



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ
ΙΣΧΥΟΣ

Πειραματική επιβεβαίωση σχεδιομελέτης κινητήρα μονίμων μαγνητών για ηλεκτροπρόωση πλοίου

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΧΡΙΣΤΟΦΟΡΟΣ Π. ΠΟΙΗΤΑΡΗΣ

Επιβλέπων : Αντώνιος Γ. Κλαδάς

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα , Μάρτιος 2023



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ
ΙΣΧΥΟΣ

Πειραματική επιβεβαίωση σχεδιομελέτης κινητήρα μονίμων μαγνητών για ηλεκτροπρόωση πλοίου

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Επιβλέπων : Αντώνιος Γ. Κλαδάς

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 21^η Μαρτίου 2023

.....

Α. Κλαδάς

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....

Σ. Παπαθανασίου

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....

Α. Αντωνόπουλος

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Μάρτιος 2023

.....
Χριστόφορος Π. Ποιητάρης

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

Copyright ©Χριστόφορος Ποιητάρης, 2023

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στα πλαίσια της παρουσίας διπλωματικής εργασίας πραγματοποιήθηκε σχεδιομελέτη σύγχρονου κινητήρα μονίμων μαγνητών, ο οποίος προορίζεται για ηλεκτροπρόωση πλοίου και κατασκευάστηκε κατάλληλο πρότυπο μαγνητικό κύκλωμα γραμμικής μηχανής μονίμων μαγνητών για την πειραματική επιβεβαίωση των λειτουργικών χαρακτηριστικών του κινητήρα. Το μαγνητικό κύκλωμα κατασκευάστηκε με αντίστοιχα υλικά και έχει όμοια γεωμετρικά χαρακτηριστικά στο διάκενο με αυτό του σύγχρονου κινητήρα μονίμων μαγνητών περιλαμβάνοντας τέσσερα ζεύγη πόλων στάτη και δύο ζεύγη πόλων δρομέα στα πλαίσια θεώρησης της κίνησης του δρομέα.

Αρχικά, παρουσιάζονται τα κύρια χαρακτηριστικά της ηλεκτροπρόωσης, και των εφαρμογών της καθώς και η εισαγωγή της στα σύγχρονα πλοία, ενώ αναλύονται και τα κύρια υποσυστήματα που χρησιμοποιούνται από την παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας μέχρι και τελική μετατροπή της σε μηχανικό έργο για την περιστροφή της προπέλας.

Στη συνέχεια αναλύονται οι εναλλακτικές διαμορφώσεις των σύγχρονων κινητήρων με έμφαση στους σύγχρονους κινητήρες μονίμων μαγνητών. Αναφέρονται τα πλεονεκτήματα αλλά και τα μειονεκτήματα που παρουσιάζουν έναντι των άλλων τύπων κινητήρων καθώς και παρατίθεται σύντομη περιγραφή των χαρακτηριστικών των σιδηρομαγνητικών υλικών που χρησιμοποιούνται. Επίσης, επεξηγείται η λειτουργία της γραμμικής μηχανής στην οποία βασίστηκε το δοκίμιο πειραματικής επιβεβαίωσης των χαρακτηριστικών του κινητήρα.

Σε ένα επόμενο βήμα περιγράφεται ο σύγχρονος κινητήρας μονίμων μαγνητών που σχεδιάστηκε χρησιμοποιώντας το λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων Ansys/Maxwell και αναλύονται η γεωμετρία και τα λειτουργικά χαρακτηριστικά του. Με βάση την γεωμετρία του κινητήρα υπολογίζεται το αντίστοιχο πρότυπο μαγνητικό κύκλωμα γραμμικής μηχανής που χρησιμοποιήθηκε για την πειραματική επιβεβαίωση των λειτουργικών χαρακτηριστικών του κινητήρα. Ακόμη, αναλύεται η διαδικασία κατασκευής της πρότυπης γραμμικής μηχανής και οι κατασκευαστικές ατέλειες που διαπιστώθηκαν κατά τις μετρήσεις. Μετά την κατασκευή της γραμμικής μηχανής συγκρίνονται τα πειραματικά αποτελέσματά με τα προσομοιωμένα για την αναπτυσσόμενη ηλεκτρεγερτική δύναμη της μηχανής, τη μέγιστη εφαπτομενική δύναμη σε κενό φορτίο και υπό φορτίο και τις απώλειες.

Τέλος καταγράφηκαν τα συμπεράσματα της εργασίας και αναφέρθηκαν μελλοντικές δυνατότητες αξιοποίησης του δοκιμίου της γραμμικής μηχανής.

Λέξεις-Κλειδιά: Ηλεκτροπρόωση, Σύγχρονοι Κινητήρες Μονίμων Μαγνητών, Γραμμική Μηχανή, Μαγνήτες Σαμαρίου-Κοβαλτίου, Απώλειες πυρήνα, Ηλεκτρεγερτική Δύναμη.

ABSTRACT

In the present diploma thesis, the design of a permanent magnet machine was undertaken, intended for ship propulsion, and an appropriate prototype magnetic circuit of a permanent magnet linear motor was constructed for the experimental validation of the operating characteristics of the motor. The magnetic circuit was made implementing the design materials and the air-gap has similar geometric characteristics to that of the permanent magnet motor including four pairs of stator poles and one pair of rotor poles in order to enable consideration of the rotor movement.

Initially, the main characteristics of electric propulsion and its applications are presented, as well as its initiation to modern ships, while the main subsystems implemented from the production of electricity to its final conversion into mechanical work for the rotation of the propeller are also analyzed.

Usually implemented alternative configurations of synchronous motors are then analyzed with emphasis on permanent magnet synchronous motors. The main advantages and disadvantages compared to other types of motors are reported, followed by a brief description of the characteristics of the ferromagnetic materials used. Moreover, the operating characteristics of the prototype linear machine constructed for the experimental validation of the motor behavior are explained.

In a next step, the permanent magnet synchronous motor designed using Ansys/Maxwell finite element software is described and its geometry and operating characteristics are analyzed. Based on the geometry of the motor, the corresponding prototype magnetic circuit of linear motor is calculated, which was used for the experimental validation of the operating characteristics of the motor. Furthermore, the manufacturing process of the prototype linear machine and the manufacturing defects detected during the measurements are analyzed. After the construction of the linear machine, the obtained experimental results are compared with the simulated ones, concerning the electromotive force developed, the maximum tangential force at no load and under full load as well as the losses.

Finally, the conclusions of the thesis are reported while cases for future exploitation of the prototype linear machine constructed are proposed.

Keywords: Electric Propulsion, Permanent Magnet Synchronous Motor, Linear Motor, SmCo Magnets, Core losses, Electromotive Force.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Με την περάτωση της διπλωματικής ολοκληρώνεται και ο κύκλος σπουδών μου στο Πολυτεχνείο. Ένας κύκλος που δεν θα μπορούσε να ολοκληρωθεί χωρίς την απεριόριστη στήριξη της οικογενείας μου, αλλά και των φίλων που έκανα κατά την διάρκειά του. Τους ευχαριστώ όλους θερμά και τους είμαι ευγνώμων.

Ευχαριστώ επίσης τον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Αντώνιο Κλαδά αρχικά για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε με την ανάθεση της διπλωματικής αυτής και έπειτα για την άψογη συνεργασία και τακτική καθοδήγηση κατά την εκπόνησή της.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω ακόμα τον Λευτέρη Καραμανή για την βοήθεια του στην οργάνωση της διπλωματικής και την εξοικείωση μου με το λογισμικό του Ansys, ενώ ιδιαίτερες ευχαριστίες θα πρέπει να δώσω και στον Γεώργιο Σακκά για την κατεύθυνση που μου έδωσε μέσα από τις συζητήσεις μας.

Τέλος χωρίς την κατασκευαστική εμπειρία του κ. Παναγιώτη Ζάννη η διπλωματική αυτήν δεν θα μπορούσε να ολοκληρωθεί και πρέπει λοιπόν να του εκφράσω τις ευχαριστίες μου.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	5
ABSTRACT	6
ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ	7
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ	8
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1	9
1.1 ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ	10
1.2 ΔΟΜΗ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ	10
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2	12
2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗΝ ΗΛΕΚΤΡΟΠΡΩΣΗ	12
2.2 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΗΛΕΚΤΡΟΠΡΩΣΗΣ	14
2.3 ΣΥΣΤΗΜΑ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ	15
2.4 ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΙ ΚΙΝΗΤΗΡΕΣ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΟΥΝΤΑΙ ΩΣ ΠΡΩΩΣΤΗΡΕΣ	21
2.5 ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΕΛΕΓΧΟΥ ΠΡΩΩΣΤΗΡΩΝ	22
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3	24
3.1 ΣΥΓΧΡΟΝΟΙ ΚΙΝΗΤΗΡΕΣ	24
3.1.1 ΣΤΑΤΗΣ ΣΥΓΧΡΟΝΟΥ ΚΙΝΗΤΗΡΑ	24
3.1.2 ΔΡΟΜΕΑΣ ΣΥΓΧΡΟΝΟΥ ΚΙΝΗΤΗΡΑ	25
3.2 ΣΙΔΗΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΑ ΥΛΙΚΑ	27
3.3 ΑΠΩΛΕΙΕΣ ΣΥΓΧΡΟΝΩΝ ΚΙΝΗΤΗΡΩΝ ΜΟΝΙΜΩΝ ΜΑΓΝΗΤΩΝ	31
3.3.1 ΑΠΩΛΕΙΕΣ ΧΑΛΚΟΥ	31
3.3.2 ΑΠΩΛΕΙΕΣ ΠΥΡΗΝΑ	31
3.3.2.1 ΑΠΩΛΕΙΕΣ ΥΣΤΕΡΗΣΗΣ	31
3.3.2.2 ΑΠΩΛΕΙΕΣ ΔΙΝΟΡΡΕΥΜΑΤΩΝ	33
3.3.2.3 ΑΠΩΛΕΙΕΣ ΔΙΝΟΡΡΕΥΜΑΤΩΝ ΣΤΟΥΣ ΜΑΓΝΗΤΕΣ	34
3.4 ΓΡΑΜΜΙΚΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ	34
3.4.1 ΓΡΑΜΜΙΚΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ ΜΟΝΙΜΩΝ ΜΑΓΝΗΤΩΝ (PMLM)	35
3.4.2 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ PMLM	35
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4	36
4.1 ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΚΥΛΙΝΔΡΙΚΟΥ ΣΥΓΧΡΟΝΟΥ ΚΙΝΗΤΗΡΑ	

ΜΟΝΙΜΩΝ ΜΑΓΝΗΤΩΝ (PMSM)	36
4.2 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΣΥΓΧΡΟΝΟΥ ΚΙΝΗΤΗΡΑ ΜΟΝΙΜΩΝ ΜΑΓΝΗΤΩΝ (PMSM)	39
4.3 ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΔΟΚΙΜΙΟΥ ΓΡΑΜΜΙΚΗΣ ΜΗΧΑΝΗΣ ΜΟΝΙΜΩΝ ΜΑΓΝΗΤΩΝ	45
4.4 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΓΡΑΜΜΙΚΗΣ ΜΗΧΑΝΗΣ ΜΟΝΙΜΩΝ ΜΑΓΝΗΤΩΝ	46
4.5 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΩΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΚΙΝΗΤΗΡΑ PMSM ΚΑΙ ΓΡΑΜΜΙΚΗΣ ΜΗΧΑΝΗΣ	50
4.6 ΟΡΙΣΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΤΗΣ ΓΡΑΜΜΙΚΗΣ ΜΗΧΑΝΗΣ	51
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5	53
5.1 ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΤΗΣ ΓΡΑΜΜΙΚΗΣ ΜΗΧΑΝΗΣ	53
5.2 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ	56
5.2.1 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΕΠΙΒΕΒΑΙΩΣΗ ΗΕΔ	56
5.2.2 ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΓΙΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟ ΑΠΩΛΕΙΩΝ	61
5.2.3 ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΓΙΑ ΕΠΙΒΕΒΑΙΩΣΗ ΟΡΙΖΟΝΤΙΑΣ ΔΥΝΑΜΗΣ	65
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6	70
6.1 ΣΥΝΟΨΗ	70
6.1.1 ΣΥΝΟΨΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΗΕΔ	70
6.1.2 ΣΥΝΟΨΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΑΠΩΛΕΙΩΝ	71
6.1.3 ΣΥΝΟΨΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΟΡΙΖΟΝΤΙΑΣ ΔΥΝΑΜΗΣ	72
6.2 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ	72
6.3 ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ	73
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	74
ΙΣΤΟΣΕΛΙΔΕΣ	75

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

1.1 Σκοπός της Διπλωματικής

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής είναι η επιβεβαίωση κάποιων χαρακτηριστικών ενός θεωρητικού σύγχρονου κινητήρα μονίμων μαγνητών μέσω της κατασκευής μιας γραμμικής μηχανής ή οποία θα αποτελεί το ισοδύναμο ηλεκτρομαγνητικό κύκλωμα για μερικούς πόλους του θεωρητικού κινητήρα στο διάκενο. Ακόμη, αναδεικνύεται η δυσκολία μεταφοράς ενός θεωρητικού μοντέλου σχεδιασμένου σε λογισμικού στην πράξη. Αποτελεί επίσης μια καλή βάση για την ανάδειξη της γραμμικής μηχανής ως κατασκευή για την μελέτη των απώλειών του κινητήρα πάνω στους μαγνήτες σε δυσμενείς συνθήκες όπως την επιβολή του πυρήνα σε εναλλασσόμενο ηλεκτρομαγνητικό πεδίο υψηλής συχνότητα αλλά και σε υψηλές θερμοκρασίες.

1.2 Δομή της Διπλωματικής

Η παρούσα διπλωματική που ασχολείται με την ανάδειξη της γραμμικής μηχανής ως κατάλληλο μέσο για την επιβεβαίωση χαρακτηριστικών θεωρητικών ηλεκτρομαγνητικών κυκλωμάτων αποτελείται από έξι κεφάλαια.

Το παρόν κεφάλαιο είναι εισαγωγικό και περιλαμβάνει αποκλειστικά τον σκοπό και την δομή της εργασίας.

Στο δεύτερο κεφάλαιο γίνεται μια εισαγωγή σχετικά με την ηλεκτροπρόωση, ως μέθοδο πρόωσης, τις εφαρμογές και τα οφέλη της στα σύγχρονα πλοία καθώς και την «διαδρομή» της ηλεκτρικής ενέργειας από την παραγωγή της μέχρι και την απόδοση της σε μηχανικό έργο για την περιστροφή της προπέλας.

Το τρίτο κεφάλαιο αποτελεί ένα θεωρητικό υπόβαθρο πάνω στους σύγχρονους κινητήρες ,τις ιδιότητες των σιδηρομαγνητικών υλικών που τις αποτελούν και τις γραμμικές μηχανές.

Στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζεται ο σύγχρονος κινητήρας μονίμων μαγνητών που θα χρησιμοποιηθεί ως προωστήρας πλοίου, αναλύονται η γεωμετρία και τα χαρακτηριστικά του και με βάση αυτόν διαμορφώνεται το ισοδύναμο γραμμικό ηλεκτρομαγνητικό κύκλωμα που θα αποτελέσει την γραμμική μηχανή και συνεπώς το αντικείμενο μελέτης της διπλωματικής αυτής.

Στο πέμπτο κεφάλαιο περιγράφεται η διαδικασία κατασκευής της γραμμικής μηχανής και στη συνέχεια αναλύονται τα πειράματα και οι μετρήσεις τους που έλαβαν χώρα στο εργαστήριο.

Τέλος στο έκτο κεφάλαιο συγκεντρώνονται τα τελικά συμπεράσματα από την διπλωματική και αναφέρονται και τα πεδία τα οποία είναι ανοιχτά για μελλοντική έρευνα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

2.1 Εισαγωγή στην Ηλεκτροπρόωση

Η θαλάσσια πρόωση είναι το σύστημα που χρησιμοποιείται για να δημιουργηθεί η απαραίτητη ώθηση ώστε το πλοίο να μετακινηθεί πάνω στο νερό εκμεταλλευόμενο συνήθως την περιστροφική κίνηση ενός έλικα (προπέλας) ,και σπανιότερα μιας πτερωτής σε περίπτωση αντλιοπρόωσης. Ο έλικας αποτελείται από στοιχεία που ονομάζονται λεπίδες οι οποίες είναι τοποθετημένες ακτινικά σε έναν άξονα και η περιστροφή τους κινεί το επίπεδο που σχηματίζουν. Το καμπυλωτό σχήμα των λεπίδων καθώς και το γεγονός ότι είναι τοποθετημένες έτσι ώστε να προεξέχουν από το επίπεδο προκαλούν διαφορετικές ταχύτητες μεταξύ των ρευστών στις δύο πλευρές του έλικα. Αυτή η διαφορά ταχυτήτων συνεπάγεται διαφορά πίεσης μεταξύ των δύο ρευστών σύμφωνα με την αρχή του Bernoulli και έτσι αναπτύσσεται μια δύναμη στον άξονα περιστροφής των λεπίδων προς την πλευρά με την μικρότερη πίεση. Έτσι δημιουργείται η ώση για την μετακίνηση του πλοίου. Ηλεκτροπρόωση είναι το σύστημα πρόωσης όπου οι άξονες του πλοίου κινούνται από την λειτουργία ηλεκτροκινητήρων, οι οποίοι τροφοδοτούνται από γεννήτριες ντίζελ ή στροβιλογεννήτριες (είτε αερίου είτε ατμού) μέσω inverters. Μέχρι πριν λίγα χρόνια η πρόωση γινόταν απευθείας από ντιζελοκινητήρες και στροβίλους ωστόσο παρότι το σύστημα ηλεκτροπρόωσης έχει ανακαλυφθεί από την δεκαετία του 50' η πρόσφατη πρόοδος των ημιαγωγικών υλικών και συνεπώς των ηλεκτρονικών ισχύος δημιούργησαν τις συνθήκες ώστε να είναι κυρίαρχος πλέον ο μηχανισμός της ηλεκτροπρόωσης. Παράλληλα όμως με την πρόοδο των ημιαγωγικών διατάξεων αυξήθηκαν και οι απαιτήσεις στον έλεγχο, την παραγωγή, την αξιοπιστία και την ποιότητα ισχύος στα συστήματα προώσεως.

Αξίζει να αναφερθούν επίσης κάποιοι όροι που εισήχθησαν στην βιβλιογραφία με την εξέλιξη της ηλεκτρικής πρόωσης [1] :

- Πλήρης Ηλεκτροπρόωση (Full Electric Propulsion): Η εγκατάσταση προώσεως κατά την οποία το πλοίο κινείται αποκλειστικά από ηλεκτρικούς κινητήρες. Τα ζεύγη κινητήριων μηχανών-γεννητριών που τροφοδοτούν τους κινητήρες προώσεως υπάρχουν αποκλειστικά για τον σκοπό αυτό (δεν τροφοδοτούν δηλαδή άλλα φορτία). Η ηλεκτρική ισχύς για όλους τους άλλους καταναλωτές του πλοίου παράγεται από άλλες γεννήτριες.

- Ολοκληρωμένη Πλήρης Ηλεκτροπρόωση (Integrated Full Electric Propulsion- I.F.E.P.): Η εγκατάσταση ηλεκτροπρόωσης στην οποία τα ίδια ζεύγη κινητήριων μηχανών γεννητριών, τροφοδοτούν τόσο τους ηλεκτρικούς κινητήρες πρόωσης, όσο και τα υπόλοιπα ηλεκτρικά φορτία του πλοίου.
- Πλήρως Εξηλεκτρισμένο πλοίο (All Electric Ship-A.E.S.): Το πλοίο που διαθέτει ολοκληρωμένη πλήρη ηλεκτροπρόωση και επιτελεί σε ευρεία έκταση τις λειτουργίες του μέσω ηλεκτρικών μηχανημάτων και συστημάτων.
- Ηλεκτρικό δίκτυο πρόωσης (Propulsion Network) : Το τμήμα εκείνο του ηλεκτρικού δικτύου πλοίου που τροφοδοτεί τα ηλεκτρικά φορτία που σχετίζονται με την πρόωση.
- Ηλεκτρικό δίκτυο χρήσεως (Ship Service System) : Το ηλεκτρικό δίκτυο του πλοίου, εκτός του δικτύου πρόωσης.

Η καθιέρωση της ηλεκτροπρόωσης επέφερε σημαντικά πλεονεκτήματα και δυνατότητες στον χώρο της ναυτιλίας. Κάποια από αυτά παρουσιάζονται παρακάτω [1] :

- Μειωμένο κόστος σε βάθος χρόνου καθώς ο έλεγχος της λειτουργίας της μηχανής γίνεται πιο ευέλικτος και έτσι υπάρχει εξοικονόμηση καυσίμου.
- Μειωμένες μηχανικές απώλειες καθώς η προπέλα είναι απευθείας συνδεδεμένη στον άξονα του κινητήρα και όχι μέσω μειωτήρων που γινόταν σε μηχανισμούς ντιζελοκινητήρων και στροβίλων, ώστε μέσω σχέσεων γραναζιών να αποδοθεί η κατάλληλη ταχύτητα περιστροφής της προπέλας.
- Χαμηλότερα επίπεδα θορύβου. Η σύνδεση της προπέλας απευθείας με τον άξονα του κινητήρα μειώνει το μήκος των μηχανικών μερών και αυτό συνεπάγεται λιγότερες ταλαντώσεις και δονήσεις. Επιπλέον το φορτίο των γεννητριών είναι σταθερό και οι αλλαγές στην ταχύτητα της προπέλας γίνεται αποκλειστικά μέσω inverters.
- Μεγαλύτερη ευελιξία στην κίνηση με την χρησιμοποίηση αζιμουθιακών προωστήρων.
- Καλύτερη εξοικονόμηση χώρου στο πλοίο καθώς οι γεννήτριες μπορούν να είναι απομακρυσμένες από τους προωστήρες, οι οποίοι τροφοδοτούνται μέσω καλωδίων.

Εκτός όμως από τα πλεονεκτήματα προκύπτουν και κάποια ζητήματα που τα αντισταθμίζουν και αξίζει να αναφερθούν. :

- Υψηλότερο κόστος επένδυσης καθώς όπως είναι λογικό για την πρόωση εκτός από τις μηχανές ντίζελ και τους στροβίλους απαιτούνται τόσο διατάξεις ηλεκτρονικών ισχύος και ηλεκτροκινητήρες. Στα επόμενα χρόνια το κόστος αναμένεται να μειωθεί αλλά θα εξακολουθήσει να είναι υψηλό.
- Προβλήματα ποιότητας ηλεκτρικής ενέργειας καθώς τα inverters εισάγουν αρμονικές και συνεπώς ενδέχεται να δημιουργήσουν προβλήματα στην λειτουργία του κινητήρα καθώς και επιπλέον απώλειες.
- Πιο εξειδικευμένο προσωπικό καθώς προστίθεται εξοπλισμός νέος που απαιτεί σωστή διαχείριση και συντήρηση.
- Υψηλότερες απώλειες σε λειτουργία πλήρους φόρτισης λόγω των επιπλέον επιπέδων ροής ενέργειας.
- Οι υπάρχουσες σχεδιάσεις σκαφών, έχοντας λάβει χώρα λαμβάνοντας υπόψιν τις σχεδιάσεις των θερμικών κινητήρων συχνά αποτελούν τροχοπέδη (συνήθως μέσω χωροταξικών περιορισμών που εντοπίζονται κυρίως στην έλικα) για την επίτευξη της μέγιστης δυνατής βελτίωσης της συνολικής απόδοσης.

2.2 Εφαρμογές Ηλεκτρικής πρόωσης

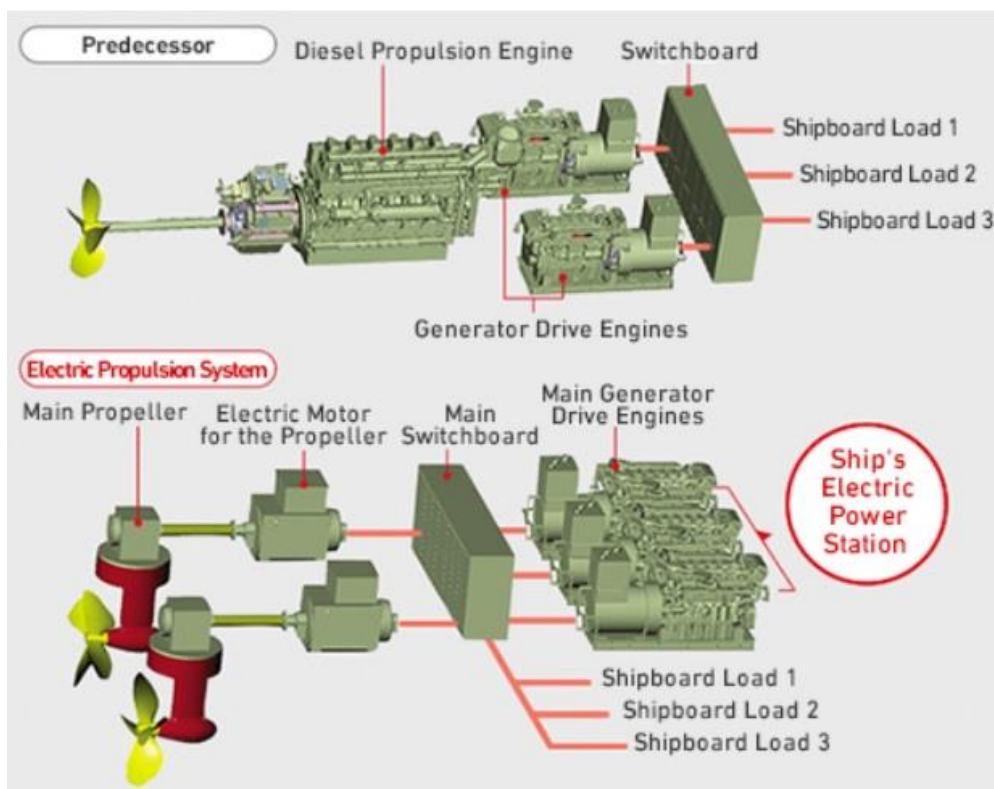
Οι κατηγορίες των πλοίων που χρησιμοποιούν την μέθοδο της ηλεκτρικής πρόωσης είναι οι παρακάτω [2] :

- Επιβατικά πλοία, καθώς ο μειωμένος θόρυβος και η μεγαλύτερη αξιοπιστία είναι απαιτήσεις που η ηλεκτρική πρόωση ικανοποιεί σε μεγάλο βαθμό.
- Γιοτ και σκάφη αναψυχής, εξαιτίας της φιλικότητας προς το περιβάλλον και την απαίτηση σε ελιγμούς.
- Παγοθραυστικά, μάλιστα από το 1980 αρχίζουν να κατασκευάζονται παγοθραυστικά που χρησιμοποιούν ηλεκτροπρόωση γιατί οι κινητήρες μπορούν εύκολα να υπερφορτιστούν και συνεπώς χρειάζονται άμεση μεταβολή μέσω των inverters.
- Υποβρύχια, στα οποία το ηλεκτροπαράγωγο ζεύγος χρησιμοποιεί πυρηνική ενέργεια, κυψέλες καυσίμου, μπαταρίες καθώς οι απαιτήσεις για μηδενικό ηλεκτρομαγνητικό αποτύπωμα και θόρυβο είναι υψηλές.
- Σκάφη πόντισης καλωδίων.

- Τα πλοία μεταφοράς υγροποιημένου φυσικού αερίου αποτελούν, τα τελευταία χρόνια, μια κατηγορία ιδιαίτερου ενδιαφέροντος για χρήση της ηλεκτροπρόωσης. Πιο συγκεκριμένα, η αγορά των LNG carriers έχει στραφεί στη χρήση ηλεκτροπρόωσης με μηχανές διπλού καυσίμου, καθώς η τεχνολογία της ηλεκτροπρόωσης είναι πιο αποδοτική και ιδιαίτερα στην συγκεκριμένη εφαρμογή έχει μικρότερη επίπτωση στο περιβάλλον λόγω χαμηλότερης κατανάλωσης καυσίμου και χαμηλότερων εκπομπών. Επιπλέον, το σύστημα ηλεκτροπρόωσης με μηχανές διπλού καυσίμου είναι πιο συμπαγές, με αποτέλεσμα να επιτρέπει τη μεταφορά περισσότερου φορτίου.

2.3 Σύστημα μεταφοράς ηλεκτρικής ισχύος

Τα συστήματα ηλεκτρικής ισχύος [3] στα σκάφη δεν διαφέρουν από τα επίγεια συστήματα ηλεκτρικής ισχύος. Η κύρια διαφορά είναι ότι οι αποστάσεις στα επίγεια συστήματα είναι μεγάλες και γι' αυτό χρειάζονται χιλιόμετρα γραμμών μεταφοράς με αρκετούς μετασχηματιστές να μεσολαβούν. Αντίθετα στα σκάφη οι αποστάσεις είναι πολύ μικρές και αυτό δημιουργεί και κάποια προβλήματα καθώς μεγάλη ποσότητα ισχύος διαχειρίζεται σε πολύ μικρό χώρο και υπάρχει κίνδυνος για υψηλά ρεύματα βραχυκύκλωσης.



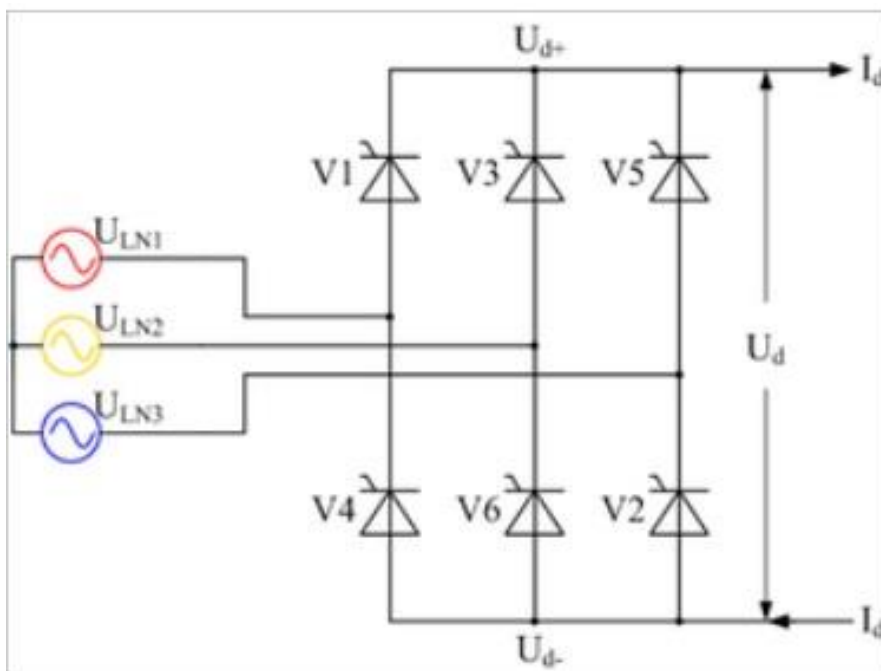
Εικόνα 2.1 Σύστημα ηλεκτρικής ισχύος στα σκάφη [12]

- Οι μηχανές που κινούν τις γεννήτριες που παράγουν την ισχύ είναι συνήθως μηχανές εσωτερικής καύσης που καίνε ντίζελ , και πιο σπάνια στρόβιλοι αερίου ή ατμού. Αυτές οι μηχανές είναι υψηλών ή και μεσέων ταχυτήτων σε αντίθεση με το προηγούμενο μηχανικό σύστημα πρόωσης όπου οι άξονες των μηχανών αυτών συνδέονταν απευθείας με την προπέλα και γιαυτό έπρεπε να είναι χαμηλών στροφών και παρόμοιας ισχύος με συνέπεια το μεγαλύτερο βάρος τους.
- Οι γεννήτριες οι οποίες συνδέονται με τον άξονα των κύριων μηχανών είναι σύγχρονες και το τύλιγμα διέγερσης συνδέεται με συνεχή τάση ώστε να δημιουργείται το σταθερό μαγνητικό πεδίο το οποίο στρέφεται με την ταχύτητα του άξονα και έτσι από επαγωγή παράγεται η τάση της γεννήτριας η οποία έχει συχνότητα ανάλογη με την ταχύτητα την σύγχρονη της γεννήτριας. $n=120 \cdot f/p$ όπου n η ταχύτητα της μηχανής σε στροφές ανά λεπτό, f η συχνότητα των ρευμάτων και p ο αριθμός των πόλων της μηχανής.
- Η παραγωγή και η διανομή της τάσης στο δίκτυο του πλοίου γίνεται σε κάποια συγκεκριμένα επίπεδα σύμφωνα με την IEC. Οι όλο και αυξανόμενες απαιτήσεις σε ισχύ έχει οδηγήσει την τάση να παράγεται και να διανέμεται σε όλο και υψηλότερα επίπεδα ώστε η ένταση των ρευμάτων να χαμηλώνει και ο εξοπλισμός να προστατεύεται από την υπερθέρμανση :
 - 11 kV: Παραγωγή και διανομή μέσης τάσης. Χρησιμοποιείται όταν η συνολική εγκατεστημένη ισχύς των γεννητριών ξεπερνά τα 20 MW. Χρησιμοποιείται επίσης για κινητήρες άνω των 400 kW.
 - 6,6 kV: Παραγωγή και διανομή μέσης τάσης. Χρησιμοποιείται για συνολική ισχύ γεννητριών μεταξύ 4-20 MW και για κινητήρες άνω των 300 kW.
 - 690 V: Παραγωγή και διανομή χαμηλής τάσης. Χρησιμοποιείται για συνολική ισχύ γεννητριών κάτω των 4 MW και για καταναλώσεις κάτω των 400 kW και ως τάση τροφοδοσίας μετατροπέων.
 - Για τα λοιπά φορτία χρησιμοποιείται χαμηλότερη τάση, π.χ. 400/230 V.
- Inverters [1]: Από τις γεννήτριες παρατηρούμε ότι συχνότητα παραγωγής του ρεύματος είναι σταθερή και σε υψηλά επίπεδα ενώ οι προωστήρες των πλοίων είναι χαμηλόστροφοι. Έτσι λοιπόν όπως σε όλες τις εγκαταστάσεις EP μεταξύ των γεννητριών και των φορτίων που αυτές τροφοδοτούν παρεμβάλλονται μετατροπείς

συχνότητας, οι οποίοι όπως αναφέρεται και παραπάνω είναι υπεύθυνοι για την εξάπλωση της ηλεκτρικής πρόωσης τα τελευταία έτη.

Η χρήση όμως των μετατροπέων ισχύος εισάγουν όμως και ζητήματα ποιότητας ισχύος που παρέχεται στα φορτία καθώς όπως είναι λογικό οι διατάξεις αυτές των ηλεκτρονικών ισχύος εισάγουν διάφορες αρμονικές συνιστώσες στο ρεύμα.

Η πιο δημοφιλής διάταξη μετατροπής συχνότητας είναι μια γέφυρα που αποτελείται από 6 thyristors και συνεπώς 6 παλμών. Αυτή διάταξη μπορεί να χρησιμοποιηθεί και σαν ανορθωτής καθώς και σαν αντιστροφέας, ωστόσο έχουν αναπτυχθεί πιο σύνθετες διατάξεις οι οποίες πετυχαίνουν καλύτερα αποτελέσματα στην αντιμετώπιση των αρμονικών. Έτσι ένας αντιστροφέας 12 παλμών αποτελείται από μια γέφυρα 6παλμική για ανόρθωση και μια γέφυρα 6παλμική για τον αντιστροφέα και οι παλμοί έχουν γωνίες έναυσης με διαφορά φάσης ανα 30° .



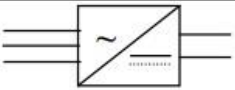
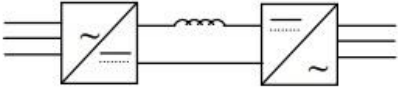
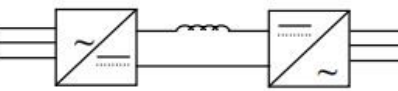
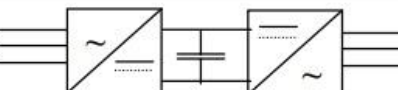
Εικόνα 2.2 Ελεγχόμενος τριφασικός ανορθωτής γέφυρας

Οι μετατροπείς ισχύος που χρησιμοποιούνται κυρίως περιγράφονται παρακάτω:

Ζεύγη ανορθωτών – αντιστροφέων SPWM

Στις διατάξεις αυτές έχουμε πρώτα μετατροπή από εναλλασσόμενη τάση σε συνεχή και στην συνέχεια με τους αντιστροφέες πάλι σε εναλλασσόμενη. Μεταξύ του κυκλώματος ανόρθωσης και του κυκλώματος αντιστροφής υπάρχει ένα σημείο(DC

link) που παρεμβάλλεται είτε ένας πυκνωτής στην περίπτωση που θέλουμε να διατηρήσουμε σταθερή την τάση και ο ανορθωτής λειτουργεί σαν πηγή σταθερής τάσης είτε ένα πηνίο στην περίπτωση που θέλουμε να διατηρήσουμε σταθερό το ρεύμα και ο ανορθωτής λειτουργεί σαν πηγή σταθερού ρεύματος. Ο συγχρομετατροπέας (synchro-converter) ή LCI αποτελεί μια ειδική περίπτωση μετατροπέα πηγής ρεύματος καθώς οι διακόπτες ισχύος σβήνουν μόνο με την βοήθεια του φορτίου τους και χρησιμοποιούνται ευρέως σε προωστικά συστήματα με σύγχρονους κινητήρες μεγάλης ισχύος.

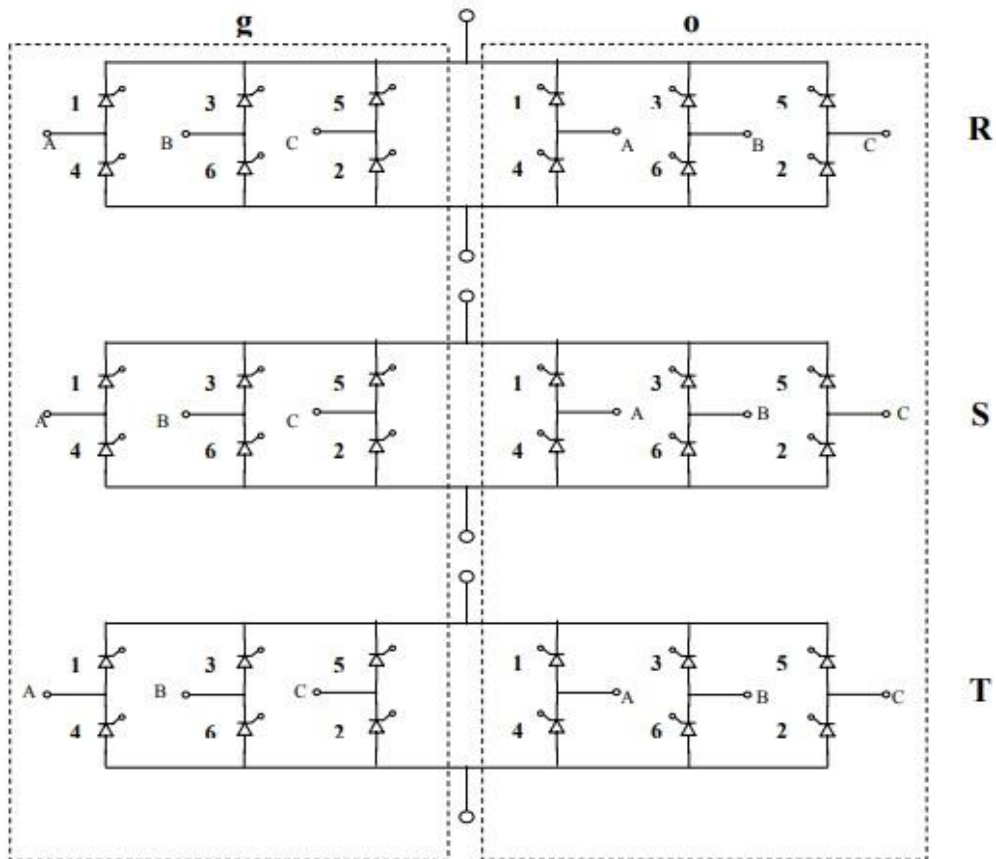
Μετατροπέας	Διάταξη	Μέγιστη ισχύς	Κυριαρχούσες αρμονικές
Ανορθωτής		>6 MVA	6.n.f _i
Αντιστροφέας CSI		1 MVA	(3k±1).f _o
Αντιστροφέας LCI		>30 MVA	(3k±1).f _o
Αντιστροφέας VSI		2 MVA	(3k±1).f _o

Εικόνα 2.3 SPWM με ζεύγη ανορθωτών [1]

Κυκλομετατροπείς (cycloconverters)

Σε αυτήν την περίπτωση δεν έχουμε μετατροπή σε συνεχή τάση αλλά απευθείας μετατροπή από μια εναλλασσόμενη τάση σταθερού πλάτους και συχνότητας σε μια άλλη διαφορετικού πλάτους και συχνότητας. Συγκεκριμένα για συστήματα ηλεκτροπρόωσης είναι συνήθως μετατροπείς από τα 50/60 Hz που είναι η συχνότητα των ρευμάτων των γεννητριών στα 3 / 4 Hz που είναι η συχνότητα των ρευμάτων των προωστήρων. Ένας απλός τριφασικός μετατροπέας 6 παλμών αποτελείται από 36 Thyristors, 12 για κάθε φάση. Οι τεχνικές ελέγχου αγωγής των thyristors ποικίλουν ανάλογα την διάταξη.

Οι κυκλομετατροπείς δίνουν στην έξοδο τους καλύτερη ποιότητα ρεύματος με μικρές παραμορφώσεις ωστόσο έχουν αυξημένο κόστος με πολλούς διακόπτες ισχύος και οι διακόπτες αυτοί απαιτείται να συντονίζονται με μεγάλη ακρίβεια από τα κυκλώματα ελέγχου.



Εικόνα 2.4 Τυπικός κυκλομετατροπέας 6 παλμών. Με A,B,C συμβολίζονται οι τρεις φάσεις εισόδου και με R,S,T οι τρεις φάσεις εξόδου [1]

Μητροειδείς μετατροπείς

Και σε αυτήν την περίπτωση πρόκειται για μετατροπείς EP/EP. Οι διατάξεις αυτές δίνουν το δικαίωμα στις φάσεις εξόδου να τροφοδοτηθούν απευθείας από τις φάσεις εισόδου κατά τρόπο ελεγχόμενο από το κύκλωμα ελέγχου. Οι διατάξεις αυτές δεν έχουν χρησιμοποιηθεί σε κάποιο σύστημα ηλεκτροπρόωσης αλλά έχουν προταθεί σε κάποιο θεωρητικό επίπεδο καθώς οι αλγόριθμοι έναυσης και σβέσης των διακοπών βρίσκονται ακόμα σε ερευνητικό στάδιο. Και σε αυτές τις διατάξεις ο έλεγχος των διακοπών πρέπει να είναι καλά συγχρονισμένος και ακριβής ώστε να αποφεύγονται πιθανά βραχυκυκλώματα και καταστραφούν οι διατάξεις.

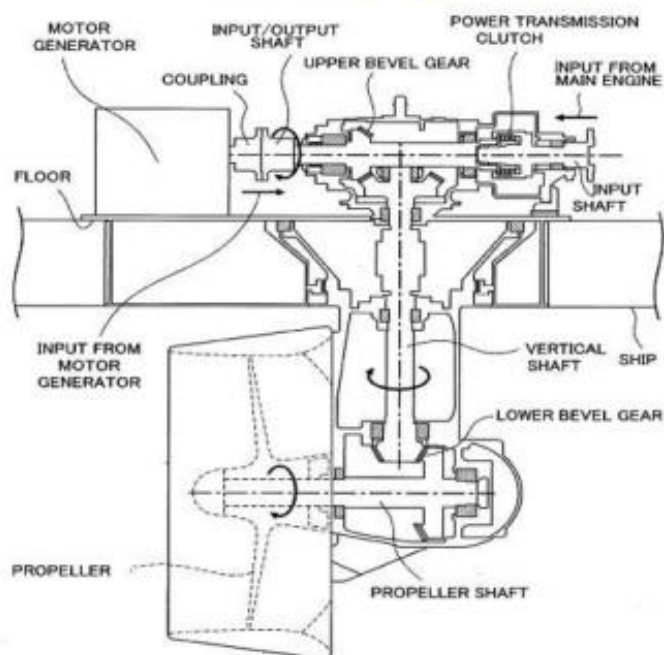
- Μονάδες πρόωσης [3]:

Κινητήρες με αξονική πρόωση : Είναι η πιο απλή μορφή πρόωσης όπου ένας κινητήρας μεταβλητής ταχύτητας βρίσκεται στο εσωτερικό του κύτους του πλοίου και ο άξονας του είτε είναι συνδεδεμένος απευθείας με την προπέλα είτε μέσω ενός κιβωτίου ταχυτήτων για μεγαλύτερη ταχύτητα ,γεγονός όμως που περιπλέκει το μηχανικό κομμάτι και αυξάνει τις απώλειες. Η πρόωση με αυτή την μονάδα επιτρέπει μόνο μπρος-πίσω κίνηση.

Κινητήρες με περιστρεφόμενη πρόωση : Και σε αυτήν την περίπτωση ο κινητήρα βρίσκεται στο εσωτερικό του κύτους ωστόσο συνδέεται με την προπέλα μέσω ενός άξονα σχήματος Z γεγονός που επιτρέπει το πλοίο να κινηθεί προς οποιαδήποτε κατεύθυνση ωστόσο με κάποιους περιορισμούς, καθώς η κίνηση είναι βέλτιστη μόνο προς μια κατεύθυνση.

Κινητήρες με αξιμουθιακή πρόωση : Όπως οι περιστρεφόμενοι προωστήρες έτσι και οι αξιμουθιακοί προωστήρες επιτρέπουν την κίνηση προς οποιαδήποτε κατεύθυνση. Η διαφορά τους είναι ότι οι προωστήρες αυτοί βρίσκονται σε ένα κλειστό συμπαγή φορέα βυθισμένο στο κάτω μέρος του κύτους και η προπέλα είναι απευθείας συνδεδεμένη στον άξονα. Οι μονάδες αξιμουθιακής πρόωσης χρησιμοποιούνται σε κρουαζιερόπλοια, παγοθραυστικά και τάνκερ εδώ και αρκετά χρόνια και ενώ έχουν επίσης μια μειωμένη δυνατότητα αντίθετης κίνησης δεν έχουν τους μηχανικούς περιορισμούς των περιστρεφόμενων προωστήρων ούτε μεσολαβεί κάποιο κιβώτιο ταχυτήτων μεταξύ άξονα κινητήρα και προπέλας.

III. ARCHITECTURE AND WORKING OF AZIMUTH THRUSTER



Εικόνα 2.5 Αζιμουθιακός προωστήρας [11]

2.4 Ηλεκτρικοί κινητήρες που χρησιμοποιούνται ως προωστήρες [3]

Σύγχρονοι Κινητήρες: Χρησιμοποιούνται κυρίως για ηλεκτροπρόωση μεγάλων πλοίων. Για ισχύ μεγαλύτερη των 5 MW συνδέονται απευθείας με την προπέλα ενώ για ισχύ μεγαλύτερη των 8-10 MW μέσω κιβωτίου ταχυτήτων. Έχουν απόδοση 96-98% περίπου 4% παραπάνω από τους κινητήρες επαγωγής ωστόσο σε περιπτώσεις που χρειάζονται γρήγοροι ελιγμοί και συνεπώς απότομη αλλαγή φορτίου είναι πιθανό οι κινητήρες αυτοί να αποσυγχρονιστούν σε αντίθεση με τους κινητήρες επαγωγής. Γι' αυτό και προτιμώνται σε μεγάλα πλοία όπου οι ταχύτητες είναι χαμηλές.

Σύγχρονοι κινητήρες με μόνιμο μαγνήτη : Έχουν απόδοση που συχνά ξεπερνά το 98%, λόγω της απουσίας ρευμάτων στον δρομέα ενώ επίσης είναι περισσότερο ανθεκτικοί στους κραδασμούς. Αυτό τους καθιστά κατάλληλους για μεγαλύτερο εύρος ταχυτήτων και φορτίου. Επίσης έχουν μεγάλη πυκνότητα ισχύος και για εφαρμογές μεγάλης ισχύος προσφέρουν εξοικονόμηση χώρου. Ως άμεση συνέπεια και σε συνδυασμό με την ανακάλυψη των μαγνητών από κράμα Νεοδυμίου η τεχνολογία αυτή έχει αρχίσει να επικρατεί.

Ασύγχρονοι Κινητήρες Εναλλασσόμενου Ρεύματος: Ο επαγωγικός κινητήρας είναι μια ώριμη τεχνολογία για χρήση σε μεγάλα πλοία. Μπορεί να έχει αρκετά υψηλή πυκνότητα ισχύος. Η απλή κατασκευή του ασύγχρονου κινητήρα όχι μόνο συμβάλλει στην εγγενή

αξιοπιστία του, αλλά επιτρέπει επίσης απλό σχεδιασμό κατάλληλο ως προς τις απαιτήσεις αντοχής σε κραδασμούς. Έχει χαμηλό επίπεδο στερεόφερτου θορύβου, επιτρέποντας απευθείας τοποθέτηση στο σκαρί του πλοίου. Έχει υψηλή πυκνότητα ισχύος, αποδοτικότητα, χαμηλά επίπεδα θορύβου και δονήσεων, υψηλή ικανότητα να αντέχει σε κραδασμούς και χαμηλό κόστος συντήρησης και κόστος κύκλου ζωής. Η πρόοδος στην τεχνολογία κατά τη διάρκεια των τελευταίων ετών τους καθιστά από τους ιδανικότερους υποψήφιους για εφαρμογές πρόωσης πλοίων. Χρησιμοποιούνται και σαν βοηθητικοί πλευρικοί κινητήρες που διευκολύνουν την επίτευξη ελιγμών.

Υπεραγώγιμοι σύγχρονοι κινητήρες υψηλής θερμοκρασίας: Οι κινητήρες αυτοί μπορεί να έχουν μεγαλύτερη πυκνότητα ισχύος και να είναι πιο αθόρυβοι από τους κινητήρες μονίμων μαγνητών αλλά δεν είναι ακόμα τεχνολογικά ώριμοι. Μπορούν να μεταφέρουν υψηλή πυκνότητα ρεύματος έχοντας αμελητέες απώλειες ισχύος στο δρομέα και μπορούν να παράγουν διπλάσια ισχύ εξόδου από τους συμβατικούς κινητήρες με περιελίξεις χαλκού σε παρόμοιο μέγεθος. Προσφέρουν την υψηλότερη ενεργειακή απόδοση.

2.5 Τεχνικές ελέγχου προωστήρων [1]

Οι κινητήρες που χρησιμοποιούνται σαν προωστήρες στα πλοία είναι EP και αυτό καθιστά τον έλεγχο τους αρκετά πιο σύνθετο σε σύγκριση με τις μηχανές ΣΡ. Η ροπή M στους κινητήρες ΣΡ είναι ανάλογη του ρεύματος των τυλιγμάτων του τυμπάνου του στάτη I_a , του ρεύματος διεγέρσεως I_f , και μιας σταθερά k που εξαρτάται από τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά της μηχανής.

$$M = k \times I_a \times I_f$$

Στις μηχανές ΣΡ όμως τα μαγνητικά πεδία που αναπτύσσονται είναι σταθερά και κάθετα μεταξύ τους, δηλαδή έχουν διαφορά φάσης 90 μοίρες, ενώ στις μηχανές EP τα πεδία στρέφονται και έχουν διαφορά φάσεις ανάλογα με τις μεταβολές στο φορτίο. Χάρη στον μετασχηματισμό dq κάθε ρεύμα φάσης μπορεί να αναλυθεί σε δύο σταθερές και κάθετες μεταξύ τους συνιστώσες, ορθού και κάθετου άξονα που στρέφονται με σταθερή ταχύτητα. Παρότι ο μετασχηματισμός αυτός έχει ανακαλυφθεί από το 1929 από τον Park τα τελευταία 20 χρόνια χρησιμοποιήθηκε με ηλεκτρονικά κυκλώματα σε πραγματικό χρόνο περιστροφής των κινητήρων. Έχουν αναπτυχθεί διάφορες παραλλαγές ανάλογα με την εκλογή του στρεφόμενου πεδίου αναφοράς με την πλέον διαδεδομένη να είναι η μέθοδος ελέγχου με προσανατολισμό στο διάνυσμα της πεπλεγμένης ροής του δρομέα ή έλεγχος πεδίου.

Έλεγχος πεδίου: Ο διανυσματικός έλεγχος πεδίου του κινητήρα διακρίνεται στον άμεσο όπου η μαγνητική ροή είτε μετρείται απευθείας είτε υπολογίζεται με την χρήση μαθηματικού μοντέλου μαγνητικής ροής και τον έμμεσο όπου η μαγνητική ροή υπολογίζεται με την μέτρηση άλλων μεγεθών όπως η ταχύτητα του κινητήρα καθώς και τα ρεύματα στάτη και δρομέα. Βέβαια η απευθείας μέτρηση του διανύσματος μαγνητικής ροής είναι δύσκολο να γίνει και εξαιτίας του θορύβου και γιατί οι αντιστάσεις και οι αντιδράσεις των τυλιγμάτων μεταβάλλονται με τις μεταβολές της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στην μηχανή από την περιστροφή. Τα μειονεκτήματα αυτής της μεθόδου είναι ότι η ροπή δεν μπορεί να ελεγχθεί απευθείας καθώς και οι απαιτήσεις σε αισθητήρες ,μετρητικά και μετατροπείς αυξάνουν την πολυπλοκότητα και την ταχύτητα απόκρισης του συστήματος.

Απευθείας Έλεγχος ροπής : Πρόκειται για μια εξέλιξη της τεχνικής διανυσματικού ελέγχου πεδίου κατά την οποία μετρούνται ή καλύτερα υπολογίζονται οι τάσεις και τα ρεύματα στάτη και μετασχηματίζονται σε στρεφόμενο πλαίσιο αναφοράς , όπως υπολογίζονται το διάνυσμα της μαγνητικής ροής του στάτη καθώς και η τιμή της ηλεκτρομαγνητικής ροπής στον άξονα του δρομέα. Από την σύγκριση των μεγεθών της μαγνητικής ροής και ροπής με τις επιθυμητές τιμές παράγονται τα σήματα ελέγχου των μετατροπέων (για έναυση και σβέση των τρανζίστορ). Η σύγκριση βασίζεται σε μη γραμμικές συναρτήσεις και έχει το πλεονέκτημα ότι αξιοποιεί την διακριτή συμπεριφορά των ηλεκτρονικών ισχύος στον χρόνο αυξάνοντας τελικά την συνολική απόδοση. Αυτή η τεχνική ελέγχου έχει αρχίσει να εφαρμόζεται κυρίως σε πλοία που χρησιμοποιούν αξιμουθιακό σύστημα πρόωσης με σύγχρονους κινητήρες μονίμων μαγνητών και ac/ac converters. Η μέθοδος έχει το πλεονέκτημα ότι προσφέρει την δυνατότητα απευθείας ελέγχου της ροπής εξόδου με λιγότερες μετρήσεις σε σύγκριση με τον διανυσματικό έλεγχο (πχ δεν χρειάζεται να μετράμε τις στροφές ανά λεπτό του δρομέα) και με αυτόν των τρόπο πετυχαίνουμε καλύτερη ροπή εξόδου χωρίς διακυμάνσεις.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

3.1 Σύγχρονοι κινητήρες

Οι σύγχρονοι κινητήρες [4], όπως και οι κινητήρες επαγωγής ανήκουν στην κατηγορία των μηχανών εναλλασσόμενου ρεύματος. Αποτελούνται από ένα σταθερό τμήμα, τον στάτη, ο πυρήνας του οποίου είναι κατασκευασμένος από μαλακό σιδηρομαγνητικό υλικό, στον όποιο μέσω τυλιγμάτων εφαρμόζεται ένα τριφασικό σύστημα ρευμάτων και τον στρεφόμενο δρομέα, ο πυρήνας του οποίου επίσης αποτελείται από ένα μαλακό σιδηρομαγνητικό υλικό. Το μαγνητικό πεδίο του δρομέα είναι σταθερό όταν ο δρομέας είναι ακίνητος και δημιουργείται είτε μέσω μαγνητών στην επιφάνεια ή το εσωτερικό του είτε μέσω τυλίγματος στο οποίο εφαρμόζεται σταθερό ρεύμα διέγερσης. Επειδή το πεδίο του στάτη περιστρέφεται συνεχώς, το πεδίο του δρομέα (μαζί με τον δρομέα) προσπαθεί να το ακολουθήσει. Ουσιαστικά το πεδίο του δρομέα “καταδιώκει” το μαγνητικό πεδίο που δημιουργεί ο στάτης χωρίς ποτέ να μπορεί να το φτάσει. Αυτή είναι και η αρχή λειτουργίας του σύγχρονου κινητήρα. Μάλιστα όσο η διαφορά φάσης των δύο πεδίων πλησιάζει τις 90° τόσο μεγαλύτερη είναι η εξωτερική ροπή που παράγει ο κινητήρας.

3.1.1 Στάτης σύγχρονου κινητήρα

Ο πυρήνας του στάτη αποτελείται από φύλλα μαγνητικής λαμαρίνας (Εικόνα 3.1α), βερνικωμένα τα οποία είναι τοποθετημένα το ένα πάνω στο άλλο σχηματίζοντας έναν κοίλο κύλινδρο με κάποιες αύλακες μέσα από τις οποίες διέρχονται τα τυλίγματα της μηχανής (Εικόνα 3.1β). Ο λόγος που ο στάτης αποτελείται από φύλλα λαμαρίνας θα αναλυθεί παρακάτω. Οι αύλακες του στάτη είναι ομοιόμορφα διανεμημένες κατά κανόνα. Για να σχηματιστεί ένα πλήρες τύλιγμα, τοποθετούνται όμοια πηνία σε απέναντι αύλακες και στην συνέχεια συνδέονται μεταξύ τους σε ομάδες. Οι ομάδες αυτές των πηνίων συνδέονται είτε σε συνδεσμολογία τριγώνου είτε σε συνδεσμολογία αστέρα. Τα τυλίγματα μπορεί να είναι μονής ή διπλής στρώσης. Στα τυλίγματα διπλής στρώσης κάθε αύλακα περιέχει δύο πλευρές πηνίου, μια στην κορυφή και μια στον πυθμένα της. Κάθε πηνίο έχει μια πλευρά σε πάνω μέρος και την άλλη σε κάτω μέρος αύλακας. Ανάλογα με το τύλιγμα και την τροφοδότηση η μηχανή μπορεί να έχει οποιοδήποτε αριθμό μαγνητικών πόλων.



(α)

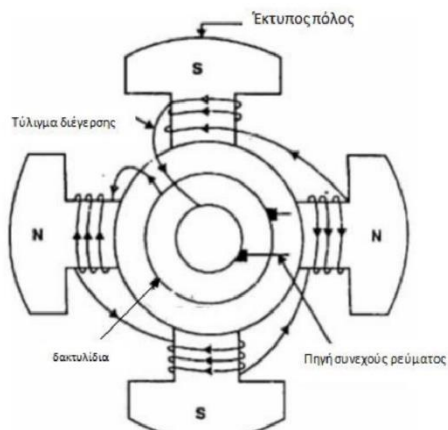


(β)

Εικόνα 3.1(α) Βερνικωμένα φύλλα λαμαρίνας που συνθέτουν τον πυρήνα του στάτη **(β)**Πυρήνας στάτη

3.1.2 Δρομέας σύγχρονου κινητήρα

Ο δρομέας ενός σύγχρονου κινητήρα όπως και ο στάτης αποτελείται από μαγνητική λαμαρίνα και φέρει τον ίδιο αριθμό μαγνητικών πόλων με τον στάτη. Οι πόλοι του δρομέα μπορεί να είναι είτε έκτυποι (Εικόνα 3.2α) είτε να σχηματίζονται στο εσωτερικό του δρομέα μέσω αυλακώσεων. Επίσης οι μαγνητικοί πόλοι προκύπτουν είτε από κάποιο σταθερό ρεύμα διεγέρσεως που εφαρμόζεται μέσω τυλίγματος πάνω στον δρομέα αλλά και από μόνιμους μαγνήτες (Εικόνα 3.2β) είτε στην επιφάνεια του δρομέα είτε στο εσωτερικό του. Τα τελευταία χρόνια μάλιστα με την εξέλιξη της τεχνολογίας και την ανακάλυψη νέων μαγνητικών υλικών οι σύγχρονοι κινητήρες μόνιμων μαγνητών κυριαρχούν καθώς όπως αναφέρθηκε και στο πρώτο κεφάλαιο παρουσιάζουν καλύτερη απόδοση, καθώς δεν εμφανίζουν απώλειες χαλκού στον δρομέα. Ο τρόπος που θα τοποθετηθούν οι μαγνήτες στον δρομέα είναι σημαντικός και καθορίζει διαφορετικές μεθόδους διαμόρφωσης. [5]



Εικόνα 3.2(α) Δρομέας με έκτυπους πόλους και τύλιγμα διεγέρσεως **(β)** Δρομέας μόνιμων μαγνητών

Δρομέας με επιφανειακούς μαγνήτες

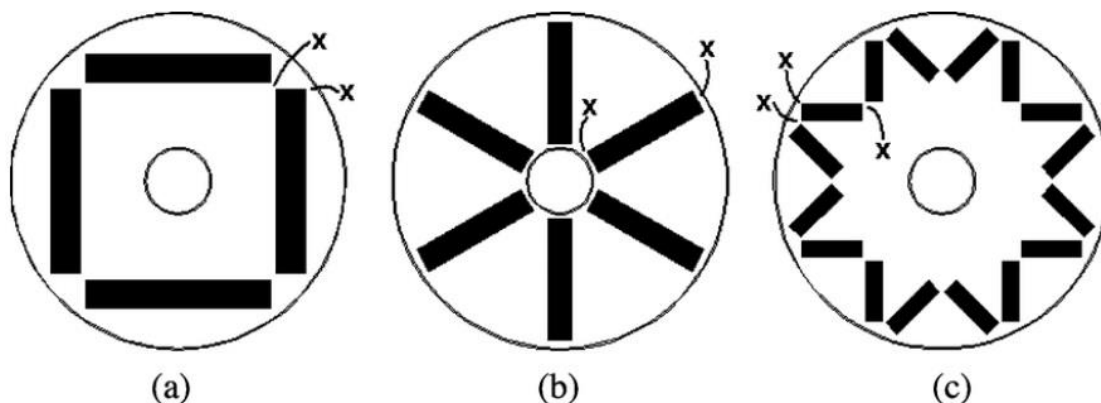
Αποτελεί την συνηθέστερη διαμόρφωση δρομέα σε μηχανές μονίμων μαγνητών και όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.2β οι μαγνήτες είναι τοποθετημένοι ομοιόμορφα στην επιφάνειά του. Ξεχωρίζει για την απλότητα της και το χαμηλό της κόστος, ωστόσο σε εφαρμογές όπου ο δρομέας απαιτεί υψηλές στροφές υπάρχει σοβαρός κίνδυνος αποκόλλησης των μαγνητών λόγω των φυγόκεντρων δυνάμεων που αναπτύσσονται από την περιστροφή. Συνεπώς σε τέτοιου είδους εφαρμογές η διαμόρφωση αυτή δεν συνίσταται.

Δρομέας με εσωτερικά επιφανειακούς μαγνήτες

Σ' αυτή την περίπτωση οι μαγνήτες είναι τοποθετημένοι στην επιφάνεια του δρομέα, αλλά μεταξύ των μαγνητών παρεμβάλλεται σίδηρος. Με αυτήν την διαμόρφωση λύνεται το θέμα των υψηλών στροφών καθώς οι μαγνήτες συγκρατούνται καλύτερα ωστόσο δημιουργείται το θέμα της υπερθέρμανσης τους η οποία είναι αιτία απομαγνήτισης.

Δρομέας με εσωτερικούς μαγνήτες

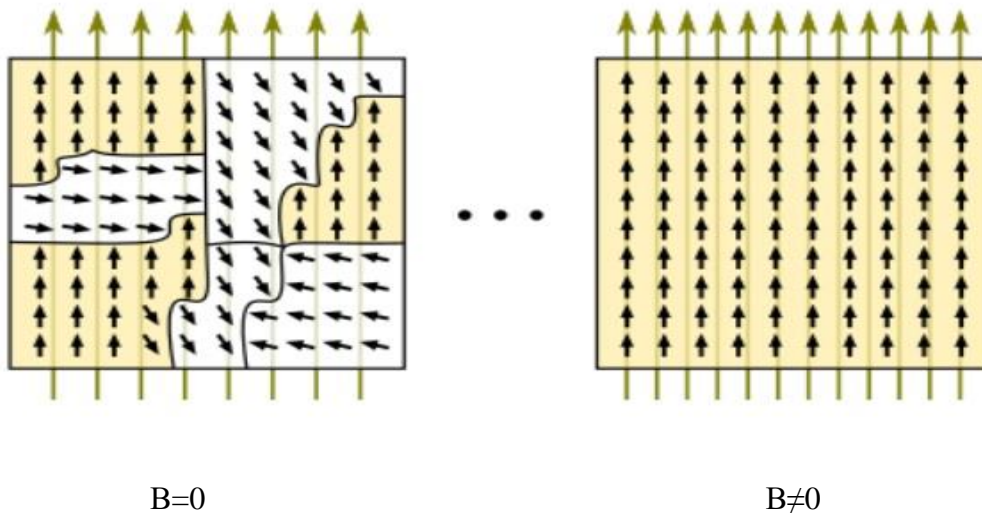
Οι μαγνήτες είναι θαμμένοι στο εσωτερικό του δρομέα. Έχουν εξαιρετικά αποτελέσματα σε εφαρμογές υψηλών ταχυτήτων, ενώ δεν διατρέχουν τον κίνδυνο απομαγνήτισης από υπερθέρμανση καθώς στο εσωτερικό του δρομέα δεν υπάρχει ιδιαίτερη μεταβολή στην θερμοκρασία. Επιπρόσθετα, σε ορισμένες εφαρμογές έχει διαπιστωθεί ότι ο εσωτερικός μαγνήτης παρουσιάζει υψηλότερη πυκνότητα μέγιστης ροπής συγκριτικά με τον επιφανειακό για ίδια ονομαστικά μεγέθη ρεύματος και ΗΕΔ. Απαιτούν όμως μια μεγαλύτερη δυσκολία στην κατασκευή και το κόστος τους είναι υψηλό.



Εικόνα 3.3 Δρομείς με διάφορες τοπολογίες εσωτερικών (“θαμμένων”) μαγνητών

3.2 Σιδηρομαγνητικά υλικά

Ο πυρήνας του στάτη και του δρομέα όπως αναφέρθηκε και παραπάνω είναι κατασκευασμένος από κάποιο σιδηρομαγνητικό υλικό. Τα υλικά αυτά αποτελούνται από domains μαγνητικών δίπολων (Εικόνα 2.4) που οφείλονται στην περιστροφή των ηλεκτρονίων γύρω από τον πυρήνα του ατόμου και όταν δεν εφαρμόζεται πάνω τους κάποιο μαγνητικό πεδίο η κατεύθυνση αυτών των διπόλων είναι ακανόνιστη. Με την επιβολή όμως κάποιου εξωτερικού μαγνητικού πεδίου τα μαγνητικά δίπολα αυτών των περιοχών ευθυγραμμίζονται και αποκτούν την κατεύθυνση του πεδίου που τους επιβάλλεται. Αυτός είναι και ο λόγος που επιλέγονται για την διανομή της μαγνητικής ροής στο εσωτερικό της μηχανής.



Εικόνα 3.4 Σιδηρομαγνητικό υλικό χωρίς και με την επιβολή μαγνητικού πεδίου.

Εκτός όμως από τις μαγνητικές του δυνατότητες τα υλικά αυτά επιλέγονται γιατί προσδίδουν στον κινητήρα μηχανική αντοχή στους κραδασμούς. Περιγράφονται από τον βρόχο υστέρησης τους ο οποίος μας δίνει πληροφορίες για την παραμένουσα μαγνήτιση τους, την μεταβολή της μαγνητικής ροής τους συναρτήσει της έντασης του εξωτερικού πεδίου, τον κορεσμό και σε συνδυασμό με το κόστος και την σπανιότητα των υλικών επιλέγεται το καλύτερο δυνατό για κάθε εφαρμογή. Τα υλικά αυτά διατίθενται είτε συμπαγή είτε σε μορφή ελασμάτων ανάλογα την χρήση. Για την κατασκευή του πυρήνα μιας μηχανής τα χαρακτηριστικά του σιδήρου που έχουν την μεγαλύτερη αξία είναι :

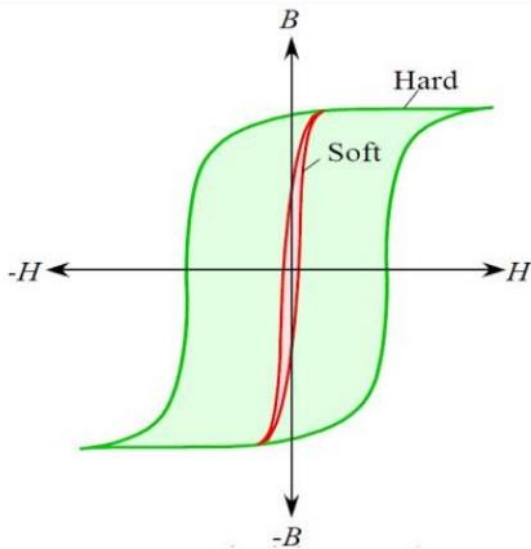
- Υψηλή μαγνητική διαπερατότητα ώστε το μαγνητικό κύκλωμα να βρίσκει την μικρότερη δυνατή μαγνητική αντίσταση

- Υψηλή πυκνότητα μαγνητική ροής στον κορεσμό ώστε να διέρχονται όσο το δυνατόν περισσότερες μαγνητικές γραμμές μέσα από το υλικό για όσο το δυνατόν μεγαλύτερη πυκνότητα ισχύος.
- Μικρό εμβαδόν βρόχου υστέρησης και μικρή ηλεκτρική αγωγιμότητα, προκειμένου να επιτευχθεί καλύτερη απόδοση, με μειωμένες απώλειες και χωρίς ιδιαίτερη αύξηση της θερμοκρασίας γεγονός που όπως αναφέρθηκε παραπάνω μπορεί να αποδειχθεί καταστροφικό για τους μόνιμους μαγνήτες. Παράλληλα η μικρή αύξηση της θερμοκρασίας μειώνει την ανάγκη για ψύξη.

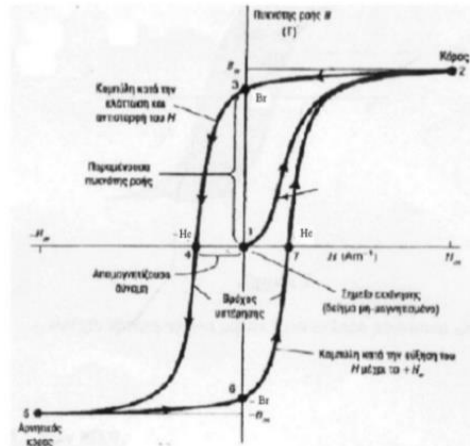
Φυσικά όλα τα παραπάνω όσο πιο ικανοποιητικά είναι τόσο περισσότερο κατασκευαστικό κόστος προσθέτουν στην μηχανή και γι' αυτό η επιλογή τους χρειάζεται και κάποια οικονομοτεχνική μελέτη σε βάθος χρόνου.

Τα σιδηρομαγνητικά υλικά ανάλογα με τον βρόχο υστέρησης τους χωρίζονται σε δύο κατηγορίες τα μαλακά και τα σκληρά. Στα μαλακά μαγνητικά υλικά ο βρόχος υστέρησης έχει μικρότερο εμβαδόν και η καμπύλη μαγνητισής τους παρουσιάζει έντονη κλίση. Επιπλέον δεν εμφανίζουν ιδιαίτερη παραμένουσα μαγνήτιση και έχουν χαμηλή μαγνητική διαπερατότητα. Μερικά παραδείγματα τέτοιων υλικών είναι ο μαλακός σίδηρος, ο πυριτιούχος χάλυβας και τα κράματα σιδήρου-κοβαλτίου τύπου Hiperco50. Χρησιμοποιούνται κατά κυρίες σε μετασχηματιστές ισχύος, ηλεκτρικές γεννήτριες, ηλεκτρικούς κινητήρες, και εν γένει διατάξεις που υπόκεινται σε χρονικά εναλλασσόμενα μαγνητικά πεδία, εξαιτίας του μικρού βρόχου υστέρησης.

Τα σκληρά σιδηρομαγνητικά υλικά αντίθετα έχουν μεγάλο εμβαδό βρόχου υστέρησης και η καμπύλη μαγνήτισης παρουσιάζει μικρότερη κλίση. Έτσι έχουν μεγαλύτερη τιμή παραμένουσας μαγνήτισης και χρειάζονται αρκετά δυνατή ένταση μαγνητικού πεδίου ώστε να απομαγνητιστούν. Αυτός είναι και ο λόγος που χρησιμοποιούνται ως μόνιμοι μαγνήτες. Παραδείγματα τέτοιων μαγνητών είναι μαγνήτες τύπου Alnico, οι μαγνήτες σαμαρίου-κοβαλτίου και οι μαγνήτες Νεοδυμίου.



(α)



(β)

Εικόνα 3.5 α) Βρόχος υστέρησης σκληρού και μαλακού σιδηρομαγνητικού υλικού

Εικόνα 3.5 β) Χαρακτηριστικά βρόχου υστέρησης [13]

Σύγχρονες μηχανές μονίμων μαγνητών

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω οι μόνιμοι μαγνήτες χρησιμοποιούνται για να δώσουν μια εναλλακτική λύση στην δημιουργία του πεδίου διέγερσης με συνεχές ρεύμα στις σύγχρονες μηχανές. Πρέπει να αναφερθεί ότι οι μαγνήτες δεν παρέχουν ισχύ αλλά την προϋπόθεση για ανάπτυξη ροπής στην μηχανή. Για την διάδοση και την ανάπτυξη των σύγχρονων μηχανών μόνιμων μαγνητών ιδιαίτερο ρόλο έπαιξε η ανακάλυψη των μαγνητών Νεοδυμίου (NdFeB) οι οποίοι έχουν σαφώς μεγαλύτερη παραμένουσα μαγνητική επαγωγή από τους μαγνήτες Σαμαρίου (SmCo), έχουν υψηλότερη αποθηκευμένη μαγνητική ενέργεια (BH_{max}) και είναι αρκετά φθηνότεροι. Ωστόσο οι μαγνήτες Σαμαρίου είναι πιο ανθεκτικοί στις υψηλές θερμοκρασίες και σε διαβρωτικά περιβάλλοντα. Μάλιστα αυτήν την περίοδο γίνονται έρευνες για ανακάλυψη νέων συνθετικών μαγνητών με καλύτερα χαρακτηριστικά, χωρίς την χρησιμοποίηση σπάνιων γαιών, γεγονός που αν επιτευχθεί θα μειώσει σημαντικά το κόστος τους.

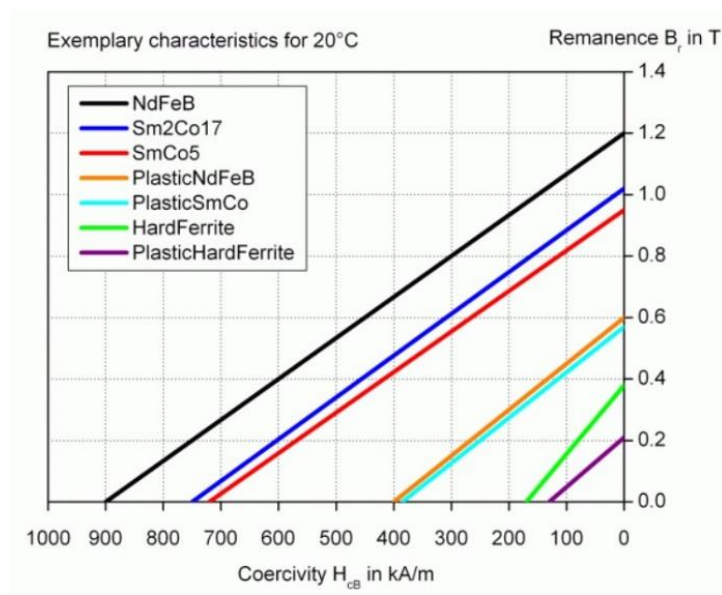
Τα πλεονεκτήματα που εμφανίζουν οι μηχανές μόνιμων μαγνητών έναντι των μηχανών με τυλίγματα διέγερσης είναι [5] :

- Μικρότερες απώλειες καθώς δεν υπάρχουν απώλειες χαλκού από ρεύμα στο τυλίγμα διέγερσης, καθώς δεν υπάρχει τυλίγμα διέγερσης.
- Μεγαλύτερη πυκνότητα ισχύος και ροπής.

- Απλοποίηση της κατασκευής καθώς δεν απαιτούνται ψήκτρες και δακτύλιοι για την DC τροφοδότηση του τυλίγματος διέγερσης.
- Καλύτερη δυναμική συμπεριφορά λόγω της αυξημένης πυκνότητας μαγνητικής ροής στο διάκενο.
- Μεγαλύτερη αξιοπιστία καθώς λειτουργούν εκ φύσεως πάντα και δεν χρειάζονται συντήρηση.
- Μικρότερα διαφεύγοντα ρεύματα στις εδράσεις εξαιτίας του μεγαλύτερου διακένου .

Ωστόσο δεν απουσιάζουν και τα μειονεκτήματα όπως είναι λογικό :

- Αδυναμία ελέγχου της μαγνήτισης καθώς είναι σταθερή, σε αντίθεση με τις συμβατικές μηχανές καθώς σε ορισμένες εφαρμογές με αρκετά πολύπλοκους ελεγκτές είναι εφικτός ο έλεγχος του DC ρεύματος διέγερσης.
- Υψηλότερο κόστος.
- Κίνδυνος απομαγνήτισης τους από υπερθέρμανση ή από επιβολή ισχυρού αντίθετου μαγνητικού πεδίου.
- Δύσκολη τοποθέτηση των μαγνητών στο εσωτερικό του δρομέα σε ορισμένες τοπολογίες.
- Κίνδυνος αδυναμίας ανταπόκρισης στις απαιτήσεις της αγοράς. Κατατοπιστικό παράδειγμα οι μαγνήτες Νεοδυμίου για την αγορά των οποίων οι ενδιαφερόμενη αντιμετωπίζουν δυσκολίες.



Εικόνα 3.6 Καμπύλες B-H των μόνιμων μαγνητών που κυκλοφορούν στην αγορά [14]

3.3 Απώλειες σύγχρονων κινητήρων μονίμων μαγνητών

3.3.1 Απώλειες χαλκού

Οι απώλειες χαλκού είναι οι απώλειες που προκύπτουν εξαιτίας του φαινομένου Joule από την διέλευση ρεύματος στα τυλίγματα της μηχανής. Στις μηχανές μονίμων μαγνητών οι απώλειες αυτές αφορούν αποκλειστικά τον στάτη καθώς όπως αναφέρθηκε και παραπάνω δεν υπάρχουν τυλίγματα στον δρομέα. Είναι ανάλογες του τετραγώνου του ρεύματος που διέρχεται από το τύλιγμα και της συνολικής αντίστασης των τυλιγμάτων της μηχανής αναφάση. Η αντίσταση αυτή εξαρτάται από το συνολικό μήκος του τυλίγματος, την διατομή του αγωγού των τυλιγμάτων καθώς και από την ειδική αντίσταση του χαλκού η οποία μεταβάλλεται με την θερμοκρασία που αναπτύσσεται στο τύλιγμα. Γι' αυτό σημαντικό ρόλο στην μείωση των απωλειών παίζει η ψύξη της μηχανής. Ανάλογα με την ισχύ της κάθε μηχανής η ψύξη γίνεται είτε με εξαναγκασμένη και μη ροή αέρα για μικρότερη ισχύ και με ροή νερού η ακόμα και με ροή υγροποιημένου υδρογόνου για μεγαλύτερη ισχύ. Επίσης οι απώλειες αυτές αυξάνονται και ανάλογα με τις αρμονικές του ρεύματος που διέρχεται από το τύλιγμα και αυτός είναι ο λόγος της ανάγκης που προκύπτει για τον περιορισμό τους.

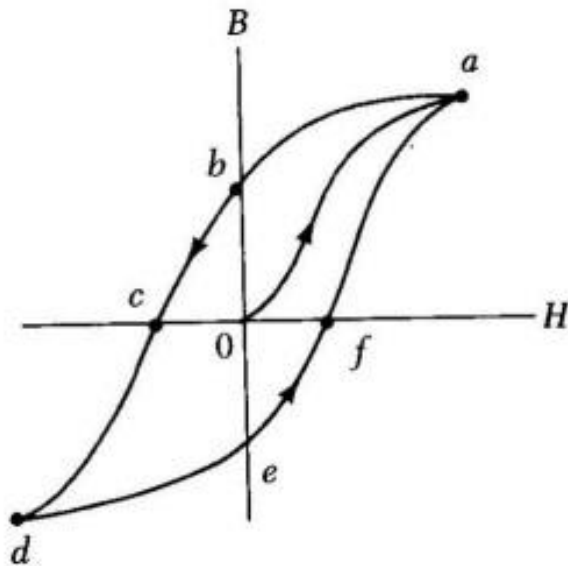
3.3.2 Απώλειες πυρήνα

Η αύξηση της θερμοκρασίας του πυρήνα μιας ηλεκτρικής μηχανής όταν αυτός διατρέχεται από χρονικά μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο οφείλεται στις απώλειες πυρήνα οι οποίες κατατάσσονται σε δύο κύριες κατηγορίες. Τις απώλειες πυρήνα λόγω υστέρησης και στις απώλειες λόγω δινορευμάτων. Στη συνέχεια περιγράφονται οι κατηγορίες αυτές και ορισμένοι τρόποι μοντελοποίησής τους για την εκτίμηση των συνολικών απωλειών πυρήνα στις ηλεκτρικές μηχανές.

3.3.2.1 Απώλειες Υστέρησης

Λόγω της εναλλαγής της μαγνητικής ροής σε ένα σιδηρομαγνητικό υλικό, το υλικό αυτό υφίσταται σμικρύνσεις και υπερεκτάσεις που οδηγούν σε απώλειες. Οι απώλειες αυτές ονομάζονται απώλειες υστέρησης. Αυτές οι σμικρύνσεις και υπερεκτάσεις οφείλονται στο γεγονός ότι όταν το υλικό μαγνητίζεται τα μαγνητικά δίπολα των διαφορών domains που αποτελείται τείνουν να ευθυγραμμιστούν στην κατεύθυνση του μαγνητικού πεδίου και έτσι προκαλούνται αλλαγές στο σχήμα και στις διαστάσεις του υλικού. Τα σιδηρομαγνητικά υλικά, τείνουν να διατηρήσουν τον προσανατολισμό στο σώμα τους έπειτα από την επιβολή

εξωτερικού μαγνητικού πεδίου. Αυτό ισχύει ακόμα και μετά την αφαίρεσή του καθώς χρειάζεται ενέργεια για τον αποπροσανατολισμό. Για το λόγο αυτό οι καμπύλες μαγνήτισης και απομαγνήτισης διαφέρουν, σχηματίζοντας τελικά τον βρόχο υστέρησης όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.7.



Εικόνα 3.7 : Βρόχος υστέρησης σιδηρομαγνητικού υλικού

Όταν ολοκληρωθεί ένας κύκλος μαγνήτισης σε ένα σιδηρομαγνητικό υλικό παρατηρείται ότι το υλικό καταναλώνει περισσότερη ενέργεια από όση αποδίδει και οι απώλειες αυτές αποτελούν τις απώλειες υστέρησης, υπολογίζονται με τον εμβαδόν του βρόχου αυτού επί τον όγκο του υλικού και μετατρέπονται σε θερμότητα. Στην περίπτωση των μηχανών και των μετασχηματιστών το ρεύμα που εφαρμόζεται στον πυρήνα του σιδηρομαγνητικού υλικού μέσω των τυλιγμάτων είναι ημιτονοειδές και στην ειδική αυτή περίπτωση οι απώλειες υστέρησης υπολογίζονται από τον τύπο:

$$P_h = k_h \times f \times B_{max}^x \times V$$

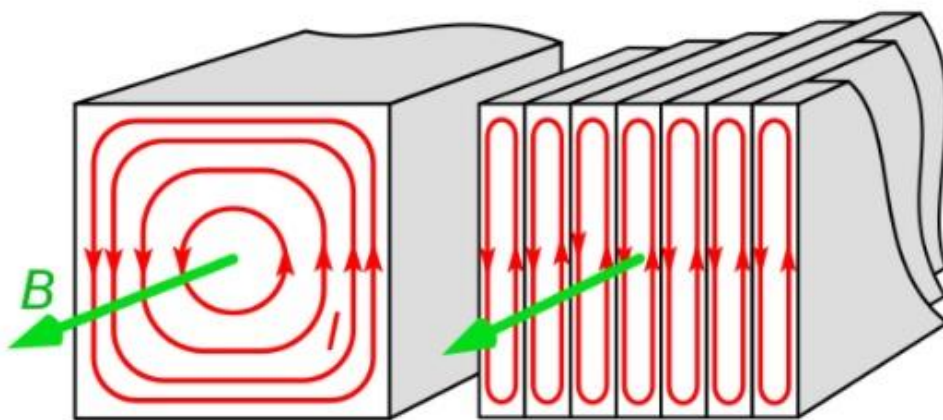
Όπου k_h σταθερά που εξαρτάται από την δομή του υλικού, f η συχνότητα του ημιτονοειδούς μαγνητικού πεδίου, B_m πλάτος ημιτονοειδούς πεδίου. X η σταθερά του Steinmetz, που κυμαίνεται από 1.8 έως 2.2 ανάλογα το υλικό και V ο όγκος του υλικού σε κυβικά μέτρα.

Ο παραπάνω τύπος προσεγγίζει με ακρίβεια τις απώλειες υστέρησης, ωστόσο όταν μεταβάλλεται εκτός από το μέτρο της μαγνητικής ροής και η διεύθυνσή της, γεγονός που συμβαίνει στις περιστροφικές μηχανές τότε δεν είναι αρκετός. Επιπλέον από τα inverters

όπως είναι γνωστό εισάγονται αρμονικές στο ρεύμα έτσι εκτός από τον βρόχο υστέρησης που δημιουργείται από το ρεύμα της θεμελιώδους συχνότητας, δημιουργούνται και κάποιοι ελάσσονες ή και ασύμμετροι βρόχοι από τις αρμονικές του ρεύματος οι οποίοι πρέπει να συνυπολογιστούν [6]. Όπως γίνεται αντιληπτό στην περίπτωση αυτή οι απώλειες υστέρησης εξαρτώνται από πολλούς παράγοντες και ο ακριβής υπολογισμός και μοντελοποίηση τους αποτελεί πρόκληση.

3.3.2.2 Απώλειες δινορρευμάτων

Οι απώλειες δινορρευμάτων ή αλλιώς Eddy current απώλειες οφείλονται στον νόμο του Faraday, στο σώμα του πυρήνα, ο οποίος αναφέρει ότι “Οποιαδήποτε μεταβολή στο περιβάλλον ενός πηνίου, προκαλεί μια επαγόμενη τάση στα άκρα του πηνίου άσχετα με τον τρόπο που προκλήθηκε η ηλεκτρομαγνητική μεταβολή”. Έτσι όταν ο πυρήνας μιας μηχανής περιστρέφεται σε ένα μαγνητικό πεδίο τότε λόγω της αγωγιμότητας των σιδηρομαγνητικών υλικών εμφανίζονται ρεύματα στο σώμα του πυρήνα, που καλούνται δινορρεύματα καθώς ρέουν κυκλικά (σαν δίνες σε υδραυλικό ανάλογο) σε επίπεδο κάθετο προς τη διεύθυνση της μαγνητικής ροής. Και έτσι λόγω του φαινομένου Joule αυτά τα ρεύματα μετατρέπονται σε απώλειες θερμότητας. Για αυτό το λόγο στις μηχανές εναλλασσόμενου ρεύματος και τους μετασχηματιστές χρησιμοποιείται στο σώμα του πυρήνα τους η πρακτική της ελασματοποιημένης λαμαρίνας. Ουσιαστικά το σώμα του πυρήνα σχηματίζεται από λεπτά “φύλλα” λαμαρίνας μονωμένα μεταξύ τους με κάποιου είδους βερνίκι και έτσι μειώνεται η ηλεκτρική αγωγιμότητα του πυρήνα και συνεπώς οι απώλειες δινορρευμάτων. Μία άλλη τεχνική μείωσης της ηλεκτρικής αγωγιμότητας του πυρήνα είναι η πρόσμιξη της λαμαρίνας με πυρίτιο αλλά με αυτόν τον τρόπο μειώνεται η μηχανικής αντοχή του υλικού.



Εικόνα 3.8 Τα eddy current losses σε συμπαγές σώμα και σε ελασματοποιημένο. [15]

Όπως και στις απώλειες υστέρησης έτσι και σε αυτές στην ειδική περίπτωση εφαρμόζεται ημιτονοειδές ηλεκτρομαγνητικό πεδίο ο προσεγγιστικός τύπος υπολογισμού των απωλειών αυτών υπολογίζεται προσεγγιστικά από τον τύπο :

$$P_e = K_e \times B_{max}^2 \times f^2 \times V$$

Όπου K_e σταθερά που εξαρτάται από τις ιδιότητες του υλικού, και f η συχνότητα μεταβολής του μαγνητικού πεδίου. Καθώς οι απώλειες λόγω δινορευμάτων εξαρτώνται από τη συχνότητα μεταβολής της μαγνητικής επαγωγής, εμφανίζεται πρόσθετη απώλεια σε περίπτωση που μεταβάλλεται και η διεύθυνση της μαγνητικής επαγωγής.

3.3.2.3 Απώλειες δινορευμάτων στους μόνιμους μαγνήτες

Τα δινορεύματα όμως δεν εμφανίζονται στο σώμα του πυρήνα αλλά και στους μαγνήτες λόγω της υψηλής τους αγωγιμότητας. Η αύξηση της θερμοκρασίας λόγω των απωλειών αυτών, μπορούν να γίνουν αιτία μερικής (ή και ολικής/μη-αναστρέψιμης αν ξεπεράσουν κάποια κρίσιμη θερμοκρασία) απομαγνήτισης των μαγνητών. Κύρια αιτία εμφάνισης αυτών των απωλειών είναι οι χωρικές αρμονικές της μαγνητεγερτικής δύναμης στον στάτη που συναντάμε σε σύγχρονες μηχανές μόνιμων μαγνητών με συγκεντρωμένο τύλιγμα. Μάλιστα αν υπάρχουν και ανώτερες αρμονικές στο ρεύμα που αναπτύσσεται στο τύλιγμα του στάτη, γεγονός που συμβαίνει αν μεσολαβεί κάποιο inverter, οι απώλειες αυτές αυξάνονται παραπάνω. Αντίστοιχα με τις απώλειες δινορευμάτων στον πυρήνα της μηχανής η κατάτμηση των μαγνητών σε μικρότερους μαγνήτες περιορίζει σημαντικά τις απώλειες αυτές. [7][9]

Ο υπολογισμός των απωλειών αυτών γίνεται με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων με των υπολογισμό των επαγόμενων ρευμάτων από τη χρονική μεταβολή του διανυσματικού δυναμικού στην περιοχή των μαγνητών.

3.4 Γραμμικές Μηχανές

Οι γραμμικές μηχανές ανήκουν στην κατηγορία των ηλεκτρικών μηχανών οι οποίες παράγουν κίνηση ως προς τον οριζόντιο άξονα σε αντίθεση με την κυκλική κίνηση που παράγουν οι κλασσικές κυλινδρικές μηχανές. Υπάρχουν διάφορα είδη γραμμικών μηχανών όπως οι επαγωγικές γραμμικές μηχανές (Induction Linear Motors), οι γραμμικές μηχανές μαγνητικής αντίστασης (Switched Reluctance Linear Motors), οι Voice Coil Linear Motors και τέλος οι γραμμικές μηχανές μόνιμων μαγνητών (Permanent Magnet Linear Motor).

3.4.1 Γραμμικές Μηχανές Μονίμων Μαγνητών (PMLM)

Οι Γραμμικές Μηχανές Μονίμων Μαγνητών [8] αποτελούνται όπως και οι κυλινδρικές μηχανές από ένα σταθερό μέρος, τον στάτη, ο οποίος δημιουργεί ένα μετακινούμενο ηλεκτρομαγνητικό πεδίο από μια σειρά από πηνία που τροφοδοτούνται με εναλλασσόμενο ρεύμα και ένα κινητό μέρος που αποτελείται από μια σειρά από μόνιμους μαγνήτες.

Η οριζόντια μετακίνηση προκύπτει από την αλληλεπίδραση των δύο πεδίων. Οι μηχανές αυτές υπερτερούν των συμβατικών κυλινδρικών μηχανών καθώς δεν απαιτούν κάποιον μηχανισμό μετατροπής της κυκλικής κίνησης σε οριζόντια, γεγονός που μεταφράζεται σε απώλειες. Επίσης υπερτερούν έναντι αντίστοιχων Γραμμικών Επαγωγικών Μηχανών καθώς παρουσιάζουν χαμηλότερες απώλειες και συνεπώς υψηλότερη απόδοση.

Ένα ακόμη πλεονέκτημα των PMLMs είναι οι υψηλές ταχύτητες και οι δυνατότητες επιτάχυνσης τους, που τις καθιστά ιδανικές σε εφαρμογές που απαιτούν γρήγορη και ακριβή μετακίνηση.

Τέλος παρουσιάζουν υψηλή πυκνότητα ισχύος καθώς δημιουργούν ισχυρές οριζόντιες δυνάμεις σε μικρό χώρο.

3.4.2 Εφαρμογές PMLM

Οι Γραμμικές Μηχανές Μονίμων Μαγνητών [8] χρησιμοποιούνται κυρίως σε βιομηχανικούς αυτοματισμούς, στις μεταφορές καθώς και σε εφαρμογές Ρομποτικής. Επίσης χρησιμοποιούνται ευρέως σε εφαρμογές της αεροδιαστημικής αλλά και της πολεμικής βιομηχανίας, όπως σε πυραύλους, πρόωση δορυφόρων και μηχανισμούς σε αεροσκάφη.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εξετάζεται ένας κυλινδρικός σύγχρονος κινητήρας μονίμων μαγνητών ο οποίος σχεδιάστηκε για ηλεκτρική πρόωση πλοίου με την βοήθεια του λογισμικού Maxwell του περιβάλλοντος προσομοίωσης του Ansys. Η διαδικασία σχεδίασης και μελέτης του κινητήρα είναι εκτός πλαισίου της διπλωματικής και δεν παρουσιάζεται καθώς στόχος της διπλωματικής αποτελεί αποκλειστικά η πειραματική επιβεβαίωση κάποιων από των χαρακτηριστικών του κινητήρα. Στο Κεφάλαιο αυτό θα αναλυθούν τα γεωμετρικά και τα λειτουργικά χαρακτηριστικά του κυλινδρικού κινητήρα, όπως και του ισοδύναμου μαγνητικού μοντέλου της γραμμικής μηχανής που παρουσιάζει όμοια γεωμετρικά χαρακτηριστικά στο διάκενο με αυτά του κυλινδρικού κινητήρα. Τέλος θα πραγματοποιηθεί η σύγκριση των λειτουργικών χαρακτηριστικών των δυο αυτών μηχανών ώστε να διαπιστωθεί η αξιοπιστία της χρήσης δοκιμίου γραμμικής μηχανής για την επιβεβαίωση χαρακτηριστικών όπως η εφαιπτομενική δύναμη, η Ηλεκτρεγερτική Δύναμη (ΗΕΔ) και οι απώλειες ενός κινητήρα.

4.1 Γεωμετρία κυλινδρικού σύγχρονου κινητήρα μονίμων μαγνητών (PMSM)

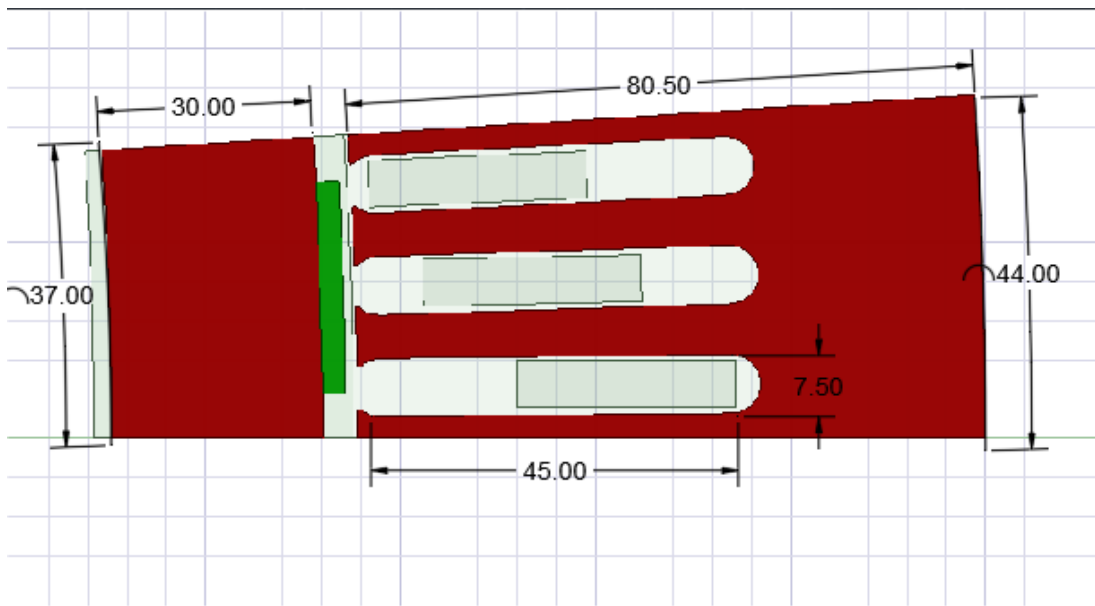
Στην εικόνα 4.1 παρουσιάζεται ο ένας πόλος από τους συνολικά 100 του κινητήρα PMSM χαμηλών στροφών, οι οποίοι εξαιτίας της συμμετρίας δεν ήταν απαραίτητο να σχεδιαστούν. Πρόκειται για έναν σύγχρονο τριφασικό κινητήρα μονίμων μαγνητών.

Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του κινητήρα αναλυτικά στον πίνακα (Εικόνα 4.1):

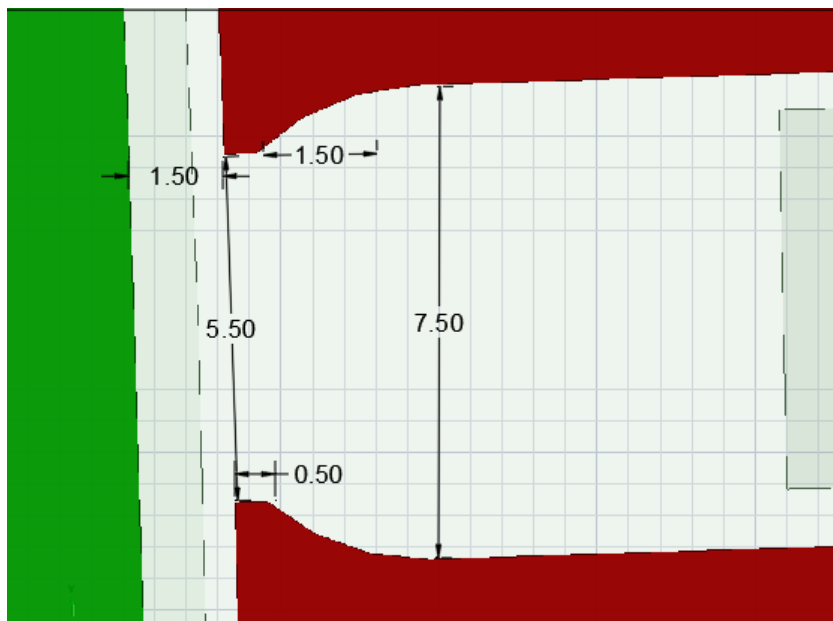
Ενεργό μήκος μηχανής	100 mm
Εξωτερική διάμετρος του στάτη	1400 mm
Διάμετρος στάτη στο διάκενο του κινητήρα	1239 mm
Διάκενο	1.50 mm
Διάμετρος δρομέα στο διάκενο	1236 mm
Διάμετρος δρομέα εσωτερικά	1176 mm
Πάχος μαγνήτη	3 mm
Πλάτος μαγνήτη	30 mm

Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των αυλάκων του κινητήρα (Εικόνα 4.2) :

Πλάτος αύλακας	7.5 mm
Ύψος σώματος αύλακας	45 mm
Άνοιγμα αύλακας	5.50 mm
Ύψος στο άνοιγμα της αύλακας	0.5 mm
Ύψος σφήνας αύλακας	1.50 mm



Εικόνα 4.1 Ένας πόλος του θεωρητικού σύγχρονου κινητήρα PMSM



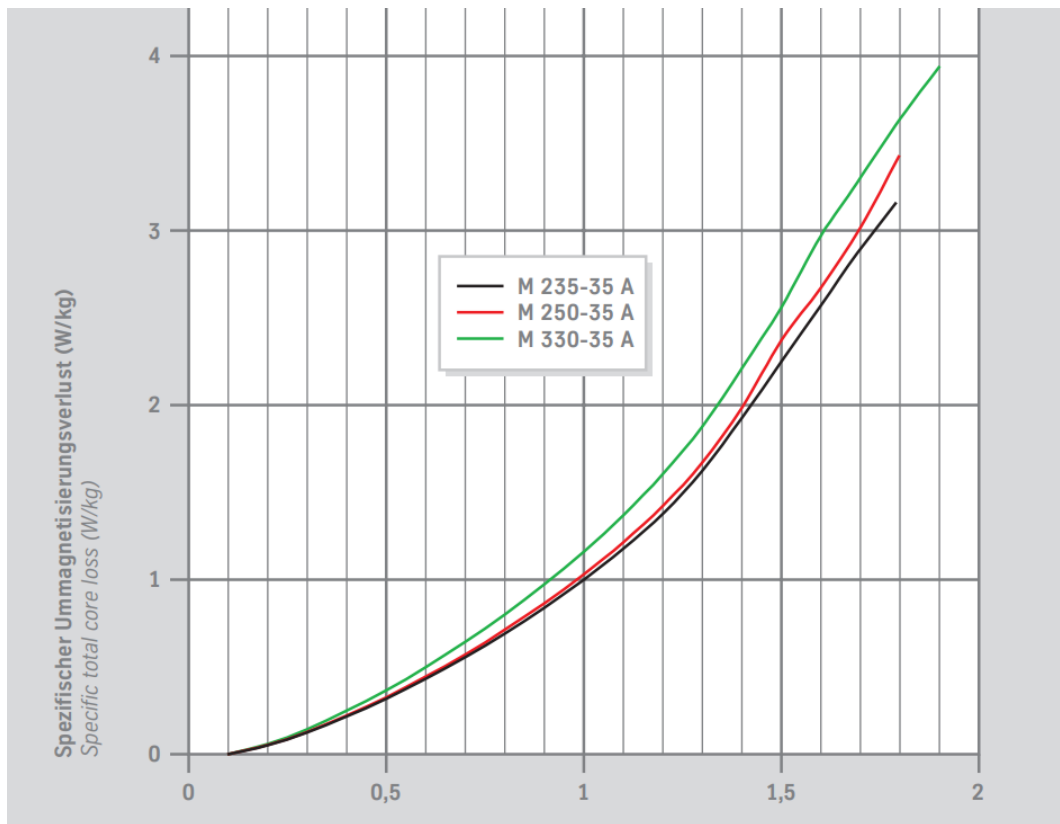
Εικόνα 4.2 Γεωμετρικά Χαρακτηριστικά της αύλακας

Για τον στάτη και τον δρομέα η σχεδίαση προέβλεπε μαγνητική λαμαρίνα M36-24G από την βιβλιοθήκη του Maxwell, ενώ οι μόνιμοι μαγνήτες που χρησιμοποιήθηκαν αποτελούσαν μαγνήτες Νεοδυμίου (NdFeB). Ωστόσο πραγματοποιήθηκε αντικατάσταση των υλικών σύμφωνα με τις δυνατότητες διαθεσιμότητας του εργαστηρίου. Έτσι ανατέθηκε για τον πυρήνα του κινητήρα η μαγνητική λαμαρίνα ThyssenKrupp M235-35 A, και για τους μόνιμους μαγνήτες, ανατέθηκαν μαγνήτες Σαμαρίου-Κοβαλτίου (Sm-Co17) με μόνιμη μαγνήτιση $M=1.056$ T. Η καμπύλη μαγνήτισης και η καμπύλη απωλειών της μαγνητικής λαμαρίνας δόθηκαν από τον κατασκευαστή και παρουσιάζονται παρακάτω.

Η τιμές της καμπύλης μαγνήτισης της λαμαρίνας Thyssenkrupp M235-35A όπως δόθηκε από τον κατασκευαστή :

B (T)	H (A/m)	B (T)	H (A/m)
0.00	0.	1.69	7000.
0.13	30.	1.71	8000.
0.22	40.	1.73	9000.
0.36	50.	1.76	10000.
0.48	60.	1.84	20000.
0.60	70.	1.86	30000.
0.70	80.	1.87	40000.
0.79	90.	1.88	50000.
0.86	100.	1.9	75000.
1.20	200.		
1.29	300.		
1.34	400.		
1.37	500.		
1.39	600.		
1.41	700.		
1.43	800.		
1.44	900.		
1.45	1000.		
1.51	2000.		
1.57	3000.		
1.60	4000.		
1.64	5000.		
1.67	6000.		

Ακολουθεί επίσης η καμπύλη απωλειών σε W/kg σύμφωνα με τον κατάλογο προϊόντων της ThyssenKrupp :

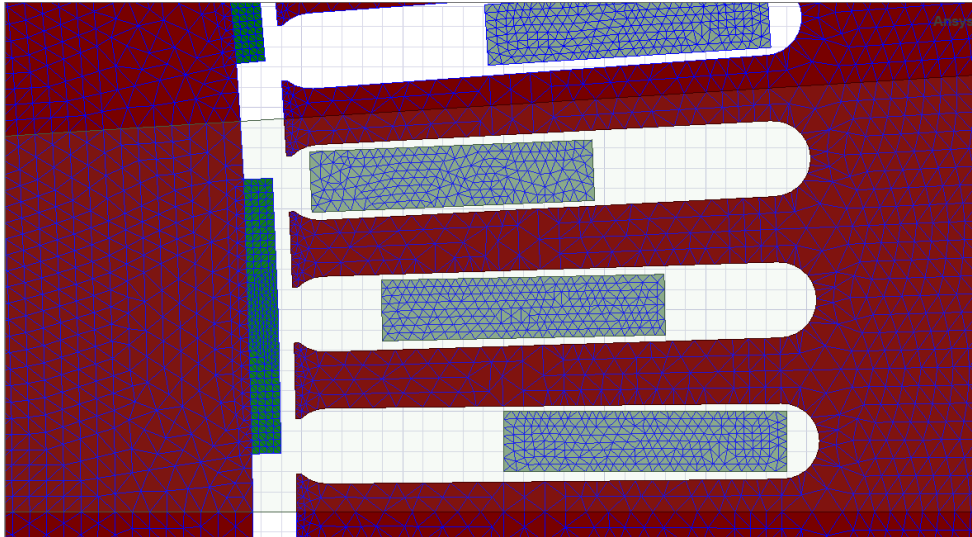


Εικόνα 4.3 Η καμπύλη απωλειών της M235-35 A μαγνητικής λαμαρίνας

Στο εσωτερικό των αυλάκων τοποθετήθηκε χαλκός, που αποτελείται από ένα σύστημα 550 αγωγών με την κατάλληλη πόλωση για κάθε φάση ώστε να δημιουργηθεί το σύστημα των τριφασικών τυλιγμάτων του στάτη του κυλινδρικού σύγχρονου κινητήρα.

4.2 Αποτελέσματα προσομοίωσης σύγχρονου κινητήρα μονίμων μαγνητών (PMSM)

Για την εξέταση των λειτουργικών χαρακτηριστικών του κυλινδρικού κινητήρα πραγματοποιήθηκαν δύο χρονομεταβλητές πεδιακές αναλύσεις στο Maxwell. Για την πραγματοποίηση των αναλύσεων το λογισμικό αξιοποιεί την μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων αφού πρώτα δημιουργηθεί το κατάλληλο τριγωνικό πλέγμα (mesh) πάνω στην γεωμετρία του κινητήρα. Στην περιοχή των δοντιών του στάτη το πλέγμα παρουσιάζει πύκνωση τριγώνων, προκειμένου να επιτευχθεί μεγαλύτερη ακρίβεια στους υπολογισμούς.



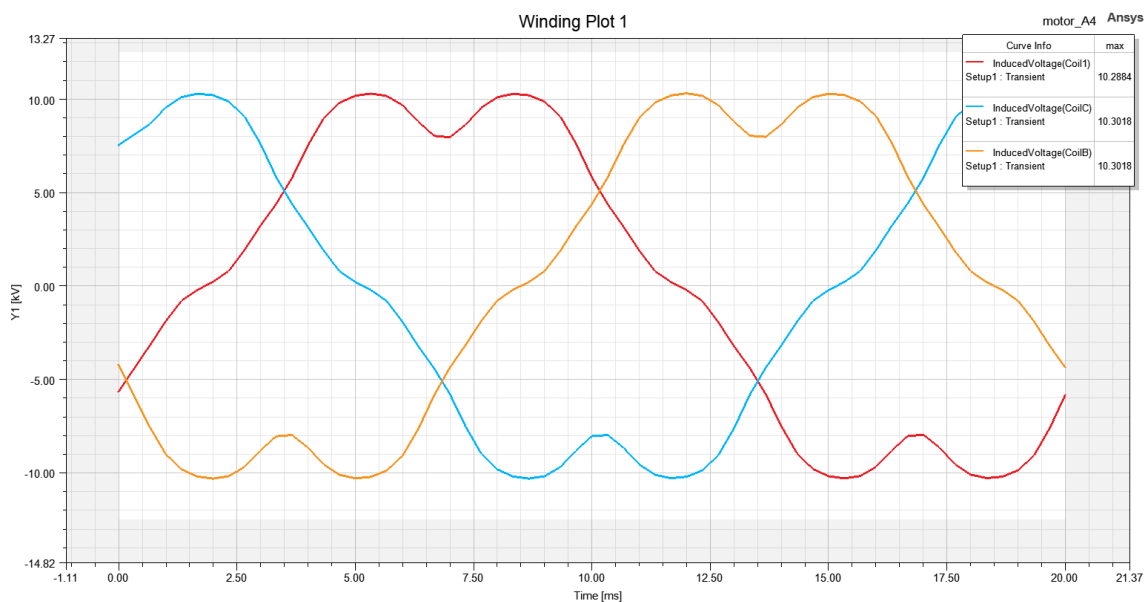
Εικόνα 4.4 Το πλέγμα (mesh) για τις χρονομεταβλητές πεδιακές αναλύσεις

Ηλεκτρεγερτική Δύναμη (ΗΕΔ) στα άκρα των πηνίων

Για τον υπολογισμό της ΗΕΔ τέθηκε μια σταθερή γωνιακή ταχύτητα στον δρομέα με αφόρτιστα τυλίγματα στον στάτη. Για να προκύψει ένα τριφασικό σύστημα τάσεων από την μεταβολή της μαγνητικής ροής των πηνίων συχνότητας 50 Hz η κατάλληλη σύγχρονη ταχύτητα που εφαρμόστηκε υπολογίζεται :

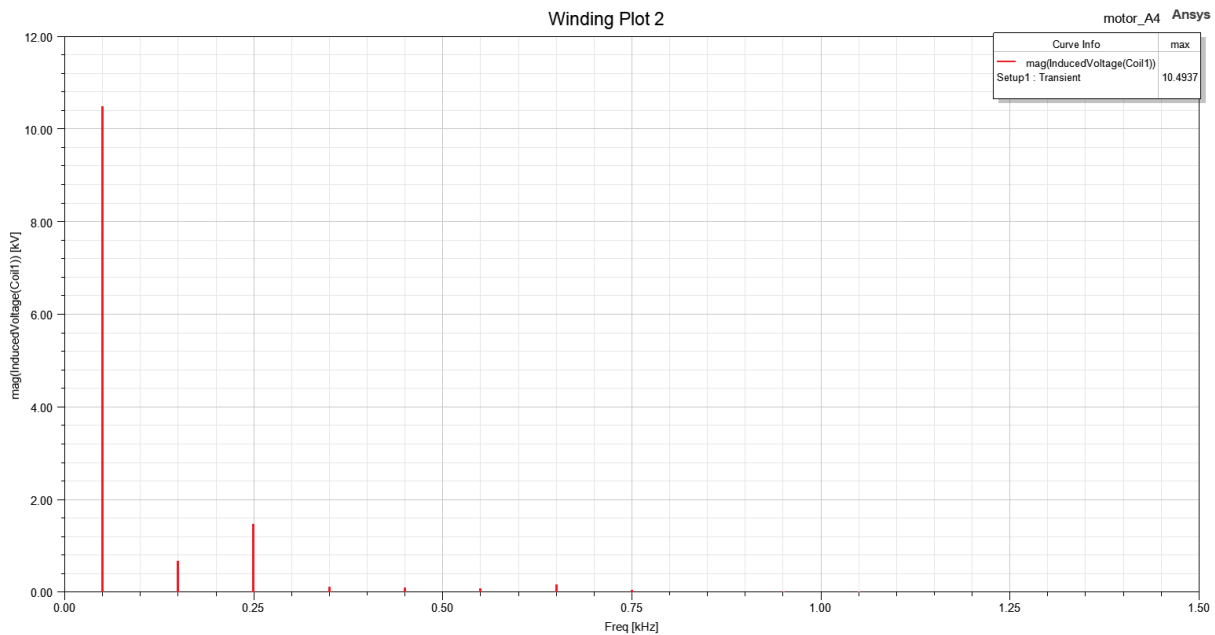
$$n = \frac{120 \times f}{\text{poles}} = \frac{120 \times 50}{100} = 60 \text{ ΣΑΛ}$$

Εκτελώντας την πεδιακή ανάλυση για την συγκεκριμένη ταχύτητα δρομέα για 20 ms και με χρονικό βήμα 20/60 ms προέκυψαν οι ακόλουθες κυματομορφές ΗΕΔ για κάθε φάση.



Εικόνα 4.5 Κυματομορφές ΗΕΔ για κάθε φάση

Ακολουθεί η φασματική ανάλυση της ΗΕΔ για την φάση Α



Εικόνα 4.6 Φασματική Ανάλυση κυματομορφής ΗΕΔ της φάσης Α

Παρατηρείται σημαντικό πλάτος στις αρμονικές τρίτης και πέμπτης τάξης.

Συγκεντρώνοντας τα αποτελέσματα της ανάλυσης :

V_{rms} [kV]	THD_v [%]
7.5108	15.67 %

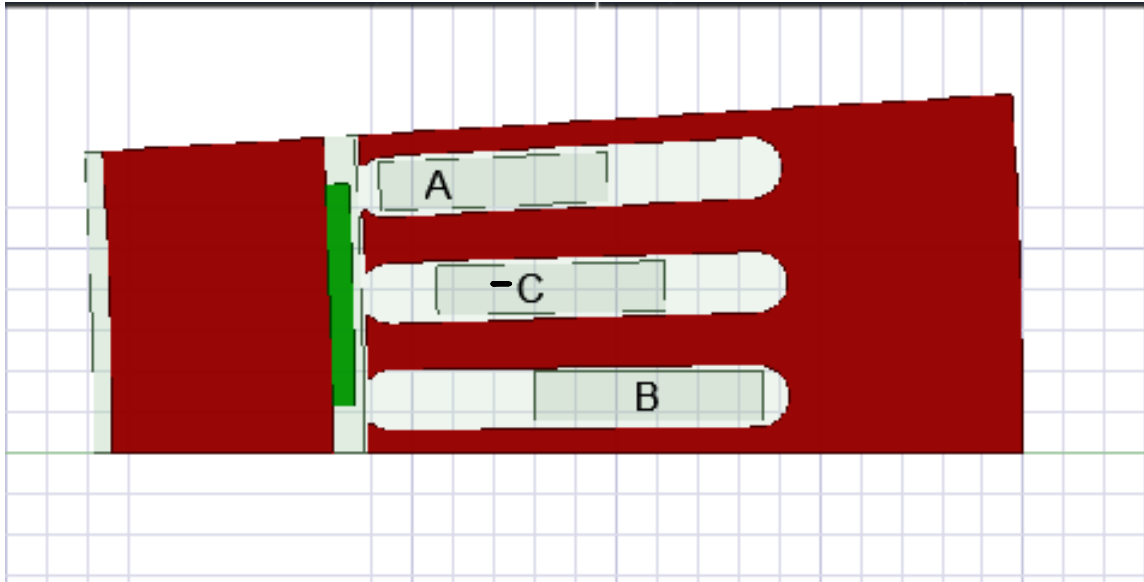
Ροπή- Εφαπτομενική δύναμη κινητήρα και απώλειες

Η δεύτερη χρονομεταβλητή πεδιακή ανάλυση πραγματοποιήθηκε για τον υπολογισμό της μέγιστης ροπής του κινητήρα στο διάκενο. Δεδομένου ότι οι γραμμικές μηχανές εξαιτίας της φύσης τους δεν παράγουν ροπή αλλά οριζόντια δύναμη, προκειμένου να υπάρξει αντιστοιχία των λειτουργικών χαρακτηριστικών και να γίνει εφικτή η σύγκριση τους, η ροπή του κινητήρα θα εκφραστεί στην συνέχεια ως εφαπτομενική δύναμη ως εξής :

$$F = \frac{T}{R}$$

Όπου T η μέγιστη ροπή του κινητήρα και R η ακτίνα του κινητήρα στο μέσο του διακένου.

Για την πεδιακή ανάλυση στο λογισμικό δεν δόθηκε κάποια γωνιακή ταχύτητα στον δρομέα, αλλά εφαρμόστηκε ένα τριφασικό σύστημα ρευμάτων στα τυλίγματα του στάτη συχνότητας 50 Hz.



Εικόνα 4.7 Διαδοχή φάσεων των αυλάκων

$$\text{Τύλιγμα φάσης A : } I_A = I_{PEAK} \times \sin (2 \times \pi \times f \times Time)$$

$$\text{Τύλιγμα φάσης B : } I_B = I_{PEAK} \times \sin (2 \times \pi \times f \times Time + 120^\circ)$$

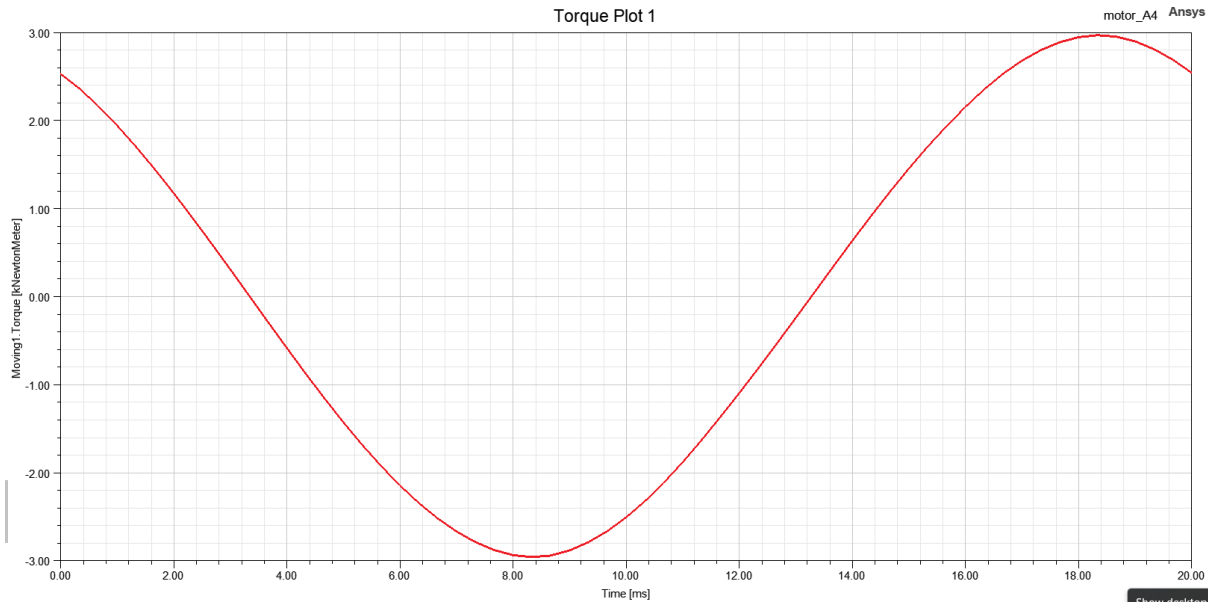
$$\text{Τύλιγμα φάσης C : } I_C = I_{PEAK} \times \sin (2 \times \pi \times f \times Time - 120^\circ)$$

Το πλάτος του ρεύματος τέθηκε 1.45 A ώστε η πυκνότητα ρεύματος σε κάθε αύλακα να προσεγγίζει την ενδεικνυόμενη τιμή $4 A/mm^2$ και υπολογίζεται :

$$J = \frac{N \times I_{PEAK}}{A \times f_f} = \frac{550 \times 1.45}{45 \times 7.5 \times 10^{-6} \times 0.6} = 3.93 A/mm^2$$

Όπου N ο αριθμός των αγωγών χαλκού που διέρχονται από μια αύλακα, A το εμβαδόν της αύλακας και f_f ο συντελεστής πληρότητας της αύλακας σε χαλκό.

Ακολουθεί η κυματομορφή της ροπής που παράγεται από το στρεφόμενο ηλεκτρομαγνητικό πεδίο του στάτη.



Εικόνα 4.8 Κυματομορφή ηλεκτρομαγνητικής ροπής

Η μέγιστη τιμή της ηλεκτρομαγνητικής ροπής που παρουσιάζεται στην καμπύλη :

$$T_{max} = 2968.3 \text{ Nm}$$

Η εφαπτομενική δύναμη του κινητήρα, δεδομένου ότι η ακτίνα από το μέσο του διακένου ισούται με :

$$R = 0.66 \text{ m}$$

Οπότε :

$$F_{max} = \frac{T_{max}}{R} = \frac{2968.3}{0.66} = 4497.42 \text{ N}$$

Από την πεδιακή ανάλυση υπολογίστηκαν και οι απώλειες πυρήνα του κινητήρα μονίμων μαγνητών με την αξιοποίηση της καμπύλης απωλειών της μαγνητικής λαμαρίνας που δόθηκε από τον κατασκευαστή (Εικόνα 4.3) :

$$P_{core} = 69.56 \text{ W}$$

Για τον υπολογισμό των απωλειών του χαλκού έπρεπε να υπολογιστεί πρώτα η ωμική αντίσταση του τυλίγματος μιας φάσης και για να πραγματοποιηθεί αυτό χρειάζεται το συνολικό μήκος των αγωγών του χαλκού για κάθε φάση.

$$cable_length_coil = turns \times (2 \times depth + 2 * \pi \times 0.03) \quad (1)$$

Όπου $turns$ οι σπείρες του πηνίου για μια φάση και έναν πόλο, $depth$ το ενεργό μήκος της μηχανής και $2 \times \pi \times 0.03$ το μήκος της διαδρομής που διανύει ο αγωγός για να περάσει στην επόμενη αύλακα στο μπροστινό και στο πίσω μέρος του κινητήρα.

$$cable_length_coil = 550 \times (2 \times 0.1 + 2 \times \pi \times 0.03) = 213.67m$$

Η αντίσταση ενός τέτοιου πηνίου υπολογίζεται από τον τύπο υπολογισμού της ωμικής αντίστασης ενός αγωγού.

$$R_{COIL} = \rho_0 \times \frac{cable_length_coil}{A} \quad (2)$$

Όπου ρ_0 είναι η ειδική αντίσταση του χαλκού $1.72 \times 10^{-8} \Omega/m$ και A η διατομή του αγωγού του χαλκού.

$$\begin{aligned} R_{COIL} &= 1.72 \times 10^{-8} \times \frac{213.67}{\frac{45 \times 7.5 \times 10^{-6} \times f_f}{turns}} = 1.72 \times 10^{-8} \times \frac{213.67}{\frac{45 \times 7.5 \times 10^{-6} \times 0.6}{550}} \\ &= 9.982 \Omega \end{aligned}$$

Όπότε για το σύνολο του κινητήρα οι απώλειες χαλκού υπολογίζονται :

$$P_{cu} = \frac{poles}{2} \times 3 \times I_{RMS}^2 \times R_{COIL} = 50 \times 3 \times \frac{1.45^2}{2} \times 9.982 = 1574.03 W$$

Η ισχύς εξόδου του κινητήρα προσεγγίζεται ως εξής :

$$\begin{aligned} P_{OUT} &= T_{max} \times \omega_s = \max(Torque) \times \frac{2 \times \pi \times n_s}{60} = \\ &= 2.9683 \times 10^3 \times \frac{2 \times \pi \times 60}{60} = 18650.38 W \end{aligned}$$

Δεδομένης της ισχύος εξόδου του κινητήρα και των απωλειών ο βαθμός απόδοσης του κινητήρα :

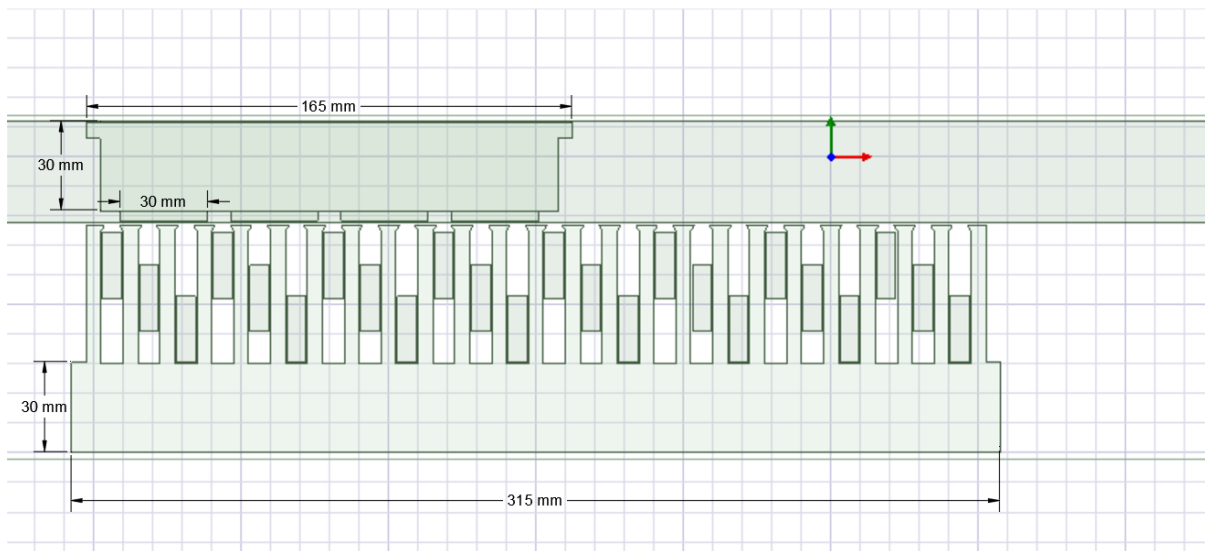
$$\eta = \frac{P_{OUT}}{P_{OUT} + P_{CU} + P_{CORE}} = \frac{18650.38}{18650.38 + 1574.03 + 69.56} = 0.919$$

4.3 Γεωμετρία δοκιμίου γραμμικής μηχανής μόνιμων μαγνητών

Το δοκίμιο της γραμμικής μηχανής που σχεδιάστηκε για την επιβεβαίωση των λειτουργικών χαρακτηριστικών του κυλινδρικού κινητήρα και αποτελεί το αντικείμενο μελέτης της παρούσας διπλωματικής εργασίας παρουσιάζει όπως αναφέρθηκε όμοια γεωμετρικά χαρακτηριστικά στο διάκενο (Πίνακας 4.1) με τον κυλινδρικό κινητήρα που εξετάστηκε στην προηγούμενη ενότητα. Για τον πυρήνα της μηχανής ανατέθηκε η ίδια μαγνητική λαμαρίνα, ενώ αξιοποιήθηκε και το ίδιο υλικό (SmCo17) για τους μόνιμους μαγνήτες. Η σχεδίαση του πραγματοποιήθηκε στο λογισμικό Maxwell επίσης. Το μαγνητικό κύκλωμα είναι κύκλωμα τεσσάρων μαγνητικών πόλων ωστόσο ο στάτης προβλέπει περισσότερες αύλακες ώστε να δίνεται η δυνατότητα μετακίνησης του δρομέα. (Εικόνα 4.9)

Πλάτος αύλακας	7.5 mm
Ύψος σώματος αύλακας	45 mm
Άνοιγμα αύλακας	5.50 mm
Ύψος στο άνοιγμα της αύλακας	0.5 mm
Ύψος σφήνας αύλακας	1.50 mm

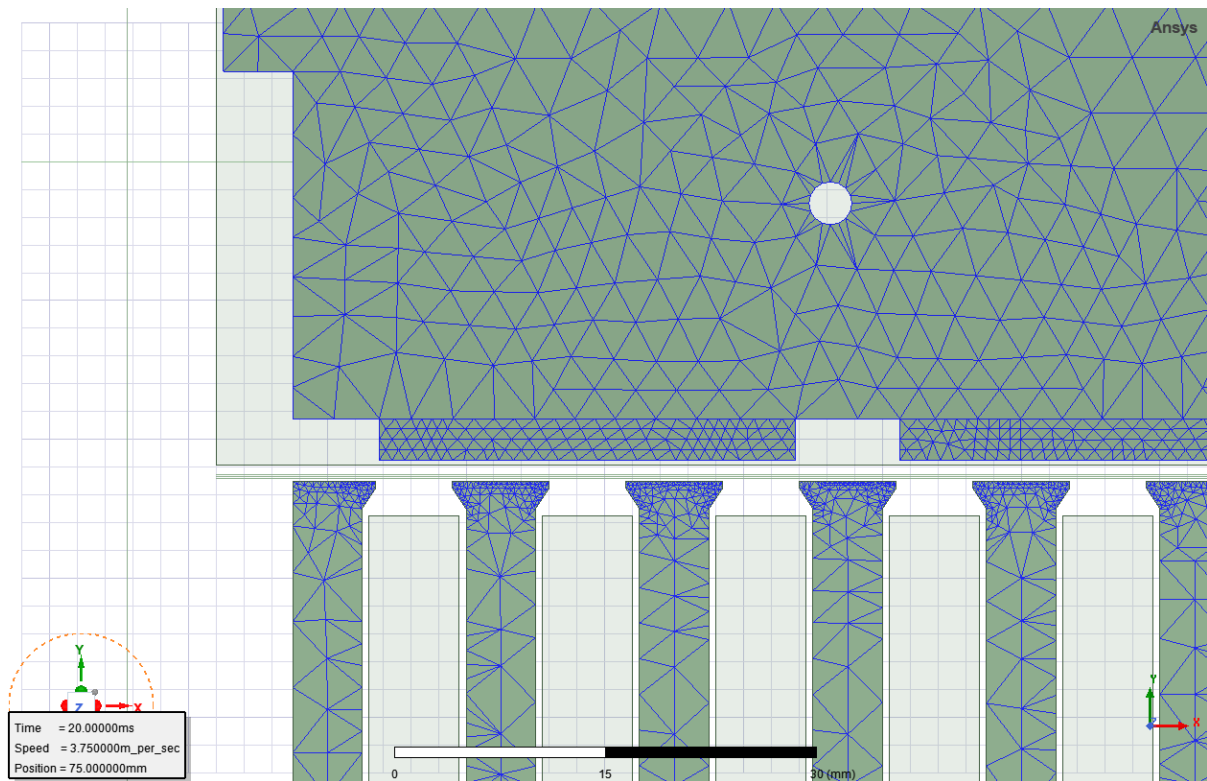
Πίνακας 4.1 Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των αυλάκων



Εικόνα 4.9 Το ηλεκτρομαγνητικό μοντέλο της γραμμικής μηχανής που σχεδιάστηκε στο Maxwell

4.4 Αποτελέσματα προσομοίωσης γραμμικής μηχανής μονίμων μαγνητών

Για την εξέταση των λειτουργικών χαρακτηριστικών της γραμμικής μηχανής πραγματοποιήθηκαν επίσης δύο χρονομεταβλητές πεδιακές αναλύσεις στο Maxwell. Ακολουθεί μια εικόνα του πλέγματος πεπερασμένων στοιχείων που δημιουργήθηκε ώστε να αξιοποιηθεί από τον αλγόριθμο που χρησιμοποιεί το λογισμικό για τους ακριβείς υπολογισμούς κατά την διάρκεια των αναλύσεων.



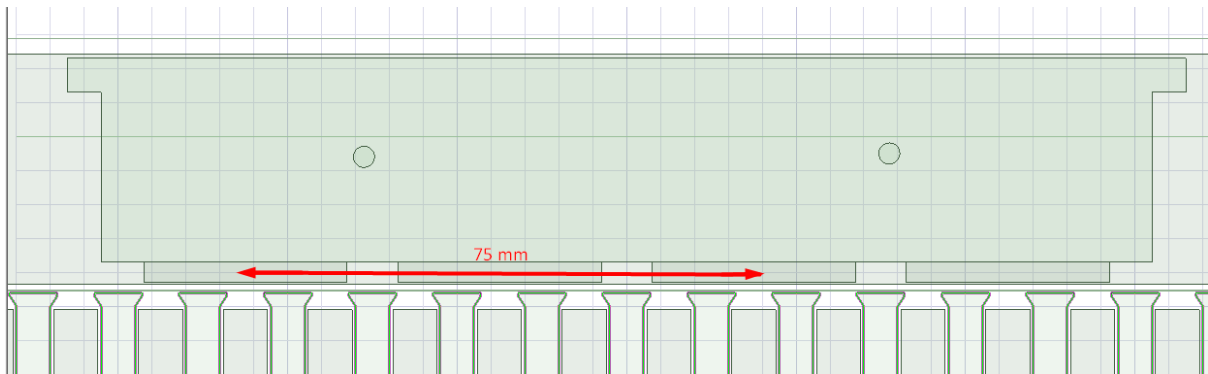
Εικόνα 4.10 Το πλέγμα (mesh) για τις χρονομεταβλητές πεδιακές αναλύσεις

Ηλεκτρεγερτική Δύναμη (ΗΕΔ) στα άκρα των πηνίων

Για τον υπολογισμό της ΗΕΔ που αναπτύσσεται στα άκρα των τυλιγμάτων κάθε φάσης εκτελείται η πρώτη πεδιακή ανάλυση με αφόρτιστα τυλίγματα στάτη και με την εφαρμογή μιας σταθερής γραμμικής ταχύτητας. Η ταχύτητα που τέθηκε στο κινούμενο μέρος της γραμμικής μηχανής επιλέχθηκε ώστε στα τυλίγματα να επαχθεί ένα τριφασικό σύστημα τάσεων συχνότητας 50 Hz. Η ταχύτητα αυτή είναι αντίστοιχη της σύγχρονης γωνιακής ταχύτητας που τέθηκε στον δρομέα του κυλινδρικού κινητήρα.

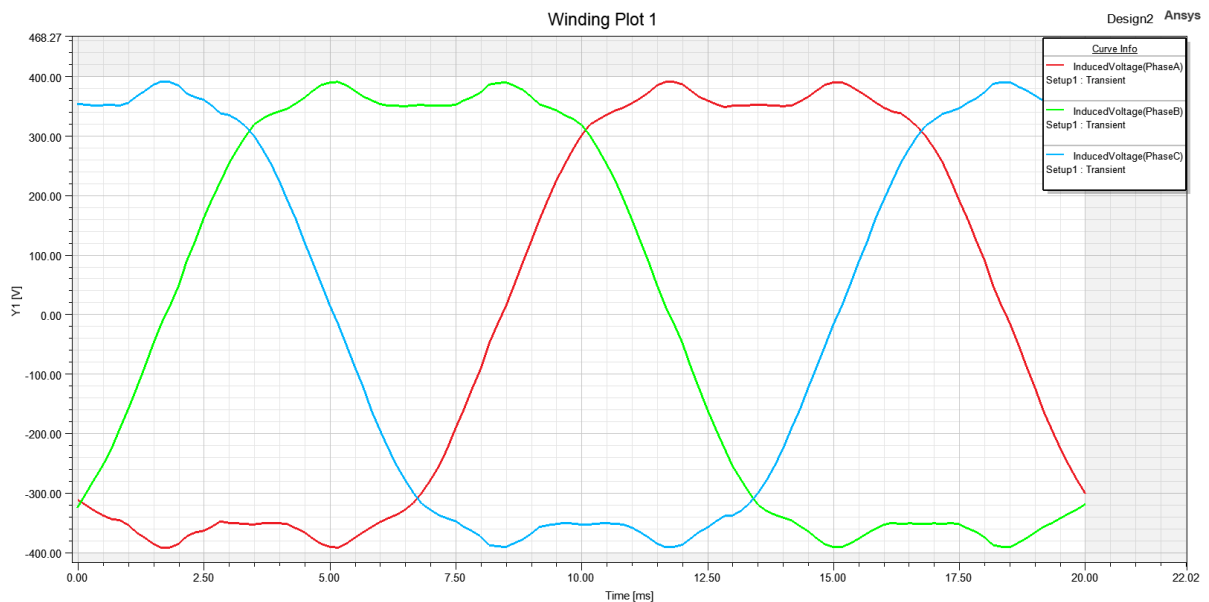
Κατά συνέπεια, η σύγχρονη ταχύτητα της γραμμικής μηχανής υπολογίζεται ως το πηλίκο της απόστασης μεταξύ δύο μαγνητών με την ίδια πολικότητα δια του χρονικού διαστήματος μιας περιόδου (Εικόνα 4.11). Αφού η συχνότητα των κυματομορφών επιλέχθηκε στα 50 Hz, το διάστημα μιας περιόδου ισούται με 20 ms.

$$V_s = \frac{S}{T} = \frac{75 \text{ mm}}{20 \text{ ms}} = 3,75 \text{ m/s}$$



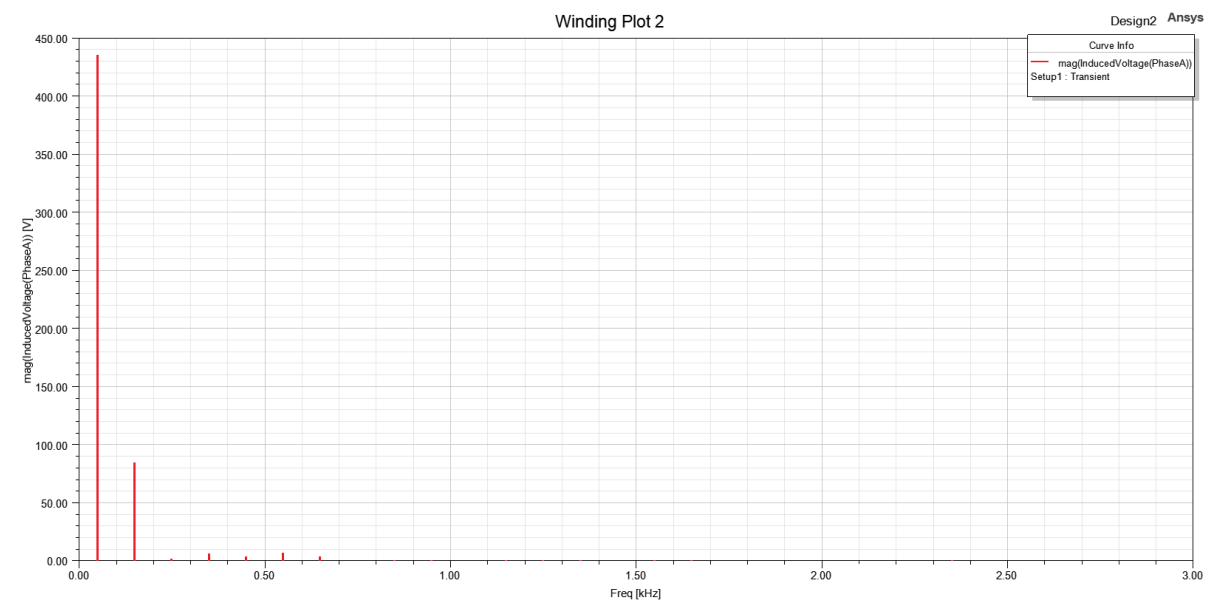
Εικόνα 4.11 Η απόσταση που διανύει ο δρομέας σε χρόνο μιας περιόδου

Από την ανάλυση του λογισμικού για χρόνο μιας περιόδου 20 ms και με βήμα 0.333 ms παρουσιάζεται το τριφασικό σύστημα τάσεων στα άκρα των τυλιγμάτων.



Εικόνα 4.12 Το τριφασικό σύστημα τάσεων που αναπτύσσεται από επαγωγή στα τυλίγματα

Ακολουθεί η φασματική ανάλυση της ΗΕΔ για την φάση Α



Εικόνα 4.13 Φασματική Ανάλυση κυματομορφής ΗΕΔ της φάσης Α

Παρατηρείται σημαντικό πλάτος της αρμονικής τρίτης τάξης

Συγκεντρώνοντας τα αποτελέσματα της ανάλυσης :

V_{rms} [V]	THD_v [%]
313.82	19.70 %

Οριζόντια δύναμη γραμμικής μηχανής μονίμων μαγνητών και απώλειες

Αντίστοιχα με τον κυλινδρικό κινητήρα μονίμων μαγνητών η δεύτερη ανάλυση που πραγματοποιήθηκε στο λογισμικό ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων, Maxwell, στοχεύει τον υπολογισμό της μέγιστης οριζόντιας δύναμης που αναπτύσσεται στο διάκενο της γραμμικής μηχανής. Η ταχύτητα που τέθηκε στον «δρομέα» της γραμμικής μηχανής είναι μηδενική και το εναλλασσόμενο ηλεκτρομαγνητικό πεδίο της μηχανής δημιουργείται από το ακόλουθο τριφασικό σύστημα ρευμάτων που εφαρμόζεται στα τυλίγματα του στάτη.

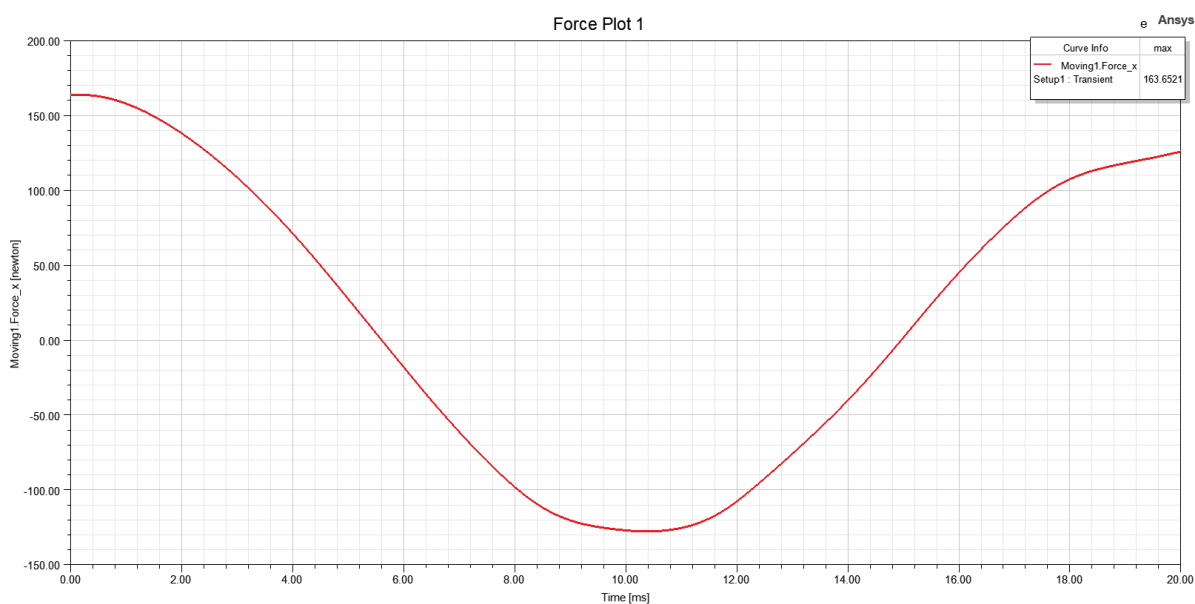
$$\text{Τύλιγμα φάσης A : } I_A = I_{PEAK} \times \sin(2 \times \pi \times f \times Time)$$

$$\text{Τύλιγμα φάσης B : } I_B = I_{PEAK} \times \sin(2 \times \pi \times f \times Time + 120^\circ)$$

$$\text{Τύλιγμα φάσης C : } I_C = I_{PEAK} \times \sin(2 \times \pi \times f \times Time - 120^\circ)$$

Τα πλάτη και οι συχνότητες των ρευμάτων ρυθμίστηκαν ώστε η τροφοδοσία να είναι όμοια με αυτήν της πεδιακής ανάλυσης του κυλινδρικού κινητήρα, όπως αναλύθηκε στην ενότητα 4.2. Ως αποτέλεσμα, η πυκνότητα ρεύματος κάθε αύλακας διατηρείται επίσης στα $J = 3.93 \text{ A/mm}^2$ εξαιτίας της όμοιας γεωμετρίας στις αύλακες των δυο μηχανών.

Αποτέλεσμα της ανάλυσης η ακόλουθη καμπύλη οριζόντιας δύναμης για χρόνο 20 ms με χρονικό βήμα 0.333 ms.



Εικόνα 4.14 Η καμπύλη της οριζόντιας δύναμης για χρόνο μιας περιόδου

Η μέγιστη τιμή της οριζόντιας δύναμης που παρουσιάζεται στην καμπύλη :

$$F_{max} = 163.65 \text{ N}$$

Από την ίδια ανάλυση οι απώλειες του πυρήνα της μηχανής υπολογίστηκαν :

$$P_{\text{πυρ}} = 2.92 \text{ W}$$

Για τις απώλειες χαλκού θεωρήθηκε ότι η ποσότητα του υλικού του χαλκού που διέρχεται από κάθε αύλακα είναι όμοια με αυτή του κυλινδρικού κινητήρα. Έτσι, η αντίσταση των αγωγών κάθε πηνίου παραμένει ως έχει.

$$P_{\text{χαλ.}} = \frac{\text{poles}}{2} \times 3 \times I_{RMS}^2 \times R_{COIL} = 2 \times 3 \times \frac{1.45^2}{2} \times 9.982 = 62.96 \text{ W}$$

Επιπλέον, η ισχύς εξόδου της γραμμικής μηχανής προσεγγίζεται ως εξής :

$$P_{OUT} = F_{max} \times V_s = \max(Force) \times V_s =$$

$$= 163.65 \times 3.75 = 613.68 \text{ W}$$

Δεδομένης της ισχύος εξόδου της μηχανής και των απωλειών ένας θεωρητικός βαθμός απόδοσης της μηχανής προσεγγίζεται ως εξής :

$$\eta = \frac{P_{OUT}}{P_{OUT} + P_{\chi\alpha\lambda} + P_{\pi\nu\rho}} = \frac{613.68}{613.68 + 62.96 + 2.92} = 0.903$$

4.5 Σύγκριση λειτουργικών χαρακτηριστικών κυλινδρικού PMSM και γραμμικής μηχανής

Προκειμένου να αποδειχθεί η αξιοπιστία της σύνδεσης των λειτουργικών χαρακτηριστικών των δυο μηχανών απαιτείται να γίνει μια προσαρμογή των χαρακτηριστικών σε ανά πόλο μεγέθη καθώς οι υπολογισμοί για τον κυλινδρικό PMSM αφορούν ένα μαγνητικό κύκλωμα 100 πόλων ενώ το αντίστοιχο μαγνητικό κύκλωμα της γραμμικής μηχανής αποτελείται από 4 πόλους.

Κυλινδρικός PMSM

	Υπολογισμοί από Ενότητα 4.2	Ανά πόλο μεγέθη [_ / πόλο]
Εφαπτομενική Δύναμη κινητήρα F_x [N]	4497.42	44.97
HEΔ Erms [V]	7510.8	75.10
Απώλειες πυρήνα [W]	69.56	0.696
Ισχύς εξόδου[W]	18650.6	186.50

Γραμμική μηχανή

	Υπολογισμοί από Ενότητα 4.4	Ανά πόλο μεγέθη [_ / πόλο]
Οριζόντια Δύναμη μηχανής F_x [N]	163.65	40.91
HEΔ Erms [V]	313.82	78.45
Απώλειες πυρήνα [W]	2.92	0.73
Ισχύς εξόδου[W]	613.68	153.42

Συγκεντρωτικά, ο ακόλουθος πίνακας καταγράφει το σύνολο των λειτουργικών χαρακτηριστικών των δύο μηχανών προσαρμοσμένα στον ίδιο αριθμό πόλων, καθώς και τις μεταξύ τους αποκλίσεις.

	Κυλ. PMSM	Γρ. Μηχανή	Απόκλιση [%]
F_x [N/ πόλο]	44.97	40.91	9.02
E_{rms} [V/ πόλο]	75.10	78.45	4.27
THD [%]	15.67	19.7	20.45
P_{out} [W/ πόλο]	186.50	153.42	17.73
P_{πυρ.} [W/ πόλο]	0.696	0.73	4.60
Βαθμός Απόδοσης η	0.919	0.903	1.74

Πίνακας 4.2 Συγκεντρωτικός πίνακας καταγραφής χαρακτηριστικών και μεταξύ τους αποκλίσεων

Διαπιστώνεται ότι η σύνδεση των χαρακτηριστικών είναι εύλογη και τα μεγέθη αντιστοιχούν σε ικανοποιητικό βαθμό. Οι όποιες αποκλίσεις προκύπτουν, κρίνονται λογικές και οφείλονται στην προσαρμογή της γεωμετρίας του κυλινδρικού κινητήρα στον οριζόντιο άξονα.

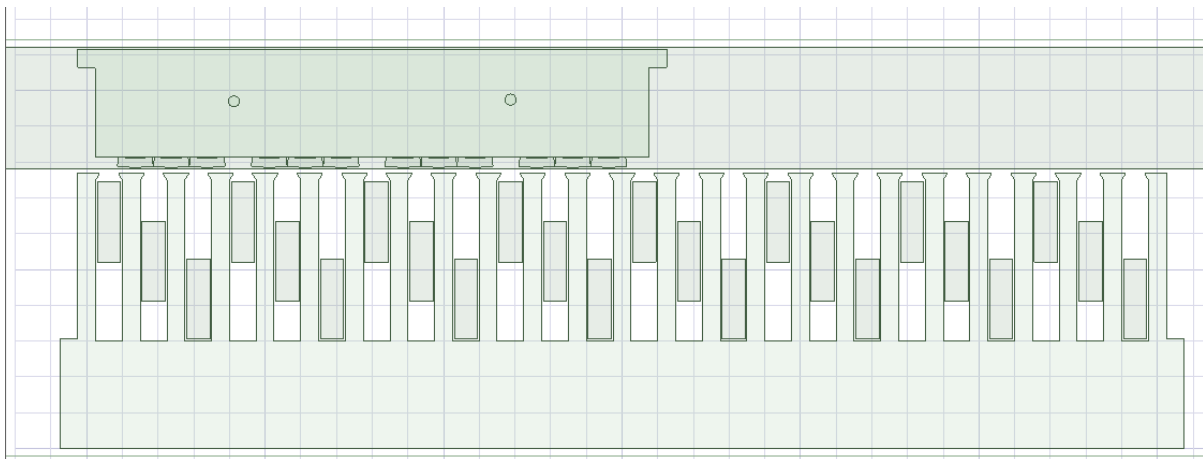
4.6 Οριστικό μοντέλο της γραμμικής μηχανής

Έπειτα από την επίτευξη της σύνδεσης των λειτουργικών χαρακτηριστικών μεταξύ κυλινδρικού κινητήρα και γραμμικής μηχανής ως επόμενο βήμα αποτέλεσε η κατασκευή του τελικού δοκιμίου μέσω του οποίου θα πραγματοποιηθεί η πειραματική επιβεβαίωση των χαρακτηριστικών.

Για το τελικό μοντέλο της γραμμικής μηχανής που κατασκευάστηκε πραγματοποιήθηκαν κάποιες απαραίτητες τροποποιήσεις. Η πρώτη τροποποίηση αφορούσε το ενεργό μήκος της μηχανής το οποίο ελαττώθηκε στα 30 mm από τα 100 mm σχεδιάστηκε αρχικά για λόγους επάρκειας του διαθέσιμου υλικού του εργαστηρίου. Η δεύτερη τροποποίηση αφορούσε το σχήμα των μαγνητών. Οι μαγνήτες που σχεδιάστηκαν αρχικά για την γραμμική μηχανή αποτελούσαν μαγνήτες διαστάσεων (30mm x 30mm x 3mm) σχήματος πλάκας. Δεδομένης της επάρκειας του εργαστηρίου σε υλικό, οι μόνιμοι μαγνήτες αυτοί αντικαταστάθηκαν με αντίστοιχους μαγνήτες Σαμαρίου-Κοβαλτίου βιομηχανικού τόξου ($R_i=35.75\text{mm}$, $R_o=38.75\text{mm}$, $L=32.5\text{mm}$, $\phi=15.1^\circ$) που προορίζονταν για κυλινδρικούς κινητήρες.

Για την δημιουργία του μόνιμου μαγνητικού πεδίου ενός μαγνητικού πόλου του δρομέα χρησιμοποιήθηκαν τρεις τέτοιοι μαγνήτες, οπότε συνολικά χρησιμοποιήθηκαν δώδεκα μαγνήτες. Οι μισοί μαγνήτες που χρησιμοποιήθηκαν έχουν τον βόρειο τους πόλο στην πλευρά που βλέπει το διάκενο για τους βόρειους πόλους του δρομέα και οι υπόλοιποι τον νότιο πόλο στην πλευρά αυτή για τους νότιους πόλους του δρομέα αντίστοιχα.

Η τρίτη τροποποίηση προέκυψε κατά την διαδικασία της κατασκευής καθώς κατά την κατασκευή του τυλίγματος του στάτη διαπιστώθηκε ότι δεν ήταν εφικτό να τοποθετηθούν στις αύλακες πηνία 550 σπειρών αγωγών χαλκού διαμέτρου διατομής 0.56 mm εξαιτίας της αλληλοεπικάλυψης τους. Έτσι ο συντελεστή πληρότητας της αύλακας που ρυθμίστηκε στα 0.6 στο λογισμικό σχεδίασης ήταν μάλλον «αισιόδοξος». Στην πράξη όπως θα γίνει γνωστό και στην συνέχεια κατασκευάστηκαν και τοποθετήθηκαν για κάθε φάση πηνία 22 σπειρών και 15 παράλληλων κλάδων. Οπότε κάθε αύλακα πλέον διατρέχεται από 330 αγωγούς χαλκού.



Εικόνα 4.14 Η γεωμετρία της οριστικής γραμμικής μηχανής

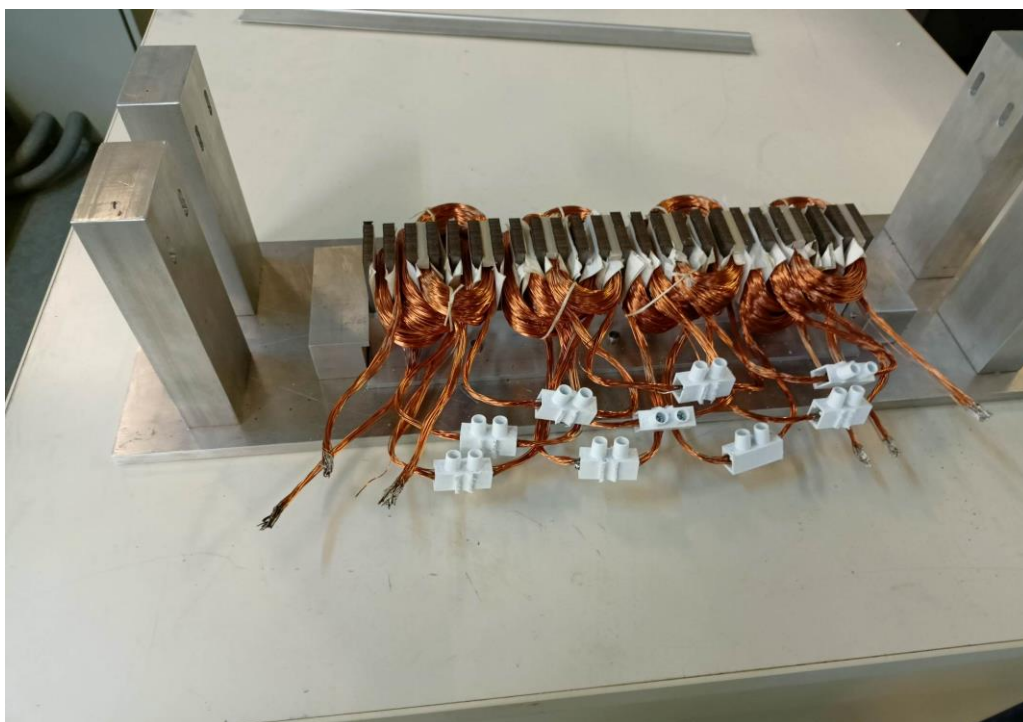
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

5.1 Κατασκευή της γραμμικής μηχανής

Αφού καθορίστηκε η τελική γεωμετρία του δοκιμίου της γραμμικής μηχανής ακολούθησε το κομμάτι της κατασκευής του. Όπως αναφέρθηκε και στο προηγούμενο κεφάλαιο τα φύλλα λαμαρίνας που διέθετε το εργαστήριο και θα αποτελούσαν τον πυρήνα της μηχανής έπρεπε να δοθούν στο μηχανουργείο ώστε να κοπούν σύμφωνα με το σχέδιο. Πρόκειται για φύλλα της μαγνητικής λαμαρίνας Thyssenkrupp M235-35 A με πάχος 0.35mm και επικαλυμμένα με μονωτικό βερνίκι και από τις δύο μεριές. Η κοπή τους πραγματοποιήθηκε με ειδικό laser για πολύ μικρές ανοχές.

Έκτος όμως από το ηλεκτρομαγνητικό κομμάτι της σχεδίασης για την κατασκευή της γραμμικής μηχανής ήταν αναγκαίο να γίνει και μια μελέτη για την μηχανική της στήριξη. Σαν βάση της κατασκευής χρησιμοποιήθηκε μια πλάκα αλουμινίου πάχους 10mm και διαστάσεων 185mm × 600mm. Στην βάση αυτή ανοίχτηκαν κατάλληλες οπές ώστε να βιδωθούν κομμάτια αλουμινίου τα οποία θα σχημάτιζαν ένα “καλούπι” για την τοποθέτηση και την συμπίεση των φύλλων λαμαρίνας του στάτη. Η αλουμινένια βάση διαθέτει επίσης οπές για την τοποθέτηση τεσσάρων αλουμινένιων κολώνων διαστάσεων (60mm x 40 mm x 165mm) συμμετρικά της.

Το επόμενο στάδιο κατασκευής αφορούσε την κατασκευή και την τοποθέτηση των πηνίων στα αυλάκια του στάτη. Σε αυτό το σημείο προέκυψε και η πρώτη αστοχία που αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 4 καθώς στην πράξη η τοποθέτηση του αριθμού των αγωγών που είχε προβλεφθεί ήταν ανέφικτη λόγω επικαλύψεων. Για τα πηνία χρησιμοποιήθηκαν αγωγοί χαλκού διαμέτρου 0.56mm (χωρίς την μόνωση). Με την βοήθεια ενός ξύλινου καλουπιού διαστάσεων (70mm x 30mm x 30mm) και του Τόρνου του εργαστηρίου κατασκευάστηκαν 12 πηνία 15 παράλληλων κλάδων και 22 σπειρών τα οποία τοποθετήθηκαν στα αυλάκια αφού προηγήθηκε η επικάλυψη των αυλάκων με ειδικό μονωτικό χαρτί. Έπειτα από την τοποθέτηση των πηνίων, αφαιρέθηκε η μόνωση στα άκρα κάθε αγωγού με την χρήση καλαί και τέλος πραγματοποιήθηκαν οι κατάλληλες συνδέσεις. Τα τέσσερα πηνία της φάσης A συνδέθηκαν σε σειρά με την χρήση connectors δημιουργώντας έτσι το τελικό τύλιγμα της φάσης A και αντίστοιχά έγινε η ίδια διαδικασία για τα πηνία των φάσεων B και C.



Εικόνα 5.1 Ο στάτης της γραμμικής μηχανής.

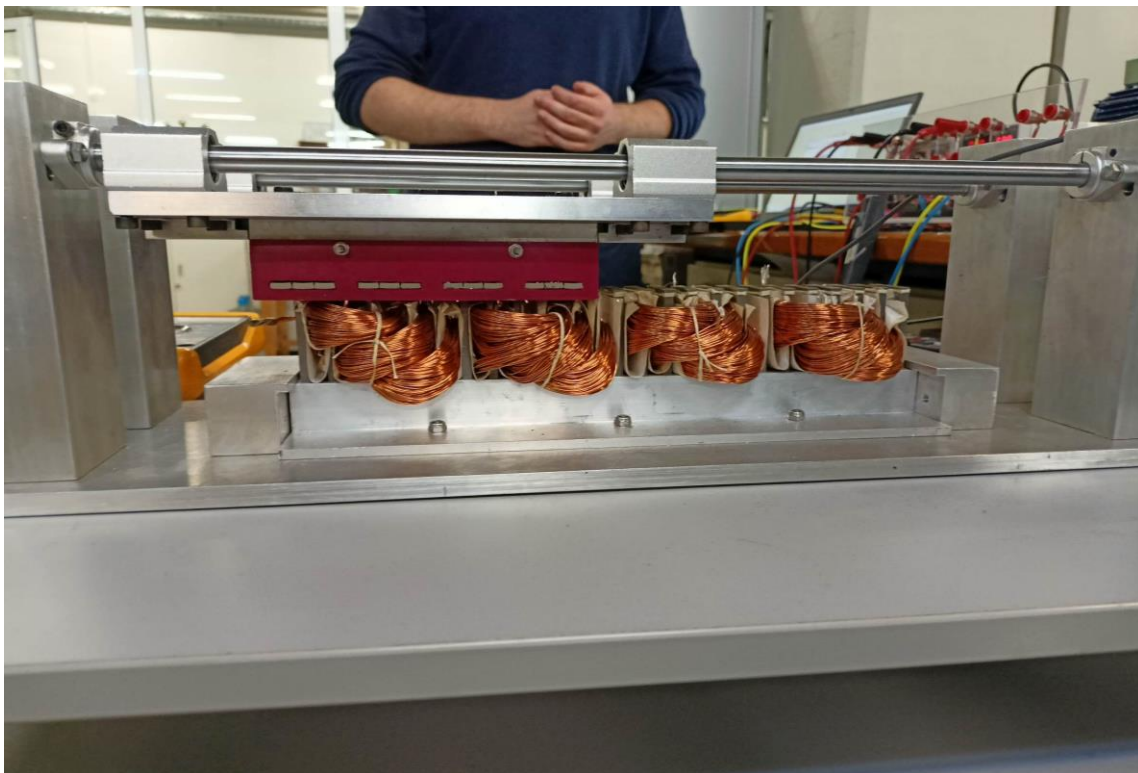
Αφού κατασκευάστηκε και στηρίχθηκε ο στάτης εκκρεμούσε η τοποθέτηση του δρομέα. Αντίστοιχα με τον στάτη τα φύλλα του δρομέα στηρίχθηκαν και συμπιέστηκαν πάνω σε μια επίσης αλουμινένια βάση πάχους 10mm και διάστασης (240mm x 135mm) με κομμάτια αλουμινίου να βιδώνονται πάνω στην βάση ώστε να συγκρατούν τα φύλλα του δρομέα, ενώ στο πίσω μέρος της βάσης τοποθετήθηκαν στις άκρες και με μία συμμετρική λογική τέσσερα πρισματικά ρουλεμάν SCS12UU μέσα από τα οποία θα διέρχονται δύο ντίζες 12 mm διαμέτρου και τα οποία θα επιτρέπουν στον δρομέα την οριζόντια μετακίνηση.

Ακολούθησε η τοποθέτηση των μαγνητών στον δρομέα. Για τους μαγνήτες αποφασίστηκε απαραίτητο να διαθέτουν και αυτοί κάποια στήριξη που θα εμποδίζει την ολίσθηση ή μετακίνηση τους και αυτός είναι ο λόγος που σχεδιάστηκαν οι δυο συμμετρικές οπές στα φύλλα του δρομέα. Μέσα από αυτές τις οπές περάστηκαν δύο μεταλλικές ντίζες πάνω στις οποίες βιδώθηκαν θήκες από σκληρό πλαστικό, οι οποίες σχεδιάστηκαν σε 3D printer. Οι θήκες αυτές διαθέτουν τέσσερα ανοίγματα όσα και οι μαγνητικοί πόλοι του δρομέα και μέσα στα ανοίγματα αυτά περάστηκαν συρταρωτά οι μαγνήτες τόξου (arc magnets). Στο πρώτο άνοιγμα οι τρεις «βόρειοι», στο επόμενο οι τρεις «νότιοι» και ούτω κάθε εξής.



Εικόνα 5.2 Οι μαγνήτες μέσα στις θήκες.

Τέλος τοποθετήθηκαν οι δύο μεταλλικές ντίζες μέσα από τα πρισματικά ρουλεμάν με τέτοιο τρόπο ώστε τα φύλλα λαμαρίνας του δρομέα να βρίσκονται ακριβώς πάνω από αυτά του στάτη και στην συνέχεια με την βοήθεια τεσσάρων στηριγμάτων SHF12 τοποθετήθηκαν οι ντίζες στις κολώνες με τέτοιο τρόπο ώστε να δημιουργηθεί διάκενο 1.5 mm. Η κατασκευή της γραμμικής μηχανής είχε ολοκληρωθεί.



Εικόνα 5.3 Η γραμμική μηχανή που θα εξεταστεί

5.2 Μετρήσεις και συγκρίσεις με τα αποτελέσματα του Maxwell

5.2.1 Πειραματική επιβεβαίωση ΗΕΔ

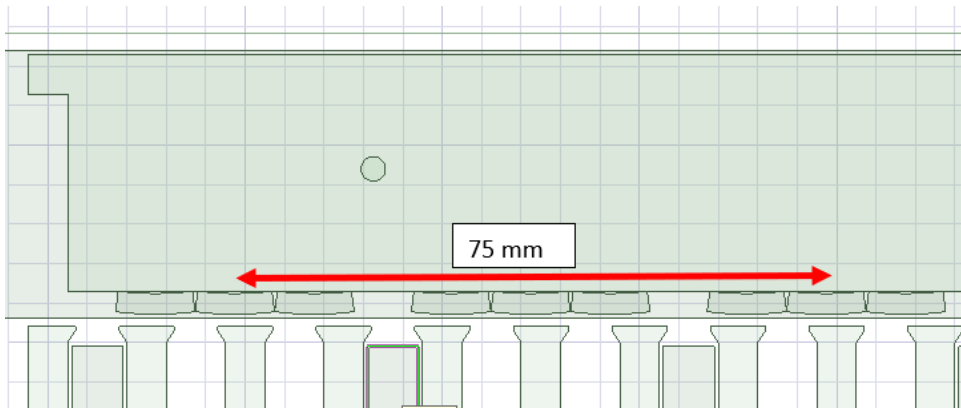
Για την εκτέλεση του πρώτου πειράματος τα τυλίγματα των τριών φάσεων της γραμμικής μηχανής συνδέθηκαν σε συνδεσμολογία αστέρα και τα άκρα κάθε τυλίγματος συνδέθηκαν με τους ακροδέκτες του παλμογράφου του εργαστηρίου. Στην συνέχεια χειροκίνητα ασκήθηκε μια δύναμη στον δρομέα της μηχανής ώστε να αποκτήσει ταχύτητα και να δημιουργηθεί μεταβολή της μαγνητικής ροής των τυλιγμάτων ώστε να καταγραφεί η ΗΕΔ που αναπτύσσεται στα άκρα κάθε τυλίγματος στον παλμογράφο. Ακολουθεί το στιγμιότυπο του παλμογράφου:



Εικόνα 5.4 Στιγμιότυπο παλμογράφου της ΗΕΔ από επαγωγή στα άκρα των τυλιγμάτων

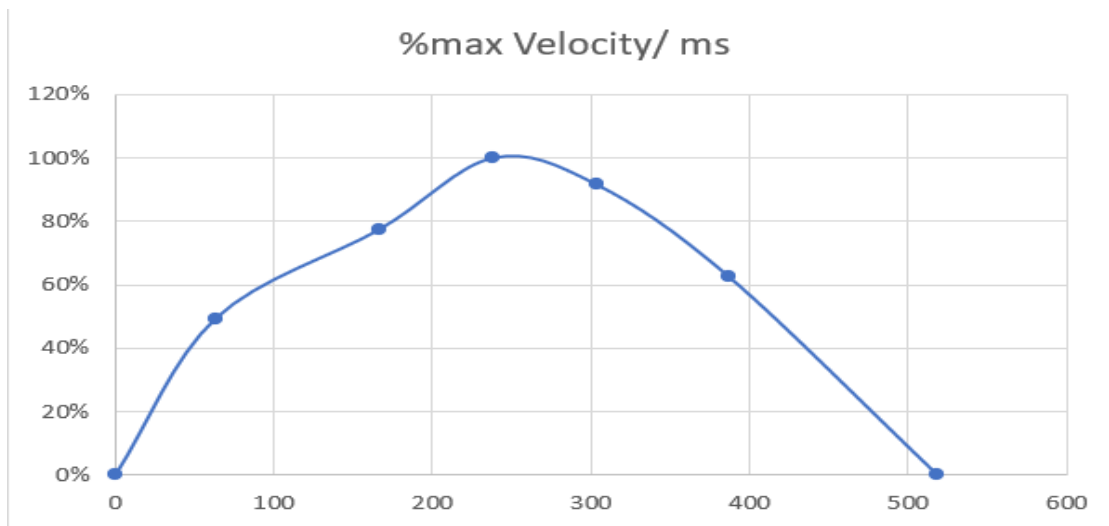
Από το παραπάνω στιγμιότυπο παρατηρείται ότι αναπτύσσεται ένα συμμετρικό τριφασικό σύστημα τάσεων με διαφορά φάσης 120 μοιρών στα άκρα των τυλιγμάτων όπως αναμενόταν ενώ τα πλάτη των κυματομορφών όπως είναι φυσικό στην αρχή είναι μικρότερα καθώς από την δύναμη που ασκήθηκε ο δρομέας επιταχύνει συνεχώς δεν φτάνει τον μέγιστο ρυθμό μεταβολής της μαγνητικής ροής των πηνίων. Αυτό συμβαίνει στις μετέπειτα περιόδους όταν η ταχύτητα έχει σταθεροποιηθεί. Τέλος τα πλάτη των κυματομορφών μειώνονται ξανά καθώς το μηχανικό έργο που δόθηκε στον δρομέα εξασθενεί και έτσι το σύστημα επιβραδύνει ώσπου να προσκρούσει ο δρομέας στις κολώνες που συγκρατούν τις «ντίζες».

Αναλυτικά ο δρομέας στο διάστημα μιας περιόδου διανύει όση απόσταση χρειάζεται ο ένας μαγνητικός πόλος του να ξαναβρεθεί στην ίδια θέση πάνω από τα τυλίγματα. Συγκεκριμένα διανύει όπως παρουσιάζεται και στην Εικόνα 5.5 75 mm σε χρόνο μιας περιόδου και συνεπώς για μια ημιπερίοδο η απαιτούμενη απόσταση είναι η μισή, δηλαδή 37.5 mm



Εικόνα 5.5 Η απόσταση που διανύει ο δρομέας σε χρόνο μιας περιόδου

Από τα παραπάνω λοιπόν προκύπτει το παρακάτω προσεγγιστικό διάγραμμα της οριζόντιας ταχύτητας του κινητού μέρους σε συνάρτηση με τον χρόνο σε ms. Πρακτικά υπολογίστηκε το ποσοστό της μέγιστης οριζόντιας ταχύτητας με την οποία κινείται ο δρομέας για κάθε ημιπερίοδο του στιγμιότυπου του παλμογράφου.



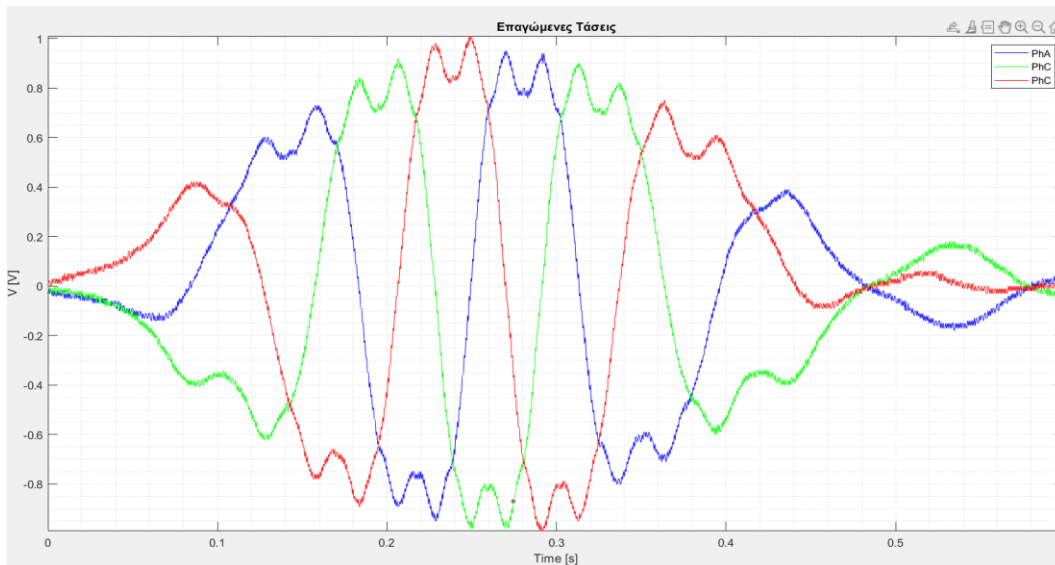
Η μέγιστη ταχύτητα που αναπτύσσει ο δρομέας υπολογίζεται προσεγγιστικά από τις μετρήσεις του παλμογράφου :

$$V_s = \frac{s}{\Delta t} = \frac{0.075}{0.1308} = 0.5733 \text{ m/s}, \Delta t = t_2 - t_1 = 0,1308 \text{ s} \text{ το διάστημα της περιόδου όπου ο δρομέας κινείται με την μέγιστη ταχύτητα}$$

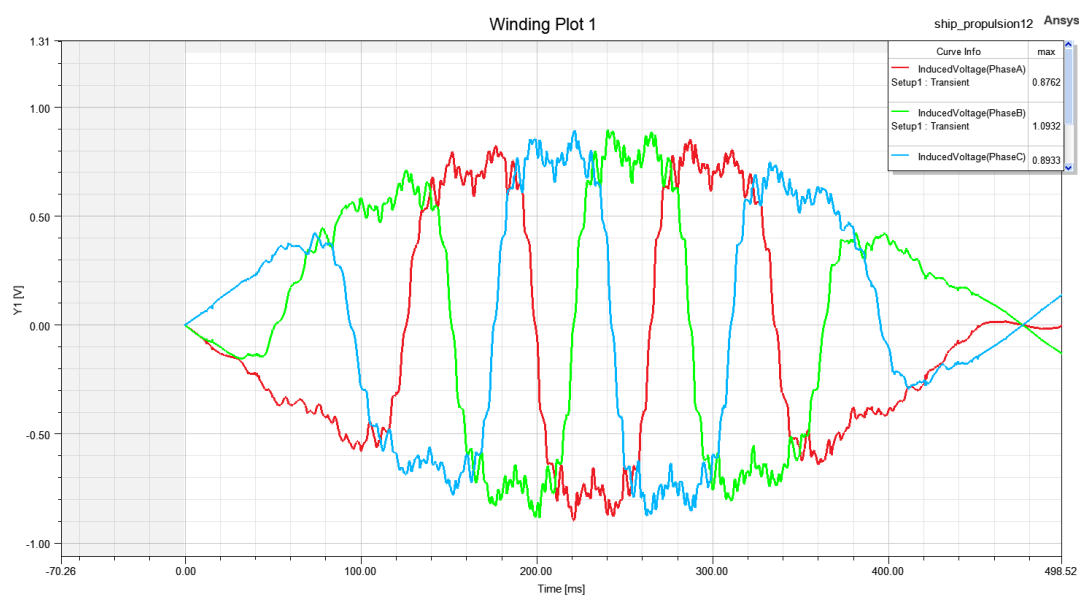
Από το παραπάνω διάγραμμα της ταχύτητας του δρομέα συναρτήσει του χρόνου η καμπύλη που προκύπτει προσεγγίζει την παρακάτω συνάρτηση :

$$v(t) = -10.121 \times (t - 0.238)^2 + 0.5733 \quad (1)$$

Το παραπάνω πείραμα μέτρησης της ΗΕΔ προσομοιώθηκε και στο λογισμικό του Maxwell πραγματοποιώντας μια χρονομεταβλητή πεδιακή ανάλυση πάνω στην γεωμετρία του μοντέλου της γραμμικής μηχανής που κατασκευάστηκε. Δεν δόθηκε φόρτιση στα τυλίγματα του στάτη ενώ στο κινητό μέρος εφαρμόστηκε η συνάρτηση (1) της ταχύτητας συναρτήσει του χρόνου.

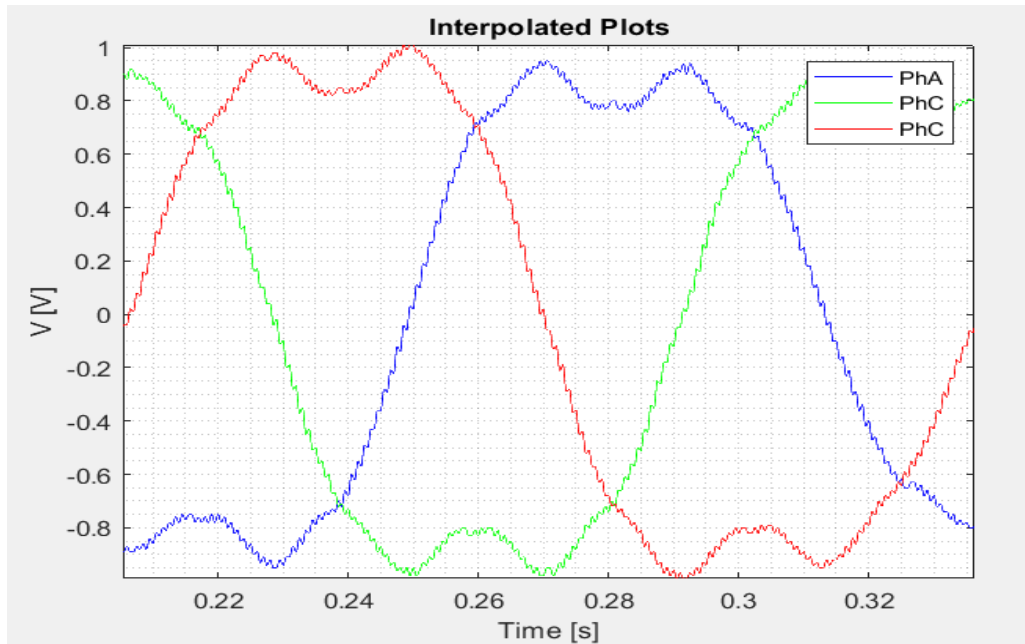


Εικόνα 5.6 Η ΗΕΔ από επαγωγή στα άκρα των τυλιγμάτων που προέκυψε από τις μετρήσεις

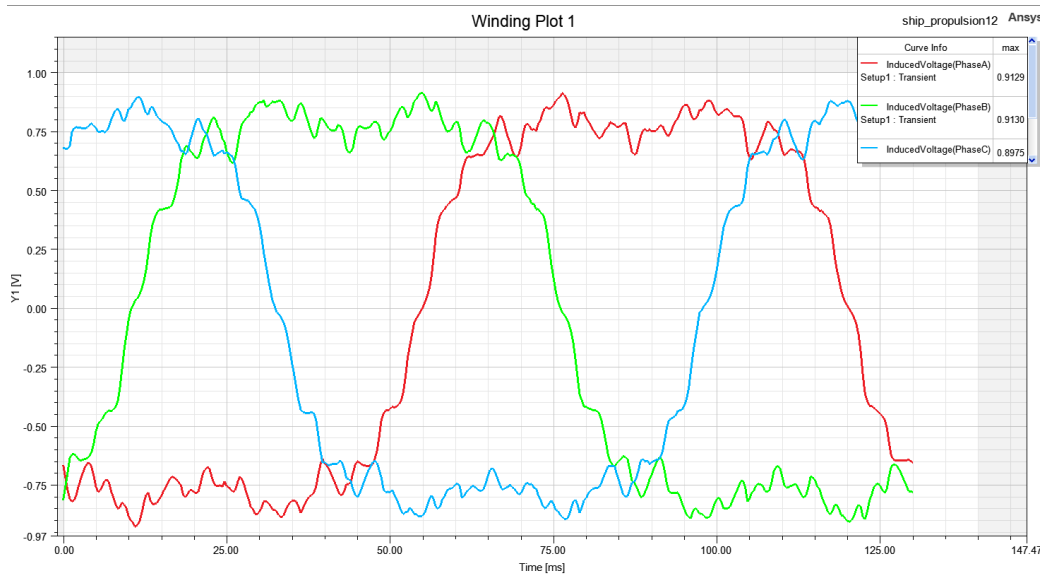


Εικόνα 5.7 Η ΗΕΔ από επαγωγή στα άκρα των τυλιγμάτων που προέκυψε στην προσομοίωση

Μέσα από τις Εικόνες 5.6 , 5.7 γίνεται η σύγκριση των κυματομορφών της ΗΕΔ μεταξύ πειράματος και προσομοίωσης. Επιπλέον παρουσιάζονται και οι κυματομορφές των επαγόμενων τάσεων στα άκρα των τυλιγμάτων κάθε φάσης που προέκυψαν από την χρονομεταβλητή πεδιακή ανάλυση στο λογισμικό Maxwell θέτοντας σταθερή ταχύτητα V_s στον δρομέα.

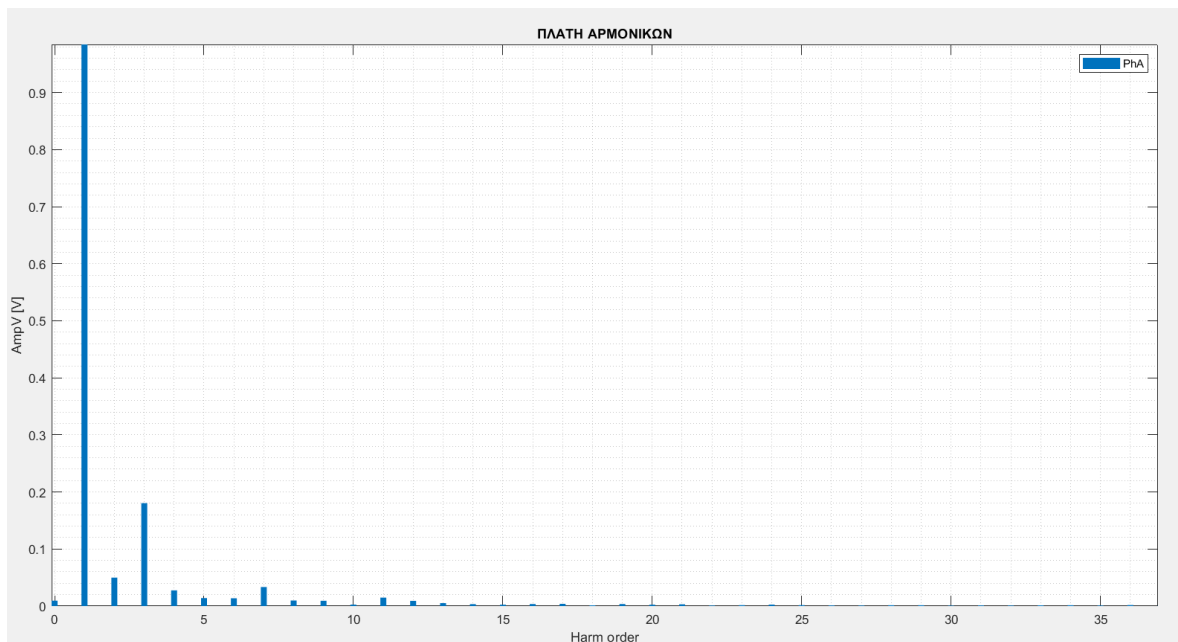


Εικόνα 5.8 ΗΕΔ από επαγωγή στα άκρα των τυλιγμάτων για μια περίοδο



Εικόνα 5.9 ΗΕΔ από επαγωγή στα άκρα των τυλιγμάτων για μια περίοδο που προέκυψε στην προσομοίωση

Στην συνέχεια η φασματική ανάλυση της κυματομορφής της επαγόμενης τάσης στο τύλιγμα της φάσης Α όπως προέκυψε από τις μετρήσεις του εργαστηρίου αλλά και από την πεδιακή ανάλυση στο λογισμικό.



Εικόνα 5.10 Τα πλάτη των αρμονικών της ΗΕΔ της φάσης Α που μετρήθηκε στο εργαστήριο



Εικόνα 5.11 Τα πλάτη των αρμονικών της ΗΕΔ της φάσης Α που προέκυψαν από την προσομοίωση. Είναι φανερό ότι τόσο στις μετρήσεις του παλμογράφου όσο και στην προσομοίωση το πλάτος στην τρίτη αρμονική είναι υψηλό όπως είναι ευδιάκριτο και από το σήμα στον χρόνο με τον διπλό λοβό στις κορυφές των κυματομορφών. Αυτές οι αρμονικές είναι χωρικές δηλαδή οφείλονται στην γεωμετρία της μηχανής στο διάκενο και συγκεκριμένα η τρίτη

αρμονική οφείλεται στα μεγάλα ανοίγματα των αυλάκων τα οποία δημιουργούν απώλεια της ροής λόγω σκεδάσεως.

Οι διαφορές που παρουσιάζουν οι κυματομορφές μεταξύ μετρήσεων και προσομοίωσης καταγράφονται στον Πίνακα 5.12 και θα αναλυθούν στο επόμενο Κεφάλαιο.

ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ MAXWELL		ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ		ΣΦΑΛΜΑ	
ΠΛΑΤΟΣ ΘΕΜΕΛΙΩΔΟΥΣ (mV)	THD (%)	ΠΛΑΤΟΣ ΘΕΜΕΛΙΩΔΟΥΣ (mV)	THD (%)	ΠΛΑΤΟΣ ΘΕΜΕΛΙΩΔΟΥΣ	THD
962.0	25.8	984.3	19.62	2,2%	31%

Πίνακας 5.12 Σύγκριση εργαστηριακών μετρήσεων με τα αποτελέσματα της προσομοίωσης

5.2.2 Μετρήσεις για υπολογισμό απωλειών

Το δεύτερο πείραμα που πραγματοποιήθηκε στο εργαστήριο είχε σκοπό την επιβεβαίωση των απωλειών του κινητήρα. Για την εκτέλεση του πειράματος αυτού αρχικά απομονώθηκε ένα πηνίο από το τύλιγμα της φάσης C. Όπως καθεμιά από τις τρεις φάσεις της γραμμικής μηχανής, η φάση C αποτελείται από τέσσερα πηνία 22 σπειρών και 15 παράλληλων κλάδων (αγωγών) συνδεδεμένα σε σειρά. Το απομονωμένο πηνίο τροφοδοτήθηκε με εναλλασσόμενο ρεύμα συχνότητας 50 Hz. Με την χρήση παλμογράφου καταγράφηκαν οι κυματομορφές της τάσης εισόδου αλλά και του ρεύματος εισόδου, τόσο με την παρουσία μαγνήτη άνωθεν του πηνίου όσο και χωρίς για τέσσερα διαφορετικά πλάτη ρεύματος, δύο υψηλά και δύο χαμηλά.

Η ωμική αντίσταση του πηνίου υπολογίστηκε από τον τύπο :

$$R = \rho_o \times \frac{l}{S}$$

Όπου:

ρ_o η ειδική αντίσταση του χαλκού η οποία ισούται με 0.0175 $\mu\Omega \times m$

l το συνολικό μήκος του αγωγού του πηνίου.

S το άθροισμα των εμβαδόν της διατομής κάθε αγωγού που τροφοδοτείται.

Όπως τονίστηκε και στην αρχή κάθε πηνίο έχει 22 σπείρες και 15 παράλληλους και για να προκύψει η σωστή ισοδύναμη αντίσταση τότε :

$$S = 15 \times \pi \times r^2$$

Όπου r είναι η ακτίνα της διατομής του αγωγού και αφού η διάμετρος είναι 0.56 mm τότε η ακτίνα ισούται με 0.28 mm.

Το συνολικό μήκος του αγωγού μετρήθηκε κατά την κατασκευή και είναι 4.6 m μαζί με τα τερματικά για τις συνδέσεις.

Έτσι η ωμική αντίσταση του τυλίγματος του πηνίου υπολογίζεται :

$$R = 0.0175 \times 10^{-6} \times \frac{4.6}{15 \times \pi \times 0.28^2 \times 10^{-6}} = 0.0217 \Omega$$

Η ισχύς που καταναλώνεται στην ωμική αντίσταση του τυλίγματος του πηνίου και εκφράζει τις απώλειες χαλκού υπολογίζεται από τον τύπο :

$$P_{CU} = I_{RMS}^2 \times R$$

Η ενεργός ισχύς εισόδου της μηχανής πρακτικά είναι όλες οι θερμικές απώλειες οι οποίες είναι είτε απώλειες χαλκού που καταναλώνονται στο τύλιγμα είτε απώλειες πυρήνα. Για το πείραμα αυτό οι απώλειες πυρήνα θεωρούνται αμελητέες καθώς μεταβολή της μαγνητικής ροής έχουμε μόνο σε 4 δόντια του στάτη και όπως θα αποδειχθεί και από τις προσομοιώσεις στο Maxwell στην καλύτερη είναι της τάξεως του mW. Γεγονός που κρίνεται απόλυτα λογικό δεδομένης της καμπύλης απωλειών (Εικόνα 4.3) που δόθηκε από τον κατασκευαστή για την μαγνητική λαμαρίνα του αποτελεί τον πυρήνα.

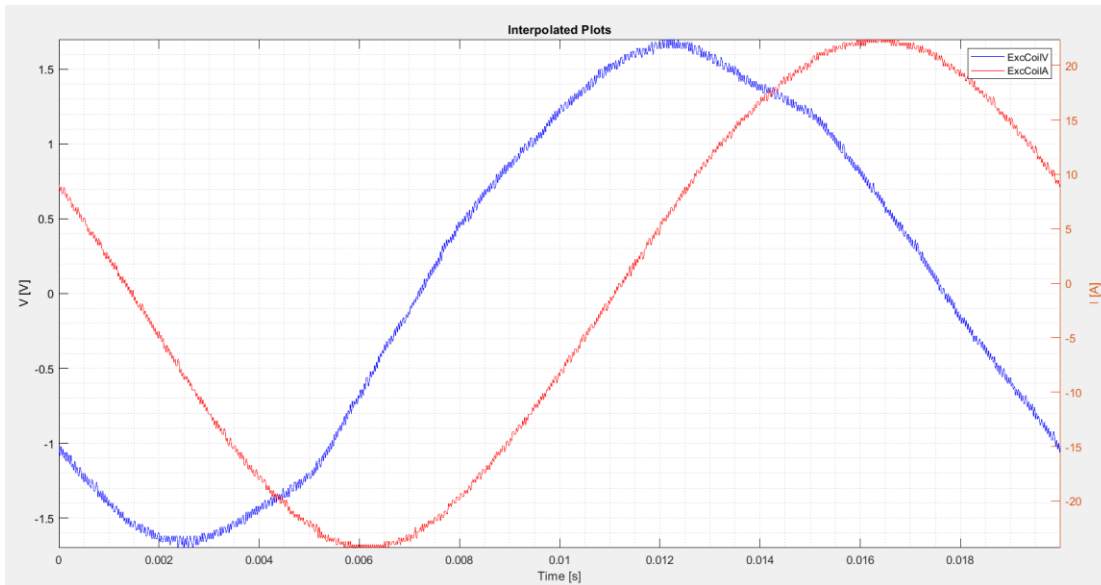
Έτσι η ενεργός ισχύς που εισάγεται η οποία αποτελεί και τις θερμικές απώλειες της γραμμικής μηχανής κατά την εκτέλεση του πειράματος υπολογίζεται από τις μετρήσεις με την χρήση κώδικα στο Matlab ως εξής :

$$P_{in} = \sum_{i=1}^N \frac{\|V_{1i}\|}{\sqrt{2}} \times \frac{\|I_{1i}\|}{\sqrt{2}} \times \cos(\varphi_{v1i} - \varphi_{I1i})$$

Όπου $\|V_{1i}\|$, $\|I_{1i}\|$ είναι τα πλάτη της θεμελιώδους και των αρμονικών της τάσης και του ρεύματος εισόδου αντίστοιχα και φ_{v1i} , φ_{I1i} είναι οι αντίστοιχες φάσεις τους.

Σύγκριση μετρήσεων εργαστηρίου με υπολογισμούς από θεωρητική προσέγγιση

Μέτρηση 1: Για ρεύμα εισόδου υψηλού πλάτους και χωρίς την παρουσία μαγνήτη



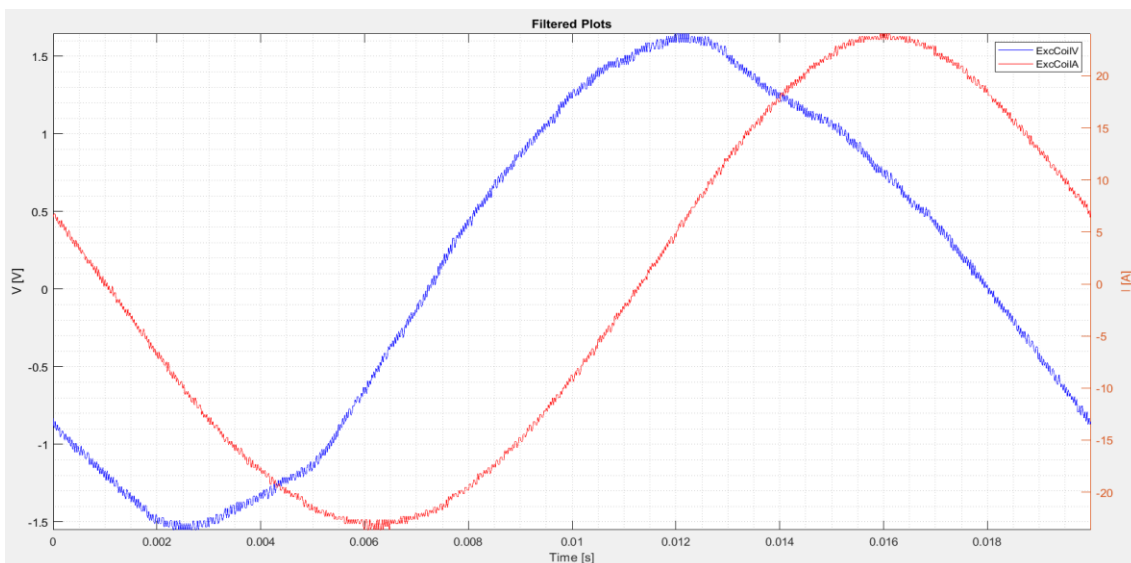
Εικόνα 5.13 Μέτρηση ρεύματος και τάσεως εισόδου (Has Mag=0 , Current High)

$$P_{CU} = I_{RMS}^2 \times R = \frac{22.13^2}{2} \times 0.0217 = 5.313 \text{ W}$$

V_{peak} [V]	I_{peak} [A]	Pcu (measured) [W]	Pcu (calculated) [W]	Σφάλμα [%]
1.757	22.13	7.0225	5.313	24.34

Οι απώλειες πυρήνα όπως υπολογίστηκαν στο Maxwell Pcore=1.068mW

Μέτρηση 2: Για ρεύμα εισόδου υψηλού πλάτους με την παρουσία μαγνήτη



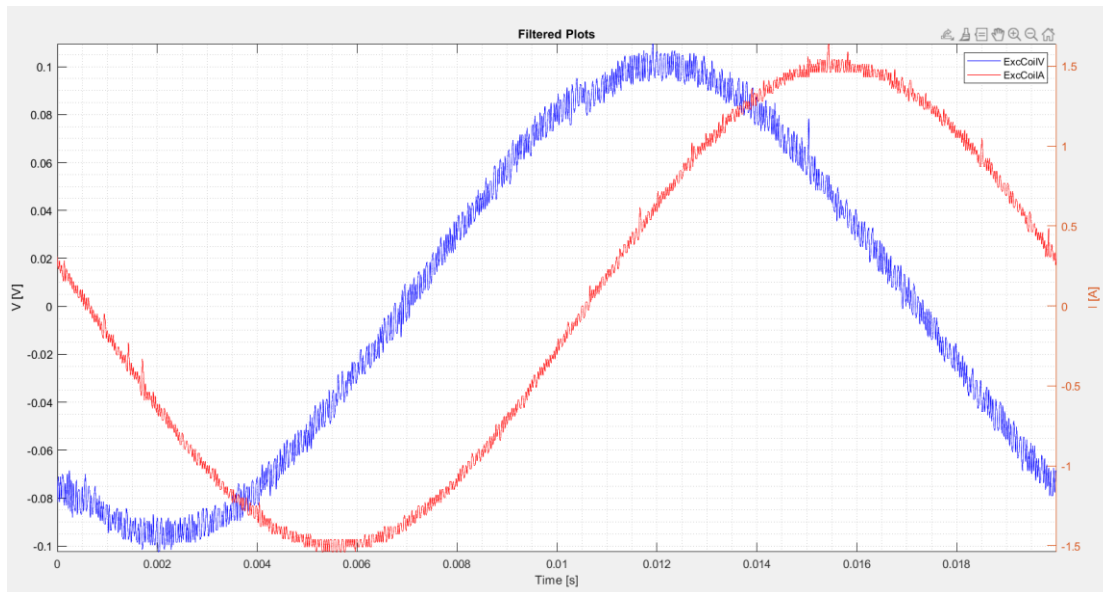
Εικόνα 5.14 Μέτρηση ρεύματος και τάσεως εισόδου (Has Mag=1 , Current High)

$$P_{CU} = I_{RMS}^2 \times R = \frac{24.07^2}{2} \times 0.0217 = 6.2861 \text{ W}$$

V_{peak} [V]	I_{peak} [A]	Pcu (measured) [W]	Pcu (calculated) [W]	Σφάλμα [%]
1.648	24.07	7.3396	6.2861	14.35

Η ενεργός ισχύς που καταναλώνεται στον πυρήνα υπολογίστηκε στο Maxwell Pcore=2.795mW

Μέτρηση 3: Για ρεύμα εισόδου χαμηλού πλάτους και με την παρουσία μαγνήτη



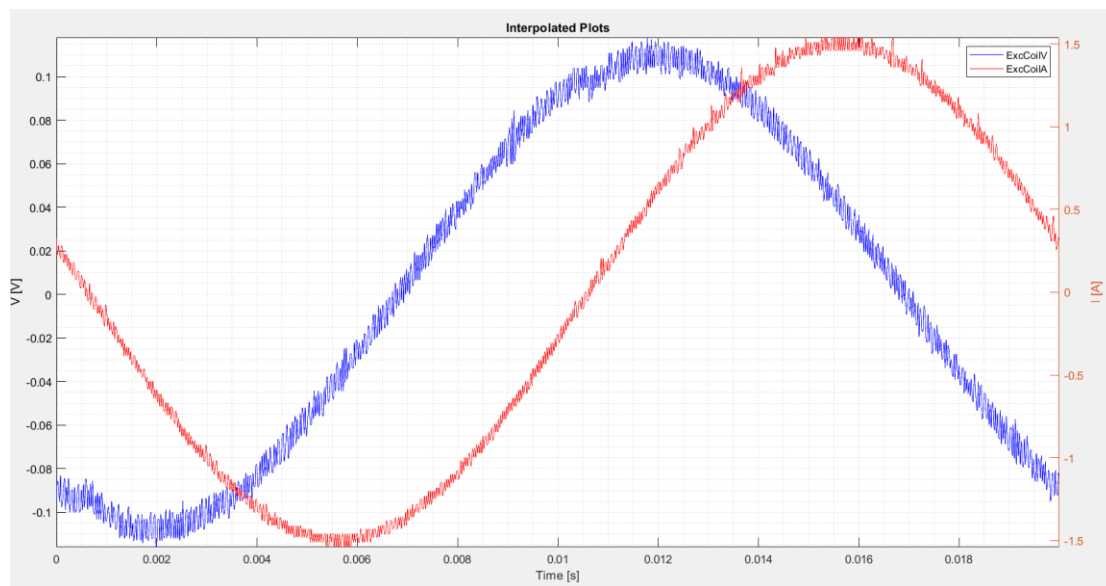
Εικόνα 5.15 Μέτρηση ρεύματος και τάσεως εισόδου (Has Mag=1 , Current Low)

$$P_{CU} = I_{RMS}^2 \times R = \frac{1.641^2}{2} \times 0.0217 = 0.0291 \text{ W}$$

V_{peak} [V]	I_{peak} [A]	Pcu (measured) [W]	Pcu (calculated) [W]	Σφάλμα [%]
0.1096	1.641	0.0318	0.0291	8.49

Η ενεργός ισχύς που καταναλώνεται στον πυρήνα υπολογίστηκε στο Maxwell Pcore=43.8 μW

Μέτρηση 4: Για ρεύμα εισόδου χαμηλού πλάτους χωρίς την παρουσία μαγνήτη



Εικόνα 5.16 Μέτρηση ρεύματος και τάσεως εισόδου (Has Mag=0 , Current Low)

$$P_{CU} = I_{RMS}^2 \times R = \frac{1,542^2}{2} \times 0.0217 = 0.0258 \text{ W}$$

V_{peak} [V]	I_{peak} [A]	Pcu (measured) [W]	Pcu (calculated) [W]	Σφάλμα [%]
0.1192	1.542	0.0304	0.0258	15.13

Η ενεργός ισχύς που καταναλώνεται στον πυρήνα υπολογίστηκε στο Maxwell Pcore=15 μ W

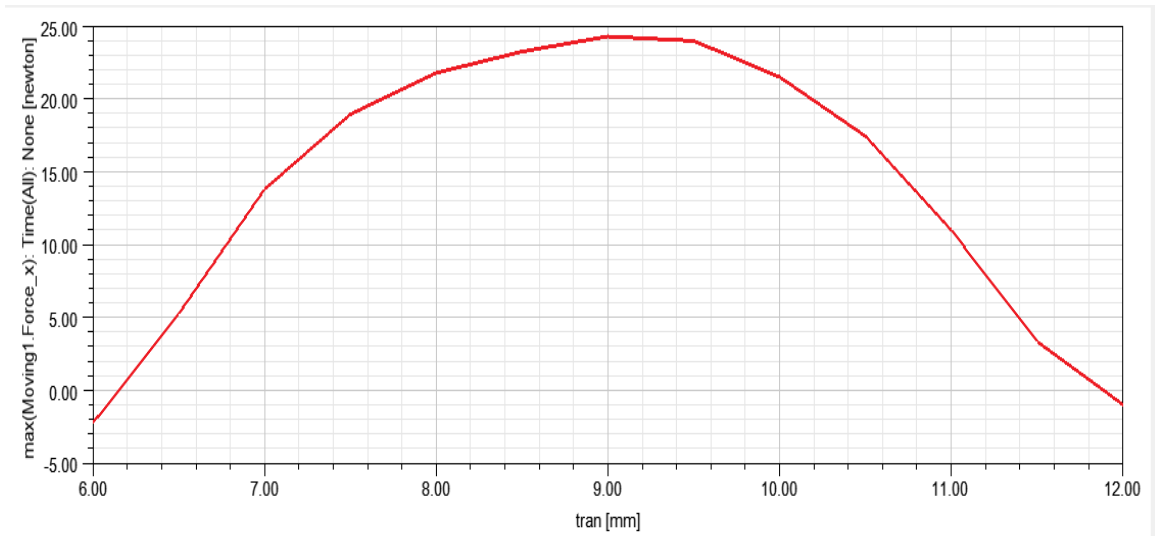
5.2.3 Μετρήσεις για επιβεβαίωση οριζόντιας δύναμης

Για την πραγματοποίηση του τρίτου πειράματος χρησιμοποιήθηκε τροχαλία, μέσα από το αυλάκι της οποίας περάστηκε σύρμα το οποίο συνέδεε τον δρομέα με ειδικά βαρίδια ώστε να μετρηθεί η ελκτική δύναμη που αναπτύσσεται μεταξύ του μαγνήτη του δρομέα και της μαγνητικής λαμαρίνας όταν τα τυλίγματα του στάτη είναι αφόρτιστα. Η δύναμη αυτή είναι γνωστή ως Cogging Force και μετρήθηκε για διάφορες θέσεις του μαγνήτη του δρομέα ως προς το απέναντι δόντι του στάτη. Για ρυθμισμένο διάκενο στο 1mm η μέγιστη δύναμη από το σύνολο των διαφορετικών θέσεων μετρήθηκε :

$$Cog.Force_{max} = 24.4 \text{ N}$$

Το πείραμα αυτό προσομοιώθηκε και στο περιβάλλον του Maxwell. Το διάκενο ρυθμίστηκε στα 0.8 mm και με βήμα 0.5 mm μετρήθηκε η οριζόντια δύναμη που ασκείται στον δρομέα

για κάθε θέση. Η δύναμη αυτή αποτελεί την Cogging Force που αναφέρθηκε παραπάνω και η καμπύλη της ως προς την θέση είναι η παρακάτω :

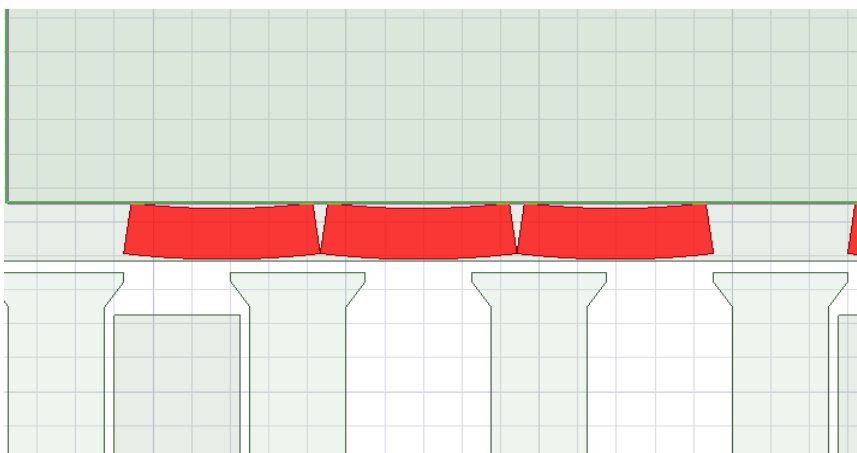


Εικόνα 5.17 Οριζόντια δύναμη ευθυγράμμισης συναρτήσει της θέσης για μηδενικό ρεύμα

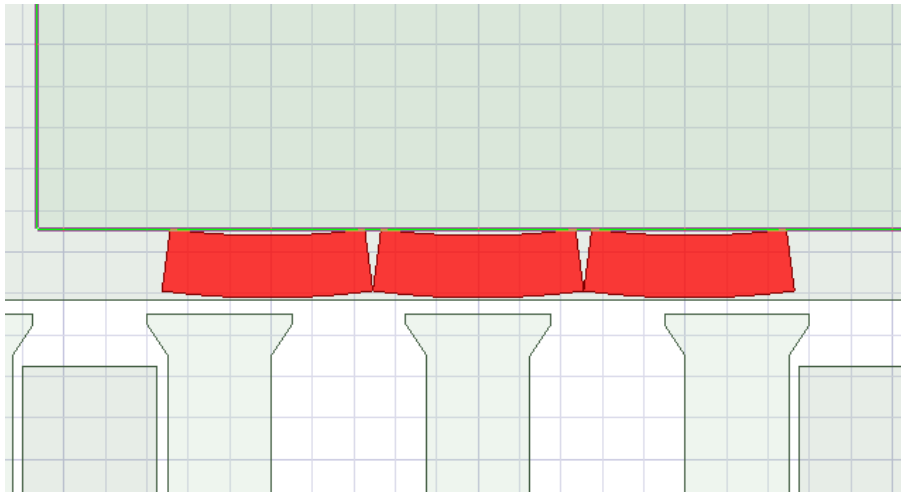
Η μέγιστη οριζόντια δύναμη της προσομοίωσης προέκυψε :

$$Cog.Force_{max}(simulated) = 24.28 N$$

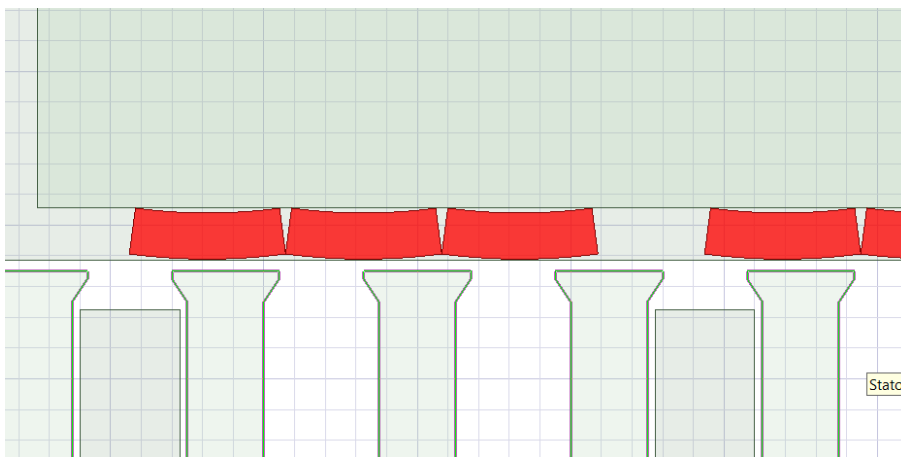
Παρατηρείται ότι η δύναμη μηδενίζεται όταν το κέντρο του μαγνήτη είναι ακριβώς πάνω από το κέντρο της αύλακας του στάτη (Εικόνα 5.18) αλλά και όταν το κέντρο του μαγνήτη είναι ακριβώς πάνω από το κέντρο του δοντιού του στάτη (Εικόνα 5.19). Η μέγιστη δύναμη αναπτύσσεται όταν το κέντρο του μαγνήτη είναι πάνω από το άκρο του δοντιού (Εικόνα 5.20)



Εικόνα 5.18 Position=6 mm, Cog Force \approx 0 N



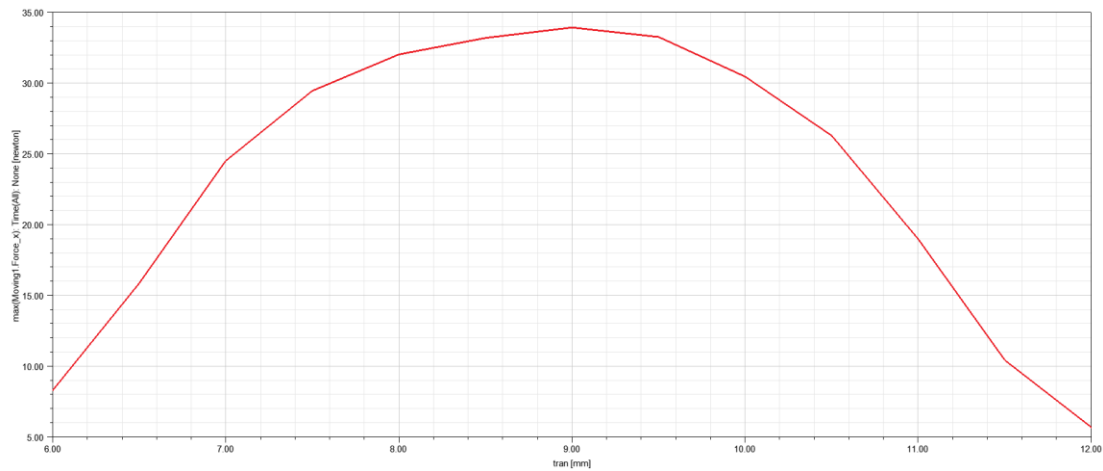
Εικόνα 5.19 Position ≈ 12 mm, Cog Force ≈ 0 N



Εικόνα 5.20 Position ≈ 9 mm, Cog Force $\approx \text{MAX}$

Στην συνέχεια του πειράματος έγινε μια προσπάθεια ώστε να επαληθευτεί η οριζόντια δύναμη που αναπτύσσεται από την γραμμική μηχανή. Αποφασίστηκε να μην τροφοδοτηθούν τα τυλίγματα με εναλλασσόμενο τριφασικό ρεύμα αλλά με DC σύστημα ρευμάτων, το οποίο ακολουθεί την τριφασική συμμετρία, να μετρηθούν οι μέγιστες οριζόντιες δυνάμεις μετακινώντας και πάλι τον δρομέα με σταθερό βήμα. Για κάθε μέτρηση που πραγματοποιήθηκε στο εργαστήριο έγινε και μια σειρά από χρονοστατικές πεδιακές αναλύσεις στο λογισμικό προσομοίωσης από τις οποίες προέκυψαν οι παρακάτω καμπύλες οριζόντιας δύναμης συναρτήσει θέσης. Οι μέγιστες τιμές των καμπυλών θα συγκριθούν με τις αντίστοιχες μέγιστες δυνάμεις που μετρήθηκαν στο εργαστήριο.

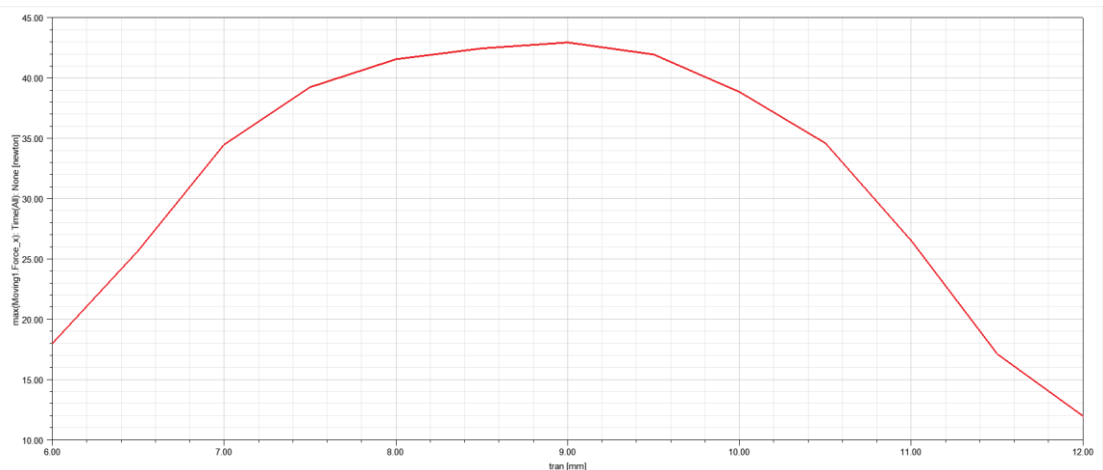
Για $I_B = -I_C = 5.2 \times \sin(120^\circ)$ A $I_A = 0$ A :



Εικόνα 5.21 Οριζόντια δύναμη για ρεύματα DC $I_B = -I_C = 5.2 \times \sin(120^\circ)$ A $I_C = 0$ A

	Μέτρηση Εργαστηρίου	Προσομοίωση
Horizontal Force (N)	35.00	33.90

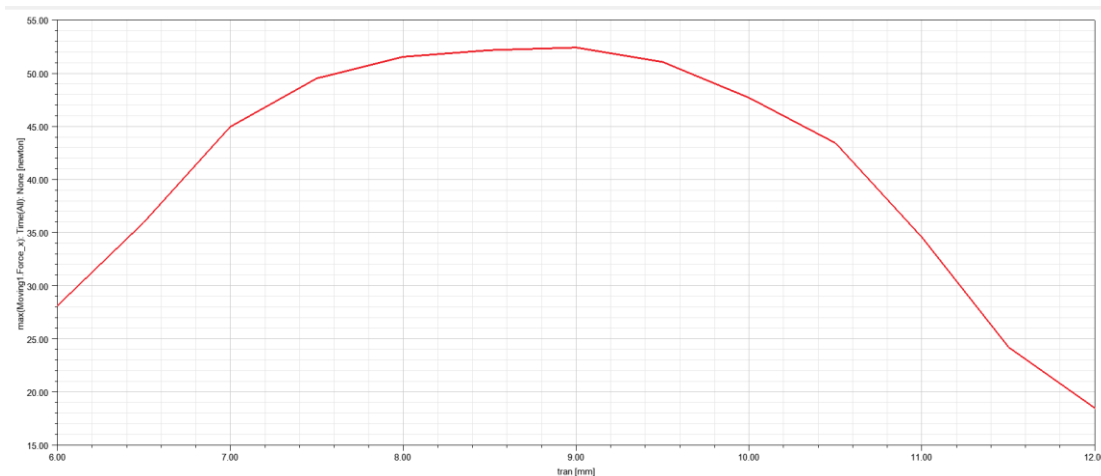
Για $I_B = -I_C = 10 \times \sin(120^\circ)$ A $I_A = 0$ A :



Εικόνα 5.22 Οριζόντια δύναμη για ρεύματα DC $I_B = -I_C = 10 \times \sin(120^\circ)$ A $I_C = 0$ A

	Μέτρηση Εργαστηρίου	Προσομοίωση
Horizontal Force (N)	44.00	42.90

Για $I_B = -I_C = 15 \times \sin(120^\circ) \text{ A}$ $I_A = 0 \text{ A}$:



Εικόνα 5.23 Οριζόντια δύναμη για ρεύματα DC $I_B = -I_C = 15 \times \sin(120^\circ) \text{ A}$ $I_C = 0 \text{ A}$

	Μέτρηση Εργαστηρίου	Προσομοίωση
Horizontal Force (N)	52.00	52.38

Οι παραπάνω τιμές και οι διαφορές με τις μετρήσεις θα καταγραφούν συγκεντρωτικά και θα αναλυθούν στο επόμενο κεφάλαιο όπου και θα εξαχθούν τα τελικά συμπεράσματα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

6.1 Σύνοψη

Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας παρουσιάστηκε σχεδιασμένη ενός σύγχρονου κυλινδρικού κινητήρα επιφανειακών μονίμων μαγνητών που πραγματοποιήθηκε στο λογισμικό ανάλυσης ηλεκτρομαγνητικών συστημάτων με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, Maxwell σε περιβάλλον προσομοίωσης Ansys. Αφού αναλύθηκαν η γεωμετρία και τα χαρακτηριστικά του σύγχρονου κινητήρα, σχεδιάστηκε στο ίδιο λογισμικό μια πρότυπη Γραμμική Μηχανή Μονίμων Μαγνητών, η οποία παρουσιάζει αντίστοιχη γεωμετρία με αυτή του σύγχρονου κινητήρα περιλαμβάνοντας οκτώ πόλους στάτη και δύο δρομέα. Η μηχανή αυτή κατασκευάστηκε και χρησιμοποιήθηκε προκειμένου να επιβεβαιωθούν πειραματικά τα λειτουργικά χαρακτηριστικά του κινητήρα που σχεδιάστηκε.

Στο Κεφάλαιο 4 εξηγήθηκε η σύνδεση των χαρακτηριστικών της πρότυπης Γραμμικής Μηχανής με εκείνα του κυλινδρικού Σύγχρονου Κινητήρα και διαπιστώθηκε, λαμβάνοντας υπόψιν τις προσαρμογές που πραγματοποιήθηκαν, ότι πράγματι τα πειραματικά αποτελέσματα εμφανίζουν αποδεκτές αποκλίσεις από τα αντίστοιχα προσομοιωμένα. Κατά συνέπεια, ο σχεδιασμός του κυλινδρικού κινητήρα μονίμων μαγνητών αποδείχθηκε αξιόπιστος.

6.1.1 Σύνοψη πειράματος μέτρησης ΗΕΔ

Το πρώτο πείραμα πραγματοποιήθηκε προκειμένου να επιβεβαιωθεί η ΗΕΔ που αναπτύσσεται στα άκρα των τυλιγμάτων της Γραμμικής Μηχανής. Στην μηχανή που κατασκευάστηκε ασκήθηκε στο κινητό της μέρος μια οριζόντια δύναμη που προκάλεσε την επιταχυνόμενη κίνησή του. Με την βοήθεια του παλμογράφου μετρήθηκε η ΗΕΔ που αναπτύχθηκε στα τυλίγματα των τριών φάσεων εξαιτίας της κίνησης αυτής και το αποτέλεσμα επιβεβαίωσε την προσομοίωση με αρκετά καλή ακρίβεια.

ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ MAXWELL		ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ		ΣΦΑΛΜΑ	
ΠΛΑΤΟΣ ΘΕΜΕΛΙΩΔΟΥΣ (mV)	THD (%)	ΠΛΑΤΟΣ ΘΕΜΕΛΙΩΔΟΥΣ (mV)	THD (%)	ΠΛΑΤΟΣ ΘΕΜΕΛΙΩΔΟΥΣ	THD
962.0	25.8	984.3	19.62	2,2%	23.9%

Πίνακας 5.12 Σύγκριση εργαστηριακών μετρήσεων με τα αποτελέσματα της προσομοίωσης

Από τον παραπάνω Πίνακα όπως αναφέρεται και στο Κεφάλαιο 5, η απόκλιση του πλάτους θεμελιώδους μεταξύ πειράματος και προσομοίωσης είναι αρκετά ικανοποιητική (2.2 %) καθώς εξαρτάται από την αλληλεπίδραση των μαγνητικών πεδίων σε βήμα ενός πόλου,

ωστόσο το ίδιο δεν συμβαίνει και μεταξύ των συντελεστών παραμόρφωσης της ΗΕΔ από τις αρμονικές για τις δύο κυματομορφές (23.9 %), καθώς υπάρχει μεγάλη εξάρτηση από τις τοπικές γεωμετρίες δοντιών-αυλακιών που είναι ευαίσθητες σε κατασκευαστικές ατέλειες.

6.1.2 Σύνοψη πειράματος μέτρησης απωλειών

Το δεύτερο πείραμα πραγματοποιήθηκε αντίστοιχα για την επιβεβαίωση των απωλειών στην πρότυπη Γραμμική Μηχανή, και συνεπώς αντίστοιχα στον Σύγχρονο Κινητήρα Μόνιμων Μαγνητών που σχεδιάστηκε για την ηλεκτροπρόωση πλοίου. Στο πείραμα αυτό απομονώθηκε ένα πηνίο της γραμμικής μηχανής το οποίο τροφοδοτήθηκε με εναλλασσόμενο ρεύμα διαφόρων τιμών με και χωρίς ύπαρξη δρομέα και καταγράφηκαν με την χρήση παλμογράφου οι κυματομορφές της τάσης εισόδου και του ρεύματος εισόδου. Από τις κυματομορφές αυτές με τη μέθοδο υπολογισμού που αναλύθηκε στο Κεφάλαιο 5 υπολογίστηκε η ενεργός ισχύς εισόδου, η οποία αποτελείται από τις απώλειες χαλκού στα τυλίγματα, τις απώλειες πυρήνα και τις απώλειες στους μόνιμους μαγνήτες (όταν υπάρχει δρομέας). Ωστόσο όπως αναδείχθηκε και από την προσομοίωση οι απώλειες χαλκού δεσπόζουν ενώ εξαρτώνται σημαντικά και από τη θερμοκρασία.

Ύπαρξη δρομέα	V_{peak} [V]	I_{peak} [A]	$P_{\text{χαλ.}}$ (μέτρηση) [W]	$P_{\text{χαλ.}}$ (υπολογισμος) [W]	Σφάλμα (%)
0	1.757	22.13	7.0225	5.313	24.34
1	1.648	24.07	7.3396	6.2861	14.35
0	0.119	1.542	0.0304	0.0258	15.13
1	0.11	1.641	0.0318	0.0291	8.49

Πίνακας 6.1 Σύγκριση συνολικών απωλειών για θεώρηση θερμοκρασίας χαλκού 20°C

Από τον Πίνακα 6.1 φαίνεται ότι υπάρχουν σημαντικές αποκλίσεις των μετρήσεων από τον θεωρητικό υπολογισμό ακόμα και για τις απώλειες χαλκού ενώ οι άλλες κατηγορίες απωλειών είναι σημαντικά μικρότερες και δεν είναι δυνατόν να επιβεβαιωθούν πειραματικά. Οι αποκλίσεις εξηγούνται από ενδεχόμενη άνοδο της θερμοκρασίας καθώς η ωμική αντίσταση των αγωγών του πηνίου επηρεάζεται σημαντικά από τη θερμοκρασία λόγω μεταβολής της ειδικής αντίστασης του χαλκού σύμφωνα με την παρακάτω σχέση:

$$\rho = \rho_0 \times (1 + \alpha \times \theta)$$

Όπου $\alpha = 3,9 \cdot 10^{-3}$ για τον χαλκό και θ η θερμοκρασία του αγωγού σε βαθμούς Κελσίου. Συνεπώς αν οι αγωγοί του πηνίου ζεσταθούν θα υπάρξει μια αύξηση της αντίστασης κατά 4% περίπου για αύξηση της θερμοκρασίας κατά 10°C

6.1.3 Σύνοψη πειράματος επιβεβαίωσης οριζόντιας δύναμης

Η εκτέλεση του τρίτου πειράματος πραγματοποιήθηκε ώστε να διαπιστωθεί η ακρίβεια υπολογισμού της οριζόντιας δύναμης που ασκείται στο δρομέα του κινητήρα σε διάφορες τιμές ρευμάτων στάτη. Σημειώνεται ότι το διάκενο που ρυθμίστηκε σε αυτό το πείραμα ήταν 0.8 mm . Ο συγκεντρωτικός πίνακας 6.2 συγκρίνει τις μετρημένες με τις προσομοιωμένες τιμές μέγιστης οριζόντιας δύναμης στο δρομέα για διάφορες τιμές ρευμάτων στάτη.

Ρεύματα στάτη	F_x (μέτρηση) [N]	F_x (προσομοίωση) [N]	Σφάλμα (%)
$I_A=I_B=I_C=0\text{A}$	24.4	24.28	0.5
$I_A= -I_B=5.2 \text{ A},$ $I_C=0\text{A}$	35	33.9	3.1
$I_A= -I_B=10 \text{ A},$ $I_C=0\text{A}$	44	42.9	2.5
$I_A= -I_B=15 \text{ A},$ $I_C=0\text{A}$	52	52.38	0.75

Πίνακας 6.2 Σύγκριση οριζόντιας δύναμης με τρήσεων και προσομοιώσεων

Από τον πίνακα αυτόν προκύπτει το συμπέρασμα ότι οι τιμές της οριζόντιας δύναμης επιβεβαιώνονται με αρκετά υψηλή ακρίβεια σε όλες της συνθήκες φόρτισης.

6.2 Κύριο συμπέρασμα

Με βάση τις εργαστηριακές μετρήσεις στην πρότυπη Γραμμική Μηχανή με μόνιμους μαγνήτες που κατασκευάστηκε επιβεβαιώθηκαν με ικανοποιητική ακρίβεια οι τιμές της ηλεκτρεγερτικής δύναμης στα τυλίγματα και της εφαπτόμενικής δύναμης στο διάκενο του κινητήρα ενώ η επιβεβαίωση των απωλειών χαλκού απαιτεί πληρέστερη γνώση της θερμοκρασίας λειτουργίας.

6.3 Προτάσεις για περαιτέρω διερεύνηση

Με την ολοκλήρωση της εργασίας αναδείχθηκε ότι η μέτρηση των απωλειών στην πρότυπη γραμμική μηχανή απαιτεί περαιτέρω διερεύνηση.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Ι. Προυσαλίδης, Γ. Αντωνόπουλος και Π. Βαλλιανάτος, "ΕΞΕΛΙΞΕΙΣ ΣΤΗΝ ΗΛΕΚΤΡΟΠΡΩΣΗ ΠΛΟΙΩΝ ΚΑΙ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ ΖΗΤΗΜΑΤΩΝ ", 2006.
- [2] A. K. Adnanes, « "Maritime Electrical Installations and Diesel Electric Propulsion"». ABB AS .
- [3] Ε. Δ. Μήτση, Σχεδιασμός και βελτιστοποίηση γεωμετρίας κινητήρα επαγωγής ισχύος 10MW για εφαρμογή σε ηλεκτροπρόωση πλοίου, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2016.
- [4] S. J. Charpan, "ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ" 4η Έκδοση, ΤΖΙΟΛΑ.
- [5] Γ. Μ. Ποτηριάδης, "Πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση ηλεκτρικών μηχανών για ηλεκτρική πρόωση πλοίου", Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2013.
- [6] Γ. Σ. Δημητρακάκης, "Διερεύνηση των απωλειών μαγνητικών στοιχείων διαρρεόμενων από υψίσυχνα ρεύματα για εφαρμογές σε διατάξεις ηλεκτρονικών στοιχείων", Πανεπιστήμιο Πατρών, Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, 2009.
- [7] Z. H.Li, «"Design optimization and site matching of direct-drive permanent magnet wind " ,» 2008.
- [8] Gieras, Jacek F., Zbigniew J., Tomczuk και Bro, Linear Synchronous Motors: Transportation and Automation Systems, Second Edition (Electric Power Engineering Series), CRC PRESS, 2011.
- [9] H. Yunkai , D. Jianning, J. Long, Z. Jianguo και G. Youguang, «"Eddy-Current Loss Prediction in the Rotor Magnets of a Permanent Magnet",» IEEE Transactions on Magnetics, 2011.
- [10] E. Sandra και B. Hans, «"Loss evaluation and design optimization for direct driven permanent magnet,» 2011.
- [11] Virendra Desai-Patil, A. Ayare, Bhushan R. Mahajan, S. Bade, "A Review of Azimuth Thruster"

ΙΣΤΟΣΕΛΙΔΕΣ

[12] <https://www.yanmar.com/global/marinecommercial/products/electricpropulsion/>

[13] <https://el.lamdageeks.com/magnetic-hysteresis-permeability-retentivity/>

[14] [https://www.maplesoft.com/documentation_center/online_manuals/modelica/Modelica Magnetic FluxTubes Material HardMagnetic.html](https://www.maplesoft.com/documentation_center/online_manuals/modelica/Modelica_Magnetic_FluxTubes_Material_HardMagnetic.html)

[15] <https://frenetic.ai/magnetic-notes/introduction-to-design-laminated-cores?>