απώλειες.....	30
3.2.1 Θερμικές απώλειες σε IGBT	31
3.2.2 Αποτέλεσμα υπολογισμού απωλειών αντίστασης στο μοντέλο μας	32
3.3 Επίδραση των IGBT's στην συχνότητα	34
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 ^ο	41
ΕΥΡΕΣΗ ΤΟΥ ΑΠΟΔΟΤΙΚΟΤΕΡΟΥ ΣΗΜΕΙΟΥ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΜΕΣΩ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ	41
4.1 Εξήγηση της σημασίας λειτουργίας του συστήματος στη βέλτιστη απόδοση	41
4.2 Ενεργός Ισχύς και απόδοση	41
4.3 Ανάλυση της αποδοτικότητας με χρήση Simulink	45
4.3.1 Εισαγωγή – Υποσυστήματα που χρησιμοποιήθηκαν	45
4.4 Εύρεση Βέλτιστων Σημείων.....	45

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 ^ο	54
ΕΥΡΕΣΗ ΤΟΥ ΑΠΟΔΟΤΙΚΟΤΕΡΟΥ ΣΗΜΕΙΟΥ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΥΠΟ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ.....	54
5.1 Εξοπλισμός που χρησιμοποιήσαμε.....	54
5.2 Εύρεση Βέλτιστων Σημείων.....	57
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	64

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο

ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ

1. 1 Ηλεκτρονικά Ισχύος

Τις τελευταίες δεκαετίες έχουν αναπτυχθεί τα ηλεκτρονικά ισχύος, μέσω των οποίων δόθηκε η δυνατότητα να ελεγχθεί η ροή της ηλεκτρικής ισχύος και να μετατραπεί η ηλεκτρική ενέργεια από τη μορφή που έχει σε μία άλλη. Τα ηλεκτρονικά ισχύος αναπτύχθηκαν με ραγδαίο ρυθμό με την εξέλιξη των ημιαγωγών, μέσω της εξέλιξης των επεξεργαστών και των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων, τα οποία χρησιμοποιούνται στα συστήματα ελέγχου των ηλεκτρονικών συστημάτων ισχύος. Στα θετικά των σύγχρονων διατάξεων των ηλεκτρονικών ισχύος συγκαταλέγεται το μικρό βάρος, ο μικρός όγκος, οι ελάχιστες απώλειες, η μεγάλη αξιοπιστία και η υψηλή απόδοση.

1.2 Μετατροπείς ηλεκτρικής ενέργειας

Βάσει της μορφής της ισχύος στην είσοδο και στην έξοδο υπάρχουν τέσσερις βασικές κατηγορίες των μετατροπέων ηλεκτρικής ενέργειας. Αυτές είναι οι κάτωθι:

1) Ανορθωτές / Μετατροπείς AC-DC:

Είναι οι διατάξεις ισχύος που επιτρέπουν τη μετατροπή του εναλλασσόμενου ρεύματος σε συνεχές. Βάσει της μορφής της εναλλασσόμενης εισόδου οι ανορθωτές χωρίζονται σε μονοφασικούς και σε πολυφασικούς, στους οποίους συγκαταλέγονται η διφασικοί, οι τριφασικοί και οι εξαφασικοί. Επίσης, χωρίζονται σε μη ελεγχόμενους και ελεγχόμενους, ανάλογα με το αν η τάση στην έξοδο μεταβάλλεται ή παραμένει σταθερή.

1.2.1 Ανόρθωση ρεύματος

Η λειτουργία των ενεργητικών στοιχείων που περιλαμβάνονται στις ηλεκτρικές και ηλεκτρονικές συσκευές και στα όργανα απαιτούν συνεχείς τάσεις D.C., για να λειτουργήσουν. Γενικότερα, πρέπει να γίνει μετατροπή της τάσης A.C. σε D.C. και με αυτό τον τρόπο να φτάσουμε στην επιθυμητή τιμή που απαιτεί κάθε εφαρμογή.

Ουσιαστικά, με τον όρο ανόρθωση νοείται η μετατροπή της εναλλασσόμενης τάσης σε συνεχή. Επίσης, η απλή ανόρθωση ονομάζεται και ανόρθωση μισού κύματος. Μία τάση που με περιοδικό τρόπο αλλάζει πολικότητα και μετατρέπεται από θετική σε αρνητική και μετά πάλι θετική θεωρείται ότι είναι τάση A.C. Αντίθετα, μία τάση που δεν αλλάζει πολικότητα και παραμένει σε όλη τη διάρκεια θετική ή αρνητική θεωρείται τάση D.C. Στο σύνολο των ηλεκτρονικών εφαρμογών απαιτείται τάση D.C., η οποία πρέπει να διατηρεί σταθερή τιμή. Επομένως, πρέπει να περιοριστεί η μία από τις δύο περιόδους της τάσης A.C. Με τον όρο απλή ανόρθωση ή διαφορετικά ημιανόρθωση νοείται η ενέργεια της εκμετάλλευσης μιας περιόδου της τάσης της πηγής. Στη συνέχεια, στο ερευνητικό μέρος θα περιγραφεί η κυματομορφή του σήματος της εισόδου του κυκλώματος κατά τη διάρκεια της εναλλαγής της πολικότητας.

2) Αντιστροφείς / Μετατροπείς DC-AC:

Ο αντιστροφέας επιτρέπει τη μετατροπή της συνεχούς τάσης σε εναλλασσόμενη, το αντίθετο από τον ανορθωτή. Η έξοδος σε έναν αντιστροφέα μπορεί να είναι μονοφασική ή πολυφασική. Ωστόσο, στις περισσότερες περιπτώσεις είναι τριφασική.

1.2.2 Αντιστροφή ρεύματος

Ο αντιστροφέας μετατρέπει τη συνεχή D.C σε εναλλασσόμενη A.C τάση. Με τον όρο αντιστροφέα νοείται ένας ηλεκτρονικός μετατροπέας που προσφέρει την δυνατότητα να μεταβληθεί το πλάτος και η συχνότητα της κυματομορφής εξόδου είτε πρόκειται για τάση είτε πρόκειται για ρεύμα. Βάσει του είδους της πηγής εισόδου ο αντιστροφέας εντάσσεται σε μία από τις δύο κατηγορίες:

- Αντιστροφέας, ο οποίος τροφοδοτείται από πηγή συνεχούς ρεύματος.
- Αντιστροφέας, ο οποίος τροφοδοτείται από πηγή συνεχούς τάσης.

Επιπρόσθετα οι άνωθι κατηγορίες υποδιαιρούνται στα κάτωθι:

- Στον μονοφασικό αντιστροφέα.
- Στον τριφασικό αντιστροφέα ο οποίος διαθέτει έξι ελεγχόμενα ημιαγωγούς και διακοπτικά στοιχεία.

Επίσης, στο εσωτερικό του κυκλώματος του αντιστροφέα βρίσκονται τα ελεγχόμενα ημιαγωγικά και διακοπτικά στοιχεία ισχύος, τα οποία κατόπιν βοήθειας από το κύκλωμα ελέγχου του, εκτελούν μόνο την έναυση ή την έναυση και τη σβέση. Τα κυκλώματα ελέγχου των αντιστροφέων περιλαμβάνουν το σύνολο των ελέγχων που απαιτείται, ανάλογα με το είδος της εφαρμογής για την οποία γίνεται η επιλογή του αντιστροφέα. Οι έξοδοι στα κυκλώματα ελέγχου αποτελούν ηλεκτρικά σήματα παλμοδότησης του αντιστροφέα που ελέγχουν τα διακοπτικά του στοιχεία. Εξαιτίας της διακοπτικής λειτουργίας η τάση στην έξοδο του αντιστροφέα διαθέτει ανώτερες αρμονικές. Για το λόγο αυτό, συνήθως, στην έξοδο βρίσκεται ένα φίλτρο για τον περιορισμό αυτών. Οι περισσότεροι αντιστροφείς βρίσκονται σε εγκατάσταση η οποία είναι συνδεδεμένη με το ηλεκτρικό δίκτυο. Επίσης, κατά τη σχεδιάσή τους μπορεί να λειτουργούν με συνδεδεμένους συσσωρευτές για λόγους ασφαλείας προς αποφυγή διακοπής τροφοδότησης. Επιπρόσθετα, μπορεί να λειτουργούν με ηλεκτρικό δίκτυο χωρίς την ύπαρξη συσσωρευτών για αυτόνομη λειτουργία. Οι αντιστροφείς συνήθως ελέγχουν τη συχνότητα και το πλάτος της τάσης εξόδου. Ο έλεγχος γίνεται μέσα από τη ρύθμιση του χρόνου αγωγής των ημιαγωγικών στοιχείων και την περίοδο μιας παλμοσειράς.

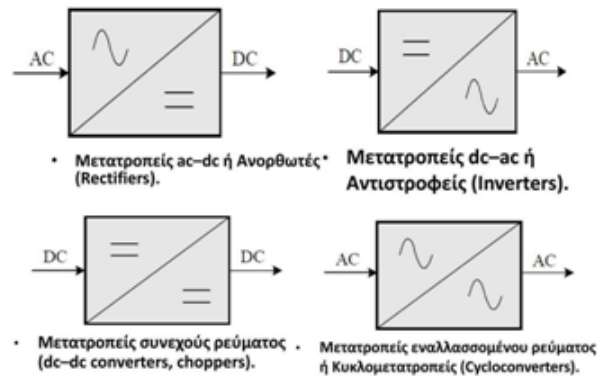
3) Μετατροπέας συνεχούς ρεύματος:

Ο μετατροπέας συνεχούς ρεύματος επιτρέπει τη μετατροπή της συνεχούς τάσης με συγκεκριμένη πολικότητα και μέση τιμή σε συνεχή, με διαφορετική πολικότητα και μέση τιμή. Οι μετατροπείς συνεχούς ρεύματος χωρίζονται σε μετατροπείς ανύψωσης της τάσης, υποβιβασμού και μεικτούς. Αυτή η διάκριση γίνεται βάσει της τάσης εξόδου και συγκεκριμένα εάν η τάση κατά την έξοδο είναι πιο μικρή ή πιο μεγάλη από την τάση κατά την είσοδο. Επίσης, χωρίζονται σε αυτούς που υπάρχει απομόνωση της εξόδου από την είσοδο και σε αυτούς που δεν υπάρχει.

4) Κυκλομετατροπείς / Μετατροπείς εναλλασσομένου ρεύματος:

Ένας κυκλομετατροπέας επιτρέπει τη μετατροπή της εναλλασσόμενης τάσης με σταθερή συχνότητα και πλάτος σε εναλλασσόμενη τάση, στην οποία ρυθμίζεται η συχνότητα και το πλάτος απευθείας. Αυτός ο μετατροπέας ηλεκτρικής ενέργειας ονομάζεται διαφορετικά και υποβιβασμού συχνότητας, στην περίπτωση κατά την οποία η συχνότητα της εξόδου είναι πιο μικρή από τη συχνότητα της εισόδου. Όταν

συμβαίνει το αντίθετο, δηλαδή, η συχνότητα της εξόδου είναι πιο μεγάλη από τη συχνότητα της εισόδου, ονομάζεται ανύψωση συχνότητας.



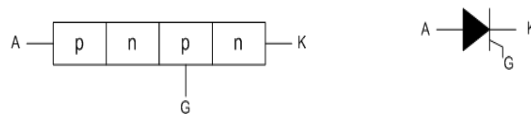
Σχήμα 1.1: Τα είδη των μετατροπέων [Σχήμα από φυλλάδιο εργαστηρίου Ηλεκτρονικά Ι]

1.3 Θυρίστορ και τρανζίστορ

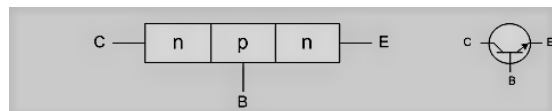
Έτσι, ονομάζεται μια μεγάλη οικογένεια ημιαγωγικών διακοπών, που αποτελείται από 4 ή περισσότερα στρώματα ημιαγωγών n και p. Όλα τα θυρίστορ έχουν δύο καταστάσεις λειτουργίας: την κατάσταση της αγωγιμότητας και την κατάσταση της αποκοπής.



Σχήμα 1.2: Συμβολισμός διόδου [Σχήμα από φυλλάδιο εργαστηρίου Ηλεκτρονικά Ισχύος]



Σχήμα 1.3: Συμβολισμός θυρίστορ [Σχήμα από φυλλάδιο εργαστηρίου Ηλεκτρονικά Ισχύος]



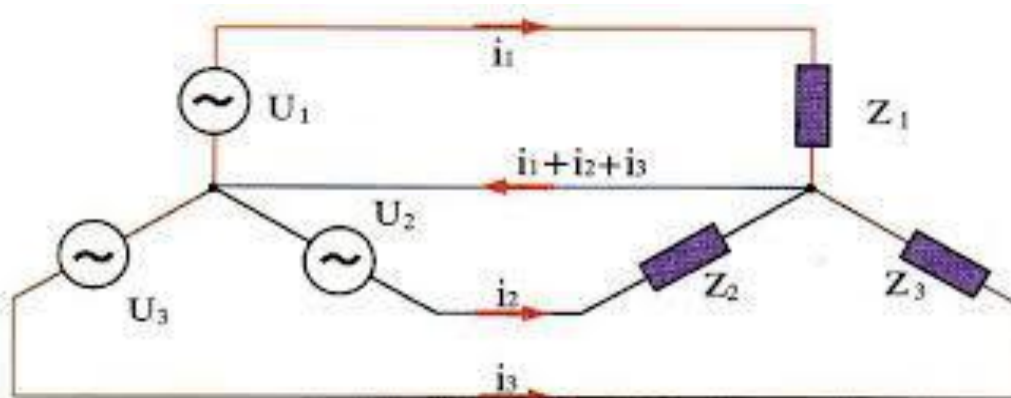
Σχήμα 1.4: Συμβολισμός τρανζίστορ [Σχήμα από φυλλάδιο εργαστηρίου Ηλεκτρονικά Ισχύος]

Υπάρχουν:

- Η δίοδος Schottky ή η δίοδος των τεσσάρων στρωμάτων pnpn, η οποία χρησιμοποιείται σε εφαρμογές ελέγχου ισχύος.
- Ο ελεγχόμενος ανορθωτής πυριτίου SCR, που έχει την ίδια δομή με τη Schottky, αλλά δεν είναι δυνατό να ελεγχθεί η τάση σκανδαλισμού μέσα από το ρεύμα πύλης.
- Το GTO, χρησιμοποιείται σε εφαρμογές μεγάλων ρευμάτων και τάσεων σε συχνότητες έως 10 kHz.
- Ο ελεγχόμενος διακόπτης πυριτίου SCS, που χρησιμοποιείται σε ψηφιακά συστήματα.
- Το DIAC, που χρησιμοποιείται σε κύκλωμα ολίσθησης φάσης, στον έλεγχο AC ισχύος. Χρησιμοποιείται για παραγωγή παλμών έναυσης στο TRIAC.
- Το TRIAC, το οποίο λειτουργεί ως 2 δίοδοι θυρίστορ που συνδέονται παράλληλα και αντίστροφα και δε διαθέτει πολικότητα. Χρησιμοποιούνται στον έλεγχο φάσης της ισχύος σε ωμικά φορτία. Λειτουργούν σε συχνότητες 50 μέχρι 400Hz. Επιπρόσθετη λειτουργία σαν ηλεκτρονόμοι στερεάς κατάστασης.
- Ο αμφίδρομος SCR, λειτουργεί σε τάση 100V και σε συχνότητα έως 50KHz, για να ελέγχονται μεγάλες ισχύς.
- Το IGBT, που ελέγχει την έναυση και τη σβέση.
- Τα οπτικά διεγερόμενα LT, χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές υψηλής τάσης, με πτώση τάσης 2V και φωτεινή διέγερση 5 mW.

Αργότερα, στο πειραματικό μέρος, θα χρησιμοποιήσω IGBT δηλαδή, τρανζίστορ ισχύος. Πιο συγκεκριμένα, εκείνα, μπορούν να διαχειριστούν μεγάλη ισχύ και χρησιμοποιούνται ως ελεγχόμενοι διακόπτες μέσω των οποίων ελέγχεται η τάση ενός ηλεκτρικού φορτίου όπως επίσης το ρεύμα, η ισχύς, η ροπή κ.α. Επιπλέον, τα IGBT χρησιμοποιούνται στις περισσότερες ηλεκτρικές και ηλεκτρομηχανικές εφαρμογές μέσης και υψηλής ισχύος την σύγχρονη εποχή.

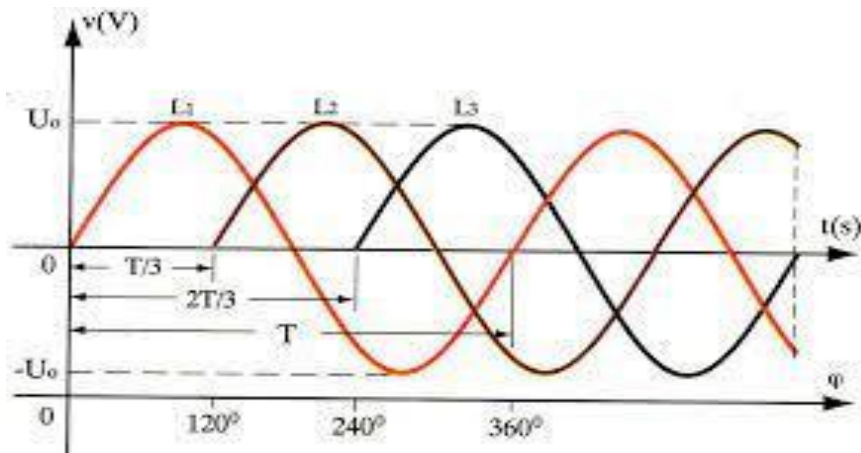
1.4 Τριφασικό κύκλωμα εναλλασσόμενου ρεύματος



Σχήμα 1.5: Τριφασικό κύκλωμα [Σχήμα από βιβλίο Ηλεκτρικά Κυκλώματα]

Το τριφασικό κύκλωμα αποτελεί την κυριότερη κατηγορία κυκλωμάτων, όπως προαναφέρθηκε και χρησιμοποιείται σε ευρεία κλίμακα στο σύνολο των δικτύων διανομής και μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας. Γενικότερα, οι περισσότερες ηλεκτρικές μηχανές χρησιμοποιούν τριφασική πηγή ρεύματος, αφού με αυτό τον τρόπο επιτυγχάνουν πιο υψηλή ροπή, λιγότερο θόρυβο και πιο υψηλή απόδοση. Επιπρόσθετα, για συγκεκριμένα επίπεδα ισχύος χρησιμοποιούνται κατά αποκλειστικότητα τριφασικές πηγές. Το κυριότερο θετικό μιας τριφασικής πηγής είναι η μεταφορά τριπλάσιας ισχύς συγκριτικά με μία μονοφασική πηγή. Έτσι, θα ήταν εύλογο πως σε όλες τις περιπτώσεις θα χρησιμοποιούνταν τριφασικές και όχι μονοφασικές πηγές και παράλληλα η τριφασική θα αποτελούσε βέλτιστη επιλογή συγκριτικά με τις άλλες δύο πολυφασικές πηγές. Η πραγματικότητα είναι πως τεχνικά και οικονομικά αίτια έχουν οδηγήσει στην επικράτηση το τριφασικό συστήματος.

Ένα τριφασικό σύστημα τάσεων, διαθέτει τρεις πηγές / φάσεις εναλλασσόμενης τάσης. Στις πηγές αυτές εντοπίζεται η ίδια συχνότητα και η ίδια ενεργός τιμή, αλλά παρουσιάζεται διαφοροποίηση φάσης 120° . Οι φάσεις αυτές συμβολίζονται με τα γράμματα R, S, T.



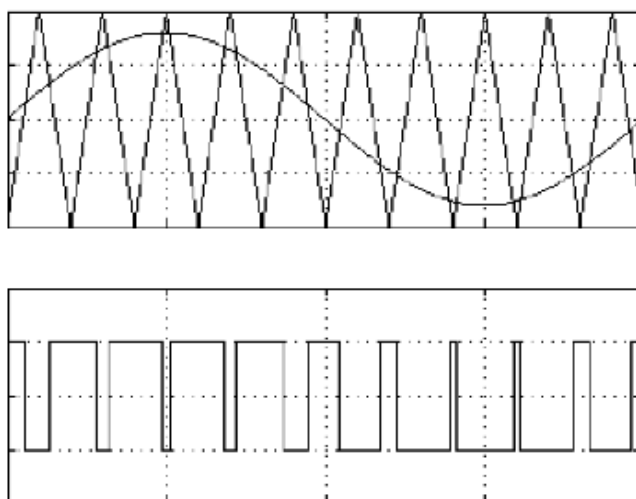
Σχήμα 1.6: Οι τρεις φάσεις εναλλασσόμενης τάσης [Σχήμα από βιβλίο Ηλεκτρικά Κυκλώματα]

Ακόμα, ο αγωγός επιστροφής των πηγών είναι κοινός και ονομάζεται ουδέτερος (N , Mr). Επιπλέον, σε ένα τριφασικό σύστημα εντοπίζεται ένας πέμπτος αγωγός γείωσης, που αποσκοπεί στην προστασία των χρηστών από επικίνδυνες τάσεις επαφής ή από κάποιο βραχυκύκλωμα. Αυτός ο αγωγός της γείωσης συμβολίζεται με SL, έχει μηδενική τάση και το ρεύμα το οποίο ρέει σε αυτόν είναι μηδενικό σε συνθήκες κανονικής λειτουργίας. Στα τριφασικά συστήματα τα μεγέθη πολικότητας είναι κρίσιμα, για το λόγο αυτό το σύνολο των δεδομένων σε ένα τριφασικό σύστημα αναφέρεται σε πολικά μεγέθη. Επίσης, αν σε κάποια τριφασική συσκευή δεν υπάρχει διευκρίνιση, τότε θεωρείται πως τα δεδομένα είναι πολικά κι όχι φασικά. Τριφασικό φορτίο είναι κάποια τριφασική ηλεκτρική μηχανή ή ένας τριφασικός μετασχηματιστής. Στις διατάξεις που παρουσιάζουν ικανοποιητική, σχεδόν σταθερή συμμετρία, θεωρείται πως το φορτίο είναι συμμετρικό και δύναται η ανάλυση του συνόλου του τριφασικού κυκλώματος με τη βοηθητική συνδρομή του μονοφασικού ισοδύναμου κυκλώματος. Συγκεκριμένα, υπολογίζονται οι τάσεις και τα ρεύματα για το υποκύκλωμα της φάσης R ή της πολικής τάσης RS. Εν συνεχεία, οι αντίστοιχες τάσεις και ρεύματα για τις άλλες φάσεις είναι απλώς μετατοπισμένες κατά 120° και 240° αντίστοιχα. Στην περίπτωση συμμετρικού τριφασικού φορτίου δε διαρρέεται από ρεύμα και έχει μηδενική τάση. Το συγκεκριμένο δεδομένο δεν ισχύει σε

περίπτωση σφάλματος ή ασύμμετρου φορτίου, δηλαδή φορτίου που παρουσιάζει ίδια εμπέδηση στο σύνολο των φάσεων του. Έτσι, η ανάλυση των κυκλωμάτων αυτών εμφανίζει δυσχέρειες εξαιτίας των πολλών κόμβων και βρόχων που πρέπει να επιλυθούν.

1.5 Παλμοδότηση SPWM

Η παλμοδότηση των ημιαγωγικών στοιχείων ενός ηλεκτρικού συστήματος βοηθά στον έλεγχο των ηλεκτρονικών μετατροπέων ισχύος. Μία συνήθης και βασική τεχνική παλμοδότησης στη σύγχρονη εποχή είναι η ημιτονοειδής διαμόρφωση εύρους SPWM. Σε αυτή την τεχνική οι παλμοί λαμβάνονται από τη σύγκριση ενός ημιτόνου με ένα τριγωνικό σήμα. Με αυτή την τεχνική παλμοδότησης, η διάρκεια των παλμών μεταβάλλεται στην περίοδο, ημιτονοειδώς. Με τον τρόπο αυτό παρουσιάζεται μέγιστη διάρκεια παλμού στη μέση της ημιπεριόδου και εντοπίζεται ελάχιστη στα άκρα της.



Σχήμα 1.7: Το εύρος της παλμοδότησης (SPWM) [Αποτέλεσμα εξομοίωσης που πραγματοποιήθηκε ενδεικτικά]

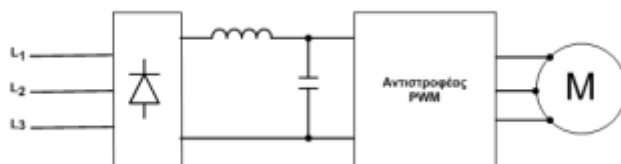
1.6 Αρχή λειτουργίας τριφασικών κινητήρων

Στους ασύγχρονους κινητήρες βραχυκυκλωμένου δρομέα, ο δρομέας είναι ανεξάρτητος ηλεκτρικά από τον στάτη και δεν γίνεται η τροφοδότησή του με ρεύμα από το δίκτυο. Στα τρία τυλίγματα του στάτη εισέρχεται τριφασικό ρεύμα και έτσι δημιουργείται ένα στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο που τέμνει τις σπείρες του δρομέα.

Στον δρομέα αναπτύσσονται επαγωγικά ρεύματα, με συνέπεια να δημιουργείται μαγνητική δύναμη που επιτρέπει την περιστροφή του δρομέα. Επίσης, η ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα είναι πιο μικρή από τη σύγχρονη ταχύτητα του στρεφόμενου μαγνητικού πεδίου.

1.7 Δομή κλιματιστικού και έλεγχος στροφών

Για να τροφοδοτηθεί και να λειτουργήσει ένα κλιματιστικό, θα πρέπει να προηγηθεί μια διαδικασία. Αρχικά, ρεύμα μπορούμε να λάβουμε είτε από μονοφασική είτε από τριφασική πηγή. Στην συνέχεια γίνεται ανόρθωση του ρεύματος, μέσω ενός ανορθωτή και πιο συγκεκριμένα από μια ανορθωτική γέφυρα που στις περισσότερες των περιπτώσεων είναι μη ελεγχόμενη. Έπειτα υπάρχει ένας πυκνωτής που χρησιμοποιείται για την εξομάλυνση του ρεύματος, και στην συνέχεια ξεκινάει η διαδικασία αντιστροφής του ρεύματος, μέσω του αντιστροφέα (inverter), ο οποίος αποτελείται από 6 διακοπτικά στοιχεία και συγκεκριμένα 6 τρανζίστορ ισχύος (IGBT). Σε κάθε περίπτωση στην έξοδο του αντιστροφέα μπορούμε να λάβουμε τριφασικό δίκτυο.



Σχήμα 1.8: Κινητήριο σύστημα αποτελούμενο από ανορθωτή αντιστροφέα και ασύγχρονη μηχανή
[Φυλλάδιο εργαστηρίου Ηλεκτρικά Κινητήρια Συστήματα]

Η τάση που θα υπάρχει στην έξοδο του inverter, κατευθύνεται στον κινητήρα, κι έτσι λειτουργεί. Πρώτα όμως, θα πρέπει να γίνει έλεγχος στροφών. Κατά τον έλεγχο στροφών και για να μπορέσει ένας inverter να τροφοδοτήσει μια μηχανή, θα πρέπει να κρατάει σταθερό τον λόγο $V(\text{τάση})/f(\text{συχνότητα})$, ώστε να περιοριστεί το ρεύμα της μηχανής.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο

ΑΠΟΔΟΣΗ ΚΛΙΜΑΤΙΣΤΙΚΩΝ-INVERTER

2.1 Εισαγωγή

Στις μέρες μας, τα συστήματα κλιματισμού χρησιμοποιούνται κυρίως για οικιακούς ή εμπορικούς σκοπούς. Οι αυξανόμενες ενεργειακές απαιτήσεις τις τελευταίες δεκαετίες, σε συνδυασμό με την ευαισθητοποίηση σε περιβαλλοντικά ζητήματα, έχουν προκαλέσει αυξημένο ενδιαφέρον για ενεργειακά αποδοτικότερες τεχνολογίες. Τα συστήματα κλιματισμού είναι μία από τις κορυφαίες ενεργειακές συσκευές τελικής χρήσης στις περισσότερες χώρες, που συμβάλλουν στη σημαντική κατανάλωση ενέργειας σε εργοστάσια, σε κτίρια και σε σπίτια. Περίπου το 15% της ηλεκτρικής ενέργειας στον κόσμο καταναλώνεται από συστήματα ψύξης και κλιματισμού. Επιπλέον, περίπου το 20% της κατανάλωσης της ηλεκτρικής ενέργειας στις ανεπτυγμένες χώρες είναι αποτέλεσμα της χρήσης κλιματιστικών. Σήμερα, το μεγαλύτερο μέρος της ηλεκτρικής ενέργειας στον κόσμο προέρχεται από ορυκτά καύσιμα, τα οποία είναι μη βιώσιμα και επιβλαβή για το περιβάλλον. Η υψηλή κατανάλωση ενέργειας συμβάλλει στην υπερθέρμανση του πλανήτη λόγω των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου. Η βελτίωση της απόδοσης του κλιματισμού είναι ένας από τους πρωταρχικούς στόχους για τη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας και των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα (CO₂). Με την αυξανόμενη τάση εγκατάστασης κλιματιστικών για οικιακή και εμπορική χρήση, κάποιες αναπτυσσόμενες χώρες έχουν υιοθετήσει ετικέτες έγκρισης ή ετικέτες σύγκρισης σε προϊόντα κλιματιστικών. Στόχος του περιεχομένου της ετικέτας είναι να διευκολυνθεί η σύγκριση των προϊόντων σχετικά με την ενεργειακή απόδοση. Οι περισσότερες από αυτές τις ετικέτες βασίζονται σε μια γραφική έννοια, όπως μια γραμμική κλίμακα, για να δείχνουν τη σχετική ενεργειακή απόδοσή του.

2.2 Ενεργειακή απόδοση κλιματιστικού

Τα αποτελέσματα μείωσης της ενέργειας από τη χρήση κλιματιστικού εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από τις αλλαγές θερμοκρασίας και του ψυκτικού φορτίου σε μια ημέρα ή σε μια εποχή. Η απόδοση της λειτουργίας ενός συστήματος κλιματισμού επηρεάζεται σημαντικά από τις εξωτερικές κλιματολογικές συνθήκες. Σήμερα,

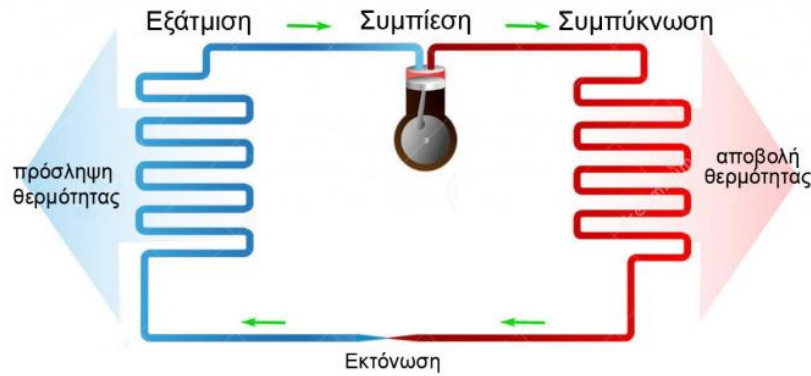
λοιπόν, οι περισσότεροι άνθρωποι επιλέγουν να στραφούν σε έναν ενεργειακά αποδοτικό τρόπο λειτουργίας των κλιματιστικών. Σε αυτή την κατεύθυνση συμβάλλει η έννοια της ενεργειακής απόδοσης ενός κλιματιστικού. Ο όρος ενεργειακή απόδοση (EER) ενός εξοπλισμού θέρμανσης ή ψύξης είναι ο λόγος της απόδοσης θερμότητας (μετρούμενη σε BTU) στην είσοδο ισχύος (μετρούμενη σε watt-h) ενώ το σύστημα είναι σε λειτουργία. Όσο υψηλότερη είναι η αναλογία μιας μονάδας κλιματισμού σε σύγκριση με άλλα συστήματα, τόσο πιο αποδοτική είναι. Ο λόγος ενεργειακής απόδοσης ενός συστήματος θέρμανσης ή ψύξης υπολογίζεται συνήθως διαιρώντας την απόδοση θερμότητας του συστήματος με την ισχύ εισόδου.

$$EER = \text{Έξοδος θερμότητας} / \text{Είσοδος ισχύος}$$

Όσον αφορά τον υπολογισμό της πραγματικής κατανάλωσης ενέργειας, η ονομαστική κατανάλωση ενέργειας ενός κλιματιστικού μπορεί να υπολογιστεί εντός 10 τοις εκατό της πραγματικής χρήσης με βάση έναν απλό τύπο. Οι απαιτούμενες πληροφορίες βρίσκονται σε μια ετικέτα που είναι κολλημένη στην εξωτερική μονάδα συμπύκνωσης. Τα κλιματιστικά καταναλωτικής ποιότητας λειτουργούν στα 220-240 βολτ. Για να υπολογιστεί η πραγματική κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας, επισημαίνονται οι ενισχυτές ονομαστικού φορτίου (RLA) για τον συμπυκνωτή, οι ενισχυτές πλήρους φορτίου (FLA) για τον ανεμιστήρα και η άντληση ενισχυτή για τον φυσητήρα, η οποία βρίσκεται στο εσωτερικό του πίνακα σέρβις της διάταξης χειρισμού. Οι τρεις αριθμοί για την άντληση ενισχυτή θα πρέπει να πολλαπλασιάζονται ξεχωριστά με την τάση λειτουργίας για κάθε εξάρτημα. Σε ένα συμβατικό σύστημα διαχωρισμού, ο φυσητήρας στη διάταξη χειρισμού αέρα λειτουργεί τυπικά στα 115 βολτ.

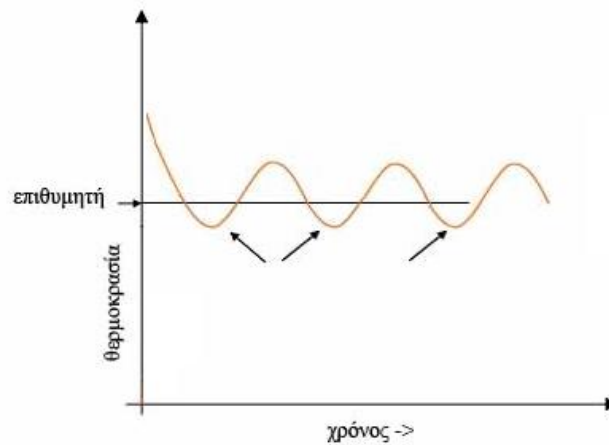
2.3 Λειτουργία απλών κλιματιστικών και inverters

Γενικά τα κλιματιστικά είτε είναι συμβατικά είτε inverter, έχουν πολλά κοινά χαρακτηριστικά στην λειτουργία τους. Είναι αντλίες θερμότητας- αέρος και λειτουργούν βάσει του ψυκτικού κύκλου, στον οποίο το ψυκτικό μέσο συμπιέζεται στον συμπιεστή συμπυκνώνεται και υγροποιείται, στη συνέχεια εκτονώνεται στην εκτονωτική βαλβίδα και αεριοποιείται και πάλι στον εξατμιστή.



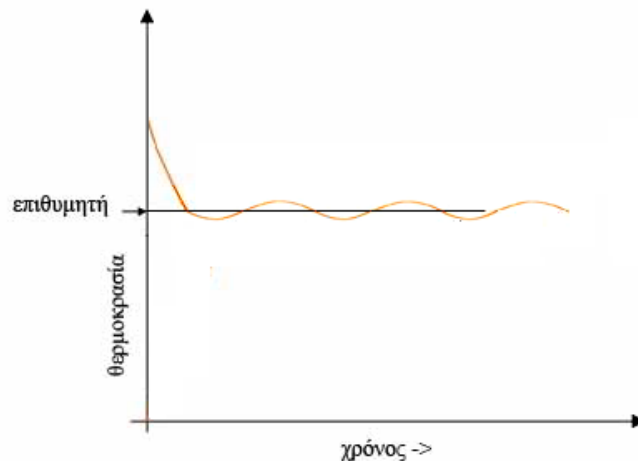
Σχήμα 2.1: Ψυκτικός κύκλος κλιματιστικού [Σχήμα από άρθρο HVAC engineer]

Ένα απλό κλιματιστικό, είτε θα λειτουργεί με τον συμπιεστή του σε σταθερές στροφές είτε θα σταματά να λειτουργεί. Επίσης ξεκινά όταν η θερμοκρασία ανέβει πάνω από την επιθυμητή, και σταματά όταν η θερμοκρασία κατέβει λίγο κάτω από την επιθυμητή. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα η θερμοκρασία του χώρου να μην είναι σταθερή, αλλά να έχει μια διακύμανση πάνω και κάτω από την επιθυμητή, όπως στο ακόλουθο σχήμα:



Σχήμα 2.2: Χαρακτηριστική θερμοκρασίας-χρόνου (απλό κλιματιστικό) [Σχήμα από άρθρο HVAC engineer]

Αντίθετα ένα κλιματιστικό inverter, μπορεί να μεταβάλλει τις στροφές του συμπιεστή και κατά συνέπεια να προσαρμόσει κάθε στιγμή την ισχύ του στις ανάγκες του χώρου. Η παραπάνω λειτουργία, επιτρέπει στο κλιματιστικό inverter να αυξάνει τις στροφές του για να χαμηλώσει την θερμοκρασία του χώρου, και να τις χαμηλώνει όταν η θερμοκρασία χώρου επιτευχθεί. Από εκεί και μετά, αυξομειώνει κάθε στιγμή τις στροφές στον συμπιεστή με τέτοιο τρόπο, ώστε η θερμοκρασία του χώρου να παραμένει σχεδόν σταθερή:



Σχήμα 2.3: Χαρακτηριστική θερμοκρασίας-χρόνου (inverter) [Σχήμα από άρθρο HVAC engineer]

Συνεπώς, ένα κλιματιστικό inverter , μας παρέχει συνθήκες άνεσης υψηλού επιπέδου, αφού επιτυγχάνει με τον καλύτερο τρόπο το ζητούμενο, που είναι η επίτευξη της επιθυμητής θερμοκρασίας στο χώρο. Τα συνεχή σταματήματα του on/off κλιματιστικού, καταπονούν τα διάφορα στοιχεία του κλιματιστικού και αυξάνουν τις απώλειες του κλιματιστικού, αφού το ρεύμα εκκίνησης είναι πολλαπλάσιο του ρεύματος λειτουργίας. Η συνεχής λειτουργία του κλιματιστικού σε χαμηλές στροφές είναι πολύ προτιμότερη από τη διακοπτόμενη λοιπόν, για δύο κυρίως λόγους:

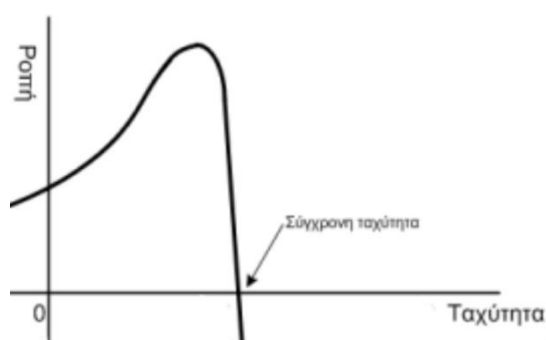
- 1) Το κλιματιστικό λειτουργεί πολύ πιο αποδοτικά και οικονομικά
- 2) Το μηχάνημα καταπονείται λιγότερο με τα συνεχή σταματήματα και ξεκινήματα.

Ο παραπάνω τρόπος λειτουργίας είναι υπεύθυνος για την πολύ μικρή κατανάλωση στα κλιματιστικά inverter σε σχέση με τα on/off συμβατικά.

2.4 Βαθμός απόδοσης κλιματιστικών

Ένα πολύ σημαντικό κομμάτι, όσον αφορά τα κλιματιστικά, είναι ο βαθμός απόδοσης. Ορίζεται ως η αναλογία της θερμικής ισχύος που παράγεται από το κλιματιστικό στην επιθυμητή θερμοκρασία, προς την ηλεκτρική ισχύ που καταναλώνει για να λειτουργήσει. Είναι τόσο σημαντικός όπου πολλοί άνθρωποι τον θεωρούν και ως μέτρο σύγκρισης ανάμεσα στο κάθε κλιματιστικό. Ένα κλιματιστικό με υψηλό βαθμό απόδοσης, είναι πιο αποδοτικό και οικονομικό στη χρήση του.

Παρόλα αυτά, λόγω των διάφορων απωλειών που οφείλονται στην υστέρηση και τα δινορεύματα, και βρίσκονται στον ανορθωτή, την κινητήρια μηχανή, αλλά και στον ίδιο τον αντιστροφέα, η απόδοση του κλιματιστικού, ενώ κάποια στιγμή βρίσκεται στην μέγιστη, μειώνεται ραγδαία, λόγω των απωλειών που προαναφέρθηκαν. Στην ουσία, οι απώλειες υστέρησης προκύπτουν από τη μετατροπή της συναρτησιακής μορφής του σήματος εισόδου σε μια κατάλληλη μορφή που μπορεί να τροφοδοτήσει τον εναλλασσόμενο ηλεκτρισμό στην έξοδο, και τις περισσότερες των περιπτώσεων οφείλονται στην αντίσταση των καλωδίων του συστήματος. Επιπλέον, οι απώλειες των δινορευμάτων προκύπτουν από το γεγονός ότι η ποιότητα του ρεύματος που δημιουργείται από τον αντιστροφέα δεν είναι απόλυτα καθαρή. Πιο συγκεκριμένα, τα δινορεύματα δημιουργούνται από την μετατροπή της συχνότητας του ρεύματος στην είσοδο σε μια διαφορετική συχνότητα στην έξοδο, κι έτσι, αυτό μπορεί να δημιουργήσει παράσιτα στο ρεύμα. Επομένως, οι απώλειες υστέρησης και δινορευμάτων σε έναν αντιστροφέα επηρεάζουν την απόδοση του συστήματος και μπορούν να μειώσουν την αποτελεσματικότητα της μετατροπής. Όλα αυτά, έχουν ως αποτέλεσμα, το κλιματιστικό να μην βρίσκεται πάντοτε στην μέγιστη απόδοση, αλλά σε μικρότερες τιμές, πράγμα το οποίο μπορούμε να διαπιστώσουμε στο Σχήμα 2.4.



Σχήμα 2.4: Χαρακτηριστική ροπής-στροφών [Φυλλάδιο εργαστηρίου Ηλεκτρικά Κινητήρια Συστήματα]

Την μεγάλη αυτή μείωση της απόδοσης, δεν την επιθυμούμε σε καμία περίπτωση, αφού θέλουμε να βρισκόμαστε συνεχώς στην μέγιστη απόδοση, και για τον λόγο αυτό, στα επόμενα κεφάλαια, με την χρήση του προγράμματος Matlab/Simulink, θα

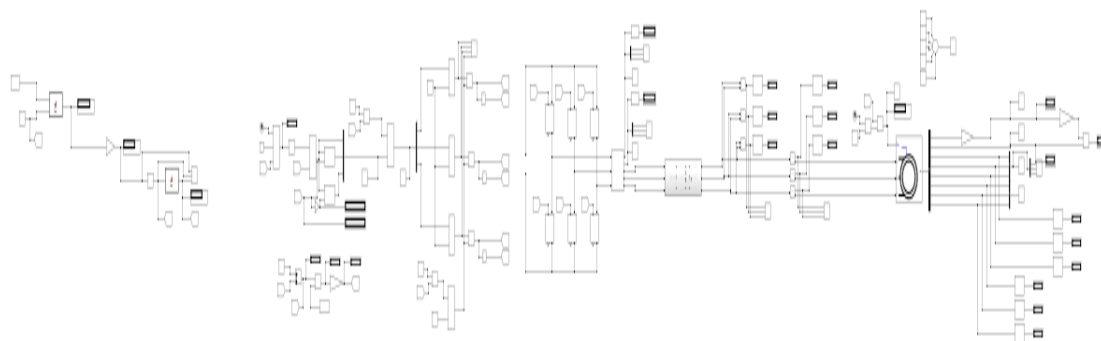
εξετάσουμε μέσω αυτόματου ελέγχου τη λειτουργία του συστήματος στην μέγιστη απόδοση.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο

ΑΠΩΛΕΙΕΣ ΚΙΝΗΤΗΡΙΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

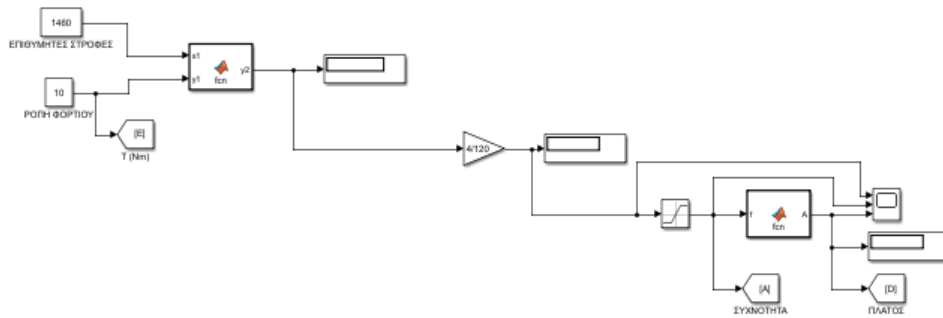
3.1 Εισαγωγή – Μελετώμενο Σύστημα

Ένα κινητήριο σύστημα μπορεί να την αποδώσει την ενέργεια στον χώρο είτε σε μεγάλο χρονικό διάστημα είτε σε μικρότερο. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα στην πρώτη περίπτωση να ζεσταθεί (ή να ψυχθεί) γρήγορα ο χώρος και στην δεύτερη πιο αργά. Στην προκειμένη περίπτωση, μας ενδιαφέρει ένα κινητήριο σύστημα να λειτουργεί αποδοτικά. Το παρακάτω σύστημα θα μελετηθεί και θα αναλυθεί κατάλληλα ώστε να ελεγχθεί η αποδοτικότητά του.

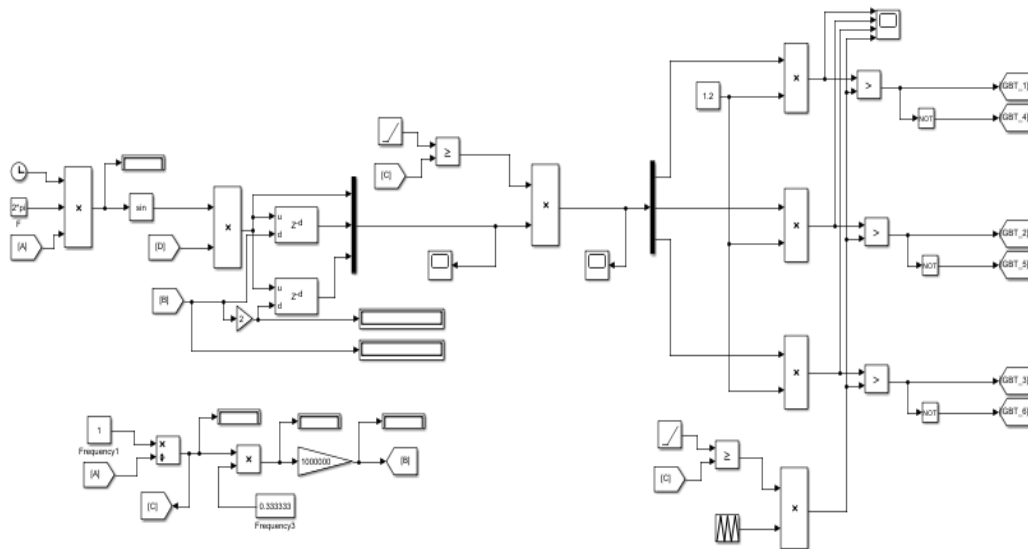


Σχήμα 3.1: Το συνολικό μοντέλο του κινητήριου συστήματος που θα μελετηθεί

Τα σχήματα που ακολουθούν (**Σχήμα 3.1.1**, **Σχήμα 3.1.2** , **Σχήμα 3.1.3** , **Σχήμα 3.1.4**), είναι τέσσερα τμήματα του συνολικού μοντέλου εξομοίωσης (**Σχήμα 3.1**), όπου έχουν μεγεθυνθεί ώστε να διακρίνονται και να αναλύονται ευκολότερα.



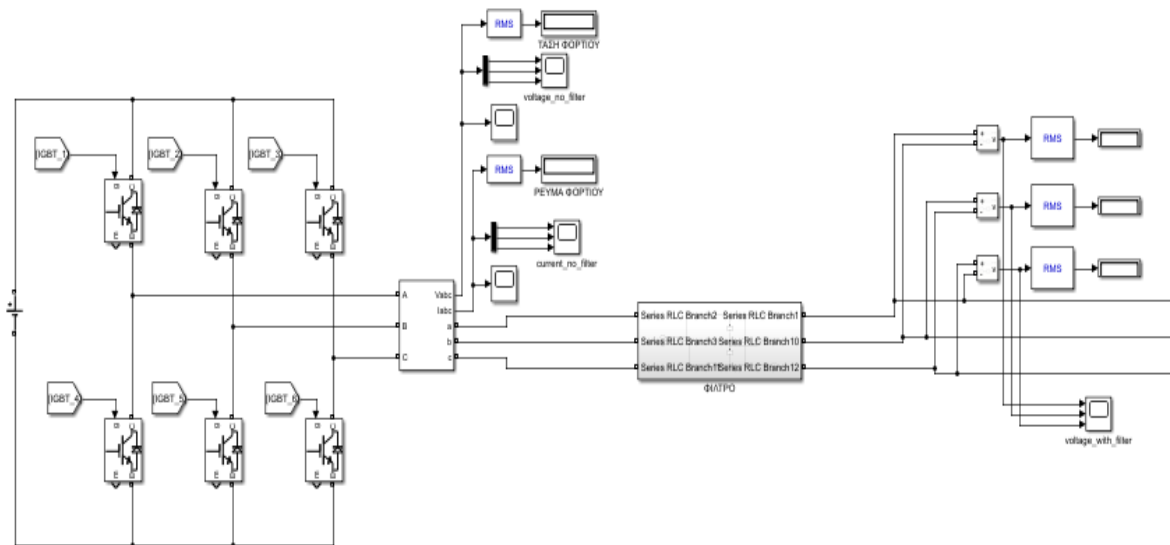
Σχήμα 3.1.1: Έλεγχος στροφών (τμήμα 1 συνολικού μοντέλου)



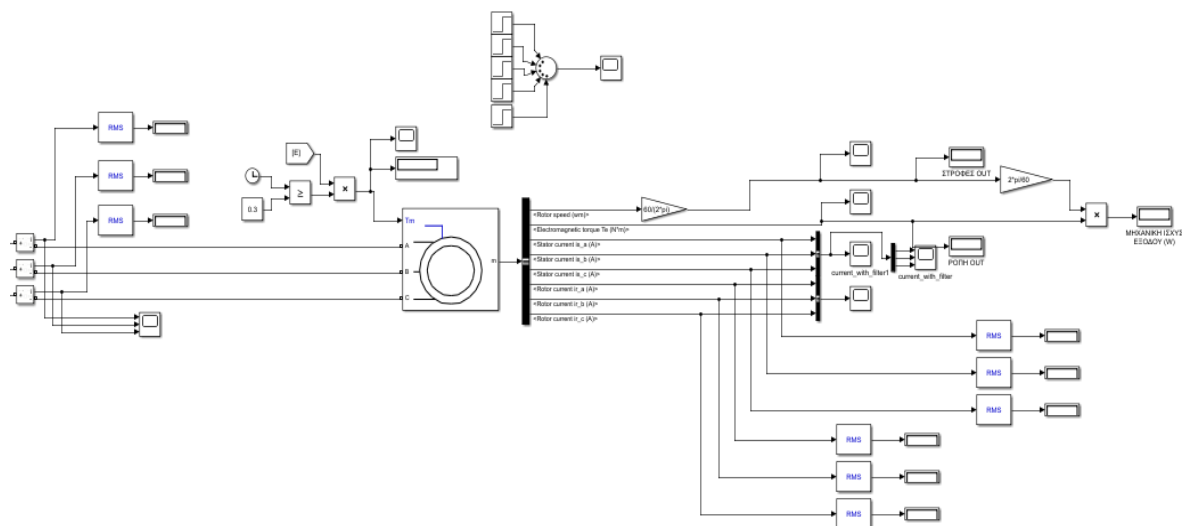
Σχήμα 3.1.2: Σύστημα pi ελέγχου με ράμπα για την ομαλή εκκίνηση (τμήμα 2 συνολικού μοντέλου)

Ο PI έλεγχος είναι μια διαδικασία αυτοματοποιημένου ελέγχου που χρησιμοποιείται για τη ρύθμιση και διατήρηση της επιθυμητής τιμής (στόχου) μιας μετρήσιμης μεταβλητής (π.χ. τάση, θερμοκρασία) σε ένα σύστημα. Ο έλεγχος PI συνδυάζει τρία διαφορετικά κομμάτια - αναλογικό, ολοκληρωτικό και παραγώγισης - για να παρακολουθεί την απόκλιση της μεταβλητής από την επιθυμητή τιμή και να

προσαρμόζει τον έλεγχο για να την αντισταθμίσει. Η ράμπα ελέγχου είναι μια ειδική λειτουργία του PI ελέγχου που βοηθά στην ομαλή εκκίνηση ή λειτουργία ενός συστήματος. Κατά τη διάρκεια της εκκίνησης, η τιμή του ελεγχόμενου μεγέθους (π.χ. τάση ή ταχύτητα) αυξάνεται αργά και ομαλά αντί για απότομη αύξηση. Αυτό βοηθά στην αποφυγή δραματικών αλλαγών που θα μπορούσαν να προκαλέσουν προβλήματα ή διαταραχές στο σύστημα.

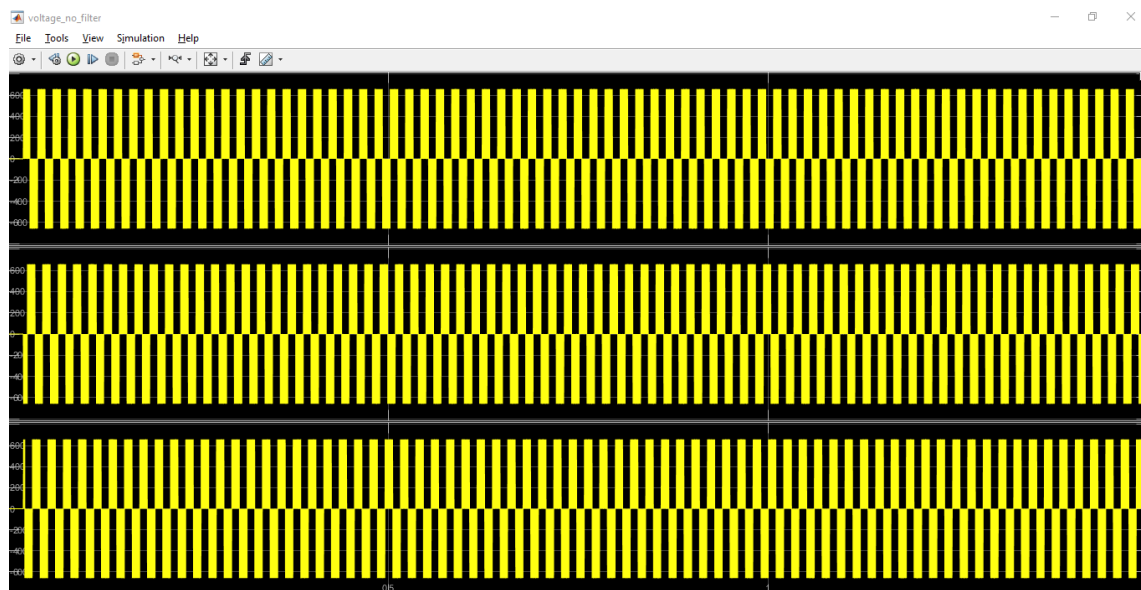


Σχήμα 3.1.3: ο inverter (τμήμα 3 συνολικού μοντέλου)



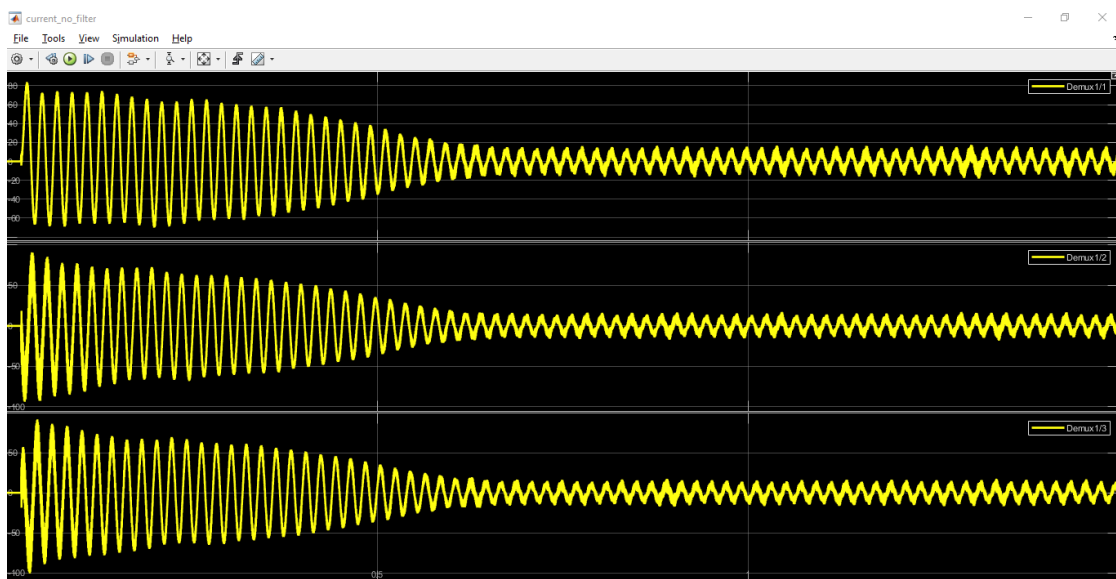
Σχήμα 3.1.4: Η μηχανή με τις μετρητικές διατάξεις (Τμήμα 4 συνολικού μοντέλου)

Στο κινητήριο σύστημα που θα μελετηθεί, φαίνεται η ασύγχρονη κινητήρια μηχανή που τροφοδοτείται από την τριφασική τάση του 3-φασικού αντιστροφέα με 6 ημιαγωγικά στοιχεία IGBT. Στην έξοδο της γέφυρας έχει τοποθετηθεί ένα μετρητικό (Three-phase V-I Measurement), με το οποίο έχουμε την δυνατότητα να παλμογραφίσουμε τις κυματομορφές που έχει η τάση αλλά και το ρεύμα στην έξοδο της γέφυρας αυτής. Ως παράδειγμα αποτυπώνονται οι παρακάτω κυματομορφές.



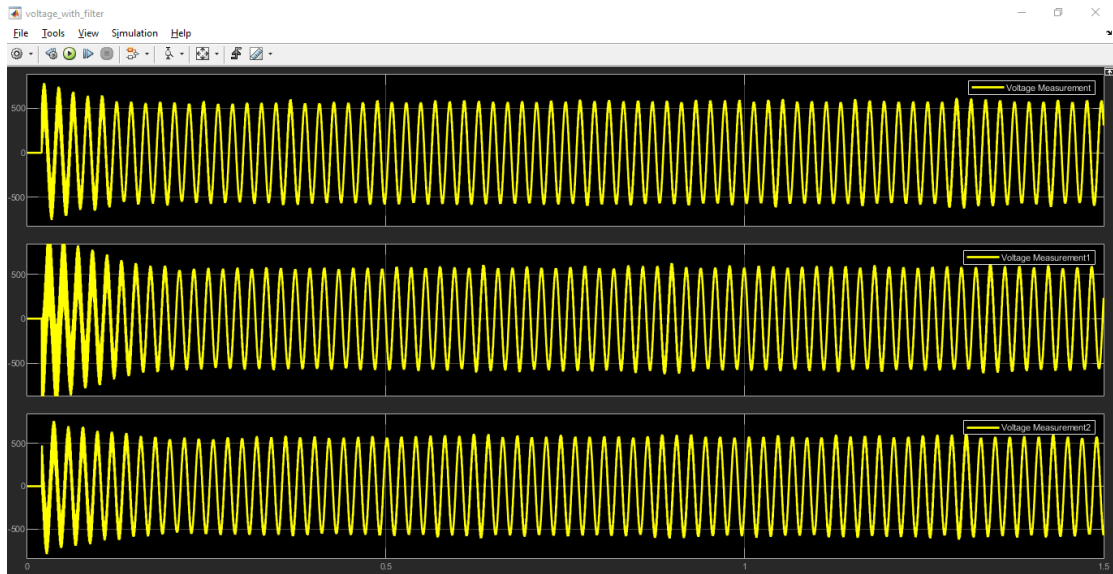
Σχήμα 3.2: Αφιλτράριστη μορφή τάσεων, στην έξοδο της γέφυρας. [Αποτελέσματα εξομοίωσης]

Στο σχήμα 3.2 φαίνεται η τάση των τριών φάσεων του μοντέλου χωρίς φίλτρο. Στο σχήμα 3.3 φαίνεται το ρεύμα των τριών φάσεων του μοντέλου χωρίς φίλτρο. Παρατηρούμε ότι το ρεύμα είναι αρκετά βελτιωμένο συγκριτικά με την τάση διότι, οι επαγωγές του επαγωγικού κινητήρα απορροφούν αρκετές από τις υψηλής συχνότητας συνιστώσες.

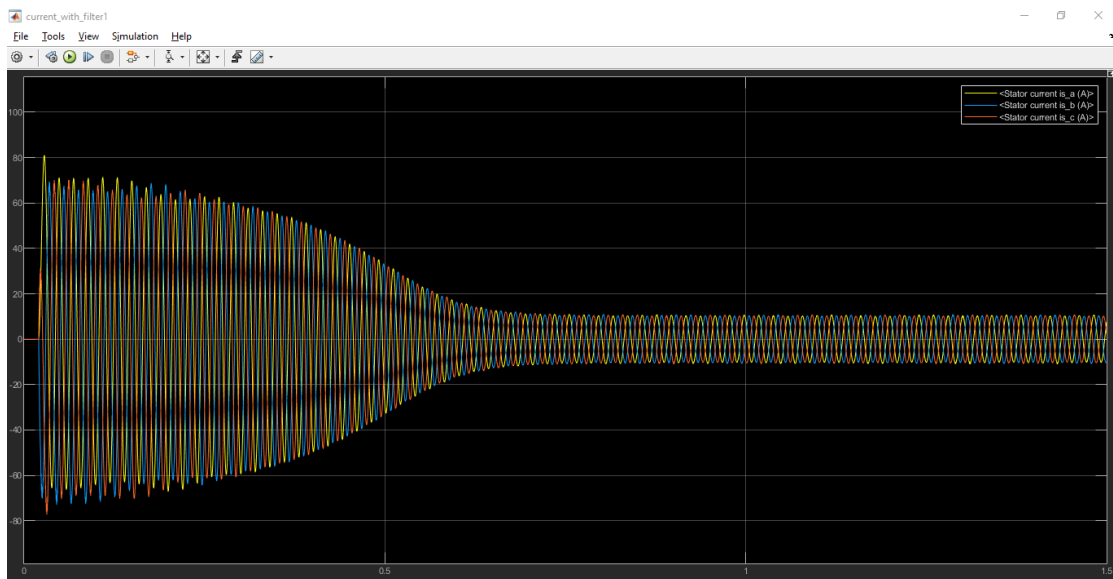


Σχήμα 3.3: Αφιλτράριστη μορφή ρευμάτων στην έξοδο της γέφυρας. [Αποτελέσματα εξομοίωσης]

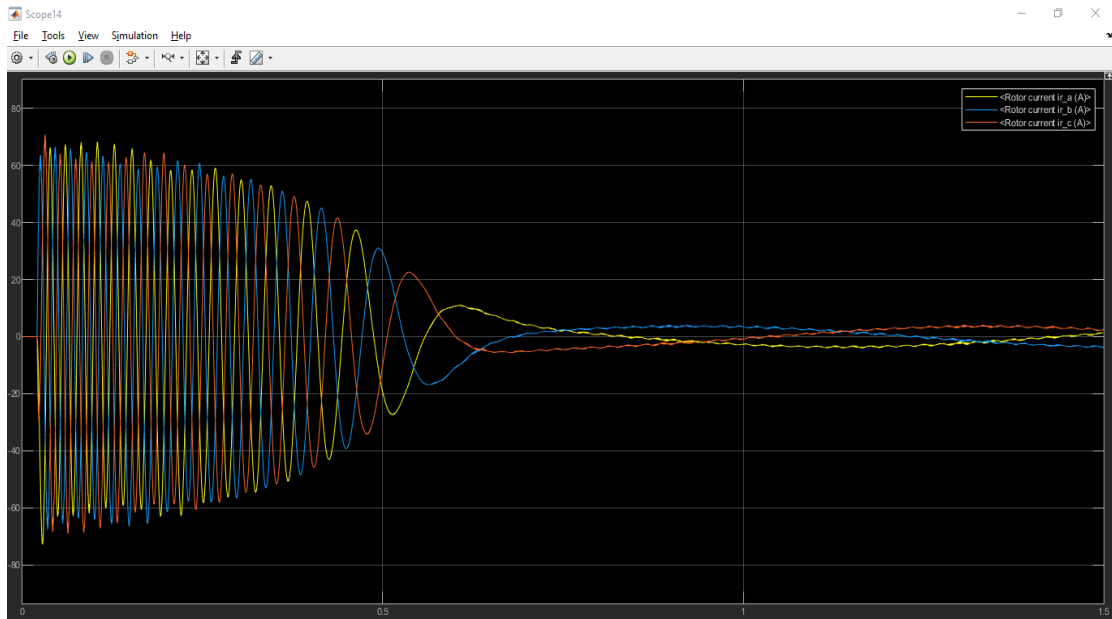
Διακρίνω όμως, πως η μορφή της τάσης χωρίς φίλτρο δεν είναι ξεκάθαρη και καθόλου ποιοτική. Για τον λόγο αυτό, τοποθετείται φίλτρο, το οποίο πραγματοποιεί εξομάλυνση, με αποτέλεσμα να έχουμε μια πολύ πιο ποιοτική μορφή τάσης και ακόμη καλύτερη κυματομορφή ρεύματος (σχ. 3.4 και 3.5).



Σχήμα 3.4: Φιλτραρισμένη μορφή τάσεων στην έξοδο του φίλτρου. [Αποτελέσματα εξομοίωσης]



Σχήμα 3.5: Φιλτραρισμένη μορφή ρευμάτων στον στάτη της μηχανής. [Αποτελέσματα εξομοίωσης]



Σχήμα 3.6: Μορφή των ρευμάτων στον ρότορα της μηχανής. [Αποτελέσματα εξομοίωσης]

Ολόκληρη η ανάλυση της διαδικασίας που θα ακολουθήσει, έχει χωριστεί σε τρία μέρη. Αρχικά θα μελετηθεί η επίδραση που έχουν στην συνολική ισχύ του μοντέλου οι εσωτερικές ωμικές αντιστάσεις των IGBT. Έπειτα θα γίνει η μελέτη της επίδρασης που έχει η αλλαγή της συχνότητας στο μοντέλο. Η συχνότητα αναφέρεται στον αριθμό των κύκλων που πραγματοποιούνται ανά δευτερόλεπτο και μετριέται σε Hertz (Hz). Συνήθως, η συχνότητα του ρεύματος στα οικιακά δίκτυα είναι 50 ή 60 Hz, ανάλογα με την κάθε χώρα. Η αλλαγή της συχνότητας σε ένα μοντέλο inverter, επηρεάζει την ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα που τροφοδοτείται από αυτό. Αυτό συμβαίνει επειδή η συχνότητα του ρεύματος είναι άμεσα συνδεδεμένη με την ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα. Αν αυξηθεί η συχνότητα, η ταχύτητα περιστροφής αυξάνεται, ενώ αν μειωθεί η συχνότητα, η ταχύτητα περιστροφής μειώνεται. Τέλος, θα μελετηθεί η αποδοτικότητα του συνολικού μοντέλου.

3.2 Θερμικές απώλειες

Κάθε φορτίο που τροφοδοτείται με τάση από μία ανορθωτική διάταξη παρουσιάζει αρμονικό περιεχόμενο στην τάση λειτουργίας. Η παρουσία αρμονικών συνιστωσών στην κυματομορφή της τάσης θα δημιουργήσει αναπόφευκτα αύξηση των αρμονικών

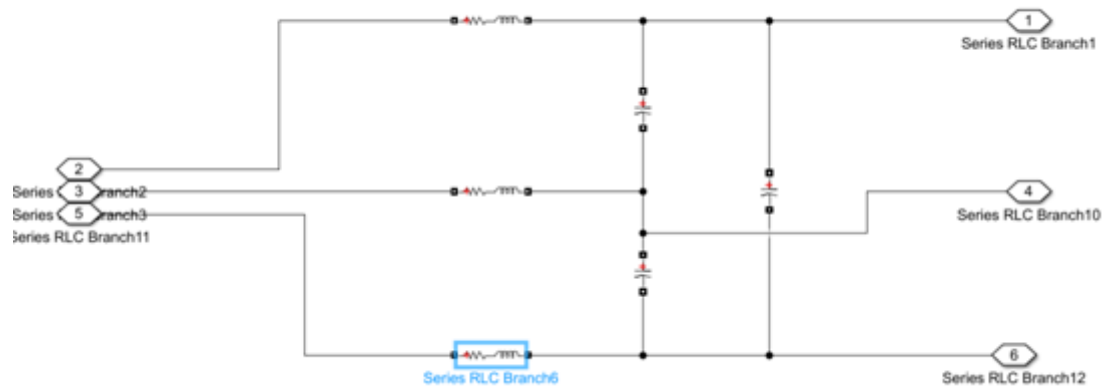
ρευμάτων της ίδιας συχνότητας στο ρεύμα φορτίου. Επιπλέον, το ρεύμα φορτίου από τη φύση του περιέχει αρμονικές συνιστώσες, επειδή στην πράξη δεν υπάρχει άπειρη αυτεπαγωγή στα πηνία εξομάλυνσης του ρεύματος. Τα ηλεκτρικά φορτία που απαιτούν AC τάση τροφοδοτούμενα από ένα αντιστροφέα τάσης DC/AC δημιουργούν από τη φύση τους αρμονικές συνιστώσες, λόγω της διακοπτικής λειτουργίας των ημιαγωγικών στοιχείων ισχύος. Οι επιπτώσεις στα φορτία είναι οι αυξημένες θερμικές απώλειες. Οι θερμικές απώλειες διακρίνονται σε δύο κατηγορίες. Τις απώλειες χαλκού στα τυλίγματα των πηνίων και τις απώλειες σιδήρου στους πυρήνες των πηνίων. Επιπλέον, οι απώλειες σιδήρου ή μαγνητικές απώλειες είναι ανάλογες με τη συχνότητα των εναλλασσόμενων τάσεων. Συνεπώς, οι αρμονικές συνιστώσες στα ρεύματα των φορτίων προξενούν αύξηση στις θερμικές απώλειες των τυλιγμάτων, αλλά και ακόμα μεγαλύτερη αύξηση των θερμικών απωλειών στους πυρήνες, αφού αυτές συνδέονται και με τη συχνότητα των ρευμάτων. Οι αυξημένες θερμικές απώλειες οδηγούν σε μείωση της απόδοσης και της ονομαστικής ισχύος ενός κινητήρα. Η επίδραση των αρμονικών καθορίζεται από τη διαδοχή που παρουσιάζουν σε σχέση με τη διαδοχή της θεμελιώδους συνιστώσας. Μία περιττή αρμονική τάξης $(3n-1)$, όπου $n=2,4,6\dots$ (5η , 11η , 17η κλπ.) παρουσιάζει αντίστροφη (αρνητική) διαδοχή από αυτή της θεμελιώδους συνιστώσας με αποτέλεσμα τα ρεύματα αυτής της αρμονικής συνιστώσας να προκαλούν στον άξονα του κινητήρα αντίθετη ροπή από τη φορά περιστροφής. Η διαδοχή προκύπτει από την αλλαγή στο πρόσημο της διαφοράς φάσης μιας αρμονικής από αυτό της θεμελιώδους. Αντίθετα, οι αρμονικές τάξης $(3n+1)$, όπου $n=2,4,6\dots$ (7η , 13η , 19η ...) παρουσιάζουν την ίδια διαδοχή με τη θεμελιώδη συνιστώσα συνεπώς δεν δημιουργούν προβλήματα αρμονικών ροπών στην κίνηση του άξονα του κινητήρα. Οι τριπλές αρμονικές (3η , 9η , 15η ...), επειδή βρίσκονται όλες σε φάση μεταξύ τους δεν παράγουν ροπή, αλλά μόνο θερμότητα, λόγω των απωλειών χαλκού και των μαγνητικών απωλειών.

3.2.1 Θερμικές απώλειες σε IGBT

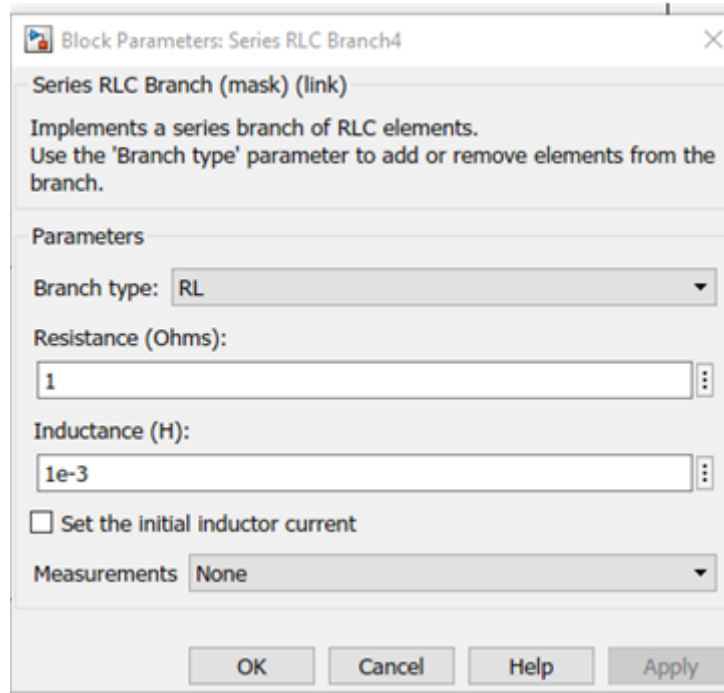
Οι θερμικές απώλειες η αλλιώς απώλειες αντίστασης, συγκεκριμένα σε ένα IGBT, μπορεί να οφείλονται σε πολλούς παράγοντες κατά την διάρκεια της λειτουργίας του. Αρχικά, κατά την διάρκεια της ενεργοποίησης, το IGBT, παρουσιάζει μια πτώση τάσης οδηγώντας σε απώλειες ισχύος σε μορφή θερμότητας (απώλειες αγωγής).

Ακόμη ένας λόγος, είναι πως κατά την μετάβαση από ενεργή σε ανενεργή κατάσταση και αντίστροφα, υπάρχει μια περίοδος όπου δαπανείται ενέργεια για να αλλάξει κατάσταση, προκαλώντας με αυτόν τον τρόπο θερμικές απώλειες (διακοπτικές απώλειες). Επιπλέον, ένας σημαντικός παράγοντας που συμβάλλει στην ύπαρξη θερμικών απωλειών, είναι ο χρόνος διακοπής. Ο χρόνος αυτός, είναι εκείνος που απαιτείται ώστε να απενεργοποιηθεί ένα IGBT και μπορεί να οδηγήσει σε απώλειες, αφού η συσκευή παραμένει σε ενεργή κατάσταση κατά τη διάρκεια αυτής της μετάβασης. Ακόμη, όταν το IGBT λειτουργεί σε υψηλό κύκλο εργασίας δηλαδή, παραμένει ενεργό για μεγάλο χρονικό διάστημα, οι αυξημένες απώλειες προκαλούν αύξηση θερμοκρασίας στο στοιχείο. Ο συνδυασμός όλων των παραπάνω παραγόντων, καθορίζει τις συνολικές θερμικές απώλειες των IGBT κατά την διάρκεια λειτουργίας τους. Επομένως ο σχεδιασμός ψύξης και οι συνθήκες λειτουργίας γενικότερα, είναι πολύ σημαντικοί παράγοντες για την διαχείριση των θερμικών απωλειών και την διασφάλιση της σταθερής λειτουργίας των IGBT.

3.2.2 Αποτέλεσμα υπολογισμού απωλειών αντίστασης στο μοντέλο μας



Σχήμα 3.7: Προσθήκη αντίστασης [Αποτέλεσμα εξομοίωσης]



Σχήμα 3.8: Επιλογές φίλτρων [Αποτέλεσμα εξομοίωσης]

Κατά τη διάρκεια της ανάλυσης μας στο μοντέλο του ηλεκτρονικού μας μετατροπέα, υπολογίσαμε τις απώλειες αντίστασης που παρουσιάζονται στις τρεις φάσεις του μοντέλου μας πριν και μετά τη χρήση φίλτρων. Ο σκοπός αυτής της ανάλυσης είναι να κατανοήσουμε πώς οι απώλειες αντίστασης επηρεάζουν την απόδοση των φίλτρων και συνεπώς του μοντέλου μας.

Πριν τη χρήση των φίλτρων, τα μετρημένα ρεύματα και τάσεις για τις τρεις φάσεις ήταν ως εξής:

- Φάση Α: Τάση $V=399.97$ V, Ρεύμα $I=6.49$ A
- Φάση Β: Τάση $V=397.59$ V, Ρεύμα $I=7.34$ A
- Φάση Γ: Τάση $V=397.46$ V, Ρεύμα $I=7.29$ A

Μετά τη χρήση των φίλτρων, τα μετρημένα ρεύματα και τάσεις για τις τρεις φάσεις έγιναν:

- Φάση Α: Τάση $V=392.13$ V, Ρεύμα $I=7.26$ A
- Φάση Β: Τάση $V=392.66$ V, Ρεύμα $I=7.24$ A

- Φάση Γ: Τάση $V=392.68$ V, Ρεύμα $I=7.30$ A

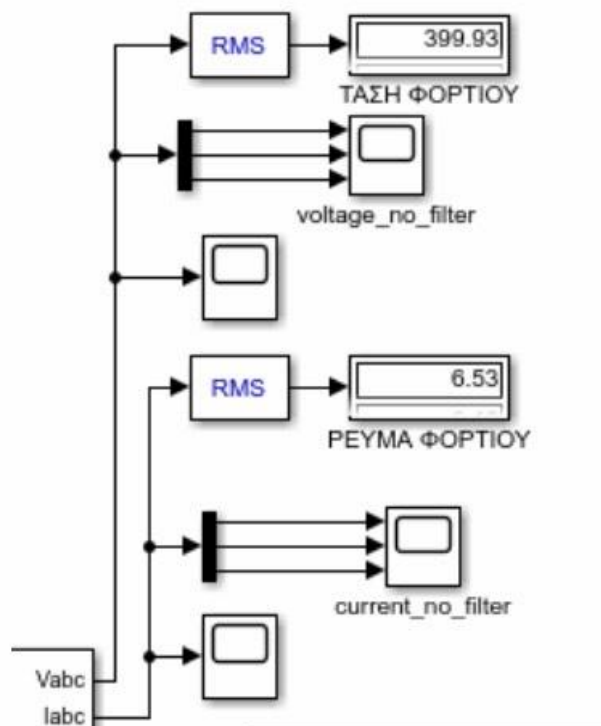
Σύμφωνα με το νόμο του Ohm, μπορούμε να υπολογίσουμε τις απώλειες αντίστασης σε κάθε φάση:

- Φάση Α: Απώλεια Αντίστασης $P_{loss_phaseA} = (7.26 \text{ A})^2 * 1 \Omega = 52.71 \text{ W}$
- Φάση Β: Απώλεια Αντίστασης $P_{loss_phaseB} = (7.24 \text{ A})^2 * 1 \Omega = 52.54 \text{ W}$
- Φάση Γ: Απώλεια Αντίστασης $P_{loss_phaseC} = (7.30 \text{ A})^2 * 1 \Omega = 53.29 \text{ W}$

Η συνολική απώλεια αντίστασης για όλες τις φάσεις είναι περίπου 158.54 W. Αυτές οι απώλειες αντίστασης αναδεικνύουν τις απώλειες ισχύος που σχετίζονται με τις αντιστάσεις στο μοντέλο μας. **Είναι σημαντικό να σημειώσουμε ότι αυτός ο υπολογισμός βασίζεται σε ιδανικές τιμές αντίστασης και δεν λαμβάνει υπόψη άλλες απώλειες ισχύος που μπορεί να εμφανίζονται λόγω μη ιδανικών στοιχείων στο μοντέλο μας. Παρ 'όλα αυτά, αυτή η ανάλυση μας παρέχει μια καλή εκτίμηση των απωλειών αντίστασης στο συγκεκριμένο μοντέλο και μας βοηθά να κατανοήσουμε την επίδρασή τους στην απόδοση του ηλεκτρονικού μας μετατροπέα.**

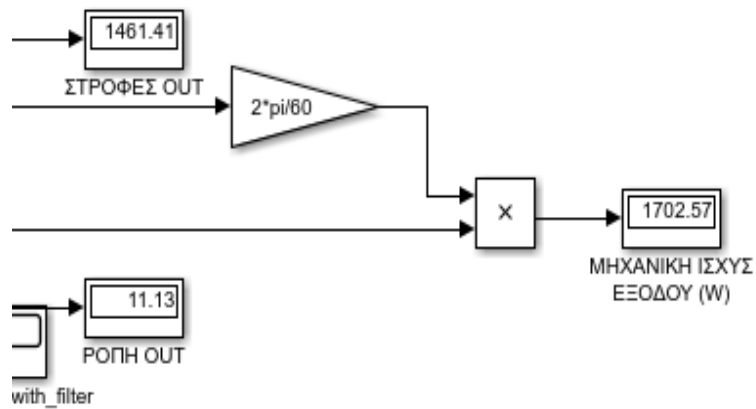
3.3 Επίδραση των IGBT's στην συχνότητα

Από την αρχικοποίηση του μοντέλου η ωμική αντίσταση των IGBT είναι $1/e^3$ άρα κατά την αρχική λειτουργία του μοντέλου υπάρχουν απώλειες, για να υπολογιστεί η επίδραση τρέξαμε το μοντέλο με μια αρχική αντίσταση και έπειτα αυξήσαμε την αντίσταση σε $1/e^2$ και ξανατρέξαμε το μοντέλο. Στο Σχήμα 3.9, διακρίνονται οι ενεργές τιμές της τάσης και της έντασης του αντιστροφέα (inverter) όπου η ένταση είναι 6.53 A, και η τάση είναι 399.93V.



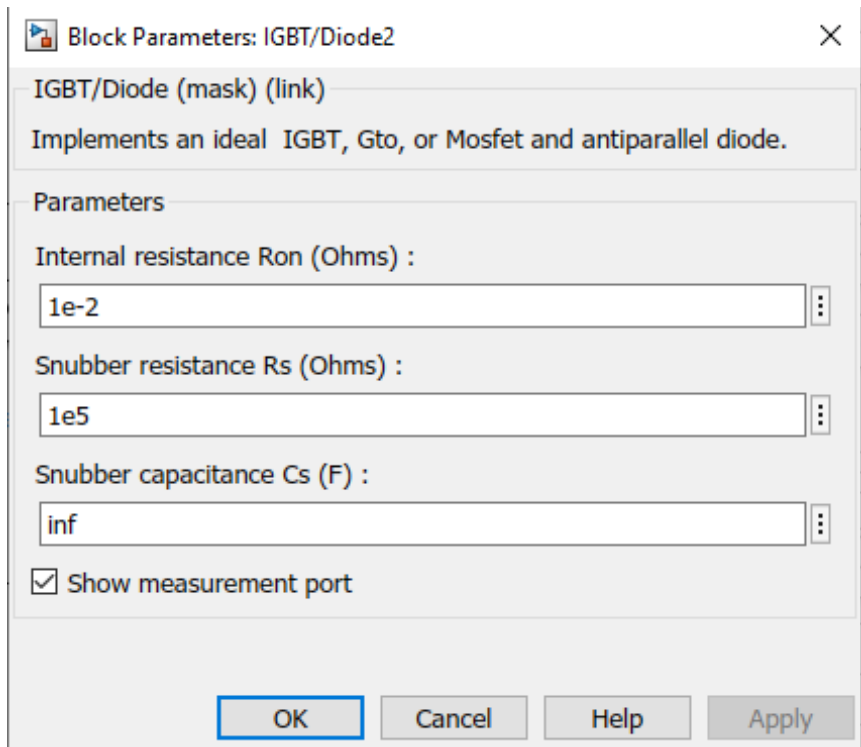
Σχήμα 3.9: Τάση φορτίου και ροή ηλεκτρικού φορτίου [Αποτέλεσμα εξομοίωσης]

Με βάση τα αποτελέσματα που πήραμε από την διαφοροποίηση του μοντέλου, φαίνεται ότι μετά την αλλαγή στην εσωτερική ωμική αντίσταση των IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor), η συχνότητα μειώθηκε από 1462 στροφές σε 1461.1 στροφές. Η μικρή μείωση στη συχνότητα προκαλεί μια αντίστοιχη μείωση στην ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα που τροφοδοτείται από τον inverter. Αυτό συμβαίνει εξαιτίας της αναλογικής σχέσης μεταξύ της συχνότητας εξόδου του μετατροπέα και της ταχύτητας περιστροφής του κινητήρα. Όταν η συχνότητα εισόδου μειώνεται, η ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα μειώνεται αναλογικά. Επιπλέον, το αποτέλεσμα δείχνει ότι η μηχανική ισχύς που παράγεται, είναι 1702.57 Watt. Αυτό είναι το αποτέλεσμα του συνδυασμού της μειωμένης συχνότητας με την εσωτερική ωμική αντίσταση των IGBT. Η εσωτερική ωμική αντίσταση επηρεάζει τις απώλειες ισχύος στο inverter, και ως αποτέλεσμα, η μηχανική ισχύς που μεταφέρεται στον κινητήρα μειώνεται. Αυτά τα αποτελέσματα υποδεικνύουν ότι η αλλαγή της συχνότητας και η αύξηση της εσωτερικής ωμικής αντίστασης των IGBT επηρεάζουν την απόδοση του inverter και την ισχύ που παράγεται για την κίνηση του κινητήρα. Είναι σημαντικό να λαμβάνονται υπόψη αυτές οι επιδράσεις.



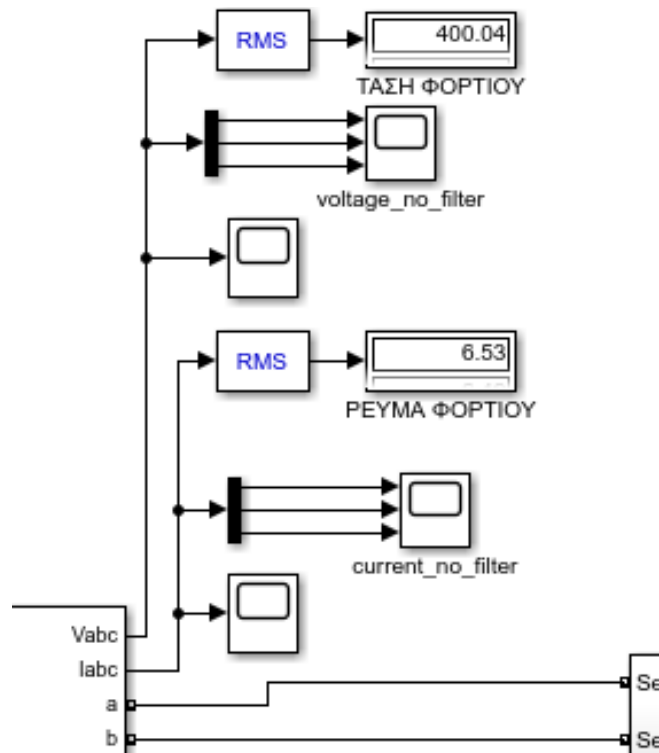
Σχήμα 3.10: Μηχανική Ισχύς [Αποτέλεσμα εξομοίωσης]

Για τον έλεγχο των απωλειών από την εσωτερική αντίσταση αλλάξαμε την ωμική αντίσταση σε $3720 \cdot 10^{-44} \Omega$ δηλαδή αποτελεί αύξηση e^{10} . Για να το επιτύχουμε αυτό, μεταβήκαμε σε όλα τα IGBT και επιλέξαμε να αυξήσουμε την ωμική αντίσταση (Σχήμα 3.11).



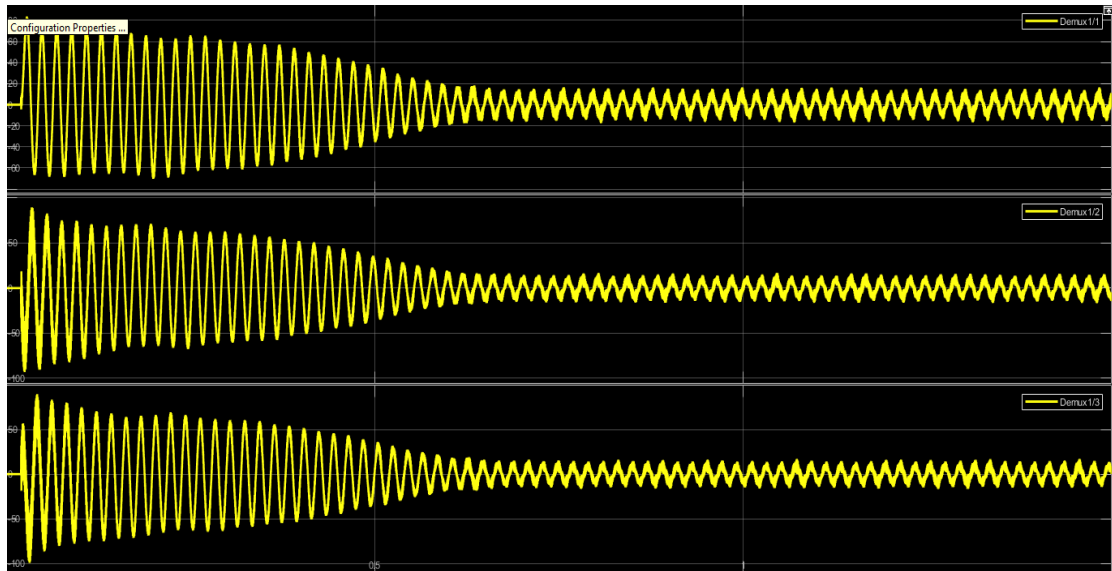
Σχήμα 3.11: Παράμετροι των IGBT [Αποτέλεσμα εξομίωσης]

Δηλαδή, στο σχήμα 3.11 αλλάζουμε την τιμή του Internal resistance.



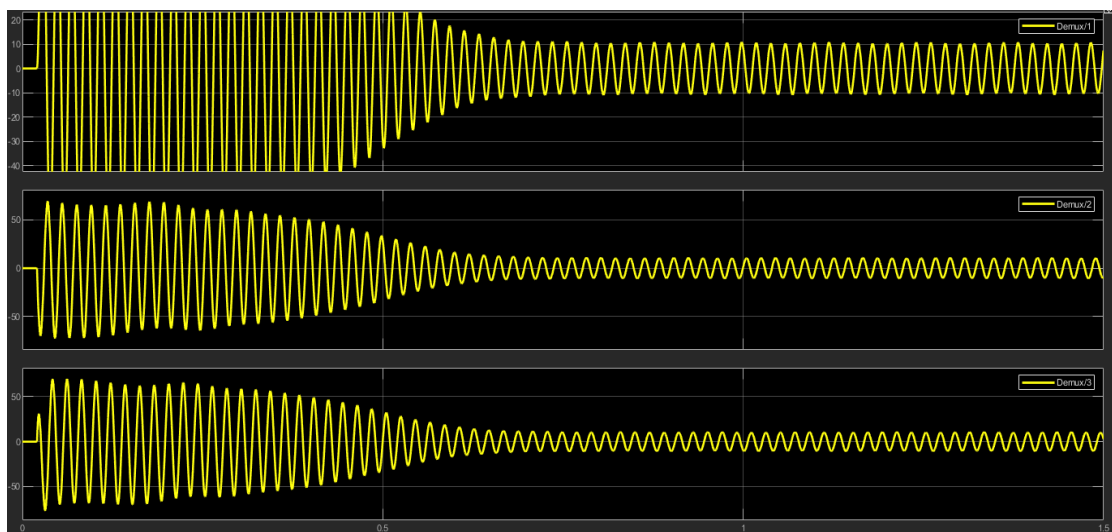
Σχήμα 3.12: Τάση φορτίου και ροή ρεύματος [Αποτέλεσμα εξομίωσης]

Στο σχήμα 3.9 φαίνονται η τάση και ένταση κατά την έξοδο από τον Inverter όπου η ένταση είναι 6.53A και η τάση 400.04V από τις μετρήσεις του μοντέλου. Όπως παρατηρούμε η ένταση δεν επηρεάστηκε καθόλου, ενώ η τάση του φορτίου αυξήθηκε.



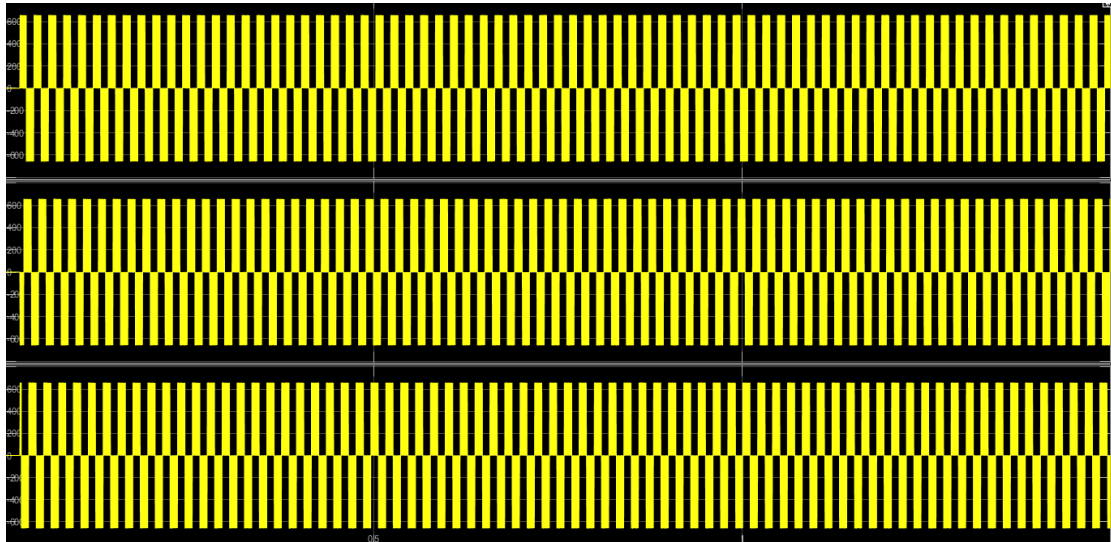
Σχήμα 3.13: Ένταση ρεύματος χωρίς φίλτρο [Αποτέλεσμα εξομοίωσης]

Παρατηρώ το διάγραμμα έντασης του ρεύματος πριν την εισαγωγή του φίλτρου. Η εικόνα είναι όμοια με την προηγούμενη αντίσταση.



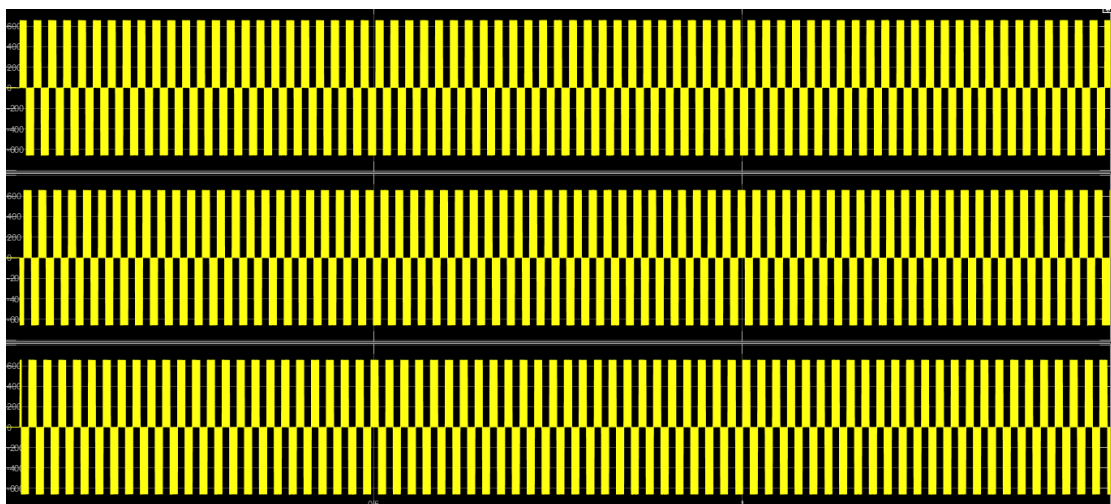
Σχήμα 3.14: Ένταση ρεύματος με φίλτρο [Αποτέλεσμα εξομοίωσης]

Στο διάγραμμα έντασης του ρεύματος μετά την εισαγωγή του φίλτρου, παρατηρώ, πως παρόμοια και με το προηγούμενο παράδειγμα, η εικόνα και μετά το φίλτρο παραμένει όμοια με εκείνη της προηγούμενης αντίστασης. Πράγμα το οποίο είναι αναμενόμενο καθώς όπως αναφέρθηκε η ένταση δεν επηρεάστηκε.

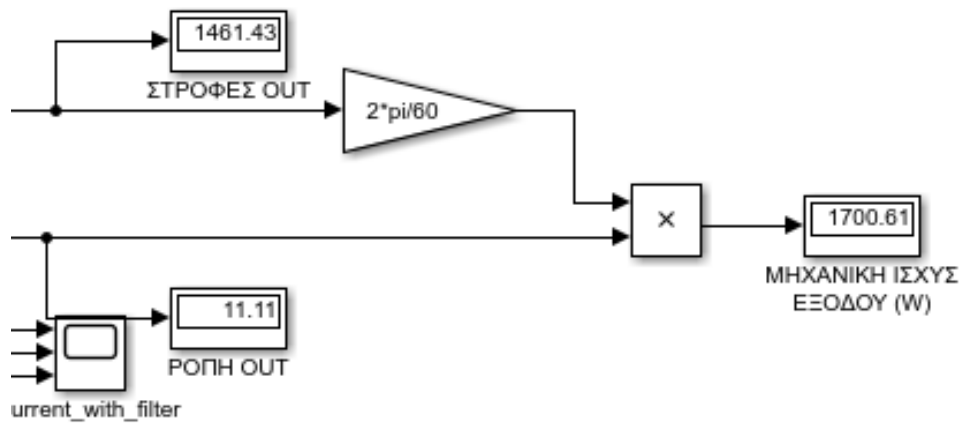


Σχήμα 3.15: Τάση ρεύματος χωρίς φίλτρο [Αποτέλεσμα εξομοίωσης]

Στην παραπάνω εικόνα φαίνεται η τάση του μοντέλου χωρίς φίλτρο. Η εικόνα του διαγράμματος είναι όμοια με της προηγούμενης ωμικής αντίστασης καθώς και η διαφοροποίηση της τάσης είναι μικρή.



Σχήμα 3.16: Ένταση ρεύματος με φίλτρο [Αποτέλεσμα εξομοίωσης]



Σχήμα 3.17: Μηχανική Ισχύς [Αποτέλεσμα εξομοίωσης]

Από την παραπάνω εικόνα βλέπουμε ότι ενώ αρχίσαμε με μία συχνότητα 1462 στροφών καταλήγουμε σε 1461.43 στροφές και ότι η μηχανική ισχύς είναι 1700.61Watt. Η διαφορά με την προηγούμενη αντίσταση αφορά μία μείωση κατά 1.96watt.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο

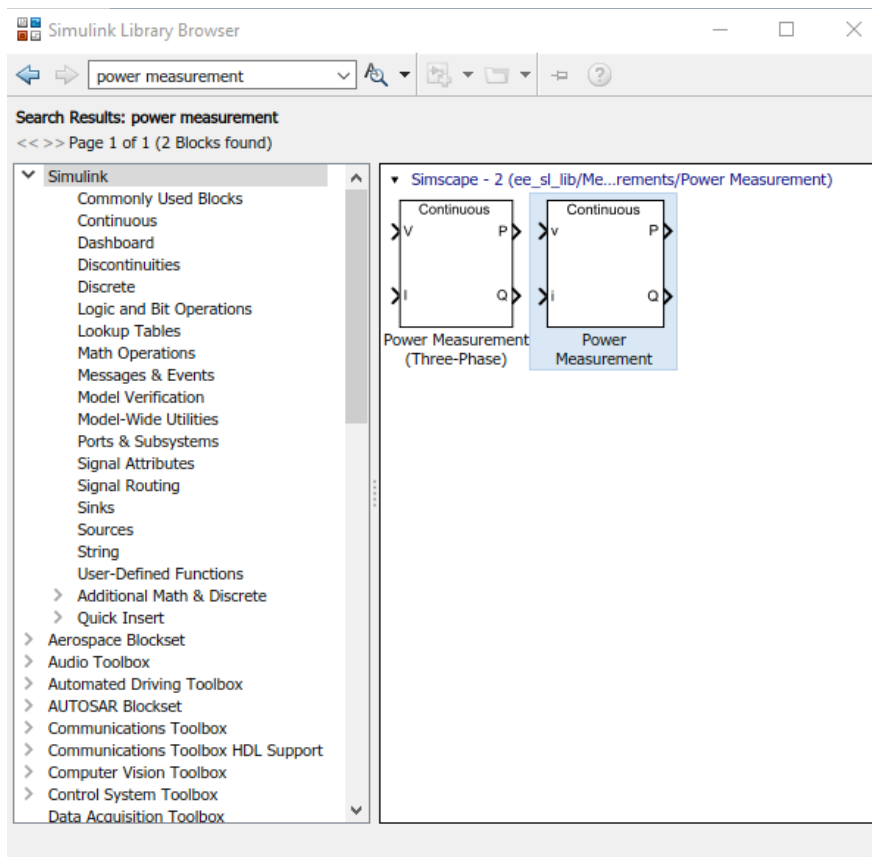
ΕΥΡΕΣΗ ΤΟΥ ΑΠΟΔΟΤΙΚΟΤΕΡΟΥ ΣΗΜΕΙΟΥ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΜΕΣΩ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ

4.1 Εξήγηση της σημασίας λειτουργίας του συστήματος στη βέλτιστη απόδοση

Η λειτουργία ενός κινητήριου συστήματος στην μέγιστη απόδοση, είναι πολύ σημαντική για διάφορους λόγους. Πρώτα απ' όλα, η βέλτιστη απόδοση συνήθως εξασφαλίζει την καλύτερη δυνατή απόδοση από τη συσκευή (inverter), εξοικονομώντας ενέργεια. Επιπλέον, η λειτουργία σε μέγιστη απόδοση είναι σημαντική για τη διατήρηση της μακροζωίας του inverter, καθώς η υπερφόρτωση ή η υπολειτουργία του μπορεί να προκαλέσει σημαντικά προβλήματα, ακόμη και πρόωρη φθορά. Επίσης, ανάλογα με την εφαρμογή, η μέγιστη απόδοση μπορεί να είναι απαραίτητη για την καλή λειτουργία των συσκευών που τροφοδοτούνται από το inverter. Τέλος, σε περιπτώσεις όπου απαιτούνται αιχμές ισχύς για μικρά χρονικά διαστήματα, ένας inverter που μπορεί να λειτουργήσει σε μέγιστη απόδοση μπορεί να ανταποκριθεί αποτελεσματικά.

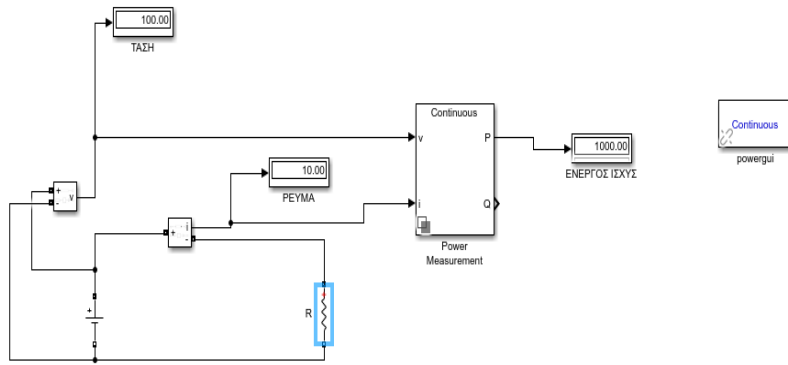
4.2 Ενεργός Ισχύς και απόδοση

Γενικά, η ενεργός ή πραγματική ισχύς P , είναι η μορφή ισχύος σε ένα ηλεκτρικό κύκλωμα που πραγματικά χρησιμοποιείται για να εκτελέσει ένα έργο, όπως την κίνηση μηχανών ή την παροχή ενέργειας σε φορτία. Μετριέται σε κιλοβατ (kW) και είναι μέρος της φαινόμενης ισχύος. Η ενεργός ισχύς, σχετίζεται στενά με την απόδοση του κινητήριου συστήματος. Μια υψηλή απόδοση σημαίνει ότι μεγαλύτερο ποσοστό της ενέργειας εισόδου μετατρέπεται σε ενεργό ισχύ στην έξοδο. Στην συγκεκριμένη διπλωματική εργασία, για τη μέτρηση της ενεργού ισχύος – και κατ'επέκταση την μέτρηση του βαθμού απόδοσης του συστήματος- χρησιμοποιήθηκε το έτοιμο block που παρουσιάζεται παρακάτω, το οποίο υπάρχει στην βιβλιοθήκη του simulink.

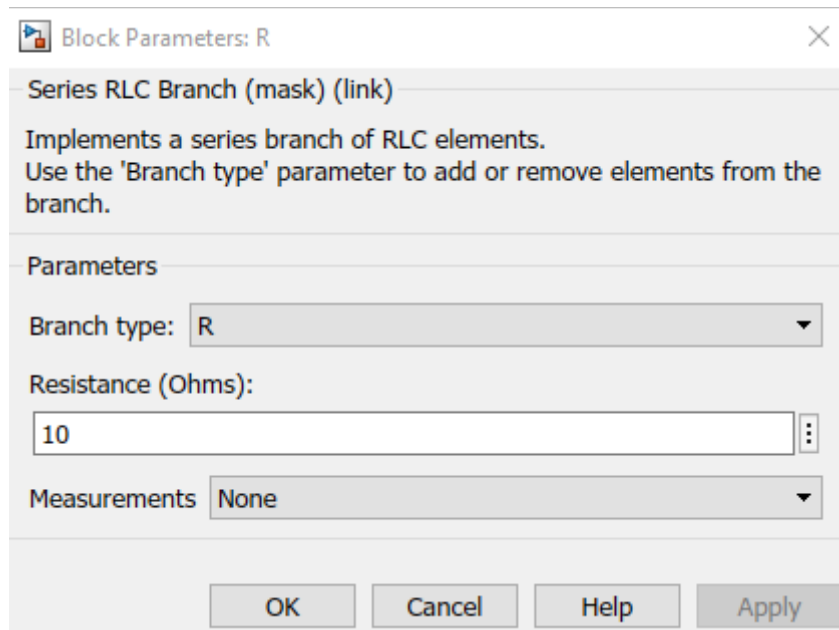


Σχήμα 4.1: Έτοιμο block μέτρησης ενεργού ισχύος

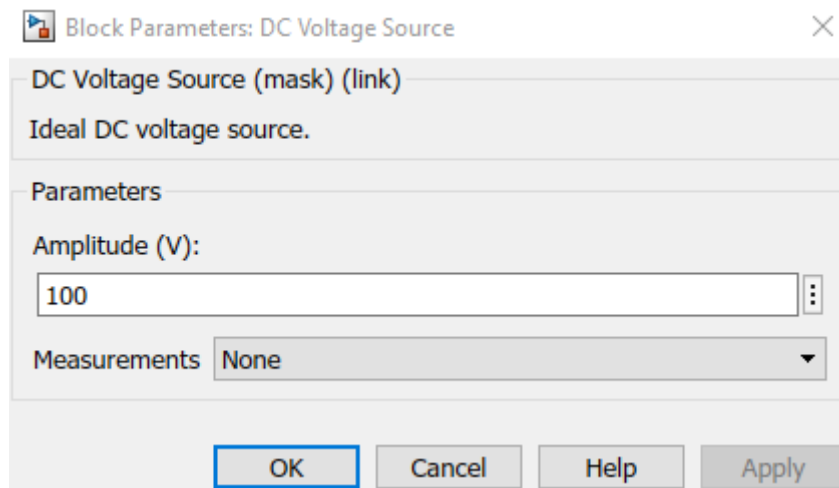
Για να επιβεβαιωθούν οι σωστές μετρήσεις και η αξιοπιστία του συγκεκριμένου block, πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις σε πολύ απλό κύκλωμα. Πιο συγκεκριμένα, όπως βλέπουμε στο σχήμα 4.2, μετρήσαμε την ενεργό ισχύ σε ένα κύκλωμα με πηγή τάσης dc 100V και μια ωμική αντίσταση 10Ω.



Σχήμα 4.2: Μέτρηση ενεργού ισχύος [Αποτέλεσμα εξομοίωσης]



Σχήμα 4.3: Επιλογή ωμικής αντίστασης στα 10Ω



Σχήμα 4.4: Επιλογή τάσης dc στα 100V

Με γνωστά πλέον την τάση (100V), και την αντίσταση (10Ω), περιμέναμε η ισχύς να είναι 1000W, πράγμα το οποίο – όπως παρατηρούμε- επιβεβαιώθηκε. Επομένως αφού διαπιστώθηκε πως το block είναι αξιόπιστο, θα το χρησιμοποιήσουμε ώστε να μετρήσουμε και την ενεργό ισχύ στην dc πλευρά του κινητήριου συστήματός μας.

4.3 Ανάλυση της αποδοτικότητας με χρήση Simulink

4.3.1 Εισαγωγή – Υποσυστήματα που χρησιμοποιήθηκαν

Στην ενότητα αυτή, εξετάζουμε λεπτομερώς το μοντέλο του inverter που δημιουργήσαμε στο περιβάλλον Simulink για τη μελέτη της αποδοτικότητας. Το μοντέλο αυτό αποτελεί τον πυλώνα της εργασίας μας και περιλαμβάνει διάφορα υποσυστήματα που αντιπροσωπεύουν τα διάφορα στοιχεία του inverter και τις μετρήσεις που πραγματοποιούμε για τη μελέτη της αποδοτικότητας. Για να εξετάσουμε το μοντέλο, χρησιμοποιήσαμε μερικά υποσυστήματα, τα οποία είναι :

-Είσοδος Συνεχούς Τάσης (DC Input): Σε αυτό το υποσύστημα, περιγράφουμε την πηγή συνεχούς τάσης (DC) που τροφοδοτεί τον inverter. Καθορίζουμε την τάση και το ρεύμα εισόδου.

-Μετρήσεις Τάσης και Ρεύματος: Χρησιμοποιήσαμε τα μπλοκ μέτρησης τάσης (Voltage Measurement) και ρεύματος (Current Measurement) για την παρακολούθηση της τάσης και του ρεύματος εισόδου. Αυτές οι μετρήσεις είναι ζωτικές για την αξιολόγηση της λειτουργίας του inverter.

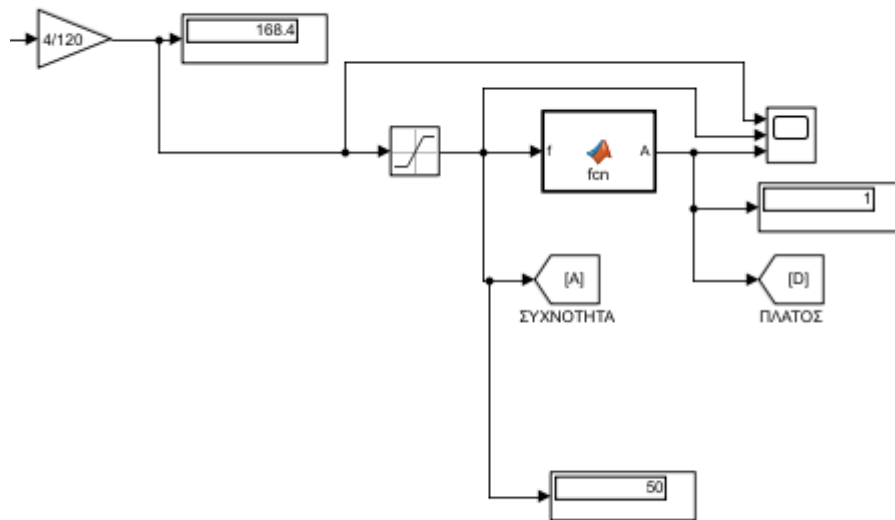
- Μπλοκ Μέτρησης (Measurement Blocks): Τα μπλοκ μέτρησης τάσης και ρεύματος που παρέχονται από το Simulink χρησιμοποιήθηκαν για την παρακολούθηση των τάσεων και των ρευμάτων στο μοντέλο.

Τα παραπάνω υποσυστήματα χρησιμοποιήθηκαν για τη δημιουργία ενός λεπτομερούς μοντέλου του inverter και την παρακολούθηση των απαραίτητων μετρήσεων για τη μελέτη της αποδοτικότητας του συστήματος.

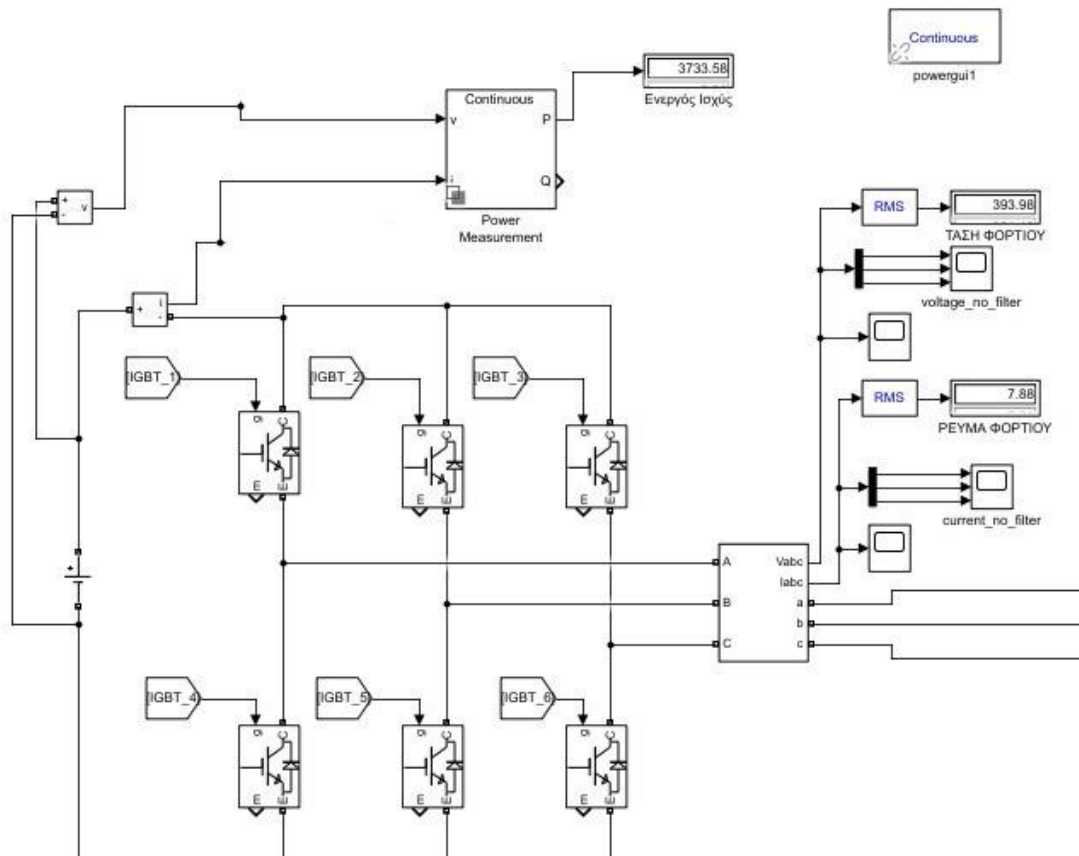
4.4 Εύρεση Βέλτιστων Σημείων

Για να μπορέσουμε να προσδιορίσουμε τα βέλτιστα σημεία για διαφορετικές τιμές ροπής, υπολογίσαμε τον βαθμό απόδοσης του συνολικού μοντέλου μας, για διαφορετικές συχνότητες, και χαράξαμε τις χαρακτηριστικές καμπύλες βαθμού απόδοσης – στροφών (ταχύτητας). Στα παρακάτω σχήματα (4.5, 4.6, 4.7) διακρίνονται

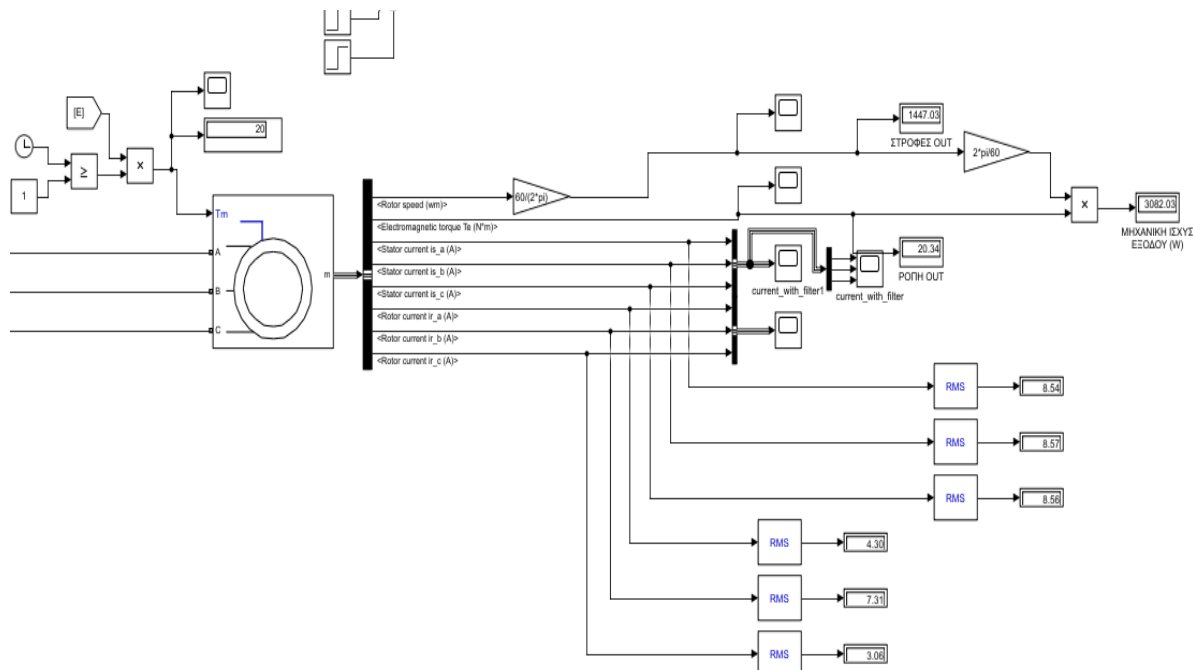
τα μεγέθη που θα χρειαστούμε δηλαδή, η ροπή μηχανικού φορτίου, η συχνότητα λειτουργίας, οι στροφές αλλά και η μηχανικής ισχύς εξόδου του συστήματός μας.



Σχήμα 4.5: Ένδειξη συχνότητας λειτουργίας σε περιβάλλον Simulink



Σχήμα 4.6: Ένδειξη ενεργού ισχύος στην είσοδο του μετατροπέα σε περιβάλλον Simulink



Σχήμα 4.7: Ένδειξη ροπής μηχανικού φορτίου στροφών και μηχανικής ισχύος εξόδου σε περιβάλλον Simulink

Ο βαθμός απόδοσης του συνολικού μοντέλου, προκύπτει διαιρώντας την μηχανική ισχύ εξόδου του συστήματος δια την ενεργό ισχύ στην είσοδο του μετατροπέα, την οποία μπορούμε να διακρίνουμε από την ένδειξη του block ισχύος που χρησιμοποιήσαμε. Πιο συγκεκριμένα, ο βαθμός απόδοσης προκύπτει από το λόγο (Μηχανική Ισχύς Εξόδου / Ενεργός Ισχύς)*100%. Στην συγκεκριμένη περίπτωση με βάση τα παραπάνω σχήματα (4.5, 4.6, 4.7) ο βαθμός απόδοσης θα είναι $(3082.03 / 3733,58) * 100\%$ δηλαδή 82,54%. Η ίδια διαδικασία πραγματοποιήθηκε για όλες τις μετρήσεις.

Μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν για διαφορετικές τιμές ροπής φορτίου αλλά και συχνότητας, προκειμένου να εξεταστεί και να βρεθεί σε διάφορες τιμές ροπής, το βέλτιστο σημείο. Οι παρακάτω πίνακες (4.1, 4.2, 4.3) παρουσιάζουν τις διαφορετικές τιμές και τον υπολογισμό του βαθμού απόδοσης σε κάθε περίπτωση.

20Nm	ΕΝΕΡΓΟΣ ΙΣΧΥΣ ΕΙΣΟΔΟΥ(DC ΠΛΕΥΡΑ)	ΣΤΡΟΦΕΣ(ΤΑΧΥΤΗΤΑ)	ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΙΣΧΥΣ ΕΞΟΔΟΥ	ΒΑΘΜΟΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ
15Hz	1446.06W	375.10	772.29W	53.41%
30Hz	2424.68W	841.63	1804.74W	74.43%
40Hz	3081.45W	1144.99	2442.80W	79.27%
50Hz	3733.58W	1447.03	3082.03W	82.54%
55Hz	4100.63W	1482.73	3452.07W	84.18%
<u>60Hz</u>	<u>4382.02W</u>	<u>1589.86</u>	<u>3774.43W</u>	<u>86.13%</u>
65Hz	5001.27W	1597.26	3856.67W	77.11%
75Hz	17672.36W	1696.88	8188.00W	46.33%

Πίνακας 4.1: Μετρήσεις για ροπή 20Nm

30Nm	ΕΝΕΡΓΟΣ ΙΣΧΥΣ ΕΙΣΟΔΟΥ(DC ΠΛΕΥΡΑ)	ΣΤΡΟΦΕΣ(ΤΑΧΥΤΗΤΑ)	ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΙΣΧΥΣ ΕΞΟΔΟΥ	ΒΑΘΜΟΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ
15Hz	2252.64W	293.94	826.95W	36.71%
30Hz	3667.03W	800.64	2535.38W	69.17%
40Hz	4629.18W	1110.10	3523.40W	76.11%
50Hz	5571.45W	1415.32	4490.31W	80.59%
<u>55Hz</u>	<u>5974.31W</u>	<u>1437.29</u>	<u>4836.66W</u>	<u>80.95%</u>
60Hz	6154.52W	1587.11	4841.13W	78.65%
65Hz	7340.11W	1592.30	4998.77W	68.11%
75Hz	9878.19W	1675.27	5026.76W	50.88%

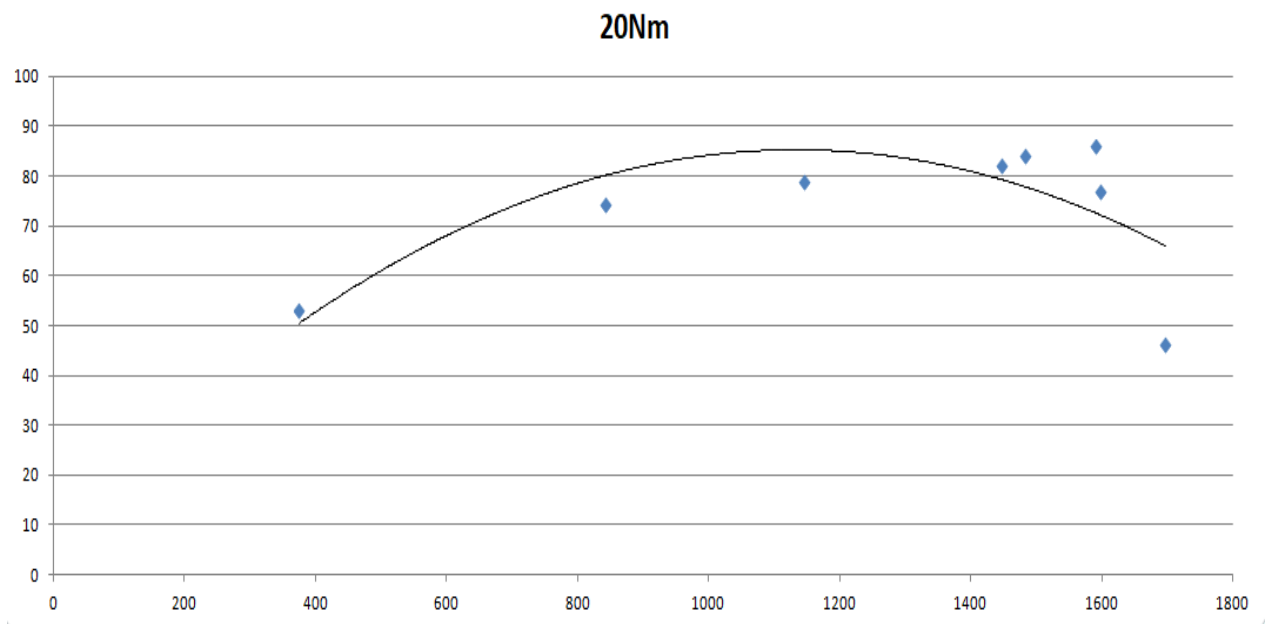
Πίνακας 4.2: Μετρήσεις για ροπή 30Nm

40Nm	ΕΝΕΡΓΟΣ ΙΣΧΥΣ ΕΙΣΟΔΟΥ(DC ΠΛΕΥΡΑ)	ΣΤΡΟΦΕΣ(ΤΑΧΥΤΗΤΑ)	ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΙΣΧΥΣ ΕΞΟΔΟΥ	ΒΑΘΜΟΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ
15Hz	3007.72W	156.92	463.08W	15.39%
30Hz	5097.17W	744.13	3062.91W	60%
40Hz	6326.13W	1066.15	4462.11W	70.53%
<u>50Hz</u>	<u>7564.98W</u>	<u>1377.40</u>	<u>5790.81W</u>	<u>76.54%</u>
55Hz	7570.23W	1386.52	5798.12W	76.39%
60Hz	8488.68W	1529.78	6455.21W	76.04%
65Hz	10332.56	1544.17	6783.88W	65.66%
75Hz	18238.94W	1658.87	4875.19W	26.73%

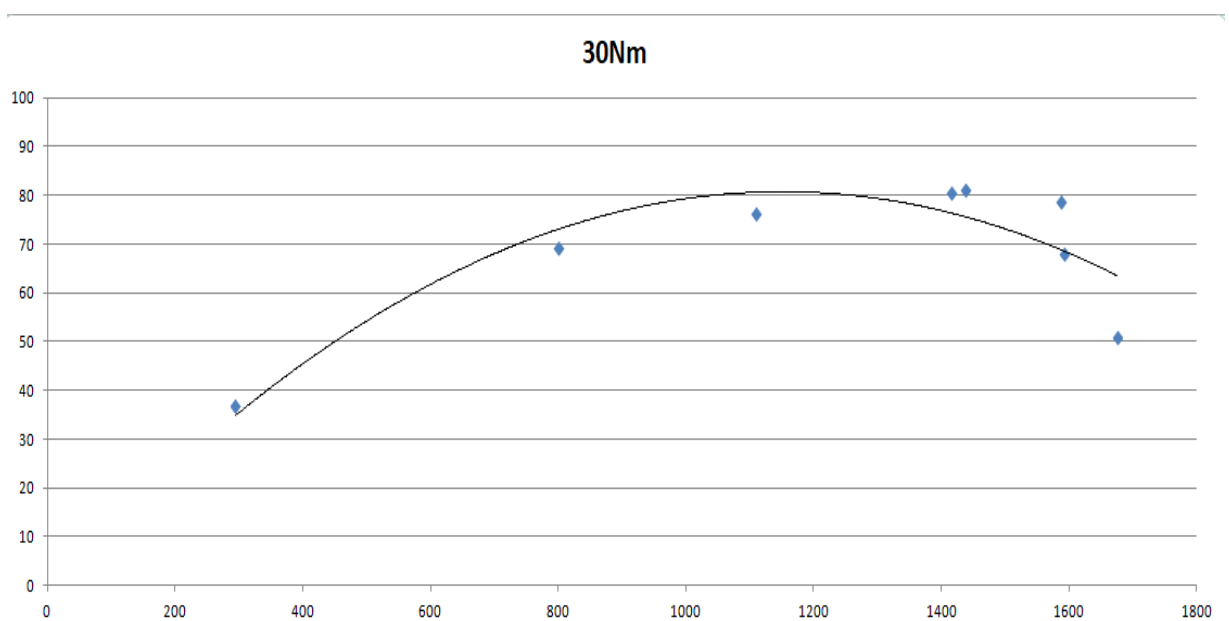
Πίνακας 4.3: Μετρήσεις για ροπή 40Nm

Σε κάθε πίνακα, διαφορετικής τιμής ροπής, είναι υπογραμμισμένες οι μετρήσεις σε μια συγκεκριμένη συχνότητα, όπου σε αυτήν την συχνότητα, ο βαθμός απόδοσης είναι μέγιστος. Σε αυτές τις συχνότητες θα λέγαμε πως το σύστημά μας λειτουργεί στη μέγιστη απόδοση δηλαδή, βρίσκεται στο βέλτιστο σημείο. Επίσης, είναι εμφανές πως σε διαφορετικές τιμές ροπής, το βέλτιστο σημείο το συναντάμε σε διαφορετικές συχνότητες.

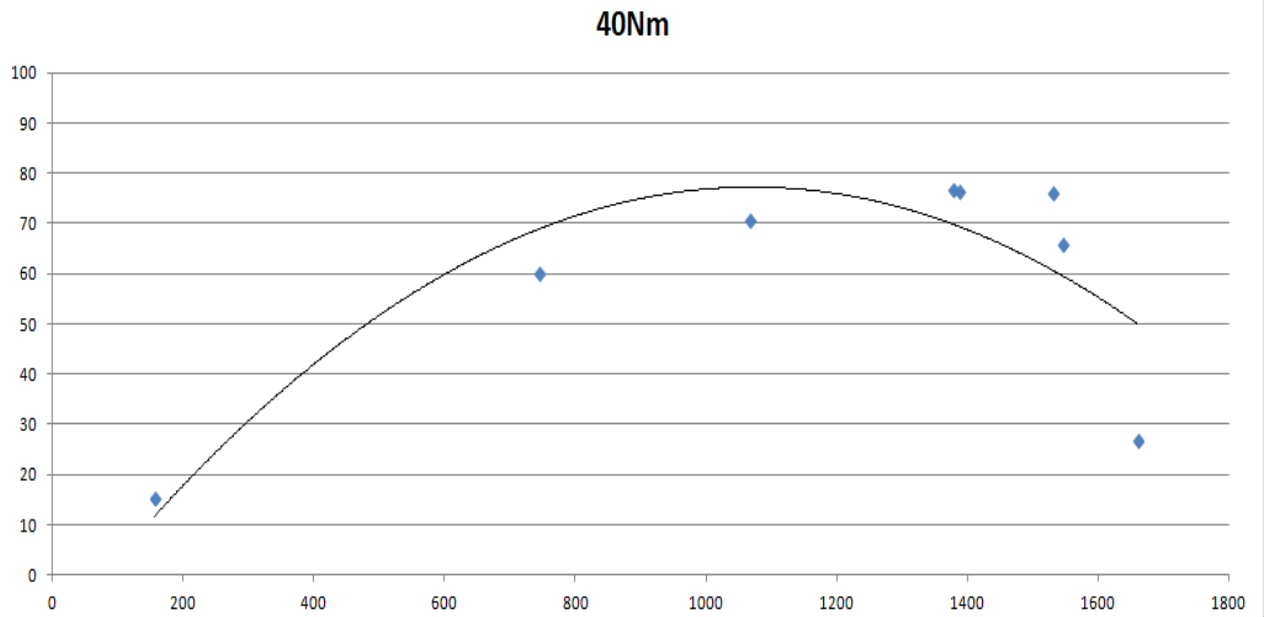
Στα παρακάτω σχήματα (4.8, 4.9, 4.10) παρουσιάζονται οι χαρακτηριστικές βαθμού απόδοσης – στροφών (ταχύτητας), για κάθε τιμή ροπής ξεχωριστά, αλλά και σε κοινούς άξονες, ώστε να μπορέσουμε να διακρίνουμε και διαγραμματικά το βέλτιστο σημείο, το οποίο βρίσκεται στο υψηλότερο σημείο κάθε καμπύλης.



Σχήμα 4.8: Βαθμός απόδοσης συναρτήσει των στροφών (20Nm)

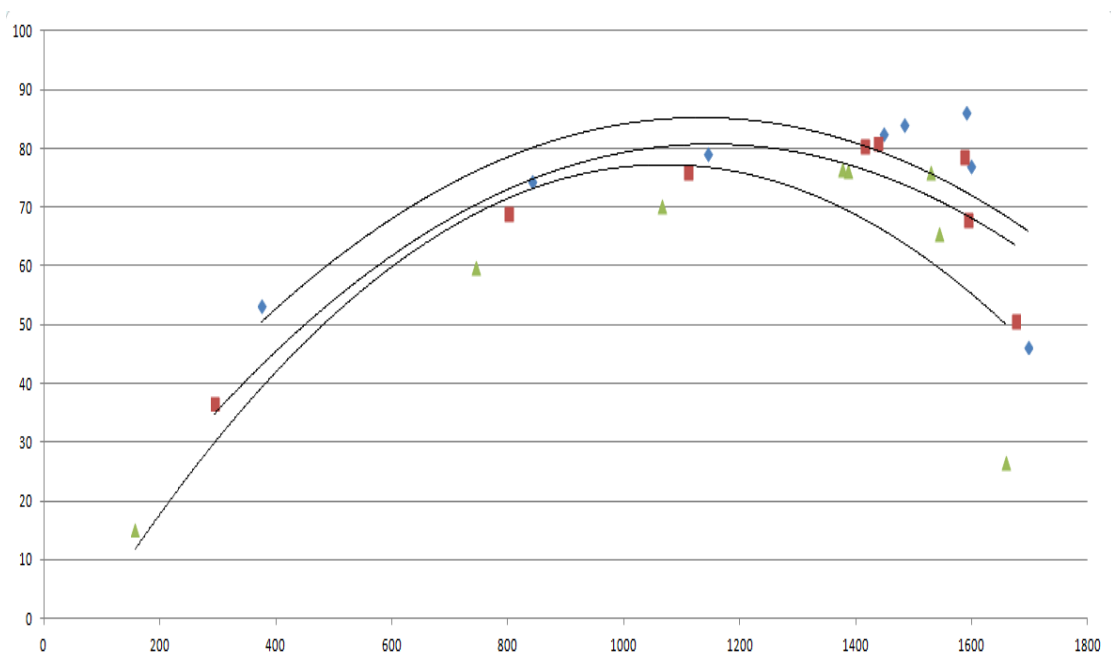


Σχήμα 4.9: Βαθμός απόδοσης συναρτήσει των στροφών(30Nm)



Σχήμα 4.10: Βαθμός απόδοσης συναρτήσει των στροφών (40Nm)

Στην παρακάτω εικόνα (4,11), παρουσιάζονται οι χαρακτηριστικές βαθμού απόδοσης – στροφών (ταχύτητας) σε κοινούς άξονες. Με μπλε χρώμα, παρουσιάζονται τα σημεία της χαρακτηριστικής για ροπή 20Nm, με κόκκινο χρώμα για 30Nm και με πράσινο για 40Nm.



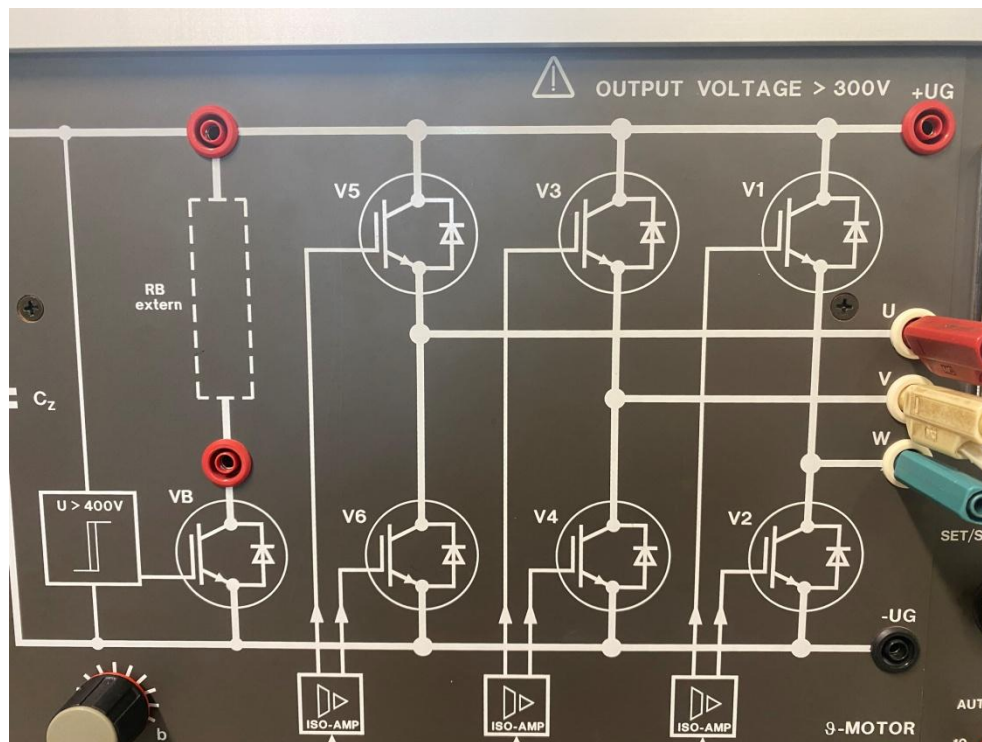
Σχήμα 4.11: Οι χαρακτηριστικές σε κοινούς άξονες

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο

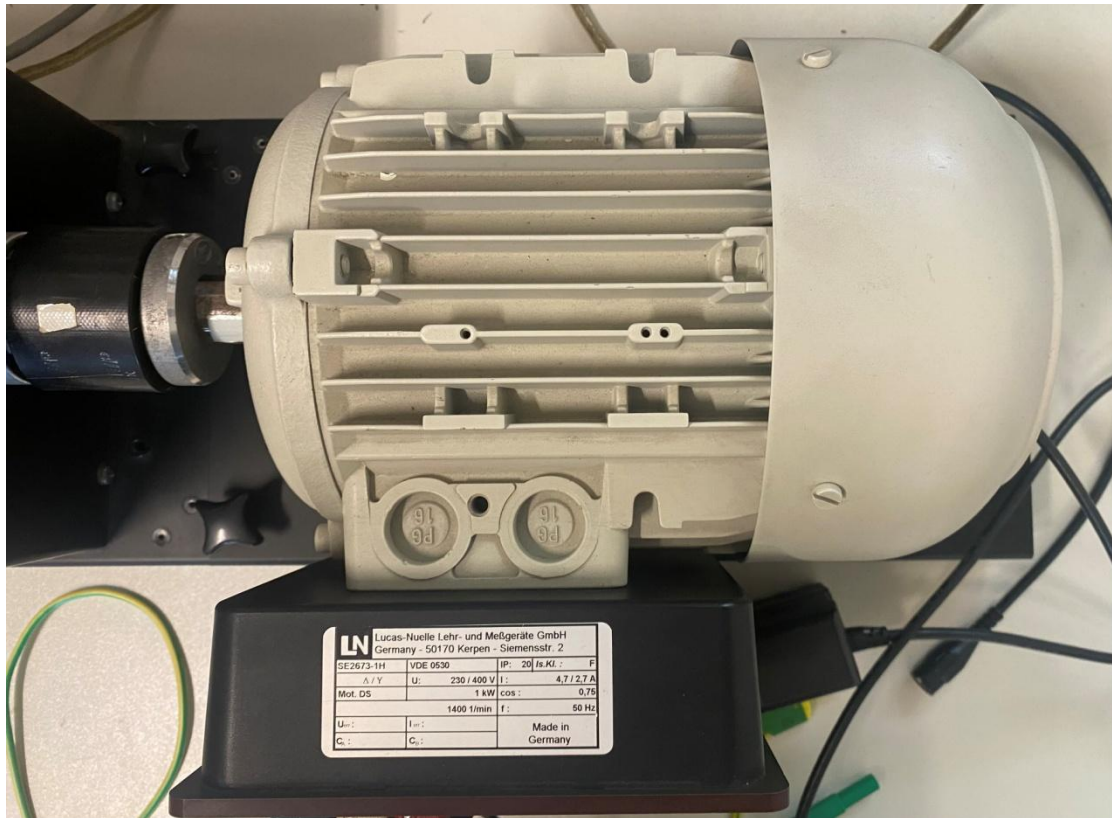
ΕΥΡΕΣΗ ΤΟΥ ΑΠΟΔΟΤΙΚΟΤΕΡΟΥ ΣΗΜΕΙΟΥ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΥΠΟ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ

5.1 Εξοπλισμός που χρησιμοποιήσαμε

Στον χώρο του εργαστηρίου, πραγματοποιήσαμε τις ίδιες μετρήσεις σε παρόμοιο κινητήριο σύστημα, για μια τυπική μηχανή 1000W, προκειμένου να δούμε τα αποτελέσματα στην πράξη κάτω από πραγματικές συνθήκες.



Σχήμα 5.1: ο αντιστροφέας που χρησιμοποιήσαμε



Σχήμα 5.2: Η κινητήρια μηχανή που χρησιμοποιήσαμε

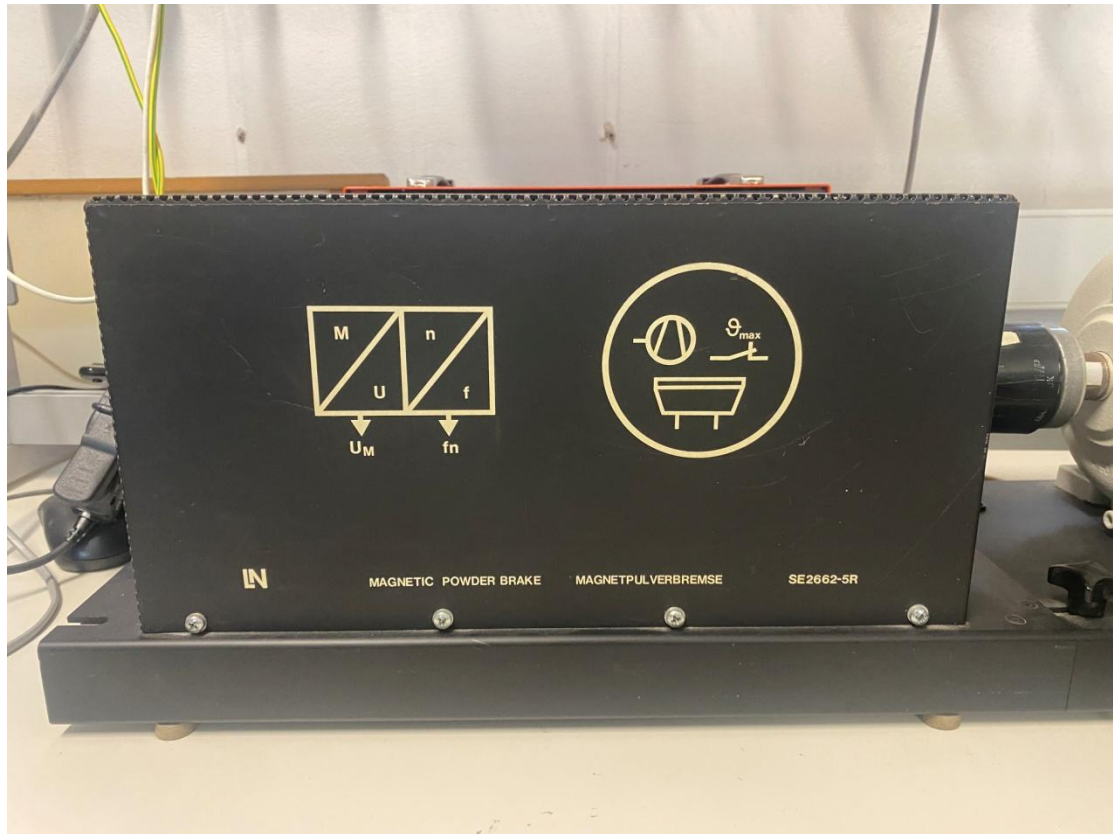
Με την βοήθεια οργάνων μετρήσαμε τα ίδια μεγέθη με πριν, ώστε να χαράξουμε ξανά τις χαρακτηριστικές βαθμού απόδοσης – στροφών (ταχύτητας). Με αναλυτή ισχύος μετρήσαμε την ενεργό ισχύ στην είσοδο του μετατροπέα, με στροφόμετρο μετρήσαμε τις στροφές της κινητήριας μηχανής, τη ροπή την επιβάλαμε με μαγνητική πέδη, ενώ τις τιμές της συχνότητας, τις ρυθμίζαμε μέσω ποντεσιομέτρων που υπάρχουν πάνω στο πάνελ του συστήματός μας και αντιστοιχούν στον επεξεργαστή του κινητήριου συστήματος.



Σχήμα 5.3: Το στροφόμετρο



Σχήμα 5.4: Ο αναλυτής ισχύος



Σχήμα 5.5: Η μαγνητική πέδη

5.2 Εύρεση Βέλτιστων Σημείων

Οι μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν για τιμές ροπής 2Nm, 3Nm, 4Nm, και για διάφορες τιμές συχνότητας, παρουσιάζονται στους παρακάτω πίνακες.

2Nm	ΕΝΕΡΓΟΣ ΙΣΧΥΣ ΕΙΣΟΔΟΥ	ΣΤΡΟΦΕΣ(ΤΑΧΥΤΗΤΑ)	ΙΣΧΥΣ ΕΞΟΔΟΥ	ΒΑΘΜΟΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ
20Hz	183.59W	600	125.6W	68.41%
30Hz	230.36W	915	191.54W	83.14%
35Hz	249.41W	1046	218.96W	87.79%
40Hz	273.66W	1198	250.6W	91.57%
45Hz	301.37W	1360	276.01W	92.62%
<u>50Hz</u>	<u>303.11W</u>	<u>1500</u>	<u>284.02W</u>	<u>93.69%</u>
60Hz	436.47W	1796	375.96W	86.13%
70Hz	505.75W	2078	434.98W	85.97%
80Hz	609.53W	2392	500.72W	82.30%

Πίνακας 5.1: Μετρήσεις για ροπή 2Nm

3Nm	ΕΝΕΡΓΟΣ ΙΣΧΥΣ ΕΙΣΟΔΟΥ	ΣΤΡΟΦΕΣ(ΤΑΧΥΤΗΤΑ)	ΙΣΧΥΣ ΕΞΟΔΟΥ	ΒΑΘΜΟΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ
20Hz	294.44W	587	184.29W	62.59%
30Hz	401.83W	900	282.6W	70.32%
35Hz	474.58W	1054	335.55W	70.70%
40Hz	504.02W	1194	374.91W	74.38%
45Hz	590.62W	1336	449.49W	76.10%
50Hz	606.21W	1492	468.48W	77.28%
60Hz	651.25W	1780	558.9W	85.81%
<u>70Hz</u>	<u>758.01W</u>	<u>2075</u>	<u>651.54W</u>	<u>85.85%</u>
80Hz	899.02W	2357	665.04W	74.97%

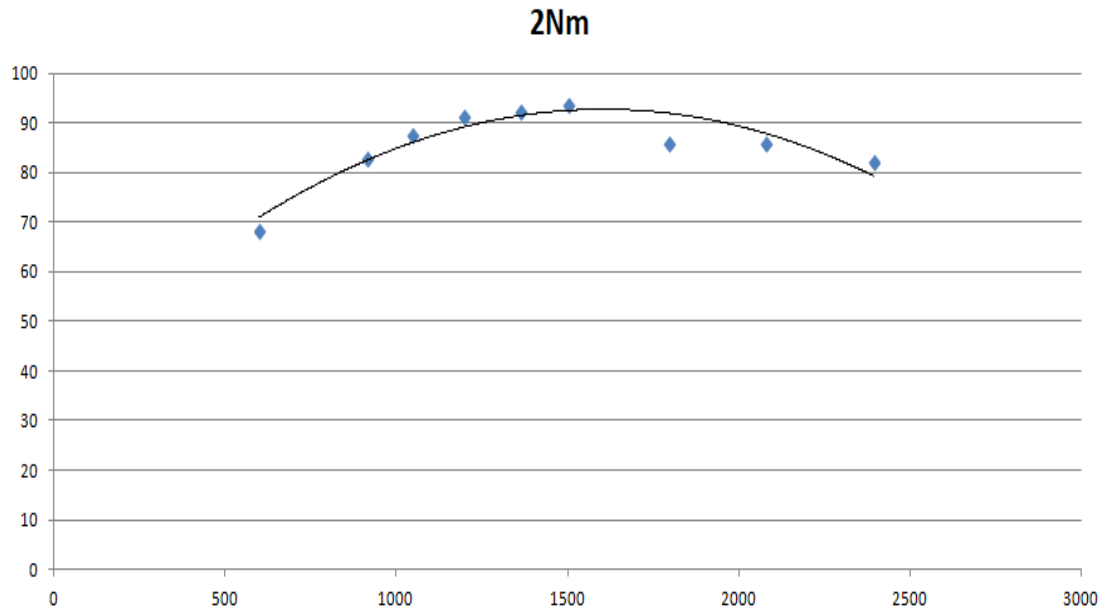
Πίνακας 5.2: Μετρήσεις για ροπή 3Nm

4Nm	ΕΝΕΡΓΟΣ ΙΣΧΥΣ ΕΙΣΟΔΟΥ	ΣΤΡΟΦΕΣ(ΤΑΧΥΤΗΤΑ)	ΙΣΧΥΣ ΕΞΟΔΟΥ	ΒΑΘΜΟΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ
20Hz	427.81W	575	240.72W	56.26%
30Hz	588.89W	890	372.6W	63.27%
35Hz	678.96W	1030	431.2W	63.50%
40Hz	748.24W	1182	494.84W	66.13%
45Hz	848.70W	1326	575.12W	67.76%
50Hz	900.66W	1468	614.6W	68.23%
<u>60Hz</u>	<u>909.90W</u>	<u>1756</u>	<u>635.92W</u>	<u>70.03%</u>
70Hz	940.43W	2055	654.36W	69.58%
80Hz	988.04W	2318	690.44W	69.19%

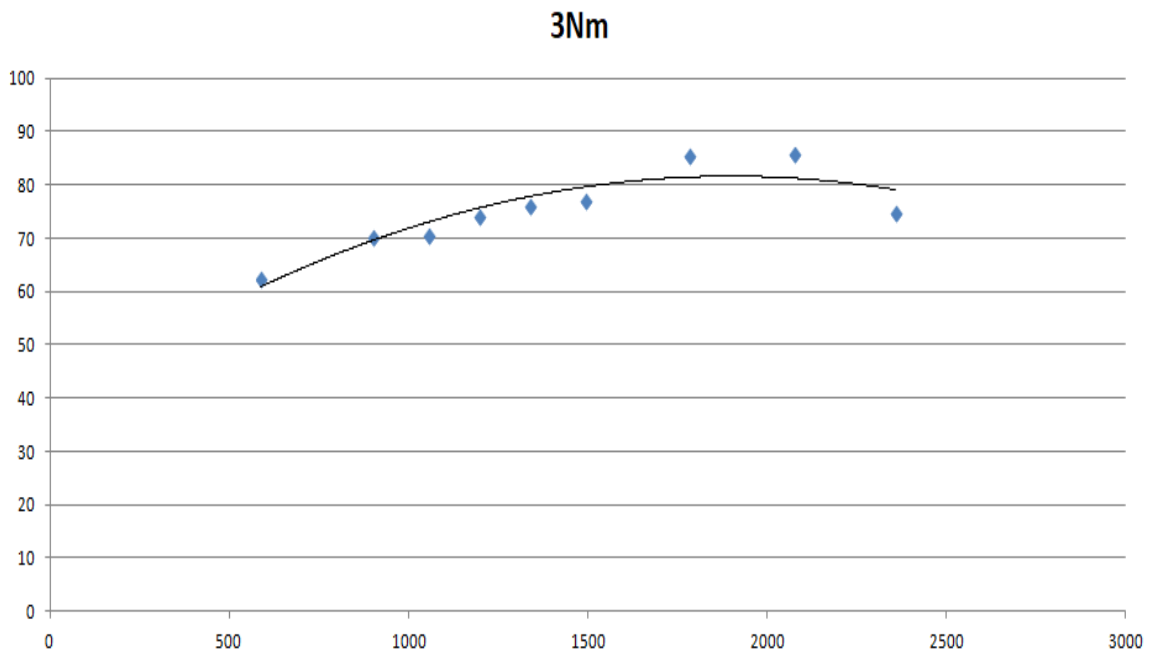
Πίνακας 5.3: Μετρήσεις για ροπή 4Nm

Η ισχύς εξόδου υπολογίστηκε μέσω του τύπου $[\text{ροπή} \cdot 2 \cdot \pi \cdot (\text{στροφές})] / 60$ (επειδή μετρούσαμε σε λεπτά, και τα μετατρέψαμε σε δευτερόλεπτα). Για παράδειγμα για ροπή 2Nm και 20Hz, η ισχύς εξόδου είναι $(2 \cdot 2 \cdot \pi \cdot 600) / 60$ δηλαδή 125,6W. Ο βαθμός απόδοσης υπολογίστηκε ακριβώς όπως στον υπολογισμό που έγινε στο προηγούμενο κεφάλαιο, για κάθε μια περίπτωση, δηλαδή $(\text{Ισχύς Εξόδου} / \text{Ισχύς Εισόδου}) \cdot 100\%$.

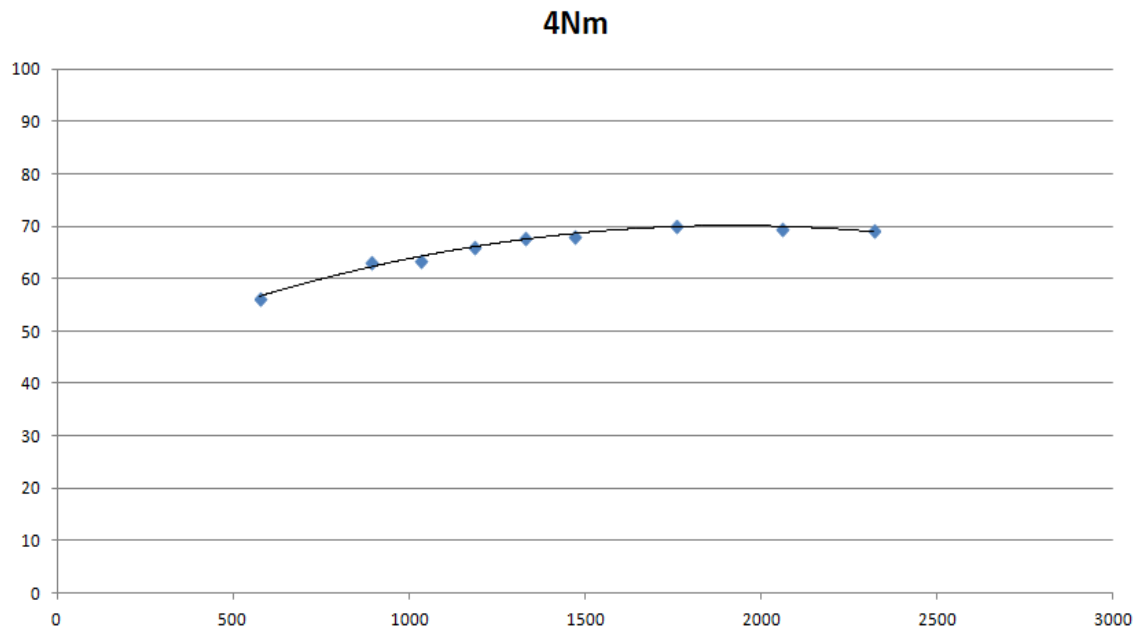
Στις παρακάτω εικόνες (5.6, 5.7, 5.8) παρουσιάζονται οι χαρακτηριστικές βαθμού απόδοσης – στροφών (ταχύτητας), για κάθε τιμή ροπής ξεχωριστά, αλλά και σε κοινούς άξονες (5.9).



Σχήμα 5.6: Βαθμός απόδοσης συναρτήσει των στροφών (2Nm)

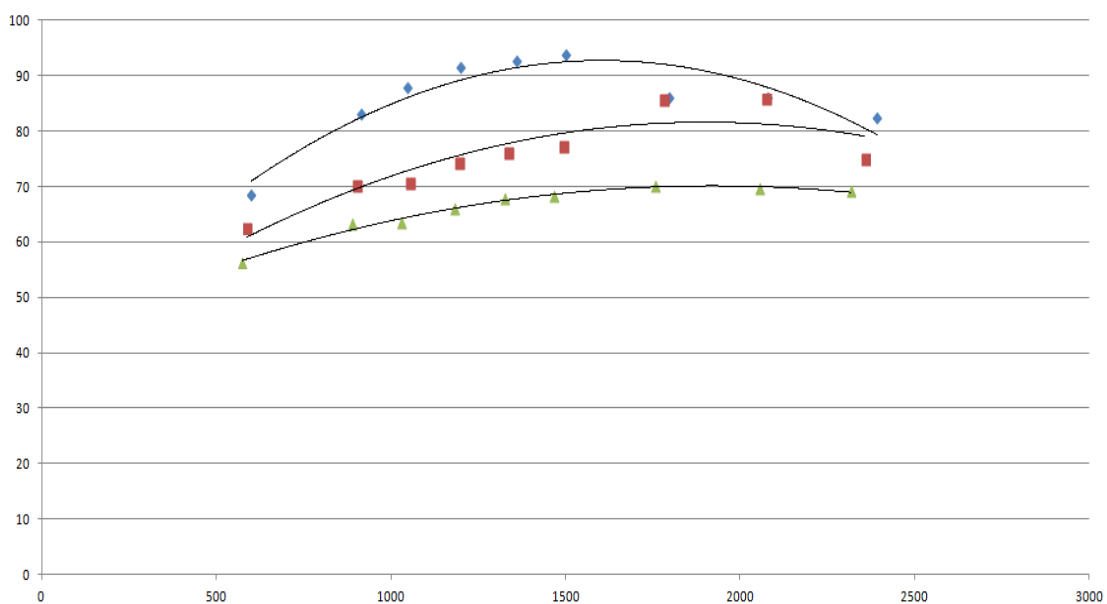


Σχήμα 5.7: Βαθμός απόδοσης συναρτήσει των στροφών (3Nm)



Σχήμα 5.8: Βαθμός απόδοσης συναρτήσει των στροφών (4Nm)

Στην παρακάτω εικόνα (5.9) παρουσιάζονται οι χαρακτηριστικές βαθμού απόδοσης – στροφών (ταχύτητας) σε κοινούς άξονες. Με μπλε χρώμα, παρουσιάζονται τα σημεία της χαρακτηριστικής για ροπή 2Nm, με κόκκινο χρώμα για 3Nm και με πράσινο για 4Nm.



Σχήμα 5.9: Οι χαρακτηριστικές σε κοινούς άξονες

Έχοντας εκτελέσει μετρήσεις και μέσω του προγράμματος simulink (Κεφάλαιο 4) αλλά και στον χώρο του εργαστηρίου (Κεφάλαιο 5), συμπεραίνουμε πως στις χαρακτηριστικές βαθμού απόδοσης – στροφών, όσο αυξάνουμε την συχνότητα αυξάνεται και ο βαθμός απόδοσης, μέχρι να φτάσουμε στο μέγιστο σημείο, όπου από εκεί και έπειτα όσο αυξάνουμε την συχνότητα μειώνεται ο βαθμός απόδοσης. Αυτή η μείωση της απόδοσης, οφείλεται στις απώλειες πυρήνα, στις μηχανικές απώλειες στις απώλειες χαλκού αλλά και στις κατανεμημένες απώλειες. Οι απώλειες πυρήνα, είναι οι απώλειες υστέρησης και δινορρευμάτων που εμφανίζονται στα μεταλλικά μέρη της μηχανής που υπάρχει στο σύστημά μας. Οι μηχανικές απώλειες ή αλλιώς απώλειες εδράνων χωρίζονται σε δύο μέρη, την τριβή και τον εξαερισμό. Οι απώλειες τριβής, οφείλονται στις τριβές που υπάρχουν στο κινητήριο σύστημα και κυρίως στην μηχανή, ενώ οι απώλειες εξαερισμού είναι εκείνες που προκαλούνται από τις τριβές που προκαλεί ο αέρας στο σύστημά μας. Οι απώλειες χαλκού γνωστές και ως ηλεκτρικές απώλειες, εμφανίζονται στην μηχανή μας και συγκεκριμένα στα τυλίγματα του δρομέα και του στάτη. Τέλος, οι κατανεμημένες απώλειες, είναι εκείνες που δεν υπάγονται σε καμία από τις παραπάνω κατηγορίες απωλειών, παρόλα αυτά υπάρχουν στο σύστημα αν και τις περισσότερες φορές είναι ελάχιστες.

Πιο συγκεκριμένα, στο κινητήριο σύστημά μας, με την αύξηση της ισχύος φορτίου, αυξάνονται οι απώλειες που αναφέραμε, όμως οι απώλειες εν κενώ παραμένουν σταθερές. Με παρόμοιο τρόπο μεταβάλλονται και οι απώλειες των ημιαγωγικών στοιχείων στον αντιστροφέα (inverter). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να αυξάνεται συνεχώς ο βαθμός απόδοσης του συστήματος, έως ότου δημιουργηθεί μαγνητικό πεδίο, και το σύστημά μας μπει στον κορεσμό, όπου από εκεί και έπειτα, με την αύξηση της ισχύος φορτίου αλλά και της συχνότητας, ο βαθμός απόδοσης αρχίζει και μειώνεται. Το τελευταίο σημείο πριν μπει το σύστημα στον κορεσμό θα λέγαμε πως είναι το βέλτιστο σημείο λειτουργίας του συστήματός μας, δηλαδή στο σημείο αυτό, προσφέρεται η μέγιστη δυνατή απόδοση. Σε κάθε κινητήριο σύστημα είναι πολύ σημαντικό να γνωρίζουμε το μέγιστο (βέλτιστο) σημείο, επομένως θα πρέπει να γίνεται έλεγχος εύρεσης του βέλτιστου σημείου.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- 1) Mohan Undeland Robbins, ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΑ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΑ ΙΣΧΥΟΣ, 3η Έκδοση, ΕΚΔΟΣΕΙΣ ΤΖΙΟΛΑ
- 2) <https://eclass.uop.gr/courses/1398/> (Ηλεκτρονικά Ισχύος Ι), Γεωργάκας διαλέξεις μαθήματος
- 3) <https://eclass.uop.gr/courses/2738/> (Ηλεκτρονικά Ισχύος ΙΙ), Γεωργάκας διαλέξεις μαθήματος
- 4) S.J. CHAPMAN (AC-DC MOTOTRS), 5^η Έκδοση, ΕΚΔΟΣΕΙΣ ΤΖΙΟΛΑ
- 5) <http://airconditioninverter.gr/articles/>
- 6) Π. Β. Μαλατέστας ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΚΙΝΗΣΗ 4^η Έκδοση, ΕΚΔΟΣΕΙΣ ΤΖΙΟΛΑ