



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

**Σχεδίαση, βελτιστοποίηση και προσομοίωση μικρών
ανεμογεννητριών για εφαρμογές χαμηλού κόστους για
σύνδεση στο δίκτυο.**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Αθανάσιος Θ. Ζαρόγιαννης

Επιβλέπων : Νικόλαος Χατζηαργυρίου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος 2012



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

**Σχεδίαση, βελτιστοποίηση και προσομοίωση μικρών
ανεμογεννητριών για εφαρμογές χαμηλού κόστους για
σύνδεση στο δίκτυο.**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Αθανάσιος Θ. Ζαρόγιαννης

Επιβλέπων : Νικόλαος Χατζηαργυρίου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 16^η Ιουλίου 2012.

.....

Νικόλαος Χατζηαργυρίου

.....

Σταύρος Σ. Παπαθανασίου

.....

Παύλος Γεωργιάκης

Αθήνα, Ιούλιος 2012

.....
Αθανάσιος Θ. Ζαρόγιαννης

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

Copyright © Αθανάσιος Ζαρόγιαννης, 2012

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

Αντικείμενο της παρούσας εργασίας είναι η μελέτη, σχεδίαση, βελτιστοποίηση και προσομοίωση μικρών γεννητριών αξονικής ροής μονίμων μαγνητών χωρίς πυρήνα για αιολικές εφαρμογές σε σύνδεση στο δίκτυο. Το εύρος ισχύος που μελετάμε είναι 3 έως 6,5 kW.

Γίνεται μια εισαγωγή στην έννοια της ενδιάμεσης τεχνολογίας ενώ ταυτόχρονα παρουσιάζονται οι βασικές αεροδυναμικές γνώσεις που χρειάζονται για τα πτερύγια και τον προσανατολισμό της Α/Γ. Επιπλέον γίνεται βιβλιογραφική έρευνα σε σχέση με τις γεννήτριες αξονικής ροής και για το αν αυτές πρέπει να προτιμώνται σε σχέση με τις γεννήτριες ακτινικής ροής για ισχείς της τάξης των 6kW. Ακόμη αναλύονται και βασικά θεωρητικά θέματα που θα βοηθήσουν στη διαστασιολόγηση.

Παρουσιάζεται η διαδικασία της διαστασιολόγησης η οποία θα χρησιμοποιηθεί σε όλο το εύρος της ισχύος από 3 έως 6,5 kW ενώ βρίσκουμε και τις ονομαστικές συνθήκες λειτουργίας των γεννητριών. Επίσης δίνονται οι σχέσεις για τον υπολογισμό των διαστάσεων των πηνίων καθώς και του συνολικού βάρους και κόστους των γεννητριών.

Με βάση την παραπάνω προσέγγιση γίνεται βελτιστοποίηση της σχεδίασης των γεννητριών σε όλο το εύρος της ισχύος. Οι μεταβλητές της βελτιστοποίησης είναι οι διαστάσεις του μαγνήτη (μήκος και πλάτος). Επιπλέον εξετάζονται οι παράγοντες της ονομαστικής συχνότητας και του βαθμού του μαγνήτη. Βασικό κριτήριο της βελτιστοποίησης είναι το ελάχιστο κόστος ενώ χρησιμοποιείται σαν κριτήριο και ο ελάχιστος όγκος.

Οι διαστάσεις του μαγνήτη βελτιστοποιούνται τόσο για κάθε ισχύ ξεχωριστά όσο και συνολικά για όλο το εύρος της ισχύος που μελετάμε καταλήγοντας σε ένα συγκεκριμένο μαγνήτη (καθολικό).

Οι διατάξεις των βέλτιστων γεννητριών προσομοιώνονται και συγκρίνονται τα χαρακτηριστικά τους τόσο μεταξύ των διαφορετικών βελτιστοποιήσεων (κόστους και όγκου) όσο και μεταξύ των διαφορετικών προσεγγίσεων στη βελτιστοποίηση. Επιλέγονται έτσι ο βέλτιστος βαθμός μαγνήτη και η βέλτιστη συχνότητα.

Ακόμα μετράται μια γεννήτρια 3kW και τα πειραματικά αποτελέσματα συγκρίνονται με αυτά της προσομοίωσής της.

Τέλος εξάγονται συμπεράσματα και κατατίθενται βελτιωτικές προτάσεις.

Λέξεις κλειδιά:

ενδιάμεση τεχνολογία, χαμηλό κόστος, μικρές και πολύ μικρές ανεμογεννήτριες, μηχανές αξονικής ροής, μόνιμοι μαγνήτες, βελτιστοποίηση, ελαχιστοποίηση κόστους, ελαχιστοποίηση όγκου, βέλτιστοι μαγνήτες, βαθμός μαγνήτη, καθολικός μαγνήτης

Abstract

Subject of the present work is the study, optimization, and simulation of a small axial flux core less generator with permanent magnets for grid connected wind energy applications.

An introduction is made on the principles of appropriate technology applications while there are also presented the basic concepts of aerodynamics and turbine orientation, that will be used. A comparison between axial AFPM and RFPM generators of around 6kW power is done.

The complete sizing process of the generators with a range of outcoming power from 3 to 6,5 kW is presented, including the determination of the nominal operating conditions. The equations for calculating the dimensions of the coils, as well as the total weight and cost of the generators are determined.

According to the previous approach the design is optimized for the whole range of power. The variables of the optimization are the dimensions of the magnets (length and width). Furthermore the factors of frequency and magnet grade are examined. Criteria of the optimization is the lowest cost and the lowest volume.

The dimensions of the magnets are optimized for each power separately as well as for the whole range of power resulting in a specific 'widespread' magnet.

The optimized generators from all different optimizations and approaches are simulated and their characteristics are compared to each other, resulting in the best magnet grade and frequency to be used.

Furthermore a 3 kW generator is tested in the laboratory and the resulting measurements are compared to the simulation results.

Finally, conclusions are drawn and proposals for improvements and further work are presented.

Key words:

appropriate technology, low cost, rural electrification, axial flux generators, small wind turbines, permanent magnets, optimization, microgrids, minimization of cost, minimization of volume, optimized magnets, magnet grade

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες στον Κώστα Λατούφη και στο Γιώργη Μεσσήνη για τις υποδείξεις και την καθοδήγησή τους κατά τη διεξαγωγή της εργασίας. Θα ήθελα να ευχαριστήσω επίσης τον κ. Νικόλαο Χατζηαργυρίου, καθηγητή Ε.Μ.Π. για την υποστήριξη της πρωτοβουλίας της διπλωματικής και τις υποδείξεις του.

Περιεχόμενα

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	
1.1. Μικρές Ανεμογεννήτριες.....	11
1.2. Η ενδιάμεση τεχνολογία.....	12
1.2.1. Σχεδιασμός βασισμένος στην ενδιάμεση τεχνολογία.....	12
1.2.2. Κοινωνικές, οικονομικές και πολιτικές προεκτάσεις.....	14
1.3 Αεροδυναμικά χαρακτηριστικά.....	15
1.3.1. Βασικές έννοιες αεροδυναμικής.....	15
1.3.2. Χαρακτηριστικά ισχύος.....	17
1.3.3. Η κατανομή του ανέμου.....	19
1.3.4. Ο περιορισμός της ισχύος.....	21
2. ΣΥΓΧΡΟΝΕΣ ΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ ΑΞΟΝΙΚΗΣ ΡΟΗΣ ΜΟΝΙΜΩΝ ΜΑΓΝΗΤΩΝ	
2.1. Γεννήτριες αξονικής και ακτινικής ροής.....	23
2.2. Οι γεννήτριες αξονικής ροής μονίμων μαγνητών.....	27
2.2.1. Βασικά χαρακτηριστικά.....	27
2.2.2. Διπλός δρομέας-μονός στάτης.....	30
2.3. Τα τυλίγματα.....	31
2.4. Θεωρητική ανάλυση.....	33
2.4.1. Μαγνητική ροή-HEΔ.....	33
2.4.2. Ανάλυση του τυλίγματος.....	35
2.4.2.1. Ανάπτυξη ροπής.....	35
2.4.2.2. Πυκνότητα ρεύματος.....	37
2.4.2.3. Αντίσταση και αυτεπαγωγή τυλίγματος.....	38
2.4.3. Το μαγνητικό κύκλωμα.....	40
2.4.4. Μελέτη απωλειών και ισοδύναμο κύκλωμα.....	42
2.4.4.1. Μελέτη απωλειών.....	42
2.4.4.2. Ισοζύγιο ενέργειας- ισοδύναμο κύκλωμα.....	44
3. ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗΣΗ ΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ ΑΞΟΝΙΚΗΣ ΡΟΗΣ	
3.1. Ονομαστικές στροφές-Ονομαστική τάση.....	46
3.2. Αριθμός πόλων-πηνίων, συχνότητα λειτουργίας.....	48
3.3. Οι μαγνήτες.....	49
3.3.1. Το είδος του μαγνήτη.....	49
3.3.2. Το σχήμα του μαγνήτη.....	50
3.3.3. Οι διαστάσεις των μαγνητών.....	52
3.3.4. Υπολογισμός λόγων πλάτους μαγνήτη προς πολικό βήμα (ai) και εσωτερικής προς εξωτερική ακτίνα (kd).....	52
3.3.5. Η πρώτη αρμονική της πυκνότητας μαγνητικής ροής.....	54
3.3.6 Ροπή και εξωτερική ακτίνα.....	54
3.4. Ο στάτης και τα πηνία.....	55
3.4.1. Το πάχος του στάτη.....	55

3.4.2. Σπείρες και πάχος πηνίου.....	56
3.4.3. Κατασκευαστικές διαστάσεις πηνίου.....	58
3.5. Το πάχος του σιδήρου.....	59
3.6. Κόστος και βάρος γεννήτριας.....	60
3.6.1. Οι μαγνήτες.....	61
3.6.2. Ο σίδηρος.....	62
3.6.3. Ο χαλκός.....	63
3.6.4. Η ρητίνη.....	63
3.6.5. Το κόντρα πλακέ.....	64
3.7. Συνοπτικά βήματα διαστασιολόγησης.....	64
4. ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ	
4.1. Η διαστασιολόγηση σε Matlab-Octave.....	66
4.2. Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων.....	66
4.2.1. Το λογισμικό FEMM.....	66
4.2.2. Σχεδίαση της γεννήτριας και μετακίνηση του δρομέα.....	67
4.3. Ο υπολογισμός της πρώτης αρμονικής της πυκνότητας μαγνητικής ροής.....	68
4.4. Οι επιδόσεις της γεννήτριας.....	69
5. ΕΥΡΕΣΗ ΒΕΛΤΙΣΤΟΥ ΜΑΓΝΗΤΗ ΓΙΑ ΚΑΘΕ ΙΣΧΥ	
5.1. Κριτήρια και μεταβλητές βελτιστοποίησης.....	72
5.2 Έλεγχος εξωτερικής ακτίνας και κατασκευαστικός περιορισμός.....	73
5.3. Έλεγχος των απωλειών και της απόδοσης.....	74
5.4. Σύγκριση βέλτιστων διατάξεων για κάθε ισχύ για διαφορετικούς βαθμούς μαγνήτη σε συχνότητα 50 Hz και κριτήριο το ελάχιστο κόστος.....	76
5.5. Σύγκριση βέλτιστων διατάξεων για κάθε ισχύ για διαφορετικούς βαθμούς μαγνήτη σε συχνότητα 40 Hz και κριτήριο το ελάχιστο κόστος.....	79
5.6. Σύγκριση βέλτιστων διατάξεων με μαγνήτες βαθμού N45 για συχνότητες 40 και 50 Hz.....	83
5.7. Παρουσίαση χαρακτηριστικών των γεννητριών με βέλτιστο βαθμό μαγνήτη και συχνότητα.....	89
5.8. Βελτιστοποίηση διαστάσεων μαγνήτη βαθμού N45 με κριτήριο τον ελάχιστο όγκο.....	94
6. ΕΥΡΕΣΗ ΚΑΘΟΛΙΚΟΥ ΜΑΓΝΗΤΗ ΣΤΟ ΕΥΡΟΣ 3-6,5 kW	
6.1. Εισαγωγή.....	102
6.2. Επιλογή βαθμού μαγνήτη για χρήση ως καθολικού καθώς και επιθυμητής συχνότητας.....	102
6.3. Σύγκριση διατάξεων με χρήση καθολικού μαγνήτη και με χρήση βέλτιστου μαγνήτη για κάθε ισχύ.....	105
6.4. Σύγκριση διατάξεων με χρήση καθολικού μαγνήτη και με χρήση βέλτιστου μαγνήτη για κάθε ισχύ, με κριτήριο τον ελάχιστο όγκο.....	108

7.ΜΕΤΡΗΣΗ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ 3 Kw	
7.1. Η γεννήτρια 3 kW.....	113
7.2. Η πειραματική διάταξη και τα μετρούμενα μεγέθη.....	114
7.3. Μέτρηση της μηχανικής ροπής, της τερματικής τάσης και της απόδοσης υπό ωμικό τριφασικό φορτίο.....	116
7.4. Μέτρηση της θερμοκρασίας του τυλίγματος σε ονομαστικές συνθήκες λειτουργίας.....	120
8. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ	
8.1. Συμπεράσματα.....	122
8.2. Προτάσεις.....	123
Βιβλιογραφία.....	124

Κεφάλαιο 1 : Εισαγωγή

1.1 Μικρές Ανεμογεννήτριες

Η παγκόσμια ανησυχία για τις επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής έχει οδηγήσει στη θέσπιση στόχων για μεγάλη διείσδυση των ΑΠΕ ως το 2020 και μακροχρόνια μέχρι το 2050 με σκοπό τη μείωση των εκπομπών αερίων. Αυτοί οι στόχοι υλοποιούνται με την ολοένα και αυξανόμενη παραγωγή ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές. Επιπλέον, το χαμηλό κόστος της ενέργειας αυτής έναντι άλλων συμβατικών (υδρογονάνθρακες κλπ) συμβάλλει ακόμα περισσότερο στην ανάπτυξη ανανεώσιμων πηγών η οποία εκφράζεται με τη δημιουργία αιολικών και φωτοβολταϊκών πάρκων, μονάδων καύσης βιομάζας κλπ.

Όσον αφορά συγκεκριμένα την αιολική ενέργεια, μεγάλα αιολικά πάρκα εγκαθίστανται σε περιοχές με ανέμους υψηλής ταχύτητας και παράγουν μεγάλες ποσότητες ηλεκτρικής ενέργειας συνήθως σε συνδυασμό με άλλες πηγές (γεννήτριες ντίζελ). Στην Ελλάδα, η ύπαρξη ολοκληρωμένου χάρτη αιολικού δυναμικού για όλη την ελληνική επικράτεια, καθώς και η θεσμοθέτηση εγγυημένης τιμής παραγόμενης kWh από ΑΠΕ (feed in tariffs) είναι δύο παράγοντες που ωθούν περαιτέρω στην ανάπτυξη της αιολικής ενέργειας, η οποία σύμφωνα με μελέτες αποτελεί την πλέον βιώσιμη λύση μεταξύ των ΑΠΕ.

Οι πιο συνηθισμένες παράμετροι για την κατηγοριοποίηση των μικρών ανεμογεννητριών είναι οι ακόλουθες:

A. Διάμετρος του στροφείου (Rotor Diameter)

B. Επιφάνεια σάρωσης του στροφείου (rotor swept area)

Γ. Ονομαστική ισχύς λειτουργίας

Η κατηγοριοποίηση σύμφωνα με το πρότυπο IEC 61400-2 γίνεται βάση της επιφάνειας σάρωσης. Πιο συγκεκριμένα ισχύει ο ακόλουθος πίνακας:

	Μicro	Πολύ μικρές	Μικρές
Επιφάνεια σάρωσης	$A \leq 3,5 \text{ m}^2$	$3,5 \text{ m}^2 < A \leq 40 \text{ m}^2$	$40 \text{ m}^2 < A \leq 200 \text{ m}^2$
Διάμετρος Στροφείου	$D \leq 2,1 \text{ m}$	$2,1 \text{ m} < D \leq 7 \text{ m}$	$7 \text{ m} < D \leq 16 \text{ m}$
Ονομαστική Ισχύς	$P \leq 1 \text{ kW}$	$1 \text{ kW} < P \leq 10 \text{ kW}$	$10 \text{ kW} < P \leq 75 \text{ kW}$

Πίνακας 1.1: Κατηγοριοποίηση μικρών ανεμογεννητριών

Το 75% της παραγωγής των μικρών ανεμογεννητριών προορίζονται για αυτόνομα υβριδικά συστήματα σε συνδυασμό με έξυπνα μίνι δίκτυα. Σήμερα λόγω της θέσπισης συστημάτων εγγυημένης τιμής kWh (feed in tariffs) σε χώρες όπως η Ιταλία, το Ην Βασίλειο, η Πορτογαλία και η Ελλάδα, δημιουργείται μια αυξητική

τάση εγκατάστασης διασυνδεδεμένων συστημάτων στην κατηγορία των Μικρών και Πολύ μικρών ανεμογεννητριών.

Στην Ελλάδα ο νόμος 3851/2010 έθεσε τις βάσεις για την ανάπτυξη των μικρών Α/Γ ενώ υπάρχει και πρόγραμμα που διευκολύνει την ανάπτυξη και εγκατάσταση ανεμογεννητριών 3-4 kW για οικιακή χρήση.

Η πιο διαδεδομένη κατηγορία μικρών ανεμογεννητριών είναι τεχνολογίας Direct drive permanent magnet. Κάποιες από αυτές συνδέονται στο δίκτυο με αντιστροφείς οι οποίοι χρησιμοποιούνται και στη σύνδεση των φωτοβολταϊκών.

Βασικά χαρακτηριστικά των ανεμογεννητριών αυτών είναι η καμπύλη ισχύος βάσει της οποίας μπορεί να βρεθεί η ενεργειακή απόδοση, το ποσό δηλαδή της ενέργειας που παράγεται σε συγκεκριμένο χρονικό διάστημα συνήθως ενός έτους. Η ενεργειακή απόδοση εξαρτάται από την κατανομή του ανέμου και είναι σημαντικό να γνωρίζουμε ότι οι μικρές ανεμογεννήτριες τοποθετούνται συνήθως σε περιοχές όπου ο άνεμος είναι αρκετά χαμηλός.

Όσον αφορά τη σύνδεση των γεννητριών αυτές μπορούν είτε να αποτελέσουν κομμάτι μιας αυτόνομης εγκατάστασης, είτε να συνδεθούν στο δίκτυο χαμηλής τάσης. Αυτόνομες εγκαταστάσεις συναντώνται εκεί όπου η σύνδεση με το δίκτυο είναι για κάποιο λόγο δύσκολη.

Στις Ηνωμένες Πολιτείες αλλά και σε πολλές ευρωπαϊκές χώρες οι ΜΑΓ έχουν πολλές εφαρμογές σε μη διασυνδεδεμένα δίκτυα, όπως:

1. Εφαρμογές αφαλάτωσης
2. Εφαρμογές κινητής τηλεφωνίας
3. Αγροτικές εφαρμογές (άρδευση, Ηλεκτροδότηση κτηνοτροφικών συγκροτημάτων)
4. Ηλεκτροδότηση μέσω αυτοπαραγωγής βιομηχανικών μονάδων εφαρμογών. Η μέθοδος αυτή επιτυγχάνει σημαντική εξοικονόμηση πόρων.

1.2. Η ενδιάμεση τεχνολογία

1.2.1. Σχεδιασμός βασισμένος στην ενδιάμεση τεχνολογία

Η «ενδιάμεση» τεχνολογία (intermediate technology) ή αλλιώς η «κατάλληλη» τεχνολογία (appropriate technology), είναι ένας τρόπος αντίληψης της τεχνολογίας ως μία ενεργή συνιστώσα στην καθημερινή διαμόρφωση των κοινωνικών σχέσεων. Εμπεριέχει την αντίληψη πως οι ανθρώπινες κοινωνίες χρειάζεται να έχουν τη δυνατότητα να αποφασίζουν άμεσα για το μέλλον τους σύμφωνα με τις ιδιαιτερότητές τους, και πως η ενδιάμεση τεχνολογία μπορεί να τις ενδυναμώσει προς αυτή την κατεύθυνση.

Μια μικρή ανεμογεννήτρια (Α/Γ) 1kW [11] καθώς και μια γεννήτρια 3 kw ως μέρος ανεμογεννήτριας κατασκευάστηκαν από τελειόφοιτους φοιτητές του ΕΜΠ στα πλαίσια διπλωματικών εργασιών και στα πλαίσια εφαρμογών ενδιάμεσης τεχνολογίας, κυρίως απευθυνόμενες σε αγροτικές περιοχές του αναπτυσσόμενου κόσμου, προσπαθώντας να ικανοποιεί συγκεκριμένα κριτήρια. Οι εφαρμογές ενδιάμεσης τεχνολογίας, με βάση το Consortium for Sustainable Village-Based Development [1], έχουν τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

Απαιτούν μικρό αρχικό κεφάλαιο: Η μικρή Α/Γ που κατασκευάστηκε έχει συνολικό κόστος πρώτων υλών 600 ευρώ, χωρίς να συμπεριλαμβάνεται το κόστος του ιστού.

Δίνουν έμφαση στην χρήση τοπικών πρώτων υλών, έτσι ώστε να μειωθεί το κόστος και τα προβλήματα ανεφοδιασμού: Τα υλικά της Α/Γ καθώς και της γεννήτριας είναι ξύλο, χάλυβας, πολυεστερική ρητίνη, χαλκός και μαγνήτες νεοδυμίου. Όλα τα υλικά μπορούν να βρεθούν τοπικά εκτός από τους μαγνήτες που έχουν αγοραστεί από το εξωτερικό.

Είναι πιο παραγωγικές από πολλές παραδοσιακές τεχνολογίες, αν και χρειάζονται σχετικά εντατική εργασία κατά την κατασκευή τους: Η Α/Γ που κατασκευάστηκε χρειάστηκε 600 εργατοώρες από ανειδίκευτους φοιτητές για να ολοκληρωθεί, αλλά παράγει ηλεκτρική ενέργεια που μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε πλήθος εφαρμογών.

Είναι αρκετά μικρές σε κλίμακα, έτσι ώστε να είναι οικονομικά προσιτές σε οικογενειακό ή κοινοτικό επίπεδο: Αυτού του τύπου η Α/Γ μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε ένα οικιακό σύστημα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, είτε σε DC σύστημα για τη φόρτιση συσσωρευτών, είτε σε AC σύστημα στα πλαίσια ενός κοινοτικού μικροδικτύου.

Είναι δυνατή η κατανόηση της λειτουργίας τους, ο έλεγχός τους και η συντήρησή τους από τους ανθρώπους που χρησιμοποιούν την τεχνολογία χωρίς εξειδικευμένη εκπαίδευση: Η κατασκευή της Α/Γ έγινε από ομάδα προπτυχιακών φοιτητών του ΕΜΠ, χωρίς εξειδικευμένες μηχανουργικές γνώσεις. Η συγκεκριμένη κατασκευή έχει υλοποιηθεί σε πολλά μέρη του κόσμου με τη μορφή ολιγόημερου πρακτικού και θεωρητικού σεμιναρίου, δίνοντας έτσι τη δυνατότητα κατανόησης, ελέγχου και συντήρησης στους χρήστες.

Μπορεί να παραχθεί η τεχνολογία σε μικρές βιοτεχνίες ή εργαστήρια χωριών και κοινοτήτων: Η Α/Γ κατασκευάστηκε σε μικρό μηχανουργείο στην κατασκήνωση «Μελτέμ» στη Ραφήνα, με τον βασικό εξοπλισμό ενός μικρού εργαστηρίου.

Προϋποθέτουν τη συλλογική εργασία της κοινότητας για τη βελτίωση των συνθηκών διαβίωσης: Συνολικά εργάστηκαν πέντε άτομα για την ολοκλήρωση της κατασκευής σε διάστημα τριών μηνών.

Προσφέρουν ευκαιρίες για τη συμμετοχή του τοπικού πληθυσμού σε αλλαγές και βελτιώσεις της τεχνολογίας και της διαδικασίας παραγωγής της: Οι φοιτητές που έχουν συμμετάσχει στο εργαστήριο κατασκευής της Α/Γ έχουν τη δυνατότητα να εξοικειωθούν με τις βασικές έννοιες λειτουργίας και σχεδιασμού γεννητριών, αεροδυναμικής και με τη χρήση βασικών μηχανουργικών εργαλείων και τεχνικών κατασκευής. Έτσι, αποκτάται η δυνατότητα τροποποίησης του σχεδιασμού της Α/Γ, όπως και βελτίωσης της διαδικασίας κατασκευής.

Είναι ευέλικτες και μπορούν να προσαρμοστούν σε διαφορετικά μέρη και σε μεταβαλλόμενες συνθήκες: Η Α/Γ μπορεί να σχεδιαστεί για σύνδεση σε AC ή DC σύστημα και για διαφορετικές τιμές ονομαστικής ισχύος. Επίσης, υπάρχει μια πληθώρα εναλλακτικών υλικών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν, όπως π.χ. ο κέδρος για την κατασκευή των περυγίων, δίνοντας έτσι έμφαση σε τοπικά υλικά που βρίσκονται σε αφθονία.

Μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην παραγωγή χωρίς να προκαλούν βλάβες στο περιβάλλον: Η χρήση και η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από μία ανανεώσιμη πηγή, όπως είναι ο άνεμος, μειώνει την κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας από συμβατικές ρυπογόνες μορφές. Βέβαια, κατά την παραγωγή ορισμένων υλικών που χρησιμοποιούνται στην κατασκευή της Α/Γ, προκαλούνται ρύποι (π.χ. στην παραγωγή χάλυβα) και επίσης χρησιμοποιούνται ορισμένα χημικά υλικά και παράγωγα πετρελαίου, όπως η πολυεστερική ρητίνη.

1.2.2. Κοινωνικές, οικονομικές και πολιτικές προεκτάσεις

Οι κοινωνικές, οικονομικές και πολιτικές προεκτάσεις της ενδιάμεσης τεχνολογίας μπορούν να συγκεντρωθούν στα εξής σημεία:

Επιτρέπει την πιο αποτελεσματική ικανοποίηση των τοπικών αναγκών, γιατί οι τοπικές κοινωνίες είναι ενεργά εμπλεκόμενες στον προσδιορισμό τους και στην πραγματοποίηση των απαιτούμενων εργασιών για την ικανοποίησή τους. Για τους ίδιους λόγους είναι πιο πιθανό αυτή η τεχνολογία να είναι εναρμονισμένη με τις τοπικές παραδόσεις και αξίες.

Συνιστά στην ανάπτυξη εργαλείων που διευρύνουν την ανθρώπινη εργασία και τις ανθρώπινες δεξιότητες, σε αντίθεση με την ανάπτυξη μηχανών που υποκαθιστούν την ανθρώπινη εργασία και εξαλείφουν τις ανθρώπινες δεξιότητες.

Αντιπροσωπεύει μια εύκολα αντιληπτή και ελεγχόμενη κλίμακα δραστηριοτήτων, οργάνωσης και σφαλμάτων, στην οποία άνθρωποι χωρίς εκπαίδευση στην οργάνωση και τη διοίκηση μπορούν να συνεργαστούν και να κατανοήσουν αυτό που κάνουν.

Επιτρέπει την οικονομικότερη λειτουργία αρκετών διαδικασιών, ελαχιστοποιώντας την ανάγκη μεταφοράς υλικών σε μία περίοδο που το κόστος της ενέργειας είναι αυξημένο, προκαλώντας μεγαλύτερη αλληλεπίδραση ανάμεσα στην τοπική βιομηχανία και επιτρέποντας μεγαλύτερη χρήση τοπικών πρώτων υλών και ανθρώπινου δυναμικού.

Καθιστά μη αναγκαίες πολλές ακριβές ή μη διαθέσιμες υπηρεσίες όπως την εύρεση οικονομικών πόρων, την εκπαίδευση, τη διαφήμιση, τη διοίκηση και την παροχή ενέργειας. Αποφεύγει την έλλειψη ελέγχου από την τοπική κοινωνία, που συνήθως συνεπάγεται η χρήση τέτοιων εξωτερικών υπηρεσιών.

Βοηθάει στην εγκαθίδρυση μιας αυτο-συντηρούμενης και συνεχώς επεκτάσιμης δεξαμενής δεξιοτήτων στην κοινότητα, που βασίζεται σε ήδη υπάρχουσες δεξιότητες.

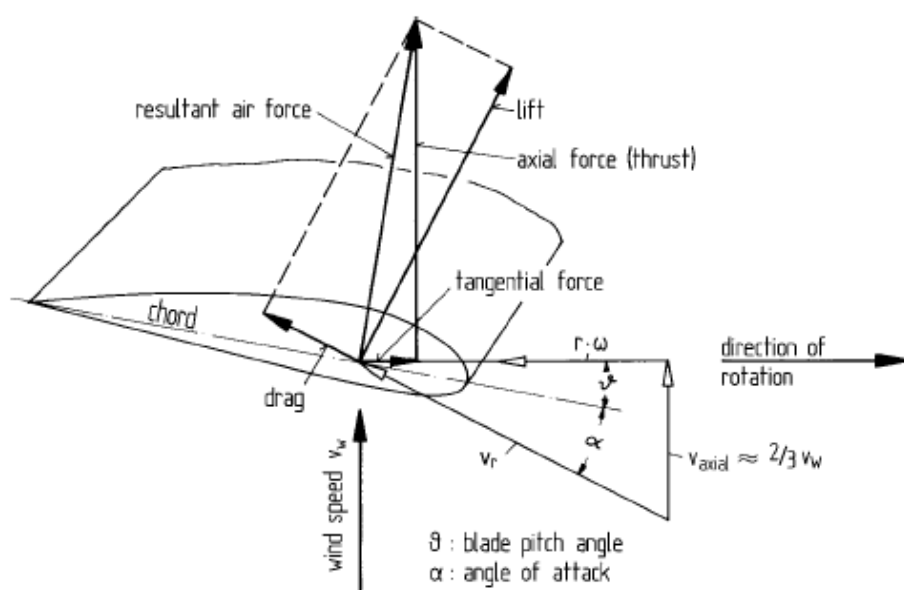
Παρέχει ένα μαξιλάρι ασφάλειας απέναντι στις επιρροές εξωτερικών οικονομικών αλλαγών, όπως π.χ. είναι η κατάρρευση της παγκόσμιας αγοράς ζάχαρης ή η ξαφνική μη διαθεσιμότητα φυτοφαρμάκων.

Βοηθάει στη μείωση της οικονομικής, κοινωνικής και πολιτικής εξάρτησης ανάμεσα σε άτομα, περιοχές και έθνη, αναγνωρίζοντας πως οι άνθρωποι μπορούν και θα κάνουν πράγματα για τις κοινότητές τους, εάν έχουν έναν τρόπο να τα υλοποιήσουν.

1.3. Αεροδυναμικά Χαρακτηριστικά

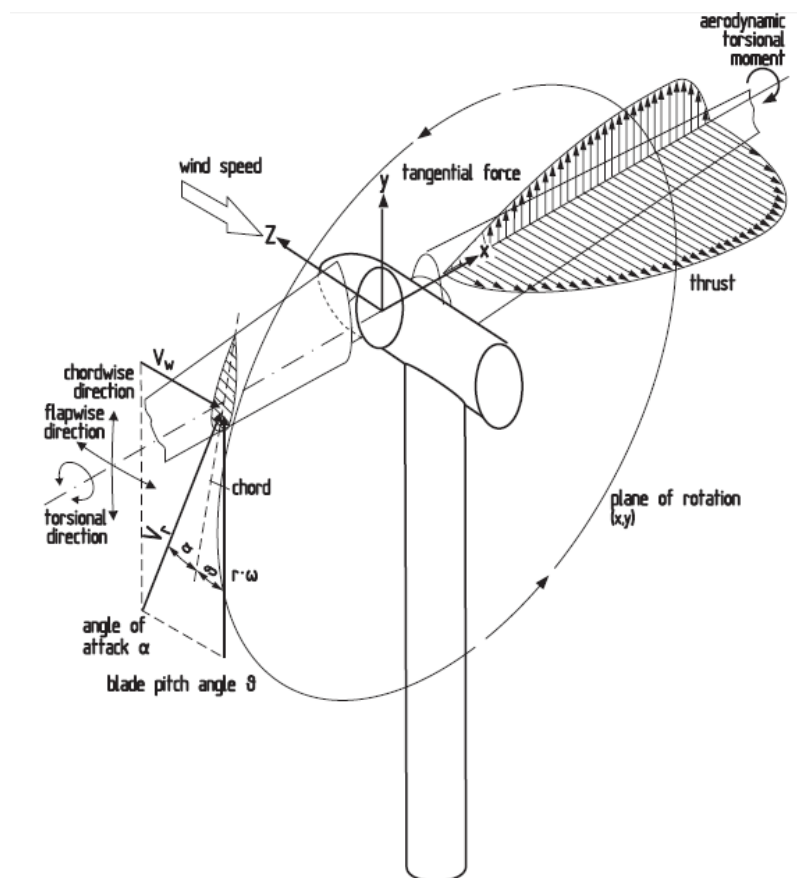
1.3.1. Βασικές έννοιες αεροδυναμικής

Ξεκινώντας τη σχεδίαση μιας ανεμογεννήτριας πρωταρχική εργασία είναι η κατανόηση της λειτουργίας του αεροδυναμικού συστήματος. Αυτό περιλαμβάνει την έλικα, το σύστημα προσανατολισμού καθώς και το σύστημα προστασίας furling. Η κατασκευή των φτερών γίνεται από ξύλο και περιγράφεται στο [2]. Τα ξύλινα φτερά μπορεί να μη φαίνονται η καλύτερη επιλογή, και δεν είναι όσον αφορά τις μεγάλες ανεμογεννήτριες, αλλά το μικρό τους βάρος, το χαμηλό τους κόστος καθώς και η ευκολία στην επεξεργασία τα καθιστούν ιδανικά για εφαρμογές χαμηλού κόστους. Φτερωτές για μικρές ανεμογεννήτριες μπορούν να κατασκευαστούν και με μείγματα ρητίνης, ωστόσο το κόστος των καλουπιών είναι απαγορευτικό και συμφέρει μόνο στην περίπτωση της μαζικής παραγωγής.



Σχήμα 1.1: Η αεροτομή του περυγίου μιας ανεμογεννήτριας.

Στο σχήμα 1.1 φαίνεται η αεροτομή του πτερυγίου μιας ανεμογεννήτριας. Η ακμή στην οποία προσπίπτει ο άνεμος ονομάζεται ακμή πρόσπτωσης (leading edge) ενώ η άλλη ακμή ονομάζεται ακμή διαφυγής (trailing edge). Η γραμμή που ενώνει τις δύο ακμές λέγεται χορδή της αεροτομής. Ο σχετικός άνεμος V_t που προσπίπτει στη φτερωτή αποτελείται από δύο συνιστώσες, την πραγματική ταχύτητα του ανέμου V_{axial} καθώς και τη μεταφορική ταχύτητα του άκρου του πτερυγίου ωR . Έτσι σχηματίζονται δύο γωνίες: η γωνία πρόσπτωσης α (angle of attack) καθώς και η γωνία βήματος πτερυγίου θ . Όπως τονίζεται στο [3] οι δύο γωνίες συχνά συγχέονται μεταξύ τους. Είναι σημαντικό πάντως να γίνει αντιληπτό ότι η γωνία πρόσπτωσης είναι αεροδυναμική παράμετρος ενώ η γωνία βήματος κατασκευαστική. Παρατηρώντας το σχήμα μπορεί κανείς απλά να θεωρήσει ότι καθώς προσπίπτει ο άνεμος ασκεί δύο δυνάμεις στη φτερωτή, τη δύναμη άωσης (lift) και την τριβή (drag) που έχει την κατεύθυνση της σχετικής ταχύτητας ανέμου. Υπολογίζοντας τις δύο παραπάνω συνιστώσες για κάθε κομμάτι των φτερών μπορεί κανείς να βρει την κατανομή των αεροδυναμικών δυνάμεων στη φτερωτή. Αυτό ακριβώς φαίνεται στο σχήμα 1.2. Οι δυνάμεις χωρίζονται σε δυο ομάδες, μια στο επίπεδο περιστροφής (η εφαπτομενική δύναμη) και μια στο κάθετο επίπεδο (thrust). Ολοκληρώνοντας την εφαπτομενική δύναμη προκύπτει η ροπή που οδηγεί το δρομέα της γεννήτριας - η μηχανική ροπή, και ολοκληρώνοντας την κατανομή της thrust παίρνουμε τη συνολική της τιμή.



Σχήμα 1.2: Η κατανομή των δυνάμεων που ασκούνται σε μια φτερωτή καθώς και στο πτερύγιο

Γενικά, και επιστρέφοντας στο σχήμα 1.1 η δύναμη άνωσης είναι η υπεύθυνη για την περιστροφική κίνηση της γεννήτριας, ενώ η δύναμη τριβής αντιτίθεται σε αυτή. Προκειμένου λοιπόν να επιτευχθεί υψηλός αεροδυναμικός συντελεστής, με άλλα λόγια να μπορεί κανείς να αποσπάσει όσο το δυνατόν μεγαλύτερη μηχανική ενέργεια από τον άνεμο, ο λόγος αυτών των δύο πρέπει να ελαχιστοποιηθεί. Αυτόν ακριβώς το λόγο καθορίζει η γωνία πρόσπτωσης α , η ιδανική τιμή της οποίας ορίζεται γύρω στις 4° . Για κάθε σημείο όμως της φτερωτής η συνιστώσα του σχετικού ανέμου ωR αλλάζει αφού αλλάζει η ακτίνα, με αποτέλεσμα η γωνία α να αλλάζει και εκείνη. Δεδομένης λοιπόν της θεωρητικής βέλτιστης τιμής των 4° θα πρέπει να αλλάζει η γωνία θ προκειμένου να επιτυγχάνεται η βέλτιστη λειτουργία. Πιο κοντά στον άξονα της γεννήτριας, όπου η ακτίνα και άρα η συνιστώσα ωR είναι πολύ μικρή, η γωνία θ θα είναι μεγαλύτερη δίνοντας έτσι μια αίσθηση στρέψης στα φτερά.

1.3.2. Χαρακτηριστικά ισχύος

Είναι γνωστό ότι η μηχανική ισχύς που μπορεί να δεσμευτεί από τον άνεμο δίνεται από τη σχέση:

$$P_{air} = \frac{1}{2} \rho c_p \pi R_{turb}^2 v_w^3$$

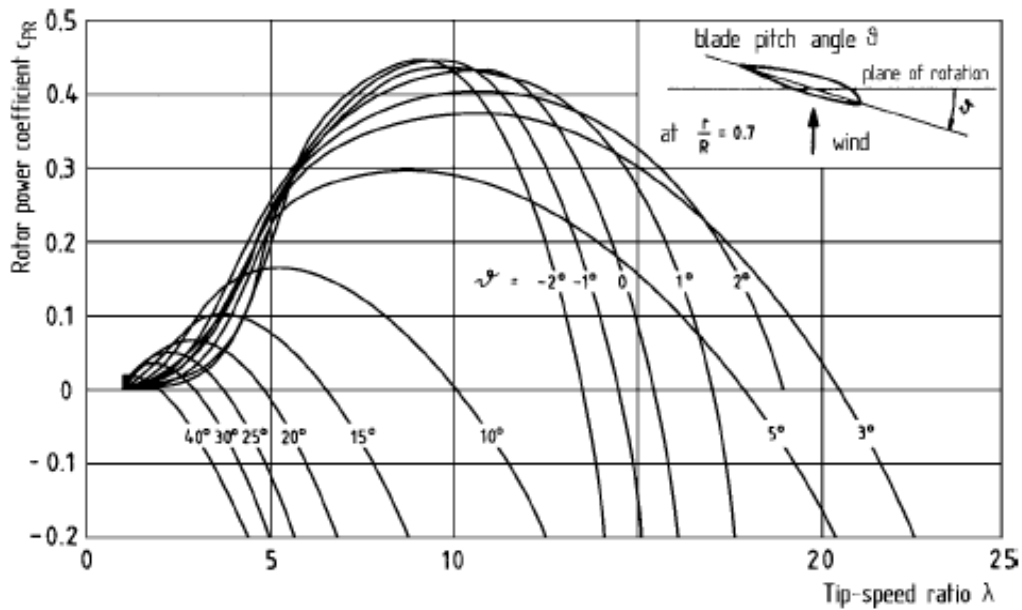
όπου:

- ρ η πυκνότητα του ανέμου
- c_p ο αεροδυναμικός συντελεστής
- R_{turb} η ακτίνα της φτερωτής
- v_w η ταχύτητα του ανέμου

Ο βασικός περιορισμός προκύπτει από το νόμο του Betz που αποδεικνύει ότι η μέγιστη τιμή του αεροδυναμικού συντελεστή είναι το 0.593. Ο λόγος όμως αυτός δεν παραμένει σταθερός κατά τη λειτουργία μιας ανεμογεννήτριας αλλά αλλάζει σε σχέση με τον άνεμο, τις στροφές και την ακτίνα της φτερωτής. Πιο συγκεκριμένα εισάγεται στο σημείο αυτό ο λόγος ακροπτερυγίου λ για τον οποίο ισχύει:

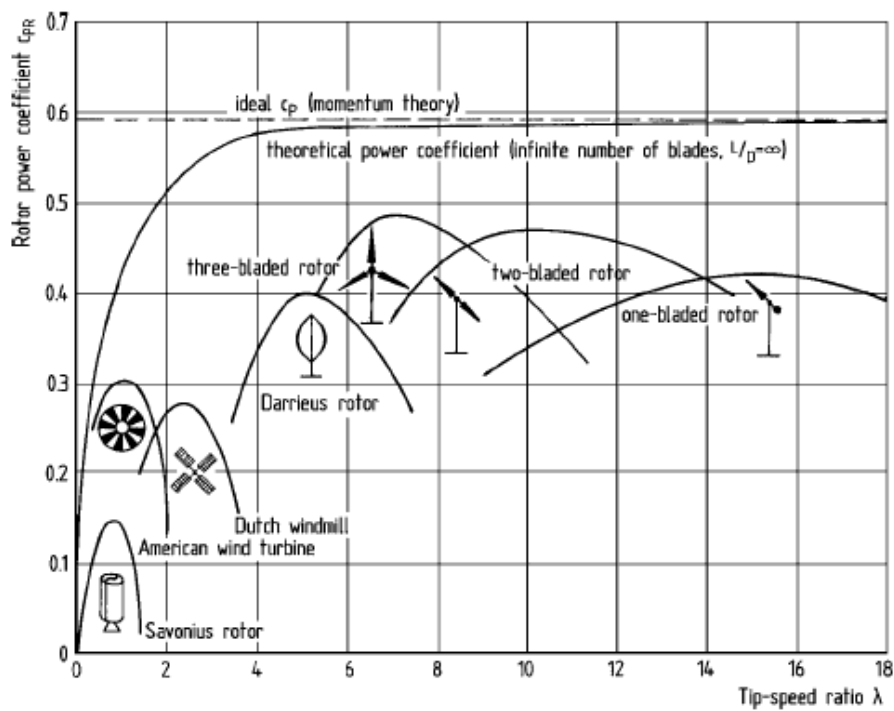
$$\lambda = \frac{\omega R_{turb}}{v_w} \rightarrow \text{Ο λόγος της ταχύτητας του ακροπτερυγίου προς την ταχύτητα του ανέμου}$$

όπου ω η γωνιακή ταχύτητα περιστροφής της γεννήτριας. Γενικά λοιπόν ο αεροδυναμικός συντελεστής είναι συνάρτηση του λόγου ακροπτερυγίου και της γωνίας του πτερυγίου ως προς την ταχύτητα του ανέμου ($C_p(\lambda, \theta)$). Στο σχήμα 1.3 φαίνονται ενδεικτικά κάποιες καμπύλες που δείχνουν τη μεταβολή του αεροδυναμικού συντελεστή σε σχέση με το λ και τη γωνία βήματος πτερυγίου θ .



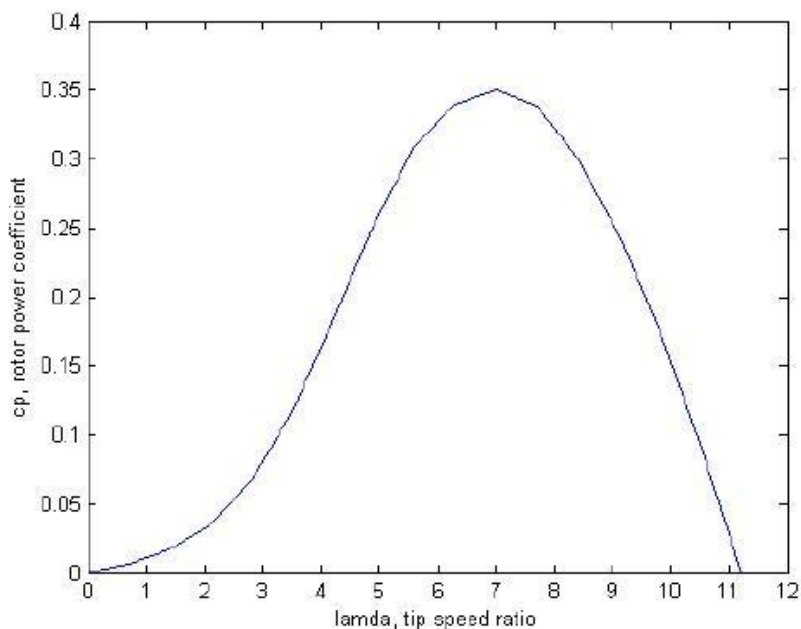
Σχήμα 1.3: Η μεταβολή του αεροδυναμικού συντελεστή σε σχέση με τον λόγο ακροπτερυγίου και τη γωνία βήματος πτερυγίου.

Οι καμπύλες αυτές έχουν να κάνουν με την κατασκευή της φτερωτής και κυρίως εξαρτώνται [3] από τον αριθμό των φτερών, το μήκος της χορδής κατά μήκος του φτερού, τα αεροδυναμικά χαρακτηριστικά και την κατανομή της γωνίας θ κατά μήκος των φτερών. Τα παραπάνω φαίνονται στο σχήμα 1.4.



Σχήμα 1.4: Οι καμπύλες C_p - λ για τύπους φτερωτών διαφορετικής σχεδίασης

Για τη συγκεκριμένη εφαρμογή έχουν δοθεί από τον κατασκευαστή ορισμένες τιμές του αεροδυναμικού συντελεστή για συγκεκριμένα λ ώστε να βρεθεί η σχέση $c_p=f(\lambda)$ που θα βοηθήσει στην ανάλυση. Έτσι προέκυψε η εξής καμπύλη, η οποία προσεγγίζεται με ένα πολυώνυμο δεκάτου βαθμού:



Σχήμα 1.5: Η καμπύλη c_p - λ για τη φτερωτή που θα χρησιμοποιηθεί.

$$c_p(\lambda) = p1 \cdot \lambda^{10} + p2 \cdot \lambda^9 + p3 \cdot \lambda^8 + p4 \cdot \lambda^7 + p5 \cdot \lambda^6 + p6 \cdot \lambda^5 + p7 \cdot \lambda^4 + p8 \cdot \lambda^3 + p9 \cdot \lambda^2 + p10 \cdot \lambda^1 + p11$$

όπου:

$$p1 = -2.2042e-008, p2 = 1.1712e-006, p3 = -2.5915e-005, p4 = 0.00030705$$

$$p5 = -0.0020796, p6 = 0.0079564, p7 = -0.016329, p8 = 0.018201, p9 = -0.0064757$$

$$p10 = 0.0092843, p11 = 3.2532e-005$$

Ο βέλτιστος λόγος ακροπτερυγίου είναι 7 ενώ ο μέγιστος αεροδυναμικός συντελεστής είναι ίσος με 0.35.

1.3.3. Η κατανομή του ανέμου

Εκείνο που ενδιαφέρει περισσότερο σε μια ανεμογεννήτρια είναι η ενεργειακή της απόδοση. Πρόκειται ουσιαστικά για μια εκτίμηση ως προς την ενέργεια που μπορεί να δώσει η γεννήτρια σε ένα χρονικό διάστημα ενός συνήθως έτους. Από όσα αναφέρθηκαν παραπάνω, αντιλαμβάνεται κανείς ότι από τη στιγμή που ο άνεμος σε μια περιοχή δεν είναι σταθερός, δε θα είναι σταθερή και η διαθέσιμη μηχανική ισχύς στην είσοδο της γεννήτριας, η οποία θα είναι δύσκολο να υπολογιστεί ούτως ή άλλως καθώς με την αλλαγή του ανέμου και των στροφών αλλάζει το λ και άρα το c_p . Γι' αυτό είναι απαραίτητη η χρήση μιας κατανομής για τον άνεμο. Σύμφωνα με το [4] η κατανομή της ταχύτητας του ανέμου σε μια θέση περιγράφεται συνήθως από τη συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας Weibull:

$$h(v_w) = \frac{k}{c} \left(\frac{v_w}{c}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{v_w}{c}\right)^k}$$

όπου k η παράμετρος μορφής και c η παράμετρος κλίμακας. Για τον ελλαδικό χώρο συνήθως ισχύει $k=1,5-2$ και εδώ επιλέγεται η τιμή 2 που δίνει την κατανομή Rayleigh:

$$h(v_w) = \frac{2}{c^2} v_w e^{-\left(\frac{v_w}{c}\right)^2}$$

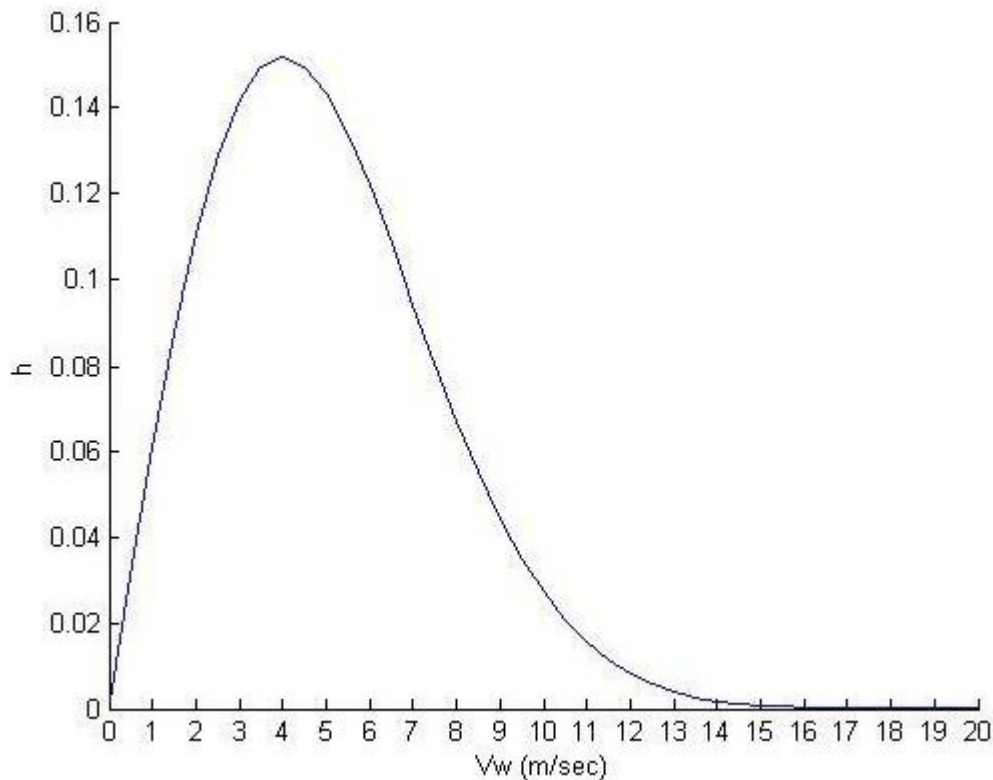
Η παράμετρος κλίμακας c καθορίζει τη μέση τιμή του ανέμου στη θέση που εξετάζεται. Γενικά ισχύει για την κατανομή Rayleigh:

$$\bar{v}_w \cong 0,866 \cdot c$$

οπότε προκύπτει η τελική κατανομή που εξαρτάται πλέον από τη μέση τιμή ανέμου:

$$h(v_w) = \frac{1,57 \cdot v_w}{\bar{v}_w^2} e^{-0,785 \left(\frac{v_w}{\bar{v}_w}\right)^2}$$

Στην εργασία αυτή θα θεωρήσουμε ότι ο μέσος άνεμος είναι ίσος με 5m/s και έτσι προκύπτει και η μορφή της κατανομής που θα χρησιμοποιηθεί:



Σχήμα 1.6: Η στατιστική κατανομή του ανέμου για κατανομή Rayleigh και μέση τιμή ανέμου τα 5m/s.

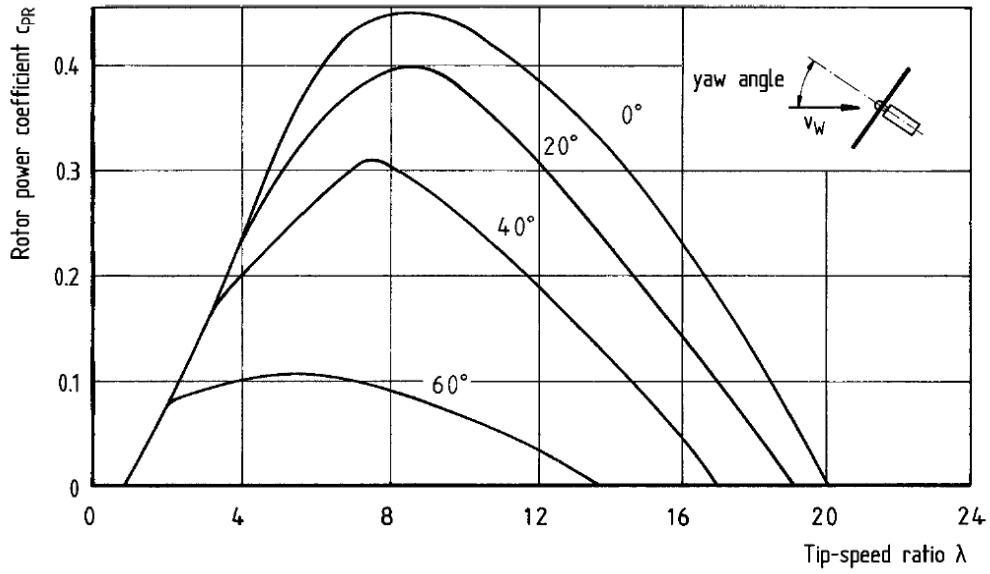
Γνωρίζοντας την κατανομή του ανέμου, με απλά λόγια δηλαδή πόσες φορές θα φυσήξει με κάποια συγκεκριμένη ταχύτητα, και άμα κανείς ξέρει την καμπύλη ισχύος (ποια η παραγόμενη ισχύς για κάθε άνεμο) της ανεμογεννήτριας μπορεί εύκολα να βρεθεί η ενέργεια που θα δώσει η γεννήτρια σε ένα χρόνο, αντικείμενο επόμενου κεφαλαίου.

1.3.4. Ο περιορισμός της ισχύος

Κάθε ανεμογεννήτρια είναι σχεδιασμένη για έναν συγκεκριμένο άνεμο στον οποίο θα δώσει τα ονομαστικά της. Όταν η λειτουργία λειτουργεί πάνω από τα ονομαστικά της υπάρχει κίνδυνος βλάβης. Ο κίνδυνος αυτός αναφέρεται αρχικά στην περίπτωση όπου θα φυσήξει άνεμος μεγαλύτερος από τον ονομαστικό οπότε και το ρεύμα που θα περάσει από το τύλιγμα θα είναι μεγαλύτερο με κίνδυνο υπερθέρμανσης. Δευτερευόντως, ο κίνδυνος αφορά τα ίδια τα φτερά που μπορεί να μην αντέχουν σε μεγάλες ταχύτητες ανέμου. Υπάρχει λοιπόν ανάγκη να περιοριστεί η ισχύς από τα ονομαστικά και μετά.

Σε μεγάλες ανεμογεννήτριες αυτό γίνεται απλά αλλάλλάζοντας τη γωνία βήματος θ, μειώνοντας έτσι το εμβαδόν της φτερωτής που βλέπει ο άνεμος και άρα και την ισχύ. Με την τεχνική αυτή (pitch control) μπορεί η ισχύς να διατηρηθεί ακριβώς στα ονομαστικά ακόμα και σε μεγαλύτερους ανέμους.

Αυτός είναι ο βασικός τρόπος με τον οποίο επιτυγχάνεται ο έλεγχος της ισχύος. Πρόκειται όμως για μέθοδο πολύ ακριβή και ασύμφορη για εφαρμογές χαμηλού κόστους. Έτσι αναπτύχθηκε το σύστημα furling. Η λογική του συστήματος αυτού είναι ουσιαστικά να απομακρύνει την ανεμογεννήτρια από το μέτωπο του ανέμου όταν ο άνεμος αυξάνεται επικίνδυνα. Το σύστημα furling θα μπορούσε να θεωρηθεί μέρος του συστήματος Yaw. Πρόκειται για μια ουρά η οποία κατευθύνει τη γεννήτρια προς τον άνεμο όταν αλλάζει η διεύθυνσή του. Ανάλογα με το βάρος και την κατασκευή του συστήματος αυτού, για συγκεκριμένους (άνω των ονομαστικών) ανέμους ενεργοποιείται το σύστημα furling που πλέον απομακρύνει τη φτερωτή από τον άνεμο κατά τη γωνία yaw [3]. Ο περιορισμός της ισχύος (μέσω μείωσης του αεροδυναμικού συντελεστή c_p) φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 1.7: Ο περιορισμός του αεροδυναμικού συντελεστή μέσω αύξησης της γωνία yaw.

Η ακριβής λειτουργία του συστήματος αυτού δεν είναι ωστόσο καθορισμένη και γι' αυτό δεν μπορούν να γίνουν ακριβείς υπολογισμοί της ισχύος για ανέμους άνω των ονομαστικών, και άρα ακριβείς υπολογισμοί της ενεργειακής απόδοσης.

Κεφάλαιο 2: Σύγχρονες γεννήτριες αξονικής ροής μονίμων μαγνητών

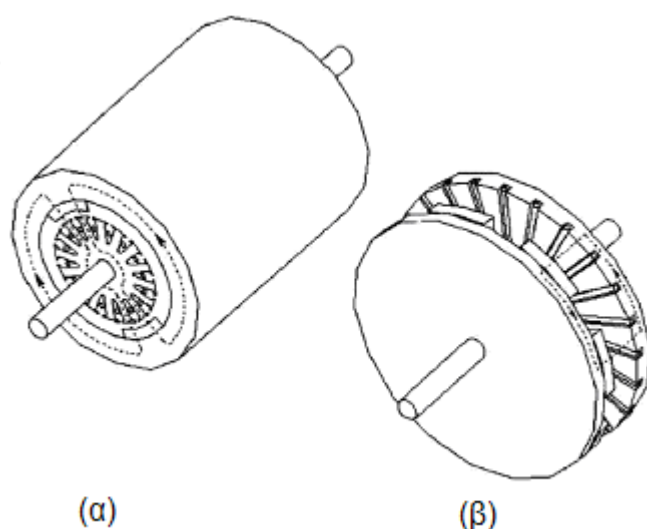
2.1. Γεννήτριες αξονικής και ακτινικής ροής

Αν και οι μηχανές μονίμων μαγνητών (PM) μας είναι γνωστές εδώ και αρκετό καιρό, ποτέ δε βρήκαν εκτενή χρήση καθώς η ποιότητα των μαγνητών δεν ήταν ικανοποιητική. Με τη βελτίωση όμως των μαγνητικών υλικών και ιδιαίτερα μετά την εισαγωγή του NdFeB οι μηχανές μονίμων μαγνητών ήρθαν και πάλι στο προσκήνιο. Η αυξανόμενη διαθεσιμότητα και η συνεχής μείωση του κόστους των μονίμων μαγνητών (rare earth PMs) τα τελευταία χρόνια είναι επίσης δύο σημαντικοί παράμετροι για την ανάπτυξη αυτού του είδους των μηχανών.

Διακρίνουμε δύο βασικά ήδη τέτοιων μηχανών:

- 1) Τις μηχανές αξονικής ροής (AFPM)
- 2) Τις μηχανές ακτινικής ροής (RFPM)

Η βασική δομική τους διαφορά, που παρατηρείται άμεσα στα σχήμα 2.1 είναι ότι η πρώτη έχει δισκοειδή δομή ενώ η δεύτερη κυλινδρική. Στην πρώτη περίπτωση η ροή ταξιδεύει στην ακτινική διεύθυνση ενώ στη δεύτερη στη διεύθυνση του άξονα της γεννήτριας.



Σχήμα 2.1: α) μηχανή ακτινικής ροής, β) μηχανή αξονικής ροής.

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.

- 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.

Σύμφωνα με το [5], οι μηχανές ακτινικής και αξονικής ροής επιδεικνύουν διαφορετική συμπεριφορά στη μεταξύ τους σύγκριση με γνώμονα δύο κριτήρια:

A) το λόγο μήκους (length ratio) των μηχανών ακτινικής ροής που ορίζεται ως το αξονικό μήκος του στάτη προς τη διάμετρο του διακένου

$$k_1 = \frac{l_{\text{eff,RF}}}{D_{\text{agap}}}$$

Συγκεκριμένα, όταν $k_1 < 0.5$ η αντίστοιχη μηχανή αξονικής ροής εμφανίζεται πιο συμφέρουσα λόγω μικρότερου όγκου.

B) τον αριθμό των πόλων

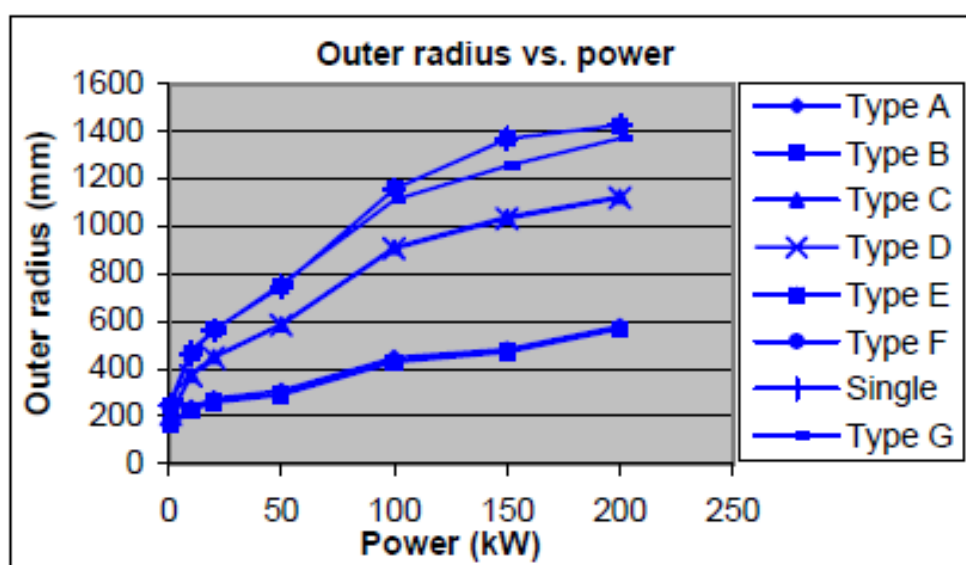
Για μικρό αριθμό πόλων ($p < 4$), είναι προτιμότερες οι μηχανές ακτινικής ροής.

Στο [5] γίνεται σύγκριση κόστους μεταξύ αυτών των δύο ειδών μηχανής για ισχύ 55kW, όπου για μικρό αριθμό πόλων ($p < 6$) η μηχανή ακτινικής ροής προτιμάται με κριτήριο τόσο το κόστος όσο και την απόδοση και την κατασκευή, ενώ για μεγαλύτερο αριθμό πόλων γίνεται πιο συμφέρουσα η χρήση μηχανής αξονικής ροής. Επιπλέον με χρήση της τελευταίας επιτυγχάνεται συνολικά μικρότερος όγκος, χρήσιμο 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 αυτές, ενώ το κόστος χαλκού είναι μεγαλύτερο καθώς απαιτούνται περισσότερες σπείρες.

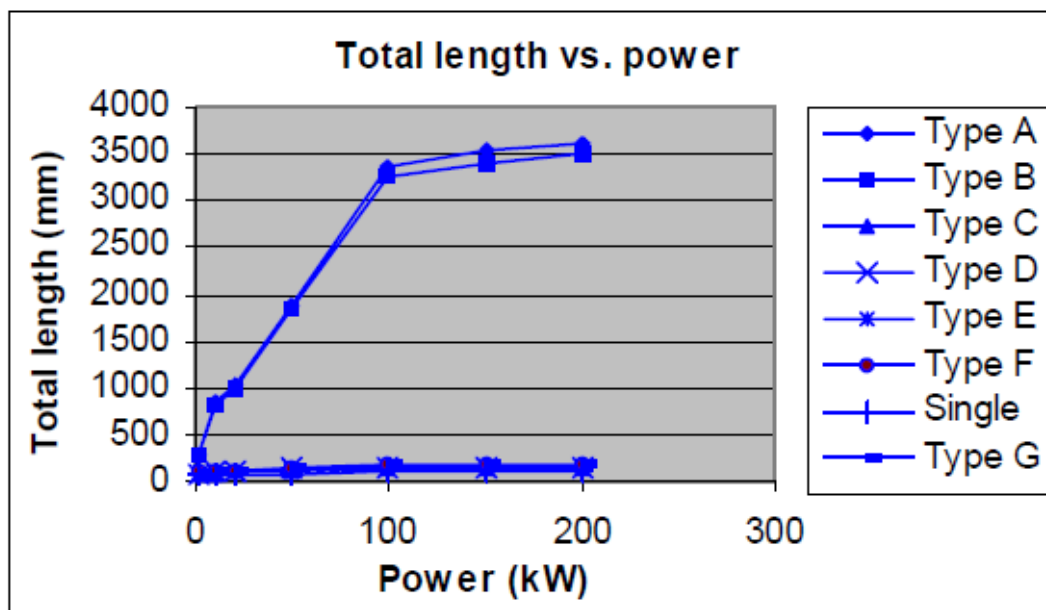
Όπως αναφέρεται στο [5], όταν η ακτίνα της μηχανής αξονικής ροής γίνει ίση με το διπλάσιο του μήκους μιας ακτινικής, τότε η μηχανή αξονικής ροής χάνει τα πλεονεκτήματά της που αφορούν το επίπεδο ισχύος που μπορεί αυτή να προσφέρει. Ή αντίστροφα, ένα υψηλό επίπεδο ισχύος απαιτεί μεγαλύτερο όγκο μηχανής αξονικής ροής παρά ακτινικής.

Στο παρακάτω διαγράμμα [9] βλέπουμε την εξωτερική ακτίνα για διάφορους τύπους μηχανών αξονικής και ακτινικής ροής σε σχέση με την ισχύ τους. Έτσι οι μηχανές ακτινικής ροής (Type A και Type B) για ισχείς από 3-7 kW περίπου, εμφανίζουν ακτίνες γύρω στα 200mm, ενώ οι μηχανές αξονικής ροής (Type C έως E), για το ίδιο εύρος ισχύος εμφανίζουν ακτίνες μεγαλύτερες από 300mm.



Σχήμα 2.2: Ακτίνες διαφόρων τύπων μηχανών σε σχέση με την ισχύ τους

Στο παρακάτω διάγραμμα, όπου εμφανίζεται το μήκος των μηχανών αυτών σε σχέση με την ισχύ, βλέπουμε ότι σε καμία περίπτωση δεν ξεπερνάμε τον αντίστοιχο περιορισμό που έχει τεθεί παραπάνω. Συγκεκριμένα, το μήκος των μηχανών ακτινικής ροής για εύρος ισχύος 3-7 kW κυμαίνεται από 500 έως 650 mm.



Σχήμα 2.3: Συνολικό μήκος μηχανής σε σχέση με ισχύ

Άρα ο περιορισμός: $R_{out,AF} < 2 * Length_{RF}$ ικανοποιείται.

Σύγκριση μιας μηχανής αξονικής ροής και μιας ακτινικής έχει γίνει επίσης στο [7]. Εκεί συγκρίνονται 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. Τέλος, 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 και αρκετά χαμηλές ταχύτητες ανέμου. (3-5 m/s).

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

Μια ακόμα σύγκριση μεταξύ των δύο διαφορετικών τοπολογιών έχει γίνει στο [8]. Στη μελέτη αυτή ένας ηλεκτρονικός υπολογιστής παράγει πολλές μηχανές αξονικής και ακτινικής ροής αφού του έχουν δοθεί συγκεκριμένες παράμετροι. Συγκρίνονται δηλαδή εικονικές μηχανές αξονικής ροής με αύλακες και ακτινικής ροής. Τα κριτήρια που χρησιμοποιούνται είναι το κόστος προς ροπή και η ροπή προς όγκο. Ως προς το πρώτο κριτήριο η μηχανή ακτινικής ροής είναι προτιμότερη. Με λίγα λόγια σε μια μηχανή ακτινικής ροής αύξηση της ροπής έχει μικρότερο κόστος απ' ό,τι στη μηχανή αξονικής ροής με αύλακες. Ως προς το δεύτερο κριτήριο όμως η μηχανή αξονικής ροής με αύλακες υπερτερεί της ακτινικής. Μια αύξηση του όγκου στις μηχανές

αξονικής ροής θα δώσει πολύ μεγαλύτερη αύξηση ροπής απ' ό,τι στις μηχανές ακτινικής ροής. Το ερώτημα είναι ποιο κριτήριο μας ενδιαφέρει. Σύμφωνα με το συγγραφέα σημαντικότερο είναι να μειώσουμε το κόστος και έτσι προκρίνονται οι μηχανές ακτινικής ροής.

Βλέπουμε, λοιπόν, ότι ανάλογα με την εφαρμογή, τη δομή της μηχανής και τα κριτήρια 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.

2.2. Οι γεννήτριες αξονικής ροής μονίμων μαγνητών

2.2.1. Βασικά χαρακτηριστικά

Υπάρχουν αρκετά είδη και διατάξεις μηχανών αξονικής ροής, οι οποίες παρουσιάζονται συνοπτικά παρακάτω:

A) Μηχανές μονής πλευράς (Μονός δρομέας-Μονός στάτης)

- Με πυρήνα σιδήρου με αύλακες
- Με πυρήνα σιδήρου δίχως αύλακες
- Χωρίς πυρήνα σιδήρου

B) Μηχανές διπλής πλευράς

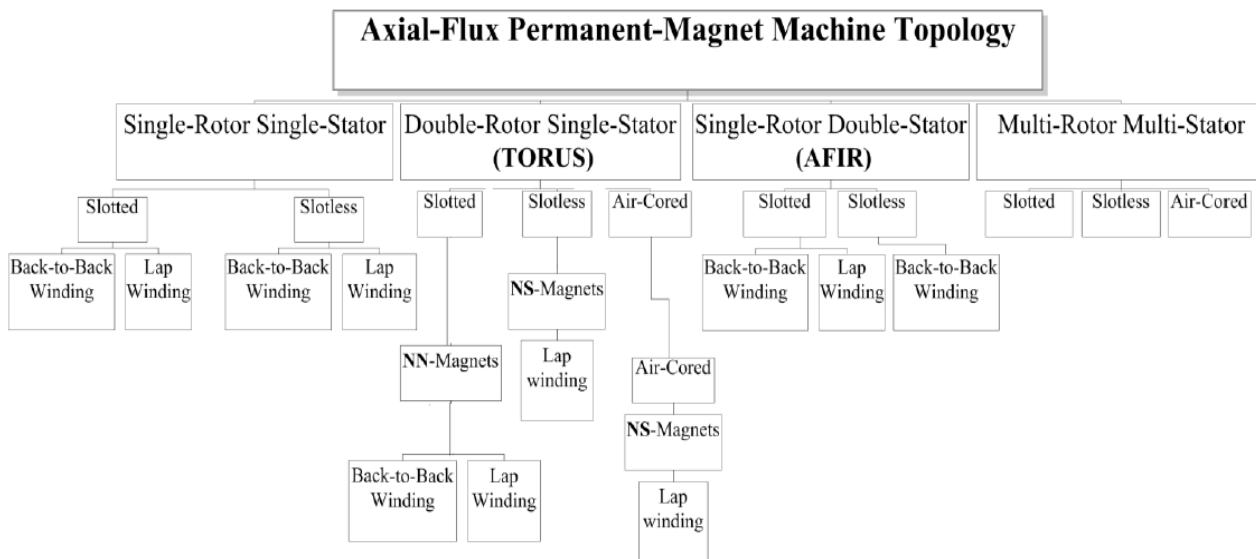
1) Διπλός δρομέας- Μονός στάτης (εσωτερικός)

- Με πυρήνα σιδήρου στο στάτη και με αύλακες
- Με πυρήνα σιδήρου στο στάτη δίχως αύλακες
- Χωρίς πυρήνα σιδήρου

2) Διπλός στάτης-Μονός δρομέας (εσωτερικός)

- Με πυρήνα σιδήρου στο στάτη και με αύλακες
- Με πυρήνα σιδήρου στο στάτη δίχως αύλακες
- Χωρίς πυρήνα σιδήρου

3) Πολλαπλών δίσκων



Σχήμα 2.4: Διάφορες διατάξεις μηχανών αξονικής ροής και τα πιθανά τυλίγματα

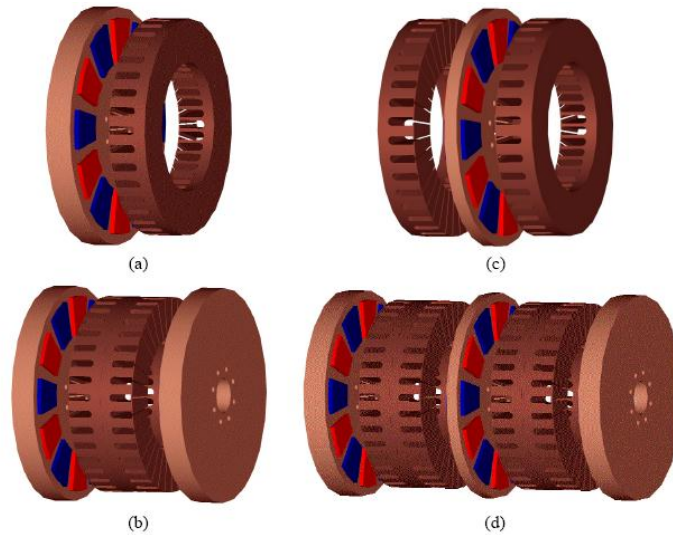
Πριν προχωρήσουμε στην επιλογή μιας από τις παραπάνω διατάξεις για την εφαρμογή μας καθώς και στην ανάλυσή της, θα αναφέρουμε δύο από τα χαρακτηριστικά που επαναλαμβάνονται σε κάθε είδος. Τους **αύλακες** και τον **πυρήνα**. Είδαμε ότι υπάρχουν μηχανές με ή χωρίς πυρήνα και εφόσον υπάρχει πυρήνας μηχανές με ή χωρίς αύλακες.

Αύλακες: Οι αύλακες εκτός των άλλων προσφέρουν και μηχανική υποστήριξη στο τύλιγμα το οποίο περνάει από αυτούς.

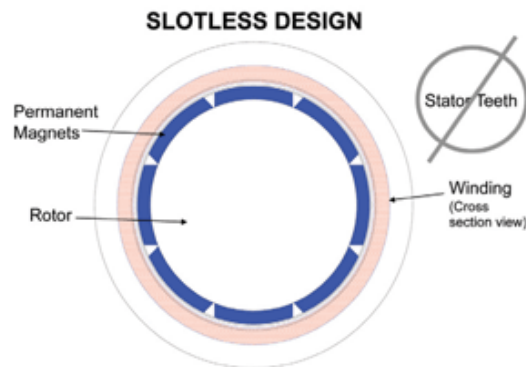
Το πλεονέκτημα είναι ότι μειώνουν το διάκενο, φέρνοντας πιο κοντά το σίδηρο στους μαγνήτες, ενισχύοντας έτσι το μαγνητικό πεδίο. Έτσι έχουμε μεγαλύτερη ροπή με τους ίδιους μαγνήτες. Άμεσο δηλαδή αποτέλεσμα της ύπαρξης αυλάκων είναι η μείωση του όγκου των μαγνητών και άρα και του κόστους της μηχανής, αφού το κόστος των μαγνητών είναι αρκετά υψηλό.

Το μειονέκτημα είναι η δημιουργία ροπής ευθυγράμμισης (Cogging Torque), η οποία οφείλεται στα δόντια (teeth). Αυτό το φαινόμενο παρατηρείται καθώς οι μαγνήτες έλκονται περισσότερο από το σίδηρο όταν περνούν μπροστά από τις αύλακες από ότι όταν περνούν από το διάκενο μεταξύ των αυλάκων. Αν αφήσουμε ελεύθερο το σύστημα θα κινηθεί ώστε να ευθυγραμμιστεί κάπου. Αυτό μας δυσκολεύει γενικά στην εκκίνηση της γεννήτριας, ιδιαίτερα όταν σε αιολικές εφαρμογές έχουμε να αντιμετωπίσουμε χαμηλούς ανέμους. Το φαινόμενο αυτό οδηγεί σε μείωση της απόδοσης, δονήσεις στη μηχανή και δημιουργία θορύβου. Σχεδιασμός χωρίς αύλακες επίσης μειώνει τις απώλειες λόγω δινορρευσμάτων αφού η απόσταση μεταξύ μαγνητών και σιδήρου είναι μεγαλύτερη.

Σχέδια μηχανών που περιλαμβάνουν και αύλακες φαίνονται παρακάτω:



Σχήμα 2.5: Διάφορες τοπολογίες μηχανών με αύλακες.



Σχήμα 2.6: Στάτης χωρίς αύλακες στον πυρήνα

Πυρήνας: Ανυπαρξία πυρήνα σημαίνει ανυπαρξία απωλειών υστέρησης και δινορρευμάτων. Με λίγα λόγια υψηλότερη απόδοση καθώς και γραμμική σχέση ροπής-ρεύματος. Τέλος, η απουσία σιδήρου έχει σαν αποτέλεσμα να μην υπάρχει ροπή ευθυγράμμισης και ελκτικές δυνάμεις μεταξύ στάτη και δρομέα και άρα η εκκίνηση είναι πιο εύκολη και η κατασκευή πιο ελαφριά.

Ανυπαρξία όμως πυρήνα σημαίνει και μεγαλύτερους μαγνήτες στη γεννήτρια καθώς ο πυρήνας είναι ουσιαστικά αυτός που ενισχύει το πεδίο. Αποτέλεσμα το υψηλότερο κόστος της μηχανής. Επίσης είναι πιο δύσκολη η ψύξη της μηχανής κάτι το οποίο δεν αποτελεί πρόβλημα στην περίπτωση των μηχανών αξονικής ροής όπως έχουμε αναφέρει πιο πάνω.

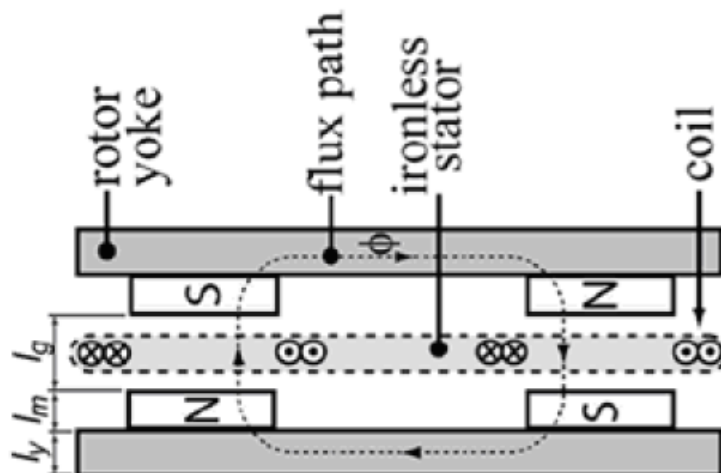


Σχήμα 2.7: Στάτης χωρίς πυρήνα

2.2.2 Διπλός δρομέας - μονός στάτης

Η τοπολογία αυτή, την οποία έχουμε επιλέξει να χρησιμοποιήσουμε έναντι των άλλων τοπολογιών μηχανών αξονικής ροής, έχει μελετηθεί εκτενώς στο [12]. Όπως βλέπουμε και στο σχήμα ο δρομέας είναι διπλός και φέρει τους μαγνήτες και στις δύο πλευρές του. Κάθε μαγνήτης έχει αντίθετη πολικότητα από τον απέναντι και τον διπλανό του. Το τύλιγμα είναι τοποθετημένο σε διαμαγνητικό, μη αγώγιο στάτη (πιθανώς από ρητίνη). Μπορεί να είναι διανεμημένο ή συγκεντρωμένο.

Μεγάλη σημασία είναι το γεγονός ότι δεν υπάρχει πυρήνας. Αυτό σημαίνει ότι δεν έχουμε απώλειες υστέρησης και δινορρευμάτων με αποτέλεσμα την μεγαλύτερη απόδοση της μηχανής σε σύγκριση με άλλες. Επίσης δεν εμφανίζεται ροπή ευθυγράμμισης γεγονός που επιτρέπει την εκκίνηση σε χαμηλούς ανέμους και άρα την εκμετάλλευσή τους. Το μειονέκτημα του αυξημένου κόστους που έχει η συγκεκριμένη διάταξη λόγω του περισσότερου μαγνητικού υλικού που απαιτείται για ανάπτυξη μαγνητικής ροής αντισταθμίζεται από τη δυνατότητα εύκολης κατασκευής που είναι και ένα από τα ζητούμενα της εργασίας αυτής. Η τοπολογία αυτή θα μας απασχολήσει εκτενώς στη συνέχεια.



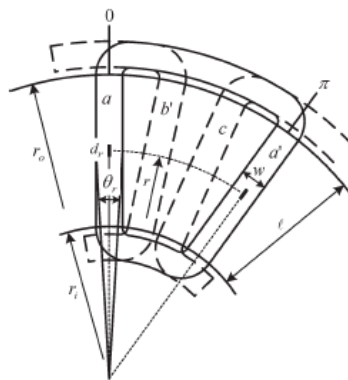
Σχήμα 2.8: Το ευθύγραμμο ανάπτυγμα της τοπολογίας διπλού δρομέα-μονού στάτη.

2.3. Τα τυλίγματα

Στην τοπολογία διπλού δρομέα-μονού στάτη χωρίς πυρήνα που έχουμε επιλέξει, ο πυρήνας κατασκευάζεται ουσιαστικά από κάποιο διαμαγνητικό υλικό (συνήθως ρητίνη) και εκεί τοποθετείται το τύλιγμα. Κάθε πλευρά πηνίου αντιστοιχίζεται στον αντίστοιχο αύλακα ενός πυρήνα σιδήρου.

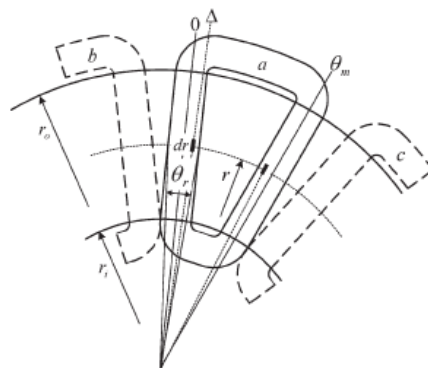
Οι διάφοροι τύποι τυλιγμάτων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν είναι οι εξής:

1. Επικαλυπτόμενο τύλιγμα. Είναι διανεμημένο σε ιδεατούς αύλακες όπως φαίνεται και στο σχήμα. Το ένα πηνίο τοποθετείται πάνω στο άλλο και γι' αυτό το τύλιγμα ονομάζεται επικαλυπτόμενο. Για να συμβεί αυτό οι άκρες του τυλιγματος πρέπει να λυγίσουν με αποτέλεσμα να γίνονται πιο μακριές.



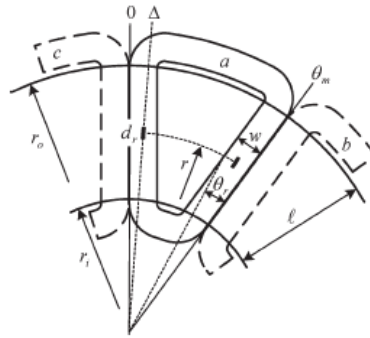
Σχήμα 2.9: Επικαλυπτόμενο τύλιγμα.

2. Συγκεντρωμένο μη επικαλυπτόμενο τύλιγμα μονής στρώσης. Τα πηνία σε αυτήν την περίπτωση είναι μη επικαλυπτόμενα. Σε κάθε ιδεατό αύλακα έχω μια πλευρά πηνίου ενώ τα πηνία έρχονται σε επαφή μόνο στην εσωτερική ακτίνα του στάτη.



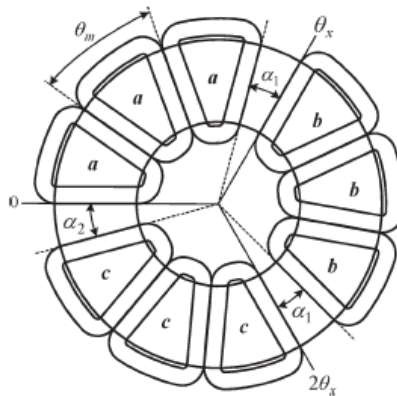
Σχήμα 2.10: Συγκεντρωμένο μη επικαλυπτόμενο τύλιγμα μονής στρώσης.

3. Συγκεντρωμένο μη επικαλυπτόμενο τύλιγμα διπλής στρώσης. Όπως και πριν τα πηνία είναι μη επικαλυπτόμενα. Σε κάθε όμως ιδεατό αύλακα συναντάμε δύο πλευρές διαφορετικών πηνίων. Οι δύο πλευρές εφάπτονται μεταξύ τους τόσο στην εσωτερική όσο και στην εξωτερική ακτίνα.



Σχήμα 2.11: Συγκεντρωμένο μη επικαλυπτόμενο τύλιγμα διπλής στρώσης.

4. Συγκεντρωμένο μη επικαλυπτόμενο τύλιγμα χωρισμένο σε ομάδες φάσεων. Όλα τα πηνία που ανήκουν στην ίδια φάση τοποθετούνται σε διπλανές θέσεις και σχηματίζουν μια ομάδα φάσης.



Σχήμα 2.12: Συγκεντρωμένο μη επικαλυπτόμενο τύλιγμα χωρισμένο σε ομάδες φάσεων.

Στο συγκεντρωμένο τύλιγμα, τα άκρα τυλίγματος δεν χρειάζεται να λυγίσουν, αντίθετα με ότι συμβαίνει στο επικαλυπτόμενο. Αυτό προσφέρει και ορισμένα πλεονεκτήματα [18]:

- Μικρότερο μήκος πηνίων άρα και λιγότερη ποσότητα χαλκού που χρειάζεται για τα πηνία
- Λιγότερες απώλειες χαλκού
- Αυξημένη απόδοση
- Χαμηλότερο κόστος (λιγότερα πηνία)
- Ευκολότερη κατασκευή

Το μειονέκτημα των συγκεντρωμένων τυλιγμάτων είναι η ανάπτυξη χαμηλότερης ηλεκτρομαγνητικής ροπής λόγω του χαμηλού συντελεστή τυλίγματος. Αυτή η δυσκολία θα πρέπει να ληφθεί υπόψη και να ξεπεραστεί με κατάλληλη σχεδίαση, όπως είναι η αύξηση του αριθμού των πόλων και η εύρεση του βέλτιστου αριθμητικού συνδυασμού πόλων και πηνίων λαμβάνοντας υπόψη το συντελεστή τυλίγματος. Σύμφωνα δε με το [19], όσο αυξάνεται ο αριθμός των πόλων τόσο αυξάνεται και η απόδοση του συγκεντρωμένου τυλίγματος έναντι του επικαλυπτόμενου.

Στο [19] συγκρίνονται τα διάφορα είδη τυλιγμάτων που αναφέραμε παραπάνω και αποδεικνύεται πως το συγκεντρωμένο τύλιγμα διπλής στρώσης αναπτύσσει υψηλότερη ροπή από τα υπόλοιπα. Αυτό ήταν αναμενόμενο καθώς η πεπλεγμένη ροή είναι μεγαλύτερη στην περίπτωση αυτή. Επίσης, όπως αναφέραμε και παραπάνω η μάζα του χαλκού που χρησιμοποιείται είναι σημαντικά μικρότερη από ότι με το επικαλυπτόμενο τύλιγμα και τέλος η κυματομορφή της τάσης είναι πιο ημιτονοειδής σε σχέση με αυτή που προκύπτει με χρήση επικαλυπτόμενου τυλίγματος. Πρέπει όμως εδώ να σημειώσουμε ότι το τύλιγμα αυτό έχει μεγαλύτερα άκρα σε σχέση με το συγκεντρωμένο μονής στρώσης.

Το τύλιγμα που επιλέγουμε στην εφαρμογή που μελετάμε είναι το συγκεντρωμένο μη επικαλυπτόμενο τύλιγμα διπλής στρώσης.

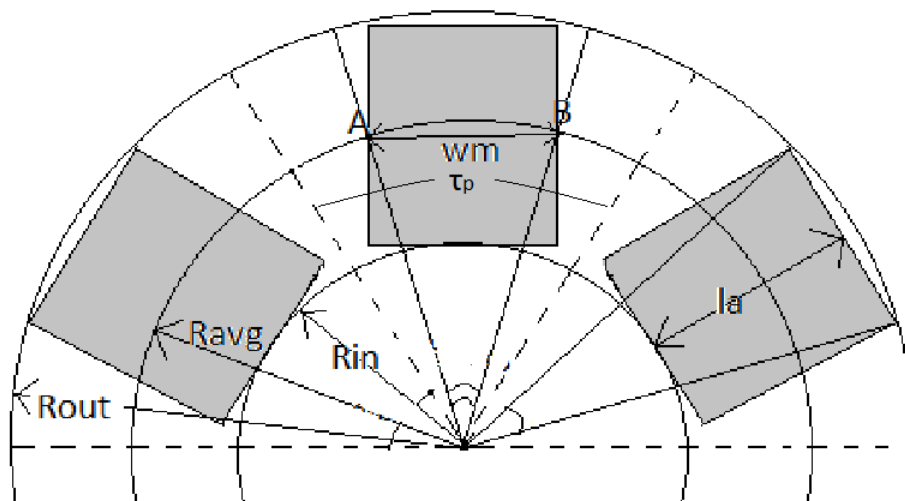
2.4. Θεωρητική Ανάλυση

2.4.1. Μαγνητική Ροή-HEΔ

Έστω γεννήτρια αξονικής ροής με τραπεζοειδείς μαγνήτες και πηνία. Το πολικό βήμα τ_p καθώς και το πλάτος του μαγνήτη w_m δεν είναι σταθερά αλλά εξαρτώνται από την ακτίνα στην οποία αναφερόμαστε. Για το πολικό βήμα μπορούμε να γράψουμε:

$$\tau_p(r) = \frac{2\pi r}{p} \quad (2.1)$$

όπου r η ακτίνα αναφοράς και p ο αριθμός των πόλων.

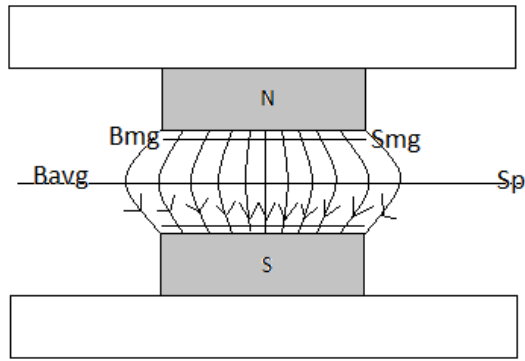


Σχήμα 2.13: Οι διάφορες ακτίνες αναφοράς και το πολικό βήμα σε μια γεννήτρια με ορθογώνιους μαγνήτες

Ένας πολύ σημαντικός συντελεστής για τη σχεδίαση της γεννήτριας είναι ο λόγος πλάτους μαγνήτη προς πολικό βήμα:

$$\alpha_i(r) = \frac{w_m(r)}{\tau_p(r)}$$

ο οποίος εξαρτάται και αυτός από την ακτίνα αναφοράς r . Ας υποθέσουμε τώρα την παρακάτω διάταξη μηχανής αξονικής ροής:



Σχήμα 2.14: Πλάγια όψη ενός πολικού βήματος μιας γεννήτριας αξονικής ροής.

Μπορούμε να πούμε παρατηρώντας το σχήμα ότι όλες οι δυναμικές γραμμές που διέρχονται από ένα εμβαδόν S_{mg} πολύ κοντά στην επιφάνεια του μαγνήτη θα διέρχονται (με διαφορετική πυκνότητα) και από ένα άλλο εμβαδόν S_p (το εμβαδόν του πολικού βήματος) στη μέση της γεννήτριας. Μπορούμε λοιπόν να γράψουμε:

$$\Phi_{avg} = \Phi_{mg} \leftrightarrow B_{mg} \cdot S_{mg} = B_{avg} \cdot S_{avg} \leftrightarrow \frac{B_{avg}}{B_{mg}} = \frac{S_{mg}}{S_p} \leftrightarrow \frac{w_m}{\tau_p} = \frac{B_{avg}}{B_{mg}} \leftrightarrow \alpha_i = \frac{B_{avg}}{B_{mg}}$$

όπου:

- B_{avg} η μέση πυκνότητα μαγνητικής ροής στη μέση της γεννήτριας
- B_{mg} η πυκνότητα μαγνητικής ροής λίγο πάνω από την επιφάνεια του μαγνήτη

Να σημειώσουμε στο σημείο αυτό ότι η μέση τιμή του B στην επιφάνεια του μαγνήτη είναι πρακτικά ίση με την τιμή του B σε όποιο σημείο της τελευταίας θέλουμε, εξαιρουμένων των άκρων όπου το πεδίο συμπεριφέρεται διαφορετικά.

Έστω τώρα ότι θέλουμε να υπολογίσουμε τη μαγνητική ροή ανά πόλο Φ_f :

$$\Phi_f = \int_{r_{in}}^{r_{out}} B ds$$

$$\text{όπου } dS = \frac{2\pi r}{p} dr$$

άρα γενικά θα ισχύει :

$$\Phi_f = \frac{B \cdot \pi}{p} (r_{out}^2 - r_{in}^2) \quad (2.2)$$

για κάποια περιοχή όπου η πυκνότητα μαγνητικής ροής είναι B .

Προκειμένου να υπολογίσουμε την ΗΕΔ θα θεωρήσουμε την πρώτη αρμονική του B καθώς δε γνωρίζουμε ότι η τελευταία είναι ημιτονοειδής. Μπορούμε λοιπόν να γράψουμε για το B που βλέπουν τα πηνία:

$$B = B_p \cdot \sin(\omega_e t)$$

Πλέον η πρώτη αρμονική του B στο διάκενο, B_p , θα χρησιμοποιείται για τους υπολογισμούς μας και θα αποτελέσει ιδιαίτερο κεφάλαιο αργότερο για τον υπολογισμό της υπό διαφορετικά δεδομένα διαστασιολόγησης. Έτσι:

$$\Phi = B \cdot S = B_p \cdot S_p \cdot \sin(\omega_e t)$$

και για την ΗΕΔ:

$$E_f = k_w N_\phi \frac{d\Phi}{dt}$$

όπου:

- k_w ο συντελεστής τυλίγματος
- N_ϕ ο αριθμός των ελιγμάτων ανά φάση. $N_\phi = q N_c$ όπου N_c τα ελίγματα ανά πηνίο και q τα πηνία ανά φάση.
- ω_e η ηλεκτρική γωνιακή ταχύτητα

Αντικαθιστώντας από τη σχέση για τη ροή το εμβαδόν S_p και ορίζοντας:

$l_a = r_{out} - r_{in}$ το ενεργό μήκος της γεννήτριας και

$r_{avg} = \frac{r_{out} + r_{in}}{2}$ η μέση ακτίνα της γεννήτριας και συχνότερη ακτίνα αναφοράς

παίρνουμε τελικά μια έκφραση για την ΗΕΔ [18]:

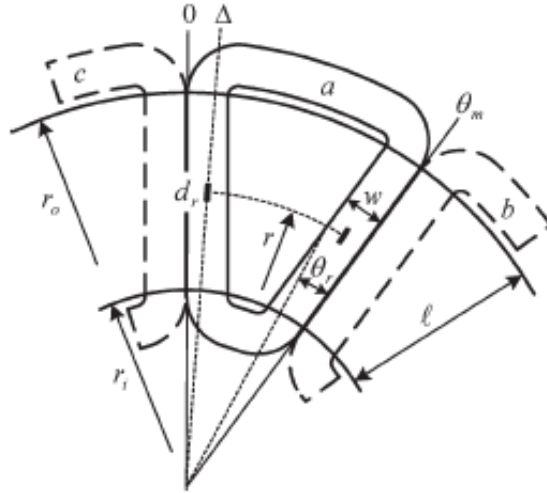
$$E_f = \frac{N_c 2\sqrt{2} q \omega_e B_p k_w l_a r_{avg}}{p} \quad (2.3)$$

Αξίζει να αναφερθεί ότι η ανάλυση στην πραγματικότητα είναι πιο περίπλοκη από ότι υποδεικνύει η παραπάνω σχέση καθώς και οι σχέσεις που θα δούμε στην επόμενη παράγραφο εξαιτίας διαφοροποιήσεων στο ενεργό μέρος του τυλίγματος, οι οποίες όμως γίνονται αμελητέες σε μηχανές με μεγάλο αριθμό πόλων.

2.4.2. Ανάλυση του τυλίγματος

2.4.2.1. Ανάπτυξη ροπής

Όπως αναφέραμε και κατά την παρουσίαση των διαφόρων ειδών τυλιγμάτων, επιλέξαμε το συγκεντρωμένο τύλιγμα διπλής στρώσης για τη γεννήτριά μας. Το τύλιγμα αυτό αναλύεται διεξοδικά στο [19] και εδώ θα παρουσιάσουμε μερικά στοιχεία της ανάλυσης που θα μας βοηθήσουν στην εξαγωγή μιας σχέσης για τη ροπή:



Σχήμα 2.15: Η γενική μορφή του συγκεντρωμένου τυλίγματος διπλής στρώσης.

$$T_d = k_{sc} k_{ec} k_r C_1 \quad (2.4)$$

Οι συντελεστές που εμφανίζονται στην παραπάνω παράσταση είναι οι εξής:

$k_{sc} = k_{wc} \sqrt{\theta_{re}^q / p}$ ένας συντελεστής τυλίγματος για τον οποίο ισχύουν:

- $k_{wc} = k_p k_d$
- k_p συντελεστής βήματος
- θ_{re} ηλεκτρική γωνία πάχους πλευράς πηνίου ίση με: $\theta_{re} = \left(\frac{r_{in} - l_a}{r_{avg}} \right) \frac{\pi}{3}$
- ο λόγος q/p για το συγκεντρωμένο τύλιγμα δεν είναι σταθερός
- πρέπει $\theta_{re} \leq \theta_{re(max)}$ όπου $\theta_{re(max)} = \frac{r_{in}}{2r_{avg}} \theta_m$

Ο συντελεστής άκρων τυλίγματος ορίζεται: $k_{ec} = (2 + \delta_c)^{-\frac{1}{2}}$ και ισχύουν:

- $\delta_c = \frac{l_{ec}}{l_a}$
- $l_{ec} = 2(r_{out} + r_{in}) \frac{\theta_m - 0.6\theta_{re}}{p}$ (2.5)
- Είναι το μέσο συνολικό μήκος των άκρων τυλίγματος
- $\theta_m = \frac{\pi p}{Q}$ η ηλεκτρική γωνία βήματος πηνίου (Q ο συνολικός αριθμός πηνίων της γεννήτριας)
- $\delta_c = \frac{2}{p} \cdot \frac{1+k_d}{1-k_d} \cdot (\theta_m - 0.6\theta_{re})$

Στις παραπάνω σχέσεις εμφανίζεται ένας νέος συντελεστής που θα μας απασχολήσει στη συνέχεια και είναι πολύ σημαντικός για τη σχεδίαση, ο λόγος εσωτερικής προς εξωτερική ακτίνα:

$$k_d = \frac{r_{in}}{r_{out}} \quad (2.6)$$

Συνεχίζοντας την ανάλυσή μας για εξαγωγή μιας σχέσης για τη ροπή συναντάμε το συντελεστή ακτίνας:

$$k_r = \sqrt{(1 - k_d)(1 + k_d)^3}$$

και τη σταθερά μηχανής για δοσμένες απώλειες χαλκού:

$$C_1 = r_{out}^2 B_p \sqrt{\frac{1.5 P_{cu} k_f t_w}{\rho_t}}$$

όπου:

- k_f ο συντελεστής πλήρωσης του πηνίου. Ή αλλιώς το ποσοστό της ιδεατής στη γεννήτριά μας αύλακας που μπορεί να καλυφθεί με χαλκό. Οι τιμές που μπορεί να πάρει ο συντελεστής αυτός κυμαίνονται από 0.4-0.6 και θα συζητηθούν στο κεφάλαιο της διαστασιολόγησης.
- t_w το αξονικό πάχος του πηνίου
- ρ_t η ειδική αντίσταση του χαλκού σε θερμοκρασία t

Συνδυάζοντας όλα τα παραπάνω παίρνουμε την τελική σχέση για τη ροπή:

$$T_d = k_{sc} k_{ec} k_r \sqrt{\frac{1.5 P_{cu} k_f t_w}{\rho_t}} r_{out}^2 B_p \quad (2.7)$$

Στην ίδια εργασία αποδεικνύεται μετά από διαδικασία βελτιστοποίησης ότι για να έχω μέγιστη ροπή η μέγιστη τιμή της γωνίας θ_{re} είναι:

$$\theta_{reopt} = \theta_{remax} = \frac{r_{in}}{2r_{avg}} \theta_m = \frac{k_d}{1 + k_d} \theta_m$$

τιμή την οποία θα χρησιμοποιήσουμε από εδώ και πέρα.

2.4.2.2. Πυκνότητα ρεύματος

Ένα στοιχείο το οποίο είναι πολύ σημαντικό όσον αφορά το τύλιγμα και επηρεάζει όλη τη δομή και το μέγεθος της γεννήτριας είναι η μέγιστη πυκνότητα ρεύματος που μπορεί να υποστεί το τύλιγμα. Συνηθισμένες τιμές της είναι $J_{max}=4-5A/mm^2$ για μηχανές μονίμων μαγνητών. Στην περίπτωση όμως μιας μηχανής αξονικής ροής μπορούμε φτάσουμε μέχρι και τα $6A/mm^2$ μιας και όπως έχουμε αναφέρει οι μηχανές αυτές έχουν πολύ καλό αερισμό σε σχέση με άλλες.

Πιο συγκεκριμένα μπορούμε να γράψουμε:

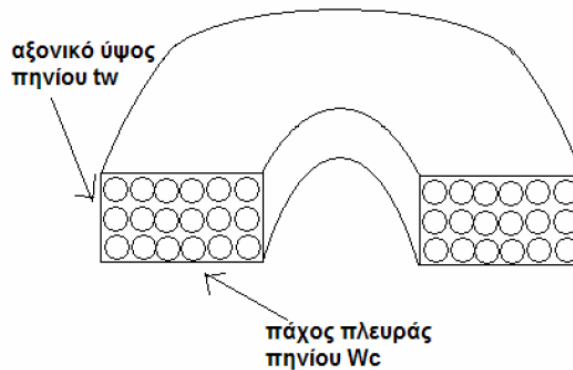
$$J_{max} = \frac{I_a}{sc}$$

όπου:

- I_a το ρεύμα της γεννήτριας
- sc το εμβαδόν διατομής μιας σπείρας ενός πηνίου

Όπως θα δούμε αργότερα το εμβαδόν διατομής μιας σπείρας του πηνίου παίζει σημαντικό ρόλο ιδιαίτερα σε μεγάλες ισχύεις όπου τα ρεύματα είναι αρκετά υψηλά και

άρα η τιμή το εμβαδό αυτό πρέπει να ναι αρκετά μεγάλο ώστε να οδηγήσει σε μικρότερη αντίσταση του χαλκού και άρα λιγότερες απώλειες στο τυλίγμα.



Σχήμα 2.16: Το αξονικό ύψος, το πάχος πλευράς και οι σπείρες ενός πηνίου.

Η διατομή του πηνίου όπως φαίνεται και στο σχήμα 2.24 μπορεί να εκφραστεί:

$$sc = \frac{N_c}{t_w w_c k_f}$$

όπου w_c το πάχος πηνίου και το t_w το αξονικό ύψος πηνίου. Το k_f όπως θα δούμε παρακάτω είναι ο συντελεστής πλήρωσης του πηνίου.

Άρα η πυκνότητα ρεύματος γράφεται:

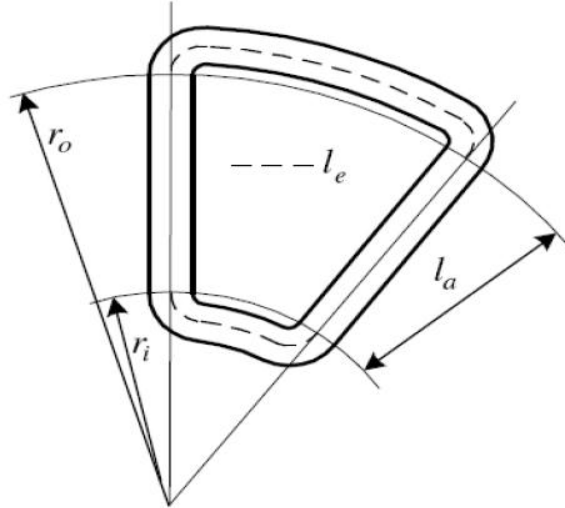
$$J_{max} = \frac{N_c I_a}{t_w w_c k_f} \quad (2.8)$$

2.4.2.3. Αντίσταση και αυτεπαγωγή τυλίγματος

Στη συνέχεια θα υπολογίσουμε την τιμή της αντίστασης και της αυτεπαγωγής του τυλίγματος, καθώς και τη συνολική μάζα του χαλκού που θα χρησιμοποιηθεί. Αυτό θα βοηθήσει πολύ αργότερα στην εκτίμηση τόσο του κόστους, όσο και του βάρους της γεννήτριας. Ιδιαίτερα η αντίσταση του τυλίγματος και κατ'επέκταση οι απώλειες που θα προκαλεί θα παίζει σημαντικό ρόλο αργότερα στη βελτιστοποίησή μας. Επίσης πρέπει να αναφέρουμε ότι η αγορά του χαλκού θα γίνει με βάση το βάρος του.

Το μέσο μήκος ελίσματος l_{avg} μπορούμε να πούμε ότι είναι ίσο με το διπλάσιο ενεργό μήκος (κάθε πλευρά του πηνίου έχει μήκος όσο το ενεργό μήκος l_a) συν τα άκρα τυλίγματος l_{ec} όπως αυτά υπολογίστηκαν από τη σχέση (2.5):

$$l_{avg} = 2l_a + l_{ec}$$



Σχήμα 2.17: Κάτοψη του πηνίου όπου φαίνονται και τα άκρα τυλίγματος.

Γνωρίζοντας το συνολικό μήκος ενός ελίσματος μπορούμε πλέον να βρούμε την αντίσταση ενός πηνίου με N_c ελίγματα:

$$R_c = N_c * R_{c,ελίσματος} = N_c \rho_t \frac{l_{avg}}{sc} = N_c \rho_t \frac{(2l_a + l_{ec})}{sc} \quad (2.9)$$

όπου ρ_t η ειδική αντίσταση του χαλκού:

$$\rho_t = \rho_{20} (1 + 0.0039(t_c - 20)) \quad \rho_{20} = 1.68 \cdot 10^{-8}$$

και t_c η θερμοκρασία στην οποία λειτουργεί η γεννήτρια.

Η αυτεπαγωγή μιας φάσης του τυλίγματος L_s έχει υπολογιστεί στο [18] και είναι:

$$L_s = \frac{q \cdot l_{avg}^2 \cdot N_c^2}{t_w} \cdot 10^{-7} \cdot K_n \quad (2.10)$$

όπου K_n η σταθερά του Nagaoka :

$$K_n = \frac{1}{1 + 0.9 \frac{l_{avg}}{2\pi t_w} + 0.32 \frac{2\pi w_c}{l_{avg}} + 0.84 \frac{w_c}{t_w}}$$

Πρόκειται ουσιαστικά για έναν συντελεστή διόρθωσης καθώς κατά τη λειτουργία της γεννήτριας τα πηνία μαγνητίζονται καθιστώντας το πεδίο μη ομοιόμορφο.

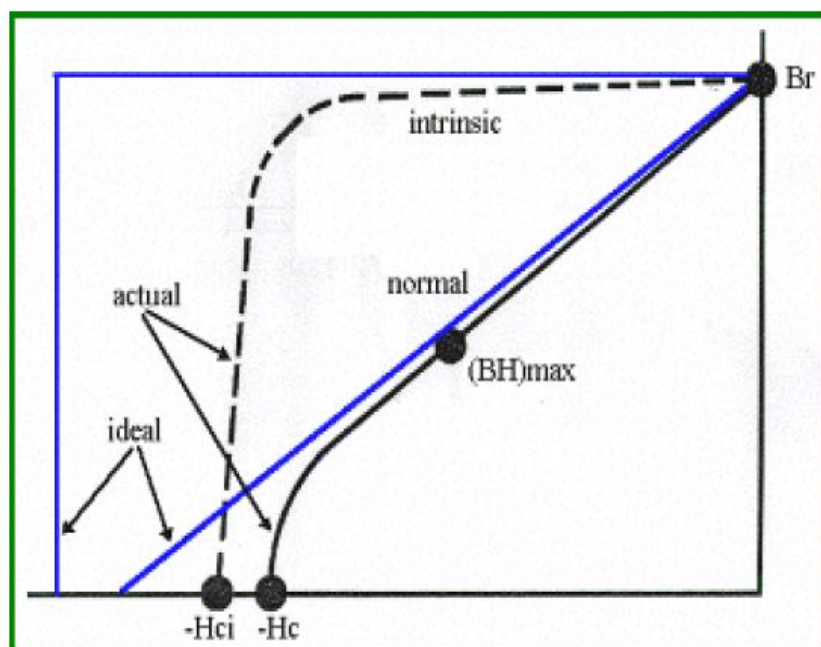
Τέλος, η μάζα χαλκού που θα χρησιμοποιηθεί υπολογίζεται απλά από τον τύπο της πυκνότητας:

$$m_{cu} = 3 * N_c * l_{avg} * sc * \rho_{cu}$$

όπου ρ_{cu} η πυκνότητα του χαλκού.

2.4.3. Το μαγνητικό κύκλωμα

Πολύ σημαντικό ρόλο στην ανάλυσή μας παίζει και η ανάλυση του μαγνητικού κυκλώματος της γεννήτριας. Πρωτεύοντα ρόλο στο κύκλωμα αυτό έχει ο μαγνήτης, οπότε πρέπει να δούμε από τι χαρακτηρίζεται ένας μόνιμος μαγνήτης.



Σχήμα 2.18: Γενική μορφή της καμπύλης απομαγνήτισης.

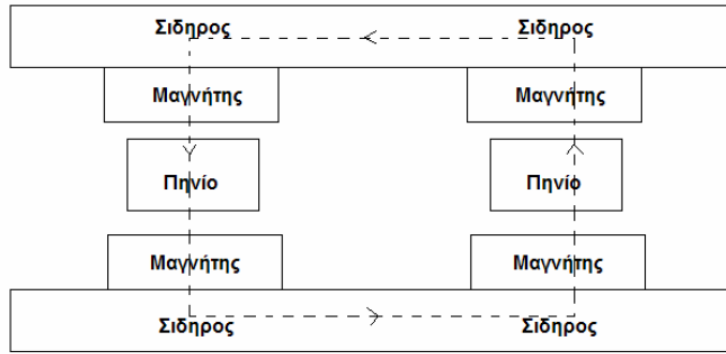
Ένας μόνιμος μαγνήτης χαρακτηρίζεται σχεδόν πλήρως από την καμπύλη απομαγνήτισής του, που φαίνεται παραπάνω. Στην καμπύλη αυτή μας ενδιαφέρει το μέγεθος της παραμένουσας μαγνήτισης B_r (Tesla) περισσότερο καθώς και η συνεχούσα δύναμη H_c (kA/m). Γενικά, ο μαγνήτης πρέπει να λειτουργεί στο σημείο εκείνο που θα μπορεί να αποδώσει τη μέγιστη ενέργεια $(BH)_{max}$. Το σημείο αυτό είναι στο γόνατο της καμπύλης απομαγνήτισης και το πεδίο μπορεί να υπολογιστεί εκεί ίσο με $B = B_r/2$. Με λίγα λόγια μπορούμε να υποθέσουμε για την πυκνότητα

μαγνητικής ροής στην επιφάνεια των μαγνητών:

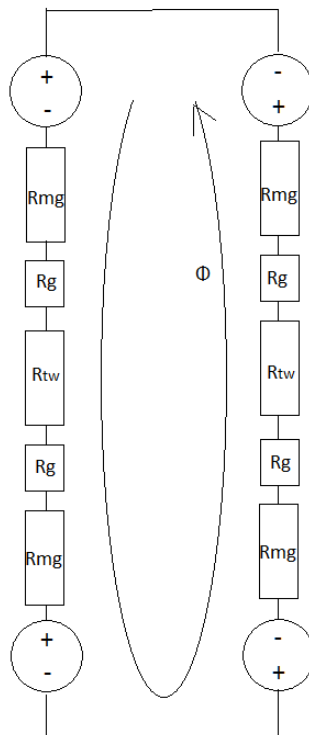
$$B_{mg} = \frac{B_r}{2} \quad (2.11)$$

Φυσικά κάθε μόνιμος μαγνήτης έχει δικές του χαρακτηριστικές ανάλογα με το υλικό από το οποίο είναι κατασκευασμένος και το πόσο ισχυρός είναι (βαθμός του μαγνήτη), οι οποίες θα μας δώσουν και τις απαραίτητες πληροφορίες οι οποίες θα χρησιμοποιηθούν κατά την προσομοίωση του μαγνήτη αυτού.

Μια πλάγια όψη της γεννήτριας καθώς και το αντίστοιχο μαγνητικό κύκλωμα που προκύπτει από αυτή φαίνεται στα παρακάτω σχήματα:



Σχήμα 2.19: Η πλάγια όψη της γεννήτριας που χρησιμοποιείται για την εξαγωγή του κυκλώματος.



Σχήμα 2.20: Το μαγνητικό κύκλωμα της γεννήτριας.

Η ανάλυση του μαγνητικού κυκλώματος έχει γίνει στο [6] από όπου προκύπτει η σχέση:

$$B_{mg} = \frac{B_r}{1 + \mu_{rrec} \frac{(g + 0.5t_w)}{h_m} k_{sat}} \quad (2.12)$$

όπου:

- μ_{rrec} η σχετική μαγνητική διαπερατότητα του μαγνήτη που ορίζεται $\mu_{rrec} = \frac{1}{\mu_0} \frac{B_r}{H_c}$ και μ_0 η μαγνητική διαπερατότητα του κενού ίση με $4\pi \cdot 10^{-7}$.
- $k_{sat}=1$ αφού δεν υπάρχει κορεσμός (δεν υπάρχει πυρήνας)
- h_m το πάχος του μαγνήτη (αξονικό ύψος)
- g το αξονικό ύψος του διακένου ή απλά το διάκενο.

Η ανάλυση αυτή είναι καλή αν και υποθέτει ότι το πεδίο B_{mg} στην επιφάνεια του μαγνήτη διατηρείται σε όλο το αξονικό ύψος της γεννήτριας, υπόθεση που μάλλον βασίζεται στην ύπαρξη πυρήνα στη γεννήτρια. Στην περίπτωση μας όμως δεν υπάρχει πυρήνας και θα πρέπει να θεωρήσουμε ότι το πεδίο εξασθενεί στο μέσο τουλάχιστον της γεννήτριας. Έτσι, μια πιο καλή προσέγγιση θα μπορούσε να γίνει θεωρώντας ότι στα διάκενα της γεννήτριας έχουμε πεδίο B_{mg} ενώ στην περιοχή των πηνίων (ύψος t_w) έχουμε B_{max} , τη μέγιστη δηλαδή τιμή της κυματομορφής του B όπου αναφερόμαστε στο σημείο που βρίσκεται στη μέση της γεννήτριας. Για το μαγνητικό κύκλωμα θεωρούμε τους μαγνήτες πηγές τάσης με τάση:

$$V = \frac{h_m B_r}{\mu_0 \mu_{rrec}}$$

τη μαγνητική ροή Φ ρεύμα με μέτρο:

$$I = B \cdot S$$

και τα υλικά στα οποία ταξιδεύει η τελευταία (αέρας και μαγνήτης) αντιστάσεις:

$$\begin{aligned} R_{mg} &= \frac{h_m}{S \mu_0 \mu_{rrec}} \\ R_g &= \frac{g}{S \mu_0} \\ R_{tw} &= \frac{t_w}{S \mu_0} \end{aligned}$$

Εφαρμόζοντας λοιπόν έναν απλό νόμο του Ohm και κάνοντας τις παραπάνω παραδοχές για το την πυκνότητα μαγνητικής ροής σε κάθε σημείο μπορούμε να γράψουμε και την παρακάτω σχέση η οποία φυσικά απαιτεί επαλήθευση μέσω προσομοίωσης στον υπολογιστή πριν χρησιμοποιηθεί:

$$t_w = \frac{2}{B_{max}} \left\{ \frac{h_m}{\mu_{rrec}} (B_r - B_{mg}) - B_{mg} g \right\} \quad (2.13)$$

2.4.4. Μελέτη απωλειών και ισοδύναμο κύκλωμα

Στο σημείο αυτό γίνεται μελέτη των απωλειών σε μια μηχανή αξονικής ροής με μόνιμους μαγνήτες η οποία δεν έχει πυρήνα. Εξάγεται το ισοδύναμο κύκλωμα για τη μοντελοποίηση αυτών καθώς και το ισοζύγιο ενέργειας. Οι απώλειες μπορούν γενικά να χωριστούν σε απώλειες στο στάτη, απώλειες στο δρομέα και απώλειες περιστροφής.

2.4.4.1. Μελέτη απωλειών

Απώλειες στο στάτη:

-**Απώλειες χαλκού:** Οι απώλειες χαλκού αποτελούν τη μεγαλύτερη συνιστώσα απωλειών και είναι οι ωμικές απώλειες των τυλιγμάτων του στάτη:

$$P_{cu} = 3I_{ac}^2 R_{phase} \quad (2.14)$$

Καθότι στη μελέτη μας, όπως θα δούμε, ερχόμαστε αντιμέτωποι με μεγάλες τιμές ρεύματος λόγω και της μεγάλης ισχύος που μελετάμε, οι απώλειες χαλκού παίζουν πολύ σημαντικό ρόλο και βασικό μας μέλημα είναι ο περιορισμός τους, τόσο για να επιτύχουμε την επιθυμητή απόδοση όσο και για να εξαλείψουμε φαινόμενα υπερθέρμανσης.

Στην παρούσα εργασία το επιδερμικό φαινόμενο έχει αγνοηθεί. Στο [6] υπολογίζονται οι απώλειες χαλκού συμπεριλαμβανομένου και του επιδερμικού φαινομένου.

-Απώλειες δινορρευμάτων: Συνήθως οι απώλειες δινορρευμάτων εμφανίζονται στον πυρήνα της γεννήτριας. Η ανυπαρξία πυρήνα εξαλείφει τις απώλειες αυτές. Απώλειες δινορρευμάτων εξακολουθούν όμως να υπάρχουν στο τύλιγμα, σε τέτοιο βαθμό που κρίνεται σκόπιμο να υπολογιστούν [18]. Προκαλούνται από τα εναλλασσόμενα μαγνητικά πεδία στο τύλιγμα, τα οποία δημιουργούνται όταν οι μόνιμοι μαγνήτες περνούν πάνω από τους αγωγούς του τυλίγματος. Σε περίπτωση που η μηχανή λειτουργεί σε σχετικά υψηλές συχνότητες, τα παραγόμενα δινορρεύματα προκαλούν σημαντικές απώλειες στη μηχανή. Οι απώλειες αυτές οδηγούν σε αύξηση της θερμοκρασίας του τυλίγματος και σε μείωση της απόδοσης της μηχανής.

Το επιδερμικό φαινόμενο που εμφανίζεται σαν αποτέλεσμα των απωλειών αυτών, μπορεί να περιοριστεί με χρήση πολύκλωνων αγωγών στο τύλιγμα [18].

Οφείλουμε να αναφέρουμε εδώ ότι μπορούμε να επιτύχουμε περιορισμό των δινορρευμάτων, με περιέλιξη και αντιμετάθεση των αγωγών του τυλίγματος. Σε περίπτωση όμως που οι σπείρες σε κάθε πηνίο είναι πολλές, αρκεί η περιέλιξη για να μειωθούν τα δινορρεύματα.

Στην εφαρμογή που μελετάμε, στην οποία έχουμε μεγάλο αριθμό πόλων, οι απώλειες αυτές δεν είναι αμελητέες και δίνονται από τον τύπο :

$$P_{eddy} = \frac{\pi l_a s c^4 B_p^2 \omega_e^2 Q N_c N_p}{32 \rho_{cu}} \quad (2.15)$$

όπου:

- $N_p=1$ ο αριθμός των παράλληλων κλώνων ανα αγωγό
- ω_e η ηλεκτρική γωνιακή ταχύτητα
- ρ_{cu} η ειδική αντίσταση του χαλκού

Όπως φαίνεται στον τύπο, οι απώλειες αυτές είναι ανάλογες της τέταρτης δύναμης της διατομής του γεγονός που αναδεικνύει τη σημασία των πολύκλωνων αγωγών.

Απώλειες στο δρομέα:

Απώλειες υπάρχουν και στο δρομέα. Συγκεκριμένα στους μόνιμους μαγνήτες υπάρχουν απώλειες οι οποίες οφείλονται σε αρμονικές υψηλής τάξης της πυκνότητας μαγνητικής ροής. Δίχως πυρήνα οι απώλειες αυτές είναι πολύ μικρές και δε λαμβάνονται υπόψη στο παρόν κείμενο. Επιπλέον απώλειες προκαλεί και ο σίδηρος που συγκρατεί τους μαγνήτες, αλλά και αυτές είναι πολύ μικρές οπότε δε λαμβάνονται υπόψη.

Απώλειες περιστροφής:

Οι απώλειες περιστροφής ή μηχανικές απώλειες αποτελούνται από δύο συνιστώσες: Τις απώλειες τριβών στα ρουλεμάν και τις απώλειες ανεμισμού, Οι τελευταίες είναι πολύ μικρές και αγνοούνται. Για τις απώλειες τριβών σε μικρές μηχανές δίνεται ο τύπος [6]:

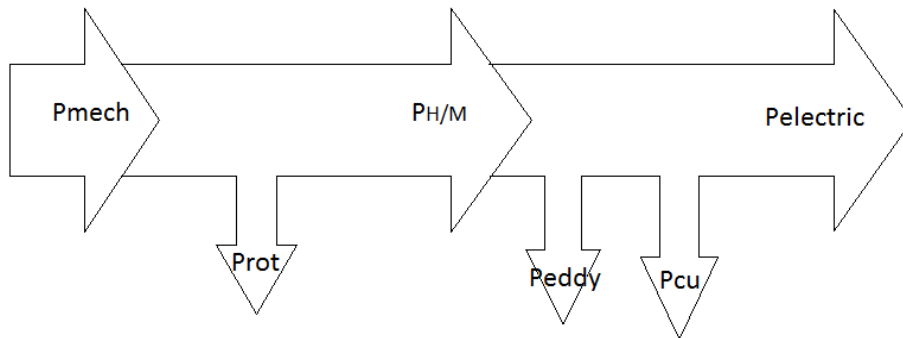
$$P_{rot} = 0.06k_{fb}(m_r + m_{sh})n \quad (2.16)$$

όπου:

- k_{fb} συντελεστής τριβών με τιμές 1-3 m^2/s^2
- m_r η μάζα του δρομέα σε kg
- m_{sh} η μάζα του άξονα σε kg
- n οι στροφές της γεννήτριας

2.4.4.2. Ισοζύγιο Ενέργειας-Ισοδύναμο Κύκλωμα

Με βάση την παραπάνω ανάλυση σχηματίζουμε το ισοζύγιο ενέργειας:



Σχήμα 2.21: Το ισοζύγιο ενέργειας της γεννήτριας αξονικής ροής μονίμων μαγνητών χωρίς πυρήνα.

Είσοδος της γεννήτριας είναι η αεροδυναμική ή μηχανική ισχύς την οποία θα συμβολίζουμε με P_{mevh} ή P_{air} . Είναι η ισχύς που μπορεί να απορροφήσει η φτερωτή από τον άνεμο. Αφαιρώντας τις απώλειες περιστροφής προκύπτει η εσωτερική ή ηλεκτρομαγνητική ισχύς

$$P_{H/M} = P_{mech} - P_{rot} \cdot$$

Στη συνέχεια αφαιρώντας τις απώλειες του τυλίγματος (δινორρευμάτων και ωμικές) προκύπτει η ηλεκτρική ισχύς (ισχύς εξόδου):

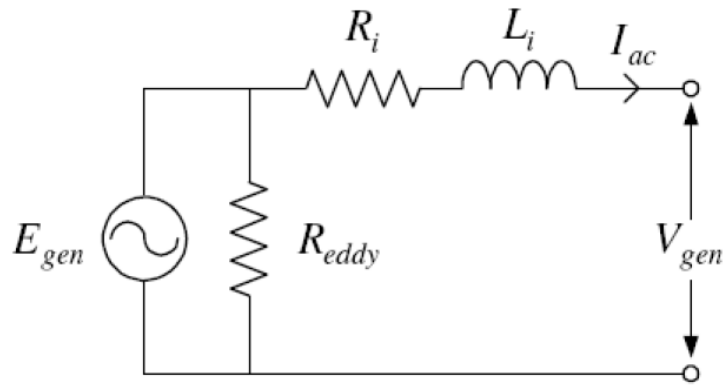
$$P_{\eta\lambda} = P_{H/M} - P_{rot} = P_{mech} - P_{rot} - P_{eddy} - P_{cu}$$

Οι παραπάνω απώλειες παρουσιάζονται και στο παρακάτω ισοδύναμο κύκλωμα, όπου η Reddy έχει τοποθετηθεί παράλληλα με την αντι-HEΔ, για να παρουσιάσει τις απώλειες δινორρευμάτων και δεν είναι μια πραγματική αντίσταση.

Η τιμή της δίνεται από τον τύπο:

$$R_{eddy} = \frac{3 * E_{gen}^2}{P_{eddy}}$$

όπου η E_{gen} είναι η RMS τιμή της αντι-HEΔ.



Σχήμα 2.22: Το ισοδύναμο κύκλωμα της γεννήτριας.

Η απόδοση στη συνέχεια υπολογίζεται από τον τύπο:

$$\eta = \frac{P_{\eta\lambda}}{P_{\eta\lambda} + P_{cu} + P_{eddy} + P_{rot}} \quad (2.17)$$

Κεφάλαιο 3 : Διαστασιολόγηση γεννητριών αξονικής ροής

Στα πλαίσια της εργασίας αυτής θα κληθούμε να μελετήσουμε και να βελτιστοποιήσουμε γεννήτριες αξονικής ροής σε ένα εύρος ισχύος από 3kW έως 6,5kW. Σε αυτό το κεφάλαιο θα περιγράψουμε τις σχέσεις που διαστασιολογούν τις γεννήτριες αυτές ανεξαρτήτως επιπέδου ισχύος. Η διαστασιολόγηση θα γίνει με βάση τα θεωρητικά στοιχεία του προηγούμενου κεφαλαίου καθώς και με χρήση κάποιων επιπλέον σχέσεων για τον υπολογισμό διαφόρων παραμέτρων των γεννητριών. Η σχεδίαση γίνεται με σκοπό οποιαδήποτε από αυτές τις γεννήτριες να συνδεθεί στο δίκτυο (σύνδεση AC). Η έξοδος της γεννήτριας (AC) θα ανορθώνεται με έναν μη ελεγχόμενο τριφασικό ανορθωτή διόδων και έπειτα θα εισέρχεται σε έναν αντιστροφέα ο οποίος θα εκτελεί εκτός των άλλων λειτουργία MPPT. Μέσω του ανορθωτή και του αντιστροφέα η γεννήτρια θα συνδέεται στο δίκτυο.

3.1. Ονομαστικές στροφές-Ονομαστική Τάση

Με δεδομένο ότι μελετάμε ένα εύρος ισχύος, η ηλεκτρική ισχύς στην έξοδο της γεννήτριας θα είναι κάθε φορά διαφορετική. Δίνοντας την ισχύ αυτή και ορίζοντας την απόδοση που θέλουμε να χουν οι γεννήτριες που σχεδιάζουμε, η μηχανική ισχύς στην είσοδο της γεννήτριας δίνεται από τον τύπο:

$$P_{μηχ} = \frac{P_{ηλ}}{\eta} \quad (3.1)$$

Στο [20] η απόδοση για τη γεννήτρια αξονικής ροής 3kW που μελετήθηκε, είχε οριστεί στο 90%. Μετά από προκαταρκτική μελέτη και προσομοίωση των γεννητριών στο εύρος ισχύος που μας ενδιαφέρει, με απόδοση ορισμένη στο 90%, και με βάση τα αποτελέσματα αυτή της μελέτης αποφασίσαμε να θεωρήσουμε την απόδοση στο 82%. Επιλέγουμε μικρότερη απόδοση καθώς όσο ανεβαίνουμε σε ισχύ τόσο πιο δύσκολο είναι να επιτύχουμε τόσο μεγάλες αποδόσεις λόγω και των αυξημένων απωλειών, αλλά πάντα λαμβάνοντας υπόψη τη δυνατότητα αποβολής της παραγόμενης, λόγω απωλειών, θερμότητας από τη γεννήτρια.

Καθώς μιλάμε για ανεμογεννήτρια, η μηχανική ισχύς που ορίζεται στον παραπάνω τύπο αντιστοιχεί στην ισχύ που αποσπά η φτερωτή από τον άνεμο. Η ισχύς αυτή δίνεται από τον τύπο:

$$P_{air} = \frac{1}{2} \rho C_p \pi R_t^2 v_w^3 \quad (3.2)$$

Από τον τύπο αυτό φαίνεται ότι η ισχύς εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τον άνεμο για τον οποίο σχεδιάζεται να λειτουργεί η γεννήτρια (ονομαστική λειτουργία). Από τον τύπο αυτό, λύνοντας ως προς R_t θα βρούμε την ακτίνα της φτερωτής:

$$R_t = \sqrt{\frac{2P_{air}}{\rho C_p v_w^3}}$$

Η επιλογή του ανέμου για τον οποίο σχεδιάζεται η γεννήτρια είναι πολύ σημαντική καθώς καθορίζει το μέγεθος της φτερωτής και άρα επηρεάζει τη συνολική κατασκευή και το κόστος της ανεμογεννήτριας. Επιλέγεται άνεμος 10 m/s, και όχι ένας μέσος άνεμος (5m/s), ώστε να μπορούν να αξιοποιούνται και υψηλότεροι από το μέσο, άνεμοι, οι οποίοι, στα ηψηλά επίπεδα ισχύος που φτάνουμε, είναι πολύ πιθανό να συναντούνται στις περιοχές τοποθέτησης των ανεμογεννητριών. Επίσης με αυτή την επιλογή περιορίζεται και η ακτίνα της φτερωτής σε πιο λογικά μήκη.

Έτσι ονομαστικός άνεμος στη σχεδίαση θεωρούνται τα 10 m/s όπου η γεννήτρια θα αποδίδει την ονομαστική ηλεκτρική ισχύ. Η γεννήτρια θα μπαίνει στο σύστημα στα 3 m/s και θα διατηρεί λόγω του MPPT πάντα το λόγο ταχύτητας ακροπερυγίου ίσο με $\lambda_{opt}=7$. Ισχύει για τις στροφές:

$$\lambda_{opt} = \frac{\omega R_{turb}}{v_w} = \frac{2\pi n R_{turb}}{60 v_w} \rightarrow n = \frac{60 v_w \lambda_{opt}}{2\pi R_{turb}} \quad (3.3)$$

Για τη μικρότερη και τη μεγαλύτερη ισχύ που θα μελετήσουμε προκύπτουν οι τιμές:

Ισχύς (W)	P_{air} (W)	R_t (m)	n_{cut-in} (ΣΑΛ)	n_{nom} (ΣΑΛ)
3100	3780	2.39	84	280
6500	7926	3.47	58	192

Πίνακας 3.1: Ενδεικτικές τιμές για μέγιστη και ελάχιστη τιμή ισχύος

Στη συνέχεια πρέπει να καθορίσουμε το εύρος των τάσεων που θα αναπτύσσει η γεννήτρια.

Όταν η γεννήτρια είναι ανοιχτοκυκλωμένη (σε κατάσταση cut-in, λίγο πριν μπει στο σύστημα) η ΗΕΔ της E_f είναι ίση με την τερματική της τάση. Δηλαδή $E_{fcutin} = V_{tcutin}$. Η τερματική αυτή τάση θα είναι ίση με την τάση στην οποία αρχίζει να λειτουργεί ο αντιστροφέας (κάτω όριο του εύρους λειτουργίας του). Αν υποθέσουμε ότι θα χρησιμοποιήσουμε το WindyBoy 3300 της SMA τότε αυτός έχει εύρος λειτουργίας 200-500 V. Η τάση της γεννήτριας, όπως έχει ήδη αναφερθεί, πρώτα ανορθώνεται και μετά φτάνει στον αντιστροφέα:

$$E_{fcutin} = \frac{V_{WBcutin}}{\sqrt{3} \cdot 1.35}$$

Γενικά, για μη ελεγχόμενη τριφασική ανόρθωση ισχύει [19]:

$$V_{dc} = \sqrt{3} \cdot 1,35 \cdot V_{ac} \quad (3.4)$$

όπου V_{ac} η φασική τάση πριν τον ανορθωτή.

Άρα με βάση τα παραπάνω η τάση εισόδου της γεννήτριας θα είναι: $E_{f_{cutin}} = 85,5 V$

Για την ονομαστική ΗΕΔ:

$$\frac{E_{f_{nom}}}{E_{f_{cutin}}} = \frac{n_{nom}}{n_{cutin}} \rightarrow E_{f_{nom}} = \frac{n_{nom}}{n_{cutin}} E_{f_{cutin}} \rightarrow E_{f_{nom}} = 286 V \quad (3.5)$$

όπου βέβαια είναι ίδια για όλο το εύρος ισχύων καθώς εξαρτάται μόνο από το κάτω όριο του αντιστροφέα και τους ανέμους cut-in και ονομαστικό που επιλέγουμε.

Εφόσον λάβουμε υπόψη μας το άνω όριο λειτουργίας του αντιστροφέα το οποίο στη συγκεκριμένη περίπτωση είναι 500 V, θα πρέπει να κινηθούμε αντίστροφα και με δεδομένο αυτό να καταλήξουμε σε άνεμο cut-in 4 m/s, μη μπορώντας έτσι να εκμεταλλευτούμε ανέμους 3-4 m/s.

3.2. Αριθμός πόλων-πηγίων, συχνότητα λειτουργίας

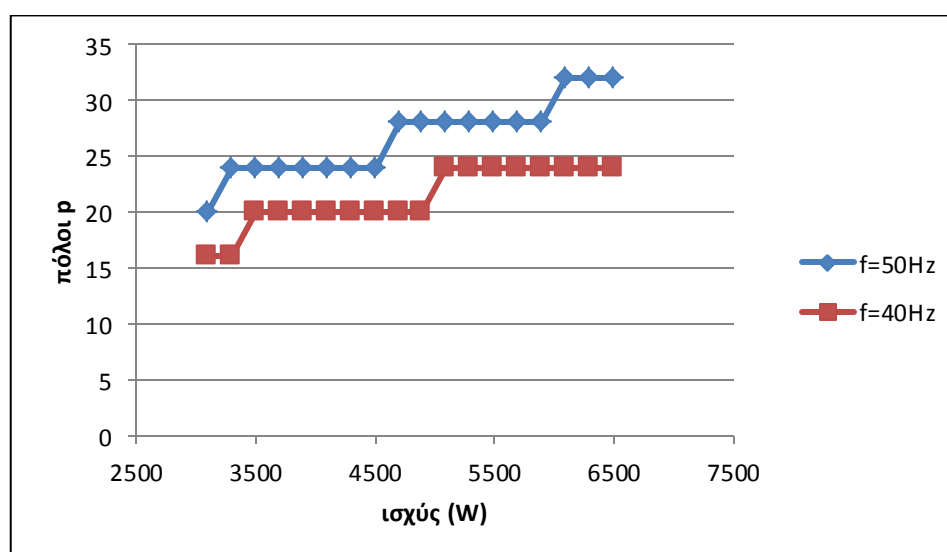
Σε μια σύγχρονη γεννήτρια ισχύει η σχέση:

$$n_{nom} = \frac{120f}{p} \quad (3.6)$$

όπου p ο αριθμός των πόλων και f η συχνότητα λειτουργίας σε Hz. Από τη σχέση αυτή θα υπολογίζουμε κάθε φορά τους πόλους της γεννήτριας έχοντας δεδομένα τη συχνότητα λειτουργίας και τις ονομαστικές στροφές.

$$p = \frac{120f_{nom}}{n_{nom}} \quad (3.7)$$

Στο εύρος της ισχύος που μελετάμε και για συχνότητα 50Hz έχουμε 4 αλλαγές στον αριθμό των πόλων ενώ για συχνότητα $f=40Hz$ έχουμε 3 αλλαγές στον αριθμό των πόλων, όπως φαίνεται και στο διάγραμμα παρακάτω.



Σχήμα 3.1: Οι αλλαγές στον αριθμό των πόλων στο εύρος της ισχύος

Προκειμένου να προκύψει ένα συμμετρικό τριφασικό σύστημα (διαφορά 120° μεταξύ των τριών φάσεων) ο αριθμός των πόλων p πρέπει να είναι διαφορετικός από τον αριθμό των πηνίων Q . Οι πόλοι πρέπει να είναι φυσικά ζυγός αριθμός και κάθε πόλος αντιστοιχεί σε δύο μαγνήτες (έναν σε κάθε δίσκο του δρομέα), ενώ τα πηνία πρέπει να διαιρούνται με το 3 καθώς η γεννήτρια έχει 3 φάσεις. Μετά από διαδικασία βελτιστοποίησης [19] βρέθηκε ότι ο αριθμός των πόλων και των πηνίων πρέπει, προκειμένου να μεγιστοποιηθεί η ροπή, να τηρεί την εξής σχέση:

$$\frac{2Q}{3p} = 0.5 \quad (3.8)$$

Με λίγα λόγια πρέπει ο αριθμός των πόλων να διαιρείται με το 4 και ο αριθμός των πηνίων με το 3. Έχοντας υπολογίσει δηλαδή τον αριθμό των πόλων, από αυτή τη σχέση υπολογίζουμε τον αριθμό των πηνίων. Έτσι προκύπτουν διάφοροι συνδυασμοί πόλων-πηνίων:

$$16-12, \quad 20-15, \quad 24-18, \quad 28-21, \quad 32-24$$

Η συχνότητα μπορεί να λάβει τιμές από 30-60 Hz. Όπως φαίνεται και παραπάνω στο διάγραμμα, στην παρούσα εργασία, έχουμε επιλέξει να μελετήσουμε συχνότητες λειτουργίας 40 και 50 Hz και σε επόμενο κεφάλαιο θα συγκρίνουμε τις διατάξεις που προέκυψαν.

Η ονομαστική συχνότητα είναι σημαντική παράμετρος της διαστασιολόγησης και επιδρά άμεσα στον αριθμό των πόλων και άρα στο κόστος της γεννήτριας. Μικρή ονομαστική συχνότητα σημαίνει λιγότερους πόλους και άρα λιγότερους μαγνήτες με παράλληλη μείωση του κόστους. Σύμφωνα όμως με το [19], περισσότεροι πόλοι λόγω υψηλότερης συχνότητας, οδηγούν σε καλύτερη ροπή για το τύλιγμα που χρησιμοποιούμε καθώς και λιγότερες σπείρες στα πηνία κάτι που τα καθιστά πιο εύκολα κατασκευάσιμα.

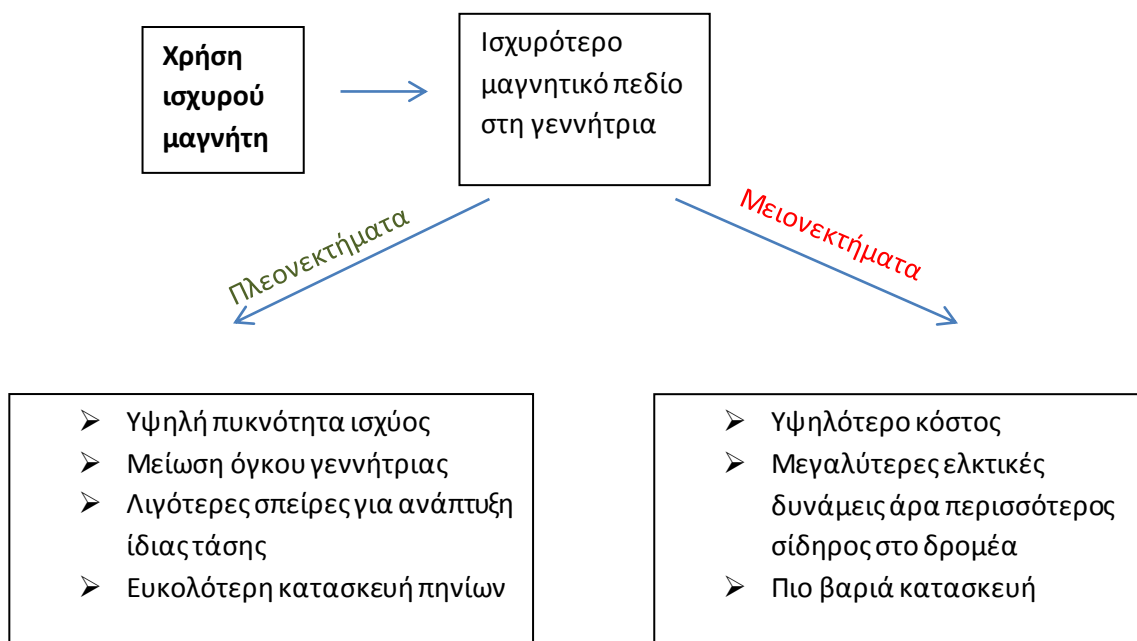
3.3. Οι Μαγνήτες

3.3.1. Το είδος του μαγνήτη

Η ανάπτυξη και η ευρεία χρήση των σύγχρονων μαγνητών (σπάνιες γαίες) και συγκεκριμένα των μαγνητών νεοδυμίου (NdFeB) με την ταυτόχρονη μείωση της τιμής τους, είναι και ο λόγος που τα τελευταία χρόνια χρησιμοποιούνται αρκετά οι μηχανές μονίμων μαγνητών. Οι μαγνήτες αυτοί είναι πολύ ισχυροί αλλά έχουν το βασικό μειονέκτημα ότι δεν αντέχουν σε υψηλές θερμοκρασίες (μέχρι 250°C) και διαβρώνονται εύκολα. Η διάβρωση αντιμετωπίζεται με ειδικά βερνίκια. Βασικό πλεονέκτημα των μαγνητών αυτών είναι η δυνατότητα χρήσης τους σε εφαρμογές σε εφαρμογές με υψηλό λόγο κόστους προς απόδοση, που είναι και βασικό μέλημα αυτής της εργασίας [6]. Για τους παραπάνω λόγους οι μαγνήτες νεοδυμίου επιλέγονται για την κατασκευή.

Οι μαγνήτες αυτοί χαρακτηρίζονται από το βαθμό τους. Ο βαθμός του μαγνήτη εκφράζει το πόσο ισχυρός είναι ο τελευταίος με βάση την παραμένουσα μαγνήτισή του. Όσο ανεβαίνει ο βαθμός τόσο αυξάνει και η τιμή του. Οι μαγνήτες νεοδυμίου συναντώνται με βαθμούς από N30 έως N52.

Η επιλογή του βαθμού του μαγνήτη είναι πολύ σημαντική και μας απασχόλησε στα πλαίσια αυτής της εργασίας. Καταρχήν υπάρχει ελευθερία στην επιλογή αυτή καθώς η ανυπαρξία πυρήνα εξαλείφει το πρόβλημα των δινορρευμάτων.



Λαμβάνοντας υπόψη όλα τα παραπάνω, με βάση και την επιλογή του βαθμού N40 που είχε γίνει στο [20] για γεννήτρια 3kW, μελετάμε τρεις διαφορετικούς βαθμούς: N40M, N42M και N45M. Το γράμμα δίπλα στο βαθμό του μαγνήτη καθορίζει τη μέγιστη θερμοκρασία που προτείνεται να λειτουργεί ο συγκεκριμένος μαγνήτης. Εμείς επιλέγουμε τους 'M' οι οποίοι προτείνεται να λειτουργούν σε θερμοκρασίες μέχρι 100°C. Στην επιλογή και χρήση ισχυρότερων από N40 μαγνητών, οδηγούμαστε και από το γεγονός ότι πλέον μελετάμε και ισχείς αρκετά υψηλότερες από 3kW φτάνοντας στα 6,5 kW.

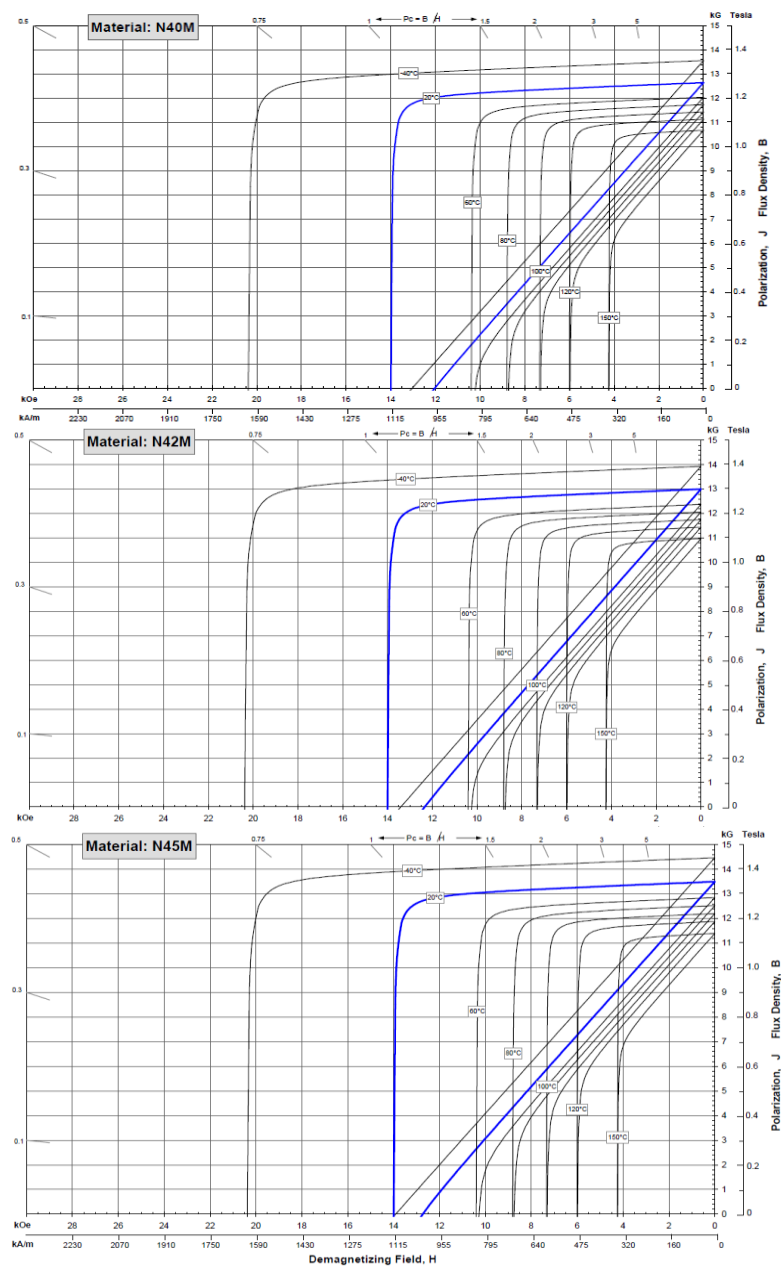
3.3.2. Το σχήμα του μαγνήτη

Έχουν μελετηθεί μηχανές αξονικής ροής με διάφορα σχήματα μαγνητών. Τρία βασικά που συναντώνται στη βιβλιογραφία είναι οι δισκοειδείς μαγνήτες, οι ορθογώνιοι και οι τραπεζοειδείς. Μετά από σύγκριση που έγινε μεταξύ ορθογώνιων και τραπεζοειδών μαγνητών στο [20], επιλέχθηκαν τελικά οι ορθογώνιοι τους οποίους θα χρησιμοποιήσουμε και εμείς.

Οι ορθογώνιοι μαγνήτες, καθώς πιο δημοφιλείς, μπορούν να βρεθούν πιο εύκολα στο εμπόριο σε μεγάλο εύρος διαστάσεων, καθώς επίσης και να κατασκευαστούν πιο

εύκολα και άρα με μικρότερο κόστος από ότι οι τραπεζοειδείς. Τα χαρακτηριστικά τους αυτά τους καθιστούν ιδανικούς για τους σκοπούς της εργασίας μας, καθώς μέσα από τη μελέτη που θα κάνουμε θα προκύψουν μαγνήτες σε ένα εύρος διαστάσεων ώστε να καλύπτουν το εύρος της ισχύος που θέλουμε, πολλοί από τους οποίους πολύ πιθανόν να μη συναντώνται στο εμπόριο και άρα να πρέπει να κατασκευαστούν.

Παρακάτω παραθέτονται οι καμπύλες απομαγνήτισης (B-H curves) των τριών βαθμών μαγνήτη που χρησιμοποιούμε στη μελέτη μας. Από τις καμπύλες αυτές έχουμε εξάγει τις απαραίτητες, για την προσομοίωση του μαγνήτη, πληροφορίες όπως αναφέρθηκαν στη θεωρητική ανάλυση.



Σχήμα 3.2: Οι καμπύλες απομαγνήτισης για τους τρεις βαθμούς μαγνήτη

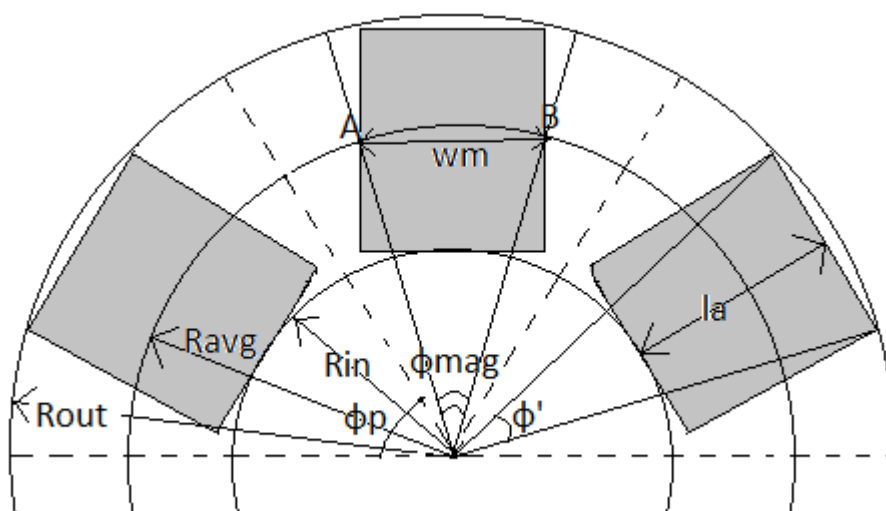
3.3.3. Οι διαστάσεις των μαγνητών

Καταρχήν επιλέγουμε το πάχος των μαγνητών που θα χρησιμοποιηθούν και το οποίο θα διατηρείται σταθερό ανεξαρτήτως της ισχύος. Το πάχος αυτό θα επηρεάσει το πάχος του σιδήρου του δρομέα και συγκεκριμένα το μαγνητικό κορεσμό σε αυτόν. Το πάχος του σιδήρου πρέπει να είναι περίπου ίσο με το πάχος του μαγνήτη για να μην υπάρχει κορεσμός. Επίσης, το πάχος του μαγνήτη επηρεάζει και την κατανομή του πεδίου στο διάκενο, δηλαδή το B_r .

Οι άλλες δύο διαστάσεις του μαγνήτη είναι το πλάτος του w_m και το μήκος του l_a , το οποίο σχεδόν ταυτίζεται με το ενεργό μήκος της γεννήτριας $R_{out}-R_{in}$. Η μικρή διαφορά μεταξύ μήκους μαγνήτη και απόστασης $R_{out}-R_{in}$ θα μπορούσε να αγνοηθεί σε μια μεγάλη μηχανή με πολλούς πόλους, εδώ όμως λαμβάνεται υπόψη στη σχεδίαση. Οι δύο αυτές διαστάσεις (w_m και l_a) θα μας απασχολήσουν ιδιαίτερα στη συνέχεια, καθώς με δεδομένο το πάχος, καθορίζουν πλήρως το μαγνήτη που επιλέγεται να χρησιμοποιηθεί κάθε φορά και είναι και ο σκοπός της εργασίας αυτής.

3.3.4. Υπολογισμός λόγων πλάτους μαγνήτη προς πολικό βήμα (a_i) και εσωτερικής προς εξωτερική ακτίνα (k_d)

Από τη γεωμετρία της γεννήτριας, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα, και με δεδομένες τις διαστάσεις του μαγνήτη w_m και l_a , καθώς και την εξωτερική ακτίνα R_{out} , μπορούμε να υπολογίσουμε τα a_i και k_d , τα οποία θα χρειαστούν στη συνέχεια της διαστασιολόγησης.



Σχήμα 3.3: Η γεωμετρία του μαγνήτη

Για να υπολογίσουμε την εσωτερική ακτίνα R_{in} , γνωρίζοντας το l_a και το R_{out} , πρέπει να υπολογίσουμε πρώτα τη γωνία ϕ' που εμφανίζεται στο σχήμα, καθώς η σχέση που συνδέει τα παραπάνω μεγέθη είναι η:

$$r_{in} = r_{out} \cos\left(\frac{\varphi'_{mag}}{2}\right) - l_a \quad (3.9)$$

όπου

$$\varphi' = 2 \sin^{-1}\left(\frac{w_m}{2r_{out}}\right) \quad (3.10)$$

Να παρατηρήσουμε εδώ ότι το μήκος του μαγνήτη l_a , το οποίο χρησιμοποιήθηκε και στον υπολογισμό της εσωτερικής ακτίνας, θεωρείται από δω και πέρα στους υπολογισμούς ως το ενεργό μήκος της γεννήτριας.

Έχοντας βρει την εσωτερική ακτίνα, θα βρούμε και τη μέση ακτίνα R_{avg} , η οποία χρησιμοποιείται στην προσομοίωση της γεννήτριας.

$$r_{avg} = \frac{r_{in} + r_{out}}{2}$$

Για τη γωνία του μαγνήτη όπως φαίνεται στο σχήμα ισχύει:

$$\varphi_{mag} = \alpha_i \varphi_p = \alpha_i \frac{2\pi}{p} \quad (3.11)$$

Εμείς έχουμε ως δεδομένο το πραγματικό (κατασκευαστικό) πλάτος του μαγνήτη w_m . Για τη διάσταση αυτή ισχύει:

$$w_m = 2r_{avg} \sin\left(\frac{\varphi_{mag}}{2}\right)$$

Από όπου μπορούμε να υπολογίσουμε τη γωνία του μαγνήτη φ_{mag} :

$$\varphi_{mag} = 2 * \sin^{-1} \frac{w_m}{2 * r_{avg}} \quad (3.12)$$

Το πλάτος του μαγνήτη που θα βλέπαμε σε ένα ευθύγραμμο ανάπτυγμα της γεννήτριας και είναι αυτό που θα χρησιμοποιηθεί στην προσομοίωσή της, θα αντιστοιχεί στο τόξο το οποίο ισούται με:

$$w_{m,τόξο} = \varphi_{mag} * r_{avg}$$

Και με χρήση της σχέσης (3.11) προκύπτει για το λόγο α_i :

$$\alpha_i = \frac{p * w_{m,τόξο}}{2 * \pi * r_{avg}} \quad (3.13)$$

Με δεδομένη την ακτίνα, η χρήση μεγαλύτερου σε πλάτος μαγνήτη, οδηγεί σε αύξηση του α_i οπότε και αύξηση της ισχύος. Σε περίπτωση που έχουμε δεδομένη την ισχύ, μεγαλύτερες τιμές του α_i θα οδηγήσουν σε μικρότερο όγκο.

Οπότε τώρα μπορούμε να υπολογίσουμε και το λόγο εσωτερικής προς εξωτερική ακτίνα k_d :

$$k_d = \frac{r_{in}}{r_{out}}$$

Ο συντελεστής αυτός επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό το σχήμα του μαγνήτη και σε εφαρμογές χαμηλού κόστους, όπως η δική μας, τείνει να παίρνει όσο το δυνατόν μεγαλύτερες τιμές.

3.3.5. Η πρώτη αρμονική της πυκνότητας μαγνητικής ροής

Το μέτρο της πρώτης αρμονικής της μαγνητικής ροής B_p εκφράζει την κατανομή του πεδίου στο διάκενο. Έτσι μπορούμε να υποθέσουμε ότι εξαρτάται αφενός από το είδος του μαγνήτη, αφετέρου από τη γεωμετρία. Δεν υπάρχει κάποια θεωρητική σχέση για τον υπολογισμό του, και μόνο για $\alpha_i=2/\pi$ γίνεται μια εκτίμηση:

$$B_p = \frac{2\sqrt{3}B_{mg}}{\pi}$$

Το είδος του μαγνήτη αλλάζει ανάλογα με το βαθμό μαγνήτη που χρησιμοποιούμε, όπως επίσης αλλάζει και η γεωμετρία του, δηλαδή το α_i , το k_d , το πάχος του μαγνήτη h_m καθώς και η απόσταση μεταξύ των μαγνητών, t_w . Το πάχος του μαγνήτη είναι επίσης δεδομένο και ίσο με 10 mm και καθορίζει άμεσα όπως έχουμε δει (δεδομένου του είδους του μαγνήτη) το t_w . Έτσι, μοναδικές μεταβλητές στην ανάλυση μένουν ο λόγος πλάτους μαγνήτη προς πολικό βήμα α_i και ο λόγος εσωτερικής προς εξωτερική ακτίνα k_d .

Ο υπολογισμός λοιπόν του B_p εμποδίζει τη γραμμική εξέλιξη της διαδικασίας. Η εξάρτηση όμως μόνο από τις δύο αυτές μεταβλητές, είναι μια καλή προσέγγιση που μπορεί να γίνει. Έτσι, υπολογίζοντας στον υπολογιστή το B_p για πολλές τιμές των α_i και k_d , μπορούμε να δημιουργήσουμε, όπως θα δούμε παρακάτω έναν πίνακα με τιμές για την πρώτη αρμονική του πεδίου, αναλόγως τις τιμές των μεταβλητών αυτών.

3.3.6. Ροπή και εξωτερική ακτίνα

Παρότι η εξωτερική ακτίνα δίνεται ως δεδομένη στην αρχή της διαστασιολόγησης για ένα εύρος τιμών, καθώς είναι απαραίτητη για τον υπολογισμό των παραμέτρων της γεννήτριας, χρησιμοποιείται για επαλήθευση η σχέση που είχε υπολογιστεί στο [γιοργης] και στηρίζεται στη θεωρητική ανάλυση του κεφαλαίου 2.

Η σχέση (2.4) υπολογίζει την ηλεκτρομαγνητική ροπή της γεννήτριας. Η ροπή αυτή αντιστοιχεί στην ηλεκτρομαγνητική ισχύ της γεννήτριας. Η ισχύς αυτή μπορεί να βρεθεί θεωρώντας απόδοση $\eta=82\%$ και γνωρίζοντας τη ζητούμενη ηλεκτρική ισχύ στην έξοδο, η οποία στα πλαίσια της εργασίας αυτής μεταβάλλεται σε ένα εύρος τιμών. Συγκεκριμένα, όπως παρατηρείται στο [2], κάθε φορά η γεννήτρια δεν πρέπει να διαστασιολογηθεί ακριβώς για την ονομαστική ισχύ στην έξοδο αλλά για λίγο

παραπάνω ώστε να αντέχει σε περίπτωση ριπών ανέμου μεγαλύτερων από 10m/s. Αν και αυτή η μέθοδος είναι αρκετά αμφίβολη, εδώ θα χρησιμοποιηθεί η $P_{max}=1.1 \cdot P_{nom}$ για ασφάλεια στη διαστασιολόγηση. Πάντως η ισχύς που μπορεί να παραχθεί από μια ριπή ανέμου είναι πολύ μεγαλύτερη από την παραπάνω. Όμως η διάρκεια της είναι πολύ μικρή. Ισχύει:

$$T_d = \frac{P_{H/Mmax}}{\omega_{mech}} = \frac{60P_{H/Mmax}}{2\pi n_{nom}} = \frac{60P_{\eta\lambda max}}{\eta * 2\pi n_{nom}} = \frac{1.1 \cdot 60P_{\eta\lambda nom}}{\eta * 2\pi n_{nom}} \quad (3.14)$$

Οπότε με βάση την επιθυμητή ηλεκτρική ισχύ στην έξοδο που θέλουμε και τις αντίστοιχες ονομαστικές στροφές, προκύπτει η ροπή.

Από τη σχέση (2.7) του κεφαλαίου 2, λύνοντας το τριώνυμο που προκύπτει ως προς r_{out} , εξάγεται η παρακάτω σχέση:

$$r_{out} = \sqrt[3]{\frac{T_d}{k_{wc}k_{ec}k_r J_{max} t_w k_f B_p \sqrt{4,5q(k_d + 1) \sin\left(\frac{\theta_{re}}{p}\right) 2\Lambda}}} \quad (3.15)$$

όπου

$$\Lambda = (1 - k_d) + \frac{\theta_m - 0,6\theta_{re}}{p} (1 + k_d) \quad (3.16)$$

Για τη μέγιστη πυκνότητα ρεύματος στο τύλιγμα, J_{max} , επιλέγεται η τιμή των 6 A/mm². Ο συντελεστής πλήρωσης του πηνίου θα καθοριστεί στη συνέχεια.

3.4. Ο στάτης και τα πηνία

Στο κεφάλαιο αυτό θα διαστασιολογηθεί το τύλιγμα το οποίο περιλαμβάνεται στο στάτη.

3.4.1. Το πάχος του στάτη

Το πάχος του στάτη αντιπροσωπεύεται από το αξονικό πάχος των πηνίων t_w . Από την ανάλυση στο κεφάλαιο 2 έχει προκύψει η σχέση (2.13) για τον υπολογισμό του t_w .

$$t_w = \frac{2}{B_{max}} \left\{ \frac{h_m}{\mu_{rrec}} (B_r - B_{mg}) - B_{mg} g \right\}$$

Οι μεταβλητές που εμφανίζονται σε αυτή τη σχέση είναι οι εξής:

- Το διάκενο της γεννήτριας g επιλέγεται να είναι ίσο με 3mm. Είναι μια μεγάλη τιμή γενικά για το διάκενο, αλλά επιλέγεται έτσι για κατασκευαστικούς λόγους και προκειμένου να υπάρχει αρκετό φυσικό κενό μεταξύ των τριών δίσκων της γεννήτριας ώστε να μη δημιουργούνται προβλήματα.

- Το πάχος των μαγνητών επιλέγεται να είναι ίσο με $h_m=10$ mm. Το πάχος αυτό συναντάται αρκετά συχνά σε εμπορικούς μαγνήτες.
- Η μέγιστη τιμή της πυκνότητας μαγνητικής ροής στο διάκενο B_{mg} , θεωρείται λίγο μικρότερη από την αντίστοιχη τιμή στην επιφάνεια του μαγνήτη, η οποία ισούται όπως αναφέραμε στη θεωρητική ανάλυση, με $B_r/2$. Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι τιμές αυτές όπως μεταβάλλονται για τους διαφορετικούς βαθμούς μαγνήτη που χρησιμοποιούμε. Το μ_{rec} υπολογίζεται από τη σχέση (2.12).

	N40M	N42M	N45M
Br (T)	1,265	1,3	1,35
Hc (kA/m)	947	955	995
BHmax (kJ/m³)	314	330	354
Bmg (T)	0.62	0.63	0.65
Bmax (T)	0.6	0.61	0.63
μ_{rec}	1,06299	1,08325	1,07969

Πίνακας 3.2: Χαρακτηριστικά μεγέθη διαφόρων βαθμών μαγνήτη

Τώρα μπορούμε να υπολογίσουμε το πάχος του στάτη t_w , για τους διάφορους βαθμούς μαγνήτη.

3.4.2. Σπείρες και πάχος πηνίου

Από την εξίσωση της τάσης που επάγεται στα τυλίγματα από τους μαγνήτες, όπως βρέθηκε στο κεφάλαιο , μπορούμε να υπολογίσουμε τις σπείρες ανα πηνίο λύνοντας ως προς N_c :

$$N_c = \frac{E_f p}{2\sqrt{2}q\omega_e B_p k_w l_a r_{avg}}$$

όπου

$$\omega_e = \frac{2\pi n p}{60 \cdot 2}$$

Για $n=n_{cutin}$ οι παραπάνω σχέσεις γράφονται:

$$N_c = \frac{E_{fcutin} p}{2\sqrt{2}q\omega_{ecutin} B_p k_w l_a r_{avg}} \quad (3.17)$$

όπου

$$\omega_e = \frac{2\pi n_{cutin} p}{60 \cdot 2} \quad (3.18)$$

Όλα τα μεγέθη στις παραπάνω εξισώσεις έχουν βρεθεί στο πρώτο μέρος αυτού του κεφαλαίου. Ο συντελεστής k_w δεν πρέπει να συγχέεται με τους άλλους συντελεστές που έχουμε ορίσει στην ανάλυση του τυλίγματος για την εύρεση της ροπής. Είναι και αυτός ένας συντελεστής τυλίγματος (συντελεστής χρησιμοποίησης τυλίγματος) και ισούται με 0.95.

Για την εύρεση του πάχους πλευράς πηνίου w_c θα χρησιμοποιήσουμε τη σχέση (2.8) του κεφαλαίου 2:

$$J_{max} = \frac{N_c I_a}{t_w w_c k_f}$$

Την οποία λύνοντας ως προς w_c προκύπτει:

$$w_c = \frac{N_c I_a}{k_f J_{max} t_w}$$

Βλέπουμε ότι χρειάζεται πρώτα να υπολογίσουμε το ρεύμα που θα περάσει τα τυλίγματα και μάλιστα το μέγιστο προκειμένου να είμαστε ασφαλείς όταν κάποια ριπή χτυπήσει τη γεννήτρια ότι δε θα περάσει ρεύμα που δε θα μπορέσει να αντέξει το τυλίγμα. Η μικρή διάρκεια των ριπών καθώς και το αεροδυναμικό φρένο της γεννήτριας εξασφαλίζουν ότι τα ρεύματα αυτά θα είναι επίσης μικρής διάρκειας και άρα όχι πολύ επικίνδυνα. Έτσι το ονομαστικό ρεύμα δίνεται από τον τύπο:

$$I_{anom} = \frac{P_{\eta\lambda}}{3E_{fnom}\eta} \quad (A)$$

Ενώ το μέγιστο ρεύμα θα είναι:

$$I_{amax} = \frac{1.1P_{\eta\lambda}}{3E_{fnom}\eta} \quad (A)$$

Ο μόνος άγνωστος συντελεστής στον τύπο του w_c είναι ο συντελεστής πλήρωσης των πηνίων k_f , ο οποίος εκφράζει τη δυνατότητα να γεμίσει η ιδεατή αύλακα με χαλκό. Η μέγιστη τιμή του για αγωγούς με κυκλική διατομή προκύπτει εύκολα από τη γεωμετρία:

$$k_{fmax} = \frac{sc}{S_{αυλακας}} = \frac{\pi R^2}{4R^2} = \frac{\pi}{4}$$

Με βάση μελέτη του συγκεκριμένου συντελεστή που έγινε [20], επιλέγεται η τιμή 0,6, τιμή στην οποία σταθεροποιείται το k_f για μεγάλο αριθμό σπειρών, γεγονός που ικανοποιεί τα δεδομένα της μελέτης μας.

Το εμβαδόν της σπείρας βρίσκεται τώρα απλά:

$$sc = \frac{I_{amax}}{J_{max}} \quad (3.19)$$

και η διάμετρος του χαλκού που θα χρησιμοποιηθεί:

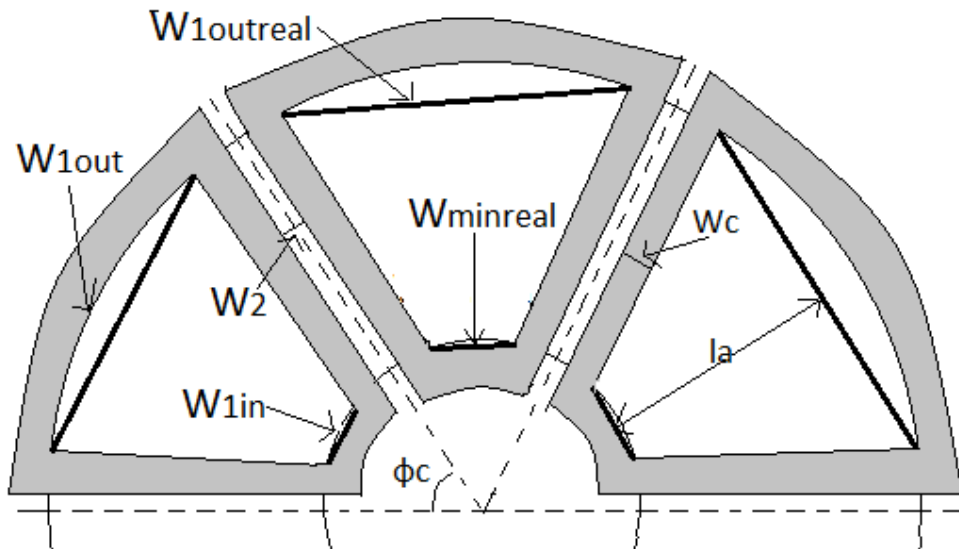
$$dc = \sqrt{\frac{4sc}{\pi}} \quad (3.20)$$

Όπως θα δούμε παρακάτω, οι τιμές αυτές θα αυξάνουν σημαντικά όσο αυξάνονται τα επίπεδα της ισχύος που μελετάμε λόγω των μεγάλων τιμών ρεύματος που καλούνται να αντέξουν τα πηνία.

3.4.3. Κατασκευαστικές διαστάσεις πηνίου

Στην παράγραφο αυτή δίνονται οι σχέσεις για τον υπολογισμό των λοιπών διαστάσεων του πηνίου που θα χρειαστούν τόσο για την προσομοίωση της γεννήτριας όσο και για την κατασκευή των πηνίων.

Η ενεργός επιφάνεια του πηνίου θα έχει σχήμα τραπέζιο. Το μήκος του πηνίου θα είναι ίσο με το ενεργό μήκος της γεννήτριας l_a . Οι υπόλοιπες διαστάσεις, οι οποίες εικονίζονται και στο σχήμα, βρίσκονται ως εξής:



Σχήμα 3.4: Οι πραγματικές και θεωρητικές διαστάσεις των πηνίων.

Θεωρούμε ότι τα πηνία, τα οποία πρέπει να εφάπτονται μεταξύ τους, έχουν μια ελάχιστη απόσταση της τάξης του $w_2 = 0.5\text{mm}$, προκειμένου να διευκολύνουμε την προσομοίωση. Την απόσταση μεταξύ των δύο πλευρών του πηνίου την ονομάζουμε w_1 και την υπολογίζουμε στη μέση, εξωτερική και εσωτερική ακτίνα αντίστοιχα:

$$w_1 = \frac{2\pi r}{Q} - 2w_c - w_2 \quad (3.21)$$

όπου στο r τίθεται η επιθυμητή ακτίνα. Αυτή είναι η διάσταση της προσομοίωσης.

Για την κατασκευή των πηνίων οι απαιτούμενες διαστάσεις είναι το ενεργό μήκος, το πάχος πλευράς και το w_{in}^{real} και w_{out}^{real} , τα οποία λόγω της ιδιομορφίας της κατασκευής υπολογίζονται:

$$w_1^{real} = 2r \sin(\varphi_c) \quad (3.22)$$

όπου

$$\varphi_c = \frac{2\pi w_1}{Q(w_1 + 2w_c + w_2)} \quad (3.23)$$

Έτσι τελειώνει η διαστασιολόγηση του τυλίγματος, καθώς τώρα όλα τα μεγέθη είναι γνωστά. Στο [2] γίνεται μια διαφορετική διαστασιολόγηση του πηνίου που σαν βάση της έχει να ταιριάζει ο μαγνήτης ακριβώς στην ενεργό επιφάνεια του πηνίου. Η τακτική αυτή δεν είναι λανθασμένη και χρησιμοποιείται προκειμένου να βελτιώσει την κυματομορφή της τάσης. Σε περίπτωση που το a_i είναι πολύ διαφορετικό από την τιμή $2/\pi$ που προσφέρει ημιτονοειδή τάση αυτή η τακτική μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να διορθώσει λίγο την κυματομορφή. Ωστόσο κάτι τέτοιο δεν είναι πάντα εφικτό δεδομένου ενός συγκεντρωμένου τυλίγματος διπλής στρώσης. Αλλαγή του τυλίγματος και απομάκρυνση από τους συντελεστές που έχουν υπολογιστεί στο κεφάλαιο 2 μπορεί να επιτρέψει κάτι τέτοιο, με την επίπτωση όμως της μείωσης της ισχύος διατηρουμένης της ακτίνας ή της αύξησης της ακτίνας (και άρα του βάρους και του κόστους) διατηρουμένης της ισχύος.

3.5. Το πάχος του σιδήρου

Το πάχος του σιδήρου είναι μια πολύ σημαντική μεταβλητή της γεννήτριας. Καθορίζει άμεσα το βάρος της και συμβάλλει έντονα στη μηχανική της αντοχή. Και οι δύο δίσκοι του δρομέα είναι κατασκευασμένοι από σίδηρο πάνω στον οποίο τοποθετούνται οι μαγνήτες περιμετρικά. Οι μαγνήτες, όπως έχει ειπωθεί, είναι σε διάταξη N-S-N-S, κάθε μαγνήτης δηλαδή έχει απέναντί του μαγνήτη της αντίθετης πολικότητας, με αποτέλεσμα να ασκούνται ελκτικές δυνάμεις μεταξύ των δύο δίσκων. Η δύναμη αυτή υπολογίζεται [6]:

$$F_z = \frac{1}{2} \frac{B_{mg}^2}{\mu_o} S_{PM} \quad (3.24)$$

όπου

$$S_{PM} = a_i \pi (r_{out}^2 - r_{in}^2) \quad (3.25)$$

η ενεργός επιφάνεια των μαγνητών. Παρατηρούμε ότι η ελκτική δύναμη εξαρτάται από το βαθμό του μαγνήτη (B_{mg}), από τις διαστάσεις της γεννήτριας και από το a_i .

Στο [20] έχει υπολογιστεί μια σχέση που συνδέει τη ροπή στα άκρα του σιδερένιου δίσκου (όπου λυγίζει πιο εύκολα) με το πάχος του σιδήρου, χρησιμοποιώντας τη σχέση (3.24). Η σχέση αυτή χρησιμοποιείται ως οδηγός για τη διαστασιολόγηση ενώ

η τελική απόφαση θα πρέπει να λαμβάνεται στο τέλος ανεξάρτητα από αυτήν για ασφάλεια.

Γενικά, η απόφαση για το πάχος του σιδήρου είναι σημαντική και πρέπει να λαμβάνονται υπόψη δύο κριτήρια: Το πρώτο είναι η μηχανική αντοχή της γεννήτριας. Να μη λυγίσουν οι δίσκοι υπό την ελκτική δύναμη των μαγνητών. Μια λύση, άμα δε θέλουμε να έχουμε μεγάλο πάχος σιδήρου παντού, είναι να έχουμε το απαιτούμενο πάχος πίσω από τους μαγνήτες και ο υπόλοιπος δίσκος να είναι πιο λεπτός και να έχει πίσω του κολλημένες ακτίνες που θα τον συγκρατούν. Το δεύτερο είναι να μην υπάρχει κορεσμός. Άμα ο σίδηρος είναι πολύ λεπτός το υλικό θα μπει στον κορεσμό, οι δυναμικές γραμμές θα οδεύουν εκτός του υλικού, με αποτέλεσμα να έχουμε μεγάλες απώλειες. Για το σίδηρο ένα πεδίο γύρω στα 1.6 T (ή και λιγότερο) στο εσωτερικό του δίνει ασφάλεια ως προς τον κορεσμό. Ένας πρακτικός τρόπος για να δει κανείς αν υπάρχει κορεσμός (αφού έχει κατασκευάσει τους δίσκους με τους μαγνήτες) είναι να τοποθετήσει στο πίσω μέρος του δίσκου έναν συνδετήρα. Άμα ο συνδετήρας κολλήσει σημαίνει ότι υπάρχει κορεσμός και δεν εκμεταλλευόμαστε όλη τη μαγνητική ροή των μαγνητών. Τα δύο κριτήρια πρέπει να ληφθούν υπόψη και να ζυγιστούν σωστά ώστε να μην προκύψει μια πολύ βαριά κατασκευή.

Ας σημειωθεί εδώ ότι στους σιδερένιους δίσκους του δρομέα μπορούν να κοπούν κάποιες οπές συμμετρικά και μακριά από τους μαγνήτες. Οι οπές αυτές θα βοηθήσουν στον ακόμα καλύτερο αερισμό της γεννήτριας και θα μειώσουν και το βάρος της. Απαιτείται απόλυτα συμμετρική κοπή για να μη δημιουργούνται ανεπιθύμητες ροπές κατά την περιστροφή του δρομέα [21].

3.6. Κόστος και βάρος γεννήτριας

Στο κεφάλαιο αυτό βρίσκεται μια εκτίμηση για το συνολικό κόστος και το βάρος της γεννήτριας σε συνάρτηση με τις διαστάσεις της. Τα βασικά υλικά από τα οποία κατασκευάζεται η γεννήτρια είναι τα εξής:

- Μαγνήτες
- Σίδηρος
- Χαλκός
- Ρητίνη
- Κόντρα πλακέ

Καθώς οι τιμές των παραπάνω υλικών δεν είναι σταθερές στο χρόνο, οι σχέσεις για τα κόστη που παρουσιάζονται παρακάτω βασίζονται σε τρέχουσες τιμές. Ιδιαίτερα στις τιμές των μαγνητών παρατηρείται έντονη αυξητική τάση σε σχέση με αντίστοιχες περσινές. Όσα υλικά παραγγέλλονται από το εξωτερικό δεν επιβαρύνονται με ΦΠΑ αλλά με έξοδα αποστολής, ενώ στα υπόλοιπα θεωρήθηκε ΦΠΑ 23%.

Η εξίσωση κόστους θα είναι:

$$C_{total} = (1 + \Phi\text{ΠΑ})(C_{Fe} + C_{cu} + C_{resin} + C_{wood}) + C_{mag}^{tot}$$

Ενώ για το βάρος:

$$M_{total} = M_{mag} + M_{Fe} + M_{cu} + M_{resin}$$

3.6.1. Οι μαγνήτες

Όπως είναι γνωστό το μεγαλύτερο μέρος του κόστους στη γεννήτρια το αποτελεί το κόστος των μαγνητών. Οπότε σε περίπτωση που το κόστος αποτελεί κριτήριο σε μια βελτιστοποίηση, καταλαβαίνουμε ότι αλλαγές στο κόστος των μαγνητών θα επηρεάσουν σε σημαντικό βαθμό τα αποτελέσματά της. Η κοστολόγηση των μαγνητών αποτέλεσε ιδιαίτερο κομμάτι αυτής της εργασίας, καθώς δεν υπάρχει κάποια τιμή για το κιλό ενός είδους μαγνήτη. Κάθε τεμάχιο τιμολογείται ξεχωριστά ανάλογα με το είδος, το βάρος, το πάχος και το σχήμα. Έτσι, γενικά, μαγνήτες μεγαλύτερου βάρους (αλλά ίδιοι κατά τα άλλα) προφανώς θα είναι ακριβότεροι. Έχοντας επιλέξει το σχήμα και το πάχος του μαγνήτη η κατάσταση διευκολύνεται λιγάκι αλλά και πάλι δεν υπάρχει κάποια ασφαλής εκτίμηση.

Επιπλέον, άλλο κόστος έχει ένας μαγνήτης που υπάρχει ήδη στο εμπόριο και χρησιμοποιείται σε μεγάλες ποσότητες και άλλο ένας μαγνήτης νέος, για τον οποίο η εταιρεία πρέπει να κατασκευάσει καλούπι από την αρχή. Έτσι η χρήση κάποιου εμπορικού μαγνήτη κρίνεται σκόπιμη για εφαρμογές χαμηλού κόστους. Από την άλλη μεριά θα μπορούσε κανείς να κοστολογήσει το μαγνήτη που έχει παραγγείλει όχι στην τιμή που τον πλήρωσε, αλλά στην τιμή που θα πλήρωνε κάποια χρόνια μετά, όταν ο μαγνήτης αυτός θα ήταν εμπορικός. Ο προσδιορισμός μιας τέτοιας σχέσης δεν είναι εύκολη εργασία.

Η διαδικασία που ακολουθείται εδώ για την εύρεση της συνάρτησης κόστους των μαγνητών είναι η εξής: Πρώτα επικοινωνήσαμε με εταιρείες παραγωγής μαγνητών με έδρα τόσο στην Ευρώπη όσο και στην Ασία και συγκεκριμένα στην Κίνα όπου υπάρχει πληθώρα κατασκευαστών. Οι εταιρείες αυτές μας προμήθευσαν με κόστη για την παραγωγή μαγνητών με συγκεκριμένο βαθμό και διαστάσεις.

Παρότι οι προσφορές που λάβαμε από την Κίνα ήταν αισθητά πιο φτηνές ανά τεμάχιο μαγνήτη, προτιμήσαμε να χρησιμοποιήσουμε τα κόστη από ευρωπαϊκές εταιρίες αφενός γιατί τα μεταφορικά κόστη από την Κίνα είναι πολύ μεγάλα και αφετέρου διότι οι προσφορές από την Κίνα αφορούσαν μόνο σε παραγγελίες 1000 τεμαχίων, αριθμός που είναι πολύ μεγάλος για τα δεδομένα μιας τοπικής παραγωγής.

Στα κόστη που λάβαμε για κατασκευή μη εμπορικών μαγνητών δε συμπεριλάβαμε, για το λόγο που αναφέρθηκε και παραπάνω το κόστος του καλουπιού. Επίσης έγινε έρευνα στο διαδίκτυο και για τους εμπορικούς μαγνήτες. Όλα τα παραπάνω κόστη χρησιμοποιήθηκαν για να εξάγουμε μια σχέση μεταξύ όγκου μαγνήτη και κόστους. Το κόστος αυτό θεωρήθηκε ότι θα είναι το κόστος των μαγνητών όταν αυτοί γίνουν

εμπορικοί. Συγκεκριμένα δημιουργήθηκαν 3 σχέσεις, μια για κάθε βαθμό μαγνήτη, οι οποίες παρουσιάζονται παρακάτω:

Μαγνήτες N40:

$$C_{mag}^{N40} = 1,997 + 6 \cdot 10^{-4} \cdot V_{mag}^{N40}$$

Μαγνήτες N42:

$$C_{mag}^{N42} = 0,445 + 6 \cdot 10^{-4} \cdot V_{mag}^{N42}$$

Μαγνήτες N45:

$$C_{mag}^{N45} = 0,3186 + 6 \cdot 10^{-4} \cdot V_{mag}^{N45}$$

Όπου ο όγκος σε όλες τις σχέσεις δίνεται για τους ορθογώνιους μαγνήτες από:

$$V_{mag} = l_a w_m h_m$$

Το ολικό κόστος των μαγνητών δίνεται σε κάθε περίπτωση (θα γίνει παραγγελία 2p μαγνητών από το εξωτερικό):

$$C_{mag}^{tot} = C_{mag} * 2p + \text{έξοδα αποστολής}$$

Το συνολικό βάρος των μαγνητών θα είναι ίσο με:

$$M_{mag} = \rho_{mag} * V_{mag} * p$$

όπου $\rho_{mag}=7.5 \text{ g/cm}^3$ για τους NdFeB όλων των βαθμών.

3.6.2. Ο σίδηρος

Θα κοπούν δύο δίσκοι σιδήρου. Η εξωτερική τους ακτίνα θα είναι ίση με r_{out} αλλά η εσωτερική ακτίνα δε θα είναι r_{in} . Η ακτίνα αυτή εξαρτάται από το ρουλεμάν όπως θα δούμε και αργότερα. Αυτό όμως δεν έχει σημασία γιατί ο σιδηρουργός δε χρεώνει το βάρος αυτού ακριβώς του κομματιού που ζητήθηκε, αλλά του συνολικού σιδήρου που κατανάλωσε εκείνος, με την έννοια ότι κατά την παρασκευή ενός δίσκου με οπή στο κέντρο του προκύπτουν κομμάτια άχρηστα στο σιδηρουργό τα οποία χρεώνεται εκείνος που κάνει την παραγγελία.

Μια ασφαλής εκτίμηση για τον όγκο του σιδήρου που θα χρησιμοποιηθεί είναι ότι ο σχεδιαστής θα πληρώσει τελικά το περιγεγραμμένο στον κύκλο τετράγωνο πάχους h_r , το οποίο θα έχει όγκο:

$$V_{Fe} = 4r_{out}^2 h_r$$

Δεδομένης της πυκνότητας του σιδήρου $\rho_{Fe}=7.87 \text{ g/cm}^3$ βρίσκουμε τη μάζα:

$$m_{Fe} = \rho_{Fe} V_{Fe}$$

Άρα το τελικό κόστος για το σίδηρο με δεδομένη από τον κατασκευαστή την τιμή άνα κιλο σιδήρου υπολογίζεται:

$$C_{Fe} = ironprice \cdot m_{Fe}$$

Όπου θα πρέπει να προσθέσουμε και το ΦΠΑ.

Για το τελικό βάρος του σιδήρου (δύο δίσκοι) υπολογίζουμε διαφορετικό όγκο:

$$V_{Fe}^{used} = \pi r_{out}^2 h_r \cdot 2$$

$$M_{Fe} = \rho_{Fe} V_{Fe}^{used}$$

3.6.3. Ο χαλκός

Η συνολική μάζα χαλκού που θα χρησιμοποιηθεί για την κατασκευή των πηνίων δίνεται:

$$M_{cu} = 3N_{phase} l_{avg} SC \rho_{cu}$$

Η πυκνότητα του χαλκού είναι ίση με $\rho_{cu}=8.94 \text{ g/cm}^3$. Το συνολικό κόστος του χαλκού θα είναι:

$$C_{cu} = copper\ price \cdot M_{cu}$$

όπου θα προσθέσουμε και το ΦΠΑ.

3.6.4. Η ρητίνη

Ρητίνη χρησιμοποιείται και στο δρομέα και στο στάτη για μηχανική στήριξη της κατασκευής. Καλύπτει ολόκληρο το δίσκο των μαγνητών, άρα έχει ύψος όσο ο μαγνήτης και όγκο τον όγκο του δίσκου αφαιρουμένου του όγκου των μαγνητών. Όσον αφορά στο στάτη, έχει ύψος το αξονικό ύψος των πηνίων t_w και καλύπτει μια επιφάνεια-δαχτυλίδι $r_{out}-r_{in}$, χωρίς να θεωρούμε ότι υπάρχει ρητίνη εκεί όπου βρίσκεται ο χαλκός.

Για τη ρητίνη στο δρομέα (δύο δίσκοι):

$$V_{resin}^{rotor} = 2\pi(r_{out}^2 - r_{in}^2)(1 - a_i)h_m$$

Για τη ρητίνη στο στάτη:

$$V_{resin}^{stator} = t_w[\pi(r_{out}^2 - r_{in}^2) - Qw_c l_a + (\pi(r_{out} + w_c)^2 - \pi r_{out}^2)]$$

όπου συμπεριλαμβάνεται και η ρητίνη που απαιτείται για την κάλυψη των άκρων του τυλίγματος.

Η ρητίνη αναμειγνύεται με θερμοαπαγωγική σκόνη (ταλκ) σε αναλογία 1:1. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την ταυτόχρονη αύξηση μάζας και πυκνότητας της ρητίνης οπότε ο όγκος μένει πρακτικά σταθερός. Ωστόσο προστίθεται ποσότητα ταλκ όση και της

ρητίνης με αποτέλεσμα το βάρος να διπλασιάζεται. Για τη μάζα της ρητίνης που θα χρειαστούμε γράφουμε:

$$M_{resin} = 2\rho_{resin}(V_{resin}^{rotor} + V_{resin}^{stator})$$

όπου $\rho_{resin}=1.36 \text{ g/cm}^3$.

Για το κόστος:

$$C_{resin} = resin \text{ price} \cdot M_{resin}/2$$

3.6.5. Τα κόντρα πλακέ

Τα κόντρα πλακέ χρησιμοποιούνται για την κατασκευή καλουπιών και μόνο και το βάρος τους δε συμβάλλει στο συνολικό βάρος της γεννήτριας παρά μόνο στο συνολικό κόστος.

Κατά προσέγγιση θα χρησιμοποιηθούν 9 κόντρα πλακέ εμβαδού λίγο μεγαλύτερου (extra) από το περιγεγραμμένο στον κύκλο ακτίνας r_{out} τετράγωνο. Τα 3 χρησιμοποιούνται στο στάτη και τα 6 στο δρομέα. Το πάχος είναι διαφορετικά και ο ξυλουργός κόβει μόνο συγκεκριμένες τιμές αυτών. Γενικά μπορεί κανείς να γράψει:

$$S_{wood} = 4\pi(r_{out} + extra)^2$$

$$C_{wood} = 3S_{wood}price1 + 6S_{wood}price2$$

Όπου $price1$ και $price2$ οι τιμές ανά m^2 για δύο διαφορετικά πάχη που χρησιμοποιούνται.

Η συγκεκριμένη κοστολόγηση είναι αρκετά προσεγγιστική καθώς και άλλα κομμάτια ξύλου χρησιμοποιούνται για την κατασκευή, πέραν από τα 9 που απαιτούνται για τα καλούπια.

3.7. Συνοπτικά βήματα διαστασιολόγησης

Η συνολική διαδικασία που ακολουθείται για τον καθορισμό όλων των διαστάσεων της γεννήτριας περιγράφεται παρακάτω:

Βήμα 1ο: Επιλογή της επιθυμητής, κάθε φορά, ισχύος $P_{ηλnom}$ και απόδοσης η . Επίσης επιλογή του εύρους των ανέμων V_{wcutin} και V_{wnom} . Υπολογισμός ακτίνας φτερωτής R_{turb} . Καθώς στη συγκεκριμένη εργασία μελετάμε ένα εύρος ισχύων, η ισχύς στην έξοδο της γεννήτριας δεν είναι μοναδική οπότε όπως θα δούμε η διαστασιολόγηση ξαναξεκινά κάθε φορά από αυτό το σημείο επιλέγοντας την νέα ισχύ που θέλουμε.

Βήμα 2ο: Υπολογισμός του εύρους των στροφών n_{cutin} και n_{nom} καθώς και του εύρους τάσεων $E_{f_{cutin}}$ και $E_{f_{nom}}$. Εύρεση του κατάλληλου αντιστροφέα.

Βήμα 3ο: Επιλογή της ονομαστικής συχνότητας f_{nom} και εύρεση του αριθμού των πόλων p και του αριθμού των πηνίων Q .

Βήμα 4ο: Επιλέγεται το είδος, το σχήμα και το πάχος του μαγνήτη που θα χρησιμοποιηθεί, καθώς και το μήκος και το πλάτος του μαγνήτη που θα χρησιμοποιήσουμε.

Βήμα 5ο: Δίνεται ως είσοδος η εξωτερική ακτίνα της γεννήτριας, η τιμή της οποίας επαληθεύεται στη συνέχεια και αφού υπολογίσουμε τους υπόλοιπους συντελεστές, με τη σχέση που υπάρχει για την εξωτερική ακτίνα.

Βήμα 6ο: Υπολογίζεται η εσωτερική ακτίνα, ο λόγος πλάτους μαγνήτη προς πολικό βήμα a_i καθώς και ο λόγος εσωτερικής προς εξωτερική ακτίνα.

Βήμα 7ο: Υπολογίζεται το πάχος του στάτη t_w , και προσεγγιστικά το B_p

Βήμα 8ο: Χρησιμοποιείται η σχέση για την εξωτερική ακτίνα για έλεγχο και επαλήθευση.

Βήμα 9ο: Υπολογίζεται ο αριθμός των σπειρών, το πάχος πλευράς πηνίου και η διάμετρος του χαλκού που θα χρησιμοποιηθεί, γνωρίζοντας το μέγιστο ρεύμα που θα περάσει από το τύλιγμα. Επίσης οι πραγματικές διαστάσεις των πηνίων.

Βήμα 10ο: Υπολογίζεται το συνολικό κόστος και το βάρος της γεννήτριας.

Σε όλη την παραπάνω διαδικασία ο σχεδιαστής πρέπει προτού ξεκινήσει να γνωρίζει:

- Τους ανέμους στους οποίους θα δουλεύει η γεννήτρια
- Το εύρος λειτουργίας του ανορθωτή
- Την ονομαστική συχνότητα
- Το βαθμό, το σχήμα και το πάχος του μαγνήτη
- Τις διαστάσεις του μαγνήτη, μήκος και πλάτος
- Την εξωτερική ακτίνα που θα επαληθευτεί βέβαια κατά τη διάρκεια της διαστασιολόγησης

Στη συνέχεια κάποιες από τις μεταβλητές που αναφέρουμε παραπάνω θα υποστούν βελτιστοποίηση, έχοντας ορίσει κάποιο κριτήριο για τη βελτιστοποίηση αυτή, και οι διατάξεις που θα προκύψουν θα προσομοιωθούν.

Κεφάλαιο 4 : Λογισμικό Προσομοίωσης

Στο κεφάλαιο αυτό θα παρουσιάσουμε τα προγράμματα που χρησιμοποιούμε στον υπολογιστή και καθιστούν δυνατή τη μοντελοποίηση της διαστασιολόγησης, όπως παρουσιάστηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, με επαναληπτικό τρόπο ώστε να ανταποκρίνεται στην ανάγκη μελέτης ενός εύρους ισχύος που είναι και το ζητούμενό μας. Επίσης τα προγράμματα αυτά επιτρέπουν την εύκολη και γρήγορη αλλαγή των μεταβλητών που θέλουμε και άρα τη βελτιστοποίησή τους.

4.1. Η διαστασιολόγηση σε Matlab-Octave

Πρόκειται για απλό λογισμικό που μοιάζει πολύ με τις γλώσσες Pascal και C, γλώσσες που γνωρίζει ο σύγχρονος μηχανικός. Το συγκεκριμένο λογισμικό χρησιμοποιείται για αρκετούς λόγους όπως είναι η ευκολία στην υλοποίηση της μοντελοποίησης, η δυνατότητα χρήσης πολλών έτοιμων συναρτήσεων και toolboxes που περιλαμβάνει, κάνοντας εργασίες όπως η λύση πολυωνύμων, η εξαγωγή εξισώσεων ή ο μετασχηματισμός Fourier να φαίνονται απλές καθώς και ο ιδανικός συσχετισμός του με το FEMM, πρόγραμμα που παρουσιάζεται παρακάτω.

4.2. Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων

4.2.1. Το λογισμικό FEMM

Μετά τη διαδικασία της διαστασιολόγησης και της βελτιστοποίησης ορισμένων μεταβλητών απαιτείται η προσομοίωση της γεννήτριας σε κατάλληλο λογισμικό, ώστε να επαληθευθούν οι στόχοι της διαστασιολόγησης (ισχύς, ροπή, απόδοση, ονομαστικό ρεύμα και τάση κ.α.). Το λογισμικό αυτό βασίζεται στη μέθοδο ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων (Finite Element Analysis-FEA).

Το λογισμικό που θα χρησιμοποιηθεί είναι το FEMM (Finite Element Method Magnetics) [<http://femm.foster-miller.com>]. Πρόκειται για ελεύθερο λογισμικό που χρησιμοποιεί τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων για να λύσει μαγνητικά και ηλεκτροστατικά προβλήματα σε δύο διαστάσεις. Δίνει τη δυνατότητα μέτρησης πολλών μεγεθών όπως η μαγνητική επαγωγή, η πεπλεγμένη ροή, η ένταση του μαγνητικού πεδίου κ.ά. Μπορεί να μετρήσει το ζητούμενο μέγεθος όπου ακριβώς θέλει ο χρήστης χωρίζοντας το πρόβλημα σε τρίγωνα για τα οποία υπολογίζει το διανυσματικό δυναμικό A . Το διανυσματικό δυναμικό έχει τη διεύθυνση του άξονα z και μέτρο που εξαρτάται από τις τιμές στους άξονες x και y όταν το πρόβλημα τίθεται στους δύο τελευταίους άξονες και μόνο. Γενικά ισχύει:

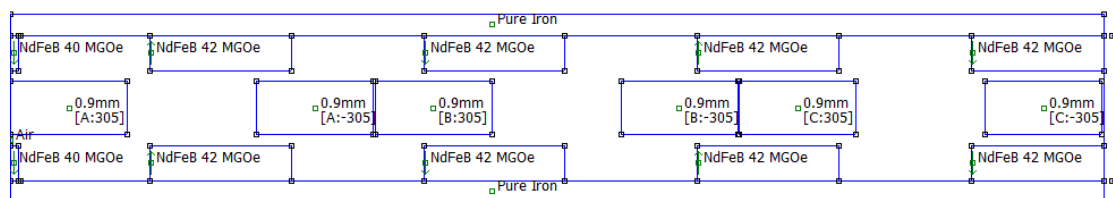
$$A = \nabla \times B$$

και από το θεώρημα Stokes βρίσκεται η μαγνητική ροή Φ :

$$\Phi = \int_S B dS = \int \nabla \times A \cdot dS = \oint_C A dl$$

4.2.2. Σχεδίαση της γεννήτριας και μετακίνηση του δρομέα

Η διάταξη της γεννήτριας μπορεί να σχεδιαστεί στις δύο διαστάσεις ως εξής: Θεωρείται μια τομή της δισκοειδούς δομής της γεννήτριας σε όποια ακτίνα είναι επιθυμητή, αρκεί αυτή να είναι αντιπροσωπευτική. Συνήθως η τομή γίνεται στη μέση ακτίνα r_{avg} και τα αποτελέσματα είναι αρκετά αντιπροσωπευτικά. Για μεγαλύτερη ακρίβεια μπορούν να γίνουν τομές και στην εσωτερική και εξωτερική ακτίνα και να βρεθεί τελικά ο μέσος όρος του ζητούμενου μεγέθους. Όσο περισσότερες οι τομές τόσο μεγαλύτερη η ακρίβεια. Αφού έχει γίνει η τομή, θεωρείται το ευθύγραμμο ανάπτυγμα αυτής. Το ανάπτυγμα αυτό δεν εξετάζεται ολόκληρο καθώς μπορεί να είναι πολύ μεγάλο αλλά μόνο ένα κομμάτι, π.χ. 4 πολικά βήματα και θεωρώντας ύστερα περιοδικές συνθήκες στα σύνορα. Καθώς το FEMM δε μπορεί να δεχθεί μεταβλητές εισόδους, το συνδέουμε με το Matlab, όπου μπορούμε να αναπαραστήσουμε όλες τις διαστάσεις με μορφή μεταβλητών οι οποίες μπορούν να αλλάζουν, στα πλαίσια ενός κώδικα, και να προκύπτει μια νέα διάταξη προς προσομοίωση. Στο επόμενο σχήμα φαίνεται η τομή μιας γεννήτριας 3,5 kW στη μέση ακτίνα (R_{avg}).



Σχήμα 4.1: Τομή της γεννήτριας στη μέση ακτίνα.

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, η ανάλυση του FEMM είναι στατική. Με λίγα λόγια δεν υπάρχει άμεσος τρόπος για να αντιληφθεί το πρόγραμμα την περιστροφή του δρομέα και άρα τη συνολική λειτουργία της γεννήτριας ώστε να βρεθούν τάσεις, ρεύματα, ισχύς, απόδοση και άλλα μεγέθη που είναι απαραίτητα για την προσομοίωση της γεννήτριας.

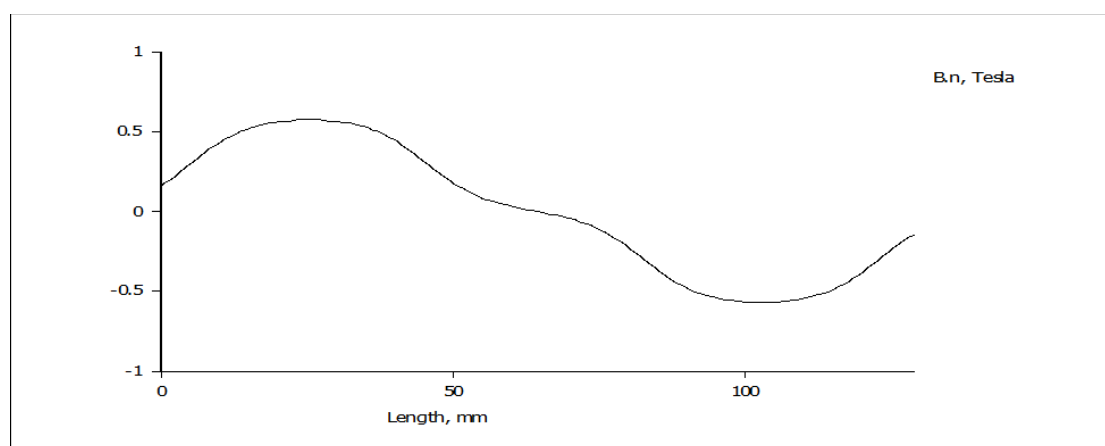
Με χρήση και πάλι του Matlab και επιλέγοντας το επιθυμητό βήμα μετακίνησης διαγράφουμε το πλάτος της διάταξης που αντιστοιχεί σε ένα βήμα από τη μία πλευρά και το σχεδιάζουμε στην άλλη. Με προσοχή πάντα στη διατήρηση της συμμετρίας της διάταξης ώστε να μην υπάρχει πρόβλημα στην περιοδικότητα. Η διαδικασία αυτή

χωρίζεται σε στάδια και ανάλογα με το κομμάτι που μεταφέρεται κάθε στιγμή μπορεί να διαφέρει. Ολοκληρώνεται με την πλήρη μεταφορά ενός μαγνήτη, ενώ αρκεί η ολοκλήρωση μίας ηλεκτρικής περιόδου (2 πολικά βήματα) για να λάβει ο σχεδιαστής όλες τις απαραίτητες πληροφορίες.

4.3. Ο υπολογισμός της πρώτης αρμονικής της πυκνότητας μαγνητικής ροής

Σε πολλά σημεία της διαστασιολόγησης απαιτείται η γνώση της πρώτης αρμονικής της πυκνότητας μαγνητικής ροής B_p στο διάκενο. Έχει αναφερθεί ήδη ότι θεωρητική σχέση για τον υπολογισμό του μεγέθους αυτού δεν έχει βρεθεί, αλλά ότι εξαρτάται μόνο από τη γεωμετρία της διάταξης και συγκεκριμένα από το λόγο πλάτους μαγνήτη προς πλάτος πολικού βήματος α_i και το λόγος εσωτερικής προς εξωτερική ακτίνα k_d .

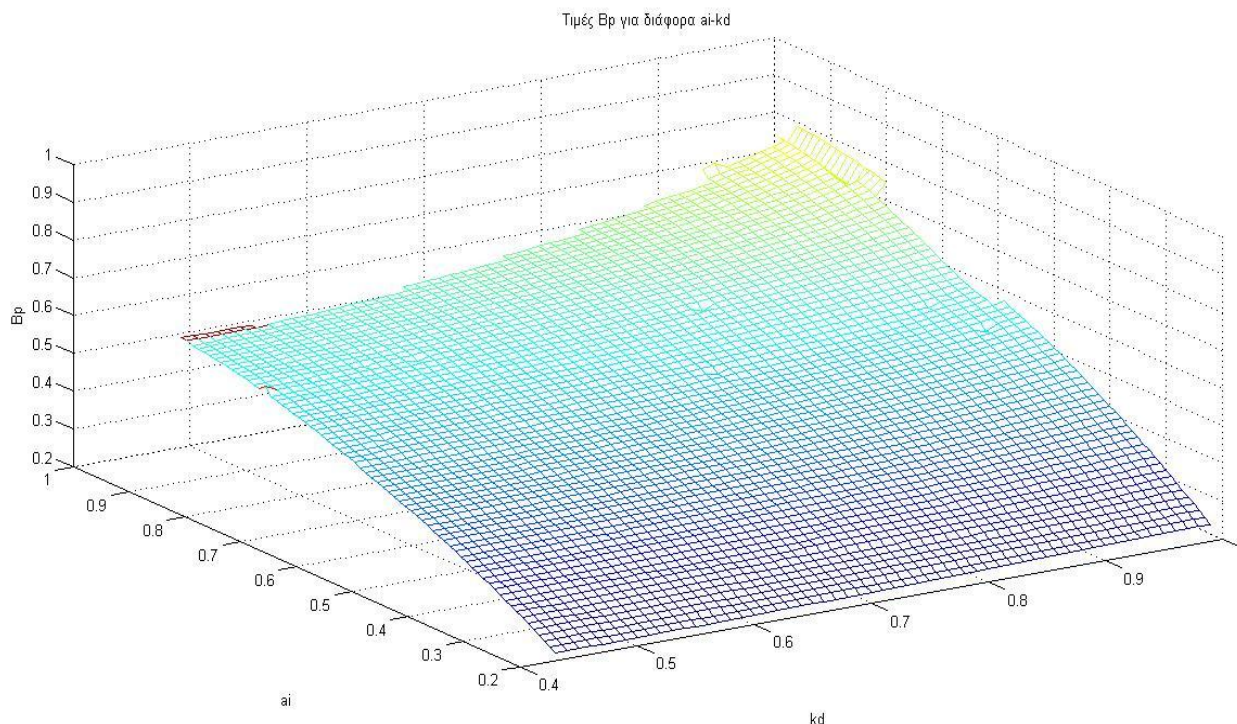
Με χρήση των παραπάνω λογισμικών σχεδιάζονται διατάξεις για όλους τους δυνατούς συνδυασμούς α_i και k_d , όπου το α_i παίρνει τιμές από 0.2 έως 0.95 με βήμα 0.01 και το k_d παίρνει τιμές από 0.4 έως 0.99 με βήμα επίσης 0.01. Για κάθε διάταξη μετράται το B_p με τον εξής τρόπο: Το FEMM υπολογίζει τη γραφική παράσταση του B για μήκος ενός πολικού βήματος (δύο μαγνήτες), και τυπώνει τα δεδομένα εξόδου θέση-πεδίο σε ένα αρχείο. Ύστερα, χρησιμοποιείται η έτοιμη συνάρτηση του Matlab `fft`, η οποία εκτελεί μετασχηματισμό Fourier στα παραπάνω δεδομένα. Έτσι για κάθε συνδυασμό α_i και k_d , υπολογίζεται η τιμή της πρώτης αρμονικής B_p , η οποία αποθηκεύεται σε έναν πίνακα. Η μορφή της μαγνητικής επαγωγής στο διάκενο φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα.



Σχήμα 4.2: Η μορφή της πυκνότητας μαγνητικής ροής στο διάκενο.

Από τον πίνακα αυτό στη συνέχεια, για κάθε α_i και k_d που υπολογίζεται στη διαδικασία της διαστασιολόγησης, υπολογίζουμε με τη μέθοδο της γραμμικής παρεμβολής την τιμή του B_p , που αντιστοιχεί στο συνδυασμό των δύο αυτών μεταβλητών.

Παρακάτω φαίνεται η τρισδιάστατη γραφική παράσταση που έχουμε σχεδιάσει με χρήση του πίνακα, όπου στους δύο άξονες (x και y) βρίσκονται τα a_i και k_d ενώ στον άξονα z αντιστοιχεί η τιμή του B_r που έχουμε υπολογίσει με την παραπάνω διαδικασία.



Σχήμα 4.3: Τιμές B_r για όλους τους συνδυασμούς a_i και k_d

Η διαδικασία που περιγράφηκε παραπάνω, επαναλήφθηκε 3 φορές, χρησιμοποιώντας κάθε φορά διαφορετικό βαθμό μαγνήτη. Η δημιουργία 3 διαφορετικών πινάκων είναι αναγκαία καθώς όπως έχουμε πει και στο προηγούμενο κεφάλαιο το B_r εξαρτάται από το είδος του μαγνήτη, καθώς αυτό επηρεάζει άμεσα το μαγνητικό πεδίο που δημιουργούν οι μαγνήτες.

4.4. Οι επιδόσεις της γεννήτριας

Χρησιμοποιείται το πρόγραμμα μετακίνησης του δρομέα και για κάθε μετακίνηση λαμβάνεται μέσω του FEMM απευθείας μέτρηση της πεπλεγμένης ροής για καθεμία από τις τρεις φάσεις του τυλίγματος σε κατάσταση ανοιχτοκύκλωσης ($I=0$). Το πεδίο που δημιουργεί ο στάτης καθώς διαρρέεται από ρεύμα είναι πολύ μικρό (απουσία πυρήνα) και για αυτό υπολογίζουμε την RMS τιμή της πεπλεγμένης ροής σε κατάσταση ανοιχτοκύκλωσης και μόνο.

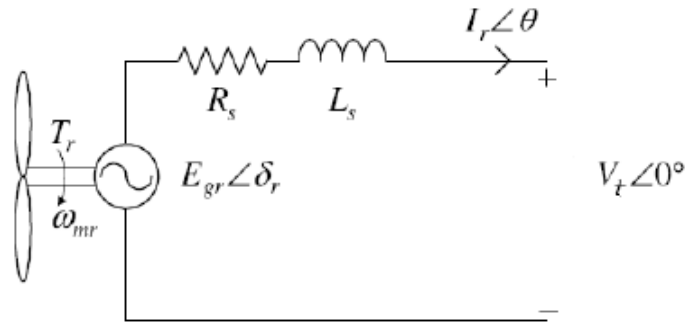
Δίνονται σαν είσοδοι από το χρήστη το ονομαστικό ρεύμα και οι ονομαστικές στροφές που αντιστοιχούν στην ισχύ εξόδου της γεννήτριας που μελετάμε κάθε φορά. Γνωρίζοντας τις στροφές εύκολα υπολογίζουμε τη συχνότητα και την τάση:

$$f = \frac{np}{120} \quad (4.1)$$

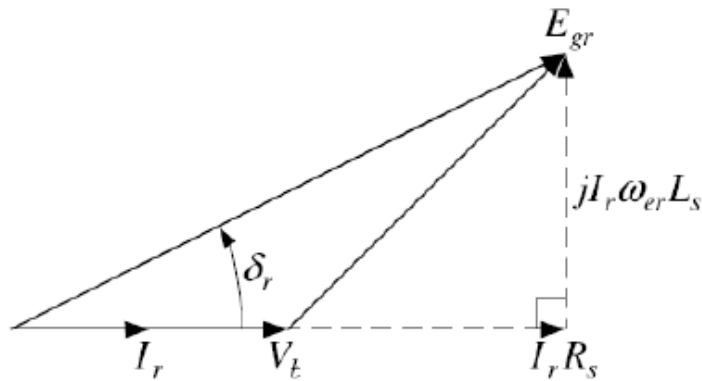
$$E_f = qFluxoc \frac{p}{2} \frac{2\pi n}{60} \quad (4.2)$$

όπου n οι ονομαστικές στροφές και Fluxoc η RMS τιμή της πεπλεγμένης ροής σε κατάσταση ανοιχτοκύκλωσης. Η ΗΕΔ σε αυτό το σημείο υπολογίζεται κατά μέτρο.

Το ισοδύναμο κύκλωμα που χρησιμοποιείται καθώς και το αντίστοιχο διανυσματικό διάγραμμα φαίνονται παρακάτω:



(α)



(β)

Σχήμα 4.4: (α) Το ισοδύναμο κύκλωμα της γεννήτριας και (β) το αντίστοιχο διανυσματικό διάγραμμα

Αναλύοντας το παραπάνω κύκλωμα βρίσκουμε τη γωνία ισχύος δ και την τερματική τάση της γεννήτριας:

$$\delta = \sin^{-1} \left(\frac{I_{rms} 2\pi f L_s}{E_f} \right) \quad (4.3)$$

όπου I_{rms} το ρεύμα της γεννήτριας το οποίο δίνεται ως είσοδος από το χρήστη και L_s η αυτεπαγωγή του τυλίγματος όπως έχει υπολογιστεί στο κεφάλαιο 2.

$$V_t = E_f \cos \delta - I_{rms} q R_c \quad (4.4)$$

Όπου qR_c η αντίσταση μίας φάσης, υπολογισμένη και αυτή στο κεφάλαιο 2.

Έτσι υπολογίζεται η ηλεκτρική ισχύς στην έξοδο, που είναι ένα από τα μεγέθη που θα μας απασχολήσουν στη συνέχεια καθώς ουσιαστικά επαληθεύει την ισχύ εξόδου που θεωρήσαμε στην αρχή της διαστασιολόγησης:

$$P_{\eta\lambda} = 3V_t I_{rms} \quad (4.5)$$

και οι απώλειες:

$$P_{cu} = 3I_{rms}^2 q R_c$$

$$P_{eddy} = \frac{\pi l_a s c^4 B_p^2 \omega_e^2 Q N_c N_p}{32 \rho_{cu}}$$

οπότε βρίσκεται η ηλεκτρομαγνητική ισχύς και ροπή:

$$P_{H/M} = P_{\eta\lambda} + P_{cu} + P_{eddy}$$

$$T_{H/M} = \frac{P_{H/M}}{\omega} = \frac{P_{H/M} 60}{2\pi n}$$

Υπολογίζονται κατά τα γνωστά οι απώλειες περιστροφής και βρίσκεται η μηχανική ισχύς και ροπή:

$$P_{rot} = 0.06 k_{fb} (m_r + m_{sh}) n$$

$$P_{mech} = P_{H/M} + P_{rot}$$

$$T_{mech} = \frac{P_{mech} 60}{2\pi n}$$

Τέλος υπολογίζεται η απόδοση:

$$\eta = \frac{P_{\eta\lambda}}{P_{\eta\lambda} + P_{cu} + P_{eddy} + P_{rot}} \quad (4.6)$$

Όλα τα παραπάνω γράφονται και αυτά στη γλώσσα λογισμικού Matlab. Οπότε πλέον υπάρχει δυνατότητα να σχεδιαστεί και να προσομοιωθεί οποιαδήποτε γεννήτρια αξονικής ροής αλλά και να γίνει βελτιστοποίηση ορισμένων μεταβλητών της σχεδίασης.

Κεφάλαιο 5 : Εύρεση βέλτιστου μαγνήτη για κάθε ισχύ

Για να μπορέσουμε να βελτιστοποιήσουμε τις γεννήτριες που μελετάμε, πρέπει να επιλέξουμε αρχικά, τις μεταβλητές τις οποίες καλούμαστε να βελτιστοποιήσουμε καθώς και τα κριτήρια με βάση τα οποία οι μεταβλητές αυτές θα βελτιστοποιηθούν. Για να συμβεί αυτό, όλες οι επιλεγμένες μεταβλητές αφαιρούνται από τη σχεδίαση και μεταβάλλονται εξωτερικά μέσα σε κάποια όρια που έχουμε θέσει, με βάση και κάποια προκαταρκτική μελέτη.

5.1. Κριτήρια και μεταβλητές βελτιστοποίησης

Παραδείγματα μεταβλητών που επιλέγονται να βελτιστοποιηθούν σε άλλες παρόμοιες εργασίες είναι: η εξωτερική ακτίνα της γεννήτριας, ο λόγος εσωτερικής προς εξωτερική ακτίνα, ο λόγος πλάτους μαγνήτη προς πλάτος πολικού βήματος, το πάχος του μαγνήτη, το πάχος του στάτη, το πάχος του σιδήρου, ο βαθμός του μαγνήτη και η διάμετρος του χαλκού [20],[22], το μήκος του διακένου [23], το κόστος προς ροπή και ροπή προς όγκο [8], ελαχιστοποίηση του μαγνητικού υλικού και η μεγιστοποίηση της απόδοσης [24] και άλλα.

Με δεδομένο ότι ο μαγνήτης αποτελεί το πιο κρίσιμο υλικό της κατασκευής λόγω και του υψηλού κόστους του, σκοπός αυτής της εργασίας είναι η βελτιστοποίηση των διαστάσεων του για κάθε ισχύ ανεξάρτητα αρχικά, και στη συνέχεια, όπως θα δούμε σε επόμενο κεφάλαιο, η εύρεση ενός καθολικού μαγνήτη ικανού να χρησιμοποιηθεί για ένα εύρος ισχύος εξίσου αποδοτικά.

Όσον αφορά τα κριτήρια με βάση τα οποία γίνεται η βελτιστοποίηση αυτά όντως εξαρτώνται από το είδος της εφαρμογής. Η εφαρμογή που μελετάται σε αυτήν την εργασία είναι αρκετά συγκεκριμένη. Πρόκειται για εφαρμογή χαμηλού κόστους και ευκολίας κατασκευής. Έτσι βασικό κριτήριο μας είναι το ελάχιστο κόστος ενώ χρησιμοποιούμε σαν κριτήριο και τον ελάχιστο όγκο, οποίος οδηγεί και σε μεγαλύτερη ευκολία στην κατασκευή. Επιπλέον κριτήρια που μας ενδιαφέρουν είναι το συνολικό βάρος της γεννήτριας προκειμένου να υπάρχει ευκολία στη μεταφορά και τοποθέτησή της.

Είναι σημαντικό να σημειώσουμε εδώ, ότι η μελέτη του κόστους βασίζεται σε τρέχουσες τιμές των υλικών οι οποίες έχουν δοθεί από τις εταιρίες που τα εμπορεύονται.

Έτσι, οι μεταβλητές που επιλέγουμε στην εργασία αυτή να βελτιστοποιήσουμε, είναι οι διαστάσεις του μαγνήτη, w_m και l_a . Επίσης δίνεται σαν είσοδος και η εξωτερική ακτίνα R_{out} , η τιμή της οποίας βέβαια ελέγχεται κάθε φορά κατά τη διάρκεια της διαστασιολόγησης. Ταυτόχρονα εξετάζεται η επίδραση και άλλων μεταβλητών όπως

η συχνότητα λειτουργίας (40Hz και 50Hz) και ο βαθμός του μαγνήτη (N40, N42 και N45). Όπως έχουμε αναφέρει ήδη, η διαδικασία της βελτιστοποίησης επαναλαμβάνεται επαναληπτικά μέχρι να καλυφθεί όλο το εύρος της ισχύος που μας ενδιαφέρει, και οι παραπάνω μεταβλητές βελτιστοποιούνται για κάθε ισχύ ξεχωριστά.

Πιο συγκεκριμένα, αρχικά επιλέγεται η ισχύς της γεννήτριας, P_{hl} , και για την ισχύ αυτή, δίνονται επαναληπτικά οι τιμές των w_m και l_a , καθώς και του R_{out} , με βάση τις οποίες σχεδιάζεται κάθε φορά μια διαφορετική γεννήτρια. Όλες οι γεννήτριες που έχουν σχεδιαστεί, πριν την επιλογή της βέλτιστης, ελέγχονται με βάση τους περιορισμούς που θα αναφέρουμε παρακάτω και αναλόγως απορρίπτονται ή όχι.

Το πεδίο ορισμού για την ισχύ είναι 3,1-6,5 kW, για το w_m είναι 25-65 mm, για το l_a είναι 10-65 mm και για το R_{out} είναι 200-600 mm. Οι παραπάνω μεταβλητές μεταβάλλονται με βήμα 1mm ενώ το R_{out} με βήμα 2 mm. Τα πεδία αυτά ορισμού έχουν προκύψει μετά από βιβλιογραφική μελέτη, μελέτη των πιο συχνά συναντώμενων διαστάσεων στο εμπόριο καθώς και από προκαταρκτικές διαστασιολογήσεις και προσομοιώσεις διερευνώντας το εύρος των παραπάνω τιμών.

5.2. Έλεγχος εξωτερικής ακτίνας και κατασκευαστικός περιορισμός

Στη διαδικασία της βελτιστοποίησης μπαίνουν ορισμένοι περιορισμοί, τόσο κατασκευαστικοί όσο και θεωρητικοί, οι οποίοι ουσιαστικά έχουν ως αποτέλεσμα την απόρριψη των διατάξεων εκείνων που δεν τους ικανοποιούν. Οπότε στη συνέχεια, στην αναζήτηση της βέλτιστης-φτηνότερης διάταξης δε λαμβάνονται υπόψη.

Κατασκευαστικός περιορισμός: Στις περιπτώσεις που χρησιμοποιείται ορθογώνιος μαγνήτης, όπως συμβαίνει και στην εργασία αυτή, υπάρχει περιορισμός ως προς τις διαστάσεις του καθώς οι μαγνήτες μπορούν οριακά να εφάπτονται στην εσωτερική ακτίνα. Οπότε πρέπει να ισχύει:

$$2\pi R_{in} \geq poles \cdot w_m$$

σχέση η οποία υιοθετείται σαν περιορισμός και αν δεν ικανοποιείται για το αντίστοιχο πλάτος w_m του μαγνήτη, απορρίπτεται η διάταξη από τις πιθανές βέλτιστες.

Έλεγχος της εξωτερικής ακτίνας: Όπως έχουμε πει, η εξωτερική ακτίνα δίνεται σαν είσοδος στην αρχή της διαστασιολόγησης, και αφού χρησιμοποιηθεί για να υπολογιστούν οι υπόλοιπες παράμετροι της διάταξης, υπολογίζεται ξανά μέσω της σχέσης (3.15) από το προηγούμενο κεφάλαιο.

$$r_{out,θεωρητικό} = \sqrt[3]{\frac{T_d}{k_{wc} k_{ec} k_r J_{max} t_w k_f B_p \sqrt{4,5q(k_d + 1) \sin\left(\frac{\theta_{re}}{p}\right) 2\Lambda}}$$

Σε περίπτωση που δεν ταυτίζονται οι δύο τιμές, R_{out} ως είσοδος και $r_{out,θεωρητικό}$ τότε και πάλι η αντίστοιχη διάταξη απορρίπτεται και οδηγούμαστε σε επόμενη τιμή ως είσοδο για το R_{out} και εκ νέου διαστασιολόγηση.

5.3 Έλεγχος των απωλειών και της απόδοσης

Όπως περιγράφηκε στο κεφάλαιο της διαστασιολόγησης, βασική προϋπόθεση για να διαστασιολογηθεί η γεννήτρια, είναι η επιλογή της απόδοσης που θα έχει. Η επιλογή αυτή παρότι δεν περιορίζεται από κάποιον βιβλιογραφικό κανόνα είναι πολύ σημαντική. Γενικότερα, σε εφαρμογές χαμηλού κόστους επιδιώκουμε μεγάλες αποδόσεις ώστε να μην έχουμε πολλές απώλειες και άρα η γεννήτρια μας να δουλεύει όσο το δυνατόν πιο αποδοτικά.

Είναι σημαντικό εδώ να τονίσουμε ότι παρόλο που καλούμαστε να επιλέξουμε εξ αρχής την απόδοση της γεννήτριας που θα σχεδιάσουμε, η τιμή αυτή δε λαμβάνεται υπόψη σε κάποιο στάδιο της διαστασιολόγησης παρά μόνο μετράται όταν υπολογίζονται οι επιδόσεις της γεννήτριας.

Στα προκαταρκτικά στάδια της μελέτης μας, δε γινόταν κάποιος έλεγχος των απωλειών της διατάξης που προέκυπτε από τη βελτιστοποίηση, γεγονός που είχε σαν συνέπεια η μετρούμενη ισχύς στην έξοδο της γεννήτριας να είναι πολύ μικρότερη από την προσδοκώμενη ισχύ, λόγω των πολύ μεγάλων απωλειών κυρίως στο τύλιγμα, ειδικά στις μεγαλύτερες ισχύεις (>5 kW).

Αυτό συνέβαινε γιατί με δεδομένο το E_{fcut-in}, το κάτω όριο τάσης το οποίο επιβάλλεται από τον αντιστροφέα, η ονομαστική ΗΕΔ, E_{fnom}, της γεννήτριας παραμένει σταθερή ανεξαρτήτως της ισχύος που διαστασιολογούμε. Αυτό με τη σειρά του έχει σαν αποτέλεσμα την ανάπτυξη πολύ ισχυρών ρευμάτων στις μεγαλύτερες ισχύεις (της τάξης των 8 A) και άρα οδηγεί σε μεγάλες απώλειες στο τύλιγμα καθώς όπως φαίνεται στον τύπο οι απώλειες είναι ανάλογες με το τετράγωνο του ρεύματος:

$$P_{cu} = 3I_{rms}^2 R_c$$

Για να ελέγξουμε την απόδοση πριν την επιλογή της τελικής βέλτιστης διάταξης για κάθε ισχύ, αφού κάθε φορά έχει διαστασιολογηθεί η γεννήτρια, υπολογίζουμε τις απώλειες που θα προκύψουν και στη συνέχεια την απόδοση από τον τύπο (2.17):

$$\eta = \frac{P_{\eta\lambda}}{P_{\eta\lambda} + P_{cu} + P_{eddy} + P_{rot}}$$

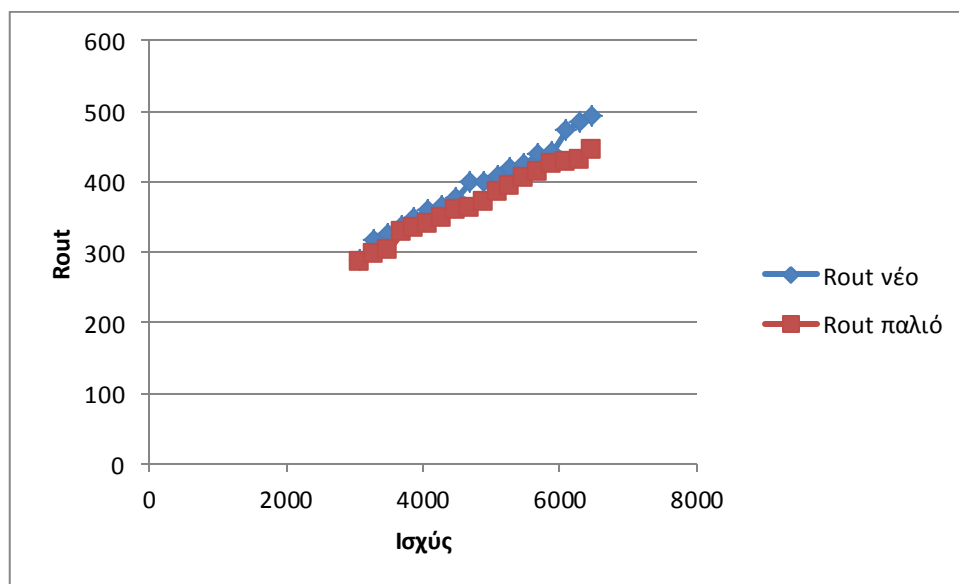
Σε περίπτωση που υπάρχει απόκλιση μεταξύ της απόδοσης που έχει οριστεί στην αρχή της διαστασιολόγησης και της μετρούμενης απόδοσης μετά τη σχεδίαση, τότε απόρριπτεται η διάταξη.

Με δεδομένο το ρεύμα που διαρρέει τα πηνία οι απώλειες χαλκού μπορούν να μειωθούν, μειώνοντας την αντίσταση του τυλίγματος R_c , η οποία υπολογίζεται από τον τύπο (2.9):

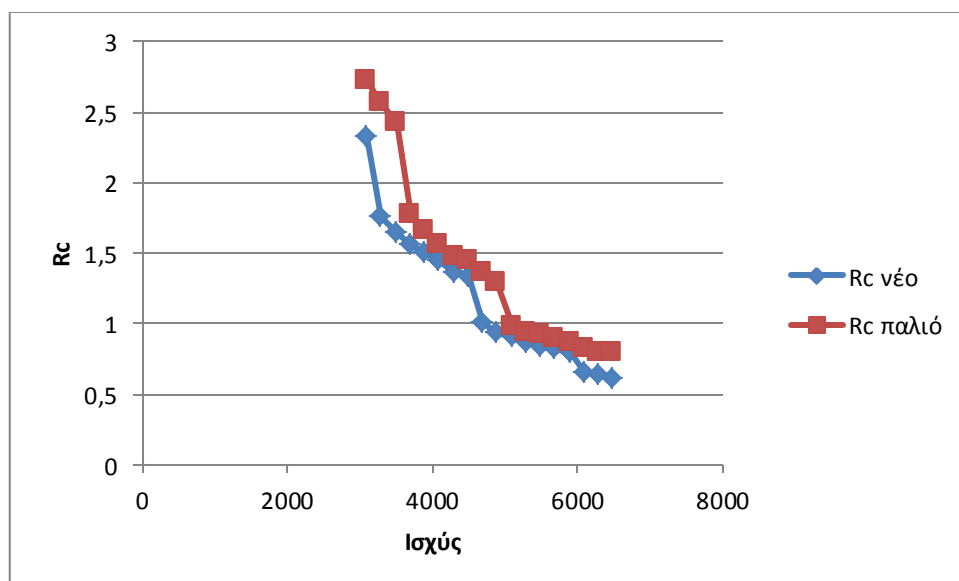
$$R_c = N_c \rho_t \frac{l_{avg}}{sc}$$

Επιπλέον ελέγχουμε τη δυνατότητα απαγωγής θερμότητας από τα τυλίγματα, με βάση την αντίστασή των πηνίων, τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά τους και το ρεύμα που τα διαρρέει, χρησιμοποιώντας τον τύπο που δίνεται στο [2].

Για να μειωθεί η R_c , αφού η διατομή του καλωδίου s_c είναι δεδομένη για συγκεκριμένο ρεύμα, πρέπει να μειωθεί ο αριθμός των σπειρών σε κάθε πηνίο κάτι το οποίο επιτυγχάνεται με αύξηση της εξωτερικής ακτίνας της γεννήτριας. Τις αλλαγές αυτές μπορούμε να παρατηρήσουμε και στις παρακάτω γραφικές συγκρίνονται οι ακτίνες και οι αντιστάσεις των διατάξεων που είχαν προκύψει από τη βελτιστοποίηση χωρίς έλεγχο της απόδοσης με τις ακτίνες και τις αντιστάσεις που προέκυψαν από τη τελική βελτιστοποίηση που περιλαμβάνει έλεγχο της απόδοσης (για βαθμό N40 και συχνότητα 50Hz).



Σχήμα 5.1: Σύγκριση εξωτερικών ακτίνων με ή χωρίς έλεγχο της απόδοσης

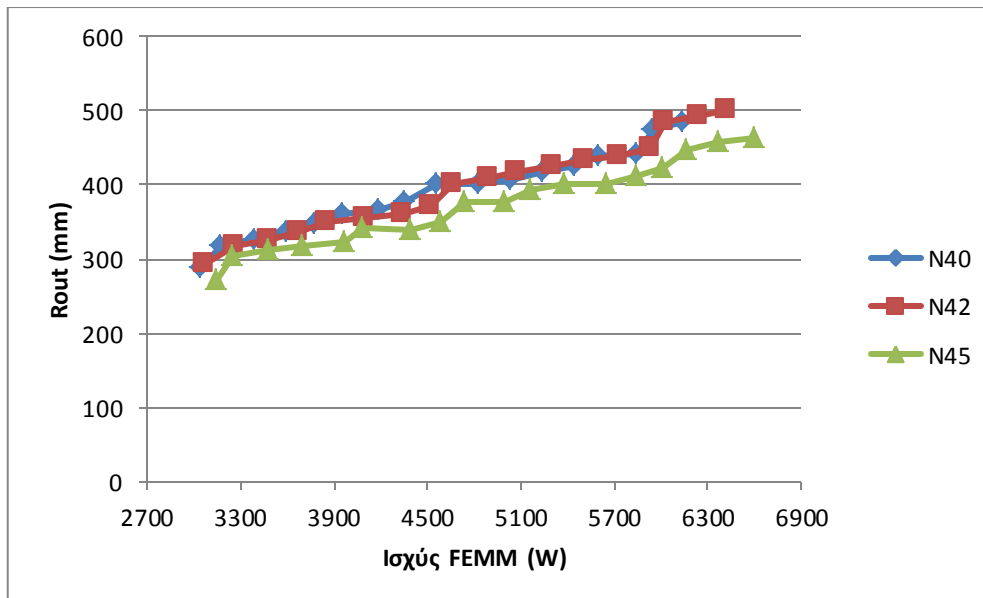


Σχήμα 5.2: Σύγκριση αντίστασης χαλκού με ή χωρίς έλεγχο της απόδοσης

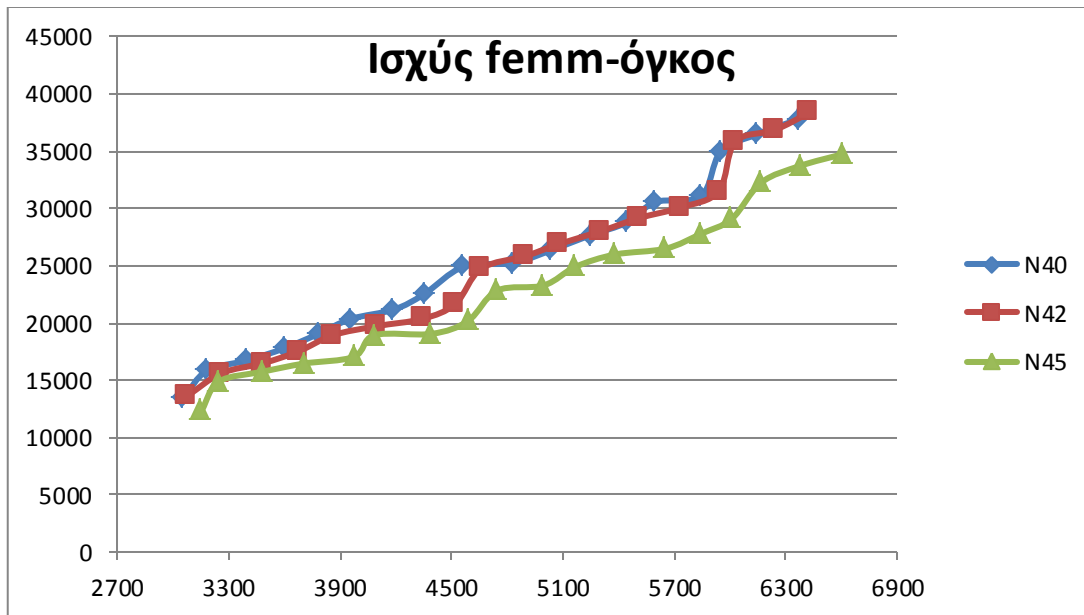
5.4 Σύγκριση βέλτιστων διατάξεων για κάθε ισχύ για διαφορετικούς βαθμούς μαγνήτη σε συχνότητα 50 Hz και κριτήριο το ελάχιστο κόστος

Στο κεφάλαιο αυτό θα παρουσιάσουμε και θα συγκρίνουμε τα χαρακτηριστικά των γεννητριών που έχουν προκύψει από τη βελτιστοποίηση των διαστάσεων του μαγνήτη για κάθε ισχύ με κριτήριο το ελάχιστο κόστος, για τους διάφορους βαθμούς μαγνήτη που χρησιμοποιούμε (N40, N42 και N45) και για συχνότητα 50 Hz. Μέσα από αυτή τη σύγκριση καλούμαστε να αποφασίσουμε ποιος βαθμός μαγνήτη είναι προτιμότερο να χρησιμοποιηθεί, με κριτήριο το ελάχιστο κόστος.

Αρχικά, συγκρίνουμε την εξωτερική ακτίνα και τον όγκο των διατάξεων για τους 3 βαθμούς. Έτσι παρατηρούμε, ότι μεταξύ των βαθμών N40 και N42 δεν υπάρχουν αξιοπρόσεκτες διαφορές ούτε στην ακτίνα και άρα ούτε και στον όγκο των βέλτιστων γεννητριών ενώ οι διατάξεις που προκύπτουν με χρήση μαγνητών βαθμού N45 έχουν λίγο μικρότερες ακτίνες και τελικά είναι λίγο μικρότερες σε όγκο, ειδικά στις μεγαλύτερες ισχύεις.

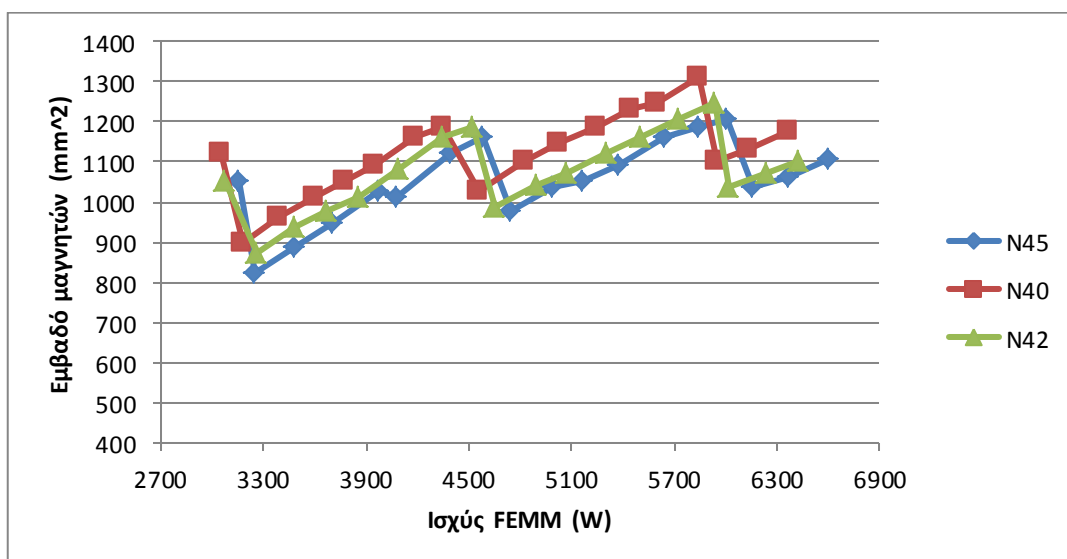


Σχήμα 5.3: Η εξωτερική ακτίνα των διατάξεων συναρτήσει της προσομοιούμενης στο FEMM ισχύος για τους 3 βαθμούς μαγνήτη



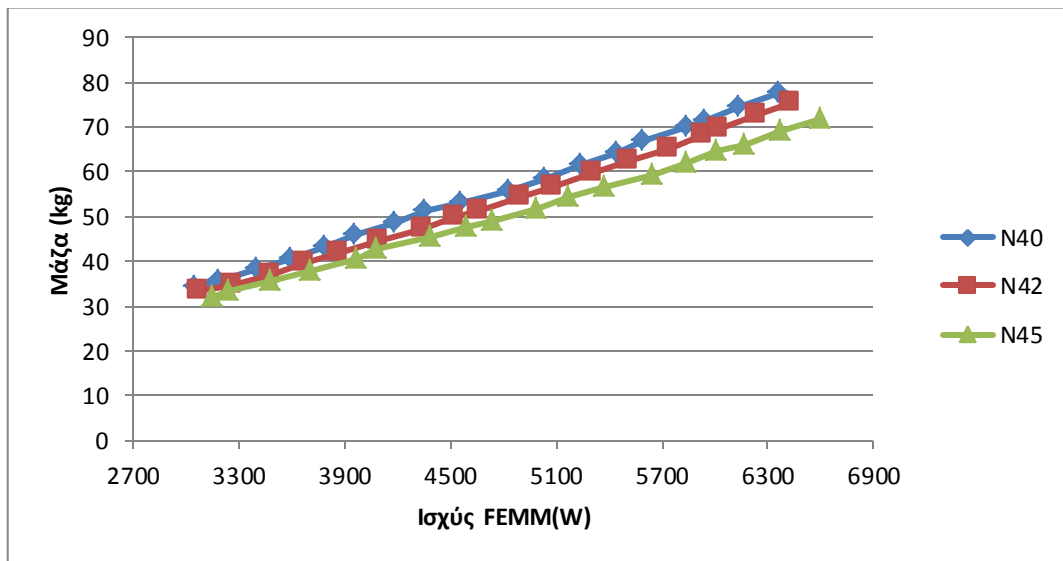
Σχήμα 5.4: Ο συνολικός όγκος των διατάξεων συναρτήσει της προσομοιούμενης στο FEMM ισχύος για τους 3 βαθμούς μαγνήτη

Στο επόμενο σχήμα συγκρίνουμε το εμβαδό των μαγνητών που χρησιμοποιούνται σε κάθε ισχύ, όπως αυτοί επιλέγονται κατά τη βελτιστοποίηση, για τους 3 βαθμούς μαγνήτη. Όπως είναι αναμενόμενο, οι ισχυρότεροι μαγνήτες απαιτούν λιγότερο μαγνητικό υλικό για την ίδια ισχύ οπότε με δεδομένο το πάχος των μαγνητών που είναι πάντα σταθερό, παρατηρούμε μείωση στο εμβαδόν τους ($w_m \times l_a$), όσο αυξάνει ο βαθμός του μαγνήτη. Το γεγονός ότι οι καμπύλες τέμνονται στα σημεία της αλλαγής των πόλων οφείλεται στο ότι η προσομοιούμενη ισχύς στο FEMM, διαφέρει ανάλογα με το βαθμό του μαγνήτη.



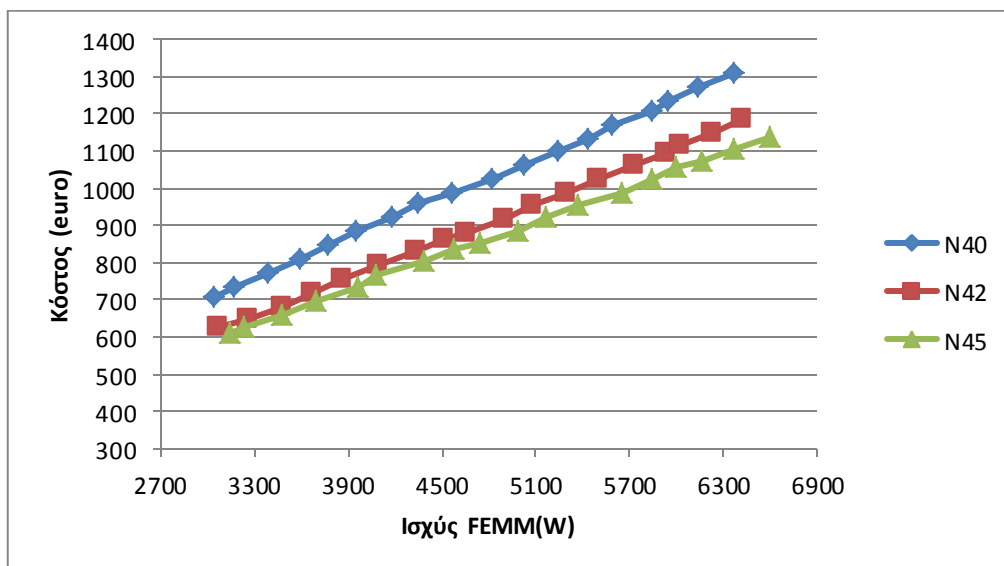
Σχήμα 5.5: Εμβαδόν μαγνητών συναρτήσει της προσομοιούμενης στο FEMM ισχύος για τους 3 βαθμούς μαγνήτη

Ακόμα βλέπουμε πως μεταβάλλεται η μάζα των γεννητριών ανάλογα με το βαθμό μαγνήτη που χρησιμοποιούμε. Έτσι υπάρχει μια μείωση της τάξης των 3-4 κιλών όσο οδηγούμαστε σε ισχυρότερο μαγνήτη, που παρατηρείται σε όλο το εύρος των ισχύων.

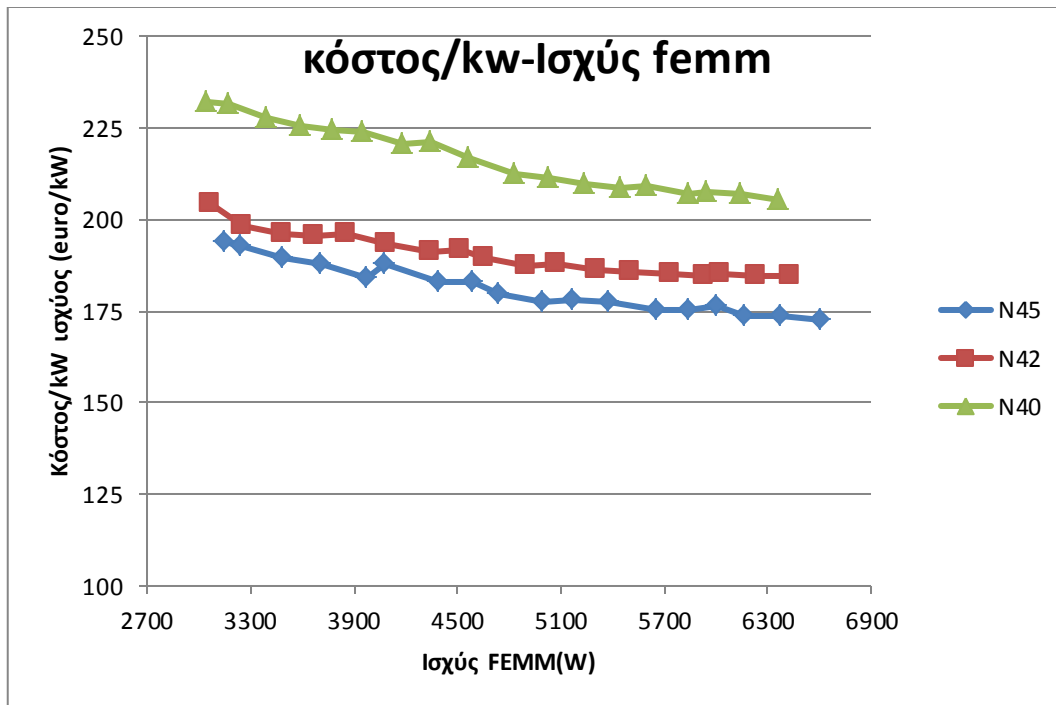


Σχήμα 5.6: Η μάζα των γεννητριών συναρτήσει της προσομοιούμενης στο FEMM ισχύος για τους 3 βαθμούς μαγνήτη

Τέλος, παραθέτουμε τα διαγράμματα του κόστους και του κόστους ανα kW ισχύος, με βάση τα οποία θα επιλέξουμε ποιος βαθμός μαγνήτη είναι προτιμότερο να χρησιμοποιηθεί καθώς δίνει τις φτηνότερες γεννήτριες.



Σχήμα 5.7: Το συνολικό κόστος των γεννητριών συναρτήσει της προσομοιούμενης στο FEMM ισχύος για τους 3 βαθμούς μαγνήτη



Σχήμα 5.8: Κόστος ανα kw ισχύος συναρτήσει της προσομοιούμενης στο FEMM ισχύος για τους 3 βαθμούς μαγνήτη

Όπως φαίνεται από τα παραπάνω διαγράμματα, ο καλύτερος βαθμός μαγνήτη για να χρησιμοποιηθεί στην εφαρμογή μας σε συχνότητα 50Hz, με βάση πάντα το ελάχιστο κόστος, είναι ο ισχυρότερος από τους 3, ο N45. Έτσι από την παραπάνω μελέτη και σύγκριση προκρίνουμε τους μαγνήτες με βαθμό N45 για χρήση σε συχνότητες 50Hz, ο οποίος σε εφαρμογές σαν τη δικιά μας προσφέρει μεγαλύτερη πυκνότητα ισχύος και συμφέρει να χρησιμοποιηθεί.

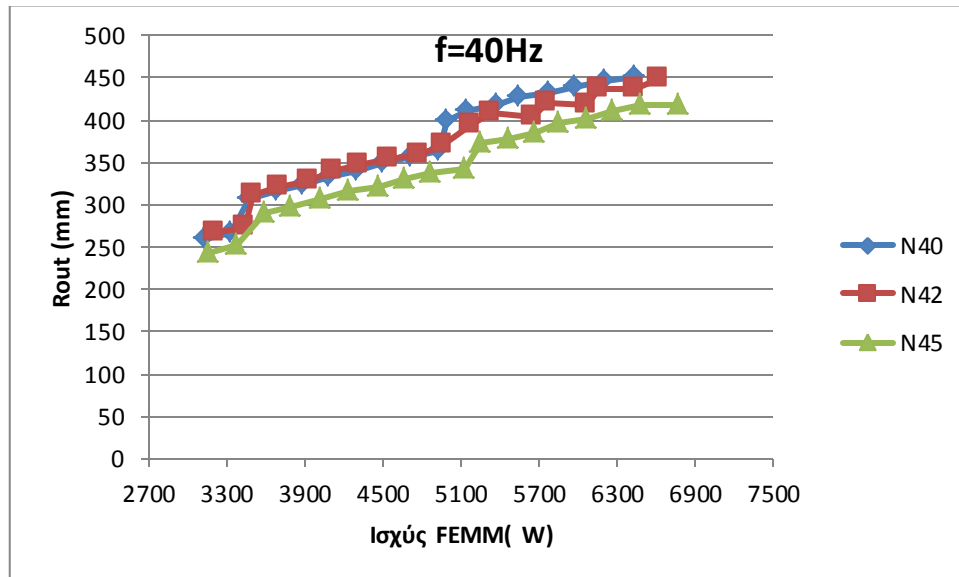
5.5 Σύγκριση βέλτιστων διατάξεων για κάθε ισχύ για διαφορετικούς βαθμούς μαγνήτη σε συχνότητα 40 Hz και κριτήριο το ελάχιστο κόστος

Στη συνέχεια αλλάζουμε τη συχνότητα λειτουργίας στα 40 Hz και επαναλαμβάνουμε τη διαδικασία της βελτιστοποίησης για τους 3 βαθμούς μαγνήτη.

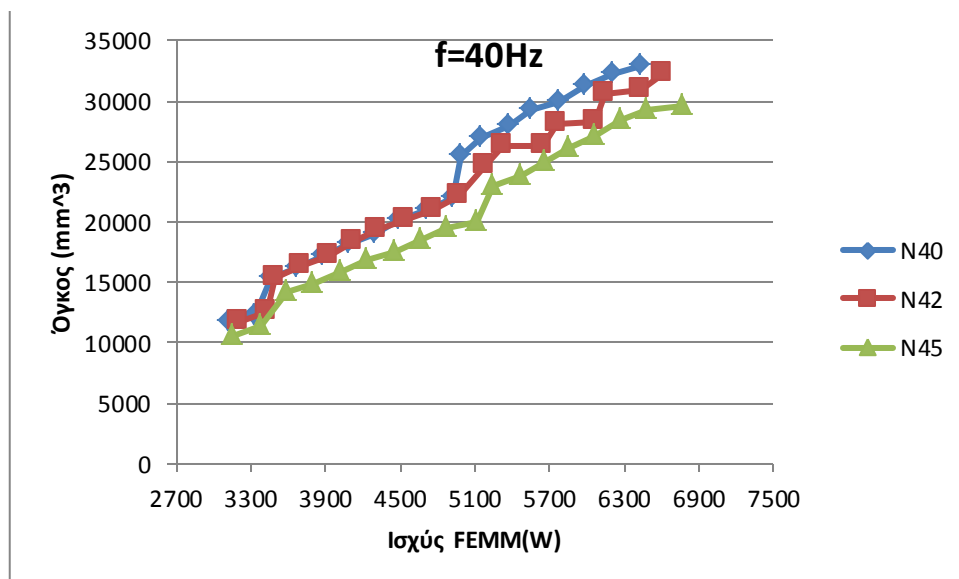
Η μείωση στη συχνότητα οδηγεί σε μείωση στον αριθμό των πόλων, που πλέον στη γεννήτρια των 3,1 kW έχουμε 16 ενώ στη γεννήτρια των 6,5 kW φτάνουμε να έχουμε 24 πόλους. Η αλλαγή αυτή επιφέρει αλλαγές τόσο στο μαγνητικό υλικό που χρησιμοποιείται αφού έχουμε λιγότερους πόλους και άρα μαγνήτες όσο και στον αριθμό των σπειρών στα πηνία. Αναλυτικότερη σύγκριση μεταξύ των δύο συχνοτήτων που χρησιμοποιούμε θα γίνει σε επόμενο κεφάλαιο.

Παρακάτω συγκρίνονται τα χαρακτηριστικά των βέλτιστων διατάξεων που έχουν προκύψει, αυτή τη φορά για συχνότητα 40 Hz, για τους διαφορετικούς βαθμούς μαγνήτη, N40, N42 και N45. Μέσα από αυτή τη σύγκριση καλούμαστε να αποφασίσουμε ποιος βαθμός μαγνήτη είναι προτιμότερο να χρησιμοποιηθεί, με κριτήριο το ελάχιστο κόστος.

Αρχικά, συγκρίνουμε την εξωτερική ακτίνα και τον όγκο των διατάξεων για τους 3 βαθμούς. Έτσι παρατηρούμε, ότι οι γραφικές για βαθμούς N40 και N42 σχεδόν ταυτίζονται τόσο για την ακτίνα όσο και για τον όγκο των βέλτιστων γεννητριών για ισχείς από 3 μέχρι 5kW όπου γίνεται και η αλλαγή του αριθμού πόλων από 20 σε 24. Στις μεγαλύτερες ισχείς και μέχρι τα 6,5 kW, η ακτίνα και ο όγκος των γεννητριών με μαγνήτες βαθμού N42, είναι λίγο μικρότερα σε σχέση με τα αντίστοιχα μεγέθη για N40. Οι διατάξεις που προκύπτουν με χρήση μαγνητών βαθμού N45 έχουν λίγο μικρότερες ακτίνες και τελικά είναι λίγο μικρότερες σε όγκο, σε όλο το εύρος της ισχύος.

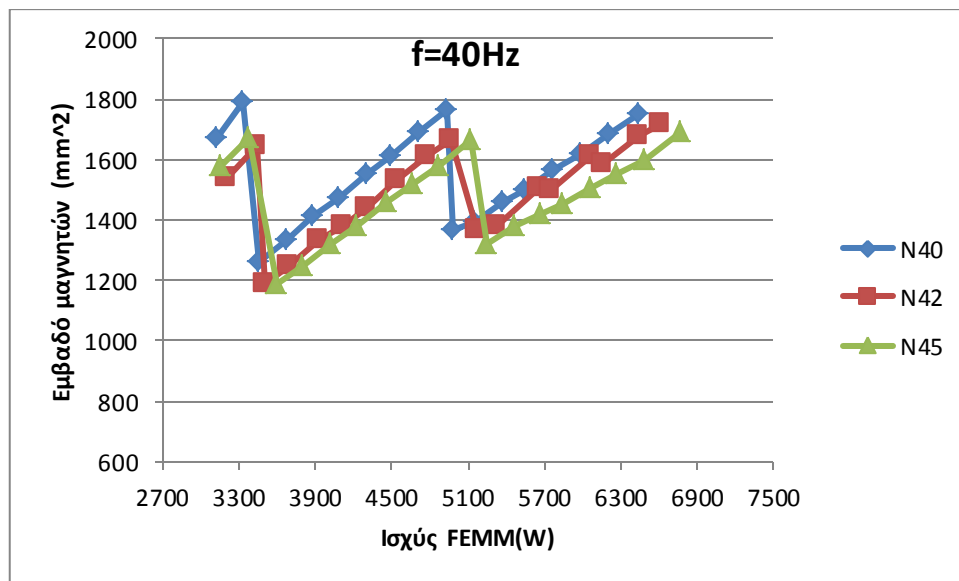


Σχήμα 5.9: Η εξωτερική ακτίνα των διατάξεων συναρτήσει της προσομοιούμενης στο FEMM ισχύος για τους 3 βαθμούς μαγνήτη



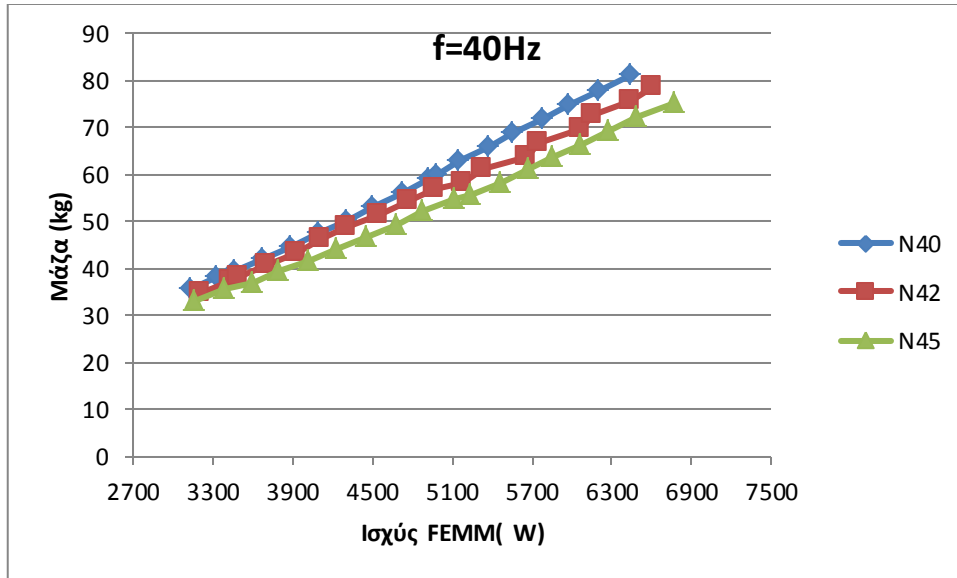
Σχήμα 5.10: Ο συνολικός όγκος των διατάξεων συναρτήσει της προσομοιούμενης στο FEMM ισχύος για τους 3 βαθμούς μαγνήτη

Στο επόμενο σχήμα συγκρίνουμε το εμβαδό των μαγνητών που χρησιμοποιούνται σε κάθε ισχύ, όπως αυτοί επιλέγονται κατά τη βελτιστοποίηση, για τους 3 βαθμούς μαγνήτη. Όπως είναι αναμενόμενο, οι ισχυρότεροι μαγνήτες απαιτούν λιγότερο μαγνητικό υλικό για την ίδια ισχύ οπότε με δεδομένο το πάχος των μαγνητών που είναι πάντα σταθερό, παρατηρούμε μείωση στο εμβαδόν τους ($w_m \times l_a$), όσο αυξάνει ο βαθμός του μαγνήτη. Μια μικρή διαφοροποίηση παρατηρούμε στις μικρές ισχύεις και μέχρι τα 3,3 kW όπου το εμβαδό των μαγνητών N42 είναι μικρότερο από το αντίστοιχο για N45. Το γεγονός ότι οι καμπύλες τέμνονται στα σημεία της αλλαγής των πόλων οφείλεται στο ότι η προσομοιούμενη ισχύς στο FEMM, διαφέρει από την επιθυμητή ανάλογα με το βαθμό του μαγνήτη.



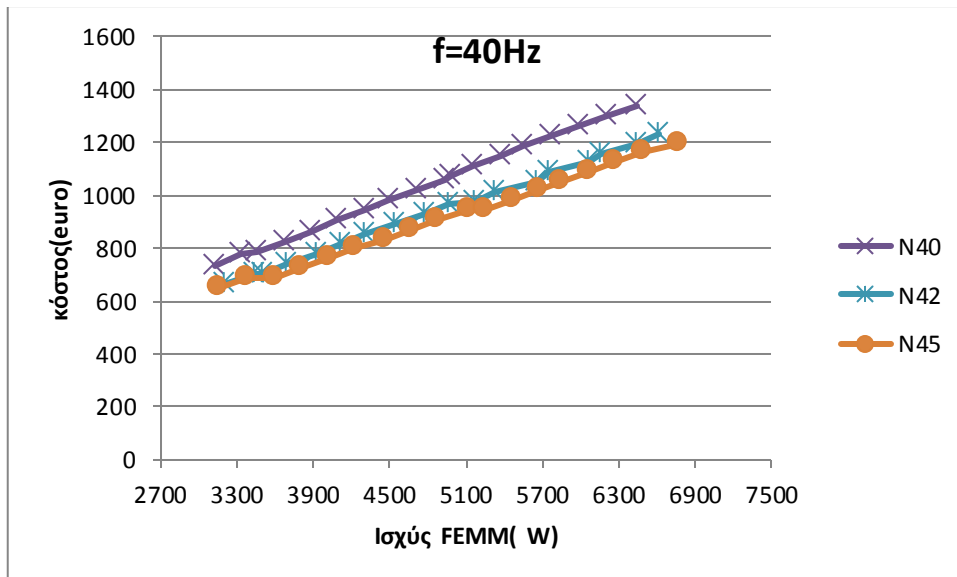
Σχήμα 5.11: Εμβαδόν μαγνητών συναρτήσει της προσομοιούμενης στο FEMM ισχύος για τους 3 βαθμούς μαγνήτη

Ακόμα βλέπουμε πως μεταβάλλεται η μάζα των γεννητριών ανάλογα με το βαθμό μαγνήτη που χρησιμοποιούμε. Έτσι υπάρχει μια μείωση της τάξης των 3-4 κιλών όσο οδηγούμαστε σε ισχυρότερο μαγνήτη, που παρατηρείται σε όλο το εύρος των ισχύων, ενώ είναι πιο έντονη στις μεγαλύτερες ισχύεις.

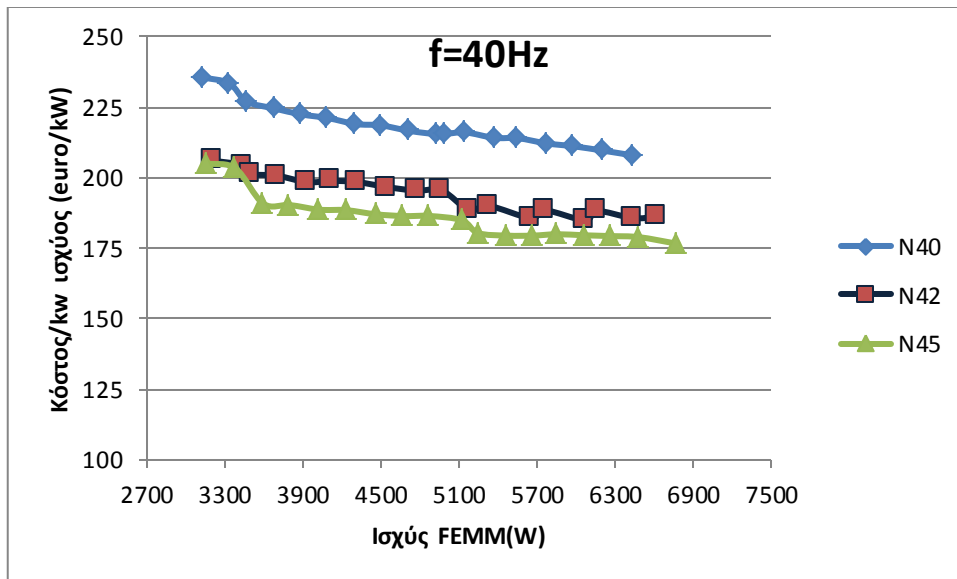


Σχήμα 5.12: Η μάζα των γεννητριών συναρτίζεται της προσομοιούμενης στο FEMM ισχύος για τους 3 βαθμούς μαγνήτη

Τέλος, παραθέτουμε τα διαγράμματα του κόστους και του κόστους ανα kW παραγόμενης ισχύος, με βάση τα οποία θα επιλέξουμε ποιος βαθμός μαγνήτη είναι προτιμότερο να χρησιμοποιηθεί με δεδομένο ότι δίνει τις φτηνότερες γεννήτριες.



Σχήμα 5.13: Το συνολικό κόστος των γεννητριών συναρτίζεται της προσομοιούμενης στο FEMM ισχύος για τους 3 βαθμούς μαγνήτη



Σχήμα 5.14: Κόστος ανα kw ισχύος συναρτήσει της προσομοιούμενης στο FEMM ισχύος για τους 3 βαθμούς μαγνήτη

Όπως φαίνεται από τα παραπάνω διαγράμματα, ο καλύτερος βαθμός μαγνήτη για να χρησιμοποιηθεί στην εφαρμογή μας σε συχνότητα 40Hz, με βάση πάντα το ελάχιστο κόστος, είναι ο ισχυρότερος από τους 3, ο N45. Πιο συγκεκριμένα, σε όλο το εύρος της ισχύος οι γεννήτριες με N40 παρουσιάζονται πιο ακριβές από των άλλων βαθμών κατά 100 euro περίπου, ενώ οι γεννήτριες με N45 παρότι παρουσιάζουν παρεμφερή κόστη με το N42, είναι λίγο πιο φτηνές, κάτι που φαίνεται πιο ξεκάθαρα στο διάγραμμα με το κόστος ανα kW ισχύος καθώς έχουν καλύτερα αποτελέσματα και στην παραγόμενη ισχύ. Έτσι από την παραπάνω μελέτη και σύγκριση προκρίνουμε τους μαγνήτες με βαθμό N45 για χρήση σε συχνότητες 40Hz, ο οποίος σε εφαρμογές σαν τη δικιά μας προσφέρει μεγαλύτερη πυκνότητα ισχύος και συμφέρει να χρησιμοποιηθεί.

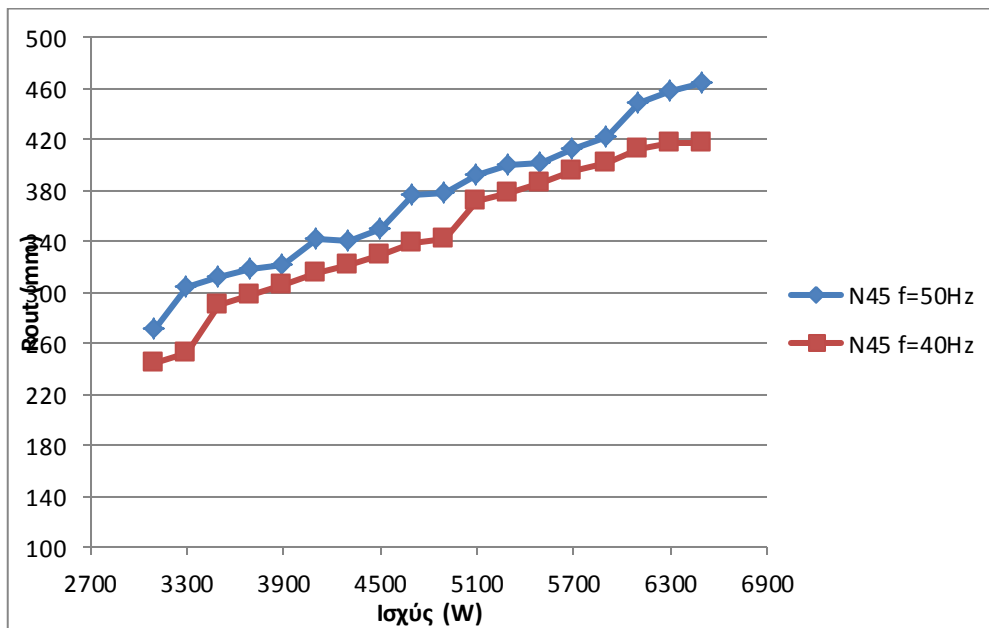
5.6 Σύγκριση βέλτιστων διατάξεων με μαγνήτες βαθμού N45 για συχνότητες 40 και 50 Hz

Όπως προέκυψε κατά τη σύγκριση των 3 βαθμών μαγνήτη που χρησιμοποιούμε τόσο για συχνότητα 50Hz όσο και για 40Hz, ο βαθμός μαγνήτη με χρήση του οποίου σχεδιάζονται οι φτηνότερες γεννήτριες είναι ο ισχυρότερος από τους 3, ο N45. Στο κεφάλαιο αυτό θα συγκριθούν οι διατάξεις στις οποίες χρησιμοποιούνται μαγνήτες βαθμού N45, σε συχνότητα 40 και 50 Hz, έτσι ώστε να καταλήξουμε και στη συχνότητα που προτείνεται σε αυτήν την εργασία αυτή να λειτουργούν οι γεννήτριες που σχεδιάζονται.

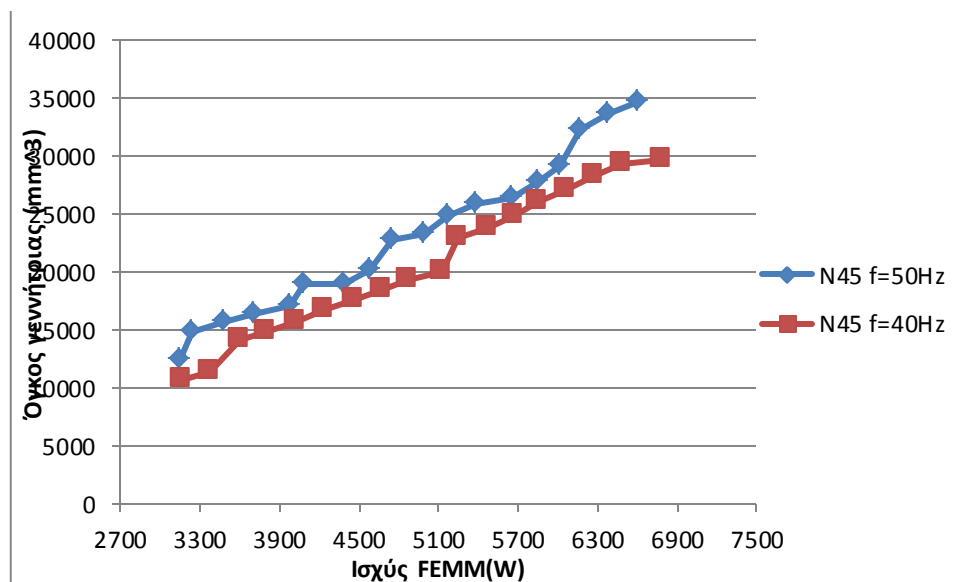
Καταρχήν, πριν παρουσιάσουμε τα διαγράμματα, πρέπει να πούμε ότι μικρότερη συχνότητα σημαίνει αυτομάτως και λιγότεροι πόλοι στη γεννήτρια και άρα λιγότεροι μαγνήτες. Οφείλουμε βέβαια να εξετάσουμε το μέγεθος των μαγνητών στα 40 Hz για να συμπαιράνουμε για το σύνολο του μαγνητικού υλικού που χρησιμοποιείται και

άρα το κόστος του, με δεδομένο ότι οι μαγνήτες είναι το ακριβότερο υλικό στην κατασκευή μιας γεννήτριας.

Αρχικά, συγκρίνουμε τις ακτίνες των γεννητριών που έχουν προκύψει από τη βελτιστοποίηση για 40 και 50 Hz καθώς και τον όγκο τους. Όπως περιμέναμε, οι γεννήτριες που έχουν σχεδιαστεί στα 40 Hz, έχουν λίγο μικρότερες ακτίνες καθώς έχουν και λιγότερους πόλους και αυτό οδηγεί και σε μικρότερο συνολικό όγκο για αυτές τις γεννήτριες.

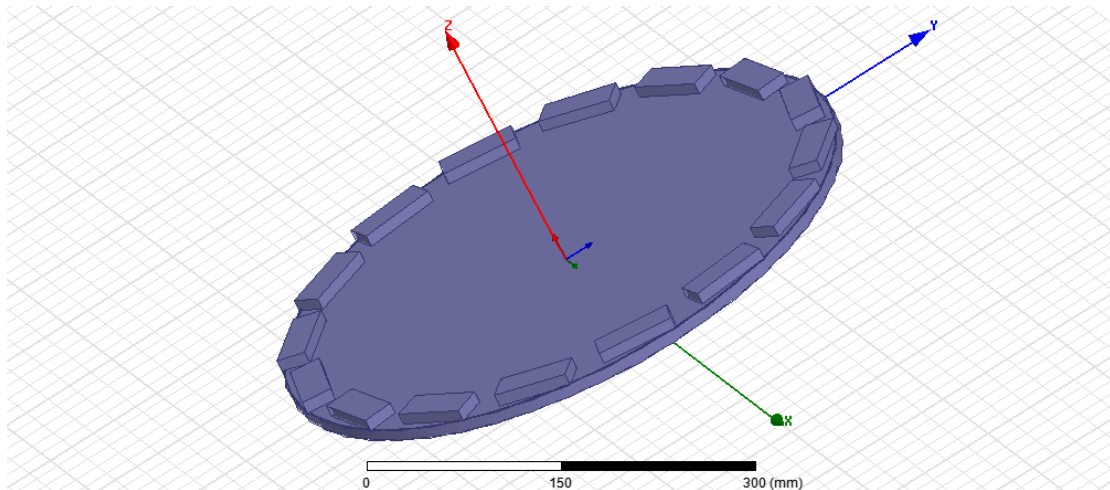


Σχήμα 5.15: Οι ακτίνες των βέλτιστων διατάξεων για συχνότητες 40 και 50 Hz και βαθμό μαγνήτη N45 συναρτήσει της ισχύος

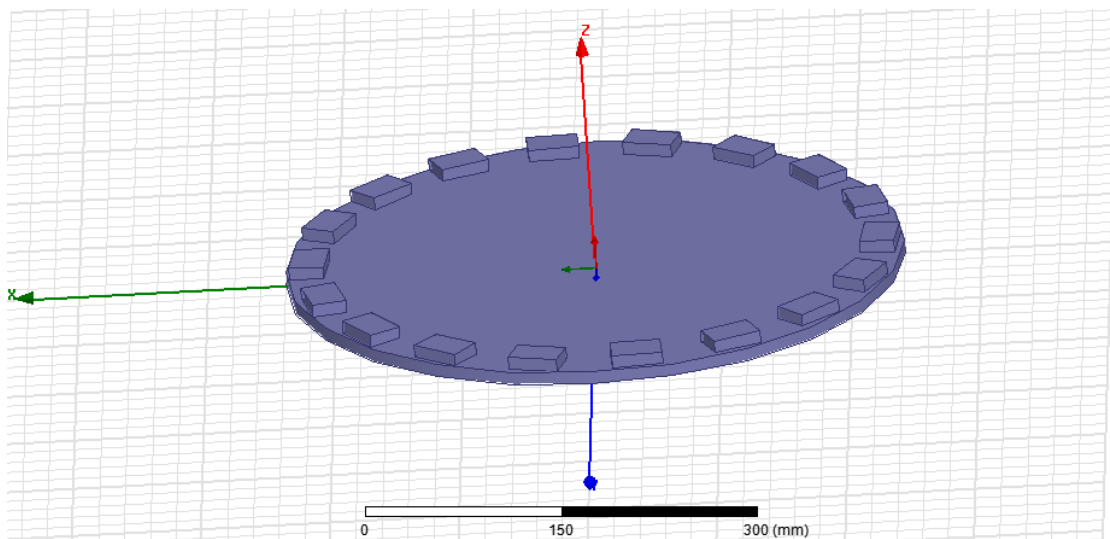


Σχήμα 5.16: Ο συνολικός όγκος των βέλτιστων διατάξεων για συχνότητες 40 και 50 Hz και βαθμό μαγνήτη N45 συναρτήσει της ισχύος

Βέβαια οι διαφορές σε αυτά τα μεγέθη είναι πολύ μικρές παρά τη μείωση των πόλων, κάτι που εξηγείται στα παρακάτω σχήματα. Εκεί μπορούμε να δούμε πως τοποθετούνται οι μαγνήτες στο δίσκο του δρομέα για συχνότητα 40 και 50 Hz. Συγκεκριμένα έχουμε σχεδιάσει το δίσκο του δρομέα ο οποίος αντιστοιχεί στη γεννήτρια των 3,1 kW, ενώ οι μαγνήτες έχουν τις διαστάσεις όπως προέκυψαν από τη βελτιστοποίηση για βαθμό N45.



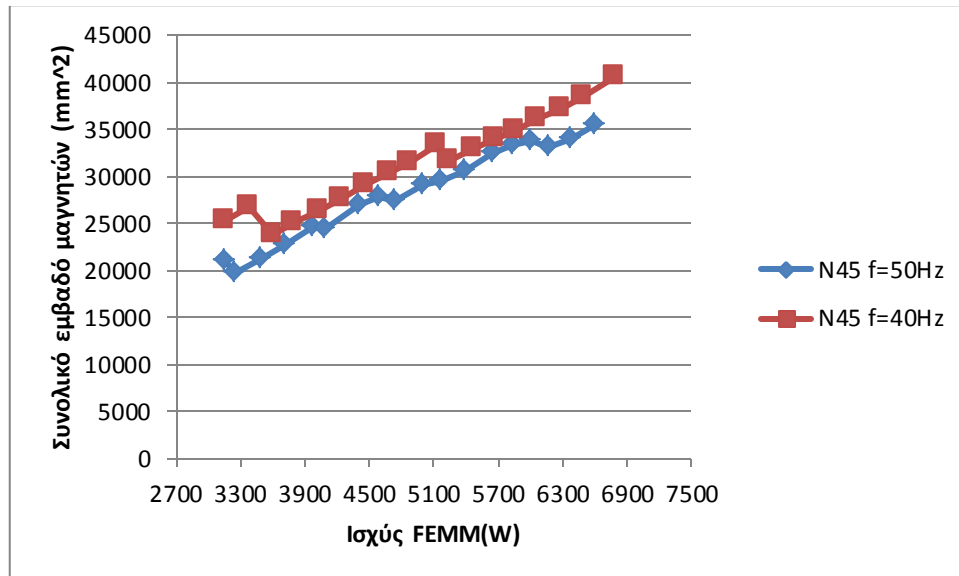
Σχήμα 5.17: Ο ένας δίσκος του δρομέα με τους μαγνήτες για ισχύ 3,1 kW και συχνότητα 40 Hz



Σχήμα 5.18: Ο ένας δίσκος του δρομέα με τους μαγνήτες για ισχύ 3,1 kW και συχνότητα 50 Hz

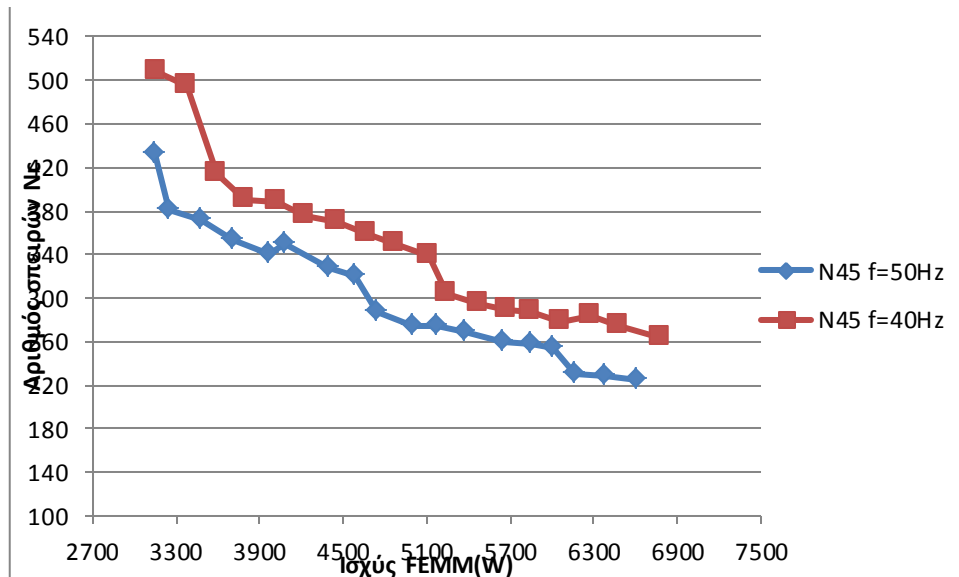
Όπως παρατηρούμε, παρότι ο αριθμός των μαγνητών είναι μικρότερος στα 40 Hz (16) από ότι στα 50Hz (20), οι διαστάσεις τους είναι μεγαλύτερες στα 40 Hz. Έτσι με τη βοήθεια και του παρακάτω διαγράμματος, καταλήγουμε στο συμπέρασμα πως το

συνολικό εμβαδό των μαγνητών που χρησιμοποιείται στα 40 Hz είναι μεγαλύτερο από αυτό που χρησιμοποιείται στα 50Hz, οπότε και το μαγνητικό υλικό είναι περισσότερο.



Σχήμα 5.19: Το συνολικό εμβαδό των μαγνητών για συχνότητες 40 και 50 Hz και βαθμό μαγνήτη N45 συναρτήσκει της ισχύος

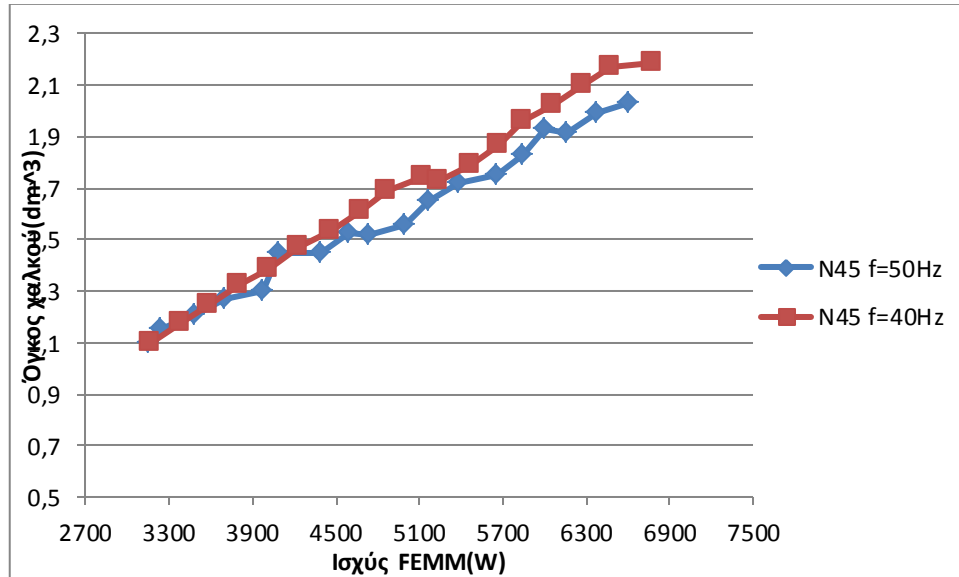
Συνεχίζουμε συγκρίνοντας τον αριθμό των σπειρών στα πηνία. Έτσι παρατηρούμε ότι στα 40 Hz, τα πηνία που προκύπτουν έχουν 20 έως 40 περισσότερες σπείρες ανα πηνίο από ότι τα πηνία στα 50 Hz.



Σχήμα 5.20: Ο αριθμός των σπειρών ανα πηνίο για συχνότητες 40 και 50 Hz και βαθμό μαγνήτη N45 συναρτήσκει της ισχύος

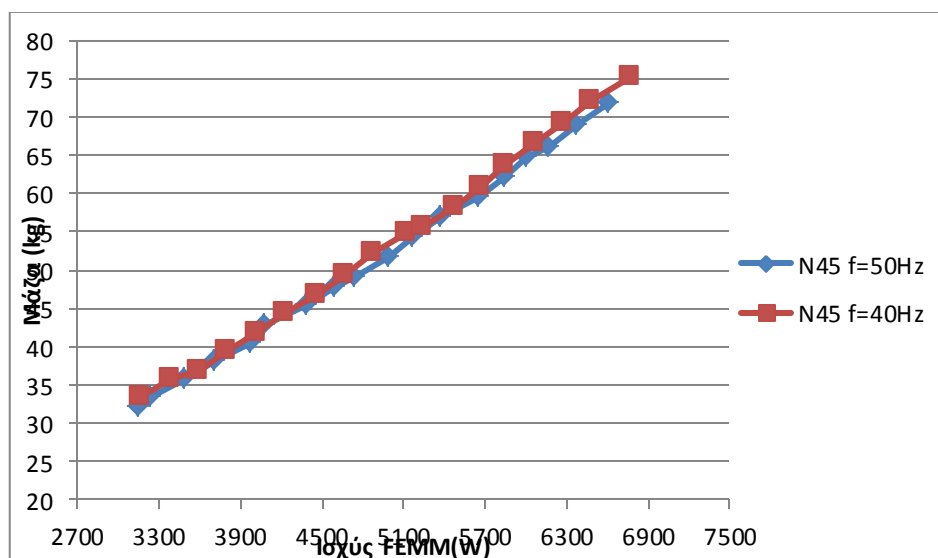
Αυτό συμβαίνει διότι οι πόλοι άρα και οι μαγνήτες στα 40 Hz είναι λιγότεροι κάτι το οποίο συνεπάγεται λιγότερο μαγνητικό υλικό, οπότε για να καταφέρουν να παράγουν

οι γεννήτριες την επιθυμητή ισχύ αυξάνουν το χαλκό στο τύλιγμα. Αυτό φαίνεται και στο επόμενο διάγραμμα όπου συγκρίνεται ο όγκος του χαλκού που χρησιμοποιείται στις 2 συχνότητες. Η διαφορά είναι πιο εμφανής σε μεγαλύτερες ισχύεις όπου ο χαλκός είναι περισσότερος στα 40 Hz, με σκοπό να παραχθεί με αυτό τον τρόπο η επιθυμητή ισχύς.



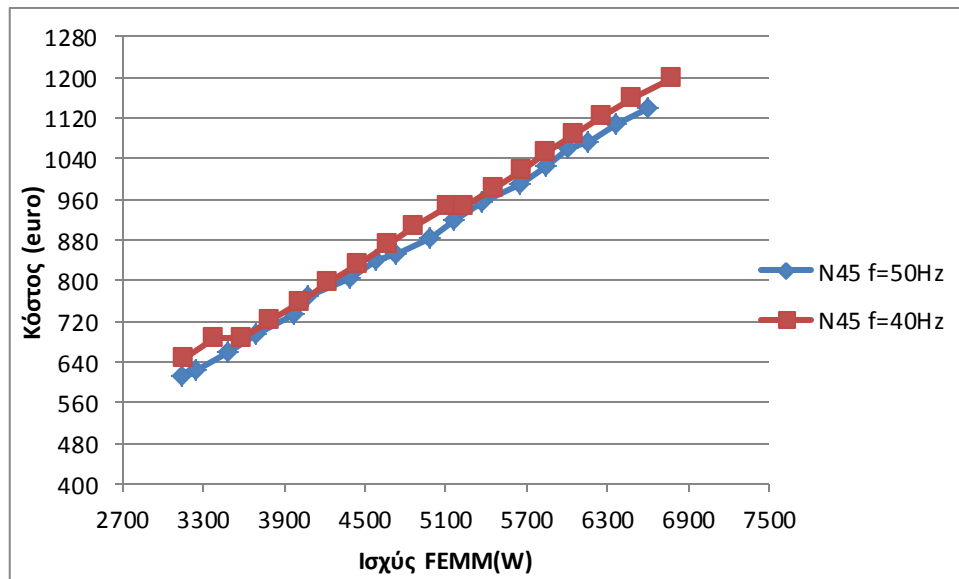
Σχήμα 5.21: Ο όγκος του χαλκού που χρησιμοποιείται στο στάτη για συχνότητες 40 και 50 Hz και βαθμό μαγνήτη N45 συναρτήσει της ισχύος

Στη συνέχεια συγκρίνονται οι μάζες των γεννητριών οι οποίες προκύπτουν σχεδόν ίδιες για τις 2 συχνότητες και μόνο στις μεγαλύτερες ισχύεις, οι γεννήτριες στα 50Hz εμφανίζονται ελάχιστα πιο ελαφριές. Οπότε με βάση αυτό το διάγραμμα δε μπορούμε να βγάλουμε κάποιο συμπέρασμα στη διαδικασία της σύγκρισης.

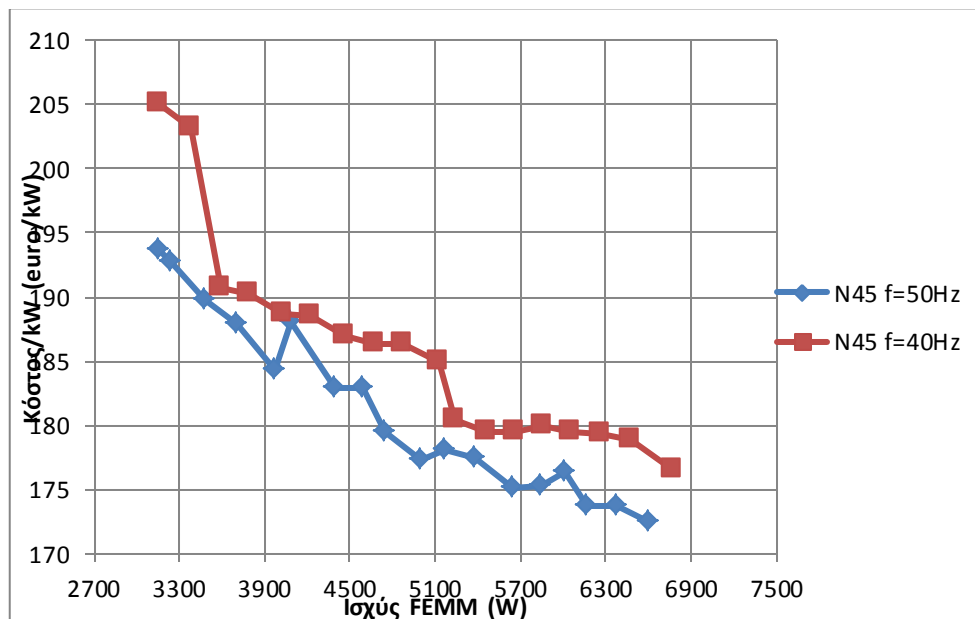


Σχήμα 5.22: Η μάζες των γεννητριών για συχνότητες 40 και 50 Hz και βαθμό μαγνήτη N45 συναρτήσει της ισχύος

Τέλος παραθέτουμε τα διαγράμματα όπου συγκρίνεται το συνολικό κόστος των διατάξεων καθώς και το κόστος ανα kW παραγόμενης ισχύος.



Σχήμα 5.23: Το κόστος των γεννητριών για συχνότητες 40 και 50 Hz και βαθμό μαγνήτη N45 συναρτήσει της ισχύος



Σχήμα 5.24: Το κόστος ανα kW ισχύος για συχνότητες 40 και 50 Hz και βαθμό μαγνήτη N45 συναρτήσει της ισχύος

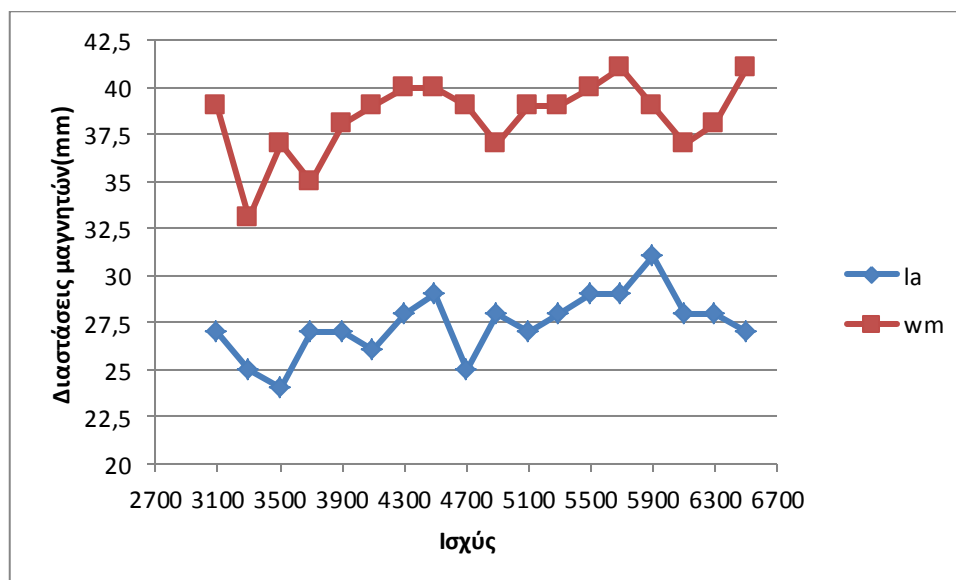
Στα διαγράμματα αυτά βλέπουμε πως οι γεννήτριες που έχουν σχεδιαστεί στα 50Hz λειτουργίας παρουσιάζονται 20 έως 60 euro φτηνότερες από τις αντίστοιχες στα 40Hz, ενώ και το κόστος ανα kW ισχύος είναι χαμηλότερο για τα 50Hz κατά 5 euro/kW περίπου ενώ σε κάποιες περιπτώσεις (ελάχιστες και μέγιστες ισχείς) η διαφορά φτάνει στα 10 euro/kW.

Έτσι, καταλήγουμε στο συμπέρασμα πως ο βαθμός μαγνήτη N45 και η συχνότητα λειτουργίας 50Hz, επιλέγονται τελικά για την κατασκευή των γεννητριών στο συγκεκριμένο εύρος ισχύος, όπως προκύπτει από τη διαδικασία της σύγκρισης των αποτελεσμάτων της βελτιστοποίησης και με κριτήριο το ελάχιστο κόστος.

5.7. Παρουσίαση χαρακτηριστικών των γεννητριών με βέλτιστο βαθμό μαγνήτη και συχνότητα

Στο κεφάλαιο αυτό θα παρουσιάσουμε αναλυτικά τις διάφορες κρίσιμες για τη σχεδίαση μεταβλητές της διαστασιολόγησης, που αντιστοιχούν στις βέλτιστες διατάξεις, και πως αυτές μεταβάλλονται στο εύρος της ισχύος που μελετάμε. Αναφέρομαστε στις διατάξεις που έχουν προκύψει με χρήση μαγνητών βαθμού N45 και για συχνότητα 50Hz, καθώς από τη διαδικασία της σύγκρισης που έγινε επιλεχθηκε αυτός ο συνδυασμός ως βέλτιστος.

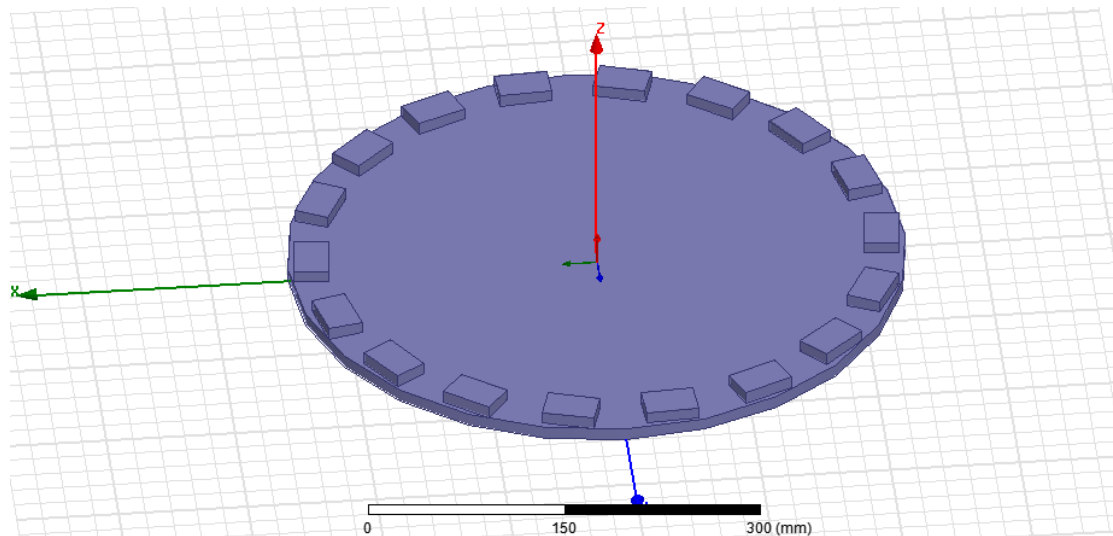
Στο πρώτο σχήμα φαίνεται οι βασικές μεταβλητές που βελτιστοποιήσαμε, το μήκος και το πλάτος μαγνήτη, w_m και l_a για τις διάφορες ισχύεις. Ουσιαστικά ο κάθε σχεδιαστής που θελει να κατασκευάσει μια γεννήτρια με ισχύ μέσα στο εύρος που έχουμε μελετήσει, μπορεί να ανατρέξει στο σχήμα αυτό και να επιλέξει το μαγνήτη που έχει βρεθεί ότι θα του δώσει το ελάχιστο κόστος, με δεδομένο ότι δε θα επιβαρυνθεί με επιπλέον κόστος σε περίπτωση που αναγκαστεί να κατασκευαστεί από την αρχή ο μαγνήτης αυτός επειδή δεν υπάρχει στο εμπόριο.



Σχήμα 5.25: Το μήκος και το πλάτος των βέλτιστων μαγνητών για κάθε ισχύ

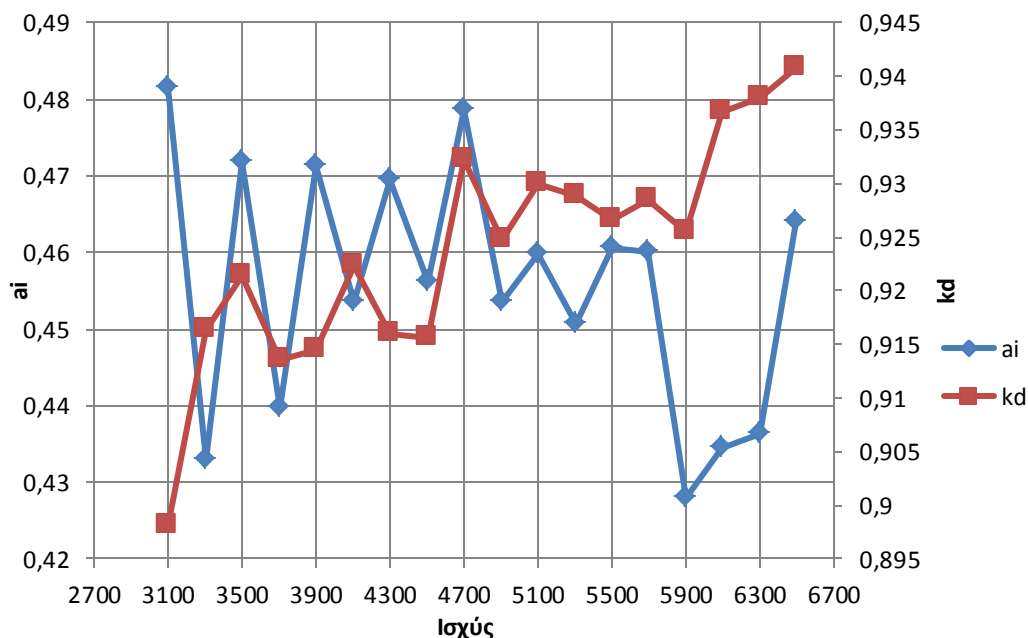
Όπως παρατηρούμε, το l_a παίρνει τιμές από 24 έως 31 mm, ενώ το w_m από 33 έως 42 mm. Είναι σημαντικό επίσης να προσέξουμε το γεγονός πως η μεγαλύτερη διάσταση των μαγνητών είναι το πλάτος τους, w_m , δηλαδή τοποθετούνται στη γεννήτρια οριζόντια, όπως φαίνεται και στο παρακάτω τρισδιάστατο σχήμα. Στο σχήμα αυτό

βλέπουμε τον ένα δίσκο του δρομέα με τους μαγνήτες που αντιστοιχεί στη βέλτιστη διάταξη για ισχύ 6,5 kW.



Σχήμα 5.26: Ο δίσκος του δρομέα με τους μαγνήτες για τα 6,5 kW

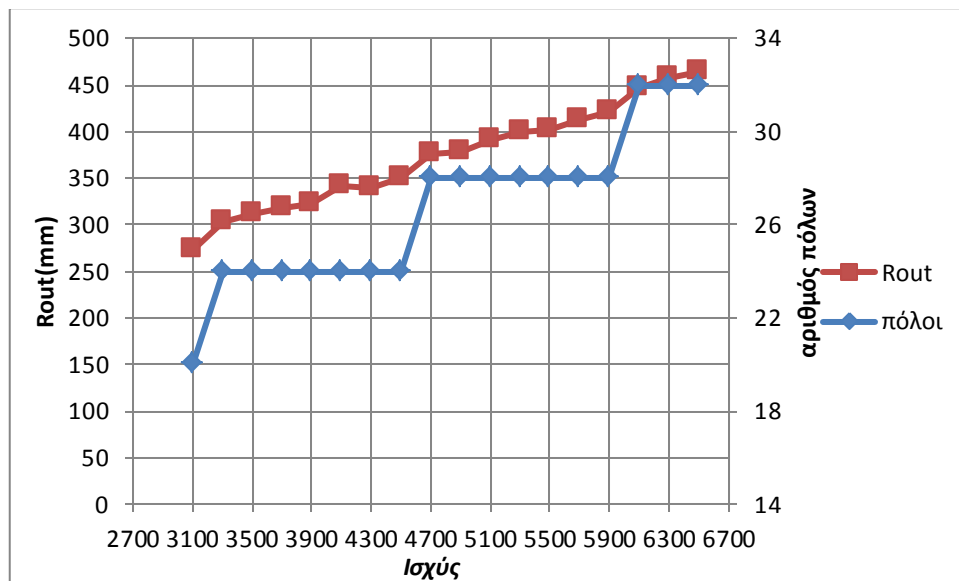
Στο επόμενο σχήμα βλέπουμε τις τιμές που παίρνουν οι λόγοι a_i και k_d , στις βέλτιστες διατάξεις. Παρατηρούμε το k_d παίρνει πάντα τιμές πάνω από 0,9 και μέχρι 0,94, γεγονός αναμενόμενο καθώς το k_d τείνει να μεγιστοποιείται όταν επιδιώκουμε ελαχιστοποίηση του κόστους μιας γεννήτριας. Το a_i κυμαίνεται γύρω από μια τιμή κοντά στο 0,45, χωρίς μεγάλες αποκλίσεις από αυτήν.



Σχήμα 5.27: Οι λόγοι a_i και k_d συναρτήσει της ισχύος

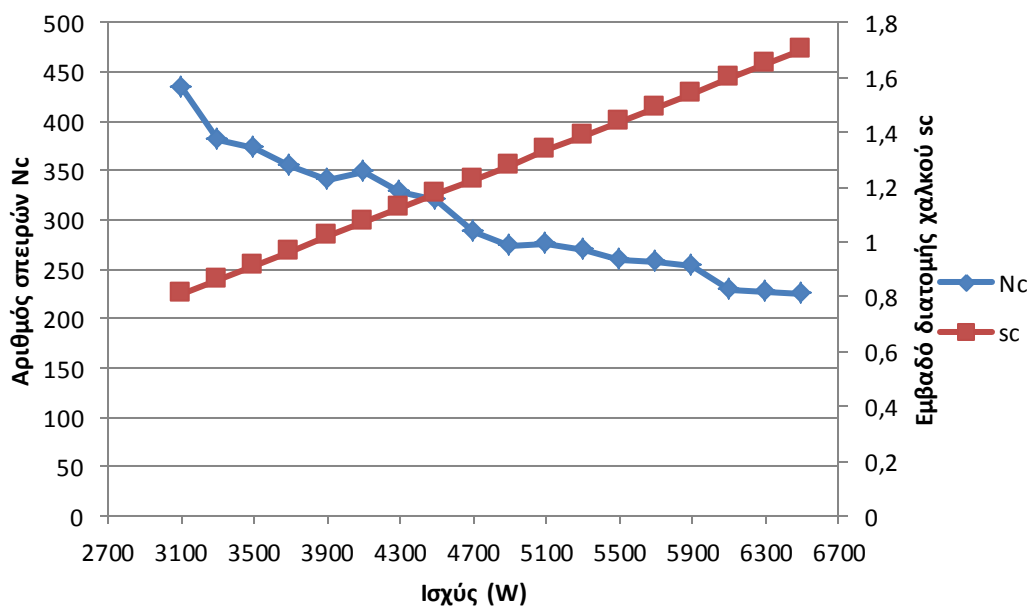
Παρακάτω βλέπουμε πως αυξάνεται η εξωτερική ακτίνα για αύξηση της ισχύος από τα 27cm και φτάνει έως τα 47cm για τη γεννήτρια των 6,5 kW. Οι τιμές αυτές

οδηγούν σε διαμέτρους για τις γεννήτριες από 55 cm έως 95 cm, μεγέθη λογικά για τα επίπεδα ισχύος που μελετάμε. Επίσης φαίνεται και η αύξηση στον αριθμό των πόλων από 20 για τη γεννήτρια των 3 kW σε 32 για τη γεννήτρια των 6,5 kW.



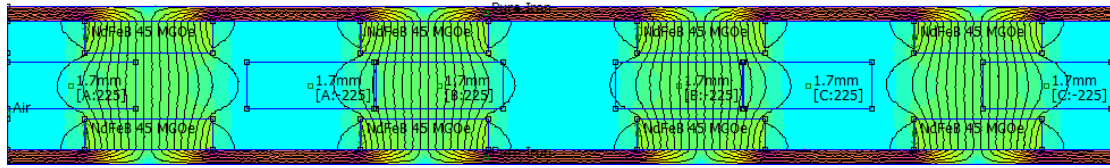
Σχήμα 5.28: Η εξωτερική ακτίνα και ο αριθμός των πόλων συναρτήσει της ισχύος

Ο αριθμός των σπειρών ανα πηνίο όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα, μειώνεται καθώς αυξάνεται η ισχύς, με ταυτόχρονη αύξηση της διατομής του χαλκού. Συγκεκριμένα παρατηρούμε υποδιπλασιασμό των σπειρών ανα πηνίο και διπλασιασμό στη διατομή του χαλκού από τα 3 στα 6,5 kW. Αυτό συμβαίνει διότι η διατομή του χαλκού στο τύλιγμα εξαρτάται άμεσα από τα ρεύματα που διαρρέουν τα πηνία και τα οποία αυξάνουν πολύ στις μεγαλύτερες ισχύεις.



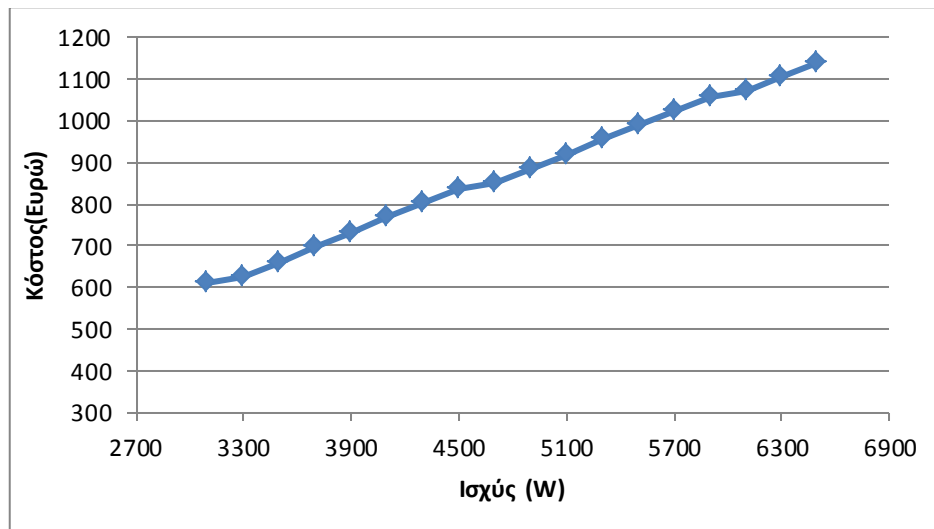
Σχήμα 5.29: Ο αριθμός των σπειρών σε κάθε πηνίο και το εμβαδό διατομής τους συναρτήσει της ισχύος

Ενδεικτικά σχεδιάζουμε τη γεννήτρια των 6,5 kW στο FEMM με τα χαρακτηριστικά που παρουσιάστηκαν παραπάνω και παρατηρούμε το μαγνητικό πεδίο στο εσωτερικό της.



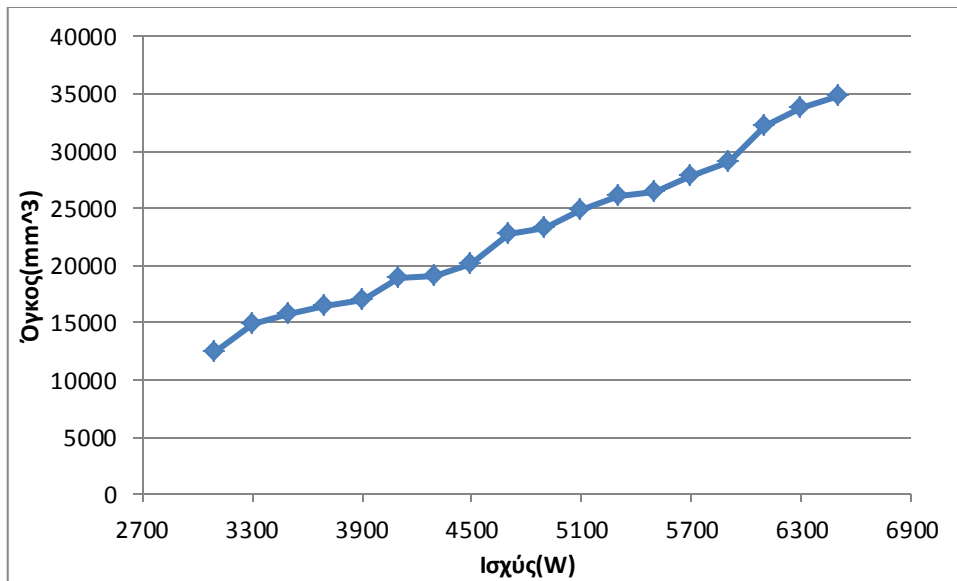
Σχήμα: Στιγμιότυπο FEMM

Στο επόμενο σχήμα φαίνεται το συνολικό κόστος κάθε βέλτιστης γεννήτριας στο εύρος της ισχύος. Με δεδομένο ότι το κόστος αποτέλεσε και το κριτήριο της βελτιστοποίησής μας, τα τιμές αυτές είναι και η φτηνότερες δυνατές για κατασκευή μιας γεννήτριας σε αυτές τις ισχύεις, πάντα βελτιστοποιώντας τις διαστάσεις του μαγνήτη. Το κόστος για την κατασκευή μιας γεννήτριας 3kW είναι 600euro, ενώ για μια γεννήτρια 6,5kW σχεδόν διπλασιάζεται φτάνοντας λίγο κάτω από τα 1200 euro.

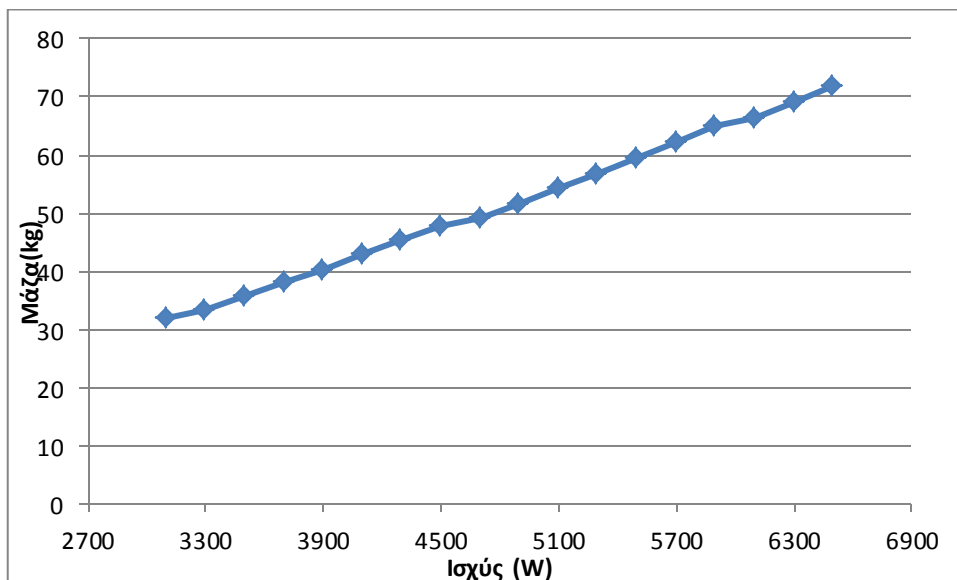


Σχήμα 5.30: Το συνολικό κόστος κατασκευής των βέλτιστων διατάξεων συναρτήσει της ισχύος

Στα δύο παρακάτω σχήματα βλέπουμε την αύξηση του όγκου και της μάζας των βέλτιστων διατάξεων όσο αυξάνει η επιθυμητή ισχύς. Όπως έχουμε αναφέρει, τα μεγέθη αυτά μπορούν να αποτελέσουν κριτήριο βελτιστοποίησης σε εφαρμογές χαμηλού κόστους, καθώς κρίνουν την ευκολία της κατασκευής. Τα μεγέθη αυτά αυξάνουν ανάλογα με την ισχύ, δηλαδή για διπλασιασμό της ισχύος οδηγούμαστε σε διπλασιασμό της μάζας και του όγκου.

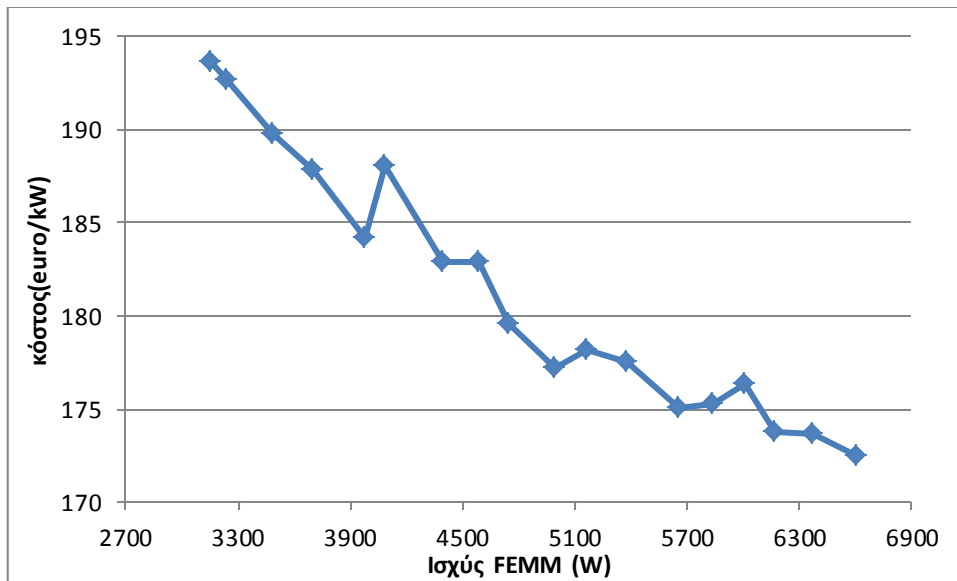


Σχήμα 5.31: Ο όγκος συναρτήσσει της ισχύος



Σχήμα 5.32: Η μάζα συναρτήσσει της ισχύος

Τέλος, στο παρακάτω σχήμα, βλέπουμε πως μεταβάλλεται το κόστος ανα kW ισχύος σε σχέση με την ισχύ που προκύπτει μετά την προσομοίωση στο FEMM των γεννητριών. Όπως είναι λογικό, το κόστος αυτό μειώνεται όσο αυξάνεται η ισχύς της διάταξης ξεκινώντας από τα 194 euro/kW περίπου και φτάνοντας στα 172 euro/kW για τη γεννήτριας των 6,5 kW.

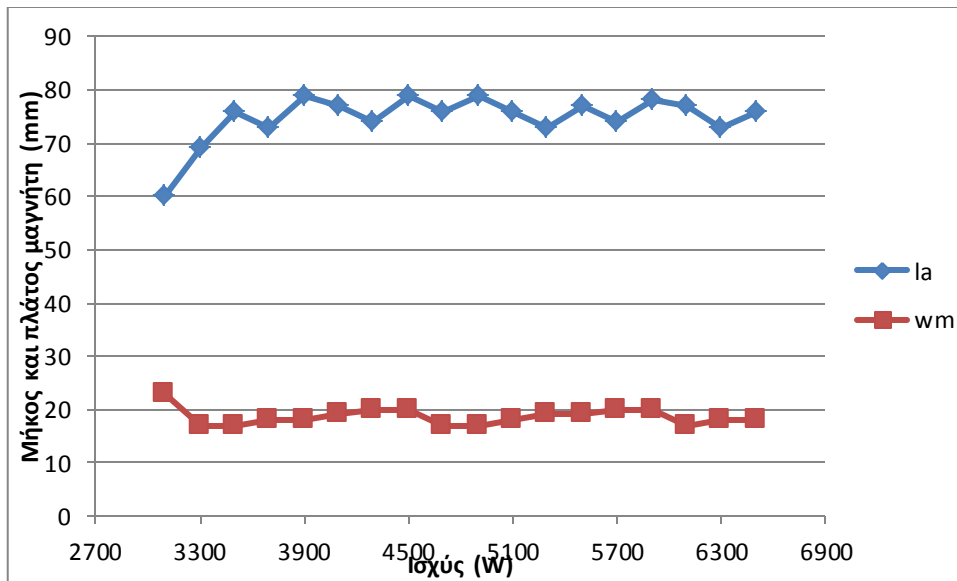


Σχήμα 5.33: Το κόστος ανα kW ισχύος συναρτήσει της προσομοιούμενης στο FEMM ισχύος

5.8. Βελτιστοποίηση διαστάσεων μαγνήτη βαθμού N45 με κριτήριο τον ελάχιστο όγκο

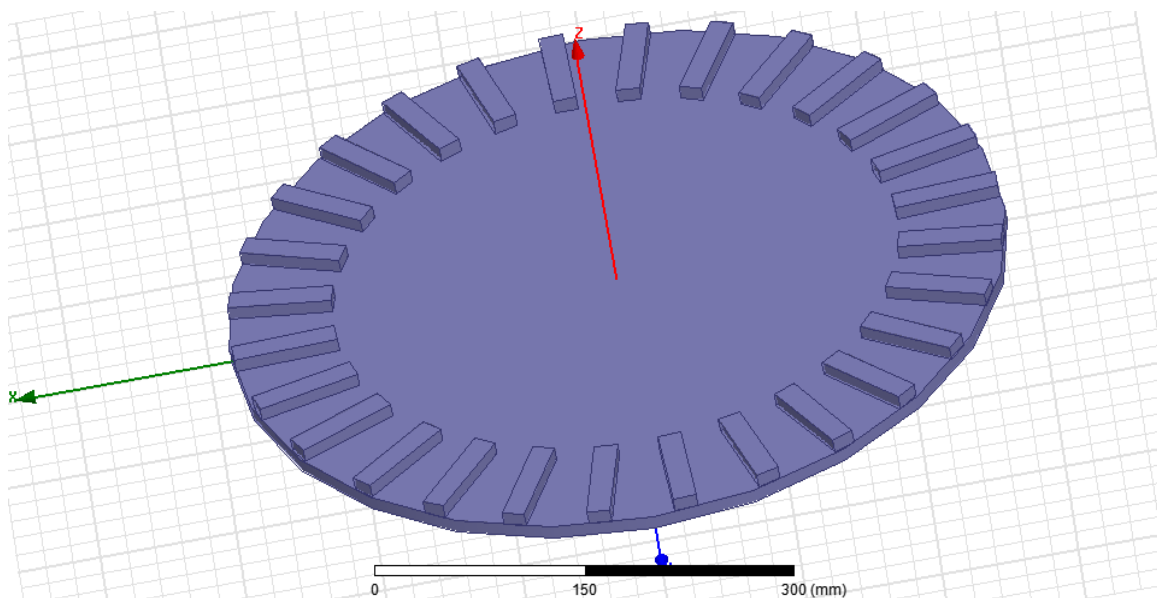
Για τον επιλεγμένο βαθμό μαγνήτη N45, καθώς και για την επιλεγμένη συχνότητα των 50Hz, βελτιστοποιούμε τις διαστάσεις του μαγνήτη, w_m και l_a , με κριτήριο τον ελάχιστο όγκο. Όπως και πριν βρίσκουμε τις βέλτιστες διαστάσεις μαγνήτη, σχεδιάζουμε και προσομοιώνουμε τη γεννήτρια για κάθε ισχύ, σε όλο το εύρος ισχύος που μελετάμε. Η επιλογή του βαθμού N45 για τη βελτιστοποίηση όγκου, πέρα από το ότι ο βαθμός αυτός επιλέχθηκε ως ιδανικός με βάση τη βελτιστοποίηση κόστους, γίνεται διότι οι ισχυρότεροι μαγνήτες οδηγούν και σε μικρότερες ακτίνες των γεννητριών, όπως είδαμε και στα αντίστοιχα διαγράμματα, αφού προσφέρουν μεγαλύτερη πυκνότητα ισχύος. Το γεγονός αυτό προκρίνει τον ισχυρότερο μαγνήτη έναντι των άλλων σε μια εφαρμογή που μας ενδιαφέρει η μείωση του όγκου.

Παρακάτω θα παρουσιάσουμε τα χαρακτηριστικά των γεννητριών που προέκυψαν από τη βελτιστοποίηση όγκου σε σύγκριση με τις αντίστοιχες τιμές που παρουσιάσαμε στην προηγούμενη παράγραφο. Αρχικά θα δούμε τις διαστάσεις του μαγνήτη οι οποίες είναι και μεταβλητές της βελτιστοποίησής μας. Παρατηρούμε ότι η διάταξη των μαγνητών στη γεννήτρια έχει αλλάξει και πλέον η μεγαλύτερη διάσταση είναι το μήκος τους (l_a), το οποίο κυμαίνεται από 70 έως 80 mm και μόνο στις μικρότερες ισχύεις παίρνει τιμές από 60 έως 70 mm. Το πλάτος του μαγνήτη, που είναι πλέον και η μικρότερη διάσταση κυμαίνεται μεταξύ 17 και 20 mm έχοντας πολύ μικρή διακύμανση και μένοντας σχεδόν σταθερό για όλο το εύρος της ισχύος ενώ μόνο στα 3 kW παίρνει την τιμή 23 mm.



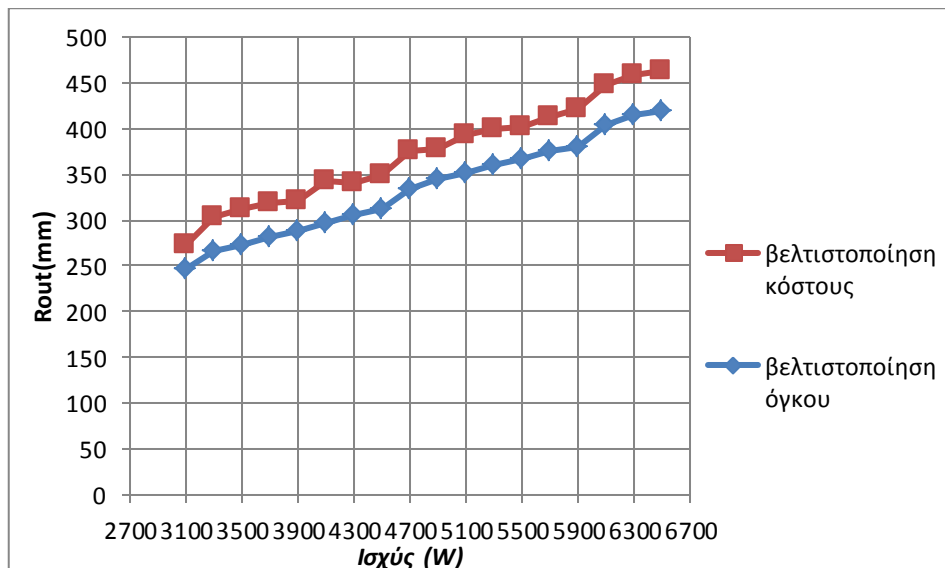
Σχήμα 5.34: Οι διαστάσεις του μαγνήτη, w_m και l_a , συναρτήσει της ισχύος

Όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα, οι βέλτιστοι μαγνήτες στη βελτιστοποίηση όγκου είναι μακρόστενοι και τοποθετούνται κάθετα, αυξάνοντας το ενεργό μήκος της γεννήτριας και μειώνοντας όπως θα δούμε την εξωτερική ακτίνα. Στο σχήμα αυτό έχουμε σχεδιάσει τον ένα δίσκο του δρομέα με τους μαγνήτες τοποθετημένους σε αυτόν για ισχύ 4,7 kW. Οι πόλοι στην ισχύ αυτή είναι 28 και άρα και οι μαγνήτες σε κάθε δίσκο θα είναι 28.



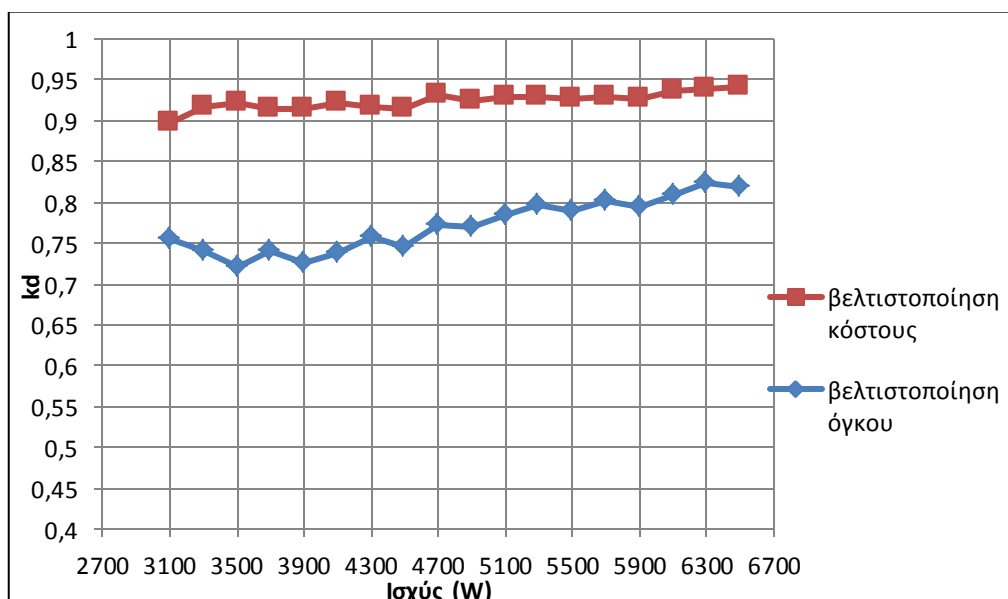
Σχήμα 5.35: Ο ένας δίσκος του δρομέα της γεννήτριας 4,7 kW, με τοποθετημένους τους μαγνήτες

Η αύξηση του l_a και άρα του ενεργού μήκους της γεννήτριας οδηγεί σε καλύτερη “αξιοποίηση” του διαθέσιμου χώρου και άρα σε μείωση της εξωτερικής ακτίνας όπως φαίνεται και στο επόμενο σχήμα. Πλέον οι ακτίνες των γεννητριών κυμαίνονται από 25 έως 42 cm οδηγώντας όπως θα δούμε σε μείωση του όγκου που είναι και το ζητούμενο αυτής της προσέγγισης.



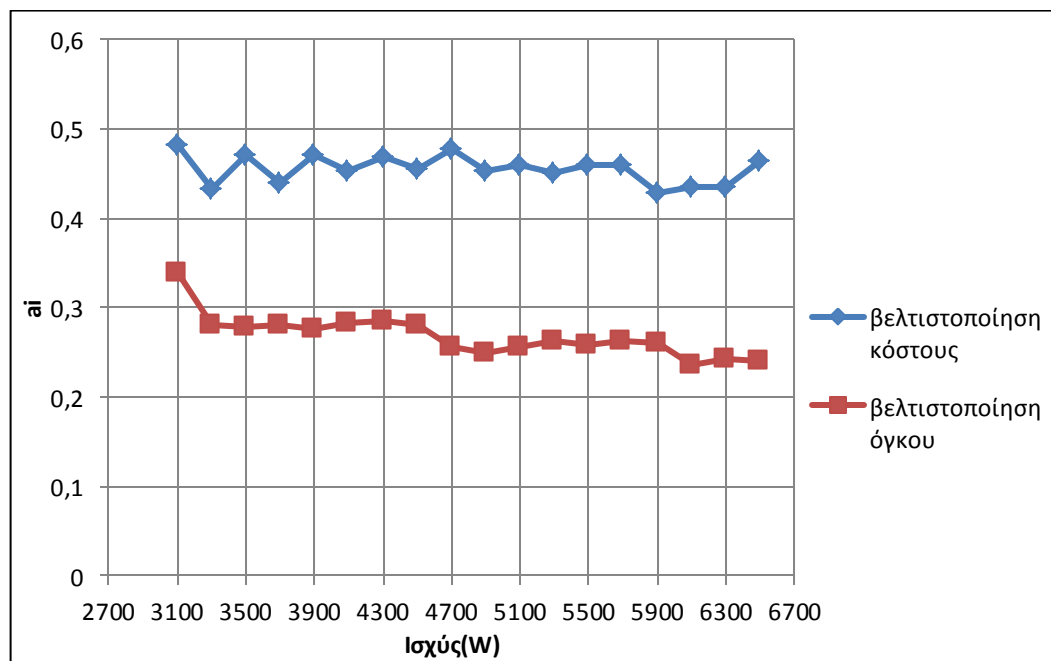
Σχήμα 5.36: Οι εξωτερικές ακτίνες των γεννητριών για τις δύο βελτιστοποιήσεις συναρτήσει της ισχύος

Η αύξηση του l_a οδηγεί ακόμα σε μείωση του συντελεστή k_d , αφού πλέον η εσωτερική ακτίνα R_{in} , διαφέρει πολύ από την εξωτερική, R_{out} με αποτέλεσμα ο λόγος τους να κυμαίνεται μεταξύ 0,72 και 0,82 και να μην ξεπερνάει το 0,9 όπως συμβαίνει όταν αναζητούμε το ελάχιστο κόστος.



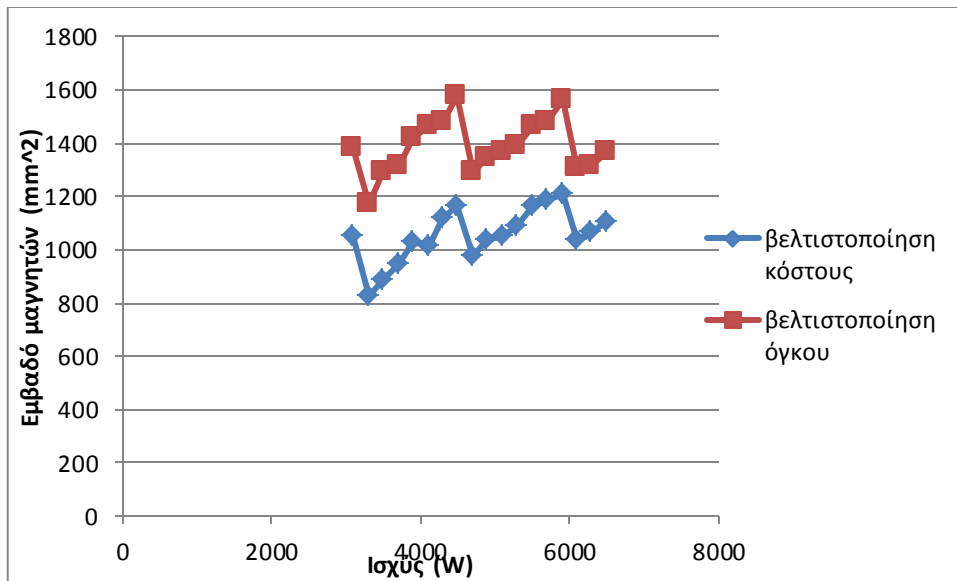
Σχήμα 5.37: Ο λόγος εσωτερικής προς εξωτερική ακτίνα k_d , για τις δύο βελτιστοποιήσεις συναρτήσει της ισχύος

Η παράλληλη μείωση του πλάτους w_m , των μαγνητών έχει σαν αποτέλεσμα τη μείωση και του συντελεστή a_i , δηλαδή του λόγου πλάτους μαγνήτη προς πολικό βήμα, καθώς ο μαγνήτης καταλαμβάνει μικρότερο μέρος του πολικού βήματος. Τώρα το a_i παίρνει τιμές από 0,3 για τις μικρότερες ισχύες ενώ μειώνεται στις μεγαλύτερες ισχύες γύρω στο 0,25 καθώς το πολικό βήμα γίνεται μεγαλύτερο λόγω αύξησης της εξωτερικής ακτίνας.

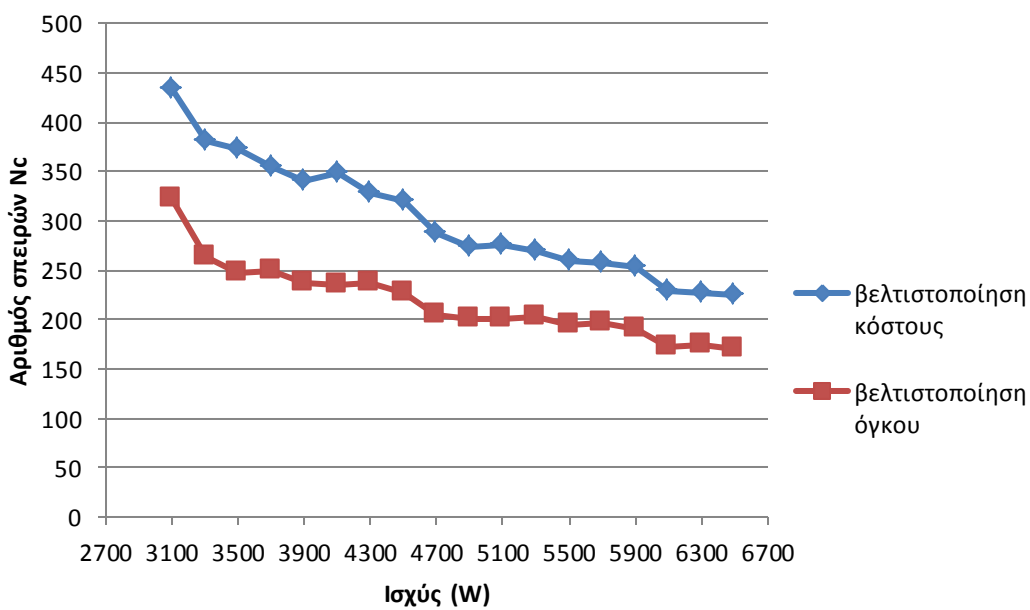


Σχήμα 5.38: Ο λόγος πλάτους μαγνήτη προς πολικό βήμα, a_i για τις δύο βελτιστοποιήσεις συναρτήσει της ισχύος

Στα δύο επόμενα διαγράμματα βλέπουμε πως αυξάνεται το εμβαδό των μαγνητών σε σχέση με την προηγούμενη βελτιστοποίηση που κάναμε, ενώ παράλληλα μειώνονται οι σπείρες ανα πηνίο λόγω της αύξησης του μαγνητικού υλικού αφού το πάχος των μαγνητών διατηρείται πάντα σταθερό. Συγκεκριμένα, παρατηρούμε μια αύξηση στο εμβαδό των μαγνητών της τάξης των 400 mm², και μια μείωση στον αριθμό των σπειρών κατά 100 ανα πηνίο για τις μικρότερες ισχύες και κατά 50 ανα πηνίο για τις μεγαλύτερες.

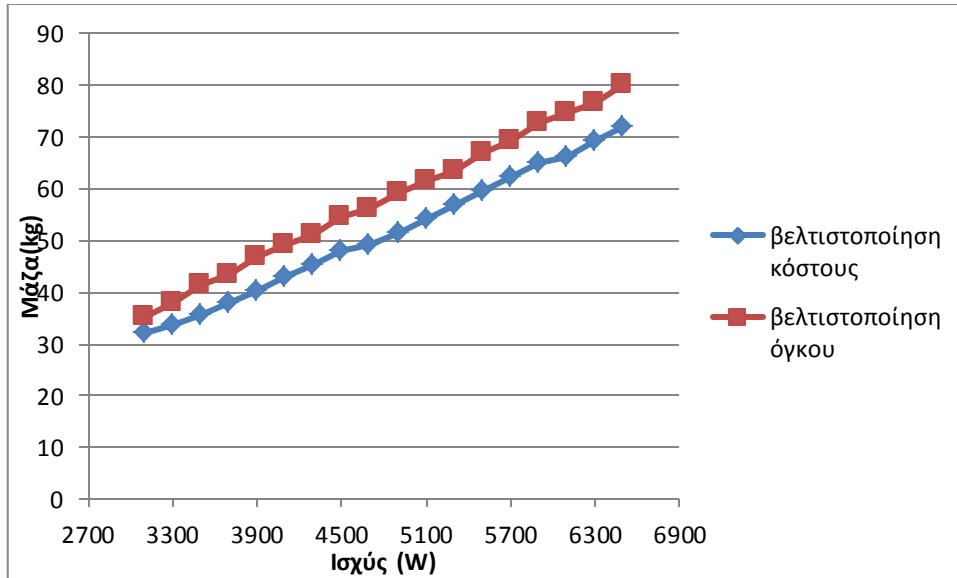


Σχήμα 5.39: Το εμβαδό των μαγνητών για τις δύο βελτιστοποιήσεις συναρτήσει της ισχύος



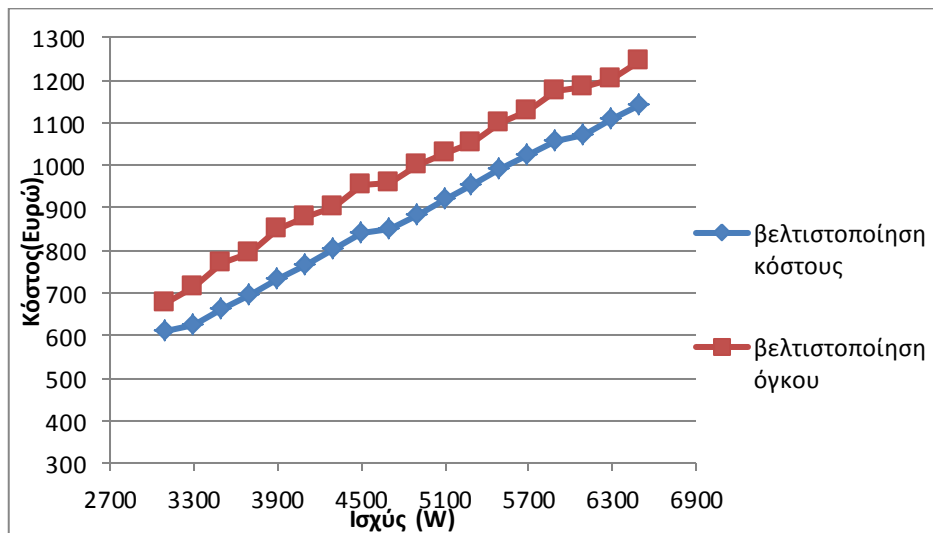
Σχήμα 5.40: Ο αριθμός των σπειρών ανα πηνίο για τις δύο βελτιστοποιήσεις συναρτήσει της ισχύος

Το ισχυρότερο μαγνητικό πεδίο που δημιουργείται στη γεννήτρια λόγω της αύξησης του μαγνητικού υλικού που χρησιμοποιείται οδηγεί σε ισχυρότερες ελκτικές δυνάμεις μεταξύ των δίσκων του δρομέα και άρα σε περισσότερο σίδηρο στο δρομέα. Καθώς ο σίδηρος είναι το βαρύτερο υλικό της κατασκευής οδηγούμαστε σε πιο βαριές συνολικά γεννήτριες, με τη μεγαλύτερη γεννήτρια των 6,5 kW να ζυγίζει πλέον 80 kg.

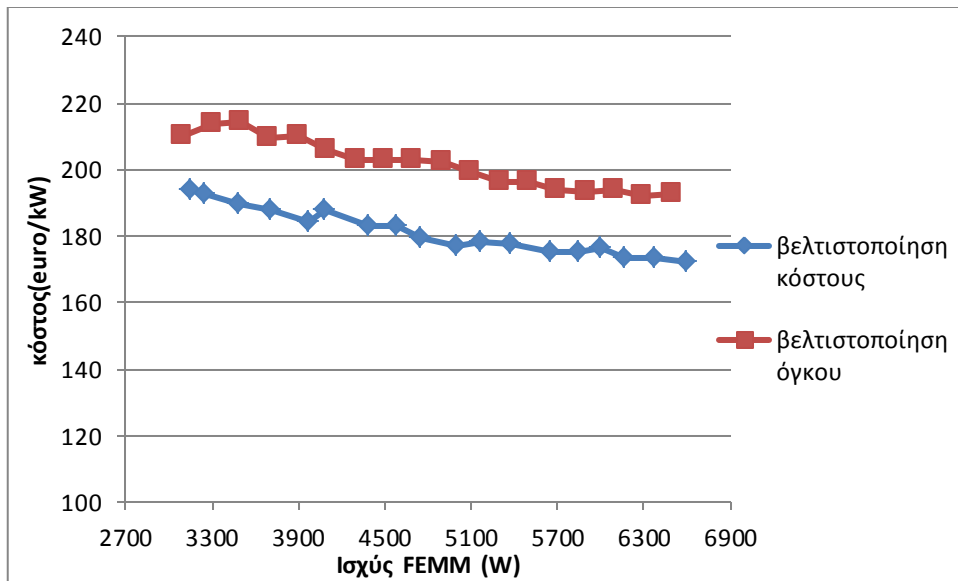


Σχήμα 5.41: Η μάζα των γεννητριών για τις δύο βελτιστοποιήσεις συναρτήσει της ισχύος

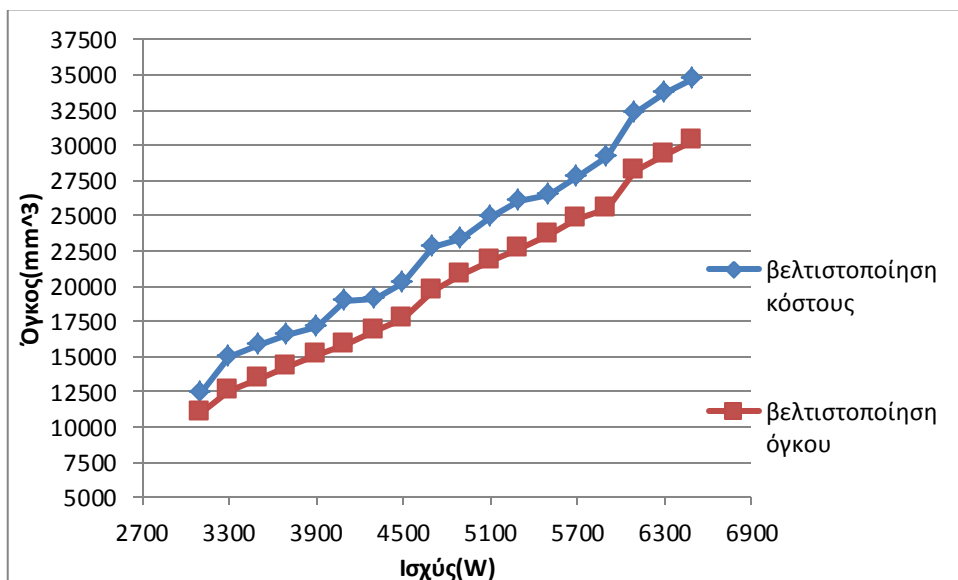
Τέλος παραθέτουμε τα διαγράμματα του κόστους, του κόστους ανα kW ισχύος και του όγκου που αποτέλεσαν και τα κριτήρια των 2 βελτιστοποιήσεων μας. Όπως αναμέναμε οι γεννήτριες που προέκυψαν από τη βελτιστοποίηση όγκου είναι ακριβότερες κατά 100 euro περίπου ή κατά 20 euro/kW σε όλο το εύρος της ισχύος από τις αντίστοιχες για τη βελτιστοποίηση κόστους. Από την άλλη όμως εμφανίζονται πιο μικρές σε όγκο κατά 2500 mm³ στις μικρότερες ισχύεις και κατά 5000mm³ στις μεγαλύτερες ισχύεις.



Σχήμα 5.42: Το συνολικό κόστος των γεννητριών για τις δύο βελτιστοποιήσεις συναρτήσει της ισχύος



Σχήμα 5.43: Το κόστος ανα kW παραγόμενης ισχύος για τις δύο βελτιστοποιήσεις συναρτήσει της ισχύος



Σχήμα 5.44: Ο συνολικός όγκος των γεννητριών για τις δύο βελτιστοποιήσεις συναρτήσει της ισχύος

Συμπεράσματα:

A) Στη βελτιστοποίηση όγκου βλέπουμε πως επιτυγχάνεται καλύτερη αξιοποίηση του χώρου της γεννήτριας με αύξηση του ενεργού της μήκους και ταυτόχρονα η αλλαγή στην τοποθέτηση των μαγνητών οδηγεί στη δυνατότητα μείωσης των ακτίνων καθώς πλέον οι ίδιοι μαγνήτες χωράνε σε μικρότερο χώρο.

B) Στη βελτιστοποίηση αυτή δε λαμβάνεται υπόψη το κόστος των τελικών διατάξεων, κάτι που έχει σαν αποτέλεσμα τη χρήση περισσότερου μαγνητικού υλικού και λιγότερου χαλκού στα τυλίγματα. Αυτό δε συνέβαινε στην προηγούμενη

βελτιστοποίηση, γιατί με δεδομένο ότι οι μαγνήτες είναι το πιο ακριβό υλικό της κατασκευής επιδιωκόταν η παραγωγή της επιθυμητής ισχύος με όσο το δυνατόν μικρότερους μαγνήτες και μεγαλύτερα πηνία (με περισσότερες σπείρες). Έτσι στη βελτιστοποίηση όγκου το ισχυρότερο μαγνητικό πεδίο που δημιουργείται και οι μικρότερες ακτίνες οδηγούν σε μεγαλύτερη πυκνότητα ισχύος αλλά ταυτόχρονα και σε βαρύτερες κατασκευές.

Κεφάλαιο 6 : Εύρεση καθολικού μαγνήτη στο εύρος ισχύος 3-6,5 kW

6.1 Εισαγωγή

Στα πλαίσια της εργασίας αυτής, αναζητούμε τις διαστάσεις εκείνες που θα μας δώσουν το βέλτιστο μαγνήτη ο οποίος θα μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε όλο το εύρος της ισχύος που μελετάμε. Όπως και πριν, βασικό κριτήριο της βελτιστοποίησης είναι το κόστος, ενώ στη συνέχεια χρησιμοποιούμε σαν κριτήριο και τον όγκο. Η διαδικασία που ακολουθούμε για την εύρεση του καθολικού μαγνήτη σε κάθε περίπτωση είναι η εξής:

Αρχικά μεταβάλλουμε εξωτερικά τις διαστάσεις του μαγνήτη, w_m και l_a , που είναι και οι μεταβλητές που θέλουμε να βελτιστοποιήσουμε. Παίρνουν ένα μεγάλο εύρος τιμών ώστε να καλύψουμε όλους τους πιθανούς συνδυασμούς τους. Στη συνέχεια μεταβάλλουμε την ισχύ εξόδου που θέλουμε να έχει κάθε φορά η γεννήτρια και για κάθε ισχύ μεταβάλλουμε την εξωτερική ακτίνα. Οι γεννήτριες που σχεδιάζονται ελέγχονται έπειτα με βάση τους περιορισμούς που έχουμε περιγράψει στο προηγούμενο κεφάλαιο και αν δεν τους ικανοποιούν απορρίπτονται. Από τις γεννήτριες που μένουν, επιλέγουμε τη φθηνότερη για κάθε ισχύ. Έτσι, για δεδομένες διαστάσεις μαγνήτη κάθε φορά, έχουμε σχεδιάσει τις φθηνότερες γεννήτριες σε όλο το εύρος της ισχύος. Στο σημείο αυτό, υπολογίζουμε το εμβαδό της καμπύλης του κόστους των γεννητριών αυτών συναρτήσει της ισχύος, που θα χρησιμοποιηθεί στη συνέχεια στη διαδικασία της επιλογής του καθολικού μαγνήτη. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται για όλους τους συνδυασμούς w_m και l_a , οπότε στο τέλος για κάθε μαγνήτη έχουμε κρατήσει το εμβαδό της καμπύλης του κόστους των φθηνότερων διατάξεων που σχεδιάζονται με χρήση αυτού, συναρτήσει της ισχύος εξόδου. Τέλος, συγκρίνοντας τα εμβαδά αυτά βρίσκουμε το ελάχιστο και επιλέγουμε το μαγνήτη που μας το δίνει, καθώς ελάχιστο εμβαδό σε αυτή την καμπύλη σημαίνει ότι ο συγκεκριμένος μαγνήτης μας δίνει το ελάχιστο κόστος συνολικά σε όλο το εύρος της ισχύος. Οπότε τότε είμαστε σε θέση να προσομοιώσουμε τις διατάξεις που σχεδιάστηκαν με χρήση αυτού του μαγνήτη.

Η βελτιστοποίηση αυτή γίνεται για τους 3 βαθμούς μαγνήτη και για συχνότητες 40 και 50 Hz. Εμείς καλούμαστε να επιλέξουμε, όπως και πριν, το βαθμό μαγνήτη και τη συχνότητα που μας δίνουν τα καλύτερα αποτελέσματα με κριτήριο το ελάχιστο κόστος, αντικείμενο της επόμενης παραγράφου.

6.2. Επιλογή βαθμού μαγνήτη για χρήση ως καθολικού καθώς και επιθυμητής συχνότητας

Όπως εξηγήσαμε στην προηγούμενη παράγραφο, η βελτιστοποίηση για την εύρεση του καθολικού μαγνήτη επαναλαμβάνεται για βαθμούς μαγνήτη N40, N42 και N45

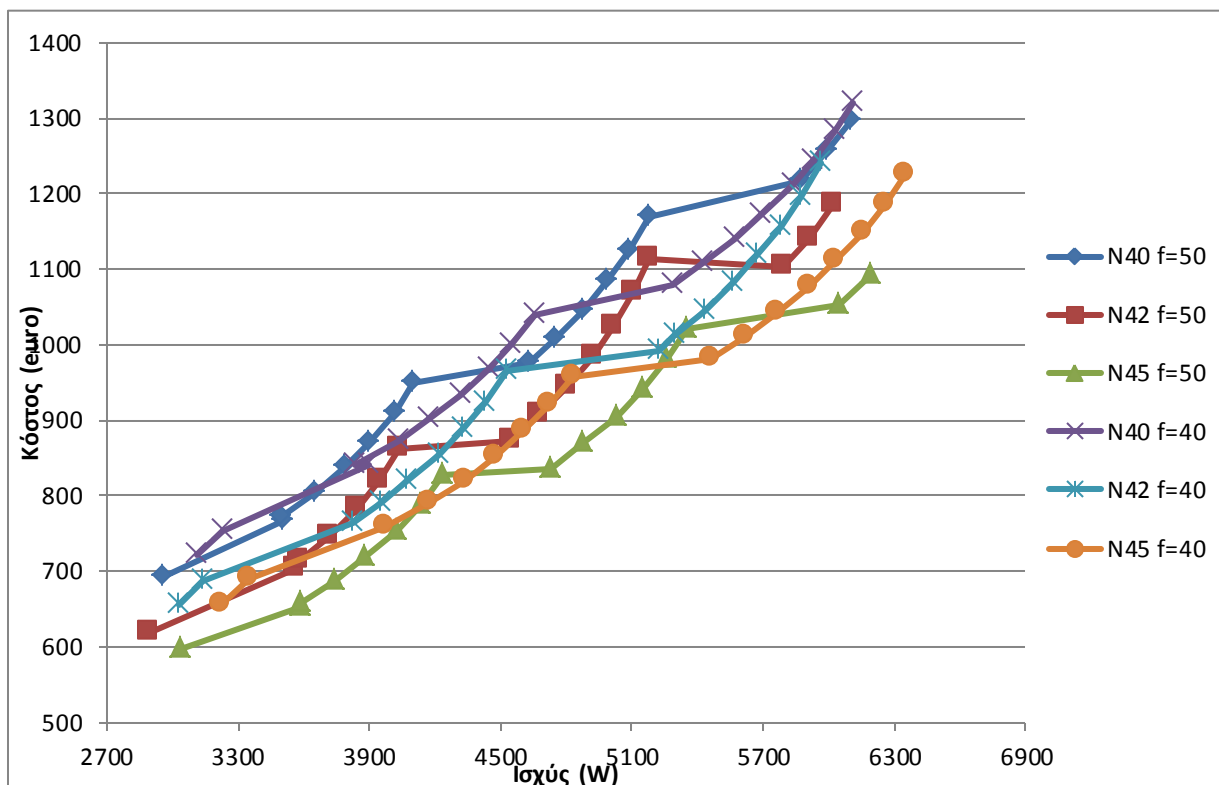
καθώς και για συχνότητες 40 και 50 Hz. Αρχικά παρουσιάζουμε τους μαγνήτες που έχουν προκύψει.

	f=50Hz			f=40Hz		
	N40	N42	N45	N40	N42	N45
la x wm (mm x mm)	28*39	28*38	27*38	33*49	32*48	32*47
Εμβαδό (mm ²)	1092	1064	1026	1617	1536	1504

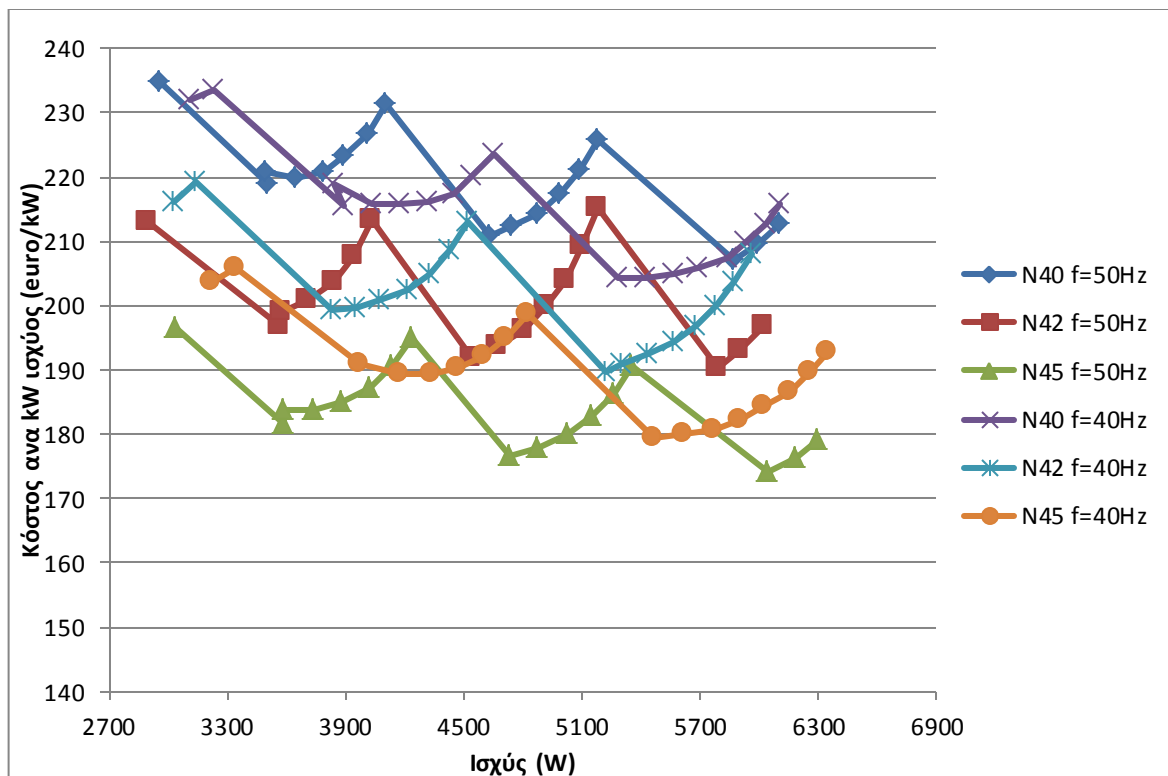
Πίνακας 6.1: Οι διαστάσεις των καθολικών μαγνητών

Παρατηρούμε πως οι διαστάσεις του καθολικού μαγνήτη μειώνονται όσο πάμε σε πιο ισχυρό μαγνήτη για την ίδια συχνότητα. Επίσης στα 40Hz επειδή οι πόλοι και άρα ο αριθμός των μαγνητών στις γεννήτριες μειώνονται αυξάνονται πολύ οι οι διαστάσεις τους.

Στη συνέχεια καλούμαστε να επιλέξουμε το βαθμό μαγνήτη και τη συχνότητα λειτουργίας που μας δίνουν τις πιο φθηνές διατάξεις σε όλο το εύρος της ισχύος. Παρακάτω συγκρίνονται οι καμπύλες κόστους και κόστους ανα kW ισχύος των διατάξεων συναρτήσει της ισχύος για όλους τους βαθμούς μαγνήτη που χρησιμοποιούμε στις δύο συχνότητες. Συνολικά συγκρίνουμε 6 καμπύλες.



Σχήμα 6.1: Το κόστος των γεννητριών με χρήση καθολικού μαγνήτη για όλους τους βαθμούς και συχνότητες συναρτήσει της ισχύος



Σχήμα 6.2: Το κόστος ανα kW ισχύος των γεννητριών με χρήση καθολικού μαγνήτη για όλους τους βαθμούς και συχνότητες συναρτήσει της ισχύος

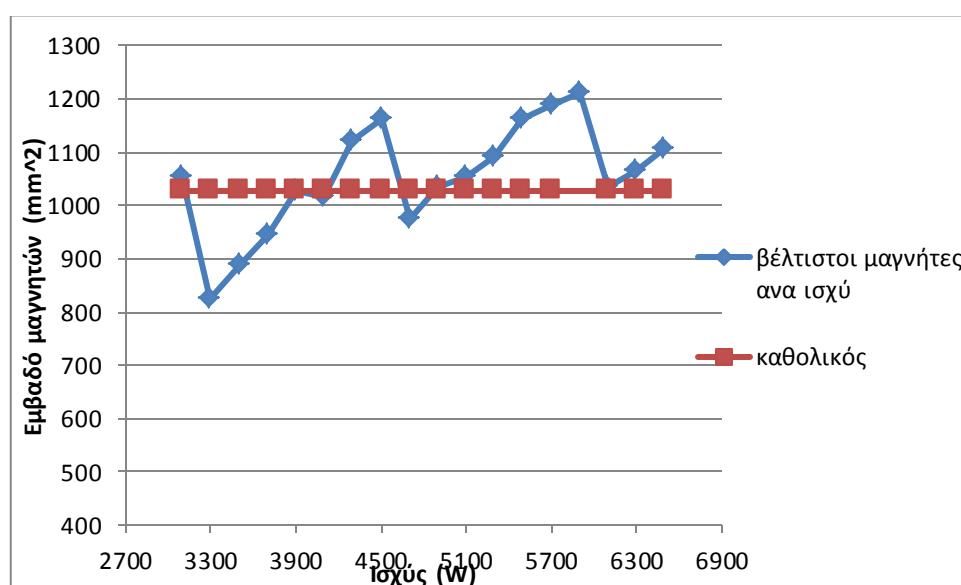
Τα διαγράμματα αυτά μας οδηγούν στην επιλογή του βαθμού N45 σε συχνότητα 50 Hz, καθώς η καμπύλη του κόστους των διατάξεων που σχεδιάζονται σε αυτή τη συχνότητα με χρήση αυτού του μαγνήτη είναι πιο κάτω από τις υπόλοιπες ενώ και το εμβαδό της είναι μικρότερο από το εμβαδό όλων των υπολοίπων. Τα σημεία που βλέπουμε ότι η καμπύλη του κόστους για μαγνήτη N45 αλλά συχνότητα 40Hz, βρίσκεται πιο κάτω από αυτή που επιλέξαμε οφείλονται στο ότι στα 40Hz η αλλαγή των πόλων γίνεται σε διαφορετικές ισχείς οπότε τα σκαλοπάτια στη γραφική του κόστους λόγω της αλλαγής των πόλων συμβαίνουν σε διαφορετικά σημεία. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα οι δύο γραφικές να επικαλύπτονται σε αυτά τα σημεία.

Αν θέλουμε να κατατάξουμε τους βαθμούς μαγνήτη με κριτήριο το ελάχιστο κόστος, μετά το N45 επιλέγουμε το N42 και τέλος το N40. Βλέπουμε έτσι ότι η χρήση ισχυρότερων μαγνητών ενδείκνυται σε εφαρμογές χαμηλού κόστους, καθώς όπως είχαμε δει και στο προηγούμενο κεφάλαιο, οδηγεί σε φθηνότερες συνολικά διατάξεις σε αυτό το εύρος ισχύος.

6.3. Σύγκριση διατάξεων με χρήση καθολικού μαγνήτη και με χρήση βέλτιστου μαγνήτη για κάθε ισχύ

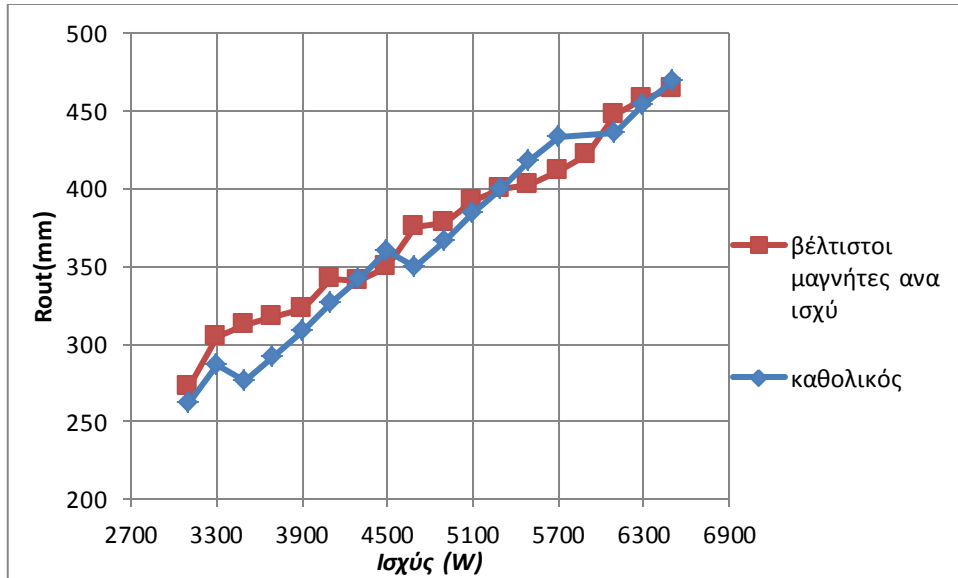
Αφού επιλέξαμε το βαθμό μαγνήτη και τη συχνότητα, σε αυτή την παράγραφο θα συγκρίνουμε τα χαρακτηριστικά των διατάξεων που έχουν σχεδιαστεί με χρήση του καθολικού μαγνήτη (N45 στα 50Hz), με τις διατάξεις που είχαν προκύψει από την προηγούμενη βελτιστοποίηση όπου σε κάθε ισχύ βρήκαμε το βέλτιστο μαγνήτη.

Αρχικά παρουσιάζουμε το εμβαδό των μαγνητών που είναι και το βασικό στοιχείο που διαφοροποιεί τις δύο προσεγγίσεις στη βελτιστοποίηση. Βλέπουμε ότι το εμβαδό των βέλτιστων μαγνητών από την προηγούμενη βελτιστοποίηση άλλοτε είναι μεγαλύτερο και άλλοτε μικρότερο από το εμβαδό του καθολικού μαγνήτη. Το γεγονός αυτό δικαιολογεί και την εικόνα κάποιων από τα επόμενα διαγράμματα.

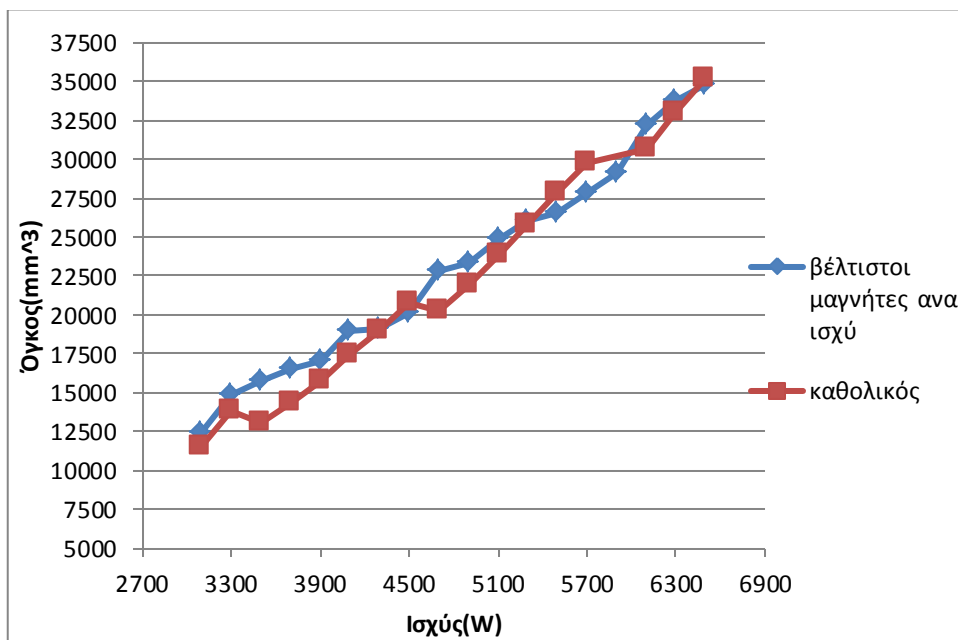


Σχήμα 6.3: Το εμβαδό του καθολικού και των βέλτιστων μαγνητών συναρτήσει της ισχύος

Στη συνέχεια βλέπουμε τη σχέση των εξωτερικών ακτίνων καθώς και του όγκου των γεννητριών. Οι διακυμάνσεις που παρατηρούμε μεταξύ των καμπυλών, οφείλονται στη διαφορά στο μέγεθος του μαγνήτη ανάλογα με την ισχύ. Έτσι στις περιπτώσεις όπου ο βέλτιστος μαγνήτης είναι μεγαλύτερος από τον καθολικό οδηγούμαστε και σε μεγαλύτερες ακτίνες και τελικά όγκο, και αντίστροφα.

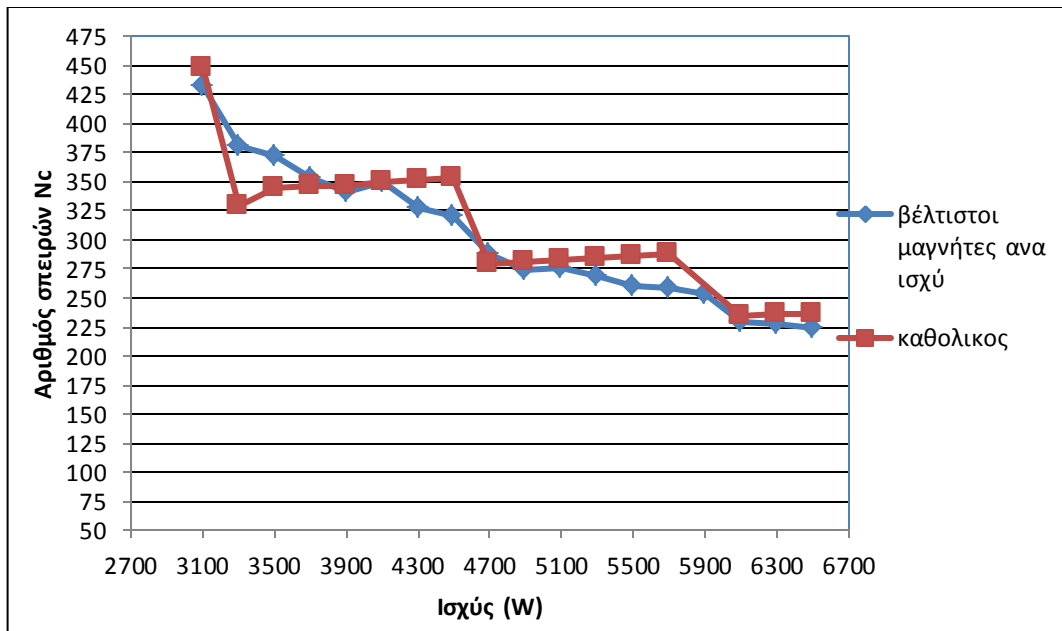


Σχήμα 6.4: Η εξωτερική ακτίνα των γεννητριών με χρήση καθολικού και βέλτιστων μαγνητών συναρτήσει της ισχύος



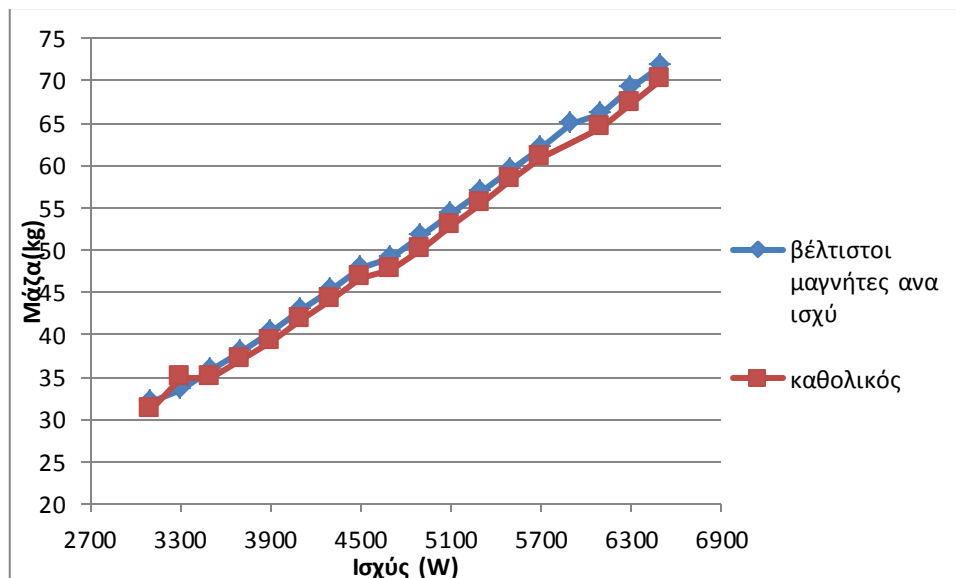
Σχήμα 6.5: Ο όγκος των γεννητριών με χρήση καθολικού και βέλτιστων μαγνητών συναρτήσει της ισχύος

Οι διακυμάνσεις στο μέγεθος των μαγνητών δικαιολογεί και τις διακυμάνσεις στον αριθμό των σπειρών ανα πηνίο. Εκεί που οι βέλτιστοι μαγνήτες είναι μικρότεροι από τον καθολικό παρατηρούμε μεγαλύτερο αριθμό σπειρών ανα πηνίο ώστε να έχουμε παραγωγή της επιθυμητής ισχύος.



Σχήμα 6.6: Ο αριθμός των σπειρών ανα πηγίο με χρήση καθολικού και βέλτιστων μαγνητών συναρτήσει της ισχύος

Η μάζα των γεννητριών με χρήση του καθολικού μαγνήτη σχεδόν είναι ίδια με τη μάζα των γεννητριών από την προηγούμενη βελτιστοποίηση και μόνο σε μεγαλύτερες ισχύεις εμφανίζονται κατά 1-2 kg πιο ελαφριές οι πρώτες.



Σχήμα 6.7: Η μάζα των γεννητριών με χρήση καθολικού και βέλτιστων μαγνητών συναρτήσει της ισχύος

Οι συντελεστές αι και kd παίρνουν σχεδόν τις ίδιες τιμές σε όλο το εύρος της ισχύος και για αυτό δεν παραθέτουμε τα αντίστοιχα διαγράμματα. Τέλος, συγκρίνοντας το κόστος των γεννητριών που προκύπτει από τις δύο προσεγγίσεις, βλέπουμε ότι οι διαφορές είναι ελάχιστες και τυχόν φτηνότερες γεννήτριες που προκύπτουν με χρήση

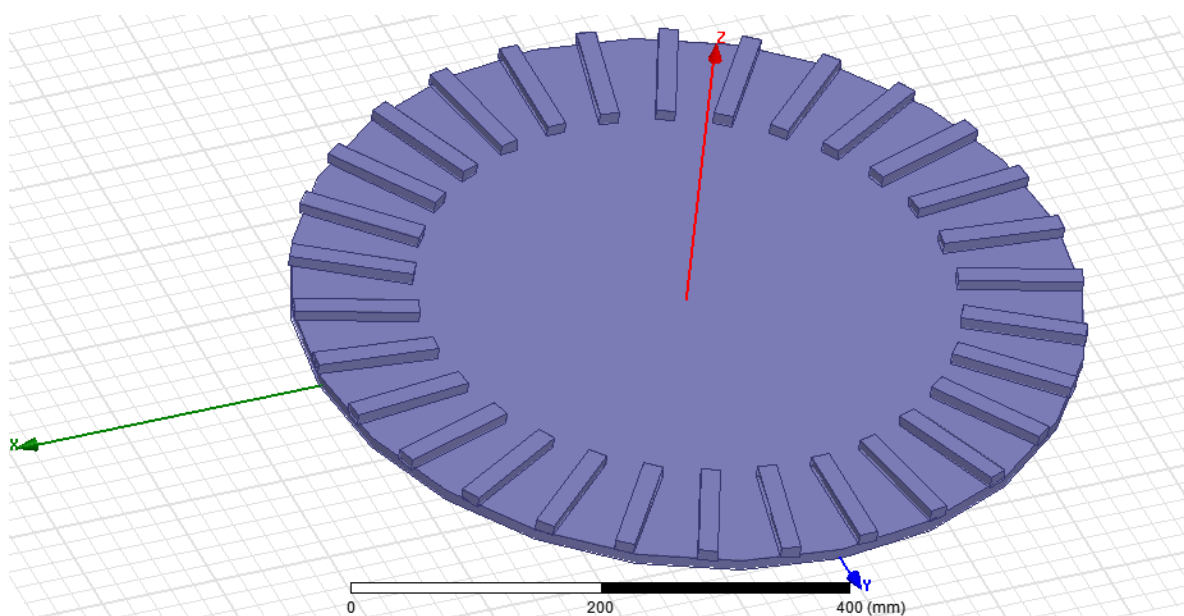
του καθολικού μαγνήτη σε κάποιες ισχύεις οφείλονται στη χαλάρωση των περιορισμών που έχουμε θέσει κατά την αναζήτηση του καθολικού μαγνήτη.

Συμπέρασμα: Από τη σύγκριση των δύο προσεγγίσεων βλέπουμε πως μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε τον καθολικό μαγνήτη στην κατασκευή γεννητριών σε αυτό το εύρος ισχύος καθώς τα χαρακτηριστικά των διατάξεων με χρήση αυτού είναι παρεμφερή με αυτά των διατάξεων από την προηγούμενη βελτιστοποίηση και με δεδομένο πως μας συμφέρει πολύ η χρήση ενός μόνο μαγνήτη γιατί μειώνεται πολύ το κόστος παραγωγής του και αγοράς του λόγω και των μεγάλων ποσοτήτων σε τυχόν παραγγελίες.

6.4. Σύγκριση διατάξεων με χρήση καθολικού μαγνήτη και με χρήση βέλτιστου μαγνήτη για κάθε ισχύ, με κριτήριο τον ελάχιστο όγκο

Στην παράγραφο αυτή παρουσιάζουμε τα αποτελέσματα που προέκυψαν κατά την εύρεση καθολικού μαγνήτη με κριτήριο τον ελάχιστο όγκο. Ο επιλεγμένος βαθμός μαγνήτη είναι και δω ο N45 και η συχνότητα λειτουργίας είναι τα 50Hz. Όπως είδαμε και στο προηγούμενο κεφάλαιο, ο καθολικός μαγνήτης που προκύπτει στη βελτιστοποίηση αυτή έχει διαφορετική διάταξη μέσα στη γεννήτρια, με το μήκος του l_a που είναι και το ενεργό μήκος της γεννήτριας να είναι η μεγαλύτερη διάσταση του μαγνήτη, ενώ το σχήμα του είναι πολύ μακρόστενο όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα. Στο σχήμα αυτό έχει σχεδιαστεί ο ένας δίσκος του δρομέα για τη γεννήτρια των 6,5 kW στον οποίο τοποθετούνται 32 μαγνήτες όσοι και οι πόλοι διαστάσεων:

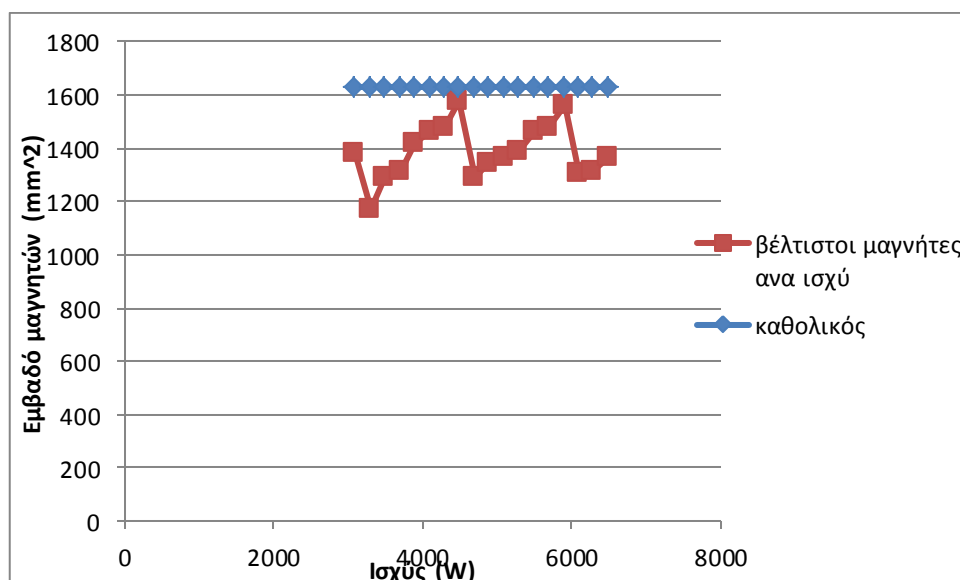
Καθολικός μαγνήτης: ($l_a \times w_m$) 102*16 mm



Σχήμα 6.8: Ο δίσκος της γεννήτριας 6,5 kW με τοποθετημένους τους καθολικούς μαγνήτες

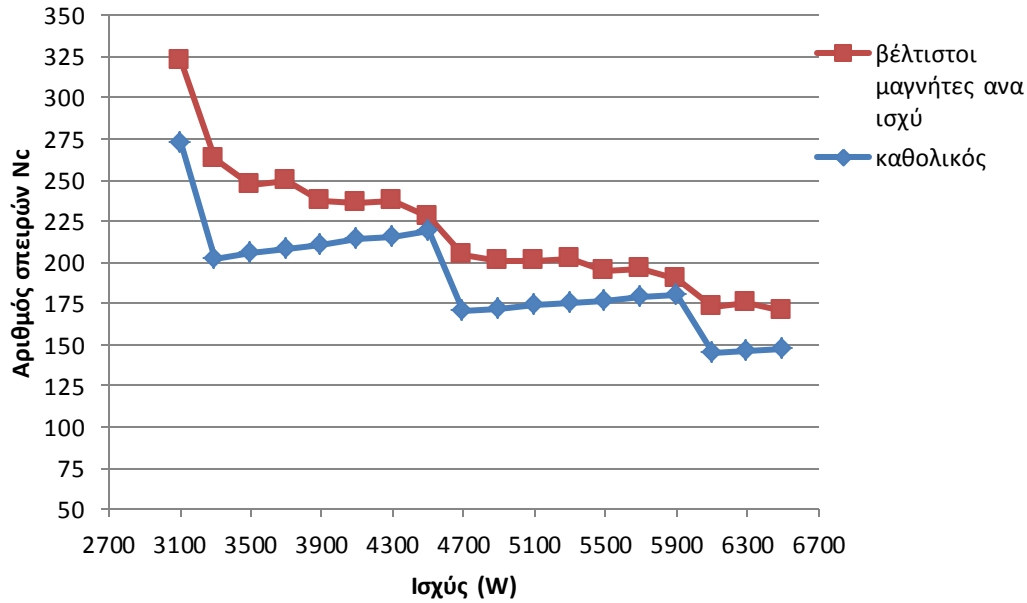
Στη συνέχεια συγκρίνονται τα χαρακτηριστικά των διατάξεων που σχεδιάστηκαν με χρήση αυτού του μαγνήτη με τα χαρακτηριστικά των διατάξεων που είχαν προκύψει

με χρήση του βέλτιστου μαγνήτη για κάθε ισχύ, με κριτήριο τον όγκο. Αρχικά συγκρίνουμε το εμβαδό του καθολικού μαγνήτη με τα εμβαδά των βέλτιστων μαγνητών. Βλέπουμε ότι σε όλο το εύρος της ισχύος οι βέλτιστοι μαγνήτες έχουν εμβαδό μικρότερο από του καθολικού μαγνήτη. Αυτό συμβαίνει διότι δε μας ενδιαφέρει το κόστος αλλά η ελαχιστοποίηση του όγκου η οποία επιτυγχάνεται συνολικά για όλες τις ισχύεις, με χρήση ενός μεγαλύτερου σε εμβαδό μαγνήτη και πολύ μακρόστενου αυξάνοντας έτσι το ενεργό μήκος της γεννήτριας.



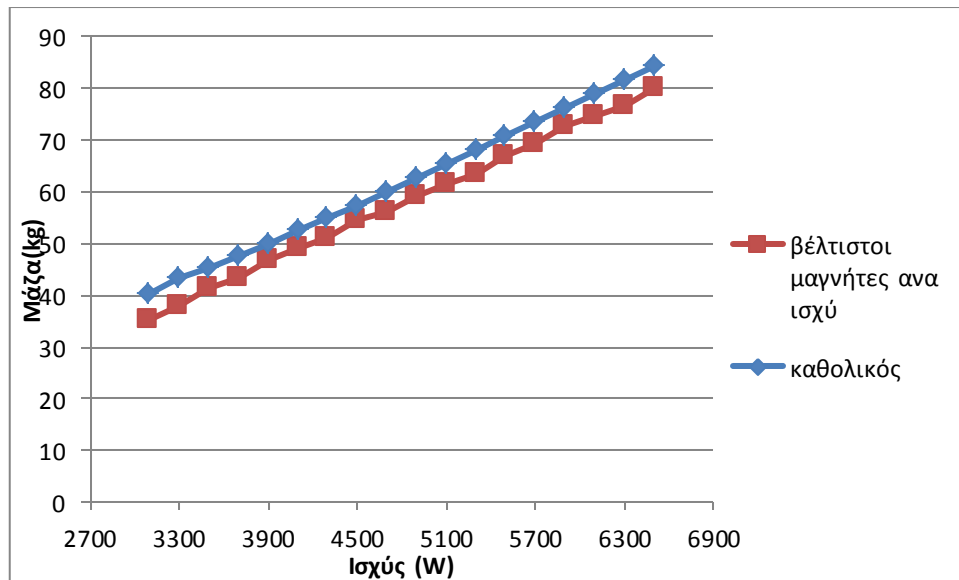
Σχήμα 6.9: Το εμβαδό του καθολικού και των βέλτιστων μαγνητών συναρτήσει της ισχύος

Η χρήση μεγαλύτερου μαγνήτη και άρα περισσότερου μαγνητικού υλικού οδηγεί σε μείωση του αριθμού των σπειρών ανα πηνίο κατά 50 σπείρες περίπου στις ισχύεις που υπάρχει και η μεγαλύτερη διαφορά στο εμβαδό των βέλτιστων μαγνητών σε σχέση με του καθολικού μαγνήτη. Η μείωση αυτή σημαίνει μείωση στον όγκο του χαλκού που χρησιμοποιείται στα τυλίγματα.



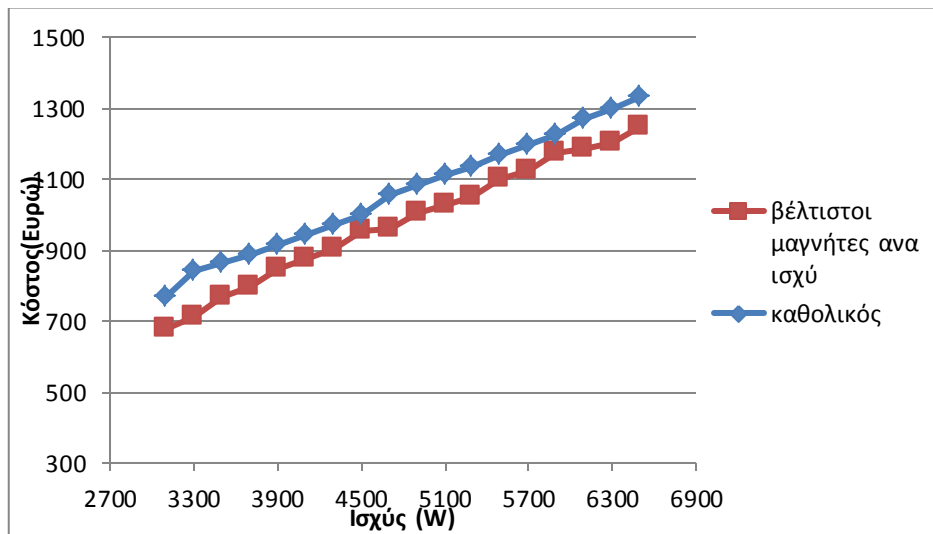
Σχήμα 6.10: Ο αριθμός των σπειρών ανα πηνίο με χρήση καθολικού και βέλτιστων μαγνητών συναρτήσει της ισχύος

Η αύξηση του μαγνητικού υλικού που χρησιμοποιείται στις γεννήτριες οδηγεί σε αύξηση του όγκου του σιδήρου που χρησιμοποιείται στους δίσκους του δρομέα λόγω των ισχυρότερων μαγνητικών δυνάμεων που αναπτύσσονται μεταξύ τους. Καθώς όμως ο σίδηρος είναι το βαρύτερο υλικό παρατηρούμε και αύξηση στις μάζες των γεννητριών με χρήση του καθολικού μαγνήτη κατά περίπου 5 Kg σε όλο το εύρος της ισχύος.

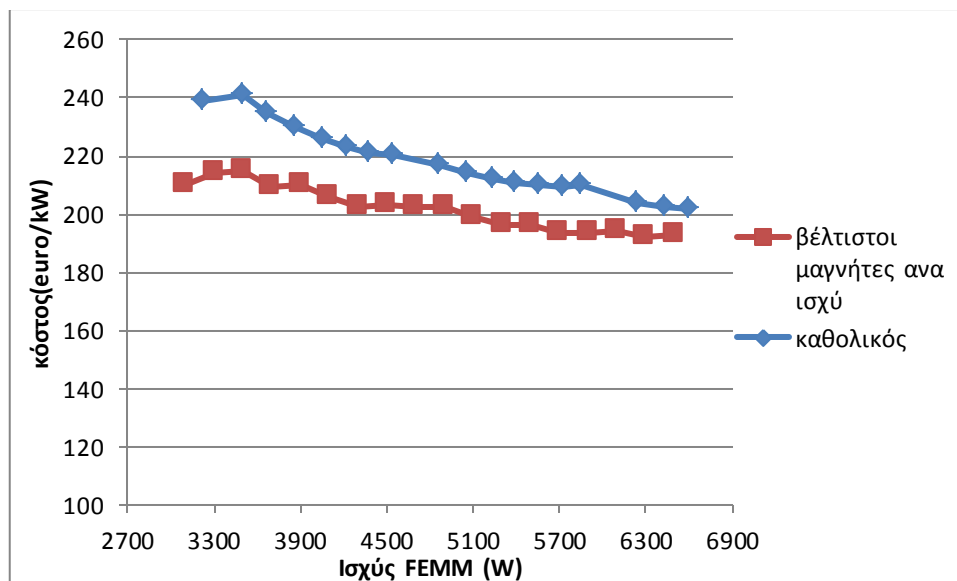


Σχήμα 6.11: Η μάζα των γεννητριών με χρήση καθολικού και βέλτιστων μαγνητών συναρτήσει της ισχύος

Η αύξηση του μαγνητικού υλικού που χρησιμοποιείται οδηγεί και σε αύξηση του κόστους των γεννητριών καθώς οι μαγνήτες είναι το πιο ακριβό υλικό στην κατασκευή. Η αύξηση αυτή είναι της τάξης των 100euro ή 25 euro/kW περίπου.

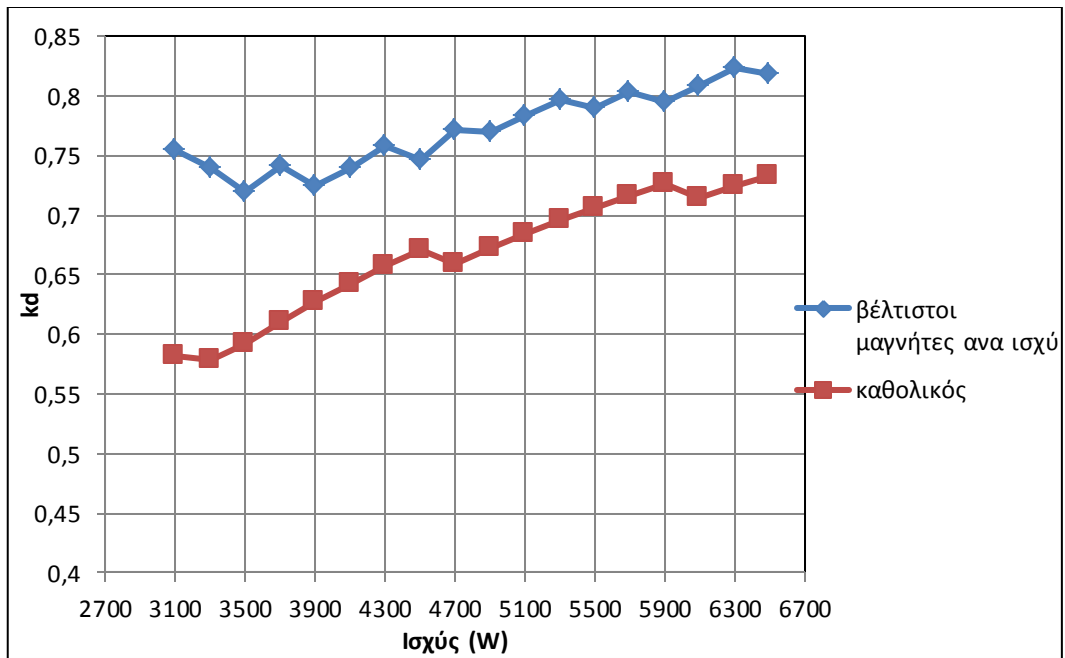


Σχήμα 6.12: Το συνολικό κόστος των γεννητριών με χρήση καθολικού και βέλτιστων μαγνητών συναρτήσει της ισχύος



Σχήμα 6.13: Το κόστος ανα kW ισχύος με χρήση καθολικού και βέλτιστων μαγνητών συναρτήσει της ισχύος

Τέλος η αύξηση του μήκους του μαγνήτη, l_a οδηγεί και σε μεγαλύτερη διαφορά μεταξύ εσωτερικής και εξωτερικής ακτίνας και άρα σε μείωση του λόγου kd .



Σχήμα 6.14: Ο λόγος εσωτερικής προς εξωτερική ακτίνα kd με χρήση καθολικού και βέλτιστων μαγνητών συναρτήσει της ισχύος

Παρατηρώντας τις εξωτερικές ακτίνες και τους όγκους των γεννητριών που προκύπτουν με χρήση του καθολικού μαγνήτη, βλέπουμε ότι διαφέρουν ελάχιστα σε σχέση με τους όγκους των γεννητριών που έχουν προκύψει με χρήση των βέλτιστων μαγνητών ανα ισχύ.

Συμπέρασμα: Από τη σύγκριση των δύο προσεγγίσεων για τη βελτιστοποίηση όγκου, βλέπουμε πως μας συμφέρει να χρησιμοποιήσουμε τον καθολικό μαγνήτη στην κατασκευή γεννητριών σε αυτό το εύρος ισχύος καθώς τα χαρακτηριστικά των διατάξεων με χρήση αυτού είναι παρεμφερή με αυτά των διατάξεων που προκύπτουν με βάση την προσέγγιση του βέλτιστου μαγνήτη ανα ισχύ και με δεδομένο πως μας συμφέρει πολύ η χρήση ενός μόνο μαγνήτη γιατί μειώνεται πολύ το κόστος παραγωγής του και αγοράς του λόγω και των μεγαλύτερων ποσοτήτων που θα παραγγελθούν.

Κεφάλαιο 7 : Μέτρηση γεννήτριας 3 kW

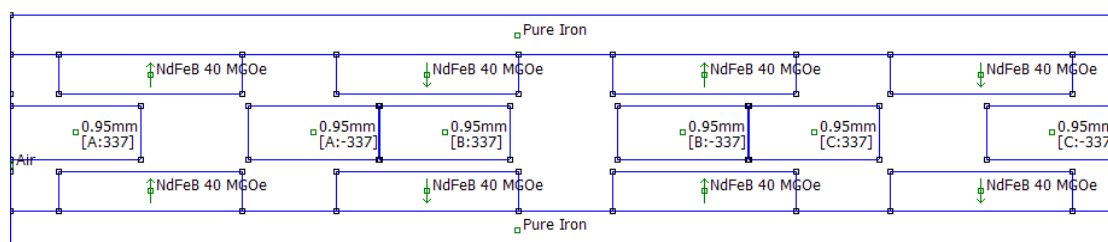
7.1. Η γεννήτρια 3 kW

Στα πλαίσια της εργασίας αυτής κάνουμε ορισμένες μετρήσεις στη γεννήτρια αξονικής ροής μόνιμων μαγνητών ισχύος 3kW, η οποία έχει κατασκευαστεί στα πλαίσια διπλωματικής εργασίας από φοιτητές [20]. Τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά της γεννήτριας αυτής φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

ΓΕΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ	
Ονομαστική Ισχύς	3 kW
Ονομαστική Συχνότητα	50 Hz
Αριθμός Πόλων	20
Αριθμός Πηνίων	15
Συνολικό Κόστος	410 €
Συνολικό Βάρος	35.48 kg
ΔΡΟΜΕΑΣ	
Χαλύβδινοι Δίσκοι	
Πάχος δίσκου	10 mm
Εξωτερική Ακτίνα	238.26 mm
Εσωτερική Ακτίνα	207.05 mm
Μαγνήτες	
Πάχος Μαγνήτη	10 mm
Πλάτος Μαγνήτη	46 mm
Μήκος Μαγνήτη (Ενεργό Μήκος)	30 mm
ΣΤΑΤΗΣ	
Πηνία	
Αξονικό Πάχος Πηνίου	13.76 mm
Πάχος Πλευράς	31,54 mm
Αριθμός Σπειρών	337
Διάμετρος Χαλκού	0.95 mm

Πίνακας 7.1: Τα χαρακτηριστικά της γεννήτριας 3kW

Επίσης δείχνουμε τη γεωμετρία της γεννήτριας όπως σχεδιάζεται στο FEMM, για τομή στη μέση ακτίνα:



Σχήμα 7.1: Τομή της γεννήτριας 3kW στη μέση ακτίνα.

7.2. Η πειραματική διάταξη και τα μετρούμενα μεγέθη

Οι μετρήσεις στη γεννήτρια γίνονται στο Εργαστήριο Υδροδυναμικής της σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του Ε.Μ.Π. όπου έχει παραχωρηθεί στη σχολή των Ηλεκτρολόγων Μηχανικών, κινητήρας DC ονομαστικής ισχύος 50 hp και ονομαστικών στροφών 1150 RPM, για τη διενέργεια τέτοιων πειραμάτων. Παρακάτω φαίνεται ο κινητήρας και το σύστημα ελέγχου των στροφών του:



Σχήμα 7. 2: Ο DC κινητήρας και το σύστημα ελέγχου των στροφών του

Για να υπολογίσουμε τις ονομαστικές στροφές στις οποίες πρέπει να λειτουργήσουμε τη γεννήτρια, λαμβάνουμε υπόψη μας την ακτίνα της φτερωτής η οποία έχει κατασκευαστεί για τη συγκεκριμένη ανεμογεννήτρια. Έτσι για ακτίνα

$$R_{turb} = 2,17 \text{ m}$$

Από τη σχέση (3.3):

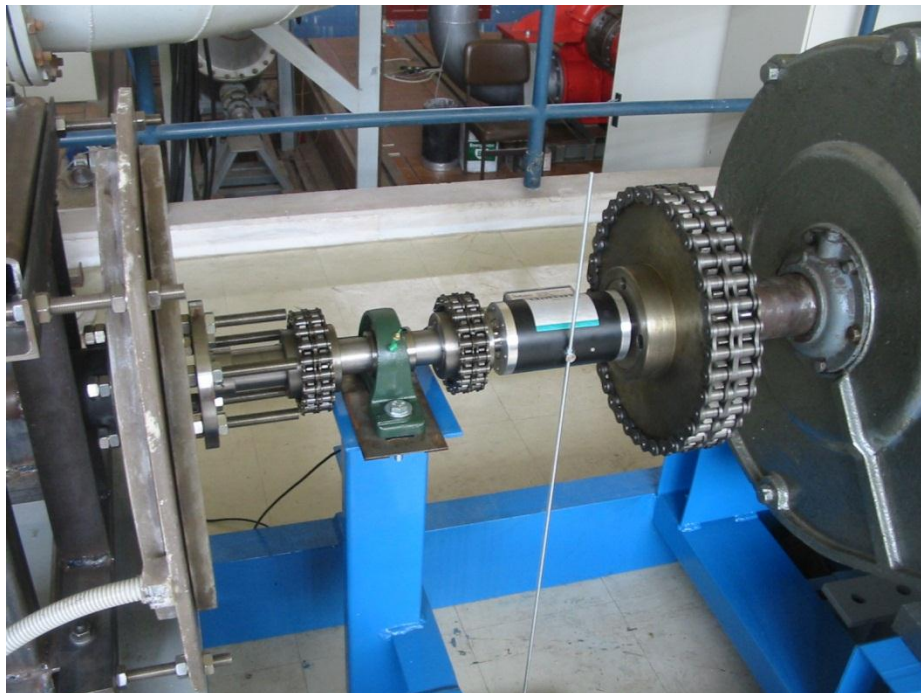
$$n = \frac{60v_w \lambda_{opt}}{2\pi R_{turb}}$$

Και για ονομαστικό άνεμο 10 m/s και $\lambda_{opt}=7$ προκύπτουν ονομαστικές στροφές 308 RPM. Παρακάτω φαίνεται η πειραματική διάταξη:



Σχήμα 7.3: Η πειραματική διάταξη.

Τα ρεύματα και οι τάσεις μετρώνται με τη βοήθεια ψηφιακού παλμογράφου. Οι στροφές μετρώνται μέσω της συχνότητας από τον παλμογράφο ενώ μεταξύ κινητήρα και γεννήτρια έχει τοποθετηθεί ροπομέτρο με εύρος 5Nm-5kNm, το οποίο μετράει τις στροφές, τη ροπή και την μηχανική ισχύ. Παρακάτω βλέπουμε τη σύνδεση του ροπομέτρου μεταξύ κινητήρα και γεννήτριας.



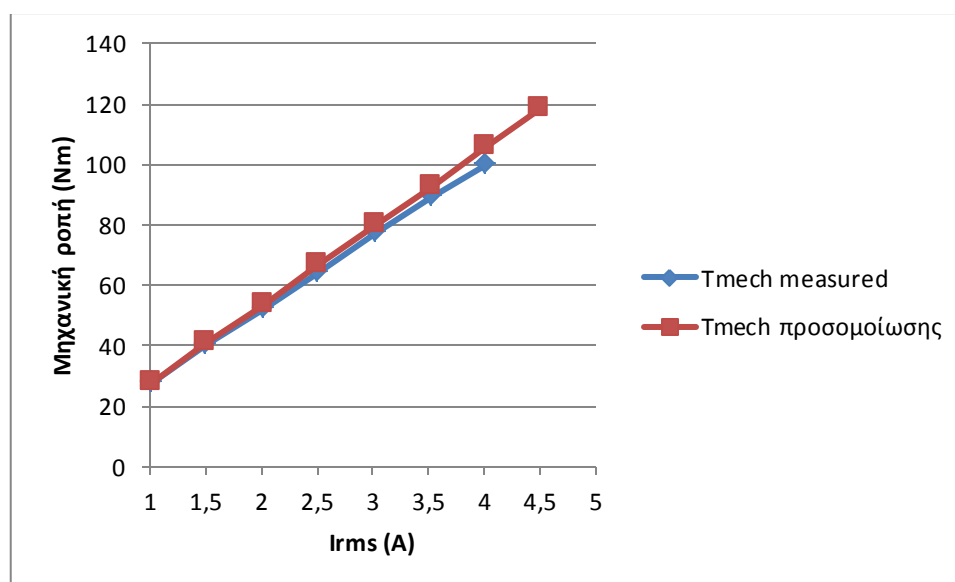
Σχήμα 7.4: Η σύνδεση του ροπομέτρου στη διάταξη

7.3. Μέτρηση της μηχανικής ροπής, της τερματικής τάσης και της απόδοσης υπό ωμικό τριφασικό φορτίο.

Για να μετρήσουμε την ροπή πρέπει οι στροφές να παραμένουν σταθερές στην ονομαστική τους τιμή (308 RPM). Συνδέουμε στα άκρα της γεννήτριας ένα τριφασικό μεταβαλλόμενο ωμικό φορτίο και το ρυθμίζουμε έως ότου να μετρηθεί το κατάλληλο ρεύμα. Το ρεύμα πρέπει να μεταβάλλεται μέχρι την ονομαστική του τιμή (3.85 A) και λίγο παραπάνω για να διαπιστωθεί η λειτουργία της γεννήτριας σε υψηλότερους ανέμους. Για κάθε ρεύμα λαμβάνεται μέτρηση της ροπής μέσω του ροπομέτρου. Οι τιμές του ρεύματος είναι αυτές που φαίνονται στον παλμογράφο με χρήση αμπεροτσιμπίδας. Η ροπή για κάθε ρεύμα φαίνεται στον Πίνακα 7.2 ενώ στο σχήμα 7.5 φαίνεται η αντίστοιχη γραφική παράσταση και συγκρίνεται με αυτήν που προέκυψε στην προσομοίωση.

I_{rms} (A)	T_{mech} (Nm)
1,01	28
1,51	40
2,03	52
2,5	64
3,03	77
3,53	89
4,01	100

Πίνακας 7.2: Η μηχανική ροπή της γεννήτριας σε σχέση με το ρεύμα γραμμής



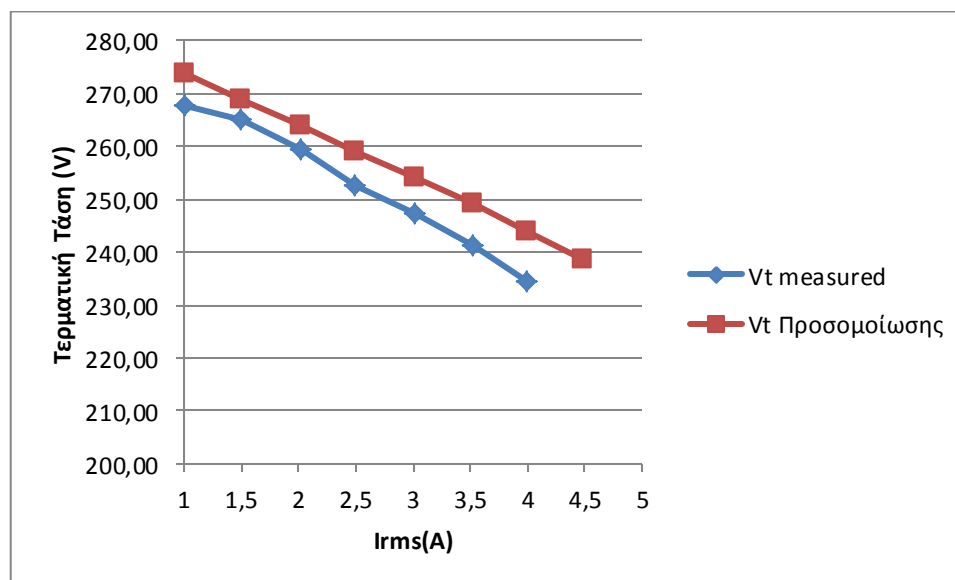
Σχήμα 7.5: Η μηχανική ροπή της γεννήτριας σε σχέση με το ρεύμα όπως μετρήθηκε στο εργαστήριο και όπως προέκυψε στην προσομοίωση.

Στο ίδιο πείραμα μετράται ταυτόχρονα η τερματική τάση της γεννήτριας με τη βοήθεια του παλμογράφου για ονομαστικές στροφές. Οι μετρήσεις φαίνονται στον

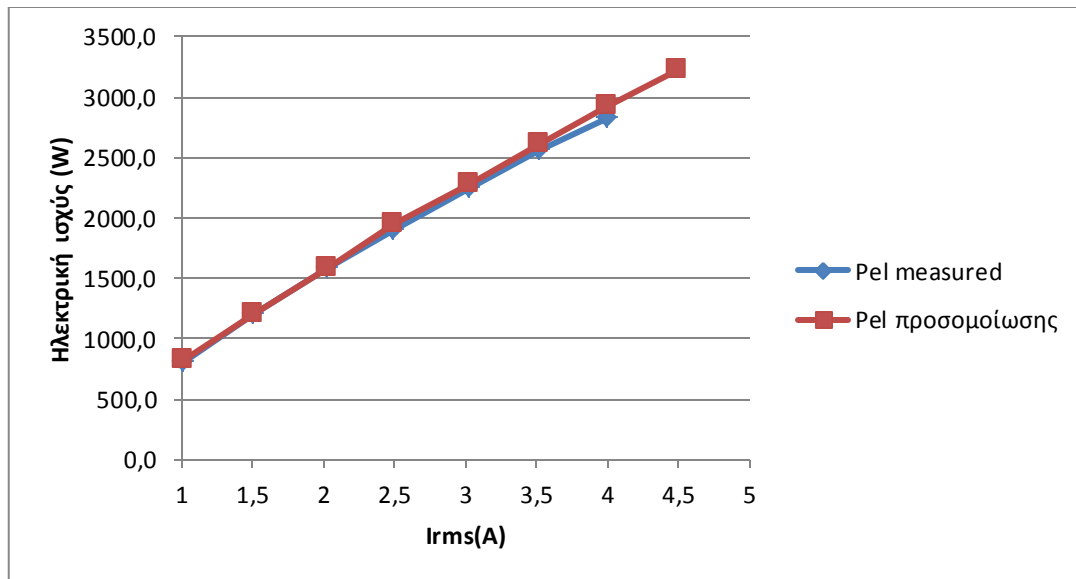
Πίνακα 7.3 όπου ταυτόχρονα υπολογίζεται και η ηλεκτρική ισχύς στην έξοδο της γεννήτριας. Στη συνέχεια γίνεται η γραφική παράσταση της τερματικής τάσης σε σχέση με το ρεύμα (σχήμα 7.6) και της ηλεκτρικής ισχύος σε σχέση με το ρεύμα (σχήμα 7.7) όπου φαίνονται και οι αναμενόμενες από την προσομοίωση τιμές.

$I_{rms}(A)$	$V_{tA}(V)$	$V_{tB}(V)$	$V_{tC}(V)$	$V_{tavg}(V)$	$P_{el}(W)$
1,01	270	264	269	267,67	811,0
1,51	268	260	267	265,00	1200,5
2,03	262	254	262	259,33	1579,3
2,5	255	249	254	252,67	1895,0
3,03	250	243	249	247,33	2248,3
3,53	244	237	243	241,33	2555,7
4,01	236	231	236	234,33	2819,0

Πίνακας 7.3: Η τερματική τάση, το ρεύμα και η ηλεκτρική ισχύς της γεννήτριας

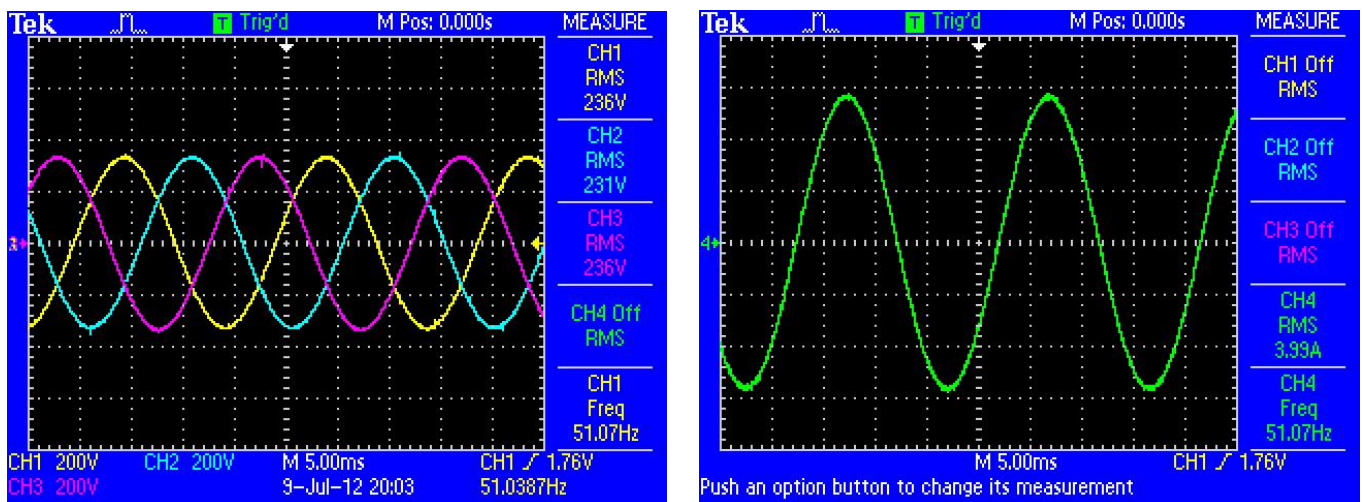


Σχήμα 7.6: Η τερματική τάση σε σχέση με το ρεύμα και οι αντίστοιχες τιμές όπως προέκυψαν στην προσομοίωση.



Σχήμα 7.7: Η ηλεκτρική ισχύς όπως μετρήθηκε στο εργαστήριο και οι αντίστοιχες τιμές της προσομοίωσης.

Επιπλέον, παρατηρούμε στον παλμογράφο ότι με το ωμικό φορτίο η τάση παραμένει ημιτονοειδής. Το σφάλμα στην τερματική τάση είναι 4 % σε σχέση με την προσομοίωση ενώ το σφάλμα στην ισχύ είναι ίσο με 3.8 %. Παρακάτω φαίνονται οι κυματομορφές της τάσης για τις 3 φάσεις καθώς και του ρεύματος όπως τις έδειξε ο παλμογράφος.



Σχήμα 7.5: Η τερματική τάση της γεννήτριας σε σχέση με το χρόνο και η κυματομορφή του ρεύματος

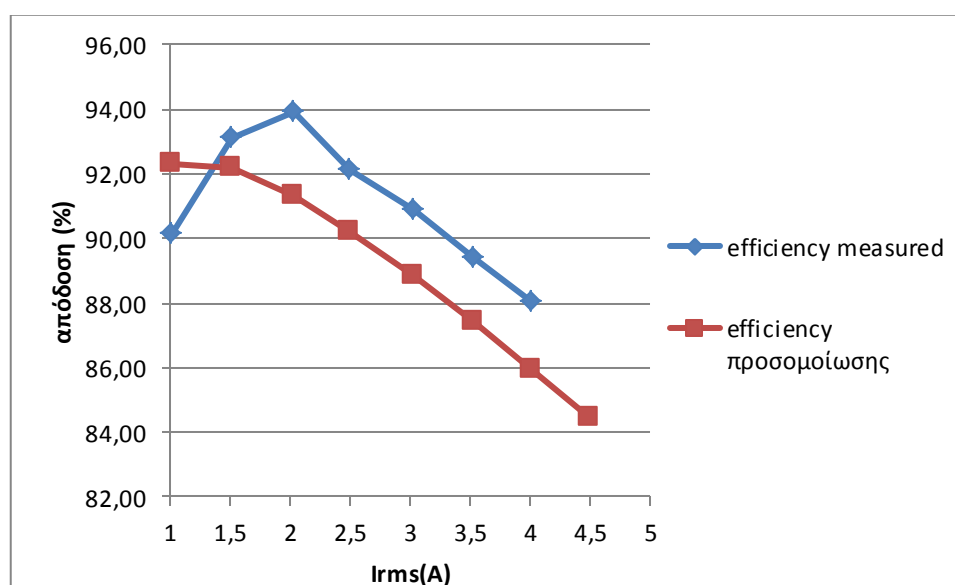
Στη συνέχεια, με τη βοήθεια της μηχανικής ροπής της γεννήτριας όπως μετρήθηκε προηγουμένως και των στροφών που μέτραγε το ροπόμετρο κάθε φορά, από τον τύπο:

$$P_{mech} = \frac{T_{mech} * 2 * \pi * n}{60}$$

θα υπολογίσουμε τη μηχανική ισχύ. Οι στροφές που μετράει το ροπόμετρο έχουν απόκλιση από τις ονομαστικές 1 RPM. Έχοντας μηχανική και ηλεκτρική ισχύ μπορούμε πλέον να υπολογίσουμε την απόδοση.

I _{rms} (A)	P _{electric} (W)	T _{mech} (Nm)	P _{mech} (W)	Efficiency (%)
1,01	811,0	28	899,7147	90,14
1,51	1200,5	40	1289,493	93,09
2,03	1579,3	52	1681,784	93,91
2,5	1895,0	64	2056,491	92,15
3,03	2248,3	77	2474,215	90,87
3,53	2555,7	89	2859,807	89,37
4,01	2819,0	100	3202,8	88,02

Πίνακας 7.4: Εύρεση της απόδοσης για λειτουργία υπό τριφασικό φορτίο στις 308 RPM.



Σχήμα 7.6: Η μεταβολή της απόδοσης για ονομαστικές στροφές και μεταβαλλόμενο ρεύμα όπως προέκυψε από τις μετρήσεις και από την προσομοίωση

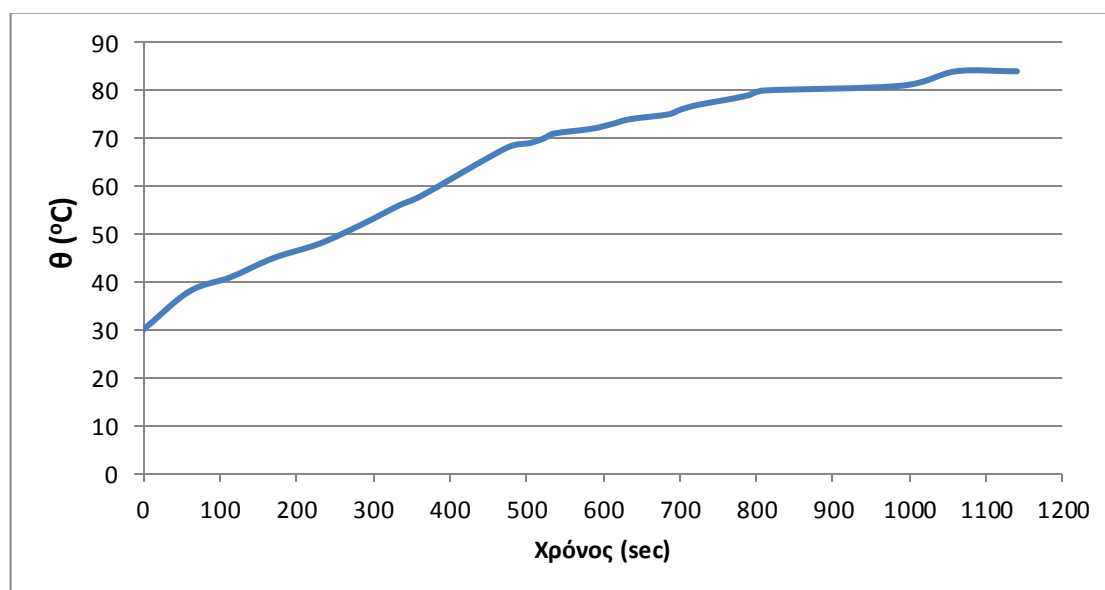
Το σφάλμα στην απόδοση προκύπτει ίσο με 2,3% , πολύ μικρότερο από ότι είχε μετρηθεί σε προηγούμενο πείραμα με χρήση άλλου ροπομέτρου.

7.4. Μέτρηση της θερμοκρασίας του τυλίγματος σε ονομαστικές συνθήκες λειτουργίας

Στο σημείο αυτό, μετράμε τη θερμοκρασία του τυλίγματος της γεννήτριας. Είναι σημαντικό να γνωρίζουμε τη θερμοκρασία που αναπτύσσεται στο τυλίγμα κατά τη λειτουργία της γεννήτριας καθώς η αντίσταση του τυλίγματος R_c , εξαρτάται από τη θερμοκρασία αυτή μέσω της σχέσης:

$$\rho_t = \rho_{20}(1 + 0.0039(t_c - 20))$$

όπου ρ_t η ειδική αντίσταση του χαλκού και t_c η θερμοκρασία που μετράμε. Μεγαλύτερες θερμοκρασίες οδηγούν σε μεγαλύτερη τιμή της αντίστασης και άρα σε αυξημένες απώλειες στο στάτη. Κατά τη διάρκεια του πειράματος, μετράμε αρχικά τη θερμοκρασία του τυλίγματος πριν αρχίσει να λειτουργεί η γεννήτρια και τη βρίσκουμε ίση με τη θερμοκρασία περιβάλλοντος. Στη συνέχεια, λειτουργούμε τη γεννήτρια στις ονομαστικές της στροφές (308 RPM) και ρυθμίζουμε το ωμικό φορτίο ώστε να έχουμε το ονομαστικό ρεύμα (3,85 A). Τώρα μπορούμε να μετρήσουμε τη θερμοκρασία καθώς και τις χρονικές στιγμές που παίρνουμε κάθε φορά τη μέτρηση θεωρώντας ως $t=0$ sec το χρόνο που θέτουμε σε λειτουργία τη γεννήτρια. Παρακάτω φαίνεται το διάγραμμα χρόνου- μετρούμενης θερμοκρασίας.



Σχήμα 7.6: Η θερμοκρασία του τυλίγματος συναρτήσει του χρόνου λειτουργίας

Η συνολική διάρκεια του πειράματος ήταν περίπου 20 λεπτά. Παρατηρούμε πως η αύξηση της θερμοκρασίας του τυλίγματος γίνεται αρχικά με μεγαλύτερο ρυθμό μέχρι να φτάσει στους 70 °C, ενώ στη συνέχεια η θερμοκρασία αυξάνεται πιο αργά. Ακόμα βλέπουμε πως η θερμοκρασία σταθεροποιείται στους 83 °C που είναι και η θερμοκρασία λειτουργίας που είχαμε θεωρήσει στη σχεδίαση των γεννητριών.

Παρατηρήσεις:

α) Τα αποτελέσματα των μετρήσεων για τη ροπή, τις ισχύεις και τελικά την απόδοση είναι πολύ πιο κοντά στα προσομοιούμενα μεγέθη γεγονός που οφείλεται στην πολύ μεγαλύτερη ακρίβεια του ροπομέτρου που χρησιμοποιούμε πλέον και άρα στην πιο σωστή μέτρηση των μεγεθών.

β) Η θερμοκρασία που μετράμε δεν είναι ίδια σε κάθε τύλιγμα. Συγκεκριμένα, σε τύλιγματα διαφορετικών φάσεων παρατηρούμε μικρές διαφοροποιήσεις στις τιμές της θερμοκρασίας. Αυτές οι διαφορές οφείλονται στον διαφορετικό αριθμό ελιγμάτων που μπορεί να έχουν αυτά τα πηνία. Εμείς βέβαια καταγράφουμε τις τιμές θερμοκρασίας μόνο από ένα τύλιγμα.

γ) Το όργανο για τη μέτρηση της θερμοκρασίας μας δίνει τη δυνατότητα της μέτρησης από μακριά, κάτι το οποίο βέβαια εμπεριέχει τον κίνδυνο λαθών ως προς το σημείο που μετράμε κάθε φορά.

δ) Όταν το τύλιγμα ανέπτυξε θερμοκρασία 80 °C, δημιουργήσαμε τεχνητό αερισμό με χρήση ανεμιστήρα ώστε να προσομοιώσουμε τις συνθήκες υπό τις οποίες θα λειτουργεί η γεννήτρια. Με δεδομένο ότι η γεννήτρια προορίζεται να τοποθετηθεί στον ιστό της ανεμογεννήτριας καθώς επίσης και ότι για να περιστρέφεται στις ονομαστικές στροφές θα φυσάνε άνεμοι της τάξης των 10m/s, είναι αυτονόητο ότι ο αερισμός της θα είναι πολύ καλός σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας.

Κεφάλαιο 8: Συμπεράσματα και Προτάσεις

8.1: Συμπεράσματα

Οι γεννήτριες αξονικής ροής μονίμων μαγνητών μπορούν να προτιμηθούν έναντι των γεννητριών ακτινικής ροής και σε εφαρμογές μεγαλύτερης ισχύος από αυτή που είχε μελετηθεί ως τώρα, καλύπτοντας ένα εύρος ισχύος τουλάχιστον μέχρι τα 6,5 kW.

Ο σχεδιασμός των γεννητριών στηρίχθηκε στις εξισώσεις του κεφαλαίου 3. Καθότι σχεδιάσαμε γεννήτριες από 3 έως 6 kW, ορισμένες σχέσεις δεν ανταποκρίνονταν εξίσου αποδοτικά σε όλο το εύρος της ισχύος. Κυρίως αποκλίσεις μεταξύ θεωρητικής σχεδίασης και προσομοίωσης παρατηρήθηκαν στις μεγαλύτερες ισχύεις όπου εκεί μεγαλώνουν αρκετά οι διαστάσεις των γεννητριών, οπότε ορισμένα στοιχεία όπως το πάχος του στάτη και το διάκενο δεν ανταποκρίνονται το ίδιο καλά.

Βελτιστοποιήθηκαν οι διαστάσεις των μαγνητών στα κεφάλαια 5 και 6, χρησιμοποιώντας ως κριτήρια την ελαχιστοποίηση του κόστους και στη συνέχεια την ελαχιστοποίηση του όγκου. Τα δύο αυτά κριτήρια οδηγούν σε διαφορετική διάταξη των μαγνητών στους δίσκους του δρομέα. Συγκεκριμένα στην ελαχιστοποίηση του κόστους, επιδιώκεται η όσο το δυνατόν μεγαλύτερη μείωση των διαστάσεων του μαγνήτη, μιας και αυτός αποτελεί το ακριβότερο υλικό της κατασκευής, ενώ στην ελαχιστοποίηση του όγκου, επιδιώκεται η όσο το δυνατόν καλύτερη αξιοποίηση των διαστάσεων της γεννήτριας με αύξηση τόσο του ενεργού μήκους όσο και των διαστάσεων του μαγνήτη αφού πλέον δε μας ενδιαφέρει το κόστος, ώστε τελικά να μειωθεί η εξωτερική ακτίνα.

Επίσης αναζητώντας ένα βέλτιστο καθολικό μαγνήτη για όλο το εύρος της ισχύος που μελετάμε, είδαμε ότι τα χαρακτηριστικά των γεννητριών που προκύπτουν με χρήση αυτού είναι εφάμιλλα των γεννητριών που προκύπτουν με χρήση ενός βέλτιστου διαφορετικού μαγνήτη για κάθε ισχύ. Έτσι καταλήγουμε στο συμπέρασμα πως είναι εφικτή η χρήση ενός μόνο μαγνήτη για την κατασκευή γεννητριών σε όλο το εύρος της ισχύος, κάτι που θα μειώσει πολύ το κόστος καθώς θα χρειαστεί να κατασκευαστεί μια φορά ο μαγνήτης αυτός και έκτοτε θα χρησιμοποιείται ως εμπορικός.

Η χρησιμοποίηση στη σχεδίαση διαφορετικών βαθμών μαγνήτη και η σύγκριση των διατάξεων που προκύπτουν μας οδηγεί στο συμπέρασμα πως πρέπει να προτιμώνται ισχυρότεροι μαγνήτες, εδώ ο N45, σε εφαρμογές χαμηλού κόστους καθώς και πυκνότητας ισχύος. Η δε συχνότητα των 50Hz που επιλέχθηκε έναντι των 40Hz, φαίνεται πως δίνει καλύτερα αποτελέσματα, αφενός γιατί οι περισσότεροι πόλοι στις γεννήτριες οδηγούν σε καλύτερες επιδόσεις του τυλίγματος που χρησιμοποιούμε και αφετέρου επειδή μειώνει τις διαστάσεις των μαγνητών.

Η εκ νέου μέτρηση της γεννήτριας 3 kW, απέδειξε ότι τα μετρούμενα μεγέθη βρίσκονται πολύ κοντά στα προσομοιούμενα και οι αποκλίσεις που είχαν παρατηρηθεί σε προηγούμενη μέτρηση οφείλονται σε λάθος του ροπομέτρου που είχε

χρησιμοποιηθεί. Επίσης επαληθεύτηκε πειραματικά η θερμοκρασία που θεωρούμε στη σχεδίαση ότι αναπτύσσει το τυλίγμα σε ονομαστικές συνθήκες λειτουργίας.

8.2: Προτάσεις

Οι αποκλίσεις στην παραγόμενη ισχύ που παρατηρήθηκαν στην προσομοίωση σε σχέση με τη θεωρητική σχεδίαση, οφείλονται σε προβλήματα που παρουσιάζει η διαστασιολόγηση. Χρειάζεται εκ νέου μελέτη της διαστασιολόγησης η οποία θα ανταποκρίνεται καλύτερα στις μεγαλύτερες ισχύεις, με δεδομένο ότι αρχικά η διαστασιολόγηση είχε βελτιστοποιηθεί για ισχύεις κοντά στα 3 kW. Καλό θα ήταν να γίνει προσπάθεια προσομοίωσης και γεννητριών μεγαλύτερης ισχύος από 6,5 kW, φτάνοντας μέχρι το 10kW.

Χρειάζεται μελέτη της σχέσης που δίνει την εξωτερική ακτίνα ώστε αυτή να χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της εξαρχής στη διαστασιολόγηση και να μην χρησιμοποιείται για έλεγχο των ακτίνων που δίνει ο χρήστης. Επίσης, πρέπει να μελετηθεί η επίδραση της απόδοσης που επιλέγεται στη διαστασιολόγηση και το αν αυτή μπορεί να λαμβάνεται υπόψη στη σχεδίαση του τυλίγματος.

Χρειάζεται μελέτη και ισχυρότερων μαγνητών, μέχρι βαθμού N52, για χρήση σε τέτοιου είδους εφαρμογές, λαμβάνοντας υπόψη την αύξηση της πυκνότητας ισχύος αλλά παράλληλα και του κόστους.

Η βελτιστοποίηση του όγκου μας έδωσε ενδιαφέροντα αποτελέσματα, οπότε είναι χρήσιμο να χρησιμοποιηθεί το κριτήριο αυτό σε συνδυασμό με το κριτήριο του κόστους ώστε να αναζητήσουμε τις φτηνότερες και ταυτόχρονα τις πιο μικρές γεννήτριες. Για να γίνει αυτό πρέπει να αξιολογηθούν τα δύο κριτήρια και να μπουν ανάλογα 'βάρη' στο καθένα με σκοπό να αυξάνουν τη σημαντικότητα του ενός έναντι του άλλου κριτηρίου. Στη βελτιστοποίηση αυτή θα μπορούσε να εξετάζεται και η μάζα των γεννητριών αφού έχει γίνει πρώτα αντίστοιχη μελέτη για το πάχος του σιδήρου.

Τέλος θα μπορούσε να διερευνηθεί η δυνατότητα κατασκευής του καθολικού μαγνήτη που προκύπτει από τη βελτιστοποίηση για χρήση σε τέτοιου είδους εφαρμογές, με σκοπό να γίνει ευρύτερα 'γνωστός' και μακροπρόθεσμα να αυξηθεί η ζήτησή του και άρα να μειωθεί σημαντικά το κόστος του.

Βιβλιογραφία

- [1] Consortium for Sustainable Village-Based Development, http://www.villageearth.org/pages/Appropriate_Technology/ATSourcebook/Introduction.php
- [2] Piggott H. “How to build a wind turbine”, 2005.
- [3] Hau E. “Wind Turbines, fundamentals, technologies, application, economics”, second edition, Springer, 2006.
- [4] Παπαθανασίου Σ., “Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, σημειώσεις παραδόσεων”, Ε.Μ.Π., 2008.
- [5] Parviainen Asko, “Design of Axial-Flux Permanent Magnet Low-speed Machines and Performance Comparison between Radial-Flux and Axial-Flux Machines”, 2005
- [6] Gieras J., Wang R., Kamper M. “Axial flux permanent magnet brushless machines”, second edition, Springer, 2008.
- [7] Rovio T., Vihriälä H., Söderlund L., Kriikka J., “Axial and radial flux generators in small scale wind power production”, In: Helm, P., Zervos, A. (eds.), Proceedings of 2001 European Wind Energy Conference, Copenhagen, Denmark, 2-6 July 2001 s. 1094-1097.
- [8] Dubois M., Polinder H., Ferreira J., “Axial and radial-flux permanent magnet generators for direct-drive wind turbines”, In P Helm (Ed.), Proceedings (pp. 5-8). Munich: WIP, January 2001.
- [9] Yicheng C., Pragasen P., Azeem K., “PM Wind Generator Comparison of Different Topologies”, Industry Applications Conference, 2004, Vol.3, pp. 1405-1412, October, 2004.
- [10] Aydin M., Huang S., Lipo T.A., “Axial flux permanent magnet machines: A review”, Wisconsin Electric Machines & Power Electronics Consortium, 2004.
- [11] Parviainen A., Pyrhönen J., Kontkanen P., “Axial Flux Permanent Magnet Generator with Concentrated Winding for Small Wind Power Application”, IEEE Int' l Conf. on Electric Machines and Drives, pp. 1187-1191.
- [12] Κοτσαμπόπουλος Π., “Μελέτη, κατασκευή και προσομοίωση της λειτουργίας μικρής ανεμογεννήτριας αξονικής ροής”, Διπλωματική εργασία, Ε.Μ.Π., 2010.
- [13] Huang S., Luo J., Leonardi F., Lipo T.A., “A comparison of power density for axial flux machines based on general purpose sizing equations”
- [14] Rovio T., “A Feasibility Study of Permanent Magnet Generator Topologies for Small-Scale Wind Power Application”, Doctoral thesis, Tampere University of Technology.

- [15] Keppola H., Perälä R., Söderlund L., Vihriälä H., “Preliminary test results of an axial flux toroidal stator wind power generator”, ICEM 2000, Vol.3, August.
- [16] Chalmers B.J., Wu W., Spooner E., “An axial-flux permanent-magnet generator for a gearless wind energy system”, IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 14, No. 2, June 1999.
- [17] Muljadi E., “Axial Flux, Modular, Permanent-Magnet Generator with a Toroidal Winding for Wind Turbine Applications”, IEEE Industry Applications Conference St. Louis, MO November 5-8, 1998.
- [18] Rossouw F., “Analysis and Design of Axial Flux Permanent Magnet Wind Generator System for Direct Battery Charging Applications”, thesis MScEng, Stellenbosch University, 2009.
- [19] Kamper M., Wang R., Rossouw F., “Analysis and Performance Evaluation of Axial Flux Air-Cored Stator Permanent Magnet Machine with Concentrated Coils”, Electric Machines & Drives Conference, 2007. IEMDC '07. IEEE International , vol.1, no., pp.13-20, 3-5 May 2007.
- [20] Μεσσήνης Γεώργιος, “ Βελτιστοποίηση, προσομοίωση και κατασκευή μικρής ανεμογεννήτριας για εφαρμογές χαμηλού κόστους και μελέτη της AC και DC σύνδεσης.” ,2011
- [21] Bartmann D., Fink D., “Homebrew Wind Power: Hands-on guide to harnessing the wind”, Buckville Publications, 2009.
- [22] Sadeghierad M., Darabi A., Lesani H., Monsef H., “Power-to-volume of the High Speed Generators”, World Applied Sciences Journal 7 (3), pp. 393-398, 2009.
- [23] Sadeghierad M., Darabi A., Lesani H., Monsef H., “Air Gap Optimization of High-Speed Axial-Flux PM Generator”, Journal of Applied Sciences 9 (10), pp. 1915-1921, 2009.
- [24] Wang R.J., Kamper J.M., Westhuizen K., Gieras F.J., “Optimal Design of a Coreless Stator Axial Flux Permanent-Magnet Generator”, IEEE Transactions on magnetics, Vol. 41, No. 1, pp. 64, January 2005.
- [25] Bumby J., Stannard N., Dominy J., McLeod N., “A Permanent Magnet Generator for Small Scale Wind and Water Turbines”, Electrical Machines, 2008. ICEM 2008. 18th International Conference on, Vol., no., pp. 1-6, 6-9 Sept. 2008.
- [26] Bumby J., Stannard N., Martin R., “A Permanent Magnet Generator for Small Scale Wind Turbines”, IEE Proc.-Electr. Power Appl., Vol. 152, No. 5, pp.1065-1075, September 2005.

- [27] El-Hasan T., Luk P.C., “Magnet Topology Optimization to Reduce Harmonics in High-Speed Axial Flux Generators”, IEE Transactions on magnets, Vol. 39, No. 5, pp. 3340-3342, September 2003.
- [28] Greaves M.C., Walker G.R., Walsh B.B., “Design optimisation of Ironless Motors based on Magnet selection” Journal of Electrical & Electronics Engineering, Australia, IEAUST, vol. 21, no. 1, pp. 49-56.
- [29] Widyan M.S., “Design, Optimization, Construction and Test of Rare-Earth Permanent-Magnet Electrical Machines with New Topology for Wind Energy Applications”, Technischen Universitat Berlin, 2006.
- [30] Hosseini S.M., Miraslim A.M., Mirzaei M., “Design, Prototyping, and Analysis of a Low Cost Axial-Flux Coreless Permanent-Magnet Generator”, IEEE transactions on magnetics, Vol. 44, No. 1, pp.75-80, January 2008.
- [31] Piggot H., “A wind turbine recipe book”, 2009.
- [32] Wang R.J., “Design Aspects and Optimisation of an Axial Field Permanent Magnet Machine with an Ironless Stator”, Dissertation, University of Stellenbosch, March 2003.