



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

**Βελτιστοποίηση γεωμετρίας γεννήτριας μονίμων μαγνητών
για εφαρμογές αιολικής ηλεκτροπαραγωγής**

Ελένη Ν. Παπαντωνίου

Επιβλέπων: Α. Κλαδάς

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Δεκέμβριος 2011



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

**Βελτιστοποίηση γεωμετρίας γεννήτριας μονίμων μαγνητών
για εφαρμογές αιολικής ηλεκτροπαραγωγής**

Ελένη Ν. Παπαντωνίου

Επιβλέπων: Α. Κλαδάς

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την

.....

Α. Κλαδάς

.....

Σ. Μανιάς

.....

Σ. Παπαθανασίου

Αθήνα, Δεκέμβριος 2011

.....

Ελένη Ν. Παπαντωνίου

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

Copyright © Ελένη Ν. Παπαντωνίου, 2011

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.

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Ευχαριστώ θερμά τον επιβλέποντα της διπλωματικής μου εργασίας κ. Αντώνιο Κλαδά, καθηγητή του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε αναθέτοντας μου την παρούσα εργασία και για την καθοδήγηση που μου παρείχε κατά τη διάρκεια της εκπόνησής της. Ιδιαίτερες ευχαριστίες οφείλω στον Διδάκτορα κ. Κωνσταντίνο Λάσκαρη που πρόθυμα με στήριξε σε κάθε βήμα της εκπόνησης της σχεδίασης, καθώς και το Διδάκτορα κ. Χαράλαμπο Πάτσιο για τις πολύτιμες συμβουλές του.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου και τους φίλους μου για τη στήριξη τους.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία επιχειρεί τη σχεδίαση σύγχρονης γεννήτριας μονίμων μαγνητών για εφαρμογές αιολικής ηλεκτροπαραγωγής μικρής ισχύος. Ως κύριο κριτήριο βελτιστοποίησης υιοθετήθηκε η μεγάλη πυκνότητα ισχύος έναντι της απόδοσης για την εν λόγω εφαρμογή. Σε ένα πρώτο βήμα προσδιορίστηκαν οι προδιαγραφές των κύριων λειτουργικών χαρακτηριστικών της γεννήτριας, και στη συνέχεια αναπτύχθηκε η μεθοδολογία σχεδίασης που χρησιμοποιήθηκε την τελική διαμόρφωση της γεωμετρίας της.

Κατά τη βιβλιογραφική διερεύνηση των επικρατέστερων διαμορφώσεων του ηλεκτρικού μέρους των ανεμογεννητριών, δόθηκε ιδιαίτερη έμφαση στις διαμορφώσεις που αφορούν σε εφαρμογές αιολικής ηλεκτροπαραγωγής μικρής ισχύος. Ακολούθησε η φάση της προκαταρκτικής σχεδίασης, κατά την οποία μέσω θεωρητικών σχέσεων, επιχειρήθηκε ο προσδιορισμός των κύριων γεωμετρικών χαρακτηριστικών του ενεργού μέρους της ηλεκτρογεννήτριας. Στη συνέχεια, αναπτύχθηκε η μεθοδολογία σχεδίασης που υιοθετήθηκε. Επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθεί συγκεντρωμένο τύλιγμα κλασματικού βήματος και κατάλληλος συνδυασμός πόλων και αυλακών. Η βελτιστοποίηση της γεωμετρίας της γεννήτριας πραγματοποιήθηκε μέσω αναλύσεων ευαισθησίας των παραμέτρων. Μετά την οριστική διαμόρφωση της γεωμετρίας προσομοιώθηκαν λεπτομερώς τα λειτουργικά χαρακτηριστικά της γεννήτριας σε μόνιμη κατάσταση λειτουργίας με χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων. Επαναλήφθηκε η προαναφερόμενη διαδικασία σχεδίασης για την περίπτωση γεννήτριας με τύλιγμα πλήρους βήματος, προκειμένου να συγκριθούν τα χαρακτηριστικά της με αυτά της γεννήτριας κλασματικού βήματος. Τέλος, πραγματοποιείται μέσω πεδιακής ανάλυσης ο προσδιορισμός των παραμέτρων του ισοδυνάμου κυκλώματος.

Για τις προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν χρησιμοποιήθηκαν τα λογισμικά ανάλυσης μαγνητικού πεδίου χρησιμοποιώντας τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων FEMM και αριθμητικής ολοκλήρωσης διαφορικών εξισώσεων MATLAB-SIMULINK.

Λέξεις κλειδιά: Ανεμογεννήτρια, ηλεκτρική μηχανή μονίμων μαγνητών, μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων, ανάλυση ευαισθησίας παραμέτρων

ABSTRACT

The present diploma thesis undertakes the design procedure of a synchronous permanent magnet generator for small-scale, wind-power electric generation. As dominant optimization criterion has been adopted the optimization of power density. In a first step the main specifications have been defined, and then the design methodology has been developed and applied to determine the final generator configuration.

The bibliographical overview in wind turbines has focused on applications to small-scale wind power systems. At the preliminary design phase theoretical formulae have been used to determine the main dimensions of the active part of the generator.

Concentrated non-overlapping fractional-slot winding has been selected and appropriate pole-slot combination has been adopted. A particular parametric design procedure has been developed in order to optimize the generator dimensions by using sensitivity analysis techniques. The final determination of the generator dimensions has been performed by using modeling based on the finite element method and the steady-state performance has been computed through detailed field analysis. The same design procedure has been repeated the integral slot winding case in order to compare the results with the fractional slot winding generator ones. Moreover, the determination of the dynamic model parameters of both generators designed has been performed.

The above mentioned analysis has been carried out by using software packages based on the finite element method for the magnetic field analysis and numerical time integration methodologies for differential equations solution (FEMM and Matlab, respectively).

Key-words: Wind-turbines, permanent magnet generators, finite element method, sensitivity analysis techniques.

Περιεχόμενα

Κεφάλαιο 1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	17
1.1 Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας.....	17
1.2 Αιολική Ενέργεια.....	18
1.3 Αεροδυναμικό μέρος.....	20
1.4 Κριτήρια διαχωρισμού ανεμογεννητριών.....	22
1.5 Επικρατέστερες διαμορφώσεις ηλεκτρικού μέρους ανεμογεννητριών.....	24
1.6 Ανεμογεννήτριες μικρής ισχύος.....	27
Κεφάλαιο 2 ΠΡΟΚΑΤΑΡΚΤΙΚΗ ΣΧΕΔΙΑΣΗ.....	31
2.1 Προσδιορισμός της επιφάνειας διακένου, της δύναμης διακένου και της ηλεκτρομαγνητικής ροπής.....	31
2.2 Προσδιορισμός χαρακτηριστικών του στάτη.....	33
2.3 Προσδιορισμός χαρακτηριστικών του δρομέα.....	34
Κεφάλαιο 3 ΟΡΙΣΤΙΚΗ ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΚΑΙ ΒΕΛΤΙΟΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΣΥΓΧΡΟΝΗΣ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ ΜΟΝΙΜΩΝ ΜΑΓΝΗΤΩΝ ΜΕ ΤΥΛΙΓΜΑ ΚΛΑΣΜΑΤΙΚΟΥ ΒΗΜΑΤΟΣ.....	39
3.1 Διαμόρφωση Γεννήτριας και διερεύνηση χαρακτηριστικών.....	39
3.1.1 Βασικές προδιαγραφές γεννήτριας.....	39
3.1.2 Επιλογή τύπου τυλίγματος.....	39
3.1.3 Επιλογή αριθμού πόλων και αυλακών.....	44
3.1.4 Ασύμμετρη μαγνητική δύναμη.....	45
3.1.5 Επιλογή αριθμού πόλων και απόδοση.....	47
3.1.6 Επιλογή συντελεστή πληρότητας και πυκνότητας ρεύματος.....	49
3.1.7 Τύλιγμα γεννήτριας.....	50
3.2 Βελτιστοποίηση Γεωμετρίας.....	52
3.2.1 Πεδιακή ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία.....	52
3.2.2 Μαγνητοστατικά προβλήματα.....	52
3.2.3 Οριακές συνθήκες.....	53
3.2.4 Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων.....	54
3.2.5 Παραμετροποιημένη σχεδίαση.....	55
3.2.6 Βέλτιστη θέση δρομέα.....	58
3.2.7 Βελτιστοποίηση Ροπής.....	60
3.2.7.1 Βελτιστοποίηση Ροπής ως προς την εξωτερική ακτίνα δρομέα και το πάχος του δοντιού.....	61
3.2.7.2 Βελτιστοποίηση ροπής ως προς μήκος μαγνήτη.....	62
3.2.7.3 Βελτιστοποίηση ροπής ως προς πάχος δοντιού, εξωτερική ακτίνα δρομέα, μαγνητικής επαγωγής στο δόντι και απώλειες χαλκού.....	64
3.2.8 Βελτιστοποίηση ροπής ευθυγράμμισης ως προς το εύρος μαγνήτη.....	72

3.2.9	Βελτιστοποίηση κυμάτωσης ροπής ως προς το εύρος του μαγνήτη.....	77
3.2.10	Βελτιστοποίηση ροπής ως προς το εύρος μαγνήτη.....	82
3.2.11	Βελτιστοποίηση ημιτονικότητας ως προς το εύρος μαγνήτη.....	83
3.2.12	Καμπύλη επίδοσης.....	87
3.3	Οριστική σχεδίαση.....	88
3.3.1	Τελική διαμόρφωση γεννήτριας μονίμων μαγνητών.....	88
3.3.2	Σύγχρονη λειτουργία.....	92
3.3.3	Απόδοση και απώλειες γεννήτριας.....	96

Κεφάλαιο 4 ΟΡΙΣΤΙΚΗ ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΚΑΙ ΒΕΛΤΙΟΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΣΥΓΧΡΟΝΗΣ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ ΜΟΝΙΜΩΝ ΜΑΓΝΗΤΩΝ ΜΕ ΤΥΛΙΓΜΑ ΠΛΗΡΟΥΣ ΒΗΜΑΤΟΣ..... 103

4.1	Βασικές προδιαγραφές σύγχρονης γεννήτριας μονίμων μαγνητών πλήρους βήματος.....	103
4.2	Παραμετροποιημένη σχεδίαση.....	104
4.3	Βελτιστοποίηση Ροπής.....	107
4.3.1	Βελτιστοποίηση Ροπής ως προς την εξωτερική ακτίνα δρομέα και το πάχος του δοντιού.....	107
4.3.2	Βελτιστοποίηση ροπής ως προς πάχος μαγνήτη.....	109
4.3.3	Βελτιστοποίηση επίδοσης ως προς πάχος δοντιού, εξωτερική ακτίνα δρομέα, μαγνητικής επαγωγής στο δόντι και απώλειες χαλκού.....	110
4.4	Βελτιστοποίηση ροπής ως προς το ποσοστό εύρους μαγνήτη επί του πολικού βήματος.....	115
4.5	Βελτιστοποίηση ροπής ευθυγράμμισης ως προς το ποσοστό εύρους μαγνήτη επί του πολικού βήματος.....	118
4.6	Βελτιστοποίηση κυμάτωσης ροπής ως προς το ποσοστό μαγνήτη επί του πολικού βήματος.....	119
4.7	Βελτιστοποίηση της ημιτονικότητας ΗΕΔ ως προς το εύρος μαγνήτη.....	121
4.8	Καμπύλη επίδοσης.....	126
4.9	Τελική διαμόρφωση γεωμετρίας γεννήτριας πλήρους βήματος.....	127
4.10	Σύγχρονη λειτουργία.....	131
4.11	Υπολογισμός απωλειών και απόδοση γεννήτριας.....	136

Κεφάλαιο 5 ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ ΠΛΗΡΟΥΣ ΚΑΙ ΚΛΑΣΜΑΤΙΚΟΥ ΒΗΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΙΣΟΔΥΝΑΜΟΥ ΚΥΚΛΩΜΑΤΟΣ...139

5.1	Τελική διαμόρφωση σύγχρονων γεννητριών μονίμων μαγνητών με τύλιγμα πλήρους και κλασματικού βήματος.....	139
5.1.1	Συγκριτική μελέτη ροπής.....	141

5.1.2	Συγκριτική μελέτη ροπής ευθυγράμμισης.....	142
5.1.3	Συγκριτική μελέτη κυμάτωσης ροπής.....	143
5.1.4	Συγκριτική μελέτη ημιτονικότητας ηλεκτρεγερτικής δύναμης.....	144
5.1.5	Συγκριτική Μελέτη Απωλειών και Απόδοσης.....	145
5.2	Υπολογισμός παραμέτρων ισοδυνάμου κυκλώματος.....	146
5.2.1	Εκτίμηση αυτεπαγωγών ευθέως και καθέτου άξονα μόνιμης κατάστασης γεννητριών μονίμων μαγνητών πλήρους και κλασματικού βήματος.....	146
5.2.2	Υπολογισμός αντίστασης γεννητριών μονίμων μαγνητών πλήρους και κλασματικού βήματος.....	148
5.2.2.1	Υπολογισμός αντίστασης γεννήτριας μονίμων μαγνητών κλασματικού βήματος.....	148
5.2.2.2	Υπολογισμός αντίστασης γεννήτριας μονίμων μαγνητών πλήρους βήματος.....	149

Κεφάλαιο 6 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

6.1	Συμπεράσματα.....	153
6.2	Σημεία προαγωγής της επιστήμης.....	154
6.3	Προτάσεις για περαιτέρω διερεύνηση.....	155

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	157
--------------------------	------------

Στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η **σχεδίαση μιας σύγχρονης γεννήτριας μονίμων μαγνητών μικρής ισχύος** για εφαρμογές αιολικής ηλεκτροπαραγωγής, με κύρια χρήση την επικουρική τροφοδότηση μικρών καταναλωτών. Η σχεδίαση πραγματοποιήθηκε με κριτήριο τη βελτιστοποίηση της πυκνότητας ισχύος.

Λαμβάνοντας υπόψη τις εγγενείς ιδιαιτερότητες των μηχανών μονίμων μαγνητών, αναζητήθηκαν τρόποι αξιοποίησής τους. Για το λόγο αυτό μελετήθηκαν δύο διαφορετικά είδη τυλιγμάτων: τυλίγματα πλήρους βήματος και κλασματικού βήματος. Και στις δύο περιπτώσεις πραγματοποιήθηκε βελτιστοποίηση γεωμετρίας των αντιστοιχών γεννητριών με κριτήριο την πυκνότητα ισχύος τους. Έγινε λεπτομερής σχεδιασμός των γεννητριών χρησιμοποιώντας τεχνικές πεδιακής ανάλυσης με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων και τεχνικές ανάλυσης ευαισθησίας των παραμέτρων, προκειμένου να βελτιστοποιηθεί η γεωμετρία τους. Μετά την τελική διαμόρφωσή τους συγκρίθηκαν συστηματικά τα λειτουργικά χαρακτηριστικά των δύο τύπων γεννητριών μόνιμου μαγνήτη.

Η εργασία περιλαμβάνει έξι κεφάλαια:

- Στο **Κεφάλαιο 1** αναφέρονται τα πλεονεκτήματα που παρουσιάζει η εκμετάλλευση των **ΑΠΕ** και, ειδικότερα, της **αιολικής ενέργειας**, και παρατίθεται η παρούσα κατάσταση σε παγκόσμιο και εθνικό επίπεδο. Στη συνέχεια, επιχειρείται βιβλιογραφική διερεύνηση των λειτουργικών χαρακτηριστικών και της διαμόρφωσης των ανεμογεννητριών. Ακολουθεί η περιγραφή των επικρατέστερων διαμορφώσεων του ηλεκτρικού μέρους των ανεμογεννητριών και των **απαιτήσεων** που πρέπει να ικανοποιούν οι γεννήτριες των συστημάτων **αιολικής ηλεκτροπαραγωγής μικρής ισχύος** ενώ συγκρίνονται οι τύποι των υφιστάμενων γεννητριών σε αντίστοιχες εφαρμογές. Οι απαιτήσεις για υψηλή πυκνότητα ισχύος, αυξημένη απόδοση, μικρό μέγεθος και βάρος, αξιοπιστία, εξάλειψη χρήσης κιβωτίου ταχυτήτων,

απλότητα κατασκευής και μηχανολογικής ευρωστίας καθιστούν **τη σύγχρονη γεννήτρια μονίμων μαγνητών** πολύ ελκυστική λύση σε εφαρμογές μικρής ισχύος.

- Στο **Κεφάλαιο 2** τίθενται οι αρχικές προδιαγραφές της υπό εξέταση γεννήτριας και προσδιορίζονται τα κύρια χαρακτηριστικά του ενεργού μέρους της γεννήτριας μονίμων επιφανειακών μαγνητών στη φάση της **προκαταρκτικής σχεδίασης**.
- Το **Κεφάλαιο 3** αποτελεί τη διαδικασία της **βελτιστοποίησης της γεωμετρίας** για την **οριστική διαμόρφωση** της σύγχρονης γεννήτριας μονίμων επιφανειακών μαγνητών κλασματικού βήματος. Περιγράφεται η επιλογή των χαρακτηριστικών της γεννήτριας με σκοπό την επίτευξη υψηλής επίδοσης, ικανοποιητικής απόδοσης, αυξημένης αξιοπιστίας, μικρού μεγέθους και βάρους. Αναπτύσσεται μεθοδολογία σχεδιασμού της που βασίζεται σε ανάλυση του μαγνητικού πεδίου με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων και τεχνικές εξέτασης ευαισθησίας παραμέτρων για τον προσδιορισμό των γεωμετρικών χαρακτηριστικών που εξασφαλίζουν βελτιστοποίηση της πυκνότητας ισχύος. Μετά την οριστική σχεδίαση της γεννήτριας παρουσιάζονται τα λεπτομερή αποτελέσματα των προσομοιώσεων σε μόνιμη κατάσταση λειτουργίας.
- Το **Κεφάλαιο 4** επιχειρεί τη διαδικασία που αναπτύχθηκε στο κεφάλαιο 3 για την περίπτωση **σύγχρονης γεννήτριας μονίμων επιφανειακών μαγνητών πλήρους βήματος**.
- Το **Κεφάλαιο 5** αποτελεί μια **συγκριτική διερεύνηση** των αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων των δύο τύπων γεννητριών. Συγκεκριμένα, συγκρίνονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων σε μόνιμη κατάσταση λειτουργίας με σκοπό την εξαγωγή συμπερασμάτων όσον αφορά την επίδραση στην πυκνότητα ισχύος και την απόδοση της επιλογής των υπό εξέταση δύο διαμορφώσεων τυλιγμάτων. Επιπλέον, παρουσιάζεται ο προσδιορισμός των **συγκεντρωμένων παραμέτρων** των κυκλωματικών μοντέλων των δύο γεννητριών μέσω πεδιακής ανάλυσης.

- Στο **Κεφάλαιο 6** παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα κυριότερα συμπεράσματα που προέκυψαν κατά τη διαδικασία σχεδίασης και συστηματικής βελτιστοποίησης γεωμετρίας των δύο γεννητριών καθώς και τα αποτελέσματα σύγκρισης της επίδρασης των δύο υπό εξέταση τύπων τυλιγμάτων στην πυκνότητα ισχύος και την απόδοση των γεννητριών. Τέλος, αναφέρεται η συνεισφορά της εργασίας στην προαγωγή της επιστήμης και προτείνονται εργασίες για περαιτέρω έρευνα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

1.1 Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας

Ως ανανεώσιμες πηγές ενέργειας χαρακτηρίζονται οι ενεργειακές πηγές (αιολική, ηλιακή, βιομάζα, υδραυλική, γεωθερμική), οι οποίες συναντώνται σε αφθονία στο φυσικό περιβάλλον. Είναι οι πρώτες μορφές ενέργειας που χρησιμοποίησε ο άνθρωπος, μέχρι τις αρχές του 20^{ου} αιώνα, όταν στράφηκε στην εντατική χρήση του άνθρακα και των υδρογονανθράκων. Το ενδιαφέρον για την αξιοποίηση των ΑΠΕ, καθώς και για την ανάπτυξη αξιόπιστων και οικονομικά αποδοτικών τεχνολογιών που δεσμεύουν το δυναμικό τους παρουσιάσθηκε μετά την πρώτη πετρελαϊκή χρήση το 1979 και παγιώθηκε την τελευταία δεκαετία μετά την τεράστια κλιματική αλλαγή της τελευταίας εκατονταετίας εξαιτίας του φαινομένου του θερμοκηπίου και της ρύπανσης της ατμόσφαιρας.

Τα κυριότερα **πλεονεκτήματα των ΑΠΕ** είναι τα εξής:

- Είναι πρακτικά **ανεξάντλητες πηγές ενέργειας** και συμβάλλουν στη μείωση της εξάρτησης από εξαντλήσιμους συμβατικούς ενεργειακούς πόρους.
- Είναι εγχώριες πηγές ενέργειας και συνεισφέρουν στην ενίσχυση της **ενεργειακής ανεξαρτητοποίησης** και της ασφάλειας του ενεργειακού εφοδιασμού σε εθνικό επίπεδο.
- Είναι **διάσπαρτες γεωγραφικά** και οδηγούν στην αποκέντρωση του ενεργειακού συστήματος, δίνοντας τη δυνατότητα κάλυψης των ενεργειακών αναγκών σε τοπικό και περιφερειακό επίπεδο, ανακουφίζοντας έτσι τα συστήματα υποδομής και μειώνοντας τις απώλειες μεταφοράς ενέργειας.
- Προσφέρουν τη δυνατότητα **ορθολογικής αξιοποίησης των ενεργειακών πόρων**, καλύπτοντας ένα ευρύ φάσμα των ενεργειακών αναγκών των χρηστών.
- Έχουν συνήθως **χαμηλό λειτουργικό κόστος** που δεν επηρεάζεται από τις διακυμάνσεις της διεθνούς οικονομίας και ειδικότερα των τιμών των συμβατικών καυσίμων.

- Οι εγκαταστάσεις εκμετάλλευσης των ΑΠΕ έχουν σχεδιαστεί για να **καλύπτουν τις ενεργειακές ανάγκες των χρηστών τους** τόσο σε μεγάλη όσο και σε μικρή κλίμακα, ενώ η μικρή διάρκεια κατασκευής τους επιτρέπει τη γρήγορη ανταπόκριση της προσφοράς προς τη ζήτηση ενέργειας.
- Οι επενδύσεις σε ΑΠΕ δημιουργούν **νέες θέσεις εργασίας**, ιδιαίτερα σε τοπικό επίπεδο.
- Είναι **φιλικές προς το περιβάλλον και τον άνθρωπο**, ενώ ταυτόχρονα το ευρύ κοινό είναι θετικό προς την αξιοποίησή τους. [10]

1.2 Αιολική ενέργεια

Η **αιολική ενέργεια** ανήκει στις ήπιες ή ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Προέρχεται από τη μετατροπή ενός πολύ μικρού ποσοστού (~0,2%) της ηλιακής ενέργειας που φθάνει στη γη. Οι πλέον ευνοημένες περιοχές από πλευράς αιολικού δυναμικού είναι οι χώρες της πολικής και εύκρατης ζώνης, ιδιαίτερα κοντά στις ακτές. Η μεγάλη ανάπτυξη αιολικών πάρκων για την ηλεκτροπαραγωγή κατά την τελευταία δεκαετία παράλληλα με την ευαισθητοποίηση για το περιβάλλον οδήγησαν την αιολική ενέργεια σε σημαντικό κομμάτι του ενεργειακού ισοζυγίου. Η παγκόσμια εγκατεστημένη ισχύς των αιολικών το 2009 έφτασε τα 159.213MW, ενώ το 2010 προστέθηκαν 38.312MW. Η αιολική ενέργεια παρουσίασε μια αύξηση της τάξης του 31,7%, η μεγαλύτερη που έχει σημειωθεί από το 2001. Το 2008 η εγκατεστημένη ισχύς ήταν 120.902,9 MW , ενώ το 2007 ήταν 93.926,8MW. Στην παγκόσμια αγορά πρώτη θέση καταλαμβάνουν οι Η.Π.Α., ενώ ακολουθούν η Κίνα και η Γερμανία.

Η **Ελλάδα** είναι μια χώρα με προνομιακή θέση, που διαθέτει ένα από τα πιο **υψηλά αιολικά δυναμικά ανάμεσα στις χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης**. Οι καλύτερες περιοχές για εγκατάσταση ανεμογεννητριών είναι η Νότια Πελοπόννησος, η Ανατολική Στερεά (Εύβοια), η Κρήτη και τα νησιά του Αιγαίου, όπου πνέουν συχνά ισχυροί άνεμοι, μέσης ταχύτητας που ξεπερνά τα 10 m/s. Σύμφωνα με το πρωτόκολλο του Κιότο και των οδηγιών της Ε.Ε., η Ελλάδα πρέπει να παράγει το 20,1% της ηλεκτρικής ενέργειας από Α.Π.Ε., ενώ το 2020 το 29%. Γι' αυτό το λόγο

δίνεται πληθώρα κινήτρων στους ανεξάρτητους παραγωγούς μεταξύ των οποίων επενδυτικές επιχορηγήσεις, εγγυημένη σύνδεση στο δίκτυο, μακροπρόθεσμα συμβόλαια κ.λ.π. Επιπρόσθετα, η απελευθέρωση των ενεργειακών αγορών καταργεί το καθετοποιημένο σύστημα παραγωγής-μεταφοράς-διανομής και επομένως παρέχει τη δυνατότητα στους υποψήφιους ανεξάρτητους παραγωγούς να επενδύσουν σε περιοχές της επιλογής τους, ανάλογα με τα συμφέροντά τους. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να έχουν κατατεθεί στην Ρυθμιστική Αρχή Ενέργειας αιτήσεις για εγκατάσταση αιολικών πάρκων. Ωστόσο, παρά το ενδιαφέρον από ανεξάρτητους παραγωγούς αφ' ενός οι χρονοβόρες και επίπονες διαδικασίες έκδοσης αδειών εγκατάστασης και αφετέρου νομικά ζητήματα αποτελούν τροχοπέδη στη συνολική αιολική διείσδυση.

Τα **πλεονεκτήματα** που προκύπτουν από την αιολική ενέργεια σε αντιστοιχία με τα πλεονεκτήματα των ΑΠΕ, είναι:

- Είναι ανανεώσιμη πηγή ενέργειας, συνεπώς δεν εξαντλείται σε αντίθεση με τα συμβατικά καύσιμα.
- Αποτελεί καθαρή μορφή ενέργειας, ήπια προς το περιβάλλον. Η χρήση της δεν επιβαρύνει το περιβάλλον των περιοχών εγκατάστασης ενώ αντικαθιστά τις ιδιαίτερα ρυπογόνες πηγές ενέργειας.
- Είναι εγχώρια πηγή ενέργειας και βοηθά στην ενίσχυση της ενεργειακής ανεξαρτητοποίησης και ασφάλειας της χώρας.
- Είναι διάσπαρτη γεωγραφικά και έτσι καλύπτονται ενεργειακές ανάγκες σε τοπικό και περιφερειακό επίπεδο ενώ παράλληλα αποφορτίζονται τα συστήματα υποδομής και μειώνονται οι απώλειες από τη μεταφορά ενέργειας.
- Ειδικότερα η χώρα μας, κυρίως στα νησιά του Αιγαίου, διαθέτει υψηλό αιολικό δυναμικό, αφού εμφανίζονται άνεμοι σημαντικής ταχύτητας και διάρκειας σχεδόν ολόκληρο το έτος.

Τα κυριότερα **μειονεκτήματα** που αποδίδονται στην αιολική ενέργεια είναι:

- Η **αδυναμία ακριβών προβλέψεων της ταχύτητας και της διεύθυνσης του ανέμου** με αποτέλεσμα οι αιολικές μηχανές να χρησιμοποιούνται ως εφεδρικές πηγές ενέργειας σε συνδυασμό με κάποια άλλη πηγή ενέργειας.
- Η **παραγόμενη ενέργεια δεν πληροί πάντα τις απαιτήσεις του δικτύου η διασύνδεση** προϋποθέτει τοποθέτηση αυτοματισμών ελέγχου, μηχανήματα ρύθμισης τάσεως και συχνότητας, καθώς και έλεγχο της άεργης ισχύος. Επίσης, λόγω μεταβατικών φαινομένων απασχολεί ιδιαίτερα οι διαδικασίες ζεύξης-απόζευξης των αιολικών μηχανών στο δίκτυο. [10]

Συμπερασματικά, η αξιοποίηση της αιολικής ενέργειας σε μεγάλη κλίμακα είναι μια σημαντική συνεισφορά στην παγκόσμια χρήση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Όσον αφορά την παρούσα κατάσταση σε **συστήματα αιολικής ηλεκτροπαραγωγής μικρής ισχύος**, η απόδοση της επένδυσης, από οικονομικής πλευράς, είναι χαμηλή, κυρίως λόγω του χαμηλού όγκου παραγωγής και της μέτριας αποτελεσματικότητας της υφιστάμενης διαδικασίας μετατροπής της ενέργειας [14].

1.3 Αεροδυναμικό μέρος

Μια ανεμογεννήτρια μετατρέπει την **κινητική ενέργεια του ανέμου σε ηλεκτρική**. Η ροπή παράγεται αεροδυναμικά από την δύναμη άνωσης στα πτερύγια και μεταφέρεται στο δρομέα. Με αυτόν τον τρόπο, η **κινητική ενέργεια του ανέμου (P) μετατρέπεται σε μηχανική ενέργεια** που στρέφει το δρομέα της ανεμογεννήτριας (P_w). Έχοντας συνδεθεί στον ίδιο άξονα η γεννήτρια, μετατρέπει με τη σειρά της τη **μηχανική ενέργεια σε ηλεκτρική**.

Η στιγμιαία ισχύς που περιέχεται σε ένα ρεύμα αέρα διατομής A ομοιόμορφης στιγμιαίας ταχύτητας V και πυκνότητας ρ υπολογίζεται από τη σχέση:

$$P = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot V_w^3 \quad (1.1)$$

και είναι ανάλογη του κύβου της στιγμιαίας ταχύτητας του ανέμου.

Η αεροδυναμική ισχύς του ανέμου που μετατρέπεται σε μηχανική από τον ανεμοκινητήρα υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$P_w = \frac{1}{2} \rho A C_p V_w^3 \quad (1.2)$$

Όπου:

A: η **επιφάνεια** που διαπερνά κάθετα ο άνεμος και ισχύει $A = \pi R^2$

ρ : η **πυκνότητα του αέρα**, η οποία συνδέεται με τη μάζα του κινούμενου αέρα με τη σχέση $m = \rho A V_w$

C_p : ο **αεροδυναμικός συντελεστής ισχύος του δρομέα** και αναφέρεται σε μια ισχύ που δεν μπορούμε να την εκμεταλλευτούμε ολόκληρη, ακόμα και με ιδανική έλικα. Η μέγιστη τιμή του αεροδυναμικού συντελεστή C_p , σύμφωνα με την απόδειξη του A.Betz είναι 0,593. Στην πραγματικότητα θα είναι μικρότερος λόγω φαινομένων συνεκτικότητας, πεπερασμένου αριθμού πτερυγίων και της υπάρχουσας συστροφής του ρεύματος του αέρα πίσω από το δρομέα, η οποία τελικά αποτελεί απώλεια ενέργειας λόγω μη μετατροπής της σε πίεση. Οι συνήθεις τιμές που συναντώνται είναι από 0,3 έως 0,5. Είναι μέγεθος που χαρακτηρίζει τους ανεμοκινητήρες, ο οποίος είναι συνάρτηση της γωνίας βήματος των πτερυγίων, αν υπάρχει, και του λόγου του ακροπτερυγίου [15]:

$$\lambda = \frac{R \omega_R}{V_w} \quad (1.3)$$

Όπου:

R: η ακτίνα της έλικας του ανεμοκινητήρα

ω_R : η γωνιακή ταχύτητα περιστροφής της έλικας του ανεμοκινητήρα

V_w : η ταχύτητα του ανέμου (m/s)

Μια ανεμογεννήτρια θα αποτελείται από:

- το **μηχανικό σύστημα** στο οποίο περιλαμβάνεται ο ανεμοκινήτρας, που μετατρέπει τη δεσμευμένη κινητική ενέργεια του ανέμου σε μηχανική, τα πτερύγια του και το σύστημα ελέγχου βήματος ακροπτερυγίου, αν υπάρχει. Συνήθως, περιλαμβάνει και το σύστημα μετάδοσης κίνησης, το οποίο περιλαμβάνει έναν πολλαπλασιαστή στροφών.
- Το **ηλεκτρικό σύστημα**, το οποίο περιλαμβάνει τη γεννήτρια και ενδεχομένως έναν μετατροπέα ισχύος που θα μεσολαβεί ανάμεσα στη γεννήτρια και στο δίκτυο ή το φορτίο.
- Το **σύστημα ελέγχου** της ανεμογεννήτριας, το οποίο προσαρμόζει τη λειτουργία της στις εκάστοτε ανεμολογικές συνθήκες, με σκοπό την μεγιστοποίηση της απόδοσης και την επιτήρηση της ασφάλειάς της. [12]

Οι βασικές παράμετροι μιας ανεμογεννήτριας είναι:

- **Ταχύτητα εκκίνησης (V_{cut-in}):** Είναι η ταχύτητα ανέμου στην οποία η Α/Γ αρχίζει να παράγει καθαρή ισχύ. Αυτή η ταχύτητα είναι μεγαλύτερη από αυτή που απαιτείται για να αρχίσουν να στρέφονται τα πτερύγια.
- **Ταχύτητα αποκοπής ($V_{cut-out}$):** Για αποφυγή υπερφόρτισης της Α/Γ, διακόπτεται η λειτουργία της μόλις η ταχύτητα του ανέμου ξεπεράσει την ταχύτητα αποκοπής.
- **Ονομαστική ισχύς:** Η μέγιστη ισχύς που μπορεί να παραχθεί κατά την κανονική λειτουργία.
- **Ονομαστική ταχύτητα:** Η ταχύτητα του ανέμου για την οποία παράγεται η ονομαστική ισχύς.

1.4 Κριτήρια διαχωρισμού των ανεμογεννητριών

Μέχρι σήμερα έχουν χρησιμοποιηθεί και χρησιμοποιούνται πολλά είδη Α/Γ, οι οποίες κατατάσσονται σε δύο βασικές κατηγορίες ανάλογα με τον **προσανατολισμό**

των αξόνων τους σε σχέση με τη ροή του ανέμου. Έτσι, οι πλέον διαδεδομένοι τύποι Α/Γ θα είναι:

- **Οριζόντιου άξονα:** Στις Α/Γ οριζόντιου άξονα ο δρομέας είναι τύπου έλικα και βρίσκεται συνεχώς παράλληλος με την κατεύθυνση του ανέμου και του εδάφους.
- **Κάθετου άξονα:** Στις Α/Γ κάθετου άξονα, ο άξονας περιστροφής τους είναι κάθετος στην επιφάνεια της γης και κάθετος στη ροή του ανέμου.

Οι ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα διαχωρίζονται ανάλογα με τον προσανατολισμό των πτερυγίων σε ανάντη και κατάντη, ενώ με βάση τον αριθμό των πτερυγίων τους σε μονόπτερες, δίπτερες, τρίπτερες και πολύπτερες, με επικρατέστερες τις δίπτερες και τρίπτερες.

Οι Α/Γ μπορούν να διαχωριστούν και ανάλογα με τη λειτουργία τους, όσον αφορά τη ρύθμιση των στροφών σε:

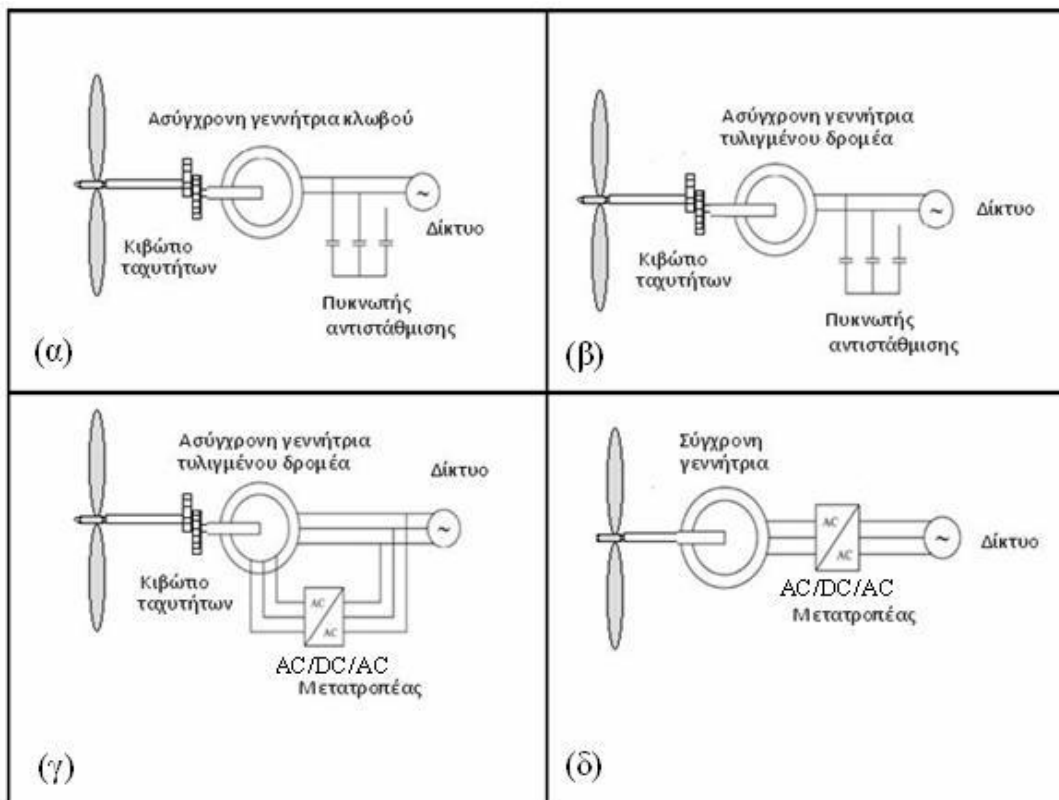
Σταθερών στροφών: Οι ανεμογεννήτριες σταθερών στροφών αποτελούν τις συμβατικές ανεμογεννήτριες του παρελθόντος που, όμως, ακόμα και σήμερα αποτελούν το σημαντικότερο ποσοστό από τις ήδη εγκατεστημένες ανεμογεννήτριες. Χρησιμοποιούν ασύγχρονες γεννήτριες απ' ευθείας συνδεδεμένες στο δίκτυο και κατ'επέκταση χαρακτηρίζονται από πρακτικά σταθερή ταχύτητα περιστροφής του δρομέα.

Μεταβλητών στροφών: Οι ανεμογεννήτριες μεταβλητών στροφών λειτουργούν σε μεγάλο εύρος ταχυτήτων πάνω και κάτω από τη σύγχρονη ταχύτητα. Η ταχύτητα περιστροφής προσαρμόζεται με βάση την τιμή του ανέμου με στόχο την αύξηση της ενεργειακής απόδοσης. Διαθέτουν σύγχρονες ή ασύγχρονες γεννήτριες, οι οποίες συνδέονται στο δίκτυο μέσω διατάξεων μετατροπών ισχύος. Με τον τρόπο αυτό, αποδεσμεύεται η ταχύτητα περιστροφής τους από τη σταθερή συχνότητα του δικτύου, επιτρέποντας την ευρεία μεταβολή της.

1.5 Επικρατέστερες διαμορφώσεις ηλεκτρικού μέρους Α/Γ

Υπάρχουν διάφοροι τύποι ανεμογεννητριών αναφορικά με τη διαμόρφωση του ηλεκτρικού μέρους τους, κάθε ένας με διαφορετικά χαρακτηριστικά. Οι κύριοι τύποι διακρίνονται σε:

- Σταθερών στροφών, με ασύγχρονη γεννήτρια κλωβού, απευθείας συνδεδεμένη με το δίκτυο(Σχήμα 1.1(α))
- Περιορισμένης λειτουργίας μεταβλητών στροφών, με ασύγχρονη γεννήτρια τυλιγμένου δρομέα μεταβλητής αντίστασης , απευθείας συνδεδεμένη με το δίκτυο((Σχήμα 1.1(β))
- Μεταβλητών στροφών με ασύγχρονη γεννήτρια διπλής τροφοδότησης(Σχήμα 1.1(γ))
- Μεταβλητών στροφών με σύγχρονη γεννήτρια με τύλιγμα διεγέρσεως ή μόνιμο μαγνήτη(Σχήμα 1.1(δ))



Σχ
ήμα 1.1:Επικρατέστερες διαμορφώσεις ηλεκτρικού μέρους Α/Γ. (α) Σταθερών στροφών με ασύγχρονη γεννήτρια τύπου κλωβού, (β) σταθερών στροφών με ασύγχρονη γεννήτρια τυλιγμένου δρομέα, (γ) μεταβλητών στροφών με ασύγχρονη γεννήτρια τυλιγμένου δρομέα διπλής τροφοδότησης, (δ) Μεταβλητών στροφών με σύγχρονη γεννήτρια και ΕΡ/ΣΡ/ΕΡ μετατροπέα στο στάτι

Η ανεμογεννήτρια **σταθερών στροφών του σχήματος (α)**, διαθέτει γεννήτρια επαγωγής τύπου κλωβού. Ο δρομέας οδηγείται από τον ανεμοκινητήρα μέσω κιβωτίου ταχυτήτων, ενώ ο στάτης συνδέεται απευθείας στο δίκτυο. Έχει ως βασικό πλεονέκτημα το μικρό κόστος, το μικρό βάρος και την απλότητα στην κατασκευή. Η μείωση του κόστους οφείλεται αφενός στην έλλειψη μετατροπέα και αφετέρου στην ίδια τη γεννήτρια που χρησιμοποιεί η οποία είναι μια συνηθισμένη ασύγχρονη γεννήτρια τύπου κλωβού. Η απουσία μετατροπέα δίνει αξιοπιστία στην κατασκευή ενώ παράλληλα οι ανάγκες της συντήρησης είναι μειωμένες. Βασικό μειονέκτημα των ανεμογεννητριών σταθερών στροφών είναι το γεγονός ότι δεν υπάρχει δυνατότητα ρύθμισης των στροφών ανάλογα με την ταχύτητα του ανέμου. Αυτό έχει ως συνέπεια οποιαδήποτε μεταβολή στην ταχύτητα του ανέμου να μεταφράζεται σε αντίστοιχη μεταβολή της μηχανικής ροπής στον άξονα με συνέπεια την παρουσία έντονων μηχανικών καταπονήσεων που φθείρουν το σύστημα. Ένα άλλο σημαντικό μειονέκτημα της ανεμογεννήτριας σταθερών στροφών είναι ότι λόγω της έλλειψης ηλεκτρονικών ισχύος δεν μπορεί να συμβάλει στην ρύθμιση της αέργου ισχύος που ανταλλάσει με το δίκτυο με συνέπεια να είναι απαραίτητη η σύνδεση πυκνωτών στην έξοδο ώστε να κάνουν αντιστάθμιση της αέργου ισχύος που απορροφούν.

Η **ασύγχρονη γεννήτρια τυλιγμένου δρομέα(β)** παρέχει τη δυνατότητα, μεταβάλλοντας την αντίσταση του δρομέα, να ελέγχεται η ηλεκτρική ροπή (β). Με τον τρόπο αυτό ελέγχεται η γεννήτρια δίνοντας τη δυνατότητα αλλαγής των στροφών της κατά τη διάρκεια ριπών ανέμου. Έτσι, από τη μία περιορίζεται ο βαθμός των μηχανικών καταπονήσεων και από την άλλη, βελτιώνεται η ποιότητα ισχύος εξόδου.

Η συνηθέστερη τοπολογία είναι αυτή των **μεταβλητών στροφών (γ - δ)**. Οι Α/Γ μεταβλητών στροφών παρουσιάζουν αυξημένη ενεργειακή απόδοση με μέγιστη αξιοποίηση της αιολικής ενέργειας. Αυτό οφείλεται στην μεταβολή της γωνιακής ταχύτητας περιστροφής, ανάλογα με την ταχύτητα του ανέμου. Εξαιτίας αυτού, υπάρχει μειωμένη μηχανική καταπόνηση τόσο στα πτερύγια, όσο και στο σύστημα μετάδοσης της κίνησης, απαλοιφή του κιβωτίου ταχυτήτων, μείωση του ακουστικού θορύβου και προσαρμογή της Α/Γ στις τοπικές ανεμολογικές συνθήκες. Ένα άλλο

χαρακτηριστικό πλεονέκτημα των Α/Γ μεταβλητών στροφών είναι το γεγονός ότι μπορούν να παρέχουν στο δίκτυο καλύτερης ποιότητας ηλεκτρική ισχύ. Επίσης, υπάρχει δυνατότητα ρύθμισης του συντελεστή ισχύος ανάλογα με τις απαιτήσεις του δικτύου. Αυτό πραγματοποιείται ελέγχοντας κατάλληλα τον μετατροπέα, ώστε ανάλογα με τα επίπεδα της τάσης του δικτύου, να γίνεται κατάλληλη έγχυση αέργου ισχύος. Αυτή η λειτουργία είναι συναφής με εκείνη των συμβατικών σταθμών και εναρμονίζεται πλήρως με τα νέα πρότυπα που αναφέρονται στην ποιότητα ισχύος.

Μια συνήθης διαμόρφωση ηλεκτρικού μέρους ανεμογεννήτριας μεταβλητών στροφών είναι εκείνη με **ασύγχρονη γεννήτρια τυλιγμένου δρομέα και διπλή τροφοδότηση με μετατροπέα συνδεδεμένο στο δρομέα (γ)**. Στην περίπτωση αυτής της ηλεκτρικής διαμόρφωσης, υπάρχει δυνατότητα ελέγχου των στροφών ρυθμίζοντας κατάλληλα τη συχνότητα των ρευμάτων που κυκλοφορούν στον δρομέα. Ο τύπος αυτός έχει όλα τα παραπάνω πλεονεκτήματα Α/Γ μεταβλητών στροφών. Επιπλέον, αποτελείται από μια συνηθισμένη γεννήτρια και ένα μικρό και σχετικά φθινό μετατροπέα. Βασικό μειονέκτημα της διπλής τροφοδότησης είναι το γεγονός ότι ο στάτης της ασύγχρονης γεννήτριας είναι άμεσα συνδεδεμένος στο δίκτυο, έτσι σε οποιαδήποτε βύθιση τάσης είναι εκτεθειμένος στη δυναμική συμπεριφορά του δικτύου. Αυτό δεν ισχύει στην διαμόρφωση του σχήματος (γ), όπου υπάρχει απομόνωση της συχνότητας του δικτύου και των μεγεθών του στάτη μέσω του μετατροπέα ανύψωσης τάσης.

Η Α/Γ **μεταβλητών στροφών με σύγχρονη γεννήτρια και μετατροπέα E.P./Σ.P/E.P., (δ)**, είναι κατάλληλη για σύνδεση στο δίκτυο δεδομένου ότι οι ραγδαίες μεταβολές της ταχύτητας περιστροφής είτε εξαιτίας του ανέμου είτε από κάποια διαταραχή στο δίκτυο, μπορούν εύκολα να εξομαλυνθούν από το δρομέα της και οποιοδήποτε μεγάλο ρεύμα, που ίσως θα προκληθεί αποσβένεται από το μαγνητικό κύκλωμα του πυρήνα, χωρίς τον κίνδυνο απομαγνητισμού, ειδικά σε σύγχρονες γεννήτριας μόνιμου μαγνήτη. Επίσης, δε διαθέτει κιβώτιο ταχυτήτων, επιτυγχάνοντας έτσι μείωση του κόστους και του βάρους, βελτίωση της αξιοπιστίας και ελάττωση του θορύβου. Μειονέκτημα της διαμόρφωσης του σχήματος (δ), είναι η μεγάλη και βαριά γεννήτρια που χρησιμοποιεί. Επίσης, από το μετατροπέα της μεταφέρεται το

100% της παραγόμενης ισχύος σε αντίθεση με την ασύγχρονη διπλής τροφοδότησης που μόνο το 1/3 περίπου της παραγόμενης ισχύος περνάει από το μετατροπέα. Το γεγονός ότι όλη η ισχύς μεταφέρεται από το μετατροπέα περιορίζει κάπως τη λειτουργία του συστήματος, ιδιαίτερα σε μη φυσιολογικές καταστάσεις λειτουργίας και συγκεκριμένα την ικανότητα αδιάλειπτης παροχής ισχύος. [12]

1.6 Ανεμογεννήτριες μικρής ισχύος

Τα μεγάλα συστήματα αιολικής ηλεκτροπαραγωγής, με έξοδο ηλεκτρικής ενέργειας τάξεως MW, υπερτερούν οικονομικά σε σχέση με τα μικρά συστήματα. Παρόλα αυτά, οι ανεμογεννήτριες μεγάλης ισχύος χρησιμοποιούνται σε συγκεκριμένες και απομονωμένες περιοχές όπου ικανοποιούνται συγκεκριμένα κριτήρια διεύθυνσης και συνήθως βασίζονται στην διαθεσιμότητα και την ικανότητα των ήδη υπαρχόντων γραμμών μεταφοράς. Από την άλλη, **οι ανεμογεννήτριες μικρής ισχύος είναι πολύ ελκυστική λύση για την ικανοποίηση των ενεργειακών αναγκών τοπικών οικισμών, μικρών επιχειρήσεων ή αναπτυσσόμενων χωρών όπου η υποδομή του δικτύου είναι περιορισμένη, ενώ μπορούν να αποτελούν κομμάτι ενός υβριδικού συστήματος, όπως παράλληλη χρήση με φωτοβολταϊκά.** Μπορούν να εγκατασταθούν σε μη διασυνδεδεμένες με το ηλεκτρικό δίκτυο περιοχές σε εφαρμογές όπως είναι οι μετεωρολογικοί ή τηλεπικοινωνιακοί σταθμοί που βρίσκονται σε κορυφές βουνών, σε συστήματα φωτισμού εθνικών οδών που διασχίζουν ακατοίκητες περιοχές, σε μικροδίκτυα με συνδυασμό συμβατικών πηγών ενέργειας και άλλων ΑΠΕ με αποθήκευση της παραγόμενης ενέργειας σε συστήματα μπαταριών ή σε αυτόνομα συστήματα με την απευθείας σύνδεση της ανεμογεννήτριας σε συσσωρευτές [2].

Έτσι, λοιπόν, μπορούν να εντοπίζονται:

- Ως αυτόνομες Α/Γ σε έναν ιστό στην περιοχή της κατοικίας. Αύτη η θέση είναι τυπική για αγροτικές περιοχές, όπου αυτές οι ανεμογεννήτριες χρησιμοποιούνται ως αυτόνομα συστήματα.
- Στην οροφή κτιρίων, όπου σε αυτή την περίπτωση η δυσκολία έγκειται στη σύνθετη ροή του αέρα γύρω από μια κατασκευή κτιρίου με έμφυτες αναταραχές.

- Ενσωματωμένες στα κτίρια, το οποίο σημαίνει ότι η κατασκευή του κτιρίου είναι προσαρμοσμένη στο να κατευθύνει τη ροή του ανέμου στις ανεμογεννήτριες.[14],[16]

Στις **ανεμογεννήτριες μικρής ισχύος** μια συνιστώσα που συνήθως αποτελεί ζήτημα προβληματισμού για την επιλογή της, αλλά και που ταυτόχρονα είναι το πιο σημαντικό μέρος της ανεμογεννήτριας είναι η **επιλογή της γεννήτριας** που θα χρησιμοποιηθεί. Αναζητείται μια λύση που προϋποθέτει την **εξάλειψη του κιβωτίου ταχυτήτων**, περιορίζοντας έτσι τις μηχανικές καταπονήσεις και τον αριθμό βλαβών. Οι απαιτήσεις περιλαμβάνουν **αξιοπιστία, λειτουργία σε χαμηλές ταχύτητες, καλή απόδοση, μικρό μέγεθος, χαμηλό βάρος**. Από την άλλη, η γεννήτρια θα πρέπει να είναι **μηχανολογικά εύρωστη, φθηνή στην κατασκευή και με χαμηλό κόστος συντήρησης και εύκολα προσαρμοζόμενη** στο σύστημα της ανεμογεννήτριας.

Πολλά επιστημονικά άρθρα υποστηρίζουν τη χρήση **σύγχρονων γεννητριών μονίμων μαγνητών στις ανεμογεννήτριες για εφαρμογές μικρής ισχύος**. Έχουν την ικανότητα να αυτοδιεγείρονται, γεγονός που επιτρέπει τη λειτουργία της υπό υψηλό συντελεστή ισχύος και υψηλή απόδοση. Οι σύγχρονες γεννήτριες μονίμων μαγνητών πληρούν όλα τα παραπάνω κριτήρια για τις μικρής ισχύος ανεμογεννήτριες. Ένα μειονέκτημα είναι το σχετικά υψηλό κόστος λόγω της χρήσης κράματος Νεοδυμίου-Βορείου-Σιδήρου ως υλικό μόνιμου μαγνήτη. Ακόμα, η διαθεσιμότητα του κράματος αυτού τα επόμενα χρόνια είναι αμφίβολη, λόγω του ότι ο κύριος προμηθευτής του, η Κίνα, δήλωσε ότι τα επόμενα χρόνια δεν θα έχει άλλα αποθέματα. Στον αντίποδα, βρίσκεται η γεννήτρια επαγωγής, είτε κλωβού είτε τυλιγμένου δρομέα, που τελευταία διερευνάται κατά πόσο μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε εφαρμογές ανεμογεννητριών μεταβλητών στροφών, χωρίς τη χρήση κιβωτίου ταχυτήτων. Σε εφαρμογές μικρής ισχύος, όπου το βάρος και το μέγεθος είναι ένας κομβικός παράγοντας επιλογής γεννήτριας, η σύγχρονη γεννήτρια μονίμων μαγνητών αποτελεί την πιο ελκυστική λύση.[2],[13]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΠΡΟΚΑΤΑΡΚΤΙΚΗ ΣΧΕΔΙΑΣΗ

Η προκαταρκτική σχεδίαση μιας ηλεκτρικής μηχανής μονίμων μαγνητών με βάση τα μαγνητικά μεγέθη περιλαμβάνει τα εξής βήματα:

- Προσδιορισμός της επιφάνειας διακένου, της δύναμης διακένου και της ηλεκτρομαγνητικής ροπής
- Προσδιορισμός των χαρακτηριστικών του στάτη και
- Προσδιορισμός των χαρακτηριστικών του δρομέα

2.1 Προσδιορισμός της επιφάνειας διακένου, της δύναμης διακένου και της ηλεκτρομαγνητικής ροπής

Οι βασικές προδιαγραφές της γεννήτριας φαίνονται στον πίνακα (2.1).

Ονομαστική Ενεργό ισχύς (kW)	P	1
Διάκενο (mm)		0,7
Ονομαστικές στροφές (ΣΑΛ)	n	500

Πίνακας 2.1: Βασικές προδιαγραφές σχεδιαζόμενης γεννήτριας μονίμων μαγνητών

Επομένως, η γωνιακή ταχύτητα θα ισούται:

$$\omega_{\text{m}} = \frac{2\pi n}{60} = 52 \frac{\text{r}}{\text{s}} \quad (2.1)$$

Και η ηλεκτρομαγνητική ροπή:

$$T_{\varepsilon} = \frac{P_m}{\omega_{rm}} = 19,2Ntm \quad (2.2)$$

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

Ο προσδιορισμός της ελάχιστης επιφάνειας του διακένου γίνεται λαμβάνοντας υπ' όψιν τις σχέσεις:

$$P_t = \frac{\int \vec{B}_n \cdot \vec{B}_t dl}{\pi \cdot D \cdot \mu_0} \quad (2.3)$$

$$T_{el,max} = \frac{\pi \cdot P_t \cdot D^2 \cdot L}{2} \quad (2.4)$$

Ως μέση επαγωγή διακένου λαμβάνεται η τιμή 0.7 T, ώστε να υπάρχουν μικρές απώλειες σιδήρου στον στάτη. Θεωρώντας ότι

$$B_n = B_t = \frac{0.7 \cdot \sqrt{2}}{2} = 0.495 \text{ T} \quad (2.5)$$

,η επιφανειακή πίεση είναι (2.3):

$$P_t = \frac{0.495^2}{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}} = 194,99 \text{ kN/m}^2$$

Τέλος, αντικαθιστώντας στη σχέση (2.4) :

$$D^2 L = 196 \text{ cm}^3$$

, όπου D, η διάμετρος του διακένου σε cm και L, το μήκος του διακένου κατά τον άξονα του κινητήρα σε cm.

Δεδομένου ότι σε μηχανές χαμηλής ισχύος επιλέγεται το ενεργό μήκος να είναι ίσο με τη διάμετρο του διακένου, το ζεύγος τιμών θα είναι [11]:

$$D=L=60\text{mm}$$

Δηλαδή:

$$D = 2 \cdot R_{\delta\rho\rho\mu\acute{\epsilon}\alpha} + L \Rightarrow 60 = 2 \cdot R_{\delta\rho\rho\mu\acute{\epsilon}\alpha} + 0,7 \Rightarrow R_{\delta\rho\rho\mu\acute{\epsilon}\alpha} = 30\text{mm} \quad (2.7)$$

2.2 Προσδιορισμός χαρακτηριστικών του στάτη

Η επιλογή ονομαστικής συχνότητας λειτουργίας και αριθμού πόλων σχετίζεται με την μηχανική ταχύτητα περιστροφής στη μόνιμη κατάσταση:

$$\omega_{rm} = \frac{4 \cdot \pi \cdot f_{el}}{p} \quad (2.8)$$

,όπου P ο αριθμός των πόλων του κινητήρα, f_{el} η συχνότητα λειτουργίας.

Λύνοντας ως προς το λόγο P/f, προκύπτει η σχέση των πόλων με τη συχνότητα λειτουργίας:

$$\frac{p}{f_{el}} = 0,24 \quad (2.9)$$

Οι απώλειες πυρήνα αυξάνονται αυξανόμενης της συχνότητας και επιλέγεται η λειτουργία της γεννήτριας να παραμείνει σε συχνότητα κοντά στα 50 Hz με παράλληλη χρήση λαμαρίνας χαμηλών ειδικών απωλειών. Έτσι, αποδεκτά ζεύγη τιμών μπορεί να είναι τα παρακάτω:

Αριθμός πόλων (p)	Συχνότητα Hz (f _{el})
10	41,67
12	50
14	58,3

Πίνακας 2.2: Συνδυασμοί πόλων- συχνότητων

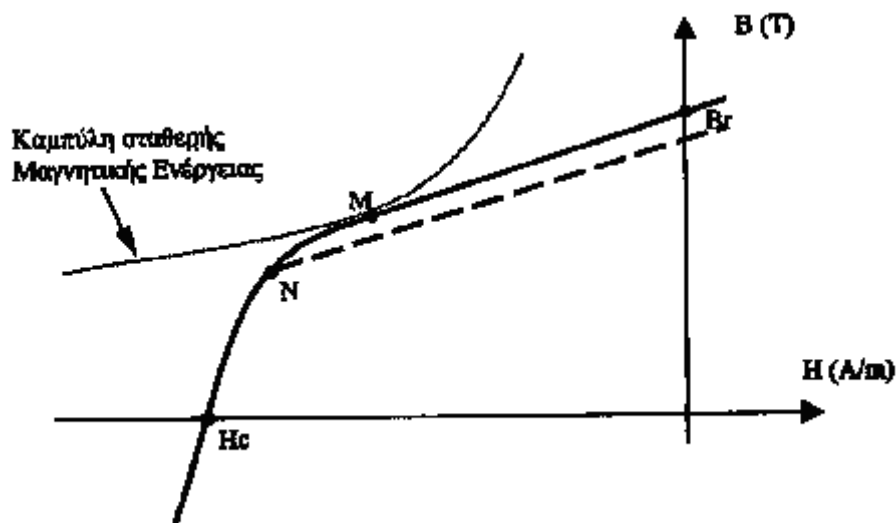
Αναλόγως τον τύπο του τυλίγματος που θα χρησιμοποιηθεί, δηλαδή αν θα είναι κλασματικού ή πλήρους βήματος, θα αποφασισθεί και ο αριθμός των πόλων.

Η μέση ροή ανά πόλο υπολογίζεται από τον τύπο [11]:

$$\Phi = \frac{B_{av} \cdot \pi \cdot L \cdot D}{P} = \frac{0.7 \cdot \pi \cdot 0,06 \cdot 0,06}{14} = 0.6 \text{ mWb} \quad (2.10)$$

2.3 Προσδιορισμός χαρακτηριστικών του δρομέα

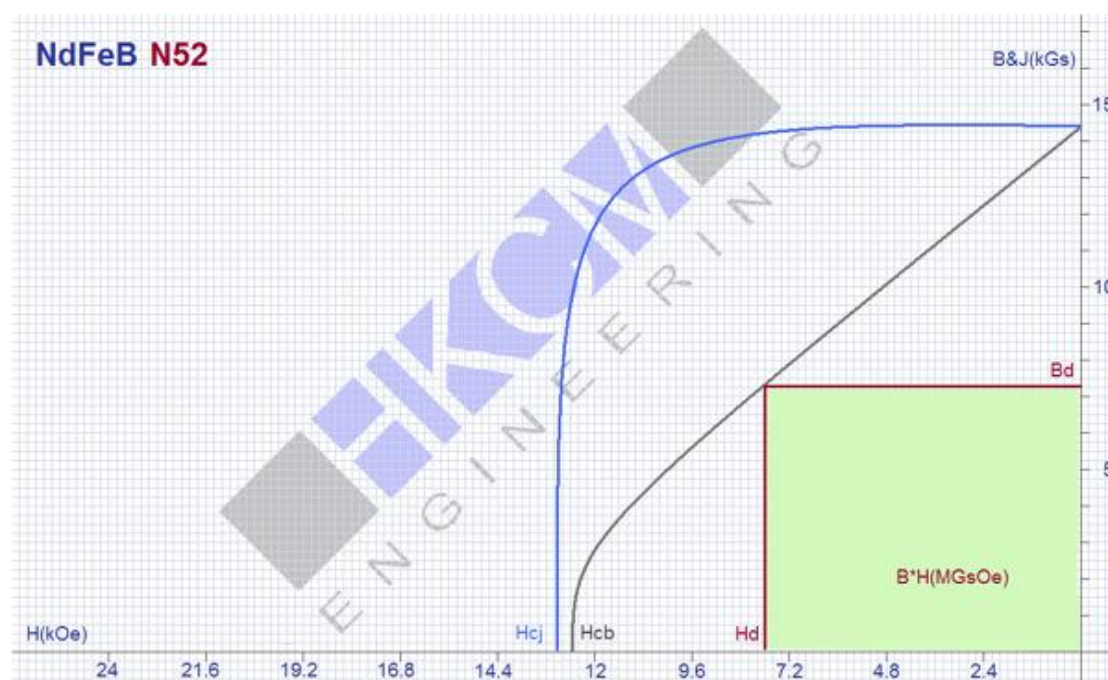
Το βασικό κριτήριο χρησιμοποίησης του υλικού του μόνιμου μαγνήτη είναι στη μέγιστη φόρτιση της μηχανής το υλικό να μη φτάσει κάτω από το γόνατο της χαρακτηριστικής απομαγνήτισης έτσι, ώστε να εξασφαλίζει τη μέγιστη μαγνητική ενέργεια- σημείο M της τυπικής χαρακτηριστικής απομαγνήτισης του μόνιμου μαγνήτη. Αν η λειτουργία οδηγήσει σε χαμηλότερο σημείο της χαρακτηριστικής, όπως στο σημείο N, τότε το υλικό απομαγνητίζεται, δηλαδή μετά την απομάκρυνση του εξωτερικού πεδίου θα ακολουθήσει μία άλλη χαρακτηριστική καμπύλη απομαγνήτισης, που δείχνεται με διακεκομμένη στο ακόλουθο σχήμα:



Σχήμα 2.1: Χαρακτηριστική καμπύλη απομαγνήτισης

Η γεωμετρική διαμόρφωση του δρομέα καθορίζεται από την ανάγκη για χαμηλές απώλειες πυρήνα και δινορρευμάτων. Επιλέγεται δρομέας επιφανειακών μαγνητών γιατί παρουσιάζει αμελητέες απώλειες πυρήνα, καθώς ο επιφανειακός μαγνήτης επιβάλλει σχεδόν σταθερή μαγνητική επαγωγή στο σώμα του σιδήρου. Θα υπολογιστούν οι κατάλληλες διαστάσεις και ο τύπος του μόνιμου μαγνήτη. Οι μαγνήτες κράματος Νεοδυμίου – Σιδήρου – Βορίου (NdFeB) επιλέγονται ως υλικό, γιατί έχουν τη μεγαλύτερη πυκνότητα ενέργειας από τις υπόλοιπες εναλλακτικές του εμπορίου. Παρουσιάζουν μέτρια θερμοκρασιακή συμπεριφορά, αλλά στην συγκεκριμένη εφαρμογή υψηλής απόδοσης δεν αναμένονται υψηλές θερμοκρασίες.

Υπολογίζονται παρακάτω οι διαστάσεις που θα πρέπει να έχει μαγνήτης Νεοδυμίου – σιδήρου – βορίου τύπου N52, ώστε να αξιοποιείται με τον καλύτερο τρόπο. Η καλή του αξιοποίηση έγκειται στη λειτουργία του σε περιοχή κοντά στο σημείο μέγιστης ενέργειας στην καμπύλη απομαγνήτισης. Η καμπύλη απομαγνήτισης των μαγνητών αυτών είναι σχεδόν ευθεία γραμμή, διευκολύνοντας τον υπολογισμό του σημείου που αποδίδουν τη μέγιστη ενέργεια, αρκεί να είναι γνωστά η παραμένουσα μαγνήτιση, B_r , και το μαγνητικό πεδίο επαναφοράς, H_c .



Σχήμα 2.2: Καμπύλη απομαγνήτισης μόνιμου μαγνήτη N52

Ο μαγνήτης δίνει τη μέγιστη ενέργεια όταν $B_d = 0,71$ T και $H_d=597$ kA/m και η παραμένουσα μαγνήτιση είναι ίση με $B_r=1,45$ T. Οπότε αν είναι επιθυμητό, η μαγνητική επαγωγή του διακένου B_δ να κυμαίνεται γύρω στο 80% της παραμένουσας μαγνήτισης, τότε [11]:

$$B_\delta \approx B_r \cdot \frac{L_m}{L_o} = \frac{L_m}{L_m + L_\delta} = 0,8 \Rightarrow L_m = 3mm \quad (2.11)$$

Όπου L_m : το ακτινικό μήκος του μαγνήτη

L_δ : το μήκος του διακένου

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΟΡΙΣΤΙΚΗ ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΚΑΙ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΣΥΓΧΡΟΝΗΣ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ ΜΟΝΙΜΩΝ ΜΑΓΝΗΤΩΝ ΜΕ ΤΥΛΙΓΜΑ ΚΛΑΣΜΑΤΙΚΟΥ ΒΗΜΑΤΟΣ

3.1 Διαμόρφωση Γεννήτριας και διερεύνηση χαρακτηριστικών

3.1.1 Βασικές προδιαγραφές γεννήτριας

Αναφέρθηκε προηγουμένως ότι η γεννήτρια που θα σχεδιαστεί θα έχει τα εξής βασικά χαρακτηριστικά(Πίνακας 3.1).

Ονομαστική Ενεργό ισχύ (kW)	P	1
Διάκενο (mm)		0,7
Ονομαστικές στροφές (ΣΑΛ)	n	500

Πίνακας 3.1: Βασικές προδιαγραφές Γεννήτριας Μόνιμων Μαγνητών Κλασματικού Βήματος

3.1.2 Επιλογή τύπου τυλίγματος

Σε πρωταρχικό στάδιο διερευνήθηκε το είδος της τοπολογίας που θα ήταν καλύτερο να χρησιμοποιηθεί για το σχεδιασμό της υπό εξέταση γεννήτριας μόνιμων μαγνητών.

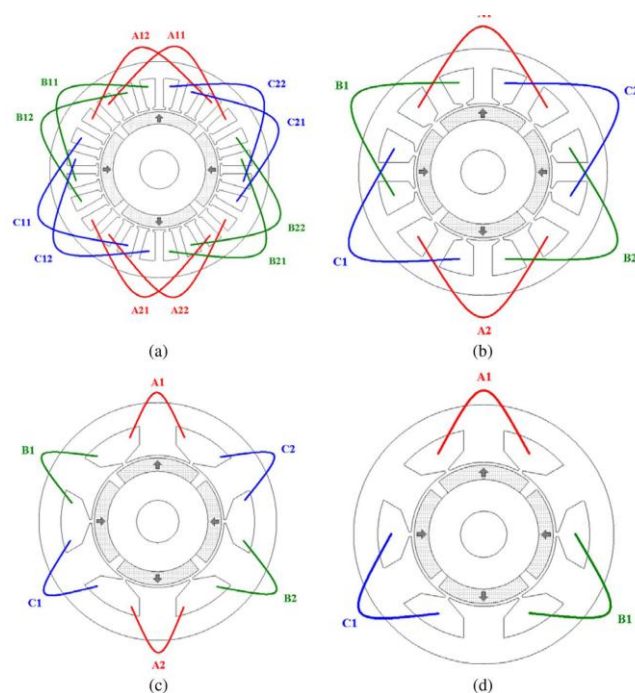
Το πρώτο ερώτημα που τίθεται είναι το αν θα υλοποιηθεί η γεννήτρια με πλήρες βήμα ή κλασματικό. Στις μηχανές μόνιμου μαγνήτη ένα από τα πιο σοβαρά θέματα που πρέπει να προβλεφθούν είναι η κυμάτωση της ροπής καθώς και η ροπή ευθυγράμμισης. Με το πλήρες βήμα μπορούν να αντιμετωπιστούν με διάφορες τεχνικές όπως το να κοπούν λοξά οι μόνιμοι μαγνήτες ή οι αύλακες του στάτη, τη μετατόπιση των μόνιμων μαγνητών, τη χρήση ψευδοαυλακών ή τη χρήση διαφορετικών ευρών μαγνητών, λύσεις όμως που είναι είτε ακριβές είτε δημιουργούν περεταίρω προβλήματα στη μηχανή.

Το κλασματικό βήμα δίνει λύση σε αυτές τις δύο παραμέτρους, με την προϋπόθεση σωστής επιλογής συνδυασμού αυλακών και πόλων.

Έχοντας καταλήξει στο κλασματικό βήμα το επόμενο είναι ο τύπος των τυλίγματος που θα χρησιμοποιηθεί. Αρχικά, πρέπει να αποφασιστεί αν είναι προτιμότερο να επιλεγεί διανεμημένο ή συγκεντρωμένο τύλιγμα.

Το διανεμημένο επικαλυπτόμενο τύλιγμα έχει ως αποτέλεσμα ημιτονική κατανομή μαγνητεγερτικής δύναμης (MMF) και ηλεκτρεγερτικής (EMF) και χρησιμοποιείται κυρίως στην κατασκευή μηχανών μόνιμων μαγνητών.

Από την άλλη το μη επικαλυπτόμενο συγκεντρωμένο τύλιγμα κλασματικού βήματος στις σύγχρονες μηχανές μόνιμων μαγνητών κερδίζει το ενδιαφέρον τα τελευταία χρόνια. Αυτό συμβαίνει γιατί παρουσιάζει πολλά πλεονεκτήματα όπως την υψηλή ισχύ, την υψηλή απόδοση, τα κοντά άκρα τυλίγματος γεγονός που διευκολύνει την κατασκευή, τον υψηλή συντελεστή πληρότητας, τη χαμηλή ροπή ευθυγράμμισης, την ανοχή σε σφάλματα και την δυνατότητα αποδυνάμωσης της ροής.



Σχήμα 3.2: Τυπικές διαμορφώσεις τυλίγματος στάτη: (a) 24 αύλακες επικαλυπτόμενο(διανεμημένο), (b) 12 αύλακες επικαλυπτόμενο(συγκεντρωμένο), (c) 6 αύλακες, μη επικαλυπτόμενο, όλα τα δόντια με τυλίγματα, (d) 6 αύλακες, μη επικαλυπτόμενο, διαδοχικά δόντια με τυλίγματα [8]

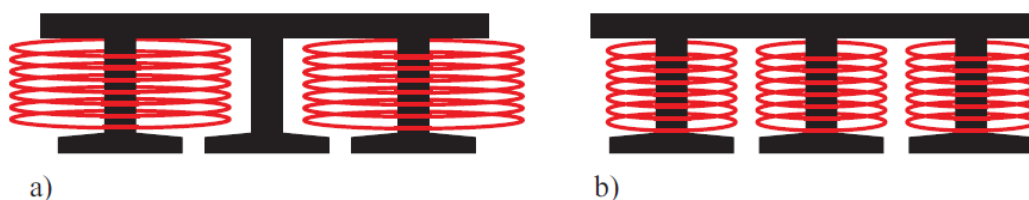
Συγκεντρωτικά, η σύγκριση ανάμεσα στα διανεμημένα και συγκεντρωμένα τυλίγματα φαίνεται στον πίνακα που ακολουθεί(Πίνακας 3.2).

	Διανεμημένα Τυλίγματα	Συγκεντρωμένα Τυλίγματα
Τυπικός συντελεστής πληρότητας χαλκού στην αύλακα	35%-45%	50%-65%
Κατασκευή στάτη	Συνεχή ελάσματα	Συνεχή ελάσματα ή τμηματικές κατασκευές
Άκρα τυλιγμάτων	Μακριά επικαλυπτόμενα	Κοντά μη επικαλυπτόμενα
Παραγωγή αρμονικών συνιστωσών ροπής στο χώρο του στάτη	Θεμελιώδης	Στις πιο πολλές περιπτώσεις (εκτός από 0,5 αύλακες/πόλο/φάση) αρμονική υψηλής τάξης

Πίνακας 3.2: Χαρακτηριστικά Διανεμημένων και Κατανεμημένων Τυλιγμάτων

Είναι προφανή τα πλεονεκτήματα του συγκεντρωμένου τυλίγματος σε σχέση με το διανεμημένο για την συγκεκριμένη εφαρμογή, όπου η χαμηλή ροπή ευθυγράμμισης είναι σημαντική παράμετρος. Επίσης, δίνει και την επιλογή ενός συντελεστή πληρότητας σχετικά υψηλότερου. [1],[8]

Η τελευταία επιλογή που πρέπει να γίνει σχετικά με το τύλιγμα είναι η στρώση του τυλίγματος που θα χρησιμοποιηθεί. Οι επιλογή θα γίνει ανάμεσα στα τυλίγματα μονής και διπλής στρώσης. Το τύλιγμα μονής στρώσης φέρει σπείρες πηνίου μόνο σε διαδοχικά δόντια, ενώ το διπλής στρώσης φέρει ένα πηνίο σε κάθε δόντι, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 3.3: (a) Τύλιγμα μονής στρώσης, (b) Τύλιγμα διπλής στρώσης [1]

Η επιλογή του αριθμού των στρώσεων εξαρτάται κυρίως από την εφαρμογή. Στον παρακάτω πίνακα συγκρίνονται κάποια χαρακτηριστικά της μονής στρώσεως σε σχέση με τη διπλή.

	Μονής Στρώσης Τύλιγμα	Διπλής Στρώσης Τύλιγμα
Θεμελιώδης Συντελεστής Τυλίγματος	υψηλότερος	χαμηλότερος
Άκρα τυλίγματος	μακριά	κοντά
Συντελεστής πληρότητας αύλακας	υψηλότερος	Χαμηλότερος
Αυτεπαγωγή	υψηλότερη	Χαμηλότερη
Αμοιβαία Επαγωγή	χαμηλότερη	υψηλότερη
EMF	Πιο τραπεζοειδής	Πιο ημιτονική
Αρμονικό περιεχόμενο MMF	υψηλότερο	χαμηλότερο
Απώλειες δινορρευμάτων Μόνιμου μαγνήτη	υψηλότερες	Χαμηλότερες
Δυνατότητα παροχής ροπής σε υπερφόρτιση	υψηλότερη	Χαμηλότερη
Κατασκευή	ευκολότερη	Δυσκολότερη
Απώλειες δρομέα	Υψηλότερες λόγω του υψηλότερου αρμονικού περιεχομένου MMF	Χαμηλότερες λόγω του χαμηλότερου αρμονικού περιεχομένου MMF
Συνδυασμοί αυλακών-πόλων	Λίγοι συνδυασμοί υποστηρίζουν το τύλιγμα	Πολλοί συνδυασμοί το υποστηρίζουν
# πηνίων	1	2

Πίνακας 3.3: Χαρακτηριστικά Τυλίγματος Μονής και Διπλής στρώσης [1]

Τα μονής στρώσεως τυλίγματα είναι προτιμότερα από τα διπλής όταν απαιτείται υψηλή ανοχή σφάλματος, αφού οι φάσεις του τυλίγματος είναι θερμικά και ηλεκτρικά μονωμένες, η αυτεπαγωγή είναι υψηλή, γεγονός που περιορίζει τα ρεύματα βραχυκυκλώσεως και η αμοιβαία επαγωγή είναι πολύ χαμηλή, γεγονός που απομονώνει μαγνητικά τις φάσεις. Εξαιτίας της υψηλότερης επαγωγής, τα μονής στρώσης τυλίγματα προτιμούνται σε εφαρμογές που απαιτούν μεγάλο εύρος στροφών σε σταθερή λειτουργία ισχύος. Όμως, οι μηχανές με μονής στρώσης τυλίγματα έχουν υψηλές αρμονικές χώρου στην κατανομή της ΜΕΔ λόγω του μικρού αριθμού αυλακών ανά πόλο ανά φάση. Με τα τυλίγματα διπλής στρώσης επιτυγχάνεται η μείωση των αρμονικών χώρου της αντίδρασης τυμπάνου, αφού το διπλής στρώσης τύλιγμα ισοδυναμεί με αύξηση του αριθμού των αυλακών. Επιπλέον, τα διπλής στρώσεως τυλίγματα είναι προτιμότερα για τον περιορισμό των απωλειών και της κυμάτωσης της ροπής. Επίσης, υπάρχουν περισσότεροι συνδυασμοί πόλων και αριθμού αυλακών στα διπλής στρώσης τυλίγματα σε σχέση με τα μονής στρώσης.

Στη συγκεκριμένη εφαρμογή αυτό που απασχόλησε ιδιαίτερη είναι η ελαχιστοποίηση της ροπής ευθυγράμμισης, ώστε η ανεμογεννήτρια να ξεκινά και σε χαμηλές ταχύτητες ανέμου. Επιπλέον, ενδιέφερε η μεγιστοποίηση της επίδοσης της γεννήτριας. Έτσι, για να μην μεγιστοποιηθεί η επίδοση σε βάρος της απόδοσης, γίνεται προσπάθεια μιας πρόβλεψης από τη φάση του σχεδιασμού. Το διπλής στρώσης τύλιγμα παρουσιάζει μειωμένες απώλειες, ενώ ταυτόχρονα μειώνει και την κυμάτωση της ροπής, εκ της οποίας μια συνιστώσα είναι και η ροπή ευθυγράμμισης. Επομένως, η επιλογή που έγινε αφορά στο τύλιγμα διπλής στρώσης.

Το επόμενο βήμα είναι η επιλογή αριθμού πόλων και αυλακών. Η ονομαστική ταχύτητα και συχνότητα δίνει ένα εύρος πιθανού αριθμού πόλων. Ο αριθμός των πόλων θα πρέπει να επιλεγεί σε συνδυασμό με τον αριθμό των αυλακών. Η επιλογή γίνεται με κριτήριο τον συντελεστή τυλίγματος, τη ροπή ευθυγράμμισης, την κυμάτωση της ροπής, τις απώλειες δρομέα και την επαγωγή της μηχανής που σχετίζεται με εκάστοτε συνδυασμό. Ο πιο ενδιαφέρων συνδυασμός είναι αυτός που

μεγιστοποιεί το θεμελιώδη συντελεστή τυλίγματος και κατ' επέκταση και τη ροπή.
[1]

Στην επιλογή συνδυασμού πόλων και αυλακών τα κριτήρια είναι τα εξής:

- Υψηλός θεμελιώδης συντελεστής τυλίγματος
- Συμμετρικό τριφασικό τύλιγμα
- Εξάλειψη ασύμμετρης μαγνητικής δύναμης
- Μείωση ροπής ευθυγράμμισης

3.1.3 Επιλογή αριθμού πόλων και αυλακών

Επιδιώκεται επιλογή συνδυασμού πόλων και αυλακών με υψηλό συντελεστή τυλίγματος στα 500 ΣΑΛ, οπότε μια καλή επιλογή είναι οι συνδυασμοί 10πολικής μηχανής, 12 πολικής ή 14πολικής μηχανής με 12 αύλακες. Από αυτές το μεγαλύτερο συντελεστή τυλίγματος παρουσιάζουν οι συνδυασμοί $p=10$ $Q=12$, $p=10$ $Q=9$, $p=14$ $Q=12$ και $p=14$ $Q=15$. Οι 12πολική μηχανή έχει χαμηλούς συντελεστές τυλίγματος και παρουσιάζει και συνδυασμούς που δίνουν ασύμμετρο τριφασικό τύλιγμα, όπου δηλαδή ο αριθμός $\frac{3p}{GCD(Q_s, 3p)}$ είναι πολλαπλάσιο του αριθμού των φάσεων και είναι σημειωμένοι με μαύρο και κόκκινο, οπότε απορρίπτονται [1].

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

$q=1/2, 1/4$	$q=3/8, 3/10$	$Q_s=21+6k, p=Q_s \pm 1, k=0, 1, 2 \dots$
$q=3/7, 3/11$	$q=5/14, 5/16$	$Q_s=24+6k, p=Q_s \pm 2, k=0, 1, 2 \dots$
$q=2/5, 2/7$	not appropriate	$k_{w1} < 0.866$

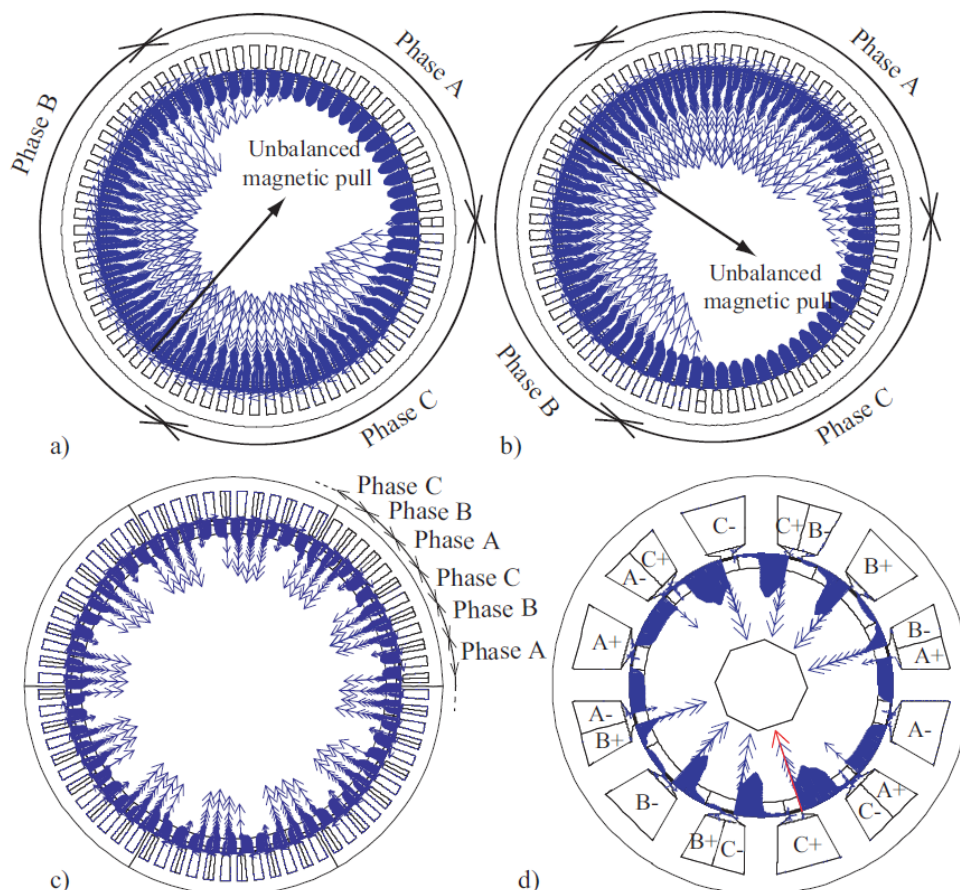
Σχήμα 3.4: Συνδυασμοί αριθμού-πόλων και αυλακών για κλασματικό βήμα διπλής στρώσης [1]

Οπότε η επιλογή θα γίνει ανάμεσα στους εξής συνδυασμούς:

$p=10 Q=12$, $p=10 Q=9$, $p=14 Q=12$, $p=14 Q=15$

3.1.4 Ασύμμετρη μαγνητική δύναμη

Αν οι ακτινικές μαγνητικές δυνάμεις δεν είναι ομαλά διανεμημένες κατά μήκος του διακένου, το αθροιστικό αποτέλεσμα είναι μια μονής κατεύθυνσης ελκτική δύναμη η οποία περιστρέφεται με το χρόνο και παράγει θόρυβο και κραδασμούς στη μηχανή. Η δύναμη που δημιουργείται ονομάζεται ασύμμετρη μαγνητική έλξη και δημιουργείται εξαιτίας τις ασυμμετρίας στα τυλίγματα. Παραδείγματα φαίνονται στα παρακάτω σχήματα.



Σχήμα 3.5: Μαγνητικές δυνάμεις στο στάτη σύγχρονου κινητήρα μονίμων μαγνητών με (a) και (b) 68 πόλους και 69 αύλακες, για διαφορετικές χρονικές στιγμές (c) 60 πόλους, 72 αύλακες (d) 10 πόλους, 12 αύλακες [1]

Οι ακτινικές μαγνητικές δυνάμεις υπολογίζονται από προσομοίωση πεπερασμένων στοιχείων για ένα κινητήρα με $p = Q_s - 1$. Το τρίτο σχέδιο του σχήματος δείχνει ένα παράδειγμα μηχανής όπου υπάρχει συμμετρία στην στρώση του τυλίγματος στο ένα έκτο της μηχανής. Σε αυτή την περίπτωση, δεν υπάρχει απορρέουσα δύναμη αφού οι ακτινικές μαγνητικές δυνάμεις αντισταθμίζουν η μια την άλλη.

Οι μηχανές στις οποίες ο συνδυασμός πόλων και αυλακών ικανοποιούν την εξίσωση $p=Q\pm 1$ (3.1) καθώς και μερικοί συνδυασμοί με μονό αριθμό αυλακών έχουν μέγιστο κοινό διαιρέτη $GCD(p,Q)=1$. Αυτές οι μηχανές δεν συνίστανται λόγω της ασύμμετρης μαγνητικής έλξης. Έτσι οι συνδυασμοί $p=10$ $Q=9$ και $p=14$ $Q=15$ απορρίπτονται αφού έχουν μέγιστο κοινό διαιρέτη ίσο με 1. Οι συνδυασμοί $p=10$ $Q=12$ και $p=14$ $Q=12$ έχουν μέγιστο κοινό διαιρέτη ίσο με 2 .

Επομένως, μένει να επιλεγθεί ένας από τους συνδυασμούς:

$p=10$ $Q=12$
$p=14$ $Q=12$

Μια μικρή τιμή ροπής ευθυγράμμισης μπορεί να επιτευχθεί αν το ελάχιστο κοινό πολλαπλάσιο του αριθμού των πόλων και των αυλακών $LCM(p,Q)$ είναι μεγάλο. Όσο πιο κοντά είναι ο αριθμός των αυλακών στον αριθμό των πόλων τόσο μεγαλύτερο είναι και το ελάχιστο κοινό πολλαπλάσιο. Συνδυασμοί πόλων και αυλακών για τους οποίους ισχύει $p=Q+k$, όπου k ακέραιος αριθμός, έχουν μεγαλύτερο ελάχιστο κοινό πολλαπλάσιο από αυτούς με $p=Q-k$, ακόμα και αν έχουν τον ίδιο συντελεστή τυλίγματος.

Έτσι, λοιπόν για τον συνδυασμό $p=10$ $Q=12$ ισχύει $p=Q-2$ και για το συνδυασμό $p=14$ $Q=12$ ισχύει $p=Q+2$. Επιβεβαιώνονται τα παραπάνω, αφού οι συνδυασμοί έχουν συντελεστή τυλίγματος ίδιο και ίσο με 0,933, ενώ το ελάχιστο κοινό πολλαπλάσιο της 10πολικής είναι ίσο με 60 και της 14πολικής είναι ίσο με 84 [1].

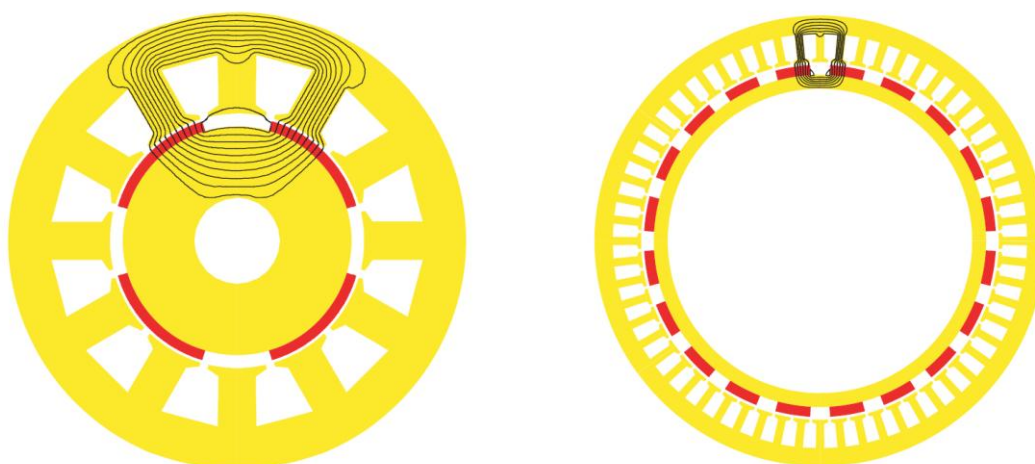
Τελικά, ο συνδυασμός πόλων και αυλακών που επιλέγεται είναι :

$$p=14 \quad Q=12$$

3.1.5 Επιλογή αριθμού πόλων και απόδοση

Η σχεδίαση μια γεννήτριας προϋποθέτει τη βελτιστοποίησή της ως προς τη παραγόμενη ροπή. Η απόδοση, όμως, η οποία είναι ανταγωνιστικό μέγεθος της απόδοσης, αν και στην παρούσα διπλωματική δεν βελτιστοποιείται, αυτό δεν σημαίνει πως δεν έχει ληφθεί υπόψη κατά τη σχεδίαση. Στην προηγούμενη παράγραφο έγινε μια επιλογή αριθμού πόλων ίσο με 14 αντί για 10. Οι λόγοι ήταν για βελτιστοποίηση της επίδοσης και της όσο το δυνατόν εξάλειψης μεγεθών που την μειώνουν. Με την αύξηση του αριθμού των πόλων, όμως, αυξάνεται η συχνότητα, οπότε αυξάνονται και οι απώλειες πυρήνα. Το ζητούμενο είναι, λοιπόν, να εξεταστεί πόσο επηρεάζει η επιλογή που έγινε στην απόδοση.

Οι μηχανές με υψηλό αριθμό πόλων παρουσιάζουν χαμηλό ενεργό βάρος. Στην πραγματικότητα, για την ίδια ζητούμενη ονομαστική ροπή, οι μηχανές με υψηλό αριθμό πόλων έχουν ελαφρύτερο μαγνητικό κύκλωμα σε σχέση με τις μηχανές με λιγότερους πόλους.



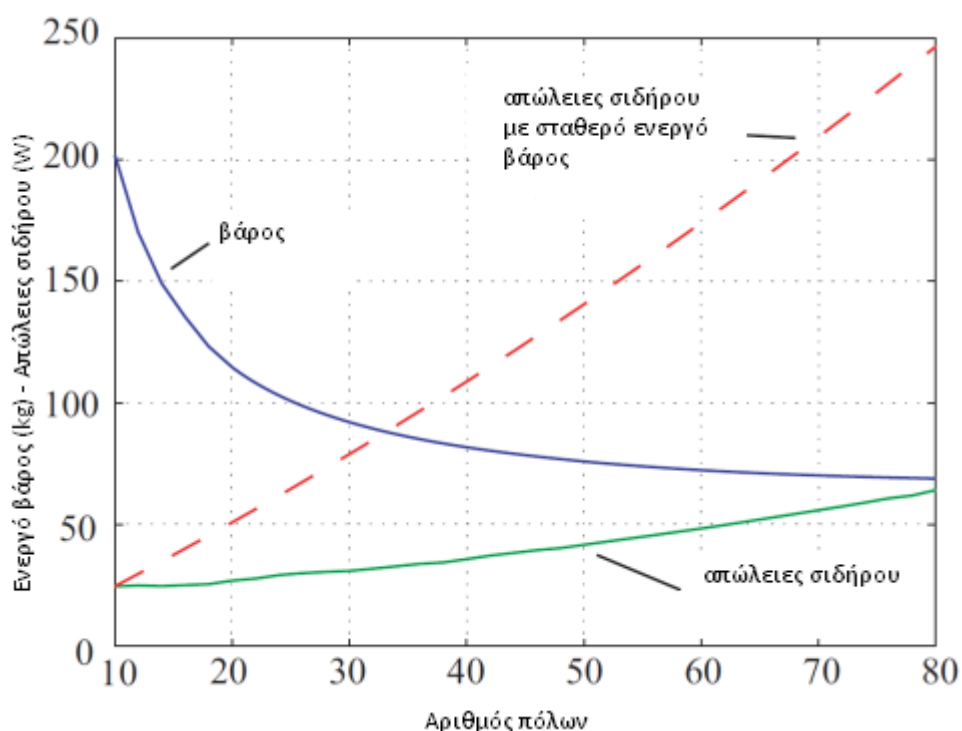
Σχήμα 3.6: (Αριστερά) τετραπολική μηχανή, (Δεξιά) εικοσαπολική μηχανή [1]

Στις δύο παραπάνω μηχανές του σχήματος, η πυκνότητα ροής είναι ίδια, αλλά η ροή από τον έναν πόλο στον άλλο είναι αντιστρόφως ανάλογη με τον αριθμό των πόλων. Αφού η ροή είναι λιγότερη με μεγαλύτερο αριθμό πόλων, το σώμα του στάτη και του δρομέα κατασκευάζονται πιο λεπτά χωρίς κίνδυνο για κορεσμό σιδήρου.

Η σχέση:

$$n = \frac{120f}{p} \quad (3.2)$$

, δείχνει ότι για χαμηλές στροφές, ο αριθμός των πόλων μπορεί να αυξηθεί ενώ ταυτόχρονα κρατείται μια σχετικά χαμηλή συχνότητα. Έτσι, οι απώλειες σιδήρου για αυτές τις εφαρμογές χαμηλών στροφών, είναι συνήθως χαμηλές συγκριτικά με τις απώλειες χαλκού.



Σχήμα 3.7: Ενεργό βάρος και απώλειες σιδήρου συναρτήσει του αριθμού των πόλων για σύγχρονες γεννήτριες μονίμων μαγνητών [1]

Στο παραπάνω διάγραμμα φαίνεται ξεκάθαρα ότι το ενεργό βάρος μειώνεται όσο αυξάνεται ο αριθμός των πόλων. Αφού ο όγκος του σιδήρου μειώνεται και αυτός, η αύξηση των απωλειών σιδήρου είναι περιορισμένη όταν η συχνότητα αυξάνεται με την αύξηση των πόλων. Οι απώλειες σιδήρου βέβαια, αυξάνονται με την αύξηση της συχνότητας, η οποία αυξάνεται με επιλογή περισσότερων πόλων. Με την αύξηση του αριθμού των πόλων τα δινορρεύματα στο σώμα του στάτη αυξάνονται, ενώ οι απώλειες υστέρησης του σώματος του στάτη παραμένουν σχεδόν σταθερές.

Με την αύξηση του αριθμού των πόλων, το μήκος των άκρων του τυλίγματος μειώνεται, κατά συνέπεια η χρήση χαλκού μπορεί να μειωθεί και έτσι και οι απώλειες χαλκού στο στάτη περιορίζονται.

Από τα παραπάνω, συμπεραίνεται ότι η επιλογή της δεκατετραπολικής μηχανής δεν επιδρά καταστροφικά στην απόδοση της μηχανής. Μπορεί να αυξάνεται η συχνότητα, και κατά συνέπεια και οι απώλειες, αλλά με περιορισμένο ρυθμό, λόγω της ταυτόχρονης μείωσης του ενεργού βάρους. Επιπλέον και οι απώλειες χαλκού, μια ακόμα συνισταμένη στον υπολογισμό της απόδοσης, δύναται να μειωθούν [1].

3.1.6 Επιλογή συντελεστή πληρότητας και πυκνότητας ρεύματος

Ο συντελεστής πληρότητας χαλκού στις αύλακες επιλέγεται να είναι 55% που είναι μια τιμή αποδεκτή βιβλιογραφικά και εντός ορίων του τυλίγματος διπλής στρώσης. Τέλος, τα ρεύματα των φάσεων δίνονται σαν πλάτη της ενδεικνυμένης τιμής της πυκνότητας του ρεύματος, που επιλέγεται να είναι ίση με 6 A/mm^2 , που είναι μια σχετικά αποδεκτή τιμή, αφού για εφαρμογές ανεμογεννητριών επιτρεπόμενη τιμή είναι τα 5 A/mm^2 και για ανεμογεννήτριες κάτω των 10kW τα $6,3 \text{ A/mm}^2$.

Η γεννήτρια που θα σχεδιαστεί θα έχει τις παρακάτω προδιαγραφές:

Ονομαστική ισχύς	1kW
Ονομαστικές Στροφές	500 ΣΑΛ
Ενεργό μήκος	60mm
Εξωτερική ακτίνα στάτη	60mm
Διάκενο	0,7mm
Ονομαστική πυκνότητα ρεύματος	6 A/mm ²
Συντελεστής πληρότητας	55%
Τύπος τυλίγματος	Συγκεντρωμένο κλασματικού βήματος
Στρώση τυλίγματος	Διπλής στρώσης
#πόλων-αυλακών	14-12

Πίνακας 3.4: Προδιαγραφές Σχεδιαζόμενης Γεννήτριας Μονίμων Μαγνητών

3.1.7 Τύλιγμα γεννήτριας

Για δεδομένο συνδυασμό αριθμού πόλων και αυλακών, υπάρχουν πολλοί τρόποι να τοποθετηθούν τα πηνία κάθε φάσης στις αύλακες, ώστε να δημιουργηθεί το τύλιγμα. Η πιο ενδιαφέρουσα διάταξη τυλίγματος είναι αυτή που δίνει τον πιο υψηλό θεμελιώδη συντελεστή τυλίγματος. Μια από τις μεθόδους που προτείνεται και είναι και αυτή που χρησιμοποιήθηκε είναι η μέθοδος του Gros, η οποία παρουσιάζεται παρακάτω. Συγκεκριμένα, η μέθοδος αυτή βασίζεται στην αποσύνθεση του αριθμού των αυλακών ανά φάση ανά πόλο q . Τα βήματα που ακολουθούνται είναι τα εξής.

1. Ο αριθμός των αυλακών ανά πόλο ανά φάση γράφεται σαν κλάσμα, το οποίο είναι τελείως απλοποιημένο. Στην συγκεκριμένη περίπτωση με $p=14$ πόλους και $Q=12$ αύλακες ο αριθμός των αυλακών ανά πόλο ανά φάση θα είναι ίσος με $q = \frac{n_u}{d} = \frac{2}{7}$.

2. Μια σειρά από $d - n_u = 7 - 2 = 5$ μηδενικά και $n_u = 2$ άσσους βρίσκεται, όπου τα μηδενικά κατανέμονται στη σειρά όσο το δυνατόν πιο συχνά.
3. Η σειρά αυτή επαναλαμβάνεται για $\frac{3p}{d} = \frac{Q}{n_u} = \frac{12}{2} = 6$ φορές.
4. Οι αγωγοί του τυλίγματος που αντιστοιχούν στους άσσους κρατούνται και δημιουργούν τη μία στρώση από το τυλίγμα διπλής στρώσης. Η δεύτερη στρώση του τυλίγματος δημιουργείται συμπληρώνοντας την αντίστοιχη επιστροφή του αγωγού στην άλλη πλευρά του δοντιού, για κάθε δεδομένο από το προηγούμενο βήμα αγωγό.
5. Ένα διάνυσμα Σ γράφεται για να περιγράψει τη διάταξη της φάσης A. Οι αύλακες αριθμούνται από το 1 έως $Q=12$, στην συγκεκριμένη περίπτωση. Το διάνυσμα αυτό αποτελείται από αριθμούς που αντιστοιχούν στις αύλακες που περιέχουν αγωγούς της φάσης A. Το διάνυσμα Σ αποτελείται από $\frac{2Q}{3} = \frac{24}{3} = 8$ στοιχεία.

Έτσι, σύμφωνα με τα παραπάνω προκύπτει η σειρά 1001000 που επαναλαμβάνεται 6 φορές.

1001000|1001000|1001000|1001000|1001000|1001000|
 AC'BA'CB'AC'BA'CB'AC'BA'CB'AC'BA'CB'AC'BA'CB'AC'BA'CB'

B' A|A' A'|A C'|C C|C' B|B' B'|BA'|A A|A' C|C' C'|C B'|B B|

Τα μαύρα στοιχεία αντιστοιχούν στους άσσους της σειράς και τοποθετήθηκαν πρώτα στις αύλακες, και στη συνέχεια συμπληρώθηκε η διπλή στρώση με τα μπλε στοιχεία [1].

3.2 Βελτιστοποίηση Γεωμετρίας

3.2.1 Πεδιακή ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία

Η προκαταρκτική σχεδίαση μιας γεννήτριας παρέχει μια βασική άποψη της απαιτούμενης διαμόρφωσης της σχεδιαζόμενης γεννήτριας. Συμπληρωματικά, η πεδιακή ανάλυση μπορεί να δώσει λεπτομερή ανάλυση του μαγνητικού πεδίου και να οδηγήσει στην επιβεβαίωση των χαρακτηριστικών της γεννήτριας που αναμένονται από την προκαταρκτική σχεδίαση ή στη διαπίστωση της ανάγκης για βελτίωσή τους. Η πεδιακή ανάλυση παρέχει την κατανομή του μαγνητικού πεδίου και μέσω αυτής, με κατάλληλη επεξεργασία μπορούν να υπολογιστούν με ακρίβεια μεγέθη, όπως, ροπή και δύναμη, απώλειες, πυκνότητα ηλεκτρικού ρεύματος, όπως επίσης και να εντοπιστούν περιοχές πυρήνα που βρίσκονται σε κορεσμό [18].

3.2.2 Μαγνητοστατικά προβλήματα

Μαγνητοστατικά ονομάζονται τα προβλήματα στα οποία το μαγνητικό πεδίο είναι αμετάβλητο στο χρόνο. Σε αυτή την περίπτωση οι εξισώσεις Maxwell είναι:

$$\nabla \times H = J \quad (3.3)$$

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (3.4)$$

Για κάθε γραμμικό υλικό ισχύει η σχέση:

$$B = \mu \cdot H \quad (3.5)$$

Ενώ, αν το υλικό δεν είναι γραμμικό, όπως ο κορεσμένος σίδηρος ή οι μαγνήτες alnico, τότε η επιτρεπτότητα μ , είναι:

$$\mu = \frac{B}{H(B)} \quad (3.6)$$

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

$$B = \nabla \times A \quad (3.7)$$

Συνδυάζοντας τις δύο παραπάνω σχέσεις, θα ισχύει:

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu(B)} \nabla \times A \right) = J \quad (3.8)$$

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

$$-\frac{1}{\mu} \nabla^2 A = J \quad (3.9)$$

Στη γενική περίπτωση, το διανυσματικό δυναμικό είναι ένα διάνυσμα τριών συνιστωσών. Σε δύο διαστάσεις, οι δύο από αυτές τις τρεις συνιστώσες είναι μηδέν και μεταβάλλεται μόνο η κατακόρυφη συνιστώσα.

Το πλεονέκτημα της χρήσης του διανυσματικού δυναμικού είναι ότι όλες οι συνθήκες που πρέπει να ικανοποιούνται στο μαγνητοστατικό πεδίο συνδυάζονται σε μια εξίσωση. Εάν είναι γνωστό το A , τα B και H προκύπτουν από διαφορίση του A .

Στην περίπτωση ύπαρξης μαγνητικού πεδίου αρμονικά μεταβαλλόμενου, μπορούν να επαχθούν δινορρέυματα σε υλικά με μη μηδενική αγωγιμότητα και τότε θα πρέπει να ληφθούν υπόψη και άλλες εξισώσεις του Maxwell αναφορικά με την κατανομή του ηλεκτρικού πεδίου [18].

3.2.3 Οριακές συνθήκες

Για την επίλυση ενός μαγνητοστατικού ή ηλεκτροστατικού προβλήματος θα πρέπει να ορισθούν οι οριακές συνθήκες του προβλήματος, οι οποίες μπορεί να είναι ανάμεσα στις εξής:

- Dirichlet: Σε αυτόν τον τύπο οριακής συνθήκης, η τιμή του δυναμικού A δηλώνεται πάνω στο όριο, π.χ. $A=0$. Δηλώνοντας σε ένα μαγνητοστατικό πρόβλημα $A=0$ κατά μήκος ενός ορίου γεωμετρίας, αποτρέπεται η μαγνητική ροή από το να διαπεράσει το όριο αυτό.
- Neumann: Αυτού του τύπου η οριακή συνθήκη ορίζει την κάθετη παράγωγο του δυναμικού κατά μήκος του ορίου και συνήθως χρησιμοποιείται στα μαγνητικά προβλήματα στην περίπτωση διεπιφάνειας με υλικό πολύ μεγάλης επιτρεπτότητας.
- Robin: Η οριακή συνθήκη Robin είναι συνδυασμός των οριακών συνθηκών Dirichlet και Neumann, καθορίζοντας μια σχέση μεταξύ της τιμής A και της παραγώγου του. Ένα παράδειγμα τέτοιας συνθήκης είναι:

$$\frac{\partial A}{\partial n} + cA = 0 \quad (3.10)$$

Αυτή η οριακή συνθήκη χρησιμοποιείται για να μιμηθεί ένα περιορισμένο χωρικά πρόβλημα τη συμπεριφορά μιας άπειρης χωρικά περιοχής.

- Περιοδική: Μια περιοδική οριακή συνθήκη συνδέει μαζί δύο όρια, ενώ οι οριακές τιμές σε αντίστοιχα σημεία δύο ορίων ισούνται.
- Αντιπεριοδική: Μια αντιπεριοδική οριακή συνθήκη συνδέει επίσης δύο όρια μεταξύ τους, αλλά σε αυτή την περίπτωση τα αντίστοιχα σημεία έχουν μεγέθη ίσου μέτρου, αλλά αντίθετου προσήμου [18].

3.2.4 Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων

Αν και οι συνθήκες ενός μαγνητικού προβλήματος μπορούν να εκφραστούν υπό τη μορφή μιας διαφορικής εξίσωσης, με ορισμένες οριακές συνθήκες, ωστόσο είναι πολύ δύσκολο να βρεθεί μια αναλυτική λύση, παρά μόνο για προβλήματα πολύ απλής γεωμετρίας. Αυτή τη δυσκολία έρχεται να ξεπεράσει η ανάλυση των πεπερασμένων στοιχείων, χωρίζοντας το πρόβλημα σε ένα μεγάλο αριθμό περιοχών και αντίστοιχων υποπροβλημάτων που όμως αναφέρονται σε απλή γεωμετρία και είναι εύκολη η επίλυσή τους. Αν η αρχική περιοχή τεμαχιστεί σε

αρκετά μεγάλο αριθμό υποπεριοχών, το υπολογιζόμενο δυναμικό προσεγγίζει αρκετά καλά την ακριβή του τιμή [18].

3.2.5 Παραμετροποιημένη σχεδίαση

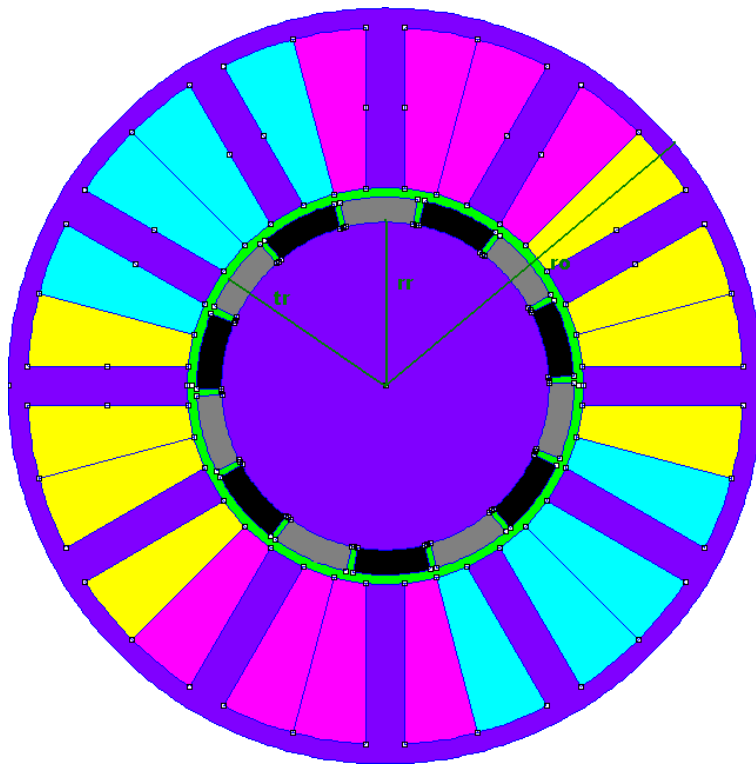
Έχοντας προσδιορίσει τις βασικές προδιαγραφές της γεννήτριας το ζητούμενο είναι η διαστασιολόγησή της. Το ζητούμενο είναι η σχεδίαση μιας γεννήτριας που να δίνει ροπή ίση με 19,11 Ntm και να έχει χαμηλή ροπή ευθυγράμμισης και ημιτονική ηλεκτρεγερτική δύναμη emf. Επίσης, όλα τα παραπάνω μεγέθη θα πρέπει να μην βελτιστοποιηθούν σε βάρος της απόδοσης. Γι' αυτό θα πρέπει η σχεδίαση να είναι παραμετροποιημένη ώστε να διερευνηθεί με δοκιμές ποιες είναι οι βέλτιστες διαστάσεις της γεννήτριας που να ικανοποιούν ταυτόχρονα τα προαναφερθέντα κριτήρια.

Έτσι, η παραμετροποιημένη σχεδίαση της γεννήτριας προϋποθέτει την εξάρτηση των διαστάσεων της γεννήτριας από κάποιες βασικές διαστάσεις. Αυτές οι διαστάσεις θα είναι:

Ενεργό μήκος γεννήτριας(mm)	L=60
Εξωτερική ακτίνα γεννήτριας(mm)	ro=60
Εσωτερική ακτίνα δρομέα (χωρίς τους μαγνήτες)	rr
Ακτινικό μήκος μαγνήτη	ml
Εξωτερική ακτίνα δρομέα (με μαγνήτες)	tr=rr+ml
Ποσοστό μαγνήτη επί του πολικού βήματος	a
Ποσοστό δοντιού επί της περιόδου δοντιού- αύλακας	b
Ακτινικό μήκος διακένου	gap
Αριθμός αυλακών	Q=12
Αριθμός πόλων	p

Πίνακας 3.5: Κύριες μεταβλητές παραμετροποιημένου σχεδιασμού

Οι κύριες μεταβλητές απεικονίζονται στα σχήματα που ακολουθούν (σχήμα 3.7 & 3.8).



Σχήμα 3.8: Κύριες μεταβλητές παραμετροποιημένου σχεδιασμού γεννήτριας κλασματικού βήματος μόνιμων μαγνητών. Απεικονίζονται η εξωτερική ακτίνα δρομέα, η εσωτερική ακτίνα δρομέα και η ακτίνα της γεννήτριας.



Σχήμα 3.8: Κύριες μεταβλητές παραμετροποιημένου σχεδιασμού (συνέχεια): ακτινικό μήκος μαγνήτη και διάκενο.

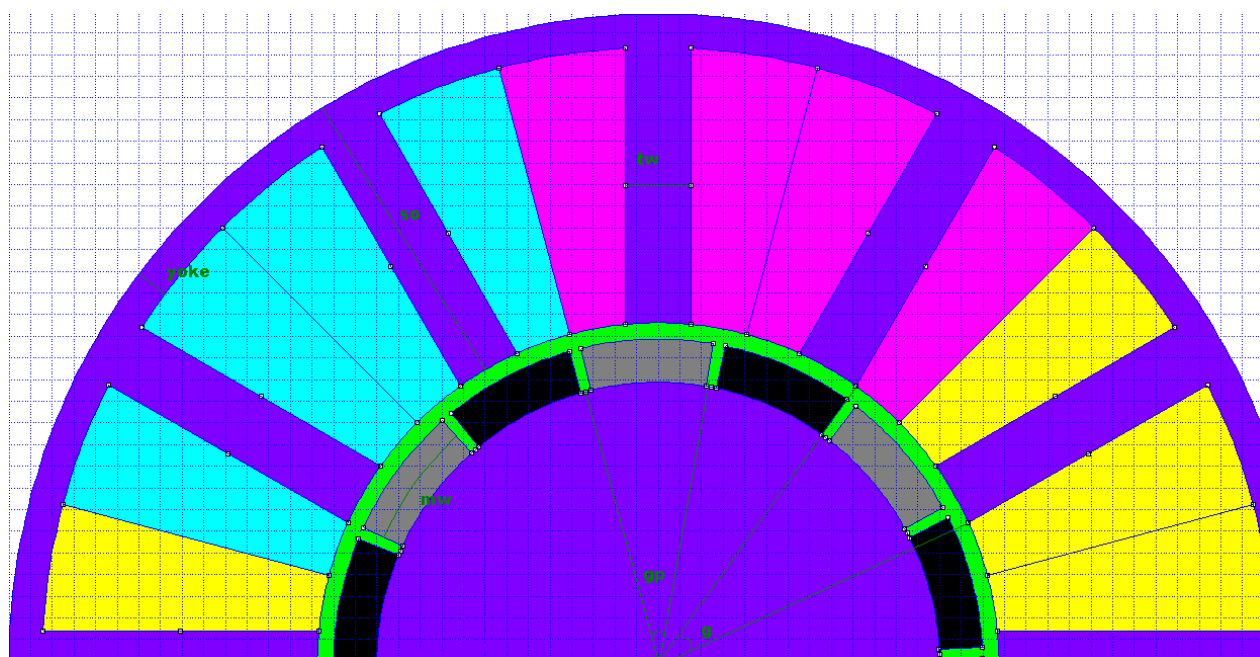
Μεταβάλλοντας τις ανεξάρτητες μεταβλητές σχεδιάζεται δυναμικά η γεννήτρια η γεννήτρια σχεδιάζεται τηρώντας τα παραπάνω μεγέθη.

Έτσι, λοιπόν, οι εξαρτημένες μεταβλητές του παραμετροποιημένου σχεδιασμού είναι οι παρακάτω:

Γωνία μιας περιόδου δοντιού-αύλακας	$g = \frac{360^\circ}{Q}$
Πολικό βήμα	$gp = \frac{360^\circ}{p}$
Εύρος μαγνήτη	$mw = a \times gp$
Εξωτερική ακτίνα στάτη	$so = ro - tr - gap$
Πάχος δοντιού	$tw = (tr + gap) \times b \times g$
Σώμα στάτη	$yoke = 0,5 \times tw$
Ακτινικό μήκος αύλακας	$sin = so - yoke$

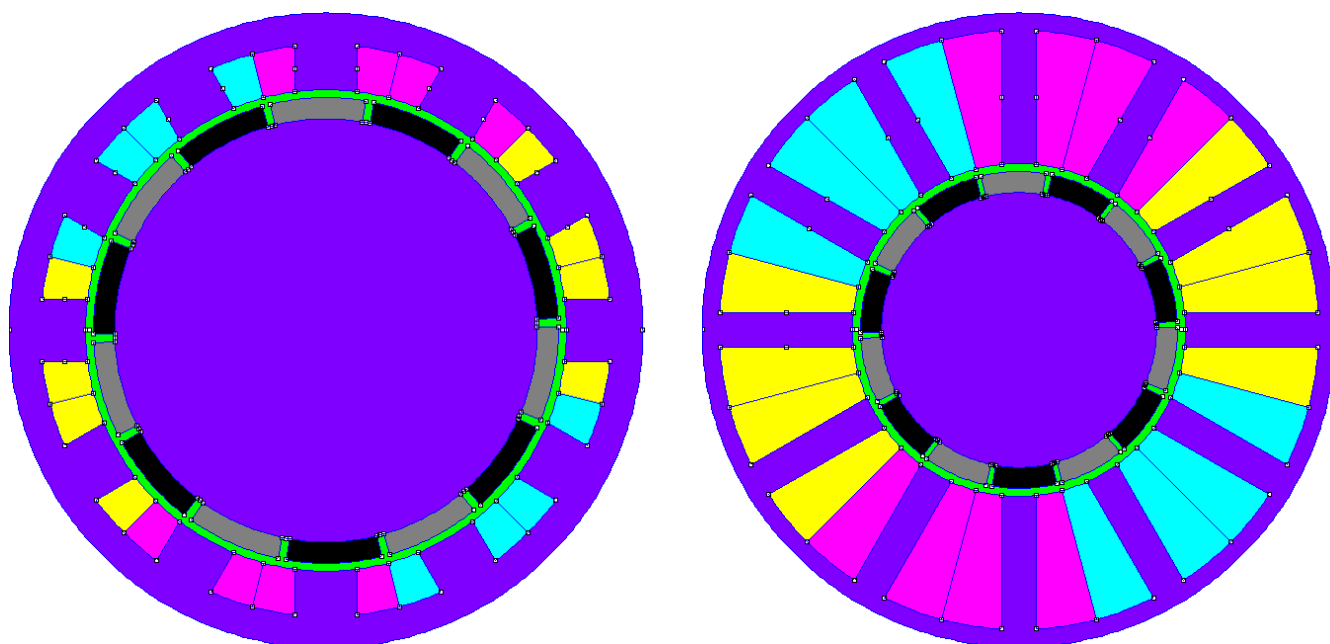
Πίνακας 3.6: Εξαρτημένες μεταβλητές παραμετροποιημένου σχεδιασμού

Οι εξαρτημένες μεταβλητές απεικονίζονται στο Σχήμα



Σχήμα 3.9: Εξαρτημένες μεταβλητές παραμετροποιημένου σχεδιασμού γεννήτριας μονίμων μαγνητών. Απεικονίζονται το πολικό βήμα, η περίοδος δοντιού-αύλακας, το σώμα του στάτη, η ακτίνα του στάτη, το εύρος του μαγνήτη.

Ενδεικτικά, μετά τη παραμετροποιημένη σχεδίαση της μηχανής, φαίνονται παρακάτω δύο στιγμιότυπα που την αποδεικνύουν:



Σχήμα 3.9: Παραδείγματα παραμετροποιημένου σχεδιασμού

3.2.6 Βέλτιστη θέση δρομέα

Στο σημείο αυτό θα πρέπει να προσδιοριστεί η βέλτιστη θέση του δρομέα, όπου δίνει μέγιστη ροπή η γεννήτρια. Θα υπολογιστεί η μηχανική γωνία του δρομέα με δύο τρόπους, θεωρητικά και με δοκιμές ολίσθησης πόλων. Η δοκιμή αυτή δεν προϋποθέτει τελική διαστασιολόγηση της γεννήτριας, αφού για την ίδια τοπολογία η βέλτιστη γωνία θα είναι ίδια για κάθε πιθανή τιμή των διαστάσεων της γεννήτριας.

Σε μια σύγχρονη τριφασική μηχανή κυλινδρικού δρομέα η ισχύς εξόδου δίνεται από τη σχέση:

$$P_{out} = \frac{V_t \times E_f}{x_d} \times \sin\delta \quad (3.11)$$

Και η μέγιστη ισχύς εξόδου:

$$P_{max} = \frac{V_t \times E_f}{x_d}, \text{ με } \delta = 90^\circ \quad (3.12)$$

Οποιαδήποτε περαιτέρω αύξηση της ισχύος σε μια γεννήτρια από την κινητήρια μηχανή προκαλεί ελάττωση της ενεργού ισχύος εξόδου. Τότε η γεννήτρια επιταχύνεται και αποσυγχρονίζεται. Γι' αυτό το όριο ευστάθειας μονίμου καταστάσεως παρουσιάζεται όταν $\delta=90^\circ$.

Επομένως, η μέγιστη ροπή θα δίνεται για εσωτερική γωνία 90° . Δεδομένου αυτής της εσωτερικής γωνίας θα υπολογίσουμε τη μηχανική γωνία του δρομέα ώστε να δίνεται η βέλτιστη ροπή.

Οι ηλεκτρικές μοίρες με τις μηχανικές μοίρες συνδέονται με τον παρακάτω τύπο:

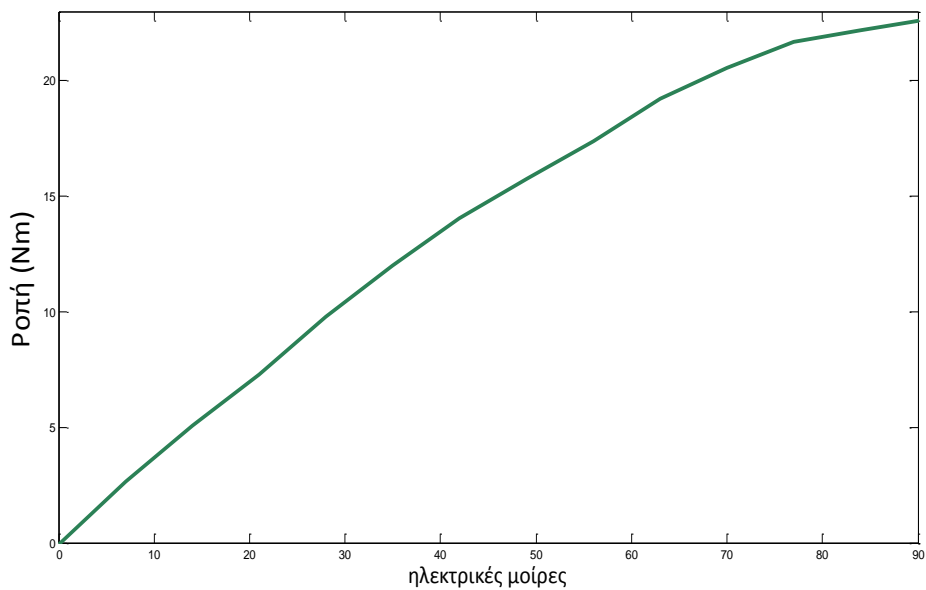
$$\theta_m = \frac{\theta_{ei}}{\frac{p}{2}}, \text{ όπου } p \text{ ο αριθμός των πόλων της μηχανής} \quad (3.13)$$

Για εσωτερική γωνία 90° η βέλτιστη θέση του δρομέα, όπου θα δίνεται και η βέλτιστη ροπή, θα βρίσκεται:

$$\theta_m = \frac{\theta_{ei}}{\frac{p}{2}} = \frac{90^\circ}{\frac{14}{2}} = 12.85^\circ$$

Στη συνέχεια, με σκοπό την επιβεβαίωση του θεωρητικού αποτελέσματος, εφαρμόζεται η μέθοδος ολίσθησης πόλων για μισή μηχανή, δεδομένου ότι η περιοδικότητα της μηχανής με αναλογία $p/Q=14/12$ είναι $p/Q=7/6$. Συγκεκριμένα, μετακινείται ο δρομέας κατά 180° με βήμα 1° και για κάθε θέση υπολογίζεται η ροπή στο μέσο του διακένου. Τα αποτελέσματα φαίνονται στο παρακάτω

διάγραμμα:



Σχήμα 3.10: Ροπή συναρτήσει ηλεκτρικών μοιρών

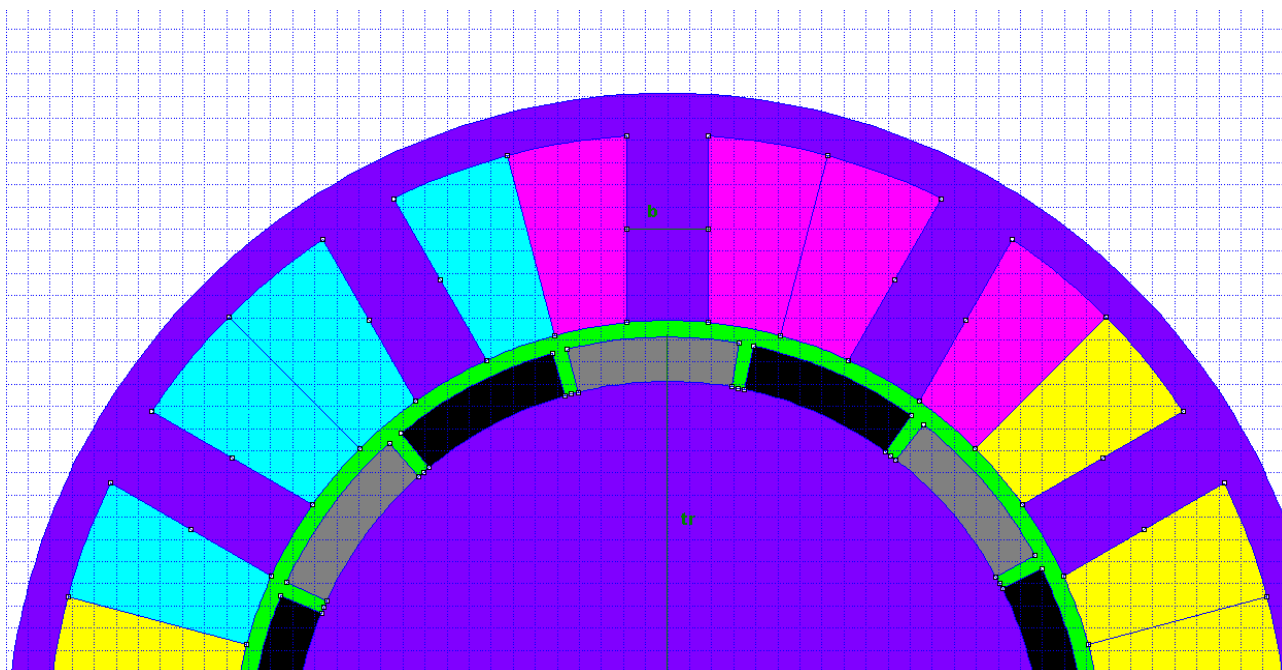
Η μέγιστη ροπή παράγεται στις 12,85° μηχανικές μετακίνησης του δρομέα από την θέση που παράγει μηδενική ροπή, όπου τα πεδία του στάτη και του δρομέα είναι ομόρροπα. Η συμφωνία του θεωρητικού αποτελέσματος και της δοκιμής ολίσθησης πόλων είναι ένδειξη μικρής αντίδρασης τυμπάνου, η οποία συνήθως είναι η αιτία απόκλισης των δύο μεθόδων.

3.2.7 Βελτιστοποίηση Ροπής

Έχοντας βρει τη βέλτιστη γωνία του δρομέα το επόμενο βήμα είναι η σάρωση του πεδίου ορισμού. Σε πρώτη φάση θεωρείται το εύρος του μαγνήτη σταθερό και το ποσοστό του επί του πολικού βήματος ίσο με 90% αυτού.

3.2.7.1 Βελτιστοποίηση Ροπής ως προς την εξωτερική ακτίνα δρομέα και το πάχος του δοντιού

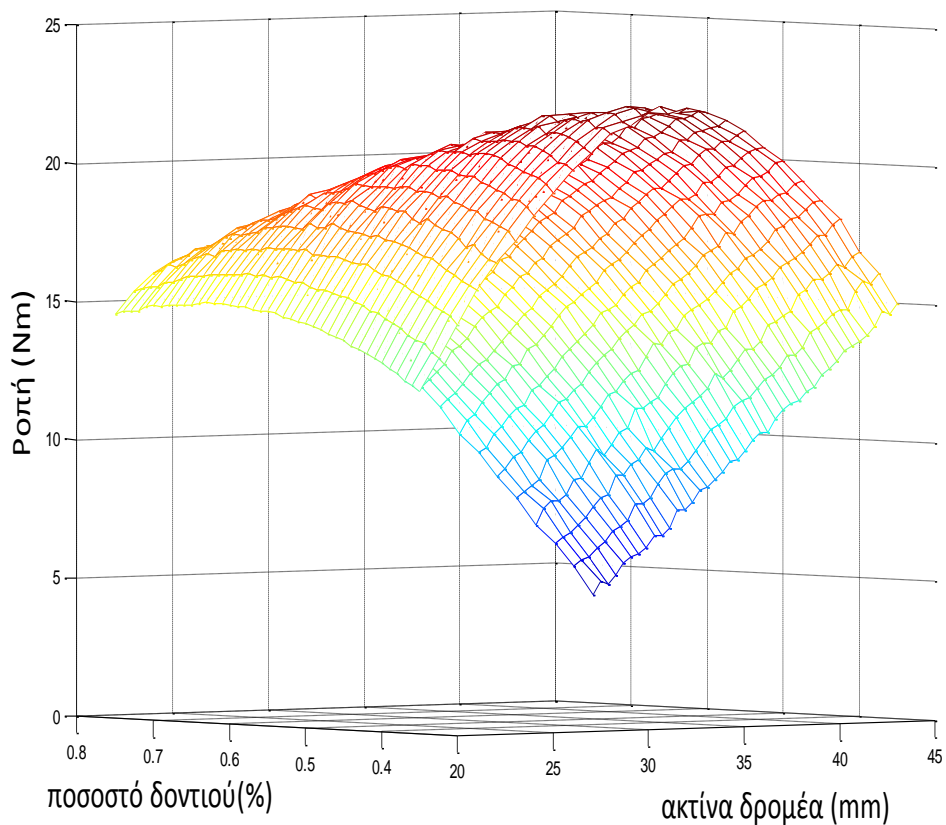
Στο πρώτο βήμα μεταβάλλεται το πάχος του δοντιού από 35 έως 75% της περιόδου δοντιού-αύλακας με βήμα 1% και της εξωτερικής ακτίνας δρομέα από 20 έως 40mm με βήμα 1mm.



Σχήμα 3.11: Γεωμετρικά μεγέθη υπό διερεύνηση εξωτερική ακτίνα δρομέα (t_r) και ποσοστό δοντιού(b) επί της περιόδου δοντιού-αύλακας

Το πάχος του μαγνήτη σε αυτή τη φάση είναι ίσο με 3mm, προς το παρόν δεν διερευνάται και είναι ενσωματωμένο στην τιμή της ακτίνας δρομέα . Σκοπός της διερεύνησης αυτής είναι να βρεθεί σε ποιο συνδυασμό πάχους δοντιού και εξωτερική ακτίνα δρομέα μεγιστοποιείται η ροπή.

Τα αποτελέσματα φαίνονται στο παρακάτω διάγραμμα:



Σχήμα 3.12: Ροπή συναρτήσει της ακτίνας δρομέα και του ποσοστού δοντιού επί της περιόδου δοντιού αύλακας

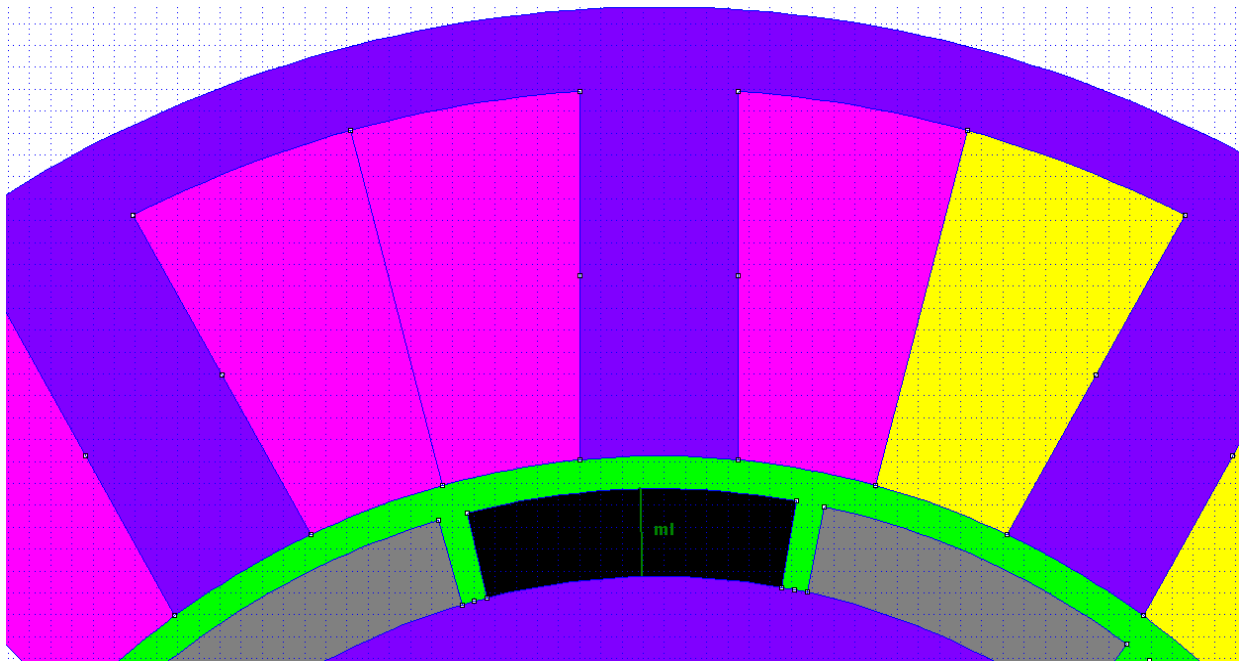
Ο συνδυασμός πάχους δοντιού- ακτίνας δρομέα για τον οποίο μεγιστοποιείται η ροπή είναι:

Ακτίνα δρομέα=33mm

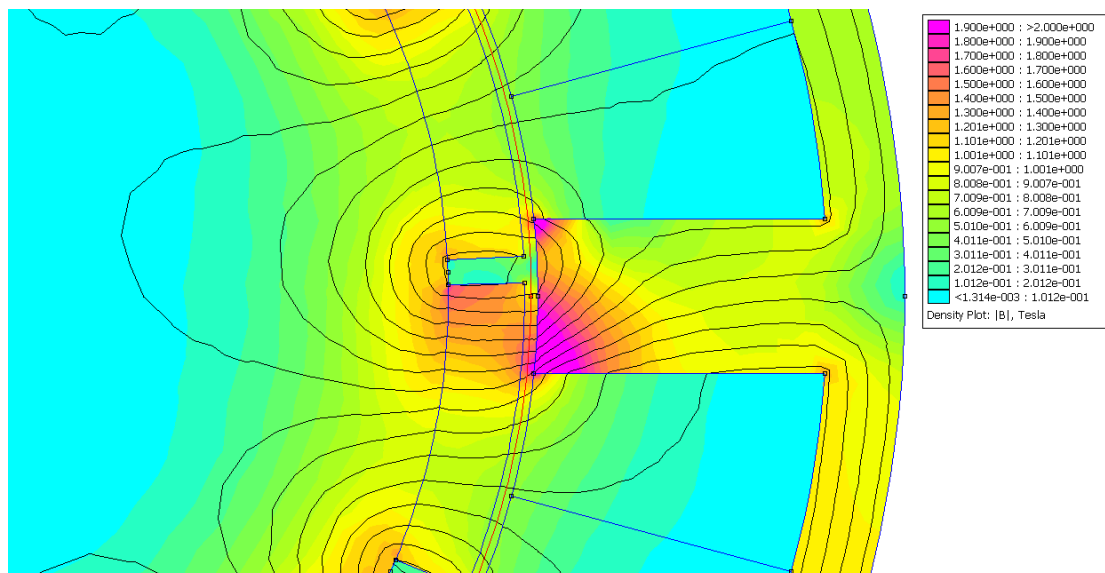
Ποσοστό δοντιού της περιόδου δοντιού-αύλακας=36%

3.2.7.2 Βελτιστοποίηση ροπής ως προς μήκος μαγνήτη

Για τις παραπάνω διαστάσεις πάχους δοντιού και εξωτερικής ακτίνας δρομέα, όπου μεγιστοποιείται η ροπή, διερευνάται το μήκος του μαγνήτη. Συγκεκριμένα, μεταβάλλεται το πάχος του μαγνήτη από 2 έως 7mm με βήμα 0,5mm και μετράται η ροπή στο μέσο του διακένου.

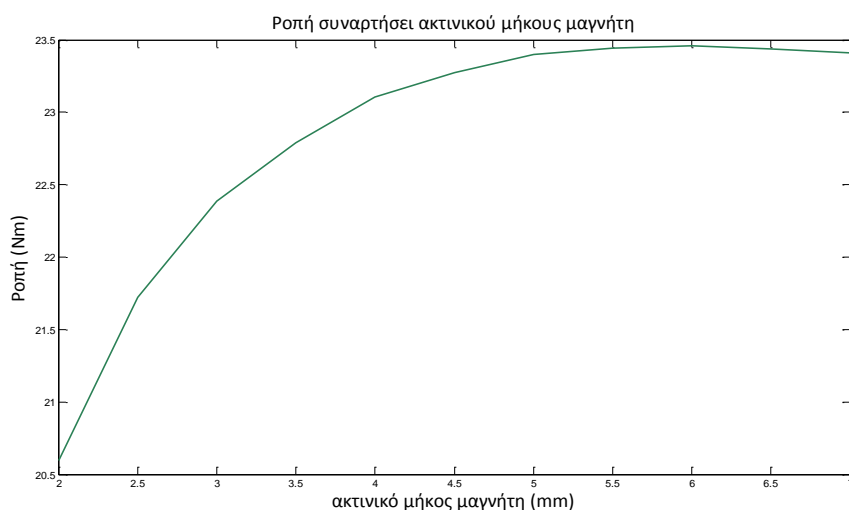


Σχήμα 3.13: Μέγεθος υπό διερεύνηση ακτινικό μήκος μαγνήτη ml



Σχήμα 3.14: Μέτρηση ροπής στο μέσο του διακένου

Διαγραμματικά, τα αποτελέσματα φαίνονται παρακάτω:

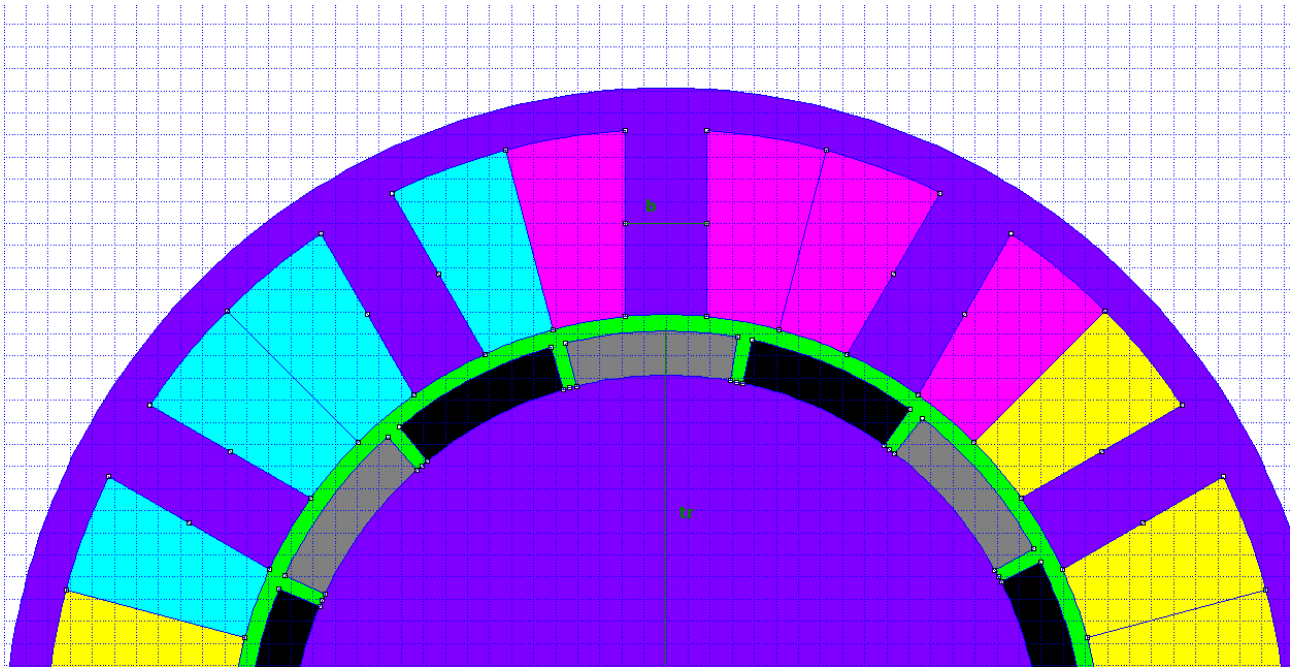


Σχήμα 3.15: Ροπή συναρτήσει του ακτινικού μήκους του μαγνήτη

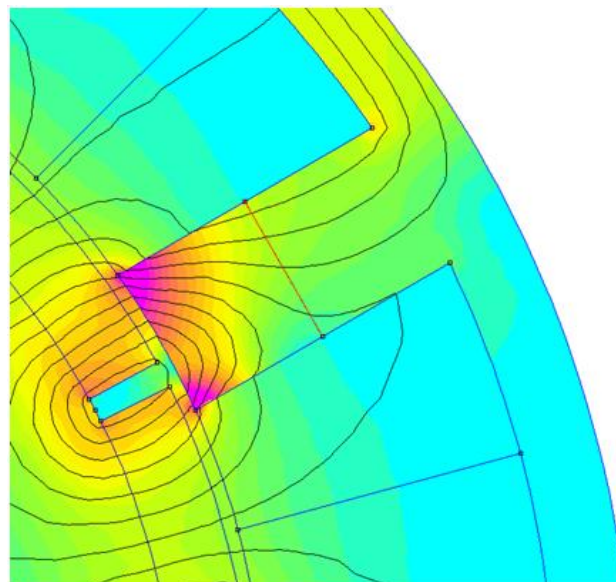
Το πάχος του μαγνήτη που θα χρησιμοποιηθεί είναι 4mm, δηλαδή στο γόνατο του παραπάνω διαγράμματος, όπου και είναι η βέλτιστη αξιοποίηση του υλικού του μόνιμου μαγνήτη. Οποιαδήποτε παραπάνω τιμή πάχους μαγνήτη που δύναται να χρησιμοποιηθεί δεν έχει περαιτέρω βελτιστοποίηση ροπής, αφού περνάει στην περιοχή κορεσμού.

3.2.7.3 Βελτιστοποίηση ροπής ως προς πάχος δοντιού, εξωτερική ακτίνα δρομέα, μαγνητικής επαγωγής στο δόντι και απώλειες χαλκού

Έχοντας καταλήξει σε πάχος μαγνήτη επαναλαμβάνεται το πρώτο βήμα αυτή τη φορά προσθέτοντας ακόμα δύο περιορισμούς. Η μαγνητική επαγωγή των δοντιών σε κενό φορτίο να μην ξεπερνά τα 1,6 T, έτσι ώστε ο πυρήνας να μην έρχεται κορεσμό (Σχήμα 3.19) και οι απώλειες χαλκού να έχουν σχετικά χαμηλή τιμή, έτσι ώστε να μην έχουν μεγάλη επίπτωση στην απόδοση της γεννήτριας. Η τελευταία παράμετρος είναι μια προσπάθεια προς την κατεύθυνση να μην επιβαρυνθεί η απόδοση προς χάριν της επίδοσης, δύο εξ' ορισμού αντικρουόμενα μεγέθη. Η μέτρηση της μαγνητικής επαγωγής στα δόντια θα γίνει στο μέσο έξι διαδοχικών δοντιών, δηλαδή στη μισή μηχανή, ενώ είναι σε κενό φορτίο:

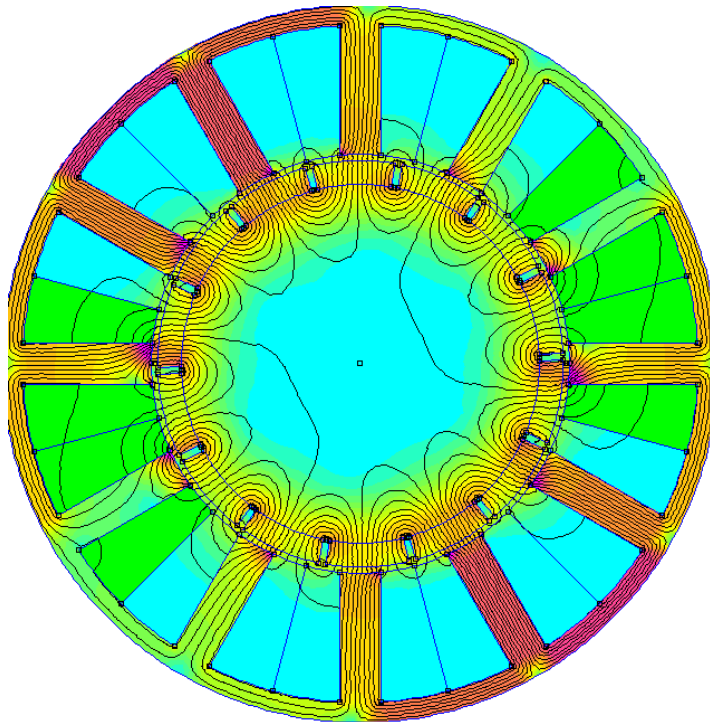


Σχήμα 3.16: Μεταβαλλόμενα μεγέθη μηχανής Εξωτερική ακτίνα στάτη και ποσοστό δοντιού



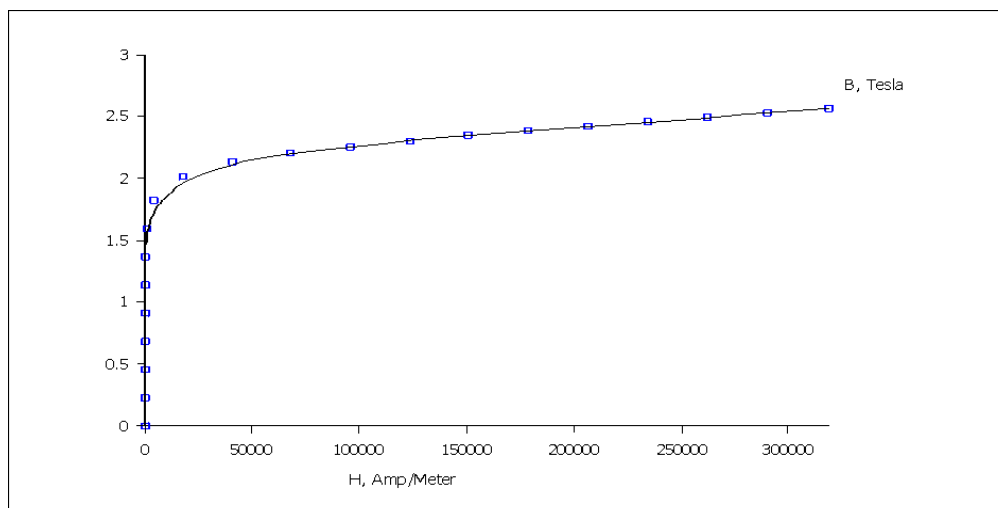
Σχήμα 3.17: Μέτρηση μαγνητικής επαγωγής στο μέσο του δοντιού

Για τον υπολογισμό των απωλειών χαλκού, επιλέχθηκαν οι αύλακες της φάσης Α, και με τη βοήθεια του femm υπολογίστηκαν οι απώλειες χαλκού της γεννήτριας.



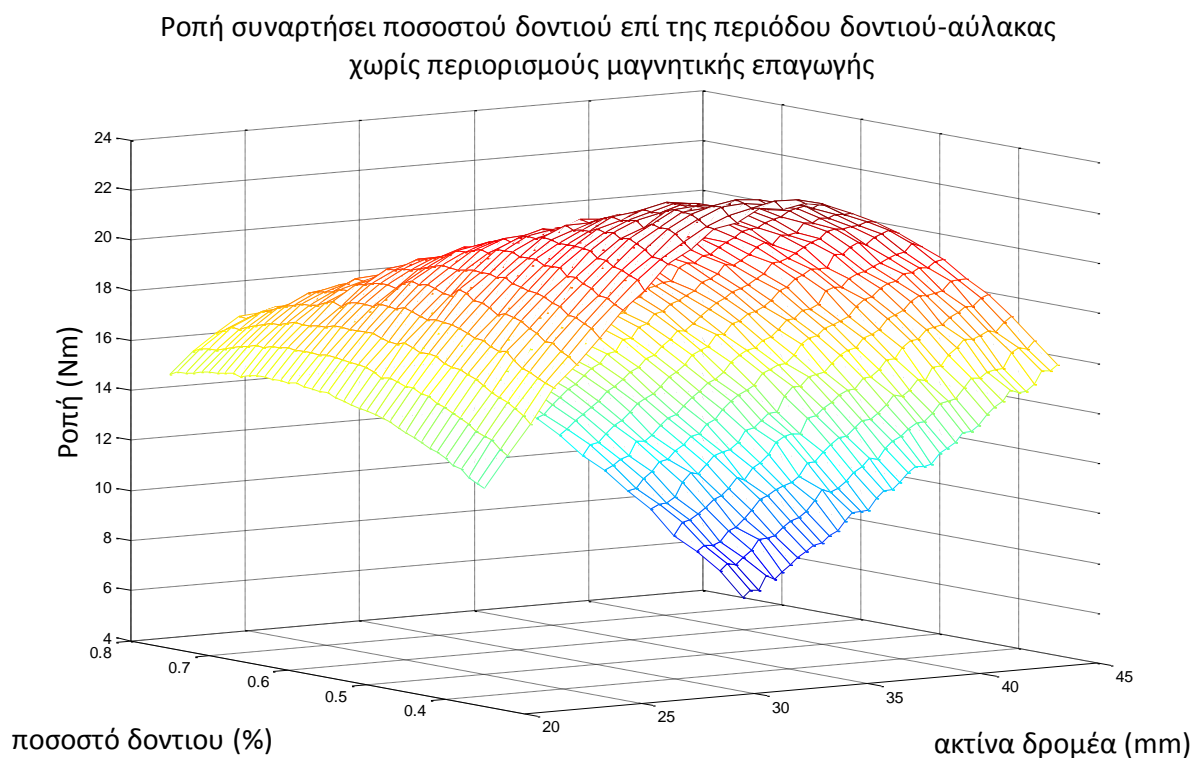
Σχήμα 3.18: Επιλογή φάσης Α για τον υπολογισμό απωλειών χαλκού

Η καμπύλη μαγνήτισης για τη λαμαρίνα του σώματος του στάτη φαίνεται παρακάτω:



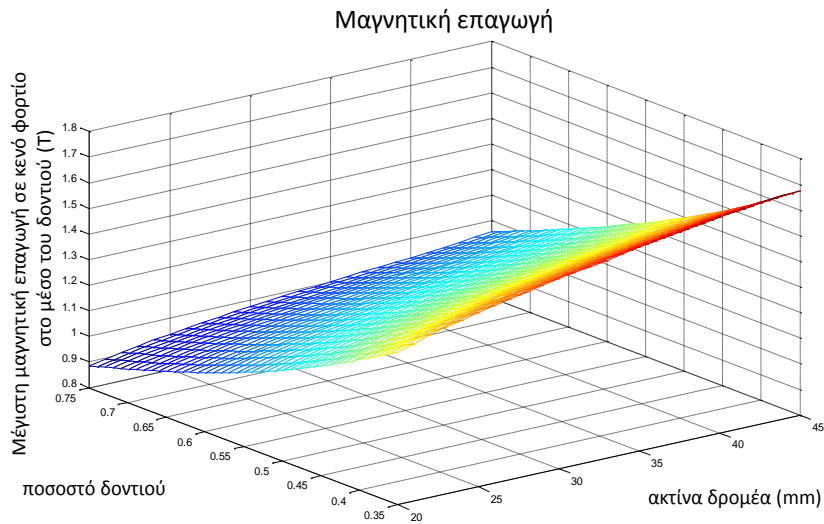
Σχήμα 3.19: Καμπύλη μαγνήτισης της λαμαρίνας του στάτη

Η ροπή συναρτῆσει του ποσοστού του δοντιού της περιόδου δοντιού-αύλακας και της ακτίνας του δρομέα, συμπεριλαμβανομένου και του ακτινικού μήκους των μαγνητών απεικονίζεται στο παρακάτω διάγραμμα:



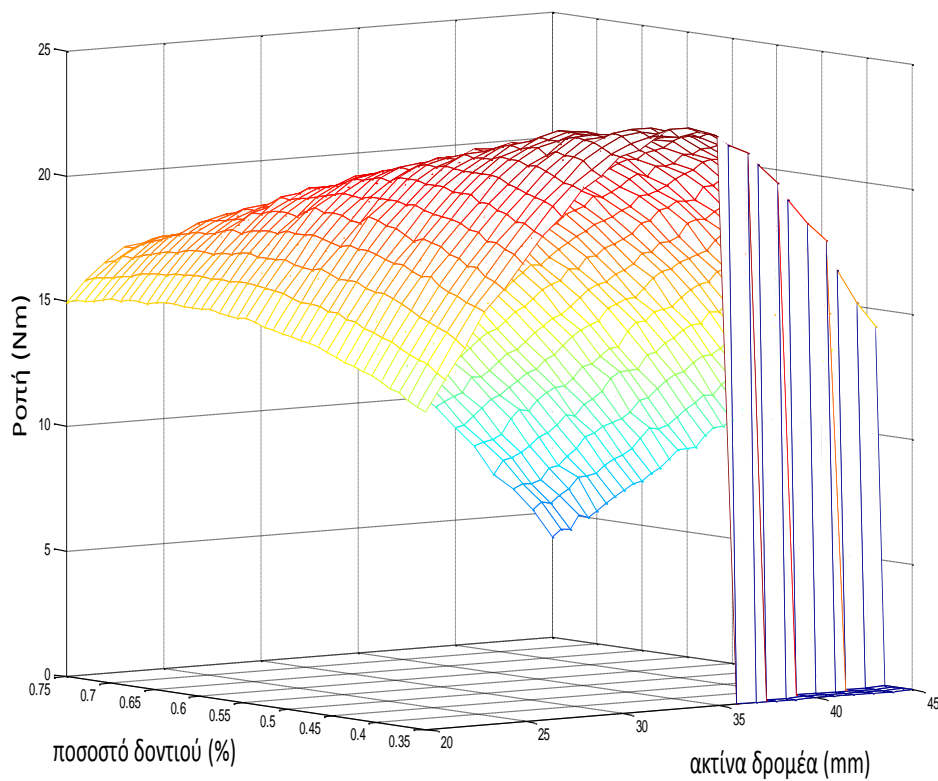
Σχήμα 3.20: Ροπή συναρτῆσει ποσοστού δοντιού και ακτίνας δρομέα

Όπως προαναφέρθηκε, για να αποφευχθεί το σώμα του στάτη να έρθει σε κορεσμό, ελέγχθηκε η μαγνητική επαγωγή στο μέσο των δοντιών σε κενό φορτίο για μισή μηχανή, ώστε η τιμή της να είναι μικρότερη από 1,6T. Για όλους τους συνδυασμούς πάχους δοντιού-ακτίνα στάτη, η επαγωγή φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα:



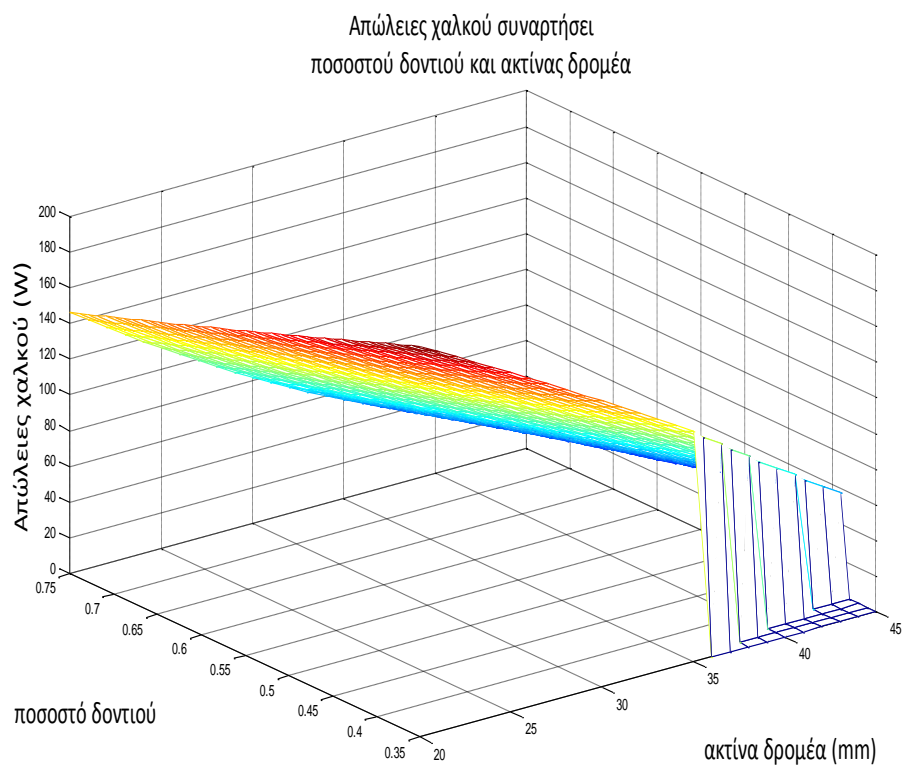
Σχήμα 3.21: Μέγιστη μαγνητική επαγωγή στο μέσο του δοντιού

Οι συνδυασμοί για τους οποίους η μαγνητική επαγωγή είναι μεγαλύτερη από την τιμή 1,6T δεν έχουν ληφθεί υπ' όψη και η αντίστοιχη ροπή έχει λάβει την τιμή μηδέν. Δηλαδή, το νέο διάγραμμα για τη ροπή, θα είναι:



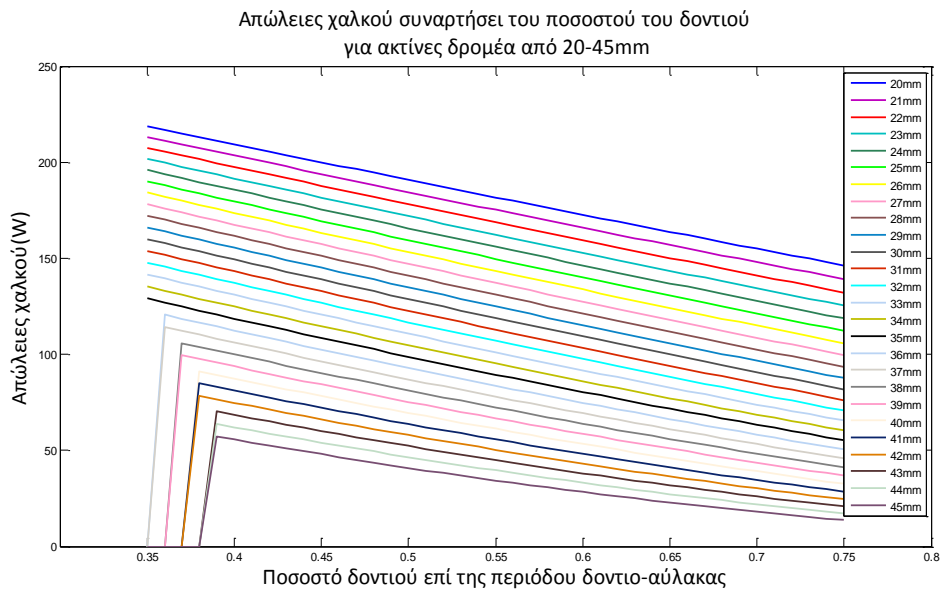
Σχήμα 3.22: Ροπή με περιορισμούς μαγνητικής επαγωγής

Τέλος, στο παρακάτω διάγραμμα φαίνονται οι συνολικές απώλειες χαλκού για όλους τους συνδυασμούς υπό διερεύνηση, όπου στις μη επιτρεπτές θέσεις λόγω αυξημένης μαγνητικής επαγωγής οι τιμές αντικαθίστανται με μηδενική τιμή:



Σχήμα 3.23: Απώλειες χαλκού για τους επιτρεπτούς συνδυασμούς γεωμετρίας

Το ενδεχόμενο το σώμα να είναι σε κορεσμό έχει αποκλειστεί. Όπως έχει προαναφερθεί, ένα από τα ζητούμενα είναι να μη βελτιστοποιηθεί η επίδοση σε βάρος της απόδοσης. Έτσι, προς αυτή την κατεύθυνση θα επιλεγεί η ακτίνα δρομέα, για την οποία εμφανίζονται μειωμένες απώλειες χαλκού. Μία εύλογη επιλογή με χαμηλές απώλειες χαλκού και με αποτέλεσμα την επιθυμητή ροπή είναι η ακτίνα δρομέα 34mm.

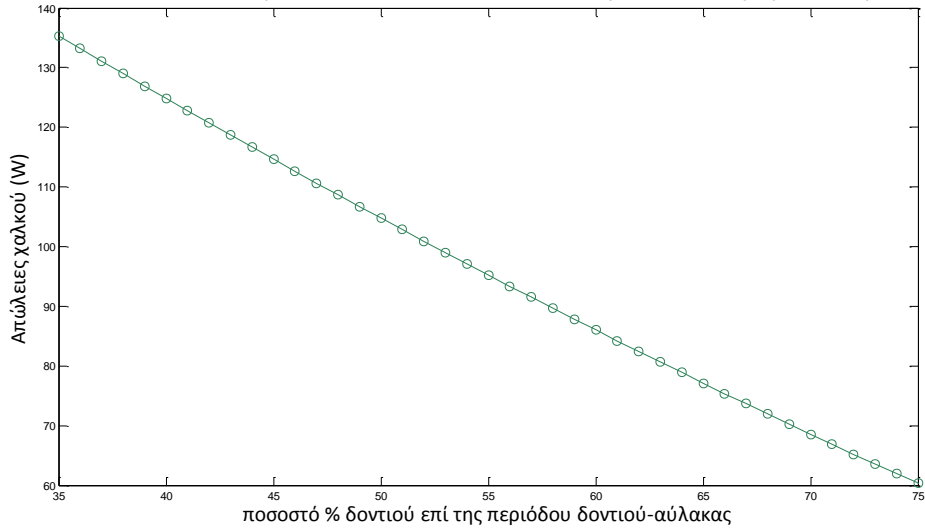


Σχήμα 3.24: Μείωση των απωλειών χαλκού όσο αυξάνει η ακτίνα δρομέα και το ποσοστό δοντιού

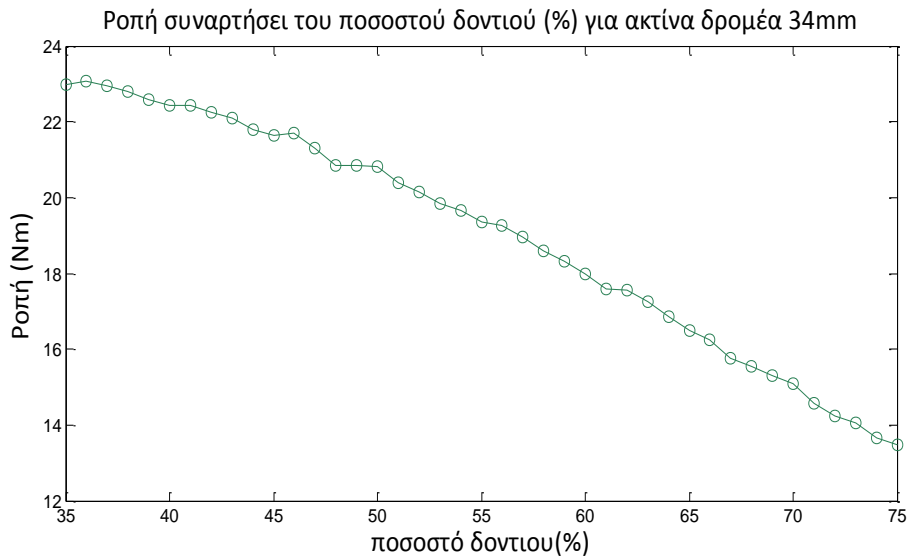
Όσο αυξάνεται η ακτίνα δρομέα μειώνονται οι απώλειες χαλκού της γεννήτριας, όπως άλλωστε βλέπουμε και στο παραπάνω διάγραμμα. Στην επιλεγθείσα ακτίνα δρομέα, οι απώλειες χαλκού είναι ικανοποιητικές, αλλά εξάγεται και η απαιτούμενη ροπή.

Με αυτή την επιλογή συνεχίζεται ο προσδιορισμός του ποσοστού δοντιού επί της περιόδου δοντιού-αύλακας. Για 34mm ακτίνα δρομέα οι επιτρεπτοί συνδυασμοί που έχουν τεθεί από τον περιορισμό των 1,6T στο μέσο του δοντιού σε κενό φορτίο είναι αυτοί με ποσοστό δοντιού από 38-75% της περιόδου δοντιού-αύλακας. Η ροπή που δίνουν οι συνδυασμοί και οι απώλειες χαλκού φαίνονται στα παρακάτω διαγράμματα:

Απώλειες χαλκού συναρτήσει του ποσοστού δοντιού για ακτίνα δρομέα ίση με 34mm



Σχήμα 3.25: Απώλειες χαλκού για ακτίνα δρομέα 34mm για κάθε ποσοστό δοντιού



Σχήμα 3.26: Ροπή για ακτίνα δρομέα ίση με 34mm για κάθε ποσοστό δοντιού

Από τα παραπάνω διαγράμματα φαίνεται ότι μια ικανοποιητική τιμή όσον αφορά τις απώλειες χαλκού και τη ζητούμενη ροπή θα είναι το ποσοστό του δοντιού επί της περιόδου δοντιού-αύλακας ίσο με 37%.

Έτσι, μέχρι στιγμής τα μεγέθη στα οποία έχει επιλεγεί η τιμή τους είναι:

Αριθμός πόλων $P=14$

Αριθμός αυλακών $Q=12$

Ακτινικό μήκος μαγνήτη $ml=4\text{mm}$

Ποσοστό δοντιού επί της περιόδου δοντιού-αύλακας $b=37\%$

Συνολική ακτίνα δρομέα (με τους μαγνήτες) $tr=34\text{mm}$

Εσωτερική ακτίνα δρομέα (χωρίς τους μαγνήτες) $rr=30\text{mm}$

Το μέγεθος που απομένει να διερευνηθεί, έτσι ώστε να ολοκληρωθεί η διαστασιολόγηση της μηχανής είναι το εύρος του μαγνήτη. Όπως προαναφέρθηκε, το εύρος του μαγνήτη εκφράζεται ως ποσοστό του πολικού βήματος. Παρακάτω γίνεται η διερεύνηση της βέλτιστης τιμής αυτού του μεγέθους και εξετάζεται κατά πόσο επηρεάζει τα κριτήρια της σχεδίασης όπως η ροπή ευθυγράμμισης, η κυμάτωση της ροπής και η ημιτονικότητα.

3.2.8 Βελτιστοποίηση ροπής ευθυγράμμισης ως προς το εύρος μαγνήτη

Η ροπή ευθυγράμμισης είναι η ροπή που εμφανίζεται εξαιτίας της αλληλεπίδρασης ανάμεσα στους μόνιμους μαγνήτες του δρομέα και τις αύλακες του στάτη σε μια μηχανή μόνιμων μαγνητών. Πιο συγκεκριμένα, η ροπή ευθυγράμμισης προκαλείται από την ποικιλότητα της μαγνητικής ενέργειας του πεδίου εξαιτίας των μόνιμων μαγνητών με την μηχανική γωνιακή θέση θ_m του δρομέα.

Οι τρόποι αντιμετώπισης της ροπής ευθυγράμμισης είναι αναλυτικά οι παρακάτω:

- Λοξότητα μόνιμων μαγνητών ή αυλακών στάτη: Για να εξαλειφθεί η ροπή ευθυγράμμισης αρκεί η γωνία κύρτωσης θ_{sk} να είναι ίση με την περίοδο της ροπής ευθυγράμμισης, δηλαδή να ισχύει:

$$\theta_{sk} = \frac{1}{N_p} \frac{2\pi}{Q} \quad (3.14).$$

Βέβαια, με αυτή τη μέθοδο προκαλούνται πολλά κατασκευαστικά προβλήματα. Η λοξότητα του στάτη κάνει την πληρότητα των αυλακών σχεδόν αδύνατη. Έτσι, αυτή η τεχνική δεν μπορεί να εφαρμοστεί σε μαζική παραγωγή μηχανών. Από την άλλη, η λοξότητα του δρομέα προϋποθέτει μαγνήτες σε συγκεκριμένο σχήμα, που είναι δύσκολο να κατασκευαστούν, είναι ακριβοί και δύσκολο να μαγνητιστούν.

- Εύρος μόνιμου μαγνήτη: Για τη μείωση των αρμονικών ροπής ευθυγράμμισης μπορούμε να επιλέξουμε κατάλληλο εύρος μαγνήτη. Η ροπή ευθυγράμμισης μπορεί να αναπαρασταθεί με σειρά Fourier. Οι συνιστώσες της εξαρτώνται από την απόσταση των άκρων δύο μόνιμων μαγνητών. Γενικά, επιλέγεται να μηδενιστεί η θεμελιώδης συνιστώσα της ροπής ευθυγράμμισης. Με αυτό τον τρόπο η θετική ροπή κάθε άκρου του μόνιμου μαγνήτη εξουδετερώνεται από την αρνητική ροπή του άλλου άκρου. Βέβαια, η σωστή τιμή του τόξου του μόνιμου μαγνήτη είναι δύσκολο να σχεδιαστεί. Εξαρτάται από τον τύπο της μαγνήτισης και από το πάχος του διακένου, καθώς και από το άνοιγμα των αυλακών. Μικρές μεταβολές στο τόξο του μόνιμου μαγνήτη μπορεί να προκαλέσουν μεγάλες μεταβολές στις αρμονικές της ροπής ευθυγράμμισης.
- Διαφορετικό εύρος μόνιμου μαγνήτη: Μια πολυπολική μηχανή μπορεί να σχεδιαστεί με διαφορετικά εύρη τόξων. Με αυτό τον τρόπο η θεμελιώδης συνιστώσα της ροπής ευθυγράμμισης μπορεί να κατανεμηθεί ομοιόμορφα κατά μήκους του βήματος της αύλακας, μειώνοντας τη συνολική ροπή ευθυγράμμισης. Αυτή η λύση όμως απαιτεί διαφορετικά σχήματα για τον ίδιο δρομέα και κατ' επέκταση διαφορετικά καλούπια. Είναι αρκετά ακριβή λύση και απαιτεί τη συναρμολόγηση πιο αργού δρομέα.

- Εγκοπές στο δόντι του στάτη: Σε αυτή την τεχνική μειώνουμε τη ροπή ευθυγράμμισης βάζοντας στα δόντια του στάτη έναν αριθμό N_n από εγκοπές με σκοπό να αποκτήσουμε ψευδοαύλακες. Έχουν ίσο μήκος μεταξύ τους και το εύρος τους είναι ίδιο με αυτό των πραγματικών αυλακών. Το αποτέλεσμα είναι αυξημένος αριθμός αλληλεπιδράσεων ανάμεσα στους μόνιμους μαγνήτες του δρομέα και στις αύλακες του στάτη και μειωμένο πλάτος της τιμής της ροπής ευθυγράμμισης. Στην πραγματικότητα οι N_n αύλακες παράγουν επιπρόσθετες καμπύλες ροπής ευθυγράμμισης, με την ίδια συμπεριφορά με την αρχική ροπή ευθυγράμμισης, μετατοπισμένες όμως κατά $\varphi_n = \frac{2\pi}{Q(N_n+1)}$ μηχανικές μοίρες. Προσθέτοντας την αρχική ροπή ευθυγράμμισης με τις επιπρόσθετες, παρατηρείται ότι οι αρμονικές που είναι πολλαπλάσιες του (N_n+1) είναι συμφασικές, έτσι το άθροισμά τους είναι κατά $(N_n + 1)$ φορές μεγαλύτερο. Αντίστροφα, οι άλλες αρμονικές ακυρώνονται. Η τελική ροπή ευθυγράμμισης χαρακτηρίζεται από υψηλότερη συχνότητα και εξασθενημένη μέγιστη τιμή, αφού γενικά οι υψηλότερες αρμονικές είναι μικρότερες από τη θεμελιώδη. Επιπλέον η ροπή ευθυγράμμισης με μεγαλύτερη συχνότητα απαιτεί μικρότερη γωνία λοξότητας και ο παραγόμενος ακουστικός θόρυβος μπορεί να πέσει κάτω από το κατώτατο όριο ακουστικών συχνοτήτων. Μια αντίστοιχη στρατηγική μείωσης ροπής ευθυγράμμισης είναι να εισάγουμε ψευδοδόντια στα ανοίγματα των αυλακών. Το αποτέλεσμα είναι το αντίστοιχο όπως περιγράφηκε παραπάνω.
- Μετατόπιση των μόνιμων μαγνητών: Όπως περιγράφηκε παραπάνω η ροπή ευθυγράμμισης μειώνεται αν τα αποτελέσματα της αλληλεπίδρασης του άκρου του μόνιμου μαγνήτη και του ανοίγματος της αύλακας σε μια περιστροφή ενός βήματος αύλακας κατανέμονται κατά μήκος του βήματος της αύλακας. Για τη μείωση της ροπής ευθυγράμμισης είναι δυνατό να προσαρμόσουμε τη αμοιβαία θέση των μόνιμων μαγνητών πάνω στο δρομέα. Δηλαδή ένα είδος περιμετρικής κύρτωσης. Ο γενικός κανόνας λέει ότι σε μια μηχανή με $2p$ πόλους, ο μόνιμος μαγνήτης που αντιστοιχεί στο νιοστό πόλο πρέπει να μετατοπιστεί με μια γωνία ίση με

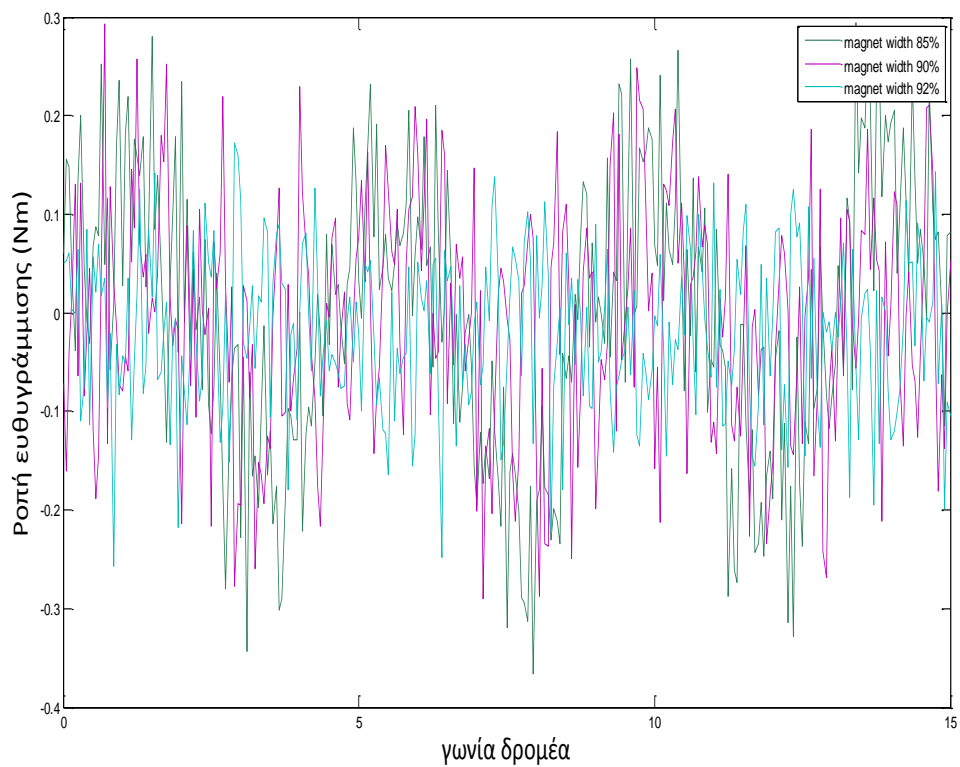
$$\varphi_{sh,v} = \frac{2\pi(v-1)}{2pN_p Q}, \text{ όπου } N_p = \frac{2p}{\text{HCF}(Q,2p)} \text{ και } v=0,1,2,\dots,2p. \text{ Η}$$

συνολική ροπή ευθυγράμμισης μπορεί να υπολογιστεί από το άθροισμα των καμπυλών της ροπής ευθυγράμμισης που παράγεται από κάθε νιοστό πόλο. Όλες οι αρμονικές της ροπής ευθυγράμμισης εξουδετερώνονται εκτός από αυτές που είναι πολλαπλάσια του $2p$, των οποίων το άθροισμα αυξάνεται αφού είναι συμφασικές.

- Τέλος, η ροπή ευθυγράμμισης μπορεί να μειωθεί σημαντικά με τη σχεδίαση μηχανών με κλασματικό βήμα. Η επιλογή συνδυασμού αριθμού πόλων και αυλακών που έχει γίνει, βοηθά προς την ελαχιστοποίηση της ροπής ευθυγράμμισης, αφού το ελάχιστο κοινό πολλαπλάσιο αυτών των αριθμών είναι μεγάλο. Επίσης, η πρόβλεψη της μείωσης της ροπής ευθυγράμμισης με τη χρήση κλασματικού βήματος αποτελεί έναν οικονομικό τρόπο αντιμετώπισής της και εύκολο στην κατασκευή [5].

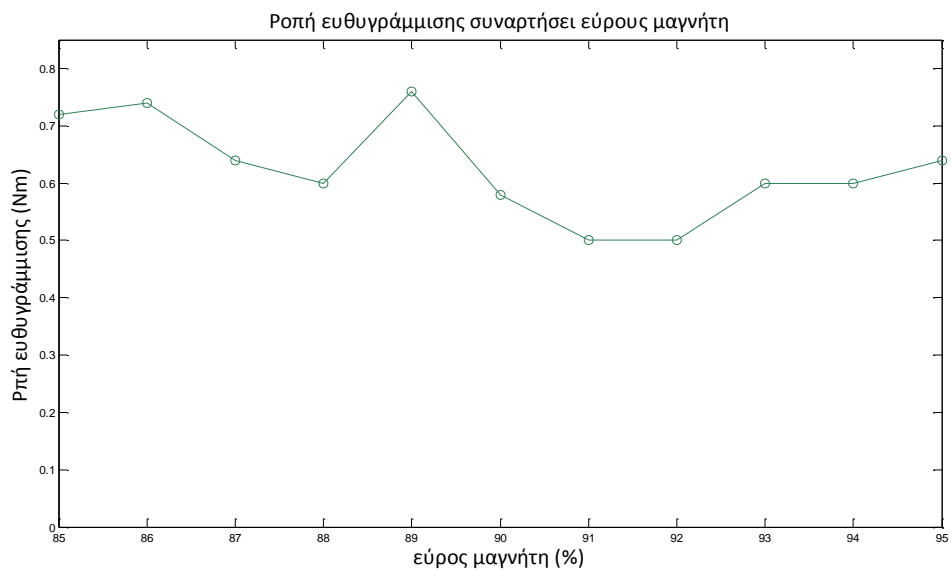
Θα εξεταστεί πως επηρεάζει το εύρος μαγνήτη τη ροπή ευθυγράμμισης της μηχανής. Ο δρομέας αρχικά είναι τοποθετημένος στη βέλτιστη γωνία. Για ποσοστό εύρους μαγνήτη 85-95% του πολικού βήματος, σε κενό φορτίο, στρέφεται ο δρομέας για 15° με βήμα 0.05° και μετράται τη ροπή ευθυγράμμισης στο μέσο του

διακένου.



Σχήμα 3.27: Ροπή ευθυγράμμισης συναρτήσει γωνίας δρομέα για μαγνήτη 85%, 90% και 92%

Στο ακόλουθο διάγραμμα φαίνονται οι μέγιστες τιμές της ροπής ευθυγράμμισης για τα ποσοστά εύρους μαγνήτη επί του πολικού βήματος υπό διερεύνηση:



Σχήμα 3.28: Μέγιστη τιμή Ροπής ευθυγράμμισης συναρτήσει γωνίας δρομέα για κάθε εύρος μαγνήτη

Οι ελάχιστες τιμές παρουσιάζονται για το 91% και 92% μαγνήτη επί του πολικού βήματος. Οι αποκλίσεις τους, όμως, από τις άλλες τιμές μαγνήτη δεν είναι μεγάλες. Γενικά, η ροπή ευθυγράμμισης που παρουσιάζει η μηχανή είναι ικανοποιητική. Αυτό βέβαια οφείλεται στο ότι η επιλεχθείσα τοπολογία της μηχανής με κλασματικό βήμα και η συγκεκριμένη επιλογή συνδυασμού αυλακών- πόλων βοηθά πολύ προς την κατεύθυνση της ελαχιστοποίησης της ροπής ευθυγράμμισης.

3.2.9 Βελτιστοποίηση κυμάτωσης ροπής ως προς το εύρος του μαγνήτη

Η κυμάτωση της ροπής οφείλεται στα εξής:

- Στη ροπή ευθυγράμμισης: Παράγεται από τη μεταβολή της μαγνητικής διαπερατότητας του μόνιμου μαγνήτη εξαιτίας των αυλακών της επιφάνειας του στάτη, ακόμα και όταν δεν υπάρχει διέγερση.
- Στη μεταβολή της διαπερατότητας των μόνιμων μαγνητών όταν υπάρχει κορεσμός.
- Στις αρμονικές χώρου: Η αλληλεπίδραση ανάμεσα στις αρμονικές του πεδίου που παράγεται από τους μόνιμους μαγνήτες και στις αρμονικές του πεδίου που παράγονται από τα τυλίγματα.
- Στις αρμονικές χρόνου: Ο αντιστροφείας επάγει χρονικές αρμονικές στο πεδίο, που παράγεται από τα τυλίγματα, το οποίο παράγει παλλόμενη ροπή όταν αλληλεπιδρά με το πεδίο του δρομέα.
- Στις ανεπιθύμητες ατέλειες της μηχανής όπως η εκκεντρότητα της μηχανής ή η ανομοιόμορφη μαγνήτιση των μαγνητών.

Υπάρχουν πολλοί τρόποι για τη μείωση της κυμάτωσης της ροπής, όπως το να κοπεί ο στάτης λοξά. Η κυμάτωση της ροπής σε σύγχρονες μηχανές μόνιμων μαγνητών με συγκεντρωμένα τυλίγματα είναι συνήθως χαμηλή. Παρόλα αυτά, με τη σωστή επιλογή συνδυασμού αριθμού πόλων και αυλακών και υιοθετώντας κάποιες σχεδιαστικές παραμέτρους όπως το ποσοστό του εύρους μαγνήτη επί του πολικού βήματος ή το εύρος του ανοίγματος της αύλακας είναι αρκετά ώστε να μειωθεί η

κυμάτωση της ροπής. Το αν έχει επιτευχθεί χαμηλή ροπή ευθυγράμμισης δεν συνεπάγεται ταυτόχρονη βελτιστοποίηση και της κυμάτωσης της ροπής [1],[7].

Η επιλογή του ποσοστού εύρους μαγνήτη επί του πολικού βήματος θα ολοκληρωθεί μετά την ανάλυση ευαισθησίας της κυμάτωσης ροπής ως προς το εύρος μαγνήτη. Η τιμή που θα επιλεγεί θα είναι αυτή που ταυτόχρονα διασφαλίζει χαμηλή ροπή ευθυγράμμισης και χαμηλή κυμάτωση ροπής.

Για τη βελτιστοποίηση της κυμάτωσης ροπής ο δρομέας της γεννήτριας μετακινήθηκε για 15° με βήμα 0.05°, ενώ ταυτόχρονα τα ρεύματα στο στάτη μετατοπίζονταν αναλόγως σύμφωνα με τη σχέση:

$$\theta_{sl} = \frac{p}{2} \theta_m = 7\theta_m$$

Δηλαδή, η μετακίνηση του δρομέα επιφέρει συγκεκριμένη μετακίνηση στα ρεύματα του στάτη, η οποία είναι ταχύτερη από τη μετακίνηση του δρομέα.

Για κάθε θέση του δρομέα και αντίστοιχη θέση ρευμάτων, μετρήθηκε η ροπή στο διάκενο για ποσοστά εύρους μαγνήτη επί του πολικού βήματος από 85-95%.

Για κάθε ποσοστό του εύρους του μαγνήτη, από τα αποτελέσματα της διερεύνησης, υπολογίστηκε ο συντελεστής ροπής κυμάτωσης (t_r), ο οποίος δίνεται από τη σχέση [3]:

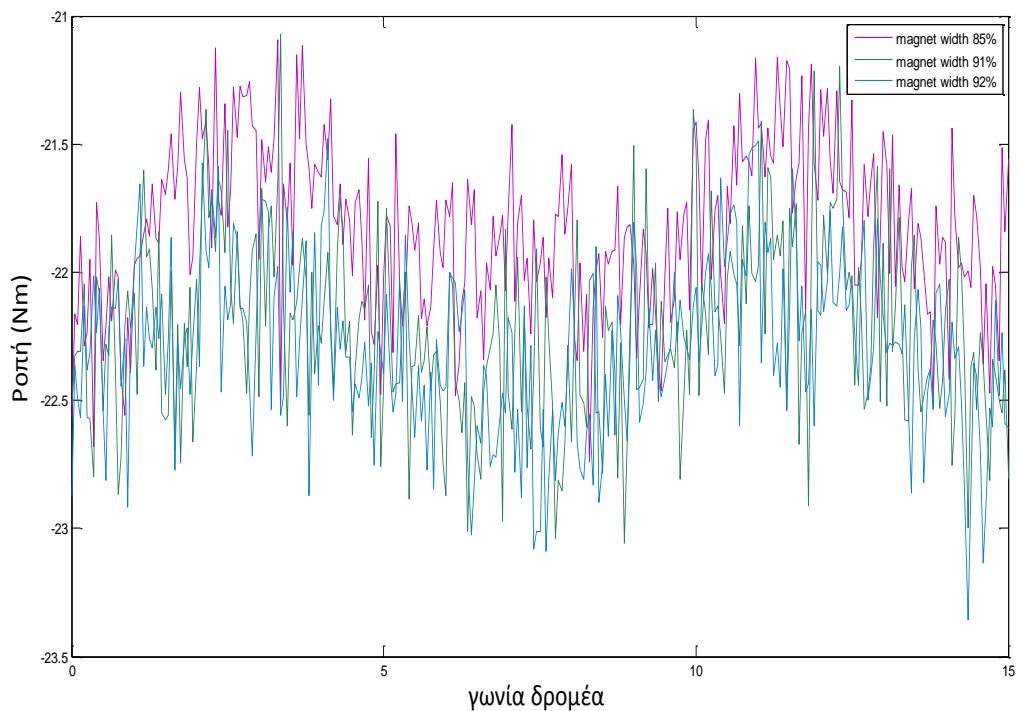
$$t_r = \frac{T_{max} - T_{min}}{T_{average}} \cdot 100\% \quad (3.15)$$

Τα αποτελέσματα φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

Ποσοστό εύρους μαγνήτη επί του πολικού βήματος (%)	T_{max} (Nm)	T_{min} (Nm)	$T_{average}$ (Nm)	Συντελεστής κυμάτωσης ροπής t_r (%)
85	22,9	21,1	21,8	8,3
86	22,99	20,64	21,89	11,9
87	23,15	20,94	21,97	10
88	23,13	20,94	22,01	10
89	23,16	21,3	22,15	8,5
90	23,5	20,98	22,16	11,3
91	23,1	21,1	22,2	8,9
92	23,4	21,47	22,3	8,3
93	23,6	21,47	22,4	9
94	23,62	21,27	22,4	10,5
95	23,79	21,5	22,5	10,2

Πίνακας 3.7: Συντελεστής κυμάτωσης ροπής για εύρη μαγνήτη 85-95% επί του πολικού βήματος

Γραφικά, τα αποτελέσματα φαίνονται παρακάτω, για επιλεγμένες τιμές:



Σχήμα 3.29:Κυμάτωση ροπής συναρτήσει γωνίας δρομέα για μαγνήτη 85%, 91% και 92%

Είναι ξεκάθαρο ότι το πιο χαμηλό συντελεστή κυμάτωσης παρουσιάζουν τα ποσοστά 85% και 92%. Τα μεγέθη αυτά είναι σε συμφωνία με τη βελτιστοποίηση της ροπής ευθυγράμμισης ως προς το εύρος του μαγνήτη, όπου υπενθυμίζεται ότι οι βέλτιστες τιμές παρουσιάστηκαν για το 91% και το 92% μαγνήτη επί του πολικού βήματος.

Για την τελική επιλογή εύρους μαγνήτη, εφόσον έχει βρεθεί η μέση ροπή, θα υπολογιστεί ο συντελεστής ροπής ευθυγράμμισης (t_c), ο οποίος δίνεται από τη σχέση [3]:

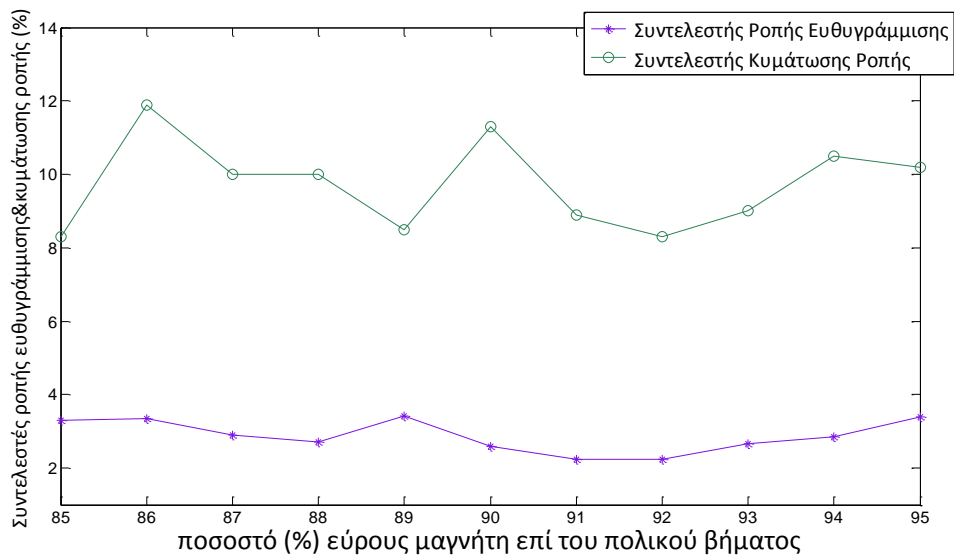
$$t_c = \frac{T_c}{T_{average}} \cdot 100\% \quad (3.16)$$

Και ορίζεται ως ο λόγος της μέγιστης τιμής της ροπής ευθυγράμμισης προς τη μέση τιμή της ροπής.

Ο συντελεστής ροπής ευθυγράμμισης υπολογίστηκε για κάθε ποσοστό εύρους μαγνήτη από 85-95% και τα αποτελέσματα φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

Ποσοστό εύρους μαγνήτη επί του πολικού βήματος (%)	Μέγιστη Τιμή ροπής ευθυγράμμισης T_{crr} (Nm)	$T_{average}$ (Nm)	Συντελεστής ροπής ευθυγράμμισης t_c (%)
85	0,72	21,8	3,3
86	0,74	21,89	3,34
87	0,64	21,97	2,9
88	0,6	22,01	2,7
89	0,76	22,15	3,43
90	0,58	22,16	2,6
91	0,5	22,2	2,25
92	0,5	22,3	2,24
93	0,6	22,4	2,67
94	0,64	22,4	2,86
95	0,76	22,5	3,4

Πίνακας 3.8: Συντελεστής ροπής ευθυγράμμισης για εύρη μαγνήτη 85-95% επί του πολικού βήματος



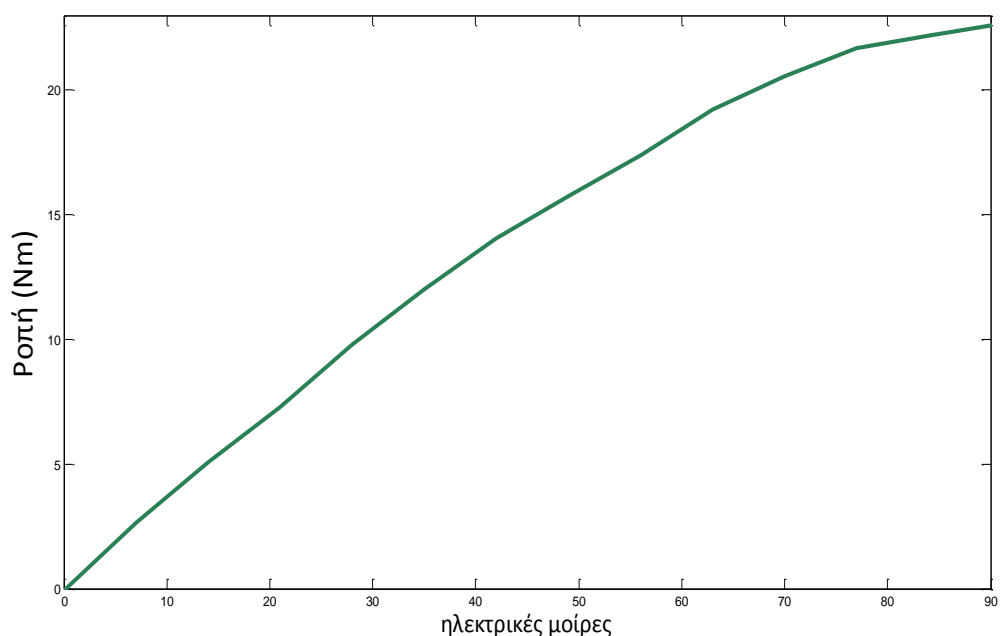
Σχήμα 3.30: Μεταβολή συντελεστών κυμάτωσης ροπής και ροπής ευθυγράμμισης σε συνάρτηση με τη μεταβολή του εύρους του μαγνήτη

Η χαμηλότερη τιμή του συντελεστή ροπής ευθυγράμμισης εμφανίζεται για το 92% μαγνήτη επί του πολικού βήματος. Δεδομένου ότι σε αυτή την τιμή παρουσιάζεται

και μια από τις χαμηλότερες τιμές του συντελεστή κυμάτωσης ροπής, οδηγεί στο συμπέρασμα ότι αυτή είναι η καταλληλότερη τιμή εύρους μαγνήτη.

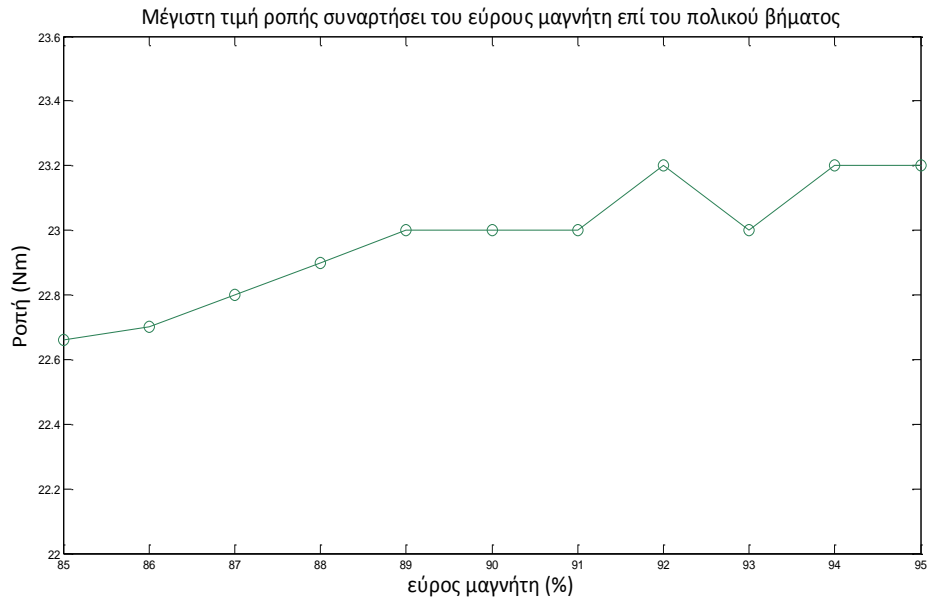
3.2.10 Βελτιστοποίηση ροπής ως προς το εύρος μαγνήτη

Θα πρέπει να διερευνηθεί η τιμή της ροπής πως αποκρίνεται στην αυξομείωση του εύρους του μαγνήτη. Για αυτό το λόγο μετρήθηκε η μέγιστη ροπή για κάθε εύρος μαγνήτη από 85 έως 95% επί του πολικού βήματος. Η μέγιστη ροπή εντοπίζεται στις 90° ηλεκτρικές όπως φαίνεται και από το παρακάτω διάγραμμα ροπής για εύρος μαγνήτη 85% επί του πολικού βήματος:



Σχήμα 3.31:Ροπή συναρτήσει ηλεκτρικών μοιρών για μαγνήτη 85%

Η μέγιστη τιμή της ροπής για κάθε εύρος μαγνήτη που διερευνάται φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα:



Σχήμα 3.32:Μέγιστη τιμή ροπής για κάθε εύρος μαγνήτη

Δεν υπάρχει αισθητή μεταβολή της τιμής της μέγιστης ροπής σε σχέση με το εύρος του μαγνήτη, όπως φαίνεται και παραπάνω. Έτσι λοιπόν, επιβεβαιώνεται η επιλογή του εύρους μαγνήτη με βάση τα κριτήρια της ροπής ευθυγράμμισης και της κυμάτωσης της ροπής.

3.2.11 Βελτιστοποίηση ημιτονικότητας ως προς το εύρος μαγνήτη

Είναι γνωστό ότι μία μεταβαλλόμενη μαγνητική ροή μέσα σε έναν βρόχο που αποτελείται από αγώγιμο υλικό θα επάγει μία τάση στο βρόχο :

$$e = -N \cdot \frac{d\Phi}{dt} \quad (3.17)$$

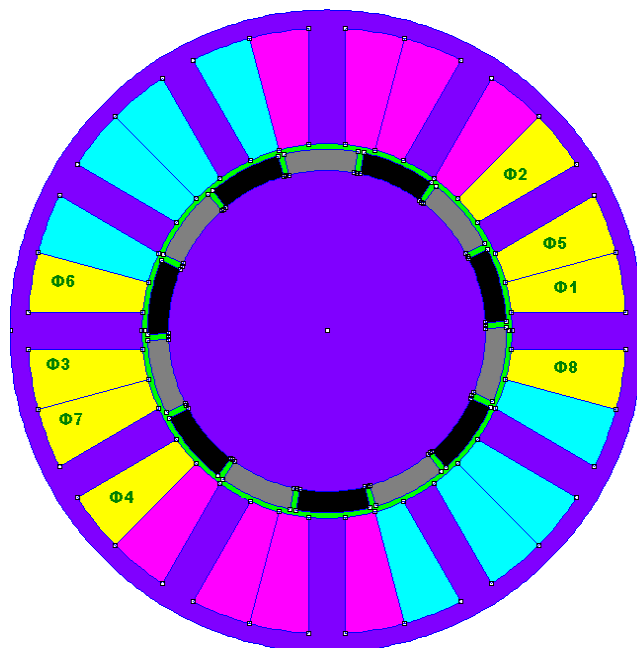
Δηλαδή έστω δύο χρονικές στιγμές t_1 και t_2 , τότε:

$$e = \frac{\Phi(t_2) - \Phi(t_1)}{t_2 - t_1} \quad (3.18)$$

Η διαδικασία της μέτρησης της ηλεκτρεγερτικής δύναμης της φάσης Α της γεννήτριας έγινε σε κενό φορτίο. Ο δρομέας θα μετατοπιστεί κατά δύο πόλους με

βήμα 1° , ενώ για κάθε θέση του δρομέα υπολογίζεται η ροή της φάσης A που περνάει από κάθε δόντι, η οποία είναι η διαφορά της ροής που προκαλείται από τις γειτονικές φάσεις, οι οποίες είναι A-A'

$$\begin{aligned}
 \phi_9 &= \phi_8 - \phi_1 \\
 \phi_{10} &= \phi_2 - \phi_5 \\
 \phi_{11} &= \phi_3 - \phi_6 \\
 \phi_{12} &= \phi_7 - \phi_4
 \end{aligned}
 \tag{3.19}$$



Σχήμα 3.33: Ροές που διέρχονται από τη φάση A

Στη συνέχεια θα υπολογιστεί η διαφορά της ροής $\Delta\Phi$, δηλαδή η ροή που διαπερνά τα δόντια σε δύο χρονικές στιγμές t_2 και t_1 :

$$\begin{aligned}
\Phi_{13} &= \Phi_9(k+1) - \Phi_9(k) \\
\Phi_{14} &= \Phi_{10}(k+1) - \Phi_{10}(k) \\
\Phi_{15} &= \Phi_{11}(k+1) - \Phi_{11}(k) \\
\Phi_{16} &= \Phi_{12}(k+1) - \Phi_{12}(k)
\end{aligned}
\tag{3.20}$$

,όπου k : το βήμα περιστροφής του δρομέα

Άρα, η συνολική επαγόμενη τάση στο στάτη θα προκύψει από το άθροισμα (λαμβάνοντας υπόψη το πρόσημο) όλων των επιμέρους επαγόμενων τάσεων από τις αύλακες που περιέχουν τυλίγματα χαλκού της φάσης A και τη διαίρεση αυτού με το Δt :

$$\Delta\Phi = \Phi_{13} + \Phi_{14} + \Phi_{15} + \Phi_{16} \tag{3.21}$$

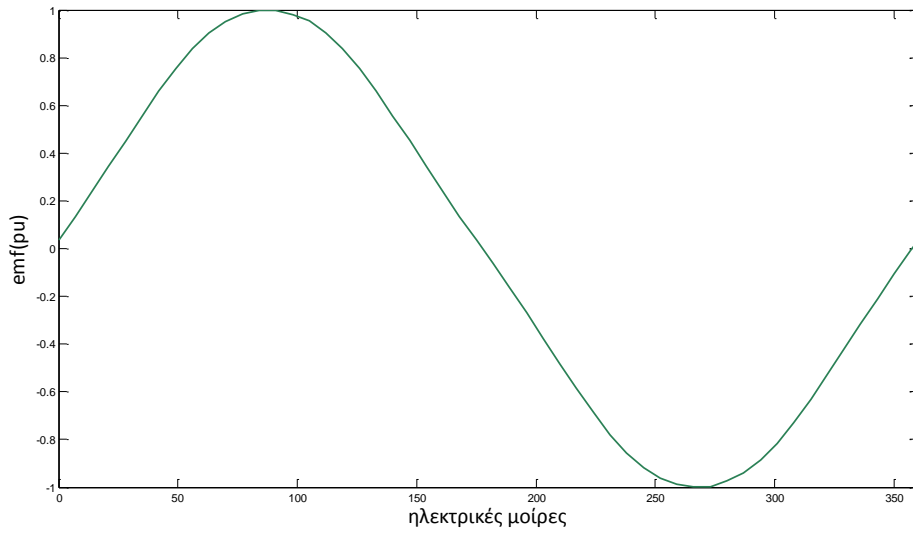
Επειδή η ονομαστική ταχύτητα περιστροφής είναι $500 \text{ ΣΑΔ} \rightarrow \frac{500}{60} \text{ ΣΑΔ} \rightarrow 360 \times \frac{500}{60} \text{ }^\circ\text{ΑΔ} :$

$$1 \text{ sec} \rightarrow 3000 \text{ }^\circ\text{ΑΔ} \tag{3.22}$$

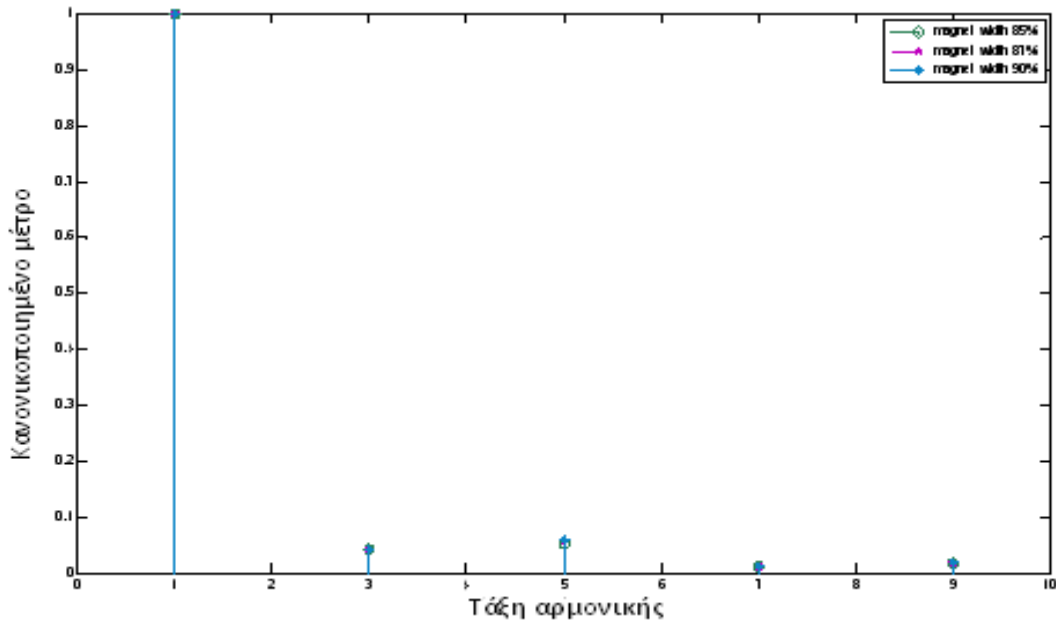
$$\frac{1}{3000} \text{ sec} \rightarrow 1^\circ$$

Άρα, $\Delta t = \frac{1}{3000} \text{ sec.}$

Στη συνέχεια μετρήθηκε η ηλεκτρεγερτική δύναμη για κάθε εύρος μαγνήτη από 85% έως 95% επί του πολικού βήματος. Η κυματομορφή της ηλεκτρεγερτικής δύναμης της φάσης A , επιλεγμένα για εύρος μαγνήτη ίσο 90% επί του πολικού βήματος θα έχει τη μορφή:

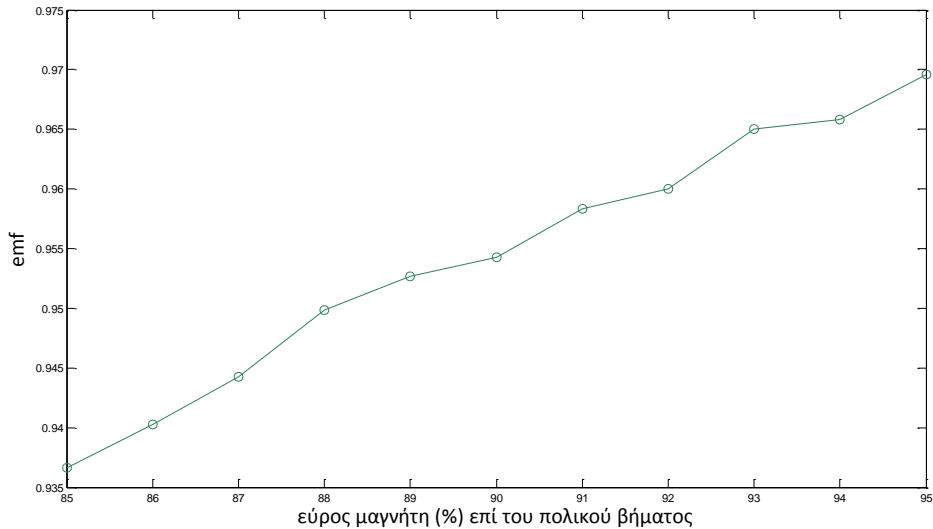


Σχήμα 3.34: Ηλεκτρεγερτική δύναμη για εύρος μαγνήτη 90%



Σχήμα 3.35:Φασματική ανάλυση ηλεκτρεγερτικής δύναμης για εύρος μαγνήτη 85%, 87%, 90%

Η μέγιστη τιμή της ηλεκτρικής δύναμης για κάθε εύρος μαγνήτη από 85% έως 95% επί του πολικού βήματος φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα:



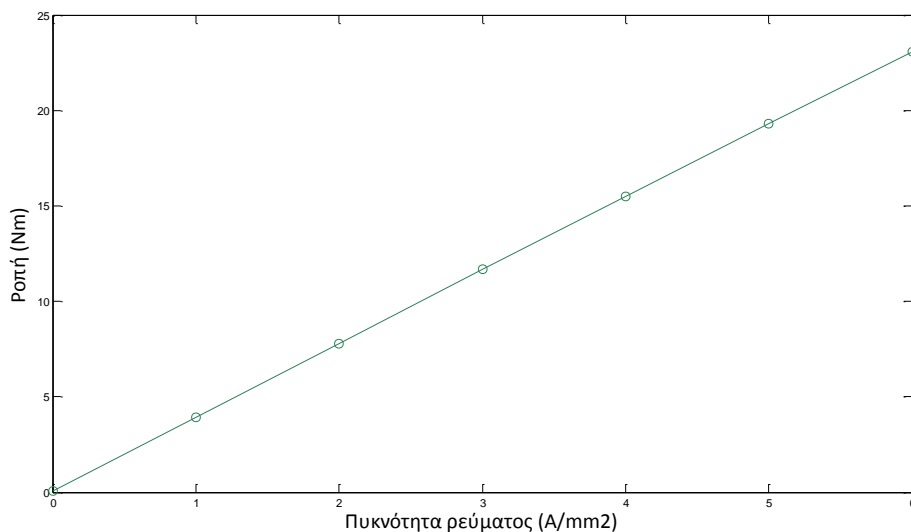
Σχήμα 3.36: Μέγιστη τιμή ηλεκτρεγερτικής δύναμης για κάθε εύρος μαγνήτη

Από τα παραπάνω διαγράμματα διαπιστώνεται ότι ούτε η τιμή της ηλεκτρεγερτικής δύναμης ούτε το αρμονικό περιεχόμενο δεν παρουσιάζουν ιδιαίτερη ευαισθησία στη μεταβολή του εύρους του μαγνήτη. Οι μεταβολές στη μέγιστη τιμή της είναι ανεπαίσθητες. Επομένως, η τελική επιλογή του εύρους του μαγνήτη, σύμφωνα με το κριτήριο ελαχιστοποίησης της κυμάτωσης ροπής και της ροπής ευθυγράμμισης, θα είναι το 92% επί του πολικού βήματος.

3.2.12 Καμπύλη επίδοσης

Η επίδοση εξαρτάται από τη μαγνητική και ηλεκτρική φόρτιση της γεννήτριας καθώς και από τις διαστάσεις της. Η ροπή που παράγεται είναι γραμμική σε σχέση με τα ρεύματα των τυλιγμάτων του στάτη, εκτός από την περίπτωση που ο πυρήνας βρίσκεται σε κορεσμό. Για την καλύτερη αξιοποίηση του όγκου και των μαγνητικών ιδιοτήτων του πυρήνα, θα πρέπει το σημείο λειτουργίας του να βρίσκεται στο γόνατο ή πριν από αυτό.

Για την επίδραση του φορτίου στο μαγνητικό κύκλωμα μετράται η μέγιστη ροπή στο μέσο του διακένου για ενδεικνύμενες τιμές πυκνότητας ρεύματος από 0-6 A/mm². Τα αποτελέσματα που προκύπτουν παρουσιάζονται στο παρακάτω διάγραμμα:



Σχήμα 3.37: Καμπύλη επίδοσης

Η παραγόμενη ροπή, άρα και η ισχύς εξόδου για σταθερές στροφές μεταβάλλεται γραμμικά με τη μεταβολή του φασικού ρεύματος. Η γραμμική σχέση του φορτίου σε σχέση με την παραγόμενη ροπή υποδηλώνει πως το σιδηρομαγνητικό υλικό του πυρήνα δεν βρίσκεται σε κορεσμό.

3.3 Οριστική σχεδίαση

3.3.1 Τελική διαμόρφωση γεννήτριας μονίμων μαγνητών

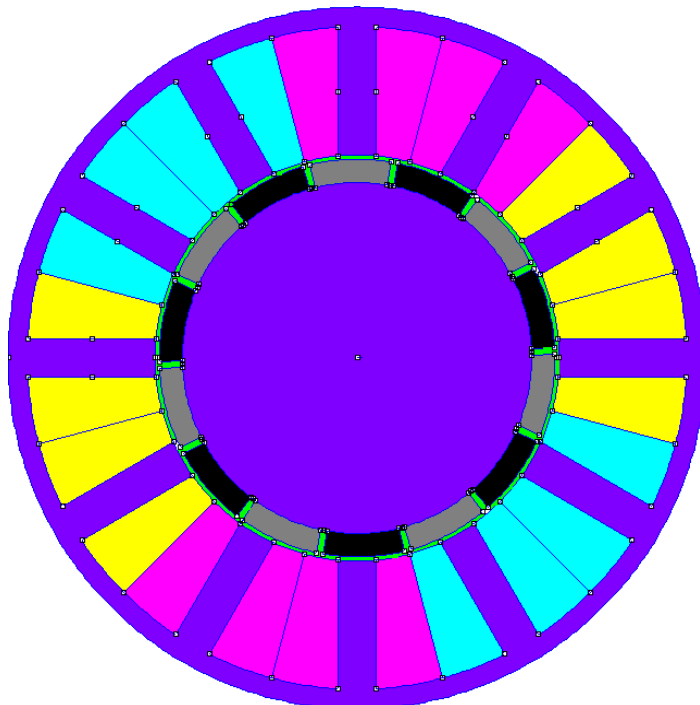
Μετά τις βελτιστοποιήσεις που πραγματοποιήθηκαν παραπάνω οι καταληκτικές διαστάσεις της μηχανής θα είναι:

Μέγιστη Παραγόμενη Ροπή(Nm)	23,1
Διάκενο(mm)	0,7
Ακτινικό μήκος μαγνητών(mm)	4
Εύρος μαγνήτη(%)	92
Τύπος μαγνήτη	NdFeB 52 MGOe
Ποσοστό δοντιού επί της περιόδου	37
Δοντιού-αύλακας(%)	

Ακτίνα δρομέα(mm)	30
Ενεργό μήκος(mm)	60
Μήκος αύλακας(mm)	22
Μήκος σώματος στάτη(mm)	3,36
Πολικό βήμα	25,7°
Μαγνήτης	23,6°
Μέση τιμή μαγνητικής επαγωγής στο διάκενο (T)	0,72
Περίοδος δοντιού-αύλακας	30°
Δόντι	11,1°
Εμβαδό αύλακας (mm ²)	186
RMS τιμή πυκνότητας ρεύματος(A/mm ²)	6

Πίνακας 3.9: Τελική διαμόρφωση γεννήτριας μονίμων μαγνητών κλασματικού βήματος

Με αυτές τις διαστάσεις, το σχέδιο της γεννήτριας φαίνεται παρακάτω:

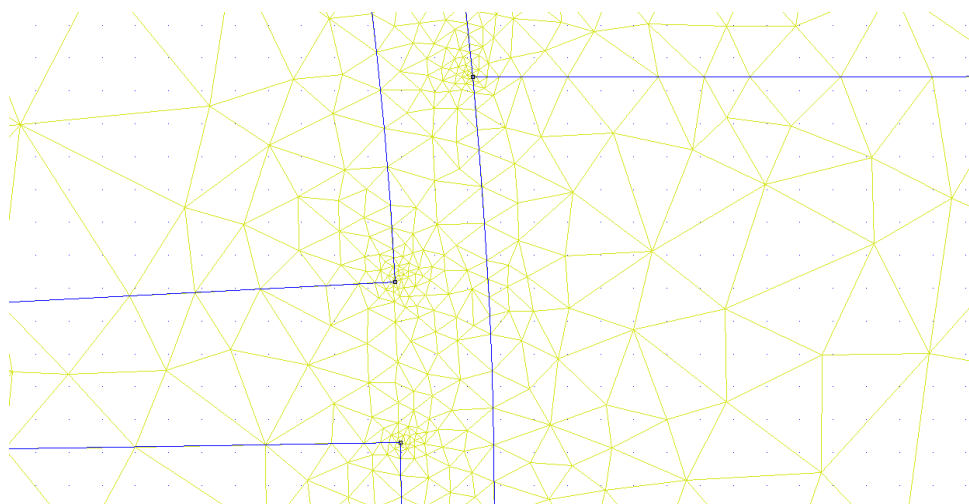


Σχήμα 3.38: Τελική διαμόρφωση γεννήτριας μονίμων μαγνητών κλασματικού βήματος

Η επίλυση του μαγνητοστατικού προβλήματος έγινε με την μέθοδο πεπερασμένων

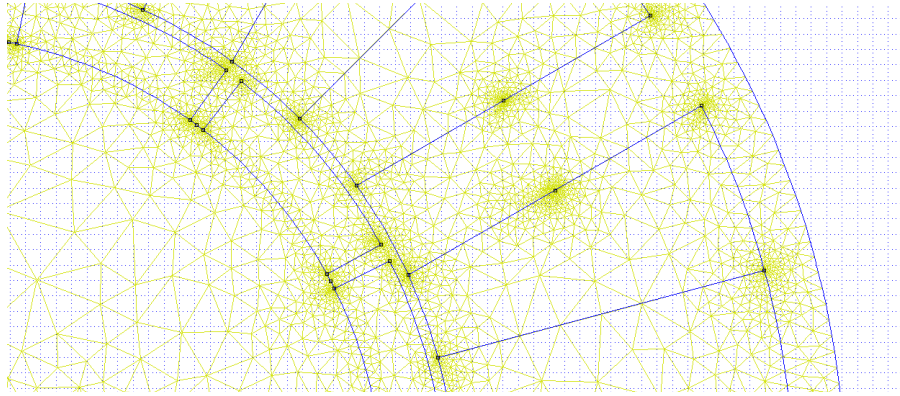
στοιχείων και συγκεκριμένα με τη χρήση του προγράμματος femm. Τα προγράμματα πεπερασμένων στοιχείων αντί να επιλύουν διαφορικές εξισώσεις με συγκεκριμένες οριακές συνθήκες, χωρίζουν το πεδίο ορισμού του προβλήματος σε υποπεριοχές. Έτσι, λοιπόν το πρόβλημα αναγάγεται σε υποπροβλήματα με απλούστερη γεωμετρία και ευκολότερη επίλυση. Για να είναι καλή η προσέγγιση του προβλήματος, είναι σημαντικό η αρχική περιοχή να τεμαχιστεί σε πολλές υποπεριοχές. Η περιοχή διακριτοποιείται σε τριγωνικές υποπεριοχές. Το σύνολο των τριγωνικών αυτών στοιχείων αποτελούν το πλέγμα. Σε κάθε στοιχείο, η λύση προσεγγίζεται με γραμμική παρεμβολή των τιμών του δυναμικού στις κορυφές του τριγώνου. Ο καθορισμός του πλέγματος παίζει σημαντικό ρόλο στο σφάλμα ή στην απόκλιση. Στα διάφορα σημεία της μηχανής το πλέγμα είναι αραιότερο ή πυκνότερο. Για παράδειγμα, στο διάκενο το πλέγμα είναι αρκετά πιο πυκνό, απ' ό τι στο σώμα του στάτη, όπως φαίνονται και στα παρακάτω σχήματα:

Το πλέγμα στο διάκενο:



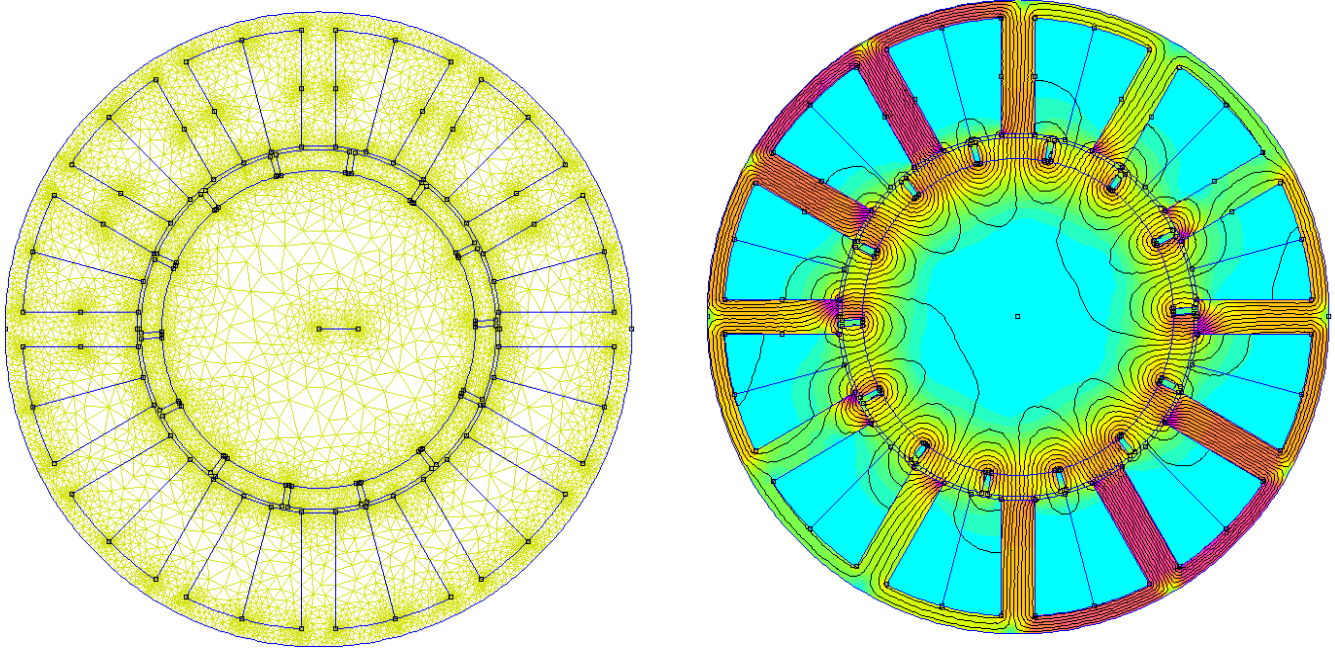
Σχήμα 3.39: Ανάλυση πλέγματος στο διάκενο

Το πλέγμα στο σώμα του στάτη, στις αύλακες, στους μαγνήτες και στο δρομέα:



Σχήμα 3.40: Ανάλυση πλέγματος στο σώμα του στάτη, τους μαγνήτες & τις αύλακες

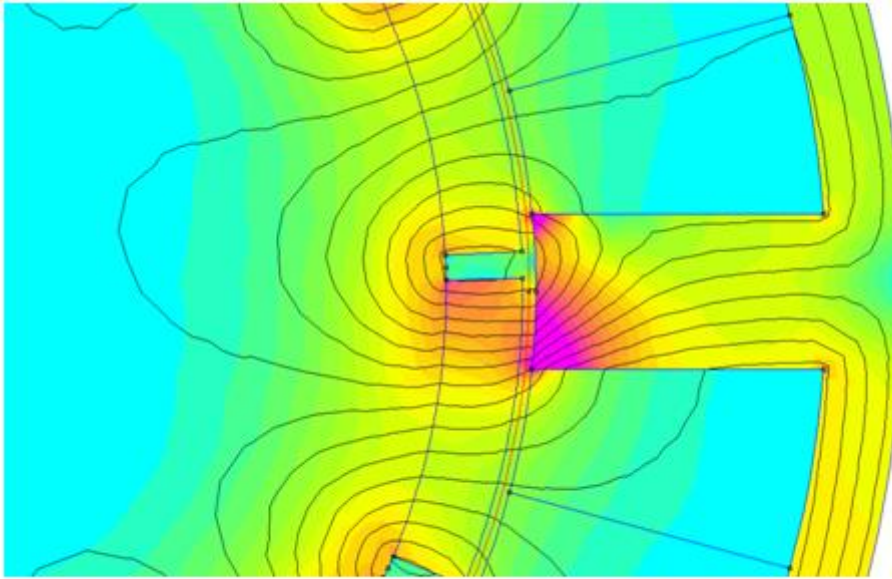
Το πλέγμα σε όλη τη μηχανή και μετά την επίλυση του μαγνητοστατικού προβλήματος, η κατανομή των δυναμικών γραμμών, φαίνονται στα παρακάτω σχήματα:



Σχήμα 3.41: Ανάλυση πλέγματος σε όλη τη μηχανή και επίλυση μαγνητοστατικού προβλήματος

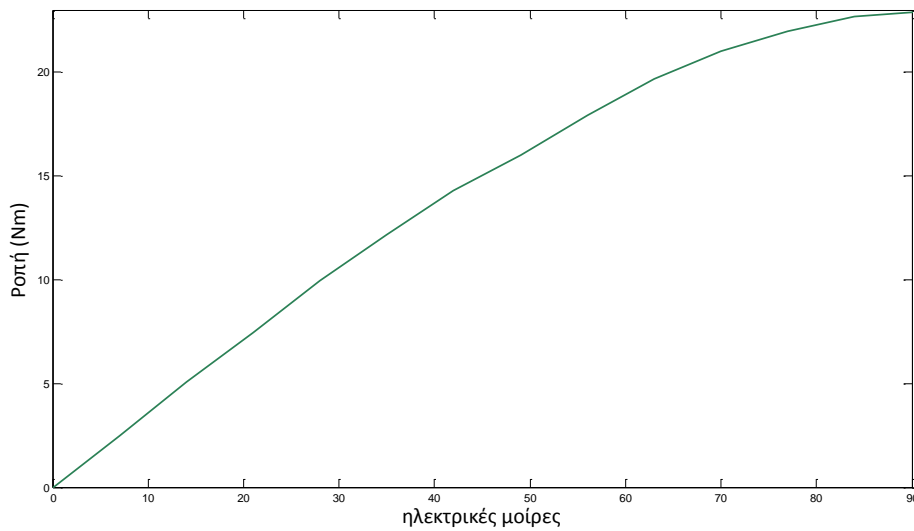
3.3.2 Σύγχρονη λειτουργία

Εφόσον, έχει πλέον επιλυθεί το μαγνητοστατικό πρόβλημα, μπορούν πλέον να πραγματοποιηθούν μετρήσεις στην έτοιμη μηχανή. Αρχικά, θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα της ροπής και της ροπής ευθυγράμμισης. Η ροπή μετράται σε πλήρες φορτίο, ενώ η ροπή ευθυγράμμισης σε κενό φορτίο, στο μέσο του διακένου με τη βοήθεια του τελεστή Maxwell.



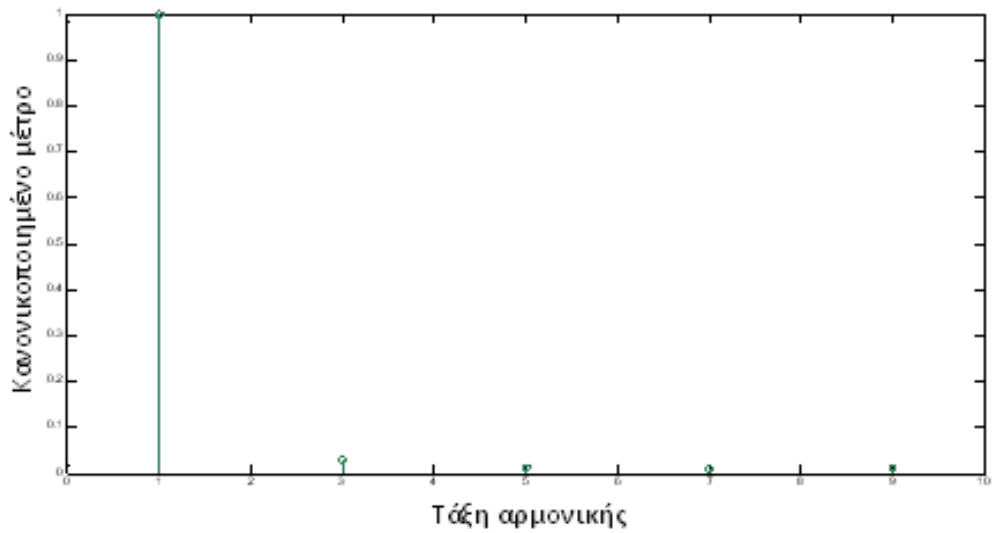
Σχήμα 3.42: Μέτρηση ροπής στο μέσο του διακένου

Η παραγόμενη ροπή θα είναι:



Σχήμα 3.43: Καμπύλη ροπής

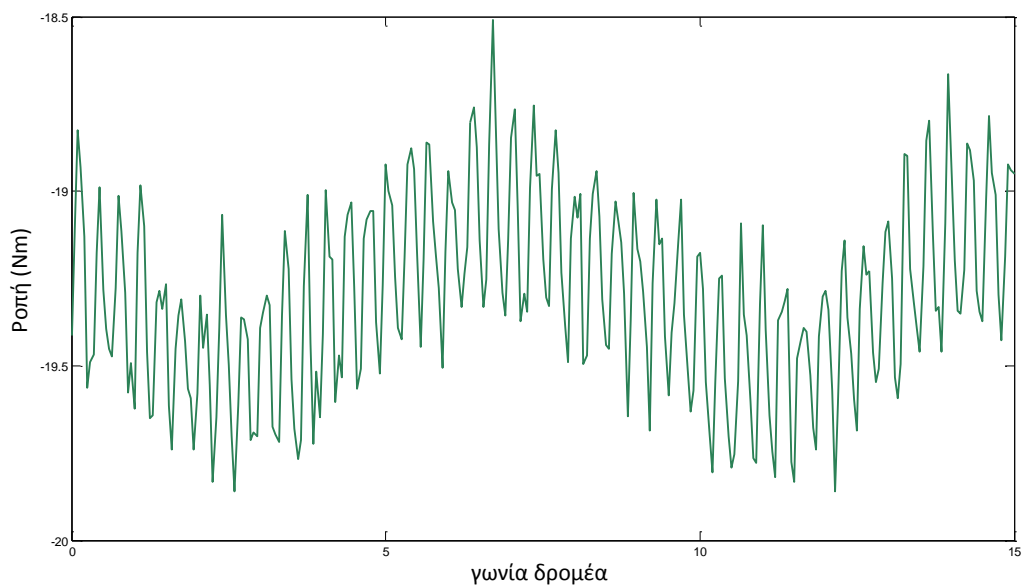
Η μέγιστη ροπή που παράγεται από τη γεννήτρια είναι περίπου 23Nm. Επιλέγεται η σύγχρονη λειτουργία της να είναι σε εσωτερική γωνία 60° , όπου η παραγόμενη ροπή ισούται με 19,3Nm.



Σχήμα 3.44: Φασματική ανάλυση καμπύλης ροπής

Η κυμάτωση της ροπής θα είναι:

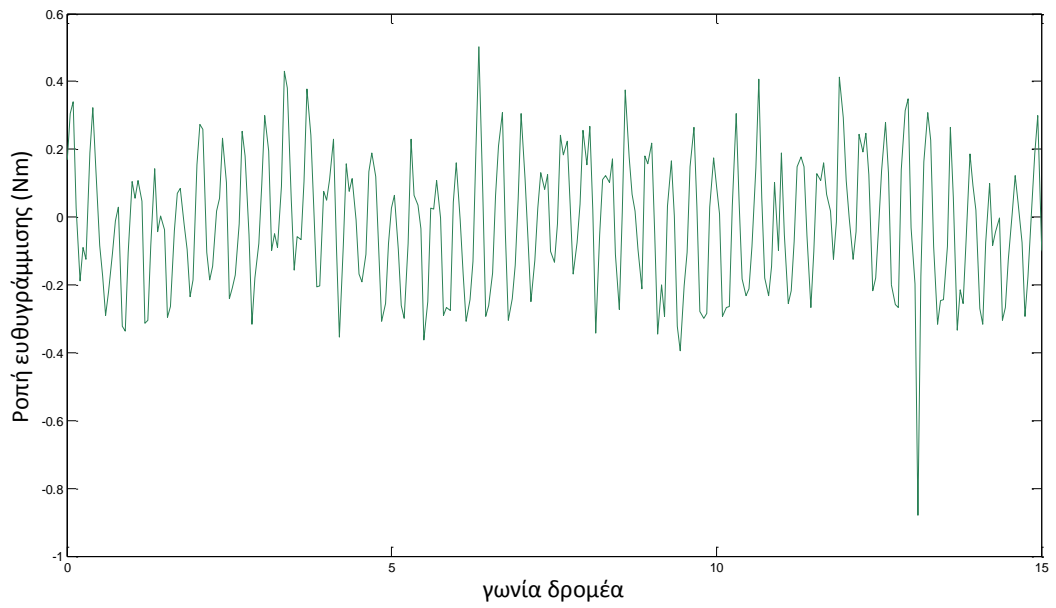
$$t_r = \frac{T_{max} - T_{min}}{T_{average}} \cdot 100\% = 7\%$$



Σχήμα 3.45: Κυμάτωση Ροπής για την σχεδιασθείσα γεννήτρια μονίμων μαγνητών

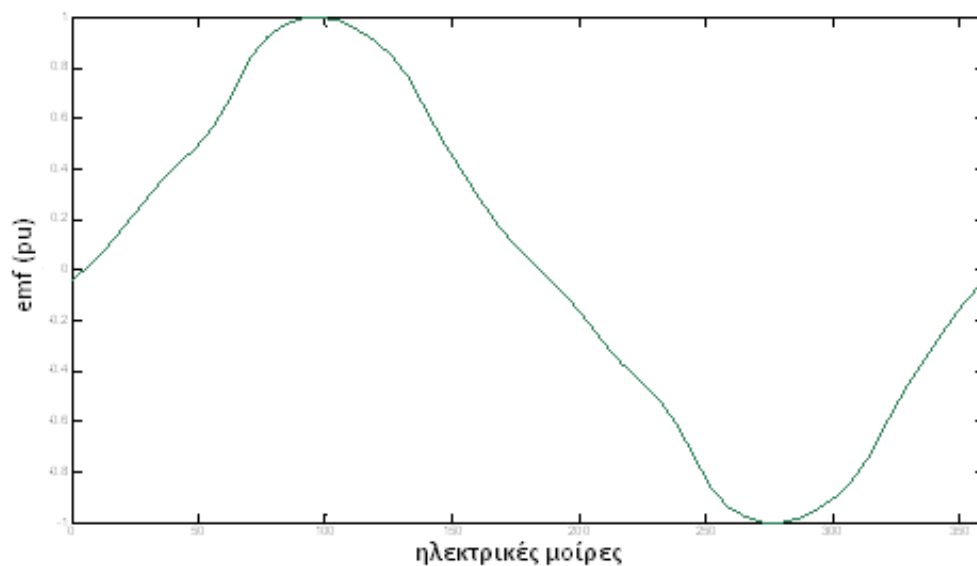
Η ροπή ευθυγράμμισης θα είναι:

$$t_c = \frac{T_c}{T_{average}} \cdot 100\% = 8\%$$



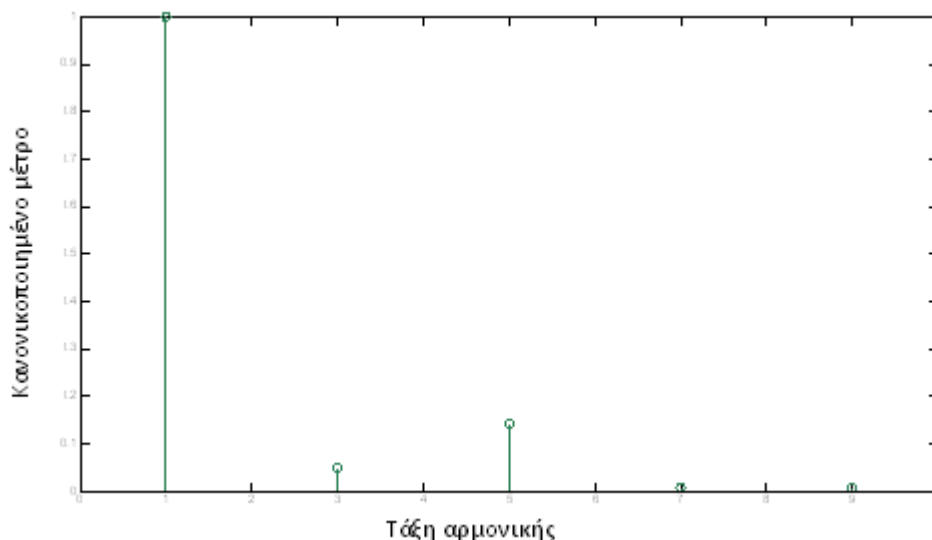
Σχήμα 3.46: Ροπή ευθυγράμμισης για την σχεδιασθείσα γεννήτρια μονίμων μαγνητών

Η ηλεκτρεγερτική δύναμη κατά τη σύγχρονη λειτουργία συναρτάσει της γωνίας του δρομέα, θα είναι:



Σχήμα 3.47: ΗΕΔ για την σχεδιασθείσα γεννήτρια μονίμων μαγνητών

Η φασματική ανάλυση της ΗΕΔ δείχνει ύπαρξη 3^{ης} αρμονικής σε ποσοστό 5% και 5^{ης} αρμονικής σε ποσοστό 10% της θεμελιώδους συνιστώσας:



Σχήμα 3.48: Φασματική ανάλυση ΗΕΔ

3.3.3 Απόδοση και απώλειες γεννήτριας

Οι απώλειες λειτουργίας των ηλεκτρικών μηχανών διακρίνονται σε απώλειες πυρήνα ή σιδήρου και σε απώλειες χαλκού.

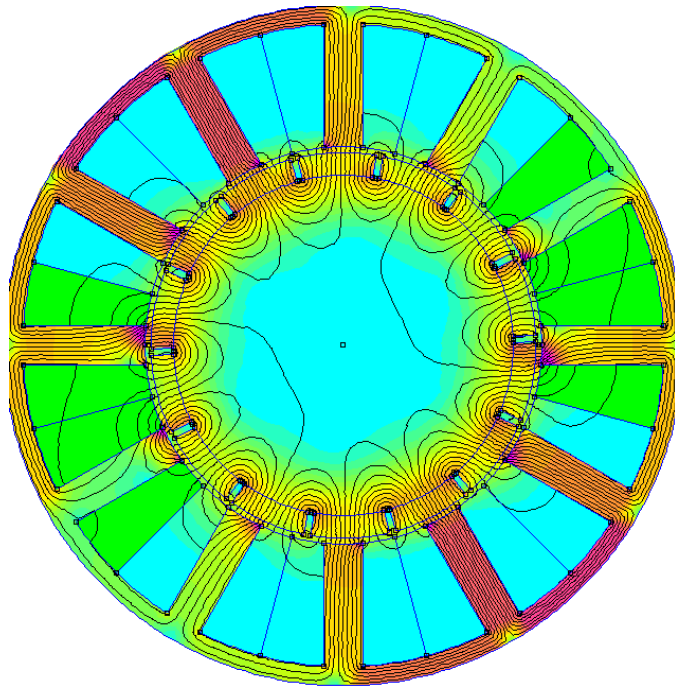
Απώλειες χαλκού

Οι απώλειες χαλκού είναι ωμικές απώλειες και προέρχονται από την διέλευση ηλεκτρικού ρεύματος στα τυλίγματα. Είναι ανάλογες της συνολικής ανά φάση αντίστασης και του τετραγώνου του ρεύματος που διαρρέει τα πηνία της ηλεκτρικής μηχανής:

$$P_{cu} = 3 \cdot I^2 \cdot R_{phase} \quad (3.23)$$

Η ύπαρξη αρμονικών συνιστωσών ρεύματος έχει ως συνέπεια πρόσθετες απώλειες χαλκού. Οι απώλειες χαλκού για τη μια φάση, για τη σχεδιασθείσα μηχανή, θα μετρηθούν με τη βοήθεια των πεπερασμένων στοιχείων, εάν στην επίλυση του προβλήματος, επιλεγθούν οι αύλακες που περιέχουν αγωγούς της φάσης A και

ζητηθεί στη συνέχεια η εμφάνιση των απωλειών χαλκού, αφού το femm ολοκληρώσει την ποσότητα i^2R , στην επιλεγμένη περιοχή:



Σχήμα 3.49: Επιλογή αυλακών της φάσης Α για τον υπολογισμό απωλειών χαλκού

Έτσι λοιπόν, για την υπό εξέταση γεννήτρια οι απώλειες χαλκού μετρήθηκαν με τη βοήθεια του femm και για τις τρεις φάσεις θα είναι ίσες με:

$$P_{cu} = 131W$$

Απώλειες πυρήνα

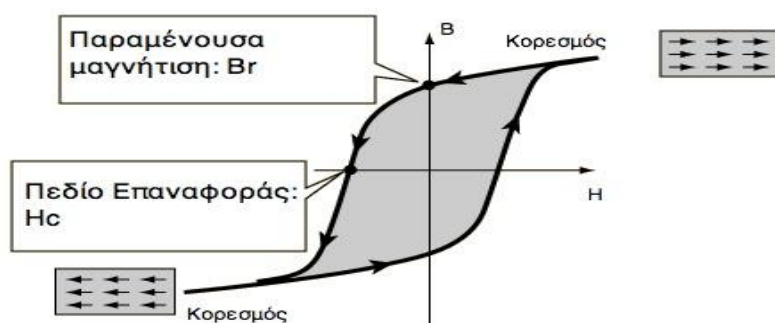
Όταν ένα μαγνητικό υλικό βρίσκεται μέσα σε μεταβαλλόμενο χρονικά μαγνητικό πεδίο, εμφανίζει τις λεγόμενες απώλειες πυρήνα υπό τη μορφή θερμότητας. Οι μηχανισμοί μετατροπής της ενέργειας του πεδίου σε θερμότητα είναι δύο, και έτσι προκύπτουν τα αντίστοιχα είδη απωλειών πυρήνα, οι απώλειες υστέρησης και οι απώλειες δινορρευμάτων. Στα παρακάτω περιγράφονται οι μηχανισμοί αυτοί και ορισμένοι τρόποι μοντελοποίησής τους, που αναπτύχθηκαν για την εκτίμηση των συνολικών απωλειών πυρήνα στις ηλεκτρικές μηχανές.

Απώλειες υστέρησης

Όταν η πυκνότητα μαγνητικής ροής σε ένα μέσο μεταβάλλεται τότε απορροφάται ή αποδίδεται ενέργεια από το μέσο αυτό. Η ενέργεια αυτή δίνεται από το ολοκλήρωμα:

$$w = \int_{B_1}^{B_2} H \cdot dB \quad \frac{J}{m^3} \quad (3.24)$$

Τα σιδηρομαγνητικά υλικά τείνουν να διατηρήσουν τη μαγνητική ροή στο σώμα τους έπειτα από την επιβολή μαγνητικού πεδίου, ακόμα και μετά την αφαίρεσή του. Γι' αυτό το λόγο οι καμπύλες μαγνήτισης και απομαγνήτισης διαφέρουν, σχηματίζοντας τελικά τον βρόχο υστέρησης όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα :



Σχήμα 3.50: Βρόγχος υστέρησης

Υπολογίζοντας το παραπάνω ολοκλήρωμα για ένα πλήρη κύκλο μαγνήτισης και απομαγνήτισης προκύπτει ότι το υλικό απορροφά περισσότερη ενέργεια από όση αποδίδει. Η ενεργειακή διαφορά μετατρέπεται σε θερμότητα και ισούται με το εμβαδό του βρόχου υστέρησης. Αυτή η ενέργεια που χάνεται σε κάθε κύκλο ονομάζεται απώλεια υστέρησης και συμβαίνει σε όλο τον όγκο του υλικού, με συνέπεια την αύξηση της θερμοκρασίας και τη μείωση της απόδοσης, είτε πρόκειται για μετασχηματιστή είτε για ηλεκτρική μηχανή.

Στην ειδική περίπτωση που η μαγνητική ροή μεταβάλλεται ημιτονοειδώς με συχνότητα f , χωρίς το σχηματισμό μικρότερων βρόχων, και με μέγιστη τιμή B_m , η ειδική απώλεια από υστέρηση δίνεται από την εμπειρική σχέση:

$$p_h = k_h \cdot f \cdot B_m^x \quad \frac{W}{m^3} \quad (3.25)$$

, όπου k_h σταθερά που εξαρτάται από τη δομή του υλικού και x , η σταθερά του Steinmetz που κυμαίνεται μεταξύ των τιμών 1.8 και 2.2, ενώ συνήθως λαμβάνεται ως 2.

Η παραπάνω μοντελοποίηση των απωλειών υστέρησης προϋποθέτει ότι η μαγνητική ροή μεταβάλλεται μόνο ως προς το μέτρο, ενώ η διεύθυνσή της παραμένει σταθερή. Αυτή η κατάσταση απαντάται στους μετασχηματιστές, στο μεγαλύτερο μέρος του πυρήνα τους. Όμως στις στρεφόμενες μηχανές λαμβάνει χώρα και μεταβολή της διεύθυνσης της μαγνητικής ροής. Κατά συνέπεια στις ηλεκτρικές μηχανές εμφανίζεται επιπλέον περιστροφική απώλεια υστερήσεως.

Απώλειες λόγω δινορρευμάτων

Η χρονική μεταβολή της μαγνητικής ροής επάγει ηλεκτρικό πεδίο στο σώμα του πυρήνα. Λόγω της αγωγιμότητας των σιδηρομαγνητικών υλικών, εμφανίζονται ρεύματα στο σώμα του πυρήνα, που ονομάζονται δινορρεύματα και ρέουν κυκλικά σε επίπεδο κάθετο προς τη διεύθυνση της μαγνητικής ροής. Ως συνέπεια, εμφανίζονται απώλειες Joule και μέρος της ενέργειας του πεδίου μετατρέπεται σε θερμότητα.

Η απώλεια από δινορρεύματα αποδεικνύεται ότι είναι ανάλογη προς το τετράγωνο της συχνότητας, το τετράγωνο του πάχους του ελάσματος και το τετράγωνο της πυκνότητας της ροής, ενώ είναι αντιστρόφως ανάλογη της ειδικής αντίστασης του υλικού.

Στην περίπτωση που η μαγνητική ροή μεταβάλλεται ημιτονοειδώς και μόνο ως προς το μέτρο της, μια σχέση περιγραφής της ειδικής απώλειας από δινορρεύματα είναι η ακόλουθη:

$$p_e = k_e \cdot B^2 \cdot f^2 \quad \frac{W}{m^3} \quad (3.26)$$

,όπου k_e σταθερά που εξαρτάται από τις ιδιότητες του υλικού, και f η συχνότητα μεταβολής του μαγνητικού πεδίου.

Υπολογισμός απόδοσης

Για τον υπολογισμό της απόδοσης της γεννήτριας χρησιμοποιήθηκε η συνάρτηση του δημιουργού του femm, David Meeker, για τον προσδιορισμό των απωλειών πυρήνα. Στη συνάρτηση, θεωρείται αρχικά ότι οι μαγνήτες έχουν διαπερατότητα ίση με τη μονάδα και στη συνέχεια τους αντικαθιστά με ισοδύναμα ρεύματα. Στη συνέχεια, δημιουργεί σειρά Fourier που αντικαθιστά τα ρεύματα αυτά με ένα σύνολο χωρικών πυκνοτήτων ρευμάτων σε διάφορες χωρικές συχνότητες. Ο δρομέας στρέφεται με σταθερή ταχύτητα, αλλά ο στάτης αντιλαμβάνεται διαφορετική συχνότητα για κάθε αρμονική της σειράς Fourier, λόγω των χωρικών ρευμάτων των μονίμων μαγνητών. Έτσι, οι μόνιμοι μαγνήτες μοντελοποιούνται ως περιστρεφόμενα τυλίγματα του δρομέα. Στη θεμελιώδη συνιστώσα συμβάλλουν τα ρεύματα του στάτη και η θεμελιώδης συνιστώσα των ρευμάτων του μαγνήτη. Για τις ανώτερες αρμονικές συμβάλλουν μόνο τα ρεύματα του μαγνήτη [17].

Η απόδοση της γεννήτριας θα ισούται με:

$$\eta(\%) = \frac{P_{out}}{P_{out} + P_{cu} + P_{core}} \cdot 100\% = \frac{1000}{1000 + 131 + 5,6} \cdot 100\% = 88\% \quad (3.27)$$

Η απόδοση της γεννήτριας θα είναι ίση με 88%, που είναι ένας αρκετά ικανοποιητικός βαθμός απόδοσης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΟΡΙΣΤΙΚΗ ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΚΑΙ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ ΣΥΓΧΡΟΝΗΣ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ ΜΟΝΙΜΩΝ ΜΑΓΝΗΤΩΝ ΜΕ ΤΥΛΙΓΜΑ ΠΛΗΡΟΥΣ ΒΗΜΑΤΟΣ

Σε αυτό το κεφάλαιο θα σχεδιασθεί και θα βελτιστοποιηθεί ως προς την παραγόμενη ροπή, τη μείωση της ροπής ευθυγράμμισης και της κυμάτωσης της ροπής και της ημιτονικότητας μια **γεννήτρια μονίμων επιφανειακών μαγνητών πλήρους βήματος**. Τα αποτελέσματα που θα προκύψουν πρόκειται να αποτελέσουν αντικείμενο σύγκρισης με τα αντίστοιχα που αφορούσαν τη γεννήτρια μονίμων επιφανειακών μαγνητών κλασματικού βήματος, του προηγούμενου κεφαλαίου. Για αυτό το λόγο θα πρέπει τα μεγέθη της γεννήτριας πλήρους βήματος που θα σχεδιασθεί να είναι όσο το δυνατό σε αντιστοιχία με αυτά της γεννήτριας κλασματικού βήματος.

4.1 Βασικές προδιαγραφές σύγχρονης γεννήτριας μονίμων μαγνητών πλήρους βήματος

Οι **αρχικές προδιαγραφές** (Πίνακας 4.1) που τίθενται είναι αυτές που φαίνονται στον παρακάτω πίνακα. Ο επιλεγμένος αριθμός πόλων είναι σε συμφωνία με τα αποτελέσματα της προκαταρκτικής σχεδίασης και σε αντιστοιχία με τη γεννήτρια κλασματικού βήματος.

Διάκενο (mm)	0,7
Αριθμός πόλων	14
Αριθμός αυλακών/ πόλο	3

Πίνακας 4.3: Αρχικές Προδιαγραφές Γεννήτριας Μονίμων Μαγνητών Πλήρους Βήματος

Όσον αφορά το **συντελεστή πληρότητας χαλκού** στις αύλακες επιλέγεται να είναι 55% κατά αντιστοιχία με τη γεννήτρια κλασματικού βήματος. Αντίστοιχα, τα **ρεύματα των φάσεων**, που δίνονται σαν πλάτη της ενδεικνύμενης τιμής της πυκνότητας του ρεύματος, που επιλέγεται να είναι ίσα με 6 A/mm^2 .

Επομένως, η γεννήτρια μόνιμων μαγνητών που θα σχεδιαστεί θα έχει τις παρακάτω προδιαγραφές (Πίνακας 4.2):

Ονομαστική ισχύς	1kW
Ονομαστικές Στροφές	500 ΣΑΛ
Ενεργό μήκος	60mm
Εξωτερική ακτίνα στάτη	60mm
Διάκενο	0,7mm
Ονομαστική πυκνότητα ρεύματος	6 A/mm ²
Συντελεστής πληρότητας	55%
Τύπος τυλίγματος	Πλήρους Βήματος
#πόλων-αυλακών	14-42

Πίνακας 4.4: Προδιαγραφές σχεδίασης γεννήτριας μόνιμων μαγνητών πλήρους βήματος

4.2 Παραμετροποιημένη σχεδίαση

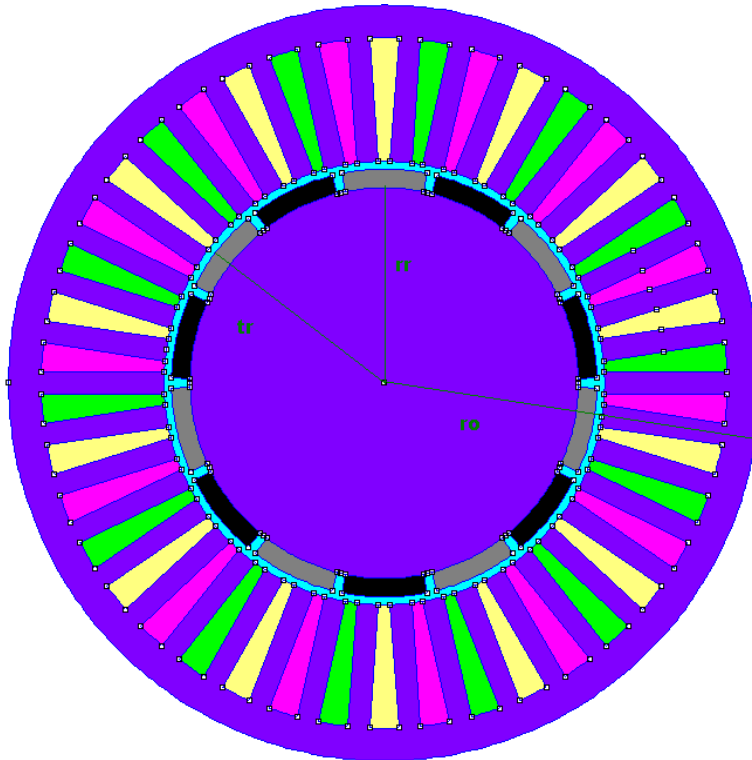
Για τη γεννήτρια μόνιμων μαγνητών πλήρους βήματος θα προηγηθεί παραμετροποιημένος σχεδιασμός, με σκοπό την τελική της διαστασιολόγηση, μετά από δοκιμές που αποσκοπούν στη βελτιστοποίηση της ως τη ροπή, τη μείωση της ροπής ευθυγράμμισης, τη μείωση της κυμάτωσης της ροπής, και την ημιτονικότητα της ηλεκτρεγερτικής δύναμης. Οι κύριες μεταβλητές, δηλαδή οι βασικές διαστάσεις, των οποίων η μεταβολή θα προκαλεί με τη σειρά της την αντίστοιχη προσαρμογή και των άλλων μεγεθών της γεννήτριας παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.3.

Ενεργό μήκος γεννήτριας (mm)	$L = 60$
Εξωτερική ακτίνα γεννήτριας (mm)	$r_o = 60$
Εσωτερική ακτίνα δρομέα (χωρίς τους μαγνήτες)	r_r
Ακτινικό μήκος μαγνήτη	m_l
Εξωτερική ακτίνα δρομέα (με μαγνήτες)	$t_r = r_r + m_l$
Ποσοστό μαγνήτη επί του πολικού βήματος	a
Ποσοστό δοντιού επί της περιόδου δοντιού-αύλακας	b

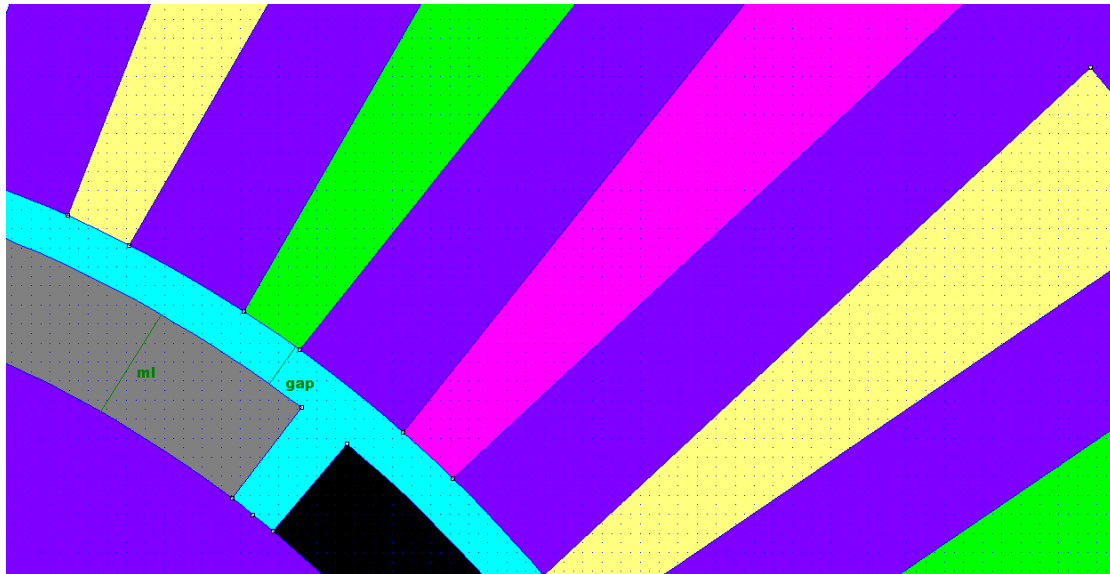
Ακτινικό μήκος διακένου	gap
Αριθμός πόλων	p

Πίνακας 4.5: Κύριες μεταβλητές παραμετροποιημένου σχεδιασμού γεννήτριας πλήρους βήματος

Οι κύριες μεταβλητές σημειώνονται στα παρακάτω σχήματα (Σχήμα 4.1 & 4.2):



Σχήμα 4.9: Κύριες μεταβλητές στη Γεννήτρια Μονίμων Μαγνητών Πλήρους Βήματος



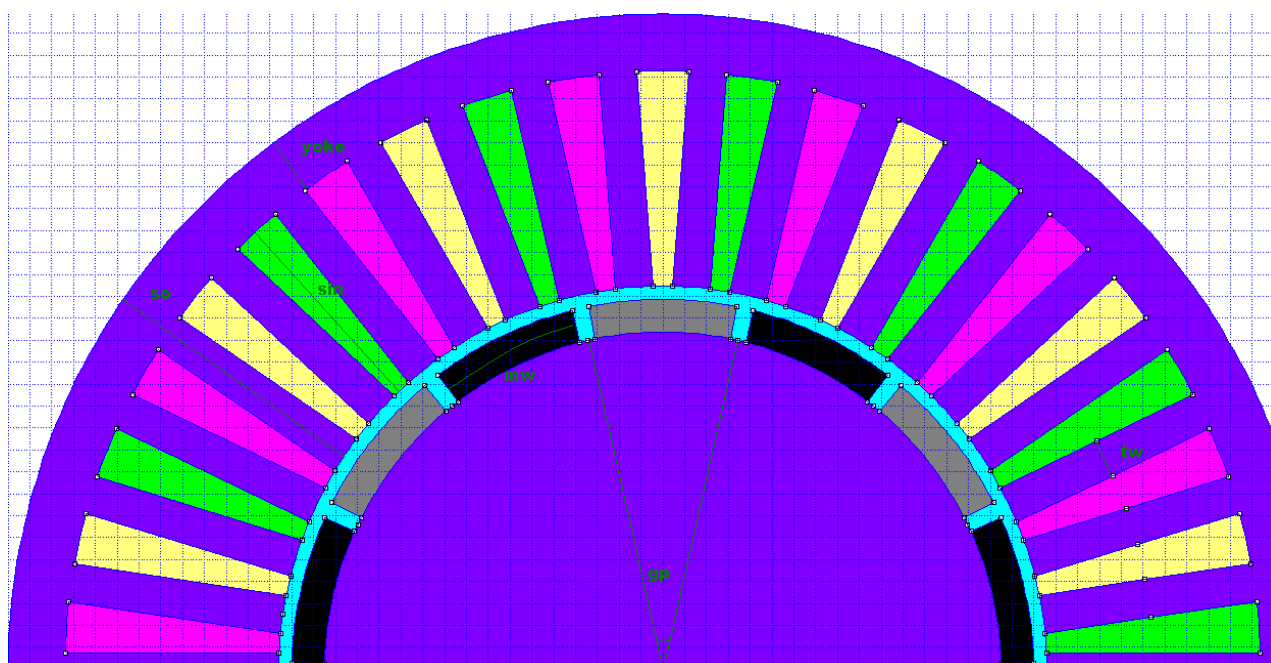
Σχήμα 4.2: Κύριες μεταβλητές στη Γεννήτρια Μονίμων Μαγνητών Πλήρους Βήματος

Οι εξαρτημένες μεταβλητές του παραμετροποιημένου σχεδιασμού, των οποίων η μεταβολή εξαρτάται από τις κύριες, φαίνονται στον Πίνακα 4.4.

Πολικό βήμα	$gp = \frac{360^\circ}{p}$
Εύρος μαγνήτη	$mw = a \times gp$
Εξωτερική ακτίνα στάτη	$so = ro - tr - gap$
Πάχος δοντιού	$tw = ((tr + gap) \times b \times gp) / 3$
Σώμα στάτη	$yoke = 1,5 \times tw$
Ακτινικό μήκος αύλακας	$sin = so - yoke$

Πίνακας 6.4: Εξαρτημένες μεταβλητές παραμετροποιημένου σχεδιασμού γεννήτριας πλήρους βήματος

Στο επόμενο σχήμα (Σχήμα 4.3) απεικονίζονται οι εξαρτημένες μεταβλητές στην υπό εξέταση γεννήτρια:



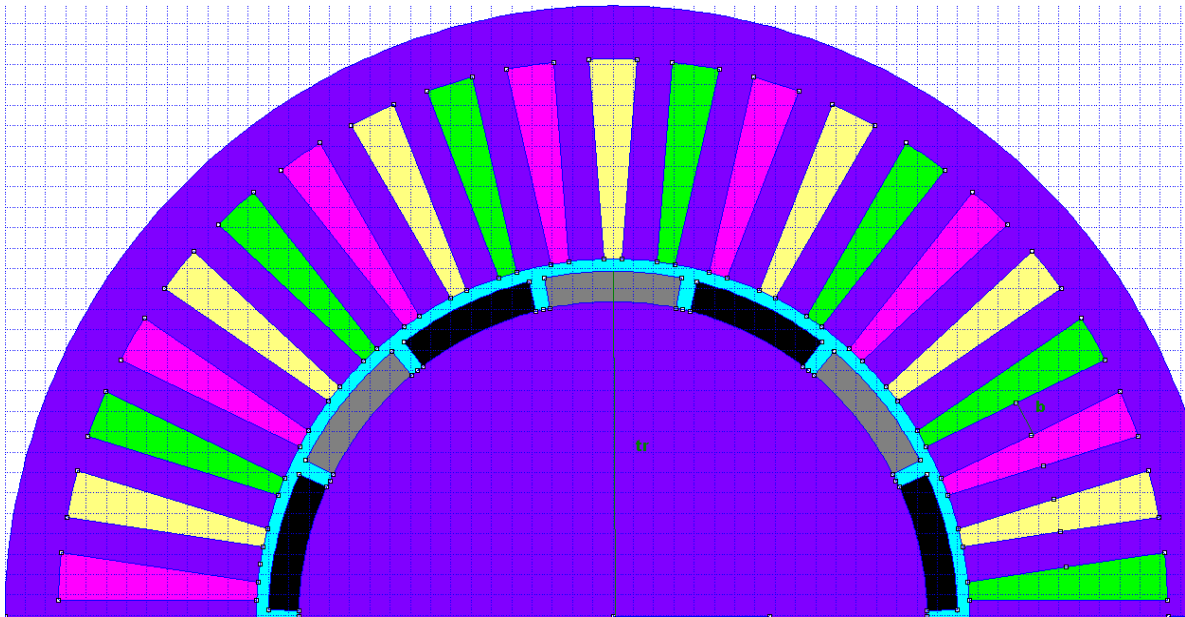
Σχήμα 4.3 : Εξαρτημένες Μεταβλητές στη Γεννήτρια Μονίμων Μαγνητών Πλήρους Βήματος

4.3 Βελτιστοποίηση Ροπής

Σε πρώτη φάση θεωρείται το εύρος του μαγνήτη σταθερό και το ποσοστό του επί του πολικού βήματος ίσο με 90%.

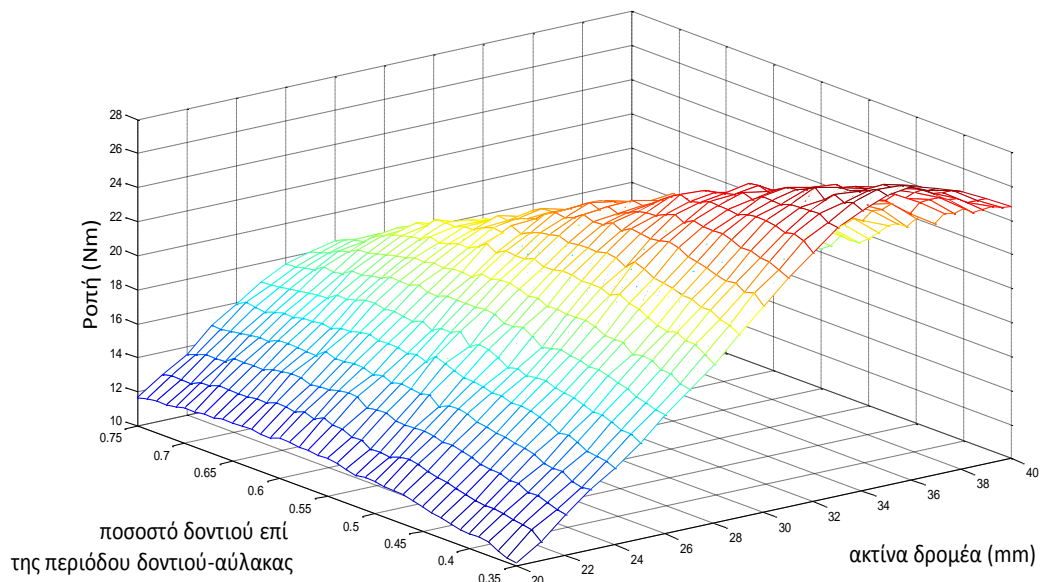
4.3.1 Βελτιστοποίηση Ροπής ως προς την εξωτερική ακτίνα δρομέα και το πάχος του δοντιού

Στο πρώτο βήμα μεταβάλλεται το **πάχος του δοντιού** από 35 έως 75% επί της περιόδου δοντιού-αύλακας με βήμα 1% και της **εξωτερικής ακτίνας δρομέα** από 20 έως 40mm με βήμα 1mm (Σχήμα 4.4).



Σχήμα 4.4 : Μεταβολή εξωτερικής ακτίνας δρομέα (t_r) και πάχους δοντιού (b) επί της περιόδου δοντιού-αύλακας

Το πάχος του μαγνήτη σε αυτή τη φάση είναι ίσο με 3mm, προς το παρόν δεν διερευνάται και είναι ενσωματωμένο στην τιμή της ακτίνας δρομέα . Σκοπός της διερεύνησης αυτής είναι να βρεθεί σε ποιο συνδυασμό πάχους δοντιού και εξωτερική ακτίνα δρομέα μεγιστοποιείται η ροπή. Τα αποτελέσματα φαίνονται στο Σχήμα 4.5.



Σχήμα 4.5 : Ροπή συναρτήσεως της ακτίνας δρομέα και του ποσοστού δοντιού (%) της περιόδου δοντιού-αύλακας

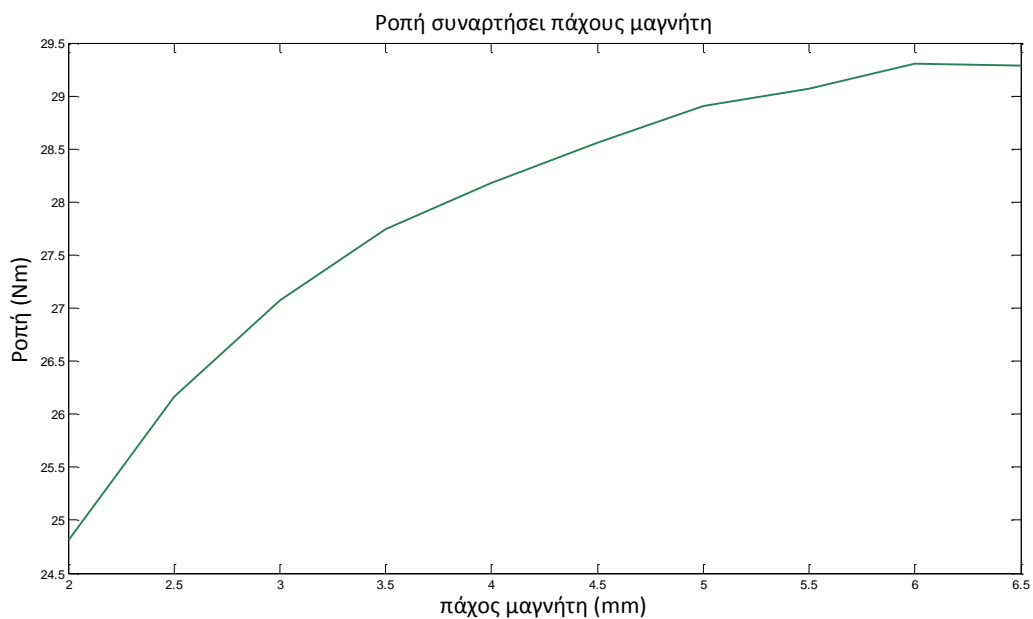
Έτσι, ο συνδυασμός ακτίνας δρομέα και ποσοστού δοντιού επί της περιόδου δοντιού-αύλακας στον οποίο μεγιστοποιείται η ροπή θα είναι:

Ακτίνα δρομέα=36mm

Ποσοστό δοντιού της περιόδου δοντιού-αύλακας=35%

4.3.2 Βελτιστοποίηση ροπής ως προς πάχος μαγνήτη

Για τις παραπάνω διαστάσεις πάχους δοντιού και εξωτερικής ακτίνας δρομέα, όπου μεγιστοποιείται η ροπή, διερευνάται το **πάχος του μαγνήτη**. Συγκεκριμένα, μεταβάλλεται το πάχος του μαγνήτη από 2 έως 6,5mm με βήμα 0,5mm και μετράται η ροπή στο μέσο του διακένου.



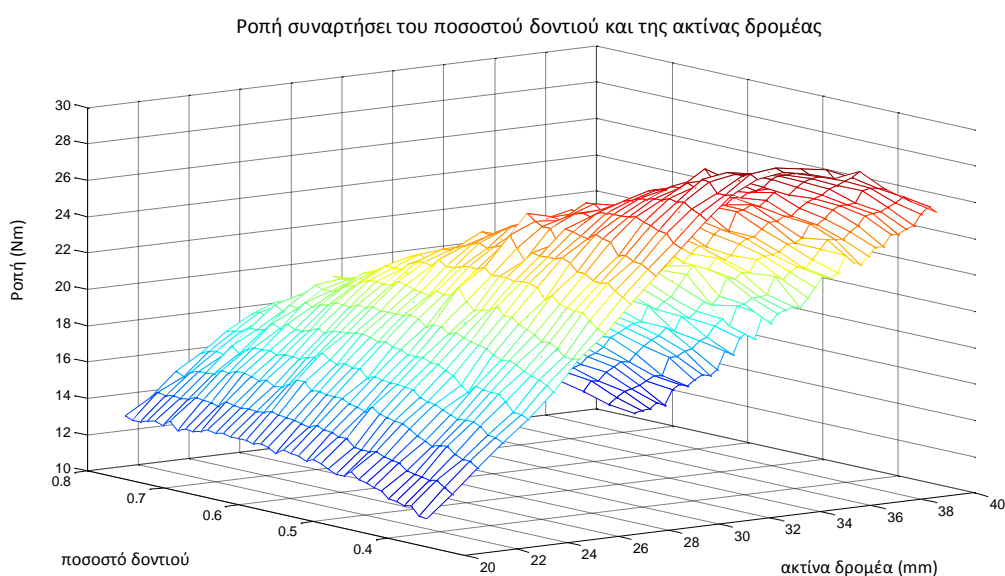
Σχήμα 4.6: Ροπή συναρτήσει πάχους μαγνήτη

Το πάχος του μαγνήτη που θα χρησιμοποιηθεί είναι 4mm, δηλαδή λίγο πιο κάτω από το γόνατο της χαρακτηριστικής (Σχήμα 4.6). Δεδομένου ότι το γόνατο είναι στα 5mm θεωρείται ότι γίνεται βέλτιστη αξιοποίηση του υλικού του μόνιμου μαγνήτη. Οποιαδήποτε παραπάνω τιμή πάχους μαγνήτη που δύναται να χρησιμοποιηθεί δεν έχει περαιτέρω βελτιστοποίηση ροπής, αφού περνάει στην περιοχή κορεσμού.

4.3.3 Βελτιστοποίηση επίδοσης ως προς πάχος δοντιού, εξωτερική ακτίνα δρομέα, μαγνητικής επαγωγής στο δόντι και απώλειες χαλκού

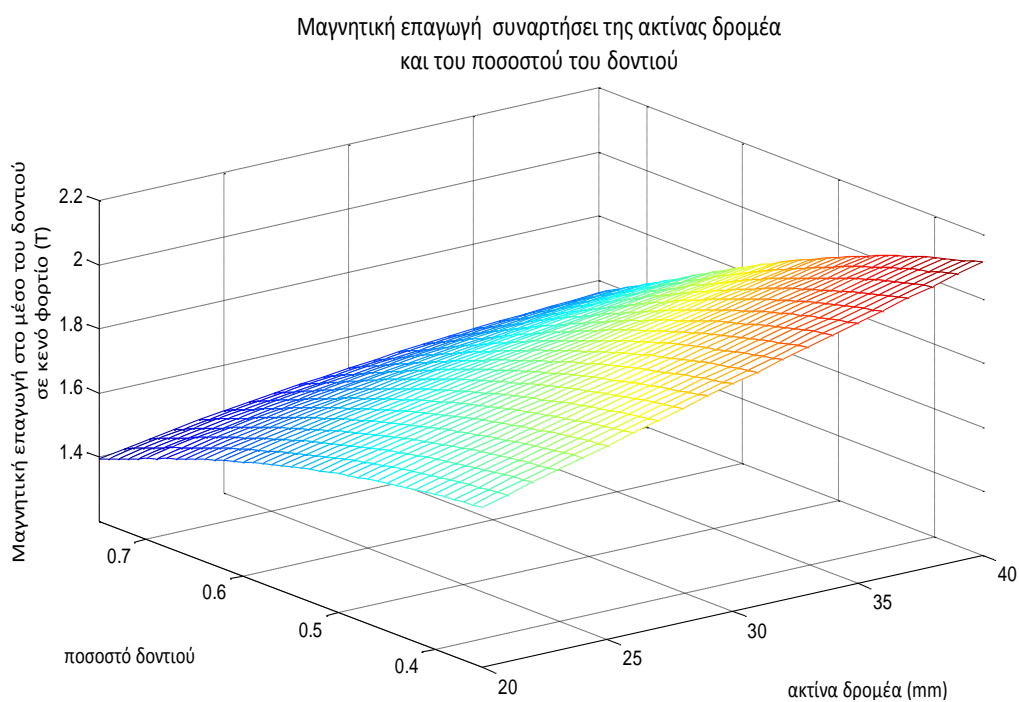
Έχοντας καταλήξει σε πάχος μαγνήτη επαναλαμβάνεται το πρώτο βήμα αυτή τη φορά προσθέτοντας ακόμα δύο περιορισμούς. Η μαγνητική επαγωγή των δοντιών σε κενό φορτίο να μην ξεπερνά τα 1,6 T, έτσι ώστε ο πυρήνας να μην έρχεται κορεσμό και οι απώλειες χαλκού να έχουν σχετικά χαμηλή τιμή, έτσι ώστε να μην έχουν μεγάλη επίπτωση στην απόδοση της γεννήτριας. Η τελευταία παράμετρος είναι μια προσπάθεια προς την κατεύθυνση να μην επιβαρυνθεί η απόδοση προς χάριν της επίδοσης, δύο εξ' ορισμού αντικρουόμενα μεγέθη.

Μεταβάλλεται το **πάχος του δοντιού** από 35%-75% επί της περιόδου δοντιού-αύλακας με βήμα 1% και της **εξωτερικής ακτίνας στάτη** από 20mm έως 40mm με βήμα 1mm. Μετράται η **ροπή σε πλήρες φορτίο** στο μέσο του διακένου για κάθε συνδυασμό και ταυτόχρονα η **μαγνητική επαγωγή σε κενό φορτίο** στο μέσο τριών διαδοχικών δοντιών ενός πόλου και ελέγχεται ώστε αυτή η τιμή να μην ξεπερνά τα 1,6 T, έτσι ώστε το σώμα του στάτη να μην έρθει σε κορεσμό. Η ροπή συναρτήσει του ποσοστού του δοντιού της περιόδου δοντιού-αύλακας και της ακτίνας του δρομέα, συμπεριλαμβανομένου και του ακτινικού μήκους των μαγνητών απεικονίζεται στο ακόλουθο διάγραμμα (Σχήμα 4.7).



Σχήμα 4.7: Ροπή συναρτήσει του ποσοστού δοντιού και της ακτίνας δρομέα

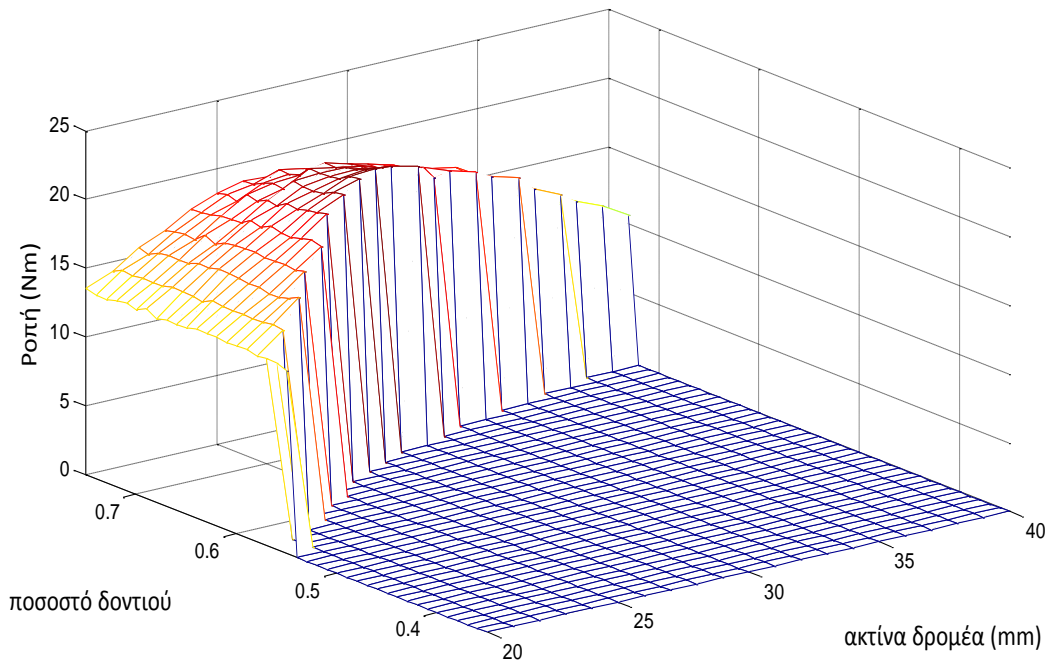
Όπως προαναφέρθηκε, για να αποφευχθεί το σώμα του στάτη να έρθει σε κορεσμό, ελέγχθηκε η μαγνητική επαγωγή στο μέσο των δοντιών σε κενό φορτίο για ένα πόλο, ώστε η τιμή της να είναι μικρότερη από 1,6T. Για όλους τους συνδυασμούς πάχους δοντιού-ακτίνα στάτη, η μαγνητική επαγωγή φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα (Σχήμα 4.8).



Σχήμα 4.8: Μαγνητική επαγωγή στο μέσο του δοντιού σε κενό φορτίο συναρτήσει της ακτίνας δρομέα και του ποσοστού του δοντιού

Οι συνδυασμοί για τους οποίους η μαγνητική επαγωγή σε κενό φορτίο λαμβάνει τιμή μεγαλύτερη από 1,6T δεν έχουν ληφθεί υπ' όψη, για αποφυγή του ενδεχομένου κορεσμού του πυρήνα. Έτσι, η αντίστοιχη ροπή για τους μη επιτρεπτούς συνδυασμούς έχει λάβει την τιμή μηδέν στο αντίστοιχο διάγραμμα (Σχήμα 4.9).

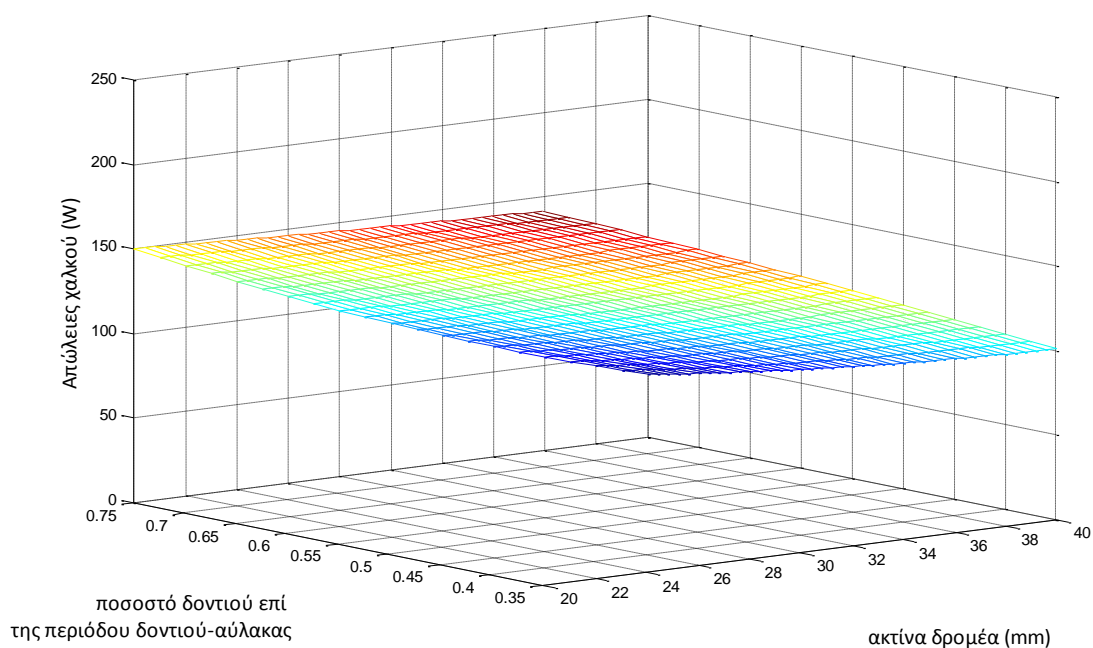
Ροπή συναρτήσει ακτίνας δρομέα και ποσοστού δοντιού



Σχήμα 4.9: Ροπή συναρτήσει ακτίνας δρομέα και ποσοστού δοντιού

Αξίζει να παρατηρηθεί ότι οι επιτρεπτοί συνδυασμοί ακτίνας δρομέα και ποσοστού δοντιού, μετά τον περιορισμό που τέθηκε από τη μαγνητική επαγωγή στο μέσο του δοντιού, είναι πολύ λιγότεροι στη μηχανή πλήρους βήματος σε σχέση με αυτούς στη μηχανή κλασματικού βήματος.

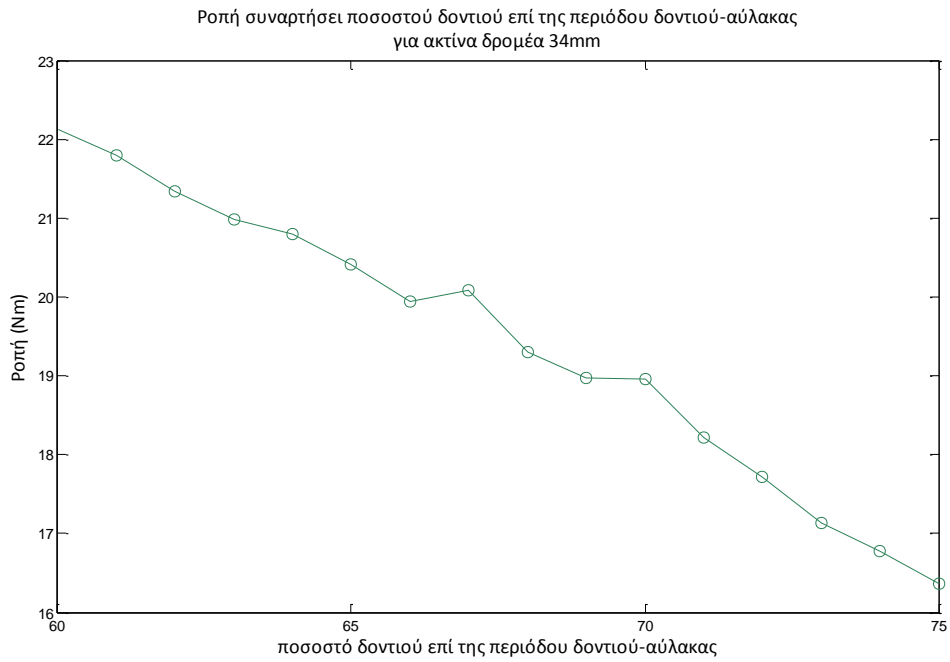
Παρακάτω φαίνονται τα αποτελέσματα των απωλειών χαλκού της γεννήτριας για τους υπο διερεύνηση συνδυασμούς(Σχήμα 4.10).



Σχήμα 4.10: Απώλειες χαλκού γεννήτριας συναρτήσει του ποσοστού δοντιού και της ακτίνας δρομέα

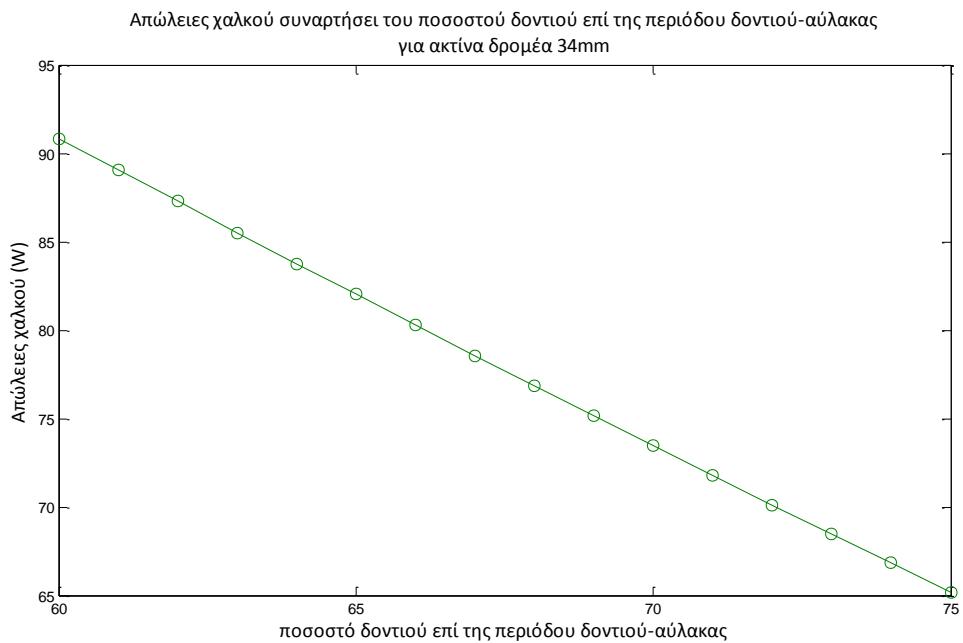
Η τελική επιλογή, λοιπόν, θα πρέπει να συνδυάζει κάποια κριτήρια όπως η παραγωγή της ζητούμενης επίδοσης και οι χαμηλές απώλειες χαλκού. Από το διάγραμμα της ροπής συναρτήσει του πάχους του δοντιού και της ακτίνας του στάτη παρατηρείται ότι οι επιτρεπτοί συνδυασμοί είναι αισθητά περιορισμένοι και οι αποδεκτοί δίνουν σχετικά χαμηλή ροπή. Δεδομένου ότι κατά τη διάρκεια της βελτιστοποίησης, η επιλογή των μεγεθών καθοδηγείται στα όρια του εφικτού από τη μηχανή του κλασματικού βήματος, αυτό συνιστά ακόμα ένα κριτήριο. Υπενθυμίζεται ότι η γεννήτρια πλήρους βήματος σχεδιάστηκε τελικά με εξωτερική ακτίνα στάτη ίση με 34mm. Ελέγχεται, λοιπόν, αν σε αυτή την περίπτωση η επιλογή της ακτίνας στάτη 34mm είναι μια αποδεκτή επιλογή βάσει των παραπάνω κριτηρίων.

Έτσι, λοιπόν, για τους επιτρεπτούς συνδυασμούς η παραγόμενη ροπή της γεννήτριας με ακτίνα δρομέα 34mm φαίνεται στο διάγραμμα:



Σχήμα 4.11: Ροπή συναρτήσει ποσοστού δοντιού για ακτίνα δρομέα 34mm

Στη συνέχεια, οι απώλειες χαλκού θα είναι:



Σχήμα 4.12: Απώλειες χαλκού συναρτήσει ποσοστού δοντιού για ακτίνα δρομέα 34mm

Η ροπή που παράγεται για ακτίνα στάτη 34mm και για ποσοστό δοντιού επί της περιόδου δοντιού-αύλακας 60% είναι ικανοποιητική. Οι απώλειες χαλκού για αυτό το συνδυασμό είναι επίσης σχετικά χαμηλές. Επομένως η τελική επιλογή, θα είναι:

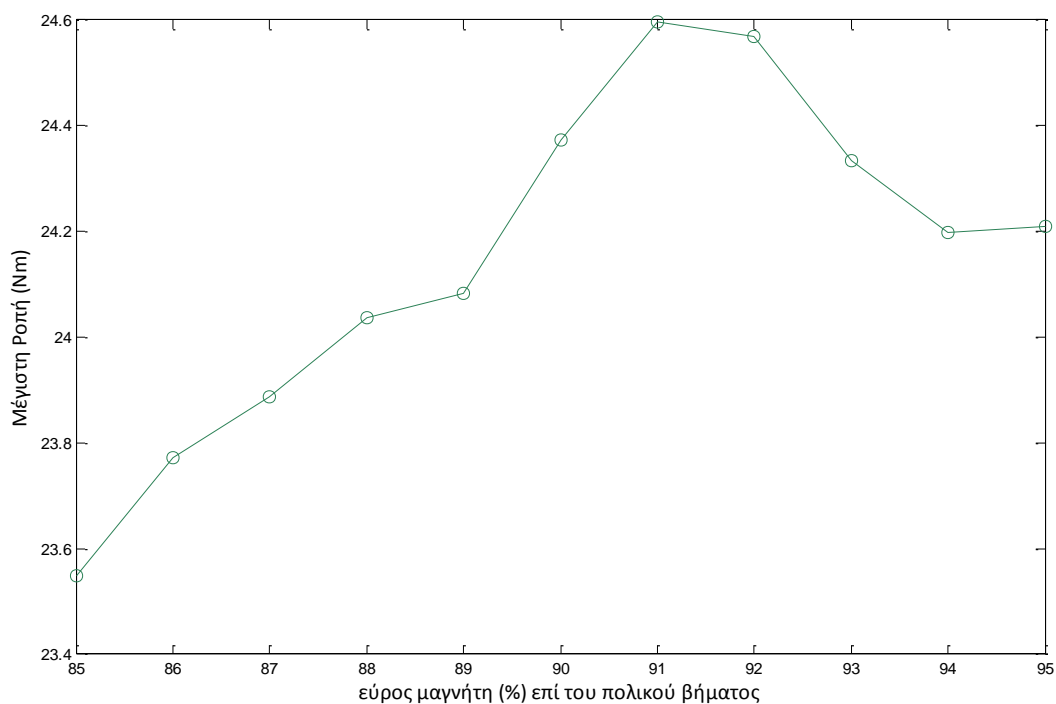
Εξωτερική ακτίνα στάτη $tr=34\text{mm}$
Ποσοστό δοντιού επί της περιόδου δοντιού αύλακας $b=60\%$

Έτσι, μέχρι στιγμής τα μεγέθη στα οποία έχει επιλεγεί η τιμή τους:

Αριθμός πόλων $P=14$
Αριθμός αυλακών $Q=42$
Ακτινικό μήκος μαγνήτη $ml=4\text{mm}$
Ποσοστό δοντιού επί της περιόδου δοντιού-αύλακας $b=60\%$
Συνολική ακτίνα δρομέα (με τους μαγνήτες) $tr=34\text{mm}$
Εσωτερική ακτίνα δρομέα (χωρίς τους μαγνήτες) $rr=30\text{mm}$

4.4 Βελτιστοποίηση ροπής ως προς το ποσοστό εύρους μαγνήτη επί του πολικού βήματος

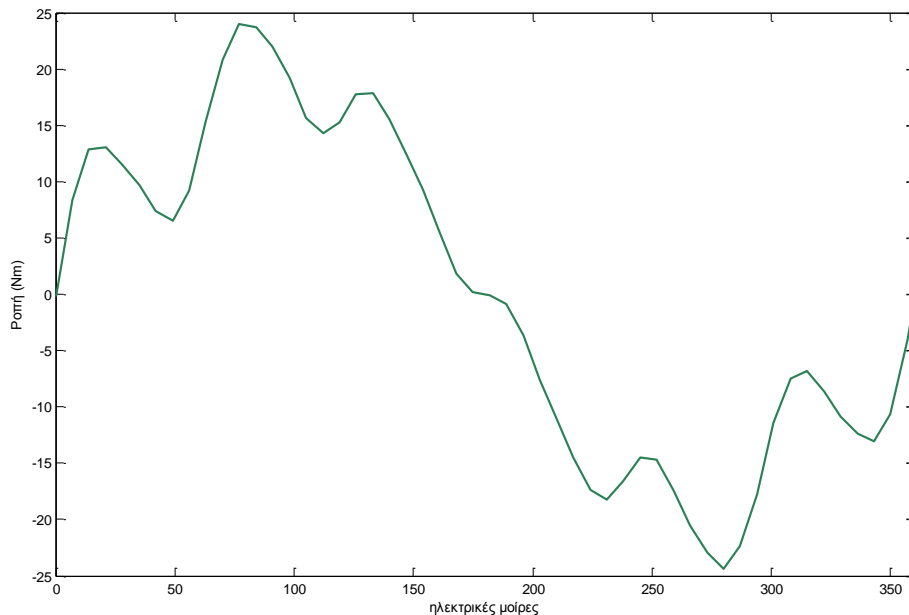
Πραγματοποιήθηκε διερεύνηση της ροπής ως προς το εύρος μαγνήτη. Μετακινώντας το δρομέα κατά 1° μετράται σε πλήρες φορτίο η ροπή στο μέσο του διακένου για εύρη μαγνήτη από 85% έως 95%. Η μέγιστη παραγόμενη ροπή για κάθε εύρος μαγνήτη φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα:



Σχήμα 4.13: Μέγιστη Ροπή για κάθε εύρος μαγνήτη από 85% έως 95% επί του πολικού βήματος

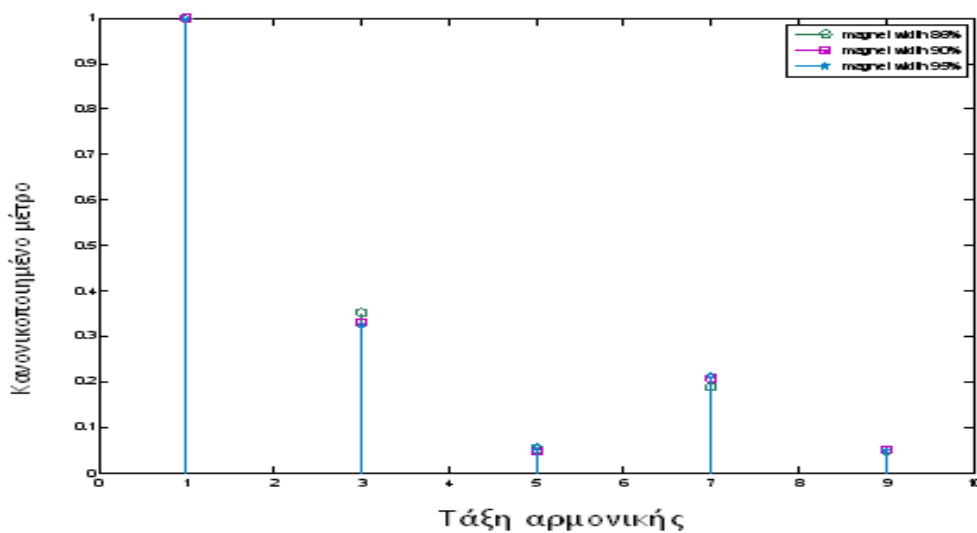
Η ευαισθησία του πλάτους της ροπής σε σχέση με το εύρος των μαγνητών δεν είναι ιδιαίτερα μεγάλη. Οι μεγαλύτερες τιμές εμφανίζονται για **εύρη μαγνήτη 91% και 92%**.

Η ροπή για μία ηλεκτρική περίοδο, για εύρος μαγνήτη 92% επί του πολικού βήματος φαίνεται στα παρακάτω διάγραμμα:



Σχήμα 4.14: Ροπή της γεννήτριας για εύρος μαγνήτη 92%

Το αρμονικό περιεχόμενο της ροπής είναι αισθητό. Η φασματική ανάλυση επιλεγμένα για εύρη μαγνήτη 86%, 90% και 95% δίνει:



Σχήμα 4.15: Φασματική Ανάλυση της Ροπής για εύρη μαγνήτη 85%,90% και 95%

Δεδομένου, ότι το αρμονικό περιεχόμενο της ροπής δεν παρουσιάζει κάποια ιδιαίτερη ευαισθησία στο εύρος μαγνήτη, σε πρώτη φάση, σε συμφωνία και τη

μηχανή κλασματικού βήματος και προς την κατεύθυνση της βελτιστοποίησης της τιμής της, επιλέγεται εύρος μαγνήτη 92% επί του πολικού βήματος.

4.5 Βελτιστοποίηση ροπής ευθυγράμμισης ως προς το ποσοστό εύρους μαγνήτη επί του πολικού βήματος

Για ποσοστά μαγνήτη από 85% έως 95% μετράται η **ροπή ευθυγράμμισης** της γεννήτριας. Συγκεκριμένα, ο δρομέας της μηχανής μετατοπίστηκε με βήμα 0,05 , και μετρήθηκε η ροπή στο μέσο του διακένου σε κενό φορτίο. Στη συνέχεια, υπολογίστηκε ο **συντελεστής ροπής ευθυγράμμισης** (t_c), ο οποίος δίνεται από τη σχέση [3]:

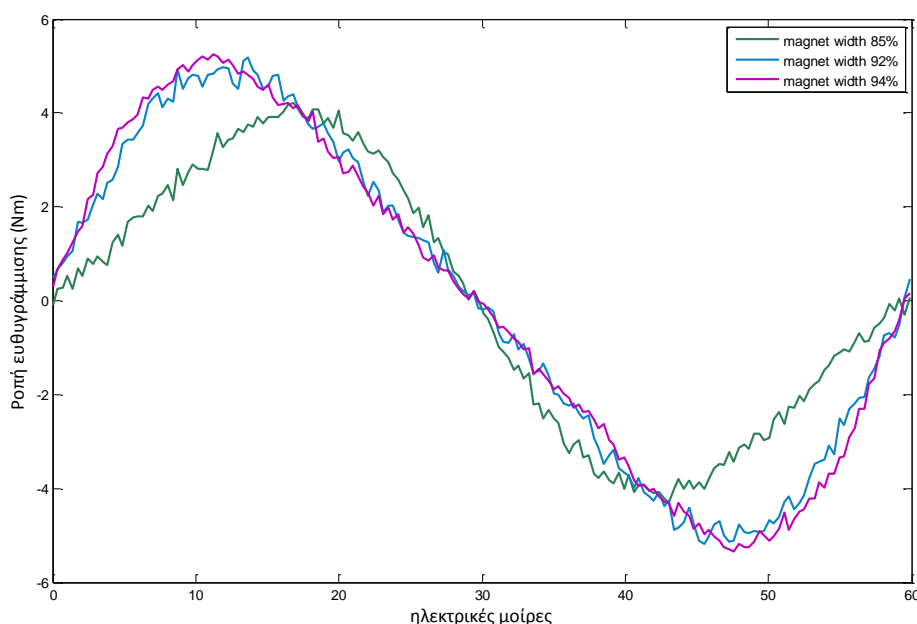
$$t_c = \frac{T_{c\text{pp}}}{T_{\text{average}}} \cdot 100\% \quad (4.1)$$

Ποσοστό εύρους μαγνήτη επί του πολικού βήματος (%)	Peak-to-peak Τιμή ροπής ευθυγράμμισης $T_{c\text{pp}}$ (Nm)	T_{average} (Nm)	Συντελεστής ροπής ευθυγράμμισης t_c (%)
85	8,4	19,3	22
86	8,9	19,3	23
87	9,5	19,4	24,5
88	9,7	19,4	25
89	9,9	19,4	25,5
90	9,7	19,4	25
91	10,6	19,5	27
92	10,4	19,5	26,5
93	10,7	19,5	27,5
94	10,8	19,5	27,5
95	11,6	19,5	30

Πίνακας 4.7: Συντελεστής Ροπή ευθυγράμμισης (%) για 85-95% εύρος μαγνήτη επί του πολικού βήματος

Ο συντελεστής ροπής ευθυγράμμισης είναι αρκετά υψηλός για κάθε εύρος μαγνήτη. Η τιμή του αυξάνεται όσο μεγαλώνει το εύρος του μαγνήτη επί του πολικού βήματος, χωρίς όμως κάποια αισθητή μεταβολή. Για αυτό το λόγο επιλέγεται και από αυτό το βήμα **εύρος μαγνήτη ίσο με 92%** επί του πολικού βήματος.

Για επιλεγμένες τιμές, η κυματομορφή της ροπής ευθυγράμμισης φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα:



Σχήμα 4.16: Ροπή ευθυγράμμισης για εύρη μαγνήτη 85%, 92% και 94%

Αξίζει να σημειωθεί ότι η περίοδος της ροπής ευθυγράμμισης είναι ίση με $T = \frac{2\pi}{N_s} = \frac{2\pi}{42}$ μηχανικές μοίρες, όπου N_s οι αύλακες της γεννήτριας, που αντιστοιχούν σε 60 ηλεκτρικές [4].

4.6 Βελτιστοποίηση κυμάτωσης ροπής ως προς το ποσοστό μαγνήτη επί του πολικού βήματος

Σε αυτό το σημείο για κάθε εύρος μαγνήτη από 85% έως 95% επί του πολικού βήματος μετράται η **κυμάτωση της ροπής**. Συγκεκριμένα, ο δρομέας μετακινήθηκε με βήμα 0,05 , ενώ η ηλεκτρική μετατόπιση ήταν επτά φορές ταχύτερη από τη μηχανική μετατόπιση, σύμφωνα με τη σχέση:

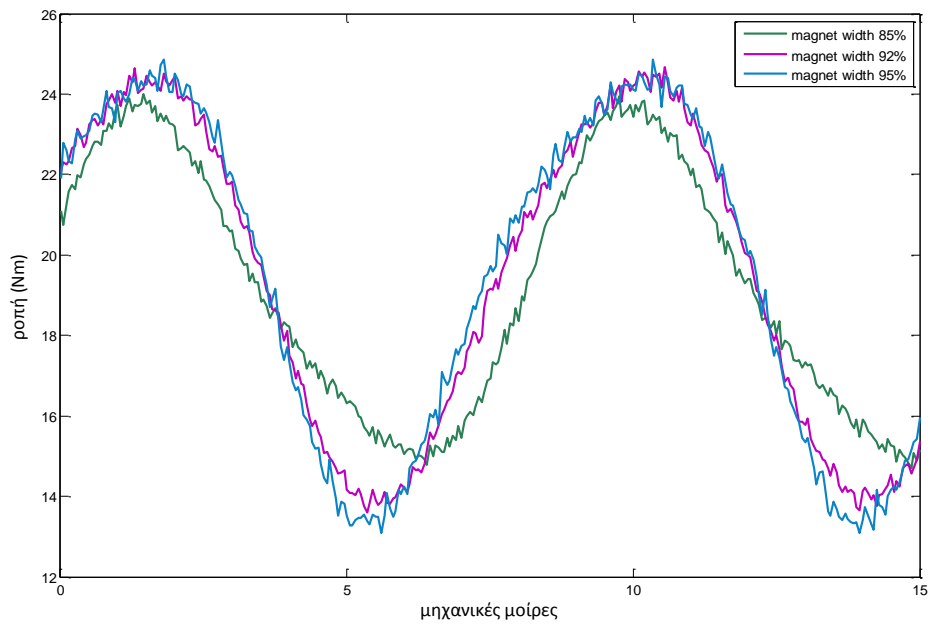
$$\theta_{el} = \frac{p}{2} \cdot \theta_m = \frac{12}{2} \cdot \theta_m = 7 \cdot \theta_m \quad (4.2)$$

Για κάθε μετατόπιση του δρομέα και των ρευμάτων του στάτη μετρούνταν η ροπή στο μέσο του διακένου. Για κάθε ποσοστό εύρους μαγνήτη υπολογίστηκε ο συντελεστής κυμάτωσης ροπής (t_r), από τη σχέση [3]:

$$t_r = \frac{T_{max} - T_{min}}{T_{average}} \cdot 100\% \quad (4.3)$$

Ποσοστό εύρους μαγνήτη επί του πολικού βήματος (%)	T_{min} (Nm)	T_{max} (Nm)	$T_{average}$ (Nm)	Συντελεστής κυμάτωσης ροπής t_r (%)
85	14,7	24	19,3	48
86	14	24,1	19,3	52
87	14,4	24,4	19,4	52
88	14,2	24,5	19,4	53
89	14,2	24,5	19,4	53
90	14	24,5	19,4	54
91	13,7	24,9	19,5	57
92	13,6	24,7	19,5	57
93	13,4	24,7	19,5	58
94	13,5	24,8	19,5	58
95	13,1	24,9	19,5	61

Πίνακας 4.8: Συντελεστής κυμάτωσης ροπής (%) για 85-95% εύρος μαγνήτη επί του πολικού βήματος



Σχήμα 4.17: Κυμάτωση Ροπής για εύρη μαγνήτη 85%, 92% και 95%

Όσο αυξάνεται το ποσοστό μαγνήτη επί του πολικού βήματος αυξάνεται και ο συντελεστής κυμάτωσης ροπής, χωρίς όμως δραματική αύξηση. Η κυμάτωση της ροπής σε κάθε περίπτωση είναι αρκετά υψηλή. Για αυτό το λόγο και σύμφωνα με τις προηγούμενες επιλογές, επιλέγεται 92% εύρος μαγνήτη επί του πολικού βήματος.

4.7 Βελτιστοποίηση της ημιτονικότητας ΗΕΔ ως προς το εύρος μαγνήτη

Κατά τα γνωστά, η επαγόμενη τάση στο στάτη θα ισούται με:

$$e = -N \cdot \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \quad (4.4)$$

Έστω, για δύο χρονικές στιγμές t_1 και t_2 , θα ισχύει:

$$e = \frac{\Phi_2 - \Phi_1}{t_2 - t_1} \quad (4.5)$$

Για την μέτρηση της ηλεκτρεγερτικής δύναμης, υπολογίζεται η ροή της φάσης A. Ο δρομέας θα μετατοπιστεί κατά δύο πόλους, με βήμα 1 .

$$\Phi_{15} = \Phi_8 - \Phi_1$$

$$\Phi_{16} = \Phi_9 - \Phi_2$$

$$\Phi_{17} = \Phi_{10} - \Phi_3$$

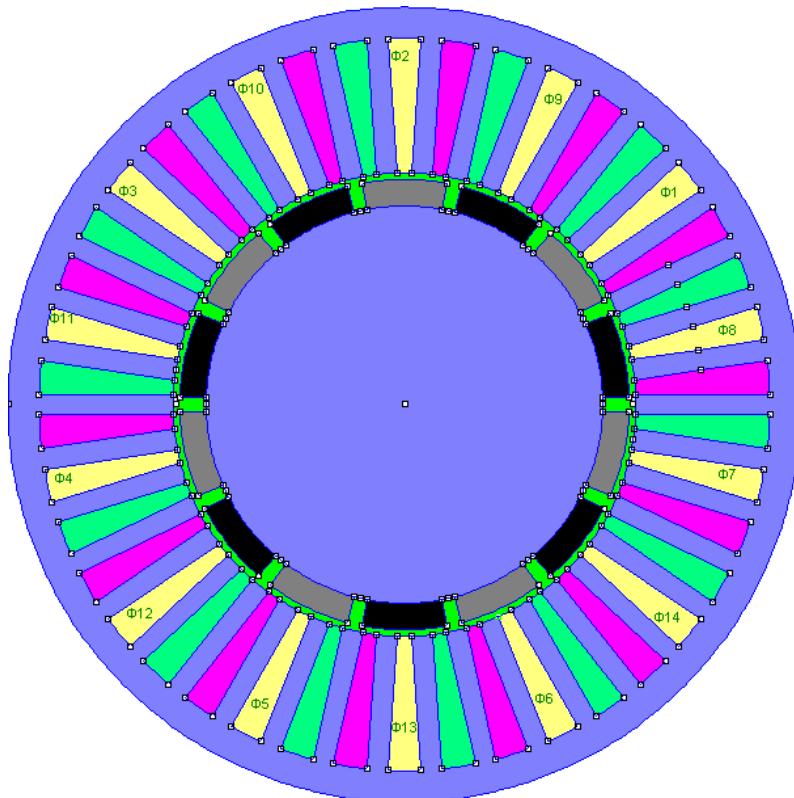
$$\Phi_{18} = \Phi_{11} - \Phi_4$$

(4.6)

$$\Phi_{19} = \Phi_{12} - \Phi_5$$

$$\Phi_{20} = \Phi_{13} - \Phi_6$$

$$\Phi_{21} = \Phi_{14} - \Phi_7$$



Σχήμα 4.18 : Η ροή που περνά από τις αύλακες της φάσης A

Στη συνέχεια υπολογίζεται η διαφορά της ροής για τις χρονικές τιμές t_2 και t_1 :

$$\Phi_{22} = \Phi_{15}(k+1) - \Phi_{15}(k)$$

$$\Phi_{23} = \Phi_{16}(k+1) - \Phi_{16}(k)$$

$$\Phi_{24} = \Phi_{17}(k+1) - \Phi_{17}(k)$$

$$\Phi_{25} = \Phi_{18}(k+1) - \Phi_{18}(k) \quad (4.7)$$

$$\Phi_{26} = \Phi_{19}(k+1) - \Phi_{19}(k)$$

$$\Phi_{27} = \Phi_{20}(k+1) - \Phi_{20}(k)$$

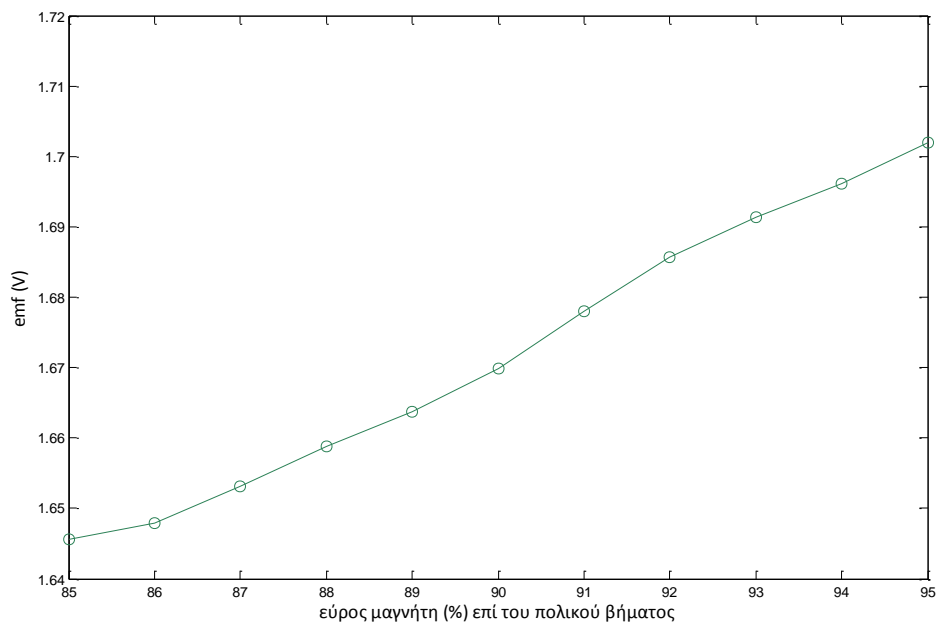
$$\Phi_{28} = \Phi_{21}(k+1) - \Phi_{21}(k)$$

, όπου k το βήμα περιστροφής του δρομέα.

Επειδή η ταχύτητα περιστροφής είναι $500 \text{ ΣΑΔ} \rightarrow \frac{500}{60} \text{ ΣΑΔ} \rightarrow 360 \cdot \frac{500}{60} \text{ }^\circ \text{ ΑΔ}$. Άρα,

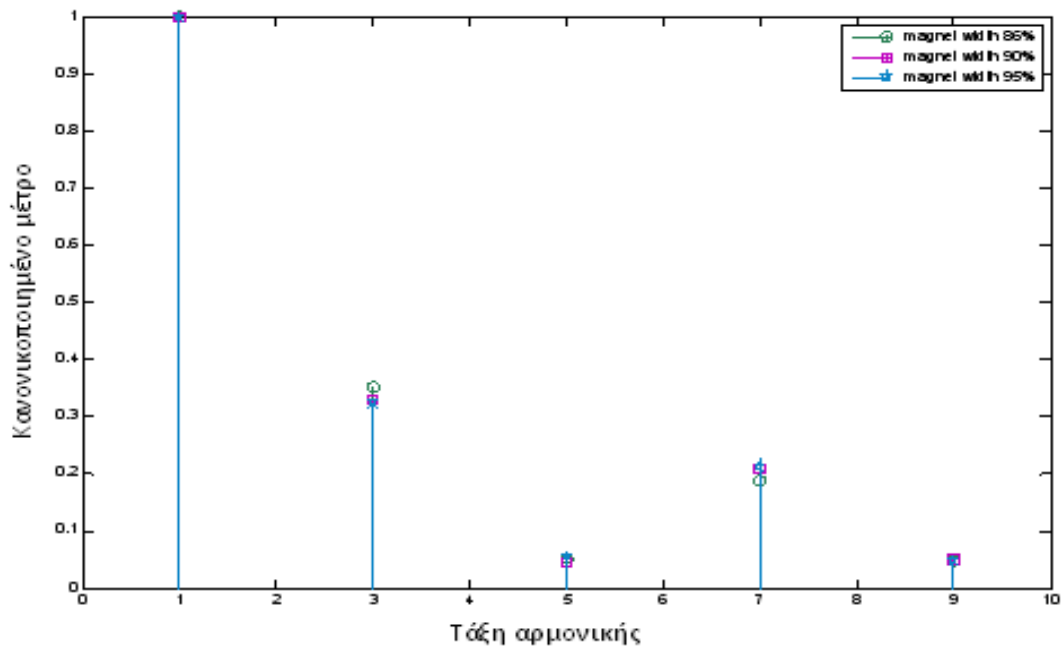
$$\Delta t = \frac{1}{3000} \text{ sec.}$$

Ακολουθώντας την παραπάνω μεθοδολογία, μετρήθηκε η ηλεκτρεγερτική δύναμη για εύρη μαγνήτη 85% έως 95% επί του πολικού βήματος. Οι μέγιστες τιμές της ηλεκτρεγερτικής δύναμης δίνονται στο παρακάτω διάγραμμα:



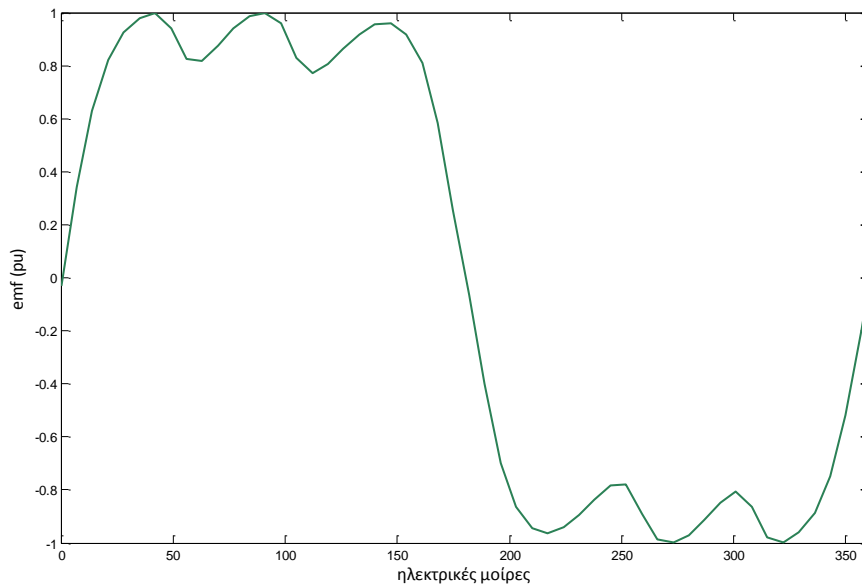
Σχήμα 4.19: Μέγιστη τιμή επαγόμενης τάσης στο στάτη για κάθε εύρος μαγνήτη 85-95%

Φαίνεται ότι η ηλεκτρεγερτική δύναμη αυξάνεται όσο αυξάνεται το εύρος μαγνήτη. Παρουσιάζει κάποια ευαισθησία στις μεταβολές του μαγνήτη, όχι όμως ιδιαίτερα αισθητές. Θα εξεταστεί πώς επηρεάζεται το αρμονικό περιεχόμενο στις μεταβολές του εύρους του μαγνήτη. Η φασματική ανάλυση, για εύρη μαγνήτη 86%, 90% και 95% φαίνεται παρακάτω:



Σχήμα 4.20: Φασματική Ανάλυση της emf για εύρη μαγνήτη 85%, 90% και 95%

Είναι εμφανής η παρουσία 3^{ης}, 5^{ης}, 7^{ης} και 9^{ης} αρμονικής συνιστώσας. Όπως φαίνεται, το αρμονικό περιεχόμενο της ηλεκτρεγερτικής δύναμης δεν παρουσιάζει ευαισθησία στη μεταβολή του εύρους μαγνήτη. Έτσι, δεν αποτελεί κριτήριο επιλογής του εύρους μαγνήτη για τη γεννήτρια. Η κυματομορφή της ηλεκτρεγερτικής δύναμης, ενδεικτικά για εύρος μαγνήτη 92% επί του πολικού βήματος, θα είναι:

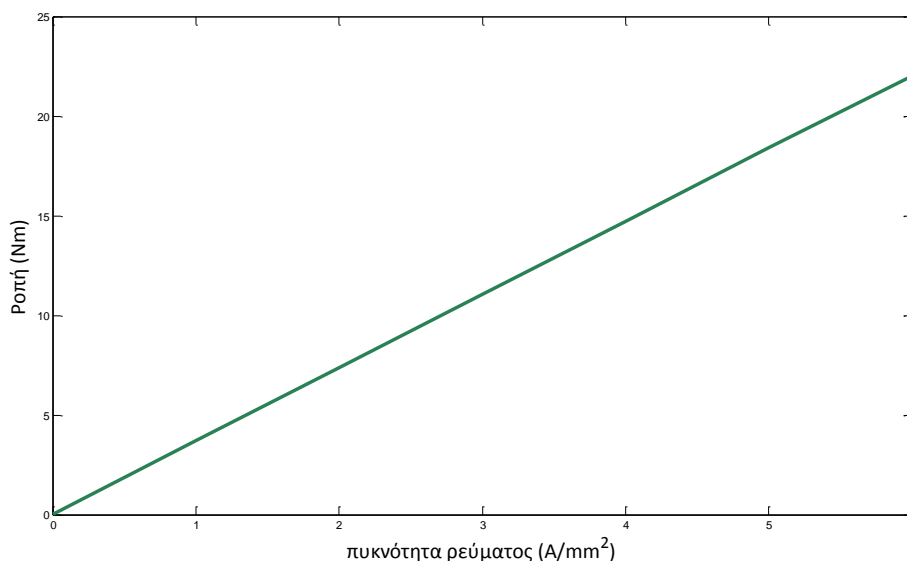


Σχήμα 4.21: Η ηλεκτρεγερτική δύναμη για εύρος μαγνήτη 92%

Συμπερασματικά, δεδομένου ότι ούτε η τιμή ούτε το αρμονικό περιεχόμενο της ηλεκτρεγερτικής δύναμης, δεν παρουσιάζει ιδιαίτερη ευαισθησία στις μεταβολές του εύρου μαγνήτη, η επιλογή του 92% μαγνήτη επί του πολικού βήματος μπορεί να διατηρηθεί.

4.8 Καμπύλη επίδοσης

Θα εξεταστεί αν η ροπή που παράγεται είναι γραμμική σε σχέση με τα ρεύματα του στάτη ή αν βρίσκεται σε κορεσμό ο πυρήνας. Θα πρέπει το σημείο λειτουργίας να βρίσκεται στη γραμμική περιοχή ή στο γόνατο, για την καλύτερη αξιοποίηση του υλικού. Έτσι, για την επίδραση του φορτίου στο μαγνητικό κύκλωμα, μετράται η μέγιστη ροπή στο μέσο του διακένου για ενδεικνύμενες τιμές πυκνότητας ρεύματος από 0-6 A/mm². Τα αποτελέσματα που προκύπτουν παρουσιάζονται στο παρακάτω διάγραμμα:



Σχήμα 4.22: Καμπύλη επίδοσης

Η παραγόμενη ροπή, άρα και η ισχύς εξόδου για σταθερές στροφές μεταβάλλεται γραμμικά με τη μεταβολή του φασικού ρεύματος. Η γραμμική σχέση του φορτίου σε σχέση με την παραγόμενη ροπή υποδηλώνει πως το σιδηρομαγνητικό υλικό του πυρήνα δεν βρίσκεται σε κορεσμό.

4.9 Τελική διαμόρφωση γεωμετρίας γεννήτριας πλήρους βήματος

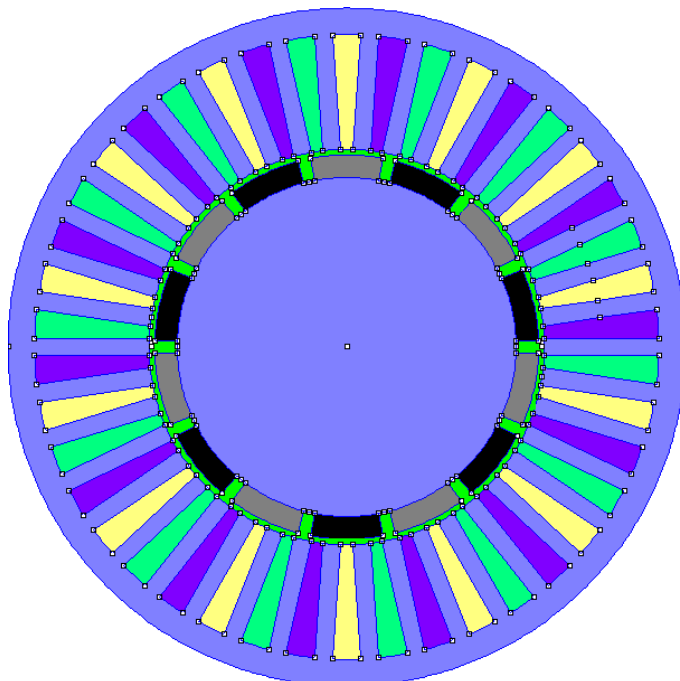
Μετά την παραμετροποιημένη σχεδίαση, τη διερεύνηση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών με σκοπό τη βελτιστοποίηση της ροπής, τη μείωση της ροπής ευθυγράμμισης και της κυμάτωσης της ροπής, η τελική διαμόρφωση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών της γεννήτριας μονίμων μαγνητών πλήρους βήματος συνοψίζεται στον ακόλουθο πίνακα(Πίνακας 4.7).

Μέγιστη παραγόμενη Ροπή (Nm)	24,6
Τύπος τυλίγματος	Πλήρους Βήματος
Ονομαστικές Στροφές (ΣΑΛ)	500
Διάκενο(mm)	0,7
Αριθμός αυλακών ανά φάση	3
Ακτινικό μήκος μαγνήτη (mm)	4

Ποσοστό μαγνήτη επί του πολικού βήματος (%)	92
Εσωτερική ακτίνα δρομέα	30
Ποσοστό δοντιού επί της περιόδου δοντιού-αύλακας (%)	60
Εμβαδόν αύλακας (mm ²)	74,7
Γωνία μαγνήτη (°)	23,67
Περίοδος δοντιού-αύλακας (°)	8,57
Γωνία δοντιού (°)	5,14
Μήκος σώματος στάτη (mm)	4,67
Μήκος αύλακας (mm)	20,63
Ενεργό μήκος (mm)	60

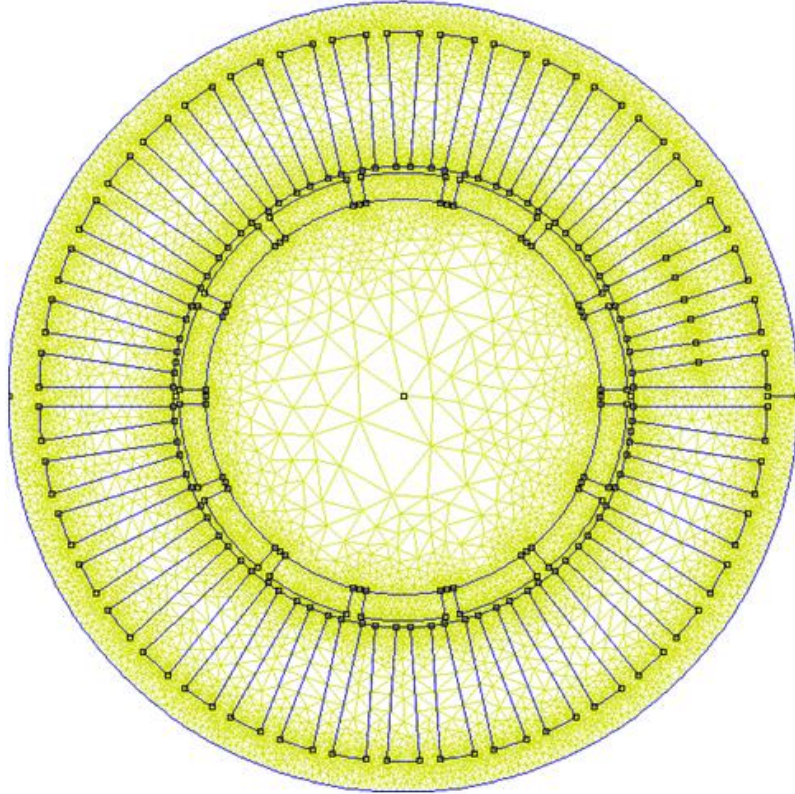
Πίνακας 4.9: Τελική Διαμόρφωση Γεωμετρίας γεννήτριας μονίμων μαγνητών πλήρους βήματος

Η σχεδιασθείσα γεννήτρια φαίνεται παρακάτω:



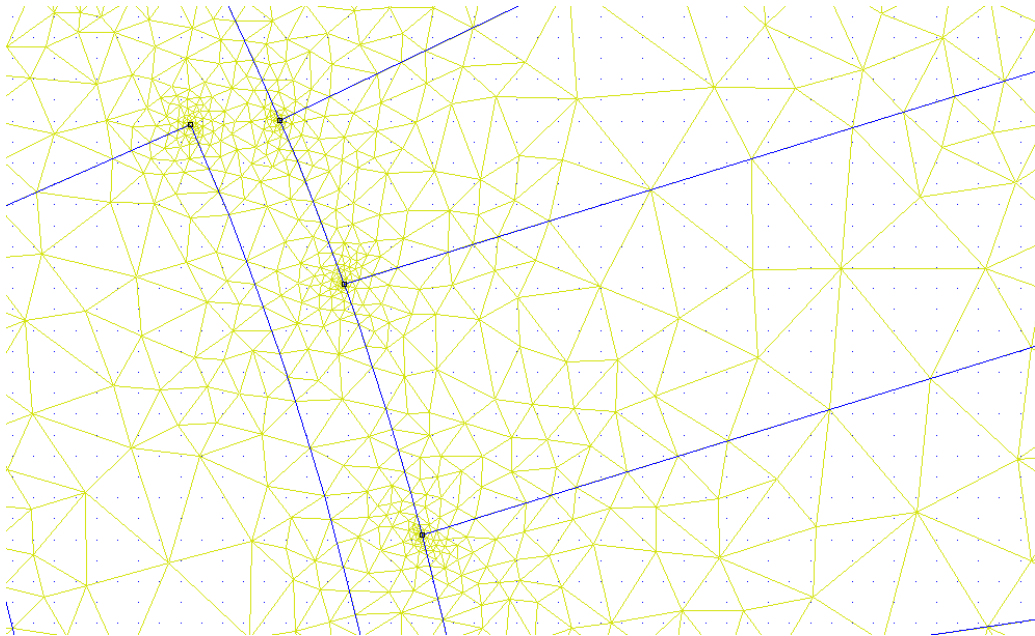
Σχήμα 4.23: Τελική Διαμόρφωση Σύγχρονης Γεννήτριας Μονίμων Μαγνητών Πλήρους Βήματος

Το πλέγμα σε ολόκληρη τη γεννήτρια που δημιουργήθηκε για την επίλυση του μαγνητοστατικού προβλήματος, φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



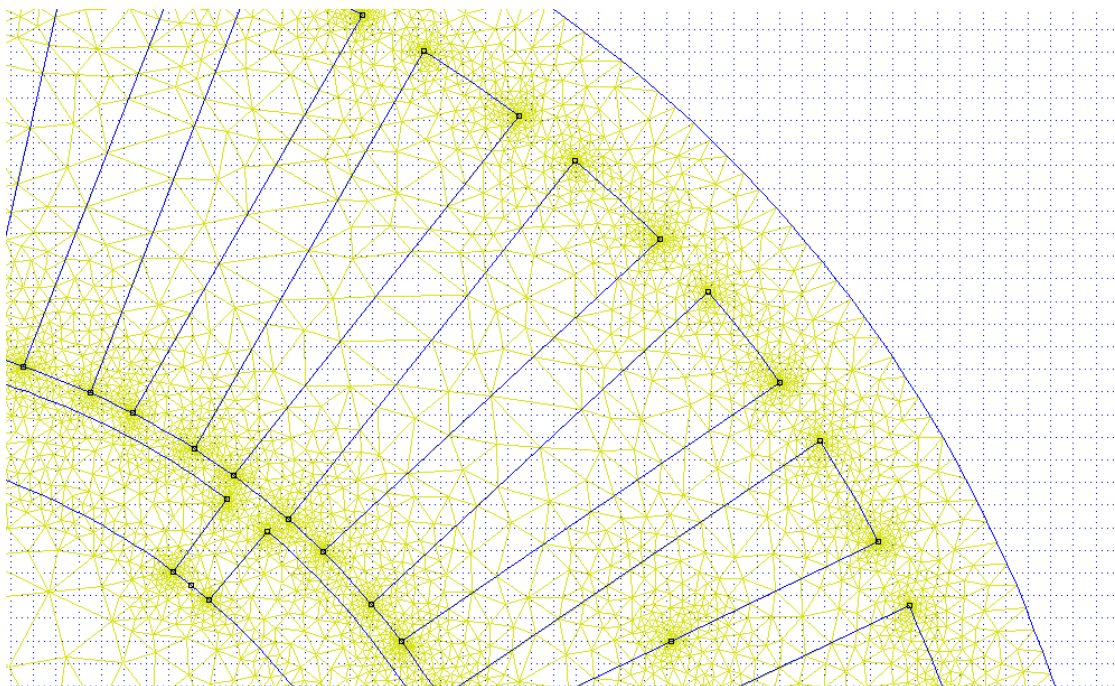
Σχήμα 4.24: Το πλέγμα ανάλυσης σε όλη τη μηχανή

Και το πλέγμα που δημιουργήθηκε στο διάκενο:



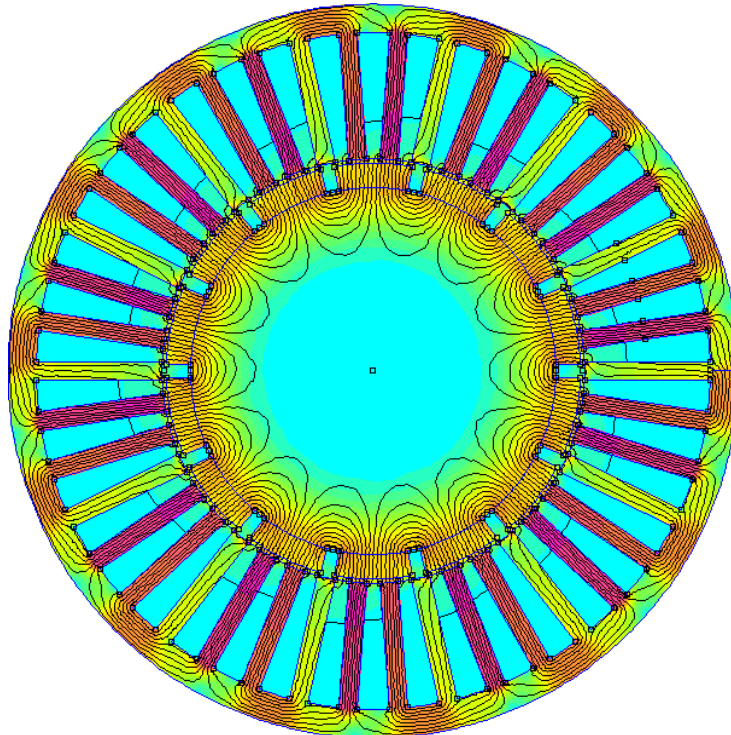
Σχήμα 4.25: Το πλέγμα ανάλυσης στο διάκενο

Το πλέγμα στο στάτη, στις αύλακες και στους μαγνήτες του δρομέα:



Σχήμα 4.26: Το πλέγμα ανάλυσης στους μαγνήτες, το διάκενο και τις αύλακες

Μετά την επίλυση του προβλήματος, η κατανομή των δυναμικών γραμμών φαίνεται παρακάτω:

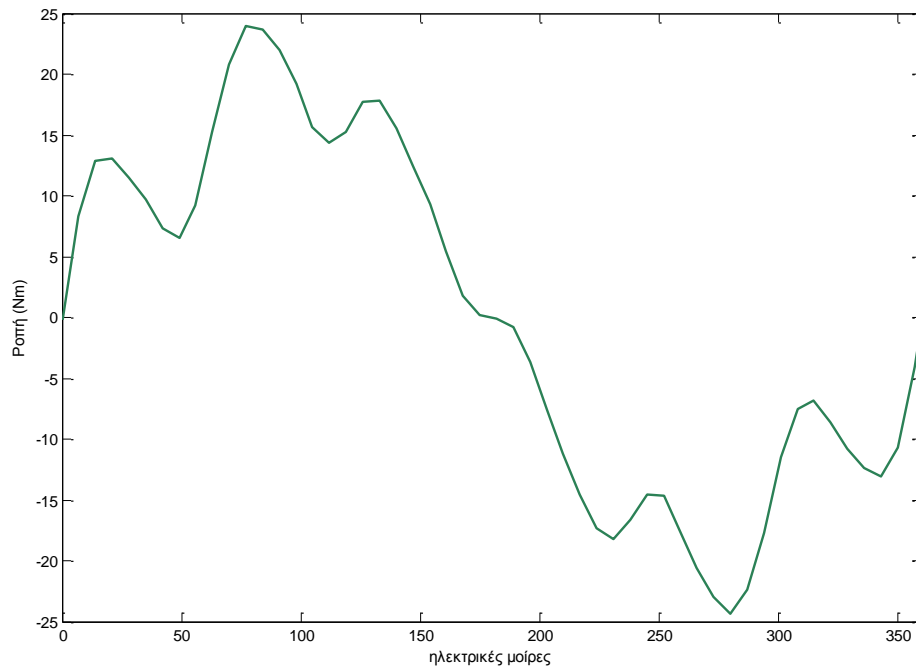


Σχήμα 4.27: Επίλυση Μαγνητοστατικού Προβλήματος με τη χρήση του προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων

4.10 Σύγχρονη λειτουργία

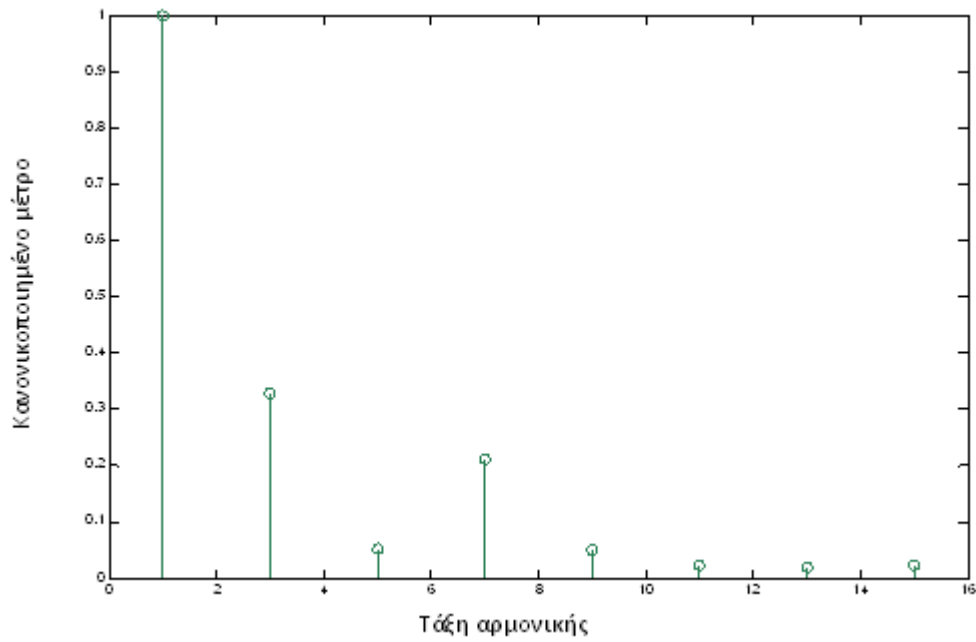
Εφ' όσον έχει ολοκληρωθεί η διαδικασία σχεδίασης και βελτιστοποίησης της σύγχρονης γεννήτριας μονίμων μαγνητών πλήρους βήματος, θα πραγματοποιηθεί η σύγχρονη λειτουργία της. Αρχικά, θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα της ροπής, της κυμάτωσης της ροπής και της ροπής ευθυγράμμισης και στη συνέχεια η κυματομορφή της ηλεκτρεγερτικής δύναμης και της τάσης εξόδου. Τέλος, θα υπολογιστεί η απόδοση της γεννήτριας.

Η κυματομορφή της ροπής για μια περίοδο και το αρμονικό περιεχόμενο , απεικονίζονται παρακάτω:



Σχήμα 4.28: Ροπή

Η μέγιστη παραγόμενη ροπή είναι ίση με 24,5 Nm. Επιλέγεται η σύγχρονη λειτουργία της γεννήτριας να είναι σε εσωτερική γωνία ίση με 70° , όπου η παραγόμενη ροπή ισούται με 19,3 Nm.

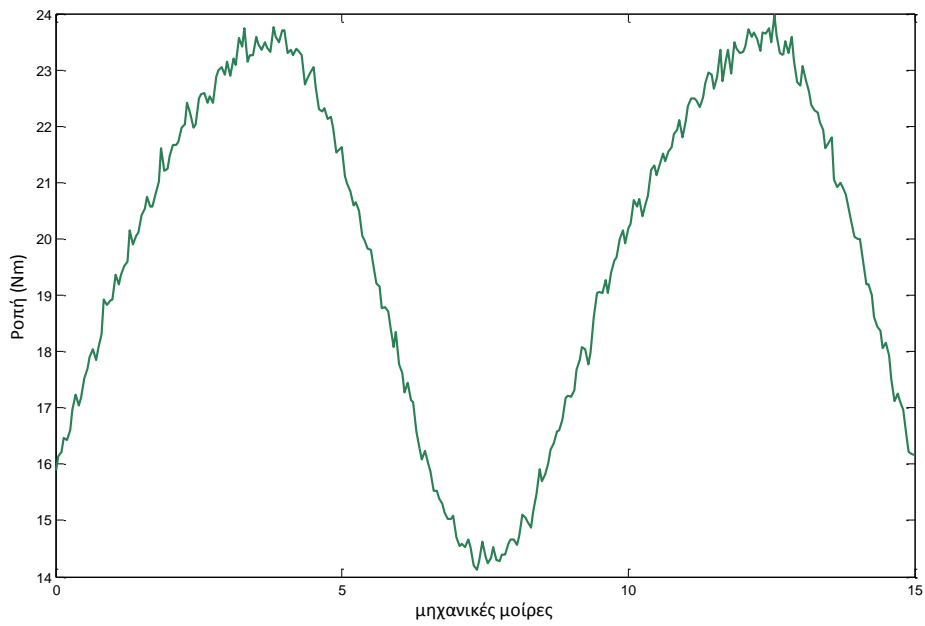


Σχήμα 4.29: Φασματική Ανάλυση Ροπής

Οι αρμονικές ροπές κάνουν αισθητή την παρουσία τους στην κυματομορφή της ροπής και αποτελούν ένα από τα συνηθέστερα προβλήματα στις μηχανές μονίμων μαγνητών.

Ο συντελεστής κυμάτωσης της ροπής και η κυματομορφή αυτής:

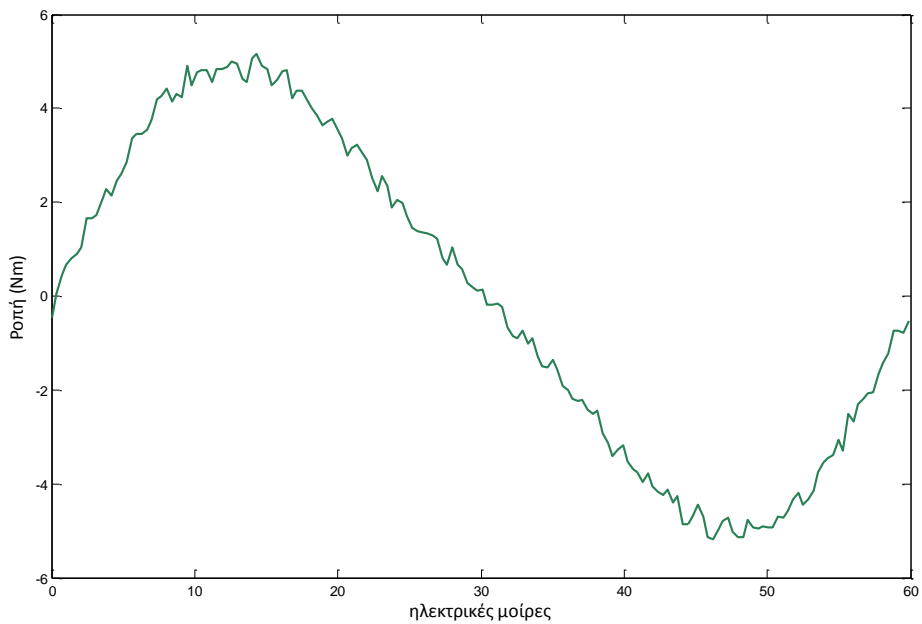
$$t_r = \frac{T_{max} - T_{min}}{T_{average}} \cdot 100\% = 49\%$$



Σχήμα 4.30: Κυμάτωση της Ροπής

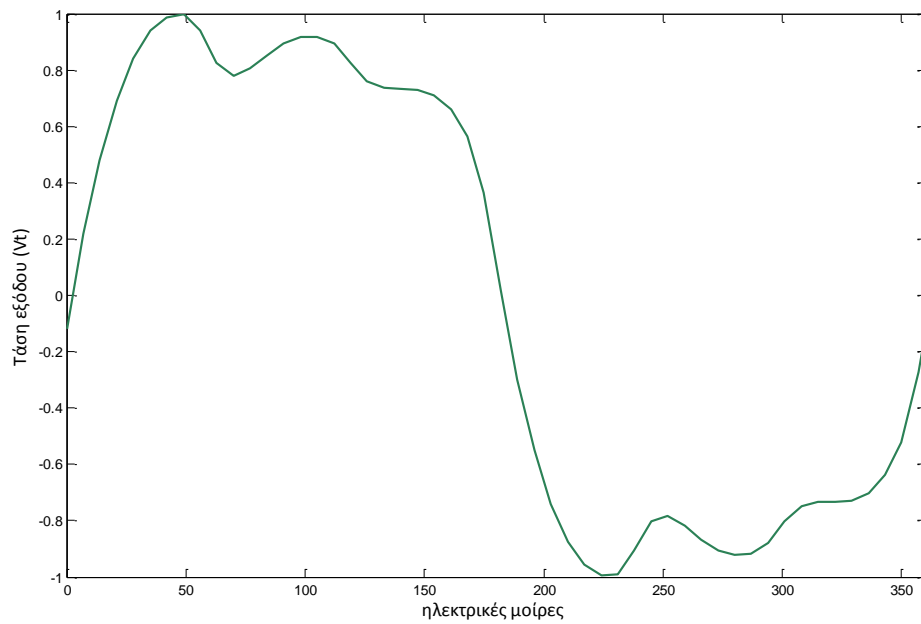
Ο συντελεστής ροπής ευθυγράμμισης και η κυματομορφή της ροπής ευθυγράμμισης:

$$t_c = \frac{T_{c_{pp}}}{T_{average}} \cdot 100\% = 26\%$$

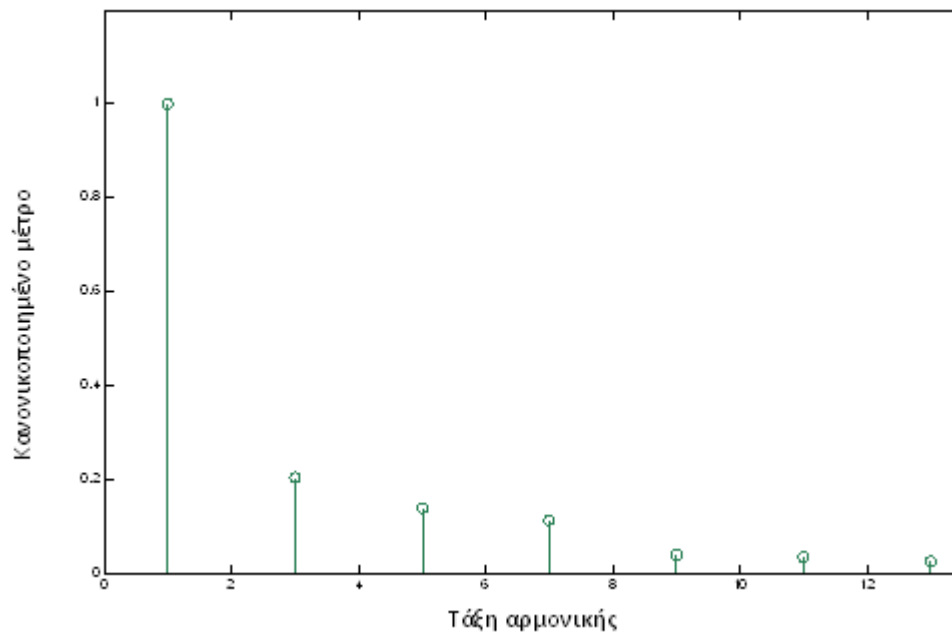


Σχήμα 4.31: Ροπή Ευθυγράμμισης

Η κυματομορφή της ΗΕΔ και η φασματική της ανάλυση:



Σχήμα 4.32: Ηλεκτρεγερτική Δύναμη



Σχήμα 4.35: Φασματική Ανάλυση ΗΕΔ

4.11 Υπολογισμός απωλειών και απόδοση γεννήτριας

Οι **απώλειες χαλκού** για τη γεννήτρια υπολογίσθηκαν με τη χρήση του προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων:

$$P_{cu} = 90,8 \text{ W}$$

Οι **απώλειες πυρήνα** υπολογίσθηκαν με τη χρήση του προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων, μέσω του αλγορίθμου του David Meeker [17], όπως και στην περίπτωση της γεννήτριας κλασματικού βήματος:

$$P_{core} = 9,172 \text{ W}$$

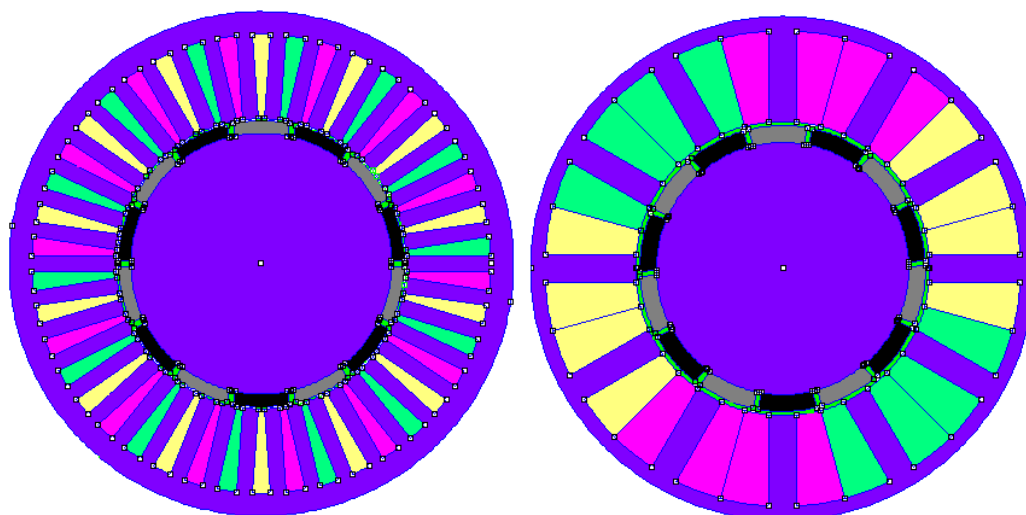
Η απόδοση θα ισούται με: $\eta = \frac{P_{in}}{P_{out}} \cdot 100\% = 90\%$

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ ΠΛΗΡΟΥΣ & ΚΛΑΣΜΑΤΙΚΟΥ ΒΗΜΑΤΟΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΙΣΟΔΥΝΑΜΟΥ ΚΥΚΛΩΜΑΤΟΣ

5.1 ΤΕΛΙΚΗ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΣΥΓΧΡΟΝΩΝ ΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ ΜΟΝΙΜΩΝ ΜΑΓΝΗΤΩΝ ΜΕ ΤΥΛΙΓΜΑ ΠΛΗΡΟΥΣ ΚΑΙ ΚΛΑΣΜΑΤΙΚΟΥ ΒΗΜΑΤΟΣ

Μετά την σχεδίαση, τη βελτιστοποίηση και την τελική διαμόρφωση των δύο γεννητριών μονίμων μαγνητών με πλήρες βήμα και κλασματικό, θα συγκριθούν τα αποτελέσματά τους όσον αφορά την ροπή, την κυμάτωση της ροπής, τη ροπή ευθυγράμμισης, την ημιτονικότητα της ηλεκτρεγερτικής δύναμης, την τάση εξόδου, τις απώλειες και την απόδοση. Η τελική διαμόρφωση τόσο για τη γεννήτρια πλήρους βήματος όσο και για αυτή του κλασματικού απεικονίζονται στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 5.1) και τα χαρακτηριστικά της γεωμετρίας τους συνοψίζονται στον ακόλουθο πίνακα (Πίνακας 5.1).



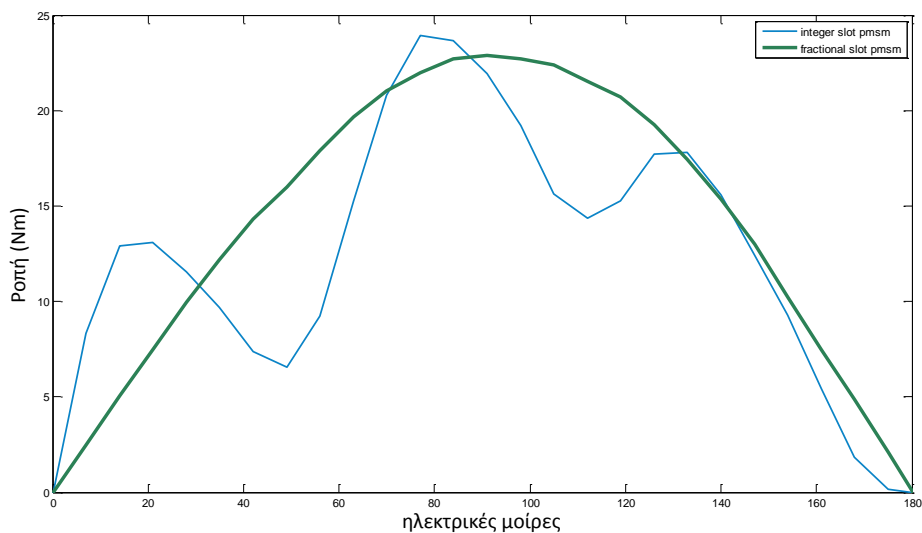
Σχήμα 5.1: Τελική Διαμόρφωση Γεννητριών Πλήρους & Κλασματικού Βήματος. Δεξιά απεικονίζεται η γεννήτρια μονίμων μαγνητών κλασματικού βήματος και αριστερά η πλήρους βήματος

Τύπος τυλίγματος γεννήτριας μόνιμου μαγνήτη	Πλήρους	Διπλής στρώσης μη επικαλυπτόμενο συγκεντρωμένο κλασματικό
Ονομαστική Ισχύς(W)	1000	1000
Ονομαστικές στροφές (ΣΑΛ)	500	500
Διάκενο (mm)	0,7	0,7
Αριθμός πόλων	14	14
Αριθμός αυλακών	42	12
Ενεργό Μήκος(mm)	60	60
Εξωτ. ακτίνα δρομέα(mm)	34	34
Εσωτ. ακτίνα δρομέα (mm)	30	30
Μήκος μαγνήτη (mm)	4	4
Εύρος μαγνήτη (°)	23,67	23,67
Μήκος αύλακας(mm)	20,628	21,9388
Εμβαδόν αύλακας (mm²)	74,7	186
Τύπος μαγνήτη	NdFeB	NdFeB
Μήκος σώματος στάτη(mm)	4,672	3,3612

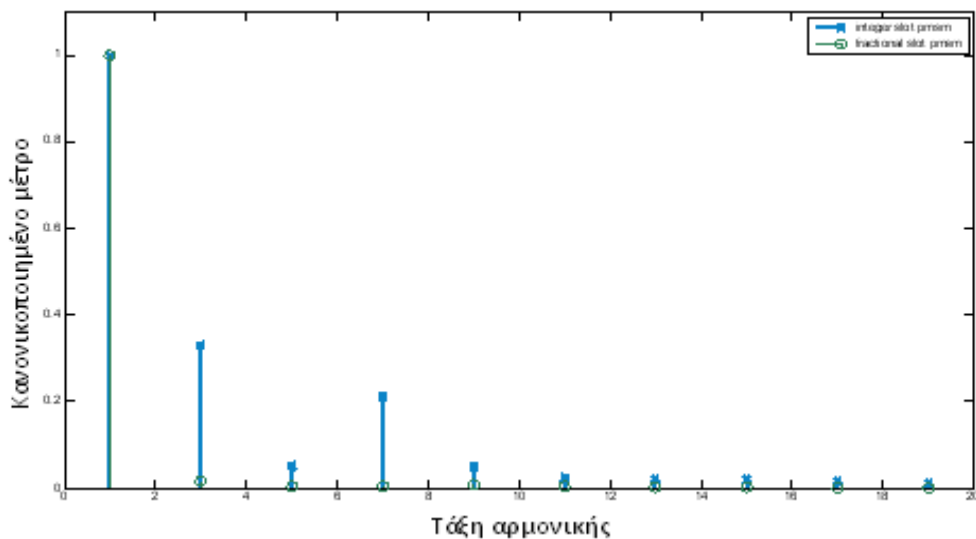
Πίνακας 5.10: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά Τελικής Διαμόρφωσης Γεννητριών Πλήρους & Κλασματικού Βήματος

5.1.1 Συγκριτική μελέτη ροπής

Η κυματομορφή της ροπής και το αρμονικό περιεχόμενο για καθεμία γεννήτρια απεικονίζεται παρακάτω (Πίνακες 5.2 και 5.3).



Σχήμα 5.2: Ροπή για τις γεννήτριες πλήρους και κλασματικού βήματος

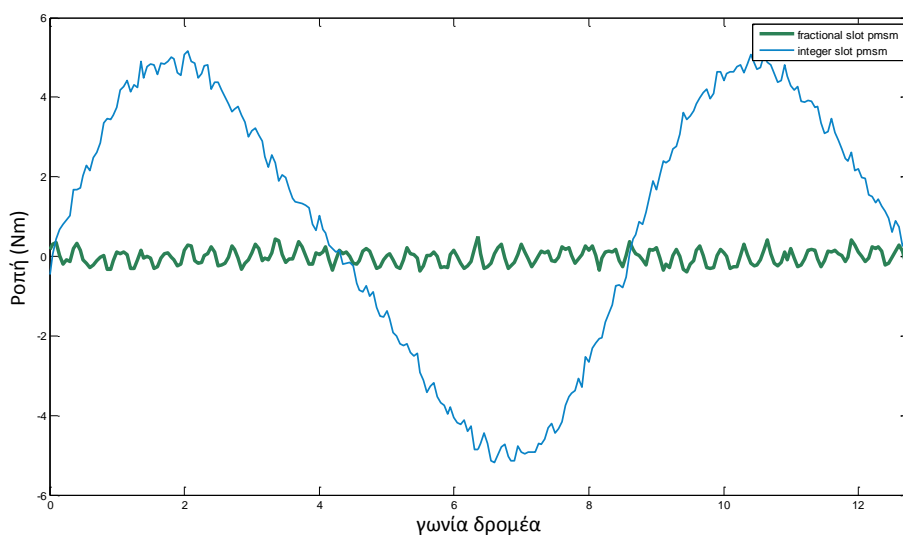


Σχήμα 5.3: Φασματική ανάλυση ροπής για τις γεννήτριες πλήρους και κλασματικού βήματος

Είναι προφανές ότι με τη χρήση κλασματικού βήματος βελτιώνονται πολύ οι αρμονικές ροπής, ένα από τα πιο σημαντικά προβλήματα που παρουσιάζονται στη μηχανή με μόνιμους μαγνήτες. Η γεννήτρια πλήρους βήματος υπερτερεί με την παραγωγή μεγαλύτερης ροπής σε σχέση με αυτή με κλασματικό βήμα [5].

5.1.2 Συγκριτική μελέτη ροπής ευθυγράμμισης

Η ροπή ευθυγράμμισης καθώς και οι συντελεστές ροπής ευθυγράμμισης για τη γεννήτρια πλήρους και κλασματικού βήματος φαίνονται παρακάτω (Σχήμα 5.4 και Πίνακας 5.2).



Σχήμα 5.4: Ροπή ευθυγράμμισης για τις γεννήτριες πλήρους και κλασματικού βήματος

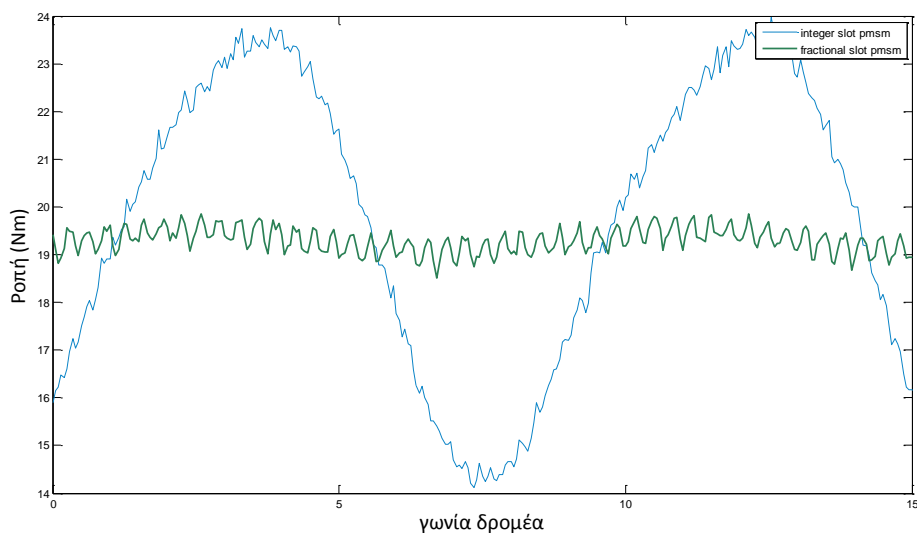
Συντελεστής ροπής ευθυγράμμισης (%) t_c	
Γεννήτρια Πλήρους Βήματος	26%
Γεννήτρια Κλασματικού Βήματος	8%

Πίνακας 5.11: Συντελεστής ροπής ευθυγράμμισης για τις γεννήτριες πλήρους και κλασματικού βήματος

Η γεννήτρια κλασματικού βήματος παρουσιάζει πολύ χαμηλότερη ροπή ευθυγράμμισης σε σχέση με αυτή του πλήρους βήματος. Αυτό φαίνεται καθαρά, όχι μόνο από τις κυματομορφές, αλλά και από του συντελεστές ροπής ευθυγράμμισης, οι οποίοι έχουν μεγάλη διαφορά. Το κλασματικό βήμα, όπως έχει προαναφερθεί, αποτελεί έναν από τους πιο οικονομικούς τρόπους μείωσης της ροπής ευθυγράμμισης [3], [5], [6],.

5.1.3 Συγκριτική μελέτη κυμάτωσης ροπής

Η κυμάτωση της ροπής είναι ακόμα ένα σημαντικό πρόβλημα που πρέπει να ληφθεί υπόψη στη σχεδίαση μιας μηχανής μονίμων μαγνητών, λόγω του ότι οι μηχανές μονίμου μαγνήτη παρουσιάζουν εγγενώς μεγάλη διακύμανση στην παραγόμενη ροπή. Δυστυχώς, η μείωση της ροπής ευθυγράμμισης δεν συνεπάγεται αυτομάτως μείωση και της κυμάτωσης ροπής. Η κυματομορφές της κυμάτωσης της ροπής της γεννήτριας των μονίμων μαγνητών και ο συντελεστής κυμάτωσης ροπής, για πλήρες και κλασματικό βήμα, απεικονίζονται παρακάτω (Σχήμα 5.5 και Πίνακας 5.3).



Σχήμα 5.5: Κυμάτωση ροπής για τις γεννήτριες πλήρους και κλασματικού βήματος

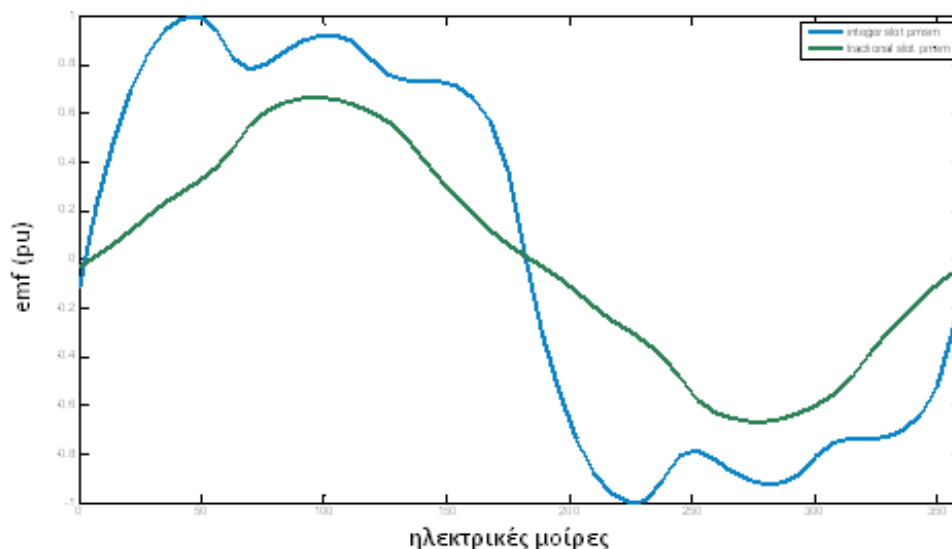
Συντελεστής κυμάτωσης ροπής (%) t_r	
Γεννήτρια Πλήρους Βήματος	49%
Γεννήτρια Κλασματικού Βήματος	7%

Πίνακας 5.12: Συντελεστής κυμάτωσης ροπής για τις γεννήτριες πλήρους και κλασματικού βήματος

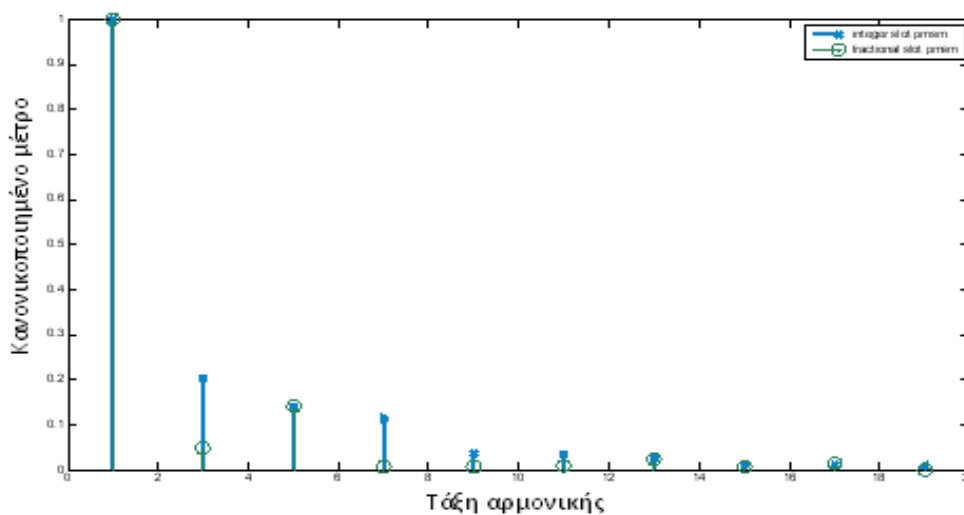
Και για την κυμάτωση ροπής, οι διαφορές ανάμεσα στους δύο αυτούς τύπους τυλιγμάτων, οι διαφορές είναι τεράστιες. Η γεννήτρια πλήρους βήματος εμφανίζει μεγάλες διακυμάνσεις στη ροπή εξόδου, αλλά ταυτόχρονα η μέγιστη παραγόμενη ροπή είναι μεγαλύτερη από αυτή του κλασματικού βήματος.

5.1.4 Συγκριτική μελέτη ημιτονικότητας ηλεκτρεγερτικής δύναμης

Η ΗΕΔ για τη γεννήτρια πλήρους και κλασματικού βήματος, όπως και το αρμονικό περιεχόμενο αυτών φαίνεται παρακάτω (Σχήματα 5.6 και 5.7).



Σχήμα 5.6: ΗΕΔ για τις μηχανές πλήρους και κλασματικού βήματος

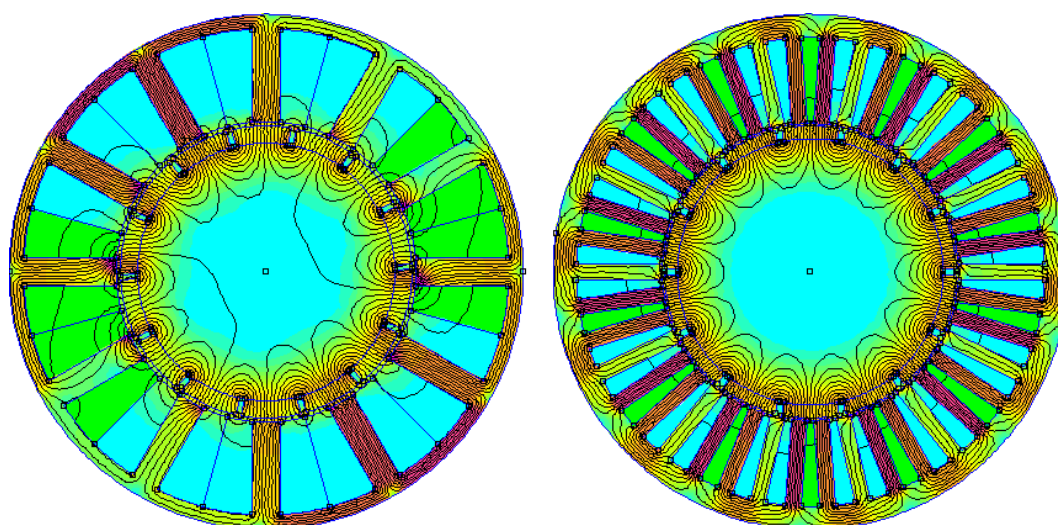


Σχήμα 5.7: Φασματική ανάλυση ΗΕΔ για τις μηχανές πλήρους και κλασματικού βήματος

Και σε αυτή την περίπτωση, με τη χρήση κλασματικού βήματος το αρμονικό περιεχόμενο μειώθηκε κατά πολύ σε σχέση με το πλήρες βήμα. Βέβαια, και η τιμή της τάσης εξόδου είναι μικρότερη στο κλασματικό βήμα σε σχέση με το πλήρες.

5.1.5 Συγκριτική Μελέτη Απωλειών και Απόδοσης

Ο υπολογισμός των απωλειών πυρήνα έγινε και στην περίπτωση της γεννήτριας μονίμων μαγνητών πλήρους βήματος και κλασματικού βήματος με τη χρήση του αλγορίθμου του David Meeker [17]. Ο υπολογισμός απωλειών χαλκού και στην περίπτωση του κλασματικού βήματος και του πλήρους έγινε μέσω του προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων, αρχικά για τη φάση A και στη συνέχεια για όλη τη μηχανή, όπως φαίνεται και παρακάτω (Σχήμα 5.10).



Σχήμα 5.8: Υπολογισμός απωλειών χαλκού φάσης A. Επιλέγονται οι αύλακες της φάσης A, αριστερά στη γεννήτρια κλασματικού βήματος και δεξιά στη γεννήτρια πλήρους βήματος

Τα αποτελέσματα των απωλειών πυρήνα και χαλκού καθώς και ο βαθμός απόδοσης των δύο γεννητριών μονίμων μαγνητών συνοψίζονται παρακάτω (Πίνακας 5.10).

Απώλειες-Απόδοση	P_{Cu} (W)	P_{core} (W)	η (%)
Γεννήτρια Πλήρους Βήματος	90,8	9,172	90
Γεννήτρια Κλασματικού Βήματος	131	5,6	88

Πίνακας 5.13: Απώλειες χαλκού, Απώλειες πυρήνα και απόδοση για τις γεννήτριες κλασματικού και πλήρους βήματος

Η γεννήτρια πλήρους βήματος εμφανίζει χαμηλότερες απώλειες χαλκού σε σχέση με τη γεννήτρια κλασματικού βήματος. Αντίθετα, οι απώλειες πυρήνα στη γεννήτρια πλήρους βήματος είναι υψηλότερες από αυτές της γεννήτριας κλασματικού

βήματος. Τέλος, ο βαθμός απόδοσης της γεννήτριας πλήρους βήματος είναι ελαφρώς μεγαλύτερος από αυτόν της κλασματικού βήματος.

5.2 Υπολογισμός παραμέτρων ισοδυνάμου κυκλώματος

5.2.1 Εκτίμηση αυτεπαγωγών ευθέως και καθέτου άξονα μόνιμης κατάστασης γεννητριών μονίμων μαγνητών πλήρους και κλασματικού βήματος

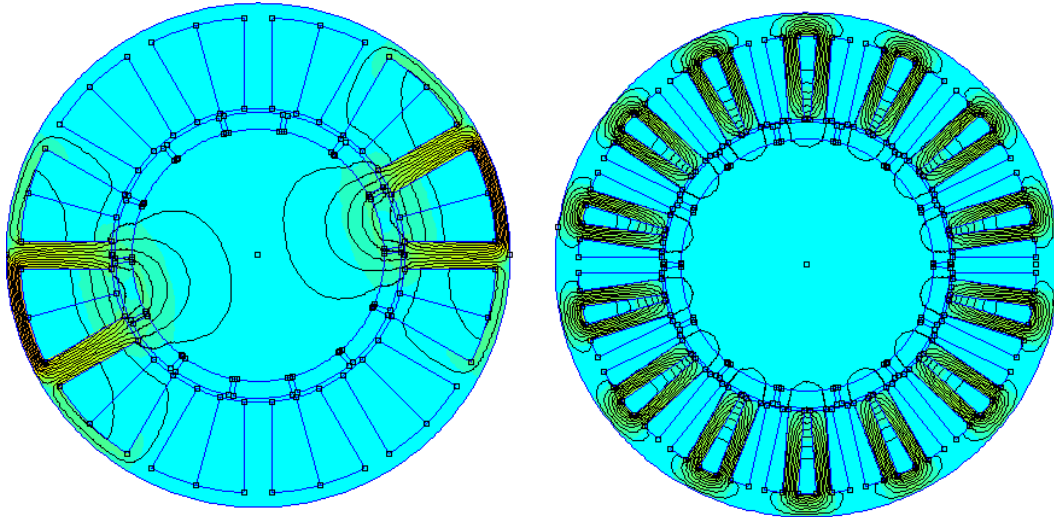
Η επιθυμητή τιμή της φασικής τάσης εξόδου των γεννητριών είναι 21V, εάν ληφθεί υπόψη ότι μια συνήθης τιμή τάσης εξόδου, λαμβάνοντας υπόψη και τον τριφασικό ανορθωτή διόδων, είναι 48V. Επομένως, οι σπείρες ανά φάση που θα έχουν οι υπό εξέταση γεννήτριες μονίμων μαγνητών πλήρους και κλασματικού βήματος θα είναι ίσες με:

$$N_{\text{πλήρους βήματος}} = 21 \text{ σπείρες/φάση}$$

$$N_{\text{κλασματικού βήματος}} = 28 \text{ σπείρες/φάση}$$

Η σύγχρονη γεννήτρια επιφανειακών μονίμων μαγνητών, με μαγνητική διαπερατότητα του μόνιμου μαγνήτη κοντά στη μονάδα, θεωρείται ότι έχει κυλινδρικό δρομέα, έτσι λοιπόν οι αυτεπαγωγές του ευθέως και του κάθετου άξονα θα είναι ίσες.

Για τον προσδιορισμό της αυτεπαγωγής ευθέως άξονα, θα πρέπει η γεννήτρια να έχει μηδενική διέγερση. Για να επιτευχθεί αυτό σε μια γεννήτρια μονίμων μαγνητών, αρκεί να αντικατασταθεί το υλικό του μόνιμου μαγνήτη με ένα μη μαγνητικό υλικό, έτσι ώστε η μηχανή πλέον να θεωρείται ότι έχει ένα ομοιόμορφο διάκενο. Έτσι, στη θέση των μονίμων μαγνητών θα μπει αέρας, υλικό το οποίο έχει την ίδια σχεδόν μαγνητική διαπερατότητα με τον μόνιμο μαγνήτη. Συγκεκριμένα, ο αέρας έχει μαγνητική διαπερατότητα ίση με τη μονάδα, ενώ ο μόνιμος μαγνήτης ίση με 1,05. Στη συνέχεια για την ευθυγράμμιση του ευθέως άξονα με τον άξονα της φάσης A, τροφοδοτούνται μόνο τα τυλίγματα της φάσης A (Σχήμα 5.11) [9].



Σχήμα 5.9: Στα αριστερά απεικονίζεται η σύγχρονη γεννήτρια μονίμων μαγνητών κλασματικού βήματος όταν τροφοδοτείται μόνο η φάση Α. Αντίστοιχα, στα δεξιά η γεννήτρια πλήρους βήματος ενώ τροφοδοτείται μόνο η φάση Α.

Μετράται η ροή που διέρχεται συνολικά από τη φάση Α, ανάλογα για κάθε τύπο τυλίγματος, με τη μεθοδολογία που περιγράφηκε για τη μέτρηση της επαγόμενης τάσης στο στάτη. Η σχέση μέσω της οποίας θα υπολογιστεί η αυτεπαγωγή και στις δύο περιπτώσεις είναι:

$$L_A = N_{\text{σπείρες/φάση}} \cdot \frac{\Phi_{A,\text{ανά σπείρα}}}{I_A} \quad (5.1)$$

Με βάση τους υπολογισμούς που πραγματοποιήθηκαν με τη βοήθεια του προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων, η αυτεπαγωγή του ευθέως και του κάθετου άξονα ισούται με:

$$L_{d,\text{κλασματικού}} = L_{q,\text{κλασματικού}} = 0,07 \text{ mH}$$

$$L_{d,\text{πλήρους}} = L_{q,\text{πλήρους}} = 0,17 \text{ mH}$$

5.2.2 Υπολογισμός αντίστασης γεννητριών μονίμων μαγνητών πλήρους και κλασματικού βήματος

5.2.2.1 Υπολογισμός αντίστασης γεννήτριας μονίμων μαγνητών κλασματικού βήματος

Αρχικά, υπολογίζεται το εμβαδό της αύλακας που θα καταλαμβάνει ο χαλκός δεδομένου ότι ο συντελεστής πληρότητας θα είναι ίσος με 55%:

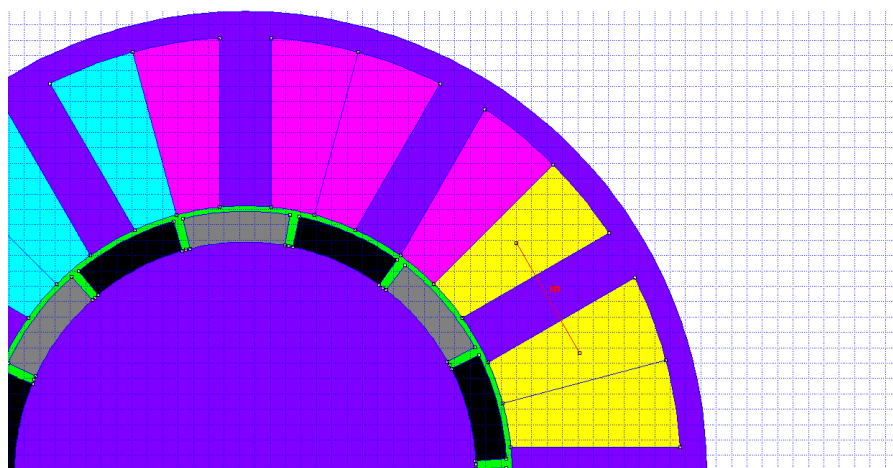
$$S_{cu} = S_{slot} \cdot fill\ factor \Rightarrow S_{cu} = 169 \cdot 0,55 \Rightarrow S_{cu} = 93mm^2 \quad (5.2)$$

$$S_{wire} = \frac{S_{cu}}{N} \Rightarrow S_{wire} = \frac{93}{28} \Rightarrow S_{wire} = 3,72 \cong 3,8\ mm^2 \quad (5.3)$$

Το μήκος μιας σπείρας δίνεται από τη σχέση:

$$l = 2 \cdot L + 2 \cdot m \quad (5.4)$$

, όπου L είναι το ενεργό μήκος της μηχανής και m είναι το μέσο μήκος της σπείρας και φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 5.10: Το μέσο μήκος μιας σπείρας στη γεννήτρια κλασματικού βήματος

Επομένως, το μήκος της σπείρας, από τη σχέση (5.4), θα είναι ίσο με:

$$l = 2 \cdot 60 + 2 \cdot 16,5 = 153mm$$

Η ειδική αντίσταση του χαλκού είναι ίση με $\rho = 1,72\ \Omega \cdot m$ και θεωρείται ότι υπάρχουν 4 πηνία ανά φάση.

Τελικά, η αντίσταση θα δίνεται από τη σχέση:

$$R_{phase, fractional} = 4 \cdot \rho \cdot \frac{l}{S_{wire}} = 4 \cdot 1,72 \cdot 10^{-5} \cdot \frac{153 \cdot 28}{3,8} = 0,079 \Omega \quad (5.5)$$

5.2.2.2 Υπολογισμός αντίστασης γεννήτριας μονίμων μαγνητών πλήρους βήματος

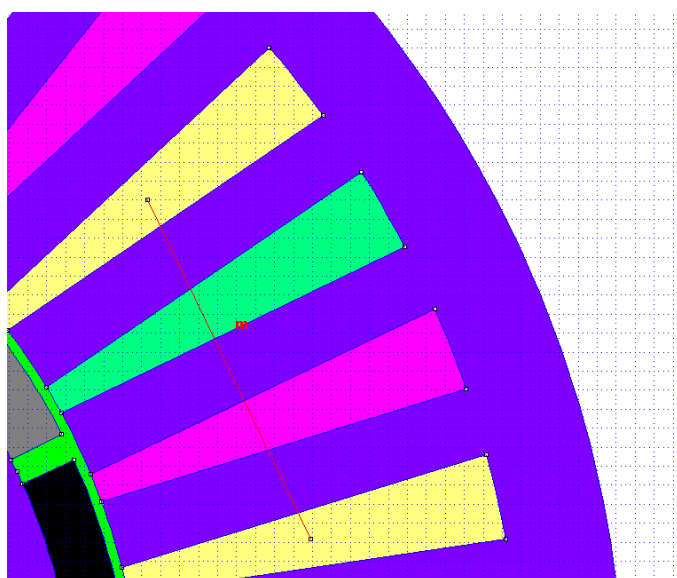
Αντίστοιχα με τη γεννήτρια κλασματικού βήματος θα υπολογιστεί και η ισοδύναμη αντίσταση της γεννήτριας πλήρους βήματος. Δεδομένης της τιμής του συντελεστή πληρότητας στο 55%, υπολογίζεται το εμβαδό της αύλακας που θα καταλαμβάνει ο χαλκός, χρησιμοποιώντας τις σχέσεις (5.2) και (5.3):

$$S_{cu} = S_{slot} \cdot fill\ factor \Rightarrow S_{cu} = 74,7 \cdot 0,55 \Rightarrow S_{cu} = 41mm^2$$

$$S_{wire} = \frac{S_{cu}}{N} \Rightarrow S_{wire} = \frac{41}{21} \Rightarrow S_{wire} = 2,4mm^2$$

Χρησιμοποιώντας τη σχέση (5.4), θα υπολογιστεί το μήκος μιας σπείρας, έχοντας βρει το μέσο μήκος σπείρας (Σχήμα 5.13) ίσο με 19mm και γνωρίζοντας το ενεργό μήκος της γεννήτριας L=60mm :

$$l = 2 \cdot 60 + 2 \cdot 19 = 158mm$$



Σχήμα 5.11: Το μέσο μήκος σπείρας στη γεννήτρια πλήρους βήματος

Η ειδική αντίσταση του χαλκού είναι ίση με $\rho = 1,72 \Omega \cdot m$ και θεωρείται ότι υπάρχουν 7 πηνία ανά φάση.

Τελικά, η αντίσταση θα δίνεται από τη σχέση:

$$R_{phase,integral} = 7 \cdot \rho \cdot \frac{l}{S_{wire}} = 7 \cdot 1,72 \cdot 10^{-5} \cdot \frac{158 \cdot 21}{2,4} = 0,166 \Omega \quad (5.6)$$

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

6.1 Συμπεράσματα

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας σχεδιάστηκαν, βελτιστοποιήθηκαν και συγκρίθηκαν τα λειτουργικά χαρακτηριστικά δύο συγχρόνων γεννητριών μόνιμων μαγνητών ισχύος 1 kW σε ταχύτητα 500 ΣΑΛ, βασισμένων σε τυλίγματα κλασματικού βήματος και πλήρους βήματος, αντίστοιχα. Ως κύριο κριτήριο κατά τη βελτιστοποίηση γεωμετρίας θεωρήθηκε η αύξηση της πυκνότητας ισχύος. Η τελική διαμόρφωση των δύο γεννητριών πραγματοποιήθηκε μετά από ανάλυση ευαισθησίας των παραμέτρων. Στην επιλογή της οριστικής γεωμετρίας των γεννητριών συνεκτιμήθηκαν η ελαχιστοποίηση της ροπής ευθυγράμμισης και της κυμάτωσης της ροπής. Επισημαίνεται ότι οι δύο προαναφερόμενες παράμετροι αποτελούν σοβαρά εγγενή προβλήματα των μηχανών με διέγερση μόνιμων μαγνητών μαζί με τις ανώτερες αρμονικές συνιστώσες της αναπτυσσόμενης ηλεκτρεγερτικής δύναμης. Ακόμα, τέθηκαν περιορισμοί έτσι ώστε να μην υποβαθμισθεί ιδιαίτερα το κριτήριο βελτιστοποίησης της απόδοσης.

Τα κυριότερα συμπεράσματα που προέκυψαν μπορούν να συνοψισθούν ως εξής:

- Η μεθοδολογία παραμετρικού σχεδιασμού που αναπτύχθηκε διευκόλυνε σημαντικά τη βελτιστοποίηση γεωμετρίας σε κάθε εξεταζόμενη περίπτωση. Οι αναλύσεις ευαισθησίας που πραγματοποιήθηκαν ανέδειξαν τις δυνατότητες της εν λόγω μεθοδολογίας.

- Η υιοθέτηση συγκεντρωμένου τυλίγματος κλασματικού βήματος, μη επικαλυπτόμενων άκρων, αποτελεί μια ικανοποιητική τεχνική δυνατότητα μείωσης της ροπής ευθυγράμμισης και της κυμάτωσης της ροπής.
- Η ηλεκτρεγερτική δύναμη δεν παρουσίασε ιδιαίτερη ευαισθησία στις μεταβολές του εύρους του μαγνήτη, ούτε ως προς τη μέγιστη τιμή της, ούτε ως προς το αρμονικό της περιεχόμενο.
- Με τη χρήση του κλασματικού βήματος παρατηρήθηκε εμφανής μείωση των αρμονικών ροπής και γενικότερα του αρμονικού περιεχομένου των κυματομορφών της τάσης και της ηλεκτρεγερτικής δύναμης.
- Εκτός από τη μείωση του αρμονικού περιεχομένου των τάσεων που προέκυψε από τη χρήση κλασματικού βήματος παρατηρήθηκε ταυτόχρονη μείωση της θεμελιώδους συνιστώσας. Συνεπώς η γεννήτρια πλήρους βήματος εμφάνισε συνολικά μεγαλύτερες τιμές πυκνότητας ισχύος και τάσης σε σχέση με αυτές της γεννήτριας κλασματικού βήματος.
- Ο βαθμός απόδοσης της γεννήτριας πλήρους βήματος είναι λίγο μεγαλύτερος από το βαθμό απόδοσης της γεννήτριας κλασματικού βήματος.

6.2 Σημεία προαγωγής της επιστήμης

- Η **μεθοδολογία παραμετρικού σχεδιασμού** της γεννήτριας που αναπτύχθηκε σε λογισμικό Matlab-Simulink επέτρεψε την ευχερή διερεύνηση διαφόρων συνδυασμών γεωμετρικών χαρακτηριστικών για την επιλογή της τελικής διαμόρφωσης.
- Η προτεινόμενη μεθοδολογία εφαρμόστηκε στη **βελτιστοποίηση γεωμετρίας μηχανής μονίμων μαγνητών** προσαρμοσμένης για **ανεμογεννήτριες μικρής ισχύος**. Συγκεκριμένα, μέσω των αναλύσεων ευαισθησίας που πραγματοποιήθηκαν βελτιστοποιήθηκαν το ακτινικό μήκος

του μαγνήτη, το εύρος του μαγνήτη, η ακτίνα του δρομέα, το μήκος των αυλακών και το εμβαδόν των αυλακών. Οι γεωμετρικές αυτές επιλογές έγιναν πριμοδοτώντας τη βελτιστοποίηση της πυκνότητας ισχύος, έναντι του βαθμού απόδοσης και της ημιτονικότητας χρονικής μεταβολής της ηλεκτρεγερτικής δύναμης.

- Διαπιστώθηκε ότι χρησιμοποιώντας κατάλληλο **τύλιγμα κλασματικού βήματος** μπορεί να επιτευχθεί **σημαντική μείωση της ροπής ευθυγράμμισης και της κυμάτωσης της ροπής**, πράγμα σοβαρής σημασίας για τις εφαρμογές αιολικής ηλεκτροπαραγωγής μικρής ισχύος που έχουν ως κύριο στόχο τη μείωση του κόστους.

6.3 Προτάσεις για περαιτέρω διερεύνηση

Με την ολοκλήρωση της εργασίας αναδείχθηκαν τα παρακάτω θέματα που χρήζουν περαιτέρω διερεύνησης:

- Πειραματική επιβεβαίωση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από τον προτεινόμενο σχεδιασμό της γεννήτριας μονίμων μαγνητών.
- Περαιτέρω διερεύνηση για τη βελτίωση του βαθμού απόδοσης της γεννήτριας μονίμων μαγνητών κλασματικού βήματος με χρήση προηγμένων μαγνητικών υλικών.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Florence Meier, Permanent-Magnet Synchronous Machines with Non-Overlapping Concentrated Windings for Low-Speed Direct-Drive Applications, Royal Institute of Technology, School of Electrical Engineering, Electrical Machines and Power Electronics, 2008
- [2] J. R. Bumby, N.Stannard, R. Martin, 'A Permanent Magnet Generator for Small Scale Wind Turbines', Paper 141, 2006
- [3] J.A. Güemes, A. M. Iraolagoita, P. Fernández, M. P. Donsión, 'Comparative Study of PMSM with integer-slot and Fractional-Slot Windings, XIX International Conference on Electrical Machines, Rome,2010, Project EHU06/77
- [4] Ting Liu, Shoudao Huang, Jian Gao, 'Optimal design of the Direct-Driven High Power Permanent Magnet Generator Turbine by Wind', Proceedings of the 2011 International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical drives, Spain 2011
- [5] Nicola Bianchi, Silverio Bolognani, 'Design Techniques of Reducing the Cogging Torque in Surface-Mounted PM Motors', IEEE Transactions on Industry applications, Vol. 38, no.5, paper IPCSD 02-030, September/October 2002
- [6] J.A. Güemes, A. M. Iraolagoita, M. P. Donsión, J.I. Del Hoyo, 'Analysis of Torque in Permanent Magnet Synchronous Motors with Fractional Slot windings', Proceedings of the 2008 International Conference on Electrical Machines, Paper ID 1181, 2008
- [7] Juha Pyrhönen, Juliette Soulard, Pia Salminen, Florence Libert, 'Torque Ripple of permanent magnet machines with concentrated windings', XII International Symposium on Electromagnetic Fields in Mechatronics, Electrical and Electronic Engineering, Spain, September 2005
- [8] Ayman M. EL-Refaie, 'Fractional Slot Concentrated-Windings Synchronous Permanent Magnet Machines: Opportunities and Challenges', IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol.57, No 1, 10.1109/TIE.2009.2030211, January 2011

- [9] Bargallo R., Llaverias J., De Blas A., Martín H., Piqué R., 'Main inductance determination in rotating machines. Analytical and Numerical calculation: A didactical approach'
- [10] Ευάγγελος Μ. Φαραντάτος, 'Μοντέλο Ανεμογεννήτριας Μεταβλητών Στροφών Με Σύγχρονη Μηχανή Για Μελέτες Ευστάθειας', Διπλωματική εργασία, Αθήνα, 2006, Ε.Μ.Π.
- [11] Γεώργιος Ι. Τσεκουράς, 'Μελέτη κατασκευής, ανάλυση κυκλωματικής και πεδιακής συμπεριφοράς δοκιμίου 2.5kW και ανεμογεννήτριας 25kW', Μεταπτυχιακή εργασία, Αθήνα, 2000, Ε.Μ.Π.
- [12] Χαράλαμπος Πάτσιος, 'Συμβολή στη βελτιστοποίηση μεθοδολογιών ελέγχου συστημάτων ηλεκτροπαραγωγής από ανανεώσιμες πηγές σε συνδυασμό με αποθήκευση ενέργειας', Διδακτορική διατριβή, Αθήνα, 2011, Ε.Μ.Π.
- [13] Liuchen Chang, Quincy Wang, 'Application of finite element method in design of a 50kW direct drive synchronous generator for variable speed wind turbines', Proceedings of the 2002 IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, 2002
- [14] Dong Li, Shujie Wang, Peng Yuan, 'A Review of Micro Wind Turbines in the Built Environment', Project Supported by National Natural Science Foundation of China, No 50979101, 2010
- [15] Nicola Milivojevic, Igor Stamenkovic, Nigel Schofield, 'Power and Energy Analysis of Commercial Small Wind Turbine Systems', IEEE, 2010
- [16] Johan Driesen, Karel De Brabandere, Reinhilde D'hulst, Ronniw Belmans, 'Small Wind Turbine in the Built Environment: Opportunities and Grid connection issues', IEEE, 2005
- [17] David Meeker, Iron Loss Calculations, <http://www.femm.info/list/msg00504html>
- [18] David Meeker, 'Finite Element Method Magnetics, User's Manual'

