



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

**Σχεδίαση ανεμογεννήτριας κατακόρυφου άξονα ισχύος 2kW με
μηχανή μονίμων μαγνητών**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Κωνσταντίνος Τσιαμπούρης

Επιβλέπων: Αντώνιος Κλαδάς

Καθηγητής Ε.Μ.Π

Αθήνα, Νοέμβριος 2017



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

**Σχεδίαση ανεμογεννήτριας κατακόρυφου άξονα ισχύος 2kW με
μηχανή μονίμων μαγνητών**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Κωνσταντίνος Τσιαμπούρης

Επιβλέπων: Αντώνιος Κλαδάς

Καθηγητής Ε.Μ.Π

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την.....

.....
Αντώνιος Κλαδάς
Καθηγητής Ε.Μ.Π

.....
Στέφανος Μανιάς
Καθηγητής Ε.Μ.Π

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

.....
Κωνσταντίνος Τσιαμπούρης

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

Copyright © Κωνσταντίνος Τσιαμπούρης, 2017

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.

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματεύεται τη σχεδίαση γεννήτριας μόνιμων μαγνητών για εφαρμογή σε ανεμογεννήτρια κατακόρυφου άξονα ισχύος 2 kW.

Αρχικά, πραγματοποιείται βιβλιογραφική διερεύνηση των βασικών χαρακτηριστικών των ανεμογεννητριών και παρουσιάζονται οι διάφορες διαμορφώσεις που αφορούν του ηλεκτρικό τους μέρος. Στη συνέχεια, επιχειρείται αναλυτική παρουσίαση και σύγκριση των διάφορων τύπων μηχανών μόνιμων μαγνητών, αναφορικά με την θέση και τη σχετική γεωμετρία των μαγνητών στο δρομέα, όπου επιλέγεται η κατάλληλη διαμόρφωση για την συγκεκριμένη εφαρμογή με κύριο κριτήριο το ελάχιστο κατασκευαστικό κόστος.

Έχοντας, επιλέξει τις προδιαγραφές της γεννήτριας, λαμβάνοντας υπ' όψιν τις απαιτήσεις ροπής - ταχύτητας και τους περιορισμούς διαστάσεων, αναπτύσσεται η μεθοδολογία που χρησιμοποιήθηκε για την προκαταρκτική σχεδίαση της γεννήτριας, θεωρώντας τυπικές τιμές φορτίσεων. Κατόπιν, πραγματοποιήθηκε η τελική σχεδίαση της μηχανής, με την ανάπτυξη μιας παραμετροποιημένης γεωμετρικής αναπαράστασης της γεννήτριας σε συνδυασμό με ένα διδιάστατο μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων. Ακολούθως, αναπτύχθηκαν τα χαρακτηριστικά του προγράμματος, το οποίο χρησιμοποιήθηκε για τις επιθυμητές προσομοιώσεις των εκάστοτε σχεδιαζόμενων γεωμετριών.

Τέλος, πραγματοποιήθηκε ανάλυση ευαισθησίας παραμέτρων για ονομαστική κατάσταση λειτουργίας, με στόχο τη βελτιστοποίηση της γεωμετρίας αναζητώντας κατάλληλο συμβιβασμό μεταξύ συνολικού κόστους κατασκευής, επίδοσης και απόδοσης.

Στις προσομοιώσεις χρησιμοποιήθηκαν τα λογισμικά πεπερασμένων στοιχείων FEMM και αριθμητικής ολοκλήρωσης διαφορικών εξισώσεων MATLAB.

Λέξεις κλειδιά: ανεμογεννήτρια, κατακόρυφου άξονα, γεννήτρια μόνιμων μαγνητών, μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων, παραμετροποιημένη σχεδίαση, ανάλυση ευαισθησίας

Abstract

The current thesis undertakes the design of a synchronous permanent magnet electric generator suitable for a 2 kW vertical axis wind turbine.

Initially, a literature survey on wind turbines and corresponding electrical machines has been presented. Furthermore, different topologies of permanent magnet configuration, related to the placement of magnets in the rotor, has been developed and applied to determine the final generator geometry, with main aim to design a machine of low cost.

Following the choice of the main specifications of the machine, i.e. torque-speed and dimensional limitations, the preliminary design of the machine was carried out, taking into consideration typical electric and magnetic loadings. Subsequently, the final design has been performed by developing a parameterized geometrical representation combined with a two-dimensional finite element model. Furthermore, the characteristics of the program created have been described, enabling the desired simulation of the designed geometries.

Finally, rotor and stator geometries have been optimized by using sensitivity analysis at the nominal operating point. The optimization procedure focused on achieving a convenient compromise amongst manufacturing cost, performance and efficiency.

It may be noted that the developed programs have implemented Matlab/Simulink and Femm software packages.

Key words: wind turbines, vertical axis, permanent magnet generator, parametric design, sensitivity analysis

Ευχαριστίες

Ευχαριστώ θερμά τον καθηγητή μου κ. Αντώνη Κλαδά, για την ευκαιρία που μου έδωσε να ασχοληθώ με την παρούσα εργασία, καθώς και για την καθοδήγηση κατά την εκπόνηση της.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια και τους φίλους μου, που στάθηκαν στο πλευρό μου καθ' όλη την διάρκεια των σπουδών μου.

Πίνακας περιεχομένων

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1.ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	13
1.1 Σκοπός της εργασίας.....	13
1.2 Δομή της εργασίας.....	13
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2.Αιολικά συστήματα ενέργειας.....	15
2.1 Αεροδυναμικό μέρος	16
2.2 Βασικοί τύποι ανεμογεννητριών.....	18
2.2.1 Οριζόντιου άξονα	18
2.2.2 Κατακόρυφου άξονα.....	19
2.2.3 Σύγκριση ανεμογεννητριών οριζόντιου και κάθετου άξονα.....	20
2.3 Μέθοδοι λειτουργίας ανεμογεννητριών	22
2.3.1 Σταθερών στροφών.....	22
2.3.2 Μεταβλητών στροφών	23
2.4 Γεννήτριες στα αιολικά συστήματα ενέργειας.....	23
2.4.1 Μηχανές Συνεχούς Ρεύματος.....	24
2.4.2 Ασύγχρονες Μηχανές	24
2.4.2.1 Βραχυκυκλωμένου κλωβού.....	24
2.4.2.2 Δακτυλιοφόρου δρομέα.....	26
2.4.3 Σύγχρονες Μηχανές.....	28
2.4.3.2 Δακτυλιοφόρου Δρομέα	28
2.4.3.2 Μόνιμου Μαγνήτη.....	29
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΚΑΙ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ.....	31
3.1 Κατασκευαστικά υλικά ηλεκτρικών μηχανών	31
3.1.1 Σιδηρομαγνητικά υλικά.....	31
3.1.2 Μόνιμοι μαγνήτες	33
3.2 Βασικά μεγέθη διαστασιολόγησης.....	34
3.2.1 Ειδικές φορτίσεις.....	34

3.2.2 Ηλεκτρικά μεγέθη	36
3.2.3 Μηχανικά μεγέθη	37
3.2.3 Πυκνότητα ρεύματος τυλίγματος.....	38
3.3 Γεννήτριες μόνιμου μαγνήτη ακτινικής και αξονικής ροής	39
3.4 Διαμορφώσεις δρομέα μηχανών μόνιμων μαγνητών	44
3.5 Τυλίγματα ηλεκτρικών μηχανών	45
3.5.1 Τύλιγμα πλήρους και κλασματικού βήματος.....	45
3.5.2 Συγκεντρωμένο και Διανεμημένο τύλιγμα	46
3.5.3 Τύλιγμα απλής και διπλής στρώσης.....	47
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ 2kW	49
4.1 Προκαταρκτική σχεδίαση.....	49
4.2.1 Διαστασιολόγηση διακένου	50
4.2.2 Πλάτος διακένου	52
4.2.3 Μεγέθη στάτη	52
4.2.3.1 Επιλογή αριθμού αυλακών.....	52
4.2.3.2 Τύλιγμα γεννήτριας	55
4.2.3.3 Διατομή αύλακος.....	57
4.2.3.4 Μαγνητική λαμαρίνα στάτη	58
4.2.4 Μεγέθη δρομέα	59
4.3 Παραμετροποιημένη σχεδίαση.....	63
4.3.1 Επιλογή Μεταβλητών	63
4.3.2 Προσδιορισμός μεγεθών.....	65
4.4 Επίλυση προβλήματος	67
4.4.1 Πεδιακή ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία	68
4.4.1.1 Μαγνητοστατικά προβλήματα.....	68
4.4.1.2 Οριακές συνθήκες.....	70
4.4.1.3 Διερεύνηση πλέγματος	71
4.4.2 Γωνία Ροπής	73

4.4.3 Κυμάτωση ροπής	75
4.4.4 Ηλεκτρεγερτική δύναμη	76
4.4.5 Απώλειες χαλκού	78
4.4.6 Απώλειες σιδήρου	80
4.4.7 Απόδοση	82
4.5 Ανάλυση ευαισθησίας παραμέτρων τελικής σχεδίασης	82
4.5.1 Βελτιστοποίηση δρομέα	85
4.5.2 Βελτιστοποίηση στάτη	88
4.5.2.1 Πάχος πέδιλου.....	89
4.5.2.2 Πάχος δοντιού.....	91
4.5.2.3 Μήκη πέδιλου δοντιού	95
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	99
5.1 Κυριότερα συμπεράσματα.....	99
5.2 Σημεία επιστημονικής συνεισφοράς.....	100
5.3 Θέματα για περαιτέρω διερεύνηση	100
Βιβλιογραφία.....	101

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Σκοπός της εργασίας

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η σχεδίαση ηλεκτρικής γεννήτριας σύγχρονων μαγνητών ονομαστικής ισχύς 2kW σε ταχύτητα 300 ΣΑΛ, η οποία θα χρησιμοποιηθεί σε ανεμογεννήτρια κατακόρυφου άξονα. Η ηλεκτρογεννήτρια θα περιλαμβάνει μόνιμους μαγνήτες ως διέγερση, ώστε να επιτυγχάνεται ευχερής εκκίνηση του συστήματος και υψηλός βαθμός απόδοσης, ενώ θα είναι πολυπολική για απευθείας σύζευξη με το δρομέα, χωρίς την παρεμβολή κιβωτίου ταχυτήτων για αυξημένη αξιοπιστία.

1.2 Δομή της εργασίας

Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζονται εισαγωγικά στοιχεία με σκοπό να κατατοπίσουν τον αναγνώστη σχετικά με το περιεχόμενο της εργασίας.

Στο δεύτερο κεφάλαιο αναφέρονται τα πλεονεκτήματα των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας και ειδικότερα αυτά που προκύπτουν από την εκμετάλλευση της αιολικής ενέργειας. Στη συνέχεια, γίνεται διερεύνηση των ανεμογεννητριών οριζόντιου και κάθετου άξονα και παρατίθενται τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της κάθε μιας διάταξης. Τέλος, γίνεται η περιγραφή των επικρατέστερων διαμορφώσεων του ηλεκτρικού μέρους των ανεμογεννητριών και παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά της κάθε μιας διάταξης.

Στο τρίτο κεφάλαιο αναλύονται αρχικά τα κατασκευαστικά υλικά των ηλεκτρικών μηχανών, ενώ ακολούθως παρουσιάζονται οι θεμελιώδεις σχέσεις της προκαταρκτικής σχεδίασης. Στη συνέχεια, γίνεται αναλυτική παρουσίαση και σύγκριση των διάφορων τύπων μηχανών μόνιμων μαγνητών, αναφορικά με την διάταξη, τη μαγνήτιση και την τοποθέτησή τους. Τέλος, επεξηγείται η επιλογή του κατάλληλου τυλίγματος για την συγκεκριμένη εφαρμογή, η οποία είναι το συγκεντρωμένο τύλιγμα κλασματικού βήματος διπλής στρώσης.

Στο τέταρτο κεφάλαιο γίνεται εκτενής παρουσίαση της γεννήτριας που σχεδιάστηκε αρχικά και αιτιολογείται κάθε σημείο της σχεδίασης αυτής, μέσω της αναλυτικής παρουσίασης της προκαταρκτικής της σχεδίασης. Στη συνέχεια γίνεται η επίλυση του μαγνητοστατικού προβλήματος, που περιγράφει την γεωμετρία του μαγνητικού κυκλώματος της μηχανής, με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων.

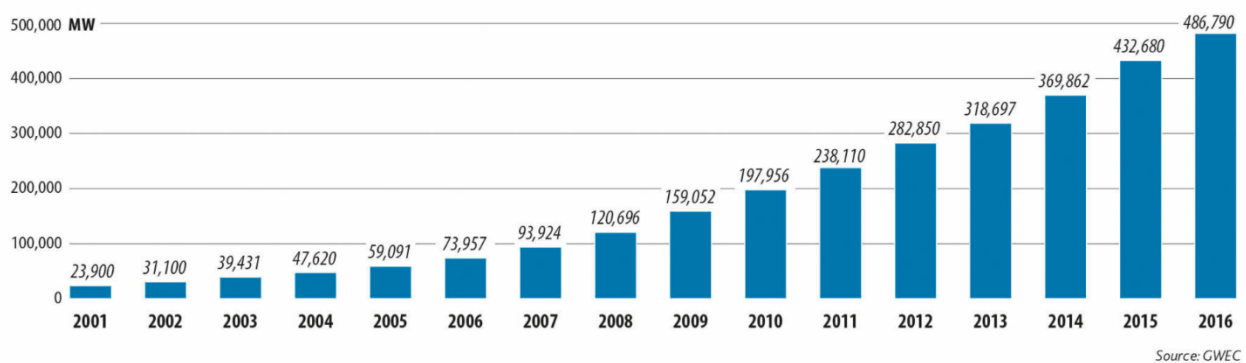
Τέλος, πραγματοποιείται ανάλυση ευαισθησίας παραμέτρων στα μεγέθη που επηρεάζουν πιο πολύ την επίδοση και την απόδοσης της γεννήτριας.

Στο πέμπτο κεφάλαιο συγκεντρώνονται τα κύρια συμπεράσματα που προέκυψαν με την περάτωση της εργασίας και αναφέρονται και τα σημεία καινοτομίας της. Το κεφάλαιο ολοκληρώνεται με μια σειρά προτάσεων για περαιτέρω διερεύνηση.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. Αιολικά συστήματα ενέργειας

Η πληθυσμιακή αύξηση σε συνδυασμό με την προσπάθεια του ανθρώπου να βελτιώσει το βιοτικό του επίπεδο έχουν σαν αποτέλεσμα την όξυνση του ενεργειακού προβλήματος. Το ενεργειακό πρόβλημα συσχετίζει τα ενεργειακά αποθέματα των ορυκτών καυσίμων που διαρκώς μειώνονται με τις απαιτήσεις για κατανάλωση ενέργειας που διαρκώς αυξάνονται. Επιπλέον, η αλόγιστη χρήση των συμβατικών καυσίμων έχει οδηγήσει στην αύξηση των ρύπων που εκπέμπονται στην ατμόσφαιρα, καθώς και τον λεγόμενων αέριων του θερμοκηπίου, τα οποία θεωρούνται παράγοντες ενδεχόμενης κλιματικής αλλαγής. Επομένως, το ενεργειακό πρόβλημα και η ρύπανση του περιβάλλοντος έχουν αποκτήσει ιδιαίτερη σημασία και η επίλυση τους έχει γίνει επιτακτική ανάγκη για το μέλλον της ανθρωπότητας. Η πιο ρεαλιστική λύση στα ενεργειακά και περιβαλλοντικά προβλήματα είναι οι Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ).

Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας είναι οι μη ορυκτές ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, δηλαδή η αιολική, η ηλιακή και η γεωθερμική ενέργεια, η ενέργεια κυμάτων, η παλιρροϊκή ενέργεια, η υδραυλική ενέργεια, τα αέρια τα εκλούμενα από χώρους υγειονομικής ταφής, από εγκαταστάσεις βιολογικού καθαρισμού και τα βιοαέρια. Ειδικά, η αιολική ενέργεια αποτελεί μια από τις σημαντικότερες ΑΠΕ και έχει προσελκύσει μεγάλο ενδιαφέρον τα τελευταία χρόνια. Σύμφωνα με το Παγκόσμια Συμβούλιο Αιολικής Ενέργειας (G.W.E.C.), η παγκόσμια εγκατεστημένη αιολική ισχύς στο τέλος του 2016 ανερχόταν στα 487 GW (σχήμα 2.1) και αναμένεται σχεδόν να διπλασιαστεί τα επόμενα 5 χρόνια.



Σχήμα 2.1 Παγκόσμια εγκατεστημένη αιολική ισχύς τα έτη 2009-2016[1]

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται οι εισαγωγικές έννοιες οι οποίες θα επιτρέψουν την καλύτερη κατανόηση της ενεργειακής αξιοποίησης της αιολικής ενέργειας.

2.1 Αεροδυναμικό μέρος

Ο ρόλος μιας αιολικής μηχανής είναι να δεσμεύει την κινητική ενέργεια του ανέμου και να την μετατρέπει σε μηχανική ενέργεια άλλης μορφής ή, συνηθέστερα, σε ηλεκτρισμό. Η κινητική ισχύς, εκφρασμένη σε (W) δεδομένου όγκου αέρα ο οποίος κινείται με ταχύτητα u , ισούται με:

$$P = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot u^3 \quad (2.1)$$

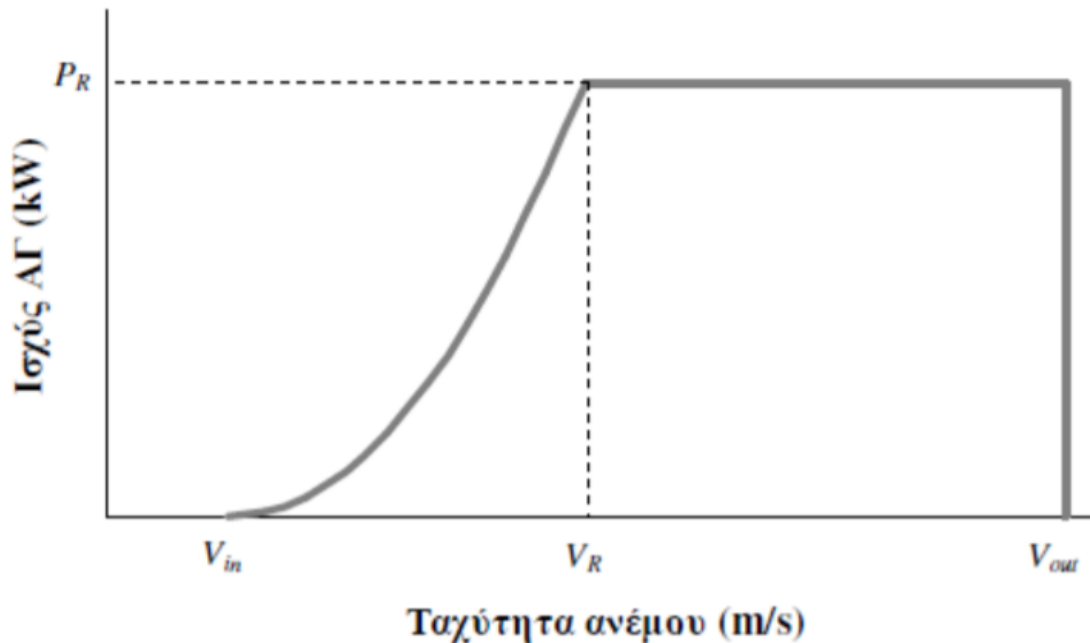
Η ισχύς η οποία υπολογίζεται με την βοήθεια της σχέσης (2.1) είναι η μέγιστη ισχύς την οποία θα μπορούσε να συλλέξει θεωρητικά η αιολική μηχανή. Ωστόσο, η πραγματική συλλεγόμενη ισχύς υπολογίζεται πολλαπλασιάζοντας την σχέση (2.1) επί μια αδιάστατη παράμετρο, η οποία ονομάζεται συντελεστής ισχύος C_p και ισούται με:

$$P_{\pi} = \frac{1}{2} \cdot C_p \cdot \rho \cdot A \cdot u^3 \quad (2.2)$$

Σύμφωνα με το κριτήριο του Betz, η μέγιστη ισχύς που μπορεί να συλλέξει μια δεδομένη αιολική μηχανή, για δεδομένη τιμή της ταχύτητας του ανέμου, λαμβάνεται όταν η τιμή του συντελεστή ισχύος είναι 0,593. Με άλλα λόγια, η ανεμογεννήτρια δεν μπορεί να δεσμεύσει περισσότερο από το 60% περίπου της ισχύος του ανέμου, διότι ο αέρας πρέπει να διατηρήσει ένα μέρος της κινητικής του ενέργειας για να μη δημιουργηθεί ασυνέχεια στη ροή του. Ωστόσο, σε πρακτικές εφαρμογές επιτυγχάνεται συντελεστής ισχύος λίγο χαμηλότερος από

0,5 για εφαρμογές υψηλών ταχυτήτων με δύο πτερύγια, και μεταξύ 0,2-0,4 για εφαρμογές χαμηλής ταχύτητας με παραπάνω πτερύγια [2].

Οι αιολικές μηχανές χαρακτηρίζονται από την λεγόμενη καμπύλη ισχύος (σχήμα 2.2)



Σχήμα 2.2 Καμπύλη ισχύος ανεμογεννητριών[3]

Από το σχήμα προκύπτει ότι η αιολική μηχανή αρχίζει να λειτουργεί από μία ελάχιστη τιμή της ταχύτητας του ανέμου, η οποία ονομάζεται ταχύτητα κατωφλίου. Αυτή συνήθως είναι περί τα 5 ms^{-1} , αλλά μπορεί να μεταβάλλεται αναλόγως της τοποθεσίας στην οποία είναι εγκατεστημένη η μηχανή. Αυξανόμενης της ταχύτητας, αυξάνεται και η ισχύς μέχρις ότου φτάσει σε μία μέγιστη τιμή. Η τιμή αυτή είναι η ονομαστική ισχύς της μηχανής και η ταχύτητα η οποία αντιστοιχεί είναι η ονομαστική ταχύτητα. Η ονομαστική ταχύτητα επιλέγεται ώστε να είναι συμβατή με τα ανεμολογικά στοιχεία της περιοχής στην οποία θα τοποθετηθεί η μηχανή. Συνήθως επιλέγεται 1,5 φορά μεγαλύτερη από την μέση ετήσια ταχύτητα του ανέμου στην περιοχή. Στις περισσότερες περιπτώσεις, η ονομαστική ταχύτητα κυμαίνεται μεταξύ 10 έως 15 ms^{-1} .

Για ταχύτητες του ανέμου μεγαλύτερες της ονομαστικής, η αιολική μηχανή εξακολουθεί να παράγει την μέγιστη ονομαστική της ισχύ, αλλά είναι αυτονόητο ότι παύει να λειτουργεί σε συνθήκες μέγιστης απόδοσης. Όταν η ταχύτητα του ανέμου υπερβεί μια συγκεκριμένη τιμή,

συνήθως τα 25ms^{-1} , τότε η λειτουργία της αιολικής μηχανής διακόπτεται. Αυτό συμβαίνει γιατί η λειτουργία της μηχανής για παρατεταμένο χρονικό διάστημα σε συνθήκες ισχύος μεγαλύτερης της ονομαστικής, μπορεί να προκαλέσει φθορές στην ηλεκτρογεννήτρια καθώς και μηχανικές βλάβες στα διάφορα κινούμενα και μη μέρη της μηχανής [4].

2.2 Βασικοί τύποι ανεμογεννητριών

Οι επικρατέστεροι τύποι ανεμογεννητριών ταξινομούνται κυρίως σύμφωνα με τον προσανατολισμό των αξόνων τους σε σχέση με την ροή του ανέμου. Ως εκ τούτου, οι πλέον διαδεδομένοι τύποι ανεμογεννητριών είναι οι ανεμογεννήτριες οριζόντιου και οι ανεμογεννήτριες κατακόρυφου άξονα.

2.2.1 Οριζόντιου άξονα

Οι ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα έχουν τον άξονα τους παράλληλο προς την επιφάνεια της γης. Σε αυτές συγκαταλέγονται οι κλασικοί παραδοσιακοί ανεμόμυλοι, καθώς και οι αργές μηχανές πολλών πτερυγίων (αμερικανικού τύπου), οι οποίες στις μέρες μας έχουν εγκαταλειφθεί λόγω των περιορισμένων διαστάσεων τους και της χαμηλής περιφερειακής ταχύτητας. Από την άλλη πλευρά, οι ανεμογεννήτριες τύπου “έλικας” (σχήμα 2.3) περιλαμβάνονται στην κατηγορία των αιολικών μηχανών οριζόντιου άξονα και καλύπτουν το 90% περίπου του συνόλου των εγκατεστημένων παγκοσμίως μηχανών. Εμφανίζουν σημαντικές περιφερειακές ταχύτητες και τα πτερύγια τους, που είναι συνήθως ένα έως τρία, βασίζονται στην τεχνολογία των αεροπορικών και ελικοπτερικών ελίκων.

Οι ανεμογεννήτριες οριζοντίου άξονα έχουν τον κύριο άξονα του ρότορα τους και την γεννήτρια ηλεκτρικού ρεύματος τοποθετημένα στην κορυφή ενός πύργου, ενώ πάντα θα πρέπει να είναι στραμμένες προς τον άνεμο. Οι μικρές ανεμογεννήτριες προσανατολίζονται προς τον άνεμο μέσω ενός απλού ανεμοδείκτη, που τοποθετείται στην ίδια ευθεία με το ρότορα, ενώ οι μεγάλες ανεμογεννήτριες χρησιμοποιούν έναν αισθητήρα ανίχνευσης της φοράς του ανέμου σε συνδυασμό με ένα σερβοκινητήρα, ο οποίος στρέφει την ανεμογεννήτρια προς την κατεύθυνση του ανέμου. Οι περισσότερες μεγάλες ανεμογεννήτριες περιλαμβάνουν ένα κιβώτιο ταχυτήτων που μετατρέπει την αργή περιστροφή του ρότορα σε μια ταχύτερη και πιο κατάλληλη για την οδήγηση μιας ηλεκτρογεννήτριας.



Σχήμα 2.3 Ανεμογεννήτρια οριζόντιου άξονα [5]

2.2.2 Κατακόρυφου άξονα

Οι ανεμογεννήτριες κατακόρυφου άξονα περιστρέφονται γύρω από έναν άξονα κάθετο τόσο στη διεύθυνση του ανέμου όσο και στο έδαφος και αυτό τους επιτρέπει την εύκολη και γρήγορη περιστροφή τους σε οποιοδήποτε είδος ανέμου και από οποιοδήποτε σημείο του ορίζοντα αυτό προέρχεται.

Οι συγκεκριμένοι τύποι ανεμογεννητριών αποτελούν μια πολύ καλή επιλογή στην περίπτωση που κάποιος θελήσει να κατασκευάσει μια μηχανή με ονομαστική ισχύς της τάξεως του 1MW και αυτό γιατί ένα άλλο σημαντικό και πολύ πρακτικό πλεονέκτημα που παρουσιάζουν είναι ότι οι μηχανισμοί και η γεννήτρια βρίσκονται κατά κανόνα στο έδαφος, με αποτέλεσμα να απαιτείται ελαφρότερος πυλώνας και άρα να διευκολύνεται η λειτουργία και η συντήρηση του όλου συστήματος. Όσο αναφορά τώρα το σύστημα μετάδοσης της κίνησης, θα πρέπει να πούμε ότι δε παρουσιάζει ιδιαίτερες διαφορές σε σύγκριση με το αντίστοιχο, συστημάτων

μηχανών οριζόντιου άξονα, αν εξαιρέσουμε βέβαια το γεγονός ότι τα εξαρτήματα είναι τοποθετημένα

κατακόρυφα. Ο δρομέας της μηχανής στηρίζεται σε κατάλληλο έδρανο στη βάση του, το οποίο ακόμα και σε σταθερή ταχύτητα ανέμου καταπονείται από εναλλασσόμενα φορτία. Επίσης, πολύ σημαντική είναι και η τοποθέτηση κάποιων καλωδίων τα οποία συνδέουν την κορυφή της μηχανής με το έδαφος και τα οποία βοηθούν τη μηχανή να διατηρηθεί σε κατακόρυφη θέση.



Σχήμα 2.4 Ανεμογεννήτρια κατακόρυφου άξονα [6]

2.2.3 Σύγκριση ανεμογεννητριών οριζόντιου και κάθετου άξονα

Παρακάτω παρουσιάζεται μια σύγκριση των δύο τύπων των ανεμογεννητριών που αφορά την σχεδίαση-κατασκευή τους και την απόδοσή τους.

Καταρχάς, οι ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα είναι πιο δύσκολες κατασκευαστικά και ασύμφορες οικονομικά. Ο λόγος είναι ότι αφενός, στις ανεμογεννήτριες κάθετου άξονα η τοποθέτηση των πτερυγίων είναι ευκολότερη. Αφετέρου, δεν υπάρχει η ανάγκη για

μηχανισμό φρεναρίσματος σε υψηλές ταχύτητες ανέμου, σε αντίθεση με την αναγκαστική τοποθέτηση της γεννήτριας και του κιβωτίου ταχυτήτων πάνω στον πύργο των ανεμογεννητριών οριζόντιου άξονα.

Επιπλέον, οι ανεμογεννήτριες κάθετου άξονα δεν χρειάζονται μηχανισμό προσανατολισμού της μηχανής με τον άνεμο σε αντίθεση με τις ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα στις οποίες απαιτείται προσανατολισμός στην κατεύθυνση του ανέμου μέσω ενεργού μηχανισμού περιστροφής. Έτσι οι ανεμογεννήτριες κάθετου άξονα είναι καταλληλότερες σε τοποθεσίες όπου ο αέρας δεν είναι σταθερός ή που περιβάλλονται από κάποια μικρά εμπόδια (με σημαντικά μειωμένη απόδοση όμως).[7]

Στη συνέχεια, οι ανεμογεννήτριες κάθετου άξονα είναι ασφαλέστερες διότι δεν υπάρχει ο κίνδυνος να σπάσει κάποιο πτερύγιο, ούτε κινούνται με την μεγάλη ταχύτητα στροφών που κινούνται οι ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα. Ωστόσο, οι ανεμογεννήτριες κάθετου άξονα έχουν πολύ χαμηλή απόδοση. Αυτό παρατηρείται σε μεγάλο βαθμό στον τύπο ανεμογεννητριών κατακόρυφου άξονα τύπου Savonius (Σχήμα 2.5) όπου η απόδοση δεν ξεπερνά το 15% αλλά και στους άλλους τύπους σε μικρότερο βαθμό. Αξίζει να αναφερθεί ότι μια καλή μικρή ανεμογεννήτρια οριζόντιου άξονα έχει μέση απόδοση 30%-40%. Συνεπώς, για να επιτύχει μια ανεμογεννήτρια κάθετου άξονα την ίδια περίπου παραγωγή με μια οριζόντιου άξονα, θα πρέπει η κάθετου άξονα να έχει μέχρι και τριπλάσια επιφάνεια επαφής με τον αέρα. Αυτό συνεπάγεται μεγάλο όγκο και βάρος της κατασκευής [8].

Κλείνοντας, οι ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα δεν απαιτούν πολύ υψηλές ταχύτητες ανέμου για να ξεκινήσουν να περιστρέφονται, με αποτέλεσμα και στις πιο μικρές ταχύτητες ανέμου να έχουμε ικανοποιητικά αποτελέσματα. Αντίθετα, οι ανεμογεννήτριες κάθετου άξονα, λόγω χαμηλότερων στροφών περιστροφής, χρειάζονται πιο ισχυρούς ανέμους για να ξεκινήσουν την φόρτιση των συσσωρευτών (με δεδομένο το ίδιο μοτέρ σε οριζόντιου άξονα ανεμογεννήτρια).



Σχήμα 2.5 Ανεμογεννήτρια κατακόρυφου άξονα τύπου Savonius[9]

2.3 Μέθοδοι λειτουργίας ανεμογεννητριών

Υπάρχουν δύο βασικές μέθοδοι λειτουργίας των συστημάτων μετατροπής της αιολικής ενέργειας σε ηλεκτρική . Η μέθοδος λειτουργίας σταθερών στροφών (fixed speed) και η μέθοδος λειτουργίας μεταβλητών στροφών (variable speed).

2.3.1 Σταθερών στροφών

Οι ανεμογεννήτριες σταθερών στροφών λειτουργούν με σταθερή ταχύτητα δρομέα ανεξαρτήτως την ταχύτητα του ανέμου. Η ταχύτητα τους εξαρτάται από την συχνότητα του δικτύου, το κιβώτιο ταχυτήτων και τον αριθμό των ζευγών των πόλων της γεννήτριας. Οι ανεμογεννήτριες αυτές χρωστάνε τη μεγάλη εξάπλωσή τους κυρίως στο μικρό τους κόστος, αφού για τη σύνδεσή τους με το δίκτυο δε χρειάζεται να παρεμβάλλονται ηλεκτρονικοί μετατροπείς, των οποίων το κόστος είναι πολύ σημαντικό. Ακόμα, οι ανεμογεννήτριες αυτού του είδους παρουσιάζουν και τα πλεονεκτήματα της εξαιρετικής απλότητας, της εξαιρετικής αξιοπιστίας, καθώς και των μηδενικών αναγκών συντήρησής τους. Ωστόσο, παρουσιάζουν σοβαρές μηχανικές καταπονήσεις σε απότομες αεροδυναμικές μεταβολές, έλλειψη ελέγχου

της κατανάλωσης έργου ισχύος και της ποιότητας της παραγόμενης ενέργειας καθώς και δημιουργία μεταβατικών διαταραχών στο δίκτυο από τις αναταράξεις του ανέμου. Τα παραπάνω προβλήματα ,οδήγησαν το επιστημονικό ενδιαφέρον όσο και των κατασκευαστών προς τις ανεμογεννήτριες μεταβλητών στροφών, οι οποίες φαίνονται να δίνουν εάν όχι ριζική, τουλάχιστον ικανοποιητική λύση σε πολλά από τα παραπάνω.

2.3.2 Μεταβλητών στροφών

Οι ανεμογεννήτριες μεταβλητών στροφών σχεδιάζονται με τρόπο ώστε να λειτουργούν σε μεγάλο εύρος ταχυτήτων του ανέμου με στόχο την επίτευξη της μέγιστης αεροδυναμικής απόδοσης. Η λειτουργία τους με μεταβλητές στροφές επιτρέπει την προσαρμογή της γωνιακής ταχύτητας του δρομέα της ανεμογεννήτριας σε κάθε ταχύτητα ανέμου. Πιο συγκεκριμένα, σε αντίθεση με τη διάταξη σταθερών στροφών, η διάταξη μεταβλητών στροφών διατηρεί τη ροπή της γεννήτριας σχεδόν σταθερή και οι διακυμάνσεις της ισχύος που προκαλούνται από μεταβολές του ανέμου αποσβένονται μέσω της αλλαγής της ταχύτητας του δρομέα. Το ηλεκτρικό σύστημα των ανεμογεννητριών μεταβλητών στροφών είναι πιο περίπλοκο από το αντίστοιχο των σταθερών στροφών. Συνήθως αποτελούνται από μια επαγωγική ή σύγχρονη γεννήτρια που συνδέεται στο δίκτυο μέσω ενός μετατροπέα ισχύος ο οποίος ελέγχει την ταχύτητα της γεννήτριας. Συνεπώς, οι διακυμάνσεις ισχύος λόγω των διακυμάνσεων του ανέμου απορροφώνται από τις αλλαγές στην ταχύτητα του δρομέα. Τα πλεονεκτήματά αυτής της διάταξης είναι η βελτιωμένη ποιότητα ισχύος που παράγουν και η μειωμένη καταπόνηση των μηχανικών μερών της ανεμογεννήτριας. Τα μειονεκτήματα των ανεμογεννητριών μεταβλητών στροφών, μπορούν να τοποθετηθούν κυρίως στον οικονομικό τομέα. Ειδικότερα, τα χρησιμοποιούμενα ηλεκτρονικά ισχύος επιβαρύνουν κατά πολύ το κόστος τους, μιας και αυτά αντιπροσωπεύουν από οικονομικής πλευράς το μεγαλύτερο μέρος του ηλεκτρολογικού εξοπλισμού.

2.4 Γεννήτριες στα αιολικά συστήματα ενέργειας

Το βασικό συστατικό στοιχείο μιας ανεμογεννήτριας είναι η γεννήτρια της. Σ' αυτό το κεφάλαιο γίνεται αναφορά στις διαφορετικές τοπολογίες ηλεκτρικών μηχανών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν στις ανεμογεννήτριες κατακόρυφου άξονα.

2.4.1 Μηχανές Συνεχούς Ρεύματος

Οι μηχανές Συνεχούς ρεύματος χρησιμοποιούνται σε περιορισμένη έκταση, σε μικρές κυρίως μονάδες και ιδίως όταν πρόκειται να φορτιστούν συσσωρευτές. Αυτό συμβαίνει διότι, οι μηχανές συνεχούς ρεύματος παρουσιάζουν υψηλές απαιτήσεις συντήρησης, λόγω του συστήματος ψηκτρών συλλέκτη. Επιπλέον, δεν υπάρχει η δυνατότητα παράλληλης λειτουργίας με τα δίκτυα αλλά και αδυναμία τροφοδοτήσεων συσκευών που είναι κατάλληλες μόνο για εναλλασσόμενο ρεύμα.

2.4.2 Ασύγχρονες Μηχανές

Στις ασύγχρονες μηχανές (ή μηχανές επαγωγής) η τάση στον δρομέα, η οποία παράγει το ρεύμα διέγερσης και το πεδίο του δρομέα, ουσιαστικά επάγεται στο κύκλωμα διέγερσης αντί να προσφέρεται σε αυτό με κάποια ηλεκτρική σύνδεση. Διακρίνονται στις μηχανές βραχυκυκλωμένου κλωβού και στις μηχανές δακτυλιοφόρου δρομέα (σχήμα 2.6).

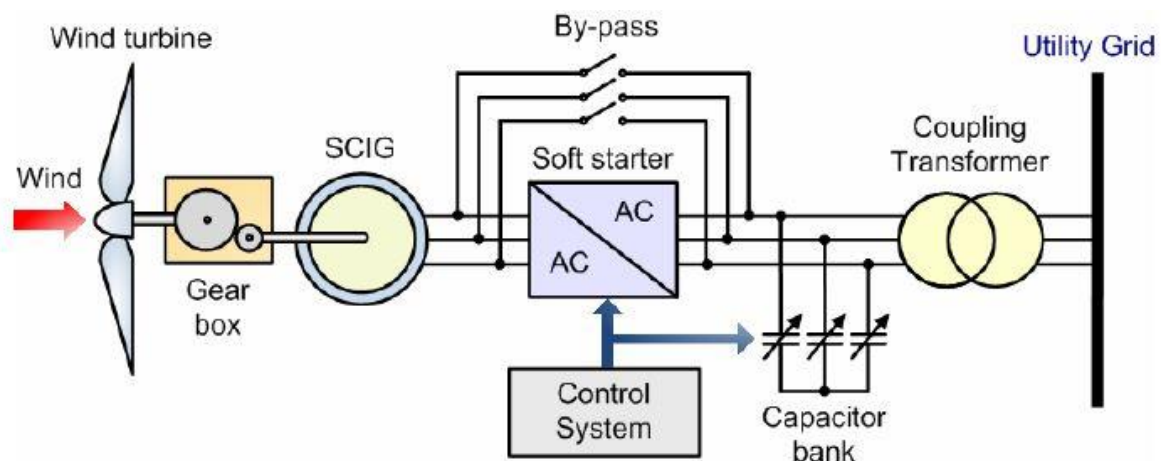


Σχήμα 2.6 Ασύγχρονη μηχανή βραχυκυκλωμένου κλωβού(αριστερά) και δακτυλιοφόρου δρομέα(δεξιά)[10]

2.4.2.1 Βραχυκυκλωμένου κλωβού

Η επαγωγική γεννήτρια βραχυκυκλωμένου κλωβού (SCIG - Squirrel Cage Induction Generator) είναι η γεννήτρια που χρησιμοποιείται κατά κύριο λόγο στις ανεμογεννήτριες σταθερής ταχύτητας. Ο λόγος για την χρήση αυτής της γεννήτριας σε συστήματα σταθερής ταχύτητας είναι ότι μεταβάλλει κατά ένα μικρό ποσοστό την ταχύτητα της εξαιτίας της ολίσθησης της, η οποία οφείλεται στις αλλαγές της ταχύτητας του ανέμου. . Η γεννήτρια και

ο άξονας της ανεμογεννήτριας συνδέονται μέσω του κιβωτίου ταχυτήτων καθώς η βέλτιστη προσδοκώμενη τιμή της ταχύτητας του άξονα είναι διαφορετική από αυτή της γεννήτριας. Αυτές οι γεννήτριες έχουν σαν χαρακτηριστικό τις απότομες αλλαγές στη ροπή με αποτέλεσμα οι διαταραχές του ανέμου να περνούν απευθείας στο δίκτυο. Οι διαταραχές αυτές παίζουν σημαντικό ρόλο κατά την σύνδεση της γεννήτριας στο δίκτυο, όπου το μεταβατικό ρεύμα μπορεί να υπερβεί την ονομαστική τιμή του 7-8 φορές. Αν αυτό το υψηλό μεταβατικό ρεύμα συνδυαστεί και με αδύναμο δίκτυο μπορεί να προκαλέσει διαταραχές στην τάση. Γι' αυτό τον λόγο η σύνδεση της γεννήτριας με το δίκτυο γίνεται σταδιακά προκειμένου να μειωθεί το μεταβατικό ρεύμα. Όσον αφορά την σχέση μεταξύ της ενεργού και άεργου ισχύος καθώς και της ταχύτητας του δρομέα, η ανεμογεννήτρια με SCIG σε υψηλές ταχύτητες ανέμου μπορεί να παράγει περισσότερη ενεργό ισχύ μόνο αν απορροφήσει περισσότερη άεργο ισχύ. Στην περίπτωση που δεν υπάρχουν οι απαραίτητες διατάξεις για την παροχή της άεργου ισχύος (σύνδεση πυκνωτών) που ζητάει η γεννήτρια, τότε αυτή προέρχεται από το δίκτυο. Ωστόσο, η διαδικασία αυτή μας δημιουργεί περαιτέρω προβλήματα ,όπως επιπρόσθετες απώλειες μεταφοράς και σε κάποιες περιπτώσεις μετατροπή του δικτύου σε ασταθές. Παρακάτω φαίνεται η τοπολογία μιας ανεμογεννήτριας με επαγωγική γεννήτρια βραχυκυκλωμένου κλωβού.



Σχήμα 2.7 Τοπολογία αιολικού συστήματος με επαγωγική γεννήτρια βραχυκυκλωμένου κλωβού(SCIG) [11]

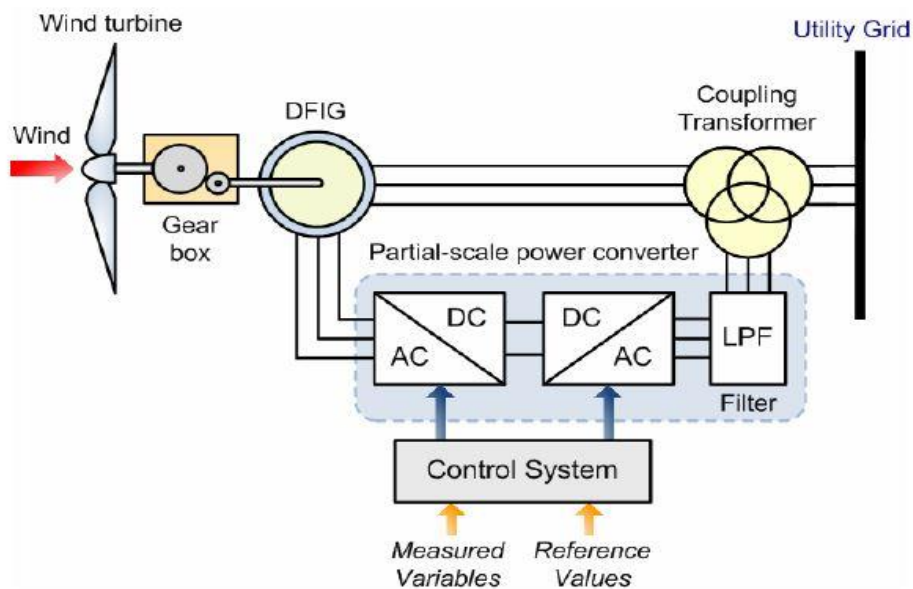
2.4.2.2 Δακτυλιοφόρου δρομέα

Στην βιομηχανία των ανεμογεννητριών συναντάμε συνήθως τους εξής δύο τύπους επαγωγικών γεννητριών δακτυλιοφόρου δρομέα, την επαγωγική γεννήτρια με ηλεκτρονικά μεταβαλλόμενη αντίσταση δρομέα (OSIG) και την επαγωγική γεννήτρια διπλής τροφοδοσίας (DFIG).

- Η επαγωγική γεννήτρια με ηλεκτρονικά μεταβαλλόμενη αντίσταση δρομέα (OSIG - Opti Slip Induction Generator) είναι μια επαγωγική γεννήτρια δακτυλιοφόρου δρομέα με μια μεταβλητή εξωτερική αντίσταση στο δρομέα, προσαρμοσμένη στα τυλίγματα του. Το εύρος της μεταβολής της ταχύτητας είναι περιορισμένο (0-10%) και εξαρτάται από το μέγεθος της μεταβλητής αντίστασης του δρομέα. Η μεταβλητή ολίσθηση είναι πολύ απλή, αξιόπιστη και πολύ αποτελεσματική στη μείωση των φορτίων σε σχέση με άλλες πιο πολύπλοκες λύσεις. Το πλεονέκτημα αυτού του τύπου γεννήτριας είναι ότι με μια σχετικά απλή τοπολογία του κυκλώματος του δρομέα, χωρίς απαραίτητα να υπάρχουν δακτύλιοι ολίσθησης, παρέχεται μεγαλύτερο εύρος ταχύτητας από την επαγωγική γεννήτρια βραχυκυκλωμένου κλωβού, ενώ παράλληλα μειώνονται τα μηχανικά φορτία αλλά και οι διαταραχές στην ενέργεια που οφείλονται στις ριπές του ανέμου. Ωστόσο, επειδή πρόκειται για μία ασύγχρονη επαγωγική γεννήτρια, είναι απαραίτητο ένα κύκλωμα αντιστάθμισης άεργου ισχύος.

- Η εξέλιξη της επαγωγικής γεννήτριας με μεταβαλλόμενη αντίσταση δρομέα είναι η επαγωγική γεννήτρια διπλής τροφοδοσίας (DFIG – Doubly Fed Induction Generator). Στην περίπτωση της DFIG η μεταβλητή αντίσταση στο δρομέα έχει αντικατασταθεί από έναν back to back IGBT μετατροπέα πηγής τάσης που συνδέεται στο δίκτυο, ενώ τα τυλίγματα του στάτη συνδέονται απευθείας στο δίκτυο (σχήμα 2.8). Ο back to back μετατροπέας αποτελείται από δύο μέρη. Το σύστημα αυτό επιτρέπει τη λειτουργία μεταβλητής ταχύτητας με ένα αρκετά μεγάλο εύρος. Τόσο στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας όσο και σε περίπτωση σφάλματος, η συμπεριφορά της γεννήτριας καθορίζεται πλήρως από το μετατροπέα και τους ελεγκτές του. Πιο συγκεκριμένα, ο μετατροπέας στην πλευρά του δρομέα ελέγχει την ενεργό και άεργο ισχύ της μηχανής μέσω ελέγχου του ρεύματος του δρομέα, ενώ ο μετατροπέας στην πλευρά του δικτύου ελέγχει την τάση στην dc διασύνδεση και διασφαλίζει λειτουργία με μοναδιαίο συντελεστή ισχύος. Ανάλογα με τη λειτουργία, η ισχύς του δρομέα μπορεί να μεταφερθεί και προς τις δύο κατευθύνσεις.

Στην υπερσύγχρονη λειτουργία όπου η ολίσθηση είναι αρνητική, έχουμε ροή ισχύος από το δρομέα μέσω του μετατροπέα στο δίκτυο, ενώ στην υποσύγχρονη λειτουργία (θετική ολίσθηση), η ροή ισχύος είναι αντίθετη. Και στις δύο αυτές περιπτώσεις, ο στάτης παρέχει ενέργεια στο δίκτυο. Έτσι, σε αντίθεση με την επαγωγική γεννήτρια με ηλεκτρονικά μεταβαλλόμενη αντίσταση δρομέα, η επαγωγική γεννήτρια διπλής τροφοδοσίας οδηγεί στο δίκτυο την αυξημένη ισχύ του δρομέα χωρίς αυτή να χάνεται σε ωμικές αντιστάσεις. Η επαγωγική γεννήτρια διπλής τροφοδοσίας δεν είναι απαραίτητο να μαγνητίζεται από το δίκτυο αλλά αυτό μπορεί να γίνει και από το κύκλωμα του δρομέα. Επίσης, είναι ικανή να παράγει άεργο ισχύ η οποία μπορεί να μεταφερθεί στο στάτη μέσω του μετατροπέα στην πλευρά του δικτύου. Σε περίπτωση που υπάρχει ένα αδύναμο δίκτυο, η επαγωγική γεννήτρια διπλής τροφοδοσίας μπορεί να παράγει ή να απορροφήσει κάποιο ποσό άεργου ισχύος προς ή από το δίκτυο, προκειμένου να γίνει έλεγχος της τάσης. Το μέγεθος του μετατροπέα δε σχετίζεται με τη συνολική ισχύ της γεννήτριας αλλά με το επιλεγμένο εύρος ρύθμισης της ταχύτητας. Έτσι ότι κερδίζουμε σε κόστος το χάνουμε σε δυνατότητα εύρους της μεταβλητής ταχύτητας. Επιπλέον μειονέκτημα της επαγωγικής γεννήτριας διπλής τροφοδοσίας είναι ότι οι δακτύλιοι ολίσθησης είναι απαραίτητοι με όλα τα προβλήματα που συνεπάγονται από την χρήση τους [12].



Σχήμα 2.8 Τοπολογία αιολικού συστήματος με επαγωγική γεννήτρια διπλής τροφοδοσίας (DFIG)[11]

2.4.3 Σύγχρονες Μηχανές

Η λειτουργία της σύγχρονης γεννήτριας οφείλεται στην προσπάθεια ευθυγράμμισης δύο ηλεκτρομαγνητικών πεδίων, ανεξάρτητων μεταξύ τους, του μαγνητικού πεδίου διέγερσης και του αντίστοιχου που δημιουργεί το τύλιγμα του επαγωγίμου. Καλείται σύγχρονη, επειδή η ταχύτητα του δρομέα είναι η ίδια ταχύτητα με την ταχύτητα του περιστρεφόμενου μαγνητικού πεδίου στον στάτη. Το μμαγνητικό πεδίο στις σύγχρονες γεννήτριες μπορεί να δημιουργηθεί με τη χρήση μόνιμων μαγνητών, ή συμβατικών τυλιγμάτων στο δρομέα. Το σημαντικό πλεονέκτημα που παρουσιάζουν είναι η δυνατότητα για έλεγχο πλήρους ισχύος με την χρήση ηλεκτρονικού μετατροπέα για την σύνδεση τους στο δίκτυο. Πιο συγκεκριμένα, ο μετατροπέας κάνει απόσβεση των διαταραχών της ισχύος που οφείλονται στις ριπές του ανέμου και επίσης των μεταβατικών φαινομένων που έρχονται από το δίκτυο. Επιπροσθέτως χρησιμοποιείται προκειμένου η συχνότητα λειτουργίας της μηχανής να συγχρονιστεί με τη συχνότητα του δικτύου. Συνεπώς μια τέτοια γεννήτρια επιτρέπει τη λειτουργία με μεταβλητή ταχύτητα στην ανεμογεννήτρια. Οι δύο τύποι σύγχρονων γεννητριών που συναντάμε στην βιομηχανία ανεμογεννητριών είναι : η σύγχρονη δακτυλιοφόρου δρομέα (WRSG) και η σύγχρονη μόνιμου μαγνήτη (PMSG).

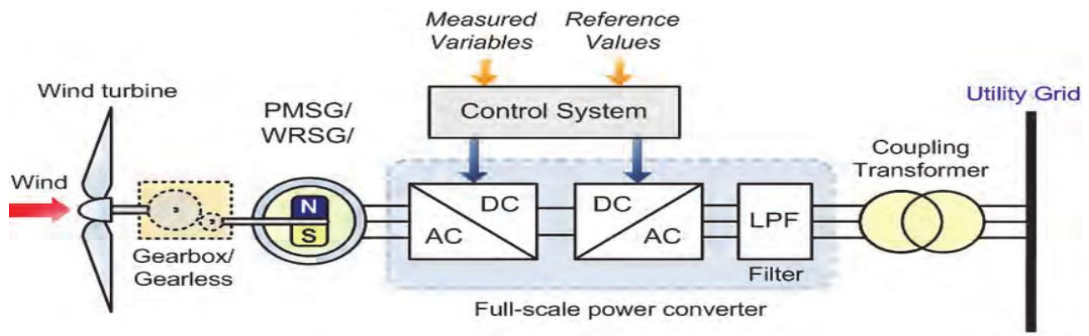
2.4.3.2 Δακτυλιοφόρου Δρομέα

Η σύγχρονη γεννήτρια δακτυλιοφόρου δρομέα (WRSG-Wounded Rotor Synchronous Generator) είναι η βασική μηχανή που χρησιμοποιείται στη βιομηχανία ηλεκτρικής ισχύος. Τα τυλίγματα του στάτη της γεννήτριας αυτής είναι συνδεδεμένα απευθείας με το δίκτυο με αποτέλεσμα η ταχύτητα περιστροφής του δρομέα της καθορίζεται αυστηρά από τη συχνότητα του δικτύου. Η διέγερση των τυλιγμάτων του δρομέα γίνεται με συνεχές ρεύμα χρησιμοποιώντας δακτυλίους ολίσθησης και ψήκτρες ή με περιστρεφόμενο ανορθωτή. Η ταχύτητα της σύγχρονης γεννήτριας καθορίζεται από τη συχνότητα του περιστρεφόμενου πεδίου και από τον αριθμό των ζευγών πόλων του δρομέα. Οι κατασκευαστές ανεμογεννητριών χρησιμοποίησαν μια σύγχρονη γεννήτρια δακτυλιοφόρου δρομέα στα αιολικά συστήματα μεταβλητών στροφών μεταβλητής ταχύτητας με πλήρως ελεγχόμενο μετατροπέα συχνότητας. Συγκεκριμένα, η γεννήτρια ήταν πολυπολική και χαμηλής ταχύτητας και δε χρειαζόταν κιβώτιο ταχυτήτων.

Όμως, το κόστος για τη λειτουργία χωρίς κιβώτιο ταχυτήτων ήταν η χρήση μιας μεγάλου μεγέθους και βάρους γεννήτρια με έναν πλήρως ελεγχόμενο ηλεκτρονικό μετατροπέα ισχύος, ο οποίος θα ελέγχει τη συνολική ισχύ του συστήματος. Τέλος, έχουν κατασκευαστεί και ανεμογεννήτριες με χρήση τετραπολικής γεννήτριας και κιβωτίου ταχυτήτων.

2.4.3.2 Μόνιμου Μαγνήτη

Στις σύγχρονες μηχανές μόνιμου μαγνήτη (PMSG – Permanent Magnet Synchronous Generator), το πεδίο της διέγερσης τους παράγεται από μαγνήτες τοποθετημένους εσωτερικά ή εξωτερικά στον δρομέα ενώ το πεδίο του τυμπάνου παράγεται από τριφασικό ρεύμα που ρέει στο τύλιγμα του στάτη. Οι σύγχρονοι κινητήρες μόνιμων μαγνητών κερδίζουν συνεχώς έδαφος στον τομέα των ανεμογεννητριών εξαιτίας των μοναδικών πλεονεκτημάτων τους όπως η υψηλή απόδοσή τους, η υψηλή πυκνότητα ισχύος και η αξιοπιστία τους [13]. Ειδικότερα, η ύπαρξη του μόνιμου μαγνήτη αντί για το τύλιγμα διέγερσης οδηγεί σε μια σειρά πλεονεκτημάτων όπως η εξάλειψη των απωλειών χαλκού στο δρομέα. Η απουσία τυλίγματος διέγερσης, επίσης, σημαίνει απουσία ψηκτρών και συλλέκτη με άμεση συνέπεια την αυξημένη αξιοπιστία και την ελαχιστοποίηση των απαιτήσεων για συντήρηση. Επιπλέον, με τη χρήση μόνιμων μαγνητών επιτυγχάνεται υψηλή πυκνότητα ροής, με αποτέλεσμα να προκύπτει μικρότερο βάρος και όγκος για μια μηχανή δεδομένης ισχύος. Επίσης, επιτυγχάνεται μεγαλύτερος βαθμός απόδοσης, αφού δε χρησιμοποιείται ηλεκτρικό ρεύμα για την παραγωγή του πεδίου, οπότε δεν υπάρχουν και απώλειες στο τύλιγμα διέγερσης. Τέλος, το γεγονός ότι δε χρειάζεται να απορροφούν άεργο ισχύ από το δίκτυο τις καθιστά ιδανικές για αυτόνομες εφαρμογές. Από την άλλη πλευρά, το βασικότερο μειονέκτημα των σύγχρονων γεννητριών μόνιμου μαγνήτη είναι ότι η συχνότητα της επαγόμενης τάσης και η ταχύτητα του δρομέα μεταβάλλονται με την αλλαγή της ταχύτητας του ανέμου. Για την επίλυση αυτού του προβλήματος γίνεται ενός πλήρως ελεγχόμενου μετατροπέα ισχύος προκειμένου να ρυθμίζει την τάση και τη συχνότητα (σχήμα 2.10).



Σχήμα 2.10 Τοπολογία αιολικού συστήματος με σύγχρονη γεννήτρια[11]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΚΑΙ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ

Στο κεφάλαιο αυτό, πραγματοποιείται μια ανάλυση ορισμένων βασικών στοιχείων που αφορούν τη σχεδίαση μιας ηλεκτρικής μηχανής. Αρχικά, γίνεται μια παρουσίαση των υλικών που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή των ηλεκτρικών μηχανών μόνιμων μαγνητών και μια ειδικότερη ανάλυση που αφορά τις ιδιότητες τους. Στη συνέχεια ,εξετάζονται οι διαφορετικές τοπολογίες που επιτυγχάνουν την διέγερση των ηλεκτρικών και επιλέγεται η κατάλληλη διαμόρφωση για την εφαρμογή μας.

3.1 Κατασκευαστικά υλικά ηλεκτρικών μηχανών

3.1.1 Σιδηρομαγνητικά υλικά

Το σώμα του στάτη και το δρομέα κατασκευάζεται από σιδηρομαγνητικό υλικό ,εξαιτίας της υψηλής μαγνητικής διαπερατότητας που εμφανίζει ο σίδηρος σαν υλικό. Ανάλογα, το κόστος των επιμέρους υλικών σε συνδυασμό με την μεταβλοτήτα της μαγνητικής επαγωγής ροής του πυρήνα επιλέγεται η κατάλληλη χρήση του σιδήρου. Πιο συγκεκριμένα, σε εφαρμογές με χαμηλές απαιτήσεις απόδοσης χρησιμοποιείται συμπαγής σίδηρος για το σώμα της μηχανής. Αντίστοιχα, σε εφαρμογές αυξημένων απαιτήσεων ο σίδηρος δεν είναι ενιαίος αλλά αποτελείται από πολλά μικρά στρώματα σιδηρομαγνητικής λαμαρίνας. Με αυτό τον τρόπο επιτυγχάνεται μείωση των δινορρευμάτων, που δημιουργούνται λόγω του επιδερμικού φαινομένου, που αποτελούν την κύρια συνιστώσα των απωλειών πυρήνα.

Στην συνέχεια, γίνεται μια πιο αναλυτική αναφορά στην χρήση της σιδηρομαγνητικής λαμαρίνας που χρησιμοποιείται κατά κόρων σε εφαρμογές AC μηχανών. Οι τύποι των ελασμάτων χωρίζονται σ 'εκείνα με κατευθυνόμενους κόκκους και σ 'εκείνα χωρίς κατευθυνόμενους κόκκους. Αρχικά, τα ελάσματα χωρίς κατευθυνόμενους κόκκους είναι ιστροπικά και χρησιμοποιούνται κατά κόρον στις ηλεκτρικές μηχανές. Τυπικές τιμές ειδικών απωλειών είναι 3 και 4 W/Kg για ελάσματα πάχους 0.35 mm και 0.5 mm αντίστοιχα σε μαγνητική επαγωγή 1.5T και συχνότητα πεδίου 50Hz. Αντίθετα, τα ελάσματα με κατευθυνόμενους κόκκους παρουσιάζουν μία κατεύθυνση στην οποία οι μαγνητικές ιδιότητες είναι βελτιωμένες και χρησιμοποιούνται κατά κύριο λόγο στην κατασκευή πυρήνων

μετασχηματιστών και όταν απαντώνται υψηλές συχνότητες. Τυπικές τιμές απωλειών σε αυτή την περίπτωση είναι 1 W/Kg σε 1.5 T, 50 Hz, για έλασμα πάχους 0.35 mm.

Οι επιθυμητές ηλεκτρικές και μαγνητικές ιδιότητες ,που καθιστούν κατάλληλα τα σιδηρομαγνητικά υλικά για την κατασκευή ηλεκτρικών μηχανών είναι :[14]

- Υψηλή μαγνητική διαπερατότητα, δηλαδή χαμηλή μαγνητική αντίσταση η οποία ελαχιστοποιεί την μείωση της πεπλεγμένης ροής στο μαγνητικό κύκλωμα της μηχανής.
- Υψηλή μαγνητική επαγωγή κορεσμού, έτσι ώστε να διέρχεται όσο το δυνατό περισσότερη μαγνητική ροή ανά μονάδα όγκου, και να ελαχιστοποιούνται οι διαστάσεις και το βάρος της μηχανής.
- Μικρό εμβαδό βρόχου υστέρησης και σχετικά μεγάλη ηλεκτρική αντίσταση. Οι ιδιότητες αυτές εξασφαλίζουν μειωμένες ειδικές απώλειες, και περιορισμένη αύξηση της θερμοκρασίας. Έτσι διευκολύνεται σημαντικά η ψύξη της μηχανής, και μειώνεται το κατασκευαστικό της κόστος.

Τα σιδηρομαγνητικά υλικά ταξινομούνται σε δύο διαφορετικές κατηγορίες στα:

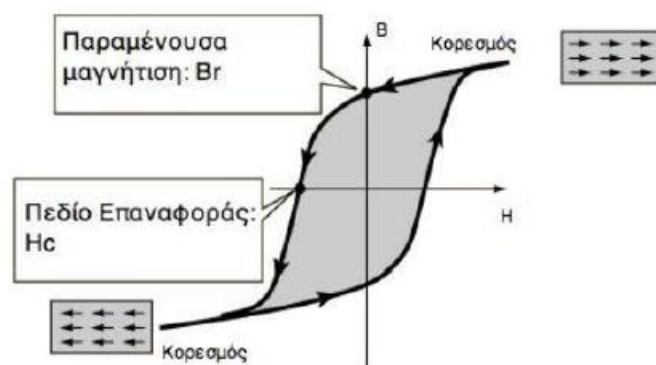
- Μαλακά

Τα μαλακά σιδηρομαγνητικά υλικά, όπως ο μαλακός σίδηρος, ο πυριτιούχος χάλυβας και τα κράματα σιδήρου-νικελίου, μαγνητίζονται και απομαγνητίζονται δύσκολα. Επιπλέον, η καμπύλη μαγνήτισης (σχήμα 3.1) παρουσιάζει μεγάλη κλίση, ενώ αντίστοιχα ο βρόχος υστέρησης έχει μικρό εμβαδό. Γι' αυτό τον λόγο τα υλικά αυτά παρουσιάζουν μειωμένες απώλειες υστέρησης, καθιστώντας τα κατάλληλα για χρήση σε μετασχηματιστές ισχύος και ηλεκτρικές μηχανές

- Σκληρά

Τα σκληρά σιδηρομαγνητικά υλικά, όπως τα κράματα Alnico, δεν απομαγνητίζονται εύκολα αλλά διατηρούν τις μαγνητικές τους ιδιότητες σχηματίζοντας μόνιμους μαγνήτες. Επιπλέον, η καμπύλη μαγνήτισης (σχήμα 3.1)

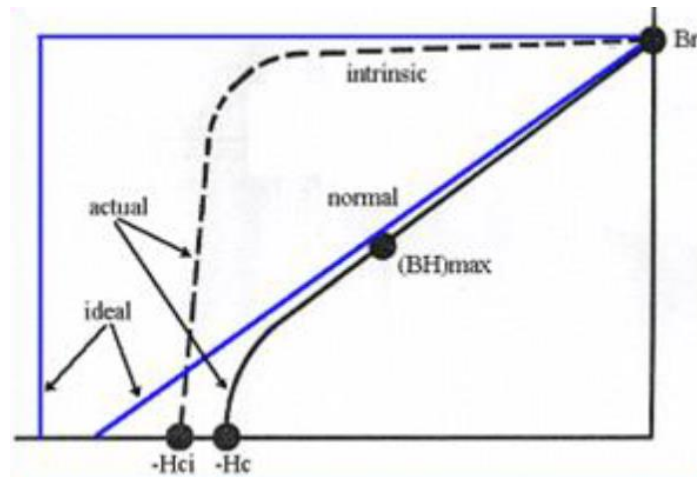
δεν ανεβαίνει απότομα ,ενώ αντίστοιχα ο βρόχος υστέρησης έχει μεγάλο εμβαδό, πράγμα που οδηγεί σε αυξημένες απώλειες υστέρησης .Τα υλικά αυτά είναι κατάλληλα για χρήση μόνιμων μαγνητών ,διότι παρουσιάζουν μεγάλες τιμές παραμένουσας μαγνήτισης B_r (το σημείο το οποίο μηδενίζεται η μαγνητική επαγωγή) και μεγάλες τιμές για το μαγνητικό πεδίο επαναφοράς H_c (η ένταση του μαγνητικού πεδίου που απαιτείται για την απομαγνήτιση του υλικού). Αναλυτικότερη αναφορά στους μόνιμους μαγνήτες γίνεται στη συνέχεια του παρόντος κεφαλαίου.



Σχήμα 3.1 Βρόχος υστέρησης σιδηρομαγνητικού υλικού [14]

3.1.2 Μόνιμοι μαγνήτες

Οι μόνιμοι μαγνήτες αντικαθιστούν συνήθως το τύλιγμα πεδίου που τροφοδοτείται με DC ρεύμα, στο δρομέα των σύγχρονων μηχανών. Τα σημαντικότερα πλεονεκτήματά τους που αφορούν την χρήση τους στις μηχανές έχουν αναπτυχθεί στο Κεφάλαιο 2.4.3.2. Οι μόνιμοι μαγνήτες, αποτελούνται από σκληρά σιδηρομαγνητικά υλικά, τα οποία τείνουν να διατηρούν τη μαγνήτισή τους απουσία μαγνητικού πεδίου, ή ακόμη και υπό την παρουσία αντίθετου, ασθενούς μαγνητικού πεδίου. Στο σχήμα 3.3 φαίνεται μια τυπική καμπύλη απομαγνήτισης ενός μόνιμου μαγνήτη:



Σχήμα 3.2 Τυπική καμπύλη απομαγνήτισης μόνιμου μαγνήτη[14]

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, το πεδίο επαναφοράς H_c , αντιστοιχεί σε εκείνη την τιμή ενός εξωτερικά επιβαλλόμενου, αντίθετου μαγνητικού πεδίου που μπορεί να απομαγνητίσει το υλικό. Για το λόγο αυτό, πρέπει να αποφεύγεται η λειτουργία κοντά στο γόνατο της παραπάνω καμπύλης, καθώς αντιστοιχεί σε λειτουργικές καταστάσεις όπου ο μαγνήτης τείνει να απομαγνητιστεί. Όσον αφορά το σημείο $(BH)_{max}$, του σχήματος, αυτό αντιστοιχεί στη μέγιστη τιμή ενέργειας του μαγνήτη. Το ακριβές σημείο στο οποίο λειτουργεί ο μαγνήτης, επί της καμπύλης απομαγνήτισης, εξαρτάται από το εξωτερικά επιβαλλόμενο πεδίο, και τη χωρική γεωμετρία. Πρέπει επομένως οι παράμετροι αυτές να λαμβάνονται υπόψιν κατά τη σχεδίαση, προκειμένου ο μαγνήτης να λειτουργεί κοντά στο σημείο $(BH)_{max}$.

3.2 Βασικά μεγέθη διαστασιολόγησης

Η σωστή διαστασιολόγηση της ηλεκτρικής γεννήτριας προκύπτει από τις τιμές βασικών μαγνητικών, ηλεκτρικών και θερμικών μεγεθών. Τα μεγέθη αυτά αναλύονται παρακάτω.

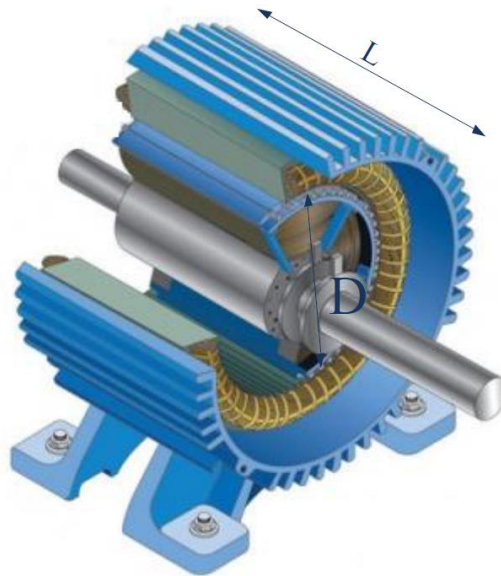
3.2.1 Ειδικές φορτίσεις

- Η ειδική μαγνητική φόρτιση \bar{B} είναι το μέγεθος που συνδέει τον αριθμό των πόλων με την μαγνητική ροή ανά πόλο Φ και ισούται:

$$\bar{B} = \frac{p \Phi}{\pi D L} \quad (3.1)$$

όπου, D : Διάμετρος διακένου

L : Αξονικό μήκος ενεργού μήκους



Σχήμα 3.3 Διαστάσεις διακένου μηχανής [15]

Τυπικές τιμές για το \bar{B} είναι μεταξύ 0.5-0.7 T και καθορίζονται από τα φαινόμενα κορεσμού που παρουσιάζονται στο μαγνητικό κύκλωμα, τις σκεδάσεις των δοντιών του στάτη και από το γόνατο στην καμπύλη μαγνήτισης του σιδηρομαγνητικού υλικού. Επιπρόσθετα, αυξημένη τιμή της μαγνητικής φόρτισης συνεπάγεται με δυνατότητα υψηλής παραγωγής ροπής και ισχύος, εντούτοις παρουσιάζονται αυξημένες απώλειες πυρήνα. Επομένως, η ιδανική τιμή αποτελεί αντικείμενο διερεύνησης για την κάθε περίπτωση ξεχωριστά.

- Η ειδική ηλεκτρική φόρτιση ac καθορίζεται από την ενεργό τιμή των αμπερελιγμάτων ανά μέτρο περιφέρειας του διακένου και ορίζεται από την σχέση:

$$ac = \frac{3 \cdot 2 N_s I}{\pi D} \quad (3.2)$$

Τυπικές τιμές της ειδικής ηλεκτρικής φόρτισης κυμαίνονται μεταξύ 15000 AE/m-45000 AE/m. Η ειδική ηλεκτρική φόρτιση καθορίζεται από κοινού με την ειδική μαγνητική φόρτιση

την ικανότητα παραγωγής ροπής μιας δεδομένης μηχανής. Τέλος, η ηλεκτρική φόρτιση συνδέεται με τις απώλειες χαλκού της μηχανής και την επαγωγική αντίδραση των τυλιγμάτων.

3.2.2 Ηλεκτρικά μεγέθη

Η φαινόμενη ισχύς δίνεται από την σχέση:

$$S = 3 \cdot E \cdot I \quad (3.3)$$

I: το φασικό ρεύμα

E: η ενεργός τιμή της επαγόμενης τάσης η οποία δίνεται από την σχέση:

$$E = 4,44 \cdot k_w \cdot f \cdot N_s \cdot \Phi \quad (3.4)$$

Όπου, K_w : ο συντελεστής τυλίγματος

N_s : ο αριθμός ελιγμάτων ανά φάση

Φ : η θεμελιώδης μαγνητική ροή ανά πόλο

f : η ηλεκτρική συχνότητα όπου συνδέεται με την μηχανική ταχύτητα περιστροφής n σε μονάδες στροφές ανά δευτερόλεπτο με την σχέση:

$$f = \frac{n \cdot P}{2} \quad (3.5)$$

Με συνδυασμό των παραπάνω σχέσεων προκύπτει ότι η φαινόμενη ισχύς ισούται με:

$$S = 1.11 \cdot k_w \cdot \bar{B} \cdot \pi^2 \cdot D^2 \cdot L \cdot ac \cdot n \quad (3.6)$$

Τα συμπεράσματα που προκύπτουν από την παραπάνω σχέση είναι η γραμμική εξάρτηση της ισχύς από την ειδική μαγνητική φόρτιση, από το τετράγωνο του μήκους διακένου και από το ενεργό μήκος της μηχανής. Από τα παραπάνω προκύπτει ότι οι δισκοειδής γεωμετρίες είναι οι πιο επιθυμητές, γιατί η αύξηση του μήκους διακένου οδηγεί σε μεγαλύτερη αύξηση της ισχύος απ' ότι η αύξηση του ενεργού μήκους.

3.2.3 Μηχανικά μεγέθη

Η οριακή τάση εκφράζεται ως η φυγόκεντρος δύναμη που ασκείται στο δρομέα ανά μονάδα επιφάνειας. Πιο συγκεκριμένα, η φυγόκεντρος δύναμη ορίζεται από την σχέση:

$$F = m \cdot \omega_{rm} \cdot R \quad (3.7)$$

m : ισοδύναμη μάζα του δρομέα

R : μηχανική γωνιακή ταχύτητα του δρομέα

ω_{rm} : η ακτίνα του δρομέα

Επομένως, η οριακή τάση διακένου δίνεται από τον κάτωθι τύπο:

$$\sigma_{max} = \frac{m \cdot \omega_{rm}}{2 \cdot \pi \cdot L} \quad (3.8)$$

Αποτελεί βασικό μέγεθος της διαστασιολόγησης, γιατί είναι το μέγεθος που εκφράζει την μηχανική αντοχή που πρέπει να έχει ο δρομέας της μηχανής. Τέλος, η μέγιστη επιτρεπόμενη τάση διακένου είναι 10 tn/cm^2 (το θεωρητικό όριο θραύσης του σιδήρου) και τυπικές τιμές αυτής της παραμέτρου συνήθως δεν ξεπερνάνε τον 1 tn/cm^2 .

3.2.3 Πυκνότητα ρεύματος τυλίγματος

Η πυκνότητα ρεύματος αποτελεί βασικό κομμάτι της σχεδίασης της μηχανής, γιατί σχετίζεται άμεσα με τη θερμική της ισορροπία. Ειδικότερα, από την πυκνότητα ρεύματος εξαρτώνται οι απώλειες των τυλιγμάτων, οι οποίες προκαλούν αύξηση της θερμοκρασίας των μονώσεων και των λοιπών υλικών της. Επομένως, αν ξεπεραστεί ένα δεδομένο όριο της θερμοκρασίας, ελλοχεύει ο κίνδυνος οι θερμικές απώλειες να προκαλέσουν καταστροφή ή υποβιβασμό της μονωτικής ικανότητας των υλικών που αποτελούν την μηχανή.

Ένα εμπειρικό όριο πυκνότητας ρεύματος είναι τα 4 A/mm^2 , πάνω από το οποίο υπάρχει ανάγκη για εξαναγκασμένη ψύξη ώστε να αυξηθεί η ικανότητα παροχής ισχύος της ηλεκτρικής μηχανής. Πιο συγκεκριμένα, ανάλογα με την ονομαστική ισχύ της μηχανής επιλέγεται ένας από τους κάτωθι τρόπους:

- Φυσική ψύξη για μηχανές έως 1kW
- Χρήση ανεμιστήρων για μηχανές 1 kW-100 kW
- Υδρόψυξη για μηχανές 1 MW-100 MW
- Υγρό υδρογόνο για μηχανές μεγαλύτερες των 100 MW

Ιδιαίτερα στην περίπτωση της ανεμογεννήτριας η θερμική ισορροπία εξαρτάται από τις δυνατότητες αερισμού. Ο υπολογισμός της απαιτούμενης ποσότητας αέρα Q υπολογίζεται από τον τύπο[16]:

$$Q = 0.78 \cdot \frac{P_{\alpha\pi}}{\theta_{\mu\eta\chi}} \cdot \frac{\theta_{\pi\epsilon\rho} + 273}{273} \cdot \frac{760}{H} \quad (3.9)$$

όπου, $P_{\alpha\pi}$: συνολικές απώλειες της μηχανής [W]

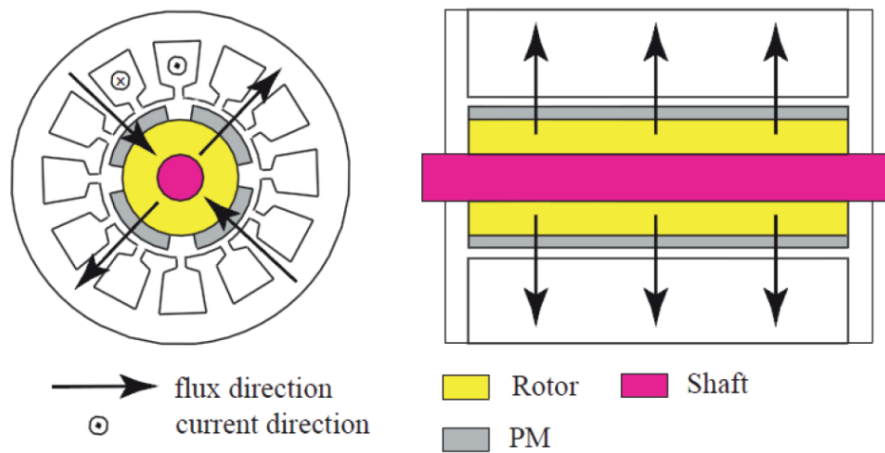
$\theta_{\mu\eta\chi}$: μέγιστη θερμοκρασία μηχανής (τυπικά 100°C) [$^\circ\text{C}$]

$\theta_{\pi\epsilon\rho}$: θερμοκρασία περιβάλλοντος [$^\circ\text{C}$]

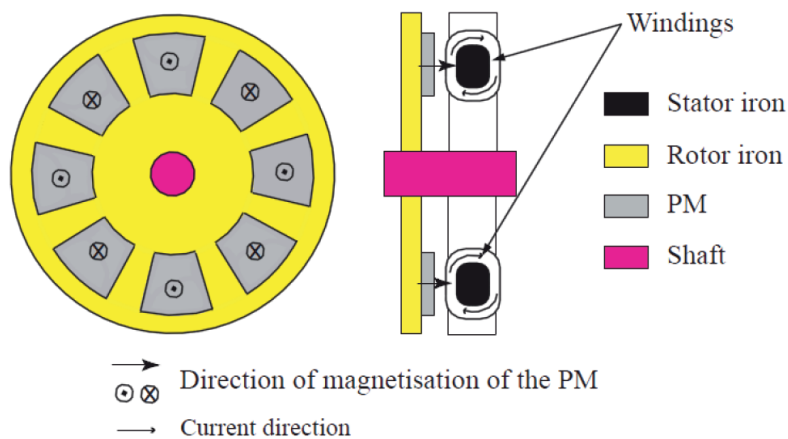
H : πίεση του αέρα [πίεση μιας ατμόσφαιρας 760 mmHg]

3.3 Γεννήτριες μόνιμου μαγνήτη ακτινικής και αξονικής ροής

Οι σύγχρονες γεννήτριες μόνιμου μαγνήτη χωρίζονται σε μηχανές ακτινικής και αξονικής ροής. Ο άξονας βρίσκεται κατά μήκος της μηχανής στον κυλινδρικό δρομέα στον κυλινδρικό σύστημα συντεταγμένων. Η σχέση του διανύσματος ροής (normal vector) με τον άξονα της μηχανής καθορίζουν αν η τοπολογία της μηχανής είναι αξονικής ή ακτινικής ροής (σχήμα 3.4). Αν το διάνυσμα της ροής είναι παράλληλο στον άξονα της μηχανής, τότε η μηχανή είναι αξονικής ροής (σχήμα 3.5).



Σχήμα 3.4 Εγκάρσια διατομή σε ακτινική και αξονική κατεύθυνση μιας τυπικής σύγχρονης γεννήτριας μόνιμου μαγνήτη ακτινικής ροής.[17]



Σχήμα 3.5. Εγκάρσια διατομή σε ακτινική και αξονική κατεύθυνση μιας τυπικής σύγχρονης γεννήτριας μόνιμου μαγνήτη αξονικής ροής.[17]

Οι μηχανές αξονικής ροής άργησαν ιδιαίτερα να χρησιμοποιηθούν κυρίως για τους παρακάτω λόγους:

- Ανάπτυξη υψηλής ελκτικής δύναμης μεταξύ στάτη και δρομέα
- Δυσκολίες που κυρίως είχαν να κάνουν με την κατασκευή του πυρήνα της μηχανής
- Υψηλό κόστος κατασκευής
- Δυσκολία στην τελική συναρμολόγηση

Συγκρίνοντας όμως σήμερα τις δύο μηχανές μπορούμε να βρούμε αρκετά πλεονεκτήματα της μηχανής αξονικής ροής .Πιο συγκεκριμένα:

- 1) Δυνατότητα αύξησης της πυκνότητας ισχύος. Αυτό μπορεί εύκολα να συμβεί περιορίζοντας το υλικό του πυρήνα.
- 2) Ο λόγος της διαμέτρου του πυρήνα προς το μήκος του άξονα περιστροφής είναι πολύ μεγάλος. Έτσι οι μηχανές αξονικής ροής αερίζονται και ψύχονται πιο εύκολα, χωρίς εξωτερικό μηχανισμό.
- 3) Λόγω της δισκοειδούς της δομής μπορούμε πιο εύκολα να ρυθμίσουμε το μήκος διακένου.
- 4) Μεγαλώνοντας την εξωτερική διάμετρο του πυρήνα έχουμε τη δυνατότητα εγκατάστασης μεγαλύτερου αριθμού πόλων και άρα χρήσης της μηχανής αυτής σε εφαρμογές υψηλής συχνότητας και χαμηλής ταχύτητας.
- 5) Τέλος, πολλοί δίσκοι μπορούν να συνδυαστούν για την επίτευξη υψηλότερης ισχύος ή ροπής. Στην επιλογή μεταξύ μηχανής ακτινικής ή αξονικής ροής πρωτεύοντα ρόλο παίζει η εφαρμογή στην οποία θα χρησιμοποιηθεί και το αν αυτή απαιτεί μια μακρύτερη και λεπτότερη σχεδίαση (ακτινική) ή μια σχεδίαση “pancake” (αξονική). Σημαντικό επίσης κριτήριο αποτελεί το κόστος καθώς η μηχανή αξονικής ροής αποδίδει την ίδια ροπή με την ακτινικής ροής χρησιμοποιώντας λιγότερο ενεργό υλικό[18].

Στην υπάρχουσα βιβλιογραφία υπάρχουν αρκετές συγκρίσεις των δύο τοπολογιών. Παρακάτω θα αναφερθούμε στις πιο σημαντικές και σχετικές με την εφαρμογή μας.

- Στο [19] ο συγγραφέας συγκρίνει τρεις μηχανές μόνιμων μαγνητών ,μιας ακτινικής ροής εσωτερικού δρομέα(Radial Flux Inner Rotor-RFIR),μιας ακτινικής εσωτερικού δρομέα(Radial Flux Outer Rotor-RFOR) και μιας αξονικής ροής(Axial Flux-AF) με βασικό το κριτήριο κόστους απόδοσης.

Αρχικά ,αξίζει να αναφερθεί ότι η εν λόγω μελέτη είναι παρόμοια μ' αυτή που θα εξετάσουμε εμείς (ανεμογεννήτρια ισχύος 3KW).Τα αποτελέσματα δείξανε ότι RFIR και AP έχουν παρόμοιες αποδόσεις ,οριακά μεγαλύτερες από την RFOR .Ακόμα ,η μηχανή αξονικού δρομέα χρειάζεται μεγαλύτερη ποσότητα σιδηρομαγνητικών υλικών ,κάτι που σημαίνει αυξημένο κόστος παραγωγής .Ωστόσο ,ο συγγραφέας εισάγει ένα συντελεστή κατασκευαστικού κόστους K (K=1.5 για AP,K=2 για RFIR-RFOR),ο οποίος κάνει την μηχανή AP να έχει το μικρότερο εκτιμώμενο κόστος .Ο συντελεστής K εισάγεται ,γιατί η διαδικασία παραγωγής της γεννήτριας αξονικής ροής είναι μικρότερη από τις αντίστοιχες ακτινικής ροής.

- Άλλη μια σύγκριση των δύο κατηγοριών έχει γίνει στο [20] .Οι μηχανές ακτινικής και αξονικής ροής επιδεικνύουν διαφορετική συμπεριφορά στη μεταξύ τους σύγκριση με γνώμονα δύο κριτήρια:

A) τον λόγο μήκους (length ratio) των μηχανών ακτινικής ροής, που ορίζεται σαν το λόγο του αξονικού μήκους του στάτη προς τη διάμετρο του διακένου :

$$K_1 = \frac{l_{eff,RF}}{D_{agap}} \quad (3.10)$$

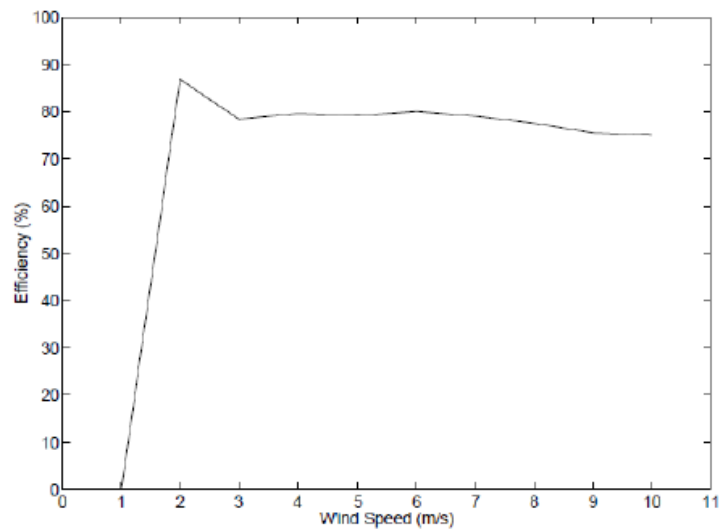
Συγκεκριμένα, όταν $K_1 < 0.5$ η αντίστοιχη μηχανή αξονικής ροής εμφανίζεται πιο συμφέρουσα λόγω μικρότερου όγκου.

B) τον αριθμό των πόλων

Για μικρό αριθμό πόλων ($p < 4$) είναι προτιμότερες οι μηχανές ακτινικής ροής. Στην ίδια αναφορά, γίνεται σύγκριση κόστους μεταξύ αυτών των δύο ειδών μηχανής για ισχύ 55 KW, όπου για μικρό αριθμό πόλων ($p < 6$) η μηχανή ακτινικής ροής προτιμάται όταν τίθεται σαν κριτήριο το κόστος, η απόδοση ή η κατασκευή αντίστοιχα, ενώ για μεγαλύτερο αριθμό πόλων γίνεται πιο συμφέρουσα η χρήση μηχανής αξονικής ροής. Επιπλέον με χρήση της τελευταίας επιτυγχάνεται συνολικά μικρότερος όγκος, κάτι το οποίο είναι χρήσιμα στην περίπτωση που θέλουμε μικρό μήκος άξονα. Πιο αναλυτικά, το κόστος για τους μόνιμους μαγνήτες είναι γενικά μικρότερο για τις μηχανές αξονικής ροής λόγω του μικρότερου διακένου σε αντίθεση με το κόστος χαλκού, που είναι μεγαλύτερο καθώς απαιτούνται περισσότερες σπείρες. Επιπλέον όταν η ακτίνα της μηχανής αξονικής ροής γίνει ίση με το διπλάσιο του μήκους μιας ακτινικής, τότε η μηχανή αξονικής ροής χάνει τα πλεονεκτήματά που αφορούν το επίπεδο ισχύος που μπορεί αυτή να προσφέρει. Ή αντίστροφα, ένα υψηλό επίπεδο ισχύος απαιτεί μεγαλύτερο όγκο μηχανής αξονικής ροής παρά ακτινικής.

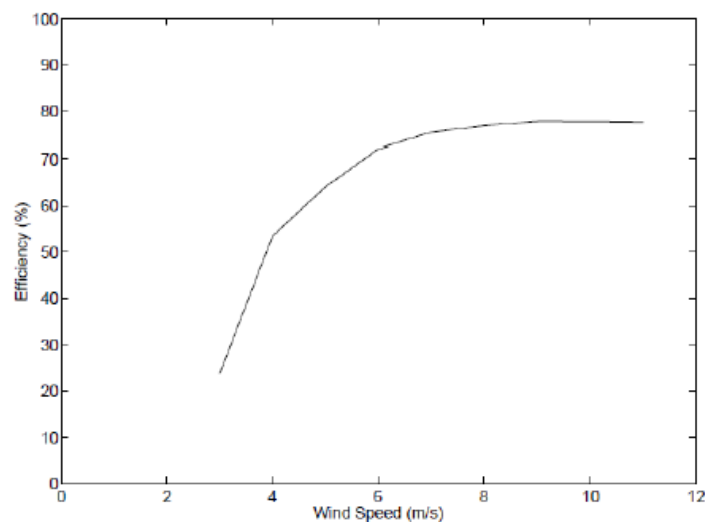
- Μια ακόμα σύγκριση μεταξύ των δύο διαφορετικών τοπολογιών έχει γίνει στο [21]. Εκεί εξετάζονται δύο μικρές γεννήτριες που πρόκειται να χρησιμοποιηθούν σε αιολικές εφαρμογές. Η γεννήτρια αξονικής ροής δεν περιλαμβάνει πυρήνα σιδήρου σε αντίθεση με τη μηχανή ακτινικής ροής. Και οι δύο είναι σχεδιασμένες ώστε να δίνουν την ίδια ροπή, στις ίδιες στροφές και με την ίδια τάση εξόδου. Τα αποτελέσματα συνοπτικά έδειξαν τα εξής:

Αξονική ροή: Η κατασκευή είναι αρκετά απλή και φθηνή. Είναι σχετικά ελαφριά και πραγματοποιείται καλή απαγωγή θερμότητας δίχως εξοπλισμό αερισμού. Επίσης, η απόδοση της μηχανής παραμένει σταθερά υψηλή για ταχύτητες ανέμων από 3-10 m/s, κάτι που ενδιαφέρει πολύ στην περίπτωση μας, καθώς στις εφαρμογές που πρόκειται να χρησιμοποιηθεί η γεννήτρια που μελετάμε θα συναντώνται κυρίως χαμηλές ταχύτητες ανέμου (3-5 m/s).



Σχήμα 3.6 Βαθμός απόδοσης ακτινικής γεννήτριας [20]

Ακτινική Ροή: Η κατασκευή είναι αρκετά πιο πολύπλοκη και ακριβή, κυρίως λόγω του τορροειδούς τυλίγματος που χρησιμοποιήθηκε. Είναι βαρύτερη και επιτυγχάνει υψηλή απόδοση μόνο κοντά στις ονομαστικές συνθήκες (10 m/s). Αυτό την καθιστά ακατάλληλη, γιατί οι μικρές ανεμογεννήτριες πολύ συχνά υφίστανται ανέμους αρκετά χαμηλότερους από αυτούς για τους οποίους σχεδιάστηκαν.



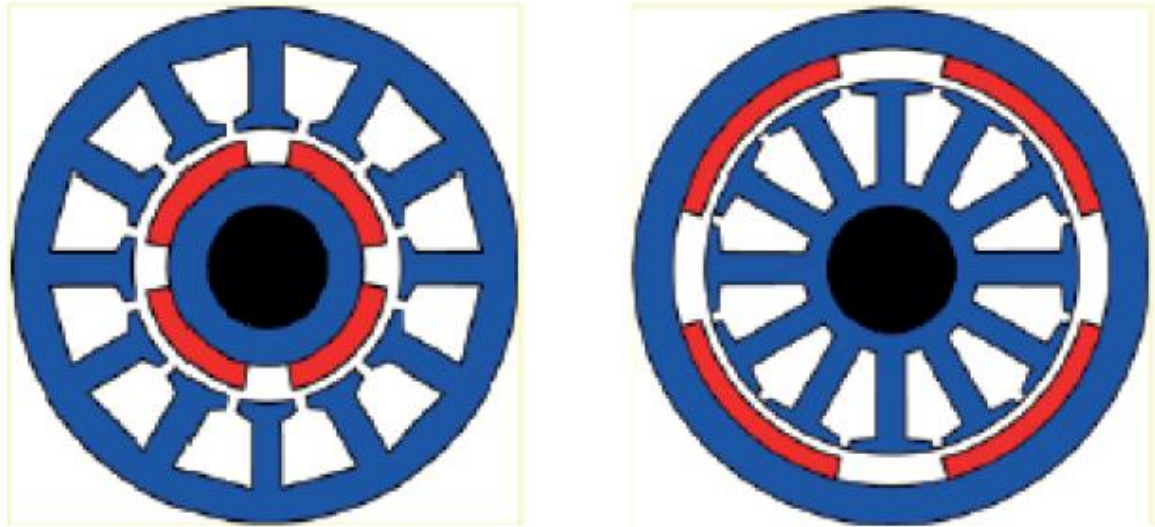
Σχήμα 3.7 Βαθμός απόδοσης αξονικής γεννήτριας [20]

Διαπιστώνουμε λοιπόν, ότι ανάλογα με την εφαρμογή, τη δομή της μηχανής, τα κριτήρια και τις παραμέτρους που θέλουμε να ικανοποιούνται, άλλοτε προκρίνονται οι μηχανές αξονικής ροής και άλλοτε οι μηχανές ακτινικής ροής και τα διάφορα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των δύο μηχανών πρέπει να ζυγιστούν καλά πριν κάνουμε την τελική μας επιλογή. Ως εκ τούτου, στην εν λόγω εφαρμογή κατάλληλη είναι μια συμβατική γεννήτρια ακτινικής ροής, κυρίως λόγω της απλότητας κατασκευής της σε σχέση με τις πιο περίπλοκες μηχανές αξονικού δρομέα.

3.4 Διαμορφώσεις δρομέα μηχανών μόνιμων μαγνητών

Στις μηχανές εξωτερικού δρομέα, ο δρομέας δεν βρίσκεται στο εσωτερικό της μηχανής αλλά στην εξωτερική της επιφάνεια, ενώ οι μόνιμοι μαγνήτες είναι προσκολλημένοι στην επιφάνεια του δρομέα (σχήμα 3.8). Αναλόγως, στην εξωτερική μηχανή ο δρομέας έχει μεγαλύτερη ακτίνα σε σύγκριση με τον στάτη και γι' αυτό μπορεί να είναι εφοδιασμένη με μεγαλύτερο αριθμό πόλων για το ίδιο πολικό βήμα. Ακόμα, στους μόνιμους μαγνήτες του δρομέα ασκούνται φυγόκεντρες δυνάμεις προς τα έξω καθιστώντας σχεδόν αδύνατο να αποκολληθούν οι μόνιμοι μαγνήτες από τη θέση τους. Οι μηχανές εξωτερικού δρομέα, χρησιμοποιούνται κατά κόρον σε εφαρμογές με μικρές ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα, όπου η πλήμνη της ανεμογεννήτριας που φέρει τα πτερύγια είναι συνδεδεμένη απευθείας με τον ρότορα.[17]

Οι μηχανές εσωτερικού δρομέα (σχήμα 3.9) είναι μια πιο συνηθισμένη διαμόρφωση που έχει κυριαρχήσει στην αγορά. Αυτό συμβαίνει, λόγω της ευκολίας κατασκευής της, όσο και για το μικρότερο κόστος κατασκευής της σε σχέση με τις υπόλοιπες διαμορφώσεις. Επιπροσθέτως, σε μηχανές μικρής ισχύος οι κύριες απώλειες είναι οι απώλειες χαλκού και ως εκ τούτου το τύλιγμα του στάτη έχει την υψηλότερη αύξηση της θερμοκρασίας στην μηχανή. Επομένως, είναι πιο ωφέλιμο το τύλιγμα του στάτη, και όχι οι μαγνήτες, να βρίσκονται πιο κοντά στο περίβλημα της μηχανής, όπου οι ιδιότητες ψύξης είναι καλές. Έτσι, έχουμε μικρότερη άνοδο της θερμοκρασίας για τον ίδιο αριθμό απωλειών σε σχέση με την μηχανή εξωτερικού δρομέα. Για όλους τους παραπάνω λόγους στην εν λόγω εφαρμογή κατάλληλη είναι η χρήση μηχανής εσωτερικού δρομέα.



Σχήμα 3.8 Μηχανή εσωτερικού δρομέα (δεξιά) και μηχανή εξωτερικού δρομέα (αριστερά) [17]

3.5 Τυλίγματα ηλεκτρικών μηχανών

Τα τυλίγματα μιας ηλεκτρικής μηχανής χαρακτηρίζονται ως προς τις τερματικές συνδέσεις των επιμέρους πηνίων, τον τρόπο με τον οποίο κατανέμονται στα αυλάκια και το βήμα συστάδας. Για την εφαρμογή αυτή το κατάλληλο τύλιγμα είναι το συγκεντρωμένο τύλιγμα κλασματικού βήματος διπλής στρώσης και παρακάτω παρουσιάζονται οι λόγοι που μας οδήγησαν σ' αυτή την επιλογή μας.

3.5.1 Τύλιγμα πλήρους και κλασματικού βήματος

Το πρώτο ερώτημα που τίθεται είναι το αν υλοποιηθεί η γεννήτρια με πλήρες ή κλασματικό βήμα. Στις μηχανές μόνιμου μαγνήτη ένα από τα πιο σοβαρά θέματα που πρέπει να προβλέψουμε είναι η κυμάτωση της ροπής και η ροπή ευθυγράμμισης. Με το πλήρες βήμα μπορούν να αντιμετωπιστούν με διάφορες τεχνικές όπως το να κοπούν λοξά οι μόνιμοι μαγνήτες ή οι αύλακες του στάτη, την μετατόπιση των μόνιμων μαγνητών, την χρήση ψευδοαυλάκων ή την χρήση διαφορετικών ευρών μαγνητών, λύσεις που είναι είτε ακριβές είτε δημιουργούν περαιτέρω προβλήματα στην μηχανή. Το κλασματικό βήμα δίνει λύση σ' αυτές τις δύο παραμέτρους, με την προϋπόθεση σωστής επιλογής συνδυασμού αυλακιών και πόλων[22].

3.5.2 Συγκεντρωμένο και Διανεμημένο τύλιγμα

Έχοντας καταλήξει στο βήμα συστάδας, η επόμενη διερεύνηση αφορά τον τύπο των τυλιγμάτων που θα χρησιμοποιηθεί. Πιο συγκεκριμένα, πρέπει να αποφασιστεί αν είναι προτιμότερο να επιλεγθεί διανεμημένο ή συγκεντρωμένο τύλιγμα.

Ο παραπάνω πίνακας παρουσιάζει τα χαρακτηριστικά του κάθε τυλιγματος:

	Διανεμημένα	Συγκεντρωμένα
Συντελεστής πληρότητας χαλκού στ' αυλάκι	35%-45%	50%-65%
Κατασκευή στάτη	Συνεχή ελάσματα	Συνεχή ελάσματα ή τμηματικές κατασκευές
Τυλίγματα τερματικών συνδέσεων	Μακρά επικαλυπτόμενα	Κοντά μη επικαλυπτόμενα
Αρμονικό περιεχόμενο παραγόμενης από το στάτη ροπής	Θεμελιώδης	Στις περισσότερες περιπτώσεις (εκτός από ½ αυλάκι/πόλο/φάση) υψηλότερης τάξης αρμονικές

Σχήμα 3.9 Διανεμημένα/Συγκεντρωμένα τυλίγματα [22]

Ορισμένα βασικά πλεονεκτήματα των συγκεντρωμένων τυλιγμάτων είναι τα ακόλουθα:

1. Ευκολία στην κατασκευή, εφόσον πρόκειται για μη επικαλυπτόμενα τυλίγματα.
2. Υψηλός συντελεστής πληρότητας χαλκού, άρα μεγαλύτερη πυκνότητα ισχύος.
3. Κοντύτερα άκρα τυλιγματος, με αποτέλεσμα χαμηλότερες απώλειες χαλκού.
4. Υψηλότερη ανοχή στα σφάλματα, εφόσον δεν υπάρχουν αμοιβαίες επαγωγές ανάμεσα στις φάσεις.
5. Χαμηλή ροπή ευθυγράμμισης, δεδομένου ότι περιλαμβάνουν μεγάλο αριθμό κύκλων ευθυγράμμισης ανά μηχανική περιστροφή.

Στα συγκεντρωμένα τυλίγματα επιτυγχάνεται υψηλότερος συντελεστής πληρότητας χαλκού (υψηλότερη πυκνότητα ισχύος), τα άκρα είναι κοντύτερα, οι απώλειες χαλκού χαμηλότερες, η

ροπή όμως περιλαμβάνει στις περισσότερες περιπτώσεις ανώτερες αρμονικές (εν αναθέσει με τα διανεμημένα τυλίγματα όπου κυριαρχεί η θεμελιώδης αρμονική ροπής, χάρη στην περισσότερο ημιτονοειδή κατανομή του μαγνητικού πεδίου στο διάκενο). Επιπλέον, οι συνολικές απώλειες είναι υψηλές σε μεγάλες ταχύτητες εξαιτίας των πρόσθετων απωλειών δινορρευμάτων στο δρομέα και στους μαγνήτες (προκαλούνται από ανώτερες αρμονικές του μαγνητικού πεδίου). Σημειώνεται ακόμη ότι το συγκεντρωμένο τύλιγμα στα δόντια του στάτη, μέχρι πριν λίγα χρόνια, χρησιμοποιείτο κυρίως σε εφαρμογές μικρής ισχύος (μερικών εκατοντάδων Watt) και πολλών πόλων (μόνο έτσι μπορεί να υλοποιηθεί τριφασικό σύστημα). Σε εφαρμογές ασύγχρονων μηχανών, η υιοθέτηση συγκεντρωμένου τυλίγματος κλασματικού βήματος χαρακτηρίζεται από μικρότερη ικανότητα ροπής, υψηλότερη κυμάτωση και απώλειες στους αγωγούς του δρομέα, εν συγκρίσει με το κλασικό διανεμημένο τύλιγμα. Από την άλλη, το κατανεμημένο τύλιγμα δίνει μεγαλύτερη ΗΕΔ χάρη στον υψηλότερο συντελεστή τυλίγματος.

3.5.3 Τύλιγμα απλής και διπλής στρώσης

Η τελευταία επιλογή που πρέπει να γίνει σχετικά με το τύλιγμα είναι η στρώση του τυλίγματος που θα χρησιμοποιηθεί. Στη συνέχεια γίνεται μία σύγκριση ανάμεσα σε τυλίγματα μονής και διπλής στρώσης:

	Τυλίγματα διπλής στρώσης	Τυλίγματα μονής στρώσης
Πηνία/αυλάκι	2	1
Αμοιβαία ζεύξη φάσεων	Σημαντική λόγω αυτεπαγωγής σκέδασης στο αυλάκι	Πολύ χαμηλή αμοιβαία επαγωγή
Άκρα τυλίγματος	Κοντά	Μακριά
Φασική αυτεπαγωγή	Χαμηλότερη λόγω μικρότερης αυτεπαγωγής σκέδασης	Υψηλότερη εξαιτίας μεγαλύτερης αυτεπαγωγής σκέδασης (καλύτερη ικανότητα εξασθένισης πεδίου)
Απώλειες δρομέα	Χαμηλότερες λόγω χαμηλότερων αρμονικών ΜΕΔ στάτη	Υψηλότερες εξαιτίας σημαντικότερου αρμονικού περιεχομένου ΜΕΔ στάτη
Δυνατοί συνδυασμοί αυλακίων-πόλων	Περισσότεροι	Λιγότεροι μπορούν να υποστηρίξουν τυλίγματα μονής στρώσης
Κατασκευή	Δυσκολότερη εφόσον υπάρχουν δύο πηνία/αυλάκι	Ευκολότερη
Συντελεστής τυλίγματος	Χαμηλότερος	Υψηλότερος
Αντί-ΗΕΔ	Πιο ημιτονοειδής	Λιγότερο ημιτονοειδής

Σχήμα 3.9 Τυλίγματα μονής και διπλής στρώσης [22]

Τα τυλίγματα μονής στρώσης παρουσιάζουν υψηλότερη αντοχή σε βραχυκύκλωμα, χάρη στις μεγαλύτερες αυτεπαγωγές ανά φάση (που περιορίζουν το ρεύμα σφάλματος) και στις μικρότερες αμοιβαίες επαγωγές (εμποδίζεται η απώλεια «υγείων» φάσεων σε περίπτωση σφάλματος). Επιπλέον, χάρη στην μεγαλύτερη αυτεπαγωγή σκέδασης, τα μονής στρώσης τυλίγματα προτιμώνται σε εφαρμογές που απαιτούν λειτουργία σταθερής ισχύος σε μεγάλο εύρος στροφών. Στη διπλή στρώση οι απώλειες πυρήνα λόγω δινορρευσμάτων είναι χαμηλότερες, εφόσον είναι μικρότερο το αρμονικό περιεχόμενο της ΜΕΔ που προκαλεί η αντίδραση τυμπάνου. Ακόμη, η ηλεκτρεγερτική δύναμη είναι περισσότερο ημιτονοειδής. Εντούτοις, στη διπλή στρώση η ικανότητα παραγωγής ροπής σε κατάσταση υπερφόρτισης είναι μικρότερη από ότι στην μονή . Στην συγκεκριμένη εφαρμογή απαιτούνται χαμηλές απώλειες, έτσι ώστε ο βαθμός απόδοσης της μηχανής να είναι ικανοποιητικός και σε χαμηλή φόρτιση. Για τους παραπάνω λόγους, επιλέγεται συγκεντρωμένο τύλιγμα κλασματικού βήματος διπλής στρώσης. Τέλος, παρά τα μειονεκτήματα της διπλής στρώσης ως προς τη ροπή (μικρότερη ικανότητα, υψηλότερη κυμάτωση), αυτή η τοπολογία χαρακτηρίζεται από χαμηλότερο επίπεδα απωλειών δρομέα και θορύβου.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ

ΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ 2kW

Στο κεφάλαιο αυτό θα γίνει η παρουσίαση της γεννήτριας που σχεδιάστηκε αρχικά και θα αιτιολογηθεί κάθε σημείο της σχεδίασης αυτής, μέσω της αναλυτικής παρουσίασης της προκαταρκτικής της σχεδίασης. Στη συνέχεια γίνεται η επίλυση του μαγνητοστατικού προβλήματος, που περιγράφει την γεωμετρία του μαγνητικού κυκλώματος της μηχανής, με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Τέλος, πραγματοποιείται ανάλυση ευαισθησίας παραμέτρων στα μεγέθη που επηρεάζουν πιο πολύ την επίδοση και απόδοσης της γεννήτριας.

4.1 Προκαταρκτική σχεδίαση

Η προκαταρκτική σχεδίαση μίας ηλεκτρικής μηχανής βάσει των μαγνητικών μεγεθών περιλαμβάνει τα ακόλουθα βήματα:

- Προσδιορισμό της επιφάνειας διακένου που θα εξασφαλίσει την απαραίτητη ηλεκτρομαγνητική ροπή.
- Προσδιορισμό των διαμορφώσεων δρομέα και στάτη που θα επιτρέψουν τη δημιουργία κατάλληλου μαγνητικού πεδίου στο διάκενο.

Σκοπός μας είναι να κατασκευαστεί μια μηχανή με τις παρακάτω προδιαγραφές:

Ονομαστική Ενεργός Ισχύς (kW)	P	2
Ονομαστικές στροφές (ΣΑΛ)	n	300

Πίνακας 2.1 Προδιαγραφές της γεννήτριας

- Η γωνιακή ταχύτητα της γεννήτριας ισούται με:

$$\omega_{rm} = \frac{2\pi n}{60} = 31.4 \frac{r}{s} \quad (4.1)$$

- Ηλεκτρομαγνητική ροπή:

$$T_e = \frac{P_m}{\omega_{rm}} = \frac{2000}{31.4} = 63.694 Nm \quad (4.2)$$

όπου θεωρήθηκε $P_m = P_e$, αφού στην προκαταρκτική σχεδίαση θεωρούνται αμελητέες απώλειες

4.2.1 Διαστασιολόγηση διακένου

Η ροπή διακένου T_e συνδέεται με τη μέση εφαπτομενική πίεση των μαγνητικών δυνάμεων στο διάκενο P_t και με την επιφάνεια του διακένου A με τις εξής εξισώσεις:

$$F_t = P_t \cdot A \quad (4.3)$$

$$T_e = \frac{1}{2} \cdot D \cdot F_t \quad (4.4)$$

$$T_e = \frac{\pi}{2} \cdot D^2 \cdot L \cdot P_t \quad (4.5)$$

Η δύναμη του διακένου δίνεται από την σχέση:

$$F_t = L \cdot \oint_c B_n \cdot H_t \cdot dl = \frac{L}{\mu_0} \cdot \oint_c B_n \cdot B_t \cdot dl \quad (4.6)$$

όπου B_n και B_t η εφαπτομενική και η κάθετη συνιστώσα της μαγνητικής επαγωγής στο διάκενο.

Άρα η μέση πίεση P_t είναι:

$$P_t = \frac{F_t}{A} = \frac{F_t}{\pi DL} = \frac{1}{\pi D \mu_o} \oint_c B_n \cdot B_t \, dc \quad (4.7)$$

Σε αυτό το σημείο θεωρούμε την ειδική μαγνητική φόρτιση ίση με:

$$B = 0,7 \, T \quad (4.8)$$

και την γωνία της μαγνητικής επαγωγής στο διάκενο $\theta = 87,5^\circ$, εφόσον η ακτινική συνιστώσα υπερσχύει της εφαπτομενικής. Επομένως:

$$P_t = \frac{1}{\pi D \mu_o} \oint_c B_n B_t \, dc = \frac{B \sin \theta \cos \theta}{\pi D \mu_o} = \frac{0,7 \sin 87,5 \cos 87,5}{4\pi 10^{-7}} = 24274 \frac{N}{m^2} \quad (4.9)$$

Λόγω της ανάγκης ανάπτυξης σημαντικής ροπής από τη μεριά της ηλεκτρογεννήτριας, θα πρέπει να μεγιστοποιηθεί η διάμετρος D , καθώς η ροπή είναι ανάλογη του τετραγώνου της. Μία εύλογη τιμή διαμέτρου, η οποία εξασφαλίζει ευχέρεια κατασκευής του δρομέα, είναι:

$$D = 0,2 \, m \quad (4.10)$$

Με αντικατάσταση στην σχέση 4.5 προκύπτει ότι:

$$L = 61,14 \, mm$$

4.2.2 Πλάτος διακένου

Το πλάτος του διακένου επιλέγεται σύμφωνα από την παρακάτω εμπειρική σχέση[23].

$$L_g = 1.6\sqrt{D} - 0.25 = 0.465mm \quad (4.12)$$

Ωστόσο, το διάκενο πρέπει να έχει το μικρότερο δυνατό πλάτος, το οποίο καθορίζεται από την ακρίβεια κατασκευής και την δυνατότητα μηχανικής υποστήριξης δρομέα και στάτη. Οι δυνάμεις για δεδομένη κατασκευή, μεγιστοποιούνται όταν το πάχος διακένου είναι ελάχιστο. Για κατασκευαστικούς λόγους επιλέγεται:

$$L_g = 0.5mm$$

4.2.3 Μεγέθη στάτη

4.2.3.1 Επιλογή αριθμού αυλακών

Ο αριθμός των πόλων επιλέγεται έτσι ώστε να είναι απευθείας η σύνδεση της ανεμογεννήτριας με το δίκτυο($f=50\text{Hz}$).Επομένως ,έχουμε:

$$n = \frac{120 f}{p} \Rightarrow P = \frac{120 f}{n} = \frac{120 \cdot 50}{300} \Rightarrow p = 20 \quad (4.13)$$

- Για την επιλογή των αριθμών των αυλακών ,επιδιώκουμε τους συνδυασμούς που θα μας δώσουν υψηλούς συντελεστές τυλίγματος για τον δεδομένο αριθμό πόλων.

Qs/p	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30	32	34	36	38	40
6	0.866		0.866	0.5		0.5	0.866		0.866	0.5		0.5	0.866		0.866	0.5		0.5	0.866
9	0.617	0.866	0.945	0.945	0.866	0.617	0.328		0.328	0.617	0.866	0.945	0.945	0.866	0.617	0.328		0.328	0.617
12	q=1		0.866	0.933		0.933	0.866								0.866	0.933		0.933	0.866
15			0.621	0.866		0.951	0.951		0.866	0.621								0.621	0.866
18		q=1		0.647	0.866	0.902	0.945		0.945	0.902	0.866	0.647							
21					0.866	0.89			0.953	0.953		0.89	0.866						
24			q=1			0.76	0.866		0.933	0.95		0.95	0.933		0.866	0.76			
27								0.866	0.877	0.915	0.945	0.954	0.954	0.945	0.915	0.877	0.866		
30				q=1					0.866	0.874		0.936	0.951		0.951	0.936		0.874	0.866
33									0.866		0.903	0.928		0.954	0.954			0.928	0.903
36					q=1						0.866	0.867	0.902	0.933	0.945	0.953		0.953	0.945
39											0.866	0.863		0.918	0.936			0.954	0.954
42						q=1						0.866		0.89	0.913			0.945	0.953
45													0.866	0.859	0.886			0.927	0.945
48							q=1							0.866	0.857			0.905	0.933
51															0.866			0.88	0.901
54								q=1									0.866	0.854	0.877
57																		0.866	0.852
60									q=1										0.866

q=1/2, 1/4	q=3/8, 3/10	Qs=21+6k, p=Qs±1, k=0, 1, 2 ...
q=3/7, 3/11	q=5/14, 5/16	Qs=24+6k, p=Qs±2, k=0, 1, 2 ...
q=2/5, 2/7	not appropriate	kw1<0.866

Σχήμα 2.1. Συντελεστές τυλίγματος για διαφορετικούς συνδυασμούς αριθμών πόλων (p) και αριθμό αυλακών (Q)[24]

Επομένως, η επιλογή μας αφορά τους κάτωθι συνδυασμούς:

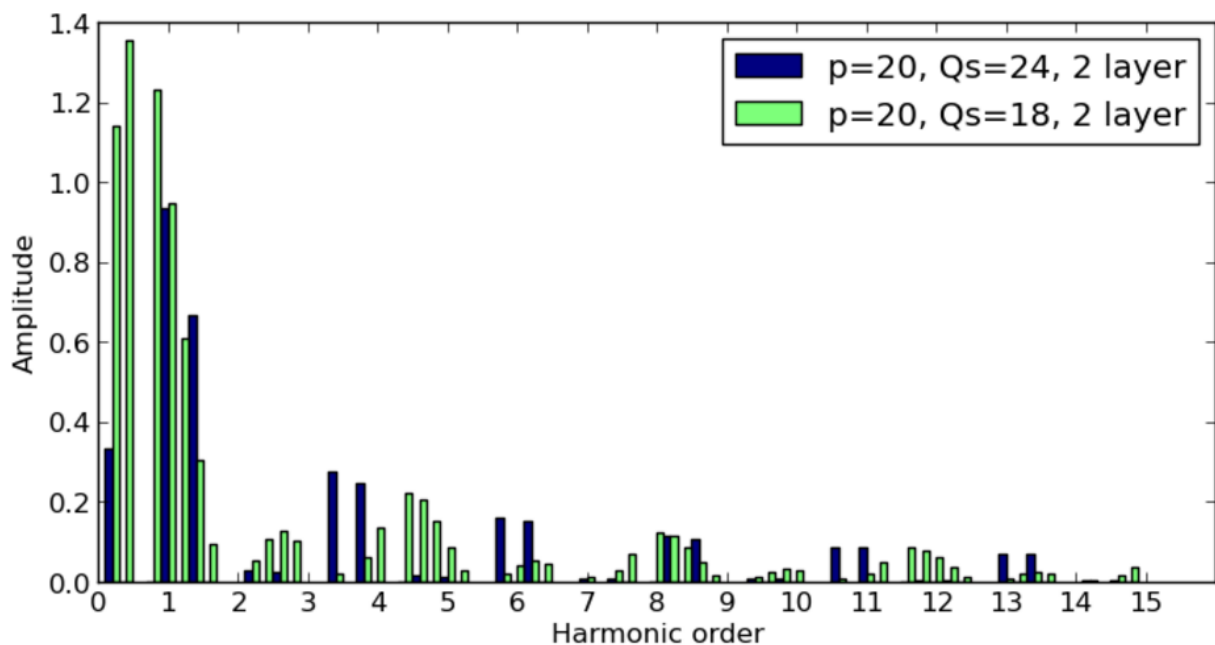
p	Q
20	18
20	21
20	24

Οι μηχανές στις οποίες ο συνδυασμός πόλων και αυλακών ικανοποιούν την εξίσωση $P=Q\pm 1$ δεν συνίστανται λόγω της ασύμμετρης μαγνητικής έλξης. Επομένως, ο συνδυασμός $p=20, Q=21$ απορρίπτεται. Επιπλέον, μια μικρή τιμή ροπής ευθυγράμμισης μπορεί να επιτευχθεί αν το ελάχιστο κοινό πολλαπλάσιο των αριθμό πόλων και αυλακιών (ΕΚΠ(p,Q)) είναι μεγάλο. Όσο πιο κοντά είναι ο αριθμός των αυλακών στον αριθμό των πόλων τόσο μεγαλύτερο είναι το ΕΚΠ.[25]. Παρακάτω φαίνονται τα ΕΚΠ των δύο συνδυασμών

$$\text{ΕΚΠ}(20,18)=180$$

$$\text{ΕΚΠ}(20,24)=120$$

Ωστόσο ,με την χρήση του γραφικού περιβάλλοντος Emetor [26] βλέπουμε ότι ο συνδυασμός $p=20, Q=18$ παρουσιάζει μεγαλύτερο αρμονικό περιεχόμενο από τον αντίστοιχο $p=20, Q=24$. Πιο συγκεκριμένα ,στην κάτωθι γραφική παράσταση παρουσιάζεται η ημιτονικότητα χωρικής κατανομής μαγνητικής ροής (“Magneto-Motive Force (MMF) distribution”), που οδηγεί σε ημιτονική κυματομορφή Ηλεκτρεγερτικής Δύναμης (ΗΕΔ).



Σχήμα 2.2. Τριφασική MMF για 20-πολικη γεννήτρια με 20 και 24 αυλάκια [26]

Για τις ανάγκες της εφαρμογής μας ,απαιτείται όσο το δυνατόν πιο ημιτονοειδής ΗΕΔ .Ακόμα ,με τα περισσότερα αυλάκια έχουμε το πλεονέκτημα ότι δεν είναι πολύ πεπλατυσμένα σε σχέση με τα λιγότερα .Επομένως ,επιλέγεται ο συνδυασμός:

$$p=20, Q=24$$

4.2.3.2 Τύλιγμα γεννήτριας

Παρακάτω περιγράφεται η διαδικασία τοποθέτησης των πηνίων των τριών φάσεων στα αυλάκια για το συνδυασμό αυλακιών-πόλων που επιλέχθηκε. Τα βασικά βήματα είναι τα ακόλουθα:

- Ο αριθμός των αυλακιών ανά πόλο και φάση γράφεται ως κλάσμα που δεν επιδέχεται περαιτέρω απλοποίηση. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, όπου $p=20$ και $Q=24$, είναι

$$q = \frac{n}{d} = \frac{2}{5}$$

Βρίσκεται στη συνέχεια μία ακολουθία από $d-n=3$ μηδενικά και $n=2$ άσσους, στην οποία οι άσσοι κατανέμονται όσο πιο «κανονικά» γίνεται.

- Η προκύπτουσα ακολουθία επαναλαμβάνεται $\frac{3P}{d} = 12$ φορές. Στη συνέχεια αντιστοιχίζεται με το σχέδιο διανεμημένου τυλίγματος με $3P=60$ αυλάκια και $q = 1$.
- Οι αγωγοί του συγκεντρωμένου τυλίγματος που αντιστοιχούν στους άσσους σχηματίζουν τη μία στρώση του τυλίγματος. Η δεύτερη στρώση προκύπτει με την επιστροφή του αγωγού απ' την άλλη πλευρά του δοντιού, δηλαδή στο επόμενο αυλάκι.
- Τέλος γράφεται ένα διάνυσμα S που περιγράφει το τύλιγμα της φάσης A . Γι' αυτό, τ' αυλάκια αριθμούνται από το 1 έως το $Q=24$. Εάν και οι δύο στρώσεις ενός αυλακιού περιέχουν αγωγούς της φάσης A , ο αριθμός του αυλακιού αυτού γράφεται δύο φορές στο διάνυσμα. Έτσι, το διάνυσμα S έχει $\frac{2Q}{3} = 16$ στοιχεία. Για τους αγωγούς επιστροφής της φάσης A τοποθετείται ένα “-“ στον αριθμό του αντίστοιχου αυλακιού. Σημειώνεται ότι απ' αυτό το διάνυσμα υπολογίζεται ο συντελεστής του τυλίγματος.

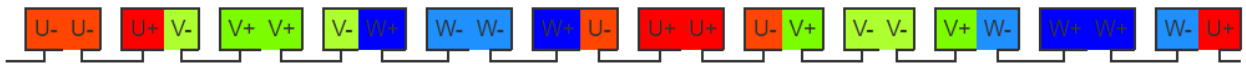
Εφαρμόζοντας αυτή τη διαδικασία προκύπτει η ακολουθία 10100, που επαναλαμβάνεται 12 φορές:

10100|10100|10100|10100|10100|10100|...

AC'BA'CB'AC'BA'CB'AC'BA'CB'AC'BA'CB'AC'BA'CB'AC'BA'CB'...

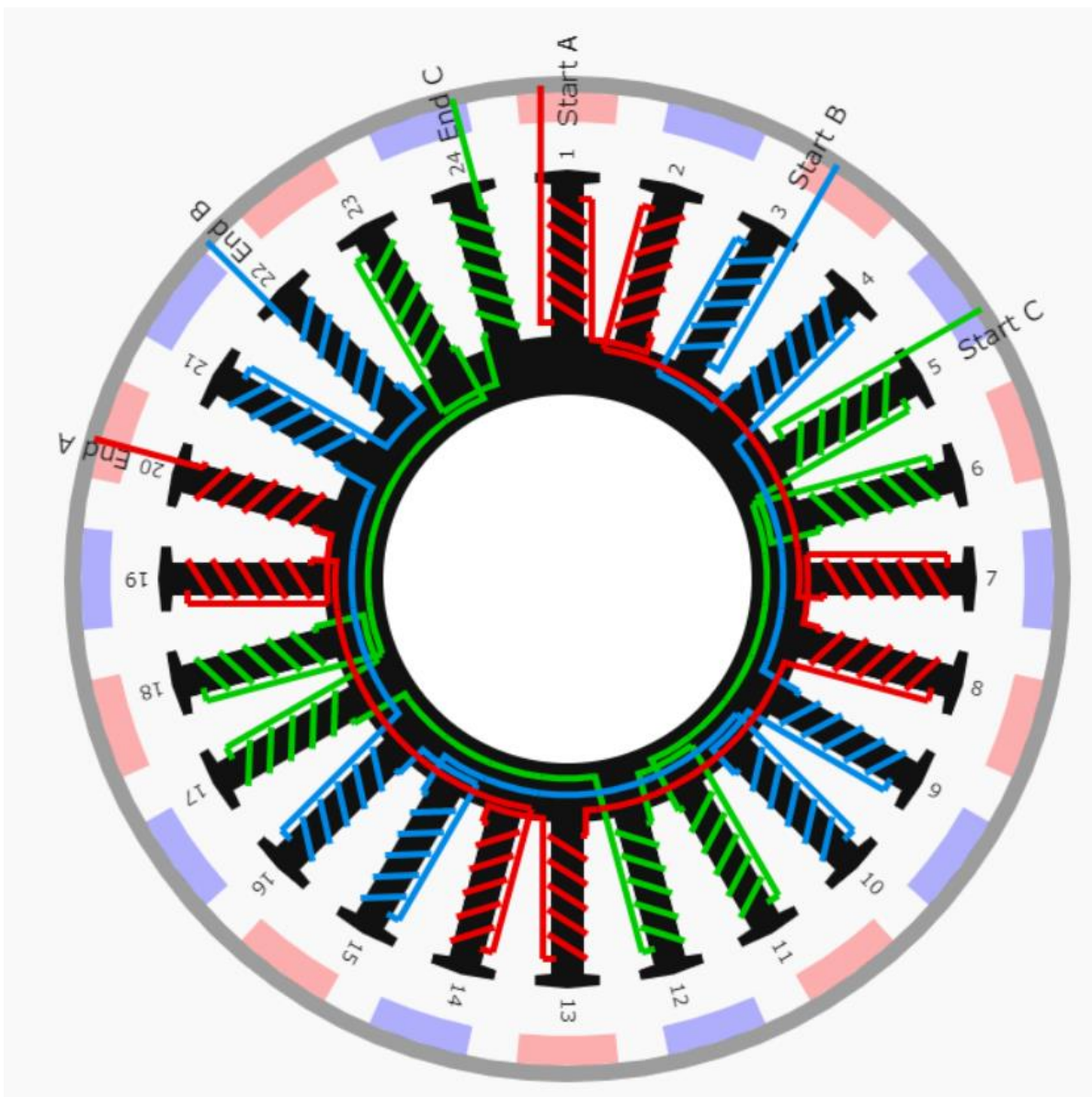
AA|A'B|B'B'|BC'|CC|C'A|A'A'|AB'|BB|B'C|C'C'|CA'|...

ή



Όπου η ακολουθία του τυλίγματος επαναλαμβάνεται 2 φορές

Τέλος , χρησιμοποιήθηκε το online λογισμικό Lambertus [27] το οποίο απεικονίζει το τύλιγμα για μηχανές εξωτερικού δρομέα. Ωστόσο για να έχουμε μια οπτική αποτύπωση για το πως κατανέμεται το τύλιγμα στον στάτη, παρουσιάζεται παρακάτω το στιγμιότυπο.



Σχήμα 2.2 Κατανομή τυλίγματος για μηχανή εξωτερικού δρομέα $p=20$, $Q=24$ [27]

3.2.3.3 Διατομή αύλακος

Βάσει της διαστολότητας του διακένου που έγινε παραπάνω, η μέγιστη μαγνητική ροή ανά πόλο υπολογίζεται ακολούθως:

$$\bar{B} = \frac{p \Phi_{max}}{\pi D L} \Rightarrow \Phi_{max} = 0,96 \text{ mWb} \quad (4.14)$$

- Οι σπείρες των πηνίων ανά φάση δίνονται από τον παρακάτω τύπο:

$$N_s = \frac{V_{rms}}{4.44 f \frac{p}{2} \Phi_{max}} = 104 \frac{\text{σπείρες}}{\text{φάση}} \quad (4.15)$$

- Η μαγνητεγερτική δύναμη δίνεται από την παρακάτω σχέση :

$$ME\Delta = N_s \cdot I_N = 391 \text{ A} - \varepsilon \quad (4.16)$$

Το ρεύμα του στάτη I_N στην μόνιμη κατάσταση λειτουργίας και σε απευθείας σύνδεση με το δίκτυο (φασική τάση 220V) δίνεται από την σχέση:

$$I_N = \frac{P_{el}}{3V \cos \varphi} \quad (4.17)$$

Όποτε αν θεωρήσουμε συντελεστή ισχύος 0,8 έχουμε:

$$I_N = 3.79 \text{ A} \quad (4.18)$$

Με απλή αντικατάσταση στην σχέση 4.16 προκύπτει ότι:

$$ME\Delta = 391 A - \varepsilon \quad (4.19)$$

- Το αναγκαίο εμβαδόν αύλακας που θα δημιουργήσει την παραπάνω ΜΕΔ υπολογίζεται με κριτήριο τη μέγιστη πυκνότητα ρεύματος η οποία επιλέγεται να είναι ίση με $J= 5$ A/mm². Επομένως, η ενεργός διατομή αύλακος θα είναι:

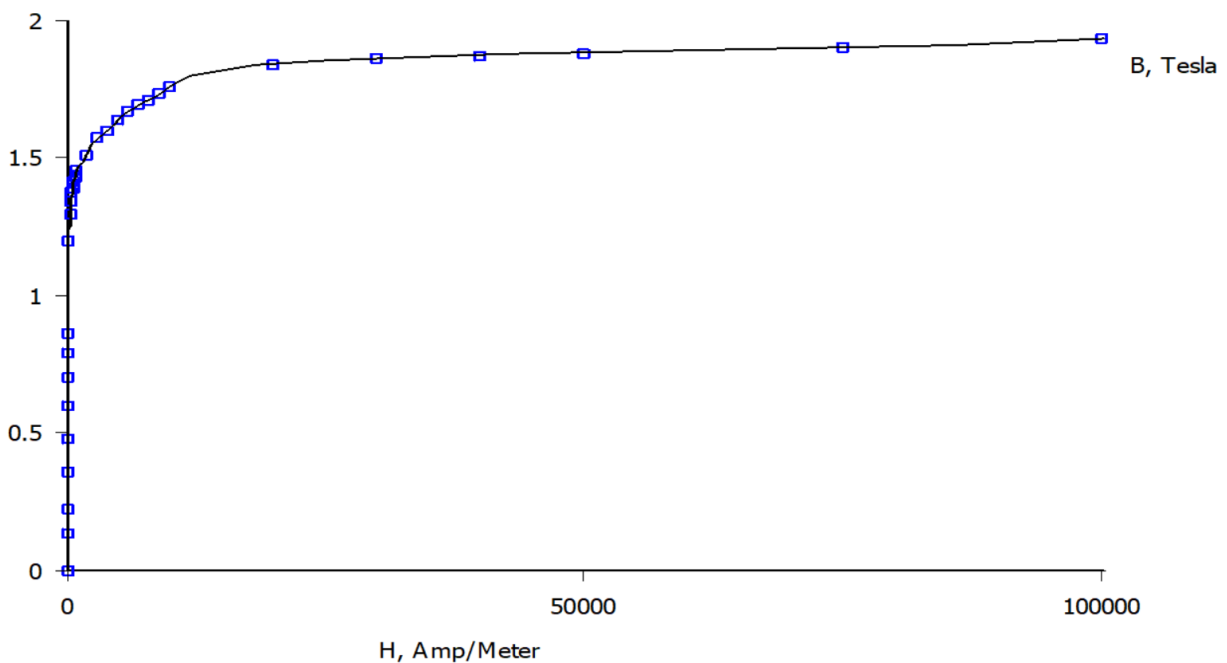
$$A_{cu} = \frac{ME\Delta}{J} = 78,2 \text{ mm}^2 \quad (4.20)$$

Θεωρώντας συντελεστή πληρότητας χαλκού στο αυλάκι $ff=0.6$ η τελική επιφάνεια προκύπτει:

$$A_{slot} = \frac{A_{cu}}{ff} = 130,35 \text{ mm}^2 \quad (4.21)$$

3.2.3.4 Μαγνητική λαμαρίνα στάτη

Για την εφαρμογή μας χρησιμοποιήσαμε την λαμαρίνα Thyssen M235-35A η οποία χαρακτηρίζεται από μειωμένες απώλειες χάρη στο μικρό πάχος της (0.35mm). Επίσης, η ίδια λαμαρίνα χρησιμοποιήθηκε και στον δρομέα.



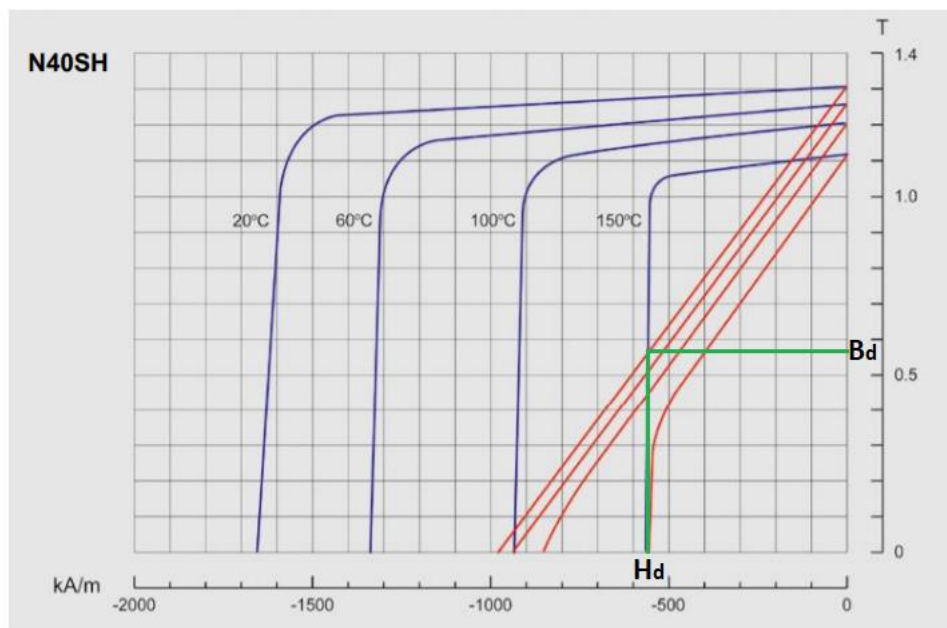
Σχήμα 2.3. Χαρακτηριστική μαγνήτισης του σιδηρομαγνητικού υλικού

4.2.4 Μεγέθη δρομέα

Η καλή αξιοποίηση του μαγνήτη έγκειται στη λειτουργία του σε περιοχή κοντά στο σημείο μέγιστης ενέργειας στην καμπύλη απομαγνήτισης. Η καμπύλη απομαγνήτισης των μαγνητών αυτών είναι σχεδόν ευθεία γραμμή, διευκολύνοντας τον υπολογισμό του σημείου που αποδίδουν τη μέγιστη ενέργεια, αρκεί να είναι γνωστά η παραμένουσα μαγνήτιση B_r , και το μαγνητικό πεδίο επαναφοράς H_c . Ο μαγνήτης που θα χρησιμοποιήσουμε στην εφαρμογή μας είναι ο N40SH με χαρακτηριστικά και καμπύλη απομαγνήτισης [28]:

NdFeB N40SH	
Πεδίο απομαγνήτισης, H_c (Ka/m)	989
Μαγνητική διαπερατότητα, μ_r	1.045
Παραμένουσα μαγνητική επαγωγή, B_r (T)	1.28
Ηλεκτρική αγωγιμότητα (MS/m)	0.694

Σχήμα 2.4.Κύρια λειτουργικά χαρακτηριστικά του μόνιμου μαγνήτη



Σχήμα 2.5. Καμπύλη απομαγνήτισης μαγνητών N40SH[28]

Ο μαγνήτης δίνει τη μέγιστη ενέργεια όταν $B_d = 0,59T$ και $H_d = 570 \text{ KA/m}$, όπως φαίνεται στο παραπάνω σχήμα. Αυτή θα πρέπει να είναι η πυκνότητα μαγνητικής ροής στην επιφάνεια του μαγνήτη κατά την ονομαστική λειτουργία της γεννήτριας.

Κατόπιν εξετάζεται η επίδραση του μαγνητικού πεδίου του στάτη στην μαγνητική επαγωγή του μαγνήτη. Η χαρακτηριστική εξίσωση της καμπύλης απομαγνήτισης είναι η ακόλουθη:

$$H(B) = H_c - \frac{H_c}{B_r} \cdot B \quad (4.22)$$

Η ηλεκτρική φόρτιση με βάση τις επιτρεπόμενες τιμές της βιβλιογραφίας θεωρήθηκε αρχικά[29]:

$$ac = 40 \text{ kA-t/m}$$

Έτσι, όταν η μηχανή λειτουργεί υπό φορτίο, η αναμενόμενη πτώση της μαγνητικής επαγωγής στην επιφάνεια του μαγνήτη προκύπτει:

$$\Delta B = \frac{B_r}{H_c} \cdot ac = 0.05 \text{ T} \quad (4.23)$$

Συνεπώς, εξασφαλίζεται ότι σε κάθε περίπτωση ο μαγνήτης θα χρησιμοποιείται κοντά στο σημείο μέγιστης ενέργειας.

Στη συνέχεια γίνεται μια αρχική εκτίμηση της γεωμετρίας των μόνιμων μαγνητών, δηλαδή του ακτινικού μήκους του μαγνήτη, καθώς και του εύρους του επί του πολικού βήματος.

Στην περίπτωση επιφανειακού μόνιμου μαγνήτη αν θεωρηθεί σταθερή η ΜΕΔ κατά μήκος μαγνήτη-διακένου θα ισχύει:

$$B_g = B_r \frac{L_m}{L_m + L_g} \quad (4.24)$$

B_r : η παραμένουσα μαγνήτιση

B_g : η μαγνητική επαγωγή στο διάκενο

L_m : το ακτινικό μήκος του μαγνήτη

L_g : το μήκος του διακένου

- Η πυκνότητα μαγνητικής ροής στο διάκενο όταν η μηχανή είναι υπό φορτίο έχει θεωρηθεί 0.7T, οπότε όταν είναι εν κενώ θα ληφθεί κάπως αυξημένη, έστω $B_g=0,9\text{T}$, δηλαδή περίπου στο 80% της παραμένουσας μαγνήτισης ($B_r = 1.28\text{T}$)[30]. Συνεπώς, το ακτινικό μήκος του μαγνήτη είναι:

$$\frac{L_m}{L_m + L_g} = 0,8 \Rightarrow L_m = 2 \text{ mm} \quad (4.25)$$

- Η ροή στο διάκενο έχει υπολογιστεί $\Phi = 0,96 \text{ mWb}$. Για την παραγωγή αυτής της μαγνητικής ροής σε κενό φορτίο, όπου η μαγνητική επαγωγή στο διάκενο θεωρείται $B_g = 0.7 \text{ T}$, το απαιτούμενο περιφερειακό μήκος μαγνήτη προκύπτει:

$$L_{magnet} = \frac{\Phi}{B_g L} = \frac{0,96}{0.7 \cdot 0.96} = 22,44 \text{ mm} \quad (4.26)$$

- Η ακτίνα δρομέα είναι:

$$R_r = \frac{D}{2} - L_m - \frac{L_g}{2} = 97.5 \quad (4.27)$$

- Δεδομένου ότι το τόξο του μαγνήτη είναι:

$$\theta_{magnet} = \frac{L_{magnet}}{R_r} \cdot \frac{180}{\pi} = 13.1884^\circ \quad (4.28)$$

και με γνωστό το πολικό βήμα:

$$pp = \frac{360}{20} = 18^\circ \quad (4.29)$$

υπολογίζεται το περιφερειακό μήκος μαγνήτη ανά πολικό βήμα.

$$magnet \text{ ang} = \frac{\theta_{magnet}}{pp} = \frac{13.1884^\circ}{18} = 73.2\% \quad (4.30)$$

4.3 Παραμετροποιημένη σχεδίαση

Έχοντας ολοκληρώσει τη βασική διαστασιολόγηση και προκαταρκτική σχεδίαση της μηχανής στο προηγούμενο κεφάλαιο, ακολουθεί η οριστική σχεδίαση, με χρήση του προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων Femm. Ωστόσο, η γεννήτρια χρειάστηκε να σχεδιαστεί αρκετές φορές για διάφορες τιμές των γεωμετρικών παραμέτρων πριν επιλεγθούν οι καταλληλότερες. Επομένως, κρίνεται αναγκαία η υλοποίηση κώδικα ο οποίος θα έχει την δυνατότητα να σχεδιάσει σε κάθε εκτέλεση την ζητούμενη γεννήτρια βάσει των παραμέτρων που θα του δίνονται. Ο κώδικας υλοποιήθηκε μέσω του λογισμικού Matlab και του ελεύθερου λογισμικού FEMM. Ειδικότερα, αξιοποιήθηκε η κονσόλα Lua 4.0. του Femm για την επικοινωνία με το λογισμικό Matlab, στο οποίο γράφτηκε σε μορφή Matlab script (*.m file) ο κώδικας που σχεδιάζει τη γεωμετρία και εν συνεχεία καλεί τον επιλύτη του Femm.

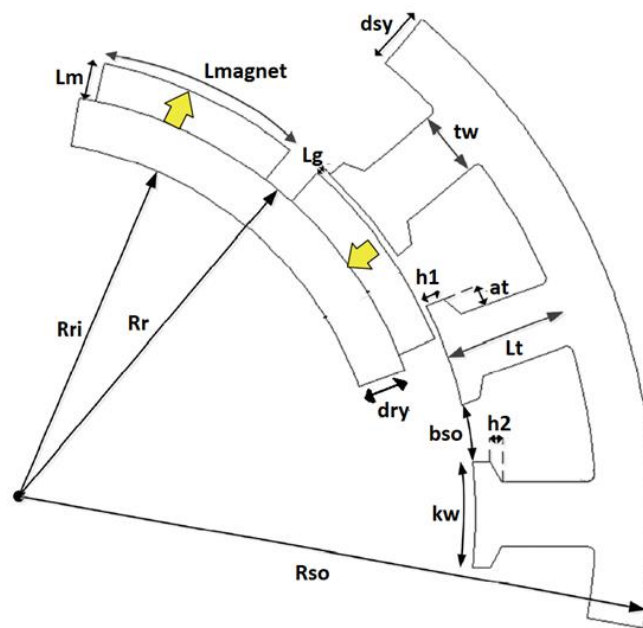
4.3.1 Επιλογή Μεταβλητών

Σκοπός της παραμετροποιημένης σχεδίασης είναι η πλήρης αναπαράσταση της γεωμετρίας της μηχανής, λαμβάνοντας μόνο τις τιμές των μεταβλητών της από έναν πίνακα. Οι μεταβλητές που εκφράζουν την γεωμετρία της γεννήτριας χωρίζονται στις ανεξάρτητες και στις εξαρτημένες:

- Ανεξάρτητες θα ονομάζουμε τις μεταβλητές που πρωταρχικά καθορίζουν τη σχεδίαση μιας τοπολογίας. Είναι τα ακλόνητα μεγέθη τα οποία ορίζουν την γεωμετρία του προβλήματος.
- Εξαρτημένες λέγονται οι μεταβλητές που μπορούν να γραφούν ως γραμμικός ή μη, συνδυασμός δύο ή περισσότερων ανεξάρτητων μεταβλητών.

ΑΝΕΞΑΡΤΗΤΕΣ	
p	αριθμός πόλων
Q	αριθμός αυλακών
D	διάμετρος του διακένου
L	ενεργό μήκος μηχανής
g	πλάτος διακένου
A	τόξο πέδιλου δοντιού
h1	μήκη πεδίου δοντιού
h2	

ΕΞΑΡΤΗΜΕΝΕΣ	
Rr	εσωτερική ακτίνα δρομέα
Rri	εσωτερική ακτίνα δρομέα
Rso	εξωτερική ακτίνα μηχανής
Lm	πάχος μαγνήτη
Lmagnet	πλάτος τόξου μαγνήτη
D_ry	σώμα δρομέα
D_sy	σώμα στάτη
kw	πλάτος τόξου πέδιλου
bs0	πλάτος τόξου αύλακος
tw	πάχος δοντιού
Lt	μήκος δοντιού



Σχήμα 4.6. Γεωμετρικές διαστάσεις της γεννήτριας[31]

4.3.2 Προσδιορισμός μεγεθών

Ορισμένες από τις εξαρτημένες μεταβλητές έχουν υπολογιστεί στο προηγούμενο κεφάλαιο ,ενώ τις υπόλοιπες θα τις ορίσουμε με βάση εμπειρικές σχέσεις και ενδεχομένως θα τις διαφοροποιούμε ελάχιστα με βάση τα αποτελέσματα.

- Το σώμα δρομέα θεωρείται ίσο με το μισό του τόξου του μαγνήτη, δεδομένου ότι η ροή που εξέρχεται (ή εισέρχεται) απ' αυτόν διαμοιράζεται στο δρομέα:

$$dry = 0.5 \cdot L_{magnet} \quad (4.31)$$

- Όμοια το σώμα στάτη θεωρείται ίσο με το μισό του τόξου του δοντιού. Ωστόσο, παρατηρήθηκε έντονος κορεσμός στον στάτη και τελικά επιλέχθηκε:

$$dsy = 0.6 \cdot tw \quad (4.32)$$

- Ο λόγος του τόξου του δοντιού προς το τόξο της αύλακος στο διάκενο κυμαίνεται από 2.5°- 4°. Ωστόσο ,όσο μεγαλύτερο είναι το άνοιγμα αύλακος τόσο μεγαλύτερη είναι και η ροπή ευθυγράμμισης[32] .Για τον παραπάνω λόγο απαιτείται εκτεταμένη ανάλυση ευαισθησίας που θα μας δίνει το μικρότερο άνοιγμα αύλακος αλλά θα ικανοποιεί και τις απαιτήσεις μας σε ροπή. Αρχικά ,επιλέχθηκε η τιμή που μας δίνει το μικρότερο μήκος αύλακος .Επομένως:

$$a = 12.8^\circ \quad (4.33)$$

$$b = sp - a \quad (4.34)$$

όπου, περίοδος δοντιού αύλακος που ισούται με:

$$sp = \frac{360}{q} \quad (4.35)$$

- Τα παραπάνω μεγέθη είναι εκφρασμένα σε μοίρες. Με μετατροπή σε μήκη τόξων από τον γνωστό τύπο προκύπτει:

$$kw = \frac{2 \cdot a \cdot \pi \cdot \frac{D}{2}}{360} \quad (4.36)$$

$$bso = \frac{2 \cdot b \cdot \pi \cdot \frac{D}{2}}{360} \quad (4.37)$$

- Το πάχος του δοντιού (tw) πρέπει να είναι 1,2 - 1,8 μικρότερο από το πάχος άκρης του δοντιού(kw). Επιλέχθηκε:

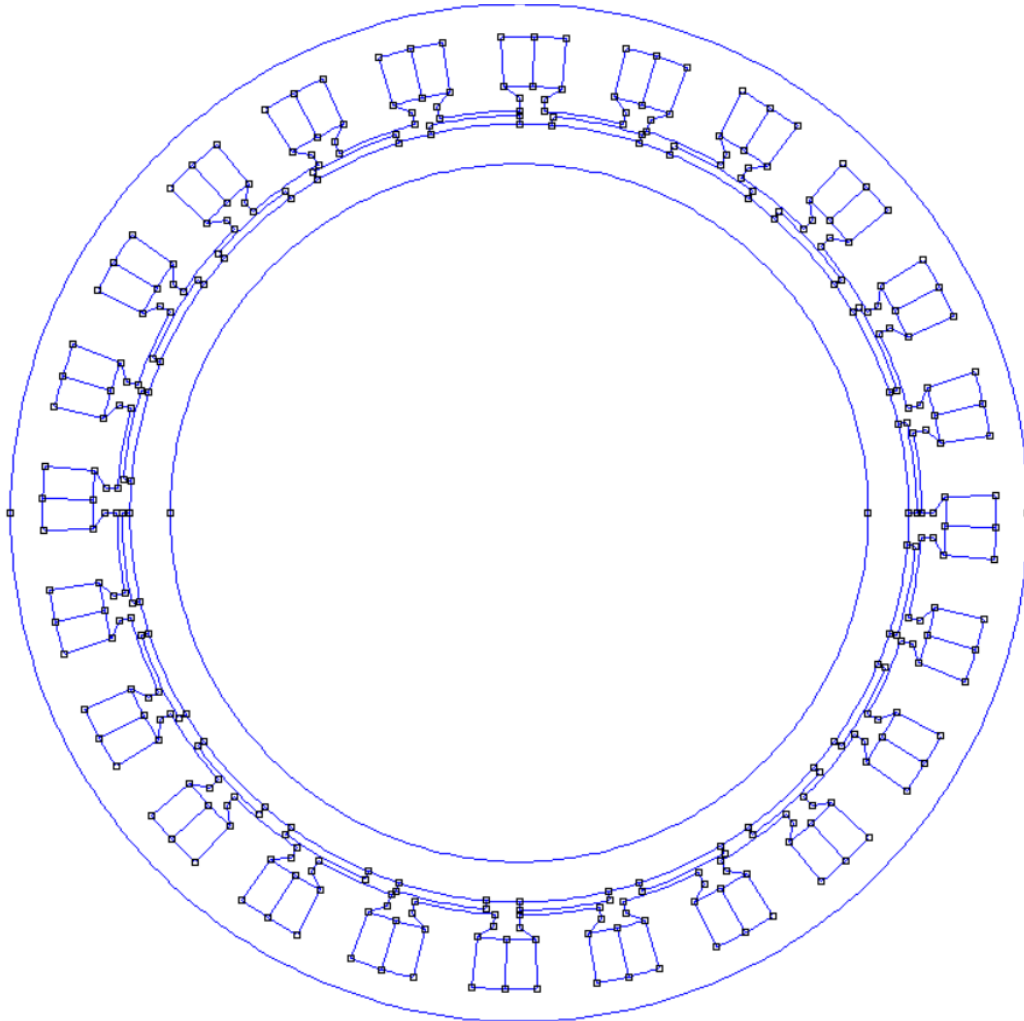
$$tw = \frac{kw}{1.6} \quad (4.38)$$

- Τέλος από το σχήμα πολύ εύκολα προκύπτουν:

$$at = \frac{kw - tw}{2} \quad (4.39)$$

$$Lt = Rso - \frac{D}{2} - dsy \quad (4.40)$$

Στον παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται η γεωμετρία της γεννήτριας που προέκυψε από την προκαταρκτική σχεδίαση.



Σχήμα 4.7 Γεωμετρία γεννήτριας

4.4 Επίλυση προβλήματος

Το επόμενο στάδιο είναι η επίλυση του μαγνητοστατικού προβλήματος που περιγράφει την γεωμετρία του μαγνητικού κυκλώματος της μηχανής, που προέκυψε από την προκαταρκτική σχεδίαση. Για την ανάλυση του μαγνητικού πεδίου χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων. Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε το ελεύθερο λογισμικό FEMM.

4.4.1 Πεδιακή ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία

Το FEMM αφού χρησιμοποιεί την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων σπάει το μοντέλο σε πολλά μικρά επιμέρους προβλήματα τα οποία τα επιλύει. Πιο συγκεκριμένα, διακριτοποιεί την περιοχή του προβλήματος χρησιμοποιώντας τριγωνικά στοιχεία. Σε κάθε στοιχείο, η λύση προσεγγίζεται με γραμμική παρεμβολή των τιμών του δυναμικού στις κορυφές του τριγώνου. Το πρόβλημα της γραμμικής άλγεβρας σχηματίζεται με ελαχιστοποίηση του μέτρου του σφάλματος ανάμεσα στην πραγματική διαφορική εξίσωση και την προσεγγιστική διαφορική εξίσωση. Ωστόσο, ο καθορισμός των τριγωνικών στοιχείων για την επίλυση του προβλήματος παίζει σημαντικό ρόλο στο σφάλμα ή στην απόκλιση. Γι' αυτόν τον λόγο είναι αναγκαία μια διερεύνηση του πλέγματος που θα ικανοποιεί τις απαιτήσεις μας σε ακρίβεια και υπολογιστικό κόστος.

4.4.1.1 Μαγνητοστατικά προβλήματα

Τα ηλεκτρομαγνητικά φαινόμενα διέπονται από τις 4 εξισώσεις του Maxwell:

$$\nabla \times E = -\frac{dB}{dt} \quad (\text{νόμος του Faraday}) \quad (4.41)$$

$$\nabla \times H = J + \frac{dD}{dt} \quad (\text{νόμος του Ampere}) \quad (4.42)$$

$$\nabla \cdot D = \rho \quad (\text{νόμος του Gauss}) \quad (4.43)$$

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (\text{νόμος του Gauss}) \quad (4.44)$$

Το πρόγραμμα FEMM χρησιμοποιείται για να επιλύσει ένα πλήθος προβλημάτων (μαγνητικά, ηλεκτρικά, θερμικά και ροής ρεύματος). Ωστόσο,

το κύριο εργαλείο ανάλυσης των ηλεκτρικών μηχανών αποτελούν τα μαγνητοστατικά προβλήματα ,διότι μπορούν να υπολογιστούν με υψηλή ακρίβεια μεγέθη όπως δύναμη ,μαγνητική επαγωγή ,πυκνότητα ηλεκτρικού ρεύματος κ.ο.κ.

Μαγνητοστατικά ονομάζονται τα προβλήματα στα οποία το μαγνητικό πεδίο είναι αμετάβλητο στο χρόνο. Ακόμα, για τα προβλήματα χαμηλών συχνοτήτων που διεκπεραιώνονται με το FEMM, μονάχα ένα υποσύνολο των εξισώσεων του Maxwell απαιτούνται. Σε αυτή την περίπτωση, η ένταση του μαγνητικού πεδίου (H) και η πυκνότητα του μαγνητικού πεδίου (B) ικανοποιούν τις σχέσεις:

$$\nabla \times H = J \quad (4.45)$$

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (4.46)$$

Ικανοποιείται επίσης η θεμελιώδης σχέση μεταξύ B και H για κάθε υλικό:

$$B = \mu H \quad (4.47)$$

Αν το υλικό είναι μη γραμμικό, όπως για παράδειγμα κορεσμένος σίδηρος ή μαγνήτες NdFeB, τότε η επιτρεπτότητα μ είναι στην πραγματικότητα μία συνάρτηση του B:

$$\mu = BH(B) \quad (4.48)$$

Η εύρεση του μαγνητικού πεδίου σε κάθε σημείο του χώρου μπορεί να επιτευχθεί υπολογίζοντας το διανυσματικό δυναμικό. Η πυκνότητα του μαγνητικού πεδίου γράφεται σε συνάρτηση του διανυσματικού δυναμικού, A, ως εξής:

$$B = \nabla \chi A \quad (4.49)$$

Αυτός ο ορισμός του B ικανοποιεί πάντα την σχέση 4.46. Τότε, η σχέση 4.45 γράφεται ως εξής:

$$\nabla \chi \left(\frac{1}{\mu(B)} \nabla \chi A \right) = J \quad (4.50)$$

Για ένα γραμμικό ιστροπικό μέσο (και υποθέτοντας ότι $\nabla \cdot A = 0$), η εξίσωση αυτή καταλήγει:

$$\frac{1}{\mu} \nabla^2 = J \quad (4.51)$$

4.4.1.2 Οριακές συνθήκες

Η επίλυση ενός ηλεκτροστατικού ή ενός μαγνητοστατικού προβλήματος προϋποθέτει την ύπαρξη οριακών συνθηκών, έτσι ώστε να υπάρχει μια και μοναδική λύση του προβλήματος.

Οι οριακές συνθήκες για το FEMM είναι τριών τύπων:

- Dirichlet. Σε αυτό τον τύπο οριακής συνθήκης, η τιμή του δυναμικού A δηλώνεται στο πάνω στο όριο, π.χ. $A=0$. Δηλώνοντας σε ένα μαγνητικό πρόβλημα $A=0$ κατά μήκος ενός ορίου της γεωμετρίας, αποτρέπεται η μαγνητική ροή από το να διαπεράσει το όριο αυτό.
- Neumann. Αυτή η οριακή συνθήκη ορίζει την κάθετη παράγωγο του δυναμικού κατά μήκος του ορίου και συνήθως . Συνήθως, ορίζεται $\frac{dA}{dn} = 0$ κατά μήκος ενός ορίου για να

‘σπρώξει’ την ροή να περάσει το όριο ακριβώς στις 90°. Χρησιμοποιείται στα μαγνητικά προβλήματα στην περίπτωση διεπιφάνειας με υλικό πολύ μεγάλης επιτρεπτότητας.

- Robin. Η οριακή συνθήκη Robin είναι ένα είδος συνδυασμού μεταξύ των Dirichlet και Neumann, καθορίζοντας μια σχέση μεταξύ της τιμής του A και της παραγώγου του. Χρησιμοποιείται συνήθως για να επιτρέψουν σε ένα περιορισμένο χωρικά πρόβλημα να μιμηθεί τη συμπεριφορά μιας άπειρης χωρικά περιοχής. Ένα παράδειγμα τέτοιας οριακής συνθήκης είναι:

$$\frac{dA}{dn} + cA = 0 \quad (4.52)$$

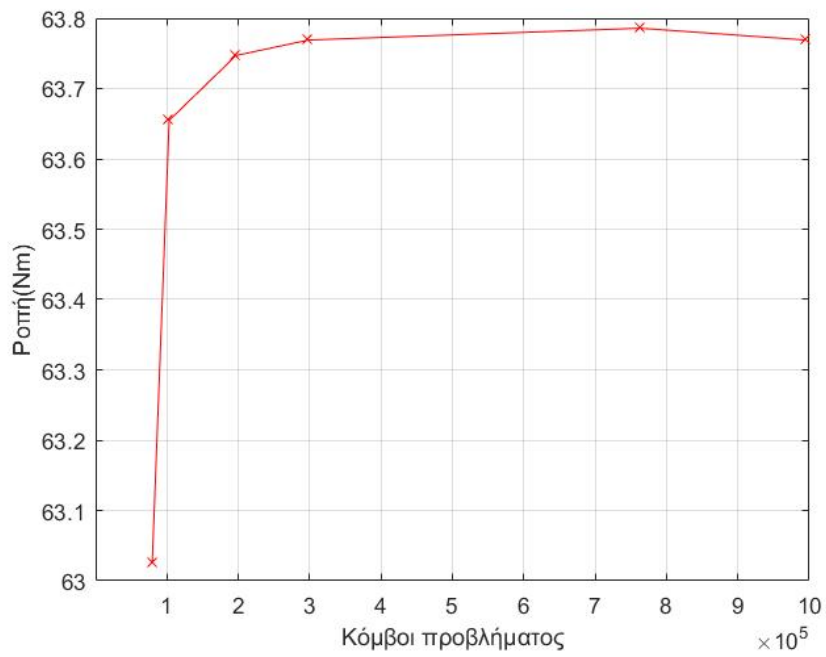
Στο μοντέλο μας χρησιμοποιήθηκε η οριακή συνθήκη Dirichlet κατά μήκος του εξωτερικού συνόρου της γεωμετρίας με το περιβάλλον.

4.4.1.3 Διερεύνηση πλέγματος

Όπως αναφέρθηκε ο καθορισμός των τριγωνικών στοιχείων για την επίλυση του προβλήματος παίζει σημαντικό ρόλο στο σφάλμα ή στην απόκλιση. Πιο συγκεκριμένα, όσο πυκνότερο είναι το πλέγμα, τόσο μεγαλύτερη ακρίβεια επιτυγχάνεται στην επίλυση του πεδίου. Από την άλλη πλευρά, πυκνότερο πλέγμα συνεπάγεται και με αυξημένο υπολογιστικό κόστος.

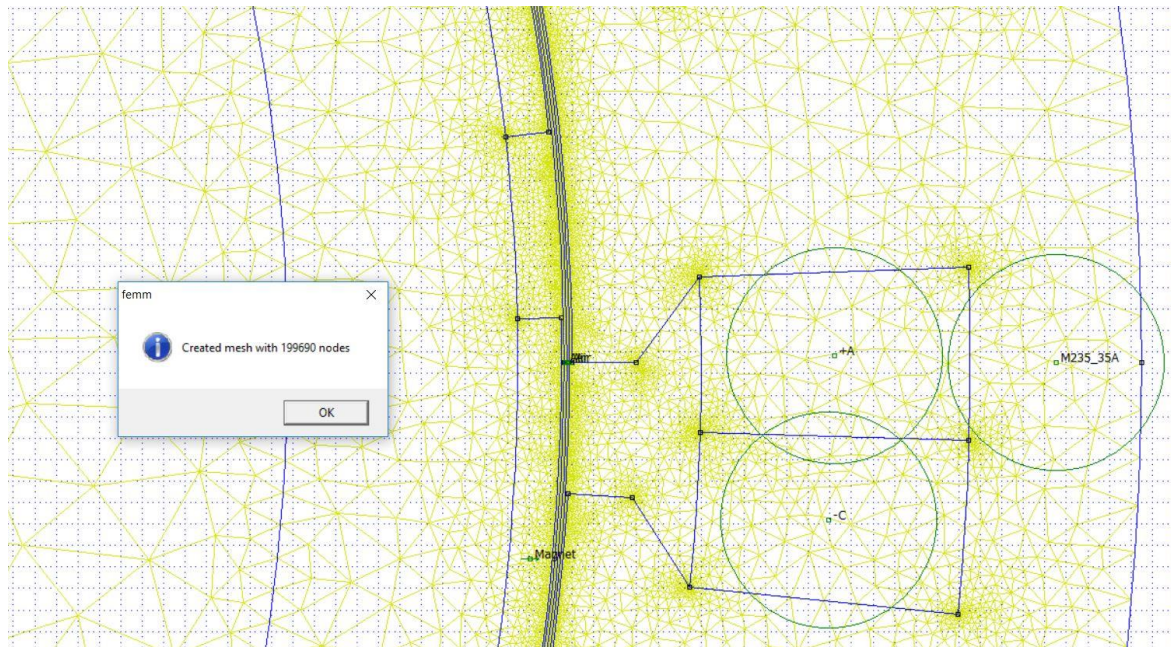
Προκειμένου να συγκεραστεί η ανάγκη για ακρίβεια και οικονομία υπολογιστικής ισχύος σε περιοχές με μεγάλη πυκνότητα ενέργειας, το πλέγμα επελέγη πυκνότερο από άλλες. Ειδικότερα, η πυκνότητα του πλέγματος στο διάκενο πρέπει να είναι πολύ μεγαλύτερη σε σύγκριση με τις περιοχές αλουμινίου και αύλακος.

Στη συνέχεια, έγινε μία διερεύνηση ως προς τον ολικό αριθμό κόμβων του προβλήματος. Για κάθε γεωμετρία μηχανής επιλύθηκε το μαγνητοστατικό πρόβλημα σε συνθήκες μέγιστης αποδιδόμενης ροπής, μεταβάλλοντας κάθε φορά την πυκνότητα του πλέγματος και μετρώντας τη ροπή. Τα αποτελέσματα φαίνονται παρακάτω:

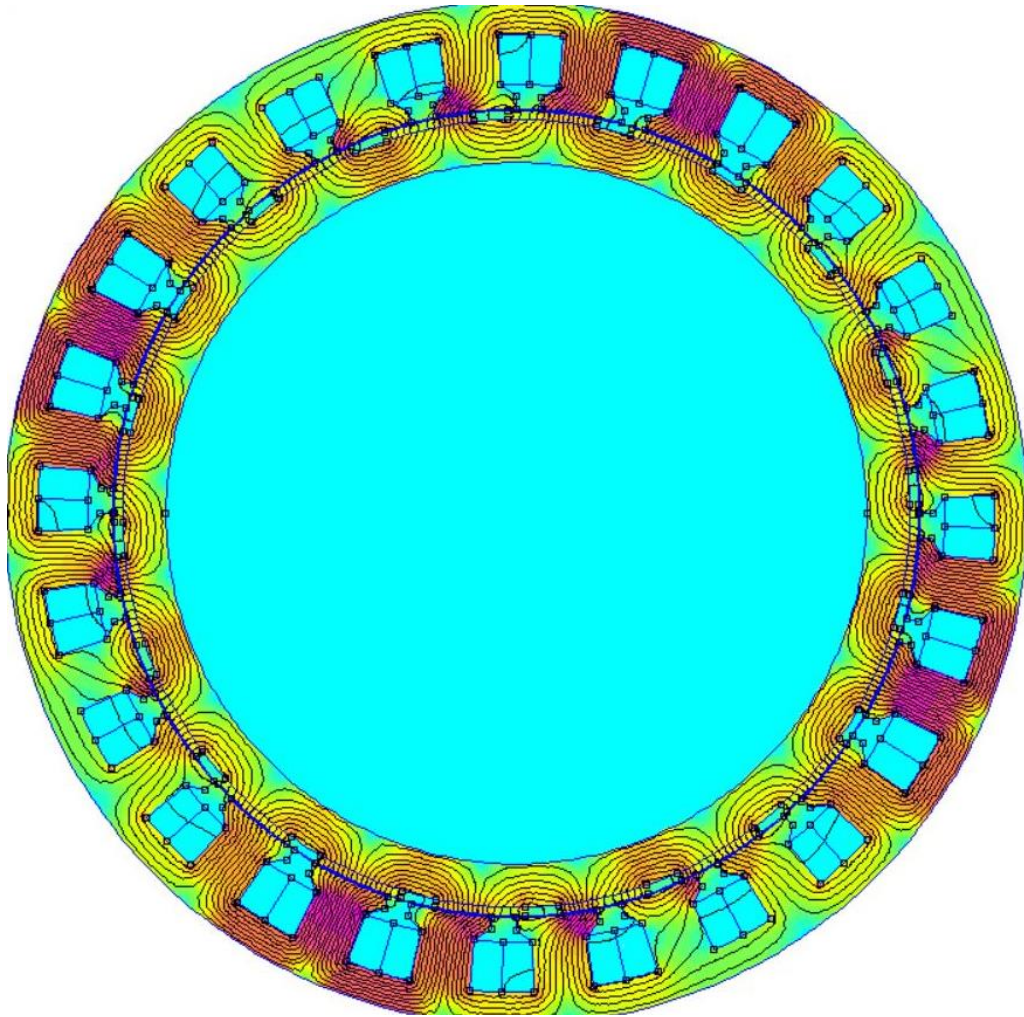


Σχήμα 4.8 Ροπή συναρτήσει αριθμού κόμβων πλέγματος

Παρατηρούμε ότι η ροπή συγκλίνει για αριθμό κόμβων 195462 και το σχετικό σφάλμα σε σχέση με την ακριβή τιμή ροπής είναι μικρότερο από 0,1%.



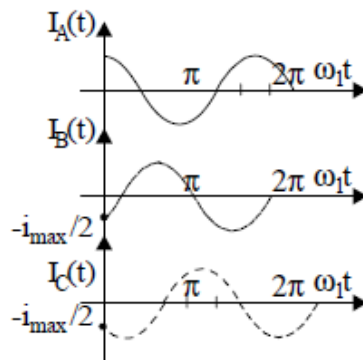
Σχήμα 4.9 Λεπτομέρεια πλέγματος



Σχήμα 4.10 Κατανομή μαγνητικής ροής για ονομαστική λειτουργία

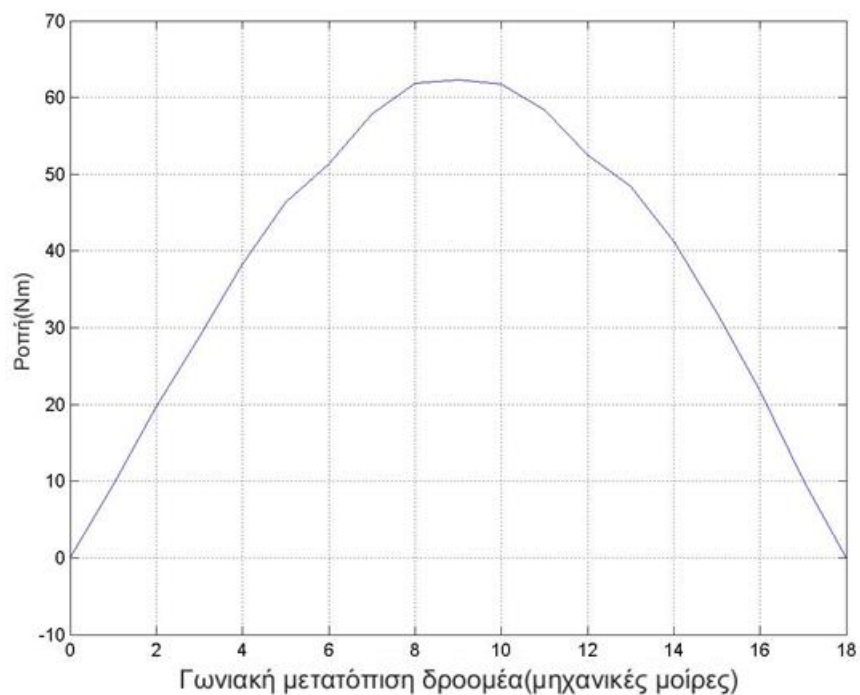
4.4.2 Γωνία Ροπής

Αρχικά, οι τιμές των ρευμάτων θα οριστούν την με την χρονική στιγμή μεγίστου της φάσης A. Θεωρώντας $i_A = I_{max}$, τα συμμετρικά ρεύματα θα είναι $i_B = i_C = -I_{max}/2$ όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 4.11 Κατανομή ρευμάτων

Έπειτα, θα ευθυγραμμίσουμε το d άξονα ενός πόλου με το στάτη, ώστε η αρχική γωνία δ να είναι μηδενική, και θα μετακινήσουμε τον δρομέα με μικρά βήματα. Μετρώντας συνεχώς την ροπή στο διάκενο βλέπουμε ότι παράγεται μια κυματομορφή που απεικονίζει το μέτρο της αποδιδόμενης ροπής συναρτήσει της μετατόπισης του δρομέα, η οποία έχει ημιτονοειδή μορφή. Συνεπώς, για μία συγκεκριμένη γωνία μετατόπισης του δρομέα παρουσιάζεται και η μέγιστη ροπή στο διάκενο. Αυτή είναι και η γωνία μέγιστης ροπής.



Σχήμα 4.12 Κυματομορφή μέγιστης ροπής

Τα πειραματικά αποτελέσματα συμφωνούν με τα θεωρητικά και η μέγιστη γωνία ροπής εμφανίζεται για $\delta=90^0$ (ηλεκτρικές μοίρες).

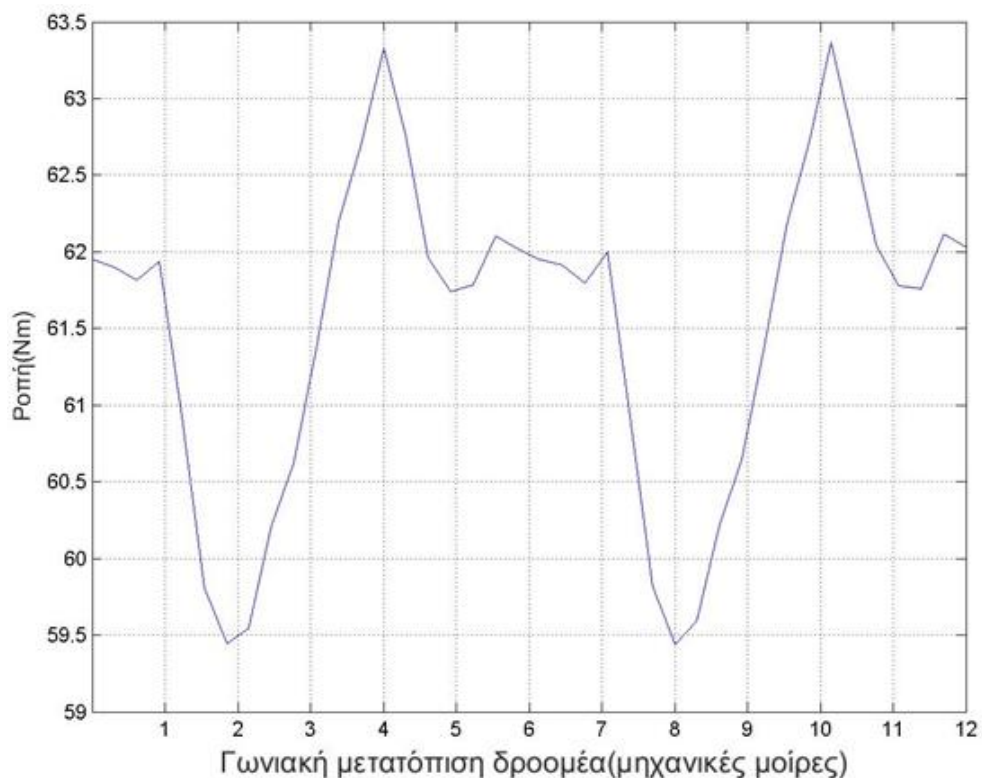
4.4.3 Κυμάτωση ροπής

Η κυμάτωση ροπής αποτελεί τον βασικό δείκτη για την αξιολόγηση της ποιότητας της παραγόμενης ροπής, διότι χαμηλή τιμή συνεπάγεται με χαμηλό θόρυβο κατά την λειτουργία του και μικρή καταπόνηση στον άξονα της γεννήτριας.

Για τον υπολογισμό αυτού του μεγέθους χρησιμοποιούμε τα δεδομένα από την επίλυση σύγχρονης περιστροφής. Πιο συγκεκριμένα, μετατοπίζουμε τον δρομέα στην θέση μέγιστης ροπής, θέτουμε τα ρεύματα σε μέγιστο στην φάση Α και ύστερα ξεκινάμε να περιστρέφουμε σύγχρονα, παράλληλα με κατάλληλη μεταβολή των ρευμάτων σύμφωνα με την σχέση:

$$\theta_e = \frac{p}{2} \cdot \theta_m \quad (4.53)$$

Παρακάτω παρουσιάζεται η κυματομορφή που προκύπτει:



Σχήμα 4.13 Κυμάτωση ροπής

Τέλος, η κυμάτωση προκύπτει από το ποσοστό της μέγιστης μείον της ελάχιστης ροπής δια τη μέση ροπή ως εξής:

$$T_{ripple} = \frac{T_{max} - T_{min}}{T_{avg}} \cdot 100\% \quad (4.54)$$

4.4.4 Ηλεκτρεγερτική δύναμη

Σύμφωνα με τον νόμο του Faraday μια μεταβαλλόμενη μαγνητική ροή μέσα σε ένα βρόχο που αποτελείται από αγώγιμο υλικό, θα επάγει μια τάση στον βρόχο σύμφωνα με τον παρακάτω τύπο:

$$e = -N \frac{d\varphi}{dt} \quad (4.18)$$

Από την κάτωθι σχέση μπορεί να υπολογιστεί η συνολική ροή που εμπλέκεται από την φάση A.

$$\Phi_{phA} = \frac{(A_{phA} - A_{ph-A}) \cdot n}{S_{slot}} \quad (4.19)$$

όπου, A_{phA} είναι το διανυσματικό δυναμικό της φάσης A,

n_c ο αριθμός των σπειρών,

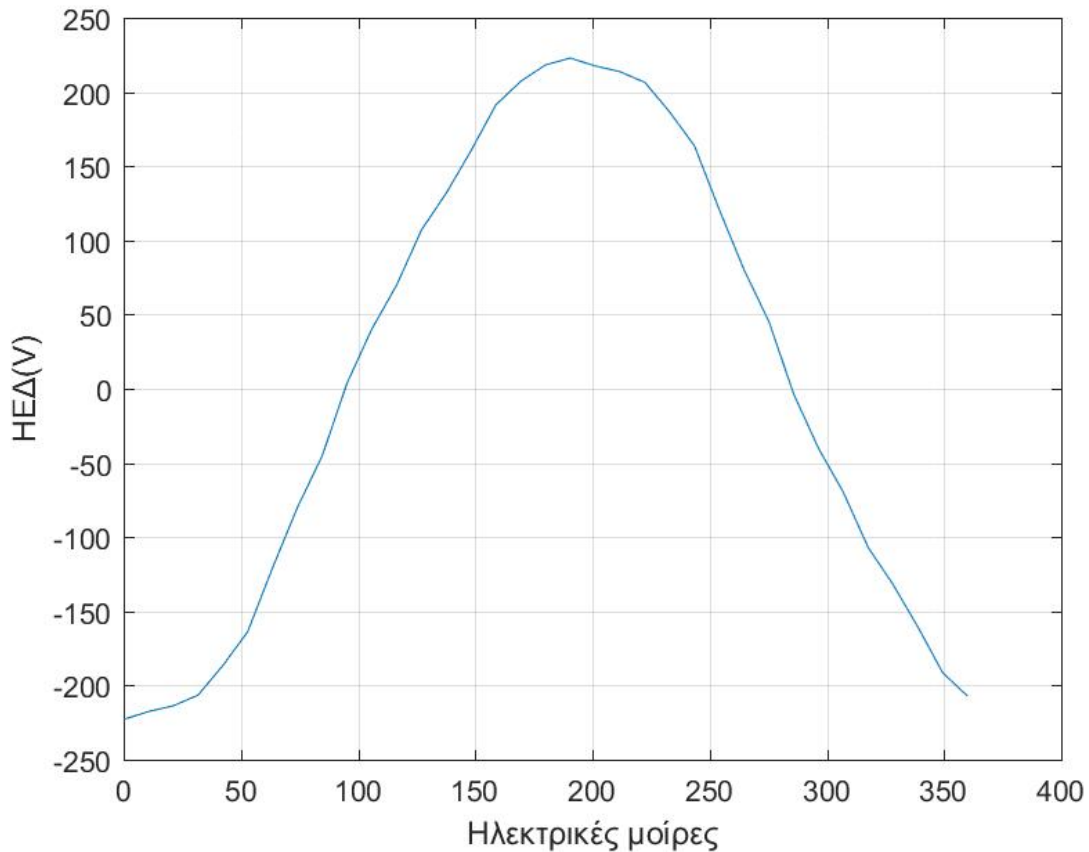
S_{slot} είναι η επιφάνεια μία αύλακας.

Διαδοχικές τιμές αποθηκεύονται σε έναν πίνακα κατά την σύγχρονη μεταβολή θέσεως δρομέα και ρευμάτων. Τελικά, η ηλεκτρεγερτική δύναμη υπολογίζεται από τον τύπο:

$$EMF(V) = \frac{2\pi n}{60} \cdot \frac{\Phi_{phA}(t+1) - \Phi_{phA}(t)}{d\theta} \quad (4.15)$$

όπου, $d\theta$ η μεταβολή της γωνίας σε rad.

Η κυματομορφή της ηλεκτρεγερτικής δύναμης της φάσης Α έχει την κάτωθι μορφή:



Σχήμα 4.14 HEΔ για ονομαστική λειτουργία

Όπως διακρίνεται καθαρά, η μορφή της τάσης που παράγεται δεν είναι απολύτως ημιτονική. Αυτό σημαίνει ότι περιέχονται αρμονικές συνιστώσες. Για να τις προσδιορίσουμε είναι απαραίτητο να προχωρήσουμε σε αρμονική ανάλυση του συγκεκριμένου σήματος μέσω του Μετασχηματισμού Fourier. Επειδή στην περίπτωση μας έχουμε διακριτό σήμα εισόδου, προχωράμε στον υπολογισμό των αρμονικών συνιστωσών μέσω του Fast Fourier Transform .

Ο αλγόριθμος FFT για το σήμα εισόδου που έχουμε υπολογίζεται μέσω της ενσωματωμένης συνάρτησης του Matlab.

Η συνάρτηση αυτή μας επιστρέφει το μέτρο όλων των αρμονικών συνιστωσών. Γνωρίζοντας τα πλάτη όλων των αρμονικών συνιστωσών υπολογίζουμε τον συντελεστή αρμονικής παραμόρφωσης:

$$THD = \frac{\sqrt{V^2 + V^3 + \dots + V_n^2}}{V_1} \quad (4.16)$$

Όπου V_1 το πλάτος της θεμελιώδους αρμονικής συνιστώσας και V_2, V_3, V_n είναι τα πλάτη όλων των αρμονικών συνιστωσών που προκύπτουν.

4.4.5 Απώλειες χαλκού

Οι απώλειες χαλκού είναι οι ωμικές απώλειες που εμφανίζονται στα τυλίγματα του στάτη και δίνονται από την εξίσωση:

$$P_{cu} = 3 \cdot I_A^2 \cdot R_A \quad (4.55)$$

Το ρεύμα του στάτη είναι γνωστό και ισούται με $I_A = 3.79A$

Για τον υπολογισμό της αντίστασης λαμβάνουμε υπόψη την ειδική αντίσταση χαλκού που ισούται με:

$$r_{cu,20} = 1.75 \cdot 10^{-5} \Omega \cdot mm \quad (4.56)$$

Ωστόσο, αυτή η ειδική αντίσταση αντιστοιχεί σε θερμοκρασία περιβάλλοντος ($\theta_0=20^0$). Προφανώς, η μηχανή μας σε ονομαστική λειτουργία δεν δουλεύει σε τόσο χαμηλή θερμοκρασία. Θα θεωρήσουμε ότι η θερμοκρασία της μηχανής σε πλήρες φορτίο είναι $\theta=90^0$ και θα υπολογίσουμε την διορθωμένη ειδική αντίσταση σύμφωνα με τον τύπο:

$$r_{cu} = r_{cu,20} \cdot [1 + a(\theta - 20)] \quad (4.57)$$

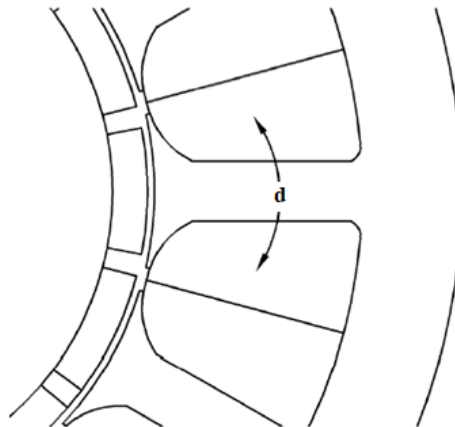
Όποτε αν θεωρήσουμε τον συντελεστή θερμοκρασιακής μεταβολής αντίστασης του χαλκού $\alpha = 3,9 \cdot 10^{-3}$ έχουμε:

$$r_{cu} = 2.1595 \cdot 10^{-5} \Omega \cdot mm \quad (4.58)$$

Για τον υπολογισμό του μέσου μήκους μιας σπείρας του τυλίγματος, λαμβάνεται υπόψη το ενεργό μήκος L της μηχανής και ορίζεται η απόσταση d (από το γεωμετρικό μέσο της μίας στρώσης μιας αύλακας, μέχρι το γεωμετρικό μέσο της ακόλουθης στρώσης της γειτονικής αύλακας .Επομένως:

$$l_{σπείρας} = 2 \cdot (L + d) \quad (4.59)$$

$$R_{phase} = r_{cu} \cdot \frac{l_{σπείρας}}{S_{wire}} \quad (4.60)$$



Σχήμα 4.15 Αναπαράσταση μέσου μήκους μεταξύ αυλακών[15]

Όπου η S_{wire} διατομή του αγωγού που ισούται με:

$$S_{wire} = \frac{A_{cu}}{n_c} \quad (4.61)$$

Τέλος, οι συνολικές απώλειες χαλκού υπολογίζονται σύμφωνα με τον κάτωθι τύπο:

$$P_{CU} = 3 \cdot I^2 \cdot \left(\frac{Q}{3} \cdot R_{phase} \right) \quad (4.62)$$

4.4.6 Απώλειες σιδήρου

Οι απώλειες υστέρησης αποτελούνται από το άθροισμα των απωλειών υστέρησης και δινορρευμάτων. Οι περισσότεροι αλγόριθμοι υπολογισμού που υπάρχουν στην βιβλιογραφία βασίζονται στην σχέση:

$$P_{losses}(f, B_{max}) = P_{hyst} + P_{eddy} = k_h \cdot f \cdot B_{max}^x + k_e \cdot f \cdot B_{max}^2 \quad (4.13)$$

- Για τις ειδικές απώλειες υστέρησης ισχύει η παραπάνω σχέση περίπτωση που η μαγνητική ροή μεταβάλλεται ημιτονοειδώς με συχνότητα f χωρίς το σχηματισμό μικρότερων βρόχων, και με μέγιστη τιμή B_m . Επιπλέον, η σταθερά k_h εξαρτάται από τη δομή του υλικού και χ , η σταθερά του Steinmetz που κυμαίνεται μεταξύ των τιμών 1.8 και 2.2, ενώ συνήθως λαμβάνεται ως 2.
- Για τις ειδικές απώλειες υστέρησης ισχύει η παραπάνω σχέση περίπτωση που η μαγνητική ροή μεταβάλλεται ημιτονοειδώς με συχνότητα f , όπου η σταθερά k_e εξαρτάται από τις ιδιότητες του υλικού.

Ωστόσο, οι απλές σχέσεις υπολογισμού 4.1 και 4.2, έχουν περιορισμένη εφαρμογή και δεν ανταποκρίνονται πλήρως στις πραγματικές πεδιακές συνθήκες κατά τη λειτουργία μιας ηλεκτρικής μηχανής.[34]

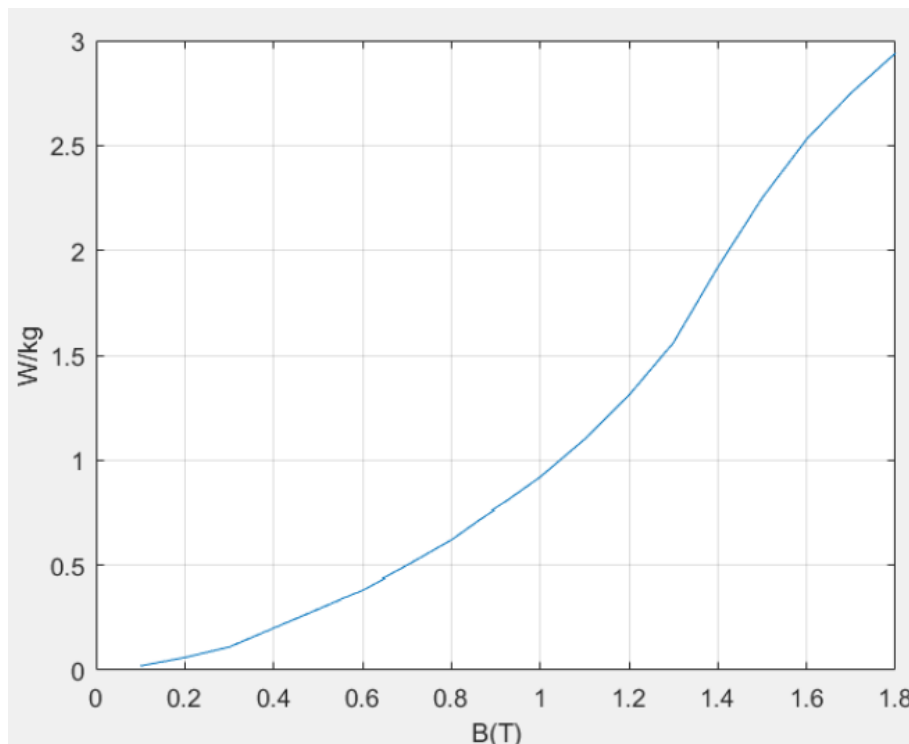
Στην παρούσα εργασία γίνεται μια προσπάθεια για την μοντελοποίηση και τον υπολογισμό των απωλειών σιδήρου με βάση τα πειραματικά δεδομένα της καμπύλης απωλειών του σιδήρου που δίνει ο κατασκευαστής (σχήμα 4.16)[34].

Αξίζει να αναφερθεί ότι στο σχήμα 4.16 απεικονίζονται μόνο οι απώλειες πυρήνα για μαγνητική ροή που μεταβάλλεται με συχνότητα 50Hz.

Πιο συγκεκριμένα, εφόσον η μηχανή στρέφεται με συχνότητα 300 ΣΑΛ ($f_m=5 \text{ Hz}$) τότε η ηλεκτρική συχνότητα του πεδίου του στάτη θα είναι:

$$f_e = f_m \cdot \frac{p}{2} = 50 \text{ Hz}$$

Στην συνέχεια, θα γίνει περιγραφή της μεθοδολογίας που εφαρμόστηκε. Αρχικά, λόγω των επιφανειακών μαγνητών που χρησιμοποιήσαμε στην υφιστάμενη γεωμετρία, η μαγνητική ροή παραμένει σχεδόν σταθερή σε φορά και στον όγκο του σιδήρου του δρομέα. Επομένως, χωρίς μεταβολή της μαγνητικής ροής δεν υπάρχουν απώλειες πυρήνα στον δρομέα και απομένει ο υπολογισμός μόνο των απωλειών πυρήνα του στάτη. Έπειτα, για κάθε στοιχείο του πλέγματος που δημιουργεί το λογισμικό ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων που ανήκει στον στάτη, λαμβάνεται το μέτρο της μαγνητικής επαγωγής. Στη συνέχεια, υπολογίζεται ο όγκος και το βάρος του στοιχείου και με απλή αντιστοίχιση στην καμπύλη απωλειών της μαγνητικής λαμαρίνας λογαριάζονται οι απώλειες του στοιχείου. Τέλος, αθροίζοντας τις απώλειες του κάθε στοιχείου, υπολογίζονται οι συνολικές απώλειες πυρήνα.



Σχήμα 4.16 Καμπύλη απωλειών σιδήρου

4.4.7 Απόδοση

Οι γεννήτριες εναλλασσόμενου ρεύματος καταναλώνουν μηχανική ισχύ και παράγουν ηλεκτρική. Η απόδοση τους ορίζεται από την σχέση:

$$n (\%) = \frac{P_{out}}{P_{out} + P_{cu} + P_{fe}} \quad (4.24)$$

Όπου έχουμε αμελήσει τις μηχανικές και τις κατανεμημένες απώλειες, οι οποίες συγκριτικά είναι πολύ μικρές.

4.5 Ανάλυση ευαισθησίας παραμέτρων τελικής σχεδίασης

Βελτιστοποίηση με πολλαπλά αντικείμενα ή χαρακτηριστικά, είναι η διαδικασία της ταυτόχρονης βελτιστοποίησης δυο ή περισσότερων αντικρουόμενων ζητημάτων με διαφόρους περιορισμούς.

Προβλήματα βελτιστοποίησης με πολλαπλά κριτήρια μπορούν να βρεθούν σε διαφόρους τομείς: παράγωγη και σχεδιασμός διαδικασιών, οικονομικά, σχεδιασμό αεροσκαφών, πετρελαϊκές βιομηχανίες, σχεδιασμό αυτοκινήτων, ή οπουδήποτε χρειάζεται να παρθεί η καταλληλότερη απόφαση για την εξισορρόπηση όλων των παραγόντων μεταξύ δυο η περισσότερων αντικρουόμενων στόχων. Μεγιστοποιώντας το κέρδος και ελαχιστοποιώντας το κόστος ενός προϊόντος, μεγιστοποιώντας την απόδοση και ελαχιστοποιώντας την κατανάλωση καυσίμου σε ένα όχημα και ελαχιστοποιώντας το βάρος καθώς μεγιστοποιείται η αντοχή κάποιου εξαρτήματος είναι παραδείγματα προβλημάτων βελτιστοποίησης με πολλαπλά κριτήρια.

Εάν ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης με πολλαπλά κριτήρια είναι καλώς ορισμένο, τότε δεν θα υπάρχει μοναδική λύση η οποία ταυτόχρονα να ελαχιστοποιεί τον κάθε στόχο στο ελάχιστο δυνατό. Σε κάθε περίπτωση ένα κριτήριο πρέπει να έχει φτάσει ένα σημείο τέτοιο ώστε κάθε προσπάθεια επιπλέον βελτιστοποίησής του να έχει ως αποτέλεσμα την υποβάθμιση άλλων κριτηρίων. Το να βρεθεί μια τέτοια λύση, και να πιστοποιηθεί το πόσο καλύτερη είναι συγκριτικά με άλλες (γενικά θα υπάρχουν πολλές) είναι ο σκοπός όταν συντίθεται και λύνεται ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης με πολλαπλά κριτήρια [35].

Η ανάλυση ευαισθησίας αποτελεί την ευκολότερη μέθοδο βελτιστοποίησης. Διενεργώντας ανάλυση ευαισθησίας σε κάποιες παραμέτρους επιλύουμε όλα τα αριθμητικά προβλήματα που προκύπτουν και λαμβάνουμε τα αποτελέσματα. Βάσει των αποτελεσμάτων επιλέγουμε την καλύτερη γεωμετρία για την μηχανή μας. Ένας γνωστός συνδυασμός που θα μπορούσαμε να εφαρμόσουμε ώστε να καταλήξουμε στην ιδανικότερη για την εφαρμογή μας γεωμετρία είναι το αλγεβρικό άθροισμα των αντικειμενικών συναρτήσεων πολλαπλασιασμένα με βάρη. Εφαρμόζοντας την μέθοδο αυτή υπολογίζουμε το άθροισμα $g(x)$ των αντικειμενικών συναρτήσεων $f_i \in F$ όπου η αντικειμενική συνάρτηση πολλαπλασιάζεται με ένα βάρος w_i που αντιπροσωπεύει τη βαρύτητα του συγκεκριμένου κριτηρίου. Έτσι με αυτή τη μέθοδο τα προβλήματα πολυαντικειμενικής βελτιστοποίησης μετατρέπονται σε μονοκριτηριακά προβλήματα.

$$g(x) = \sum_{i=1}^n w_i f_i(x) \quad (4.25)$$

Προφανώς ισχύει:

$$\sum_{i=1}^n w_i = 1 \quad (4.26)$$

Μεταβάλλοντας τις τιμές των βαρών, θα προκύψουν διαφορετικές λύσεις του προβλήματος, οι οποίες θα αντιστοιχούν σε διαφορετικές εφαρμογές.

Οι αντικειμενικές συναρτήσεις στην περίπτωση μας είναι η μέγιστη (T) και η κυμάτωση ροπή (T_{ripple}), το αρμονικό περιεχόμενο της τάσης (THD) και η απόδοση (eff).. Στην περίπτωση μας αποφασίστηκε να συνδυαστούν όλα τα παραπάνω κύρια χαρακτηριστικά σε μία μόνο μονοκριτηριακή αντικειμενική συνάρτηση. Για να είναι πιο σαφής η λειτουργία της συνάρτησης αυτής, προχωρήσαμε στην κανονικοποίηση των μεγεθών που αναφέρονται θεωρώντας ως τιμές αναφοράς, τις τιμές των μεγεθών αυτών για την αρχική σχεδίαση της μηχανής. Οι τιμές αυτές παρουσιάζονται παρακάτω:

Μέγιστη Ροπή - T	63.6T
Κυμάτωση Ροπής – T _{ripple}	6.38%
Αρμονική Παραμόρφωση Τάσης - THD	4,462%
Απόδοση - eff	64.22%

Προκύπτει έτσι μια γενική σχέση για την αντικειμενική συνάρτηση:

$$Result = w_1 \cdot \frac{63.6}{T} + w_2 \cdot \frac{T_{ripple}}{6.38} + w_3 \cdot \frac{THD}{4,462} + w_4 \cdot \frac{94.22}{eff} \quad (4.27)$$

Όπως φαίνεται, το αποτέλεσμα για την περίπτωση της αρχικής σχεδίασης ισούται με ένα. Επειδή ορισμένες από τις μεταβλητές θέλουμε να μειωθούν όσο το δυνατό περισσότερο, τις βάζουμε στον αριθμητή του αντίστοιχου κλάσματος (T_{ripple}, THD), αντίθετα όσες θέλουμε να αυξηθούν όσο το δυνατόν περισσότερο κατά τη βελτιστοποίηση τις βάζουμε στον παρονομαστή (T, eff), ώστε η αύξησή τους, να οδηγεί σε μείωση του αντίστοιχου κλάσματος και συνεπώς του συνολικού αποτελέσματος της αντικειμενικής συνάρτησης.

Η βέλτιστη τιμή ανάλογα τους συντελεστές που έχουμε βάλει στην εξίσωση (4.27) βρίσκεται με γενετικούς αλγόριθμους και μέτωπα pareto. Ωστόσο, η χρήση τους δεν αποτελεί αντικείμενο αυτής της εργασίας. Αυτό που επιχειρείται είναι ο συγκερασμός των αντικρουόμενων κριτηρίων επίδοσης και απόδοσης, έτσι ώστε η μηχανή να παρουσιάζει ισορροπημένα χαρακτηριστικά.

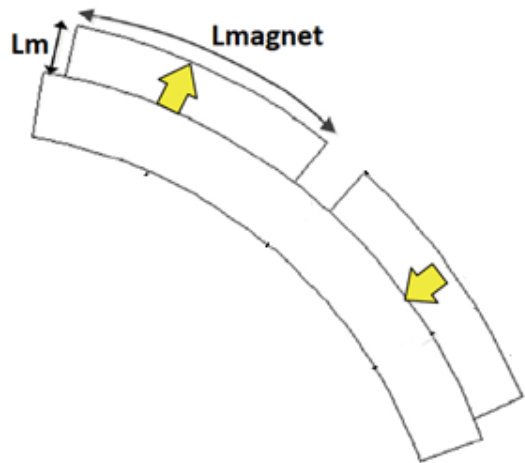
Η μεθοδολογία λοιπόν που θα εφαρμόσουμε παρακάτω έχει ως εξής:

1. Θα ορίσουμε τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά που θα γίνεται η βελτίωση και το πεδίο ορισμού τους. Με αυτόν τον τρόπο αποτρέπουμε την πιθανότητα να καταλήξουμε σε κάποιες γεωμετρίες που δεν ορίζονται και περιορίζουμε το υπολογιστικό κόστος.
2. Θα μεταβάλουμε μονοσήμαντα το κάθε μέγεθος που προέκυψε από την προκαταρκτική σχεδίαση και θα εκτελούμε τον αλγόριθμο με τα κάτωθι βήματα:
 - i. Εύρεση μέγιστης γωνίας ροπής
 - ii. Λειτουργία Σύγχρονης περιστροφής της γεννήτριας, όπου υπολογίζονται η κυμάτωση ροπής, η ΗΕΔ και το αρμονικό της περιεχόμενο.
 - iii. Εύρεση απόδοσης για ονομαστική λειτουργία

3. Επιλογή του πιο συμφέροντα συνδυασμού σταθμίζοντας τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της κάθε γεωμετρίας

4.5.1 Βελτιστοποίηση δρομέα

Τα κύρια χαρακτηριστικά του δρομέα είναι η γωνία μαγνήτη και το πάχος του (σχήμα 4.17).



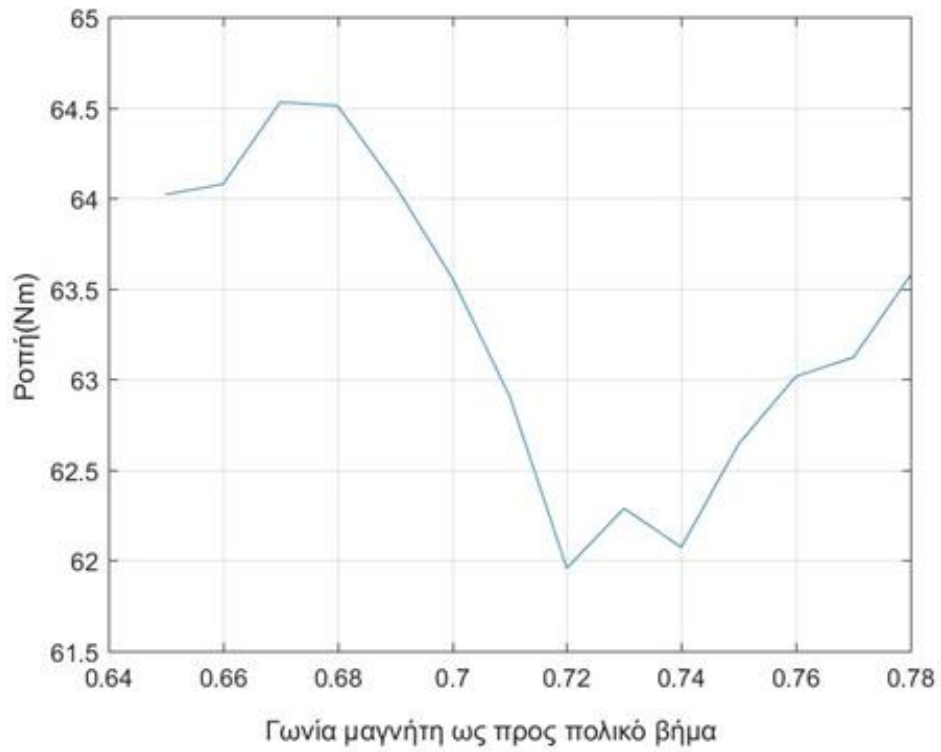
Σχήμα 4.17 Μεγέθη δρομέα

Τα μεγέθη αυτά είναι αλληλένδετα μεταξύ τους, γιατί η μεταβολή μόνο του ενός επηρεάζει την διέγερση της γεννήτριας. Συνεπώς, η ανάλυση ευαισθησίας του κάθε μεγέθους ξεχωριστά δεν θα μας οδηγήσει σε εύλογα συμπεράσματα, ώστε να αποφανθούμε για την βέλτιστη διαμόρφωση.

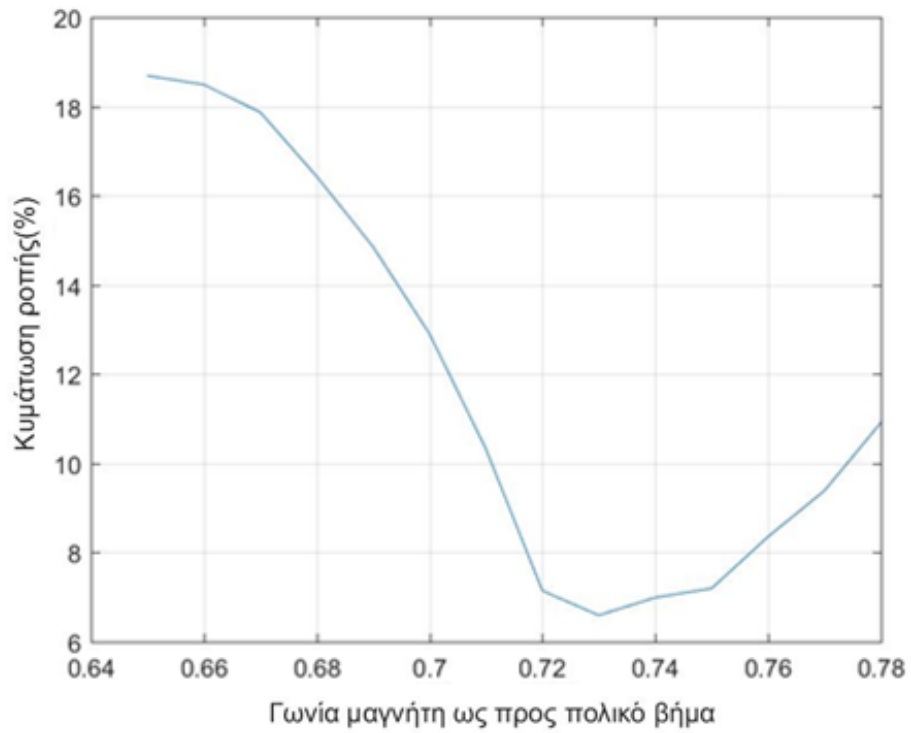
Για αυτόν τον λόγο, ορίσαμε ως σταθερό εμβαδό μαγνήτη ,εκείνο που προέκυψε από την προκαταρκτική σχεδίαση, το οποίο ικανοποιεί τις απαιτήσεις μας σε ροπή .Στη συνέχεια μεταβάλλαμε την γωνία του μαγνήτη, μεταβάλλοντας κατάλληλα και το πάχος του μαγνήτη. Κάτω από αυτές τις προϋποθέσεις, επιτυγχάνουμε να παραμείνει σταθερή η διέγερση. Στα διαγράμματα η γωνία του μαγνήτη είναι εκφρασμένη σαν ποσοστό επί της γωνίας του πολικού βήματος(magnet pole per ratio-mprr).

Επιλέξαμε το mpr να λαμβάνει τιμές από 0,65 έως 0,78, γιατί γνωρίζουμε ότι θεωρητικά το βέλτιστο σημείο κυμαίνεται γύρω από τα 2/3 του. Πράγμα που επιβεβαιώθηκε και από μεμονωμένες μετρήσεις για ακραίες τιμές που επιλέξαμε.

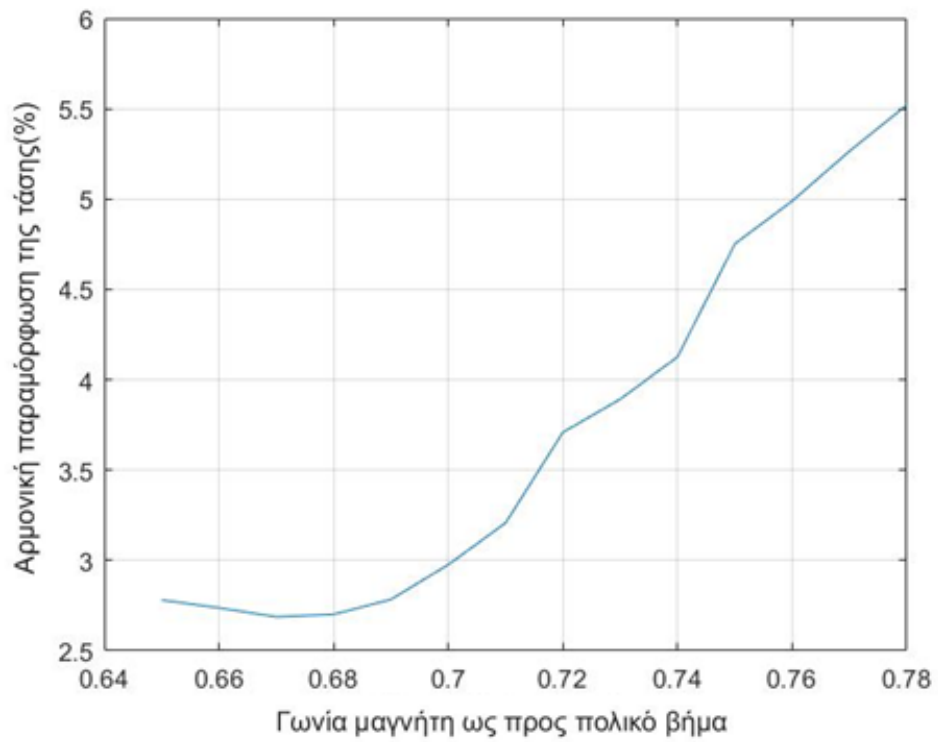
Μέγιστη ροπή



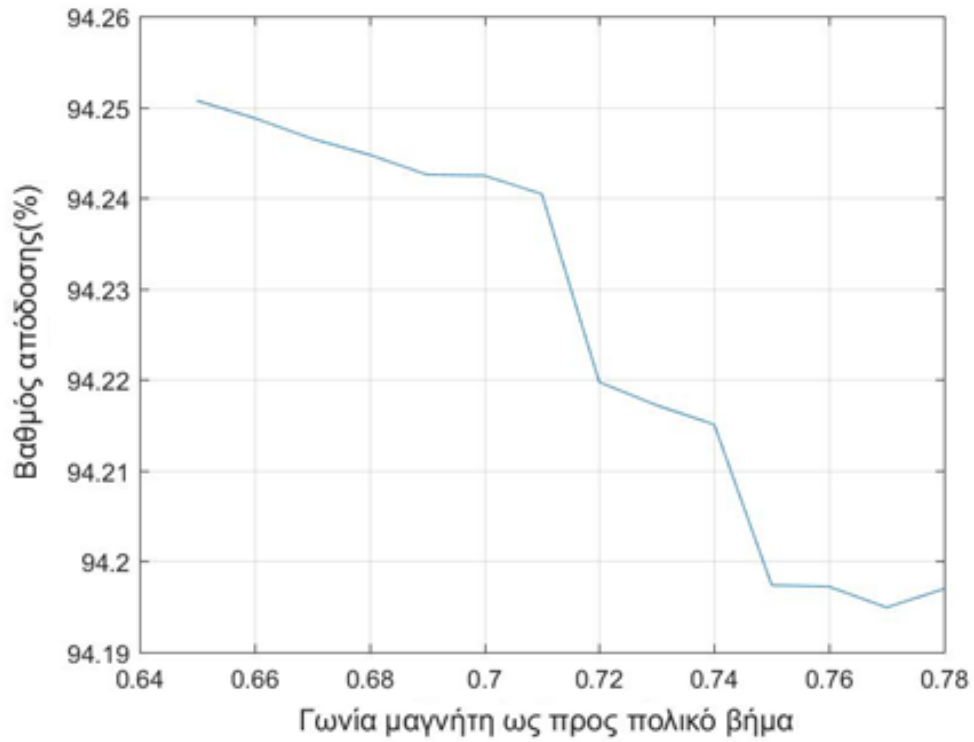
Κυμάτωση Ροπής



Αρμονική παραμόρφωση τάσης



Βαθμός Απόδοσης



Η μέγιστη ονομαστική ροπή επιτυγχάνεται για γωνία μαγνήτη ίση με 0.64, ενώ αντίστοιχα η ελάχιστη για 0.72. Αντίστοιχα, η ελάχιστη κυμάτωση ροπής επιτυγχάνεται για το περιφερειακό μήκος μαγνήτη που έχει υπολογιστεί στη προκαταρκτική σχεδίαση.

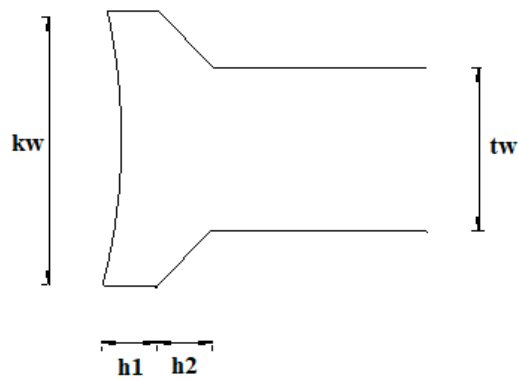
Η αρμονική παραμόρφωση τάσης παρουσιάζει ελάχιστο για γωνία μαγνήτη 0,67. Ωστόσο, όλες οι τιμές που κυμαίνονται από 0,65-0,69 μας δίνουν σχεδόν “καθαρή” ημιτονοειδή κυματομορφή τάσης. Τέλος, ακόμη και η μέγιστη τιμή (THD=5.5%) που προκύπτει για το μέγιστη γωνία μαγνήτη βρίσκεται μέσα σε ανεκτά όρια, λόγω των σχεδιαστικών επιλογών που έγιναν (τύλιγμα, συνδυασμός πόλων - αυλακών).

Η απόδοση της γεννήτριας μεταβάλλεται ελάχιστα με την αύξηση της γωνίας του μαγνήτη. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η γωνία μαγνήτη δεν επηρεάζει τις απώλειες χαλκού, ενώ αντίστοιχα η μεταβολή των απωλειών πυρήνα είναι πολύ μικρή.

Απ’ όλα τα παραπάνω κρίνεται ότι η γωνία μαγνήτη της προκαταρκτικής σχεδίασης ($\text{mpg} = 0,73$) μας δίνει τα πιο ισορροπημένα χαρακτηριστικά, γιατί βελτιώνει σημαντικά της ποιότητα της παραγόμενης ροπής. Ενώ αντίστοιχα, η αύξηση του THD δεν είναι τόσο δραστική και κρίνεται ικανοποιητική για την εφαρμογή μας.

4.5.2 Βελτιστοποίηση στάτη

Η βελτιστοποίηση του στάτη αφορά όλα τα μεγέθη που περιγράφουν την γεωμετρία του δοντιού (σχήμα 4.18). Σε αντίθεση με την ανάλυση ευαισθησίας που έγινε στον δρομέα, η μεταβολή του πάχους πέλδου (k_w) και δοντιού (t_w) συνεπάγεται με μεταβολή στο άνοιγμα αύλακος και συνεπώς στο ρεύμα που διαρρέει τα πηνία της μηχανής. Γι’ αυτό τον λόγο, γράφτηκε κατάλληλος κώδικας στο Matlab ώστε να διατηρείται σταθερό το ρεύμα. Πιο συγκεκριμένα, από τα δεδομένα εισόδου που δίναμε στο πρόγραμμα, μέσω μαθηματικών σχέσεων υπολογιζόταν το εμβαδό του αύλακος. Ύστερα, μεταβάλαμε κατάλληλα την πυκνότητα ρεύματος J ώστε να διατηρείται σταθερό το ρεύμα.

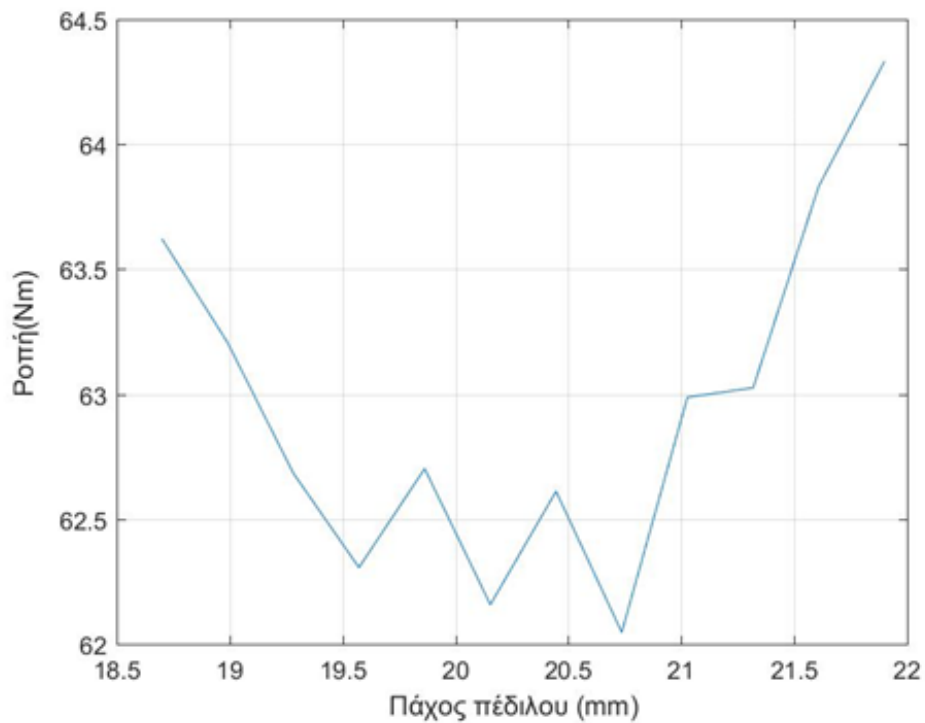


Σχήμα 4.18 Μεγέθη στάτη

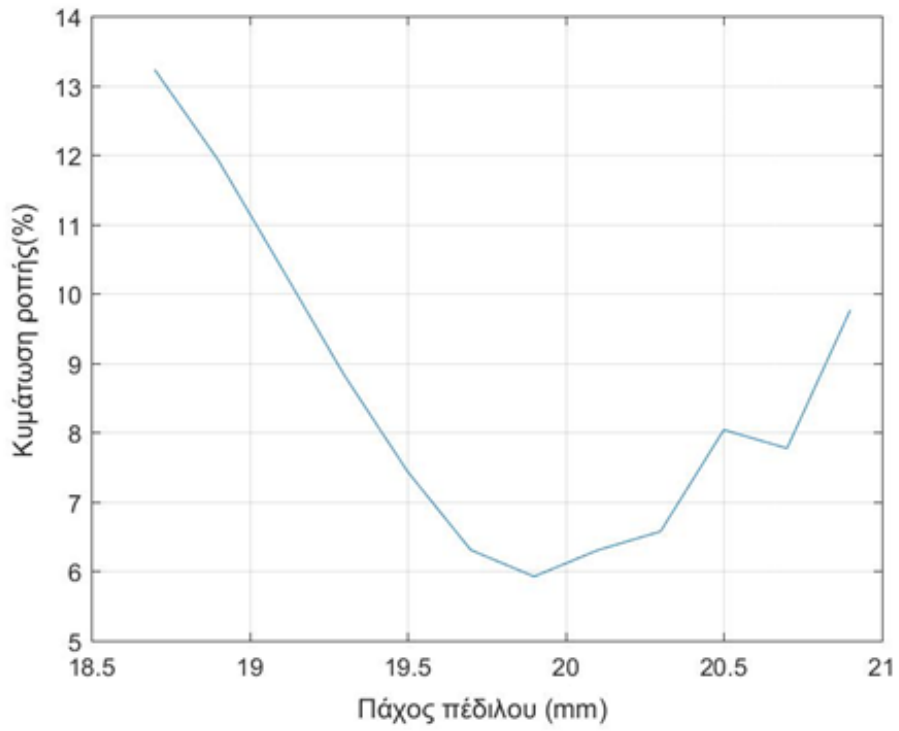
4.5.2.1 Πάχος πέδιλου

Στην ενότητα 4.3.2 είχε οριστεί ότι το πάχος του πέδιλου πρέπει να κυμαίνεται από 18,7 mm έως 20,9 mm. Με βάση αυτά τα μεγέθη εκτελούμε 12 επαναλήψεις με βήμα 0.4 έχουμε:

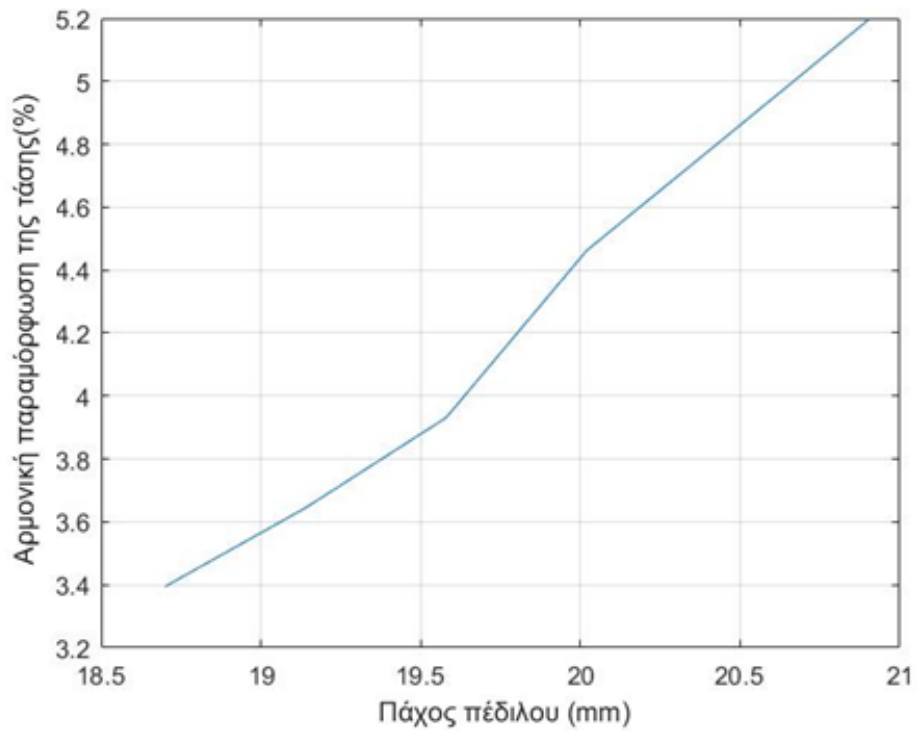
Μέγιστη ροπή



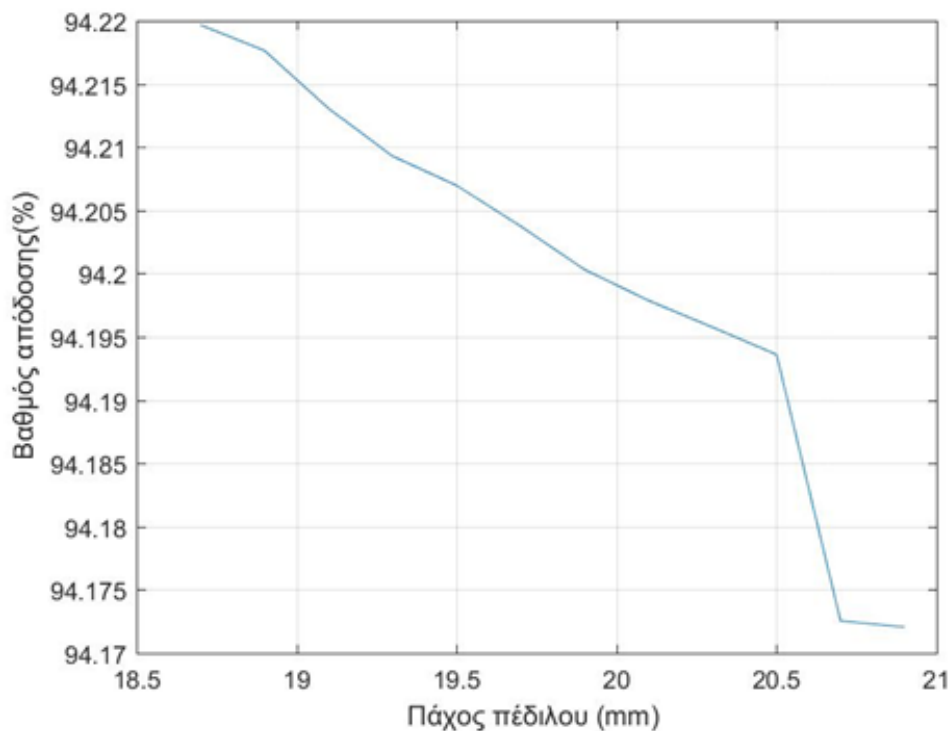
Κυμάτωση Ροπής



Αρμονική Παραμόρφωση Τάσης



Απόδοση

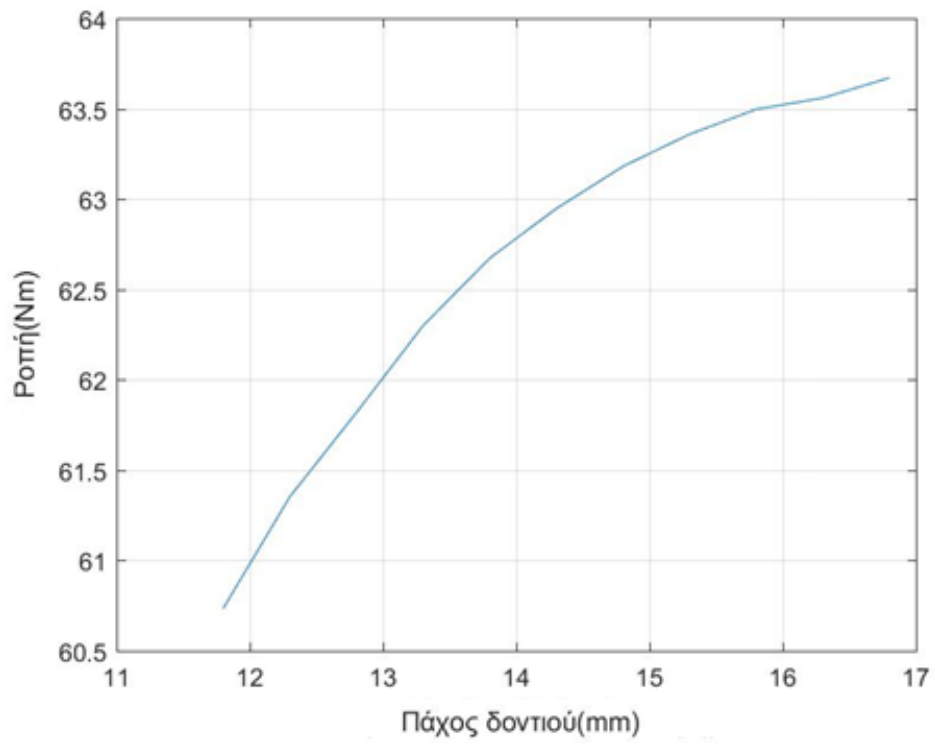


Η μέγιστη ροπή στον άξονα μετά την τιμή 20,7 αυξάνεται γραμμικά, ενώ για την ελάχιστη τιμή δεν μπορούμε να βγάλουμε ασφαλή συμπεράσματα γιατί μεταξύ των τιμών 19,7-20,7 παρουσιάζει οδοντωτή συμπεριφορά. Ομοίως, η αύξηση του πάχους πέλδλου οδηγεί σε γραμμική αύξηση της THD. Τέλος, η μείωση απωλειών κρίνεται αμελητέα και δεν θα την λάβουμε υπόψη μας. Με τα ίδια κριτήρια, που βελτιστοποιήσαμε τον δρομέα καταλήγουμε ότι η μέγιστη τιμή είναι για $k_w=19.8$.

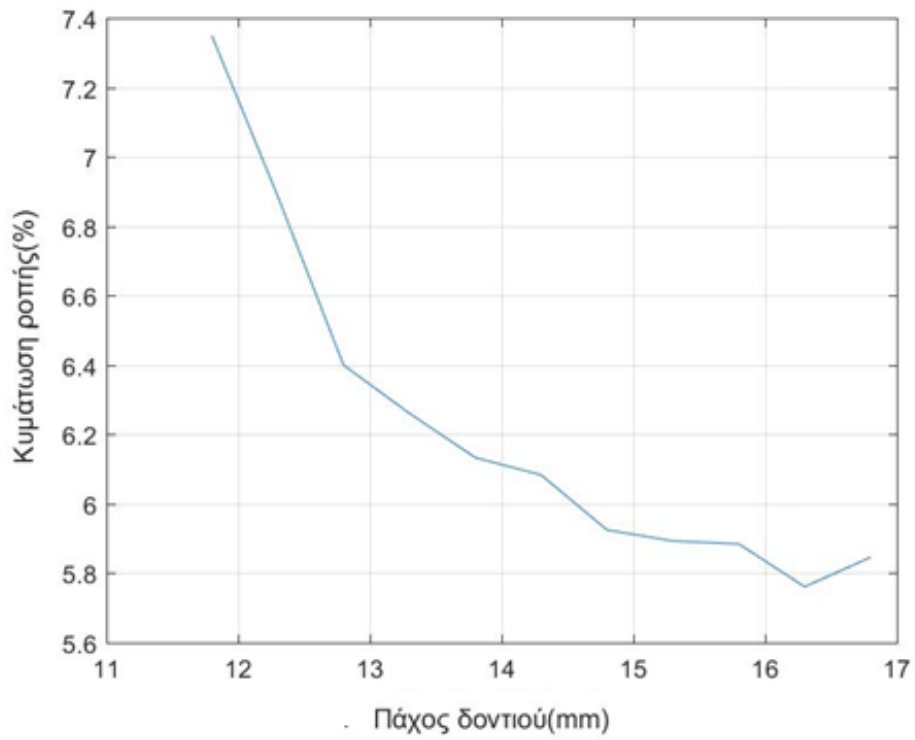
4.5.2.2 Πάχος δοντιού

Στην ενότητα 4.3.2 είχε οριστεί ότι το πάχος του δοντιού πρέπει να κυμαίνεται από 11,8 mm έως 16,8 mm. Με βάση αυτά τα μεγέθη εκτελούμε 12 επαναλήψεις με βήμα 0.4 έχουμε:

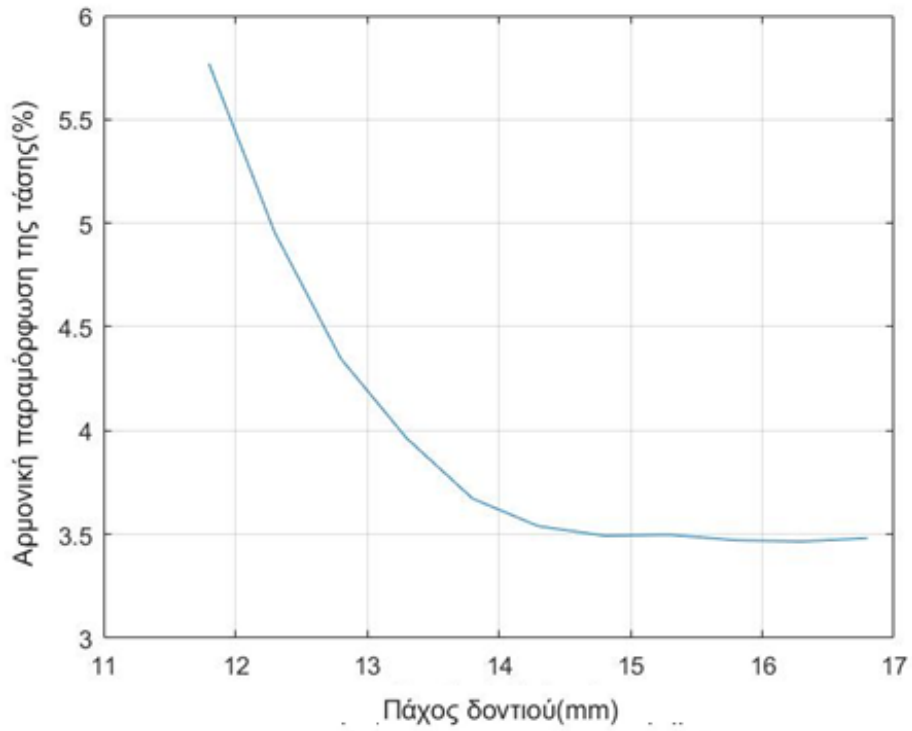
Αποδιδόμενη ροπή



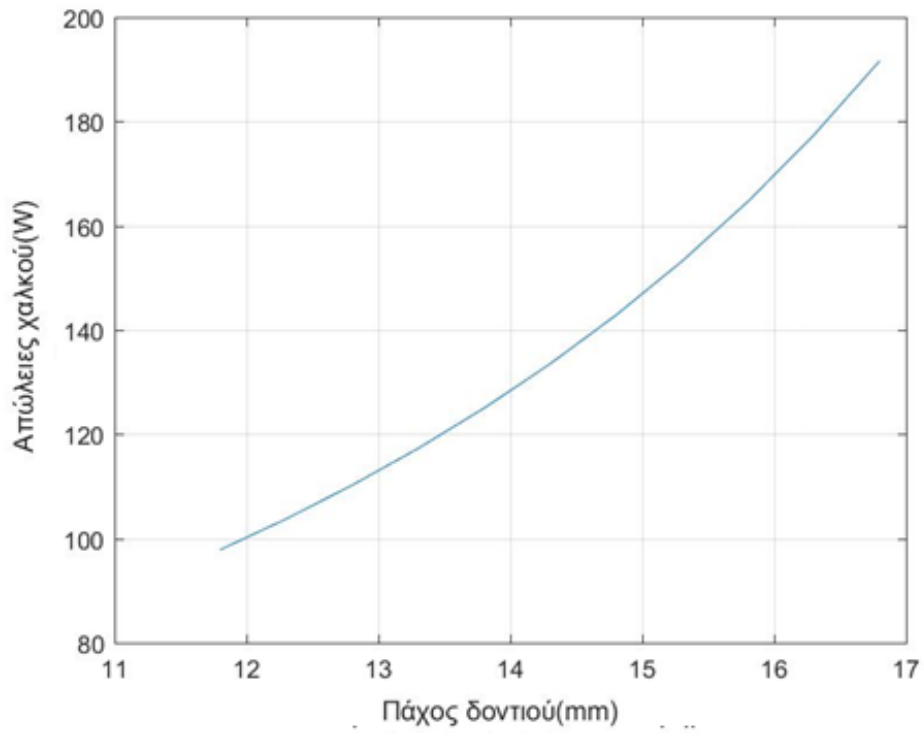
Κυμάτωση ροπής



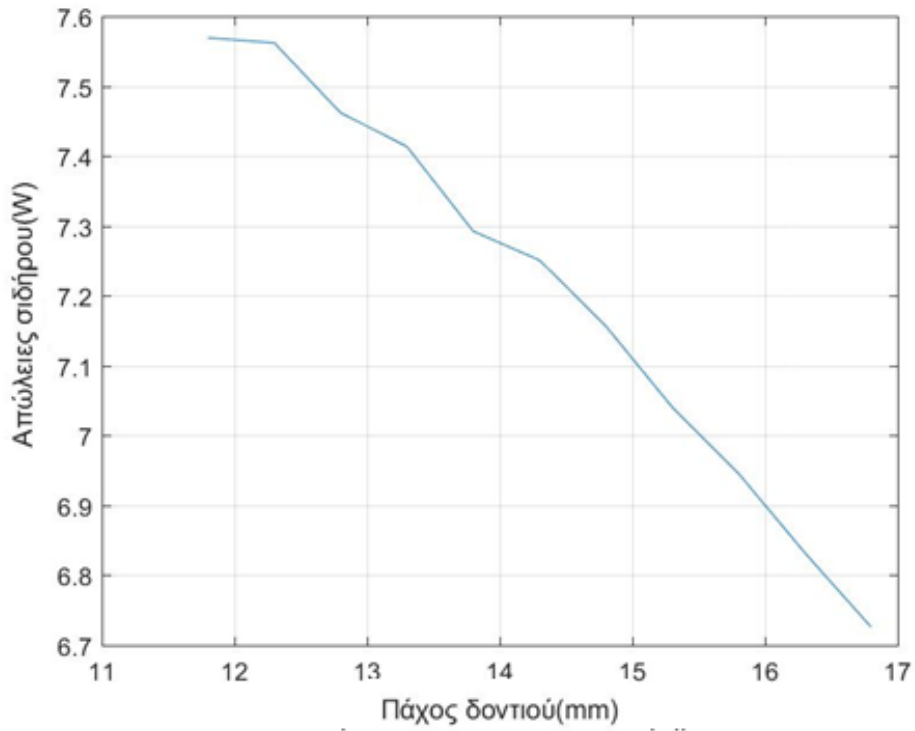
Αρμονική Παραμόρφωση Τάσης



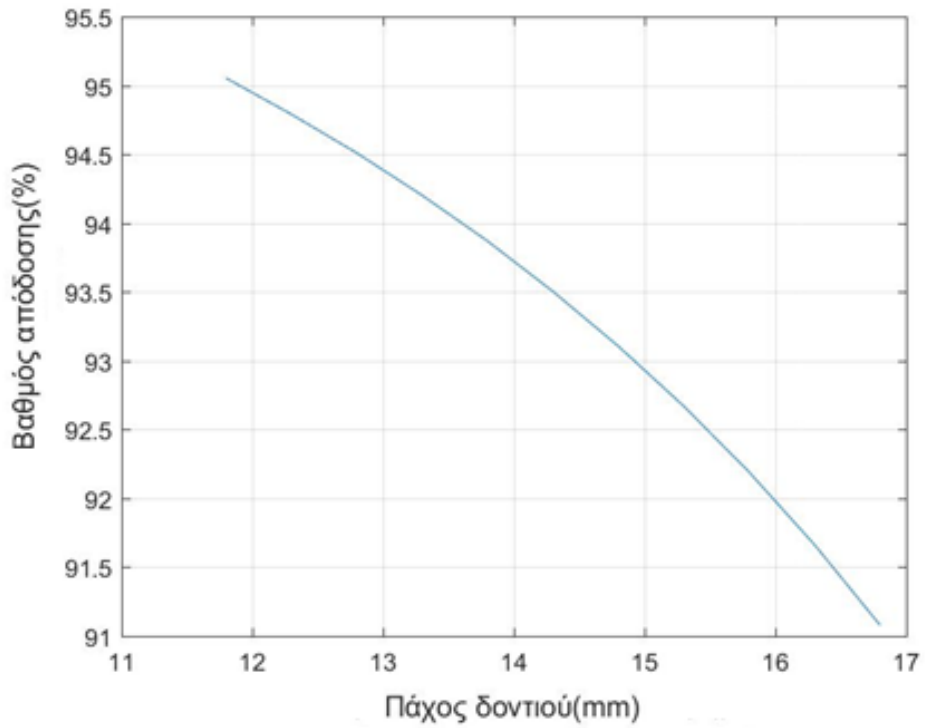
Απώλειες χαλκού



Απώλειες σιδήρου



Βαθμός απόδοσης



Είναι εμφανές ότι το μέγεθος αυτό επηρεάζει δραστικά όλα τα χαρακτηριστικά της γεννήτριας. Πιο συγκεκριμένα, η αύξηση του πάχους δοντιού (tw) οδηγεί σε μεγαλύτερη και πιο ποιοτική ροπή. Αναμενόμενο αποτέλεσμα, γιατί το μικρό δόντι εμποδίζει την ομαλή κίνηση της μαγνητικής ροής με αποτέλεσμα να περιορίζεται η επίδοση της μηχανής. Αντίστοιχα, με την αύξηση του πάχους του δοντιού μειώνεται και η αρμονική παραμόρφωση της τάσης.

Από την άλλη πλευρά, η αύξηση του tw οδηγεί σε έντονη μείωση της απόδοσης. Όπως έχει αναφερθεί και έχει παρατηρηθεί από τις προηγούμενες μετρήσεις, οι απώλειες χαλκού έχουν την μεγαλύτερη συνεισφορά στις συνολικές απώλειες, για τον λόγο αυτό στις προηγούμενες προσομοιώσεις οι μεταβολές στις συνολικές απώλειες ήταν σχεδόν αμελητέες. Ωστόσο, με την αύξηση του πάχους δοντιού, αυξάνεται και το μήκος καλωδίου που χρειαζόμαστε για το τύλιγμα. Λόγω της γραμμικής εξάρτησης των απωλειών χαλκού με το μήκος καλωδίου (σχέση 4.59) εξηγείται και η γραμμική μορφή της γραφικής παράστασης.

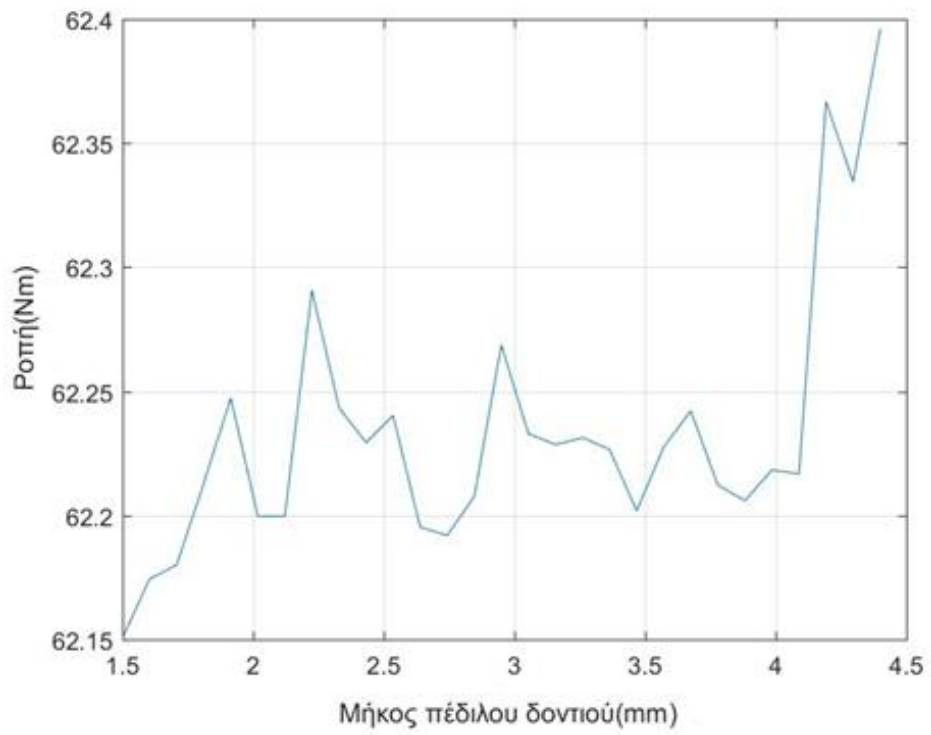
Επομένως πρέπει κάποιος να κρίνει πόσο η αύξηση της επίδοσης της γεννήτριας δικαιολογεί το μείωση της απόδοσης.

4.5.2.3 Μήκη πέδιλου δοντιού

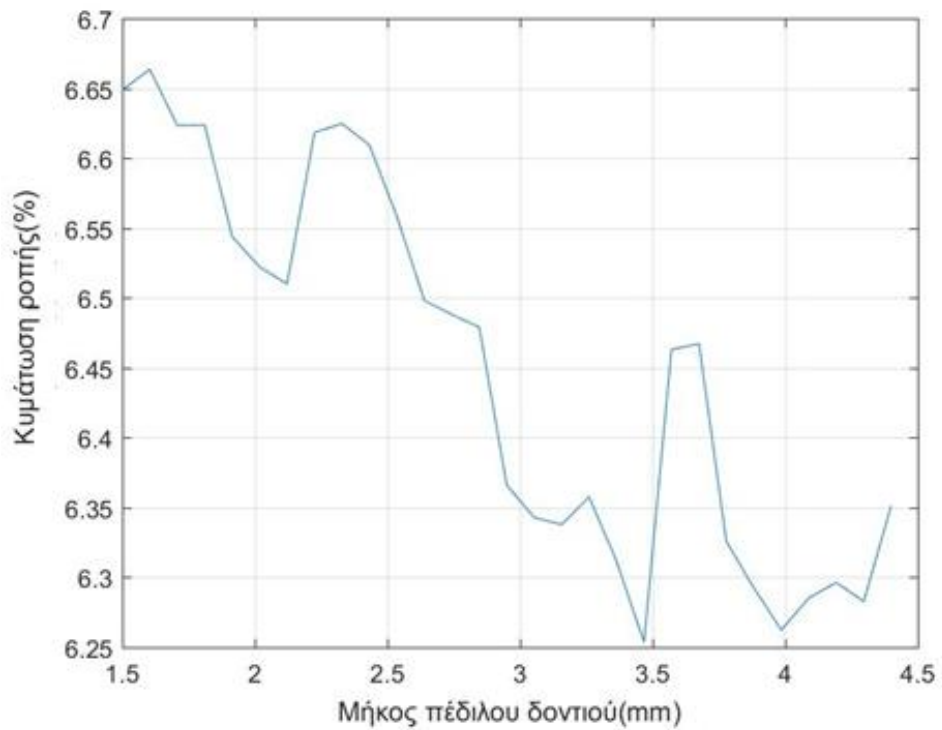
Θεωρήσαμε ότι $h_1 + h_2 = 6$ και μεταβάλαμε το h_1 από 1.5-4.4 με βήμα 0.1mm. Ο λόγος είναι ότι η σάρωση για όλους τους συνδυασμούς των h_1 - h_2 θα οδηγούσε σε δυσνόητα διαγράμματα, όπου δεν θα εμφανιζόταν κάποια αναμενόμενη συμπεριφορά, ενώ αντίστοιχα θα αυξανόταν σημαντικά και το υπολογιστικό κόστος. Επιπλέον, οι εμπειρικές τιμές

$h_1 = h_2 = 6$ που είχαμε επιλέξει στην αρχική σχεδίαση παρουσίαζαν ικανοποιητική συμπεριφορά. Τέλος, το βήμα που επιλέχθηκε είναι αρκετά μικρό και ίσο με 0,1mm για τον λόγο ότι αν προκύψει μια μικρή κατασκευαστική αστοχία, να γνωρίζουμε τι συμπεριφορά να αναμένουμε. Εξάλλου, κατασκευαστικά είναι εφικτή μια ακρίβεια τις τάξη του 0,025mm με μηχανήματα κοπής μετάλλου του εμπορίου. [36]

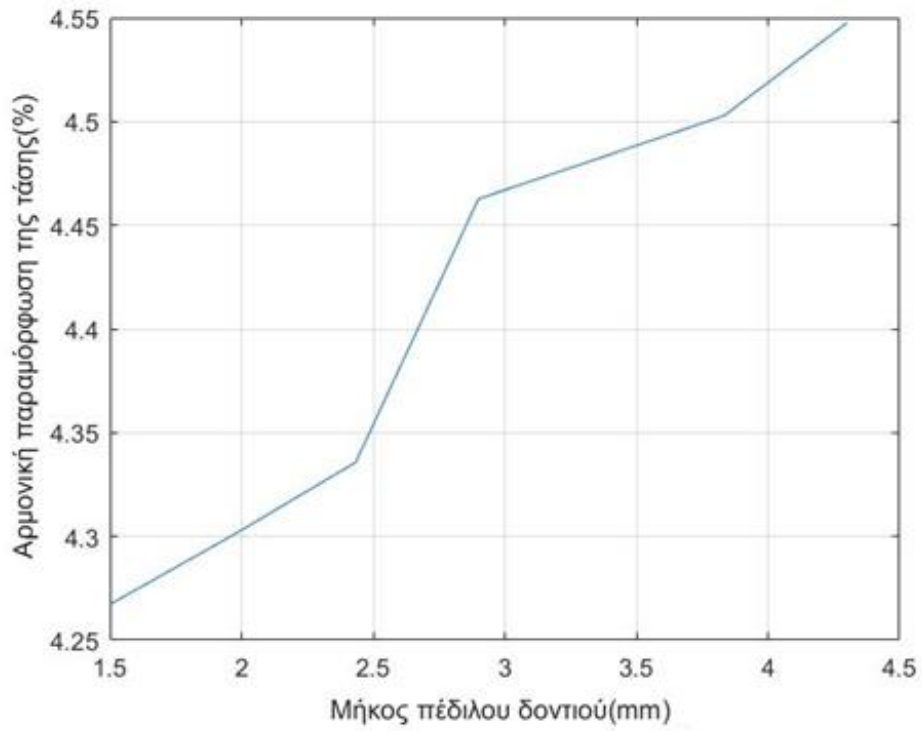
Αποδιδόμενη ροπή



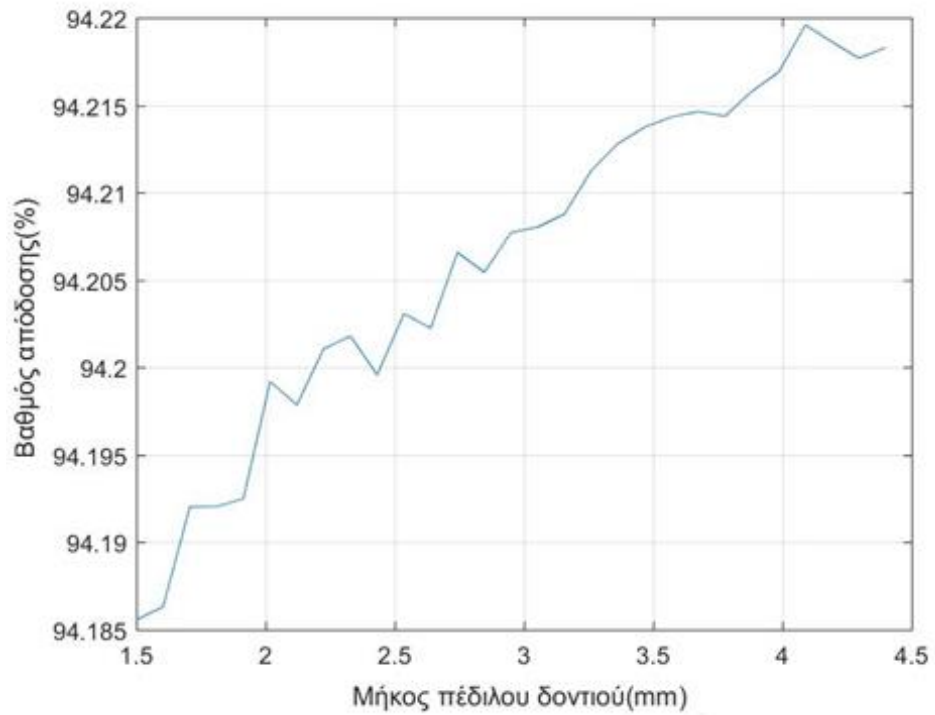
Κυμάτωση ροπής



Αρμονική Παραμόρφωση Τάσης



Απόδοση



Εκ πρώτης όψης βλέπουμε ότι η μεταβολή αυτής της παραμέτρου επηρεάζει ελάχιστα όλα τα μετρούμενα μεγέθη. Πιο συγκεκριμένα, βρήκαμε ότι για $h_1=4.2$ έχουμε την μέγιστη ροπής ροπή και αντίστοιχα για $h_1=3.4$ την ελάχιστη κυμάτωση ροπής. Επιπλέον, αύξηση του h_1 οδηγεί σε χειρότερη THD, ενώ αντιθέτως η απόδοση βελτιστοποιείται. Ωστόσο, συνήθως γραφικές με τόσο θόρυβο και αυξομειώσεις δεν λαμβάνονται υπόψιν στην διαδικασία της βελτιστοποίησης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

5.1 Κυριότερα συμπεράσματα

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας πραγματοποιήθηκε η σχεδίαση γεννήτριας 2 kW σε ταχύτητα 300 ΣΑΛ, προκειμένου να χρησιμοποιηθεί σε ανεμογεννήτρια κατακόρυφου άξονα. Κατάλληλη για την εφαρμογή μας κρίθηκε η σύγχρονη γεννήτρια μόνιμων μαγνητών, ώστε να επιτυγχάνεται υψηλός βαθμός απόδοσης και ευχερής εκκίνηση του συστήματος. Στη συνέχεια, από τη διερεύνηση των διαθέσιμων τοπολογιών μιας ηλεκτρικής μηχανής μόνιμων μαγνητών, επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθεί μηχανή ακτινικής ροής εσωτερικού δρομέα, κυρίως λόγω της ευκολίας και του μικρότερου κόστους κατασκευής που παρουσιάζουν αυτές οι διαμορφώσεις. Ακολούθως, η γεννήτρια σχεδιάστηκε με συγκεντρωμένο τύλιγμα κλασματικού βήματος διπλής στρώσης, εξαιτίας των πλεονεκτημάτων που παρουσιάζει για τη συγκεκριμένη εφαρμογή. Αυτά αφορούν κυρίως τις μειωμένες απώλειες χαλκού, τα περιορισμένα άκρα τυλίγματος, τη χαμηλή ροπή ευθυγράμμισης, την ημιτονοειδή ηλεκτρεγερτική δύναμη και την κατασκευαστική ευκολία. Κατόπιν, έγινε η προκαταρκτική σχεδίαση της γεννήτριας με κλασσικές σχέσεις και η οριστική σχεδίαση επιλύοντας το μαγνητοστατικό πρόβλημα για τη συγκεκριμένη γεωμετρία με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Πιο συγκεκριμένα, υπολογίσθηκαν τα βασικότερα μεγέθη επίδοσης (ροπή), απόδοσης (απώλειες) και ποιότητας ισχύος (αρμονική παραμόρφωση τάσης, κυμάτωση ροπής). Λόγω των δυσκολιών που προκύπτουν για την εκτίμηση των απωλειών σιδήρου, αναπτύχθηκε προσεγγιστική μεθοδολογία για τον υπολογισμό τους ανά περιοχές του πυρήνα. Η μέθοδος θεωρήθηκε ικανοποιητική, καθώς στις τοπολογίες επιφανειακών μαγνητών οι απώλειες πυρήνα στον δρομέα είναι αμελητέες, και η μεταβολή της μαγνητικής επαγωγής στο σώμα του πυρήνα του στάτη είναι σχεδόν ευθύγραμμη. Τέλος, μέσω της ανάλυσης ευαισθησίας παραμέτρων μεταβλήθηκαν τα σημαντικότερα γεωμετρικά χαρακτηριστικά, τα οποία προέκυψαν από την προκαταρκτική σχεδίαση, και βελτιστοποιήθηκαν τα μεγέθη επίδοσης-απόδοσης για ονομαστική κατάσταση λειτουργίας.

Συγκεντρωτικά τα κυριότερα συμπεράσματα που προέκυψαν είναι τα ακόλουθα:

- Με την χρήση του συγκεντρωμένου τυλίγματος κλασματικού βήματος διπλής στρώσης και με τον συνδυασμό πόλων-αυλακών ($p = 20, Q = 24$), επιτυγχάνεται χαμηλή αρμονική παραμόρφωση ΗΕΔ για όλες τις γεωμετρίες.
- Η ελάχιστη κυμάτωση ροπής βρίσκεται για την γωνία μαγνήτη που είχε υπολογιστεί στην προκαταρκτική σχεδίαση.
- Η μεταβολή της γεωμετρίας δεν επιφέρει σημαντική μεταβολή στην απόδοση. Εξάιρεση αποτελεί η μεταβλητή του πάχους δοντιού η οποία επηρεάζει γραμμικά τις απώλειες χαλκού.
- Η ανάλυση ευαισθησίας στα πάχη πέδιλου έδειξε ότι η μεταβολή τους δεν επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό χαρακτηριστικά λειτουργίας της γεννήτριας

5.2 Σημεία επιστημονικής συνεισφοράς

Η επιστημονική συνεισφορά της παρούσας εργασίας εντοπίζεται στα παρακάτω σημεία:

- Ανάπτυξη παραμετροποιημένης σχεδίασης ηλεκτρικής μηχανής με δρομέα επιφανειακών μαγνητών διπλής στρώσης για συγκεντρωμένο τύλιγμα στάτη.
- Πρόταση κατάλληλης ανάλυσης ευαισθησίας γεωμετρικών παραμέτρων ώστε να επιτυγχάνεται συμβιβασμός μεταξύ των κριτηρίων επίδοσης (ροπή), και απόδοσης (απώλειες).

5.3 Θέματα για περαιτέρω διερεύνηση

Παρακάτω παρουσιάζονται προτάσεις με τις οποίες θα μπορούσε να επεκταθεί περαιτέρω το έργο που αναλύθηκε στην παρούσα εργασία.

- Πειραματική επιβεβαίωση των χαρακτηριστικών της γεννήτριας που υπολογίστηκαν.
- Μελέτη της γεννήτριας για μεταβατική κατάσταση λειτουργίας.

Βιβλιογραφία

- [1] Global Wind Energy Council/ GWEC (2016) *Global wind report 2016*
- [2] Γιάννης Κατσιγιάννης, *Ανεμογεννήτριες*, http://ape.chania.teicrete.gr/gr/files/HPIESI_Pres_02_Wind_Turbines.pdf
- [3] *Wind and Solar Power Systems*, Mukund R. Patel, 1999 by CRC Press LLC
- [4] Horizontal Axis Wind Turbine – 1.5 MW from Urban Green Energy (UGE)
- [5] Erik Möllerström, Fredric Ottermo, Jonny Hylander and Hans Bernhoff , “*Noise Emission of a 200 kW Vertical Axis Wind Turbine*”, Uppsala University
- [6] *Συμβατικές και ήπιες μορφές ενέργειας*, Κωνσταντίνος Α. Μπαλάρας, Αθανάσιος Α. Αργυρίου, Φώτης Ε. Καραγιάννης, 2006 από TeKΔΟΤΙΚΗ
- [7] *Ανεμοκινητήρες*, Γ. Μπεργελές, 2005 από Συμειών
- [8] Anwelli Soala Okpue, “*Aerodynamic Analysis of Vertical and horizontal axis wind turbines*”, THESIS, Michigan State University, 2011
- [9] Wind side Production Ltd., <http://www.windside.com>.
- [10] ΕΠΑΓΩΓΙΚΟΙ ΚΙΝΗΤΗΡΕΣ.
http://eclass.opencourses.teicm.gr/eclass/modules/document/file.php/TMA112/mix_hm_08_EEPAGWGIKO_KINHHTHRES.pdf
- [11] Molina, Marcelo & Enrique Mercado, Pedro. (2011), *Modelling and Control Design of Pitch-Controlled Variable Speed Wind Turbines*
- [12] *Wind turbines: fundamentals, technologies, application, economics*, E. Hau, Springer Verlag Berlin Heidelberg, 2000.
- [13] H. Li, Z. Chen, “*Overview of different wind generator systems and their comparisons*”, IET Renew. Power Gener., vol. 2, 2008, no. 2, pp. 123–138.
- [14] Ηλίας Α. Καραφυλλάκης, “*Σχεδίαση κινητηρίου συστήματος για πρότυπο ηλεκτρικό όχημα*”, ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ, Αθήνα, 2015 , ΕΜΠ
- [15] Δαρδαμάνης Κ. Λάμπρος, “*Σχεδίαση και βελτιστοποίηση σύγχρονου κινητήρα μόνομων μαγνητών*”, Αθήνα, 2016, ΕΜΠ
- [16] Αντώνιος Κλαδάς, “*Υποδειγματική προκαταρκτική σχεδίαση γεννήτριας μόνιμων μαγνητών ισχύος 25kW*”, Σημειώσεις μαθήματος Κατασκευή ηλεκτρικών μηχανών, Αθήνα, 2016, ΕΜΠ
- [17] N.Madani, “*Design of a permanent magnet synchronous generator for a vertical axis wind turbine*”, M Sc Thesis, School Of Electrical Engineering, Royal Institute of Technology Stockholm, 2001
- [18] Αθανάσιος Θ. Ζαρόγιαννης, “*Σχεδίαση, βελτιστοποίηση και προσομοίωση μικρών ανεμογεννητριών για εφαρμογές χαμηλού κόστους για σύνδεση στο δίκτυο*”, Διπλωματική εργασία ,Αθήνα ,2012 ,ΕΜΠ

- [19] A. A. Pop, F. Jurca, C. Oprea, M. Chirca, S. Breban and M. M. Radulescu, "Axial-flux vs radial-flux permanent-magnet synchronous generators for micro-wind turbine application", 2013 15th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE), Lille, 2013, pp 1-10
- [20] Asko Parviainen, "Design of axial-flux permanent magnet low-speed machines and performances comparison between radial-flux permanent and axial-flux machines", PhD Thesis, Lappeenranta University of Technology, Finland, 2005
- [21] Rovio T., Vihria, H., Soderlund L., Kriikka J., "Axial and radial flux generators in small scale wind power production", In: Helm, P., Proceedings of 2001 European Wind Energy Conference, Copenhagen, Denmark, 2-6 July 2001
- [22] Άρης-Διονύσιος Πιπταράς, "Σχεδιασμός και μελέτη ηλεκτρογεννήτριας συνδεδεμένης στο αξονικό σύστημα πλοίου", Διπλωματική εργασία, Αθήνα, 2012, Ε.Μ.Π
- [23] Γεώργιος Ι. Τσεκούρας, "Μελέτη κατασκευής, ανάλυση κυκλωματικής και πεδιακής συμπεριφοράς δοκιμίου 2.5kW και ανεμογεννήτριας 25kW", Μεταπτυχιακή εργασία, Αθήνα, 2000, Ε.Μ.Π.
- [24] Florence Libert, "Design, Optimization and Comparison of Permanent Magnet Motors for a Low-Speed Direct-Driven Mixer", Stockholm: KTH, 2004
- [25] F. Libert and J. Soulard, "Investigation on pole-slot combinations for permanent magnet machines with concentrated windings", Proc. of International Conference on Electrical Machines, Krakow, Poland, 2004
- [26] EMETOR, <https://www.emetor.com/edit/windings/>
- [27] Lambertus, <http://lambertus.info/?bewicklungsrechner-fur-wicklungsschema-version-2,67>
- [28] https://www.hkcm.de/HKCM_demag_data.php?l=en&gr=40SH
- [29] *Design of Rotating Electrical Machines*, Juha Pyrhonen, Tapani Jokinen and Valeria Hrabovcova, 2008 John Wiley & Sons
- [30] Χρήστος Θ. Κρασόπουλος, "Σχεδίαση και κατασκευή κινητήρα μονίμων μαγνητών για πρότυπο ηλεκτρικό όχημα", Διπλωματική εργασία, Αθήνα, 2013, Ε.Μ.Π
- [31] ΑΘΑΝΑΣΙΟΣ Γ. ΣΑΡΗΓΙΑΝΝΙΔΗΣ, "Βέλτιστος Σχεδιασμός και Διαχείριση Συστημάτων Κίνησης Ηλεκτρικών Οχημάτων", Διδακτορική διατριβή, Αθήνα, 2016, ΕΜΠ
- [32] N. Levin, S. Orlova, V. Pugachov, B. Ose-Zala, E. Jakobsons, "Methods to Reduce the Cogging Torque in Permanent Magnet Synchronous Machines", ELEKTRONIKA IR ELEKTROTECHNIKA, ISSN 1392-1215, VOL. 19, NO. 1, 2013
- [33] Κωνσταντίνος Λάσκαρης, "Σχεδιασμός και κατασκευή κινητήρων μονίμων μαγνητών για ηλεκτρικά οχήματα", Διδακτορική διατριβή, Αθήνα, 2011, ΕΜΠ.
- [34] <https://perso.uclouvain.be/ernest.matagne/ELEC2311/T2006/NOFP.pdf>
- [35] Βελτιστοποίηση με πολλαπλά κριτήρια, https://el.wikipedia.org/wiki/Βελτιστοποίηση_με_πολλαπλά_κριτήρια
- [36] Νικόλαος Δημόπουλος, "Ανάπτυξη Κώδικα Εξελικτικής Βελτιστοποίησης και Εφαρμογή στη Σχεδίαση Ηλεκτρικών Μηχανών Μόνιμων Μαγνητών", Διπλωματική εργασία, ΕΜΠ